

การลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทางวิศวกรรม

พฤษภาคม 2555

การลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทางวิศวกรรม

พฤษภาคม 2555

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทางวิศวกรรม

พฤษภาคม 2555

ภมร บัวทุม. (2555). การลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง.

ปริญญาานิพนธ์ วศ.ม. (การจัดการทางวิศวกรรม). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม:

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิตติ สถาพรประสาธน์, ดร. วิชชากร จารุศิริ.

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงการลดความชื้นข้าวเปลือกโดยใช้เครื่องอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้งกำหนดให้วัสดุเคลื่อนที่เป็นวิถีโค้งตามรัศมีความโค้งของห้องอบแห้ง ซึ่งให้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้ง โดยเครื่องอบแห้งชนิดนี้จะเหมาะสำหรับการลดความชื้นที่อยู่บริเวณผิวของวัสดุให้ลดลงอย่างรวดเร็ว และกระบวนการอบแห้งจะเกิดขึ้นเฉพาะในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของ อุณหภูมิอากาศด้านเข้า อัตราการป้อนวัสดุและปริมาตรห้องอบแห้ง ที่มีผลต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งในรูปแบบของอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ สำหรับการทดลองได้ใช้ข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 28 % (d.b.) ความเร็วของอากาศด้านเข้า 25 m/s อุณหภูมิอากาศด้านเข้าระหว่าง 70 – 110 °C และอัตราการป้อนวัสดุระหว่าง 20 - 56 kg_{dry solid}/h จากผลการทดลองพบว่า เครื่องอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้งที่มีปริมาตรห้องอบแห้งขนาด 50 และ 20 ลิตร สามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกได้ 5.24 ถึง 5.5 % (d.b.) ตามลำดับ ภายในเวลา 1.72 – 1.90 วินาที เปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดเฉลี่ยเท่ากับ 1.84 % และค่าความขาวเฉลี่ยของข้าวสารเท่ากับ 32.37 % โดยที่อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรมีค่าสูงสุดประมาณ 153.90 kg_{water}/m³h ขณะที่สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรมีค่าสูงสุดประมาณ 279.40 W/m³K และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าต่ำสุด 1.08 MJ/kg_{water}

คำสำคัญ: ข้าวเปลือก การอบแห้งแบบกระแสน อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร

Paddy Dehydration Process Using Tangential Horizontal Impinging Stream Dryer

AN ABSTRACT

BY

PHAMORN BUATUM



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

May 2012

Phamorn Buatum. (2012). *Paddy Dehydration Process Using Tangential Horizontal Impinging Stream Dryer*. Master Thesis, M.Eng. (Engineering Management).
Bangkok: Graduate school, Srinakharinwirot University. Advisor Committee:
Asst. Prof. Dr. Kittisathapornprasath, Dr. Witchakorn jarusiri.

This research was proposed to study of paddy dehydration process using tangential horizontal impinging stream dryer, using hot air as the drying medium. This type of dryer are therefore an excellent to flash dryer for removing surface moisture from particles in the unhindered drying period. The objective of this study was thus to investigate the effect of various operating parameters, i.e., inlet air temperature, particles feed rate, volumetric of drying chamber, on the overall performance in terms of the volumetric water evaporation rate and volumetric heat transfer coefficient and specific energy consumption. In this study, paddy had initial moisture content of about 28% (d.b.), velocity inlet air 25 m/s, inlet air temperature from 70 to 110 °C and particles feed rate from 20 to 56 kg_{dry solid}/h. From the experimental result of the drying chamber volume 50 and 20 liter, the dryer could reduce the moisture content of paddy by 5.24 to 5.5 % (d.b.) within 1.72 – 1.90, head rice yield average 1.84 % and whiteness average 32.37 %. The maximum volumetric water evaporation rate was found to be around 153.90 kg_{water}/m³h while the maximum volumetric heat transfer coefficient was around 279.40 W/m³K and the lowest total specific energy consumption was 1.08 MJ/kg_{water}.

Keywords: Paddy, Impinging stream drying, volumetric water evaporation rate, volumetric heat transfer coefficient.

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

การลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง

ของ

ภมร บัวทุม

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทางวิศวกรรม

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย สันติวัฒนกุล)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. 2555

คณะกรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์

คณะกรรมการสอบปากเปล่า

.....ประธาน

.....ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติ สถาพรประสาธน์)

(อาจารย์ ดร. อาจรี ศุภสุธิกุล)

.....กรรมการ

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร. วิชชากร จารุศิริ)

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติ สถาพรประสาธน์)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร. วิชชากร จารุศิริ)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย นิยมมล)

ประกาศคุณประการ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิตติ สถาพรประสาธน์ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปริญญานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนแนวทางการแก้ปัญหาต่างๆอันเป็น
ประโยชน์ต่อการดำเนินงานวิจัยเป็นอย่างมาก ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. วิชากร จารุศิริ อาจารย์
ดร. อาจรี ศุภสุธิกุล และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ฉัตรชัย นิยมล ที่ให้เกียรติเป็นกรรมการประเมินผล
การทำปริญญานิพนธ์ และให้คำแนะนำเพิ่มเติมเพื่อให้ปริญญานิพนธ์มีความสมบูรณ์เพิ่มมากขึ้น

ขอขอบคุณโครงการวิจัยและนวัตกรรมเพื่อถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ชุมชนรากฐานเครือข่ายวิจัย
อุดมศึกษาภาคกลางตอนบนที่ให้ทุนสนับสนุนทุนวิจัย ขอขอบคุณภาคีวิชาการวิศวกรรมเครื่องกล คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่เอื้อเพื่อให้ใช้สถานที่ในการทดลองและศูนย์วิจัยข้าว
ปทุมธานีที่ให้ความอนุเคราะห์ในการวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพของข้าว

กราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้กำลังใจและสนับสนุนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วย
ความเรียบร้อย

ภมร บัวทุม

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	2
ขอบเขตการวิจัย.....	2
วิธีดำเนินงานวิจัย.....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
ทฤษฎีการอบแห้ง.....	4
การอบแห้ง.....	4
อัตราการอบแห้ง.....	5
คุณสมบัติของอากาศชื้น.....	6
ความชื้นสัมพัทธ์.....	7
อุณหภูมิกระเปาะเปียก.....	7
ความชื้นในวัสดุ.....	7
การเพิ่มความชื้นให้แก่วัสดุ.....	9
ความชื้นสมดุลของวัสดุ.....	9
ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ.....	9
ความร้อนจำเพาะ.....	10
สภาพนำความร้อน.....	10
เส้นโค้งลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง.....	10
คุณลักษณะของระบบกระแสน.....	11
การเคลื่อนที่ของวัสดุอนุภาคเดี่ยวในกระแสน.....	12

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2 (ต่อ)	
การคำนวณค่าอัตราการระเหยของน้ำเชิงปริมาตรและ	
สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร.....	14
การหาค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ.....	15
การประมาณความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ.....	16
หลักการของเครื่องอบแห้งกระแสน.....	17
บททวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	24
วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	24
อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยและสถานที่ทดลอง.....	24
ขั้นตอนในการเตรียมข้าวเปลือกขึ้น.....	27
ขั้นตอนการกำหนดตัวแปรการทดลอง.....	27
ขั้นตอนการทดลองอบแห้งข้าวเปลือก.....	28
ขั้นตอนการหาความชื้นข้าวเปลือก.....	28
ขั้นตอนการประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง.....	28
ขั้นตอนการหาเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ.....	28
ขั้นตอนการวิเคราะห์คุณภาพข้าว.....	29
ขั้นตอนการประมาณความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องอบแห้ง.....	29
ขั้นตอนการวิเคราะห์ทางสถิติ.....	29
4 ผลการทดลองและวิจารณ์.....	30
ผลของตัวแปรที่มีผลต่อการลดความชื้น.....	30

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 (ต่อ)	
ผลของตัวแปรที่มีต่อค่าอัตราการระเหยของน้ำเชิงปริมาตร.....	34
ผลของตัวแปรที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร.....	39
การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง.....	40
เวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ.....	42
ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ.....	43
คุณภาพทางกายภาพของข้าว.....	47
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	48
สรุปผลการทดลอง.....	48
ข้อเสนอแนะ.....	49
บรรณานุกรม.....	50
ภาคผนวก.....	54
ภาคผนวก ก การคำนวณระบบอบแห้งแบบกระแสน.....	55
ภาคผนวก ข รูปภาพแสดงระบบอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง.....	62
ภาคผนวก ค การทดลองหาอัตราการป้อนวัสดุและเวลาที่วัสดุ อยู่ในระบบอบแห้ง.....	72
ภาคผนวก ง การเตรียมความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก.....	77
ภาคผนวก จ ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง.....	80
ภาคผนวก ฉ ตัวอย่างการคำนวณ.....	106

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	112
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	115



บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 วิเคราะห์ทางสถิติของค่าความชื้นที่ลดลงของระบบอบแห้งเมื่อขนาด ห้องอบแห้ง 20 ลิตร.....	31
2 วิเคราะห์ทางสถิติของค่าความชื้นที่ลดลงของระบบอบแห้งเมื่อขนาด ห้องอบแห้ง 50 ลิตร.....	32
3 วิเคราะห์ทางสถิติของค่าความชื้นที่ลดลงของระบบอบแห้งเมื่อขนาด ห้องอบแห้งปริมาตร 20 ลิตร และ 50 ลิตร.....	33
4 ผลวิเคราะห์ทางสถิติของค่าอัตราการระเหยของน้ำเชิงปริมาตรและ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรของห้องอบแห้ง ขนาด 20 ลิตร.....	36
5 ผลวิเคราะห์ทางสถิติของค่าอัตราการระเหยของน้ำเชิงปริมาตรและ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรของห้องอบแห้ง ขนาด 50 ลิตร.....	37
6 ผลวิเคราะห์ทางสถิติของค่าอัตราการระเหยของน้ำเชิงปริมาตรและ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรของห้องอบแห้ง ขนาด 20 ลิตร และ 50 ลิตร.....	38
7 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง.....	41
8 เวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบอบแห้ง.....	42
9 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งของข้าวเปลือกด้วยวิธีการอบแห้งต่างๆ.....	43
10 เปรียบเทียบความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะทั้งหมดกับวิธีการอบแห้งแบบอื่นๆ...	44
11 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของระบบอบแห้ง.....	45
12 ผลการวิเคราะห์ข้าวที่ได้จากระบบอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง.....	46
13 อัตราการป้อนวัสดุ.....	74

บัญชีตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
14 เวลาที่วัสดุอยู่ในระบบ (ห้องอบแห้งขนาด 50 ลิตร).....	76
15 เวลาที่วัสดุอยู่ในระบบ (ห้องอบแห้งขนาด 20 ลิตร).....	76
16 อุณหภูมิของอากาศที่จุดต่างๆของระบบอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง (อุณหภูมิ 70 °C ความเร็วอากาศ 25 m/s อัตราการป้อนวัสดุ 20 kg _{dry solid} /h ขนาดห้องอบแห้ง 20 ลิตร).....	81
17 อุณหภูมิของอากาศที่จุดต่างๆของระบบอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง (อุณหภูมิ 70 °C ความเร็วอากาศ 25 m/s อัตราการป้อนวัสดุ 35 kg _{dry solid} /h ขนาดห้องอบแห้ง 20 ลิตร).....	82
18 อุณหภูมิของอากาศที่จุดต่างๆของระบบอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง (อุณหภูมิ 70 °C ความเร็วอากาศ 25 m/s อัตราการป้อนวัสดุ 56 kg _{dry solid} /h ขนาดห้องอบแห้ง 20 ลิตร).....	83
19 อุณหภูมิของอากาศที่จุดต่างๆของระบบอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง (อุณหภูมิ 90 °C ความเร็วอากาศ 25 m/s อัตราการป้อนวัสดุ 20 kg _{dry solid} /h ขนาดห้องอบแห้ง 20 ลิตร).....	84
20 อุณหภูมิของอากาศที่จุดต่างๆของระบบอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง (อุณหภูมิ 90 °C ความเร็วอากาศ 25 m/s อัตราการป้อนวัสดุ 35 kg _{dry solid} /h ขนาดห้องอบแห้ง 20 ลิตร).....	85
21 อุณหภูมิของอากาศที่จุดต่างๆของระบบอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง (อุณหภูมิ 90 °C ความเร็วอากาศ 25 m/s อัตราการป้อนวัสดุ 56 kg _{dry solid} /h ขนาดห้องอบแห้ง 20 ลิตร).....	86
22 อุณหภูมิของอากาศที่จุดต่างๆของระบบอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง (อุณหภูมิ 110 °C ความเร็วอากาศ 25 m/s อัตราการป้อนวัสดุ 20 kg _{dry solid} /h ขนาดห้องอบแห้ง 20 ลิตร).....	87

บัญชีตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
23	อุณหภูมิของอากาศที่จุดต่างๆของระบบอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง (อุณหภูมิ 110 °C ความเร็วอากาศ 25 m/s อัตราการป้อนวัสดุ 35 kg _{dry solid} /h ขนาดห้องอบแห้ง 20 ลิตร).....	88
24	อุณหภูมิของอากาศที่จุดต่างๆของระบบอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง (อุณหภูมิ 110 °C ความเร็วอากาศ 25 m/s อัตราการป้อนวัสดุ 56 kg _{dry solid} /h ขนาดห้องอบแห้ง 20 ลิตร).....	89
25	อุณหภูมิของอากาศที่จุดต่างๆของระบบอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง (อุณหภูมิ 70 °C ความเร็วอากาศ 25 m/s อัตราการป้อนวัสดุ 20 kg _{dry solid} /h ขนาดห้องอบแห้ง 50 ลิตร).....	90
26	อุณหภูมิของอากาศที่จุดต่างๆของระบบอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง (อุณหภูมิ 70 °C ความเร็วอากาศ 25 m/s อัตราการป้อนวัสดุ 35 kg _{dry solid} /h ขนาดห้องอบแห้ง 50 ลิตร).....	91
27	อุณหภูมิของอากาศที่จุดต่างๆของระบบอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง (อุณหภูมิ 70 °C ความเร็วอากาศ 25 m/s อัตราการป้อนวัสดุ 56 kg _{dry solid} /h ขนาดห้องอบแห้ง 50 ลิตร).....	92
28	อุณหภูมิของอากาศที่จุดต่างๆของระบบอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง (อุณหภูมิ 90 °C ความเร็วอากาศ 25 m/s อัตราการป้อนวัสดุ 20 kg _{dry solid} /h ขนาดห้องอบแห้ง 50 ลิตร).....	93
29	อุณหภูมิของอากาศที่จุดต่างๆของระบบอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง (อุณหภูมิ 90 °C ความเร็วอากาศ 25 m/s อัตราการป้อนวัสดุ 35 Kg _{dry solid} /h ขนาดห้องอบแห้ง 50 ลิตร).....	94

บัญชีตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
30 อุณหภูมิของอากาศที่จุดต่างๆของระบบอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง (อุณหภูมิ 90 °C ความเร็วอากาศ 25 m/s อัตราการป้อนวัสดุ 56 Kg _{dry solid} /h ขนาดห้องอบแห้ง 50 ลิตร).....	95
31 อุณหภูมิของอากาศที่จุดต่างๆของระบบอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง (อุณหภูมิ 110 °C ความเร็วอากาศ 25 m/s อัตราการป้อนวัสดุ 20 Kg _{dry solid} /h ขนาดห้องอบแห้ง 50 ลิตร).....	96
32 อุณหภูมิของอากาศที่จุดต่างๆของระบบอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง (อุณหภูมิ 110 °C ความเร็วอากาศ 25 m/s อัตราการป้อนวัสดุ 35 Kg _{dry solid} /h ขนาดห้องอบแห้ง 50 ลิตร).....	97
33 อุณหภูมิของอากาศที่จุดต่างๆของระบบอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง (อุณหภูมิ 110 °C ความเร็วอากาศ 25 m/s อัตราการป้อนวัสดุ 56 Kg _{dry solid} /h ขนาดห้องอบแห้ง 50 ลิตร).....	98
34 การหาความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก (ห้องอบแห้งขนาด 20 ลิตร).....	99
35 การหาความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก (ห้องอบแห้งขนาด 50 ลิตร).....	100
36 การหาความชื้นหลังการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งกระแสน แบบวิถีโค้ง(ห้องอบแห้งขนาด 20 ลิตร).....	101
37 การหาความชื้นหลังการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งกระแสน แบบวิถีโค้ง(ห้องอบแห้งขนาด 50 ลิตร).....	102
38 ข้อมูลการใช้พลังงานของระบบอบแห้งกระแสน (ขนาด 20 ลิตร).....	103
39 ข้อมูลการใช้พลังงานของระบบอบแห้งกระแสน (ขนาด 50 ลิตร).....	103
40 คุณภาพข้าวหลังการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งกระแสน แบบวิถีโค้ง (ห้องอบแห้งขนาด 20 ลิตร).....	104

บัญชีตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
41 คุณภาพข้าวหลังการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งกระแสน้ำ	
แบบวิถีโค้ง (ห้องอบแห้งขนาด 50 ลิตร).....	105



บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 การอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และลดลง	6
2 การอบแห้งในช่วงเวลาการอบแห้งลดลง.....	6
3 ลักษณะเฉพาะของการอบแห้งภายใต้เงื่อนไขการอบแห้งคงที่.....	11
4 พื้นฐานของระบบกระแสน.....	12
5 การเคลื่อนที่ของวัสดุอนุภาคในระบบกระแสน.....	13
6 ผลของแผ่นกั้นที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน.....	14
7 อัตราส่วนการะที่มีผลต่อค่าเวลาเฉลี่ยของวัสดุที่อยู่ในระบบอบแห้ง ที่มีแผ่นกั้นและไม่มีแผ่นกั้น.....	16
8 หลักการของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน.....	17
9 จุดตรวจวัดของเครื่องอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง.....	25
10 ขั้นตอนการทดลอง.....	26
11 ผลกระทบของตัวแปรที่มีผลต่ออัตราการระเหยของน้ำเชิงปริมาตร.....	35
12 ผลกระทบของตัวแปรที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร....	40
13 ตำแหน่งการวางแท่งความร้อนไฟฟ้า.....	57
14 แฟกเตอร์ความเสียหาย (f) และค่าแก้ไข (χ).....	58
15 ภาพ 3 มิติ ของระบบอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง.....	63
16 จุดตรวจวัดอุณหภูมิของห้องอบแห้ง.....	63
17 ภาพฉายของระบบอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง.....	64
18 ห้องอบแห้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.37 m. กับ 0.22 m.....	64
19 ระบบอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง.....	65
20 พัดลมแรงดันสูง.....	65
21 เครื่องทำความร้อนด้วยไฟฟ้า.....	66
22 เครื่องควบคุมอุณหภูมิของอากาศ.....	66

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
23 โกลบวาล์วสำหรับปรับอัตราการไหลของอากาศ.....	67
24 มิเตอร์ไฟฟ้าสำหรับเครื่องทำความร้อนและพัดลมแรงดันสูง.....	67
25 ตู้เย็นสำหรับแช่ข้าวเปลือก.....	68
26 เครื่องอบไฟฟ้าสำหรับอบไล่ความชื้นข้าวเปลือก.....	68
27 เครื่องป้อนข้าวเปลือกแบบสายพานลำเลียง.....	69
28 เครื่องวัดความเร็วลม.....	69
29 เครื่องวัดค่าอุณหภูมิแบบต่อเนื่อง.....	70
30 เครื่องปรับแรงดันไฟฟ้าสำหรับเครื่องป้อนข้าวเปลือกแบบสายพาน.....	70
31 เครื่องวัดอุณหภูมิกระเปาะเปียก.....	71
32 เครื่องชั่งน้ำหนัก.....	71

บทที่ 1

บทนำ

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ตั้งแต่อดีตมาจนถึงปัจจุบันประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการประกอบอาชีพทางการเกษตรเป็นหลัก และได้เริ่มพัฒนามาเป็นอุตสาหกรรมเกษตรมากขึ้น ในแต่ละปีจะมีผลผลิตทางการเกษตรออกมาเป็นจำนวนมากซึ่งจะมีผลต่อการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจของประเทศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งข้าวซึ่งเป็นผลผลิตทางการเกษตรที่มีปริมาณมากและนับได้ว่าเป็นสินค้าหลักที่ส่งออกเพื่อทำรายได้ให้ประเทศเป็นจำนวนมาก ข้าวเปลือกที่มีคุณภาพดีนั้นจะต้องมีความชื้นของข้าวอยู่ที่ประมาณ 13-15 % (d.b.) แต่โดยปกติโดยทั่วไปข้าวเปลือกที่เกษตรกรเก็บเกี่ยวนั้นส่วนใหญ่มักจะมีความชื้นค่อนข้างสูง กล่าวคือ ประมาณ 20-25% (d.b.) ดังนั้นเพื่อให้การเก็บรักษาข้าวเปลือกให้นานและมีคุณภาพที่ดีนั้น จึงมีความจำเป็นต้องลดความชื้นของข้าวเปลือกให้อยู่ในระดับความเหมาะสมในการเก็บรักษา ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น เทคนิคฟลูอิดไรซ์เบด (Fluidized bed) เครื่องอบแห้งแบบแบบโรตารี (Rotary dryer) เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (Spray dryer) เป็นต้น ถ้าหากพิจารณาทางด้านอุตสาหกรรมแล้ว ในการอบแห้งหรือลดความชื้นของวัสดุออกอย่างรวดเร็วนับว่าเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง ด้วยเหตุนี้จึงเกิดแนวคิดที่จะพัฒนาวิธีอบแห้งขึ้นมาใหม่โดยอาศัยหลักการของระบบกระแสน้ำ (Impinging stream system) เพื่อเป็นการลดการใช้พลังงานและเวลาในการอบแห้ง

การอบแห้งแบบกระแสน้ำเป็นเทคโนโลยีที่ใหม่ การศึกษาและค้นคว้าวิจัยยังไม่แพร่หลาย แต่เครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำมีลักษณะเด่นหลายประการ อีกทั้งระบบยังมีการทำงานที่ไม่ซับซ้อน ไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ เหมาะกับการอบแห้งวัสดุที่ต้องการดึงเอาน้ำหรือความชื้นจำนวนมากที่บริเวณผิวของวัสดุออกอย่างรวดเร็ว จึงเป็นที่น่าสนใจที่จะนำเอาเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำมาประยุกต์ใช้กับการอบแห้งวัสดุต่างๆที่มีความชื้นเริ่มต้นสูง

ถึงแม้ว่าจะมีการวิจัยหลายชิ้น ที่รายงานถึงข้อดีต่างๆ ของการอบแห้งแบบกระแสน้ำ แต่การศึกษาถึงผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ยังมีอยู่น้อยมาก ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นระบบกระแสน้ำแบบท่อแกนเดียวและท่อด้านเข้าจะอยู่ตรงกันข้าม แต่สำหรับกรณีที่ใช้ห้องอบแห้งแบบกำหนดให้วัสดุเคลื่อนที่อยู่ในระบบโค้งตามขนาดของห้องอบแห้ง (Tangential Horizontal Flow) มีอยู่น้อยมาก การเคลื่อนที่

แบบวิถีโค้งนี้คาดว่าจะมีแนวโน้มที่จะทำให้เวลาที่วัสดุอยู่ในระบบได้นานขึ้นและสามารถลดความชื้นของวัสดุได้มากขึ้นตามไปด้วย งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิอากาศด้านเข้า อัตราการป้อนวัสดุและปริมาตรห้องอบแห้ง ที่มีผลต่อสมรรถนะเครื่องอบแห้งแบบกระแสนแบบวิถีโค้ง และเวลาที่วัสดุเคลื่อนที่อยู่ในระบบ โดยสมรรถนะเครื่องอบแห้งสามารถพิจารณาได้จากค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร

2. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการลดความชื้นของข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานของระบบ และคุณสมบัติทางกายภาพบางอย่างของข้าวที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง

3. ขอบเขตการวิจัย

1. ออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งแบบกระแสนสำหรับลดความชื้นข้าวเปลือกชนิดกำหนดให้วัสดุเคลื่อนที่อยู่ในระบบโค้งตามขนาดของห้องอบแห้งในระดับห้องปฏิบัติการ
2. ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในการลดความชื้นข้าวเปลือก เช่น อุณหภูมิของอากาศร้อน ความเร็วของอากาศร้อน อัตราการป้อนข้าวเปลือกและปริมาตรห้องอบแห้ง ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานของระบบอบแห้ง และคุณสมบัติทางกายภาพบางอย่างของข้าวที่ผ่านการอบแห้ง เช่น การแตกหักของเมล็ดและความขาวของเมล็ดข้าว

4. วิธีดำเนินการวิจัย

1. ออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งแบบกระแสนสำหรับการลดความชื้นข้าวเปลือกชนิดกำหนดให้วัสดุเคลื่อนที่อยู่ในระบบโค้งตามขนาดของห้องอบแห้งในระดับห้องปฏิบัติการ
2. ทดสอบการทำงานของเครื่องอบแห้งที่ได้พัฒนาขึ้น
3. ทดลองเบื้องต้นเพื่อหาเงื่อนไขที่เป็นไปได้สำหรับใช้ในการลดความชื้นของข้าวเปลือก

4. ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในการลดความชื้นข้าวเปลือก เช่น อุณหภูมิของอากาศร้อน ความเร็วของอากาศร้อน อัตราการป้อนข้าวเปลือกและปริมาตรห้องอบแห้ง ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานของระบบอบแห้ง และสมบัติทางกายภาพบางอย่างของข้าว

5. ปรับเปลี่ยนขนาดห้องอบแห้งเพื่อทำการทดลองซ้ำในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง โดยใช้ห้องอบแห้งขนาด 50 ลิตร และ 20 ลิตร

สถานที่ทำการทดลองและเก็บข้อมูล : โครงการวิจัยดังกล่าวจะดำเนินการที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์ จ. นครนายก

5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงผลของการลดความชื้นของข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง
2. ทราบถึงผลกระทบจากอุณหภูมิของอากาศร้อน อัตราการป้อนวัสดุและปริมาตรของห้องอบแห้ง ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานของระบบ และคุณสมบัติทางกายภาพบางอย่างของข้าวที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง
3. เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการพัฒนาเครื่องอบแห้งต่อไปในอนาคต

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

จากการสืบค้นข้อมูลและการทบทวนวรรณกรรมที่มีความคล้ายกันหรือใกล้เคียงกันกับงานวิจัยในครั้งนี้ซึ่งเป็นการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาทั้งภายในและต่างประเทศ ซึ่งได้รวบรวมเรียบเรียงไว้แล้วโดยแบ่งเนื้อหาออกเป็นดังต่อไปนี้

1. ทฤษฎีการอบแห้ง

ในการอบแห้งวัสดุโดยทั่วไปจะใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้ง โดยที่การถ่ายเทความร้อนจากอากาศร้อนไปยังวัสดุจะเกิดขึ้นพร้อมๆกัน ความร้อนส่วนใหญ่จะถูกใช้ไปสำหรับการระเหยน้ำออกจากวัสดุ ถ้าผิววัสดุมีปริมาณน้ำอยู่เป็นจำนวนมาก อุณหภูมิและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวก็จะคงที่ ซึ่งส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant drying rate) ถ้าอุณหภูมิ ความชื้นและความเร็วอากาศมีค่าคงที่ เมื่อผิวของวัสดุมีปริมาณน้ำลดลงมากแล้ว ความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวของวัสดุย่อมเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลให้ความเข้มข้นของไอน้ำจะลดลง ซึ่งจะส่งผลให้อัตราการอบแห้งลดลง (Falling drying rate) การเปลี่ยนแปลงความชื้นและอัตราการอบแห้งเทียบกับเวลาภายใต้อุณหภูมิ ความชื้นและความเร็วของอากาศคงที่ ความชื้นที่อยู่ระหว่างช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ และช่วงการอบแห้งลดลงเรียกว่า ความชื้นวิกฤต

วัสดุทางการเกษตรส่วนใหญ่ก็มีโครงสร้างภายในเป็นรูพรุน ซึ่งการอบแห้งส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงการอบแห้งลดลง และการเคลื่อนที่ของน้ำส่วนมากจะอยู่ในรูปของเหลว ซึ่งเป็นผลจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้นที่เป็นลักษณะการแพร่ของน้ำภายในวัสดุ (สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2540)

1.1. การอบแห้ง

การอบแห้ง คือ กระบวนการที่ทำให้ความชื้นที่อยู่ในวัสดุลดลง ซึ่งส่วนใหญ่เป็นการถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุที่มีความชื้นเพื่อทำให้เกิดการระเหยของน้ำเพื่อลดความชื้นของวัสดุลง โดยความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการระเหย (สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2540) การอบแห้งโดยทั่วไปจะใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการพาความชื้นออกไปจากวัสดุเพื่อต้องการทำให้แห้ง เพื่อช่วยในการยืด

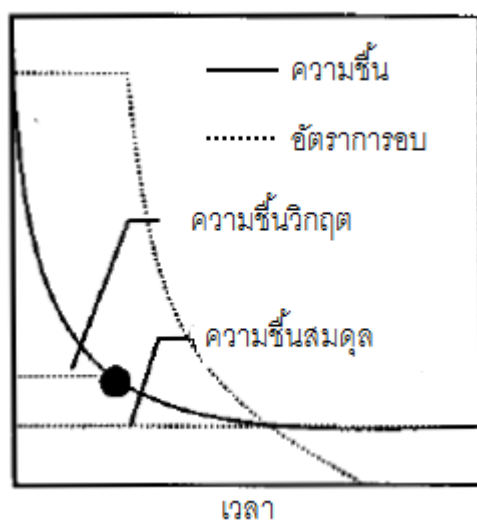
อายุการเก็บรักษาวัสดุนั้นๆ เมื่อวัสดุมีความชื้นลดลงก็จะทำให้ไม่มีการเติบโตของจุลินทรีย์ หรือเพื่อต้องการลดปริมาตรและน้ำหนักเพื่อช่วยลดต้นทุนในการขนส่งและลดพื้นที่ในการเก็บรักษา

1.2. อัตราการอบแห้ง

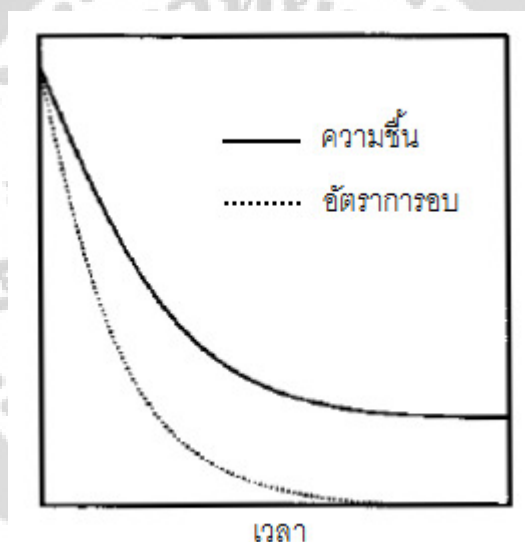
อัตราการอบแห้ง คือ อัตราการดึงความชื้นออกจากวัสดุขึ้นที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาที่เปลี่ยนไป สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง คือ ช่วงอัตราอบแห้งแบบคงที่ และช่วงอัตราอบแห้งแบบลดลง (เมธาวุฒิ โชติสวัสดิ์. 2550)

1.2.1 ช่วงอัตราอบแห้งแบบคงที่ การถ่ายเทความร้อนระหว่างมวลวัสดุกับอากาศร้อนจะเหมือนกับการถ่ายเทความร้อนและมวลที่เกิดขึ้นที่กระเปาะเป็ยกของเทอร์โมมิเตอร์ การถ่ายเทความร้อนและมวลจะเกิดขึ้นที่ผิวหน้าของวัสดุเท่านั้น เมื่อน้ำเกาะที่ผิวของวัสดุเป็นจำนวนมากและความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านวัสดุจะทำให้ฟิล์มอากาศนี้มีความหนาลดลง เป็นผลให้ความต้านทานต่อการไหลของความร้อนและมวลลดลงด้วย เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของการอบแห้งให้สูงขึ้นจะทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างที่ผิววัสดุ และกระแสอากาศที่ไหลอย่างอิสระมีค่ามากขึ้น เป็นผลให้การถ่ายเทความร้อนและมวลดีขึ้น และเมื่อลดค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้ง จะเป็นผลให้ความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นอิ่มตัวที่ผิววัสดุ และอัตราส่วนความชื้นของกระแสอากาศที่ไหลอย่างอิสระมีค่าเพิ่มมากขึ้น ทำให้มีความสามารถในการถ่ายเทมวลมากขึ้น ซึ่งตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อช่วงอัตราการอบแห้งแบบคงที่ คือ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วของอากาศ

1.2.2 ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงความชื้นของวัสดุจะมีค่าต่ำกว่าความชื้นวิกฤต การถ่ายเทความชื้นและมวลไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะที่ผิววัสดุเท่านั้น แต่เกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุด้วย การเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในเนื้อวัสดุมายังผิววัสดุช้ากว่าการพาความชื้นที่ผิววัสดุไปยังอากาศ ทำให้อัตราการอบแห้งลดลง อัตราการระเหยของน้ำจะถูกควบคุมโดย ความต้านทานการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำในวัสดุ ในขณะที่อุณหภูมิของวัสดุมีค่าเพิ่มสูงขึ้น และสูงกว่าอุณหภูมิกระเปาะเป็ยก เมื่อลดค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้งลงจะเป็นผลให้เกิดความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นเพิ่มขึ้น และมีผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นเพิ่มขึ้นด้วย



ภาพประกอบ 1 การอบแห้งในช่วงอัตราความดันแห้งคงที่และลดลง (รณชาติ กรุงกรด. 2543)



ภาพประกอบ 2 การอบแห้งในช่วงเวลาการอบแห้งลดลง (รณชาติ กรุงกรด. 2543)

1.3 สมบัติของอากาศชื้น

สมบัติของอากาศชื้น คือ อากาศรวมกับไอน้ำ อากาศแห้งที่ไม่มีไอน้ำจะประกอบด้วย ไนโตรเจน 79% โดยมวล กับออกซิเจน 21% โดยมวล และอากาศถือว่าเป็นก๊าซที่มีมวลโมเลกุลเท่ากับ $29 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ (ฮาจิเมะ; และคณะ. 2548) ในบรรยากาศประกอบด้วยไอน้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และองค์ประกอบที่มีปริมาณน้อยอีกหลายชนิด ซึ่งส่วนประกอบต่างๆ เหล่านี้ล้วนมีผลกระทบต่อกระบวนการอบแห้ง

1.4 ความชื้นสัมพัทธ์

ความชื้นสัมพัทธ์ คือ อัตราส่วนของเศษส่วนเชิงโมล (Mole fraction) หรือความดันไอของไอน้ำในอากาศต่อเศษส่วนเชิงโมลหรือความดันไอของไอน้ำในอากาศอิ่มตัวที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ ความชื้นสัมพัทธ์มีค่าระหว่าง 0 - 1

1.5 อุณหภูมิกระเปาะเปียก

อุณหภูมิกระเปาะเปียก คือ อุณหภูมิของอากาศชื้นที่วัดได้โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์ที่กระเปาะถูกหุ้มด้วยผ้าก๊อตเปียก และมีลมเป่าผ่านด้วยความเร็วอย่างน้อย 4.6 m/s (รณชาติ กรุงกรรต. 2543) เรียกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกเชิงไซโครเมตริก (Psychrometric wet-bulb temperature) อุณหภูมิกระเปาะเปียกอีกชนิดหนึ่งเรียกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกเชิงเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic wet-bulb temperature) อุณหภูมินี้ได้จากการทำอากาศชื้นให้เป็นอากาศชื้นอิ่มตัวอย่างอะเดียเบติก (Adiabatic saturation) โดยสัมผัสกับน้ำที่อุณหภูมิกระเปาะเปียกจนอากาศชื้นนั้นอิ่มตัว ซึ่งสามารถทำได้โดยการปล่อยให้อากาศไหลผ่านท่อที่ยาวมากและท่อต้องหุ้มฉนวนเป็นอย่างดี และฉีดน้ำที่อุณหภูมิกระเปาะเปียกเข้าไปในท่อ อากาศนี้จะขึ้นขึ้นเรื่อยๆ ขณะที่ไหลผ่านภายในท่อและจะถึงจุดอิ่มตัวด้วยไอน้ำ ที่จุดนี้จะมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียกเชิงเทอร์โมไดนามิกส์ ค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกทั้งสองแบบมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก ในกรณีอากาศแห้งและไอน้ำในทางปฏิบัติมักจะใช้ค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกทางไซโครเมตริกในการคำนวณ

1.6 ความชื้นในวัสดุ

ความชื้นในวัสดุเป็นค่าที่จะบ่งบอกถึงปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเมื่อเทียบกับมวลของวัสดุขึ้นหรือแห้ง การวัดความชื้นในวัสดุสามารถแสดงได้ 2 แบบ คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (% w.b.) ความชื้นแบบนี้นิยมใช้กับการค้าทั่วไป โดยจะอ้างอิงในรูปแบบของเปอร์เซ็นต์ กับความชื้นมาตรฐานแห้ง (% d.b.) ความชื้นแบบนี้นิยมใช้กับการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งทางทฤษฎีเพราะช่วยให้การคำนวณสะดวกขึ้น ซึ่งเป็นเพราะมวลของวัสดุแห้งจะมีค่าคงที่หรือเกือบคงที่ระหว่างการอบแห้งที่ว่าเกือบคงที่นี้เป็นเพราะผลผลิตทางเกษตรกรรมเป็นสิ่งมีชีวิตมีการหายใจ มีการเผาผลาญพลังงานจึงทำให้มวลแห้งมีขนาดลดลง (กาญจน์ สาข่า. 2543)

อัตราส่วนความชื้นของวัสดุ (ฮาจิเม; และคณะ. 2548)

$$W = \frac{W_w}{1 - W_w} \quad (2-1)$$

เมื่อ

W_w คือ วัสดุที่มีความชื้นต่อ 1 kg ของวัสดุที่ปราศจากน้ำ

ปริมาณน้ำในวัสดุสามารถบอกได้ในรูปของเปอร์เซ็นต์ ตามมาตรฐานเปียกและมาตรฐานแห้งซึ่งในการวิเคราะห์ส่วนประกอบของปริมาณน้ำในวัสดุส่วนใหญ่จะบอกในรูปแบบมาตรฐานแห้ง เพราะว่าการคำนวณสามารถทำได้ง่ายกว่า ในกรณีของอัตราส่วนความชื้นมาตรฐานแห้ง มวลของวัสดุจะไม่เปลี่ยนแปลงทั้งก่อนและหลังอบแห้งซึ่งจะทำการสมมูลมวลของน้ำได้ง่ายกว่าจึงเป็นที่นิยมใช้มากกว่า ซึ่งการหาค่าอัตราส่วนความชื้นมาตรฐานเปียกและความชื้นมาตรฐานแห้ง สามารถหาได้จากสมการ (2-2) และ (2-3) ตามลำดับดังนี้

$$M_{db} = \frac{w - d}{d} \times 100 \quad (2-2)$$

$$M_{wb} = \frac{w - d}{w} \times 100 \quad (2-3)$$

เมื่อ

M_{db} คือ ความชื้น (มาตรฐานแห้ง) %

M_{wb} คือ ความชื้น (มาตรฐานเปียก) %

w คือ มวลวัสดุขึ้น, kg

d คือ มวลวัสดุแห้ง, kg

เพื่อให้หาค่าความชื้นต่างๆ อย่างรวดเร็วและง่ายต่อการเข้าใจจึงกำหนดให้ความดันย่อยของไอน้ำในอากาศเป็น P ความดันไออิ่มตัวของน้ำที่อุณหภูมิของอากาศเป็น P_s ความดันรวมเป็น P_t และให้โมเลกุลของอากาศและน้ำเป็น M_a และ M_w นำตัวแปรต่างๆ มาหาความสัมพันธ์ต่างๆ ดังต่อไปนี้

ความชื้นสัมพัทธ์ ϕ (ฮาจิเม; และคณะ. 2548)

$$\phi = \frac{P}{P_s} \quad (2-4)$$

ความชื้นสัมบูรณ์ H [kg-steam·(kg-dry air)⁻¹] (ฮาจิเม; และคณะ. 2548)

$$H = \frac{M_w P}{M_a (P_t - P)} \quad (2-5)$$

ความชื้นสัมบูรณ์เชิงโมล H_{mol} [kmol-steam·(kmol-dry air)⁻¹] (ฮาจิเม; และคณะ. 2548)

$$H_{mol} = \frac{P}{(P_t - P)} \quad (2-6)$$

1.7 การเพิ่มความชื้นให้แก่วัสดุ

ในการทดลองจะต้องกำหนดค่าความชื้นเริ่มต้นให้แก่วัสดุตัวอย่าง แต่การที่จะได้ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุตามที่ต้องการนั้นจะต้องมีการให้ความชื้นแก่วัสดุโดยการเติมน้ำเข้าไปเพื่อให้วัสดุนั้นๆ มีความชื้นตามที่ต้องการ ปริมาณน้ำที่จะต้องเติมให้แก่วัสดุนั้นสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$M_{w/kg} = (M_{df} - M_{di}) \times d \quad (2-7)$$

เมื่อ

$M_{w/kg}$ คือ น้ำหนักน้ำที่จะต้องเติมต่อมวลกิโลกรัมวัสดุ

M_{df} คือ ความชื้นสุดท้ายของวัสดุที่ต้องการ

M_{di} คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุที่ต้องการเพิ่มความชื้น

d คือ น้ำหนักมวลแห้งต่อหนึ่งกิโลกรัมวัสดุ หาได้จากสมการ (2-2)

1.8 ความชื้นสมดุลของวัสดุ

ความชื้นสมดุลของวัสดุมีความสำคัญต่อการศึกษาระบวนการอบแห้ง เพราะเมื่ออบแห้งวัสดุโดยใช้อากาศที่สภาวะคงที่ เช่น อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์คงที่ ความชื้นของวัสดุจะลดต่ำลงจนถึงจุดจุดหนึ่ง จนทำให้ความชื้นของวัสดุไม่เปลี่ยนแปลงในเวลานั้น วัสดุมีค่าความดันไอเท่ากับความดันไอของอากาศที่อยู่รอบๆ วัสดุ และอุณหภูมิของวัสดุก็เท่ากับอุณหภูมิของอากาศที่อยู่รอบๆ วัสดุ จะเรียกความชื้นขณะนั้นว่า ความชื้นสมดุล ค่าความชื้นสมดุลจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศและค่า Water activity ในวัสดุ ซึ่งค่าดังกล่าวนี้จะมีค่าเท่ากับ ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ ก็ต่อเมื่อวัสดุและอากาศอยู่ในภาวะสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ และสมมติว่าไอน้ำเป็นก๊าซในอุดมคติ (กาญจน์ สาขา. 2543)

การใช้อากาศร้อนซึ่งมีอุณหภูมิและความชื้นค่าหนึ่งในการอบแห้งนั้น จะสามารถอบแห้งวัสดุได้ต่ำสุดถึงอัตราส่วนความชื้นสมดุลเท่านั้น หากต้องการลดอัตราส่วนความชื้น W ในวัสดุใดๆ กับอัตราส่วนความชื้นสมดุล W_e ณ เงื่อนไขการอบแห้งนั้นๆ อัตราส่วนความชื้นอิสระ $F = (W - W_e)$ ซึ่งเป็นตัวแสดงถึงปริมาณน้ำที่สามารถระเหยออกได้ ณ เงื่อนไขนั้นๆ (ฮาจิเมะ; และคณะ. 2548)

1.9 ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ

ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ คือ ความร้อนที่วัสดุต้องใช้สำหรับการเปลี่ยนสถานะจากสารของเหลวให้เป็นไอที่อุณหภูมิและความดันคงที่ ความร้อนแฝงของการระเหยของน้ำในวัสดุอาหารจะมีค่าสูงกว่าน้ำที่อยู่อย่างอิสระ โดยเฉพาะเมื่อวัสดุนั้นมีความชื้นต่ำกว่าจากข้อมูลความชื้นสมดุลสามารถคำนวณหาความร้อนแฝงของการระเหยได้ ความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำจากวัสดุขึ้นอยู่กับ

ความชื้นและอุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิและความชื้นของวัสดุมีค่าต่ำ ค่าความร้อนแฝงของการระเหยจะมีค่าสูง

1.10 ความร้อนจำเพาะ

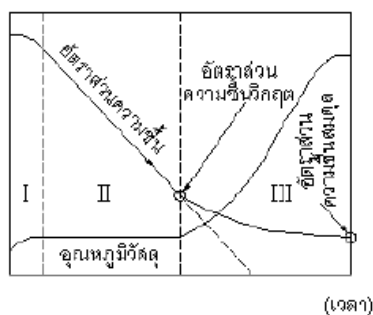
ความร้อนจำเพาะ คือ ปริมาณความร้อนที่ทำให้วัสดุหนึ่งหน่วยมวลมีอุณหภูมิสูงขึ้นหนึ่งองศา ที่ความดันหรือปริมาตรคงที่ โดยส่วนมากมักจะเกี่ยวข้องกับกระบวนการความดันคงที่มากกว่า ปริมาตรคงที่ ความร้อนจำเพาะมีหน่วยเป็น $\text{kJ/kg}^{\circ}\text{C}$ ค่าความร้อนจำเพาะในผลิตภัณฑ์อาหารมักขึ้นอยู่กับความชื้นของผลิตภัณฑ์ในเชิงเส้น หรือสัดส่วนของส่วนประกอบในตัวผลิตภัณฑ์ เช่น น้ำ ไขมัน แป้ง

1.11 สภาพนำความร้อน

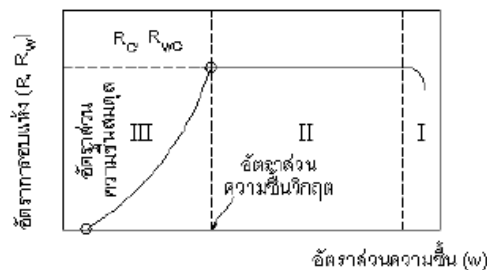
นิยามจากกฎการนำความร้อนของ Fourier ซึ่งกล่าวว่าฟลักการนำความร้อนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับเกรเดียนต์อุณหภูมิ ค่าคงที่ของสมการที่ได้ คือ สภาพนำความร้อนของวัสดุ การทดสอบหาค่าสภาพนำความร้อนอาจทำแบบการไหลของความร้อนที่สถานะคงตัวหรือไม่คงตัว ความหนาแน่นเป็นตัวแปรสำคัญในการวิเคราะห์การอบแห้ง ความหนาแน่นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ ความหนาแน่นจริงและความหนาแน่นปรากฏ ความหนาแน่นจริง หมายถึง อัตราส่วนของมวลวัสดุต่อปริมาตรของวัสดุ ส่วนความหนาแน่นปรากฏ (Bulk density) มักใช้กับวัสดุเม็ดที่กองรวมกันอยู่เป็นจำนวนมาก และหมายถึงมวลต่อปริมาตรทั้งหมด ซึ่งรวมปริมาตรของเม็ดวัสดุและปริมาตรของอากาศที่แทรกตัวอยู่ตามช่องว่างของวัสดุด้วย

1.12 เส้นโค้งลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง

วัสดุที่มีความเปียกชื้นถึงผิวนอกเมื่อนำมาอบด้วยความร้อนและนำมาเขียนเป็นความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นและอุณหภูมิเมื่อเทียบกับเวลาจะมีลักษณะของการอบแห้งดังภาพประกอบ 3(1) ส่วนภาพประกอบ 3(2) คือ ภาพประกอบที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยในวัสดุ โดยอัตราการอบแห้งของวัสดุสามารถหาได้จากการหาอนุพันธ์เทียบกับเวลาของเส้นโค้งการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นในภาพประกอบ 3(1) ส่วนเส้นโค้งในภาพประกอบ 3(2) เป็นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งภายใต้เงื่อนไขการอบแห้งแบบคงที่ (อุณหภูมิอากาศร้อน ความชื้นอากาศร้อน ความเร็วอากาศมีค่าคงที่) ซึ่งเงื่อนไขเหล่านี้เป็นพื้นฐานในการออกแบบอุปกรณ์ชุดอบแห้ง



(1) ช่วงเวลา 3 ระยะของการอบแห้ง



(2) เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง

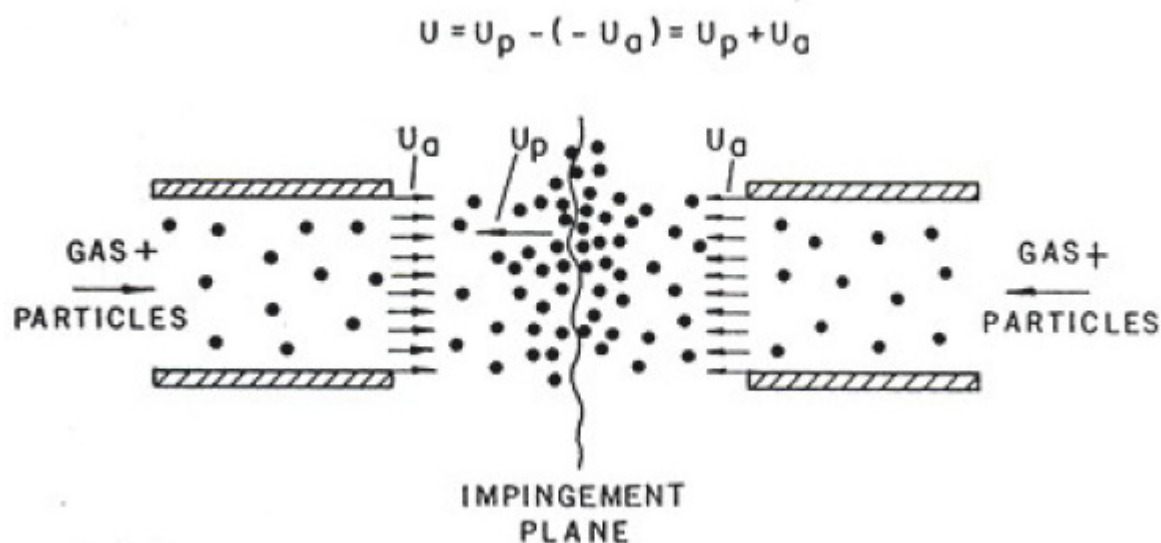
ภาพประกอบ 3 ลักษณะเฉพาะของการอบแห้งภายใต้เงื่อนไขการอบแห้งคงที่ (ฮาจิเมะ; และคณะ. 2548)

2. คุณลักษณะของระบบกระแสน

กระบวนการถ่ายเทมวลและความร้อนของของไหลไปยังวัสดุสามารถพิจารณาได้ในส่วนของความต้านทานต่างๆ ได้แก่ ความต้านทานในส่วนของของไหล ซึ่งโดยปกติจะขึ้นอยู่กับการออกแบบระบบและอุปกรณ์ต่างๆ นอกจากนี้ในบางกรณียังมีความต้านทานบริเวณผิวของวัสดุซึ่งอาจเกิดจากสิ่งเจือปนต่างๆ ที่ปกคลุมผิวของวัสดุและความต้านทานภายใน ความต้านทานภายในของวัสดุอาจลดลงได้โดยการลดขนาดของวัสดุหรือการเพิ่มเวลาการเคลื่อนที่ของวัสดุในระบบให้มากขึ้น ส่วนการลดลงของความต้านทานบริเวณผิวสามารถทำได้ดังต่อไปนี้ (Elperin, I. 1961)

1. การเพิ่มความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างวัสดุกับกระแสการไหล
2. การลดความหนาของฟิล์มของไหลที่ปกคลุมอยู่บริเวณผิวของวัสดุ
3. การให้วัสดุกระจายตัวอยู่ในกระแสนของไหลอย่างสม่ำเสมอ
4. การเพิ่มแรงจากภายนอกมากระทำเช่น แรงเฉื่อย

ทาเมียร์ (Tamir, A. 1994. อ้างอิงจาก Elperin, I. 1961) ได้นำเสนอระบบกระแสนสำหรับกระบวนการถ่ายเทมวลและความร้อนตามข้อเสนอนี้ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยอาศัยลักษณะการไหลที่พิเศษ คือ การนำกระแสของไหลสองกระแสหรือมากกว่ามาชนกัน ซึ่งอาจมีการนำวัสดุเข้าสู่ระบบผ่านกระแสนของไหลทางใดทางหนึ่งหรือทั้งสองทางก็ได้ แสดงดังภาพประกอบ 4

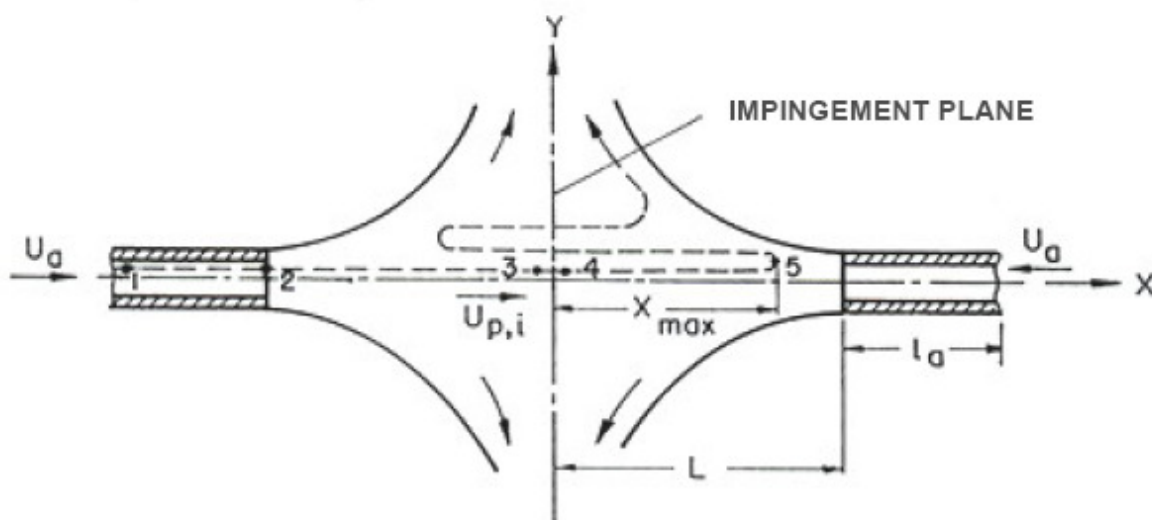


ภาพประกอบ 4 พื้นฐานของระบบกระแสชน (Tamir, A. 1994)

ผลจากการชนกันระหว่างกระแสของไหลทั้งสองกระแส ความเร็วสัมพัทธ์ของวัสดุเมื่อเทียบกับกระแสของไหลจะเพิ่มขึ้นอย่างมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณที่วัสดุเคลื่อนที่สวนเข้าไปยังกระแสนตรงกันข้าม กระบวนการถ่ายเทมวลและความร้อนจะเกิดขึ้นในบริเวณดังกล่าว สำหรับการเคลื่อนที่ของวัสดุนั้นเริ่มต้นจากการที่วัสดุถูกเร่งให้มีความเร็วมากขึ้นโดยกระแสของไหลที่นำวัสดุเข้าสู่ระบบ จนกระทั่งผ่านเข้าสู่ระนาบการชน (Impingement plate) วัสดุจะเคลื่อนที่สวนทางเข้าไปยังกระแสของไหลตรงกันข้ามด้วยแรงเฉื่อย และวัสดุจะถูกดันจากกระแสของไหลตรงกันข้ามให้มีความเร็วของวัสดุค่อยๆ ลดจนกระทั่งเข้าสู่ภาวะหยุดนิ่ง จากนั้นวัสดุจะถูกเร่งอีกครั้งให้มีความเร็วเพิ่มขึ้นจากกระแสของไหลดังกล่าว วัสดุจะเคลื่อนที่กลับไป-กลับมา ในบริเวณการชน (Impingement zone) จนความเร็วของวัสดุลดลงและถูกพาให้ออกจากห้องอบแห้งในที่สุด

2.1 การเคลื่อนที่ของวัสดุอนุภาคเดียวในกระแสชน

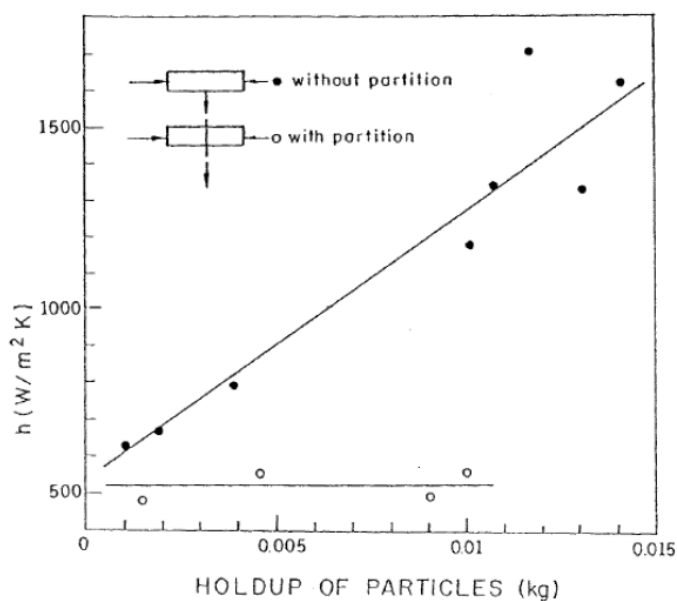
โดยปกติทั่วไปจะมีแรงอยู่สามแรงที่กระทำต่อวัสดุขณะเคลื่อนที่ในกระแสของไหล ได้แก่ 1) แรงจากภายนอก (External force) ซึ่งอาจจะเป็นแรงโน้มถ่วงหรือแรงเหวี่ยง 2) แรงลอยตัว (Buoyancy force) จะกระทำขนาดเท่ากับแรงจากภายนอกแต่ทิศทางตรงกันข้าม 3) แรงฉุดลาก (Drag force) จะเป็นแรงต้านการเคลื่อนที่ของวัสดุ ซึ่งขนานกับการเคลื่อนที่ของวัสดุแต่ทิศทางตรงกันข้าม หากพิจารณากรณีการเคลื่อนที่ของวัสดุในแนวระนาบหนึ่งมิติ โดยทั่วไปจะพบว่าแรงจากภายนอกและแรงลอยตัวจะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับแรงฉุดลาก



ภาพประกอบ 5 การเคลื่อนที่ของวัสดุอนุภาคในระบบกระแส (Tamir, A. 1994)

จากภาพประกอบ 5 หากพิจารณาการเคลื่อนที่ของวัสดุอนุภาคเดี่ยวในระบบกระแส ซึ่งเริ่มต้นด้วยการป้อนวัสดุเข้าสู่ระบบที่จุด 1 ความเร็วเริ่มต้นของวัสดุจะเท่ากับศูนย์ ($U_p = 0$) และกำหนดความเร็วสัมพัทธ์ให้เท่ากับ $U = U_a - U_p$ เมื่อ U_a คือ ความเร็วของของไหล และกำหนดให้ทิศทางจากจุดที่ 1 ไปทางขวามีค่าเป็นบวก วัสดุจะถูกเร่งจากกระแสของไหลที่นำเข้าสู่ระบบ เมื่อวัสดุอยู่ที่จุดที่ 3 ซึ่งเป็นจุดที่วัสดุอยู่ใกล้กับระนาบการชนมากที่สุด ความเร็วของวัสดุจะเทียบเท่ากับความเร็วของกระแสไหล ($U_p = U_a$) ดังนั้นความเร็วสัมพัทธ์จึงมีค่าเท่ากับศูนย์ ($U = 0$) จากนั้นวัสดุจะเริ่มเคลื่อนที่สวนทางเข้าไปยังกระแสดตรงกันข้ามที่จุดที่ 4 ซึ่งตำแหน่งนี้จะเป็นตำแหน่งที่มีความเร็วสัมพัทธ์มากที่สุด โดยจะมีค่าเท่ากับ $U = U_a - (-U_a) = 2U_a$ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของความเร็วสัมพัทธ์อย่างมีนัยสำคัญนี้มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของกระบวนการถ่ายเทมวลและความร้อนในกระแสน

ทาเมียร์ (Tamir, A. 1994) ศึกษาและแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนกับปริมาณอนุภาคใน ระบบกระแสทั้งแบบที่มีแผ่นกั้นเพื่อไม่ให้วัสดุไหลชนกันและแบบที่ไม่มีแผ่นกั้นเพื่อให้วัสดุไหลชนกันได้โดยตรง จะพบว่าในกรณีที่เครื่องอบแห้งไม่มีแผ่นกั้นการชนกันจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามการเพิ่มของปริมาณอนุภาคที่อยู่ในระบบ ส่วนการอบแห้งแบบมีแผ่นกั้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามปริมาณของอนุภาค



ภาพประกอบ 6 ผลของแผ่นกั้นที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Tamir, A. 1994)

2.2 การคำนวณค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร

สมรรถนะเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำวนพิจารณาได้จากค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร (N_v) (Tamir, A. 1994)

$$N_v = \frac{W_p (x_i - x_e)}{V_r} \quad (2.8)$$

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร (h_v) (Tamir, A. 1994)

$$h_v = \frac{W_p (x_i - x_e) \lambda}{V_r \Delta T_{lm}} \quad (2.9)$$

โดยที่ ΔT_{lm} คือ ผลต่างอุณหภูมิแบบลอการิทึม ซึ่งเป็นตัวแทนของอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างของไหลทางเข้าและทางออก โดยสมการที่ (2.10)

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{db.} - T_{wb.})_e - (T_{db.} - T_{wb.})_i}{\ln \frac{(T_{db.} - T_{wb.})_e}{(T_{db.} - T_{wb.})_i}} \quad (2.10)$$

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 (kg/h)

V_r คือ ปริมาตรห้องอบแห้ง (m^3)

X_i คือ ความชื้นของวัสดุที่ทางเข้า ($\text{kg}/\text{kg}_{\text{d.b.}}$)

X_e คือ ความชื้นของวัสดุที่ทางออก ($\text{kg}/\text{kg}_{\text{d.b.}}$)

λ คือ ความร้อนแฝงของการระเหย (kJ/kg)

2.3 การหาค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ (τ) (Kitron, Y.; & Tamir, A. 1988)

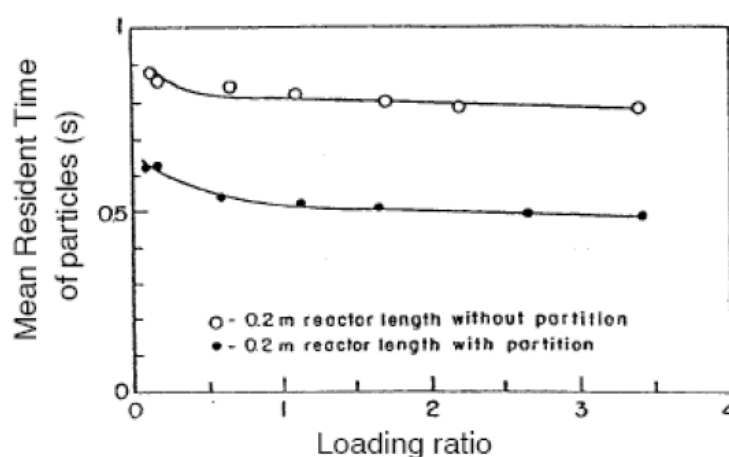
$$\tau = \frac{M_p}{W_p} \quad (2.11)$$

เมื่อ

τ คือ เวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ (s)

M_p คือ ปริมาณวัสดุที่อยู่ในระบบ (kg)

W_p คือ อัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุ (kg/s)



ภาพประกอบ 7 อัตราส่วนภาระที่มีผลต่อค่าเวลาเฉลี่ยของวัสดุที่อยู่ในระบบอบแห้งที่มีแผ่นกั้นและไม่มีแผ่นกั้น (Tamir, A. 1994)

จากภาพประกอบ 7 แสดงถึงเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบอบแห้งที่มีแผ่นกั้นและไม่มีแผ่นกั้น จะพบว่าระบบอบแห้งที่ไม่มีแผ่นกั้น ค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบจะมีค่ามากกว่าค่าเวลาเฉลี่ยของวัสดุที่อยู่ในระบบอบแห้งแบบมีแผ่นกั้น เนื่องจากระบบอบแห้งที่ไม่มีแผ่นกั้นนั้นวัสดุจะสามารถเคลื่อนที่กลับไป-กลับมาในระนาบขนได้มากขึ้นจึงทำให้วัสดุสามารถอยู่ในระบบได้นานขึ้น

2.4 การประมาณความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) (Nimmol, C.; et al. 2007; Watchiaphansakul, S.; & Devahastin, S. 2007)

การประมาณความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ คือ อัตราส่วนระหว่างพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบอบแห้งต่อปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุเป็นกิโลกรัม สามารถหาได้โดยสมการ ดังนี้

$$SEC = \frac{E}{M_w} \quad (2.12)$$

เมื่อ

SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ($\text{MJ/kg}_{\text{water}}$)

E คือ พลังงานที่ป้อนให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้า (MJ)

M_w คือ ปริมาณน้ำ (ความชื้น) ที่นำออกจากวัสดุที่นำมาอบแห้ง (kg) ซึ่งสามารถหาได้จากความแตกต่างระหว่างความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายของวัสดุที่นำมาอบแห้ง สำหรับวัสดุที่นำมาอบแห้งมีการเคลื่อนที่ออกจากเครื่องอบแห้งแบบต่อเนื่องสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$M_w = W_p (x_i - x_e)t \quad (2.13)$$

เมื่อ

W_p คือ อัตราการป้อนวัสดุ ($\text{kg}_{\text{dry solid}}/\text{min}$)

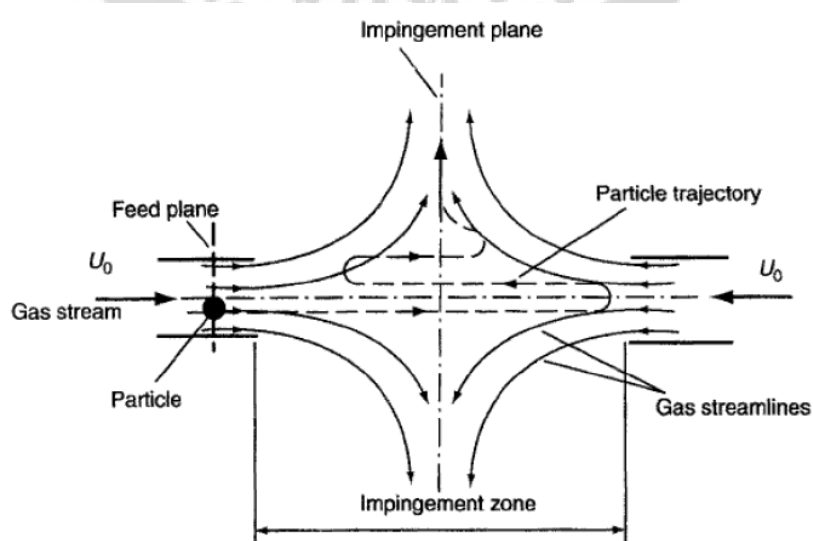
x_i คือ ความชื้นของวัสดุก่อนการอบแห้ง (kg/kg, d.b.)

x_e คือ ความชื้นของวัสดุหลังการอบแห้ง (kg/kg, d.b.)

t คือ เวลาในการอบแห้ง (min)

3. หลักการของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน

เครื่องอบแห้งกระแสน (Impinging stream dryers, ISD) จัดอยู่ในกลุ่มเครื่องอบแห้งแบบรวดเร็ว (Flash dryers) ซึ่งเหมาะแก่การอบแห้งอนุภาคเปียก (Wet particles) มีหลักการพื้นฐาน คือ การกำหนดให้กระแสนไหลซึ่งเป็นตัวกลางการอบแห้งตั้งแต่สองกระแสนไหลมาชนกัน โดยให้กระแสนใดกระแสนหนึ่งหรือมากกว่าพาอนุภาคเข้าสู่ระบบ โดยกระบวนการอบแห้งจะเกิดขึ้นบริเวณที่มีการชนกันเป็นหลัก จากคุณลักษณะของอุทกพลวัต (Hydrodynamic characteristics) ในบริเวณการชนและผลของแรงเฉื่อย (Inertia) ของวัสดุที่มีมากกว่าของไหลที่เป็นตัวกลาง ทำให้การเคลื่อนที่ของอนุภาคของกระแสนมีความพิเศษ คือ มีการเคลื่อนที่ของอนุภาคแบบสวนทางกลับไป – กลับมา (Oscillatory motion) ภายในระนาบการชน การเคลื่อนที่ลักษณะนี้ทำให้อนุภาคอยู่ในระบบได้นานขึ้น จึงมีเวลาให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนและมวลสารกับตัวกลางการอบแห้งมากขึ้น ในบริเวณการชนยังมีความปั่นป่วนสูงจึงทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลสารสูงขึ้น จึงส่งผลให้ความชื้นของวัสดุระเหยอย่างรวดเร็วและทำให้เวลาในการอบแห้งลดลง



ภาพประกอบ 8 หลักการของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน (Kudra, T.; et al. 1995)

จากลักษณะพิเศษทางอุทกพลศาสตร์ของระบบกระแสน ทำให้เครื่องอบแห้งแบบกระแสน มีลักษณะเด่นหลายประการดังนี้ (Kudra, T.; et al. 1995)

1. อัตราการอบแห้งสูง
2. การทำงานของเครื่องอบแห้งไม่ยุ่งยากเพราะไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่
3. มีขนาดเล็กกว่าเครื่องอบแห้งชนิดอื่นที่ภาระการอบแห้งเท่ากัน
4. สามารถใช้งานร่วมกับกระบวนการอื่นๆ เช่น กระบวนการทางเคมี การทำความเย็น

4. ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

คิตรอน และทาเมียร์ (Kitorn, Y.; & Tamir, A. 1988) ศึกษาพลศาสตร์การเคลื่อนที่ของวัสดุ การอบแห้ง เวลาที่วัสดุอยู่ในระบบ และการถ่ายเทความร้อนของเครื่องอบแห้งกระแสนแบบแกนเดียวกัน พบว่าปริมาณการถ่ายเทมวลและความร้อนไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาตรของห้องอบแห้งแต่ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างท่อทางเข้าห้องอบแห้งทั้งสองด้าน ส่วนเวลาเฉลี่ยของวัสดุที่อยู่ในระบบ พบว่ามีส่วนสัมพันธ์กับอัตราส่วนภาระ คือ เมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น ค่าเวลาเฉลี่ยที่อยู่ในระบบก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วยทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากพลังงานจลน์ของวัสดุมีค่ามากขึ้นก็จะส่งผลให้วัสดุมีการเคลื่อนที่กลับไป-กลับมาได้นานขึ้น ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราการป้อนวัสดุ

ทาเมียร์ (Tamir, A. 1989) ศึกษาการอบแห้งวัสดุในเครื่องอบแห้งแบบกระแสน โดยใช้เมล็ดข้าวฟ่างเป็นวัสดุในการทดสอบวัสดุที่ใช้มีค่าความชื้นเริ่มต้นประมาณ 25 – 30 % (d.b.) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 1.5 mm. และ 1.9 mm. มีความหนาแน่นเท่ากับ 1,153 kg/m³ ส่วนอากาศร้อนที่ใช้ในการอบแห้งคงที่โดยที่อุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าคงที่เท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศด้านเข้าห้องอบแห้ง ส่วนการเปรียบเทียบสมรรถนะเครื่องอบแห้งนั้นพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรที่มีค่าเพิ่มมากขึ้นจากการที่มวลของวัสดุที่อยู่ในระบบมากขึ้น ย่อมแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของเครื่องอบแห้งที่มากกว่าด้วย

คูดา และมุจัมดา (Kudra, T.; & Mujumdar, A.S. 1989) ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบเครื่องอบแห้งแบบกระแสนและเปรียบเทียบคุณลักษณะในการอบแห้งวัสดุอนุภาคของเครื่องอบแห้งแบบกระแสนกับเครื่องอบแห้งชนิดอื่นๆ เช่น เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบด เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดแบบสั่น (Vibrofluidized bed dryer) และเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (Pneumatic dryer) โดยการจำแนกประเภทของเครื่องอบแห้งแบบกระแสนนั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดและทิศทางการไหลของของไหล จากข้อมูลการวิจัยดังกล่าวพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรของเครื่องอบแห้งแบบกระแสนจะมีค่าสูงกว่าเครื่องอบแห้งชนิดอื่น โดย

มีค่าประมาณ $260 - 112,500 \text{ W/m}^3\text{K}$ ในขณะที่เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยจะมีค่าประมาณ $1,000 - 6,000 \text{ W/m}^3\text{K}$ และเครื่องอบแห้งแบบสปาร์ตเต็ดเบด และ เครื่องอบแห้งแบบไซโคลนจะมีค่าประมาณ $5,800 \text{ W/m}^3\text{K}$

คิตรอน และทาเมียร์ (Kitorn, Y.; & Tamir, A. 1990) ศึกษาคุณลักษณะเฉพาะของเครื่องอบแห้งกระแสนแบบแกนเดียว ซึ่งใช้วัสดุในการทดลอง คือ เมล็ดข้าวฟ่าง ซึ่งมีความหนาแน่น $1,153 \text{ kg/m}^3$ และเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 1.9 mm . โดยทำการทดลองอบแห้งด้วยอัตราการอบแห้งคงที่พบว่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบเพิ่มขึ้นตามอัตราการลดลงของอัตราส่วนภาวะ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรจะเพิ่มขึ้นเมื่อมวลของวัสดุที่อยู่ในระบบและอัตราการไหลของอากาศมีค่าเพิ่มมากขึ้น

ทาเมียร์ (Tamir, A. 1994) เป็นการศึกษาความสามารถในการอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน โดยทำการศึกษาเครื่องอบแห้งที่มีและไม่มีแผ่นกั้นระหว่างกลางของกระแสนสองกระแสน จากผลการทดลองพบว่าในกรณีของเครื่องอบแห้งที่ไม่มีแผ่นกั้นทำให้เกิดการชนโดยตรงของอนุภาคอากาศร้อนทั้งสองกระแสนได้ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามปริมาณการเพิ่มของอนุภาคที่อยู่ในเครื่องอบแห้ง ในขณะที่เครื่องอบแห้งแบบมีแผ่นกั้นระหว่างกระแสนอากาศร้อนทั้งสองกระแสนมีการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนอย่างไม่มีนัยสำคัญเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอนุภาคที่อยู่ในเครื่องอบแห้ง จากการทดลองดังกล่าวอาจสรุปได้ว่าการชนกันของกระแสนอากาศร้อนสองกระแสนมีผลอย่างยิ่งต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลระหว่างอนุภาคและตัวกลางการอบแห้ง นอกจากนี้ยังพบว่าการอบแห้งส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่บริเวณกระแสนของไหลสองกระแสนเกิดการชนกัน

คูดา และคณะ (Kudra, T.; et al. 1995) ได้กล่าวถึงการประยุกต์การใช้เครื่องอบแห้งแบบกระแสนในการอบแห้งของเสียที่เป็นตะกอนโดยการใช้เครื่องอบแห้งกระแสนแกนเดียว โดยใช้อุณหภูมิในการอบแห้งระหว่าง $560 - 700^\circ\text{C}$ ส่วนความเร็วของตัวกลางที่ออกจากหัวฉีดอยู่ที่ระหว่าง $200 - 250 \text{ m/s}$ ซึ่งความเร็วดังกล่าวเพียงพอที่จะส่งให้ของไหลดังกล่าวเคลื่อนที่ไปตามท่อได้ ความชื้นเริ่มต้นของตะกอนของเสียมีค่าประมาณ $72 - 83 \%$ (w.b.) จากการทดลอง พบว่าความสิ้นเปลืองการใช้อากาศจำเพาะต่อกิโกรัมการระเหยของน้ำอยู่ที่ $4.5 - 5 \text{ Nm}^3$ และการใช้พลังงานไฟฟ้าอยู่ระหว่าง $0.02 - 0.03 \text{ kWh/kg}$ ความชื้นสุดท้ายของตะกอนมีค่า 2% (w.b.) สำหรับตะกอนขนาด 0.25 mm . ถึง 55% (w.b.) สำหรับขนาด 5 mm . โดยเฉลี่ยแล้วตะกอนที่มีขนาดระหว่าง $1 - 2 \text{ mm}$. จะมีความชื้นสุดท้ายประมาณ 19.5% (w.b.)

เหยา และคณะ (Yao, B.; et al. 1995) ศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการทำความเย็นจากการระเหยของอากาศ (evaporation cooling of air) ในระบบกระแสน โดยใช้ข้อมูลที่

ได้จากการทดลองและประยุกต์ใช้วิธีของ Buckingham pi เพื่อหาสมการความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อสมรรถนะเครื่องทำความเย็นจากการระเหย โดยสมรรถนะเครื่องทำความเย็นจากการระเหยนั้นพิจารณาเปรียบเทียบได้จากสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร

หู และหลิว (Hu, X.; & Liu, D. 1999) ทำการทดลองเพื่อศึกษาคุณลักษณะการไหลและการอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบแบบกระแสนวนแฉกตั้งจากผลการทดลองพบว่า การเพิ่มขึ้นของอัตราการระเหยน้ำออกจากผิวของวัสดุ ในขณะที่อัตราส่วนภาระจะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของอากาศ ซึ่งจะทำให้เวลาเฉลี่ยของวัสดุที่อยู่ในระบบมีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของคิตรอนและทาร์เมียร์ (Kitron, Y.; & Tamir, A. 1990) เนื่องจากวัสดุมีแรงเฉื่อยมากขึ้นทำให้วัสดุสามารถเคลื่อนที่สวนเข้าไปยังกระแสนวนตรงกันข้ามได้มากขึ้น หรืออาจจะเป็นเพราะว่าอัตราส่วนภาระลดลงจากการลดการป้อนวัสดุโดยที่อัตราการไหลของอากาศคงที่ จะทำให้มีมวลของวัสดุที่อยู่ในระบบน้อยลง วัสดุมีการชนกันเองน้อยลงจึงเกิดการสูญเสียพลังงานจลน์น้อยลง ทำให้วัสดุมีพลังงานจลน์เหลือที่จะสามารถเคลื่อนที่กลับไป-กลับมาได้นานขึ้น จึงทำให้เวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบได้นานขึ้น

หู และคณะ (Hu, X.L.; et al. 2003) ศึกษาการอบแห้งของเครื่องอบแห้งกระแสนวนที่มีแนวการเคลื่อนที่ของวัสดุแบบครึ่งวงกลม (Semi – circular impinging stream dryer) โดยตัวอย่างที่ใช้ทดสอบเป็นลักษณะเป็นเม็ด โดยศึกษาถึงตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อกระบวนการอบแห้ง เช่น อุณหภูมิอากาศด้านเข้า อัตราส่วนภาระและความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ จากการศึกษาพบว่า ระยะเวลาในการอบแห้งแบบอัตราการอบแห้งคงที่ไม่ได้ขึ้นอยู่กับส่วนของการชนกันแบบกึ่งวิถีโค้งเพียงอย่างเดียว ค่าประมาณของรัศมีมีความโค้ง อัตราส่วนภาระ ความเร็วของอากาศและอุณหภูมิที่สูงขึ้นของอากาศด้านเข้าจะเป็นส่วนที่จะทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งดีขึ้นและลดการใช้พลังงานสุทธิและค่าใช้จ่ายดำเนินงาน ผลที่ได้จากการคำนวณและผลการทดลองมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน

สถาพรประสาธน์, เทพหัสดิน และโสภณรณฤทธิ์ (Sathapornprasath, K.; Devahastin, S.; & Soponronnarit, S. 2004) ศึกษาผลการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขการทดลองที่มีผลต่อสมรรถนะเครื่องอบแห้งกระแสนวน โดยคำนวณค่าอัตราการระเหยของน้ำจากวัสดุอนุภาคเดี่ยวภายใต้ช่วงอัตราอบแห้งคงที่สำหรับอากาศร้อน พบว่าการเพิ่มขึ้นของความเร็วอากาศด้านเข้า อุณหภูมิอากาศด้านเข้าจะส่งผลให้อัตราการระเหยของน้ำ ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของความชื้นสัมพัทธ์จะทำให้อัตราการระเหยของน้ำลดลง ส่วนกรณีของไอน้ำร้อนยิ่งยวดยิ่ง พบว่าการเพิ่มขึ้นของไอน้ำร้อนยิ่งยวดด้านเข้าและอุณหภูมิไอน้ำร้อนยิ่งยวดด้านเข้าจะส่งผลให้อัตราการระเหยของน้ำเพิ่มมากขึ้น แต่ขณะที่การเพิ่มขึ้นของความดันของไอน้ำร้อนยิ่งยวดยิ่งจะส่งผลให้อัตราการระเหยของน้ำมีค่าลดลง และกรณีของค่าอุณหภูมิผกผันของเครื่องอบแห้งแบบกระแสนวนที่พิจารณานี้จะมีค่าประมาณ $212\text{ }^{\circ}\text{C}$ ที่อัตราการระเหยเท่ากับ $60\text{ kg/m}^3\text{h}$

สถาพรประสาธน์, เทพหัสดิน และโสภณรณฤทธิ์ (Sathapornprasath, K.; Devahastin, S.; & Soponronnarit, S. 2007) ทำการลดความชื้นของเรซินด้วยเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำที่มีลักษณะคล้ายกับงานวิจัยของเซาว์ หยาน และ บัวเกา (Cao, C.; Yan, Z.; & Baoguo, L. 1999) โดยศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆ เช่น อุณหภูมิอากาศร้อนด้านเข้า (110 – 150 °C) ความเร็วอากาศด้านเข้า อัตราการป้อนวัสดุ และระยะห่างในการชนที่มีผลต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำในแง่ของอัตราการระเหยของน้ำเชิงปริมาตรและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร โดยเรซินที่นำมาทดลองมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 81 – 85 % (d.b.) ผลจากการทดลองพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิของอากาศด้านเข้าจะส่งผลให้อัตราการระเหยของน้ำเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้น แต่กลับไม่ส่งผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิของอากาศร้อนด้านเข้าค่าเดียวกัน ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อความเร็วของอากาศด้านเข้าและการป้อนวัสดุมีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับอัตราการระเหยของน้ำเชิงปริมาตรสูงสุดและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุดที่ได้มีค่าเท่ากับ $110 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3\text{h}$ และ $880 \text{ W}/\text{m}^3\text{K}$ ตามลำดับ

นิมมอล และเทพหัสดิน (Nimmol, C.; & Devahastin, S. 2010) หาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำแกนเดียวสองทิศทางสำหรับอบแห้งข้าวเปลือก โดยการทดลองและศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่างๆ เช่น อุณหภูมิอากาศร้อน ระยะการชน อัตราการป้อนวัสดุและลักษณะการป้อนวัสดุทั้งแบบทิศทางเดียวและสองทิศทาง หาสมรรถนะเครื่องอบแห้งจากอัตราการระเหยของน้ำเชิงปริมาตรและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร รวมถึงอัตราความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้น ผลจากการทดลองพบว่า สามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกได้ 3.4 – 7.7 % ตามมาตรฐานแห้ง การระเหยของน้ำสูงสุดมีค่าประมาณ $198 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3\text{h}$ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรมีค่าประมาณ $7,013 \text{ W}/\text{m}^3\text{K}$ ค่าเวลาเฉลี่ยที่อนุภาคอยู่ในระบบประมาณ 1.81 – 2.42 s อัตราการใช้พลังงานจำเพาะต่ำสุดประมาณ $5.1 \text{ MJ}/\text{kg}_{\text{water}}$ เมื่อมีการป้อนวัสดุแบบสองทิศทาง โดยอุณหภูมิอากาศด้านเข้า 110 °C ระยะการชน 5 cm. อัตราการป้อนวัสดุอยู่ที่ $150 \text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$

จ้อยเจริญ เทพหัสดิน และโสภณรณฤทธิ์ (Choicharoen, K.; Devahastin, S.; & Soponronnarit, S. 2011) ทำการปรับปรุงเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำสำหรับวัสดุอนุภาคของสถาพรประสาธน์ (Sathapornprasath, K. 2007) เพื่อหาสมรรถนะเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำในแบบอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร โดยใช้กากถั่วเหลืองเป็นวัสดุในการทดลองอบแห้ง และได้ศึกษาถึงเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบรวมถึงการประมาณความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องอบแห้ง ผลจากการปรับปรุงเครื่องพบว่า อัตราการระเหยของน้ำ

เชิงปริมาตรสูงสุดมีค่าประมาณ $520 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3\text{h}$ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าประมาณ $4,500 \text{ W/m}^2\text{K}$ เวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบมีค่าประมาณ $0.97 - 1.74 \text{ s}$ ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าประมาณ $5.6 \text{ MJ/kg}_{\text{water}}$

กิตติ (2552) ทำการศึกษาผลกระทบอุณหภูมิของอากาศร้อนที่มีผลต่อสมรรถนะเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำในรูปของอัตราการระเหยของน้ำเชิงปริมาตร โดยใช้ข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 21 % (d.b.) เป็นวัสดุที่ใช้สำหรับทดลอง ซึ่งการอบแห้งอยู่ในช่วงการอบแห้งคงที่ไม่มี การกีดขวางของกระแสอากาศทั้งสองที่อยู่ตรงกันข้าม ห้องอบแห้งทำจากท่อสแตนเลสมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 m. ระยะห่างในการชน 0.20 m. อัตราส่วนภาระ 0.1 – 0.2 และอุณหภูมิของอากาศร้อนอยู่ระหว่าง $70 - 110^\circ\text{C}$ พบว่า ค่าอัตราการระเหยของน้ำเชิงปริมาตรสูงสุดเท่ากับ $474.43 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3\text{h}$ โดยเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบประมาณ 2 s

ธัญญาพร (2553) ศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำสำหรับวัสดุทางการเกษตร โดยศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งและอัตราส่วนภาระที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งในรูปของอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร การใช้พลังงานจำเพาะของแต่ละเงื่อนไขการทดลอง ในการทดลองได้เลือกใช้ข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 20 – 30 % (d.b.) ซึ่งการทดลองจะให้เฉพาะช่วงการอบแห้งแบบคงที่เท่านั้น ห้องอบแห้งทำจากสแตนเลสมีปริมาตร 0.047 m^3 ระยะห่างในการชนเท่ากับ 0.24 m. ระบบอบแห้งถูกหุ้มด้วยฉนวนใยแก้วหนา 0.05 m. ในการทดลองใช้อุณหภูมิ $70 - 110^\circ\text{C}$ ความเร็วลมของอากาศคงที่เท่ากับ 25 m/s อัตราส่วนภาระ 0.1 – 0.6 ไม่มีการกั้นของกระแสอากาศร้อน จากการทดลองพบว่า ความชื้นของวัสดุได้ลดลงประมาณ 6 % (d.b.) อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุด $963.7 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3\text{h}$ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร $1,832.5 \text{ W/m}^2\text{K}$ ที่อุณหภูมิด้านเข้า 110°C อัตราส่วนภาระ 0.56 ค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบประมาณ 1 s ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของพัสดุมีค่ามากกว่าค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องกำเนิดความร้อนเฉพาะที่อุณหภูมิ 70°C และ 90°C และจากการศึกษาพบว่าค่าความชื้นสุดท้ายจากการทดลองและการทำนายด้วยการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้มิติมีความแตกต่างกัน 1.53 % เมื่อเปรียบเทียบเมล็ดข้าวที่ได้จากเครื่องอบแห้งกับเมล็ดข้าวที่ตากลมที่อุณหภูมิห้องพบว่า ปริมาณข้าวเต็มเมล็ดและข้าวตันแตกต่างกันไม่เกิน 17 % และความขาวของข้าวสารมีความแตกต่างกัน 9 %

ปฏิวดี (2554) ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำในช่วงเริ่มต้น ร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมในช่วงหลังซึ่งใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางการอบแห้ง โดยกำหนดให้ กระแสของอากาศร้อนไหลเข้าชนกันในระดับตรงโดยที่วัสดุถูกลำเลียงเข้าสู่ระบบด้วยกระแสไหลเพียงกระแสเดียวเมื่อวัสดุถูกพาเข้าสู่ห้องอบแห้งแบบกระแสน้ำแล้ว วัสดุที่ได้จะมีความชื้นที่ผิวลดลง

และจะถูกลำเลียงเข้าสู่กระบวนการอบแห้งแบบพาหะลมต่อ ในการทดลองจะศึกษาถึงผลกระทบของตัวแปรต่างๆ เช่น อุณหภูมิอบแห้งและอัตราการป้อนวัสดุ ที่มีผลต่อสมรรถนะเครื่องอบแห้งในรูปของอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ โดยใช้ข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้น 28 % (d.b.) อุณหภูมิอบแห้งอยู่ระหว่าง 70 – 110 °C อัตราการป้อนวัสดุอยู่ที่ 22 – 62 kg_{dry solid}/h ผลจากการทดลองพบว่า เครื่องอบแห้งแบบกระแสนร่วมนกับพาหะลมสามารถลดความชื้นข้าวเปลือกลงได้ 6.6 – 9.7 % (d.b.) ภายในเวลาอันรวดเร็วและคุณภาพข้าวอยู่ในเกณฑ์ดี อัตราการระเหยของน้ำเชิงปริมาตรสูงสุดอยู่ที่ 328.88 kg_{water}/m³h ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุดอยู่ที่ 604.45 W/m³K ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะทั้งหมดมีค่าต่ำสุด 2.65 MJ/kg_{water} ซึ่งพลังงานที่ใช้้น้อยกว่าระบบอบแห้งแบบระเหยอย่างเดียวประมาณ 5 %

จากงานวิจัยต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าเครื่องอบแห้งชนิดต่างๆ ส่วนมากแล้วจะใช้ อากาศร้อนเป็นตัวกลางการอบแห้ง สำหรับเครื่องอบแห้งแบบกระแสนร่วมนั้นเป็นเครื่องอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับวัสดุที่มีความชื้นที่ผิวในปริมาณที่สูง สามารถลดความชื้นของวัสดุได้อย่างรวดเร็ว เครื่องอบแห้งแบบกระแสนร่อนถือเป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งวัสดุทางการเกษตรที่มีลักษณะเป็นอนุภาค ด้วยข้อดีที่ว่าระบบไม่มีความซับซ้อนและสามารถลดความชื้นที่ผิวของวัสดุได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้การใช้พลังงานของกระบวนการลดความชื้นด้วยเทคนิคดังกล่าวเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ จากงานวิจัยที่ได้กล่าวมาข้างต้นส่วนมากจะเป็นการทดลองโดยการอบแห้งแบบอนุภาคเคลื่อนที่ชนกันแบบระนาบตรง

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นทำการทดลองลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งกระแสนร่อนโดยการกำหนดให้วัสดุเคลื่อนที่อยู่ในระบบโค้งตามขนาดของห้องอบแห้งซึ่งมีการศึกษาวิจัยน้อยมาก จากการเคลื่อนที่ของวัสดุตามลักษณะดังกล่าวมีแนวโน้มที่จะทำให้เวลาที่วัสดุอยู่ในระบบได้นานขึ้นและสามารถลดความชื้นของวัสดุได้มากขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตามการควบคุมอุณหภูมิอากาศร้อนความเร็วของอากาศร้อนและอัตราการป้อนวัสดุที่เหมาะสมถือเป็นปัจจัยสำคัญต่อการรักษาคุณภาพข้าวเปลือกให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาสมรรถนะเครื่องอบแห้งนี้จะพิจารณาจากอัตราการระเหยของน้ำเชิงปริมาตร อัตราการป้อนวัสดุที่เหมาะสม ความเร็วของอากาศด้านเข้า อุณหภูมิอากาศด้านเข้าและด้านออก การหาความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง รวมถึงการหาค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบและการประมาณความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ โดยสามารถแบ่งเป็นหัวข้อสำหรับขั้นตอนการทดลองเป็นดังนี้

1. วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

ข้าวเปลือกที่ใช้วิจัย คือ ข้าวเปลือกพันธุ์ปทุมธานี 1 จากศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี ซึ่งมีลักษณะเด่นดังนี้ (กรมการข้าว. 2543)

1. เป็นข้าวไม่ไวต่อช่วงแสง
2. เมล็ดคล้ายกับข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ข้าวสุกนุ่มเหนียวมีกลิ่นหอม
3. ต้านทานเพลี้ยกระโดดหลังขาว
4. ต้านทานโรคใบไหม้
5. ต้านทานต่อเพลี้ยกระโดดสีน้ำตาล
6. ทนต่อโรคขอบใบแห้ง
7. ให้ผลผลิตเฉลี่ย 650-770 กิโลกรัมต่อไร่

2. อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยและสถานที่ทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง คือ เครื่องอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้งในระดับห้องปฏิบัติการ โดยทำการทดลองและเก็บข้อมูลที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

จากภาพประกอบ 9 เครื่องอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้งประกอบด้วยส่วนต่างๆ ที่ถูกหุ้มด้วยฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน และเครื่องมือวัดค่าต่างๆตามรายการดังต่อไปนี้

1. เป็นพัดลมแรงดันสูง (Side channel blower, RT-5026, Taiwan) จำนวน 2 ชุด
2. ชุดควบคุมปริมาณการไหลของอากาศมีอยู่ 2 ชุด โดยการใช้โกลบวาล์ว
3. เครื่องกำเนิดความร้อนชนิดแท่งไฟฟ้าขนาด 15 kW จำนวน 2 ชุด

4. ชุดป้อนวัสดุแบบสายพานลำเลียงที่สามารถปรับความเร็วรอบของสายพานได้โดยการปรับแรงเคลื่อนไฟฟ้าของมอเตอร์กระแสตรง

5. อุปกรณ์รองรับวัสดุจากสายพานลำเลียงเข้าสู่ห้องอบแห้ง ทำจากสแตนเลส

6. ห้องอบแห้ง มี 2 ขนาด คือ 50 ลิตร และ 20 ลิตร ทำจากสแตนเลส

7. เครื่องชั่งน้ำหนัก (KRO-TRON, SKS-2001 SG-1500, Taiwan)

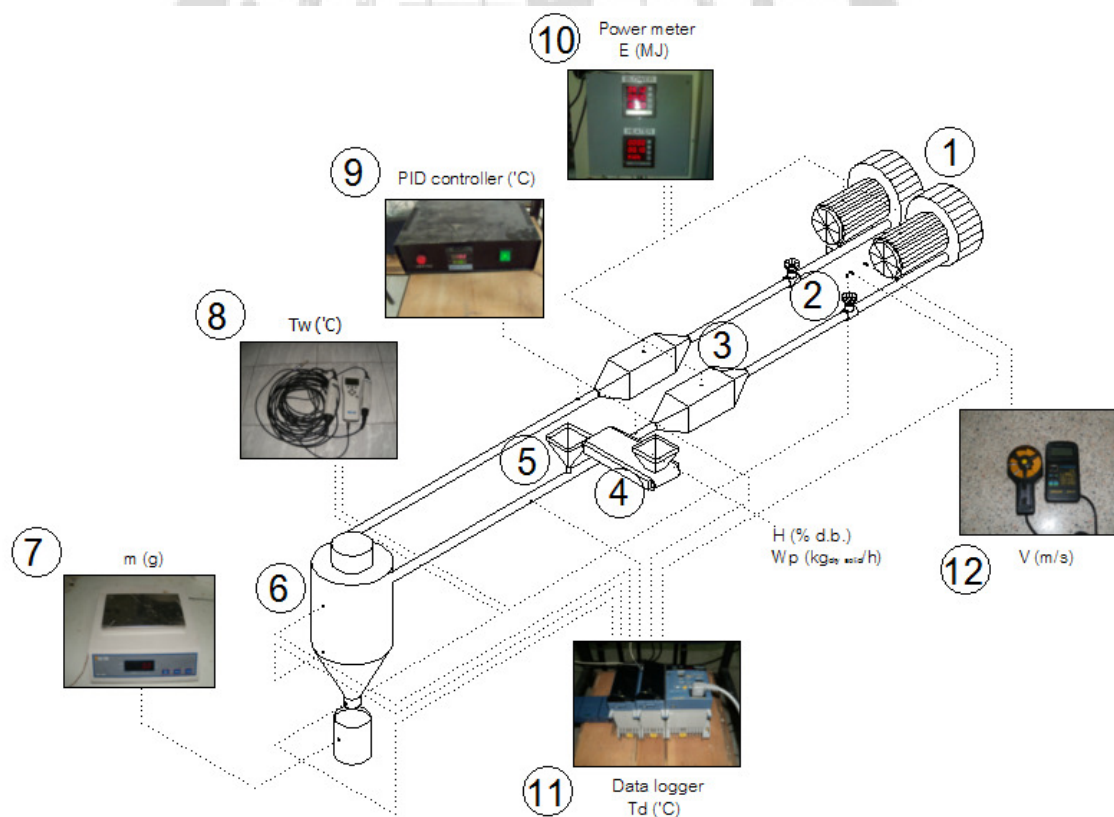
8. เครื่องวัดอุณหภูมิกระเปาะเปียก (VAISALA, HM70, Finland)

9. ชุดควบคุมอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดความร้อนด้วยไฟฟ้าชนิดแท่ง (Digicon, MD-400N, Taiwan)

10. เครื่องเก็บข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบอบแห้ง (Algodue Electronica, UPM310, Italy)

11. เครื่องวัดอุณหภูมิกระเปาะแห้ง (Yokogawa, MW100, Japan) ใช้ควบคู่กับ Thermocouple type K

12. เครื่องวัดความเร็วลม (Digicon, DA – 41, Taiwan)



ภาพประกอบ 9 จุดตรวจวัดของเครื่องอบแห้งกระแสแบบวิถีโค้ง

เมื่อ

V คือ ความเร็วอากาศด้านเข้า, m/s

m คือ มวลของข้าวเปลือก, g

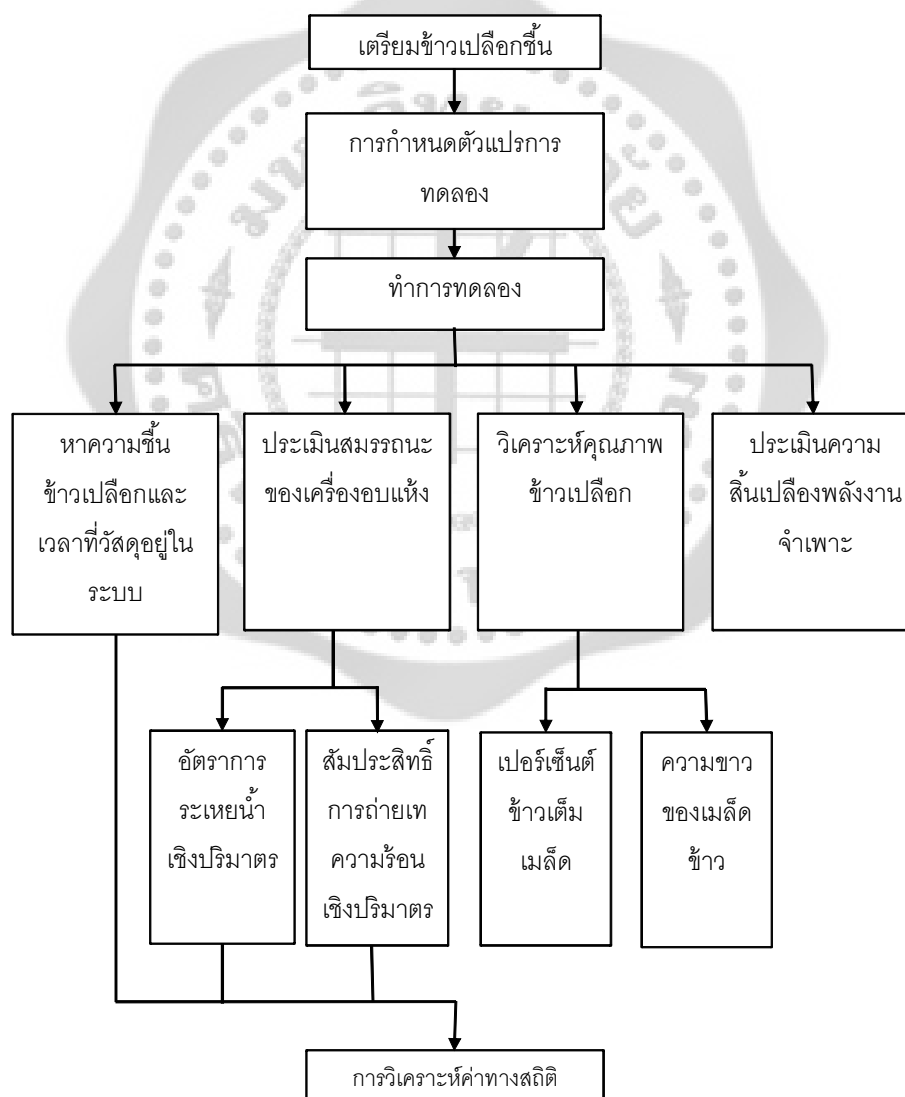
H คือ ความชื้นข้าวเปลือก, % d.b.

E คือ พลังงานจำเพาะของระบบแห้ง, MJ

T_d คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้ง, °C

T_w คือ อุณหภูมิกระเปาะเปียก, °C

W_p คือ อัตราการป้อนข้าวเปลือก, $\text{kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$



ภาพประกอบ 10 ขั้นตอนการทดลอง

3. ขั้นตอนในการเตรียมข้าวเปลือกขึ้น

การเตรียมความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก เป็นกระบวนการเพิ่มความชื้นแก่ข้าวเปลือกที่ได้มาจากการจำหน่ายของศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี จึงเป็นข้าวเปลือกที่ได้ผ่านกระบวนการลดความชื้นมาแล้วแต่ในการทดลองต้องใช้ข้าวเปลือกที่มีความชื้นใกล้เคียงกับข้าวเปลือกที่ได้จากการเก็บเกี่ยว จึงต้องมีการเพิ่มความชื้นให้กับข้าวเปลือกซึ่งจะใช้วิธีคลุกข้าว มีวิธีการเตรียมดังนี้

1. นำข้าวเปลือกที่แช่เย็นที่อุณหภูมิ 4 – 6 °C จากตู้แช่ (Apache daily cool, STFF2, Thailand) มาผึ่งไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 30 นาที
2. เพิ่มความชื้นให้ข้าวเปลือกโดยการเติมน้ำในปริมาณที่คำนวณได้
3. ทำการคลุกเคล้าข้าวเปลือกให้เข้ากันน้ำให้ทั่วถึงและสม่ำเสมอ
4. นำข้าวเปลือกที่ได้ไปพักไว้ในภาชนะที่ปิดมิดชิด แล้วนำไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 – 6 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง โดยจะต้องทำการคลุกเคล้าทุก 24 ชั่วโมง เพื่อให้น้ำกระจายตัวอย่างทั่วถึงและสม่ำเสมอภายในเมล็ดข้าว
5. นำข้าวเปลือกที่ได้จากการแช่เย็นจนครบ 72 ชั่วโมง มาผึ่งไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 30 นาที เพื่อให้อุณหภูมิของข้าวเปลือกเท่ากับอุณหภูมิห้องก่อนการทดลอง

4. ขั้นตอนการกำหนดตัวแปรการทดลอง

งานวิจัยนี้จะกำหนดตัวแปรต่างๆที่จะมีผลกระทบต่ออัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร โดยจะมีการควบคุมและปรับเปลี่ยนอุปกรณ์ตามรายละเอียดดังนี้

1. กำหนดให้อัตราการไหลของอากาศด้านเข้าของพัดลมคงที่เท่ากับ 25 m/s
2. กำหนดให้อุณหภูมิอากาศด้านเข้าห้องอบแห้งเท่ากับ 70 90 และ 110 °C
3. กำหนดให้อัตราการป้อนวัสดุเท่ากับ 20 35 และ 56 kg_{dry solid}/h โดยการปรับความเร็วรอบของชุดสายพานลำเลียงด้วยเครื่องปรับแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรง (Hammax, 3-15 VDC 5A, Thailand)
4. กำหนดให้ทดลองโดยใช้ห้องอบแห้งมีปริมาตรขนาด 50 ลิตร และ 20 ลิตร ในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

5. ขั้นตอนการทดลองอบแห้งข้าวเปลือก

ในกระบวนการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกจะมีขั้นตอนต่างๆ สำหรับเตรียมการทดลอง ประกอบด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. กำหนดตัวแปรการทดลอง
2. ตรวจสอบสถานะความพร้อมของเครื่องอบแห้งหลังจากนั้นจึงเปิดเครื่อง
3. ปรับค่าความเร็วและอุณหภูมิของอากาศตามที่ต้องการ
4. เมื่อระบบอยู่ในภาวะคงตัวให้เริ่มป้อนวัสดุตามปริมาณที่ต้องการอย่างต่อเนื่อง
5. บันทึกค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกและกระเปาะแห้งของอากาศด้านเข้าและด้านออกของเครื่องอบแห้งหลังจากระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว
6. ทำการทดลองซ้ำจนครบทุกเงื่อนไขการทดลอง
7. นำวัสดุที่ได้จากการอบแห้งไปหาค่าความชื้นหลังการอบแห้ง
8. คำนวณค่าอัตราการระเหยของน้ำเชิงปริมาตร สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรและค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

6. ขั้นตอนการหาความชื้นข้าวเปลือก

การหาความชื้นของข้าวเปลือกโดยการใช้ความร้อนอบไล่ความชื้นออกไป (Oven methods) โดยนำวัสดุไปชั่งน้ำหนักก่อนที่จะนำวัสดุที่ต้องการหาความชื้นไปเข้าเครื่องอบ (Lab companion, OF – 01E, Korea) เพื่ออบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน Association of official agricultural chemists (AOAC) เมื่อได้ข้าวเปลือกที่ผ่านกรรมวิธีการอบดังกล่าวแล้ว จึงนำไปชั่งน้ำหนัก เพื่อกำหนดหาความชื้นตามมาตรฐานแห่งตามสมการ 2-2

7. ขั้นตอนการประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองสามารถนำมาประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งโดยการคำนวณหาอัตราการระเหยของน้ำเชิงปริมาตร และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร โดยใช้สมการที่ 2.8 และ 2.9 ตามลำดับ

8. ขั้นตอนการหาเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ

ค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบสามารถคำนวณได้โดยการวัดปริมาณของวัสดุที่อยู่ในระบบ (Hold – up) และค่าอัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุที่ป้อนเข้าสู่เครื่องอบแห้ง โดยสามารถคำนวณหาเวลาเฉลี่ยดังกล่าวได้จากสมการ 2.11

การหาค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบประกอบด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เปิดเครื่องเป่าลมแรงดันสูงและทำการปรับความเร็วลมภายในท่อส่งวัสดุให้ได้ตามค่าที่ต้องการ
2. ป้อนวัสดุที่ต้องการทดสอบเข้าสู่ระบบอบแห้งด้วยอัตราที่ต้องการอย่างต่อเนื่อง
3. เมื่อระบบอยู่ในภาวะคงตัว จะทำการหยุดการป้อนวัสดุเข้าสู่เครื่องอบแห้งพร้อมกันนั้นให้ปิดพัดลมแรงดันสูง ในระหว่างที่พัดลมแรงดันสูงและเครื่องป้อนวัสดุหยุดทำงานนั้น จะมีวัสดุบางส่วนตกค้างอยู่ภายในระบบอบแห้ง
4. เปิดพัดลมแรงดันสูงเพื่อเป่าให้วัสดุที่ตกค้างอยู่ภายในระบบออกมาให้หมด
5. นำวัสดุที่ตกค้างอยู่ภายในระบบทั้งหมดไปชั่งน้ำหนัก
6. คำนวณค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบตามสมการ 2.11

9. ขั้นตอนการวิเคราะห์คุณภาพข้าว

ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้าวที่ได้จากการอบแห้งนั้น จะเก็บตัวอย่างข้าวที่ได้จากการอบแห้งแล้วไปทำการวิเคราะห์คุณภาพของข้าว เช่น เปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดซึ่งมีวิธีการวิเคราะห์โดยนำข้าวเปลือกไปทำการสีและชั่งน้ำหนักข้าวสารที่ได้แล้วคัดเฉพาะข้าวเต็มเมล็ดมาชั่งน้ำหนักเพื่อที่จะคำนวณเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ด ส่วนความขาวของข้าวจะใช้ข้าวสารที่ได้มาทำการขัดหลังจากนั้นนำเข้าเครื่องตรวจวัด (Kett, C-300) เพื่อส่งวัดความขาวโดยจะใช้ค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย ซึ่งในกระบวนการวิเคราะห์ข้าวจะส่งข้าวตัวอย่างที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์ที่ศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี ดังแสดงในภาคผนวก จ

10. ขั้นตอนการประมาณความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องอบแห้ง

การใช้พลังงานในกระบวนการอบแห้งของเครื่องอบแห้งกระแสน สามารถวัดการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยใช้เครื่องวัดกำลังไฟฟ้า โดยแบ่งออกเป็นส่วนของพัดลมแรงดันสูงกับส่วนของแหล่งกำเนิดความร้อนโดยนำค่าพลังงานที่ได้มาคำนวณหาความสูญเสียพลังงานจำเพาะตามสมการ 2.12

11. ขั้นตอนการวิเคราะห์ทางสถิติ

การวิเคราะห์ผลการศึกษาโดยใช้หลักวิธีทางสถิติ โดยนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และแสดงผลการคำนวณค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรในรูปของค่าเฉลี่ย เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

รายละเอียดของบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองในการลดความชื้นของข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง โดยใช้ห้องอบแห้งขนาด 50 ลิตร และ 20 ลิตร ซึ่งผลทดลองที่ได้จะแสดงถึงค่าความชื้นของข้าวเปลือกที่ลดลง สมรรถนะของเครื่องอบแห้งซึ่งแสดงในรูปอัตราการระเหยของน้ำเชิงปริมาตรและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของระบบอบแห้งและคุณสมบัติทางกายภาพของข้าวที่ได้จากการลดความชื้น

1. ผลของตัวแปรที่มีผลต่อการลดความชื้น

ผลของตัวแปรที่มีผลต่อการลดความชื้นของกระบวนการอบแห้งภายใต้สภาวะและเงื่อนไขต่างๆ พบว่า สามารถลดความชื้นได้มากขึ้นเมื่ออัตราการป้อนวัสดุและอุณหภูมิอากาศด้านเข้าเพิ่มสูงขึ้นทุกเงื่อนไข เพราะว่าผลจากการเพิ่มอุณหภูมิอากาศด้านเข้าทำให้อัตราการระเหยของน้ำที่ผิววัสดุเพิ่มสูงขึ้น จึงส่งผลให้สามารถลดความชื้นของวัสดุลงได้มาก ส่วนผลของการป้อนวัสดุที่เพิ่มมากขึ้นที่อุณหภูมิอากาศด้านเข้าค่าเดียวกันส่งผลให้สามารถลดความชื้นของวัสดุลงได้มากขึ้นเช่นเดียวกัน

สำหรับการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้งที่มีขนาดห้องอบแห้งขนาด 20 ลิตร เปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งที่มีขนาดห้องอบแห้ง 50 ลิตร พบว่า เมื่ออุณหภูมิอากาศด้านเข้าและอัตราการป้อนวัสดุค่าเดียวกัน เครื่องอบแห้งที่มีขนาดห้องอบแห้ง 20 ลิตร สามารถลดความชื้นได้มากกว่าทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าวัสดุมีเวลาอยู่ในระบบนานกว่าทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างตัวกลางกับวัสดุมีค่ามากกว่าระบบที่วัสดุมีเวลาอยู่ในระบบสั้น (พิจารณาประกอบกับตาราง 8) จึงส่งผลให้อัตราการระเหยของน้ำที่ผิวของวัสดุมากกว่า จึงทำให้ลดความชื้นของวัสดุได้มากกว่า เครื่องอบแห้งที่มีขนาดห้องอบแห้ง 20 ลิตร สามารถลดความชื้นได้สูงสุด 5.5 % d.b. ส่วนเครื่องอบแห้งที่มีขนาดห้องอบแห้ง 50 ลิตร สามารถลดความชื้นได้สูงสุด 5.24 % d.b. (พิจารณาประกอบกับตาราง 1-3)

สำหรับผลทดลองที่ได้เมื่อนำมาวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อหาผลของปัจจัยที่มีผลต่อการลดความชื้นของข้าวเปลือกของระบบอบแห้งแต่ละเงื่อนไขการทดลอง และนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ซึ่งค่าเฉลี่ยที่ได้จะนำมาเปรียบเทียบความแตกต่างโดยใช้ Duncan's Test

ตาราง 1 วิเคราะห์ทางสถิติของค่าความชื้นที่ลดลงของระบบอบแห้งเมื่อขนาดห้องอบแห้ง 20 ลิตร

เงื่อนไขการทดลอง			$X_i - X_o$
T	W_p	V	
(°C)	(kg _{dry solid} /h)	(m/s)	(% d.b.)
70	20	25	1.69 ± 0.64^a
70	35	25	1.97 ± 0.90^a
70	56	25	2.10 ± 0.32^a
90	20	25	3.96 ± 0.47^b
90	35	25	4.18 ± 0.59^b
90	56	25	4.34 ± 0.45^b
110	20	25	4.67 ± 0.77^c
110	35	25	4.99 ± 0.59^c
110	56	25	5.50 ± 1.08^c

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายความว่าค่าที่ระบุไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากตาราง 1 ค่าผลต่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นเมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิอากาศค่าเดียวกันพบว่า ผลต่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นจะเพิ่มขึ้นตามอัตราการป้อนวัสดุที่เพิ่มขึ้นทุกเงื่อนไขการทดลอง และเมื่อเปรียบเทียบที่อัตราการป้อนวัสดุค่าเดียวกันพบว่า เมื่ออุณหภูมิอากาศเพิ่มขึ้นผลต่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นจะเพิ่มสูงขึ้นทุกเงื่อนไขการทดลอง เมื่อวิเคราะห์ค่าทางสถิติพบว่า ผลต่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่เพิ่มขึ้นไม่มีนัยสำคัญ จากการทดลองพบว่า ผลต่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นของห้องอบแห้งขนาด 20 ลิตร มีค่าสูงสุดเท่ากับ 5.5 % d.b. ที่อุณหภูมิอากาศ 110 °C อัตราการป้อนวัสดุ 56 kg_{dry solid}/h

ตาราง 2 วิเคราะห์ทางสถิติของค่าความชื้นที่ลดลงของระบบอบแห้งเมื่อขนาดห้องอบแห้ง 50 ลิตร

เงื่อนไขการทดลอง			$X_t - X_o$
T	W_p	V	
(°C)	(kg _{dry solid} /h)	(m/s)	(% d.b.)
70	20	25	1.69 ± 0.67^a
70	35	25	1.70 ± 0.85^a
70	56	25	1.81 ± 1.17^a
90	20	25	3.23 ± 0.77^b
90	35	25	3.36 ± 0.33^b
90	56	25	3.61 ± 0.58^b
110	20	25	4.51 ± 0.86^c
110	35	25	4.74 ± 0.61^c
110	56	25	5.24 ± 1.08^c

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายความว่าค่าที่ระบุไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากตาราง 2 ผลต่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นเมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิอากาศค่าเดียวกันพบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นจะเพิ่มขึ้นตามอัตราการป้อนวัสดุที่เพิ่มขึ้นทุกเงื่อนไขการทดลอง และเมื่อเปรียบเทียบที่อัตราการป้อนวัสดุค่าเดียวกันพบว่า ผลต่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของอากาศเพิ่มขึ้นทุกเงื่อนไขการทดลอง เมื่อวิเคราะห์ค่าทางสถิติพบว่า เปอร์เซ็นต์ความชื้นที่เพิ่มขึ้นไม่มีนัยสำคัญ ผลต่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นของห้องอบแห้งขนาด 50 ลิตร มีค่าสูงสุดเท่ากับ 5.4 % d.b. ที่อุณหภูมิอากาศ 110 °C อัตราการป้อนวัสดุ 56 kg_{dry solid}/h

จากตาราง 3 เมื่อเปรียบเทียบผลต่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่เพิ่มขึ้นของห้องอบแห้งขนาด 20 ลิตร และ 50 ลิตร เมื่อวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ผลต่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ลดลงมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญทุกเงื่อนไขการทดลองที่อุณหภูมิอากาศและอัตราการป้อนวัสดุค่าเดียวกัน

ตาราง 3 วิเคราะห์ทางสถิติของค่าความชื้นที่ลดลงของระบบอบแห้งเมื่อขนาดห้องอบแห้ง 20 ลิตร และ 50 ลิตร

เงื่อนไขการทดลอง				
Drying chamber	T (°C)	W _p (kg _{dry solid} /h)	V (m/s)	X _i - X _o (% d.b.)
20 L	70	20	25	1.69 ± 0.64 ^a
	70	35	25	1.97 ± 0.90 ^a
	70	56	25	2.10 ± 0.32 ^a
	90	20	25	3.96 ± 0.47 ^b
	90	35	25	4.18 ± 0.59 ^b
	90	56	25	4.34 ± 0.45 ^b
	110	20	25	4.67 ± 0.77 ^c
	110	35	25	4.99 ± 0.59 ^c
	110	56	25	5.50 ± 1.08 ^c
50 L	70	20	25	1.69 ± 0.67 ^a
	70	35	25	1.70 ± 0.85 ^a
	70	56	25	1.81 ± 1.17 ^a
	90	20	25	3.23 ± 0.77 ^b
	90	35	25	3.36 ± 0.33 ^b
	90	56	25	3.61 ± 0.58 ^b
	110	20	25	4.51 ± 0.86 ^c
	110	35	25	4.74 ± 0.61 ^c
	110	56	25	5.24 ± 1.08 ^c

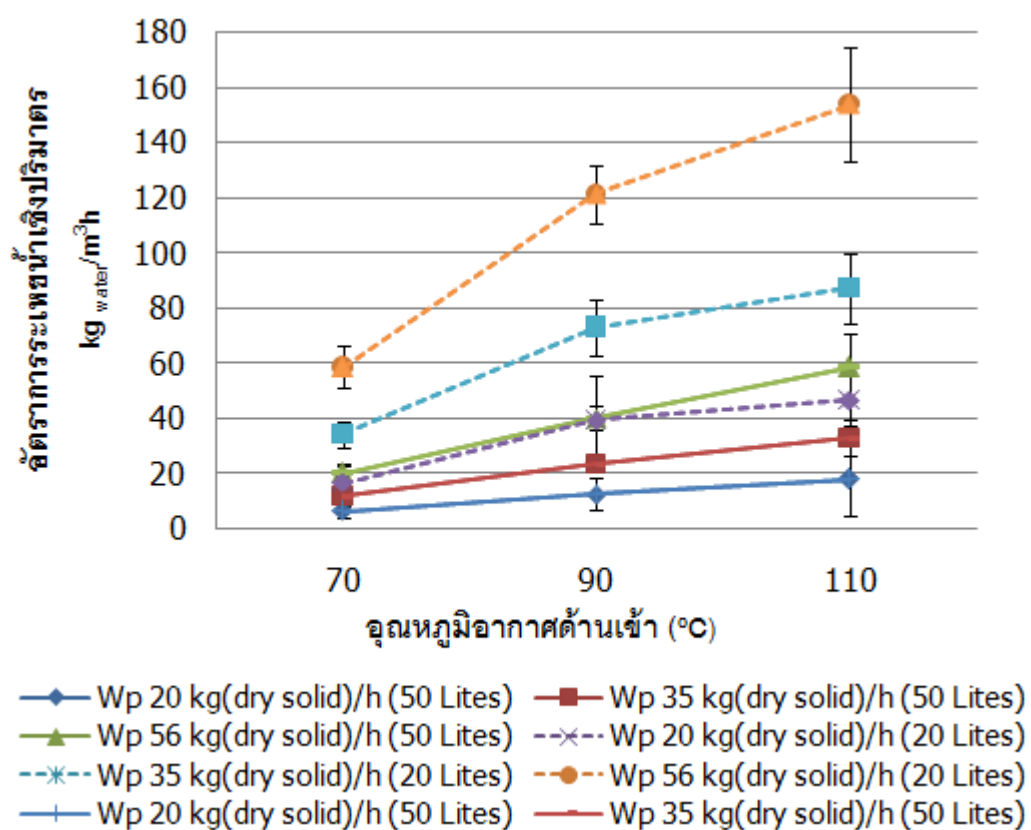
หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายความว่าค่าที่ระบุไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

2. ผลของตัวแปรที่มีต่อค่าอัตราการระเหยของน้ำเชิงปริมาตร

ผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบอบแห้งในรูปของค่าอัตราการระเหยของน้ำเชิงปริมาตร แสดงในภาพประกอบ 11 ซึ่งจะพบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราการระเหยของน้ำเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิอากาศด้านเข้าทุกสภาวะเงื่อนไข ทั้งนี้เป็นเพราะอุณหภูมิอากาศด้านเข้าเพิ่มสูงขึ้นจึงเกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศร้อนกับอุณหภูมิที่ผิวของข้าวเปลือกมากขึ้น จึงส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและมวลสารมีค่าเพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดการระเหยของน้ำที่ผิววัสดุเพิ่มมากขึ้น พบว่าสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Sathapornprasath; et al. (2007), Choicharoen; et al. (2010), Nimmol; & Devahastin. (2010) และ Khomwachirakul. (2011)

สำหรับผลของอัตราการป้อนวัสดุพบว่า เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนวัสดุให้มีปริมาณมากขึ้น อัตราการระเหยของน้ำเชิงปริมาตรก็มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย แม้ว่าปริมาณวัสดุที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณความชื้นที่เข้าสู่ระบบเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เป็นเพราะว่าเครื่องอบแห้งยังมีขีดความสามารถในการระเหยน้ำที่ผิววัสดุได้อย่างเพียงพอ ดังนั้นเมื่อปริมาณวัสดุในระบบสูงขึ้นอัตราการระเหยของน้ำเชิงปริมาตรจึงสูงขึ้นตามไปด้วย สอดคล้องกับผลวิจัยของ Sathapornprasath; et al. (2007), Choicharoen; et al. (2010), Nimmol; & Devahastin. (2010) และ Khomwachirakul. (2011)

สำหรับการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้งที่มีขนาดของห้องอบแห้ง 20 ลิตร เปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งกระแสนวิถีโค้งที่มีขนาดห้องอบแห้ง 50 ลิตร พบว่าเมื่ออุณหภูมิอากาศด้านเข้าและอัตราการป้อนวัสดุค่าเดียวกัน ค่าอัตราการระเหยของน้ำเชิงปริมาตรของห้องอบแห้งขนาด 20 ลิตร มีค่าสูงกว่าห้องอบแห้งขนาด 50 ลิตร ทั้งนี้อาจจะเป็นผลสืบเนื่องจากที่วัสดุคงอยู่ในระบบอบแห้งได้นานกว่าแต่เมื่อวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าเวลาที่วัสดุอยู่ในระบบมีค่าแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ แต่เมื่อพิจารณาจากตัวเลขแล้วขนาดห้องอบแห้งที่เล็กกว่าวัสดุน่าจะอยู่ในระบบได้นานขึ้น ซึ่งช่วงเวลาดังกล่าวเป็นเวลาวัสดุมีการแลกเปลี่ยนความร้อนและมวลสารกับตัวกลางการอบแห้ง ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนและมวลสารได้มากกว่าวัสดุที่คงอยู่ในระบบในเวลาที่สั้นกว่า โดยอัตราการระเหยของน้ำเชิงปริมาตรสูงสุดที่ได้จากการวิจัยนี้เท่ากับ $154.00 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3\text{h}$ (เกิดขึ้นเมื่อระบบอบแห้งมีขนาดห้องอบแห้ง 20 ลิตร ที่อุณหภูมิอากาศด้านเข้า 110°C และอัตราการป้อนวัสดุ $56 \text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$) ซึ่งค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรที่ได้จากการทดลองมีค่าน้อยมากนั้น เป็นเพราะว่าระบบอบแห้งมีปริมาตรของห้องอบแห้งขนาดใหญ่เมื่อคำนวณหาอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรจึงได้ค่าน้อยมาก ผลที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อหาผลของปัจจัยที่มีผลกระทบต่ออัตราการระเหยของน้ำเชิงปริมาตรของแต่และเงื่อนไขการทดลองและวิเคราะห์ผล ซึ่งค่าเฉลี่ยที่ได้จะถูกนำมาเปรียบเทียบความแตกต่างโดยใช้ Duncan's Test



ภาพประกอบ 11 ผลกระทบของตัวแปรที่มีผลต่ออัตราการระเหยของน้ำเชิงปริมาตร

ตาราง 4 ผลวิเคราะห์ทางสถิติของค่าอัตราการระเหยของน้ำเชิงปริมาตรและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรของห้องอบแห้งขนาด 20 ลิตร

เงื่อนไขการทดลอง			อัตราการระเหยน้ำ เชิงปริมาตร	สัมประสิทธิ์การถ่ายเท ความร้อนเชิงปริมาตร
T (°C)	W_p (kg _{dry solid} /h)	V (m/s)	(kg _{water} /m ³ h)	(W/m ³ K)
70	20	25	16.83 ± 6.47 ^a	33.83 ± 13.02 ^a
70	35	25	34.36 ± 15.77 ^a	69.07 ± 31.70 ^a
70	56	25	58.7 ± 8.93 ^b	118.10 ± 17.96 ^b
90	20	25	39.56 ± 4.65 ^a	75.80 ± 8.91 ^a
90	35	25	73.27 ± 10.29 ^b	140.41 ± 19.74 ^b
90	56	25	121.42 ± 12.81 ^c	233.85 ± 24.57 ^c
110	20	25	46.73 ± 7.71 ^a	84.91 ± 14.02 ^a
110	35	25	94.73 ± 10.34 ^b	172.02 ± 18.77 ^b
110	56	25	153.90 ± 20.48 ^c	279.40 ± 25.33 ^c

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายความว่าค่าที่ระบุไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตาราง 5 ผลวิเคราะห์ทางสถิติของค่าอัตราการระเหยของน้ำเชิงปริมาตรและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรของห้องอบแห้งขนาด 50 ลิตร

เงื่อนไขการทดลอง			อัตราการระเหยน้ำ เชิงปริมาตร	สัมประสิทธิ์การถ่ายเท ความร้อนเชิงปริมาตร
T (°C)	W_p (kg _{dry solid} /h)	V (m/s)	(kg _{water} /m ³ h)	(W/m ³ K)
70	20	25	6.76 ± 2.68^a	13.58 ± 5.40^a
70	35	25	11.97 ± 5.98^a	23.90 ± 12.01^a
70	56	25	20.42 ± 13.10^a	40.73 ± 26.33^a
90	20	25	12.94 ± 3.09^a	24.73 ± 5.91^a
90	35	25	23.52 ± 2.31^b	45.05 ± 4.42^b
90	56	25	40.50 ± 6.51^c	77.42 ± 12.47^c
110	20	25	18.04 ± 3.47^a	32.76 ± 6.30^a
110	35	25	33.15 ± 4.28^a	60.15 ± 7.76^a
110	56	25	58.76 ± 12.11^b	106.32 ± 21.94^b

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายความว่าค่าที่ระบุไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตาราง 6 ผลวิเคราะห์ทางสถิติของค่าอัตราการระเหยของน้ำเชิงปริมาตรและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรของห้องอบแห้งขนาด 20 ลิตร และ 50 ลิตร

เงื่อนไขการทดลอง			อัตราการระเหยน้ำ เชิงปริมาตร	สัมประสิทธิ์การถ่ายเท ความร้อนเชิงปริมาตร
T	W _p	V		
(°C)	(kg _{dry solid} /h)	(m/s)	(kg _{water} /m ³ h)	(W/m ³ K)
70	20	25	16.83 ± 6.47 ^a	33.83 ± 13.02 ^a
70	35	25	34.36 ± 15.77 ^a	69.07 ± 31.70 ^a
70	56	25	58.7 ± 8.93 ^b	118.10 ± 17.96 ^b
90	20	25	39.56 ± 4.65 ^a	75.80 ± 8.91 ^a
90	35	25	73.27 ± 10.29 ^b	140.19 ± 19.74 ^b
90	56	25	121.42 ± 12.81 ^c	233.85 ± 24.57 ^c
110	20	25	46.73 ± 7.71 ^a	84.91 ± 14.02 ^a
110	35	25	94.73 ± 10.34 ^b	172.02 ± 18.77 ^b
110	56	25	153.90 ± 20.48 ^c	279.40 ± 25.33 ^c
70	20	25	6.76 ± 2.68 ^a	13.58 ± 5.40 ^a
70	35	25	11.97 ± 5.98 ^a	23.90 ± 12.01 ^a
70	56	25	20.42 ± 13.10 ^a	40.73 ± 26.33 ^a
90	20	25	12.94 ± 3.09 ^a	24.73 ± 5.91 ^a
90	35	25	23.52 ± 2.31 ^b	45.05 ± 4.42 ^b
90	56	25	40.50 ± 6.51 ^c	77.42 ± 12.47 ^c
110	20	25	18.04 ± 3.47 ^a	32.76 ± 6.30 ^a
110	35	25	33.15 ± 4.28 ^a	60.15 ± 7.76 ^a
110	56	25	58.76 ± 12.11 ^b	106.32 ± 21.94 ^b

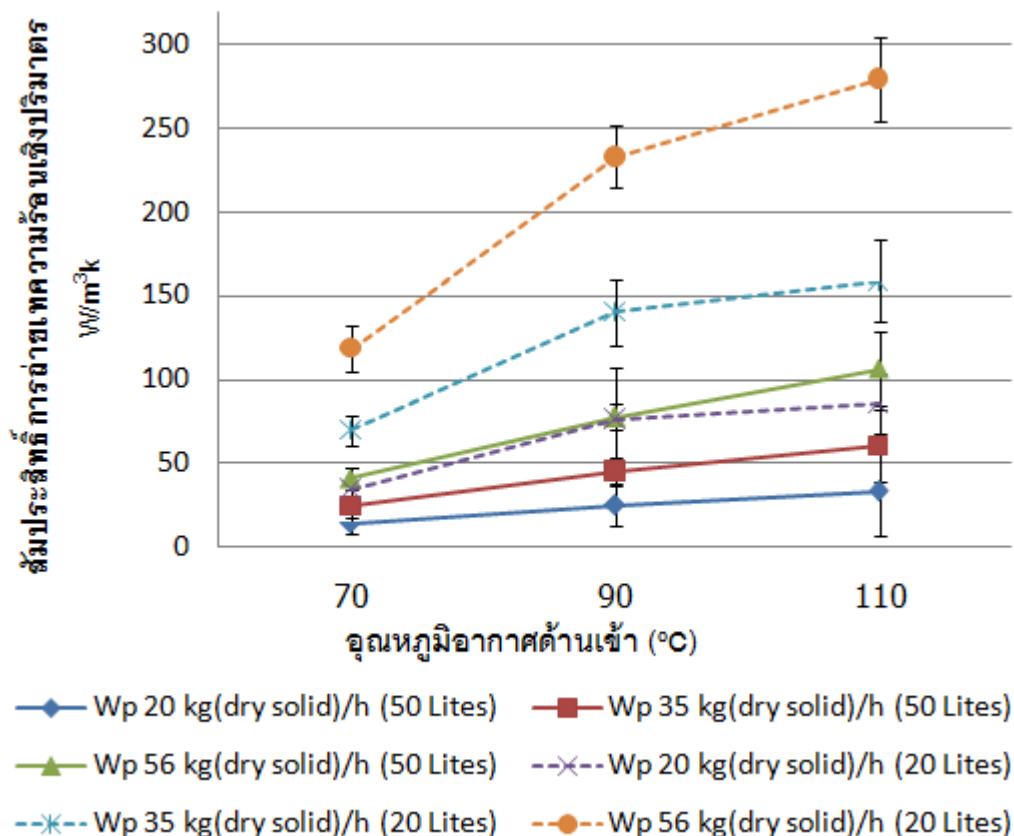
หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายความว่าค่าที่ระบุไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

3. ผลของตัวแปรที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร

ผลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร ดังที่ได้แสดงในภาพประกอบ 12 พบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอากาศด้านเข้าทุกภาวะเงื่อนไขการทดลอง เนื่องจากอุณหภูมิอากาศด้านเข้าที่สูงขึ้นทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศกับอุณหภูมิผิวของวัสดุมีค่ามากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลสารมีค่าสูงขึ้นจึงทำให้เกิดการระเหยของน้ำมากขึ้นตามไปด้วย สำหรับค่าอุณหภูมิเฉลี่ยลอการิทึมมีค่าไม่แตกต่างกันมากและค่าความร้อนแฝงการระเหยของน้ำจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิอากาศด้านเข้าสูงขึ้น เมื่อนำมาพิจารณาร่วมกันแล้วจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรมีค่าเพิ่มมากขึ้น

ในกรณีของอัตราการป้อนวัสดุพบว่าเมื่ออัตราการป้อนวัสดุเพิ่มมากขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยและแปรผันตรงกับปริมาณการระเหยของน้ำที่ผิววัสดุ ดังนั้นเมื่อป้อนวัสดุมากขึ้นจึงทำให้ปริมาณการระเหยของน้ำที่ผิววัสดุเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Sathapornprasath; et al. (2007), Choicharoen; et al. (2010) และ Khomwachirakul. (2011) แต่ผลการทดลองที่ได้จะขัดแย้งกับผลการทดลองของ Nimmol; & Devahastin. (2010) อาจจะเป็นผลเนื่องมาจากระบบอบแห้งของงานวิจัยครั้งนี้ยังสามารถรองรับการถ่ายเทความร้อนของวัสดุได้อีก ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรจึงเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราการป้อนวัสดุมีค่าเพิ่มขึ้น

สำหรับการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้งที่มีขนาดของห้องอบแห้ง 20 ลิตร เปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งกระแสนวิถีโค้งที่มีขนาดห้องอบแห้ง 50 ลิตร พบว่าเมื่ออุณหภูมิอากาศด้านเข้าและอัตราการป้อนวัสดุค่าเดียวกัน ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรของห้องอบแห้งขนาด 20 ลิตร มีค่าสูงกว่าห้องอบแห้งขนาด 50 ลิตร ทั้งนี้เป็นผลสืบเนื่องจากที่วัสดุคงอยู่ในระบบอบแห้งได้นานกว่า ซึ่งช่วงเวลาดังกล่าวเป็นเวลาทีวัสดุมีการแลกเปลี่ยนความร้อนและมวลสารกับตัวกลางการอบแห้ง ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนและมวลสารได้มากกว่าวัสดุที่คงอยู่ในระบบในเวลาที่สั้นกว่า โดยอัตราการระเหยของน้ำเชิงปริมาตรสูงสุดที่ได้จากการวิจัยนี้เท่ากับ $279.57 \text{ W/m}^3\text{K}$ (เกิดขึ้นเมื่อระบบอบแห้งมีขนาดห้องอบแห้ง 20 ลิตร ที่อุณหภูมิอากาศด้านเข้า 110°C และอัตราการป้อนวัสดุ $56 \text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$) ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรที่ได้มีค่าน้อยมากนั้นเป็นเพราะว่า ระบบอบแห้งมีปริมาตรของห้องอบแห้งขนาดใหญ่เมื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรจึงได้ค่าน้อยมาก ผลที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อหาผลของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนปริมาตรของแต่และเงื่อนไขการทดลองและวิเคราะห์ผล ซึ่งค่าเฉลี่ยที่ได้จะถูกนำมาเปรียบเทียบความแตกต่างโดยใช้ Duncan's Test



ภาพประกอบ 12 ผลกระทบของตัวแปรที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร

4. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในแต่ละเงื่อนไขของการทดลอง

จากตาราง 7 จะพบว่าเมื่ออัตราการป้อนวัสดุเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิค่าเดียวกันอุณหภูมิ T_a ด้านออกจะมีค่าลดลง แต่อุณหภูมิ T_w ด้านออกจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะว่าเมื่ออัตราการป้อนวัสดุเพิ่มสูงขึ้นทำให้อัตราการระเหยของน้ำเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้มีความชื้นในอากาศมากและความดันไอน้ำของอากาศมีค่ามากขึ้นจึงส่งผลให้อากาศขณะนั้นรองรับความชื้นได้น้อยลงทำให้อุณหภูมิกระเปาะเปียกมีค่าสูงขึ้น เมื่อพิจารณาถึงอุณหภูมิด้านเข้าที่สูงขึ้นแต่อัตราการป้อนวัสดุค่าเดียวกันจะพบว่า T_w มีค่าเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างห้องอบแห้งขนาด 50 และ 20 ลิตร จะพบว่าที่อุณหภูมิและอัตราการป้อนวัสดุค่าเดียวกัน ห้องอบแห้งขนาด 20 ลิตร จะมีค่า T_w ที่สูงกว่าห้องอบแห้งขนาด 50 ลิตร เมื่อพิจารณาถึงค่า ΔT_{lm} เมื่ออัตราการป้อนวัสดุเพิ่มมากขึ้นที่อุณหภูมิค่าเดียวกัน จะพบว่าค่า ΔT_{lm} มีแนวโน้มลดลง เมื่อพิจารณาค่า ΔT_{lm} เมื่ออุณหภูมิอากาศด้านเข้าเพิ่มสูงขึ้นแต่อัตราการป้อนวัสดุค่าเดียวกันพบว่าค่า ΔT_{lm} มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นและเมื่อเปรียบเทียบค่า ΔT_{lm} ระหว่างห้องอบแห้งปริมาตร 50 ลิตร และ 20 ลิตร ที่อุณหภูมิและอัตราการป้อนวัสดุค่าเดียวกัน พบว่าค่า ΔT_{lm} ของห้องอบแห้งขนาดปริมาตร 50 ลิตร มีค่ามากกว่าห้องอบแห้งขนาดปริมาตร 20 ลิตร

ตาราง 7 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

Drying Chamber	Temp. (°C)	Wp (kg _{dry solid} /h)	อุณหภูมิเฉลี่ยด้านเข้า T _d (°C) T _w (°C)		อุณหภูมิเฉลี่ยด้านออก T _d (°C) T _w (°C)		ΔT_{lm} (C)
50 L	70	20	71.3	34.0	65.4	32.16	35.2
		35	70.7	33.8	65.3	31.66	35.3
		56	70.5	33.8	65.1	31.33	35.2
	90	20	90.1	37.2	83.3	35.2	50.5
		35	90.5	37.5	82.5	34.78	50.3
		56	90.3	37.5	82.4	34.33	50.4
	110	20	110.7	40.0	103.0	37.77	68.0
		35	111.5	40.2	103.7	37.57	68.6
		56	111.5	40.2	103.8	37.45	68.8
	70	20	72.4	34.2	65.3	33.06	35.1
		35	71.8	34.0	65.2	32.79	35.0
		56	71.6	34.2	65.0	32.66	34.8
	90	20	90.3	37.5	83.2	35.43	50.2
		35	90.5	37.2	82.4	35.28	50.1
		56	90.3	37.4	82.2	35.10	49.9
20 L	110	20	110.8	40.0	102.8	37.83	67.8
		35	111.1	40.0	102.7	37.65	68.0
		56	111.2	39.8	102.4	37.54	68.1

จากตาราง 7 จะเห็นได้ว่าค่าผลต่างของอุณหภูมิกะเปาะแห้งด้านเข้าและด้านออกมีค่าน้อยนั้นอาจจะเป็นเพราะว่า ช่วงเวลาที่วัสดุอยู่ในระบบมีค่าน้อยจึงมีการถ่ายเทความร้อนและมวลสารระหว่างวัสดุและอากาศร้อนได้น้อยจึงส่งผลให้ค่าผลต่างของอุณหภูมิดังกล่าวมีค่าไม่มาก

5. เวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ

จากตาราง 8 จะพบว่า ห้องอบแห้งปริมาตรขนาด 20 ลิตร จะมีค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบมีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญกับห้องอบแห้งที่มีปริมาตรขนาด 50 ลิตร แต่เมื่อพิจารณาถึงห้องอบแห้งขนาด 50 ลิตร ที่มีรัศมีความโค้งที่กว้างและมีระยะการชนกันของกระแสของไหลสองกระแสที่มากกว่าห้องอบแห้งขนาด 20 ลิตร ซึ่งมีรัศมีความโค้งและระยะการชนกันของกระแสของไหลสองกระแสที่น้อยกว่า เมื่อวัสดุเคลื่อนที่เข้าสู่ระนาบการชนที่มีระยะการชนที่ยาวกว่าจึงอาจส่งผลให้วัสดุสูญเสียความเร็วไปมากและส่งผลให้ความเฉื่อยของวัสดุลดลง วัสดุจึงไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าสู่กระแสของไหลด้านตรงข้ามได้ จึงส่งผลให้วัสดุอยู่ในระบบได้ในระยะเวลาอันสั้น แต่ในทางกลับกันสำหรับระยะการชนที่น้อยกว่าทำให้วัสดุไม่ได้สูญเสียความเร็วมากนัก วัสดุยังคงมีแรงเฉื่อยมากพอที่จะเคลื่อนที่เข้าสู่กระแสของไหลตรงกันข้ามจึงส่งผลให้วัสดุสามารถคงอยู่ในระบบเป็นเวลานานขึ้น จากเหตุผลข้างต้นจึงมีแนวโน้มที่ห้องอบแห้งขนาดเล็กจะมีผลให้วัสดุคงอยู่ในระบบได้นานกว่าห้องอบแห้งขนาดใหญ่

ตาราง 8 เวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบอบแห้ง

เงื่อนไขการทดลอง			เวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ
Drying chamber	W_p (kg _{dry solid} /h)	V (m/s)	(s)
20 L	20	25	1.76 ± 0.07^a
	35	25	1.85 ± 0.04^{ab}
	56	25	1.90 ± 0.05^b
50L	20	25	1.72 ± 0.18^a
	35	25	1.79 ± 0.12^a
	56	25	1.81 ± 0.04^a

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายความว่าค่าที่ระบุไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตาราง 9 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งของข้าวเปลือกด้วยวิธีการอบแห้งต่างๆ

Drying Technique	T (°C)	$X_t - X_o$ (% d.b.)	Drying time (s)	Drying rate (% d.b.) ⁻¹
Impinging Stream Dryer Using Tangential Horizontal (งานวิจัยนี้)	110	5.50	1.90	2.89
Impinging stream dryer combined with Pneumatic drying (ปฏิวดี คมวชิรกุล. 2554)	110	9.79	3.22	3.01
Impinging Stream Dryer (Nimmol; & Devahastin. 2010)	110	7.7	2.42	3.18
Spouted-bed drying (Madhiyanon; & Soponronnarit. 2005)	110	7.50	9.00	0.01
Fluidized-bed drying (สุภวรรณ ภูริวณิชยกุล; และคนอื่นๆ. 2545)	110	10.50	144.00	0.07

จากตาราง 9 เมื่อนำผลการทดลองจากงานวิจัยครั้งนี้ที่สามารถลดความชื้นได้สูงสุด 5.5 % d.b. ในระยะเวลา 1.90 วินาที มาเปรียบเทียบกับระบบอบแห้งแบบอื่นๆ ซึ่งใช้ระยะเวลาในการอบแห้งมาเป็นตัวพิจารณาจะเห็นได้ว่าระบบอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้งมีค่าอัตราการอบแห้งที่ใกล้เคียงกับระบบอบแห้งกระแสนร่วมกับพาหะลม (ปฏิวดี คมวชิรกุล. 2554) และ การอบแห้งกระแสน (Nimmol; & Devahastin. 2010) ทั้งนี้เป็นเพราะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งกระแสนมีค่าน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้งมีศักยภาพสูงในกระบวนการลดความชื้นของข้าวเปลือก

6. ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

จากตาราง 10 เมื่อเปรียบเทียบความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของระบบอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้งกับการอบแห้งของงานวิจัยอื่นๆ พบว่า ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของงานวิจัยครั้งนี้มีค่าน้อยมาก ทั้งนี้อาจจะเป็นเพราะว่า ระบบอบแห้งใช้อุณหภูมิในการอบแห้งที่ต่ำและวัสดุมีเวลาอยู่ในระบบน้อย อัตราการอบแห้งสูง ส่งผลให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำ

จากตาราง 11 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของระบบอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้งที่สภาวะเงื่อนไขต่างๆ เมื่อพิจารณาความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของพัดลมแรงดันสูง (SEC_{blower})

พบว่า SEC_{blower} จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิอากาศด้านเข้าสูงขึ้น เป็นเพราะว่าเมื่ออุณหภูมิอากาศที่สูงขึ้นทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศกับอุณหภูมิที่ผิววัสดุมากขึ้นจึงส่งผลให้เกิดการระเหยของน้ำจากผิววัสดุเพิ่มมากขึ้น แต่ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าของพัดลมแรงดันสูงยังคงมีค่าคงที่และระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองไม่มีความแตกต่างกันจึงส่งผลให้ค่า SEC_{blower} มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิอากาศด้านเข้ามีค่าสูงขึ้น เมื่อพิจารณาในด้านอัตราการป้อนวัสดุที่เพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิอากาศด้านเข้าค่าเดียวกัน พบว่าเมื่ออัตราการป้อนวัสดุเพิ่มขึ้นค่าอัตราการระเหยของน้ำของวัสดุจึงเพิ่มขึ้น ในขณะที่อัตราการใช้ไฟฟ้าของพัดลมยังคงที่ส่งผลให้ค่า SEC_{blower} มีค่าลดลง

ส่วนค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของชุดทำความร้อน (SEC_{hester}) พบว่า SEC_{hester} มีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิอากาศด้านเข้าเพิ่มมากขึ้น เป็นเพราะว่าเมื่ออุณหภูมิอากาศด้านเข้าเพิ่มสูงขึ้นชุดทำความร้อนต้องใช้พลังงานไฟฟ้ามากขึ้นจึงส่งผลให้ SEC_{hester} เพิ่มสูงขึ้น เมื่อพิจารณาถึงอัตราการป้อนวัสดุที่มากขึ้นที่อุณหภูมิอากาศด้านเข้าค่าเดียวกัน พบว่าเมื่ออัตราการป้อนวัสดุเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าอัตราการระเหยของน้ำเพิ่มขึ้นแต่อัตราการใช้พลังงานของชุดทำความร้อนมีค่าคงที่และเวลาในการทดลองไม่แตกต่างกันจึงส่งผลให้ค่า SEC_{hester} มีค่าลดลงเหมือนกับพัดลมแรงดันสูง สำหรับงานวิจัยนี้พบว่าค่า SEC_{blower} มีค่าต่ำสุดเท่ากับ $0.63 \text{ MJ/kg}_{\text{water}}$ ส่วนค่า SEC_{hester} มีค่าต่ำสุดเท่ากับ $0.28 \text{ MJ/kg}_{\text{water}}$

ตาราง 10 เปรียบเทียบความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะทั้งหมดกับวิธีการอบแห้งแบบอื่นๆ

Drying technique	T (°C)	$X_i - X_o$ (% d.b.)	SEC total (MJ/kg _{water})
Impinging Stream Dryer Using Tangential Horizontal (งานวิจัยนี้)	110	5.50	1.08
Impinging stream dryer combined with Pneumatic drying (ปฏิวดี คมวชิรกุล. 2554)	110	9.79	2.93
Impinging Stream Dryer (Nimmol; & Devahastin. 2010)	110	7.70	5.10
Spouted-bed drying (Madhiyanon; & Soponronnarit. 2005)	110	7.50	5.50
Fluidized-bed drying (Jittanit; et al. 2010)	100-110	7.60	3.87

ตาราง 11 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของระบบอบแห้ง

เงื่อนไขการทดลอง				SEC _{blower}	SEC _{heater}	SEC _{total}
Drying chamber	T (°C)	W _p (kg _{dry solid} /h)	V (m/s)			
20 L	70	20	25	5.75	1.02	6.77
	70	35	25	2.82	0.50	3.32
	70	56	25	1.65	0.29	1.95
	90	20	25	2.45	0.87	3.33
	90	35	25	1.33	0.47	1.80
	90	56	25	0.80	0.28	1.08
	110	20	25	2.08	1.48	3.56
	110	35	25	1.11	0.79	1.90
	110	56	25	0.63	0.45	1.08
50 L	70	20	25	5.75	1.02	6.77
	70	35	25	3.27	0.58	3.85
	70	56	25	1.92	0.34	2.26
	90	20	25	3.01	1.07	4.08
	90	35	25	1.65	0.59	2.24
	90	56	25	0.96	0.34	1.30
	110	20	25	2.16	1.53	3.69
	110	35	25	1.17	0.83	2.01
	110	56	25	0.66	0.47	1.13

ตาราง 12 ผลการวิเคราะห์ข้าวที่ได้จากระบบอบแห้งกระแสแบบวิถีโค้ง

เงื่อนไขการทดลอง					
Drying chamber	T (°C)	W _p (kg _{dry solid} /h)	V (m/s)	Head-Rice yield	Whiteness
20 L	70	20	25	1.9 ± 0.7 ^a	33.57 ± 0.12 ^a
	70	35	25	2.55 ± 0.13 ^b	34.32 ± 0.32 ^b
	70	56	25	1.83 ± 0.15 ^a	34.81 ± 0.10 ^c
	90	20	25	2.06 ± 0.2 ^b	34.06 ± 0.22 ^b
	90	35	25	2.31 ± 0.1 ^b	33.51 ± 0.06 ^a
	90	56	25	1.25 ± 0.05 ^a	33.34 ± 0.21 ^a
	110	20	25	1.83 ± 0.05 ^b	33.53 ± 0.09 ^a
	110	35	25	1.31 ± 0.07 ^a	34.66 ± 0.14 ^b
	110	56	25	2.05 ± 0.13 ^c	33.24 ± 0.22 ^a
50 L	70	20	25	2.41 ± 0.07 ^b	34.71 ± 0.10 ^b
	70	35	25	1.79 ± 0.06 ^a	34.36 ± 0.06 ^a
	70	56	25	2.42 ± 0.07 ^b	34.56 ± 0.07 ^b
	90	20	25	1.72 ± 0.09 ^a	34.53 ± 0.09 ^b
	90	35	25	2.08 ± 0.07 ^b	33.45 ± 0.31 ^a
	90	56	25	1.77 ± 0.06 ^a	33.57 ± 0.08 ^a
	110	20	25	1.96 ± 0.07 ^b	33.87 ± 0.02 ^b
	110	35	25	1.83 ± 0.09 ^b	35.27 ± 0.66 ^c
	110	56	25	1.61 ± 0.09 ^a	33.39 ± 0.12 ^a
อ้างอิง				35.8	36.1

หมายเหตุ ค่าอ้างอิงได้จากข้าวที่แห้งโดยธรรมชาติ ตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกัน หมายความว่าค่าที่ระบุไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

7. คุณภาพทางกายภาพของข้าว

จากตาราง 12 พบว่า เปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดมีค่าน้อยมากทั้งนี้อาจจะเป็นผลเนื่องมาจากความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้ในการทดลองมีค่าที่สูง จึงส่งผลให้เมล็ดข้าวเปลือกมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงพุ่งเข้าชนกับผนังห้องอบแห้ง จึงส่งผลให้เกิดความแตกหักของเมล็ดข้าวในปริมาณสูง กรณีความขาวของข้าวสารพบว่า ความขาวของข้าวสารไม่ได้มีความแตกต่างกับค่าอ้างอิงมากนัก ทั้งนี้ อาจจะเป็นเพราะว่าระยะเวลาในการอบแห้งนั้นสั้นมากจึงไม่ทำให้เกิดการสะสมความร้อนของเมล็ดข้าว ความขาวของข้าวสารจึงไม่เปลี่ยนแปลง สำหรับผลการทดลองครั้งนี้พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดอยู่ที่ 1.2 – 2.6 % ส่วนความขาวของข้าวสารอยู่ที่ 33.0 – 35.



บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

1. สรุปผลการทดลอง

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการลดความชื้นข้าวเปลือกโดยใช้เทคนิคการอบแห้งกระแสน้ำวนโดยกำหนดให้วัสดุเคลื่อนที่เป็นแนวโค้งตามผนังของห้องอบแห้งโดยใช้ห้องอบแห้งที่มีปริมาตรขนาด 50 ลิตร และ 20 ลิตร โดยศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิอากาศด้านเข้า อัตราการป้อนวัสดุและขนาดห้องอบแห้งที่จะมีผลกระทบต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งในรูปของอัตราการระเหยของน้ำเชิงปริมาตรและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร โดยใช้ข้าวเปลือกพันธุ์ปทุมธานี 1 ที่มีความชื้นประมาณ 28 % d.b. เป็นวัสดุในการทดลอง โดยได้ประเมินถึงความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องอบแห้งและศึกษาถึงคุณสมบัติทางกายภาพของข้าวที่ได้จากการอบแห้ง พอลสรุปผลได้ดังนี้

การลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งกระแสน้ำวนแบบวิถีโค้ง สามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกได้สูงสุดประมาณ 5.5 % (d.b.) ในระยะเวลา 1.90 s (เกิดที่อุณหภูมิอากาศด้านเข้า 110 °C อัตราการป้อนวัสดุ 56 kg_{dry solid}/h ห้องอบแห้งมีปริมาตร 20 ลิตร)

ส่วนค่าอัตราการระเหยของน้ำเชิงปริมาตรและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามอุณหภูมิอากาศด้านเข้าและอัตราการป้อนวัสดุทุกสภาวะเงื่อนไข เมื่อเปรียบเทียบระหว่างห้องอบแห้งขนาด 50 ลิตร และ 20 ลิตร พบว่าค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรของห้องอบแห้งขนาด 20 ลิตร จะมีค่าสูงกว่า โดยค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรมีค่าสูงสุด 153.90 kg_{water}/m³h ขณะที่สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรมีค่าสูงสุดประมาณ 279.40 W/m³K

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของระบบอบแห้ง พบว่า SEC_{total} มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิอากาศด้านเข้าและอัตราการป้อนวัสดุเพิ่มสูงขึ้น โดยค่า SEC_{total} มีค่าต่ำสุด 1.08 MJ/kg_{water}

ส่วนคุณภาพข้าวหลังการอบแห้งพบว่าเกิดการแตกหักของเมล็ดข้าวในปริมาณที่สูงส่วนความขาวของข้าวอยู่ในเกณฑ์ดี ด้วยเหตุผลข้างต้นถ้าพิจารณาในด้านพลังงานถือว่าเป็นระบบที่สามารถใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ถ้าพิจารณาในด้านคุณภาพข้าวที่ได้จากการอบแห้งอาจจะไม่เหมาะสมกับการใช้งาน

2. ข้อเสนอแนะ

1. จากผลการทดลองพบว่าเครื่องอบแห้งกระแสนจะมีความแปรปรวนของอุณหภูมิที่สูงมากหลังจากการป้อนวัสดุเข้าสู่ระบบ ก่อนการบันทึกข้อมูลจะต้องรอให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวก่อนเพื่อข้อมูลที่ได้อาจจะไม่มี ความแตกต่างกันมาก

2. สำหรับจุดตรวจวัดอุณหภูมิตามจุดต่างๆที่ใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด K ควรตรวจสอบถึงความแน่นอนตรงจุดที่ยึดติดเพราะอาจจะทำให้ค่าที่อ่านได้มีความคลาดเคลื่อน

3. จากการทดลองพบว่าเกิดการแตกหักของเมล็ดข้าวที่ได้จากการอบแห้งมีปริมาณที่สูงมาก อาจจะเป็นผลมาจากความเร็วของอากาศที่ใช้มีค่าสูงมาก หากท่านผู้สนใจจะนำวิธีการทดลองนี้ไปใช้ควรเลือกใช้กับวัสดุที่มีความแข็งแรงมากกว่าเมล็ดข้าวหรือใช้กับวัสดุที่ไม่มีผลกับการแตกหักของวัสดุ หรืออาจจะทำการปรับลดความเร็วของอากาศลงแต่เมื่อมีการปรับลดความเร็วของอากาศลงก็จะส่งผลต่ออัตราการอบแห้งและค่าอื่นๆเช่นกัน





บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- กรมการข้าว. (2543). พันธุ์ข้าวนาสวนไม่ไวต่อช่วงแสง. สืบค้นเมื่อ 4 พฤษภาคม 2555, จาก <http://www.brrd.in.th/rkb/seed/index.php-file=content.php.&id=4.htm#4>
- กาญจน์ สาข่า. (2543). การออกแบบเครื่องอบแห้งชนิดอุโมงค์แบบอากาศไหลสองทิศทาง. วิทยานิพนธ์ วศ.ม. (วิศวกรรมเกษตร). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. ถ่ายเอกสาร.
- กิตติ สถาพรประเสริฐ. (2552). การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งกระแสน. ประชุมวิชาการเครื่องจักรพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 5. พิษณุโลก: มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- ทามอน ฮาจิเมะ; และคนอื่นๆ. (2548). เทคโนโลยีการอบแห้งในอุตสาหกรรม. แปลโดย วิรุฬห์ ตันตะพานิชกุลและคณะ. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น.
- ธัญญาพร ปัตตาซารี. (2553). การศึกษาสมรรถนะเครื่องอบแห้งแบบกระแสนสำหรับวัสดุทางการเกษตร. วิทยานิพนธ์ วศ.ม. (วิศวกรรมเครื่องกล). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. ถ่ายเอกสาร.
- ปวิวัติ คมวชิรกุล. (2554). การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลม. วิทยานิพนธ์ วศ.ม. (การจัดการทางวิศวกรรม). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. ถ่ายเอกสาร.
- เมธาวุฒิ โชติสวัสดิ์. (2550). ผลกระทบของวิธีการควบคุมอุณหภูมิและเงื่อนไขการอบแห้งที่มีต่อสมรรถนะเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน. วิทยานิพนธ์ วศ.ม. (วิศวกรรมพลังงาน) เชียงใหม่: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. ถ่ายเอกสาร.
- รณชาติ กรงกรด. (2543). การออกแบบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้กระบวนการฟลูอิดไดซ์เซชันแบบสองตะแกรง. วิทยานิพนธ์ วศ.ม. (วิศวกรรมเกษตร). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. ถ่ายเอกสาร.
- สมชาติ ไสภณรณฤทธิ์. (2540). การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- Cao, C.; Yan, Z.; & Baoguo, L. (1999). *Experimental study on impinging stream drying of Particulate materials*. Process of the International Conference on Agricultural Engineering, Beijing, P.R., China, IV., pp.10-14.

- Choicharoen, K.; Devahastin, S.; & Soponronnarit, S. (2010). *Comparative evaluation of performance and energy consumption of hot air and superheated steam impinging stream dryer for high moisture particulate materials*. Applied Thermal Engineering. Volume 31. pp. 3442-3452.
- Elperin, I. (1961). *Heat and mass transfer in opposing currents*. In Journal of Engineering Physics. Quoted by Tamir, A. (1994), V.6. pp. 62-68.
- Hu, X.; & Liu, D. (1999). *Experiment investigation on flow and drying characteristics of a vertical and semi cyclic combined impinging stream dryer*. In Drying technology. V.17. pp. 1879-1892.
- Hu, X.L.; et al. (2003). *Multi-phase flow and drying characteristics in semi-circular Impinging stream dryer*. In International Journal of Heat Transfer. V.46. pp. 3061-3067.
- Kitron, Y.; & Tamir, A. (1988). *Performance of coaxial gas-solid two-impinging stream (TIS) reactor hydrodynamics, residence time distribution, and drying heat transfer*. In Industrial & Engineering Chemistry Research. V.27. pp. 1760-1767.
- Kitron, Y.; & Tamir, A. (1990). *Characteristics and scale-up of coaxial impinging stream gas-solid contractors*. In Drying Technology. V.8. pp. 781-818.
- Kudra, T.; & Mujumdar, A.S. (1989). *Impinging stream dryers for particles and pastes*. In Drying Technology. V.7. pp. 219-266
- Kudra, T.; Mujumdar, A.S.; & Meltser, V.L. (1995). *Impinging stream dryers*. In handbook of industrial drying. Mujumdar, A.S., Ed., Marcel Dekker. New York: pp. 539-567.
- Nimmol, C.; et al. (2007). *Drying and heat transfer behavior of banana undergoing combined low-pressure superheat steam and far-infrared radiation drying*. In Applied Thermal Engineering. V.21. pp. 2483-2494.
- Nimmol, C.; & Devahastin, S. (2010). *Evaluation of performance and energy consumption of an impinging stream dryer for paddy*. Applied Thermal Engineering. Volume 30, pp. 2204-2212.

- Sathapornprasath, K.; Devahastin, S.; & Soponronnarit, S. (2004). *Effects of operating condition on the overall performance of an-air and superheated stream-operated impinging stream dryer*. Proceeding 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. V.15. pp. 1121-1128.
- Tamir, A. (1989). *Process and phenomental impinging-stream reactors*. In Chemical Engineering Process. V.85. pp. 53-61.
- Tamir, A. (1994). *Impinging-stream reactors*. Elsevise: Amsterdam.
- Wachiraphansakul, S.; & Devahastin, S. (2007). *Drying kinetics and quality of okara dried in a jet spouted bead of sorbent particles*. In LWT-Food science and Technology.V.40. pp. 207-219.
- Yao, B.; Berman, Y.; & Tamir, A. (1995). *Evaporative cooling of air in impinging streams*. In *AIChEJournal*. V.41. pp. 1667-1675.





การคำนวณระบบอบแห้งแบบกระแสน

อัตราการไหลเชิงปริมาตรและอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแต่ละด้าน ท่อทางเข้าเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.5 นิ้ว สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} V_a &= \text{พื้นที่หน้าตัด (m}^2\text{)} \times \text{ความเร็วสูงสุด (m/s)} \\ &= (3.14 \times 0.04^2 \times 30)/4 \\ &= 0.038 \text{ m}^3/\text{s} \\ &= 137 \text{ CMH} \\ &= 80 \text{ CFM} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_a &= \text{อัตราการไหลเชิงปริมาตร (m}^3/\text{s)} \times \text{ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m}^3\text{)} \\ &= 0.038 \times 1.1614 \\ &= 0.044 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

การคำนวณภาระความร้อน

ภาระทางความร้อนสูงสุดของเครื่องทำความร้อนแต่ละตัว สามารถคำนวณโดยใช้สมการดังนี้ โดยสมมติให้อุณหภูมิอากาศด้านเข้ามีค่าสูงสุดเท่ากับ 35 °C และอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการทดลองสูงสุดเท่ากับ 120 °C

$$\begin{aligned} Q &= m_a \times C_p \times \Delta T \\ &= 0.044 \text{ (kg/s)} \times 1.03 \text{ (kJ/kg)} \times (393-308) \text{ K} \\ &= 4.07 \times \text{safety factor } 50\% \\ &= 6 \text{ kW} \end{aligned}$$

ความดันสูญเสียของกล่องทำความร้อน

การคำนวณความดันสูญเสียของกล่องชุดทำความร้อน ซึ่งแสดงตำแหน่งการวางแท่งความร้อนไฟฟ้าตามภาพประกอบ 13

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

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

เมื่อ

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของแท่งความร้อน (0.05 m)

$V_{\max}$ คือ ความเร็วสูงสุดที่ผ่านแท่งความร้อน (m/s)

m_f คือ ความเร็วของอากาศเฉลี่ย (m/s)

S_T คือ ระยะห่างระหว่างแท่งความร้อนในแนวตั้ง (m)

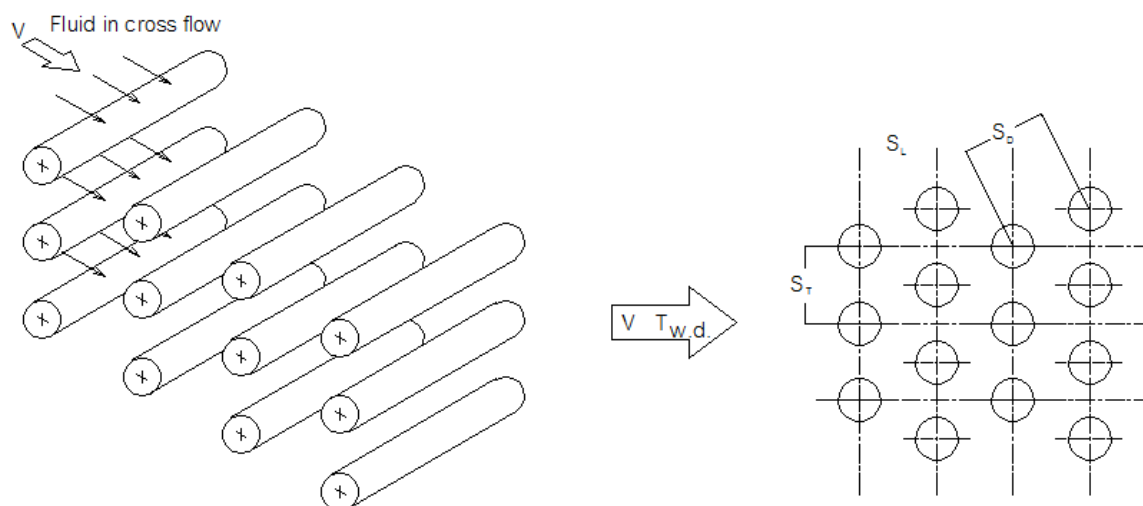
S_L คือ ระยะห่างระหว่างแท่งความร้อนในแนวนอน (m)

$$S_T/D = 0.3$$

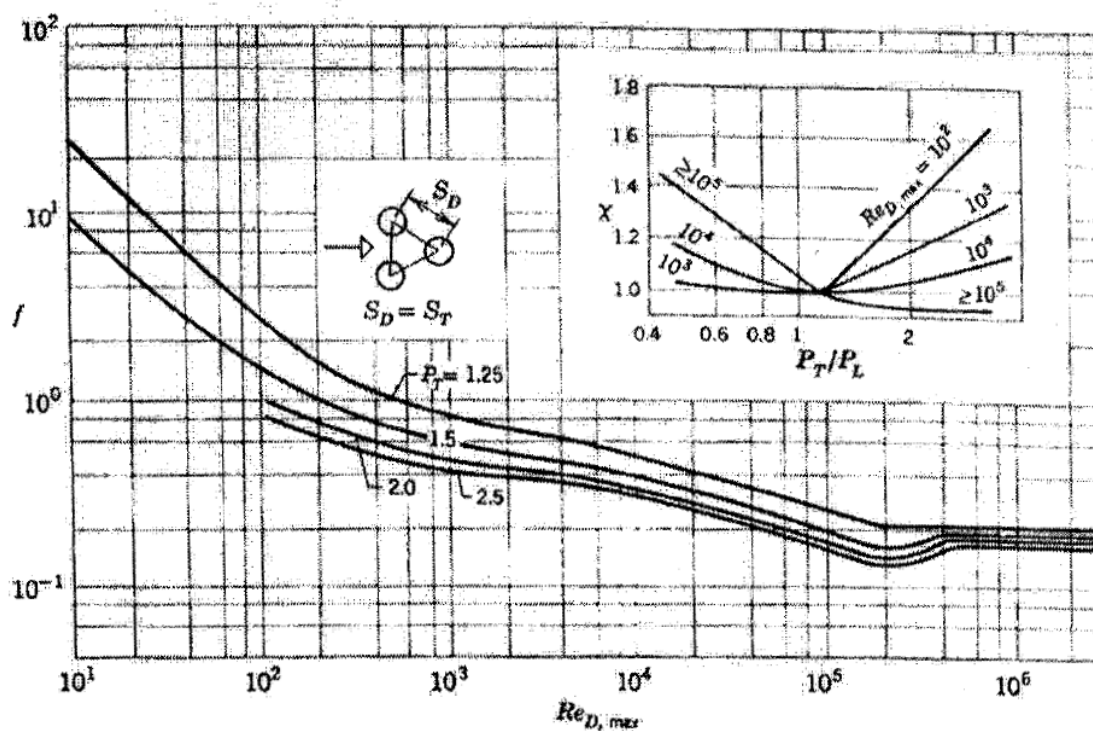
$$S_T = 0.15 \text{ m.}$$

$$S_L/D = 2.0$$

$$S_L = 0.1 \text{ m.}$$



ภาพประกอบ 13 ตำแหน่งการวางแท่งความร้อนไฟฟ้า



ภาพประกอบ 14 แฟกเตอร์ความเสียดทาน (f) และค่าแก้ไข (χ), (Incropera; & Dewitt. 2002)

อัตราการไหลเชิงปริมาตร = พื้นที่หน้าตัดของกล่องเครื่องทำความร้อน $\times$ ความเร็วอากาศเฉลี่ย

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

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

$$v_{\max} = \left[\frac{0.15}{0.15 - 0.05} \right] \times 0.42$$

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

$$Re_{\max} = \frac{1.1614 \times 0.63 \times 0.15}{1.846 \times 10^{-5}}$$

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

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

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

จากข้อมูลของ $Re_{\max}$ และค่าที่ได้จากกราฟในภาพประกอบ 14 จะได้ค่าแฟกเตอร์ความเสียดทาน (f) = 0.6 และค่าแก้ไข (χ) = 1.3 ค่าความดันสูญเสียของกล่องเครื่องทำความร้อน (ΔP) มีค่าเท่ากับ

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

ความดันสูญเสียของท่อและอุปกรณ์

ท่อสแตนเลสขนาด 1.5 นิ้ว

$$\begin{aligned}
 Re &= \frac{\rho V D}{\mu} \\
 &= \frac{1.1614 \times 25 \times 0.04}{1.846 \times 10^{-5}} \\
 &= 62,914 \text{ (Turbulence)}
 \end{aligned}$$

แฟกเตอร์ความหยาบของผิวท่อสแตนเลส (Roughness factor of stainless steel pipe)

$$\begin{aligned}
 \varepsilon &= 0.045 \text{ m} \\
 \frac{\varepsilon}{D} &= \frac{0.045}{40} \\
 &= 0.001125
 \end{aligned}$$

จาก Moody diagram

$$\begin{aligned}
 \frac{\varepsilon}{D} &= 0.001125 \\
 Re &= 62,914
 \end{aligned}$$

แฟกเตอร์ความเสียดทาน

$$\begin{aligned}
 f &= 0.02 \\
 \Delta P &= f \times \frac{L}{D} \times \frac{V^2}{2g} \\
 &= 0.02 \times \frac{5}{0.04} \times \frac{25^2}{2 \times 9.81} \\
 &= 83.62 \text{ Pa}
 \end{aligned}$$

โกลบวาล์ว ขนาด 1.5 นิ้ว

$$\begin{aligned}\Delta P &= K \times \frac{V^2}{2g} \\ &= 0.14 \times \frac{25^2}{2 \times 9.81} \\ &= 4.46 \text{ Pa}\end{aligned}$$

ความดันสูญเสียสุทธิของท่อและอุปกรณ์

$$\begin{aligned}&= 82.62 + 4.46 \\ &= 87.08 \text{ Pa}\end{aligned}$$

ความดันสูญเสียของห้องอบแห้งกระแสน (Tamir A., 1994)

สามารถหาจากสมการดังนี้

$$\begin{aligned}\Delta P &= 0.5 \rho_a u_{a,0}^2 \\ &= 0.5 \times 1.1614 \times 25^2 \\ &= 362.93 \text{ Pa}\end{aligned}$$

ความดันสูญเสียรวมทั้งหมดของระบบอบแห้งกระแสน

$$\begin{aligned}&= \text{ความดันสูญเสียของกล่องทำความร้อน} + \text{ความดันสูญเสียของท่อ} \\ &\quad \text{และอุปกรณ์} + \text{ความดันสูญเสียของห้องอบแห้งแบบกกระแสน} \\ &= 1.08 + 87.08 + 362.93 \\ &= 451.09 \text{ Pa}\end{aligned}$$

การคำนวณหาปริมาตรของห้องอบแห้ง

ในกระบวนการทดลองจะมีการใช้ห้องอบแห้ง 2 ขนาด คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.37 m. กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.22 m. จึงแสดงการคำนวณหาปริมาตรห้องอบแห้งทั้งสองขนาด ดังนี้

$$\begin{aligned}V_r &= V_{\text{ห้องอบแห้ง}} + \text{ท่อลำเลียง} \\ V &= A \times L\end{aligned}$$

ห้องอบแห้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.37 m.

$$\begin{aligned}
 V &= (3.14 \times D^2 \times h)/4 + (3.14 \times D^2 \times h)/4 + (3.14 \times D^2 \times h)/4 \\
 &= (3.14 \times 0.37^2 \times 0.45)/4 + (3.14 \times 0.37^2 \times 0.3)/4 + (3.14 \times 0.08^2 \\
 &\quad \times 0.05)/4 - (3.14 \times 0.19^2 \times 0.4)/4 \\
 &= 0.048 \text{ m}^3 \\
 \text{ท่อลำเลียง} &= (3.14 \times D^2 \times L)/4 \\
 &= (3.14 \times 0.04^2 \times 1.6)/4 \\
 &= 0.002 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

ปริมาตรรวมของห้องอบแห้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.37 m.

$$\begin{aligned}
 V_r &= 0.048 + 0.002 \\
 &= 0.050 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

ห้องอบแห้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.22 m.

$$\begin{aligned}
 V &= (3.14 \times D^2 \times h)/4 + (3.14 \times D^2 \times h)/4 + (3.14 \times D^2 \times h)/4 - (3.14 \\
 &\quad \times D^2 \times h)/4 \\
 &= (3.14 \times 0.22^2 \times 0.3)/4 + (3.14 \times 0.22^2 \times 0.2)/4 + (3.14 \times 0.08^2 \times \\
 &\quad 0.05)/4 - (3.14 \times 0.13^2 \times 0.3)/4 \\
 &= 0.018 \text{ m}^3 \\
 \text{ท่อลำเลียง} &= (3.14 \times D^2 \times L)/4 \\
 &= (3.14 \times 0.04^2 \times 1.6)/4 \\
 &= 0.002 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

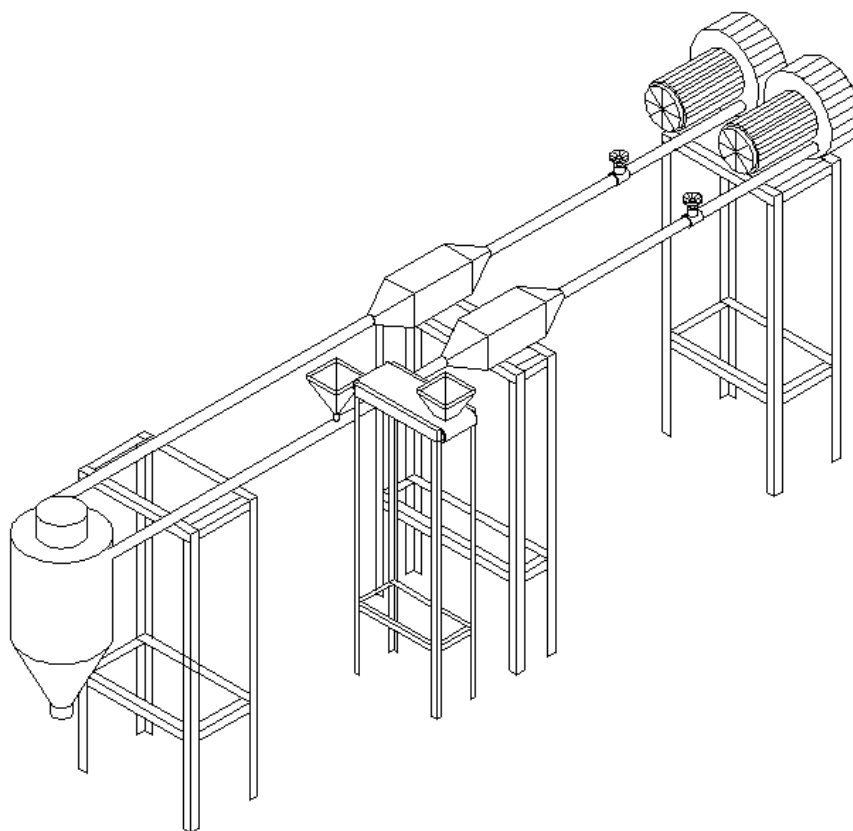
ปริมาตรรวมของห้องอบแห้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.22 m.

$$\begin{aligned}
 V_r &= 0.018 + 0.002 \\
 &= 0.020 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

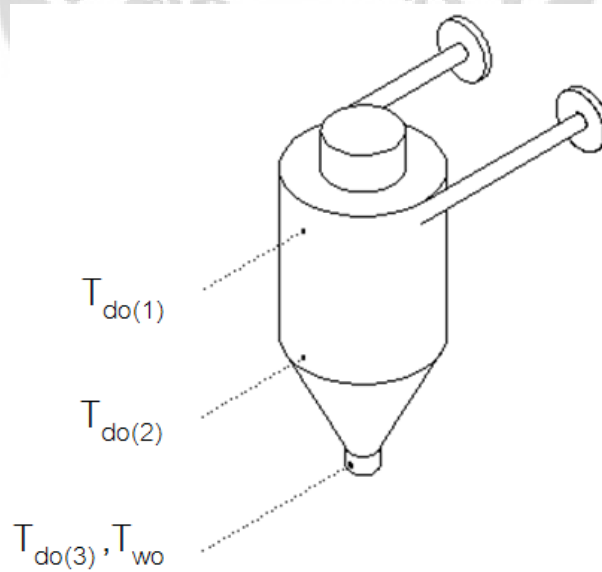


ภาคผนวก ข

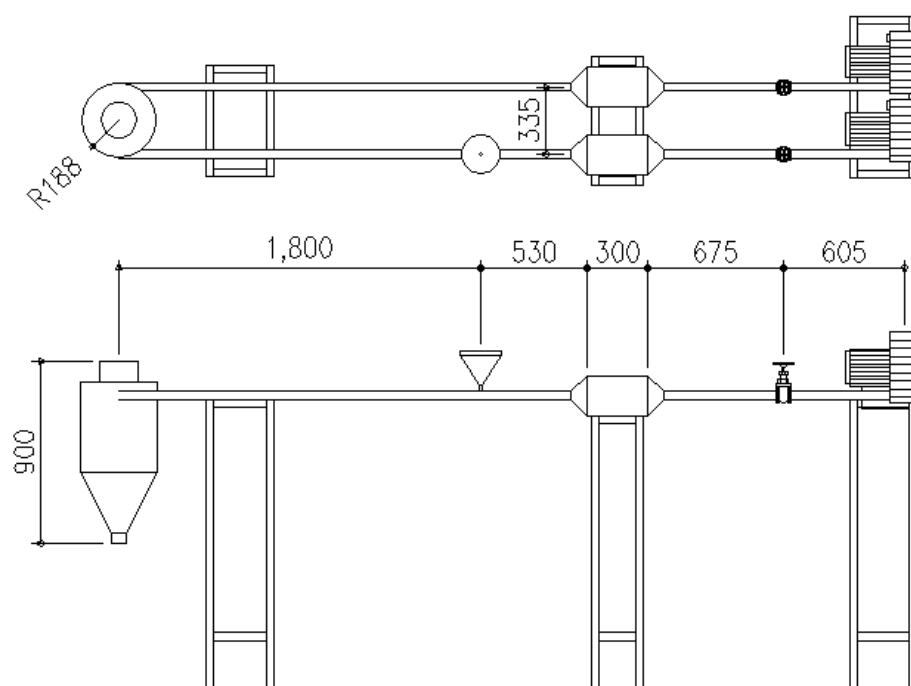
รูปภาพแสดงระบอบแห่งกระแสนแบบวิถีโค้ง



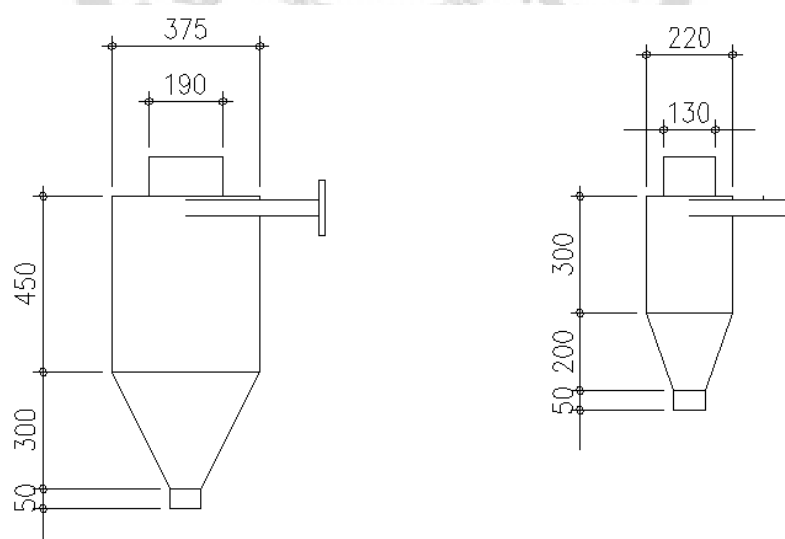
ภาพประกอบ 15 ภาพ 3 มิติ ของระบบอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง



ภาพประกอบ 16 จุดตรวจวัดอุณหภูมิของห้องอบแห้ง



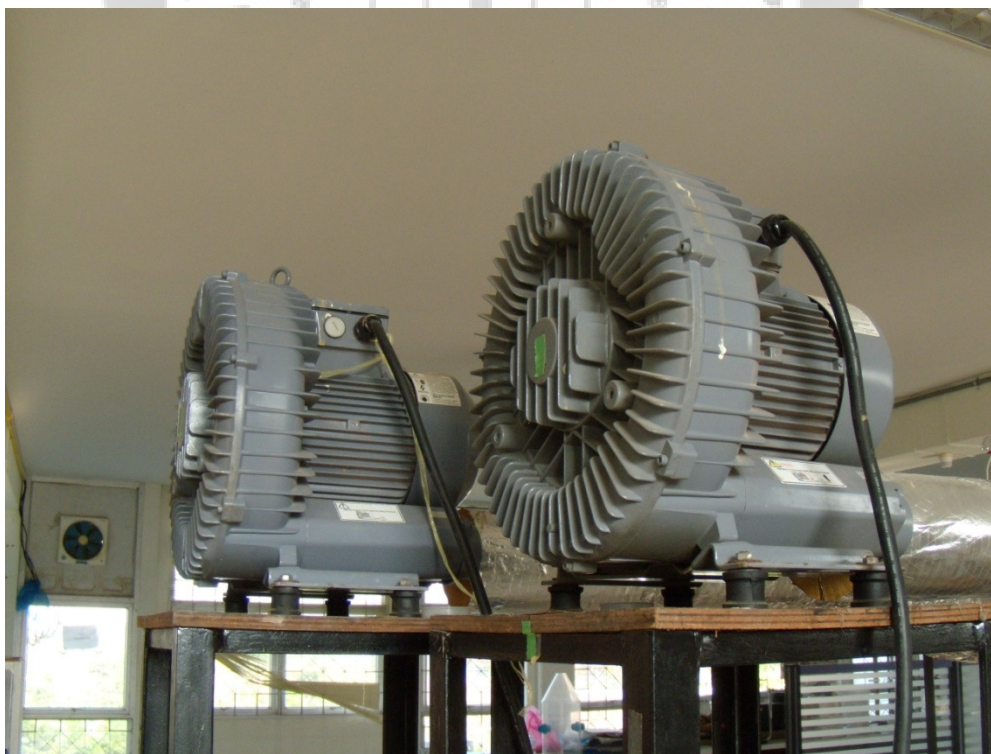
ภาพประกอบ 17 ภาพฉายของระบบอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง



ภาพประกอบ 18 ห้องอบแห้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.37 m. กับ 0.22 m.



ภาพประกอบ 19 ระบบอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง



ภาพประกอบ 20 พัดลมแรงดันสูง



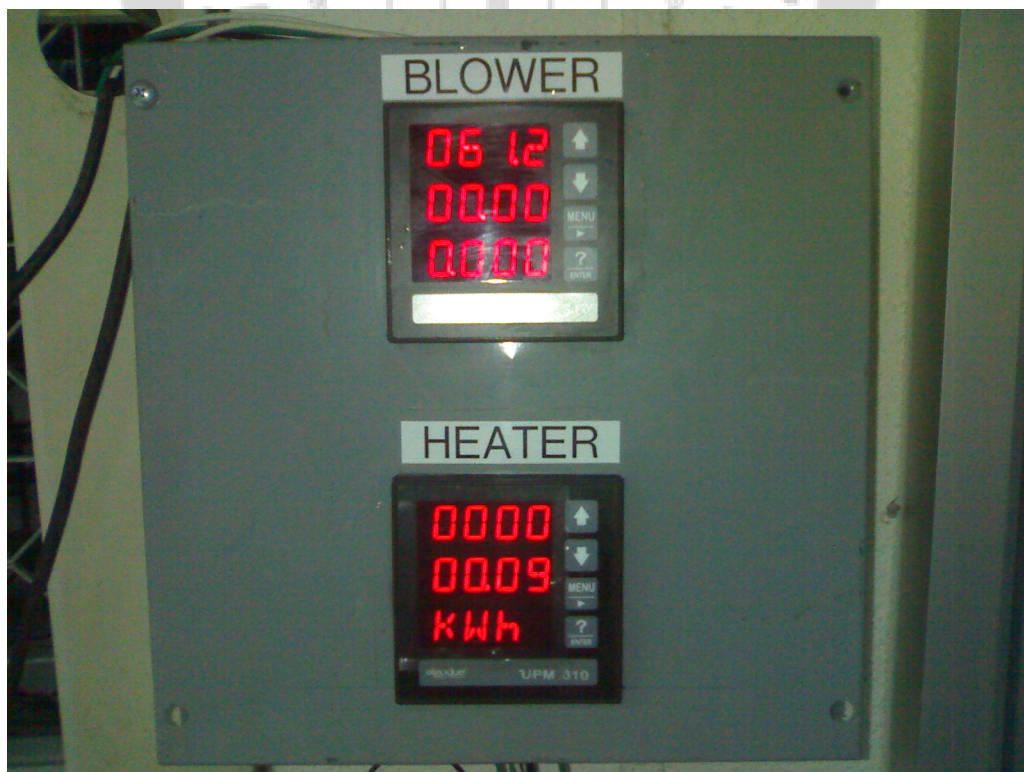
ภาพประกอบ 21 เครื่องทำความร้อนด้วยไฟฟ้า



ภาพประกอบ 22 เครื่องควบคุมอุณหภูมิของอากาศ



ภาพประกอบ 23 โกลบวาล์วสำหรับปรับอัตราการไหลของอากาศ



ภาพประกอบ 24 มิเตอร์ไฟฟ้าสำหรับเครื่องทำความร้อนและพัดลมแรงดันสูง



ภาพประกอบ 25 ตู้เย็นสำหรับแช่ข้าวเปลือก



ภาพประกอบ 26 เครื่องอบไฟฟ้าสำหรับอบไล่ความชื้นข้าวเปลือก



ภาพประกอบ 27 เครื่องป้อนข้าวเปลือกแบบสายพานลำเลียง



ภาพประกอบ 28 เครื่องวัดความเร็วลม



ภาพประกอบ 29 เครื่องวัดค่าอุณหภูมิแบบต่อเนื่อง



ภาพประกอบ 30 เครื่องปรับแรงดันไฟฟ้าสำหรับเครื่องปั๊มข้าวแบบสายพาน



ภาพประกอบ 31 เครื่องวัดอุณหภูมิกระเปาะเปียก



ภาพประกอบ 32 เครื่องชั่งน้ำหนัก



ภาคผนวก ค

การทดลองหาอัตราการปนัวส์ดูและเวลาที่วิส์ดูอยู่ในระบบอบแห้ง

การทดลองหาอัตราการป้อนวัสดุที่เหมาะสมต่อระบบอบแห้ง

อัตราการป้อนวัสดุเป็นตัวแปรหนึ่งที่จะมีผลกระทบต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง การป้อนวัสดุด้วยอัตราที่เหมาะสมจะช่วยให้เครื่องอบแห้งมีสมรรถนะที่ดีขึ้น ในการทดลองจะใช้ระบบสายพานลำเลียงที่สามารถควบคุมอัตราความเร็วรอบได้ เข้ามาช่วยในการป้อนวัสดุเพื่อให้มีความเที่ยงตรงสม่ำเสมอและสามารถปรับอัตราการป้อนวัสดุด้วยการปรับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์กระแสตรงที่ใช้ขับเคลื่อนสายพานลำเลียง อุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้า คือ ตัวปรับค่าแรงดันไฟฟ้า (Voltage regulator) สำหรับการทดลองเพื่อหาอัตราการป้อนวัสดุมีขั้นตอนและวิธีการดังนี้

วัสดุอุปกรณ์

1. เครื่องป้อนวัสดุ
2. ตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้า
3. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล
4. นาฬิกาจับเวลา
5. วัสดุที่จะใช้ทดลอง (ข้าวเปลือก)
6. ภาชนะรองรับ

ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

1. บรรจุข้าวเปลือกในเครื่องป้อนวัสดุ
2. เปิดเครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้า โดยปรับค่าแรงดันไฟฟ้าไว้ที่ 5, 6 และ 7 โวลต์
3. จับเวลาใน 10, 20 และ 30 s เสร็จแล้วนำข้าวเปลือกที่ได้จากเครื่องป้อนวัสดุไปชั่งน้ำหนัก
4. บันทึกผลการทดลองเพื่อหาอัตราการป้อนวัสดุที่เหมาะสม
5. ทำการทดลองซ้ำในแต่ละค่าแรงดันไฟฟ้าจำนวน 3 ซ้ำ (5, 6 และ 7 โวลต์) ตามลำดับ

ตามลำดับ

ตาราง 13 อัตราการป้อนวัสดุ

แรงดันไฟฟ้า (Volt)	เวลา (s)	น้ำหนัก (g)	อัตราการป้อน (kg _{dry solid} /h)	ค่าเฉลี่ย อัตราการป้อน (kg _{dry solid} /h)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
5	10	50.4	18.1	20	1.09
	10	51.8	18.6		
	10	52.8	19.0		
	20	114.8	20.7		
	20	115.6	20.8		
	20	116.8	21.0		
	30	174.4	20.9		
	30	173.4	20.8		
	30	174.6	21.0		
	30	174.6	21.0		
6	10	94.0	33.8	35	0.99
	10	94.8	34.1		
	10	95.4	34.3		
	20	193.4	34.8		
	20	195.0	35.1		
	20	195.6	35.2		
	30	302.8	36.3		
	30	305.6	36.7		
	30	303.6	36.4		
	30	303.6	36.4		

ตาราง 13 (ต่อ)

แรงดันไฟฟ้า (Volt)	เวลา (s)	น้ำหนัก (g)	อัตราการป้อน (kg _{dry solid} /h)	ค่าเฉลี่ย อัตราการป้อน (kg _{dry solid} /h)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
7	10	153.6	55.3	56	1.03
	10	155.0	55.8		
	10	154.8	55.7		
	20	304.0	54.7		
	20	305.6	55.0		
	20	303.8	54.7		
	30	472.0	56.6		
	30	476.4	57.2		
	30	481.0	57.7		

การทดลองหาเวลาที่วัสดุอยู่ในระบบ

วัสดุอุปกรณ์

1. เครื่องอบแห้ง
2. เครื่องป้อนวัสดุ
3. ตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าสำหรับเครื่องป้อนวัสดุ
4. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล
5. วัสดุที่จะใช้ทดลอง (ข้าวเปลือก)
6. ภาชนะรองรับ

ตาราง 14 เวลาที่วัสดุอยู่ในระบบ (ห้องอบแห้งขนาด 50 ลิตร)

แรงดันไฟฟ้า (Volt)	อัตราการป้อน (kg/s)	น้ำหนัก (g)	เวลาที่วัสดุ อยู่ในระบบ (s)	เวลาเฉลี่ยที่ วัสดุอยู่ในระบบ (s)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
5	5.56×10^{-3}	8.4	1.51	1.72	0.15
		9.8	1.76		
		10.4	1.87		
6	9.72×10^{-3}	16.2	1.67	1.79	0.17
		18.6	1.91		
		17.4	1.79		
7	15.56×10^{-3}	27.4	1.76	1.81	0.05
		28.4	1.83		
		28.6	1.84		

ตาราง 15 เวลาที่วัสดุอยู่ในระบบ (ห้องอบแห้งขนาด 20 ลิตร)

แรงดันไฟฟ้า (Volt)	อัตราการป้อน (kg/s)	น้ำหนัก (g)	เวลาที่วัสดุ อยู่ในระบบ (s)	เวลาเฉลี่ยที่ วัสดุอยู่ในระบบ (s)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
5	5.56×10^{-3}	9.4	1.69	1.76	0.06
		9.8	1.76		
		10.2	1.84		
6	9.72×10^{-3}	18.4	1.89	1.85	0.06
		17.6	1.81		
		18.0	1.85		
7	15.56×10^{-3}	28.6	1.84	1.90	0.08
		30.2	1.94		
		30.0	1.93		



ภาคผนวก ง

การเตรียมความขึ้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก

การเตรียมความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก

การเตรียมความชื้นของข้าวเปลือกที่เหมาะสมต่อกระบวนการทดลอง สามารถคำนวณและมีกระบวนการเตรียมดังต่อไปนี้

1. นำความชื้นเริ่มต้น (M_{di}) ที่หาได้จากข้าวเปลือกที่นำมาเป็นวัสดุทดลองมาหาน้ำหนักมวลงแห้ง

2. หาน้ำหนักมวลงแห้ง (d) ต่อ 1 มวลกิโกรัมข้าวเปลือก จากสมการ

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

แทนค่า $w = 1$ จะได้

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

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

3. หาน้ำหนักน้ำที่ต้องเติมเพื่อเพิ่มความชื้นให้กับข้าวเปลือกโดยจะคิดต่อมวลกิโกรัมข้าวเปลือก ($M_{w/kg}$) ซึ่งมีค่าเท่ากับความชื้นที่ต้องการ (M_{df}) ลบด้วยความชื้นเริ่มต้น (M_{di}) แล้วนำผลลัพธ์ที่ได้มาคูณกับน้ำหนักมวลงแห้ง (d) แสดงได้ตามสมการดังนี้

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

เมื่อ

$M_{w/kg}$ คือ น้ำหนักน้ำที่ต้องเติมต่อมวลกิโกรัมข้าวเปลือก

M_{di} คือ ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก

M_{df} คือ ความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกที่ต้องการ

การคำนวณหาน้ำหนักน้ำที่ต้องเติม

ข้าวเปลือกตัวอย่างสำหรับทดลองมีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 11.5 % d.b. หาน้ำหนักมวลงแห้ง (d) ต่อ 1 มวลกิโกรัมข้าวเปลือก จากสมการ

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

แทนค่า $w = 1$ จะได้

$$\begin{aligned}
 M_{di} &= \frac{1-d}{d} \\
 d &= \frac{1}{M_{di} + 1} \\
 d &= \frac{1}{0.115 + 1} \\
 d &= 0.897 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

ความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกที่ต้องการสำหรับการทดลอง = 28% d.b. คำนวณหาน้ำหนักน้ำที่จะต้องเติมเพื่อเพิ่มความชื้นให้แก่ข้าวเปลือกต่อมวลข้าวเปลือก 1 กิโลกรัม

$$\begin{aligned}
 M_{w/kg} &= (M_{df} - M_{di}) \times d \\
 M_{w/kg} &= (0.28 - 0.115) \times 0.897 \\
 M_{w/kg} &= 0.148 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

สำหรับกระบวนการเพิ่มความชื้นให้กับข้าวเปลือก ปริมาณน้ำที่เติมเพื่อเพิ่มความชื้นให้แก่ข้าวเปลือกอาจเกิดความสูญเสียระหว่างกระบวนการ จึงจะต้องเติมน้ำเพิ่มอีก 15% ของน้ำหนักน้ำที่หาได้ (ปฏิวดี คมวชิรกุล, 2554) ดังนั้นน้ำหนักของน้ำที่จะต้องเติมต่อปริมาณข้าวเปลือก 1 kg = $0.148 + 0.022 = 0.170 \text{ kg}$



1. ผลของอุณหภูมิของอากาศที่จุดต่างๆของระบบอบแห้ง (ขนาด 50 ลิตร)

ตาราง 16 อุณหภูมิของอากาศที่จุดต่างๆของระบบอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง (อุณหภูมิ 70 °C

ความเร็วอากาศ 25 m/s อัตราการป้อนวัสดุ 20 kg_{dry solid}/h) จุดตรวจวัดแสดงในภาคผนวก ข

Time (s)	T _{di(1)} (°C)	T _{di(2)} (°C)	T _{di(aver)} (°C)	T _{wi} (°C)	T _{af} (°C)	T _{do(1)} (°C)	T _{do(2)} (°C)	T _{do(3)} (°C)	T _{do(aver)} (°C)	T _{wo} (°C)	ΔT _{lm} (°C)
15	71.2	71.1	71.2	34.0	65.0	65.2	64.0	63.0	64.1	32.17	34.5
30	71.5	71.1	71.3	34.0	65.0	65.3	64.3	63.3	64.3	32.23	34.6
45	71.3	71.1	71.2	34.0	65.1	65.4	64.7	63.4	64.5	32.26	34.7
60	71.8	71.0	71.4	34.0	65.2	65.4	64.9	63.5	64.6	32.27	34.8
75	71.8	71.0	71.4	34.0	65.1	65.6	65.1	63.7	64.8	32.28	34.9
90	71.6	71.0	71.3	34.0	65.1	65.7	65.3	63.8	64.9	32.28	34.9
105	71.6	71.2	71.4	34.0	65.2	65.8	65.5	64.0	65.1	32.36	35.0
120	71.2	71.2	71.2	34.0	65.2	66.1	65.7	64.3	65.4	32.39	35.0
135	71.2	71.0	71.1	34.0	65.1	66.1	65.9	64.5	65.5	32.31	35.1
150	71.0	71.4	71.2	34.0	65.1	66.1	66.0	64.5	65.5	32.22	35.2
165	70.9	71.7	71.3	34.0	65.2	66.2	66.1	64.6	65.6	32.20	35.3
180	70.6	71.5	71.1	34.0	65.1	66.2	66.2	64.8	65.7	32.09	35.3
195	71.0	71.5	71.3	34.0	65.2	66.3	66.4	64.9	65.9	32.06	35.5
210	70.8	71.1	71.0	34.0	65.2	66.3	66.4	65.0	65.9	32.02	35.4
225	71.2	71.3	71.3	34.0	65.2	66.4	66.6	65.1	66.0	32.07	35.6
240	71.3	71.3	71.3	34.0	65.1	66.4	66.7	65.1	66.1	32.05	35.6
255	71.2	71.3	71.3	34.0	65.1	66.4	66.7	65.1	66.1	32.02	35.6
270	71.2	71.4	71.3	34.0	65.1	66.5	66.7	65.1	66.1	32.03	35.7
285	71.1	71.5	71.3	34.0	65.2	66.5	66.8	65.0	66.1	32.01	35.7
300	71.5	71.3	71.4	34.0	65.1	66.6	66.9	65.0	66.2	31.95	35.8
Average	71.3	71.3	71.3	34.0	65.1	66.0	65.8	64.4	65.4	32.16	35.2
SD	0.07	0.04	0.03	0.00	0.01	0.10	0.19	0.15	0.15	0.03	0.09

ตาราง 17 อุณหภูมิของอากาศที่จุดต่างของระบบอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง (อุณหภูมิ 70 °C
ความเร็วอากาศ 25 m/s อัตราการป้อนวัสดุ 35 kg_{dry solid}/h) จุดตรวจวัดแสดงในภาคผนวก ข

Time (s)	T _{di(1)} (°C)	T _{di(2)} (°C)	T _{di(aver)} (°C)	T _{wi} (°C)	T _{af} (°C)	T _{do(1)} (°C)	T _{do(2)} (°C)	T _{do(3)} (°C)	T _{do(aver)} (°C)	T _{wo} (°C)	ΔT _{lm} (°C)
15	72.6	69.7	71.2	33.8	65.4	66.7	65.5	64.2	65.5	31.61	35.6
30	72.3	69.8	71.1	33.8	65.4	66.7	65.5	64.2	65.5	31.60	35.5
45	72.3	69.9	71.1	33.8	65.4	66.7	65.3	64.2	65.4	31.68	35.5
60	72.1	69.7	70.9	33.8	65.3	66.7	65.3	64.2	65.4	31.68	35.4
75	72.4	69.7	71.1	33.8	65.4	66.7	65.3	64.2	65.4	31.69	35.5
90	72.0	69.8	70.9	33.8	65.5	66.6	65.2	64.3	65.4	31.70	35.4
105	72.3	69.6	71.0	33.8	65.3	66.6	65.2	64.3	65.4	31.66	35.4
120	72.0	69.7	70.9	33.8	65.4	66.6	65.2	64.2	65.3	31.68	35.3
135	71.7	69.6	70.7	33.8	65.4	66.6	65.2	64.2	65.3	31.69	35.2
150	71.8	69.6	70.7	33.8	65.4	66.5	65.3	64.2	65.3	31.66	35.3
165	71.5	69.6	70.6	33.8	65.4	66.5	65.3	64.2	65.3	31.67	35.2
180	71.7	69.6	70.7	33.8	65.4	66.5	65.3	64.1	65.3	31.69	35.2
195	71.6	69.4	70.5	33.8	65.2	66.5	65.3	64.1	65.3	31.71	35.1
210	71.3	69.4	70.4	33.8	65.2	66.5	65.3	64.1	65.3	31.63	35.1
225	71.5	69.5	70.5	33.8	65.2	66.5	65.3	64.0	65.3	31.63	35.1
240	71.4	69.6	70.5	33.8	65.2	66.6	65.3	64.1	65.3	31.64	35.2
255	71.2	69.5	70.4	33.8	65.3	66.6	65.3	64.0	65.3	31.63	35.1
270	71.4	69.4	70.4	33.8	65.2	66.5	65.3	64.0	65.3	31.63	35.1
285	71.2	69.4	70.3	33.8	65.2	66.5	65.3	64.0	65.3	31.63	35.0
300	71.0	69.4	70.2	33.8	65.2	66.5	65.3	64.0	65.3	31.65	35.0
Average	71.8	69.6	70.7	33.8	65.3	66.6	65.3	64.1	65.3	31.66	35.3
SD	0.10	0.03	0.06	0.00	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.04

ตาราง 18 อุณหภูมิของอากาศที่จุดต่างของระบบอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง (อุณหภูมิ 70 °
ความเร็วอากาศ 25 m/s อัตราการป้อนวัสดุ 56 kg_{dry solid}/h) จุดตรวจวัดแสดงในภาคผนวก ข

Time (s)	T _{di(1)} (°C)	T _{di(2)} (°C)	T _{di(aver)} (°C)	T _{wi} (°C)	T _{af} (°C)	T _{do(1)} (°C)	T _{do(2)} (°C)	T _{do(3)} (°C)	T _{do(aver)} (°C)	T _{wo} (°C)	ΔT _{lm} (°C)
15	72.2	69.8	71.0	33.8	65.5	66.3	65.1	64.4	65.3	31.31	35.6
30	72.3	69.8	71.1	33.8	65.5	66.3	65.2	64.6	65.4	31.31	35.6
45	72.1	69.7	70.9	33.8	65.5	66.2	65.2	64.6	65.3	31.36	35.5
60	71.9	69.6	70.8	33.8	65.4	66.2	65.2	64.5	65.3	31.35	35.4
75	71.6	69.6	70.6	33.8	65.4	66.2	65.2	64.5	65.3	31.36	35.4
90	71.5	69.6	70.6	33.8	65.5	66.3	65.2	64.5	65.3	31.34	35.4
105	71.7	69.7	70.7	33.8	65.6	66.3	65.2	64.6	65.4	31.33	35.4
120	71.5	69.7	70.6	33.8	65.4	66.2	65.2	64.7	65.4	31.31	35.4
135	71.6	69.6	70.6	33.8	65.5	66.1	65.2	64.7	65.3	31.31	35.4
150	71.4	69.7	70.6	33.8	65.5	66.1	65.2	64.6	65.3	31.31	35.4
165	71.2	69.7	70.5	33.8	65.5	66.2	64.8	64.2	65.1	31.32	35.2
180	71.1	69.6	70.4	33.8	65.4	66.2	64.6	64.2	65.0	31.31	35.1
195	71.0	69.6	70.3	33.8	65.4	66.1	64.6	64.2	65.0	31.31	35.1
210	70.7	69.6	70.2	33.8	65.4	66.1	64.5	64.2	64.9	31.3	35.0
225	70.6	69.6	70.1	33.8	65.4	66.2	64.5	64.1	64.9	31.32	34.9
240	70.4	69.6	70.0	33.8	65.4	66.1	64.5	64.1	64.9	31.33	34.9
255	70.6	69.7	70.2	33.8	65.4	66.0	64.3	64.2	64.8	31.33	34.9
270	70.6	69.7	70.2	33.8	65.5	66.0	64.4	64.2	64.9	31.34	34.9
285	70.5	69.7	70.1	33.8	65.5	66.0	64.4	64.1	64.8	31.34	34.9
300	70.4	69.7	70.1	33.8	65.5	66.0	64.3	64.1	64.8	31.36	34.8
Average	71.2	69.7	70.5	33.8	65.5	66.2	64.8	64.4	65.1	31.33	35.2
SD	0.14	0.01	0.07	0.00	0.01	0.02	0.08	0.05	0.05	0.00	0.06

ตาราง 19 อุณหภูมิของอากาศที่จุดต่างๆของระบบอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง (อุณหภูมิ 90 °C
ความเร็วอากาศ 25 m/s อัตราการป้อนวัสดุ 20 kg_{dry solid}/h) จุดตรวจวัดแสดงในภาคผนวก ข

Time (s)	T _{di(1)} (°C)	T _{di(2)} (°C)	T _{di(aver)} (°C)	T _{wi} (°C)	T _{af} (°C)	T _{do(1)} (°C)	T _{do(2)} (°C)	T _{do(3)} (°C)	T _{do(aver)} (°C)	T _{wo} (°C)	ΔT _{lm} (°C)
15	90.2	90.3	90.3	37.2	83.0	83.5	82.8	80.2	82.2	35.08	50.0
30	90.2	90.3	90.3	37.2	83.0	83.5	82.9	80.3	82.2	35.11	50.0
45	90.2	90.4	90.3	37.2	83.0	83.7	83.2	80.7	82.5	35.11	50.2
60	90.0	90.2	90.1	37.2	82.8	83.7	83.3	80.7	82.6	35.13	50.1
75	90.4	90.3	90.4	37.2	82.9	83.9	83.6	81.0	82.8	35.15	50.4
90	89.5	90.2	89.9	37.2	83.1	83.8	83.6	81.2	82.9	35.17	50.1
105	90.1	90.2	90.2	37.2	83.1	84.0	83.8	81.4	83.1	35.14	50.4
120	89.5	90.3	89.9	37.2	83.2	84.0	83.9	81.4	83.1	35.14	50.3
135	90.0	90.3	90.2	37.2	83.1	84.2	84.1	81.5	83.3	35.06	50.5
150	90.5	90.1	90.3	37.2	83.1	84.2	84.2	81.5	83.3	35.11	50.6
165	90.3	90.1	90.2	37.2	83.1	84.4	84.4	81.8	83.5	35.15	50.7
180	90.2	90.2	90.2	37.2	83.2	84.4	84.4	81.7	83.5	35.16	50.6
195	90.3	90.1	90.2	37.2	83.2	84.5	84.5	81.9	83.6	35.21	50.7
210	89.7	90.1	89.9	37.2	83.2	84.4	84.5	82.0	83.6	35.24	50.5
225	90.6	90.1	90.4	37.2	83.2	84.6	84.8	82.4	83.9	35.28	50.9
240	90.0	90.1	90.1	37.2	83.2	84.6	84.8	82.2	83.9	35.23	50.7
255	90.0	90.1	90.1	37.2	83.2	84.6	84.8	82.3	83.9	35.32	50.7
270	90.3	90.0	90.2	37.2	83.2	84.7	84.9	82.3	84.0	35.34	50.8
285	90.1	90.0	90.1	37.2	83.1	84.8	85.0	82.6	84.1	35.38	50.8
300	89.2	90.0	89.6	37.2	83.2	84.7	85.0	82.6	84.1	35.40	50.5
Average	90.1	90.2	90.1	37.2	83.1	84.2	84.1	81.6	83.3	35.20	50.5
SD	0.08	0.03	0.04	0.00	0.02	0.09	0.15	0.16	0.13	0.02	0.06

ตาราง 20 อุณหภูมิของอากาศที่จุดต่างๆของระบบอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง (อุณหภูมิ 90 °C
ความเร็วอากาศ 25 m/s อัตราการป้อนวัสดุ 35 kg_{dry solid}/h) จุดตรวจวัดแสดงในภาคผนวก ข

Time (s)	T _{di(1)} (°C)	T _{di(2)} (°C)	T _{di(aver)} (°C)	T _{wi} (°C)	T _{af} (°C)	T _{do(1)} (°C)	T _{do(2)} (°C)	T _{do(3)} (°C)	T _{do(aver)} (°C)	T _{wo} (°C)	ΔT _{lm} (°C)
15	90.4	90.7	90.6	37.5	83.2	82.4	80.8	78.5	80.6	34.38	49.5
30	90.4	90.4	90.4	37.5	83.1	82.5	81.1	78.7	80.8	34.45	49.5
45	90.5	90.6	90.6	37.5	83.3	82.8	81.5	79.3	81.2	34.51	49.8
60	90.7	90.5	90.6	37.5	83.3	82.9	81.7	79.4	81.3	34.52	49.9
75	90.7	90.8	90.8	37.5	83.4	83.2	82.1	79.7	81.7	34.55	50.1
90	90.6	90.6	90.6	37.5	83.4	83.3	82.3	79.8	81.8	34.64	50.1
105	90.3	90.6	90.5	37.5	83.4	83.5	82.6	80.1	82.1	34.71	50.1
120	91.0	90.6	90.8	37.5	83.5	83.7	82.9	80.4	82.3	34.75	50.4
135	90.7	90.6	90.7	37.5	83.5	83.8	83.1	80.7	82.5	34.82	50.4
150	90.5	90.5	90.5	37.5	83.6	83.9	83.3	80.9	82.7	34.76	50.4
165	91.0	90.4	90.7	37.5	83.5	84.1	83.5	81.2	82.9	34.86	50.6
180	90.4	90.5	90.5	37.5	83.5	84.0	83.6	81.2	82.9	34.85	50.5
195	90.3	90.4	90.4	37.5	83.6	84.1	83.8	81.3	83.1	34.89	50.5
210	90.9	90.5	90.7	37.5	83.6	84.2	83.9	81.3	83.1	34.91	50.7
225	90.2	90.4	90.3	37.5	83.6	84.3	84.1	81.4	83.3	35.02	50.5
240	90.5	90.4	90.5	37.5	83.6	84.4	84.2	81.5	83.4	34.96	50.6
255	90.4	90.5	90.5	37.5	83.6	84.3	84.3	81.5	83.4	34.93	50.7
270	90.3	90.2	90.3	37.5	83.5	84.4	84.4	81.6	83.5	34.98	50.6
285	90.7	90.4	90.6	37.5	83.6	84.4	84.4	81.7	83.5	34.99	50.7
300	89.8	90.4	90.1	37.5	83.6	84.4	84.5	81.8	83.6	35.03	50.5
Average	90.5	90.5	90.5	37.5	83.5	83.7	83.1	80.6	82.5	34.78	50.3
SD	0.06	0.03	0.04	0.00	0.03	0.14	0.26	0.23	0.21	0.04	0.08

ตาราง 21 อุณหภูมิของอากาศที่จุดต่างๆของระบบอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง (อุณหภูมิ 90 °C
ความเร็วอากาศ 25 m/s อัตราการป้อนวัสดุ 56 kg_{dry solid}/h) จุดตรวจวัดแสดงในภาคผนวก ข

Time (s)	T _{di(1)} (°C)	T _{di(2)} (°C)	T _{di(aver)} (°C)	T _{wi} (°C)	T _{af} (°C)	T _{do(1)} (°C)	T _{do(2)} (°C)	T _{do(3)} (°C)	T _{do(aver)} (°C)	T _{wo} (°C)	ΔT _{lm} (°C)
15	90.9	90.3	90.6	37.5	83.7	82.4	80.8	78.5	80.6	34.31	49.6
30	90.3	90.3	90.3	37.5	83.7	82.5	81.1	78.7	80.8	34.31	49.6
45	90.8	90.3	90.6	37.5	83.6	82.8	81.5	79.3	81.2	34.36	49.9
60	90.6	90.3	90.5	37.5	83.8	82.9	81.7	79.4	81.3	34.35	49.9
75	90.3	90.3	90.3	37.5	83.8	83.2	82.1	79.7	81.7	34.36	50.0
90	90.4	90.2	90.3	37.5	83.7	83.3	82.3	79.8	81.8	34.34	50.1
105	90.3	90.3	90.3	37.5	83.8	83.5	82.6	80.1	82.1	34.33	50.2
120	90.9	90.3	90.6	37.5	83.9	83.7	82.9	80.4	82.3	34.31	50.5
135	90.4	90.3	90.4	37.5	83.9	83.8	83.1	80.7	82.5	34.31	50.5
150	90.3	90.2	90.3	37.5	83.9	83.9	83.3	80.9	82.7	34.31	50.5
165	90.3	90.2	90.3	37.5	83.9	84.1	83.5	81.2	82.9	34.32	50.7
180	89.8	90.3	90.1	37.5	83.9	84.0	83.6	81.2	82.9	34.31	50.6
195	90.6	90.0	90.3	37.5	83.8	84.1	83.8	81.3	83.1	34.31	50.8
210	90.3	90.2	90.3	37.5	83.8	84.2	83.9	81.3	83.1	34.30	50.8
225	89.8	90.0	89.9	37.5	83.8	84.3	83.9	81.4	83.2	34.32	50.6
240	90.7	90.2	90.5	37.5	83.8	84.4	83.6	81.5	83.2	34.33	50.9
255	90.6	90.2	90.4	37.5	83.9	84.3	83.3	81.5	83.0	34.33	50.8
270	90.1	90.1	90.1	37.5	83.9	84.4	83.4	81.6	83.1	34.34	50.7
285	90.2	90.1	90.2	37.5	83.9	84.4	83.4	81.7	83.2	34.34	50.7
300	90.0	90.0	90.0	37.5	83.7	84.4	83.5	81.8	83.2	34.36	50.7
Average	90.4	90.2	90.3	37.5	83.8	83.7	82.9	80.6	82.4	34.33	50.4
SD	0.07	0.02	0.04	0.00	0.02	0.14	0.21	0.23	0.19	0.00	0.09

ตาราง 22 อุณหภูมิของอากาศที่จุดต่างๆของระบบอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง (อุณหภูมิ 110 °C
ความเร็วอากาศ 25 m/s อัตราการป้อนวัสดุ 20 kg_{dry solid}/h) จุดตรวจวัดแสดงในภาคผนวก ข

Time (s)	T _{di(1)} (°C)	T _{di(2)} (°C)	T _{di(aver)} (°C)	T _{wi} (°C)	T _{af} (°C)	T _{do(1)} (°C)	T _{do(2)} (°C)	T _{do(3)} (°C)	T _{do(aver)} (°C)	T _{wo} (°C)	ΔT _{lm} (°C)
15	110.5	110.8	110.7	40.0	101.8	103.6	103.7	100.6	102.6	37.83	67.7
30	111.6	110.8	111.2	40.0	101.9	103.7	103.8	100.7	102.7	37.81	68.0
45	110.6	110.8	110.7	40.0	101.9	103.7	103.9	100.7	102.8	37.78	67.8
60	111.0	110.6	110.8	40.0	101.9	103.7	103.9	100.7	102.8	37.80	67.8
75	110.3	110.9	110.6	40.0	102.0	103.8	104.0	100.9	102.9	37.80	67.8
90	110.7	110.9	110.8	40.0	102.0	103.8	104.1	100.9	102.9	37.76	67.9
105	110.8	110.7	110.8	40.0	101.8	103.7	104.0	100.8	102.8	37.73	67.9
120	110.4	110.5	110.5	40.0	101.7	103.8	104.1	100.8	102.9	37.78	67.8
135	110.6	110.8	110.7	40.0	101.8	103.8	104.1	100.8	102.9	37.78	67.9
150	110.6	110.7	110.7	40.0	101.9	103.8	104.1	100.9	102.9	37.78	67.9
165	110.0	110.9	110.5	40.0	102.1	103.7	104.1	101.0	102.9	37.76	67.8
180	111.0	110.5	110.8	40.0	102.0	103.8	104.1	101.2	103.0	37.75	68.0
195	110.1	110.7	110.4	40.0	101.8	103.8	104.2	101.2	103.1	37.72	67.8
210	111.5	110.7	111.1	40.0	101.9	104.1	104.3	101.4	103.3	37.73	68.3
225	111.2	110.7	111.0	40.0	101.9	104.0	104.4	101.4	103.3	37.76	68.2
240	110.5	110.8	110.7	40.0	101.5	104.0	104.4	101.4	103.3	37.73	68.1
255	111.1	110.7	110.9	40.0	101.8	104.1	104.5	101.4	103.3	37.77	68.2
270	110.5	110.7	110.6	40.0	101.9	104.0	104.4	101.3	103.2	37.78	68.0
285	111.2	110.6	110.9	40.0	102.0	104.1	104.6	101.5	103.4	37.74	68.2
300	111.2	110.5	110.9	40.0	101.7	104.1	104.5	101.6	103.4	37.74	68.2
Average	110.8	110.7	110.7	40.0	101.9	103.9	104.2	101.1	103.0	37.77	68.0
SD	0.10	0.03	0.04	0.00	0.03	0.04	0.05	0.07	0.05	0.01	0.04

ตาราง 23 อุณหภูมิของอากาศที่จุดต่างๆของระบบอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง (อุณหภูมิ 110 °C
ความเร็วอากาศ 25 m/s อัตราการป้อนวัสดุ 35 kg_{dry solid}/h) จุดตรวจวัดแสดงในภาคผนวก ข

Time (s)	T _{di(1)} (°C)	T _{di(2)} (°C)	T _{di(aver)} (°C)	T _{wi} (°C)	T _{af} (°C)	T _{do(1)} (°C)	T _{do(2)} (°C)	T _{do(3)} (°C)	T _{do(aver)} (°C)	T _{wo} (°C)	ΔT _{lm} (°C)
15	111.0	111.0	111.0	40.2	102.1	103.6	103.7	100.9	102.7	37.50	68.0
30	111.5	111.0	111.3	40.2	101.8	103.6	103.7	101.0	102.8	37.49	68.1
45	110.8	110.9	110.9	40.2	102.8	104.3	104.1	101.8	103.4	37.51	68.2
60	111.7	111.0	111.4	40.2	103.9	105.0	104.6	102.7	104.1	37.57	68.8
75	111.3	111.2	111.3	40.2	102.8	104.7	104.6	102.3	103.9	37.52	68.7
90	111.3	111.3	111.3	40.2	102.5	104.4	104.6	101.9	103.6	37.59	68.5
105	111.4	111.1	111.3	40.2	102.3	104.2	104.5	101.7	103.5	37.61	68.4
120	112.3	111.1	111.7	40.2	102.3	104.3	104.6	101.8	103.6	37.65	68.7
135	111.7	111.0	111.4	40.2	102.2	104.3	104.6	101.8	103.6	37.59	68.5
150	112.6	111.0	111.8	40.2	102.1	104.6	104.7	102.0	103.8	37.65	68.8
165	112.4	111.1	111.8	40.2	102.2	104.4	104.7	101.9	103.7	37.62	68.8
180	111.8	110.9	111.4	40.2	102.3	104.4	104.7	102.0	103.7	37.58	68.6
195	112.4	111.0	111.7	40.2	102.3	104.5	104.7	102.1	103.8	37.54	68.8
210	112.3	111.1	111.7	40.2	102.2	104.6	104.8	102.1	103.8	37.54	68.9
225	112.3	111.1	111.7	40.2	102.2	104.7	104.9	102.2	103.9	37.56	68.9
240	112.2	111.0	111.6	40.2	102.2	104.6	104.9	102.1	103.9	37.57	68.8
255	112.4	111.1	111.8	40.2	102.0	104.7	105.0	102.2	104.0	37.62	68.9
270	111.7	111.3	111.5	40.2	102.2	104.5	104.9	102.1	103.8	37.56	68.8
285	111.1	111.0	111.1	40.2	102.3	104.4	104.8	102.1	103.8	37.59	68.5
300	113.0	111.0	112.0	40.2	102.4	104.6	104.9	102.2	103.9	37.57	69.0
Average	111.9	111.1	111.5	40.2	102.4	104.4	104.6	101.9	103.7	37.57	68.6
SD	0.13	0.02	0.07	0.00	0.09	0.07	0.08	0.09	0.08	0.01	0.06

ตาราง 24 อุณหภูมิของอากาศที่จุดต่างๆของระบบอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง (อุณหภูมิ 110 °C
ความเร็วอากาศ 25 m/s อัตราการป้อนวัสดุ 56 kg_{dry solid}/h) จุดตรวจวัดแสดงในภาคผนวก ข

Time (s)	T _{di(1)} (°C)	T _{di(2)} (°C)	T _{di(aver)} (°C)	T _{wi} (°C)	T _{af} (°C)	T _{do(1)} (°C)	T _{do(2)} (°C)	T _{do(3)} (°C)	T _{do(aver)} (°C)	T _{wo} (°C)	ΔT _{lm} (°C)
15	112.3	111.3	111.8	40.2	103.0	104.3	104.6	102.3	103.7	37.45	68.9
30	111.6	111.3	111.5	40.2	103.0	104.2	104.6	102.2	103.7	37.49	68.7
45	112.6	111.5	112.1	40.2	103.0	104.5	104.7	102.4	103.9	37.44	69.1
60	111.9	111.8	111.9	40.2	102.9	104.4	104.7	102.4	103.8	37.46	69.0
75	112.6	111.1	111.9	40.2	102.8	104.5	104.7	102.5	103.9	37.51	69.0
90	112.1	111.1	111.6	40.2	102.8	104.3	104.6	102.4	103.8	37.47	68.8
105	112.1	111.1	111.6	40.2	102.9	104.4	104.7	102.5	103.9	37.46	68.9
120	112.4	111.3	111.9	40.2	102.9	104.4	104.7	102.4	103.8	37.45	69.0
135	111.4	111.3	111.4	40.2	103.0	104.4	104.7	102.3	103.8	37.45	68.7
150	111.9	111.0	111.5	40.2	102.9	104.4	104.6	102.3	103.8	37.43	68.8
165	112.0	111.1	111.6	40.2	103.0	104.2	104.6	102.2	103.7	37.50	68.7
180	111.6	111.2	111.4	40.2	103.0	104.4	104.7	102.4	103.8	37.46	68.8
195	111.9	111.1	111.5	40.2	103.0	104.3	104.6	102.3	103.7	37.44	68.8
210	111.3	110.9	111.1	40.2	102.7	104.3	104.6	102.4	103.8	37.43	68.6
225	111.8	111.1	111.5	40.2	102.6	104.4	104.6	102.4	103.8	37.41	68.8
240	111.3	111.2	111.3	40.2	102.8	104.2	104.6	102.3	103.7	37.40	68.6
255	112.0	111.2	111.6	40.2	102.9	104.5	104.7	102.6	103.9	37.39	68.9
270	111.6	111.1	111.4	40.2	102.8	104.3	104.6	102.4	103.8	37.42	68.7
285	111.2	111.3	111.3	40.2	102.9	104.4	104.6	102.5	103.8	37.47	68.7
300	111.2	111.0	111.1	40.2	102.6	104.3	104.6	102.4	103.8	37.49	68.6
Average	111.8	111.2	111.5	40.2	102.9	104.4	104.6	102.4	103.8	37.45	68.8
SD	0.10	0.04	0.06	0.00	0.03	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.03

2. ผลของอุณหภูมิของอากาศที่จุดต่างๆของระบบอบแห้ง (ขนาด 20 ลิตร)

ตาราง 25 อุณหภูมิของอากาศที่จุดต่างๆของระบบอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง (อุณหภูมิ 70 °C

ความเร็วอากาศ 25 m/s อัตราการป้อนวัสดุ 20 kg_{dry solid}/h) จุดตรวจวัดแสดงในภาคผนวก ข

Time (s)	T _{di(1)} (°C)	T _{di(2)} (°C)	T _{di(aver)} (°C)	T _{wi} (°C)	T _{af} (°C)	T _{do(1)} (°C)	T _{do(2)} (°C)	T _{do(3)} (°C)	T _{do(aver)} (°C)	T _{wo} (°C)	ΔT _{lm} (°C)
15	71.8	72.6	72.2	34.2	65.0	65.2	64.0	63.0	64.1	33.09	34.4
30	71.8	72.8	72.3	34.2	65.0	65.3	64.3	63.3	64.3	33.05	34.6
45	71.8	72.7	72.3	34.2	65.1	65.2	64.2	63.2	64.2	33.06	34.5
60	71.8	72.7	72.3	34.2	65.2	65.3	64.1	63.2	64.2	33.07	34.5
75	71.9	72.8	72.4	34.2	65.1	65.4	65.1	63.3	64.6	33.08	34.7
90	71.9	72.8	72.4	34.2	65.1	65.3	65.3	63.3	64.6	33.08	34.7
105	71.9	72.9	72.4	34.2	65.2	65.3	65.4	64.0	64.9	33.05	34.9
120	71.9	72.8	72.4	34.2	65.2	66.1	65.6	64.3	65.3	33.03	35.1
135	71.9	72.8	72.4	34.2	65.1	66.1	65.8	64.2	65.4	33.07	35.1
150	71.9	72.8	72.4	34.2	65.1	66.1	66.0	64.2	65.4	33.03	35.2
165	71.9	72.8	72.4	34.2	65.2	66.2	66.1	64.3	65.5	33.05	35.2
180	72.0	72.9	72.5	34.2	65.1	66.2	66.2	64.6	65.7	33.07	35.3
195	72.0	72.8	72.4	34.2	65.2	66.3	66.2	64.8	65.8	33.05	35.4
210	72.0	72.9	72.5	34.2	65.2	66.3	66.1	65.0	65.8	33.08	35.4
225	72.0	72.9	72.5	34.2	65.2	66.4	66.2	65.1	65.9	33.07	35.5
240	72.0	72.9	72.5	34.2	65.1	66.4	66.2	65.1	65.9	33.06	35.5
255	72.0	72.9	72.5	34.2	65.1	66.4	66.3	65.1	65.9	33.05	35.5
270	72.0	73.5	72.8	34.2	65.1	66.3	66.2	65.1	65.9	33.07	35.6
285	72.0	72.9	72.5	34.2	65.2	66.3	66.1	65.0	65.8	33.08	35.4
300	72.1	73.0	72.6	34.2	65.1	66.3	66.1	65.0	65.8	33.08	35.5
Average	71.9	72.9	72.4	34.2	65.1	65.9	65.6	64.3	65.3	33.06	35.1
SD	0.02	0.04	0.03	0.00	0.01	0.11	0.18	0.17	0.15	0.00	0.09

ตาราง 26 อุณหภูมิของอากาศที่จุดต่างๆของระบบอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง (อุณหภูมิ 70 °C
ความเร็วอากาศ 25 m/s อัตราการป้อนวัสดุ 35 kg_{dry solid}/h) จุดตรวจวัดแสดงในภาคผนวก ข

Time (s)	T _{di(1)} (°C)	T _{di(2)} (°C)	T _{di(aver)} (°C)	T _{wi} (°C)	T _{af} (°C)	T _{do(1)} (°C)	T _{do(2)} (°C)	T _{do(3)} (°C)	T _{do(aver)} (°C)	T _{wo} (°C)	ΔT _{lm} (°C)
15	71.8	71.3	71.6	34.0	65.4	66.3	65.1	64.2	65.2	32.66	35.0
30	71.8	71.2	71.5	34.0	65.4	66.3	65.1	64.2	65.2	32.75	34.9
45	71.7	71.5	71.6	34.0	65.4	66.3	65.2	64.2	65.2	32.75	35.0
60	71.6	71.6	71.6	34.0	65.3	66.3	65.3	64.2	65.3	32.77	35.0
75	71.6	71.7	71.7	34.0	65.4	66.3	65.3	64.2	65.3	32.79	35.0
90	71.5	71.8	71.7	34.0	65.5	66.2	65.2	64.3	65.2	32.79	35.0
105	71.5	71.8	71.7	34.0	65.3	66.2	65.2	64.3	65.2	32.77	35.0
120	71.5	71.8	71.7	34.0	65.4	66.2	65.2	64.2	65.2	32.79	35.0
135	71.5	72.1	71.8	34.0	65.4	66.2	65.2	64.2	65.2	32.78	35.0
150	71.5	72.1	71.8	34.0	65.4	66.1	65.3	64.2	65.2	32.76	35.1
165	71.5	72.2	71.9	34.0	65.4	66.1	65.3	64.2	65.2	32.77	35.1
180	71.5	72.2	71.9	34.0	65.4	66.1	65.3	64.1	65.2	32.78	35.0
195	71.5	72.2	71.9	34.0	65.2	66.1	65.3	64.1	65.2	32.79	35.0
210	71.5	72.3	71.9	34.0	65.2	66.1	65.3	64.1	65.2	32.80	35.1
225	71.5	72.4	72.0	34.0	65.2	66.1	65.3	64.0	65.1	32.78	35.1
240	71.5	72.5	72.0	34.0	65.2	66.2	65.3	64.1	65.2	32.82	35.1
255	71.6	72.4	72.0	34.0	65.3	66.2	65.3	64.0	65.2	32.83	35.1
270	71.6	72.4	72.0	34.0	65.2	66.1	65.3	64.0	65.1	32.86	35.1
285	71.6	72.5	72.1	34.0	65.2	66.1	65.3	64.0	65.1	32.83	35.1
300	71.6	72.5	72.1	34.0	65.2	66.1	65.3	64.0	65.1	32.84	35.1
Average	71.6	72.0	71.8	34.0	65.3	66.2	65.3	64.1	65.2	32.79	35.0
SD	0.02	0.09	0.04	0.00	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01

ตาราง 27 อุณหภูมิของอากาศที่จุดต่างๆของระบบอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง (อุณหภูมิ 70 °C
ความเร็วอากาศ 25 m/s อัตราการป้อนวัสดุ 56 kg_{dry solid}/h) จุดตรวจวัดแสดงในภาคผนวก ข

Time (s)	T _{di(1)} (°C)	T _{di(2)} (°C)	T _{di(aver)} (°C)	T _{wi} (°C)	T _{af} (°C)	T _{do(1)} (°C)	T _{do(2)} (°C)	T _{do(3)} (°C)	T _{do(aver)} (°C)	T _{wo} (°C)	ΔT _{lm} (°C)
15	71.5	71.3	71.4	34.2	65.5	66.3	65.1	64.4	65.3	32.61	34.9
30	71.4	71.3	71.4	34.2	65.5	66.3	65.2	64.4	65.3	32.63	34.9
45	71.4	71.5	71.5	34.2	65.5	66.2	65.2	64.4	65.3	32.62	34.9
60	71.3	71.3	71.3	34.2	65.4	66.2	65.2	64.3	65.2	32.58	34.8
75	71.4	71.6	71.5	34.2	65.4	66.2	65.2	64.3	65.2	32.60	34.9
90	71.3	71.7	71.5	34.2	65.5	66.3	65.2	64.3	65.3	32.61	34.9
105	71.3	71.7	71.5	34.2	65.6	66.3	65.0	64.3	65.2	32.62	34.9
120	71.3	71.8	71.6	34.2	65.4	66.2	64.8	64.4	65.1	32.64	34.9
135	71.3	71.8	71.6	34.2	65.5	66.1	64.6	64.3	65.0	32.66	34.8
150	71.3	71.9	71.6	34.2	65.5	66.1	64.6	64.2	65.0	32.66	34.8
165	71.3	72.1	71.7	34.2	65.5	66.2	64.4	64.2	64.9	32.66	34.8
180	71.4	72.1	71.8	34.2	65.4	66.2	64.3	64.2	64.9	32.67	34.8
195	71.4	72.1	71.8	34.2	65.4	66.1	64.3	64.2	64.9	32.68	34.8
210	71.4	72.1	71.8	34.2	65.4	66.1	64.3	64.2	64.9	32.70	34.8
225	71.4	72.2	71.8	34.2	65.4	66.2	64.3	64.1	64.9	32.72	34.8
240	71.4	72.2	71.8	34.2	65.4	66.1	64.4	64.1	64.9	32.70	34.8
255	71.4	72.2	71.8	34.2	65.4	66.0	64.3	64.2	64.8	32.72	34.8
270	71.4	72.3	71.9	34.2	65.5	66.0	64.4	64.2	64.9	32.73	34.8
285	71.4	72.6	72.0	34.2	65.5	66.0	64.4	64.1	64.8	32.72	34.9
300	71.4	72.2	71.8	34.2	65.5	66.0	64.3	64.1	64.8	32.71	34.8
Average	71.4	71.9	71.6	34.2	65.5	66.2	64.7	64.2	65.0	32.66	34.8
SD	0.01	0.08	0.04	0.00	0.01	0.02	0.08	0.02	0.04	0.01	0.01

ตาราง 28 อุณหภูมิของอากาศที่จุดต่างๆของระบบอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง (อุณหภูมิ 90 °C
ความเร็วอากาศ 25 m/s อัตราการป้อนวัสดุ 20 kg_{dry solid}/h) จุดตรวจวัดแสดงในภาคผนวก ข

Time (s)	T _{di(1)} (°C)	T _{di(2)} (°C)	T _{di(aver)} (°C)	T _{wi} (°C)	T _{af} (°C)	T _{do(1)} (°C)	T _{do(2)} (°C)	T _{do(3)} (°C)	T _{do(aver)} (°C)	T _{wo} (°C)	ΔT _{lm} (°C)
15	90.3	90.6	90.5	37.5	83.0	83.3	82.6	80.2	82.0	35.32	49.8
30	89.9	90.6	90.3	37.5	83.0	83.3	82.7	80.3	82.1	35.32	49.7
45	90.5	90.4	90.5	37.5	83.0	83.4	82.9	80.7	82.3	35.37	49.9
60	90.0	90.3	90.2	37.5	82.8	83.3	83.2	80.7	82.4	35.39	49.8
75	90.6	90.5	90.6	37.5	82.9	83.4	83.3	81.0	82.6	35.40	50.1
90	90.1	90.6	90.4	37.5	83.1	83.4	83.3	81.2	82.6	35.41	50.0
105	90.4	90.4	90.4	37.5	83.1	83.6	83.5	81.4	82.8	35.43	50.1
120	89.9	90.7	90.3	37.5	83.2	83.8	83.7	81.4	83.0	35.41	50.1
135	90.4	90.3	90.4	37.5	83.1	84.2	84.1	81.5	83.3	35.42	50.3
150	89.7	90.5	90.1	37.5	83.1	84.2	84.2	81.5	83.3	35.44	50.2
165	90.1	90.5	90.3	37.5	83.1	84.4	84.4	81.8	83.5	35.42	50.4
180	89.3	90.4	89.9	37.5	83.2	84.4	84.4	81.7	83.5	35.42	50.2
195	90.8	90.4	90.6	37.5	83.2	84.5	84.5	81.9	83.6	35.45	50.6
210	90.1	90.5	90.3	37.5	83.2	84.4	84.5	82.0	83.6	35.47	50.4
225	90.3	90.5	90.4	37.5	83.2	84.4	84.7	82.2	83.8	35.48	50.6
240	89.8	90.7	90.3	37.5	83.2	84.4	84.7	82.2	83.8	35.49	50.5
255	89.7	90.4	90.1	37.5	83.2	84.4	84.8	82.3	83.8	35.51	50.4
270	89.8	90.4	90.1	37.5	83.2	84.3	84.9	82.2	83.8	35.49	50.4
285	89.6	90.4	90.0	37.5	83.1	84.3	85.0	82.2	83.8	35.48	50.4
300	89.5	91.0	90.3	37.5	83.2	84.3	85.0	82.2	83.8	35.47	50.5
Average	90.0	90.5	90.3	37.5	83.1	84.0	84.0	81.5	83.2	35.43	50.2
SD	0.09	0.04	0.04	0.00	0.02	0.10	0.17	0.14	0.14	0.01	0.06

ตาราง 29 อุณหภูมิของอากาศที่จุดต่างๆของระบบอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง (อุณหภูมิ 90 °C
ความเร็วอากาศ 25 m/s อัตราการป้อนวัสดุ 35 kg_{dry solid}/h) จุดตรวจวัดแสดงในภาคผนวก ข

Time (s)	T _{di(1)} (°C)	T _{di(2)} (°C)	T _{di(aver)} (°C)	T _{wi} (°C)	T _{af} (°C)	T _{do(1)} (°C)	T _{do(2)} (°C)	T _{do(3)} (°C)	T _{do(aver)} (°C)	T _{wo} (°C)	ΔT _{lm} (°C)
15	91.0	90.9	91.0	37.2	83.2	82.4	80.8	78.5	80.6	35.33	49.4
30	90.7	90.9	90.8	37.2	83.1	82.5	81.1	78.7	80.8	35.33	49.4
45	90.9	90.9	90.9	37.2	83.3	82.5	81.5	79.3	81.1	35.33	49.6
60	90.4	90.7	90.6	37.2	83.3	82.5	81.7	79.4	81.2	35.34	49.5
75	90.8	90.7	90.8	37.2	83.4	82.7	82.1	79.7	81.5	35.31	49.8
90	90.5	90.7	90.6	37.2	83.4	82.8	82.3	79.8	81.6	35.36	49.8
105	90.3	90.7	90.5	37.2	83.4	83.2	82.6	80.1	82.0	35.35	49.9
120	90.6	90.6	90.6	37.2	83.5	83.4	82.9	80.4	82.2	35.34	50.1
135	90.2	90.7	90.5	37.2	83.5	83.5	83.1	80.6	82.4	35.32	50.1
150	90.4	90.6	90.5	37.2	83.6	83.8	83.3	80.6	82.6	35.29	50.2
165	89.9	90.5	90.2	37.2	83.5	84.1	83.5	80.7	82.8	35.28	50.2
180	90.5	90.7	90.6	37.2	83.5	84.0	83.5	80.9	82.8	35.24	50.4
195	90.3	90.5	90.4	37.2	83.6	84.1	83.6	81.3	83.0	35.30	50.4
210	90.0	90.7	90.4	37.2	83.6	84.2	83.6	81.3	83.0	35.23	50.4
225	90.5	90.4	90.5	37.2	83.6	84.3	83.8	81.3	83.1	35.19	50.6
240	90.3	90.5	90.4	37.2	83.6	84.4	83.9	81.3	83.2	35.21	50.6
255	89.8	90.7	90.3	37.2	83.6	84.3	84.1	81.4	83.3	35.22	50.5
270	90.4	90.4	90.4	37.2	83.5	84.4	84.2	81.4	83.3	35.26	50.6
285	89.8	90.5	90.2	37.2	83.6	84.4	84.3	81.4	83.4	35.22	50.5
300	90.1	90.5	90.3	37.2	83.6	84.4	84.3	81.5	83.4	35.19	50.6
Average	90.4	90.6	90.5	37.2	83.5	83.6	83.0	80.5	82.4	35.28	50.1
SD	0.07	0.03	0.05	0.00	0.03	0.17	0.24	0.21	0.20	0.01	0.09

ตาราง 30 อุณหภูมิของอากาศที่จุดต่างๆของระบบอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง (อุณหภูมิ 90 °C
ความเร็วอากาศ 25 m/s อัตราการป้อนวัสดุ 56 kg_{dry solid}/h) จุดตรวจวัดแสดงในภาคผนวก ข

Time (s)	T _{di(1)} (°C)	T _{di(2)} (°C)	T _{di(aver)} (°C)	T _{wi} (°C)	T _{af} (°C)	T _{do(1)} (°C)	T _{do(2)} (°C)	T _{do(3)} (°C)	T _{do(aver)} (°C)	T _{wo} (°C)	ΔT _{lm} (°C)
15	90.5	90.5	90.5	37.4	83.7	82.4	80.8	78.5	80.6	35.14	49.2
30	90.3	90.5	90.4	37.4	83.7	82.5	81.1	78.7	80.8	35.13	49.2
45	90.2	90.5	90.4	37.4	83.6	82.5	81.3	79.3	81.0	35.11	49.4
60	90.6	90.4	90.5	37.4	83.8	82.7	81.5	79.4	81.2	35.10	49.5
75	90.1	90.5	90.3	37.4	83.8	82.8	81.7	79.7	81.4	35.12	49.5
90	90.3	90.5	90.4	37.4	83.7	83.3	81.8	79.8	81.6	35.12	49.7
105	90.3	90.5	90.4	37.4	83.8	83.5	81.9	80.1	81.8	35.12	49.8
120	89.6	90.5	90.1	37.4	83.9	83.6	82.2	80.2	82.0	35.11	49.7
135	90.4	90.5	90.5	37.4	83.9	83.6	82.5	80.2	82.1	35.13	49.9
150	90.0	90.5	90.3	37.4	83.9	83.6	82.8	80.4	82.3	35.15	49.9
165	90.4	90.6	90.5	37.4	83.9	83.7	82.9	80.5	82.4	35.07	50.1
180	90.2	90.5	90.4	37.4	83.9	83.8	83.2	80.5	82.5	35.08	50.1
195	90.3	90.4	90.4	37.4	83.8	83.8	83.3	80.7	82.6	35.08	50.2
210	90.0	90.5	90.3	37.4	83.8	83.9	83.5	80.9	82.8	35.08	50.2
225	90.1	90.4	90.3	37.4	83.8	84.3	83.5	81.2	83.0	35.10	50.3
240	89.5	90.5	90.0	37.4	83.8	84.4	83.3	81.3	83.0	35.11	50.2
255	90.0	90.4	90.2	37.4	83.9	84.3	83.3	81.5	83.0	35.07	50.3
270	89.5	90.5	90.0	37.4	83.9	84.4	83.4	81.5	83.1	35.07	50.3
285	90.3	90.5	90.4	37.4	83.9	84.4	83.4	81.5	83.1	35.08	50.5
300	89.7	90.6	90.2	37.4	83.7	84.4	83.5	81.5	83.1	35.06	50.4
Average	90.1	90.5	90.3	37.4	83.8	83.6	82.5	80.4	82.2	35.10	49.9
SD	0.07	0.01	0.03	0.00	0.02	0.15	0.20	0.20	0.18	0.01	0.09

ตาราง 31 อุณหภูมิของอากาศที่จุดต่างๆของระบบอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง (อุณหภูมิ 110 °C
ความเร็วอากาศ 25 m/s อัตราการป้อนวัสดุ 20 kg_{dry solid}/h) จุดตรวจวัดแสดงในภาคผนวก ข

Time (s)	T _{di(1)} (°C)	T _{di(2)} (°C)	T _{di(aver)} (°C)	T _{wi} (°C)	T _{af} (°C)	T _{do(1)} (°C)	T _{do(2)} (°C)	T _{do(3)} (°C)	T _{do(aver)} (°C)	T _{wo} (°C)	ΔT _{lm} (°C)
15	110.2	111.3	110.8	40	101.8	103.1	103.1	100.6	102.3	37.87	67.5
30	109.4	111.4	110.4	40	101.9	103.2	103.1	100.7	102.3	37.81	67.4
45	110	111.3	110.7	40	101.9	103.2	103.2	100.7	102.4	37.81	67.6
60	110.8	111.3	111.1	40	101.9	103.2	103.1	100.7	102.3	37.81	67.7
75	110.1	111.2	110.7	40	102	103.3	103.3	100.9	102.5	37.84	67.6
90	110.8	111.2	111	40	102	103.3	103.5	100.9	102.6	37.82	67.8
105	110.2	111.2	110.7	40	101.8	103.2	103.7	100.8	102.6	37.82	67.7
120	109.9	111.3	110.6	40	101.7	103.3	104.1	100.8	102.7	37.82	67.7
135	110.4	111.1	110.8	40	101.8	103.3	104.1	100.8	102.7	37.8	67.8
150	110.4	111.1	110.8	40	101.9	103.3	104.1	100.9	102.8	37.83	67.8
165	111.2	111.1	111.2	40	102.1	103.2	104.1	101	102.8	37.88	68
180	109.9	111.1	110.5	40	102	103.3	104.1	101.2	102.9	37.82	67.7
195	110.7	111.2	111	40	101.8	103.3	104.2	101.2	102.9	37.8	68
210	110.1	111.2	110.7	40	101.9	103.6	104.3	101.2	103	37.89	67.9
225	110.8	111.1	111	40	101.9	103.8	104.4	101.2	103.1	37.88	68.1
240	110.7	111.1	110.9	40	101.5	104.1	104.4	101.3	103.3	37.81	68.1
255	110.4	111	110.7	40	101.8	104.1	104.5	101.3	103.3	37.8	68.1
270	110.8	111.2	111	40	101.9	104	104.4	101.3	103.2	37.84	68.2
285	110.7	111.1	110.9	40	102	104.1	104.6	101.5	103.4	37.8	68.2
300	110.7	110.9	110.8	40	101.7	104.1	104.5	101.5	103.4	37.88	68.1
Average	110.4	111.2	110.8	40	101.9	103.5	103.9	101	102.8	37.83	67.8
SD	0.09	0.03	0.04	0	0.03	0.08	0.12	0.06	0.08	0.01	0.05

ตาราง 32 อุณหภูมิของอากาศที่จุดต่างๆของระบบอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง (อุณหภูมิ 110 °C
ความเร็วอากาศ 25 m/s อัตราการป้อนวัสดุ 35 kg_{dry solid}/h) จุดตรวจวัดแสดงในภาคผนวก ข

Time (s)	T _{di(1)} (°C)	T _{di(2)} (°C)	T _{di(aver)} (°C)	T _{wi} (°C)	T _{af} (°C)	T _{do(1)} (°C)	T _{do(2)} (°C)	T _{do(3)} (°C)	T _{do(aver)} (°C)	T _{wo} (°C)	ΔT _{lm} (°C)
15	111.9	111.2	111.6	40.0	101.8	103.1	102.5	100.6	102.1	37.69	67.9
30	110.9	111.0	111.0	40.0	101.9	103.2	102.5	100.7	102.1	37.60	67.7
45	110.9	111.1	111.0	40.0	101.9	103.2	102.6	100.7	102.2	37.66	67.7
60	112.0	111.0	111.5	40.0	101.9	103.2	102.6	100.7	102.2	37.67	67.9
75	110.8	111.1	111.0	40.0	102.0	103.3	102.8	100.9	102.3	37.60	67.8
90	111.2	111.2	111.2	40.0	102.0	103.3	102.8	100.9	102.3	37.66	67.9
105	110.5	111.1	110.8	40.0	101.8	103.2	103.2	100.8	102.4	37.61	67.8
120	111.6	111.0	111.3	40.0	101.7	103.3	103.3	100.8	102.5	37.68	68.0
135	110.9	111.0	111.0	40.0	101.8	103.3	103.3	100.8	102.5	37.67	67.8
150	111.0	111.0	111.0	40.0	101.9	103.3	103.3	100.9	102.5	37.61	67.9
165	111.8	111.1	111.5	40.0	102.1	103.2	103.2	101.0	102.5	37.64	68.1
180	111.1	111.1	111.1	40.0	102.0	103.3	103.1	101.2	102.5	37.67	67.9
195	111.1	111.1	111.1	40.0	101.8	103.3	103.2	101.2	102.6	37.69	67.9
210	110.4	111.1	110.8	40.0	101.9	103.6	103.3	101.2	102.7	37.60	67.9
225	110.9	111.1	111.0	40.0	101.9	103.8	104.4	101.2	103.1	37.63	68.2
240	111.0	111.2	111.1	40.0	101.5	104.1	104.4	101.3	103.3	37.69	68.3
255	110.7	111.1	110.9	40.0	101.8	104.1	104.5	101.3	103.3	37.66	68.2
270	111.1	111.1	111.1	40.0	101.9	104.0	104.4	101.3	103.2	37.61	68.3
285	111.1	111.0	111.1	40.0	102.0	104.1	104.6	101.5	103.4	37.67	68.4
300	110.3	111.2	110.8	40.0	101.7	104.1	104.5	101.5	103.4	37.65	68.2
Average	111.1	111.1	111.1	40.0	101.9	103.5	103.4	101.0	102.7	37.65	68.0
SD	0.10	0.02	0.05	0.00	0.03	0.08	0.16	0.06	0.10	0.01	0.05

ตาราง 33 อุณหภูมิของอากาศที่จุดต่างๆของระบบอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง (อุณหภูมิ 110 °C
ความเร็วอากาศ 25 m/s อัตราการป้อนวัสดุ 56 kg_{dry solid}/h) จุดตรวจวัดแสดงในภาคผนวก ข

Time (s)	T _{di(1)} (°C)	T _{di(2)} (°C)	T _{di(aver)} (°C)	T _{wi} (°C)	T _{af} (°C)	T _{do(1)} (°C)	T _{do(2)} (°C)	T _{do(3)} (°C)	T _{do(aver)} (°C)	T _{wo} (°C)	ΔT _{lm} (°C)
15	110.9	111.3	111.1	39.8	101.8	103.1	102.4	100.6	102.0	37.51	67.9
30	111.8	111.3	111.6	39.8	101.9	103.2	102.4	100.7	102.1	37.53	68.1
45	111.0	111.3	111.2	39.8	101.9	103.2	102.6	100.7	102.2	37.54	67.9
60	112.0	111.4	111.7	39.8	101.9	103.2	102.7	100.7	102.2	37.57	68.2
75	111.5	111.4	111.5	39.8	102.0	103.3	102.8	100.9	102.3	37.50	68.2
90	110.8	111.4	111.1	39.8	102.0	103.3	102.8	100.9	102.3	37.55	68.0
105	110.9	111.3	111.1	39.8	101.8	103.2	103.2	100.8	102.4	37.55	68.0
120	110.6	111.2	110.9	39.8	101.7	103.3	103.3	100.8	102.5	37.57	68.0
135	111.8	111.3	111.6	39.8	101.8	103.3	103.3	100.8	102.5	37.59	68.3
150	110.6	111.6	111.1	39.8	101.9	103.3	103.3	100.9	102.5	37.59	68.1
165	111.4	110.9	111.2	39.8	102.1	103.2	103.2	101.0	102.5	37.52	68.1
180	111.5	111.5	111.5	39.8	102.0	103.3	103.1	101.2	102.5	37.53	68.3
195	111.5	111.1	111.3	39.8	101.8	103.3	103.2	101.2	102.6	37.54	68.2
210	110.7	111.2	111.0	39.8	101.9	103.6	102.5	101.2	102.4	37.55	68.0
225	110.9	111.7	111.3	39.8	101.9	103.6	102.5	101.2	102.4	37.53	68.1
240	111.3	111.1	111.2	39.8	101.5	103.7	102.6	101.3	102.5	37.54	68.1
255	110.9	111.2	111.1	39.8	101.8	103.6	102.6	101.3	102.5	37.56	68.0
270	111.1	111.4	111.3	39.8	101.9	103.8	102.8	101.3	102.6	37.53	68.2
285	110.6	111.1	110.9	39.8	102.0	103.8	102.8	101.5	102.7	37.53	68.1
300	111.5	111.3	111.4	39.8	101.7	103.8	102.5	101.5	102.6	37.55	68.3
Average	111.2	111.3	111.2	39.8	101.9	103.4	102.8	101.0	102.4	37.54	68.1
SD	0.10	0.04	0.05	0.00	0.03	0.05	0.07	0.06	0.04	0.01	0.03

3. ผลการหาความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกก่อนการอบแห้ง (ขนาด 20 ลิตร)

ตาราง 34 การหาความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก (ห้องอบแห้งขนาด 20 ลิตร ความเร็วอากาศ 25 m/s)

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการป้อน (kg _{dry solid} /h)	น้ำหนักวัสดุ ก่อนอบ (g)	น้ำหนักวัสดุ หลังอบ (g)	% d.b.	ค่าเฉลี่ย % d.b.	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
70	20	34.6	26.8	28.10	28.36	0.17
		37.8	28.8	28.60		
		38.0	28.8	28.37		
	35	34.0	26.6	27.81	28.78	0.75
		37.6	29.0	29.65		
		36.6	28.4	28.87		
	56	37.2	28.6	29.16	28.64	0.44
		37.4	28.8	28.08		
		35.0	27.0	28.67		
	20	37.4	28.8	28.96	28.71	0.37
		35.6	27.4	28.98		
		38.2	29.4	28.18		
90	35	34.0	27.0	28.78	28.78	0.50
		36.4	27.6	28.16		
		35.2	27.0	29.41		
	56	39.8	31.0	28.38	28.73	0.48
		41.6	31.6	28.39		
		39.6	30.0	29.41		
	20	34.2	26.2	28.57	27.99	0.61
		37.2	28.6	28.27		
		35.6	25.2	27.14		
	35	37.6	28.4	28.38	28.30	0.46
		38.8	29.6	28.39		
		36.0	27.4	29.41		
110	56	38.6	29.8	29.53	28.87	0.70
		37.6	29.0	27.89		
		35.4	27.0	29.19		

4. ผลการหาความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกก่อนการอบแห้ง (ขนาด 50 ลิตร)

ตาราง 35 การหาความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก (ห้องอบแห้งขนาด 50 ลิตร ความเร็วอากาศ 25 m/s)

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการป้อน (kg _{dry solid} /h)	น้ำหนักวัสดุ ก่อนอบ (g)	น้ำหนักวัสดุ หลังอบ (g)	% d.b.	ค่าเฉลี่ย % d.b.	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
70	20	36.8	28.6	28.67	28.30	0.44
		40.6	31.8	27.67		
		39.6	30.8	28.57		
	35	39.0	30.4	28.29	28.43	0.30
		36.4	28.4	28.17		
		38.4	29.8	28.86		
	56	40.8	31.8	28.30	28.63	0.24
		39.4	30.6	28.76		
		38.4	29.8	28.86		
	20	40.4	31.4	28.66	28.02	0.71
		37.6	29.6	27.03		
		38.0	29.6	28.38		
90	35	39.0	30.4	28.29	28.26	0.26
		39.4	30.8	27.92		
		39.6	30.6	28.57		
	56	37.2	28.8	29.17	28.15	0.74
		34.4	27.0	27.41		
		37.6	29.4	27.89		
	20	34.0	26.6	27.82	28.28	0.35
		35.0	27.2	28.68		
		34.4	26.8	28.36		
	35	38.0	29.8	27.52	28.16	0.60
		37.4	29.0	28.97		
		38.4	30.0	28.00		
110	56	38.2	29.6	28.19	28.49	0.45
		36.4	28.4	28.17		
		39.0	30.2	29.14		

5. ผลการทดลองหาความชื้นของข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง (ขนาด 20 ลิตร)

ตาราง 36 การหาความชื้นหลังการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งกระแสขนแบบวิถีโค้ง

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการป้อน (kg _{dry solid} /h)	น้ำหนักวัสดุ ก่อนอบ (g)	น้ำหนักวัสดุ หลังอบ (g)	% d.b.	ค่าเฉลี่ย % d.b.	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
70	20	39.8	31.4	26.75	26.67	0.38
		37.6	29.8	26.17		
		39.4	31.0	27.10		
	35	41.6	32.8	26.83	26.81	0.08
		36.8	29.0	26.90		
		37.0	29.2	26.71		
	56	37.8	29.8	26.85	26.54	0.22
		37.4	29.6	26.35		
		40.2	31.8	26.42		
	20	41.6	33.4	24.55	24.75	0.19
		43.0	34.4	25.00		
		41.4	33.2	24.70		
90	35	41.2	33.0	24.85	24.60	0.19
		40.8	32.8	24.39		
		41.6	33.4	24.55		
	56	41.6	33.4	24.55	24.39	0.33
		40.4	32.6	23.93		
		40.4	32.4	24.69		
	20	40.6	32.8	23.78	23.32	0.36
		40.8	33.2	22.89		
		36.0	29.2	23.29		
	35	39.8	32.2	23.60	23.31	0.31
		37.6	30.6	22.88		
		40.0	32.4	23.46		
110	56	39.2	31.8	23.27	23.37	0.19
		40.8	33.0	23.64		
		41.4	33.6	23.21		

6. ผลการทดลองหาความชื้นของข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง (ขนาด 50 ลิตร)

ตาราง 37 การหาความชื้นหลังการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งกระแสลมแบบวิถีโค้ง

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการป้อน (kg _{dry solid} /h)	น้ำหนักวัสดุ ก่อนอบ (g)	น้ำหนักวัสดุ หลังอบ (g)	% d.b.	ค่าเฉลี่ย % d.b.	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
70	20	40.2	33.2	26.51	26.61	0.10
		39.8	31.4	26.75		
		40.0	31.6	26.58		
	35	38.0	30.2	25.83	26.73	0.66
		40.0	31.4	27.39		
		38.6	30.4	26.97		
	56	38.8	30.4	27.63	26.82	0.74
		38.6	30.4	26.97		
		37.0	29.4	25.85		
	20	40.2	32.2	24.84	24.79	0.08
		37.4	30.0	24.67		
		41.2	33.0	24.85		
90	35	43.0	34.4	25.00	24.90	0.07
		42.2	33.8	24.85		
		41.2	33.0	24.85		
	56	39.0	31.2	25.00	24.54	0.33
		41.8	33.6	24.40		
		40.0	32.2	24.22		
	20	42.0	33.8	24.26	23.77	0.36
		39.0	31.6	23.42		
		40.8	33.0	23.64		
	35	41.6	33.8	23.08	23.42	0.25
		42.0	34.0	23.53		
		41.8	33.8	23.67		
110	56	41.6	33.8	23.08	23.25	0.49
		40.4	32.6	23.93		
		41.0	33.4	22.75		

7. ข้อมูลการใช้พลังงานของระบบอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง

ตาราง 38 ข้อมูลการใช้พลังงานของระบบอบแห้งกระแสน (ห้องอบแห้งขนาด 20 ลิตร)

เงื่อนไขการทดลอง			E_{blower}	E_{heater}
T	W_p	V	(kWh)	(kWh)
(°C)	(kg _{dry solid} /h)	(m/s)		
70	20	25	0.045	0.008
70	35	25	0.045	0.008
70	56	25	0.045	0.008
90	20	25	0.045	0.016
90	35	25	0.045	0.016
90	56	25	0.045	0.016
110	20	25	0.045	0.032
110	35	25	0.045	0.032
110	56	25	0.045	0.032

ตาราง 39 ข้อมูลการใช้พลังงานของระบบอบแห้งกระแสน (ห้องอบแห้งขนาด 50 ลิตร)

เงื่อนไขการทดลอง			E_{blower}	E_{heater}
T	W_p	V	(kWh)	(kWh)
(°C)	(kg _{dry solid} /h)	(m/s)		
70	20	25	0.045	0.008
70	35	25	0.045	0.008
70	56	25	0.045	0.008
90	20	25	0.045	0.016
90	35	25	0.045	0.016
90	56	25	0.045	0.016
110	20	25	0.045	0.032
110	35	25	0.045	0.032
110	56	25	0.045	0.032

8. ผลของคุณภาพข้าวหลังการอบแห้ง

การวิเคราะห์คุณภาพของเมล็ดข้าวที่ได้จากการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง จะกระทำโดยการเก็บตัวอย่างข้าวที่ได้ผ่านกระบวนการอบแห้ง เพื่อส่งไปวิเคราะห์ข้าวที่ศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี ซึ่งจะแสดงผลที่ได้ดังตาราง 42 และ 43

ตาราง 40 คุณภาพข้าวหลังการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง (ห้องอบแห้งขนาด 20 ลิตร)

เงื่อนไขการทดลอง			ข้าวเต็ม	ความขาว
T (°C)	W_p (kg _{dry solid} /h)	V (m/s)	เมล็ด (%)	
70	20	25	1.9	33.6
70	35	25	2.5	34.5
70	56	25	1.8	34.9
90	20	25	2.0	34.4
90	35	25	2.2	34.4
90	56	25	1.2	33.4
110	20	25	1.8	33.5
110	35	25	1.2	34.6
110	56	25	2.0	33.0
อ้างอิง			35.8	36.1

หมายเหตุ อ้างอิง = ตัวอย่างข้าวเปลือกจากการทดลองที่แห้งตามธรรมชาติ

ตาราง 41 คุณภาพข้าวหลังการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง (ห้องอบแห้งขนาด 50 ลิตร)

เงื่อนไขการทดลอง			ข้าวเต็ม	ความขาว
T	W_p	V	เมล็ด	
(°C)	(kg _{dry solid} /h)	(m/s)	(%)	
70	20	25	2.4	34.8
70	35	25	1.8	34.3
70	56	25	2.3	34.5
90	20	25	1.7	34.6
90	35	25	2.0	33.1
90	56	25	1.7	33.6
110	20	25	1.9	33.9
110	35	25	1.8	35.1
110	56	25	2.6	33.4
อ้างอิง			35.8	36.1

หมายเหตุ อ้างอิง = ตัวอย่างข้าวเปลือกจากการทดลองที่แห้งตามธรรมชาติ

เปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดสามารถหาได้จากขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ชั่งน้ำหนักข้าวเปลือกที่ทำความสะอาดแล้วตัวอย่างละ 250 กรัม
2. นำข้าวเปลือกเข้าเครื่องกระเทาะเปลือกจนเปลือกหลุดหมด
3. นำข้าวที่ได้ไปเข้าเครื่องขัดขาว แล้วนำข้าวสารที่ได้ไปเข้าเครื่องแยกส่วนที่เป็นเมล็ดและข้าวหักออกจากกัน จากนั้นชั่งน้ำหนักข้าวเต็มเมล็ด
4. คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดจาก

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

ค่าความขาวหาได้จาก การวัดค่าจากเครื่องวัดความขาว Kett รุ่น C-300



ภาคผนวก จ
ตัวอย่างการคำนวณ

1. การคำนวณค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร

ตัวอย่างแสดงการคำนวณค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรของระบบอบแห้งกระแสนแบบวิธีโค้ง ในกรณีเงื่อนไขการทดลองเมื่อ ความเร็วอากาศด้านเข้าพัดลมของระบบอบแห้งกระแสนมีค่าเท่ากับ 25 m/s อุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งมีค่าเท่ากับ 110 °C อัตราการป้อนข้าวเปลือกมีค่าเท่ากับ 56 kg_{dry solid}/h สามารถคำนวณหาอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรได้จากสมการ 2.8

$$N_v = \frac{W_p (x_i - x_e)}{V_r}$$

เมื่อปริมาตรห้องอบแห้งขนาด 50 ลิตร

อัตราการป้อนข้าวเปลือก	W_p	=	56 kg _{dry solid} /h
ปริมาตรห้องอบแห้ง	V_r	=	0.050 m ³
ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก	X_i	=	28.49 kg/kg (d.b.)
ความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือก	X_e	=	23.25 kg/kg (d.b.)
	N_v	=	$\frac{56 \times (0.2849 - 0.2325)}{0.050}$
		=	58.76 kg _{water} /m ³ h

เมื่อปริมาตรห้องอบแห้งขนาด 20 ลิตร

อัตราการป้อนข้าวเปลือก	W_p	=	56 kg _{dry solid} /h
ปริมาตรห้องอบแห้ง	V_r	=	0.020 m ³
ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก	X_i	=	28.87 kg/kg (d.b.)
ความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือก	X_o	=	23.37 kg/kg (d.b.)
	N_v	=	$\frac{56 \times (0.2887 - 0.2337)}{0.020}$
		=	153.90 kg _{water} /m ³ h

2. คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร

แสดงการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรของระบบอบแห้งกระแสน้ำแบบวิถีโค้ง ในเงื่อนไขการทดลอง ความเร็วของอากาศด้านเข้าพัดลมของระบบอบแห้งมีค่าเท่ากับ 25 m/s อุณหภูมิอากาศที่ใช้ในการอบแห้งมีค่าเท่ากับ 110 °C อัตราการป้อนข้าวเปลือกเท่ากับ 56 kg_{dry solid}/h สามารถคำนวณหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรได้จากสมการ 2.9

$$h_v = \frac{W_p (x_i - x_e) \lambda}{V_r \Delta T_{lm}}$$

เมื่อปริมาตรห้องอบแห้งขนาด 50 ลิตร ที่อุณหภูมิ 110 °C

$$\text{อัตราการป้อนข้าวเปลือก } W_p = 56 \text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$$

$$\text{ปริมาตรห้องอบแห้ง } V_r = 0.050 \text{ m}^3$$

$$\text{ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก } X_i = 28.49 \text{ kg/kg (d.b.)}$$

$$\text{ความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือก } X_e = 23.25 \text{ kg/kg (d.b.)}$$

$$\text{ความร้อนแฝงของการระเหย} = 2,230,200 \text{ J/kg}$$

$$\text{ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยลอการิทึม } \Delta T_{lm} \text{ จากสมการ 2.10}$$

$$\begin{aligned} \Delta T_{lm} &= \frac{(T_{db.} - T_{wb.})_e - (T_{db.} - T_{wb.})_i}{\ln \frac{(T_{db.} - T_{wb.})_e}{(T_{db.} - T_{wb.})_i}} \\ &= \frac{(103.5 - 37.45) - (111.5 - 40.2)}{\ln \frac{(103.5 - 37.45)}{(111.5 - 40.2)}} \end{aligned}$$

$$= 68.64 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$= 341.79 \text{ K}$$

$$\begin{aligned} h_v &= \frac{W_p (x_i - x_e) \lambda}{V_r \Delta T_{lm}} \\ &= \frac{56 \times (0.2849 - 0.2325) \times 2,230,200}{0.050 \times 341.79 \times 3600} \\ &= 106.32 \text{ W/m}^3\text{K} \end{aligned}$$

เมื่อปริมาตรห้องอบแห้งขนาด 20 ลิตร ที่อุณหภูมิ 110 °C

อัตราการป้อนข้าวเปลือก	W_p	=	56 kg _{dry solid} /h
ปริมาตรห้องอบแห้ง	V_r	=	0.020 m ³
ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก	X_i	=	28.87 kg/kg (d.b.)
ความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือก	X_o	=	23.37 kg/kg (d.b.)
ความร้อนแฝงของการระเหย	λ	=	2,230,200 J/kg
ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยลอการิทึม ΔT_{lm} จากสมการ 2.10			

$$\begin{aligned}
 \Delta T_{lm} &= \frac{(T_{db.} - T_{wb.})_e - (T_{db.} - T_{wb.})_i}{\ln \frac{(T_{db.} - T_{wb.})_e}{(T_{db.} - T_{wb.})_i}} \\
 &= \frac{(111.2 - 37.54) - (102.4 - 39.8)}{\ln \frac{(111.2 - 37.54)}{(102.4 - 39.8)}} \\
 &= 68.1 \text{ }^{\circ}\text{C} \\
 &= 341.25 \text{ K} \\
 h_v &= \frac{W_p (x_i - x_e) \lambda}{V_r \Delta T_{lm}} \\
 &= \frac{56 \times (0.2887 - 0.2337) \times 2,230,200}{0.020 \times 341.25 \times 3600} \\
 &= 279.40 \text{ W/m}^3\text{K}
 \end{aligned}$$

3. การคำนวณค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

การคำนวณหาค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของระบบอบแห้งกระแสนแบบวิถีโค้ง สำหรับเงื่อนไขการทดลอง ความเร็วของอากาศด้านเข้าของพัดลมมีค่าเท่ากับ 25 m/s อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมีค่าเท่ากับ 110 °C อัตราการป้อนข้าวเปลือกมีค่าเท่ากับ 56 kg_{dry solid}/h สามารถคำนวณหาค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะได้จากสมการ 2.12

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

ปริมาณน้ำที่นำออกจากวัสดุสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.13

$$m_w = w_p (x_i - x_e) t$$

เมื่อปริมาตรห้องอบแห้งมีขนาด 50 ลิตร ที่อุณหภูมิอากาศด้านเข้า 110 °C อัตราการป้อนวัสดุ 56 kg_{dry solid}/h

ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่พัดลมแรงดันสูงในช่วงเวลา 5 นาที

$$E_{\text{blower}} = 0.045 \text{ kWh} = 0.162 \text{ MJ}$$

ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่เครื่องทำความร้อนด้วยไฟฟ้าในช่วงเวลา 5 นาที

$$E_{\text{heater}} = 0.032 \text{ kWh} = 0.115 \text{ MJ}$$

อัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุ

$$W_p = 0.933 \text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{min}$$

ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก

$$X_i = 28.49 \text{ kg/kg (d.b.)}$$

ความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือก

$$X_e = 23.25 \text{ kg/kg (d.b.)}$$

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของพัดลมแรงดันสูงจะมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{SEC} &= \frac{E}{m_w} \\ &= \frac{0.162}{0.933 \times (0.2849 - 0.2325) \times 5} \\ &= 0.66 \end{aligned}$$

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของพัดลมแรงดันสูงจะมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{SEC} &= \frac{E}{m_w} \\ &= \frac{0.115}{0.933 \times (0.2849 - 0.2325) \times 5} \\ &= 0.47 \end{aligned}$$

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะทั้งหมดของห้องอบแห้งที่มีปริมาตร 50 ลิตร เท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{SEC} &= 0.66 + 0.47 \\ &= 1.13 \text{ MJ/kg}_{\text{water}} \end{aligned}$$

เมื่อปริมาตรห้องอบแห้งมีขนาด 20 ลิตร ที่อุณหภูมิอากาศด้านเข้า 110 °C อัตราการป้อน
วัสดุ 56 kg_{dry solid}/h

ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่พัดลมแรงดันสูงในช่วงเวลา 5 นาที

$$E_{\text{blower}} = 0.045 \text{ kWh} = 0.162 \text{ MJ}$$

ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่เครื่องทำความร้อนด้วยไฟฟ้าในช่วงเวลา 5 นาที

$$E_{\text{heater}} = 0.032 \text{ kWh} = 0.115 \text{ MJ}$$

อัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุ

$$W_p = 0.933 \text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{min}$$

ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก

$$X_i = 28.87 \text{ kg/kg (d.b.)}$$

ความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือก

$$X_e = 23.37 \text{ kg/kg (d.b.)}$$

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของพัดลมแรงดันสูงจะมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{SEC} &= \frac{E}{m_w} \\ &= \frac{0.162}{0.933 \times (0.2887 - 0.2337) \times 5} \\ &= 0.63 \text{ MJ/kg}_{\text{water}} \end{aligned}$$

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของพัดลมแรงดันสูงจะมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{SEC} &= \frac{E}{m_w} \\ &= \frac{0.115}{0.933 \times (0.2887 - 0.2337) \times 5} \\ &= 0.45 \text{ MJ/kg}_{\text{water}} \end{aligned}$$

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะทั้งหมดของห้องอบแห้งที่มีปริมาตร 20 ลิตร เท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{SEC} &= 0.63 + 0.45 \\ &= 1.08 \text{ MJ/kg}_{\text{water}} \end{aligned}$$



คำอธิบายสัญลักษณ์

คำอธิบายสัญลักษณ์

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย
N_v	อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร, $\text{kg}_{\text{water}}/\text{m}^3\text{h}$
h_v	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร, $\text{W}/\text{m}^3\text{K}$
W_p	อัตราการป้อนวัสดุ, $\text{kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$
V_r	ปริมาตรห้องอบแห้ง, m^3
X_i	ความชื้นของวัสดุที่ด้านเข้า, $\text{kg}/\text{kg}_{(\text{d.b.})}$
X_e	ความชื้นของวัสดุที่ด้านออก, $\text{kg}/\text{kg}_{(\text{d.b.})}$
λ	ความร้อนแฝงของการระเหย, kJ/kg
ΔT_{lm}	ค่าผลต่างของอุณหภูมิลอการิทึม, K
T_{di}	อุณหภูมิอากาศกระเปาะแห้งด้านเข้าของเครื่องอบแห้ง, $^{\circ}\text{C}$
T_{do}	อุณหภูมิอากาศกระเปาะแห้งด้านออกของเครื่องอบแห้ง, $^{\circ}\text{C}$
T_{wi}	อุณหภูมิอากาศกระเปาะเปียกด้านเข้าของเครื่องอบแห้ง, $^{\circ}\text{C}$
T_{wo}	อุณหภูมิอากาศกระเปาะเปียกด้านออกของเครื่องอบแห้ง, $^{\circ}\text{C}$
τ	เวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ, s
E	พลังงานไฟฟ้าป้อนให้ระบบอบแห้ง, MJ
m_p	ปริมาณวัสดุที่อยู่ในระบบ, kg
m_w	ปริมาณความชื้นที่นำออกจากวัสดุที่นำมาอบแห้ง, kg
m_a	อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ, $\text{kg}_{\text{dry air}}/\text{min}$
Δw	ผลต่างของความชื้นของอากาศด้านเข้าและด้านออกของระบบ อบแห้ง, $\text{kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dry air}}$
t	เวลาในการอบแห้ง, min
ϕ	ความชื้นสัมพัทธ์
P	ความดันย่อยของไอน้ำในอากาศ, Pa
P_s	ความดันไออิ่มตัวที่อุณหภูมิของอากาศ, Pa
P_t	ความดันรวม, Pa
M_a	โมเลกุลของอากาศ, g/m^3

คำอธิบายสัญลักษณ์

สัญลักษณ์(ต่อ)

	ความหมาย
M_w	โมเลกุลของน้ำ, g/m^3
H_{mol}	ความชื้นสัมบูรณ์เชิงโมล, $kmol_{vapor}/kmol_{dry\ air}$
M_{wb}	ความชื้นมาตรฐานเปียก, %
M_{db}	ความชื้นมาตรฐานแห้ง, %
m_w	น้ำหนักวัตถุเปียก, g
m_d	น้ำหนักวัตถุแห้ง, g
$M_{w/kg}$	น้ำหนักน้ำที่ต้องเติมต่อมวลกิโกรัมวัสดุ, g
M_{df}	ความชื้นสุดท้ายของวัสดุที่ต้องการ, %
M_{di}	ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุที่ต้องการเพิ่มความชื้น, %
d	น้ำหนักมวลแห้งต่อกิโลกรัมวัสดุ, kg



ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	ภมร บัวทุม
วันเดือนปีเกิด	1 กรกฎาคม 2524
สถานที่เกิด	อำเภอหนองไผ่ จังหวัด เพชรบูรณ์
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	87 หมู่ 2 ตำบล บ้านโคกสน อำเภอ หนองไผ่ จังหวัด เพชรบูรณ์ รหัสไปรษณีย์ 67140
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	วิศวกรอาวุโส
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	บริษัท ไทยเคมิคอล(ประเทศไทย) จำกัด
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2547	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยนเรศวร
พ.ศ. 2555	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทาง วิศวกรรม มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

