



การออกซีเตชันของมีเทนโดยจุลินทรีย์ในชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ
ภายใต้สภาวะการทดลองในห้องปฏิบัติการ



โดย
นางสาวเจนจิรา ปานล้ำเลิศ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การออกซิเดชันของมีเทนโดยจุลินทรีย์ในชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ
ภายใต้สภาวะการทดลองในห้องปฏิบัติการ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

MICROBIAL METHANE OXIDATION IN LANDFILL COVERS
UNDER LABORATORY – SCALE CONDITIONS



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree

Master of Science Program in Environmental Science

Department of Environmental Science

Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2015

Copyright of Graduate School, Silpakorn University

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “การออกซิเดชันของ
มีเทนโดยจุลินทรีย์ในชั้นปิดทับหลุมฝังกลบภายใต้สภาวะการทดลองในห้องปฏิบัติการ” เสนอโดย
นางสาวเจนจิรา ปานล้ำเลิศ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปานใจ ธารทัศน์วงศ์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

อาจารย์ ดร.ดาวรุ่ง สัจข์ทอง

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภวรรณ รัตสุข)

...../...../.....

.....กรรมการ

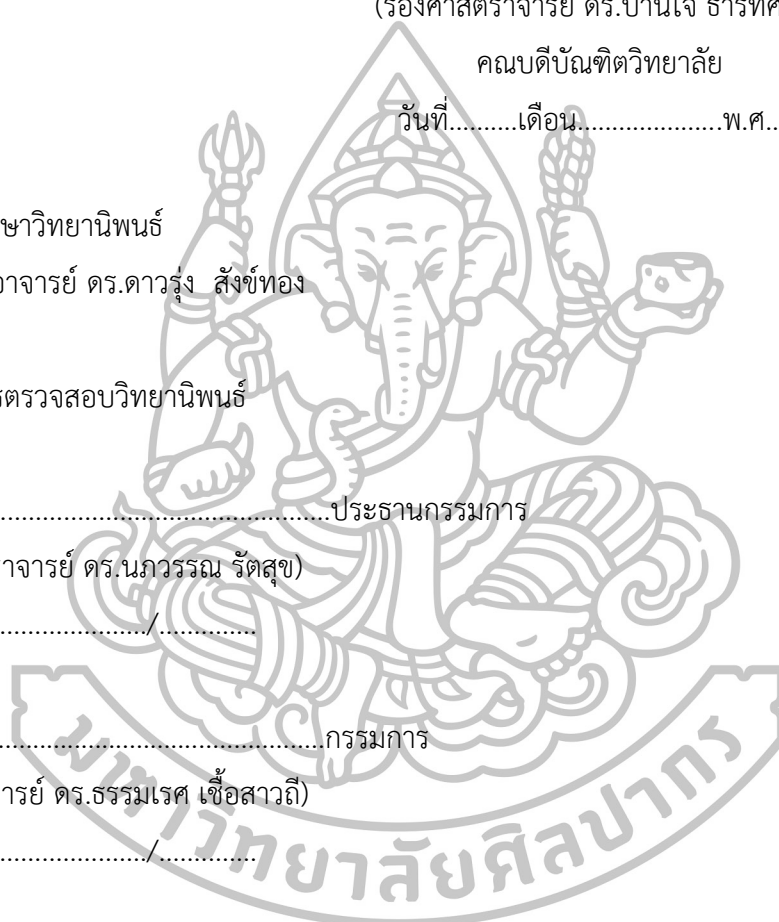
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธรรมเรศ เชื้อสาวถี)

...../...../.....

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ดาวรุ่ง สัจข์ทอง)

...../...../.....



56311303 : สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ : หลุมฝังกลบมูลฝอยชุมชน / การแพร่กระจายของมีเทน / การออกซิเดชันมีเทน / ตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ / ชั้นดินปิดทับชีวภาพ

เจนจิรา ปานล้ำเลิศ : การออกซิเดชันของมีเทนโดยจุลินทรีย์ในชั้นปิดทับหลุมฝังกลบภายใต้สภาวะการทดลองในห้องปฏิบัติการ. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : อ.ดร.ดาวรุ่ง สังข์ทอง. 199 หน้า.

การออกซิเดชันของมีเทนโดยจุลินทรีย์ในชั้นปิดทับหลุมฝังกลบกกำลังได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างมากในปัจจุบันเนื่องจากเป็นหนึ่งในมาตรการสำคัญในการช่วยลดการแพร่กระจายของมีเทนที่เกิดขึ้นจากหลุมฝังกลบมูลฝอยชุมชนได้ งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาถึงความสามารถในการออกซิเดชันมีเทนภายใต้สภาวะการทดลองในห้องปฏิบัติการของตัวอย่างดิน 3 ชนิด ในประเทศไทย ได้แก่ ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบมูลฝอยจากตำบลวังขนาย จังหวัดกาญจนบุรี ดินที่ใช้ในการเพาะปลูกจากตำบลธรรมศาลา จังหวัดนครปฐม และดินที่ใช้ในการเพาะปลูกจากตำบลสามง่าม จังหวัดนครปฐม โดยมีวัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือ เพื่อศึกษาถึงความสามารถและประสิทธิภาพในการออกซิเดชันมีเทน และเพื่อศึกษาถึงตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ (V_{max} และ K_m) ของการออกซิเดชันมีเทนของดินทั้ง 3 ชนิด ผลการศึกษาพบว่า ในขั้นตอนการปรับสภาพดินด้วยมีเทนความเข้มข้นร้อยละ 10 (โดยปริมาตร) ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบและดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลาต้องการระยะเวลาที่เหมาะสมในการปรับสภาพเท่ากับ 11 วัน ส่วนดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่ามต้องการระยะเวลาที่เหมาะสมในการปรับสภาพเท่ากับ 35 วัน ก่อนเริ่มการออกซิเดชันในขั้นตอนการบ่ม เมื่อเปรียบเทียบการดำเนินกิจกรรมของเมทาโนโทรฟและอัตราการออกซิเดชันมีเทนของดินทั้ง 3 ชนิด ในระหว่างขั้นตอนการบ่มดิน พบว่า กิจกรรมของเมทาโนโทรฟเกิดขึ้นสูงสุดในดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ รองลงมาคือ ดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา และน้อยที่สุดในดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาที่พบว่า อัตราการออกซิเดชันมีเทนมีค่าสูงสุดในดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ มีค่าสูงในดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา และมีค่าต่ำในดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม จากการศึกษาทางจลนพลศาสตร์ของการออกซิเดชันมีเทนในดินทั้ง 3 ชนิด พบว่า มีกลไกการออกซิเดชันมีเทนเป็นไปตามไมเคิลลิส – เมนเทน (Michaelis – Menten mechanism) และพบว่า ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ ดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา และดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม มีค่าศักยภาพในการออกซิเดชัน (V_{max}) เท่ากับ 1.60 1.05 และ 0.215 ไมโครโมลต่อกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ และมีค่าความจำเพาะต่อมีเทน (K_m) เท่ากับ 251.87 138.92 และ 108.64 ไมโครโมล ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบมีความจำเพาะต่อมีเทนต่ำสุด และมีศักยภาพในการออกซิเดชันมีเทนสูงสุด ด้วยเหตุนี้ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบจึงสามารถออกซิเดชันมีเทนที่ความเข้มข้นสูงได้ดีกว่าดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา และดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม อย่างไรก็ตาม ดินทั้ง 3 ชนิดจัดได้ว่าเป็นดินที่มีศักยภาพในการนำไปใช้เป็นวัสดุปิดทับเพื่อลดการแพร่กระจายของมีเทนจากหลุมฝังกลบได้

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

56311303 : MAJOR : ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEY WORD : MUNICIPAL SOLID WASTE LANDFILL / METHANE EMISSION / METHANE
OXIDATION / KINETIC PARAMETERS / SOIL BIO – COVER

JANEJIRA PANLAMLERT : MICROBIAL METHANE OXIDATION IN LANDFILL
COVERS UNDER LABORATORY – SCALE CONDITIONS. THESIS ADVISOR : DAOROONG
SUNGTHONG, Ph.D. 199 pp.

Microbial methane oxidation in landfill cover layer has received increasing attention in recent years as an important measure to minimize methane emissions from municipal solid waste landfills. This research, thus, studied the ability for oxidizing methane under laboratory experiments in three selected soils in Thailand including a landfill soil collected from Wang Khanai Subdistrict, Kanchanaburi, an agricultural soil collected from Tham Sala Subdistrict, Nakhon Pathom and another agricultural soil collected from Sam Ngam Subdistrict, Nakhon Pathom. The objectives of the study were to examine the capacity and the effectiveness for oxidizing methane, and to study the kinetic parameters (V_{max} and K_m) of methane oxidation, of those three selected soils. Results show that, during the preincubation stage with 10% methane (v/v), landfill soil and Tham Sala agricultural soil required an optimal preincubation period of 11 days, whereas Sam Ngam agricultural soil required those of 35 days, before initiating the methane oxidation in the incubation stage. During the incubation stage, among the tested soils, the methanotrophic activity was highest in landfill cover soil, followed by Tham Sala agricultural soil, and lowest in Sam Ngam agricultural soil. The highest rates of methane oxidation were observed in landfill cover soil, followed by Tham Sala agricultural soil, and lowest in Sam Ngam agricultural soil. Examining the kinetic parameters of methane oxidation in three selected soils revealed that methane oxidation followed the Michaelis – Menten mechanism. The values of potential activity of methane oxidation (V_{max}) in landfill cover soil, Tham Sala agricultural soil, and Sam Ngam agricultural soil were 1.60, 1.05 and 0.215 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$, respectively. The values of half-saturated constant (K_m) were 251.87, 138.92 and 108.64 μmol , respectively. Landfill soil, thus, showed higher than other soils capability of oxidizing high concentration of methane. The three soils tested, however, have potential usefulness to reduce methane emissions from landfills.

Department of Environmental Science

Graduate School, Silpakorn University

Student's Signature.....

Academic Year 2015

Thesis Advisor's Signature.....

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาการออกซิเดชันของมีเทนโดยจุลินทรีย์ในชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ ภายใต้สภาวะการทดลองในห้องปฏิบัติการ ได้รับทุนอุดหนุนบางส่วนจากภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ จังหวัดนครปฐม ในการนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่สนับสนุนและประสานงานในทุก ๆ ด้านจนการศึกษาในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

บุคคลที่มีบทบาทมากที่สุดในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ คือ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.ดาวรุ่ง สังข์ทอง ซึ่งได้ให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะ รวมถึงการหาแนวทางแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ในระหว่างการดำเนินการวิจัย ตลอดจนการตรวจรายละเอียดต่าง ๆ ในการเขียนเล่มวิทยานิพนธ์อันเป็นประโยชน์ยิ่งสำหรับการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างสูง

นอกจากนี้ ยังมีบุคคลอื่นที่มีส่วนช่วยให้การวิจัยในครั้งนี้ประสบความสำเร็จ ได้แก่ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภวรรณ รัตสุข ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.ธรรมเรศ เชื้อสาวถี กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งเป็นผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ข้าพเจ้ารู้สึกขอบพระคุณอาจารย์ทั้งสองท่านที่กรุณาสละเวลาอันมีค่ายิ่งในการเป็นกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมกับชี้แนะและให้ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ส่งผลให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ข้าพเจ้า ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุตินา จารุศิริพจน์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ได้ให้คำแนะนำและชี้แนะข้อบกพร่องต่าง ๆ เพื่อนำไปปรับแก้ขณะดำเนินการวิจัย

ขอขอบคุณ คุณวิทยากรณ คงอยู่ ที่คอยเป็นผู้ช่วยในขณะดำเนินการวิจัย และแสดงความคิดเห็นที่เป็นประโยชน์หลายประการสำหรับการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงคุณปริษา แก้วมณี คุณเยาวลักษณ์ แดงรักษ์ คุณจินตสุภา เป็ลียนศรี และคุณมานิตา จะโรจจร ที่ช่วยในเรื่องของการดำเนินการวิเคราะห์ดินที่เป็นส่วนของพารามิเตอร์เบื้องต้น

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ทุกท่าน ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์การดำเนินการเอกสารข้อมูล และอำนวยความสะดวกต่าง ๆ ในการดำเนินการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้า ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่ รวมถึงทุกคนในครอบครัวปานลำเลิศ ที่เป็นกำลังใจ พร้อมทั้งให้การสนับสนุนและเป็นแรงผลักดันตลอดมา ขอขอบคุณ พี่ น้อง และเพื่อนทุก ๆ คน ที่คอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฏ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ที่มาและความสำคัญ.....	1
ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
สมมุติฐานการศึกษา.....	4
ขอบเขตการศึกษา.....	4
ประโยชน์ที่ได้รับ.....	4
2 การตรวจสอบเอกสาร.....	6
ปรากฏการณ์เรือนกระจก (greenhouse effect).....	6
มีเทน (methane) และแหล่งกำเนิดมีเทน (sources of methane).....	9
การเกิดมีเทนในหลุมฝังกลบมูลฝอย.....	11
ขั้นตอนที่ 1 การไฮโดรไลซิส (hydrolysis).....	12
ขั้นตอนที่ 2 การสร้างกรด (acidogenesis หรือ fermentation).....	12
ขั้นตอนที่ 3 การสร้างกรดอะซิติก (acetogenesis).....	12
ขั้นตอนที่ 4 การสร้างมีเทน (methanogenesis).....	13
ปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิตแก๊สมีเทนในหลุมฝังกลบ.....	13
องค์ประกอบของมูลฝอย (waste composition).....	13
ปริมาณออกซิเจนในหลุมฝังกลบ (oxygen in the landfill).....	14
ความชื้น (moisture content).....	14
ค่าพีเอช (pH).....	14
อุณหภูมิ (temperature).....	14

บทที่	หน้า
สารพิษและสารยับยั้ง (toxic agents and chemical inhibitors).....	15
สารอาหาร (nutrient).....	15
การเก็บรวบรวมแก๊สมีเทนจากหลุมฝังกลบมูลฝอยเพื่อลดการแพร่กระจาย.....	16
การรวบรวมแก๊สแบบระบายตามธรรมชาติ (passive system).....	16
การรวบรวมแก๊สแบบการสูบหรืออัดอากาศเข้าไปในระบบท่อรวบรวม (active system).....	17
การออกซิเดชันของมีเทนในชั้นดินปิดทับหลุมฝังกลบมูลฝอย.....	18
จุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ในการออกซิเดชันมีเทน (methane-oxidizing microorganisms).....	18
การดูดซับคาร์บอนเพื่อการออกซิเดชันมีเทนด้วยเอนไซม์.....	21
การตรวจพบเชื้อเมทาโนโทรฟในสิ่งแวดล้อม.....	23
ปัจจัยที่ส่งผลต่อการออกซิเดชันของมีเทน.....	24
จลนพลศาสตร์ของเอนไซม์ (enzyme kinetic).....	31
กฎอัตรา (rate law) และอันดับปฏิกิริยา (order of reaction).....	32
กลไกของไมเคิลลิส - เมนเทน (Michaelis - Menten mechanism).....	35
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	39
3 วิธีดำเนินการทดลอง.....	44
วัสดุและอุปกรณ์.....	44
วัสดุและอุปกรณ์รวมถึงสารเคมีสำหรับการเก็บ การเตรียม และการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมี.....	44
วัสดุและอุปกรณ์รวมถึงสารเคมีสำหรับการวิเคราะห์การออกซิเดชันของมีเทนในดินตัวอย่าง.....	45
ตัวอย่างดินที่ใช้ในการศึกษา.....	46
ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบมูลฝอยตำบลวังขนาย จังหวัดกาญจนบุรี.....	46
ดินที่ใช้ในการเพาะปลูกจากพื้นที่ตำบลธรรมศาลา จังหวัดนครปฐม.....	46
ดินที่ใช้ในการเพาะปลูกจากพื้นที่ตำบลสามง่าม จังหวัดนครปฐม.....	47
วิธีการเก็บตัวอย่างดิน.....	48
การเตรียมตัวอย่างดิน.....	49

	หน้า
บทที่	
การศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีบางประการของดิน.....	49
การศึกษาการออกซิเดชันของมีเทนในดินตัวอย่าง.....	50
การทดลองบ่มตัวอย่างแบบแบตช์ (batch incubation experiment).....	50
การวิเคราะห์ด้วยแก๊สโครมาโตกราฟี (gas chromatographic analyses).....	56
4 ผลการศึกษาและวิจารณ์ผลการศึกษา.....	58
สมบัติทางกายภาพและทางเคมีบางประการของดินแต่ละชนิด.....	58
เนื้อดิน (soil texture).....	58
ความหนาแน่นรวม (bulk density).....	60
พีเอช (pH).....	60
การนำไฟฟ้า (electrical conductivity; EC).....	60
ปริมาณอินทรีย์คาร์บอน (organic carbon; OC) ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (organic matter; OM).....	61
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (total nitrogen).....	61
อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจน (carbon/nitrogen ratio; C/N ratio)...	62
ความสามารถในการออกซิเดชันของมีเทนในตัวอย่างดิน.....	62
ผลของการปรับสภาพตัวอย่างดิน (acclimatization) (ระยะที่ 1).....	62
ผลของการบ่มตัวอย่าง (incubation) (ระยะที่ 2).....	65
การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการออกซิเดชันของมีเทนในตัวอย่างดินทั้ง 3 ชนิด.....	87
จลนพลศาสตร์ของการออกซิเดชันมีเทนในดินที่ศึกษา.....	92
การประยุกต์ผลการศึกษาเพื่อลดการแพร่กระจายแก๊สมีเทนในพื้นที่หลุมฝังกลบ.....	98
5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ.....	101
สรุปผลการศึกษา.....	101
ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาในอนาคต.....	103
รายการอ้างอิง.....	105
ภาคผนวก.....	114
ภาคผนวก ก รายละเอียดวิธีวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน.....	115
ภาคผนวก ข ความชื้นของตัวอย่างดิน.....	129
ภาคผนวก ค การเปลี่ยนหน่วยความเข้มข้นของมีเทนจากร้อยละเป็นไมโครโมลต่อกรัม.....	131

บทที่

ภาคผนวก ง	กราฟมาตรฐานของมีเทนสำหรับการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ.	133
ภาคผนวก จ	ข้อมูลผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีบางประการของดิน.....	149
ภาคผนวก ฉ	ข้อมูลผลของการปรับสภาพตัวอย่างดิน (acclimatization) (ระยะที่ 1).....	151
ภาคผนวก ช	ข้อมูลผลของการบ่มตัวอย่าง (incubation) (ระยะที่ 2).....	155
ภาคผนวก ซ	ข้อมูลผลของความเข้มข้นมีเทนที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการบ่มตัวอย่าง (ระยะที่ 2) ในดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบและดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา ที่จุดความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 14 (โดยปริมาตร) ซึ่งมีการทดลองเดิมออกซิเจน.....	180
ภาคผนวก ฌ	การประยุกต์ข้อมูลทางจลนพลศาสตร์ที่ได้จากการศึกษาเพื่อคำนวณความหนาของชั้นดินปิดทับหลุมฝังกลบมูลฝอยที่เหมาะสมต่อการออกซิเดชันมีเทน.	185
ภาคผนวก ฎ	ระบบบำบัดทางชีวภาพ (biotic treatment systems).....	188
ประวัติผู้วิจัย.....		199



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ความเข้มข้นในบรรยากาศและศักยภาพในการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนของแก๊สเรือนกระจกที่สำคัญ.....	7
2.2 สัดส่วนของแก๊สเรือนกระจกต่อภาวะโลกร้อนทั่วโลกและประเทศไทย.....	8
2.3 แหล่งกำเนิดของแก๊สมีเทน (CH ₄) ที่ปล่อยสู่บรรยากาศในแต่ละปี (พ.ศ.) (ล้านตัน CO ₂ e).....	10
2.4 ความเข้มข้นของไอออนประจุบวกในการกระตุ้นและยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์.....	15
2.5 ลักษณะต่าง ๆ ของเชื้อเมทาโนโทรฟแต่ละประเภท.....	22
2.6 ความต้องการมีเทน (CH ₄ consumption) ที่ระดับความเข้มข้นของออกซิเจนและไนโตรเจนต่าง ๆ กัน ตลอดระยะเวลาการทดลอง 6 วัน ณ อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส.....	30
2.7 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องทางจลนพลศาสตร์ของการออกซิเดชันของมีเทนในดิน.....	40
2.8 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องทางจลนพลศาสตร์ของการออกซิเดชันของมีเทนในดินที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	42
3.1 พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ในดินแต่ละชนิด.....	49
3.2 ชุดความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินที่ทำการศึกษาในระยะที่ 2.....	52
3.3 ความเข้มข้นของมีเทนที่ใช้ทำกราฟมาตรฐาน.....	57
4.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีบางประการของดินที่ใช้ทดสอบ.....	59
4.2 การประเมินระดับไนโตรเจนทั้งหมดในดิน.....	61
4.3 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทนที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการปรับสภาพตัวอย่างดิน (ระยะที่ 1) ด้วยความเข้มข้นของมีเทนร้อยละ 10 (โดยปริมาตร).....	63
4.4 ระยะพักตัวของตัวอย่างดินทั้ง 3 ชนิด เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ.....	65
4.5 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทนที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการบ่มตัวอย่าง (ระยะที่ 2) ของดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ.....	67
4.6 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทนที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการบ่มตัวอย่าง (ระยะที่ 2) ของดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา.....	71

ตารางที่

4.7	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทนที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการบ่มตัวอย่าง (ระยะที่ 2) ของดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม.....	75
4.8	อัตราส่วนระหว่างจำนวนโมลของออกซิเจนและมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดิน...	82
4.9	อัตราส่วนระหว่างออกซิเจนและมีเทนที่จุดความเข้มข้นของมีเทนร้อยละ 14 (โดยปริมาตร) หลังจากการเติมออกซิเจน.....	83
4.10	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทนที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการบ่มตัวอย่าง (ระยะที่ 2) ของดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ ที่จุดความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 14 (โดยปริมาตร) ซึ่งมีการทดลองเติมออกซิเจน.....	83
4.11	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทนที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการบ่มตัวอย่าง (ระยะที่ 2) ของดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาสตร์ ที่จุดความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 14 (โดยปริมาตร) ซึ่งมีการทดลองเติมออกซิเจน.....	85
4.12	อัตราการออกซิเดชันมีเทนของดินที่ใช้ในการศึกษา.....	87
4.13	อัตราการออกซิเดชันมีเทนสูงสุดของดินแต่ละชนิดเมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่ทำการทดลองแบบแบตช์ (batch experiments).....	88
4.14	อัตราส่วนระหว่างมีเทนและไนโตรเจนของตัวอย่างดินที่ใช้ในการศึกษา.....	91
4.15	ตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ของการออกซิเดชันมีเทนในดินที่ทำการศึกษา.....	95
4.16	ชั้นดินปิดทับชีวภาพด้วยการทดลองแบบแบตช์ (batch experiments).....	97
4.17	อัตราการปลดปล่อยแก๊สมีเทน.....	98
4.18	การประเมินความหนาของชั้นดินปิดทับหลุมฝังกลบเพื่อลดการแพร่ระบายนีมีเทน.....	99

ตารางผนวก

ข.1	ความชื้นของตัวอย่างดิน.....	130
ง.1	ความเข้มข้นของมีเทนและพื้นที่พีคที่ใช้ทำกราฟมาตรฐานชุดที่ 1.....	134
ง.2	ความเข้มข้นของมีเทนและพื้นที่พีคที่ใช้ทำกราฟมาตรฐานชุดที่ 2.....	135
ง.3	ความเข้มข้นของมีเทนและพื้นที่พีคที่ใช้ทำกราฟมาตรฐานชุดที่ 3.....	136
ง.4	ความเข้มข้นของมีเทนและพื้นที่พีคที่ใช้ทำกราฟมาตรฐานชุดที่ 4.....	137
ง.5	ความเข้มข้นของมีเทนและพื้นที่พีคที่ใช้ทำกราฟมาตรฐานชุดที่ 5.....	138
ง.6	ความเข้มข้นของมีเทนและพื้นที่พีคที่ใช้ทำกราฟมาตรฐานชุดที่ 6.....	139

ตารางผนวก

ง.7	ความเข้มข้นของมีเทนและพื้นที่พีคที่ใช้ทำกราฟมาตรฐานชุดที่ 7.....	140
ง.8	ความเข้มข้นของมีเทนและพื้นที่พีคที่ใช้ทำกราฟมาตรฐานชุดที่ 8.....	141
ง.9	ความเข้มข้นของมีเทนและพื้นที่พีคที่ใช้ทำกราฟมาตรฐานชุดที่ 9.....	142
ง.10	ความเข้มข้นของมีเทนและพื้นที่พีคที่ใช้ทำกราฟมาตรฐานชุดที่ 10.....	143
ง.11	ความเข้มข้นของมีเทนและพื้นที่พีคที่ใช้ทำกราฟมาตรฐานชุดที่ 11.....	144
ง.12	ความเข้มข้นของมีเทนและพื้นที่พีคที่ใช้ทำกราฟมาตรฐานชุดที่ 12.....	145
ง.13	ความเข้มข้นของมีเทนและพื้นที่พีคที่ใช้ทำกราฟมาตรฐานชุดที่ 13.....	146
ง.14	ความเข้มข้นของมีเทนและพื้นที่พีคที่ใช้ทำกราฟมาตรฐานชุดที่ 14.....	147
ง.15	ความเข้มข้นของมีเทนและพื้นที่พีคที่ใช้ทำกราฟมาตรฐานชุดที่ 15.....	148
จ.1	สมบัติทางกายภาพและเคมีบางประการของตัวอย่างดิน.....	150
ฉ.1	ข้อมูลผลของการปรับสภาพตัวอย่างดิน (acclimatization).....	152
ช.1	ข้อมูลผลของการบ่มตัวอย่าง (incubation) ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ.....	156
ช.2	ข้อมูลผลของการบ่มตัวอย่าง (incubation) ดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา.....	162
ช.3	ข้อมูลผลของการบ่มตัวอย่าง (incubation) ดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม.....	171
ซ.1	ข้อมูลผลของความเข้มข้นมีเทนที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการบ่มตัวอย่าง (ระยะที่ 2) ของดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ ที่ชุดความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 14 (โดยปริมาตร) ซึ่งมีการทดลองเดิมออกซิเจน.....	181
ซ.2	ข้อมูลผลของความเข้มข้นมีเทนที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการบ่มตัวอย่าง (ระยะที่ 2) ของดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา ที่ชุดความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่าง เหนือตัวอย่างดินร้อยละ 14 (โดยปริมาตร) ซึ่งมีการทดลองเดิมออกซิเจน.....	183
ณ.1	ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาในดินตัวอย่างทั้ง 3 ชนิด.....	186
ด.1	เปรียบเทียบข้อแตกต่างระหว่างระบบชีวภาพเพื่อการออกซิเดชันของมีเทน.....	191

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ปรากฏการณ์เรือนกระจก (greenhouse effect).....	7
2.2	การเปลี่ยนแปลงของแก๊สที่เกิดขึ้นภายในหลุมฝังกลบมูลฝอย.....	11
2.3	กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกาศ.....	11
2.4	การรวบรวมแก๊สแบบระบายตามธรรมชาติ (passive system).....	17
2.5	การรวบรวมแก๊สแบบการสูบหรืออัดอากาศเข้าไปในระบบท่อรวบรวม (active system).....	18
2.6	กระบวนการทางชีวภาพในการลดปริมาณการแพร่กระจายของมีเทนจากหลุมฝังกลบมูลฝอย.....	19
2.7	วิธีการออกซิเดชันของมีเทนและการดูดซึมพอร์มิลดีไฮด์ของเชื้อเมทาโนโทรฟประเภทที่ 1 (Type I) และ ประเภทที่ 2 (Type II).....	23
2.8	กลไกการผลิต การออกซิเดชัน และการปลดปล่อยมีเทนจากแปลงข้าว.....	29
2.9	ความสัมพันธ์ระหว่าง [S] กับเวลาสำหรับปฏิกิริยาอันดับศูนย์.....	33
2.10	ความสัมพันธ์ระหว่าง [S] และเวลาสำหรับปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง.....	33
2.11	ความสัมพันธ์ระหว่าง ln [S] กับเวลาสำหรับปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง.....	34
2.12	ความสัมพันธ์ระหว่าง 1/[S] กับเวลาสำหรับปฏิกิริยาอันดับสอง.....	34
2.13	ความสัมพันธ์ของสารตั้งต้นกับเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปในปฏิกิริยาที่มีเอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	36
2.14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเริ่มต้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้นเริ่มต้น.....	38
2.15	กราฟไลน์วีเวอร์ – เบิร์ก (Lineweaver – Burk plot).....	39
3.1	สถานที่เก็บตัวอย่างดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบตำบลวังขนาย จังหวัดกาญจนบุรี.....	46
3.2	สถานที่เก็บตัวอย่างดินที่ใช้ในการเพาะปลูกจากพื้นที่ตำบลธรรมศาลา จังหวัดนครปฐม.....	47
3.3	สถานที่เก็บตัวอย่างดินที่ใช้ในการเพาะปลูกจากพื้นที่ตำบลสามง่าม จังหวัดนครปฐม.....	48
3.4	การเก็บตัวอย่างด้วยสว่านเจาะดิน (soil auger).....	48
3.5	การทดลองบ่มตัวอย่างแบบแบตช์.....	50
3.6	การทดลองในระยะที่ 1 การปรับสภาพตัวอย่างดิน.....	51
3.7	ทำการเปิดฝาขวดซีรัมและตั้งทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง.....	53
3.8	ปิดปากขวดด้วยจุกยางและรัดให้แน่นด้วยฟาลอลูมิเนียม.....	54

หน้า

รูปที่		
3.9	ฉีดตัวอย่างเข้าเครื่องเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ (GC analysis).....	54
3.10	การทดลองในระยะที่ 2 การหาค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์.....	55
3.11	เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ (gas chromatography; GC).....	57
4.1	ค่าเฉลี่ยและแถบข้อผิดพลาดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความเข้มข้นของมีเทนที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการปรับสภาพตัวอย่างดิน (ระยะที่ 1) ด้วยความเข้มข้นของมีเทนร้อยละ 10 (โดยปริมาตร).....	63
4.2	ค่าเฉลี่ยและแถบข้อผิดพลาดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความเข้มข้นของมีเทนที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการบ่มตัวอย่าง (ระยะที่ 2) ของดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ.....	66
4.3	ค่าเฉลี่ยและแถบข้อผิดพลาดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความเข้มข้นของมีเทนที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการบ่มตัวอย่าง (ระยะที่ 2) ของดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมชาติ.....	70
4.4	ค่าเฉลี่ยและแถบข้อผิดพลาดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความเข้มข้นของมีเทนที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการบ่มตัวอย่าง (ระยะที่ 2) ของดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม.....	74
4.5	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมีเทน (ครอบคลุมช่วงความเข้มข้นร้อยละ 2 – 14) กับเวลา ในระหว่างการบ่มตัวอย่าง (ระยะที่ 2) ของดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ.....	80
4.6	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมีเทน (ครอบคลุมช่วงความเข้มข้นร้อยละ 2 – 14) กับเวลา ในระหว่างการบ่มตัวอย่าง (ระยะที่ 2) ของดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมชาติ.....	80
4.7	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมีเทน (ครอบคลุมช่วงความเข้มข้นร้อยละ 2 – 14) กับเวลา ในระหว่างการบ่มตัวอย่าง (ระยะที่ 2) ของดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม.....	81
4.8	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทนที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการบ่มตัวอย่าง (ระยะที่ 2) ของดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบมูลฝอย ที่ชุดความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 14 (โดยปริมาตร) ซึ่งมีการทดลองเดิมออกซิเจน.....	83
4.9	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทนที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการบ่มตัวอย่าง (ระยะที่ 2) ของดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมชาติ ที่ชุดความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 14 (โดยปริมาตร) ซึ่งมีการทดลองเดิมออกซิเจน.....	85

รูปที่		
4.10	อัตราการออกซิเดชันมีเทนในตัวอย่างดินทั้ง 3 ชนิด.....	88
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของมีเทนและอัตราการออกซิเดชันมีเทนของดินจาก ชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ.....	92
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของมีเทนและอัตราการออกซิเดชันมีเทนของดิน เพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา.....	93
4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของมีเทนและอัตราการออกซิเดชันมีเทนของดิน เพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม.....	93
4.14	ความสัมพันธ์ระหว่าง 1/ความเข้มข้นของมีเทน และ 1/อัตราการออกซิเดชันมีเทนที่ใช้ ในการคำนวณ ความจำเพาะต่อมีเทน (K_m) และศักยภาพในการออกซิไดซ์ (V_{max}) ของดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ.....	94
4.15	ความสัมพันธ์ระหว่าง 1/ความเข้มข้นของมีเทน และ 1/อัตราการออกซิเดชันมีเทนที่ใช้ ในการคำนวณ ความจำเพาะต่อมีเทน (K_m) และศักยภาพในการออกซิไดซ์ (V_{max}) ของดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา.....	94
4.16	ความสัมพันธ์ระหว่าง 1/ความเข้มข้นของมีเทน และ 1/อัตราการออกซิเดชันมีเทนที่ใช้ ในการคำนวณ ความจำเพาะต่อมีเทน (K_m) และศักยภาพในการออกซิไดซ์ (V_{max}) ของดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม.....	95



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

การย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนของสารอินทรีย์ซึ่งเป็นส่วนประกอบหนึ่งของมูลฝอยชุมชนภายในหลุมฝังกลบเป็นกระบวนการทางชีวเคมีที่มีความซับซ้อนและก่อให้เกิดแก๊สมีเทน (methane; CH₄) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (carbon dioxide; CO₂) เป็นปริมาณมาก โดยเกิดผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิส (hydrolysis) การสร้างกรด (acidogenesis) การสร้างกรดอะซิติก (acetogenesis) และการสร้างมีเทน (methanogenesis) ตามลำดับ (Tchobanoglous *et al.*, 1993; Cheremisinoff, 2003) และแก๊สดังกล่าวสามารถแพร่กระจายออกจากหลุมฝังกลบมูลฝอยได้โดยทั่วไปองค์ประกอบโดยปริมาตรของแก๊สที่แพร่กระจายออกจากหลุมฝังกลบมูลฝอยชุมชนมักประกอบด้วย มีเทน ร้อยละ 50 – 55 คาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละ 40 – 45 และสารอื่น ๆ อีกปริมาณเล็กน้อย (น้อยกว่าร้อยละ 1) เช่น ไนโตรเจน ออกซิเจน ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ไฮโดรเจน แอมโมเนีย และสารประกอบอินทรีย์ที่ไม่ใช่มีเทน (nonmethane organic compounds; NMOCs) เป็นต้น (Environmental Protection Agency [EPA], 2000; Massachusetts Office of Information Technology [MassIT], 2014)

หลุมฝังกลบมูลฝอยจัดเป็นแหล่งกำเนิดที่สำคัญแหล่งหนึ่งของมีเทน โดยเมื่อพิจารณาจากรายงานการศึกษาถึงปริมาณการแพร่กระจายของมีเทนที่มีสาเหตุมาจากกิจกรรมของมนุษย์ ในช่วงปี พ.ศ. 2543 (ค.ศ. 2000) – พ.ศ. 2552 (ค.ศ. 2009) พบว่า หลุมฝังกลบมูลฝอยจากทั่วโลกมีการแพร่กระจายของมีเทนเฉลี่ย 75 ล้านตันต่อปี ซึ่งปริมาณดังกล่าวคิดเป็นร้อยละ 23 ของปริมาณการแพร่กระจายของมีเทนทั้งหมดที่มีสาเหตุมาจากกิจกรรมของมนุษย์ และเมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งกำเนิดอื่น ๆ พบว่า หลุมฝังกลบมูลฝอยเป็นแหล่งกำเนิดที่มีการแพร่กระจายของมีเทนสูงเป็นลำดับที่สาม รองจากการทำปศุสัตว์ (เฉลี่ย 89 ล้านตันต่อปี) และ การสกัด การผลิต ตลอดจนการใช้ประโยชน์จากเชื้อเพลิงฟอสซิล (เฉลี่ย 96 ล้านตันต่อปี) (The Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2013)

มีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์จัดเป็นแก๊สเรือนกระจกที่ส่งผลกระทบต่อการเกิดภาวะโลกร้อน ซึ่งจะต้องทำการลดปริมาณการแพร่กระจายตามที่ได้มีการกำหนดไว้ในพิธีสารเกียวโต (United Nations Framework Convention on Climate Change [UNFCCC], 1997) อย่างไรก็ตาม การควบคุมการแพร่กระจายของมีเทนกำลังได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้นในปัจจุบัน เนื่องจากมีเทนมี

ศักยภาพในการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน (global warming potential; GWP) มากกว่าคาร์บอนไดออกไซด์ กล่าวคือ มีเทนสามารถดูดซับรังสีความร้อนได้มากกว่าคาร์บอนไดออกไซด์ถึง 28 เท่า ในช่วงระยะเวลา 100 ปี และสามารถดูดซับรังสีความร้อนได้มากกว่าคาร์บอนไดออกไซด์ถึง 84 เท่า ในช่วงระยะเวลา 20 ปี (IPCC, 2013) และเมื่อพิจารณาจากรายงานการศึกษาต่าง ๆ ในช่วงระยะเวลามากกว่า 150 ปี คือ ตั้งแต่ ปี พ.ศ. 2293 (ค.ศ. 1750) ถึง พ.ศ. 2554 (ค.ศ. 2011) พบว่าความเข้มข้นเฉลี่ยของมีเทนในชั้นบรรยากาศโลกเพิ่มสูงถึงร้อยละ 150 ในขณะที่ความเข้มข้นเฉลี่ยของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้นเพียงร้อยละ 40 เท่านั้น (IPCC, 2013) ด้วยเหตุนี้ การลดการแพร่ระบาดของมีเทนซึ่งมีค่า GWP สูงกว่า และมีอายุในชั้นบรรยากาศ (12.4 ปี) สั้นกว่าคาร์บอนไดออกไซด์ จึงมีความสำคัญอย่างมากต่อการลดภาวะโลกร้อน (IPCC, 2013) นอกจากนี้มีเทนยังเป็นแก๊สที่สามารถติดไฟได้เองและเกิดการระเบิดได้เมื่อมีความเข้มข้นในบรรยากาศที่ระดับร้อยละ 5 – 15 (Linde, 2013)

ดังนั้นการลดการแพร่ระบาดของมีเทนจากหลุมฝังกลบมูลฝอยจึงเป็นมาตรการสำคัญ มาตรการหนึ่งในการที่จะช่วยบรรเทาปัญหาการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศอันเนื่องมาจากภาวะโลกร้อน ปัจจุบันการลดการแพร่ระบาดของมีเทนจากหลุมฝังกลบมูลฝอยได้มีการดำเนินการใน 2 แนวทาง โดยแนวทางที่หนึ่งเป็นการติดตั้งระบบรวบรวมแก๊สเพื่อเก็บรวบรวมแก๊สที่เกิดขึ้นจากหลุมฝังกลบมูลฝอยและนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนในการผลิตพลังงานไฟฟ้าหรือเผาทิ้งไป ส่วนแนวทางที่สองเป็นการลดการแพร่ระบาดของมีเทนโดยใช้วิธีการต่าง ๆ เหล่านี้ ได้แก่ การนำกลับคืนวัสดุรีไซเคิล (waste recovery) การหมักทำปุ๋ย (composting) และการเผาในเตาเผา (incineration) เป็นต้น ซึ่งแนวทางแรกเป็นวิธีที่มีการนำไปใช้โดยทั่วไปในหลุมฝังกลบมูลฝอยที่มีขนาดใหญ่ แต่แนวทางนี้ไม่เป็นที่นิยมในหลุมฝังกลบมูลฝอยที่มีขนาดกลางหรือขนาดเล็กซึ่งมีอัตราการแพร่ระบาดของมีเทนต่ำ เพราะไม่เกิดความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งระบบรวบรวมแก๊ส ส่งผลให้หลุมฝังกลบมูลฝอยเหล่านี้ยังคงมีการแพร่ระบาดของมีเทนเป็นปริมาณไม่มากนักน้อย หรือแม้กระทั่งในหลุมฝังกลบมูลฝอยสมัยใหม่ที่มีระบบรวบรวมแก๊ส ก็ไม่สามารถเก็บรวบรวมมีเทนที่เกิดขึ้นได้ทั้งหมด ส่งผลให้มีเทนบางส่วนเกิดการแพร่ระบาดของมีเทนออกจากหลุมฝังกลบมูลฝอยได้ โดยจะเห็นได้จากการศึกษาต่าง ๆ ซึ่งพบว่า ระบบรวบรวมแก๊สจากหลุมฝังกลบมูลฝอยสามารถเก็บรวบรวมมีเทนได้เพียงร้อยละ 50 – 90 ของปริมาณมีเทนที่เกิดขึ้นทั้งหมด (Augenstein and Pacey, 1996) ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการพัฒนาวิธีการและเทคโนโลยีที่สามารถลดการแพร่ระบาดของมีเทนจากหลุมฝังกลบได้อย่างมีประสิทธิภาพ วิธีการหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างมากในปัจจุบันในการลดการแพร่ระบาดของมีเทนที่เกิดขึ้นจากหลุมฝังกลบมูลฝอยคือ การฝังพินาศกระบวนการทางชีวเคมีในชั้นดินปิดทับมูลฝอย ซึ่งสามารถลดการแพร่ระบาดของมีเทนได้ถึงร้อยละ 25 – 30 ต่อปี (Pawlowska, 2014) โดยกระบวนการนี้เกี่ยวข้องกับจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ในการย่อยสลายมีเทน นั่นคือ แบคทีเรียชนิดเมทาโน-

โทรฟ (methanotrophs) หรือ เมทาโนโทรฟิคแบคทีเรีย (methanotrophic bacteria) แบคทีเรียกลุ่มนี้สามารถใช้มีเทนเป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงานในการย่อยสลายมีเทนให้กลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายใต้สภาวะที่มีอากาศ (aerobic condition) หรือเรียกกระบวนการนี้ว่า การออกซิเดชันของมีเทนโดยจุลินทรีย์ (microbial methane oxidation) ซึ่งการประยุกต์การออกซิเดชันของมีเทนโดยแบคทีเรียกลุ่มเมทาโนโทรฟิในชั้นดินปิดทับหลุมฝังกลบมูลฝอยเป็นวิธีการหนึ่งที่มีค่าลงทุนต่ำในการควบคุมการแพร่กระจายของมีเทนจากหลุมฝังกลบมูลฝอย และเป็นเทคโนโลยีและวิธีปฏิบัติที่มีประสิทธิภาพอีกวิธีหนึ่งด้วย นอกจากนี้ได้มีการพัฒนาและออกแบบชั้นดินปิดทับหลุมฝังกลบเพื่อศึกษาถึงการลดการแพร่กระจายของมีเทนและศึกษาถึงปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ ที่เหมาะสมต่อการออกซิเดชันของมีเทน โดยพบว่าการออกแบบชั้นดินปิดทับหลุมฝังกลบด้วยการผสมวัสดุที่มีสารอินทรีย์สูง เช่น กากตะกอน หรือปุ๋ยหมัก เป็นต้น ส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการออกซิเดชันมีเทน และเมื่อไม่นานมานี้ในหลาย ๆ ประเทศได้ทำการศึกษาถึงการลดการแพร่กระจายของมีเทนจากหลุมฝังกลบในระดับสนาม (field scale) ด้วยการทำระบบชั้นดินปิดทับชีวภาพ (soil bio – covers) และ ระบบตัวกรองชีวภาพ (bio – filters) (Scheutz *et al.*, 2009) และจากการประชุมของ The Intergovernmental Panel on Climate Change หรือ IPCC โดยคณะทำงานกลุ่ม 3 ที่รับผิดชอบทางด้าน การลดการปล่อยแก๊สเรือนกระจก ได้มีการระบุให้ชั้นดินปิดทับชีวภาพ และระบบตัวกรองชีวภาพ เป็นเทคโนโลยีและวิธีปฏิบัติที่ใช้สำหรับการลดความเสี่ยงของการแพร่กระจายของมีเทนเพื่อลดผลกระทบต่อมนุษย์และภาวะโลกร้อนในอนาคต (Bogner *et al.*, 2007) ซึ่งงานวิจัยนี้ได้สังเกตเห็นถึงความสำคัญดังกล่าว จึงได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการออกซิเดชันของมีเทนในดินชนิดต่าง ๆ ของประเทศไทยเพื่อที่จะได้ทราบถึงศักยภาพในการออกซิเดชันและความสามารถในการลดการแพร่กระจายของมีเทนผ่านชั้นดินปิดทับหลุมฝังกลบ

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

การศึกษานี้มีเป้าหมายหลักที่จะศึกษาถึงการให้ชั้นดินปิดทับชีวภาพ (soil bio – covers) เพื่อลดการแพร่กระจายของมีเทนในหลุมฝังกลบมูลฝอยขนาดกลาง และขนาดเล็กที่ไม่มีระบบเก็บรวบรวม บำบัดและ/หรือกำจัดแก๊ส รวมไปถึงการนำไปประยุกต์ในหลุมฝังกลบมูลฝอยขนาดใหญ่ที่มีระบบเก็บรวบรวมแก๊ส เพื่อใช้เป็นส่วนเสริมในการลดการแพร่กระจายของมีเทนที่ไม่สามารถเก็บรวบรวมได้ ทั้งนี้ก็เพื่อเป็นการลดผลกระทบจากปรากฏการณ์เรือนกระจกเป็นสำคัญ โดยมีวัตถุประสงค์ย่อยที่จะนำไปสู่เป้าหมายหลักดังต่อไปนี้

1.2.1 เพื่อศึกษาถึงความสามารถในการออกซิเดชันของมีเทนในตัวอย่างดิน 3 ชนิด ได้แก่ ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบมูลฝอยตำบลวังขนาย จังหวัดกาญจนบุรี ดินที่ใช้ในการเพาะปลูกจาก

พื้นที่ตำบลธรรมศาลา จังหวัดนครปฐม และดินที่ใช้ในการเพาะปลูกจากพื้นที่ตำบลสามง่าม จังหวัดนครปฐม

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการออกซิเดชันของมีเทนในตัวอย่างดิน 3 ชนิด ได้แก่ ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบมูลฝอยตำบลวังขนาญ จังหวัดกาญจนบุรี ดินที่ใช้ในการเพาะปลูกจากพื้นที่ตำบลธรรมศาลา จังหวัดนครปฐม และดินที่ใช้ในการเพาะปลูกจากพื้นที่ตำบลสามง่าม จังหวัดนครปฐม

1.2.3 เพื่อหาค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ของการออกซิเดชันของมีเทนในตัวอย่างดิน 3 ชนิด ได้แก่ ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบมูลฝอยตำบลวังขนาญ จังหวัดกาญจนบุรี ดินที่ใช้ในการเพาะปลูกจากพื้นที่ตำบลธรรมศาลา จังหวัดนครปฐม และดินที่ใช้ในการเพาะปลูกจากพื้นที่ตำบลสามง่าม จังหวัดนครปฐม

1.3 สมมติฐานการศึกษา

ความสามารถและประสิทธิภาพในการออกซิเดชันของมีเทนในดินแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน ทั้งนี้เป็นผลสืบเนื่องมาจากลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดินที่ต่างกันซึ่งส่งผลต่อการดำเนินกิจกรรมของจุลินทรีย์ชนิดเมทาโนโทรฟซึ่งใช้มีเทนเป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงานในการย่อยสลายมีเทนให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ภายใต้สภาวะที่มีอากาศ (aerobic condition)

1.4 ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงการออกซิเดชันของมีเทนบริสุทธิ์ และศึกษาค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ของการออกซิเดชันของมีเทน ในตัวอย่างดินที่เป็นสภาพดินธรรมชาติ 3 ชนิด ได้แก่ ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบมูลฝอยตำบลวังขนาญ จังหวัดกาญจนบุรี ดินที่ใช้ในการเพาะปลูกจากพื้นที่ตำบลธรรมศาลา จังหวัดนครปฐม และดินที่ใช้ในการเพาะปลูกจากพื้นที่ตำบลสามง่าม จังหวัดนครปฐม ในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้การทดลองแบบแบตช์ (batch experiments) และทำการศึกษาในขวดซีรัม (serum)

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.5.1 ทราบถึงลักษณะทางกายภาพและเคมีที่แตกต่างกันในดินแต่ละชนิด เช่น พีเอช ปริมาณอินทรีย์วัตถุ และความหนาแน่นรวม เป็นต้น ที่ส่งผลต่อการดำเนินกิจกรรมของเมทาโนโทรฟ ในตัวอย่างดิน 3 ชนิดที่ทำการศึกษา

1.5.2 ทราบถึงความสามารถและประสิทธิภาพในการออกซิเดชันมีเทนของตัวอย่างดิน 3 ชนิดที่ทำการศึกษา

1.5.3 ทราบถึงความสัมพันธ์ของการดำเนินกิจกรรมของเมทาโทรฟและอัตราการออกซิเดชันมีเทนในตัวอย่างดิน 3 ชนิดที่ทำการศึกษา

1.5.4 ทราบถึงค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ของการออกซิเดชันมีเทน ได้แก่ ศักยภาพในการออกซิไดซ์ (V_{max}) และ ความจำเพาะต่อมีเทน (K_m) ของตัวอย่างดิน 3 ชนิดที่ทำการศึกษา

1.5.5 ทราบถึงความหนาของชั้นดินปิดทับหลุมฝังกลบที่เหมาะสมต่อการออกซิเดชันมีเทนของตัวอย่างดินทั้ง 3 ชนิดที่ทำการศึกษา

1.5.6 สามารถนำข้อมูลการออกซิเดชันของมีเทนไปประยุกต์ใช้กับชั้นดินปิดทับหลุมฝังกลบเพื่อลดการแพร่ระบาดของแก๊สมีเทนจากพื้นที่หลุมฝังกลบ



บทที่ 2

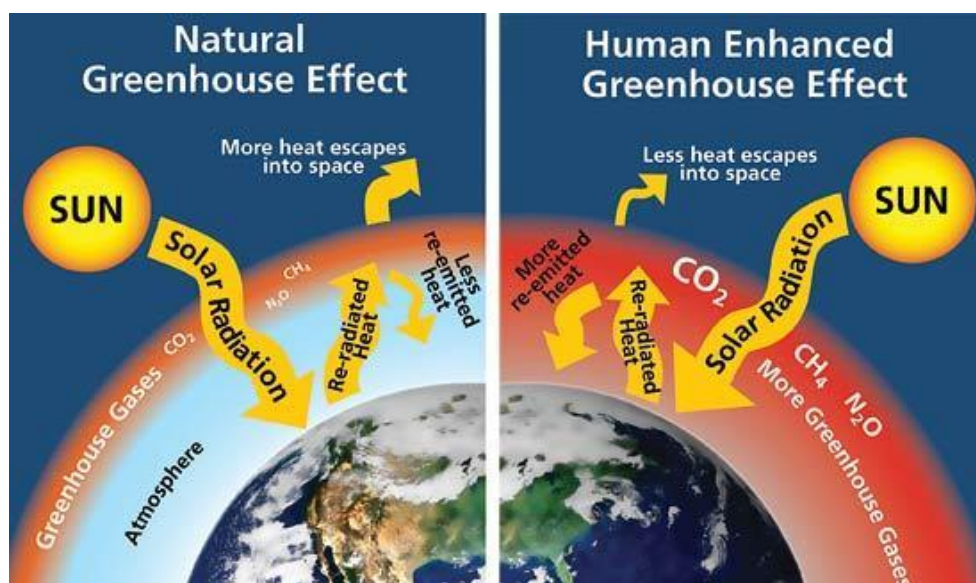
การตรวจสอบเอกสาร

2.1 ปรากฏการณ์เรือนกระจก (greenhouse effect)

ดวงอาทิตย์ทำหน้าที่ควบคุมสภาพภูมิอากาศของโลก โดยการแผ่พลังงานที่อยู่ในรูปของรังสีคลื่นสั้นในช่วงความยาวคลื่น 0.2 – 0.4 ไมโครเมตร มายังโลก เมื่อรังสีคลื่นสั้นนี้เดินทางมาถึงชั้นบรรยากาศโลก ประมาณ 1 ใน 3 ของรังสีคลื่นสั้นจะเกิดการสะท้อนกลับออกสู่อวกาศ ส่วนที่เหลืออีก 2 ใน 3 จะถูกดูดซับโดยพื้นโลกและชั้นบรรยากาศโลก อย่างไรก็ตามรังสีคลื่นสั้นบางส่วนที่สามารถผ่านชั้นบรรยากาศโลกเข้ามาได้ ซึ่งจะเกิดการสะท้อนกลับที่เมฆระดับสูง สำหรับส่วนที่ผ่านมายังพื้นโลกได้ก็จะเกิดรังสีสะท้อนกลับจากพื้นโลกขึ้นไปในชั้นบรรยากาศอีกครั้งหนึ่ง เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการแผ่รังสีของโลก (terrestrial radiation) โดยรังสีที่สะท้อนออกจากผิวโลกเหล่านี้เรียกว่ารังสีคลื่นยาวหรือรังสีความร้อน (infrared หรือ heat energy) ซึ่งมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 4 – 60 ไมโครเมตร

เมื่อรังสีคลื่นยาวหรือรังสีความร้อนสะท้อนกลับจากพื้นโลกเข้าไปในบรรยากาศ บางส่วนของรังสีความร้อนนี้จะถูกดักจับด้วยเมฆระดับต่ำและแก๊สเรือนกระจกที่มีอยู่ในธรรมชาติตามปกติที่ชั้นบรรยากาศโทรโปสเฟียร์ (troposphere) และจะแผ่กลับมายังพื้นโลกอีกครั้งหนึ่ง จึงเรียกปรากฏการณ์ว่าปรากฏการณ์เรือนกระจก (greenhouse effect) ซึ่งส่งผลให้โลกมีอุณหภูมิสูงขึ้น เกิดความอบอุ่นแก่โลกจึงเหมาะแก่การดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิต (รูปที่ 2.1) แต่เมื่อในชั้นบรรยากาศมีความหนาแน่นของแก๊สเรือนกระจกที่เพิ่มขึ้นและด้วยคุณสมบัติของแก๊สเรือนกระจกที่สามารถกักเก็บและแผ่ความร้อนได้ดี รวมถึงมีความคงตัวในบรรยากาศที่ระยะเวลาแตกต่างกัน (ตารางที่ 2.1) ส่งผลให้แก๊สเรือนกระจกดูดซับความร้อนและแผ่กลับสู่โลกมากขึ้นทำให้อุณหภูมิโลกเพิ่มสูงขึ้น จึงส่งผลให้เกิดสภาวะโลกร้อนขึ้นนั่นเอง (global warming) (Lallanila, 2015) (รูปที่ 2.1)

สำหรับสาเหตุที่ทำให้ความหนาแน่นของแก๊สเรือนกระจกเพิ่มมากขึ้นนั้นเกิดจากหลาย ๆ ปัจจัย ได้แก่ การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงฟอสซิลและกิจกรรมอื่น ๆ ของมนุษย์ เช่น การตัดไม้ทำลายป่า การเพาะปลูก การทำเหมืองแร่ การสำรวจและขุดเจาะน้ำมันและแก๊สธรรมชาติ การบำบัดน้ำเสีย และการดำเนินงานหลุมฝังกลบมูลฝอย เป็นต้น ซึ่งกิจกรรมต่าง ๆ เหล่านี้ ก่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นของแก๊สเรือนกระจกเป็นปริมาณมากกว่าที่เกิดขึ้นเองจากปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ เช่น การหายใจของพืช และการย่อยสลายของอินทรีย์วัตถุ ถึงแม้ว่าพืชและอินทรีย์วัตถุจะมีการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์เป็นปริมาณมากกว่า 10 เท่าของกิจกรรมมนุษย์ แต่ปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 2.1 ปรากฏการณ์เรือนกระจก (greenhouse effect)
ที่มา: Lallanila (2015)

ตารางที่ 2.1 ความเข้มข้นในบรรยากาศและศักยภาพในการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนของแก๊สเรือนกระจกที่สำคัญ

ชนิดของแก๊สเรือนกระจก	ความคงตัวในบรรยากาศ (ปี)	ความเข้มข้นในปี พ.ศ. 2548	ความเข้มข้นในปี พ.ศ. 2554	ศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (GWP) ในช่วงระยะเวลา 100 ปี
CO ₂ (ppm)	200	379	391 ± 0.2	1
CH ₄ (ppb)	12.4	1,774	1,803 ± 2	28
N ₂ O (ppb)	114 – 120	319	324 ± 0.1	265
CFC – 11 (ppt)	45	251	238 ± 0.8	4,664
CFC – 12 (ppt)	100	542	528 ± 1	10,200
SF ₆ (ppt)	3,200	5.64	7.28 ± 0.03	23,500

หมายเหตุ: เนื่องจากแก๊สเรือนกระจกแต่ละชนิดมีสมบัติต่างกัน ดังนั้นหากต้องการเปรียบเทียบถึงศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนของแก๊สเรือนกระจกที่ไม่ใช่คาร์บอนไดออกไซด์เมื่อเทียบในรูปปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ สามารถทำได้โดยคำนวณจากค่าคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO₂ – equivalents, CO₂e) โดยใช้ศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนในช่วงระยะเวลา 100 ปี

ppm คือ parts per million

ppb คือ parts per billion

ppt คือ parts per trillion

ที่มา: IPCC (2001, 2013)

ที่เกิดขึ้นจะถูกนำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช ดังนั้นความหนาแน่นของแก๊สเรือนกระจกที่เพิ่มสูงขึ้นนั้น จึงมีสาเหตุมาจากกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์นั่นเอง (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2547)

แก๊สเรือนกระจก (greenhouse gases) สามารถแบ่งได้เป็นแก๊สเรือนกระจกที่มีอยู่ตามธรรมชาติ เช่น ไอน้ำ โอโซน (O_3) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มีเทน (CH_4) ไนตรัสออกไซด์ (N_2O) เป็นต้น ซึ่งเป็นองค์ประกอบส่วนน้อยในชั้นบรรยากาศ และแก๊สเรือนกระจกที่ไม่มีตามธรรมชาติแต่เป็นแก๊สเรือนกระจกที่มนุษย์สร้างขึ้น ได้แก่ สารในกลุ่มฮาโลคาร์บอน เช่น คลอโรฟลูออโรคาร์บอน (CFC_s) ไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (HFC_s) เพอร์ฟลูออโรคาร์บอน (PFC_s) เป็นต้น โดยสารที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในด้านอุตสาหกรรมคือ $CFC - 11$ และ $CFC - 12$ ซึ่งมีค่าศักยภาพในการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนสูง โดยความสามารถในการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน นิยามเป็นค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global Warming Potential; GWP) ของแก๊สเรือนกระจก ซึ่งเป็นค่าที่ใช้เทียบกับค่า GWP ของคาร์บอนไดออกไซด์ (สมชัย, 2558; IPCC, 2001, 2013)

สำหรับสัดส่วนของแก๊สเรือนกระจกที่สำคัญในภาพรวมของทั่วโลกนั้น พบว่า ปริมาณการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนมากที่สุดถึงร้อยละ 63.5 รองลงมาคือ มีเทน ร้อยละ 20.5 (Riemer *et al.*, 1998) และสำหรับแก๊สเรือนกระจกที่ก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนมากที่สุดในประเทศไทย ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละ 73 รองลงมาคือ มีเทน ร้อยละ 25 (ตารางที่ 2.2) (Thailand Environment Institute, 1990)

ตารางที่ 2.2 สัดส่วนของแก๊สเรือนกระจกต่อภาวะโลกร้อนทั่วโลกและประเทศไทย

ลำดับที่	ทั่วโลก	สัดส่วน (ร้อยละ)	ประเทศไทย	สัดส่วน (ร้อยละ)
1	CO_2	63.5	CO_2	73
2	CH_4	20.5	CH_4	25
3	CFC_s	11.5	N_2O	2
4	N_2O	4.5	CFC_s	-

ที่มา: Thailand Environment Institute (1990) และ Riemer *et al.* (1998)

ด้วยปัญหาสภาวะที่เกิดขึ้นนี้เอง ในปี พ.ศ. 2530 จึงมีการร่วมมือกันทั่วโลกภายใต้พิธีสารมอนทรีออล (Montreal protocol) ซึ่งเป็นการควบคุมการใช้สารเคมีในกลุ่มของคลอรีนและโบรมีน เช่น คลอโรฟลูออโรคาร์บอน (CFC) ไฮโดรคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (HCFC) คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (CCl_4) และเมทิลคลอโรฟอร์ม (CH_3CCl_3) เป็นต้น ทั้งนี้เพื่อเป็นการลดการทำลายชั้นโอโซนในชั้นบรรยากาศสตราโทสเฟียร์ (stratosphere) ภายหลังจากการปฏิบัติตามสนธิสัญญาแล้ว พบว่า

ปริมาณสาร CFCs มีค่าลดน้อยลง (ตารางที่ 2.1) อย่างไรก็ตาม ในปี พ.ศ. 2541 พบว่าแก๊สเรือนกระจกยังคงมีอัตราการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จึงมีการเสนอให้มีการลดการเกิดแก๊สเรือนกระจก อันประกอบไปด้วย คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) มีเทน (CH₄) ไนตรัสออกไซด์ (N₂O) ซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF₆) เป็นต้น ภายใต้สนธิสัญญาเกียวโต (Kyoto protocol) ซึ่งมีเทนจัดเป็นแก๊สเรือนกระจกที่ทั่วโลกให้ความสนใจ เนื่องจากมีเทนมีค่า GWP สูงกว่าคาร์บอนไดออกไซด์ กล่าวคือ มีเทนสามารถดูดซับรังสีความร้อนได้มากกว่าคาร์บอนไดออกไซด์ถึง 28 เท่า ในช่วงระยะเวลา 100 ปี และสามารถดูดซับรังสีความร้อนได้มากกว่าคาร์บอนไดออกไซด์ถึง 84 เท่าในช่วงระยะเวลา 20 ปี (IPCC, 2013) และเมื่อพิจารณาจากรายงานการศึกษาต่าง ๆ ในช่วงระยะเวลามากกว่า 150 ปี คือ ตั้งแต่ ปี พ.ศ. 2293 (ค.ศ. 1750) ถึง พ.ศ. 2554 (ค.ศ. 2011) พบว่า ความเข้มข้นเฉลี่ยของมีเทนในชั้นบรรยากาศโลกเพิ่มสูงถึงร้อยละ 150 ในขณะที่ความเข้มข้นเฉลี่ยของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้นเพียงร้อยละ 40 เท่านั้น (IPCC, 2013) ด้วยเหตุนี้ การลดการแพร่กระจายของมีเทนซึ่งมีค่า GWP สูงกว่า และมีอายุในชั้นบรรยากาศ (12.4 ปี) สั้นกว่าคาร์บอนไดออกไซด์จึงมีความสำคัญอย่างมากต่อการลดภาวะโลกร้อน (IPCC, 2013) นอกจากนี้มีเทนยังเป็นแก๊สที่สามารถติดไฟได้เองและเกิดการระเบิดได้เมื่อมีความเข้มข้นในบรรยากาศที่ระดับร้อยละ 5 – 15 (Linde, 2013)

2.2 มีเทน (methane) และแหล่งกำเนิดมีเทน (sources of methane)

มีเทน มีสูตรโมเลกุลคือ CH₄ มีสถานะเป็นแก๊สที่ปราศจากสีและกลิ่นที่อุณหภูมิห้องและความดันมาตรฐาน มีจุดเดือดที่ -161.5 องศาเซลเซียส (-257.8 องศาฟาเรนไฮต์) ที่ความดัน 1 บรรยากาศ มีเทนในสถานะแก๊สเมื่อมีความเข้มข้นอยู่ในบรรยากาศที่ระดับร้อยละ 5 – 15 จะสามารถติดไฟได้เอง (สมชัย, 2558; Linde, 2013)

มีเทนเกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ (anaerobic condition) และพบว่าเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของแก๊สธรรมชาติและเป็นแหล่งพลังงานสำคัญที่มีการนำไปใช้ในครัวเรือน ระบบขนส่ง และโรงไฟฟ้า

มีเทนที่แพร่กระจายสู่บรรยากาศโลกมีที่มาจากแหล่งกำเนิดที่สำคัญซึ่งสามารถแบ่งได้ 3 กลุ่มด้วยกัน (IPCC, 2013) คือ (1) biogenic เป็นกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพภายใต้สภาวะไร้อากาศ (anaerobic condition) หรือเรียกกระบวนการนี้ว่าเมทาโนเจเนซิส (methanogenesis) โดยมีแหล่งกำเนิดของมีเทนที่สำคัญ เช่น พื้นที่ชุ่มน้ำ (wetland) นาข้าว (rice paddies) อ่างเก็บน้ำ (oxygen – poor freshwater) เขื่อน (dams) การทำปศุสัตว์ (enteric fermentation) มูลสัตว์ (manure) กากตะกอน (sludge) และหลุมฝังกลบมูลฝอย (landfills) เป็นต้น (2) thermogenic เป็นกระบวนการเกิดมีเทนด้วยกระบวนการทางธรณีวิทยาของซากฟอสซิลเป็นระยะเวลามากกว่าล้านปี ภายใต้สภาวะที่มีอุณหภูมิและความดันสูง โดยมีเทนจะถูกปลดปล่อยจากรอยแตกหรือรอยแยกของ

เปลือกโลกทำให้มีเทนแพร่กระจายออกสู่ชั้นบรรยากาศได้ เช่น แพร่กระจายออกจากรอยแตกหรือรอยแยกของพื้นดิน (terrestrial seeps) แพร่กระจายจากทะเล (marine seepage) และภูเขาไฟโคลน (mud volcanoes) เป็นต้น นอกจากนี้การแพร่กระจายของมีเทนยังมีสาเหตุมาจากการนำเชื้อเพลิงฟอสซิลมาใช้ประโยชน์อย่างไม่เหมาะสม เช่น กระบวนการสกัดถ่านหิน (coal extraction) อุตสาหกรรมน้ำมัน (oil industry) และแก๊สธรรมชาติที่รั่วไหลออกมาจากกระบวนการสกัดและการขนส่ง เป็นต้น (3) pyrogenic เป็นผลมาจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงรูปแบบต่าง ๆ เช่น การเผาไหม้ของชีวมวล การเกิดไฟป่า การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวภาพ และการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงฟอสซิล เป็นต้น ซึ่งแหล่งกำเนิดของมีเทนทั้ง 3 กลุ่มนี้มีที่มาจากแหล่งกำเนิดโดยธรรมชาติ และแหล่งกำเนิดที่เกิดขึ้นจากการกระทำของมนุษย์ (ตารางที่ 2.3) ทั้งนี้มีเทนที่เกิดขึ้นจากการกระทำของมนุษย์ คิดเป็นร้อยละ 50 – 65 ของแหล่งกำเนิดมีเทนทั้งหมด (IPCC, 2013)

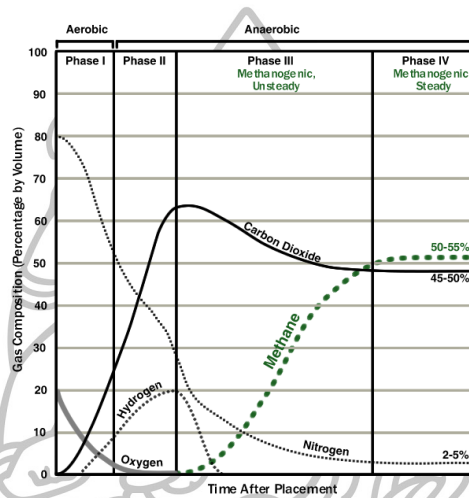
ตารางที่ 2.3 แหล่งกำเนิดของแก๊สมีเทน (CH₄) ที่ปล่อยสู่บรรยากาศในแต่ละปี (พ.ศ.) (ล้านตัน CO₂e)

แหล่งกำเนิด	2533	2548	2550	2551	2552	2553	2554
การสกัด การผลิต ตลอดจนการใช้ประโยชน์จากเชื้อเพลิงฟอสซิล	161.2	159.0	168.4	163.4	150.7	143.6	144.7
การทำปศุสัตว์	132.7	137.0	141.8	141.4	140.6	139.3	137.4
หลุมฝังกลบ	147.8	112.5	111.6	113.6	113.3	106.8	103.0
เหมืองถ่านหิน	84.1	56.9	57.9	67.1	70.3	72.4	63.2
การจัดการปุ๋ยคอก	31.5	47.6	52.4	51.5	50.5	51.8	52.0
ปิโตรเลียม	35.2	29.2	29.8	30.0	30.5	30.8	31.5
ระบบบำบัดน้ำเสีย	15.9	16.5	16.6	16.6	16.5	16.4	16.2
พื้นที่ป่า	2.5	8.0	14.4	8.7	5.7	4.7	14.2
การเพาะปลูกข้าว	7.1	6.8	6.2	7.2	7.3	8.6	6.6
การเผาแบบติดที่	7.5	6.6	6.4	6.6	6.3	6.3	6.3
เหมืองถ่านหินใต้ดินร้าง	6.0	5.5	5.3	5.3	5.1	5.0	4.8
ผลผลิตปิโตรเลียม	2.3	3.1	3.3	2.9	2.9	3.1	3.1
การเผาแบบเคลื่อนย้ายได้	4.6	2.4	2.1	1.9	1.8	1.8	1.7
ปุ๋ยหมัก	0.3	1.6	1.7	1.7	1.6	1.5	1.5
การเผาฟางข้าว	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
ผลรวม	639.9	593.6	618.6	618.8	603.8	592.7	587.2

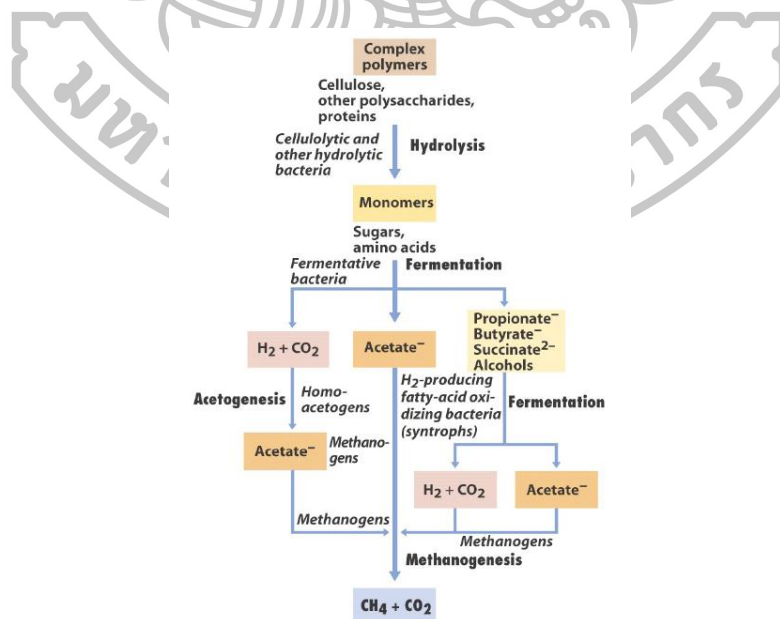
ที่มา: U.S. Department of State (2014)

2.3 การเกิดมีเทนในหลุมฝังกลบมูลฝอย

แก๊สจากหลุมฝังกลบเกิดจากกระบวนการย่อยสลายของสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ ซึ่งกระบวนการย่อยสลาย ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน โดยองค์ประกอบของแก๊สจะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของแต่ละขั้นตอนในการย่อยสลายมูลฝอยจากหลุมฝังกลบเป็นระยะเวลา 20 – 30 ปี ดังนั้นของเสียในหลุมฝังกลบในแต่ละพื้นที่อาจจะมีการย่อยสลายในขั้นตอนที่แตกต่างกัน (รูปที่ 2.2 และ รูปที่ 2.3) (Tchobanoglous *et al.*, 1993; Cheremisinoff, 2003)



รูปที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงของแก๊สที่เกิดขึ้นภายในหลุมฝังกลบมูลฝอย
ที่มา: EPA (1997)



รูปที่ 2.3 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกาศ
ที่มา: Madigan *et al.* (2006)

2.3.1 ขั้นตอนที่ 1 การไฮโดรไลซิส (hydrolysis)

ในขั้นตอนนี้จะเกิดการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ที่ใช้ใช้อากาศ (aerobic condition) เนื่องจากในหลุมฝังกลบยังมีออกซิเจนแทรกตัวอยู่ โดยจุลินทรีย์จะทำการย่อยสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อน เช่น โปรตีน ไขมัน และคาร์โบไฮเดรตที่มีองค์ประกอบเป็นพวกเซลลูโลสและพวกโพลีเมอร์ เช่น ลิกนิน เป็นต้น ให้กลายเป็นสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็กลง ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากกระบวนการนี้คือ คาร์บอนไดออกไซด์ และไนโตรเจน ซึ่งจะมีค่าสูงมากในตอนเริ่มต้นและจะค่อย ๆ ลดน้อยลง โดยกระบวนการไฮโดรไลซิสนี้จะยังคงเกิดขึ้นได้ต่อไป จนกว่าออกซิเจนจะถูกใช้ไปจนหมด ดังนั้นระยะเวลาของการย่อยสลายในขั้นตอนนี้จึงขึ้นอยู่กับปริมาณของออกซิเจนที่มีอยู่ในหลุมฝังกลบ

2.3.2 ขั้นตอนที่ 2 การสร้างกรด (acidogenesis หรือ fermentation)

ขั้นตอนนี้จะเริ่มเกิดขึ้นหลังจากที่ออกซิเจนในหลุมฝังกลบถูกใช้หมดไป จึงส่งผลให้ภายในหลุมฝังกลบเกิดสภาวะไร้อากาศ (anaerobic condition) ขึ้น ในขั้นตอนนี้จุลินทรีย์จะทำหน้าที่เปลี่ยนสารประกอบที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 (การไฮโดรไลซิส) ไปเป็นกรดอะซิติก (acetic acid) แลคติก (lactic) และแอลกอฮอล์ เช่น เมทานอล (methanol) และเอทานอล (ethanol) เป็นต้น ภายในหลุมฝังกลบจะมีความเป็นกรดสูงขึ้น เมื่อกรดผสมกับความชื้นที่เกิดขึ้นในหลุมฝังกลบ จะส่งผลให้เกิดการละลายของสารอาหารบางชนิดออกมา เช่น ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส เป็นต้น เมื่อมีสารอาหารเหล่านี้ละลายออกมามากขึ้น จุลินทรีย์ในหลุมฝังกลบจึงใช้ประโยชน์จากไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้มากขึ้นตามไปด้วย สำหรับแก๊สสำคัญที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้คือ คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน อย่างไรก็ตามหากหลุมฝังกลบถูกรบกวนโดยการมีออกซิเจนแพร่เข้ามาในระบบกระบวนการจะเกิดการย้อนกลับไปเป็นกระบวนการไฮโดรไลซิสอีกครั้งหนึ่ง

2.3.3 ขั้นตอนที่ 3 การสร้างกรดอะซิติก (acetogenesis)

กระบวนการย่อยสลายในขั้นตอนนี้เริ่มขึ้นเมื่อจุลินทรีย์บางชนิดที่ไม่ใช้อากาศทำการย่อยสลายกรดอินทรีย์ที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 และเปลี่ยนให้เป็นกรดอะซิติก (acetic acid) กระบวนการนี้ทำให้ภายในหลุมฝังกลบมีสภาวะที่เป็นกลางมากขึ้น ส่งผลให้จุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ในการสร้างมีเทนมีจำนวนเพิ่มขึ้น ซึ่งจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ในการสร้างมีเทนและจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ในการสร้างกรดอะซิติกมีความสัมพันธ์แบบพึ่งพาอาศัยกัน โดยจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ในการสร้างกรดอะซิติกจะสร้างสารประกอบที่จำเป็นสำหรับจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ในการสร้างมีเทน และจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ในการสร้างมีเทนจะใช้คาร์บอนไดออกไซด์และกรดอะซิติก แต่ถ้าในระบบมีคาร์บอนไดออกไซด์หรือกรดอะซิติกมากเกินไป จะเป็นอันตรายต่อจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ในการสร้างมีเทนได้ ในขั้นตอนนี้คาร์บอนไดออกไซด์จัดเป็นแก๊สหลักที่จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น และมีไฮโดรเจนเกิดขึ้นเล็กน้อยและจะค่อย ๆ ลดลง

2.3.4 ขั้นตอนที่ 4 การสร้างมีเทน (methanogenesis)

ในขั้นตอนนี้ องค์ประกอบและอัตราการผลิตแก๊สจากหลุมฝังกลบมีลักษณะค่อนข้างคงที่ โดยปกติองค์ประกอบโดยปริมาตรของแก๊สจากหลุมฝังกลบจะประกอบด้วย มีเทน ร้อยละ 50 – 55 คาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละ 45 – 50 และแก๊สอื่น ๆ อีก เช่น ซัลไฟด์ ประมาณร้อยละ 2 – 5 (EPA, 1996; MassIT, 2014) ในขั้นตอนนี้อัตราการผลิตแก๊สจากหลุมฝังกลบจะมีลักษณะที่คงที่ โดยอาจใช้ระยะเวลาถึง 20 ปี อย่างไรก็ตามแก๊สจากหลุมฝังกลบอาจยังคงแพร่ระบายออกสู่บรรยากาศได้เป็นระยะเวลาถึง 50 ปี หรือมากกว่าได้

สำหรับวิถีในการสร้างมีเทนสามารถเกิดขึ้นได้ใน 2 ลักษณะด้วยกันคือ วิถีที่ 1 เป็นการสร้างมีเทนจากกรดอะซิติก คิดเป็นร้อยละ 70 ของแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นในระบบ และวิถีที่ 2 เป็นการสร้างมีเทนจากคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน คิดเป็นร้อยละ 30 ของแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นในระบบ อย่างไรก็ตามการสร้างมีเทนในทั้ง 2 วิถี จะต้องเกิดขึ้นภายใต้สภาวะไร้อากาศโดยจุลินทรีย์กลุ่มที่ทำหน้าที่สร้างมีเทน (methane formers) ซึ่งจุลินทรีย์กลุ่มนี้เป็นจุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตช้าและเจริญเติบโตได้ในสภาพแวดล้อมที่จำกัด เช่น ค่าพีเอช อุณหภูมิ และสารอาหาร ต้องมีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโต เป็นต้น รวมถึงการเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มนี้ยังขึ้นอยู่กับการทำงานอย่างสัมพันธ์กันของจุลินทรีย์ในขั้นตอนอื่น ๆ ด้วย

2.4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิตแก๊สมีเทนในหลุมฝังกลบ

ระบบการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศจะประกอบด้วยจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ในการสร้างกรด (acidogenic microorganisms) และจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ในการสร้างมีเทน (methanogenic microorganisms) เพื่อเป็นการควบคุมให้ระบบทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ จึงจำเป็นที่จะต้องควบคุมปัจจัยต่าง ๆ (Agency for Toxic Substances and Disease Registry [ATSDR], 2016) ให้เหมาะสมกับจุลินทรีย์แต่ละชนิดด้วย โดยแต่ละปัจจัยมีรายละเอียดดังนี้

2.4.1 องค์ประกอบของมูลฝอย (waste composition)

หากในขยะมูลฝอยมีองค์ประกอบที่เป็นสารอินทรีย์อยู่เป็นปริมาณมาก จะส่งผลให้เกิดการผลิตแก๊สโดยกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์สูงขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้ของเสียอินทรีย์บางชนิดยังอุดมไปด้วยสารอาหาร เช่น โซเดียม โปตัสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม เป็นต้น ซึ่งเป็นสารอาหารที่ช่วยในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ดังนั้นเมื่อมีสารอาหารเหล่านี้อยู่ในหลุมฝังกลบ ก็จะช่วยให้มีการผลิตแก๊สเพิ่มขึ้นด้วย ในทางตรงกันข้ามหากของเสียบางชนิดมีสารที่เป็นอันตรายต่อจุลินทรีย์ก็จะส่งผลให้อัตราการผลิตแก๊สลดลง ดังตัวอย่างเช่น จุลินทรีย์บางชนิดที่ทำหน้าที่ในการสร้างมีเทนสามารถถูกยับยั้งได้เมื่ออยู่ในสภาวะที่มีโซเดียมสูง (ตารางที่ 2.4)

2.4.2 ปริมาณออกซิเจนในหลุมฝังกลบ (oxygen in the landfill)

เมื่อออกซิเจนในหลุมฝังกลบถูกใช้หมดไป จุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ในการสร้างมีเทนจึงจะเริ่มสร้างมีเทน ดังนั้นหากยังคงมีออกซิเจนอยู่ในหลุมฝังกลบ กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในขั้นตอนที่ 1 โดยจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนก็จะใช้เวลานานมากขึ้น นอกจากนี้หากของเสียในหลุมฝังกลบถูกฝังกลบอย่างหลวม ๆ หรือถูกรบกวนอย่างบ่อยครั้ง ก็จะทำให้มีการเติมออกซิเจนลงไป ในหลุมฝังกลบอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้จุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนเจริญเติบโตได้ต่อไปและทำหน้าที่ในการผลิตคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำออกไปอีกเป็นระยะเวลาสั้นขึ้น แต่หากของเสียในหลุมฝังกลบถูกบดอัดให้แน่นขึ้น กระบวนการสร้างมีเทนจะเกิดขึ้นได้เร็วขึ้น เนื่องจากจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนถูกแทนที่ด้วยจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ในการสร้างมีเทนซึ่งเป็นจุลินทรีย์ชนิดไม่ใช้อากาศในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในขั้นตอนที่ 3 ซึ่งกระบวนการสร้างมีเทนที่ถูกผลิตโดยจุลินทรีย์ชนิดไม่ใช้อากาศจะเกิดขึ้นได้เมื่อออกซิเจนในหลุมฝังกลบถูกใช้หมดไปโดยจุลินทรีย์ชนิดใช้อากาศ ด้วยเหตุนี้ปริมาณออกซิเจนที่เหลืออยู่ภายในหลุมฝังกลบจะส่งผลให้กระบวนการสร้างมีเทนเกิดขึ้นได้ช้าลง

2.4.3 ความชื้น (moisture content)

ความชื้นที่มีอยู่ในหลุมฝังกลบเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่ออัตราการเพิ่มการผลิตแก๊สจากหลุมฝังกลบเนื่องจากความชื้นช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และทำหน้าที่ในการเคลื่อนย้ายสารอาหารและจุลินทรีย์ไปยังบริเวณต่าง ๆ ภายในหลุมฝังกลบ ซึ่งปริมาณความชื้นที่ระดับมากกว่าหรือเท่ากับ ร้อยละ 40 (โดยน้ำหนักสดของมูลฝอย) จัดเป็นปริมาณความชื้นที่ช่วยส่งเสริมให้เกิดการสร้างมีเทนได้สูงสุด (ในหลุมฝังกลบที่ปิดแล้ว) ส่วนการบดอัดมูลฝอยที่แน่นเกินไปภายในหลุมฝังกลบจะทำให้การสร้างมีเทนเกิดขึ้นได้ช้าลงเนื่องจากไปทำให้ความหนาแน่นของมูลฝอยเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้อัตราการซาบซึมน้ำภายในของเสียลดลง

2.4.4 ค่าพีเอช (pH)

จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนเป็นจุลินทรีย์ที่ต้องการสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม รวมทั้งพีเอชที่อยู่ระหว่าง 6.8 – 8.0 เพื่อที่จะให้การผลิตมีเทนเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Tchobanoglous *et al.*, 1993) จากการรายงานของ Klink and Ham (1982) พบว่าค่าพีเอชในหลุมฝังกลบมูลฝอยที่เหมาะสมคือ 6.8 – 7.5 ซึ่งส่งผลให้มีอัตราการสร้างมีเทนเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ

2.4.5 อุณหภูมิ (temperature)

การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในชั้นมูลฝอยจะทำให้การผลิตแก๊สเพิ่มมากขึ้นไปด้วย ซึ่งอุณหภูมิที่มีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์จะอยู่ในช่วง 30 – 55 องศาเซลเซียส หากสูงกว่าหรือต่ำกว่าระดับที่กำหนดนี้ จะส่งผลให้ปริมาณมีเทนลดลงได้ สอดคล้องกับรายงานของ Alvarez and Viturtia (1986) ที่พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อจุลินทรีย์อยู่ในช่วง 34 – 38 องศาเซลเซียส

2.4.6 สารพิษและสารยับยั้ง (toxic agents and chemical inhibitors)

โลหะหนัก สารพิษ และสารปฏิชีวนะ รวมถึงสารทำความสะอาตต่างๆ ส่งผลต่อการยับยั้งกระบวนการผลิตมีเทน (methanogenesis) รวมถึงส่งผลต่อปริมาณจุลินทรีย์ ซึ่งจะทำให้จุลินทรีย์ตายได้ จึงส่งผลกระทบต่อการสร้างมีเทนด้วย

2.4.7 สารอาหาร (nutrient)

สารอาหารเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ถึงแม้จะเป็นจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ออกาศ (anaerobic bacteria) แต่ก็มีความต้องการสารอาหารจำพวกไนโตรเจน ฟอสฟอรัส ซัลเฟอร์ และสารอื่น ๆ ในปริมาณน้อยที่จะช่วยในการเจริญเติบโต เพราะฉะนั้นจึงต้องมีการเติมสารอาหารให้เพียงพอต่อความต้องการของจุลินทรีย์ เพราะของเสียที่เข้าสู่ระบบนั้นจะมีสมบัติแตกต่างกันไป

Mccarty (1964) ได้ทำการคำนวณปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่ต้องการของเซลล์จุลินทรีย์ โดยคำนวณจากค่าเฉลี่ยของสูตรเคมีของเซลล์จุลินทรีย์ $C_5H_9O_3N$ ซึ่งมีไนโตรเจนอยู่ร้อยละ 11 ของน้ำหนักเซลล์ที่เป็นของแข็งระเหย และพบว่าต้องการฟอสฟอรัสประมาณ 1 ใน 5 ของน้ำหนักเซลล์ที่เป็นของแข็งระเหย นอกจากสารอาหารประเภทไนโตรเจนและฟอสฟอรัสแล้ว ยังพบว่ามีสารอื่นๆ (ตารางที่ 2.4) ที่ทำหน้าที่ในการกระตุ้นการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เมื่อมีความเข้มข้นต่ำ และจะยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น

ตารางที่ 2.4 ความเข้มข้นของไอออนประจุบวกในการกระตุ้นและยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

ประจุบวก (cation)	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)		
	มีฤทธิ์กระตุ้น (stimulation)	มีฤทธิ์ยับยั้งปานกลาง (moderately inhibitory)	มีฤทธิ์ยับยั้งรุนแรง (strong inhibitory)
โซเดียม (Na)	100 – 200	3,500 – 5,500	8,000
โพแทสเซียม (P)	200 – 400	2,500 – 4,500	12,000
แคลเซียม (Ca)	100 – 200	2,500 – 4,500	8,000
แมกนีเซียม (Mg)	75 – 150	1,000 – 1,500	3,000

ที่มา: Mccarty (1964)

2.5 การเก็บรวบรวมแก๊สมีเทนจากหลุมฝังกลบมูลฝอยเพื่อลดการแพร่กระจาย

แก๊สที่เกิดขึ้นจากหลุมฝังกลบสามารถเก็บรวบรวมได้ผ่านการรวบรวมแก๊สแบบระบายตามธรรมชาติ (passive system) หรือการรวบรวมแก๊สแบบการสูบหรืออัดอากาศเข้าไปในระบบท่อรวบรวม (active system) ซึ่งในแต่ละแบบจะประกอบด้วยชุดบ่อรวบรวมแก๊สที่ติดตั้งไว้ในหลุมฝังกลบ โดยที่จำนวนและระยะห่างของบ่อรวบรวมแก๊สจะขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะของหลุมฝังกลบแต่ละแห่ง เช่น ปริมาตรของมูลฝอย ความหนาแน่น ความลึก และขนาดพื้นที่ เป็นต้น สำหรับลักษณะเฉพาะของแต่ละระบบ มีรายละเอียดดังนี้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2544; ATSDR, 2016)

2.5.1 การรวบรวมแก๊สแบบระบายตามธรรมชาติ (passive system)

การรวบรวมแก๊สแบบระบายตามธรรมชาติ เหมาะสำหรับหลุมฝังกลบที่มีปริมาณมีเทนเกิดขึ้นไม่มากนักและสามารถแพร่กระจายด้วยแรงดันภายในหลุมฝังกลบเอง ซึ่งการรวบรวมแก๊สแบบระบายตามธรรมชาติ มีองค์ประกอบดังต่อไปนี้ (รูปที่ 2.4)

2.5.1.1 ท่อระบายแก๊สและการเผาแก๊สบริเวณชั้นวัสดุปิดทับ (pressure relief vents/flares in landfill cover)

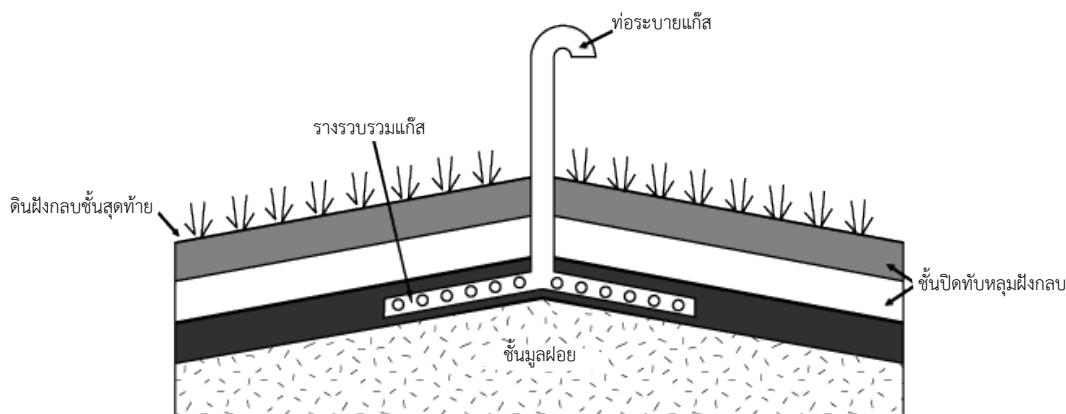
ระบบนี้อาศัยหลักการที่แก๊สภายในสถานที่ฝังกลบมีความดันมาก ซึ่งจะสามารถแพร่กระจายออกสู่บรรยากาศได้ โดยการต่อท่อระบายแก๊ส (relief vents) บนชั้นวัสดุปิดทับชั้นสุดท้าย โดยด้านปลายของท่อจะต่อถึงถึงมวลขยะ ในกรณีที่แก๊สมีปริมาณมากท่อระบายอากาศจะถูกต่อรวมกันและทำการต่อเข้ากับเครื่องเผาไหม้แก๊ส (gas burner)

2.5.1.2 รางรวบรวมแก๊สรอบสถานที่ฝังกลบ (perimeter interceptor trenches)

รางรวบรวมแก๊สรอบสถานที่ฝังกลบประกอบด้วยท่อพลาสติก PVC หรือ PE ติดตั้งอยู่ในแนวราบและฝังอยู่ในรางกรวด (gravel – filled interceptor trenches) เพื่อรวบรวมแก๊สที่เคลื่อนที่ในแนวราบในสถานที่ฝังกลบมูลฝอย และจะต่อเชื่อมกับท่อแนวตั้ง (vertical riser) เพื่อส่งผ่านแก๊สออกไปยังบรรยากาศหรือผ่านไปยังเครื่องเผาไหม้แก๊ส

2.5.1.3 ผนังกั้นแก๊สรอบสถานที่ฝังกลบ (perimeter barrier trench or slurry wall)

ผนังกั้นแก๊สรอบสถานที่ฝังกลบจะทำจากวัสดุที่น้ำซึมผ่านได้ยาก เช่น เบนโทไนต์ (bentonite) หรือดินเหนียว (clay slurry) ซึ่งทำหน้าที่เป็นเหมือนผนังในแนวตั้งใต้ดินป้องกันการแพร่กระจายของแก๊สที่เกิดจากสถานที่ฝังกลบและทำหน้าที่เก็บกักแก๊สให้อยู่บริเวณผนังด้านใน ซึ่งจะถูกรวบรวมโดยรางรวบรวมแก๊ส (perimeter interceptor trench)



รูปที่ 2.4 การรวบรวมแก๊สแบบระบายตามธรรมชาติ (passive system)

ที่มา: ดัดแปลงจาก ATSDR (2016)

2.5.2 การรวบรวมแก๊สแบบการสูบหรืออัดอากาศเข้าไปในระบบท่อรวบรวม (active system)

การรวบรวมแก๊สแบบการสูบหรืออัดอากาศเข้าไปในระบบท่อรวบรวมเป็นวิธีที่มีการใช้ปั๊มดูดโดยตรง ส่งผลให้วิธีนี้มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าการรวบรวมแก๊สแบบระบายตามธรรมชาติ จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับหลุมฝังกลบที่มีมีเทนเกิดขึ้นเป็นปริมาณมาก และสามารถนำมีเทนไปใช้ประโยชน์ในด้านพลังงานได้ อย่างไรก็ตามวิธีนี้จะมีค่าใช้จ่ายสูงในเรื่องของค่าติดตั้งและการดูแลรักษา ระบบ สำหรับการรวบรวมแก๊สแบบการสูบหรืออัดอากาศเข้าไปในระบบท่อรวบรวมมีองค์ประกอบดังต่อไปนี้ (รูปที่ 2.5)

2.5.2.1 บ่อดูดแก๊สตามแนวตั้ง (vertical gas extraction wells)

ต้องมีการติดตั้งบ่อดูดแก๊สในแนวตั้งให้ครอบคลุมพื้นที่หลุมฝังกลบ และทำการติดตั้งบ่อดูดอากาศหลังจากทำการฝังกลบมูลฝอยเสร็จสมบูรณ์แล้ว สำหรับหลุมฝังกลบที่มีมานานแล้วนั้น การติดตั้งบ่อดูดแก๊สในแนวตั้งยังเป็นการช่วยในเรื่องการนำพลังงานกลับมาใช้ประโยชน์ และยังเป็นการควบคุมการไหลของแก๊สไปยังบริเวณใกล้เคียงอีกด้วย

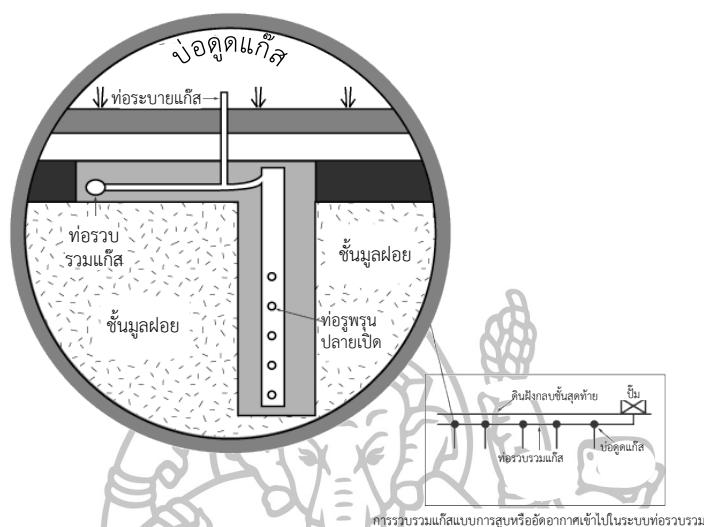
2.5.1.2 บ่อดูดแก๊สในแนวราบ (horizontal gas extraction wells)

บ่อดูดแก๊สในแนวราบจะถูกติดตั้งหลังจากได้ทำการฝังกลบมากกว่า 2 ชั้น ซึ่งจะเชื่อมต่อกับบ่อดูดแก๊สตามแนวตั้ง และประกอบไปด้วยท่อที่มีรูพรุนปลายเปิดฝังอยู่ในรางกรวด

2.5.1.3 การจัดการแก๊สควบแน่น (condensate management)

แก๊สในสถานที่ฝังกลบจะมีอุณหภูมิที่สูงและเมื่อเย็นลงจะเกิดการกลั่นตัว และรวบรวมไปตามท่อที่มีความชันประมาณร้อยละ 3 โดยจุดต่ำสุดของท่อจะเป็นกับดักไอน้ำ

(condensate trap) ซึ่งเป็นจุดรวบรวมไอน้ำ (condensate) ไปยังถังเก็บรวบรวม (holding tank) และจะถูกปั๊มออกไปรวมกับน้ำชะขยะหมุนเวียน (recirculated leachate)



รูปที่ 2.5 การรวบรวมแก๊สแบบการสูบหรืออัดอากาศเข้าไปในระบบท่อรวบรวม (active system)
ที่มา: ดัดแปลงจาก ATSDR (2016)

2.6 การออกซิเดชันของมีเทนในชั้นดินปิดทับหลุมฝังกลบมูลฝอย

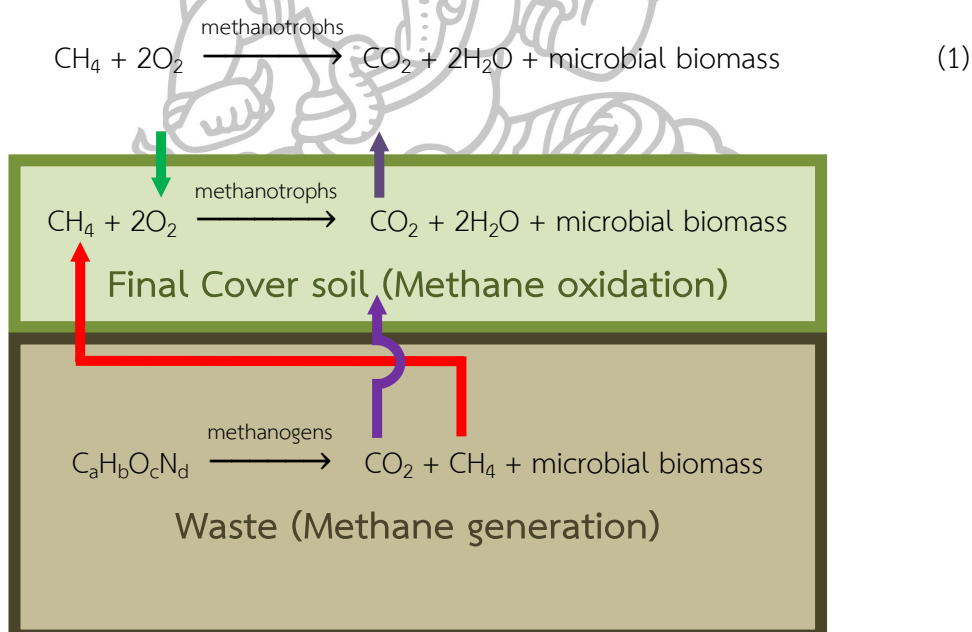
การออกซิเดชันของมีเทนโดยจุลินทรีย์ในชั้นดินปิดทับหลุมฝังกลบมูลฝอยเป็นวิธีการหนึ่งที่มีการนำไปใช้ในการควบคุมการแพร่กระจายของมีเทน จากรายงานการศึกษาต่าง ๆ พบว่า กระบวนการออกซิเดชันของมีเทนในชั้นดินปิดทับหลุมฝังกลบเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการลดการแพร่กระจายของมีเทน (Humer and Lechner, 1999; Hilger and Humer, 2003; Huber – Humer, 2004; Stern *et al.*, 2007; Huber – Humer *et al.*, 2008; Abushammala *et al.*, 2014a) กระบวนการออกซิเดชันของมีเทนโดยจุลินทรีย์นี้สามารถเกิดขึ้นได้เองโดยทั่วไปในระบบธรรมชาติและในดิน ทั้งนี้เนื่องมาจากความหลากหลายของชนิดและความมากมายของจุลินทรีย์กลุ่มที่ใช้ออกซิเจนสำหรับกระบวนการออกซิเดชันนั่นเอง กระบวนการนี้จึงได้ถูกนำมาใช้เพื่อลดการแพร่กระจายของมีเทนในพื้นที่ฝังกลบมูลฝอยที่ไม่มีระบบรวบรวมแก๊สหรือแม้กระทั่งในพื้นที่ที่มีระบบรวบรวมแก๊ส ทั้งนี้ก็เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมการแพร่กระจายของมีเทนให้ดียิ่งขึ้น

2.6.1 จุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ในการออกซิเดชันมีเทน (methane – oxidizing micro-organisms)

กระบวนการออกซิเดชันของมีเทนในชั้นดินปิดทับหลุมฝังกลบเกิดจากแบคทีเรียกลุ่มเมทาโนโทรฟ (methanotrops) หรือเมทาโนโทรฟิคแบคทีเรีย (methanotrophic bacteria)

ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มเมทิลโอโทรฟแบคทีเรีย (methylotroph bacteria) ซึ่งเป็นกลุ่มของแบคทีเรียที่เจริญเติบโตได้ในสภาวะที่มีอากาศเท่านั้น (obligate aerobes) และเป็นแบคทีเรียกลุ่มเดียวที่สามารถดั่งสารประกอบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบอยู่ 1 อะตอมมาใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงานในการเจริญเติบโต (Hanson and Hanson, 1996; Pawlowska, 2014) สำหรับสารประกอบคาร์บอนที่กลุ่มของเมทิลโอโทรฟแบคทีเรียสามารถนำมาใช้ได้มี ได้แก่ มีเทน เมทานอล เมทิลเลทเอมีน ฮาโลมีเทน และสารประกอบเมทิลที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ นอกจากนี้เมทิลโอโทรฟแบคทีเรียบางชนิดยังสามารถใช้หมู่เมทิลจากสารประกอบอินทรีย์ที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบหรือจากสารกำจัดแมลงพวกคาร์โบฟูแรน (carbofuran) เป็นต้น (Hanson and Hanson, 1996)

เมทาโนโทรฟจัดเป็นแบคทีเรียชนิดโพรคาริโอต (prokaryotic microorganisms) จะใช้คาร์บอนอะตอมจากมีเทนเป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงานในการเจริญเติบโต (Pawlowska, 2014) ซึ่งเมทาโนโทรฟจะทำหน้าที่ในการออกซิไดซ์มีเทนให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และมวลชีวภาพจุลินทรีย์ (microbial biomass) ดังสมการที่ 1 และ รูปที่ 2.6 (Abushammala *et al.*, 2014b)



รูปที่ 2.6 กระบวนการทางชีวภาพในการลดปริมาณการแพร่กระจายของมีเทนจากหลุมฝังกลบมูลฝอย
ที่มา: ดัดแปลงจาก Chiemchaisri (2000)

2.6.1.1 การจำแนกเชื้อเมทาโนโทรฟ

เมทาโนโทรฟมีมากมายหลายชนิด และในการจำแนกชนิดของเมทาโนโทรฟจะพิจารณาจากลักษณะต่าง ๆ เหล่านี้ เช่น ลักษณะรูปร่างของเซลล์ (cell morphology)

รูปแบบระยะพักตัว (resting stage formed) ลักษณะของเยื่อหุ้มไซโตพลาสซึม (fine structure intracytoplasmic membrane) ลักษณะภายนอกทั่วไป (physiological characteristics) และรูปแบบการนำฟอร์มาลดีไฮด์เข้าสู่เซลล์ เป็นต้น และจากการศึกษาของ Whittenbury *et al.* (1970) พบว่าสามารถจำแนกเชื้อเมทาโนโทรฟได้มากกว่า 100 ชนิด

เมทาโนโทรฟจัดเป็นแบคทีเรียแกรมลบ (gram – negative bacteria) อยู่ในไฟลัม (phylum) proteobacteria คือเป็นแบคทีเรียที่มีเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นนอก (outer membrane) ประกอบไปด้วยไลโปโพลีแซคคาไรด์ (lipopolysaccharide) ที่มีการจัดเรียงตัวของเยื่อหุ้มไซโตพลาสซึมแตกต่างกัน (Jiang *et al.*, 2010; Pawlowska, 2014) และเมื่อพิจารณาจากการนำฟอร์มาลดีไฮด์เข้าสู่เซลล์และความสามารถในการใช้มีเทนของแบคทีเรียไฟลัม proteobacteria จะสามารถจำแนกเมทาโนโทรฟออกเป็น 2 ประเภทด้วยกัน (ตารางที่ 2.5) ดังนี้ (Jiang *et al.*, 2010; Pawlowska, 2014)

- **เมทาโนโทรฟประเภทที่ 1 (type I)**

เมทาโนโทรฟประเภทที่ 1 นี้ จัดอยู่ในไฟลัม γ – proteobacteria มีลักษณะรูปร่างเป็นแท่งหรือรูปร่างทรงกลม ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ในที่ที่มีอุณหภูมิสูง (ประมาณ 45 องศาเซลเซียส) ลักษณะของเยื่อหุ้มไซโตพลาสซึมมีลักษณะเรียงซ้อนกันคล้ายแผ่นจานภายในเซลล์ มีรูปแบบระยะพักอยู่ในรูปของซิสต์ (cyst) และนำฟอร์มาลดีไฮด์เข้าสู่เซลล์ด้วยวิถีอาร์ยูเอ็มพี (RuMP pathway) พบอยู่ในสกุล (genus) *Methylobacter*, *Methylomicrobium*, *Methylomonas*, *Methylocaldum*, *Methylosphaera*, *Methylothermus*, *Methulosarcina*, *Methylolalobius*, *Methylosoma*, *Methylococcus* ซึ่งจัดอยู่ในตระกูล (family) *Methylococcaceae*

- **เมทาโนโทรฟประเภทที่ 2 (type II)**

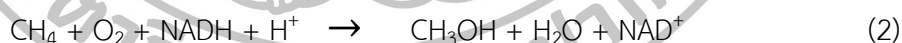
เมทาโนโทรฟประเภทที่ 2 จัดอยู่ในไฟลัม α – proteobacteria มีรูปร่างเป็นแท่งและในบางชนิดมีรูปร่างเป็นวงรี ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ในที่ที่มีอุณหภูมิสูง (ประมาณ 45 องศาเซลเซียส) ลักษณะของเยื่อหุ้มไซโตพลาสซึมมีลักษณะเป็นเยื่อหุ้ม 2 ชั้น ขนานไปกับผนังเซลล์ รูปแบบของระยะพักอยู่ในรูปของซิสต์ (cyst) และเอกโซสปอร์ (exospore) นำฟอร์มาลดีไฮด์เข้าสู่เซลล์ด้วยวิถีซีรีน (serine partway) พบอยู่ในสกุล *Methylocystis* และ *Methylosinus* ซึ่งจัดอยู่ในตระกูล *Methylocystaceae* และยังพบอีก 2 สกุล ได้แก่ *Methylocella* และ *Methylocapsa* ซึ่งจัดอยู่ในตระกูล *Beijerinckiaceae*

ต่อมามีการค้นพบเมทาโนโทรฟประเภทใหม่ คือ เมทาโนโทรฟประเภทเอ็กซ์ (type X) (ตารางที่ 2.5) โดยจัดอยู่ในไฟลัม γ – proteobacteria เมทาโนโทรฟประเภทนี้มีลักษณะบางประการร่วมกันระหว่างเมทาโนโทรฟประเภทที่ 1 และประเภทที่ 2 แต่มีรูปร่างลักษณะ

ส่วนใหญ่เป็นทรงกลมและมักพบเป็นคู่ (dicocci) และเจริญเติบโตได้ที่อุณหภูมิสูงกว่าเมทาโนโทรฟประเภท 1 และประเภทที่ 2 คือสามารถเจริญเติบโตได้ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส และมีลักษณะของเยื่อหุ้มไซโตพลาสซึมเรียงซ้อนกันคล้ายแผ่นจาน รูปแบบของระยะพักอยู่ในรูปของซิสต์ (cyst) ซึ่งมีการตรึงไนโตรเจนได้ โดยอาศัยวิถีอาร์ยูเอ็มพี (RuMP partway) และวิถีซีรีน (serine partway) ในการดูดซึมฟอร์มัลดีไฮด์เข้าสู่เซลล์ ประกอบไปด้วยสกุล *Methylococcus* และ *Methylocaldum*

2.6.2 การดูดซึมคาร์บอนเพื่อการออกซิเดชันมีเทนด้วยเอนไซม์

เอนไซม์ที่สำคัญในการออกซิเดชันมีเทนในเมทาโนโทรฟมีด้วยกันหลายชนิด เช่น เอนไซม์มีเทนโมนอกซีจีเนสหรือเอ็มเอ็มโอ (methane monooxygenase; MMO) โดยเมทาโนโทรฟจะใช้เอนไซม์เอ็มเอ็มโอสำหรับเร่งปฏิกิริยาการออกซิเดชันของมีเทนให้กลายเป็นเมทานอล (Hanson and Hanson, 1996) ดังสมการที่ 2 (Bedard and Knowles, 1989) ซึ่งเอนไซม์เอ็มเอ็มโอสามารถแบ่งได้ 2 รูปแบบ ได้แก่ แบบที่หนึ่งคือ โสลูเบิลมีเทนโมนอกซีจีเนสหรือเอสเอ็มเอ็มโอ (soluble methane monooxygenase; sMMO) เป็นเอนไซม์ที่ละลายอยู่ในไซโตพลาสซึม ซึ่งสามารถพบได้ในเมทาโนโทรฟบางสายพันธุ์เท่านั้น โดยจะพบในเมทาโนโทรฟประเภทที่ 2 ได้แก่ สกุล *Methylosinus* *Methylocystis* ทุกสายพันธุ์ เมทาโนโทรฟประเภทเอ็กซ์ ได้แก่ สกุล *Methylococcus* ทุกสายพันธุ์ และพบในบางสายพันธุ์ของเมทาโนโทรฟประเภทที่ 1 สกุล *Methylomonas* และ *Methylomicrobium* และแบบที่สองคือ พาคิวเลทมีเทนโมนอกซีจีเนสหรือพีเอ็มเอ็มโอ (particulate methane monooxygenase; pMMO) ซึ่งจะเกาะติดอยู่ภายในเยื่อหุ้มไซโตพลาสซึม โดยจะพบในทุกชนิดพันธุ์ของเมทาโนโทรฟ (Hanson and Hanson, 1996; Abushammala *et al.*, 2014b)

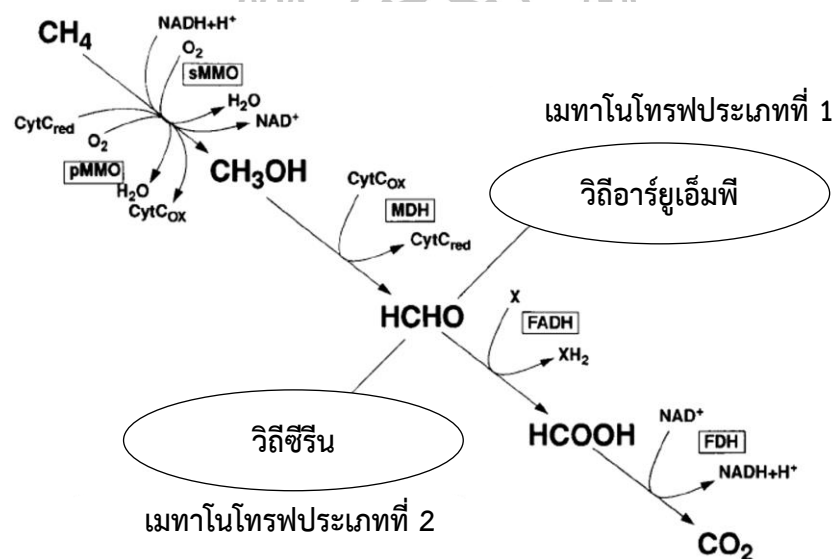


ตารางที่ 2.5 ลักษณะต่าง ๆ ของเชื้อเมทาโนโทรฟแต่ละประเภท

ลักษณะเฉพาะ (characteristics)	เมทาโนโทรฟประเภทที่ 1 (Type I)	เมทาโนโทรฟประเภทที่ 2 (Type II)	เมทาโนโทรฟประเภทเอ็กซ์ (Type X)
ลักษณะของเซลล์ (cell morphology)	รูปร่างเป็นแท่งหรือทรงกลม เป็นเซลล์เดี่ยว หรือเซลล์คู่ ที่ต่อเป็นสายสั้นๆ	รูปร่างเป็นแท่งและในบางชนิดมีรูปร่างเป็นวงรี มีเมือกเหนียวหุ้มเซลล์	รูปร่างกลม มักพบเป็นคู่
การเจริญเติบโตที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ปริมาณของดีเอ็นเอ G + C (mol%)	ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ 49 - 60	ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ 62-67	สามารถเจริญเติบโตได้ 59 - 65
การจัดเรียงตัวของเยื่อหุ้มเซลล์ (membrane arrangement)			
- bundles of vesicular disks	ใช่	ไม่ใช่	ใช่
- paired membranes	ไม่ใช่	ใช่	ไม่ใช่
การตรึงไนโตรเจน (nitrogen fixation)	ไม่ใช่	ใช่	ไม่ใช่
รูปแบบระยะพัก (resting stages formed)			
- เอกโซสปอร์ (exospore)	ไม่ใช่	บางชนิด	ไม่ใช่
- ซีสต์ (cysts)	บางชนิด	บางชนิด	บางชนิด
วิถีอาร์ยูเอ็มพี (RuMP pathway)	ใช่	ไม่ใช่	ใช่
วิถีซีรีน (serine pathway)	ไม่ใช่	ใช่	บางชนิด
กลุ่มย่อยของโปรติโอแบคทีเรีย (proteobacteria subdivision)	แกมมา	แอลฟา	แกมมา
ความจำเพาะของลักษณะทางพันธุกรรม (phylogenetic signature probe)	1041 (5'-CTCCGCTATCTCTAACAGATT-3') 1035 (5'-GATTCTCTGGATGTCAAGGG-3') MM650(5'-CCTCTACTCAACTCTAGT-3') MM850(5'-TACGTTAGCTCCACCACTAA-3')	1034 (5'-CCATACCGGACATGTCCAAAGC-3')	-

ที่มา: Hanson and Hanson (1996)

เมื่อเมทาโนโทรฟออกซิไดซ์มีเทนเป็นเมทานอล โดยการทำงานของเอนไซม์เอ็มเอ็มเอ็ม-โอแล้วนั้น เมทานอลก็จะถูกออกซิไดซ์ต่อไปเป็นฟอร์มัลดีไฮด์ ฟอร์มเมตและคาร์บอนไดออกไซด์ตามลำดับ โดยอาศัยการทำงานของเอนไซม์เมทานอลดีไฮโดรจีเนสหรือเอ็มดีเอช (methanol dehydrogenase; MDH) ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนเมทานอลเป็นฟอร์มัลดีไฮด์ สำหรับเอนไซม์ฟอร์มัลดีไฮด์ดีไฮโดรจีเนสหรือเอฟเอดีเอช (formaldehyde dehydrogenase; FADH) จะทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนฟอร์มัลดีไฮด์ไปเป็นฟอร์มเมต และเอนไซม์ฟอร์มเมตดีไฮโดรจีเนสหรือเอฟดีเอช (formate dehydrogenase; FDH) จะทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนฟอร์มเมตไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (รูปที่ 2.7) (Hanson and Hanson, 1996)



รูปที่ 2.7 วิธีการออกซิเดชันของมีเทนและการดูดซึมฟอร์มัลดีไฮด์ของเชื้อเมทาโนโทรฟประเภทที่ 1 (Type I) และ ประเภทที่ 2 (Type II) ที่มา: ตัดแปลงจาก Hanson and Hanson (1996)

2.6.3 การตรวจพบเชื้อเมทาโนโทรฟในสิ่งแวดล้อม

จากการศึกษาของ Reeburgh *et al.* (1993) พบว่าเมทาโนโทรฟสามารถลดอัตราการแพร่กระจายของมีเทนทั้งจากแหล่งกำเนิดโดยธรรมชาติ และแหล่งกำเนิดที่เกิดขึ้นจากการกระทำของมนุษย์ได้ถึง 700 ล้านตันต่อปี ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่าอัตราการแพร่กระจายของมีเทนจากทุก ๆ แหล่งกำเนิดที่มีค่าเพียง 582 ล้านตันต่อปี และจากรายงานของ IPCC (2007) พบว่า อัตราการออกซิเดชันของมีเทนในดินชนิดต่าง ๆ จะสามารถลดการแพร่กระจายของมีเทนออกสู่บรรยากาศได้ถึงร้อยละ 5.2 ซึ่งเมทาโนโทรฟจะอาศัยอยู่ในดินเพาะปลูก (arable soil) ดินป่า (forest soil) ดินทุ่งหญ้า (meadow soil) ดินอินทรีย์ (peat soil) ดินทุ่งนา (rice paddy soil) ตะกอนจากทะเลสาบ

(lake sediment) และตะกอนจากทะเล (sea sediment) แต่จะพบมากที่สุดในชั้นดินปิดทับหลุมฝังกลบ นอกจากนี้ยังสามารถอาศัยอยู่ในน้ำได้ เช่น น้ำอุ่นที่มาจากความร้อนใต้พิภพ (geothermal water) น้ำพุร้อน (hot spring) และ น้ำในทะเลสาบที่มีความเป็นด่างสูง (soda lake) (Pawlowska, 2014)

2.6.4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการออกซิเดชันของมีเทน

ความสามารถในการออกซิเดชันของมีเทนในชั้นดินปิดทับหลุมฝังกลบขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น การเปลี่ยนแปลงของฤดูกาล (Abushammala *et al.*, 2014a) สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของชั้นดินปิดทับหลุมฝังกลบ และความเข้มข้นของมีเทนในหลุมฝังกลบ (Boeckx *et al.*, 1996)

ในการศึกษาของ Mosier *et al.* (2004) พบว่า ปัจจัยหลักที่ควบคุมการออกซิเดชันของมีเทนคือ ศักยภาพความต้องการทางชีวภาพ (potential biological demand) และอัตราการแพร่กระจายของมีเทน ทั้งนี้ความต้องการทางชีวภาพจะถูกควบคุมด้วยปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมทั้งทางกายภาพและทางเคมี แต่อัตราการแพร่กระจายของมีเทนจะถูกควบคุมโดยปัจจัยสิ่งแวดล้อมทางกายภาพเพียงอย่างเดียว จากรายงานการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการออกซิเดชันของมีเทนดังตัวอย่างเช่น การศึกษาของ Albanna *et al.* (2007) พบว่า การเพิ่มความหนาของชั้นดินจาก 15 เซนติเมตร เป็น 20 เซนติเมตร ทำให้อัตราการออกซิเดชันของมีเทนเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 29 เป็น ร้อยละ 35 ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาผลของชั้นปิดทับชีวภาพ (bio – cover) ต่อการออกซิเดชันของมีเทน ณ สถานีฝังกลบเมือง Leon ในมลรัฐฟลอริดา โดย Stern *et al.* (2007) พบว่า ชั้นปิดทับชีวภาพมีประสิทธิภาพในการออกซิเดชันของมีเทนอยู่ที่ร้อยละ 64 ในขณะที่เซลล์ควบคุม (control cell) มีประสิทธิภาพในการออกซิเดชันมีเทนเพียงร้อยละ 30 เท่านั้น ส่วนการศึกษาของ Abichou *et al.* (2009) ซึ่งทำการศึกษา ณ สถานที่แห่งเดียวกัน พบว่า ระบบชั้นปิดทับชีวภาพมีประสิทธิภาพในการออกซิเดชันมีเทนเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 79 ส่วนในเซลล์ควบคุมมีประสิทธิภาพในการออกซิเดชันมีเทนเพียงร้อยละ 29 เท่านั้น จากผลการศึกษาต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้น จะเห็นได้ว่าความสามารถในการออกซิเดชันของมีเทนในชั้นปิดทับหลุมฝังกลบมีความแปรผันค่อนข้างมาก ทั้งนี้ก็เป็นผลมาจากปัจจัยต่าง ๆ ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น

สำหรับปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมที่สำคัญที่ส่งผลต่อกระบวนการออกซิเดชันของมีเทนในชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ ซึ่งได้แก่ เนื้อดิน (soil texture) ปริมาณสารอินทรีย์ในดิน (soil organic content) ความชื้น (moisture content) อุณหภูมิ (temperature) พีเอช (pH) สารอาหาร (nutrients) ความเข้มข้นของออกซิเจน (oxygen concentration) และความเข้มข้นของมีเทน (methane concentration) (Boeckx *et al.*, 1996; Wilshusen *et al.*, 2004) มีรายละเอียดของแต่ละปัจจัยดังนี้

2.6.4.1 เนื้อดิน (soil texture)

เนื้อดินส่งผลต่อการเคลื่อนย้ายของแก๊สจากหลุมฝังกลบและการแพร่ผ่านของแก๊สออกซิเจนจากบรรยากาศ ด้วยเหตุนี้เนื้อดินจึงทำหน้าที่ในการควบคุมทั้งอัตราการแพร่กระจายของมีเทนและอัตราการออกซิเดชันของมีเทน จากการศึกษาของ Kightley *et al.* (1995) ซึ่งทำการตรวจสอบถึงความสามารถในการออกซิเดชันของมีเทนในเนื้อดินประเภทต่าง ๆ พบว่า ดินทรายหยาบ (coarse sand) มีประสิทธิภาพในการออกซิเดชันของมีเทนเท่ากับร้อยละ 61 และสูงกว่าในดินทรายละเอียด (fine sand) หรือ ดินเหนียว (clay) ที่มีประสิทธิภาพในการออกซิเดชันของมีเทนเท่ากับร้อยละ 40 – 41 และในการศึกษาของ Boeckx *et al.* (1996) ได้สรุปว่า ดินเนื้อหยาบ (coarse soils) มีความสามารถในการออกซิเดชันของมีเทนสูงกว่าในดินเนื้อละเอียด (fine soils) นอกจากนี้ Gebert and Grongroft (2009) ก็ได้แนะนำให้มีการใช้ดินเนื้อหยาบที่มีปริมาตรของส่วนที่เป็นช่องว่างมากกว่าร้อยละ 17 เช่น ดินทราย (sands) ดินทรายร่วน (loamy sands) และดินร่วนปนทราย (sandy loams) เป็นต้น เป็นชั้นดินปิดทับชีวภาพเพื่อการออกซิเดชันของมีเทน

2.6.4.2 ปริมาณสารอินทรีย์ในดิน (soil organic content)

จากการศึกษาของ Humer and Lechner (2001) Christophersen *et al.* (2000) และ Visvanathan *et al.* (1999) พบว่า อัตราการออกซิเดชันของมีเทนเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณสารอินทรีย์ในดินเพิ่มสูงขึ้น และจากการทดสอบโดยการบ่มดิน (soil incubation test) ของ Christophersen *et al.* (2000) พบว่า ดินที่มีปริมาณสารอินทรีย์สูงกว่าให้ประสิทธิภาพในการลดการแพร่กระจายของมีเทนโดยการออกซิเดชันได้ดีกว่าดินที่มีปริมาณสารอินทรีย์ต่ำกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมมีความสัมพันธ์กับปริมาณสารอินทรีย์ โดยปริมาณความชื้นส่งผลให้อัตราการออกซิเดชันเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณสารอินทรีย์เพิ่มสูงขึ้น ส่วนการศึกษาของ Visvanathan *et al.* (1999) ซึ่งทำการทดสอบในคอลัมน์ พบว่า ในดินที่มีสารอินทรีย์สูงกว่าส่งผลให้อัตราการออกซิเดชันของมีเทนสูงกว่าด้วย นอกจากนี้ก็ได้มีการนำวัสดุที่มีสารอินทรีย์สูง เช่น ปุ๋ยหมัก ไปใช้เป็นวัสดุปิดทับหลุมฝังกลบเพื่อเพิ่มความสามารถในการออกซิเดชันของมีเทน (Streese and Stegmann, 2003; Wilshusen *et al.*, 2004; Gebert and Grongroft, 2006; Huber – Humer *et al.*, 2008; Abichou *et al.*, 2009) ซึ่งวัสดุที่มีสารอินทรีย์สูง อุดมด้วยธาตุอาหาร และมีความพรุนสูง ได้รับการยืนยันแล้วว่ามีประสิทธิภาพในการออกซิเดชันของมีเทนสูงด้วยเช่นกัน

2.6.4.3 ปริมาณความชื้น (moisture content)

น้ำในชั้นดินปิดทับหลุมฝังกลบมีที่มาจากแหล่งต่าง ๆ เหล่านี้ เช่น น้ำที่ไหลซาบซึมจากผิวดิน น้ำฝน น้ำชะมูลฝอยหมุนเวียน และน้ำจากปฏิกิริยาการย่อยสลายที่เกิดขึ้นภายในหลุมฝังกลบ เป็นต้น

เมื่อความชื้นในชั้นปิดทับหลุมฝังกลบเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ปริมาณช่องว่างที่ก่อให้เกิดการเคลื่อนย้ายและการแพร่ของแก๊สลดลง นอกจากนี้ปริมาณความชื้นที่เพิ่มสูงขึ้นในชั้นปิดทับหลุมฝังกลบยังทำให้การแทรกซึมของออกซิเจนซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อกระบวนการออกซิเดชันจากบรรยากาศเหนือดินลงสู่ชั้นปิดทับหลุมฝังกลบลดลงด้วย ส่วนปริมาณความชื้นในดินที่ต่ำเกินไปจะทำให้กิจกรรมของจุลินทรีย์ในชั้นดินปิดทับหลุมฝังกลบลดลง จึงส่งผลให้ความสามารถในการออกซิเดชันของมีเทนลดลงด้วย (Tecele *et al.*, 2009)

เมื่อดินแห้งขึ้นทั้งจากความชื้นที่ต่ำลงและจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการออกซิเดชันของมีเทนจะส่งผลให้ปริมาณของช่องว่างที่มีน้ำอยู่ลดน้อยลง ซึ่งจะทำให้เกิดการแพร่ระบายของมีเทนผ่านชั้นดินปิดทับหลุมฝังกลบได้ดีขึ้น และทำให้อัตราการออกซิเดชันของมีเทนลดลงได้อันเนื่องมาจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ถูกยับยั้งจากการมีระดับความชื้นที่ไม่เหมาะสม (Maurice and Lagerkvist, 2003)

สำหรับระดับความชื้นที่เหมาะสมต่อการออกซิเดชันของมีเทนโดยจุลินทรีย์จะอยู่ในช่วงร้อยละ 11 – 25 (โดยปริมาตร) (Tecele *et al.*, 2009) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Boeckx *et al.* (1996) ซึ่งได้ศึกษาถึงปริมาณความชื้นที่เหมาะสมต่อความสามารถในการออกซิเดชันของมีเทนในชั้นดินปิดทับหลุมฝังกลบที่มีความหนา 30 เซนติเมตร โดยทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และมีปริมาณความชื้นของดินที่ศึกษาอยู่ในระดับต่าง ๆ ได้แก่ ที่ร้อยละ 5 10 15 20 25 และ 30 (โดยน้ำหนัก) ผลการศึกษา พบว่า ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง ร้อยละ 15.6 – 18.8 (โดยน้ำหนัก) Visvanathan *et al.* (1999) รายงานว่า ปริมาณความชื้นที่ก่อให้เกิดการออกซิเดชันของมีเทนสูงที่สุดคือ ร้อยละ 15 สำหรับการทดลองแบบคอลัมน์ และอยู่ระหว่าง ร้อยละ 15 – 20 สำหรับการทดลองแบบแบตช์ นอกจากนี้ยังพบว่า ที่ระดับความชื้น ร้อยละ 6 มีการออกซิเดชันของมีเทนเกิดขึ้นน้อยมาก ส่วนที่ระดับความชื้นร้อยละ 1.5 ไม่พบว่ามี การออกซิเดชันของมีเทนเกิดขึ้น Lee *et al.* (2009) พบว่า อัตราการออกซิเดชันของมีเทนเกิดขึ้นมากที่สุดที่ระดับความชื้น ร้อยละ 5 ในชั้นปิดทับหลุมฝังกลบประเภทดินทราย แต่เมื่อระดับความชื้นเพิ่มมากขึ้น อัตราการออกซิเดชันของมีเทนกลับลดลง

Christophersen *et al.* (2000) ทำการศึกษาถึงผลของความชื้นในดินต่อการออกซิเดชันของมีเทน ผลการศึกษา พบว่า ระดับความชื้นที่เหมาะสมอยู่ในช่วงร้อยละ 11 – 32 นอกจากนี้ยังพบว่าระดับความชื้นและการออกซิเดชันของมีเทนเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น Park *et al.* (2002) ศึกษาผลของความชื้นในดินทรายร่วน (loamy sand) ต่อความสามารถในการออกซิเดชันของมีเทน ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณความชื้นเท่ากับร้อยละ 13 (โดยน้ำหนัก) เป็นระดับที่เหมาะสมต่อการออกซิเดชันของมีเทนในดินชนิดนี้ Park *et al.* (2005) สรุปว่า ปริมาณความชื้นเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการควบคุมอัตราการออกซิเดชันของมีเทนในชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ

ประเภทดินทราย และจากการศึกษาของ Mor *et al.* (2006) พบว่า ผลของความชื้นต่อการออกซิเดชันของมีเทนในปุ๋ยหมักชนิดต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับระยะเวลา และพบว่าระดับความชื้นที่เหมาะสมอยู่ในช่วงร้อยละ 45 – 110 (โดยน้ำหนักแห้ง)

2.6.4.4 อุณหภูมิ (temperature)

การออกซิเดชันของมีเทนในชั้นดินปิดทับหลุมฝังกลบเป็นกระบวนการทางชีวภาพ และอุณหภูมิของดินก็เป็นปัจจัยที่สำคัญปัจจัยหนึ่งที่จะส่งผลกระทบต่อกระบวนการนี้ (Streese and Stegmann, 2003) ซึ่งโครงสร้างทางสังคมของเมทาโนโทรฟจะเปลี่ยนแปลงไปตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ดังเช่น เมทาโนโทรฟประเภทที่ 2 (Type II) จะมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิและปริมาณน้ำฝนเพิ่มสูงขึ้น (Horz *et al.*, 2005)

มีการศึกษาต่าง ๆ มากมายได้รายงานถึงระดับอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการออกซิเดชันของมีเทนในชั้นดินปิดทับหลุมฝังกลบ ดังเช่น Castro *et al.* (1995) พบว่าอุณหภูมิดินเป็นปัจจัยที่สำคัญปัจจัยหนึ่งสำหรับการออกซิเดชันของมีเทน โดยที่อุณหภูมิ -5 – 10 องศาเซลเซียส จะมีผลต่อการออกซิเดชันของมีเทน แต่ที่อุณหภูมิ 10 – 20 องศาเซลเซียสจะไม่มีผลต่อการออกซิเดชันของมีเทน Visvanathan *et al.* (1999) พบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงกว่าระดับที่เหมาะสมซึ่งอยู่ในช่วง 30 – 36 องศาเซลเซียส การออกซิเดชันของมีเทนจะถูกยับยั้ง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ De Visscher *et al.* (2001) ที่พบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการออกซิเดชันของมีเทนในดินร่วนปนทราย (sandy loamy soil) จากหลุมฝังกลบแห่งหนึ่งของประเทศเบลเยียม คือ 35 องศาเซลเซียส และผู้ศึกษายังสรุปว่า หากอุณหภูมิดินสูงเกินกว่า 30 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลานาน จะส่งผลให้การออกซิเดชันของมีเทนลดลง และจากการศึกษาของ Scheutz and Kjeldsen (2004) พบว่า การออกซิเดชันของมีเทนเพิ่มขึ้นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ($R^2 > 0.91$) เมื่ออุณหภูมิดินเพิ่มขึ้นจาก 2 องศาเซลเซียส เป็น 25 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังพบว่า อัตราการออกซิเดชันของมีเทนเกิดขึ้นสูงสุดที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และเริ่มลดลงที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส Mor *et al.* (2006) ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการออกซิเดชันของมีเทนในปุ๋ยหมักชนิดต่าง ๆ และพบว่า ผลของอุณหภูมิต่อการออกซิเดชันของมีเทนขึ้นอยู่กับระยะเวลา โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 15 – 30 องศาเซลเซียส

นอกจากนี้ยังมีรายงานการศึกษาถึงความสัมพันธ์กันของอุณหภูมิและความชื้นต่อการออกซิเดชันของมีเทน ดังเช่น การศึกษาของ Visvanathan *et al.* (1999) ซึ่งพบว่า การออกซิเดชันของมีเทนเพิ่มสูงขึ้น เมื่อความชื้นอยู่ในระดับที่เหมาะสมและอุณหภูมิก็อยู่ในระดับที่เหมาะสมเช่นกันคือ ประมาณ 20 องศาเซลเซียส แต่ Castaldi and Fierro (2005) พบว่า อัตราการออกซิเดชันของมีเทนเพิ่มสูงสุดเมื่อปริมาณความชื้นอยู่ในระดับต่ำมากและอุณหภูมิอยู่ในระดับสูง ส่วน Einola *et al.* (2007) ได้รายงานถึงความสัมพันธ์กันของอุณหภูมิและความชื้นต่อการ

ออกซิเดชันของมีเทน และชี้ให้เห็นว่าทั้งสองปัจจัยเป็นปัจจัยที่ทำหน้าที่ควบคุมความสามารถในการออกซิเดชันของมีเทนและยังส่งผลต่อการออกซิเดชันของมีเทนด้วย

2.6.4.5 พีเอช (pH)

การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชในชั้นดินปิดทับหลุมฝังกลบส่งผลต่อการออกซิเดชันของมีเทน (Hutsch *et al.*, 1994) จากการศึกษาของ Whittenbury *et al.* (1970) พบว่า เมทาโนโทรฟทุกชนิดสามารถเจริญเติบโตได้ในช่วงพีเอชระหว่าง 5.8 – 7.4 โดยมีช่วงค่าพีเอชที่เหมาะสมคือ 6.6 – 6.8 แต่จากงานวิจัยของ Saari *et al.* (2004) ซึ่งทำการศึกษาถึงความสามารถในการออกซิเดชันในดินชนิดต่าง ๆ ที่มีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 3 – 7.5 พบว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการออกซิเดชันในดินบางชนิดมีค่าสูงกว่า 7 และในการศึกษาของ Scheutz and Kjeldsen (2004) ซึ่งทำการทดลองกับตัวอย่างดินที่เก็บจากหลุมฝังกลบ Skellingsted ของประเทศเดนมาร์ก พบว่า มีค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการออกซิเดชันมีเทนเท่ากับ 6.9

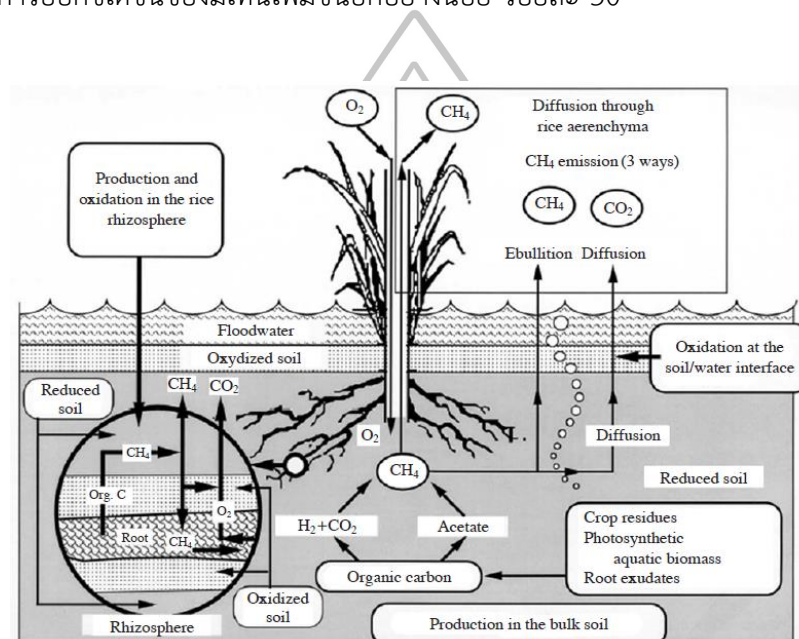
เมทาโนโทรฟมีความไวต่อความเป็นกรดของดิน ซึ่งจากการวิจัยของ Mer and Roger (2001) พบว่า อัตราการออกซิเดชันของดินในแปลงหญ้าที่ไม่ได้ใส่ปุ๋ย ณ สถาบันวิจัย Rothamsted ในประเทศอังกฤษ ลดลงจาก 67 นาโนลิตรมีเทนต่อลิตรต่อชั่วโมง เป็น 35 นาโนลิตรมีเทนต่อลิตรต่อชั่วโมง เมื่อพีเอชของดินมีค่าลดลงจาก 6.3 เป็น 5.6 ในขณะที่งานวิจัยอื่น ๆ (Hutsch *et al.*, 1994) รายงานว่า การออกซิเดชันของมีเทนลดลงเป็นศูนย์ เมื่อพีเอชมีค่าอยู่ระหว่าง 5.6 – 5.1 และจากการศึกษาของ Hanson and Hanson (1996) พบว่า เมทาโนโทรฟไม่สามารถเจริญเติบโตเมื่อค่าพีเอชต่ำกว่า 5

2.6.4.6 สารอาหาร (nutrients)

นอกจากคาร์บอนที่ได้จากการออกซิเดชันของมีเทน จุลินทรีย์ในชั้นปิดทับหลุมฝังกลบยังต้องการสารอาหารอื่น ๆ อีก สำหรับกระบวนการเมตาบอลิซึมในเซลล์ ซึ่งการเติมสารอาหารบางชนิดลงไปในระบบชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและอัตราการออกซิเดชันของมีเทนให้ดีขึ้น (Borjesson *et al.*, 1998; Albanna *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2009) จากการศึกษาของ Albanna *et al.* (2007) พบว่าความชื้นในดินและการเติมสารอาหารให้ผลเสริมกันต่อการออกซิเดชันของมีเทนชั้นดินปิดทับหลุมฝังกลบ โดยพบว่า ประสิทธิภาพการออกซิเดชันเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า เมื่อมีการเติมสารอาหารลงในดินที่มีความชื้นร้อยละ 32 แต่การเติมสารอาหารลงในดินที่มีความชื้นต่ำ (ร้อยละ 15) กลับไม่ส่งเสริมให้ประสิทธิภาพในการออกซิเดชันของมีเทนดีขึ้นแต่อย่างใด

พืชพรรณอาจส่งผลต่อการเจริญเติบโตและกิจกรรมของเมทาโนโทรฟได้หลากหลายรูปแบบ (Wang *et al.*, 2008) เช่น รากพืชช่วยให้เกิดการเคลื่อนย้ายของแก๊สออกซิเจนจากบรรยากาศสู่ชั้นดินที่ลึกลงไป (รูปที่ 2.8) (Tanthachoon *et al.*, 2007) นอกจากนี้การปล่อย

สารคัดหลั่ง (exudates) จากรากพืชออกสู่บริเวณรอบรากพืช ก็เป็นการช่วยเติมสารอาหารให้แก่เมทาโนโทรฟ และเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการออกซิเดชันของมีเทนได้ (Tanthachoon *et al.*, 2007) ด้วยเหตุนี้พืชพรรณที่ขึ้นปกคลุมอยู่บนชั้นดินปิดทับหลุมฝังกลบจึงช่วยส่งเสริมกิจกรรมของเมทาโนโทรฟในชั้นดินได้เป็นอย่างดี แต่อย่างไรก็ตามพืชพรรณเหล่านี้อาจไปแย่งสารอาหารและน้ำของจุลินทรีย์ ทำให้ประสิทธิภาพในการออกซิเดชันของมีเทนลดลงได้ (Hilger and Humer, 2003) จากการวิจัยของ Bohn and Jager (2009) พบว่า การปลูกพืชบนชั้นดินปิดทับหลุมฝังกลบช่วยให้อัตราการออกซิเดชันของมีเทนเพิ่มขึ้นอีกอย่างน้อย ร้อยละ 50



รูปที่ 2.8 กลไกการผลิต การออกซิเดชัน และการปลดปล่อยมีเทนจากแปลงข้าว

ที่มา: Mer and Roger (2001)

ในระบบบำบัดทางชีวภาพ มักมีการเติมไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในรูปของแอมโมเนียม (NH_4^+) และออร์โธฟอสเฟต (orthophosphate) อย่างไรก็ตามการเติมแอมโมเนียมทำให้ความสามารถในการออกซิเดชันของมีเทนลดลง เนื่องจากแอมโมเนียมไปยับยั้งกิจกรรมของเมทาโนโทรฟ (Hanson and Hanson, 1996; Wang and Ineson, 2003; Reay and Nedwell, 2004) และในการออกซิเดชันของแอมโมเนียก่อให้เกิดไนไตรท์ ซึ่งส่งผลต่อการยับยั้งเอนไซม์เอ็มเอ็มโอ และจากการศึกษาของ Bosse *et al.* (1993) พบว่า อัตราการออกซิเดชันของมีเทนลดลงเมื่อความเข้มข้นของแอมโมเนียมมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 4 มิลลิโมลาร์ (mM) และถูกยับยั้งอย่างสมบูรณ์เมื่อความเข้มข้นของแอมโมเนียมมีค่ามากกว่า 20 มิลลิโมลาร์

2.6.4.7 ความเข้มข้นของออกซิเจน (oxygen concentration)

ออกซิเจนเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญและจัดเป็นปัจจัยจำกัด (limiting factor) ในการควบคุมการออกซิเดชันของมีเทนในชั้นดินปิดทับหลุมฝังกลบ (Berger *et al.*, 2005) ความเข้มข้นของออกซิเจนเปลี่ยนแปลงไปตามระดับความลึกของชั้นดินและได้รับอิทธิพลจากตัวแปรอื่น ๆ เช่น ลักษณะของแก๊ส สภาพภูมิอากาศ อัตราการออกซิเดชันมีเทนของจุลินทรีย์เหนือดิน และความหนาของชั้นดินปิดทับ เป็นต้น ความพรุนของดินจะควบคุมการแทรกซึมของออกซิเจนลงไปในดิน (Humer and Lechner, 1999) โดยบริเวณที่เกิดการออกซิเดชันมีเทนที่ดีที่สุดคือที่ความลึกประมาณ 20 เซนติเมตรนับจากผิวดิน ซึ่งในบริเวณนี้จะมีการแพร่ของมีเทนและออกซิเจนที่เหมาะสม โดยทั่วไปกิจกรรมของเมทาโนโทรฟจะเกิดขึ้นที่ระดับความลึก 30 – 40 เซนติเมตรนับจากผิวดิน และความลึกที่มีความสามารถในการออกซิเดชันมีเทนสูงที่สุดคือ 15 – 20 เซนติเมตรนับจากผิวดิน (Scheutz *et al.*, 2009) จากการศึกษาของ Visvanathan *et al.* (1999) พบว่า การออกซิเดชันของมีเทนเกิดสูงสุดที่ความลึก 15 – 40 เซนติเมตร ในขณะที่การศึกษาของ Borjesson and Svensson (1997) พบว่า ที่ความลึก 50 – 60 เซนติเมตร เป็นความลึกที่เหมาะสมในการออกซิเดชันของมีเทน จากการศึกษาของ Jones and Nedwell (2006) พบว่าการออกซิเดชันของมีเทนเกิดสูงสุดที่ความลึกตั้งแต่ 10 – 30 เซนติเมตร ในขณะที่ Jugnia *et al.* (2008) พบว่า ความลึกที่เหมาะสมสำหรับกิจกรรมการออกซิเดชันมีเทนคือ 0 – 10 เซนติเมตร William and Zobell (1949) รายงานว่า เมื่อความเข้มข้นของออกซิเจนอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 10 – 40 ส่งผลให้อัตราการออกซิเดชันของมีเทนเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 2.6) ในขณะที่เมื่อความเข้มข้นของออกซิเจนมีค่าน้อยกว่าหรือมากกว่าช่วงดังกล่าว อัตราการออกซิเดชันของมีเทนกลับลดลง

ตารางที่ 2.6 ความต้องการมีเทน (CH_4 consumption) ที่ระดับความเข้มข้นของออกซิเจนและไนโตรเจนต่าง ๆ กัน ตลอดระยะเวลาการทดลอง 6 วัน ณ อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส

ความดันย่อย		ความต้องการมีเทนต่อวัน	
ออกซิเจน (ร้อยละ)	ไนโตรเจน (ร้อยละ)	ตัวอย่าง A (มิลลิลิตร)	ตัวอย่าง B (มิลลิลิตร)
0.0	70	0.0	0.0
10	60	1.05	0.94
20	50	0.88	0.88
30	40	1.05	1.05
40	30	-	0.94
60	10	0.35	0.52
70	0.0	0.23	0.29

ที่มา: William and Zobell (1949)

2.6.4.8 ความเข้มข้นของมีเทน (methane concentration)

เมื่อความเข้มข้นของมีเทนเพิ่มขึ้น อัตราการออกซิเดชันของมีเทนจะเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งอิทธิพลจากความเข้มข้นของมีเทนต่อความสามารถในการออกซิเดชันของมีเทนสามารถอธิบายได้โดยสมการไมเคิลลิส – เมนเทน (Michaelis – Menten equation) (Bogner *et al.*, 1997; Visvanathan *et al.*, 1999; Pawlowska and Stepniewski, 2006) ดังสมการที่ 3

$$V = V_{\max} \frac{1}{1 + (K_m/[S])} \quad (3)$$

โดยที่ V = อัตราการออกซิเดชันของมีเทนที่เกิดขึ้นจริง

V_{\max} = อัตราการออกซิเดชันมีเทนสูงสุด

K_m = ค่าคงที่ไมเคิลลิส – เมนเทน (Michaelis – Menten constant) สำหรับมีเทน

[S] = ความเข้มข้นของมีเทน

จากการศึกษาของ Pawlowska and Stepniewski (2006) ถึงอิทธิพลของความเข้มข้นของมีเทนต่ออัตราการออกซิเดชันของมีเทนในชั้นกรองชีวภาพ (bio – filter model assay) พบว่า เมื่อความเข้มข้นของมีเทนเพิ่มขึ้น 8 เท่า อัตราการออกซิเดชันของมีเทนจะเพิ่มขึ้น 1.1 – 2.5 เท่า Visvanathan *et al.* (1999) ทำการศึกษาทั้งในแบบคอลัมน์และแบบแบตช์ซึ่งถึงผลของปัจจัยทางสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ความเข้มข้นของมีเทน เป็นต้น ต่ออัตราการออกซิเดชันของมีเทนในชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ ผลการศึกษาพบว่า อัตราการให้มีเทนผ่านคอลัมน์และความเข้มข้นของมีเทนในช่องว่างเหนือสารตัวอย่าง (headspace) ในการทดลองแบบแบตช์ส่งผลต่อการออกซิเดชันของมีเทนแตกต่างกัน ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากปัจจัยเกี่ยวกับความชื้นและอุณหภูมิซึ่งส่งผลต่อการออกซิเดชันของมีเทน

2.7 จลนพลศาสตร์ของเอนไซม์ (enzyme kinetic)

จลนพลศาสตร์ของเอนไซม์ (enzyme kinetic) คือ การศึกษาอัตราการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้น (substrate) ไปเป็นสารใหม่หรือสารผลิตภัณฑ์ (product) หรือที่เรียกว่าการศึกษาอัตราเร็วของปฏิกิริยา (reaction rate) โดยที่ปริมาณความเข้มข้นของสารตั้งต้นจะลดลงต่อเวลา และปริมาณความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้นต่อเวลาในปฏิกิริยาหนึ่ง ๆ

ในการศึกษาเกี่ยวกับจลนพลศาสตร์ของเอนไซม์จำเป็นต้องทำความเข้าใจเกี่ยวกับกฎอัตรา (rate law) และอันดับของปฏิกิริยาเคมี (chemical reaction order) และกลไกของไมเคิลลิส – เมนเทน (Michaelis – Menten mechanism) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.7.1 กฎอัตรา (rate law) และอันดับปฏิกิริยา (order of reaction)

กฎอัตรา คือ สมการที่แสดงว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้น ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นได้ตาม law of mass action ดังสมการที่ 4 และอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสารตั้งต้นที่เข้าทำปฏิกิริยากัน โดยสามารถเขียนสมการกฎอัตราได้ดังสมการที่ 5 (Heldman *et al.*, 2007)



$$r = k[A]^x[B]^y \quad (5)$$

โดยที่ k = ค่าคงที่อัตรา (rate constant)

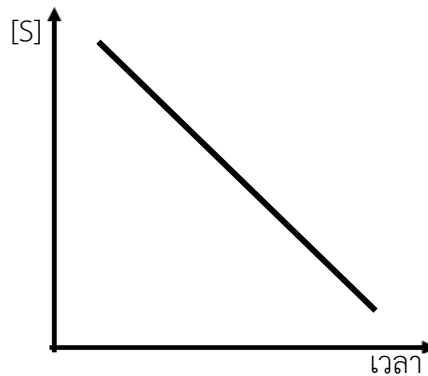
x, y = อันดับปฏิกิริยา

ส่วนอันดับปฏิกิริยาเป็นตัวเลขใด ๆ (x, y) อาจเป็นตัวเลขจำนวนเต็มหรือเศษส่วน ซึ่งตัวเลขอันดับปฏิกิริยานี้ได้จากการทดลองหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาเมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นของสารตั้งต้นเท่านั้น โดยอันดับปฏิกิริยาอาจแบ่งออกได้ดังนี้ (Bisswanger, 2002; Heldman *et al.* 2007)

2.7.1.1 ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ (zero order)

ปฏิกิริยาอันดับศูนย์เป็นปฏิกิริยาที่ศึกษาได้ง่าย มีกฎอัตราแสดงดังสมการที่ 6 อัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยาไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้นจึงมีอัตราการเกิดคงที่เสมอ (รูปที่ 2.9)

$$r = k[S]^0 = k \quad (6)$$



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง [S] กับเวลาสำหรับปฏิกิริยาอันดับศูนย์

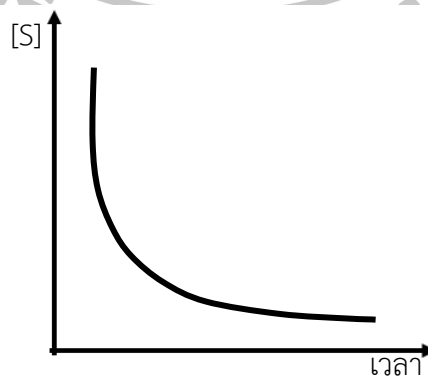
ที่มา: Heldman *et al.* (2007)

2.7.1.2 ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (first - order reaction)

ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งคือ ปฏิกิริยาที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้นยกกำลังหนึ่ง มีกฎอัตราแสดงดังสมการที่ 7

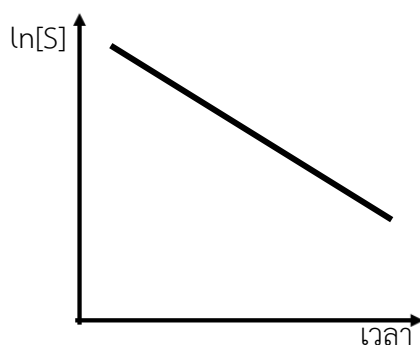
$$r = k[A]^1 \quad (7)$$

เมื่อสร้างกราฟระหว่างความเข้มข้น [S] กับเวลา (time) จะได้กราฟที่แสดงการลดลงของความเข้มข้นของสารตั้งต้นเมื่อเวลาเปลี่ยนไป ดังรูปที่ 2.10 และหากสร้างกราฟระหว่าง $\ln[S]$ กับเวลา จะได้กราฟเป็นเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $-k$ และเมื่อเวลาผ่านไป [S] จะลดลงเช่นกัน ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง [S] และเวลาสำหรับปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

ที่มา: Heldman *et al.* (2007)



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln [S]$ กับเวลาสำหรับปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

ที่มา: Heldman *et al.* (2007)

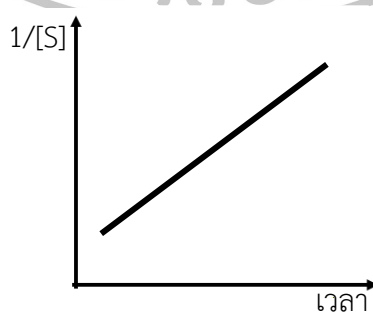
2.7.1.3 ปฏิกิริยาอันดับสอง (second - order reaction)

ปฏิกิริยาอันดับสองคือ ปฏิกิริยาที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้นยกกำลังสอง หรือขึ้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้นสองชนิด และแต่ละชนิดยกกำลังหนึ่ง จึงมีกฎอัตราเป็นไปได้ 2 แบบ ดังสมการที่ 8 และสมการที่ 9

$$r = k[A]^2 \quad (8)$$

$$r = k[A]^1[B]^1 \quad (9)$$

เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/[S]$ กับเวลา (time) จะได้กราฟเป็นเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ k ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/[S]$ กับเวลาสำหรับปฏิกิริยาอันดับสอง

ที่มา: Heldman *et al.* (2007)

นอกจากอิทธิพลของความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาแล้ว อุณหภูมิก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา กล่าวคือ การที่อุณหภูมิของสารตั้งต้นเพิ่มขึ้น โมเลกุลของสารจะมีพลังงานจลน์สูงขึ้น และเคลื่อนที่เร็วขึ้นจึงมีโอกาสในการชนกันมากขึ้น จึงทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น

2.7.2 กลไกของไมเคิลลิส – เมนเทน (Michaelis – Menten mechanism)

การศึกษาทางจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาที่ถูกเร่งด้วยเอนไซม์ ที่รู้จักกันดีคือ กลไกของไมเคิลลิส – เมนเทน (Michaelis – Menten mechanism) ซึ่งปฏิกิริยาขั้นแรกเป็นปฏิกิริยาย้อนกลับได้ เกิดจากสารตั้งต้น (substrate) ถูกเร่งด้วยเอนไซม์ เกิดเป็นโมเลกุลเชิงซ้อนคือ เอนไซม์ซับสเตรตคอมเพลกซ์ (enzyme – substrate complex) ซึ่งเป็นโมเลกุลที่ไม่มีพันธะโควาเลนต์ระหว่างเอนไซม์กับสารตั้งต้น สามารถสลายตัวกลับคืนเป็นเอนไซม์และสารตั้งต้นได้อย่างรวดเร็ว ส่วนปฏิกิริยาในขั้นที่สองมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโมเลกุลเกิดขึ้นในเอนไซม์ซับสเตรตคอมเพลกซ์ ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์และเอนไซม์เริ่มต้นกลับคืนมา ซึ่งสามารถเร่งปฏิกิริยาให้เอนไซม์จับกับสารตั้งต้นได้อีกครั้ง (Bisswanger, 2002) ดังสมการที่ 10



โดยที่ S = สารตั้งต้น (substrate)

E = เอนไซม์ (enzyme)

ES = เอนไซม์ซับสเตรตคอมเพลกซ์ (enzyme – substrate complex)

P = ผลิตภัณฑ์ (product)

k_1 = ค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาการเกิดเอนไซม์ซับสเตรตคอมเพลกซ์

k_{-1} = ค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาย้อนกลับ

k_2 = ค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาการสลายตัวไปเป็นผลิตภัณฑ์

จากสมการที่เกิดขึ้นนำมาเขียนเป็นสมการการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้นแต่ละชนิดเมื่อเทียบกับเวลา ดังนี้

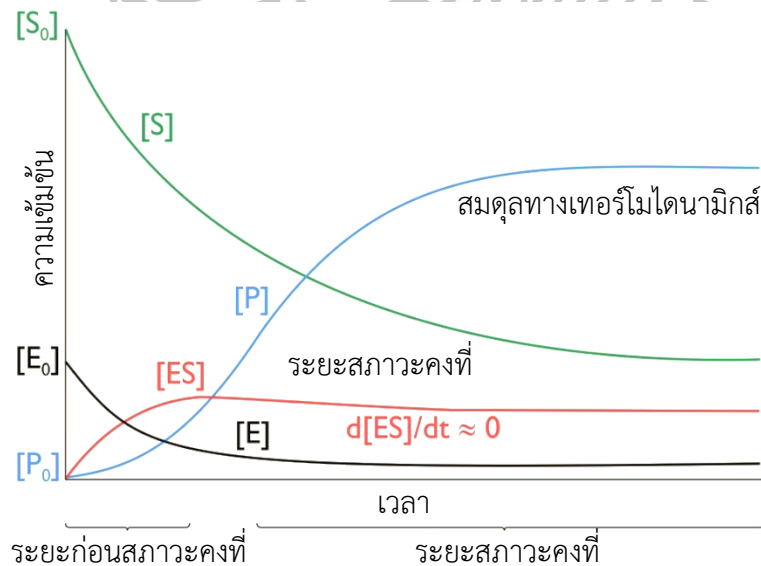
$$\frac{d[S]}{dt} = -k_1[S][E] + k_{-1}[ES] \quad (11)$$

$$\frac{d[E]}{dt} = -k_1[S][E] + (k_{-1} + k_2)[ES] \quad (12)$$

$$\frac{d[ES]}{dt} = k_1[S][E] - (k_{-1} + k_2)[ES] \quad (13)$$

$$\frac{d[P]}{dt} = k_2[ES] = v \quad (14)$$

ในระยะเริ่มต้นเอนไซม์ซับสเตรทคอมเพล็กซ์จะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นและปริมาณสารตั้งต้นจะลดลงต่อเวลา ซึ่งเรียกระยะนี้ว่า ระยะก่อนสภาวะคงที่ (pre – steady state) ซึ่งจะเกิดในระยะสั้น ๆ ต่อมาเมื่อความเข้มข้นของเอนไซม์ซับสเตรทคอมเพล็กซ์สูงขึ้น ปฏิกริยาในระยะที่สองจะเกิดได้มากขึ้นเนื่องจากอัตราเร็วเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของเอนไซม์ซับสเตรทคอมเพล็กซ์ เมื่อถึงระยะที่เอนไซม์ซับสเตรทคอมเพล็กซ์ถูกสร้างขึ้นมาด้วยอัตราเร็วเท่ากับการสลายของเอนไซม์ซับสเตรทคอมเพล็กซ์ไปเป็นเอนไซม์และผลิตภัณฑ์ ความเข้มข้นของเอนไซม์ซับสเตรทคอมเพล็กซ์จะมีค่าคงที่เรียกระยะนี้ว่า ระยะสภาวะคงที่ (steady state) ที่ระยะนี้ปฏิกริยาจะคงที่อยู่เกือบตลอดเวลาและช่วงสุดท้ายของปฏิกริยาจะเป็นช่วงที่เอนไซม์ซับสเตรทคอมเพล็กซ์ถูกสลายเป็นผลิตภัณฑ์จนหมด และจะเหลือสารตั้งต้นส่วนที่มากเกินพอต่อปฏิกริยา ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ของสารตั้งต้นกับเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปในปฏิกริยา

ที่มีเอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกริยา

ที่มา: Hegyi *et al.* (2013)

จากระยะสภาวะคงที่ (steady state) จะพบว่า $\frac{d[ES]}{dt} = \frac{d[E]}{dt} = 0$ ซึ่งเมื่อแทนค่าลงในสมการ 12 และ 13 จะได้สมการดังนี้

$$k_1[S][E] = (k_{-1} + k_2)[ES] \quad (15)$$

แทนค่า [E] ตามหลักการ mass conservation ถ้าให้ $[E]_0$ เป็นความเข้มข้นเริ่มต้นของเอนไซม์ ความเข้มข้น [E] ของเอนไซม์ที่เวลาใด ๆ ที่ยังไม่ได้เป็นคอมเพลกซ์จะเท่ากับ $[E]_0 - [ES]$

$$[ES] = \frac{k_1[S][E]_0}{k_1[S] + k_{-1} + k_2} \quad (16)$$

อัตราการเกิดปฏิกิริยาคิดจากขั้นกำหนดอัตรา (rate determining step) คือขั้นตอนการเกิดผลิตภัณฑ์ ดังนั้น

$$v = \frac{d[P]}{dt} = k_2[ES] = \frac{k_2[E]_0[S]}{k_1 + \frac{k_2 + k_{-1}}{k_1}[S]} \quad (17)$$

$\frac{(k_{-1} + k_2)}{k_1}$ เป็นค่าคงที่เรียกว่าค่าคงที่ไมเคิลลิส (Michaelis constant, K_m) จึงได้สมการของไมเคิลลิส - เมนเทน (Michaelis - Menten equation) ดังนี้

$$v = \frac{k_2[S][E]_0}{K_m + [S]} \quad (18)$$

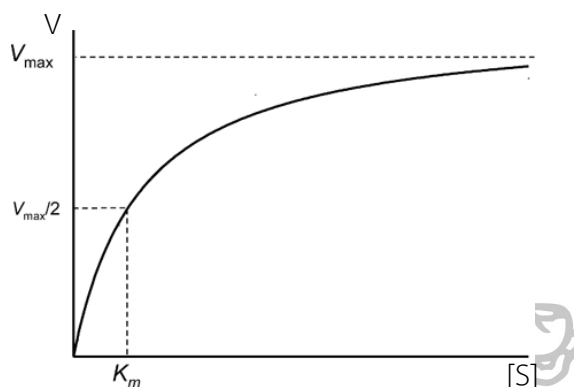
อัตราการเกิดปฏิกิริยามีค่าสูงสุด (The maximum reaction rate, V_{max} หรือ limiting reaction rate) เมื่อเอนไซม์กลายเป็นเอนไซม์ซับซ้อนคอมเพลกซ์หมด ความเข้มข้น [ES] เท่ากับ $[E]_0$ จะได้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็น

$$V_{max} = k_2 \quad (19)$$

เมื่อแทนค่าลงในสมการไมเคิลลิส - เมนเทน จะได้

$$v = \frac{V_{max}[S]}{K_m + [S]} \quad (20)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของปฏิกิริยา V กับความเข้มข้นของสารตั้งต้น $[S]$ มีลักษณะเป็นกราฟแบบไฮเพอร์โบล่า ดังรูปที่ 2.14 ในระยะที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่ำ ค่าอัตราเร็วเริ่มต้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งเมื่อสารตั้งต้นมีค่าสูงมาก ค่าอัตราเร็วจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ช้าลงจนในที่สุดอัตราเร็วจะคงที่ไม่สามารถเพิ่มได้อีก โดยค่า K_m มีค่าเท่ากับความเข้มข้นของสารตั้งต้น เมื่อ $V = \frac{1}{2} V_{max}$

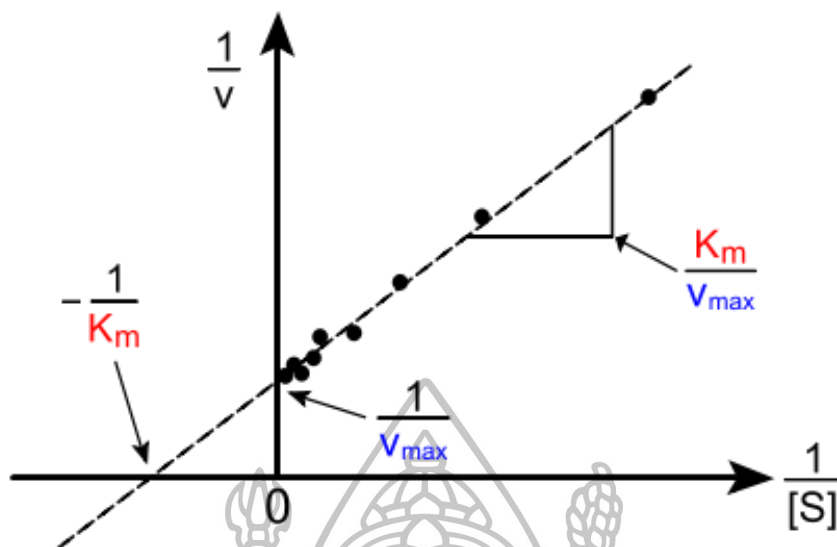


รูปที่ 2.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเริ่มต้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้นเริ่มต้น
ที่มา: Bisswanger (2002)

นอกจากนี้ค่า V_{max} และ K_m ยังหาได้จากกราฟไลน์วีเวอร์ – เบิร์ก (Lineweaver – Burk plot) ซึ่งเป็นกราฟเส้นตรงที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{1}{V}$ กับ $\frac{1}{[S]}$ สามารถคำนวณค่าทั้งสองได้จากจุดตัดบนแกนตั้ง แกนนอน และจากความชันของเส้นตรง ดังรูปที่ 2.15 ซึ่งสมการไลน์วีเวอร์ – เบิร์ก สามารถเขียนได้ ดังนี้

$$\frac{1}{V} = \frac{K_m}{V_{max}} \frac{1}{[S]} + \frac{1}{V_{max}} \quad (21)$$

- โดยที่ V = อัตราการเกิดออกซิเดชันมีเทนที่เกิดขึ้นจริง
 V_{max} = อัตราการเกิดออกซิเดชันมีเทนที่สูงที่สุด
 K_m = ค่าคงที่ไม่เคิลลิส – เมนเทน (Michaelis – Menten constant)
 $[S]$ = ความเข้มข้นของมีเทน



รูปที่ 2.15 กราฟไลน์วีเวอร์ - เบิร์ก (Lineweaver - Burk plot)

ที่มา: Bisswanger (2002)

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Walkiewicz *et al.* (2012) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการออกซิเดชันมีเทนในดิน 3 ชนิด ได้แก่ Eutric Cambisol Haplic Podzol และ Mollic Gleysol ภายใต้สภาวะการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยทำการบ่มตัวอย่างดินในขวดแก้วขนาดเล็ก (vessel) ด้วยมีเทนบริสุทธิ์ โดยให้บริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินมีความเข้มข้นของมีเทนร้อยละ 10 (โดยปริมาตร) เป็นเวลา 24 วัน ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ดินทุกชนิดที่ทำการศึกษามีศักยภาพในการออกซิเดชันมีเทนความเข้มข้นสูงถึงร้อยละ 10 นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาถึงจลนพลศาสตร์ของการออกซิเดชันของมีเทน และพบว่า การออกซิเดชันของมีเทนทั้ง 3 ชนิด เป็นไปตามจลนพลศาสตร์ของไมเคิลลิส - เมนเทน (Michaelis - Menten equation) โดยมีค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง (ตารางที่ 2.7) ต่ำที่สุดในดิน Eutric Cambisol มีค่าสูงที่สุดในดิน Haplic Podzol และมีค่าสูงที่สุดในดิน Mollic Gleysol ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ดิน Mollic Gleysol มีความจำเพาะต่อมีเทน (K_m) ต่ำที่สุด และมีศักยภาพในการออกซิไดซ์ (V_{max}) มีเทนสูงที่สุด ดังนั้นดิน Mollic Gleysol สามารถออกซิไดซ์มีเทนที่ความเข้มข้นสูงได้ดีกว่าดิน Haplic Podzol และดิน Eutric Cambisol

ตารางที่ 2.7 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องทางจลนพลศาสตร์ของการออกซิเดชันของมีเทนในดิน

ชนิดดิน (soil type)	ความจำเพาะต่อมีเทน, K_m (ไมโครโมล)	ศักยภาพในการออกซิไดซ์, V_{max} (ไมโครโมลต่อกรัมดินต่อชั่วโมง)
Mollic Gleysol	30.66	0.550
Haplic Podzol	19.79	0.443
Eutric Cambisol	5.98	0.137

ที่มา: Walkiewicz *et al.* (2012)

Pawlowska and Stepniewski (2006) ได้ศึกษาถึงจลนพลศาสตร์ของการออกซิเดชันของมีเทนในชั้นปิดทับหลุมฝังกลบภายใต้สภาวะต่าง ๆ โดยได้ทำการศึกษาในคอลัมน์ (column experiments) และใช้ทรายหยาบ (coarse sand) ขนาดอนุภาค 0.5 – 1.0 มิลลิเมตร บรรจุในคอลัมน์ ให้มีความหนาแน่นเท่ากับ 1.48 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และผ่านอากาศที่มีความเข้มข้นของมีเทนระหว่างร้อยละ 1.0 – 16.0 (โดยปริมาตร) จากทางด้านล่างของคอลัมน์ ทำการวัดความเข้มข้นของมีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ และออกซิเจน ที่ระดับความลึกต่าง ๆ และที่ช่องว่างเหนือตัวอย่าง ภายในระยะเวลา 48 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่า ที่ระดับความลึก 60 เซนติเมตร กิจกรรมของจุลินทรีย์ในการออกซิเดชันมีเทนมากที่สุด และมีค่าศักยภาพในการออกซิไดซ์ (V_{max}) อยู่ในช่วง 0.11×10^{-3} – 0.86×10^{-3} ลูกบาศก์เมตรของมีเทนต่อลูกบาศก์เมตรของดินต่อวินาที ส่วนค่าความจำเพาะต่อมีเทน (K_m) อยู่ในช่วงร้อยละ 0.6 – 2.9 (โดยปริมาตร)

Berger *et al.* (2005) ได้ศึกษาถึงการสลายการแพร่กระจายของมีเทนในชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ โดยทำการศึกษาในถังปฏิกรณ์ขนาด $4.8 \times 0.8 \times 2.1$ เมตร ภายในบรรจุปุ๋ยผสมทรายมีความหนา 0.3 เมตร เป็นชั้นล่าง ส่วนชั้นบนสุดบรรจุดินร่วนปนทราย (loamy sand) มีความหนา 0.9 เมตร มีการจำลองสภาพภูมิอากาศ 4 ฤดูกาล ได้แก่ ฤดูร้อน ฤดูหนาว ฤดูใบไม้ผลิ และฤดูใบไม้ร่วง และทำการผ่านแก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนความเข้มข้นของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ เท่ากับ ร้อยละ 50 : ร้อยละ 50 (โดยปริมาตร) จากทางด้านล่างของถังปฏิกรณ์โดยควบคุมอัตราการไหลแบบคงที่เท่ากับ 18 ลิตรต่อชั่วโมง ผลการศึกษา พบว่า อัตราการออกซิเดชันของมีเทนในชั้นปิดทับจำลองมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 57 – 98 และเกิดการออกซิเดชันสูงสุดที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตร

Perdikea *et al.* (2008) ได้ศึกษาถึงการออกซิเดชันของมีเทนโดยใช้ชั้นปิดทับชีวภาพแบบบาง (thin biocovers; TBC) โดยทำการทดลองทั้งแบบแบตช์ (batch experiments) และแบบคอลัมน์ (column experiments) การทดลองแบบแบตช์เป็นการศึกษาเพื่อเลือกวัสดุที่มีความเหมาะสมที่สุดในการใช้เป็นชั้นปิดทับชีวภาพแบบบาง และเพื่อศึกษาถึงความสามารถในการออกซิเดชันของมีเทนไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์โดยแบคทีเรียเมทาโนโทรฟ ส่วนการทดลองแบบ

คอลัมน์ใช้เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของชั้นปิดทับชีวภาพแบบบางภายใต้สภาวะที่กำหนด ได้แก่ ความชื้นระดับต่าง ๆ อัตราส่วนของปุ๋ยหมักต่อซีลี้อย อัตราการไหลของมีเทน และความหนาของชั้นปิดทับชีวภาพ ผลการศึกษาพบว่า ชั้นปิดทับชีวภาพแบบบางที่มีความเหมาะสมที่สุดโดยมีประสิทธิภาพในการออกซิเดชันมีเทนเท่ากับร้อยละ 100 เป็นระยะเวลานาน แม้มีอัตราการระบรทุกมีเทนสูงถึง 9.4 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง คือ มีความหนา 30 เซนติเมตร อัตราส่วนของของผสมเป็นซีลี้อยมีปริมาณร้อยละ 0 – 10 ผสมกับปุ๋ยหมัก และมีความชื้นอยู่ที่ระดับร้อยละ 52 (โดยน้ำหนัก)

Gebert *et al.* (2003) ได้ทำการศึกษากการออกซิเดชันของมีเทนในชั้นกรองชีวภาพ (bio – filter) โดยนำระบบชั้นกรองชีวภาพเข้าไปติดตั้งกับระบบรวบรวมแก๊สแบบระบายตามธรรมชาติ (passive venting system) ของหลุมฝังกลบกากตะกอนแห่งหนึ่ง ในประเทศเยอรมนี โดยศึกษาถึงจำนวนประชากรของจุลินทรีย์เมทาโนโทรฟ ความสามารถในการออกซิเดชันของมีเทน และค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ ผลการศึกษาพบว่า ภายใน 1 ปี หลังจากที่มีการดำเนินงานระบบชั้นกรองชีวภาพ ประชากรของเมทาโนโทรฟมีจำนวนมากและมีค่าคงที่อยู่ในช่วง $1.3 \times 10^8 - 7.1 \times 10^9$ เซลล์ต่อกรัม น้ำหนักแห้ง และพบมีจำนวนประชากรสูงที่สุดคือ 1.2×10^{11} เซลล์ต่อกรัม น้ำหนักแห้ง ความสามารถในการออกซิเดชันของมีเทนอยู่ระหว่าง 5.3 – 10.7 ไมโครกรัมต่อชั่วโมงต่อกรัม น้ำหนักแห้ง และจำนวนประชากรของเมทาโนโทรฟมีความสัมพันธ์กันอย่างมากกับความสามารถในการออกซิเดชันของมีเทน และจากการศึกษาค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ พบว่า มีค่าศักยภาพในการออกซิไดซ์ (V_{max}) เท่ากับ 1.78 ไมโครโมลมีเทนต่อชั่วโมงต่อกรัม น้ำหนักเปียก และค่าความจำเพาะต่อมีเทน (K_m) เท่ากับ 15.1 ไมโครโมลาร์ แสดงให้เห็นว่า จุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ในการออกซิเดชันของมีเทนเป็นจุลินทรีย์กลุ่มที่สามารถออกซิไดซ์มีเทนที่ความเข้มข้นสูงได้ดี (low-affinity methane oxidizing community)

De Visscher *et al.* (2001) ได้ศึกษาถึงจลนพลศาสตร์ในการเพิ่มประสิทธิภาพการออกซิเดชันของมีเทนในชั้นดินปิดทับหลุมฝังกลบที่สภาวะแวดล้อมต่าง ๆ โดยการนำตัวอย่างดินที่ผ่านการบ่มด้วยมีเทนมาแล้วจากการทดลองแบบคอลัมน์ มาทำการศึกษาในแบบแบตซ์ด้วยชุดซีรัม (serum) โดยมีผลการศึกษาของค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ของการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องทางจลนพลศาสตร์ของการออกซิเดชันของมีเทนในดินที่
อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความจำเพาะต่อมีเทน (K_m) (ไมโครโมล)	ศักยภาพในการออกซิไดซ์ (V_{max}) (ไมโครโมลต่อกรัมดินน้ำหนักแห้งต่อชั่วโมง)
5	1.18±0.12	0.0233±0.0002
10	2.10±0.24	0.0478±0.0001
15	2.20±0.14	0.0546±0.0001
20	4.20±0.02	0.1069±0.0001
25	5.60±0.01	0.200±0.0003
30	6.71±0.10	0.3026±0.0006
35	7.01±0.31	0.503±0.015

ที่มา: De Visscher *et al.* (2001)

Benstead and King (1997) ได้ศึกษาการตอบสนองของจุลินทรีย์เมทาโนโทรฟ (methanotropic) ต่อการออกซิเดชันของมีเทนในดินป่า (forest soil) ผลการศึกษาพบว่า ความชื้น (soil water content) มีความสัมพันธ์ต่อการออกซิเดชันมีเทน โดยระดับความชื้นที่เหมาะสมคือ ร้อยละ 14 – 40 นอกจากนี้ได้มีการศึกษาถึงผลของความเข้มข้นของมีเทนที่ระดับต่าง ๆ ต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์เมทาโนโทรฟ (methanotroph) โดยพบว่า เมื่อความเข้มข้นของมีเทนสูงขึ้น การเกิดกิจกรรมของจุลินทรีย์เมทาโนโทรฟก็จะสูงขึ้นด้วย และในการศึกษาค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์พบว่า มีค่าศักยภาพในการออกซิไดส์ (V_{max}) เท่ากับ 1.0 นาโนโมลต่อกรัมดินน้ำหนักแห้งต่อชั่วโมง และค่าความจำเพาะต่อมีเทน (K_m) เท่ากับ 10 นาโนโมลาร์

Boeckx *et al.* (1996) ได้ศึกษาการแพร่กระจายของมีเทนจากหลุมฝังกลบและความสามารถในการออกซิเดชันของมีเทนในชั้นดินปิดทับ ผลการศึกษาพบว่า อัตราการแพร่กระจายของมีเทนจากหลุมฝังกลบมีความผันแปรไปตามฤดูกาล โดยมีค่าอยู่ในช่วง -5.9 – 914.3 มิลลิกรัมมีเทนต่อตารางเมตรต่อวัน โดยความผันแปรดังกล่าวอาจมีสาเหตุมาจากระดับความชื้นในชั้นปิดทับหลุมฝังกลบซึ่งทำหน้าที่ควบคุมการดำเนินกิจกรรมของเมทาโนโทรฟและความสามารถในการซาบซึมของแก๊ส นอกจากนี้ยังพบว่า ระดับความชื้นที่เหมาะสมต่อการออกซิเดชันของมีเทน อยู่ในช่วงร้อยละ 15.6 – 18.8 (โดยน้ำหนัก) ส่วนอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการออกซิเดชันของมีเทนคือ 15 – 20 องศาเซลเซียส และเมื่อความเข้มข้นของแอมโมเนียมไนโตรเจนเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้อัตราการออกซิเดชันของมีเทนลดลง

Mor *et al.* (2006) ได้ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของระยะเวลาบ่ม ปริมาณความชื้น และ อุณหภูมิต่อการออกซิเดชันของมีเทนในปุ๋ยหมักชนิดต่าง ๆ ผลการศึกษาพบว่า อิทธิพลของปริมาณ ความชื้นและอุณหภูมิต่อการออกซิเดชันของมีเทนขึ้นอยู่กับระยะเวลา โดยอัตราการออกซิเดชันของ มีเทนเกิดขึ้นสูงสุดเมื่อระดับความชื้นอยู่ระหว่าง ร้อยละ 45 – 110 (โดยน้ำหนักแห้ง) และอุณหภูมิที่ เหมาะสมอยู่ในช่วง 15 – 30 องศาเซลเซียส



บทที่ 3 วิธีดำเนินการทดลอง

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

3.1.1 วัสดุและอุปกรณ์รวมถึงสารเคมีสำหรับการเก็บ การเตรียม และการวิเคราะห์ สมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน

3.1.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการเก็บ การเตรียม และการวิเคราะห์

เครื่องมือและอุปกรณ์ในการเก็บ การเตรียม และการวิเคราะห์ ได้แก่

- สว่านเจาะดิน (soil auger)
- ตะแกรงร่อนตัวอย่าง (sieve) ของ ELE international ขนาดช่อง 2 มิลลิเมตรและขนาดช่อง 0.5 มิลลิเมตร
- เครื่องแก้วและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง เช่น ปิเปตอัตโนมัติ (automatic pipette) ดิจิตอลบิวเรต (digital burette) บีกเกอร์ (beaker) กระบอกตวง (cylinder) กรวยกรอง (funnel) ขวดปริมาตร (volumetric flask) กระบอกฉีดยาน้ำกลั่น (wash bottle) โกร่งบดสาร (mortar and pestle) คีมคีบ (forceps) ถ้วยระเหยสาร (evaporating disk) กรวยบุชเนอร์ (buchner funnel) ขวดรูปชมพู่ (erlenmeyer flask) กระดาษกรอง whatman เบอร์ 42 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 90 มิลลิเมตร ฯลฯ โดยเครื่องแก้วต้องผ่านการล้างด้วยกรดไนตริกร้อยละ 10
- เครื่องชั่งน้ำหนักอย่างละเอียด (analytical balance) ของ Mettler – Toledo รุ่น AB204 และ PB3002
- ตู้อบแห้ง (drying oven) ของ ELE international รุ่น LT900
- เครื่องกลั่นไนโตรเจนแบบอัตโนมัติ (automatic distillation) ของ Gerhardt รุ่น Vapodes 20
- เครื่องย่อยตัวอย่าง (block digestion unit) ของ Gerhardt รุ่น KB8S
- ปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump) ของ Neuberger รุ่น N022AT.18
- เครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก (magnetic stirrer) ของ Denville Scientific Inc.
- เครื่องให้ความร้อน (hot plate) ของ Heidolph รุ่น MR 300
- เครื่องวัดพีเอช (pH meter) ของ Schott รุ่น Lab 850

- เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (conductivity instrument) ของ YSI รุ่น 3200

3.1.1.2 สารเคมีสำหรับการวิเคราะห์

สารเคมีสำหรับวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน ใช้สารเคมีระดับงานวิเคราะห์ (analytical grade) ซึ่งสามารถดูได้จาก ภาคผนวก ก

3.1.2 วัสดุและอุปกรณ์รวมถึงสารเคมีสำหรับการวิเคราะห์การออกซิเดชันของมีเทนในดินตัวอย่าง

3.1.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิเคราะห์

เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิเคราะห์ ได้แก่

- ตู้บ่มเชื้อและควบคุมอุณหภูมิ (incubator) ของ WIB Binder รุ่น KBW
- เครื่องนึ่งด้วยไอน้ำ (autoclave) ของ Hirayama รุ่น HVE – 50
- ขวดซีรัม (serum) ขนาด 117 มิลลิลิตร
- จุกยาง (rubber stopper) สำหรับปากขวดซีรัมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร
- ฝาอลูมิเนียม (aluminum crimp cap) สำหรับปากขวดซีรัมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร
- แก๊สมีเทนมาตรฐานความเข้มข้นร้อยละ 99.9 ของบริษัท ลินด์ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน)
- แก๊สไนโตรเจนความเข้มข้นร้อยละ 99.999 ของบริษัท แมสเซอร์ สเปเซียลตี้ ก๊าซ จำกัด
- แก๊ส air – zero ของบริษัท แมสเซอร์ สเปเซียลตี้ ก๊าซ จำกัด
- เข็มฉีดยา เบอร์ 24G ของ Nipro
- กระบอกสำหรับเก็บตัวอย่างแก๊ส (gas tight syringe) ของ SGE รุ่น 1MDF – LL – GT 5MDR – VLLMA – GT 10MDF – LL – GT และ 25MDR – VLLMA – GT
- เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (gas chromatography; GC) ของ Agilent รุ่น 6890

3.1.2.2 สารเคมีสำหรับการวิเคราะห์

สารเคมีสำหรับวิเคราะห์จะใช้สารเคมีระดับงานวิเคราะห์ (analytical grade) ได้แก่ โซเดียมเอไซด์ (sodium azide) ใช้สำหรับทำชุดควบคุมไม่ใช่ชีวภาพ (abiotic control)

3.2 ตัวอย่างดินที่ใช้ในการศึกษา

การศึกษาค้างนี้ใช้ตัวอย่างดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบมูลฝอย จำนวน 1 แห่ง และดินที่เก็บจากพื้นที่เพาะปลูก จำนวน 2 แห่ง โดยมีรายละเอียดแหล่งที่มาของตัวอย่างดินที่ใช้ในการศึกษาดังนี้

3.2.1 ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบมูลฝอย ตำบลวังขนาย จังหวัดกาญจนบุรี

ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบมูลฝอย (รูปที่ 3.1) ที่ใช้ในการศึกษานี้ ทำการเก็บจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบมูลฝอย ณ ศูนย์กำจัดขยะเทศบาลตำบลท่าม่วง ตั้งอยู่บริเวณหมู่ที่ 3 บ้านมะกอกหมู่ ตำบลวังขนาย อำเภอท่าม่วง จังหวัดกาญจนบุรี โดยได้ทำการเก็บตัวอย่างดินในพื้นที่ดังกล่าวในช่วงเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2557



รูปที่ 3.1 สถานที่เก็บตัวอย่างดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ ตำบลวังขนาย จังหวัดกาญจนบุรี

3.2.2 ดินที่ใช้ในการเพาะปลูกจากพื้นที่ตำบลธรรมศาลา จังหวัดนครปฐม

บริเวณที่เก็บตัวอย่างดินเป็นพื้นที่เกษตรกรรมที่ใช้ในการเพาะปลูกพืชจำพวกพืชผักสวนครัว เช่น กวางตุ้ง และคะน้า เป็นต้น (รูปที่ 3.2) โดยตั้งอยู่บริเวณหมู่ที่ 4 ตำบลธรรมศาลา อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม พื้นที่แห่งนี้มีการทำการเกษตรติดต่อกันเป็นระยะเวลานานกว่า 10 ปี ปัจจุบันมีการปลูกพืชผสมผสานแบบยกร่อง รวมถึงมีการใช้ปูนขาวเพื่อปรับพีเอชของดิน และมีการใช้ปุ๋ยชีวภาพเพื่อปรับสภาพดินก่อนการหว่านเมล็ดพืช และมีการใช้ปุ๋ยเคมีร่วมด้วยคือ มีการใช้ปุ๋ยยูเรีย (46-0-0) เพื่อเพิ่มธาตุไนโตรเจนให้กับพืช โดยทำการใส่ปุ๋ยหลังจากต้นพืชอายุได้ 10 - 15 วัน และใช้ปุ๋ยปริมาณ 50 กิโลกรัมต่อพื้นที่ 1 ไร่ ทำการเก็บตัวอย่างดินในพื้นที่ดังกล่าวในช่วงเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2557



รูปที่ 3.2 สถานที่เก็บตัวอย่างดินที่ใช้ในการเพาะปลูกจากพื้นที่ตำบลธรรมศาลา จังหวัดนครปฐม

3.2.3 ดินที่ใช้ในการเพาะปลูกจากพื้นที่ตำบลสามง่าม จังหวัดนครปฐม

บริเวณที่เก็บตัวอย่างดินเป็นพื้นที่เกษตรกรรมที่ใช้ในการเพาะปลูกพืชจำพวก มะเขือเปราะและข้าวโพด ซึ่งทำการปลูกพืชแบบยกร่อง โดยทำการปลูกมะเขือร่องเว้นร่อง และร่องที่ เว้นจะทำการปลูกข้าวโพดสลับกันไป (รูปที่ 3.3) พื้นที่แห่งนี้มีการทำการเกษตรติดต่อกันประมาณ 5 ปี ตั้งอยู่บริเวณตำบลสามง่าม อำเภอดอนตูม จังหวัดนครปฐม ซึ่งพื้นที่แห่งนี้มีการใช้ปุ๋ยเคมีและสาร กำจัดวัชพืชในการทำการเกษตรร่วมด้วย เช่น อาหารซิน ใช้ก่อนเพาะปลูกพืช โดยจะฉีดพ่นให้ทั่ว บริเวณพื้นที่เพาะปลูกเพื่อกำจัดวัชพืช โดยใช้ในปริมาณ 400 – 500 กรัมผสมในน้ำ 60 – 80 ลิตร สำหรับพื้นที่ 1 ไร่ และใช้อามิทรินซึ่งเป็นสารฆ่าหญ้าประเภทหนึ่ง หลังจากปลูกพืชแล้ว โดยใช้ ปริมาณ 400 – 500 กรัม ผสมในน้ำ 60 – 80 ลิตร สำหรับพื้นที่ 1 ไร่ นอกจากนี้มีการใช้ปุ๋ย แอมโมเนียมซัลเฟต (21 – 0 – 0) หลังจากการปลูกพืชแล้ว 20 – 25 วัน โดยใช้ในอัตรา 25 – 50 กิโลกรัมต่อพื้นที่ 1 ไร่ เป็นต้น สำหรับพื้นที่นี้ได้ทำการเก็บตัวอย่างดินในช่วงเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2558



รูปที่ 3.3 สถานที่เก็บตัวอย่างดินที่ใช้ในการเพาะปลูกจากพื้นที่ตำบลสามง่าม จังหวัดนครปฐม

3.3 วิธีการเก็บตัวอย่างดิน

การเก็บตัวอย่างดินที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ใช้วิธีเก็บตัวอย่างดินรวม (composite sample) โดยทำการเก็บตัวอย่างดินแบบสุ่มด้วยสว่านเจาะดิน (soil auger) (รูปที่ 3.4) จากพื้นที่ที่ระบุในข้อ 3.2 โดยสุ่มเก็บอย่างน้อย 50 จุด ที่ระดับความลึก 0 – 20 เซนติเมตร จากนั้นเก็บรวบรวมดินตัวอย่างในถุงพลาสติก คลุกเคล้าดินที่เก็บได้จากทุกจุดให้เข้ากันอย่างสม่ำเสมอและนำกลับมายังห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 3.4 การเก็บตัวอย่างด้วยสว่านเจาะดิน (soil auger)

3.4 การเตรียมตัวอย่างดิน

นำตัวอย่างดินรวมที่เก็บมาจากแต่ละพื้นที่มาผึ่งให้แห้ง (air dried) ในที่ร่ม หลังจากนั้นนำมาบดด้วยโกร่งบดสารให้ละเอียด แล้วร่อนผ่านตะแกรงที่มีขนาดช่อง 2 มิลลิเมตร ตัวอย่างที่ค้างบนตะแกรงต้องนำไปบดอีก และร่อนผ่านตะแกรงจนหมด นำตัวอย่างที่บดละเอียดแล้วผสมคลุกเคล้าให้เข้ากันดีและเก็บใส่ถุงพลาสติกเพื่อนำไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีบางประการ และนำไปใช้ในการศึกษาถึงการออกซิเดชันของมีเทน

3.5 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีบางประการของดิน

นำตัวอย่างดินแต่ละชนิดที่ผ่านการเตรียมตัวอย่างจากข้อ 3.4 มาวิเคราะห์หาสมบัติทางกายภาพและเคมีบางประการ โดยปฏิบัติตามวิธีการในคู่มือต่อไปนี้ ได้แก่ Method of soil analysis Part 3 (Sparks, 1996) Part 4 (Dane *et al.*, 2002) Soil sampling and method of analysis (Carter, 1993) และ Soil sampling preparation and analysis (Tan, 1995) และมีพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ในดินแต่ละชนิดและวิธีวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3.1 ส่วนรายละเอียดวิธีการวิเคราะห์แต่ละพารามิเตอร์แสดงในภาคผนวก ก สำหรับข้อมูลผลการวิเคราะห์รายงานโดยใช้น้ำหนักดินในสถานะไม่มีความชื้นเป็นน้ำหนักอ้างอิง (oven - dry basis) (ดูข้อมูลความชื้นของตัวอย่างดินได้จากภาคผนวก ข)

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ในดินแต่ละชนิด

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์
1. ปริมาณความชื้น	Gravimetric method
2. ปริมาณอนุภาคขนาดทราย	ไฮโดรมิเตอร์ (hydrometer)
3. ปริมาณอนุภาคขนาดทรายแป้ง	ไฮโดรมิเตอร์ (hydrometer)
4. ปริมาณอนุภาคขนาดดินเหนียว	ไฮโดรมิเตอร์ (hydrometer)
5. เนื้อดิน	จากสามเหลี่ยมเนื้อดิน
6. ความหนาแน่นรวม (bulk density)	Measurement of disturbed soil
7. พีเอช (อัตราส่วน ดิน : น้ำ = 1 : 5)	เครื่องวัดพีเอช (pH meter)
8. การนำไฟฟ้าของดิน (อัตราส่วน ดิน : น้ำ = 1 : 5)	เครื่องวัดการนำไฟฟ้า (conductivity meter)
9. ปริมาณอินทรีย์คาร์บอน (organic carbon)	Walkley and Black method
10. ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (organic matter)	จากการคำนวณ
11. ไนโตรเจนทั้งหมด (total N)	Kjeldahl method
12. อัตราส่วนคาร์บอนและไนโตรเจน	จากการคำนวณ

ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ในตารางที่ 3.1 ใช้การวิเคราะห์ซ้ำในตัวอย่างเดียวกัน (replicate) โดยตรวจตัวอย่างซ้ำ 3 ครั้ง ด้วยวิธีการเดิม และมีการหาค่าเฉลี่ยของผลการวิเคราะห์ และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) นอกจากนี้ยังมีการทำแบลนด์ (blank) ของน้ำยาเคมีซึ่งมีการเตรียมตามขั้นตอนการวิเคราะห์ทั้งหมดโดยไม่เติมตัวอย่างดินและทำซ้ำ 3 ครั้ง ในทุก ๆ พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์

3.6 การศึกษาการออกซิเดชันของมีเทนในดินตัวอย่าง

3.6.1 การทดลองบ่มตัวอย่างแบบแบตช์ (batch incubation experiment)

การศึกษาถึงการออกซิเดชันของมีเทน และค่าตัวแปรทางจุลชีววิทยาของการออกซิเดชันมีเทนในดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบมูลฝอย 1 บริเวณ และดินที่ใช้ในการเพาะปลูกจาก 2 บริเวณคือ พื้นที่ธรรมศาลา และพื้นที่สามง่าม จังหวัดนครปฐม ได้ใช้การทดลองแบบแบตช์ (รูปที่ 3.5) โดยมีรายละเอียดของการทดลองดังนี้

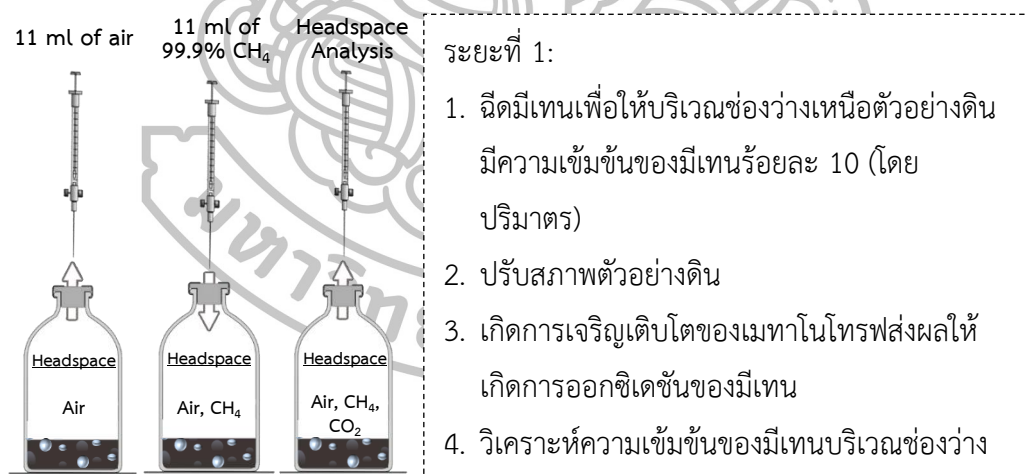


รูปที่ 3.5 การทดลองบ่มตัวอย่างแบบแบตช์

ระยะที่ 1 การปรับสภาพตัวอย่างดิน (acclimatization)

ด้วยเหตุที่ความหนาแน่นรวมของดินผิวดินในตัวอย่างดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ ดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา และดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม มีค่าเท่ากับ 1.13 ± 0.00 , 1.24 ± 0.02 และ 1.25 ± 0.00 กรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ และต้องการควบคุมปริมาณมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินซึ่งกำหนดให้มีปริมาตรเท่ากับ 109 มิลลิลิตร ในขวดซีรัมขนาด 117 มิลลิลิตร ให้มีความเข้มข้นร้อยละ 10 (โดยปริมาตร) จึงทำการชั่งตัวอย่างดินที่ผ่านการเตรียมตัวอย่าง

จาก ข้อ 3.4 จำนวน 9 กรัม (สำหรับดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ) และจำนวน 10 กรัม (สำหรับดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา และดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม) บรรจุลงในขวดซีรัม (serum) ขนาด 117 มิลลิลิตร หลังจากนั้นปรับความชื้นของตัวอย่างดินด้วยน้ำกลั่นให้มีความชื้นอยู่ที่ร้อยละ 25 (โดยน้ำหนักแห้ง) (Scheutz and Kjeldsen, 2004; Teclé *et al.*, 2009) ปิดปากขวดด้วยจุกยาง (rubber stopper) และรัดให้แน่นด้วยฝาอลูมิเนียม (aluminum crimp cap) จากนั้นใช้กระบอกสำหรับเก็บตัวอย่างแก๊ส (gas tight syringe) ดูดอากาศบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดิน (headspace) ออกจากขวดซีรัม ปริมาณ 11 มิลลิลิตร และทำการฉีดมีเทนความเข้มข้นร้อยละ 99.9 ด้วยกระบอกสำหรับเก็บตัวอย่างแก๊ส ปริมาณ 11 มิลลิลิตร เข้าไปในขวดซีรัม เพื่อให้บริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินมีความเข้มข้นของมีเทนร้อยละ 10 (โดยปริมาตร) (Walkiewicz *et al.*, 2012) จากนั้นนำไปเก็บในตู้บ่มเชื้อ (incubator) ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ และเพื่อให้อยู่ในที่มืดภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศ โดยควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส (Whalen *et al.*, 1990; Walkiewicz *et al.*, 2012) และทำการเก็บตัวอย่างแก๊สบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินด้วยกระบอกสำหรับเก็บตัวอย่างแก๊ส จำนวน 3 มิลลิลิตร (รูปที่ 3.6) และนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ (GC analysis) เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมีเทนในทุก ๆ วัน จนกว่าจะตรวจไม่พบมีเทน



รูปที่ 3.6 การทดลองในระยะที่ 1 การปรับสภาพตัวอย่างดิน

ในทุกชุดการทดลองจะมีการวิเคราะห์ซ้ำในตัวอย่างเดียวกัน (replicate) โดยตรวจตัวอย่างซ้ำ 3 ครั้ง โดยวิธีการเดิม และมีการหาค่าเฉลี่ยของผลการวิเคราะห์และค่าการเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) และข้อมูลที่ได้จากการทดลองในระยะที่ 1 นี้ ถูกนำไปสร้างกราฟระหว่างความเข้มข้นของมีเทนที่เปลี่ยนแปลงไป (ไมโครโมลต่อกรัม) กับเวลา (วัน) และเพื่อศึกษาถึง

ระยะเวลาที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการปรับสภาพตัวอย่างดินแต่ละชนิดก่อนนำไปใช้ในการศึกษาใน
ระยะที่ 2 ต่อไป สำหรับการเปลี่ยนหน่วยความเข้มข้นของมีเทนจากร้อยละเป็นไมโครโมลต่อกรัมมี
วิธีคำนวณแสดงดังภาคผนวก ค

ระยะที่ 2 การหาค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์

การศึกษาในระยะที่ 2 นี้ ดำเนินการต่อเนื่องจากระยะที่ 1 คือ เมื่อตรวจไม่พบมีเทน
จากขวดซีรัมในระยะที่ 1 ส่งผลให้การทดลองในระยะที่ 1 หยุดลง และเข้าสู่การดำเนินงานระยะการ
บ่มตัวอย่าง (incubation) หรือระยะที่ 2 ซึ่งเป็นการทดลองเพื่อหาค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ใน
การออกซิเดชันของมีเทนในตัวอย่างดินแต่ละชนิด ซึ่งเป็นการศึกษาถึงการออกซิเดชันของมีเทนที่
ความเข้มข้นในระดับต่าง ๆ กัน

สำหรับดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ และดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา มีชุด
ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินที่ทำการศึกษาในระยะที่ 2 ทั้งหมด 6 ชุด
ครอบคลุมช่วงความเข้มข้นร้อยละ 2 – 14 ส่วนดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม มีชุดความเข้มข้นของ
มีเทนที่ทำการศึกษาในระยะที่ 2 ทั้งหมด 5 ชุด ครอบคลุมช่วงความเข้มข้นร้อยละ 2 – 10 (ตารางที่
3.2)

ตารางที่ 3.2 ชุดความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินที่ทำการศึกษาในระยะที่ 2

ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่าง เหนือตัวอย่างดินที่ทำการศึกษา (ร้อยละ)	ปริมาณอากาศที่ดูดออกและ ปริมาณมีเทนที่ฉีดเข้าขวดซีรัม (มิลลิลิตร)
2.0	2.2
4.0	4.4
6.0	6.6
8.0	8.8
10.0	11.0
14.0	16.5

โดยเมื่อระยะที่ 1 หยุดลง ให้นำขวดซีรัมมาทำการเปิดฝาอลูมิเนียมและจุกยางออก
และตั้งทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง (Walkiewicz *et al.*, 2012) (รูปที่ 3.7) เพื่อกำจัดแก๊ส สารตั้ง
ต้น หรือผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับการออกซิเดชันของมีเทนในระยะที่ 1 ออกไป และเพื่อปรับสมดุล
ของอากาศภายในขวดกับอากาศภายนอก จากนั้นปิดปากขวดด้วยจุกยางและรัดให้แน่นด้วยฝา

อลูมิเนียมอีกครั้งหนึ่ง (รูปที่ 3.8) หลังจากนั้นใช้กระบอกสำหรับเก็บตัวอย่างแก๊สชุดอากาศบริเวณ ช่องว่างเหนือตัวอย่างดินในปริมาณที่สอดคล้องตามชุดความเข้มข้นที่กำหนด (ตารางที่ 3.2) เพื่อลด ความดันเกิน (overpressure) ที่อาจเกิดจากการฉีดยามีเทนความเข้มข้นร้อยละ 99.9 ในปริมาณที่ สอดคล้องตามชุดความเข้มข้นที่กำหนด (ตารางที่ 3.2) จากนั้นนำไปเก็บในตู้บ่มเชื้อโดยให้อยู่ใน สภาพที่กำหนดเช่นเดียวกับการทดลองในระยะที่ 1 และทำการเก็บตัวอย่างแก๊สบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินด้วยกระบอกสำหรับเก็บตัวอย่างแก๊ส จำนวน 3 มิลลิลิตร และนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง แก๊สโครมาโตกราฟ (GC analysis) (รูปที่ 3.9) เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมีเทนใน ระยะแรก (initial concentration) เป็นระยะเวลา 0 – 24 ชั่วโมง โดยทำการเก็บตัวอย่างเพื่อตรวจวัด มีเทนทุก ๆ 3 6 9 12 15 และ 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการเก็บตัวอย่างวันเว้นวันสำหรับดินจากชั้น ปิดทับหลุมฝังกลบ และดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา และเก็บตัวอย่างหนึ่งวันเว้นสองวันสำหรับ ดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม ทำการเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างจนกว่าความเข้มข้นของมีเทนมีค่า ไกล่เคียงศูนย์หรือประมาณร้อยละ 0.02 โดยปริมาตร (รูปที่ 3.10)



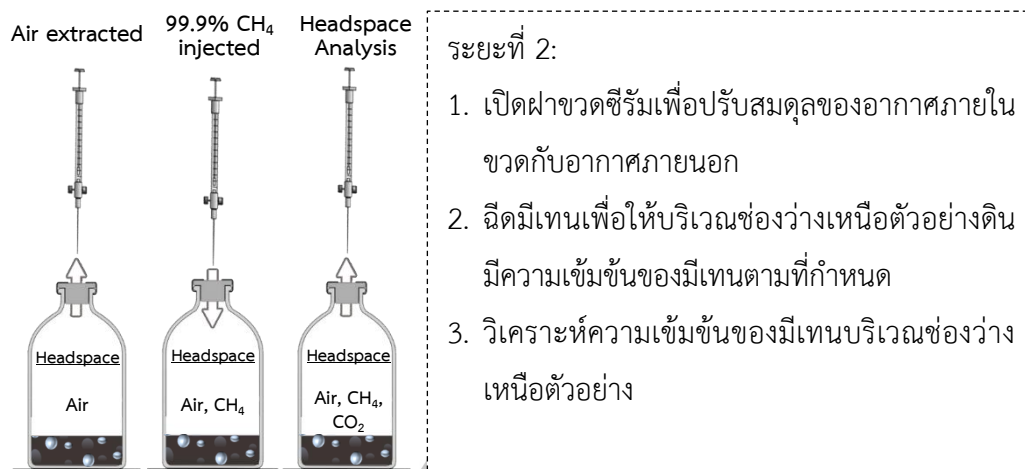
รูปที่ 3.7 ทำการเปิดฝาขวดซีรัมและตั้งทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง



รูปที่ 3.8 ปิดปากขวดด้วยจุกยางและรัดให้แน่นด้วยฝาลูมิเนียม



รูปที่ 3.9 ฉีดตัวอย่างเข้าเครื่องเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ (GC analysis)



รูปที่ 3.10 การทดลองในระยะที่ 2 การหาค่าตัวแปรทางจุลชีววิทยา

นอกจากนี้มีการทำชุดควบคุม (control) 2 แบบ ได้แก่ แบบที่ 1 เรียกว่า ชุดควบคุมไม่ใช่ชีวภาพ (abiotic control) ชุดควบคุมนี้ ใช้วิธีการเตรียมตัวอย่างในขวดซีรัมเช่นเดียวกับชุดทดลองดังรายละเอียดที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น แต่มีข้อยกเว้นคือ ตัวอย่างดินถูกทำให้ปราศจากเชื้อโดยการเติมสารละลายโซเดียมเอไซด์ (sodium azide) ความเข้มข้น 25 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Scheutz and Kjeldsen, 2004) และใช้เป็นสารละลายปรับความชื้นของตัวอย่างดินให้ได้ระดับความชื้นตามที่กำหนดแทนน้ำกลั่น หลังจากนั้นนำขวดตัวอย่างที่ปิดฝาอย่างแน่นหนาแล้วไปทำให้ปราศจากเชื้อด้วยวิธีหนึ่งด้วยไอน้ำ (autoclave) อีกครั้งหนึ่ง ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บาร์ เป็นเวลา 20 นาที และทำการดูดอากาศบริเวณช่องว่างเหนือสารตัวอย่างออกจากขวดซีรัม และฉีดมีเทนเข้าไปในบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างในปริมาณเดียวกันกับในชุดทดลอง และทำการวิเคราะห์มีเทนเช่นเดียวกันกับในชุดทดลอง การทดลองชุดนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบการสูญหายของแก๊สมีเทนอันเนื่องมาจากกระบวนการอื่น ๆ ที่ไม่ใช่กระบวนการทางชีวภาพ เช่น การย่อยสลายที่ไม่ใช่กระบวนการทางชีวภาพ (abiotic degradation) และการดูดซับ (sorption) เป็นต้น ส่วนแบบที่ 2 เรียกว่า ชุดควบคุมชีวภาพ (biotic control) ชุดควบคุมนี้ใช้วิธีการเตรียมตัวอย่างในขวดซีรัมเช่นเดียวกับชุดทดลองซึ่งมีรายละเอียดที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น แต่มีข้อยกเว้นคือ ไม่ทำการดูดอากาศบริเวณช่องว่างเหนือสารตัวอย่างออกจากขวดซีรัม และไม่มีการฉีดมีเทนเข้าไปในบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่าง และทำการวิเคราะห์มีเทนเช่นเดียวกันกับในชุดทดลอง การทดลองชุดนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อแสดงให้เห็นว่า ไม่มีกระบวนการสร้างมีเทนเกิดขึ้นในชุดทดลอง และความเข้มข้นของมีเทนที่เปลี่ยนแปลงไปในชุดทดลองเป็นผลมาจากกิจกรรมการย่อยสลายของเมทาโนโทรฟ

ในทุกชุดการทดลองของระยะการบ่มตัวอย่าง (incubation) ในระยะที่ 2 นี้ รวมถึงการทำชุดควบคุมทั้ง 2 แบบ ได้แก่ ชุดควบคุมไม่ใช่ชีวภาพ และชุดควบคุมชีวภาพ มีการวิเคราะห์ซ้ำ

ในตัวอย่างเดียวกัน (replicate) โดยตรวจตัวอย่างซ้ำ 3 ครั้ง โดยวิธีการเดิม และมีการหาค่าเฉลี่ยของผลการวิเคราะห์และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) และข้อมูลที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนนี้ได้ถูกนำไปสร้างกราฟระหว่างความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม) ที่เปลี่ยนแปลงไปกับเวลา (วัน) เพื่อศึกษาถึงอัตราการออกซิเดชันของมีเทนในดินแต่ละชนิด สำหรับการเปลี่ยนหน่วยความเข้มข้นของมีเทนจากร้อยละเป็นไมโครโมลต่อกรัมมีวิธีคำนวณแสดงดังภาคผนวก ค

สำหรับการศึกษาอัตราการออกซิเดชันมีเทนในดินแต่ละชนิดได้ใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (linear regression analysis) จากการสร้างกราฟที่พล็อตระหว่างความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม) ในระยะแรก (initial concentration) ในแต่ละความเข้มข้น กับเวลาที่ 0 – 24 ชั่วโมง จากนั้นนำอัตราการออกซิเดชันมีเทนที่ได้มาในแต่ละความเข้มข้นมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมล) กับอัตราการออกซิเดชันมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัมต่อชั่วโมง) ตามกลไกของไมเคิลลิส – เมนเทน (Michaelis – Menten mechanism) และนำมาหาค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ ได้แก่ อัตราการออกซิเดชันมีเทนสูงสุดหรือที่เรียกว่าค่าศักยภาพในการออกซิไดซ์ (V_{max}) และค่าคงที่ไมเคิลลิส – เมนเทนสำหรับมีเทนหรือที่เรียกว่าค่าความจำเพาะต่อมีเทน (K_m) โดยใช้สมการไลน์วีเวอร์-เบอร์ก ตามสมการที่ 21 ดังรายละเอียดในบทที่ 2

3.6.2 การวิเคราะห์ด้วยแก๊สโครมาโตกราฟ (gas chromatographic analyses)

การวิเคราะห์ความเข้มข้นของมีเทนในตัวอย่างดำเนินการโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ (gas chromatography; GC) (รูปที่ 3.11) รุ่น 6890 Agilent ซึ่งคอลัมน์ที่ใช้ในการทดลองเป็นแบบ packed column อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส และใช้แก๊สไนโตรเจนทำหน้าที่เป็นแก๊สตัวพา (carrier gas) ที่อัตราการไหล 19.1 มิลลิลิตรต่อนาที สำหรับ detector ที่ใช้ในการทดลองเป็นชนิด thermal conductivity detector (TCD) มีอุณหภูมิเท่ากับ 200 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง คือ 11 นาที

การสร้างกราฟมาตรฐาน (calibration curve) กระทำโดยนำแก๊สมีเทนที่ทราบความเข้มข้นแน่นอนหลาย ๆ ขนาดความเข้มข้นมาทำโครมาโตแกรม โดยการนำขวดซีรัมขนาด 117 มิลลิลิตร มาปิดปากขวดด้วยจุกยางและรัดให้แน่นด้วยฝาลูมิเนียม และทำการแทนที่อากาศภายในขวดด้วยไนโตรเจนร้อยละ 99.999 โดยให้ไนโตรเจนไหลเข้าขวดในอัตราการไหล (flow rate) เท่ากับ 18.1 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นใช้กระบอกสำหรับเก็บตัวอย่างแก๊สดูดอากาศภายในขวดในปริมาณที่สอดคล้องตามความเข้มข้นมาตรฐานที่กำหนด (ตารางที่ 3.3) เพื่อลดความดันเกิน และใช้กระบอกสำหรับเก็บตัวอย่างแก๊สชนิดมีเทนความเข้มข้นร้อยละ 99.9 ในปริมาณที่สอดคล้องตามความเข้มข้นมาตรฐานที่ได้กำหนดไว้ (ตารางที่ 3.3) ตั้งทิ้งไว้ 2 ชั่วโมงเพื่อให้แก๊สที่ฉีดเข้าไปผสมเข้ากันดีภายในขวด จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างแก๊สบริเวณช่องว่างภายในขวดซีรัมด้วย

กระบอกสำหรับเก็บแก๊ส จำนวน 3 มิลลิลิตร และนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ (GC analysis) เพื่อตรวจวัดความเข้มข้นของมีเทนตามความเข้มข้นที่ระดับต่าง ๆ โดยทำการวัดพื้นที่พีค (area peak) จากโปรแกรมสำเร็จรูป Chemstation Rev.A.10.02 [1757] แล้วนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของมีเทน (ร้อยละ) กับ พื้นที่พีค ส่วนความเข้มข้นของมีเทนที่ไม่ทราบค่าของตัวอย่างได้ถูกนำมาวัดพื้นที่พีคเช่นเดียวกัน หลังจากนั้นนำพื้นที่พีคที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูปไปเทียบกับกราฟความเข้มข้นมาตรฐานเพื่อหาความเข้มข้นหรือคำนวณเป็นความเข้มข้นโดยใช้สมการเชิงเส้นของกราฟมาตรฐานนั้น ๆ (ดูข้อมูลกราฟมาตรฐานของมีเทนสำหรับการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟได้จากภาคผนวก ง)



รูปที่ 3.11 เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ (gas chromatography; GC)

ตารางที่ 3.3 ความเข้มข้นของมีเทนที่ใช้ทำกราฟมาตรฐาน

ความเข้มข้นของมีเทนภายในขวด (ร้อยละ)	ปริมาณอากาศที่ดูดออกและ ปริมาณมีเทนที่ฉีดเข้าขวดซีรัม (มิลลิลิตร)
0.03	0.04
0.85	1.0
1.71	2.0
3.42	4.0
6.83	8.0
13.66	16.0
17.08	20.0

บทที่ 4

ผลการศึกษาและวิจารณ์ผลการศึกษา

การศึกษาการออกซิเดชันของมีเทนโดยจุลินทรีย์ในชั้นปิดทับหลุมฝังกลบภายใต้สภาวะการทดลองในห้องปฏิบัติการ ในตัวอย่างดินที่เป็นสภาพดินธรรมชาติ 3 ชนิด (ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบมูลฝอยตำบลวังขนาย จังหวัดกาญจนบุรี ดินที่ใช้ในการเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา จังหวัดนครปฐม และดินที่ใช้ในการเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม จังหวัดนครปฐม) มีการจำแนกผลการศึกษาออกเป็นด้านต่าง ๆ ได้แก่ (1) สมบัติทางกายภาพและทางเคมีบางประการของตัวอย่างดิน สำหรับรายละเอียดของผลวิเคราะห์ที่นำมาใช้หาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแสดงในภาคผนวก จ (2) ความสามารถในการออกซิเดชันของมีเทนในตัวอย่างดิน ซึ่งแบ่งเป็น 2 ระยะ ได้แก่ ระยะการปรับสภาพตัวอย่างดิน (acclimatization) และระยะการบ่มตัวอย่าง (incubation) มีรายละเอียดของผลวิเคราะห์ที่นำมาใช้หาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแสดงในภาคผนวก ฉ และ ช ตามลำดับ (3) การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการออกซิเดชันของมีเทนในตัวอย่างดินทั้ง 3 ชนิด (4) จลนพลศาสตร์ของการออกซิเดชันมีเทนในดินที่ศึกษา และ (5) การประยุกต์ผลการศึกษาเพื่อลดการแพร่กระจายแก๊สมีเทนในพื้นที่หลุมฝังกลบ ทั้งนี้มีรายละเอียดของผลและวิจารณ์ผลการศึกษาในแต่ละด้านดังต่อไปนี้

4.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีบางประการของดินแต่ละชนิด

สมบัติทางกายภาพและทางเคมีบางประการของดินที่ทำการวิเคราะห์ ได้แก่ ปริมาณอนุภาคขนาดทราย (sand) ทรายแป้ง (silt) และดินเหนียว (clay) เนื้อดิน (soil texture) ความหนาแน่นรวม (bulk density) พีเอช (pH) การนำไฟฟ้าของดิน (electrical conductivity; EC) ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (total nitrogen) ปริมาณอินทรีย์คาร์บอน (organic carbon; OC) ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (organic matter; OM) และอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจน (carbon/nitrogen ratio; C/N ratio) มีผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.1 และมีรายละเอียดดังนี้

4.1.1 เนื้อดิน (soil texture)

จากการวิเคราะห์เนื้อดินของดินที่ใช้ทดสอบ พบว่า ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ มีค่าปริมาณอนุภาคขนาดดินเหนียวเท่ากับร้อยละ 50.4 อนุภาคขนาดทรายแป้งเท่ากับร้อยละ 25.3 และอนุภาคขนาดทรายเท่ากับร้อยละ 24.4 จัดได้ว่ามีลักษณะเนื้อดินอยู่ในประเภทดินเหนียว (clay) ดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา มีค่าปริมาณอนุภาคขนาดดินเหนียวเท่ากับร้อยละ 51.8 อนุภาค

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีบางประการของดินที่ใช้ทดสอบ

พารามิเตอร์	ดินจากชั้นปิดทับ ดินเพาะปลูกจาก ดินเพาะปลูกจาก		
	หลุมฝังกลบ	พื้นที่ธรรมศาลา	พื้นที่สามง่าม
ปริมาณอนุภาคขนาดทราย (ร้อยละ)	24.4	23.0	43.9
ปริมาณอนุภาคขนาดทรายแป้ง (ร้อยละ)	25.3	25.2	30.8
ปริมาณอนุภาคขนาดดินเหนียว (ร้อยละ)	50.4	51.8	25.3
เนื้อดิน	ดินเหนียว	ดินเหนียว	ดินร่วน
ความหนาแน่นรวม (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	294	369	1,658
พีเอช (อัตราส่วน ดิน : น้ำ = 1 : 5)	8.4	6.9	7.4
การนำไฟฟ้าของดิน (อัตราส่วน ดิน : น้ำ = 1 : 5) (มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)	0.62	0.13	0.15
ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (ร้อยละ)	3.04	2.39	0.91
ปริมาณอินทรีย์คาร์บอน (ร้อยละ)	1.76	1.39	0.53
ไนโตรเจนทั้งหมด (ร้อยละ)	0.18	0.12	0.06
อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจน	10	12	8

ขนาดทรายแป้งเท่ากับร้อยละ 25.2 และอนุภาคขนาดทรายเท่ากับร้อยละ 23.0 จัดได้ว่ามีลักษณะเนื้อดินอยู่ในประเภทดินเหนียว (clay) และดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม มีค่าปริมาณอนุภาคขนาดดินเหนียวเท่ากับร้อยละ 25.3 อนุภาคขนาดทรายแป้งเท่ากับร้อยละ 30.8 และอนุภาคขนาดทรายเท่ากับร้อยละ 43.9 จัดได้ว่ามีลักษณะเนื้อดินอยู่ในประเภทดินร่วน (loam) ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ และดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา มีลักษณะเนื้อดินอยู่ในกลุ่มดินเนื้อละเอียด (fine – textured soil) และดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม มีลักษณะอยู่ในกลุ่มดินเนื้อปานกลาง (medium – textured soil)

เนื้อดินจะส่งผลต่อการเคลื่อนย้ายของแก๊สจากหลุมฝังกลบและการแพร่ผ่านของแก๊สออกซิเจนจากบรรยากาศ ด้วยเหตุนี้เนื้อดินจึงทำหน้าที่ในการควบคุมทั้งอัตราการแพร่ระบายของมีเทนและอัตราในการออกซิเดชันมีเทนด้วย โดยจากการศึกษาของ Boeckx *et al.* (1996) พบว่าดินที่อยู่ในกลุ่มดินเนื้อละเอียดมีความสามารถในการออกซิเดชันมีเทนต่ำกว่าดินเนื้อหยาบ (coarse – texture soil) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Kightley *et al.* (1995) ที่ทำการตรวจสอบถึงความสามารถในการออกซิเดชันของมีเทนในเนื้อดินประเภทต่าง ๆ พบว่า ดินทรายหยาบ (coarse sand) มีประสิทธิภาพในการออกซิเดชันมีเทนเท่ากับร้อยละ 61 และสูงกว่าในดินทรายละเอียด (fine

sand) หรือ ดินเหนียว (clay) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการออกซิเดชันมีเทนเท่ากับร้อยละ 40 – 41 นอกจากนี้ Gebert and Grogroft (2009) ก็ได้แนะนำให้มีการใช้ดินเนื้อหยาบที่มีปริมาตรของส่วนที่เป็นช่องว่างมากกว่าร้อยละ 17 ซึ่งได้แก่ ดินทราย (sands) ดินทรายร่วน (loamy sands) และดินร่วนปนทราย (sandy loams) เป็นต้น เป็นชั้นดินปิดทับชีวภาพเพื่อการออกซิเดชันของมีเทน

4.1.2 ความหนาแน่นรวม (bulk density)

จากผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นรวมของดินที่ใช้ทดสอบ พบว่า ดินจากชั้นปิดทับ หลุมฝังกลบ ดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา และดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม มีค่าความหนาแน่นรวมเท่ากับ 294 369 และ 1,658 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ซึ่งค่าความหนาแน่นรวม สามารถบอกถึงความพรุน (porosity) และปริมาณอากาศในส่วนที่เป็นช่องว่างของดิน หากดินมีความหนาแน่นรวมต่ำจะส่งผลให้อัตราการแพร่กระจายของมีเทนและอัตราการออกซิเดชันมีเทนมากขึ้น ในทางตรงกันข้าม อัตราการออกซิเดชันมีเทนจะลดลงเมื่อความหนาแน่นรวมของดินมีค่ามากขึ้น (McTaggart *et al.*, 2008; Gebert *et al.*, 2011; Prajapati, 2013)

4.1.3 พีเอช (pH)

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์พีเอชของดินที่ใช้ในการศึกษา พบว่า ดินจากชั้นปิดทับ หลุมฝังกลบ ดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา และดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม มีค่าพีเอชเท่ากับ 8.4 6.9 และ 7.4 ตามลำดับ พีเอชเป็นปัจจัยที่สำคัญปัจจัยหนึ่งในกิจกรรมของเมทาโนโทรฟ ซึ่งมีการรายงานว่ามีเมทาโนโทรฟจะมีความไวต่อพีเอช และค่าพีเอชที่แตกต่างกันในดินชนิดต่าง ๆ สามารถส่งผลให้มีอัตราการออกซิเดชันมีเทนที่แตกต่างกันได้ โดยจากการศึกษาของ Whittenbury *et al.* (1970) พบว่าค่าพีเอชที่เมทาโนโทรฟสามารถเจริญเติบโตได้คือ 5.8 – 7.4 และค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับเมทาโนโทรฟคือ 6.6 – 6.8 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Scheutz and Kjeldsen (2004) ที่ทำการศึกษาในหลุมฝังกลบ Skellingsted ประเทศเดนมาร์ก พบว่าพีเอชที่เหมาะสมกับการออกซิเดชันมีเทนคือ 6.9 การศึกษาของ Hanson and Hanson (1996) พบว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับเมทาโนโทรฟคือ 5.5 – 8.5 และพบว่าเมทาโนโทรฟไม่สามารถเจริญได้หากมีค่าพีเอชต่ำกว่า 5

4.1.4 การนำไฟฟ้า (electrical conductivity; EC)

จากผลการวิเคราะห์ค่าการนำไฟฟ้าของดินที่ใช้ทดสอบ พบว่า ดินจากชั้นปิดทับ หลุมฝังกลบ ดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา และดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม มีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 0.62 0.13 และ 0.15 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งจากการศึกษาของ Gebert *et al.* (2003) พบว่าช่วงการนำไฟฟ้าที่จะทำให้ความสามารถในการออกซิเดชันมีเทนเพิ่มขึ้นคือ 2.8 – 3 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ส่วนค่าการนำไฟฟ้ามากกว่า 6 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ส่งผลให้อัตราการออกซิเดชันมีเทนลดลง

4.1.5 ปริมาณอินทรีย์คาร์บอน (organic carbon; OC) และ ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (organic matter; OM)

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในดินทั้ง 3 ชนิด ที่ทำการศึกษา พบว่า ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ ดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา และดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม มีค่าปริมาณอินทรีย์คาร์บอนเท่ากับร้อยละ 1.76 1.39 และ 0.53 ตามลำดับ และเมื่อนำค่าปริมาณอินทรีย์คาร์บอนมาคำนวณเพื่อหาค่าปริมาณอินทรีย์วัตถุของดินที่ใช้ทดสอบ พบว่า ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ ดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา และดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม มีค่าปริมาณอินทรีย์วัตถุเท่ากับร้อยละ 3.04 2.39 และ 0.91 ตามลำดับ ซึ่งจากการศึกษาของ Visvanathan *et al.* (1999) และ Humer and Lechner (2001) พบว่า อัตราการออกซิเดชันของมีเทนเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารอินทรีย์ในดินเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Christophersen *et al.* (2000) พบว่า ดินที่มีปริมาณสารอินทรีย์สูงกว่าให้ประสิทธิภาพการลดการแพร่กระจายของมีเทนโดยการออกซิเดชันได้ดีกว่าดินที่มีปริมาณสารอินทรีย์ต่ำกว่า

4.1.6 ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (total nitrogen)

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดของดินที่ใช้ทดสอบ พบว่า ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ ดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา และดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม มีค่าปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 0.18 0.12 และ 0.06 ตามลำดับ เมื่อนำมาประเมินระดับความมกน้อยของไนโตรเจนทั้งหมดเปรียบเทียบกับเกณฑ์ในตารางที่ 4.2 พบว่า ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ และดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา มีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดอยู่ในระดับต่ำ ส่วนดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม มีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดอยู่ในระดับต่ำมาก

ตารางที่ 4.2 การประเมินระดับไนโตรเจนทั้งหมดในดิน

ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดิน	การประเมิน
น้อยกว่า 0.1	ต่ำมาก
0.1 – 0.2	ต่ำ
0.2 – 0.5	ปานกลาง
0.5 – 1.0	สูง
มากกว่า 1.0	สูงมาก

ที่มา: Landon (1991)

ในการออกซิเดชันมีเทนในชั้นดินปิดทับหลุมฝังกลบจะมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น จุลินทรีย์เมทาโนโทรฟต้องอาศัยสารอาหารสำหรับกระบวนการเมตาบอลิซึมในเซลล์ ซึ่งอาจทำได้โดยการเติมสารอาหารบางชนิดลงไปในระบบชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและอัตราการออกซิเดชันของมีเทนให้ดีขึ้น (Borjesson *et al.*, 1998; Albanna *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2009) เช่น Lee *et al.* (2009) พบว่า ความสามารถในการออกซิเดชันของมีเทนในชั้นดินปิดทับหลุมฝังกลบ ประเภทดินทรายเพิ่มขึ้นร้อยละ 60 เมื่อมีการเติมแอมโมเนียมไนโตรเจน ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) ในปริมาณ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน

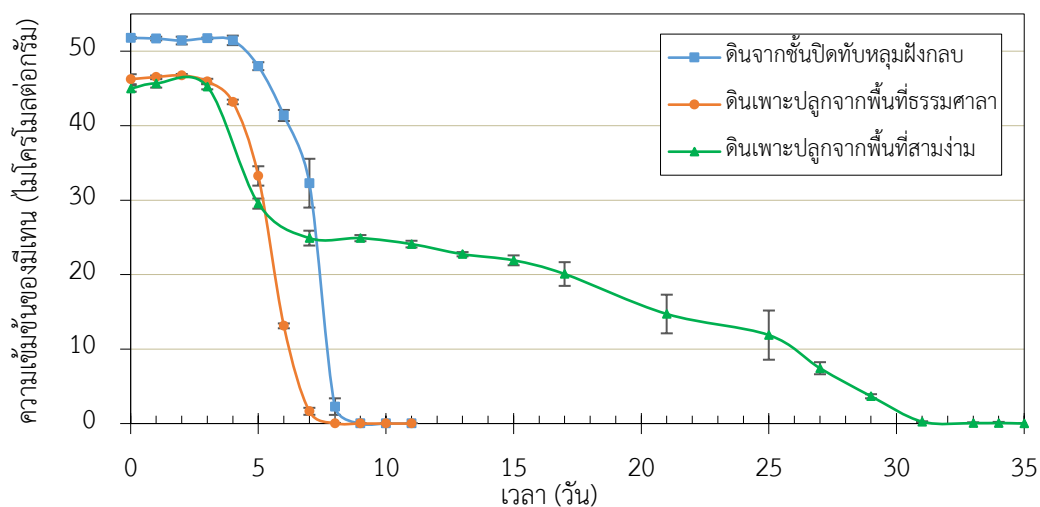
4.1.7 อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจน (carbon/nitrogen ratio; C/N ratio)

จากผลการวิเคราะห์อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจนของดินที่ใช้ทดสอบ พบว่า ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ ดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา และดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม มีอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจนเท่ากับ 10 : 1 12 : 1 และ 8 : 1 ตามลำดับ โดยทั่วไปอัตราส่วนคาร์บอนและไนโตรเจนในเซลล์จุลินทรีย์มักมีค่าประมาณ 10 : 1 ซึ่งจากการศึกษาของ Singh (2013) พบว่าอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจนที่มีค่าสูงจะส่งผลให้เกิดกระบวนการที่เรียกว่า Immobilization ซึ่งเป็นกระบวนการที่จุลินทรีย์จะใช้สารอินทรีย์ไนโตรเจนในดิน ได้แก่ แอมโมเนียม (ammonium; NH_4^+) และไนเตรต (nitrate; NO_3^-) มาใช้ในการเพิ่มจำนวนเซลล์ และในทางตรงข้ามหากอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจนมีค่าต่ำจะทำให้เกิดกระบวนการที่เรียกว่า Mineralization ซึ่งเป็นกระบวนการที่จุลินทรีย์ทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ไนโตรเจนในดินให้อยู่ในรูปของสารอินทรีย์

4.2 ความสามารถในการออกซิเดชันของมีเทนในตัวอย่างดิน

4.2.1 ผลของการปรับสภาพตัวอย่างดิน (acclimatization) (ระยะที่ 1)

ในระยะที่ 1 เป็นขั้นตอนของการปรับสภาพตัวอย่างดินหรือที่เรียกว่าระยะเตรียมการบ่ม (preincubation) โดยตัวอย่างดินแต่ละชนิด ได้แก่ ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ ดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา และดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม ถูกนำมาทำการปรับสภาพตัวอย่างดินด้วยการฉีดมีเทนความเข้มข้นร้อยละ 99.9 เพื่อให้บริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินมีความเข้มข้นของมีเทนร้อยละ 10 (โดยปริมาตร) และติดตามการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นมีเทน จนกว่าจะตรวจไม่พบมีเทน ซึ่งมีผลการศึกษาดังรูปที่ 4.1 และตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยและแถบข้อผิดพลาดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความเข้มข้นของมีเทนที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการปรับสภาพตัวอย่างดิน (ระยะที่ 1) ด้วยความเข้มข้นของมีเทนร้อยละ 10 (โดยปริมาตร)

ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทนที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการปรับสภาพตัวอย่างดิน (ระยะที่ 1) ด้วยความเข้มข้นของมีเทนร้อยละ 10 (โดยปริมาตร)

ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ		ดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา		ดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม	
เวลา (วัน)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)
0.00	51.79±0.13	0.00	46.23±0.67	0.00	44.97±0.42
1.00	51.69±0.25	1.00	46.53±0.20	1.00	45.67±0.57
2.00	51.42±0.52	2.00	46.74±0.20	3.00	45.25±0.38
3.00	51.72±0.11	3.00	45.92±0.36	5.00	29.53±0.68
4.00	51.45±0.64	4.00	43.18±0.31	7.00	24.90±1.00
5.00	47.98±0.53	5.00	33.25±1.30	9.00	24.90±0.41
6.00	41.37±0.74	6.00	13.12±0.33	11.00	24.10±0.45
7.00	32.27±3.28	7.00	1.64±0.47	13.00	22.74±0.29
8.00	2.27±1.11	8.00	<0.09	15.00	21.91±0.66
9.00	<0.09	9.00	<0.09	17.00	20.08±1.59
10.00	<0.09	10.00	<0.09	21.00	14.71±2.59
11.00	<0.09	11.00	<0.09	25.00	11.87±3.30
-	-	-	-	27.00	7.43±0.81

ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทนที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการปรับสภาพตัวอย่างดิน (ระยะที่ 1) ด้วยความเข้มข้นของมีเทนร้อยละ 10 (โดยปริมาตร) (ต่อ)

ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ		ดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา		ดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม	
เวลา (วัน)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)
-	-	-	-	29.00	3.67±0.28
-	-	-	-	31.00	0.25±0.03
-	-	-	-	33.00	<0.09
-	-	-	-	34.00	<0.09
-	-	-	-	35.00	<0.09

จากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า ในช่วงแรก (2 – 4 วัน) ของการปรับสภาพดินไม่พบว่ามี การลดลงของมีเทน แสดงให้เห็นว่า มีระยะพักตัวหรือระยะเริ่มต้น (lag phase) เกิดขึ้น โดยดินจาก ชั้นปิดทับหลุมฝังกลบมีระยะพักตัวประมาณ 4 วัน ดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา มีระยะพักตัว ประมาณ 3 วัน และดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม มีระยะพักตัวประมาณ 2 วัน ซึ่งระยะพักตัวนี้เป็น ระยะที่เมทาโนโทรฟจะปรับตัวเข้ากับสิ่งแวดล้อมใหม่ เมื่อมีการเติมสารตั้งต้นซึ่งในที่นี้คือมีเทนลงไป จึงยังไม่พบการเจริญเติบโตของเมทาโนโทรฟ (Maier, 2008) เมื่อเปรียบเทียบการศึกษาอื่น (ตารางที่ 4.4) จะเห็นได้ว่าระยะเวลาของระยะพักตัวอาจแตกต่างกันไปในแต่ละตัวอย่างทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัย ต่าง ๆ เหล่านี้ เช่น ชนิดของตัวอย่าง ความเข้มข้นของมีเทนเริ่มต้น รวมถึงสมบัติทางกายภาพและ เคมีบางประการของตัวอย่างซึ่งส่งผลต่อการปรับตัวของเมทาโนโทรฟ (Maier, 2008) เป็นต้น

หลังจากผ่านระยะพักตัว (วันที่ 2 – วันที่ 4) (รูปที่ 4.1) ความเข้มข้นของมีเทนค่อย ๆ ลดลง แสดงให้เห็นว่ามีการออกซิเดชันมีเทนเกิดขึ้น ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากเมทาโนโทรฟสามารถ ปรับตัวและเจริญเติบโตได้ดีในสภาวะที่กำหนด และมีการใช้มีเทนเป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงานใน การเจริญเติบโต โดยพบว่า ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ และดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา เกิด การออกซิเดชันมีเทนขึ้นอย่างรวดเร็ว และดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่ามเกิดการออกซิเดชันมีเทนที่ ช้ากว่า ซึ่งดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ และดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา มีเทนถูกใช้หมดไป ภายในวันที่ 11 ส่วนดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม มีเทนถูกใช้หมดไปภายในวันที่ 35 แสดงให้เห็นว่า ระยะเวลาที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการปรับสภาพตัวอย่างดินแต่ละชนิดก่อนนำไปใช้ในการศึกษาในระยะ ที่ 2 คือ 11 วัน สำหรับดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบและดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา และ 35 วัน สำหรับดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม

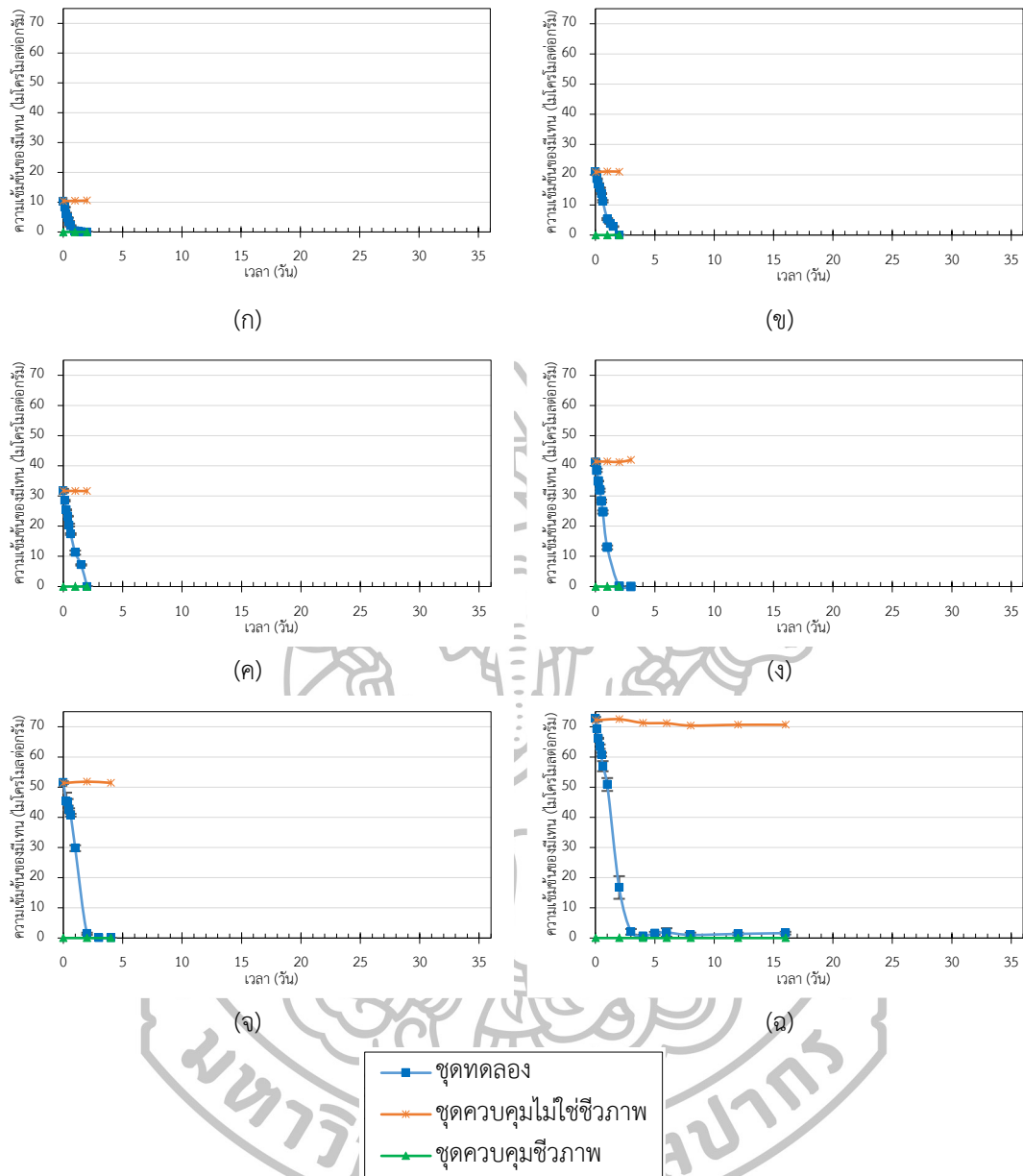
ตารางที่ 4.4 ระยะพักตัวของตัวอย่างดินทั้ง 3 ชนิด เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นของมีเทน บริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่าง (ร้อยละ)	ระยะพักตัว (วัน)	เอกสารอ้างอิง
ปุ๋ยหมัก	5	8	Mor <i>et al.</i> (2006)
ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ	5	10	Spokas and Bogner (2011)
ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ	5	5	De Visscher and Van Cleemput (2003)
ดินอนินทรีย์	10	3 – 7	Walkiewicz <i>et al.</i> (2012)
ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ	10	4	การศึกษานี้
ดินเพาะปลูกจากพื้นที่ ธรรมศาลา	10	3	การศึกษานี้
ดินเพาะปลูกจากพื้นที่ สามง่าม	10	2	การศึกษานี้

4.2.2 ผลของการบ่มตัวอย่าง (incubation) (ระยะที่ 2)

ระยะที่ 2 เป็นระยะที่ดำเนินการต่อเนื่องจากระยะที่ 1 และเรียกระยะที่ 2 นี้ว่า ระยะการบ่มตัวอย่าง (incubation) เป็นการศึกษาถึงการออกซิเดชันมีเทนที่มีความเข้มข้นในระดับต่าง ๆ กัน ในดินตัวอย่าง

สำหรับดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ และดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา มีชุดความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินที่ทำการศึกษาในระยะที่ 2 ทั้งหมด 6 ชุด ครอบคลุมช่วงความเข้มข้นร้อยละ 2 – 14 ได้แก่ ร้อยละ 2 4 6 8 10 และ 14 (โดยปริมาตร) ส่วนดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม มีชุดความเข้มข้นของมีเทนที่ทำการศึกษาในระยะที่ 2 ทั้งหมด 5 ชุด ครอบคลุมช่วงความเข้มข้นร้อยละ 2 – 10 ได้แก่ ร้อยละ 2 4 6 8 และ 10 (โดยปริมาตร) และมีผลการศึกษาถึงความเข้มข้นของมีเทนที่เปลี่ยนแปลงไปกับเวลา ดังรูปที่ 4.2 และตารางที่ 4.5 สำหรับดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ ดังรูปที่ 4.3 และตารางที่ 4.6 สำหรับดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา และดังรูปที่ 4.4 และตารางที่ 4.7 สำหรับดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม



รูปที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยและแถบข้อผิดพลาดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความชื้นสัมพัทธ์ของมีเทนที่เปลี่ยนแปลง

ในระหว่างการบ่มตัวอย่าง (ระยะที่ 2) ของดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ

- (ก) ชุดความชื้นสัมพัทธ์ของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 2 (โดยปริมาตร)
- (ข) ชุดความชื้นสัมพัทธ์ของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 4 (โดยปริมาตร)
- (ค) ชุดความชื้นสัมพัทธ์ของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 6 (โดยปริมาตร)
- (ง) ชุดความชื้นสัมพัทธ์ของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 8 (โดยปริมาตร)
- (จ) ชุดความชื้นสัมพัทธ์ของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 10 (โดยปริมาตร)
- (ฉ) ชุดความชื้นสัมพัทธ์ของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 14 (โดยปริมาตร)

ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทนที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการบ่มตัวอย่าง (ระยะที่ 2) ของดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ

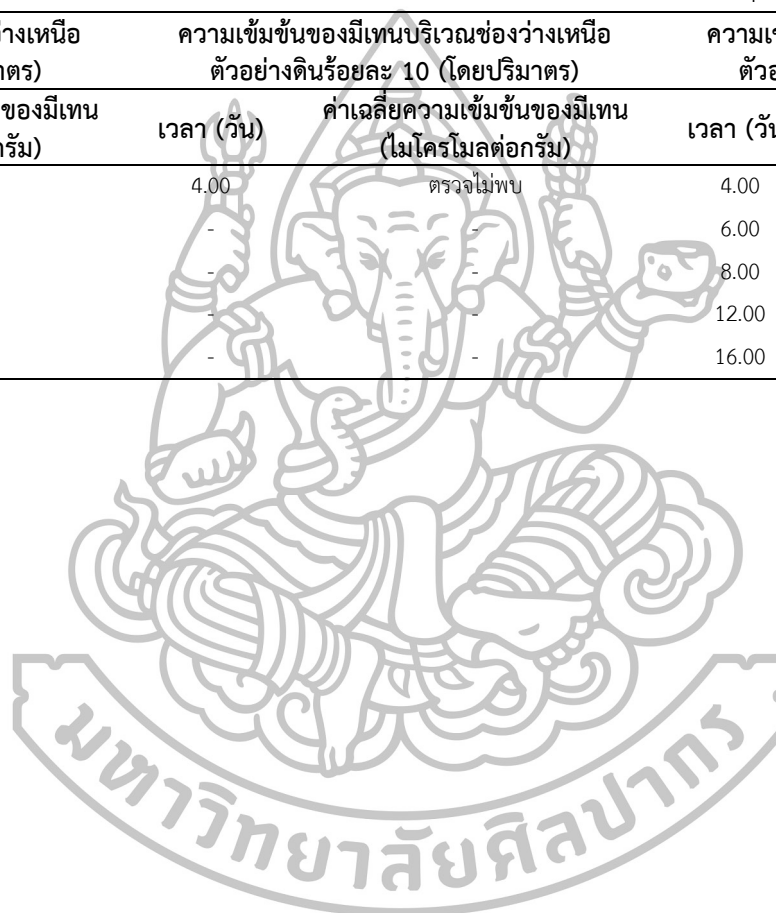
ชุดทดลอง/ชุดควบคุม	ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 2 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 4 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 6 (โดยปริมาตร)	
	เวลา (วัน)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)
ชุดทดลอง	0.00	10.29±0.15	0.00	20.82±0.31	0.00	31.75±0.59
	0.13	8.33±0.14	0.13	18.62±0.16	0.13	28.46±0.27
	0.25	6.21±0.23	0.25	16.98±0.18	0.25	25.41±0.16
	0.38	4.80±0.11	0.38	15.66±0.02	0.38	23.30±0.15
	0.50	3.44±0.21	0.50	13.73±0.03	0.50	20.36±0.45
	0.63	2.04±0.22	0.63	11.21±0.38	0.63	17.38±0.30
	1.00	0.38±0.13	1.00	5.29±0.32	1.00	11.24±0.66
	1.25	0.24±0.02	1.25	3.86±0.13	1.50	7.17±0.24
	1.50	0.13±0.03	1.50	2.81±0.14	2.00	<0.09
	2.00	<0.09	2.00	<0.09	-	-
ชุดควบคุม ไม่ใช่ชีวภาพ	0.00	10.40±0.33	0.00	20.87±0.17	0.00	31.72±0.18
	1.00	10.45±0.17	1.00	21.06±0.23	1.00	31.67±0.32
	2.00	10.55±0.09	2.00	21.02±0.13	2.00	31.63±0.19
ชุดควบคุม ชีวภาพ	0.00	ตรวจไม่พบ	0.00	ตรวจไม่พบ	0.00	ตรวจไม่พบ
	1.00	ตรวจไม่พบ	1.00	ตรวจไม่พบ	1.00	ตรวจไม่พบ
	2.00	ตรวจไม่พบ	2.00	ตรวจไม่พบ	2.00	ตรวจไม่พบ

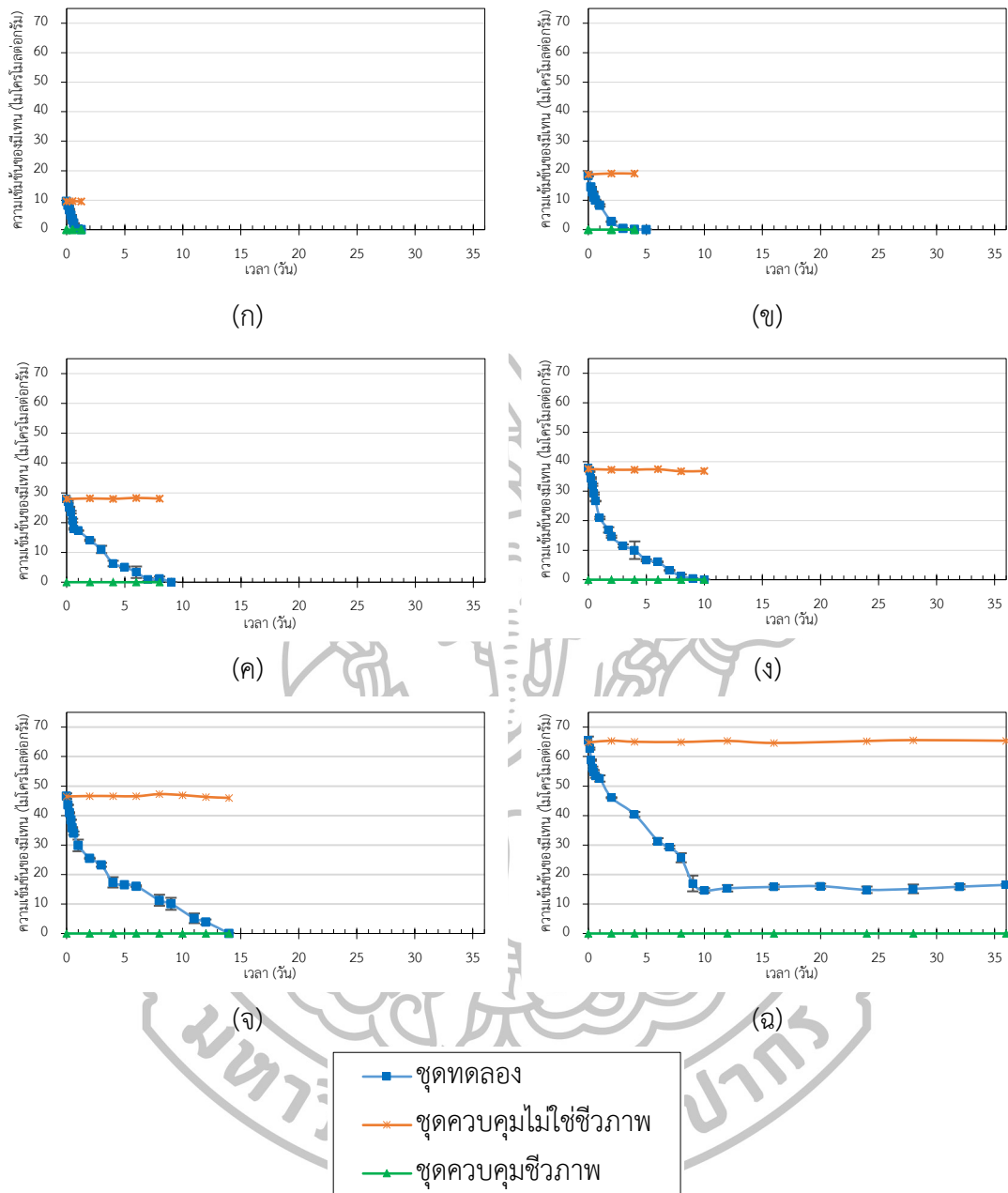
ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทนที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการบ่มตัวอย่าง (ระยะที่ 2) ของดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ (ต่อ)

ชุดทดลอง/ชุดควบคุม	ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 8 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 10 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 14 (โดยปริมาตร)	
	เวลา (วัน)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)
ชุดทดลอง	0.00	41.17±0.48	0.00	51.49±0.38	0.00	72.70±0.55
	0.13	38.50±0.54	0.25	45.30±2.87	0.13	69.31±2.53
	0.25	34.94±0.06	0.38	44.98±1.08	0.25	66.17±0.16
	0.38	31.92±0.50	0.50	42.52±0.46	0.38	63.42±0.73
	0.50	28.33±0.46	0.63	40.69±0.44	0.50	60.79±0.60
	0.63	24.68±0.52	1.00	29.77±0.97	0.63	56.93±1.68
	1.00	12.96±0.62	2.00	1.42±0.35	1.00	50.87±2.13
	2.00	<0.09	3.00	<0.09	2.00	16.75±3.75
	3.00	<0.09	4.00	<0.09	3.00	2.06±0.93
	-	-	-	-	4.00	0.68±0.41
	-	-	-	-	5.00	1.57±0.49
	-	-	-	-	6.00	1.84±1.41
	-	-	-	-	8.00	1.03±0.74
	-	-	-	-	12.00	1.37±0.42
	-	-	-	-	16.00	1.62±0.44
	ชุดควบคุม	0.00	41.38±0.04	0.00	51.33±0.48	0.00
ไม่ใช่ชีวภาพ	1.00	41.40±0.14	2.00	51.81±0.31	2.00	72.50±0.32
	2.00	41.26±0.22	4.00	51.42±0.26	4.00	71.29±0.40
	3.00	41.92±0.07	-	-	6.00	71.14±0.25
	-	-	-	-	8.00	70.40±0.86
	-	-	-	-	12.00	70.64±1.69
	-	-	-	-	16.00	70.64±1.03
ชุดควบคุม	0.00	ตรวจไม่พบ	0.00	ตรวจไม่พบ	0.00	ตรวจไม่พบ
ชีวภาพ	1.00	ตรวจไม่พบ	2.00	ตรวจไม่พบ	2.00	ตรวจไม่พบ

ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทนที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการบ่มตัวอย่าง (ระยะที่ 2) ของดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ (ต่อ)

ชุดทดลอง/ชุดควบคุม	ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 8 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 10 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 14 (โดยปริมาตร)	
	เวลา (วัน)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)
ชุดควบคุม	2.00	ตรวจไม่พบ	4.00	ตรวจไม่พบ	4.00	ตรวจไม่พบ
ชีวภาพ	3.00	ตรวจไม่พบ	-	-	6.00	ตรวจไม่พบ
	-	-	-	-	8.00	ตรวจไม่พบ
	-	-	-	-	12.00	ตรวจไม่พบ
	-	-	-	-	16.00	ตรวจไม่พบ





รูปที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยและแถบข้อผิดพลาดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความชื้นของมีเทนที่เปลี่ยนแปลง

ในระหว่างการบ่มตัวอย่าง (ระยะที่ 2) ของดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา

- (ก) ชุดความชื้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 2 (โดยปริมาตร)
- (ข) ชุดความชื้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 4 (โดยปริมาตร)
- (ค) ชุดความชื้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 6 (โดยปริมาตร)
- (ง) ชุดความชื้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 8 (โดยปริมาตร)
- (จ) ชุดความชื้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 10 (โดยปริมาตร)
- (ฉ) ชุดความชื้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 14 (โดยปริมาตร)

ตารางที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทนที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการบ่มตัวอย่าง (ระยะที่ 2) ของดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา

ชุดทดลอง/ชุดควบคุม	ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 2 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 4 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 6 (โดยปริมาตร)	
	เวลา (วัน)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)
ชุดทดลอง	0.00	9.58±0.05	0.00	18.37±0.31	0.00	27.95±0.05
	0.13	8.22±0.20	0.25	14.44±0.07	0.13	27.05±0.36
	0.25	6.71±0.33	0.38	12.76±0.18	0.25	25.25±0.08
	0.38	4.92±0.07	0.50	11.03±0.08	0.38	23.51±0.44
	0.50	3.32±0.20	0.63	10.00±0.16	0.50	20.70±0.59
	0.63	2.10±0.12	1.00	8.21±0.42	0.63	17.89±0.32
	1.00	0.13±0.01	2.00	2.70±0.17	1.00	17.34±0.16
	1.25	<0.09	3.00	0.40±0.14	2.00	14.07±0.30
	-	-	4.00	<0.09	3.00	10.99±1.23
	-	-	5.00	<0.09	4.00	6.27±0.92
	-	-	-	-	5.00	5.10±0.17
	-	-	-	-	6.00	3.35±1.94
	-	-	-	-	7.00	0.93±0.48
	-	-	-	-	8.00	1.22±0.68
-	-	-	-	9.00	<0.09	
ชุดควบคุม	0.00	9.58±0.03	0.00	18.71±0.06	0.00	27.89±0.09
ไม่ใช่ชีวภาพ	0.50	9.67±0.15	2.00	19.07±0.06	2.00	28.13±0.16
	1.25	9.55±0.01	4.00	19.00±0.14	4.00	27.98±0.08
	-	-	-	-	6.00	28.29±0.11
	-	-	-	-	8.00	28.04±0.04
ชุดควบคุม	0.00	ตรวจไม่พบ	0.00	ตรวจไม่พบ	0.00	ตรวจไม่พบ
ชีวภาพ	0.50	ตรวจไม่พบ	2.00	ตรวจไม่พบ	2.00	ตรวจไม่พบ
	1.25	ตรวจไม่พบ	4.00	ตรวจไม่พบ	4.00	ตรวจไม่พบ
	-	-	-	-	6.00	ตรวจไม่พบ
	-	-	-	-	8.00	ตรวจไม่พบ

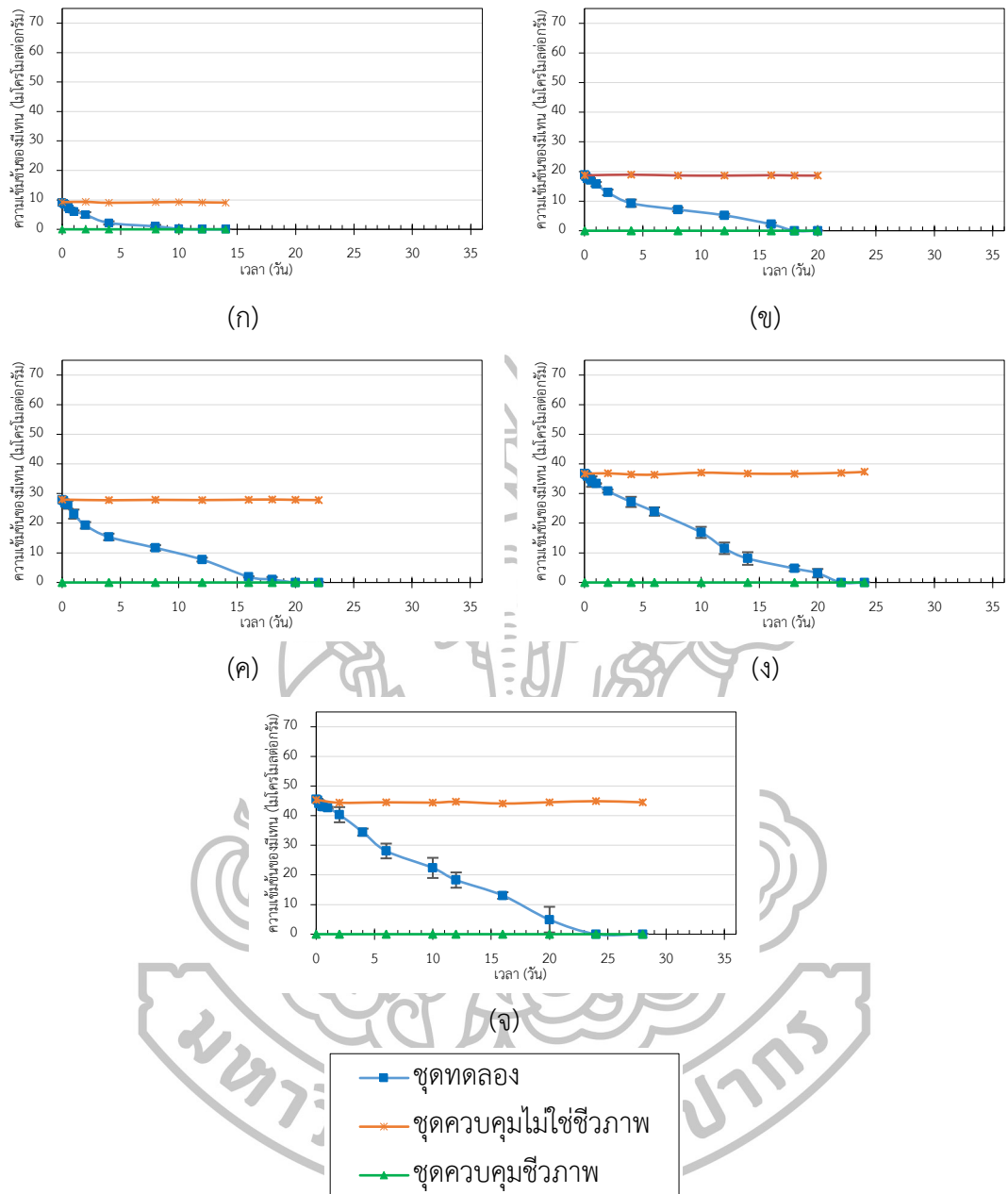
ตารางที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทนที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการบ่มตัวอย่าง (ระยะที่ 2) ของดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา (ต่อ)

ชุดทดลอง/ชุดควบคุม	ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินรื้อยละ 8 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินรื้อยละ 10 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินรื้อยละ 14 (โดยปริมาตร)	
	เวลา (วัน)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)
ชุดทดลอง	0.00	37.86±0.15	0.00	46.60±0.94	0.00	65.43±1.37
	0.13	36.78±0.25	0.13	43.62±0.18	0.13	62.68±0.36
	0.25	34.45±0.33	0.25	40.94±0.20	0.25	58.80±0.28
	0.38	32.19±0.40	0.38	38.56±0.10	0.38	56.15±0.46
	0.50	29.18±0.39	0.50	35.87±0.21	0.50	54.76±0.65
	0.63	26.65±0.14	0.63	34.02±0.58	0.63	53.37±0.58
	1.00	20.93±0.41	1.00	29.87±1.97	1.00	52.57±1.06
	1.75	16.88±0.91	2.00	25.50±0.23	2.00	46.05±0.20
	2.00	14.57±0.37	3.00	23.29±0.67	4.00	40.38±0.86
	3.00	11.45±0.51	4.00	17.34±1.76	6.00	31.33±0.98
	4.00	10.00±2.99	5.00	16.49±0.11	7.00	29.28±0.48
	5.00	6.55±0.35	6.00	16.06±0.28	8.00	25.69±1.55
	6.00	6.05±0.12	8.00	11.27±1.88	9.00	16.96±2.68
	7.00	3.13±0.21	9.00	10.07±2.04	10.00	14.60±0.78
	8.00	1.23±0.59	11.00	5.15±1.65	12.00	15.34±1.10
	9.00	0.39±0.04	12.00	3.91±0.84	16.00	15.80±0.77
	10.00	<0.09	14.00	<0.09	20.00	16.04±0.84
	-	-	-	-	24.00	14.82±1.10
	-	-	-	-	28.00	15.13±1.49
	-	-	-	-	32.00	15.87±0.86
-	-	-	-	36.00	16.49±0.24	
ชุดควบคุม	0.00	37.55±0.50	0.00	46.47±0.18	0.00	64.83±1.14
ไม่ใช่ชีวภาพ	2.00	37.31±0.27	2.00	46.63±0.12	2.00	65.39±1.94
	4.00	37.30±0.18	4.00	46.62±0.23	4.00	65.02±0.64
	6.00	37.43±0.07	6.00	46.54±0.22	8.00	64.94±0.42
	8.00	36.77±0.08	8.00	47.27±0.18	12.00	65.32±0.40

ตารางที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทนที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการบ่มตัวอย่าง (ระยะที่ 2) ของดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา (ต่อ)

ชุดทดลอง/ชุดควบคุม	ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินรื้อยละ 8 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินรื้อยละ 10 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินรื้อยละ 14 (โดยปริมาตร)	
	เวลา (วัน)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)
ชุดควบคุม	10.00	36.85±0.25	10.00	46.94±0.28	16.00	64.62±0.94
ไม่ใช่ชีวภาพ	-	-	12.00	46.31±0.09	24.00	65.28±0.71
	-	-	14.00	45.99±0.19	28.00	65.59±0.04
	-	-	-	-	36.00	65.38±0.69
	-	-	-	-	-	-
ชุดควบคุม	0.00	ตรวจไม่พบ	0.00	ตรวจไม่พบ	0.00	ตรวจไม่พบ
ชีวภาพ	2.00	ตรวจไม่พบ	2.00	ตรวจไม่พบ	2.00	ตรวจไม่พบ
	4.00	ตรวจไม่พบ	4.00	ตรวจไม่พบ	4.00	ตรวจไม่พบ
	6.00	ตรวจไม่พบ	6.00	ตรวจไม่พบ	8.00	ตรวจไม่พบ
	8.00	ตรวจไม่พบ	8.00	ตรวจไม่พบ	12.00	ตรวจไม่พบ
	10.00	ตรวจไม่พบ	10.00	ตรวจไม่พบ	16.00	ตรวจไม่พบ
	-	-	12.00	ตรวจไม่พบ	24.00	ตรวจไม่พบ
	-	-	14.00	ตรวจไม่พบ	28.00	ตรวจไม่พบ
	-	-	-	-	36.00	ตรวจไม่พบ





รูปที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยและแถบข้อผิดพลาดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความเข้มข้นของมีเทนที่เปลี่ยนแปลง

ในระหว่างการบ่มตัวอย่าง (ระยะที่ 2) ของดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม

(ก) ชุดความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 2 (โดยปริมาตร)

(ข) ชุดความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 4 (โดยปริมาตร)

(ค) ชุดความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 6 (โดยปริมาตร)

(ง) ชุดความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 8 (โดยปริมาตร)

(จ) ชุดความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 10 (โดยปริมาตร)

ตารางที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทนที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการบ่มตัวอย่าง (ระยะที่ 2) ของดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม

ชุดทดลอง/ชุดควบคุม	ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 2 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 4 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 6 (โดยปริมาตร)	
	เวลา (วัน)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)
ชุดทดลอง	0.00	9.02±0.16	0.00	18.80±0.14	0.00	27.91±0.16
	0.13	8.85±0.22	0.13	18.33±0.12	0.13	27.61±0.19
	0.25	8.43±0.38	0.25	17.62±0.33	0.25	26.80±0.32
	0.50	7.53±0.10	0.50	17.09±0.65	0.50	26.26±1.37
	0.63	6.89±0.47	1.00	15.74±0.72	1.00	23.06±1.55
	1.00	6.07±0.38	2.00	12.93±0.96	2.00	19.29±1.10
	2.00	4.93±0.92	4.00	9.30±1.22	4.00	15.37±1.11
	4.00	2.16±0.56	8.00	7.16±0.65	8.00	11.68±0.90
	8.00	1.00±0.47	12.00	5.20±0.51	12.00	7.71±0.65
	10.00	0.18±0.03	16.00	2.18±0.54	16.00	1.88±0.20
	12.00	<0.09	18.00	<0.09	18.00	1.00±0.82
	14.00	<0.09	20.00	<0.09	20.00	<0.09
	-	-	-	-	22.00	<0.09
	ชุดควบคุม	0.00	9.22±0.17	0.00	18.69±0.13	0.00
ไม่ใช่ชีวภาพ	2.00	9.32±0.05	4.00	18.93±0.55	4.00	27.76±0.05
	4.00	9.02±0.16	8.00	18.65±0.19	8.00	27.89±0.17
	8.00	9.19±0.15	12.00	18.61±0.83	12.00	27.81±0.15
	10.00	9.27±0.12	16.00	18.74±0.28	16.00	27.94±0.03
	12.00	9.17±0.26	18.00	18.64±0.01	18.00	28.00±0.08
	14.00	9.07±0.27	20.00	18.62±0.02	20.00	27.88±0.11
	-	-	-	-	22.00	27.83±0.17

ตารางที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทนที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการบ่มตัวอย่าง (ระยะที่ 2) ของดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม (ต่อ)

ชุดทดลอง/ชุดควบคุม	ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 2 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 4 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 6 (โดยปริมาตร)	
	เวลา (วัน)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)
ชุดควบคุม	0.00	ตรวจไม่พบ	0.00	ตรวจไม่พบ	0.00	ตรวจไม่พบ
ชีวภาพ	2.00	ตรวจไม่พบ	4.00	ตรวจไม่พบ	4.00	ตรวจไม่พบ
	4.00	ตรวจไม่พบ	8.00	ตรวจไม่พบ	8.00	ตรวจไม่พบ
	8.00	ตรวจไม่พบ	12.00	ตรวจไม่พบ	12.00	ตรวจไม่พบ
	10.00	ตรวจไม่พบ	16.00	ตรวจไม่พบ	16.00	ตรวจไม่พบ
	12.00	ตรวจไม่พบ	18.00	ตรวจไม่พบ	18.00	ตรวจไม่พบ
	14.00	ตรวจไม่พบ	20.00	ตรวจไม่พบ	20.00	ตรวจไม่พบ
	-	-	-	-	22.00	ตรวจไม่พบ

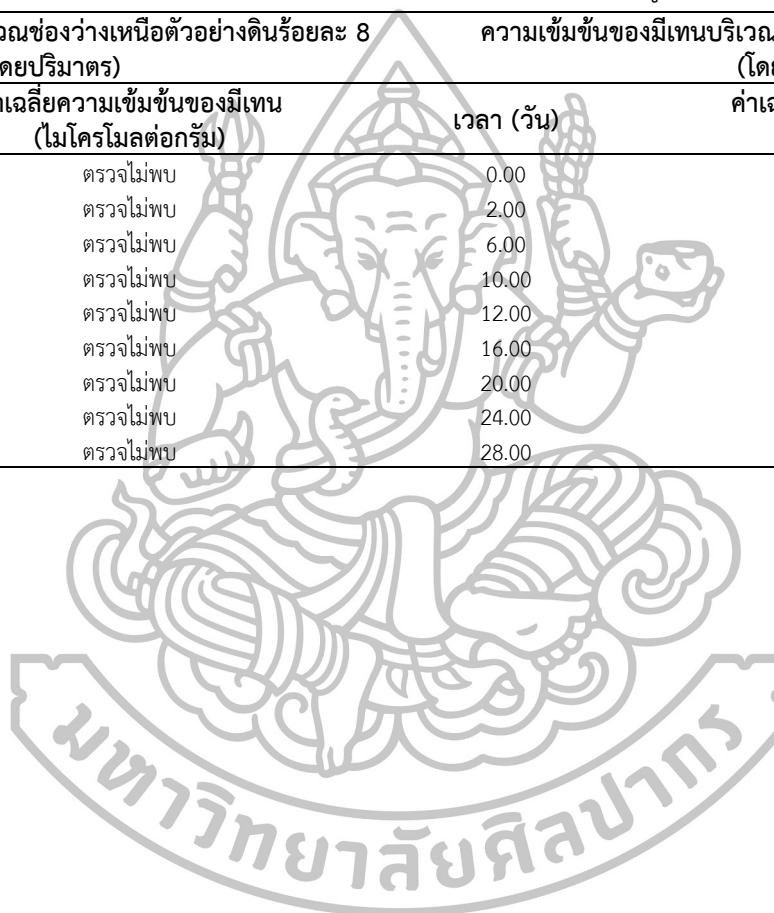


ตารางที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทนที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการบ่มตัวอย่าง (ระยะที่ 2) ของดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม (ต่อ)

ชุดทดลอง/ชุดควบคุม	ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 8 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 10 (โดยปริมาตร)	
	เวลา (วัน)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)
ชุดทดลอง	0.00	36.73±0.27	0.00	45.53±0.13
	0.13	36.43±0.27	0.13	45.17±0.52
	0.25	35.82±0.70	0.25	44.13±1.11
	0.50	34.90±0.28	0.50	43.10±0.22
	0.63	34.04±1.76	0.63	43.00±0.78
	1.00	33.42±0.07	1.00	42.65±0.34
	2.00	30.85±0.49	2.00	40.33±2.56
	4.00	27.19±1.71	4.00	34.43±1.20
	6.00	23.95±1.41	6.00	28.08±2.49
	10.00	16.90±1.88	10.00	22.38±3.40
	12.00	11.53±1.94	12.00	18.27±2.58
	14.00	8.08±2.13	16.00	13.06±1.11
	18.00	4.72±0.89	20.00	4.91±4.33
	20.00	3.12±1.43	24.00	<0.09
22.00	<0.09	28.00	<0.09	
24.00	<0.09	-	-	
ชุดควบคุม ไม่ใช่ชีวภาพ	0.00	36.67±0.74	0.00	45.36±0.32
	2.00	36.85±0.49	2.00	44.37±0.69
	4.00	36.45±0.16	6.00	44.51±0.24
	6.00	36.40±0.29	10.00	44.40±0.13
	10.00	37.05±0.07	12.00	44.69±0.12
	14.00	36.73±0.66	16.00	44.09±0.54
	18.00	36.70±0.24	20.00	44.52±0.63
	22.00	37.01±0.19	24.00	44.90±0.48
	24.00	37.33±0.05	28.00	44.51±0.23

ตารางที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทนที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการบ่มตัวอย่าง (ระยะที่ 2) ของดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม (ต่อ)

ชุดทดลอง/ชุดควบคุม	ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 8 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 10 (โดยปริมาตร)	
	เวลา (วัน)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)
ชุดควบคุม	0.00	ตรวจไม่พบ	0.00	ตรวจไม่พบ
ชีวภาพ	2.00	ตรวจไม่พบ	2.00	ตรวจไม่พบ
	4.00	ตรวจไม่พบ	6.00	ตรวจไม่พบ
	6.00	ตรวจไม่พบ	10.00	ตรวจไม่พบ
	10.00	ตรวจไม่พบ	12.00	ตรวจไม่พบ
	14.00	ตรวจไม่พบ	16.00	ตรวจไม่พบ
	18.00	ตรวจไม่พบ	20.00	ตรวจไม่พบ
	22.00	ตรวจไม่พบ	24.00	ตรวจไม่พบ
	24.00	ตรวจไม่พบ	28.00	ตรวจไม่พบ



จากรูปที่ 4.2 – รูปที่ 4.4 และ ตารางที่ 4.5 – ตารางที่ 4.7 เมื่อพิจารณาถึงชุดควบคุมไม่ใช่ชีวภาพในทุกชุดการทดลองของทุกดินตัวอย่างที่ทำการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ไม่มีการสูญหายของแก๊สมีเทนอันเนื่องมาจากกระบวนการอื่น ๆ ที่ไม่ใช่กระบวนการทางชีวภาพเกิดขึ้น เช่น การย่อยสลายที่ไม่ใช่กระบวนการทางชีวภาพ (abiotic degradation) และ การดูดซับ (sorption) เป็นต้น และเมื่อพิจารณาถึงชุดควบคุมชีวภาพในทุกชุดการทดลองของทุกดินตัวอย่างที่ทำการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ไม่มีกระบวนการสร้างมีเทนเกิดขึ้นในชุดทดลอง ดังนั้นจึงยืนยันได้ว่าความเข้มข้นของมีเทนที่เปลี่ยนแปลงไปในชุดทดลองต่าง ๆ ที่ทำการศึกษา เป็นผลมาจากกิจกรรมการย่อยสลายของเมทาโนโทรฟ

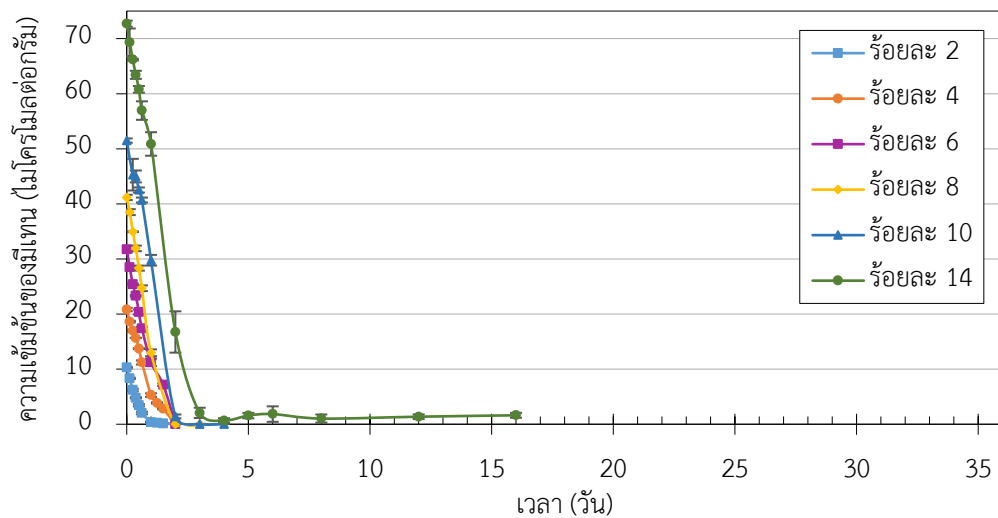
เมื่อพิจารณาถึงการออกซิเดชันของมีเทนในดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ (รูปที่ 4.2) พบว่า ในทุกชุดความเข้มข้นของมีเทนมีการลดลงของมีเทนเป็นแบบเส้นตรง (linear) จึงพิจารณาได้ว่าอัตราการออกซิเดชันมีเทนเป็นแบบปฏิกิริยาอันดับศูนย์ (zero order) แสดงให้เห็นว่าอัตราการออกซิเดชันของมีเทนไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของมีเทน

เมื่อพิจารณาถึงการออกซิเดชันของมีเทนในดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา (รูปที่ 4.3) พบว่าชุดความเข้มข้นของมีเทนร้อยละ 2 (โดยปริมาตร) แสดงการลดลงของมีเทนแบบเส้นตรง (รูปที่ 4.3 (ก)) จึงมีอัตราการออกซิเดชันมีเทนเป็นแบบปฏิกิริยาอันดับศูนย์ ส่วนชุดความเข้มข้นของมีเทนร้อยละ 4 6 8 10 และ 14 (โดยปริมาตร) แสดงการลดลงของมีเทนแบบเอกซ์โพเนนเชียล (exponential) จึงมีอัตราการออกซิเดชันมีเทนเป็นแบบปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (first – order reaction) แสดงให้เห็นว่าอัตราการออกซิเดชันมีเทนขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของมีเทน

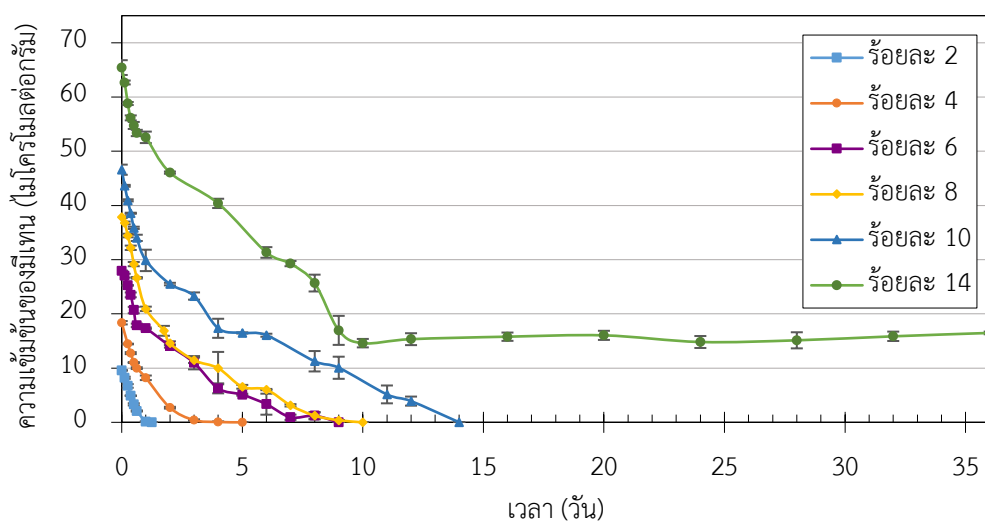
เมื่อพิจารณาถึงการออกซิเดชันของมีเทนในดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม (รูปที่ 4.4) พบว่าทุกชุดความเข้มข้นของมีเทนแสดงการลดลงของมีเทนแบบเอกซ์โพเนนเชียล จึงมีอัตราการออกซิเดชันมีเทนเป็นแบบปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

เมื่อพิจารณาภาพรวมในการออกซิเดชันมีเทนของดินแต่ละชนิดที่ทำการศึกษาระหว่างการบ่มในระยะที่ 2 ดังรูปที่ 4.5 สำหรับดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ ดังรูปที่ 4.6 สำหรับดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา และดังรูปที่ 4.7 สำหรับดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของมีเทนลดลงในทันที โดยไม่มีระยะพัก แสดงให้เห็นว่า ระยะเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเป็นเวลา 11 วัน สำหรับดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบและดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา และระยะเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเป็นเวลา 35 วัน สำหรับดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม เป็นระยะเวลาที่เพียงพอในการชักนำให้เกิดกิจกรรมการออกซิเดชันของมีเทนโดยจุลินทรีย์เมทาโนโทรฟ และเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการดำเนินกิจกรรมการออกซิเดชันของมีเทนโดยจุลินทรีย์เมทาโนโทรฟ ในช่วงความเข้มข้นร้อยละ 2 – 10 (โดยปริมาตร) ของดินทั้ง 3 ชนิด โดยพิจารณาจากระยะเวลาที่ มีเทนถูกใช้จนมีความเข้มข้นน้อยกว่า 0.09 ไมโครโมลต่อกรัม จะเห็นได้ว่า ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝัง

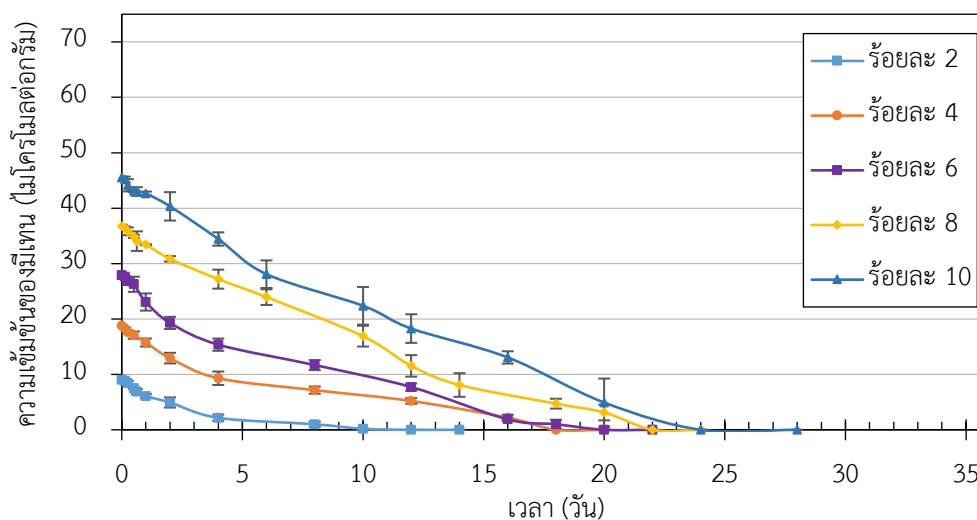
กลบมีกิจกรรมการออกซิเดชันของมีเทนโดยจุลินทรีย์เมทาโนโทรฟสูงที่สุด (มีเทนถูกใช้จนมีความเข้มข้นน้อยกว่า 0.09 ไมโครโมลต่อกรัม ในระยะเวลาไม่เกิน 2 วัน) รองลงมาคือ ดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา (มีเทนถูกใช้จนมีความเข้มข้นน้อยกว่า 0.09 ไมโครโมลต่อกรัม ในระยะเวลาไม่เกิน 15 วัน) และน้อยที่สุดในดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม (มีเทนถูกใช้จนมีความเข้มข้นน้อยกว่า 0.09 ไมโครโมลต่อกรัม ในระยะเวลาไม่เกิน 23 วัน)



รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมีเทน (ครอบคลุมช่วงความเข้มข้นร้อยละ 2 – 14) กับเวลา ในระหว่างการบ่มตัวอย่าง (ระยะที่ 2) ของดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ



รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมีเทน (ครอบคลุมช่วงความเข้มข้นร้อยละ 2 – 14) กับเวลา ในระหว่างการบ่มตัวอย่าง (ระยะที่ 2) ของดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา



รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมีเทน (ครอบคลุมช่วงความเข้มข้นร้อยละ 2 – 14) กับเวลา ในระหว่างการบ่มตัวอย่าง (ระยะที่ 2) ของดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม

อย่างไรก็ดีเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของมีเทนที่ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 14 (โดยปริมาตร) ตามเวลา จากรูปที่ 4.5 ของดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ และรูปที่ 4.6 ของดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา พบว่า มีการออกซิเดชันของมีเทนเกิดขึ้นในทันทีเช่นเดียวกันกับความเข้มข้นของมีเทนในระดับอื่น ๆ แต่เมื่อเวลาผ่านไปช่วงหนึ่งจะสังเกตเห็นว่าความเข้มข้นของมีเทนเริ่มคงที่ กล่าวคือหลังจากวันที่ 3 เป็นต้นไป (มีเทนคงเหลือ 2.06 ± 0.93 ไมโครโมลต่อกรัม หรือร้อยละ 0.4 (โดยปริมาตร)) ในดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ และ หลังจากวันที่ 10 เป็นต้นไป (มีเทนคงเหลือ 14.60 ± 0.78 ไมโครโมลต่อกรัม หรือร้อยละ 4 (โดยปริมาตร)) ในดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา แสดงให้เห็นว่าการออกซิเดชันของมีเทนหยุดลงหรือไม่มีการออกซิเดชันมีเทนเกิดขึ้น ทั้งนี้สันนิษฐานได้ว่าอาจเนื่องมาจากปริมาณออกซิเจนมีไม่เพียงพอต่อความต้องการของเมทาโนโทรฟ ซึ่งออกซิเจนเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญและจัดเป็นปัจจัยจำกัด (limiting factor) ต่อการออกซิเดชันของมีเทน

โดยทั่วไปกระบวนการทางชีวภาพในการลดปริมาณการแพร่กระจายของมีเทนจากหลุมฝังกลบมูลฝอยที่ใช้เมทาโนโทรฟในการออกซิไดซ์มีเทนให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ มีกลไกแสดงดังสมการที่ 1 (ในบทที่ 2) และเมื่อพิจารณาอัตราส่วนจำนวนโมลระหว่างออกซิเจนและมีเทนดังสมการตามทฤษฎี พบว่า เมทาโนโทรฟมีความต้องการออกซิเจน 2 โมลเพื่อใช้ในการออกซิไดซ์มีเทน 1 โมล ดังนั้นจะเห็นได้ว่าอัตราส่วนระหว่างออกซิเจนและมีเทนที่เหมาะสมตามทฤษฎีในการเกิดการออกซิเดชันจะเท่ากับ 2 : 1 และเมื่อตั้งสมมติฐานว่าในขวดซีรัมมีความเข้มข้นของออกซิเจนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินเท่ากับความเข้มข้นของออกซิเจนในบรรยากาศคือร้อยละ 21 และความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินมีความเข้มข้นตามชุดทดลองที่

กำหนด จะสามารถคำนวณอัตราส่วนระหว่างออกซิเจนและมีเทนในแต่ละชุดความเข้มข้นของมีเทน ได้ดังตารางที่ 4.8 และเมื่อพิจารณาอัตราส่วนดังกล่าว จะเห็นได้ว่ามีเพียงชุดทดลองความเข้มข้นของ มีเทนร้อยละ 14 (โดยปริมาตร) เท่านั้น ที่มีอัตราส่วนต่ำกว่าตามทฤษฎี กล่าวคือ มีอัตราส่วนระหว่าง ออกซิเจนและมีเทนเพียง 1 : 1 เท่านั้น จึงอาจเป็นสาเหตุที่ส่งผลให้การออกซิเดชันมีเทนที่เกิดขึ้นไม่ สมบูรณ์ในชุดทดลองที่มีความเข้มข้นของมีเทนร้อยละ 14 (โดยปริมาตร)

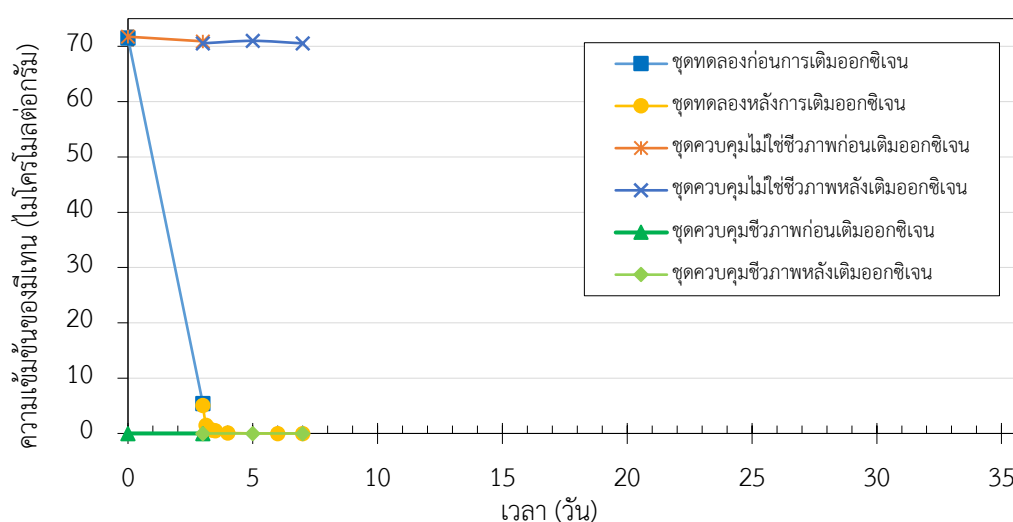
ตารางที่ 4.8 อัตราส่วนระหว่างจำนวนโมลของออกซิเจนและมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดิน

ความเข้มข้นของมีเทน บริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดิน (ร้อยละ)	จำนวนโมลของ ออกซิเจน (โมล)	จำนวนโมลของ มีเทน (โมล)	อัตราส่วนระหว่าง จำนวนโมลของ ออกซิเจนและมีเทน
2	0.00100	0.00009	11 : 1
4	0.00097	0.00020	5 : 1
6	0.00096	0.00029	3 : 1
8	0.00094	0.00039	2 : 1
10	0.00092	0.00049	2 : 1
14	0.00087	0.00069	1 : 1

เพื่อพิสูจน์สมมติฐานดังกล่าว จึงได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมว่าออกซิเจนเป็นปัจจัย จำกัดต่อการออกซิเดชันมีเทนที่ระดับความเข้มข้นเริ่มต้น ร้อยละ 14 (โดยปริมาตร) หรือไม่ ซึ่งได้ ดำเนินการทดสอบโดยการเติมออกซิเจนความเข้มข้นร้อยละ 99.9 ลงในขวดซีรัมเดิมบริเวณช่องว่าง เหนือตัวอย่างดิน และมีปริมาณการเติมโดยคำนึงถึงอัตราส่วนระหว่างออกซิเจนและมีเทนให้เป็นไป ตามทฤษฎีคือ 2 : 1 (ตารางที่ 4.9) โดยเติมออกซิเจนปริมาณ 1 มิลลิลิตร ในดินจากชั้นปิดทับหลุมฝัง กลบ และเติมออกซิเจนปริมาณ 10 มิลลิลิตร ในดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา หลังจากนั้นทำการ ติดตามการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมีเทนทุกวันจนกว่าความเข้มข้นของมีเทนมีค่าน้อยกว่า 0.09 ไมโครโมลต่อกรัม หรือประมาณร้อยละ 0.02 (โดยปริมาตร) สำหรับผลจากการตรวจติดตามการ เปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมีเทนในดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ แสดงดังรูปที่ 4.8 และตารางที่ 4.10 ส่วนในดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา แสดงดังรูปที่ 4.9 และตารางที่ 4.11 สำหรับ รายละเอียดของผลวิเคราะห์ที่นำมาใช้หาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแสดงในภาคผนวก ข

ตารางที่ 4.9 อัตราส่วนระหว่างออกซิเจนและมีเทนที่จุดความเข้มข้นของมีเทนร้อยละ 14 (โดยปริมาตร) หลังจากการเติมออกซิเจน

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นมีเทนที่เหลือ (โมล)	ความเข้มข้นของออกซิเจนที่ใส่เพิ่มเติม (โมล)	อัตราส่วนระหว่างออกซิเจนและมีเทน
ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ	17.8	44.58	2.5 : 1
ดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา	178.3	445.8	2.5 : 1



รูปที่ 4.8 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทนที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการบ่มตัวอย่าง (ระยะที่ 2) ของดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบมูลฝอย ที่จุดความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 14 (โดยปริมาตร) ซึ่งมีการทดลองเติมออกซิเจน

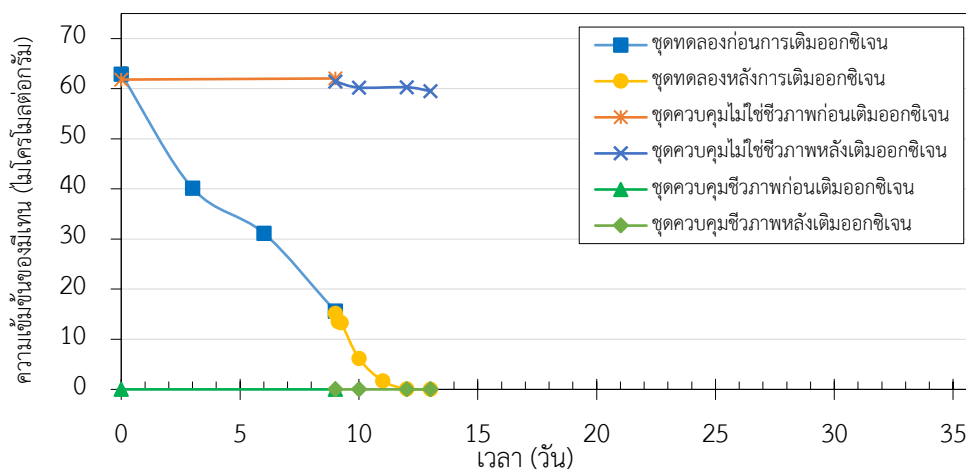
ตารางที่ 4.10 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทนที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการบ่มตัวอย่าง (ระยะที่ 2) ของดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ ที่จุดความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 14 (โดยปริมาตร) ซึ่งมีการทดลองเติมออกซิเจน

จุดทดลอง/จุดควบคุม	ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 14 (โดยปริมาตร)	
	เวลา (วัน)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)
จุดทดลอง	0.00	71.51±0.62
	3.00	5.41±0.47
	3.00*	5.07±0.24

ตารางที่ 4.10 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทนที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการบ่มตัวอย่าง (ระยะที่ 2) ของดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ ที่ชุดความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 14 (โดยปริมาตร) ซึ่งมีการทดลองเติมออกซิเจน (ต่อ)

ชุดทดลอง/ชุดควบคุม	ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 14 (โดยปริมาตร)	
	เวลา (วัน)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)
	3.13*	1.51±0.24
	3.25*	0.80±0.06
	3.38*	0.63±0.21
	3.50*	0.48±0.06
	4.00*	0.09±0.06
	6.00*	<0.09
	7.00*	<0.09
ชุดควบคุม	0.00	71.74±0.99
ไม่ใช่ชีวภาพ	3.00	70.90±0.69
	3.00*	70.54±0.38
	5.00*	70.99±0.73
	7.00*	70.53±0.31
ชุดควบคุม	0.00	ตรวจไม่พบ
ชีวภาพ	3.00	ตรวจไม่พบ
	3.00*	ตรวจไม่พบ
	5.00*	ตรวจไม่พบ
	7.00*	ตรวจไม่พบ

หมายเหตุ: * คือ ผลของการติดตามการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 14 (โดยปริมาตร) หลังจากการทดลองเติมออกซิเจน



รูปที่ 4.9 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทนที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการบ่มตัวอย่าง (ระยะที่ 2) ของดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา ที่ชุดความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 14 (โดยปริมาตร) ซึ่งมีการทดลองเติมออกซิเจน

ตารางที่ 4.11 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทนที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการบ่มตัวอย่าง (ระยะที่ 2) ของดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา ที่ชุดความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 14 (โดยปริมาตร) ซึ่งมีการทดลองเติมออกซิเจน

ชุดทดลอง/ชุดควบคุม	ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 14 (โดยปริมาตร)	
	เวลา (วัน)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)
ชุดทดลอง	0.00	62.89±0.92
	3.00	40.16±0.85
	6.00	31.15±0.99
	9.00	15.61±0.61
	9.00*	15.17±0.70
	9.13*	13.50±0.12
	9.25*	13.33±0.11
	10.00*	6.19±0.55
	11.00*	1.70±0.20
	12.00*	0.09±0.04
	13.00*	<0.09

ตารางที่ 4.11 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทนที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการบ่มตัวอย่าง (ระยะที่ 2) ของดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา ที่ชุดความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 14 (โดยปริมาตร) ซึ่งมีการทดลองเติมออกซิเจน (ต่อ)

ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 14		
ชุดทดลอง/ชุดควบคุม	(โดยปริมาตร)	
	เวลา (วัน)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)
ชุดควบคุม	0.00	61.82±0.57
ไม่ใช่ชีวภาพ	9.00	62.05±1.65
	9.00*	61.44±1.71
	10.00*	60.23±1.05
	12.00*	60.29±0.98
	13.00*	59.53±0.23
ชุดควบคุม	0.00	ตรวจไม่พบ
ชีวภาพ	9.00	ตรวจไม่พบ
	9.00*	ตรวจไม่พบ
	10.00*	ตรวจไม่พบ
	12.00*	ตรวจไม่พบ
	13.00*	ตรวจไม่พบ

หมายเหตุ : * คือ ผลของการติดตามการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 14 (โดยปริมาตร) หลังจากการเติมออกซิเจน

เมื่อพิจารณาถึงผลที่เกิดขึ้นจากการเติมออกซิเจนเพิ่มเติมลงไปในตัวอย่งดิน พบว่าความเข้มข้นของมีเทนลดลงอย่างต่อเนื่องจนมีค่าน้อยกว่า 0.09 ไมโครโมลต่อกรัม ภายในเวลา 6 วัน สำหรับดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ (รูปที่ 4.8) และภายในเวลา 13 วัน สำหรับดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา (รูปที่ 4.9) แสดงให้เห็นว่า ปริมาณมีเทนที่คงเหลืออยู่ในการทดลองบ่มตัวอย่างด้วยมีเทนความเข้มข้น ร้อยละ 14 (โดยปริมาตร) ในดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบและดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา มีสาเหตุมาจากการมีออกซิเจนไม่เพียงพอต่อการออกซิเดชันของมีเทน จึงสามารถสรุปได้ว่าออกซิเจนเป็นปัจจัยจำกัดต่อการออกซิเดชันของมีเทน

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบปริมาณมีเทนที่คงเหลืออยู่ในการทดลองที่บ่มตัวอย่างด้วยมีเทนความเข้มข้น ร้อยละ 14 (โดยปริมาตร) ในดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบและดินเพาะปลูกจาก

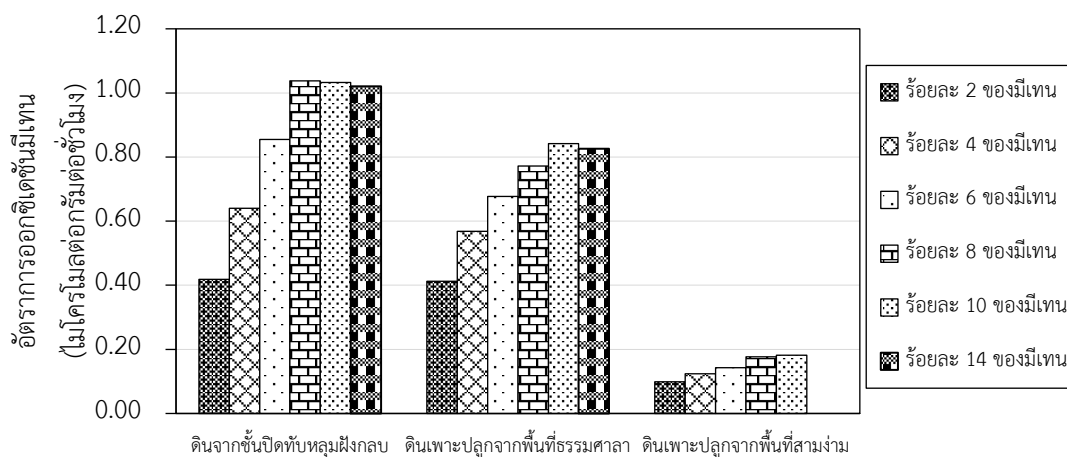
พื้นที่ธรรมศาลา จะเห็นได้ว่า ดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลามีปริมาณมีเทนคงเหลืออยู่สูงกว่าในดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลามีกิจกรรมการออกซิเดชันของมีเทนโดยจุลินทรีย์เมทาโนโทรฟต่ำกว่าดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ จึงใช้ออกซิเจนไปในกระบวนการออกซิเดชันได้ช้ากว่า ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่ในระบบถูกแย่งใช้โดยจุลินทรีย์กลุ่มอื่น ๆ เช่น แบคทีเรียกลุ่ม Actinomycetes ในสกุล *Streptomyces* *Nocardia* และ *Micromonospora* เป็นต้น แบคทีเรียกลุ่ม Chemoautotroph ในสกุล *Nitrosomonas* *Nitrobacter* เป็นต้น และกลุ่ม Heterotrophs ในสกุล *Azotobacter* *Arthrobacter* และ *Azotomonas* เป็นต้น (Gobat *et al.*, 2004) ที่มีอยู่ในดินด้วยได้ จึงก่อให้เกิดสภาวะการขาดแคลนออกซิเจนในระดับที่รุนแรงกว่า และส่งผลให้ปริมาณมีเทนคงเหลืออยู่ในระบบสูงกว่าได้

4.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการออกซิเดชันของมีเทนในตัวอย่างดินทั้ง 3 ชนิด

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการออกซิเดชันมีเทนในตัวอย่างดินทั้ง 3 ชนิด โดยการศึกษาอัตราการออกซิเดชันมีเทนสูงสุด (maximum methane oxidation rate) ของดินที่ใช้ในการศึกษา ซึ่งใช้วิธีวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (linear regression analysis) ของการสร้างกราฟที่พลอตระหว่าง การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม) ที่เกิดขึ้นในระยะแรก (initial concentration) ในแต่ละความเข้มข้น กับเวลาที่ 0 – 24 ชั่วโมง (Walkiewicz *et al.*, 2012) และหาอัตราการออกซิเดชันมีเทนสูงสุดจากค่าความชันของกราฟในแต่ละความเข้มข้นของมีเทน (Gulledge *et al.*, 2004; Walkiewicz *et al.*, 2012) ได้ผลการศึกษาอัตราการออกซิเดชันมีเทนสูงสุดของดินทั้ง 3 ชนิด ในแต่ละความเข้มข้นของมีเทนที่ทำการศึกษาดังตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.10

ตารางที่ 4.12 อัตราการออกซิเดชันมีเทนของดินที่ใช้ในการศึกษา

ความเข้มข้นของมีเทน บริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดิน (ร้อยละ)	อัตราการออกซิเดชันมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัมต่อชั่วโมง)		
	ดินจากชั้นปิดทับ หลุมฝังกลบ	ดินเพาะปลูกจาก พื้นที่ธรรมศาลา	ดินเพาะปลูกจาก พื้นที่สามง่าม
2	0.418 ($R^2 = 0.93$)	0.412 ($R^2 = 0.96$)	0.099 ($R^2 = 0.95$)
4	0.640 ($R^2 = 0.99$)	0.568 ($R^2 = 0.99$)	0.124 ($R^2 = 0.97$)
6	0.855 ($R^2 = 0.99$)	0.677 ($R^2 = 0.97$)	0.143 ($R^2 = 0.95$)
8	1.038 ($R^2 = 0.99$)	0.772 ($R^2 = 0.98$)	0.177 ($R^2 = 0.98$)
10	1.032 ($R^2 = 1.0$)	0.843 ($R^2 = 1.0$)	0.182 ($R^2 = 0.95$)
14	1.021 ($R^2 = 0.99$)	0.826 ($R^2 = 0.96$)	-



รูปที่ 4.10 อัตราการออกซิเดชันมีเทนในตัวอย่างดินทั้ง 3 ชนิด

เมื่อพิจารณาอัตราการออกซิเดชันมีเทนสูงสุดในแต่ละความเข้มข้นของมีเทน (ตารางที่ 4.12 และ รูปที่ 4.10) พบว่าในระยะที่ความเข้มข้นของมีเทนต่ำ ค่าอัตราการออกซิเดชันมีเทนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งความเข้มข้นของมีเทนมีค่าสูงมากขึ้น อัตราการออกซิเดชันมีเทนจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ช้าลงจนในที่สุดอัตราเร็วของการออกซิเดชันมีเทนมีค่าคงที่ไม่สามารถเพิ่มได้อีก ซึ่งอัตราการออกซิเดชันมีเทนมีค่าสูงสุดในดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ มีค่าสูงในดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา และมีค่าต่ำในดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม อย่างไรก็ตามตัวอย่างดินทั้ง 3 ชนิด ยังมีความสามารถในการลดการแพร่กระจายมีเทนจากหลุมฝังกลบได้ และเมื่อนำอัตราการออกซิเดชันมีเทนสูงสุดของดินที่ใช้ในการศึกษามาเปรียบเทียบกับการศึกษาอื่น ๆ ในตารางที่ 4.13 พบว่าความสามารถและประสิทธิภาพในการออกซิเดชันมีเทนในดินแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน ทั้งนี้อาจเป็นผลสืบเนื่องมาจากลักษณะทางกายภาพและเคมีของดินและสภาพแวดล้อมที่ต่างกันจึงส่งผลให้การดำเนินกิจกรรมของเมทาโนโทรฟมีความแตกต่างกัน

ตารางที่ 4.13 อัตราการออกซิเดชันมีเทนสูงสุดของดินแต่ละชนิดเมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่ทำการทดลองแบบแบตช์ (batch experiments)

อุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มตัวอย่าง (องศาเซลเซียส)	อัตราการออกซิเดชันมีเทนสูงสุด (ไมโครโมลต่อกรัมต่อชั่วโมง)	แหล่งข้อมูล
25	0.16	Whalen <i>et al.</i> (1990)
20	1.7	Kightley <i>et al.</i> (1995)
20	0.33 – 0.67	Gebert <i>et al.</i> (2003)
25	0.137 – 0.550	Walkiewicz <i>et al.</i> (2012)
25	0.099 – 1.038	การศึกษานี้

ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบมีความสามารถและประสิทธิภาพในการออกซิเดชันมีเทนได้ดีกว่าดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา และดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่ามตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการมีลักษณะทางกายภาพและทางเคมีที่ต่างกัน (ตารางที่ 4.1) จึงส่งผลให้อัตราการออกซิเดชันของมีเทนในตัวอย่างดินแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน ซึ่งอาจมาจากเหตุผลต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ (1) พีเอชในดิน จากการศึกษาของ Hanson and Hanson (1996) ที่พบว่าช่วงของค่าพีเอชที่เหมาะสมคือ 5.5 – 8.5 และถ้าค่าพีเอชต่ำกว่า 5 เมทาโนโทรฟจะไม่สามารถเจริญเติบโตได้ สำหรับการศึกษาที่พบว่าดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบมีค่าพีเอชสูงสุด (พีเอช 8.4) แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการเกิดกิจกรรมของเมทาโนโทรฟได้มากที่สุดและส่งผลต่อประสิทธิภาพในการออกซิเดชันของมีเทนที่ดีที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Walkiewicz *et al.* (2012) พบว่าค่าพีเอชที่สูง (พีเอช 8.5) จะมีประสิทธิภาพในการออกซิเดชันมีเทนที่ดีที่สุด สำหรับค่าพีเอชของตัวอย่างดินอื่น ๆ ได้แก่ ดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา (พีเอช 6.9) และดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม (พีเอช 7.4) กล่าวได้ว่ามีค่าพีเอชที่สามารถเกิดการออกซิเดชันมีเทนได้ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Whitenbury *et al.* (1970) ที่พบว่าค่าพีเอชที่เมทาโนโทรฟสามารถเจริญเติบโตได้คือ 5.8 – 7.4 (2) สารอินทรีย์ในดิน จากการศึกษาของ Humer and Lechner (2001) Christophersen *et al.* (2000) และ Visvanathan *et al.* (1999) พบว่า อัตราการออกซิเดชันของมีเทนเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณสารอินทรีย์ในดินเพิ่มสูงขึ้น และจากการทดสอบโดยการบ่มดิน (soil incubation test) ของ Christophersen *et al.* (2000) พบว่า ดินที่มีปริมาณสารอินทรีย์สูงกว่าให้ประสิทธิภาพในการลดการแพร่กระจายของมีเทนโดยการออกซิเดชันได้ดีกว่าดินที่มีปริมาณสารอินทรีย์ต่ำกว่า ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Visvanathan *et al.* (1999) พบว่า ในดินที่มีสารอินทรีย์สูงกว่าส่งผลให้มีอัตราการออกซิเดชันของมีเทนที่สูงกว่าด้วย และจากการศึกษาที่พบว่าดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบมีปริมาณอินทรีย์วัตถุสูงที่สุด (ร้อยละ 3.04) รองลงมาคือในดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา (ร้อยละ 2.39) และมีค่าต่ำที่สุดในดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม (ร้อยละ 0.91) ซึ่งอาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบมีอัตราการออกซิเดชันที่ดีกว่าดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลาและดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม ตามลำดับ และ (3) ความหนาแน่นรวมของดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบที่มีความหนาแน่นรวมน้อยที่สุด (294 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) เมื่อเทียบกับดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา (369 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) และดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม (1,658 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ค่าความหนาแน่นรวมสามารถบอกได้ถึงการประมาณการณ์ความพรุนและปริมาณอากาศบริเวณช่องว่างในตัวอย่างดินได้ ซึ่งการที่ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบมีค่าความหนาแน่นรวมน้อยที่สุดแสดงถึงการมีปริมาณอากาศบริเวณช่องว่างในตัวอย่างดินที่มากส่งผลให้มีออกซิเจนภายในตัวอย่างดินมากจึงเกิดอัตราการออกซิเดชันมากขึ้นนั่นเอง (McTaggart *et al.*, 2008; Gebert *et al.*, 2011; Prajapati, 2013)

นอกจากลักษณะทางกายภาพและเคมีจะเป็นปัจจัยที่ทำให้ประสิทธิภาพการออกซิเดชันมีเทนต่างกันแล้ว กระบวนการทางชีวภาพก็เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการออกซิเดชันมีเทนด้วย เช่น อัตราส่วนระหว่างออกซิเจนและมีเทน สำหรับการลดการแพร่ระบายนีเทนด้วยเมทาโนโทรฟ จำเป็นต้องใช้อัตราส่วนระหว่างออกซิเจนและมีเทน เท่ากับ 2 : 1 เพื่อออกซิไดซ์มีเทนให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ อีกทั้งความเข้มข้นของออกซิเจนยังเป็นปัจจัยที่สำคัญและเป็นปัจจัยจำกัดอีกด้วย ซึ่งถ้าอัตราส่วนระหว่างออกซิเจนและมีเทนมีค่ามากกว่า 3 : 1 จะไม่มีผลกระทบต่อออกซิเดชันมีเทน แต่ถ้าอัตราส่วนระหว่างออกซิเจนและมีเทนมีค่าน้อยกว่า 3 : 1 จะเกิดผลในทางลบกับอัตราการออกซิเดชันมีเทนของเมทาโนโทรฟกล่าวคือปริมาณของออกซิเจนไม่เพียงพอต่อความต้องการของเมทาโนโทรฟในการเจริญเติบโตและออกซิไดซ์มีเทน ซึ่งอัตราส่วนระหว่างออกซิเจนและมีเทนที่เหมาะสมจะเท่ากับ 3 : 1 และเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมมากกว่าอัตราส่วนตามทฤษฎี (Sadasiyam and Reddy, 2014)

นอกจากอัตราส่วนระหว่างออกซิเจนและมีเทนแล้ว ยังพบปัจจัยที่มีบทบาทสำคัญอีกปัจจัยหนึ่ง คืออัตราส่วนระหว่างมีเทนและไนโตรเจน ซึ่งจัดได้ว่าเป็นปัจจัยจำกัดอีกปัจจัยหนึ่งสำหรับการออกซิเดชันมีเทน ซึ่งอัตราส่วนระหว่างมีเทนและไนโตรเจนที่เหมาะสมคือ 4 : 1 (Scheutz *et al.* (2009) กล่าวคือเมทาโนโทรฟจะดูดซึมคาร์บอนของมีเทน 1 โมล จำเป็นต้องใช้ไนโตรเจน 4 โมล และจากการศึกษาของ Anthony (1982) พบว่าหากอัตราส่วนระหว่างมีเทนและไนโตรเจนมีค่ามากกว่า 10 : 1 จะส่งผลให้ไนโตรเจนเป็นปัจจัยจำกัด สำหรับการศึกษาเมื่อพิจารณาจากความเข้มข้นสูงสุดของมีเทนในตัวอย่างดินแต่ละชนิด ได้แก่ ความเข้มข้นสูงสุดของดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบและดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา คือ ร้อยละ 14 (โดยปริมาตร) และความเข้มข้นสูงสุดของดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม คือ ร้อยละ 10 (โดยปริมาตร) ซึ่งสามารถนำมาคำนวณจำนวนโมลของความเข้มข้นสูงสุดของมีเทนในตัวอย่างดินที่ศึกษาดังตารางที่ 4.14 และเมื่อพิจารณาความเข้มข้นของไนโตรเจนในตัวอย่างดินที่ใช้ศึกษา (ตารางที่ 4.1) สามารถคำนวณจำนวนโมลของไนโตรเจนของตัวอย่างดินได้ดังตารางที่ 4.14 ซึ่งจากการพิจารณาจำนวนโมลของมีเทนและไนโตรเจนเพื่อนำมาคำนวณหาอัตราส่วนระหว่างมีเทนและไนโตรเจน (ดังตาราง 4.14) พบว่าไนโตรเจนมีปริมาณเพียงพอต่อความต้องการของเมทาโนโทรฟ แสดงให้เห็นว่าไนโตรเจนไม่ใช่ปัจจัยจำกัดต่อการออกซิเดชันมีเทนของตัวอย่างดินที่ใช้ในการศึกษา

ตารางที่ 4.14 อัตราส่วนระหว่างมีเทนและไนโตรเจนของตัวอย่างดินที่ใช้ในการศึกษา

ตัวอย่างดิน	ความเข้มข้นที่ สูงสุดของมีเทน (ไมโครโมล)	ความเข้มข้น ของไนโตรเจน (ไมโครโมล)	อัตราส่วนระหว่าง มีเทนและไนโตรเจน
ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ	654	1200	0.55 : 1
ดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา	654	860	0.76 : 1
ดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม	455	430	1.06 : 1

ลักษณะทางกายภาพและเคมีของดินส่งผลต่อการช่วยส่งเสริมหรือยับยั้งการทำงานของเมทาโนโทรฟในตัวอย่างดินแต่ละชนิดให้มีความแตกต่างกัน โดยที่กล่าวมาข้างต้นเป็นปัจจัยที่ช่วยส่งเสริมการทำงานของเมทาโนโทรฟ และเป็นปัจจัยที่ทำให้ประสิทธิภาพการออกซิเดชันมีเทนของตัวอย่างดินแต่ละชนิดแตกต่างกัน แต่สำหรับการยับยั้งการทำงานของเมทาโนโทรฟนั้น สามารถเกิดขึ้นจากหลายปัจจัย เช่น มีสารตัวอื่น ๆ แข่งแย่งกับมีเทนในการเข้าจับกับเอนไซม์เอ็มเอ็มโอ สารตัวอื่น ๆ เช่น ไดฟลูออโรมีเทน (difluoromethane) ไดคลอโรมีเทน (dichloromethane) เมทิลฟลูออไรด์ (methyl fluoride) อะเซติลีน (acetylene) เอทิลีน (ethylene) และแอมโมเนียม เป็นต้น สารเหล่านี้อาจพบในสารกำจัดศัตรูพืชซึ่งพบมากในดินเพาะปลูก อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อออกซิเดชันของมีเทน เช่น เลนาซิล (lenacil) ไมคาโด (mikado) ออกซาไดซิล (oxadixyl) อาทราซีน (atrazine) ไดเมทีนามิด (dimethenamid) เป็นต้น (Sadasivam and Reddy, 2014) ซึ่งอาจพบได้ในดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบแต่มีปริมาณที่น้อยกว่าดินเพาะปลูกถึง 10 เท่า (Scheutz *et al.*, 2009)

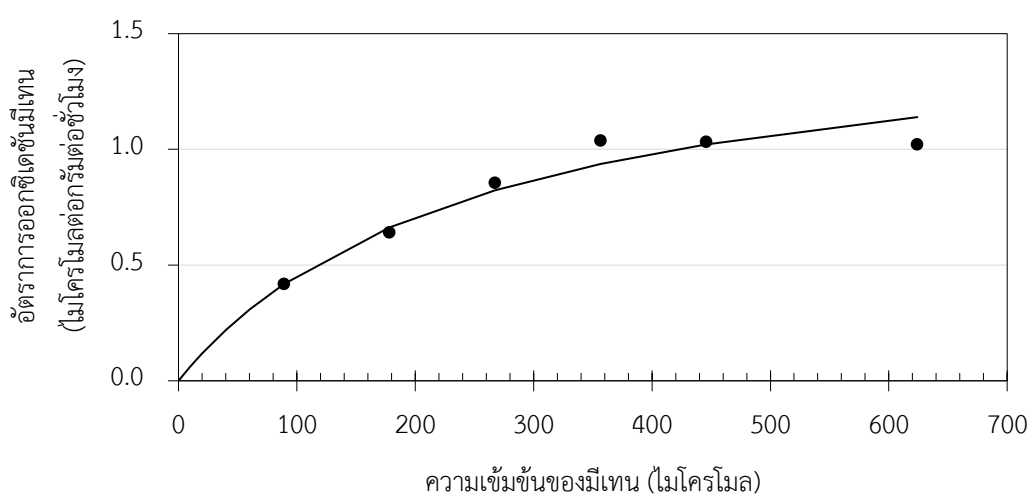
มีงานวิจัยต่าง ๆ ที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับการยับยั้งการทำงานของเมทาโนโทรฟ เช่น จากการศึกษาของ Arif *et al.* (1996) พบว่าการใช้สารออกซินสังเคราะห์ (2,4-dichlorophenoxyacetic acid) ในปริมาณ 5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ส่งผลให้เกิดการยับยั้งการออกซิเดชันมีเทนขึ้น Borjesson (2001) พบว่าเมทาเนทีโอล (methanethiol) และคาร์บอนไดซัลไฟด์ (Carbon disulfide) เป็นตัวยับยั้งการออกซิเดชันมีเทนในหลุมฝังกลบ De Visscher and Van Cleemput (2003) ได้ทำการศึกษาผลของแอมโมเนียมไนโตรเจนต่อการตอบสนองของกิจกรรมของเมทาโนโทรฟ พบว่าแอมโมเนียมไนโตรเจนมีผลยับยั้งการออกซิเดชันมีเทนเช่นเดียวกัน

ดังนั้นดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่ามมีอัตราการออกซิเดชันต่ำที่สุดอาจมีสาเหตุมาจากการใช้ปุ๋ยเคมีและสารกำจัดศัตรูพืช เช่น อาทราซีน อามิทริน เป็นต้น ซึ่งสารเหล่านี้จะส่งผลทำให้เกิดการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์เอ็มเอ็มโอ ซึ่งเมทาโนโทรฟจะใช้เอนไซม์เอ็มเอ็มโอสำหรับเร่งปฏิกิริยาการออกซิเดชันมีเทนให้กลายเป็นเมทานอล และดังที่กล่าวมาแล้วว่าสารกำจัดศัตรูพืชจะพบในดิน

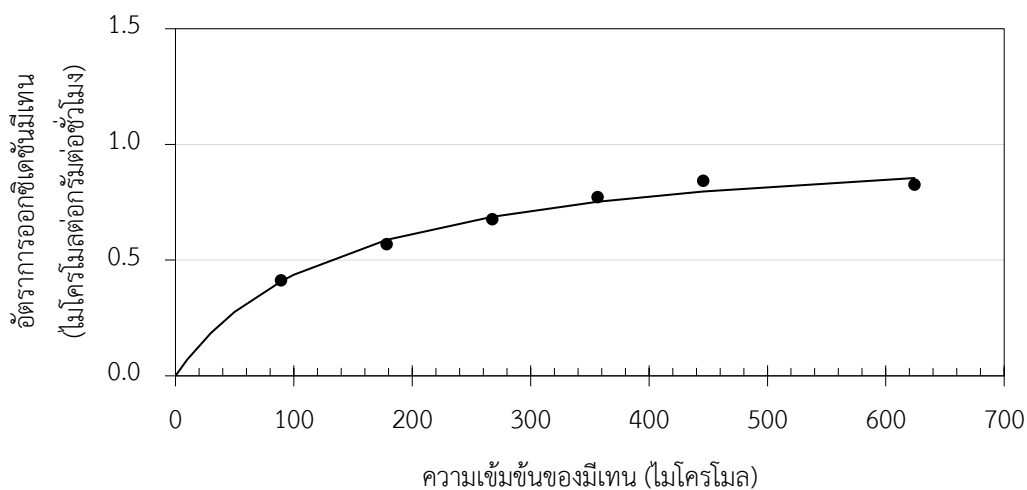
เพาะปลูกมากกว่าดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบถึง 10 เท่า จึงอาจเป็นเหตุผลที่ทำให้ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบมีอัตราการออกซิเดชันมีเทนที่สูงที่สุด

4.4 จลนพลศาสตร์ของการออกซิเดชันมีเทนในดินที่ศึกษา

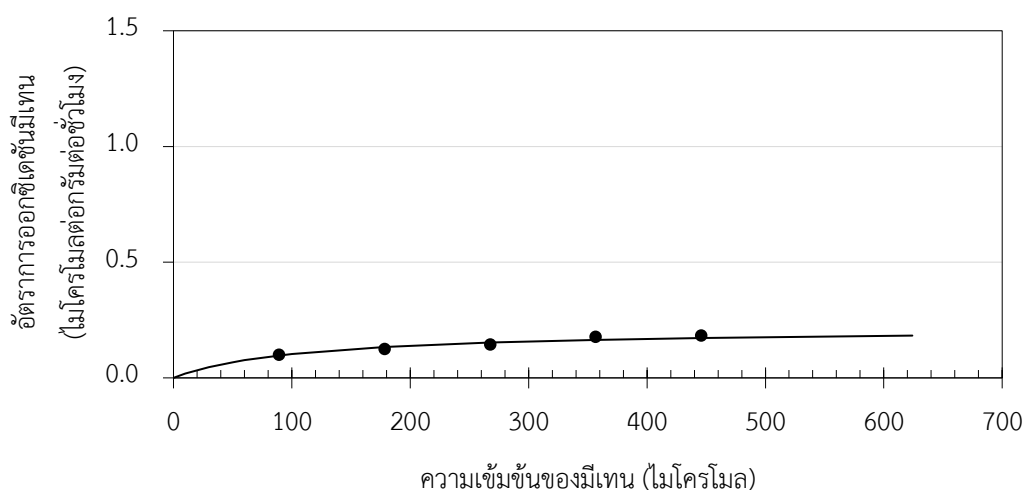
การหาค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ของการออกซิเดชันมีเทนในดินที่ทำการศึกษา โดยนำอัตราการออกซิเดชันมีเทนสูงสุดของแต่ละความเข้มข้นมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมล) กับอัตราการออกซิเดชันมีเทนสูงสุด (ไมโครโมลต่อกรัมต่อชั่วโมง) มีผลการศึกษาดังรูปที่ 4.11 สำหรับดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ ดังรูปที่ 4.12 สำหรับดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา และ ดังรูปที่ 4.13 สำหรับดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม พบว่า การออกซิเดชันมีเทนในดินทั้ง 3 ชนิดเป็นไปตามกลไกของไมเคิลลิส – เมนเทน (Michaelis – Menten mechanism) ที่เป็นลักษณะเฉพาะของปฏิกิริยาที่ใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งในการเกิดปฏิกิริยา โดยมีลักษณะกราฟเป็นแบบไฮเพอร์โบลา ซึ่งในระยะที่ความเข้มข้นของมีเทนต่ำ ค่าอัตราการออกซิเดชันมีเทนเริ่มต้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงมีอัตราการออกซิเดชันมีเทนเป็นแบบปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง แสดงให้เห็นว่าอัตราการออกซิเดชันมีเทนขึ้นกับความเข้มข้นของมีเทน จนกระทั่งความเข้มข้นของมีเทนมีค่าสูงมากขึ้น ค่าอัตราการออกซิเดชันมีเทนจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ช้าลงจนถึงจุดอิ่มตัวในที่สุด ทำให้อัตราเร็วของการออกซิเดชันมีเทนมีค่าคงที่ไม่สามารถเพิ่มได้อีก พบว่าอัตราการออกซิเดชันมีเทนเป็นแบบปฏิกิริยาอันดับศูนย์ แสดงให้เห็นว่าอัตราการออกซิเดชันมีเทนไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของมีเทน (Spokas and Bogner, 2011; Wang *et al.*, 2011)



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของมีเทนและอัตราการออกซิเดชันมีเทนของดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ



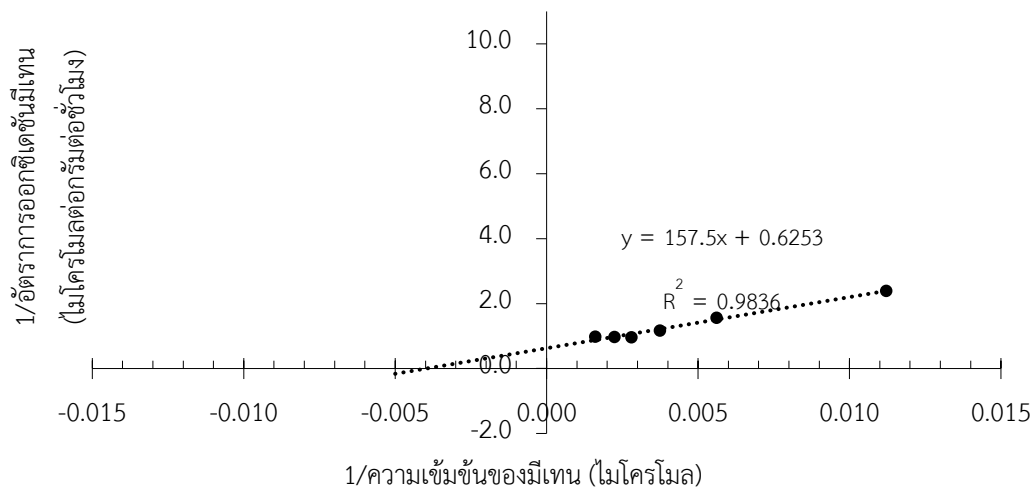
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของมีเทนและอัตราการออกซิเดชันมีเทนของดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา



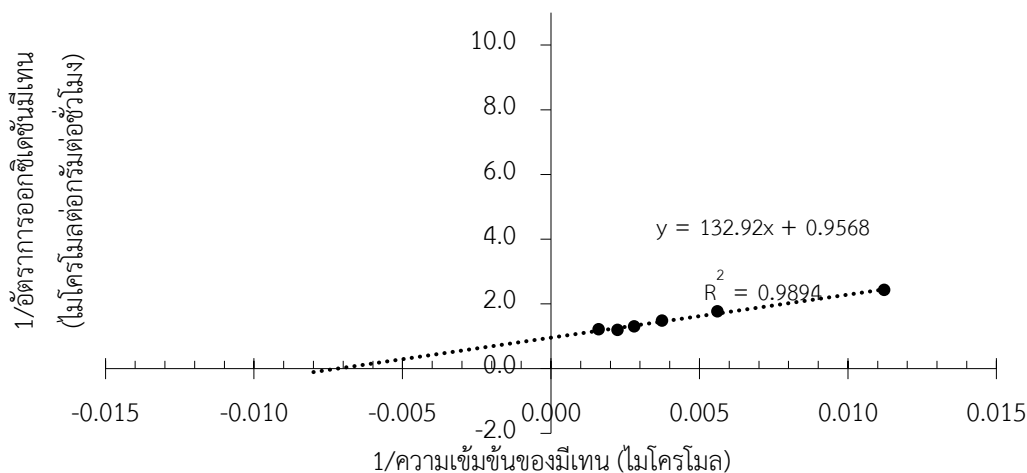
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของมีเทนและอัตราการออกซิเดชันมีเทนของดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม

ทั้งนี้สามารถหาค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ ได้แก่ ค่าศักยภาพในการออกซิไดซ์ (V_{max}) และค่าความจำเพาะต่อมีเทน (K_m) ของดินทั้ง 3 ชนิด ได้จากกราฟไลเนียร์-เบิร์ก (Lineweaver – Burk plot) ซึ่งเป็นกราฟเส้นตรงที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $1/\text{ความเข้มข้นของมีเทน}$ กับ $1/\text{อัตราการออกซิเดชันมีเทน}$ ดังรูปที่ 4.14 4.15 และ 4.16 โดยสามารถคำนวณค่าศักยภาพในการออกซิไดซ์ได้จาก $1/\text{จุดตัดบนแกนตั้ง}$ และสามารถคำนวณค่าความจำเพาะต่อมีเทน ได้จาก $1/\text{จุดตัดแกนนอน}$ หรือสามารถคำนวณค่าศักยภาพในการออกซิไดซ์และค่าความจำเพาะต่อมีเทน ได้จากความชันของ

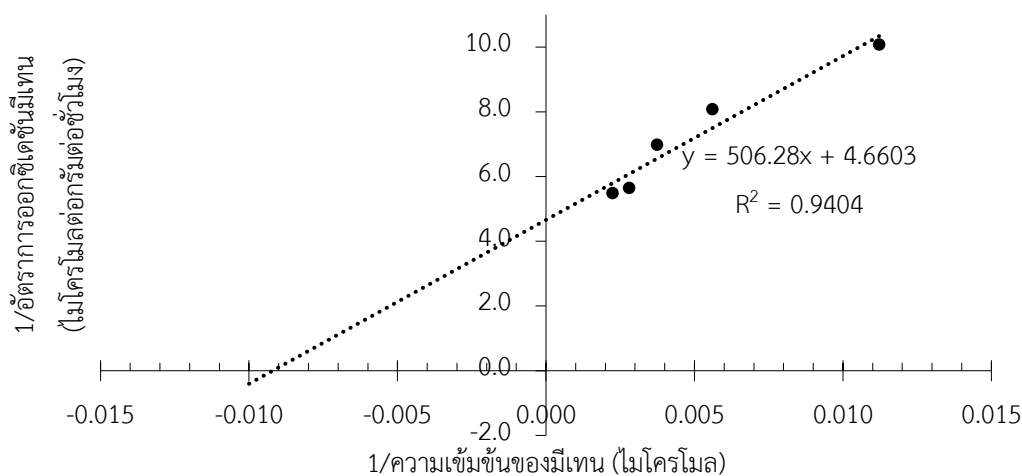
เส้นตรงที่มีค่าเท่ากับค่าความจำเพาะต่อมีเทนต่อค่าศักยภาพในการออกซิไดซ์ ดังรูปที่ 2.15 หรือสมการที่ 21 สำหรับผลการคำนวณค่าศักยภาพในการออกซิไดซ์ และค่าความจำเพาะต่อมีเทนของดินทั้ง 3 ชนิด แสดงดังตารางที่ 4.15



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง 1/ความเข้มข้นของมีเทน และ 1/อัตราการออกซิเดชันมีเทน ที่ใช้ในการคำนวณ ความจำเพาะต่อมีเทน (K_m) และศักยภาพในการออกซิไดซ์ (V_{max}) ของดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง 1/ความเข้มข้นของมีเทน และ 1/อัตราการออกซิเดชันมีเทน ที่ใช้ในการคำนวณ ความจำเพาะต่อมีเทน (K_m) และศักยภาพในการออกซิไดซ์ (V_{max}) ของดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง 1/ความเข้มข้นของมีเทน และ 1/อัตราการออกซิเดชันมีเทน ที่ใช้ในการคำนวณ ความจำเพาะต่อมีเทน (K_m) และศักยภาพในการออกซิไดซ์ (V_{max}) ของดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม

เมื่อพิจารณาค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ของการออกซิเดชันมีเทนในตัวอย่างดินที่ทำการศึกษา (ตารางที่ 4.15) พบว่า ค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์มีค่าต่ำที่สุดในดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม มีค่าสูงในดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา และมีค่าสูงที่สุดในดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบมีความจำเพาะต่อมีเทน (K_m) ต่ำที่สุด และมีศักยภาพในการออกซิไดซ์ (V_{max}) มีเทนสูงที่สุด ดังนั้นดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบสามารถออกซิไดซ์มีเทนที่ความเข้มข้นสูงได้ดีกว่าดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา และดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม

ตารางที่ 4.15 ตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ของการออกซิเดชันมีเทนในดินที่ทำการศึกษา

ตัวอย่างดิน	ความจำเพาะต่อมีเทน (K_m)	ศักยภาพในการออกซิไดซ์ (V_{max})
	(ไมโครโมล)	(ไมโครโมลต่อกรัมต่อชั่วโมง)
ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ	251.87	1.60
ดินเพาะปลูกจากธรรมศาลา	138.92	1.05
ดินเพาะปลูกจากสามง่าม	108.64	0.215

เมื่อพิจารณาถึงจลนพลศาสตร์ของการออกซิเดชันมีเทน (methane oxidation kinetics) ในดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบหรือในดินทั่วไปที่มีการศึกษาวิจัยทั้งในระดับห้องปฏิบัติการหรือระดับสนามพบว่า จลนพลศาสตร์ของการออกซิเดชันมีเทนถูกควบคุมด้วยเมทาโนโทรฟอย่างน้อย 2 กลุ่ม

ได้แก่ (1) กลุ่มที่มีลักษณะแบบ high methane affinity เมทาโนโทรฟในกลุ่มนี้เจริญเติบโตได้ดีในสภาพแวดล้อมที่มีความเข้มข้นของมีเทนระดับต่ำ (1.8 ppm) และมีความเข้มข้นของออกซิเจนในระดับสูงใกล้เคียงกับความเข้มข้นในระดับบรรยากาศ เมทาโนโทรฟกลุ่มนี้มีความจำเพาะต่อมีเทนต่ำ (low K_m) และศักยภาพในการออกซิไดซ์ต่ำ (low V_{max}) ค่าศักยภาพในการออกซิไดซ์ (V_{max}) อยู่ในช่วง 0 – 0.1 ไมโครกรัมต่อกรัมต่อชั่วโมง และค่าความจำเพาะต่อมีเทน (K_m) อยู่ในช่วง 20 – 90 ppm ซึ่งเมทาโนโทรฟที่จัดอยู่ในกลุ่มที่มีลักษณะแบบนี้ ได้แก่ เมทาโนโทรฟประเภทที่ 1 (type I) และ (2) กลุ่มที่มีลักษณะแบบ low methane affinity เมทาโนโทรฟในกลุ่มนี้เจริญเติบโตได้ดีในสภาพแวดล้อมที่มีความเข้มข้นของมีเทนในระดับสูงแต่มีความเข้มข้นของออกซิเจนในระดับที่ต่ำกว่ากลุ่มที่มีลักษณะแบบ high methane affinity โดยเมทาโนโทรฟกลุ่มนี้มีความจำเพาะต่อมีเทนสูง (high K_m) และศักยภาพในการออกซิไดซ์สูง (high V_{max}) โดยมีค่าศักยภาพในการออกซิไดซ์ (V_{max}) อยู่ในช่วง 2 – 104 ไมโครกรัมต่อกรัมต่อชั่วโมง ค่าความจำเพาะต่อมีเทน (K_m) อยู่ในช่วง 1000 – 25000 ppm ซึ่งเมทาโนโทรฟที่จัดอยู่ในกลุ่มที่มีลักษณะแบบนี้ ได้แก่ เมทาโนโทรฟประเภทที่ 2 (type II) (Scheutz *et al.*, 2009)

เมื่อพิจารณาจากข้อมูลที่กล่าวมาข้างต้นประกอบกับการศึกษาค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ ดังตารางที่ 4.15 อาจกล่าวได้ว่าการออกซิเดชันมีเทนที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากกลุ่มที่มีลักษณะแบบ low methane affinity ซึ่งจัดเป็นเมทาโนโทรฟประเภทที่ 2 (type II) เนื่องจากสามารถเจริญเติบโตได้ดีที่ความเข้มข้นของมีเทนสูง นอกจากนั้นอุณหภูมิยังเป็นปัจจัยที่ใช้ในการจำแนกประเภทของเมทาโนโทรฟด้วย โดยเมื่อพิจารณาจากอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มตัวอย่างสำหรับการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของเมทาโนโทรฟประเภทที่ 2 (type II) เนื่องจากเมทาโนโทรฟประเภทที่ 2 (type II) สามารถเจริญเติบโตได้ที่อุณหภูมิ 25 – 35 องศาเซลเซียส แต่เมทาโนโทรฟประเภทที่ 1 (type I) จะสามารถเจริญเติบโตได้ที่อุณหภูมิ 5 – 15 องศาเซลเซียสเท่านั้น (Pawlowska, 2014)

เมื่อเปรียบเทียบผลการศึกษาค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ ได้แก่ ศักยภาพในการออกซิไดซ์ (V_{max}) และค่าความจำเพาะต่อมีเทน (K_m) ของดินที่ใช้ในการศึกษากับงานวิจัยอื่น ๆ ดังตารางที่ 4.16 พบว่าค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์มีความแตกต่างกันไป ทั้งนี้อาจขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพและเคมีของตัวอย่างดิน และปริมาณความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดิน รวมถึงอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ในสิ่งแวดล้อม เช่น ปริมาณความชื้น และอุณหภูมิ เป็นต้น

ตารางที่ 4.16 ชั้นดินปิดทับชีวภาพด้วยการทดลองแบบแบตช์ (batch experiments)

ตัวอย่างดิน	ความชื้น (ร้อยละ)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความเข้มข้นของ มีเทนบริเวณ ช่องว่างเหนือ ตัวอย่าง (ร้อยละ)	ค่าศักยภาพในการออกซิไดซ์ (V_{max}) (ไมโครโมลต่อกรัมต่อชั่วโมง)	ค่าความจำเพาะต่อ มีเทน (K_m) (ไมโครโมล)	แหล่งข้อมูล
Mollic Gleysol	25	25	0.5 1.0 1.5 3.0	0.550	30.66	Walkiewicz <i>et al.</i> (2012)
Haplic Podzol			5.0 และ 10.0	0.443	19.79	
Eutric Cambisol				0.137	5.98	
ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ	9 14 และ	5 – 35	2	0.0014 –	1.8 – 7.01	De Visscher <i>et al.</i> (2001)
ดินร่วนปนทราย (sandy loam)	20			0.0302	ไมโครโมลาร์	
ดินป่า (forest soil)	25	25	มีเทนบรรยากาศ	0.001	10 ไมโครโมลาร์	Benstead and king (1997)
แบบจำลองระบบตัวกรองชีวภาพ (bio – filter)		22	3	1.78	15.1 ไมโครโมลาร์	Gebert <i>et al.</i> (2003)
ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ	25	22	15	6.48	ร้อยละ 2.0 โดยปริมาตร	Scheutz and Kjeldsen (2004)
ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ	18 – 20	30 – 35	6	0.0204	ร้อยละ 1.18 โดยปริมาตร	Abichou <i>et al.</i> (2011)
ดินเหนียว (clay)						
ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ		30	1 – 20	0.0049	23 ไมโครโมลาร์	Lee <i>et al.</i> (2011)
ดินร่วนปนทราย (sandy loam)						
ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ	25	25	2 4 6 8 10 และ	1.60	251.87	การศึกษานี้
ดินเพาะปลูก จากธรรมชาติ			14	1.05	138.92	
ดินเพาะปลูก จากสามง่าม				0.215	108.64	

4.5 การประยุกต์ผลการศึกษาเพื่อลดการแพร่กระจายแก๊สมีเทนในพื้นที่หลุมฝังกลบ

จากการศึกษาค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ ได้แก่ ศักยภาพในการออกซิไดซ์ (V_{max}) และค่าความจำเพาะต่อมีเทน (K_m) ของดินที่ใช้ในการศึกษา ทำให้สามารถประเมินความหนาของชั้นดินปิดทับหลุมฝังกลบมูลฝอยที่เหมาะสมเพื่อลดการแพร่กระจายของมีเทนได้ โดยพิจารณาผลที่ได้จากการศึกษา ได้แก่ ค่าความหนาแน่นรวมของตัวอย่างดินทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา และดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม ที่มีค่าความหนาแน่นรวมเท่ากับ 294 369 และ 1,658 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ (ตารางที่ 4.1) และค่าศักยภาพในการออกซิไดซ์ (V_{max}) เท่ากับ 1.599 1.045 และ 0.215 ไมโครโมลต่อกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ (ตารางที่ 4.13) และตั้งสมมติฐานให้ค่าอัตราการปลดปล่อยแก๊สมีเทน (methane flux rate) จากหลุมฝังกลบเป็นไปตามการศึกษาของ Willumsen and Bach (1991) ที่ได้มีการศึกษาอัตราการปลดปล่อยแก๊สมีเทนซึ่งมีชั้นของเสียภายในหลุมฝังกลบหนาประมาณ 20 เมตร และมีอัตราการเกิดแก๊สจากหลุมฝังกลบประมาณ 11 – 17 ลูกบาศก์เมตรของแก๊สจากหลุมฝังกลบต่อลูกบาศก์เมตรของของเสียต่อปี ซึ่งพบว่าภายใน 10 – 15 ปี มีอัตราการปลดปล่อยแก๊สมีเทนดังตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 อัตราการปลดปล่อยแก๊สมีเทน

ประเภทของหลุมฝังกลบ	อัตราการปลดปล่อยแก๊สมีเทน (กรัมมีเทนต่อตารางเมตรต่อวัน)
หลุมฝังกลบที่มีอายุมากและมีระบบเก็บรวบรวมแก๊สมีเทน	85
หลุมฝังกลบที่เริ่มดำเนินการปิดทับใหม่ ๆ หรือเป็นหลุมฝังกลบที่มีอายุน้อย	1,300

ที่มา: Willumsen and Bach (1991)

จากสมมติฐานข้างต้นทำให้สามารถคำนวณความหนาของชั้นดินปิดทับหลุมฝังกลบเพื่อให้เกิดความเหมาะสมต่อการออกซิเดชันมีเทนได้ (การคำนวณแสดงดังภาคผนวก ฅ) สำหรับการประเมินความหนาของชั้นดินปิดทับหลุมฝังกลบ ถูกแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ (1) ประเภทของหลุมฝังกลบที่มีอายุมากและมีระบบเก็บรวบรวมแก๊ส และ (2) ประเภทของหลุมฝังกลบที่เริ่มดำเนินการปิดทับใหม่ ๆ หรือเป็นหลุมฝังกลบที่มีอายุน้อย แสดงผลดังตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.18 การประเมินความหนาของชั้นดินปิดทับหลุมฝังกลบเพื่อลดการแพร่กระจายมีเทน

ตัวอย่าง	ความหนาของชั้นดินปิดทับหลุมฝังกลบที่มีอายุมากและมีระบบเก็บรวบรวมแก๊ส	ความหนาของชั้นดินปิดทับหลุมฝังกลบที่เริ่มดำเนินการปิดทับใหม่ ๆ หรือเป็นหลุมฝังกลบที่มีอายุ
	(เมตร)	อายุน้อย (เมตร)
ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ	0.47	7
ดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา	0.57	9
ดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม	0.62	10

จากการประเมินตัวอย่างดินที่ทำการศึกษาเพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นชั้นดินปิดทับหลุมฝังกลบให้มีความเหมาะสมต่อการออกซิเดชันมีเทน ได้ทำการคำนวณเพื่อกำหนดความหนาของชั้นดิน พบว่าสำหรับหลุมฝังกลบที่มีอายุมากและมีระบบเก็บรวบรวมแก๊สจำเป็นต้องใช้ตัวอย่างดินแต่ละชนิด ได้แก่ ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ ดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา และดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม เท่ากับ 0.47 0.57 0.62 เมตร ตามลำดับ แต่การใช้ตัวอย่างดินแต่ละชนิดเพื่อทำชั้นดินปิดทับหลุมฝังกลบสำหรับหลุมฝังกลบที่ปิดทับใหม่ ๆ หรือหลุมฝังกลบที่มีอายุน้อย จำเป็นต้องใช้ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ ดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา และดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม ให้มีความหนาถึง 7 9 และ 10 เมตร ตามลำดับ ซึ่งชั้นดินปิดทับหลุมฝังกลบปกติจะมีความหนาประมาณ 0.60 เมตร เท่านั้น (Willumsen and Bach, 1991)

หลุมฝังกลบโดยทั่วไปจะใช้ดินเดิมจากพื้นที่นั้น ๆ เป็นวัสดุปิดทับหลุมฝังกลบเนื่องจากจะทำให้ประหยัดต้นทุนในส่วนของการขนส่งดินจากพื้นที่อื่น ๆ ได้ ซึ่งชั้นของวัสดุปิดทับหลุมฝังกลบ (landfill cover) จะถูกแบ่งออกเป็นประเภทต่าง ๆ ได้แก่ (1) ชั้นของวัสดุปิดทับรายวัน (daily cover) เป็นชั้นของวัสดุปิดทับมูลฝอยเมื่อทำการฝังกลบมูลฝอยเสร็จสิ้นในแต่ละวัน (2) ชั้นของวัสดุปิดทับระหว่างชั้นมูลฝอย (intermediate cover) เป็นชั้นของวัสดุที่ปิดทับมูลฝอยระหว่างชั้นฝังกลบก่อนทำการฝังกลบมูลฝอยในชั้นถัดไป และ (3) ชั้นของวัสดุปิดทับชั้นสุดท้าย (final cover) เป็นชั้นของวัสดุปิดทับมูลฝอยชั้นสุดท้ายภายหลังจากการบดอัดมูลฝอยได้เต็มพื้นที่หลุมฝังกลบ

ปัจจุบันได้มีวิธีการและเทคโนโลยีที่สามารถลดการแพร่กระจายของมีเทนได้ซึ่งก็คือ กระบวนการออกซิเดชันมีเทนโดยจุลินทรีย์ที่จะเกิดขึ้นบริเวณชั้นของวัสดุปิดทับประเภทต่าง ๆ โดยกระบวนการนี้สามารถลดการแพร่กระจายของมีเทนได้ถึงร้อยละ 25 – 30 ต่อปี (Pawlowska, 2014) ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการพัฒนาชั้นของวัสดุปิดทับเพื่อบำบัดแก๊สจากหลุมฝังกลบโดยใช้ระบบบำบัดทางชีวภาพ (biotic treatment systems) (รายละเอียดแสดงดังภาคผนวก ญ) สามารถทำได้หลายลักษณะ เช่น ระบบตัวกรองชีวภาพ (bio – filter) ระบบหน้าต่างชีวภาพ (bio – window) ระบบชั้น

ปิดทับชีวภาพ (bio – cover) และระบบชั้นปิดทับชีวภาพสำเร็จรูป (bio – tarp) เป็นต้น (Abushammala *et al.*, 2014a) ซึ่งระบบเหล่านี้เป็นระบบที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย และสามารถนำอัตราการออกซิเดชันมีเทนของตัวอย่างดินทั้ง 3 ชนิดมาประยุกต์ใช้กับระบบบำบัดทางชีวภาพเหล่านี้ได้

การนำมาประยุกต์ใช้กับระบบหน้าต่างชีวภาพ อาจทำได้โดยนำตัวอย่างดินแต่ละชนิดมาใช้เป็นชั้นวัสดุปิดทับชั้นสุดท้าย ซึ่งจะทำให้การติดตั้งระบบหน้าต่างชีวภาพเป็นบริเวณเล็ก ๆ ในบริเวณที่พบว่ามีแก๊สแพร่กระจายของมีเทนสูง (hot spot) โดยทั่วไประบบหน้าต่างชีวภาพจะประกอบไปด้วยชั้นที่ติดกับมูลฝอยอาจเลือกใช้วัสดุที่มีความพรุนสูง เช่น กรวด (gravel) หรือแก้วที่บดละเอียด (crushed glass) เป็นต้น และชั้นถัดขึ้นมาจะเป็นชั้นที่เกิดกระบวนการออกซิเดชันมีเทนซึ่งอาจจะนำดินที่ทำการศึกษาแล้วว่ามีสามารถในการออกซิเดชันมีเทนได้มาประยุกต์ใช้เพื่อทำชั้นนี้ เนื่องจากบริเวณที่ทำการติดตั้งระบบหน้าต่างชีวภาพจะเป็นบริเวณที่มีความพรุนสูงแก๊สจึงสามารถแพร่กระจายมาบริเวณนี้ได้ดีแต่บริเวณที่ไม่มีการติดตั้งระบบหน้าต่างชีวภาพนั้นจะมีความพรุนที่น้อยกว่าทำให้แก๊สแพร่กระจายออกได้ยากกว่า ส่งผลให้บริเวณที่เป็นระบบหน้าต่างชีวภาพมีการออกซิเดชันมีเทนได้ดีซึ่งจะช่วยแก้ปัญหการแพร่กระจายแก๊สที่เกิดขึ้นได้

การนำมาประยุกต์ใช้กับระบบชั้นปิดทับชีวภาพ เป็นระบบที่ง่ายและราคาถูกที่สุดสำหรับระบบบำบัดทางชีวภาพ ซึ่งอาจใช้ตัวอย่างดินแต่ละชนิดที่มีความสามารถในการออกซิเดชันมีเทนมาทำระบบชั้นปิดทับชีวภาพ โดยระบบชั้นปิดทับชีวภาพจะประกอบไปด้วยชั้นที่มีความพรุนสูงซึ่งจะอยู่เหนือชั้นมูลฝอย และชั้นถัดขึ้นมาจะเป็นชั้นที่เกิดการออกซิเดชันมีเทน เช่นเดียวกับระบบหน้าต่างชีวภาพ ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าชั้นการแพร่กระจายของแก๊สหรือชั้นที่มีความพรุนสูงนั้นจะอยู่ด้านบนของชั้นมูลฝอยซึ่งทำให้แก๊สจากหลุมฝังกลบไหลขึ้นสู่ชั้นระบบชั้นปิดทับชีวภาพและเกิดกิจกรรมของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายมีเทนขึ้นในชั้นนี้ แต่ระบบนี้จะทำครอบคลุมทั้งพื้นที่หลุมฝังกลบ ซึ่งจากการคำนวณความหนาของชั้นวัสดุปิดทับหลุมฝังกลบในกรณีที่เป็นหลุมฝังกลบที่เริ่มดำเนินการปิดทับใหม่ ๆ หรือเป็นหลุมฝังกลบที่มีอายุน้อย ที่มีอัตราการปลดปล่อยแก๊สมีเทนในปริมาณที่สูงส่งผลให้ต้องใช้ดินแต่ละชนิดในการทำชั้นวัสดุปิดทับหลุมฝังกลบในปริมาณที่มากซึ่งเป็นข้อจำกัดของการใช้งานในระบบนี้ เนื่องจากอาจประสบปัญหาความขาดแคลนดินหรือวัสดุฝังกลบได้

การนำมาประยุกต์ใช้กับระบบชั้นปิดทับชีวภาพสำเร็จรูป อาจทำได้โดยนำตัวอย่างดินแต่ละชนิดที่มีความสามารถในการออกซิเดชันมีเทนมาทำระบบชั้นปิดทับชีวภาพสำเร็จรูป โดยทั่วไปจะใช้แผ่นใยสังเคราะห์ (geotextile) เป็นวัสดุในการทำระบบ ซึ่งจะประกอบไปด้วยชั้นของแผ่นใยสังเคราะห์ที่บรรจุตัวอย่างดินที่มีการเจริญเติบโตของเมทาโนโทรฟและนำมาใช้เป็นชั้นของวัสดุปิดทับรายวันเพื่อลดการแพร่กระจายของมีเทน

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

5.1.1 ดินที่ใช้ในการศึกษาทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ ดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา และดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม มีสมบัติทางกายภาพและเคมีที่เหมาะสมต่อการดำเนินกิจกรรมของเมทาโนโทรฟ โดยสังเกตพบว่า ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบมีการดำเนินกิจกรรมของเมทาโนโทรฟสูงที่สุด รองลงมาคือ ดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา และน้อยที่สุดใน ดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม

5.1.2 ความสามารถในการออกซิเดชันมีเทนของดินที่ใช้ในการศึกษา

5.1.2.1 ความสามารถในการออกซิเดชันมีเทนในขั้นตอนการปรับสภาพตัวอย่างดิน (acclimatization) ด้วยมีเทนความเข้มข้นร้อยละ 10 (โดยปริมาตร) พบว่า มีระยะพัก (lag phase) เกิดขึ้นเป็นระยะเวลาประมาณ 2 – 4 วัน ก่อนการเกิดการออกซิเดชันมีเทน และเมื่อมีการออกซิเดชันของมีเทนเกิดขึ้นก็พบว่า การออกซิเดชันของมีเทนเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ และดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา และมีเทนถูกใช้หมดไปภายในระยะเวลา 11 วัน ส่วนดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่ามเกิดการออกซิเดชันมีเทนที่ช้ากว่า และมีเทนถูกใช้หมดไปภายในระยะเวลา 35 วัน จึงกล่าวได้ว่า ระยะเวลาที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการปรับสภาพตัวอย่างดินแต่ละชนิดคือ 11 วัน สำหรับดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบและดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา และ 35 วัน สำหรับดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม

5.1.2.2 ความสามารถในการออกซิเดชันมีเทนในขั้นตอนการบ่มตัวอย่าง (incubation) ด้วยมีเทนความเข้มข้นร้อยละ 2 4 6 8 10 และ 14 (โดยปริมาตร) สำหรับดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบและดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา และด้วยมีเทนความเข้มข้นร้อยละ 2 4 6 8 และ 10 (โดยปริมาตร) สำหรับดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม

- การออกซิเดชันมีเทนของดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ ในทุกชุดความเข้มข้นมีการลดลงของมีเทนแบบเส้นตรง (linear) แสดงว่ามีอัตราการออกซิเดชันมีเทนแบบปฏิกิริยาอันดับศูนย์ (zero order)

- การออกซิเดชันมีเทนของดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา ในชุดความเข้มข้น ร้อยละ 2 (โดยปริมาตร) มีการลดลงของมีเทนแบบเส้นตรง (linear) แสดงว่ามีอัตราการออกซิเดชันมีเทนแบบปฏิกิริยาอันดับศูนย์ (zero order) ส่วนชุดความเข้มข้น ร้อยละ 4 6 8 10 และ 14 (โดยปริมาตร) มีการลดลงของมีเทนแบบเอกซ์โพเนนเชียล (exponential) แสดงว่ามีอัตราการออกซิเดชันมีเทนแบบปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (first – order reaction)

- การออกซิเดชันมีเทนของดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม ในทุกชุดความเข้มข้นมีการลดลงของมีเทนแบบเอกซ์โพเนนเชียล (exponential) แสดงว่ามีอัตราการออกซิเดชันมีเทนแบบปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (first – order reaction)

5.1.3 เมื่อใช้วิธีวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (linear regression analysis) โดยการสร้างกราฟที่แสดงถึงการลดลงของมีเทนหรือการออกซิเดชันของมีเทนที่เกิดขึ้นในระยะแรก (0 – 24 ชั่วโมง) เมื่อบ่มตัวอย่างดินด้วยมีเทนที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 4 6 8 10 และ 14 (โดยปริมาตร) สำหรับดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบและดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา และเมื่อบ่มตัวอย่างดินด้วยมีเทนความเข้มข้นร้อยละ 2 4 6 8 และ 10 (โดยปริมาตร) สำหรับดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม พบว่าดินแต่ละชนิดมีอัตราการออกซิเดชันมีเทนสูงสุดในแต่ละความเข้มข้นดังนี้

5.1.3.1 ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ ในชุดความเข้มข้นต่าง ๆ ที่ระบุข้างต้น มีอัตราการออกซิเดชันมีเทนสูงสุดเท่ากับ 0.418 0.640 0.855 1.04 และ 1.03 ไมโครโมลต่อกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ

5.1.3.2 ดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา ในชุดความเข้มข้นต่าง ๆ ที่ระบุข้างต้น มีอัตราการออกซิเดชันมีเทนสูงสุดเท่ากับ 0.412 0.568 0.677 0.772 0.843 และ 0.826 ไมโครโมลต่อกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ

5.1.3.3 ดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม ในชุดความเข้มข้นต่าง ๆ ที่ระบุข้างต้น มีอัตราการออกซิเดชันมีเทนสูงสุด เท่ากับ 0.099 0.124 0.143 0.177 และ 0.182 ไมโครโมลต่อกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ

5.1.4 เมื่อพิจารณาอัตราการออกซิเดชันมีเทนสูงสุดของตัวอย่างดินทั้ง 3 ชนิด ที่ทำการศึกษา แสดงให้เห็นว่า ดินทั้ง 3 ชนิด มีความสามารถในการลดการแพร่ระบายนีเทนจากหลุมฝังกลบได้ โดยดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบมีความสามารถสูงที่สุดในการลดการแพร่ระบายนีเทน รองลงมาคือ ดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา และต่ำสุดในดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม

5.1.5 เมื่อพิจารณาถึงจลนพลศาสตร์ของการออกซิเดชันมีเทนในดินที่ทำการศึกษา พบว่าดินทั้ง 3 ชนิด มีกลไกการออกซิเดชันมีเทนเป็นไปตามไมเคิลลิส – เมนเทน (Michaelis – Menten mechanism) และมีค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ของการออกซิเดชันมีเทน ได้แก่ ค่าศักยภาพในการออกซิไดซ์ (V_{max}) และค่าความจำเพาะต่อมีเทน (K_m) ดังนี้

5.1.5.1 ค่าศักยภาพในการออกซิไดซ์ เท่ากับ 1.60 1.05 และ 0.215 ไมโครโมลต่อกรัมต่อชั่วโมง ในดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ ดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา และดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม ตามลำดับ

5.1.5.2 ค่าความจำเพาะต่อมีเทน เท่ากับ 251.87 138.92 และ 108.64 ไมโครโมล ในดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ ดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา และ ดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม ตามลำดับ

5.1.6 เมื่อพิจารณาค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ของการออกซิเดชันมีเทนในดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบซึ่งมีความจำเพาะต่อมีเทนต่ำที่สุด และมีศักยภาพในการออกซิไดซ์มีเทนสูงที่สุด จึงกล่าวได้ว่าดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบสามารถออกซิไดซ์มีเทนที่ความเข้มข้นสูงได้ดีกว่าดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา และดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม

5.1.7 ในการนำดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ ดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา และดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม ไปใช้เป็นวัสดุปิดทับชีวภาพสำหรับหลุมฝังกลบมูลฝอยเพื่อลดการแพร่ระบาดของมีเทนนั้น มีแนวทางดังนี้

5.1.7.1 สำหรับหลุมฝังกลบที่มีอายุมากและมีระบบเก็บรวบรวมแก๊สมีเทน และมีอัตราการปลดปล่อยแก๊สมีเทนสูงสุดเท่ากับ 85 กรัมมีเทนต่อตารางเมตรต่อวัน (Willumsen and Bach, 1991) เสนอให้ใช้ความหนาของชั้นดินปิดทับหลุมฝังกลบ เท่ากับ 0.47 0.57 และ 0.62 เมตร ในดินที่ทำการศึกษาแต่ละชนิด ตามลำดับ

5.1.7.2 สำหรับหลุมฝังกลบที่เริ่มดำเนินการปิดทับใหม่ ๆ หรือเป็นหลุมฝังกลบที่มีอายุน้อย และมีอัตราการปลดปล่อยแก๊สมีเทนสูงสุดเท่ากับ 1,300 กรัมมีเทนต่อตารางเมตรต่อวัน (Willumsen and Bach, 1991) เสนอให้ใช้ความหนาของชั้นดินปิดทับหลุมฝังกลบ เท่ากับ 7 9 และ 10 เมตร ในดินที่ทำการศึกษาแต่ละชนิด ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาในอนาคต

5.2.1 ควรมีการศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีในระหว่างขั้นตอนการดำเนินการบ่มตัวอย่างตามระยะเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป เพื่อที่จะได้ทราบถึงลักษณะทางกายภาพและเคมีที่ส่งผลต่อเมทาโนโทรฟ

5.2.2 ควรมีการศึกษาปัจจัยที่มีส่วนส่งเสริมหรือยับยั้งการทำงานของเมทาโนโทรฟ เช่น การวิเคราะห์อินทรีย์ไนโตรเจน ได้แก่ แอมโมเนียมไนโตรเจนและไนเตรตไนโตรเจน เนื่องจากปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจนมีผลต่อการเจริญเติบโตหรือยับยั้งเมทาโนโทรฟ เป็นต้น

5.2.3 ควรมีการศึกษาถึงปริมาณและชนิดของจุลินทรีย์เมทาโนโทรฟในตัวอย่างที่นำมาศึกษา ในระหว่างขั้นตอนการดำเนินการปรับสภาพตัวอย่างดิน

5.2.4 ควรมีการศึกษาการออกซิเดชันของมีเทนในระดับห้องปฏิบัติการ โดยการจำลองชั้นของวัสดุปิดทับหลุมฝังกลบในคอลัมน์ (column experiments) เพื่อศึกษาความสามารถในการออกซิไดส์มีเทนของวัสดุปิดทับชนิดต่าง ๆ รวมถึงศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมีเทนคาร์บอนไดออกไซด์ และ ออกซิเจน ตามความลึกในวัสดุปิดทับชนิดต่าง ๆ

5.2.5 ควรมีการศึกษาถึงประสิทธิภาพการออกซิเดชันมีเทนนอกเหนือจากตัวอย่างที่เป็นดิน เช่น กากตะกอน ชีลื้อย หรือ ปุ๋ยหมัก เป็นต้น เนื่องจากวัสดุเหล่านี้มีปริมาณสารอินทรีย์ที่เมทาโนโทรฟต้องการสูง



รายการอ้างอิง

- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2547. **ตำราระบบบำบัดมลพิษอากาศ**. ครั้งที่ 1. ศูนย์บริการวิชาการ แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- กรมควบคุมมลพิษ. 2544. **เกณฑ์มาตรฐานและแนวทางการจัดการขยะมูลฝอยชุมชน**. ครั้งที่ 5. โรงพิมพ์คุรุสภาลาดพร้าว, กรุงเทพฯ.
- สมชัย บวรกิตติ. 2558. **เมื่อโลกร้อน**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพवेशสาร, กรุงเทพฯ.
- Abichou, T., K. Mahieu, L. Yuan, J. Chanton and G. Hater. 2009. Effects of compost biocovers on gas flow and methane oxidation in a landfill cover. **Waste Management**. 29: 1595-1601.
- Abushammala, M.F., N.E.A. Basri and M.K Younes. 2014a. Methane Oxidation in Landfill Cover Soils: A Review. **Asian Journal of Atmospheric Environment**. 8(1): 1-14.
- Abushammala, M.F.M., N.E.A. Basri, A.A.H. Kadhum, H. Basri, A.H. El-Shafie and S.S. Mastura. 2014b. Evaluation of methane generation rate and potential from selected landfills in Malaysia. **International Journal of Environmental Science and Technology**. 11(2): 377-384.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry. 2016. **Landfill Gas Primer - An Overview for Environmental Health Professionals**. Source: <http://www.atsdr.cdc.gov/HAC/landfill/html/intro.html>, January 22, 2016.
- Albanna, M., L. Fernandes and M. Warith. 2007. Methane oxidation in landfill cover soil; the combined effects of moisture content, nutrient addition, and cover thickness. **Journal of Environmental engineering and Science**. 6(2): 191-200.
- Alvarez, J.M. and A.M. Viturtia. 1986. Laboratory simulation of municipal solid waste fermentation with leachate recycle. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology**. 36(12): 547-556.
- Augenstein, D. and J. Pacey. 1996. **Landfill Gas Energy Utilization: Technology Options and Case Studies**. Source: <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/30003W3E.PDF?Dockey=30003W3E.PDF>, November 6, 2014

- Benstead, J. and G.M. King. 1997. Response of methanotrophic activity in forest soil to methane availability. **FEMS Microbiology Ecology**. 23(4): 333 – 340.
- Berger, J., L.V. Fornes, C. Ott, J. Jager, B. Wawra and U. Zanke. 2005. Methane oxidation in a landfill cover with capillary barrier. **Waste Management**. 25(4): 369–373.
- Berger, J., L.V. Fornés, C. Ott, J. Jager, B. Wawra and U. Zanke. 2005. Methane oxidation in a landfill cover with capillary barrier. **Waste Management**. 25(4): 369 – 373.
- Bisswanger, H. 2002. **Enzyme Kinetic**. WILEY – VCH, Germany.
- Boeckx, P., O.V. Cleemput and I.D.A. Villaralvo. 1996. Methane emission from a landfill and the methane oxidising capacity of its covering soil. **Soil Biology and Biochemistry**. 28(10): 1397–1405.
- Bogner J.E., M.A. Ahmed, C. Diaz, A. Faaij, Q. Gao, S. Hashimoto, K. Mareckova, R. Pipatti and T. Zhang. 2007. Waste Management, pp. 585–618. *In* The Intergovernmental Panel on Climate Change, eds. **Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change**. Cambridge, UK and New York.
- Bogner, J.E., K.A. Spokas and E.A. Burton. 1997. Kinetics of Methane Oxidation in a Landfill Cover Soil: Temporal Variations, a Whole-Landfill Oxidation Experiment, and Modeling of Net CH₄ Emissions. **Environmental Science and Technology**. 31(9): 2504-2514.
- Bohn, S. and J. Jager. 2009. Microbial methane oxidation in landfill top covers- Process study on an MBT landfill. *In* **Twelfth International Waste Management and Landfill Symposium**. CISA, Italy.
- Borjesson, G. and B.H. Svensson. 1997. Seasonal and diurnal methane emissions from a landfill and their regulation by methane oxidation. **Waste Management and Research**. 15(1): 33–54.
- Borjesson, G., I. Sundh, A. Tunlid, A.F. rostegard and B.H. Svensson. 1998. Microbial oxidation of CH₄ at high partial pressures in an organic landfill cover soil under Landfill Methane Oxidation 11 different moisture regimes. **FEMS Microbiology Ecology**. 26: 207-217.

- Bosse, U., P. Frenzel and R. Conrad. 1993. Inhibition of methane oxidation by ammonium in the surface layer of a littoral sediment. **FEMS Microbiology Ecology**. 13(2): 123–134.
- Carter, M.R. 1993. **Canadian Society of Soil Science**. Lewis publishers. Ottawa, Canada.
- Castaldi, S. and A. Fierro. 2005. Soil-atmosphere methane exchange in undisturbed and burned Mediterranean shrubland of Southern Italy. **Ecosystems**. 8: 182-190.
- Castro, M. S., P.A. Steudler, J.M. Melillo, J.D. Aber and R.D. Bowden. 1995. Factors controlling atmospheric methane consumption by temperate forest soils. **Global Biogeochemical Cycles**. 9(1): 1–10.
- Chereisinoff, N.P. 2003. **Handbook of solid waste management and waste minimization technologies**. Butterworth–Heinemann, America.
- Chiemchaisri, W. 2000. **Experiment Investigation of Nutrient Requirements: EPS Production and VOC Inhibition on Methane Oxidation in Tropical Landfill Cover Soils**. Dissertation Asian Institute of Technology, Pathumthani, Thailand.
- Christophersen, M., L. Linderod, P.E. Jensen and P. Kjeldsen. 2000. Methane oxidation at low temperatures in soil exposed to landfill gas. **Journal of Environmental Quality**. 29(6): 1989–1997.
- Dane, J.H. and C. Topp. 2002. **Methods of Soil Analysis Part 4**. Physical Methods. Soil Science Society of America, USA
- De Visscher, A., M. Schippers and O. Van Cleemput. 2001. Short-term kinetic response of enhanced methane oxidation in landfill cover soils to environmental factors. **Biology and Fertility of Soils**. 33(3): 231–237.
- De Visscher, A. and O. Van Cleemput. 2003. Induction of enhanced CH₄ oxidation in soils: NH₄⁺ inhibition patterns. **Soil Biology and Biochemistry**. 35(7): 907-913.
- Einola, J.K., R.H. Kettunen and J.A. Rintala. 2007. Responses of methane oxidation to temperature and water content in cover soil of a boreal landfill. **Soil Biology and Biochemistry**. 39: 1156-1164.

- Environmental Protection Agency. 2000. **Facts About Landfill Gas**. Source: <http://www.dem.ri.gov/programs/benviron/waste/central/lfgfact.pdf>, November 6, 2014.
- Gebert J. and A. Groenroeft. 2006. Passive landfill gas emission – Influence of atmospheric pressure and implications for the operation of methane-oxidising biofilters. **Waste Management**. 26(3): 245-251.
- Gebert, J., A. Groenroeft and G. Miehlich. 2003. Kinetics of microbial landfill methane oxidation in biofilters. **Waste Management**. 23(7): 609 – 619.
- Gebert, J., and A. Groenroeft. 2009. Role of Soil Gas Diffusivity for the Microbial Oxidation of Methane in Landfill Covers, 5–9. *In Twelfth International Waste Management and Landfill Symposium*. CISA, Italy.
- Gobat, J.M., M. Aragna and W. Matthey. 2004. **The Living Soil: Fundamentals of Soil Science and Soil Biology**. Science Publisher, USA.
- Gulledge, J., Y. Hrywna, C. Cavanaugh and P. A. Steudler. 2004. Effects of long-term nitrogen fertilization on the uptake kinetics of atmospheric methane in temperate forest soils. **FEMS Microbiology Ecology**. 49(3): 389-400.
- Hanson, R.S. and T.E. Hanson. 1996. Methanotrophic bacteria. **Microbiological reviews**. 60(2): 439–471.
- Hegyí, G., J. Kardos, M. Kovacs, A.M. Csizmadia, L. Nyitrai, G. Pal, L. Radnai, A. Remenyi and I. Venekei. 2013. **Introduction to Practical Biochemistry**. IT Study Hungary Ltd., Hungary.
- Heldman, D.R., D.B. Lund, R. Villota and J.G. Hawkes. 2007. **Handbook of food Engineering**. CRC Press, New York.
- Hilger, H. and M. Humer. 2003. Biotic landfill cover treatments for mitigating methane emissions. **Environmental Monitoring and Assessment**. 84(1-2): 71–84.
- Horz, H. P., V. Rich, S. Avrahami and B. J. Bohannan. 2005. Methane-oxidizing bacteria in a California upland grassland soil: diversity and response to simulated global change. **Applied and environmental microbiology**. 71(5): 2642 – 2652.

- Huber-Humer, M. 2004. International research into landfill gas emissions and mitigation strategies—IWWG working group “CLEAR”. **Waste Management**. 24(4): 425-427.
- Huber-Humer, M., J. Gebert, and H. Hilger. 2008. Biotic systems to mitigate landfill methane emissions. **Waste Management and Research**. 26(1): 33-46.
- Humer, M. and P. Lechner. 1999. Alternative approach to the elimination of greenhouse gases from old landfills. **Waste Management and Research**. 17(6): 443-452.
- Humer, M. and P. Lechner. 2001. Design of a landfill cover layer to enhance methane oxidation results of a two year field investigation, pp. 541-550. *In* Proceedings of SARDINIA 2001 - Eighth International Waste Management and Landfill Symposium. CISA. Cagliari, Italy.
- Hutsch, B.W., C.P. Webster and D.S. Powlson. 1994. Methane oxidation in soil as affected by land use, soil pH and N fertilization. **Soil Biology and Biochemistry**. 26: 1613-1622.
- Jiang, H., Y. Chen, P. Jiang, C. Zhang, T.J. Smith, J.C. Murrell and X.H. Xing. 2010. Methanotrophs: multifunctional bacteria with promising applications in environmental bioengineering. **Biochemical Engineering Journal**. 49(3): 277-288.
- Jones, H.A. and D.B. Nedwell. 2006. Methane emission and methane oxidation in land-fill cover soil. **FEMS Microbiology Letters**. 102: 185-195.
- Jugnia, L.B., A.R. Cabral and C.W. Greer. 2008. Biotic methane oxidation within an instrumented experimental landfill cover. **Ecological Engineering**. 33(2): 102-109.
- Kightley, D., D.B. Nedwell and M. Cooper. 1995. Capacity for methane oxidation in landfill cover soils measured in laboratory-scale soil microcosms. **Applied and Environmental Microbiology**. 61(2): 592-601.
- Klink, R.E. and R.K. Ham. 1982. Effects of moisture movement on methane production in solid waste landfill samples. **Resources and Conservation**. 8(1): 29-41.

- Lallanila, M. 2015. **What is the Greenhouse Effect**. Source:
<http://www.livescience.com/37743-greenhouse-effect.html>, January 22, 2016.
- Lee, SW., J. Im, A.A. DiSpirito, L. Bodrossy, M.J. Barcelona and J.D. Semrau. 2009.
 Effect of nutrient and selective inhibitor amendments on methane oxidation,
 nitrous oxide production, and key gene presence and expression in landfill
 cover soils: characterization of the role of methanotrophs, nitrifiers, and
 denitrifiers. **Applied Microbiology and Biotechnology**. 85: 389-403.
- Linde. 2013. **Methane material safety data sheet**. Available source:
http://msds.lindeus.com/files/msds/WPS_LIND_052_METHANE_NA_MSDS_FINAL_REV_9_27_13.pdf, December 7, 2014.
- Madigan, M.T., J.M. Martinko and T.D. Brock. 2006. **Brock biology of microorganisms**. Upper Saddle River, New Jersey.
- Maier, R.M. 2008. Bacterial Growth. *In* R.M. Maier, J.L. Pepper and C.P. Gerba. eds.
 Environmental Microbiology. Elsevier.
- Massachusetts Office of Information Technology. 2014. **Basic of landfill gas**. Source:
<http://www.mass.gov/eea/docs/dep/recycle/laws/lfgasapp.pdf>, November 6,
 2014.
- Mauric, C. and A. Lagerkvist. 2003. LFG emission measurements in cold climatic
 conditions: seasonal variations and methane emissions mitigation. **Cold
 Regions Science and Technology**. 36: 37-46.
- McCarty, P.L. 1964. Anaerobic waste treatment fundamentals. **Public work**. 95(9):
 107-112.
- Mer, J.L. and P. Roger. 2001. Production, oxidation, emission and consumption of
 methane by soils: A review. **European Journal of Soil Biology**. 37: 25-50.
- Mor, S. A. De Visscher, K. Ravindra, R.P. Dahiya, A. Chandra and O. Van Cleemput.
 2006. Induction of enhanced methane oxidation in compost: Temperature
 and moisture response. **Waste Management**. 26(4): 381-388.
- Mosier, A., R. Wassmann, L. Verchot, J. King and C. Palm. 2004. Methane and
 Nitrogen Oxide Fluxes in Tropical Agricultural Soils: Sources, Sinks and
 Mechanisms. **Environment, Development and Sustainability**. 6(1-2): 11-
 49.

- Park, J.R., S. Moon, Y.M. Ahn, J.Y. Kim and K. Nam. 2005. Determination of environmental factors influencing methane oxidation in a sandy landfill cover soil. **Environmental Technology**. 26: 93-102.
- Park, S., K. W. Brown and J. C. Thomas. 2002. The effect of various environmental and design parameters on methane oxidation in a model biofilter. **Waste management and research**. 20(5): 434-444.
- Pawloska, M. 2014. **Mitigation of Landfill Gas Emissions**. CRC Press, New York.
- Pawlowska, M. and W. Stepniewski. 2006. An influence of methane concentration on the methanotrophic activity of a model landfill cover. **Ecological Engineering**. 26(4): 392 – 395.
- Perdikeaa, k., A.K. Mehrotra, J. Patrick and A. Hettiaratchib. 2008. Study of thin biocovers (TBC) for oxidizing uncaptured methane emissions in bioreactor landfills. **Waste Management**. 28(8): 1364 – 1374.
- Reay, D.S. and D.B. Nedwell. 2004. Methane oxidation in temperate soils: effects of inorganic N. **Soil Biology and Biochemistry**. 36: 2059-2065.
- Reebugh, W.S., S.C. Whalen and M.J. Alperin. 1993. The role of methylophony in the global methane budget. *In* J.C. Murrell and D.P. Kelly, eds. **Microbial Growth on C1 Compounds**. Andover.
- Riemer, P.W.F., A.Y. Smith and K.V. Thambimuthu. 1998. **Greenhouse Gas Mitigation**. Elsevier Science Ltd, Netherlands.
- Saari, A., R. Rinnan and P.J.Martikainen. 2004. Methane oxidation in boreal forest soils: kinetics and sensitivity to pH and ammonium. **Soil Biology and Biochemistry**. 36: 1037-1046.
- Scheutz, C. and P. Kjeldsen. 2004. Environmental factors influencing attenuation of methane and hydrochlorofluorocarbons in landfill cover soils. **Journal of environmental quality**. 33(1): 72–79.
- Sparks, D.L., A.L. Page, P.A. Helmke and R.H. Loeppert. 1996. **Methods of soil analysis Part 3**. Chemical methods. Soil Science Society of America, USA.
- Spokas, K.A. and J.E. Bogner. 2011. Limits and dynamics of methane oxidation in landfill cover soils. **Waste Management**. 31(5): 823-832.

- Stern, J.C., J. Chanton, T. Abichou, D. Powelson, L. Yuan, S. Escoriza and J. Bogner. 2007. Use of a biologically active cover to reduce landfill methane emissions and enhance methane oxidation. **Waste Management**. 27(9): 1248-1258.
- Streese, J. and R. Stegmann. 2003. Microbial oxidation of methane from old landfills in biofilters. **Waste Management**. 23(7): 573–580.
- Tan, K.H. 1995. **Soil Sampling, Preparation, and analysis**. Marcel dekker, New York.
- Tanthachoon, N., Chiemchaisri, C., and Chiemchaisri, W. 2007. Alternative approach for encouraging methane oxidation in compost based landfill cover layer with vegetation, pp. 202-209. *In Proceedings of the International Conference on Sustainable Solid Waste Management*. 5 – 7 September 2007, Chennai. India.
- Tchobanoglous, G., H. Theisen and S.A. Vigil. 1993. **Integrated Solid Waste Management, Engineering Principal and Management issue**. McGraw Hill, Inc., New York.
- Teclé, D., J. Lee, and S. Hasan. 2009. Quantitative analysis of physical and geotechnical factors affecting methane emission in municipal solid waste landfill. **Environmental Geology**. 56(6): 1135–1143.
- Thailand Environment Institute. 1990. **Thailand's National Greenhouse Gas Inventory, 1990**. n.p., US.
- The Intergovernmental Panel on Climate Change. 2001. **Climate Change 2001: The Scientific Basis**. 881.
- The Intergovernmental Panel on Climate Change. 2007. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. 1007.
- The Intergovernmental Panel on Climate Change. 2013. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. 1552.
- U. S. Environmental Protection Agency. 1996. **A landfill gas to energy project development handbook**. 268.
- U. S. Environmental Protection Agency. 1997. **Landfill Gas Energy Basics**. Source: http://www.epa.gov/lmop/documents/pdfs/pdh_chapter1.pdf, November 6, 2014.

- U.S. Department of State. 2014. **U.S. Climate Action Report 2014 (2014 CAR)**. U.S. Department of state. Source: <http://www.state.gov/e/oes/rls/rpts/car6/index>, November 6, 2014.
- United Nations Framework Convention on Climate Change. 1997. **Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change**. 24.
- Visvanathan, C., D. Pokhrel, W. Cheimchaisri, J.P.A. Hettiaratchi and J.S. Wu. 1999. Methanotrophic activities in tropical landfill cover soils: effects of temperature, moisture content and methane concentration. **Waste Management and Research**. 17(4): 313–323.
- Walkiewicz, A., P. Bulak, M. Brzezińska, T. Włodarczyk and C. Polakowski. 2012. Kinetics of methane oxidation in selected mineral soils. **International Agrophysics**. 26(4): 401 – 406.
- Wang, J., F. F. Xia, Y. Bai, C. R. Fang, D. S. Shen and R. He. 2011. Methane oxidation in landfill waste biocover soil: kinetics and sensitivity to ambient conditions. **Waste management**. 31(5): 864-870.
- Wang, Y., W. Wu, Y. Ding, W. Liu, A. Perera, Y. Chen and M. Devare. 2008. Methane oxidation activity and bacterial community composition in a simulated landfill cover soil is influenced by the growth of *Chenopodium album* L. **Soil Biology and Biochemistry**. 40: 2452–2459.
- Wang, Z.P. and P. Ineson. 2003. Methane oxidation in a temperate coniferous forest soil: effects of inorganic N. **Soil Biology and Biochemistry**. 35: 427-433.
- Whittenbury, R., K.C. Phillips and J.F. Wilkinson. 1970. Enrichment, isolation and some properties of methane-utilizing bacteria. **Journal of General Microbiology**. 61(3): 205-218.
- William, G.M. and C. Zobell. 1949. The occurrence and characteristics of methane oxidizing bacteria in marine sediment. **Applied and Environmental Microbiology**. 58: 462-473.
- Wilshusen, J.H., J.P.A. Hettiaratchi, A. De Visscher and R. Saint-Fort. 2004. Methane oxidation and formation of EPS in compost: effect of oxygen concentration. **Environmental Pollution**. 129(2): 305-314.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

รายละเอียดวิธีวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน

1. การวิเคราะห์ความชื้นในตัวอย่าง

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง
2. ปีกเกอร์ (beaker) ขนาด 100 มิลลิลิตร
3. ตู้อบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ถึง 110 องศาเซลเซียส และควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้

วิธีวิเคราะห์

1. อบปีกเกอร์ในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นานอย่างน้อย 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นทิ้งให้เย็นในโถแก้วดูดความชื้นและชั่งน้ำหนัก (W_1)
2. ตักตัวอย่างดินที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาดช่อง 2 มิลลิเมตร หรือ 0.5 มิลลิเมตร หนักประมาณ 50 กรัม แล้วชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของดินและปีกเกอร์ (W_2)
3. นำดินที่อยู่ในปีกเกอร์ไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นานอย่างน้อย 3 ชั่วโมง จากนั้นนำไปทิ้งให้เย็นในโถแก้วดูดความชื้น แล้วชั่งน้ำหนัก (W_3)

วิธีคำนวณ

1. ค่าความชื้นของตัวอย่างดินคำนวณได้จากสมการ

$$\text{Moisture (\%)} = \frac{(W_2 - W_3)}{(W_3 - W_1)} \times 100$$

โดยที่

W_1 = น้ำหนักภาชนะ (กรัม)

W_2 = น้ำหนักดิน + ภาชนะ ก่อนอบแห้ง (กรัม)

W_3 = น้ำหนักดิน + ภาชนะ หลังอบแห้ง (กรัม)

2. moisture correction factor (mf) คำนวณได้จากสมการ

$$mf = \frac{100 + \% \text{moisture}}{100}$$

2. การวิเคราะห์หาเนื้อดิน (soil texture) โดยวิธีไฮโดรมิเตอร์

วิธีที่ใช้ในที่นี้เป็นวิธีที่ไม่ได้มีการกำจัดอินทรียวัตถุออกจากตัวอย่างดิน ซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับตัวอย่างดินที่มีอินทรียวัตถุน้อยกว่าร้อยละ 5

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ไฮโดรมิเตอร์ ชนิด 152H (20°C)
2. เครื่องปั่นไฟฟ้า (electric mixer)
3. ถ้วยปั่น (metal dispersing cup)
4. กระจกบอแก้วสำหรับการตกตะกอน ขนาด 1 ลิตร
5. จุกยางปิดกระจกบอแก้วสำหรับการตกตะกอน
6. เทอร์โมมิเตอร์ (thermometer)
7. เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง
7. นาฬิกาจับเวลา

สารเคมีและการเตรียมสารเคมี

1. สารละลายแคลคอนร้อยละ 5 พีเอช 8.3 (5% calgon solution, pH 8.3)
ละลายโซเดียมเฮกซะเมตาฟอสเฟต (sodium hexametaphosphate) จำนวน 50.0 กรัม ในน้ำกลั่นปริมาณ 800 มิลลิลิตร ปรับให้มีค่าพีเอชประมาณ 8.3 โดยเติมโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ในขวดปรับปริมาตร
2. เอทิลแอลกอฮอล์ (ethyl alcohol)

วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งตัวอย่างดินที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 10 (ขนาดช่อง 2 มิลลิเมตร) จำนวน 50 กรัม ใส่ลงในถ้วยปั่น
2. เติมสารละลายแคลคอน 100 มิลลิลิตร
3. เติมน้ำกลั่นเพิ่มลงไป โดยสังเกตให้ระดับน้ำอยู่ต่ำกว่าปากของถ้วยปั่น 5 – 8 เซนติเมตร ปั่นผสมสารละลายดินด้วยเครื่องปั่นไฟฟ้าเป็นเวลา 15 นาที
4. หลังจากนั้นถ่ายสารละลายดินจากถ้วยปั่นลงในกระจกบอแก้วขนาด 1 ลิตร สำหรับการตกตะกอน ใช้ น้ำกลั่นฉีดล้างสิ่งต่าง ๆ ในถ้วยปั่น แกนและใบพัดของเครื่องปั่นไฟฟ้า ลงในกระจกบอแก้วให้หมด

5. ปรับปริมาตรสารละลายดินในกระบอกแก้วด้วยน้ำกลั่นเป็น 1 ลิตร
6. ปิดปากกระบอกแก้วด้วยจุกยาง และตั้งกระบอกแก้วทิ้งไว้ข้ามคืนในที่ที่ปราศจากการสั่นสะเทือน เพื่อเป็นการปรับอุณหภูมิของสารละลายดินให้เท่ากับอุณหภูมิห้อง
7. หลังจากตั้งทิ้งไว้ข้ามคืนแล้วนั้นให้ทำการเขย่ากระบอกแก้วในแนวตั้งกลับไปกลับมาประมาณ 25 ครั้ง เพื่อทำให้เกิดสารแขวนลอยดินที่สมบูรณ์
8. วางกระบอกแก้วลงบนโต๊ะ แล้วเริ่มจับเวลาทันที เปิดจุกยางออก และค่อย ๆ หย่อนไฮโดรมิเตอร์ลงไป อ่านค่าบนก้านไฮโดรมิเตอร์ทันทีเมื่อครบ 40 วินาที ถ้าบริเวณผิวหน้าของสารละลายดินเต็มไปด้วยฟองอากาศ ให้หยดเอทิลแอลกอฮอล์ลงไป 2 – 3 หยด
9. นำไฮโดรมิเตอร์ออกจากกระบอกแก้ว แล้ววัดอุณหภูมิของสารละลายดินโดยหย่อนเทอร์โมมิเตอร์ลงไปให้มีความลึกอยู่ในสารละลายดินประมาณ 5 เซนติเมตร ล้างไฮโดรมิเตอร์และเทอร์โมมิเตอร์ให้สะอาดเพื่อใช้อ่านค่าในช่วงเวลาถัดไป
10. ตั้งกระบอกแก้วทิ้งไว้บนโต๊ะ ห้ามรบกวนและเคลื่อนย้าย จับเวลาต่อให้ครบ 2 ชั่วโมง
11. เมื่อครบ 2 ชั่วโมง อ่านค่าจากไฮโดรมิเตอร์และเทอร์โมมิเตอร์อีกครั้งหนึ่ง
12. ทำแบล็งค์ (Blank) (ไม่ใช่ตัวอย่างดิน) โดยใช้สารละลายแคลกอนลงในกระบอกแก้วสำหรับการตกตะกอน จำนวน 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 1 ลิตร และเขย่าให้เข้ากันดี จากนั้นทำตามขั้นตอนที่ 6. – 11.
13. คำนวณหาร้อยละของอนุภาคขนาดทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว และหาประเภทของเนื้อดินโดยใช้สามเหลี่ยมแสดงประเภทเนื้อดิน

วิธีคำนวณ

1. ปรับค่าแบล็งค์

$$\text{corrected hydrometer reading}_1 = R_S - R_B$$

โดยที่

R_S = ค่าที่อ่านได้ของสารแขวนลอยดินที่อุณหภูมิห้อง เมื่อ 40 วินาที หรือ 2 ชั่วโมง (กรัม/ลิตร)

R_B = ค่าที่อ่านได้ของสารละลายแคลกอนที่อุณหภูมิห้อง เมื่อ 40 วินาที หรือ 2 ชั่วโมง (กรัม/ลิตร)

2. ปรับค่าอุณหภูมิ

$$\text{corrected hydrometer reading}_2 = \text{Corrected Hydrometer Reading}_1 + 0.36 (T-20^\circ\text{C})$$

โดยที่

T = อุณหภูมิของสารแขวนลอยดินเมื่อ 40 วินาที หรือ 2 ชั่วโมง (องศาเซลเซียส)

3. การคำนวณผลรวมของปริมาณอนุภาคขนาดทรายแป้งและดินเหนียว

$$\text{silt} + \text{clay} (\%) = \frac{\text{corrected hydrometer reading}_2 \text{ at 40 seconds}}{W} \times 100 \times \text{mf}$$

โดยที่

W = น้ำหนักตัวอย่างดิน (กรัม)

mf = moisture correction factor

4. การคำนวณปริมาณอนุภาคของดินเหนียว

$$\text{clay} (\%) = \frac{\text{corrected hydrometer reading}_2 \text{ at 2 hours}}{W} \times 100 \times \text{mf}$$

โดยที่

W = น้ำหนักตัวอย่างดิน (กรัม)

mf = moisture correction factor

5. การคำนวณปริมาณอนุภาคขนาดทรายแป้ง

$$\text{Silt} (\%) = (3.) - (4.)$$

6. การคำนวณปริมาณอนุภาคขนาดทราย

$$\text{Sand} (\%) = 100 - (3.)$$

3. ความหนาแน่นรวม (bulk density) โดยวิธี Measurement of disturbed soil

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. กระจกตวง (cylinder) ขนาด 100 มิลลิลิตร
2. เครื่องชั่งตวง 2 ตำแหน่ง

วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งกระจกตวงขนาด 100 มิลลิลิตร
2. ตักตัวอย่างดินที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 10 (ขนาดช่อง 2 มิลลิเมตร) แล้วลงไป
ในกระจกตวงให้มีปริมาตร 100 มิลลิลิตร
3. ทำให้ดินอัดแน่นในกระจกตวงโดยการนำกระจกตวงมาเคาะบนฝ่ามือเบา ๆ 10 ครั้ง
จะทำให้ดินลดลงจากขีดปริมาตรที่ 100 มิลลิลิตร ให้ทำการเติมดินลงไปเพื่อให้ปริมาตรของดินอยู่ที่
100 มิลลิลิตรดั้งเดิม
4. นำกระจกตวงที่มีตัวอย่างดินมาชั่งน้ำหนัก

วิธีคำนวณ

1. ค่าความหนาแน่นรวมของตัวอย่างดินคำนวณได้จาก

$$D = \frac{M}{V}$$

โดยที่

D = ความหนาแน่นรวม (bulk density) (กรัมต่อมิลลิลิตร)

M = น้ำหนักของตัวอย่างดิน (กรัม)

V = ปริมาตรของดิน

4. การวัดระดับพีเอช (pH) (อัตราส่วน ดิน : น้ำ เท่ากับ 1 : 5)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องวัดระดับความเป็นกรดต่าง (pH meter)
2. เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง
3. ปีกเกอร์ (beaker) ขนาด 100 มิลลิลิตร
4. แท่งแก้วสำหรับคน (stirring rod)
5. กระจกบอกล้างน้ำกลั่น (wash bottle)

สารเคมีและการเตรียมสารเคมี

1. สารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐาน (standard buffer solution) พีเอช 4 7 และ 9
2. น้ำกลั่น

วิธีวิเคราะห์

1. ก่อนวัดพีเอชต้องสอบเทียบ (calibration) เครื่องวัดพีเอชด้วยสารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐานที่พีเอช 4 7 และ 9
2. ชั่งตัวอย่างดินที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาดเบอร์ 10 (ขนาดช่อง 2 มิลลิเมตร) จำนวน 10 กรัม ใส่ในปีกเกอร์ แล้วเติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร
3. ใช้แท่งแก้วคนให้ดินและน้ำเข้ากันเป็นระยะ ๆ ให้บ่อยครั้งในระยะ 30 นาทีแรก หลังจากนั้นตั้งทิ้งไว้อีก 30 นาที
4. ใช้แท่งแก้วคนดินและน้ำให้เข้ากันอีกครั้งและวัดพีเอชของดินในส่วนชุ่นด้วยเครื่องวัดพีเอช

5. การนำไฟฟ้าของดิน (electrical conductivity) (อัตราส่วน ดิน : น้ำ เท่ากับ 1:5)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (electrical conductivity meter)
2. เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง
3. ปีกเกอร์ (beaker) ขนาด 100 มิลลิลิตร
4. แท่งแก้วสำหรับคน (stirring rod)
5. กระจกบอกล้างน้ำกลั่น (wash bottle)

สารเคมีและการเตรียมสารเคมี

1. สารละลายโปแตสเซียมคลอไรด์มาตรฐาน ความเข้มข้น 0.001 M
ละลายโปแตสเซียมคลอไรด์ (Potassium Chloride, KCl) ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส มาแล้ว เป็นเวลาอย่างน้อย 2 ชั่วโมง จำนวน 0.0746 กรัม ในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ในขวดปรับปริมาตร
2. สารละลายโปแตสเซียมคลอไรด์มาตรฐาน ความเข้มข้น 0.01 M
ละลายโปแตสเซียมคลอไรด์ (Potassium Chloride, KCl) ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส มาแล้ว เป็นเวลาอย่างน้อย 2 ชั่วโมง จำนวน 0.746 กรัม ในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ในขวดปรับปริมาตร
3. สารละลายโปแตสเซียมคลอไรด์มาตรฐาน ความเข้มข้น 0.1 M
ละลายโปแตสเซียมคลอไรด์ (Potassium Chloride, KCl) ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส มาแล้ว เป็นเวลาอย่างน้อย 2 ชั่วโมง จำนวน 7.46 กรัม ในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ในขวดปรับปริมาตร

วิธีวิเคราะห์

1. ก่อนวัดค่าการนำไฟฟ้า จำเป็นต้องสอบเทียบ (calibration) เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า ด้วยสารละลายโปแตสเซียมคลอไรด์มาตรฐาน ความเข้มข้น 0.001 0.01 และ 0.1 M
2. ชั่งตัวอย่างดินที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 10 (ขนาดช่อง 2 มิลลิเมตร) จำนวน 10 กรัม ใส่ในปีกเกอร์แล้วเติมน้ำกลั่น จำนวน 50 มิลลิลิตร ลงไป
3. ใช้แท่งแก้วคนให้ดินและน้ำเข้ากันเป็นระยะ ๆ ให้บ่อยครั้งในระยะเวลา 30 นาทีแรก หลังจากนั้นตั้งทิ้งไว้อีก 30 นาที
4. วัดค่าการนำไฟฟ้าของดิน บริเวณสารละลายส่วนใสด้วยเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า

6. อินทรีย์คาร์บอน (organic carbon) และอินทรีย์วัตถุ (organic matter)

โดยวิธี Walkley and Black

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง
2. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง
3. เครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก (magnetic stirrer)
4. ขวดخمพู่ (erlenmeyer flask) ขนาด 250 มิลลิลิตร
5. บิวเรต ดูด - จ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตร (auto burette)
6. ปิเปต ดูด - จ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตรได้ (auto pipette)
7. เครื่องดูด - จ่ายกรดซัลฟูริกอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตรได้ (acid dispenser)
8. บีกเกอร์ (breaker) ขนาด 100 มิลลิลิตร และ 250 มิลลิลิตร
9. หลอดหยดสารละลาย (dropper)

สารเคมีและการเตรียมสารเคมี

1. สารละลายโปแตสเซียมไดโครเมต (potassium dichromate, $K_2Cr_2O_7$) 1.0 N
ละลายโปแตสเซียมไดโครเมตที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส มาแล้วเป็นเวลาอย่างน้อย 3 ชั่วโมง จำนวน 49.04 กรัม ในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ในขวดปรับปริมาตร
2. กรดซัลฟูริกเข้มข้น (sulfuric acid, H_2SO_4)
กรดที่ใช้ต้องมีความเข้มข้นไม่น้อยกว่าร้อยละ 96
3. สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) 0.5 N
ละลายเฟอร์รัสซัลเฟต ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) จำนวน 140 กรัม ในน้ำกลั่นประมาณ 500 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้นลงไป 20 มิลลิลิตร ทั้งให้เย็น ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ในขวดปรับปริมาตร

สารละลายนี้จะมีความเข้มข้นลดลงเรื่อย ๆ เนื่องจากเกิดการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในบรรยากาศ ดังนั้นจึงต้องมีการเทียบมาตรฐานกับสารละลายโปแตสเซียมไดโครเมตในข้อ 1. ทุกครั้งที่มีการทำปฏิบัติการ (คือการทำแบลิ่งค์)

4. เฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ (ferroin indicator)

ละลาย 1,10 – phenanthroline monohydrate จำนวน 1.48 กรัม และเฟอร์รัสซัลเฟต ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) จำนวน 0.7 กรัม ในน้ำกลั่น ปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ในขวดปริมาตร

วิธีวิเคราะห์

1. บดตัวอย่างดินที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 10 (ขนาดช่อง 2 มิลลิเมตร) ประมาณ 5 กรัม ด้วยครกกระเบื้องเคลือบ ผสมคลุกเคล้าให้เข้ากันดี และนำไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 35 (ขนาดช่อง 0.5 มิลลิเมตร)
2. ชั่งตัวอย่างดินที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 35 (ขนาดช่อง 0.5 มิลลิเมตร) จำนวน 0.5 กรัม (บันทึกน้ำหนักถึงทศนิยม 4 ตำแหน่ง) ใส่ลงในขวดชมพูขนาด 250 มิลลิลิตร อาจชั่งดินให้น้อยลงได้ สำหรับดินที่มีสีเข้มและเป็นดินเนื้อละเอียด หรือชั่งตัวอย่างดินให้มากขึ้นสำหรับดินที่มีสีจางและเป็นดินเนื้อหยาบ โดยทั่วไป สำหรับดินแร่ธาตุ แนะนำให้ชั่งตัวอย่างดินหนัก 0.5 – 2.00 กรัม ส่วนดินอินทรีย์ แนะนำให้ชั่งตัวอย่างดินหนัก 0.05 – 0.20 กรัม
3. ปิเปตสารละลาย 1.0 N โปแตสเซียมไดโครเมต ลงในขวดชมพู จำนวน 10 มิลลิลิตร แก้วขวดชมพูเบา ๆ ให้วัสดุผสมกับสารละลาย
4. เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้นลงไป 20 มิลลิลิตร โดยเร็วให้กรดผสมกับสารละลายดินโดยตรง แก้วขวดชมพูไปรอบ ๆ เบา ๆ จนดินและสารละลายผสมกันดี เป็นเวลา 1 นาที การแกว่งผสมสารละลายควรทำด้วยความระมัดระวังเพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้ตัวอย่างดินเกาะติดอยู่ตามผนังของขวดชมพู (ขั้นตอนนี้อาจเกิดปฏิกิริยารุนแรง ควรทำปฏิกิริยาในตู้ดูดควัน สวมถุงมือป้องกันกรดและสวมแว่นตา)
5. ตั้งขวดชมพูทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที เพื่อให้ทำปฏิกิริยา
6. เติมน้ำกลั่นลงไปประมาณ 50 มิลลิลิตร
7. หยดเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ จำนวน 3 – 4 หยด
8. ไทเทรตสารละลายดิน กับ 0.5 N เฟอร์รัสซัลเฟต เมื่อใกล้ถึงจุดยุติ สารละลายวัสดุผสมจะเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีเขียวเข้ม ที่จุดนี้ค่อย ๆ เติมเฟอร์รัสซัลเฟตลงไปช้า ๆ (ทีละหยด) จนกระทั่งสารละลายวัสดุผสมเปลี่ยนจากสีเขียวอมน้ำเงินเป็นน้ำตาลแกมแดง
9. เมื่อพบว่าใช้ปริมาตรของเฟอร์รัสซัลเฟต อยู่ระหว่าง 0 – 4 มิลลิลิตร ให้ทำใหม่ โดยลดน้ำหนักดินลง หรือพบว่าใช้เฟอร์รัสซัลเฟตเป็นปริมาตรเท่ากับหรือมากกว่า 17 มิลลิลิตร ให้ทำใหม่เช่นกัน โดยเพิ่มน้ำหนักดินให้มากขึ้น
10. ทำแบล็งค์ (blank) 3 ซ้ำ โดยไม่ใส่ตัวอย่างดิน แต่ปฏิบัติเช่นเดียวกับการวิเคราะห์วัสดุ (ข้อ 3. – 8.) เพื่อใช้ในการเทียบมาตรฐานสารละลายเฟอร์รัสซัลเฟต

วิธีคำนวณ

ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนและอินทรีย์วัตถุสามารถประมาณได้จากสมการต่อไปนี้

$$N_f = \frac{10 N_C}{T_1}$$

$$\text{organic carbon (\%)} = \frac{(T_1 - T_2) \times N_f \times 0.003 \times O_f \times 100}{W} \times mf$$

$$\text{organic matter (\%)} = C_f \times \text{organic C (\%)}$$

โดยที่

T_1 = ปริมาตรของสารละลาย Fe^{2+} ที่ใช้ไทเทรตกับแบลิ่งค์ (มิลลิลิตร)

T_2 = ปริมาตรของสารละลาย Fe^{2+} ที่ใช้ไทเทรตกับดินที่ใช้ทดสอบ (มิลลิลิตร)

N_f = ความเข้มข้นของสารละลาย Fe^{2+} (N)

N_C = ความเข้มข้นของสารละลายโปแตสเซียมไดโครเมต (N)

0.003 = น้ำหนักสมมูลของคาร์บอน (กรัม)

O_f = oxidation factor (ค่าโดยทั่วไปที่ใช้คือ 1.3 เนื่องจากสมมติฐานที่ว่า อินทรีย์คาร์บอนเพียงร้อยละ 77 เท่านั้นที่เกิดปฏิกิริยา)

W = น้ำหนักดินที่ใช้ทดสอบ (กรัม)

mf = moisture correction factor

C_f = conversion factor (ห้องปฏิบัติการในประเทศไทยนิยมใช้ค่า 1.724 หรือ 100/58 เนื่องจากสมมติฐานที่ว่า อินทรีย์วัตถุในดินประกอบด้วยอินทรีย์คาร์บอนร้อยละ 58)

7. การวิเคราะห์ไนโตรเจนทั้งหมด (Total N) โดยวิธี kjeldahl method

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง
2. เครื่องย่อย (digestion block)
3. เครื่องกลั่นไนโตรเจน (kjeldahl distillation unit)
4. เครื่องกวนสารแบบให้ความร้อน (hot plate stirrer)
5. หลอดย่อย (digestion tube) 250 มิลลิลิตร
6. ปีกเกอร์ (breaker) 100 500 และ 1000 มิลลิลิตร
7. ขวดخمพู่ (eelenmeyer flask) 125 และ 250 มิลลิลิตร
8. ขวดปริมาตร (volumetric flask) 100 1000 และ 2000 มิลลิลิตร
9. บิวเรต (buret) 50 มิลลิลิตร
10. ปิเปต (pipet) 10 และ 25 มิลลิลิตร
11. กระบอกตวง (cylinder) 50 และ 100 มิลลิลิตร

สารเคมีและการเตรียมตัวอย่าง

1. กรดซัลฟูริก (sulfuric acid, H_2SO_4) เข้มข้นร้อยละ 98
2. สารผสมเร่งปฏิกิริยา (catalyst mixture)
3. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, NaOH) 10 M
ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 400 กรัมในน้ำกลั่น 800 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรในขวด ปริมาตร 1 ลิตร
4. อินดิเคเตอร์ผสม (mixed indicator)
ละลายเมทิลเรด (methyl red) 0.066 กรัม และโบรมโครีซอลกรีน (bromocresol green) 0.099 กรัม ในเอธานอลร้อยละ 95 (w/w) ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร
5. สารละลายกรดบอริกอินดิเคเตอร์ร้อยละ 2 (boric acid indicator solution)
ละลายกรดบอริก (boric acid, H_3BO_3) 20 กรัมในน้ำ 800 มิลลิลิตร ในปีกเกอร์ขนาด 1 ลิตร นำไปตั้งบนเครื่องกวนสารแบบให้ความร้อน เพื่อละลายกรดบอริกเมื่อกรดบอริกละลายหมด เติมอินดิเคเตอร์ผสมลงไป 20 มิลลิลิตร และเติม 0.1 M โซเดียมไฮดรอกไซด์ทีละน้อยจนกระทั่ง สารละลายมีสีม่วง (pH ประมาณ 5.0) จากนั้นเทใส่ขวดปริมาตรเพื่อปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตรด้วยน้ำ กลั่น เขย่าให้เข้ากัน

6. สารละลายมาตรฐาน กรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid, HCl) 0.025 M
 ปิเปตกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2.08 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปริมาตรที่มีน้ำประมาณ 800 มิลลิลิตร เขย่าให้สารละลายผสมกัน ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร (นำไปหาความเข้มข้นที่แน่นอนอีกครั้ง)
7. โซเดียมคาร์บอเนต (sodium carbonate, Na_2CO_3)
8. เมททิลเรดอินดิเคเตอร์ร้อยละ 0.1 (methyl red indicator)
 ละลายเมททิลเรด 0.5 กรัมใส่ในขวดปริมาตรที่มีน้ำประมาณ 800 มิลลิลิตร เขย่าให้สารละลายผสมกัน ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร

วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งตัวอย่างดินที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 35 (ขนาดช่อง 0.5 มิลลิเมตร) จำนวน 0.5 – 1 กรัม ใส่ในหลอดย่อยบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน ระวังอย่าให้วัสดุเปื้อนด้านข้างหลอด และใช้หลอดเปล่าเป็นแบล็ก (blank) (ไม่ใส่วัสดุที่ใช้ทดสอบ) และทำวัสดุอ้างอิงไปพร้อมกัน
2. เติมสารผสมเร่งปฏิกิริยา ลงไป 1 เม็ด
3. เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้นลงไป 5 – 10 มิลลิลิตร โดยหมุนหลอดย่อยช้า ๆ เขย่าให้ส่วนผสมทั้งหมดคลุกเคล้ากัน
4. นำไปย่อยด้วยเครื่องย่อย ในตู้ดูดควันค่อย ๆ เพิ่มอุณหภูมิจาก 100 – 250 – 380 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และย่อยต่อไปจนกระทั่งสีของสารละลายที่ย่อยใสหรือสีขาวขุ่น แล้วยกออกจากเครื่องย่อย ทิ้งไว้ให้เย็น
5. เติมสารละลายกรดบอริกอินดิเคเตอร์ร้อยละ 2 จำนวน 20 มิลลิลิตร ลงในขวดชมพู ขนาด 125 มิลลิลิตร
6. นำสารละลายผสมวัสดุที่ผ่านการย่อยแล้วจากข้อ 4. ไปกลั่นด้วยเครื่องกลั่น ก่อนกลั่นเติมน้ำกลั่นลงไป 50 มิลลิลิตร เติมสารละลาย 10 M โซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไป 25 มิลลิลิตร และใช้กรดบอริกจากข้อ 5 ดักจับแก๊สแอมโมเนียที่เกิดขึ้น ทำการกลั่นจนกว่าสีของบอริกอินดิเคเตอร์เปลี่ยนจากสีชมพูเป็นสีเขียว และได้สารละลายจากการกลั่นประมาณ 75 มิลลิลิตร
7. นำสารละลายที่กลั่นได้จากข้อ 6. ไปไทเทรตด้วยสารละลาย 0.025 M ไฮโดรคลอริก จนสารละลายเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีชมพู บันทึกปริมาตรของสารละลายกรดที่ใช้ นำมาคำนวณหาปริมาณไนโตรเจน
8. กลั่นแบล็กและไทเทรตเช่นเดียวกับวัสดุที่ใช้ทดสอบ

วิธีคำนวณ

1. ความเข้มข้นของไนโตรเจนทั้งหมดในวัสดุที่ใช้ทดสอบ คำนวณได้จาก

$$\% \text{ไนโตรเจน (Total N)} = \frac{N \times (V-B) \times 0.014 \times 100}{W} \times mf$$

โดยที่

N = ความเข้มข้นที่แท้จริงของกรดไฮโดรคลอริก (M)

V = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ไทเทรตกับตัวอย่างดิน (ml)

B = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ไทเทรตกับแบล้งค์ (ml)

W = น้ำหนักของวัสดุที่ใช้ทดสอบ (g)

mf = moisture factor

การหาความเข้มข้นที่แท้จริงของกรดไฮโดรคลอริก (0.025 M HCl)

ซิงโซเดียมคาร์บอเนต (sodium carbonate, Na_2CO_3) ที่อบแห้ง 110 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง ประมาณ 0.002 - 0.01 กรัมใส่ลงในขวดชมพูขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร เขย่าจนสารละลายหมด หยด เมทิลเรดอินดิเคเตอร์ร้อยละ 15 ลงไป 3 หยด นำไปไทเทรตด้วยสารละลายไฮโดรคลอริกที่เตรียมไว้จนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีแดง นำไปตั้งบนเครื่องกวนสารแบบให้ความร้อน สารละลายจะเปลี่ยนจากสีแดงเป็นเหลืองอีกครั้ง หลังจากนั้นทำให้เย็นและนำไปไทเทรตต่อจนสารละลายเป็นสีแดง บันทึกปริมาตรของสารละลายไฮโดรคลอริกที่ใช้ แล้วนำมาคำนวณหาความเข้มข้นที่แท้จริงของไฮโดรคลอริก โดยมีวิธีคำนวณดังนี้

$$\text{ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (M)} = \frac{\text{น้ำหนักของ } \text{Na}_2\text{CO}_3 \text{ ที่ใช้ (กรัม)}}{53 \times \text{ปริมาตร HCl ที่ใช้ไทเทรต}} \times 1000$$



ภาคผนวก ข
ความขึ้นของตัวอย่างดิน

ตารางที่ ข.1 ความชื้นของตัวอย่างดิน

ตัวอย่างดิน	ความชื้น (ร้อยละ)	Moisture correction factor (mf)
ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ	3.83 ± 0.04	1.04 ± 0.00
ดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา	3.36 ± 0.02	1.03 ± 0.00
ดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม	0.76 ± 0.02	1.01 ± 0.00





การเปลี่ยนหน่วยความเข้มข้นของมีเทนจากร้อยละเป็นไมโครโมลต่อกรัม

สภาวะของการทดลอง

- ความเข้มข้นของมีเทน = 2 4 6 8 10 และ 14 ร้อยละ
- ปริมาตรภายในขวดซีรัมบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดิน = 109 มิลลิลิตร
- ปริมาตรของแก๊สใด ๆ 1 โมล ที่อุณหภูมิและความดันปกติ (อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความดัน 760 มิลลิเมตรปรอท) = 24.45 ลิตร
- น้ำหนักตัวอย่างดินของดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ = 9 กรัม
- น้ำหนักตัวอย่างดินของดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา และดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม = 10 กรัม
- Moisture correction factor (mf) สำหรับดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ = 1.04
- Moisture correction factor (mf) สำหรับดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา = 1.03
- Moisture correction factor (mf) สำหรับดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม = 1.01

ความเข้มข้นมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม) =

$$\frac{\text{ร้อยละของมีเทน}}{100} \times \text{ปริมาตรขวด (ml)} \times \frac{\text{mmol}}{24.45 \text{ ml}} \times \frac{1}{\text{น้ำหนักดิน (g)}} \times \frac{1000 \text{ } \mu\text{mol}}{\text{mmol}} \times \text{mf}$$

ตัวอย่างการคำนวณ สำหรับดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ กำหนดให้

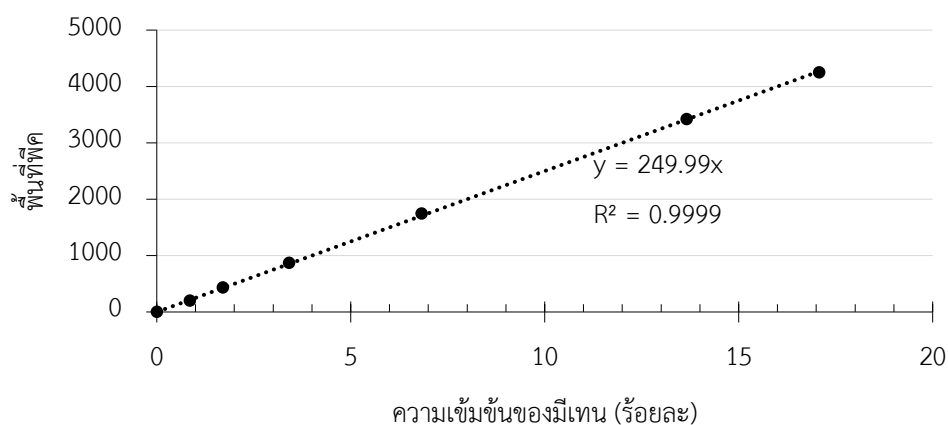
- ความเข้มข้นของมีเทน = 10 ร้อยละ
- น้ำหนักตัวอย่างดิน = 9 กรัม

$$\begin{aligned} \text{ความเข้มข้นมีเทน} &= \frac{10}{100} \times 109 \text{ ml} \times \frac{\text{mmol}}{24.45 \text{ ml}} \times \frac{1}{9 \text{ g}} \times \frac{1000 \text{ } \mu\text{mol}}{\text{mmol}} \times 1.04 \\ &= 51.56 \quad \text{ไมโครโมลต่อกรัม} \end{aligned}$$



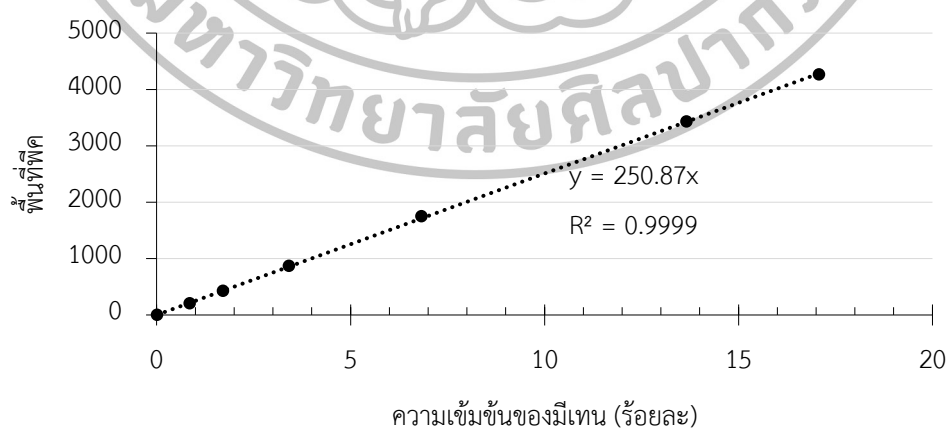
ตารางที่ ง.1 ความเข้มข้นของมีเทนและพื้นที่ฟีดที่ใช้ทำกราฟมาตรฐานชุดที่ 1

การวิเคราะห์ซ้ำ	ความเข้มข้นของมีเทน (ร้อยละ)	พื้นที่ฟีด	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทน (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยพื้นที่ฟีด
1	0.01	2.10	0.01±0.00	1.87±0.21
2	0.01	1.80		
3	0.01	1.70		
1	0.85	207.50	0.85±0.00	200.77±6.43
2	0.85	194.70		
3	0.85	200.10		
1	1.71	431.70	1.71±0.00	434.30±2.33
2	1.71	436.20		
3	1.71	435.00		
1	3.42	872.70	3.42±0.00	869.51±5.81
2	3.42	873.02		
3	3.42	862.80		
1	6.83	1,747.10	6.83±0.00	1,744.73±3.12
2	6.83	1,745.90		
3	6.83	1,741.20		
1	13.66	3,441.00	13.66±0.00	3,417.57±25.87
2	13.66	3,421.90		
3	13.66	3,389.80		
1	17.08	4,252.20	17.08±0.00	4,248.33±11.31
2	17.08	4,257.20		
3	17.08	4,235.60		



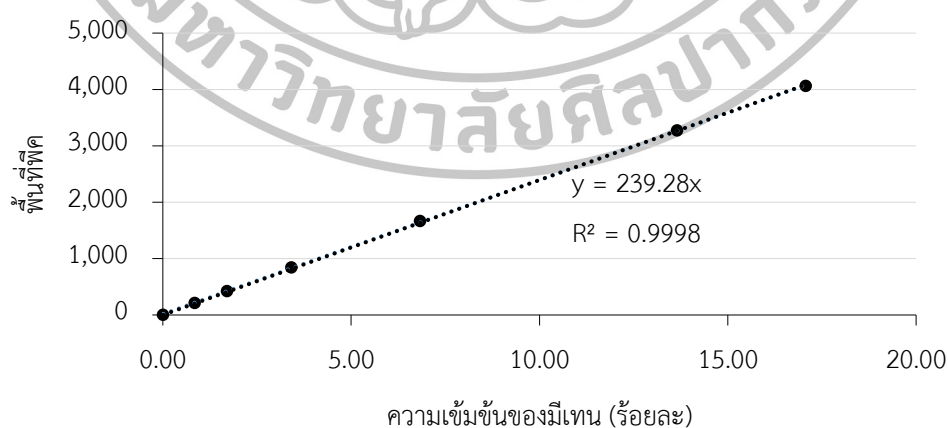
ตารางที่ ง.2 ความเข้มข้นของมีเทนและพื้นที่ฟีดที่ใช้ทำกราฟมาตรฐานชุดที่ 2

การวิเคราะห์ซ้ำ	ความเข้มข้นของมีเทน (ร้อยละ)	พื้นที่ฟีด	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทน (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยพื้นที่ฟีด
1	0.01	1.20	0.01±0.00	1.23±0.06
2	0.01	1.30		
3	0.01	1.20		
1	0.85	202.90	0.85±0.00	205.35±3.46
2	0.85	207.80		
3	-	-		
1	1.71	431.60	1.71±0.00	428.20±5.72
2	1.71	431.40		
3	1.71	421.60		
1	3.42	871.00	3.42±0.00	869.27±2.83
2	3.42	866.00		
3	3.42	870.80		
1	6.83	1756.00	6.83±0.00	1,752.13±10.83
2	6.83	1739.90		
3	6.83	1760.50		
1	13.66	3452.30	13.66±0.00	3,428.53±30.83
2	13.66	3439.60		
3	13.66	3393.70		
1	-	-		
2	17.08	4253.90	17.08±0.00	4,264.80±15.41
3	17.08	4275.70		



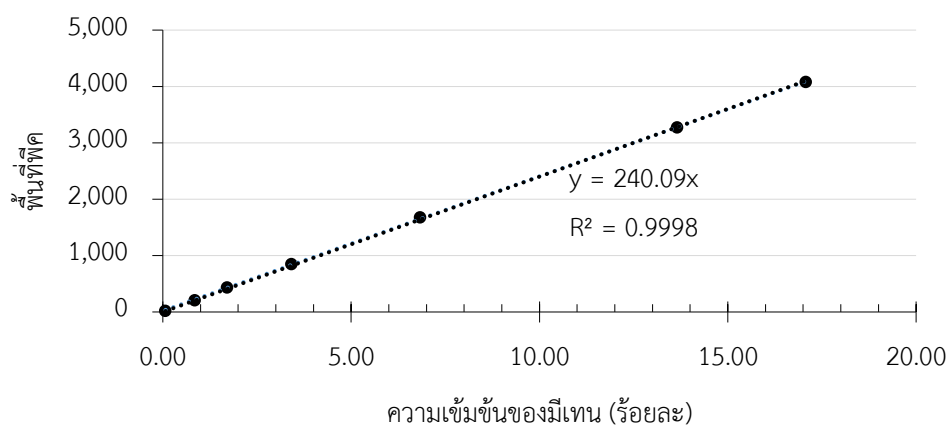
ตารางที่ ง.3 ความเข้มข้นของมีเทนและพื้นที่ฟีดที่ใช้ทำกราฟมาตรฐานชุดที่ 3

การวิเคราะห์ซ้ำ	ความเข้มข้นของมีเทน (ร้อยละ)	พื้นที่ฟีด	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทน (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยพื้นที่ฟีด
1	0.01	1.60	0.01±0.00	1.63±0.06
2	0.01	1.60		
3	0.01	1.70		
1	0.85	209.80	0.85±0.00	208.53±1.78
2	0.85	206.50		
3	0.85	209.30		
1	1.71	423.20	1.71±0.00	422.00±4.33
2	1.71	425.60		
3	1.71	417.20		
1	3.42	841.10	3.42±0.00	842.77±1.56
2	3.42	843.00		
3	3.42	844.20		
1	6.83	1671.40	6.83±0.00	1,665.47±13.98
2	6.83	1649.50		
3	6.83	1675.50		
1	13.66	3281.10	13.66±0.00	3,274.20±19.39
2	13.66	3289.20		
3	13.66	3252.30		
1	17.08	4074.10	17.08±0.00	4,062.20±16.55
2	17.08	4043.30		
3	17.08	4069.20		



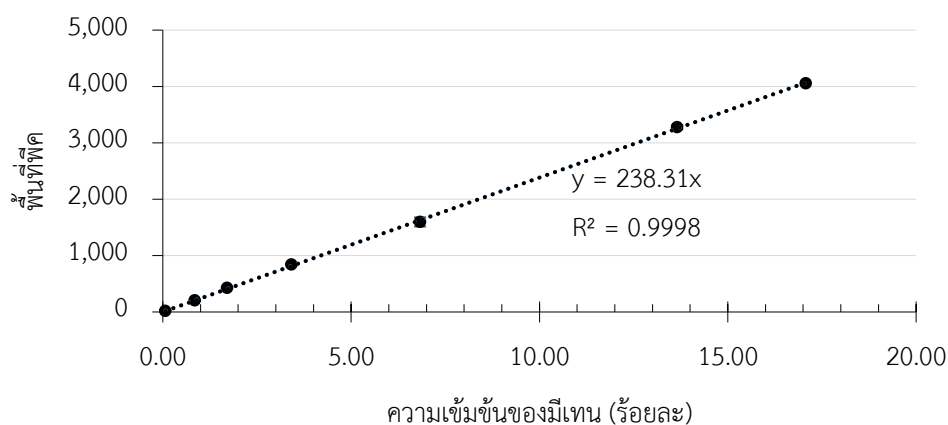
ตารางที่ ง.4 ความเข้มข้นของมีเทนและพื้นที่ฟีดที่ใช้ทำกราฟมาตรฐานชุดที่ 4

การวิเคราะห์ซ้ำ	ความเข้มข้นของมีเทน (ร้อยละ)	พื้นที่ฟีด	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของ มีเทน (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยพื้นที่ฟีด
1	0.07	16.9	0.07±0.00	16.03±0.81
2	0.07	15.9		
3	0.07	15.3		
1	0.85	179.90	0.85±0.00	203.47±20.48
2	0.85	217.00		
3	0.85	213.50		
1	1.71	438.40	1.71±0.00	435.50±3.12
2	1.71	432.20		
3	1.71	435.90		
1	3.42	842.70	3.42±0.00	849.80±6.32
2	3.42	854.80		
3	3.42	851.90		
1	6.83	1671.80	6.83±0.00	1,678.93±11.84
2	6.83	1692.60		
3	6.83	1672.40		
1	13.66	3305.70	13.66±0.00	3,274.40±33.72
2	13.66	3278.80		
3	13.66	3238.70		
1	17.08	4115.50	17.08±0.00	4,079.77±31.94
2	17.08	4054.00		
3	17.08	4069.80		



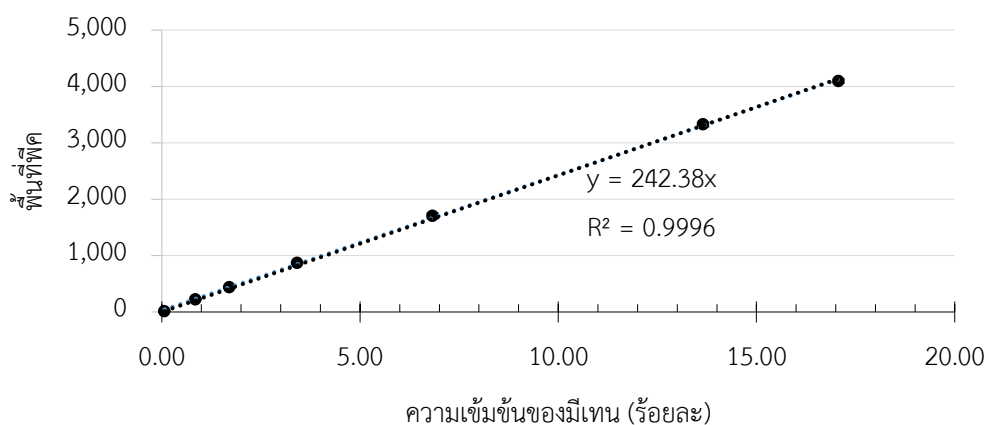
ตารางที่ ง.5 ความเข้มข้นของมีเทนและพื้นที่ฟีดที่ใช้ทำกราฟมาตรฐานชุดที่ 5

การวิเคราะห์ซ้ำ	ความเข้มข้นของมีเทน (ร้อยละ)	พื้นที่ฟีด	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทน (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยพื้นที่ฟีด
1	0.07	16.7	0.07±0.00	15.83±0.85
2	0.07	15.8		
3	0.07	15.0		
1	0.85	205.9	0.85±0.00	203.17±3.30
2	0.85	199.5		
3	0.85	204.1		
1	1.71	435.6	1.71±0.00	425.77±10.56
2	1.71	414.6		
3	1.71	427.1		
1	3.42	833.8	3.42±0.00	843.67±14.73
2	3.42	860.6		
3	3.42	836.6		
1	6.83	1,550.3	6.83±0.00	1,596.87±81.00
2	6.83	1,690.4		
3	6.83	1,549.9		
1	13.66	3,258.3	13.66±0.00	3,276.60±36.92
2	13.66	3,319.1		
3	13.66	3,252.4		
1	17.08	4,102.5	17.08±0.00	4,056.77±53.39
2	17.08	3,998.1		
3	17.08	4,069.7		



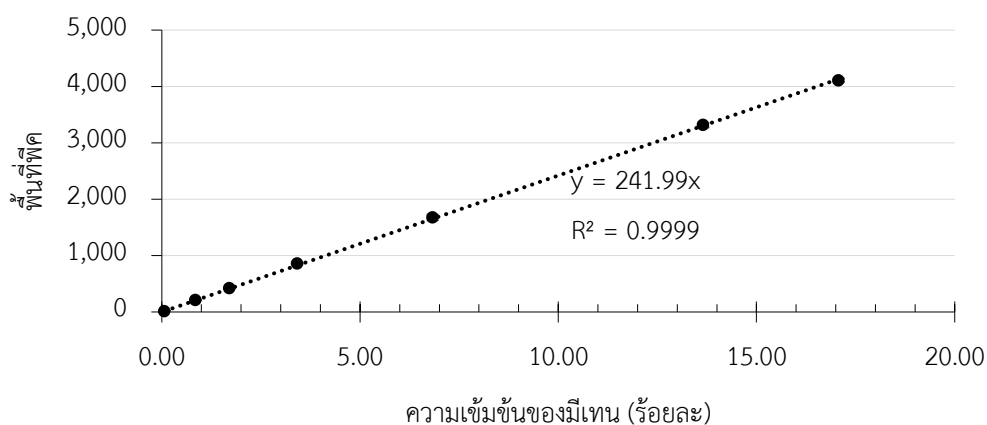
ตารางที่ ง.6 ความเข้มข้นของมีเทนและพื้นที่ฟีดที่ใช้ทำกราฟมาตรฐานชุดที่ 6

การวิเคราะห์ซ้ำ	ความเข้มข้นของมีเทน (ร้อยละ)	พื้นที่ฟีด	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทน (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยพื้นที่ฟีด
1	0.07	12.6	0.07±0.00	15.37±2.51
2	0.07	16.0		
3	0.07	17.5		
1	0.85	222.1	0.85±0.00	223.73±2.10
2	0.85	223.0		
3	0.85	226.1		
1	1.71	445.1	1.71±0.00	436.50±9.26
2	1.71	426.7		
3	1.71	437.7		
1	3.42	861.3	3.42±0.00	867.33±10.28
2	3.42	879.2		
3	3.42	861.5		
1	6.83	1,675.1	6.83±0.00	1,704.87±48.13
2	6.83	1,760.4		
3	6.83	1,679.1		
1	13.66	3,361.6	13.66±0.00	3,326.13±39.54
2	13.66	3,333.3		
3	13.66	3,283.5		
1	17.08	4,129.7	17.08±0.00	4,095.67±32.00
2	17.08	4,066.2		
3	17.08	4,091.1		



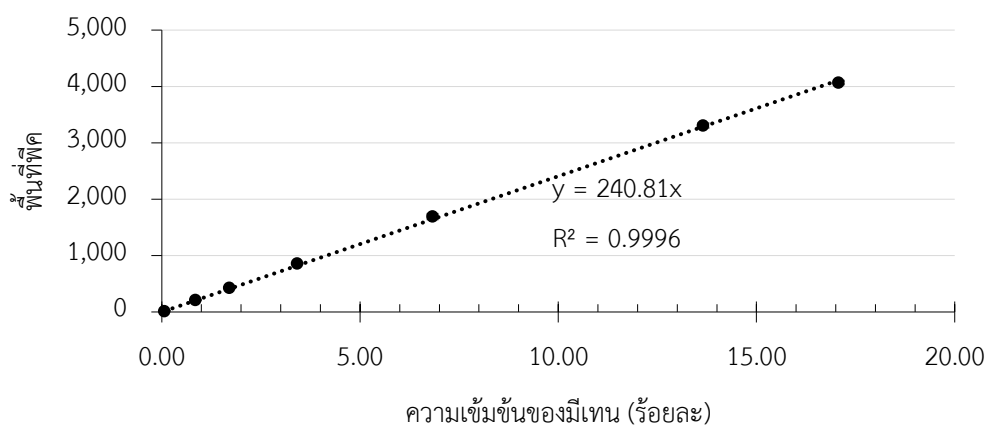
ตารางที่ ง.7 ความเข้มข้นของมีเทนและพื้นที่ฟีดที่ใช้ทำกราฟมาตรฐานชุดที่ 7

การวิเคราะห์ซ้ำ	ความเข้มข้นของมีเทน (ร้อยละ)	พื้นที่ฟีด	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทน (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยพื้นที่ฟีด
1	0.07	16.7	0.07±0.00	15.07±1.42
2	0.07	14.1		
3	0.07	14.4		
1	0.85	214.5	0.85±0.00	208.77±8.58
2	0.85	212.9		
3	0.85	198.9		
1	1.71	406.8	1.71±0.00	421.77±13.61
2	1.71	433.4		
3	1.71	425.1		
1	3.42	854.4	3.42±0.00	855.83±2.15
2	3.42	858.3		
3	3.42	854.8		
1	6.83	1,667.5	6.83±0.00	1,675.27±14.77
2	6.83	1,666.0		
3	6.83	1,692.3		
1	13.66	3,266.8	13.66±0.00	3,314.53±46.83
2	13.66	3,360.4		
3	13.66	3,316.4		
1	17.08	4,080.5	17.08±0.00	4,109.13±51.86
2	17.08	4,077.9		
3	17.08	4,169.0		



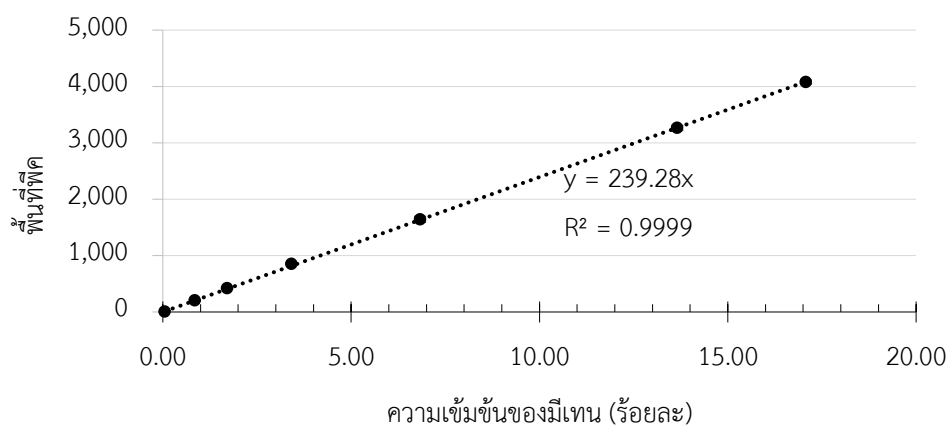
ตารางที่ ง.8 ความเข้มข้นของมีเทนและพื้นที่ฟีดที่ใช้ทำกราฟมาตรฐานชุดที่ 8

การวิเคราะห์ซ้ำ	ความเข้มข้นของมีเทน (ร้อยละ)	พื้นที่ฟีด	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทน (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยพื้นที่ฟีด
1	0.07	14.2	0.07±0.00	14.93±1.36
2	0.07	16.5		
3	0.07	14.1		
1	0.85	214.5	0.85±0.00	210.23±7.56
2	0.85	201.5		
3	0.85	214.7		
1	1.71	432.8	1.71±0.00	428.43±3.98
2	1.71	425.0		
3	1.71	427.5		
1	3.42	852.4	3.42±0.00	858.13±5.11
2	3.42	859.8		
3	3.42	862.2		
1	6.83	1,703.1	6.83±0.00	1,691.73±17.65
2	6.83	1,700.7		
3	6.83	1,671.4		
1	13.66	3,345.6	13.66±0.00	3,307.43±36.66
2	13.66	3,304.2		
3	13.66	3,272.5		
1	17.08	4,106.6	17.08±0.00	4,069.67±45.24
2	17.08	4,083.2		
3	17.08	4,019.2		



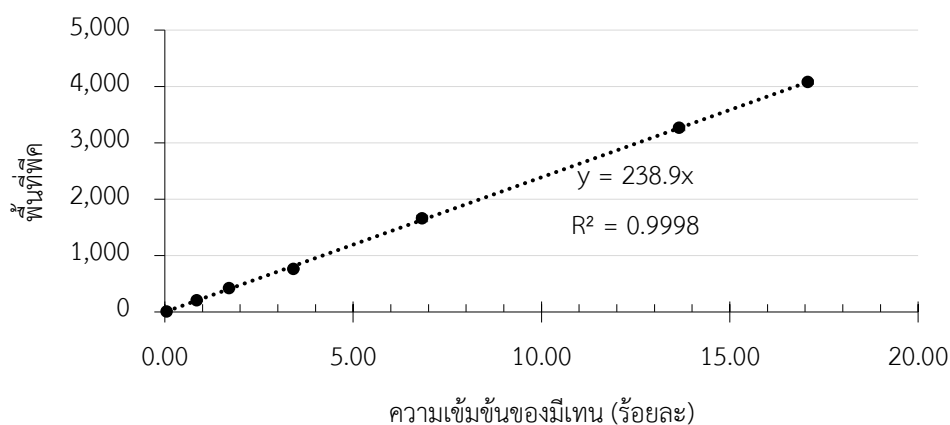
ตารางที่ ง.9 ความเข้มข้นของมีเทนและพื้นที่ฟีดที่ใช้ทำกราฟมาตรฐานชุดที่ 9

การวิเคราะห์ซ้ำ	ความเข้มข้นของมีเทน (ร้อยละ)	พื้นที่ฟีด	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทน (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยพื้นที่ฟีด
1	0.05	9.0	0.05±0.00	8.93±1.10
2	0.05	7.8		
3	0.05	10.0		
1	0.85	211.5	0.85±0.00	202.90±7.64
2	0.85	200.3		
3	0.85	196.9		
1	1.71	421.5	1.71±0.00	423.90±3.21
2	1.71	420.2		
3	1.71	426.3		
1	3.42	859.3	3.42±0.00	854.10±7.58
2	3.42	845.4		
3	3.42	857.6		
1	6.83	1,674.4	6.83±0.00	1,642.90±27.28
2	6.83	1,627.3		
3	6.83	1,627.0		
1	13.66	3,188.1	13.66±0.00	3,263.77±65.70
2	13.66	3,306.4		
3	13.66	3,296.8		
1	17.08	4,067.6	17.08±0.00	4,077.30±8.40
2	17.08	4,082.4		
3	17.08	4,081.9		



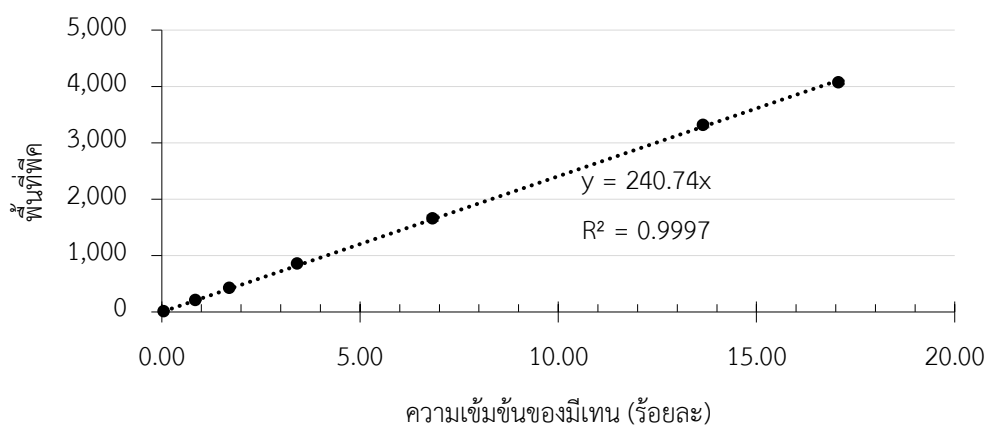
ตารางที่ ง.10 ความเข้มข้นของมีเทนและพื้นที่ฟีดที่ใช้ทำกราฟมาตรฐานชุดที่ 10

การวิเคราะห์ซ้ำ	ความเข้มข้นของมีเทน (ร้อยละ)	พื้นที่ฟีด	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทน (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยพื้นที่ฟีด
1	0.05	9.0	0.05±0.00	8.93±1.10
2	0.05	7.8		
3	0.05	10.0		
1	0.85	211.5	0.85±0.00	202.90±7.64
2	0.85	200.3		
3	0.85	196.9		
1	1.71	421.5	1.71±0.00	423.90±3.21
2	1.71	420.2		
3	1.71	426.3		
1	3.42	589.3	3.42±0.00	764.10±151.50
2	3.42	845.4		
3	3.42	857.6		
1	6.83	1,674.4	6.83±0.00	1,657.90±26.78
2	6.83	1,672.3		
3	6.83	1,627.0		
1	13.66	3,188.1	13.66±0.00	3,263.77±65.70
2	13.66	3,306.4		
3	13.66	3,296.8		
1	17.08	4,067.6	17.08±0.00	4,077.30±8.40
2	17.08	4,082.4		
3	17.08	4,081.9		



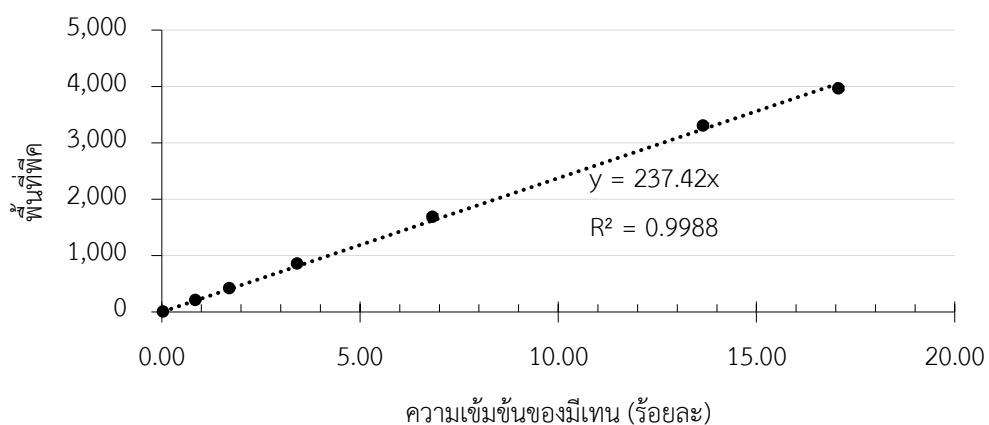
ตารางที่ ง.11 ความเข้มข้นของมีเทนและพื้นที่ฟีดที่ใช้ทำกราฟมาตรฐานชุดที่ 11

การวิเคราะห์ซ้ำ	ความเข้มข้นของมีเทน (ร้อยละ)	พื้นที่ฟีด	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทน (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยพื้นที่ฟีด
1	0.05	13.3	0.05±0.00	12.10±1.20
2	0.05	10.9		
3	0.05	12.1		
1	0.85	208.8	0.85±0.00	211.27±5.81
2	0.85	207.1		
3	0.85	217.9		
1	1.71	435.1	1.71±0.00	427.50±10.02
2	1.71	416.2		
3	1.71	419.9		
1	3.42	860.1	3.42±0.00	857.20±2.62
2	3.42	855.0		
3	3.42	856.5		
1	6.83	1,660.3	6.83±0.00	1,662.05±2.47
2	6.83	1,663.8		
3	6.83	1,216.1		
1	13.66	3,318.4	13.66±0.00	3,315.43±64.60
2	13.66	3,378.5		
3	13.66	3,249.4		
1	17.08	4,105.3	17.08±0.00	4,073.10±40.67
2	17.08	4,086.6		
3	17.08	4,027.4		



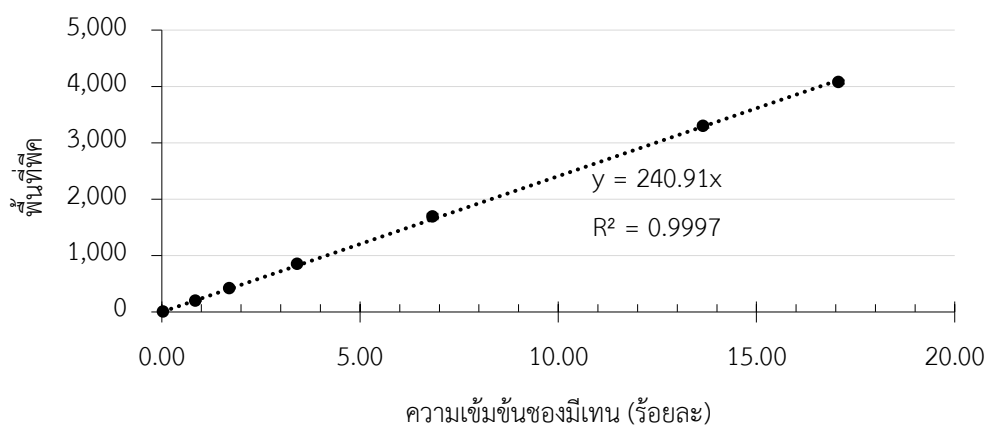
ตารางที่ ง.12 ความเข้มข้นของมีเทนและพื้นที่ฟีดที่ใช้ทำกราฟมาตรฐานชุดที่ 12

การวิเคราะห์ซ้ำ	ความเข้มข้นของมีเทน (ร้อยละ)	พื้นที่ฟีด	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทน (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยพื้นที่ฟีด
1	0.03	7.6	0.03±0.00	7.17±0.40
2	0.03	7.1		
3	0.03	6.8		
1	0.85	212.4	0.85±0.00	208.83±3.46
2	0.85	208.6		
3	0.85	205.5		
1	1.71	423.2	1.71±0.00	422.87±2.52
2	1.71	420.2		
3	1.71	425.2		
1	3.42	859.3	3.42±0.00	857.13±3.50
2	3.42	859.0		
3	3.42	853.1		
1	6.83	1,690.3	6.83±0.00	1,686.90±4.81
2	6.83	1,706.5		
3	6.83	1,683.5		
1	13.66	3,299.8	13.66±0.00	3,306.00±5.97
2	13.66	3,306.5		
3	13.66	3,311.7		
1	17.08	3,918.2	17.08±0.00	3,966.45±68.24
2	17.08	4,014.7		
3	17.08	4,280.6		



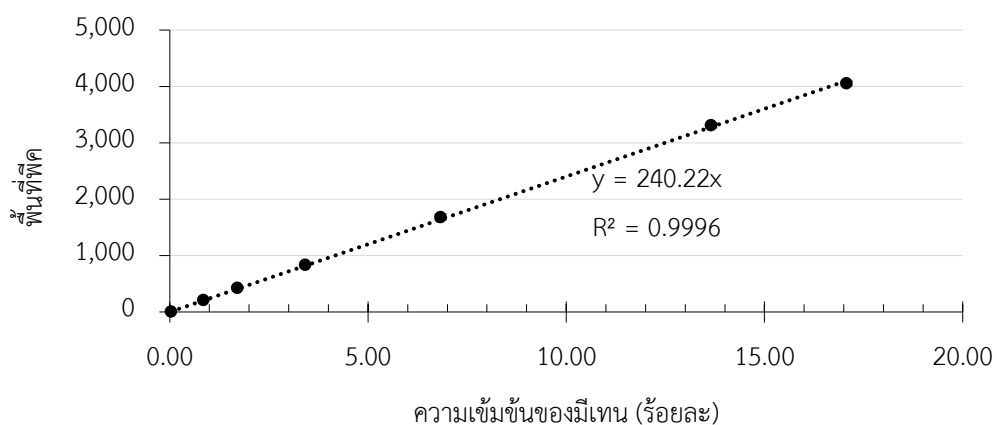
ตารางที่ ง.13 ความเข้มข้นของมีเทนและพื้นที่ฟีดที่ใช้ทำกราฟมาตรฐานชุดที่ 13

การวิเคราะห์ซ้ำ	ความเข้มข้นของมีเทน (ร้อยละ)	พื้นที่ฟีด	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทน (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยพื้นที่ฟีด
1	0.03	5.5	0.03±0.00	6.67±1.15
2	0.03	6.7		
3	0.03	7.8		
1	0.85	203.1	0.85±0.00	202.70±1.44
2	0.85	201.1		
3	0.85	203.9		
1	1.71	417.3	1.71±0.00	422.47±5.05
2	1.71	422.7		
3	1.71	427.4		
1	3.42	853.4	3.42±0.00	851.67±3.35
2	3.42	847.8		
3	3.42	853.8		
1	6.83	1,686.7	6.83±0.00	1,692.60±0.07
2	6.83	1,686.8		
3	6.83	1,704.3		
1	13.66	3,308.4	13.66±0.00	3,302.70±12.10
2	13.66	3,288.8		
3	13.66	3,310.9		
1	17.08	4,066.7	17.08±0.00	4,078.37±16.94
2	17.08	4,097.8		
3	17.08	4,070.6		



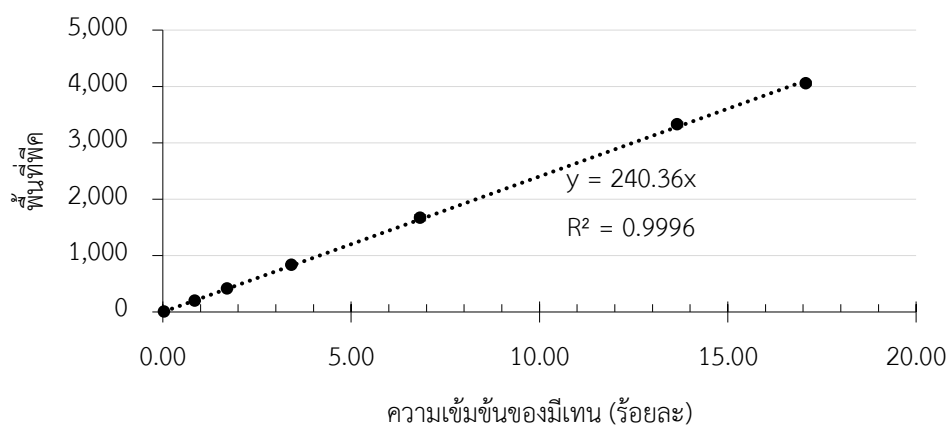
ตารางที่ ง.14 ความเข้มข้นของมีเทนและพื้นที่ฟีดที่ใช้ทำกราฟมาตรฐานชุดที่ 14

การวิเคราะห์ซ้ำ	ความเข้มข้นของมีเทน (ร้อยละ)	พื้นที่ฟีด	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทน (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยพื้นที่ฟีด
1	0.03	8.1	0.03±0.00	7.83±0.64
2	0.03	7.1		
3	0.03	8.3		
1	0.85	213.4	0.85±0.00	209.37±3.68
2	0.85	206.2		
3	0.85	208.5		
1	1.71	431.9	1.71±0.00	428.77±3.69
2	1.71	424.7		
3	1.71	429.7		
1	3.42	834.4	3.42±0.00	838.30±3.41
2	3.42	840.7		
3	3.42	839.8		
1	6.83	1,668.1	6.83±0.00	1,683.33±17.04
2	6.83	1,692.2		
3	6.83	1,689.7		
1	13.66	3,285.9	13.66±0.00	3,312.27±25.03
2	13.66	3,315.2		
3	13.66	3,335.7		
1	17.08	4,088.9	17.08±0.00	4,054.57±29.74
2	17.08	4,037.1		
3	17.08	4,037.7		



ตารางที่ ง.15 ความเข้มข้นของมีเทนและพื้นที่ฟีดที่ใช้ทำกราฟมาตรฐานชุดที่ 15

การวิเคราะห์ซ้ำ	ความเข้มข้นของมีเทน (ร้อยละ)	พื้นที่ฟีด	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมีเทน (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยพื้นที่ฟีด
1	0.03	7.8	0.03±0.00	7.90±0.10
2	0.03	7.9		
3	0.03	8.0		
1	0.85	193.9	0.85±0.00	197.97±4.32
2	0.85	197.5		
3	0.85	202.5		
1	1.71	419.8	1.71±0.00	416.83±3.91
2	1.71	418.3		
3	1.71	412.4		
1	3.42	831.1	3.42±0.00	833.77±2.56
2	3.42	836.2		
3	3.42	834.0		
1	6.83	1,669.9	6.83±0.00	1,671.80±11.31
2	6.83	1,685.9		
3	6.83	1,659.6		
1	13.66	3,329.0	13.66±0.00	3,326.63±10.45
2	13.66	3,335.7		
3	13.66	3,315.2		
1	17.08	4,088.9	17.08±0.00	4,054.57±29.74
2	17.08	4,037.1		
3	17.08	4,037.7		



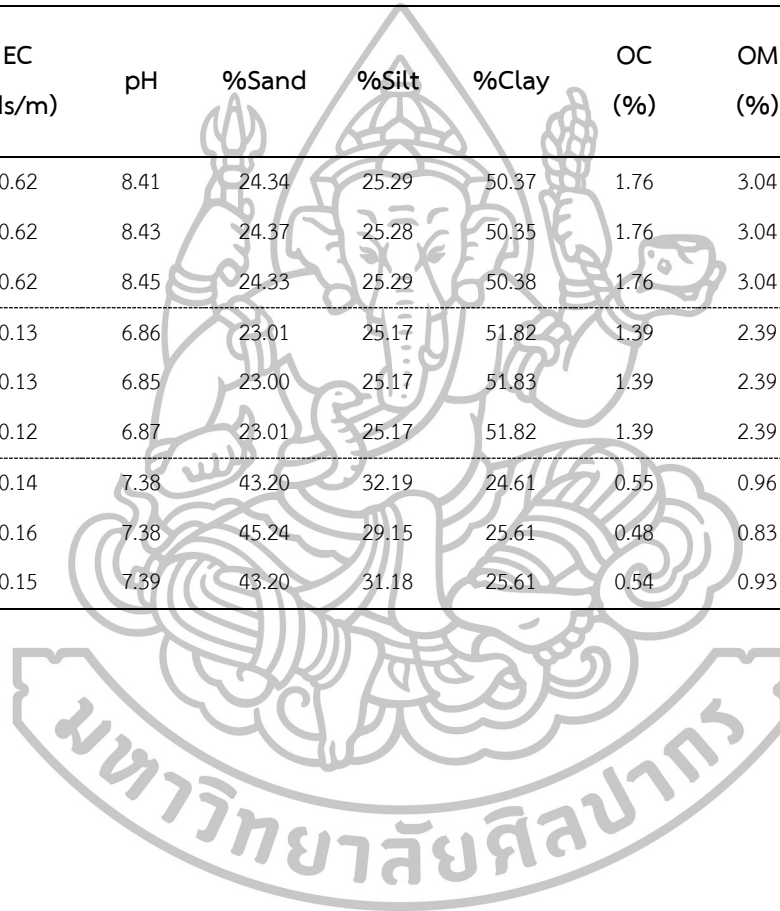


ภาคผนวก จ

ข้อมูลผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีบางประการของดิน

ตารางที่ จ.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีบางประการของตัวอย่างดิน

ตัวอย่างดิน	การวิเคราะห์ซ้ำ	MC (%)	EC (ds/m)	pH	%Sand	%Silt	%Clay	OC (%)	OM (%)	TKN (%)	C/N ratio	Bulk Density (kg/m ³)
ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ	1	3.87	0.62	8.41	24.34	25.29	50.37	1.76	3.04	0.18	10.00	293.65
	2	3.84	0.62	8.43	24.37	25.28	50.35	1.76	3.04	0.18	10.02	293.42
	3	3.79	0.62	8.45	24.33	25.29	50.38	1.76	3.04	0.18	9.86	293.50
ดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา	1	3.37	0.13	6.86	23.01	25.17	51.82	1.39	2.39	0.12	11.78	372.86
	2	3.35	0.13	6.85	23.00	25.17	51.83	1.39	2.39	0.12	11.68	361.05
	3	3.35	0.12	6.87	23.01	25.17	51.82	1.39	2.39	0.12	11.83	372.15
ดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม	1	0.73	0.14	7.38	43.20	32.19	24.61	0.55	0.96	0.06	8.60	1,657.69
	2	0.77	0.16	7.38	45.24	29.15	25.61	0.48	0.83	0.07	7.24	1,659.58
	3	0.77	0.15	7.39	43.20	31.18	25.61	0.54	0.93	0.06	8.60	1,657.51





ตารางที่ ๑.1 ข้อมูลผลของการปรับสภาพตัวอย่างดิน (acclimatization)

ชุดทดลอง/ ชุดควบคุม	การวิเคราะห์ ซ้ำ	ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ		ดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา		ดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม	
		เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)
ชุดทดลอง	1	0.00	51.93	0.00	45.56	0.00	44.76
	2		51.68		46.22		45.45
	3		51.75		46.91		44.71
	1	1.00	51.74	1.00	46.35	1.00	46.22
	2		51.42		46.74		45.09
	3		51.91		46.50		45.70
	1	2.00	51.30	2.00	46.82	3.00	44.91
	2		50.98		46.88		45.65
	3		51.99		46.51		45.19
1	3.00	51.79	3.00	45.64	5.00	28.77	
2		51.59		45.80		29.73	
3		51.77		46.33		30.09	
1	4.00	51.97	4.00	42.84	7.00	25.95	
2		51.64		43.42		23.96	
3		50.74		43.28		24.78	
1	5.00	47.82	5.00	34.72	9.00	24.43	
2		48.58		32.27		25.03	
3		47.55		32.74		25.22	
1	6.00	41.99	6.00	13.03	11.00	24.35	
2		40.54		13.48		24.36	
3		41.56		12.85		23.58	

ตารางที่ ฉ.1 ข้อมูลผลของการปรับสภาพตัวอย่างดิน (acclimatization) (ต่อ)

ชุดทดลอง/ ชุดควบคุม	การวิเคราะห์ ซ้ำ	ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ		ดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา		ดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม	
		เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)
ชุดทดลอง	1	7.00	29.94	7.00	1.19	13.00	22.59
	2		30.87		1.61		23.07
	3		36.02		2.13		22.55
	1	8.00	1.09	8.00	<0.09	15.00	22.53
	2		3.30		<0.09		22.00
	3		2.43		<0.09		21.21
	1	9.00	<0.09	9.00	<0.09	17.00	18.37
	2		<0.09		<0.09		21.51
	3		<0.09		<0.09		20.35
	1	10.00	<0.09	10.00	<0.09	21.00	11.93
	2		<0.09		<0.09		15.12
	3		<0.09		<0.09		17.07
	1	11.00	<0.09	11.00	<0.09	25.00	8.54
	2		<0.09		<0.09		11.94
	3		<0.09		<0.09		15.14
	1	-	-	-	-	27.00	6.55
	2		-		-		7.58
	3		-		-		8.15
	1	-	-	-	-	29.00	3.92
	2		-		-		3.71
	3		-		-		3.37

ตารางที่ ๑.1 ข้อมูลผลของการปรับสภาพตัวอย่างดิน (acclimatization) (ต่อ)

ชุดทดลอง/ ชุดควบคุม	การวิเคราะห์ ซ้ำ	ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ		ดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา		ดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม	
		เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)
ชุดทดลอง	1	-	-	-	-	31.00	0.24
	2	-	-	-	-		0.29
	3	-	-	-	-		0.23
	1	-	-	-	-	33.00	0.18
	2	-	-	-	-		<0.09
	3	-	-	-	-		<0.09
	1	-	-	-	-	34.00	0.24
	2	-	-	-	-		<0.09
	3	-	-	-	-		<0.09
1	-	-	-	-	35.00	<0.09	
2	-	-	-	-		<0.09	
3	-	-	-	-		<0.09	





ตารางที่ ข.1 ข้อมูลผลของการบ่มตัวอย่าง (incubation) ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ

ชุดทดลอง/ ชุดควบคุม	การวิเคราะห์ ซ้ำ	ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 2 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 4 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 6 (โดยปริมาตร)	
		เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)
ชุดทดลอง	1	0.00	10.45	0.00	21.16	0.00	32.13
	2		10.25		20.75		32.04
	3		10.16		20.55		31.07
	1	0.13	8.43	0.13	18.77	0.13	28.67
	2		8.23		18.64		28.16
	3		-		18.46		28.55
	1	0.25	6.01	0.25	17.09	0.25	25.24
	2		6.46		16.78		25.44
	3		6.15		17.08		25.54
	1	0.38	4.92	0.38	15.65	0.38	23.19
	2		4.71		15.68		23.47
	3		4.78		15.65		23.24
	1	0.50	3.38	0.50	13.74	0.50	20.87
	2		3.68		13.69		20.20
	3		3.27		13.75		20.01
	1	0.63	2.27	0.63	11.65	0.63	17.48
	2		2.02		11.05		17.05
	3		1.83		10.95		17.62
	1	1.00	0.49	1.00	5.39	1.00	11.63
	2		0.24		5.54		10.47
	3		0.40		4.93		11.61
	1	1.25	0.24	1.25	3.85	1.50	7.32
	2		0.25		3.74		7.28
	3		0.22		3.99		6.90

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลผลของการบ่มตัวอย่าง (incubation) ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ (ต่อ)

ชุดทดลอง/ ชุดควบคุม	การวิเคราะห์ ซ้ำ	ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 2 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 4 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 6 (โดยปริมาตร)	
		เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)
	1	1.50	0.14	1.50	2.67	2.00	<0.09
	2		0.10		2.79		<0.09
	3		0.15		2.96		<0.09
	1	2.00	<0.09	2.00	<0.09	-	-
	2		<0.09		<0.09		-
	3		<0.09		<0.09		-
ชุดควบคุม ไม่ใช่ชีวภาพ	1	0.00	10.12	0.00	21.01	0.00	31.51
	2		10.76		20.91		31.79
	3		10.33		20.68		31.84
	1	1.00	10.32	1.00	21.29	1.00	31.63
	2		10.64		20.83		32.01
	3		10.40		21.08		31.37
	1	2.00	10.65	2.00	21.15	2.00	31.42
	2		10.52		20.89		31.69
	3		10.49		21.02		31.78
ชุดควบคุม ชีวภาพ	1	0.00	ตรวจไม่พบ	0.00	ตรวจไม่พบ	0.00	ตรวจไม่พบ
	2		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	3		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	1	1.00	ตรวจไม่พบ	1.00	ตรวจไม่พบ	1.00	ตรวจไม่พบ
	2		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	3		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	1	2.00	ตรวจไม่พบ	2.00	ตรวจไม่พบ	2.00	ตรวจไม่พบ
	2		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	3		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลผลของการบ่มตัวอย่าง (incubation) ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ (ต่อ)

ชุดทดลอง/ ชุดควบคุม	การวิเคราะห์ ซ้ำ	ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 8 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 10 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 14 (โดยปริมาตร)	
		เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)
ชุดทดลอง	1	0.00	41.41	0.00	51.26	0.00	72.08
	2		41.48		51.28		73.09
	3		40.62		51.93		72.95
	1	0.13	39.11	0.25	47.50	0.13	70.32
	2		38.30		46.34		71.17
	3		38.09		42.05		66.43
	1	0.25	34.92	0.38	45.92	0.25	66.36
	2		35.01		45.21		66.12
	3		34.90		43.80		66.04
	1	0.38	32.25	0.50	42.56	0.38	64.23
	2		32.17		42.04		63.24
	3		31.34		42.96		62.80
	1	0.50	28.84	0.63	40.63	0.50	61.45
	2		27.95		40.29		60.29
	3		28.21		41.17		60.62
	1	0.63	25.27	1.00	30.88	0.63	55.59
	2		24.49		29.28		56.40
	3		24.29		29.14		58.81
	1	1.00	13.64	2.00	1.77	1.00	53.32
	2		12.85		1.40		49.90
	3		12.41		1.08		49.40
	1	2.00	0.11	3.00	<0.09	2.00	14.76
	2		<0.09		<0.09		14.40
	3		<0.09		<0.09		21.07

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลผลของการบ่มตัวอย่าง (incubation) ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ (ต่อ)

ชุดทดลอง/ ชุดควบคุม	การวิเคราะห์ ซ้ำ	ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 8 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 10 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 14 (โดยปริมาตร)	
		เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)
ชุดทดลอง	1	3.00	<0.09	4.00	<0.09	3.00	1.41
	2		<0.09		<0.09		2.72
	3		<0.09		<0.09		-
	1	-	-	-	-	4.00	1.03
	2		-		-		0.23
	3		-		-		0.76
	1	-	-	-	-	5.00	1.54
	2		-		-		1.09
	3		-		-		2.07
	1	-	-	-	-	6.00	0.32
	2		-		-		2.10
	3		-		-		3.10
	1	-	-	-	-	8.00	1.71
	2		-		-		0.24
	3		-		-		1.13
	1	-	-	-	-	12.00	1.29
	2		-		-		0.99
	3		-		-		1.82
	1	-	-	-	-	16.00	1.49
	2		-		-		1.26
	3		-		-		2.11
ชุดควบคุม	1	0.00	31.51	0.00	51.29	0.00	72.23
ไม่ใช่ชีวภาพ	2		31.79		51.83		71.65
	3		31.84		50.87		72.62

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลผลของการบ่มตัวอย่าง (incubation) ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ (ต่อ)

ชุดทดลอง/ ชุดควบคุม	การวิเคราะห์ ซ้ำ	ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 8 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 10 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 14 (โดยปริมาตร)	
		เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)
ชุดควบคุม ไม่ใช่ชีวภาพ	1	1.00	31.63	2.00	51.96	2.00	72.78
	2		32.01		52.03		72.14
	3		31.37		51.45		72.58
	1	2.00	31.42	4.00	51.56	4.00	71.54
	2		31.69		51.58		71.49
	3		31.78		51.12		70.83
	1	-	-	-	-	6.00	71.07
	2		-		-		70.93
	3		-		-		71.41
1	-	-	-	-	8.00	70.93	
2		-		-		69.40	
3		-		-		70.86	
1	-	-	-	-	12.00	70.99	
2		-		-		72.13	
3		-		-		68.81	
1	-	-	-	-	16.00	71.03	
2		-		-		71.43	
3		-		-		69.48	
ชุดควบคุม ชีวภาพ	1	0.00	ตรวจไม่พบ	0.00	ตรวจไม่พบ	0.00	ตรวจไม่พบ
	2		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	3		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	1	1.00	ตรวจไม่พบ	2.00	ตรวจไม่พบ	2.00	ตรวจไม่พบ
	2		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	3		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลผลของการบ่มตัวอย่าง (incubation) ดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ (ต่อ)

ชุดทดลอง/ ชุดควบคุม	การวิเคราะห์ ซ้ำ	ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 8 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 10 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 14 (โดยปริมาตร)	
		เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)
ชุดควบคุม ชีวภาพ	1	2.00	ตรวจไม่พบ	4.00	ตรวจไม่พบ	4.00	ตรวจไม่พบ
	2		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	3		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	1	3.00	ตรวจไม่พบ	-	-	6.00	ตรวจไม่พบ
	2		ตรวจไม่พบ	-	-		ตรวจไม่พบ
	3		ตรวจไม่พบ	-	-		ตรวจไม่พบ
	1	-	-	-	-	8.00	ตรวจไม่พบ
	2		-	-	-		ตรวจไม่พบ
	3		-	-	-		ตรวจไม่พบ
1	-	-	-	-	12.00	ตรวจไม่พบ	
2		-	-	-		ตรวจไม่พบ	
3		-	-	-		ตรวจไม่พบ	
1	-	-	-	-	16.00	ตรวจไม่พบ	
2		-	-	-		ตรวจไม่พบ	
3		-	-	-		ตรวจไม่พบ	



ตารางที่ ข.2 ข้อมูลผลของการบ่มตัวอย่าง (incubation) ดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา

ชุดทดลอง/ ชุดควบคุม	การวิเคราะห์ ซ้ำ	ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 2 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 4 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 6 (โดยปริมาตร)	
		เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)
ชุดทดลอง	1	0.00	9.52	0.00	18.68	0.00	27.89
	2		9.60		18.37		27.97
	3		9.61		18.06		27.99
	1	0.13	8.44	0.25	14.53	0.13	27.06
	2		8.14		14.41		27.39
	3		8.08		14.39		26.68
	1	0.25	6.97	0.38	12.55	0.25	25.27
	2		6.83		12.84		25.32
	3		6.33		12.89		25.16
	1	0.38	4.90	0.50	11.12	0.38	23.90
	2		4.99		11.00		23.60
	3		4.86		10.97		23.03
	1	0.50	3.47	0.63	10.16	0.50	21.23
	2		3.39		9.84		20.82
	3		3.09		9.98		20.07
	1	0.63	2.07	1.00	8.14	0.63	18.02
	2		2.00		7.84		18.13
	3		2.23		8.66		17.53
	1	1.00	0.14	2.00	2.56	1.00	17.34
	2		0.12		2.66		17.18
	3		0.14		2.88		17.50
	1	1.25	<0.09	3.00	0.35	2.00	13.92
	2		<0.09		0.57		13.88
	3		<0.09		0.30		14.42

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลผลของการบ่มตัวอย่าง (incubation) ดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา (ต่อ)

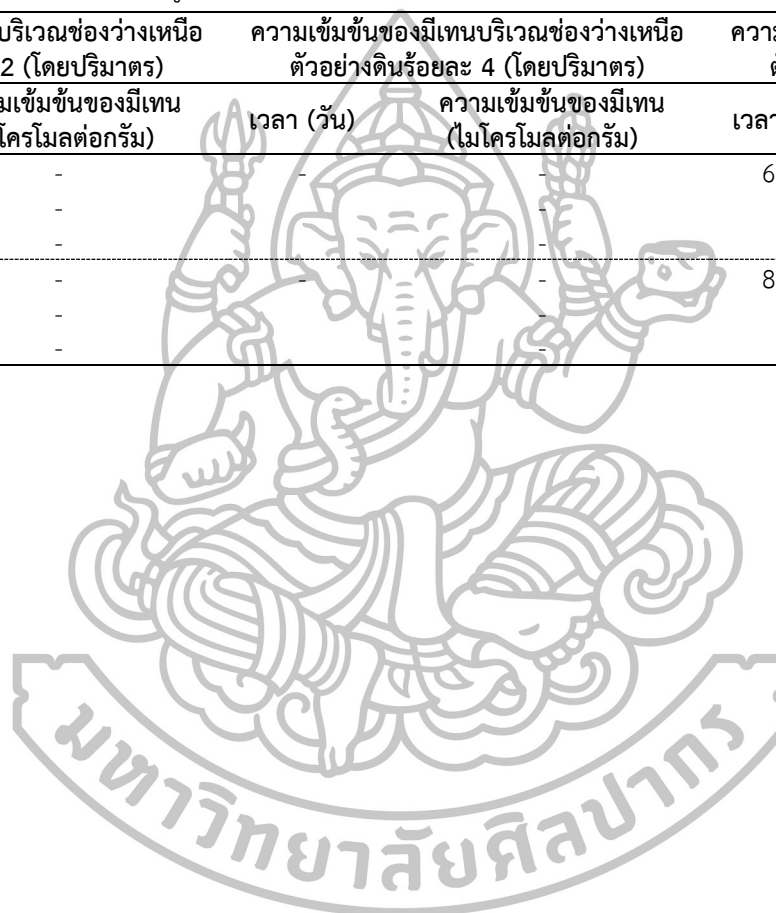
ชุดทดลอง/ ชุดควบคุม	การวิเคราะห์ ซ้ำ	ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 2 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 4 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 6 (โดยปริมาตร)	
		เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)
ชุดทดลอง	1	-	-	4.00	0.20	3.00	9.67
	2	-	-	-	<0.09	-	11.22
	3	-	-	-	<0.09	-	12.09
	1	-	-	5.00	<0.09	4.00	6.60
	2	-	-	-	<0.09	-	5.23
	3	-	-	-	<0.09	-	6.97
	1	-	-	-	-	5.00	5.17
	2	-	-	-	-	-	4.90
	3	-	-	-	-	-	5.23
	1	-	-	-	-	6.00	4.47
	2	-	-	-	-	-	4.46
	3	-	-	-	-	-	1.11
	1	-	-	-	-	7.00	0.71
	2	-	-	-	-	-	1.49
	3	-	-	-	-	-	0.60
	1	-	-	-	-	8.00	0.46
	2	-	-	-	-	-	1.76
	3	-	-	-	-	-	1.44
	1	-	-	-	-	9.00	<0.09
	2	-	-	-	-	-	<0.09
	3	-	-	-	-	-	<0.09
ชุดควบคุม	1	0.00	9.59	0.00	18.76	0.00	27.79
ไม่ใช่ชีวภาพ	2	-	9.61	-	18.65	-	27.92
	3	-	9.54	-	18.72	-	27.96

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลผลของการบ่มตัวอย่าง (incubation) ดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา (ต่อ)

ชุดทดลอง/ ชุดควบคุม	การวิเคราะห์ ซ้ำ	ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 2 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 4 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 6 (โดยปริมาตร)	
		เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)
ชุดควบคุม ไม่ใช่ชีวภาพ	1	0.50	9.56	2.00	19.12	2.00	28.31
	2		9.62		19.08		28.09
	3		9.84		19.00		28.00
	1	1.25	9.54	4.00	19.01	4.00	27.95
	2		9.56		18.85		28.07
	3		9.57		19.13		27.92
	1	-	-	-	-	6.00	28.23
	2		-		-		28.22
	3		-		-		28.42
1	-	-	-	-	8.00	28.01	
2		-		-		28.09	
3		-		-		28.02	
ชุดควบคุม ชีวภาพ	1	0.00	ตรวจไม่พบ	0.00	ตรวจไม่พบ	0.00	ตรวจไม่พบ
	2		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	3		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	1	0.50	ตรวจไม่พบ	2.00	ตรวจไม่พบ	2.00	ตรวจไม่พบ
	2		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	3		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	1	1.25	ตรวจไม่พบ	4.00	ตรวจไม่พบ	4.00	ตรวจไม่พบ
	2		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	3		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลผลของการบ่มตัวอย่าง (incubation) ดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา (ต่อ)

ชุดทดลอง/ ชุดควบคุม	การวิเคราะห์ ซ้ำ	ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 2 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 4 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 6 (โดยปริมาตร)	
		เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)
ชุดควบคุม ชีวภาพ	1	-	-	-	-	6.00	ตรวจไม่พบ
	2	-	-	-	-		ตรวจไม่พบ
	3	-	-	-	-		ตรวจไม่พบ
	1	-	-	-	-	8.00	ตรวจไม่พบ
	2	-	-	-	-		ตรวจไม่พบ
	3	-	-	-	-		ตรวจไม่พบ



ตารางที่ ข.2 ข้อมูลผลของการบ่มตัวอย่าง (incubation) ดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา (ต่อ)

ชุดทดลอง/ ชุดควบคุม	การวิเคราะห์ ซ้ำ	ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินรื้อยละ 8 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินรื้อยละ 10 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินรื้อยละ 14 (โดยปริมาตร)	
		เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)
ชุดทดลอง	1	0.00	37.90	0.00	47.51	0.00	66.93
	2		37.69		46.65		65.09
	3		37.98		45.64		64.27
	1	0.13	37.07	0.13	43.83	0.13	62.71
	2		36.66		43.51		63.03
	3		36.61		43.53		62.31
	1	0.25	34.83	0.25	41.16	0.25	59.13
	2		34.33		40.77		58.69
	3		34.21		40.90		58.60
1	0.38	32.43	0.38	38.63	0.38	56.41	
2		32.42		38.49		56.43	
3		31.73		-		55.63	
1	0.50	29.04	0.50	35.91	0.50	55.05	
2		29.62		35.65		54.02	
3		28.89		36.06		55.21	
1	0.63	26.80	0.63	34.61	0.63	53.27	
2		26.53		34.00		52.85	
3		26.63		33.46		54.00	
1	1.00	20.99	1.00	30.91	1.00	53.00	
2		21.30		31.11		53.34	
3		20.49		27.59		51.36	
1	1.75	17.39	2.00	25.76	2.00	45.82	
2		17.41		25.42		46.17	
3		15.83		25.32		46.18	

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลผลของการบ่มตัวอย่าง (incubation) ดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา (ต่อ)

ชุดทดลอง/ ชุดควบคุม	การวิเคราะห์ ซ้ำ	ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 8 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 10 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 14 (โดยปริมาตร)	
		เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)
ชุดทดลอง	1	2.00	14.19	3.00	23.96	4.00	39.57
	2		14.93		23.29		41.28
	3		14.60		22.63		40.30
	1	3.00	11.90	4.00	19.15	6.00	30.70
	2		11.54		15.64		30.83
	3		10.90		17.24		32.46
	1	4.00	13.44	5.00	16.62	7.00	29.37
	2		8.51		16.42		29.71
	3		8.04		16.44		28.76
1	5.00	6.91	6.00	15.95	8.00	24.55	
2		6.21		15.86		25.07	
3		6.54		16.38		27.45	
1	6.00	6.13	8.00	12.20	9.00	14.09	
2		5.96		12.50		17.42	
3				9.10		19.39	
1	7.00	3.03	9.00	11.82	10.00	15.34	
2		2.99		10.56		13.78	
3		3.38		7.83		14.69	
1	8.00	1.64	11.00	6.37	12.00	14.11	
2		0.56		5.81		16.23	
3		1.49		3.28		15.67	
1	9.00	0.36	12.00	4.66	16.00	15.79	
2		0.43		4.07		15.03	
3		0.37		3.01		16.56	

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลผลของการบ่มตัวอย่าง (incubation) ดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา (ต่อ)

ชุดทดลอง/ ชุดควบคุม	การวิเคราะห์ ซ้ำ	ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 8 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 10 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 14 (โดยปริมาตร)	
		เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)
ชุดทดลอง	1	10.00	<0.09	14.00	<0.09	20.00	15.11
	2		<0.09		<0.09		16.73
	3		<0.09		<0.09		16.29
	1	-	-		-	24.00	13.66
	2		-		-		14.94
	3		-		-		15.85
	1	-	-		-	28.00	16.56
	2		-		-		15.23
	3		-		-		13.59
ชุดควบคุม ไม่ใช่ชีวภาพ	1	-	-		-	32.00	16.76
	2		-		-		15.81
	3		-		-		15.03
	1	-	-		-	36.00	16.54
	2		-		-		16.71
	3		-		-		16.23
	1	0.00	38.01	0.00	46.29	0.00	64.42
	2		37.64		46.64		63.95
	3		37.01		46.49		66.11
ชุดควบคุม ไม่ใช่ชีวภาพ	1	2.00	37.60	2.00	46.76	2.00	67.12
	2		37.27		46.63		65.75
	3		37.05		46.51		63.30
ชุดควบคุม ไม่ใช่ชีวภาพ	1	4.00	37.09	4.00	46.39	4.00	65.75
	2		37.42		46.85		64.53
	3		37.38		46.62		64.77

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลผลของการบ่มตัวอย่าง (incubation) ดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา (ต่อ)

ชุดทดลอง/ ชุดควบคุม	การวิเคราะห์ ซ้ำ	ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 8 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 10 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 14 (โดยปริมาตร)	
		เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)
ชุดควบคุม ไม่ใช่ชีวภาพ	1	6.00	37.51	6.00	46.34	8.00	65.24
	2		37.38		46.51		65.13
	3		37.41		46.77		64.46
	1	8.00	36.86	8.00	47.47	12.00	65.59
	2		36.74		47.14		65.52
	3		36.72		47.18		64.86
	1	10.00	36.88	10.00	47.25	16.00	64.50
	2		37.09		46.70		65.61
	3		36.59		46.87		63.75
ชุดควบคุม ชีวภาพ	1	-	-	12.00	46.31	24.00	66.03
	2		-		46.22		64.61
	3		-		46.41		65.20
	1	-	-	14.00	46.20	28.00	65.62
	2		-		45.89		65.60
	3		-		45.86		65.55
	1	-	-	-	-	36.00	65.93
	2		-		-		64.61
	3		-		-		65.59
ชุดควบคุม ชีวภาพ	1	0.00	ตรวจไม่พบ	0.00	ตรวจไม่พบ	0.00	ตรวจไม่พบ
	2		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	3		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	1	2.00	ตรวจไม่พบ	2.00	ตรวจไม่พบ	2.00	ตรวจไม่พบ
	2		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	3		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลผลของการบ่มตัวอย่าง (incubation) ดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา (ต่อ)

ชุดทดลอง/ ชุดควบคุม	การวิเคราะห์ ซ้ำ	ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 8 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 10 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 14 (โดยปริมาตร)	
		เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)
ชุดควบคุม ชีวภาพ	1	4.00	ตรวจไม่พบ	4.00	ตรวจไม่พบ	4.00	ตรวจไม่พบ
	2		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	3		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	1	6.00	ตรวจไม่พบ	6.00	ตรวจไม่พบ	8.00	ตรวจไม่พบ
	2		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	3		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	1	8.00	ตรวจไม่พบ	8.00	ตรวจไม่พบ	12.00	ตรวจไม่พบ
	2		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	3		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	1	10.00	ตรวจไม่พบ	10.00	ตรวจไม่พบ	16.00	ตรวจไม่พบ
	2		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	3		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	1	-	-	12.00	ตรวจไม่พบ	24.00	ตรวจไม่พบ
	2		-		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	3		-		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	1	-	-	14.00	ตรวจไม่พบ	28.00	ตรวจไม่พบ
	2		-		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	3		-		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	1	-	-	-	-	36.00	ตรวจไม่พบ
	2		-		-		ตรวจไม่พบ
	3		-		-		ตรวจไม่พบ

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลผลของการบ่มตัวอย่าง (incubation) ดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม

ชุดทดลอง/ ชุดควบคุม	การวิเคราะห์ ซ้ำ	ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 2 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 4 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 6 (โดยปริมาตร)	
		เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)
ชุดทดลอง	1	0.00	8.84	0.00	18.77	0.00	27.78
	2		9.10		18.67		28.08
	3		9.13		18.95		27.88
	1	0.13	9.08	0.13	18.40	0.13	27.81
	2		8.65		18.19		27.44
	3		8.81		18.40		27.57
	1	0.25	8.66	0.25	17.40	0.25	26.52
	2		8.64		17.47		27.16
	3		7.99		18.00		26.73
1	0.50	7.63	0.50	17.84	0.50	24.98	
2		7.53		16.68		26.11	
3		7.43		16.74		27.70	
1	0.63	6.76	1.00	15.85	1.00	24.65	
2		7.41		16.41		22.97	
3		6.50		14.97		21.56	
1	1.00	6.24	2.00	12.69	2.00	18.69	
2		5.64		12.12		20.56	
3		6.34		13.99		18.62	
1	2.00	5.48	4.00	10.26	4.00	14.45	
2		3.88		9.70		15.06	
3		5.44		7.93		16.60	
1	4.00	2.81	8.00	7.83	8.00	12.71	
2		1.79		7.10		11.33	
3		1.88		6.54		11.01	

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลผลของการบ่มตัวอย่าง (incubation) ดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม (ต่อ)

ชุดทดลอง/ ชุดควบคุม	การวิเคราะห์ ซ้ำ	ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 2 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 4 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 6 (โดยปริมาตร)	
		เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)
ชุดทดลอง	1	8.00	1.50	12.00	5.69	12.00	8.39
	2		0.94		4.68		7.65
	3		0.56		5.23		7.09
	1	10.00	0.20	16.00	1.91	16.00	1.91
	2		0.20		1.84		1.66
	3		0.15		2.80		2.06
	1	12.00	<0.09	18.00	<0.09	18.00	0.97
	2		<0.09		<0.09		1.83
	3		<0.09		<0.09		0.19
1	14.00	<0.09	20.00	<0.09	20.00	<0.09	
2		<0.09		<0.09		<0.09	
3		<0.09		<0.09		<0.09	
1	-	-	-	-	22.00	<0.09	
2		-		-		<0.09	
3		-		-		<0.09	
ชุดควบคุม ไม่ใช่ชีวภาพ	1	0.00	9.25	0.00	18.57	0.00	27.90
	2		9.37		18.83		27.97
	3		9.04		18.68		28.01
	1	2.00	9.31	4.00	18.63	4.00	27.72
	2		9.37		18.59		27.82
	3		9.27		19.56		27.74
	1	4.00	8.97	8.00	18.83	8.00	27.82
	2		8.88		18.45		27.75
	3		9.20		18.68		28.08

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลผลของการบ่มตัวอย่าง (incubation) ดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม (ต่อ)

ชุดทดลอง/ ชุดควบคุม	การวิเคราะห์ ซ้ำ	ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 2 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 4 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 6 (โดยปริมาตร)	
		เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)
ชุดควบคุม ไม่ใช่ชีวภาพ	1	8.00	9.36	12.00	19.57	12.00	27.93
	2		9.09		18.18		27.65
	3		9.13		18.09		27.87
	1	10.00	9.36	16.00	19.06	16.00	27.94
	2		9.31		18.62		27.97
	3		9.13		18.54		27.92
	1	12.00	9.26	18.00	18.64	18.00	27.93
	2		8.88		18.65		28.09
	3		9.37		18.63		27.97
1	14.00	9.03	20.00	18.64	20.00	27.96	
2		9.36		18.62		27.92	
3		8.82		18.60		27.75	
	1	-	-	-	-	22.00	27.92
	2		-		-		27.64
	3		-		-		27.93
ชุดควบคุม ชีวภาพ	1	0.00	ตรวจไม่พบ	0.00	ตรวจไม่พบ	0.00	ตรวจไม่พบ
	2		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	3		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	1	2.00	ตรวจไม่พบ	4.00	ตรวจไม่พบ	4.00	ตรวจไม่พบ
	2		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	3		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	1	4.00	ตรวจไม่พบ	8.00	ตรวจไม่พบ	8.00	ตรวจไม่พบ
	2		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	3		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลผลของการบ่มตัวอย่าง (incubation) ดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม (ต่อ)

ชุดทดลอง/ ชุดควบคุม	การวิเคราะห์ ซ้ำ	ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 2 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 4 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือ ตัวอย่างดินร้อยละ 6 (โดยปริมาตร)	
		เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)
ชุดควบคุม ชีวภาพ	1	8.00	ตรวจไม่พบ	12.00	ตรวจไม่พบ	12.00	ตรวจไม่พบ
	2		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	3		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	1	10.00	ตรวจไม่พบ	16.00	ตรวจไม่พบ	16.00	ตรวจไม่พบ
	2		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	3		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	1	12.00	ตรวจไม่พบ	18.00	ตรวจไม่พบ	18.00	ตรวจไม่พบ
	2		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	3		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
1	14.00	ตรวจไม่พบ	20.00	ตรวจไม่พบ	20.00	ตรวจไม่พบ	
2		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ	
3		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ	
1	-	-	-	-	22.00	ตรวจไม่พบ	
2		-		-		ตรวจไม่พบ	
3		-		-		ตรวจไม่พบ	



ตารางที่ ข.3 ข้อมูลผลของการบ่มตัวอย่าง (incubation) ดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม (ต่อ)

ชุดทดลอง/ชุดควบคุม	การวิเคราะห์ซ้ำ	ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 8 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 10 (โดยปริมาตร)	
		เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)
ชุดทดลอง	1	0.00	37.04	0.00	45.68
	2		36.63		45.41
	3		36.53		45.51
	1	0.13	36.23	0.13	44.59
	2		36.33		45.34
	3		36.73		45.59
	1	0.25	36.26	0.25	-
	2		36.19		44.91
	3		35.01		43.34
	1	0.50	34.59	0.50	42.85
	2		34.97		43.17
	3		35.15		43.27
	1	0.63	34.58	0.63	42.72
	2		32.07		42.40
	3		35.48		43.88
	1	1.00	33.50	1.00	42.83
	2		33.35		42.26
	3		33.42		42.86
	1	2.00	30.37	2.00	41.61
	2		30.85		37.38
	3		31.35		42.00
	1	4.00	25.24	4.00	33.13
	2		28.48		35.51
	3		27.85		34.66

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลผลของการบ่มตัวอย่าง (incubation) ดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม (ต่อ)

ชุดทดลอง/ชุดควบคุม	การวิเคราะห์ซ้ำ	ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 8 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 10 (โดยปริมาตร)	
		เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)
ชุดทดลอง	1	6.00	24.18	6.00	25.22
	2		25.23		29.76
	3		22.43		29.26
	1	10.00	16.83	10.00	18.64
	2		18.81		23.21
	3		15.06		25.29
	1	12.00	12.15	12.00	18.36
	2		13.09		20.81
	3		9.36		15.65
	1	14.00	9.44	16.00	12.37
	2		9.17		12.46
	3		5.62		14.34
	1	18.00	5.62	20.00	<0.09
	2		3.85		6.54
	3		4.69		8.19
	1	20.00	1.87	24.00	<0.09
	2		4.68		<0.09
	3		2.82		<0.09
	1	22.00	<0.09	28.00	<0.09
	2		<0.09		<0.09
	3		<0.09		<0.09
	1	24.00	<0.09	-	-
	2		<0.09	-	-
	3		<0.09	-	-

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลผลของการบ่มตัวอย่าง (incubation) ดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม (ต่อ)

ชุดทดลอง/ชุดควบคุม	การวิเคราะห์ซ้ำ	ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 8 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 10 (โดยปริมาตร)	
		เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)
ชุดควบคุม ไม่ใช่ชีวภาพ	1	0.00	36.64	0.00	45.71
	2		35.95		45.27
	3		37.42		45.10
	1	2.00	36.71	2.00	44.64
	2		37.40		43.58
	3		36.44		44.88
	1	4.00	36.59	6.00	44.54
	2		36.48		44.73
	3		36.27		44.26
1	6.00	36.07	10.00	44.37	
2		36.51		44.29	
3		36.62		44.55	
1	10.00	37.00	12.00	44.56	
2		37.01		44.70	
3		37.13		44.79	
1	14.00	36.83	16.00	43.51	
2		37.34		44.18	
3		36.04		44.59	
1	18.00	36.81	20.00	43.85	
2		36.85		44.63	
3		36.42		45.09	
1	22.00	36.79	24.00	45.45	
2		37.12		44.74	
3		37.11		44.53	

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลผลของการบ่มตัวอย่าง (incubation) ดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม (ต่อ)

ชุดทดลอง/ชุดควบคุม	การวิเคราะห์ซ้ำ	ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 8 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 10 (โดยปริมาตร)	
		เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)
ชุดควบคุม ไม่ใช่ชีวมวล	1	24.00	37.27	28.00	44.27
	2		37.34		44.55
	3		37.37		44.71
ชุดควบคุม ชีวมวล	1	0.00	ตรวจไม่พบ	0.00	ตรวจไม่พบ
	2		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	3		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	1	2.00	ตรวจไม่พบ	2.00	ตรวจไม่พบ
	2		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	3		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	1	4.00	ตรวจไม่พบ	6.00	ตรวจไม่พบ
	2		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	3		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	1	6.00	ตรวจไม่พบ	10.00	ตรวจไม่พบ
	2		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	3		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	1	10.00	ตรวจไม่พบ	12.00	ตรวจไม่พบ
	2		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	3		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	1	14.00	ตรวจไม่พบ	16.00	ตรวจไม่พบ
	2		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	3		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	1	18.00	ตรวจไม่พบ	20.00	ตรวจไม่พบ
	2		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	3		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลผลของการบ่มตัวอย่าง (incubation) ดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม (ต่อ)

ชุดทดลอง/ชุดควบคุม	การวิเคราะห์ซ้ำ	ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 8 (โดยปริมาตร)		ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 10 (โดยปริมาตร)	
		เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)
ชุดควบคุม ชีวภาพ	1	22.00	ตรวจไม่พบ	24.00	ตรวจไม่พบ
	2		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	3		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	1	24.00	ตรวจไม่พบ	28.00	ตรวจไม่พบ
	2		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ
	3		ตรวจไม่พบ		ตรวจไม่พบ





ภาคผนวก ซ

ข้อมูลผลของความเข้มข้นมีเทนที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการบ่มตัวอย่าง (ระยะที่ 2) ในดินจาก
ชั้นปิดทับหลุมฝังกลบและดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา ที่ชุดความเข้มข้นของมีเทนบริเวณ
ช่องว่างเนื้อตัวอย่างดินร้อยละ 14 (โดยปริมาตร) ซึ่งมีการทดลองเต็มออกซิเจน

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลผลของความเข้มข้นมีเทนที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการบ่มตัวอย่าง (ระยะที่ 2) ของดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ ที่ชุดความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 14 (โดยปริมาตร) ซึ่งมีการทดลองเต็มออกซิเจน

ชุดทดลอง/ชุดควบคุม	การวิเคราะห์ซ้ำ	ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 14 (โดยปริมาตร)	
		เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)
ชุดทดลอง	1	0.00	3,380.50
	2		3,322.90
	3		3,352.80
	1	3.00	272.00
	2		259.50
	3		229.40
	1	3.00*	225.60
	2		220.30
	3		238.90
	1	3.13*	74.00
	2		58.20
	3		79.50
	1	3.25*	36.20
	2		40.80
	3		35.90
	1	3.38*	40.50
	2		23.20
	3		24.20
	1	3.50*	19.80
	2		22.30
	3		25.20
	1	4.00*	7.00
	2		2.00
	3		3.10
	1	6.00*	<0.09
	2		<0.09
	3		<0.09
	1	7.00*	<0.09
	2		<0.09
	3		<0.09
ชุดควบคุมไม่ชีวภาพ	1	0.00	3,335.60
	2		3,416.70
	3		3,335.40

หมายเหตุ: * คือ ผลของการติดตามการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 14 (โดยปริมาตร) หลังจากการทดลองเต็มออกซิเจน

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลผลของความเข้มข้นมีเทนที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการบ่มตัวอย่าง (ระยะที่ 2) ของดินจากชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ ที่ชุดความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 14 (โดยปริมาตร) ซึ่งมีการทดลองเต็มออกซิเจน (ต่อ)

ชุดทดลอง/ชุดควบคุม	การวิเคราะห์ซ้ำ	ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 14 (โดยปริมาตร)		
		เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)	
ชุดควบคุมไม่ชีวภาพ	1	3.00	3,349.70	
	2		3,328.80	
	3		3,287.00	
	1	3.00*	3,312.30	
	2		3,320.50	
	3		3,284.60	
	1	5.00*	3,287.60	
	2		3,341.40	
	3		3,351.00	
	1	7.00*	3,285.60	
	2		3,312.20	
	3		3,287.90	
	ชุดควบคุมชีวภาพ	1	0.00	ตรวจไม่พบ
		2		ตรวจไม่พบ
		3		ตรวจไม่พบ
1		3.00	ตรวจไม่พบ	
2			ตรวจไม่พบ	
3			ตรวจไม่พบ	
1		3.00*	ตรวจไม่พบ	
2			ตรวจไม่พบ	
3			ตรวจไม่พบ	
1		5.00*	ตรวจไม่พบ	
2			ตรวจไม่พบ	
3			ตรวจไม่พบ	
1		7.00*	ตรวจไม่พบ	
2			ตรวจไม่พบ	
3			ตรวจไม่พบ	

หมายเหตุ: * คือ ผลของการติดตามการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 14 (โดยปริมาตร) หลังจากการทดลองเต็มออกซิเจน

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลผลของความเข้มข้นมีเทนที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการบ่มตัวอย่าง (ระยะที่ 2) ของดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา ที่ชุดความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 14 (โดยปริมาตร) ซึ่งมีการทดลองเต็มออกซิเจน

ชุดทดลอง/ชุดควบคุม	การวิเคราะห์ซ้ำ	ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 14 (โดยปริมาตร)	
		เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)
ชุดทดลอง	1	0.00	3,305.50
	2		3,327.40
	3		3,233.90
ชุดควบคุม	1	3.00	2,052.90
	2		2,140.70
	3		2,090.20
ชุดทดลอง	1	6.00	1,592.70
	2		1,599.00
	3		1,683.60
ชุดควบคุม	1	9.00	789.30
	2		802.60
	3		850.40
ชุดทดลอง	1	9.00*	750.30
	2		803.60
	3		820.10
ชุดควบคุม	1	9.13*	703.80
	2		698.20
	3		710.50
ชุดทดลอง	1	9.25*	695.30
	2		700.50
	3		689.50
ชุดควบคุม	1	10.00*	304.50
	2		356.10
	3		307.90
ชุดทดลอง	1	11.00*	85.70
	2		100.30
	3		80.30
ชุดควบคุม	1	12.00*	7.10
	2		4.10
	3		3.20
ชุดทดลอง	1	13.00*	<0.09
	2		<0.09
	3		<0.09

หมายเหตุ: * คือ ผลของการติดตามการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 14 (โดยปริมาตร) หลังจากการทดลองเต็มออกซิเจน

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลผลของความเข้มข้นมีเทนที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการบ่มตัวอย่าง (ระยะที่ 2) ของดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา ที่ชุดความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 14 (โดยปริมาตร) ซึ่งมีการทดลองเต็มออกซิเจน (ต่อ)

ชุดทดลอง/ชุดควบคุม	การวิเคราะห์ซ้ำ	ความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 14 (โดยปริมาตร)	
		เวลา (วัน)	ความเข้มข้นของมีเทน (ไมโครโมลต่อกรัม)
ชุดควบคุมไม่ซีวภาพ	1	0.00	3,249.00
	2		3,250.30
	3		3,198.20
	1	9.00	3,250.30
	2		3,150.80
	3		3,321.20
	1	9.00*	3,295.00
	2		3,200.00
	3		3,117.00
	1	10.00*	3,202.30
	2		3,120.50
	3		3,098.80
	1	12.00*	3,109.80
	2		3,120.50
	3		3,202.50
ชุดควบคุมซีวภาพ	1	13.00*	3,120.50
	2		3,099.60
	3		3,095.60
	1	0.00	ตรวจไม่พบ
	2		ตรวจไม่พบ
	3		ตรวจไม่พบ
	1	9.00	ตรวจไม่พบ
	2		ตรวจไม่พบ
	3		ตรวจไม่พบ
	1	9.00*	ตรวจไม่พบ
	2		ตรวจไม่พบ
	3		ตรวจไม่พบ
	1	10.00*	ตรวจไม่พบ
	2		ตรวจไม่พบ
	3		ตรวจไม่พบ
1	12.00*	ตรวจไม่พบ	
2		ตรวจไม่พบ	
3		ตรวจไม่พบ	
1	13.00*	ตรวจไม่พบ	
2		ตรวจไม่พบ	
3		ตรวจไม่พบ	

หมายเหตุ: * คือ ผลของการติดตามการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมีเทนบริเวณช่องว่างเหนือตัวอย่างดินร้อยละ 14 (โดยปริมาตร) หลังจากการทดลองเต็มออกซิเจน



ภาคผนวก ฅ

การประยุกต์ข้อมูลทางจลนพลศาสตร์ที่ได้จากการศึกษาเพื่อคำนวณความหนาของชั้นดินปิดทับ
หลุมฝังกลบมูลฝอยที่เหมาะสมต่อการออกซิเดชันมีเทน

การประยุกต์ข้อมูลทางจลนพลศาสตร์ที่ได้จากการศึกษาเพื่อคำนวณความหนาของชั้นดินปิดทับ
หลุมฝังกลบมูลฝอยที่เหมาะสมต่อการออกซิเดชันมีเทน

ตารางที่ ฅ.1 ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาในดินตัวอย่างทั้ง 3 ชนิด

ข้อมูลจากการศึกษา	ดินจากชั้นปิด ทับหลุมฝังกลบ	ดินเพาะปลูกจาก พื้นที่ธรรมศาลา	ดินเพาะปลูกจาก พื้นที่สามง่าม
ความหนาแน่นรวม (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	0.294	0.369	1.66
ศักยภาพในการออกซิไดซ์ (V_{max}) (ไมโครโมลต่อกรัมต่อชั่วโมง)	0.614	0.401	0.0834

สมมติฐานที่ใช้สำหรับหลุมฝังกลบที่มีอายุมากและมีระบบเก็บรวบรวมแก๊สมีเทน

เมื่อกำหนดให้หลุมฝังกลบที่มีอายุมากและมีระบบเก็บรวบรวมแก๊สมีเทน มีอัตราการปลดปล่อยแก๊สมีเทน (methane flux rate) เท่ากับ 85,000 มิลลิกรัมมีเทนต่อตารางเมตรต่อวัน (Willumsen and Bach, 1991)

การคำนวณความหนาของชั้นดินปิดทับหลุมฝังกลบในตัวอย่างดินแต่ละชนิด ดังนี้

ความหนาของชั้นปิดทับเมื่อใช้ดินจากชั้นดินปิดทับหลุมฝังกลบ

$$= \frac{\text{cm}^3}{0.294 \text{ g}} \times \frac{85000 \text{ mg}}{\text{m}^2 \times \text{day}} \times \frac{\text{g} \times \text{day}}{0.614 \text{ mg}} \times \frac{\text{m}^2}{10000 \text{ cm}^2} \times \frac{\text{m}}{100 \text{ cm}} = 0.47 \text{ เมตร}$$

ความหนาของชั้นปิดทับเมื่อใช้ดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา

$$= \frac{\text{cm}^3}{0.369 \text{ g}} \times \frac{85000 \text{ mg}}{\text{m}^2 \times \text{day}} \times \frac{\text{g} \times \text{day}}{0.401 \text{ mg}} \times \frac{\text{m}^2}{10000 \text{ cm}^2} \times \frac{\text{m}}{100 \text{ cm}} = 0.57 \text{ เมตร}$$

ความหนาของชั้นปิดทับเมื่อใช้ดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม

$$= \frac{\text{cm}^3}{1.658 \text{ g}} \times \frac{85000 \text{ mg}}{\text{m}^2 \times \text{day}} \times \frac{\text{g} \times \text{day}}{0.0834 \text{ mg}} \times \frac{\text{m}^2}{10000 \text{ cm}^2} \times \frac{\text{m}}{100 \text{ cm}} = 0.62 \text{ เมตร}$$

สมมติฐานที่ใช้สำหรับหลุมฝังกลบที่เริ่มดำเนินการปิดทับใหม่ ๆ หรือเป็นหลุมฝังกลบที่มีอายุน้อย

เมื่อกำหนดให้หลุมฝังกลบที่เริ่มดำเนินการปิดทับใหม่ ๆ หรือเป็นหลุมฝังกลบที่มีอายุน้อยมีอัตราการปลดปล่อยแก๊สมีเทน (methane flux rate) เท่ากับ 1.3×10^6 มิลลิกรัมมีเทนต่อตารางเมตรต่อวัน (Willumsen and Bach, 1991)

การคำนวณความหนาของชั้นดินปิดทับหลุมฝังกลบในตัวอย่างดินแต่ละชนิด ดังนี้

ความหนาของชั้นปิดทับเมื่อใช้ดินจากชั้นดินปิดทับหลุมฝังกลบ

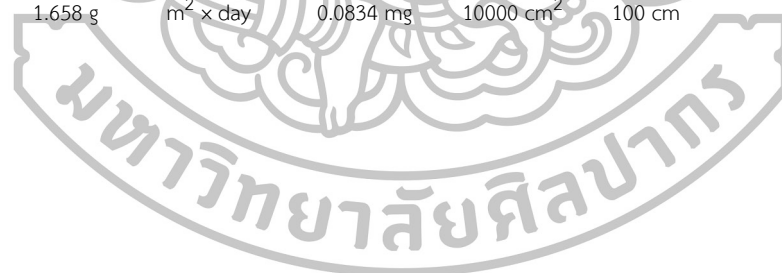
$$= \frac{\text{cm}^3}{0.294 \text{ g}} \times \frac{1.3 \times 10^6 \text{ mg}}{\text{m}^2 \times \text{day}} \times \frac{\text{g} \times \text{day}}{0.614 \text{ mg}} \times \frac{\text{m}^2}{10000 \text{ cm}^2} \times \frac{\text{m}}{100 \text{ cm}} = 7.2 \text{ เมตร}$$

ความหนาของชั้นปิดทับเมื่อใช้ดินเพาะปลูกจากพื้นที่ธรรมศาลา

$$= \frac{\text{cm}^3}{0.369 \text{ g}} \times \frac{1.3 \times 10^6 \text{ mg}}{\text{m}^2 \times \text{day}} \times \frac{\text{g} \times \text{day}}{0.401 \text{ mg}} \times \frac{\text{m}^2}{10000 \text{ cm}^2} \times \frac{\text{m}}{100 \text{ cm}} = 8.8 \text{ เมตร}$$

ความหนาของชั้นปิดทับเมื่อใช้ดินเพาะปลูกจากพื้นที่สามง่าม

$$= \frac{\text{cm}^3}{1.658 \text{ g}} \times \frac{1.3 \times 10^6 \text{ mg}}{\text{m}^2 \times \text{day}} \times \frac{\text{g} \times \text{day}}{0.0834 \text{ mg}} \times \frac{\text{m}^2}{10000 \text{ cm}^2} \times \frac{\text{m}}{100 \text{ cm}} = 9.5 \text{ เมตร}$$





ภาคผนวก ญ
ระบบบำบัดทางชีวภาพ
(biotic treatment systems)

ระบบบำบัดทางชีวภาพ (biotic treatment systems) เพื่อการออกซิเดชันของมีเทน เป็นระบบบำบัดที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการบำบัดแก๊สที่เกิดขึ้นจากหลุมฝังกลบมูลฝอย เช่น ระบบตัวกรองชีวภาพ (bio – filter) ระบบหน้าต่างชีวภาพ (bio – window) ระบบชั้นปิดทับชีวภาพ (bio – cover) และระบบชั้นปิดทับชีวภาพสำเร็จรูป (bio – tarp) เป็นต้น (ตารางที่ ญ.1) ซึ่งระบบเหล่านี้มีต้นทุนไม่สูงมากนักในการควบคุมการแพร่ระบาดของมีเทนจากหลุมฝังกลบขยะมูลฝอยที่มีระดับความเข้มข้นของมีเทนต่ำ และยังเป็นระบบที่สามารถประยุกต์ใช้กับหลุมฝังกลบได้หลากหลายรูปแบบ เช่น หลุมฝังกลบที่มีการติดตั้งระบบเก็บรวบรวมแก๊สมีเทน และหลุมฝังกลบขนาดเล็กที่ไม่มีการติดตั้งระบบเก็บรวบรวมแก๊สมีเทน เป็นต้น แต่ในระหว่างดำเนินการฝังกลบจำเป็นต้องมีการติดตามผลกระทบสิ่งแวดล้อม และบำรุงรักษาหลุมฝังกลบภายหลังการฝังกลบเสร็จสิ้นแล้ว (aftercare) สำหรับระบบบำบัดทางชีวภาพรูปแบบต่าง ๆ มีรายละเอียดดังนี้

- **ระบบตัวกรองชีวภาพ (bio – filter)**

ระบบตัวกรองชีวภาพ (bio – filter) เป็นระบบที่พัฒนาขึ้นเพื่อลดการแพร่ระบาดของมีเทนที่เกิดจากหลุมฝังกลบมูลฝอย โดยอาศัยกระบวนการออกซิเดชันของมีเทนในบริเวณชั้นปิดทับหลุมฝังกลบภายใต้สภาวะแบบใช้อากาศ (aerobic condition) (Figueroa, 1996) ซึ่งโดยปกติแก๊สที่เกิดขึ้นจากหลุมฝังกลบจะมีการแพร่กระจายแบบธรรมชาติ (passive) จากการเปลี่ยนความดันของแก๊สภายในหลุมฝังกลบและชั้นบรรยากาศ (Gebert and Grongroft, 2006) สำหรับระบบตัวกรองชีวภาพสามารถดำเนินการรวบรวมแก๊สจากหลุมฝังกลบได้ 2 รูปแบบ ได้แก่ แบบระบายตามธรรมชาติ (passively system) และแบบการสูบหรืออัดอากาศเข้าไปในระบบที่รวบรวม (actively system) (Pawlowska, 2014) และจากรูปแบบการรวบรวมแก๊สที่มีความแตกต่างกันนี้จึงทำให้สามารถแบ่งระบบตัวกรองชีวภาพออกได้เป็น 2 ระบบ (Pawlowska, 2014) ได้แก่ ระบบตัวกรองชีวภาพแบบเปิด (open system) และระบบตัวกรองชีวภาพแบบปิด (close system) สำหรับระบบตัวกรองชีวภาพแบบเปิด (รูปที่ ญ.1) มักนำไปใช้กับหลุมฝังกลบที่มีรูปแบบการรวบรวมแก๊สแบบระบายตามธรรมชาติ โดยมีลักษณะการแพร่ของแก๊สผ่านชั้นกรองแบบไหลจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบน (upflow) (Streese and Stegmann, 2003) ซึ่งระบบตัวกรองชีวภาพแบบเปิดนี้เป็นระบบตัวกรองชีวภาพที่มีความยากต่อการเดินระบบ เนื่องจากไม่สามารถควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ให้มีความคงที่ได้ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และการแพร่ของอากาศ เป็นต้น ส่วนระบบตัวกรองชีวภาพแบบปิดมักไม่พบปัญหาการควบคุมปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้ เนื่องจากระบบตัวกรองชีวภาพแบบปิดมีการเติมอากาศเข้าไปในระบบทำให้สามารถควบคุมอุณหภูมิ ความชื้น และการแพร่ของอากาศได้อย่างเหมาะสม ซึ่งการควบคุมความชื้นสามารถทำได้โดยการเติมแก๊สที่มีความชื้น (gas humidification) (Plessis *et al.*, 2003; Nikiema *et al.*, 2007) หรือติดตั้งหัวกระจายน้ำเข้าสู่ชั้นกรอง (Powelson *et al.*, 2006;

Tanthachoon *et al.*, 2007) นอกจากนี้ระบบตัวกรองชีวภาพแบบปิดยังมีการรวบรวมแก๊สแบบ การสูบหรืออัดอากาศเข้าไปในระบบที่รวบรวม (actively system) โดยมีการแพร่ของแก๊สผ่านชั้น กรองเป็นได้ทั้งแบบไหลจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบน (upflow) และแบบไหลจากด้านบนลงสู่ด้านล่าง (downflow) (รูปที่ ๓.๒) สำหรับข้อดีของระบบตัวกรองชีวภาพแบบปิดคือ สามารถควบคุมปัจจัย ภายนอกได้ แต่อย่างไรก็ตามอาจมีต้นทุนในการดำเนินการสูง โดยเมื่อเปรียบเทียบกับระบบตัวกรอง ชีวภาพแบบเปิด ระบบตัวกรองชีวภาพแบบปิดจะมีต้นทุนในการดำเนินการที่มากกว่าถึงร้อยละ 15 (Huang *et al.*, 2011)

ปัญหาที่มักพบในระบบตัวกรองชีวภาพคือ การสร้างสาร Extracellular Polymeric Substances หรือ EPS จากเมทาโนโทรฟ ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญอย่างยิ่ง (Streese and Stegmann, 2003; Wilshusen *et al.*, 2004) เนื่องจากสาร EPS ที่เกิดขึ้นจะก่อให้เกิดการอุดตันบริเวณช่องว่าง ของวัสดุชั้นกรอง ส่งผลต่อการลดลงของปริมาณสารอาหารที่เกิดขึ้นในชั้นกรองทำให้กิจกรรมของ เมทาโนโทรฟลดลง ซึ่งการสร้าง EPS ที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่มีสาเหตุมาจากการใช้งานระบบเป็นระยะ เวลานาน (Streese and Stegmann, 2003; Wilshusen *et al.*, 2004) สำหรับระบบตัวกรอง ชีวภาพที่มีการรวบรวมแก๊สแบบระบายตามธรรมชาติ (passively system) มีโอกาสที่ระบบจะได้รับ แก๊สในลักษณะที่ไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้เกิดการสร้าง EPS ขึ้นในปริมาณมาก แต่หากมีการควบคุม อัตราการไหลของแก๊สที่เกิดขึ้นจากหลุมฝังกลบก็จะเป็นการลดหรือยังยั้งการสร้าง EPS ได้ (Huber – Humer *et al.*, 2008) หรืออาจเพิ่มความหนาของชั้นกรองเพื่อให้แก๊สมีระยะเวลาการเคลื่อนที่ ได้มากขึ้นก็เป็นการลดการเกิด EPS ได้เช่นเดียวกัน (Streese and Stegmann, 2003)

จากการศึกษาของ Wilshusen *et al.* (2004) ที่ใช้ปุ๋ยหมักเนื้อละเอียดเป็นวัสดุชั้นกรอง และทำการบ่มด้วยแก๊สมีเทนความเข้มข้นร้อยละ 2.5 (โดยปริมาตร) พบว่า ในระยะเวลา 3 เดือนแรก ของการบ่ม มีอัตราการออกซิเดชันของมีเทนมากถึง 63 กรัมลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง แต่ในระยะเวลา 5 เดือนต่อมา พบว่าอัตราการออกซิเดชันของมีเทนมีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Streese and Stegmann (2003) ที่ทำการทดสอบวัสดุชั้นกรองชีวภาพสำหรับการบำบัดแก๊สมีเทน โดยบ่ม ตัวอย่างด้วยมีเทนความเข้มข้นร้อยละ 3 (โดยปริมาตร) และใช้ระยะเวลาในการทดสอบมากกว่า 1 ปี พบว่าตัวอย่างที่มีการผสมปุ๋ยหมักเข้ากับพีท (peat) และเส้นใยไม้ (wood fibers) มีค่าอัตราการ ออกซิเดชันของมีเทนคงที่ (stable) เท่ากับ 20 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และหลังจากอัตราการ ออกซิเดชันของมีเทนเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุด พบว่าอัตราการออกซิเดชันมีเทนจะค่อย ๆ ลดลง เนื่องจากสาร EPS ที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ของเมทาโนโทรฟ

ตารางที่ ๑.1 เปรียบเทียบข้อแตกต่างระหว่างระบบชีวภาพเพื่อการออกซิเดชันของมีเทน

ระบบตัวกรองชีวภาพ (bio – filter)		ระบบหน้าต่างชีวภาพ (bio – window)	ระบบชั้นปิดทับชีวภาพ (bio – cover)	ระบบชั้นปิดทับชีวภาพสำเร็จรูป (bio – tarp)
การรวบรวมแก๊สแบบการสูบหรือดูดอากาศเข้าไปในระบบท่อรวบรวม (actively system)	การรวบรวมแก๊สแบบระบายตามธรรมชาติ (passively system)			
<p>การนำไปประยุกต์ใช้</p> <ul style="list-style-type: none"> -เหมาะสำหรับหลุมฝังกลบที่มีอายุมาก ซึ่งมีความเข้มข้นของแก๊สลดลงแล้ว และมีระบบเก็บรวบรวมแก๊ส -ติดตั้งอยู่ภายในหลุมฝังกลบ บนหลุมฝังกลบหรือติดตั้งบริเวณใกล้เคียงกับหลุมฝังกลบ 	<ul style="list-style-type: none"> -เหมาะสำหรับหลุมฝังกลบขนาดเล็กหรือหลุมฝังกลบที่มีอายุมากและไม่มีระบบเก็บรวบรวมแก๊ส -ติดตั้งอยู่ภายในหรืออยู่ภายใต้ชั้นปิดทับหลุมฝังกลบ (capping landfill) 	<ul style="list-style-type: none"> -ใช้กับบริเวณที่มีการแพร่กระจายของแก๊สมีเทนสูง (hot spot) ในหลุมฝังกลบ -สามารถใช้เป็นชั้นปิดทับชั่วคราว (interim cover) หรือเป็นชั้นปิดทับขั้นสุดท้าย (final cover) 	<ul style="list-style-type: none"> -ใช้กับพื้นที่ใหญ่ ๆ เช่น ครอบคลุมทั้งพื้นที่หลุมฝังกลบ -สามารถใช้เป็นชั้นปิดทับชั่วคราว (interim cover) หรือเป็นชั้นปิดทับขั้นสุดท้าย (final cover) -สามารถใช้กับระบบที่มีหรือไม่มีระบบเก็บรวบรวมแก๊สก็ได้ -ใช้ในระหว่างดำเนินการฝังกลบหรือช่วงที่มีการติดตามและบำรุงรักษาหลุมฝังกลบอยู่ 	<ul style="list-style-type: none"> -ใช้ในกระบวนการกลบทับหน้าประจำวัน (daily cover) -ใช้ได้ในระหว่างการกลบทับจนทำการกลบทับหลุมฝังกลบเสร็จ
วัสดุที่ใช้	วัสดุอินทรีย์หรือวัสดุอินทรีย์ที่ผ่านกระบวนการทางวิศวกรรมบางอย่าง เช่น ปุ๋ยหมัก ขี้เลื่อยหรือเศษหญ้า (green or brown waste) ดินเหนียวสังเคราะห์ (manufactured clay) เม็ดดินเผา (pellets) พีท (peat) เปลือกไม้ วัสดุที่มีส่วนผสมระหว่างพีทและทราย กากตะกอนจากน้ำเสีย			<ul style="list-style-type: none"> - ทำจากพอลิโพรไพลีน (polypropylene) หรือทำจาก polyethylene geomembrane เช่น HDPE

ตารางที่ ญ.1 เปรียบเทียบข้อแตกต่างระหว่างระบบชีวภาพเพื่อการออกซิเดชันของมีเทน (ต่อ)

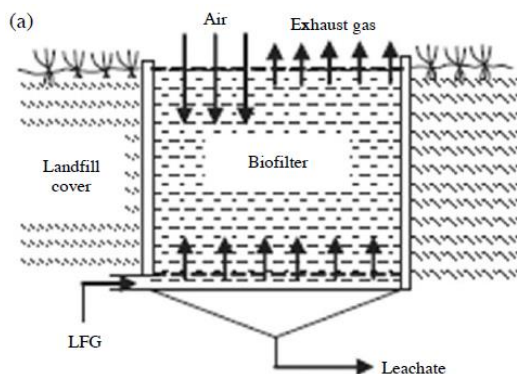
ระบบตัวกรองชีวภาพ (bio – filter)		ระบบหน้าต่างชีวภาพ (bio – window)	ระบบชั้นปิดทับชีวภาพ (bio – cover)	ระบบชั้นปิดทับชีวภาพสำเร็จรูป (bio – tarp)
การรวบรวมแก๊สแบบการสูบหรืออัดอากาศเข้าไปในระบบท่อรวบรวม (actively system)	การรวบรวมแก๊สแบบระบายตามธรรมชาติ (passively system)			
<p>ข้อดี</p> <ul style="list-style-type: none"> - บำบัดแก๊สจากหลุมฝังกลบได้มากขึ้นจึงช่วยลดการแพร่กระจายของแก๊สเรือนกระจกให้ต่ำลง - ควบคุมง่ายกว่าระบบตัวกรองชีวภาพ (bio – filter) ระบบหน้าต่างชีวภาพ (bio – window) และระบบชั้นปิดทับชีวภาพ (bio – cover) 	<ul style="list-style-type: none"> - มีค่าใช้จ่ายน้อยกว่าระบบการรวบรวมแก๊สแบบการสูบหรืออัดอากาศเข้าไปในระบบท่อรวบรวม - ไม่มีการใช้ไฟฟ้า จึงส่งผลให้มีความบำรุงรักษาและค่าดำเนินการต่ำกว่าการรวบรวมแก๊สแบบการสูบหรืออัดอากาศเข้าไปในระบบท่อรวบรวม - การควบคุมระบบทำได้ง่ายกว่าระบบตัวกรองชีวภาพ (bio – filter) ระบบหน้าต่างชีวภาพ (bio – window) และระบบชั้นปิดทับชีวภาพ (bio – cover) 	<ul style="list-style-type: none"> - ง่ายต่อการติดตั้ง - ใช้กับบริเวณที่มีการแพร่กระจายของแก๊สมีเทนสูง (hot spot) - ราคาถูก - ไม่จำเป็นต้องมีระบบเก็บรวบรวมแก๊ส 	<ul style="list-style-type: none"> - เหมาะสำหรับดำเนินการระยะยาว - พื้นที่ที่ใช้ระบบมีขนาดใหญ่จึงได้ค่าการออกซิเดชันของมีเทนที่สูง - ภาวะบรรทุทุกของมีเทนต่ำจะส่งผลให้การสร้าง EPS น้อย 	<ul style="list-style-type: none"> - ลดการแพร่กระจายแก๊สมีเทนในระหว่างการดำเนินการฝังกลบ - เป็นชั้นปิดทับประจำวันในระหว่างการฝังกลบ - ช่วยประหยัดพื้นที่หลุมฝังกลบ

ตารางที่ ๑.1 เปรียบเทียบข้อแตกต่างระหว่างระบบชีวภาพเพื่อการออกซิเดชันของมีเทน (ต่อ)

	ระบบตัวกรองชีวภาพ (bio – filter)		ระบบหน้าต่างชีวภาพ (bio – window)	ระบบชั้นปิดทับชีวภาพ (bio – cover)	ระบบชั้นปิดทับชีวภาพสำเร็จรูป (bio – tarp)
	การรวบรวมแก๊สแบบการสูบหรืออัดอากาศเข้าไปในระบบท่อรวบรวม (actively system)	การรวบรวมแก๊สแบบระบายตามธรรมชาติ (passively system)			
ข้อเสีย	<ul style="list-style-type: none"> - ค่าลงทุนและค่าดำเนินการสูงกว่าระบบการรวบรวมแก๊สแบบระบายตามธรรมชาติ - ต้องการผู้ควบคุมและดูแลระบบที่มีความรู้และความชำนาญกว่าระบบการรวบรวมแก๊สแบบระบายตามธรรมชาติ - EPS เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว 	<ul style="list-style-type: none"> - อาจมีการเคลื่อนย้ายของแก๊สจากหลุมฝังกลบออกสู่สิ่งแวดล้อมโดยรอบได้ - มี EPS เกิดขึ้นในระบบ แต่ใช้ระยะเวลานานกว่าในระบบการรวบรวมแก๊สแบบการสูบหรืออัดอากาศเข้าไปในระบบท่อรวบรวม 	<ul style="list-style-type: none"> - มีความเสี่ยงของภาวะบรรทุกมีเทนเกินอัตรา - มีความเสี่ยงต่อการเกิด EPS 	<ul style="list-style-type: none"> - สถานะการดำเนินการสำหรับการควบคุมจำกัด - มีข้อจำกัดในวัสดุที่ใช้ 	<ul style="list-style-type: none"> - ราคาสูง - ยังไม่มีรายงานการใช้งานระบบนี้

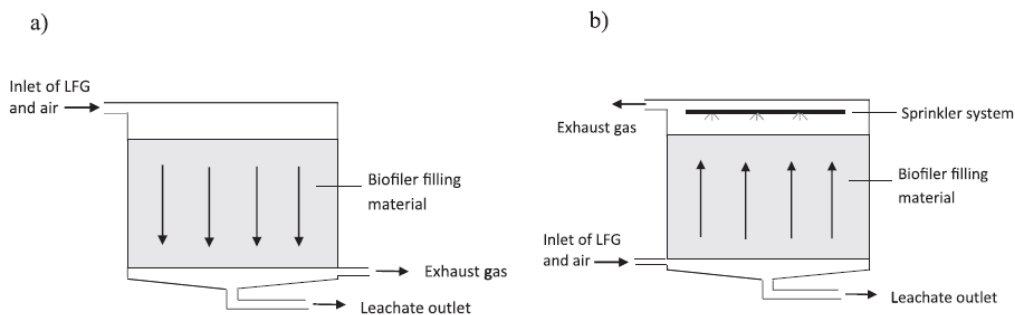
ที่มา: Abushammala *et al.* (2014a)





รูปที่ ๑.๑ ระบบตัวกรองชีวภาพแบบเปิด (open system)

ที่มา: Abushammala *et al.* (2014a)



รูปที่ ๑.๒ ระบบตัวกรองชีวภาพแบบปิด (close system)

a) แบบไหลจากด้านบนลงสู่ด้านล่าง (downflow) และ b) แบบไหลจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบน (upflow)

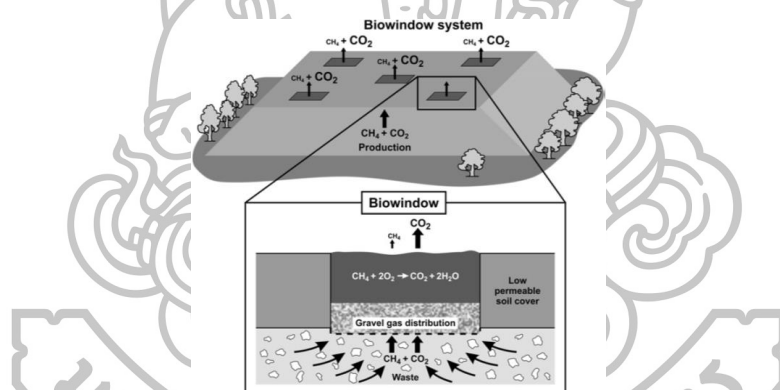
ที่มา: Pawlowska (2014)

- ระบบหน้าต่างชีวภาพ (bio - window)

ระบบหน้าต่างชีวภาพ (bio - window) เป็นระบบบำบัดทางชีวภาพระบบหนึ่งซึ่งช่วยลดการแพร่กระจายของมีเทนจากหลุมฝังกลบสู่บรรยากาศ โดยระบบหน้าต่างชีวภาพเป็นระบบที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้กับหลุมฝังกลบแบบถูกหลักสุขาภิบาล (sanitary landfills) (Pawlowska, 2014) และมักใช้กับหลุมฝังกลบที่ไม่มีระบบเก็บรวบรวมแก๊ส หรือหลุมฝังกลบที่มีระบบรวบรวมแก๊สแบบระบบตามธรรมชาติ (passively system) (Abushammala *et al.*, 2014a) สำหรับการติดตั้งระบบหน้าต่างชีวภาพจะติดตั้งหลังจากที่มีการปิดหลุมฝังกลบเรียบร้อยแล้วและพบว่ามี การแพร่กระจายของมีเทนสูง โดยจะติดตั้งเป็นบริเวณเล็ก ๆ บนชั้นปิดทับหลุมฝังกลบในบริเวณที่พบว่ามี การแพร่กระจายของแก๊สมีเทนสูง (hot spot) ซึ่งการตรวจสอบการแพร่กระจายของมีเทนเพื่อให้ทราบถึงบริเวณของชั้นปิดทับหลุมฝังกลบที่มีการแพร่กระจายของแก๊สมีเทนสูง สามารถทำได้ 2 วิธี ได้แก่ วิธีการใช้กล่อง

เก็บตัวอย่างแก๊ส (flux chamber) และวิธีการทางธรณีสถิติ (geo – statistical) (Abushammala *et al.*, 2014a)

ระบบหน้าต่างชีวภาพประกอบด้วยชั้นที่ติดกับมูลฝอย และชั้นที่เกิดกระบวนการออกซิเดชันมีเทน โดยชั้นที่ติดกับมูลฝอยจะใช้วัสดุที่มีความพรุนสูง เพื่อรองรับชั้นวัสดุตัวกลางซึ่งเป็นชั้นที่เกิดกระบวนการออกซิเดชันมีเทน เพื่อให้แก๊สในหลุมฝังกลบแพร่มายังบริเวณชั้นที่เกิดกระบวนการออกซิเดชันมีเทนได้ดีกว่าบริเวณอื่น ส่งผลให้บริเวณที่เป็นระบบหน้าต่างชีวภาพมีการออกซิเดชันมีเทนได้ดีจึงสามารถช่วยแก้ปัญหาการแพร่กระจายแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นจากหลุมฝังกลบได้ โดยทั่วไปชั้นวัสดุตัวกลางจะใช้ปุ๋ยหมักซึ่งเป็นวัสดุจากธรรมชาติในการเพิ่มประสิทธิภาพการออกซิเดชันของมีเทน (รูปที่ ๓) (Abushammala *et al.*, 2014a; Pawlowska, 2014) แต่หากใช้ปุ๋ยหมักเป็นวัสดุตัวกลางในระบบหน้าต่างชีวภาพและทำการติดตั้งระบบแบบครอบคลุมทั้งพื้นที่เช่นเดียวกับระบบชั้นปิดทับชีวภาพ (bio – cover) จะทำให้การติดตั้งระบบหน้าต่างชีวภาพไม่เกิดความคุ้มค่าแก่การลงทุน



รูปที่ ๓ ระบบหน้าต่างชีวภาพ (bio – window)

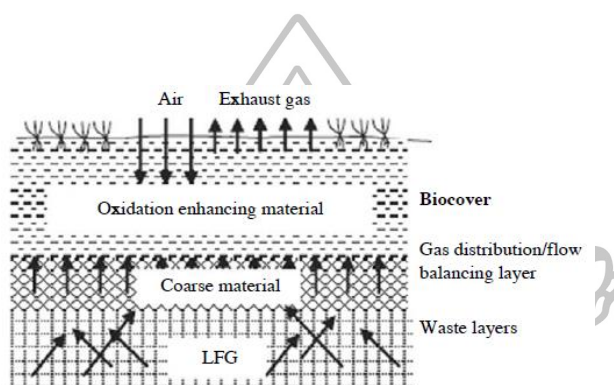
ที่มา: Kjelsen and Charlotte (2014)

- ระบบชั้นปิดทับชีวภาพ (bio – cover)

ระบบชั้นปิดทับชีวภาพ (bio – cover) เป็นระบบบำบัดทางชีวภาพที่ดำเนินการได้ง่าย รวมทั้งมีค่าดำเนินการต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับระบบบำบัดทางชีวภาพแบบอื่น ๆ ซึ่งจากการศึกษาของ Huber – Humer *et al.* (2009) พบว่าหลุมฝังกลบมูลฝอยที่มีการใช้ระบบชั้นปิดทับชีวภาพจะช่วยให้เพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเมทาโนโทรฟและลดปริมาณแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นจากหลุมฝังกลบได้

โดยทั่วไประบบชั้นปิดทับชีวภาพประกอบด้วยชั้นที่มีความพรุนสูงซึ่งอยู่ชั้นบนของชั้นมูลฝอย เช่น กรวด (gravel) หรือแก้วที่บดละเอียด (crushed glass) ซึ่งมีความหนาประมาณ 10 – 30

เซนติเมตร และชั้นถัดขึ้นมาคือชั้นของปุ๋ยหมัก (Stern *et al.*, 2007; Jugnia *et al.*, 2008) ซึ่งมีความหนาของชั้นประมาณ 100 เซนติเมตรหรืออาจมากกว่า โดยจะส่งผลให้ความสามารถในการออกซิเดชันของมีเทนสูงขึ้น ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าชั้นการแพร่กระจายของแก๊สหรือชั้นที่มีรูพรุนสูงจะอยู่ด้านบนของมูลฝอยทำให้แก๊สจากหลุมฝังกลบไหลขึ้นสู่ชั้นระบบชั้นปิดทับชีวภาพและเกิดกิจกรรมของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายมีเทนขึ้นในชั้นนี้ (รูปที่ ๓.๔) แต่ข้อเสียของระบบนี้คือใช้วัสดุในการทำชั้นปิดทับชีวภาพปริมาณมากและขาดการควบคุมสภาวะการออกซิเดชันของมีเทน (Pawlowska, 2014)



รูปที่ ๓.๔ ระบบชั้นปิดทับชีวภาพ (bio - cover)

ที่มา: Abushammala *et al.* (2014a)

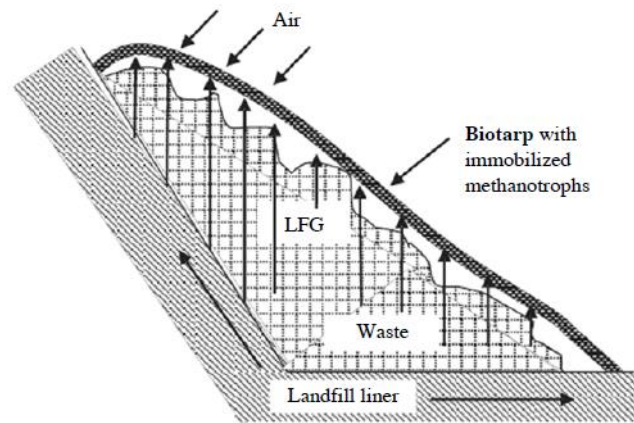
- ระบบชั้นปิดทับชีวภาพสำเร็จรูป (bio - tarp)

ชั้นของวัสดุปิดทับหลุมฝังกลบก่อนการปิดทับหลุมฝังกลบขั้นสุดท้าย (final cover) สามารถแบ่งได้ 2 ประเภท ได้แก่ ชั้นของวัสดุปิดทับรายวัน (daily cover) และชั้นของวัสดุปิดทับระหว่างชั้นมูลฝอย (intermediate cover) โดยชั้นของวัสดุปิดทับรายวันคือ ชั้นกลบทับหน้ามูลฝอยที่ทำการฝังกลบในช่วงท้ายของการทำงานในแต่ละวัน ซึ่งปกติจะใช้ดินบริเวณหลุมฝังกลบทำการกลบทับ ทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างของเสียกับอากาศ ช่วยลดกลิ่นไม่พึงประสงค์ ช่วยป้องกันลมพัดขยะ ลดความเสี่ยงของการเกิดเพลิงไหม้ภายในบริเวณหลุมฝังกลบ ป้องกันสัตว์คุ้ยขยะ รวมทั้งป้องกันแมลงวัน และสัตว์พาหะต่าง ๆ ไม่ให้เข้าและออกจากบริเวณที่ทำการฝังกลบ ซึ่งโดยปกติชั้นวัสดุปิดทับแบบรายวันจะมีความหนาประมาณ 15 เซนติเมตร สำหรับบางพื้นที่ที่ไม่สามารถใช้ดินดั้งเดิมเป็นวัสดุกลบทับแบบรายวัน อาจใช้วัสดุทางเลือกของชั้นปิดทับประจำวัน (Alternative daily cover; ADC) แทน เช่น ขี้เลื่อยหรือเศษหญ้า (green or brown waste) กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย (sewage sludge) หรือผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์ (commercial products) เช่น โฟม (foams) และผ้าใบ เป็นต้น แต่การใช้วัสดุ ADC ต้องมีการเติมอากาศลงในบริเวณนั้นด้วย (Hilger *et al.*, 2009) ส่วนการใช้วัสดุกลบทับชั้นกลางหรือการปิดชั้นหลุมฝังกลบ

บริเวณด้านบนและด้านข้าง เป็นการกลบทับมูลฝอยระหว่างชั้นฝังกลบ โดยหลังจากบดอัดมูลฝอยเต็มชั้นหรือเซลล์ที่ได้ออกแบบไว้จะต้องทำการปิดทับด้วยวัสดุปิดทับเพื่อให้หลุมฝังกลบและกองมูลฝอยเกิดความมั่นคง (Abushammala *et al.*, 2014a) ก่อนที่จะทำการฝังกลบในเซลล์ต่อไป

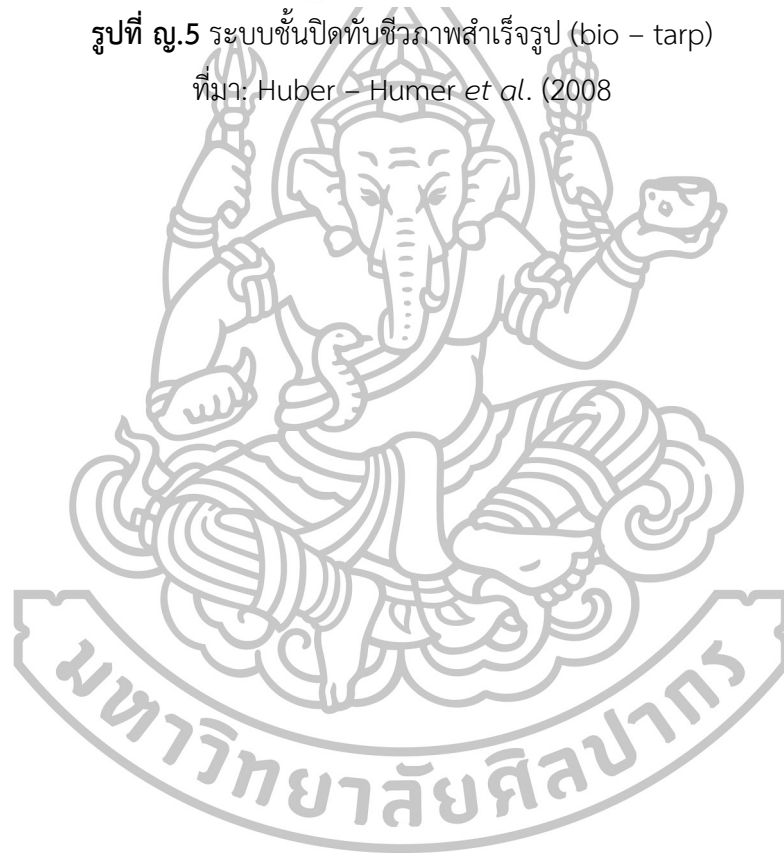
ระบบชั้นปิดทับชีวภาพสำเร็จรูป (bio – tarp) เป็นนวัตกรรมใหม่ที่นำมาใช้ร่วมกับระบบบำบัดทางชีวภาพเพื่อลดการแพร่กระจายของแก๊สมีเทนในหลุมฝังกลบ ระบบชั้นปิดทับชีวภาพสำเร็จรูปมีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มชีวภาพที่มีความยืดหยุ่นและสามารถใช้เป็นชั้นวัสดุปิดทับรายวัน (daily cover) ในการปิดทับของเสียได้ (รูปที่ ๓.๕) วัสดุที่นำมาทำระบบชั้นปิดทับชีวภาพสำเร็จรูปจะต้องมีน้ำหนักเบา มีความยืดหยุ่นสูง รักษาความชุ่มชื้นได้ดี มีความพรุนสูง และสามารถป้องกันการย่อยสลายได้ (biodegradation) ซึ่งชั้นปิดทับชีวภาพสำเร็จรูปควรมีความหนาที่เหมาะสมเพื่อให้แก๊สมีเทนมีระยะเวลาเพียงพอที่จะถูกออกซิไดซ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนที่จะผ่านชั้นปิดทับชีวภาพสำเร็จรูปออกไป (Huber – Humer *et al.*, 2008) จากงานวิจัยของ Hilger *et al.* (2007) ได้ทำการทดสอบวัสดุต่าง ๆ เพื่อใช้เป็นระบบชั้นปิดทับชีวภาพสำเร็จรูป เช่น ฟองน้ำธรรมชาติ (natural sponge) แผ่นใยสังเคราะห์ (geotextile) แผ่นโพลีคาร์บอเนต (polycarbonate membrane) แผ่นใยสังเคราะห์โพลีพรพิลีนแบบไม่ถักทอ (non – woven polypropylene geotextile) เม็ดแก้ว (glass beads) พบว่า ฟองน้ำธรรมชาติ (natural sponge) และ แผ่นใยสังเคราะห์ (geotextile) เป็นวัสดุที่มีความเหมาะสมที่สุด และยังสามารถรีไซเคิลที่เรียกว่าเมทาโนโทรฟได้เป็นอย่างดี แต่เป็นวัสดุที่สูญเสียความชื้นได้เร็วกว่าวัสดุอื่น ๆ จึงควรมีการคัดเลือกชนิดของเมทาโนโทรฟให้มีความเหมาะสมซึ่งเมทาโนโทรฟบางชนิดสามารถมีชีวิตอยู่ได้เมื่อขาดมีเทนนานถึง 12 ชั่วโมง แต่เมทาโนโทรฟบางชนิดก็ไม่สามารถมีชีวิตอยู่ได้ (Huber – Humer *et al.*, 2008) ดังนั้นการเลือกใช้ชนิดของเมทาโนโทรฟจึงมีความสำคัญสำหรับระบบชั้นปิดทับชีวภาพสำเร็จรูปเป็นอย่างมาก (Pawlowska, 2014)

สำหรับระบบชั้นปิดทับชีวภาพสำเร็จรูปเป็นส่วนที่อยู่ชั้นบนสุดของการปิดทับในแต่ละวัน และจะมีการนำออกในวันถัดไปที่มีการเพิ่มปริมาณของของเสียภายในเซลล์ เนื่องจากการฝังกลบมูลฝอยในแต่ละเซลล์นั้นอาจต้องใช้ระยะเวลานาน และในระหว่างนี้เป็นช่วงเวลาที่ไม่มีแก๊สมีเทนโดยรวมแก๊สมีเทน ดังนั้นการใช้ระบบชั้นปิดทับชีวภาพสำเร็จรูปจึงเป็นการลดการแพร่กระจายของมีเทนโดยเมทาโนโทรฟ (Abushammala *et al.*, 2014) จากการศึกษาของ Adams *et al.* (2011) พบว่า การใช้ระบบชั้นปิดทับชีวภาพสำเร็จรูปจะสามารถกำจัดมีเทนได้ถึงร้อยละ 16 และหากระบบชั้นปิดทับชีวภาพสำเร็จรูปที่ใช้มีการบรรจุวัสดุเพิ่มเข้าไป เช่น ปุ๋ยหมัก หรือ หินดินดาน (shale) จะสามารถเพิ่มการกำจัดมีเทนได้ถึงร้อยละ 32



รูปที่ ๕.๕ ระบบชั้นปิดทับชีวภาพสำเร็จรูป (bio - tarp)

ที่มา: Huber - Humer *et al.* (2008)



ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นางสาวเจนจิรา ปานล้ำเลิศ
ที่อยู่	107/8 ม.1 ต.บ้านบ่อ อ.เมืองสมุทรสาคร จ.สมุทรสาคร 74000 โทรศัพท์ 083-009-1624 E-mail address : janejira.pan@gmail.com
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ.2555	สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยศิลปากร
พ.ศ.2556	ศึกษาต่อระดับปริญญาโทบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยศิลปากร
ประวัติการฝึกงานและอบรม	
พ.ศ.2554	ผ่านการฝึกงาน จากสวนคุณภาพ ความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสิ่งแวดล้อม ภายในบริษัท ปตท.จำกัด (มหาชน) จังหวัดชลบุรี
พ.ศ.2555	ผ่านการอบรม ISO 14000 จากบริษัท Moody International
ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์และเผยแพร่	Pantlamlert, J., D. Sungthong, N. Rattasuk, C. Jarusiripot and P. Sridang. 2016. Methane Oxidation Rate in Landfill Cover Soils – Microcosm Studies, pp. 43 – 44. <i>In Proceedings of the 5th International Conference on Environmental Engineering, Science and Management.</i> 11 – 13 May 2016, Environmental Engineering Association of Thailand, Bangkok.