การศึกษาการปลดปล่อยมลพิษจากการเผาขยะชุมชนในเตาเผาขนาดเล็ก

Investigation of Pollutants Derived from Municipal Solid Waste Combustion in a Small Incinerator

ธเนศ อุ่นชัยศรี* ทนงค์ ฉายาวัฒนะ จารุวรรณ ภูศรี อภิญญา เดชเสถียร และปวีณ ชัยวัฒมเสฏฐ์

Thanet Unchaisri* Tanong Chayawattana Jaruwan Poosri Apinya Dechsatian and Pawin Chaivatamaset

Received: *July 11, 2024;* ***Revised:*** *October 13, 2024;* ***Accepted:*** *October 17, 2024*

บทคัดย่อ

การศึกษาการปลดปล่อยมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ขยะมูลฝอยในเตาเผาขนาดเล็ก โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาปริมาณขยะที่เหมาะสมกับการกำจัดขยะโดยใช้เตาเผาไหม้ และเพื่อศึกษาการปลดปล่อยมลพิษจากการกำจัดขยะโดยวิธีการเผาไหม้ การทดลองดำเนินการโดยใช้ขยะมูลฝอยที่มีปริมาณการป้อนต่อครั้ง 3 ระดับ คือ 4 3 และ 2.9 กิโลกรัม ขยะที่ใช้เป็นขยะแห้ง ขยะแห้งผสมกิ่งไม้ร้อยละ 26.7 และขยะแห้งผสมขยะสดร้อยละ 10.3 ตัวแปรตามที่ศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ อุณหภูมิไอเสีย และค่ามลพิษที่ปลดปล่อยประกอบด้วย แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) และแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) เตาเผาขยะทำจากเหล็กหนา 3 มิลลิเมตร ห้องเตาเผามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 เซนติเมตร สูง 90 เซนติเมตร และช่องที่สำหรับป้อนขยะมีขนาดกว้าง x ยาว x ลึก 55 x 55 x 55 เซนติเมตร จากผลการศึกษาพบว่าที่อัตราการป้อนที่เหมาะสมอยู่ที่ 2.9 กิโลกรัม/ครั้งการป้อน ซึ่งมีอัตราส่วนผสมของขยะสด (ร้อยละ 10.3) โดยที่อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้อยู่ที่ 400 - 500 องศาเซลเซียส และปริมาณคาร์บอนที่ไม่สามารถเผาได้อยู่ที่ร้อยละ 12.3 สำหรับมลพิษที่เกิดจากการเผาขยะมูลฝอย ได้แก่ CO 6,843 ppm, NO_x 302 ppm และ SO_2 574 ppm ซึ่งยังมีค่าเกินมาตรฐานกำหนด โดยเฉพาะมลพิษ SO_2 ซึ่งเกิดจากองค์ประกอบหลักของขยะมูลฝอยที่เป็นพลาสติกในขยะชุนชนในอัตราส่วนร้อยละ 52.1

คำสำคัญ : การเผาไหม้; เตาเผาขยะ; ขยะชุมชน; มลพิษ

สถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี วิทยาเขตบางขุนเทียน

Pilot Plant Development and Training Institute, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bang Khun Thian Campus

* *Corresponding Author, Tel. 08 3516 4003, E - mail: thanet.unc@mail.kmutt.ac.th*

Abstract

The experimental study of pollutants derived from municipal solid waste combustion in a small incinerator of waste aims to determine the appropriate waste quantity for combustion in the incinerator, and to investigate the release of pollutants during waste combustion. Municipal solid waste was used in the experiments, and there were three feeding levels: 4, 3, and 2.9 kg/batch. The wood and the fresh waste were applied for co-firing with the dry municipal solid waste. The mass fractions of wood and fresh waste were at 26.7 wt% and 10.3 wt%, respectively. The combustion chamber's internal temperature, the temperature of exhaust gases, and the pollutants, such as carbon monoxide (CO), nitrogen oxides (NO_x), and sulfur dioxide (SO_2), were all factors that were examined. The incinerator was made of steel that was a thickness of 3 mm, a waste feed opening size of 55 x 55 x 55 cm (width x length x depth), and an internal diameter of 25 cm with a height of 90 cm. The study results revealed that the suitable feeding rate was at 2.9 kg/batch, which contained a mixture of fresh waste (10.3 wt%), with the combustion chamber temperature varied in range of 400 - 500 °C and the unburned carbon content of 12.3 wt%. The pollutants emitted from waste incineration were at 6,843 ppm of CO, 302 ppm of NO_x, and 574 ppm of SO_2, which exceeded the pollutant standard limits, especially SO_2, which resulted from the main component of municipal solid waste being plastic in the waste mixture at a ratio of 52.1 wt%.

Keywords: Combustion; Incinerator; Municipal Solid Waste; Pollutants

บทนำ

ขยะมูลฝอยที่มีปริมาณมากในประเทศไทยพบว่าในปี พ.ศ. 2565 มีถึง 25.7 ล้านตัน หรือคิดเป็น 70,411 ตัน/วัน (Waste and Hazardous Substance Management Division, 2022) และปริมาณขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มที่สูงขึ้นเนื่องจากพฤติกรรมการบริโภคอาหารโดยการสั่งแบบออนไลน์ในปัจจุบัน ขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้นจะถูกจัดการกันเองตามครัวเรือน องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น และบางส่วนนำกลับไปใช้ประโยชน์โดยการคัดแยกและขายคืนให้กับร้านรับซื้อของเก่า อย่างไรก็ตามยังมีขยะมูลฝอยบางส่วนที่เหลือประมาณ 5.40 ล้านตัน (คิดเป็นร้อยละ 21) (Waste and Hazardous Substance Management Division, 2022) ถูกนำไปกำจัดอย่างไม่ถูกวิธี เช่น การเทกอง เผากลางแจ้ง เตาเผาที่ไม่มีระบบกำจัดมลพิษทางอากาศ เป็นต้น ซึ่งอันเป็นต้นเหตุของการเกิดมลพิษ เหตุเดือดร้อนรำคาญได้

จากการสำรวจในปี พ.ศ. 2565 ในประเทศไทยพบว่ามีสถานที่กำจัดขยะมูลฝอยดำเนินการได้อย่างถูกต้องจำนวน 111 แห่ง และมีสถานที่กำจัดขยะมูลฝอยดำเนินการอย่างไม่ถูกต้องถึง 1,963 แห่ง (Waste and Hazardous Substance Management Division, 2022) โดยภายในจังหวัดราชบุรี พบว่ามีสถานที่กำจัดขยะมูลฝอยดำเนินการได้อย่างถูกต้องเพียง 3 แห่ง และมีสถานที่กำจัดขยะมูลฝอยดำเนินการอย่างไม่ถูกต้อง 7 แห่ง (Waste and Hazardous Substance Management Division, 2022) และขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้นภายในจังหวัดราชบุรีที่เกิดขึ้นในแต่ละวันมีปริมาณ 798 ตัน ขยะมูลฝอยจะถูกนำกลับไปใช้ประโยชน์และกำจัดอย่างถูกวิธี 690 ตัน ดังนั้นจะมีขยะมูลฝอยถึง 108 ตัน/วัน ในจังหวัดราชบุรี ที่ถูกกำจัดอย่างไม่ถูกวิธี (Waste and Hazardous Substance Management Division, 2022)

โครงการอุทยานธรรมชาติวิทยาอันเนื่องมาจากพระราชดำริ สมเด็จพระกนิษฐาธิราชเจ้า กรมสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี ตั้งอยู่ที่อำเภอสวนผึ้ง จังหวัดราชบุรี มีพื้นที่ในส่วนงานอำนวยการ 49 ไร่ ภายในประกอบด้วย ศาลาข้อมูลธรรมชาติและเส้นทางศึกษาธรรมชาติ โดยเปิดให้บริการตามแผนงานการบริการและถ่ายทอดเทคโนโลยีของโครงการฯ ให้แก่เด็ก เยาวชน และประชาชนทั่วไปที่สนใจศึกษาธรรมชาติ ขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้นภายในอุทยานแบ่งออกสามส่วนหลัก ได้แก่ ถังคัดแยกประเภทของขยะ ขยะสดจากโรงครัว และขยะชีวมวลที่สามารถย่อยสลายได้

ขยะมูลฝอยจากถังคัดแยกขยะก่อนที่จะถูกส่งไปกำจัดโดยองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นจะถูกนำมาคัดเพื่อนำส่วนที่กลับไปใช้ได้ นำไปจำหน่ายให้กับร้านรับซื้อของเก่า ส่วนขยะสดนำไปหมักในถังฝังดินเพื่อย่อยสลายและทำเป็นปุ๋ย สำหรับขยะชีวมวลที่เกิดขึ้นนำไปทำปุ๋ยโดยวิธีเทกองทับกัน ขยะมูลฝอยภายในอุทยานฯ ที่เหลือจากสามส่วนหลักที่กล่าวมาข้างต้น จะถูกนำมาเผากลางแจ้ง ซึ่งเป็นปัญหาทางด้านมลพิษทางอากาศบริเวณโดยรอบอุทยานฯ

จากปัญหาขยะมูลฝอยภายในอุทยานฯ เฉพาะในส่วนพื้นที่อำนวยการ พบว่ามีปริมาณประมาณ 50 กิโลกรัมต่อสัปดาห์ ถึง 80 กิโลกรัมต่อสัปดาห์ ที่เหลือจากการคัดแยกนำไปกำจัดโดยส่งองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น จำหน่ายให้กับร้านรับซื้อของเก่า และในการไปทำปุ๋ยหมัก โดยที่ขยะมูลฝอยที่เหลือนี้จะถูกนำไปเผากลางแจ้ง ซึ่งเป็นวิธีการกำจัดที่ไม่ถูกต้อง ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO) แก๊สออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และเขม่าควัน เป็นต้น อีกทั้งดินบริเวณที่ใช้เผากลางแจ้งเมื่อโดนชะล้างโดยฝนอาจก่อให้เกิดสารตกค้างในน้ำใต้ดินได้ การกำจัดขยะมูลฝอยโดยใช้วิธีเผาในเตาเผาไหม้จึงเป็นอีกทางเลือกเพื่อลดปัญหาดังกล่าว อีกทั้งยังลดปริมาณขยะที่จะถูกกำจัดโดยสถานที่กำจัดขยะมูลฝอยภายในจังหวัดราชบุรีที่มีอย่างจำกัด งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตราการป้อนขยะที่กระทบต่อการเกิดมลพิษจากการเผาขยะมูลฝอยในเตาเผาไหม้ขนาดเล็ก โดยขอบเขตของกลุ่มตัวอย่างนำมาจากขยะแห้งภายในอุทยานธรรมชาติวิทยาอันเนื่องมาจากพระราชดำริ เฉพาะในเขตพื้นที่ในส่วนงานอำนวยการ จังหวัดราชบุรี ทั้งนี้ผลการศึกษาที่ได้จะถูกใช้เป็นฐานข้อมูลในการปรับปรุงเตาเผาไหม้ขยะชุมชนให้เกิดมลพิษน้อยที่สุด

วิธีดำเนินการ

การศึกษาการปลดปล่อยมลพิษจากการเผาขยะมูลฝอย ณ อุทยานธรรมชาติวิทยาอันเนื่องมาจากพระราชดำริสมเด็จพระกนิษฐาธิราชเจ้า กรมสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี อำเภอสวนผึ้ง จังหวัดราชบุรี วิธีดำเนินการแบ่งเป็นสามส่วนหลัก ได้แก่ ตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัย อุปกรณ์ที่ใช้ และวิธีดำเนินการทดลอง

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

ตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัย ประกอบไปด้วย ขยะมูลฝอยสามประเภท คือ ขยะแห้ง กิ่งไม้เศษไม้ และขยะสด (เศษผักสดและอาหาร) โดยที่ขยะแห้งเป็นส่วนที่เหลือจากการคัดแยกขยะเพื่อนำไปขายต่อและรีไซเคิล ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพลาสติก กล่องนม ซองใส่ขนม เศษผ้า เป็นต้น ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบของขยะแห้ง

ขยะที่เผาไหม้ได้ (wt%)*	
เศษอาหาร	12.8
กระดาษ	21.4
พลาสติก (ซองใส่ขนม แก้วน้ำ ถุงแกง เป็นต้น)	52.1
เศษไม้ กิ่งไม้	10.5
เศษผ้า	2.1
ขยะที่ไม่สามารถเผาได้ (wt%)**	
โลหะและอโลหะ	0.2
แก้ว	0.8
เซรามิกส์	0.1

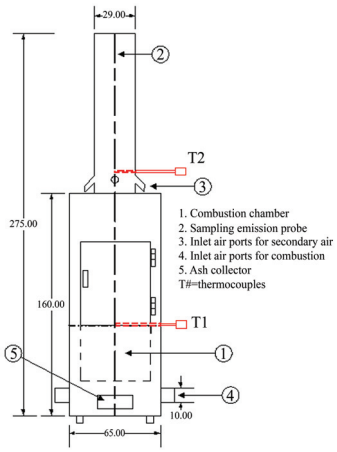
* ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน $\pm$1.8

** ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน $\pm$0.1

ISSN 3027-6756 (Online)
Research on Modern science and Utilizing Technological Innovation Journal (RMUTI Journal)

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เตาเผาขยะที่ใช้ในงานวิจัยนี้ที่ทำจากเหล็กหนา 3 มิลลิเมตร โดยห้องเตาเผามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 เซนติเมตร สูง 90 เซนติเมตร และมีช่องสำหรับป้อนขยะขนาด 55 x 55 x 55 เซนติเมตร ดังรูปที่ 1 ที่บริเวณปล่องไอเสียมีการเจาะรูรอบด้านเพื่อให้อากาศเข้าเผาไหม้ไอเสียก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศ เทอร์โมคัปเปิ้ล K-type ถูกติดตั้งที่ห้องเผาไหม้ (ตำแหน่ง T1) และปล่อยไอเสีย (ตำแหน่ง T2) เพื่อสังเกตอุณหภูมิระหว่างการทดลอง และข้อมูลอุณหภูมิถูกบันทึกโดย Testo 175 T3 มลพิษถูกวัดและบันทึกโดยเครื่องวิเคราะห์ไอเสีย Testo 350 โดยแก๊สที่วัดได้แก่ O_2 CO NO_x และ SO_2



รูปที่ 1 เตาเผาขยะ

วิธีดำเนินการทดลอง

เพื่อศึกษาอัตราการป้อนขยะที่กระทบต่อการปลดปล่อยมลพิษ ขยะประเภทแรกคือ ขยะแห้งล้วน (ดังตารางที่ 1) น้ำหนัก 4 กิโลกรัม (รหัสการทดสอบ F1) ประเภทที่สองเป็นการผสมระหว่างขยะแห้ง 2.2 กิโลกรัมกับกิ่งไม้ 0.8 กิโลกรัม (รหัสการทดสอบ F2) และประเภทสุดท้ายเป็นการผสมระหว่างขยะแห้ง 2.6 กิโลกรัมกับขยะสด 0.3 กิโลกรัม (รหัสการทดสอบ F3) ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เงื่อนไขตัวแปรต้นของตัวอย่างขยะมูลฝอยที่ใช้ในการทดลอง

รหัสการทดสอบ	เงื่อนไขตัวแปรต้น	ลักษณะของขยะมูลฝอย
F1	ขยะแห้ง 4 กก.	
F2	ขยะแห้ง 2.2 กก. + กิ่งไม้ 0.8 กก.	
F3	ขยะแห้ง 2.6 กก. + ขยะสด 0.3 กก.	

วิธีดำเนินการทดลองเริ่มจากการเริ่มจุดเตาเผาให้ติดไฟโดยใช้เศษกิ่งไม้และกระดาษ จากนั้นจึงเริ่มป้อนขยะและจับเวลาในการเผาไหม้ของแต่ละรหัสทดสอบ ระหว่างการทดลองอุณหภูมิภายในเตาเผาและอุณหภูมิที่ปล่องไอเสียจะถูกบันทึกทุก ๆ 10 วินาที และค่ามลพิษ CO NO_x SO_2 ถูกวัดที่ปลายปล่องโดยบันทึกค่าทุก ๆ 10 วินาที ค่ามลพิษที่วัดได้จากปล่องไอเสียจะถูกคำนวณ (ดังสมการที่ (1)) (Pollutant Control Department, 2020) ที่ความเข้มข้นออกซิเจนอ้างอิง (O_2 Reference) เพื่อนำค่ามลพิษที่คำนวณได้เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานการปลดปล่อยมลพิษ สำหรับการคำนวณค่ามลพิษของประเทศไทยได้กำหนดที่ความเข้มข้นออกซิเจนอยู่ที่ร้อยละ 7 (Pollutant Control Department, 2020)

$$Corrected\ \ PPM = measured\ \ PPM\left[\frac{20.9 - O_2 reference}{20.9 - O_2 measured}\right] \quad (1)$$

Corrected PPM คือ ค่ามลพิษที่ความเข้มข้นออกซิเจนอ้างอิง
measured PPM คือ ค่ามลพิษที่วัดได้จากปล่องไอเสีย
O_2 *reference* คือ ค่าออกซิเจนอ้างอิง
O_2 *measured* คือ ค่าออกซิเจนที่วัดได้จากปล่องไอเสีย

ในการทดลองมีการทดลองซ้ำ รวมเป็นการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง โดยค่าเฉลี่ยของผลการทดลอง อุณหภูมิห้องเผาไหม้ อุณหภูมิปล่องไอเสีย ค่ามลพิษ ในแต่ละเวลาคำนวณดังสมการที่ (2)

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^{n} x_i \quad (2)$$

$\bar{x}$ = ค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลองในแต่ละเวลา
n = จำนวนครั้งของการทดลอง

ค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลแต่ละการทดลองเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยในแต่ละเวลา โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของการคลาดเคลื่อนของค่าการทดลองดังสมการที่ (3)

$$Error\ \ of\ \ value\left[\%\right] = \left(\frac{x_i - \bar{x}}{\bar{x}}\right) \times 100 \quad (3)$$

หลังจากการทดลองเผาไหม้เสร็จสิ้น ตัวอย่างขยะที่ใช้ป้อนในแต่ละรหัสการทดสอบและเถ้าที่ตกบริเวณใต้เตาเผาจะถูกนำมาวิเคราะห์หาความชื้นและปริมาณคาร์บอนที่ไม่สามารถเผาได้ ตามมาตรฐาน ASTM E871-82 (2006) และ ASTM E1131 (2008)

ผลการศึกษา

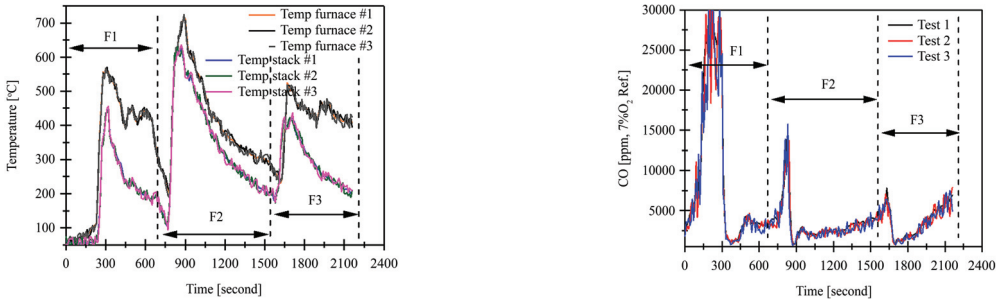
ตัวอย่างของขยะที่ใช้ทดสอบประกอบด้วย ซองใส่ขนม แก้วน้ำ ถุงแกง เศษผ้า ฯลฯ ดังตารางที่ 1 ขยะที่ใช้ทดสอบมีลักษณะแห้งในการทดสอบของ F1 และ F2 เนื่องจากทางอุทยานฯ ได้มีการคัดแยกขยะเพื่อนำกลับไปขายให้กับร้านรับซื้อของเก่าและขยะสดเพื่อทำปุ๋ย ส่วนกรณีการทดสอบของ F3 ได้ผสมขยะสด เช่น เปลือกผลไม้ลงไปผสมร้อยละ 10.3 โดยน้ำหนัก การทดสอบเตาเผาขยะได้ทำการป้อนขยะเปรียบเทียบทั้ง 3 แบบ เพื่อดูผลของอุณหภูมิห้องเผาไหม้ อุณหภูมิไอเสีย และมลพิษที่เกิดขึ้นจากการเผาขยะ โดยที่ขยะแห้งซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักได้ถูกนำมาวิเคราะห์หาสมบัติ เช่น ปริมาณความชื้น เถ้า และองค์ประกอบทางเคมี ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สมบัติของขยะแห้ง

การวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate Analysis, wt %, มาตรฐานเปียก)	
ความชื้น	12.1
เถ้า	11.8
การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (Ultimate Analysis, wt %, มาตรฐานเปียก)	
คาร์บอน	35.1
ไฮโดรเจน	4.7
ไนโตรเจน	0.4
ซัลเฟอร์	1.6
ออกซิเจน	34.3

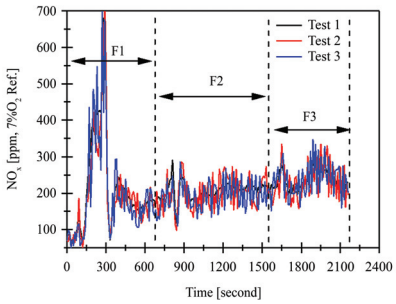
การทดสอบเผาขยะกรณี F1 ที่ใช้ขยะแห้งน้ำหนัก 4.0 กิโลกรัม ใช้เวลาในการเผาไหม้ 11 นาที (ช่วง 0 - 660 วินาที) พบว่าอุณหภูมิในห้องเผาไหม้และอุณหภูมิไอเสียอยู่ที่ 550 องศาเซลเซียส และ 430 องศาเซลเซียส โดยประมาณ จากการศึกษาของ Márquez et al. (2023) ได้ศึกษาช่วงอุณหภูมิการสลายตัวและขั้นตอนการเผาไหม้ของขยะชุมชนในสเปน พบว่าการเผาไหม้ขยะแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการระเหยความชื้น การเผาไหม้สารระเหย (Volatile Combustion) การสลายตัวของแข็งและเผาไหม้ และขั้นตอนสุดท้าย คือ การเผาไหม้เถ้า โดยที่แต่ละขั้นตอนมีอุณหภูมิในช่วง (80 - 150 องศาเซลเซียส) (150 - 400 องศาเซลเซียส) ในช่วง (400 - 520 องศาเซลเซียส) และในช่วง (520 - 900 องศาเซลเซียส) ตามลำดับ ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้เริ่มตกอย่างต่อเนื่อง (ถึงประมาณ 200 องศาเซลเซียส) ดังรูปที่ 2 จึงแสดงสถานะที่เชื้อเพลิงขยะก่อนหน้าได้สลายตัวและเผาไหม้จนครบทั้ง 4 ขั้นตอน และพร้อมที่จะป้อนขยะกรณีต่อไป

การป้อนขยะกรณี F2 ผลของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้และอุณหภูมิไอเสียอยู่ที่ 700 องศาเซลเซียส และ 600 องศาเซลเซียส โดยประมาณ (ดังรูปที่ 2(ก)) และใช้เวลาในการเผาไหม้ 15 นาที (ช่วง 661 - 1,560 วินาที) สังเกตได้ว่ากรณี F2 ใช้เวลานานกว่าและอุณหภูมิในห้องเผาไหม้และไอเสียสูงกว่ากรณีของ F1 สันนิษฐานมาจากส่วนผสมที่มีกิ่งไม้ ส่งผลให้ใช้เวลาในการเผาไหม้ที่นานขึ้น สำหรับกรณี F3 อุณหภูมิในห้องเผาไหม้และอุณหภูมิไอเสียอยู่ที่ 500 องศาเซลเซียส และ 400 องศาเซลเซียส โดยประมาณ ใช้เวลาในการเผาไหม้ 10 นาที (ช่วง 1,561 - 2,160 วินาที) อุณหภูมิในห้องเผาไหม้และอุณหภูมิไอเสียกรณี F3 ต่ำกว่ากรณี F2 เนื่องจากส่วนผสมของขยะสด เช่น เปลือกผลไม้ที่มีความชื้นอยู่สูง

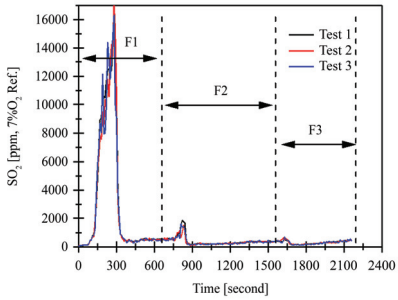


(ก) อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้และไอเสีย (ข) มลพิษคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)

รูปที่ 2 อุณหภูมิภายในเตาเผาขยะ อุณหภูมิไอเสีย และมลพิษที่ปลดปล่อยจากการเผาไหม้ขยะมูลฝอย



(ค) มลพิษออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x)

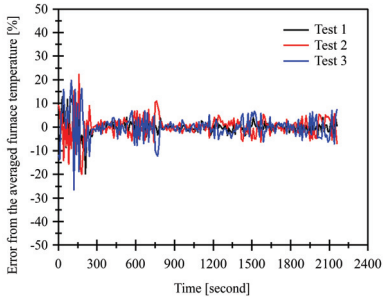


(ง) มลพิษซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2)

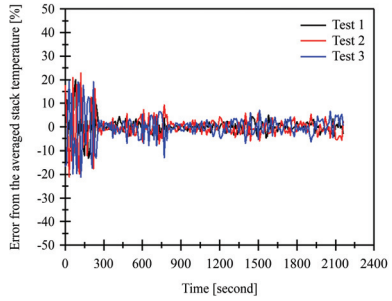
รูปที่ 2 อุณหภูมิภายในเตาเผาขยะ อุณหภูมิไอเสีย และมลพิษที่ปลดปล่อยจากการเผาไหม้ขยะมูลฝอย (ต่อ)

จากผลการทดสอบการเผาขยะที่ 4 กิโลกรัม (กรณี F1) ค่ามลพิษ CO NO_x และ SO_2 (ที่ความดัน 1 บรรยากาศ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ปริมาตรออกซิเจนร้อยละ 7) อยู่ในช่วง 1,128 - 29,737 ppm 64 - 680 ppm และ 66 - 16,365 ppm (ดังรูปที่ 2(ข)-(ง)) ค่ามลพิษสูงกว่ากรณีของ F2 และ F3 มาก เนื่องจากขยะที่มีปริมาณมากส่งผลให้ปฏิกิริยาการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์โดยดูจากอุณหภูมิในห้องเผาไหม้และอุณหภูมิไอเสียที่ต่ำ เมื่อทำการลดปริมาณขยะลง 2.9 - 3.0 กิโลกรัม (กรณี F2 และ F3) ค่ามลพิษ CO NO_x และ SO_2 มีค่าลดลง และสังเกตขยะภายในเตาเผายังมีการเผาไหม้และเปลวไฟที่ดี อย่างไรก็ตามค่ามลพิษที่ได้จากการศึกษากรณี F1 F2 และ F3 เมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานการปลดปล่อยมลพิษ NO_x (250 ppm) SO_2 (30 ppm) (Pollutant Control Department, 2020) และ CO (50 ppm) (Brizio et al., 2004) พบว่าค่ามลพิษ NO_x ยังเกินค่ามาตรฐานอยู่เล็กน้อย (กรณี F2 และ F3) ส่วนมลพิษ CO และ SO_2 ยังสูงกว่าค่ามาตรฐาน

ในการทดลองมีการทดลองซ้ำ รวมเป็นการทดลอง 3 ครั้ง (Test 1 Test 2 Test 3) เพื่อความเชื่อถือได้ของข้อมูลการทดลอง โดยที่ความคลาดเคลื่อนของข้อมูลอุณหภูมิทั้งภายในเตา (Furnace Temperature) และอุณหภูมิปล่อง (Stack Temperature) โดยส่วนใหญ่แกว่งอยู่ที่ร้อยละ $\pm$10 โดยประมาณ (ดังรูปที่ 3) ยกเว้นช่วงต้นของการทดลองทุกครั้งที่มีการแกว่งของข้อมูลสูงอยู่ที่ร้อยละ $\pm$20 โดยประมาณ เนื่องจากอุณหภูมิกระจายตัวไม่สม่ำเสมอและไม่ทั่วทั้งเตาเผา สำหรับค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลมลพิษอยู่ที่ประมาณร้อยละ 20 โดยส่วนใหญ่ อย่างไรก็ตามทั้งสามการทดลองข้อมูลมีแนวโน้มในทางเดียวกันหลังจากการเผาไหม้แล้วได้นำตัวอย่างเถ้ามาวิเคราะห์พบว่ามีปริมาณคาร์บอนที่ไม่สามารถเผาได้ (Unburned Carbon) อยู่ที่ร้อยละ 13.3 1.2 ร้อยละ 12.5 0.5 และร้อยละ 12.3 0.6 ของการทดลอง F1 F2 และ F3 ตามลำดับ

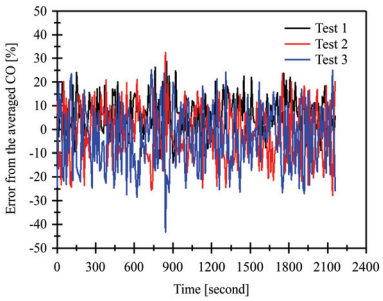


(ก) ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้

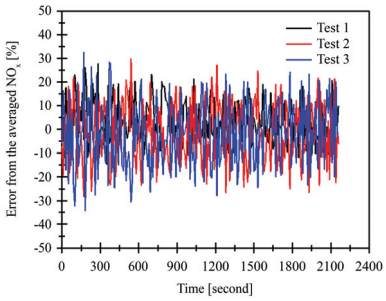


(ข) ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิไอเสีย

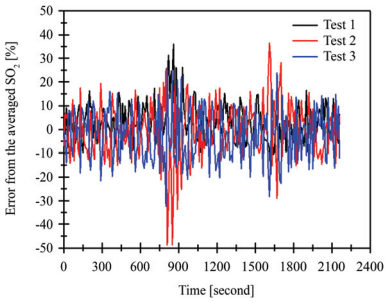
รูปที่ 3 ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิภายในเตาเผาขยะ อุณหภูมิไอเสีย และมลพิษที่ปลดปล่อยจากการเผาไหม้ขยะมูลฝอย



(ค) ความคลาดเคลื่อนของมลพิษคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)



(ง) ความคลาดเคลื่อนของมลพิษออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x)



(จ) ความคลาดเคลื่อนของมลพิษซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2)

รูปที่ 3 ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิภายในเตาเผาขยะ อุณหภูมิไอเสีย และมลพิษที่ปลดปล่อยจากการเผาไหม้ขยะมูลฝอย (ต่อ)

จากการศึกษาของ Sukchana (2014) ได้ศึกษาการเผาไหม้ขยะในเตาเผาไหม้โดยทำการเผาอย่างต่อเนื่องจากอัตราการป้อนขยะเริ่มที่ 30 กิโลกรัม/ชั่วโมง และเพิ่มอัตราการป้อนขยะครั้งละ 10 กิโลกรัม/ชั่วโมง จนถึงอัตราการป้อน 70 กิโลกรัม/ชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนขยะจาก 30 ถึง 60 กิโลกรัม/ชั่วโมง ส่งผลให้อุณหภูมิในห้องเผาไหม้และค่ามลพิษ CO และ NO_x เพิ่มขึ้น และเมื่ออัตราการป้อนขยะจาก 60 กิโลกรัม/ชั่วโมง เพิ่มเป็น 70 กิโลกรัม/ชั่วโมง พบว่าอุณหภูมิในห้องเผาไหม้และค่ามลพิษเริ่มลดลง เนื่องจากอัตราการป้อนที่มากเกินไปทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ สอดคล้องกับผลการทดสอบดังรูปที่ 2 แม้ว่ากรณี F1 ที่มีอัตราการป้อนมากกว่า แต่กลับมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่ากรณี F2 และมลพิษ CO NO_x และ SO_2 ที่สูง ดังนั้นอัตราการป้อนขยะจึงมีผลกระทบต่ออุณหภูมิและค่ามลพิษที่เกิดขึ้น

การทดสอบเปรียบเทียบที่อัตราการป้อน 2.9 - 4.0 กิโลกรัม/ครั้ง (ตารางที่ 2) พบว่าที่อัตราการป้อน 2.9 กิโลกรัม/ครั้ง (F3) มีความเหมาะสมต่อเตาเผา โดยดูจากผลของอุณหภูมิการเผาไหม้และอุณหภูมิของไอเสีย และค่ามลพิษ CO NO_x และ SO_2 ที่ปลดปล่อยค่อนข้างเสถียรและต่ำกว่าที่อัตราการป้อน 4.0 กิโลกรัม/ครั้ง รวมทั้งค่าคาร์บอนที่ไม่สามารถเผาได้ (Unburnt Carbon) ต่ำกว่ากรณี F1 และ F2 โดยอยู่ที่ร้อยละ 12.3 ซึ่งเป็นตัวชี้วัดของการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ อย่างไรก็ตามมลพิษ CO และ SO_2 ยังมีค่าค่อนข้างสูงอาจต้องมีปรับปรุงระบบการเผาไหม้ต่อไป ทั้งนี้จากผลการทดลองในงานวิจัยนี้ได้มีการเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเตาเผาขยะชุมชนที่ขนาดและประเภทต่าง ๆ ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 มลพิษที่ปลดปล่อยจากการเผาไหม้ขยะชุมชนขนาดเล็กและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ประเภทของเตาเผาขยะ	CO (ppm)	NO_x (ppm)	SO_2 (ppm)
เตาเผาขนาดเล็ก (อัตราการป้อน 2.9 กก./ครั้ง กรณีทดสอบ F3) งานวิจัยนี้	6,843	302	74
เตาเผาขนาดใหญ่ (อัตราการป้อน 50 กก./ชม.) (Sukchana, 2014)	102 - 1,200	91 - 230	n.d.
เตาเผาขนาดใหญ่ (อัตราการป้อน 80 กก./ชม.) (Sukchana and Sirikasemsuk, 2015)	60 - 140	10 - 140	n.d.
หลอดทดลอง (Quartz Tube) (Tang et al., 2012)	n.d.	15	45
ฟลูอิไดซ์เบด (Suksankraisorn et al., 2010)	40	n.d.	2,400
ตะกรับ (Xia et al., 2014)	n.d.	230 - 250	n.d.
เตาเผาขนาดเล็ก (อัตราการป้อน 10 กก./ชม.) (Sangbuatao and Kancahna, 2014)	726	n.d.	n.d.

* n.d. (ไม่ปรากฏข้อมูล)

การปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) จากการเผาขยะมูลฝอยในงานวิจัยนี้อยู่ที่ 6,843 ppm (ที่อัตราการป้อน 2.9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง F3) ซึ่งเกินกว่าระดับที่รายงานในการศึกษาอื่น ๆ อย่างมาก ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 40 - 726 ppm (Suksankraisorn et al., 2010; Sangbuatao and Kancahna, 2014) สิ่งนี้บ่งชี้ว่ากระบวนการเผาไหม้ในเตาเผาขนาดเล็กในงานวิจัยนี้อาจมีประสิทธิภาพต่ำกว่าหรือทำงานภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างเมื่อเทียบกับระบบอื่น ๆ และอีกปัจจัยที่ทำให้ค่ามลพิษ CO ในงานวิจัยนี้สูง เนื่องจากเตาเผาที่ใช้ในการทดลองมีข้อจำกัด คือ ไม่สามารถปรับอัตราอากาศส่วนเกิน (Excess Air) เพิ่มเข้าไปในระบบ ๆ ได้ โดยอัตราอากาศส่วนเกินนี้เป็นอีกวิธีที่สามารถลดมลพิษ CO โดยที่อากาศส่วนเกินทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ขึ้น ดังสมการที่ (4) ดังการศึกษาของ Suksankraisorn et al. (2010) ได้ใช้อัตราอากาศส่วนเกินที่ 10 % ในการเผาไหม้ขยะชุมชนสำหรับเตาเผาไหม้แบบฟลูอิไดซ์เบด ทั้งนี้จากงานวิจัยดังกล่าวพบว่าเมื่อป้อนอัตราส่วนเกินที่มากเกินไปอาจทำให้มลพิษ CO และ NO_x มีค่าเพิ่มขึ้นได้ อันเนื่องมาจากคาร์บอนและไนโตรเจนที่มีอยู่ในขยะชุมชนสามารถที่จะเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนที่มากเกินดังสมการที่ (5) ดังนั้นในการใช้อัตราอากาศส่วนเกินจึงมีความจำเป็นต้องหาอัตราส่วนที่เหมาะสม สำหรับการปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ที่ 302 ppm (ที่อัตราการป้อน 2.9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง F3) ในงานวิจัยนี้ยังค่ามีสูงกว่าผลการศึกษาที่เกี่ยวข้อง (ดังตารางที่ 4) อย่างไรก็ตามยังมีค่าใกล้เคียงกับผลการศึกษาของ Xia et al. (2014) ที่ใช้เตาเผาแบบตะกรับในการเผาไหม้ขยะชุมชน

$$CO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO_2 \quad (4)$$

$$CNO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow NO + CO \quad (5)$$

การปล่อยแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ที่ 574 ppm (ที่อัตราการป้อน 2.9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง F3) ในงานวิจัยนี้อยู่ระหว่างค่าที่เคยศึกษาในการเผาขยะชุมชนในท่อควอตซ์ (ระดับห้องปฏิบัติการ) และในเตาเผาแบบฟลูอิไดซ์เบด คือ ในช่วง 45 - 2,400 ppm (Suksankraisorn et al., 2010; Márquez et al., 2023) สังเกตได้ว่าทั้งงานวิจัยนี้และงานวิจัยดังกล่าวมีค่าความเข้มข้นของ SO_2 ที่สูงเกินกว่ามาตรฐานกำหนด คือ 30 ppm (Pollutant Control

Department, 2020) โดยทั่วไปขยะชุมชนมีองค์ประกอบซัลเฟอร์ (S) 1.13 % ถึง 1.94 % โดยน้ำหนัก (Tang et al., 2012; Xia et al., 2014) ซึ่งสามารถก่อให้เกิดมลพิษ SO_2 ที่สูง และจากการศึกษาของ Vantúch et al. (2016) เชื้อเพลิงถ่านหินผสมขวดพลาสติก PET ในอัตราส่วนร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก เมื่อทำการเผาไหม้เกิดมลพิษแก๊ส SO_2 อยู่ที่ 1,300 ppm เมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงถ่านหินที่ไม่ผสมขวด PET เกิดมลพิษแก๊ส SO_2 อยู่ที่ 850 ppm จึงเห็นได้ว่าขยะขวดพลาสติก PET มีผลอย่างมากในการปลดปล่อยมลพิษ SO_2 จากผลการทดสอบกรณี F2 (2.2 กิโลกรัมขยะแห้ง) ที่มีส่วนผสมของขยะแห้งน้อยกว่า F3 (2.6 กิโลกรัมขยะแห้ง) ซึ่งขยะแห้งมีองค์ประกอบของซัลเฟอร์ร้อยละ 1.6 โดยน้ำหนัก (ดังตารางที่ 3) แต่ผลมลพิษ SO_2 ในกรณี F2 กลับมีความเข้มข้นมากกว่า ทั้งนี้อาจมาจากผลของอุณหภูมิที่เกิดจากการเผาไหม้ที่สูงจากการที่ใช้เชื้อเพลิงที่แห้งและเผาไหม้ได้ดีกว่าโดยเฉพาะเมื่อผสมกับเศษไม้ ตัวปัจจัยของอุณหภูมิจึงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน (ดังสมการที่ 6) ในการเกิดแก๊ส SO_2 (Wu et al., 2020)

$$S_2 + 2O_2 \rightarrow 2SO_2 \tag{6}$$

ความเข้มข้น SO_2 ที่สูงนี้สามารถถูกดูดซับกักเก็บไว้ได้ด้วยการใช้ปูนขาว ซึ่งโดยทั่วไปมีองค์ประกอบหลัก คือ CaO และ $Ca(OH)_2$ (Han et al., 2021) โดยปฏิกิริยาระหว่างแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์และสารประกอบของแคลเซียมในปูนขาว เกิดสารประกอบผลิตภัณฑ์ในรูปแคลเซียมซัลเฟตดังสมการที่ (7) และ (8) ซึ่งสารประกอบนี้เกิดขึ้นอยู่ในรูปเถ้าและไม่ก่อให้เกิดปัญหาในการกำจัด ดังการศึกษาของ (Tang et al., 2012) ศึกษาการลดความเข้มข้นมลพิษ SO_2 ในการเผาขยะมูลฝอยโดยใช้หินปูน (Limestone) ในอัตราส่วนผสม Ca/s = 5 โดยโมล สามารถลดมลพิษ SO_2 ลงได้ร้อยละ 23.4 ที่อุณหภูมิการเผาไหม้ 900 องศาเซลเซียส

$$CaO + SO_2 + 1/2O_2 \rightarrow CaSO_4 \tag{7}$$

$$Ca(OH)_2 + SO_2 \rightarrow CaSO_3 \cdot 1/2H_2O + 1/2H_2O \tag{8}$$

องค์ประกอบของขยะมูลฝอยและเทคนิคการเผาไหม้มีผลอย่างมากต่อการปล่อยมลพิษเหล่านี้ โดยปริมาณคาร์บอนในขยะส่งผลโดยตรงต่อการปล่อย CO เมื่อการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ส่วนปริมาณไนโตรเจนในขยะ โดยเฉพาะในเศษอาหารและวัสดุอินทรีย์มีผลต่อการเกิด NO_x ในระหว่างการเผา นอกจากนี้ปริมาณซัลเฟอร์ในขยะ ซึ่งอาจมาจากยาง พลาสติก หรือวัสดุสังเคราะห์อื่น ๆ จะส่งผลโดยตรงต่อการปล่อย SO_2 (Tang et al., 2012) จากการเปรียบเทียบงานวิจัยนี้และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังกล่าวข้างต้น ผลการทดลองที่ต่างกันอาจเกิดจากปัจจัยอื่น ๆ ด้วย เช่น การออกแบบเตาเผา ขนาดของการดำเนินการ และการมีหรือไม่มีเทคโนโลยีควบคุมการปล่อยมลพิษ

สรุปผลการศึกษา

การศึกษาการปลดปล่อยมลพิษจากการเผาขยะมูลฝอยในเตาเผาขนาดเล็ก จากการศึกษาพบว่าอัตราการป้อนที่เหมาะสมอยู่ที่ 2.9 กิโลกรัม/ครั้งการป้อน ซึ่งมีอัตราส่วนผสมขยะสด (ร้อยละ 10.3) อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ที่เหมาะสมอยู่ที่ 400 - 500 องศาเซลเซียส มลพิษที่เกิดขึ้น ได้แก่ CO NO_x และ SO_2 อยู่ที่ 6,843 ppm 302 ppm และ 574 ppm ตามลำดับ ซึ่งค่ามลพิษที่เกิดขึ้นดังกล่าวยังมีค่าเกินมาตรฐานกำหนด โดยเฉพาะมลพิษ SO_2 ซึ่งเกิดจากส่วนประกอบของขยะมูลฝอยที่เป็นพลาสติกถึงร้อยละ 52.1 และมีองค์ประกอบของซัลเฟอร์ร้อยละ 1.6 สำหรับข้อเสนอแนะสำหรับการเผาไหม้ในเตาเผาขยะมูลฝอยนี้ คือ ดำเนินการทดลองที่อัตราการป้อนที่เท่ากันทุกการทดลองและเปลี่ยนอัตราส่วนผสม เพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนเชื้อเพลิงขยะที่กระทบต่อการปลดปล่อยมลพิษ และเนื่องจากขยะมูลฝอยมีส่วนผสมของพลาสติกซึ่งมีองค์ประกอบของซัลเฟอร์ เป็นสาเหตุให้เกิดมลพิษ SO_2 เมื่อทำการเผาไหม้ จากผลการทดลองค่ามลพิษ SO_2 มีค่าสูงมากและเกินกว่ามาตรฐานกำหนด ดังนั้นควรทำการศึกษาเพิ่มเติมโดยใช้หินปูนหรือปูนขาวในอัตราส่วนที่เหมาะสมในการดักจับมลพิษ SO_2 ในไอเสีย

References

Brizio, E., Genon, G. and Poggio, M. (2004). *Comparison of Locations for a MSW Incineration Plant*. In V. Popov, H. Itoh, C.A. Brebbia & S. Kungolos (Eds.), Waste Management and the Environment II. 78(11), pp. 633-643. WIT Press. https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/WM04/WM04063FU.pdf

Han, J.W., Hassoli, N., Lee, K.S., Park, S.S., Kim, K.D., Kim, H.T. and Park, Y.O. (2021). Dry Scrubbing of Gaseous HCl and SO_2 with Hydrated Lime in Entrained Mixing Reactor. *Powder Technology*, 393, 471-481. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.05.089

Márquez, A., Patlaka, E., Sfakiotakis, S., Ortiz, I. and Sánchez-Hervás, J.M. (2023). Pyrolysis of Municipal Solid Waste: A Kinetic Study Through Multi-Step Reaction Models. *Waste Management*, 172, 171-181. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.10.031

Pollutant Control Department. (2024, 10 July). *Announcement of the Ministry of Natural Resources and Environment on Setting Air Emission Standards for Municipal Waste Incinerators*. https://www.pcd.go.th/laws/4082

Sangbuatao, S. and Kancahna, R. (2014). Identifying the Optimal Factor for Design and Fabrication of a Small Municipal Solid Wasted Incinerator with the Design of Experiments Technique. *Journal of Engineering, RMUTT*, 1(1), 43-53. (in Thai)

Sukchana, T. (2014). *The Performance Test of an Incinerator with Loopback Exhaust*. In The 28rd Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand (ME-NETT 2014) 15-17 November, Khon Kaen, Thailand (365-375). (in Thai)

Sukchana, T. and Sirikasemsuk, S. (2015). *The Burning Efficiency Test of a Cylindrical Incinerator with a Rolling Grill*. In The 29th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand (ME-NETT 2015). 1-3 July, Nakhon Ratchasima, Thailand (in Thai)

Suksankraisorn, K., Patumsawadnd, S. and Fungtammasan, B. (2010). Co-firing of Thai Lignite and Municipal Solid Waste (MSW) in a Fluidised Bed: Effect of MSW Moisture Content. *Applied Thermal Engineering*, 30(17-18), 2693-2697. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.07.020

Tang, Y., Ma, X., Lai, Z., Zhou, D., Lin, H. and Chen, Y. (2012). NO_x and SO_2 Emissions from Municipal Solid Waste (MSW) Combustion in CO_2/O_2 Atmosphere. *Energy*, 40(1), 300-306. https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.01.070

Vantúch, M., Kaduchová, K. and Lenhard, R. (2016). The Impact of Municipal Waste Combustion in Small Heat Sources. *AIP Conference Proceedings*, 1745(1), 020063. https://doi.org/10.1063/1.4953757

Waste and Hazardous Substance Management Division. (2022). *Report on the Situation of Municipal Solid Waste Disposal Sites in Thailand 2022*. Bangkok: Pollutant Control Department, Ministry of Natural Resources and Environment.

Wu, X., Fan, W., Liu, S., Chen, J., Guo, H. and Liu, Z. (2020). Effect of High Temperature and Separated Combustion on SO_2 Release Characteristics During Coal Combustion Under O_2/CO_2 Atmosphere. *Journal of the Energy Institute*, 93(6), 2388-2398. https://doi.org/10.1016/j.joei.2020.07.013

Xia, Z., Li, J., Wu, T., Chen, C. and Zhang, X. (2014). CFD Simulation of MSW Combustion and SNCR in a Commercial Incinerator. *Waste Management*, 34(9), 1609-1618. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.04.015