

การศึกษามรรณนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำสำหรับวัสดุทางการเกษตร

ปริญญานิพนธ์

ของ

ธัญญาพร ปัตตาชาวี

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มีนาคม 2553

การศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำสำหรับวัสดุทางการเกษตร

ปริญญานิพนธ์

ของ

ธัญญาพร ปัตตาชารี

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มีนาคม 2553

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การศึกษามรรณนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำสำหรับวัสดุทางการเกษตร

บทคัดย่อ

ของ

ธัญญาพร ปัตตาหารี

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มีนาคม 2553

ธัญญาพร ปัตตาชารี. (2553). *การศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำสำหรับวัสดุทางการเกษตร*. ปริญญาานิพนธ์ วศ.ม. (วิศวกรรมเครื่องกล). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม: ดร. กิตติ สถาพรประสาธน์, ดร.ประชา บุญยวานิชกุล.

ปริญญาานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์ของการศึกษาเพื่อหาผลกระทบของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งและอัตราส่วนภาระ (อัตราการป้อนวัสดุต่ออัตราการไหลของอากาศร้อน) ที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง ในรูปแบบของอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร การใช้พลังงานจำเพาะของแต่ละเงื่อนไขการทดลอง ทั้งนี้ยังได้ทำการทำนายค่าความชื้นสุดท้ายของวัสดุด้วยการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้มิติ และทำการวิเคราะห์คุณภาพในแง่ของปริมาณข้าวเต็มเมล็ด และความขาวของข้าวสาร ในการศึกษานี้จะเลือกทดลองการลดความชื้นของข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 20 - 30 % d.b. ซึ่งการอบแห้งจะอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่เท่านั้น ห้องอบแห้งทำจากสแตนเลสที่มีปริมาตร 0.047 m³. ระยะห่างในการชนเท่ากับ 0.24 m. ทั้งระบบอบแห้งหุ้มด้วยฉนวนใยแก้วกันความร้อนหนา 0.05 m. สำหรับเงื่อนไขการทดลองจะใช้อุณหภูมิของอากาศร้อนระหว่าง 70 - 110 °C ความเร็วลมของอากาศคงที่ 25 m/s. อัตราส่วนภาระระหว่าง 0.1 - 0.6 กระแสอากาศร้อนภายในห้องอบแห้งไม่มีการกีดกันของกระแสอากาศ ทำให้วัสดุเกิดการเคลื่อนที่ด้วยคุณลักษณะพิเศษของการไหลแบบเคลื่อนที่กลับไปกลับมาข้ามเข้าไปสู่กระแสของอากาศร้อนที่อยู่ตรงข้ามที่อยู่ในห้องอบแห้ง ทำให้สามารถลดความชื้นของวัสดุลงได้สูงสุดประมาณ 6 % d.b. อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุดที่ 963.7 kg_{water}/m³h สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร 1832.5 W/m³K ที่อุณหภูมิของอากาศเข้า 110 °C และอัตราส่วนภาระ 0.56 ค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบมีค่าประมาณ 1 s. ซึ่งค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของพัดลมความดันสูง (SEC_{blower}) มีค่ามากกว่าค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องกำเนิดความร้อน (SEC_{heater}) เฉพาะที่อุณหภูมิ 70 °C และ 90 °C และจากการศึกษาพบว่าค่าความชื้นสุดท้ายจากการทดลองและการทำนายด้วยการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้มิติมีความแตกต่างกันไม่เกิน 1.53% คุณภาพของข้าวในแง่ของปริมาณข้าวเต็มเมล็ดและข้าวตัน และความขาวของข้าวสาร โดยการเปรียบเทียบกับข้าวเปลือกที่ลดความชื้นด้วยการตากลมที่อุณหภูมิห้อง พบว่ามีปริมาณข้าวเต็มเมล็ดและข้าวตันมีความแตกต่างกันไม่เกิน 17% ความขาวของข้าวสารมีค่าแตกต่างกันไม่เกิน 9%

PERFORMANCE STUDY OF AN IMPINGING STREAM DRYER FOR
AGRICULTURAL PRODUCT

AN ABSTRACT

BY

THANYAPORN PATTACHARI

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

March 2010

Thanyaporn pattachari. (2010). *Performance study of an impinging stream dryer for agricultural product*. Master Thesis, M.Eng. (Mechanical Engineering). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Commiyytee: Dr. Kitti Sathapornprasath, Dr.Pracha Boonyawanichakul.

The objective of this study was to investigate the effects of drying temperature (hot air) and loading ratio (mass flow rate of particle per mass flow rate of hot air) on the overall performance of an impinging stream dryer in terms of volumetric heat transfer coefficient, volumetric water evaporation rates as well as specific energy consumption of the dryer. The moisture has to predict the final cost of materials by analyzing the relationship of variables without dimensions. And analyzed the quality in terms of whole head rice and whiteness. In this study the selection trials to reduce moisture paddy with moisture content of from about 20 - 30% d.b. The drying in the constant rate period only. Drying chamber was developed from stainless with volume 0.047 m^3 . distance between the faces of inlet pipe was 0.24 m. Both systems such as drying clothed with fiber thermal insulation thickness 0.05 m. The experimental condition was to used hot air drying between $70\text{--}110^\circ\text{C}$ velocity of air 25 m/s. and loading ratio between 0.1-0.6. Hot air flow within the drying chamber not obstruct air flow. The characteristics of oscillatory motions of particles was found that the maximum moisture content reduction to be around 6 %d.b. volumetric water evaporation rates are $963.7 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3\text{h}$ volumetric heat transfer coefficient are $1832.5 \text{ W/m}^3\text{K}$ at inlet air temperature 110°C and loading ratio 0.56 and average particle residence time of approximately 1 second. The value of specific energy consumption of high-pressure fan ($\text{SEC}_{\text{blower}}$) is greater than the value of specific energy consumption of a heat source ($\text{SEC}_{\text{heater}}$) specific inlet air temperature 70°C and 90°C . And the study found that the final moisture content of the experiment and interpretation by analyzing the relationship of variables is no different dimension not exceeding 1.53%. Quality of rice in terms of the whole kernels head rice and whiteness by comparison with the paddy had reduce the moisture

weathering at room temperature found that the whole kernels head rice are different less than 17% the whiteness have different values does not exceed 9%.

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำสำหรับวัสดุทางการเกษตร

ของ

ธัญญาพร ปัตตาหารี

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

..... คนบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย สันติวัฒนกุล)

วันที่ เดือน พ.ศ. 25.....

คณะกรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์

คณะกรรมการสอบปากเปล่า

..... ประธาน

..... ประธาน

(ดร.กิตติ สถาพรประสาธน์)

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย นิยมล)

..... กรรมการ

..... กรรมการ

(ดร.ประชา บุญยวนิชกุล)

(รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล นามล)

..... กรรมการ

(ดร.กิตติ สถาพรประสาธน์)

..... กรรมการ

(ดร.ประชา บุญยวนิชกุล)

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์นี้ล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก ดร. กิตติ สถาพร
ประสารณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์นี้ ท่านได้เสียสละเวลาถ่ายทอดความรู้และประสบการณ์
ตลอดจนให้คำปรึกษาในการแก้ปัญหาต่าง ๆ รวมทั้ง ดร.ประชา บุญยวานิชกุล อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
ของปริญญานิพนธ์นี้ และขอขอบคุณคณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์ สำหรับการให้คำแนะนำ
เพิ่มเติมเพื่อให้ปริญญานิพนธ์มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิ
โรฒ ที่เชื้อเพื่อสถานที่ในการทำวิทยานิพนธ์และสนับสนุนทุนในการทำวิจัยครั้งนี้ รวมทั้งขอขอบคุณ
อาจารย์คณะวิศวกรรมและเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ที่ให้คำปรึกษา
นักวิจัย ผู้เขียนตำรา เอกสารต่างๆ ที่ได้กล่าวถึงในบรรณานุกรมทุกท่านที่เป็นแหล่งความรู้และเป็น
แหล่งข้อมูลในการทำปริญญานิพนธ์นี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ตลอดจนหัวหน้าในหน่วยงานที่ให้การสนับสนุนและ
ให้กำลังใจด้วยดีตลอดมา

ธัญญาพร ปัตตาชาวี

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
ขอบเขตการวิจัย.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
คุณลักษณะของระบบกระแสชน.....	4
การคำนวณค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเท ความร้อนเชิงปริมาตร.....	6
การทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	10
พื้นฐานการอบแห้ง.....	14
ลักษณะทางกายภาพของข้าว.....	27
การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของข้อมูลโดยวิธีการวิเคราะห์ตัวแปรไม่มีมิติ.....	28
การทำนายค่าความชื้นสุดท้ายของวัสดุ.....	29
3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	30
วัสดุและวิธีการทดลอง.....	30
การดำเนินการทดลอง.....	31
อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร.....	32
สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร.....	32
การหาค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ.....	34

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3 (ต่อ)	
ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ.....	35
การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของข้อมูลโดยวิธีการวิเคราะห์ตัวแปรไรมิตี.....	36
การทำนายค่าความชื้นสุดท้ายของวัสดุ.....	37
4 ผลการทดลองและวิจารณ์.....	38
อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร.....	38
สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร.....	39
ค่าเฉลี่ยเวลาที่วัสดุอยู่ในระบบ.....	41
การประมาณค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ.....	42
ตัวแปรไรมิตีที่ได้จากการทดลอง.....	44
การทำนายค่าความชื้นสุดท้ายของวัสดุ.....	45
การวิเคราะห์คุณภาพข้าว.....	46
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	48
สรุปผลการทดลอง.....	48
ข้อเสนอแนะ.....	50
บรรณานุกรม.....	51
ภาคผนวก.....	55
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	114

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	117

บทที่ 1

บทนำ

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการประกอบอาชีพทางเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมเกษตรเป็นหลักและมีพืชผลทางการเกษตรที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจหลายชนิด โดยผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรหลายชนิดจะมีความชื้นบริเวณผิวมาก ทางหนึ่งที่จะรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ก็คือการลดความชื้นหรือการอบแห้งวัสดุก่อนที่จะนำไปเก็บรักษาต่อไป อย่างไรก็ตามการที่จะลดความชื้นของวัสดุนั้นสามารถทำได้หลายวิธี เช่น เครื่องอบแห้งแบบโรตารี (Rotary dryer) เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (Spray dryer) หรือ เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด (Fluidized bed dryer) เป็นต้น ซึ่งเครื่องอบแห้งดังกล่าวจะใช้พลังงานมากและเวลานาน ด้วยเหตุนี้จึงเกิดแนวคิดที่จะพัฒนาวิธีการอบแห้งขึ้นมาใหม่โดยอาศัยหลักการของระบบกระแสน้ำ (Impinging stream system) เพื่อเป็นการลดการใช้พลังงานและเวลาในการอบแห้ง โดยการใช้เครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำ (Impinging stream dryer)

หลักการพื้นฐานของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำ คือ การให้กระแสการไหลของตัวกลางการอบแห้ง 2 กระแส (หรือมากกว่า) มาชนกัน โดยให้กระแสใดกระแสหนึ่ง (หรือมากกว่า) พาเอาวัสดุ (โดยทั่วไปอยู่ในรูปของอนุภาค) เข้ามาสู่ระบบด้วย ผลของการชนกันของกระแสการไหลของตัวกลางการอบแห้งดังกล่าว จะทำให้เกิดบริเวณซึ่งเรียกว่าบริเวณการชน (Impingement zone) ซึ่งเป็นบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเท มวลสาร ความร้อน และโมเมนตัมสูงมาก ทั้งนี้เนื่องมาจากผลของแรงเฉือนและความปั่นป่วนของกระแสการไหลที่มีค่าสูงในบริเวณดังกล่าว นอกจากนี้การเคลื่อนที่ของอนุภาคในเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำยังมีความพิเศษ นั่นคือการเคลื่อนที่ของอนุภาคจะเป็นแบบสวนทางกลับไปมา (oscillatory motion) ภายในบริเวณการชน ทั้งนี้เริ่มมาจากการที่อนุภาคถูกเร่งให้มีความเร็วสูงขึ้นโดยกระแสการไหลของตัวกลางการอบแห้งกระแสหนึ่ง (คือกระแสที่พาอนุภาคเข้าสู่ระบบ) และวิ่งสวนเข้าไปในกระแสการไหลตรงกันข้าม อันเนื่องมาจากผลของความเฉื่อยของอนุภาคนั้น และในที่สุดอนุภาคก็จะหยุดการเคลื่อนที่เนื่องจากถูกต้านด้วยกระแสการไหลตรงกันข้าม จากนั้นอนุภาคจะถูกเร่งอีกครั้งด้วยกระแสการไหลตรงกันข้าม เคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณการชนอีกครั้ง เป็นลักษณะแบบสวนทางกลับไปมา จนกระทั่งเมื่อความเร็วของอนุภาคลดลงจนถึงค่าหนึ่ง อนุภาคก็จะถูกกระแสการไหลของตัวกลางการอบแห้งพาออกไปจากระบบ การเคลื่อนที่ลักษณะนี้ ทำให้อนุภาคอยู่ในระบบได้นานขึ้น จึงมีเวลาในการแลกเปลี่ยนความร้อนและมวลสารกับตัวกลางการอบแห้งมากขึ้น ด้วยสมบัติของระบบดังกล่าวทั้งสองข้อ (คือมีบริเวณการชนที่ให้อัตราการถ่ายเทมวลสาร ความร้อน และโมเมนตัมสูง และลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคแบบพิเศษ) ทำให้เครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำ

มีขนาดเล็กกว่าเครื่องอบแห้งแบบอื่นๆ สำหรับภาระการอบแห้งที่เท่ากัน จึงนับว่าเป็นระบบที่ประหยัดพลังงาน และมีประสิทธิภาพทางความร้อนสูงกว่าระบบอบแห้งอื่นๆ มาก

การอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำ นับว่าเป็นเทคโนโลยีใหม่สำหรับประเทศไทย การศึกษาและค้นคว้าวิจัยยังไม่เป็นที่แพร่หลาย แต่เนื่องจากเครื่องอบแห้งแบบนี้มีลักษณะเด่นหลายประการดังกล่าวข้างต้น อีกทั้งระบบยังมีการทำงานที่ไม่ซับซ้อน ไม่มีชิ้นส่วนที่มีการเคลื่อนที่ และเหมาะกับการอบแห้งวัสดุที่ต้องการดึงเอาน้ำหรือความชื้นจำนวนมากที่บริเวณรอบๆ ผิวของวัสดุออกอย่างรวดเร็ว จึงเป็นที่น่าสนใจที่จะนำเอาเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำมาประยุกต์ใช้กับการอบแห้งวัสดุต่างๆ ที่มีความชื้นเริ่มต้นสูงๆ

ถึงแม้ว่าจะมีงานวิจัยหลายชิ้นที่รายงานถึงข้อดีต่างๆ ของการอบแห้งแบบกระแสน้ำ แต่การศึกษาถึงผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ก็ยังมีอยู่จำนวนน้อยมาก งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่การศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิอากาศขาเข้า (Inlet air temperature) และอัตราส่วนภาระ (Loading ratio) ที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำ โดยสมรรถนะของเครื่องอบแห้งจะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร และ อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร ดังนั้นหากได้มีการสร้างและทดสอบเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำ ก็จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการศึกษาถึงความเป็นไปได้และข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับระบบการอบแห้งแบบนี้

2.วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 2.1 เพื่อออกแบบ และสร้างเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำโดยใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้งให้เหมาะสมกับการอบแห้งวัสดุทางการเกษตร
- 2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำ
- 2.3 เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำที่ใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้งให้อยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติ

3.ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 3.1 หาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำที่ใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้งวัสดุทางการเกษตรหรืออุตสาหกรรมอาหาร เช่น ข้าวเปลือกพันธุ์ ปทุมธานี 1
- 3.2 ศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ เช่น อุณหภูมิของตัวกลางในการอบแห้งที่ $70 - 110^{\circ}\text{C}$ และอัตราส่วนภาระ 0.15, 0.33, และ 0.56 (อัตราส่วนระหว่างอัตราการป้อนวัสดุและอัตราการไหล

ของอากาศ) ที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร และการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราการระเหยน้ำของเครื่องอบแห้งแบบกระแสนในช่องอัตราการอบแห้งคงที่

3.3 พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับเครื่องอบแห้งแบบกระแสนและเปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองในแง่ของค่าความชื้นสุดท้ายของวัสดุที่ทางออกของห้องอบแห้ง

4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

4.1 เครื่องอบแห้งแบบกระแสนซึ่งสามารถใช้ได้กับวัสดุทางการเกษตร

4.2 ได้ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ในการอบแห้งที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสนที่ใช้อากาศร้อนสำหรับวัสดุทางการเกษตร

4.3 ได้สมการที่ใช้ในการทำนายความชื้นสุดท้ายของวัสดุจากระบบอบแห้งแบบกระแสน

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

จากการสืบค้นข้อมูลและการทวนวรรณกรรมที่มีความคล้ายคลึงและใกล้เคียงกับการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้เป็นการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาทั้งภายในและต่างประเทศ ซึ่งได้เรียบเรียงมาแล้วโดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนในส่วนแรกเป็นส่วนของทฤษฎีและสุดท้ายเป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

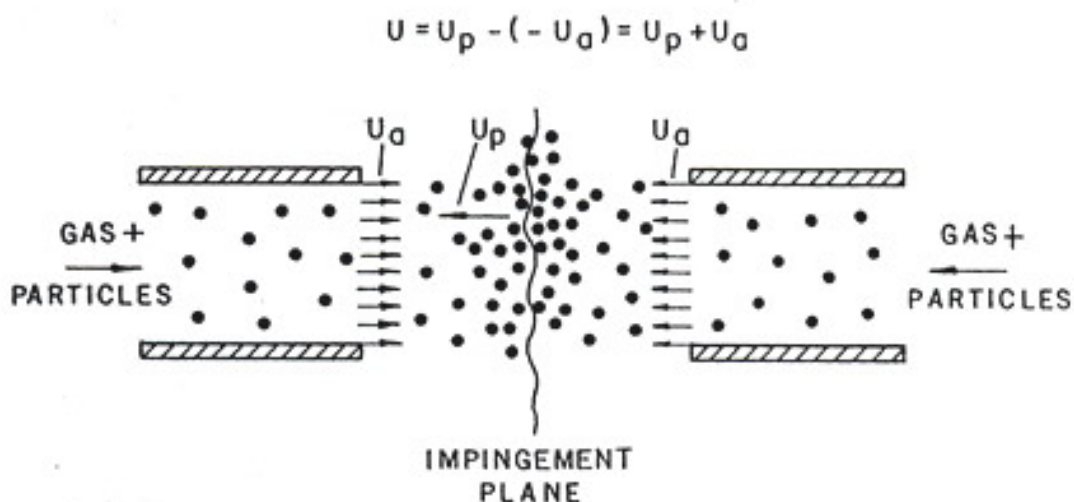
2.1 คุณลักษณะของระบบกระแสน

กระบวนการถ่ายเทมวลและความร้อนของของไหลไปยังวัสดุ สามารถพิจารณาได้ในเทอมของความต้านทานต่างๆ ได้แก่ ความต้านทานในส่วนหนึ่งของของไหล ซึ่งโดยปกติแล้วจะขึ้นอยู่กับการออกแบบระบบและอุปกรณ์ต่างๆ นอกจากนี้ในบางกรณียังมีความต้านทานบริเวณผิวของวัสดุซึ่งอาจเกิดจากสิ่งเจือปนต่างๆ ที่ปกคลุมบริเวณผิวของวัสดุ ส่วนความต้านทานสุดท้ายคือความต้านทานภายใน โดยปกติทั่วไปแล้วจะพยายามที่จะลดความต้านทานบางส่วนหรือทั้งหมดตามที่ได้กล่าวมาแล้ว

ความต้านทานภายในอาจจะสามารถลดลงได้โดยการลดขนาดของวัสดุ หรือการเพิ่มเวลาการเคลื่อนที่ของวัสดุในระบบให้มากขึ้น ส่วนการลดลงของความต้านทานบริเวณผิวสามารถทำได้ดังต่อไปนี้

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

Elperin (1961) ได้นำเสนอระบบกระแสนสำหรับกระบวนการถ่ายเทมวลและความร้อนตามข้อเสนอแนะที่ได้กล่าวมาแล้วในช่วงต้น โดยอาศัยลักษณะการไหลที่พิเศษคือ การนำกระแสนของไหลสองกระแสนหรือมากกว่ามาชนกัน ซึ่งอาจมีการนำวัสดุเข้าสู่ระบบผ่านกระแสนของไหลทางใดทางหนึ่งหรือทั้งสองทางก็ได้ แสดงดังภาพประกอบ 1



ภาพประกอบ 1 แสดงพื้นฐานของระบบกระแสชน (Tamir,1994)

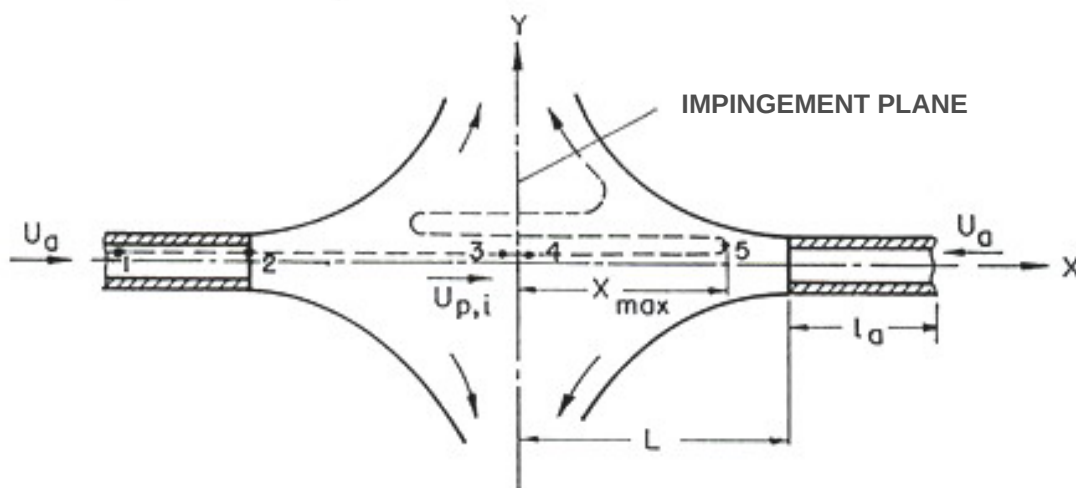
จากผลของการชนกันระหว่างกระแสของไหลทั้งสองกระแส ความเร็วสัมพัทธ์ของวัสดุเมื่อเทียบกับกระแสของไหลจะเพิ่มขึ้นอย่างมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณที่วัสดุเคลื่อนที่สวนกระแสตรงกันข้าม กระบวนการถ่ายเทมวลและความร้อนจะเกิดขึ้นในบริเวณดังกล่าว สำหรับการเคลื่อนที่ของวัสดุนั้นเริ่มต้นจากการที่วัสดุถูกเร่งให้มีความเร็วมากขึ้นโดยกระแสของไหลที่นำวัสดุเข้าสู่ระบบ จนกระทั่งผ่านเข้าสู่ระนาบการชน (Impingement plane) วัสดุจะเคลื่อนที่เข้าไปสู่กระแสน้ำตรงกันข้ามด้วยแรงเฉื่อย และวัสดุจะถูกดันจากกระแสน้ำตรงกันข้ามให้ค่อยๆ มีความเร็วลดลง จนกระทั่งอยู่ในสภาวะหยุดนิ่ง จากนั้นวัสดุจะถูกเร่งให้มีความเร็วเพิ่มขึ้นอีกจากกระแสน้ำดังกล่าว วัสดุจะมีเคลื่อนที่กลับไป-กลับมาในบริเวณการชน (Impingement zone) จนความเร็วของวัสดุลดลงและถูกพาให้ออกจากห้องอบแห้งในที่สุด

2.2 การเคลื่อนที่ของวัสดุอนุภาคเดียวในระบบกระแสชน

โดยปกติทั่วไปจะมีแรงอยู่สามแรงที่กระทำต่อวัสดุขณะเคลื่อนที่ในกระแสของไหล ได้แก่

- 1) แรงจากภายนอก (External force) ซึ่งอาจจะเป็นแรงโน้มถ่วงหรือแรงเหวี่ยง
- 2) แรงลอยตัว (Buoyancy force) จะกระทำขนานกับแรงจากภายนอกแต่มีทิศทางตรงกันข้าม
- 3) แรงฉุดลาก (Drag force) จะเป็นแรงต้านการเคลื่อนที่ของวัสดุ ซึ่งขนานกับการเคลื่อนที่ของวัสดุแต่มีทิศทางตรงกันข้าม

หากพิจารณากรณีการเคลื่อนที่ของวัสดุในแนวระนาบหนึ่งมิติ โดยทั่วไปจะพบว่า แรงจากภายนอก และ แรงลอยตัว จะมีน้อยมากเมื่อเทียบกับแรงฉุดลาก



ภาพประกอบ 2 แสดงการเคลื่อนที่ของวัสดุอนุภาคในระบบกระแสชน (Tamir, 1994)

หากพิจารณาการเคลื่อนที่ของวัสดุอนุภาคเดี่ยวในระบบกระแสชน ซึ่งเริ่มต้นด้วยการป้อนวัสดุเข้าสู่ระบบที่จุดที่ 1 ความเร็วเริ่มต้นของวัสดุจะมีค่าเป็นศูนย์ ($U_p = 0$) และกำหนดความเร็วสัมพัทธ์ให้เท่ากับ $U = U_a - U_p$ เมื่อ U_a คือ ความเร็วของของไหล และกำหนดให้ทิศทางจากจุดที่ 1 ไปทางขวามีค่าเป็นบวก แสดงดังภาพที่ 2 วัสดุจะถูกเร่งโดยกระแสของไหลที่นำเข้าสู่ระบบ เมื่อวัสดุอยู่ที่จุดที่ 3 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่วัสดุอยู่ใกล้กับระนาบการชนมากที่สุด ความเร็วของวัสดุจะเท่ากับความเร็วของกระแสของไหล ($U_p = U_a$) ดังนั้นความเร็วสัมพัทธ์จะมีค่าเท่ากับศูนย์ ($U = 0$) จากนั้นวัสดุจะเริ่มเคลื่อนที่สวนทางเข้าไปยังกระแสดตรงกันข้ามที่จุดที่ 4 ซึ่งตำแหน่งนี้จะเป็นตำแหน่งที่มีความเร็วสัมพัทธ์มากที่สุดโดยจะมีค่าเท่ากับ $U = -U_a - U_a = -2U_a$ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของความเร็วสัมพัทธ์อย่างมีนัยสำคัญนี้มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของกระบวนการถ่ายเทมวลและความร้อนในระบบกระแสชน

2.3 การคำนวณค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร

สมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสชนพิจารณาได้จากค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรซึ่งคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

2.3.1 อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร (N_v) (Tamir,1994)

$$N_v = \frac{W_p (X_i - X_e)}{V_r} \quad (2-1)$$

2.3.2 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร (h_v) (Song et al.,1999; Tamir, 1989; Tamir, 1994; Yao et al.,1995)

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

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

โดย ΔT_{lm} คือค่าผลต่างอุณหภูมิแบบลอการิทึม ซึ่งเป็นตัวแทนของอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างของไหลทางเข้าและทางออกนิยามโดยสมการที่ (2-3)

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{do} - T_{wo}) - (T_{di} - T_{wi})}{\ln \frac{(T_{do} - T_{wi})}{(T_{di} - T_{wo})}} \quad (2-3)$$

เมื่อ

T_{di} คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศที่ทางเข้าของการอบแห้ง, K

T_{do} คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศที่ทางออกของการอบแห้ง, K

T_{wi} คือ อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศที่ทางเข้าของการอบแห้ง, K

T_{wo} คือ อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศที่ทางออกของการอบแห้ง, K

2.3.4. การหาค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ (τ) (Kitron & Tamir, 1988; Xiao & Eckehard, 2006)

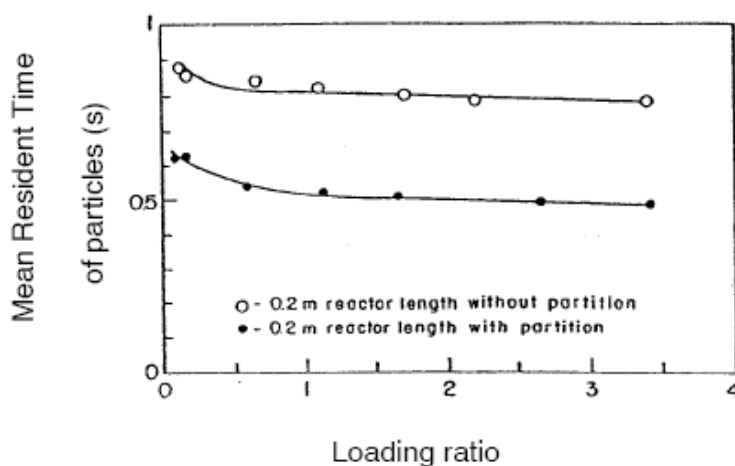
$$\tau = \frac{m_p}{W_p} \quad (2-4)$$

เมื่อ

τ คือ เวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ, s

m_p คือ ปริมาณของวัสดุที่อยู่ในระบบ, kg

W_p คือ อัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุ, kg/s



ภาพประกอบ 3 แสดงอัตราส่วนภาระที่มีผลต่อค่าเวลาเฉลี่ยของวัสดุที่อยู่ในระบบอบแห้งที่มีแผ่นกั้น และไม่มีแผ่นกั้น (Tamir, 1994)

ภาพประกอบที่ 3 แสดงเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบอบแห้งที่มีแผ่นกั้นและไม่มีแผ่นกั้น พบว่าในระบบอบแห้งที่ไม่มีแผ่นกั้นค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบจะมีค่ามากกว่าในระบบอบแห้งที่มีแผ่นกั้นเนื่องจากระบบอบแห้งที่ไม่มีแผ่นกั้นทำให้วัสดุเคลื่อนที่กลับไป-กลับมาในบริเวณระนาบการชนได้มากขึ้นวัสดุจึงอยู่ในระบบได้นานขึ้น

2.3.5 การประมาณความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) (Nimmol et al., 2007;

Watchiraphansakul & Devhastin, 2007)

$$SEC = \frac{E}{m_w} \quad (2-5)$$

เมื่อ

SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ, MJ/kg_{water}

E คือ พลังงานที่ป้อนให้กับอุปกรณ์ที่ใช้ไฟฟ้า, MJ

m_w คือ ปริมาณน้ำ (ความชื้น) ที่นำออกจากวัสดุที่นำมาอบแห้ง (kg) ซึ่งสามารถหาได้

จากความแตกต่างระหว่างความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายของวัสดุที่นำมาอบแห้ง แต่ถ้าเป็นกรณี ที่วัสดุมีการเคลื่อนที่ออกจากระบบอย่างต่อเนื่อง การหาปริมาณน้ำที่ออกจากวัสดุสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$m_w = \dot{m}_a \Delta w_t \quad (2-6)$$

เมื่อ

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

Δw คือ ผลต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นของอากาศร้อนขาเข้าและขาออกของระบบอบแห้ง ($\text{kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dry air}}$) หาได้จากผลต่างของความชื้นสัมบูรณ์ (Absolute humidity) ซึ่งคำนวณได้จากอุณหภูมิกระเปาะแห้งและกระเปาะเปียกของอากาศทางขาเข้าและขาออกของระบบอบแห้ง

t คือ เวลาในการอบแห้ง (min)

ซึ่งระบบอบแห้งนี้ได้ใช้มาตรวัดหน่วยพลังงานรวมทั้งไฟฟ้าที่ใช้กับพัดลมแรงดันสูงและไฟฟ้าที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนเข้าด้วยกันค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะจึงเป็นค่าความสิ้นเปลืองไฟฟ้าของทั้งสองระบบดังกล่าวรวมกันมีหน่วยเป็น (kilowatt hour meter)

2.4 การทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kitron & Tamir (1988) ศึกษาพลศาสตร์การเคลื่อนที่ของวัสดุ การอบแห้ง เวลาที่วัสดุอยู่ในระบบ และการถ่ายเทความร้อนของเครื่องอบแห้งกระแสนแบบแกนเดียวกันพบว่า ปริมาณการถ่ายเทมวลและความร้อนไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาตรของห้องอบแห้ง แต่ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างท่อทางเข้าห้องอบแห้งทั้งสองด้าน ส่วนเวลาเฉลี่ยของวัสดุที่อยู่ในระบบ พบว่ามีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนของภาระ (ระหว่างอัตราการป้อนวัสดุและอัตราการไหลของอากาศ) คือ เมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น ค่าเวลาเฉลี่ยที่อยู่ในระบบก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วยทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจาก พลังงานจลน์ของวัสดุมีค่ามากขึ้นย่อมส่งผลให้วัสดุมีความสามารถในการเคลื่อนที่กลับไป-กลับมาได้นานขึ้น ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราการป้อนวัสดุ

Kitron & Tamir (1990) ศึกษาคุณลักษณะเฉพาะของเครื่องอบแห้งกระแสนแบบแกนเดียวซึ่งวัสดุที่ในการศึกษาคั้งนี้คือ Millet seed ซึ่งมีความหนาแน่น $1,153 \text{ kg/m}^3$ และเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย $1.9 \times 10^{-3} \text{ m}$. โดยการทดลองอบแห้งด้วยอัตราการอบแห้งที่คงที่ พบว่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุ

อยู่ในระบบเพิ่มขึ้นตามการลดลงของอัตราส่วนภาระ (Loading ratio) ค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรจะเพิ่มขึ้นเมื่อมวลของวัสดุที่อยู่ในระบบ (Hold-up of the particle) และอัตราการไหลของอากาศ (Air Flow rate) มีค่าเพิ่มมากขึ้น

Tamir (1989) ศึกษาการอบแห้งวัสดุอนุภาคในเครื่องอบแห้งแบบกระแสน โดยใช้วัสดุทดสอบคือ Millet seed ซึ่งมีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 25-30% มาตรฐานแห้ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยกับ 1.5 และ 1.9 mm และมีความหนาแน่นกับ $1,153 \text{ kg/m}^3$ ส่วนอากาศร้อนที่ใช้ในการอบแห้งคงที่โดยที่อุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าคงที่เท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศขาเข้าห้องอบแห้ง ส่วนการเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งนั้นจะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรที่มีค่าเพิ่มมากขึ้นจากการที่มวลของวัสดุที่อยู่ในระบบ (Hold up of particles) มากขึ้น ย่อมแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของเครื่องอบแห้งที่มากกว่าด้วย

Kudra and Mujumdar (1989) ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการทดสอบเครื่องอบแห้งและเปรียบเทียบลักษณะในการอบแห้งวัสดุอนุภาคของเครื่องอบแห้งกระแสนกับเครื่องอบแห้งแบบต่างๆ เช่น ฟลูอิไดซ์เบด (Fluidized bed dryer), เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (Spray Dryer) เครื่องอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่น (Vibrofluidized bed dryer) และเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (Pneumatic dryer) โดยในการจำแนกประเภทของเครื่องแบบกระแสนนั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดและทิศทางการไหลของของไหล จากข้อมูลดังกล่าวพบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรของเครื่องอบแห้งกระแสนสูงกว่าเครื่องอบแห้งชนิดอื่นโดยมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนอยู่ในช่วง $260-112,500 \text{ W/m}^3\text{K}$ ซึ่งเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยมีค่าประมาณ $1,000-6,000 \text{ W/m}^3\text{K}$ (Master, 1979) และสำหรับสเปาต์เตคเบดและเครื่องอบแห้งแบบไซโคลนมีค่าประมาณ $5,800 \text{ W/m}^3\text{K}$ (Tamir, 1987) เครื่องอบแห้งกระแสนสามารถนำมาประยุกต์ใช้ทางอุตสาหกรรม เช่นการอบแห้งของเหลวข้น โดยสามารถป้อนวัสดุได้ถึง $1,250-1,900 \text{ kg/h}$ ของแข็งแห้งที่อัตราการระเหย $3,500-5,000 \text{ kg H}_2\text{O/h}$ โดยใช้ก๊าซธรรมชาติเท่ากับ $550 \text{ m}^3/\text{h}$ และปริมาตรอากาศอยู่ที่ $16,000 \text{ m}^3/\text{h}$

Hu and Liu (1999) ทำการทดลองเพื่อศึกษาคุณลักษณะการไหลและการอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบกระแสนแนวตั้ง จากผลการทดลองพบว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราการระเหยน้ำออกจากผิวของวัสดุ ในขณะที่อัตราส่วนภาระ (Loading ratio) จะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของอากาศ (อัตราการป้อนวัสดุคงที่) ซึ่งจะทำให้เวลาเฉลี่ยของวัสดุที่อยู่ในระบบมีค่าสูงขึ้น

เนื่องจากวัสดุมีแรงเฉื่อยมากขึ้นทำให้วัสดุสามารถเคลื่อนที่สวนเข้าไปยังกระแสตรงกันข้ามได้มากขึ้น หรืออีกนัยหนึ่งคือ การที่อัตราส่วนภาระลดลงจากการลดลงของอัตราการป้อนวัสดุ (อัตราการไหลของอากาศคงที่) จะทำให้มวลของวัสดุที่อยู่ในระบบน้อยลง วัสดุมีการชนกันเองน้อยลง การสูญเสียพลังงานจลน์ของวัสดุก็น้อยลงตามไปด้วยเช่นกัน ทำให้วัสดุสามารถเคลื่อนที่กลับไป-กลับมาได้นานขึ้น เวลาเฉลี่ยที่อนุภาคอยู่ในระบบก็จะมากขึ้นด้วย

Xu and Zhu (1999) คำนวณค่าความเร็วของวัสดุในห้องอบแห้งโดยใช้กฎของนิวตัน (Newton's law) โดยพิจารณาเฉพาะแรงกดลาก (Drag force) ในการทำนายการเคลื่อนที่ของวัสดุที่อยู่ภายในบริเวณการชน จากการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองและการคำนวณพบว่าสมการดังกล่าวสามารถใช้ในการทำนายความเร็วและตำแหน่งของวัสดุได้ดี

Huai et al (2003) ศึกษาการอบแห้งของเครื่องอบแห้งกระแสน้ำที่มีแนวการเคลื่อนที่ของวัสดุแบบครึ่งวงกลม (semi-circular impinging stream dryer) ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิอากาศขาเข้า อัตราส่วนภาระ (loading ratio) และความชื้นวัสดุเริ่มต้นของวัสดุ ที่มีผลต่อสมรรถนะในการอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำ จากการศึกษพบว่า อัตราส่วนภาระระเหยน้ำเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศของอัตราส่วนภาระ (loading ratio) ซึ่งผลที่ได้จากการทำนายจะมีแนวโน้มเช่นเดียวกับผลที่ได้จากการทดลอง

Sathapornprasarth; et al (2007) หาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งกระแสน้ำสำหรับวัสดุอนุภาคโดยการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งกระแสน้ำโดยศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งกระแสน้ำ ได้แก่ อุณหภูมิและความเร็วของอากาศที่ทางเข้า อัตราการป้อนอนุภาคที่อบแห้งและช่องว่างระหว่างทางเข้าทั้งสองที่อยู่ตรงข้ามกัน ซึ่งสมรรถนะของเครื่องอบแห้งกระแสน้ำหาได้จากอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร ซึ่งได้ใช้เรซินเป็นตัวทดสอบการอบแห้งโดยไม่มีการกีดขวางซึ่งส่วนใหญ่ความชื้นจะแพร่ออกมาที่ผิวหน้า เรซินที่ใช้มีความชื้นเริ่มต้น 81-85 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง การระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุดมีค่าประมาณ $110 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3\text{h}$ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรมีค่า $880 \text{ W/m}^3\text{K}$ อนุภาคมีค่าเฉลี่ยเวลาที่อยู่ในระบบประมาณ 2 วินาที ซึ่งค่าที่ได้จากการทดลองกับการประมาณค่ามีค่าความผิดพลาดประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์

Yao et al (1995) ศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการทำความเย็นจากการระเหยของอากาศ (evaporation cooling of air) ในระบบกระแสช่น โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองและการประยุกต์ใช้วิธีของ Buckingham Pi เพื่อหาสมการความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องทำความเย็นจากการระเหย โดยสมรรถนะของเครื่องทำความเย็นจากการระเหยนั้นพิจารณาเปรียบเทียบได้จากสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร

กิตติ (2009) ทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิของอากาศร้อนที่มีผลต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสช่นในรูปของอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร โดยใช้ข้าวเปลือกเป็นที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 21 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้งเป็นวัสดุทดสอบซึ่งการอบแห้งจะอยู่ในช่วงการอบแห้งคงที่ไม่มีการกีดขวางของกระแสอากาศทั้งสองที่อยู่ตรงข้ามกัน ห้องอบแห้งทำจากท่อสแตนเลสที่มีขนาด 0.25 เมตร ระยะห่างในการช่น 0.20 เมตร ท่อทางเข้าของกระแสอากาศที่อยู่ตรงข้ามมีขนาด 0.20 เมตร อัตราส่วนการระ 0.1-0.2 และอุณหภูมิของอากาศร้อนระหว่าง 70-110°C พบว่าค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุดเท่ากับ 474.43 kg_{water}/m³h โดยที่เวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบประมาณ 2 วินาที

ชอบ (1990) ได้ศึกษาคุณสมบัติเชิงฟิสิกส์ทางความร้อนของข้าวเปลือกพบว่า เส้นผ่านศูนย์กลางของข้าวเปลือกพันธุ์ กข7 และ กข35 มีค่าเท่ากับ 3.5 mm. ซึ่งความหนาแน่นของข้าวเปลือกบางออกได้เป็น 2 ชนิด คือ ความหนาแน่นจริง (ρ_{true}) และความหนาแน่นปรากฏ (Bulk density, ρ_p) โดยข้าวเปลือกที่กองรวมนิยมให้ใช้เป็นความหนาแน่นปรากฏ (Bulk density, ρ_p) จากการวิเคราะห์หาความหนาแน่นของข้าวเปลือก ชนิดเมล็ดยาวสองชนิด คือ ข้าวเปลือกพันธุ์ กข7 และ กข35 ได้สมการดังนี้

$$\text{ข้าวเปลือกพันธุ์ กข7} \quad \rho_{paddy} = 552 + 282 (MC_{db})$$

$$\text{ข้าวเปลือกพันธุ์ กข35} \quad \rho_{paddy} = 551 + 321 (MC_{db})$$

ชลธิชา และคณะ (2006) ออกแบบและสร้างเครื่องลดความชื้นแบบไหลต่อเนื่องโดยใช้หลักการของฟลูอิดไดซ์เซชันวัสดุที่ใช้ทดลองคือข้าวเปลือกเป็นวัสดุทดสอบ พบว่าความเร็วรอบของพัดลมที่เหมาะสมคือ 2300 rpm ที่อุณหภูมิ 116 °C อัตราการไหลของอากาศ 2.15 m³/s ความเร็วเฉลี่ยของอากาศเข้า 4.78 m/s สามารถลดความชื้นได้ถึง 4.86 %w.b. จากความชื้นเริ่มต้น 29.01 %w.b.

มีค่าอัตราการระเหยน้ำจำเพาะเฉลี่ย 0.73 kg/kWh และได้ทำการหาความหนาแน่นของข้าวเปลือก พบว่าข้าวเปลือก 1 L มีน้ำหนัก 0.507 kg หรือมีความหนาแน่น 507 kg/m^3

2.5 พื้นฐานการอบแห้ง

การอบแห้ง คือ กระบวนการลดความชื้น ซึ่งส่วนใหญ่ใช้การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุที่ขึ้น เพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหย โดยใช้ความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการระเหย (สมชาติ,2540) การอบแห้งโดยทั่วไปจะใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการพาความชื้นออกไป จากวัสดุที่ต้องการทำแห้งเพื่อยืดอายุในการเก็บรักษาวัสดุนั้นๆ เนื่องจากไม่มีการเจริญเติบโตของ จุลินทรีย์ หรือนำไปใช้ประโยชน์เพื่อลดปริมาณและน้ำหนักเมื่อช่วยลดต้นทุนในการขนส่งและการเก็บ รักษา

2.5.1 สมบัติของอากาศชื้น

อากาศแห้งที่ปราศจากไอน้ำมีองค์ประกอบของไนโตรเจน 79% โดยโมล กับออกซิเจน 21% โดยโมล และถือว่าเป็นก๊าซที่มีมวลโมเลกุลเท่ากับ $29 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ (ฮาจิเม และคณะ,2548) บรรยากาศ ประกอบด้วยไอน้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และองค์ประกอบที่มีปริมาณน้อยอีกหลายชนิด ซึ่ง โมเลกุลเหล่านี้มีผลต่อกระบวนการอบแห้งดังนั้นในการคำนวณในกระบวนการอบแห้งนั้น “อากาศชื้น ก็คือ “อากาศ+ไอน้ำ” นั่นเอง

2.5.2 ความชื้น (humidity)

เพื่อให้การหาค่าความชื้นต่างๆ รวดเร็วและง่ายต่อการเข้าใจจึงให้ความดันย่อยของไอน้ำใน อากาศเป็น p ความดันไออิ่มตัวของน้ำที่อุณหภูมิของอากาศเป็น p_s ความดันรวมเป็น p_t และให้ โมเลกุลของอากาศและน้ำเป็น M_a และ M_w ตามลำดับแล้วนำตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการหา ความชื้นของอากาศโดยได้ความสัมพันธ์ต่างๆ ดังนี้

ความชื้นสัมพัทธ์ $\phi[-]$ (ฮาจิเม และคณะ,2548) :

$$\phi = \frac{p}{p_s} \quad (2-7)$$

ความชื้น (สัมบูรณ์) $H [\text{kg-ไอน้ำ}\cdot(\text{kg-อากาศแห้ง})^{-1}]$ (ฮาจิเม และคณะ,2548) :

$$H = \frac{M_w p}{M_a (p_t - p)} = \frac{18}{29} \frac{p}{p_t - p} = 0.62 \frac{p}{p_t - p} \quad (2-8)$$

ความชื้น (สัมบูรณ์) เชิงโมล H_{mol} [kmol-ไอน้ำ·(kmol-อากาศแห้ง)⁻¹] (ฮาจิเม และคณะ, 2548)

$$H_{mol} = \frac{p}{p_t - p} \quad (2-9)$$

ถ้าเอา p_s เข้าไปแทนที่ p ในสมการ (2-7) กับ (2-8) ก็จะได้เป็นความชื้นอิ่มตัว H_s และความชื้นอิ่มตัวเชิงโมล $H_{mol, s}$ ในกรณีของกระบวนการอบแห้ง ปริมาณของไอน้ำในอากาศที่อยู่ในเครื่องอบแห้งจะเปลี่ยนแปลงตามค่าเวลาหรือตำแหน่ง ดังนั้นการใช้ H , H_{mol} ซึ่งใช้อากาศแห้งที่ไม่เปลี่ยนไปตามความคืบหน้าของการอบแห้งเป็นฐานของการคำนวณ จึงสะดวกกว่าการใช้สมการของการหาความชื้นสัมพัทธ์

2.5.3 กลไกการอบแห้งและสมบัติการอบแห้งของวัสดุแต่ละประเภท

2.5.3.1 อัตราส่วนความชื้นของวัสดุ

อัตราส่วนความชื้นของวัสดุสามารถหาได้สองรูปแบบโดยอยู่ในรูปแบบของอัตราส่วนความชื้น (มาตรฐานแห้ง) เป็นสัดส่วนของวัสดุที่มีความชื้นต่อวัสดุที่ปราศจากความชื้นส่วนการหาปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในวัสดุสามารถหาได้จากอัตราส่วนความชื้น (มาตรฐานเปียก) ซึ่งอัตราส่วนความชื้นทั้งสองมาตรฐานสามารถหาได้ดังนี้

อัตราส่วนความชื้นของวัสดุ (ฮาจิเม และคณะ, 2548) :

$$W = \frac{W_w}{1 - W_w} \quad (2-10)$$

เมื่อ

W_w คือ วัสดุที่มีความชื้นต่อ 1 kg ของวัสดุที่ปราศจากน้ำ

เนื่องจากในกรณีของอัตราส่วนความชื้น (มาตรฐานแห้ง) มวลของวัสดุแห้งจะไม่เปลี่ยนแปลงทั้งก่อนและหลังการอบแห้งซึ่งจะทำการดูมวลของน้ำได้ง่ายกว่าจึงเป็นที่นิยมใช้มากกว่า ซึ่งการหาค่าอัตราส่วนความชื้น (มาตรฐานเปียก) สามารถหาได้โดยการย้ายข้างตัวแปรในสมการ (2-10)

ปริมาณน้ำที่อยู่ในวัสดุสามารถบอกได้ในรูปของเปอร์เซ็นต์ ตามมาตรฐานเปียกและมาตรฐานแห้งได้ซึ่งในการวิเคราะห์หองค์ประกอบของปริมาณน้ำในวัสดุส่วนใหญ่จะบอกในรูปของมาตรฐานแห้งเพราะในการคำนวณทำได้ง่ายกว่าซึ่งการหาปริมาณน้ำที่อยู่ในวัสดุทั้งสองมาตรฐานสามารถหาได้ดังนี้

$$M_d = \frac{w-d}{d} \times 100 \quad (2-11)$$

$$M_w = \frac{w-d}{w} \times 100 \quad (2-12)$$

เมื่อ

$$M_d = \text{ความชื้น (มาตรฐานเปียก) \%}$$

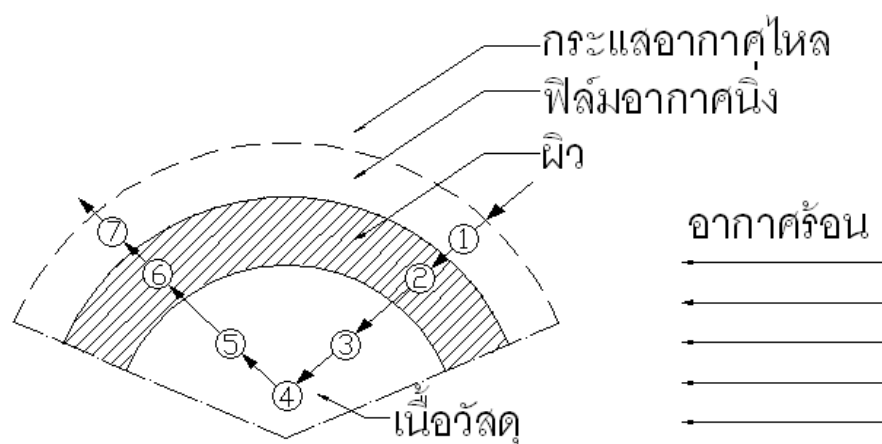
$$M_w = \text{ความชื้น (มาตรฐานแห้ง) \%}$$

2.5.3.2 อัตราส่วนความชื้นสมดุล และอัตราส่วนความชื้นอิสระ

ความชื้นสมดุลของวัสดุมีความสำคัญต่อการศึกษาระบวนการอบแห้ง เพราะเมื่อทำการอบแห้งวัสดุโดยใช้อากาศที่สภาวะคงที่ (เช่น อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์คงที่) ความชื้นของวัสดุจะลดลงจนถึงจุดๆ หนึ่งซึ่งไม่มีการเปลี่ยนแปลง ในขณะนั้นความชื้นในวัสดุมีความดันไอเท่ากับความดันไอของอากาศที่อยู่รอบๆ และอุณหภูมิของวัสดุก็เท่ากับอุณหภูมิของอากาศรอบๆ ด้วย ค่าความชื้นสมดุลขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (สมชาติ,2540)

การใช้ลมร้อนซึ่งมีอุณหภูมิและความชื้นค่าหนึ่งในการอบแห้งนั้น จะสามารถอบแห้งวัสดุได้ต่ำสุดถึงอัตราส่วนความชื้นสมดุลเท่านั้น ถ้าหากต้องการลดอัตราส่วนความชื้น W ในวัสดุใด ๆ กับอัตราส่วนความชื้นสมดุล W_e ณ เงื่อนไขการอบแห้งนั้น ๆ อัตราส่วนความชื้นอิสระ $F = (W - W_e)$ ซึ่งเป็นตัวแสดงถึงปริมาณน้ำที่สามารถระเหยออกได้ ณ เงื่อนไขนั้น ๆ (ฮาจิเม และคณะ,2548)

2.5.4 การถ่ายเทมวลและความร้อน



- | | |
|---|--|
| ① ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนที่ฟิล์มอากาศ | ⑤ ความต้านทานการถ่ายเทมวลในเนื้อวัสดุ |
| ② ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนที่ผิววัสดุ | ⑥ ความต้านทานการถ่ายเทมวลที่ผิววัสดุ |
| ③ ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนในเนื้อวัสดุ | ⑦ ความต้านทานการถ่ายเทมวลที่ฟิล์มอากาศนิ่ง |
| ④ น้ำที่จะระเหย | |

ภาพประกอบ 4 แสดงการถ่ายเทความร้อนและมวลในเนื้อวัสดุ (สมชาติ, 2540)

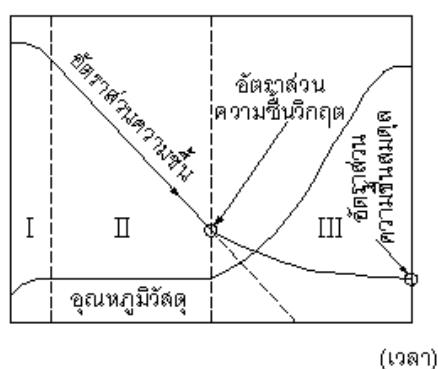
ช่วงอัตราการอบแห้งที่คงที่ การถ่ายเทความร้อนและมวลจะเกิดขึ้นที่ผิวนอกของวัสดุเท่านั้น จะมีน้ำอยู่ที่ผิวของวัสดุเป็นจำนวนมาก เมื่อความเร็วของอากาศที่จะให้อบแห้งเพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาของฟิล์มของอากาศนิ่งลดลงทำให้ความต้านทานการไหลของมวลลดลงด้วย เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของอากาศและลดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ใช้อบแห้งจะทำให้การถ่ายเทมวลและความร้อนเพิ่มขึ้น

ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง เกิดจากการถ่ายเทความร้อนและมวลที่ผิวของวัสดุหมดไปแล้ว ทำให้เกิดการระเหยจากภายในเนื้อวัสดุออกมาสู่ภายนอก โดยความร้อนที่ได้รับนั้นส่วนหนึ่งต้องนำไปชดเชยกับผิวที่สูญเสียไปและนำไปใช้เพื่อการระเหยน้ำด้วย ดังนั้นเมื่อเพิ่มหรือลดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแล้วจะเป็นผลให้การถ่ายเทความร้อนและมวลดีขึ้น เมื่อเพิ่มความเร็วลมจะพบว่าความหนาของฟิล์มอากาศนิ่งมีค่าลดลง เป็นผลให้ความต้านทานลดลงเนื่องจากความ

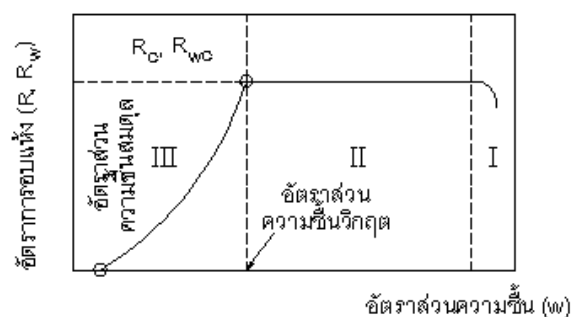
ด้านทานที่ฟิล์มอากาศมีค่าน้อยลงเมื่อเทียบกับความต้านทานตัวอื่น ดังนั้นจึงไม่มีผลต่ออัตราการถ่ายความร้อน (สมชาติ,2540)

2.5.5 เส้นโค้งลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง

วัสดุที่มีความเปียกชื้นถึงผิวนอกนำมาอบด้วยลมร้อนและนำมาเขียนเป็นความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความชื้นและอุณหภูมิเมื่อเทียบกับเวลาจะมีลักษณะของการอบแห้งเป็นดังภาพประกอบ 5 (1) ส่วนภาพประกอบ 5 (2) คือภาพประกอบที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยในวัสดุ โดยอัตราของการอบแห้งของวัสดุสามารถหาได้จากการหาอนุพันธ์เทียบกับเวลาของเส้นโค้งการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นในภาพประกอบ 5 (1) ส่วนเส้นโค้งในภาพประกอบ 5 (2) เป็นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งภายใต้เงื่อนไขการอบแห้งคงที่ (เงื่อนไขภายนอกอย่างเช่น อุณหภูมิลมร้อน, ความชื้นลมร้อน, ความเร็วลม มีค่าคงที่) ซึ่งเงื่อนไขเหล่านี้เป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญที่สุดในการออกแบบอุปกรณ์อบแห้ง



(1) ช่วงเวลา 3 ระยะของการอบแห้ง



(2) เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง

ภาพประกอบ 5 แสดงลักษณะเฉพาะของการอบแห้งภายใต้เงื่อนไขการอบแห้งคงที่

(ฮาจิเม และคณะ,2548)

ในขณะที่อุณหภูมิความร้อนภายในวัสดุมีค่าเท่ากันแล้ว ความร้อนของการอบแห้งที่ถ่ายเทจากลมร้อนไปยังวัสดุที่ต้องการอบแห้ง และการเพิ่มความร้อนของวัสดุ มีการสมดุลความร้อน ดังนี้ (ฮาจิเม และคณะ,2548)

$$\left(\frac{W}{A}\right)(C_s + wC_w)\frac{dt_m}{d\theta} = h(t - t_m) - \frac{W}{A}\left(-\frac{dW}{d\theta}\right)r_m \quad (2-13)$$

เมื่อ

W = มวลของวัสดุที่ปราศจากน้ำ, kg

A = พื้นที่ผิวการอบแห้ง, m^2

C_s = ความร้อนจำเพาะของวัสดุที่ปราศจากน้ำ, $\frac{kJ}{kgK}$

C_w = ความร้อนจำเพาะของน้ำ, $\frac{kJ}{kgK}$

h = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างลมร้อนกับวัสดุ, $\frac{kJ}{hm^2K}$

t = อุณหภูมิของอากาศร้อน, K

t_m = อุณหภูมิของวัสดุ, K

r_m = ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอน้ำที่อุณหภูมิ t_m , K

สามารถเขียนใหม่ได้ (ฮาจิเม และคณะ, 2548)

$$\frac{W}{A}\left(-\frac{dw}{d\theta}\right) = k(H_{m-H}) \quad (2-14)$$

เมื่อ

k = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล, $\frac{kg_w}{hm^2\Delta H}$

H_m = ความชื้นอิ่มตัวของอากาศ ณ อุณหภูมิ t_m

ถ้าเอาสมการ (11) แทนในสมการ (10) ก็จะได้ (ฮาจิเม และคณะ,2548)

$$\left(\frac{W}{A}\right)(C_s + wC_w)\frac{dt_m}{d\theta} = h(t - t_m) - k(H_m - H)r_m \quad (2-15)$$

ในช่วงเริ่มต้นของการอบแห้งอุณหภูมิของวัสดุ t_m ยังมีค่าน้อยอยู่เมื่อเวลาผ่านไปอุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้นซึ่งช่วงเวลานี้คือ “ช่วงเวลาการอุ่นวัสดุ” อยู่ในช่วงอุณหภูมิเริ่มต้นไปจนถึงจุดอุณหภูมิสมดุล เฉพาะในกรณีที่เป็นการพาความร้อนเท่านั้นที่อุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของอากาศ

ภาพประกอบ 4 (1) และ ภาพประกอบ 4 (2) ในช่วง II คือ “ช่วงเวลาการอบแห้งที่มีอัตราคงที่” จะเกิดในช่วงการอบแห้งวัสดุที่มีการระเหยความร้อนที่ผิวซึ่งอุณหภูมิและอัตราการอบแห้งของวัสดุจะมีค่าคงที่ ช่วงเวลานี้จะยังคงอยู่ต่อไปพร้อมกับความชื้นที่ผิวที่ยังคงเกิดการระเหยอยู่

ในช่วง III คือ “ช่วงเวลาการอบแห้งที่อัตราลดลง” เกิดจากการระเหยของน้ำที่ผิวของวัสดุที่ทำการอบแห้งระเหยออกไปอย่างรวดเร็วซึ่งภายในของวัสดุยังมีความชื้นอยู่ ความชื้นจากภายในไม่สามารถเคลื่อนที่เข้ามาชดเชยการสูญเสียความชื้นจากการระเหยน้ำจากภายนอกได้ทันดังนั้นการระเหยความชื้นของวัสดุจะค่อยๆ เข้าไปสู่ข้างในของวัสดุทำให้อัตราการอบแห้งลดลงเพราะความร้อนที่รับจากลมร้อนส่วนหนึ่งนั้นถูกนำไปใช้เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุและถูกนำไปใช้เพื่อการระเหยความชื้นของวัสดุ

อัตราส่วนความชื้นวิกฤต เป็นค่าของอัตราส่วนความชื้นที่อยู่ระหว่าง ช่วง I กับ II เมื่อเวลาผ่านไปค่าความชื้นวิกฤตนี้จะกลายเป็นค่าความชื้นสมดุลซึ่งในการหาค่าความชื้นวิกฤตนี้ทำได้ยากขึ้นอยู่กับการเงื่อนไขและวิธีการของการอบแห้งซึ่งในการอบแห้งด้วยลมร้อนจะช่วยให้เวลาในการอบแห้งลดลงทำให้อัตราส่วนความชื้นวิกฤตลดลงด้วย ยกตัวอย่างเช่นวัสดุเม็ดและผงในสภาพถูกกองสุมอยู่ ซึ่งมีอัตราส่วนความชื้นวิกฤต 15-20% นั้น ค่าของ w_c จะลดลงรวดเร็วเหลือประมาณ 1.0-0.5% ถ้าหากถูกอบแห้งในสภาพที่เม็ดและผงกระจายกระจายอยู่ในลมร้อน หรือกำลังถูกกวาดผสม (ฮาจิเม และคณะ,2548)

2.5.6 อัตราการอบแห้ง

2.5.6.1 อัตราการอบแห้งที่คงที่ (R_c)

กรณีของเงื่อนไขการอบแห้งที่คงที่

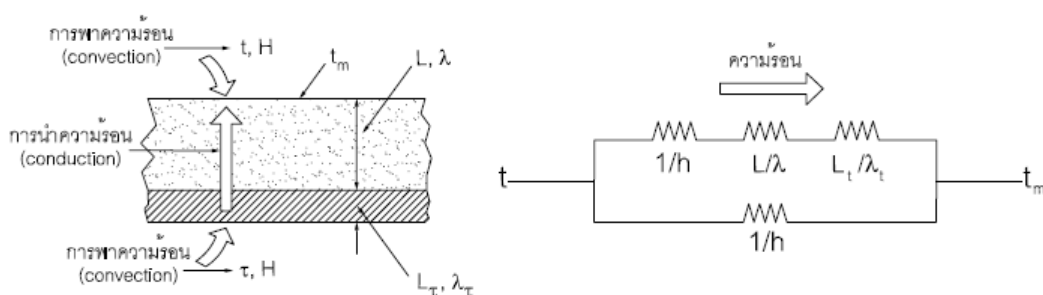
เงื่อนไขของการอบแห้งวัสดุที่คงที่ คือ ในช่วงเวลาการอบแห้งที่อัตราคงที่อุณหภูมิของวัสดุที่ต้องการอบแห้งนั้นคงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงซึ่งอบแห้งด้วยลมร้อนที่มีความชื้นและอุณหภูมิคงที่ เมื่อประยุกต์ใช้ความสัมพันธ์ของ Lewis แล้ว อัตราการอบแห้งที่คงที่ $R_c \left(\frac{kg_w}{hm^2} \right)$ เป็นดังนี้คือ

$$R_c = \left(\frac{W}{A} \right) \left(-\frac{dw}{d\theta} \right) = k(H_m - H) = \left(\frac{h}{C_H} \right) (H_m - H) \quad (2-16)$$

ในกรณีของวัสดุที่รูปทรงซับซ้อนหรือไม่แน่นอน ซึ่งไม่สามารถกำหนดพื้นที่ผิวของการอบแห้งได้แน่ชัด จะแสดงอัตราการอบแห้งเป็น $R_w = \left(-\frac{dw}{d\theta} \right) [kg\text{-น้ำ} \cdot h^{-1} \cdot (kg\text{-วัสดุปราศจากน้ำ})^{-1}]$

ในกรณีที่ใช้ความร้อนจากลมร้อนอย่างเดียว t_m จะมีค่าเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียก t_w ของลมร้อนตลอดช่วงเวลาการอบแห้งที่อัตราคงที่ (ฮาจิเม และคณะ, 2548)

$$R_c = h \frac{t - t_m}{r_m} \quad (2-17)$$



ภาพประกอบ 6 แสดงอัตราการอบแห้งคงที่ (รับความร้อนจาก 2 ด้าน, อบแห้งที่ผิวด้านเดียว)
(ฮาจิเม และคณะ, 2548)

จากภาพประกอบ 6 แสดงอัตราการอบแห้งที่คงที่อบแห้งด้วยลมร้อนของการอบแห้งแบบ ถาดโดยได้รับความร้อนทั้งด้านบนและด้านล่าง ไอน้ำระเหยออกที่ผิวทางด้านบน การถ่ายเทความร้อน

ของวัสดุจะคิดเทียบกับ 1 ตารางเมตรโดยการถ่ายเทความร้อนของแต่ละส่วนเป็นดังที่แสดงในรูปซึ่ง
การคิดค่าความต้านทานจะคิดแบบความต้านทานทางไฟฟ้าโดยใช้กฎของโอห์ม ทำให้สามารถหา
อัตราการถ่ายเทความร้อนในแต่ละชั้นของระบบอบแห้งได้ ดังนี้) (ฮาจิเม และ คณะ,2548)

$$R_c = \left(h + \frac{1}{\frac{1}{h} + \frac{L}{\lambda} + \frac{L_t}{\lambda_t}} \right) \frac{t - t_m}{r_m} \quad (2-18)$$

เมื่อ

$$L = \text{ความหนาของชั้นวัสดุ, } m$$

$$L_t = \text{ความหนาของผนังภาชนะ, } m$$

$$\lambda = \text{ค่าความนำความร้อนของชั้นวัสดุ, } \frac{kJ}{hmk}$$

$$\lambda_t = \text{ค่าความนำความร้อนของผนังภาชนะ, } \frac{kJ}{hmk}$$

มีข้อจำกัดที่ว่าในกรณีนี้ $t_m \neq t_w$ ในกรณีของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน $h \left(\frac{kJ}{hm^2k} \right)$ มีการ
สมการการทดลองดังต่อไปนี้ (ฮาจิเม และคณะ,2548)

- ลมร้อนไหลขนานกับผิวของวัสดุที่มีลักษณะเป็นแผ่น สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (ฮา
จิเม และ คณะ,2548)

$$h = 0.054 G^{0.8}; \quad 2500 < G < 15000 \quad (2-19)$$

$$G \text{ เป็นความเร็วเชิงมวลของลมร้อน, } \frac{kg}{m^2h}$$

- มีการฉีดพ่นลมร้อนในแนวตั้งฉากกับผิวของวัสดุโดยใช้ออร์ฟิสหรือหัวฉีด 2 มิติ (ฮาจิเมะ และ คณะ, 2548)

$$h = cG_j^{0.78} \quad (2-20)$$

เมื่อ

$$c = 0.4 - 1.7 \text{ (ขึ้นกับโครงสร้างหัวฉีดและการจัดเรียง)}$$

$$G_j = \text{ความเร็วเชิงมวลของลมร้อนต่อพื้นที่ผิววัสดุ} \left(m^2 \right), \frac{kg}{m^2 h}$$

- ในกรณีของอนุภาคทรงกลมเดียวกับลมร้อน (ฮาจิเมะ และ คณะ, 2548)

$$\frac{hd_p}{\lambda_f} = 2 + 0.6 Re_p^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}} \quad (2-21)$$

เมื่อ

$$Re_p = \frac{d_p u \rho_f}{\mu_f} [-]$$

$$d_p = \text{เส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค, } m$$

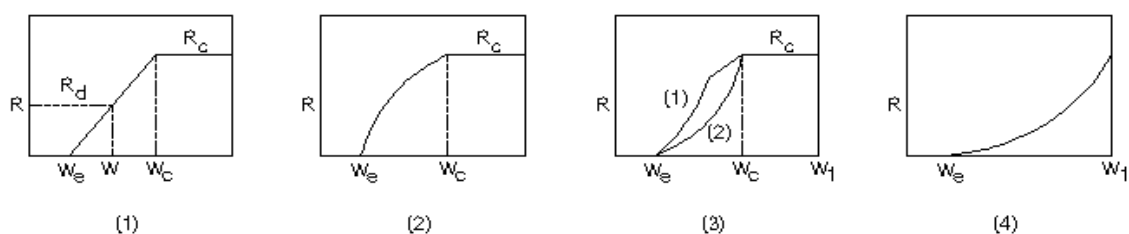
$$u = \text{ความเร็วลมร้อน, } \frac{m}{h}$$

$$Pr = \frac{C_{pf} \mu_f}{\lambda_f}$$

2.5.6.2 อัตราการอบแห้งที่ต่ำลง (R_d)

การเกิดลักษณะเส้นโค้งของอัตราการอบแห้งที่ต่ำลงของวัสดุที่ต้องการอบแห้งนั้นไม่เหมือนกันทุกชนิดทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะเฉพาะของวัสดุแต่ละชนิด ที่มีน้ำอยู่ในวัสดุในปริมาณที่ไม่เท่ากัน ซึ่งสามารถแยกเส้นโค้งของอัตราการอบแห้งที่ลดลงได้ 4 แบบดังภาพประกอบ 7 ในแบบที่ 1 และ 2 จะพบได้ในการอบแห้งวัสดุที่มีเซลล์โปร่ง เนื้อของวัสดุมีความพรุนและมีการเคลื่อนที่ของน้ำแบบ capillary ที่ผิวหมดไปแล้วจะเกิดการขนานน้ำด้วยการแพร่จากภายในวัสดุเพื่อมาชดเชยน้ำที่ผิว

ของวัสดุที่ระเหยไปแต่การแพร่ของน้ำที่ผิวของวัสดุเกิดได้ช้าไม่ทันกับที่สูญเสียไปจึงทำให้อัตราการเร็ว ลดลงซึ่งในการวิเคราะห์เวลาที่เหมาะสมกับการอบแห้งของวัสดุประเภทนี้จะต้องพิจารณาจากความ หนาของวัสดุด้วย ในแบบที่ 3 จะพบได้ในการอบแห้งวัสดุที่มีความชื้นและในเนื้อของอนุภาคมีความ ละเอียดสูง ซึ่งเวลาในการอบแห้งวัสดุประเภทนี้จะอยู่ในระหว่างช่วงเวลาการอบแห้งของแบบที่ 1 และ 2 กับ 4 ในแบบที่ 4 จะพบได้ในการอบแห้งวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นเอกพันธ์เป็นการอบแห้งที่ไม่มี ช่วงเวลาอัตราการอบแห้งที่คงที่ ซึ่งเวลาที่ใช้ในการอบแห้งชนิดนี้จะพิจารณาจากความหนาของวัสดุ ยกกำลังสอง



ภาพประกอบ 7 แสดงเส้นโค้งอัตราการอบแห้งที่ช้าลงภายใต้เงื่อนไขการอบแห้งที่คงที่

(ฮาจิเม และ คณะ, 2548)

โดยทั่วไปแล้ว ถ้าความเร็วการอบแห้ง $R(w)$ ถูกให้มาในรูปฟังก์ชันของอัตราส่วนความชื้น w เวลาที่จำเป็นในการอบแห้งวัสดุจากอัตราส่วนความชื้น w_1 ($w_1 > w_c$) จนเหลือ w_2 ($w_2 < w_c$) จะสามารถหาได้จากทั้งอัตราการอบแห้งที่คงที่ R_c และอัตราการอบแห้งที่ช้าลง R_d โดยใช้สมการ (2-19) (ฮาจิเม และ คณะ, 2548)

$$\theta = -\frac{W}{A} \int_{w_1}^{w_2} \frac{1}{R(w)} dw = \frac{W}{A} \left(\frac{w_1 - w_c}{R_c} + \int_{w_2}^{w_c} \frac{1}{R_d} dw \right) \quad (2-22)$$

- กรณีของภาพประกอบ (1)

เนื่องจากอัตราการอบแห้งที่ช้าลงมีค่าลดลงแบบแปรผันกับอัตราส่วนความชื้นเพราะฉะนั้น R_d จะถูกแสดงได้ดังสมการถัดไป (ฮาจิเม และ คณะ, 2548)

$$R_d = R_c \frac{w - w_e}{w_c - w_e} = R_c \frac{F}{F_c} \quad (2-23)$$

ถ้าเอาสมการ (2-20) แทนค่าในสมการ (2-19) เวลาที่ต้องใช้อบแห้ง θ ก็จะเป็นดังสมการ
ถัดไปคือ (ฮาจิเม และ คณะ, 2548)

$$\begin{aligned} \theta &= \frac{W}{AR_c} \left\{ (w_1 - w_c) + (w_c - w_e) \ln \left(\frac{w_c - w_e}{w_2 - w_c} \right) \right\} \\ &= \frac{W}{AR_c} \left\{ (F_1 - F_c) + F_c \ln \left(\frac{F_c}{F_2} \right) \right\} \end{aligned} \quad (2-24)$$

เมื่อ

W = มวลของวัสดุที่ปราศจากน้ำ, kg

A = พื้นที่ผิวหน้าของการอบแห้งทั้งด้านบนและด้านล่าง, m^2

w_1 = อัตราส่วนความชื้น (ก่อนอบแห้ง)

w_2 = อัตราส่วนความชื้น (หลังอบแห้ง)

w_c = อัตราส่วนความชื้นวิกฤต

w_e = อัตราส่วนความชื้นสุดท้าย

R_c = อัตราการอบแห้งที่คงที่

R_d = อัตราการอบแห้งที่ช้าลง

- กรณีของภาพประกอบ (2)

ถ้าทำการวัดเส้นโค้งลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง โดยการทดลองที่เงื่อนไขภายนอกอย่างหนึ่ง (ตัวห้อย “1”) อัตราการอบแห้งที่ลดลง ณ อัตราส่วนความชื้นอิสระเดียวกันภายใต้เงื่อนไขอื่น (ตัวห้อย “2”) จะเป็นไปตามสมการถัดไป คือ (ฮาจิเม และ คณะ,2548)

$$\frac{R_{d2}}{R_{d1}} = \frac{R_{c2}}{R_{c1}} \quad (2-25)$$

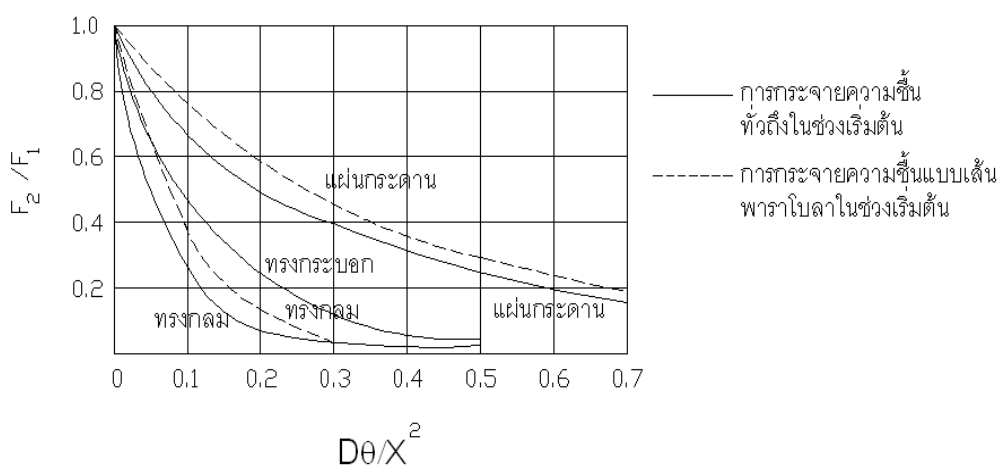
ในกรณีของภาพประกอบ 7 (1) และ 7 (2) อัตราการอบแห้งที่คงที่มีค่ามากขึ้น อัตราการอบแห้งที่ช้าลงก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย และเวลาที่ใช้อบแห้งก็จะสั้นลง เพราะฉะนั้น การเลือกเครื่องอบแห้งที่มีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงจึงเป็นสิ่งสำคัญ (ฮาจิเม และ คณะ,2548)

- กรณีของภาพประกอบ 7 (3)

เนื่องจากไม่มีกฎจากประสบการณ์ที่นำมาใช้ได้ โดยทั่วไปจึงจำเป็นต้องทำการทดลองเท่านั้น (ฮาจิเม และ คณะ,2548)

- กรณีของภาพประกอบ 7 (4)

เนื่องจากลักษณะเส้นโค้งอัตราการอบแห้งที่ลดลงของภาพประกอบ 7 (4) เกิดขึ้นในวัสดุที่มีลักษณะเป็นเอกพันธ์ ในการหาเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง สัมประสิทธิ์การแพร่และเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่เงื่อนไขที่แตกต่างกันสามารถหาได้จากภาพประกอบ 8



ภาพประกอบ 8 แสดงเวลาที่ใช้อบแห้งวัสดุที่เกิดการแพร่ของน้ำ (ฮาจิเม และ คณะ,2548)

เมื่อ

$x =$ ครึ่งของความหนาของแผ่นวัสดุที่ต้องการอบแห้งเพียงด้านเดียว

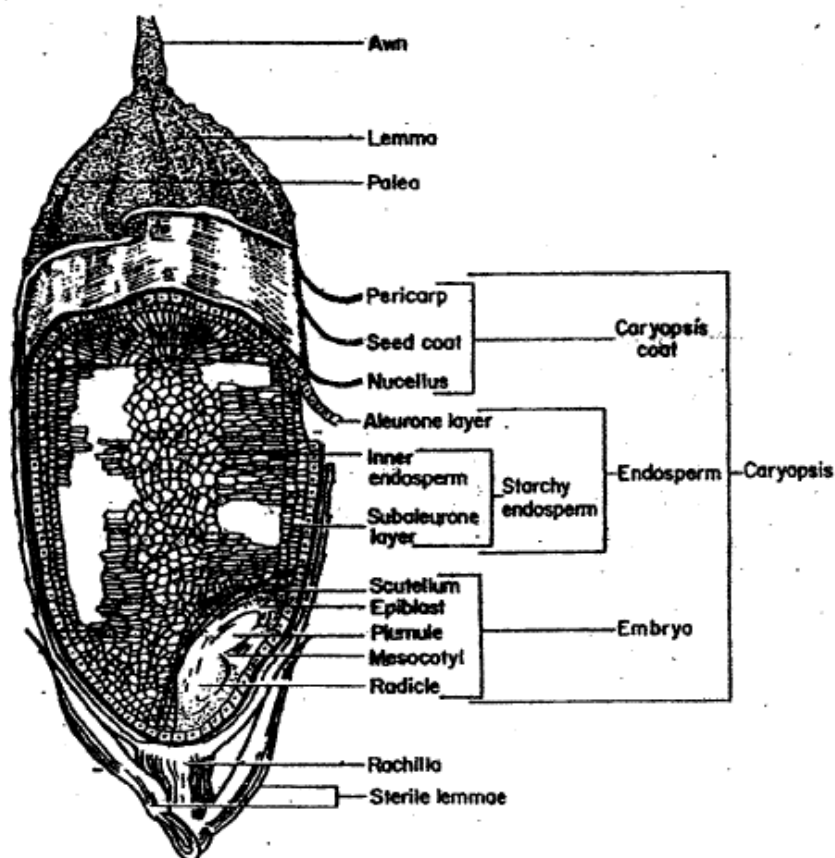
หรือ

$x =$ รัศมีของวัสดุที่เป็นทรงกลมหรือทรงกระบอก

ในช่วงเวลาการอบแห้งที่อัตราข้างของ 7 (3) และ 7 (4) นั้น ความเร็วการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุจะเป็นตัวกำหนดอัตราการอบแห้ง ดังนั้นจึงไม่ค่อยมีประโยชน์ในการทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น แต่วิธีที่จะได้ผลมากกว่าก็คือการเพิ่มอุณหภูมิการอบแห้ง เพราะจะทำให้เวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งสั้นลงอย่างมีประสิทธิภาพ (ฮาจิเม และ คณะ, 2548)

2.6. ลักษณะทางกายภาพของข้าว

ข้าวเป็นพืชล้มลุกตระกูลหญ้า มีระบบรากฝอยใช้ในการหาอาหารมาเลี้ยงส่วนต่าง ๆ รากอยู่ใต้ผิวดิน มีอายุประมาณ 1 ปี และข้าวยังเป็นอาหารหลักของประชากรในแถบทวีปเอเชีย



ภาพประกอบ 9 แสดงส่วนประกอบของเมล็ดข้าว (Juliano, 1980)

เมล็ดข้าว คือส่วนทั้งหมดรวมเมล็ดที่เป็นแบ่ง เรียกว่า endosperm คือส่วนที่เราบริโภคได้ ซึ่งถูกห่อหุ้มด้วยชั้นของ palea ที่เป็นแบ่งอีกชั้นหนึ่งและทั้ง endosperm และ palea ถูกห่อหุ้มด้วยเปลือกแข็งที่เรียกว่า lemma

7.2 น้ำหนักเมล็ด (ชลธิชา และคณะ,2006) ตรวจสอบน้ำหนักข้าวเปลือก 100 เมล็ดของข้าวไทยพันธุ์ต่าง ๆ จำนวน 344 พันธุ์ มีน้ำหนักแปรปรวนระหว่าง 1.62-4.17 กรัม ส่วนข้าวพันธุ์ที่รัฐบาลส่งเสริมจะมีน้ำหนัก 100 เมล็ด ระหว่าง 2.25-3.67 กรัม น้ำหนักเมล็ดสามารถประเมินได้ 2 รูปแบบคือ

- น้ำหนักต่อปริมาตร ประเมินเป็น กรัมต่อลิตร หรือ กิโลกรัมต่อถัง
- น้ำหนักต่อจำนวนเมล็ด ประเมินเป็น 100 เมล็ด หรือน้ำหนัก 1,000 เมล็ด เป็นต้น

7.3 ความหนาแน่นของข้าวเปลือก แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ความหนาแน่นจริง (ρ_{true}) และความหนาแน่นปรากฏ (Bulk density, ρ_p) โดยข้าวเปลือกที่รวมเป็นกองนิยมให้ใช้ความหนาแน่นปรากฏในการวิเคราะห์ โดยความหนาแน่นมีหน่วยเป็น kg/m^3 (ชอบ, 1990)

2.7 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของข้อมูลโดยวิธีการวิเคราะห์ตัวแปรไร้มิติ

ในการทดลองเพื่อหาผลเฉลยหรือปัญหาของของไหลนั้น ต้องใช้เวลาและมีค่าใช้จ่ายในการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ในการทดลองจึงได้มีการค้นหาวิธีการวิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์มิติ (Dimension Analysis) การวิเคราะห์มิติเป็นการนำตัวแปรเชิงเรขาคณิตที่เกี่ยวข้องกับการไหลหลาย ๆ ตัวแปรมาวิเคราะห์โดยการจัดกลุ่มให้อยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติ ซึ่งในการหาตัวแปรไร้มิตินั้นหาได้จากความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งหมดที่คาดว่าจะมีผลต่อการทดลองที่มีความเป็นไปได้ที่น้อยที่สุด โดยทั่วไปวิธีการวิเคราะห์มิติที่ได้รับการยอมรับมีอยู่ 2 วิธีคือ ทฤษฎีของราเลย์ (Raleigh's method) และ ทฤษฎีของพายบัคกิงแฮม (Buckingham Pi-theorem) ในการวิเคราะห์ตามทฤษฎีของพายบัคกิงแฮมเหมาะสมกับการใช้ในกรณีที่ตัวแปรมีมากกว่า 4 ตัวแปร สัญลักษณ์ π เป็นกลุ่มของตัวแปรไร้มิติ ค่า π อาจมีมากกว่า 1 กลุ่มกำหนดได้จากค่าจริง ความความรู้ที่มีอยู่ หรือจากประสบการณ์ โดยวัตถุประสงค์ของการจัดกลุ่มตัวแปรต่าง ๆ เพื่อต้องการหาคำตอบหรืออธิบายอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากการไหลนั้น

ขั้นตอนการหาตัวแปรไร้มิติมี 6 ขั้นตอนสำคัญ ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดตัวแปรทั้งหมดที่คาดว่าจะเกี่ยวข้องหรือมีผลต่อการทดลอง

(กำหนดให้ n เป็นจำนวนของตัวแปรทั้งหมด)

ขั้นตอนที่ 2 เลือกมิติพื้นฐาน เช่น (M,L,T,t) หรือ (F,L,T,t)

ขั้นตอนที่ 3 ทำให้มิติของตัวแปรทุกตัวอยู่ในรูปของมิติพื้นฐาน

ขั้นตอนที่ 4 หาค่า m เพื่อหากรูปลูก่อนของกรูปลูก่อนตัวแปรไร้มิติจาก $(n-m)$ โดยที่ m คือจำนวนตัวแปรอิสระที่น้อยที่สุด

ขั้นตอนที่ 5 จัดกรูปลูก่อนของ π ที่ได้เทียบสัมประสิทธิ์และแก้สมการจะได้กรูปลูก่อนตัวแปรไร้มิติ

ขั้นตอนที่ 6 ตรวจสอบความไร้มิติของกรูปลูก่อนตัวแปรไร้มิติที่ได้

2.8 การทำนายค่าความขึ้นสุดท้ายของวัสดุ

การทำนายค่าความขึ้นสุดท้ายของวัสดุทำได้โดยนำความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งหมดที่คาดว่าจะมีผลต่อการทดลองมาหาความสัมพันธ์ให้อยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติ ดังหัวข้อที่ 2.7 แล้วนำความค่าคุณสมบัติต่างๆ ของอากาศมาประกอบแล้วทำการหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ด้วย โปรแกรม SPSS ซึ่งขั้นตอนในการทำนายค่าความขึ้นสุดท้ายของวัสดุมีขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนการทำนายค่าความขึ้นของวัสดุสรุปได้ 5 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 นำคุณสมบัติต่าง ๆ ของอากาศมาประกอบกับกรูปลูก่อนตัวแปรไร้มิติที่ได้จากหัวข้อที่ 2.7 และ

จัดรูปให้มีค่าสัมประสิทธิ์ของ A และ ค่ายกกำลังด้วยตัวแปรต่างๆ เช่น a,b,c,.....

ขั้นตอนที่ 2 หาความสัมพันธ์ของกรูปลูก่อนตัวแปรไร้มิติด้วยโปรแกรม SPSS

ขั้นตอนที่ 3 วิเคราะห์และทำการตัดกรูปลูก่อนตัวแปรที่ไม่เกี่ยวข้องจากขั้นตอนที่ 3

ขั้นตอนที่ 4 แทนค่าสัมประสิทธิ์และค่ายกกำลังลงในกรูปลูก่อนตัวแปร

ขั้นตอนที่ 5 นำสมการการหาค่าอัตรากระเหยน้าเชิงปริมาตรมาเท่ากับกรูปลูก่อนของตัวแปรไร้มิติแล้วทำการแก้สมการเพื่อหาค่าความขึ้นสุดท้าย

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

การศึกษасสมรรถนะของเครื่องอบแห้งนี้จะพิจารณาจากค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร การหาอัตราการป้อนวัสดุที่เหมาะสม การหาความเร็วอากาศเข้าที่เหมาะสม การหาอุณหภูมิอากาศเข้าและออกจากห้องอบแห้งและ การหาความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง รวมทั้งได้หาค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ซึ่งได้ออกแบบการทดลองดังนี้

3.1 การจัดเตรียมวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

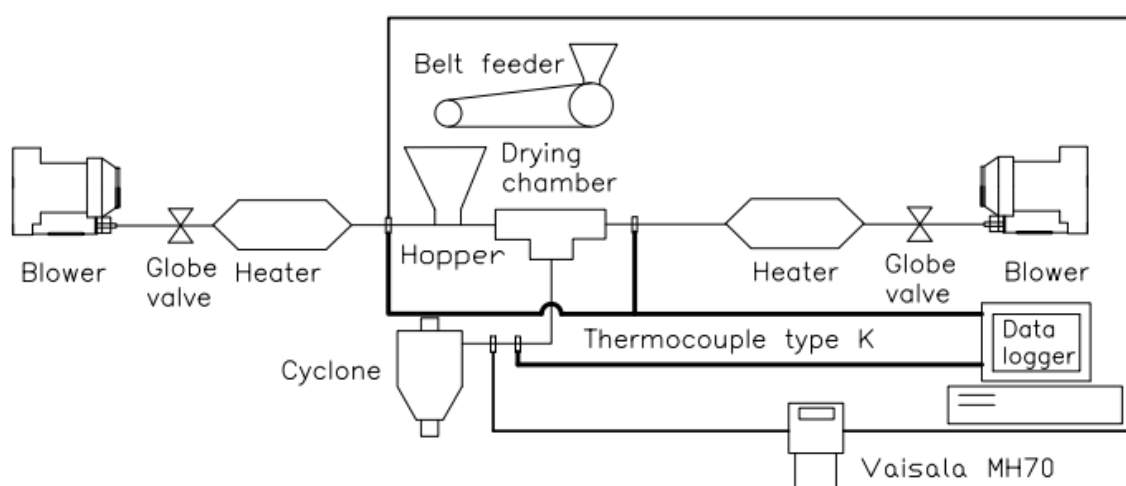
เนื่องจากการอบแห้งกระแสนเป็นกรอบโดยการใช้ลมร้อนฉะนั้นจะทำได้ดีกับวัสดุที่มีความชื้นที่ผิวมากและการไหลของวัสดุแบบอิสระ ซึ่งวัสดุที่จะนำมาใช้ได้กับการทดลองในครั้งนี้ คือ ข้าวเปลือกพันธุ์ปทุมธานี 1 ซึ่งมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 29 เปอร์เซ็นต์แห้ง

อุปกรณ์

1. ห้องอบแห้งจากเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.89 เมตร (ท่อขนาด 3.5 นิ้ว) ยาว 0.24 เมตร
2. ชุดป้อนวัสดุแบบสายพานควบคุมอัตราการป้อนโดยการใช้แรงดันจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
3. เครื่องกำเนิดความร้อนชนิดแท่งไฟฟ้าขนาด 15 kW
4. พัดลมความดันสูงขนาด 2.2 kW LDL รุ่น RT5026
5. อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิกระเปาะแห้ง Thermocouple type K และบันทึกอุณหภูมิและด้วยโปรแกรม Labview
6. เครื่องมือวัดและบันทึกอุณหภูมิกระเปาะเปียก Vaisala รุ่น MH 70 (Finland)
7. เครื่องมือวัดความเร็วลม Testo รุ่น 445 (Germany)
8. เครื่องชั่งน้ำหนัก T Scale รุ่น NB/NHB series precision balance
9. อุปกรณ์ดักฝุ่นแบบไซโคลน

วัสดุ

ข้าวเปลือกพันธุ์ปทุมธานี 1 เตรียมข้าวเปลือกให้มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 29 % (d.b.) ด้วยการ rewet ข้าวเปลือกโดยแช่น้ำ 1 ชั่วโมง แล้วเกลี่ยให้มีความชื้นสม่ำเสมอที่อุณหภูมิห้อง ทำการหาความชื้นเริ่มต้นโดยชั่งน้ำหนักข้าวเปลือกก่อนอบแล้วอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน Association of Official Agricultural Chemists (AOAC) ทำการชั่งน้ำหนักหลังอบ และคำนวณหาค่าความชื้นเริ่มต้นตามมาตรฐานแห่ง



ภาพประกอบ 10 แสดงแผนผังของเครื่องอบแห้งกระแสนและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง

3.2 การดำเนินการทดลอง

เริ่มต้นด้วยการบันทึกค่าการใช้กำลังไฟฟ้าที่มาตรวัดไฟฟ้ามีหน่วยเป็น kWh

1. เปิดพัดลมความดันสูงทั้ง 2 ตัวพร้อมกันโดยตรวจวัดความเร็วลมด้วยเครื่องมือวัดความเร็วลม Testo รุ่น 445 (Germany) แล้วทำการปรับความเร็วลมให้ได้ตามที่ต้องการที่ 25 m/s ด้วยการปรับโกลบวาล์ว

2. เมื่อได้ความเร็วลมตามที่ต้องการแล้วเปิดเครื่องกำเนิดความร้อนทั้ง 2 ตัวพร้อมกันเพื่อให้ได้กระแสลมร้อนตามที่ต้องการโดยในการทดลองครั้งนี้ทดลองที่อุณหภูมิ 70-110 °C โดยใช้ Thermocouple type K ตรวจวัดอุณหภูมิที่ทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้งและบันทึกอุณหภูมิด้วยโปรแกรม Labview เป็นค่าของอุณหภูมิกระเปาะแห้ง

3. ทำการป้อนวัสดุที่ต้องการอบแห้งซึ่งในการทดลองครั้งนี้ใช้ข้าวเปลือกพันธุ์ปทุมธานี 1 เป็นวัสดุทดลอง ป้อนวัสดุด้วยเครื่องป้อนแบบสายพานที่อัตราการป้อน 20, 45 และ 75 kg/h หรือที่อัตราส่วนภาระ 0.15, 0.33 และ 0.56 เป็นการป้อนวัสดุด้วยกระแสของอากาศร้อนเพียงด้านเดียว

4. ตรวจวัดและบันทึกค่าของอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศที่ทางเข้าและทางออกด้วย Visala รุ่น MH 70 (Finland) เพื่อนำไปใช้คำนวณหาผลต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยลอการิทึม

5. เมื่อทำการป้อนวัสดุที่ต้องการอบแห้งที่ข้างหนึ่งของเครื่องอบโดยการปล่อยให้อากาศร้อนของเครื่องอบไหลมาทั้งสองข้างจะปะทะกันที่ห้องอบและเข้าสู่ระบบกระแสลมโดยเกิดการเคลื่อนที่ตามระบบของกระแสลม เมื่อวัสดุเกิดการระเหยน้ำที่บริเวณการชนแล้วก็จะตกลงด้านล่างของห้องอบที่ต่อเข้ากับเครื่องดักฝุ่น

6. นำวัสดุที่ได้จากการทดลองมาชั่งน้ำหนักและบันทึกค่า ต่อจากนั้นนำไปเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน Association of Official Agricultural Chemists (AOAC) เพื่อหาความชื้นสุดท้าย

7. ทำการคำนวณหาอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรเพื่อเป็นการศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งกระแสลม ดังสมการต่อไปนี้

3.2.1. อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร (N_v) (Tamir, 1994):

$$N_v = \frac{W_p (X_i - X_e)}{V_r} \quad (3-1)$$

3.2.2. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร (h_v) (Song et al., 1999; Tamir, 1989; Tamir, 1994; Yao et al., 1995):

$$h_v = \frac{W_p (X_i - X_e) \lambda}{V_r \Delta T_{lm}} \quad (3-2)$$

เมื่อ

W_p	คือ	อัตราการป้อนวัสดุ, kg/h
V_r	คือ	ปริมาตรห้องอบแห้ง, m^3
X_i	คือ	ความชื้นของวัสดุที่ทางเข้า, kg/kg (d.b.)
X_e	คือ	ความชื้นของวัสดุที่ทางออก, kg/kg (d.b.)
λ	คือ	ความร้อนแฝงของการระเหย, kJ/kg

โดย ΔT_{lm} คือค่าผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยลอการิทึม ซึ่งเป็นตัวแทนของอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างของไหลทางเข้าและทางออกนิยามโดยสมการที่ (3-3)

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{do} - T_{wo}) - (T_{di} - T_{wi})}{\ln \frac{(T_{do} - T_{wi})}{(T_{di} - T_{wo})}} \quad (3-3)$$

เมื่อ

- T_{di} คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศที่ทางเข้าของห้องอบแห้ง, K
 T_{do} คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศที่ทางออกของห้องอบแห้ง, K
 T_{wi} คือ อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศที่ทางเข้าของห้องอบแห้ง, K
 T_{wo} คือ อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศที่ทางออกของห้องอบแห้ง, K

3.3 การหาอัตราการป้อนวัสดุที่เหมาะสม

เนื่องลักษณะทางกายภาพของวัสดุทางการเกษตรนั้นมีความแตกต่างกัน ทั้งในเรื่องของขนาด น้ำหนักและผิวของวัสดุ จึงต้องทำการทดลองหาอัตราการป้อนที่เหมาะสมกับเครื่องป้อนเพื่อนำไปใช้คำนวณหาอัตราส่วนภาระ (Loading ratio) หรือ อัตราส่วนการป้อนวัสดุต่ออัตราส่วนการไหลของอากาศ เพื่อที่จะนำไปเปรียบเทียบหาค่าประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งต่อไป โดยอัตราส่วนภาระหาได้จากสมการ

$$\mu = \frac{w_p}{w_A} \quad (3-4)$$

เมื่อ

- μ คือ อัตราส่วนภาระ
 w_p คือ อัตราการป้อนวัสดุ, kg/h
 w_A คือ อัตราการไหลของอากาศ, kg/h

โดยที่ w_A หาได้จาก $w_A = Q \times \rho$ (3-5)

เมื่อ

- ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ, kg/m³

อัตราการไหลของอากาศหาได้จากการวัดค่าความเร็วลมหาพื้นที่หน้าตัดของท่อแล้วทำการคำนวณหาอัตราการไหลของอากาศได้จากสมการ

$$Q = V \times A \quad (3-6)$$

เมื่อ

Q คือ อัตราการไหลของอากาศ, m^3/h

V คือ ความเร็วของอากาศ, m/s

A คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อ, m^2

ขั้นตอนการหาอัตราการป้อนที่เหมาะสม เริ่มต้นด้วยการกำหนดอัตราการป้อนโดยปรับค่าแรงดันไฟฟ้าเป็นโวลต์ พบว่าที่ค่าแรงดันไฟฟ้า 6, 10, และ 14 โวลต์ หรือที่อัตราการป้อน 20, 45 และ 75 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เครื่องป้อนป้อนวัสดุได้อย่างต่อเนื่องไม่เกิดการติดขัด ดังนั้นจึงเลือกใช้ที่อัตราการป้อนดังกล่าวในการศึกษาครั้งนี้

3.4 การหาค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ

การทดลองหาค่าเวลาเฉลี่ยที่อยู่ในระบบ (Mean resident time) ใช้ข้าวเปลือกพันธุ์ปทุมธานี 1 เป็นวัสดุทดลอง ค่าเวลาเฉลี่ยดังกล่าวสามารถหาได้จากการวัดปริมาณของวัสดุที่อยู่ในระบบ (Hold-up) และค่าอัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุที่ป้อนเข้าสู่เครื่องอบแห้ง โดยค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบหาได้จากสมการ (Kitron & Tamir; 1988: Xiao & Eckehard; 2006)

$$\tau = \frac{m_p}{W_p} \quad (3-7)$$

เมื่อ

τ คือ ค่าเวลาเฉลี่ยที่อยู่ในระบบ, s

m_p คือ ปริมาณของวัสดุที่คงอยู่ในระบบ, kg

W_p คือ อัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุ, kg/s

ขั้นตอนการหาค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบสำหรับการทดลองครั้งนี้ เริ่มต้นด้วยการกำหนดตัวแปรที่อาจมีผลต่อค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบดังนี้

1. ความเร็วอากาศเข้าที่ 25 m/s
2. อัตราการป้อนวัสดุที่ 20, 45 และ 75 kg/h
3. ระยะห่างในการชน 0.24 m

ทำการกำหนดตัวแปรต่างๆ ที่คาดว่าจะมีผลต่อค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ ปรับตั้งค่าความเร็วลมให้ได้ตามที่ต้องการ จากนั้นทำการป้อนข้าวเปลือกตามอัตราการใช้ที่กำหนดเข้าสู่ระบบอบแห้งอย่างต่อเนื่องและรอจนกว่าระบบอยู่ในสภาวะคงตัว จากนั้นจะหยุดการป้อนข้าวเปลือกที่เข้าสู่ระบบอบแห้งและปิดเครื่องเป่าลมแรงดันสูงพร้อมกัน ซึ่งในขณะนั้นจะมีข้าวเปลือกซึ่งเป็นวัสดุทดสอบติดค้างอยู่ในระบบอยู่จำนวนหนึ่ง ต้องนำข้าวเปลือกดังกล่าวมาชั่งน้ำหนักเพื่อหาปริมาณของวัสดุที่คงอยู่ในระบบ ทำได้โดยเปิดเครื่องเป่าลมแรงดันสูงเพื่อเป็นการนำเอาข้าวเปลือกออกจากระบบและใช้ภาชนะมารับอยู่ที่ทางออกของระบบอบแห้ง นำค่าปริมาณของข้าวเปลือกดังกล่าวมาคำนวณหาค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ ซึ่งการหาปริมาณวัสดุที่คงอยู่ในระบบดังกล่าวมีความแม่นยำค่อนข้างน้อย และในทางการปฏิบัติจริงทำได้ยาก เนื่องจากต้องหยุดการป้อนวัสดุและหยุดเครื่องเป่าลมแรงดันสูงพร้อมกัน Kitron and Tamir (1988) ได้เสนอแนะว่าการทำการทดลองในแต่ละสภาวะควรทำการทดลองไม่น้อยกว่า 5-10 ซ้ำ

3.5 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

การใช้พลังงานในกระบวนการอบแห้งสามารถวัดได้โดยตรงด้วยมาตรวัดหน่วยพลังงาน ซึ่งระบบอบแห้งที่ได้ทำการทดลองครั้งนี้ประกอบด้วยไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างกระแสอากาศให้มีความเร็วสูงตามที่ต้องการ และไฟฟ้าที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนในการอบแห้ง

เนื่องจากระบบอบแห้งที่ศึกษาในครั้งนี้ได้ใช้มาตรวัดหน่วยพลังงานรวมทั้งไฟฟ้าที่สร้างกระแสอากาศและไฟฟ้าที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนเข้าด้วยกันค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะจึงเป็นค่าความสิ้นเปลืองไฟฟ้าของทั้งสองระบบดังกล่าวรวมกัน

การประมาณความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ เริ่มต้นด้วยการปล่อยวัสดุที่ต้องการอบแห้งเปิด สวิตช์ให้กระแสอากาศมีความเร็วสูงตามที่ต้องการเปิดสวิตช์แหล่งกำเนิดความร้อนจนถึงขณะหนึ่งที่ระบบทั้งหมดคงที่เริ่มทำการบันทึกตัวเลขของหน่วยมาตรวัดและบันทึกตัวเลขของหน่วยมาตรวัดหลังการอบแห้งเสร็จสิ้น ซึ่งนำความแตกต่าง ของหน่วยมาตรวัดดังกล่าวมาหารด้วยน้ำหนักของน้ำที่ระเหยไปในช่วงอบแห้งดังกล่าว จะทำให้ทราบถึงปริมาณของพลังงานที่ใช้ไปในระหว่างกระบวนการอบแห้ง โดยหาได้จากสมการดังนี้ (Nimmol et al., 2007; Wachiraphansakul and Devahastin, 2007)

$$SEC = \frac{E}{m_w} \quad (3-8)$$

เมื่อ

SEC คือ ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ, MJ/kg_{water}

E คือ ค่ากำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับอุปกรณ์ที่ใช้ไฟฟ้า, MJ

m_w คือ ปริมาณน้ำที่นำออกจากวัสดุ, kg เนื่องจากการอบแห้งมีการเคลื่อนที่เข้าและออกตลอดเวลาดังนั้นปริมาณน้ำออกจากวัสดุหาได้จากความแตกต่างระหว่างความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายของวัสดุที่นำมาอบแห้ง การหาปริมาณน้ำที่ออกจากวัสดุสามารถหาได้จาก

$$m_w = \dot{m}_a \Delta w t \quad (3-9)$$

เมื่อ

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

Δw คือ ผลต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นของอากาศร้อนทางด้านขาเข้าและขาออกของระบบอบแห้ง (kg_{water}/kg_{dry air}) ซึ่งสามารถหาได้จากผลต่างของความชื้นสัมบูรณ์ (Absolute humidity) ซึ่งคำนวณค่าได้จากอุณหภูมิกระเปาะเปียกและกระเปาะแห้งของอากาศทางด้านขาเข้าและขาออกของระบบอบแห้ง

t คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง

3.5 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของข้อมูลโดยวิธีการวิเคราะห์ตัวแปรไร้มิติ

ในการทดลองเพื่อหาผลเฉลยหรือปัญหาของของไหลนั้น ต้องใช้เวลาและมีค่าใช้จ่ายในการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ในการทดลองจึงได้มีการค้นหาวิธีการวิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์มิติ (Dimension Analysis) การวิเคราะห์มิติเป็นการนำตัวแปรเชิงเรขาคณิตที่เกี่ยวข้องกับการไหลหลาย ๆ ตัวแปรมาวิเคราะห์โดยการจัดกลุ่มให้อยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติ ซึ่งในการหาตัวแปรไร้มนั้นหาได้จากความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งหมดที่คาดว่าจะมีผลต่อการทดลองที่มีความเป็นไปได้ที่น้อยที่สุด โดยทั่วไปวิธีการวิเคราะห์มิติที่ได้รับการยอมรับมีอยู่ 2 วิธีคือ ทฤษฎีของราเลย์ (Raleigh's method) และ ทฤษฎีของพายบัคกิ้งแฮม (Buckingham Pi-theorem) ในการวิเคราะห์ตามทฤษฎีของพายบัคกิ้งแฮมเหมาะสมกับการใช้ในกรณีที่ตัวแปรมีมากกว่า 4 ตัวแปร สัญลักษณ์ π เป็นกลุ่มของตัวแปรไร้มิติ ค่า π อาจมีมากกว่า 1 กลุ่ม กำหนดได้จากค่าจริง จากความรู้ที่มีอยู่ หรือจากประสบการณ์ โดยวัตถุประสงค์ของการจัดกลุ่มตัวแปรต่าง ๆ เพื่อต้องการหาคำตอบหรืออธิบายอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากการไหลนั้น

ขั้นตอนการหาตัวแปรไรมิตีมี 6 ขั้นตอนสำคัญ ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดตัวแปรทั้งหมดที่คาดว่าจะเกี่ยวข้องหรือมีผลต่อการทดลอง

(กำหนดให้ n เป็นจำนวนของตัวแปรทั้งหมด)

ขั้นตอนที่ 2 เลือกมิติพื้นฐาน เช่น (M,L,T,t) หรือ (F,L,T,t)

ขั้นตอนที่ 3 ทำให้มิติของตัวแปรทุกตัวอยู่ในรูปของมิติพื้นฐาน

ขั้นตอนที่ 4 หาค่า m เพื่อหากลุ่มจำนวนของกลุ่มตัวแปรไรมิตีจาก $(n-m)$ โดยที่ m คือจำนวนตัวแปรอิสระที่น้อยที่สุด

ขั้นตอนที่ 5 จัดกลุ่มของ π ที่ได้เทียบสัมประสิทธิ์และแก้สมการจะได้กลุ่มตัวแปรไรมิตี

ขั้นตอนที่ 6 ตรวจสอบความไรมิตีของกลุ่มตัวแปรไรมิตีที่ได้

3.6 การทำนายค่าความขึ้นสุดท้ายของวัสดุ

การทำนายค่าความขึ้นสุดท้ายของวัสดุทำได้โดยการนำความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งหมดที่คาดว่าจะมีผลต่อการทดลองมาหาความสัมพันธ์ให้อยู่ในรูปของตัวแปรไรมิตี ดังหัวข้อที่ 2.7 แล้วนำความค่าคุณสมบัติต่างๆ ของอากาศมาประกอบแล้วทำการหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ด้วย โปรแกรม SPSS ซึ่งขั้นตอนในการทำนายค่าความขึ้นสุดท้ายของวัสดุมีขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนการทำนายค่าความขึ้นของวัสดุสรุปได้ 5 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 นำคุณสมบัติต่าง ๆ ของอากาศมาประกอบกับกลุ่มตัวแปรไรมิตีที่ได้จากหัวข้อที่ 2.7 และจัดรูปให้มีค่าสัมประสิทธิ์ของ A และ ค่ายกกำลังด้วยตัวแปรต่างๆ เช่น a,b,c,.....

ขั้นตอนที่ 2 หาความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปรไรมิตีด้วยโปรแกรม SPSS

ขั้นตอนที่ 3 วิเคราะห์และทำการตัดกลุ่มตัวแปรที่ไม่เกี่ยวข้องจากขั้นตอนที่ 3

ขั้นตอนที่ 4 แทนค่าสัมประสิทธิ์และค่ายกกำลังลงในกลุ่มตัวแปร

ขั้นตอนที่ 5 นำสมการการหาอัตรากระเหยน้าเชิงปริมาตรมาเท่ากับกลุ่มของตัวแปรไรมิตีแล้วทำการแก้สมการเพื่อหาค่าความขึ้นสุดท้าย

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

ในบทนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำ ซึ่งการหาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำได้จาก อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร นอกจากการหาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งด้วยความสัมพันธ์ที่ได้กล่าวมาแล้วยังได้ทำการหาอัตราการป้อนวัสดุที่เหมาะสม ค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ การประมาณค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะด้วย โดยแบ่งเป็นหัวข้อได้ดังนี้

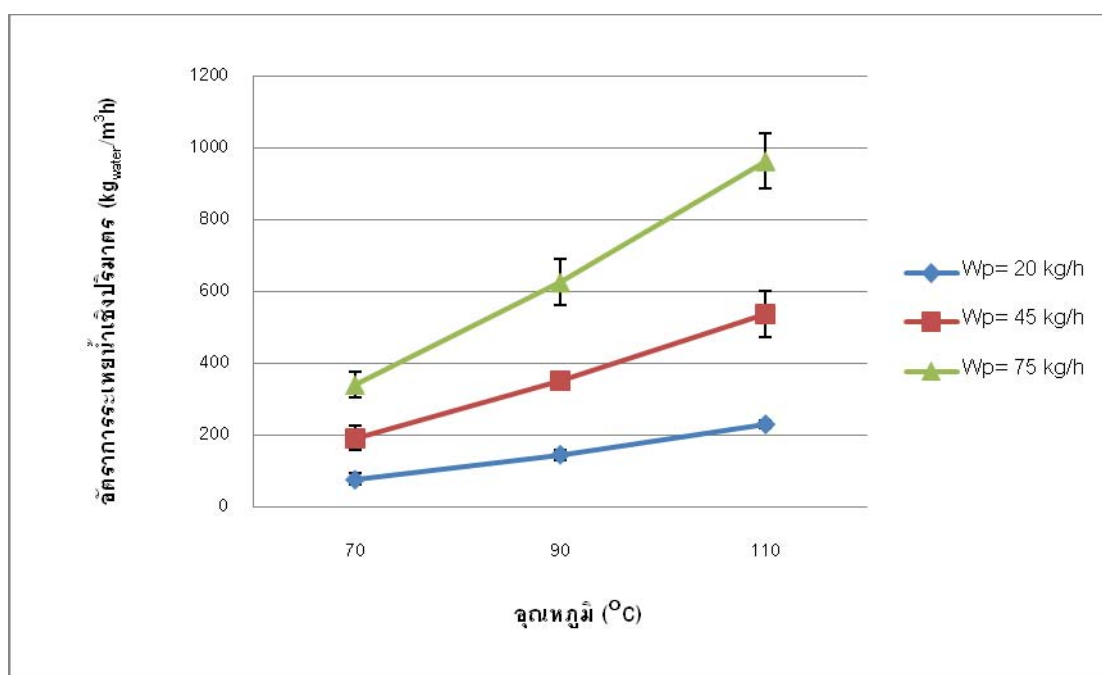
- 4.1 อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร
- 4.2 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร
- 4.3 ค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ
- 4.4 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ
- 4.5 ตัวแปรไร้มิติที่ได้จากการทดลอง
- 4.6 การทำนายความชื้นสุดท้ายของวัสดุ
- 4.7 การวิเคราะห์คุณภาพข้าว

4.1 อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร

ในการหาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำทำการวิเคราะห์ด้วยอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร ที่อุณหภูมิของอากาศขาเข้า 70°C - 110°C ความเร็วของอากาศขาเข้า 25 m/s ที่อัตราการป้อนวัสดุ 20, 45 และ 75 kg/h จากการทดลองพบว่า

4.1.1 อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอากาศขาเข้าที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในทุกเงื่อนไขการทดลอง ดังภาพประกอบ 11 เนื่องจากอุณหภูมิอากาศขาเข้าที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศร้อนกับอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งก็คือการทำให้อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศเพิ่มขึ้นทำให้อัตราการถ่ายเทมวลและความร้อนสูงขึ้น ส่งผลให้การระเหยน้ำที่ผิวของวัสดุเกิดได้มากขึ้น ผลการทดลองสอดคล้องกับผลการทดลองของ Sathapornprasath et al, (2007).

4.1.2 ผลของอัตราการป้อนวัสดุกับค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร พบว่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญตามอัตราการป้อนวัสดุที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรมากขึ้น อาจเป็นเพราะว่าเครื่องอบแห้งยังมีความสามารถที่จะดึงน้ำ หรือ ความชื้นออกจากวัสดุได้อีกแม้ว่าความชื้นจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากจำนวนของวัสดุที่เข้าสู่ห้องอบแห้งมากขึ้น ซึ่งความสามารถสูงสุดของเครื่องอบแห้งจะเท่ากับอัตราการป้อนวัสดุเข้าสู่เครื่องอบแห้งสูงสุดเท่าที่เครื่องอบแห้งจะระเหยความชื้นออกได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Kitron & Tamir, (1988). Tamir,(1994). และ Sathapornprasath et al, (2007).



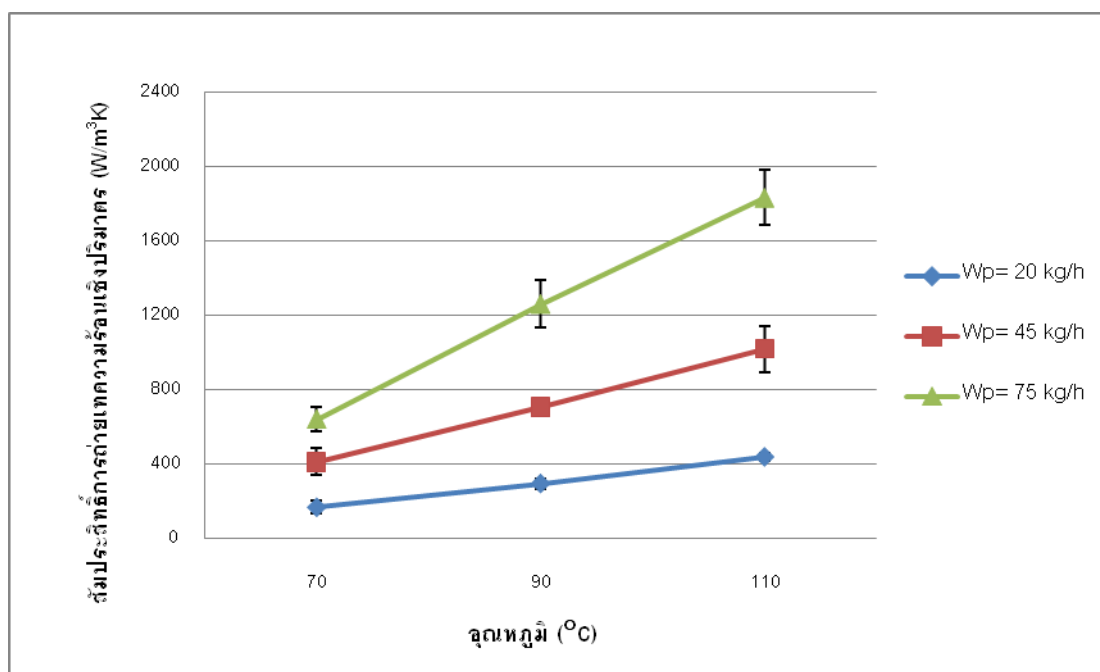
ภาพประกอบ 11 ผลของการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่างๆ ที่มีต่ออัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร

4.2 สมบัติการถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร

ในการหาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งกระแสน้ำ ซึ่งวิเคราะห์ด้วยค่าสมบัติการถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 70°C - 110°C ความเร็วของอากาศเข้า 25 m/s ที่อัตราการป้อนวัสดุ 20, 45 และ 75 kg/h ผลการทดลองวิเคราะห์จากอุณหภูมิอากาศเข้าและอัตราการป้อนพบว่า

4.2.1 ผลของอุณหภูมิของอากาศขาเข้าที่สูงขึ้นพบว่าที่อุณหภูมิของอากาศขาเข้าที่สูงขึ้นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้น ดังภาพประกอบ 12 เนื่องจากอุณหภูมิของอากาศที่สูงขึ้นทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิของอากาศร้อนกับอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุเพิ่มขึ้นทำให้อัตราการถ่ายเทมวลและความร้อนมีค่าสูงขึ้นส่งผลให้การระเหยน้ำเกิดได้มากขึ้น ค่าของอุณหภูมิเฉลี่ยแบบลอการิทึมมีค่าไม่แตกต่างกันมาก และค่าความร้อนแฝงของการระเหยมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิขาเข้าของอากาศสูงขึ้น เมื่อนำมาพิจารณาร่วมกันแล้วทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ

4.2.2 ผลของอัตราการป้อนวัสดุที่เพิ่มขึ้นที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร พบว่า เมื่ออัตราการป้อนวัสดุที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้นด้วย ดังภาพประกอบ 12 เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรแปรผันตรงกับปริมาณความชื้นที่ผิวของวัสดุที่ระเหยมากขึ้น ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Sathapornprasath et al, (2007)



ภาพประกอบ 12 ผลของการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร

ตาราง 1 การวิเคราะห์ทางสถิติของค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสัมประสิทธิ์และค่าการถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรที่ความเร็วลมของอากาศ 25 m/s, ระยะการชน 0.24 m, และเวลาการทดลอง 5 min

เงื่อนไขการทดลอง			$X_i - X_e$ (%d.b.)	ΔT_{lm} °C	N_v (kg _{water} /m ³ h)	h_v (W/m ³ K)
T (°C)	W_p (kg/h)	μ				
70	20	0.15	1.88	31.36	78.7±16.2 ^a	167.6±34.4 ^a
70	45	0.33	2.05	30.75	192.9±34.1 ^b	411.4±72.7 ^c
70	75	0.56	2.14	31.03	342.2±36.6 ^d	640.2±68.5 ^d
90	20	0.15	3.15	44.06	147.3±14.1 ^b	294.9±28.24 ^b
90	45	0.33	3.75	43.65	353.4±20.8 ^d	707.8±41.67 ^e
90	75	0.56	3.92	42.38	626.7±63.4 ^f	1260.0±28.07 ^g
110	20	0.15	5.51	58.53	230.9±11.8 ^c	436.6±22.3 ^c
110	45	0.33	5.72	58.38	538.7±65.0 ^e	1018.7±123.0 ^f
110	75	0.56	6.03	56.53	963.7±77.8 ^g	1832.5±147.9 ^h

หมายเหตุ ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันหมายความว่าค่าที่ระบุมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4.3 ค่าเฉลี่ยเวลาที่วัสดุอยู่ในระบบ

การวิเคราะห์ค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ วิเคราะห์ที่ความเร็วลมคงที่ 25 m/s อัตราการป้อน 20, 45 และ 75 kg/h พบว่าเมื่ออัตราการป้อนวัสดุเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณของวัสดุที่คงเหลืออยู่ในระบบมากขึ้นทำให้อัตราการถ่ายเทมวลและความร้อนสูงขึ้นด้วย จากตารางที่ 4.2 พบว่าเมื่ออัตราส่วนภาระเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบเพิ่มขึ้น (อัตราการไหลของอากาศคงที่) แต่จะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้นและต่อจากนั้นค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบจะลดลงเนื่องจากวัสดุเกิดการชนกันเองมากขึ้นทำให้พลังงานในการเคลื่อนที่ของวัสดุลดลงจนวัสดุเคลื่อนที่ออกไปจากห้องอบแห้ง ค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบมีค่าไม่เกิน 1 วินาที และมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% สอดคล้องกับผลการทดลองของ Kitron & Tamir (1988).

ตาราง .2 การวิเคราะห์ทางสถิติของค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ

เงื่อนไขการทดลอง				เวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ (s)
V (m/s)	W_p kg/h	L (m)	μ	
25	20	0.24	0.15	0.61 ± 0.21^a
25	45	0.24	0.33	0.72 ± 0.11^a
25	75	0.24	0.56	0.67 ± 0.09^a

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายความว่าค่าที่ระบุไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4.4 การประมาณค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

การประมาณค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการทดลองครั้งนี้ได้หาค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างกระแสลมความเร็วสูง (SEC_{blower}) และค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำให้กระแสมีความร้อน (SEC_{heater}) ที่เงื่อนไขการทำงานต่าง ๆ พบว่าผลของอุณหภูมิของอากาศขาเข้าที่สูงขึ้นทำให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้ในการสร้างกระแสลมความเร็วสูง (SEC_{blower}) ลดลงเนื่องจากอุณหภูมิของอากาศขาเข้าที่สูงขึ้นทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศร้อนกับอุณหภูมิที่ผิววัสดุเกิดขึ้นมากทำให้การระเหยน้ำเพิ่มขึ้นด้วย และเนื่องจากการใช้พลังงานไฟฟ้าในการขับเคลื่อนอุปกรณ์และเวลาที่ใช้ในการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกันมากจึงทำให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลงเมื่ออุณหภูมิของอากาศขาเข้าสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าผลอัตราการป้อนวัสดุที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้ในการสร้างกระแสลมความเร็วสูง (SEC_{blower}) ลดลงเนื่องจากวัสดุที่อยู่ในระบบมากขึ้นจึงทำให้อัตราการระเหยน้ำเกิดได้มากขึ้นส่งผลให้ (SEC_{blower}) มีค่าลดลง ส่วนค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำให้กระแสมีความร้อน (SEC_{heater}) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิขาเข้าของอากาศสูงขึ้น เนื่องจากเครื่องกำเนิดความร้อนต้องใช้พลังงานในการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศร้อนให้สูงขึ้นด้วย ผลของอัตราการป้อนวัสดุที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานในการใช้ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดความร้อน (SEC_{heater}) ลดลงเนื่องจากวัสดุที่อยู่ในระบบมากขึ้นจึงทำให้อัตราการระเหยน้ำเกิดได้มากขึ้นส่งผลให้ (SEC_{heater}) มีค่าลดลงด้วย จากตาราง 4.3 แสดงให้เห็นว่าค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของพัดลมความดันสูง (SEC_{blower}) มีค่า

มากกว่าค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องกำเนิดความร้อน (SEC_{heater}) เฉพาะที่อุณหภูมิ 70 °C และ 90 °C เนื่องจากค่าการใช้ไฟฟ้าของพัดลมความดันสูง (SEC_{blower}) มีค่ามากกว่าค่าการใช้ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดความร้อน (SEC_{heater})

ตาราง 3 ผลการทดลองหาค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

เงื่อนไขการทดลอง					E_{blower} (kWh)	E_{heater} (kWh)	SEC_{blower} (MJ/kg _{water})	SEC_{heater} (MJ/kg _{water})	$SEC_{blower+heater}$ (MJ/kg _{water})
T (°C)	W_p (kg/h)	V (m/s)	μ	t (min)					
70	20	25	0.15	5	0.04	0.01	1.15	0.29	1.43
70	45	25	0.33	5	0.04	0.01	0.98	0.24	1.22
70	75	25	0.56	5	0.04	0.01	1.06	0.27	1.33
90	20	25	0.15	5	0.04	0.03	0.84	0.63	1.47
90	45	25	0.33	5	0.04	0.03	0.74	0.55	1.29
90	75	25	0.56	5	0.04	0.03	0.66	0.49	1.15
110	20	25	0.15	5	0.04	0.05	0.65	0.81	1.46
110	45	25	0.33	5	0.04	0.05	0.65	0.81	1.46
110	75	25	0.56	5	0.04	0.05	0.57	0.71	1.28

4.5 ตัวแปรไร้มิติที่ได้จากการทดลอง

ความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

กำหนดตัวแปรอิสระที่คาดว่าจะมีผลต่อการระบายน้ำเชิงปริมาตร (N_v) ของเครื่องอบแห้ง

แบบกระแสน

$$N_v = f(k_a, c_p, \rho_a, \mu_a, d, L, V_r, U_a, d_p, \rho_p, W_p, g, \Delta T_{lm})$$

หาความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระให้อยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติตามทฤษฎีของ Buckingham

Pi, Dalby, (2001)

$$\frac{N_v c_p d_p^2}{k_a} = A \left(\frac{L}{d_p} \right)^a \left(\frac{V_r}{d_p^3} \right)^b \left(\frac{U_a c_p \rho_a d_p}{k_a} \right)^c \left(\frac{\mu_a c_p}{k_a} \right)^d \left(\frac{d}{d_p} \right)^e \left(\frac{\rho_p}{\rho_a} \right)^f \left(\frac{W_p c_p}{k_a d_p} \right)^g \left(\frac{d_p^3 g c_p^2 \rho_a^2}{k_a^2} \right)^h \left(\frac{\Delta T_{lm} c_p^3 \rho_a^2 d_p^2}{k_a^2} \right)^i \quad (4.1)$$

เมื่อ A และตัวอักษรที่ยกกำลัง a ถึง i คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากผลการทดลอง และคุณสมบัติของอากาศ จากนั้นจึงนำความสัมพันธ์ดังกล่าวมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ด้วยโปรแกรม SPSS

$$\frac{N_v c_p d_p^2}{k_a} = 10^{-16.273} \left(\frac{\mu_a c_p}{k_a} \right)^{-21.695} \left(\frac{W_p c_p}{k_a d_p} \right)^{1.131} \left(\frac{d_p^3 g c_p^2 \rho_a^2}{k_a^2} \right)^{-0.950} \left(\frac{\Delta T_{lm} c_p^3 \rho_a^2 d_p^2}{k_a^2} \right)^{0.887} \quad (4.2)$$

4.6 การทำนายความชื้นสุดท้ายของวัสดุ

การทำนายความชื้นสุดท้ายของวัสดุทำได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระที่อยู่ในรูป
ไรมิตีจากสมการที่ (4.2) และค่าคุณสมบัติของอากาศมาประกอบ

$$\frac{W_p(X_i - X_e)}{V_r} = 10^{-16.273} \left(\frac{\mu c_p}{k_a} \right)^{-21.695} \left(\frac{W_p c_p}{k_a d_p} \right)^{1.131} \left(\frac{d_p^3 g c_p^2 \rho_a^2}{k_a^2} \right)^{-0.950} \left(\frac{\Delta T_{lm} c_p^3 \rho_a^2 d_p^2}{k_a^2} \right)^{0.887} \left(\frac{k_a}{c_p d_p^2} \right) \quad (4.3)$$

ตาราง 4 เปรียบเทียบค่าความชื้นสุดท้ายที่ได้จากการทดลองกับการทำนายด้วยความสัมพันธ์ของ
ตัวแปรไรมิตี

เงื่อนไขการทดลอง					ความชื้นของวัสดุ (kg/kg _(%d.b.))	
T (°C)	W _p (kg/s)	V (m/s)	μ	L (m)	Experimental value	Predicted value
70	20	25	0.15	0.24	0.2740	0.2720
70	45	25	0.33	0.24	0.2723	0.2700
70	75	25	0.56	0.24	0.2714	0.2680
90	20	25	0.15	0.24	0.2577	0.2540
90	45	25	0.33	0.24	0.2553	0.2530
90	75	25	0.56	0.24	0.2536	0.2510
110	20	25	0.15	0.24	0.2377	0.2350
110	45	25	0.33	0.24	0.2356	0.2320
110	75	25	0.56	0.24	0.2325	0.2300

4.7 วิเคราะห์คุณภาพข้าว

4.7.1 คุณภาพการสี โดยประเมินจากปริมาณข้าวเต็มเมล็ดและข้าวตัน พบว่าที่อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าห้องอบแห้งเพิ่มขึ้น ที่ 70-110 °C และอัตราการป้อนวัสดุที่เพิ่มขึ้นที่ 20 - 75 kg/h ปริมาณข้าวเต็มเมล็ดและข้าวตันมีความแตกต่างกับข้าวเปลือกที่ลดความชื้นด้วยลมที่อุณหภูมิห้องสูงสุดที่ 17% โดยก่อนการทดลองมีปริมาณข้าวเต็มเมล็ดและข้าวตันเท่ากับ 51.80% ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบมีค่าไม่แตกต่างกันในขณะที่อุณหภูมิขาเข้าของอากาศสูงขึ้นจึงส่งผลให้ปริมาณข้าวเต็มเมล็ดและข้าวตัน ลดลง สอดคล้องกับผลการทดลองของ จินดา (2541).

4.7.2 ความขาวของข้าวสาร Whiteness โดยที่ค่าความขาวมาตรฐานมีค่า 86.30 จากการนำข้าวสารทั้งก่อนและหลังการทดลองมาวิเคราะห์ความขาว พบว่าที่อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าห้องอบแห้งอยู่ระหว่าง 70-110 °C และอัตราการป้อนวัสดุที่ 20 - 75 kg/h โดยความขาวของข้าวสารก่อนการทดลอง 48.10 พบว่าความขาวของข้าวสารหลังการทดลอง มีค่าแตกต่างกับข้าวเปลือกที่ลดความชื้นด้วยลมที่อุณหภูมิห้องไม่เกิน 9% ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบมีค่าไม่แตกต่างกันและเวลาในการเก็บรักษาข้าวก่อนการลดความชื้นด้วยเครื่องอบแห้งแบบกระแสนเท่กันความขาวของข้าวจึงไม่แตกต่างกันสอดคล้องกับผลการทดลองของ กัญญา และคณะ. (2549).

ตาราง 5 การวิเคราะห์คุณภาพข้าว

เงื่อนไขการทดลอง		ความชื้นของวัสดุ %d.b.		การวิเคราะห์คุณภาพข้าว	
T (°C)	W _p (kg/h)	Initial value	Final value	Whole kernels and Head rice (%)	Whiteness (standard value 86.3)
70	20	29.28±0.63 ^a	27.40±0.39 ^a	34.56	45.90
70	45	29.28±0.63 ^a	27.23±0.36 ^a	35.28	45.30
70	75	29.28±0.63 ^a	27.14±0.23 ^a	36.64	43.90
90	20	29.28±0.63 ^a	25.77±0.34 ^b	35.40	43.50
90	45	29.28±0.63 ^a	25.53±0.22 ^{bc}	34.16	45.00

ตาราง 5 (ต่อ)

เงื่อนไขการทดลอง		ความชื้นของวัสดุ %d.b.		การวิเคราะห์คุณภาพข้าว	
T (°C)	W _p (kg/h)	Initial value	Final value	Whole kernels and Head rice (%)	Whiteness (standard value 86.30)
90	75	29.28±0.63 ^a	25.36±0.40 ^c	35.20	45.50
110	20	29.28±0.63 ^a	23.77±0.28 ^d	36.88	46.10
110	45	29.28±0.63 ^a	23.56±0.69 ^{de}	34.88	45.20
110	75	29.28±0.63 ^a	23.25±0.49 ^e	36.08	45.80

หมายเหตุ ค่าความขาว 86.30 เป็นค่าความขาวมาตรฐานของข้าวสารอ้างอิงจากห้องปฏิบัติการของศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำสำหรับวัสดุทางการเกษตร ศึกษาจากผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง ได้แก่ อุณหภูมิของอากาศขาเข้า ความเร็วของอากาศขาเข้า อัตราการป้อนโดยใช้ข้าวเปลือกพันธุ์ปทุมธานี 1 เป็นวัสดุทดลอง หาค่าเฉลี่ยเวลาที่วัสดุอยู่ในระบบ และยังได้หาค่าการประมาณความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ซึ่งสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร พบว่าที่อุณหภูมิของอากาศขาเข้าสูงขึ้นทำให้อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้นในทุกเงื่อนไขการทดลอง เนื่องจากเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิกระเปาะเปียกเพิ่มขึ้นทำให้การถ่ายเทมวลและความร้อนของอากาศร้อนกับความร้อนที่ผิวของวัสดุเกิดได้มากขึ้นด้วย ส่วนผลของอัตราการป้อนที่มีต่อการระเหยน้ำเชิงปริมาตรพบว่า เมื่ออัตราการป้อนเพิ่มขึ้นในทุกเงื่อนไขการทดลอง อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรยังเพิ่มขึ้นด้วย แสดงให้เห็นว่าเครื่องอบแห้งกระแสน้ำมีความสามารถในการระเหยน้ำออกจากวัสดุได้อีกแม้ว่าความชื้นของวัสดุจะเพิ่มขึ้น

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร พบว่าเมื่ออุณหภูมิของอากาศขาเข้าสูงขึ้นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิของอากาศที่สูงขึ้นทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิของอากาศร้อนกับอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุเพิ่มขึ้นทำให้การระเหยน้ำเกิดได้มากขึ้นด้วย ที่ความเร็วของอากาศคงที่ในส่วนของอัตราการป้อนวัสดุพบว่าอัตราการป้อนวัสดุที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรแปรผันตามการการระเหยน้ำที่ผิวของวัสดุที่ระเหยออกมากขึ้น

ค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ พบว่าความเร็วของอากาศคงที่ และอัตราการป้อนวัสดุเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณของวัสดุที่คงเหลืออยู่ในระบบมากขึ้นทำให้อัตราการถ่ายเทมวลและความร้อนสูงขึ้นด้วย ส่วนค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยและต่อจากนั้นค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบจะลดลงเนื่องจากวัสดุเกิดการชนกันเองมากขึ้นทำให้พลังงานในการเคลื่อนที่ของวัสดุลดลงค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบอยู่ในช่วง 1 วินาที ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95%

ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะพบว่า ที่ความเร็วลมของอากาศคงที่ ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของ (SEC_{blower}) มีค่าลดลงเนื่องจากวัสดุที่อยู่ในระบบมากขึ้นจึงทำให้อัตราการระเหยน้ำเกิดได้มากขึ้นส่งผลให้ (SEC_{blower}) มีค่าลดลง ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของพัดลมความดันสูง (SEC_{blower}) มีค่ามากกว่าค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องกำเนิดความร้อน (SEC_{heater}) เฉพาะที่อุณหภูมิ 70 °C และ 90 °C เนื่องจากค่าการใช้ไฟฟ้าของพัดลมความดันสูง (SEC_{blower}) มีค่ามากกว่าค่าการใช้ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดความร้อน (SEC_{heater}) ซึ่งค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของ ($SEC_{blower/heater}$) มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิและอัตราการป้อนวัสดุเพิ่มขึ้นโดยสัดส่วนการใช้พลังงานเฉลี่ยของพัดลมความดันสูง (SEC_{blower}) และเครื่องกำเนิดความร้อน (SEC_{heater}) มีค่าประมาณ 40% และ 60% ของพลังงานเฉลี่ยทั้งหมด มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสูงสุดอยู่ที่ 1.47 MJ/kg_{water}

สมการความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระให้อยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติ เพื่อใช้เป็นตัวแทนของการทดลองด้วยเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำวนและสภาวะการทดลองนี้เท่านั้น

$$\frac{N_v c_p d_p^2}{k_a} = 10^{-16.276} \left(\frac{\mu_a c_p}{k_a} \right)^{-21.695} \left(\frac{W_p c_p}{k_a d_p} \right)^{1.131} \left(\frac{d_p^3 g c_p^2 \rho_a^2}{k_a^2} \right)^{-0.950} \left(\frac{\Delta T_{lm} c_p^3 \rho_a^2 d_p^2}{k_a^2} \right)^{0.887} \quad (5.1)$$

การทำนายค่าความชื้นสุดท้ายเพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองพบว่าค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยสมการความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้มิติพบว่ามีค่าความแตกต่างสูงสุดที่ 1.53%

การวิเคราะห์คุณภาพข้าวสารโดยคุณภาพการสีประเมินจากปริมาณข้าวเต็มเมล็ดและข้าวตัน พบว่าปริมาณข้าวเต็มเมล็ดและข้าวตันมีความแตกต่างกับข้าวเปลือกที่ลดความชื้นด้วยลมที่อุณหภูมิห้องไม่เกิน 17% ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบมีค่าไม่แตกต่างกันในขณะที่อุณหภูมิขาเข้าของอากาศสูงขึ้นจึงส่งผลให้ปริมาณข้าวเต็มเมล็ดและข้าวตันลดลง ในส่วนของความขาวของข้าวสารพบว่าพบว่าความขาวของข้าว มีค่าแตกต่างกับข้าวเปลือกที่ลดความชื้นด้วย

ลมที่อุณหภูมิห้องไม่เกิน 9% ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบมีค่าไม่แตกต่างกันและระยะเวลาในการเก็บรักษาข้าวก่อนการลดความชื้นเท่ากัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

พบว่าในการทดลองเพื่อหาอัตราการป้อนวัสดุที่เหมาะสม เครื่องป้อนเกิดการหยุดเป็นบางครั้ง เนื่องจากมอเตอร์ไฟฟ้ามีกำลังขับเคลื่อนน้อยเมื่อเปิดให้วัสดุตกลงบนสายพานลำเลียงทำให้เครื่องไม่มีกำลังพอที่จะหาวัสดุไปได้จึงควรปรับปรุงให้มอเตอร์ไฟฟ้ามีกำลังขับเคลื่อนมากขึ้นและควรกำหนดขนาดของช่องเปิดถึงป้อนวัสดุด้วย

ในการทำการทดลองควรทำการเปิดกระแสลมให้คงที่ก่อนแล้วจึงเปิดเครื่องกำเนิดความร้อน เนื่องจากการเปิดเครื่องกำเนิดความร้อนก่อนการเปิดกระแสลมทำให้ความร้อนขึ้นสูงมากและทำให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อระหว่างเครื่องกำเนิดความร้อนกับเครื่องควบคุมอุณหภูมิ

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- กิตติ สถาพรประสาธน์. (2552). การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบกระแสน. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 5. พิษณุโลก: มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- กัญญา เชื้อพันธุ์ และคณะ. (2549). คุณภาพข้าวปทุมธานี 1 เมื่อเก็บรักษาในสภาพข้าวเปลือกและข้าวสาร. สืบค้นเมื่อ 8 มีนาคม 2553,
จาก http://pikul.lib.ku.ac.th/FullText_Rice3/RICO20091C.pdf.
- จารุวรรณ บางแว และคณะ. (2552). ทำไม เมล็ดข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 เหลืองเร็ว. สืบค้นเมื่อ 8 มีนาคม 2553,
จาก http://as.doa.go.th/pprdo/index.php?option=com_content&view=article&id=14:--1-&catid=3:2009-06-25-03-31-26&Itemid=4.
- ขวัญชัย จ้อยเจริญ. (2551). การปรับปรุงและประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน. ปรินญาณพนธ์ วศ.ด. (เทคโนโลยีพลังงาน). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. ถ่ายเอกสาร.
- ชลธิชา และคณะ. (2549). การออกแบบและสร้างเครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบไหลต่อเนื่อง. ปรินญาณพนธ์ วศ.บ. (วิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูป). ปทุมธานี: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. ถ่ายเอกสาร.
- ชอบ ลายทอง. (2530). การศึกษาคุณสมบัติเชิงฟิสิกส์ความร้อนของข้าวเปลือก. ปรินญาณพนธ์ วศ.ม. (เทคโนโลยีพลังงาน). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. ถ่ายเอกสาร.
- ทามอน ฮาจิเม และคณะ. (2548). เทคโนโลยีอบแห้งในอุตสาหกรรม. แปลโดย วิรุฬห์ ตัณฑะพานิชกุล และคณะ. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น.
- สมชาติ ไสภณรณฤทธิ์. (2540). การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- Benjamin. (1997). *Building Technology Mechanical & Electrical System. Second Edition.* New York: John Wiley & Sons.
- Elperin. (1994). Heat and mass transfer in opposing currents. In *Journal of Engineering Physics*. Quoted by Tamir, V.6. pp. 62-68.
- Darby, R. (2001). *Chemical Engineering Fluid Mechanics*. New York: Marcel Dekker.

- Fox, R.W. & McDonald, A.T. (1998). *Introduction of Fluid Mechanics*. New York: John Wiley & Sons.
- Hansen, A.G. (1967). *Fluid Mechanics*. New York : John Wiley & Sons.
- 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.
- Huai, 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.
- Juliano, J.B. (1980). *Morphology of Oryza sativa Linnaeus*. Philipp Agric.
- Kitron, Y. & Tamir, A. (1990). Characteristics and scale-up of coaxial impinging stream gas-solid contractors. In *Drying Technology*. V.8. pp. 781-810.
- Kitron, Y. & Tamir, A. (1988). Performance of a coaxial gas-solid two-impinging-stream (TIS) reactor hydrodynamics, residence time distribution, and drying heat transfer: In *Industrial & Engineering Chemistry Research*. V.27. pp. 1760-1767.
- Kudra, T. & Mujumdar, A.S. (1989). Impinging stream dryers for particles and pastes. In *Drying Technology*. V.7. pp. 219-266.
- Nimmol, C. et al. (2007). Drying and heat transfer behavior of banana undergoing combined low-pressure superheated stream and far-infrared radiation drying. In *Applied Thermal Engineering*. V.27. pp. 2483-2494.
- Sathapornprasath, K. Devahastin, S. & Soponronnarit, S. (2007). Performance Evaluation of an Impinging Stream Dryer for Particulate Materials. In *Drying Technology*. V.25. pp. 1121-1128.
- Song, M. Steiff, A. & Weinspach, P.M. (1999). Direct-contact heat transfer with change of phase: A population balance model. In *Chemical Engineering Science*. V.54. pp. 3861-3871.
- Tamir, A. (1994). *Impinging-stream reactor*. Elsevier: Amsterdam.
- Tamir, A. (1989). Process and phenomena in impinging-stream reactors. In *Chemical Engineering Progress*. V.85. pp. 53-61.

- Wachiraphansakul, S. & Devahasatin, S. (2007). Drying kinetics and quality of okara dried in a jet spouted bed of sorbent particles. In *LWT-Food Science and Technology*. V.40. pp. 207-219.
- Xiao, Y.L. & Eckehard, S. (2006). Mean resident time and hold-up of solids in rotary kilns. In *Chemical Engineering Science*. V.61. pp. 5276-5181.
- Xu, D. & Zhu, W. (2002). Hydrokinetic characteristic analysis of a new type of impinging stream dryer. In *Proceedings of the 13th International drying Symposium, Beijing, P.R. China*. pp. 856-860.
- Yao, B; Berman, Y; & Tamir, A. (1995). Evaporative cooling of air in impinging streams. In *AIChE Journal*. V.41. pp. 1667-1675.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การคำนวณระบบอบแห้งแบบกระแสน

การคำนวณระบบอบแห้งแบบกระแสน

อัตราการไหลเชิงปริมาตรและอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแต่ละด้านของท่อทางเข้า (เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของท่อทางเข้าเท่ากับ 1.5 นิ้ว) สามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$v_a = \text{พื้นที่หน้าตัด (m}^2\text{)} \times \text{ความเร็วสูงสุด (m/s)}$$

$$= \frac{\pi}{4} \times 0.04^2 \times 30$$

$$= 0.038 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$= 137 \text{ CMH}$$

$$= 80 \text{ CFM}$$

$$m_a = \text{อัตราการไหลเชิงปริมาตร (m}^3/\text{s)} \times \text{ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m}^3\text{)}$$

$$= 0.038 \times 1.1614$$

$$= 0.044 \text{ kg/s}$$

การคำนวณภาระความร้อน

ภาระความร้อนสูงสุดของเครื่องทำความร้อนแต่ละด้านสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้ โดยสมมุติอากาศขาเข้าเท่ากับ 30°C และอุณหภูมิอากาศสูงสุดที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เท่ากับ 120°C

$$Q = m_a \times C_p \times \Delta T$$

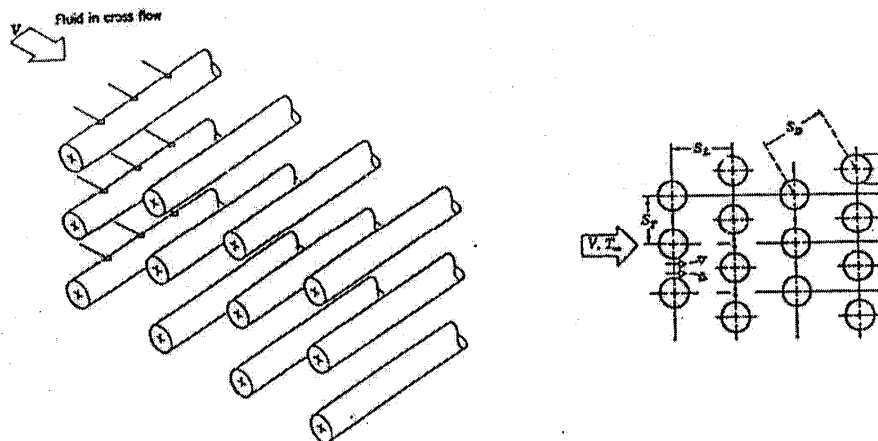
$$= 0.044 \text{ (kg/s)} \times 1.03 \text{ (kJ/kg)} \times (393-303) \text{ K}$$

$$= 4.07 \text{ kW}$$

$$= 4.07 \times \text{safety factor } 1.5 = 6 \text{ kW}$$

ความดันสูญเสียของกล่องเครื่องทำความร้อน

การคำนวณหาความดันสูญเสียของกล่องเครื่องทำความร้อน ซึ่งแสดงตำแหน่งการวางแท่งความร้อนไฟฟ้าตามภาพประกอบ ก.1



ภาพประกอบ 1 ตำแหน่งการวางแท่งความร้อนไฟฟ้า

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

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

เมื่อ

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของแท่งความร้อน (0.05 m)

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

m_f คือ ความเร็วของอากาศเฉลี่ย (m/s)

S_T คือ ระยะห่างระหว่างแท่งความร้อนในแนวตั้ง (m)

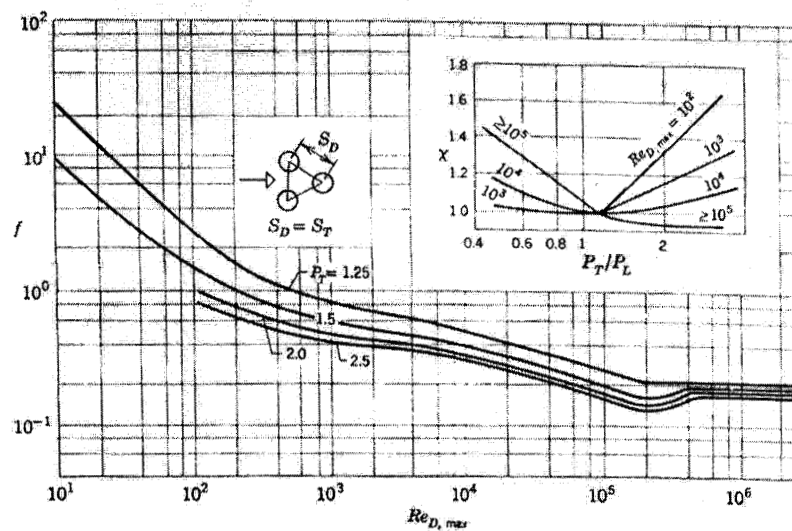
S_L คือ ระยะห่างระหว่างแท่งความร้อนในแนวนอน (m)

$$S_T/D = 3.0$$

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

$$S_L/D = 2.0$$

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



ภาพประกอบ 2 แฟกเตอร์ความเสียดทาน (f) และค่าแก้ไข (χ), Incropera and Dewitt (2002)

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

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

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

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

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

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

$$= 1982$$

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

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

จากข้อมูลของ Re_{max} และค่าที่ได้จากกราฟใน ก.2 พบว่าจะได้ $(f) = 0.6$ และค่าแก้ไข

$$(\chi) = 1.3$$

ความดันสูญเสียของกล่องเครื่องทำความร้อน (ΔP) มีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} \Delta P &= N_L \chi \left[\frac{\rho_a V_{max}^2}{2} \right] f \\ &= 6 \times 1.3 \times \left[\frac{1.1614 \times 0.63^2}{2} \right] \times 0.6 \\ &= 1.1 \quad \text{Pa} \end{aligned}$$

ความดันสูญเสียของท่อและอุปกรณ์

ท่อสแตนเลสขนาด 1.5 นิ้ว

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

แฟกเตอร์ความหยาบของท่อสแตนเลส (Roughness factor of stainless steel pipe)

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

$$\begin{aligned} \frac{\varepsilon}{D} &= \frac{0.045}{40} \\ &= 0.00113 \end{aligned}$$

จาก Moody diagram

$$\frac{\varepsilon}{D} = 0.00113$$

$$\text{Re} = 75,497$$

แฟกเตอร์ความเสียหาย

$$f = 0.021$$

$$\begin{aligned}\Delta P &= f \times \left(\frac{L}{D}\right) \times \left(\frac{v}{1.29}\right)^2 \\ &= 0.021 \times \left(\frac{5}{0.04}\right) \times \left(\frac{30}{1.29}\right)^2 \\ &= 1419.7 \text{ Pa}\end{aligned}$$

ข้องอ 90° ขนาด 3 นิ้ว

$$\begin{aligned}\Delta P &= K \times \left(\frac{v}{1.29}\right)^2 \\ &= 0.31 \times \left(\frac{17}{1.29}\right)^2 \times 1 \\ &= 53.8 \text{ Pa}\end{aligned}$$

สามทางขนาด 3 นิ้ว

$$\begin{aligned}\Delta P &= K \times \left(\frac{v}{1.29}\right)^2 \\ &= 0.7 \times \left(\frac{17}{1.29}\right)^2 \times 1 \\ &= 121.6 \text{ Pa}\end{aligned}$$

โกลบวาล์ว ขนาด 1.5 นิ้ว

$$\begin{aligned}\Delta P &= K \times \left(\frac{v}{1.29} \right)^2 \\ &= 0.14 \times \left(\frac{17}{1.29} \right)^2 \times 1 \\ &= 75.7 \text{ Pa}\end{aligned}$$

ความดันสูญเสียของท่อและอุปกรณ์

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

ความดันสูญเสียของห้องอบแห้งกระแสน (Tamir ,1994)

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

การคำนวณหาขนาดและความดันลดลงของเครื่องดักฝุ่น (Cyclone)

ข้อมูลของขนาดและสัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ ของเครื่องดักฝุ่น ได้แก่

$$\frac{A}{D} = 0.5$$

$$\frac{W}{D} = 0.2$$

$$\frac{O}{D} = 0.5$$

$$\frac{S}{D} = 0.5$$

$$\frac{E}{D} = 1.5$$

$$\frac{H}{D} = 4.0$$

$$\frac{B}{D} = 0.375$$

$$C = 551.3$$

$$\Delta H = 5.4$$

$$\frac{V}{D^2} = 1.53$$



$$D = \text{diameter , m}$$

$$A = \text{cyclone inlet height , m}$$

$$W = \text{cyclone inlet width , m}$$

$$O = \text{cyclone outlet diameter , m}$$

$$S = \text{cyclone outlet length , m}$$

$$E = \text{cyclone cylinder height , m}$$

$$H = \text{height , m}$$

$$B = \text{cyclone inlet height , m}$$

$$\Delta H = \text{velocity head change}$$

$$V = \text{volume flow rate , m}^3/\text{s}$$

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

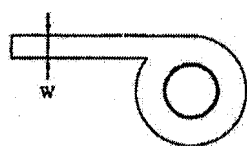
$$\frac{V}{D^2} = \frac{0.076}{D^2} = 1.53$$

$$\therefore D = 0.225 \text{ m}$$

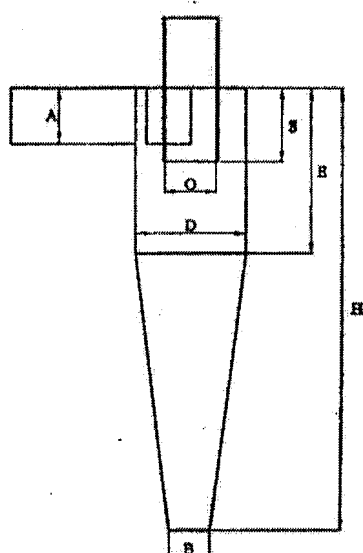
เลือกใช้ขนาด D เท่ากับ 0.25 m และสามารถคำนวณหาสัดส่วนองค์ประกอบต่างๆของเครื่องดักฝุ่นได้ ดังตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบทางกายภาพของเครื่องดักฝุ่น ดังภาพที่ 3

ตาราง 1 แสดงสัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ ของเครื่องดักฝุ่น

D	A	W	O	S	E	H	B
0.25	0.125	0.05	0.125	0.125	0.375	1.0	0.094



Top view



Front view

ภาพประกอบ ก.3 แสดงองค์ประกอบทางกายภาพของเครื่องดักฝุ่น

ความเร็วที่ทางเข้าเครื่องดักฝุ่นสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{อัตราการไหลเชิงปริมาตร} = \text{พ.ท.หน้าตัดของทางเข้า} \times \text{ความเร็วที่ทางเข้าเครื่องดักฝุ่น}$$

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

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

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

การคำนวณหาความดันลดในเครื่องดักฝุ่นสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

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

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

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

ความดันสูญเสียรวมทั้งหมดของระบบอบแห้งกระแสน

$$\text{ความดันสูญเสียรวม} = \text{กล่องเครื่องทำความร้อน} + \text{ท่อและอุปกรณ์} + \text{ห้อง}$$

$$\text{อบแห้งแบบกระแสน} + \text{เครื่องดักฝุ่น}$$

$$= 1.1 + 1670.8 + 522.63 + 463.67$$

$$= 2658.2 \text{ Pa}$$

การคำนวณหาปริมาตรห้องอบแห้ง

เมื่อ $V_r = V_{\text{ห้องอบแห้ง}} + V_{\text{ของท่อลำเลียงทั้งสองข้าง}}$

$$V = A \times L$$

ห้องอบแห้ง $V = \frac{\pi}{4} \times d^2 \times L$

$$= \frac{\pi}{4} \times 0.0762^2 \times 0.24$$

$$= 1.094 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

ท่อลำเลียง $V = \frac{\pi}{4} \times d^2 \times L$

$$= \frac{\pi}{4} \times 0.0381^2 \times (1.6 \times 2)$$

$$= 3.648 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

ปริมาตรรวมของห้องอบแห้ง

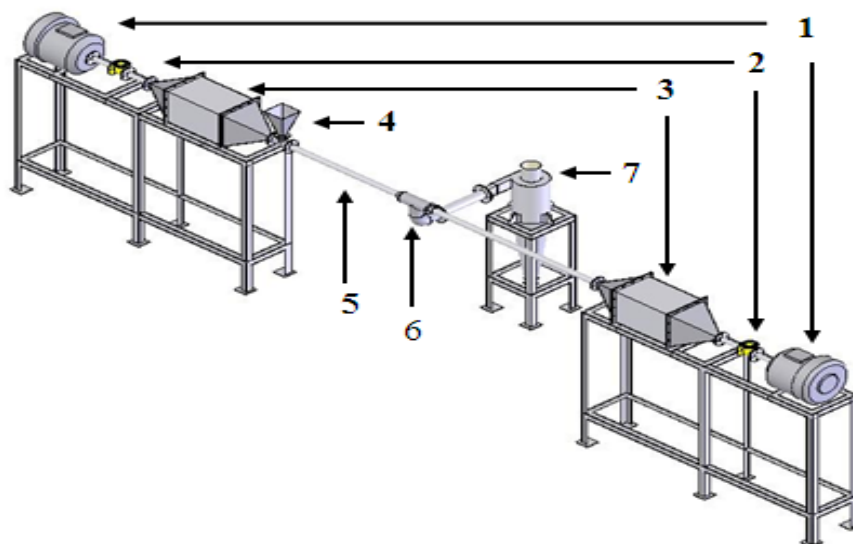
$$V_r = 1.094 \times 10^{-3} + 3.648 \times 10^{-3}$$

$$= 4.742 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

ภาคผนวก ข

แบบของเครื่องอบแห้งและอุปกรณ์ต่างๆ

แบบของเครื่องอบแห้งและอุปกรณ์ต่างๆ



ภาพประกอบ 1 แบบจำลองเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำสำหรับวัสดุทางการเกษตร

อุปกรณ์ต่างๆ

1. พัดลมความดันสูง (High Pressure Blower)
2. วาล์วปรับอัตราการไหล (Globe Valve)
3. เครื่องทำความร้อน (Heater)
4. ตัวรับวัตถุดิบเข้าห้องอบแห้ง (Hopper)
5. ท่อลำเลียงวัสดุ (Pipe)
6. ห้องอบแห้ง (Drying Chamber)
7. เครื่องดักฝุ่น (Cyclone)
8. เครื่องป้อนวัตถุดิบ (Feeder)



ภาพประกอบ 2 เครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำสำหรับวัสดุทางการเกษตร



ภาพประกอบ 3 พัดลมความดันสูง (High Pressure Blower)



ภาพประกอบ 4 วาล์วปรับอัตราการไหล (Globe valve)



ภาพประกอบ 5 เครื่องกำเนิดความร้อนชนิดแท่งไฟฟ้า (Heater)



ภาพประกอบ 6 ห้องอบแห้ง (Drying chamber)



ภาพประกอบ 7 เครื่องดักฝุ่น (Cyclone)



ภาพประกอบ 8 เครื่องป้อนวัตถุดิบ (Feeder)



ภาพประกอบ 9 มิเตอร์ไฟฟ้า



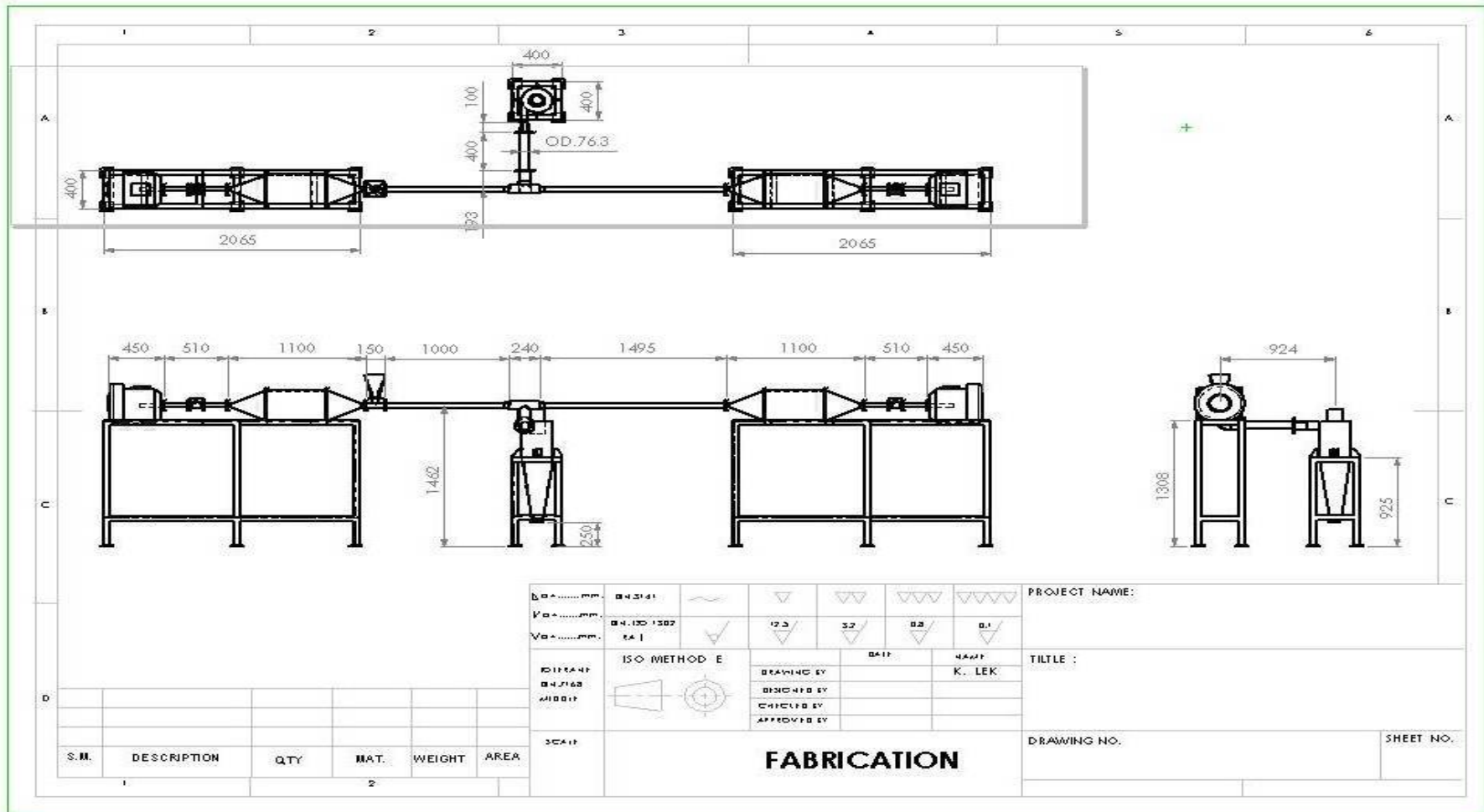
ภาพประกอบ 10 เครื่องชั่งน้ำหนัก



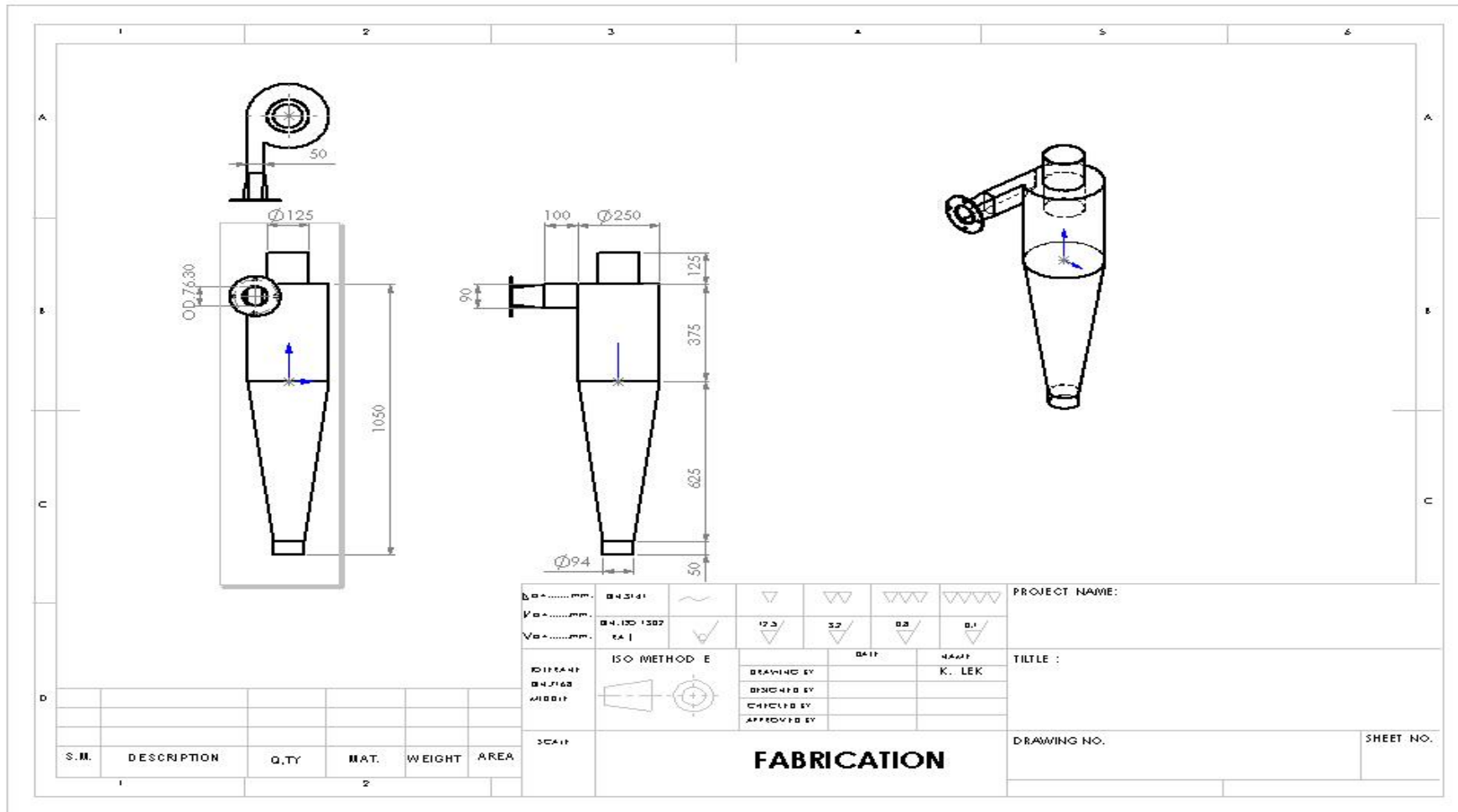
ภาพประกอบ 11 ชุดควบคุมการทำงานของระบบไฟฟ้า



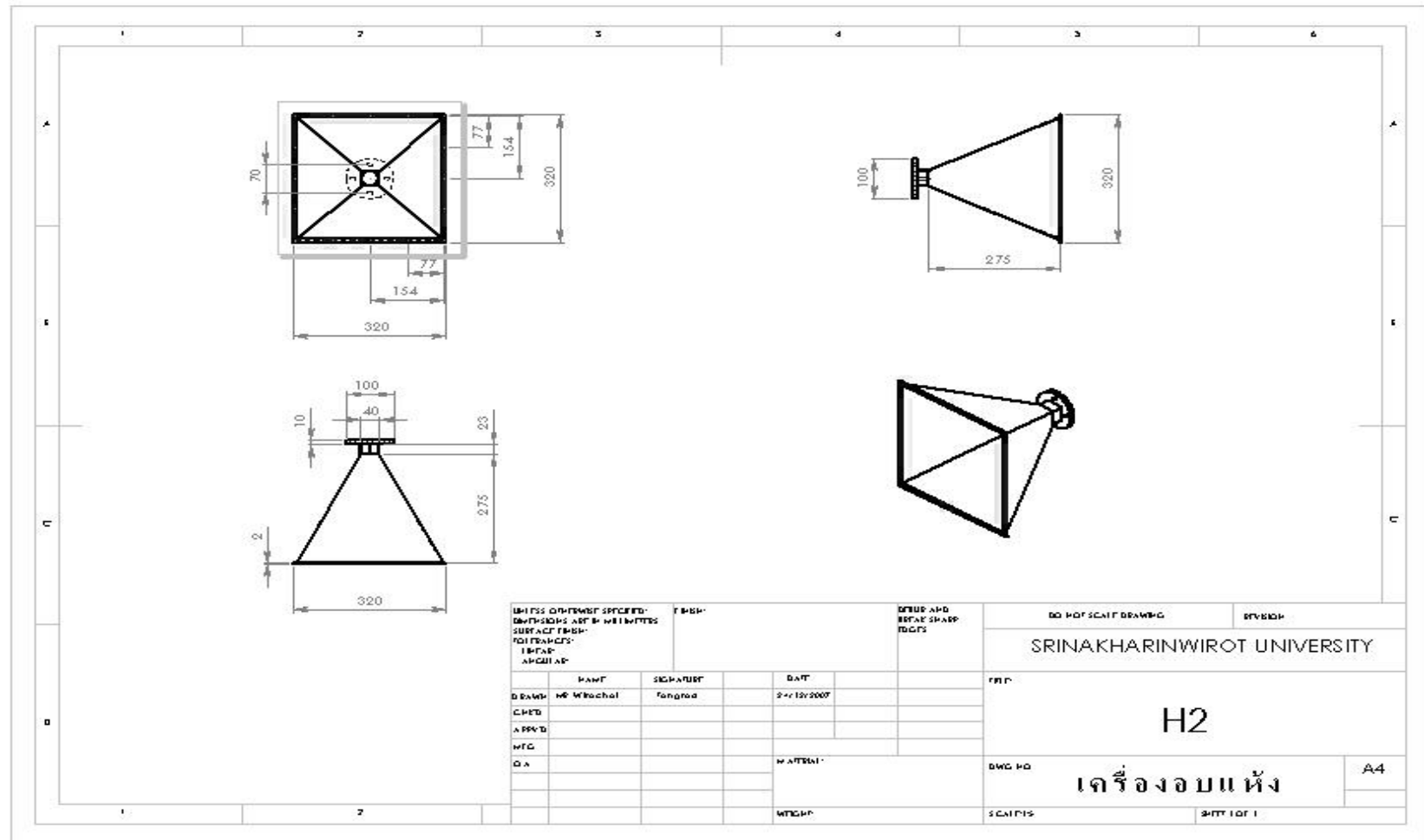
ภาพประกอบ 12 เครื่องมือตรวจวัดความเร็วลม



ภาพประกอบ ข.13 การออกแบบเครื่องอบแห้ง



ภาพประกอบ ข.14 การออกแบบเครื่องดักฝุ่น



ภาพประกอบ ข.16 แบบเครื่องทำความร้อน (ด้านทางเข้า-ออก)

ภาคผนวก ค

การทดลองหาอัตราการป้อนวัสดุที่เหมาะสมของเครื่องป้อน

การทดลองหาอัตราการป้อนวัสดุที่เหมาะสมของเครื่องป้อน

เนื่องลักษณะทางกายภาพของวัสดุทางการเกษตรนั้นมีความแตกต่างกัน ทั้งในเรื่องของขนาด น้ำหนักและผิวของวัสดุ จึงต้องทำการทดลองหาอัตราการป้อนที่เหมาะสมกับเครื่องป้อนเพื่อนำไปใช้คำนวณหาอัตราส่วนภาระ (Loading ratio) หรือ อัตราส่วนการป้อนวัสดุต่ออัตราส่วนการไหลของอากาศ เพื่อที่จะนำไปเปรียบเทียบหาค่าประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งต่อไป โดยอัตราส่วนภาระหาได้จากสมการ

$$\mu = \frac{W_p}{W_A}$$

เมื่อ

μ คือ อัตราส่วนภาระ

W_p คือ อัตราการป้อนวัสดุ, kg/h

W_A คือ อัตราการไหลของอากาศ, kg/h

วัสดุและอุปกรณ์

1. เครื่องป้อนวัสดุ
2. หม้อแปลงไฟฟ้าแบบปรับค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าได้
3. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล
4. นาฬิกาจับเวลา
5. ข้าวเปลือก
6. ภาชนะรองรับ

ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

1. นำข้าวเปลือกใส่ในถังของเครื่องป้อนวัสดุ
2. เปิดสวิตช์อุปกรณ์ปรับแรงดันไฟฟ้า โดยปรับแรงดันไฟฟ้าที่ 6, 10, และ 14 volt ตามลำดับ
3. จับเวลาทุกๆ 1 นาที แล้วนำข้าวเปลือกที่ออกจากเครื่องป้อนวัสดุไปชั่งน้ำหนัก
4. บันทึกผลการทดลองลงในตารางเพื่อหาอัตราการป้อน
5. ทำการทดลองที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าค่าละ 10 ครั้ง ตามลำดับ

ตาราง 1 อัตราการป้อนของเครื่องป้อนวัสดุ

ครั้งที่	แรงดันไฟฟ้า		
	6 volt	10 volt	14 volt
	kg/h	kg/h	kg/h
1	20.04	43.75	75.05
2	19.04	46.94	76.54
3	20.32	46.86	76.38
4	19.98	42.95	76.24
5	19.94	44.12	75.16
6	19.66	43.58	76.44
7	20.16	43.34	75.46
8	19.34	44.92	75.19
9	20.72	44.80	75.40
10	19.60	45.18	75.79
ค่าเฉลี่ย	19.88	44.64	75.76
ค่าเบี่ยงเบน	0.49	1.38	0.58

อัตราการป้อนที่ 19.88 ± 0.49 kg/h

44.64 ± 1.38 kg/h

75.76 ± 0.58 kg/h

ภาคผนวก ง

ตัวอย่างการคำนวณ

ตัวอย่างการคำนวณหาอัตราส่วนภาระ (Loading ratio)

ตัวอย่างการคำนวณ

ตัวอย่างการคำนวณหาอัตราส่วนภาระ (Loading ratio)

คำนวณหาอัตราส่วนภาระ (Loading ratio) หรือ อัตราส่วนการป้อนวัสดุต่ออัตราส่วนการไหลของอากาศ เพื่อที่จะนำไปเปรียบเทียบหาค่าประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งต่อไป โดยอัตราส่วนภาระหาได้จากสมการ

$$\mu = \frac{W_p}{W_A}$$

อัตราการป้อนวัสดุ $W_p = 20 \text{ kg/h}$

อัตราการไหลของอากาศ $W_A = 135.716 \text{ kg/h}$

โดยที่ W_A หาได้จาก $W_A = Q \times \rho$

ความหนาแน่นของอากาศ $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$

$$Q = V \times A$$

ความเร็วของอากาศ $V = 25 \text{ m/s}$

$$\text{พื้นที่หน้าตัดของท่อ } A = \frac{\pi}{4} \times d^2$$

$$= \frac{\pi}{4} \times 0.04^2$$

$$= 1.256 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$Q = (1.256 \times 10^{-3}) \times 25 \times 3600$$

$$= 113.097 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$W_A = 113.097 \times 1.2$$

$$= 135.716 \text{ kg/h}$$

$$\mu = \frac{20}{135.716}$$

$$= 0.15$$

ตัวอย่างการคำนวณหาอัตรากระเหยน้ำแข็งปริมาตร N_v

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

อุณหภูมิของอากาศขาเข้า $T_i = 343.05 \text{ K}$

อัตราส่วนภาวะ $\mu = 0.15$

อัตราการป้อนวัสดุ $W_p = 20 \text{ kg/h}$

ปริมาตรห้องอบแห้ง $V_r = 4.742 \times 10^{-3} \text{ m}^3$

ความชื้นของวัสดุที่ทางเข้า $X_i = 0.2928 \text{ kg/kg (d.b.)}$

ความชื้นของวัสดุที่ทางออก $X_e = 0.2740 \text{ kg/kg (d.b.)}$

$$\begin{aligned} N_v &= \frac{W_p (X_i - X_e)}{V_r} \\ &= \frac{20(0.2928 - 0.2740)}{4.742 \times 10^{-3}} \\ &= 78.73 \text{ (kg}_{\text{water}}/\text{m}^3\text{h)} \end{aligned}$$

ตัวอย่างการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร h_v

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

อัตราการป้อน $W_p = 20 \text{ kg/h}$

ปริมาตรห้องอบแห้ง $V_r = 4.742 \times 10^{-3} \text{ m}^3$

ความร้อนแฝงของการระเหย $\lambda = 2334237.96 \text{ J/kg}$ (จากตารางความร้อนแฝงการระเหยของน้ำ)

ความชื้นของวัสดุที่ทางเข้า $x_i = 0.2928 \text{ kg/kg (d.b.)}$

ความชื้นของวัสดุที่ทางออก $x_e = 0.2740 \text{ kg/kg (d.b.)}$

ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยลอการิทึม ΔT_{lm} หาได้จาก

$$\begin{aligned}\Delta T_{lm} &= \frac{(T_{do} - T_{wo}) - (T_{di} - T_{wi})}{\ln \frac{(T_{do} - T_{wo})}{(T_{di} - T_{wi})}} \\ &= \frac{(327.11 - 302.89) - (343.05 - 303.26)}{\ln \frac{(327.11 - 302.89)}{(343.05 - 303.26)}} \\ &= 304.52 \text{ K} \\ h_v &= \frac{W_p (x_i - x_e) \lambda}{V_r \Delta T_{lm}} \\ &= \frac{20(0.2928 - 0.2740)2334237.96}{4.7472 \times 10^{-3} \times 304.52 \times 3600} \\ &= 167.64 \text{ (W/m}^3\text{h)}\end{aligned}$$

ตัวอย่างการหาค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ (τ)

$$\tau = \frac{m_p}{W_p}$$

ปริมาณของวัสดุที่อยู่ในระบบ $m_p = 3.38 \times 10^{-3} \text{ kg}$

อัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุ $W_p = 5.52 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$

$$\tau = \frac{3.38 \times 10^{-3}}{5.52 \times 10^{-3}} = 0.61 \text{ s}$$

การคำนวณหาค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC)

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

ค่าพลังงานไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดความดันสูงใช้ไปในการอบแห้งในช่วง 5 นาที

$$E_{\text{blower}} = 0.04 \text{ kWh} \quad \text{หรือ} \quad 0.144 \text{ MJ}$$

ค่าพลังงานไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดความร้อนใช้ไปในการอบแห้งในช่วง 5 นาที

$$E_{\text{heater}} = 0.01 \text{ kWh} \quad \text{หรือ} \quad 0.036 \text{ MJ}$$

อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ

$$\dot{m}_a = \rho_a V_a A \text{ (kg}_{\text{dry air}}/\text{min)}$$

ความหนาแน่นของอากาศ $T_{\text{db in}} = 69.89^\circ\text{C}$, $T_{\text{wb in}} = 30.11^\circ\text{C}$, $P_a = 1.013 \text{ bar}$

$$\rho_a = 1.01168 \text{ kg/m}^3 \text{ (จากแผนภูมิไซโครเมตริก)}$$

ความเร็วของอากาศขาเข้า

$$V_a = 25 \text{ m/s หรือ } 1500 \text{ m/min}$$

พื้นที่หน้าตัดท่อส่งอากาศขาเข้าห้องอบแห้ง

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi 0.04^2}{4} = 1.256 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ

$$\dot{m}_a = (1.01168)(1500)(1.256 \times 10^{-3}) = 1.906 \text{ kg}_{\text{dry air}}/\text{min}$$

เนื่องจากอากาศไหลเข้าห้องอบแห้งทั้งสองด้านอย่างต่อเนื่อง

$$\dot{m}_a = 1.906 \times 2 = 3.812 \text{ kg}_{\text{dry air}}/\text{min}$$

ผลต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นของอากาศขาเข้าและขาออกของห้องอบแห้ง หาได้จาก

$$\text{ด้านขาเข้า: } T_{\text{db in}} = 69.89^\circ\text{C}, T_{\text{wb in}} = 30.11^\circ\text{C}$$

$$W_{\text{in}} = 0.01080753 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dry air}} \text{ (จากแผนภูมิไซโครเมตริก)}$$

$$\text{ด้านขาออก: } T_{\text{wb out}} = 53.96^\circ\text{C}, T_{\text{db out}} = 29.73^\circ\text{C}$$

$$W_{\text{out}} = 0.01739887 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dry air}} \text{ (จากแผนภูมิไซโครเมตริก)}$$

ผลต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นของอากาศขาเข้าและขาออกของห้องอบแห้ง

$$\Delta w = 0.01739887 - 0.01080753 = 0.00659134 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dry air}}$$

เวลาในการทดลอง

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

ดังนั้น ปริมาณน้ำที่ออกจากวัสดุ

$$\begin{aligned} m_w &= \dot{m}_a \Delta w t \\ &= (3.812)(0.00659134)(5) = 0.125631 \text{ kg}_{\text{water}} \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าความสิ้นเปลืองพลังงาน

$$\begin{aligned} \text{SEC}_{\text{blower}} &= \frac{E_{\text{blower}}}{m_w} = \frac{0.144}{0.1256} = 1.15 \text{ (MJ/kg}_{\text{water}}) \\ \text{SEC}_{\text{heater}} &= \frac{E_{\text{heater}}}{m_w} = \frac{0.036}{0.1256} = 0.28 \text{ (MJ/kg}_{\text{water}}) \end{aligned}$$

ตัวอย่างการหาความสัมพันธ์ของข้อมูลในรูปของตัวแปรไร้มิติ

กำหนดตัวแปรอิสระที่คาดว่าจะมีผลต่อการระเหยน้ำเชิงปริมาตร (N_v) ของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน

$$N_v = f(k_a, c_p, \rho_a, \mu_a, d, L, V_r, U_a, d_p, \rho_p, W_p, g, \Delta T_{lm})$$

กำหนดตัวแปรซ้ำ คือ (k_a, c_p, ρ_a, d_p)

$$\pi_1 = (k_a, c_p, \rho_a, d_p, N_v)$$

$$\pi_1 = (ML^{-1}t^{-3})^a (L^2T^{-1}t^{-2})^b (ML^{-3})^c (L)^d (ML^{-3}t^{-1})$$

$$M = a+c+1 = 0$$

$$L = a+2b-3c+d-3 = 0$$

$$T = -a-b = 0$$

$$t = -3a-2b-1 = 0$$

$$a = -1, b = 1, c = 0, d = 2$$

$$\therefore \pi_1 = \frac{c_p d_p^2 N_v}{k_a}$$

$$\pi_2 = (k_a, c_p, \rho_a, d_p, \mu_a)$$

$$\pi_2 = (ML^{-1}t^{-3})^a (L^2T^{-1}t^{-2})^b (ML^{-3})^c (L)^d (ML^{-1}t^{-1})$$

$$M = a+c+1 = 0$$

$$L = a+2b-3c+d-1 = 0$$

$$T = -a-b = 0$$

$$t = -3a-2b-1 = 0$$

$$a = -1, b = 1, c = 0, d = 0$$

$$\therefore \pi_2 = \frac{c_p \mu_a}{k_a}$$

$$\pi_3 = (k_a, c_p, \rho_a, d_p, d)$$

$$\pi_3 = (ML^{-1}t^{-3})^a (L^2T^{-1}t^{-2})^b (ML^{-3})^c (L)^d (L)$$

$$M = a + c = 0$$

$$L = a + 2b - 3c + d + 1 = 0$$

$$T = -a - b = 0$$

$$t = -3a - 2b = 0$$

$$a = 0, b = 0, c = 0, d = -1$$

$$\therefore \pi_3 = \frac{d}{d_p}$$

$$\pi_4 = (k_a, c_p, \rho_a, d_p, L)$$

$$\pi_3 = (ML^{-1}t^{-3})^a (L^2T^{-1}t^{-2})^b (ML^{-3})^c (L)^d (L)$$

$$M = a + c = 0$$

$$L = a + 2b - 3c + d + 1 = 0$$

$$T = -a - b = 0$$

$$t = -3a - 2b = 0$$

$$a = 0, b = 0, c = 0, d = -1$$

$$\therefore \pi_4 = \frac{L}{d_p}$$

$$\pi_5 = (k_a, c_\rho, \rho_a, d_\rho, V_r)$$

$$\pi_5 = (ML^{-1}t^{-3})^a (L^2T^{-1}t^{-2})^b (ML^{-3})^c (L)^d (L^3)$$

$$M = a+c = 0$$

$$L = a+2b-3c+d+3 = 0$$

$$T = -a-b = 0$$

$$t = -3a-2b = 0$$

$$a = 0, b = 0, c = 0, d = -3$$

$$\therefore \pi_3 = \frac{V_r}{d_\rho^3}$$

$$\pi_6 = (k_a, c_\rho, \rho_a, d_\rho, U_a)$$

$$\pi_6 = (ML^{-1}t^{-3})^a (L^2T^{-1}t^{-2})^b (ML^{-3})^c (L)^d (Lt^{-1})$$

$$M = a+c = 0$$

$$L = a+2b-3c+d+1 = 0$$

$$T = -a-b = 0$$

$$t = -3a-2b-1 = 0$$

$$a = -1, b = 1, c = 1, d = 1$$

$$\therefore \pi_6 = \frac{c_\rho \rho_a d_\rho U_a}{k_a}$$

$$\pi_7 = (k_a, c_\rho, \rho_a, d_\rho, \rho_\rho)$$

$$\pi_7 = (ML^{-1}t^{-3})^a (L^2T^{-1}t^{-2})^b (ML^{-3})^c (L)^d (ML^{-3})$$

$$M = a+c+1 = 0$$

$$L = a+2b-3c+d-3 = 0$$

$$T = -a-b = 0$$

$$t = -3a-2b = 0$$

$$a = 0, b = 0, c = -1, d = 0$$

$$\therefore \pi_7 = \frac{\rho_p}{\rho_a}$$

$$\pi_8 = (k_a, c_p, \rho_a, d_p, W_p)$$

$$\pi_8 = (ML^{-1}t^{-3})^a (L^2T^{-1}t^{-2})^b (ML^{-3})^c (L)^d (Mt^{-1})$$

$$M = a+c+1 = 0$$

$$L = a+2b-3c+d = 0$$

$$T = -a-b = 0$$

$$t = -3a-2b-1 = 0$$

$$a = 0, b = 0, c = -1, d = 0$$

$$\therefore \pi_8 = \frac{c_p W_p}{k_a d_p}$$

$$\pi_9 = (k_a, c_p, \rho_a, d_p, g)$$

$$\pi_9 = (ML^{-1}t^{-3})^a (L^2T^{-1}t^{-2})^b (ML^{-3})^c (L)^d (Lt^{-2})$$

$$M = a+c+1 = 0$$

$$L = a+2b-3c+d+1 = 0$$

$$T = -a-b = 0$$

$$t = -3a-2b-2 = 0$$

$$a = -2, b = 2, c = 2, d = -3$$

$$\therefore \pi_g = \frac{c_p^2 \rho_a^2 d_p^3 g}{k_a^2}$$

$$\pi_{10} = (k_a, c_p, \rho_a, d_p, \Delta T_{lm})$$

$$\pi_{10} = (ML^{-1}t^{-3})^a (L^2T^{-1}t^{-2})^b (ML^{-3})^c (L)^d (T)$$

$$M = a+c = 0$$

$$L = a+2b-3c+d = 0$$

$$T = -a-b+1 = 0$$

$$t = -3a-2b = 0$$

$$a = -2, b = 3, c = 2, d = 2$$

$$\therefore \pi_{10} = \frac{c_p^3 \rho_a^2 d_p^3 \Delta T_{lm}}{k_a^2}$$

นำความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปรมิติที่ได้มาจัดกลุ่มโดยที่ A และตัวอักษรที่ยกกำลัง a ถึง i คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากผลการทดลอง

$$\frac{N c_p d_p^2}{k_a} = A \left(\frac{L}{d_p} \right)^a \left(\frac{V_r}{d_p^3} \right)^b \left(\frac{U c_p \rho_a d_p}{k_a} \right)^c \left(\frac{\mu c_p}{k_a} \right)^d \left(\frac{d}{d_p} \right)^e \left(\frac{\rho_p}{\rho_a} \right)^f$$

$$\left(\frac{W c_p}{k_a d_p} \right)^g \left(\frac{d_p^3 g c_p^2 \rho_a^2}{k_a^2} \right)^h \left(\frac{\Delta T_{lm} c_p^3 \rho_a^2 d_p^2}{k_a^2} \right)^i$$

นำค่าคุณสมบัติของอากาศต่าง ๆ มาประกอบจากนั้นจึงนำความสัมพันธ์ดังกล่าวมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ด้วยโปรแกรม SPSS

$$\frac{N_v c_p d_p^2}{k_a} = 10^{-16.273} \left(\frac{\mu_a c_p}{k_a} \right)^{-21.695} \left(\frac{W_p c_p}{k_a d_p} \right)^{1.131} \left(\frac{d_p^3 g c_p^2 \rho_a^2}{k_a^2} \right)^{-0.950} \left(\frac{\Delta T_{lm} c_p^3 \rho_a^2 d_p^2}{k_a^2} \right)^{0.887}$$

$$N_v = 10^{-16.273} \left(\frac{\mu_a c_p}{k_a} \right)^{-21.695} \left(\frac{W_p c_p}{k_a d_p} \right)^{1.131} \left(\frac{d_p^3 g c_p^2 \rho_a^2}{k_a^2} \right)^{-0.950} \left(\frac{\Delta T_{lm} c_p^3 \rho_a^2 d_p^2}{k_a^2} \right)^{0.887}$$

$$\left(\frac{k_a}{c_p d_p^2} \right)$$

ตัวอย่างการทำนายค่าความชื้นสุดท้ายของวัสดุ

การทำนายความชื้นสุดท้ายของวัสดุทำได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระที่อยู่ในรูปไมตรีจากสมการที่ (4.2) และค่าคุณสมบัติของอากาศมาประกอบ

$$\frac{N_v c_p d_p^2}{k_a} = 10^{-16.273} \left(\frac{\mu_a c_p}{k_a} \right)^{-21.695} \left(\frac{W_p c_p}{k_a d_p} \right)^{1.131} \left(\frac{d_p^3 g c_p^2 \rho_a^2}{k_a^2} \right)^{-0.950} \left(\frac{\Delta T_{lm} c_p^3 \rho_a^2 d_p^2}{k_a^2} \right)^{0.887}$$

$$N_v = 10^{-16.273} \left(\frac{\mu_a c_p}{k_a} \right)^{-21.695} \left(\frac{W_p c_p}{k_a d_p} \right)^{1.131} \left(\frac{d_p^3 g c_p^2 \rho_a^2}{k_a^2} \right)^{-0.950} \left(\frac{\Delta T_{lm} c_p^3 \rho_a^2 d_p^2}{k_a^2} \right)^{0.887}$$

$$\left(\frac{k_a}{c_p d_p^2} \right)$$

อุณหภูมิของอากาศขาเข้า $T_i = 343.05 \text{ K}$

อัตราส่วนการระเหย $\mu = 0.15$

อัตราการป้อนวัสดุ $W_p = 0.00536389 \text{ kg/s}$

ความเร็วลม $U_a = 25 \text{ m/s}$

ระยะการชน $L = 0.24 \text{ m}$

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุ $d_p = 0.0026 \text{ m}$

ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยแบบลอการิทึม $\Delta T_{lm} = 71.75 \text{ }^{\circ}\text{C}$

ค่าการนำความร้อน $k_a = 0.02891 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

ค่าความจุความร้อนจำเพาะ $C_p = 1009 \text{ J/kgK}$

ค่าความหนาแน่นของอากาศ $\rho_a = 1.049 \text{ kg/m}^3$

ค่าความหนืดของอากาศ $\mu_a = 0.000020548 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ $d = 0.04 \text{ m}$

ค่าแรงโน้มถ่วง $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

ปริมาตรห้องอบแห้ง $V_r = 4.742 \times 10^{-3} \text{ m}^3$

$$N_v = 10^{-16.273} (0.698352)^{21.695} (254615.8)^{1.131} (41.26517)^{-0.950} (92491243)^{0.887} (4.7025)$$

$$N_v = 0.2674965736$$

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

$$\frac{W_p (X_i - X_e)}{V_r} = 0.2674965736$$

$$\begin{aligned} W_p (X_i - X_e) &= 0.2674965736 \times 0.004742 \\ &= 0.00126846875 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 X_i - X_e &= \left(\frac{0.00126846}{0.02104444} \right) \\
 &= 0.06027572 \\
 &= 0.29 - 0.06027572
 \end{aligned}$$

$$\therefore X_e = 0.22972428 \text{ kg/kg}_{(\%d.b.)}$$

เมื่อ

d_p = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของวัสดุ, m

k_a = ค่าการนำความร้อนของอากาศ, W/m K

U_a = ความเร็วของอากาศขาเข้า, m/s

V_r = ปริมาตรห้องอบแห้ง, m³

W_p = อัตราการป้อนวัสดุ, kg/s

X_i = ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ, kg/kg_(%d.b.)

X_e = ความชื้นสุดท้ายของวัสดุ, kg/kg_(%d.b.)

μ_a = ความหนืดของอากาศ, kg/m

ภาคผนวก จ

การบันทึกข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศด้วยโปรแกรม Labview

การบันทึกข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศด้วยโปรแกรม Labview

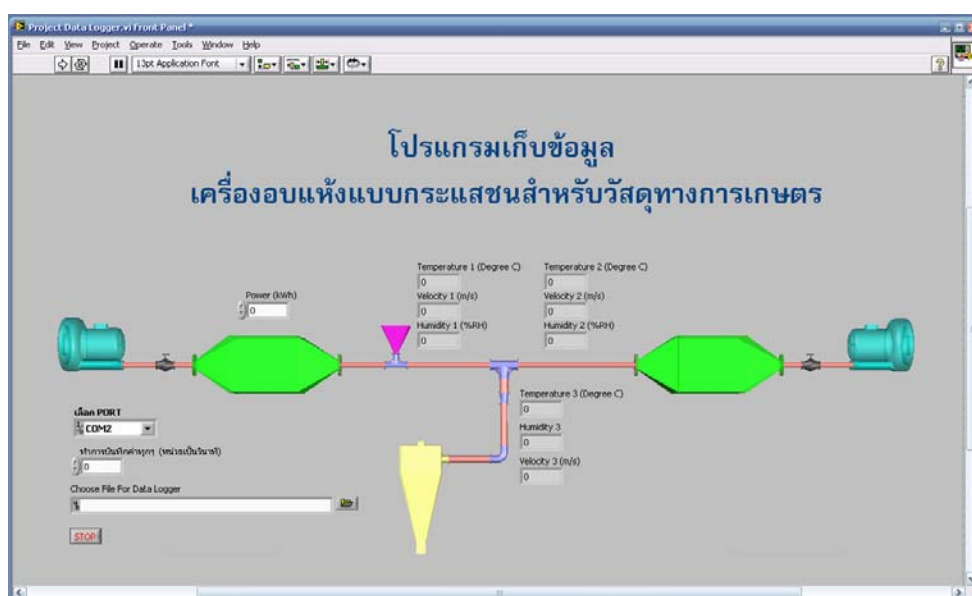
การใช้โปรแกรม

1. ทำการสร้างไฟล์เพื่อที่จะเก็บข้อมูลเป็น Data Logger โดยเป็นไฟล์ Excel มา 1 ไฟล์
2. เปิดโปรแกรม VI ที่ออกแบบไว้



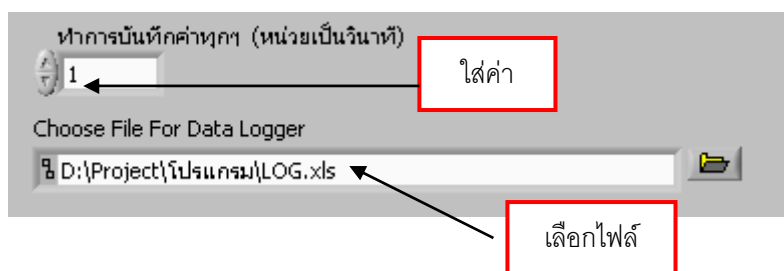
ภาพประกอบ 1 โปรแกรม Project Data Logger

เปิดโปรแกรม VI (Virtual Instrument) ที่สร้างไว้ขึ้นมาจะได้หน้าจอ ดังภาพประกอบ จ.2



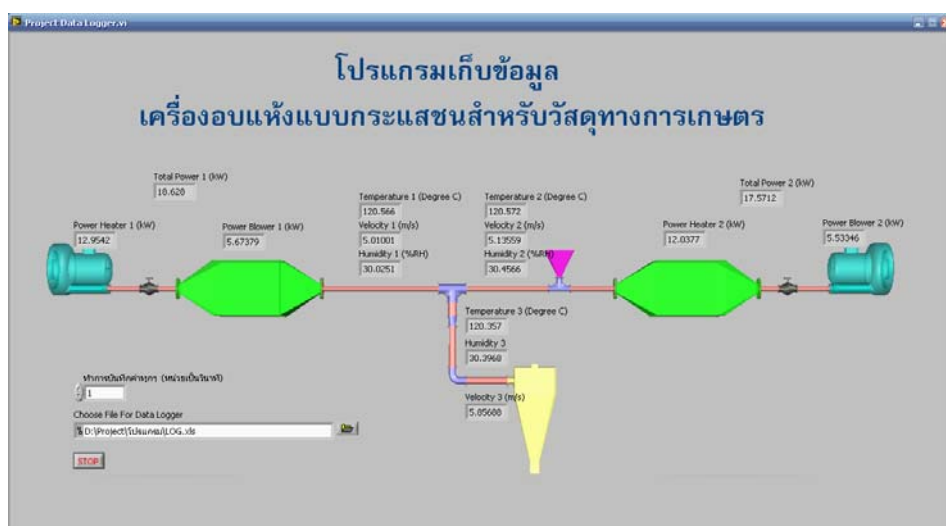
ภาพประกอบ .2 แสดงหน้าจอแสดงโปรแกรมเก็บข้อมูล

3. ที่ช่อง "Choose File for Data Logger" คลิกที่รูป  แล้วเลือกไฟล์ Data Logger ที่สร้างไว้ในขั้นตอนที่ 2 คลิก OK จากนั้นตั้งช่วงเวลาที่ต้องการบันทึก โดยการใส่ตัวเลขที่ช่อง โดยที่เวลาจะทำการบันทึกเวลา (หน่วยเป็นวินาที)



ภาพประกอบ 3 แสดงการตั้งเวลาและการเลือกไฟล์ที่ต้องการบันทึก

4. จากนั้นกดปุ่ม  เพื่อทำการรันโปรแกรม



ภาพประกอบ 4 โปรแกรมขณะทำงาน

5. เปิดชุดทดลอง เครื่องอบแห้ง

โปรแกรมจะทำการเก็บข้อมูลไปเรื่อยๆ ในขณะที่รันโปรแกรมนี้อีกเพื่อเก็บข้อมูล โปรแกรมจะทำการแสดงค่าข้อมูลที่เวลาปัจจุบันซึ่งทำให้เราสามารถทราบค่าต่างๆ ที่ทำการวัดได้ด้วย

6. เมื่อทำการทดลองเสร็จเรียบร้อยแล้ว กดปุ่ม STOP

7. ทำการทดลองซ้ำโดยเริ่มตั้งแต่ขั้นตอนที่ 3 เปลี่ยนชื่อไฟล์และตั้งเวลาการบันทึกค่า จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเรื่อยๆจนครบจำนวนซ้ำของการทดลอง

ภาคผนวก จ

ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

ตาราง 1 คุณสมบัติของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้ง

(อุณหภูมิ 70 °C, ความเร็วลม 25 m/s, อัตราการป้อน 20 kg/h)

time (s)	T _{di} (°C)	T _{wi} (°C)	T _{do} (°C)	T _{wo} (°C)	ΔT _{lm} (°C)
15	69.63	30.12	54.20	29.97	31.25
30	69.79	30.15	54.20	29.86	31.37
45	69.63	30.10	54.20	29.89	31.31
60	69.78	30.12	54.20	29.85	31.39
75	69.78	30.15	54.30	29.95	31.37
90	69.83	30.15	54.20	30.15	31.22
105	69.82	30.13	54.10	29.93	31.29
120	69.87	30.14	54.10	29.84	31.36
135	69.90	30.14	54.10	30.07	31.24
150	69.97	30.14	53.70	29.89	31.14
165	69.95	30.12	54.00	29.95	31.28
180	69.97	30.12	53.70	29.28	31.51
195	70.02	30.12	53.60	29.37	31.42
210	69.91	30.08	53.70	29.41	31.42
225	69.99	30.09	53.90	29.54	31.49
240	69.97	30.08	54.10	30.03	31.32
255	70.01	30.08	53.90	29.34	31.62
270	69.99	30.06	53.70	29.41	31.46
285	70.04	30.07	53.60	29.50	31.37
300	70.01	30.07	53.70	29.54	31.42
Average	69.90	30.11	53.96	29.74	31.42
SD	0.13	0.03	0.24	0.78	0.11

ตาราง 2 อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้ง

(อุณหภูมิ 70 °C, ความเร็วลม 25 m/s, อัตราการป้อน 45 kg/h)

time (s)	T _{di} (°C)	T _{wi} (°C)	T _{do} (°C)	T _{wo} (°C)	ΔT _{lm} (°C)
15	70.14	30.07	55.20	31.26	31.32
30	70.09	30.04	54.50	31.97	30.45
45	70.14	30.11	55.20	29.30	32.45
60	70.10	30.08	54.30	29.30	31.92
75	70.13	30.08	53.90	29.32	31.69
90	70.05	30.05	53.50	29.64	31.24
105	70.13	30.07	53.20	30.28	30.70
120	70.12	30.06	53.00	29.54	31.02
135	70.17	30.06	52.30	30.73	29.89
150	70.04	30.00	52.10	29.45	30.52
165	70.05	29.99	51.40	29.55	30.04
180	69.99	29.97	50.80	29.62	29.61
195	69.95	29.96	50.60	29.66	29.45
210	69.99	29.96	51.40	29.96	29.94
225	69.97	29.95	52.00	29.71	30.30
240	70.03	29.94	52.20	29.74	30.61
255	69.96	29.93	52.80	29.76	30.76
270	70.06	29.94	52.90	29.76	30.86
285	70.03	29.94	53.60	29.81	31.32
300	70.03	29.94	53.20	29.79	31.01
Average	70.06	30.01	52.92	29.89	30.75
SD	0.07	0.06	1.32	0.68	0.77

ตาราง 3 อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้ง

(อุณหภูมิ 70 °C, ความเร็วลม 25 m/s, อัตราการป้อน 75 kg/h)

time (s)	T _{di} (°C)	T _{wi} (°C)	T _{do} (°C)	T _{wo} (°C)	ΔT _{lm} (°C)
15	70.04	29.81	56.70	30.07	32.96
30	70.04	29.80	57.60	29.71	33.69
45	70.07	29.79	56.30	30.19	32.68
60	70.02	29.79	55.10	30.05	30.04
75	70.02	29.77	55.10	30.25	31.93
90	70.05	29.80	54.40	30.30	31.49
105	70.07	29.79	53.30	30.26	30.98
120	69.89	29.75	53.50	28.98	31.57
135	69.91	29.75	52.60	30.34	30.33
150	69.91	29.76	52.50	30.09	30.42
165	69.93	29.77	52.30	32.14	29.02
180	69.92	29.75	52.00	28.72	30.96
195	69.92	29.78	51.40	27.97	31.04
210	70.03	29.79	50.50	29.48	29.60
225	69.91	29.78	51.20	29.18	30.17
240	70.00	29.78	50.50	29.78	29.40
255	69.93	29.81	50.70	28.15	30.50
270	70.00	29.80	49.80	26.98	30.69
285	69.93	29.77	50.00	27.44	30.52
300	69.93	29.78	50.30	27.48	30.67
Average	69.98	29.78	52.79	29.37	31.03
SD	0.06	0.02	2.38	1.27	1.19

ตาราง 4 อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้ง

(อุณหภูมิ 90 °C, ความเร็วลม 25 m/s, อัตราการป้อน 20 kg/h)

time (s)	T _{di} (°C)	T _{wi} (°C)	T _{do} (°C)	T _{wo} (°C)	ΔT _{lm} (°C)
15	88.30	32.94	67.40	32.93	44.09
30	88.24	32.92	67.20	33.25	43.77
45	88.43	32.93	66.80	33.15	43.67
60	88.54	32.96	66.70	32.93	43.77
75	88.55	32.95	66.60	33.15	43.59
90	88.75	32.97	66.80	33.00	43.88
105	88.75	32.97	66.60	32.92	43.80
120	88.78	32.98	66.60	32.85	43.85
135	88.88	33.05	66.60	32.97	43.80
150	88.93	33.04	66.30	32.87	43.70
165	89.00	33.02	66.50	32.93	43.82
180	89.10	33.06	66.50	33.04	43.78
195	89.07	33.02	67.60	33.04	44.44
210	89.10	33.04	67.20	32.80	44.35
225	89.18	33.11	67.40	33.01	44.35
240	89.26	33.08	67.10	32.92	44.27
255	89.73	33.15	68.00	32.94	44.96
270	89.06	33.09	67.80	32.82	44.66
285	89.30	33.08	67.20	32.99	44.31
300	89.58	33.08	67.10	33.01	44.36
Average	88.93	33.02	67.00	32.97	44.06
SD	0.39	0.07	0.47	0.11	0.38

ตาราง 5 อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้ง

(อุณหภูมิ 90 °C, ความเร็วลม 25 m/s, อัตราการป้อน 45 kg/h)

time (s)	T _{di} (°C)	T _{wi} (°C)	T _{do} (°C)	T _{wo} (°C)	ΔT _{lm} (°C)
15	89.62	33.11	68.80	34.43	44.53
30	89.58	33.10	68.00	34.34	44.09
45	89.60	33.11	67.70	34.19	44.00
60	90.10	33.20	67.40	34.18	44.00
75	89.34	33.07	67.00	33.75	43.76
90	89.75	33.13	67.10	34.04	43.81
105	89.61	33.11	66.80	32.95	44.21
120	89.75	33.12	66.70	33.20	44.06
135	89.68	33.10	66.20	33.22	43.72
150	89.51	33.08	65.90	33.22	43.48
165	89.66	33.10	65.90	33.22	43.53
180	89.70	33.12	65.60	33.04	43.47
195	89.58	33.10	65.50	33.20	43.27
210	89.67	33.11	65.60	32.71	43.66
225	89.66	33.11	65.20	33.15	43.15
240	89.56	33.08	64.90	33.06	42.99
255	89.68	33.08	65.00	33.01	43.13
270	89.55	33.08	65.10	32.80	43.27
285	89.64	33.07	65.00	32.43	43.47
300	89.71	33.12	65.30	32.98	43.33
Average	89.65	33.10	66.23	33.35	43.65
SD	0.14	0.03	1.14	0.58	0.41

ตาราง 6 อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้ง

(อุณหภูมิ 90 °C, ความเร็วลม 25 m/s, อัตราการป้อน 75 kg/h)

time (s)	T _{di} (°C)	T _{wi} (°C)	T _{do} (°C)	T _{wo} (°C)	ΔT _{lm} (°C)
15	89.51	33.12	66.20	34.55	42.84
30	89.94	33.19	66.00	34.95	42.62
45	89.60	33.11	65.30	33.87	42.74
60	89.80	33.13	64.90	34.05	42.46
75	89.74	33.10	64.40	33.90	42.23
90	89.65	33.13	64.30	32.89	42.74
105	89.77	33.09	64.40	33.12	42.73
120	89.77	33.15	64.50	33.84	42.32
135	89.77	33.13	63.80	33.29	42.24
150	89.84	33.17	64.00	32.55	42.83
165	89.84	33.16	64.10	32.91	42.67
180	89.82	33.14	63.90	33.78	42.01
195	89.88	33.17	63.50	33.24	42.11
210	90.34	33.23	63.40	32.37	42.75
225	89.57	33.12	64.50	34.60	41.78
240	90.05	33.18	63.90	33.58	42.21
255	89.94	33.16	63.70	32.18	42.21
270	90.30	33.20	63.80	33.64	42.88
285	89.78	33.18	63.60	34.02	41.64
300	89.89	33.19	63.90	33.34	41.67
Average	89.84	33.15	64.25	33.53	42.38
SD	0.21	0.04	0.83	0.74	0.40

ตาราง 7 อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้ง

(อุณหภูมิ 110 °C, ความเร็วลม 25 m/s, อัตราการป้อน 20 kg/h)

time (s)	T _{di} (°C)	T _{wi} (°C)	T _{do} (°C)	T _{wo} (°C)	ΔT _{lm} (°C)
15	109.41	35.65	82.40	36.04	59.00
30	109.16	35.57	82.60	36.90	58.54
45	109.24	35.59	82.50	36.77	58.59
60	109.25	35.61	82.80	36.63	58.84
75	109.15	35.55	82.90	36.58	58.91
90	109.56	35.63	82.30	36.57	58.71
105	109.09	35.61	82.10	36.50	58.44
120	109.49	35.62	82.10	36.50	58.60
135	109.29	35.60	81.90	36.30	58.53
150	109.98	35.63	81.90	36.21	58.86
165	108.97	35.61	82.00	36.41	58.38
180	109.69	35.61	81.60	36.41	58.45
195	109.41	35.62	81.30	36.43	58.14
210	109.69	35.71	81.40	36.37	58.31
225	107.60	35.47	81.60	36.15	57.77
240	110.14	35.90	81.30	36.04	58.56
255	110.27	35.92	81.30	35.96	58.65
270	110.72	35.97	81.00	36.22	58.49
285	109.86	35.88	81.10	36.12	58.28
300	110.49	35.94	81.10	36.01	58.59
Average	109.52	35.68	81.86	36.35	58.53
SD	0.66	0.15	0.59	0.26	0.28

ตาราง 8 อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้ง

(อุณหภูมิ 110 °C, ความเร็วลม 25 m/s, อัตราการป้อน 45 kg/h)

time (s)	T _{di} (°C)	T _{wi} (°C)	T _{do} (°C)	T _{wo} (°C)	ΔT _{lm} (°C)
15	110.67	35.97	82.00	35.62	59.42
30	109.98	38.88	81.90	35.80	59.00
45	110.58	35.96	81.40	37.40	57.97
60	110.08	35.87	81.60	36.84	58.25
75	110.54	35.91	81.50	36.39	58.64
90	110.40	35.93	81.20	36.21	58.60
105	110.58	36.02	81.20	35.64	59.30
120	109.46	35.82	81.30	36.41	58.08
135	111.35	36.05	81.10	35.72	59.08
150	109.98	35.90	81.10	36.85	57.89
165	110.80	35.95	80.90	36.62	58.23
180	110.37	35.92	80.90	36.17	58.33
195	110.50	35.93	80.90	36.50	58.19
210	110.49	35.93	81.00	36.48	58.25
225	110.70	35.96	81.10	36.61	58.31
240	110.41	35.98	80.20	35.52	57.73
255	110.61	35.91	80.30	36.17	58.05
270	110.36	35.96	80.00	35.81	58.01
285	110.62	35.96	80.20	35.70	58.29
300	110.84	35.93	80.50	36.40	58.14
Average	110.51	35.93	81.01	36.29	58.38
SD	0.46	0.05	0.55	0.47	0.47

ตาราง 9 อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้ง

(อุณหภูมิ 110 °C, ความเร็วลม 25 m/s, อัตราการป้อน 75 kg/h)

time (s)	T _{di} (°C)	T _{wi} (°C)	T _{do} (°C)	T _{wo} (°C)	ΔT _{lm} (°C)
15	110.67	35.93	81.20	35.52	59.02
30	110.57	35.91	81.00	35.76	58.73
45	110.46	35.92	80.50	36.49	57.94
60	110.55	35.93	80.00	38.18	56.65
75	110.55	35.95	78.90	38.01	56.07
90	110.48	35.88	78.40	37.51	56.07
105	110.50	35.89	77.80	36.64	56.24
120	110.54	35.95	77.70	34.54	57.45
135	110.41	35.88	78.30	36.15	56.81
150	110.56	35.93	78.00	36.99	56.15
165	110.63	35.94	77.60	37.51	55.61
180	111.28	35.99	77.30	37.40	55.73
195	110.08	35.88	76.90	36.61	55.53
210	111.19	36.00	76.30	36.72	55.49
225	110.91	35.98	76.30	34.38	56.84
240	110.29	35.93	77.20	35.49	56.47
255	110.90	35.97	76.90	35.82	56.32
270	110.63	35.93	77.10	37.23	55.47
285	110.57	35.96	77.10	36.70	55.77
300	110.54	35.94	76.70	35.67	53.15
Average	110.54	35.93	8.06	36.46	56.53
SD	0.27	0.03	1.51	1.05	1.03

ตารางที่ 10 ผลการทดลองหาความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ

(อุณหภูมิ 105 °C, เวลา 72 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน AOAC)

No.	น.น. กระป๋อง	น.น. กระป๋อง + วัสดุ ก่อน อบ	น.น. กระป๋อง + วัสดุ หลัง อบ	น.น.วัสดุ (g) ก่อน อบ	น.น.วัสดุ (g) หลัง อบ	%d.b.
B4	19.66	40.12	35.50	20.46	15.84	29.28
B5	19.92	39.99	35.30	20.07	15.38	30.48
B6	19.14	41.58	36.50	22.44	17.36	29.24
B7	18.39	40.21	35.20	21.81	16.81	29.80
B8	20.03	41.70	36.80	21.67	16.77	29.21
B9	18.51	40.65	35.60	22.14	17.09	29.56
B10	19.39	40.83	36.00	20.89	16.61	29.07
B12	19.65	40.54	35.90	21.44	16.25	28.57
B14	20.03	40.92	36.30	20.89	16.27	29.28
Average	19.41	40.73	35.90	20.89	16.49	29.28
SD	0.33	0.61	0.55	0.79	0.62	0.63

ตาราง 11 ผลการทดลองหาความชื้นของวัสดุหลังอบแห้ง

(อุณหภูมิ 70 °C, ความเร็วลม 25 m/s, อัตราการป้อน 20 kg/h)

No.	น.น. กระป๋อง (g)	น.น. กระป๋อง + วัสดุก่อน อบ	น.น. กระป๋อง + วัสดุ หลังอบ	น.น.วัสดุ ก่อนอบ (g)	น.น.วัสดุ หลังอบ (g)	%d.b.
S1	20.07	41.41	36.80	21.34	16.73	27.57
S2	20.80	41.61	37.20	20.81	16.41	26.85
S3	20.32	41.64	37.00	21.31	16.68	27.79
S4	20.24	42.21	37.40	21.97	17.16	28.01
S5	19.52	41.77	37.00	22.24	17.48	27.27
S6	18.94	40.05	35.50	21.11	16.56	27.45
S7	18.84	41.39	36.60	22.55	17.77	26.95
S8	18.92	41.40	36.60	22.48	17.68	27.13
S9	20.33	41.47	36.90	21.14	16.57	27.59
Average	19.77	41.44	36.78	21.66	17.00	27.40
SD	0.74	0.58	0.54	0.65	0.53	0.39

ตาราง 12 ผลการทดลองหาความชื้นของวัสดุหลังอบแห้ง

(อุณหภูมิ 70 °C, ความเร็วลม 25 m/s, อัตราการป้อน 45 kg/h)

No.	น.น. กระป๋อง	น.น. กระป๋อง +	น.น. กระป๋อง +	น.น.วัสดุ ก่อนอบ	น.น.วัสดุ หลังอบ	%d.b.
		วัสดุก่อน อบ	วัสดุหลัง อบ			
S10	20.17	40.90	36.50	20.72	16.33	26.94
S11	20.05	39.40	35.20	19.34	15.15	27.70
S12	19.00	39.83	35.40	20.82	16.40	27.00
S13	20.20	39.67	35.50	19.47	15.30	27.26
S14	20.62	40.35	36.20	19.74	15.58	26.64
S15	19.99	39.62	35.40	19.62	15.41	27.35
S16	19.92	39.92	35.80	19.00	14.88	27.70
S17	20.01	41.59	37.00	21.58	16.99	27.01
S18	20.06	40.38	36.00	20.31	15.94	27.46
Average	20.12	40.18	35.89	20.07	15.77	27.23
SD	0.52	0.70	0.59	0.84	0.69	0.36

ตาราง 13 ผลการทดลองหาความชื้นของวัสดุหลังอบแห้ง

(อุณหภูมิ 70 °C, ความเร็วลม 25 m/s, อัตราการป้อน 75 kg/h)

No.	น.น. กระป๋อง	น.น. กระป๋อง +	น.น. กระป๋อง +	น.น.วัสดุ ก่อนอบ	น.น.วัสดุ หลังอบ	%d.b.
		วัสดุก่อน อบ	วัสดุหลัง อบ			
S19	19.93	40.59	36.20	20.66	16.27	17.01
S20	20.11	39.48	35.40	19.37	15.29	26.65
S21	19.09	41.22	36.50	22.13	17.41	27.13
S22	20.08	41.38	36.80	21.30	16.72	27.42
S23	20.17	40.94	36.50	20.77	16.33	27.20
S24	20.09	40.48	36.10	20.39	16.01	27.38
S25	19.97	41.24	36.70	21.26	16.73	27.11
S26	20.05	39.43	35.30	19.38	15.25	27.08
S27	20.07	40.34	36.00	20.27	15.93	27.26
Average	19.95	40.57	36.17	20.62	16.22	27.14
SD	0.33	0.73	0.53	0.90	0.69	0.23

ตาราง 14 ผลการทดลองหาความชื้นของวัสดุหลังอบแห้ง

(อุณหภูมิ 90 °C, ความเร็วลม 25 m/s, อัตราการป้อน 20 kg/h)

No.	น.น. กระป๋อง	น.น. กระป๋อง +	น.น. กระป๋อง +	น.น.วัสดุ ก่อนอบ	น.น.วัสดุ หลังอบ	%d.b.
		วัสดุก่อน อบ	วัสดุหลัง อบ			
T1	20.08	39.70	35.70	19.62	15.62	25.63
T2	20.50	40.59	36.50	20.09	16.00	25.56
T3	19.93	39.92	35.80	19.99	15.86	25.98
T4	20.03	41.71	37.30	21.69	17.72	25.54
T5	19.98	40.43	36.30	20.45	16.32	25.30
T6	19.96	41.35	37.00	21.39	17.04	25.54
T7	20.00	39.90	35.80	19.91	15.80	25.95
T8	20.11	39.63	35.60	19.52	15.49	26.04
T9	20.12	41.83	37.30	21.71	17.18	26.37
Average	20.08	40.56	36.37	20.48	16.29	25.77
SD	0.17	0.87	0.69	0.88	0.70	0.34

ตาราง 15 ผลการทดลองหาความชื้นของวัสดุหลังอบแห้ง

(อุณหภูมิ 90 °C, ความเร็วลม 25 m/s, อัตราการป้อน 45 kg/h)

No.	น.น. กระป๋อง	น.น. กระป๋อง +	น.น. กระป๋อง +	น.น.วัสดุ ก่อนอบ	น.น.วัสดุ หลังอบ	%d.b.
		วัสดุ ก่อน อบ	วัสดุ หลัง อบ			
T10	20.26	40.43	36.30	20.17	16.04	25.77
T11	19.97	39.65	35.60	19.67	15.63	25.89
T12	20.04	41.06	36.80	21.02	16.76	25.44
T13	20.21	40.04	36.00	19.83	15.79	25.61
T14	20.28	41.00	35.80	20.72	16.52	25.43
T15	19.99	39.08	35.20	19.10	15.22	25.52
T16	20.05	40.26	36.20	20.21	16.15	25.12
T17	20.05	40.57	36.40	20.52	16.35	25.51
T18	20.78	39.87	36.00	19.09	15.22	25.43
Average	20.18	40.22	36.14	20.04	15.96	25.53
SD	0.25	0.64	0.52	0.68	0.55	0.22

ตาราง 16 ผลการทดลองหาความชื้นของวัสดุหลังอบแห้ง

(อุณหภูมิ 90 °C, ความเร็วลม 25 m/s, อัตราการป้อน 75 kg/h)

No.	น.น. กระป๋อง	น.น. กระป๋อง + วัสดุ ก่อน อบ	น.น. กระป๋อง + วัสดุ หลัง อบ	น.น.วัสดุ ก่อนอบ	น.น.วัสดุ หลังอบ	%d.b.
T19	18.88	39.75	35.60	20.86	16.72	24.80
T20	20.16	40.83	36.70	20.67	16.54	24.95
T21	20.07	39.87	35.80	19.80	15.73	25.85
T22	20.12	39.21	35.30	19.09	15.18	25.77
T23	20.47	41.34	37.10	20.87	16.63	25.51
T24	19.80	41.20	36.90	21.40	17.10	25.17
T25	20.12	40.37	36.30	20.25	16.18	25.18
T26	20.08	41.01	36.80	20.93	16.72	25.16
T27	20.05	41.13	36.80	21.08	16.75	25.84
Average	19.97	40.52	36.37	20.55	16.39	25.36
SD	0.44	0.76	0.65	0.72	0.60	0.40

ตาราง 17 ผลการทดลองหาความชื้นของวัสดุหลังอบแห้ง

(อุณหภูมิ 110 °C, ความเร็วลม 25 m/s, อัตราการป้อน 20 kg/h)

No.	น.น. กระป๋อง	น.น. กระป๋อง + วัสดุ ก่อน อบ	น.น. กระป๋อง + วัสดุ หลัง อบ	น.น. วัสดุ ก่อนอบ	น.น.วัสดุ หลังอบ	%d.b.
A1	20.14	41.13	37.10	20.99	16.96	23.78
A2	20.18	40.58	36.70	20.41	16.53	23.49
A3	20.04	41.47	37.40	21.42	17.36	23.44
A4	19.97	40.96	36.90	21.00	16.93	24.00
A8	19.52	40.42	36.40	20.91	16.88	23.82
A10	20.06	40.22	36.30	20.16	16.24	24.14
A11	19.14	39.82	35.90	20.68	16.76	23.41
A12	19.98	41.29	37.20	21.31	17.22	23.76
A13	18.48	39.85	35.70	21.37	17.22	24.11
Average	19.72	40.64	36.62	36.62	16.90	23.77
SD	0.58	0.61	0.59	0.59	0.35	0.28

ตาราง 18 ผลการทดลองหาความชื้นของวัสดุหลังอบแห้ง

(อุณหภูมิ 110 °C, ความเร็วลม 25 m/s, อัตราการป้อน 45 kg/h)

No.	น.น. กระป๋อง	น.น. กระป๋อง +	น.น. กระป๋อง +	น.น.วัสดุ ก่อนอบ	น.น.วัสดุ หลังอบ	%d.b.
		วัสดุ ก่อน อบ	วัสดุ หลัง อบ			
A14	20.13	40.76	36.80	20.63	16.67	23.77
A15	19.80	39.98	36.20	20.19	16.41	23.06
A16	20.86	40.18	36.50	19.31	15.64	23.51
A17	19.63	39.02	35.30	19.39	15.67	23.72
A18	19.70	40.00	36.20	20.29	16.50	23.00
A19	19.99	41.49	37.30	21.50	17.30	24.21
A20	20.09	41.47	37.20	21.37	17.11	24.94
A22	18.95	39.90	36.00	20.95	17.05	22.87
A25	19.92	39.93	36.20	20.01	16.28	22.94
Average	19.90	40.30	36.41	20.41	16.51	23.56
SD	0.51	0.80	0.62	0.78	0.60	0.69

ตาราง 19 ผลการทดลองหาความชื้นของวัสดุหลังอบแห้ง

(อุณหภูมิ 110 °C, ความเร็วลม 25 m/s, อัตราการป้อน 75 kg/h)

No.	น.น. กระป๋อง	น.น. กระป๋อง +	น.น. กระป๋อง +	น.น.วัสดุ ก่อนอบ	น.น.วัสดุ หลังอบ	%d.b.
		วัสดุ ก่อน อบ	วัสดุ หลัง อบ			
A26	19.98	39.69	36.00	19.71	16.02	23.02
A27	19.93	41.37	37.30	21.44	17.37	23.45
A28	20.18	40.94	37.00	20.77	16.82	23.43
A31	20.18	41.76	37.70	21.58	17.52	23.16
A34	19.75	40.46	36.50	20.71	16.75	23.62
A35	19.94	41.10	37.20	21.15	17.26	22.58
A36	19.68	41.24	37.20	21.56	17.52	23.07
A40	16.34	39.85	35.50	23.51	19.16	22.73
A45	20.02	41.11	37.00	21.09	16.98	24.18
Average	19.56	40.83	36.82	21.28	17.27	23.25
SD	1.22	0.70	0.70	1.02	0.85	0.49

คำอธิบายสัญลักษณ์

สัญลักษณ์

ความหมาย

N_v	อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร, ($\text{kg}_{\text{water}}/\text{m}^3\text{h}$)
W_p	อัตราการป้อนวัสดุ, kg/h
V_r	ปริมาตรห้องอบแห้ง, m^3
X_i	ความชื้นของวัสดุที่ทางเข้า, $\text{kg/kg}_{(\text{d.b.})}$
X_e	ความชื้นของวัสดุที่ทางออก, $\text{kg/kg}_{(\text{d.b.})}$
λ	ความร้อนแฝงของการระเหย, kJ/kg
ΔT_{lm}	ค่าผลต่างอุณหภูมิแบบลอการิทึม, K
T_{di}	อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศที่ทางเข้าของการอบแห้ง, K
T_{do}	อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศที่ทางออกของการอบแห้ง, K
T_{wi}	อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศที่ทางเข้าของการอบแห้ง, K
T_{wo}	อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศที่ทางออกของการอบแห้ง, K
τ	เวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ, s
m_p	ปริมาณของวัสดุที่อยู่ในระบบ, kg
E	พลังงานที่ป้อนให้กับอุปกรณ์ที่ใช้ไฟฟ้า, MJ
m_w	ปริมาณความชื้นที่นำออกจากวัสดุที่นำมาอบแห้ง, kg

คำอธิบายสัญลักษณ์

สัญลักษณ์ (ต่อ)

ความหมาย

 $\dot{m}_a$

อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศขาเข้า, $\text{kg}_{\text{dry air}}/\text{min}$

 Δw

ผลต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นของอากาศร้อนขาเข้าและขาออก

ของระบบอบแห้ง, $\text{kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dry ai}}$

 t

เวลาในการอบแห้ง, min

 ϕ

ความชื้นสัมพัทธ์

 P

ความดันย่อยของไอน้ำในอากาศ, Pa

 p_s

ความดันไออิ่มตัวของน้ำที่อุณหภูมิของอากาศ, Pa

 p_t

ความดันรวม, Pa

 M_a

โมเลกุลของอากาศ, g/m^3

 M_w

โมเลกุลของน้ำ, g/m^3

 H_{mol}

ความชื้นสัมบูรณ์เชิงโมล, $\text{kmol}_{\text{vapor}}/\text{kmol}_{\text{air dry}}$

 M_{wb}

ความชื้น (มาตรฐานเปียก) %

 M_{db}

ความชื้น (มาตรฐานแห้ง) %

 m_w

น้ำหนักวัสดุเปียก, g

 m_d

น้ำหนักวัสดุแห้ง, g

คำอธิบายสัญลักษณ์

สัญลักษณ์ (ต่อ)

ความหมาย

C_s	ความร้อนจำเพาะของวัสดุที่ปราศจากน้ำ, kJ/kgK
C_w	ความร้อนจำเพาะของน้ำ, kJ/kgK
h	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างลมร้อนกับวัสดุ, kJ/hm ² K
t	อุณหภูมิของอากาศร้อน, K
t_m	อุณหภูมิของวัสดุ, K
r_m	ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอน้ำที่อุณหภูมิ t_m , K
k	คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล, kg _w /hm ² ΔH
d_p	เส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค, m

ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล

นางสาวธัญญาพร ปัตตาหารี

วันเดือนปีเกิด

21 มีนาคม 2526

สถานที่เกิด

อำเภอ ัญบุรี จังหวัด ปทุมธานี

สถานที่อยู่ปัจจุบัน

27/3 หมู่ 10 ตำบล บึงคำพร้อย อำเภอ ลำลูกกา

จังหวัด ปทุมธานี รหัสไปรษณีย์ 12150

ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน

วิศวกร

สถานที่ทำงานปัจจุบัน

บริษัท เดลต้าอิเล็กทรอนิกส์ (ประเทศไทย)

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2548

ปริญญาตรี

จาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ัญบุรี

พ.ศ. 2553

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ