

การคำนวณหาความยาวของท่ออบแห้งแบบหมุนในงานอุตสาหกรรม

โดยการวิเคราะห์ความไวที่ใช้พารามิเตอร์

สุชาดา ลิทธิ์จิงสถาพร¹, ธนภรณ์ พันธุ์ปรีชารัตน์²

¹สถาบันนวัตกรรมมหานคร ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

²สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบเพื่อหาขนาดความยาวของท่ออบแห้งแบบหมุนสำหรับการอบแห้งแบบโปรยในระดับอุตสาหกรรม ด้วยการวิเคราะห์ความไวที่ใช้พารามิเตอร์ ซึ่งการวิเคราะห์ความไวที่ใช้พารามิเตอร์เป็นการวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากการใช้งานจริงในระดับอุตสาหกรรม ได้แก่ ความชื้นสมดุล, สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร และ สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน เป็นต้น บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอการคำนวณหาขนาดความยาวท่อหมุนอบแห้งระดับอุตสาหกรรมที่เหมาะสมกับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ผลที่ได้จากการคำนวณเมื่อนำค่าที่ได้คำนวณเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่มีการใช้งานในปัจจุบัน พบว่า ในกรณีศึกษาที่ 1 ความยาวท่อหมุนที่ได้มีเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดเท่ากับ 2.17 เปอร์เซ็นต์ และในกรณีศึกษาที่ 2 มีเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดของขนาดท่อหมุนเท่ากับ 6.17 เปอร์เซ็นต์ โดยทั้งสองกรณีสามารถคำนวณได้ขนาดใกล้เคียงกับท่อหมุนที่มีการใช้งานจริงในระดับอุตสาหกรรม

คำสำคัญ : ท่ออบแห้งแบบหมุน การวิเคราะห์ความไวที่ใช้พารามิเตอร์, ความร้อนและการถ่ายเทความร้อน

Calculation for Length of Rotary Dryer Pipe in Industry using Parametric Sensitivity Analysis

Suchada Sitjongsataporn¹, Tanaporn Pantuprecharat²

¹Mahanakorn Institute of Innovation, Department of Electronic Engineering, Faculty of Engineering,
Mahanakorn University of Technology

²Department of Computer Engineering, Faculty of Industrial Technology,
Suan Sunandha Rajabhat University

ABSTRACT

This paper presents a design of length of industrial rotary dryer for the thermal efficiency of showering drying with a parametric sensitivity analysis, that analyze the effect of parameter currently used in industry; such as Equilibrium Moisture, Volumetric heat transfer coefficient and Heat loss coefficient, etc. The objective is to analyze the relation of selected parameters to calculate the length of industrial rotary dryer based on the parametric sensitivity analysis. In case study 1, the percentage error of rotary dryer length calculated from the proposed method is 2.17. In case study 2, the percentage error is 6.17. Results of proposed method shows that can be calculated in comparison with some example in the industrial use.

Keywords : Rotary dryer, Parametric sensitivity analysis, Heat and mass transfer

บทนำ

การอบแห้งแบบทอหมุน (rotary dryer) ที่ใช้หลักการโปรยของแข็งหรือวัสดุเปียกด้วยการตกของแข็งที่อยู่ภายในทอหมุนแล้วโปรยลงสู่ด้านล่างโดยการให้ลมร้อน (hot air) เคลื่อนที่ผ่านตลอดความยาวท่อ ลมร้อนจะทำหน้าที่แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของแข็งเปียกกับลมร้อนและพัดพาให้ของแข็งเคลื่อนที่ผ่านทอหมุนได้ โครงสร้างหลักของเครื่องอบแห้งแบบหมุน (Rotary drum dryer) ประกอบด้วยท่อทรงกระบอกหมุนทำมุมเอียงที่เหมาะสม กับแนวระดับเพื่อให้ของแข็งเกิดการเคลื่อนที่ ต่อมาทำการป้อนของแข็งเปียกเข้าทางปลายข้างหนึ่งของท่อทรงกระบอกซึ่งของแข็งเมื่อมีการสัมผัสกับลมร้อนที่ไหลผ่านท่อทรงกระบอก ทำให้เกิดการระเหยความชื้นภายในของแข็งเปียกได้ ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งแบบหมุนโดยทั่วไป จะขึ้นอยู่กับปรากฏการณ์เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของของแข็งเปียกภายในทอหมุน และการถ่ายเทความร้อนและมวลซึ่งจัดเป็นสิ่งที่จำเป็นในการทำงานของเครื่องอบแห้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การใช้ทอหมุนอบแห้งมีการนำมาใช้เพื่อการอบแห้งผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ในระดับอุตสาหกรรม ในส่วนการวิจัยได้มีการนำเสนองานวิจัยต่าง ๆ โดยใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์และการจำลองการทำงานเพื่อหาประสิทธิภาพของทอหมุนอบแห้งในอุตสาหกรรมต่างๆ (Abbasfard, Rafsanjani, Ghader, & Ghanbari, 2013) - (Iguaz, Esnoz, Martínez, López, & Virseda, 2003) โดยการนำเสนอความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับสมดุลความชื้นของแอมโมเนียมไนเตรทที่เป็นส่วนประกอบในการทำปุ๋ยเม็ด (Abbasfard, Rafsanjani, Ghader, & Ghanbari, 2013) และอัตราการอบแห้งที่ใช้สำหรับทำปุ๋ยเม็ด (Silva, Lira, Arruda, Murata, & Barrozo, 2012) ส่วน

บทความ (Osborn, White, Sulaiman, & Walton, 1989) ได้กล่าวถึงการคาดการณ์สัดส่วนของสมดุลความชื้นของถั่วเหลือง ส่วนบทความ (Jr., Lobato, Arruda, & Barrozo, 2008) นำเสนอวิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งในทอหมุนอบแห้งด้วยวิธีการหาวิวัฒนาการโดยใช้การหาอนุพันธ์ ต่อมาทีมงานวิจัยที่ได้ทำการวิเคราะห์ถึงอิทธิพลของพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งแบบหมุน (Friedman & Marshal, 1949) และรูปแบบการถ่ายเทความร้อนและมวลภายในทอหมุนอบแห้ง (Gu, Zhang, Li, & Yuan, 2014) ส่วนบทความ (Iguaz, Esnoz, Martínez, López, & Virseda, 2003) นำเสนอการจำลองการทำงานสำหรับกระบวนการขจัดน้ำออกจากผลผลิตทางการเกษตรสำหรับตลาดขายส่ง ในบทความ (สุชาติ, 2561) เสนอการออกแบบครีบภายในทอหมุนเพื่อให้มีการอบแห้งตามหลักการโปรยได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการหาขนาดความยาวของทออบแห้งแบบหมุนในระดับอุตสาหกรรมที่สัมพันธ์กับอัตราการอบแห้งด้วยวิธีการวิเคราะห์ความไวที่ใช้พารามิเตอร์ (Gal & Greenberg, 1997)
2. เพื่อนำเสนอสมการที่ใช้คำนวณหาขนาดความยาวทอหมุนอบแห้งที่เหมาะสมกับพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับองค์ประกอบพื้นฐานที่สัมพันธ์กับความชื้นสมดุล สมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร สมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน เวลาคงอยู่และอัตราการอบแห้ง
3. เพื่อให้ผู้ที่สนใจหรือผู้ใช้งานในภาคอุตสาหกรรมสามารถทำความเข้าใจการออกแบบเครื่องอบแห้งแบบทอหมุนได้เป็นอย่างดี และสามารถนำไปปรับใช้เมื่อมีการวางแผนปรับปรุงประสิทธิภาพ

การอบแห้งของท่อหมุนอบแห้งระดับอุตสาหกรรม
ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ระเบียบวิธีการวิจัย

1. สมดุลมวลและพลังงาน (Energy and Mass Balances)

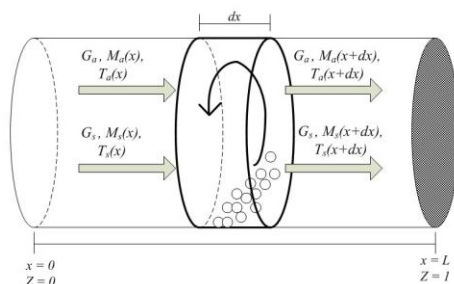
โมเดลทางคณิตศาสตร์ในหนึ่งมิติ (One-dimensional mathematical model) มีการพัฒนาเพื่อนำมาใช้ในการทำนายการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำและอุณหภูมิของวัสดุที่เกี่ยวข้องตลอดความยาวของท่อหมุนอบแห้ง (Abbasfard, Rafsanjani, Ghader, & Ghanbari, 2013) โดยมีสมมติฐานที่เกี่ยวข้องกับโมเดลทางคณิตศาสตร์ของท่อหมุน ดังต่อไปนี้

1) สมมติให้การดำเนินการอยู่ในสถานะคงตัว (steady state)

2) ขบวนการทำให้แห้ง (drying process) จะเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่เกี่ยวข้องกับการโปรยของแข็ง (Falling-rate period) เท่านั้น

3) การไหลของอากาศและของแข็งตลอดทั้งความยาวท่อเป็นการไหลแบบตามกัน (plug flow regime)

การพัฒนาโมเดลโดยใช้ชิ้นส่วนประกอบปริมาตรขนาดเล็กในระบบพิกัดทรงกระบอก (Infinitesimal volume element) ภายในท่อหมุนอบแห้ง ดังแสดงในภาพที่ 1 เป็นการทำงานเมื่อการไหลมีทิศทางเดียวกัน (concurrent flow) โดยเป็นสัดส่วนกับตำแหน่งของ x และความยาวของท่อหมุน เมื่อ z เป็นความยาวชนิดไม่มีมิติ (non-dimensional length)



ภาพที่ 1 ส่วนประกอบปริมาตรขนาดเล็กในระบบพิกัดทรงกระบอกภายในท่อหมุนอบแห้ง

2. สมการสำหรับองค์ประกอบพื้นฐาน (Constitutive Equations)

2.1 ความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture)

สมการที่ใช้หาความชื้นสมดุล โดยเลือกใช้สมการที่ปรับปรุงจากสมการของ Halsey (Modified Halsey's equation) (Osborn, White, Sulaiman, & Walton, 1989) ดังนี้

$$M_{eq} = \left(\frac{-e^{-2.08-0.045T_s}}{\ln(RH)} \right)^{\frac{1}{1.435}} \quad (1)$$

โดยที่ T_s เป็นอุณหภูมิที่ผิวของของแข็ง หน่วยเป็น $^{\circ}\text{C}$ และ RH เป็น ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (Relative Humidity of air)

2.2 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร (Volumetric heat transfer coefficient)

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร (U_v) (Jr., Lobato, Arruda, & Barrozo, 2008) คำนวณได้จาก

$$U_v = 3.535G_f^{0.289}G_s^{0.541} \quad (2)$$

โดยที่ G_f เป็นอัตราไหลของไอร้อน (หน่วยเป็น kg/min) และ G_s เป็นอัตราไหลของแข็ง (หน่วยเป็น kg/min)

2.3 สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน (Heat loss coefficient)

สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน (U_p) (Silva, Lira, Arruda, Murata, & Barrozo, 2012) คำนวณได้จาก

$$U_p = 0.022 G_f^{0.879} \quad (3)$$

โดยที่ G_f เป็นอัตราไหลของไอร้อน (หน่วยเป็น kg/min)

2.4 อัตราการอบแห้ง (Drying rate)

อัตราการอบแห้ง (M_R) (Silva, Lira, Arruda, Murata, & Barrozo, 2012) สำหรับของแข็งที่มีความชื้นในรูปแบบของข้อมูลทางจลนศาสตร์การอบแห้ง (Drying kinetics data) คำนวณได้ดังนี้

$$M_R = e^{-K \cdot t^{0.424}} \quad (4)$$

$$K = 0.304 \cdot e^{\frac{-128.828}{T_f}} \quad (5)$$

โดยที่ T_f เป็นอุณหภูมิก๊าซ หน่วยเป็น $^{\circ}\text{C}$ และ t เป็นเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง หน่วยเป็นวินาที

2.5 เวลาคงอยู่ (Residence Time)

เวลาคงอยู่ (τ) (Friedman & Marshal, 1949) หน่วยเป็น นาที หาได้จาก

$$\tau = L \left(\frac{0.1962}{\alpha D N_R^{0.9}} \pm \frac{0.00036 G_f}{G_s d_p^{0.5}} \right) \quad (6)$$

โดยที่ G_s เป็นอัตราไหลของแข็ง (หน่วยเป็น kg/min)

G_f เป็นอัตราไหลของไอร้อน (หน่วยเป็น kg/min)

D เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางท่อหมุน (หน่วยเป็น m)

L เป็นความยาวท่อหมุน (หน่วยเป็น m)

α เป็นมุมเอียงของท่อหมุนจากพื้น (หน่วยเป็น radian)

N_R เป็นจำนวนรอบหมุนต่อนาที (หน่วยเป็น rpm)

d_p เป็น เส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคของแข็ง (หน่วยเป็น m)

สังเกตว่าเทอมที่ 2 ในสมการที่ (6) นั้นจะมีค่าเป็น บวก เมื่อมีการไหลไปในทิศทางเดียวกัน (concurrent flow) และมีค่าเป็น ลบ เมื่อมีการไหลไปในทิศทางสวนกัน (countercurrent flow)

ในบทความนี้กำหนดให้ท่อหมุนอบแห้งระดับอุตสาหกรรมมีการไหลชนิดไปในทิศทางเดียวกัน ดังนั้น เวลาคงอยู่ ($\tilde{\tau}$) จะเป็น

$$\tilde{\tau} = L \left(\frac{0.1962}{\alpha D N_R^{0.9}} + \frac{0.00036 G_f}{G_s d_p^{0.5}} \right) \quad (7)$$

2. การคำนวณความยาวท่อหมุนอบแห้ง

บทความนี้นำเสนอ การพิสูจน์เพื่อหาความยาวท่อหมุนอบแห้ง โดยใช้ความสัมพันธ์ของเวลาที่ของแข็งคงอยู่ภายในท่อหมุน (τ) และเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (t) ดังต่อไปนี้

จัดสมการที่ (4) ให้อยู่ในรูปตัวแปร t โดยใส่ $\ln\{\cdot\}$ ทั้งสองข้างของสมการ จะได้

$$\begin{aligned} \ln\{M_R\} &= \ln\{e^{-K \cdot t^{0.424}}\} \\ \ln\{M_R\} &= -K \cdot t^{0.424} \\ -\ln\{M_R\} &= K \cdot t^{0.424} \\ \ln\left\{\frac{1}{M_R}\right\} &= K \cdot t^{0.424} \\ t^{0.424} &= \frac{1}{K} \ln\left\{\frac{1}{M_R}\right\} \\ \therefore t &= \left(\frac{1}{K} \ln\left\{\frac{1}{M_R}\right\}\right)^{\frac{1}{0.424}} \quad (8) \end{aligned}$$

แทนค่า $\tilde{\tau}$ ในสมการที่ (7) ด้วย t จากสมการที่ (8) แล้วจัดรูปสมการให้อยู่ในรูปตัวแปร L เพื่อหาความยาวท่อหมุน จะได้

$$L = \frac{t}{\left(\frac{0.1962}{\alpha D N_R^{0.9}} + \frac{0.00036 G_f}{G_s d_p^{0.5}} \right)} \quad (9)$$

โดยที่ t กำหนดให้เป็นเวลาที่ของแข็งคงอยู่ภายในท่อหมุนนั้นเป็นเวลาที่ใช้ในการอบแห้งมีหน่วยเป็น นาที คำนวณได้จากสมการที่ (8)

ต่อมาแทนค่า t จากสมการที่ (8) ในสมการที่ (9) จะได้สมการเพื่อหาความยาวท่อหมุน L ดังนี้

$$L = \frac{\left(\frac{1}{K} \ln\left(\frac{1}{M_R}\right)\right)^{\frac{1}{0.424}}}{\left(\frac{0.1962}{\alpha D N_R^{0.9}} - \frac{0.00036 G_f}{G_s d_p^{0.5}}\right)} \quad (10)$$

โดยที่ K กำหนดไว้ในสมการที่ (5)

3. การวิเคราะห์เพื่อหาคำตอบที่เหมาะสม

กำหนดให้สมการวัตถุประสงค์เป็นฟังก์ชันของความยาวท่อหมุนอบแห้งที่สัมพันธ์กับอัตราการอบแห้งจากสมการที่ (4) ดังนี้

$$\begin{aligned} f(\mathbf{x}) &= M_R(t_z, T_f) \\ &= e^{-K \cdot t_z^{0.424}} \\ &= e^{-0.304 \cdot e^{\frac{-128.828}{T_f}} \cdot t_z^{0.424}} \end{aligned}$$

โดยที่ t_z คำนวณจาก (Silva, Lira, Arruda, Murata, & Barrozo, 2012)

$$t_z = \left(\frac{1}{\left(-0.431 \cdot e^{\frac{-121.845}{T_f}} \right) \ln\left\{ \frac{1}{M_{Rz}} \right\}} \right)^{0.392} \quad (11)$$

$$M_{Rz} = \frac{M - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} \quad (12)$$

เมื่อ M_{eq} คำนวณได้จากสมการที่ (1)

M เป็นความชื้นของแข็ง และ

M_0 เป็นความชื้นเริ่มต้นของแข็ง

t_z เป็นเวลาที่ใช้สัมพันธ์กับอัตราการอบแห้ง หน่วยเป็นวินาที

T_f เป็นอุณหภูมิของลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง หน่วยเป็น $^{\circ}\text{C}$

รูปแบบปัญหาการวิเคราะห์เพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมกับสมการวัตถุประสงค์และสมการเงื่อนไข $g_j(\mathbf{x})$ มีดังนี้

$L = \text{Minimize } f(\mathbf{x});$

$$g_j(\mathbf{x}) \leq 0, j = 1, 2, \dots, 5 \quad (13)$$

โดยที่ L เป็นขนาดของความยาวท่อหมุน โดยกำหนดให้

$$\begin{aligned} \therefore L = f(x) &= \frac{\left(\frac{1}{K} \ln\left\{ \frac{1}{M_R} \right\}\right)^{\frac{1}{0.424}}}{\left(\frac{0.1962}{\alpha D N_R^{0.9}} - \frac{0.00036 G_f}{G_s d_p^{0.5}}\right)} \\ &= \frac{\left(\frac{1}{K} \ln\left\{ \frac{1}{M_R} \right\}\right)^{2.358}}{\left(\frac{0.1962}{\alpha x_1 N_R^{0.9}} - \frac{3.6 \times 10^{-4} x_2}{x_3 x_4^{0.5}}\right)} \quad (14) \end{aligned}$$

และ

$$K = 0.304 \cdot e^{\frac{-128.828}{T_f}} \quad (15)$$

โดยที่ D เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อหมุน หน่วยเป็น m

T_f เป็นอุณหภูมิแก๊ส หน่วยเป็น $^{\circ}\text{C}$

M_R เป็นอัตราอบแห้ง

α เป็นมุมเอียงของท่อหมุนจากพื้น หน่วยเป็น radian

N_R เป็นจำนวนรอบหมุนต่อนาที หน่วย

เป็น rpm

x_1 ถึง x_4 เป็นตัวแปรไม่ทราบค่าที่ใช้ในการออกแบบเพื่อหาความยาวท่อหมุน ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตัวแปรไม่ทราบค่าที่ใช้ในการออกแบบ

สัญลักษณ์	ตัวแปรไม่ทราบค่า	หน่วย
x_1	เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อหมุน (D)	m
x_2	อัตราไหลของไอร้อน (G_f)	kg/min
x_3	อัตราไหลของอนุภาคของแข็ง (G_s)	kg/min
x_4	เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง (d_p)	m

ผลการวิจัย

การศึกษาผลกระทบของตัวแปรที่มีต่อค่าที่เหมาะสม หรือ เรียกว่า การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity analysis) ซึ่งในบทความนี้ กำหนดค่ามุมเอียงของท่อหมุนจากพื้น (α) ระหว่าง 1 ถึง 4 องศา และจำนวนรอบหมุน ระหว่าง 2 ถึง 5 rpm โดยศึกษาถึงผลกระทบที่มีต่อความยาวท่อหมุนรอบแห้ง (L) ที่เหมาะสม

1.1 กรณีศึกษาที่ 1

ทำการคำนวณเพื่อหาความยาวท่อหมุนรอบแห้ง โดยใช้สมการเงื่อนไข ดังแสดงในตารางที่ 2 และมีค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบจากบทความ (Lisboa, Vitorino, Delaiba, Finzer, & Barrozo, 2007) ดังแสดงในตารางที่ 3 จากนั้นทำการแก้ปัญหา และวิเคราะห์ด้วยสมการที่ (11) - (13)

ตารางที่ 2 สมการเงื่อนไข

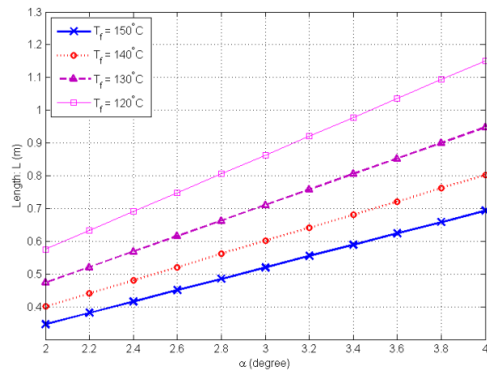
สมการเงื่อนไข	รูปแบบ
$g_1(x)$	$U_p \leq 0.005$
$g_2(x)$	$U_v \leq 1.50$

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบจากบทความ (Lisboa, Vitorino, Delaiba, Finzer, & Barrozo, 2007)

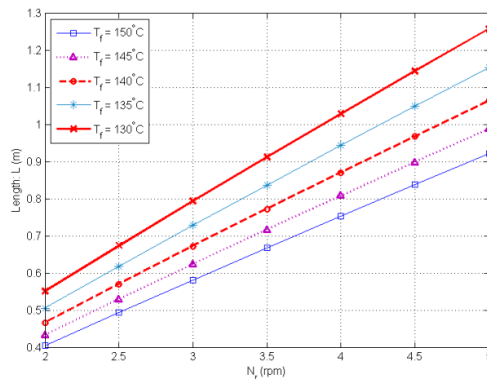
พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด (หน่วย)
เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง (d_p)	2.76 mm
ความเร็วรอบของท่อหมุน (N_R)	2.65 rpm
เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อหมุน (D)	0.25 m
อัตราไหลของไอร้อน (G_f)	0.15 kg/min
อัตราไหลของอนุภาคของแข็ง (G_s)	0.33 kg/min

ในภาพที่ 2 พบว่า เมื่อมุมเอียงของท่อหมุนจากพื้นเพิ่มขึ้น ยังต้องเพิ่มความยาวท่อหมุน

รอบแห้งให้ยาวยิ่งขึ้น และอุณหภูมิของแก๊สมีผลต่อความยาวท่อหมุนรอบแห้ง กล่าวคือ เมื่อใช้อุณหภูมิของแก๊สที่สูงขึ้น จะทำให้สามารถลดขนาดความยาวท่อหมุนรอบแห้งลงได้



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อหมุนรอบแห้ง (L) และมุมเอียงของท่อหมุนจากพื้น (α) เมื่ออุณหภูมิแก๊ส (T_f) ที่มีค่าแตกต่างกันโดยใช้พารามิเตอร์ในการออกแบบจากบทความ (Lisboa, Vitorino, Delaiba, Finzer, & Barrozo, 2007)



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อหมุนรอบแห้ง (L) และความเร็วรอบของท่อหมุน (N_R) เมื่ออุณหภูมิแก๊ส (T_f) ที่มีค่าแตกต่างกันโดยใช้พารามิเตอร์ในการออกแบบจากบทความ (Lisboa, Vitorino, Delaiba, Finzer, & Barrozo, 2007)

ในภาพที่ 3 พบว่า เมื่อยิ่งเพิ่มความเร็วยาวของท่อหมุนขึ้น ยิ่งจำเป็นที่จะต้องใช้ท่อขนาดความยาวเพิ่มขึ้น ส่วนปัจจัยในเรื่องของอุณหภูมิที่มีผลขนาดความยาวของท่อที่ต้องใช้สอดคล้องกับผลการทดลองในภาพที่ 2 กล่าวคือ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของแก๊สให้สูงขึ้น สามารถลดขนาดความยาวท่อหมุนอบแห้งลงได้

สรุปผลการการคำนวณหาขนาดความยาวท่อหมุนอบแห้งที่ได้นำเสนอ ดังแสดงในภาพที่ 3 เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดความยาวท่อหมุนในบทความ (Lisboa, Vitorino, Delaiba, Finzer, & Barrozo, 2007) เท่ากับ 0.60 m และจากภาพที่ 3 ได้ขนาดความยาวท่อหมุนที่คำนวณได้เท่ากับ 0.613 m ที่ความเร็วรอบของท่อหมุน (N_R) เป็น 2.65 rpm และอุณหภูมิแก๊ส (T_f) เป็น 140°C โดยมีเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดขนาดความยาวท่อหมุนเท่ากับ

$$\frac{|0.613-0.60|}{0.60} \times 100 = 2.17\%$$

1.2 กรณีศึกษาที่ 2

ทำการคำนวณเพื่อหาความยาวท่อหมุนอบแห้ง โดยใช้สมการเงื่อนไข ดังแสดงในตารางที่ 4 และมีค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ จากบทความ (Abbasfard, Rafsanjani, Ghader, & Ghanbari, 2013) ดังแสดงในตารางที่ 5 จากนั้นทำการแก้ปัญหาและวิเคราะห์ด้วยสมการที่ (11)

ตารางที่ 4 สมการเงื่อนไข

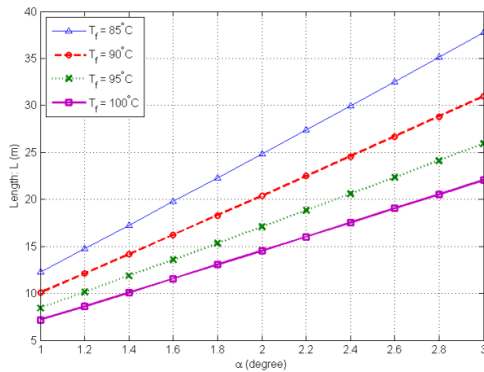
สมการเงื่อนไข	รูปแบบ
$g_1(x)$	$U_p \leq 0.03$
$g_2(x)$	$U_v \leq 2.75$

ตารางที่ 5 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบจากบทความ (Lisboa, Vitorino, Delaiba, Finzer, & Barrozo, 2007)

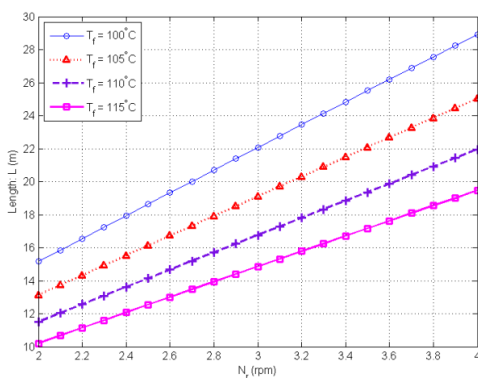
พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด (หน่วย)
เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง (d_p)	2 mm
ความเร็วรอบของท่อหมุน (N_R)	3 rpm
เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อหมุน (D)	3.324 m
อัตราไหลของไอรอน (G_f)	1.016 kg/min
อัตราไหลของอนุภาคของแข็ง (G_s)	0.538 kg/min

ในภาพที่ 4 พบว่า เมื่อมุมเอียงของท่อหมุนยิ่งเพิ่มขึ้น ยิ่งต้องเพิ่มความยาวท่อให้ยาวยิ่งขึ้น นอกจากนั้นยังพบอีกว่า อุณหภูมิของแก๊สมีผลต่อความยาวที่จำเป็นของท่อ กล่าวคือ เมื่อใช้อุณหภูมิของแก๊สที่สูงขึ้น จะทำให้สามารถลดขนาดความยาวท่อหมุนอบแห้งลงได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในกรณีศึกษาที่ 1

ในภาพที่ 5 พบว่า เมื่อยิ่งเพิ่มความเร็วยาวของท่อหมุนขึ้น ยิ่งจำเป็นที่จะต้องใช้ท่อขนาดความยาวเพิ่มขึ้น ส่วนปัจจัยในเรื่องของอุณหภูมิที่มีผลขนาดความยาวของท่อที่ได้ สอดคล้องกับผลการทดลองในกรณีศึกษาที่ 1 กล่าวคือ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของแก๊สให้สูงขึ้น สามารถลดขนาดความยาวท่อหมุนอบแห้งลงได้ ซึ่งผลการทดลองดังกล่าว ได้ผลไปในทำนองเดียวกันกับผลการทดลองที่ได้จากกรณีศึกษาที่ 1



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อหมุนรอบแห้ง (L) และมุมเอียงของท่อหมุนจากพื้น (α) เมื่ออุณหภูมิแก๊ส (T_f) ที่มีค่าแตกต่างกันโดยใช้พารามิเตอร์ในการออกแบบจากบทความ (Abbasfard, Rafsanjani, Ghader, & Ghanbari, 2013)



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวท่อหมุนรอบแห้ง (L) และความเร็วยรอบของท่อหมุน (N_p) เมื่ออุณหภูมิแก๊ส (T_f) ที่มีค่าแตกต่างกันโดยใช้พารามิเตอร์ในการออกแบบจากบทความ (Abbasfard, Rafsanjani, Ghader, & Ghanbari, 2013)

สรุปผลที่ได้จากการคำนวณหาขนาดความยาวท่อหมุนรอบแห้งที่ได้นำเสนอ ดังแสดงในภาพที่ 5 เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดความยาวท่อหมุนในบทความ (Abbasfard, Rafsanjani, Ghader, &

Ghanbari, 2013) เท่ากับ 18 m. และจากรูปที่ 5 ได้ขนาดความยาวท่อหมุนที่คำนวณได้ เท่ากับ 19.11 m. ที่ความเร็วรอบของท่อหมุน (N_p) เป็น 3 rpm และอุณหภูมิแก๊ส (T_f) เป็น 105°C โดยมีเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดขนาดความยาวท่อหมุนมากกว่ากรณีที่ 1 คือ เท่ากับ

$$\frac{|19.11-18|}{18} \times 100 = 6.17\%$$

ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสูตรที่เสนอ เหมาะกับพารามิเตอร์ในกรณีศึกษาที่ 1 มากกว่า

สรุปและอภิปรายผล

บทความนี้ได้นำเสนอสูตรที่ใช้สำหรับคำนวณหาความยาวของท่ออบแห้งแบบหมุน สำหรับการอบแห้งแบบโปรยในระดับอุตสาหกรรม จากผลการทดลองพบว่า สูตรที่เสนอสามารถคำนวณหาความยาวท่ออบแห้งได้ใกล้เคียงกับที่ใช้งานจริงในปัจจุบัน โดยเมื่อใช้สูตรกับพารามิเตอร์ตามกรณีศึกษาที่ 1 จะได้ความยาวของท่ออบแห้งที่ใกล้เคียงกับท่ออบแห้งที่ใช้งานจริงในโรงงานมากกว่าที่ใช้กับพารามิเตอร์ตามกรณีศึกษาที่ 2 คือเมื่อคำนวณโดยใช้พารามิเตอร์ตามกรณีศึกษาที่ 1 มีความคลาดเคลื่อนเพียง 2.17% และเมื่อคำนวณโดยใช้พารามิเตอร์ตามกรณีศึกษาที่ 2 มีความคลาดเคลื่อน 6.17%

References

- Abbasfard, H., Rafsanjani, H. H., Ghader, S., & Ghanbari, M. (2013). Mathematical modeling and simulation of an industrial rotary dryer: A case study of ammonium nitrate plant. *Powder Technology*, 239, 499-505.
- Friedman, S., & Marshal, W. (1949). Studies in rotary drying. *Chemical Engineering Progress*. 45, 482-573.

- Gal, T., & Greenberg, H. (1997). **Advances in Sensitivity Analysis and Parametric Programming**. Springer.
- Gu, C., Zhang, X., Li, B., & Yuan, Z. (2014). Study on heat and mass transfer of flexible filamentous particles in a rotary dryer. **Power Technology**, 267, 234-239.
- Iguaz, A., Esnoz, A., Martínez, G., López, A., & Vírveda, P. (2003). Mathematical modeling and simulation for the drying process of vegetable wholesale by-products in a rotary dryer. **Journal of Food Engineering**, 59, 151-160.
- Jr., V. S., Lobato, F. S., Arruda, E. B., & Barrozo, M. A. (2008). Estimation of drying parameters in rotary dryers using differential evolution. **Journal of Physics: Conference Series**, 138, 1-8.
- Lisboa, M. H., Vitorino, D. S., Delaiba, W. B., Finzer, J. R., & Barrozo, M. A. (2007). A Study of Particle Motion in Rotary Dryer. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, 24(3), 365-374.
- Osborn, G. S., White, G. M., Sulaiman, A. H., & Walton, L. R. (1989). Predicting Equilibrium Moisture Proportion of Soybeans. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, 32 (6), 2109-2113.
- Silva, M. G., Lira, T. S., Arruda, E. B., Murata, V. V., & Barrozo, M. A. (2012). Modelling of fertilizer drying in a rotary dryer: Parametric sensitivity analysis. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, 29(2), 359-369.
- Suchada, S. (2017). Design of 3-segment Flights within an Industrial Rotary Dryer. **Engineering Journal Chiang Mai University**, 25(1), 147-155.