

การศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งขยะอินทรีย์จากมูลฝอยชุมชนจาก กระบวนการเชิงกลและชีวภาพ

Drying Kinetics Study of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste Obtained from Mechanical and Biological Treatment Process

พลศักดิ์ ศรีนาวิน (Polasak Srinavin)* ดร.สุรพล ผดุงทน (Dr.Surapol Padungthon)^{1**}

(Received: September 21, 2021; Revised: December 8, 2021; Accepted: December 8, 2021)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการอบแห้งขยะอินทรีย์จากมูลฝอยชุมชนเพื่อลดความชื้น โดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากฮีตเตอร์ไฟฟ้าในการให้อุณหภูมิร้อนที่ 70 100 และ 130 องศาเซลเซียส จากการอบแห้งอินทรีย์มูลฝอยชุมชน พบว่าเมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้นส่งผลให้อัตราส่วนความชื้นลดลงอย่างรวดเร็วโดยใช้เวลาน้อยลง ซึ่งการศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้ง ด้วยแบบจำลองที่แตกต่างกัน 6 สมการ โดยผลการวิเคราะห์ แสดงให้เห็นว่าสมการแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของ Wang and Singh มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับอุณหภูมิในช่วง 70 ถึง 130 องศาเซลเซียส เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) สูงสุด 0.9915 ค่าสถิติไคสแควร์ (χ^2) และรากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (RMSE) นั้นมีค่าต่ำสุดอยู่ในช่วง 0.0010 ถึง 0.0039 และ 0.0316 ถึง 0.0629 ตามลำดับ การอบแห้งแบบถาดสำหรับอินทรีย์มูลฝอย พบว่ามีความสามารถในการนำไปออกแบบและใช้งานต่าง ๆ อาทิเช่นนำไปผลิตถ่านชีวภาพ

ABSTRACT

This study attempts to reduce moisture content of organic fraction municipal solid waste (OFMSW). The heat energy source from electric heater was used to generated hot air temperatures at various temperature 70, 100 and 130 °C. Increased temperature result in high rate reduced of moisture ratio and drying time. Additionally, 6 mathematical drying kinetic models were investigated to describe the drying characteristic of OFMSW. The result show that the best fitted kinetic model is Wang Singh models in the range of 70 to 130 °C due to the highest value Coefficient of determination (R^2) 0.9915 with low value Reduced Chi-square (χ^2) and Root mean Square Error (RMSE) were range of 0.0010 to 0.0039 and 0.0316 to 0.0629, respectively. For the drying of OFMSW was found to be capable of different design and application. For example, used to produce biochar.

คำสำคัญ: ขยะอินทรีย์จากมูลฝอยชุมชน จลนพลศาสตร์การอบแห้ง

Keywords: Organic fraction of municipal solid waste, Drying kinetic

¹Corresponding author: Surapolp@kku.ac.th

*นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

**รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทนำ

มูลฝอยชุมชน หรือขยะชุมชน (Municipal Solid Waste; MSW) คือ มูลฝอยที่เกิดจากกิจกรรมของชุมชน เช่น บ้านพักอาศัย ธุรกิจร้านค้า สถานประกอบการ สถานบริการ ตลาดสด สถาบันต่างๆ รวมทั้งเศษวัสดุก่อสร้าง ทั้งนี้ไม่รวมของเสียอันตรายและมูลฝอยติดเชื้อ [1] จากรายงานของกรมควบคุมมลพิษ [2] ในปี พ.ศ.2563 แสดงถึงปริมาณมูลฝอยชุมชนทั้งหมดที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนมีปริมาณ 28.71 ล้านตัน โดยมูลฝอยชุมชนประมาณ 6.38 ล้านตัน หรือคิดเป็นร้อยละ 22 ของปริมาณมูลฝอยชุมชนทั้งหมด มีการกำจัดอย่างไม่ถูกวิธี อาทิ การเผากลางแจ้ง และเททิ้งแบบกอง (Open dump) ก่อมลพิษต่อสุขภาพอนามัยของชุมชน และสิ่งแวดล้อมเช่น มลพิษทางกลิ่น และมลพิษทางน้ำจากน้ำชะขยะอันเป็นแหล่งเพาะพันธุ์ยุง ทำให้เสียค่าใช้จ่าย และพื้นที่ในการกำจัดสูง อย่างไรก็ตามหากมีการกำจัดมูลฝอยชุมชนอย่างถูกวิธี จะสามารถนำขยะอินทรีย์นั้นไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในครัวเรือน หรือใช้ทดแทนปุ๋ยเคมี เป็นการทดแทนทรัพยากรได้อย่างมีประสิทธิภาพ [3]

วิธีการในการกำจัดขยะอินทรีย์ที่นิยมใช้นั้น ได้แก่ การทำให้แห้งวิธีทางธรรมชาติ การย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion; AD) [4] การฝังกลบขยะเพื่อผลิตก๊าซ (Landfill gas to energy) [5] และการอบ เป็นต้น ซึ่งจากเทคโนโลยีข้างต้นพบว่า การทำให้แห้งด้วยวิธีทางธรรมชาติและการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนนั้นก่อให้เกิดปัญหา ซึ่งมักมีทั้งกลิ่นเหม็นและทัศนียภาพที่ไม่สวยงาม รวมถึงต้องใช้พื้นที่ในการย่อยสลายที่มากอีกด้วย เทคโนโลยีการฝังกลบเพื่อผลิตก๊าซ เป็นเทคโนโลยีที่ไม่สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพคงที่จำเป็นต้องมีการคัดแยกขยะเพื่อแยกเฉพาะขยะอินทรีย์ก่อนเข้าระบบ ซึ่งต้องมีทั้งตะแกรงคัดแยก ลดขนาด และอุปกรณ์การเติมขยะอินทรีย์เข้าระบบอย่างคงที่ ระบบกักเก็บก๊าซใช้พื้นที่มาก อีกวิธีที่เป็นที่นิยม คือ การบำบัดขยะด้วยวิธีการแบบเชิงกลและชีวภาพ (Mechanical and Biological Treatment; MBT) [6] เป็นกระบวนการหนึ่งที่สามารถปรับเสถียรภาพของมูลฝอยชุมชนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสามารถแยกขยะประเภทพลาสติก (Refuse Derive Fuel; RDF) [7] และขยะอินทรีย์จากมูลฝอยชุมชน (Organic Fraction of Municipal Solid Waste; OFMSW) [8] ออกจากกัน โดยอาศัยกระบวนการทางชีวภาพของแบคทีเรียในการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุที่มีอยู่ในมูลฝอย ภายใต้สภาวะ ความชื้น อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจน รวมทั้งสัดส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสม

ในการศึกษางานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาจากข้อมูลการสำรวจภาคสนาม โรงงานกำจัดขยะเทศบาลเมืองร้อยเอ็ด จังหวัดร้อยเอ็ด พบว่ามูลฝอยชุมชนที่ออกจากกระบวนการหมักของระบบกำจัดมูลฝอยชุมชนแบบเชิงกลและชีวภาพ แบ่งองค์ประกอบออกได้เป็น RDF ที่ถูกนำไปแปรรูปเป็นปุ๋ยอินทรีย์ [9] อย่างไรก็ตามกระบวนการหมักด้วยวิธีการแบบเชิงกลและชีวภาพเพื่อทำปุ๋ยอินทรีย์มักมีการปนเปื้อนของโลหะหนัก และขยะอินทรีย์มีปริมาณความชื้นสูงประมาณร้อยละ 50 ถึง 60 [10] จึงทำให้การพลิกกลับกองเพื่อให้เกิดการหมักที่สมบูรณ์ใช้ระยะเวลานาน [11] และเสียพื้นที่ในการหมักขยะ รวมทั้งส่งกลิ่นเหม็น จึงไม่เป็นที่ยอมรับในการนำมาใช้งานจริง

เพื่อลดปริมาณความชื้นในการหมักขยะอินทรีย์ สามารถใช้วิธีการตากแห้ง (Solar drying) [12] ซึ่งเป็นอีกวิธีหนึ่งที่สะดวกและประหยัดค่าใช้จ่ายในด้านแหล่งพลังงานเชื้อเพลิง แต่ปัญหาที่พบคือปริมาณความร้อนจากความชื้นแสงอาทิตย์ไม่สม่ำเสมอตลอดทั้งวัน สภาพอากาศที่แตกต่างกันในแต่ละฤดูกาล การใช้พื้นที่มากขึ้นตามปริมาณขยะที่ต้องการทำให้แห้ง รวมถึงระยะเวลาการตากแห้งใช้เวลานาน กระบวนการในการตากแห้งจึงเป็นกระบวนการหนึ่งที่มีความสามารถในการลดความชื้นแต่ใช้ระยะเวลาในการหมักขยะอินทรีย์นาน ดังนั้นเพื่อควบคุมปริมาณความร้อนให้สม่ำเสมอจึงใช้วิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนมาแก้ไขในส่วนนี้ จากการศึกษาวิจัยการอบแห้งขยะด้วยวิธีจลนพลศาสตร์ของ Alaei Behnam และ Amir Chayan R [13] พบว่าความร้อนจากรังสีอินฟราเรดส่งผลต่อของอย่างมีนัยสำคัญ โดยรังสีอินฟราเรดนั้นมีประสิทธิภาพในการทำขยะแห้งเร็วขึ้น [14] เนื่องจากกระบวนการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดจากฮีต

เตอร์ ทำให้อัตราความชื้นลดลงอย่างรวดเร็วทำให้ระยะเวลาการอบแห้งสั้นลง รังสีอินฟราเรดจากฮีตเตอร์ไฟฟ้าสามารถแผ่รังสีทะลุผ่านเข้าไปภายในพื้นผิวภายในของวัสดุและผลิตภัณฑ์ต่างๆได้ โดยไม่ทำให้ผิวผลิตภัณฑ์ไหม้ ซึ่งเกิดจากการถ่ายเทพลังงานจากคลื่นความร้อนไปยังโมเลกุลของน้ำภายในพื้นผิวของวัสดุนั้นๆ และทำให้เกิดความร้อนจากการสั่นของโมเลกุลน้ำ ก่อให้เกิดอุณหภูมิพื้นผิวภายในของวัสดุสูงขึ้น เมื่อเทียบกับอุณหภูมิที่ผิวชั้นนอก ทำให้เกิดการถ่ายโอนพลังงานความร้อนที่ส่งผลต่อการทำให้ความชื้นในพื้นผิววัสดุลดลงอย่างรวดเร็ว [15] หากแต่ฮีตเตอร์อินฟราเรดที่ใช้ก๊าซเป็นเชื้อเพลิงนั้น สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการซื้อก๊าซสูง เมื่อมีการอบแห้งขยะในปริมาณมาก การควบคุมความร้อนจึงไม่คงที่ ดังนั้นการอบแห้งด้วยฮีตเตอร์อินฟราเรดแบบไฟฟ้าจึงเป็นทางเลือกที่มีความเหมาะสม เนื่องจากสามารถควบคุมความร้อนให้คงที่ ใช้พื้นที่น้อยและเป็นที่แพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหารและผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ [16] ซึ่งขยะอินทรีย์ที่ผ่านการอบแห้งด้วยฮีตเตอร์อินฟราเรดแบบไฟฟ้า มักจะได้นำไปใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินหรือสามารถนำไปเผาแปรรูปเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ เช่น แปรรูปขยะอินทรีย์เป็นถ่านชีวภาพ (Biochar) [17] เนื่องจากขยะอินทรีย์มีความคุณสมบัติที่ได้เปรียบกว่าขยะชนิดอื่น คือมีองค์ประกอบของคาร์บอนเป็นหลักและแร่ธาตุอื่น ๆ เช่น ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส เป็นต้น ช่วยปรับปรุงคุณภาพของดิน [18] ดังนั้นหากเพิ่มความสามารถในการลดปริมาณความชื้นของขยะอินทรีย์ได้ จะทำให้สามารถนำไปใช้งานเร็วขึ้น และสามารถเก็บไว้คงรูปได้นาน อีกทั้งยังลดพื้นที่การจัดเก็บรวมทั้งการขนส่งได้อย่างสะดวกและเป็นที่ยอมรับ

จากคุณสมบัติที่ดีของฮีตเตอร์อินฟราเรดแบบไฟฟ้า ได้นำมาประยุกต์ในงานวิจัยนี้โดยการเพิ่มประสิทธิภาพด้วยการติดตั้งพัดลมเป่าอากาศ (Blower) เพื่อให้สามารถกระจายความร้อนได้ดี และศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการอบแห้งขยะอินทรีย์ที่มีความชื้นสูง จึงมีประโยชน์สำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมของขยะอินทรีย์และการออกแบบการทำงานของเตาอบที่มีขั้นตอนไม่ซับซ้อน ซึ่งใช้แบบจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้งแบบถาดในรูปแบบสมการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นตรง (Non-linear regression) จากแบบจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้งของ Newton [19], Page [20], Henderson and Pabis [21], Logarithmic [22], Two-term exponential [23] และ Wang and Singh [24] มาใช้วิเคราะห์เพื่อระบุความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการอบแห้งและอัตราส่วนความชื้นต่อเวลา

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาสมมูลมวลของขยะอินทรีย์จากกระบวนการกำจัดมูลฝอยชุมชนจากกระบวนการ MBT
2. ศึกษาคุณสมบัติการอบแห้งของขยะอินทรีย์ ด้วยแบบจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้งขยะอินทรีย์ โดยใช้สมการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นตรง (Non-linear regression)

วิธีการวิจัย

วัสดุและเครื่องมือวิเคราะห์

จากภาพที่ 1 ขยะอินทรีย์ (OFMSW) ซึ่งเป็นขยะมูลฝอยในขั้นตอนสุดท้ายจากกระบวนการกำจัดขยะด้วยวิธีเชิงกลและชีวภาพ (Mechanical Biological Waste Treatment, MBT) โดยเทศบาลเมืองร้อยเอ็ด จังหวัดร้อยเอ็ด ประเทศไทย แล้วจึงนำมาวิเคราะห์ปริมาณความชื้นด้วยวิธีการอบด้วยเครื่องอบ (Hot air oven method) ที่ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงด้วยมาตรฐาน Association of Official Analytical Chemists (AOAC) [25] ชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง ในการวิจัยนี้ใช้อุณหภูมิเป็นตัวแปรควบคุมโดยใช้อุณหภูมิที่ 70 100 และ 130 องศาเซลเซียส น้ำหนักทดสอบ 30 กิโลกรัมสำหรับแต่ละอุณหภูมิ วัดปริมาณความชื้นเริ่มต้นช่วงร้อยละ 65 ถึง 68 มาตรฐานเปียก ทำการทดลองอบแห้ง โดยใช้เตาอบลมร้อนไฟฟ้าแบบถาด ลมร้อนไหลจากบนลงล่างความเร็วลมคงที่ 2 เมตรต่อวินาที ให้กำลัง 3 กิโลวัตต์ ขนาดหน้ากว้าง 60 ลึก 65 สูง 118 เซนติเมตร ถาด 6 ชั้น แต่ละชั้นห่างกัน 10 เซนติเมตร ดัง

ภาพที่ 2 ตรวจวัดความชื้นทุก ๆ 30 นาที ตลอดจนได้ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ซึ่งอยู่ในช่วงร้อยละ 15 ถึง 20 มาตรฐานเปียก



ภาพที่ 1 ขยะอินทรีย์ (OFMSW)



ภาพที่ 2 เตาอบลมร้อนฮีตเตอร์ไฟฟ้าแบบถาด

การวิเคราะห์ผลงานพลศาสตร์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการศึกษาพลศาสตร์การอบแห้งมูลฝอยชุมชนนี้ใช้กระบวนการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง โดยสมการที่ใช้ในการวัดค่าความชื้น (Moisture Content, MC) แสดงปริมาณความชื้นมาตรฐานเปียก จากการทดลอง และอัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio, MR) แสดงให้เห็นถึงอัตราส่วนความชื้นที่เหลืออยู่เพื่อใช้ในการวิเคราะห์สมการการอบแห้งแสดงได้ดังสมการที่ (1) และ (2) [26-27] โดยปริมาณความชื้นที่เก็บวัดได้จะถูกนำไปคำนวณในสมการของอัตราส่วนความชื้น แสดงในตารางที่ 1 แสดงสมการแบบจำลองทั้ง 6 สมการ โดยใช้ข้อมูลจากการทดลองมาวิเคราะห์ด้วยสมการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นตรง (Non-linear regression) รูปแบบวิธี Levenberg-Marquardt algorithm [27] ด้วยโปรแกรม Origin® 8.0 ในการประเมินตัวแปรแต่ละแบบจำลอง โดยจะใช้ตัวบ่งชี้ที่สำคัญได้แก่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) ใช้ในการประมาณค่าว่ามีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ได้หรือไม่หรือมาก โดยเกณฑ์เกณฑ์ที่ยอมรับได้จะอยู่ในช่วงระหว่าง 0 ถึง 1 โดยที่แบบจำลองหนึ่งจะถือว่าดีกว่าอีกแบบหนึ่งหากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงกว่า [28] ถัดมาคือค่าสถิติไคสแควร์ (Reduced Chi-square, χ^2) คือค่าที่ใช้ทดสอบสมมติฐาน เป็นการตรวจสอบสมการตามสมมติฐานกับข้อมูลทดลอง โดยเกณฑ์ที่ยอมรับได้คือค่าใกล้เคียง 0 หรือยิ่งค่าต่ำสมการนั้นยิ่งมีความกลมกลืนระหว่างสมมติฐานกับข้อมูลทดลองโดยสมบูรณ์แบบ [29] และรากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (Root Mean Square Error, RMSE) คือที่ใช้แสดงค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างสมมติฐานกับข้อมูลทดลอง โดยมีเกณฑ์ที่ยอมรับได้คือค่าใกล้เคียง 0 [30] แสดงได้ดังสมการที่ (3)-(5)

$$MC = \frac{w_1 - w_2}{w_1} \times 100 \quad (1)$$

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (2)$$

โดยที่ w_1 คือน้ำหนักก่อนอบ (กรัม), w_2 คือน้ำหนักหลังอบ (กรัม), M_0 คือปริมาณความชื้นเริ่มต้น และ M_t คือปริมาณความชื้น ณ เวลาใดๆ

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (\bar{MR}_{pre} - MR_{exp,i})^2} \quad (3)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N-Z} \quad (4)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

โดยที่ $MR_{exp,i}$ และ $MR_{pre,i}$ คือ ข้อมูลอัตราส่วนความชื้นค่าจากการทดลอง และค่าจากการทำนายที่ค่า i ใดๆ ตามลำดับ ค่า N คือจำนวนข้อมูลทั้งหมด และค่า Z คือจำนวนพารามิเตอร์ในสมการ

ตารางที่ 1 ตารางแสดงสมการจลนศาสตร์การอบแห้ง

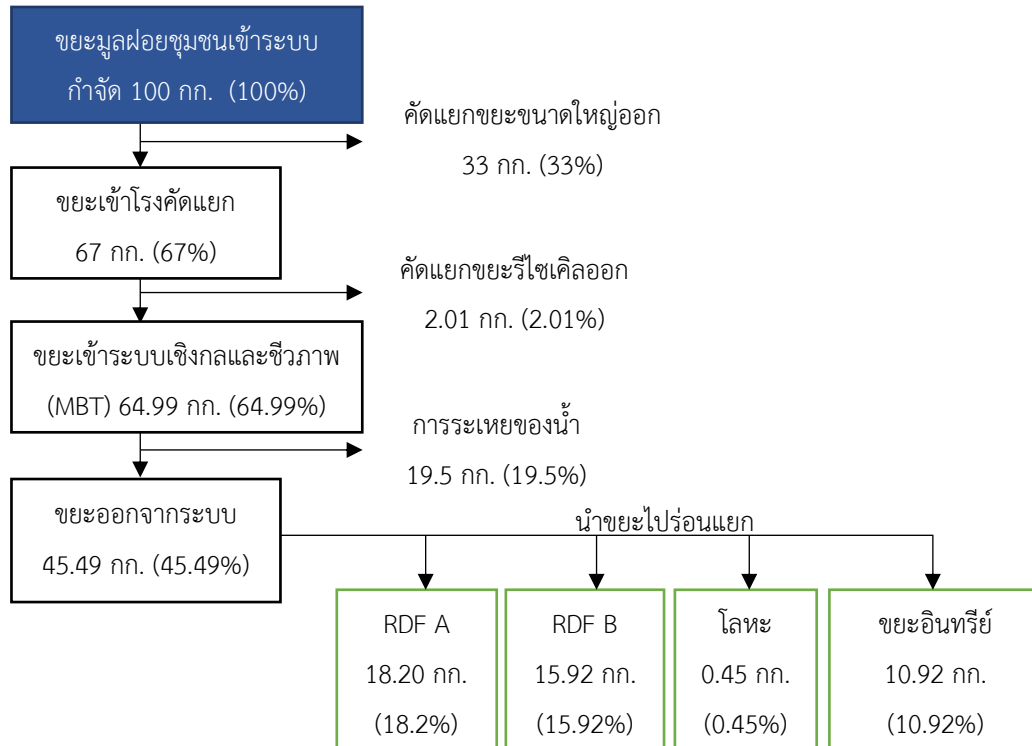
ชื่อแบบจำลอง	สมการแบบจำลอง	ที่มา
Newton	$MR = \exp(-kt)$	[19, 20]
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	[20, 31]
Henderson and Pabis	$MR = a \cdot \exp(-kt)$	[32, 33]
Logarithmic	$MR = a \cdot \exp(-kt) + c$	[29]
Two-term exponentials	$MR = a \cdot \exp(-kt) + (1-a) \cdot \exp(-kat)$	[34]
Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	[32]

หมายเหตุ a b c n และ k คือค่าคงตัวของสมการการอบแห้ง

ผลการวิจัย

กระบวนการ และสมมูลมวลของมูลฝอยชุมชนจากกระบวนการกำจัดแบบ MBT

มูลฝอยชุมชนที่เข้ากระบวนการกำจัดมูลฝอยชุมชนแบบ MBT ทั้งหมดคิดเป็นปริมาณ 100 กิโลกรัม ขยะขนาดใหญ่ประเภทยางรถยนต์ สายไฟ หลอดไฟ คิดเป็น 33 กิโลกรัมจะถูกคัดแยกออกก่อน จากนั้นขยะที่เหลือจะเข้าโรงคัดแยก คิดเป็น 67 กิโลกรัม เปิดปากถุงคัดแยกขยะประเภทรีไซเคิลคิดเป็น 2.01 กิโลกรัม จากนั้นเข้าสู่ระบบ MBT 64.99 กิโลกรัม หลังหมักผ่านไป 26 วัน น้ำหนักขยะจึงลดเหลือ 45.49 กิโลกรัม ร่อนแยกได้เชื้อเพลิง RDF3 ขนาด 50 มม. ตามมาตรฐานของ ASTM E856-83 [35] แบ่งเป็น RDF A เป็นเชื้อเพลิงขยะคุณภาพสูง องค์ประกอบคือพลาสติก HDPE และ LDPE มีค่าเกณฑ์ความร้อนต่ำ (LHV) มากกว่า 46.3 เมกะจูลต่อกิโลกรัม คิดเป็น 18.2 กิโลกรัม และ RDF B เชื้อเพลิงขยะคุณภาพต่ำ มีองค์ประกอบคือพลาสติก PET ให้ค่าเกณฑ์ความร้อนต่ำ (LHV) มากกว่า 25.6 เมกะจูลต่อกิโลกรัม คิดเป็น 15.92 กิโลกรัม ในส่วนของโลหะที่แยกได้คิดเป็น 0.45 กิโลกรัม และได้ขยะอินทรีย์ คิดเป็น 10.92 กิโลกรัม โดยแผนภาพสมมูลมวลจะแสดงในภาพที่ 3 และภาพกระบวนการ MBT จะแสดงในภาพที่ 4



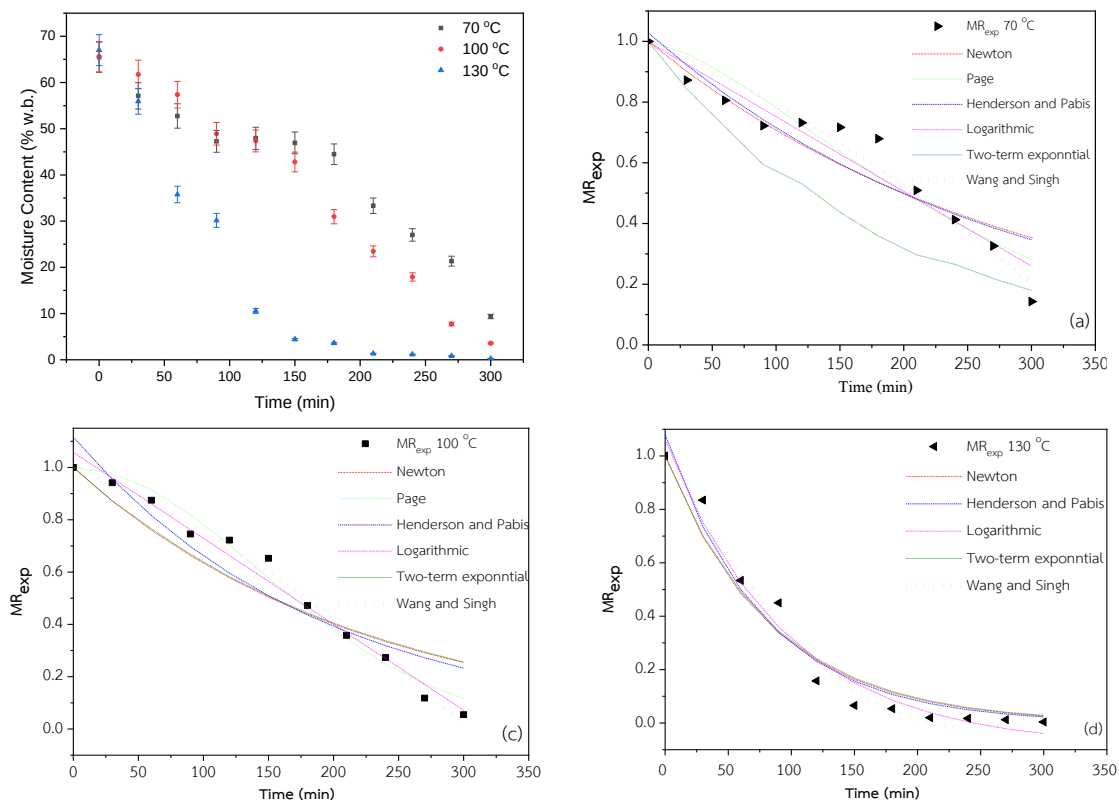
ภาพที่ 3 แผนภาพสมดุลมวลการกำจัดมูลฝอยชุมชนจากโรงกำจัดขยะแบบ MBT เทศบาลตำบลร้อยเอ็ด จังหวัดร้อยเอ็ด ประเทศไทย



ภาพที่ 4 ภาพกระบวนการกำจัดขยะแบบ MBT เทศบาลตำบลร้อยเอ็ด จังหวัดร้อยเอ็ด ประเทศไทย ลำดับจาก (ก) นำมูลฝอยชุมชนซึ่งน้ำหนัก (ข) เข้าโรงคัดแยก (ค) เข้าโรงสับย่อย และหมักจากนั้นนำไปร่อน (ง) แบ่งเป็น RDF และขยะอินทรีย์

จลนพลศาสตร์การอบแห้งขยะอินทรีย์ และสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากภาพที่ 5(a) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา จากการทดลองพบว่าเวลาที่เหมาะสมกับการใช้งานจริงสำหรับอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสอยู่ในช่วงเวลา 270 ถึง 300 นาที ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสอยู่ในช่วงเวลา 210 ถึง 270 นาที และที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียสอยู่ในช่วงเวลา 90-120 นาที ภาพที่ 5(b c และ d) แสดงอัตราส่วนความชื้นจากการทดลองเปรียบเทียบกับอัตราส่วนความชื้นจำลองขึ้นจากทุกสมการแบบจำลอง พบว่าในช่วงต้นของการทดลอง อัตราส่วนความชื้นการอบแห้งขยะอินทรีย์ในช่วงแรกจะลดลงเร็วแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล เนื่องจากมีปริมาณความชื้นในมูลฝอยอินทรีย์สูง และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิลมร้อนยังทำให้เกิดการลดลงของอัตราส่วนความชื้นอย่างรวดเร็วยิ่งขึ้น [27] และเมื่ออบแห้งนานขึ้นความชื้นในขยะอินทรีย์ที่น้อยลง จะเกิดการถ่ายเทมวลน้ำจากข้างในวัสดุไปยังพื้นผิวข้าง เป็นเหตุให้อัตราส่วนความชื้นลดลงช้า [36] ตารางที่ 2 แสดงสมการจำลองที่เหมาะสม โดยวิเคราะห์ได้จากค่า R^2 ที่สูงสุด χ^2 และ RMSE ที่ต่ำสุด พบว่าสมการจำลองที่เหมาะสมที่สุดคือ Wang and Singh สำหรับทุกอุณหภูมิที่จำลอง ซึ่งสมการแบบจำลอง Wang and Singh แสดงค่า R^2 สูงสุดในช่วง 9.448-9.918 ค่า χ^2 มีค่าต่ำในช่วง 0.0010-0.0039 และ RMSE มีค่าต่ำสุดในช่วง 0.0316-0.0629 จากข้อมูลจลนพลศาสตร์จากการทดลองและข้อมูลจำลองจลนพลศาสตร์ที่เหมาะสม โดยในภาพที่ 6 แสดงผลการจำลองจากสมการแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดช่วงอุณหภูมิ 70 ถึง 130 องศาเซลเซียส โดยพบว่ามีค่า R^2 เท่ากับ 0.9915

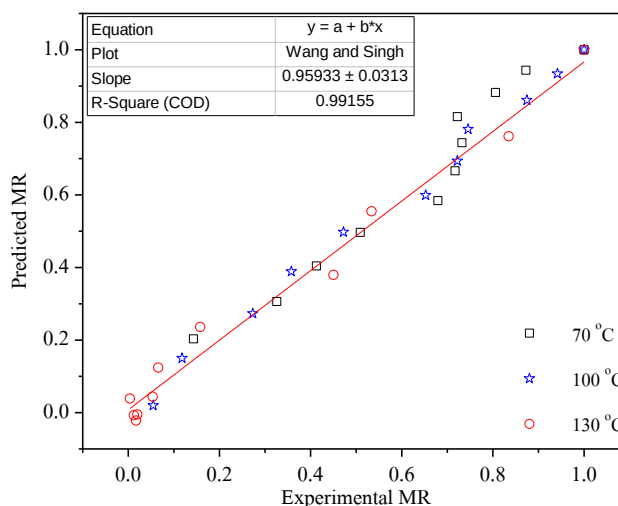


ภาพที่ 5(a) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา (b c และ d) แสดงอัตราส่วนความชื้นของมูลฝอยอบแห้งเปรียบเทียบกับอัตราส่วนความชื้นจากแบบจำลองที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 70 100 และ 130 องศาเซลเซียส



ตารางที่ 2 ตารางแสดงผลสมการแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์

อุณหภูมิ	แบบจำลอง	สมการ	R ²	χ ²	RMSE
70 องศาเซลเซียส	Newton	$MR = \exp(-0.0035 \cdot t)$	0.8582	0.0092	0.0958
	Page	$MR = \exp(-0.0002 \cdot t^{1.4916})$	0.8983	0.0073	0.0855
	Henderson and Pabis	$MR = 1.0277 \cdot \exp(-0.0036 \cdot t)$	0.8609	0.0100	0.0999
	Logarithmic	$MR = 521.9230 \cdot \exp(-0.000005 \cdot t) - 520.9245$	0.9284	0.0058	0.0761
	Two term exponentials	$MR = -3 \cdot 10^{-14} \cdot \exp(-0.0057 \cdot t) + (1 + 3 \cdot 10^{-14}) \cdot \exp(0.0057 \cdot 3 \cdot 10^{-14} \cdot t)$	0.4973	0.0361	0.1901
	Wang and Singh	$MR = 1 - 0.0018 \cdot t - 2.8891 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$	0.9448	0.0039	0.0629
100 องศาเซลเซียส	Newton	$MR = \exp(-0.0046 \cdot t)$	0.8689	0.0143	0.1195
	Page	$MR = \exp(-0.2707 \cdot 10^{-4} \cdot t^{1.9790})$	0.9798	0.0024	0.0494
	Henderson and Pabis	$MR = 1.1164 \cdot \exp(-0.0052 \cdot t)$	0.8946	0.0128	0.1129
	Logarithmic	$MR = 483.7844 \cdot \exp(-0.6803 \cdot 10^{-5} \cdot t) - 482.7263$	0.9830	0.0023	0.0481
	Two term exponentials	$MR = 3.905 \cdot 10^{-13} \cdot \exp(-0.0045 \cdot t) + (1 - 3.905 \cdot 10^{-13}) \cdot \exp(-0.0045 \cdot 3.905 \cdot 10^{-13} \cdot t)$	0.8705	0.0157	0.1252
	Wang and Singh	$MR = 1 - 0.0021 \cdot t - 3.973 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$	0.9918	0.0010	0.0316
130 องศาเซลเซียส	Newton	$MR = \exp(-0.0121 \cdot t)$	0.9547	0.0060	0.0772
	Henderson and Pabis	$MR = 1.0795 \cdot \exp(-0.0129 \cdot t)$	0.9612	0.0057	0.0753
	Logarithmic	$MR = 1.1495 \cdot \exp(-0.0104 \cdot t) - 0.0900$	0.9717	0.0047	0.0682
	Two term exponentials	$MR = 1.8542 \cdot 10^{-13} \cdot \exp(-0.0119 \cdot t) + (1 - 1.8542 \cdot 10^{-13}) \cdot \exp(-0.0119 \cdot 1.8542 \cdot 10^{-13} \cdot t)$	0.9549	0.0066	0.0812
	Wang and Singh	$MR = 1 - 0.0085 \cdot t - 1.7566 \cdot 10^{-5} \cdot t^2$	0.9817	0.0027	0.0518



ภาพที่ 6 แสดงอัตราส่วนความชื้นขยะอินทรีย์อบแห้งเปรียบเทียบกับอัตราส่วนความชื้นขยะอินทรีย์จากสมการแบบจำลอง Wang and Singh

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

กระบวนการกำจัดมูลฝอยชุมชนด้วยวิธีแบบเชิงกลและชีวภาพ (MBT) แยกมูลฝอยชุมชนออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ขยะเชื้อเพลิง (RDF) และขยะอินทรีย์ (OFMSW) ขยะอินทรีย์ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 10.92 จะถูกนำไปหมักเป็นปุ๋ย หากแต่การหมักนั้นต้องใช้ระยะเวลายาวนาน 2 ถึง 4 เดือน ซึ่งระหว่างหมักต้องทำการกลับกอง ทำให้พบปัญหาด้านกลิ่นเหม็น และโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำชะขยะ การนำไปใช้งานจริงจึงเป็นสิ่งที่ยากต่อการยอมรับ จึงเป็นสิ่งท้าทายในการจัดการขยะอินทรีย์จากมูลฝอยชุมชนให้เป็นที่ยอมรับในการนำไปใช้งาน งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาอบแห้งขยะอินทรีย์ พบว่าอุณหภูมิส่งผลต่ออัตราส่วนความชื้นโดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูง อัตราส่วนความชื้นการอบแห้งจะลด ทำให้ใช้เวลาอบแห้งน้อยลง

จากสมการจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้งทั้ง 6 แบบ พบว่าแบบจำลองของ Wang and Singh เหมาะสมทั้ง 3 อุณหภูมิ ได้แก่ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ได้สมการ $MR = 1 - 0.0018 \cdot t - 2.8891 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$ มีความเหมาะสมสุดจากค่า R^2 สูงสุดคือ 0.9448 ค่า χ^2 ต่ำสุดคือ 0.0039 และค่า RMSE ต่ำสุดคือ 0.0629 ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ได้สมการ $MR = 1 - 0.0021 \cdot t - 3.973 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$ มีความเหมาะสมสุดจากค่า R^2 สูงสุดคือ 0.9918 ค่า χ^2 ต่ำสุดคือ 0.0010 และค่า RMSE ต่ำสุดคือ 0.0316 และที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ได้สมการ $MR = 1 - 0.0085 \cdot t - 1.7566 \cdot 10^{-5} \cdot t^2$ มีความเหมาะสมสุดจากค่า R^2 สูงสุดคือ 0.9817 ค่า χ^2 ต่ำสุดคือ 0.0027 และค่า RMSE ต่ำสุดคือ 0.0518 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบทั้ง 3 อุณหภูมิ (70 100 และ 130 องศาเซลเซียส) พบว่าค่า R^2 มีค่า 0.9915 อธิบายได้ว่าแบบจำลองนี้มีความสามารถในการอธิบายจลนพลศาสตร์การอบแห้งของขยะอินทรีย์ที่ช่วงอุณหภูมิ 70 ถึง 130 องศาเซลเซียส ขยะอินทรีย์เมื่ออยู่ในรูปสารอินทรีย์อบแห้ง มีประโยชน์สำหรับการขนส่งเคลื่อนย้าย และเก็บรักษาได้ยาวนาน การนำไปแปรรูปเป็นถ่านชีวภาพเป็นอีกทางเลือกซึ่งช่วยเพิ่มมูลค่าของขยะอินทรีย์ต่อไปได้

การศึกษานี้ใช้ตัวอย่างเพียงชนิดเดียว เป็นขยะอินทรีย์ที่ผ่านกระบวนการ MBT ซึ่งผ่านการร่อนคัดแยกขนาดของขยะผ่านตะแกรงร่อนขนาดเล็กลงกว่า 6 มม. และเพื่อให้ได้ความหลากหลายเชิงองค์ประกอบของขยะอินทรีย์ จึงทำการเก็บตัวอย่างขยะอินทรีย์ ด้วยกระบวนการแบ่งขยะออกเป็น 4 ส่วน (Quartering method) งานวิจัยนี้มีข้อจำกัดคือ ด้านแหล่งพลังงานความร้อน เนื่องจากการอบแห้งต้องใช้อุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลานาน การอบแห้งที่ปริมาณมากจึงอาจไม่เหมาะสมสำหรับใช้งานปริมาณมาก ควรที่จะได้รับแหล่งพลังงานความร้อนฟรี (Exhaust air) จากความร้อนปลายปล่อย

อุณหภูมิต่ำกว่าโรงงานไฟฟ้าหรือ โรงไฟฟ้าชีวมวล ซึ่งส่วนใหญ่มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 66-121 องศาเซลเซียส จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ การศึกษานี้มีระบบเตาอบลมร้อนที่มีการควบคุมอุณหภูมิและระบบการกระจายลมร้อนได้ดี อย่างไรก็ตามการนำ เมื่อนำสมการนี้ไปใช้ในเตาอบขนาดใหญ่ ที่มีฉนวนกันความร้อน แหล่งพลังงานความร้อนจากภายนอก เช่น LPG และไฟฟ้ามาใช้งานจึงเป็นเรื่องสำคัญที่ต้องพิจารณาเนื่องจากมีความเสี่ยงต่อการอบแห้งปริมาณมาก จำเป็นต้องออกแบบเตาอบให้มีประสิทธิภาพ โดยการควบคุมอุณหภูมิ และการไหลของอากาศได้ดีถึงจะใช้สมการนี้ได้เหมาะสม

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และ
ทุนบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น

เอกสารอ้างอิง

1. Sirisopana S. Municipal Solid Waste, Sanitary Landfill and Remediation. SWU Sci. J. 2006; 22(2): 104-121. Thai.
2. Pollution Control Department. Thailand State of Pollution Report 2019. 2019. Ministry of Natural Resources and Environment; Style Creative House Co., Ltd. Thai.
3. Rangseesuriyachai T, Saricheewin K. Study of Organic Waste Composting with Aeration and Use of Crude Enzyme. Journal of Engineering, RMUTT. 2017; 2(16): 1-12. Thai.
4. Shahbaz M, Ammar M, Zou D, Korai RM, Li X. An Insight into the Anaerobic Co-digestion of Municipal Solid Waste and Food Waste: Influence of Co-substrate Mixture Ratio and Substrate to Inoculum Ratio on Biogas Production. Applied Biochemistry and Biotechnology. 2019; 187(4): 1356-1370.
5. Powell JT, Chertow MR. Quantity, Components, and Value of Waste Materials Landfilled in the United States. Journal of Industrial Ecology. 2019; 23(2): 466-479.
6. Menikpura N, Sang-Arun J, Bengtsson M. Mechanical Biological Treatment as a Solution for Mitigating Greenhouse Gas Emissions from Landfills in Thailand, in The ISWA World Solid Waste Congress 2012. 2012.
7. Center of Excellent in biomass. Integrated Solid Waste Management (ISWM). 2021. Thai.
8. Alvarez C, Fdez-Güelfo LA, Aguilar M, Romero Garcia L. Thermochemical Pretreatments of Organic Fraction of Municipal Solid Waste from a Mechanical-Biological Treatment Plant. International Journal of Molecular Sciences. 2015; 16: 3769-3782.
9. Patarasiriwong V. Application of earthworms on decontamination of hazardous residues in soil amendment derived from municipal solid waste. 2019. Department of environmental quality promotion. Thai.
10. Weerasak T, Sanongraj S. Potential of Producing Refuse Derived Fuel (RDF) from Municipal Solid Waste at Rajamangala University of Technology Isan Surin Campus. Applied Environmental Research. 2015; 37(2): 85-91. Thai.



11. Padungthon S. Municipal Solid Waste Engineering. ed. 1. Vol. 1. 2018. Khon Kean; KKU printing house. p. 392. Thai.
12. Rada EC, Ragazzi M, Villotti S, Torretta V. Sewage sludge drying by energy recovery from OFMSW composting: Preliminary feasibility evaluation. *Waste Management*. 2014; 34(5): 859-866.
13. Alaei B, Amiri Chayjan R. Drying Characteristics of Pomegranate Arils Under Near Infrared-Vacuum Conditions. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2015; 39(5): 469-479.
14. Villalobos VW, Bracamonte OH, Naccha JR, Zare VN, Rojas C, Angulo JV. Moisture prediction of sweet potato-quinoa-kiwicha flakes dried by rotary drum dryer using artificial intelligence. *Scientia Agropecuaria*. 2018; 9: 83-91.
15. Zabaniotou A. Simulation of forestry biomass drying in a rotary dryer. *Drying Technology*. 2000; 18: 1415-1431.
16. Iguez A, Esnoz A, Martínez G, López-Gómez A, Vírveda P. Mathematical modeling and simulation for the drying process of vegetable wholesale by-products in a rotary dryer. *Journal of Food Engineering*. 2003; 59: 151-160.
17. Liu G, Xie M, Zhang S. Effect of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW)-based biochar on organic carbon mineralization in a dry land soil. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2017; 19(1): 473-482.
18. Głab T, Palmowska J, Zaleski T, Gondek K. Effect of biochar application on soil hydrological properties and physical quality of sandy soil. *Geoderma*. 2016; 281: 11-20.
19. Lewis WK. The Rate of Drying of Solid Materials. *Journal of Industrial & Engineering Chemistry*. 1921; 13(5): 427-432.
20. Bruce DM. Exposed-layer barley drying: Three models fitted to new data up to 150°C. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1985; 32(4): 337-348.
21. Henderson SM. PS. Grain drying theory I. Temperature effect on drying coefficient. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1961; 6(3): 169-174.
22. Yagcioglu A. DA, Cagatay F. in *Proceedings of the 7th International Congress on Agricultural Mechanization and Energy*. 1999. Adana, Turkey.
23. Henderson SM. PS. Progress in the thin layer drying equation. *Transaction of the ASAE* 17. 1978: 1167-1172.
24. Wang C, Singh R. USE OF VARIABLE EQUILIBRIUM MOISTURE CONTENT IN MODELING RICE DRYING. 1978.
25. Association of Official Analytical Chemists, Helrich K. Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists. 1990. Arlington, VA; The Association.
26. Mazutti MA, Zabot G, Boni G, Skovronski A, de Oliveira D, Di Luccio M, Oliveira JV, Rodrigues MI, Treichel H, Maugeri F. Mathematical modeling of thin-layer drying of fermented and non-fermented sugarcane bagasse. *Biomass and Bioenergy*. 2010; 34(5): 780-786.



27. Kayran S, Doymaz İ. Infrared Drying and Effective Moisture Diffusivity of Apricot Halves: Influence of Pretreatment and Infrared Power. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2017; 41(2).
28. Aviara NA, Igbeke JC. Modeling for Drying of Thin Layer of Native Cassava Starch in Tray Dryer. *Journal of Biosystems Engineering*. 2016; 41(4): 342-356.
29. Yaldiz O, Ertekin C, Uzun HI. Mathematical modeling of thin layer solar drying of Sultana grapes. *Energy*. 2001; 26: 457-465.
30. Ertekin C, Yaldiz O. Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of Food Engineering*. 2004; 63: 349-359.
31. Tarhan S, Telci İ, Tuncay MT, Polatci H. Product quality and energy consumption when drying peppermint by rotary drum dryer. *Industrial Crops and Products*. 2010; 32(3): 420-427.
32. Wang Z, Sun J, Liao X, Chen F, Zhao G, Wu J, Hu X. Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace. *Food Research International*. 2007; 40(1): 39-46.
33. Boyce DS. Grain moisture and temperature changes with position and time during through drying. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1965; 10(4): 333-341.
34. Akpınar EK, Bicer Y, Yıldız C. Thin layer drying of red pepper. *Journal of Food Engineering*. 2003; 59(1): 99-104.
35. Gug J, Cacciola D, Sobkowicz M. Processing and properties of a solid energy fuel from municipal solid waste (MSW) and recycled plastics. *Waste management (New York, N.Y.)*. 2014; 35.
36. Yodkaew S, Tirawanichakul Y, Tirawanichakul S. Drying Kinetics of Chicken Meat Slice by Infrared Radiative Heat Source and Vacuum Technique. *Princess of Naradhiwas University Journal*. 2017; 9(3): 162-175. Thai.