

**การประเมินการแพร่กระจายก๊าซมีเทนโดยวิธี Default,
First Order Decay และโปรแกรม LandGEM
จากสถานที่กำจัดขยะมูลฝอยแบบเทกองที่มีการควบคุม :
กรณีศึกษาพื้นที่เทศบาลเมืองนครพนมจังหวัดนครพนม
Determination of Methane Potential by Default Method,
First Order Decay Method and LandGEM from
a Controlled Dump Site: A Case Study of Nakhonphanom
Municipality in Nakhonphanom Province**

อรอนงค์ บัวอาจ (Onanong Bouart)^{1*} ดร.พรพรรณ สกุลคู (Dr.Pornpun Sakunkoo)**

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อคาดการณ์การแพร่กระจายก๊าซมีเทนที่เกิดจากสถานที่กำจัดขยะมูลฝอยแบบศูนย์รวมกำจัดขยะมูลฝอยเทศบาลเมืองนครพนม จังหวัดนครพนมโดยวิธีการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ คือ 1) วิธี default ของ IPCC 2) วิธีปฏิกิริยาลำดับที่ 1 ของ IPCC และ 3) โปรแกรม LandGEM ของ U.S.EPA ผลการศึกษาพบว่าค่าที่คำนวณตามวิธี default ของ IPCC มีค่าสูงสุด รองลงมาคือวิธีปฏิกิริยาลำดับที่ 1 ของ IPCC และโปรแกรม LandGEM ของ U.S.EPA โดยพื้นที่บ่อฝังกลบที่ 1 มีอัตราการแพร่กระจายรวมเท่ากับ 117,138 58,023 และ 40,005 ตันคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปี ตามลำดับและจากการคาดการณ์บ่อฝังกลบที่ 2 พบว่าอัตราการแพร่กระจายรวมเท่ากับ 176,757 77,196 และ 33,978 ตันคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปี มีลักษณะการแพร่กระจายเช่นเดียวกับ บ่อฝังกลบที่ 1 โดยปริมาณก๊าซเพิ่มขึ้นตั้งแต่เริ่มฝังกลบมูลฝอยและจากกราฟปริมาณการแพร่กระจายก๊าซมีเทนจากพื้นที่ศูนย์กำจัดมูลฝอยรวม เทศบาลเมืองนครพนมบ่อที่ 1 และ 2 ด้วยวิธี default ของ IPCC เท่านั้นที่แตกต่างจากแบบจำลองอื่นมาก ค่าการคาดการณ์การแพร่กระจายก๊าซมีเทนโดยวิธี FOD ของ IPCC และ LandGEM มีค่าใช้ได้แตกต่างกันมากข้อจำกัดของการศึกษานี้เนื่องจากการศึกษาครั้งนี้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อให้สามารถทำการประเมินปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจากสถานที่ฝังกลบขยะ ควรมีการใช้เครื่องมืออื่นๆ ในการตรวจวัดเพิ่มเติม เช่น flux chamber เพื่อให้สามารถตรวจวัดค่าก๊าซใกล้เคียงค่าที่แท้จริงและหากมีการดำเนินงานจริงควรวัดปริมาณและองค์ประกอบของก๊าซจากพื้นที่ฝังกลบอีกครั้ง

¹Correspondent author: oon_environment@windowslive.com

* นักศึกษา หลักสูตรสาธารณสุขศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชานามัยสิ่งแวดล้อม คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์อ้อมนัยสิ่งแวดล้อม คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ABSTRACT

The objective of this research was to estimate methane emission from a controlled dump site in Nakhonphanom Municipality, Nakhonphanom Province in northeast Thailand. Currently, the site is a controlled dump site with possible plans to convert to a sanitary landfill. Three mathematical models were used: 1) the Default Method from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2) the First-Order Decay Method from the IPCC (IPCC version 02, October 2007), and 3) the Land Gas Emission Model Program (LandGEM version 3.02, May 2005). The results of methane emission evaluated by mathematical models were found that the mean value calculated based on the Default Method was the highest, followed by the IPCC, First-Order Decay Method, and the U.S.EPA LandGEM totaling 117,138, 58,023, and 40,005 tones carbon dioxide equivalent., in waste disposal site 1. And average methane emission emitted from waste disposal site 2, estimated methane production rates totaling 176,757, 77,196, and 33,978 tones carbon dioxide equivalent. Which of methane emission evaluated likewise waste disposal site 1 by increasing the amount of gas from landfill waste, and graph Methane Emission from waste disposal Nakhon Phanom site 1 and 2. The Default Method of the IPCC is very different from other models. The predictions of methane emission by FOD Method of the IPCC and is available LandGEM very different. Limitations of the study include the use of modeling methods intended for closed landfills, which is not yet the case. Future studies should collect other information, such as a flux chamber for measuring gas closer to the true value. Landfill operators should perform long-term surveillance of the amount and composition of the gas from the landfill.

คำสำคัญ : ก๊าซฝังกลบ ก๊าซเรือนกระจก การฝังกลบแบบเทกองที่มีการควบคุม อัตราการแพร่กระจายก๊าซมีเทน

Keywords : Landfill gas, Greenhouse gas, Controlled dump, Methane emission

บทนำ

การฝังกลบมูลฝอยเป็นวิธีการจัดการขยะมูลฝอยที่ทั่วโลกใช้มากที่สุด ประเทศกำลังพัฒนาในภูมิภาคเอเชียแปซิฟิกส่วนใหญ่ยังคงจัดการขยะมูลฝอยโดยการเทกองและการฝังกลบ [1, 11] ซึ่งจะเกิดกระบวนการหมักขยะอินทรีย์แบบไร้อากาศทำให้เกิดก๊าซในหลุมฝังกลบที่เรียกว่า landfill gas (LFG) [2] ก๊าซจากหลุมฝังกลบประกอบด้วย ก๊าซมีเทน (CH_4) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ก๊าซไนโตรเจน (N_2)

ก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) และก๊าซออกซิเจน (O_2) ไอน้ำ (H_2O) นอกจากนี้มีก๊าซอื่นๆ ที่มีปริมาณไม่มากโดยมาจากองค์ประกอบของมูลฝอยที่แตกต่างกัน เช่น สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compound: VOC) [3] องค์ประกอบหลักของก๊าซชีวภาพประกอบด้วยก๊าซมีเทนร้อยละ 60 และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 40 [4-5] และก๊าซที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายของขยะยังจัดอยู่ในกลุ่มก๊าซเรือนกระจกที่ทำให้เกิดสภาวะโลกร้อนโดยเฉพาะก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซทั้งสองเป็นส่วนประกอบหลักของก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse

Gases) [6] พื้นที่กำจัดมูลฝอยจึงจัดเป็นแหล่งกำเนิดของก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมของมนุษย์ที่สำคัญแหล่งหนึ่งโดยเฉพาะการเกิดก๊าซมีเทนซึ่งมีศักยภาพในการเพิ่มอุณหภูมิของบรรยากาศโลกได้มากกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถึง 20 เท่า [7]

ในขณะที่รัฐบาลส่งเสริมให้ทำการฝังกลบขยะมูลฝอยอย่างถูกหลักสุขาภิบาล [8] และจัดตั้งศูนย์กำจัดขยะมูลฝอยรวมแบบครบวงจร (Cluster) แต่ขยะมูลฝอยส่วนมากยังคงถูกเทกองไม่มีการปิดทับและขาดระบบรวบรวมก๊าซ LFG ทำให้เกิดปัญหาไฟไหม้หลุมฝังกลบขยะเป็นจำนวนมากก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศและส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของประชาชนที่อาศัยอยู่ใกล้เคียงบริเวณสถานที่กำจัดขยะ [9] โดยลักษณะทางกายภาพของขยะมูลฝอยในศูนย์กำจัดขยะมูลฝอยรวม เทศบาลเมืองนครพนม ส่วนใหญ่มีปริมาณขยะอินทรีย์ประเภทเศษผัก เศษอาหาร เหลือร้อยละ 41.51 รองลงมา ประเภทพลาสติก ร้อยละ 20.92 และกระดาษร้อยละ 20.9 และมีปริมาณขยะต่อปี 15,847 ตัน/ปี [10] ผลกระทบที่เกิดจากการกำจัดมูลฝอยด้วยวิธีย่อยสลายทางชีวภาพ ไม่ว่าจะเป็นฝังกลบอย่างถูกหลักสุขาภิบาลหรือการเทกองกลางแจ้ง คือ การแพร่ระบาดของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในมูลฝอยโดยจุลินทรีย์ [12-15] ซึ่งปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในหลุมฝังกลบขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ปริมาณและองค์ประกอบของขยะมูลฝอย ความชื้นและวิธีการจัดการ [4, 16] โดยทั่วไปปริมาณการเกิดก๊าซมีเทนจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณสารอินทรีย์และความชื้นเพิ่มขึ้น

การฝังกลบขยะแบบถูกหลักสุขาภิบาล ทำให้ได้ก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจก อันมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของโลก และก่อให้เกิดปัญหาในประเทศแถบยุโรป ในปัจจุบัน หลุมฝังกลบขยะมูลฝอยอย่างถูกหลักสุขาภิบาลมีศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนมากกว่าหลุมฝังกลบแบบเทกองโดยการฝังกลบแบบถูกหลักสุขาภิบาลต้องมีความลึกของหลุมอย่างน้อย 10 เมตร

แต่การฝังกลบแบบเทกองไม่มีการควบคุม มีการคุ้ยขยะและไม่มีมาตรการใดๆ ในการควบคุมการระบายหรือการปลดปล่อยสารมลพิษและสารปนเปื้อนจากสถานที่กำจัดขยะออกสู่สิ่งแวดล้อม [14, 17] ขยะที่อยู่ด้านบนส่วนใหญ่เกิดการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจน หลุมฝังกลบแบบเทกองที่มีความลึกมากจะเกิดก๊าซมีเทนมากกว่าหลุมฝังกลบแบบเทกองที่มีความลึกน้อยกว่า การวิจัยครั้งนี้มุ่งศึกษาอัตราการแพร่ระบาดของก๊าซมีเทนที่เกิดจากสถานที่กำจัดขยะมูลฝอยแบบเทกองที่มีการควบคุม เทศบาลเมืองนครพนม จังหวัดนครพนม เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการประเมินผลกระทบจากก๊าซที่เกิดขึ้นในพื้นที่ศูนย์กำจัดขยะมูลฝอยรวม (Clustering) ในภาพรวมของจังหวัดนครพนมต่อไป

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อประเมินอัตราการแพร่ระบาดของก๊าซมีเทนที่เกิดจากสถานที่กำจัดขยะมูลฝอยแบบเทกองที่มีการควบคุม เทศบาลเมืองนครพนม จังหวัดนครพนม
2. เพื่อเปรียบเทียบการแพร่ระบาดของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในพื้นที่ศูนย์กำจัดขยะมูลฝอยรวมเทศบาลเมืองนครพนมที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แต่ละวิธี

วิธีการวิจัย

การประเมินศักยภาพและอัตราการแพร่ระบาดของก๊าซมีเทนในการศึกษานี้ เป็นการวิจัยเชิงวิเคราะห์ (Analytical study) โดยใช้วิธีการที่แตกต่างกัน 3 วิธี ดังนี้ 1) การคำนวณโดยใช้วิธี default ของ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2) การคำนวณโดยใช้วิธีปฏิกิริยาลำดับที่ 1 (first order decay model) ของ (IPCC) 3) การคำนวณโดยใช้โปรแกรม Landfill Gas Emission Model (LandGEM) ซึ่งพัฒนาขึ้นโดย U.S. Environmental Protection Agency (U.S.EPA)

1. การประเมินอัตราการเกิดก๊าซมีเทน โดยใช้วิธี default ของ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2006)

ใช้ประเมินปริมาณก๊าซทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากมูลฝอยที่เข้าสู่พื้นที่ฝังกลบในปีนั้น โดยไม่ต้องคำนึงถึงระยะเวลาในการย่อยสลาย แสดงดังสมการที่ 1

$$CH_4 \text{ Emission} = (MSW_T \times MSW_F \times L_0 - R) \times (1 - OX) \quad (1)$$

CH_4 Emission = อัตราในการแพร่กระจายก๊าซมีเทนในปี Y (Gg/y)

MSW_T = ปริมาณมูลฝอยที่เกิดขึ้นทั้งหมดในปี x (Gg/y) คำนวณโดย จำนวนประชากรในพื้นที่ (คน) x อัตราการผลิตมูลฝอย (กก./คน/วัน)

MSW_F = สัดส่วนปริมาณมูลฝอยที่ถูกนำไปกำจัด (%) คำนวณโดย (ปริมาณมูลฝอยที่นำไปฝังกลบ x 100) / ปริมาณมูลฝอยที่เกิดขึ้นทั้งหมด / 100

R = ปริมาณก๊าซมีเทนที่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ (Gg/y) เท่ากับ 0

OX = สัดส่วนของก๊าซมีเทนที่ถูกเปลี่ยนรูปโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน ศึกษาจากวัสดุกลบทับมูลฝอย (สัดส่วน) เท่ากับ 0.1

L_0 = ศักยภาพการเกิดก๊าซมีเทน (จิกะกรัมมีเทนต่อจิกะกรัมมูลฝอย) เท่ากับ 0.082

$$L_0 = MCF \cdot DOC_j \cdot DOC_f \cdot F \cdot 6 \quad (2)$$

$$BE_{CH_4SWDS} = 0. (1 - f) \cdot GWP_{CH_4} \cdot (1 - ox) \cdot \frac{16}{12} \cdot F \cdot DOC_j \cdot MCF \cdot \sum_{x=i}^y \sum_j W_{j,x} \cdot DOC_j \cdot e^{-kj \cdot (y-x)} \cdot (1 - e^{-kj}) \quad (3)$$

$BE_{CH_4SWDS Y}$ = ปริมาณการแพร่กระจายก๊าซมีเทนจากพื้นที่ฝังกลบมูลฝอยในปี y

0 = ค่าการแก้ไข Model จากความไม่แน่นอน กำหนดโดย IPCC เท่ากับ 0.9

f = ปริมาณก๊าซมีเทนที่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์และถูกทำลายโดยการเผาไหม้หรือวิธีอื่น (จิกะกรัมมีเทนต่อปี)

GWP_{CH_4} = ศักยภาพทำให้โลกร้อนของก๊าซมีเทน (ตันคาร์บอนคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน)

กำหนดโดย IPCC เท่ากับ 21 ตันคาร์บอนคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน

OX = สัดส่วนของก๊าซมีเทนที่ถูกเปลี่ยนรูปโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน เท่ากับ 0.1

F = สัดส่วนของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพ กำหนดโดย IPCC เท่ากับ 0.5

DOC_f = สัดส่วนของคาร์บอนอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ ซึ่งถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซชีวภาพ (สัดส่วน)

MCF = ค่าปรับแก้สัดส่วนของมูลฝอยที่ก่อให้เกิดก๊าซมีเทน ขึ้นอยู่กับวิธีการจัดการมูลฝอยในพื้นที่ กำหนดโดย IPCC เท่ากับ 1.0

DOC_j = สัดส่วนของคาร์บอนอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ (จิกะกรัมคาร์บอนต่อจิกะกรัมมูลฝอย) เท่ากับ 0.16

DOC_f = สัดส่วนของคาร์บอนอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ ซึ่งถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซมีเทน (สัดส่วน) เท่ากับ 0.77

F = สัดส่วนของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพ (สัดส่วน) กำหนดโดย IPCC เท่ากับ 0.5

2. การประเมินอัตราการเกิดก๊าซมีเทน โดยใช้แบบจำลองการย่อยสลายลำดับที่ 1 (first order decay model:FOD) (IPCC, 2007)

ใช้คำนวณการแพร่กระจายก๊าซมีเทนจากการจำแนกสารประกอบอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบของมูลฝอยตามการย่อยสลายทางชีวภาพที่ต่างกัน 3 ระดับ คือ รวดเร็วปานกลาง ช้า ใช้ค่าอัตราการย่อยสลาย (k) ของมูลฝอยอินทรีย์ 5 ประเภท ได้แก่ เศษอาหาร กระดาษ เศษไม้ สิ่งทอ และผ้าอ้อม ซึ่งสัดส่วนของมูลฝอยดังกล่าวมีผลต่อปริมาณก๊าซแสดงดังสมการที่ 3

เท่ากับ 0.77

MCF = ค่าปรับแก้สัดส่วนของมูลฝอยที่ก่อให้เกิดก๊าซมีเทน ขึ้นอยู่กับวิธีการกำจัดมูลฝอย เท่ากับ 1

$W_{j,x}$ = ปริมาณมูลฝอยอินทรีย์ประเภท j ในพื้นที่ฝังกลบมูลฝอยในปี X (ตัน)

DOC_j = สัดส่วนของคาร์บอนอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ (สัดส่วน) เท่ากับ 0.16

3. การประเมินอัตราการผลิตก๊าซมีเทนโดยใช้โปรแกรม **Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) version 3.02 (EPA, 2005) U.S. EPA** ข้อมูลปริมาณขยะที่นำไปฝังในแต่ละปี (หรือค่าประมาณแต่ละปี) ดังสมการที่ 4

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 k L_o \left(\frac{M_i}{10} \right) \left(e^{-kt_{ij}} \right) \quad (4)$$

ตัวแปรต่างๆ มีรายละเอียด ดังนี้

Q_{CH_4} = ปริมาณการแพร่ระบายก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในปี (ลูกบาศก์เมตร/ปี)

i = เวลาที่เพิ่มขึ้น 1 ปี

n = (ปีสุดท้ายสำหรับการคำนวณ) - (ปีที่เริ่มคำนวณ)

j = ช่วงระยะเวลาใน 1 ปีที่ใช้คำนวณ โดยแต่ละช่วงเท่ากับ 10% ของระยะเวลา หนึ่งปี

k = ค่าคงที่สำหรับอัตราการเกิดก๊าซมีเทน (1/ปี)

L_o = อัตราการเกิดก๊าซมีเทนอย่างสมบูรณ์ (ลูกบาศก์เมตร/เมกกะกรัม)

M_i = น้ำหนักของขยะที่นำมาฝังในปีที่ i

t_{ij} = อายุของขยะถูกนำมาฝังนับจากช่วงที่ j จนครบปีที่ i (หน่วยเป็นจุดทศนิยม)

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ข้อมูลปริมาณมูลฝอยที่นำไปกำจัดและพื้นที่ที่นำมูลฝอยไปกำจัด ณ ศูนย์รวมขยะมูลฝอยเทศบาลเมืองนครพนม

จากการรวบรวมข้อมูลปริมาณมูลฝอยที่เกิดขึ้นและปริมาณมูลฝอยที่นำไปกำจัดทั้งหมดตั้งแต่ ปี พ.ศ. 2541 – ปี พ.ศ. 2558 เท่ากับ 333,720 และ 149,770 ตัน ตามลำดับ โดยปริมาณมูลฝอยที่นำไปกำจัดคิดเป็นร้อยละ 45 ของปริมาณมูลฝอยที่เกิดขึ้นทั้งหมดและจำนวนประชากรเฉลี่ยตั้งแต่ปี พ.ศ. 2541 ถึงปี พ.ศ. 2558 เท่ากับ 102,648 คน ผลการศึกษาปริมาณมูลฝอยที่เกิดขึ้นและจำนวนประชากรรวมตั้งแต่ปี พ.ศ. 2541 – ปี พ.ศ. 2548 มีปริมาณขยะมูลฝอยจากเทศบาลเมืองนครพนมแห่งเดียวที่นำขยะไปกำจัดในพื้นที่ดังกล่าวโดยมีประชากรเริ่มต้น เท่ากับ

18,114 คน ปริมาณขยะที่นำไปกำจัด 1,481 ตัน/ปี และปี พ.ศ. 2549 – ปี พ.ศ. 2553 มีจำนวนองค์การบริหารส่วนตำบลที่นำขยะมากำจัดในพื้นที่ จำนวน 10 แห่งปี พ.ศ. 2554 มีจำนวน 11 แห่ง ปี พ.ศ. 2555 มีจำนวน 12 แห่ง และปี พ.ศ. 2556 – ปี พ.ศ. 2557 มีจำนวน 13 แห่ง จากการคาดการณ์ปัจจุบันมีปริมาณขยะที่นำไปกำจัดทั้งหมด 15,848 ตันต่อปี พื้นที่บ่อขยะบ่อที่ 1 ใช้ไปแล้วจำนวน 50 ไร่ สามารถรองรับปริมาณมูลฝอยได้อีกไม่เกิน ปี พ.ศ. 2558 พื้นที่ที่เหลือเพียง 26 ไร่ โดยศึกษาออกแบบศูนย์การจัดการมูลฝอยรวมเพื่อรองรับปริมาณขยะที่จะนำมากำจัดจากองค์การปกครองส่วนท้องถิ่นที่เข้าร่วมโครงการจำนวน 28 แห่ง เทศบาลเมือง 1 แห่ง เทศบาลตำบล 3 แห่ง และองค์การบริหารส่วนตำบล 24 แห่ง โดยคาดว่าจะรองรับปริมาณขยะได้ไม่เกิน 10 ปี รองรับปริมาณขยะ

ตั้งแต่ ปี พ.ศ.2559 – ปี พ.ศ. 2569 เทศบาลเมืองนครพนมต้องจัดหาพื้นที่ฝังกลบมูลฝอยเพิ่มเติมอีกไม่น้อยกว่า 20 ไร่ สำหรับการจัดการขยะมูลฝอยได้อย่างน้อย 20 ปี จะเห็นได้ว่าปริมาณมูลฝอยเพิ่มขึ้นตามจำนวนประชากร โดยอัตราการผลิตมูลฝอย เทศบาลเมือง 1.10 กิโลกรัมต่อคนต่อวัน อัตราการผลิตมูลฝอยเทศบาลตำบล 0.50 กิโลกรัมต่อคนต่อวันและอัตราการผลิตมูลฝอยองค์การบริหารส่วนตำบล 0.27 กิโลกรัมต่อคนต่อวัน [10] (ดังแสดงในภาพที่ 1)

การคำนวณโดยใช้วิธี default ของ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

การประเมินการแพร่กระจายก๊าซมีเทนจากพื้นที่ศูนย์รวมขยะมูลฝอย เทศบาลเมืองนครพนมคำนวณโดยวิธี default ของ IPCC กำหนดสัดส่วนของคาร์บอนอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ (DOC_j) เท่ากับ 0.16 และสัดส่วนของคาร์บอนอินทรีย์ที่ถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซชีวภาพ (DOC_f) เท่ากับ 0.77 ค่าสัดส่วนของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพ (F) เท่ากับ 0.5 สัดส่วนของก๊าซมีเทนที่ถูกเปลี่ยนรูปโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (OX) เท่ากับ 0.1 โดยไม่คิดปริมาณก๊าซมีเทนที่นำกลับมาใช้ประโยชน์ ผลการประเมินก๊าซมีเทนบ่อฝังกลบที่ 1 พบว่าปริมาณก๊าซเพิ่มขึ้นตั้งแต่เริ่มฝังกลบมูลฝอยปี พ.ศ. 2541 ถึงปี พ.ศ. 2558 ปริมาณก๊าซรวมทั้งหมดตั้งแต่ปี พ.ศ. 2541 ถึงปี พ.ศ.2573 เท่ากับ 5,578 เมกกะกรัมมีเทนหรือ 117,138 ตันคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปี ปริมาณการแพร่กระจายของก๊าซสูงสุดในปี พ.ศ. 2558 เท่ากับ 594 เมกกะกรัมมีเทนหรือ 12,474 ตันคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปี และหลังจากหยุดดำเนินงานปริมาณก๊าซมีเทนลดลงทันทีในปี พ.ศ. 2559 โดยไม่พบอัตราการแพร่กระจายก๊าซในพื้นที่ (ดังแสดงในภาพที่ 2) ส่วนการคาดการณ์การแพร่กระจายของก๊าซมีเทนจากบ่อฝังกลบที่ 2 พบว่ามีลักษณะการแพร่กระจายเช่นเดียวกับ บ่อฝังกลบที่ 1 ปริมาณก๊าซเพิ่มขึ้นตั้งแต่เริ่มฝังกลบมูลฝอยปี พ.ศ. 2559 ถึงปี พ.ศ. 2569 ปริมาณก๊าซรวมทั้งหมดตั้งแต่ปี พ.ศ.2559 ถึงปี พ.ศ.2584 เท่ากับ 16,839

เมกกะกรัมมีเทนหรือ 353,619 ตันคาร์บอนไดออกไซด์ ปริมาณการแพร่กระจายของก๊าซสูงสุดในปี พ.ศ. 2569 เท่ากับ 2,025 เมกกะกรัมมีเทนหรือ 42,525 ตันคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งวิธี default ของ IPCC ใช้เพื่อประเมินปริมาณก๊าซทั้งหมดที่เกิดจากมูลฝอยที่เข้าสู่พื้นที่ฝังกลบในปี นั้น ๆ โดยไม่คำนึงถึงระยะเวลาในการย่อยสลาย และไม่สามารถประเมินการใช้ประโยชน์จากก๊าซที่เกิดขึ้นได้ (ดังแสดงในภาพที่ 3)

การคำนวณโดยใช้วิธีปฏิกิริยาลำดับที่ 1 (first order decay model) ของ (IPCC)

การคำนวณการแพร่กระจายก๊าซมีเทนโดยใช้วิธีปฏิกิริยาลำดับที่ 1 (FOD) ของ IPCC เป็นการประเมินอัตราการแพร่กระจายก๊าซทั้งหมดที่ได้จากการย่อยสลายมูลฝอยที่นำมากำจัดในปีที่คำนวณ โดยคำนึงถึงระยะเวลาในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในมูลฝอยและใช้ค่าอัตราการย่อยสลาย (k) ของมูลฝอยอินทรีย์ 5 ประเภท ซึ่งมีผลต่อปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้น ทำให้ต้องวัดองค์ประกอบมูลฝอยจริงและใช้ข้อมูลจริงจากภาคสนามประเมินก๊าซมากที่สุดผลการประเมินปริมาณก๊าซมีเทนศูนย์รวมขยะมูลฝอย เทศบาลเมืองนครพนมพบว่าบ่อฝังกลบที่ 1 ปริมาณก๊าซเพิ่มขึ้นตั้งแต่เริ่มฝังกลบมูลฝอยปี พ.ศ. 2541 ถึงปี พ.ศ. 2558 ปริมาณก๊าซรวมทั้งหมดตั้งแต่ปี พ.ศ. 2541 ถึงปี พ.ศ.2573 เท่ากับ 2,763 เมกกะกรัมมีเทนหรือ 58,023 ตันคาร์บอนไดออกไซด์ ปริมาณก๊าซมีเทนแพร่กระจายสูงสุดในปี พ.ศ. 2573 เท่ากับ 162 เมกกะกรัมมีเทนหรือ 3,402 ตันคาร์บอนไดออกไซด์ (ดังแสดงในภาพที่ 2) ส่วนการคาดการณ์การแพร่กระจายของก๊าซมีเทนจากบ่อฝังกลบที่ 2 พบว่ามีลักษณะการแพร่กระจายเช่นเดียวกับ บ่อฝังกลบที่ 1 ปริมาณก๊าซเพิ่มขึ้นตั้งแต่เริ่มฝังกลบมูลฝอยปี พ.ศ. 2559 ถึงปี พ.ศ. 2569 ปริมาณก๊าซรวมทั้งหมดตั้งแต่ปี พ.ศ.2559 ถึงปี พ.ศ.2584 เท่ากับ 3,676 เมกกะกรัมมีเทนหรือ 77,196 ตันคาร์บอนไดออกไซด์ ปริมาณการแพร่กระจายของก๊าซสูงสุดในปี พ.ศ.2569 เท่ากับ 156 เมกกะกรัมมีเทนหรือ 3,276 ตันคาร์บอนไดออกไซด์ (ดังแสดงในภาพที่ 3) โดยวิธีปฏิกิริยาลำดับที่ 1 ใช้

ข้อมูลจริงจากภาคสนามในการประเมินก๊าซมากที่สุด การคำนวณโดยใช้โปรแกรม **Landfill Gas Emission Model (LandGEM)**

โปรแกรม LandGEM ของ U.S.EPA ในการคำนวณกำหนดให้การย่อยสลายมูลฝอยและการเกิดก๊าซเป็นปฏิกิริยาลำดับที่ 1 เป็นการคำนวณที่ประกอบด้วยปริมาณมูลฝอยที่เกิดขึ้น อัตราการเกิดก๊าซมีเทนใช้ค่า k เท่ากับ 0.02 ต่อปี กำหนดให้ ศักยภาพของการเกิดก๊าซมีเทน L_0 มีค่าเท่ากับ 170 ลูกบาศก์เมตรต่อตันมูลฝอย ค่าคงที่การเกิดก๊าซมีเทน (k) เท่ากับ 0.02 ต่อปี [8, 17, 18] ผลการประเมินปริมาณก๊าซที่เกิดจากศูนย์กำจัดมูลฝอยรวม เทศบาลเมืองนครพนม บ่อที่ 1 พบว่าปริมาณก๊าซเพิ่มขึ้นตั้งแต่เริ่มฝังกลบมูลฝอยปี พ.ศ. 2541 ถึงปี พ.ศ. 2558 ปริมาณก๊าซรวมทั้งหมดตั้งแต่ปี พ.ศ.2541 พ.ศ.2573 เท่ากับ 1,905 เมกกะกรัมมีเทนหรือ 40,005 ตัน คาร์บอนไดออกไซด์ ปริมาณก๊าซมีเทนที่แพร่กระจายสูงสุดในปี พ.ศ. 2544 เท่ากับ 189 เมกกะกรัมมีเทนหรือ 3,969 ตัน คาร์บอนไดออกไซด์ (ดังแสดงในภาพที่ 2)

การคาดการณ์การแพร่กระจายของก๊าซมีเทน บ่อฝังกลบที่ 2 พบว่ามีลักษณะการแพร่กระจายเช่นเดียวกับบ่อฝังกลบที่ 1 ปริมาณก๊าซเพิ่มขึ้นตั้งแต่เริ่มฝังกลบมูลฝอยปี พ.ศ. 2559 ถึงปี พ.ศ.2569 ปริมาณก๊าซรวมทั้งหมดตั้งแต่ปี พ.ศ.2559 ถึงปี พ.ศ.2584 เท่ากับ 1,618 เมกกะกรัมมีเทนหรือ 33,978 ตัน คาร์บอนไดออกไซด์ ปริมาณการแพร่กระจายก๊าซสูงสุดในปี พ.ศ. 2569 เท่ากับ 192 เมกกะกรัมมีเทนหรือ 4,032 ตัน คาร์บอนไดออกไซด์ (ดังแสดงในภาพที่ 3)

จากการประเมินการแพร่กระจายก๊าซมีเทน โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธี Default, FOD และ LandGEM จากสถานที่กำจัดขยะมูลฝอยเทศบาลเมืองนครพนม จังหวัดนครพนม เพื่อคาดการณ์การแพร่กระจายก๊าซมีเทนพบว่าบ่อฝังกลบที่ 1 ค่าที่คำนวณตามวิธี default ของ IPCC มีค่าสูงสุด รองลงมา คือ วิธีปฏิกิริยาลำดับที่ 1 ของ IPCC และโปรแกรม LandGEM ของ U.S.EPA ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของชาติ

และคณะ [4] ในปี พ.ศ. 2545 ประเมินศักยภาพและอัตราการแพร่กระจายของก๊าซมีเทนจากพื้นที่กำจัดมูลฝอยและกองกลางแจ้งในประเทศไทย 142 แห่ง โดยวิธีการคำนวณ Default ของ IPCC เท่ากับ 138.9 กิกะกรัมต่อปีสูงกว่าการประเมินโดยโปรแกรม LandGEM ของ U.S.EPA เท่ากับ 94.6 กิกะกรัมต่อปี และ Sembiring et al., [19] ประเมินการแพร่กระจายของก๊าซมีเทนจากพื้นที่กำจัดมูลฝอยในประเทศอินโดนีเซียพบว่า วิธี default ของ IPCC สูงกว่าวิธีปฏิกิริยาลำดับที่ 1 เท่ากับ 142 และ 60 เมกกะกรัมต่อปีตามลำดับและบ่อฝังกลบที่ 2 พบว่าค่าที่คำนวณตามวิธี default ของ IPCC มีค่าสูงสุด รองลงมา คือวิธีปฏิกิริยาลำดับที่ 1 ของ IPCC และโปรแกรม LandGEM ของ U.S.EPA ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของอวาตีฟ มะแอ [20] ประเมินและใช้ประโยชน์ก๊าซจากหลุมฝังกลบมูลฝอยแบบสุขาภิบาล เทศบาลนครหาดใหญ่และเทศบาลเมืองบ้านพรุ ค่าที่คำนวณตามวิธี default ของ IPCC มีค่าสูงสุด รองลงมาคือ วิธีปฏิกิริยาลำดับที่ 1 ของ IPCC และโปรแกรม LandGem ตามลำดับ ปริมาณการแพร่กระจายก๊าซมีเทนจากพื้นที่ฝังกลบมูลฝอยเทศบาลนครหาดใหญ่ ตั้งแต่ปี พ.ศ.2556 – พ.ศ.2563 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 25,343 16,002 และ 11,031 ตันคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนพื้นที่ฝังกลบมูลฝอยเทศบาลเมืองบ้านพรุ บ่อฝังกลบที่ 1 ปริมาณการแพร่กระจายก๊าซมีเทนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2,284 14,83 และ 788 ตันคาร์บอนไดออกไซด์ และบ่อฝังกลบที่ 2 ตั้งแต่ปี พ.ศ.2549 – พ.ศ. 2569 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2,344 1,442 และ 757 ตันคาร์บอนไดออกไซด์

จากผลการศึกษาข้างต้นสรุปได้ว่าการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณปริมาณก๊าซที่เกิดจากพื้นที่ศูนย์กำจัดขยะมูลฝอยรวม เทศบาลเมืองนครพนม แต่ละวิธีมีค่าต่างกันเนื่องจากค่าสัดส่วนของคาร์บอนอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้โดยแต่ละวิธีใช้ค่าต่างกันหากมีค่าสูงจะส่งผลต่อการแพร่กระจายก๊าซในพื้นที่สูงตามไปด้วย โดยวิธี default ของ IPCC ไม่คำนึงถึงระยะเวลาในการย่อยสลาย ปริมาณ

ก๊าซทั้งหมดที่เกิดขึ้นคิดจากมูลฝอยที่เข้าสู่พื้นที่ฝังกลบและถูกสะสมภายในเวลา 15 ปี ส่วนโปรแกรม LandGEM ของ U.S.EPA ใช้วิธีการคำนวณจากมูลฝอยทุกประเภทรวมกันโดยมีค่าตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ ได้แก่ ค่าศักยภาพการเกิดก๊าซมีเทน (L_0) แต่ใช้อัตราการย่อยสลาย (k) ของมูลฝอยทุกประเภทรวมกันทำให้ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นไม่ได้แปรผันตามองค์ประกอบและชนิดของมูลฝอยที่เข้าสู่พื้นที่ฝังกลบ [21, 23] โดยปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงสุดเมื่อมีการฝังกลบขยะไปแล้ว 1 ปี ทำให้อัตราการแพร่กระจายก๊าซมีเทนรวมมีปริมาณต่ำกว่า วิธี default ของ IPCC ในขณะที่วิธีปฏิริยาลำดับที่ 1 ของ IPCC คำนวณจากปริมาณสัดส่วนมูลฝอยอินทรีย์ประเภท j5 ประเภท ได้แก่ เศษผัก เศษอาหาร กระดาษ สิ่งทอ เศษใบไม้ และผ้าอ้อม ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นทั้งหมดเกิดจากปริมาณมูลฝอยที่ทับถมกัน [22] โดยคำนึงถึงระยะเวลาในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในมูลฝอยและใช้ข้อมูลจริงจากภาคสนามในการประเมินก๊าซมากที่สุด ทำให้อัตราการแพร่กระจายก๊าซมีเทนรวมมีปริมาณต่ำกว่า วิธี default ของ IPCC และโปรแกรม LandGEM

ผลการศึกษาครั้งนี้จึงสอดคล้องกับทฤษฎีการแพร่กระจายก๊าซจากพื้นที่ฝังกลบมูลฝอยของ Tchobanoglous และคณะ [15] เนื่องจากลักษณะของการเกิดก๊าซและการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยการย่อยสลายก๊าซมีเทนเป็นไปตามเวลาในช่วงแรกที่มีมูลฝอยเข้าสู่ระบบ การย่อยสลายจะถูกย่อยสลายภายในเวลา 1-5 ปีสำหรับมูลฝอยที่ย่อยสลายเร็ว มูลฝอยที่ย่อยสลายช้าจะใช้เวลาในการย่อยสลาย 15-20 ปี มูลฝอยอินทรีย์ทั้งหมดใช้เวลาในการย่อยสลายภายใน 15 ปี ประกอบกับหากดูจากกราฟ ปริมาณการแพร่กระจายก๊าซมีเทน ด้วยวิธี default ของ IPCC เท่านั้นที่แตกต่างจากแบบจำลองอื่นมาก ค่าการคาดการณ์การแพร่กระจายก๊าซมีเทนโดยวิธี FOD ของ IPCC และ LandGEM มีค่าใช้ได้แตกต่างกันมาก

สรุปผลการวิจัย

ผลการประเมินการแพร่กระจายก๊าซมีเทนจากสถานที่กำจัดขยะมูลฝอยรวมของเทศบาลเมืองนครพนมในปัจจุบันบ่อฝังกลบที่ 1 พบว่าค่าที่คำนวณตามวิธี default ของ IPCC มีค่าสูงสุด รองลงมา คือ โปรแกรม LandGEM ของ U.S.EPA และวิธีปฏิริยาลำดับที่ 1 ของ IPCC ตามลำดับ ปริมาณการแพร่กระจายก๊าซมีเทนตั้งแต่ปี พ.ศ.2541 - พ.ศ. 2573 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 117,138 58,023 และ 40,005 ตันคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปีและจากการคาดการณ์การแพร่กระจายของก๊าซมีเทนจากศูนย์รวมขยะมูลฝอยเทศบาลเมืองนครพนมในอนาคตบ่อฝังกลบที่ 2 พบว่าค่าที่คำนวณตามวิธี default ของ IPCC มีค่าสูงสุด รองลงมา คือวิธีปฏิริยาลำดับที่ 1 ของ IPCC และโปรแกรม LandGEM ของ U.S.EPA ตามลำดับ โดยปริมาณการแพร่กระจายก๊าซมีเทนตั้งแต่ปี พ.ศ.2559 - พ.ศ. 2584 พบว่าค่าที่คำนวณตามวิธี default ของ IPCC มีค่าสูงสุด รองลงมา คือวิธีปฏิริยาลำดับที่ 1 ของ IPCC และโปรแกรม LandGEM ของ U.S.EPA ตามลำดับ โดยมีอัตราการแพร่กระจายรวมเท่ากับ 176,757 77,196 และ 33,978 ตันคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปี

ดังนั้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีข้อมูลที่จำกัดในการพัฒนาแบบจำลองหากมีการสร้างหลุมฝังกลบขยะขึ้นมาใหม่และมีการเก็บข้อมูลที่มากขึ้นจะช่วยปรับปรุงแบบจำลองให้ดีขึ้น และถ้ามีการพัฒนาหลุมฝังกลบขยะให้มีระบบรวบรวมก๊าซและมีการเก็บข้อมูลต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องเพื่อนำมาเปรียบเทียบและพัฒนาแบบจำลองหรือเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ที่มีอยู่ก็จะช่วยให้แบบจำลองมีความแม่นยำมากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

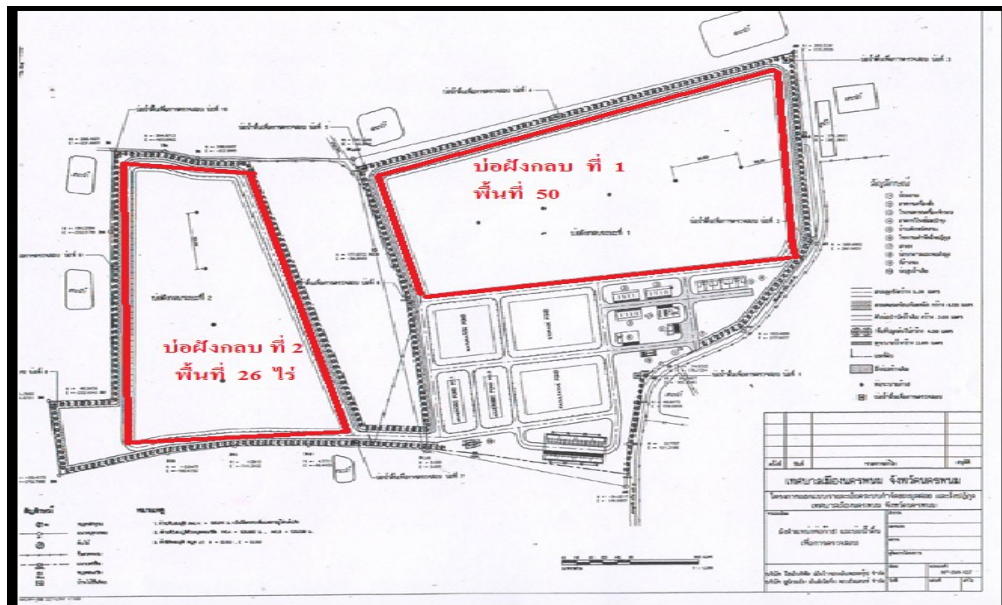
งานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์ข้อมูลพื้นที่กำจัดมูลฝอยรวมในการศึกษาครั้งนี้จาก เทศบาลเมืองนครพนมและที่ปรึกษาโครงการศึกษาออกแบบรายละเอียดศูนย์กำจัดมูลฝอยรวม ศูนย์บริการ

เทคโนโลยีสาธารณสุขและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัย
ขอนแก่นขอขอบคุณนายกเทศมนตรีเมืองนครพนม
ที่อนุญาตให้ผู้วิจัยเข้าเก็บข้อมูลงานวิจัยนี้สำเร็จ
ลุล่วงไปด้วยดี

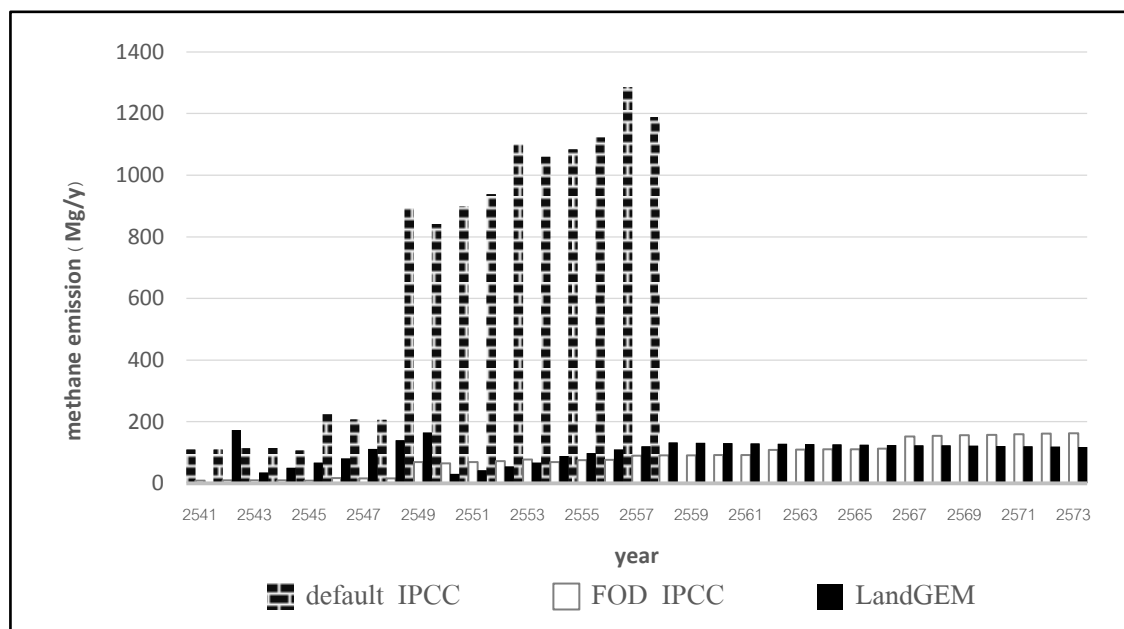
เอกสารอ้างอิง

1. Research and air quality management. reported a literature review. Incineration in the Community Open and Management, University of Chiang Mai. 2001.Thai
2. Noparit S,Chart C,Wilai C,Komsil V, Kasuto En,Masato Ya, Semi - Aerobic landfill for Reducing Greenhouse Gas emissions from solid wastes. Research Center for Material Cycles and Waste Management, Institute for Environmental 2010; 258-267. Thai
3. Thares Srisatid. Municipal solid waste management engineering. Press, 1 thed. St ; 2010.Thai
4. Chart C, Pimolrut B. The influence of season on the composition. And chamber of gas from solid waste landfills. Documentation ConferenceThe 14th Annual Environmental Engineering Association of Thailand;2002.Thai.
5. Chart C, Wilai, Salvaros O, Luknanulak N, Towprayoon S, Visvanathan C. Comparison of different methods for determining methane emission from waste disposal sites in Thailand. Asian J. Energy Environ,2005;6(1), 1-16. Thai.
6. Johannessen L, Guidance M. Note on Recuperation of Landfill Gas from Municipal Solid Waste Landfills. Urban and Local Government Working Paper Series No. 4, The World Bank, Washington, D.C.1996 [Internet] Aavailable from <http://info.worldbank.org/etools/docs/library/128809/Johannessen%201999.pdf>
7. Nirmala Menikpuraand Janya Sang-Arun. User Manual Estimation Tool for Greenhouse Gas (GHG) Emissions from Municipal Solid Waste (MSW) Management in a Life Cycle Perspective This tool is developed under the project of Measurement, Reporting and Verification (MRV) for low carbon development in Asia, 2013
8. Thipsuree K, Chart C, Wilai C, Sirinthornthep T, Chettiyappan V. Determination of Methane Gas Emissions from Waste Disposal Sites in Thailand with Geographical Information System Application. Thai Environmental Engineering Journal. 2005; 19(3),11-23 Thai.
9. PCD Ministry of Natural Resources manuals 20 common problems. In landfill waste and hygiene.
10. Health and Environment Technology Center Faculty of Health Sciences KhonKaen. 2557 report, feasibility study and project design.Details include a solid waste management. Municipality NakhonPhanom

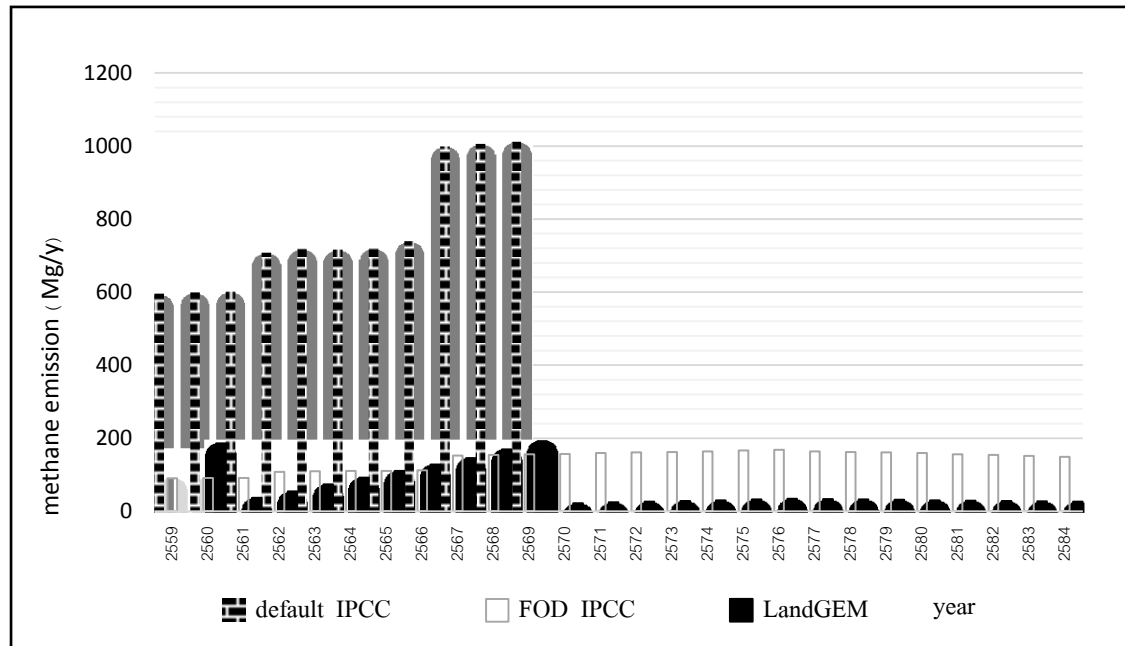
11. Amin A.T.M. Nurul. [Internet]. [accessed 20th February 2007]. Changes in Waste Recycling and Composting Practices Associated with the Stages of Economic Development. http://www.seauema.ait.ac.th/Download/ARL/ISWM_Conference/Overview%20on%20Regional%20Perspectives.pdf. 2007.
12. Di Bella G, Di Trapani D, Viviani G. Evaluation of methane emissions from Palermo municipal landfill: Comparison between field measurements and models. *Waste management*, 2011; 31(8): 1820-1826.
13. Chen IC, Hegde U, Chang CH, Yang SS. Methane and carbon dioxide emissions from closed landfill in Taiwan. *Chemosphere*, 2008; 70(8), 1484-1491.
14. Koliopoulos TC, Koliopoulou G. Risk Analysis of landfill gas Emissions: Mid uchencarroch Project, Asian J. Exp. Sci., 2007; 121(2), 215-226.
15. Tchobanoglous G, Theisen H, Vigil SA. Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues, McGraw-Hill International Editions, Singapore. 1993.
16. Pumrin R. Factors affecting the quantity and quality of methane gas from landfill waste Kampang Saen. Nakhon Pathom Environmental Management Technology Mahidol University, 2001
17. Durmusoglu, Ertan, Fatih Taspinar, and Aykan Karademir. Health risk assessment of BTEX emissions in the landfill environment. *Journal of Hazardous Materials*. 2010; 176(1):870-877.
18. IPCC, Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston HS Buendia L Miwa K Ngara T Tanabe, K (Eds.). Published: IGES, Japan. 2006.
19. Sembiring E, Yogyantiningtya S, Driejana. Economic analysis of methane for jelekong landfill site, Bandung, Indonesia. International Conference on Engineering and Environment. 2007.
20. Awatif Ma-ae. Evaluation and Utilization of methane gas from Sanitary Landfill: A Case Study of Hat Yai and Ban Pru Sites [Msc thesis]. Songkla University; 2009. Thai.
21. Amin Kalantarifard, Go Su Yang. Estimation of Methane Production by LANDGEM Simulation Model from Tanjung Langsat Municipal Solid Waste Landfill, Malaysia. 2012; 1(9): 481-487.
22. Karagiannidis A, Tsatsarelis Tand, Moussiopoulos N. Estimation of methane potential from Landfill gas of the new Hellenic sanitary landfill. Proceedings Sardinia 2007, Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium. Environmental Sanitary Engineering Centre, Italy Italy; 1 - 5 October 2007.
23. US EPA, May. Landfill Gas Emissions Model (LandGem) Version 3.02 User's Guide. United States Environmental Protection Agency, EPA-600/R-05/047. <http://www.epa.gov/ttn/catc1/dir1/landgem-v302-guide.pdf>. 2005.



ภาพที่ 1 แผนที่บ่อฝังกกลบมูลฝอยรวม เทศบาลเมืองนครพนม จังหวัดนครพนม



ภาพที่ 2 การแพร่ระบายก๊าซมีเทนจากพื้นที่ศูนย์กำจัดมูลฝอยรวม เทศบาลเมืองนครพนมบ่อที่ 1 ตั้งแต่ปี พ.ศ.2541- พ.ศ.2573



ภาพที่ 3 การแพร่กระจายก๊าซมีเทนจากพื้นที่ศูนย์กำจัดมูลฝอยรวม เทศบาลเมืองนครพนมบ่อที่ 2 ตั้งแต่ปี พ.ศ.2559 - พ.ศ.2584