

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย

การปรับปรุงประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งแบบกระแสน

สำหรับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

IMPROVEMENT OF THE EFFICIENCY OF AN IMPINGING STREAM

DRYER FOR AGRICULTURAL WASTE

คณะผู้วิจัย

นายลักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา

นายฉัตรชัย นิยมผล

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจาก

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

ปีงบประมาณ 2552

บทคัดย่อ

เครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำได้อั้วเป็นเครื่องอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งวัสดุอนุภาคที่มีความชื้นสูง อย่างไรก็ตามข้อมูลผลของตัวแปรการทำงานต่าง ๆ ที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งยังมีอยู่น้อยมากหรือยังไม่สมบูรณ์ นอกจากนี้การทดสอบสมรรถนะเครื่องอบแห้งส่วนใหญ่มักใช้วัสดุจำลองแทนวัสดุจริงซึ่งมีความชื้นที่ผิวสูงและเกาะติดผนังของเครื่องอบแห้งได้ง่าย ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้คือเพื่อปรับปรุงเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำต้นแบบของ Sathapornprasath et al. (2007) ให้เหมาะสมสำหรับการอบแห้งวัสดุอนุภาคที่มีความชื้นสูง จากนั้นจึงศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งในเทอมของอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร โดยใช้กากถั่วเหลืองเป็นวัสดุทดสอบ นอกจากนี้ยังศึกษาค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบเพื่อนำผลที่ได้ไปใช้อธิบายสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง ตลอดจนหาค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องอบแห้งที่เงื่อนไขการทำงานต่าง ๆ ซึ่งจากผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งพบว่า อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุดมีค่าประมาณ $520 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3\text{h}$ ส่วนสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุดมีค่าประมาณ $4,500 \text{ W}/\text{m}^3\text{K}$ นอกจากนี้ยังพบว่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบมีค่าประมาณ 0.97-1.74 วินาที ส่วนความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าต่ำสุดประมาณ $5.6 \text{ MJ}/\text{kg}_{\text{water}}$

คำสำคัญ: กากถั่วเหลือง/การอบแห้ง/เครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำ/สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร/อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร

Abstract

Impinging stream dryer (ISD) is a novel alternative to flash dryer for high-moisture particulate materials. However, information on the effects of various geometric and operating parameters of an ISD on its performance is not very limited and inconclusive. In addition, ISD has so far been tested mainly with model materials, which do not represent the real challenge of higher-moisture materials, which tend to be sticky in nature. In this research, modifications were made to an existing coaxial two-impinging stream dryer of Sathapornprasath et al. (2007) to make it more suitable for high-moisture particulate materials. The newly modified dryer was then evaluated for its performance in terms of the volumetric water evaporation rate and volumetric heat transfer coefficient. Soy residue (okara), which is a by-product of a soymilk production process, was used as a test material. Particle mean residence time was also evaluated and the results were used to support and explain the performance data of the dryer. Finally, the specific energy consumption of the dryer was assessed. The maximum volumetric water evaporation rate was found to be around $520 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3 \text{ h}$, while the maximum volumetric heat transfer coefficient was around $4,500 \text{ W}/\text{m}^3 \text{ K}$ for the mean particle residence time of approximately 0.97-1.74 s. In terms of the specific energy consumption the lowest specific energy consumption was found to be around $5.6 \text{ MJ}/\text{kg}_{\text{water}}$.

Keywords: Drying/Impinging stream dryer/Okara/Volumetric heat transfer coefficient/
Volumetric water evaporation rate

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ii
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	iii
สารบัญ	iv
รายการรูปประกอบ	vi
รายการตาราง	vii
รายการสัญลักษณ์และคำย่อ	viii+
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย	4
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 การถ่ายเทความร้อนและมวลสารในระบบบอนุภาค	5
2.2 หลักการของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน	8
2.3 ผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน	9
2.4 เวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ	14
2.5 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ	16
3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	19
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	19
3.2 เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง	21
3.3 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	21
3.4 การควบคุมอัตราการป้อนวัสดุ	22
3.5 การกำหนดตัวแปรการทดลอง	23
3.6 การเตรียมภาคั่วเหลืองก่อนการทดลอง	23

3.7	ขั้นตอนการทดลอง	24
3.8	การทดลองหาค่าเวลาที่วัสดุอยู่ในระบบ	24
3.9	การประมาณการความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ	26
3.10	การวิเคราะห์ทางสถิติ	26
4.	ผลการทดลองและวิจารณ์	27
4.1	ผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่ออัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร	27
4.2	ผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร	29
4.3	เวลาที่วัสดุอยู่ในระบบ	31
4.4	ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ	32
5.	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	35
5.1	สรุปผลการวิจัย	35
5.2	ข้อเสนอแนะ	36
	เอกสารอ้างอิง	37
	ผลงานตีพิมพ์	40

รายการรูปประกอบ

รูป	หน้า
2.1 หลักการของระบบกระแสชน	6
2.2 ผลของแผ่นกั้นที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน	7
2.3 ผลของแผ่นกั้นที่มีต่อเวลาเฉลี่ยที่อนุภาคอยู่ในระบบ	8
2.4 หลักการของเครื่องอบแห้งแบบกระแสชน (ISD)	9
3.1 แผนผังของเครื่องอบแห้งแบบกระแสชน	20
3.2 ลักษณะของกากถั่วเหลืองก่อนการคั้นน้ำ	22
3.3 ลักษณะของกากถั่วเหลืองก่อนนำมาใช้ทดลอง	22
3.4 การผึ่งกากถั่วเหลืองก่อนนำมาใช้ทดลอง	23
4.1 ผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร	28
4.2 ผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร	30

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
4.1 เวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ	31
4.2 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้งกากถั่วเหลือง	33

รายการสัญลักษณ์และคำย่อ

E	=	พลังงานที่ป้อนให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้า, MJ
h_v	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร, W/m^3K
m_p	=	ปริมาณของวัสดุที่คงอยู่ในระบบ, kg
m_w	=	ปริมาณของน้ำที่ออกจากผิววัสดุ, kg_{water}
\dot{m}_a	=	อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ, $kg_{dry\ air}/min$
N_v	=	อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร, kg_{water}/m^3h
t	=	เวลาในการอบแห้ง, min
T_{di}	=	อุณหภูมิกระเปาะแห้งที่ทางเข้าของการอบแห้ง, K
T_{do}	=	อุณหภูมิกระเปาะแห้งที่ทางออกของการอบแห้ง, K
T_{wi}	=	อุณหภูมิกระเปาะเปียกที่ทางเข้าของการอบแห้ง, K
T_{wo}	=	อุณหภูมิกระเปาะเปียกที่ทางออกของการอบแห้ง, K
U	=	ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างอนุภาคกับของไหลตัวกลาง, m/s
U_a	=	ความเร็วของแก๊สหรือของไหลตัวกลาง, m/s
U_p	=	ความเร็วของอนุภาค, m/s
V_r	=	ปริมาตรห้องอบแห้ง, m^3
W_p	=	อัตราการป้อนวัสดุ, $kg_{dry\ solid}/h$
X_i	=	ความชื้นของวัสดุที่ทางเข้า, kg/kg (d.b.)
X_o	=	ความชื้นของวัสดุที่ทางออก, kg/kg (d.b.)
Δp	=	ความดันลด, N/m^2
ΔT_{lm}	=	ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยลอการิทึม, K
Δw	=	ผลต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นของอากาศร้อน, $kg_{water}/kg_{dry\ air}$

สัญลักษณ์กรีก

λ	=	ความร้อนแฝงของการระเหย, J/kg
τ	=	เวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ, s

ตัวห้อย

a	=	อากาศ
blower	=	เครื่องเป่าลมแรงดันสูง
d	=	แห้ง
e	=	ทางออก
heater	=	เครื่องทำความร้อนแบบไฟฟ้า
i	=	ทางเข้า
p	=	วัสดุ
r	=	สัมพัทธ์
w	=	เปียก, น้ำ

คำย่อ

SEC	=	ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ, MJ/kg _{water}
-----	---	---

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

โดยทั่วไปอุตสาหกรรมที่ต้องนำผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรมาแปรรูปมักก่อให้เกิดกากของเสียหรือวัสดุเหลือทิ้งในรูปแบบต่าง ๆ อยู่เสมอซึ่งปริมาณของกากของเสียหรือวัสดุเหลือทิ้งจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับลักษณะของกระบวนการผลิต กำลังการผลิต รวมไปถึงชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ทำการผลิต ในกรณีที่เกิดกากของเสียหรือวัสดุเหลือทิ้งดังกล่าวมีปริมาณมาก การจัดการกากของเสียหรือวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้ถือเป็นเรื่องที่มีความสำคัญมาก ตัวอย่างของกากของเสียหรือวัสดุเหลือทิ้งที่เกิดจากกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรที่เห็นได้ชัดเจน ได้แก่ กากถั่วเหลือง (Okara) ที่เหลือจากกระบวนการผลิตน้ำมันถั่วเหลืองซึ่งมีปริมาณค่อนข้างมากในแต่ละปี โดยปกติแล้วกากถั่วเหลืองที่ได้จากกระบวนการดังกล่าวจะมีความชื้นสูงซึ่งจะเสื่อมสภาพ (เน่าเสีย) อย่างรวดเร็ว หากไม่มีวิธีการจัดการที่เหมาะสมก็อาจก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและชีวอนามัยตามมา การจัดการกับกากถั่วเหลืองที่ได้จากกระบวนการดังกล่าวข้างต้นสามารถทำได้หลายวิธี แต่หนึ่งในวิธีการที่มีความเหมาะสมเป็นอย่างยิ่งได้แก่การอบแห้ง ซึ่งจะช่วยให้กากถั่วเหลืองมีความชื้นลดลงหรือกลายเป็นกากถั่วเหลืองแห้งที่ง่ายต่อการจัดการต่อไปด้วยวิธีการต่าง ๆ นอกจากนี้เนื่องจากกากถั่วเหลืองดังกล่าวยังคงมีคุณค่าทางอาหารอยู่มาก กล่าวคือ มีใยอาหาร ประมาณ 60% (d.b.) โปรตีน ประมาณ 29% (d.b.) และไขมัน ประมาณ 11% (d.b.) (Taruna and Jindal, 2002) ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำกากถั่วเหลืองดังกล่าวไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ เช่น ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตอาหารสัตว์ รวมไปถึงใช้เป็นส่วนประกอบในการผลิตอาหารสำหรับมนุษย์ เป็นต้น

ดังที่กล่าวข้างต้นกากถั่วเหลืองที่ไม่ผ่านกระบวนการลดความชื้นจะเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็ว ดังนั้นหากต้องการนำกากถั่วเหลืองมาใช้ประโยชน์จึงจำเป็นต้องนำกากถั่วเหลืองไปผ่านกระบวนการอบแห้งที่เหมาะสม ทั้งนี้เพื่อให้ได้กากถั่วเหลืองแห้งที่มีลักษณะเป็นไปตามความต้องการและสามารถเก็บรักษาไว้ได้นาน โดยทั่วไปแล้วการอบแห้งกากถั่วเหลืองสามารถทำได้ด้วยการใช้เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง (Drum dryer) เครื่องอบแห้งแบบโรตารี (Rotary dryer) หรือเครื่องอบแห้งแบบสปอตเทดเบด (Spouted bed dryer) เป็นต้น แต่การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งดังกล่าวมีข้อจำกัดโดยเฉพาะในแง่ของพลังงานที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง (มีประสิทธิภาพทางความร้อนต่ำ) ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องหาวิธีการอบแห้งแบบอื่นที่มีประสิทธิภาพทางความร้อนสูง

โดยหลักการแล้วประสิทธิภาพทางความร้อนของกระบวนการอบแห้งภาคตัวเหลือง (หรือวัสดุอนุภาคอื่น ๆ) สามารถเพิ่มขึ้นได้โดยการทำให้วัสดุมีลักษณะเป็นอนุภาคขนาดเล็ก ๆ ทั้งนี้เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างวัสดุกับอากาศร้อนหรือโดยการเพิ่มระยะเวลาในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างวัสดุกับอากาศร้อน รวมไปถึงการทำให้ความต้านทานในการถ่ายเทมวลและความร้อนที่ผิวของวัสดุลดลง โดยปรากฏการณ์ทั้งหมดที่กล่าวนี้สามารถเกิดขึ้นได้ด้วยการใช้ระบบการอบแห้งแบบกระแสน้ำ (Impinging stream drying)

หลักการพื้นฐานของการอบแห้งแบบกระแสน้ำคือการให้กระแสการไหลของตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้ง (โดยส่วนใหญ่คืออากาศร้อน) 2 กระแส (หรือมากกว่า) มาชนกัน โดยให้กระแสใดกระแสหนึ่ง (หรือมากกว่า) พาววัสดุเข้าสู่ระบบ ผลของการชนกันของกระแสการไหลของตัวกลางที่ใช้การอบแห้งจะทำให้เกิดบริเวณการชน (Impingement zone) ซึ่งเป็นบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทมวลสารความร้อน และโมเมนต์ที่สูงมาก ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณดังกล่าวมีแรงเฉือนและความปั่นป่วนของกระแสการไหลสูงมาก นอกจากนี้การเคลื่อนที่ของวัสดุภายในระบบยังมีลักษณะพิเศษ กล่าวคือการเคลื่อนที่ของวัสดุจะเป็นแบบสวนทางกลับไปกลับมา (Oscillatory motion) ภายในบริเวณการชน ซึ่งเริ่มต้นจากการที่วัสดุถูกเร่งให้มีความเร็วสูงโดยกระแสการไหลของตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้ง กระแสหนึ่ง (กระแสที่พาววัสดุเข้าสู่ระบบ) และวิ่งสวนเข้าไปในกระแสการไหลตรงกันข้ามอันเนื่องมาจากแรงเฉื่อยของวัสดุนั้น จนในที่สุดวัสดุดังกล่าวจะหยุดการเคลื่อนที่เนื่องจากถูกต้านด้วยกระแสการไหลตรงกันข้าม หลังจากนั้นวัสดุจะถูกเร่งให้มีความเร็วสูงขึ้นอีกครั้งโดยกระแสการไหลตรงกันข้ามเพื่อเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณการชนอีกครั้ง ปรากฏการณ์การเคลื่อนที่ของวัสดุจะเป็นเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งความเร็วของวัสดุลดลงจนถึงค่า ๆ หนึ่ง วัสดุจะถูกกระแสการไหลของตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้งพาออกไปจากระบบ (ห้องอบแห้ง) ด้วยลักษณะการเคลื่อนที่แบบกลับไปกลับมา ดังกล่าว วัสดุจะอยู่ในระบบเป็นระยะเวลาที่ยาวขึ้น เวลาในการแลกเปลี่ยนความร้อนและมวลสารระหว่างวัสดุกับตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้งจึงมากขึ้นไปด้วย จึงทำให้ระบบการอบแห้งแบบกระแสน้ำมีประสิทธิภาพทางความร้อนสูงกว่าระบบการอบแห้งชนิดอื่นมาก นั้นหมายความว่าระบบการอบแห้งแบบกระแสน้ำจะมีขนาดเล็กกว่าเครื่องอบแห้งแบบอื่นที่ภาระการอบแห้งเท่ากัน จึงนับได้ว่าการอบแห้งแบบกระแสน้ำเป็นระบบการอบแห้งที่มีความน่าสนใจในการนำมาประยุกต์ใช้เป็นอย่างยิ่ง

แม้ว่าจะมีจุดเด่นในแง่ของประสิทธิภาพทางความร้อนที่สูงดังกล่าวข้างต้น รวมไปถึงการเป็นระบบที่ไม่ซับซ้อน แต่ระบบการอบแห้งแบบกระแสน้ำยังเป็นเทคโนโลยีที่ค่อนข้างใหม่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับประเทศไทย การพัฒนาและการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับระบบการอบแห้งแบบนี้ยังมีจำนวนไม่มาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่นำมาประยุกต์ใช้กับวัสดุเหลือทิ้งที่เกิดจากกระบวนการแปรรูป

อาหารซึ่งเป็นวัสดุที่สลับซับซ้อนเมื่อเทียบกับวัสดุอื่น ๆ ที่มีการศึกษากันมาแล้ว สำหรับในประเทศไทยนั้น เครื่องอบแห้งแบบกระแสนเครื่องแรกได้ถูกพัฒนาขึ้นโดย Sathapornprasath et al. (2007) แต่ด้วยขนาดของเครื่องอบแห้งที่ค่อนข้างเล็ก (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางเข้าประมาณ 25 mm) จึงทำให้เกิดปัญหาการอุดตันภายในระบบได้ง่ายเมื่อนำมาใช้ในการอบแห้งกากถั่วเหลือง ประกอบเกิดปัญหาการจับตัวกันของกากถั่วเหลืองในระหว่างการป้อนกากถั่วเหลืองเข้าเครื่องอบแห้งโดยใช้สกรูลำเลียง (Screw conveyor) ส่งผลให้อัตราการป้อนกากถั่วเหลืองเข้าเครื่องอบแห้งไม่สม่ำเสมอด้วยเหตุนี้ การศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสนที่ได้พัฒนาขึ้นสำหรับการอบแห้งกากถั่วเหลืองจึงไม่สามารถทำได้

ด้วยเหตุดังกล่าวข้างต้น คณะผู้วิจัยจึงเกิดแนวคิดที่จะพัฒนาระบบการอบแห้งแบบกระแสนสำหรับการอบแห้งกากถั่วเหลืองขึ้น โดยการเพิ่มขนาดของเครื่องอบแห้งให้ใหญ่ขึ้นเพื่อแก้ปัญหาการอุดตันในระบบ รวมไปถึงการปรับเปลี่ยนวิธีการป้อนกากถั่วเหลืองเข้าระบบให้มีความสม่ำเสมอมากขึ้น นอกจากนี้จะทำการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในการอบแห้งกากถั่วเหลืองซึ่งได้แก่ อุณหภูมิของอากาศร้อน ความเร็วของอากาศร้อน และอัตราการป้อนกากถั่วเหลืองที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน ผลจากการศึกษาจะสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการพัฒนาระบบการอบแห้งกากถั่วเหลืองให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น รวมถึงสามารถนำไปขยายผลเพื่อการอบแห้งวัสดุทางการเกษตรชนิดอื่นในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อปรับปรุงเครื่องอบแห้งแบบกระแสนต้นแบบสำหรับอบแห้งกากถั่วเหลือง
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในการอบแห้งกากถั่วเหลืองที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสนในแง่ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรและอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ปรับปรุงเครื่องอบแห้งแบบกระแสนต้นแบบจากเครื่องอบแห้งซึ่งได้รับการพัฒนาโดย Sathapornprasath et al. (2007) โดยเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทางเข้าห้องอบแห้งเป็น 65 mm และกำหนดให้มีช่องทางออกของอากาศและวัสดุจากห้องอบแห้งเพียงทางเดียว

2. ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในการอบแห้งกากถั่วเหลือง อันได้แก่ อุณหภูมิของอากาศร้อน ความเร็วของอากาศร้อน และอัตราการป้อนกากถั่วเหลือง (อย่างละ 3 ค่า) ที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสนอนแรงของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรและอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

องค์ความรู้เกี่ยวกับการประยุกต์แนวคิดของการอบแห้งแบบกระแสนอนในการอบแห้งวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรซึ่งสามารถนำไปต่อยอดเพื่อพัฒนาเป็นเครื่องอบแห้งแบบกระแสนอนในระดับอุตสาหกรรมได้ในอนาคต นอกจากนี้ยังคาดว่าจะได้ผลงานวิจัยซึ่งสามารถตีพิมพ์ได้ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติอีก 1 เรื่อง

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การถ่ายเทความร้อนและมวลสารในระบบอนุภาค

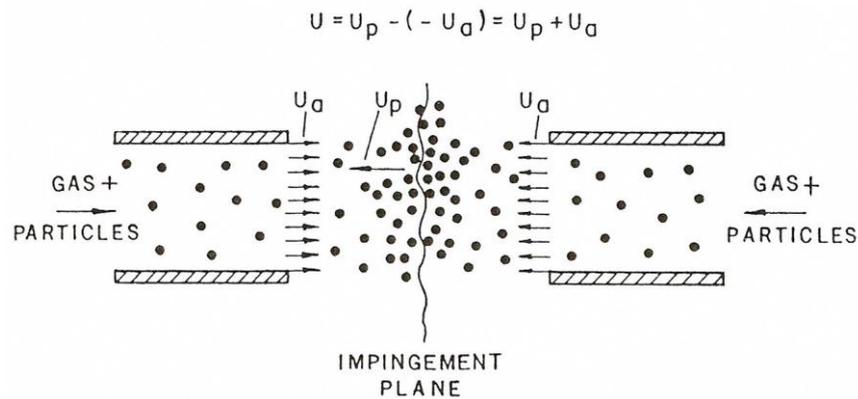
โดยทั่วไปกระบวนการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer) และการถ่ายเทมวลสาร (Mass transfer) ระหว่าง ก๊าซ-ของแข็ง ก๊าซ-ของเหลว ของเหลว-ของเหลว และของแข็ง-ของเหลว จะพิจารณาในเทอมของความต้านทานสามส่วนที่สัมพันธ์กัน ได้แก่ ความต้านทานภายนอก (External resistance) ความต้านทานที่ผิว (Surface resistance) และความต้านทานภายใน (Internal resistance)

Tamir (1994) แสดงตัวอย่างของระบบละอองของเหลว-ก๊าซ เพื่อให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของความต้านทานต่าง ๆ โดยความต้านทานด้านก๊าซกำหนดให้เป็นความต้านทานภายนอก ส่วนความต้านทานที่ผิวเกิดจากการสะสมของสิ่งสกปรกบริเวณผิวสัมผัสและความต้านทานภายในเกิดจากอนุภาคของเหลวหรือของแข็งเอง ดังนั้นถ้าสามารถลดความต้านทานส่วนใดส่วนหนึ่งหรือทั้งสามส่วนลงได้ก็จะทำให้กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนและมวลสารเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

โดยทั่วไปความต้านทานภายในอาจทำให้ลดลงได้โดยการลดขนาดของอนุภาคของแข็งหรือละอองของเหลว แต่ถ้าไม่สามารถทำได้จะต้องทำให้เวลาที่อนุภาคอยู่ในระบบ (Residence time) นานขึ้น ส่วนการลดความต้านทานที่ผิวอาจทำได้โดยการกำจัดสิ่งสกปรกที่ผิวออกไป สำหรับการลดความต้านทานภายนอกอาจทำได้ดังนี้

1. เพิ่มความเร็วสัมพัทธ์ (Relative velocity) ระหว่างอนุภาคกับของไหลอย่างต่อเนื่อง แต่วิธีนี้จะทำให้เกิดแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความดันลด (Pressure drop) ในระบบสูงขึ้น
2. ลดขนาดของอนุภาคให้เล็กลงซึ่งจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและมวลสารเพิ่มขึ้น ($h \propto 1/d_p$) แต่ก็อาจทำให้ความเร็วสัมพัทธ์ลดลงไปด้วย
3. ทำให้อนุภาคกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในกระแสการไหล

การลดความต้านทานต่าง ๆ โดยใช้วิธีการของระบบกระแสนอนอาจพิจารณาได้จากรูปที่ 2.1 โดยผลการชนกันของกระแสของไหล 2 กระแสที่มีทิศทางไหลตรงกันข้ามจะทำให้เกิดความปั่นป่วนในบริเวณการชนสูง ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลสารสูงขึ้นด้วย



รูปที่ 2.1 หลักการของระบบกระแสชน (Tamir, 1994)

การเพิ่มขึ้นของอัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในระบบกระแสชนอาจเป็นผลมาจาก (Tamir, 1994)

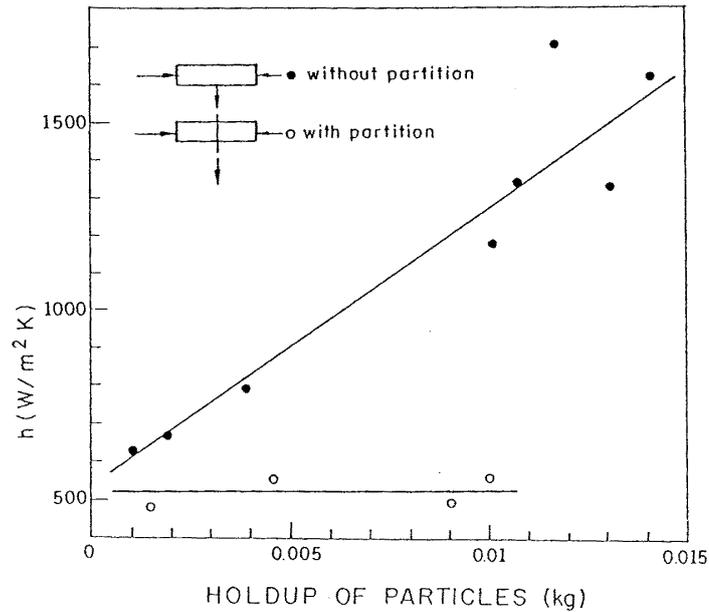
1. การเพิ่มขึ้นของความเร็วสัมพัทธ์ U ระหว่างอนุภาคที่กำลังเคลื่อนที่ทะลุผ่านกระแสการไหลตรงข้ามของไหลตรงข้ามดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$U = U_p - (-U_a) = U_p + U_a \quad (2.1)$$

อนุภาคจะมีความเร็วเท่ากับความเร็วของไหลที่ตำแหน่งทางเข้าของกระแสการไหลตรงข้าม $U_p = -U_a$ ดังนั้นขณะที่อนุภาคผ่านกระแสการไหลตรงข้ามความเร็วสัมพัทธ์จะเพิ่มขึ้นจนเป็นสองเท่าของความเร็วของไหล $U = 2U_a$ ซึ่งผลที่ได้จะทำให้ความต้านทานภายนอกจะลดลง

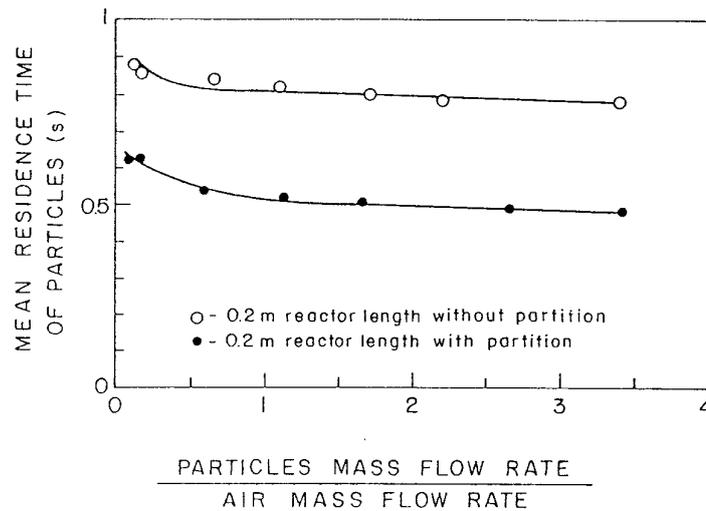
2. การเพิ่มขึ้นของเวลาที่อนุภาคอยู่ในระบบซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ทะลุผ่านของอนุภาคเข้าไปในกระแสการไหลตรงข้ามและการเคลื่อนที่กลับไป-มาของอนุภาคในบริเวณการชน อย่างไรก็ตามในระบบที่มีอนุภาคอยู่กันอย่างหนาแน่น การชนกันของอนุภาคจำนวนมากอาจลดเวลาที่อนุภาคอยู่ในระบบลงได้
3. ในระบบก๊าซ-ของเหลว ของเหลว-ของเหลว แรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากการชนกันของกระแสของไหลทำให้เกิดการกระจาย (Dispersion) ของอนุภาคทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสเพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลสารเพิ่มขึ้น
4. การชนกันอย่างต่อเนื่องของกระแสของไหลจะเหนี่ยวนำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความดันของไหลหรือทำให้เกิดความปั่นป่วนในแนวรัศมีและแนวแกนส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและมวลสารที่ดีในบริเวณการชน

รูปที่ 2.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนกับปริมาณของอนุภาคในที่อยู่ระบบกระแสน ทั้งในกรณีที่มีแผ่นกั้น (เพื่อไม่ให้กระแสของไหลสองกระแสนกั้น) และไม่มีแผ่นกั้น จะเห็นว่ากรณีของเครื่องอบแห้งที่ไม่มีแผ่นกั้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณอนุภาคที่อยู่ในระบบ ในขณะที่เครื่องอบแห้งแบบมีแผ่นกั้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะไม่มีเปลี่ยนแปลงกับปริมาณอนุภาคที่อยู่ในระบบ



รูปที่ 2.2 ผลของแผ่นกั้นที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Tamir, 1994)

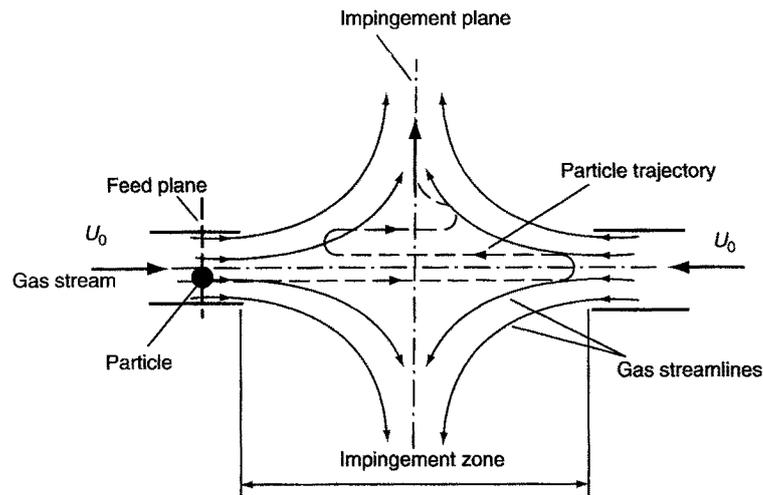
รูปที่ 2.3 แสดงเวลาเฉลี่ยที่อนุภาคอยู่ในระบบทั้งกรณีที่มีแผ่นกั้นและไม่มีแผ่นกั้น จะเห็นว่ากรณีที่ไม่มีแผ่นกั้นเวลาเฉลี่ยที่อนุภาคอยู่ในระบบมีค่ามากกว่ากรณีที่ไม่มีแผ่นกั้น เนื่องจากการมีแผ่นกั้นจะทำให้อนุภาคไม่สามารถเคลื่อนที่ทะลุผ่านเข้าสู่กระแสการไหลตรงข้ามได้ทำให้ไม่เกิดการเคลื่อนที่กลับไป-มาในบริเวณการชน



รูปที่ 2.3 ผลของแผ่นกั้นที่มีต่อเวลาเฉลี่ยที่อนุภาคอยู่ในระบบ (Tamir, 1994)

2.2 หลักการของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน

เครื่องอบแห้งแบบกระแสน (Impinging Stream Dryer, ISD) จัดอยู่ในกลุ่มเครื่องอบแห้งแบบแฟลช (Flash dryer) ซึ่งเหมาะกับการอบแห้งอนุภาคเปียก (Wet particles) หรือละอองของเหลว (Liquid droplets) โดยกระบวนการอบแห้งจะเกิดขึ้นในบริเวณการชน (Impingement zone) เป็นหลัก ทั้งนี้เนื่องจากการชนกันของกระแสของไหลความเร็วสูงสองกระแสที่มีทิศทางตรงข้ามกัน โดยอาจทำการป้อนวัสดุที่ต้องการอบแห้งเข้าไปที่ด้านหนึ่งหรือทั้งสองด้านของกระแสการไหล และจากคุณลักษณะทางอุทกพลวัต (Hydrodynamic characteristics) ในบริเวณการชนและผลของความเฉื่อย (Inertia) ของอนุภาคที่มีมากกว่าของไหลตัวกลางทำให้อนุภาคสามารถเคลื่อนที่กลับไป-มาในบริเวณระนาบการชน (Impingement plane) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ทำให้อนุภาคมีเวลาในการแลกเปลี่ยนความร้อนและมวลสารกับกระแสของไหลได้นานขึ้น นอกจากนี้ในบริเวณการชนมีความปั่นป่วน (Turbulence) สูงและเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้เกิดกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในอัตราที่สูง ดังนั้นความชื้นของอนุภาคจึงระเหยออกไปอย่างรวดเร็วส่งผลให้ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นลง



รูปที่ 2.4 หลักการของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำวน (ISD) (Kudra et al., 1995)

จากลักษณะพิเศษทางอุทกพลศาสตร์ของระบบกระแสน้ำวนทำให้เครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำวนมีลักษณะเด่นหลายประการดังนี้ (Kudra et al., 1995)

1. อัตราการอบแห้งสูง
2. การออกแบบและการทำงานของเครื่องอบแห้งไม่ยุ่งยากเนื่องจากไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่
3. เครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำวนมีขนาดเล็กกว่าเครื่องอบแห้งชนิดอื่น ๆ ที่มีการอบแห้งเท่ากัน
4. สามารถใช้งานร่วมกับกระบวนการอื่น ๆ ได้ดี เช่น กระบวนการทำความเย็น กระบวนการทางเคมี

2.3 ผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำวน

โดยทั่วไปสมรรถนะของเครื่องอบแห้งสามารถประเมินได้ในเทอมของอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร (Volumetric water evaporation rate) และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร (Volumetric heat transfer coefficient) ซึ่งคำนวณได้จากสมการดังนี้ (Kitron et al., 1987; Sathapornprasath et al., 2007; Yao et al., 1995)

2.3.1 อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร

$$N_v = \frac{W_p (X_i - X_o)}{V_r} \quad (2.2)$$

เมื่อ	N_v	คือ อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร, $\text{kg}_{\text{water}}/\text{m}^3 \text{ h}$
	W_p	คือ อัตราการป้อนวัสดุ, $\text{kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$
	X_i	คือ ความชื้นของวัสดุที่ทางเข้า, kg/kg (d.b.)
	X_o	คือ ความชื้นของวัสดุที่ทางออก, kg/kg (d.b.)
	V_r	คือ ปริมาตรห้องอบแห้ง, m^3

2.3.2 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร

$$h_v = \frac{W_p (X_i - X_o) \lambda}{V_r \Delta T_{lm}} \quad (2.3)$$

เมื่อ	h_v	คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร, $\text{W}/\text{m}^3\text{K}$
	W_p	คือ อัตราการป้อนวัสดุ, $\text{kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$
	X_i	คือ ความชื้นของวัสดุที่ทางเข้า, kg/kg (d.b.)
	X_o	คือ ความชื้นของวัสดุที่ทางออก, kg/kg (d.b.)
	V_r	คือ ปริมาตรห้องอบแห้ง, m^3
	λ	คือ ความร้อนแฝงของการระเหย, J/kg
	ΔT_{lm}	คือ ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยลอการิทึม, K ซึ่งหาได้จาก

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{do} - T_{wo}) - (T_{di} - T_{wi})}{\ln \frac{(T_{do} - T_{wi})}{(T_{di} - T_{wo})}} \quad (2.4)$$

เมื่อ	T_{di}	คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้งที่ทางเข้าของการอบแห้ง, K
	T_{do}	คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้งที่ทางออกของการอบแห้ง, K
	T_{wi}	คือ อุณหภูมิกระเปาะเปียกที่ทางเข้าของการอบแห้ง, K
	T_{wo}	คือ อุณหภูมิกระเปาะเปียกที่ทางออกของการอบแห้ง, K

สมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสนอนอาจจะขึ้นอยู่กับรูปแบบของเครื่องอบแห้งเองและตัวแปรการทำงานต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิตัวกลางขาเข้า ระยะห่างการชน อัตราการป้อนอนุภาคเข้าสู่ระบบ ความเร็วกระแสนอน ชนิดของตัวกลาง ความชื้นเริ่มต้นของอนุภาค เป็นต้น ดังนั้นการศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ เหล่านี้ที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสนอนมีความสำคัญสำหรับการพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบกระแสนอนเพื่อให้มีประสิทธิภาพที่สูงยิ่งขึ้น

Kitron et al. (1987) ศึกษาพลศาสตร์การเคลื่อนที่ของอนุภาค เวลาที่อนุภาคอยู่ในระบบและพฤติกรรมการอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำทิศทาง (Four impinging streams, FIS) และเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำสองทิศทาง (Two impinging streams, TIS) โดยทำการเปรียบเทียบสมรรถนะในการอบแห้ง พบว่าสภาวะการอบแห้งที่ดีที่สุดสามารถพิจารณาได้จากอัตราการเพิ่มขึ้นของภาระการป้อนอนุภาคเข้าสู่ระบบ โดยถ้าป้อนอนุภาคเข้าสู่ระบบได้มากขึ้นแล้วเครื่องอบแห้งยังสามารถดึงความชื้นออกจากอนุภาคได้หมด นั่นแสดงว่าเครื่องอบแห้งนี้มีสมรรถนะการทำงานที่สูงและยังสามารถเพิ่มสมรรถนะของเครื่องอบแห้งได้อีก

Kitron and Tamir (1988) พบว่าอนุภาคจะอยู่ในระบบนานขึ้น (ที่อัตราการไหลอากาศคงที่) เมื่ออัตราการป้อนอนุภาคเพิ่มขึ้น แต่จะเพิ่มขึ้นได้ถึงค่าหนึ่งเท่านั้น เนื่องจากอนุภาคในระบบชนกันมากขึ้นทำให้อนุภาคสูญเสียพลังงานจลน์ (Kinetic energy) และจะเคลื่อนที่ออกจากห้องอบแห้งไป ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อพลังงานจลน์ของอนุภาคสูงขึ้นทำให้การเคลื่อนที่กลับไป-มา นานขึ้น ส่งผลให้เวลาที่อนุภาคอยู่ในระบบเพิ่มขึ้น ในกรณีของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน พบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการป้อนอนุภาคเพิ่มขึ้น แต่จะเพิ่มขึ้นสูงสุดและคงที่ที่ค่าอัตราการป้อนค่าหนึ่งเท่านั้น

Sathapornprasath et al. (2004) ศึกษาผลการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขการทำงานที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำ โดยทำการคำนวณค่าอัตราการระเหยน้ำของอนุภาคเดี่ยวภายใต้ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ สำหรับกรณีของอากาศร้อน พบว่าการเพิ่มความเร็วและอุณหภูมิอากาศเข้าส่งผลให้อัตราการระเหยน้ำเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ทำให้อัตราการระเหยน้ำลดลง ส่วนกรณีของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง พบว่าการเพิ่มความเร็วและอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งเข้าส่งผลให้อัตราการระเหยน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ในขณะที่การเพิ่มความดันไอน้ำร้อนยวดยิ่งกลับส่งผลให้อัตราการระเหยน้ำมีค่าลดลง สำหรับค่าอุณหภูมิผกผันของกรณีการอบแห้งนี้มีค่าประมาณ $212\text{ }^{\circ}\text{C}$ ที่อัตราการระเหยน้ำเท่ากับ $60\text{ kg/m}^2\text{h}$

Sathapornprasath et al. (2007) ศึกษาผลของอุณหภูมิอากาศเข้า ความเร็วอากาศเข้า อัตราการป้อนวัสดุและระยะห่างการชนที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำในเทอมของค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร จากผลการศึกษาพบว่าในทุกเงื่อนไขการทำงานค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศเข้า ในขณะที่อุณหภูมิอากาศเข้ามีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรอย่างไม่มีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรมีค่าสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความเร็วอากาศเข้าและอัตราการป้อน

วัสดุที่แต่ละอุณหภูมิการอบแห้ง ส่วนผลของระยะห่างการชนที่มีต่อค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรจะขึ้นอยู่กับค่าความเร็วอากาศขาเข้าและอัตราการป้อนวัสดุ โดยอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุดมีค่าประมาณ $110 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3\text{h}$ ในขณะที่สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุดมีค่าประมาณ $880 \text{ W}/\text{m}^3\text{K}$ ซึ่งในการทดลองได้พบปัญหาที่เกิดจากระบบการป้อนวัสดุเข้าสู่เครื่องอบแห้งทำได้อย่างไม่สม่ำเสมอ

Jantaka (2007) ทำการปรับปรุงเครื่องอบแห้งแบบกระแสนของ Sathapomprasath et al. (2007) โดยทำการขยายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อส่งวัสดุเข้าสู่เครื่องอบแห้งให้ใหญ่ขึ้น และเปลี่ยนอุปกรณ์ป้อนวัสดุแบบสกรูลำเลียงเป็นแบบสายพานลำเลียง (Belt conveyor) และได้ทำการทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งที่ปรับปรุงแล้วโดยใช้กากถั่วเหลืองเป็นวัสดุทดลอง พบว่าที่ทุกสภาวะการอบแห้งค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งเพิ่มขึ้น แต่อุณหภูมิไม่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร ส่วนผลของระยะห่างการชนที่มีต่อค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรจะขึ้นอยู่กับอัตราการป้อนวัสดุ โดยอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุดมีค่าประมาณ $300 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3\text{h}$ ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุดมีค่าประมาณ $5,750 \text{ W}/\text{m}^3\text{K}$ ซึ่งค่าทั้งสองดังกล่าวมีค่าสูงกว่าของ Sathapomprasath et al. (2007) ทั้งนี้อาจเนื่องจากปริมาณวัสดุที่ป้อนเข้าสู่เครื่องอบแห้งมีความสม่ำเสมอและต่อเนื่อง ทั้งนี้เพราะว่าการใช้อุปกรณ์ป้อนวัสดุแบบสายพานลำเลียงทำให้การควบคุมอัตราการป้อนวัสดุเข้าสู่เครื่องอบแห้งทำได้ดีขึ้น จึงทำให้กระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารภายในห้องอบแห้งเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอและต่อเนื่องจนถึงสภาวะสูงสุดของอัตราการระเหยน้ำที่เครื่องอบแห้งสามารถทำได้ จึงส่งผลให้ค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงขึ้น และยังพบว่าอาจเกิดจากความแตกต่างของตำแหน่งการวัดค่าอุณหภูมิอากาศขาเข้า ซึ่งในกรณีของ Jantaka (2007) ทำการวัดอุณหภูมิกระเปาะเปียกและอุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศขาเข้าที่จุด A และ D ตามลำดับ (ดูรูปที่ 3.1) ส่วนในกรณีของ Sathapomprasath et al. (2007) ทำการวัดอุณหภูมิกระเปาะเปียกและอุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศขาเข้าที่จุด B และ A ตามลำดับ จึงเห็นได้ว่าความแตกต่างของตำแหน่งการวัดอุณหภูมิดังกล่าวอาจส่งผลต่อความแตกต่างของค่าอุณหภูมิที่วัดได้ และเมื่อนำค่าของอุณหภูมิดังกล่าวไปทำการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรจึงทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวแตกต่างกัน นอกจากนี้ในการทดลองยังได้พบปัญหาที่เกิดจากการควบคุมอุณหภูมิของอากาศร้อนให้เข้าสู่สภาวะคงตัวทำได้ยากและต้องใช้เวลาาน ทั้งนี้เนื่องจาก เครื่องอบแห้งดังกล่าว มีเครื่องทำความร้อนแบบไฟฟ้าเพียงชุดเดียวจึงมีจุดควบคุมอุณหภูมิอากาศขาเข้าห้องอบแห้งเพียงด้านเดียว ประกอบกับท่อส่งของไหลเข้าห้องอบแห้งทั้งสองด้านมีความยาวไม่เท่ากันจึงอาจส่งผลให้การควบคุมอุณหภูมิอากาศขาเข้าห้องอบแห้งทั้งสองด้านทำได้ยากดังกล่าว

Choicharoen (2008) ทำการปรับปรุงเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำจาก Jantaka (2007) โดยทำการแยกเครื่องทำความร้อนแบบไฟฟ้าที่มีกำลังเท่ากันออกเป็นสองชุดและจัดวางในตำแหน่งที่สมมาตรกันกับระยะของห้องอบแห้ง (ดูรูปที่ 3.1) นอกจากนี้ยังได้ทำการแยกชุดควบคุมอุณหภูมิออกเป็นสองชุดเพื่อให้การควบคุมอุณหภูมิอากาศเข้าทั้งสองด้านของห้องอบแห้งเป็นอิสระต่อกันพร้อมกับติดตั้งเทอร์มอคัปเปิลสำหรับวัดค่าอุณหภูมิไว้ที่ท่อส่งอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้งทั้งสองด้านเพื่อให้เทอร์มอคัปเปิลแต่ละตัววัดอุณหภูมิอากาศเข้าในตำแหน่งที่ถูกติดตั้งอยู่ เพื่อให้ชุดควบคุมอุณหภูมิตามการทำงานของเครื่องทำความร้อนแบบไฟฟ้า ซึ่งจากลักษณะการทำงานดังกล่าวช่วยให้อุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้งทั้งสองด้านจะเข้าใกล้ค่าที่กำหนดเร็วขึ้นและยังช่วยให้ระบบมีอุณหภูมิของอากาศร้อนเข้าสู่สภาวะคงตัวเร็วขึ้น จากนั้นจึงได้ทำการทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งโดยใช้กากถั่วเหลืองเป็นวัสดุทดลอง พบว่าค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิอากาศเข้าเพิ่มขึ้น (ที่ทุกเงื่อนไขการทำงาน) ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร ไม่เปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิอากาศเข้าอย่างมีนัยสำคัญซึ่งเกิดขึ้นเฉพาะที่อัตราการป้อนวัสดุที่ $10 \text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$ และระยะห่างการชนที่ 13 cm ส่วนที่เงื่อนไขการทำงานอื่น ๆ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอากาศเข้าอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกและอุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศออกจากห้องอบแห้งที่นำมาใช้คำนวณค่าดังกล่าวอาจมีค่าแปรปรวน ซึ่งเกิดจากปริมาณวัสดุที่ป้อนเข้าสู่เครื่องอบแห้งไม่มีความสม่ำเสมอ เพราะในขณะทำการทดลองอบแห้งในบางสภาวะจะมีวัสดุไหลย้อนกลับออกมาทางจุดป้อนวัสดุเข้าเครื่องอบแห้ง ซึ่งมักจะเกิดขึ้นหลังจากทำการป้อนวัสดุไปได้ระยะเวลาหนึ่ง โดยเฉพาะที่อัตราการป้อนวัสดุมีค่าสูงส่งผลให้อัตราการระเหยน้ำเกิดขึ้นอย่างไม่สม่ำเสมอจึงทำให้ค่าอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งมีค่าแปรปรวน ซึ่งมีผลต่อค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกและอุณหภูมิกระเปาะแห้งขาออกจากห้องอบแห้งดังกล่าว นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการป้อนวัสดุเพิ่มขึ้น (ที่แต่ละอุณหภูมิอากาศเข้า) และยังพบว่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรขึ้นอยู่กับระยะห่างการชน กล่าวคือที่อัตราการป้อนวัสดุมีค่าสูง พบว่าระยะห่างการชนที่สั้นทำให้ค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรมีค่าสูง ทั้งนี้เนื่องจาก เมื่ออัตราส่วนภาระของระบบเพิ่มขึ้นทำให้วัสดุสูญเสียพลังงานจลน์เพิ่มขึ้นจนไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านกระแสน้ำไหลตรงข้ามได้ ดังนั้นจึงต้องอาศัยผลของการชนกันอย่างรุนแรงของกระแสน้ำไหลสองกระแสเพื่อทำให้เกิดความรุนแรงและปั่นป่วนที่สูงขึ้นในบริเวณการชนจึงทำให้ระยะห่างการชนที่สั้นจะช่วยทำให้เกิดความรุนแรงของการชนที่สูงกว่า และถ้าพิจารณาที่อัตราการป้อนวัสดุมีค่าต่ำ พบว่าระยะห่างการชนที่ยาวทำให้ค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรมีค่าสูง ทั้งนี้เนื่องจาก เมื่ออัตราส่วนภาระของระบบลดลงทำให้วัสดุมีพลังงานจลน์เพิ่มขึ้นจนสามารถเคลื่อนที่ผ่านกระแสน้ำไหลตรงข้ามได้ และทำให้วัสดุสามารถเคลื่อนที่กลับไป-

มาในระนาบการชน วัสดุจึงมีเวลาถ่ายเทความร้อนและมวลสารภายในห้องอบแห้งนานขึ้น ประกอบกับระยะห่างการชนที่ยาวจะช่วยเพิ่มระยะการเคลื่อนที่ของวัสดุในบริเวณการชนมากยิ่งขึ้น และจากผลการอบแห้งกากถั่วเหลือง พบว่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุดมีค่าประมาณ $370 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3\text{h}$ ซึ่งมีค่าสูงกว่าของ Jantaka (2007) ทั้งนี้อาจเกิดจาก ผลของการแยกเครื่องทำความร้อนแบบไฟฟ้าและชุดควบคุมอุณหภูมิออกเป็นสองชุด เนื่องจากระบบการให้ความร้อนดังกล่าวจะช่วยให้สามารถควบคุมอุณหภูมิอากาศเข้าห้องอบแห้งทั้งสองด้านได้ตามค่าอุณหภูมิที่กำหนดและอุณหภูมิคงที่มากขึ้น จึงส่งผลให้สามารถระเหยน้ำออกจากวัสดุได้มาก ในขณะที่สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุดมีค่าประมาณ $4,100 \text{ W}/\text{m}^3\text{K}$ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าของ Jantaka (2007) ทั้งนี้อาจเนื่องจากความแตกต่างของตำแหน่งการวัดค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกและอุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศเข้าห้องอบแห้ง ซึ่งในกรณีของ Choicharoen (2008) ทำการวัดอุณหภูมิดังกล่าวที่จุด B (ดูรูปที่ 3.1) ส่วนในกรณีของ Jantaka (2007) ทำการวัดอุณหภูมิกระเปาะเปียกและอุณหภูมิกระเปาะแห้งที่จุด A และ D ตามลำดับ ซึ่งความแตกต่างของตำแหน่งการวัดอุณหภูมิดังกล่าวอาจส่งผลต่อความแตกต่างของค่าอุณหภูมิที่วัดได้ และเมื่อนำค่าอุณหภูมิดังกล่าวไปทำการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรจึงทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวแตกต่างกัน โดยในการทดลองได้พบปัญหาที่เกิดจากการป้อนวัสดุเข้าเครื่องอบแห้งได้ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งเกิดจากส่วนรับวัสดุเข้าสู่เครื่องอบแห้งที่เป็นแบบออริฟิส (Orifice) ซึ่งเป็นแบบที่ Kitron and Tamir (1988) ได้รายงานไว้ว่าวัสดุอาจจะไหลเข้าเครื่องอบแห้งได้อย่างไม่สม่ำเสมอ และพบว่าช่วงของตัวแปรที่ทดสอบในครั้งนี้อย่างแคบเกินไปจึงควรทำการทดลองที่ค่าตัวแปรการทำงานต่าง ๆ เพิ่มเติม นอกจากนี้ยังควรศึกษาถึงเวลาที่วัสดุอยู่ในระบบเพื่อจะได้นำผลที่ได้มาใช้อธิบายผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง ตลอดจนควรจะได้ศึกษา และความสัมพันธ์ของพลังงานจำเพาะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสนเพื่อทำให้ได้ข้อมูลที่สมบูรณ์มากขึ้น

2.4 เวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ

Xiao and Eckehard (2006) ได้กล่าวไว้ว่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ (Mean residence time) มีความสำคัญต่อกระบวนการอบแห้ง เนื่องจากช่วงเวลาดังกล่าวเป็นช่วงที่วัสดุมีการแลกเปลี่ยนความร้อนและมวลสารกับตัวกลางการอบแห้ง ซึ่งหมายความว่าถ้าวัสดุอยู่ในระบบเป็นเวลานานก็จะมีการถ่ายเทความร้อนและมวลสารสูงกว่ากรณีที่วัสดุที่อยู่ในระบบเป็นเวลาดสั้น ซึ่งสอดคล้องกับผลของ Tamir (1994) ซึ่งได้แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนกับปริมาณของวัสดุที่คงอยู่ในระบบ (Hold-up) ของระบบกระแสนทั้งในกรณีที่มีแผ่นกั้น (เพื่อไม่ให้กระแสนของไหลสองกระแสนกัน) และในกรณีที่ไม่มีแผ่นกั้น (ดูรูปที่ 2.2) ซึ่งเห็นได้ว่ากรณีที่ไม่มีแผ่นกั้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อปริมาณของวัสดุที่คงอยู่ในระบบเพิ่มขึ้น (เป็นสัดส่วนกับอัตราการ

ป้อนวัสดุ) แต่ในกรณีที่มีแผ่นกั้นเห็นได้ว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากในกรณีที่ไม่มีแผ่นกั้น วัสดุสามารถเคลื่อนที่ผ่านกระแสของไหลตรงข้ามและเคลื่อนที่กลับไป-มาในบริเวณการชนได้ทำให้วัสดุจำนวนดังกล่าวคงอยู่ในระบบเป็นเวลานานจึงส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนและมวลสารสูงขึ้น และจากรูปที่ 2.2 ยังแสดงให้เห็นอีกว่าถ้าอัตราการป้อนวัสดุเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณของวัสดุคงอยู่ในระบบมากขึ้นซึ่งส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนและมวลสารสูงยิ่งขึ้น นอกจากนี้หากนำค่าปริมาณของวัสดุที่คงอยู่ในระบบหารด้วยค่าอัตราการป้อนวัสดุที่เข้าสู่เครื่องอบแห้งก็จะทำให้ได้ค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ ถ้าวัสดุอยู่ในระบบเป็นเวลานานก็จะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลสารสูงกว่ากรณีที่วัสดุอยู่ในระบบเป็นเวลาสั้น อย่างไรก็ตาม เวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบยังขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วนภาระของระบบ (อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุกับอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งเห็นได้ว่าเมื่ออัตราส่วนภาระของระบบลดลงทำให้เวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบเพิ่มขึ้น แต่ถ้าอัตราส่วนภาระของระบบเพิ่มขึ้นทำให้เวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบลดลงอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ยังพบอีกว่าถ้าวัสดุสามารถเคลื่อนที่ผ่านกระแสของไหลตรงข้ามได้ก็จะทำให้เวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบเป็นเวลานานกว่ากรณีที่วัสดุไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านกระแสของไหลตรงข้ามได้ (ดูรูปที่ 2.3) ส่วนในกรณีที่มีแผ่นกั้นวัสดุจะไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านกระแสของไหลตรงข้ามได้ จึงต้องอาศัยความรุนแรงของการชนแผ่นกั้นที่แต่ละด้านเป็นหลัก ซึ่งวัสดุจำนวนดังกล่าวจะคงอยู่ในระบบเป็นเวลานานทำให้การถ่ายเทความร้อนและมวลสารน้อยกว่าในกรณีที่ไม่มีแผ่นกั้น และจากรูปที่ 2.2 ยังพบว่าถ้าอัตราการป้อนวัสดุเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณของวัสดุคงอยู่ในระบบมากขึ้นแต่จะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ทั้งนี้เนื่องจากมีผลของความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างวัสดุกับของไหลตัวกลางน้อยกว่าในกรณีที่ไม่มีแผ่นกั้น

Kitron and Tamir (1988) ศึกษาเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบซึ่งสามารถหาได้จากการวัดปริมาณวัสดุที่คงอยู่ในระบบ (Hold-up) และอัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุที่เข้าเครื่องอบแห้ง ซึ่งจากผลการทดลอง พบว่าการคงอยู่ของวัสดุในระบบ (ที่อัตราการไหลอากาศคงที่) เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการป้อนวัสดุเพิ่มขึ้น แต่จะป้อนวัสดุได้สูงสุดค่าหนึ่งเท่านั้น เพราะหลังจากนั้นเวลาที่วัสดุอยู่ในระบบจะลดลงเนื่องจากวัสดุในระบบชนกันเองมากขึ้นทำให้วัสดุสูญเสียพลังงานจลน์และจะเคลื่อนที่ออกจากห้องอบแห้งไป นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่ออัตราส่วนภาระเพิ่มขึ้น (ที่อัตราการไหลมวลของอากาศคงที่) มีผลให้เวลาที่วัสดุอยู่ในระบบลดลงเล็กน้อย แต่ถ้าหากทำการเพิ่มอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศจะส่งผลให้เวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากพลังงานจลน์ของวัสดุเพิ่มขึ้น สำหรับทุกกรณีพบว่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 0.7 และ 1 วินาที

สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการหาค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ เพื่อศึกษาพฤติกรรมของวัสดุว่าจะอยู่ในระบบ (เครื่องอบแห้ง) เป็นเวลานานเพียงใดในแต่ละเงื่อนไขการทำงาน ซึ่งคาดว่าผลที่ได้จากการหาค่าดังกล่าวจะสามารถนำมาใช้ร่วมวิเคราะห์กับผลการทดสอบหาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำที่มีต่อตัวแปรการทำงานต่าง ๆ ได้แก่ ความเร็วอากาศขาเข้า อัตราการป้อนวัสดุ และระยะห่างการชนในเทอมของค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรได้สมบูรณ์มากขึ้น ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ได้ใช้เรซินเป็นวัสดุทดลองแทนการใช้กากถั่วเหลือง ทั้งนี้เนื่องจากการใช้เรซินจะช่วยลดปัญหาที่เกิดจากการเกาะติดของวัสดุตามผนังห้องอบแห้งได้ดีกว่ากากถั่วเหลืองตามที่ Sathapornprasath et al. (2007) ได้รายงานไว้ ซึ่งคาดว่า การใช้เรซินเป็นวัสดุทดสอบแทนการใช้กากถั่วเหลืองดังกล่าวจะไม่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมของวัสดุที่อยู่ในระบบ ทั้งนี้เนื่องจากปรกติการหาค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบอาจมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงตามที่ Kitron and Tamir (1988) ได้แสดงถึงค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวไว้ ซึ่งควรทำการทดลองไม่น้อยกว่า 5-10 ซ้ำ สำหรับเรซินที่ใช้ทดสอบมีลักษณะเป็นเม็ดกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.5 mm และมีความหนาแน่นประมาณ 1250 kg/m³

2.5 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

การประเมินประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งทำได้โดยการคำนวณค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงปริมาณพลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำจำนวน 1 kg ออกจากวัสดุที่นำมาอบแห้ง ซึ่งความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้ (Nimmol et al., 2007; Wachiraphansakul and Devahastin, 2007)

$$SEC = E/m_w \quad (2.5)$$

- เมื่อ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของอุปกรณ์ที่ใช้พลังงาน (MJ/kg_{water})
 E คือ พลังงานที่ป้อนให้กับอุปกรณ์ที่ใช้ไฟฟ้า (MJ)
 m_w คือ ปริมาณน้ำ (ความชื้น) ที่นำออกจากวัสดุที่นำมาอบแห้ง (kg) ซึ่งสามารถหาได้

จากความแตกต่างระหว่างความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายของวัสดุที่นำมาอบแห้ง แต่ถ้าเป็นกรณีที่วัสดุอบแห้งมีการเคลื่อนที่เข้าและออกจากระบบตลอดเวลา การหาปริมาณน้ำที่นำออกจากวัสดุสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$m_w = \dot{m}_a \Delta w t \quad (2.6)$$

เมื่อ \dot{m}_a คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศขาเข้า ($\text{kg}_{\text{dry air}}/\text{min}$)

Δw คือ ผลต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นของอากาศร้อนทางด้านขาเข้าและขาออกของระบบอบแห้ง ($\text{kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dry air}}$) ซึ่งสามารถหาได้จากผลต่างของความชื้นสัมบูรณ์ (Absolute humidity) ซึ่งคำนวณค่าได้จากอุณหภูมิกะเปาะเปียกและกะเปาะแห้งของอากาศทางด้านขาเข้าและขาออกของระบบอบแห้ง

t คือ เวลาในการอบแห้ง (min)

สำหรับการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งแบบกระแสนี้ ประกอบด้วยพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างกระแสอากาศความเร็วสูงเข้าสู่ห้องอบแห้งและพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เป็นแหล่งความร้อนในการอบแห้ง พลังงานที่ใช้ในส่วนแรกเป็นพลังงานที่จ่ายให้กับเครื่องเป่าลมแรงดันสูง ในขณะที่พลังงานส่วนที่สองเป็นพลังงานที่จ่ายให้กับเครื่องทำความร้อนแบบไฟฟ้า ซึ่งการใช้พลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์ทั้งสองสามารถทำการวัดได้โดยตรงด้วยมาตรวัดหน่วยพลังงาน (Kilowatt hour meter)

จากการศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องอบแห้ง ทั้งที่อยู่ในกลุ่มเดียวกับเครื่องอบแห้งแบบรวดเร็ว (Flash dryers) และเครื่องอบแห้งกลุ่มอื่น ๆ พอสรุปได้ดังนี้

Baker and McKenzie (2005) ทำการประมาณค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (Spray dryers) ที่ใช้ในอุตสาหกรรมเคมี อาหาร และเซรามิก พบว่าค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 3 GJ/t ($3 \text{ MJ/kg}_{\text{water}}$) ถึง 20 GJ/t ($20 \text{ MJ/kg}_{\text{water}}$) ของน้ำที่ระเหยไป

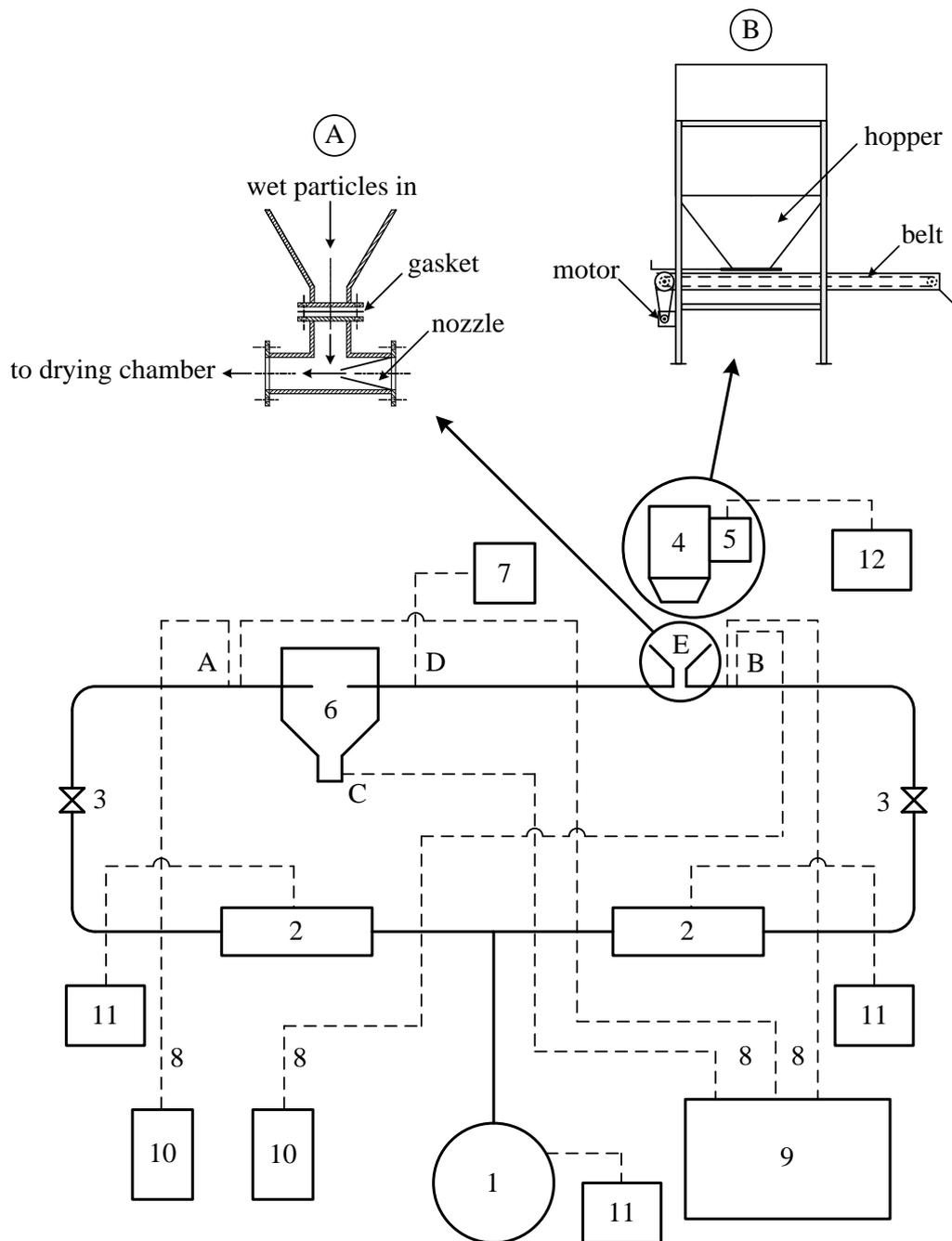
Wachiraphansakul and Devahastin (2007) ทำการประมาณค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งกากถั่วเหลืองด้วยเครื่องอบแห้งแบบสปายท์เต็คเบด ซึ่งพบว่า SEC ที่คำนวณได้อยู่ในช่วง $1.62\text{-}4.06 \text{ MJ/kg}_{\text{water}}$ ซึ่งผลของอุณหภูมิกอบแห้งที่มีต่อ SEC เฉลี่ย พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิกอบแห้งในช่วง $55\text{-}110 \text{ }^\circ\text{C}$ จะทำให้ SEC มีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ SEC เฉลี่ยมีค่าสูงสุดประมาณ $3.42 \text{ MJ/kg}_{\text{water}}$ เมื่อทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ $110 \text{ }^\circ\text{C}$ ในทางตรงกันข้ามการอบแห้งที่อุณหภูมิ $130 \text{ }^\circ\text{C}$ จะให้ SEC มีค่าต่ำกว่า ($3.14 \text{ MJ/kg}_{\text{water}}$) ที่อุณหภูมิ $110 \text{ }^\circ\text{C}$ เนื่องจากการใช้อุณหภูมิอบแห้งที่ $130 \text{ }^\circ\text{C}$ จะทำให้อัตราการดึงน้ำออกสูงในช่วงเวลาที่สั้นมาก ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของการใช้พลังงานสูงขึ้นด้วย สำหรับผลของความเร็วอากาศขาเข้าต่อค่า SEC เฉลี่ย พบว่าที่

ความเร็วอากาศสูง (0.65 m/s) ทำให้ SEC เฉลี่ยมีค่าสูงกว่าการใช้ความเร็วอากาศต่ำ (0.55 m/s) เนื่องจากการใช้ความเร็วอากาศสูงต้องการพลังงานที่ใช้สูงกว่าแต่ไม่ได้ทำให้อัตราการระเหยน้ำเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก

บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

รูปที่ 3.1 แสดงแผนผังของเครื่องอบแห้งแบบกระแสชอนที่ใช้ในการศึกษานี้ ซึ่งประกอบด้วยห้องอบแห้ง (Drying chamber) ที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม มีปริมาตรประมาณ 0.018 m^3 ภายในห้องอบแห้งมีหัวฉีดที่สามารถปรับระยะห่างของปลายหัวฉีด (ระยะห่างการชน) ได้ระหว่าง 5 ถึง 13 cm ท่อส่งวัสดุเข้าห้องอบแห้งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.038 m และมีความยาวประมาณ 1.2 m โดยห้องอบแห้งและท่อส่งวัสดุทั้งหมดหุ้มฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม เครื่องเป่าลมแรงดันสูง (High pressure blower) ใช้มอเตอร์กำลังขับเคลื่อนขนาด 5.5 kW ซึ่งใช้สำหรับสร้างกระแสอากาศความเร็วสูงในระบบ โดยสามารถสร้างแรงดันได้สูงสุดประมาณ $4,000 \text{ mmH}_2\text{O}$ ที่อัตราการไหลของอากาศประมาณ $4.8 \text{ m}^3/\text{min}$ ความเร็วของอากาศภายในท่อส่งวัสดุสามารถปรับตั้งด้วยโกลบวาล์ว ส่วนอัตราการป้อนวัสดุสามารถควบคุมได้โดยการปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ป้อนให้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีกำลัง 117 W ซึ่งใช้เป็นตัวขับเคลื่อนสายพานลำเลียงที่อุปกรณ์ป้อนวัสดุ ส่วนการให้ความร้อนกับอากาศใช้เครื่องทำความร้อนแบบไฟฟ้าขนาด 6 kW จำนวน 2 ชุด ซึ่งควบคุมการทำงานด้วย PID controller จำนวน 2 ชุด และมีการบันทึกอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องตลอดการทดลองโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ต่อกับเครื่องบันทึกอุณหภูมิยี่ห้อ Yokogawa รุ่น $\mu\text{R} 100$ (Japan) สำหรับการบันทึกอุณหภูมิกระแสเป่าเป็ยกและกระแสเป่าแห้งของอากาศร้อนที่เข้าและออกจากห้องอบแห้งตรวจวัดและบันทึกอย่างต่อเนื่องโดยใช้เครื่องวัดยี่ห้อ Vaisala รุ่น HM70 (Finland) ซึ่งอุณหภูมิกระแสเป่าเป็ยกและกระแสเป่าแห้งของอากาศเข้าห้องอบแห้งจะตรวจวัดที่จุด B ส่วนอุณหภูมิกระแสเป่าเป็ยกและกระแสเป่าแห้งของอากาศออกจากห้องอบแห้งจะตรวจวัดที่จุด C สำหรับการวัดพลังงานไฟฟ้าของเครื่องเป่าลมแรงดันสูงและเครื่องทำความร้อนแบบไฟฟ้าสามารถวัดได้โดยตรงโดยการใช้มาตรวัดหน่วยพลังงาน (Kilowatt hour meter) โดยในกรณีของเครื่องเป่าลมแรงดันสูงใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นแบบ 3 เฟส จึงใช้มาตรวัดหน่วยพลังงานชนิด 3 เฟส 4 สาย ยี่ห้อ Holley รุ่น DT58 (Thailand) ซึ่งมีความแม่นยำในการวัดที่ $\pm 0.1 \text{ kWh}$ ส่วนในกรณีของเครื่องทำความร้อนแบบไฟฟ้าที่มีจำนวน 2 ชุดใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นแบบ 1 เฟส จึงใช้มาตรวัดหน่วยพลังงานชนิด 1 เฟส 2 สาย ยี่ห้อ Holley รุ่น HLD01 (Thailand) ซึ่งมีความแม่นยำในการวัดที่ $\pm 0.1 \text{ kWh}$ จำนวน 2 ชุด เพื่อให้สามารถวัดการใช้พลังงานของเครื่องทำความร้อนแบบไฟฟ้าเป็นอิสระจากกัน



(1) เครื่องเป่าลมแรงดันสูง (2) เครื่องทำความร้อนแบบไฟฟ้า (3) โกลบวาล์ว (4) เครื่องป้อนวัสดุแบบสายพานลำเลียง (5) มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (6) ห้องอบแห้ง (7) อุปกรณ์วัดความเร็วลม (8) เทอร์โมคัปเปิล (9) เครื่องบันทึกข้อมูล (อุณหภูมิ) (10) อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (11) มาตรฐานหน่วยพลังงาน (12) ตัวคุมค่าแรงดัน ซึ่ง A แสดงรายละเอียดของทางเข้าแบบหัวฉีด ส่วน B แสดงรายละเอียดของอุปกรณ์ป้อนแบบสายพานลำเลียง

รูปที่ 3.1 แผนผังของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน

3.2 เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยเครื่องมือวัดความเร็วลม เครื่องมือวัดอุณหภูมิ เครื่องบันทึกข้อมูล อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ และมาตรวัดหน่วยพลังงาน (Kilowatt hour meter) โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. เครื่องมือวัดความเร็วลม ยี่ห้อ Testo รุ่น 445 (Germany) มีความแม่นยำ ± 0.2 m/s ใช้สำหรับวัดความเร็วของอากาศที่จุด A และ D
2. เครื่องมือวัดอุณหภูมิ ยี่ห้อ Vaisala รุ่น HM70 (Finland) ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิกระเปาะเปียกและกระเปาะแห้งที่จุด B และ C
3. เครื่องบันทึกข้อมูล ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น μ R 100 (Japan) มีความแม่นยำ ± 0.1 °C ใช้สำหรับบันทึกข้อมูลของอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ
4. อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (PID controller) ยี่ห้อ Omron รุ่น E5CN (Japan) มีความแม่นยำ ± 1 °C ใช้สำหรับควบคุมการทำงานของเครื่องทำความร้อนแบบไฟฟ้า
5. มาตรวัดหน่วยพลังงานไฟฟ้าชนิด 3 เฟส 4 สาย ยี่ห้อ Holly รุ่น DT58 (Thailand) มีความแม่นยำ ± 0.1 kWh ใช้สำหรับวัดการใช้พลังงานของเครื่องเป่าลมแรงดันสูง
6. มาตรวัดหน่วยพลังงานไฟฟ้าชนิด 1 เฟส 2 สาย ยี่ห้อ Holly รุ่น HLD01 (Thailand) มีความแม่นยำ ± 0.1 kWh ใช้สำหรับวัดการใช้พลังงานของเครื่องทำความร้อนแบบไฟฟ้า

3.3 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

กากถั่วเหลือง (Soy residue) หรือ Okara เป็นวัสดุที่นำมาใช้ในการทดลองอบแห้ง โดยกากถั่วเหลืองที่นำมาทดลองเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตน้ำมันถั่วเหลืองของบริษัท กรีนสปอต จำกัด ซึ่งมีลักษณะติดกันเป็นก้อนคล้ายดินเหนียว (ดูรูปที่ 3.2) เนื่องจากมีน้ำปนอยู่เป็นจำนวนมาก และเมื่อนำมาหาความชื้นเริ่มต้น พบว่าความชื้นเริ่มต้นมีค่าประมาณ 82-85 % (w.b.) ซึ่งลักษณะของกากถั่วเหลืองดังกล่าวยังไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ทดสอบ เพราะกากถั่วเหลืองจะเกาะติดตามผนังภายในของห้องอบแห้ง ดังนั้นจึงนำกากถั่วเหลืองดังกล่าวมาคั้นน้ำออกด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกส์ ยี่ห้อ Sakaya รุ่น 4104 (Thailand) จากนั้นนำกากถั่วเหลืองที่มีปริมาณน้ำลดลงแล้วมาร้อนผ่านตะแกรงที่มีขนาดของรูเปิดประมาณ 2×2 mm กากถั่วเหลืองที่ได้จึงมีลักษณะชิ้นเล็ก ๆ ซึ่งมีขนาดกว้างและยาวประมาณ 2×2 mm (ดูรูปที่ 3.3) และเมื่อนำมาหาความชื้น พบว่าความชื้นมีค่าประมาณ 72-75% (w.b.) ซึ่งลักษณะของกากถั่วเหลืองดังกล่าวถือว่ามีความเหมาะสมสำหรับนำมาใช้เป็นวัสดุทดลอง



รูปที่ 3.2 ลักษณะของกากถั่วเหลืองก่อนการคั้นน้ำ



รูปที่ 3.3 ลักษณะของกากถั่วเหลืองก่อนนำมาใช้ทดลอง

3.4 การควบคุมอัตราการป้อนวัสดุ

การป้อนวัสดุ (กากถั่วเหลือง) เข้าสู่เครื่องอบแห้งทำได้โดยใช้อุปกรณ์ป้อนวัสดุแบบสายพานลำเลียงที่สามารถควบคุมอัตราการป้อนวัสดุได้โดยการปรับความเร็วรอบของสายพานลำเลียงด้วยการปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายให้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้เป็นตัวขับเคลื่อนสายพานลำเลียง ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ปรับแรงดันไฟฟ้าดังกล่าว คือตัวคุมค่าแรงดัน (ดูรูปที่ 3.1) สำหรับการทดลองครั้งนี้ได้กำหนดอัตราการป้อนวัสดุไว้ที่ 10 และ 20 $\text{kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$ ซึ่งจากการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีหน่วยเป็น Volt กับอัตราการป้อนวัสดุที่มีหน่วยเป็น $\text{kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$ พบว่าหากต้องการป้อนกากถั่วเหลืองที่ 10 $\text{kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$ จะต้องปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเท่ากับ 3 V และที่อัตราการป้อน 20 $\text{kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$ จะต้องปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเท่ากับ 5 V

3.5 การกำหนดตัวแปรการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดตัวแปรการทำงานต่าง ๆ ที่อาจมีผลต่อค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรดังนี้

1. อุณหภูมิอากาศขาเข้าที่ 130, 150 และ 170 °C
2. ความเร็วอากาศขาเข้าที่ 20 และ 27 m/s
3. อัตราการป้อนวัสดุที่ 10 และ 20 kg_{dry solid}/h
4. ระยะห่างการชนที่ 5, 9 และ 13 cm

3.6 การเตรียมกากถั่วเหลืองก่อนการทดลอง

กากถั่วเหลืองก่อนนำมาใช้ในการทดลองจะแช่อยู่ในห้องเย็นที่มีอุณหภูมิ 4 °C ดังนั้นก่อนทำการทดลองจึงต้องนำกากถั่วเหลืองดังกล่าวออกมาผึ่งไว้บนภาชนะรองที่มีพื้นที่กว้างและเกลี่ยกากถั่วเหลืองให้บางสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นที่ (ดูรูปที่ 3.4) และรองจนกว่าอุณหภูมิของกากถั่วเหลืองมีอุณหภูมิสูงขึ้นเท่ากับอุณหภูมิบรรยากาศแวดล้อม ซึ่งกากถั่วเหลืองที่มีอุณหภูมิในช่วงดังกล่าวจะถูกนำไปหาความชื้นเริ่มต้นก่อนทำการทดลองอีกครั้งด้วย



รูปที่ 3.4 การผึ่งกากถั่วเหลืองก่อนนำมาใช้ทดลอง

3.7 ขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอนแรกจะกำหนดตัวแปรในการเก็บข้อมูลก่อน จากนั้นปรับตั้งระยะห่างการชนที่กำหนดในห้องอบแห้งก่อนการเดินเครื่องอบแห้ง จากนั้นเปิดเครื่องเป่าลมแรงดันสูงและทำการวัดความเร็วอากาศในท่อที่จุด A และ D ให้ได้ตามที่กำหนดโดยการปรับ โกลบวาล์วที่แต่ละด้านของท่อส่งอากาศเข้าสู่ห้องอบแห้ง เมื่อได้ความเร็วอากาศตามกำหนดแล้วก็เปิดเครื่องทำความร้อนแบบไฟฟ้าทั้งสองชุดและทำการปรับตั้งอุณหภูมิตามเงื่อนไขการทดลอง จากนั้นจะต้องรอจนกว่าอุณหภูมิทุกจุดในระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady state) เมื่อระบบอยู่ในสภาวะคงตัวแล้วจะทำการป้อนกากถั่วเหลืองที่เตรียมไว้แล้วตามอัตราการป้อนตามเงื่อนไขการทดลองอย่างต่อเนื่องโดยการปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงไปที่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อขับสายพานลำเลียง จากนั้นต้องรอจนกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกและกระเปาะแห้งที่จุดทางเข้าและทางออกอยู่ในสภาวะคงตัว และทำการอบแห้งไปอย่างต่อเนื่อง จากนั้นทำการเก็บกากถั่วเหลืองที่ออกจากห้องอบแห้งเพื่อนำไปหาความชื้นหลังการอบแห้งโดยนำไปอบในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 16 ชั่วโมง จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ทั้งหมดมาคำนวณค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร ซึ่งในการทดลองที่แต่ละสภาวะจะทำการทดลอง 3 ซ้ำ เพื่อนำผลมาวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ

3.8 การทดลองหาค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ

การทดลองหาค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ ใช้เรซินเป็นวัสดุทดลองแทนกากถั่วเหลืองเพื่อลดปัญหาการเกาะติดของกากถั่วเหลืองที่ผนังห้องอบแห้งและท่อส่งวัสดุเข้าสู่ห้องอบแห้งซึ่งอาจส่งผลให้เกิดความผิดพลาดของผลการทดลองได้เป็นอย่างมาก สำหรับค่าเวลาเฉลี่ยดังกล่าวสามารถหาได้จากการวัดปริมาณของวัสดุที่คงอยู่ในระบบและค่าอัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุที่ป้อนเข้าสู่ห้องอบแห้ง จากนั้นนำค่าทั้งสองมาคำนวณตามสมการดังนี้ (Kitron and Tamir, 1988; Xiao and Eckehard, 2006)

$$\tau = m_p / W_p \quad (3.1)$$

เมื่อ τ คือ เวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ, s
 m_p คือ ปริมาณของวัสดุที่คงอยู่ในระบบ, kg
 W_p คือ อัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุ, kg/s

3.8.1 การกำหนดตัวแปรการหาค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ

สำหรับการศึกษาผลของเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ ได้กำหนดตัวแปรการทำงานที่อาจมีต่อค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบดังนี้

1. ความเร็วอากาศเข้าที่ 20 และ 27 m/s
2. อัตราการป้อนวัสดุที่ 10 และ 20 kg/h
3. ระยะห่างการชนที่ 5, 9 และ 13 cm
4. ใช้เรซิน (Resin) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.5 mm และมีความหนาแน่นประมาณ 1250 kg/m³ เป็นวัสดุทดลอง ซึ่งเรซินดังกล่าวไม่ได้ทำการปรับความชื้นเริ่มต้นก่อนการทดลอง

3.8.2 ขั้นตอนการหาปริมาณวัสดุที่คงอยู่ในระบบ

ขั้นตอนแรกจะกำหนดค่าตัวแปรในการทดลองเก็บข้อมูล ทำการปรับตั้งระยะห่างการชนที่กำหนดในห้องอบแห้งก่อนการเดินเครื่องอบแห้ง จากนั้นเปิดเครื่องเป่าลมแรงดันสูงและทำการปรับความเร็วของอากาศในท่อส่งวัสดุให้ได้ตามที่กำหนด จากนั้นทำการป้อนเรซินตามอัตราการไหลที่กำหนดเข้าสู่เครื่องอบแห้งอย่างต่อเนื่องและรอจนกว่าระบบอยู่ในสภาวะคงตัว จากนั้นจะหยุดการป้อนเรซินเข้าสู่เครื่องอบแห้งพร้อมกับปิดเครื่องเป่าลมแรงดันสูงพร้อมกันอย่างทันทีทันใด ซึ่งในขณะนี้จะมีเรซินคงอยู่ภายในท่อส่งวัสดุและห้องอบแห้ง ซึ่งต้องนำเรซินดังกล่าวออกมาชั่งน้ำหนักเพื่อหาปริมาณของเรซินที่คงอยู่ในระบบ ซึ่งทำได้โดยนำภาชนะรองรับที่ชั่งน้ำหนักแล้วมาคอยรองรับเรซินตรงบริเวณทางออกของห้องอบแห้ง จากนั้นเปิดเครื่องเป่าลมแรงดันสูงเพื่อให้อากาศพาเรซินที่ค้างอยู่ในระบบออกมา และนำเรซินที่รองรับได้ทั้งหมดมาชั่งน้ำหนักก็จะทำให้รู้ถึงปริมาณของเรซินที่คงอยู่ในระบบ นำค่าปริมาณของเรซินดังกล่าวมาคำนวณหาค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ อย่างไรก็ตามการหาปริมาณวัสดุที่คงอยู่ในระบบนั้น Kitron and Tamir (1988) ได้แนะนำไว้ว่าการหาปริมาณดังกล่าวอาจมีความแม่นยำค่อนข้างน้อย เนื่องจากต้องทำการหยุดการป้อนวัสดุเข้าสู่เครื่องอบแห้งและหยุดเดินเครื่องเป่าลมแรงดันสูงพร้อมกันอย่างทันทีทันใด ซึ่งในทางปฏิบัติอาจทำได้ค่อนข้างยาก ดังนั้นจึงควรทดลองไม่น้อยกว่า 5-10 ชั่วโมงที่แต่ละเงื่อนไขสภาวะการทำงาน

3.9 การประมาณการความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

การใช้พลังงานในกระบวนการอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบกระแสนสามารถวัดได้โดยตรงด้วยมาตรวัดหน่วยพลังงาน ซึ่งประกอบด้วยไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างกระแสของอากาศความเร็วสูงภายในห้องอบแห้งและพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เป็นแหล่งความร้อนในการอบแห้ง พลังงานที่ใช้ในส่วนแรกเป็นพลังงานที่จ่ายให้กับเครื่องเป่าลมแรงดันสูง ในขณะที่พลังงานส่วนที่สองเป็นพลังงานที่จ่ายให้กับเครื่องทำความร้อนแบบไฟฟ้า

การวัดการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องเป่าลมแรงดันสูงและเครื่องทำความร้อนแบบไฟฟ้าจะทำการวัดก่อนเริ่มต้นการป้อนกากถั่วเหลืองเข้าสู่เครื่องอบแห้งและหลังจากหยุดการป้อนกากถั่วเหลืองเข้าสู่เครื่องอบแห้ง ซึ่งในช่วงเวลาดังกล่าวได้ทำการบันทึกตัวเลขหน่วยของมาตรวัดพลังงานไว้ ซึ่งค่าความแตกต่างของตัวเลขหน่วยของมาตรวัดดังกล่าวจะทำให้รู้ถึงปริมาณของพลังงานที่ใช้ไประหว่างการอบแห้ง และสามารถนำไปหาค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะได้โดยการหารด้วยมวลของน้ำที่ระเหยไปในช่วงการอบแห้งดังกล่าว

3.10 การวิเคราะห์ทางสถิติ

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองทั้งหมดจะถูกนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และแสดงผลการคำนวณค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร และเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบของแต่ละเงื่อนไขในรูปแบบของค่าเฉลี่ย ซึ่งค่าเฉลี่ยที่ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบความแตกต่างโดยใช้ Duncan's Test โดยค่าเฉลี่ยถูกพิจารณาให้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อ $p < 0.05$ ซึ่งการทดสอบทางสถิตินี้กระทำโดยใช้โปรแกรม SPSS (version 13)

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์

หลังจากออกแบบและทดสอบเครื่องอบแห้งแบบกระแสนแล้ว ได้ทำการทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งในเทอมของอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร โดยทำการศึกษาผลของตัวแปรการทำงานต่าง ๆ ได้แก่ความเร็วอากาศขาเข้าที่ 20 และ 27 m/s อุณหภูมิอากาศขาเข้าที่ 130, 150 และ 170 °C อัตราการป้อนวัสดุที่ 10 และ 20 kg_{dry solid}/h และระยะห่างการชนที่ 5, 9 และ 130 cm ที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง นอกจากนี้ยังได้ศึกษาเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในเครื่องอบแห้ง รวมทั้งประมาณการความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน ซึ่งพอสรุปผลได้ดังนี้

4.1 ผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่ออัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร

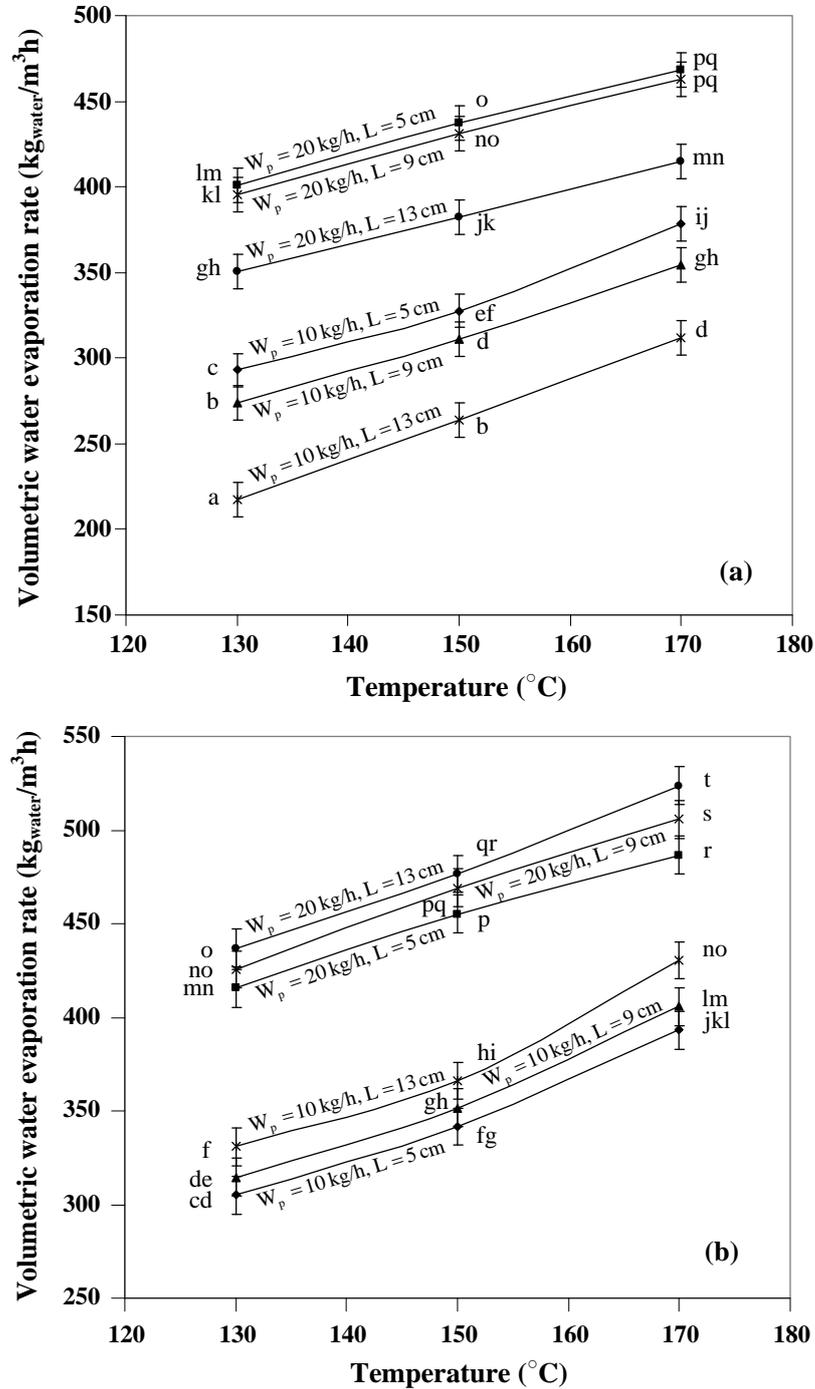
รูปที่ 4.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรกับอุณหภูมิอากาศขาเข้าที่ความเร็วอากาศขาเข้าเท่ากับ 20 และ 27 m/s ที่อัตราการป้อนวัสดุเท่ากับ 10 และ 20 kg_{dry solid}/h และที่ระยะห่างการชนเท่ากับ 5, 9 และ 130 cm ซึ่งพบว่าค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอากาศขาเข้าในทุกเงื่อนไขการทำงาน

สำหรับผลของความเร็วอากาศขาเข้าที่มีต่ออัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร (ดูรูปที่ 4.1) เมื่อพิจารณาที่อัตราการป้อนวัสดุและระยะห่างการชนคงที่ และที่แต่ละอุณหภูมิอบแห้ง พบว่าเมื่อความเร็วอากาศขาเข้าสูงขึ้นส่งผลให้ค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงขึ้นเช่นเดียวกัน

ส่วนผลของอัตราการป้อนวัสดุที่มีต่ออัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร (ดูรูปที่ 4.1) นั้น เมื่อพิจารณาที่ความเร็วอากาศขาเข้าเดียวกันและที่แต่ละอุณหภูมิอบแห้ง พบว่าเมื่ออัตราการป้อนวัสดุเพิ่มขึ้นค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรก็จะเพิ่มขึ้น

ส่วนผลของระยะห่างการชนที่มีต่ออัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร สำหรับกรณีที่มีความเร็วอากาศขาเข้าเท่ากับ 20 m/s (ดูรูปที่ 4.1(a)) เมื่อพิจารณาที่อัตราการป้อนวัสดุเดียวกันและที่แต่ละอุณหภูมิอบแห้ง พบว่าระยะห่างการชนที่สั้นกว่าส่งผลให้อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้หากพิจารณาที่อัตราการป้อนวัสดุเท่ากับ 20 kg_{dry solid}/h และที่ระยะห่างการชนเท่ากับ 5 และ 9 cm พบว่าระยะห่างการชนไม่มีผลต่ออัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามเมื่ออัตราการป้อนวัสดุลดลงเท่ากับ 20 kg_{dry solid}/h พบว่าระยะห่างการชนมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่ออัตราการ

ระเหยน้ำเชิงปริมาตร สำหรับกรณีที่มีความเร็วอากาศเข้าเท่ากับ 27 m/s (ดูรูปที่ 4.1(b)) หากพิจารณาที่อัตราการป้อนวัสดุเดียวกันและที่แต่ละอุณหภูมิอบแห้ง พบว่าระยะห่างการชนที่ยาวกว่าส่งผลให้อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 4.1 ผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร ที่ความเร็วอากาศเข้าเท่ากับ (a) 20 m/s และ (b) 27 m/s (ตัวอักษรที่กำกับค่าในรูปที่แตกต่างกันหมายถึงค่าที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ)

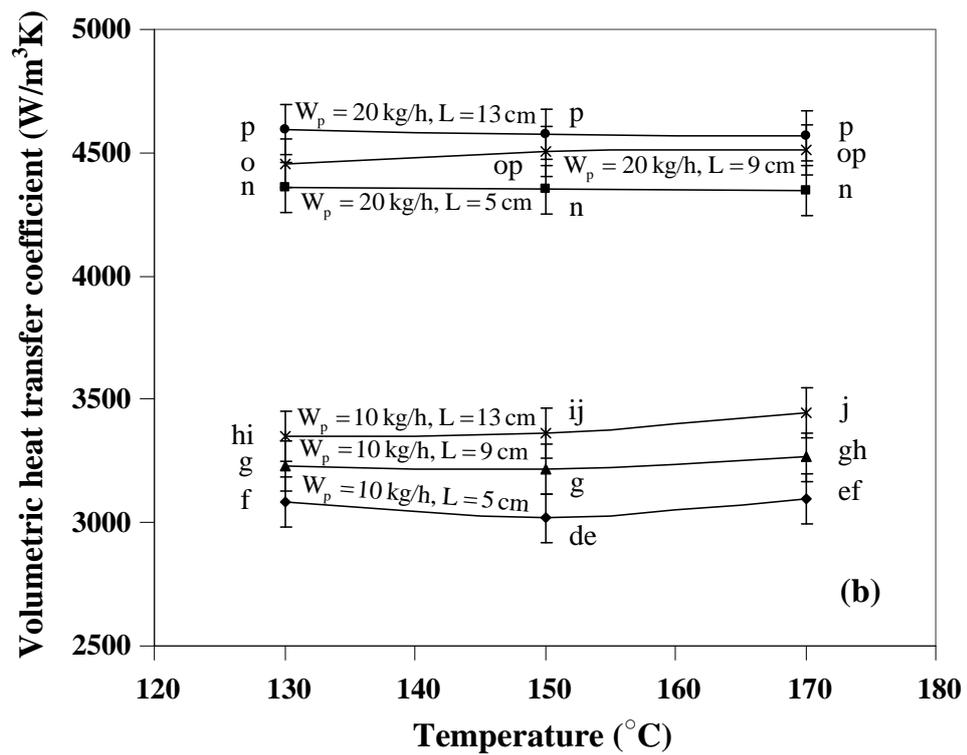
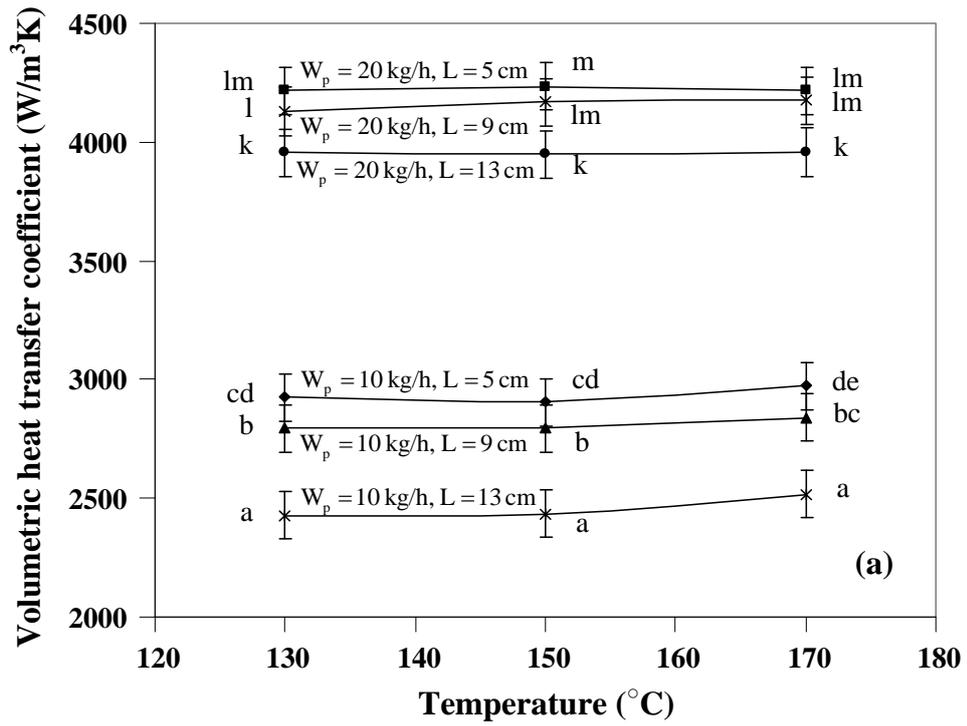
4.2 ผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร

รูปที่ 4.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรกับอุณหภูมิอากาศขาเข้าที่ความเร็วอากาศขาเข้าเท่ากับ 20 และ 27 m/s ที่อัตราการป้อนวัสดุเท่ากับ 10 และ 20 kg_{dry solid}/h และที่ระยะห่างการชนเท่ากับ 5, 9 และ 130 cm โดยพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิอากาศขาเข้าอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเกิดขึ้นทั้งในกรณีที่มีความเร็วอากาศขาเข้าเท่ากับ 20 และ 27 m/s

สำหรับผลของความเร็วอากาศขาเข้าที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร (ดูรูปที่ 4.2) หากพิจารณาที่อัตราการป้อนวัสดุและระยะการชนคงที่ พบว่าความเร็วอากาศขาเข้าที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงขึ้น

ส่วนผลของอัตราการป้อนวัสดุที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร หากพิจารณาที่ความเร็วอากาศขาเข้าเดียวกันและที่แต่ละอุณหภูมิอบแห้ง พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้นตามอัตราการป้อนวัสดุ

ส่วนผลของระยะห่างการชนที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร สำหรับกรณีที่มีความเร็วอากาศขาเข้าเท่ากับ 20 m/s (ดูรูปที่ 4.2(a)) เมื่อพิจารณาที่อัตราการป้อนวัสดุเดียวกันและที่แต่ละอุณหภูมิการอบแห้ง พบว่าระยะห่างการชนที่สั้นกว่าส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงขึ้น ส่วนในกรณีที่ความเร็วอากาศขาเข้าเท่ากับ 27 m/s (ดูรูปที่ 4.2(b)) หากพิจารณาที่อัตราการป้อนวัสดุเดียวกันและที่แต่ละอุณหภูมิการอบแห้ง พบว่าระยะห่างการชนที่ยาวกว่าส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงขึ้น



รูปที่ 4.2 ผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร ที่ความเร็วอากาศเข้าเท่ากับ (a) 20 m/s และ (b) 27 m/s (ตัวอักษรที่กำกับค่าในรูปที่แตกต่างกันหมายถึงค่าที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ)

4.3 เวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ

ตารางที่ 4.1 แสดงเวลาเฉลี่ยที่วัสดุ (กากถั่วเหลือง) อยู่ในระบบอบแห้งแบบกระแสวน (ซึ่งรวมถึงห้องอบแห้งและท่อนำวัสดุเข้าสู่เครื่องอบแห้ง) โดยพบว่าที่ความเร็วอากาศเข้าเท่ากับ 20 m/s เวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบมีค่าในช่วง 0.97-1.24 s และมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนที่ความเร็วอากาศเข้าเท่ากับ 27 m/s เวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบมีค่าในช่วง 1.44-1.74 s และมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตามหากพิจารณาระหว่างกรณีที่ความเร็วอากาศเข้าเท่ากับ 20 และ 27 m/s ก็จะพบว่าความเร็วอากาศเข้าที่สูงขึ้นส่งผลให้เวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

ส่วนกรณีผลของระยะห่างการชนที่มีต่อค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ เมื่อพิจารณาที่ความเร็วอากาศเข้าเท่ากับ 20 m/s และที่อัตราการป้อนวัสดุเดียวกัน พบว่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบลดลงเมื่อระยะห่างการชนยาวขึ้น

ตารางที่ 4.1 เวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ

สภาวะ			เวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ (s)
V (m/s)	W_p (kg _{dry solid} /h)	L (cm)	
20	10	5	1.24 ± 0.2 ^b
20	10	9	1.09 ± 0.1 ^{ab}
20	10	13	0.97 ± 0.2 ^a
20	20	5	1.25 ± 0.1 ^b
20	20	9	1.17 ± 0.2 ^b
20	20	13	1.06 ± 0.1 ^{ab}
27	10	5	1.44 ± 0.2 ^c
27	10	9	1.57 ± 0.1 ^{cd}
27	10	13	1.68 ± 0.1 ^d
27	20	5	1.45 ± 0.1 ^c
27	20	9	1.59 ± 0.1 ^{cd}
27	20	13	1.74 ± 0.1 ^d

ตัวอักษรเดียวกันในสดมภ์เดียวกันหมายถึงค่าที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

4.4 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน โดยแยกออกเป็นในส่วนของเครื่องเป่าลมแรงดันสูง (SEC_{blower}) และเครื่องทำความร้อนแบบไฟฟ้า (SEC_{heater}) ที่เงื่อนไขการทำงานต่าง ๆ ซึ่งในกรณีของค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องเป่าลมแรงดันสูง พบว่า SEC_{blower} มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิอากาศขาเข้าสูงขึ้นที่ทุกเงื่อนไขการทำงาน นอกจากนี้ยังพบอีกด้วยว่าที่ความเร็วอากาศขาเข้าเดียวกัน SEC_{blower} มีค่าลดลงเมื่ออัตราการป้อนวัสดุเพิ่มขึ้น ส่วนผลของความเร็วอากาศขาเข้าที่มีต่อ SEC_{blower} โดยพิจารณาที่อัตราการป้อนวัสดุและระยะห่างการชนคกที่พบว่า SEC_{blower} ที่ความเร็วอากาศขาเข้า 27 m/s มีค่าน้อยกว่าที่ความเร็วอากาศขาเข้า 20 m/s นอกจากนี้ยังพบว่าที่ความเร็วอากาศขาเข้าและอัตราการป้อนวัสดุคงที่และที่แต่ละอุณหภูมิการอบแห้งค่า SEC_{blower} ไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างการชน

ส่วนในกรณีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องทำความร้อนแบบไฟฟ้า พบว่า SEC_{heater} มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิอากาศขาเข้าสูงขึ้นที่ทุกเงื่อนไขการทำงาน นอกจากนี้ยังพบอีกว่าสัดส่วนของการใช้พลังงานเฉลี่ยของเครื่องเป่าลมแรงดันสูงและเครื่องทำความร้อนแบบไฟฟ้ามีค่าประมาณ 70 และ 30% ของพลังงานเฉลี่ยทั้งหมดตามลำดับ

สำหรับค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการใช้พลังงานทั้งหมดมีค่าต่ำที่สุดประมาณ 5.6 MJ/kg_{water} ที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 170 °C ความเร็วอากาศขาเข้า 27 m/s อัตราการป้อนวัสดุ 20 kg_{dry solid}/h และที่ระยะห่างการชน 13 cm

ตารางที่ 4.2 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้งกากถั่วเหลือง

สภาวะ				ΔT (°C)	SEC _{blower} (MJ/kg _{water})	SEC _{heater} (MJ/kg _{water})
T (°C)	L (cm)	W_p (kg _{dry solid} /h)	V (m/s)			
130	5	10	20	65.1	6.5	2.8
150	5	10	20	69.7	5.9	2.5
170	5	10	20	74.7	5.5	2.4
130	9	10	20	64.9	6.7	2.9
150	9	10	20	69.8	6.0	2.6
170	9	10	20	74.8	5.6	2.4
130	13	10	20	64.9	6.8	2.9
150	13	10	20	69.1	6.3	2.7
170	13	10	20	74.9	6.0	2.6
130	5	20	20	64.8	6.0	2.6
150	5	20	20	69.8	5.6	2.4
170	5	20	20	75.0	5.1	2.2
130	9	20	20	64.5	6.0	2.6
150	9	20	20	69.6	5.6	2.4
170	9	20	20	74.6	5.3	2.3
130	13	20	20	64.8	6.4	2.7
150	13	20	20	69.8	5.9	2.5
170	13	20	20	74.5	5.6	2.4
130	5	10	27	64.4	5.1	2.2
150	5	10	27	69.4	4.6	2.0
170	5	10	27	74.7	4.3	1.8
130	9	10	27	64.7	5.0	2.2
150	9	10	27	69.3	4.4	1.9
170	9	10	27	74.7	4.2	1.8
130	13	10	27	64.7	4.8	2.1
150	13	10	27	69.5	4.3	1.8

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

170	13	10	27	74.2	4.0	1.7
130	5	20	27	64.4	5.0	2.1
150	5	20	27	69.6	4.4	1.9
170	5	20	27	74.4	4.2	1.8
130	9	20	27	64.3	4.8	2.1
150	9	20	27	69.2	4.3	1.9
170	9	20	27	74.6	3.9	1.7
130	13	20	27	64.1	4.6	2.0
150	13	20	27	69.7	4.2	1.8
170	13	20	27	74.3	3.9	1.7

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

หลังจากออกแบบและทดสอบเครื่องอบแห้งแบบกระแสดวนแล้ว ได้ทำการทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งในเทอมของอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร โดยทำการศึกษาผลของตัวแปรการทำงานต่าง ๆ ได้แก่ความเร็วอากาศขาเข้าที่ 20 และ 27 m/s อุณหภูมิอากาศขาเข้าที่ 130, 150 และ 170 °C อัตราการป้อนวัสดุที่ 10 และ 20 kg_{dry solid}/h และระยะห่างการชนที่ 5, 9 และ 130 cm ที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง นอกจากนี้ยังได้ศึกษาเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในเครื่องอบแห้ง รวมทั้งประมาณการความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสดวน ซึ่งพอสรุปผลได้ดังนี้

ในกรณีของค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร พบว่าอุณหภูมิอากาศขาเข้าที่สูงขึ้นทำให้ค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงขึ้นในทุกเงื่อนไขการทำงาน นอกจากนี้ยังพบว่าความเร็วอากาศขาเข้าสูงส่งผลให้ค่าอัตราการระเหยน้ำสูงขึ้น เนื่องจากความเร็วอากาศขาเข้ามีผลต่อความรุนแรงและความปั่นป่วนของการชนกันของกระแสดวนไหลและยังช่วยเพิ่มโมเมนตัมให้กับวัสดุจนสามารถเคลื่อนที่ทะลุผ่านกระแสดวนไหลตรงข้ามซึ่งส่งผลให้วัสดุมีเวลาอยู่ในเครื่องอบแห้งนานขึ้น สำหรับผลของอัตราการป้อนวัสดุพบว่าเมื่ออัตราการป้อนวัสดุเพิ่มขึ้นค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรมีค่าสูงขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของเครื่องอบแห้งที่ยังสามารถระเหยน้ำออกจากผิววัสดุได้ขณะที่ปริมาณความชื้นในเครื่องอบแห้งสูงขึ้น และยังพบอีกว่าที่ความเร็วอากาศขาเข้า 20 m/s ระยะห่างการชนที่สั้นกว่าทำให้ค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่ความเร็วอากาศขาเข้าต่ำต้องอาศัยความรุนแรงของการชนเป็นหลักในการก่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร เนื่องจากวัสดุมีโมเมนตัมน้อยจนไม่สามารถเคลื่อนที่ทะลุผ่านกระแสดวนไหลตรงข้ามได้ แต่หากเพิ่มความเร็วอากาศขาเข้าเป็น 27 m/s จะพบว่าระยะห่างการชนที่ยาวกว่าทำให้ค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรมีค่าสูงขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ความเร็วอากาศขาเข้าที่สูงขึ้นจะช่วยเพิ่มโมเมนตัมให้กับวัสดุ จึงทำให้วัสดุเคลื่อนที่ทะลุผ่านกระแสดวนไหลตรงข้ามได้

ในกรณีของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร พบว่าอุณหภูมิอากาศขาเข้าไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม เมื่อความเร็วอากาศขาเข้าสูงขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบอีกว่าเมื่ออัตราการป้อนวัสดุเพิ่มขึ้นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงขึ้น

ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์กับค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร ซึ่งรวมถึงผลของระยะห่างการชนดิ่งที่กล่าวไว้ในข้อสรุปของค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร

สำหรับค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในเครื่องอบแห้ง พบว่าความเร็วอากาศขาเข้าสูงขึ้นช่วยเพิ่มโมเมนต์ให้กับวัสดุมากขึ้นส่งผลให้วัสดุเคลื่อนที่ทะลุผ่านกระแสนของไหลตรงข้ามในบริเวณการชนได้มากขึ้น ซึ่งเห็นได้จากค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในเครื่องอบแห้งมีค่ามากกว่าในกรณีที่ความเร็วอากาศขาเข้าต่ำ

ส่วนค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องเป่าลมแรงดันสูงและเครื่องทำความร้อนแบบไฟฟ้า พบว่า $SEC_{blower/heater}$ มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิอากาศขาเข้าและอัตราการป้อนวัสดุสูงขึ้น และความเร็วอากาศขาเข้าสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า สัดส่วนของการใช้พลังงานเฉลี่ยของเครื่องเป่าลมแรงดันสูงและเครื่องทำความร้อนแบบไฟฟ้ามีค่าประมาณ 70 และ 30% ของพลังงานเฉลี่ยทั้งหมด ตามลำดับ และยังพบว่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำที่สุดของ $SEC_{blower/heater}$ มีค่าประมาณ 5.6 MJ/kg_{water} ที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 170 °C ความเร็วอากาศขาเข้า 27 m/s อัตราการป้อนวัสดุ 20 kg_{dry solid}/h และที่ระยะห่างการชน 13 cm

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในระหว่างการศึกษาพบว่าความดันลดเกิดขึ้นในส่วนของห้องอบแห้งค่อนข้างสูง ซึ่งอาจจะมีผลให้อัตราการป้อนวัสดุได้น้อยลง ทั้งนี้เนื่องจากทางออกของห้องอบแห้งมีพื้นที่หน้าตัดน้อยกว่าผลรวมของพื้นที่หน้าตัดทางเข้า จึงทำให้อากาศถูกกักอยู่ในห้องอบแห้ง ถ้าหากพิจารณาห้องอบแห้งพบว่าได้ถูกออกแบบให้มีทางออกที่ด้านบนด้วยแต่ได้ถูกปิดไว้จึงทำให้เหลือพื้นที่ทางออกด้านล่างเพียงด้านเดียวทำให้พื้นที่หน้าตัดทางออกมีขนาดเล็กดังกล่าว ดังนั้นถ้าหากทำการขยายพื้นที่หน้าตัดทางออกได้ก็จะช่วยลดความดันลดดังกล่าว นอกจากนี้ควรทดลองหาค่าเวลาเฉลี่ยของวัสดุโดยใช้กากถั่วเหลืองเป็นวัสดุทดลองเพื่อเปรียบเทียบกับการใช้เรซินเป็นวัสดุทดลอง

นอกจากนี้ยังควรศึกษาการป้อนวัสดุเป็นแบบสองด้านของห้องอบแห้ง และควรศึกษาการเปลี่ยนของไหลตัวกลางเป็นไอน้ำร้อนขดขึงแทนการใช้อากาศร้อน

เอกสารอ้างอิง

Baker, C.G.J. and McKenzie, K.A., 2005, “Energy consumption of industrial spray dryers,” **Drying Technology**, Vol. 23, pp. 365-386.

Jantaka, P., 2007, **Modification of an impinging stream dryer for agricultural waste: A case study using soy residue**, M.Eng. Thesis, Department of Food Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut’s University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand.

Jie, Y. and Xing, Y.L., 2006, “Study on evaporating characteristics of a coaxial two impinging-stream concentrator,” **Chemical Engineering Technology**, Vol. 29, pp. 124-129.

Kitron, A., Buchmann, R., Luzzatto, K. and Tamir, A., 1987, “Drying and mixing of solids and particles residence time distribution in four impinging streams and multistage two impinging streams reactors,” **Industrial & Engineering Chemistry Research**, Vol. 26, pp. 2454-2461.

Kitron, Y. and Tamir, A., 1988, “Performance of a coaxial gas–solid two–impinging–streams (TIS) reactor: Hydrodynamics, residence time distribution, and drying heat transfer,” **Industrial & Engineering Chemistry Research**, Vol. 27, pp. 1760-1767.

Kitron, Y. and Tamir, A., 1990, “Characteristics and scale-up of coaxial impinging streams gas–solid contractors,” **Drying Technology**, Vol. 8, pp. 781-810.

Kudra, T., Mujumdar, A.S. and Meltser, V.L., 1995, “Impinging stream dryers,” **Handbook of Industrial Drying**, 2nd edition, In Mujumdar, A.S. (Ed.), Marcel Dekker, New York, pp. 539-566.

Kudra, T. and Mujumdar, A.S., 2002, **Advanced Drying Technologies**, Marcel Dekker, New York.

Mujumdar, A.S., 2000, “Dryers for production of particulate solids,” **Mujumdar’s Practical Guide to Industrial Drying**, In Devahastin, S. (Ed.), Exergex, Brossard, Canada, pp. 63-73.

Nimmol, C., Devahastin, S., Swasdisevi, T. and Soponronnarit, S., 2007, "Drying and heat transfer behavior of banana undergoing combined low-pressure superheated steam and far-infrared radiation drying," **Applied Thermal Engineering**, Vol. 27, pp. 2483-2494.

Sathapornprasath, K., Devahastin, S. and Soponronnarit, S., 2004, "Effects of operating conditions on the overall performance of an air-and superheated steam-operated impinging stream dryer," **Proceedings of the 15th International Symposium on Transport Phenomena**, Bangkok, Thailand, pp. 55-59.

Sathapornprasath, K., 2006, **Development and study of an impinging stream dryer for particulate materials**, Ph.D. Thesis, Division of Thermal Technology, School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand.

Sathapornprasath, K., Devahastin, S. and Soponronnarit, S., 2007, "Performance evaluation of an impinging stream dryer for particulate materials," **Drying Technology**, Vol. 25, pp. 1121-1128.

Tamir, A., 1994, **Impinging-stream reactions**, Elsevier, Amsterdam.

Tamir, A. and Grinholtz, M., 1987, "Performance of a continuous solid-liquid two-impinging-streams (TIS) reactor: Distribution of solids, hydrodynamics, mean residence time, and holdup of the particles," **Industrial & Engineering Chemistry Research**, Vol. 26, pp. 726-731

Taruna, I., Jindal, V.K., 2002, "Drying of soy pulp (okara) in a bed of inert particles," **Drying Technology**, Vol. 20, pp. 1035-1051.

Wachiraphansakul, S. and Devahastin, S., 2007, "Drying kinetics and quality of okara dried in a jet spouted bed of sorbent particles," **LWT-Food Science and Technology**, Vol. 40, pp. 207-219.

Xiao, Y.L and Eckehard, S., 2006, "Mean residence time and hold-up of solids in rotary kilns," **Chemical Engineering Science**, Vol. 61, pp. 5176-5181.

Yao, B., Berman, Y. and Tamir, A., 1995, "Evaporative cooling of air in impinging streams," **AIChE Journal**, Vol. 41, pp. 1667-1675.

ผลงานตีพิมพ์

Choicharoen, K., Devahastin, S., Soponronnarit, S., 2010, "Performance and energy consumption of an impinging stream dryer for high-moisture particulate materials," **Drying Technology**, Vol. 28, pp. 20-29.