

การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลม



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทางวิศวกรรม

พฤษภาคม 2554

การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลม



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทางวิศวกรรม

พฤษภาคม 2554

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลม



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทางวิศวกรรม

พฤษภาคม 2554

ปฏิวดี คมวชิรกุล. (2554). การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการ
อบแห้งแบบพาหะลม. ปริญญาโท วิศวกรรม. (การจัดการทางวิศวกรรม). กรุงเทพฯ:
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม:
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติ สถาพรประสาธน์, ดร.อาจริ ศุภสุธิกุล.

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการลดความชื้นข้าวเปลือกโดยใช้เทคนิคอบแห้งแบบกระแสนในช่วง
เริ่มต้นและตามด้วยการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่อง ซึ่งใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการ
อบแห้ง โดยเครื่องอบแห้งชนิดนี้จะเหมาะกับการลดความชื้นที่อยู่บริเวณผิวออกอย่างรวดเร็ว และ
จะเกิดขึ้นเฉพาะในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ ซึ่งมีวัตถุประสงค์คือ ศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆ
ได้แก่ อุณหภูมิอบแห้งและอัตราการป้อนวัสดุที่มีผลต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง ในรูปแบบของ
อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรและความสิ้นเปลือง
พลังงานจำเพาะ สำหรับในการศึกษานี้ใช้ข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้น 28 % (d.b.) โดยที่อุณหภูมิ
อบแห้งอยู่ในช่วง 70 ถึง 110 °C และอัตราการป้อนวัสดุอยู่ในช่วง 22 ถึง 62 kg_{dry solid}/h จากผลการ
ทดลองพบว่าเครื่องอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมสามารถลดความชื้นของ
ข้าวเปลือกได้ถึง 6.6 ถึง 9.7 % (d.b.) ภายในเวลาอันรวดเร็วและคุณภาพของข้าวอยู่ในเกณฑ์ดี
สำหรับอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรมีค่าสูงสุดประมาณ 328.88 kg_{water}/m³ h ขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์
การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรมีค่าสูงสุดประมาณ 604.45 W/m³ K และความสิ้นเปลืองพลังงาน
จำเพาะทั้งหมดมีค่าต่ำสุด 2.65 MJ/kg_{water} ซึ่งมีค่าการใช้พลังงานจำเพาะน้อยกว่าระบบอบแห้งแบบ
กระแสนอย่างเดียวที่สภาวะเงื่อนไขเดียวกันประมาณ 5%

คำสำคัญ: ข้าวเปลือก, การอบแห้งแบบกระแสน, การอบแห้งแบบพาหะลม, อัตราการระเหยน้ำเชิง
ปริมาตร, สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร

PADDY DRYING USING IMPINGING STREAM DRYER
COMBINED WITH PNEUMATIC DRYING



Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Master of Engineering degree in Engineering Management
at Srinakharinwirot University

May 2011

Patiwat Khomwachirakul. (2011). *Paddy drying using impinging stream dryer combined with pneumatic drying*. Master Thesis, M.Eng. (Engineering Management).

Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee:

Asst.Prof. Dr.Kitti Sathapornprasath, Dr. Ajaree Supasuteekul.

This research was proposed to study of reducing the high initial moisture content of wet paddy by using an impinging stream drying technique as a first stage drying and follow by a pneumatic drying. These types of dryer are therefore an excellent alternative to flash dryer for removing surface moisture from particles in the unhindered drying rate period. The objective of this study was thus to investigate the effect of various operating parameters, i.e., drying temperature, particles feed rate, on the overall performance in terms of the volumetric water evaporation rate, volumetric heat transfer coefficient and specific energy consumption. In this study, paddy with an initial moisture content of about 28% (d.b.), and the experiments were conducted the drying temperature from 70 to 110 °C and particles feed rate from 22 to 62 kg_{dry solid}/h. From the experimental results, the combined drying could reduce the moisture content of paddy by 6.6 to 9.7 % (d.b) within a very short time and without changes in paddy qualities. The maximum volumetric water evaporation rate was found to be around 328.88 kg_{water}/m³h while the maximum volumetric heat transfer coefficient was around 604.45 W/m³K. The lowest total specific energy consumption was found to be 2.65 MJ/kg_{water} and the total specific energy consumption lower than in the case of using impinging stream drying technique at same condition around 5%.

Keywords: paddy, impinging stream drying, pneumatic drying, volumetric water evaporation rate, volumetric heat transfer coefficient.

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลม

ของ

ปฏิวดี คมวชิรกุล

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทางวิศวกรรม

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย สันติวัฒนกุล)

วันที่ เดือน พ.ศ. 2554

คณะกรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์

คณะกรรมการสอบปากเปล่า

..... ประธาน

..... ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติ สถาพรประสาธน์)

(อาจารย์ ดร.วิซชากร จารุศิริ)

..... กรรมการ

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.อาจรี ศุภสุธิกุล)

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติ สถาพรประสาธน์)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.อาจรี ศุภสุธิกุล)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย นิยมมล)

ประกาศคุณูปการ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติ สถาพรประสาธน์ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปริญญานิพนธ์ อาจารย์ ดร.อาจรี ศุภสุธีกุล อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา
คำแนะนำ ตลอดจนแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่างๆ อันเป็นประโยชน์ต่อการดำเนินการวิจัยเป็น
อย่างมาก ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.วิษชากร จารุศิริ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จัตรชัย นิยมผล
ที่ทำให้เกียรติเป็นกรรมการประเมินผลการทำปริญญานิพนธ์ และให้คำแนะนำเพิ่มเติมเพื่อให้ปริญญานิพนธ์สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณโครงการวิจัยและนวัตกรรมเพื่อถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ชุมชนรากฐานเครือข่าย
วิจัยอุดมศึกษาภาคกลางตอนบนที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทดลองและศูนย์วิจัย
ข้าวปทุมธานีที่ให้ความอนุเคราะห์ในการวิเคราะห์คุณภาพข้าว

กราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้กำลังใจและสนับสนุนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไป
ได้ด้วยดี

ปวิวัติ คมวชิรกุล

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
ขอบเขตการวิจัย.....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
ความสำคัญของการอบแห้ง.....	5
ความชื้นวัสดุ.....	5
การอบแห้งเมล็ดพืช.....	6
การอบแห้งแบบกระแสน.....	7
การอบแห้งแบบพาหะลม.....	11
ผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับ การอบแห้งแบบพาหะลม.....	13
ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ.....	14
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	20
วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	20
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองและสถานที่ในการทำงานวิจัย.....	20
ขั้นตอนในการเตรียมข้าวเปลือกขึ้น.....	24
ขั้นตอนการกำหนดตัวแปรการทดลอง.....	24
ขั้นตอนการทดลองอบแห้งข้าวเปลือก.....	24
ขั้นตอนการหาความชื้นข้าวเปลือก.....	25
ขั้นตอนการประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง.....	25
ขั้นตอนการหาเวลาเฉลี่ยของวัสดุที่อยู่ในระบบ.....	25
ขั้นตอนการวิเคราะห์คุณภาพข้าว.....	26
ขั้นตอนการประมาณการความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องอบแห้ง.....	26

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3 (ต่อ)	
ขั้นตอนการวิเคราะห์ทางสถิติ.....	26
4 ผลการทดลองและวิจารณ์.....	27
ผลของตัวแปรที่มีผลต่อการลดค่าความชื้น.....	27
ผลของตัวแปรที่มีต่อค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร.....	32
ผลของตัวแปรที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร.....	38
เวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ.....	40
ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ.....	43
คุณภาพของข้าว.....	46
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	50
สรุปผลการทดลอง.....	50
ข้อเสนอแนะ.....	51
บรรณานุกรม.....	52
ภาคผนวก.....	56
ภาคผนวก ก. การคำนวณระบบอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลม.....	57
ภาคผนวก ข. รูปภาพของระบบอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลม.....	76
ภาคผนวก ค. การทดลองหาอัตราการป้อนวัสดุที่เหมาะสมต่อระบบอบแห้ง.....	90
ภาคผนวก ง. การเตรียมความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก.....	94
ภาคผนวก จ. ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง.....	97
ภาคผนวก ฉ. การคำนวณ.....	122

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
อภิธานศัพท์.....	130
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	131
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	133



บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 อัตราการระเหยน้ำและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรของ เครื่องอบแห้ง.....	16
2 การวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความชื้นที่ลดลงของระบบอบแห้งแบบกระแสน อย่างเดียว.....	29
3 การวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความชื้นที่ลดลงของระบบอบแห้งแบบกระแสน อย่างเดียวร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่อง.....	30
4 การวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความชื้นที่ลดลงของระบบอบแห้งแบบกระแสน อย่างเดียวและระบบอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลม แบบต่อเนื่อง.....	31
5 การวิเคราะห์ทางสถิติของค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรและค่าสัมประสิทธิ์ การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรของระบบอบแห้งแบบกระแสนอย่างเดียว.....	35
6 การวิเคราะห์ทางสถิติของค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรและค่าสัมประสิทธิ์ การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรของระบบอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการ การอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่อง.....	36
7 การวิเคราะห์ทางสถิติของค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรและค่าสัมประสิทธิ์ การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรของระบบอบแห้งแบบกระแสนอย่างเดียว และระบบอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่อง.....	37
8 การวิเคราะห์ทางสถิติของค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบของระบบอบแห้งแบบ กระแสน.....	41
9 การวิเคราะห์ทางสถิติของค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบของระบบอบแห้งแบบ พาหะลม.....	42
10 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งของข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยวิธีการต่าง ๆ.....	42
11 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของระบบอบแห้งแบบกระแสนอย่างเดียว.....	44
12 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของระบบอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการ การอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่อง.....	45
13 เปรียบเทียบความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะทั้งหมดในการลดความชื้นข้าวเปลือก ที่อบแห้งด้วยวิธีการต่าง ๆ.....	46

บัญชีตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
14 การวิเคราะห์ทางสถิติคุณภาพของข้าวของระบบอบแห้งแบบกระแสน อย่างเดียว.....	47
15 การวิเคราะห์ทางสถิติคุณภาพของข้าวของระบบอบแห้งแบบกระแสน ร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่อง.....	48
16 เปรียบเทียบคุณภาพข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยวิธีการต่าง ๆ.....	48
17 แสดงสัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ ของเครื่องดักฝุ่น.....	65
18 อัตราการป้อนของเครื่องป้อนวัสดุ (ข้าวเปลือก).....	92
19 อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้งแบบกระแสน (อุณหภูมิ 70 °C, ความเร็วลม 25 m/s, อัตราการป้อนวัสดุ 22 kg/h).....	98
20 อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้งแบบกระแสน (อุณหภูมิ 70 °C, ความเร็วลม 25 m/s, อัตราการป้อนวัสดุ 47 kg/h).....	99
21 อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้งแบบกระแสน (อุณหภูมิ 70 °C, ความเร็วลม 25 m/s, อัตราการป้อนวัสดุ 62 kg/h).....	100
22 อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้งแบบกระแสน (อุณหภูมิ 90 °C, ความเร็วลม 25 m/s, อัตราการป้อนวัสดุ 22 kg/h).....	101
23 อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้งแบบกระแสน (อุณหภูมิ 90 °C, ความเร็วลม 25 m/s, อัตราการป้อนวัสดุ 47 kg/h).....	102
24 อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้งแบบกระแสน (อุณหภูมิ 90 °C, ความเร็วลม 25 m/s, อัตราการป้อนวัสดุ 62 kg/h).....	103
25 อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้งแบบกระแสน (อุณหภูมิ 110 °C, ความเร็วลม 25 m/s, อัตราการป้อนวัสดุ 22 kg/h).....	104
26 อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้งแบบกระแสน (อุณหภูมิ 110 °C, ความเร็วลม 25 m/s, อัตราการป้อนวัสดุ 47 kg/h).....	105
27 อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้งแบบกระแสน (อุณหภูมิ 110 °C, ความเร็วลม 25 m/s, อัตราการป้อนวัสดุ 62 kg/h).....	106
28 อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้งแบบพาหะลม (อุณหภูมิ 70 °C, ความเร็วลม 16 m/s, อัตราการป้อนวัสดุ 22 kg/h).....	107

บัญชีตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
29 อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้งแบบพาหะลม (อุณหภูมิ 70 °C, ความเร็วลม 16 m/s, อัตราการป้อนวัสดุ 47 kg/h).....	108
30 อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้งแบบพาหะลม (อุณหภูมิ 70 °C, ความเร็วลม 16 m/s, อัตราการป้อนวัสดุ 62 kg/h).....	109
31 อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้งแบบพาหะลม (อุณหภูมิ 90 °C, ความเร็วลม 16 m/s, อัตราการป้อนวัสดุ 22 kg/h).....	110
32 อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้งแบบพาหะลม (อุณหภูมิ 90 °C, ความเร็วลม 16 m/s, อัตราการป้อนวัสดุ 47 kg/h).....	111
33 อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้งแบบพาหะลม (อุณหภูมิ 90 °C, ความเร็วลม 16 m/s, อัตราการป้อนวัสดุ 62 kg/h).....	112
34 อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้งแบบพาหะลม (อุณหภูมิ 110 °C, ความเร็วลม 16 m/s, อัตราการป้อนวัสดุ 22 kg/h).....	113
35 อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้งแบบพาหะลม (อุณหภูมิ 110 °C, ความเร็วลม 16 m/s, อัตราการป้อนวัสดุ 47 kg/h).....	114
36 อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้งแบบพาหะลม (อุณหภูมิ 110 °C, ความเร็วลม 16 m/s, อัตราการป้อนวัสดุ 62 kg/h).....	115
37 ผลการทดลองหาความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ.....	116
38 ผลการทดลองหาความชื้นหลังการอบแห้งวัสดุของระบบอบแห้งแบบกระแสน	117
39 ผลการทดลองหาความชื้นหลังการอบแห้งวัสดุของระบบอบแห้งแบบกระแสน รวมกับการอบแห้งแบบพาหะลม.....	118
40 ผลการทดลองการใช้พลังงานของระบบอบแห้ง.....	119
41 คุณภาพข้าวหลังการอบแห้งของระบบอบแห้งแบบกระแสน.....	120
42 คุณภาพข้าวหลังการอบแห้งของระบบอบแห้งแบบกระแสนรวมกับการอบแห้ง แบบพาหะลมแบบต่อเนื่อง.....	121

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 หลักการของระบบกระแสชุน.....	8
2 ผลของแผ่นกั้นที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน.....	9
3 ผลของแผ่นกั้นที่มีต่อเวลาเฉลี่ยที่อนุภาคอยู่ในระบบ.....	10
4 หลักการของเครื่องอบแห้งแบบกระแสชุน.....	11
5 เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม.....	12
6 แผนผังของเครื่องอบแห้งแบบกระแสชุนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลม.....	22
7 ขั้นตอนการทดลอง.....	23
8 ผลกระทบของตัวแปรที่มีผลต่ออัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร.....	34
9 ผลกระทบของตัวแปรที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร.....	38
10 ตำแหน่งการวางแท่งความร้อนไฟฟ้า.....	59
11 แพลกเตอร์ความเสียดทาน (f) และค่าแก๊ (X).....	60
12 องค์ประกอบทางกายภาพของเครื่องดักฝุ่น.....	65
13 องค์ประกอบทางกายภาพของเครื่องดักฝุ่น.....	68
14 องค์ประกอบทางกายภาพของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม.....	69
15 แพลกเตอร์ความเสียดทาน (f) และค่าแก๊ (X).....	72
16 ภาพ 3 มิติ ของระบบอบแห้งแบบกระแสชุนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลม.....	77
17 ภาพฉายของระบบอบแห้งแบบกระแสชุน.....	78
18 ภาพฉายของระบบอบแห้งแบบพาหะลม.....	79
19 ระบบอบแห้งแบบกระแสชุน.....	80
20 เครื่องเป่าลมแรงดันสูง.....	80
21 เครื่องทำความร้อนแบบไฟฟ้า.....	81
22 วาล์วปรับอัตราการไหล.....	81
23 อุปกรณ์รองรับวัสดุ.....	82
24 ห้องอบแห้ง.....	82
25 เครื่องป้อนวัสดุ.....	83
26 ไฮโคลน.....	83
27 มาตรวัดหน่วยพลังงาน.....	84

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
28 ตัวคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องป้อนวัสดุ.....	84
29 PID Controller.....	85
30 ระบบอบแห้งแบบพาหะลม.....	86
31 เครื่องเป่าลมแรงดันสูง.....	86
32 เครื่องทำความร้อนแบบไฟฟ้า.....	87
33 อุปกรณ์รองรับวัสดุ.....	87
34 ท่ออบแห้ง.....	88
35 ไซโคลน.....	88
36 ชุดควบคุมอุณหภูมิและความเร็วรอบของเครื่องเป่าลมพร้อมมาตรวัดพลังงาน.....	89



บทที่ 1

บทนำ

1. ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ข้าวเป็นผลผลิตทางการเกษตรที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศไทย เพราะนอกจากจะเป็นอาหารหลักของคนไทยแล้วข้าวยังเป็นผลิตภัณฑ์ส่งออกที่ทำรายได้ให้กับประเทศค่อนข้างมาก แต่ปัญหาที่พบคือหลังการเก็บเกี่ยวข้าวเปลือกจะมีความชื้นที่สูงทำให้เกิดปัญหาในการเก็บรักษาถ้าไม่สามารถลดความชื้นให้ลดลงในระดับที่เหมาะสมแล้ว ก็อาจจะก่อให้เกิดความเสียหายทั้งทางด้านคุณภาพและปริมาณได้ เพราะถ้าความชื้นในการเก็บรักษามากเกินไปจะทำให้ข้าวเปลือกเน่าเสียได้ การอบแห้ง (Drying) หรือการลดความชื้นของข้าวเปลือกก่อนนำไปเก็บรักษา นับว่ามีความสำคัญในการยืดอายุการเก็บรักษาของข้าวเปลือก ซึ่งความชื้นของข้าวเปลือกที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาจะมีค่าประมาณ 13-15% (wet basis)

ปัจจุบันมีเทคนิคการอบแห้งแบบต่าง ๆ ที่ได้รับการพัฒนาสำหรับนำมาใช้ในการลดความชื้นของข้าวเปลือกเพื่อให้มีอัตราการอบแห้งสูง อบแห้งได้อย่างรวดเร็วและมีคุณภาพอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ แต่โดยทั่วไปแล้วหากอบแห้งอย่างรวดเร็วก็จะทำให้เกิดการสิ้นเปลืองพลังงานมากขึ้นเช่นกัน ซึ่งวิธีการอบแห้งอันหลากหลายในปัจจุบันจะใช้พลังงานจำเพาะในการอบแห้งอยู่ในช่วง 4-15 MJ/kg_{water} (Marier. 2002) สำหรับเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบด (Fluidized bed dryer) และ เครื่องอบแห้งแบบ สเปาเจ็ตเบด (Spouted bed dryer) เป็นเครื่องอบแห้งที่ได้รับความนิยมในระดับอุตสาหกรรม เพราะสามารถอบแห้งข้าวเปลือกได้รวดเร็ว และคุณภาพข้าวเปลือกหลังการอบแห้งเป็นที่ยอมรับได้และที่นิยมอีกประเภทคือ เครื่องอบแห้งแบบเคลื่อนที่ (Moving bed) เช่น เครื่องแบบที่ข้าวไหลในแนวดิ่งผ่านอากาศที่ไหลในแนวขวาง เครื่องอบแห้งจำพวกนี้มักใช้อุณหภูมิในการอบแห้งที่สูงเพื่อให้มีการอบแห้งอย่างรวดเร็ว แต่อัตราการใช้พลังงานก็สูงเช่นเดียวกัน (สมชาติ โสภณธนฤทธิ์; และคนอื่น ๆ. 2545) ได้ทำการศึกษาการอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดโดยเทคนิคการทำฐานสั่นเพื่อลดอัตราการใช้พลังงานจำเพาะ ผลการศึกษาพบว่า การอบแห้งโดยเทคนิคการทำฐานสั่นมีอัตราการใช้พลังงานจำเพาะ 5.36 MJ/kg_{water} และความชื้นสุดท้าย 26 % (dry basis) ซึ่งมีการใช้พลังงานจำเพาะน้อยกว่าแบบไม่มีการสั่นประมาณ 7% (ฐานิตย์ เมธิยานนท์; และสมชาติ โสภณธนฤทธิ์. 2546) ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งสเปาเจ็ตเบดที่สามารถปรับเปลี่ยนอัตราการไหลอากาศเข้าดาวน์คัมเมอร์ได้ พบว่าการใช้พลังงานจำเพาะในการอบแห้งมีค่าประมาณ 5.5 MJ/kg_{water} และเมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไรซ์เบดพบว่า อัตราการอบแห้งต่อหน่วยปริมาตรห้องอบโดยเทคนิคสเปาเจ็ตเบดสูงกว่าการอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไรซ์เบด

จากปัญหาวิกฤติทางด้านพลังงานซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญและส่งผลกระทบโดยตรงต่อต้นทุนของผลผลิตทางการเกษตรโดยเฉพาะการอบแห้งข้าวเปลือกซึ่งต้องใช้พลังงานในกระบวนการ

ลดความชื้น ด้วยเหตุนี้จึงเกิดแนวคิดที่จะศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้การอบแห้งแบบกระแสน (Impinging stream drying) ร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลม (Pneumatic drying) เพื่อเป็นการลดการใช้พลังงานและเวลาในการอบแห้ง

หลักการของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน (Impinging stream dryer, ISD) คือการให้กระแสนไหลของตัวกลางการอบแห้งตั้งแต่ 2 สองกระแสนมาชนกัน ซึ่งการชนกันของกระแสนของไหลทำให้เกิดความปั่นป่วนในบริเวณการชนสูง ส่งผลให้มีอัตราการถ่ายเทมวลสาร ความร้อน และโมเมนตัมสูง ทำให้เครื่องอบแห้งแบบกระแสนมีประสิทธิภาพทางความร้อนสูง (อัตราการอบแห้งสูง) นอกจากนี้แล้วเครื่องอบแห้งแบบกระแสนยังมีขนาดกะทัดรัดและใช้เนื้อที่ในการติดตั้งน้อย ด้วยลักษณะเด่นดังกล่าว สำหรับภาระการอบแห้งที่เท่ากัน ถือว่าระบบกระแสนเป็นระบบที่ประหยัดพลังงานสูงกว่าระบบแห้งอื่นๆ (Kudra; & Mujumdra. 1989) ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบเครื่องอบแห้งแบบต่างๆ พบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรของเครื่องอบแห้งแบบกระแสนสูงกว่าเครื่องอบแห้งชนิดอื่น โดยมีค่าอยู่ในช่วง $260-112,500 \text{ W/m}^3\text{K}$ เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (Spray dryer) มีค่าประมาณ $1,000-6,000 \text{ W/m}^3\text{K}$ เครื่องอบแห้งแบบสเปาเด็ดเบด (Spouted bed dryer) และเครื่องอบแห้งแบบไซโคลน (Cyclone dryer) มีค่าประมาณ $5,800 \text{ W/m}^3\text{K}$

สำหรับเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (Pneumatic dryer) เป็นเครื่องอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับวัสดุที่มีลักษณะเป็นอนุภาค การอบแห้งของวัสดุจะเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ เนื่องจากวัสดุอบแห้งจะจัดกระจายอยู่ในกระแสนลมร้อน ทำให้มีการถ่ายเทความร้อนและมวลสารได้มาก สามารถทำให้วัสดุแห้งภายในระยะเวลาอันสั้น นับตั้งแต่เริ่มป้อนวัสดุจนกระทั่งออกจากไซโคลน (Kaensup; et al. 2006) ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมในระดับห้องปฏิบัติการสำหรับการลดความชื้นข้าวเปลือก พบว่าข้าวเปลือกสามารถลดความชื้นลงได้ถึง 18% (w.b.) ภายในเวลาเพียงแค่ 3-4 วินาที โดยพลังงานที่ใช้ในการลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมมีค่าต่ำกว่ากรณีใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด ในขณะที่คุณภาพของข้าวเปลือกที่ได้ไม่มีความแตกต่างกัน จึงนับได้ว่าเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมสามารถลดความชื้นของวัสดุลงได้มากเมื่อเทียบกับระยะเวลาที่วัสดุอยู่ในระบบแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมมีค่าค่อนข้างสูง ดังนั้นการรวมข้อดีของทั้งสองระบบคือการอบแห้งแบบกระแสนและการอบแห้งแบบพาหะลมเข้าด้วยกันนั้น จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจและนำมาศึกษาเพื่อเป็นแนวทางในการลดการใช้พลังงาน

งานวิจัยนี้จะศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำเทคนิคกระแสนสำหรับใช้ในการอบแห้งข้าวเปลือกในช่วงเริ่มต้นและตามด้วยการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่องโดยจะศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในการอบแห้งข้าวเปลือก ได้แก่ อุณหภูมิของอากาศร้อน ความเร็วของอากาศร้อน และอัตราการป้อนข้าวเปลือกต่อปริมาณอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง ที่มีต่อสมรรถนะของระบบการอบแห้ง รวมทั้งความสัมพันธ์ของพลังงานจำเพาะของระบบ ผลที่ได้จากการศึกษาสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐาน

สำหรับการพัฒนากระบวนการลดความชื้นข้าวเปลือกให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น และเป็นแนวทางในการใช้พลังงานให้น้อยที่สุด รวมไปถึงสามารถที่จะนำไปขยายผลเพื่อใช้กับวัสดุทางการเกษตรชนิดอื่นได้ในอนาคต

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาความเป็นไปได้ในการอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลม
2. ศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบและคุณภาพของข้าวที่ผ่านการอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลม
3. ประเมินความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมสำหรับการอบแห้งข้าวเปลือก

3. ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อสมรรถนะของการอบแห้งข้าวเปลือกที่สภาวะการทำงานต่างๆ ดังนี้
 - 1.1 ระบบอบแห้งแบบกระแสนอย่างเดียว เงื่อนไขการทดลองที่ความเร็วของอากาศขาเข้าพัดลมที่ 25 m/s ระยะห่างในการชน 24 cm. อุณหภูมิอากาศที่ใช้ในการอบแห้งที่ 70, 90 และ 110 °C อัตราการป้อนวัสดุที่ 22 , 47 และ 62 kg_{dry solid} /h
 - 1.2 ระบบอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลม เงื่อนไขการทดลองที่ความเร็วอากาศขาเข้าพัดลมที่ 25 m/s ระยะห่างในการชน 24 cm. อุณหภูมิอากาศที่ใช้ในการอบแห้งที่ 70 , 90 และ 110 °C อัตราการป้อนวัสดุที่ 22 , 47 และ 62 kg_{dry solid} /h และควบคุมความเร็วอากาศในระบบอบแห้งแบบพาหะลมที่ 16 m/s ทำงานอย่างต่อเนื่อง
2. ศึกษาคุณภาพของข้าวที่ผ่านการอบแห้งที่เงื่อนไขต่างๆ ได้แก่ เปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดและค่าความขาวของข้าวทั้งก่อนและหลังการทดลอง
3. ประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมในเทอมของค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร
4. ประเมินความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลม โดยทำการวัดค่าพลังงานที่จ่ายให้กับเครื่องเป่าลมแรงดันสูงและเครื่องทำความร้อนแบบไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง

4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ข้อมูลเกี่ยวกับผลกระทบของตัวแปรต่างๆที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมซึ่งใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการขยายผลไปสู่การประยุกต์ใช้กับวัสดุทางการเกษตรชนิดอื่นได้ในอนาคต
2. ได้ข้อมูลความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลม



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ความสำคัญของการอบแห้ง

การอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรเป็นกระบวนการลดความชื้นที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการรักษาคุณภาพ ลดความสูญเสีย และยืดเวลาการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ ความชื้นสำหรับพืชจำพวกแป้งที่เหมาะสมในการเก็บรักษามีค่าในช่วง 13-15% w.b. สำหรับพืชน้ำมันควรมีค่าประมาณ 10% w.b. (สมชาติ โสภณธนฤทธิ์. 2540)

การอบแห้งเป็นกระบวนการลดความชื้นมักใช้ความร้อนเป็นตัวกลาง ความร้อนจะถ่ายเทจากกระแสอากาศอบแห้งไปยังผิววัสดุ ความร้อนบางส่วนถูกใช้ไปในการระเหยน้ำในรูปของความชื้นแฝงของการระเหย และไอน้ำจะเคลื่อนที่สู่อากาศอบแห้งเมื่อผิววัสดุมีการสูญเสียน้ำไป ความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวจะลดลงทำให้ความชื้นจากภายในเมล็ดเกิดการเคลื่อนตัวออกสู่ภายนอกและเคลื่อนที่สู่อากาศอบแห้ง

2. ความชื้นวัสดุ

ความชื้นเป็นสิ่งที่บ่งบอกถึงปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเมื่อเทียบกับมวลของวัสดุ ความชื้นในวัสดุสามารถแสดงได้ 2 แบบคือ

1. ความชื้นมาตรฐานเปียก เป็นค่าที่นิยมใช้กันในการค้า

$$M_w = \frac{(w - d)}{w} \quad (2-1)$$

2. ความชื้นมาตรฐานแห้ง เป็นค่าที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งทางทฤษฎีเนื่องจากมวลของวัสดุแห้งจะมีค่าคงที่หรือเกือบคงที่ระหว่างการอบแห้ง

$$M_d = \frac{(w - d)}{d} \quad (2-2)$$

เมื่อ w = มวลของวัสดุชื้น, kg
 d = มวลของวัสดุแห้ง, kg

3. การอบแห้งเมล็ดพืช

โดยทั่วไปแล้วจะใช้อากาศที่มีอุณหภูมิสูงและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำเป็นตัวกลางในการอบแห้ง ทั้งนี้เพราะสามารถอบแห้งได้เร็ว และได้ความชื้นของเมล็ดพืชต่ำตามที่ต้องการอุณหภูมิของอากาศขึ้นอยู่กับลักษณะการนำเมล็ดพืชไปใช้งาน วิธีและเทคนิคที่ใช้ในการอบแห้งซึ่งจะเลือกอุณหภูมิสูงสุดที่ยอมให้ได้โดยคุณภาพของเมล็ดพืชไม่เสียหาย เพราะจะทำให้อบแห้งได้เร็ว

โครงสร้างภายในของวัสดุทางการเกษตรส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นรูพรุนทำให้มีกระบวนการอบแห้งเกิดขึ้น 2 กระบวนการ คือ ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ และช่วงอัตราการอบแห้งลดลงในช่วงแรกวัสดุมีความชื้นสูง การอบแห้งจะเป็นแบบอัตราการอบแห้งคงที่ในช่วงนี้ผิวของวัสดุจะมีน้ำเกาะอยู่เป็นจำนวนมาก การถ่ายเทความร้อนและมวลจะเกิดขึ้นเฉพาะที่ผิววัสดุเท่านั้น อัตราการอบแห้งจะถูกควบคุมโดยความเร็วอากาศ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ถ้าสถานะของอากาศคงที่จะทำให้อัตราการอบแห้งมีค่าคงที่ด้วย จนกระทั่งเมื่อวัสดุมีความชื้นลดลงต่ำกว่าความชื้นวิกฤตจะอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง น้ำจะเคลื่อนที่จากภายในวัสดุออกมาที่ผิวของวัสดุในลักษณะของเหลวหรือไอน้ำและน้ำที่ผิวจึงระเหยออกไปยังอากาศ อัตราการอบแห้งจะถูกควบคุมโดยอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุมายังที่ผิวนอก

การอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรเป็นกระบวนการหนึ่งในงานเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการรักษาคุณภาพ ลดการสูญเสีย และยืดเวลาการเก็บรักษาผลิตผล เทคโนโลยีการอบแห้งเป็นกระบวนการที่ไม่สลับซับซ้อน แต่การวางแผนการดำเนินการอบแห้งภายใต้สภาวะเงื่อนไขที่กำหนดเป็นสิ่งสำคัญและจำเป็นต้องมีการศึกษาให้เข้าใจอย่างละเอียด ทั้งนี้เพื่อให้ได้วิธีการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุด นอกจากนี้ การพิจารณาชนิดของพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งก็เป็นสิ่งจำเป็น เนื่องจากกระบวนการอบแห้งจะใช้พลังงานค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับกระบวนการอื่น ๆ ในงานเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว โดยพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ พลังงานความร้อนที่ใช้ในการทำให้อากาศร้อน เพื่อใช้ในการอบแห้ง และ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนอุปกรณ์ต่าง ๆ ให้เป็นงานกลหลักการอบแห้งเมล็ดพืชโดยทั่วไปมักใช้อากาศที่มีอุณหภูมิสูงและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำเป็นตัวกลางในการอบแห้ง ทั้งนี้เพราะสามารถอบแห้งได้รวดเร็ว และได้ความชื้นของเมล็ดพืชต่ำตามที่ต้องการในขณะที่อากาศร้อนเคลื่อนที่ผ่านชั้นเมล็ดพืชจะเกิดการถ่ายเทความร้อนและถ่ายเทมวลพร้อมกันความร้อนจากอากาศจะถ่ายเทไปยังเมล็ดพืชและทำให้น้ำที่บริเวณผิวของเมล็ดเข้าไปอยู่ในอากาศเป็นผลให้อากาศมีอุณหภูมิลดลงและความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น ส่วนเมล็ดพืชจะมีความชื้นต่ำลง และหากความชื้นลดลงมากพอแล้ว อุณหภูมิของเมล็ดพืชก็สูงขึ้นด้วย จนเมล็ดพืชจะมีอุณหภูมิเท่ากับอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง และเมื่อความชื้นลดลงจนถึงความชื้นสมดุลแล้ว ความชื้นของเมล็ดพืชก็จะไม่ลดลงอีก

การอบแห้งมีผลต่อคุณภาพทางกายภาพ ทางเคมี และชีวภาพของเมล็ดพืชหลังการอบแห้ง คุณภาพทางกายภาพที่สำคัญได้แก่ ความชื้นและการหดตัวของเมล็ดพืชระหว่างการอบแห้งซึ่งส่งผลให้เกิดการร้าวหรือแตกหักในเมล็ดพืช คุณภาพทางเคมีในเมล็ดพืชบางชนิดได้แก่ปฏิกิริยา

การเกิดสีน้ำตาล (Browning reactions) ความสามารถในการแยกแยะ และคุณค่าทางอาหาร เป็นต้น ส่วนคุณภาพทางชีวภาพได้แก่ความสามารถในการงอกของเมล็ดพืช อุณหภูมิของการอบแห้งมีผลต่อคุณภาพของเมล็ดพืชหลังการอบแห้งมาก การใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไปจะทำให้บริเวณผิวของเมล็ดพืชสูญเสียความชื้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ผิวแข็งตัว เมื่อโซนการอบแห้งเคลื่อนย้ายจากบริเวณผิวไปยังชั้นในๆ ของเมล็ดพืช ทำให้ชั้นในสูญเสียความชื้นและหดตัวโดยแยกตัวออกจากผิวที่แข็งซึ่งอาจมีผลให้เกิดรอยร้าว แยกแตก ปริหรือหักในเมล็ดพืชได้ ถ้าอุณหภูมิไม่สูงเกินไป การอบแห้งหรือการสูญเสียความชื้นจะเป็นไปอย่างช้าๆ ซึ่งผิวของเมล็ดพืชจะไม่แข็งตัวในเวลาอันรวดเร็วเกินไป การหดตัวภายในเมล็ดพืชเมื่อโซนการอบแห้งเคลื่อนย้ายเข้าไปถึง จึงไม่ก่อให้เกิดการแตกแยก แตกปริหรือหักในเมล็ดพืช คุณภาพที่สำคัญของข้าวเปลือกหลังการอบแห้งอันหนึ่งได้แก่เปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ด ซึ่งข้าวเต็มเมล็ดหมายถึงเมล็ดข้าวสารที่มีความยาวตั้งแต่แปดในสิบของเมล็ดข้าวที่สมบูรณ์ การแตกร้าวของเมล็ดพืชมีผลต่อการเก็บรักษา กล่าวคือเมล็ดที่มีการแตกร้าวจะถูกทำลายโดยแมลงได้ง่าย และการเจริญเติบโตของเชื้อราจะเป็นไปได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับเมล็ดที่ไม่แตกร้าว (สมชาติ โสภณธนฤทธิ์. 2540)

4. การอบแห้งแบบกระแสน

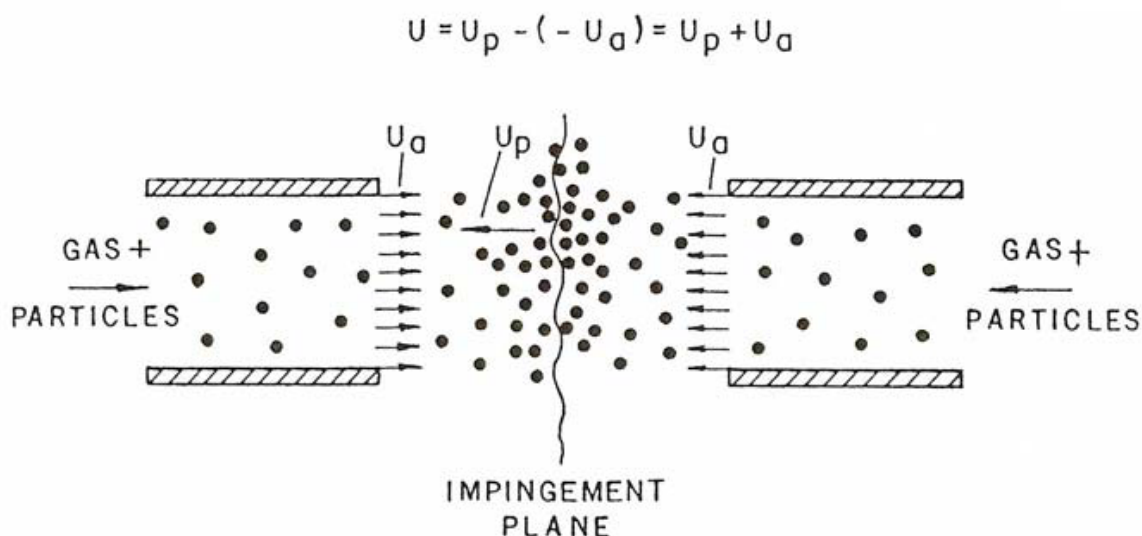
1. คุณลักษณะของระบบกระแสน

กระบวนการถ่ายเทมวลและความร้อนของของไหลไปยังวัสดุ สามารถพิจารณาได้ในเทอมของความต้านทานต่างๆ ได้แก่ ความต้านทานในส่วนหนึ่งของของไหล ซึ่งโดยปกติแล้วจะขึ้นอยู่กับอัตราการออกแบบระบบและอุปกรณ์ต่างๆ นอกจากนี้ในบางกรณียังมีความต้านทานบริเวณผิวของวัสดุซึ่งอาจเกิดจากสิ่งเจือปนต่างๆ ที่ปกคลุมบริเวณผิวของวัสดุ ส่วนความต้านทานสุดท้ายคือความต้านทานภายใน โดยปกติทั่วไปแล้วจะพยายามที่จะลดความต้านทานบางส่วนหรือทั้งหมดตามที่ได้กล่าวมาแล้ว

ความต้านทานภายในอาจจะสามารถลดลงได้โดยการลดขนาดของวัสดุ หรือการเพิ่มเวลาการเคลื่อนที่ของวัสดุในระบบให้มากขึ้น ส่วนการลดลงของความต้านทานบริเวณผิวอาจทำได้โดยการกำจัดสิ่งสกปรกที่ผิวออกไป สำหรับการลดความต้านทานภายนอก (กิตติ สถาพรประสาธน์. 2549) อาจทำได้ดังนี้

1. การเพิ่มความเร็วสัมพัทธ์ (Relative velocity) ระหว่างวัสดุกับกระแสนของไหล
2. การลดขนาดของฟิล์มของไหลที่ปกคลุมอยู่บริเวณผิวของวัสดุ
3. การให้วัสดุกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในกระแสนของไหล
4. การเพิ่มแรงจากภายนอกมากระทำเช่น แรงเฉื่อย

ระบบของกระแสนพิจารณาได้จากภาพประกอบ 1 โดยการนำกระแสนของไหลสองกระแสนหรือมากกว่ามาชนกันทำให้เกิดความปั่นป่วนในบริเวณการชนสูง ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลสารสูงขึ้นด้วย



ภาพประกอบ 1 หลักการของระบบกระแสชน (Tamir, 1994)

การเพิ่มขึ้นของอัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในระบบกระแสชน มีปัจจัยจาก (Tamir, A. 1994)

1. การเพิ่มขึ้นของความเร็วสัมพัทธ์ U ระหว่างอนุภาคที่กำลังเคลื่อนที่ทะลุผ่านกระแสน้ำไหลของของไหลตรงข้ามดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$U = U_p - (-U_a) = U_p + U_a \quad (2-3)$$

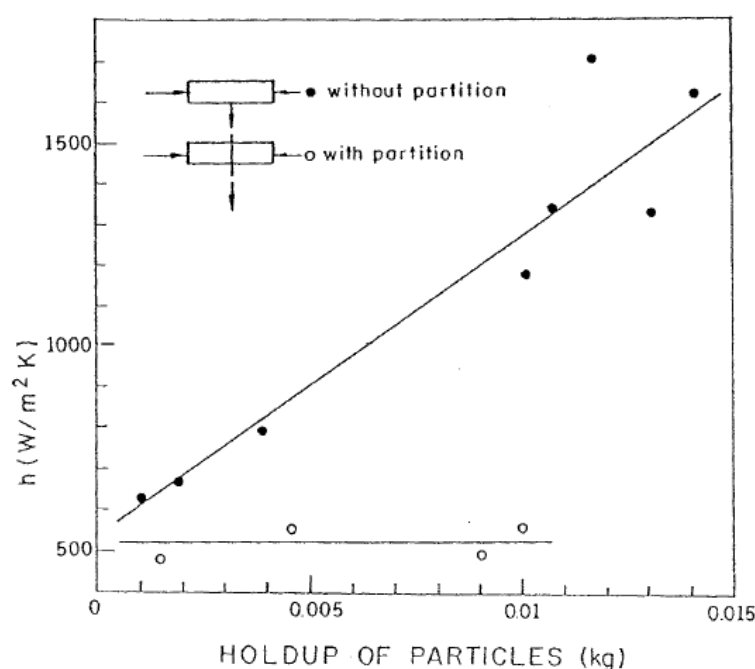
อนุภาคจะมีความเร็วเท่ากับความเร็วของไหลที่ตำแหน่งทางเข้าของกระแสน้ำไหลตรงข้าม $U_p = -U_a$ ดังนั้นขณะที่อนุภาคผ่านกระแสน้ำไหลตรงข้ามความเร็วสัมพัทธ์จะเพิ่มขึ้นจนเป็น สองเท่าของความเร็วของไหล $U = 2U_a$ ซึ่งผลที่ได้จะทำให้ความต้านทานภายนอกจะลดลง

2. การเพิ่มขึ้นของเวลาที่อนุภาคอยู่ในระบบซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ทะลุผ่านของอนุภาคเข้าไปในกระแสน้ำไหลตรงข้ามและการเคลื่อนที่กลับไป-มาของอนุภาคในบริเวณการชน อย่างไรก็ตาม ในระบบที่มีอนุภาคอยู่กันอย่างหนาแน่นการชนกันของอนุภาคจำนวนมากอาจลดเวลาที่อนุภาคอยู่ในระบบลงได้

3. ในระบบแก๊ส-ของเหลว และของเหลว-ของเหลว แรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากการชนกันของกระแสของไหลทำให้เกิดการกระจาย (Dispersion) ของอนุภาคทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลสารเพิ่มขึ้น

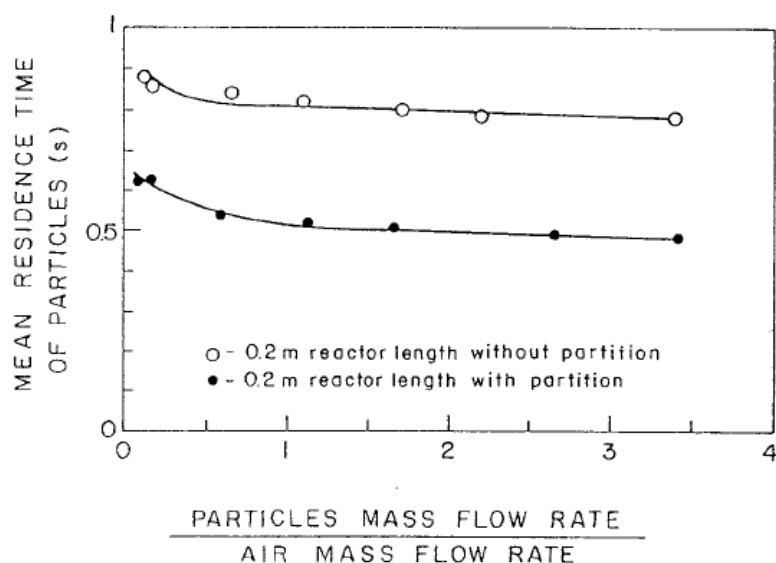
4. การชนกันอย่างต่อเนื่องของกระแสของไหลจะเหนี่ยวนำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความดันของไหลหรือทำให้เกิดความปั่นป่วนในแนวรัศมีและแนวแกนส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและมวลสารที่ดีในบริเวณการชน

ทาเมียร์ (Tamir, A. 1994) ศึกษาและแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนกับปริมาณของอนุภาคในระบบกระแสน้ำ ทั้งในกรณีที่มีแผ่นกั้น (เพื่อไม่ให้กระแสของไหลสองกระแสน้ำ) และไม่มีแผ่นกั้น จะเห็นได้ว่ากรณีของเครื่องอบแห้งที่ไม่มีแผ่นกั้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณอนุภาคที่อยู่ในระบบ ในขณะที่เครื่องอบแห้งแบบมีแผ่นกั้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะไม่มีเปลี่ยนแปลงกับปริมาณอนุภาคที่อยู่ในระบบ แสดงดังภาพประกอบ 2



ภาพประกอบ 2 ผลของแผ่นกั้นที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Tamir, A. 1994)

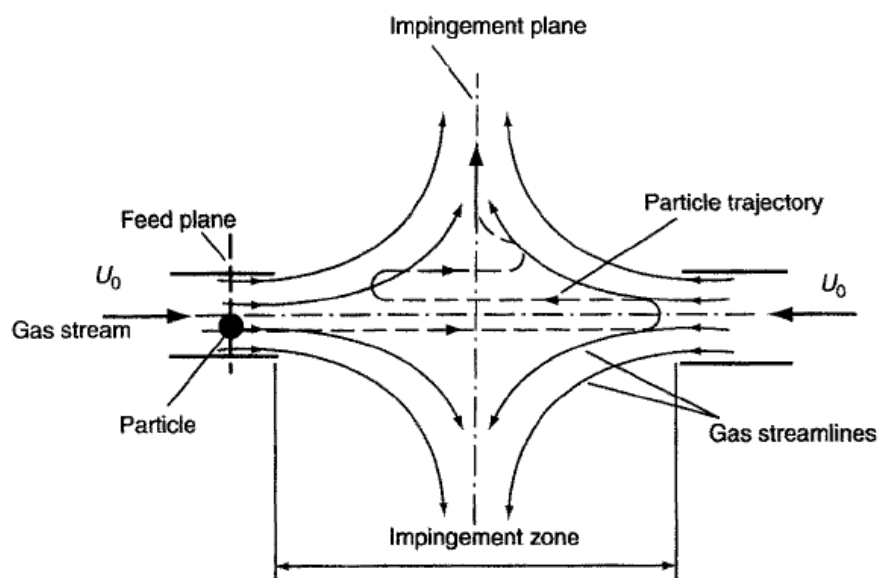
ภาพประกอบ 3 แสดงเวลาเฉลี่ยที่อนุภาคอยู่ในระบบทั้งกรณีที่มีแผ่นกั้นและไม่มีแผ่นกั้น จะเห็นได้ว่ากรณีที่ไม่มีแผ่นกั้นเวลาเฉลี่ยที่อนุภาคอยู่ในระบบมีค่ามากกว่ากรณีที่มีแผ่นกั้น เนื่องจากการมีแผ่นกั้นจะทำให้อนุภาคไม่สามารถเคลื่อนที่ทะลุผ่านเข้าสู่กระแสการไหลตรงข้ามได้ ทำให้ไม่เกิดการเคลื่อนที่กลับไป-มาในบริเวณการชน



ภาพประกอบ 3 ผลของแผ่นกั้นที่มีต่อเวลาเฉลี่ยที่อนุภาคอยู่ในระบบ (Tamir, A. 1994)

2. หลักการของเครื่องอบแห้งแบบกระแสนชน

เครื่องอบแห้งแบบกระแสนชน (Impinging stream dryers, ISD) จัดอยู่ในกลุ่มเครื่องอบแห้งแบบรวดเร็ว (Flash dryers) ซึ่งเหมาะกับการอบแห้งอนุภาคเปียก (Wet particles) มีหลักการพื้นฐาน คือ การให้กระแสนไหลของตัวกลางการอบแห้งตั้งแต่ 2 กระแสนมาชนกัน โดยให้กระแสนใดกระแสนหนึ่ง (หรือมากกว่า) พาเอาอนุภาคเข้ามาสู่ระบบ โดยกระบวนการอบแห้งจะเกิดขึ้นในบริเวณการชนกัน (Impingement zone) เป็นหลัก จากคุณลักษณะทางอุทกพลวัต (Hydrodynamic characteristics) ในบริเวณการชน และผลของแรงเฉื่อย (Inertia) ของวัสดุที่มีมากกว่าของไหลตัวกลาง ทำให้การเคลื่อนที่ของอนุภาคในเครื่องอบแห้งแบบกระแสนชนมีความพิเศษ นั่นคือการเคลื่อนที่ของอนุภาคจะเป็นแบบสวนทางกลับไป-มา (Oscillatory motion) ภายในระนาบการชน (Impingement plane) แสดงในภาพประกอบ 4 การเคลื่อนที่ลักษณะนี้ ทำให้อนุภาคอยู่ในระบบได้นานขึ้น จึงมีเวลาในการแลกเปลี่ยนความร้อนและมวลสารกับตัวกลางการอบแห้งมากขึ้น นอกจากนี้ ในบริเวณการชนมีความปั่นป่วนสูง ทำให้เกิดกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในอัตราที่สูง ดังนั้นความชื้นของอนุภาคจึงระเหยออกไปอย่างรวดเร็วส่งผลให้ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นลง



ภาพประกอบ 4 หลักการของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน (Kudra; et al. 1995)

จากลักษณะพิเศษทางอุทกพลศาสตร์ของระบบกระแสนทำให้เครื่องอบแห้งแบบกระแสนมีลักษณะเด่นหลายประการดังนี้ (Kudra; et al. 1995)

1. อัตราการอบแห้งสูง
2. การทำงานของเครื่องอบแห้งไม่ยุ่งยาก เนื่องจากไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่
3. มีขนาดเล็กกว่าเครื่องอบแห้งชนิดอื่นๆ ที่มีการอบแห้งเท่ากัน
4. สามารถใช้งานร่วมกับกระบวนการอื่นๆ ได้ดี เช่นกระบวนการทางเคมีและการทำ

ความเย็น

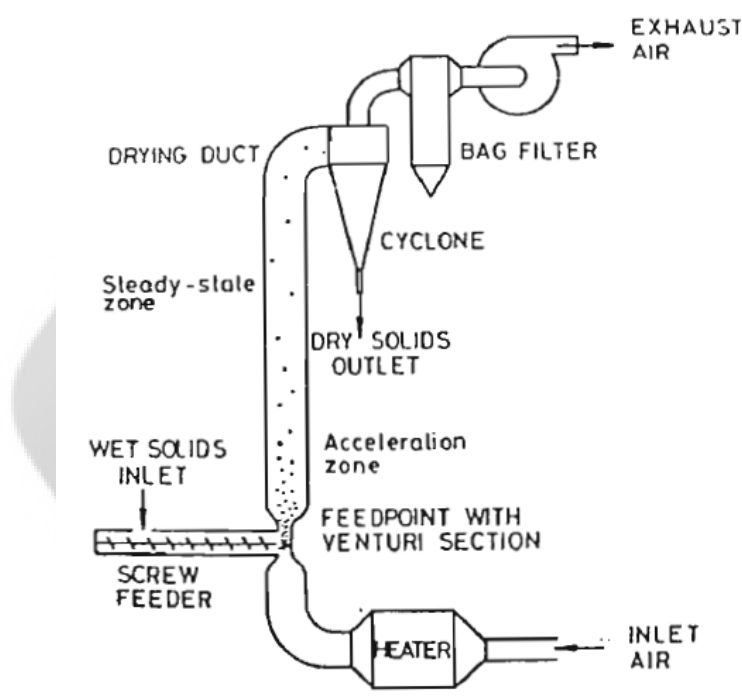
5. การอบแห้งแบบพาหะลม

1. หลักการของการขนถ่ายวัสดุโดยใช้พาหะลม

ระบบการขนถ่ายใช้พาหะลมเหมาะสำหรับวัสดุที่เป็นเม็ดหรือผง การขนถ่ายชนิดนี้มีประโยชน์มาก เนื่องจากระหว่างการขนถ่ายจะไม่มี การเปื้อนและทำให้เม็ดแห้งด้วย หลักการที่สำคัญของการขนถ่ายวัสดุแบบพาหะลมคือ ต้องใช้ความเร็วของอากาศมากพอที่จะทำให้วัสดุไหลไปกับอากาศได้ ดังนั้นความเร็วของอากาศต้องมีความมากกว่าความเร็วสุดท้ายก่อนตกของวัสดุ (Terminal velocity) แต่ความเร็วของวัสดุจะต่ำกว่าความเร็วของอากาศเล็กน้อย โดยทั่วไปมักจะให้ความเร็วของวัสดุที่ถูกพาไปกับอากาศมีค่ามากกว่า 80% ของความเร็วอากาศ (ทงค์ ฉายาวัดนะ. 2537)

2. เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม

กระบวนการอบแห้งจะเริ่มจากการที่วัสดุถูกพาไปกับอากาศร้อน ขณะเดียวกันก็ถูกอบแห้ง การไหลของอากาศและวัสดุจะเป็นการไหลแบบตามกัน จนกระทั่งถึงตัวเก็บผลิตภัณฑ์ ซึ่งได้แก่ ไซโคลน เวลาที่ใช้ในการอบแห้งจะสั้น การกระจายของวัสดุขณะสัมผัสกับอากาศมีความสำคัญมาก เพราะจะเกิดผลกระทบต่ออัตราการถ่ายเทมวลและความร้อน ลักษณะของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมแสดงดังภาพประกอบ 5 จะเห็นได้ว่าเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมประกอบด้วยท่อตรง มีตัวอุปกรณ์ป้อนวัสดุเข้าไปในอากาศร้อน และถูกพาไปยังไซโคลนเพื่อแยกวัสดุออกจากอากาศร้อน ส่วนอากาศร้อนจะถูกดูดออกทางปล่องโดยพัดลม



ภาพประกอบ 5 เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (Kemp, I.C. 1994)

จากที่เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมเป็นเครื่องอบแห้งแบบไหลขนาน ทำให้มีลักษณะเด่นหลายประการดังนี้ (ทงค์ ฉายาวัฒน์. 2537)

1. เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการอบแห้งสั้นมาก และการไหลของวัสดุและอากาศเป็นแบบตามกันจึงเหมาะกับวัสดุที่มีความไวต่อความร้อน (Sensitive)
2. การใช้อุณหภูมิอบแห้งสูง แม้จะใช้อัตราการไหลของอากาศต่ำก็สามารถทำให้ประสิทธิภาพทางความร้อนสูงได้
3. เครื่องอบแห้งชนิดนี้สามารถขนถ่ายวัสดุได้โดยไม่ต้องมีอุปกรณ์อื่นช่วยพาวัสดุในระหว่างการอบแห้ง

4. การอบแห้งจะเกิดอย่างสม่ำเสมอเนื่องจากวัสดุมีการกระจายตัวในกระแสน้ำวนร้อนรวมทั้งมีพื้นที่ถ่ายเทความร้อนสูง
5. โครงสร้างของเครื่องอบแห้งเป็นแบบง่าย ๆ และการติดตั้งใช้พื้นที่น้อย

6. ผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำวนร่วม

กับการอบแห้งแบบพาหะลม

เครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำวนและเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม จัดอยู่ในกลุ่มเครื่องอบแห้งแบบรวดเร็ว ซึ่งสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง (Performance of dryer) สามารถประเมินได้ในเทอมของอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร (Volumetric water evaporation rate) และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร (Volumetric heat transfer coefficient) สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้ (Sathapornprasath; et al., 2007; Choicharoen; et al., 2010; Nimmol; & Devahastin. 2010)

อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร

$$N_v = \frac{W_p(X_i - X_e)}{V_r} \quad (2-4)$$

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร

$$h_v = \frac{W_p(X_i - X_e)\lambda}{V_r \Delta T_{lm}} \quad (2-5)$$

เมื่อ	N_v	คือ อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร, $\text{kg}_{\text{water}}/\text{m}^3 \text{h}$
	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_e	คือ ความชื้นของวัสดุที่ทางออก, kg/kg (d.b.)
	V_r	คือ ปริมาตรห้องอบแห้ง, m^3
	λ	คือ ความร้อนแฝงของการระเหย, kJ/kg
	ΔT_{lm}	คือ ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยลอการิทึม, K ซึ่งหาได้จาก

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_d - T_w)_e - (T_d - T_w)_i}{\ln[(T_d - T_w)_e / (T_d - T_w)_i]} \quad (2-6)$$

เมื่อ

i และ e คือ ทางเข้า และ ทางออก ของการอบแห้ง

7. ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

การประเมินประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งทำได้โดยการคำนวณค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงปริมาณพลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำจำนวน 1 kg ออกจากวัสดุที่นำมาอบแห้ง ซึ่งความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้ (Choicharoen; et al., 2009;)

$$SEC = \frac{E}{m_w} \quad (2-7)$$

เมื่อ

SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของอุปกรณ์ที่ใช้พลังงาน (MJ/kg_{water})

E คือ พลังงานที่ป้อนให้กับอุปกรณ์ที่ใช้ไฟฟ้า (MJ)

m_w คือ ปริมาณน้ำ (ความชื้น) ที่นำออกจากวัสดุที่นำมาอบแห้ง (kg) ซึ่งสามารถหาได้จากความแตกต่างระหว่างความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายของวัสดุที่นำมาอบแห้ง แต่ถ้าเป็นกรณีที่วัสดุอบแห้งมีการเคลื่อนที่เข้าและออกจากระบบตลอดเวลา การหาปริมาณน้ำที่นำออกจากวัสดุสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$m_w = \dot{m}_a \Delta w t \quad (2-8)$$

เมื่อ

$\dot{m}_a$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศขาเข้า (kg_{dry air} /min)

Δw คือ ผลต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นของอากาศร้อนทางด้านขาเข้าและขาออกของระบบอบแห้ง (kg_{water}/kg_{dry air}) ซึ่งสามารถหาได้จากผลต่างของความชื้นสัมบูรณ์ซึ่งคำนวณค่าได้จากอุณหภูมิกระเปาะเปียกและกระเปาะแห้งของอากาศทางด้านขาเข้าและขาออกของระบบอบแห้ง

t คือ เวลาในการอบแห้ง (min)

8. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

คิตรอน และคนอื่นๆ (Kitron, Y.; et al. 1987) ศึกษาพลศาสตร์การเคลื่อนที่ของวัสดุการอบแห้งและเวลาที่วัสดุอยู่ในระบบของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำสี่ทิศทาง (Four impinging stream, FIS) และเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำสองทิศทาง (Two impinging stream, TIS) พบว่าเงื่อนไขที่ดีที่สุดสำหรับการอบแห้งอาจพิจารณาได้จากการเพิ่มขึ้นของภาระการป้อนวัสดุเข้าสู่ระบบ กล่าวคือหากเพิ่มอัตราการป้อนวัสดุให้มากขึ้นแล้วเครื่องอบแห้งยังสามารถระบายน้ำออกได้ย่อมจะเป็นการแสดงถึงประสิทธิภาพของเครื่องอีกทางหนึ่ง

คิตรอน และทาเมียร์ (Kitron, Y.; & Tamir, A. 1988) พบว่าอนุภาคจะอยู่ในระบบนานขึ้น (ที่อัตราการไหลอากาศคงที่) เมื่ออัตราการป้อนอนุภาคเพิ่มขึ้น แต่จะเพิ่มขึ้นได้ถึงค่าหนึ่งเท่านั้น เนื่องจากอนุภาคในระบบชนกันมากขึ้นทำให้อนุภาคสูญเสียพลังงานจลน์ (Kinetic energy) และจะเคลื่อนที่ออกจากห้องอบแห้งไป ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อพลังงานจลน์ของอนุภาคสูงขึ้นทำให้การเคลื่อนที่กลับไป-มานานขึ้นส่งผลให้เวลาที่อนุภาคอยู่ในระบบเพิ่มขึ้น ในกรณีของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน พบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการป้อนอนุภาคเพิ่มขึ้น แต่จะเพิ่มขึ้นสูงสุดและคงที่ที่ค่าอัตราการป้อนค่าหนึ่งเท่านั้น

ทาเมียร์ (Tamir, A. 1989) ศึกษาการอบแห้งวัสดุอนุภาคในเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำโดยใช้วัสดุทดสอบคือ Millet seed ซึ่งมีความชื้นเริ่มต้น 25-30% มาตรฐานแห้ง อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งอยู่ระหว่าง 50-65 °C และการทดลองอบแห้งดังกล่าวอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่โดยที่อุณหภูมิผิวของวัสดุจะมีค่าคงที่เท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศเข้าห้องอบแห้ง ส่วนการเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งนั้นจะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร ซึ่งการที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรมีค่าเพิ่มขึ้นจากการที่มีมวลของวัสดุที่อยู่ในระบบมากขึ้น ย่อมแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของเครื่องอบแห้งที่มากกว่า

คิตรอน และทาเมียร์ (Kitron, Y; & Tamir, A. 1990) ศึกษาคุณลักษณะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำแบบแกนเดี่ยวซึ่งวัสดุที่ใช้ในการศึกษาคือ เมล็ดธัญพืช โดยการทดลองอบแห้งดังกล่าวอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ จากผลการทดลองพบว่า เวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบจะเพิ่มขึ้นตามการลดลงของอัตราส่วนภาระ ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรจะเพิ่มขึ้นเมื่อมวลของ วัสดุที่อยู่ในระบบ และอัตราการไหลของอากาศมีค่าเพิ่มมากขึ้น

ทาเมียร์ (Tamir, A. 1994) ทำการเปรียบเทียบอัตราการระเหยน้ำและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำกับเครื่องอบแห้งชนิดอื่นดังตารางที่ 1 พบว่าอัตราการระเหยน้ำและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำสูงกว่าเครื่องอบแห้งแบบอื่น

ตาราง 1 อัตราการระเหยน้ำและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรของเครื่องอบแห้ง

ชนิดเครื่องอบแห้ง	วัสดุทดสอบ	สัมประสิทธิ์การถ่ายเท	
		อัตราการระเหยน้ำ ($\text{kg}_{\text{water}}/\text{m}^3 \text{ s}$)	ความร้อนเชิงปริมาตร ($\text{W}/\text{m}^3 \text{ K}$)
เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย	กาแฟ	0.5×10^{-3}	18.6
เครื่องอบแห้งแบบสเปาท์เตดเบด	พอลิเมอร์	$(0.75-45.0) \times 10^{-3}$	15.1-3,390
เครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำไหล	อนุภาค	36.7×10^{-3}	831.6
เครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำ	เมล็ดธัญพืช	$(200-1,500) \times 10^{-3}$	138-133,114

เซา, หยาน, และบัวเกา (Cao, C.; Yan, Z.; & Baoguo, L. 1999) ศึกษาอิทธิพลของระยะห่างในการชน ปริมาตรของห้องอบแห้งและวัสดุที่ใช้ในการทดลองชนิดต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำ สำหรับวัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือ ข้าว เมล็ดธัญพืช และมันฝรั่งเม็ด ซึ่งจากการทดลองพบว่า ระยะห่างในการชนที่มากกว่าและปริมาตรห้องอบแห้งที่ใหญ่ขึ้นจะสามารถทำให้น้ำระเหยออกจากวัสดุได้มากขึ้น โดยเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำเหมาะสมที่สุดกับวัสดุที่มีความชื้นบริเวณผิวสูงและมีขนาดเล็ก เช่นเมล็ดธัญพืช และมันฝรั่งเม็ด

สถาพรประสารณ์, เทพหัสดิน, และโสภณรณฤทธิ์ (Sathapornprasath, K.; Devahastin, S.; & Soponronnarit, S. 2004) ศึกษาผลกระทบของสภาวะการทำงานต่างๆ ที่มีผลต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำ โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณหาอัตราการอบแห้งของอนุภาคเดี่ยวภายใต้ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ จากการคำนวณพบว่าอัตราการอบแห้งในกรณีที่ใช้อากาศร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิ และความเร็วของอากาศร้อนเข้าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความชื้นสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการอบแห้งลดลง ส่วนกรณีการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งนั้นพบว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและความเร็วของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง มีผลให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น ส่วนความดันไอน้ำที่เพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการอบแห้งลดลงและพบว่าอุณหภูมิผกผันของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำที่พิจารณานี้ มีค่าประมาณ $212\text{ }^{\circ}\text{C}$ ที่อัตราการอบแห้งเท่ากับ $60\text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3\text{ h}$

สถาพรประสารณ์, เทพหัสดิน, และโสภณรณฤทธิ์ (Sathapornprasath, K.; Devahastin, S.; & Soponronnarit, S. 2007) ศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำสำหรับวัสดุอนุภาค ซึ่งทำการทดลองและดูผลของการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อสมรรถนะของเครื่อง

อบแห้งแบบกระแสน้ำ ได้แก่ อุณหภูมิและความเร็วอากาศขาเข้า อัตราการป้อนอนุภาคที่อบแห้ง ซึ่งสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำได้จากอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร ซึ่งใช้เรซินเป็นตัวทดสอบการอบแห้ง ซึ่ง ส่วนใหญ่ ความชื้นจะแพร่ออกมาที่ผิวหน้า และมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 81-85 % มาตรฐานแห้ง และจากการทดลองพบว่าการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุดมีค่าประมาณ $110 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3\text{h}$ ขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรมีค่า $880 \text{ W}/\text{m}^3\text{K}$ และอนุภาคมีค่าเฉลี่ยเวลาที่อยู่ในระบบประมาณ 2 วินาที

จ้อยเจริญ, เทพหัสดิน, และโสภณรณฤทธิ์ (Choicharoen, K.; Devahastin, S.; & Soponronnarit, S. 2010) ได้ทำการปรับปรุงแก้ไขเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำสำหรับวัสดุอนุภาคของสถาพรประสาธน์ เพื่อศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำในรูปแบบอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร ซึ่งใช้กากถั่วเหลืองเป็นตัวทดลองการอบแห้ง นอกจากนี้ยังศึกษาในส่วนของเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบรวมทั้งประมาณการความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องอบแห้ง ซึ่งจากผลของการปรับปรุงพบว่า 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 ส่วนค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าต่ำสุดประมาณ $5.6 \text{ MJ}/\text{kg}_{\text{water}}$

นิมมอล และเทพหัสดิน (Nimmol, C.; & Devahastin, S. 2010) ศึกษาหาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งกระแสน้ำแบบแกนเดี่ยวสองทิศทางสำหรับข้าวเปลือก โดยการสร้างเครื่องอบแห้งกระแสน้ำแล้วทดลองและ ดูผลการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิอากาศขาเข้า ระยะการชน อัตราการป้อนอนุภาคและลักษณะการป้อนอนุภาค (ป้อนทิศทางเดียว กับ ป้อนสองทิศทาง) การหาสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง ซึ่งหาได้จากอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร รวมทั้งอัตราการใช้พลังงานจำเพาะของเครื่องที่ถูกพัฒนาขึ้น และจากการทดลองพบว่า สามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกได้ 3.4 – 7.7 % มาตรฐานแห้ง การระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุดมีค่าประมาณ $198 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3\text{h}$ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรมีค่าประมาณ $7,013 \text{ W}/\text{m}^3\text{K}$ อนุภาคมีค่าเฉลี่ยเวลาที่อยู่ในระบบในช่วง 1.81 – 2.42 วินาที อัตราการใช้พลังงานจำเพาะต่ำสุด $5.1 \text{ MJ}/\text{kg}_{\text{water}}$ เมื่อลักษณะการป้อนเป็นแบบป้อนสองทิศทาง โดยมีอุณหภูมิขาเข้า 110°C มีระยะการชน 5 cm อัตราการป้อนวัสดุอนุภาคมีค่า $150 \text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$

เคมปี (Kemp, I.C. 1994) ศึกษาแนวทางการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นในขบวนการอบแห้งแบบพาหะลม โดยใช้ทฤษฎีต่างๆ ดังนี้ การถ่ายเทความร้อน การส่งถ่ายวัสดุ การสมดุลของมวล และการสมดุลความร้อน ได้มีการจำลองการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมแล้วทำการวิเคราะห์จากทฤษฎีดังกล่าวด้วย Computational fluid dynamics (CFD) วิธีการวิเคราะห์คือ กำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ความเร็วของแก๊สร้อน กำหนดขนาดและปริมาณความชื้นของวัสดุที่ส่งผ่าน แล้วหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของอากาศร้อน กับความสูงของ

ท่ออากาศร้อนที่ทำให้วัสดุมีการเคลื่อนที่ พบว่าหากเพิ่มความยาวของท่อส่ง ความเร็วของอากาศร้อนต้องเพิ่มขึ้นด้วย

แก่นทรพย์, กุลวงศ์, และวงศ์วิเศษ (Keansup, W.; Kulwong, S.; & Wongwises, S. 2006) ศึกษาความเป็นไปได้ของการลดความชื้นของข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้นสูงด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม โดยทดลองใช้ความเร็วอากาศร้อน 20 -30 m/s อัตราการไหลของข้าวเปลือก 150 – 350 kg/hr ความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือก 22 – 26 % (w.b.) อุณหภูมิอากาศร้อน 35 – 70 °C จากผลการทดลองพบว่า ความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกมีค่าต่ำสุด 18 % (w.b.) หรือลดลงประมาณร้อยละ 5 – 6 จากความชื้นเริ่มต้น ซึ่งใช้เวลา 3 - 4 วินาที โดยไม่ทำให้คุณภาพของเมล็ดข้าวเสียหาย

แก่นทรพย์, กุลวงศ์, และวงศ์วิเศษ (Keansup, W.; Kulwong, S.; & Wongwises, S. 2006) ได้ทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมแบบที่มีไซโคลนและแบบที่ไม่มีไซโคลน โดยใช้ความเร็วอากาศร้อนตั้งแต่ 20 – 30 m/s อัตราการไหลของข้าวเปลือก 150 – 350 kg/h และอุณหภูมิของอากาศร้อน 35 – 70 °C จากการทดลองพบว่า การอบแห้งแบบที่มีไซโคลนจะมีประสิทธิภาพในการอบแห้งที่ดีกว่าแบบที่ไม่มีไซโคลน ในแง่ของความชื้นที่ลดลง อัตราการระเหยน้ำและด้านคุณภาพของเมล็ดข้าวที่มีค่าสูงกว่า

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น เห็นได้ว่าตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้งวัสดุต่างๆ ในเครื่องอบแห้งคืออากาศร้อน สำหรับเครื่องอบแห้งแบบกระแสนเป็นเครื่องอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งวัสดุที่มีความชื้นที่ผิวสูง สามารถลดความชื้นของวัสดุได้อย่างรวดเร็ว โดยใช้หลักการของกระแสน กล่าวคือทำให้กระแสนการไหลของตัวกลางการอบแห้งตั้งแต่ 2 กระแสนวนกัน ซึ่งการชนกันของกระแสนของไหลทำให้เกิดความปั่นป่วนในบริเวณการชนกันสูง เนื่องจากการเคลื่อนที่ของวัสดุจะเป็นแบบสวนทางกลับไป-มา ภายในบริเวณการชน ทำให้วัสดุอยู่ในระบบได้นานขึ้น ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลสารสูง ซึ่งเป็นหลักการที่ทำให้เครื่องอบแห้งแบบกระแสนมีประสิทธิภาพสูงกว่าเครื่องอบแห้งชนิดอื่นๆ นอกจากนี้แล้วระบบยังมีการทำงานที่ไม่ซับซ้อน และไม่มีชิ้นส่วนที่มีการเคลื่อนที่ อย่างไรก็ตาม สำหรับสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสนอาจจะขึ้นอยู่กับรูปแบบของเครื่องอบแห้งเองและตัวแปรการทำงานต่างๆ เช่น อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง ระยะห่างการชน อัตราการป้อนวัสดุเข้าสู่ระบบอบแห้ง ความเร็วกระแสนการไหล และความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ เป็นต้น ส่วนเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมเหมาะสำหรับวัสดุที่เป็นเมล็ดหรือผง เครื่องอบแห้งชนิดนี้มีประสิทธิภาพทางความร้อนสูง สามารถลำเลียงวัสดุได้โดยไม่ต้องมีอุปกรณ์อื่นช่วยพาวัสดุในระหว่างการอบแห้ง การอบแห้งจะเกิดอย่างสม่ำเสมอ เนื่องจากวัสดุมีการกระจายตัวในกระแสนอากาศร้อน จึงสามารถทำให้วัสดุแห้งได้ภายในระยะเวลาอันสั้น

สำหรับเครื่องอบแห้งแบบกระแสนนั้นยังเป็นเทคโนโลยีที่ใหม่สำหรับประเทศไทย จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาและวิจัยถึงผลกระทบตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งเพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการขยายผลไปสู่การประยุกต์ใช้กับวัสดุทางเกษตรชนิดอื่นได้ในอนาคต จากผลการศึกษาในอดีตที่ผ่านมา ระบบการอบแห้งแบบกระแสนจะมีสมรรถนะที่สูงเมื่อวัสดุอยู่ใน

ระบบได้นานเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นการใช้เครื่องอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลม เพื่อเพิ่มเวลาของวัสดุให้อยู่ในระบบได้นานมากขึ้น ก็จะทำให้ระบบอบแห้งมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น ซึ่งทำให้สันนิษฐานได้ว่าหากเครื่องอบแห้งนี้มีการทำงานแบบต่อเนื่อง จะทำให้ระบบการอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมมีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพมาก



บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

วิธีดำเนินการวิจัยแบ่งเป็นหัวข้อได้แก่ วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองและสถานที่ในการทำงานวิจัย การเตรียมข้าวเปลือกขึ้น การกำหนดตัวแปรการทดลอง การทดลองอบแห้งข้าวเปลือก การหาความชื้นข้าวเปลือก การประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง การหาเวลาเฉลี่ยของวัสดุที่อยู่ในระบบ การวิเคราะห์คุณภาพข้าว การประมาณการความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องอบแห้ง และการวิเคราะห์ทางสถิติ ดังนี้

1. วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

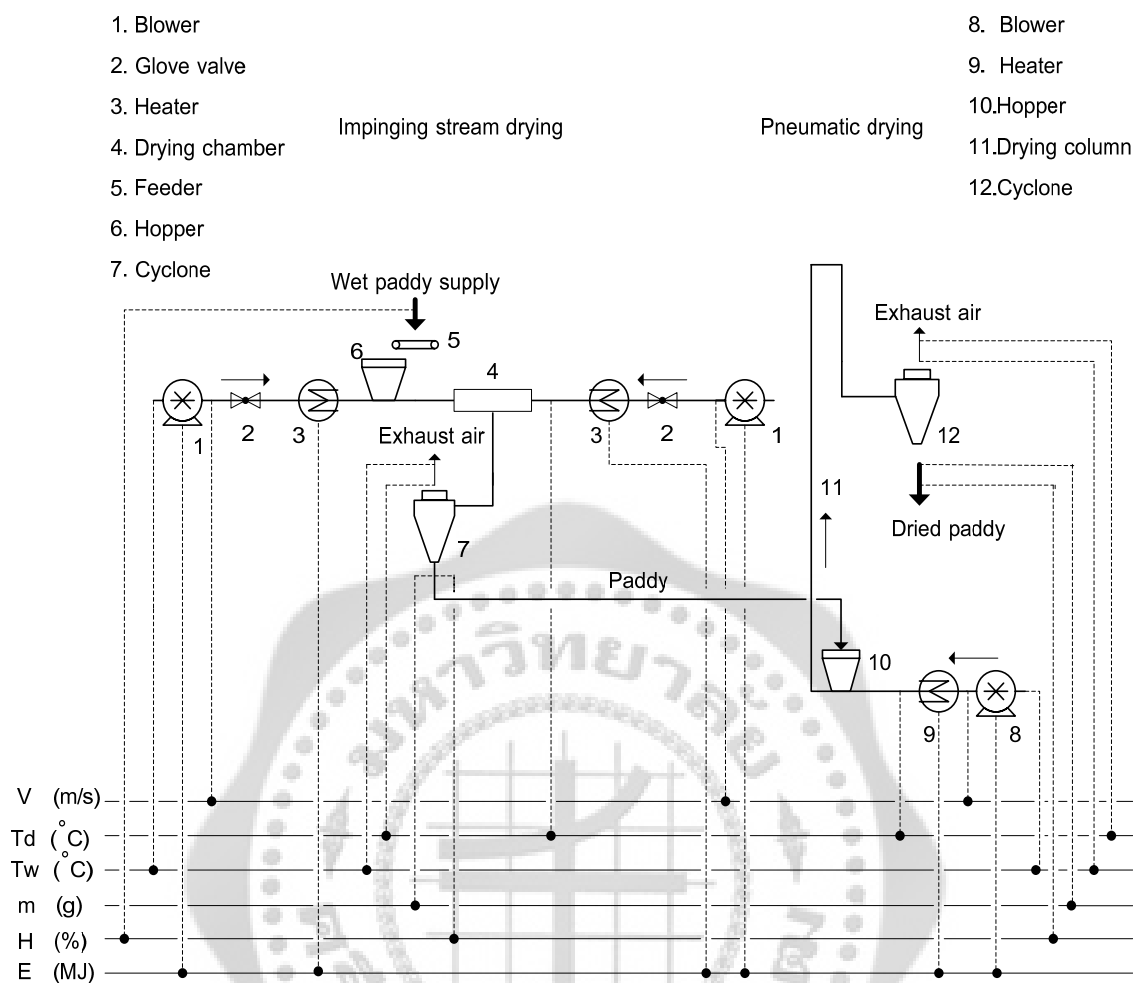
ข้าวเปลือกที่ใช้ในงานวิจัยคือ ข้าวเปลือกพันธุ์ปทุมธานี 1 จากศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี ซึ่งมีลักษณะเด่น ดังนี้ (กรมวิชาการเกษตร. 2543)

1. เป็นข้าวเจ้าหอมไม่ไวต่อช่วงแสง
2. คุณภาพเมล็ดคล้ายพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ข้าวสุกนุ่มเหนียว มีกลิ่นหอม
3. ต้านทานเพลี้ยกระโดดสีน้ำตาล
4. ต้านทานเพลี้ยกระโดดหลังขาว
5. ต้านทานโรคไหม้
6. ทนทานโรคขอบใบแห้ง
7. ให้ผลผลิตเฉลี่ย 650-774 กิโลกรัมต่อไร่

2. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองและสถานที่ในการทำงานวิจัย

อุปกรณ์ที่ใช้คือ เครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำวนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมในระดับห้องปฏิบัติการ โดยทำการทดลองและเก็บข้อมูลที่ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ภาพประกอบ 6 แสดงแผนผังของเครื่องอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมที่ใช้ในการศึกษานี้ โดยเครื่องอบแห้งแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 เครื่องอบแห้งแบบกระแสน ประกอบด้วยห้องอบแห้งที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม (Type 304) มีปริมาตรประมาณ 0.0047 m^3 โดยที่เครื่องอบแห้งหุ้มฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้วทั้งหมด เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม เครื่องเป่าลมแรงดันสูง (High pressure blower) ใช้มอเตอร์กำลังขับเคลื่อนขนาด 2.2 kW จำนวน 2 ชุด ความเร็วของอากาศภายในท่อลำเลียงวัสดุ สามารถปรับตั้งด้วยโกลบวาล์วและตรวจวัดโดยใช้เครื่องมือวัด ส่วนอัตราการป้อนวัสดุสามารถควบคุมได้โดยการปรับแรงดันไฟฟ้า กระแสตรงที่ป้อนให้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งใช้เป็นตัวขับเคลื่อนสายพานลำเลียงที่อุปกรณ์ป้อนวัสดุ ส่วนการให้ความร้อนกับอากาศใช้เครื่องกำเนิดความร้อนชนิดแท่งไฟฟ้าขนาดรวม 15 kW จำนวน 2 ชุด โดยมีเทอร์โมคัปเปิล ชนิด K ต่อเข้ากับเครื่องอ่านอุณหภูมิของอากาศร้อน ส่วนไซโคลนทำหน้าที่แยกข้าวเปลือกกับฝุ่นละอองที่เกิดจากการอบแห้ง สำหรับการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องเป่าลมแรงดันสูงและเครื่องทำความร้อนแบบไฟฟ้า สามารถวัดได้โดยตรงโดยการใช้มาตรวัดหน่วยพลังงานไฟฟ้า ส่วนที่ 2 เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม ประกอบด้วยห้องอบแห้งที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม (Type 304) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.0381 m โดยที่เครื่องอบแห้งหุ้มฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้วทั้งหมด เครื่องเป่าลมแรงดันสูงใช้มอเตอร์กำลังขับเคลื่อนขนาด 1.75 kW จำนวน 1 ชุด เพื่อใช้ในการลำเลียงข้าวเปลือกให้เคลื่อนที่ไปตามแนวยาวของท่ออากาศร้อน ความเร็วของอากาศภายในห้องอบแห้ง สามารถควบคุมความเร็วอากาศได้ด้วยการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ ส่วนการให้ความร้อนกับอากาศใช้เครื่องกำเนิดความร้อนชนิดแท่งไฟฟ้าขนาดรวม 9 kW จำนวน 1 ชุด โดยมีเทอร์โมคัปเปิล ชนิด K ต่อเข้ากับเครื่องอ่านอุณหภูมิของอากาศร้อน ส่วนไซโคลนทำหน้าที่แยกข้าวเปลือกกับฝุ่นละอองที่เกิดจากการอบแห้ง สำหรับการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องเป่าลมแรงดันสูงและเครื่องทำความร้อนแบบไฟฟ้า สามารถวัดได้โดยตรงโดยการใช้มาตรวัดหน่วยพลังงานไฟฟ้า



โดยที่

V คือ ความเร็วอากาศเข้า, m/s

T_d คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้ง, °C

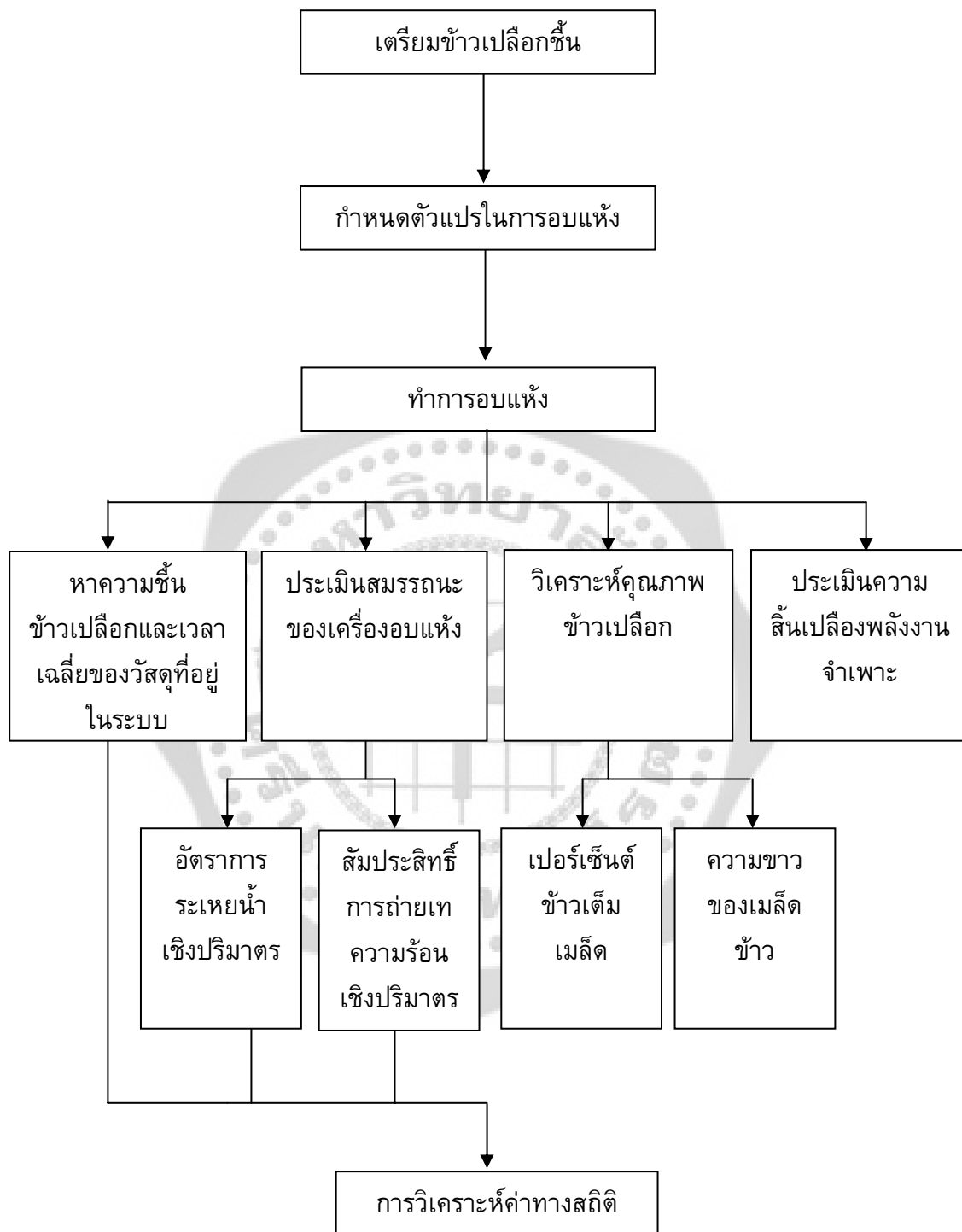
T_w คือ อุณหภูมิกระเปาะเปียก, °C

m คือ มวลของข้าวเปลือก, g

H คือ ความชื้นข้าวเปลือก, % d.b

E คือ พลังงานจำเพาะของระบบอบแห้ง, MJ

ภาพประกอบ 6 แผนผังของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำวนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลม



ภาพประกอบ 7 ขั้นตอนการทดลอง

3. ขั้นตอนในการเตรียมข้าวเปลือกชั้น

การเตรียมความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือก เป็นกระบวนการเพิ่มความชื้นของข้าวเปลือก เนื่องจากข้าวเปลือกที่ใช้ในการทดลองได้มาจากการซื้อ ซึ่งผ่านการลดความชื้นมาแล้วทำให้ความชื้นต่ำ แต่ในการทดลองต้องการใช้ข้าวเปลือกที่มีความชื้นให้ใกล้เคียงกับความชื้นที่ได้หลังการเก็บเกี่ยว ดังนั้นจึงต้องมีกระบวนการทำขึ้นเพื่อให้ได้ข้าวเปลือกชั้นที่ใช้ในการทดลอง ในงานวิจัยนี้ใช้ค่าความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกอยู่ที่ประมาณ 28 % d.b. ซึ่งการเพิ่มความชื้นให้กับข้าวเปลือกจะใช้วิธีการคลุกข้าว ซึ่งมีวิธีการทำดังนี้

1. นำข้าวเปลือกที่แช่อยู่ในตู้เย็นอุณหภูมิ 4-6 °C มาตากผึ่งที่อุณหภูมิห้อง 30 นาที
2. เพิ่มความชื้นให้ข้าวเปลือกโดยการเติมน้ำในปริมาณที่คำนวณได้ ซึ่งอธิบายดังภาคผนวก ง
3. ทำการคลุกเคล้าข้าวเปลือกให้เข้ากันเพื่อให้น้ำกระจายอย่างทั่วถึงและสม่ำเสมอ
4. นำข้าวเปลือกไปพักไว้ในภาชนะที่ปิดมิดชิด แล้วนำไปแช่ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4-6 °C เป็นระยะเวลา 3 วัน โดยจะทำการคลุกเคล้าทุก 24 ชั่วโมง เพื่อให้น้ำกระจายอย่างทั่วถึงและสม่ำเสมอภายในเมล็ดข้าวเปลือก
5. นำข้าวเปลือกออกมาผึ่งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาทีก่อนทำการทดลองเพื่อให้อุณหภูมิของข้าวเปลือกมีค่าเท่ากับอุณหภูมิห้องแล้วจึงดำเนินการทดลอง

4. ขั้นตอนการกำหนดตัวแปรการทดลอง

ในงานวิจัยนี้จะดำเนินการกำหนดตัวแปรการทำงานต่างๆ ที่อาจมีผลต่อค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรดังนี้

1. ระบบอบแห้งแบบกระแสน้อยอย่างเดียวความเร็วของอากาศขาเข้าของพัดลมแรงดันสูงที่ 25 m/s อุณหภูมิอากาศขาเข้าที่ใช้ในการอบแห้งที่ 70, 90 และ 110 °C อัตราการป้อนวัสดุที่ 22, 47 และ 62 kg_{dry solid} /h
2. ระบบอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่อง ความเร็วอากาศขาเข้าของพัดลมแรงดันสูงที่ 25 m/s อุณหภูมิอากาศขาเข้าที่ใช้ในการอบแห้งที่ 70, 90 และ 110 °C อัตราการป้อนวัสดุที่ 22, 47 และ 62 kg_{dry solid} /h ซึ่งควบคุมความเร็วอากาศในระบบอบแห้งแบบพาหะลมที่ 16 m/s ทำงานอย่างต่อเนื่อง

5. ขั้นตอนการทดลองอบแห้งข้าวเปลือก

1. กำหนดตัวแปรในการเก็บข้อมูล
2. ตรวจสอบสถานะความพร้อมของเครื่องอบแห้งหลังจากนั้นจึงเปิดการทำงานของเครื่อง
3. ปรับค่าความเร็วอากาศร้อน และปรับตั้งอุณหภูมิอากาศร้อนตามเงื่อนไขการทดลอง

4. เมื่อระบบอยู่ในสภาวะคงตัวแล้ว ทำการป้อนข้าวเปลือกที่เตรียมไว้ตามอัตราการป้อนในแต่ละเงื่อนไขการทดลองอย่างต่อเนื่อง
5. ตรวจวัดและบันทึกค่าของอุณหภูมิกระเปาะเปียกและกระเปาะแห้งของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของเครื่องอบแห้ง
6. นำข้าวเปลือกที่ออกจากห้องอบแห้งไปหาความชื้นหลังการอบแห้ง
7. คำนวณค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร และ ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

6. ขั้นตอนการหาความชื้นข้าวเปลือก

การหาความชื้นใช้วิธีการใช้ความร้อนอบไล่ความชื้นออกไป (Oven methods) โดยนำเมล็ดพืชไปชั่งน้ำหนักก่อน หลังจากนั้นนำไปอบในเครื่องอบแห้ง เพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน Association of Official Agricultural Chemists (AOAC) แล้วนำไปชั่งน้ำหนักหลังการอบแห้ง หลังจากนั้นคำนวณหาความชื้นตามมาตรฐานแห่ง

7. ขั้นตอนการประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองหลังผ่านเครื่องอบแห้ง นำมาหาสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง (Performance of dryer) ได้ ในเทอมของอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร (Volumetric water evaporation rate) และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร (Volumetric heat transfer coefficient) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 2-4 และสมการที่ 2-5

8. ขั้นตอนการหาเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ

การทดลองหาค่าเวลาเฉลี่ยที่อยู่ในระบบ (Mean resident time) ใช้ข้าวเปลือกพันธุ์ปทุมธานี 1 เป็นวัสดุทดลอง ค่าเวลาเฉลี่ยดังกล่าวสามารถหาได้จากการวัดปริมาณของวัสดุที่อยู่ในระบบ (Hold-up) และค่าอัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุที่ป้อนเข้าสู่เครื่องอบแห้ง โดยค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบหาได้จากสมการ (Kitron; & Tarmir. 1988)

$$\tau = \frac{m_p}{W_p} \quad (3-1)$$

เมื่อ

- τ คือ ค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ, s
 m_p คือ ปริมาณของวัสดุที่คงอยู่ในระบบ, kg
 W_p คือ อัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุ, kg/s

ขั้นตอนการหาค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ

1. เปิดเครื่องเป่าลมแรงดันสูงและทำการปรับความเร็วของอากาศในท่อส่งวัสดุตามที่กำหนด
2. ป้อนข้าวเปลือกตามอัตราการป้อนที่กำหนดไว้เข้าสู่เครื่องอบแห้งอย่างต่อเนื่อง
3. เมื่อระบบอยู่ในสภาวะคงตัว จะทำการหยุดการป้อนข้าวเปลือกเข้าเครื่องอบแห้งพร้อมกับปิดเครื่องเป่าลมแรงดันสูงพร้อมกัน ซึ่งในขณะนี้มีข้าวเปลือกคงอยู่ภายในท่อส่งวัสดุและห้องอบแห้ง
4. เปิดเครื่องเป่าลมแรงดันสูงเพื่อให้อากาศพาข้าวเปลือกที่คงเหลืออยู่ในระบบออกมา
5. นำข้าวเปลือกที่ได้ทั้งหมดชั่งน้ำหนัก
6. คำนวณหาค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบตามสมการ 3-1

9. ขั้นตอนการวิเคราะห์คุณภาพข้าว

ในการวิเคราะห์ด้านคุณภาพข้าวนั้น จะเก็บตัวอย่างข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งไปทำการวิเคราะห์คุณภาพข้าว ได้แก่ เปอร์เซนต์ข้าวเต็มเมล็ดและค่าความขาวของข้าว ซึ่งในการวิเคราะห์ข้อมูลจะเก็บตัวอย่างข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งไปทำการวิเคราะห์ ณ ศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี

10. ขั้นตอนการประมาณการความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องอบแห้ง

การใช้พลังงานในกระบวนการอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำวนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่อง สามารถวัดได้โดยตรงด้วยมาตรวัดหน่วยพลังงาน ซึ่งประกอบด้วยส่วนแรกพลังงานที่จ่ายให้กับเครื่องเป่าลมแรงดันสูงในห้องอบแห้งและพลังงานส่วนที่สองเป็นพลังงานที่จ่ายให้กับเครื่องทำความร้อนแบบไฟฟ้าหลังจากนั้นนำค่าพลังงานที่ได้มาคำนวณหาความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องอบแห้ง ตามสมการที่ 2-7

11. ขั้นตอนการวิเคราะห์ทางสถิติ

การวิเคราะห์ผลการศึกษาใช้หลักวิธีทางสถิติ โดยนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และแสดงผลการคำนวณค่าอัตรากระเหยน้าเชิงปริมาตร ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายทอดความร้อนเชิงปริมาตรในรูปของค่าเฉลี่ย แล้วเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยใช้โปรแกรม SPSS

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกของระบบอบแห้งแบบกระแสนอนอย่างเดี่ยว และระบบอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่อง ซึ่งผลการทดลองได้แสดงถึงการลดค่าความชื้นของข้าวเปลือก สมรรถนะของเครื่องอบแห้งซึ่งแสดงในรูปของอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของระบบอบแห้ง รวมทั้งคุณภาพทางกายภาพของข้าวเปลือก

1. ผลของตัวแปรที่มีผลต่อการลดค่าความชื้น

ตาราง 2 และ 3 แสดงผลของตัวแปรที่มีผลต่อการลดค่าความชื้นของกระบวนการอบแห้งในสภาวะเงื่อนไขต่าง ๆ พบว่าสามารถลดความชื้นได้เพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิอากาศขาเข้าและอัตราการป้อนวัสดุเพิ่มมากขึ้นทุกเงื่อนไข ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิอากาศขาเข้าที่สูงขึ้นทำให้เกิดการระเหยน้ำที่ผิววัสดุได้มากขึ้น จึงส่งผลให้ค่าความชื้นลดลงได้มากขึ้น ในกรณีของอัตราการป้อนวัสดุพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราป้อนวัสดุให้มีค่ามากขึ้น ค่าความชื้นของข้าวเปลือกก็ลดลงเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกัน

สำหรับกรณีของการอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่องเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอบแห้งแบบกระแสนอย่างเดี่ยว พบว่าที่อุณหภูมิอากาศขาเข้าและอัตราการป้อนวัสดุเดียวกัน พบว่าสามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกได้มากกว่า ทั้งนี้เพราะว่าปริมาณวัสดุสามารถคงอยู่ภายในระบบเป็นเวลานานมากขึ้น ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและมวลสารสูงกว่ากรณีที่วัสดุอยู่ในระบบเป็นเวลาสั้น จึงส่งผลให้เกิดการระเหยน้ำที่ผิววัสดุได้มากกว่าจึงทำให้สามารถลดความชื้นได้มากกว่า โดยที่การใช้เครื่องอบแห้งแบบกระแสนอย่างเดี่ยว สามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกได้สูงสุดประมาณ 5.87 % (d.b.) ขณะที่การใช้เครื่องอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่องสามารถลดความชื้นข้าวเปลือกได้สูงสุดถึง 9.79 % (d.b.)

สำหรับผลที่ได้นำมาวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อหาผลของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการลดความชื้นข้าวเปลือกของระบบอบแห้งในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง และนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ซึ่งค่าเฉลี่ยที่ได้จะถูกนำมาเปรียบเทียบความแตกต่างโดยใช้ Duncan's Test

ตาราง 2 แสดงการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความชื้นที่ลดลงของระบบอบแห้งแบบกระแสนอย่างเดี่ยว พบว่าเมื่อพิจารณาเฉพาะที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 70, 90 และ 110 °C อย่างเดียวให้ผลการศึกษาของความชื้นที่สามารถลดลงได้ ($X_i - X_e$) ที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติและเมื่อพิจารณาเกี่ยวกับอัตราการป้อนวัสดุของแต่ละอุณหภูมิอากาศขาเข้าพบว่าที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 70 °C เมื่ออัตราการป้อนวัสดุเพิ่มมากขึ้น ค่าความชื้นที่ลดลงของข้าวเปลือกมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นและเมื่อนำมาวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติพบว่าที่อัตราการป้อนวัสดุ 22, 47 kg_{dry solid}/h ให้ผลการศึกษาของความชื้นที่ลดลง ($X_i - X_e$) ที่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ สำหรับอุณหภูมิอากาศ

เข้า 90°C เมื่ออัตราการป้อนวัสดุเพิ่มมากขึ้น ค่าความชื้นที่ลดลงของข้าวเปลือกมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น เช่นเดียวกันและเมื่อนำมาวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติพบว่าที่อัตราการป้อนวัสดุ 47, 62 $\text{kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$ ให้ผลการศึกษาของความชื้นที่ลดลง ($X_i - X_o$) ที่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติและสำหรับ อุณหภูมิอากาศเข้า 110°C เมื่ออัตราการป้อนวัสดุเพิ่มมากขึ้นค่าความชื้นที่ลดลงของข้าวเปลือกมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกันและเมื่อนำมาวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติพบว่า ทุกอัตราการป้อน วัสดุให้ผลการศึกษาของความชื้นที่ลดลง ($X_i - X_o$) ที่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากอัตราการป้อนวัสดุที่ใช้ในการทดลองมีความแตกต่างกันไม่มากพอที่จะเห็นถึงการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว

ตาราง 3 แสดงการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความชื้นที่ลดลงของระบบอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่อง พบว่าเมื่อพิจารณาเฉพาะที่อุณหภูมิอากาศเข้า 70, 90 และ 110°C อย่างเดียว ให้ผลการศึกษาของความชื้นที่ลดลงเพิ่มมากขึ้น ($X_i - X_o$) ที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติและเมื่อพิจารณาเกี่ยวกับอัตราการป้อนวัสดุของแต่ละอุณหภูมิอากาศเข้าพบว่าที่ อุณหภูมิอากาศเข้า 70°C เมื่ออัตราการป้อนวัสดุเพิ่มมากขึ้นทำให้ค่าความชื้นที่ลดลงของข้าวเปลือกมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นและเมื่อนำมาวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติพบว่าทุกอัตราการป้อนวัสดุ ให้ผล การศึกษาของความชื้นที่ลดลง ($X_i - X_o$) ที่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ สำหรับอุณหภูมิ อากาศเข้า 90°C เมื่ออัตราการป้อนวัสดุเพิ่มมากขึ้นทำให้ค่าความชื้นที่ลดลงของข้าวเปลือกมี แนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกัน และเมื่อนำมาวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติพบว่าทุกอัตราการป้อน วัสดุให้ผลการศึกษาของความชื้นที่ลดลง ($X_i - X_o$) ที่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และ สำหรับอุณหภูมิอากาศเข้า 110°C เมื่ออัตราการป้อนวัสดุเพิ่มมากขึ้นทำให้ค่าความชื้นที่ลดลงของ ข้าวเปลือกมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกันและเมื่อนำมาวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติพบว่าที่ อัตราการป้อนวัสดุ 22 และ 47 $\text{kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$, 47 และ 62 $\text{kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$ ให้ผลการศึกษาของความชื้นที่ลดลง ($X_i - X_o$) ที่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากอัตราการป้อนวัสดุที่ ใช้ในการทดลองมีความแตกต่างกันไม่มากพอที่จะเห็นถึงการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว

ตาราง 4 แสดงการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความชื้นที่ลดลงของระบบอบแห้งแบบกระแสน อย่างเดียวและระบบอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่องพบว่าที่ อุณหภูมิอากาศเข้าและอัตราการป้อนวัสดุเดียวกัน เมื่อนำมาวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติพบว่า ระบบอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่อง ให้ผลการศึกษาของความชื้น ที่ลดลง ($X_i - X_o$) สูงกว่าระบบอบแห้งแบบกระแสนอย่างเดียวที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทุกเงื่อนไขการทดลอง

ตาราง 2 การวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความชื้นที่ลดลงของระบบอบแห้งแบบกระแสนอนอย่างเดี่ยว

เงื่อนไขการทดลอง			$X_i - X_e$
T (°C)	W_p (kg _{dry solid} /h)	V (m/s)	(% d.b.)
70	22	25	1.99 ± 0.20^a
70	47	25	2.33 ± 0.22^a
70	62	25	2.77 ± 0.22^b
90	22	25	3.20 ± 0.22^c
90	47	25	3.68 ± 0.27^d
90	62	25	3.75 ± 0.24^d
110	22	25	5.53 ± 0.34^e
110	47	25	5.80 ± 0.25^e
110	62	25	5.87 ± 0.16^e

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายความว่าค่าที่ระบุไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตาราง 3 การวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความชื้นที่ลดลงของระบบอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่อง

เงื่อนไขการทดลอง				$X_i - X_e$
T (° C)	W_p (kg _{dry solid} /h)	$V_{impinging}$ (m/s)	$V_{pneumatic}$ (m/s)	(% d.b.)
70	22	25	16	6.60 ± 0.20^a
70	47	25	16	6.68 ± 0.17^a
70	62	25	16	6.89 ± 0.39^a
90	22	25	16	7.49 ± 0.39^b
90	47	25	16	7.59 ± 0.19^b
90	62	25	16	7.75 ± 0.21^b
110	22	25	16	9.30 ± 0.30^c
110	47	25	16	9.52 ± 0.06^{cd}
110	62	25	16	9.79 ± 0.12^d

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายความว่าค่าที่ระบุไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตาราง 4 การวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความชื้นที่ลดลงของระบบอบแห้งแบบกระแสน้อยอย่างเดียว และระบบอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่อง

ระบบอบแห้ง	เงื่อนไขการทดลอง				$X_i - X_e$ (% d.b.)
	T (°C)	W_p (kg _{dry solid} /h)	$V_{impinging}$ (m/s)	$V_{pneumatic}$ (m/s)	
กระแสน	70	22	25	-	1.99 ± 0.20^a
	70	47	25	-	2.33 ± 0.22^a
	70	62	25	-	2.77 ± 0.22^b
	90	22	25	-	3.20 ± 0.22^c
	90	47	25	-	3.68 ± 0.27^d
	90	62	25	-	3.75 ± 0.24^d
	110	22	25	-	5.53 ± 0.34^e
	110	47	25	-	5.80 ± 0.25^e
	110	62	25	-	5.87 ± 0.16^e
กระแสน ร่วมกับพาหะลม	70	22	25	16	6.60 ± 0.20^f
	70	47	25	16	6.68 ± 0.17^f
	70	62	25	16	6.89 ± 0.39^f
	90	22	25	16	7.49 ± 0.39^g
	90	47	25	16	7.59 ± 0.19^g
	90	62	25	16	7.75 ± 0.21^g
	110	22	25	16	9.30 ± 0.30^h
	110	47	25	16	9.52 ± 0.06^{hi}
	110	62	25	16	9.79 ± 0.12^i

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายความว่าค่าที่ระบุไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

2. ผลของตัวแปรที่มีต่อค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร

สำหรับผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบอบแห้งในรูปแบบของอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรได้แสดงในภาพประกอบ 8 ซึ่งจะพบว่า การเปลี่ยนแปลงค่าของอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอากาศขาเข้าในทุกสภาวะเงื่อนไข ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิอากาศขาเข้าที่สูงขึ้นทำให้ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศร้อนกับอุณหภูมิผิววัสดุเพิ่มมากขึ้น ซึ่งทำให้การถ่ายเทความร้อนและมวลสารมีอัตราที่สูงขึ้นจึงส่งผลให้เกิดการระเหยน้ำที่ผิววัสดุได้มากขึ้น ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลของ Sathapornprasath; et al. (2007) และ Choicharoen; et al. (2010)

สำหรับผลของอัตราการป้อนวัสดุพบว่า เมื่อเพิ่มอัตราป้อนวัสดุให้มีค่ามากขึ้น อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรก็จะเพิ่มขึ้นด้วย แม้ว่าปริมาณวัสดุที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความชื้นเข้าสู่เครื่องอบแห้งมากขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะว่าเครื่องอบแห้งยังมีความสามารถเพียงพอในการระเหยความชื้นที่ผิววัสดุออกไปได้ ดังนั้นเมื่อปริมาณวัสดุในระบบสูงขึ้นค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรจึงสูงตามไปด้วย ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลของ Sathapornprasath; et al. (2007) และ Choicharoen; et al. (2010)

สำหรับกรณีของการอบแห้งแบบกระแสน้ำวนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่องเมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งแบบกระแสน้ำวนอย่างเดียว พบว่าที่อุณหภูมิอากาศขาเข้าและอัตราการป้อนวัสดุเดียวกัน ค่าของอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรจะมีค่าสูงกว่า ทั้งนี้เพราะว่าปริมาณวัสดุสามารถคงอยู่ภายในระบบเป็นเวลานานมากขึ้น ซึ่งช่วงเวลาดังกล่าวเป็นช่วงที่วัสดุมีการแลกเปลี่ยนความร้อนและมวลสารกับตัวกลางการอบแห้ง ทำให้การถ่ายเทความร้อนและมวลสารสูงกว่ากรณีที่วัสดุอยู่ในระบบเป็นเวลานาน จึงส่งผลให้เกิดการระเหยน้ำที่ผิววัสดุได้มากกว่า โดยอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุดที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ $328.88 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3 \text{ h}$ (เกิดขึ้นเมื่ออบแห้งแบบกระแสน้ำวนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่อง ที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 110°C และอัตราการป้อนวัสดุ $62 \text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$)

สำหรับผลที่ได้ก็นำมาวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อหาผลของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรของระบบอบแห้งในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง และนำมาวิเคราะห์ความ ซึ่งค่าเฉลี่ยที่ได้จะถูกนำมาเปรียบเทียบความแตกต่างโดยใช้ Duncan's Test

ตาราง 5 แสดงการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรของระบบอบแห้งแบบกระแสน้ำวนอย่างเดียว พบว่าที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า $70, 90$ และ 110°C เมื่ออัตราการป้อนวัสดุเพิ่มมากขึ้นทำให้ค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นและเมื่อนำมาวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติพบว่า ที่แต่ละอุณหภูมิอากาศขาเข้า ทุกอัตราการป้อนวัสดุให้ผลการศึกษาของค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

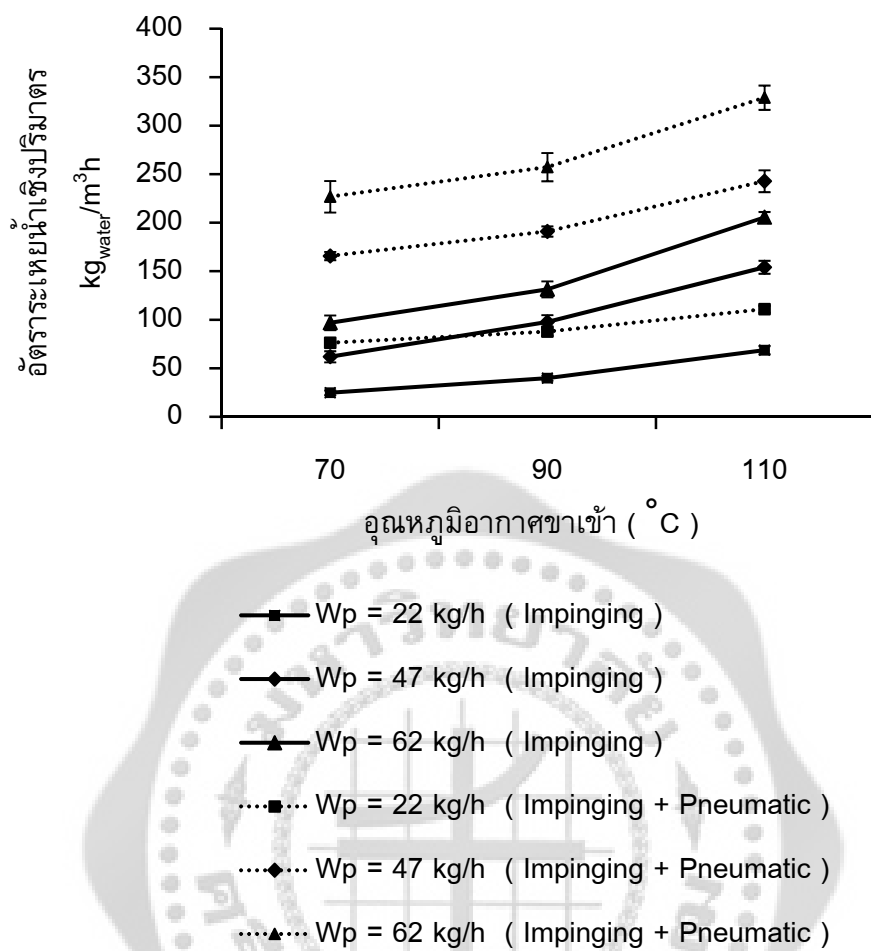
สำหรับกรณีอุณหภูมิอากาศขาเข้า 70°C อัตราการป้อนวัสดุ $47 \text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$ และอุณหภูมิอากาศขาเข้า 110°C อัตราการป้อนวัสดุ $22 \text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$ ให้ผลการศึกษาของค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรที่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ สำหรับกรณีอุณหภูมิอากาศขาเข้า 70°C อัตราการป้อนวัสดุ $62 \text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$ และอุณหภูมิอากาศขาเข้า 90°C อัตราการป้อนวัสดุ $47 \text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$ ให้ผล

การศึกษาของค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรที่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเช่นเดียวกัน

ตาราง 6 แสดงการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรของระบบอบแห้งแบบกระแสน้ำวนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่องพบว่าที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 70, 90 และ 110 °C เมื่ออัตราการป้อนวัสดุเพิ่มมากขึ้นทำให้ค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อนำมาวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติพบว่าที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 70 และ 90 °C อัตราการป้อนวัสดุ 22 kg_{dry solid}/h ไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งอาจเป็นผลจากที่เงื่อนไขการทดลองนี้ ความรุนแรงในการชนระหว่างอนุภาคทั้งสองกระแสน้ำวน ซึ่งไม่ส่งผลต่ออัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร

ตาราง 7 แสดงการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรของระบบอบแห้งแบบกระแสน้ำวนอย่างเดียวและระบบอบแห้งแบบกระแสน้ำวนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่องพบว่าที่อุณหภูมิอากาศขาเข้าและอัตราการป้อนวัสดุเดียวกัน เมื่อนำมาวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติพบว่าระบบอบแห้งแบบกระแสน้ำวนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่องให้ผลการศึกษาของค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงกว่าระบบอบแห้งแบบกระแสน้ำวนอย่างเดียวที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติทุกเงื่อนไขการทดลอง

สำหรับกรณีระบบอบแห้งแบบกระแสน้ำวนอย่างเดียวที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 70 °C อัตราการป้อนวัสดุ 47 kg_{dry solid}/h และที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 110 °C อัตราการป้อนวัสดุ 22 kg_{dry solid}/h ให้ผลการศึกษาของค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรที่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติสำหรับกรณีระบบอบแห้งแบบกระแสน้ำวนอย่างเดียวที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 110 °C มีอัตราการป้อนวัสดุ 22 kg_{dry solid}/h และระบบอบแห้งแบบกระแสน้ำวนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่อง ที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 70 °C อัตราการป้อนวัสดุ 22 kg_{dry solid}/h ให้ผลการศึกษาของค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรที่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ กรณีระบบอบแห้งแบบกระแสน้ำวนอย่างเดียวที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 70 และ 90 °C อัตราการป้อนวัสดุ 62 และ 47 kg_{dry solid}/h ตามลำดับและระบบอบแห้งแบบกระแสน้ำวนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่องที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 90 °C อัตราการป้อนวัสดุ 22 kg_{dry solid}/h ให้ผลการศึกษาของค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรที่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ กรณีระบบอบแห้งแบบกระแสน้ำวนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่อง ที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 70 และ 90 °C อัตราการป้อนวัสดุเดียวกันที่ 22 kg_{dry solid}/h ให้ผลการศึกษาของค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรที่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเช่นเดียวกัน



ภาพประกอบ 8 ผลกระทบของตัวแปรที่มีผลต่ออัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร

ตาราง 5 การวิเคราะห์ทางสถิติของค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรของระบบอบแห้งแบบกระแสนอนอย่างเดี่ยว

เงื่อนไขการทดลอง			อัตราการระเหยน้ำเชิง ปริมาตร	สัมประสิทธิ์การถ่ายเท ความร้อนเชิงปริมาตร
T (° C)	W _p (kg _{dry solid} /h)	V (m/s)	(kg _{water} /m ³ h)	(W/m ³ K)
70	22	25	24.78 ± 2.47 ^a	51.61 ± 5.14 ^a
70	47	25	61.87 ± 5.71 ^c	128.93 ± 11.91 ^c
70	62	25	96.91 ± 7.55 ^d	201.59 ± 15.70 ^d
90	22	25	39.82 ± 2.67 ^b	76.91 ± 5.16 ^b
90	47	25	97.63 ± 7.17 ^d	188.70 ± 13.86 ^d
90	62	25	131.36 ± 8.28 ^e	254.31 ± 16.03 ^e
110	22	25	68.69 ± 4.21 ^c	124.00 ± 7.60 ^c
110	47	25	154.10 ± 6.68 ^f	278.22 ± 12.06 ^f
110	62	25	205.62 ± 5.51 ^g	371.68 ± 9.95 ^g

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายความว่าค่าที่ระบุไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตาราง 6 การวิเคราะห์ทางสถิติของค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรของระบบอบแห้งแบบกระแสน้ำวนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่อง

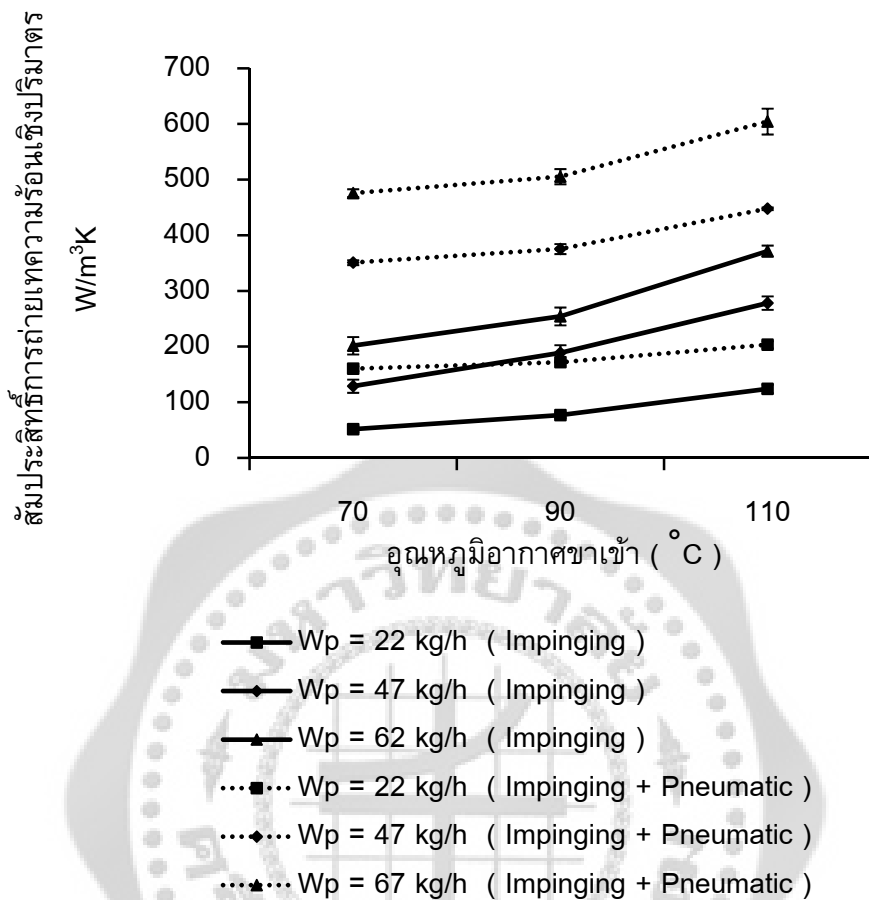
เงื่อนไขการทดลอง				อัตราการระเหยน้ำเชิง ปริมาตร	สัมประสิทธิ์การ ถ่ายเทความร้อนเชิง ปริมาตร
T (°C)	W _p (kg _{dry solid} /h)	V _{impinging} (m/s)	V _{pneumatic} (m/s)	(kg _{water} /m ³ h)	(W/m ³ K)
70	22	25	16	76.26 ± 1.69 ^a	160.30 ± 4.32 ^a
70	47	25	16	165.73 ± 4.25 ^c	350.92 ± 8.95 ^c
70	62	25	16	226.79 ± 3.25 ^e	475.82 ± 7.09 ^f
90	22	25	16	87.76 ± 4.46 ^a	171.85 ± 0.33 ^a
90	47	25	16	190.99 ± 5.25 ^d	375.38 ± 8.97 ^d
90	62	25	16	257.35 ± 14.55 ^g	505.46 ± 13.61 ^g
110	22	25	16	110.87 ± 3.56 ^b	203.36 ± 6.50 ^b
110	47	25	16	242.85 ± 11.26 ^f	447.81 ± 2.38 ^e
110	62	25	16	328.88 ± 12.52 ^h	604.45 ± 23.21 ^h

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายความว่าค่าที่ระบุไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตาราง 7 การวิเคราะห์ทางสถิติของค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรของระบบอบแห้งแบบกระแสน้ำ และระบบอบแห้งแบบกระแสน้ำร่วมกับ การอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่อง

ระบบ อบแห้ง	เงื่อนไขการทดลอง				อัตราการระเหยน้ำ เชิงปริมาตร	สัมประสิทธิ์การ ถ่ายเทความร้อน เชิงปริมาตร
	T	W _p	V _{impinging}	V _{pneumatic}		
	(° C)	(kg _{dry solid} /h)	(m/s)	(m/s)	(kg _{water} /m ³ h)	(W/m ³ K)
กระแสน้ำ	70	22	25	-	24.78 ± 2.47 ^a	51.61 ± 5.14 ^a
	70	47	25	-	61.87 ± 5.71 ^c	128.93 ± 11.91 ^c
	70	62	25	-	96.91 ± 7.55 ^f	201.59 ± 15.70 ^f
	90	22	25	-	39.82 ± 2.67 ^b	76.91 ± 5.16 ^b
	90	47	25	-	97.63 ± 7.17 ^f	188.70 ± 13.86 ^{ef}
	90	62	25	-	131.36 ± 8.28 ^h	254.31 ± 16.03 ^g
	110	22	25	-	68.69 ± 4.21 ^{cd}	124.00 ± 7.60 ^c
	110	47	25	-	154.10 ± 6.68 ⁱ	278.22 ± 12.06 ^h
	110	62	25	-	205.62 ± 5.51 ^l	371.68 ± 9.95 ^j
กระแสน้ำ ร่วมกับ พาหะลม	70	22	25	16	76.26 ± 1.69 ^{de}	160.30 ± 4.32 ^d
	70	47	25	16	165.73 ± 4.25 ^j	350.92 ± 8.95 ⁱ
	70	62	25	16	226.79 ± 3.25 ^m	475.82 ± 7.09 ^l
	90	22	25	16	87.76 ± 4.46 ^{ef}	171.85 ± 0.33 ^{de}
	90	47	25	16	190.99 ± 5.25 ^k	375.38 ± 8.97 ^j
	90	62	25	16	257.35 ± 14.55 ^o	505.46 ± 13.61 ^m
	110	22	25	16	110.87 ± 3.56 ^g	203.36 ± 6.50 ^f
	110	47	25	16	242.85 ± 11.26 ⁿ	447.81 ± 2.38 ^k
	110	62	25	16	328.88 ± 12.52 ^p	604.45 ± 23.21 ^o

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายความว่าค่าที่ระบุไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



ภาพประกอบ 9 ผลกระทบของตัวแปรที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร

4.3 ผลของตัวแปรที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร

ผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบอบแห้งในรูปแบบของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรได้แสดงในภาพประกอบ 9 พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอากาศขาเข้าในทุกสภาวะเงื่อนไข เนื่องจากอุณหภูมิอากาศขาเข้าที่สูงขึ้นทำให้ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศร้อนกับอุณหภูมิผิววัสดุเพิ่มมากขึ้น ซึ่งทำให้การถ่ายเทความร้อนและมวลสารมีอัตราที่สูงขึ้นจึงส่งผลให้เกิดการระเหยน้ำที่ผิววัสดุได้มากขึ้น สำหรับค่าของอุณหภูมิเฉลี่ยลอการิทึมมีค่าไม่แตกต่างกันมากและค่าความหนาแน่นของการระเหยมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิอากาศขาเข้าของอากาศสูงขึ้นเมื่อนำมาพิจารณาร่วมกันแล้วทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรมีค่าเพิ่มมากขึ้น

ในกรณีของอัตราการป้อนวัสดุพบว่าอัตราการป้อนวัสดุที่มากขึ้นส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรมีค่ามากขึ้นด้วยทั้งนี้เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรแปรผันตรงกับปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากผิววัสดุ ดังนั้นเมื่อป้อนวัสดุเข้าสู่ระบบมากขึ้นทำให้

ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากผิววัสดุได้มากขึ้น ดังอธิบายแล้วในหัวข้อผลของตัวแปรที่มีต่อค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร จึงส่งผลให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรมีค่ามากขึ้นด้วย ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลของ Sathapornprasath; et al. (2007) และ Choicharoen; et al. (2010)

สำหรับกรณีของการอบแห้งแบบกระแสน้ำวนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่องเมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งแบบกระแสน้ำวนอย่างเดียว พบว่าที่อุณหภูมิอากาศขาเข้าและอัตราการป้อนวัสดุเดียวกัน ค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรจะมีค่าสูงกว่าทั้งนี้เพราะว่าปริมาณวัสดุสามารถคงอยู่ภายในระบบเป็นเวลานานมากขึ้น ทำให้การถ่ายเทความร้อนและมวลสารสูงกว่ากรณีที่วัสดุอยู่ในระบบเป็นเวลาสั้น ส่งผลให้เกิดการระเหยน้ำที่ผิววัสดุได้มากกว่าซึ่งการระเหยน้ำที่ผิววัสดุจะแปรผันตรงกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรดังนั้นจึงทำให้การอบแห้งแบบกระแสน้ำวนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่องมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรที่สูงกว่า ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลของ Tamir (1994) โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุดที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ $604.45 \text{ W/m}^3 \text{ K}$ (เกิดขึ้นเมื่ออบแห้งแบบกระแสน้ำวนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่องที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 110°C อัตราการป้อนวัสดุ $62 \text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$)

สำหรับผลที่ได้นำมาวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อหาผลของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรของระบบอบแห้งในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง และนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งค่าเฉลี่ยที่ได้จะถูกนำมาเปรียบเทียบความแตกต่างโดยใช้ Duncan's Test

ตาราง 5 แสดงการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรของระบบอบแห้งแบบกระแสน้ำวนอย่างเดียว พบว่าที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า $70, 90$ และ 110°C เมื่ออัตราการป้อนวัสดุเพิ่มมากขึ้นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นและเมื่อนำมาวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติพบว่าแต่ละอุณหภูมิอากาศขาเข้าและทุกอัตราการป้อนวัสดุให้ผลการศึกษาของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

สำหรับกรณีอุณหภูมิอากาศขาเข้า 70°C อัตราการป้อนวัสดุ $47 \text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$ และอุณหภูมิอากาศขาเข้า 110°C อัตราการป้อนวัสดุ $22 \text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$ ให้ผลการศึกษาของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรที่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ กรณีอุณหภูมิอากาศขาเข้า 70°C อัตราการป้อนวัสดุ $62 \text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$ และอุณหภูมิอากาศขาเข้า 90°C อัตราการป้อนวัสดุ $47 \text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$ ให้ผลการศึกษาของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรที่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเช่นเดียวกัน

ตาราง 6 แสดงการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรของระบบอบแห้งแบบกระแสน้ำวนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่อง พบว่าที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า $70, 90$ และ 110°C เมื่ออัตราการป้อนวัสดุเพิ่มมากขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นอย่างไรก็ตามเมื่อนำมาวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติพบว่าที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 70 และ 90°C อัตราการป้อนวัสดุ $22 \text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$ ไม่ส่งผลกระทบต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

ร้อนเชิงปริมาตรอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากภายใต้เงื่อนไขการอบแห้งนี้ ผลกระทบของระยะเวลาที่วัสดุอยู่ในระบบมีค่าเดียวกันน่าจะเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการระเหยนํ้ามากกว่า อุณหภูมิอากาศขาเข้า

ตาราง 7 แสดงการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรของระบบอบแห้งแบบกระแสน้อยอย่างเดียวและระบบอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่องพบว่าที่อุณหภูมิอากาศขาเข้าและอัตราการป้อนวัสดุเดียวกัน เมื่อนำมาวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติพบว่าระบบอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่อง ให้ผลการศึกษาของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงกว่าระบบอบแห้งแบบกระแสน้อยอย่างเดียวที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติทุกเงื่อนไขการทดลอง

สำหรับกรณีระบบอบแห้งแบบกระแสน้อยอย่างเดียวที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 70°C มีอัตราการป้อนวัสดุ $47\text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$ และที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 110°C มีอัตราการป้อนวัสดุ $22\text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$ ให้ผลการศึกษาของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรที่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ กรณีระบบอบแห้งแบบกระแสน้อยอย่างเดียวที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 70 และ 90°C อัตราการป้อนวัสดุ 62 และ $47\text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$ ตามลำดับและระบบอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่องที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 110°C อัตราการป้อนวัสดุ $22\text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$ ให้ผลการศึกษาของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรที่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ กรณีระบบอบแห้งแบบกระแสน้อยอย่างเดียวที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 90°C อัตราการป้อนวัสดุ $47\text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$ และระบบอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่องที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 90°C อัตราการป้อนวัสดุ $22\text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$ ให้ผลการศึกษาของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรที่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ กรณีระบบอบแห้งแบบกระแสน้อยอย่างเดียวที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 110°C อัตราการป้อนวัสดุ $62\text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$ และระบบอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่องที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 90°C อัตราการป้อนวัสดุ $47\text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$ ให้ผลการศึกษาของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรที่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ สำหรับกรณีระบบอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่องที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 70 และ 90°C อัตราการป้อนวัสดุ $22\text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$ ให้ผลการศึกษาของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรที่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเช่นเดียวกัน

4.4 เวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ

การวิเคราะห์ค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ สำหรับระบบอบแห้งแบบกระแสนที่ความเร็วลมคงที่ 25 m/s อัตราการป้อนวัสดุ $22, 47$ และ $62\text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$ พบว่าเมื่ออัตราการป้อนวัสดุเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณของวัสดุที่คงเหลืออยู่ในระบบมากขึ้นทำให้อัตราการถ่ายเทมวลและความร้อนสูงขึ้นด้วย จากตาราง 8 พบว่าเมื่ออัตราการป้อนวัสดุเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบเพิ่มขึ้น แต่จะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้นและต่อจากนั้นค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบจะลดลงเนื่องจากวัสดุเกิดการ

ชนกันเองมากขึ้นทำให้พลังงานในการเคลื่อนที่ของวัสดุลดลงจนวัสดุเคลื่อนที่ออกไปจากห้องอบแห้ง ค่าเวลาเฉลี่ยของวัสดุอยู่ในระบบมีค่าไม่เกิน 1 วินาที และมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

สำหรับระบบอบแห้งแบบพาหะลมที่ความเร็วลมคงที่ 16 m/s อัตราการป้อนวัสดุ 22, 47 และ 62 kg_{dry solid}/h พบว่าเมื่ออัตราการป้อนวัสดุเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณของวัสดุที่คงเหลืออยู่ในระบบมากขึ้น ทำให้อัตราการถ่ายเทมวลและความร้อนสูงขึ้นด้วย โดยค่าเวลาเฉลี่ยของวัสดุอยู่ในระบบมีค่าในช่วง 2.35 – 2.55 วินาที และมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเช่นเดียวกัน

ตาราง 8 การวิเคราะห์ทางสถิติของค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบของระบบอบแห้งแบบกระแสน

เงื่อนไขการทดลอง		เวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ (s)
W_p (kg _{dry solid} /h)	$V_{impinging}$ (m/s)	
22	25	0.61 ± 0.21^a
47	25	0.72 ± 0.11^a
62	25	0.67 ± 0.09^a

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายความว่าค่าที่ระบุไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตาราง 9 การวิเคราะห์ทางสถิติของค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบของระบบอบแห้งแบบพาหะลม

เงื่อนไขการทดลอง		เวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ (s)
W_p (kg _{dry solid} /h)	$V_{pneumatic}$ (m/s)	
22	16	2.35 ± 0.20^a
47	16	2.38 ± 0.22^a
62	16	2.55 ± 0.15^a

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายความว่าค่าที่ระบุไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากผลการทดลองจะพบว่า เครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำวนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมสามารถลดความชื้นข้าวเปลือกมีค่าในช่วง 6.60 ถึง 9.79 % (d.b.) (ตาราง 4.2) ภายในระยะเวลา 3.22 วินาที และเมื่อนำมาพิจารณาโดยใช้อัตราการอบแห้งมาเปรียบเทียบกับระบบอบแห้งอื่น ซึ่งใช้ระยะเวลามาเป็นตัวพิจารณาด้วยจะเห็นได้ว่า ระบบอบแห้งแบบกระแสน้ำวนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่องมีค่าอัตราการอบแห้งที่สูงกว่าเครื่องอบแห้งอีกสองชนิดค่อนข้างมากซึ่งเป็นผลมาจากระยะเวลาการอบแห้งที่สั้นกว่ามาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบอบแห้งแบบกระแสน้ำวนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่องมีศักยภาพสูงในกระบวนการลดความชื้นข้าวเปลือก

ตาราง 10 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งของข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยวิธีการต่างๆ

Drying Technique	T (°C)	$X_i - X_o$ (% d.b.)	Drying time (s)	Drying rate (% d.b.) s ⁻¹
Impinging stream dryer combined with Pneumatic drying (งานวิจัยนี้)	110	9.79	3.22	3.01
Spouted-bed drying (Madhiyanon; & Soponronnarit. 2005)	110	7.50	900.00	0.01
Fluidized-bed drying (สุภวรรณ ภูริระวินิชย์กุล; และคนอื่นๆ. 2545)	110	10.50	144.00	0.07

4.5 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

จากตาราง 11 และ 12 แสดงค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของระบบอบแห้งแบบกระแสนอนอย่างเดี่ยวและระบบอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่องที่เงื่อนไขการทำงานต่างๆ ในกรณีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องเป่าลมแรงดันสูง (SEC_{blower}) พบว่า SEC_{blower} มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิอากาศขาเข้าสูงขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิอากาศขาเข้าสูงขึ้นทำให้ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศร้อนกับอุณหภูมิผิววัสดุมีค่าเพิ่มขึ้นจึงทำให้อัตราการระเหยน้ำสูงขึ้น ขณะที่ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนมอเตอร์ของพัดลมแรงดันสูงมีค่าคงที่และเวลาที่ใช้ในการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกันจึงส่งผลให้ SEC_{blower} มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิอากาศขาเข้าเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ณ อุณหภูมิอากาศขาเข้าเดียวกันเมื่ออัตราการป้อนวัสดุเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องเป่าลมแรงดันสูง (SEC_{blower}) ลดลงทั้งนี้เนื่องจากวัสดุที่อยู่ในระบบเพิ่มมากขึ้นจะทำให้อัตราการระเหยน้ำเพิ่มมากขึ้นแต่ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่พัดลมแรงดันสูงมีค่าคงที่จึงทำให้ SEC_{blower} มีค่าลดลง

ในกรณีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของชุดทำความร้อน (SEC_{heater}) พบว่า SEC_{heater} มีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิอากาศขาเข้าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากชุดทำความร้อนต้องใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้นในการเพิ่มอุณหภูมิอากาศขาเข้า ส่วนอัตราการป้อนวัสดุที่เพิ่มมากขึ้น ณ อุณหภูมิอากาศขาเข้าเดียวกันจะทำให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของชุดทำความร้อน (SEC_{heater}) ลดต่ำลงเหมือนกรณีของเครื่องเป่าลมแรงดันสูง ในงานวิจัยนี้กรณีของระบบอบแห้งแบบกระแสนอนอย่างเดี่ยวพบว่าค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องเป่าลมแรงดันสูงมีค่าต่ำสุดเท่ากับ $1.75 \text{ MJ/kg}_{water}$ และค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของชุดทำความร้อนมีค่าต่ำสุดเท่ากับ $0.65 \text{ MJ/kg}_{water}$ สำหรับกรณีของระบบอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่องพบว่า ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องเป่าลมแรงดันสูงมีค่าต่ำสุดเท่ากับ $1.51 \text{ MJ/kg}_{water}$ และค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของชุดทำความร้อนมีค่าต่ำสุดเท่ากับ $0.78 \text{ MJ/kg}_{water}$

สำหรับกรณีของการอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่องเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการอบแห้งแบบกระแสน พบว่าที่อุณหภูมิอากาศขาเข้าและอัตราการป้อนวัสดุเดียวกัน ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะทั้งหมดจะมีค่าต่ำกว่า ทั้งนี้เพราะว่าปริมาณวัสดุสามารถคงอยู่ภายในระบบเป็นเวลานานมากกว่าจึงส่งผลให้เกิดการระเหยน้ำออกจากผิววัสดุได้มากขึ้น สำหรับค่าการใช้พลังงานมีค่าไม่แตกต่างกันมาก เมื่อนำมาพิจารณาร่วมกันแล้วจึงทำให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะทั้งหมดมีค่าที่ต่ำกว่า โดยค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะทั้งหมดของระบบอบแห้งแบบกระแสนอย่างเดี่ยวมีค่าต่ำสุด $2.78 \text{ MJ/kg}_{water}$ ขณะที่ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะทั้งหมดของระบบอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมมีค่าต่ำสุดเพียง $2.65 \text{ MJ/kg}_{water}$

ตาราง 11 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของระบบอบแห้งแบบกระแสนอนอย่างเดี่ยว

เงื่อนไขการทดลอง			SEC _{blower}	SEC _{heater}	SEC _{total}
T (°C)	W _p (kg _{dry solid} /h)	V (m/s)	(MJ/kg _{water})	(MJ/kg _{water})	(MJ/kg _{water})
70	22	25	2.34	0.72	3.06
70	47	25	2.21	0.68	2.89
70	62	25	2.13	0.65	2.78
90	22	25	2.39	1.10	3.49
90	47	25	2.11	0.97	3.08
90	62	25	2.00	0.92	2.92
110	22	25	1.84	1.42	3.26
110	47	25	1.81	1.40	3.21
110	62	25	1.75	1.34	3.09

ตาราง 12 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของระบบอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่อง

เงื่อนไขการทดลอง				SEC _{blower}	SEC _{heater}	SEC _{total}
T (°C)	W _p (kg _{dry solid} /h)	V _{impinging} (m/s)	V _{pneumatic} (m/s)	(MJ/kg _{water})	(MJ/kg _{water})	(MJ/kg _{water})
70	22	25	16	2.23	0.93	3.16
70	47	25	16	1.93	0.80	2.74
70	62	25	16	1.87	0.78	2.65
90	22	25	16	2.00	1.15	3.15
90	47	25	16	1.85	1.08	2.93
90	62	25	16	1.79	1.03	2.82
110	22	25	16	1.63	1.55	3.18
110	47	25	16	1.55	1.46	3.01
110	62	25	16	1.51	1.42	2.93

จากผลการทดลองพบว่า เครื่องอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่องใช้พลังงานจำเพาะทั้งหมดในการลดความชื้นข้าวเปลือกมีค่าในช่วง 2.65 ถึง 3.18 MJ/kg_{water} (ตาราง 12) และเมื่อนำมาพิจารณาเปรียบเทียบกับระบบอบแห้งอื่น (ตาราง 13) จะเห็นได้ว่าระบบอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่องมีค่าการใช้พลังงานจำเพาะทั้งหมดต่ำกว่าระบบอบแห้งแบบอื่น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่องเป็นระบบที่ประหยัดพลังงานมาก

ตาราง 13 เปรียบเทียบความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะทั้งหมดในการลดความชื้นข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยวิธีการต่างๆ

Drying Technique	T (°C)	$X_i - X_o$ (% d.b.)	SEC_{total} MJ/kg _{water}
Impinging stream dryer combined with Pneumatic drying (งานวิจัยนี้)	110	9.79	2.93
Spouted-bed drying (Madhiyanon; & Soponronnarit. 2005)	110	7.50	5.50
Fluidized-bed drying (Jittanit et al., 2010)	100 - 110	7.60	3.87

4.6 คุณภาพของข้าว

ผลการศึกษาคุณภาพของข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยระบบอบแห้งแบบกระแสนอนอย่างเดี่ยวและระบบอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่องดังแสดงในตาราง 4.11 และ 4.12 จะเห็นว่าบางเงื่อนไขข้าวเต็มเมล็ดมีค่าเพิ่มมากขึ้นที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าเมื่อเมล็ดข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูงอยู่เมล็ดข้าวเปลือกเกิดการจลาคีโนซิสของแป้งเป็นผลให้แรงยึดเกาะระหว่างโมเลกุลของแป้งมีความแข็งแรงมากขึ้น จึงทำให้ข้าวเต็มเมล็ดเพิ่มขึ้น กรณีอุณหภูมิอากาศขาเข้าเพิ่มมากขึ้นทำให้เปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดลดลงทั้งนี้เพราะว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ภายในเมล็ดข้าวเกิดความเค้น (Stresses) ที่เกิดจากแรงดึงที่ผิวและแรงกดดันภายในเมล็ดมีค่าสูงขึ้นจึงทำให้เมล็ดข้าวแตกหักหลังการขัดสี กรณีอัตราการป้อนวัสดุพบว่าเมื่ออัตราการป้อนวัสดุเพิ่มมากขึ้นทำให้เปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดลดลงเช่นเดียวกัน เนื่องจากเมื่อปริมาณข้าวเปลือกในห้องอบแห้งเพิ่มมากขึ้นทำให้ข้าวเปลือกเกิดการชนกันเองมากขึ้นจึงส่งผลทำให้ข้าวเปลือกมีการแตกหักเพิ่มมากขึ้น สำหรับกรณีความขาวพบว่าค่าความขาวไม่มีความแตกต่างกันมากนักทั้งนี้เนื่องจากการอบแห้งในแต่ละเงื่อนไขข้าวเปลือกอยู่ในห้องอบแห้งในระยะเวลาอันสั้นทำให้ไม่มีการสะสมความร้อนภายในเมล็ดข้าวจึงส่งผลให้ความขาวหลังการอบแห้งไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

สำหรับกรณีของการอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่องเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งแบบกระแสนอย่างเดี่ยว พบว่าที่อุณหภูมิอากาศขาเข้าและอัตราการป้อนวัสดุเดียวกันเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดมีค่าต่ำกว่าทุกเงื่อนไขการทดลองทั้งนี้เพราะว่าการอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่องนั้นข้าวเปลือกมีเวลาในห้องอบแห้งที่มากกว่าทำให้เมล็ดข้าวมีความร้อนเพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดความเค้นภายในเมล็ดข้าวมากขึ้นจึงส่งผลให้เมล็ดข้าวแตกหักมากขึ้น สำหรับค่าความขาวไม่มีความแตกต่างกันมากนักดังเหตุผลที่กล่าวข้างต้น โดยที่ระบบ

อบแห้งแบบกระแสน้อยอย่างเดียวมีค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 84.90-117.50 % และค่าความขาวสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 94.10-100.00 % สำหรับระบบอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่องมีค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 84.30-104.80 % และมีค่าความขาวสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 93.80-100.00 % โดยที่ค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดสัมพัทธ์และค่าความขาวสัมพัทธ์หาได้จากอัตราส่วนของเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดและค่าความขาวของข้าวที่ผ่านระบบอบแห้งกับข้าวอ้างอิงที่แห้งตามธรรมชาติ

ตาราง 14 การวิเคราะห์คุณภาพของข้าวของระบบอบแห้งแบบกระแสน้อยอย่างเดียว

เงื่อนไขการทดลอง			Relative Head-rice yield	Relative whiteness
T (° C)	W _p (kg _{dry solid} /h)	V (m/s)	(%)	(%)
70	22	25	117.50	94.10
70	47	25	115.60	99.70
70	62	25	108.40	100.00
90	22	25	113.20	95.40
90	47	25	114.40	97.60
90	62	25	113.20	98.40
110	22	25	98.70	96.80
110	47	25	87.30	96.80
110	62	25	84.90	96.20

หมายเหตุ เปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดอ้างอิง = 33.2 , ค่าความขาวอ้างอิง = 37.7

ตาราง 15 การวิเคราะห์คุณภาพของข้าวของระบบอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่อง

เงื่อนไขการทดลอง				Relative Head-rice yield	Relative whiteness
T (° C)	W _p (kg _{dry solid} /h)	V _{impinging} (m/s)	V _{pneumatic} (m/s)	(%)	(%)
70	22	25	16	104.80	95.40
70	47	25	16	102.40	100.00
70	62	25	16	100.00	96.50
90	22	25	16	98.70	95.40
90	47	25	16	86.70	95.40
90	62	25	16	89.10	93.80
110	22	25	16	84.30	94.90
110	47	25	16	84.90	95.20
110	62	25	16	84.90	94.60

หมายเหตุ เปอร์เซนต์ข้าวเต็มเมล็ดอ้างอิง = 33.2 , ค่าความขาวอ้างอิง = 37.7

ตาราง 16 เปรียบเทียบคุณภาพข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยวิธีการต่างๆ

Drying Technique	T (° C)	X _i - X _o (% d.b.)	Relative head-rice yield (%)	Relative whiteness (%)
Impinging stream dryer combined with Pneumatic drying (งานวิจัยนี้)	110	9.79	84.90	94.60
Spouted-bed drying (Madhiyanon; & Soponronnarit. 2005)	110	7.50	110.00	100.00
Fluidized-bed drying (สุภวรรณ ฐิระวณิชย์กุล; และคนอื่นๆ. 2545)	110	10.50	100.00	100.00

จากตาราง 16 คุณภาพข้าวเปลือกหลังผ่านการอบแห้งของระบบอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่องเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับระบบอบแห้งแบบอื่นพบว่าระบบอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่องให้คุณภาพข้าวเปลือกหลังผ่านการอบแห้งต่ำกว่าระบบอื่นแต่หากพิจารณาที่อุณหภูมิ 70°C (ตาราง 15) พบว่าระบบอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่องให้ผลของคุณภาพข้าวเปลือกหลังผ่านการอบแห้งอยู่ในเกณฑ์ดี แต่หากมองที่ความสามารถในการลดความชื้นจะมีค่าต่ำกว่า ซึ่งจากผลการทดลองนี้การปรับปรุงและการศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อคุณภาพข้าวเปลือกหลังผ่านการอบแห้งของระบบอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่องจะทำการศึกษาต่อไปในอนาคตเพื่อให้ระบบอบแห้งนี้มีศักยภาพสูงทั้งในด้านความสามารถในการลดความชื้นและคุณภาพข้าวเปลือกอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้



บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

1. สรุปผลการทดลอง

การศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำวนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่องในครั้งนี้ ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิอากาศขาเข้าและอัตราการป้อนวัสดุที่มีผลต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง ในรูปของอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร โดยใช้ข้าวเปลือกพันธุ์ปทุมธานี 1 เป็นวัสดุในการทดลอง โดยได้ประเมินความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องอบแห้งนี้รวมทั้งศึกษาคุณภาพของข้าวหลังผ่านการอบแห้ง ซึ่งพอสรุปผลได้ดังนี้

การลดค่าความชื้นข้าวเปลือกด้วยระบบอบแห้งแบบกระแสน้ำวนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่องสามารถลดความชื้นข้าวเปลือกได้สูงสุดประมาณ 9.79 % (d.b.) ในระยะเวลา 2 – 4 วินาที

การเปลี่ยนแปลงค่าของอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศขาเข้าและอัตราการป้อนวัสดุในทุกสภาวะเงื่อนไข กรณีของการอบแห้งแบบกระแสน้ำวนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่องเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำวนอย่างเดียว พบว่าที่อุณหภูมิอากาศขาเข้าและอัตราการป้อนวัสดุเดียวกัน ค่าของอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรจะมีค่าสูงกว่า ทั้งนี้เพราะว่าปริมาณวัสดุสามารถคงอยู่ภายในระบบเป็นเวลานานมากขึ้น จึงส่งผลให้เกิดการระเหยน้ำที่ผิววัสดุได้มากกว่า โดยอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุดที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ $328.88 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3\text{h}$ ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุดมีค่าเท่ากับ $604.45 \text{ W}/\text{m}^3\text{K}$

ในกรณีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของระบบอบแห้ง พบว่า $\text{SEC}_{\text{total}}$ มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิอากาศขาเข้าและอัตราการป้อนวัสดุสูงขึ้น โดยที่ระบบอบแห้งแบบกระแสน้ำวนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่องมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะทั้งหมดต่ำสุดประมาณ $2.65 \text{ MJ}/\text{kg}_{\text{water}}$ ซึ่งมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะทั้งหมดต่ำกว่าระบบอบแห้งแบบกระแสน้ำวนอย่างเดียวประมาณ 5 %

ส่วนคุณภาพของข้าวหลังผ่านการอบแห้งพบว่า บางเงื่อนไขข้าวเต็มเมล็ดมีค่าเพิ่มมากขึ้นที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าเมื่อเมล็ดข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูงอยู่เมล็ดข้าวเปลือกเกิดการจีลาติไนส์ (gelatinization) ของแป้งซึ่งช่วยสมานรอยร้าวของข้าวที่เกิดขึ้นได้ สำหรับค่าความขาวของข้าวไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก โดยที่ระบบอบแห้งแบบกระแสน้ำวนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่องมีค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 84.3 – 104.8 % และ ค่าความขาวสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 93.8 – 100 % ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่องเป็นระบบการอบแห้งที่มีประสิทธิภาพมาก

2. ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่าการลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยระบบอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่องเป็นกระบวนการลดความชื้นที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งนับว่าเป็นประโยชน์อย่างมากต่อกระบวนการอบแห้ง และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรอื่นๆ ได้

นอกจากนี้ควรศึกษาการป้อนวัสดุเป็นแบบสองด้านของห้องอบแห้ง ส่วนตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้งอาจเป็นไอน้ำร้อนยวดยิ่งแทนการใช้ก๊าซร้อน ด้านคุณภาพของข้าวหลังผ่านการอบแห้งควรศึกษาที่ความชื้นเริ่มต้นหลายๆ ค่า รวมทั้งอาจมีการใช้การจำลองทางคณิตศาสตร์ขั้นสูงสำหรับศึกษาปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระบบอบแห้ง





บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- กิตติ สถาพรประสาธน์. (2549). *การพัฒนาและศึกษาระบบการอบแห้งแบบกระแสน. ปรินญา นิพนธ์ วจ.ด. (เทคโนโลยีอุตสาหกรรม). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. ถ่ายเอกสาร*
- กิตติ สถาพรประสาธน์; สักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา; และ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ (2548). ผลกระทบของสภาวะการทำงานต่างๆ ที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน. *การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6. กรุงเทพฯ. กรมวิชาการเกษตร. (2543). พันธุ์ข้าวปทุมธานี1. กรุงเทพฯ: ฝ่ายถ่ายทอดเทคโนโลยี กรมฯ.*
- ขวัญชัย จ้อยเจริญ. (2551). *การทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน (ระยะที่ 2). การศึกษาปัญหาพิเศษ 2 วจ.ด. (เทคโนโลยีพลังงาน). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. ถ่ายเอกสาร*
- ฐานิตย์ เมธิยานนท์; และ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. (2546). *การอบแห้งเมล็ดพืชที่อุณหภูมิสูงโดยเทคนิคสเปาเต็ดเบดที่สามารถปรับเปลี่ยนอัตราการไหลอากาศเข้าดาวนั้คัมเมอร์ได้. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17. ปราจีนบุรี.*
- ทงศ์ ฉายาวิณะ. (2537). *เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมเกษตร. นครปฐม.*
- ธัญญาพร ปัตตาธารี; และ กิตติ สถาพรประสาธน์. (2552). *การศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสนสำหรับวัสดุทางการเกษตร. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23. เชียงใหม่.*
- สิทธิเดช กุลวงศ์. (2547). *การศึกษาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบส่งไปตามท่อโดยใช้ลม. วจ.ม. (วิศวกรรมเครื่องกล). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. ถ่ายเอกสาร.*
- สุภารรณ ฐิระวณิชย์กุล; และคนอื่นๆ. (2545). *ผลกระทบของอุณหภูมิของการอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไ้เบดที่มีต่อค่าความขาวและผลของข้าวเต็มเมล็ด. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 3. เชียงใหม่.*
- สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. (2540). *การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.*
- สมชาติ โสภณรณฤทธิ์; และคณะ. (2545, ตุลาคม – ธันวาคม). *การออกแบบ ทดสอบ และหาแนวทางที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการทำไหลบนฐานสั่น. วารสารราชบัณฑิตยสถาน. ปีที่ 27(4): หน้า 59-69.*

- อนุชา ใจกล้า; และคนอื่นๆ (2549). เงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการรักษาคุณภาพข้าวเปลือกที่อบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดาเซชัน. *การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 2*. นครราชสีมา.
- Cao, C.; Yan, Z.; & Baoguo, L. (1999). Experimental study on impinging stream drying of particulate materials. In *Proceedings of the 4th International Conference on Agricultural Engineering*. Beijing, P.R. China. pp. 10-14.
- Choicharoen, K.; Devahastin, S.; & Soponronnarit, S. (2010). Performance and Energy Consumption of an Impinging Stream Dryer for High-Moisture Particulate Materials. In *Drying Technology*. 28: 20-29.
- Jittanit, W.; Saeteaw, N.; & Charoenchaisri, A. (2010). Industrial paddy drying and energy saving options. In *Journal of Store Products Research*. 46: 209-213.
- Keansup, W.; Kulwong, S.; & Wongwises, S. (2006). Comparison of Drying Kinetics of Paddy using a Pneumatic Conveying Dryer without a Cyclone. In *Drying Technology*. 24: 1039-1045.
- Keansup, W.; Kulwong, S.; & Wongwises, S. (2006). A Small-Scale Pneumatic Conveying Dryer of Rough Rice. In *Drying Technology*. 24: 105-113.
- Kemp, I.C. (1994). Scale-up of Pneumatic Conveying Dryers. In *Drying Technology*. 12 (1&2): 279-297.
- Kitron, Y. et al. (1987). Drying and mixing of solids and particles residence time distribution in four impinging streams and multistage two impinging streams reactors. In *Chemical Engineering Technology*. 26: 2454-2461.
- Kitron, Y. & Tamir, A. (1988). Performance of a coaxial gas-solid two impinging stream (TIS) reactor hydrodynamics, residence time distribution, and drying heat transfer. In *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 8: 1760-1767.
- Kitron, Y. & Tamir, A. (1990). Characteristics and scale-up of coaxial impinging streams gas-solid contractors. In *Drying Technology*. 8: 781-810.
- Kudra, T. & Mujumdar, A.S. (1989). Impinging stream dryers for particles and pastes. In *Drying Technology*. 7: 219-266.
- Kudra, T.; Mujumda, A.S.; & Meltser, V.L. (1995). Impinging stream drying. In *Hanbook of Industrial Drying*. 2nd ed. New York: Marcel Dekker. pp. 539-566.

- Madhiyanon, T.; Soponronnarit, S. (2005). High Temperature Spouted Bed Paddy Drying with Varied Downcomer Air Flows and Moisture Contents: Effects on Drying Kinetics, Critical Moisture, and Milling Quality. In *Drying Technology*. 23: 473-495.
- Marier, D.E. (2002). Grain Drying System. In *Facility Design Conference of the Grain Elevator & Processing Society*. USA.
- Nimmol, C.; & Devahastin, S. (2010). Evaluation of performance and energy consumption of impinging stream dryer for paddy. In *Applied Thermal Engineering*. 30: 2204- 2212.
- Sathapornprasath, K.; Devahastin, S.; & Soponronnarit, S. (2004). Effect of operating Conditions on the overall performance of an-air and superheated steam-operated impinging stream drying. In *Proceedings of the 15th International Symposium on Transport Phenomena*. Bangkok, Thailand. pp. 55-59.
- Sathapornprasath, K.; Devahastin, S.; Soponronnarit, S. (2007). Performance evaluation of an impinging stream dryer for particulate materials. In *Drying Technology*. 25: 1121-1128.
- Tamir, A. (1989). Process and phenomena in impinging-stream reactors. In *Chemical Engineering Progress*. 85: 53-61.
- Tamir, A. (1994). *Impinging stream-reactor*. Elsevier: Amsterdam.





ภาคผนวก ก

การคำนวณระบอบบั้งแบบกระแสน้ำร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลม

การคำนวณระบบอบแห้งแบบกระแสน

อัตราการไหลเชิงปริมาตรและอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแต่ละด้านของท่อทางเข้า (เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทางเข้าเท่ากับ 1.5 นิ้ว) สามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 v_a &= \text{พื้นที่หน้าตัด (m}^2\text{)} \times \text{ความเร็วสูงสุด (m/s)} \\
 &= \frac{\pi}{4} \times 0.04^2 \times 30 \\
 &= 0.038 \text{ m}^3/\text{s} \\
 &= 137 \text{ CMH} \\
 &= 80 \text{ CFM} \\
 m_a &= \text{อัตราการไหลเชิงปริมาตร (m}^3/\text{s)} \times \text{ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m}^3\text{)} \\
 &= 0.038 \times 1.1614 \\
 &= 0.044 \text{ kg/s}
 \end{aligned}$$

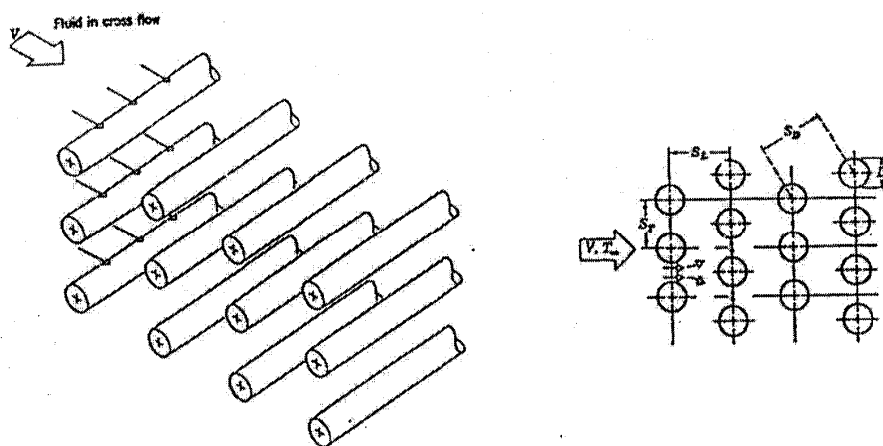
การคำนวณภาระความร้อน

ภาระความร้อนสูงสุดของเครื่องทำความร้อนแต่ละด้านสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้ โดยสมมติอากาศขาเข้าเท่ากับ 30°C และอุณหภูมิอากาศสูงสุดที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เท่ากับ 120°C

$$\begin{aligned}
 Q &= m_a \times C_p \times \Delta T \\
 &= 0.044 \text{ (kg/s)} \times 1.03 \text{ (kJ/kg)} \times (393-303) \text{ K} \\
 &= 4.07 \text{ kW} \\
 &= 4.07 \times \text{safety factor } 1.5 \\
 &= 6 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

ความดันสูญเสียของกล่องเครื่องทำความร้อน

การคำนวณหาความดันสูญเสียของกล่องเครื่องทำความร้อน ซึ่งแสดงตำแหน่งการวางแท่งความร้อนไฟฟ้าตามภาพประกอบ 10



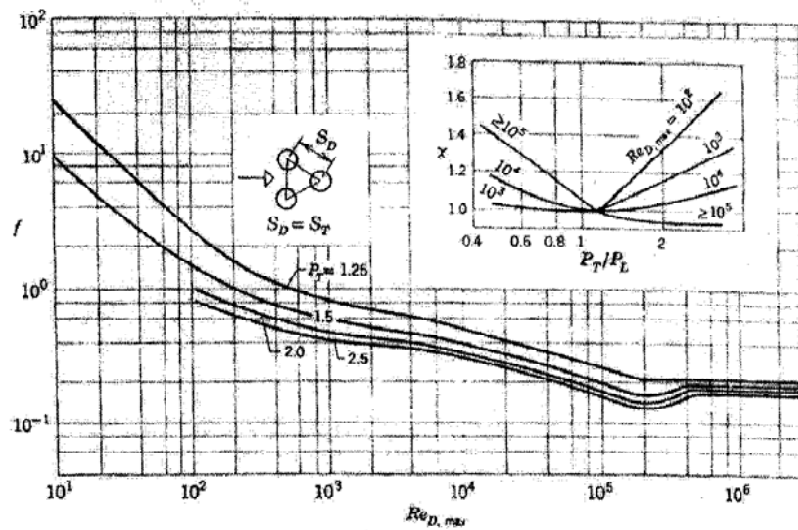
ภาพประกอบ 10 ตำแหน่งการวางแท่งความร้อนไฟฟ้า

$$Re_{\max} = \frac{\rho V_{\max} D}{\mu}$$

$$V_{\max} = \frac{S_T}{(S_T - D) m_f}$$

เมื่อ

D	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งความร้อน (0.05 m)
$V_{\max}$	คือ	ความเร็วสูงสุดที่ผ่านแท่งความร้อน (m/s)
m_f	คือ	ความเร็วของอากาศเฉลี่ย (m/s)
S_T	คือ	ระยะห่างระหว่างแท่งความร้อนในแนวตั้ง (m)
S_L	คือ	ระยะห่างระหว่างแท่งความร้อนในแนวนอน (m)
S_T/D	=	3.0
S_T	=	0.15 m
S_L/D	=	2.0
S_L	=	0.1 m



ภาพประกอบ 11 แฟกเตอร์ความเสียดทาน (f) และค่าแก๊ (χ) , (Incropere; & Dewitt. 2002)

อัตราการไหลเชิงปริมาตร = พ.ท.หน้าตัดของกล่องเครื่องทำความเย็น $\times$ ความเร็วอากาศเฉลี่ย

$$0.038 = (0.3 \times 0.3) \times m_f$$

$$m_f = 0.42 \text{ m/s}$$

$$V_{\max} = \frac{0.15}{(0.15 - 0.05)} \times 0.42$$

$$= 0.63 \text{ m/s}$$

$$Re_{\max} = \frac{1.1614 \times 0.63 \times 0.05}{1.846 \times 10^{-5}}$$

$$= 1981.8 \text{ (Laminar)}$$

$$P_T = \frac{S_T}{D} = 3.0$$

$$\frac{P_T}{P_L} = \frac{S_D/D}{S_L/D} = 3.0$$

จากข้อมูลของ Re_{max} และค่าที่ได้จากกราฟในภาพประกอบ 11 พบว่าจะได้ $(f)=0.6$ และค่าแก้ไข $(\chi)=1.3$ ความดันสูญเสียของกล่องเครื่องทำความร้อน (ΔP) มีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned}\Delta P &= N_L \chi \left[\frac{\rho_a V_{max}^2}{2} \right] f \\ &= 6 \times 1.3 \times \left[\frac{1.1614 \times 0.63^2}{2} \right] \times 0.6 \\ &= 1.08 \text{ Pa}\end{aligned}$$

ความดันสูญเสียของท่อและอุปกรณ์

ท่อสแตนเลสขนาด 1.5 นิ้ว

$$\begin{aligned}Re &= \frac{\rho V D}{\mu} \\ &= \frac{1.1614 \times 30 \times 0.04}{1.846 \times 10^{-5}} \\ &= 75,497 \text{ (Turbulence)}\end{aligned}$$

แฟกเตอร์ความหยาบของท่อสแตนเลส (Roughness factor of stainless steel pipe)

$$\varepsilon = 0.045 \text{ m}$$

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{0.045}{40}$$

$$= 0.001125$$

จาก Moody diagram

$$\frac{\varepsilon}{D} = 0.001125$$

$$Re = 75,497$$

แฟกเตอร์ความเสียดทาน

$$f = 0.021$$

$$\Delta P = f \times \left(\frac{L}{D} \right) \times \frac{v^2}{2g}$$

$$= 0.021 \times \left(\frac{5}{0.04} \right) \times \left(\frac{30^2}{2 \times 9.81} \right)$$

$$= 120.41 \text{ Pa}$$

ข้อ 90° ขนาด 3 นิ้ว

$$\Delta P = K \times \left(\frac{v^2}{2g} \right)$$

$$= 0.31 \times \left(\frac{30^2}{2 \times 9.81} \right) \times 1$$

$$= 53.8 \text{ Pa}$$

สามทางขนาด 3 นิ้ว

$$\Delta P = K \times \left(\frac{v^2}{2g} \right)$$

$$= 0.7 \times \left(\frac{30^2}{2 \times 9.81} \right) \times 1$$

$$= 121.6 \text{ Pa}$$

โกลบวาล์ว ขนาด 1.5 นิ้ว

$$\begin{aligned}\Delta P &= K \times \left(\frac{v^2}{2g} \right) \\ &= 0.14 \times \left(\frac{30^2}{2 \times 9.81} \right) \times 1 \\ &= 75.7 \text{ Pa}\end{aligned}$$

ความดันสูญเสียของท่อและอุปกรณ์

$$\begin{aligned}&= 1419.7 + 53.8 + 121.6 + 75.7 \\ &= 1670.8 \text{ Pa}\end{aligned}$$

ความดันสูญเสียของห้องอบแห้งกระแสน (Tamir, A. 1994)

หาได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\Delta P &= 0.5 \rho_a U_{a,0}^2 \\ &= 0.5 \times 1.1614 \times 30^2 \\ &= 522.63 \text{ Pa}\end{aligned}$$

การคำนวณหาขนาดและความดันลดลงของเครื่องดักฝุ่น (Cyclone)

ข้อมูลของขนาดและสัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ ของเครื่องดักฝุ่น ได้แก่

$$\begin{aligned}\frac{A}{D} &= 0.5 \\ \frac{W}{D} &= 0.2 \\ \frac{O}{D} &= 0.5 \\ \frac{S}{D} &= 0.5 \\ \frac{E}{D} &= 1.5\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{H}{D} &= 4.0 \\ \frac{B}{D} &= 0.375 \\ C &= 551.3 \\ \Delta H &= 5.4 \\ \frac{V}{D^2} &= 1.53\end{aligned}$$

เมื่อ

$$\begin{aligned}D &= \text{diameter , m} \\ A &= \text{cyclone inlet height , m} \\ W &= \text{cyclone inlet width , m} \\ O &= \text{cyclone outlet diameter , m} \\ S &= \text{cyclone outlet length , m} \\ E &= \text{cyclone cylinder height , m} \\ H &= \text{height , m} \\ B &= \text{cyclone inlet height , m} \\ \Delta H &= \text{velocity head change} \\ V &= \text{volume flow rate , m}^3/\text{s}\end{aligned}$$

จากข้อมูลของระบบบอบแห้งใช้อัตราการไหลเชิงปริมาตรเท่ากับ $0.076 \text{ m}^3/\text{s}$ ดังนั้นสามารถหาขนาดของเครื่องดักฝุ่นได้จากความสัมพันธ์ดังกล่าว

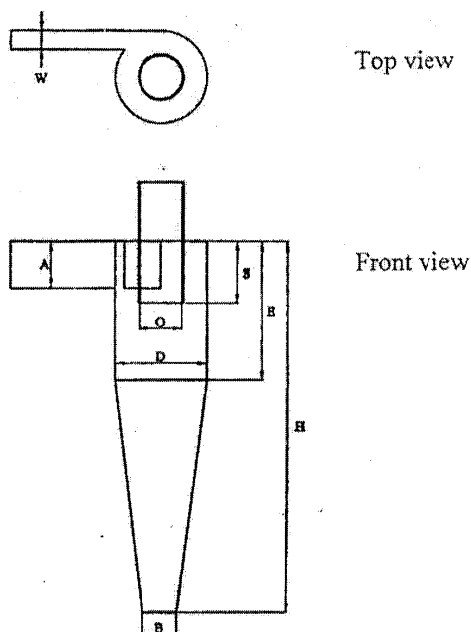
$$\begin{aligned}\frac{V}{D^2} &= \frac{0.076}{D^2} \\ &= 1.53\end{aligned}$$

$$\therefore D = 0.2 \text{ m}$$

เลือกใช้ขนาด D เท่ากับ 0.2 m และสามารถคำนวณหาสัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ ของเครื่องดักฝุ่นได้ ดังตาราง 17 และองค์ประกอบทางกายภาพของเครื่องดักฝุ่น ดังภาพประกอบ 12

ตาราง 17 แสดงสัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ ของเครื่องดักฝุ่น

D	A	W	O	S	E	H	B
0.2	0.1	0.04	0.1	0.1	0.3	0.8	0.075



ภาพประกอบ 12 องค์ประกอบทางกายภาพของเครื่องดักฝุ่น

ความเร็วที่ทางเข้าเครื่องดักฝุ่นสามารถคำนวณได้ดังนี้

อัตราการไหลเชิงปริมาตร = พ.ท.หน้าตัดของทางเข้า $\times$ ความเร็วที่ทางเข้าเครื่องดักฝุ่น

$$= (W \times A) \times v$$

$$0.076 = (0.05 \times 0.125) \times v$$

$$\therefore v = 12.16 \text{ m/s}$$

การคำนวณหาความดันลดในเครื่องดักฝุ่นสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\Delta P = v^2 \rho_a \frac{\Delta H}{2}$$

$$= 12.16^2 \times 1.1614 \times \frac{5.4}{2}$$

$$\therefore \Delta P = 463.67 \text{ Pa}$$

ความดันสูญเสียรวมทั้งหมดของระบบอบแห้งกระแสน

$$\begin{aligned}
 &= \text{กล่องเครื่องทำความร้อน} + \text{ท่อและอุปกรณ์} + \\
 &\quad \text{ห้องอบแห้งแบบกระแสน} + \text{เครื่องดักฝุ่น} \\
 &= 1.10 + 1670.80 + 522.63 + 463.67 \\
 &= 2658.2 \text{ Pa}
 \end{aligned}$$

การคำนวณหาปริมาตรห้องอบแห้ง

$$\begin{aligned}
 \text{เมื่อ} \quad V_r &= V_{\text{ห้องอบแห้ง}} + V_{\text{ท่อลำเลียงทั้งสองข้าง}} + V_{\text{ไซโคลน}} \\
 V &= A \times L
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ห้องอบแห้ง} \quad V &= \frac{\pi}{4} \times d^2 \times L \\
 &= \frac{\pi}{4} \times 0.0762^2 \times 0.24 \\
 &= 1.094 \times 10^{-3} \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ท่อลำเลียง} \quad V &= \frac{\pi}{4} \times d^2 \times L \\
 &= \frac{\pi}{4} \times 0.0381^2 \times (1.6 \times 2) \\
 &= 3.65 \times 10^{-3} \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ไซโคลน} \quad V &= \left(\frac{\pi}{4} \times d^2 \times h \right) + \left(\frac{\pi}{12} \times d^2 \times h \right) \\
 &= \left(\frac{\pi}{4} \times 0.2^2 \times 0.3 \right) + \left(\frac{\pi}{12} \times 0.2^2 \times 0.5 \right) \\
 &= 13.00 \times 10^{-3} \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

ปริมาตรรวมของห้องอบแห้ง

$$\begin{aligned}
 V_r &= (1.094 \times 10^{-3}) + (3.648 \times 10^{-3}) + (13 \times 10^{-3}) \\
 &= 17.70 \times 10^{-3} \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

การออกแบบเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม

1. ขนาดท่อ 1.5 in.ch
2. ความเร็วลมที่ใช้สำหรับการออกแบบ 4,900 fpm หรือ 25 m/s
3. อุณหภูมิเริ่มต้น (T_0) 30°C, อุณหภูมิสุดท้าย (T_1) 200°C
4. ความหนาแน่นของอากาศ (ρ_{air}) = 1.2 kg/m³ (สำหรับความหนาแน่นของอากาศที่สภาวะมาตรฐาน)
5. $C_{p,\text{air}} = 1.005 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$

คำนวณหาอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ ($\dot{m}_{\text{air}}$)

$$\begin{aligned}\dot{m}_{\text{air}} &= \rho_{\text{air}} \dot{V} \\ &= 1.2 \text{ kg/m}^3 \times \frac{\pi}{4} \times (0.0381 \text{ m})^2 \times 25 \text{ m/s} \\ &= 0.0342 \text{ kg/s}\end{aligned}$$

คำนวณหาอุณหภูมิแตกต่าง (ΔT)

$$\begin{aligned}\Delta T &= T_1 - T_0 \\ &= (200 + 273) - (30 + 273) \\ &= 170 \text{ K}\end{aligned}$$

คำนวณหาพลังงานความร้อนที่ใช้ในระบบ

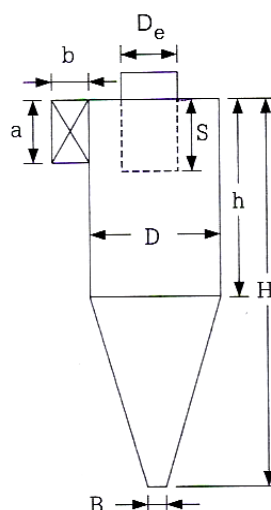
$$\begin{aligned}\dot{Q} &= \dot{m}_{\text{air}} C_{p,\text{air}} \Delta T \\ &= (0.0342 \text{ kg/s}) \times (1.005 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}) \times (170 \text{ K}) \\ &= 5.8431 \text{ kJ/s}\end{aligned}$$

เพื่อค่าความปลอดภัย 50%

$$\begin{aligned}&= 5.8431 \text{ kJ/s} \times 1.5 \\ &= 8.76 \text{ kJ/s}\end{aligned}$$

การหาขนาดของไซโคลน

1. ขนาดท่อ 1.5 in
2. ความเร็วลมที่ใช้สำหรับการออกแบบ 4,900 fpm
3. ใช้ไซโคลนตามมาตรฐานของ Lapple



ภาพประกอบ 13 องค์ประกอบทางกายภาพของเครื่องดักฝุ่น

คำนวณหาอัตราการไหลของอากาศ

$$\begin{aligned}
 \dot{V}_{\text{air}} &= A V \\
 &= \frac{\pi}{4} \times (0.125 \text{ ft})^2 \times 4,900 \text{ fpm} \\
 &= 60.132 \text{ cfm}
 \end{aligned}$$

หาพื้นที่หน้าตัดช่องทางเข้าไซโคลน

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{\dot{V}_{\text{air}}}{V} \\
 &= \frac{60.132}{4,900} \\
 &= 0.0123 \text{ ft}^2
 \end{aligned}$$

$a = 0.5D$ และ $b = 0.25D$ ดังนั้นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตัวเรือนของไซโคลน (D)
หาได้จาก $A = a \times b = 0.5D \times 0.25D = 0.125D^2$

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้น} \quad D &= \sqrt{\frac{A}{0.125}} \\
 &= \sqrt{\frac{0.0123 \text{ ft}^2}{0.125}}
 \end{aligned}$$

$$= 0.314 \text{ ft}$$

เมื่อได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตัวเรือนไซโคลนแล้ว ขนาดอื่นของไซโคลนก็สามารถหาได้โดยอาศัยสัดส่วนในตารางไซโคลนมาตรฐาน

a	$= 0.5D$	$= 0.157 \text{ ft}$
b	$= 0.25D$	$= 0.785 \text{ ft}$
S	$= 0.625D$	$= 0.1963 \text{ ft}$
D_e	$= 0.5D$	$= 0.157 \text{ ft}$
h	$= 2D$	$= 0.628 \text{ ft}$
H	$= 4D$	$= 1.256 \text{ ft}$
B	$= 0.25D$	$= 0.785 \text{ ft}$
N_H	$= 8D$	
N_e	$= 6D$	

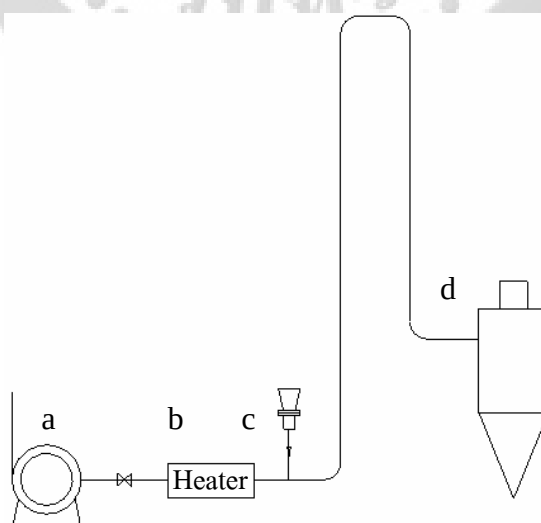
การหาขนาดพัดลม (ฉัตรชัย นิยมล. 2548)

ข้อมูล

$$V_{\text{air}} = 60.132 \text{ cfm}$$

$$V = 4,900 \text{ fpm}$$

$$D_{\text{ท่อ}} = 1.5 \text{ in} = 0.125 \text{ ft}$$



ภาพประกอบ 14 องค์ประกอบทางกายภาพของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม

ช่วง $a \rightarrow b = 0.3 \text{ m.} = 1 \text{ ft.}$

พื้นที่หน้าตัดของท่อ 1.5 in คือ $\frac{\pi}{4} \times (0.125 \text{ ft})^2 = 0.0123 \text{ ft}^2$

ความเร็วจริงในท่อ $V_d = \frac{\dot{V}_{air}}{A} = \frac{60.132 \text{ cfm}}{0.0123 \text{ ft}^2} = 4888.78$

ความดันจลน์ของอากาศในท่อ $VP_d = \left(\frac{V_d}{4005} \right)^2 = 1.221 \text{ in.wg}$

ที่ทางเข้าจะมีการสูญเสียจากความเร่งและการสูญเสียที่ทางเข้าหัวดูด
แฟกเตอร์การสูญเสียที่ทางเข้า

$$F_h = 0.49 \text{ (เป็นแบบปากเรียบมีหน้าแปลน)}$$

แฟกเตอร์การสูญเสียเนื่องจากความเร่ง = 1.0

แฟกเตอร์การสูญเสียความดันต่อความดันจลน์รวม

$$F_H = 1.0 \times 0.49 = 1.49$$

การสูญเสียความดันที่ทางเข้า

$$\begin{aligned} h_{ed} &= F_H VP_d \\ &= 1.49 \times 1.221 \text{ in.wg} \\ &= 1.82 \text{ in.w} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} SP_h &= h_{cd} + VP_d \\ &= 1.82 \text{ in.wg} + 1.221 \text{ in.wg} \\ &= 3.041 \text{ in.wg} \end{aligned}$$

ความยาวของท่อช่วงนี้ คือ $L = 0.3 \text{ m.} = 1 \text{ ft.}$

แฟกเตอร์การเสียดทานของท่อสแตนเลส (Stainless)

$$a = 0.0425$$

$$b = 0.465$$

$$c = 0.602$$

$$\begin{aligned}
 H_f &= \frac{a(V_d)^b}{V^c} \\
 &= \frac{0.0425 \times (4888.78)^{0.465}}{60.132^{0.602}} \\
 &= 0.1889 \text{ in.wg.}
 \end{aligned}$$

การสูญเสียความดันของท่อตรงต่อความดันจลน์

$$\begin{aligned}
 F_h &= LH_f \\
 &= 1 \text{ ft.} \times 0.1889 \text{ in.wg.} \\
 &= 0.1889
 \end{aligned}$$

การสูญเสียความดันในท่อ

$$\begin{aligned}
 h_L &= LH_f VP_d \\
 &= 1 \text{ ft.} \times 0.1889 \text{ in.wg} \times 1.221 \text{ in.wg} \\
 &= 0.231 \text{ in.wg.}
 \end{aligned}$$

การสูญเสียความดันสถิตในท่อ

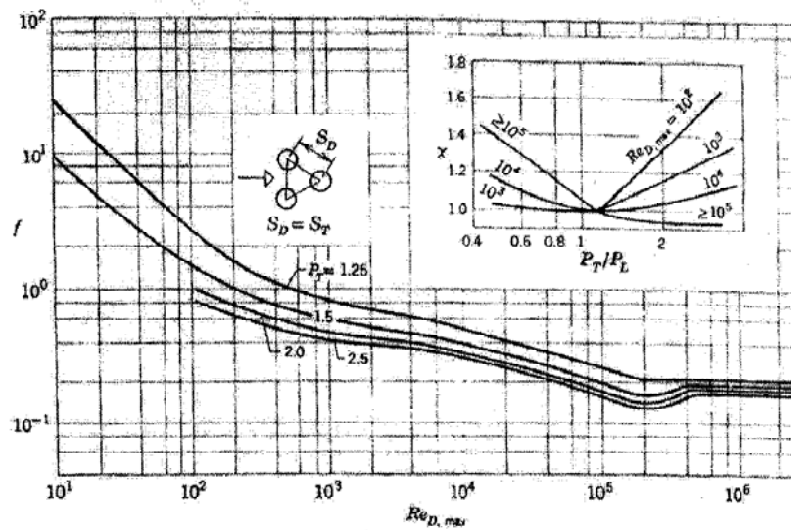
$$\begin{aligned}
 SP_h &= h_{ed} + h_L + VP_d \\
 &= 1.82 \text{ in.wg.} + 0.231 \text{ in.wg.} + 1.221 \text{ in.wg.} \\
 &= 3.272 \text{ in.wg.}
 \end{aligned}$$

ช่วง $b \rightarrow c$ (Heater)

$$\begin{aligned}
 V_{\max} &= \frac{s_T}{(s_T - D)} \times m_f \\
 Re &= \frac{\rho V_{\max} D}{\mu}
 \end{aligned}$$

เมื่อ

D	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งความร้อน (0.012 m)
$V_{\max}$	คือ	ความเร็วสูงสุดที่ผ่านแท่งความร้อน (m/s)
m_f	คือ	ความเร็วของอากาศเฉลี่ย (m/s)
S_T	คือ	ระยะห่างระหว่างแท่งความร้อนในแนวตั้ง (m)
S_L	คือ	ระยะห่างระหว่างแท่งความร้อนในแนวนอน (m)
S_T/D	=	4.17
S_T	=	0.05 m.
S_L/D	=	4.17
S_L	=	0.05 m.



ภาพประกอบ 15 แฟกเตอร์ความเสียดทาน (f) และค่าแก้ไข (χ) (Incropera; & Dewitt. 2002)

อัตราการไหลเชิงปริมาตร = พ.ท.หน้าตัดของกล่องเครื่องทำความร้อน $\times$ ความเร็วอากาศเฉลี่ย

$$0.031 = (0.430\text{m.} \times 0.322\text{m.}) \times m_f$$

$$m_f = 0.224 \text{ m/s}$$

$$V_{\max} = \frac{0.05\text{m.}}{0.05\text{m.} - 0.012\text{m.}} \times 0.224$$

$$= 0.295\text{m/s}$$

$$\text{Re} = \frac{1.12 \times 0.295 \times 0.012}{1.8 \times 10^{-5}}$$

$$= 220.27 \text{ เป็นการไหลแบบ Laminar}$$

$$f = \frac{64}{220.27}$$

$$= 0.29$$

$$P_T = \frac{S_T}{D} = \frac{0.05}{0.012} = 4.17$$

$$\frac{P_T}{P_L} = \frac{S_T/D}{S_L/D} = \frac{4.17}{4.17} = 1.0$$

จากค่าในแผนภาพประกอบแฟกเตอร์ความเสียดทาน $\chi = 1.1$

$$\Delta P = N_L \chi \left[\frac{\rho_a V_{\max}^2}{2} \right] \times f$$

$$\begin{aligned} \Delta P &= 6 \times 1.1 \times \left(\frac{1.12 \times 0.295}{2} \right) \times 0.291 \\ &= 0.094 \end{aligned}$$

$$Pa = 0.0004 \text{ in.wg}$$

ช่วง $c \rightarrow d = 15.9 \text{ m.} = 52.165 \text{ ft.}$

อัตราการไหลของอากาศที่ต้องการในระบบ 60.132 cfm

$V_{air} = 4900 \text{ fpm}$ หรือ 25 m/s

ขนาดของท่อ 1.5 in หรือ 0.125 ft

พื้นที่หน้าตัดของท่อ 1.5 in คือ $\frac{\pi}{4} \times (0.125 \text{ ft})^2 = 0.0123 \text{ ft}^2$

ความเร็วจริงในท่อ $V_d = \frac{\dot{V}_{air}}{A} = \frac{60.132 \text{ cfm}}{0.0123 \text{ ft}^2} = 4888.78 \text{ fpm}$

ความดันจลน์ของอากาศในท่อ $VP_d = \left(\frac{V_d}{4005} \right)^2 = \left(\frac{4888.78 \text{ fpm}}{4005} \right)^2 = 1.221 \text{ in.wg}$

ที่ทางเข้าจะมีการสูญเสียจากความเร่งและการสูญเสียที่ทางเข้าหัวดูด
แฟกเตอร์การสูญเสียที่ทางเข้า

$$F_h = 0.49$$

แฟกเตอร์การสูญเสียเนื่องจากความเร่ง

$$F_h = 1.0$$

แฟกเตอร์การสูญเสียความดันต่อความดันจลน์รวม

$$F_H = 1.0 \times 0.49 = 1.49$$

การสูญเสียความดันที่ทางเข้า

$$\begin{aligned} h_{ed} &= F_H VP_d \\ &= 1.49 \times 1.221 \text{ in.wg} \\ &= 1.82 \text{ in.wg} \end{aligned}$$

ความยาวของท่อช่วงนี้ คือ $L = 52.165 \text{ ft}$

แฟกเตอร์การเสียดทานของท่อสแตนเลส (Stainless)

$$a = 0.0425$$

$$b = 0.465$$

$$c = 0.602$$

$$H_f = \frac{a(V_d)^b}{V^c} = \frac{0.0425 \times (4888.78)^{0.465}}{60.132^{0.602}} = 0.1889 \text{ in.wg.}$$

$$\begin{aligned} F_h &= LH_f \\ &= 52.165 \text{ ft} \times 0.1889 \text{ in.wg} \\ &= 9.85 \end{aligned}$$

จำนวนท่อเลี้ยว 90 คือ 4 ตัว

แฟกเตอร์การสูญเสียท่อเลี้ยว 90 °

$$F_h = 0.13$$

$$\text{จำนวน 4 ตัว} = 4 \times 0.13 = 0.52$$

การสูญเสียความดันในท่อต่อความดันจลน์

$$\begin{aligned} F_h &= 9.85 + 0.52 \\ &= 10.37 \end{aligned}$$

การสูญเสียความดันภายในท่อ

$$\begin{aligned} h_l &= F_H VP_d \\ &= 10.37 \times 1.221 \text{ in.wg} \\ &= 12.66 \text{ in.wg} \end{aligned}$$

การสูญเสียความดันสถิตในท่อช่วง $c \rightarrow d$

$$SP_h = h_{ed} + h_l + VP_d$$

$$\begin{aligned}
 &= 1.82 \text{ in.wg.} + 12.66 \text{ in.wg.} + 1.22 \text{ in.wg.} \\
 &= 15.70 \text{ in.wg.}
 \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้นเกิดค่าความดันสูญเสีย ตั้งแต่ a ถึง d ทั้งหมด

$$\begin{aligned}
 &= a \rightarrow b + b \rightarrow c + c \rightarrow d \\
 &= 3.272 \text{ in.wg} + 0.0004 \text{ in.wg.} + 15.701 \text{ in.wg.} \\
 &= 18.97 \text{ in.wg.}
 \end{aligned}$$

การคำนวณหาปริมาตรห้องอบแห้ง

เมื่อ

$$V_r = V_{\text{ห้องอบแห้ง}} + V_{\text{ไซโคลน}}$$

$$V = A \times L$$

ห้องอบแห้ง

$$\begin{aligned}
 V &= \frac{\pi}{4} \times d^2 \times L \\
 &= \frac{\pi}{4} \times 0.0381^2 \times 15.9 \\
 &= 18 \times 10^{-3} \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

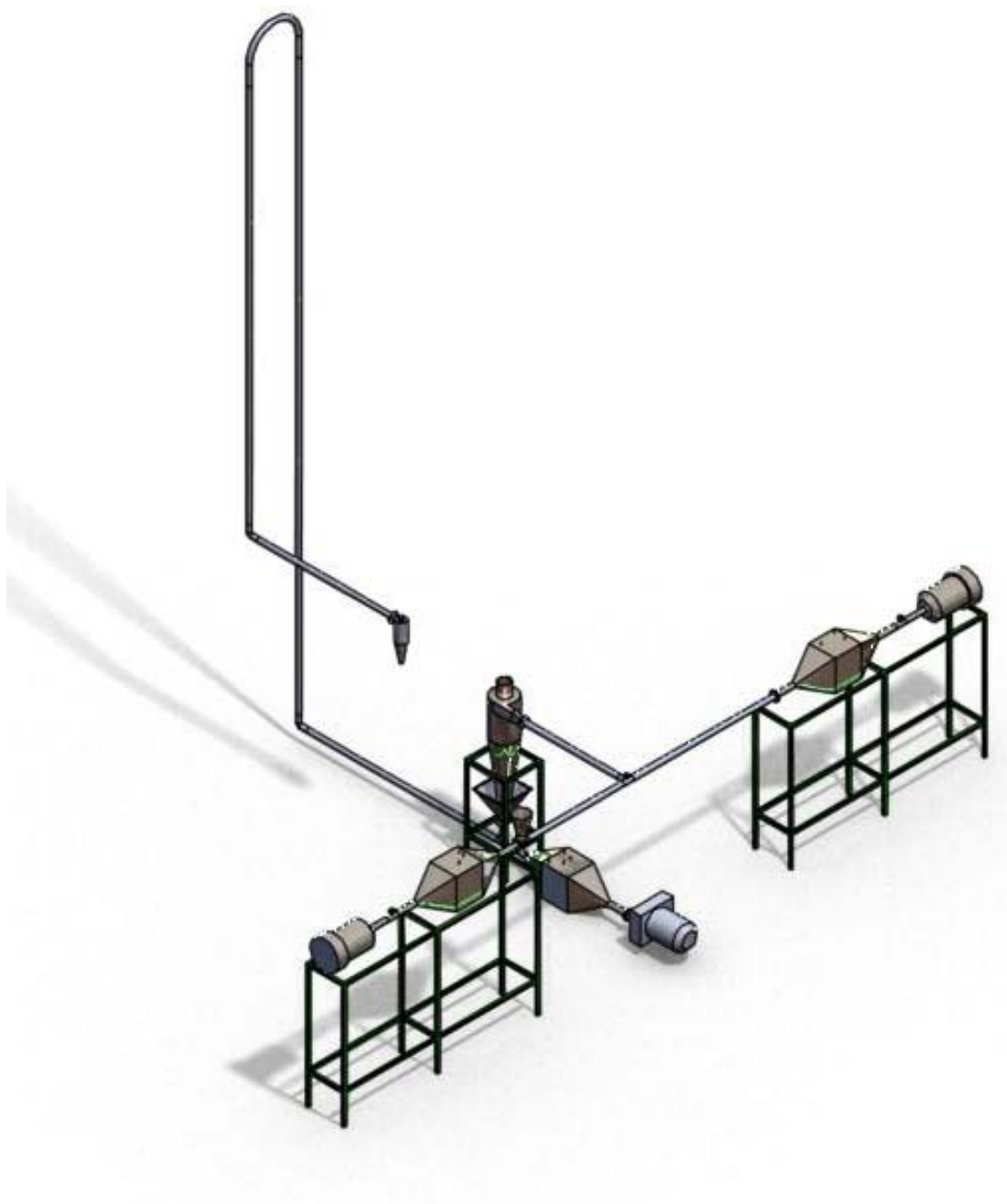
ไซโคลน

$$\begin{aligned}
 V &= \left(\frac{\pi}{4} \times d^2 \times h \right) + \left(\frac{\pi}{12} \times d^2 \times h \right) \\
 &= \left(\frac{\pi}{4} \times 0.094^2 \times 0.188 \right) + \left(\frac{\pi}{12} \times 0.094^2 \times 0.188 \right) \\
 &= 1.7 \times 10^{-3} \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

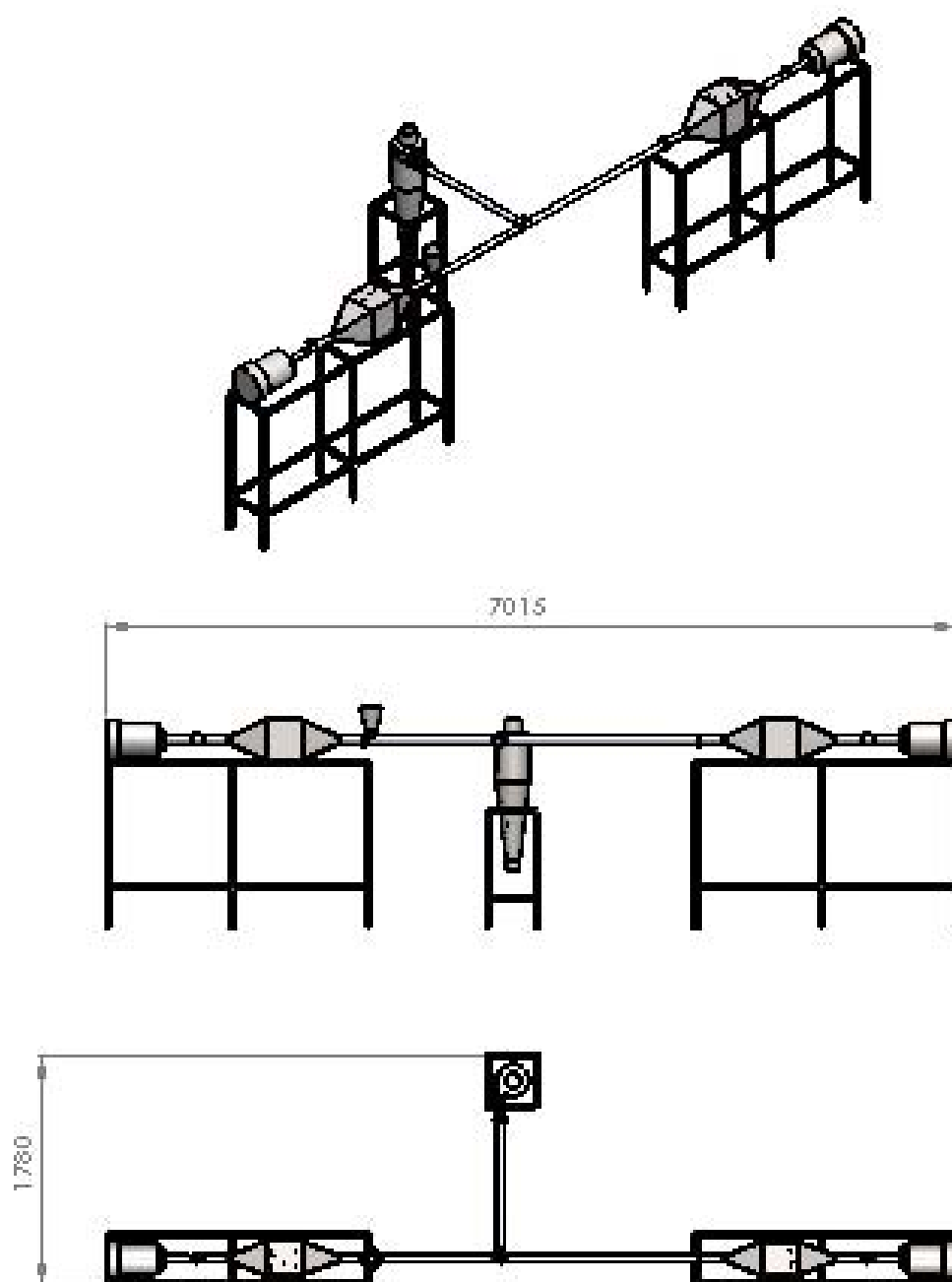
ปริมาตรรวมของห้องอบแห้ง

$$\begin{aligned}
 V_r &= (18.1 \times 10^{-3}) + (1.6 \times 10^{-3}) \\
 &= 19.7 \times 10^{-3} \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

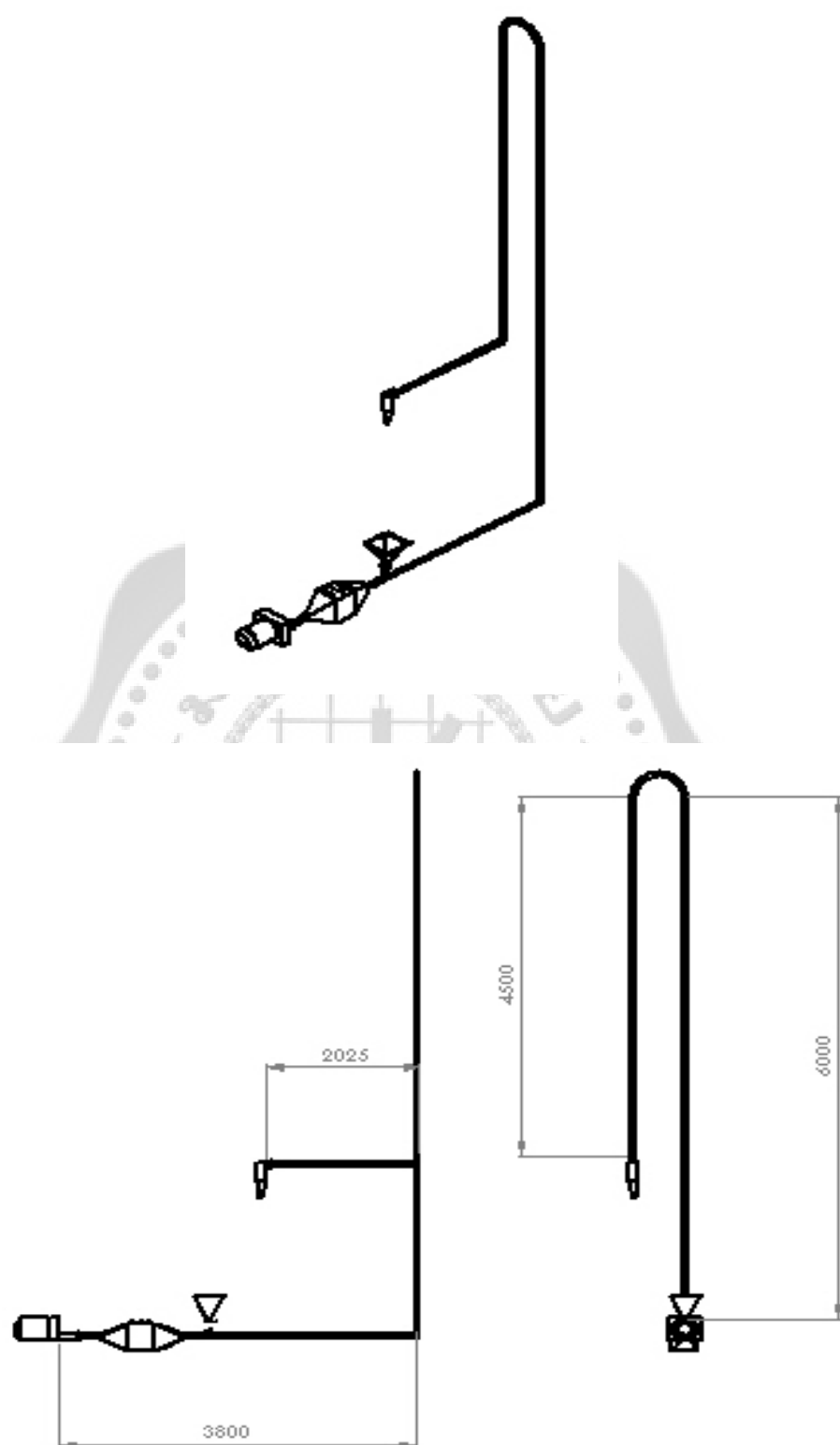




ภาพประกอบ 16 ภาพ 3 มิติ ของระบบบอบแห้งแบบกระแสรวมกับการอบแห้งแบบพาหะลม



ภาพประกอบ 17 ภาพฉายของระบบบอบแห้งแบบกระแสน



ภาพประกอบ 18 ภาพฉายของระบบบึงแบบพาหะลม

ภาพของระบบอบแห้งแบบกระแสชน



ภาพประกอบ 19 ระบบอบแห้งแบบกระแสชน



ภาพประกอบ 20 เครื่องเป่าลมแรงดันสูง



ภาพประกอบ 21 เครื่องทำความร้อนแบบไฟฟ้า



ภาพประกอบ 22 วาล์วปรับอัตราการไหล



ภาพประกอบ 23 อุปกรณ์รองรับวัสดุ



ภาพประกอบ 24 ห้องอบแห้ง



ภาพประกอบ 25 เครื่องป้อนวัสดุ



ภาพประกอบ 26 ไซโคลน



ภาพประกอบ 27 มาตรวัดหน่วยพลังงาน



ภาพประกอบ 28 ตัวคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องป้อนวัสดุ



ภาพประกอบ 29 PID Controller



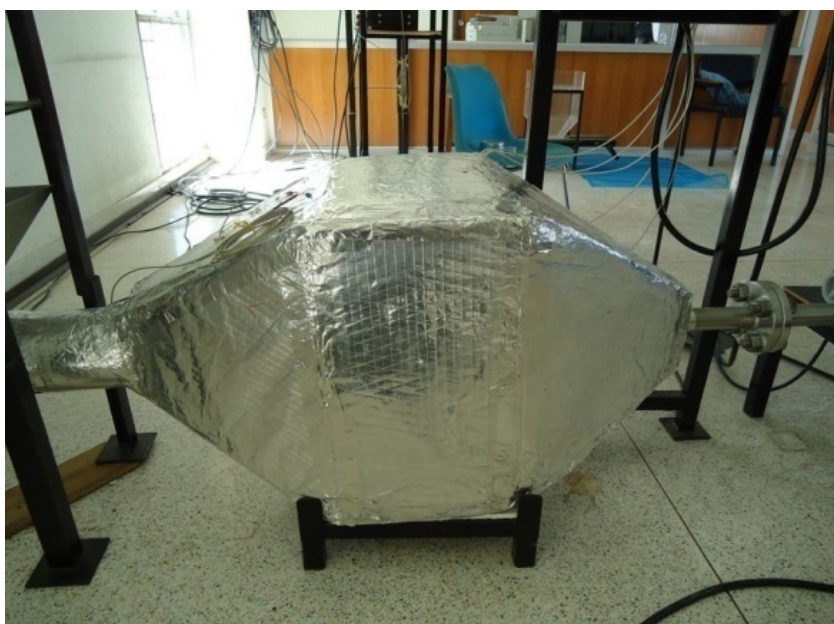
ภาพของระบบอบแห้งแบบพาหะลม



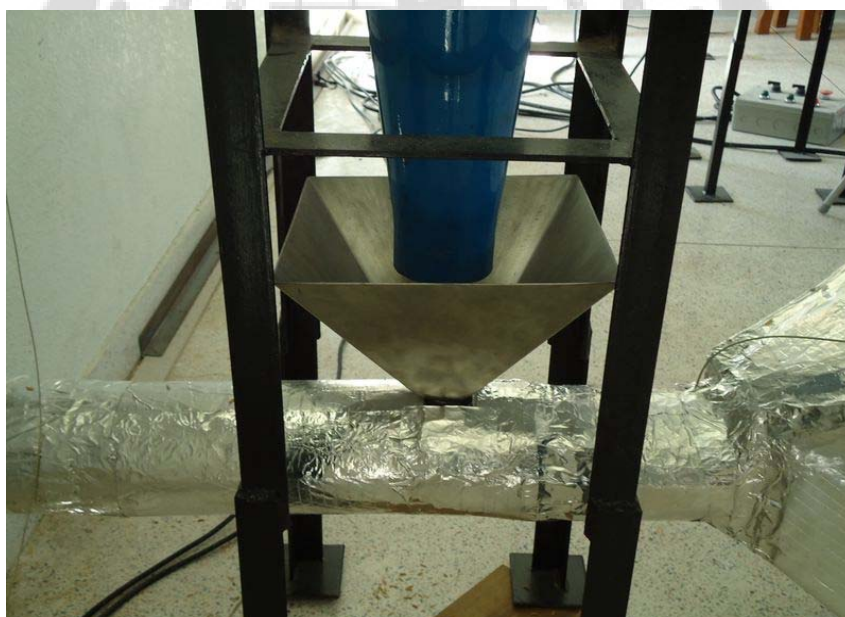
ภาพประกอบ 30 ระบบอบแห้งแบบพาหะลม



ภาพประกอบ 31 เครื่องเป่าลมแรงดันสูง



ภาพประกอบ 32 เครื่องทำความร้อนแบบไฟฟ้า



ภาพประกอบ 33 อุปกรณ์รองรับวัสดุ



ภาพประกอบ 34 ท่ออบแห้ง



ภาพประกอบ 35 ไซโคลน



ภาพประกอบ 36 ชุดควบคุมอุณหภูมิและความเร็วรอบของเครื่องเป่าลม
พร้อมมาตรวัดหน่วยพลังงาน



ภาคผนวก ค

การทดลองหาอัตราการป้อนวัสดุที่เหมาะสมต่อระบบอบแห้ง

การทดลองหาอัตราการป้อนวัสดุที่เหมาะสมต่อระบบอบแห้ง

อัตราการป้อนวัสดุเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีผลกระทบต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง การป้อนวัสดุ (ข้าวเปลือก) เข้าสู่เครื่องอบแห้งทำได้โดยใช้อุปกรณ์ป้อนวัสดุแบบสายพานลำเลียงที่สามารถควบคุมอัตราการป้อนวัสดุได้โดยการปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายให้กับมอเตอร์กระแสตรงที่ใช้เป็นตัวขับเคลื่อนสายพานลำเลียง ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ปรับแรงดันไฟฟ้าคือ ตัวคุมค่าแรงดันไฟฟ้า (Voltage regulator) สำหรับการทดลองในครั้งนี้จะทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงกับอัตราการป้อนวัสดุ และอัตราการป้อนวัสดุที่ทดลองได้นั้นจะเป็นค่าที่เหมาะสมกับระบบอบแห้งนี้ ซึ่งพบว่าอัตราการป้อนวัสดุที่เหมาะสมคือ 22 , 47 และ 62 kg_{dry solid}/h สำหรับการทดลองหาอัตราการป้อนวัสดุมีขั้นตอนและวิธีการดังนี้

วัสดุและอุปกรณ์

1. เครื่องป้อนวัสดุ
2. ตัวคุมค่าแรงดันไฟฟ้า
3. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล
4. นาฬิกาจับเวลา
5. วัสดุ (ข้าวเปลือก)
6. ภาชนะรองรับ

ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

1. นำข้าวเปลือกใส่ในถังของเครื่องป้อนวัสดุ
2. เปิดสวิตซ์ตัวคุมค่าแรงดันไฟฟ้า โดยปรับแรงดันไฟฟ้าที่ 3, 4 และ 5 โวลต์

ตามลำดับ

3. จับเวลาใน 10, 20 และ 30 วินาที แล้วนำข้าวเปลือกที่ออกจากเครื่องป้อนวัสดุ

ไปชั่งน้ำหนัก

4. บันทึกผลการทดลองลงในตารางเพื่อหาอัตราการป้อนวัสดุ
5. ทำการทดลองที่แรงดันไฟฟ้าค่าละ 3 ครั้ง (3, 4 และ 5 โวลต์) ตามลำดับ

ตาราง 18 อัตราการป้อนของเครื่องป้อนวัสดุ (ข้าวเปลือก)

แรงดันไฟฟ้า (Volt)	เวลา (s)	น้ำหนัก (g)	อัตราการป้อน (kg _{dry solid} /h)	ค่าเฉลี่ย อัตราการป้อน (kg _{dry solid} /h)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
3	10	62.60	22.54	22.30	0.25
	10	62.40	22.46		
	10	62.00	22.32		
	20	124.00	22.32		
	20	126.40	22.75		
	20	122.80	22.10		
	30	183.20	21.98		
	30	183.60	22.03		
	30	185.20	22.22		
4	10	130.00	46.80	47.07	0.19
	10	135.80	48.89		
	10	127.60	45.93		
	20	264.40	47.59		
	20	254.80	45.86		
	20	260.00	46.80		
	30	395.00	47.40		
	30	396.40	47.57		
	30	389.60	46.75		

ตาราง 18 (ต่อ)

แรงดันไฟฟ้า (Volt)	เวลา (s)	น้ำหนัก (g)	อัตราการป้อน (kg _{dry solid} /h)	ค่าเฉลี่ย อัตราการป้อน (kg _{dry solid} /h)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
5	10	176.40	63.50		
	10	172.00	61.92		
	10	171.00	61.56		
	20	345.00	62.10		
	20	347.00	62.46	62.22	0.71
	20	350.80	63.14		
	30	511.00	61.32		
	30	517.40	62.09		
	30	515.40	61.85		



การทำความเข้าใจเริ่มต้นของข้าวเปลือก

ในการหาความชื้นที่เราต้องการเพื่อหาความเหมาะสมของข้าวเปลือกก่อนที่จะนำมาทดลองสามารถหาได้ดังนี้

1. นำความชื้นเริ่มต้น (M_{di}) ที่เราหาได้จากข้าวเปลือกปทุมธานี 1 ที่นำมาเป็นวัสดุทดลอง มาหาน้ำหนักมวลแห้ง
2. หาน้ำหนักมวลแห้ง (d) ต่อ 1 มวลกิโลกรัมข้าวเปลือก จากสมการ

$$M_{di} = \frac{(w - d)}{d}$$

แทนค่า $w = 1$ จะได้

$$M_{di} = \frac{(1 - d)}{d}$$

$$d = \frac{1}{(M_{di} + 1)}$$

3. หาน้ำหนักน้ำที่เราต้องเติมต่อมวลกิโลกรัมข้าวเปลือก ($M_{w/kg}$) ซึ่งมีค่าเท่ากับ ความชื้นที่เราต้องการ (M_{df}) ลบด้วยความชื้นเริ่มต้น (M_{di}) แล้วนำผลลัพธ์ที่ได้มาคูณกับน้ำหนักมวลแห้ง (d) ที่หาได้จากข้อ 2 ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$M_{w/kg} = (M_{df} - M_{di}) \times d$$

เมื่อ $M_{w/kg}$ = น้ำหนักน้ำที่ต้องเติมต่อมวลกิโลกรัมข้าวเปลือก

M_{di} = ความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือก

M_{df} = ความชื้นสุดท้ายข้าวเปลือกที่ต้องการ

การคำนวณหาน้ำหนักน้ำที่ต้องเติม

ข้าวเปลือกปทุมธานี 1 มีความชื้นเริ่มต้น = 11.5 % d.b. หาน้ำหนักมวลแห้ง (d) ต่อ 1 มวลกิโลกรัมข้าวเปลือก จากสมการ

$$M_{di} = \frac{(w - d)}{d}$$

แทนค่า $w = 1$ จะได้

$$M_{di} = \frac{(1-d)}{d}$$

$$d = \frac{1}{(M_{di} + 1)}$$

$$d = \frac{1}{(0.115 + 1)}$$

$$d = 0.897 \quad \text{kg}$$

ความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกที่ต้องการ = 28 % d.b. หาน้ำหนักน้ำที่ต้องเติมต่อมวลข้าวเปลือก 1 kg

$$M_{w/kg} = (M_{df} - M_{di}) \times d$$

$$M_{w/kg} = (0.28 - 0.115) \times 0.897$$

$$M_{w/kg} = 0.148 \quad \text{kg}$$

เนื่องจากขณะทำการทดลองทำความชื้นข้าวเปลือก น้ำที่เติมลงในข้าวเปลือกเกิดความสูญเสียขณะคลุกข้าว ดังนั้นจึงทำการเติมน้ำเพิ่มอีก 15% ของน้ำหนักน้ำที่ต้องเติม ดังนั้นน้ำหนักน้ำที่ต้องเติมต่อมวลข้าวเปลือก 1 kg = $0.148 + 0.022 = 0.170$ kg



1. ผลของอุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้ง

ตาราง 19 อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้งแบบกระแสน
(อุณหภูมิ 70 °C, ความเร็วลม 25 m/s, อัตราการป้อนวัสดุ 22 kg/h)

time (s)	T _{di} (°C)	T _{wi} (°C)	T _{de} (°C)	T _{we} (°C)	ΔT _{lm} (°C)
15	71.40	28.20	64.5	29.44	38.99
30	71.20	28.20	64.2	29.44	38.73
45	71.20	28.20	64.0	29.35	38.67
60	71.00	28.20	64.2	29.34	38.69
75	70.80	28.20	64.1	29.39	38.52
90	70.80	28.20	63.1	29.28	38.04
105	70.80	28.20	63.2	29.87	37.78
120	70.70	28.20	63.7	29.37	38.27
135	70.70	28.20	63.7	29.32	38.30
150	70.60	28.20	62.0	29.39	37.29
165	70.70	28.20	63.4	29.56	38.01
180	70.60	28.20	63.0	29.25	37.91
195	70.60	28.20	63.0	29.62	37.71
210	70.60	28.20	62.9	29.52	37.71
225	70.50	28.20	63.8	29.34	38.25
240	70.60	28.20	62.8	29.30	37.78
255	70.60	28.20	62.8	29.36	37.74
270	70.50	28.20	62.6	29.37	37.58
285	70.50	28.20	62.5	29.36	37.53
300	70.60	28.20	62.5	29.11	37.72
Average	70.75	28.20	63.30	29.40	38.06
SD	0.26	0.00	0.69	0.16	0.38

ตาราง 20 อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้งแบบกระแสชน
(อุณหภูมิ 70 °C, ความเร็วลม 25 m/s, อัตราการป้อนวัสดุ 47 kg/h)

time (s)	T _{di} (°C)	T _{wi} (°C)	T _{de} (°C)	T _{we} (°C)	ΔT _{lm} (°C)
15	70.90	28.50	63.60	29.85	37.91
30	71.00	28.50	63.10	29.88	37.67
45	70.90	28.50	63.70	29.78	38.00
60	70.90	28.50	63.40	29.92	37.76
75	70.90	28.50	63.30	29.98	37.68
90	71.10	28.50	63.10	29.86	37.73
105	71.10	28.50	63.90	29.86	38.16
120	71.20	28.50	63.80	29.81	38.18
135	71.10	28.50	63.70	29.82	38.07
150	71.10	28.50	63.60	29.83	38.01
165	71.20	28.50	63.50	29.74	38.06
180	71.20	28.50	63.20	29.86	37.83
195	71.20	28.50	63.40	29.69	38.03
210	71.30	28.50	63.10	29.72	37.90
225	71.20	28.50	63.50	29.71	38.07
240	71.20	28.50	63.10	29.66	37.88
255	71.20	28.50	63.30	29.64	38.00
270	71.30	28.50	63.30	29.69	38.02
285	71.30	28.50	63.20	29.60	38.01
300	71.20	28.50	63.20	29.65	37.94
Average	71.13	28.50	63.40	29.78	37.95
SD	0.14	0.00	0.25	0.10	0.14

ตาราง 21 อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้งแบบกระแสชน
(อุณหภูมิ 70 °C, ความเร็วลม 25 m/s, อัตราการป้อนวัสดุ 62 kg/h)

time (s)	T _{di} (°C)	T _{wi} (°C)	T _{de} (°C)	T _{we} (°C)	ΔT _{lm} (°C)
15	71.50	28.50	63.1	29.12	38.31
30	71.50	28.50	63.7	30.14	38.09
45	71.50	28.50	63.3	30.12	37.88
60	71.60	28.50	63.1	30.09	37.83
75	71.60	28.50	63.9	30.00	38.32
90	71.60	28.50	63.8	30.01	38.26
105	71.60	28.50	63.6	30.01	38.15
120	71.50	28.50	64.5	30.20	38.49
135	71.60	28.50	64.4	30.03	38.57
150	71.70	28.50	64.2	30.01	38.52
165	71.80	28.50	63.2	29.87	38.10
180	71.70	28.50	64.2	29.98	38.54
195	71.70	28.50	64.5	29.34	39.04
210	71.80	28.50	64.6	29.46	39.08
225	71.70	28.50	64.3	29.98	38.59
240	71.80	28.50	64.7	29.59	39.06
255	71.80	28.50	64.8	29.87	38.97
270	71.80	28.50	64.1	30.10	38.46
285	71.80	28.50	64.3	30.02	38.61
300	71.70	28.50	65.5	30.00	39.22
Average	71.67	28.50	64.09	29.90	38.51
SD	0.11	0.00	0.63	0.29	0.20

ตาราง 22 อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้งแบบกระแสชน
(อุณหภูมิ 90 °C, ความเร็วลม 25 m/s, อัตราการป้อนวัสดุ 22 kg/h)

time (s)	T _{di} (°C)	T _{wi} (°C)	T _{de} (°C)	T _{we} (°C)	ΔT _{lm} (°C)
15	91.5	31.00	82.2	31.97	55.21
30	92.0	31.00	82.8	32.01	55.74
45	91.4	31.00	82.5	32.01	55.30
60	91.7	31.00	82.3	32.02	55.33
75	91.4	31.00	82.3	32.10	55.14
90	92.0	31.00	82.4	32.05	55.50
105	91.4	31.00	82.1	32.01	55.08
120	91.4	31.00	82.2	32.03	55.13
135	91.7	31.00	82.3	32.02	55.33
150	91.4	31.00	82.1	31.86	55.16
165	91.7	31.00	82.0	31.80	55.28
180	91.4	31.00	81.9	31.80	55.09
195	91.4	31.00	81.9	32.00	54.98
210	91.7	31.00	81.8	31.73	55.21
225	91.1	31.00	81.9	31.28	55.22
240	91.7	31.00	81.9	31.97	55.14
255	91.3	31.00	81.9	31.30	55.31
270	91.2	31.00	81.8	32.02	54.83
285	91.6	31.00	81.9	32.02	55.07
300	91.1	31.00	81.8	32.01	54.78
Average	91.51	31.00	82.10	31.90	55.19
SD	0.25	0.00	0.27	0.23	0.11

ตาราง 23 อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้งแบบกระแสชน
(อุณหภูมิ 90 °C, ความเร็วลม 25 m/s, อัตราการป้อนวัสดุ 47 kg/h)

time (s)	T _{di} (°C)	T _{wi} (°C)	T _{de} (°C)	T _{we} (°C)	ΔT _{lm} (°C)
15	91.1	30.80	81.9	31.93	54.97
30	91.2	30.80	81.5	31.83	54.86
45	91.0	30.80	82.1	31.82	55.09
60	91.3	30.80	82.1	31.86	55.21
75	91.1	30.80	81.9	31.92	54.98
90	90.8	30.80	81.8	31.98	54.75
105	91.2	30.80	81.8	31.89	54.99
120	91.7	30.80	81.8	31.89	55.22
135	91.1	30.80	81.8	31.88	54.95
150	91.2	30.80	81.7	31.88	54.94
165	91.8	30.80	81.9	31.88	55.33
180	91.4	30.80	81.9	31.86	55.15
195	90.8	30.80	81.8	31.96	54.76
210	91.4	30.80	81.7	31.93	55.01
225	91.1	30.80	81.6	31.96	54.80
240	91.0	30.80	81.8	31.86	54.91
255	91.4	30.80	81.8	31.89	55.08
270	91.4	30.80	81.6	31.93	54.95
285	91.3	30.80	81.6	31.95	54.90
300	90.7	30.80	81.8	31.91	54.74
Average	91.20	30.80	81.80	31.90	54.98
SD	0.28	0.00	0.15	0.04	0.18

ตาราง 24 อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้งแบบกระแสชน
(อุณหภูมิ 90 °C, ความเร็วลม 25 m/s, อัตราการป้อนวัสดุ 62 kg/h)

time (s)	T _{di} (°C)	T _{wi} (°C)	T _{de} (°C)	T _{we} (°C)	ΔT _{lm} (°C)
15	90.80	30.80	80.9	31.71	54.42
30	91.20	30.80	81.5	31.83	54.86
45	90.60	30.80	81.3	31.85	54.46
60	91.10	30.80	81.1	31.67	54.69
75	90.90	30.80	81.2	31.32	54.83
90	90.80	30.80	80.6	31.25	54.50
105	91.60	30.80	80.8	31.74	54.72
120	90.60	30.80	81.4	31.80	54.54
135	91.10	30.80	81.1	32.12	54.44
150	90.70	30.80	80.9	32.19	54.11
165	91.20	30.80	80.8	32.17	54.30
180	90.90	30.80	80.8	32.10	54.20
195	90.80	30.80	80.9	32.13	54.19
210	91.10	30.80	81.0	32.05	54.43
225	90.70	30.80	81.3	32.05	54.40
240	91.10	30.80	81.2	32.07	54.52
255	91.10	30.80	81.2	32.17	54.47
270	90.80	30.80	81.1	32.27	54.22
285	91.20	30.80	81.0	32.26	54.36
300	90.70	30.80	80.9	32.33	54.04
Average	90.95	30.80	81.05	31.95	54.44
SD	0.26	0.00	0.23	0.30	0.22

ตาราง 25 อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้งแบบกระแสน
(อุณหภูมิ 110 °C, ความเร็วลม 25 m/s, อัตราการป้อนวัสดุ 22 kg/h)

time (s)	T _{di} (°C)	T _{wi} (°C)	T _{de} (°C)	T _{we} (°C)	ΔT _{lm} (°C)
15	110.6	33.00	97.3	33.80	70.31
30	110.4	33.00	97.2	33.84	70.15
45	110.5	33.00	97.4	33.84	70.30
60	110.6	33.00	97.1	33.81	70.20
75	109.8	33.00	97.0	33.99	69.68
90	110.9	33.00	97.1	33.90	70.29
105	110.2	33.00	97.8	33.95	70.31
120	110.2	33.00	97.5	33.96	70.15
135	110.7	33.00	97.5	33.91	70.41
150	109.9	33.00	97.6	33.97	70.06
165	110.6	33.00	97.5	33.91	70.36
180	110.6	33.00	97.2	33.97	70.17
195	110.0	33.00	97.2	33.92	69.92
210	110.4	33.00	97.0	33.90	70.01
225	109.6	33.00	96.2	33.94	69.18
240	110.4	33.00	96.5	33.86	69.76
255	110.9	33.00	96.3	33.98	69.82
270	110.3	33.00	96.7	33.91	69.79
285	110.7	33.00	96.4	33.89	69.83
300	110.7	33.00	96.5	33.91	69.87
Average	110.40	33.00	97.05	33.91	70.03
SD	0.36	0.00	0.47	0.06	0.29

ตาราง 26 อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้งแบบกระแสน
(อุณหภูมิ 110 °C, ความเร็วลม 25 m/s, อัตราการป้อนวัสดุ 47 kg/h)

time (s)	T _{di} (°C)	T _{wi} (°C)	T _{de} (°C)	T _{we} (°C)	ΔT _{lm} (°C)
15	110.20	33.00	97.8	33.87	70.36
30	109.60	33.00	97.7	34.02	69.94
45	110.20	33.00	97.8	34.04	70.27
60	110.20	33.00	97.6	34.10	70.13
75	109.80	33.00	97.7	34.09	70.00
90	110.40	33.00	97.4	34.11	70.11
105	109.60	33.00	97.5	34.16	69.76
120	110.20	33.00	97.4	34.10	70.02
135	110.20	33.00	97.4	34.12	70.01
150	109.40	33.00	97.4	34.13	69.63
165	110.20	33.00	97.2	34.07	69.93
180	109.60	33.00	97.3	34.16	69.65
195	109.80	33.00	97.8	34.14	70.02
210	110.40	33.00	97.6	34.09	70.23
225	109.80	33.00	97.5	34.10	69.89
240	110.10	33.00	97.6	34.08	70.09
255	110.00	33.00	97.4	34.10	69.93
270	109.60	33.00	97.3	34.11	69.68
285	110.40	33.00	97.3	34.11	70.05
300	109.90	33.00	97.2	34.12	69.76
Average	109.98	33.00	97.50	34.09	69.98
SD	0.31	0.00	0.20	0.06	0.20

ตาราง 27 อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้งแบบกระแสชน
(อุณหภูมิ 110 °C, ความเร็วลม 25 m/s, อัตราการป้อนวัสดุ 62 kg/h)

time (s)	T _{di} (°C)	T _{wi} (°C)	T _{de} (°C)	T _{we} (°C)	ΔT _{lm} (°C)
15	110.40	33.20	97.2	34.12	69.90
30	109.50	33.20	97.1	34.20	69.38
45	110.40	33.20	97.0	34.24	69.73
60	110.20	33.20	97.3	34.24	69.80
75	109.60	33.20	97.0	34.28	69.34
90	110.50	33.20	97.3	34.33	69.89
105	109.60	33.20	97.2	34.35	69.40
120	110.20	33.20	97.1	34.39	69.61
135	110.40	33.20	97.2	34.39	69.76
150	109.60	33.20	97.0	34.29	69.33
165	110.40	33.20	97.1	34.33	69.74
180	109.60	33.20	97.1	34.37	69.34
195	110.20	33.20	97.0	34.32	69.59
210	110.30	33.20	96.9	34.24	69.63
225	109.80	33.20	97.1	34.21	69.52
240	109.90	33.20	96.9	34.27	69.43
255	109.90	33.20	97.0	34.30	69.47
270	109.20	33.20	97.2	34.33	69.23
285	110.10	33.20	97.2	34.33	69.65
300	109.70	33.20	97.1	34.33	69.41
Average	109.98	33.20	97.10	34.29	69.56
SD	0.38	0.00	0.12	0.07	0.20

ตาราง 28 อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้งแบบพาหะลม
(อุณหภูมิ 70 °C, ความเร็วลม 16 m/s, อัตราการป้อนวัสดุ 22 kg/h)

time (s)	T _{di} (°C)	T _{wi} (°C)	T _{de} (°C)	T _{we} (°C)	ΔT _{lm} (°C)
15	71.80	27.50	52.70	27.96	33.58
30	71.90	27.50	52.60	28.01	33.53
45	71.50	27.50	53.10	28.06	33.63
60	71.00	27.50	53.00	28.04	33.38
75	71.00	27.50	53.20	28.23	33.38
90	71.00	27.50	53.10	28.90	32.91
105	71.00	27.50	53.40	28.12	33.57
120	71.00	27.50	53.50	28.23	33.56
135	71.00	27.50	53.40	28.55	33.31
150	71.00	27.50	53.80	28.08	33.83
165	71.90	27.50	53.80	28.50	33.96
180	71.90	27.50	54.00	28.45	34.11
195	71.90	27.50	54.10	28.15	34.35
210	71.90	27.50	54.20	28.17	34.40
225	71.90	27.50	54.30	28.29	34.39
240	71.90	27.50	54.40	28.19	34.51
255	71.90	27.50	54.50	28.29	34.51
270	71.90	27.50	54.70	28.34	34.60
285	71.90	27.50	54.90	28.45	34.65
300	71.00	27.50	54.90	28.50	34.24
Average	71.52	27.50	53.78	28.28	33.92
SD	0.44	0.00	0.71	0.23	0.50

ตาราง 29 อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้งแบบพาหะลม
(อุณหภูมิ 70 °C, ความเร็วลม 16 m/s, อัตราการป้อนวัสดุ 47 kg/h)

time (s)	T _{di} (°C)	T _{wi} (°C)	T _{de} (°C)	T _{we} (°C)	ΔT _{lm} (°C)
15	71.20	27.2	45.30	28.47	28.27
30	71.30	27.2	45.70	28.54	28.54
45	71.40	27.2	45.90	28.53	28.73
60	71.40	27.2	46.30	28.53	29.01
75	71.50	27.2	46.50	28.42	29.26
90	71.60	27.2	46.90	28.41	29.58
105	71.60	27.2	47.00	28.41	29.65
120	71.60	27.2	47.20	28.43	29.77
135	71.60	27.2	47.40	28.44	29.90
150	71.60	27.2	47.60	28.46	30.02
165	71.70	27.2	48.00	28.47	30.32
180	71.80	27.2	48.20	28.48	30.49
195	71.00	27.2	48.80	28.48	30.57
210	71.10	27.2	49.10	28.48	30.81
225	71.10	27.2	49.40	27.88	31.39
240	71.20	27.2	49.40	28.45	31.06
255	71.10	27.2	49.50	28.03	31.36
270	71.10	27.2	49.50	27.99	31.39
285	71.10	27.2	49.50	27.96	31.40
300	71.20	27.2	49.60	27.93	31.53
Average	71.36	27.20	47.84	28.34	30.17
SD	0.25	0.00	1.45	0.23	1.02

ตาราง 30 อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้งแบบพาหะลม
(อุณหภูมิ 70 °C, ความเร็วลม 16 m/s, อัตราการป้อนวัสดุ 62 kg/h)

time (s)	T _{di} (°C)	T _{wi} (°C)	T _{de} (°C)	T _{we} (°C)	ΔT _{lm} (°C)
15	72.10	27.00	51.60	28.33	32.99
30	72.10	27.00	51.90	28.25	33.23
45	72.20	27.00	52.00	28.15	33.40
60	72.20	27.00	52.30	28.07	33.63
75	72.20	27.00	52.30	27.97	33.69
90	72.10	27.00	52.70	27.93	33.93
105	72.30	27.00	52.90	27.96	34.11
120	72.30	27.00	52.60	28.10	33.84
135	72.40	27.00	53.00	28.26	34.03
150	72.40	27.00	53.10	28.38	34.02
165	72.50	27.00	53.20	28.48	34.06
180	72.40	27.00	53.20	28.53	33.99
195	72.40	27.00	53.10	28.56	33.91
210	72.40	27.00	53.10	28.57	33.90
225	72.50	27.00	53.10	28.58	33.94
240	72.70	27.00	53.10	28.60	34.01
255	72.70	27.00	53.10	28.58	34.02
270	72.70	27.00	53.20	28.58	34.08
285	72.70	27.00	53.40	28.44	34.29
300	72.70	27.00	53.40	28.35	34.35
Average	72.40	27.00	52.82	28.33	33.88
SD	0.22	0.00	0.52	0.23	0.33

ตาราง 31 อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้งแบบพาหะลม
(อุณหภูมิ 90 °C, ความเร็วลม 16 m/s, อัตราการป้อนวัสดุ 22 kg/h)

time (s)	T _{di} (°C)	T _{wi} (°C)	T _{de} (°C)	T _{we} (°C)	ΔT _{lm} (°C)
15	90.60	30.00	66.10	31.39	46.46
30	90.50	30.00	66.40	31.39	46.60
45	90.70	30.00	66.40	31.44	46.65
60	90.60	30.00	66.50	31.26	46.78
75	90.70	30.00	66.60	31.28	46.87
90	90.60	30.00	66.80	31.57	46.77
105	90.80	30.00	67.00	31.53	47.00
120	90.80	30.00	67.10	31.57	47.04
135	90.70	30.00	67.20	31.33	47.20
150	90.70	30.00	67.20	31.34	47.20
165	90.70	30.00	67.40	31.50	47.22
180	90.80	30.00	67.40	31.49	47.27
195	90.80	30.00	67.40	31.62	47.19
210	90.80	30.00	67.70	31.62	47.37
225	90.90	30.00	67.70	31.66	47.39
240	90.80	30.00	67.70	31.75	47.29
255	90.80	30.00	67.70	31.75	47.29
270	90.80	30.00	68.00	31.70	47.50
285	90.80	30.00	68.10	31.60	47.62
300	90.90	30.00	68.10	31.62	47.65
Average	90.74	30.00	67.23	31.52	47.12
SD	0.10	0.00	0.60	0.15	0.33

ตาราง 32 อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้งแบบพาหะลม
(อุณหภูมิ 90 °C, ความเร็วลม 16 m/s, อัตราการป้อนวัสดุ 47 kg/h)

time (s)	T _{di} (°C)	T _{wi} (°C)	T _{de} (°C)	T _{we} (°C)	ΔT _{lm} (°C)
15	89.90	30.40	60.90	30.87	43.10
30	89.90	30.40	61.00	30.91	43.14
45	89.90	30.40	61.10	30.99	43.15
60	89.90	30.40	61.30	30.88	43.35
75	89.90	30.40	61.20	31.03	43.19
90	89.90	30.40	61.30	30.90	43.33
105	89.90	30.40	62.00	30.72	43.89
120	89.90	30.40	62.30	31.01	43.89
135	90.10	30.40	62.30	30.95	44.01
150	90.10	30.40	62.40	30.71	44.23
165	90.20	30.40	62.40	30.78	44.22
180	90.20	30.40	63.10	31.32	44.32
195	90.20	30.40	63.20	31.39	44.34
210	90.20	30.40	63.20	31.34	44.37
225	90.20	30.40	63.30	31.30	44.46
240	90.30	30.40	63.40	31.30	44.56
255	90.20	30.40	63.60	31.34	44.62
270	90.30	30.40	63.80	31.35	44.78
285	90.40	30.40	63.90	31.40	44.85
300	90.40	30.40	64.10	31.58	44.87
Average	90.10	30.40	62.49	31.10	44.04
SD	0.18	0.00	1.07	0.26	0.60

ตาราง 33 อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้งแบบพาหะลม
(อุณหภูมิ 90 °C, ความเร็วลม 16 m/s, อัตราการป้อนวัสดุ 62 kg/h)

time (s)	T _{di} (°C)	T _{wi} (°C)	T _{de} (°C)	T _{we} (°C)	ΔT _{lm} (°C)
15	89.90	30.10	62.50	31.03	44.13
30	90.00	30.10	62.50	31.01	44.18
45	90.00	30.10	62.70	31.59	43.94
60	90.20	30.10	62.60	31.84	43.80
75	90.20	30.10	63.10	31.87	44.10
90	90.20	30.10	63.40	31.10	44.77
105	90.20	30.10	63.40	31.02	44.82
120	90.20	30.10	63.60	30.98	44.97
135	90.20	30.10	63.70	31.87	44.48
150	90.30	30.10	63.80	30.95	45.15
165	90.30	30.10	64.00	30.38	45.63
180	90.30	30.10	64.30	31.35	45.21
195	90.40	30.10	64.20	31.22	45.27
210	90.50	30.10	64.20	31.22	45.32
225	90.50	30.10	64.20	30.51	45.75
240	90.60	30.10	64.20	31.34	45.28
255	90.60	30.10	64.30	30.24	46.02
270	90.50	30.10	64.60	31.21	45.57
285	90.60	30.10	64.60	30.43	46.09
300	90.60	30.10	64.70	31.01	45.79
Average	90.32	30.10	63.73	31.11	45.02
SD	0.22	0.00	0.73	0.47	0.69

ตาราง 34 อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้งแบบพาหะลม
(อุณหภูมิ 110 °C, ความเร็วลม 16 m/s, อัตราการป้อนวัสดุ 22 kg/h)

time (s)	T _{di} (°C)	T _{wi} (°C)	T _{de} (°C)	T _{we} (°C)	ΔT _{lm} (°C)
15	109.80	32.80	70.60	32.56	55.25
30	109.80	32.80	70.80	32.56	55.38
45	109.80	32.80	71.20	32.67	55.56
60	109.10	32.80	71.40	32.69	55.40
75	109.80	32.80	71.50	32.67	55.75
90	109.80	32.80	71.80	32.72	55.91
105	109.80	32.80	72.10	32.72	56.10
120	109.00	32.80	72.20	32.81	55.79
135	109.80	32.80	72.30	32.68	56.26
150	109.10	32.80	72.30	32.85	55.86
165	109.10	32.80	73.20	32.74	56.50
180	109.10	32.80	73.30	32.88	56.47
195	109.30	32.80	73.30	32.78	56.62
210	109.10	32.80	73.40	32.81	56.58
225	109.10	32.80	73.30	32.91	56.45
240	108.10	32.80	73.30	32.99	55.99
255	109.30	32.80	73.40	32.89	56.61
270	109.40	32.80	73.40	32.92	56.63
285	108.40	32.80	73.50	32.98	56.25
300	108.40	32.80	73.10	32.84	56.09
Average	109.26	32.80	72.47	32.78	56.08
SD	0.52	0.00	0.97	0.13	0.44

ตาราง 35 อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้งแบบพาหะลม
(อุณหภูมิ 110 °C, ความเร็วลม 16 m/s, อัตราการป้อนวัสดุ 47 kg/h)

time (s)	T _{di} (°C)	T _{wi} (°C)	T _{de} (°C)	T _{we} (°C)	ΔT _{lm} (°C)
15	108.10	32.80	62.30	33.27	48.54
30	108.70	32.80	63.60	33.28	49.67
45	109.10	32.80	63.10	33.32	49.45
60	109.10	32.80	63.50	33.26	49.77
75	109.00	32.80	64.70	33.21	50.59
90	109.10	32.80	64.10	33.05	50.33
105	109.40	32.80	64.50	33.03	50.73
120	109.40	32.80	64.20	33.19	50.42
135	109.50	32.80	64.20	33.05	50.55
150	109.10	32.80	65.00	33.22	50.83
165	109.10	32.80	65.20	33.10	51.05
180	109.10	32.80	65.20	33.21	50.98
195	109.10	32.80	66.10	33.00	51.73
210	109.10	32.80	66.40	33.15	51.83
225	109.00	32.80	66.50	33.17	51.84
240	109.00	32.80	67.10	33.20	52.23
255	109.10	32.80	67.20	33.10	52.40
270	109.00	32.80	67.40	33.20	52.43
285	109.10	32.80	67.50	33.18	52.54
300	109.00	32.80	67.90	33.28	52.70
Average	109.06	32.80	65.29	33.17	51.05
SD	0.28	0.00	1.64	0.09	1.13

ตาราง 36 อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้งแบบพาหะลม
(อุณหภูมิ 110 °C, ความเร็วลม 16 m/s, อัตราการป้อนวัสดุ 62 kg/h)

time (s)	T _{di} (°C)	T _{wi} (°C)	T _{de} (°C)	T _{we} (°C)	ΔT _{lm} (°C)
15	109.20	32.80	68.70	33.56	53.13
30	109.20	32.80	69.10	33.63	53.34
45	109.60	32.80	69.40	33.59	53.72
60	109.60	32.80	69.10	33.61	53.51
75	109.70	32.80	69.20	33.58	53.64
90	109.60	32.80	70.00	33.59	54.12
105	109.70	32.80	70.20	33.57	54.30
120	109.80	32.80	70.3	33.63	54.36
135	109.80	32.80	71.20	33.51	55.02
150	109.80	32.80	71.20	33.53	55.01
165	109.80	32.80	71.20	33.41	55.09
180	109.10	32.80	71.20	33.42	54.80
195	109.00	32.80	72.30	33.13	55.65
210	109.00	32.80	72.30	33.49	55.42
225	109.00	32.80	72.40	33.42	55.53
240	109.00	32.80	73.00	33.32	55.97
255	109.20	32.80	73.10	33.29	56.13
270	109.30	32.80	73.20	33.25	56.26
285	109.30	32.80	73.40	33.25	56.39
300	109.30	32.80	73.80	33.20	56.67
Average	109.40	32.80	71.22	33.45	54.92
SD	0.31	0.00	1.65	0.16	1.07

2. ผลการทดลองหาความชื้นของวัสดุ

ตาราง 37 ผลการทดลองหาความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการป้อน (kg/h)	น้ำหนักวัสดุ ก่อนอบ (g)	น้ำหนักวัสดุ หลังอบ (g)	% d.b.	ค่าเฉลี่ย % d.b.	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
70	22	25.00	19.40	28.87	28.42	0.76
		25.00	19.40	28.87		
		25.00	19.60	27.55		
	47	25.00	19.60	27.55	27.99	0.76
		25.00	19.60	27.55		
		25.00	19.40	28.87		
	62	25.00	19.60	27.55	27.99	0.76
		25.00	19.40	28.87		
		25.00	19.60	27.55		
	22	25.00	19.60	27.55	28.42	0.76
		25.00	19.40	28.87		
		25.00	19.40	28.87		
90	47	25.00	19.40	28.87	27.99	0.76
		25.00	19.60	27.55		
		25.00	19.60	27.55		
	62	25.00	19.60	27.55	27.99	0.76
		25.00	19.60	27.55		
		25.00	19.40	28.87		
	22	25.00	19.60	27.55	27.99	0.76
		25.00	19.60	27.55		
		25.00	19.40	28.87		
	47	25.00	19.60	27.55	27.99	0.76
		25.00	19.60	27.55		
		25.00	19.40	28.87		
110	47	25.00	19.60	27.55	28.42	0.76
		25.00	19.40	28.87		
		25.00	19.40	28.87		
	62	25.00	19.60	27.55	28.42	0.76
		25.00	19.40	28.87		
		25.00	19.40	28.87		

ตาราง 38 ผลการทดลองหาความชื้นหลังการอบแห้งวัสดุของระบบอบแห้งแบบกระแสน

อุณหภูมิ (° C)	อัตราการป้อน (kg/h)	น้ำหนักวัสดุ ก่อนอบ (g)	น้ำหนักวัสดุ หลังอบ (g)	% d.b.	ค่าเฉลี่ย % d.b.	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
70	22	27.60	21.80	26.60	26.43	0.20
		26.00	20.60	26.21		
		25.80	20.40	26.47		
	47	26.60	21.20	25.44	25.66	0.22
		28.40	22.60	25.67		
		29.20	23.20	25.87		
	62	25.80	20.60	25.24	25.22	0.22
		25.00	20.00	25.00		
		28.20	22.60	25.43		
	22	27.80	22.20	25.22	25.21	0.22
		29.00	23.20	25.00		
		28.60	22.80	25.43		
90	47	29.40	23.60	24.58	24.31	0.27
		27.60	22.20	24.32		
		25.80	20.80	24.04		
	62	28.80	23.20	24.14	24.24	0.24
		26.80	21.60	24.07		
		25.40	20.40	24.51		
	22	27.40	22.40	22.32	22.46	0.34
		25.80	21.00	22.85		
		26.40	21.60	22.22		
	47	27.00	22.00	22.72	22.62	0.25
		28.00	22.80	22.80		
		25.20	20.60	22.33		
110	62	27.00	22.00	22.72	22.55	0.16
		27.20	22.20	22.52		
		28.40	23.20	22.41		

ตาราง 39 ผลการทดลองหาความชื้นหลังการอบแห้งวัสดุของระบบอบแห้งแบบกระแสขนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลม

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการป้อน (kg/h)	น้ำหนักวัสดุ ก่อนอบ (g)	น้ำหนักวัสดุ หลังอบ (g)	% d.b.	ค่าเฉลี่ย % d.b.	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
70	22	26.80	22.00	21.82	21.82	0.20
		26.60	21.80	22.01		
		27.00	22.20	21.62		
	47	25.20	20.80	21.16	21.30	0.17
		26.00	21.40	21.49		
		29.60	24.40	21.27		
	62	27.60	22.80	21.05	21.09	0.13
		27.40	22.60	21.24		
		28.80	23.80	21.00		
	22	27.00	22.40	20.53	20.92	0.38
		29.40	24.40	20.49		
		26.20	21.80	20.18		
90	47	27.00	22.40	20.53	20.40	0.19
		29.40	24.40	20.49		
		26.20	21.80	20.18		
	62	26.00	21.60	20.37	20.23	0.21
		26.40	22.00	20.00		
		28.40	23.60	20.34		
	22	25.80	21.80	18.35	18.69	0.30
		26.40	22.20	18.91		
		27.80	23.40	18.80		
	47	29.00	24.40	18.85	18.89	0.06
		25.20	21.20	18.87		
		27.60	23.20	18.97		
110	62	28.00	23.60	18.64	18.63	0.12
		25.60	21.60	18.51		
		26.60	22.40	18.75		

3. ผลการทดลองการใช้พลังงานของระบบอบแห้ง

ตาราง 40 ผลการทดลองการใช้พลังงานของระบบอบแห้ง

ระบบอบแห้ง	เงื่อนไขการทดลอง			E_{blower} (kWh)	E_{heater} (kWh)
	T	W_p	V		
	($^{\circ}\text{C}$)	($\text{kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$)	(m/s)		
กระแสน	70	22	25	0.065	0.020
	70	47	25	0.065	0.020
	70	62	25	0.065	0.020
	90	22	25	0.065	0.030
	90	47	25	0.065	0.030
	90	62	25	0.065	0.030
	110	22	25	0.065	0.050
	110	47	25	0.065	0.050
	110	62	25	0.065	0.050
พาหะลม	70	22	16	0.031	0.020
	70	47	16	0.031	0.020
	70	62	16	0.031	0.020
	90	22	16	0.031	0.025
	90	47	16	0.031	0.025
	90	62	16	0.031	0.025
	110	22	16	0.031	0.040
	110	47	16	0.031	0.040
	110	62	16	0.031	0.040

4. ผลของคุณภาพข้าวหลังการอบแห้ง

ในการวิเคราะห์ด้านคุณภาพข้าวนั้น จะเก็บตัวอย่างข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งไปทำการวิเคราะห์คุณภาพข้าว ณ ศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี ซึ่งผลการทดลองแสดงดังตาราง 41 และตาราง 42

ตาราง 41 คุณภาพข้าวหลังการอบแห้งของระบบอบแห้งแบบกระแสนอนอย่างเดี่ยว

T (° C)	เงื่อนไข		ข้าวเต็ม	ความขาว
	W_p (kg _{dry solid} /h)	V (m/s)	เมล็ด (%)	
70	22	25	39.0	35.5
70	47	25	38.4	37.6
70	62	25	36.0	37.7
90	22	25	37.6	36.0
90	47	25	38.0	36.8
90	62	25	37.6	37.1
110	22	25	32.8	36.5
110	47	25	29.0	36.5
110	62	25	28.2	36.3
อ้างอิง			33.2	37.7

หมายเหตุ อ้างอิง = ตัวอย่างข้าวเปลือกก่อนการทดลองที่แห้งตามธรรมชาติ

ตาราง 42 คุณภาพข้าวหลังการอบแห้งของระบบอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่อง

เงื่อนไข				ข้าวเต็ม	ความขาว
T	W _p	V _{impinging}	V _{pneumatic}	เมล็ด	
(°C)	(kg _{dry solid} /h)	(m/s)	(m/s)	(%)	
70	22	25	16	34.8	36.0
70	47	25	16	34.0	37.7
70	62	25	16	33.2	36.4
90	22	25	16	32.8	36.0
90	47	25	16	28.8	36.0
90	62	25	16	29.6	35.4
110	22	25	16	28.0	35.8
110	47	25	16	28.2	35.9
110	62	25	16	28.2	35.7
อ้างอิง				33.2	37.7

หมายเหตุ อ้างอิง = ตัวอย่างข้าวเปลือกก่อนการทดลองที่แห้งตามธรรมชาติ

เปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ด หาได้จาก

1. ชั่งน้ำหนักข้าวเปลือกที่ทำความสะอาดแล้วตัวอย่างละ 250 กรัม
2. นำข้าวเปลือกไปกะเทาะเปลือกด้วยเครื่องกะเทาะเปลือกจนเปลือกหลุดออกหมด
3. นำข้าวกลิ้งที่ได้ไปขัดขาวด้วยเครื่องขัดขาว แล้วนำข้าวสารที่ได้ไปแยกส่วนที่เป็นข้าวเต็มเมล็ดและข้าวหักออกจากกันด้วยเครื่องคัดแยกเมล็ดข้าวหลังจากนั้นชั่งน้ำหนักข้าวเต็มเมล็ด

4. คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดได้จาก

$$\text{เปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ด} = (\text{น้ำหนักข้าวเต็มเมล็ด} / \text{น้ำหนักข้าวเปลือก}) \times 100$$

ค่าความขาว หาได้จาก การวัดค่าจากเครื่องวัดความขาว Kett รุ่น C-300



1. การคำนวณค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร

ตัวอย่างการคำนวณค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรของระบบอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่อง ในกรณีเงื่อนไขการทดลอง ความเร็วอากาศขาเข้าพัดลมระบบอบแห้งแบบกระแสนที่ 25 m/s อุณหภูมิอากาศที่ใช้ในการอบแห้งที่ 110 °C อัตราการป้อนวัสดุที่ 62 kg_{dry solid} /h และควบคุมความเร็วอากาศในระบบอบแห้งแบบพาหะลมที่ 16 m/s ทำงานอย่างต่อเนื่อง

อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร จากสมการ (2-4)

$$N_v = \frac{W_p(X_i - X_e)}{V_r}$$

ระบบอบแห้งแบบกระแสน

อัตราการป้อนวัสดุ $W_p = 62 \text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$

ปริมาตรห้องอบแห้ง $V_r = 0.0177 \text{ m}^3$

ความชื้นวัสดุเริ่มต้น $X_i = 0.2842 \text{ kg/kg (d.b.)}$

ความชื้นวัสดุสุดท้าย $X_e = 0.2255 \text{ kg/kg (d.b.)}$

$$N_v = \frac{W_p(X_i - X_e)}{V_r}$$

$$= \frac{62 \times (0.2842 - 0.2255)}{0.0177}$$

$$= 205.62 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3 \text{ h}$$

ระบบอบแห้งแบบพาหะลม

อัตราการป้อนวัสดุ $W_p = 62 \text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$

ปริมาตรห้องอบแห้ง $V_r = 0.0197 \text{ m}^3$

ความชื้นวัสดุเริ่มต้น $X_i = 0.2255 \text{ kg/kg (d.b.)}$

ความชื้นวัสดุสุดท้าย $X_e = 0.1863 \text{ kg/kg (d.b.)}$

$$N_v = \frac{W_p(X_i - X_e)}{V_r}$$

$$= \frac{62 \times (0.2255 - 0.1863)}{0.0197}$$

$$= 123.26 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3 \text{ h}$$

ดังนั้น อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรของระบบอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่อง หาได้จาก

$$N_{V \text{ total}} = N_{V \text{ impinging}} + N_{V \text{ pneumatic}}$$

$$N_{V \text{ total}} = 205.62 + 123.26$$

$$= 328.88 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3 \text{ h}$$

2. การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร

ตัวอย่างการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรของระบบอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่อง ในกรณีเงื่อนไขการทดลอง ความเร็วอากาศขาเข้าพัดลมระบบอบแห้งแบบกระแสนที่ 25 m/s อุณหภูมิอากาศที่ใช้ในการอบแห้งที่ 110 °C อัตราการป้อนวัสดุที่ 62 kg_{dry solid}/h และควบคุมความเร็วอากาศในระบบอบแห้งแบบพาหะลมที่ 16 m/s ทำงานอย่างต่อเนื่อง

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร จากสมการ (2-5)

$$h_V = \frac{W_p(X_i - X_e)\lambda}{V_r \Delta T_{lm}}$$

ระบบอบแห้งแบบกระแสน

อัตราการป้อนวัสดุ $W_p = 62 \text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$

ปริมาตรห้องอบแห้ง $V_r = 0.0177 \text{ m}^3$

ความชื้นวัสดุเริ่มต้น $X_i = 0.2842 \text{ kg/kg (d.b.)}$

ความชื้นวัสดุสุดท้าย $X_e = 0.2255 \text{ kg/kg (d.b.)}$

ความร้อนแฝงของการระเหย $\lambda = 2230200 \text{ J/kg}$

ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยลอการิทึม ΔT_{lm} จากสมการ (2-6)

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_d - T_w)_e - (T_d - T_w)_i}{\ln[(T_d - T_w)_e / (T_d - T_w)_i]}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta T_{lm} &= \frac{(97.10 - 34.29) - (109.98 - 33.20)}{\ln[(97.10 - 34.29)/(109.98 - 33.20)]} \\
 &= 69.56 \text{ }^{\circ}\text{C} \\
 &= 342.71 \text{ K} \\
 h_V &= \frac{W_p(X_i - X_e)\lambda}{V_r \Delta T_{lm}} \\
 &= \frac{62 \times (0.2842 - 0.2255) \times 2230200}{0.0177 \times 342.71 \times 3600} \\
 &= 371.68 \text{ W/m}^3 \text{ K}
 \end{aligned}$$

ระบบอบแห้งแบบพาหะลม

อัตราการป้อนวัสดุ	W_p	= 62 kg _{dry solid} /h
ปริมาตรห้องอบแห้ง	V_r	= 0.0197 m ³
ความชื้นวัสดุเริ่มต้น	X_i	= 0.2255 kg/kg (d.b.)
ความชื้นวัสดุสุดท้าย	X_e	= 0.1863 kg/kg (d.b.)
ความร้อนแฝงของการระเหย	λ	= 2230200 J/kg
ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยลอการิทึม	ΔT_{lm}	จากสมการ (2-6)

$$\begin{aligned}
 \Delta T_{lm} &= \frac{(T_d - T_w)_e - (T_d - T_w)_i}{\ln[(T_d - T_w)_e / (T_d - T_w)_i]} \\
 \Delta T_{lm} &= \frac{(71.22 - 33.45) - (109.40 - 32.80)}{\ln[(71.22 - 33.45)/(109.40 - 32.80)]} \\
 &= 54.92 \text{ }^{\circ}\text{C} \\
 &= 328.08 \text{ K} \\
 h_V &= \frac{W_p(X_i - X_e)\lambda}{V_r \Delta T_{lm}} \\
 &= \frac{62 \times (0.2255 - 0.1863) \times 2230200}{0.0197 \times 328.08 \times 3600} \\
 &= 232.77 \text{ W/m}^3 \text{ K}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น สมบัติประสิทธิภาพถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรของระบบอบแห้งแบบกระแสนวน
รวมกับการอบแห้งแบบพาหะลมหาได้จาก

$$h_{V \text{ total}} = h_{V \text{ impinging}} + h_{V \text{ pneumatic}}$$

$$= 371.68 + 232.77$$

$$= 604.45 \text{ W/m}^3 \text{ K}$$

3. การคำนวณค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ตัวอย่างการคำนวณค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของระบบอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่อง ในกรณีเงื่อนไขการทดลอง ความเร็วอากาศขาเข้าพัดลมระบบอบแห้งแบบกระแสนที่ 25 m/s อุณหภูมิอากาศที่ใช้ในการอบแห้งที่ 110 °C อัตราการป้อนวัสดุที่ 62 kg_{dry solid} /h และควบคุมความเร็วอากาศในระบบอบแห้งแบบพาหะลมที่ 16 m/s ทำงานอย่างต่อเนื่อง

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ จากสมการ (2-7)

$$\text{SEC} = \frac{E}{m_w}$$

ปริมาณน้ำที่นำออกจากวัสดุ จากสมการ (2-8)

$$m_w = \dot{m}_a \Delta w t$$

ระบบอบแห้งแบบกระแสน

ค่าพลังงานไฟฟ้าที่เครื่องเป่าลมแรงดันสูงในช่วง 5 นาที

$$E_{\text{blower}} = 0.065 \text{ kWh} = 0.234 \text{ MJ}$$

ค่าพลังงานไฟฟ้าที่เครื่องทำความร้อนแบบไฟฟ้าในช่วง 5 นาที

$$E_{\text{heater}} = 0.05 \text{ kWh} = 0.18 \text{ MJ}$$

อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ

$$\dot{m}_a = \rho_a VA$$

ความหนาแน่นของอากาศขาเข้าที่สภาวะ $T_{\text{db,in}} = 109.98 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{wb,in}} = 33.20 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $P_a = 1.013 \text{ bar}$ จะได้ $\rho_a = 0.9224 \text{ kg/m}^3$ (จากแผนภูมิไซโครเมตริก)

ความเร็วของอากาศขาเข้า

$$V = 25 \text{ m/s} = 1,500 \text{ m/min}$$

พื้นที่หน้าตัดท่อส่งอากาศขาเข้าห้องอบแห้ง

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \times (0.04)^2}{4} = 0.001256 \text{ m}^2$$

อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ

$$\begin{aligned}\dot{m}_a &= 0.9224 \times 1,500 \times 0.001256 \\ &= 1.737 \text{ kg}_{\text{dry air}}/\text{min}\end{aligned}$$

เนื่องจากอากาศไหลเข้าห้องอบแห้งทั้งสองด้าน ดังนั้น อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ

รวม จะได้ $\dot{m}_a = 3.474 \text{ kg}_{\text{dry air}}/\text{min}$

ผลต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นของอากาศขาเข้าและขาออกจากห้องอบแห้ง, Δw

ด้านขาเข้าที่สภาวะ $T_{\text{db,in}} = 109.98^\circ\text{C}$, $T_{\text{wb,in}} = 33.20^\circ\text{C}$ จะได้

$$w_{\text{in}} = 0.0011 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dry air}} \text{ (จากแผนภูมิไซโครเมตริก)}$$

ด้านขาออกที่สภาวะ $T_{\text{db,out}} = 97.10^\circ\text{C}$, $T_{\text{wb,out}} = 34.29^\circ\text{C}$ จะได้

$$w_{\text{out}} = 0.0088 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dry air}} \text{ (จากแผนภูมิไซโครเมตริก)}$$

ดังนั้นผลต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นของอากาศขาเข้าและอากาศขาออกจากห้อง

อบแห้งจะได้

$$\begin{aligned}\Delta w &= 0.0088 - 0.0011 \\ &= 0.0077 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dry air}}\end{aligned}$$

เวลาในการทดสอบ

$$t = 5 \text{ min}$$

ดังนั้นปริมาณน้ำที่นำออกจากวัสดุ จะได้

$$\begin{aligned}m_w &= 3.474 \times 0.0077 \times 5 \\ &= 0.134 \text{ kg}_{\text{water}}\end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องเป่าลมแรงดันสูง จะได้

$$\text{SEC}_{\text{blower}} = \frac{E_{\text{blower}}}{m_w} = \frac{0.234}{0.134} = 1.75 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}_{\text{water}}}$$

ดังนั้น ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องทำความร้อนแบบไฟฟ้า จะได้

$$\text{SEC}_{\text{heater}} = \frac{E_{\text{heater}}}{m_w} = \frac{0.18}{0.134} = 1.34 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}_{\text{water}}}$$

ดังนั้น ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะทั้งหมดของเครื่องอบแห้งแบบกระแสนจะ

$$\text{SEC}_{\text{total}} = \text{SEC}_{\text{blower}} + \text{SEC}_{\text{heater}}$$

$$\text{SEC}_{\text{total}} = 1.75 + 1.34 = 3.09 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}_{\text{water}}}$$

ระบบอบแห้งแบบพาหะลม

ค่าพลังงานไฟฟ้าที่เครื่องเป่าลมแรงดันสูงในช่วง 5 นาที

$$E_{\text{blower}} = 0.031 \text{ kWh} = 0.111 \text{ MJ}$$

ค่าพลังงานไฟฟ้าที่เครื่องทำความร้อนแบบไฟฟ้าในช่วง 5 นาที

$$E_{\text{heater}} = 0.04 \text{ kWh} = 0.144 \text{ MJ}$$

อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ

$$\dot{m}_a = \rho_a VA$$

ความหนาแน่นของอากาศเข้าที่สภาวะ $T_{\text{db,in}} = 109.40^\circ\text{C}$, $T_{\text{wb,in}} = 32.80^\circ\text{C}$, $P_a = 1.013 \text{ bar}$ จะได้ $\rho_a = 0.922 \text{ kg/m}^3$ (จากแผนภูมิไซโครเมตริก)

ความเร็วของอากาศเข้า

$$V = 16 \text{ m/s} = 960 \text{ m/min}$$

พื้นที่หน้าตัดท่อส่งอากาศเข้าห้องอบแห้ง

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \times (0.04)^2}{4} = 0.001256 \text{ m}^2$$

อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ

$$\begin{aligned} \dot{m}_a &= 0.922 \times 960 \times 0.001256 \\ &= 1.111 \text{ kg}_{\text{dry air}}/\text{min} \end{aligned}$$

ผลต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นของอากาศเข้าและขาออกจากห้องอบแห้ง, Δw

ด้านขาเข้าที่สภาวะ $T_{\text{db,in}} = 109.40^\circ\text{C}$, $T_{\text{wb,in}} = 32.80^\circ\text{C}$ จะได้

$$w_{\text{in}} = 0.000355 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dry air}} \text{ (จากแผนภูมิไซโครเมตริก)}$$

ด้านขาออกที่สภาวะ $T_{\text{db,out}} = 71.22^\circ\text{C}$, $T_{\text{wb,out}} = 33.45^\circ\text{C}$ จะได้

$$w_{\text{out}} = 0.01732 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dry air}} \text{ (จากแผนภูมิไซโครเมตริก)}$$

ดังนั้นผลต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นของอากาศเข้าและอากาศขาออกจากห้องอบแห้งจะได้

$$\begin{aligned} \Delta w &= 0.01732 - 0.000355 \\ &= 0.01696 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dry air}} \end{aligned}$$

เวลาในการทดสอบ

$$t = 5 \text{ min}$$

ดังนั้นปริมาณน้ำที่นำออกจากวัสดุ จะได้

$$\begin{aligned} m_w &= 1.111 \times 0.01696 \times 5 \\ &= 0.094 \text{ kg}_{\text{water}} \end{aligned}$$

ระบบอบแห้งแบบกระแสน้ำวนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่อง ปริมาณน้ำที่นำออกจากวัสดุทั้งหมดจะได้

$$m_{w \text{ total}} = m_{w \text{ impinging}} + m_{w \text{ pneumatic}}$$

$$m_{w \text{ total}} = 0.134 + 0.094 = 0.228 \text{ kg}_{\text{water}}$$

ดังนั้น ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องเป่าลมแรงดันสูง จะได้

$$\begin{aligned} SEC_{\text{blower, total}} &= \frac{E_{\text{blower, impinging}}}{m_{w \text{ total}}} + \frac{E_{\text{blower, pneumatic}}}{m_{w \text{ total}}} \\ &= \frac{0.234}{0.228} + \frac{0.111}{0.228} \\ &= 1.03 + 0.48 \\ &= 1.51 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}_{\text{water}}} \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องทำความร้อนแบบไฟฟ้า จะได้

$$\begin{aligned} SEC_{\text{heater, total}} &= \frac{E_{\text{heater, impinging}}}{m_{w \text{ total}}} + \frac{E_{\text{heater, pneumatic}}}{m_{w \text{ total}}} \\ &= \frac{0.180}{0.228} + \frac{0.144}{0.228} \\ &= 0.79 + 0.63 \\ &= 1.42 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}_{\text{water}}} \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะรวมทั้งหมดของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำวนรวมกับการอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่องจะได้

$$\begin{aligned} SEC_{\text{total}} &= SEC_{\text{blower, total}} + SEC_{\text{heater, total}} \\ SEC_{\text{total}} &= 1.51 + 1.42 = 2.93 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}_{\text{water}}} \end{aligned}$$



ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล

นายปวิวัติ คมวชิรกุล

วันเดือนปีเกิด

25 พฤษภาคม 2521

สถานที่เกิด

อำเภอนาโพธิ์ จังหวัดบุรีรัมย์

สถานที่อยู่ปัจจุบัน

67/210 ซอยพหลโยธิน 69 ถนนพหลโยธิน แขวงคลองถนน

เขตบางเขน กรุงเทพฯ 10220

ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน

วิศวกร

สถานที่ทำงานปัจจุบัน

บริษัทชิงเจนเกิน (ประเทศไทย) จำกัด

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2544

ปริญญาตรี

วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

พ.ศ. 2554

ปริญญาโท

การจัดการทางวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์

จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

