



การออกแบบครีบบแบบสามเหลี่ยมภายในท่ออบแห้งแบบหมุน

ระดับอุตสาหกรรม

Design of 3-segment Flights within an Industrial Rotary Dryer

สุชาดา สิทธิจงสถาพร

Suchada Sitjongsatoporn

ศูนย์ออกแบบระบบอิเล็กทรอนิกส์และการประมวลสัญญาณ

ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

140 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530

Centre of Electronic Systems Design and Signal Processing (CESdSP)

Department of Electronic Engineering, Faculty of Engineering

Mahanakorn University of Technology, 10530, Thailand

E-mail: ssuchada@mut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้แนะนำเสนอเกี่ยวกับการออกแบบเพื่อหาขนาดของครีบบสามเหลี่ยมที่เหมาะสมภายในท่ออบแห้งแบบหมุนระดับอุตสาหกรรมสำหรับการอบแห้งแบบโปรยได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการออกแบบจะใช้พื้นฐานตรีโกณมิติและพีชคณิตร่วมกับการตั้งสมมติฐานจากการใช้งานจริงเพื่อให้สัมพันธ์กับขนาดของวัสดุที่นำมาใช้ในการอบแห้งแบบโปรยภายในท่ออบแห้งและระยะโปรยสูงสุดของอนุภาคของแข็งที่ตกจากปลายครีบบขณะท่ออบแห้ง ซึ่งเป็นบริเวณที่อนุภาคของแข็งได้สัมผัสกับลมร้อนในระหว่างที่ของแข็งตกลงมา บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอวิธีการออกแบบคำนวณครีบบสามเหลี่ยมได้อย่างง่าย แล้วนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับขนาดของครีบบสามเหลี่ยมที่ได้มีการนำเสนอมาแล้ว โดยวิธีการที่นำเสนอด้วยการใช้สูตรคำนวณอย่างง่ายสามารถออกแบบได้ใกล้เคียงกับในบทความที่ได้นำเสนอมาแล้ว ผลที่ได้จากการออกแบบนั้นเมื่อนำไปคำนวณเปรียบเทียบกับตัวอย่างของครีบบสามเหลี่ยมที่มีการใช้งานในปัจจุบัน โดยแบ่งตามขนาดของอนุภาคของแข็งชนิดเดียวกันที่มีขนาดต่างกัน พบว่า กรณีที่ของแข็งมีขนาดระหว่าง 1-10 มม. นั้นสามารถคำนวณขนาดของครีบบสามเหลี่ยมภายในท่ออบแห้ง ด้วยวิธีการออกแบบที่นำเสนอ โดยมิเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดของระยะโปรยสูงสุด เท่ากับ 3.04% ส่วนกรณีที่ของแข็งมีขนาดน้อยกว่า 1 มม. สามารถคำนวณขนาดของครีบบสามเหลี่ยมภายในท่ออบแห้ง ที่ได้จากรูปวิธีการออกแบบที่นำเสนอ โดยมิเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดของระยะโปรยสูงสุด เท่ากับ 2.08% ซึ่งทั้งสองกรณีสามารถคำนวณขนาดของครีบบสามเหลี่ยมภายในท่ออบแห้ง ได้ใกล้เคียงกับขนาดของครีบบสามเหลี่ยมในระดับอุตสาหกรรมที่มีใช้งาน

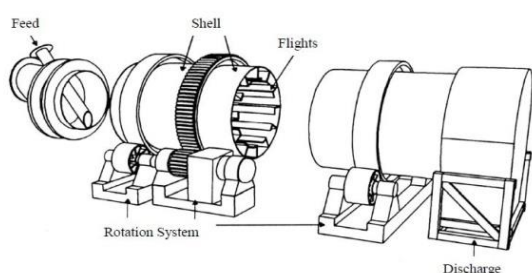
ABSTRACT

This paper presents a design of 3-segment flights within an industrial rotary dryer for the thermal efficiency of showering drying. The proposed assumption of design is based on trigonometry and linear algebra related with the size of materials used in the showering drying of solids within rotary drum dryer and the length of particle fall which the materials are in contact with the hot air

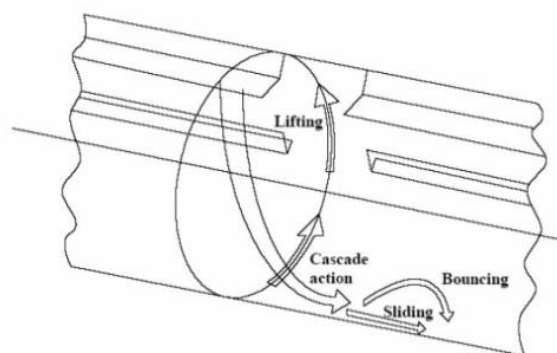
during the fall. The objective is to present the method of calculation in order to easily understand the basic concept of design compared with the previous methods. Some examples of calculation are presented with the different sizes of materials in details. In case of the size of materials between 1 to 10 mm., the calculation for 3-segment flights of rotary dryer by the proposed design shows that the percent error of length of particle fall is of 3.04%. In the similar fashion, when the size of materials lower than 1 mm., then the calculation using the proposed method for 3-segment flights shows that the percent error of length of particle fall is of 2.08%. The results of proposed design show that can be calculated in comparison with the 3-segment flights of the conventional rotary dryer.

1. บทนำ

การอบแห้งแบบท่อหมุนที่ใช้หลักการโปรยของแข็งหรือวัสดุเปียกด้วยการตกของแข็งที่อยู่ภายในท่อหมุนแล้วโปรยลงสู่ด้านล่างโดยการให้ลมร้อน (hot air) เคลื่อนที่ผ่านตลอดความยาวท่อ ลมร้อนจะทำหน้าที่แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของแข็งเปียกกับลมร้อนและพัดพาให้ของแข็งเคลื่อนที่ผ่านท่อหมุนได้ โครงสร้างหลักของเครื่องอบแห้งแบบหมุน (Rotary drum dryer) ประกอบด้วยท่อทรงกระบอกหมุนทำมุมเอียงที่เหมาะสมกับแนวระดับเพื่อให้ของแข็งเกิดการเคลื่อนที่ ดังแสดงในรูปที่ 1 และ 2 ต่อมาทำการป้อนของแข็งเปียกเข้าทางปลายข้างหนึ่งของท่อทรงกระบอกซึ่งของแข็งเมื่อมีการสัมผัสกับลมร้อนที่ไหลผ่านท่อทรงกระบอกทำให้เกิดการระเหยความชื้นภายในของแข็งเปียกได้



รูปที่ 1 ชุดเครื่องอบแห้งแบบหมุน [1]



รูปที่ 2 ลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งภายในท่อหมุน [5]

ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งแบบหมุนโดยทั่วไปจะขึ้นอยู่กับปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของของแข็งเปียกภายในท่อหมุนและการถ่ายเทความร้อนและมวล (Heat and mass transfer) ซึ่งจัดเป็นสิ่งที่จำเป็นในการทำงานของเครื่องอบแห้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ [1]

ครีป (Flights) เป็นอุปกรณ์ภายในท่อหมุนที่ใช้ในการตกของแข็ง ในขณะที่ท่อหมุนนั้น ครีปที่ติดอยู่บริเวณผนังท่อหมุนด้านในจะทำการตกของแข็งแล้วยกขึ้นแล้วโปรยลงสู่ด้านล่างตามแรงโน้มถ่วง เพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนของของแข็งกับลมร้อนที่ไหลผ่านในท่อหมุน การทำให้แห้งโดยส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาที่ของแข็งในขณะที่โปรยลงมาสัมผัสกับลมร้อน

บทความต่างๆ [2] [3] และ [4] ที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งด้วยท่อหมุนโดยนำเสนอโมเดลคณิตศาสตร์และการจำลองการทำงานของการอบแห้งของท่อหมุนโดยรวมในระดับอุตสาหกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพโดย

ในบทความเหล่านี้จะอ้างอิงจากการใช้งานครีบบนแบบสอง เซกเมนต์

บทความ [5] ได้นำเสนอการศึกษาทางอุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamic) และคุณลักษณะที่เกี่ยวข้องกับการทำให้แห้ง (drying) ของอนุภาคภายในท่อหมุนระดับอุตสาหกรรมสำหรับเม็ดปุ๋ยขนาดเล็ก (granulated fertilizers) และบทความ [6] ได้นำเสนอการออกแบบครีบบนแบบสามเซกเมนต์ของท่อหมุนโดยใช้มุมระหว่างครีบบนแบบสองเซกเมนต์ติดกันมาใช้ในการออกแบบ ร่วมกับการกำหนดหาระยะโปรยของอนุภาคของแข็ง นำมาคำนวณโดยใช้เรขาคณิตวิเคราะห์ โดยทำการทดลองกับการทำให้อนุภาคของเม็ดสารดูดความชื้นที่มีขนาดเล็กมาก

วัตถุประสงค์ในการนำเสนอบทความนี้ เพื่อที่จะหาสูตรคำนวณอย่างง่ายในการออกแบบครีบบนแบบสามเซกเมนต์อย่างคร่าวๆที่สามารถนำไปใช้ในกรณีที่มีขนาดของอนุภาคของแข็งที่ต้องการทำให้แห้งนั้นมีหลากหลายขนาด เนื่องจากสมการที่ได้จากบทความ [6] ในการออกแบบครีบบนแบบสามเซกเมนต์นั้นมีความยุ่งยากในการนำมาใช้และความเข้าใจในการออกแบบ ผู้เขียนจึงต้องการนำเสนอการออกแบบโดยอ้างอิงจากบทความ [5] และ [6] แต่นำมาปรับใช้เพื่อหาสูตรคำนวณอย่างง่ายโดยใช้ร่วมกับการกำหนดสมมติฐานจากการใช้งานจริง เพื่อให้ผู้สนใจหรือผู้ใช้งานในภาคอุตสาหกรรมสามารถทำความเข้าใจเบื้องต้นเกี่ยวกับการออกแบบครีบบนแบบสามเซกเมนต์อย่างคร่าวๆและนำไปปรับใช้เมื่อมีการวางแผนในการปรับปรุงการอบแห้งให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอวิธีการออกแบบคำนวณครีบบนแบบสามเซกเมนต์อย่างง่าย แล้วนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับขนาดของครีบบนแบบสามเซกเมนต์ที่ได้มีการนำเสนอมาแล้ว โดยวิธีการที่นำเสนอด้วยการใช้สูตรคำนวณอย่างง่ายสามารถออกแบบได้ใกล้เคียงกับในบทความที่ได้นำเสนอมาแล้ว

บทความนี้จะนำเสนอการออกแบบขนาดของครีบบนที่ใช้ในการตากหรือเคลื่อนย้ายอนุภาคของแข็งเพื่อให้ของแข็งได้สัมผัสกับลมร้อนได้มากที่สุดเพื่อให้เกิดการทำ

ให้แห้งได้อย่างรวดเร็ว การออกแบบจะใช้พื้นฐานทางตรีโกณมิติและพีชคณิตร่วมกับการตั้งสมมติฐานที่ใช้ในการทำงานให้สัมพันธ์กับขนาดของของแข็งที่ต้องการทำให้แห้ง

2. ลักษณะการเคลื่อนที่ของของแข็งในขณะท่อหมุน

2.1 ลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็ง

ลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งจะขึ้นอยู่กับ การออกแบบครีบบนในท่อหมุนร่วมกับเงื่อนไขในการทำงาน [5] โดยจะเป็นการทำงานร่วมกันอย่างซับซ้อนของอนุภาคของแข็งที่ครีบบนตักขึ้น ทำให้อนุภาคมีการเคลื่อนย้าย (sliding) หมุน (rolling) กระดอน (bouncing) และตกลงมา แล้วกระจายตัวออกเป็น ทอดๆ (spreading cascade) ในขณะที่ผ่านมาลมร้อนแล้วตกลงมาที่ด้านล่างของท่อหมุน ดังแสดงในรูปที่ 2

2.2 โมเดลการอบแห้งที่เกิดขึ้นในขณะท่อหมุน

แบ่งได้เป็น 2 เฟส ดังแสดงในรูปที่ 3 ดังนี้

- แอคทีฟเฟส (Active phase) เป็นช่วงที่อนุภาคของแข็งขยับลงมาจากครีบบนเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับลมร้อน

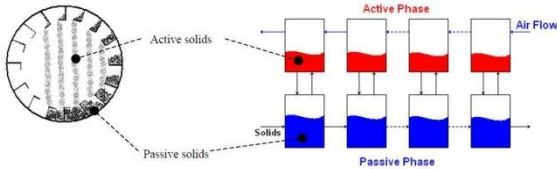
- พาสซีฟเฟส (Passive phase) เป็นช่วงที่ของแข็งกองอยู่ที่ด้านล่างของท่อหมุนรวมทั้งของแข็งที่อยู่ภายในครีบบนขณะตักขึ้น

2.3 ลักษณะของน้ำหนักบรรทุกหรือโหลดภายในท่ออบแห้ง

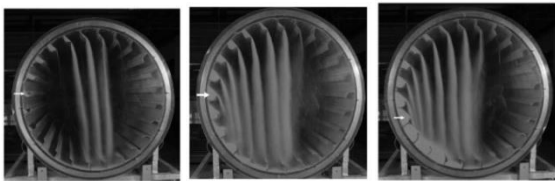
ลักษณะของน้ำหนักรบรรทุกหรือโหลดที่เกิดขึ้นภายในท่ออบแห้ง [7] แบ่งได้เป็น 3 ระดับ ได้แก่ ระดับต่ำ (under loading) ระดับกลาง (intermediate loading) และระดับสูง (over loading) โดยนิยามการทำงานของท่ออบแห้งมีเงื่อนไขตามลักษณะโหลดที่เกิดขึ้นสัมพันธ์กับความจุของครีบบนและประสิทธิภาพการทำงานของท่ออบแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยลักษณะโหลดระดับสูงนั้นพบว่ามีการแลกเปลี่ยนความร้อนมีประสิทธิภาพต่ำ เพราะ

ปริมาณอนุภาคของแข็งส่วนใหญ่อยู่ในครีบริบตั้งแต่ตำแหน่ง 6 นาฬิกา ในขณะที่ลักษณะโหลระดับต่ำ พบว่าปริมาณของแข็งในท่อหมุนมีจำนวนน้อย ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้ในการสร้างลมร้อน

ลักษณะโหลระดับกลางเป็นระดับของโหลที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอนุภาคของแข็งและลมร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยอนุภาคของแข็งส่วนใหญ่จะอยู่ในขณะโปรยลงมาเพื่อสัมผัสลมร้อนเริ่มตั้งแต่ตำแหน่ง 9 นาฬิกาและโปรยเสร็จสิ้นในตำแหน่ง 12 นาฬิกา ดังแสดงในรูปที่ 4 ข)



รูปที่ 3 โมเดลการอบแห้งขณะท่อหมุน [8]



ก) ระดับต่ำ ข) ระดับกลาง ค) ระดับสูง

รูปที่ 4 ลักษณะของโหลภายในท่ออบแห้งขณะหมุนแบบตามเข็มนาฬิกาโดยลูกศรสีขาวแสดงตำแหน่ง 9 นาฬิกา [7]

2.4 ระยะเวลาโปรยของอนุภาคของแข็ง

ระยะเวลาของการโปรยอนุภาคของแข็ง (Y_f) คำนวณได้ [5] ดังนี้

$$Y_f = \frac{Y_0 + \sqrt{R^2 - X_0^2}}{\cos(\omega)} \quad (1)$$

เมื่อ R เป็น รัศมีของท่อหมุน และ ω เป็นมุมยกของท่อหมุนจากพื้น ระยะเวลา Y_0 เป็นระยะจากจุดพิกัดที่จุดศูนย์กลางของแกนท่อหมุนและรัศมี X_0 เป็นรัศมีวงกลมที่กำหนดเมื่อปลายครีบริบอยู่ที่ตำแหน่งสมมติในขณะท่อหมุน

3. สมมติฐานที่ใช้ออกแบบเซกเมนต์ของครีบริบสามเซกเมนต์

บทความนี้นำเสนอการคำนวณเพื่อหาความยาวของเซกเมนต์ทั้งสามของครีบริบ ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 5, 6 และ 7 ภายใต้สมมติฐานเพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังต่อไปนี้

- 1) สมมติให้ระยะโปรยสูงสุดของของแข็ง (Y_f) มีค่าโดยประมาณ เป็นร้อยละ 85 ของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อหมุน
- 2) กรณีที่อนุภาคของแข็งที่โหลในท่อหมุนเป็นชนิดเดียวกัน

- 2.1) อนุภาคของแข็งมีขนาดระหว่าง 1-10 มม,
- ก. สมมติให้ความยาวเซกเมนต์ L_3 มีค่าเริ่มต้นที่ 50 มม.
- ข. สมมติให้ความยาวของเซกเมนต์ L_2 มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับเป็นจำนวน 3 เท่าของความยาวของเซกเมนต์ L_3

- 2.2) อนุภาคของแข็งมีขนาดน้อยกว่า 1 มม,
- ก. สมมติให้ความยาวเซกเมนต์ L_3 มีค่าเริ่มต้นที่ 15 มม.

- ข. สมมติให้ความยาวเซกเมนต์ L_2 เท่ากับความยาวเซกเมนต์ L_3

- 3) กรณีที่อนุภาคของแข็งที่โหลในท่อหมุนมีหลายขนาดแตกต่างกัน

- ก. สมมติให้ความยาวของเซกเมนต์ L_3 มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับขนาดสูงสุดของอนุภาคของแข็งที่โหลเข้าไปในท่อหมุน

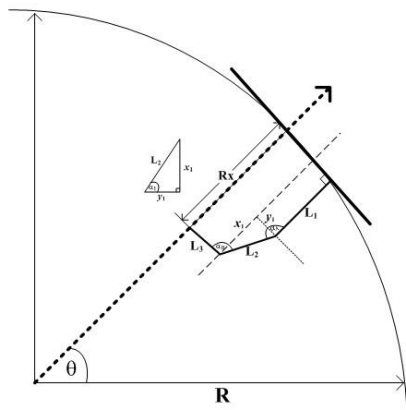
- ข. สมมติให้ความยาวของเซกเมนต์ L_2 มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับเป็นจำนวน 1.5 เท่าของความยาวของเซกเมนต์ L_3

- 4) สมมติให้ผลรวมของครีบริบทั้งสามเซกเมนต์จะต้องใกล้เคียงหรือโดยประมาณ 0.25 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อหมุน

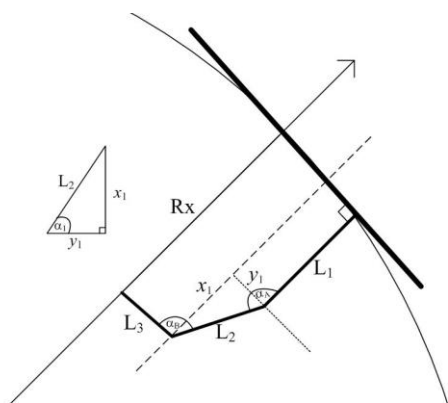
4. การออกแบบครีบบนแบบสามเหลี่ยมที่นำเสนอ

การออกแบบครีบบนแบบสามเหลี่ยมที่นำเสนอการใช้พื้นฐานทางตรีโกณมิติและพีชคณิต โดยลักษณะครีบบนแบบสามเหลี่ยม (Flights with three segments) ได้แก่ L_1 L_2 และ L_3 ติดตั้งที่ผนังด้านในของท่อหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ดังแสดงในรูปที่ 5 และ 6 โดยมีเงื่อนไขลักษณะของครีบบนแบบสามเหลี่ยมที่มีการโปรยของอนุภาคของแข็งได้ ดังแสดงในรูปที่ 7

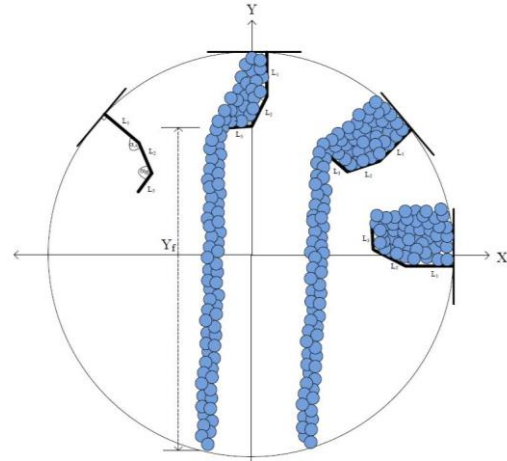
ความยาวของครีบบนแบบสามเหลี่ยม L_1 L_2 และ L_3 โดยมีมุม α_A เป็นมุมระหว่างเหลี่ยม L_1 และ L_2 ส่วนมุม α_B เป็นมุมระหว่างเหลี่ยม L_2 และ L_3 ดังแสดงในรูปที่ 6 โดยใช้พื้นฐานทางตรีโกณมิติและพีชคณิต



รูปที่ 5 มุมมองการออกแบบครีบบนแบบสามเหลี่ยมที่นำเสนอ



รูปที่ 6 การออกแบบครีบบนแบบสามเหลี่ยมที่นำเสนอ



รูปที่ 7 เงื่อนไขที่ใช้นำเสนอในการออกแบบครีบบนแบบสามเหลี่ยม

เราสามารถกำหนดสมการได้ดังนี้

$$x_1 = L_2 \sin(\alpha_1) \text{ and } y_1 = L_2 \cos(\alpha_1) \quad (2)$$

เมื่อ $\alpha_1 = \alpha_A - 90^\circ$ โดยที่ α_1 เป็นมุมสมมติระหว่าง y_1 และ L_2

4.1 พื้นที่ภายในครีบบนแบบสามเหลี่ยม

จากรูปที่ 6 สมมติให้พื้นที่สูงสุดในครีบบนแบบสามเหลี่ยม (A_F) ได้จากผลรวมของพื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมู (A_1) และพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้า (B_1) ดังนี้

$$A_F = A_1 + B_1 \quad (3)$$

$$A_1 = \frac{1}{2} [L_1 + (L_1 + x_1)] \cdot y_1 \quad (4)$$

$$B_1 = (L_1 + x_1) \cdot L_3 \quad (5)$$

ดังนั้นพื้นที่ A_1 และ B_1 สามารถคำนวณได้จากการแทนสมการที่ (2) ใน สมการที่ (4) และ (5) จะได้

$$\begin{aligned} \therefore A_1 &= \frac{1}{2} [L_1 + (L_1 + \{L_2 \sin(\alpha_1)\})] \\ &\quad \cdot L_2 \cos(\alpha_1) \\ &= L_1 L_2 \cos(\alpha_1) + \frac{1}{2} L_2^2 \sin(\alpha_1) \cos(\alpha_1) \quad (6) \end{aligned}$$

$$\therefore B_1 = L_3 \cdot (L_1 + L_2 \sin(\alpha_1))$$

$$= L_1 L_3 + L_2 L_3 \sin(\alpha_1) \quad (7)$$

4.2 ระยะโพรยเมื่ออนุภาคของแข็งตกจากครีบบสามเหลี่ยม

จากรูปที่ 7 สมมติให้ระยะโพรยสูงสุดของของแข็งที่ตกจากปลายครีบบในตำแหน่ง 12 นาฬิกาลงมาที่พื้นด้านล่างขณะต่อหมุน โดยเป็นระยะที่ของแข็งได้สัมผัสกับลมร้อนเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด

สมมติค่าเหล่านี้ในรูปที่ 5 และ 7 เมื่อมุม $\theta = 90^\circ$

$$X_o = 0, \quad \text{and} \quad Y_o = R_o$$

$$R_o = R - R_x, \quad \text{and} \quad R_x = x_1 + L_1$$

เมื่อ $x_1 = L_2 \sin(\alpha_1)$ จากสมการที่ (2) แล้วแทนค่าทั้งหมดลงในสมการที่ (1) ดังนั้นระยะโพรยของแข็งสูงสุดที่สัมพันธ์กับความยาวครีบบสามเหลี่ยมได้จาก

$$\begin{aligned} \therefore Y_f &= \frac{R_o + R}{\cos(\omega)} = \frac{\{R - (L_1 + x_1)\} + R}{\cos(\omega)} \\ &= \frac{2R - L_1 - L_2 \sin(\alpha_1)}{\cos(\omega)} \end{aligned} \quad (8)$$

4.3 ปริมาตรภายในครีบบสามเหลี่ยม

ปริมาตรภายในครีบบสามเหลี่ยม (V_F) สามารถหาได้จาก

$$V_F = \frac{N_f}{2} (A_F \cdot L) \quad (9)$$

เมื่อ L เป็นความยาวของต่อหมุน และ N_f เป็นจำนวนครีบบทั้งหมดภายในต่อหมุนตลอดทั้งความยาวของต่อหมุน และเมื่อ $\frac{N_f}{D} \approx 6.56 - 9.84$ [9] โดย D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของต่อหมุน

4.4 ปริมาตรภายในครีบบสามเหลี่ยมที่ใช้บรรทุกอนุภาคของแข็งขณะต่อหมุน

เงื่อนไขที่ใช้เพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพขณะต่อหมุน [9] มีดังนี้

1) ปริมาตรทั้งหมดของอนุภาคของแข็งที่ต้องการอบแห้งขณะต่อหมุน จะต้องอยู่ระหว่าง 10-15% ของปริมาตรทั้งหมดของต่อหมุน

2) ปริมาตรทั้งหมดของอนุภาคของแข็งที่อยู่บนครีบบสามเหลี่ยมขณะต่อหมุน จะต้องอยู่ระหว่าง 10-15% ของปริมาตรทั้งหมดของอนุภาคของแข็งที่อยู่ในต่อหมุน

จากเงื่อนไขข้างต้น ดังนั้นปริมาตรภายในครีบบสามเหลี่ยมขณะต่อหมุนเพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ (V_{eff}) กำหนดได้จาก

$$V_{eff} = 0.15(0.15V_d) = 0.15(0.15\pi R^2 L) \quad (10)$$

เมื่อ L เป็นความยาวของต่อหมุน V_d เป็นปริมาตรทั้งหมดของต่อหมุน และ R เป็นรัศมีของต่อหมุนโดย มีเงื่อนไขว่า $V_F > 2V_{eff}$

5. ผลการคำนวณของกรณีศึกษา

5.1 กรณีศึกษาที่ 1

ทำการคำนวณเพื่อหาขนาดของครีบบสามเหลี่ยม L_1, L_2 และ L_3 โดยใช้ข้อมูลจากบทความ [5] ดังนี้

ขนาดของอนุภาคของแข็งที่เป็นเม็ดปุ๋ย = 0.0031 ม. เส้นผ่านศูนย์กลางของต่อหมุน (D) = 3 ม. รัศมี (R) = 1.5 ม. และมุม $\omega = 2.5^\circ$ มุม $\alpha_1 = 55^\circ$ จำนวนครีบบทั้งหมดตลอดความยาวต่อหมุน (N_f) = 16 ความยาวต่อหมุน (L) = 30 ม. โดยแสดงวิธีคำนวณ ดังนี้

1) ในกรณีนี้อนุภาคเป็นของแข็งชนิดเดียวกันที่มีขนาดระหว่าง 0.001-0.010 ม. จากสมมติฐานที่ให้ ความยาวเชกเมนต์ $L_3 = 0.050$ ม. และความยาวเชกเมนต์ L_2 เป็นสามเท่าของ L_3 ดังนั้น $L_2 = 0.150$ ม.

2) คำนวณหา L_1 จากสมมติฐานที่ให้ระยะโพรยสูงสุดของของแข็ง (Y_f) มีค่าโดยประมาณเป็นร้อยละ 85 ของเส้นผ่านศูนย์กลางของต่อหมุน แล้วแทนในสมการที่ (8) เพื่อคำนวณหา L_1 ดังนี้

$$Y_f = 0.85 \cdot D = \frac{2R - L_1 - L_2 \sin(\alpha_1)}{\cos(\omega)}$$

$$\therefore L_1 = 2R - 0.85D \cos(\omega) - L_2 \sin(\alpha_1) = 0.330$$

ดังนั้น ความยาวเชกเมนต์ $L_1 = 0.330$ ม.

3) คำนวณหาระยะโปรยของอนุภาคของแข็ง Y_f โดยแทนค่า L_1 และ L_2 ในสมการที่ (8)

$$\therefore Y_f = \frac{2R - L_1 - L_2 \sin(\alpha_1)}{\cos(\omega)} = 2.55 \text{ ม.}$$

4) คำนวณหาพื้นที่สูงสุดในครีบทรงสามเหลี่ยม (A_f) โดยแทนสมการที่ (6) และ (7) ในสมการที่ (3) จะได้

$$\therefore A_f = L_1 L_3 + L_2 L_3 \sin(\alpha_1) + L_1 L_2 \cos(\alpha_1) + \frac{1}{2} L_2^2 \sin(\alpha_1) \cos(\alpha_1) = 0.0563 \text{ ม.}^2$$

5) คำนวณหาปริมาตรภายในครีบทรงสามเหลี่ยม (V_f) จากสมการที่ (9) จะได้

$$\therefore V_f = \frac{N_f}{2} (A_f \cdot L) = 13.50 \text{ ม.}^3.$$

สรุปผลที่ได้จากการคำนวณหาขนาดของครีบทรงสามเหลี่ยมที่มีอนุภาคของแข็งเป็นเม็ดปุ๋ยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.0031 ม. ด้วยการออกแบบที่ได้นำเสนอเปรียบเทียบกับขนาดของครีบทรงสามเหลี่ยมในบทความ [5] ดังแสดงในตารางที่ 1 จะได้ $V_{\text{eff}} = 4.77 \text{ ม.}^3$ และ V_f ที่คำนวณได้ มีค่ามากกว่า สองเท่าของ V_{eff} เป็นจริงตามเงื่อนไขที่กำหนดข้างต้น และเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดของระยะโปรยที่ได้ (Y_f^{err}) เท่ากับ $\frac{|2.63 - 2.55|}{2.63} \times 100 = 3.04\%$

5.2 กรณีศึกษาที่ 2

ทำการคำนวณเพื่อหาขนาดของครีบทรงสามเหลี่ยม L_1 , L_2 และ L_3 โดยใช้ข้อมูลจากบทความ [6] ดังนี้

ขนาดของอนุภาคของแข็งที่เป็นเม็ดสารดูดความชื้น (Adsorbent beads) = 0.0007 ม. เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อหมุน (D) = 0.387 ม. รัศมี (R) = 0.1935 ม. มุม $\omega = 2.5^\circ$ มุม $\alpha_1 = 45^\circ$, จำนวนครีบทรงทั้งหมดตลอดความยาวท่อหมุน (N_f) = 12 ความยาวท่อหมุน (L) = 1.21 ม. โดยแสดงวิธีคำนวณ ดังนี้

1) ในกรณีนี้อนุภาคเป็นของแข็งชนิดเดียวกันที่มีขนาดน้อยกว่า 0.001 ม. จากสมมติฐานที่ให้ ความยาวเชกเมนต์ $L_3 = 0.015$ ม. และความยาวเชกเมนต์ L_2 เท่ากับ L_3 ดังนั้น $L_2 = 0.015$ ม.

2) คำนวณหา L_1 จากสมมติฐานที่ให้ ระยะโปรยสูงสุดของของแข็ง (Y_f) มีค่าโดยประมาณ เป็นร้อยละ 85 ของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อหมุน แล้วแทนในสมการที่ (8) เพื่อคำนวณหา L_1 ดังนี้

$$Y_f = 0.85 \cdot D = \frac{2R - L_1 - L_2 \sin(\alpha_1)}{\cos(\omega)}$$

$$\therefore L_1 = 2R - 0.85D \cos \omega - L_2 \sin(\alpha_1) = 0.048 \text{ ม.}$$

ดังนั้น ความยาวเชกเมนต์ $L_1 = 0.048$ ม.

3) คำนวณหาระยะโปรยของอนุภาคของแข็ง Y_f โดยแทนค่า L_1 และ L_2 ในสมการที่ (8)

$$\therefore Y_f = \frac{2R - L_1 - L_2 \sin(\alpha_1)}{\cos(\omega)} = 0.3290 \text{ ม.}$$

4) คำนวณหาพื้นที่สูงสุดในครีบทรงสามเหลี่ยม (A_f) โดยแทนสมการที่ (6) และ (7) ในสมการที่ (3) จะได้

$$\therefore A_f = L_1 L_3 + L_2 L_3 \sin(\alpha_1) + L_1 L_2 \cos(\alpha_1) + \frac{1}{2} L_2^2 \sin(\alpha_1) \cos(\alpha_1) = 0.00144 \text{ ม.}^2$$

5) คำนวณหาปริมาตรภายในครีบทรงสามเหลี่ยม (V_f) จากสมการที่ (9) จะได้

$$\therefore V_f = \frac{N_f}{2} (A_f \cdot L) = 0.01045 \text{ ม.}^3.$$

สรุปผลที่ได้จากการคำนวณหาขนาดของครีบทรงสามเหลี่ยมในกรณีที่มีอนุภาคของแข็งเป็นเม็ดสารดูดความชื้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.0007 ม. เปรียบเทียบกับการออกแบบที่ได้นำเสนอกับขนาดของครีบทรงสามเหลี่ยมในบทความ [6] เมื่อขนาดของอนุภาคมีขนาดเล็กมากและท่อหมุนอบแห้งมีขนาดเล็กผลที่ได้ ดังแสดงในตารางที่ 2 จะได้ $V_{\text{eff}} = 0.0032 \text{ ม.}^3$ และ V_f ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าสองเท่าของ V_{eff} เป็นจริงตามเงื่อนไขที่

กำหนดข้างต้นและ เปอร์เซ็นต์ผิดพลาดของระยะ โปรยที่
ได้ ($Y_{F^{err}}$) เท่ากับ $\frac{|0.336-0.329|}{0.336} \times 100 = 2.08\%$

ตารางที่ 1 ผลที่ได้จากการออกแบบเปรียบเทียบกับข้อมูล
จากบทความ [5] โดยขนาดอนุภาค = 0.0031 ม. และ $D=3$ ม.,
 $\omega = 2.5^\circ$, $N_f=16$, $L=30$ ม.

รายละเอียด	บทความ [2]	จากการออกแบบ	รายละเอียด	บทความ [2]	จากการออกแบบ
L ₁ (m)	0.220	0.330	α_A / α_1	145°/55°	145°/55°
L ₂ (m)	0.190	0.150	α_B / α_2	125°/35°	125°/35°
L ₃ (m)	0.050	0.050	A _F (m ²)	0.0512	0.0563
Y _{f(m)}	2.63	2.55	V _F (m ³)	12.30	13.50

ตารางที่ 2 ผลที่ได้จากการออกแบบเปรียบเทียบกับข้อมูล
จากบทความ [6] โดยขนาดอนุภาค = 0.7 มม. และ $D =$
0.387 ม. และ $\omega = 2.5^\circ$, $N_f = 12$, $L = 1.21$ ม.

รายละเอียด	บทความ [6]	จากการออกแบบ	รายละเอียด	บทความ [6]	จากการออกแบบ
L ₁ (m)	0.041	0.048	α_A / α_1	135°/45°	135°/45°
L ₂ (m)	0.015	0.015	α_B / α_2	135°/45°	135°/45°
L ₃ (m)	0.015	0.015	A _F (m ²)	0.00126	0.00144
Y _{f(m)}	0.336	0.329	V _F (m ³)	0.00915	0.01045

6. สรุปผล

บทความนี้ได้แนะนำเสนอวิธีการออกแบบครีบสาม
เชกเมนต์สำหรับท่อหมุนอบแห้งในระดับอุตสาหกรรม
โดยใช้พื้นฐานตรีโกณและสมมติฐานที่สัมพันธ์กับเงื่อนไข
ที่ใช้ในการทำงาน โดยมีระยะ โปรยสูงสุดของอนุภาค
ของแข็งที่ตกจากปลายครีบในตำแหน่ง 12 นาฬิกาลงมาที่
พื้นด้านล่างขณะท่อหมุน ซึ่งเป็นระยะที่เกิดประสิทธิภาพ
สูงสุดในการแลกเปลี่ยนความร้อน โดยบทความนี้มี
วัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอวิธีการออกแบบและการคำนวณ
ครีบสามเชกเมนต์อย่างง่าย แล้วนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับ
ขนาดของครีบสามเชกเมนต์ที่ได้มีการนำมาแล้ว โดย
วิธีการที่นำเสนอด้วยการใช้สูตรคำนวณอย่างง่ายนำมาใช้
คำนวณด้วยข้อมูลจากบทความที่ [5] และ [6] ดังแสดงผล

ในตารางที่ 1 และ 2 การคำนวณเมื่ออนุภาคของแข็งมี
ขนาดที่แตกต่างกัน

โดยกรณีศึกษาที่ 1 พบว่า กรณีที่ของแข็งมีขนาด
ระหว่าง 1-10 มม. สามารถคำนวณขนาดของครีบสาม
เชกเมนต์ภายในท่อหมุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 ม. ด้วย
วิธีการออกแบบที่นำเสนอ ดังนี้ 0.330 ม. 0.150 ม. และ
0.05 ม. โดยมีระยะ โปรยสูงสุดเท่ากับ 2.55 ม. ซึ่งมีค่า
ใกล้เคียงกับขนาดของครีบสามเชกเมนต์ในท่อหมุนระดับ
อุตสาหกรรมที่มีใช้งานในปัจจุบัน ซึ่งมีขนาด 0.220 ม.
0.190 ม. และ 0.05 ม. โดยมีระยะ โปรยสูงสุดเท่ากับ
2.63 ม. ดังนั้นเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดของระยะ โปรยที่ได้
($Y_{F^{err}}$) เท่ากับ 3.04%

กรณีศึกษาที่ 2 พบว่า กรณีที่ของแข็งมีขนาดน้อยกว่า
1 มม. สามารถคำนวณขนาดของครีบสามเชกเมนต์ภายใน
ท่อหมุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.387 ม. ที่ได้จากรี
ออกแบบที่นำเสนอ ดังนี้ 0.048 ม. 0.015 ม. และ 0.015ม.
 โดยมีระยะ โปรยสูงสุดเท่ากับ 0.329 ม. ซึ่งมีค่าใกล้เคียง
กับขนาดของครีบ สามเชกเมนต์ใน ท่อหมุนระดับ
อุตสาหกรรมที่มีใช้งาน ซึ่งมีขนาด 0.041 ม. 0.015 ม.
และ 0.015 ม. โดยมีระยะ โปรยสูงสุดเท่ากับ 0.336 ม.
ดังนั้นเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดของระยะ โปรยที่ได้ ($Y_{F^{err}}$)
เท่ากับ 2.08%

สรุปได้ว่าครีบสามเชกเมนต์ภายในท่อหมุนที่
ออกแบบสามารถออกแบบได้ใกล้เคียงกับครีบสาม
เชกเมนต์ในบทความที่ได้แนะนำมาแล้ว โดยใช้การ
คำนวณอย่างง่ายและผลที่ได้จากการออกแบบเมื่อ
เปรียบเทียบกับอุปกรณ์ที่มีใช้งานจริง พบว่า ค่าที่ได้มีค่า
ใกล้เคียงกัน

เอกสารอ้างอิง

- [1] Silva, M.G., Lira, T.S., Arruda, E.B., Murata V.V. and Barrozo, M.A.S. Modelling of fertilizer drying in a rotar dryer: Parametric sensitivity analysis. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 2012; 29(02): 359-369.

- [2] Abbasfard, H., Rafsanjani, H.H, Ghader, S. and Ghanbari, M. Mathematical modeling and simulation of an industrial rotary dryer: A case study of ammonium nitrate plant. *Powder Technology*, 2013; 239: 499-505.
- [3] Linga, A. and Sai, P.S.T. Studies on drying kinetics of solids in a rotary dryer. *Thermal Issues in Emerging Technologies (ThETA)*, 2010; 389-394.
- [4] Lobato, F.S., Steffen, V.Jr., Arruda, E.B. and Barrozo, M.A. Estimation of drying parameters in rotary dryers using differential evolution. *Journal of Physics: Conference Series*, 2008; 135: 1-8.
- [5] Fernandes, N.J., Ataide, C.H. and Barrozo, M.A.S. Modeling and experimental study of hydrodynamic and drying characteristics of an industrial rotary dryer. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 2009; 26(2): 331-341.
- [6] Revol, D., Briens, C.L. and Chabagno, J.M. The design of flights in rotary dryers. *Power Technology*, 2001; 121: 230-238.
- [7] Ajayi, O.O. Multiscale modelling of industrial flighted rotary dryers. PhD thesis, James Cook University, 2011.
- [8] Lee, A., Sheehan, M.E. and Schneider, P.A. Solids transport in rotary sugar dryer. *Australian Society of Sugar Cane Technologists (ASSCT)*, 2004; 26.
- [9] Friedman, S.J., Marshal, W.R. Studies in rotary drying. *Chemical Engineering Progress*, 1949; 45: 482-573,