

การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งปุ๋ยแบบหมุนโดยใช้ความร้อนทิ้งจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ร่วมกับก๊าซชีวภาพเป็นแหล่งความร้อนในฟาร์มสุกร

Design and Construction of Rotary Dryer for Fertilizer Drying Using Waste Heat from Electrical Generator and Biogas as a Heat Source in a Pig Farm

กฤษณา นามวงษ์¹, รัชพล สันติวรารักษ์^{2*} และ วศกร ตริเตช³

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

ติดต่อ: โทรศัพท์: 043-202845, โทรสาร: 043-202849

E-mail: krissada_nam@hotmail.com¹, ratchaphon@kku.ac.th², wasakron@live.kku.ac.th³

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อทำการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งปุ๋ยแบบหมุนโดยใช้ความร้อนทิ้งจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าร่วมกับก๊าซชีวภาพ โดยได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งปุ๋ยแบบหมุนโดยใช้ความร้อนทิ้งจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ร่วมกับการใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิง จากการออกแบบจะได้เครื่องอบแห้งปุ๋ยแบบหมุนที่กำลังการผลิต 1 ตันต่อวัน มีขนาดความยาวของท่ออบแห้ง 10 เมตร จำนวน 2 ท่อ โดยแบ่งเป็นท่ออบร้อนและท่ออบเย็น เส้นผ่านศูนย์กลางตัวท่ออบ 0.5 เมตร ใช้มอเตอร์ในการขับเคลื่อนท่ออบแห้งขนาด 5 แรงม้า จำนวน 2 ตัว และใช้โบลเวอร์สำหรับดูดลมร้อนและลมเย็นขนาด 2 แรงม้า จำนวน 2 ตัว เครื่องอบแห้งที่ได้ทำการออกแบบมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนอยู่ที่ 66 % จากการคำนวณเครื่องอบแห้งปุ๋ยดังกล่าวพบว่าสามารถใช้งานได้จริงได้ค่าทดสอบที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้คำนวณไว้

คำหลัก: เครื่องอบแห้งแบบหมุน, เครื่องกำเนิดไฟฟ้า, ความร้อนทิ้ง, ปุ๋ย

Abstract

This research were studied to design and construct of rotary fertilizer dryer machine by using waste heat from electric generator, cooperated with biogas. The rotary dryer were designed and constructed by using a waste heat from electric generator at the temperature of 400°C , cooperated with biogas fuel. The designed capacity of rotary fertilizer dryer was 1 ton per day. A couple drying pipes can be divided to hot dryer pipe and cold dryer pipe, it had a length of 10 meter and 0.5 meter of diameter. The power transmission of couple drying pipes and couple blowers were selected to be 5 Hp and 2 Hp electric motor, respectively. The designed thermal efficiency of the rotary fertilizer dryer was 66%. The designed calculation of thermal efficiency is close to that obtained from the experiment.

Keywords: Rotary dryer, Electrical generator, Waste heat, Fertilizer

1. บทนำ

ปัจจุบันในฟาร์มเลี้ยงสุกรขนาดใหญ่ได้มีระบบผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และนอกจากนี้ยังมีระบบการผลิตปุ๋ยอินทรีย์ที่ได้จากกากตะกอนของบ่อหมักก๊าซชีวภาพ โดยกระบวนการผลิตปุ๋ยอินทรีย์เริ่มต้นจากการนำแม่ปุ๋ยซึ่งเป็นวัตถุดิบตั้งต้นชนิดต่างๆ มาผสมตามสูตรของปุ๋ยชนิดต่างๆ ในถังผสมปุ๋ย เมื่อผสมแม่ปุ๋ยให้เข้ากันตามสูตรแล้วจึงลำเลียงต่อไปยังงานปั้นปุ๋ยเพื่อปั้นเป็นเม็ด กระบวนการนี้ จะมีการฉีดละอองน้ำลงไปเพื่อให้แม่ปุ๋ย ซึ่งมีลักษณะเป็นผงจับตัวกันเป็นเม็ดปุ๋ย [1]

และกระบวนการสุดท้าย คือ กระบวนการอบแห้งปุ๋ยเพื่อลดความชื้นในเม็ดปุ๋ยให้อยู่ในช่วงระหว่าง 10-12%wt เพื่อให้ง่ายต่อการบรรจุภัณฑ์

โดยปัจจุบันได้มีเทคโนโลยีในการอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบหมุน ดังนี้ งานวิจัยของ M.H. Lisboa et al. [2] ได้ทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งปุ๋ยแบบหมุนแบบ roto-fluidized กับเครื่องอบแห้งแบบหมุนแบบดั้งเดิมโดยใช้เม็ดปุ๋ยเป็นวัสดุในการทดลอง งานวิจัยของ E.B. Arruda et al. [3] ได้ทำการศึกษารทดลองและจำลองแบบทดลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งปุ๋ยแบบหมุนโดยได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างการทดลองและการจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้ฮีตเตอร์ในการให้ความร้อน งานวิจัยของ N.J. Fernandes et al. [4] ได้ทำการศึกษากลไกการเคลื่อนที่ของอากาศและทิศทางการอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบหมุนที่ใช้ในอุตสาหกรรมการอบปุ๋ย ผลการทดลองคือ ที่มุม 125 องศา จะมีการกระจายตัวของเม็ดปุ๋ยดีที่สุด งานวิจัยของ ไพบุรย์ โรจน์วิบูลย์ชัย [5] ได้ทำการศึกษารอบแห้งข้าวโพดด้วยเครื่องอบแห้งแบบหมุนและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และแนวทางการอบแห้ง เพื่อหาเงื่อนไขการอบแห้งที่เหมาะสม ผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนข้าวโพด อัตราการหมุนหรือมุมเอียงของตัวถังทรงกระบอก หรือความเร็วลมเวลาที่ผลิตภัณฑ์ค้างอยู่ในถัง จะมีค่าลดลง เวลาที่ผลิตภัณฑ์ค้างอยู่ในถังของเครื่องอบแห้งแบบหมุนจะขึ้นอยู่กับอัตราการป้อนข้าวโพด อัตราการหมุน มุมเอียงของตัวถังทรงกระบอก และความเร็วลม การสิ้นเปลืองพลังงานของเครื่องอบแห้งแบบหมุนขึ้นอยู่กับมวลที่ค้างอยู่และความชื้นของข้าวโพด ในการอบแห้งข้าวโพดด้วยเครื่องอบแห้งแบบหมุนควรใช้อุณหภูมิของกระแสอากาศ

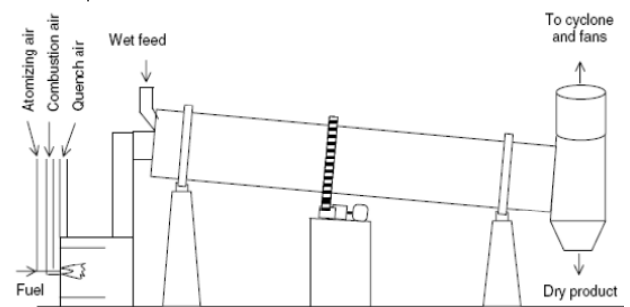
ค่อนข้างสูงและไม่ควรอบจนผลิตภัณฑ์มีความชื้นต่ำเกินไป

ด้วยเหตุนี้คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดการนำความร้อนทิ้งจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามาใช้ในการอบแห้งปุ๋ยร่วมกับการใช้ก๊าซชีวภาพ เพื่อเป็นการใช้ประโยชน์จากก๊าซชีวภาพให้ได้อย่างคุ้มค่าและมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้การนำความร้อนทิ้งมาใช้ในการอบแห้งปุ๋ยจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้อีกด้วย ดังนั้นจึงได้จัดทำการศึกษาเพื่อออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งปุ๋ยแบบหมุนโดยใช้ความร้อนทิ้งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าร่วมกับก๊าซชีวภาพขึ้น ซึ่งงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาถึงความสามารถในการอบแห้งปุ๋ย พลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง ต้นทุนในการอบแห้ง สภาพการทำงานที่เหมาะสม และความคุ้มค่าในการลงทุนสร้างเครื่องอบแห้ง ทั้งนี้เพื่อใช้เป็นแนวทางในการลงทุนเพื่อขยายผลในเชิงธุรกิจของอุตสาหกรรมอบแห้งปุ๋ยต่อไป

2. หลักการและทฤษฎี

2.1 เครื่องอบแห้งแบบหมุน

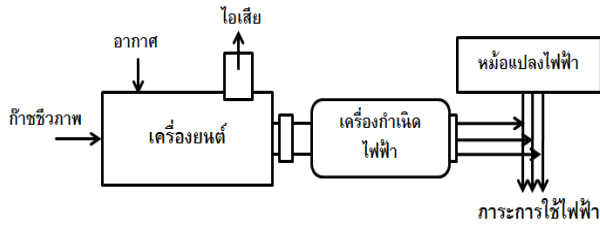
โครงสร้างหลักของเครื่องอบแห้งแบบหมุน ประกอบด้วยท่อทรงกระบอกหมุนทำมุมเอียงที่เหมาะสมกับแนวระดับเพื่อให้เม็ดปุ๋ยเกิดการเคลื่อนที่ เม็ดปุ๋ยที่ต้องการอบแห้งจะถูกป้อนเข้าทางปลายข้างหนึ่งของท่อทรงกระบอกซึ่งเม็ดปุ๋ยจะถูกทำให้แห้งโดยการสัมผัสกับลมร้อนที่ไหลผ่านท่อทรงกระบอก หรือโดยการสัมผัสกับผิวท่อทรงกระบอกที่มีความร้อนในขณะที่เม็ดปุ๋ยเคลื่อนที่ไปตามมุมเอียงของท่อทรงกระบอก [6]



รูปที่ 1 เครื่องอบแห้งแบบหมุน

2.2 เครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าโดยใช้ก๊าซชีวภาพ

ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพประกอบด้วยเครื่องยนต์สันดาปภายใน เพลาส่งกำลัง ชุดระบายความร้อน และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 เครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าโดยใช้ก๊าซชีวภาพ

การทำงานภายในของเครื่องยนต์ นอกจากจะให้เกิดกำลังในการหมุนเพลาเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าแล้ว ไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ภายในที่มีอุณหภูมิสูงจะถูกปล่อยทิ้งสู่บรรยากาศ โดยความร้อนในส่วนนี้จะสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการอบแห้งปุยได้ [7]

2.3 การออกแบบเครื่องอบแห้งแบบหมุน

2.3.1 จำนวนรอบของการหมุน [6]

$$ND_T = 7 \sim 12 \text{ m} / \text{min} \quad (1)$$

โดยที่

N = จำนวนรอบ (RPM)

D_T = เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทรงกระบอก (m)

2.3.2 อัตราการไหลเชิงมวลของลมร้อนในท่อทรงกระบอก ($\text{kg gas} / \text{m}^2 \cdot \text{hr}$) [8]

$$G' = \frac{G_m}{A} \quad (2)$$

$$G_m = \rho VA \quad (3)$$

โดยที่

V = ความเร็วไอเสีย (m/s)

ρ = ความหนาแน่นไอเสีย (kg / m^3)

A = พื้นที่หน้าตัดท่อทรงกระบอก (m^2)

2.3.3 จำนวนครีบภายในท่ออบแห้ง (n_f)

Friedman and Marshall ได้เสนอวิธีการหาจำนวนครีบภายในท่ออบแห้ง ดังนี้ [9]

$$\frac{n_f}{D_T} = 6.56 \sim 9.84 \quad (4)$$

2.3.4 อัตราส่วนของวัสดุที่อยู่ในเครื่อง (Hold up)

Key, 1995 ได้เสนอปริมาณ hold up ของผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมภายในถังอบแห้งอยู่ที่ระหว่าง 8 – 12 % ของปริมาตรท่ออบแห้ง [10]

2.3.5 มุมเอียงของตัวเครื่อง (S)

$$S = \frac{0.23L}{N^{0.9} D_T \left(\tau - \frac{2.0\beta LG_m}{F_a} \right)} \quad (5)$$

$$\beta = 5 \times 10^{-3} (D_p)^{-0.5} \quad (6)$$

โดยที่

τ = เวลาเฉลี่ยที่เม็ดปุยอยู่ในท่ออบแห้ง (min)

S = อัตราส่วนมุมเอียง (m/m ความยาวท่ออบแห้ง)

N = จำนวนรอบการหมุนของท่ออบแห้ง (RPM)

L = ความยาวท่ออบแห้ง (m)

D_T = เส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออบแห้ง (m)

G_m = อัตราการไหลเชิงมวลของไอเสียต่อ

พื้นที่หน้าตัด ($\text{kg} / \text{m}^2 \cdot \text{hr}$)

F_a = อัตราการป้อนเม็ดปุยต่อพื้นที่หน้าตัด

($\text{kg} / \text{m}^2 \cdot \text{hr}$)

D_p = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเม็ดปุย (mm)

β = ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากสมการที่ 6

2.3.6 กำลังขับเคลื่อนการหมุนของเครื่อง (P), HP [6]

$$P = D_T L \quad (7)$$

2.3.7 กำลังที่ต้องการใช้ของมอเตอร์โบเวอร์ (P_b), HP

$$P_b = (5 \sim 10) D_T^2 \quad (8)$$

2.3.8 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร

Miller et al. ได้เสนอสมการหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรดังต่อไปนี้ [8]

$$U_a = K_S G'^{0.46} \quad (9)$$

โดยที่ $4.3 \sim K_S \sim 6.4$

2.3.9 การคำนวณเวลาเฉลี่ยที่เม็ดปุ๋ยอยู่ในท่ออบแห้ง (Residence time: $\bar{\tau}$) [4]

$$\bar{\tau} = L \left(\frac{0.1962}{SN^{0.9}DT} \pm \frac{0.00036G_f}{G_s D_p^{0.5}} \right) \quad (10)$$

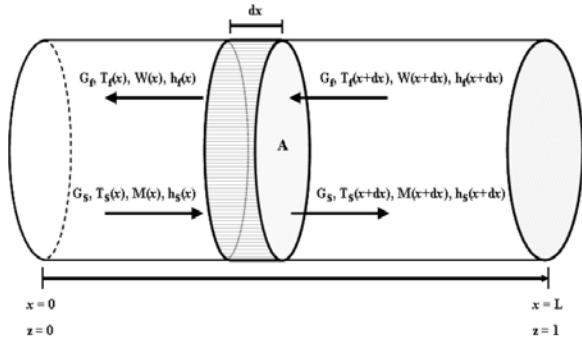
โดยที่

G_s = อัตราการไหลของเม็ดปุ๋ย (kg / min)

G_f = อัตราการไหลของไอเสีย (kg / min)

2.4 การถ่ายเทความร้อนภายในท่ออบแห้ง (Heat and Mass transfer)

2.4.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์



รูปที่ 3 ทิศทางการไหลแบบสวนทางของมวลภายในท่ออบแห้ง (Arruda, 2008)

การระบบสมการสมดุลมวลและสมดุลพลังงานระหว่างไอเสียและเม็ดปุ๋ย เราจะได้สัดส่วนระหว่างระนาบแกน X กับความยาวของท่ออบแห้ง (L) ดังต่อไปนี้

$$\frac{dW}{dz} = - \frac{R_w H^*}{G_f} \quad (11)$$

$$\frac{dM}{dz} = - \frac{R_w H^*}{G_s} \quad (12)$$

$$\frac{dT_f}{dz} = \frac{\left[\begin{matrix} U_{va}V(T_f - T_s) \\ + R_w H^* (\lambda + C_{pv}T_f) \\ + U_p \pi DL(T_f - T_{amb}) \end{matrix} \right]}{G_f (C_{pf} + WC_{pv})} \quad (13)$$

$$\frac{dT_s}{dz} = \frac{\left[\begin{matrix} U_{va}V(T_f - T_s) + R_w H^* C_{pl}T_s \\ - R_w H^* [\lambda + C_{pv}(T_f - T_s)] \end{matrix} \right]}{G_s (C_{ps} + MC_{pl})} \quad (14)$$

จากระบบสมการเชิงอนุพันธ์ข้างต้น เราจะกำหนดค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องทั้งหมด 4 ตัวแปรเพื่อจะพิจารณาค่าที่จะเกิดขึ้น ดังต่อไปนี้ [3]

$$W(1) = W_0; M(0) = M_0;$$

$$T_f(1) = T_{f0}; T_s(0) = T_{s0}$$

อัตราการอบแห้งในเครื่องอบแห้งแบบหมุนส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นตอนที่เม็ดปุ๋ยตกจากแผ่นครีบทําให้การสัมผัสกับไอเสียเกิดขึ้นได้ดี ซึ่งจะสอดคล้องกับสัดส่วนเวลาเฉลี่ยที่ผลิตภณท์อยู่ในถังอบแห้ง [11] และสัดส่วนนี้จะอ้างอิงผลของเวลาการสัมผัสระหว่างเม็ดปุ๋ยกับไอเสีย และสามารถคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่เม็ดปุ๋ยตกจากครีบทําเวลารวมทั้งวัฏจักร ในทางกลับกันความสัมพันธ์ของเวลาทั้งหมดจากวัสดุที่เม็ดปุ๋ยตกค้างอยู่ในแผ่นครีบทํากระทั่งเม็ดปุ๋ยเคลื่อนตกลงไปด้านล่างของท่ออบแห้งส่วนนี้คือ effective time factor จะสามารถหาได้จากสมการที่ 15, จำนวนรอบรวมของวัฏจักร (Total number of cycles) หาจากสมการที่ 16 เวลาที่เม็ดปุ๋ยสัมผัสกัน (effective contact time) หาได้จากสมการที่ 17 และจำนวนที่เม็ดปุ๋ยอยู่ในท่ออบแห้ง (Drying total load) หาได้จากสมการ 18

$$f_{tef} = \frac{\bar{t}_q}{\bar{t}_{Ci}} \times \frac{N_{Ci}}{N_{Ci}} = \frac{N_{Ci} \bar{t}_q}{\bar{\tau}} \quad (15)$$

$$N_{Ci} = \frac{L}{l} = \frac{L}{\bar{Y}_q \text{sen}(\alpha)} \quad (16)$$

$$t_{ef} = f_{tef} \times \bar{\tau} \quad (17)$$

$$H^* = \bar{\tau} \times G_s \quad (18)$$

2.4.2 สมการเพิ่มเติม

สมการความชื้นสมดุล(Equilibrium moisture: M_{eq})

สมการความชื้นสมดุลของเม็ดปุ๋ยใช้สมการของ Halsey (Osborn et al., 1989) โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ถูกรุ่นเสนอโดย Arruda (2008) ดังนี้

$$M_{eq} = \left(\frac{-\exp(-0.45T_s + 2.08)}{\ln(RH)} \right)^{1.435} \quad (19)$$

โดยที่

M_{eq} = ความชื้นสมดุลของปุ๋ย (kg water / kg drysolid)

T_s = อุณหภูมิที่ผิวของเม็ดปุ๋ย (°C)

RH = Relative humidity

อัตราการอบแห้ง (Drying Rate: MR)

อัตราเร็วหรือความสามารถในการระเหยของน้ำต่อหน่วยเวลาหรือต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ในระหว่างการอบแห้ง

สมการอัตราการอบแห้งของปุ๋ยใช้สมการของ Page (1949) โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ถูกนำเสนอโดย Arruda (2008) ดังนี้

$$MR = \exp(-Kt^{0.424}) \quad (20)$$

$$K = 0.304 \exp\left(\frac{-128.282}{T_f}\right) \quad (21)$$

โดยที่

M_R = อัตราการอบแห้ง

T_f = อุณหภูมิของไอเสีย ($^{\circ}\text{C}$)

t = เวลา (s)

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน(Heat transfer coefficient: U_{va})

$$U_{va} = 3.535G_f^{0.289}G_s^{0.541} \quad (22)$$

โดยที่

U_{va} = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ($\text{W} / \text{m}^2 \text{K}$)

G_f = อัตราการไหลของไอเสีย (kg / min)

G_s = อัตราการไหลของเม็ดปุ๋ย (kg / min)

3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 อุปกรณ์การทดลอง

ในการทดลองครั้งนี้ได้ทำการออกแบบเครื่องอบแห้งปุ๋ยแบบหมุนขนาดความยาวท่ออบแห้ง 10 เมตร แบ่งเป็นท่อร้อนและท่อเย็น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออบกว้าง 0.5 เมตร ใช้มอเตอร์ในการขับเคลื่อนขนาด 5 แรงม้า และมอเตอร์โบลเวอร์ขนาด 2 แรงม้า โดยให้ความร้อนทั้งจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าก๊าซชีวภาพขนาด 128 kW ของฟาร์มสุกร บริษัท ช.เกษตรรุ่งเรือง อ.เมือง จ.นครศรีธรรมราช โดยมีอุณหภูมิของก๊าซไอเสียที่ 450°C ที่อัตราการไหล $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ โดยมีอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัด คือ เครื่องวัดความเร็วลม เครื่องวัดองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ รุ่น Biogas Check ยี่ห้อ Geotech เครื่องวัดองค์ประกอบไอเสีย รุ่น 340 ยี่ห้อ testo เครื่องวัดอัตราการไหลของของเหลวในท่อ และเครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด

ปุ๋ยที่ใช้ในการทดลองเป็นปุ๋ยเม็ดชนิด Granulated simple super-phosphate fertilizer (SSPG) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3 mm. ความหนาแน่น 1.1 kg/m^3 , ค่าความจุความร้อนจำเพาะ $1.02 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C}$ และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจลน์ (μ) = 0.984 (Arruda,2008)

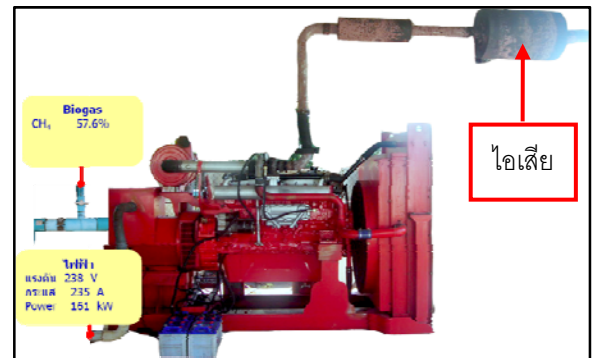
3.2 วิธีการทำนายผลการทดลอง

3.2.1 ตรวจวัดค่าต่างๆและตำแหน่งที่ตรวจวัด

ตำแหน่งที่ตรวจวัดตามรูปที่ 4 จะประกอบด้วยก๊าซไอเสียและก๊าซชีวภาพเพื่อหาค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนและอุณหภูมิ ค่าที่ตรวจวัดมีดังต่อไปนี้

1. ไอเสียวัดอุณหภูมิและองค์ประกอบก๊าซ (% O_2 , % CO_2 และ CO)

2. ก๊าซชีวภาพ วัดความเร็ว อุณหภูมิ และองค์ประกอบก๊าซ (% CH_4 , % CO_2 และ % O_2)



รูปที่ 4 ตำแหน่งตรวจวัดที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าก๊าซชีวภาพ

3. ที่ตัวเครื่องอบแห้งแบบหมุนวัดค่าตามจุดต่างๆตามรูปที่ 5 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 5 ตำแหน่งตรวจวัดที่เครื่องอบแห้งปุ๋ยแบบหมุน

- จุด A (ทางเข้าของเม็ดปุ๋ยที่มีความชื้น) วัดค่า Solid federate, Inlet moisture, Solid temp., Wet bulb temp
- จุด B (จุดปล่อยก๊าซไอเสยทิ้ง) วัดค่า Outlet federate, Outlet temp, Outlet humidity, Outlet flowrate
- จุด C (ทางออกเม็ดปุ๋ยหลังการอบแห้ง) วัดค่า Solid federate, Exit moisture, Solid temp.
- จุด D (ทางเข้าก๊าซไอเสย) วัดค่า Inlet federate, Inlet temp., Inlet humidity, Inlet flowrate, Flue heating value
- จุด E วัดอุณหภูมิบรรยากาศและอุณหภูมิที่ผิวท่อ

3.2.2 การคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบแห้งปุ๋ยแบบหมุน [6]

$$\eta_{th} = \left(\frac{q_d + q_s}{Q} \right) \times 100\% \quad (23)$$

โดยที่

- Q = ปริมาณความร้อนที่ให้กับเครื่องอบแห้ง (kW)
- Q' = ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทในเครื่องอบแห้ง
- Q' = $q_d + q_s$
- q_d = ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจาก วัสดุ (ความร้อนแฝง)
= $\dot{m}L$
- q_s = ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุในระหว่างอบแห้ง
= $\dot{m}C_{ps}(T_{sen} - T_{m1})$
- Q'' = ปริมาณความร้อนที่ปล่อยทิ้งไปหลังจากผ่านกระบวนการอบแห้ง
= $\dot{m}_e C_{pa}(T_1 - T_2)$
- \dot{m} = อัตราการไหลของเม็ดปุ๋ย (kg/s)
- \dot{m}_e = อัตราการไหลของไอเสยที่ทางออก (kg/s)
- L = ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ
= 2,260 kJ/kg
- C_{ps} = ค่าความจุความร้อนของปุ๋ย = 1.02 kJ/kg^oC
- C_{pa} = ค่าความจุความร้อนของอากาศ (kJ/kg^oC)
- T_{sen} = อุณหภูมิที่น้ำเดือดเป็นไอ = 100^oC

T_{m1} = อุณหภูมิเม็ดปุ๋ยเริ่มต้น (°C)

T_1 = อุณหภูมิเริ่มต้นของไอเสย (°C)

T_2 = อุณหภูมิสุดท้ายของไอเสย (°C)

ในสภาวะคงที่จะได้

$$Q = Q' + Q'' \quad (24)$$

โดยที่ Q'' มีค่าบวกและ $Q > Q'$ เสมอในกรณีที่ใช้ลมร้อน

3.2.3 ความชื้นในเม็ดปุ๋ย

สมการหาความชื้นวัสดุ (มาตรฐานแห้ง)

คือ อัตราส่วนน้ำหนักของน้ำในเม็ดปุ๋ยต่อน้ำหนักของเม็ดปุ๋ยแห้ง หากค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ดังนี้ [13]

$$M = \frac{M_w - M_d}{M_d} \times 100 \quad (25)$$

โดยที่

M = %ความชื้นมาตรฐานเปียก

M_w = น้ำหนักเริ่มต้นของเม็ดปุ๋ยที่มีความชื้น

M_d = น้ำหนักของเม็ดปุ๋ยหลังการอบแห้ง

3.3 ข้อมูลที่ใช้ในการทำนายผลการทดลอง

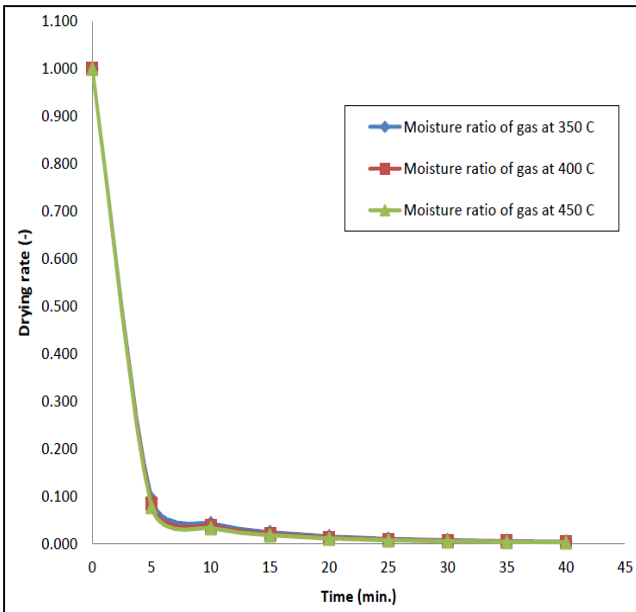
ข้อมูลที่ใช้ในการทำนายผล เพื่อคำนวณหาความชื้นเม็ดปุ๋ยสุดท้ายและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบแห้งแบบหมุนดังแสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อมูลที่ใช้ในการทำนายผล

ตัวแปร	ค่า	หน่วย
อุณหภูมิก๊าซไอเสย	350,400,450	°C
ปริมาตรการไหลของไอเสย	1.5	m ³ /s
ความร้อนแฝงของน้ำที่อุณหภูมิ 100 ^o C	2270	kJ/kg
อัตราการไหลของก๊าซร้อน	0.0369	kg/s
ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ	60	%RH
ความหนาแน่นของปุ๋ย	1.1	kg/m ³
ขนาดเม็ดปุ๋ย	3	mm
อัตราการป้อนปุ๋ย	125	kg/h
Mass velocity gas	687.6	kg/m ² .h
Volume of dryer	1.963	m ³
ความหนาแน่นไอเสย	0.470	kg/m ³
ความเร็วก๊าซไอเสย	36	m/s

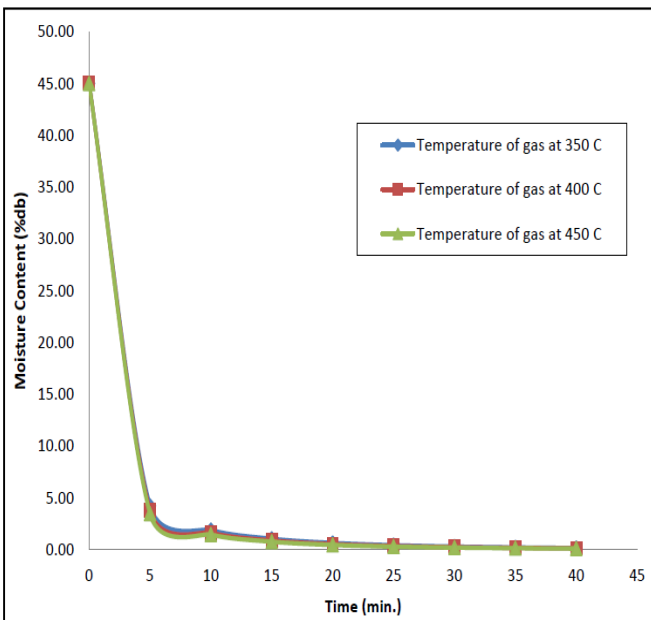
4. การทำนายผลการทดลอง

4.1 อัตราการอบแห้งปุ๋ย (Drying rate : MR)



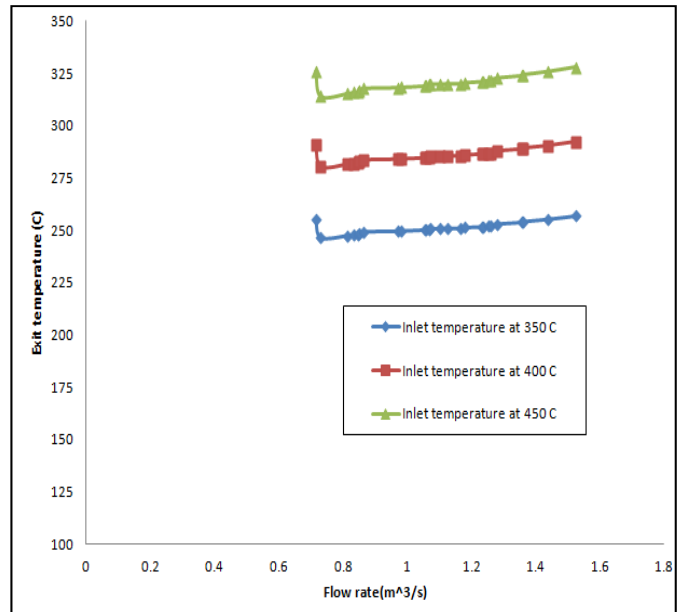
รูปที่ 6 อัตราการอบแห้งปุ๋ยที่อุณหภูมิก๊าซไอเสีย 350, 400, 450 °C เปรียบเทียบกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง

4.2 ความชื้นปุ๋ยหลังการอบแห้ง (Moisture Content)



รูปที่ 7 ความชื้นของเม็ดปุ๋ยหลังการอบแห้งที่อุณหภูมิ ก๊าซไอเสีย 350, 400, 450 °C เปรียบเทียบกับเวลาที่ใช้ ในการอบแห้ง

4.3 อุณหภูมิที่ถูกปล่อยออกหลังจากการอบแห้ง (Exit temperature)



รูปที่ 8 อุณหภูมิที่ถูกปล่อยออกหลังจากการอบแห้งปุ๋ย อุณหภูมิก๊าซไอเสีย 350, 400, 450 °C เปรียบเทียบกับ อัตราการไหลของก๊าซไอเสีย

4.4 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบแห้งปุ๋ย แบบหมุนที่ได้ทำการออกแบบและสร้างขึ้น

ผลการคำนวณประสิทธิภาพเชิงความร้อนของ เครื่องอบแห้งปุ๋ยแบบหมุนเป็นไปตามตารางที่ 2, 3, 4

ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่อุณหภูมิ ก๊าซไอเสีย 350 °C

ค่าพารามิเตอร์	ค่าที่ได้	หน่วย
ปริมาณความร้อนที่เข้าสู่ระบบ (Heat load)	210.28	kW
ปริมาณความร้อนแฝง (Latent heat)	137.08	kW
ปริมาณความร้อนสัมผัส (Sensibility heat)	1.94	kW
ปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปยังสิ่งแวดล้อม	1.11	kW
ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal Efficiency)	66.11	%

ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่อุณหภูมิ
ก๊าซไอเสีย 400°C

ค่าพารามิเตอร์	ค่าที่ได้	หน่วย
ปริมาณความร้อนที่เข้าสู่ระบบ (Heat load)	220.97	kW
ปริมาณความร้อนแฝง (Latent heat)	137.08	kW
ปริมาณความร้อนสัมผัส (Sensibility heat)	1.94	kW
ปริมาณความร้อนที่สูญเสียไป ยังสิ่งแวดล้อม	1.28	kW
ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal Efficiency)	62.92	%

ตารางที่ 4 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่อุณหภูมิ
ก๊าซไอเสีย 450°C

ค่าพารามิเตอร์	ค่าที่ได้	หน่วย
ปริมาณความร้อนที่เข้าสู่ระบบ (Heat load)	231.66	kW
ปริมาณความร้อนแฝง (Latent heat)	137.08	kW
ปริมาณความร้อนสัมผัส (Sensibility heat)	1.94	kW
ปริมาณความร้อนที่สูญเสียไป ยังสิ่งแวดล้อม	1.44	kW
ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal Efficiency)	60.02	%

5. สรุปผลการทดลอง

จากการออกแบบและคำนวณเครื่องอบแห้งปุ๋ยแบบ
ทอหมุนโดยใช้พลังงานความร้อนร่วมระหว่างก๊าซไอเสีย
จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและก๊าซชีวภาพประกอบไปด้วย
ท่ออบร้อนและท่ออบเย็นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5
เมตร ยาว 10 เมตร ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 5 แรงม้าเป็น
อุปกรณ์ส่งกำลัง และใช้โบลเวอร์ขนาด 2 แรงม้า ในการ
ดูดลมร้อนและเย็นออกจากท่ออบ

จากการทำนายผลการทดลองพบว่าอัตราการ
อบแห้งปุ๋ยที่อุณหภูมิก๊าซไอเสีย 350, 400, และ 450
องศาเซลเซียสจะมีอัตราการอบแห้งสูงที่ช่วง 5 นาทีแรก
และอัตราการอบแห้งจะค่อยๆลดลงอย่างช้าๆ ความชื้น

ของเมล็ดปุ๋ยหลังจากการอบแห้งที่อุณหภูมิก๊าซไอเสีย
350, 400, และ 450 องศาเซลเซียส จะลดลงอย่าง
รวดเร็วที่ 5 นาทีแรกเช่นกัน เนื่องจากเกิดความร้อนแฝง
สูงในช่วงแรก

ปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ระบบที่อุณหภูมิ
350°C , 400°C และ 450°C มีค่าเท่ากับ 210.28 kW ,
220.97 kW และ 210.28 kW ตามลำดับ ซึ่งคิดเป็น
ประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งเท่ากับ
66.11% , 62.92% และ 60.02% ตามลำดับ

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักประสานงานโครงการทุนวิจัย
มหาบัณฑิต (สกว.) และบริษัท ช.เกษตรรุ่งเรือง อ.เมือง
จ.นครศรีธรรมราช ที่ให้การสนับสนุนสถานที่ ข้อมูล
งบประมาณ และความร่วมมือต่อการดำเนินงานวิจัยนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] รัตนะ เลहनิช. 2550. การออกแบบและทดสอบ
เตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลลงสำหรับกระบวนการ
อบแห้งปุ๋ย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท .
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 82 หน้า.
- [2] M.H. Lisboa, D.S. Vitorino, W.B. Delaiba,
J.R.D. Finzer, M.A.S. Barrozo. 2007. Study of
the performance of the rotary dryer with
fluidization, Braz. J.Chem. Eng. 265–374.
- [3] Arruda, E.B. 2008. Experimental and
Simulation Study of Fertilizer Drying in
Rotary Dryer. Brazilian Journal of Chemical
Engineering, Federal University of
Uberlândia, Brazil
- [4] N. J. Fernandes, C. H. Ataíde and M. A. S.
Barrozo. 2008. Modeling and experimental
study of hydrodynamic and drying
characteristics of an industrial rotary dryer.
Brazilian Journal of Chemical Engineering,
Federal University of Uberlândia, Brazil

- [5] ไพบุรย์ โรจน์วิบูลย์ชัย และ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. 2535. การอบแห้งข้าวโพดด้วยเครื่องอบแห้งแบบหมุนและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และแนวทางการอบแห้ง. วารสารเกษตรศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 50-59
- [6] เรียวโซ โทเอ. 2525. อุปกรณ์อบแห้งในอุตสาหกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 2. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ
- [7] เรวดี แสนอุดม และ รัชพล สันติวารากร. 2554. การเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพในฟาร์มสุกร. การศึกษาแบบอิสระเชิงวิทยาศาสตร์. วิทยาลัยเทคโนโลยีวิทยาลักษณ์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- [8] Miller, C. O., Smith, B. A., Schuette, 1942. Factor Influencing the Operation of Rotary Dryers. Trans AIChE, 38, 841
- [9] Friedman, S. J. and Marshall, W. R. 1949. Studies in Rotary Drying, Chemical Engineering Progress, 45, 482-573
- [10] Keey, R.B. 1978. Introduction to Industrial Drying Operations, Pergamon Press, Oxford.
- [11] Baker, C.G.J , 1983, Cascading Rotary Dryer in Advance in Drying, 1,Mujumdar, A.S. (ed)(Hemisphere), New York, USA.
- [12] Page, G. E. 1999. Factors Influencing the Maximum Rates of Air Drying Shelled Corn in Thin-Layer. Indiana-USA, Purdue University.
- [13] สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. 2540. การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. พิมพ์ครั้งที่ 7,โครงการส่งเสริมการสร้างตำราสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.