

บทความวิชาการ: การศึกษาการอบแห้งแบบกระแสน

A review: The study of Impinging Stream Drying

ปราชญา ตรีสุทธาชีพ* กิตติ สถาพรประสาธน์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์

ถ.รังสิต-นครนายก อ.องครักษ์ จ.นครนายก 26120

Prachaya Treesutthacheep* Kitti Sathapornprasath

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University,

Rangsit-Nakhonnayok Rd., Khong 16, Ongkharak, Nakhonnayok 26120

*Corresponding author Email: prachaya_me@hotmail.com

(Received: December 31, 2022; Revised: August 3, 2023 ; Accepted: September 8, 2023)

บทคัดย่อ

การอบแห้งแบบกระแสนเป็นเทคโนโลยีที่มีการศึกษาอย่างแพร่หลายทั่วโลก ในบทความนี้ได้รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับหลักการพื้นฐานของกระแสน งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบเครื่องอบแห้งแบบกระแสนที่ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการอบแห้ง วัสดุอบแห้งสามารถใช้วัสดุที่หลากหลายในการอบแห้งได้ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นวัสดุทางการเกษตร ได้แก่ กากถั่วเหลือง ข้าวเปลือก และข้าวเหนียว (parboiled rice) ค่าตัวแปรที่ใช้วัดประสิทธิภาพของการอบแห้งในงานวิจัยส่วนใหญ่ ได้แก่ ค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร ค่าพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง และการศึกษาที่ใช้แบบจำลองเพื่อศึกษาเกี่ยวกับตัวแปรต่างๆในการอบแห้งแบบกระแสน

คำสำคัญ: การอบแห้งแบบกระแสน วัสดุทางการเกษตร สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร กากถั่วเหลือง อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร

ABSTRACT

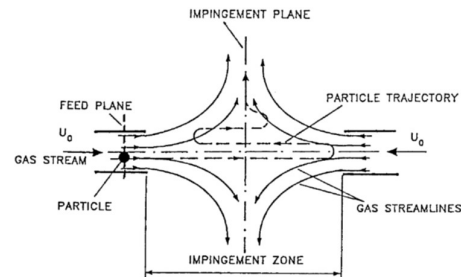
Impinging stream drying (ISD) is technology that has been studied worldwide. This article reviewed the principle of impinging stream, and research of ISD. Most research were focused on designing and verifying factors affected the efficiency of ISD. Drying materials a variety of materials can be used for drying. Drying materials are mostly agricultural products, including okara, rice paddy and parboiled rice. To assess the efficacy of ISD, volumetric water evaporation rate, volumetric heat transfer coefficient and energy consumption were determined in most research and a study by using a simulation for study the variables in an impinging stream dryer

Keyword: Impinging steam drying, Agricultural products, Volumetric heat transfer coefficient, Okara, Volumetric water evaporation rate.

1. หลักการของการอบแห้งแบบกระแสน

การอบแห้งแบบกระแสน ซึ่งมีลักษณะเด่นคือใช้เวลาในการอบสั้นมากเมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบอื่นๆ โดยการอบแบบกระแสนเหมาะสำหรับการอบแห้งวัสดุที่มีความชื้นที่ผิวสูง แนวคิดพื้นฐานของกระแสน คือ เมื่อกระแสนของไหลความเร็วสูง 2 กระแสนซึ่งไหลเข้าสู่ระบบในทิศทางตรงกันข้ามเกิดการชนกันจะเกิดเป็นระนาบการชนส่งผลให้บริเวณดังกล่าวเกิดการถ่ายเทความร้อน มวลสาร และโมเมนตัมขึ้น เป็นผลเนื่องมาจากแรงเฉือน (Shear force) ที่เกิดขึ้นจากการชนกันของกระแสนของไหล 2 กระแสน หลังจากกระแสนของไหลชนกันแล้วก็จะไหลออกจากกระแสน โดยวัสดุที่เป็นของแข็งหรือของเหลวเริ่มไหลไปกับกระแสนใดกระแสนหนึ่ง ความเร็วของวัสดุจะถูกเร่งจากความเร็วเท่ากับศูนย์ (zero velocity; U_0) จนถึงความเร็วระดับหนึ่งอันเป็นผลมาจากไฮโดรไดนามิกของการไหลของของแข็งและแก๊สเมื่อผ่านระนาบการชน (impingement plane) วัสดุจะแทรกตัวเข้าสู่กระแสนตรงกันข้ามในระนาบเดิม และเมื่อผ่านบริเวณนี้ ความเร็วของวัสดุจะลดลง และหยุดที่ระยะทางหนึ่งในบริเวณกระแสนตรงกันข้าม จากนั้นวัสดุจะมีความเร็วเพิ่มขึ้นอีกครั้ง และเคลื่อนที่ย้อนกลับเนื่องจากแรงของกระแสนที่เป่าจากทิศตรงกันข้าม และเคลื่อนตัวกลับไปกลับมาเนื่องจากการเพิ่มและลดความเร็วเข้าไปมาเนื่องจากการชนกันของกระแสนตรงกันข้าม การเคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้ามกันไปมาและเกิดขึ้นซ้ำ ๆ กันกระทั่งวัสดุในบริเวณที่เกิดการชน (impingement zone) มีความเร็วเท่ากับความเร็วสุดท้าย (terminal velocity) และหลุดออกจากกระแสนการอบแห้งแบบกระแสน [1] ด้วยกลไกการอบแห้งเช่นนี้ทำให้ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นมาก สามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับระบบการอบแห้งวัสดุ (เฟสกระจายตัว) ที่เป็นของเหลวหรือของแข็งขนาดเล็ก โดยมีแก๊สหรือของเหลวเป็นกระแสน (เฟสต่อเนื่อง) แต่ทั้งนี้เนื่องจากการอบแห้งแบบกระแสนมีระยะเวลาของวัสดุที่อยู่ในระบบสั้นมาก โดยมีหน่วยของระยะเวลาเป็นวินาที ความชื้นที่

ออกจากวัสดุส่วนใหญ่นั้นเป็นความชื้นที่อยู่บริเวณพื้นผิววัสดุ



รูปที่ 1 หลักการของ impinging stream drying [1]

2. งานวิจัยที่ทำการศึกษ

ในการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้รวบรวมมา เช่น การสร้างแบบจำลอง และการใช้วัสดุต่างๆมาอบแห้งโดยเครื่องอบแห้งแบบกระแสน ได้แก่ เรซิน กากถั่วเหลือง ข้าวเปลือก ข้าวเปลือกนึ่ง และข้าวกล้องนึ่ง รวมไปถึงการนำไปใช้ในวัสดุอื่นที่ไม่ใช่วัสดุทางการเกษตรเช่น ถ่านหิน เป็นต้น

2.1 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การวิเคราะห์ผ่านโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ หรือที่เรียกว่า การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical model) โดยการจำลอง (simulation) ผลการวิจัยที่เป็นไปได้โดยการใช้สมการทางคณิตศาสตร์ ทำนายผลการทดลอง และเครื่องมือที่นิยมใช้จำลองและวิเคราะห์ผลการทดลองได้ด้วยระบบคอมพิวเตอร์ คือ โปรแกรม computational fluid dynamics (CFD) ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์สำหรับการวิเคราะห์ด้านพลศาสตร์ของไหล ด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ ใช้อธิบายพฤติกรรมการไหลของไหล โดยการจำลองปรากฏการณ์จะคำนวณด้วยชุดของสมการอนุรักษ์ (Conservation Equations) ได้แก่ สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equations) สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum Equations) สมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy Equations)

ในงานวิจัยของ Khomwachirakul et al. [2] ได้ใช้โปรแกรม computational fluid dynamics (CFD) และ

โปรแกรม computational fluid dynamics and discrete element method (CFD-DEM) ในการจำลองการไหลและลักษณะการอบแห้งของอนุภาคความชื้นสูงในการอบแห้งแบบกระแสน้ำ จากงานวิจัยได้กำหนดตัวแปรต้นซึ่งเป็นสภาวะในการทดลอง ได้แก่ ขนาดของอนุภาค ความหนาแน่นของอนุภาค ค่าความจุความร้อนของอนุภาค ค่าการนำความร้อนของอนุภาค ความชื้นเริ่มต้นของอนุภาค อุณหภูมิอากาศขาเข้า ความเร็วอากาศขาเข้า อัตราการป้อนวัสดุ และระยะการชน และในการใช้โปรแกรม CFD เพื่อจำลองการไหลและลักษณะการอบแห้งนั้น มีการกำหนดค่าตัวแปรเพิ่มเติมคือ ค่า restitution coefficient of particle-wall ค่า gas time step และค่า particle time step ในขณะที่การจำลองโดยใช้โปรแกรม CFD-DEM ได้ใช้ค่า spring constant ค่า friction coefficient และค่า restitution coefficient of particle-particle เพิ่มเติม โดยหลักการที่เกี่ยวข้องกับการจำลองดังกล่าว ได้แก่ พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของแก๊ส (gas motion behavior) พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอนุภาค (particle motion behavior) และจลนศาสตร์ของการอบแห้งของอนุภาคความชื้นสูง (kinetic drying of high moisture particle) และมีสมการที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ สมการ continuity equation (สมการที่ (1)) [2]

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha \rho) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\alpha \rho u_i) = M_m \quad (1)$$

เมื่อ	t	คือ เวลา (วินาที)
	α	คือ สัดส่วนของช่องว่าง
	ρ	คือ ความหนาแน่นของแก๊ส (kg/m ³)
	x_i	คือ พิกัดตามแนวแกน x (m)
	u_i	คือ ความเร็วแก๊สในแนวแกน x (m/s)
	M_m	คือ เทอมของสมการความต่อเนื่อง (kg/m ³ s)

สมการโมเมนตัม (Momentum equation)
(สมการที่ (2)) [2]

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha \rho u_j) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\alpha \rho u_i u_j) = -\alpha \frac{\partial P}{\partial x_i} + \left[\alpha (\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \alpha \rho g + M_F \quad (2)$$

เมื่อ	u_i	คือ ความเร็วแก๊สในแนวแกน y (m/s)
	P	คือ ความดัน (N/m ²)
	x_j	คือ พิกัดตามแนวแกน y (m)
	μ	คือ ความหนืดพลวัตของแก๊ส (kg/m.s)
	μ_t	คือ ความหนืดเนื่องจากการไหลปั่นป่วน (kg/m.s)
	g	คือ อัตราเร่งจากแรงโน้มถ่วง (m/s ²)
	M_F	คือ เทอมของสมการโมเมนตัม (N/m ³)

สมการ Particle motion equations (สมการที่ (3)) [2]

$$m_p \frac{du_p}{dt} = F_g + F_D + F_C \quad (3)$$

เมื่อ	m_p	คือ มวลของวัสดุ (kg)
	u_p	คือ ความเร็วของวัสดุ (m/s)
	F_g	คือ แรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (N)
	F_D	คือ แรงฉุดลาก (N)
	F_C	คือ ผลรวมของแรงปฏิสัมพันธ์กันระหว่างอนุภาคกับอนุภาค (N)

สมการพลังงาน (energy equation for the gas phase) (สมการที่ (4)) [2]

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha \rho c_p T) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\alpha \rho c_p u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + M_h \quad (4)$$

เมื่อ	c_p	คือ ความจุความร้อนจำเพาะของอนุภาค (J/kg.K)
-------	-------	--

T คือ อุณหภูมิ (K)

k คือ พลังงานจลน์ของความปั่นป่วน
(m^2/s^2)

M_h คือ เทอมของสมการพลังงาน (W/m^3)

และสมการ species (water) balance equation
(สมการที่ (5)) [2]

$$\frac{\partial(\alpha\rho C)}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha\rho u_i C)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha \left(\rho D + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial C}{\partial x_i} \right) + M_m \quad (5)$$

เมื่อ C คือ ความเข้มข้นของอนุภาค (kg/m^3)

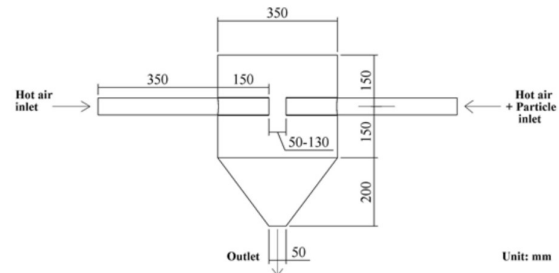
D คือ ค่าสัมประสิทธิ์ในการแพร่ของแก๊ส
(m^2/s)

Sc_t คือ สมิตทันัมเบอร์ของความปั่นป่วน

จากงานวิจัยดังกล่าวได้นำสมการคณิตศาสตร์มาใช้จำลองการไหลและลักษณะการอบแห้งอนุภาคที่มีความชื้นสูง โดยเปรียบเทียบความแม่นยำระหว่างการคำนวณผ่านโปรแกรม CFD และโปรแกรม CFD-DEM เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองจริง ได้แก่ค่าเฉลี่ยของระยะเวลาที่วัสดุอยู่ในระบบ (mean residence time) และค่าความชื้นของวัสดุ (moisture content of particle) พบว่าการใช้โปรแกรม CFD-DEM ให้ผลการทดลองที่แม่นยำกว่าการใช้โปรแกรม CFD นอกเหนือไปจากการสร้างภาพจำลองของอนุภาคในระหว่างการอบแห้งแบบกระแสนด้วยโปรแกรมดังกล่าวแล้ว Khomwachirakul et al. [2] ได้รายงานผลค่าเฉลี่ยของระยะเวลาที่วัสดุอยู่ในระบบ (mean residence time) และค่าความชื้นของวัสดุ (moisture content of particle) โปรแกรม CFD-DEM แสดงผลค่าเฉลี่ยของระยะเวลาที่วัสดุอยู่ในระบบที่มีความคลาดเคลื่อนจากค่าจริงเพียง $\pm 4\%$ เท่านั้น แต่โปรแกรม CFD แสดงผลค่าเฉลี่ยของระยะเวลาที่วัสดุอยู่ในระบบที่มีความคลาดเคลื่อนจากค่าจริง $\pm 8\%$ สำหรับค่าความชื้นของวัสดุ

นั้น โปรแกรม CFD-DEM และโปรแกรม CFD แสดงค่าความชื้นของวัสดุคลาดเคลื่อน $\pm 3\%$ และ $\pm 7\%$ ตามลำดับ

ต่อมา Khomwachirakul et al. [3] ใช้แบบจำลอง CFD-DEM ทำการศึกษาการอบแห้งในเครื่องอบแห้งแบบกระแสนแบบหลายชั้นตอนซึ่งมุ่งเน้นศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าและจำนวนรอบการอบแห้ง ที่มีผลต่อค่าความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกหนึ่งที่ทางออกของห้องอบแห้ง และอุณหภูมิของข้าวเปลือกหนึ่ง ในการจำลองข้าวเปลือกหนึ่งถูกรอบแห้งทั้งหมด 7 รอบการอบแห้ง ซึ่งในแต่ละรอบการอบแห้ง จะถูกพักในที่อับอากาศเป็นเวลา 4 นาที หลังจากนั้นข้าวเปลือกหนึ่งจะถูกนำกลับเข้าสู่เครื่องอบแห้งอีกครั้ง

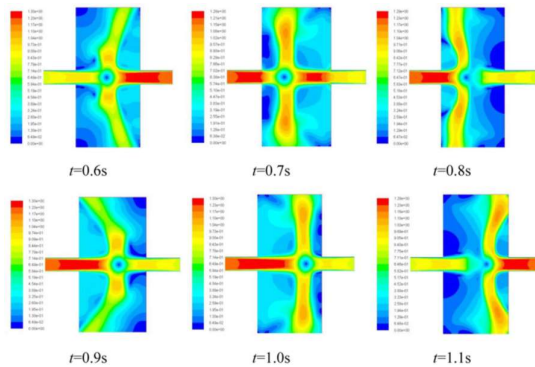


รูปที่ 2 แผนผังห้องอบแห้งที่ใช้ในการจำลอง [3]

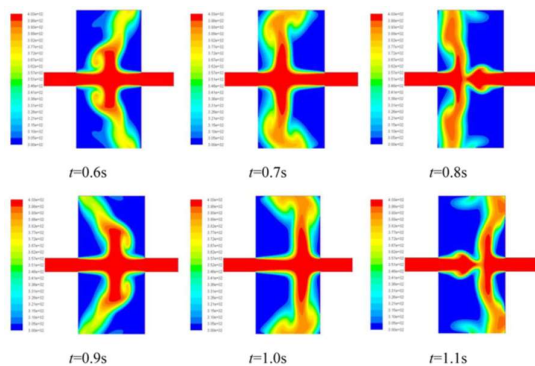
การจำลองแบบพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณร่วมกับวิธีเอลิเมนต์ไม่ต่อเนื่องได้ถูกนำมาใช้ในการจำลองการอบแห้งข้าวเปลือกหนึ่งแบบหลายชั้นตอน สำหรับทำนายผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อค่าความชื้นสุดท้ายและอุณหภูมิของข้าวเปลือกหนึ่งในระบบอบแห้งแบบกระแสนซึ่งพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้ผลการจำลองสอดคล้องกับผลการทดลอง และมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm 5\%$ โดยผลอัตราการลดลงของความชื้นข้าวเปลือกหนึ่งขึ้นอยู่กับทั้งอุณหภูมิอากาศร้อน และจำนวนรอบการอบแห้ง

ต่อมา Li et al. [4] ได้สร้างแบบจำลองเพื่อการศึกษาเกี่ยวกับอุณหภูมิของแก๊สในแต่ละตำแหน่งภายในห้องอบแห้งดังรูปที่ 3 ความเร็วของแก๊สเมื่อมีการ

ชนของกระแสทั้ง 2 ด้านในตำแหน่งต่างๆภายในห้อง
อบแห้งดังรูปที่ 4

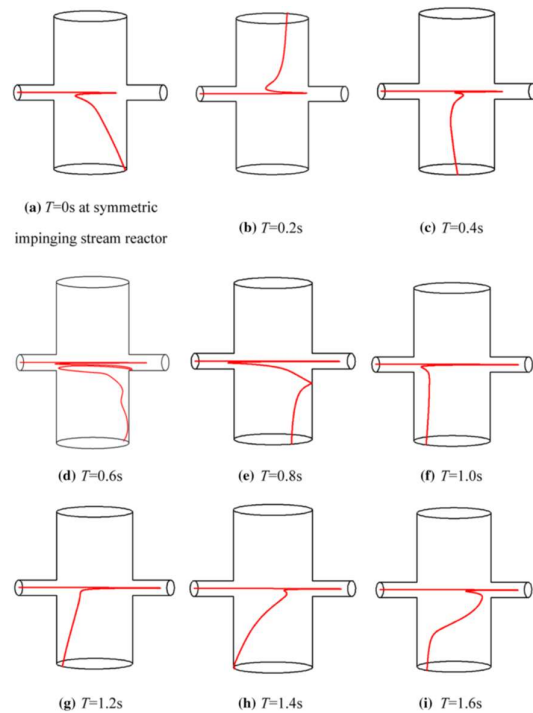


รูปที่ 3 ความเร็วของอากาศในแต่ละช่วงเวลาที่ได้
จากการจำลองปฏิกิริยาการอบแห้งแบบกระแสน [4]

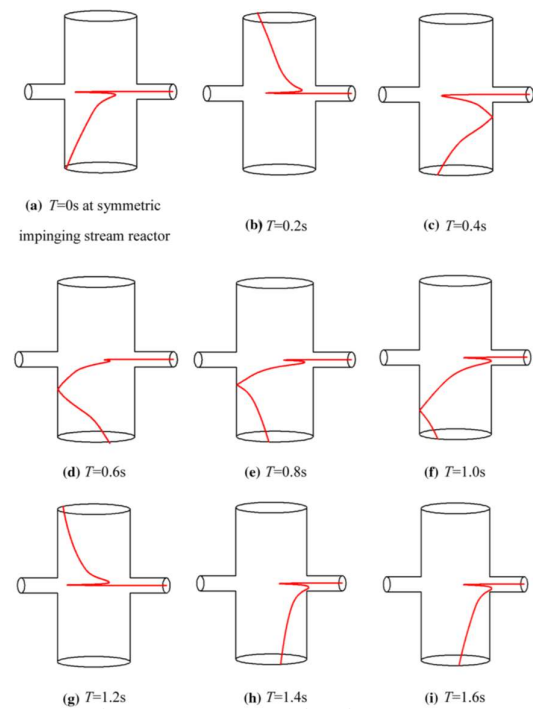


รูปที่ 4 อุณหภูมิของอากาศในแต่ละช่วงเวลาที่ได้จาก
การจำลองปฏิกิริยาการอบแห้งแบบกระแสน [4]

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงลักษณะการเคลื่อนที่ของ
อนุภาค ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ และ
รูปแบบของการเคลื่อนที่ในลักษณะที่สามารถพบเจอได้ใน
ห้องอบแห้งของแต่ละช่วงเวลาดังรูปที่ 5 และรูปที่ 6 ทำ
ให้ทราบถึงโอกาสในการเคลื่อนที่ไปกลับของวัสดุผ่าน
ระนาบการชน โดยการเคลื่อนที่ที่ดังกล่าวสามารถนำไปใช้
ในการออกแบบห้องอบแห้ง

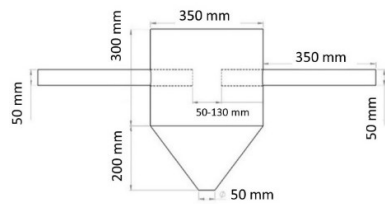


รูปที่ 5 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคเข้าห้อง
อบแห้งจากทางด้านซ้ายในแต่ละช่วงเวลา [4]

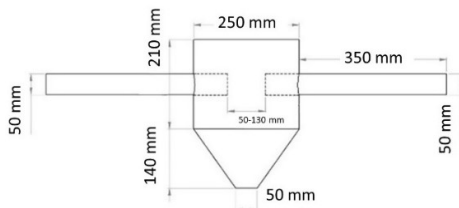


รูปที่ 6 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคเข้าห้อง
อบแห้งจากทางด้านขวาในแต่ละช่วงเวลา [4]

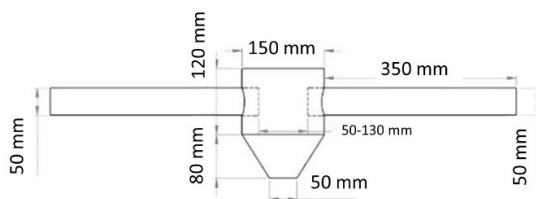
จากการศึกษาลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาค Iamyaem and Kundkun [5] ทำการศึกษาถึงรูปทรงต่างๆ ของห้องอบแห้ง ได้แก่ ห้องอบแห้งรูปทรงกระบอกกรวย รูปทรงกลม และรูปทรงสามทาง และความชันที่บริเวณปลายท่อส่งวัสดุเดียวกัน พบว่ารูปทรงห้องอบแห้งส่งผลต่อระยะเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในห้องอบแห้งเป็นอย่างมาก หากรูปทรงห้องอบแห้งไม่เอื้ออำนวยต่อการเคลื่อนที่ออกจากห้องอบแห้งอาจทำให้เกิดการตกค้างของวัสดุภายในห้องอบแห้ง และพบว่าการลดปริมาตรห้องอบแห้ง (ภาพที่ 7, 8 และ 9) ซึ่งขนาดห้องอบแห้ง L, M และ S มีปริมาตรห้องอบแห้งเท่ากับ 0.035, 0.013 และ 0.0028 m^3 ตามลำดับ ทำให้ประสิทธิภาพการลดความชื้นของวัสดุลดลง เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนและความชื้นของวัสดุส่วนใหญ่เกิดที่บริเวณการชน



รูปที่ 7 แบบของห้องอบแห้ง size L [5]

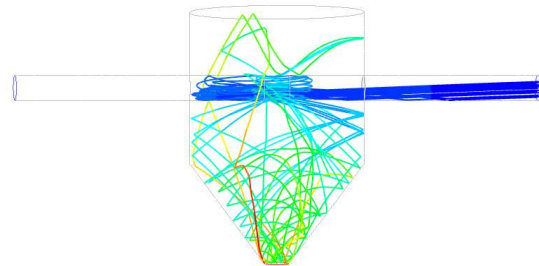


รูปที่ 8 แบบของห้องอบแห้ง size M [5]



รูปที่ 9 แบบห้องอบแห้ง size S [5]

และนอกจากนี้ยังพบว่าการปรับเพิ่มความชันที่บริเวณปลายท่อส่งวัสดุเพื่อลดปัญหาการตกค้างของวัสดุจนถึงบริเวณการชน สามารถทำได้โดยการเพิ่มความชันที่บริเวณปลายท่อส่งวัสดุ เนื่องจากการเพิ่มความชันทำให้วัสดุสามารถเคลื่อนที่เข้าสู่ระบบการชนได้ในปริมาณที่มากขึ้น อย่างน้อย 1 รอบการเคลื่อนที่



รูปที่ 10 การเคลื่อนที่ของวัสดุภายในห้องอบแห้งที่ความชัน 1° ภายใต้เงื่อนไขระยะทางในการชน 50 mm ความเร็วอากาศเข้า 20 m/s อัตราการป้อนวัสดุ 10 $\text{kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$ และอุณหภูมิอากาศเข้า 170°C [5]

2.2 การอบแห้งจากเครื่องอบแห้ง

งานวิจัยที่ใช้วัสดุเป็นเรซินเป็นวัสดุสำหรับอบแห้ง ได้แก่ Sathapornprasath et al. [6] ได้ทำการศึกษาโดยเรซินมีความชื้นเริ่มต้น 81-85 % (d.b.) อุณหภูมิการอบแห้ง $70-110^\circ\text{C}$ มีเวลาเฉลี่ยที่อนุภาคอยู่ในระบบ 2 วินาที พบว่าได้อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุด $110 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3\text{h}$ และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุด $880 \text{ W}/\text{m}^3\text{K}$

ในการศึกษากับวัสดุที่เป็นกากถั่วเหลืองได้มีผู้วิจัยทำการศึกษาเกี่ยวกับกากถั่วเหลืองโดยพัฒนาจากเครื่องต้นแบบของ Sathapornprasath et al. [6] และได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับกากถั่วเหลืองโดย Jantaka et al. [7] ได้ขยายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อส่งวัสดุเข้าเครื่องอบแห้งให้ใหญ่ขึ้นจาก 0.025 เป็น 0.038 เมตร และเปลี่ยนอุปกรณ์ป้อนวัสดุแบบสกรู (Screw conveyor) เป็นแบบสายพานลำเลียง (Belt conveyor) อุณหภูมิการอบแห้ง

130 และ 150 °C มีระยะการชน 5 และ 13 cm อัตราการป้อนกากถั่วเหลือง 10 และ 20 kg_{dry solid}/h พบว่าได้ อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุด 300 kg_{water}/m³h และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุด 5750 W/m³K ที่ความเร็วลม 25 m/s อุณหภูมิ 150 °C

ต่อมา Choicharoen et al. [8] ได้ทำการทดลองกับ กากถั่วเหลือง โดยมีปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ อากาศร้อน ที่อุณหภูมิ 130, 150 และ 170 °C ตามลำดับ ใช้ไอน้ำ ยิ่งยวดที่อุณหภูมิ 130, 150, 170 และ 190 °C ตามลำดับ และระยะการชน 5, 9 และ 13 cm ตามลำดับ อัตราการป้อนกากถั่วเหลือง 10 และ 20 kg_{dry solid}/h พบว่าสำหรับ อากาศร้อนอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุด 549 kg_{water}/m³h และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิง ปริมาตรสูงสุด 4805 W/m³K สำหรับไอน้ำอัตราการ ระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุด 807 kg_{water}/m³h และค่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุด 7983 W/m³K ซึ่งอุณหภูมิ ความเร็ว และอัตราการป้อนที่ เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้น และมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะรวมของเครื่องอบแห้งต่ำสุดเท่ากับ 3.1 MJ/kg_{water} ที่ไอน้ำยิ่งยวดอุณหภูมิ 190 °C อัตราการป้อนกากถั่วเหลือง 20 kg_{dry solid}/h และ ระยะการชน 5 cm

ต่อมาในปี 2017 Nimmol et al. [9] ได้ใช้กากถั่ว เหลืองซึ่งมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 288 ถึง 342% (d.b.) เป็นวัสดุทดสอบการทดลองอบแห้งแบ่งออกเป็นสองส่วน กล่าวคือ การอบแห้ง 1 รอบและการอบแห้ง 2 รอบ อุณหภูมิอบแห้ง 100, 130 และ 150 °C ตามลำดับ และ อัตราการป้อนกากถั่วเหลือง 15, 30 และ 45 kg_{dry solid}/h ตามลำดับ พบว่าได้อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุด 1784.2 kg_{water}/m³h และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุด 3385.3 W/m³K ซึ่งเกิดขึ้นในการ อบแห้งรอบที่ 1 ที่อุณหภูมิอบแห้ง 150 °C และอัตราการ ป้อนกากถั่วเหลือง 45 kg_{dry solid}/h มีค่าความสิ้นเปลือง พลังงานจำเพาะรวมของเครื่องอบแห้งต่ำสุดเท่ากับ 2.07

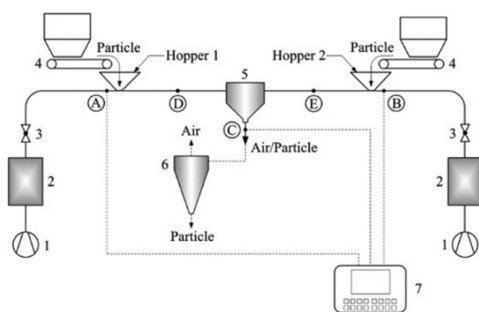
MJ/kg_{water} ที่อุณหภูมิ 150 °C อัตราการป้อนกากถั่ว เหลือง 45 kg_{dry solid}/h

สำหรับการอบแห้งที่ใช้ถั่วเหลืองเป็นวัสดุอบแห้งนั้น ได้มีการศึกษาโดย Choicharoen et al. [10] ปัจจัยที่ ทำการศึกษาคือ อากาศร้อนที่อุณหภูมิ 130, 150 และ 170 °C ตามลำดับ ระยะการชน 5, 9 และ 13 cm ตามลำดับ อัตราการป้อนกากถั่วเหลือง 10 และ 20 kg_{dry solid}/h ความเร็วลม 20 และ 27 m/s พบว่าได้อัตราการ ระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุด 524 kg_{water}/m³h และค่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุด 4593 W/m³K โดยที่อุณหภูมิ ความเร็ว และอัตราการป้อนที่ เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้น ในขณะที่ ความเร็ว อัตราการป้อน และระยะห่างการชนที่ เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิง ปริมาตรมีค่าเพิ่มขึ้น และค่าความสิ้นเปลืองพลังงาน จำเพาะรวมของเครื่องอบแห้งต่ำสุดเท่ากับ 5.6 MJ/kg_{water} ที่อุณหภูมิ 170 °C อัตราการป้อนกากถั่ว เหลือง 20 kg_{dry solid}/h และระยะการชน 13 cm

สำหรับการอบแห้งที่ใช้ข้าวเปลือกเป็นวัสดุอบแห้งได้ มีการศึกษาโดย Pattachari and Sathapornprasath [11] ได้ทำการศึกษากับข้าวเปลือกที่มีความชื้น 22 % (d.b.) อุณหภูมิ 70-110 °C พบว่าได้อัตราการระเหยน้ำ เชิงปริมาตรสูงสุด 44.7 kg_{water}/m³h และค่าสัมประสิทธิ์ การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุด 602.83 W/m³K

ต่อมา Nimmol et al. [12] ได้ทำการปรับปรุงระบบ ให้มีการป้อนวัสดุ 2 จุดดังแสดงในรูปที่ 11 โดยมีปัจจัยที่ ทำการศึกษาคือ อากาศร้อนที่อุณหภูมิ 110, 130 และ 150 °C ตามลำดับ ระยะการชน 5, 10 และ 15 cm ตามลำดับ และ อัตราการป้อนข้าวเปลือก 130 และ 150 kg_{dry solid}/h พบว่าได้อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุด 198 kg_{water}/m³h ที่การป้อนจุดเดียว พบว่าอุณหภูมิ และ อัตราการป้อนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าอัตราการระเหยน้ำเชิง ปริมาตรเพิ่มขึ้น และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน เชิงปริมาตรสูงสุด 7013 W/m³K ที่การป้อน 2 จุด ค่า ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะรวมของเครื่องอบแห้ง

ต่ำสุดเท่ากับ $5.1 \text{ MJ/kg}_{\text{water}}$ ที่อุณหภูมิ 110°C อัตราการป้อน $150 \text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$ และระยะการชน 5 cm ที่การป้อน 2 จุด ในการศึกษาไม่ได้คำนึงถึงการแตกหัก และคุณภาพของข้าวเปลือก



- | | |
|--|--------------------------|
| 1) พัดลมความดันสูง | 2) เครื่องกำเนิดความร้อน |
| 3) โกลบวาล์ว | 4) สายพานลำเลียง |
| 5) ห้องอบแห้ง | 6) ไซโคลน |
| 7) เครื่องเก็บข้อมูลอุณหภูมิ และความชื้น | |

รูปที่ 11 แผนผังของเครื่องอบแห้งกระแสน และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง

ต่อมา Nimmol et al. [13] ได้ทำการทดลองการอบแห้งข้าวเปลือก โดยมีการปรับปรุงระบบใช้ร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลม มีปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ อากาศร้อนที่อุณหภูมิ $70, 90$ และ 110°C ตามลำดับ ความเร็วลม 16 และ 25 m/s อัตราการป้อนข้าวเปลือก $22, 47$ และ $62 \text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$ ตามลำดับ พบว่าการอบแบบพาหะลมมีอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุด $150 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3\text{h}$ และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุด $2325 \text{ W/m}^3\text{K}$ สำหรับการอบแบบกระแสนร่วมกับแบบพาหะลมมีอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุด $329 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3\text{h}$ และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุด $3310 \text{ W/m}^3\text{K}$ ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะรวมของเครื่องอบแห้งต่ำสุดเท่ากับ $2.6 \text{ MJ/kg}_{\text{water}}$ ที่อุณหภูมิ 70°C อัตราการป้อน $62 \text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$ ที่การอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับแบบ

พาหะลม โดยที่อุณหภูมิการอบแห้งมีผลกับความขาวของเมล็ดข้าวเล็กน้อยเนื่องจากเวลาในการอบแห้งสั้นมากมีค่า $36-38$ และ $35-38$ ค่าร้อยละต้นข้าวจากการอบแบบพาหะลม และการอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับแบบพาหะลมอยู่ในช่วง $36-45\%$ และ $28-43\%$ ตามลำดับ

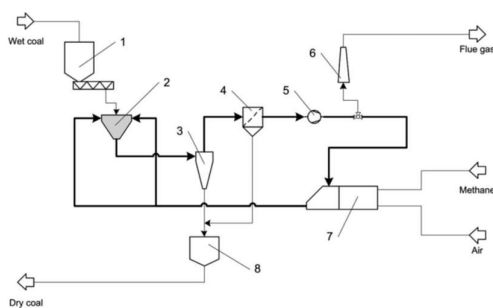
ต่อมา Thanasookprasert et al. [14] ได้ทำการอบแห้งข้าวเปลือกจำนวน 2 รอบโดยใช้อุณหภูมิในการอบแห้ง $130, 150$ และ 170°C ความเร็วของอากาศเข้าห้องอบแห้ง 20 m/s ระยะห่างกระแสนเท่ากับ 5 cm และอัตราการป้อนวัสดุ 90 kg/h และการทดลองนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับร้อยละต้นข้าว การเปลี่ยนแปลงสีของข้าว ซึ่งผลจากการทดลองพบว่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุด $377.2 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3\text{h}$ ในการอบรอบที่ 1 และการเปลี่ยนแปลงสีค่อนข้างน้อย ความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือก และร้อยละต้นข้าวลดลงเมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น ในขณะที่อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น ทำให้ความชื้นของข้าวเปลือกนั้นลดลง แต่จะส่งผลทำให้ปริมาณร้อยละต้นข้าวลดลงไปด้วย ในส่วนการเปลี่ยนแปลงสีของข้าวหลังจากผ่านกระบวนการอบแห้งนั้นพบว่ามีความน้อยเนื่องจากการใช้เวลาในการอบแห้งสั้นเมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบอื่น

ต่อมา Swasdisevi et al. [15] ได้ทำการทดลองกับข้าวเปลือกเช่นเดียวกัน โดยมีปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ อากาศร้อนที่อุณหภูมิ $(130, 150, 170, 190^\circ\text{C})$ และ การใช้ไอน้ำยิ่งยวดที่อุณหภูมิ $(130, 150, 170, 190^\circ\text{C})$ ทดสอบที่ 1 และ 2 รอบ อัตราการป้อนข้าวเปลือก $90 \text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$ พบว่าสำหรับอากาศร้อนอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุด $377.2 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3\text{h}$ และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุด $8634.8 \text{ W/m}^3\text{K}$ สำหรับไอน้ำอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุด $351.6 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3\text{h}$ และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุด $10120 \text{ W/m}^3\text{K}$ ที่การทดลอง 1 รอบ และสรุปได้ว่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ การใช้ไอน้ำยังยวดยค่าความ
สิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำกว่าการใช้ก๊าซร้อน ค่า
ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะรวมของเครื่องอบแห้ง
ต่ำสุดเท่ากับ $3.7 \text{ MJ/kg}_{\text{water}}$ จากการใช้ไอน้ำยังยวดย
อุณหภูมิ 190°C

สำหรับการอบแห้งที่ใช้ข้าวเป็นวัสดุอบแห้งนั้นได้มี
การศึกษาโดย Kumklam et al. [16] มีปัจจัยที่
ทำการศึกษาคือ อากาศร้อนที่อุณหภูมิ 80, 150, 170
และ 190°C ตามลำดับ ระยะการขน 5 และ 13 cm ทำ
การอบแห้ง 17 รอบ ความเร็วลม 10, 15, 20 และ 25
 m/s ตามลำดับ อัตราการป้อนข้าวเปลือก 80, 110 และ
 $160 \text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$ ตามลำดับ จากผลการทดลองแนะนำให้
ใช้ความเร็วลม 15 เมตร/วินาที และอุณหภูมิ 190°C
สำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกหนึ่ง ด้วยเงื่อนไขดังกล่าวการใช้
พลังงานทั้งหมดประมาณ 8.5 MJ/kg สำหรับอัตราป้อน
ข้าวเปลือก $160 \text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$

นอกจากนี้การอบแห้งแบบกระแสนำไปลด
ความชื้นของถ่านหินโดย Słowik, and Stec [17] โดยมี
อัตราป้อนถ่านหิน 50–120 kg/h ถ่านหินมีความชื้น 4–
18% (w.b.) ที่อุณหภูมิ 500°C พบว่าสามารถลดความชื้น
สูงสุดได้ 32.4 % อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุด
 $230.5 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3\text{h}$ และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน
เชิงปริมาตรสูงสุด $2420 \text{ W/m}^3\text{K}$



- 1) ถ่านหินเปียกป้อนแบบสกรู 2) อบแห้งถ่านหินแบบกระแสนำ
- 3) โซ่ไดรล 4) กรอบอุณหภูมิถ่านหิน
- 5) พัดลมแก๊สเผาไหม้ 6) ปล่องแก๊ส
- 7) ห้องเผาไหม้ 8) ถ่านหินแห้ง

รูปที่ 12 แผนผังการทำงานของโรงอบแห้งนำร่อง

3. สรุปผลการศึกษา

จากการที่ได้ทำการศึกษางานวิจัยของแต่ละท่าน
พบว่าได้มีการใช้แบบจำลองในการศึกษาถึงตัวแปรต่าง ๆ
ในการอบแห้ง รวมถึงพฤติกรรมของวัสดุในช่วงเวลาต่าง ๆ
และการอบแห้งจากเครื่องอบแห้งแบบกระแสนำทำให้
พบว่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ
ของอากาศ และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะ
เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราการป้อนวัสดุ [18] โดยที่
2 ตัวแปรนี้เป็นตัวแปรสำคัญในการอบแห้ง และการศึกษา
งานวิจัยมาในข้างต้นควรจะคำนึงถึงคุณภาพของวัสดุที่ได้
จากการอบแห้งด้วย เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะ
ส่งผลให้เกิดความเค้นขึ้นภายในเมล็ด ความเค้นที่สูงนี้จะ
ส่งผลให้เกิดการแตกร้าวเมื่อนำไปขัดสีเมล็ดข้าวจึงเกิดการ
แตกหัก ส่งผลให้ปริมาณต้นข้าวเต็มเมล็ดมีค่าลดลง [14]

4. เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Kudra, and A. S. Mujumdar, *Advanced Drying Technologies*. New York: Marcel Dekker, Inc., 2002.
- [2] P. Khomwachirakul, S. Devahastin, T. Swasdisewi and S. Soponronnarit. "Simulation of flow and drying characteristics of high-moisture particles in an impinging stream dryer via CFD- DEM," *Drying Technol.*, vol. 34, pp. 403-419, 2016.
- [3] P. Khomwachirakul, S. Devahastin, T. Swasdisewi and S. Soponronnarit, "CFD-DEM simulation of parboiled paddy drying in an impinging stream dryer" in *The 18th TSAE National Conference and the 10th TSAE International Conference.*, 2017
- [4] C. Li, S. Yue and M. Li, "Numerical simulation of the drying characteristics of a high-moisture particle in a dynamic

- asymmetric impinging stream reactor,” *Chemical Papers.*, vol. 76, pp. 41-56, 2021.
- [5] K. Iamyaem and A. Kundkun, “The study of variables that affect the movement of particle in impinging stream dryer,” Senior project Dept. Mech. Eng., Srinakharinwirot Univ., Thailand, 2019.
- [6] K. Sathapornprasath, S. Devahastin and S. Soponronnarit, "Performance evaluation of an impinging stream dryer for particulate materials," *Drying Technology*, vol. 25, pp. 1121-1128, 2007.
- [7] P. Jantaka, C. Nimmol and S. Devahastin, "Use of an impinging stream dryer for agricultural waste: A case study with soy residue," in *The 22nd Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand*, 2008.
- [8] K. Choicharoen, S. Devahastin, and S. Soponronnarit, "Comparative evaluation of performance and energy consumption of hot air and superheated steam impinging stream dryers for high-moisture particulate materials," *Applied Thermal Engineering*, vol. 31, pp. 3444-3452, 2011.
- [9] C. Nimmol, A. Hirunwat and K. Sathapornprasath, "Performance and energy efficiency of an impinging stream Dryer for Okara" *Engineering Journal Chiang Mai University*, vol. 24, pp.45-59, 2017.
- [10] K. Choicharoen, S. Devahastin, and S. Soponronnarit, "Performance and Energy Consumption of an Impinging Stream Dryer for High-Moisture Particulate Materials," *Drying Technology*, vol. 28, pp. 20-29, 2009.
- [11] T. Pattachari and K. Sathapornprasath, "Performance study of an impinging stream dryer for agricultural product," in *The 23rd Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand*, 2009.
- [12] C. Nimmol and S. Devahastin, "Evaluation of performance and energy consumption of an impinging stream dryer for paddy," *Applied Thermal Engineering*, vol. 30, pp. 2204-2212, 2010.
- [13] C. Nimmol, K. Sathapornprasath and S. Devahastin, "Drying of High-Moisture Paddy Using a Combined Impinging Stream and Pneumatic Drying System," *Drying Technology*, vol. 30, pp. 1854-1862, 2012.
- [14] S. Thanasookprasert, T. Swasdisevi, S. Devahastin and S. Soponronnarit, “ Dehydration of Unhusked Rice by using Impinging Stream Dryer” *Journal of Science and Technology*, vol. 1, no. 2, pp. 1-10, 2012
- [15] T. Swasdisevi, S. Devahastin, S. Thanasookprasert and S. Soponronnarit, "Comparative Evaluation of Hot-Air and Superheated-Steam Impinging Stream Drying as Novel Alternatives for Paddy Drying," *Drying Technology*, vol. 31, pp. 717-725, 2013.
- [16] P. Kumklam, S. Prachayawarakorn, S. Devahastin and S. Soponronnarit, "Effects of operating parameters of impinging stream dryer on parboiled rice quality and energy consumption" *Drying Technology*, vol. 38, pp. 634-645, 2019.
- [17] A. C. K. Słowik and M. Stec, “Experimental Investigations of a pilot scale coal impinging

stream dryer," *International Journal of Coal Preparation and Utilization.*, vol. 40, no. 9, pp. 604-617, 2017.

- [18] Y. Kitron and A. Tamir, "Characteristics and scale-up of coaxial impinging streams gas-solid contractors," *Drying Technology*, vol. 8, pp. 781-810, 1990.