

การพัฒนาระบบอบแห้งแบบปล่องลมแดด



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2562

**DEVELOPMENT OF A SOLAR CHIMNEY
DRYING SYSTEM**



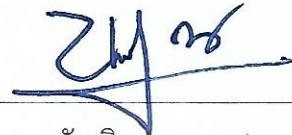
Sorawit Klongdee

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the
Degree of Master of Engineering in Mechanical
and Process System Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2019**

การพัฒนาระบบอบแห้งแบบปล่องลมแดด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.บัณฑิต กฤตาคม)

ประธานกรรมการ

อำนวยการ

(ผศ. ดร.อาทิตย์ คุณศรีสุข)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ. ดร.กระวี ตรีอำนาจ)

กรรมการ



(ผศ. ดร.พรรษา ลิบลับ)

กรรมการ



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

สรวิษ คล่องดี : การพัฒนาระบบอบแห้งปล่องลมแดด (DEVELOPMENT OF A SOLAR CHIMNEY DRYING SYSTEM) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ อุณหศรีสุข, 106 หน้า.

การตากแห้งโดยธรรมชาติเป็นวิธีอบแห้งที่เกษตรกรนิยม แต่เนื่องจากข้อเสียต่าง ๆ เช่น ผลผลิต โคนฝน โคนฝุ่น และเชื้อโรคจากแมลง ระบบอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์จึงเป็นที่นิยมในปัจจุบัน แต่ด้วยสมรรถนะการอบแห้งของเครื่องอบแห้งประเภทนี้ต่ำ จึงควรที่จะพัฒนาต่อยอดเพื่อเพิ่มสมรรถนะการอบแห้ง งานวิจัยนี้จึงสนใจพัฒนาระบบอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบรูปทรงของเครื่องอบแห้งชนิดปล่องลมแดดแบบปล่องบานด้วยการจำลองเชิงตัวเลข โดยใช้โปรแกรม ANSYS-FLUENT 18 จำลองระบบเครื่องอบแห้งปล่องลมแดดเพื่อหารูปทรงที่เหมาะสมโดยการปรับอัตราส่วนพื้นที่ทางออกต่อพื้นที่ทางเข้า (Area ratio : AR) เท่ากับ 0.5, 1, 2, 4, 8, 16, 20, 25 และปรับหาความสูงที่เหมาะสมของเครื่องเท่ากับ 1.5 เมตร และ 2 เมตร รวมถึงรูปทรงของเครื่องอบแห้งและจำนวนถาดใส่ผลผลิต 2 และ 3 ถาด นอกจากนี้ยังได้สร้างชุดทดลองเพื่อประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งปล่องลมแดด โดยพบว่า อัตราการไหลอากาศเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนพื้นที่เพิ่มขึ้น โดยมีอัตราการไหลสูงสุดเท่ากับ 6.93 ลิตรต่อวินาที ที่ AR16 อุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งมีค่าเท่ากับ 33-35 °C ผลการอบแห้งปลานิลเว็นแดดเดียวพบว่า การอบแห้งในเครื่องอบแห้งปล่องลมแดดสามารถลดความชื้นได้มากกว่าการตากแห้งตามธรรมชาติคิดเป็นร้อยละ 5-13.4 และ Two term ทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งชั้นบางของปลานิลเว็นแดดเดียวได้แม่นยำที่สุด โดยมี R^2 เท่ากับ 0.995 และ RMSE เท่ากับ 0.001

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนักศึกษา สรวิษ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา อาทิตย์

SORAWIT KLONGDEE : DEVELOPMENT OF SOLAR CHIMNEY
DRYING SYSTEM. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. ATIT
KOONSRSISUK, Ph.D., 106 PP.

SOLAR DRYER/SOLAR CHIMNEY DRYER/COMPUTATIONAL FLUID
DYNAMICS/DRYING KINETICS OF TILAPIA

The drying that farmers commonly use is natural drying. But due to various disadvantages such as being exposed to rain, dust and germs. Drying systems using solar dryers are therefore popular today. But with the low drying performance of this type of dryer, it should be further developed to increase the drying performance. This research is therefore interested in developing a drying system using solar energy. The objective is to build and design a solar chimney dryer with numerical simulation. Which uses ANSYS-FLUENT 18 to investigate the dryer for finding the right shape by adjusting the Area ratio (AR) equal to 0.5, 1, 2, 4, 8, 16, 20, 25 and adjust the optimum height of the machine to 1.5 m. and 2 m. , including the shape of the dryer and the number of trays. It was found that the flow rate increased when the area ratio increased with the highest flow rate of 6.93 L/s at AR16. The air temperature in the dryer was 33-35 °C. Drying in the solar chimney dryer can reduce humidity more than natural drying by 5-13.4 percent and Two term predicted the kinetics of the thin layer drying of the tilapia to be the most accurate, with R^2 equal to 0.995 and RMSE is 0.001.

School of Mechanical Engineering

Academic year 2019

Student's Signature



Advisor's Signature



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัยจากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อาทิตย์ คุณศรีสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งเป็นทั้ง ผู้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางวิชาการ อีกทั้งยังคอยแนะนำและผลักดันการทำวิทยานิพนธ์ คอยฝึก ให้ข้าพเจ้าได้พัฒนาตนเองอยู่ตลอดเวลา และนอกจากคอยให้คำแนะนำเรื่องวิชาการแล้วยังได้ ให้คำแนะนำต่าง ๆ ในการใช้ชีวิต การทำงาน ด้วยความปรารถนาดีต่อลูกศิษย์คนนี้อย่างเต็มที่ ซึ่งหาก ไม่มีท่านอาจารย์ตัวข้าพเจ้าคงไม่มีวันที่ประสบความสำเร็จดังทุกวันนี้ จึงขอกราบขอบพระคุณแก่ ท่านอาจารย์ด้วยความเคารพยิ่ง และจะนำคำสอนที่ได้รับมาไปใช้ในการดำเนินชีวิตตลอดไป

ขอขอบคุณทุนจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช) ผ่านมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มอบทุนในการทำงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมร พรชื่นชูวงศ์ ที่ให้คำแนะนำและความ อนุเคราะห์ให้ใช้สถานที่ในการทำงานวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ในสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่านที่เคยสั่งสอนตัว ข้าพเจ้าตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน

ขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ทุกคนที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจกันเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่คอยอยู่เบื้องหลังเสมอมา อดทน ทำงานหนักส่งลูกคนนี้เรียนจนถึงวันที่ตัวข้าพเจ้าประสบความสำเร็จ

สรวิษ กล้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฅ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
2 ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 การอบแห้ง.....	4
2.3 การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์.....	6
2.3.1 การตากแดดตามธรรมชาติ.....	6
2.3.2 การอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์.....	7
2.4 ความชื้นของวัสดุ.....	9
2.5 ความชื้นสัมบูรณ์.....	10
2.6 ความชื้นสัมพัทธ์.....	11
2.7 ความชื้นสมดุล.....	11

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.8	อัตราส่วนความชื้น.....	11
2.9	อัตราการอบแห้ง.....	12
2.10	วิธีการหาความชื้น.....	12
2.11	การถ่ายเทความร้อน.....	12
	2.11.1 การนำความร้อน (Conduction).....	13
	2.11.2 การพาความร้อน (Convection).....	13
	2.11.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation).....	15
	2.11.4 สัมประสิทธิ์การพาความร้อน.....	15
2.12	แรงลอยตัว.....	17
2.13	ค่าเลขกราชอฟ.....	19
2.14	การพาแบบอิสระผ่านแผ่นระนาบตั้ง.....	20
2.15	สมการชั้นผิวบาง.....	20
2.16	การถ่ายเทมวล.....	23
2.17	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องถ่ายเทมวล.....	23
2.18	การถ่ายเทมวล.....	23
3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	29
	3.1 บทนำ.....	29
	3.2 ตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม.....	29
	3.2.1 โรงไฟฟ้าปล่องลมแดด.....	29
	3.2.2 เงื่อนไขและขอบเขตการจำลองการไหล ในโรงไฟฟ้าปล่องลมแดด.....	30
	3.3 ออกแบบเครื่องอบแห้งปล่องลมแดด.....	31
	3.4 ออกแบบเครื่องอบแห้งปล่องลมแดด.....	33
	3.4.1 กรณีศึกษาในการจำลอง.....	34
	3.4.2 โดเมนในการจำลอง.....	36
	3.4.3 การสร้างเมช (Mesh).....	37

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.4	เงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขการคำนวณ.....	38
3.5	การสร้างเครื่องต้นแบบ.....	41
3.5.1	การติดตั้งชุดเก็บข้อมูล.....	44
3.6	การทดสอบเพื่อประเมินประสิทธิภาพ.....	46
3.7	จลนพลศาสตร์การอบแห้งชั้นบาง.....	50
4	ผลการดำเนินการวิจัย.....	52
4.1	บทนำ.....	52
4.2	ผลการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม.....	52
4.3	อิทธิพลของอัตราส่วนพื้นที่ต่อสมรรถนะของ เครื่องอบแห้งปล่องลมแคด.....	54
4.4	อิทธิพลของจำนวนภาคต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งปล่องแคด.....	57
4.5	อิทธิพลของความสูงทางเข้าของเครื่องอบแห้งปล่องลมแคด.....	59
4.6	ผลการทดสอบเครื่องอบแห้งปล่องลมแคด (No-load).....	60
4.7	ผลการอบแห้งปลานิลเส้นแคดเดี่ยว.....	61
4.8	จลนพลศาสตร์การอบแห้งชั้นบางของปลานิล.....	66
5	บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	68
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	68
	รายการอ้างอิง.....	70
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	73
	ประวัติผู้เขียน.....	106

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	เลขน้สเซลต์การพาความร้อนแบบอิสระของแผ่นระนาบตั้ง..... 18
2.2	เปรียบเทียบอุณหภูมิของอากาศ อัตราการไหลของอากาศ และราคาในการก่อสร้าง..... 24
3.1	ขนาดและข้อมูลที่ใช้ในการจำลองโรงไฟฟ้าปล่องลมแคด 31
3.2	ขอบเขตและเงื่อนไข..... 31
3.3	ขนาดของเครื่องอบแห้ง 33
3.4	ขนาดเครื่องอบแห้งปล่องลมแคดรูปทรงวงกลม..... 35
3.5	ขนาดเครื่องอบแห้งปล่องลมแคดรูปทรงสี่เหลี่ยม..... 35
3.6	เงื่อนไขขอบเขต 39
3.7	เงื่อนไขการคำนวณ 40
3.8	รายละเอียดส่วนประกอบของเครื่องต้นแบบ..... 41
3.9	ชุดเก็บข้อมูล..... 46
3.10	รูปแบบสมการอบแห้งชั้นบาง..... 50
4.1	มวลแห้งของปลานิล..... 61
4.2	ผลการทำนายพฤติกรรมการอบแห้งชั้นบางของปลานิลเส้นแคดเดียว..... 66

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การลดลงของความชื้นวัสดุ.....	4
2.2 การตากแห้งปลานิลเส้นตามธรรมชาติ.....	7
2.3 การถ่ายเทความร้อนและมวลสารของผลผลิตซึ่งตากแดดตามธรรมชาติ.....	8
2.4 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภท Direct mode.....	8
2.5 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภท Indirect mode.....	9
2.6 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภท Mixed mode.....	9
2.7 การพาอิสระของแก่น้ำร้อน.....	14
2.8 การไหลโดยการพาอิสระผ่านแผ่นรั้นในแนวตั้ง.....	20
2.9 เครื่องอบแห้งปล่องลมแดดชนิด Direct mode.....	25
2.10 เครื่องแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกระโจม.....	26
2.11 แผนภาพของโรงงานไฟฟ้าปล่องลมแดด.....	27
2.12 แผนภาพของโรงงานไฟฟ้าปล่องลมแดด.....	27
3.1 โรงงานไฟฟ้าปล่องลมแดด.....	30
3.2 โดเมนของโรงไฟฟ้าปล่องลมแดด.....	30
3.3 เครื่องอบแห้งปล่องลมแดดรูปทรงสี่เหลี่ยม.....	32
3.4 เครื่องอบแห้งปล่องลมแดดรูปทรงวงกลม.....	32
3.5 เครื่องอบแห้งปล่องลมแดดรูปทรงสี่เหลี่ยม.....	34
3.6 เครื่องอบแห้งปล่องลมแดดรูปทรงวงกลม.....	35
3.7 โดเมนของเครื่องอบแห้งปล่องลมแดดรูปทรงสี่เหลี่ยม.....	36
3.8 โดเมนของเครื่องอบแห้งปล่องลมแดดรูปทรงวงกลม.....	36
3.9 ลักษณะกริดแบบ Tetrahedron ของรูปทรงสี่เหลี่ยม.....	37
3.10 ลักษณะกริดแบบ Tetrahedron ของรูปทรงวงกลม.....	37
3.11 ความเป็นอิสระของกริด.....	38
3.12 เงื่อนไขขอบเขตของโดเมน.....	39
3.13 โครงสร้างของเครื่องอบแห้งปล่องลมแดด.....	42

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.14	พลาสติกใสหุ้มเครื่อง.....	42
3.15	ตะแกรงสแตนเลส.....	43
3.16	เครื่องอบแห้งปล่องลมแคครูปทรงสี่เหลี่ยม.....	43
3.17	เครื่องอบแห้งปล่องลมแคครูปทรงวงกลม.....	44
3.18	การติดตั้งชุดเก็บข้อมูล.....	45
3.19	เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ.....	45
3.20	Pyranometer.....	46
3.21	ปลานิลเส้น.....	48
3.22	ตัวอย่างปลานิลเส้น.....	48
3.23	อบโดยใช้ตู้อบลมร้อน.....	49
3.24	อบแห้งปลานิลเส้น โดยใช้เครื่องอบแห้งปล่องลมแคค.....	49
3.25	ตากแห้งปลานิลเส้นโดยธรรมชาติ.....	50
4.1	ความเร็วในโรงไฟฟ้าปล่องลมแคค.....	53
4.2	อุณหภูมิในโรงไฟฟ้าปล่องลมแคค.....	53
4.3	อิทธิพลของอัตราส่วนพื้นที่ต่ออัตราการไหล.....	54
4.4	การหมุนวนบริเวณทางออก.....	55
4.5	อิทธิพลของอัตราส่วนพื้นที่ต่ออุณหภูมิบริเวณทางออก.....	55
4.6	ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับความสูงภายใน เครื่องอบแห้งปล่องลมแคครูปทรงสี่เหลี่ยม.....	56
4.7	ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับความสูงภายใน เครื่องอบแห้งปล่องลมแคครูปทรงวงกลม.....	56
4.8	อิทธิพลของจำนวนภาคต่ออัตราการไหล.....	57
4.9	อิทธิพลของจำนวนภาคต่ออุณหภูมิบริเวณทางออก.....	58
4.10	อิทธิพลของ Porosity ต่ออุณหภูมิทางออก.....	58
4.11	อิทธิพลของความสูงทางเข้าต่ออัตราการไหล.....	59
4.12	ข้อมูลการทดสอบเครื่องอบแห้งปล่องลมแคค (No-load).....	60

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 ความสัมพันธ์ของความชื้นกับเวลาของปลานิลเส้นแคตเดี่ยวใน เครื่องอบแห้งปล่องลมแคตรูปทรงสี่เหลี่ยม 2 ถาด	62
4.14 ความสัมพันธ์ของความชื้นกับเวลาของปลานิลเส้นแคตเดี่ยวใน เครื่องอบแห้งปล่องลมแคตรูปทรงสี่เหลี่ยม 3 ถาด	62
4.15 ความสัมพันธ์ของความชื้นกับเวลาของปลานิลเส้นแคตเดี่ยวใน เครื่องอบแห้งปล่องลมแคตรูปทรงวงกลม 2 ถาด.....	63
4.16 ความสัมพันธ์ของความชื้นกับเวลาของปลานิลเส้นแคตเดี่ยวใน เครื่องอบแห้งปล่องลมแคตรูปทรงวงกลม 3 ถาด.....	63
4.17 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับเวลา.....	65
4.18 ความสัมพันธ์ของความชื้นสัมพัทธ์กับเวลา.....	65
4.19 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา.....	66



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

M_w	=	ความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basis)
M_d	=	ความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry basis)
w	=	มวลของวัสดุ, g
w_d	=	มวลแห้งของวัสดุ, g
ω	=	อัตราส่วนความชื้น, kg/kg _a
m_v	=	มวลไอน้ำในอากาศชื้น, kg _v
m_d	=	มวลอากาศแห้ง, kg _a
m_g	=	มวลไอน้ำในอากาศอิ่มตัว, kg _g
\dot{m}	=	อัตราการไหลอากาศ, kg/s
m_g	=	มวลไอน้ำที่ระเหย, kg
m_p	=	มวลของผลผลิต, kg
RH	=	ความชื้นสัมพัทธ์, kg _v /kg _g
M	=	ความชื้นที่เวลาใด ๆ (% d.b.)
M_0	=	ความชื้นเริ่มต้น (% d.b.)
M_e	=	ความชื้นสมดุล (% d.b.)
M_T	=	ความชื้นที่เวลา t (% d.b.)
t	=	เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง, (นาที)
\dot{Q}	=	ปริมาณความร้อน, kW
q''	=	การถ่ายเทพลังงานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่, W/m ²
c_p	=	ความร้อนจำเพาะ, kJ/kg.K
$c_{p,P}$	=	ความร้อนจำเพาะของผลผลิต, kJ/kg.K
k	=	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน, W/m.°C
h	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, W/m ² .°K
h_{fg}	=	ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (ที่ความดันบรรยากาศ), kJ/kg
ΔT	=	ความแตกต่างของอุณหภูมิ, K

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

dT	=	ความแตกต่างของอุณหภูมิ, K
dx	=	ความแตกต่างของระยะทางที่ความร้อนเคลื่อนผ่าน, m
T_s	=	อุณหภูมิพื้นผิววัสดุ, K
T_a	=	อุณหภูมิอากาศสิ่งแวดล้อม, K
T_s^4	=	อุณหภูมิของวัสดุที่ปล่อยรังสีความร้อน, K
T_∞^4	=	อุณหภูมิอากาศสิ่งแวดล้อม, K
T	=	อุณหภูมิสมบูรณ์, K
T_∞	=	อุณหภูมิสมบูรณ์ของของไหลที่อยู่ห่างไกล, K
$T_{out,c}$	=	อุณหภูมิทางออกหลังรับแสง, K
$T_{in,c}$	=	อุณหภูมิทางเข้าหลังรับแสง, K
$T_{P,t+dt}$	=	อุณหภูมิของผลผลิตเมื่อเวลาผ่านไป, K
$T_{P,t}$	=	อุณหภูมิเริ่มต้นของผลผลิต, K
A	=	พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน, m^2
ε	=	Emissivity มีค่าในช่วง $(0 \leq \varepsilon \leq 1)$
σ	=	Stefan-Boltzmann Constant = $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$
Nu	=	Nusselt Number
Ra	=	Rayleigh Number
Gr	=	Grashof Number
Pr	=	Prandtl Number
$F_{buoyancy}$	=	แรงลอยตัว, N
ρ_{fluid}	=	ความหนาแน่นของของไหล, kg/m^3
ρ	=	ความหนาแน่น, kg/m^3
ρ_∞	=	ความหนาแน่นของของไหลที่อยู่ห่างไกล, kg/m^3
g	=	ความเร่งโน้มถ่วง, m/s^2
V_{body}	=	ปริมาตรของวัตถุที่จมอยู่ในของไหล, m^3
β	=	สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตร
x	=	ความยาวคุณลักษณะของโครงร่าง, m
v	=	ความหนืดจลศาสตร์ของของไหล, m^2/s

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

k_g	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล
P_{vsf}	=	Water vapor partial pressure of surface
P_{va}	=	Water vapor partial pressure of air
A_c	=	พื้นที่ของหลังคารับแสง, m^2
I_T	=	ความเข้มแสงแดด, W/m^2
η_C	=	ประสิทธิภาพหลังคารับแสง
η_E	=	ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง
η_D	=	ประสิทธิภาพการอบแห้ง



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย

ประเทศไทยเป็นประเทศที่ประชากรทำอาชีพเกษตรกรรมถึง 34% (สำนักงานสถิติแห่งชาติ, 2557) ผลผลิตที่ได้ในแต่ละปีนั้นมีปริมาณมาก เช่น ข้าวในปีมีปริมาณ 25.5 ล้านตัน มันสำปะหลังโรงงานมีปริมาณ 31 ล้านตัน (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2559) รวมถึงผลผลิตจำพวกเนื้อสัตว์เมื่อไม่สามารถขายได้ทันทีจะเกิดการเน่าเสีย วิธีหนึ่งในการยืดอายุผลผลิตสามารถทำได้โดยการอบแห้งผลผลิตซึ่งช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับผลผลิตได้อีก เช่น การทำกล้วยตาก การทำเนื้อแดดเดียว การทำปลาแดดเดียว การอบแห้งเป็นกระบวนการหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ถนอมและเก็บรักษาผลผลิตทางการเกษตร โดยผลผลิตที่ผ่านกระบวนการอบแห้งจะมีความชื้นลดลงทำให้จุลินทรีย์ที่อยู่ในผลผลิตมีอัตราการเจริญเติบโตช้าลงส่งผลให้ผลผลิตไม่เน่าเสียง่าย ซึ่งปัจจุบันมีเครื่องอบแห้งขายอยู่ทั่วไปในท้องตลาดโดยการใช้เทคนิคการอบแห้งด้วยพลังงานจากแหล่งต่าง ๆ เช่น พลังงานไฟฟ้า พลังงานความร้อนจากชีวมวล คลื่นไมโครเวฟ รังสีอินฟราเรด พลังงานลมร้อน เป็นต้น อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีการอบแห้งที่กล่าวมาข้างต้นมีค่าใช้จ่ายในการอบแห้งยังค่อนข้างสูง อีกทั้งราคาเครื่องอบแห้งก็สูงด้วย (อัจฉรา แซ่โคว้ และคณะ, 2556) จึงได้มีการพัฒนาระบบการอบแห้งเพิ่มมากขึ้น มีการเลือกใช้แหล่งพลังงานที่เหมาะสมมาใช้ในกระบวนการอบแห้งเพื่อเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับเกษตรกรในการเลือกใช้ และลดต้นทุนค่าใช้จ่ายสำหรับกระบวนการอบแห้งผลผลิต โดยยังคงรักษาคุณภาพของผลผลิตไว้ได้นาน (สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์, 2540) ทางเลือกหนึ่งคือการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการอบแห้ง เพราะไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายด้านพลังงานในการอบแห้ง ไม่ต้องพึ่งพาไฟฟ้า จึงไม่จำเป็นต้องอยู่ใกล้กับแหล่งจ่ายไฟฟ้า และราคาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ยังถูกกว่าเครื่องอบแห้งชนิดอื่น ๆ เป็นการลดค่าใช้จ่ายในการอบแห้งของเกษตรกร การอบแห้งที่เกษตรกรนิยมใช้คือ การตากแห้งโดยธรรมชาติ แต่เนื่องจากข้อเสียต่าง ๆ เช่น ผลผลิตโดนฝน ฝุ่น และเชื้อโรคจากแมลง ระบบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์จึงเป็นที่นิยมในปัจจุบัน แต่ด้วยสมรรถนะการอบแห้งต่ำของเครื่องอบแห้งประเภทนี้จึงควรพัฒนาต่อยอดเพื่อเพิ่มสมรรถนะการอบแห้ง

ในงานวิจัยฉบับนี้เพื่อที่จะช่วยให้เกษตรกรยืดอายุของผลผลิตทางการเกษตร โดยมีต้นทุนไม่สูง ไม่ต้องใช้พลังงานไฟฟ้า วิทยานิพนธ์นี้จึงสนใจที่จะออกแบบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ให้มีสมรรถนะการอบแห้งที่ดีขึ้น

โดย Taghaddosi (2005) และ Saitoh et al. (2007) กล่าวว่าการใช้สารทำงานของวัฏจักรเป็นสารอินทรีย์ที่มีอุณหภูมิมีตัวต่ำ ทำให้ระบบสามารถทำงานที่อุณหภูมิระเหยต่ำได้ และยังสามารถใช้ผลิตรกระแสไฟฟ้าในระบบการผลิตขนาดเล็กรวมถึงการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์ได้อีกด้วย

ดังนั้นการนำความร้อนทิ้งจากศูนย์ข้อมูลมาเป็นแหล่งความร้อนให้กับโรงไฟฟ้าโออาร์จีจึงมีความน่าสนใจ ในวิทยานิพนธ์นี้จึงทำการศึกษาความเป็นไปได้ที่จะนำเอาความร้อนจากศูนย์ข้อมูลมาใช้ในการผลิตรกระแสไฟฟ้าด้วยโรงไฟฟ้าโออาร์จีพร้อมทั้งออกแบบระบบโออาร์จีเพื่อผลิตรกระแสไฟฟ้าจากความร้อนทิ้งของศูนย์ข้อมูลด้วยวิธีจำลองเชิงตัวเลข นอกจากนี้ยังมีการประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตรกระแสไฟฟ้าดังกล่าวเพื่อเป็นทางเลือกสำหรับการใช้ความร้อนทิ้งจากศูนย์ข้อมูลอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อออกแบบรูปทรงของเครื่องอบแห้งชนิดปล่องลมแดดแบบปล่องบานด้วยการจำลองเชิงตัวเลข

1.2.2 เพื่อสร้างและประเมินเครื่องอบแห้งต้นแบบชนิดปล่องลมแดดแบบปล่องบาน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ใช้วิธีการศึกษาเชิงตัวเลข

1.3.2 ศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนรูปทรงของเครื่องอบแห้งปล่องลมแดด กำหนดโดยอัตราส่วนพื้นที่ทางออกต่อทางเข้า โดยมีค่าเท่ากับ 0.5, 1, 2, 4, 8, 16, 20, 25

1.3.3 ศึกษาผลกระทบของความสูงของเครื่องอบแห้งปล่องลมแดดที่สูง 1 และ 2 เมตร

1.3.4 ศึกษาผลกระทบของจำนวนถาด 2 และ 3 ถาด

1.3.5 ใช้ปลานิลเป็นผลิตภัณฑ์ในการอบแห้ง

1.3.6 ใช้สภาพอากาศของ อ.เมือง จ.นครราชสีมา

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

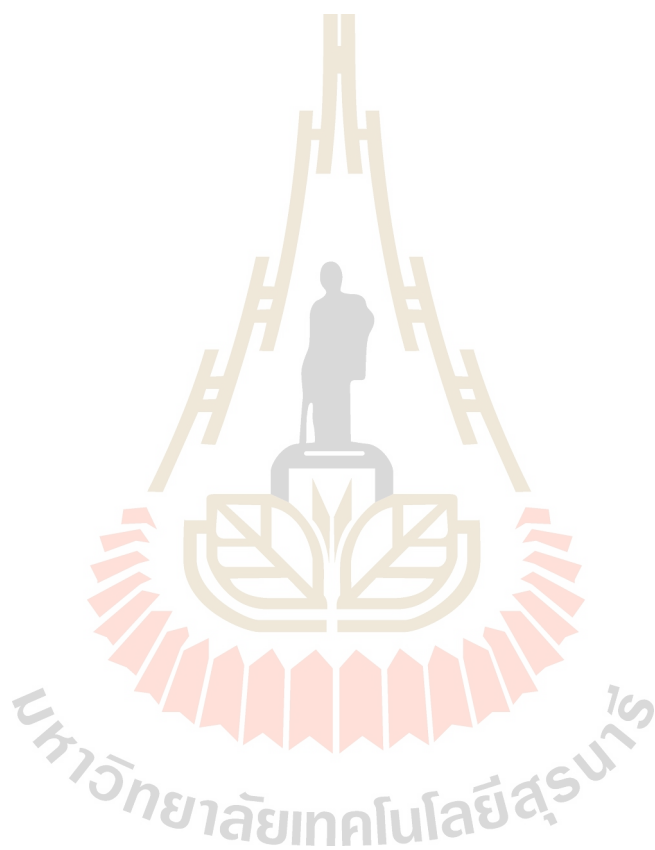
1.4.1 ได้ทางเลือกใหม่ในการออกแบบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

1.4.2 ได้เครื่องอบแห้งปล่องลมแดดแบบปล่องบานที่มีการถ่ายเทอากาศภายในห้องอบแห้งดีขึ้น

1.4.3 ได้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีสมรรถนะการอบแห้งดีขึ้น

1.5 สถานที่ทำการวิจัย

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ และบริเวณลานหน้าศูนย์วิจัย
มันสำปะหลังและผลิตภัณฑ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา



บทที่ 2

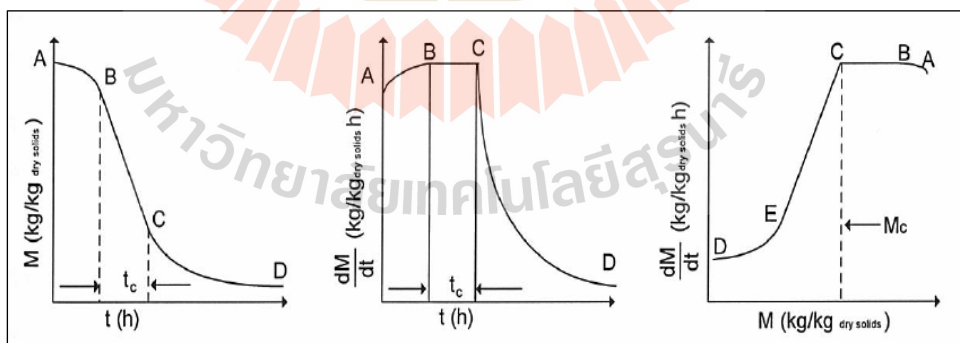
ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

การอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นการใช้ประโยชน์จากพลังงานที่ไม่เสียค่าใช้จ่าย อีกทั้งยังช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้า พลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งเป็นข้อดีของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ อย่างไรก็ตาม พบว่าข้อเสียประการหนึ่งของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์คือ อัตราการไหลและอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งนั้นต่ำ ซึ่งส่งผลให้กระบวนการอบแห้งเกิดขึ้นช้า

2.2 การอบแห้ง

การอบแห้ง (Drying) คือ กระบวนการลดความชื้นที่มีอยู่ในผลผลิตให้ลดลงจนมีความชื้นอยู่ในปริมาณที่เหมาะสมต่อการรักษา การอบแห้งสามารถยืดอายุของผลผลิตไว้ได้นานโดยที่ผลผลิตไม่เสียหายจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ซึ่งผลผลิตทางการเกษตรหลายชนิดจำเป็นต้องพึ่งกระบวนการอบแห้งก่อนการเก็บรักษาได้แก่ ข้าว มันสำปะหลัง ธัญพืช ผลไม้ สมุนไพร เนื้อสัตว์ ฯลฯ เป็นต้น



รูปที่ 2.1 การลดลงของความชื้นวัสดุ (เทวรัตน์ ทิพย์วิมล, 2552)

การอบแห้งส่วนใหญ่ใช้หลักการการถ่ายเทความร้อนไปยังผลผลิตที่ชื้นเพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหยจากเนื้อผลผลิต ซึ่งความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการระเหยและความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิวัสดุ โดยปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการอบแห้ง ได้แก่ อุณหภูมิ

ความชื้นสัมพัทธ์ อัตราการไหลของอากาศ และประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง โดยทั่วไป พฤติกรรมของกระบวนการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนเป็นตัวกลางในการพาความชื้นออกจากวัสดุ แสดงดังรูปที่ 2.1 โดยแบ่งการอบแห้งออกเป็น 3 ช่วง

ช่วง A-B ช่วงนี้เป็นช่วงสถานะที่ผิวของวัสดุเข้าสู่สมดุลกับอากาศเกิดขึ้นเมื่อเริ่มทำการอบแห้ง ความร้อนจากลมร้อนจะถ่ายเทสู่ผิววัสดุจนถึงค่า ๆ หนึ่งซึ่งมีความสมดุลระหว่างผิววัสดุกับอากาศ

ช่วง B-C ช่วงนี้เป็นช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant rate period of drying) ช่วงนี้ผิววัสดุยังคงชุ่มไปด้วยน้ำซึ่งจะถูกนำออกจากผิววัสดุด้วยการระเหยซึ่งอัตราการอบแห้งในช่วงนี้จะขึ้นอยู่กับอัตราการถ่ายเทความร้อนไปยังผิวของการอบแห้ง อัตราการถ่ายเทความร้อนมีความสมดุลกับอัตราการถ่ายเทความร้อนจึงทำให้อุณหภูมิที่ผิวของวัสดุอบแห้งคงที่ ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศอบแห้ง

ช่วง C-D ช่วงนี้เป็นช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate period) เนื่องจากปริมาณความชื้นภายในเนื้อวัสดุเคลื่อนที่เข้าสู่ผิวด้านนอกลดลง ณ จุด C ในรูปที่ 2.1 อัตราการอบแห้งเริ่มลดลงความชื้นของวัสดุที่จุดนี้เรียกว่า “ความชื้นวิกฤต (Critical moisture content)” เมื่อกระบวนการอบแห้งดำเนินต่อไปอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดกระบวนการ โดยปกติช่วงอัตราการอบแห้งลดลงประกอบไปด้วยสองช่วงคือ ช่วงของการอบแห้งลดลงส่วนที่ 1 (C-E) ช่วงนี้ผิวของวัสดุจะแห้งและอัตราการอบแห้งลดลง ช่วงของการอบแห้งลดลงส่วนที่ 2 (E-D) ช่วงนี้ระนาบของการระเหยจะเคลื่อนตัวเข้าสู่ภายในเนื้อวัสดุและผลกระทบจากปัจจัยภายนอก เช่น อัตราการไหลของอากาศมีค่าน้อยลง เมื่อพิจารณาตลอดกระบวนการอบแห้งจะพบว่าช่วงของการอบแห้งลดลงเป็นช่วงหลักที่เกิดขึ้น

อัตราการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนจะเกิดช้าหรือเร็วขึ้นมีปัจจัยที่สำคัญซึ่งมีผลต่ออัตราการอบแห้งคือ

1. ลักษณะทางธรรมชาติของวัสดุ เป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง ถ้าสภาพทางธรรมชาติของวัสดุเอื้ออำนวยต่อการส่งผ่านความร้อนไปยังโมเลกุลของน้ำภายในเนื้อวัสดุและเอื้ออำนวยต่อการเคลื่อนที่ของไอน้ำออกจากวัสดุ เช่น วัสดุที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุน โมเลกุลของน้ำในเนื้อวัสดุสามารถเคลื่อนที่ออกมาได้ง่ายทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น

2. ขนาดและรูปร่างของวัสดุ วัสดุที่มีขนาดและรูปร่างที่ทำให้อัตราส่วนของพื้นที่ต่อปริมาตรมาก จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งผ่านความร้อนให้ทั่วชิ้นวัสดุทำให้การระเหยน้ำออกจากเนื้อวัสดุดีขึ้น อัตราการอบแห้งจึงเร็วขึ้น

3. ปริมาณและการจัดเรียงวัสดุ วัสดุที่นำมาจัดเรียงซ้อนกันหลาย ๆ ชั้นในถาดทำให้ปริมาณของวัสดุต่อถาดมากเกินไปจะทำให้วัสดุที่อยู่บริเวณตรงกลางได้รับความร้อนไม่ทั่วถึงทำให้บริเวณนั้นมีอัตราการอบแห้งที่ช้า การจัดเรียงที่เหมาะสมควรทำการจัดเรียงเป็นแบบชั้นบางเพื่อให้วัสดุได้รับความร้อนอย่างสม่ำเสมอ

4. ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศร้อนกับวัสดุมีมากทำให้การถ่ายเทความร้อนสู่น้ำในเนื้อวัสดุได้จึงทำให้น้ำในเนื้อวัสดุเคลื่อนที่และระเหยได้เร็วขึ้น ถึงแม้ว่าอุณหภูมิที่สูงจะทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้นแต่ก็ต้องคำนึงถึงความเหมาะสมกับวัสดุที่ใช้ในการอบแห้งด้วย

5. ความชื้นของอากาศร้อน หากความชื้นของอากาศร้อนมีค่ามากจะมีผลให้การเคลื่อนที่ของน้ำและการระเหยของไอน้ำออกจากเนื้อวัสดุได้ยาก

6. คุณสมบัติเชิงความร้อนและฟิสิกส์ของวัสดุ คุณสมบัติเชิงความร้อนของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งคือ ความร้อนจำเพาะ สภาพการนำความร้อน และการแพร่ความร้อน ส่วนคุณสมบัติทางฟิสิกส์ ได้แก่ ความหนาแน่นจริง ความหนาแน่นปรากฏ และสัดส่วนช่องว่างอากาศในกองวัสดุ (เทวรัตน์ ทิพย์วิมล, 2552)

ประโยชน์ของการอบแห้ง

1. ช่วยให้เกิดรักษาผลผลิตหรืออาหารได้นานขึ้น เนื่องจากลดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ เชื้อรา

2. ประหยัดพื้นที่ในการเก็บรักษาและลดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง เนื่องจากปริมาตรและน้ำหนักของผลผลิตหรืออาหารลดลง

3. ควบคุมปริมาณและราคาของผลผลิตทางการเกษตรตามฤดูกาลที่ออกสู่ตลาด ซึ่งมักมีปริมาณมาก

4. ปรับปรุงกระบวนการแปรรูปและเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์

2.3 การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar drying) เป็นวิธีอบแห้งที่ถูกใช้มานานเพราะสะดวกและเสียค่าใช้จ่ายน้อยหรือไม่มีค่าใช้จ่ายเลย ซึ่งสามารถแบ่งได้ 2 วิธี คือ การตากแดดตามธรรมชาติ และการอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

2.3.1 การตากแดดตามธรรมชาติ

การตากแดดตามธรรมชาติ เป็นวิธีที่ถูกใช้มาตั้งแต่มนุษย์เริ่มรู้จักการถนอมอาหาร มีลักษณะดังรูปที่ 2.2 รังสีอาทิตย์ตกกระทบผลผลิตและบางส่วนจะถูกสะท้อนออกไปภายนอก บางส่วนจะถูกผลผลิตดูดกลืนและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งทำให้น้ำในผลผลิตระเหย

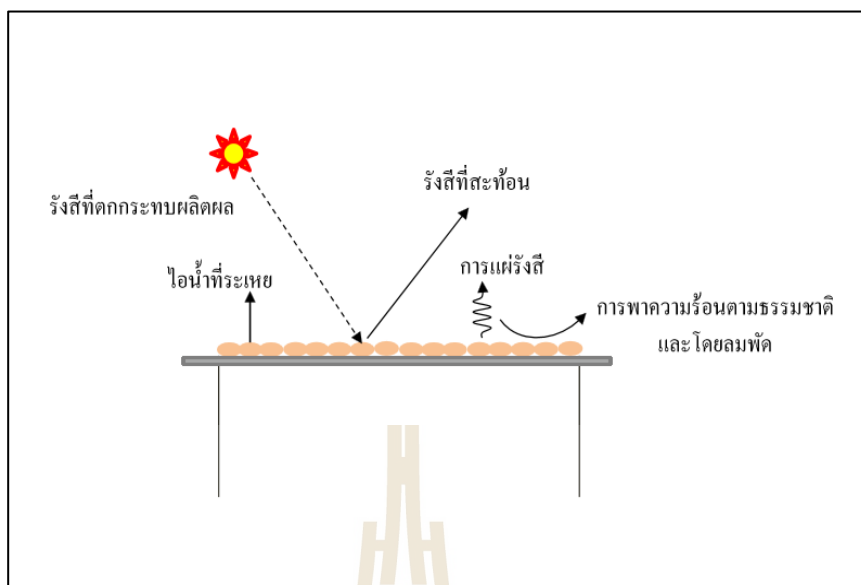
ออกมาสู่อากาศแวดล้อม โดยความร้อนที่เกิดขึ้นบางส่วนจะสูญเสียไปโดยการพาความร้อนโดยลม (Force convection) การพาความร้อนตามธรรมชาติ (Natural convection) และการแผ่รังสีสู่ท้องฟ้า และสิ่งแวดล้อม ดังรูปที่ 2.3 จะเห็นว่า การตากแดดตามธรรมชาติเป็นการใช้พลังงานรังสีอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำ เพราะมีการสูญเสียความร้อนมาก นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์มักได้รับความเสียหายจากแมลงและสัตว์ต่าง ๆ ตลอดจนการเปื้อกฝนระหว่างการตากแห้ง

2.3.2 การอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

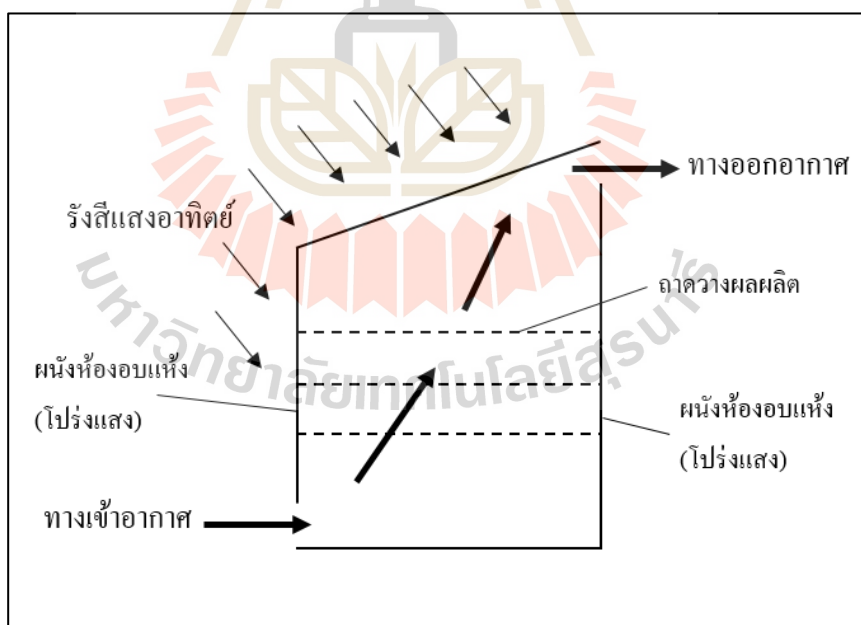
จากปัญหาของการตากแดดตามธรรมชาติดังกล่าว Ismailova (1957) เป็นคนแรกที่เสนอแนวคิดเกี่ยวกับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ โดยพัฒนาเครื่องอบแห้ง 3 แบบ ได้แก่ 1) แบบที่รังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบผลผลิตได้โดยตรง (Direct mode) 2) แบบที่รังสีแสงอาทิตย์ไม่ตกกระทบผลผลิตแต่ใช้ลมร้อนจากตัวทำลมร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ (Indirect mode) 3) แบบที่รังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบผลผลิตและใช้ลมร้อนจากตัวทำลมร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ (Mixed-mode) ดังรูปที่ 2.4-2.6 ตามลำดับ และได้ทดสอบกับแอปเปิ้ลขึ้นบาง ๆ ซึ่งผลการทดสอบพบว่าเครื่องอบแห้งทั้ง 3 แบบ ทำงานได้ดี ประหยัดพลังงาน และแก้ปัญหาต่าง ๆ ของการตากแดดตามธรรมชาติได้



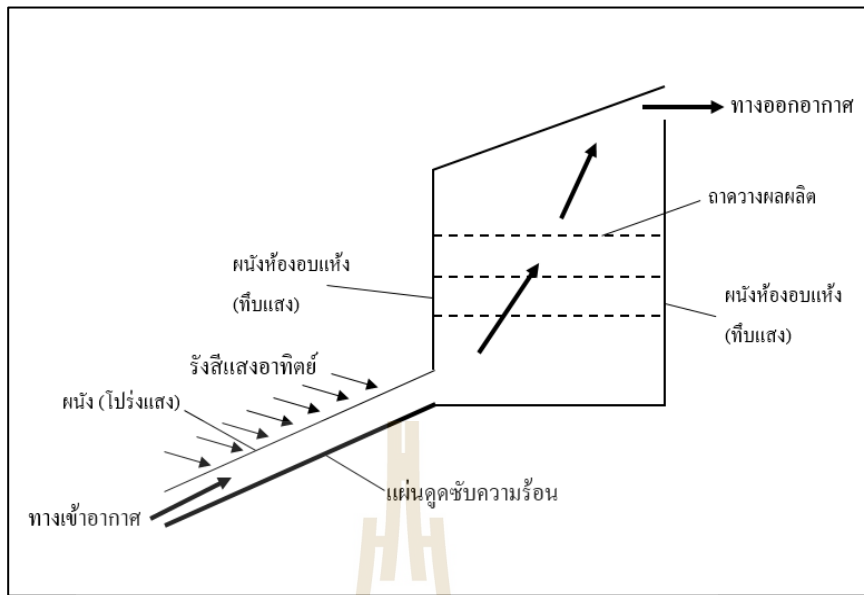
รูปที่ 2.2 การตากแห้งปลานิลเส้นตามธรรมชาติ



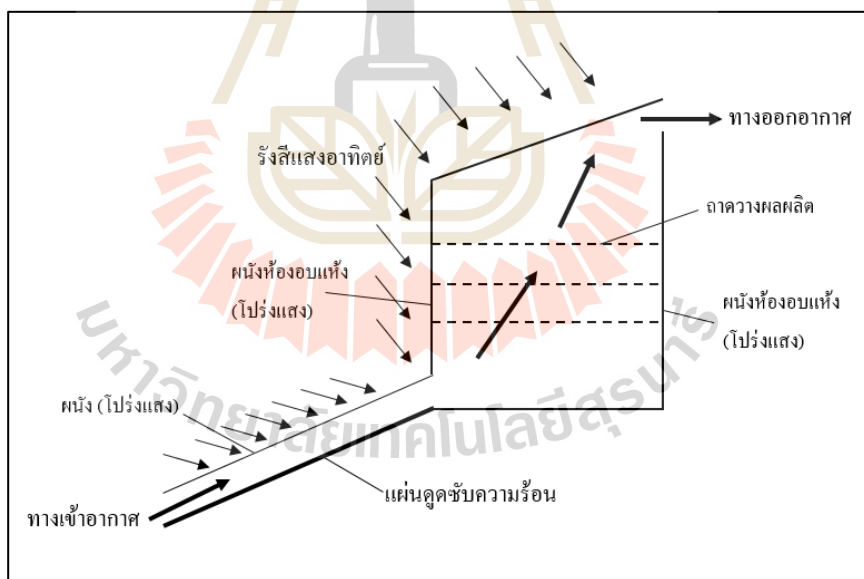
รูปที่ 2.3 การถ่ายเทความร้อนและมวลสารของผลผลิตซึ่งตากแดดตามธรรมชาติ
(เสริม จันทร์ฉาย, 2560)



รูปที่ 2.4 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภท Direct mode



รูปที่ 2.5 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภท Indirect mode



รูปที่ 2.6 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภท Mixed mode

2.4 ความชื้นของวัสดุ

ความชื้นของวัสดุสามารถแบ่งออกได้ 2 ชนิด คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basis) และ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry basis)

1. ความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basis) นิยามโดยผลต่างระหว่างมวลวัสดุกับมวลแห้งของวัสดุส่วนด้วยมวลของวัสดุ (Afriyie et al., 2016) ดังสมการที่ 2.1 ซึ่งความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basis) นิยมใช้ในทางการค้า ส่วนใหญ่อยู่ในรูปเปอร์เซ็นต์

$$M_w = \frac{W - W_d}{W} \quad (2.1)$$

2. ความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry basis) นิยามโดยผลต่างระหว่างมวลวัสดุกับมวลแห้งของวัสดุส่วนด้วยมวลแห้งของวัสดุ (Afriyie et al., 2016) ดังสมการที่ 2.2 ความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry basis) นิยมใช้ในการวิเคราะห์ทางทฤษฎี เพราะมวลแห้งของวัสดุคงที่ จึงง่ายต่อการคำนวณ

$$M_d = \frac{W - W_d}{W_d} \quad (2.2)$$

เมื่อ M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basis)

M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry basis)

w คือ มวลของวัสดุ, g

w_d คือ มวลแห้งของวัสดุ, g

2.5 ความชื้นสัมบูรณ์

ความชื้นสัมบูรณ์เป็นค่าที่บ่งบอกว่าอากาศมีความชื้นมากหรือน้อย ซึ่งพิจารณาจากปริมาณไอน้ำในอากาศ โดยคิดจากค่าอัตราส่วนความชื้น (Humidity Ratio) หรืออาจเรียกว่า “ความชื้นสัมบูรณ์ (Absolute Humidity)” มีนิยามคือ อัตราส่วนมวลของไอน้ำในอากาศต่อมวลของอากาศแห้งในอากาศ (Cengel, 1998) ดังสมการที่ 2.3

$$\omega = \frac{m_v}{m_d} \quad (2.3)$$

เมื่อ ω คือ อัตราส่วนความชื้น, kg/kg_a

m_v คือ มวลไอน้ำในอากาศชื้น, kg_v

m_d คือ มวลอากาศแห้ง, kg_a

2.6 ความชื้นสัมพัทธ์

ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงสถานะของอากาศว่าเข้าใกล้สภาวะอิ่มตัวหรือไม่ ซึ่งพิจารณาจากอัตราส่วนมวลไอน้ำในอากาศต่อมวลไอน้ำในอากาศอิ่มตัว ความชื้นสัมพัทธ์มีค่าระหว่าง 0-100% (Cengel, 1998) โดยนิยามดังสมการที่ 2.4

$$RH = \frac{m_v}{m_g} \quad (2.4)$$

เมื่อ RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์, kg_v/kg_g
 m_v คือ มวลไอน้ำในอากาศชื้น, kg_v
 m_g คือ มวลไอน้ำในอากาศอิ่มตัว, kg_g

2.7 ความชื้นสมดุล

ความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content, EMC) คือ ค่าความชื้นซึ่งค่าความดันไอกภายในวัสดุมีค่าเท่ากับความดันไอกของสิ่งแวดล้อม เป็นค่าที่สำคัญต่อการศึกษารอบแห้ง เพราะค่า EMC เป็นตัวบ่งบอกถึงค่าความชื้นต่ำสุดของวัสดุอบแห้งภายใต้สภาวะใด ๆ ความชื้นสมดุลของวัสดุแต่ละชนิดมีค่าเฉพาะตัว ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

2.8 อัตราส่วนความชื้น

อัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) เป็นค่าที่นิยมในการศึกษาเรื่องการอบแห้ง เพราะเป็นตัวแปรไร้มิติ ซึ่งมีประโยชน์ในการทำกราฟทดลองเพราะไม่จำเป็นต้องใช้ผลผลิตจำนวนมากในการศึกษา นิยามโดยผลต่างระหว่างความชื้นที่เวลาใด ๆ กับความชื้นสมดุลส่วนด้วยผลต่างระหว่างความชื้นเริ่มต้นกับความชื้นสมดุล (Djebli et al., 2019) ดังสมการที่ 2.5

$$MR = \frac{(M_t - M_c)}{(M_0 - M_c)} \approx \frac{M_t}{M_0} \quad (2.5)$$

เมื่อ M_t คือ ความชื้นที่เวลาใด ๆ (%d.b.)
 M_0 คือ ความชื้นเริ่มต้น (% d.b.)
 M_c คือ ความชื้นสมดุล (% d.b.)

2.9 อัตราการอบแห้ง

อัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR) สามารถหาได้จากปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุต่อระยะเวลาในการอบแห้ง หรือปริมาณความชื้นต่อระยะเวลาในการอบแห้ง นิยามโดยผลต่างระหว่างความชื้นเริ่มต้นกับความชื้นที่เวลาใด ๆ ส่วนด้วยเวลา (Djebli et al., 2019) ดังสมการที่ 2.6

$$DR = \frac{M_0 - M_T}{t} \quad (2.6)$$

เมื่อ	M_0	คือ ความชื้นเริ่มต้น (% d.b.)
	M_T	คือ ความชื้นที่เวลา t (% d.b.)
	t	คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง, (นาที)

2.10 วิธีการหาความชื้น

การหาสามารถแบ่งได้ 2 วิธี คือ วิธีตรงและวิธีอ้อม วิธีตรงเป็นวิธีที่แม่นยำและเป็นวิธีมาตรฐาน แต่ใช้เวลานาน ส่วนวิธีอ้อมเป็นวิธีที่รวดเร็วกว่าแต่ไม่ค่อยแม่นยำเนื่องจากต้องใช้คุณสมบัติอื่นของวัสดุในการหาค่าความชื้นและยังต้องตรวจสอบเครื่องมือวัดอยู่เป็นประจำ

1. วิธีตรง มีหลักการคือระเหยความชื้นในวัสดุออกให้หมด ให้เหลือแต่มวลแห้งของวัสดุ โดยวิธีตรงที่นิยมใช้กันทั่วไปคือ การหาความชื้นด้วยตู้อบลมร้อน (Oven method) การหาความชื้นด้วยตู้อบแบบ Vacuum การกลั่นด้วยวิธี Brown-Duvel เป็นต้น
2. วิธีอ้อม มีหลักการคือวัดค่าคุณสมบัติอื่นของวัสดุแล้วนำไปเปรียบเทียบหาความชื้นต่อไป เช่น ค่าความต้านทานไฟฟ้า ค่าการนำไฟฟ้า ซึ่งค่าที่ได้เป็นค่าประมาณ ไม่แม่นยำนักจึงต้องทำการเปรียบเทียบค่าและตรวจสอบเครื่องมือวัดอยู่เสมอ

2.11 การถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อน คือ การส่งผ่านพลังงานความร้อนซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างสองแหล่งใด ๆ โดยทิศทางการส่งผ่านความร้อนจะเกิดขึ้นจากแหล่งที่มีอุณหภูมิสูงไปยังแหล่งที่อุณหภูมิต่ำ โดยการถ่ายเทความร้อนสามารถแบ่งได้ 3 ประเภท ได้แก่ การนำความร้อน (Conduction) การพาความร้อน (Convection) การแผ่รังสีความร้อน (Thermal radiation) ซึ่งในระหว่างกระบวนการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนเป็นตัวกลางในการพาความร้อนออกจากวัสดุมีการถ่ายเทเกิดขึ้นคือ การถ่ายเทความร้อนจากสิ่งแวดล้อมสู่ผิวหน้าของวัสดุอบแห้ง สามารถหาปริมาณการถ่ายเทความร้อนได้จากสมการที่ 2.7 (Cengel, 1998)

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p \Delta T \quad (2.7)$$

เมื่อ	\dot{Q}	คือ ปริมาณความร้อน, kW
	\dot{m}	คือ อัตราการไหลอากาศ, kg/s
	c_p	คือ ความร้อนจำเพาะ, kJ/kg.K
	ΔT	คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิ, K

2.11.1 การนำความร้อน (Conduction)

การนำความร้อน (Conduction) เป็นการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุ โดยสามารถอธิบายได้จากสมการ Fourier's Law of Heat Conduction (Cengel, 1998)

$$q'' = kA \frac{dT}{dx} \quad (2.8)$$

เมื่อ	q''	คือ การถ่ายเทพลังงานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่, W
	k	คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน, W/m.°C
	A	คือ พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน, m ²
	dT	คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิ, K
	dx	คือ ความแตกต่างของระยะทางที่ความร้อนเคลื่อนผ่าน, m

2.11.2 การพาความร้อน (Convection)

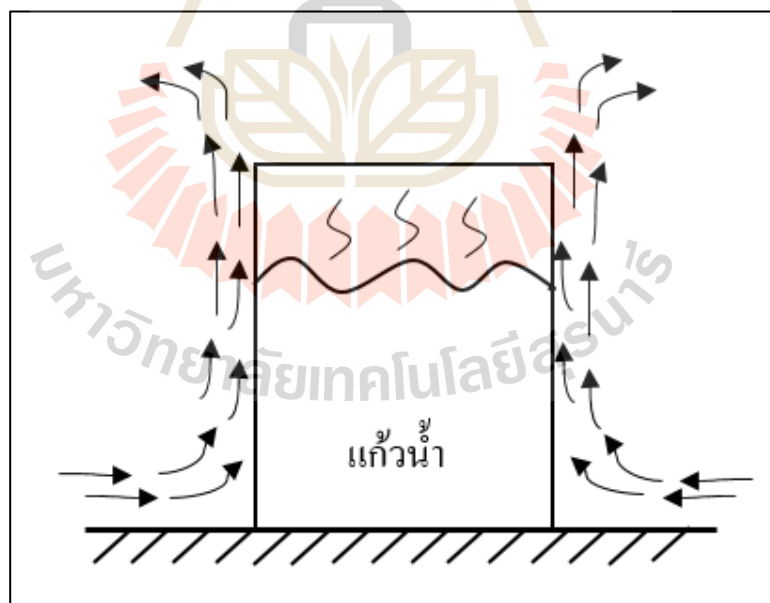
การพาความร้อน (Convection) เป็นการถ่ายเทความร้อนโดยอาศัยการเคลื่อนที่ของของไหล เกิดได้ทั้งจาก ผิวหน้าของวัตถุกับของไหลหรือของไหลกับของไหล การพาความร้อนแบ่งออกได้ 2 ลักษณะคือ

1) การพาความร้อนแบบบังคับ (Forced convection) เป็นการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวของแข็งและของไหล โดยที่ของไหลถูกบังคับให้ไหลผ่านผิวหน้าของของแข็งจากอุปกรณ์ภายนอก เช่น เครื่องเป่า พัดลม เครื่องสูบน้ำ ซึ่งสามารถอธิบายตามสมการ Newton's Law of Cooling (Cengel, 1998)

$$q'' = hA(T_s - T_a) \quad (2.9)$$

เมื่อ	q''	คือ การถ่ายเทพลังงานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่, W
	h	คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, W/m ² .K
	A	คือ พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน, m ²
	T_s	คือ อุณหภูมิพื้นผิววัสดุ, K
	T_a	คือ อุณหภูมิอากาศสิ่งแวดล้อม, K

2. การพาความร้อนแบบอิสระ (Free convection) หรืออาจเรียกว่าการพาโดยธรรมชาติ (Natural convection) ซึ่งเป็นการพาความร้อนที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ โดยการไหลเกิดขึ้นตามธรรมชาติเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ ซึ่งตัวอย่างปรากฏการณ์การพาความร้อนโดยธรรมชาติที่พบเห็นได้ในชีวิตประจำวัน คือ แก้วน้ำร้อนที่วางไว้ในสิ่งแวดล้อมอุณหภูมิต่ำกว่า เมื่อเวลาผ่านไปอุณหภูมิแก้วน้ำร้อนจะเย็นลงดังรูปที่ 2.7 ส่วนอุณหภูมิอากาศบริเวณใกล้ผิวแก้วจะสูงขึ้น เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนจากน้ำร้อนสู่แก้ว และแก้วถ่ายเทความร้อนสู่อากาศ ในช่วงแรกอุณหภูมิของน้ำร้อนจะลดลงอย่างช้า ๆ เนื่องจากรอบ ๆ ผิวของแก้วล้อมรอบด้วยชั้นอากาศร้อน โดยไม่ได้สัมผัสกับอากาศเย็นที่อยู่ชั้นถัดมา



รูปที่ 2.7 การพาอิสระของแก้วน้ำร้อน

เมื่ออากาศบริเวณชั้นชิดผิวแก้วร้อนขึ้นทำให้ความหนาแน่นมีค่าลดลง (เมื่อพิจารณาที่ความดันคงที่) ซึ่งอากาศชั้นถัดมาจากผิวแก้วมีอุณหภูมิต่ำกว่า มีความหนาแน่น

มากกว่า ความแตกต่างของความหนาแน่นส่งผลให้เกิดแรงขับดันให้อากาศร้อนที่ชั้นชิดผิวแก้วลอยตัวสูงขึ้น และอากาศที่เย็นกว่าจะไหลเข้ามาแทนที่ โดยหลักการของอากาศร้อนที่ลอยตัวขึ้น และอากาศที่เย็นกว่าจะเข้ามาแทนที่ จะเรียกว่า “Stack effect” แรงขับดันนี้เกิดขึ้นจากแรงลอยตัว (พรสวรรค์ ทองใบ, 2546)

2.11.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation)

การแผ่รังสีความร้อน (Radiation) คือ การแผ่พลังงานออกจากวัตถุที่อยู่ในรูปการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ถ้าวัตถุอื่นดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้ก็จะได้รับพลังงานความร้อน ทำให้อุณหภูมิของวัตถุสูงขึ้นการถ่ายเทความร้อนในลักษณะนี้จะมีประสิทธิภาพในสถานะที่เป็นสุญญากาศ ซึ่งอัตราการถ่ายเทความร้อนสามารถอธิบายตามสมการ Stefan-Boltzmann Law (Cengel, 1998)

$$q'' = \varepsilon \sigma A (T_s^4 - T_a^4) \quad (2.10)$$

เมื่อ	q''	คือ การถ่ายเทพลังงานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่, W/m^2
	ε	คือ Emissivity มีค่าในช่วง $(0 \leq \varepsilon \leq 1)$
	σ	คือ Stefan-Boltzmann constant = $5.67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$
	A	คือ พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน, m^2
	T_s^4	คือ อุณหภูมิของวัตถุที่ปล่อยรังสีความร้อน, K
	T_a^4	คือ อุณหภูมิอากาศสิ่งแวดล้อม, K

2.11.4 สัมประสิทธิ์การพาความร้อน

สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) จากสมการการพาความร้อนจะเห็นว่าส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน โดยการถ่ายเทความร้อนแปรผันตรงกับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน โดยทั่วไปค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนหาได้จากการทดลองแล้วนำมาสร้างสมการความสัมพันธ์โดยมีความเกี่ยวข้องกับเลขนัสเซลต์ (Nusselt number, Nu) ได้ดังนี้ (Cengel, 1998)

1) กรณีการพาความร้อนแบบอิสระ

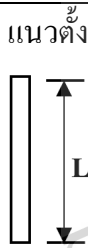
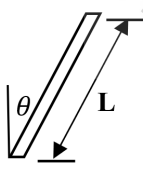
$$Nu = \frac{hL_c}{k} = C(Gr_L Pr)^n = CRa_L^n \quad (2.11)$$

เมื่อ Ra เป็นเลขเรย์ลี (Rayleigh Number), Gr เป็นเลขกราชโฮฟ (Grashof number) และ Pr เป็นเลขพรันด์เทิล (Prandtl Number) มีความสัมพันธ์ดังนี้ (Cengel, 1998)

$$Ra_L = Gr_L Pr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)x^3}{\nu^2} \quad (2.12)$$

สำหรับแผ่นระนาบที่วางแนวตั้ง (Fujii and Imura, 1972) และแนวเอียง (Churchill and Chu, 1975) สมการความสัมพันธ์เลขนัสเซลต์แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 เลขนัสเซลต์การพาความร้อนแบบอิสระของแผ่นระนาบตั้ง

ลักษณะการวางตัว	ช่วงของ Ra	Nu
 แนวตั้ง	$10^4 - 10^9$	$Nu = 0.59Ra_L^{1/4}$
	$10^{10} - 10^{13}$	$Nu = 0.1Ra_L^{1/3}$ Fujii and Imura (1972)
	ได้ทุกช่วง	$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387Ra_L^{1/6}}{\left[1 + (0.492 / Pr)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2$
	-	สามารถใช้สมการของการวางตัวในแนวตั้งได้ ถ้า $0 \leq \theta \leq 60$ แทน g ด้วย $g \cos 60$ Churchill and Chu (1975)

2) กรณีการพาความร้อนแบบบังคับ

$$Nu = \frac{hL_c}{k} = CRa_L^m Pr^n \quad (2.13)$$

เมื่อ Ra คือ ค่าเลขเรย์โนลด์ส์ m และ n เป็นตัวประกอบคงที่ของเลขยกกำลัง และ C เป็นค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปทรงและการไหลของของไหล

2.12 แรงลอยตัว

แรงลอยตัว (Buoyancy force) สามารถอธิบายได้ตามหลักการของอาร์คิมิดีส (Archimedes' principle) ว่า วัตถุที่จมอยู่ในของไหลมีน้ำหนักลดลง เพราะมีแรงพยุงจากด้านล่าง และหากวัตถุน้ำหนักเบากว่าของไหลที่มีปริมาตรเท่ากับวัตถุ แรงพยุงจะมีค่าสูงกว่าวัตถุ ทำให้วัตถุสามารถลอยตัวอยู่ในของไหลนั้น ถ้าวัตถุเป็นของไหลก็จะเกิดแรงลอยตัวสูงขึ้นในเนื้อของของไหล ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “การไหลแบบพาอิสระ (Natural convection)” ซึ่งแรงลอยตัวมีค่าเท่ากับน้ำหนักของของไหลที่ถูกแทนที่โดยวัตถุนั้น นั่นคือ (Cengel, 1998)

$$F_{\text{Buoyancy}} = \rho_{\text{fluid}} g V_{\text{body}} \quad (2.14)$$

เมื่อ	F_{Buoyancy}	คือ แรงลอยตัว, N
	ρ_{fluid}	คือ ความหนาแน่นของของไหล, kg/m^3
	g	คือ ความเร่งโน้มถ่วง, m/s^2
	V_{body}	คือ ปริมาตรของวัตถุที่จมอยู่ในของไหล, m^3

หากพิจารณาแรงที่กระทำกับวัตถุในแนวตั้งแล้ว แรงสุทธิที่กระทำกับวัตถุจะมีค่าเท่ากับน้ำหนักของวัตถุลบด้วยแรงลอยตัว ดังสมการ

$$\begin{aligned} F_{\text{net}} &= W - F_{\text{Buoyancy}} \\ &= \rho_{\text{body}} g V_{\text{body}} - \rho_{\text{fluid}} g V_{\text{body}} \\ &= (\rho_{\text{body}} - \rho_{\text{fluid}}) g V_{\text{body}} \end{aligned} \quad (2.15)$$

จากสมการที่ 2.15 จะเห็นว่า แรงสุทธิแปรผันตรงกับผลต่างระหว่างความหนาแน่นของวัตถุกับความหนาแน่นของของไหล ในกรณีของแก้วน้ำร้อนที่กล่าวมา วัตถุคืออากาศร้อนที่ขึ้นขีด

ผิวแก้ว ซึ่งมีความหนาแน่นน้อยกว่าของไหล (อากาศชั้นถัดมาจากผิวแก้วที่เย็นกว่า) แรงแสุทริจะมีทิศทางขึ้นด้านบน ซึ่งเป็นแรงผลักดันให้อากาศลอยตัวขึ้น

ในการศึกษาเรื่องแรงลอยตัวจะเห็นว่าความหนาแน่นเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ ยิ่งอุณหภูมิสูงความหนาแน่นก็จะต่ำ ส่งผลให้แรงแสุทริมีค่าสูงไปด้วย เพราะฉะนั้นอุณหภูมิจึงเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญ ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกับอุณหภูมิได้โดยใช้สมการของสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตร (Volumetric thermal expansion coefficient, β) ดังนี้

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (2.16)$$

เมื่อพิจารณาที่ความดันคงที่ จะได้

$$\beta \approx -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\Delta \rho}{\Delta T} \right)$$

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\rho_\infty - \rho}{T_\infty - T} \right)$$

$$(\rho_\infty - \rho) = \rho \beta (T - T_\infty) \quad (2.17)$$

เมื่อพิจารณาให้ของไหลเป็นแก๊สในอุดมคติ (Ideal gas) จะได้ความสัมพันธ์ตามสมการ $p = \rho RT$ ความสัมพันธ์ของค่า β จะได้ดังนี้

$$\beta_{\text{ideal gas}} = \frac{1}{T} \quad (2.18)$$

เมื่อ	β	คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตร
	ρ	คือ ความหนาแน่น, kg/m^3
	ρ_∞	คือ ความหนาแน่นของของไหลที่อยู่ห่างไกล, kg/m^3
	T	คือ อุณหภูมิสมบูรณ์, K
	T_∞	คือ อุณหภูมิสมบูรณ์ของของไหลที่อยู่ห่างไกล, K

ขนาดของค่า β ในสมการที่ 2.16-2.18 เป็นค่าที่แสดงถึงปริมาณการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป โดยค่า β มากหมายถึงความหนาแน่นเปลี่ยนแปลงไปมากเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป โดยจากเรื่องแรงลอยตัวจะเห็นว่าแรงลอยตัวแปรผันตรงกับความหนาแน่น ซึ่งความหนาแน่นแปรผันตรงกับอุณหภูมิ (เมื่อพิจารณาที่ความดันคงที่) เพราะฉะนั้นจึงกล่าวได้ว่าแรงลอยตัวแปรผันตรงกับอุณหภูมิ

2.13 ค่าเลขกราชอฟ

ค่าเลขกราชอฟเป็นค่าเลขไร้มิติที่ใช้ควบคุมลักษณะการไหลของการพาอิสระ โดยการไหลในช่วงราบเรียบค่าเลขกราชอฟต้องไม่มากกว่า 1×10^9 ถ้ามากกว่านี้จะเป็นการไหลในช่วงปั่นป่วน ซึ่งนิยามโดยสัดส่วนของแรงลอยตัวต่อแรงเนื่องจากความหนืดที่กระทำต่อของไหล ดังนี้

$$\begin{aligned} Gr &= \frac{\text{buoyancy force}}{\text{viscous force}} \\ &= \frac{\Delta \rho g V}{\mu v^2} \\ &= \frac{g \beta \Delta T V}{\nu^2} \end{aligned} \quad (2.19)$$

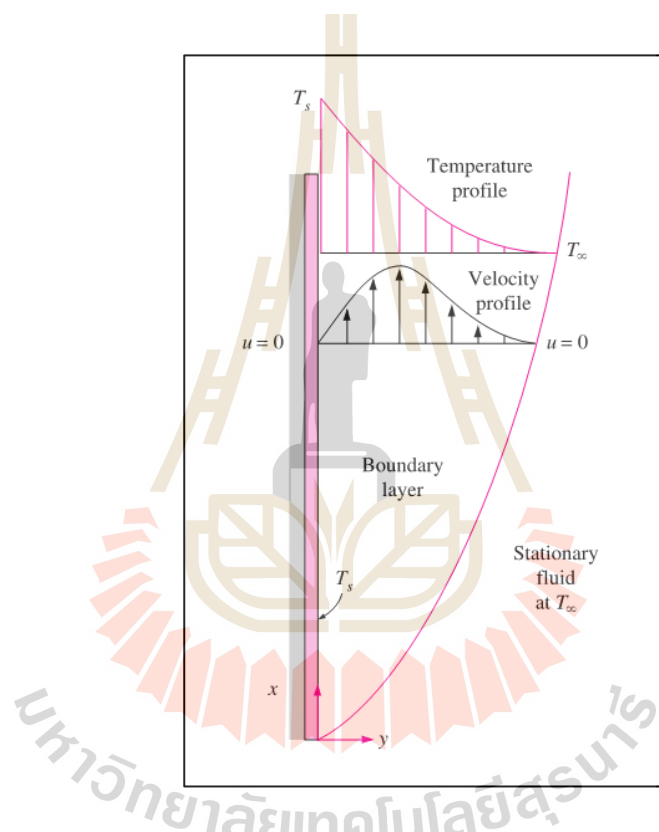
สมการที่ 2.19 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปที่เหมาะสมได้ดังนี้

$$Gr = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) x^3}{\nu^2} \quad (2.20)$$

เมื่อ	β	คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตร
	T_s	คือ อุณหภูมิของผิว, K
	T_∞	คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม, K
	x	คือ ความยาวคุณลักษณะของโครงสร้าง, m
	ν	คือ ความหนืดจลศาสตร์ของของไหล, m^2/s
	g	คือ ความเร่งโน้มถ่วง, m/s^2

2.14 การพาแบบอิสระผ่านแผ่นระนาบตั้ง

การไหลโดยการพาอิสระผ่านแผ่นระนาบตรงจะเกิดชั้นผิวบาง (Boundary layer) ของการไหลขึ้น ที่ผิวของแผ่นระนาบการไหลเป็นแบบไม่ลื่นไถล (No-slip condition) ความเร็วของอากาศที่ผิวของแผ่นระนาบจึงมีค่าเท่ากับศูนย์ ความเร็วสูงสุดช่วงในช่วงของชั้นผิวบาง และจะเป็นศูนย์อีกครั้งที่ความหนาของชั้นผิวบาง (Boundary layer thickness) อุณหภูมิสูงสุดของอากาศเกิดที่แผ่นระนาบ และมีค่าเท่ากับอุณหภูมิแผ่นระนาบพอดี อุณหภูมิจะลดลงเรื่อย ๆ จนมีค่าเท่ากับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่ชั้นความหนาผิวบาง ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การไหลโดยการพาอิสระผ่านแผ่นร้อนในแนวตั้ง (Cengel, 1998)

2.15 สมการชั้นผิวบาง

สมการชั้นผิวบาง (The boundary layer equations) คือ สมการการไหลแบบการพาอิสระ หรือสมการอนุกรมโมเมนต์นั่นเอง โดยสำหรับการไหลแบบการพาอิสระในรูปที่ 2.3 เมื่อพิจารณาให้ของไหลเป็นของไหลไม่อัดตัวและการไหลใน 2 มิติ สมการอนุกรมโมเมนต์ในแนวแกน x ซึ่งเป็นทิศทางเดียวกันกับแผ่นร้อน เป็นดังนี้ (Cengel, 1998)

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} - \rho g + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (2.21)$$

โดยจะเห็นว่ามีพจน์ ρg เพิ่มเข้ามาจากสมการอนุรักษ์โมเมนตัมทั่วไป พจน์นี้คือเทอมของแรงลอยตัว

สำหรับความดันของของไหลในแนวแกน x ที่อยู่ไกลออกไปจาก Boundary layer เมื่อพิจารณาให้ของไหลหยุดนิ่ง ($u=0$) มีค่าดังนี้

$$\frac{\partial P_\infty}{\partial x} = -\rho_\infty g \quad (2.22)$$

กรณีการไหลผ่านแผ่นร้อนในชั้นผิวบางนี้ สามารถประมาณให้เกรเดียนต์ของความดันในทิศทางตั้งฉากกับแผ่นระนาบ (แนวแกน y) มีค่าประมาณเท่ากับศูนย์ ดังนี้

$$\frac{\partial P}{\partial y} = 0 \quad (2.23)$$

ความดันของของไหลในชั้นผิวบาง (แนวแกน x) จึงมีค่าเท่ากับความดันของของไหลที่อยู่ไกลออกไป จะได้ Free stream

$$\left. \frac{\partial p}{\partial x} \right|_{\text{buoyancy force}} = \left. \frac{\partial p}{\partial x} \right|_{\text{free stream}} = -\rho_\infty g \quad (2.24)$$

ดังนั้นสมการอนุรักษ์ดมเมนตัม 2 มิติ ของการไหลในชั้นผิวบางจึงเป็น

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = g(\rho_\infty - \rho) + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (2.25)$$

เนื่องจากความหนาแน่นในการไหลโดยการพาอิสระเปลี่ยนแปลงน้อยมากจึงสามารถพิจารณาให้ความหนาแน่นคงที่ได้ ยกเว้นเทอมของน้ำหนักของไหล เนื่องจากการเปลี่ยนแปลง

ความหนาแน่นเพียงเล็กน้อยนี้ก่อให้เกิดแรงลอยตัวขนาดใหญ่ จากสมการที่ 2.25 เมื่อหารความหนาแน่น จะได้

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{g}{\rho} (\rho_\infty - \rho) + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (2.26)$$

จากสมการที่ 2.26 สามารถเขียนเทอมของผลต่างของความหนาแน่นในรูปของสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตร (Volumetric thermal expansion coefficient, β) เมื่อพิจารณาที่ความดันคงที่ ซึ่งมีนิยามดังนี้

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$$

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\rho_\infty - \rho}{T_\infty - T} \right)$$

$$(\rho_\infty - \rho) = \rho \beta (T - T_\infty) \quad (2.27)$$

แทนความสัมพันธ์นี้ลงในสมการที่ 2.26

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \beta (T - T_\infty) + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (2.28)$$

สำหรับสมการอนุกรมมวลและสมการอนุกรมพลังงาน มีรูปแบบเหมือนกันกับสมการของการไหลในชั้นผิวบางผ่านแผ่นแนวนอน (Boundary layer flow over a flat plate) โดยสามารถเขียนสมการแม่บท (The governing equations) ที่อธิบายถึงการไหลแบบการพาอิสระผ่านแผ่นระนาบตั้ง โดยใช้ Boussinesq approximation (Kays and Crawford, 1993) ได้ดังชุดของสมการด้านล่าง ดังนี้

สมการอนุกรมมวล

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.29)$$

สมการอนุรักษ์พลังงาน

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (2.30)$$

สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \beta(T - T_\infty) + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (2.31)$$

2.16 การถ่ายเทมวล

การถ่ายเทมวลจากวัสดุสู่สิ่งแวดล้อมเกิดขึ้น เนื่องจากความแตกต่างของ Partial vapor pressure ที่ Boundary layer ในบริเวณรอยต่อของอากาศและวัสดุ (เทวรัตน์ ตรีอำนาจ, 2556)

$$n_w = k_g (P_{vsf} - P_{va}) \quad (2.32)$$

เมื่อ k_g คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล
 P_{vsf} คือ Water vapor partial pressure of surface
 P_{va} คือ Water vapor partial pressure of air

2.17 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องถ่ายเทมวล

การอบแห้ง โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นการอบแห้งที่มีต้นทุนในการอบแห้งที่ต่ำหรือแทบไม่มีเลย เพราะไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายไปกับพลังงานที่ต้องใช้ในการอบ เช่น พลังงานเชื้อเพลิงจากฟอสซิล พลังงานไฟฟ้า พลังงานชีวมวล เป็นต้น เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ปัจจุบันสามารถแยกประเภทได้ 3 ประเภทดังนี้

1) Direct mode แสงอาทิตย์จะส่องมายังผลิตภัณฑ์ภายในเครื่องอบแห้งโดยตรง พลังงานแสงอาทิตย์ที่ส่องมายังห้องอบแห้ง (Drying chamber) จะทำให้อากาศภายในห้องอบแห้งร้อนขึ้น ส่งผลให้อากาศลอยตัวขึ้น เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิของอากาศสูงขึ้นความหนาแน่นของอากาศจะลดลง (ทวิช จิตรสมบูรณ์, 2554) ทำให้เกิดการถ่ายเทอากาศภายในห้องอบแห้ง ในขณะที่เดียวกันอากาศที่ไหลผ่านผลิตภัณฑ์ภายในห้องอบแห้งก็จะพาความชื้นออกไปด้วย

2) Indirect mode หลักการทำงานจะเหมือนกับประเภทแรกแต่จะแตกต่างจากประเภทที่ 1 ตรงที่แสงไม่สามารถส่องผ่านห้องอบแห้งได้โดยตรง ช่องทางการรับพลังงานจากจากแสงอาทิตย์ จะมีอุปกรณ์รับพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อใช้เป็นตัวทำให้อากาศร้อนอยู่ด้านนอก

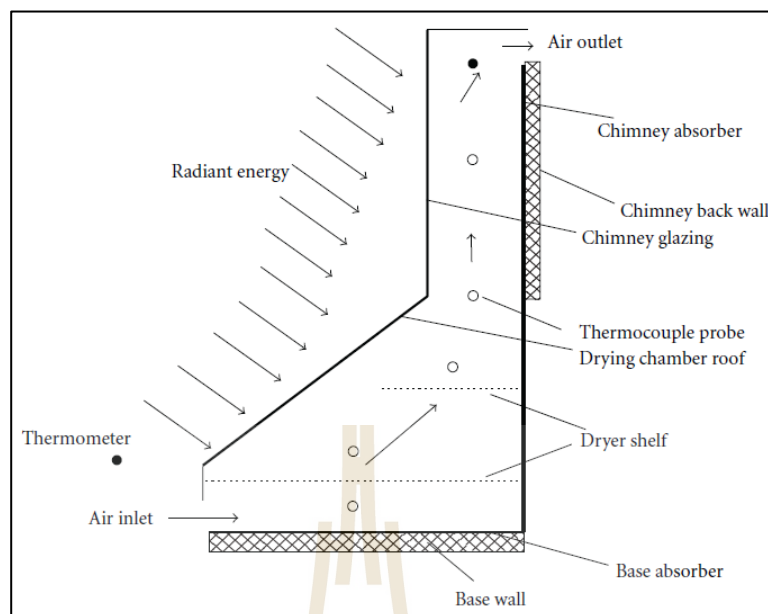
3) Mixed mode หลักการทำงานจะเหมือนกับ 2 ประเภทแรกเพียงแต่ประเภทที่ 3 นี้เป็นการนำสองประเภทแรกมารวมกันคือ ช่องทางการรับพลังงานมี 2 ช่องทาง คือ แสงสามารถส่องผ่านห้องอบแห้งได้ และมีอุปกรณ์รับพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อใช้เป็นตัวทำให้อากาศร้อนอยู่ด้านนอก ทั้ง 3 ประเภทที่กล่าวมาข้างต้นนี้มีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันจึงจะเปรียบเทียบในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบอุณหภูมิของอากาศ อัตราการไหลของอากาศ และราคาในการก่อสร้าง

ประเภทเครื่องอบแห้ง	อุณหภูมิอากาศ	อัตราการไหลอากาศ	ราคาในการสร้าง
Direct mode	ปานกลาง	ปานกลาง	ถูกสุด
Indirect mode	น้อยสุด	น้อยสุด	ปานกลาง
Mixed mode	สูงสุด	สูงสุด	แพงสุด

จากข้อมูลที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่าเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ถึงจะไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานและมีค่าใช้จ่ายในการสร้างถูกที่สุด แต่สมรรถนะการอบแห้งยังต่ำ เนื่องจากไม่มีอุปกรณ์ให้ความร้อนหรือพัดลมที่เป็นตัวช่วยในการอบแห้ง อาศัยเพียงการถ่ายเทอากาศโดยธรรมชาติ (Natural ventilation) ซึ่งปัจจัยในการอบแห้งที่ดีนั้นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ และอัตราการไหลของอากาศที่ไหลผ่านผลิตภัณฑ์ ซึ่งจากตารางที่ 2.2 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภท Direct mode มีราคาถูกที่สุดในการสร้างเมื่อเทียบกันทั้ง 3 ประเภท อีกทั้งอุณหภูมิและอัตราการไหลยังอยู่ในระดับปานกลางจึงน่าสนใจที่จะพัฒนาให้มีสมรรถนะดีขึ้น

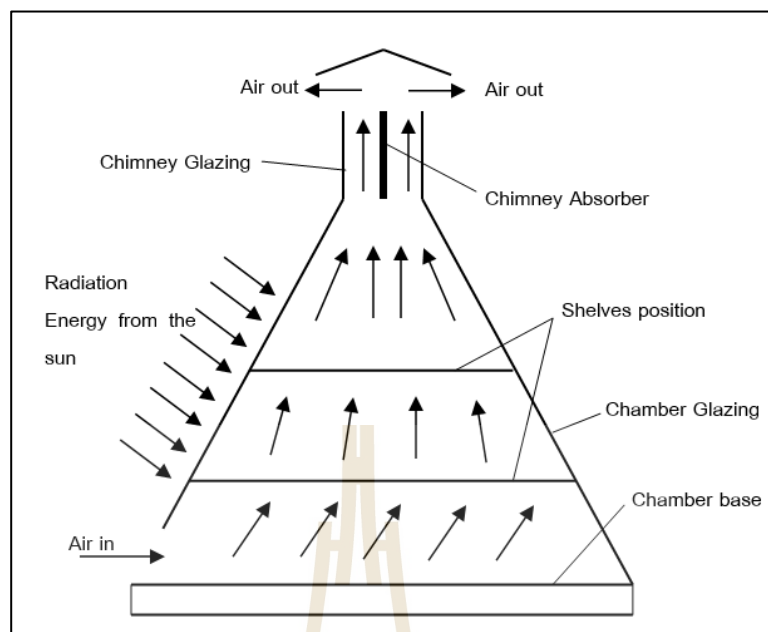
Afriyie et al. (2012) นำเสนอเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์อีกแบบที่ประยุกต์ใช้กับ Solar chimney เรียกว่า เครื่องอบแห้งปล่องลมแดด (Solar chimney dryer) แสดงดังรูปที่ 2.9 โดยที่ทดลองอบแห้งปรับมุมของหลังคาปรับแสงเท่ากับ 81° , 64° และ 51° และปรับความสูงทางเข้าเท่ากับ 70, 50 และ 30 มิลลิเมตร ให้พลังงานความร้อนจากหลอดไฟขนาด 100 W จำนวน 8 ตัว แทนพลังงานแสงอาทิตย์ โดยผลการทดลองพบว่า กรณีที่เครื่องอบแห้งปล่องลมแดดมีมุมหลังรับแสงเท่ากับ 51° และความสูงทางเข้าเท่ากับ 70 มิลลิเมตร มีสมรรถนะการอบแห้งสูงที่สุด โดยมีอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 6-7 ลิตรต่อวินาที



รูปที่ 2.9 เครื่องอบแห้งปล่องลมแดดชนิด Direct mode (Afriyie et al., 2012)

นอกจากนี้ยังพบว่า กระบวนการอบแห้งส่วนใหญ่เกิดขึ้นในช่วงวันแรกที่ผิวของวัสดุยังชุ่มไปด้วยน้ำโดยที่อิทธิพลที่มีผลต่อการไล่ความชื้นในช่วงแรกมากที่สุดคือ อัตราการไหลของอากาศ ซึ่งเครื่องอบแห้งปล่องลมแดดมีการถ่ายเทอากาศภายในห้องอบแห้งดีกว่าเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีปล่อง

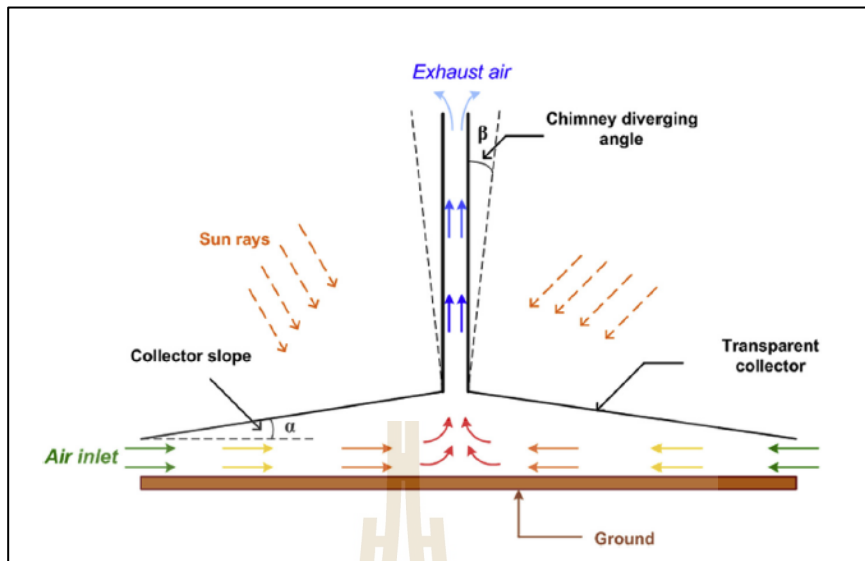
Afriyie et al. (2016) ทดลองอบแห้งมันสำปะหลังโดยใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกระโจม ลักษณะดังรูปที่ 2.10 และได้เปรียบเทียบกับการตากแห้งตามธรรมชาติพบว่า ร้อยละ 75-80 ของกระบวนการอบแห้งเกิดขึ้นในช่วง 1-2 วันแรกของการอบและการตากแห้ง โดยธรรมชาติลดความชื้นได้มากกว่าเครื่องอบแห้งในช่วงแรกของการอบ เนื่องจากในช่วง 1-2 วันแรกผิวของมันสำปะหลังยังชุ่มไปด้วยน้ำและอิทธิพลของอัตราการไหลมีผลต่อการไล่ความชื้นมากกว่าอุณหภูมิ ซึ่งการตากแห้งตามธรรมชาติมีลมพัดผ่านวัสดุอบแห้งตลอดเวลา หลังจากนั้นเมื่อผ่าน 2 วันแรกไป เครื่องอบแห้งสามารถลดความชื้นได้มากกว่าการตากแห้งตามธรรมชาติ เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงกว่า ซึ่งพบว่าอุณหภูมิในห้องอบแห้งสูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อมเท่ากับ 4-20 °C โดยที่อุณหภูมิจะสูงขึ้นเรื่อย ๆ ตามความสูงของปล่อง เพราะฉะนั้นหากติดตั้งถาดสำหรับอบแห้งไว้ที่สูงจะดีเนื่องจากอุณหภูมิเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำหรับกระบวนการการอบแห้ง นอกจากนี้การติดตั้ง Absorber ในห้องอบแห้งยังสามารถเพิ่มอุณหภูมิขึ้นได้อีกเมื่อเทียบกับ Solar chimney dryer ที่ไม่มี Absorber



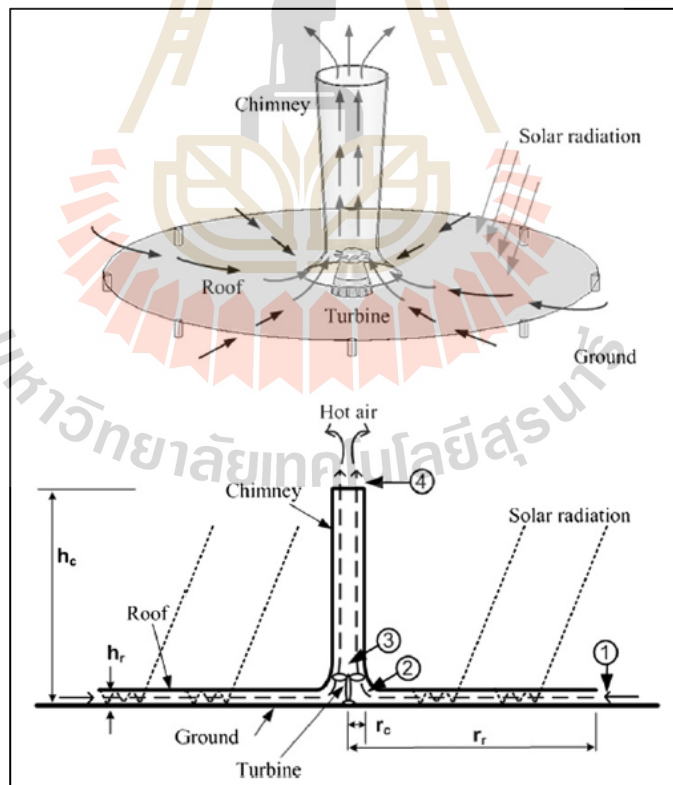
รูปที่ 2.10 เครื่องกังหันพลังงานแสงอาทิตย์แบบกระโจม (Afriyie et al., 2016)

Chen and Qu (2013) ได้ศึกษาการติดแผงรับความร้อนร้อนที่มีลักษณะเป็นรูปทรงแปดเหลี่ยมเข้าไปในเครื่องอบแห้งแบบ Mixed mode โดยติดแผงรับความร้อนร้อนมีค่าความพรุนเท่ากับ 0.5 และ 0.8 พบว่า เมื่อติด Absorber ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น 3°C และพบว่าเมื่อติด Absorber porosity เท่ากับ 0.5 อุณหภูมิของอากาศจะสูงกว่า Absorber porosity เท่ากับ 0.8 อยู่ 3°C ซึ่งจากการทดลองพบว่าค่าความพรุนของแผงรับความร้อนร้อนมีผลกระทบต่ออุณหภูมิอบแห้ง ซึ่ง Wang et al. (2014) พบว่าค่าความพรุนที่เหมาะสมสำหรับแผงรับความร้อนร้อนที่มีลักษณะพรมมีค่าเท่ากับ

Hassan (2017) ได้ตรวจสอบสมรรถนะของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยการทดลองปรับมุมของหลังคารับแสง เท่ากับ 4° , 6° , 8° , 10° และมุมของปล่องไฟ เท่ากับ 1° , 2° , 3° ดังรูปที่ 2.11 พบว่าการปรับมุมของหลังคารับแสงเพิ่มขึ้นสามารถเพิ่มความเร็วของการอากาศได้ แต่หาก มากกว่า 6° จะทำให้เส้นการไหลของอากาศเกิดการหมุนวนและทำให้ความเร็วลดลง ในการปรับมุมของปล่องไฟพบว่าเท่ากับ 1° สามารถเพิ่มความเร็วของอากาศจาก 9.1 m/s เป็น 11.6 ซึ่งทำให้ได้พลังงานเพิ่มขึ้นร้อยละ 108 สอดคล้องกับ Koonsrisuk & Chitsomboon (2013)



รูปที่ 2.11 แผนภาพของโรงงานไฟฟ้าปล่องลมแดด (Hassan, 2017)



รูปที่ 2.12 แผนภาพของโรงงานไฟฟ้าปล่องลมแดด (Koonsrisuk & Chitsomboon, 2013)

Koonsrisuk & Chitsomboon (2013) ได้ศึกษาผลกระทบของการปรับปรุงทรงหลังคารับแสง และปล่องไฟต่อสมรรถนะของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ กำหนดโดยอัตราส่วนพื้นที่ (Area ratio : AR) สำหรับหลังคารับแสงกำหนดโดยอัตราส่วนพื้นที่ทางเข้าต่อพื้นที่ทางออกของหลังคารับแสง (AR12) และปล่องไฟกำหนดโดยอัตราส่วนพื้นที่ทางออกต่อพื้นที่ทางเข้าของปล่องไฟ (AR43) ดังรูปที่ 2.12 พบว่าปล่องไฟที่มีลักษณะบานมีอัตราการไหลสูงกว่าปล่องไฟที่มีลักษณะตรงหรือหุบเข้า โดยที่ปล่องไฟที่มีพื้นที่ทางออกต่อพื้นที่ทางเข้าเท่ากับ 16 ทำให้ได้พลังงานเพิ่มขึ้นจากปล่องตรงร้อยละ 179.16

ในงานวิจัยนี้เพื่อที่จะช่วยให้เกษตรกรวัยอายุของผลผลิตทางการเกษตร โดยมีต้นทุนไม่สูง ไม่ต้องใช้พลังงานไฟฟ้า จึงสนใจที่จะออกแบบรูปทรงของเครื่องอบแห้งปล่องลมแดดด้วยการจำลองเชิงตัวเลขและสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ปล่องลมแดดแบบที่มีแต่ปล่องบานซึ่งผลที่คาดว่าจะได้รับคือได้ทางเลือกใหม่ในการออกแบบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ มีราคาถูก ง่ายต่อการก่อสร้าง และได้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีสมรรถนะการอบแห้งดีขึ้น



บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งปล่องลมแดด โดยจะใช้โปรแกรมวิเคราะห์แบบจำลองคณิตศาสตร์ในการจำลองระบบและสร้างเครื่องเพื่อประเมินสมรรถนะเมื่อทำการอบแห้งผลิตภัณฑ์ ผลที่ได้จะเป็นองค์ความรู้และแนวที่ดีทางการออกแบบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ในอนาคต สำหรับบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยโดยละเอียด เริ่มจากการทดสอบโปรแกรม เงื่อนไขการจำลอง การสร้างชุดทดลอง รวมไปถึงขั้นตอนการทดลอง

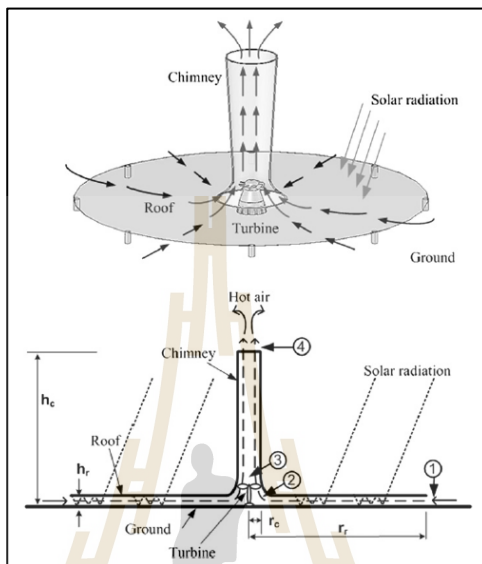
3.2 ตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม

การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม ANSYS-FLUENT 18 มีขึ้นเพื่อสร้างความมั่นใจในความถูกต้องแม่นยำของโปรแกรม และในขั้นตอนนี้ยังมีไว้เพื่อให้ผู้ใช้ได้มีโอกาสศึกษาการใช้งานโปรแกรมอย่างถูกต้อง ตลอดจนฝึกฝนและสร้างประสบการณ์จนเกิดความมั่นใจก่อนที่จะนำโปรแกรมไปจำลองกับปัญหาต่าง ๆ ในงานการวิจัย ซึ่งได้ตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมโดยการจำลองการไหลในโรงไฟฟ้าปล่องลมแดด (Solar chimney power plant) เพราะเป็นการไหลโดยการพาโดยธรรมชาติและได้รับความร้อนจากรังสีแสงอาทิตย์ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับงานวิจัยนี้ โดยเทียบกับผลการจำลองกับผลการทดลอง รายละเอียดดังนี้

3.2.1 โรงไฟฟ้าปล่องลมแดด

โรงไฟฟ้าปล่องลมแดด (Solar chimney power plant) เป็นโรงงานที่ผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ โดยมีหลักการให้อากาศไหลผ่านกังหัน เมื่อกังหันหมุนก็จะปั่นกระแสไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) โดยมีลักษณะดังรูปที่ 3.1 จุดที่ 1 คือ ทางเข้าของอากาศ จากนั้นอากาศจะไหลไปยังจุดที่ 2 ซึ่งระหว่างทางอากาศจะได้รับพลังงานความร้อนจากรังสีแสงอาทิตย์ โดยปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นคือระหว่างจุดที่ 1-2 คือ รังสีแสงอาทิตย์ที่ส่องผ่านหลังคารับแสงลงมาเกิดการสะท้อนไปมาทำให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse effect) อากาศจะร้อนขึ้นตลอดระยะทางการไหลโดยได้รับความร้อนจากการปลดปล่อยพลังงานความร้อนหรือรังสีอินฟราเรดของรังสีแสงอาทิตย์ อากาศร้อนที่จุดที่ 2 จะไหลและลอยตัวขึ้นเนื่องจากแรงลอยตัว (Buoyancy force)

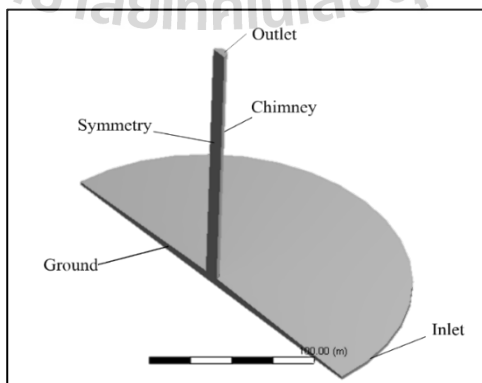
ไปยังจุดที่ 3 ซึ่งระหว่างทางจะได้กักหน้ดั่งขวางทางการไหล กักหน้จะหมุนเนื่องจากอากาศที่ไหลผ่านและไปปั่นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า อากาศจากจุดที่ 3 จะลอยตัวขึ้นภายในปล่องไฟ (Chimney) ไปยังจุดที่ 4 ซึ่งเป็นทางออกของอากาศ



รูปที่ 3.1 โรงงานไฟฟ้าปล่องลมแดด (Koonsrisuk, 2012)

3.2.2 เงื่อนไขและขอบเขตการจำลองการไหลในโรงไฟฟ้าปล่องลมแดด

การจำลองเป็นการจำลองการไหลใน 3 มิติ โดยโดเมนมีลักษณะดังรูปที่ 3.2 ขนาดและเงื่อนไขแสดงดังตารางที่ 3.1 และ 3.2



รูปที่ 3.2 โดเมนของโรงไฟฟ้าปล่องลมแดด

ตารางที่ 3.1 ขนาดและข้อมูลที่ใช้ในการจำลองโรงไฟฟ้าปล่องลมแดด (Hassan, 2018)

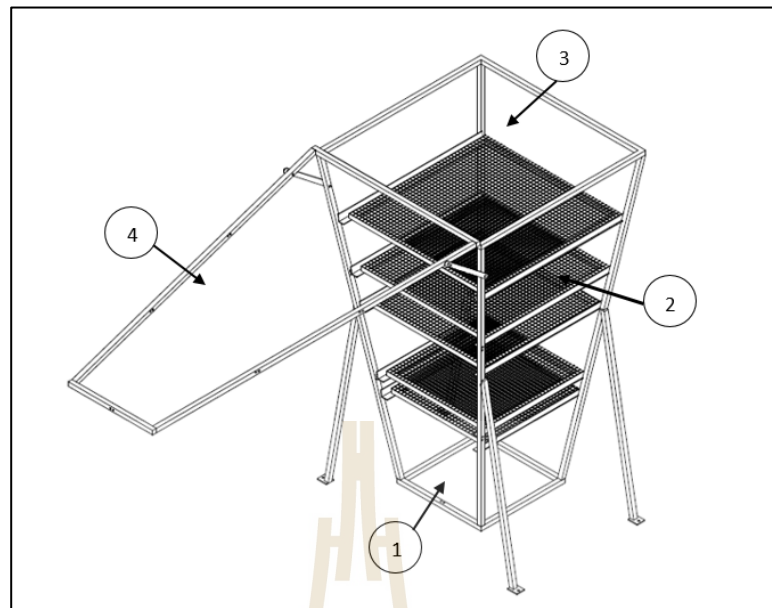
รายการ	ค่า
ละติจูด	38.99° N
ลองจิจูด	3.37° W
เขตเวลา	+2
ความสูงปล่อง	195 เมตร
รัศมีหลังคารับความร้อน	122 เมตร
รัศมีปล่อง	5 เมตร
ความสูงหลังคา	6 เมตร

ตารางที่ 3.2 ขอบเขตและเงื่อนไข

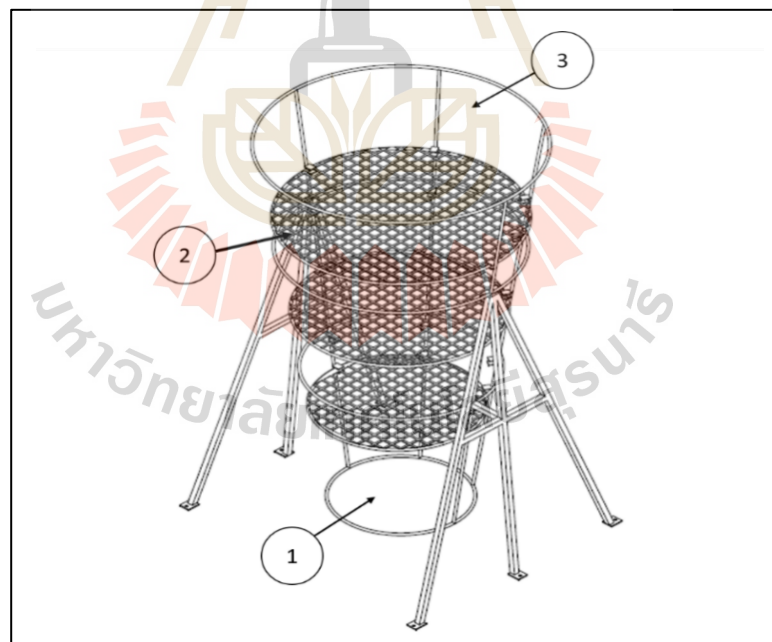
เงื่อนไข	เงื่อนไขการไหล	เงื่อนไขเชิงความร้อน
Inlet	Pressure inlet (Total pressure 0 Pa)	Constant Temperature $T_\infty = 303$ K
Ground	No slip Wall (Opaque)	Adiabatic ($Q = 0$)
Outlet	Pressure outlet (Static pressure 0 Pa)	Constant Temperature $T_\infty = 303$ K
Chimney	No slip Wall (Opaque)	Adiabatic ($Q = 0$)
Collector	No slip Wall (Semi-transparent)	Mixed Mode $h = 10$ W/m ² K Solar radiation = 744 W/m ²

3.3 ออกแบบเครื่องอบแห้งปล่องลมแดด

เครื่องอบแห้งปล่องลมแดดจัดอยู่ในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภท Direct mode ซึ่งใช้หลักการของแรงลอยตัวทำให้เกิดกระแสการไหลของอากาศภายในห้องอบแห้ง โดยสำหรับเครื่องอบแห้งปล่องลมแดดมีลักษณะตั้งตรงและบานออก ทั้งรูปทรงสี่เหลี่ยมและวงกลม ทางเข้าของอากาศอยู่ด้านล่าง (หมายเลข 1) ภายในมีถาดสำหรับวางผลผลิตวางอยู่ (หมายเลข 2) ทางออกของอากาศอยู่ด้านบน (หมายเลข 3) ผนังคลุมด้วยวัสดุโปร่งแสง เครื่องอบแห้งมีประตูที่สามารถเปิดเพื่อนำถาดออกมาได้ (หมายเลข 4) มีลักษณะดังรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4 ส่วนขนาดของเครื่องอบแห้งแสดงดังตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เครื่องอบแห้งปล่องลมแคบรูปทรงสี่เหลี่ยม



รูปที่ 3.4 เครื่องอบแห้งปล่องลมแคบรูปทรงวงกลม

ตารางที่ 3.3 ขนาดของเครื่องอบแห้ง

รายการ	สี่เหลี่ยม	วงกลม
ทางเข้า	0.266 เมตร (ด้าน)	0.3 เมตร (รัศมี)
ทางออก	0.532 เมตร (ด้าน)	0.6 เมตร (รัศมี)
สูง	2 เมตร	2 เมตร

3.4 ออกแบบเครื่องอบแห้งปล่องลมแดด

การจำลองการไหลภายในเครื่องอบแห้งปล่องลมแดด เป็นการไหลแบบ 3 มิติ ซึ่งขั้นตอนแรกก่อนที่จะเริ่มการจำลองด้วยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ คือการกำหนดขบวนการไหลโดยการคำนวณค่าเลขกราชอฟ (The Grashof number) และเป็นเลขเรย์ลี (Rayleigh number) ได้ดังนี้

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)x^3}{\nu^2} \quad (3.1)$$

$$Ra_L = Gr_L Pr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)x^3}{\nu^2} Pr \quad (3.2)$$

เมื่อ $\beta = 1/T_f$ และ Pr คือ ค่าเลขพรันด์เทิล (Prandtl number) อุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้ง 310 K อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 303 K ระยะการไหลมีค่าเท่ากับความสูงของผนังเครื่องอบแห้งพอดี ($x = 2$ m) จากการคำนวณพบว่าค่าเลขกราชอฟและค่าเลขพรันด์เทิล มีค่าเท่ากับ 6.50×10^9 และ 4.72×10^9 ตามลำดับ ดังนั้นการไหลจึงจัดเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Cengel, 1998) ถัดมาเป็นการคำนวณความหนาของชั้นผิวบาง (Boundary layer thickness) เมื่อพิจารณาการไหลเป็นแบบปั่นป่วนจากสมการ (Kays and Crawford, 1993)

$$\frac{T - T_\infty}{T - T_s} = 1 - \left(\frac{y}{\delta}\right)^{1/7} \quad (3.3)$$

จากสมการที่ 3.3 เมื่อ y เท่ากับความสูงผนังของเครื่องอบแห้ง (2 เมตร) จะได้ความหนาของชั้นผิวบางเท่ากับ 3.9 mm และคำนวณ y^+ ได้เท่ากับ 1.59 mm ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและค่าเลขนัสเซิลต์ (Nusselt number, Nu) หาได้จากสมการที่ 3.4

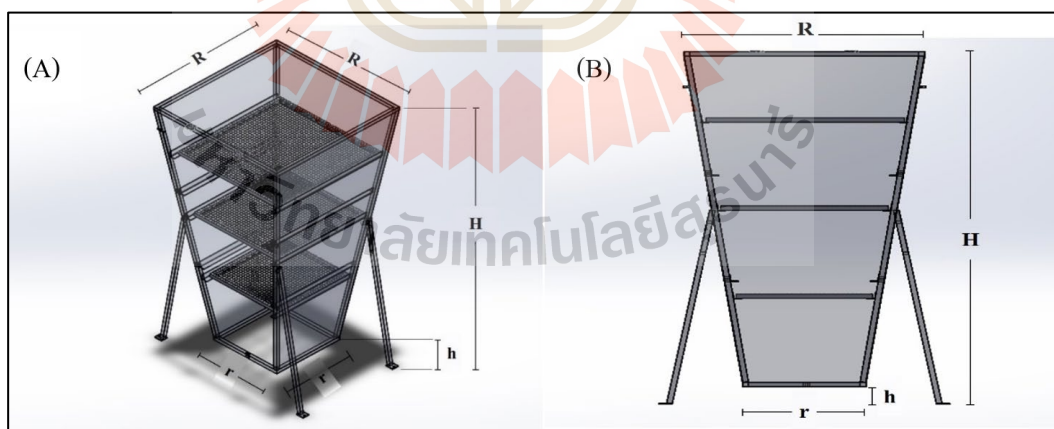
$$h = \frac{kNu}{L_c} \quad (3.4)$$

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387Ra_L^{1/6}}{\left[1 + (0.492/Pr)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (3.5)$$

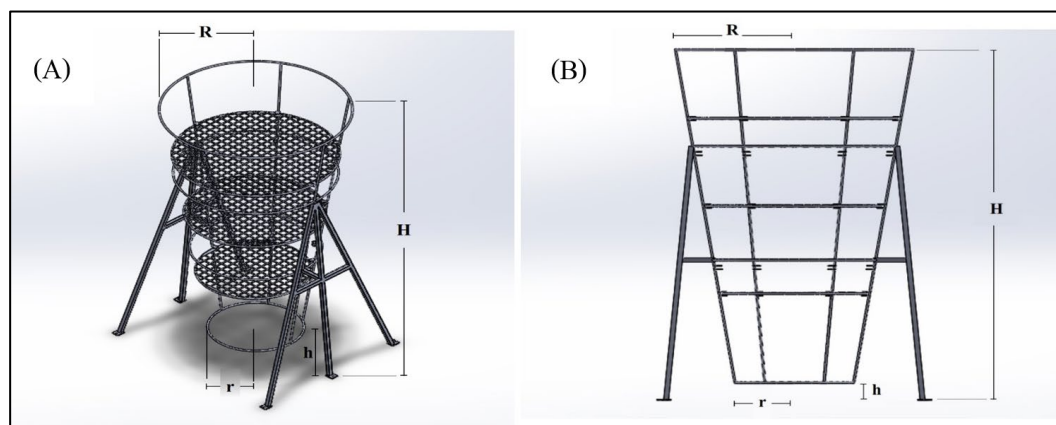
เมื่อ L_c คือ ความสูงของผนังเครื่องอบแห้งปล่องลมแคด จากการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีค่าเท่ากับ $2.02 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

3.4.1 กรณีศึกษาในการจำลอง

ในงานวิจัยนี้ได้จำลองเครื่องอบแห้งปล่องลมแคด 2 แบบ คือ แบบสี่เหลี่ยมและแบบวงกลม โดยแต่ละแบบได้ปรับเปลี่ยนรูปทรงของเครื่องอบแห้งให้มีลักษณะบานออกเรื่อยๆ กำหนดโดยอัตราส่วนพื้นที่ทางออกต่อพื้นที่ทางเข้า (Area ratio: AR) และจำลองการปรับความสูงของเครื่องอบแห้งกับความสูงทางเข้าจากพื้นดินรวมถึงจำนวนถาดวางผลผลิต แสดงรูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6 ขนาดของเครื่องอบแห้งแสดงดังตารางที่ 3.4 และ 3.5



รูปที่ 3.5 เครื่องอบแห้งปล่องลมแคดรูปทรงสี่เหลี่ยม



รูปที่ 3.6 เครื่องอบแห้งปล้องลมแคดรูปทรงวงกลม

ตารางที่ 3.4 ขนาดเครื่องอบแห้งปล้องลมแคดรูปทรงวงกลม

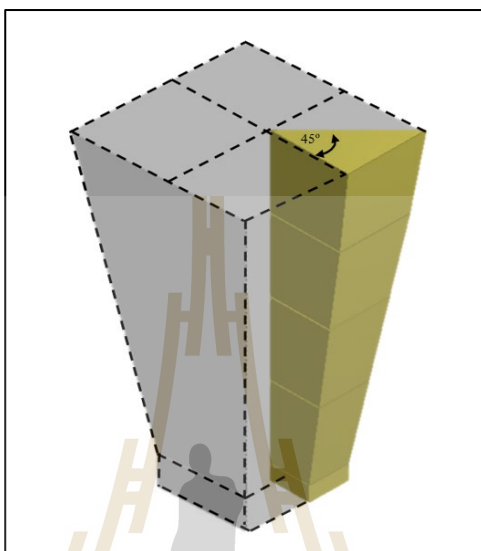
อัตราส่วนพื้นที่	0.5	1	2	4	8	16	20	25
รัศมีทางเข้า r (cm)	42.2	30	30	30	30	30	30	30
รัศมีทางออก R (cm)	30	30	42.2	60	84.9	120	134	1.5
ความสูงทางเข้า h (cm)	10, 20, 30							
ความสูง H (m)	1.5, 2							
จำนวนถาด	2, 3							

ตารางที่ 3.5 ขนาดเครื่องอบแห้งปล้องลมแคดรูปทรงสี่เหลี่ยม

อัตราส่วนพื้นที่	0.5	1	2	4	8	16	20	25
ความยาวด้านทางเข้า r (cm)	53	53	53	53	53	53	53	53
ความยาวด้านทางออก R (cm)	38	53	73	106	150	219	119	133
ความสูงทางเข้า h (cm)	10, 20, 30							
ความสูง H (m)	1.5, 2							
จำนวนถาด	2, 3							

3.4.2 โดเมนในการจำลอง

โดเมนที่ใช้จำลองในงานวิจัยนี้มีลักษณะตัดเป็นชั้นเล็ก ๆ 45 องศาสำหรับรูปทรงสี่เหลี่ยมและ 15 องศา สำหรับวงกลม เพื่อลดระยะเวลาในการคำนวณ แสดงดังรูปที่ 3.7 และรูปที่ 3.8



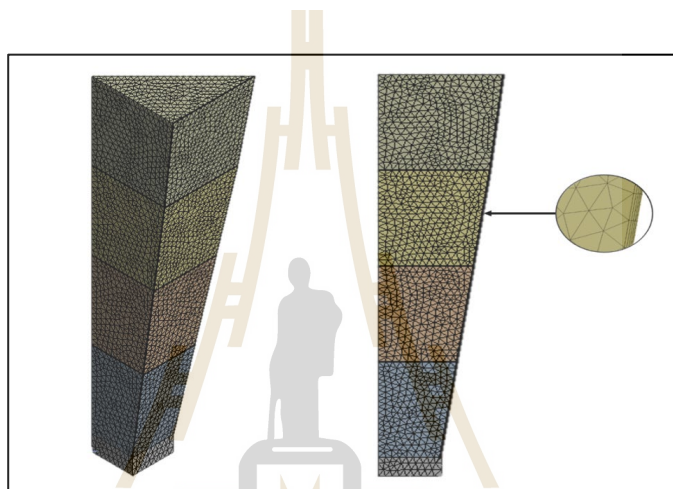
รูปที่ 3.7 โดเมนของเครื่องอบแห้งปล่องลมแคดรูปทรงสี่เหลี่ยม



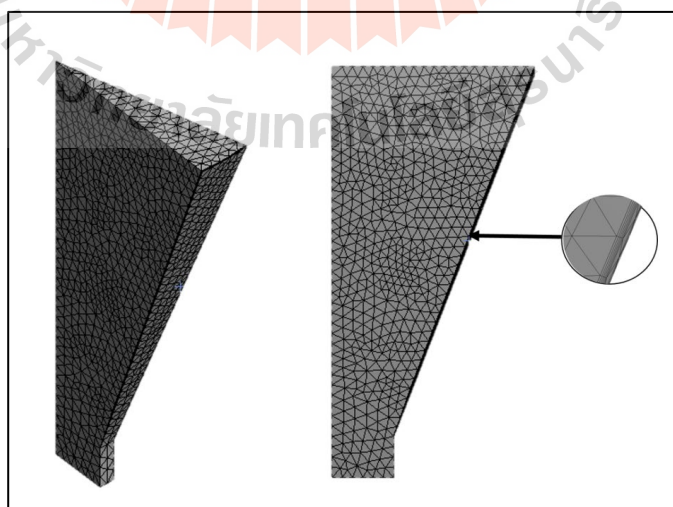
รูปที่ 3.8 โดเมนของเครื่องอบแห้งปล่องลมแคดรูปทรงวงกลม

3.4.3 การสร้างเมช (Mesh)

กริดที่ใช้ในการจำลองการไหลในเครื่องอบแห้งปล่องลมแคบสำหรับงานวิจัยนี้ เลือกใช้กริดแบบรูปหน้าสามเหลี่ยม Tetrahedron เพราะรูปทรงปัญหาสามารถฟิตเข้าได้กับ กริดลักษณะดังกล่าว (Hassan, 2018) สำหรับการไหลโดยการพาอิสระจำเป็นต้องให้ความสำคัญ กับกริดที่อยู่ชิดขอบของ โคนเมนเพราะจะเกิดชั้นฟิวบาง (Boundary layer thickness) โดยใช้คำสั่ง Inflation ในการเพิ่มจำนวนชั้นความหนาของกริดเพื่อความถูกต้องและแม่นยำของแบบจำลอง (Mara et al., 2014) แสดงดังรูปที่ 3.9 และรูปที่ 3.10

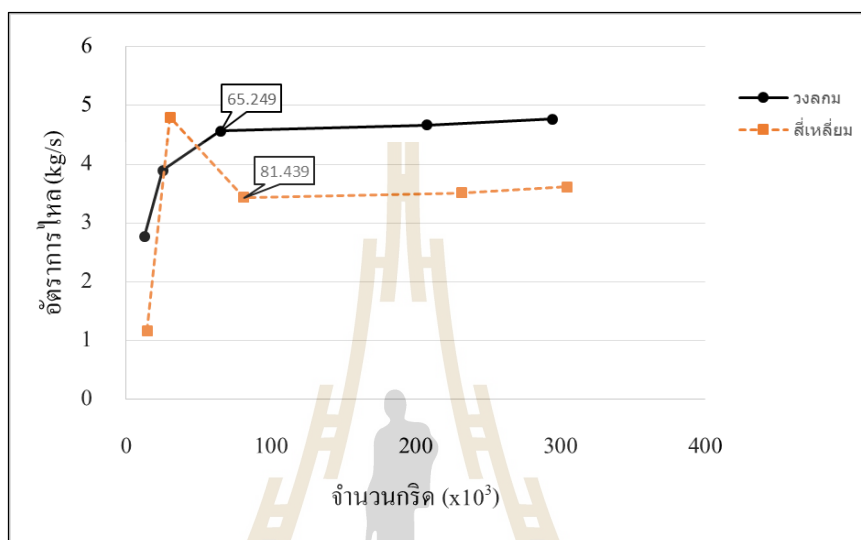


รูปที่ 3.9 ลักษณะกริดแบบ Tetrahedron ของรูปทรงสี่เหลี่ยม



รูปที่ 3.10 ลักษณะกริดแบบ Tetrahedron ของรูปทรงวงกลม

ขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญในการสร้างเมช คือการทดสอบความเป็นอิสระของกริด เพื่อหาจำนวนกริดที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากผลเฉลยของอัตราการไหลของอากาศภายในเครื่องอบแห้งปล่องแคด ซึ่งจำนวนกริดที่เหมาะสมสำหรับรูปทรงวงกลมมีค่าเท่ากับ 65,249 กริด และจำนวนกริดที่เหมาะสมสำหรับรูปทรงสี่เหลี่ยมมีค่าเท่ากับ 81,439 กริด แสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ความเป็นอิสระของกริด

3.4.4 เงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขการคำนวณ

1) เงื่อนไขขอบเขต

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตเป็นขั้นตอนที่สำคัญสำหรับการจำลองปัญหาทางวิศวกรรมต่าง ๆ ที่ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป และเป็นขั้นตอนที่สร้างความยุ่งยากพอสมควรเพราะต้องเข้าใจลักษณะทางกายภาพของลักษณะการไหลนั้น ซึ่งสำหรับการไหลโดยการพาโดยธรรมชาติในเครื่องอบแห้งปล่องแคดมีเงื่อนไขที่ใช้ทั้งหมด 5 ประเภท ดังรูปที่ 3.12 และตารางที่ 3.6

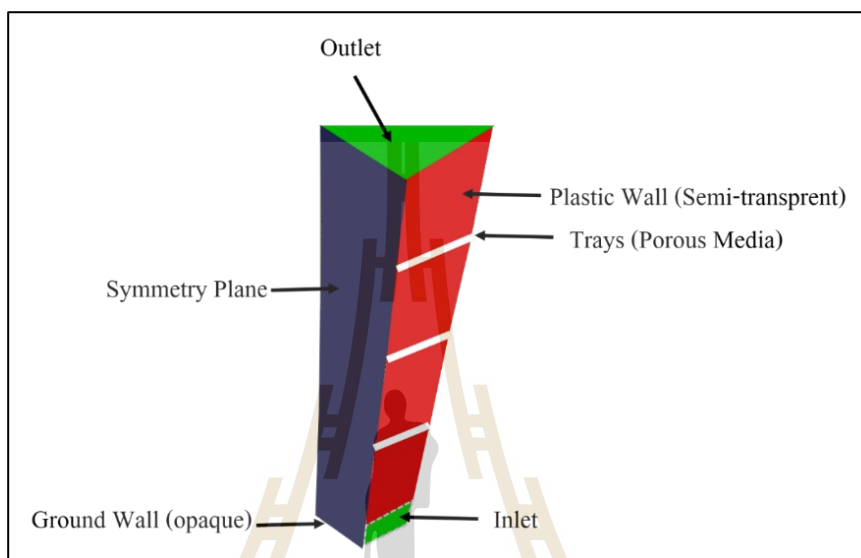
Inlet : เป็นการกำหนดทิศทางการไหลให้เป็นการไหลเข้าเท่านั้น

Outlet : เป็นการกำหนดทิศทางการไหลให้เป็นการไหลออกเท่านั้น

Wall : เป็นการกำหนดในพื้นที่ตรงนั้นเป็นผนัง หมายความว่าของไหลไม่สามารถผ่านเข้าออกพื้นที่นั้นได้

Porous Media : เป็นการกำหนดให้พื้นที่ตรงนั้นให้มีลักษณะรูพรุนของไหลจะไหลผ่านช่องว่าง

Symmetry Plane : ของไหลไม่สามารถผ่านเข้าออกพื้นที่ผิวนั้นได้ เงื่อนไขขอบเขตประเภทนี้ใช้กับปัญหาการไหลที่มีลักษณะสมมาตร พื้นผิวสมมาตรจะเป็นเสมือนกระจกสะท้อนค่าที่ได้จากการคำนวณ ค่าคุณสมบัติต่าง ๆ หรือพฤติกรรมของการไหลภายในโดเมนที่อยู่เป็นระยะห่างเท่ากันเมื่อวัดจากพื้นผิวสมมาตรออกไปจะมีค่าเท่ากันเสมอ



รูปที่ 3.12 เงื่อนไขขอบเขตของโดเมน

ตารางที่ 3.6 เงื่อนไขขอบเขต

เงื่อนไข	เงื่อนไขการไหล	เงื่อนไขเชิงความร้อน
Inlet	Pressure inlet (Total pressure 0 Pa)	<ul style="list-style-type: none"> Constant Temperature $T_{\infty} = 303 \text{ K}$, $h = 2.02 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$
Ground	No slip Wall (opaque)	<ul style="list-style-type: none"> Adiabatic ($Q=0$)
Outlet	Pressure outlet (Static pressure 0 Pa)	<ul style="list-style-type: none"> Constant Temperature $T_{\infty} = 303 \text{ K}$, $h = 2.02 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$
Plastic	No slip Wall (Semi-transparent)	<ul style="list-style-type: none"> Mixed Mode ($h = 2.02 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$) Solar Radiation ($I = 331 \text{ W/m}^2$)
Trays	No slip (Porous Media)	<ul style="list-style-type: none"> Convection ($h = 2.02 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$)
Symmetry Plane	-	-

2) เงื่อนไขการคำนวณ

เงื่อนไขการคำนวณสำหรับการจำลองในงานวิจัยนี้ แสดงดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 เงื่อนไขการคำนวณ

เงื่อนไข	การคำนวณ
ซอฟต์แวร์	ANSYS-FLUENT
อัลกอริทึม	Coupled, Pseudo Transient
Numerical scheme	Upwind Differencing Scheme (UDS)
Viscosity Model	Turbulent $k - \epsilon$, Standard Wall Functions
Radiation Model	Discrete Ordinates (DO), Solar Ray Tracing
Flow Model	Boussinesq approximation
Under-Relaxation Factor	
• Pressure	0.3
• Density	1
• Body Forces	1
• Momentum	0.7
• Energy	1
Grid Type	Tetrahedron
Methods	Pressure <ul style="list-style-type: none"> • PRESTO! Momentum <ul style="list-style-type: none"> • Second Order Upwind Turbulent Kinetic Energy <ul style="list-style-type: none"> • Second Order Upwind Turbulent Dissipation Rate <ul style="list-style-type: none"> • Second Order Upwind Energy <ul style="list-style-type: none"> • Second Order Upwind Discrete Ordinates <ul style="list-style-type: none"> • Second Order Upwind

ตารางที่ 3.7 เงื่อนไขการคำนวณ (ต่อ)

เงื่อนไข	การคำนวณ
Equations Residual	
• Continuity	1e-06
• x-Velocity	1e-06
• y-Velocity	1e-06
• z-Velocity	1e-06
• Energy	1e-06
• k	1e-06
• Epsilon	1e-04
• do-intensity	1e-06
Initialization Method	Hybrid Initialization

3.5 การสร้างเครื่องต้นแบบ

เครื่องต้นแบบของเครื่องอบแห้งปล่องลมแดดมีลักษณะตั้งตรงและบานออก มีอัตราส่วนพื้นที่ทางออกต่อพื้นที่ทางเข้าเท่ากับ AR4 ภายในมีถาดสำหรับวางผลผลิต โดยสร้างเครื่องต้นแบบทั้งรูปทรงสี่เหลี่ยมและวงกลม ส่วนประกอบหลัก ๆ ประกอบไปด้วยโครงสร้าง ผนังที่ทำจากแผ่นผ้าพลาสติกใสและถาดสำหรับวางผลผลิต ซึ่งมีรายละเอียดดังตารางที่ 3.8 และรูปที่ 3.13-3.15

ตารางที่ 3.8 รายละเอียดส่วนประกอบของเครื่องต้นแบบ

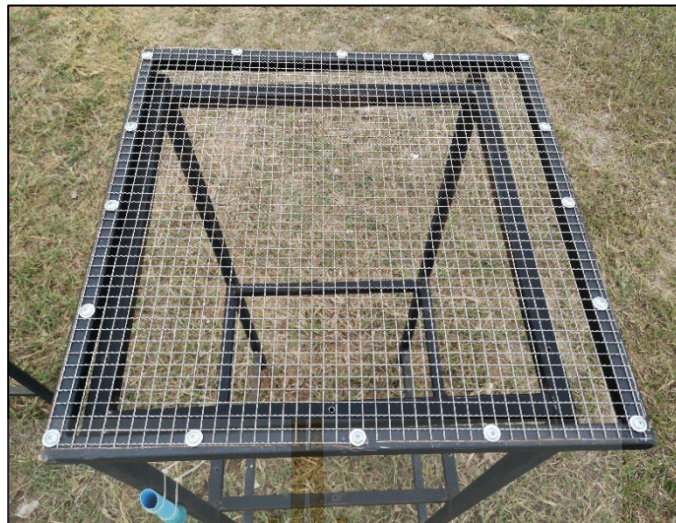
ชื่อ	รายละเอียด
โครงสร้าง	เหล็กกล่องขนาด 1×1 นิ้ว
ผนัง	พลาสติกใสหนา 0.4 มิลลิเมตร
ถาด	ตะแกรงสแตนเลส ขนาดข้อ 1×1 เซนติเมตร



รูปที่ 3.13 โครงสร้างของเครื่องอบแห้งปล่องลมแดด



รูปที่ 3.14 พลาสติกใสหุ้มเครื่อง



รูปที่ 3.15 ตะแกรงสแตนเลส

สำหรับเครื่องอบแห้งต้นแบบทั้ง 2 รูปทรง มีลักษณะดังรูปที่ 3.16 และรูปที่ 3.17



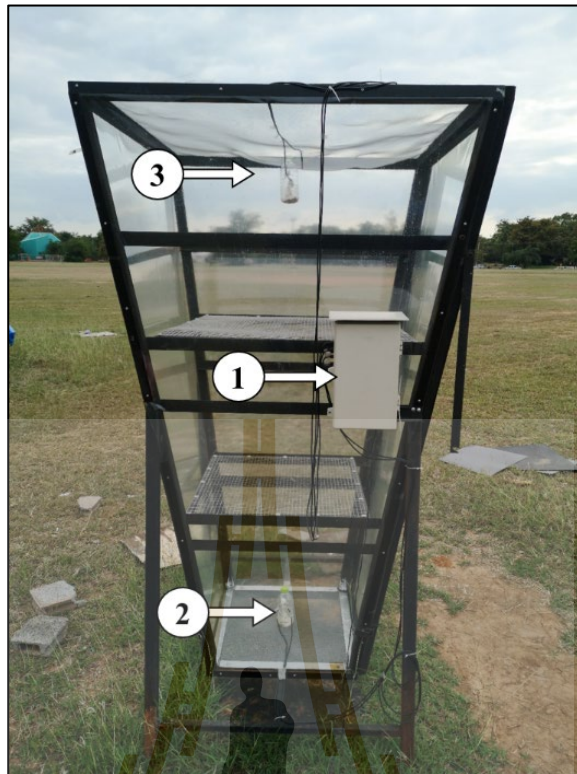
รูปที่ 3.16 เครื่องอบแห้งปล่องลมแคครูปทรงสี่เหลี่ยม



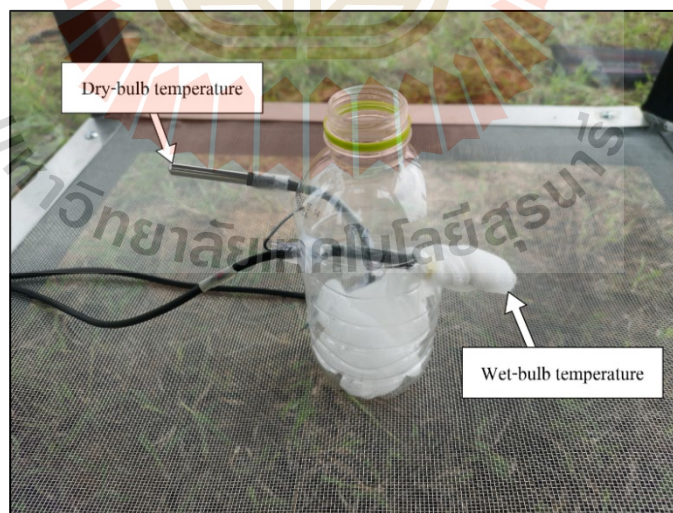
รูปที่ 3.17 เครื่องอบแห้งปล่องลมแดดรูปทรงวงกลม

3.5.1 การติดตั้งชุดเก็บข้อมูล

การทดสอบเครื่องอบแห้งปล่องลมแดดได้ติดตั้งชุดเก็บข้อมูล ดังรูปที่ 3.18 หมายเลข 1 คือ Data logger เป็นชุดควบคุมและเก็บข้อมูล หมายเลข 2 คือ เซนเซอร์วัดอุณหภูมิอากาศทางเข้า หมายเลข 3 คือ เซนเซอร์วัดอุณหภูมิอากาศทางออก แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 3.9 โดยวัดอุณหภูมิทั้งอุณหภูมิกระเปาะแห้งและอุณหภูมิกระเปาะเปียกแสดงดังรูปที่ 3.19 และเครื่องวัดความเข้มแสง (Pyranometer) แสดงดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.18 การติดตั้งชุดเก็บข้อมูล



รูปที่ 3.19 เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ



รูปที่ 3.20 Pyranometer

ตารางที่ 3.9 ชุดเก็บข้อมูล

อุปกรณ์	รายละเอียด
Data logger	ARUDUINO R3
เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ	Digital Temperature Sensor Probe DS18B20
Pyranometer	METEON Irradiance Meter

ก่อนการใช้งานชุดเก็บข้อมูลมีขั้นตอนหนึ่งที่ต้องพิจารณา คือการสอบเทียบความถูกต้อง (Calibration) ของอุปกรณ์เพื่อให้แน่ใจว่าอุปกรณ์สามารถใช้ได้และมีความแม่นยำ โดยเซนเซอร์วัดอุณหภูมิที่ทำการสอบเทียบความถูกต้องทั้งหมด 10 ตัว โดยมีความคลาดเคลื่อนร้อยละ 0.11-0.35

3.6 การทดสอบเพื่อประเมินประสิทธิภาพ

การประเมินประสิทธิภาพของการอบแห้งและเครื่องอบแห้งสามารถทำได้ดังนี้

1) ประสิทธิภาพหลังการรับแสง (Collector efficiency) โดยทั่วไปแล้วประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหลังการรับแดด นิยามโดยอัตราส่วนของพลังงานที่อากาศได้รับต่อปริมาณความเข้มแสงแดด (Duffie & Beckman, 2013) ดังสมการที่ 3.6

$$\eta_c = \frac{\dot{m}C_p (T_{out,c} - T_{in,c})}{A_c I_T} \quad (3.6)$$

2) ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง (Dryer efficiency) นิยามโดยอัตราส่วนของพลังงานที่ใช้สำหรับการระเหยของไอน้ำในเนื้อวัสดุต่อปริมาณความเข้มแสงแดด (César et al., 2019) ดังสมการที่ 3.7

$$\eta_E = \frac{m_w h_{fg}}{A_c I_T} \quad (3.7)$$

3) ประสิทธิภาพการอบแห้ง (Drying efficiency) นิยามโดยอัตราส่วนของพลังงานที่ทำให้ผลผลิตร้อนขึ้นและพลังงานที่ใช้สำหรับการระเหยของไอน้ำในเนื้อวัสดุต่อปริมาณความเข้มแสงแดดที่หลังการรับแดดได้รับ (Hall, 1987) ดังสมการที่ 3.8

$$\eta_D = \frac{m_p C_{p,P} (T_{P,t+dt} - T_{P,t}) + m_w h_{fg}}{I_T A_c \eta_C} \quad (3.8)$$

เมื่อ	\dot{m}	คือ อัตราการไหลอากาศ, kg/s
	C_p	คือ ความร้อนจำเพาะ, kJ/kg.K
	$C_{p,P}$	คือ ความร้อนจำเพาะของผลผลิต, kJ/kg.K
	$T_{out,c}$	คือ อุณหภูมิทางออกหลังรับแสง, K
	$T_{in,c}$	คือ อุณหภูมิทางเข้าหลังรับแสง, K
	$T_{P,t+dt}$	คือ อุณหภูมิของผลผลิตเมื่อเวลาผ่านไป, K
	$T_{P,t}$	คือ อุณหภูมิเริ่มต้นของผลผลิต, K
	A_c	คือ พื้นที่ของหลังการรับแสง, m ²
	I_T	คือ ความเข้มแสงแดด, W/m ²
	m_w	คือ มวลไอน้ำที่ระเหย, kg
	m_p	คือ มวลของผลผลิต, kg
	h_{fg}	คือ ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (ที่ความดันบรรยากาศ), kJ/kg

ในการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งปล่องลมแดดทั้ง 2 รูปทรง ใช้ปลานิลเป็นวัตถุดิบในการอบ โดยเป็นการอบแห้งเพื่อทำปลานิลเส้นแดดเดียว มีขั้นตอนดังนี้

- 1) เตรียมปลานิลให้เป็นเส้นมีขนาดพอเหมาะ โดยมีน้ำหนัก 100 กรัม ดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 ปลานิลเส้น

- 2) อบเพื่อหามวลแห้งของปลานิลโดยใช้ตัวอย่างปลานิลเส้นจำนวน 7 ชุด แบ่งเป็นชุดตัวอย่างน้ำหนัก 500 กรัม จำนวน 5 ชุด และชุดตัวอย่างน้ำหนัก 300 กรัม จำนวน 2 ชุด อบโดยเครื่องตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105-110 °C เป็นเวลา 24-72 ชั่วโมง ดังรูปที่ 3.22 และรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.22 ตัวอย่างปลานิลเส้น



รูปที่ 3.23 อบโดยใช้ตู้อบลมร้อน

3) ทดสอบอบแห้งปลานิลเส้นโดยใช้เครื่องอบแห้งปล่องลมแดดทั้ง 2 รูปทรง โดยทดสอบทั้งแบบเครื่องอบแห้ง 2 ถาด และ 3 ถาด พร้อมกับตากแห้งตามธรรมชาติควบคู่ไปด้วย โดยน้ำหนักปลาในแต่ละถาดเท่ากับ 100 กรัม โดยเริ่มทดสอบระหว่างวันที่ 17 กันยายน ถึง 20 ตุลาคม พ.ศ. 2562 ตั้งแต่เวลา 8.00-19.00 น. ดังรูปที่ 3.24 และรูปที่ 3.25 ชั่งน้ำหนักปลาทุก ๆ 2 ชั่วโมง



รูปที่ 3.24 อบแห้งปลานิลเส้นโดยใช้เครื่องอบแห้งปล่องลมแดด



รูปที่ 3.25 ดาดแห้งปลานิลเส้น โดยธรรมชาติ

3.7 จลนพลศาสตร์การอบแห้งชั้นบาง

จลนพลศาสตร์การอบแห้งชั้นบาง (Drying kinetic) หมายถึง พฤติกรรมของการอบแห้ง หรือการลดความชื้นออกจากเนื้อวัสดุ โดยทั่วไปนิยมอธิบายในรูปของอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) เทียบกับเวลา ซึ่งหากได้ทำการทดลองก็จะทราบถึงพฤติกรรมดังกล่าวได้โดยการวัดความชื้นของวัสดุ อย่างไรก็ตามในหลายกรณีในทางปฏิบัติการทำการทดลองอบแห้งจริง อาจมีความยุ่งยาก ซึ่งการใช้แบบจำลองในการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งชั้นบางจะช่วยลดระยะเวลาและไม่ต้องทดลองจริง โดยสมการอบแห้งชั้นบางที่ใช้ในการทำนายอัตราส่วนความชื้น แสดงดังตารางที่ 3.10

ตารางที่ 3.10 รูปแบบสมการอบแห้งชั้นบาง

ลำดับ	แบบจำลอง	ชื่อ	อ้างอิง
1	$MR = \exp(-kt)$	Newton	Ayensu, (1997)
2	$MR = \exp(-kt^n)$	Page	Simal et al., (2005)
3	$MR = \exp(-kt^n)$	Modified Page 1	Diamante, (1993)
4	$MR = a \exp(-kt)$	Henderson and Pabis	Yaldiz et al., (2001)
5	$MR = a \exp(-kt) + c$	Logarithmic	Togrul and Pehlivan, (2003)
6	$MR = a \exp(-k_1t) + b \exp(-k_2t)$	Tow term	Henderson, (1974)

ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ของสมการการอบแห้งชั้นบาง ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression) ซึ่งมีดัชนีชี้วัดความสามารถในการทำนายของสมการอบแห้งชั้นบาง คือ สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination : R^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error : RMSE) โดยการพิจารณาดัชนีชี้วัด ค่า R^2 ควรมีค่าใกล้ 1 และ RMSE ควรใกล้เคียง 0 (César et al., 2019) ซึ่ง R^2 และ RMSE นิยามโดย (Seerangurayar et al., 2019) (Shi, 2008)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{pre},i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp}} - MR_{\text{pre},i})^2} \quad (3.9)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{pre},i} - MR_{\text{exp},i})^2}{N} \right]^{1/2} \quad (3.10)$$

เมื่อ MR_{exp} คือ ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

MR_{pre} คือ ข้อมูลที่ได้จากการทำนาย

N คือ จำนวนข้อมูล

i คือ จำนวนเต็ม 1, 2, 3,...

บทที่ 4

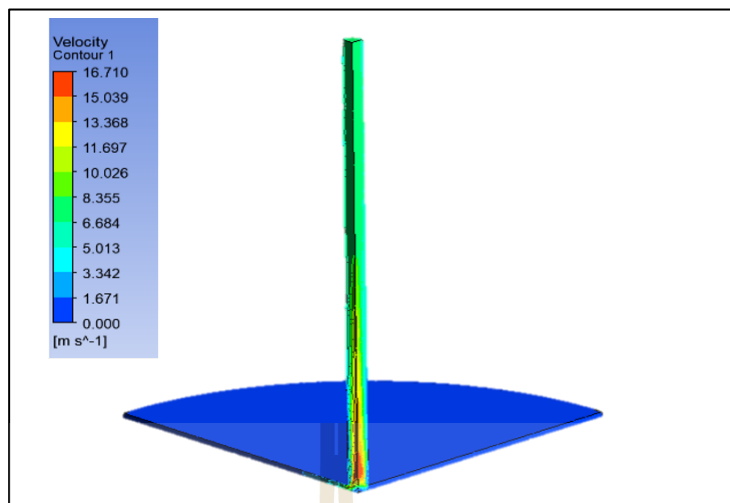
ผลการดำเนินการวิจัย

4.1 บทนำ

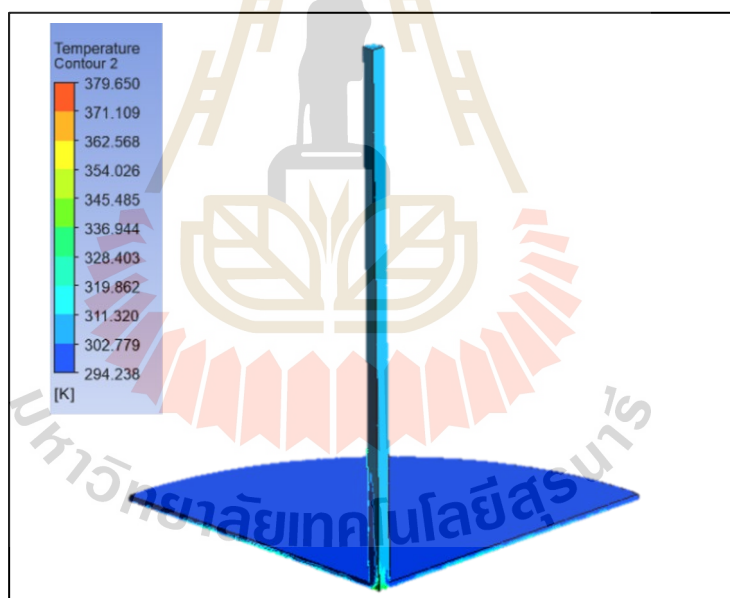
บทนี้จะกล่าวถึงผลการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม ผลการจำลองของเครื่องอบแห้งปล่องลมแดดโดยใช้ค่าความเข้มแสงแดดเท่ากับ 331 W/m^2 และอุณหภูมิอากาศเท่ากับ 303 K ซึ่งเป็นผลของอัตราการไหลและอุณหภูมิอากาศบริเวณทางออก โดยแสดงผลกระทบของการปรับเปลี่ยนรูปทรงของเครื่องอบแห้งปล่องลมแดด กำหนดโดยอัตราส่วนพื้นที่ทางออกต่อทางเข้า (Area ratio : AR) เท่ากับ 0.5, 1, 2, 4, 8, 16, 20, 25 และผลกระทบของความสูงของเครื่องอบแห้งปล่องลมแดด 1.5 และ 2 เมตร รวมถึงผลกระทบต่อจำนวนถาด 2 และ 3 ถาด ผลการทดลองการอบแห้งปาลานิลเส้นด้วยเครื่องอบแห้งปล่องลมแดดทั้ง 2 รูปทรง รวมถึงผลการตากแห้งโดยธรรมชาติ

4.2 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม

งานวิจัยนี้ได้ตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมโดยการจำลองการไหลในโรงไฟฟ้าปล่องลมแดด (Solar chimney power plant) เพราะเป็นการไหลโดยการพาโดยธรรมชาติและได้รับความร้อนจากรังสีแสงอาทิตย์ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับงานวิจัยนี้ แสดงดังรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 ความเร็วในโรงไฟฟ้าปล่องลมแคด

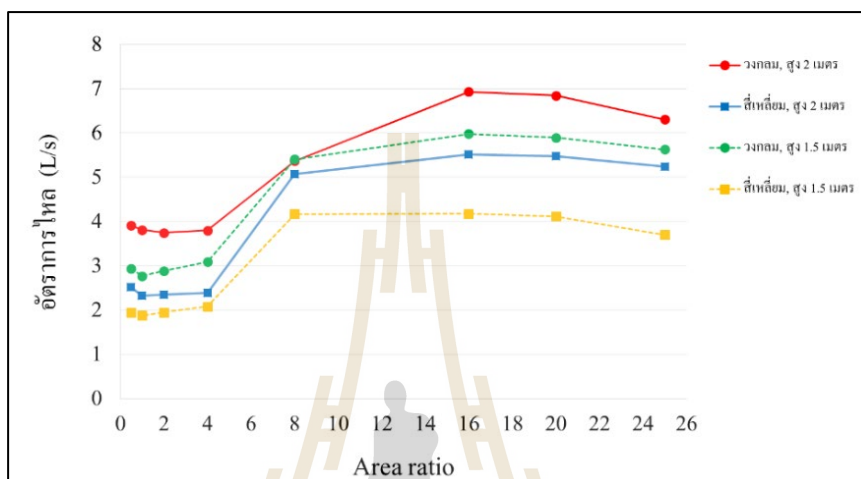


รูปที่ 4.2 อุณหภูมิในโรงไฟฟ้าปล่องลมแคด

ในการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมได้พิจารณาผลเฉลยของความเร็วและอุณหภูมิทางออกของปล่อง โดยเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Haaf, (1984) พบว่าผลเฉลยของความเร็วและอุณหภูมิทางออกปล่องของแบบจำลองมีความแตกต่างจากผลการทดลองร้อยละ 4.28 และ 5.4 ตามลำดับ

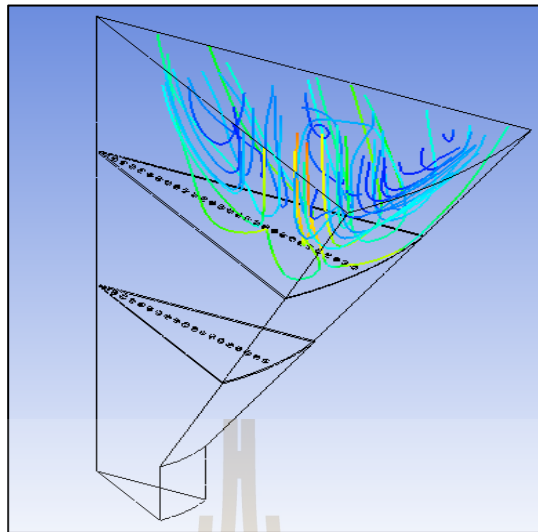
4.3 อิทธิพลของอัตราส่วนพื้นที่ต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งปล่องลมแดด

อัตราการไหลของอากาศที่ไหลอยู่ภายในเครื่องอบแห้งเป็นปัจจัยที่สำคัญในการอบแห้ง โดยหากอัตราการไหลสูงจะส่งผลดีต่อการอบแห้ง (Afriyie et al., 2016) ทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น ซึ่งพบว่าอัตราส่วนพื้นที่ (Area ratio, AR) มีอิทธิพลต่ออัตราการไหล แสดงดังรูปที่ 4.3



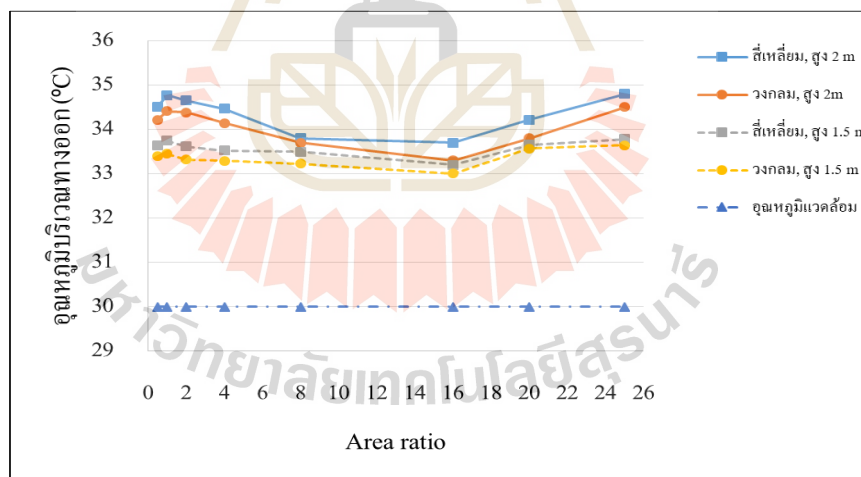
รูปที่ 4.3 อิทธิพลของอัตราส่วนพื้นที่ต่ออัตราการไหล

จากรูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศและอัตราส่วนพื้นที่ (AR) พบว่าอัตราการไหลเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนพื้นที่เพิ่มขึ้น โดยที่ AR16 มีอัตราการไหลสูงสุดทั้ง 2 รูปทรง และ 2 ความสูง ซึ่งเครื่องอบแห้งสูง 2 เมตร อัตราการไหลสูงสุดเท่ากับ 6.93 ลิตรต่อวินาที และ 5.51 ลิตรต่อวินาที สำหรับรูปทรงวงกลมและสี่เหลี่ยม ตามลำดับ และสำหรับเครื่องอบแห้งสูง 1.5 เมตร อัตราการไหลสูงสุดเท่ากับ 5.98 ลิตรต่อวินาที และ 4.18 ลิตรต่อวินาที สำหรับรูปทรงวงกลมและสี่เหลี่ยม ตามลำดับ ในทางกลับกันพบว่าเมื่อ AR เพิ่มมากกว่า AR16 ทำให้อัตราการไหลลดลง เนื่องจากเกิดการหมุนวนของอากาศบริเวณทางออก ดังรูปที่ 4.4 การหมุนวนเกิดจากแรงดันต่อต้านบริเวณทางออก (Adverse pressure gradient) ซึ่งเมื่อ AR เพิ่มขึ้นความดันต่อต้านจะเพิ่มขึ้น ซึ่งหากมากพอจะทำให้การไหลบางส่วนเกิดการหมุนวน โดยเฉพาะของไหลที่อยู่ชิดผิวผนัง ซึ่งสอดคล้องตามหลักการเบอร์นูลลี (Bernoulli's principle) และ (ทวิช จิตรสมบูรณ์, 2554)



รูปที่ 4.4 การหมุนวนบริเวณทางออก

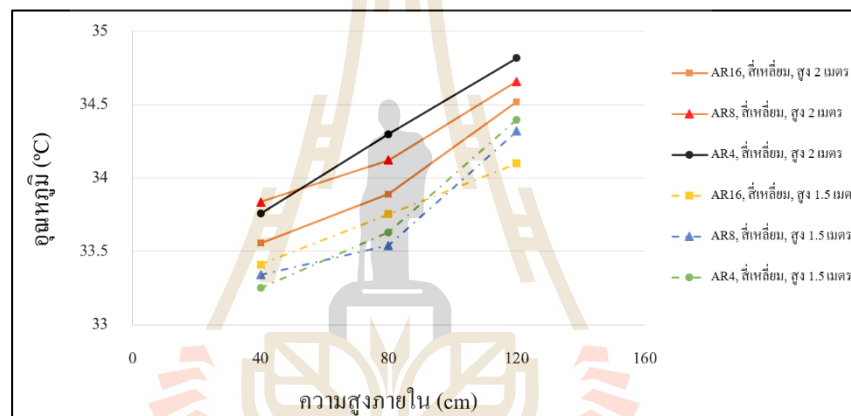
นอกจากนี้ยังพบว่า อัตราส่วนพื้นที่ซึ่งมีอิทธิพลต่ออุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง ดังรูปที่ 4.5



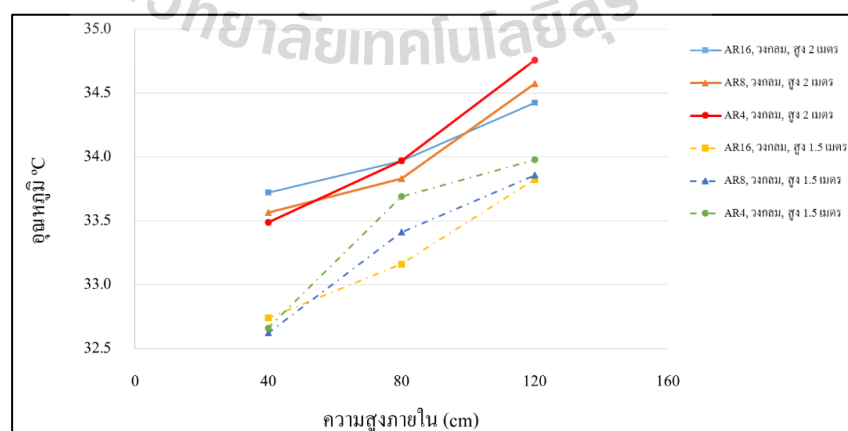
รูปที่ 4.5 อิทธิพลของอัตราส่วนพื้นที่ต่ออุณหภูมิบริเวณทางออก

อุณหภูมิภายในห้องอบแห้งเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการอบแห้ง โดยยิ่งอุณหภูมิสูงจะส่งผลให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น แต่ในหลายกรณีการอบแห้งไม่ได้ต้องการให้อากาศอุณหภูมิสูงเกินไปเพราะมีผลต่อสีและความกรอบของผลผลิต กลิ่น เช่น การอบแห้งธัญพืช พริก สมุนไพร ปลาแดดเดียว เป็นต้น การอบแห้งเหล่านี้มีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ที่ 20-40 °C จากรูปที่ 4.5

พบว่า อุณหภูมิบริเวณทางออกอยู่ในช่วง 33-35 °C โดยอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 3-5 °C และพบว่า AR เพิ่มขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิลดลง เนื่องจากอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.4 ในทางกลับกันเมื่อ AR เพิ่มมากกว่า AR 16 อุณหภูมิบริเวณทางออกสูงขึ้น เหตุผลเพราะอัตราการไหลเริ่มลดลง นอกจากนี้เมื่อเครื่องอบแห้งสูงขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดยเครื่องอบแห้งสูง 2 เมตร มีอุณหภูมิสูงกว่าเครื่องอบแห้ง 1.5 เมตร ประมาณ 1 °C เนื่องจากเมื่อเครื่องอบแห้งสูงขึ้นทำให้พื้นที่รับแสงเพิ่มขึ้นร้อยละ 32.2 สำหรับรูปทรงของเครื่องอบแห้งพบว่า รูปทรงสี่เหลี่ยมมุมสูงกว่ารูปทรงวงกลม เนื่องจากรูปทรงสี่เหลี่ยมมีพื้นที่รับแสงมากกว่ารูปทรงวงกลมร้อยละ 12.64 สอดคล้องกับสมการที่ 2.9 และเมื่อพิจารณาอุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งปล่องลมแคบพบว่า อุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามความสูงภายในเครื่องอบแห้ง แสดงดังรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับความสูงภายในเครื่องอบแห้งปล่องลมแคบรูปทรงสี่เหลี่ยม

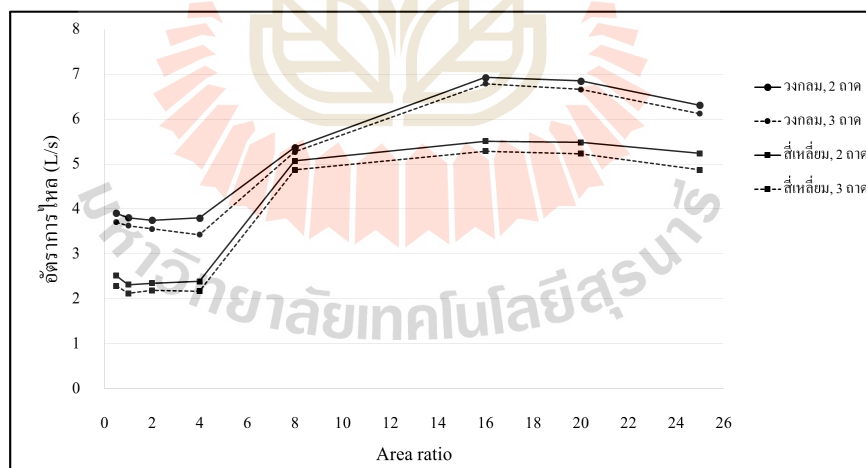


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับความสูงภายในเครื่องอบแห้งปล่องลมแคบรูปทรงวงกลม

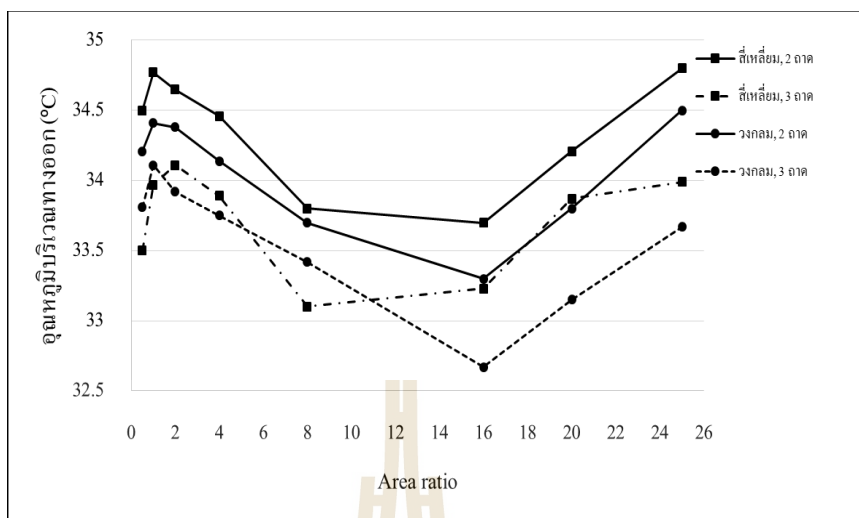
จากรูปที่ 4.6 และ 4.7 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับความสูงภายในเครื่องอบแห้งแต่ละรูปทรงทรง พบว่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงภายในเพิ่มขึ้น เนื่องจากระหว่างทางเมื่ออากาศลอยตัวสูงขึ้นภายในปล่อง อากาศได้รับพลังงานความร้อนจากถาดซึ่งทำให้อุณหภูมิอากาศเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับสมการที่ 2.7

4.4 อิทธิพลของจำนวนถาดต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งปล่องแคด

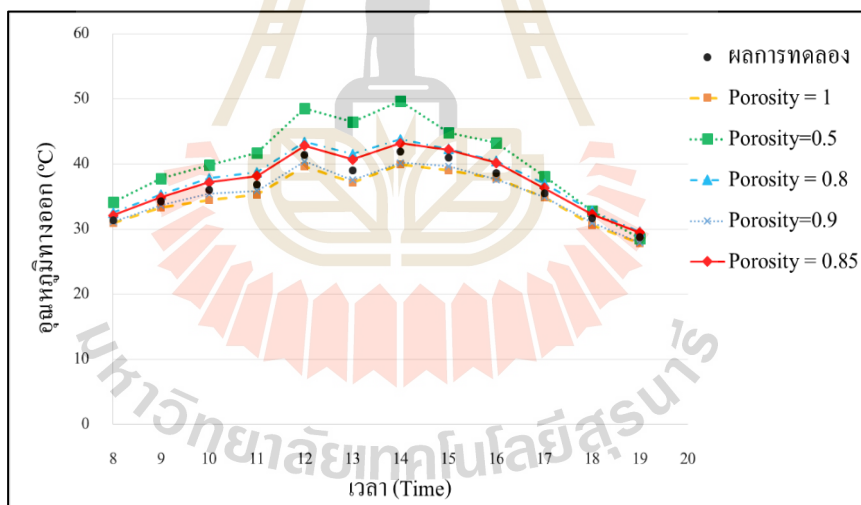
จำนวนของถาดสำหรับวางผลผลิตมีผลต่อการออกแบบเครื่องอบแห้ง เพราะจะทำให้อบผลผลิตได้ครั้งละจำนวนมาก อย่างไรก็ตามควรคำนึงถึงผลกระทบของจำนวนถาดต่ออัตราไหลและอุณหภูมิเพราะเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อสมรรถนะการอบแห้ง ซึ่งพบว่า เมื่อจำนวนถาดเพิ่มขึ้นจาก 2 ถาด เป็น 3 ถาด ทำให้อัตราการไหลลดลงทั้งรูปทรงวงกลมและสี่เหลี่ยม เช่น รูปทรงวงกลม AR16 อัตราการไหลลดลงจาก 6.93 ลิตรต่อวินาที เป็น 6.79 ลิตรต่อวินาที รูปทรงสี่เหลี่ยม AR16 อัตราการไหลลดลงจาก 5.51 ลิตรต่อวินาที เป็น 5.29 ลิตรต่อวินาที ลดลงร้อยละ 2.02-9.13 เนื่องจากถาดที่เพิ่มเข้ามานั้นขวางการไหลของอากาศ อากาศไหลออกไม่สะดวก อย่างไรก็ตามเมื่อจำนวนถาดเพิ่มขึ้นทำให้อุณหภูมิบริเวณทางออกเพิ่มขึ้นประมาณ 1 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.8 อิทธิพลของจำนวนถาดต่ออัตราการไหล



รูปที่ 4.9 อิทธิพลของจำนวนถาดต่ออุณหภูมิบริเวณทางออก



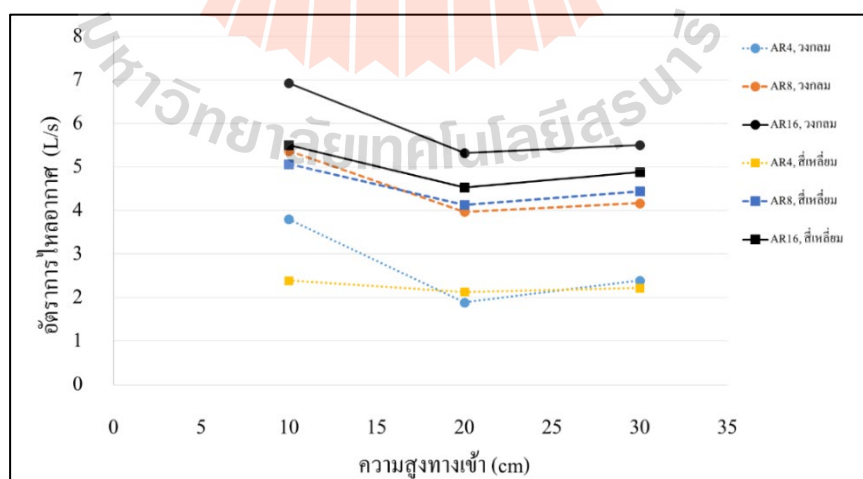
รูปที่ 4.10 อิทธิพลของ Porosity ต่ออุณหภูมิทางออก

นอกจากนี้ในการศึกษาอิทธิพลของถาดยังพบว่าอิทธิพลของความพรุนของถาด (Porosity) มีผลต่อความถูกต้องของผลการจำลองและอุณหภูมิของอากาศ เนื่องจากลักษณะของถาดในเครื่องต้นแบบเป็นตะแกรงขนาดช่อง 1×1 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.14 และในการจำลองถาดได้ใช้ฟังก์ชัน Porous media ที่เป็นการกำหนดให้ถาดมีลักษณะพรุน ซึ่งพบว่าตัวแปรหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อความถูกต้องของผลเฉลยคือค่า Porosity แสดงดังรูปที่ 4.10 โดยแสดงผลของอิทธิพลของ Porosity

ต่ออุณหภูมิทางออกเมื่อเวลาผ่านไป โดยที่ Porosity คืออัตราส่วนปริมาตรของช่องว่างต่อปริมาตรทั้งหมด เช่น Porosity เท่ากับ 1 หมายความว่าปริมาตรทั้งหมดมีแต่ช่องว่าง และ Porosity เท่ากับ 0 หมายความว่าปริมาตรทั้งหมดไม่มีช่องว่าง อีกหนึ่งความหมายของ Porosity คือยังมีค่าน้อยหมายความว่าความวัตถุนั้นมีความสามารถในการรับความร้อนสูง จะเห็นว่าเมื่อ Porosity เท่ากับ 0.5 อุณหภูมิทางออกสูงกว่าผลการทดลองร้อยละ 0.8-18.97 และเมื่อ Porosity เท่ากับ 1 อุณหภูมิทางออกต่ำกว่าผลการทดลองร้อยละ 1.37-4.86 ซึ่งพบว่า Porosity ที่เหมาะสมสำหรับการจำลองตะแกรงขนาดช่อง 1×1 เซนติเมตร มีค่าเท่ากับ 0.8-0.9 สอดคล้องกับ Wang et al., (2014) โดยค่า Porosity ที่ควรใช้คือ 0.85 เนื่องจากในการจำลองไม่ได้พิจารณาถึงการสูญเสียความร้อนและความคลาดเคลื่อนของโปรแกรม Round-off error และ Truncation errors

4.5 อิทธิพลของความสูงทางเข้าของเครื่องอบแห้งปล่องลมแดด

ความสูงทางเข้าหรือความสูงจากพื้นดินถึงทางเข้าเป็นปัจจัยหนึ่งที่ต้องพิจารณาในการสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ เพราะเป็นตัวบอกว่าควรตั้งให้ทางเข้าเครื่องอบแห้งสูงจากพื้นเท่าไรเพื่อสมรรถนะการอบแห้งที่เหมาะสม ความสูงทางเข้ามีผลต่ออัตราการไหลภายในห้องอบแห้งซึ่งพบว่า เครื่องอบแห้งปล่องลมแดดทั้ง 2 รูปทรง มีอัตราการไหลสูงสุดที่ความสูงทางเข้าเท่ากับ 10 เซนติเมตร เช่น รูปทรงสี่เหลี่ยม AR16 ที่ความสูงทางเข้า 10, 20 และ 30 มีอัตราการไหลเท่ากับ 5.5, 4.5, 4.8 ลิตรต่อวินาที ตามลำดับ และรูปทรงวงกลม AR16 ที่ความสูงทางเข้า 10, 20 และ 30 มีอัตราการไหลเท่ากับ 6.9, 5.32, 5.51 ลิตรต่อวินาที ตามลำดับ

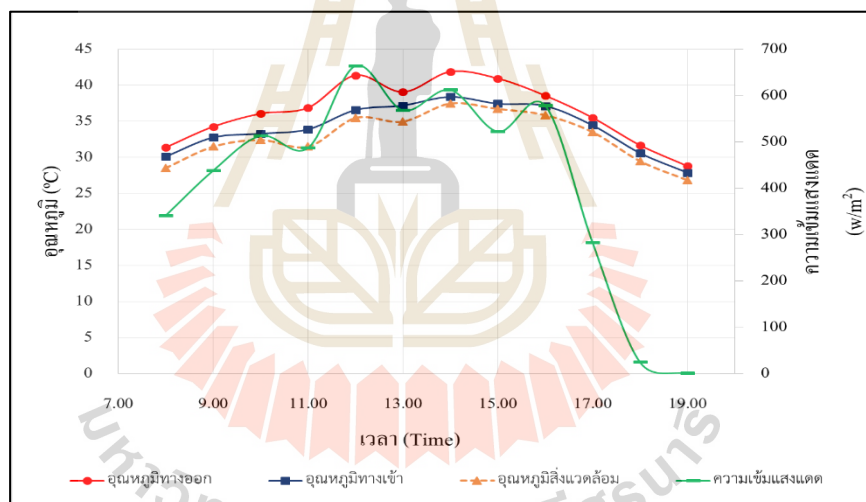


รูปที่ 4.11 อิทธิพลของความสูงทางเข้าต่ออัตราการไหล

ทั้งนี้เป็นเพราะที่ความสูงทางเข้าเท่ากับ 20 และ 30 เซนติเมตร อากาศบางส่วนเกิดการหมุนวนที่บริเวณทางเข้าเนื่องจากปริมาณที่มากเกินไป อย่างไรก็ตามได้พิจารณาเพิ่มเติมที่ความสูงทางเข้าเท่ากับ 40 เซนติเมตร ทั้ง 2 รูปทรง เพราะจากแนวโน้มที่ปรากฏดูเหมือนว่าอัตราการไหลจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงทางเข้าเพิ่มขึ้น พบว่าความสูงทางเข้า 40 เซนติเมตร ทำให้อัตราการไหลลดลง เนื่องจากอากาศบางส่วนเกิดการหมุนวนที่บริเวณทางเข้าเนื่องจากปริมาณที่มากเกินไปดังที่กล่าวมาข้างต้น

4.6 ผลการทดสอบเครื่องอบแห้งปล่องลมแดด (No-load)

การทดสอบเครื่องอบแห้งปล่องลมแดดในกรณีที่ไม่มีผลผลิตเป็นการทดสอบเครื่องอบแห้งรูปทรงสี่เหลี่ยมที่มีอัตราส่วนพื้นที่เท่ากับ AR4 สูง 2 เมตร เริ่มทำการทดสอบตั้งแต่ 8.00-19.00 น. โดยระหว่างการทดลองได้วัดอุณหภูมิทางเข้าและทางออกของเครื่องอบแห้งปล่องลมแดดและอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม รวมถึงวัดค่าความเข้มแสงตลอดการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ข้อมูลการทดสอบเครื่องอบแห้งปล่องลมแดด (No-load)

จากรูปที่ 4.12 การทดสอบเครื่องอบแห้งปล่องลมแดดกรณีที่ไม่มีผลผลิต พบว่า อุณหภูมิทางออกสูงกว่าอุณหภูมิทางเข้าตลอดการทดลอง ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิทางเข้า 0.92-4.82 °C คิดเป็นร้อยละ 3.08-13.18 สอดคล้องกับผลการจำลองในรูปที่ 4.5 โดยแนวโน้มของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตั้งแต่ 8.00 น. จนถึง 14.00 น. จากนั้นอุณหภูมิเริ่มลดลงจนจบการทดลองสอดคล้องกับค่าความเข้มแสงที่บันทึก นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิทางเข้าสูงกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมตลอดการทดลอง ซึ่งคำนวณประสิทธิภาพหลังการรับแดดจากสมการที่ 3.6 ได้ 0.5-9.55 เปอร์เซ็นต์ โดยจะเห็นว่า

ประสิทธิภาพหลังการรับแคดมีค่าต่ำ เหตุผลหนึ่งเป็นเพราะในสมการที่ 3.6 คำนึงถึงเพียงปริมาณของความเข้มแสงแคดแต่ไม่ได้คำนึงถึงคุณภาพของความเข้มแสงแคด ซึ่งไม่ยุติธรรมเพราะพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่มีคุณภาพต่ำประมาณร้อยละ 50 ของความเข้มแสงแคดที่หลังการรับแคดที่ได้รับ (Kabelac, 2005) ซึ่งหากคำนึงถึงค่าคุณภาพของความเข้มแสงแคดด้วย พบว่าประสิทธิภาพของหลังการรับแสงเป็น 1.01-19.2 เปอร์เซ็นต์

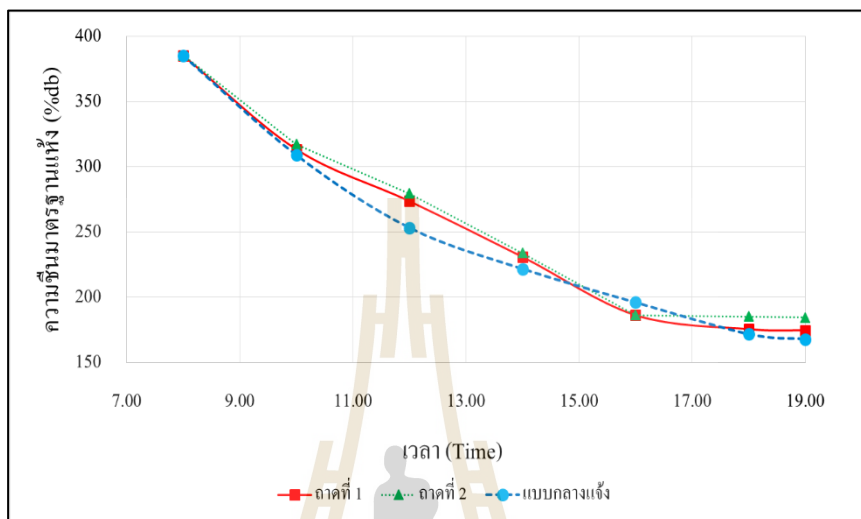
4.7 ผลการอบแห้งปลานิลเส้นแคดเดียว

การอบแห้งปลานิลเส้นแคดเดียวเริ่มต้นด้วยการทดสอบหามวลแห้งของปลานิล แสดงดังตารางที่ 4.1 และอบปลานิลเส้นแคดเดียวโดยเครื่องอบแห้งปล่องลมแคดใช้เนื้อปลานิลสดที่มีน้ำหนัก 100 กรัมต่อถาด ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 385 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง อบแห้งจนถึงความชื้นสุดท้ายเหลือ 150 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง ซึ่งเป็นความชื้นมาตรฐานของปลานิลเส้นแคดเดียวที่มีขายตามท้องตลาด (ชนกร หอมจำปา, 2555) โดยที่เนื้อปลานิลจะเลือกใช้เนื้อส่วนเดียวกันและมีขนาดและรูปร่างคล้ายคลึงกัน ทำการทดสอบเครื่องอบแห้งปล่องลมแคดที่มีจำนวนถาด 2 ถาด และ 3 ถาด ตามลำดับ โดยเป็นผลของความชื้นของปลานิลเส้นแคดเดียวเทียบกับเวลา ซึ่งผลการทดลองของเครื่องอบแห้งปล่องลมแคดรูปทรงสี่เหลี่ยม แสดงดังรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14 สำหรับผลการทดลองของเครื่องอบแห้งปล่องลมแคดรูปทรงวงกลม แสดงดังรูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.16

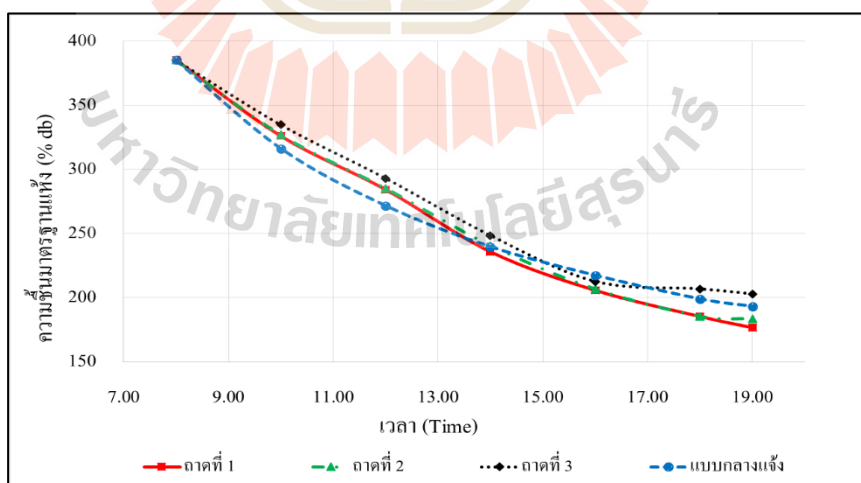
ตารางที่ 4.1 มวลแห้งของปลานิล

ลำดับ	น้ำหนักก่อนอบ (กรัม)	น้ำหนักหลังอบ (กรัม)	มวลแห้งเทียบกับน้ำหนักก่อนอบ (%)
1	500.00	103.15	20.63
2	500.00	104.12	20.82
3	500.00	103.52	20.70
4	500.00	103.08	20.61
5	500.00	101.45	20.39
6	219.81	44.19	20.53
7	379.33	78.01	20.56

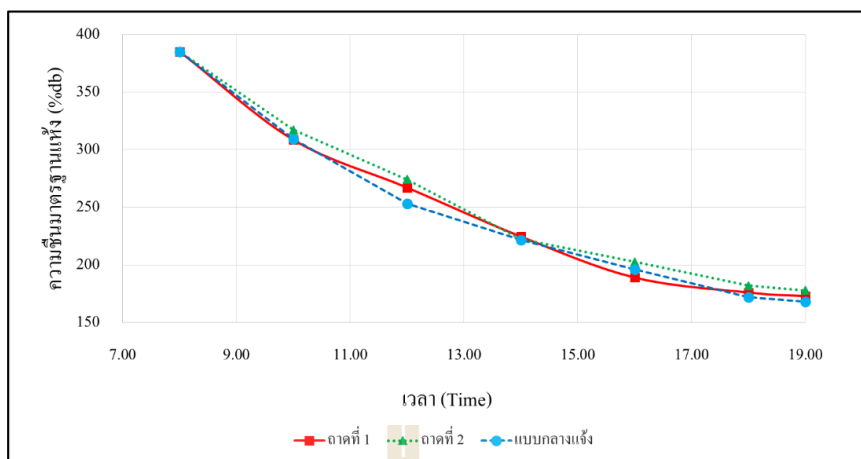
จากตารางที่ 4.1 การหามวลแห้งของปลานิลโดยใช้ปลานิลจำนวน 7 ชุดตัวอย่าง แบ่งเป็น ปลานิลเส้นน้ำหนัก 500 กรัม จำนวน 5 ชุด และ น้ำหนัก 219 กรัม กับ 379 กรัม อย่างละชุด พบว่า มวลแห้งของปลานิลมีน้ำหนักประมาณร้อยละ 20 ของน้ำหนักปลาเริ่มต้น



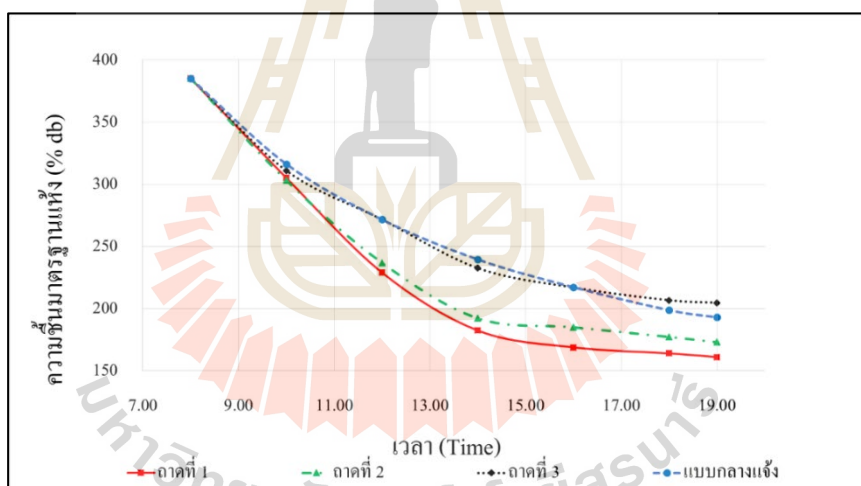
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ของความชื้นกับเวลาของปลานิลเส้นแคดเดี่ยวในเครื่องอบแห้ง ปล่องลมแคดรูปทรงสี่เหลี่ยม 2 ถาด



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ของความชื้นกับเวลาของปลานิลเส้นแคดเดี่ยวในเครื่องอบแห้ง ปล่องลมแคดรูปทรงสี่เหลี่ยม 3 ถาด



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ของความชื้นกับเวลาของปลานิลเส้นแคตเดี่ยวในเครื่องอบแห้ง
ปล่องลมแคครูปทรงวงกลม 2 ถาด



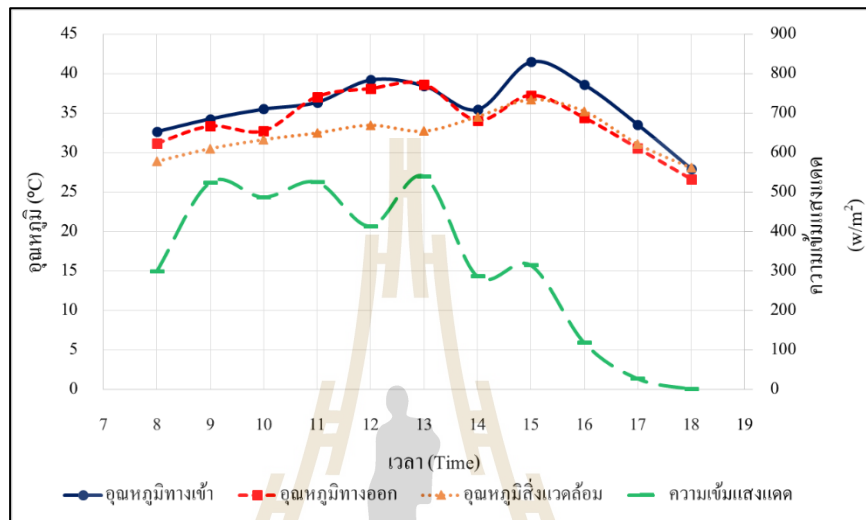
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ของความชื้นกับเวลาของปลานิลเส้นแคตเดี่ยวในเครื่องอบแห้ง
ปล่องลมแคครูปทรงวงกลม 3 ถาด

จากการทดลองอบแห้งปลานิลเส้นแคตเดี่ยว ซึ่งได้ทดลองอบแห้งในเครื่องอบแห้งปล่องลมแคตทั้งแบบรูปทรงสี่เหลี่ยมและวงกลม จากรูปที่ 4.13-4.16 พบว่า ความชื้นในเนื้อปลานิลลดลงตลอดช่วงการทดลองเมื่อเวลาผ่านไป โดยในช่วงแรก (8.00-10.00 น.) ความชื้นลดลงอย่างรวดเร็ว เป็นเพราะช่วงนี้ผิวของปลานิลยังชุ่มไปด้วยน้ำ ความชื้นจึงออกไปได้เร็ว ช่วงนี้คือช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant rate period of drying) ซึ่งคำนวณอัตราการอบแห้งจากสมการที่ 2.6 ได้

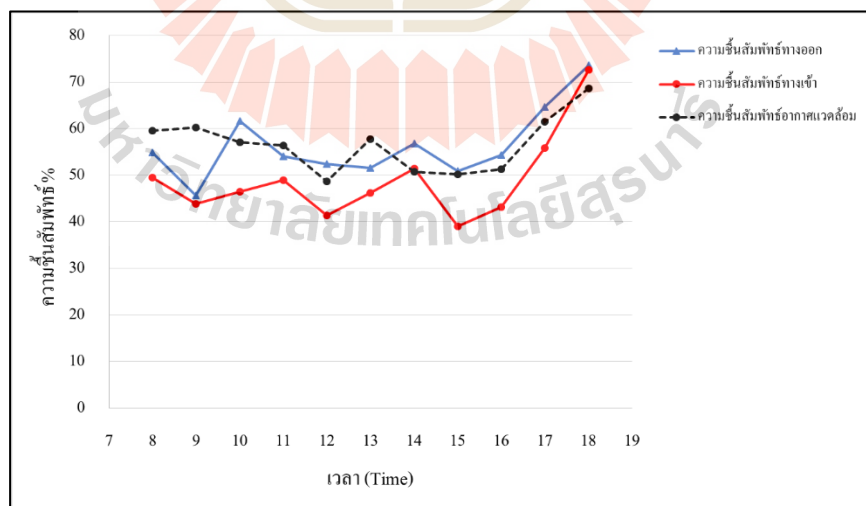
เท่ากับ 0.59-0.64 ความชื้นมาตรฐานแห้งต่อหน้าที่ หลังจากนั้นช่วงถัดมา (10.00-14.00 น.) ความชื้นเริ่มลดลงช้าลง เพราะผิวของปลานิลเริ่มแห้งความชื้นที่ระเหยเริ่มมาจากข้างในเนื้อปลา ช่วงนี้เรียกว่า ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate period) มีอัตราการอบแห้งเท่ากับ 0.3-0.51 ความชื้นมาตรฐานแห้งต่อหน้าที่ ส่วนช่วง (14.00-19.00 น.) ความชื้นเริ่มลดลงช้ากว่าเดิม ช่วงนี้ช่วงนี้ระนาบของการระเหยจะเคลื่อนตัวเข้าสู่ภายในเนื้อวัสดุ กล่าวคือความชื้นที่ระเหยจะมาจากในเนื้อปลา ช่วงนี้เรียกว่า “ช่วงของการอบแห้งลดลง” ส่วนที่ 2 ซึ่งมีอัตราการอบแห้งเท่ากับ 0.08-0.13 ความชื้นมาตรฐานแห้งต่อหน้าที่ นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าในช่วงเริ่มต้นของการอบแห้งหรือช่วงสภาวะที่ผิววัสดุเข้าสู่สมดุลกับอากาศ ไปจนถึงช่วงเกิดการอบแห้งคงที่ ความชื้นปลานิลเส้นที่ตากแห้งตามธรรมชาติลดลงเร็วกว่าการอบแห้งในเครื่องอบแห้งปล่องลมแดด เนื่องจากในช่วงนี้อัตราการไหลของอากาศที่คอยพัดผ่านและรับความชื้นออกจากวัสดุมีอิทธิพลมากในการไล่ความชื้น แต่เมื่อเข้าสู่ส่วนอัตราการอบแห้งลดลง ปลานิลเส้นที่อบแห้งในเครื่องอบแห้งจะมีความสามารถในการลดความชื้นได้มากกว่าการตากแห้งตามธรรมชาติ ซึ่งเป็นเพราะว่าในช่วงนี้ความชื้นบริเวณผิวเริ่มหมดไปอิทธิพลของอัตราการไหลเริ่มลดน้อยลง และอุณหภูมิมีอิทธิพลผลมากกว่าอัตราการไหลของอากาศ เนื่องจากในสภาวะอบแห้งมีอุณหภูมิสูงจะทำให้ความชื้นที่อยู่ภายในเนื้อปลาระเหยออกมาภายนอกได้ดี ซึ่งอุณหภูมิในเครื่องอบแห้งสูงกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม สอดคล้องกับ Afriyie et al., (2016) นอกจากนี้อากาศที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะมีความสามารถในการรับความชื้นได้ดีเนื่องจากความชื้นสัมพัทธ์ลดลง ดังรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18

เมื่อพิจารณาผลการอบแห้งในกรณีเครื่องอบแห้งที่มี 2 ถาด และ 3 ถาด พบว่า กรณี 2 ถาด ความชื้นของปลานิลเส้นแดดเดียวลดลงใกล้เคียงกับการตากแห้งตามธรรมชาติทั้งสองรูปทรง ความชื้นสุดท้ายของรูปทรงสี่เหลี่ยมมีค่าเท่ากับ 174, 184, 168 มาตรฐานแห้ง สำหรับถาดที่ 1, 2 และตากแห้งตามธรรมชาติ ตามลำดับ ความชื้นสุดท้ายของรูปทรงวงกลมมีค่าเท่ากับ 172, 177, 168 มาตรฐานแห้ง สำหรับถาดที่ 1, 2 และตากแห้งตามธรรมชาติ ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.15 อย่างไรก็ตามในกรณี 2 ถาด จะเห็นการอบแห้งในเครื่องอบแห้งปล่องลมแดดไม่สามารถลดความชื้นได้น้อยกว่าการตากแห้งตามธรรมชาติ สำหรับกรณี 3 ถาด พบว่า ความชื้นของปลานิลเส้นแดดเดียวลดลงมากกว่าการตากแห้งตามธรรมชาติทั้งสองรูปทรง ความชื้นสุดท้ายของรูปทรงสี่เหลี่ยมมีค่าเท่ากับ 176, 182, 202, 193 มาตรฐานแห้ง สำหรับถาดที่ 1, 2, 3 และตากแห้งตามธรรมชาติ ตามลำดับ ความชื้นสุดท้ายของรูปทรงวงกลมมีค่าเท่ากับ 164, 177, 192, 186 มาตรฐานแห้ง สำหรับถาดที่ 1, 2, 3 และตากแห้งตามธรรมชาติ ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าในกรณี 3 ถาด การอบแห้งในเครื่องอบแห้งปล่องลมแดดสามารถลดความชื้นได้มากกว่าการตากแห้งตามธรรมชาติร้อยละ 6-9.7 และร้อยละ 5-13.4 สำหรับรูปทรงสี่เหลี่ยมและวงกลม ตามลำดับ

ดังรูปที่ 4.14 และ 4.16 นอกจากนี้จะเห็นว่าเครื่องอบแห้งปล่องลมเดครูปทรงวงกลมสามารถลดความชื้นได้มากกว่ารูปทรงสี่เหลี่ยมทุกกรณี เนื่องจากอัตราการไหลอากาศของรูปทรงวงกลมมากกว่ารูปทรงสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 4.3 และประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง ดังสมการที่ 3.7 มีค่าเท่ากับ 0.78-12.8 เปอร์เซ็นต์ และ 0.8-18 เปอร์เซ็นต์ สำหรับรูปทรงสี่เหลี่ยมและวงกลม ตามลำดับ



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับเวลา



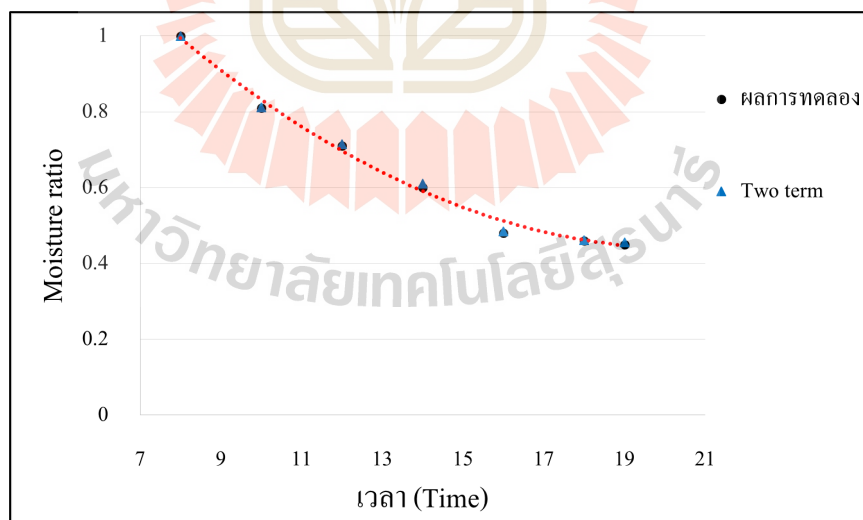
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ของความชื้นสัมพัทธ์กับเวลา

4.8 จลนพลศาสตร์การอบแห้งชั้นบางของปลานิล

การศึกษาสมการจลนพลศาสตร์การอบแห้งชั้นบางของปลานิลเส้นแสดเดี่ยว ทำได้โดยการนำอัตราส่วนความชื้นจากการทดลองมาเปรียบเทียบกับผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นจากสมการทำนายที่นำเสนอไว้ในตารางที่ 3.10 ซึ่งพบว่า Two term ทำนายพฤติกรรมของการอบแห้งชั้นบางหรือการลดความชื้นออกจากเนื้อปลานิลเส้นแสดเดี่ยวได้แม่นยำที่สุด แสดงดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.19

ตารางที่ 4.2 ผลการทำนายพฤติกรรมการอบแห้งชั้นบางของปลานิลเส้นแสดเดี่ยว

โมเดล	R ²	RMSE
Newton	0.978	0.0060
Page	0.990	0.0027
Modified Page1	0.991	0.0023
Henderson and Pabis	0.982	0.0050
Logarithmic	0.944	0.0150
Two term	0.995	0.0010



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา

จากรูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา พบว่าอัตราส่วนความชื้นลดลงเมื่อเวลาผ่านไป โดยที่ผลการทำนายแบบจำลองของ Two term และผลการทดลองมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี สอดคล้องกับ ประทีป ตุ่มทอง และ อำไพศักดิ์ ทิบุญญา, (2016) ซึ่งเป็น การศึกษาการศึกษาสมการจลนพลศาสตร์การอบแห้งและสัมประสิทธิ์การแพร่ของปลานิล นอกจากนี้เมื่อพิจารณาดัชนีชี้วัดความสามารถในการทำนายของสมการอบแห้งชั้นบางพบว่า R^2 เท่ากับ 0.995 และ RMSE เท่ากับ 0.0010



บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

บทนี้จะกล่าวถึงผลสรุปการทำวิจัยระบบอบแห้งปล่องลมแคดที่มีทั้งผลการจำลองสมรรถนะของเครื่องอบแห้งปล่องลมแคดและผลทดลองอบแห้งปลานิลเส้นแคดเดี่ยว ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

อัตราการไหลอากาศเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนพื้นที่ (Area ratio, AR) เพิ่มขึ้น โดยสำหรับเครื่องอบแห้งสูง 2 เมตร อัตราการไหลสูงสุดเกิดขึ้นที่ AR16 เท่ากับ 6.93 ลิตรต่อวินาที และ 5.51 ลิตรต่อวินาที สำหรับรูปทรงวงกลมและสี่เหลี่ยม ตามลำดับ และสำหรับเครื่องอบแห้งสูง 1.5 เมตร อัตราการไหลสูงสุดเท่ากับ 5.98 ลิตรต่อวินาที และ 4.18 ลิตรต่อวินาที สำหรับรูปทรงวงกลมและสี่เหลี่ยม ตามลำดับ ในทางกลับกันเมื่อ AR เพิ่มมากกว่า AR16 ทำให้อัตราการไหลลดลงเกิดการหมุนวนของอากาศบริเวณทางออก และอุณหภูมิอากาศเพิ่มขึ้นตลอดความสูงภายในของเครื่องอบแห้ง เนื่องจากระหว่างทางเมื่ออากาศลอยตัวสูงขึ้นภายในปล่อง อากาศได้รับพลังงานความร้อนจากถาด โดยที่อุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 3-5 °C และเมื่อ AR เพิ่มขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิลดลง เนื่องจากอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น เครื่องอบแห้งสูง 2 เมตร มีอุณหภูมิสูงกว่าเครื่องอบแห้ง 1.5 เมตร ประมาณ 1 °C เนื่องจากพื้นที่รับแสงเพิ่มขึ้นร้อยละ 32.2 สำหรับรูปทรงของเครื่องอบแห้งพบว่า รูปทรงสี่เหลี่ยมอุณหภูมิสูงกว่ารูปทรงวงกลม เนื่องจากรูปทรงสี่เหลี่ยมมีพื้นที่รับแสงมากกว่ารูปทรงวงกลมร้อยละ 12.64 และเมื่อจำนวนถาดเพิ่มขึ้นจาก 2 ถาด เป็น 3 ถาด ทำให้อัตราการไหลลดลงร้อยละ 2.02-9.13 เนื่องจากถาดที่เพิ่มเข้ามานั้นขวางการไหลของอากาศ อย่างไรก็ตามเมื่อจำนวนถาดเพิ่มขึ้นทำให้อุณหภูมิบริเวณทางออกเพิ่มขึ้นประมาณ 1 °C ค่า Porosity ที่เหมาะสมสำหรับการจำลองตะแกรงขนาดช่อง 1×1 เซนติเมตร มีค่าเท่ากับ 0.8-0.9 โดยค่า Porosity ที่ควรใช้คือ 0.85 และความสูงทางเข้าของห้องอบแห้งที่มีอัตราการไหลสูงสุดที่ความสูงทางเข้าเท่ากับ 10 เซนติเมตร

การทดลองเครื่องอบแห้งปล่องลมแคดพบว่า อุณหภูมิทางออกสูงกว่าอุณหภูมิทางเข้าตลอดการทดลอง ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิทางเข้าร้อยละ 3.08-13.18 โดยที่ประสิทธิภาพของหลังคาบังแสง

เท่ากับ 1.01-19.2 เปอร์เซ็นต์ และการทดสอบอบแห้งปลานิลเส้นแสดเดียวมีมวลแห้งประมาณร้อยละ 20 ของน้ำหนักปลาเริ่มต้น โดยมีอัตราการอบแห้งสูงสุดเท่ากับ 0.59-0.64 ความชื้นมาตรฐานแห้งต่อหน้าที่ เกิดขึ้นในช่วงแรก (8.00-10.00 น.) ความชื้นลดลงอย่างรวดเร็วเป็นเพราะช่วงนี้ผิวของปลานิลยังชุ่มไปด้วยน้ำความชื้นจึงออกไปได้เร็ว โดยที่การอบแห้งในเครื่องอบแห้งปล่องลมแสดสามารถลดความชื้นได้มากกว่าการตากแห้งตามธรรมชาติร้อยละ 6-9.7 และร้อยละ 5-13.4 สำหรับรูปทรงสี่เหลี่ยมและวงกลม ตามลำดับ โดยสำหรับประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง มีค่าเท่ากับ 0.78-12.8 เปอร์เซ็นต์ และ 0.8-18 เปอร์เซ็นต์ สำหรับรูปทรงสี่เหลี่ยมและวงกลม ตามลำดับ และสมการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งชั้นบางของปลานิลเส้นแสดเดียว Two term ทำนายพฤติกรรมของการอบแห้งชั้นบางหรือการลดความชื้นออกจากเนื้อปลานิลเส้นแสดเดียวได้แม่นยำที่สุดโดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.995 และ REMS เท่ากับ 0.010

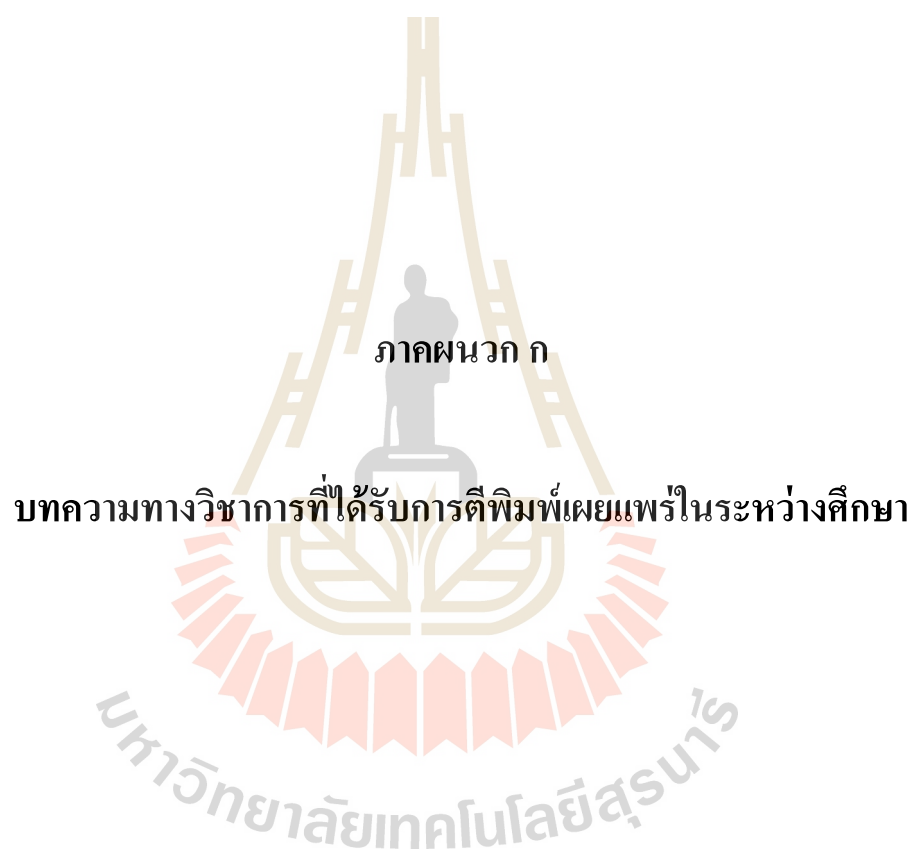


รายการอ้างอิง

- ทวิช จิตรสมบูรณ์. (2554). ตำราเรียนกลศาสตร์ของไหล. McGraw-Hill.
- เทวรัตน์ ทิพย์วิมล. (2552). การอบแห้งและการเก็บรักษาผลผลิตเกษตร. ตำราประกอบการสอนวิชา สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- พรสวรรค์ ทองใบ. (2546). การวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการถ่ายเทอากาศในอาคารโดยระบบการพา ความร้อนอิสระผ่านห้องหลังคาปรับแดด. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- ธนกร หอมจำปา. (2555). ผลของปริมาณปลานิลที่มีต่อเงื่อนไขการอบแห้งที่เหมาะสม. การประชุม วิชาการวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวแห่งชาติ ครั้งที่ 10. 23-34 สิงหาคม 2555. ศูนย์นวัตกรรม เทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว: หน่วยงานร่วมมหาวิทยาลัยขอนแก่น ศูนย์วิจัยเครื่องจักรกล เกษตรและวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- สมชาติ โสภณธฤทธิ์. (2540). การอบแห้งเมล็ดธัญพืช, พิมพ์ครั้งที่ 5, คณะพลังงานและวัสดุ, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 338 หน้า.
- เสริม จันทร์ฉาย. (2560). เทคโนโลยีการอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์. ตำราประกอบการสอน วิชา 514524 เทคโนโลยีการอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร
- อัจฉรา แซ่ไคว้, สุภวรรณ ภูริระวิชย์กุล และ ยุทธนา ภูริระวิชย์กุล (2558). ปัจจัยของการอบแห้ง ด้วยแหล่งพลังงานความร้อนแบบการพาและการแผ่รังสีความร้อนที่มีต่อจลนพลศาสตร์ และคุณภาพของพริกไทยดำ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- อำไพศักดิ์ ทีบุญมา และ ประทีป ตุ่มทอง. (2016). จลนพลศาสตร์ การอบแห้งและสัมประสิทธิ์การ แพร่ ของปลานิล. วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ., 3(2), 9-16.
- Afriyie, J. K., & Kojo Atta A. (2016). Field Drying of Cassava in a Solar Tent Dryer equipped with a Solar Chimney. ResearchGate, 2016.
- Afriyie, J. K., & Bart-Plange, A. (2012). Performance Investigation of a Chimney- Dependent Solar Crop Dryer for Different Inlet Areas with a Fixed Outlet Area. ISRN Renewable Energy, 2012.

- Ayensu, A. (1997). Dehydration of food crops using a solar dryer with convective heat flow. *Solar energy*, 59(4-6), 121-126.
- César, L. V. E., Lilia, C. M. A., Octavio, G. V., Isaac, P. F., & Rogelio, B. O. (2019). Thermal performance of a passive, mixed-type solar dryer for tomato slices (*Solanum lycopersicum*). *Renewable Energy*, 147, 845-855.
- Cengel, Y.A. (1998). Heat transfer: A practical approach (International ed.). McGraw-Hill.
- Churchill, S. W., & Chu, H. H. (1975). Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate. *International journal of heat and mass transfer*, 18(11), 1323-1329.
- Diamante, L. M., & Munro, P. A. (1993). Mathematical modelling of the thin layer solar drying of sweet potato slices. *Solar energy*, 51(4), 271-276.
- Djebli, A., Hanini, S., Badaoui, O., Haddad, B., & Benhamou, A. (2020). Modeling and comparative analysis of solar drying behavior of potatoes. *Renewable Energy*, 145, 1494-1506.
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons.
- Fujii, T., & Imura, H. (1972). Natural-convection heat transfer from a plate with arbitrary inclination. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 15(4), 755-767.
- Haaf W. (1984). Solar chimneys: part II: preliminary test results from the Manzanares plant. *Int J Sol Energy*; 2:141-61.
- Hassan, A., Ali, M., & Waqas, A. (2018). Numerical investigation on performance of solar chimney power plant by varying collector slope and chimney diverging angle. *Energy*, 142, 411-425.
- Hall, C. W. (1988). HANDBOOK OF INDUSTRIAL DRYING: Arun S. Mujumdar, Editor Marcel Dekker, Inc. New York and Basel, 948 p. 1987. *Drying Technology*, 6(3), 571-573.
- Henderson, S. M. (1974). Progress in developing the thin layer drying equation. *Transactions of the ASAE*, 17(6), 1167-1168.
- Ismailova A.A. (1957). Possibilities of applying solar energy to dry fruits and vegetable, *Teptoenergetika* 1, 1-22.

- Kabelac, S. (2005). Exergy of solar radiation. *Int. J. Energy Technology and Policy*, 3(1-2), 115-122.
- Kays, W. M., & Crawford, M. E. (1993). *Convective heat and mass transfer* (No. BOOK). McGraw-Hill.
- Koonsrisuk, A., & Chitsomboon, T. (2013). Effects of flow area changes on the potential of solar chimney power plants. *Energy*, 51, 400-406
- Koonsrisuk, A. (2012). Mathematical modeling of sloped solar chimney power plants. *Energy*, 47(1), 582-589.
- Mara, B. K., Mercado, B. C., Mercado, L. A., Pascual, J. M., & Lopez, N. S. (2014, November). Development and validation of a CFD model using ANSYS CFX for aerodynamics simulation of Magnus wind rotor blades. In *2014 International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM)* (pp. 1-6). IEEE.
- Seerangurayar, T., Al-Ismaïli, A. M., Jeewantha, L. J., & Al-Nabhani, A. (2019). Experimental investigation of shrinkage and microstructural properties of date fruits at three solar drying methods. *Solar Energy*, 180, 445-455.
- Simal, S., Femenia, A., Garau, M. C., & Rossello, C. (2005). Use of exponential, Page's and diffusional models to simulate the drying kinetics of kiwi fruit. *Journal of food engineering*, 66(3), 323-328.
- Shi, J., Pan, Z., McHugh, T. H., Wood, D., Hirschberg, E., & Olson, D. (2008). Drying and quality characteristics of fresh and sugar-infused blueberries dried with infrared radiation heating. *LWT-Food Science and Technology*, 41(10), 1962-1972.
- Togrul, I. T., & Pehlivan, D. (2003). Modelling of drying kinetics of single apricot. *Journal of Food Engineering*, 58(1), 23-32.
- Wang, F., Tan, J., & Wang, Z. (2014). Heat transfer analysis of porous media receiver with different transport and thermophysical models using mixture as feeding gas. *Energy Conversion and Management*, 83, 159-166.
- Yaldiz, O., Ertekin, C., & Uzun, H. I. (2001). Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy*, 26(5), 457-465.



ภาคผนวก ก

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

สรวิษ คล่องดี และอาทิตย์ คุณศรีสุข. (2561). การจำลองเครื่องอบแห้งปล่องแดด. ในการประชุม
เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 32 ระหว่างวันที่ 3-6 กรกฎาคม
พ.ศ. 2561 ณ จังหวัดมุกดาหาร

สรวิษ คล่องดี และอาทิตย์ คุณศรีสุข. (2562). อิทธิพลของรูปทรงสำหรับเครื่องอบแห้งปล่อง
ลมแดด. ในการประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15 ระหว่าง
วันที่ 21-23 พฤษภาคม พ.ศ. 2562 ณ จังหวัดนครราชสีมา

สรวิษ คล่องดี และอาทิตย์ คุณศรีสุข. (2562). การเพิ่มสมรรถนะของเครื่องอบแห้งปล่องแดด.
ในการประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสถาปัตยกรรมศาสตร์
ครั้งที่ 10 เฉลิมพระเกียรติ เนื่องในโอกาสมหามงคลพระราชพิธีราชาภิเษก ระหว่าง
วันที่ 30 สิงหาคม พ.ศ. 2562 ณ จังหวัดนครราชสีมา

Sorawit Klongdee and Atit Koonsrisuk. (2019). Design of a Solar Chimney Dryer. At 10th Thai
Society of Mechanical Engineers International Conference on Mechanical Engineering
TSME-ICoME 2019, December 10th-13th, 2019

AMM - XXX

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 32
3 – 6 กรกฎาคม 2561 จังหวัดมุกดาหาร



การจำลองเครื่องอบแห้งปล่องแดด Simulation of a Solar chimney dryer

สรวิช คล่องดี¹, อาทิตย์ คุณศรีสุข²

¹ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่อยู่ 111 ถนน มหาวิทยาลัย (ตำบล) สุรนารี (อำเภอ) เมือง จังหวัด นครราชสีมา รหัสไปรษณีย์ 30000

² มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่อยู่ 111 ถนน มหาวิทยาลัย (ตำบล) สุรนารี (อำเภอ) เมือง จังหวัด นครราชสีมา รหัสไปรษณีย์ 30000

*ติดต่อ: Sorawit-max@hotmail.com, 08-8374-8792

บทคัดย่อ

ก่อนหน้านี้พบว่าเครื่องอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีปล่องลมแดดมีประสิทธิภาพการอบแห้งที่ดีกว่าที่ไม่มีปล่องไฟ นอกจากนี้ยังได้รับการพิสูจน์ว่าปล่องบานสามารถเพิ่มอัตราการไหลของระบบได้ ในการศึกษาครั้งนี้จึงเป็นการศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งปล่องลมแดดแบบปล่องบานด้วยการจำลองเชิงตัวเลข โดยใช้โปรแกรม ANSYS Fluent ในการจำลองโมเดล โดยพื้นที่หน้าตัดทางออกส่วนด้วยพื้นที่หน้าตัดทางเข้าของปล่อง (Area ratio AR) ในศึกษานี้มีค่าเท่ากับ 0.25, 0.5, 1, 2, 3, และ 4 ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มขึ้นของ AR สามารถเพิ่มอัตราการไหลของอากาศได้ แล้วกราฟยังแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของ AR ยังเพิ่มระดับความปั่นป่วนในการไหล ซึ่งทำให้สามารถปรับปรุงการถ่ายเทมวลในการอบแห้งได้

คำหลัก: การอบแห้ง, เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์, ปล่องลมแดด, การจำลองเชิงตัวเลขของการไหล, ปล่องบาน

Abstract

Previously, it was shown that a solar dryer with chimney provides a better drying performance than that without a chimney. Also, it has been proved that divergent chimney can increase the mass flow rate of a system. Consequently, the performance of a solar dryer with divergent chimney was investigated numerically in this study. The outlet/inlet area ratios (AR) of the chimney investigated were 0.25, 0.5, 1, 2, 3, and 4. A 5-degree axis-symmetry model in ANSYS Fluent was used in the modeling. The study revealed that the increase of AR can increase the air mass flow rate. It was shown graphically that the increase of AR also increase the degree of flow turbulence, which can improve the mass transfer in the drying.

Keywords: Drying, Solar dryer, Solar chimney, CFD, Divergent chimney



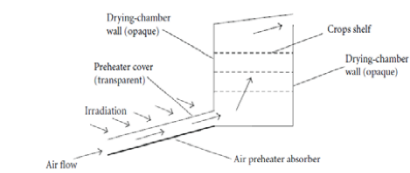
1. บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศที่ประชากรทำอาชีพเกษตรกรรมถึง 34% (สำนักงานสถิติแห่งชาติ, 2557) ผลผลิตที่ได้ในแต่ละปีนั้นมีปริมาณมาก เช่น ข้าวนาปีมีปริมาณ 25.5 ล้านตัน มันสำปะหลังโรงงานมีปริมาณ 31 ล้านตัน (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2559) แต่ผลผลิตทั้งหมดนี้ไม่สามารถขายได้ทั้งหมดเนื่องจากปัญหาในการเก็บรักษาผลผลิตเพราะผลผลิตบางส่วนเกิดความเสียหายจากการเน่าเสีย ทำให้เกษตรกรเสียรายได้ไปกับผลผลิตที่เน่าเสีย วิธีหนึ่งในการยืดอายุผลผลิตคือการอบแห้งผลผลิต การอบแห้งเป็นกระบวนการหนึ่งที่สามารถใช้เพื่อถนอมและเก็บรักษาผลผลิตทางการเกษตรโดยผลผลิตที่ผ่านกระบวนการอบแห้งจะมีความชื้นลดลงทำให้จุลินทรีย์ที่อยู่ในผลผลิตมีอัตราการเจริญเติบโตช้าลง ผลผลิตไม่เน่าเสียง่าย

ปัจจุบันมีเครื่องอบแห้งจำหน่ายโดยใช้พลังงานจากแหล่งต่างๆ เพื่อการอบแห้ง เช่น พลังงานความร้อนจากชีวมวล ควันไม้ไครเวฟ รั้งสีอินฟราเรด พลังงานลมร้อน เป็นต้น อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีการอบแห้งที่กล่าวมาข้างต้นมีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานในการอบแห้งยังค่อนข้างสูง อีกทั้งราคาเครื่องอบแห้งก็สูงด้วย [1] จึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีการอบแห้งอย่างต่อเนื่อง โดยมีการเลือกใช้แหล่งพลังงานทางเลือกในกระบวนการอบแห้งเพื่อให้เกษตรกรเลือกใช้ และเพื่อลดต้นทุนค่าใช้จ่ายด้านพลังงานในการอบแห้งผลผลิต [2]

โดยทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ คือการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการอบแห้ง เพราะไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายด้านพลังงานในการอบแห้ง ไม่ต้องพึ่งพาไฟฟ้า จึงไม่จำเป็นต้องอยู่ใกล้กับแหล่งจ่ายไฟฟ้า และราคาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ยังถูกกว่าเครื่องอบแห้งชนิดอื่นๆ เป็นการลดค่าใช้จ่ายในการอบแห้งของเกษตรกร ปัจจุบันเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภท ได้แก่ Direct mode

Indirect mode และ Mixed-mode ดังรูปที่ 1, 2 และ 3 [3]



รูปที่ 1 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภท direct mode

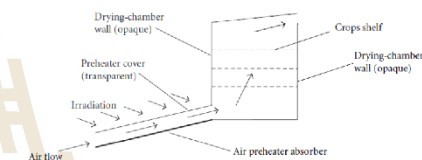
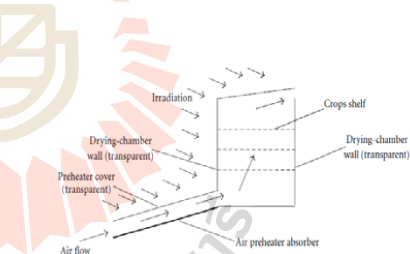


FIGURE 1: Schematic diagram of an indirect-mode cabinet dryer.

รูปที่ 2 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภท indirect mode



รูปที่ 3 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภท mixed mode

ทั้ง 3 ประเภทที่กล่าวมาข้างต้นนี้มีข้อดีข้อเสียแตกต่างกัน จะเปรียบเทียบในตารางที่ 1



ตารางที่ 1 เปรียบเทียบอุณหภูมิของอากาศ อัตราการไหลของอากาศ และราคาในการก่อสร้าง

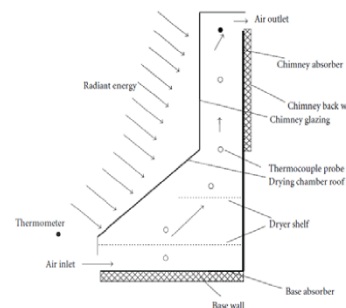
[3]

ประเภทของเครื่องอบแห้ง	อุณหภูมิของอากาศ	อัตราการไหลของอากาศ	ราคาในการก่อสร้าง
Direct mode	ปานกลาง	ปานกลาง	ถูกสุด
Indirect mode	น้อยสุด	น้อยสุด	ปานกลาง
Mixed mode	สูงสุด	สูงสุด	แพงสุด

จากการศึกษาพบว่าเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีงบประมาณและค่าใช้จ่ายด้านพลังงานค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งชนิดอื่น อย่างไรก็ตาม พบว่าสมรรถนะการอบแห้งยังไม่ดีนักเนื่องจากไม่มีอุปกรณ์ให้ความร้อนหรือพัดลมที่เป็นตัวช่วยในการอบแห้ง อาศัยเพียงการถ่ายเทอากาศโดยธรรมชาติ. (natural ventilation) ซึ่งปัจจัยในการอบแห้งที่ดีนั้นจะขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิของอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ และอัตราการไหลของอากาศที่ไหลผ่านผลิตภัณฑ์

[3] นำเสนอเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์อีกแบบที่ประยุกต์ใช้กับ solar chimney เรียกว่า เครื่องอบแห้งปล่องลมแดด (solar chimney dryer) รายละเอียดแสดงดังรูปที่ 4 โดยเครื่องอบแห้งปล่องลมแดดจะมีการถ่ายเทอากาศภายในห้องอบแห้งดีกว่าเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่กล่าวมาข้างต้น และอุณหภูมิจะสูงขึ้นเรื่อยๆตามความสูงของปล่อง ดังนั้นการติดตั้งถาดอบแห้งไว้ที่สูงจะส่งผลดีต่อการอบแห้งดี และยังพบว่า 75% -80% ของกระบวนการอบแห้งเกิดขึ้นในช่วง 2 วันแรกของการอบ

ซึ่งปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการอบแห้งคือ อัตราการไหลของอากาศภายในอบแห้ง [4]



รูปที่ 4 เครื่องอบแห้งปล่องลมแดดชนิด direct mode

ในงานวิจัยฉบับนี้จึงเป็นการจำลองรูปทรงของเครื่องอบแห้งปล่องลมแดดแบบต่างๆ โดยใช้โปรแกรม ANSYS Fluent เวอร์ชัน 18 ในการจำลอง เพื่อศึกษาผลการของอุณหภูมิและอัตราการไหลของอากาศภายในเครื่องอบแห้งปล่องลมแดดรูปทรงต่างๆ ซึ่งผลที่คาดว่าจะได้รับคือ ได้รูปทรงของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีอัตราการไหลและอุณหภูมิของอากาศภายในห้องอบแห้งสูงขึ้น

2. แนวคิดการออกแบบเครื่องอบแห้งปล่องลมแดดแบบปล่องบาน

เพื่อจะมีเครื่องอบแห้งที่ต้นทุนไม่สูง และไม่ต้องการพลังงานไฟฟ้าในการทำงาน งานวิจัยฉบับนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อออกแบบรูปทรงของเครื่องอบแห้งที่ใช้พลังงานแสงแดด ที่มีลักษณะแบบปล่องลมแดด โดยใช้การจำลองเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม Ansys Fluent ในขั้นตอนแรกจะเป็นการพัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลขของเครื่องอบแห้งปล่องลมแดด ขั้นตอนที่สองเป็นการออกแบบรูปทรงของเครื่องอบแห้ง และจะได้รายงานผลการทำนายของแบบจำลองเมื่อใช้งานเครื่องอบแห้ง

AMM - XXX

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 32
3 – 6 กรกฎาคม 2561 จังหวัดมุกดาหาร



ดังกล่าว โดยเป็นผลของอัตราการไหลและอุณหภูมิของ
อากาศภายในห้องอบแห้ง

3. การจำลอง

บทความนี้นำเสนอการจำลองเครื่องอบแห้ง
ปล่องลมแดดโดยใช้การจำลองแบบ 3D ด้วยโปรแกรม
ANSYS Fluent เวอร์ชัน 18 มีลักษณะดังรูปที่ 5 ผนังทำ
จากพลาสติกใส ทางเข้าอยู่ด้านล่างส่วนทางออกอยู่
ด้านบน โดยทำการจำลองให้มีลักษณะบานออกโดย
กำหนดอัตราส่วนพื้นที่ทางออกต่อทางเข้า (area ratio,
AR) เป็น 0.25, 0.5, 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ และ
กำหนดให้ผนังที่เป็นพลาสติกมีอุณหภูมิเท่ากับ 50 °C

ตารางที่ 2 ขนาดของเครื่องอบแห้งในการจำลอง

รัศมี ทางเข้า (cm.)	รัศมี ทางออก (cm.)	Area ratio	อุณหภูมิ ของผนัง °C	ความ สูง (m.)
120	30	0.25	50	1.5
60	30	0.5		
30	30	1		
30	60	2		
30	90	3		
30	120	4		

3.2 สมมติฐานการจำลองและขอบเขต

ในการศึกษา ได้กำหนดสมมติฐานของการ
จำลองดังนี้

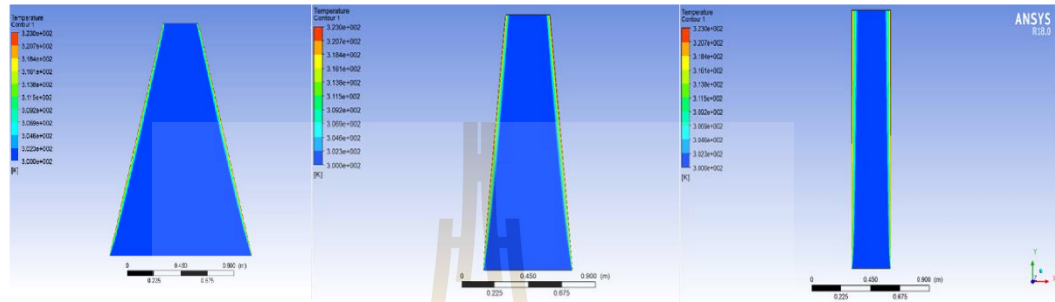
1. อุณหภูมิผนังมีค่าคงที่เท่ากับ 50 องศาเซลเซียส
2. ไม่มีการสูญเสียพลังงานความร้อนจากผนังด้านนอก
3. คุณสมบัติของอากาศ (ความร้อนจำเพาะ, ค่าการนำ
ความร้อน และความหนืด) มีค่าคงที่
5. การไหลเป็นแบบอัดตัวไม่ได้
6. อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมคงที่เท่ากับ 30 °C
7. no-slip condition บริเวณผนัง



รูปที่ 5 เครื่องอบแห้งปล่องลมแดด
โดยเครื่องอบแห้งปล่องลมแดดมีขนาดดังแสดง
ในตารางที่ 2



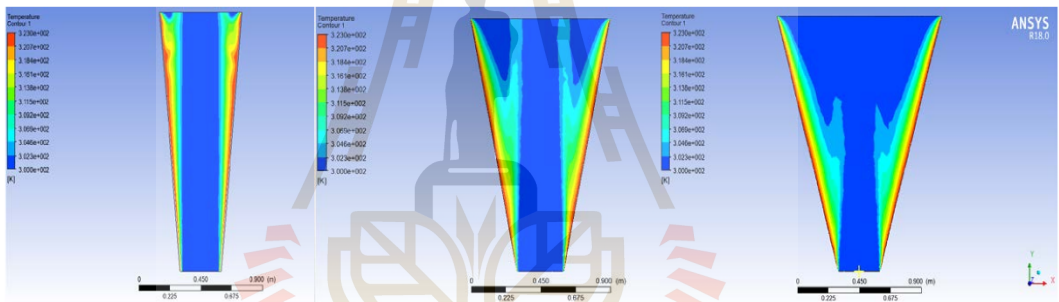
4. ผลและการอธิบาย



(a) AR 0.25

(b) AR 0.5

(c) AR 1



(d) AR 2

(e) AR 3

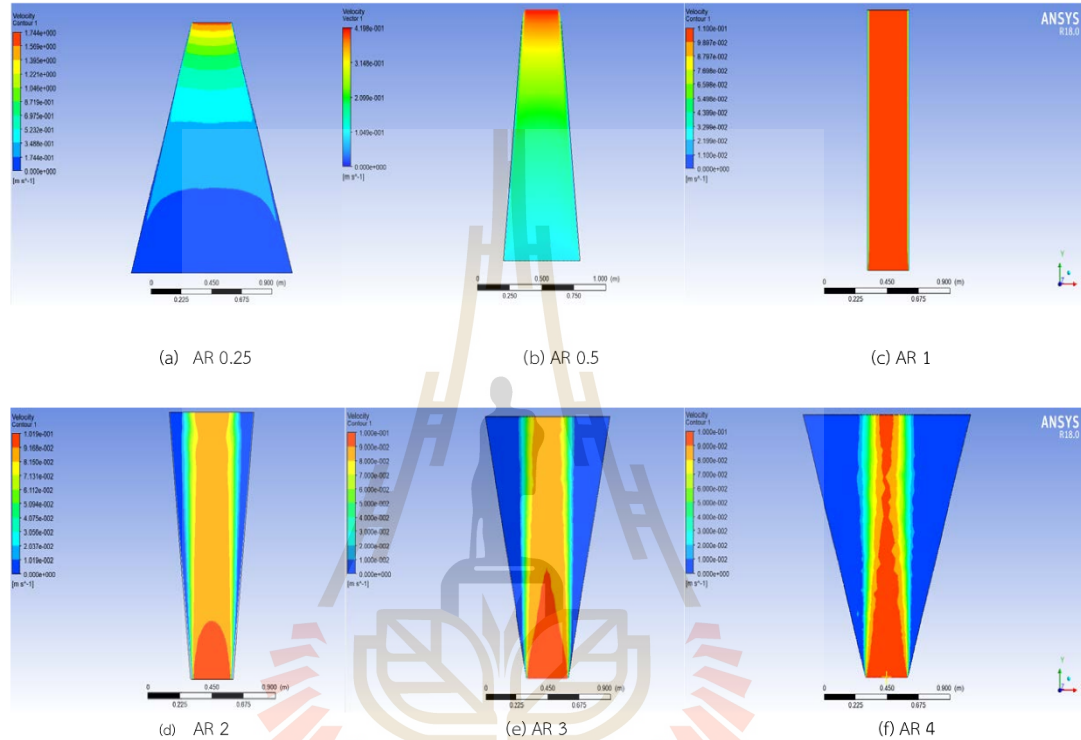
(f) AR 4

รูปที่ 6 อุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้ง

4.1 ผลของอุณหภูมิ

รูปที่ 6 แสดงถึงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งของ AR เท่ากับ 0.25 , 0.5 , 1 , 2 , 3 และ 4 จากผลการจำลองพบว่าบริเวณขอบผนังจะมีอุณหภูมิสูงสุดและลดลงเรื่อยๆเมื่อเข้าสู่ใจกลางของเครื่องอบแห้ง และจะเห็นว่าเมื่อ AR เพิ่มขึ้นการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งจะเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณา

ที่ทางออกพบว่า AR2 มีอุณหภูมิสูงสุดและการกระจายตัวของอุณหภูมิเยื่อที่สุดซึ่งเป็นผลดีต่อการอบแห้ง เพราะการอุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งในการอบแห้ง อีกทั้งเมื่อทางออกบานออกยังมีพื้นที่ในการอบแห้งเยื่อขึ้นด้วย



รูปที่ 7 ความเร็วภายในเครื่องอบแห้ง

4.2 ผลของความเร็

รูปที่ 7 แสดงถึงการกระจายตัวของความเร็วภายในเครื่องอบแห้งของ AR เท่ากับ 0.25, 0.5, 1, 2, 3 และ 4 จากผลการจำลองพบว่าความเร็วจะมีค่าที่บริเวณผนังและเพิ่มขึ้นเมื่อเข้าสู่ใจกลางของเครื่องอบแห้งเนื่องจากที่บริเวณผิวไม่มีการเลื่อนไหล (no-slip condition) โดยความเร็วสูงสุดสำหรับ AR เท่ากับ 0.25, 0.5, 1, 2, 3 และ 4 มีค่า 1.744 m/s, 0.4198

m/s, 0.11 m/s, 0.1019 m/s, 0.1 m/s และ 0.1 m/s ตามลำดับ ที่บริเวณทางออกของ AR0.5 มีค่าความเร็วมากที่สุด การเพิ่มขึ้นของ AR ทำให้ความเร็วเพิ่มขึ้นอย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นของ AR ยังทำให้การไหลเกิดความปั่นป่วนซึ่งเป็นผลเสียต่อการอบแห้ง เพราะจะทำให้การถ่ายเทอากาศที่รับไอน้ำภายในห้องอบแห้งไม่ดี

AMM - XXX

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 32

3 – 6 กรกฎาคม 2561 จังหวัดมุกดาหาร



อย่างไรก็ตามการอบแห้งจะต้องพิจารณาทั้งสองปัจจัยคือ อุณหภูมิและความเร็ว เพราะที่อุณหภูมิสูง กระบวนการอบแห้งจะเกิดขึ้นเร็ว และที่พื้นที่การไหล ภายในห้องอบแห้งเท่ากัน รูปทรงใดมีความเร็วสูง อัตราการไหลของอากาศก็จะสูงไปด้วย ส่งผลให้สมรรถนะ กระบวนการอบแห้งดี การอบแห้งจึงไม่สามารถนำ รูปทรงที่มีอุณหภูมิสูงหรือความเร็วอย่างเดียวมาใช้ได้ จำเป็นต้องพิจารณาร่วมกันให้เหมาะสมต่อผลิตภัณฑ์อบแห้ง

5. สรุป

จากการจำลองพบว่า ที่ทางออกAR2 มีอุณหภูมิสูงสุดและการกระจายตัวของอุณหภูมิเยอะที่สุดแต่ AR0.5 มีค่าความเร็วมากที่สุด และเมื่อ AR เพิ่มขึ้นการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งเยอะขึ้นแต่จะทำให้การไหลเกิดความปั่นป่วน เพราะจะทำให้การถ่ายเทอากาศที่รับไอน้ำภายในห้องอบแห้งไม่ดี ดังนั้นในการเลือกใช้รูปทรงของเครื่องอบแห้งนั้นต้องเลือกให้เหมาะสม

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] อัจฉรา แซ่โค้ว, สุวรรณี ภูริระวีชัยกุล และ ยุทธนา ภูริระวีชัยกุล (2558). ปัจจัยของการอบแห้งด้วยแหล่งพลังงานความร้อนแบบการพาและการแผ่รังสีความร้อนที่มีต่ออุณหภูมิและคุณภาพของพริกไทยดำ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- [2] สมชาติ โสภณธนฤทธิ์. (2540). การอบแห้งเมล็ดถั่วเขียว, พิมพ์ครั้งที่ 5, คณะพลังงานและวัสดุ, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 338 หน้า.
- [3] Afriyie, J. K., & Bart-Plange, A. (2012). Performance Investigation of a Chimney-Dependent Solar Crop Dryer for Different Inlet

Areas with a Fixed Outlet Area. ISRN Renewable Energy, 2012.

[4] Afriyie, J. K., & Kojo Atta A. (2016). Field Drying of Cassava in a Solar Tent Dryer equipped with a Solar Chimney. ResearchGate,2016

อิทธิพลของรูปทรงสำหรับเครื่องอบแห้งปล่องลมแดด Effects of geometries on a solar chimney dryer

สรวีช คล่องดี¹, อาทิตย์ อุณศรีสุข²

¹มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่อยู่ 111 ถนน มหาวิทยาลัย (ตำบล) สุรนารี (อำเภอ) เมือง จังหวัด นครราชสีมา รหัสไปรษณีย์ 30000

²มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่อยู่ 111 ถนน มหาวิทยาลัย (ตำบล) สุรนารี (อำเภอ) เมือง จังหวัด นครราชสีมา รหัสไปรษณีย์ 30000

*ติดต่อ: Sorawit-max@hotmail.com, 08-8374-8792

บทคัดย่อ

การอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เพราะประหยัดต้นทุนการอบและไม่ต้องเสียค่าไฟฟ้า โดยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ได้ถูกวิจัยและพัฒนาหลากหลายรูปแบบ รูปแบบหนึ่งที่น่าสนใจคือ เครื่องอบแห้งปล่องลมแดด เพราะมีสมรรถนะการอบแห้งดีกว่าเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีปล่องลมแดด นอกจากนี้ยังได้รับการพิสูจน์ว่าปล่องบานสามารถเพิ่มอัตราการไหลของระบบได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจการจำลองเครื่องอบแห้งปล่องลมแดดรูปทรงต่างๆ ด้วยวิธีการจำลองเชิงตัวเลขด้วยโมเดลสมมาตร 30 องศา โดยใช้โปรแกรม ANSYS-FLEUNT โดยปรับรูปทรงให้มีพื้นที่ทางออกต่อพื้นที่ทางเข้า (area ratio AR) เท่ากับ 0.5, 1, 2, 3, 4 และ 5 และปรับความสูงทางเข้าจากพื้นดินเท่ากับ 10, 20, 30 เซนติเมตร ผลการศึกษาพบว่า ความสูงทางเข้าเท่ากับ 20 เซนติเมตร ทำให้อัตราการไหลมากที่สุดเท่ากับ 8.3 ลิตรต่อวินาที ที่ AR4 และการเพิ่มขึ้นของ AR ทำให้อัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้นและยังเพิ่มความปั่นป่วนของอากาศ ส่วนอุณหภูมิที่ทางออกมีค่าเท่ากับ 33 – 35 องศาเซลเซียส ในทุก AR ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร

คำหลัก: เครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์; อบแห้ง; ปล่องลมแดด; พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ; ปล่องบาน

Abstract

The solar dryer is one of the promising options for drying various products. This study introduces a design of a solar chimney dryer, which is based on an optimal geometry concept found in the design of the chimney of solar chimney power plants. The simulations using ANSYS-FLUENT were implemented and validated with a result taken from the literature. The optimal area ratio (AR) between the chimney exit and chimney entrance is investigated. The height of the chimney entrance from the ground was varied in the range of 10 – 30 cm. It was found that the maximum air flow rate of 8.3 L/s can be obtained when the inlet height is 20 cm and AR = 4. It was also found that the increase of AR can increase the air flow rate. However, when AR exceeds a certain value, the flow recirculation occurs. This leads to the reduction of air flow rate. The temperatures outlet of the system are in the range of 33 – 35°C which is appropriate for drying agricultural products.

Keywords: Solar dryer; Drying; Solar chimney; CFD; Divergent chimney

1. บทนำ

ปัจจุบันสมุนไพรได้รับการสนใจนำไปใช้ในการรักษามากขึ้น โดยจากข้อมูลจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการส่งเสริมสุขภาพ (สสส.) พบว่า สมุนไพรเจ้าใหญ่ๆ ของโลกปัจจุบัน

คือจีนและอินเดีย อันดับ 3 อาจจะมีญี่ปุ่นและเกาหลีได้ ในขณะที่ประเทศไทย ตลาดสมุนไพรโตขึ้นอย่างรวดเร็ว ในปี 2560 โตขึ้นถึงกว่า 30% และข้อมูลจากศูนย์ศึกษาการค้าระหว่างประเทศ มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย ระบุว่า ประเทศ

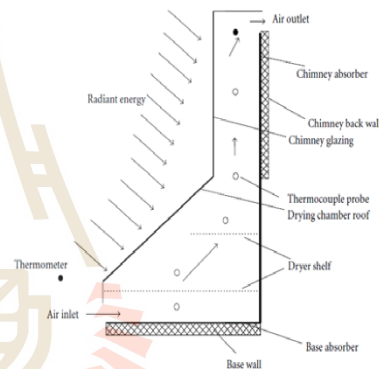
ไทยส่งออกสมุนไพรและสารสกัดปีละประมาณ 1,000 ล้านบาท ขณะที่ข้อมูลของ Euromonitor–Herbal/Traditional Products in Thailand ระบุว่า เมื่อปี 2559 ตลาดสมุนไพรทั้งเวชสำอาง อาหารเสริม เครื่องดื่มและสมุนไพรแห้ง สมุนไพรสด ในประเทศมีมูลค่าประมาณ 3.92 หมื่นล้านบาท และคาดว่าจะขยายตัวเป็น 5.69 หมื่นล้านบาท ในปี 2564 ซึ่งถือว่าการขยายตัวมีแนวโน้มที่ดีในเชิงเศรษฐกิจ แต่ผลผลิตทั้งหมดนี้ไม่สามารถขายได้ทั้งหมดเนื่องจากปัญหาในการเก็บรักษาผลผลิตเพราะผลผลิตบางส่วนเกิดความเสียหายจากการเน่าเสีย ทำให้เกษตรกรเสียหายได้ไปกับผลผลิตที่เน่าเสีย วิธีหนึ่งในการยืดอายุผลผลิตคือ การอบแห้งผลผลิต การอบแห้งเป็นกระบวนการหนึ่งที่สามารถใช้เพื่อถนอมและเก็บรักษาผลผลิตทางการเกษตรโดยผลผลิตที่ผ่านกระบวนการอบแห้งจะทำให้ความชื้นลดลง จุลินทรีย์ที่อยู่ในผลผลิตมีอัตราการเจริญเติบโตช้าลง ผลผลิตไม่เน่าเสียง่าย ซึ่งโดยทั่วไปการอบแห้งสมุนไพรใช้อุณหภูมิในการอบที่ 20 – 40 องศาเซลเซียส ในการอบ ต้น ใบ ดอก ส่วนการอบเปลือกและรากใช้อุณหภูมิที่ 30 – 65 องศาเซลเซียส (สำนักงานข้อมูลและสมุนไพร คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล)

ในปัจจุบันการอบแห้งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การอบแห้งด้วยลมร้อน การอบแห้งแบบฟลูอิดเซชัน การเร่งกระบวนการอบแห้งด้วยสนามไฟฟ้า การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ ฯลฯ เป็นต้น โดยกระบวนการอบแห้งที่กล่าวข้างต้นมีการผลิตเครื่องอบแห้งและมีขายทั่วไปในท้องตลาดแต่มีราคาค่อนข้างแพงและยังเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมจากการใช้พลังงานไฟฟ้าอีกด้วย

โดยทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ คือการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการอบแห้ง เพราะไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายด้านพลังงานในการอบแห้ง ไม่ต้องพึ่งพาไฟฟ้า จึงไม่จำเป็นต้องอยู่ใกล้กับแหล่งจ่ายไฟฟ้า เป็นการลดค่าใช้จ่ายในการอบแห้งของเกษตรกร เพื่อความสะดวกแล้วโดยทั่วไปการอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์เกษตรกรจะทำการตากผลผลิตไว้กลางแจ้ง แต่การตากกลางแจ้งส่วนใหญ่แล้วต้องใช้พื้นที่ค่อนข้างมากในการตากแห้งแต่ละครั้งและยังมีโอกาสเสี่ยงที่ผลผลิตจะเกิดความเสียหายจากปัจจัยอื่นๆ เช่น ปลิวหายจากลมแรง ผลผลิตขึ้นราจากการโดนฝน ผลผลิตปนเปื้อนเชื้อโรคจากการตอมของแมลง ดังนั้นการใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์จึงเป็นทางเลือกที่ดีในการใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานในการอบแห้งและไม่ต้อง

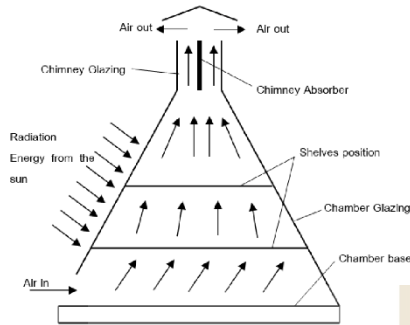
เสี่ยงกับปัจจัยต่างๆที่อาจส่งผลเสียต่อผลผลิตดังที่กล่าวมาข้างต้น

Afriyie et al. [1] ได้ศึกษาพบว่าเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีงบประมาณและค่าใช้จ่ายด้านพลังงานค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งชนิดอื่น อย่างไรก็ตามพบว่าเครื่องอบแห้งพลังงานแสงสมรรถนะการอบแห้งยังไม่ดีเนื่องจากไม่มีอุปกรณ์ให้ความร้อนหรือพัดลมที่เป็นตัวช่วยในการอบแห้ง อาศัยเพียงการถ่ายเทอากาศโดยธรรมชาติ (natural ventilation) ซึ่งปัจจัยในการอบแห้งที่ดีนั้นจะขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิของอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ และอัตราการไหลของอากาศภายในเครื่องอบแห้ง จึงนำเสนอเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบใหม่โดยการติดปล่อง (chimney) เข้าไป รายละเอียดแสดงดังรูปที่ 1 พบว่าอุณหภูมิและอัตราการไหลของอากาศภายในห้องอบแห้งเพิ่มขึ้น

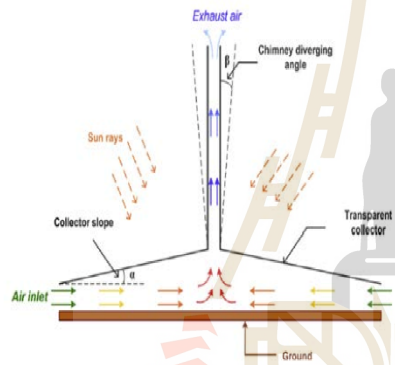


รูปที่ 1 เครื่องอบแห้งปล่องลมแดด [1]

Afriyie and Aikins [2] ได้นำเสนอเครื่องแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกระโจมโดยมีภาควางผลผลิตอยู่ด้านใน รายละเอียดแสดงดังรูปที่ 2 พบว่าอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งสูงกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 20 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นปัจจัยที่ดีสำหรับกระบวนการอบแห้ง อย่างไรก็ตามรูปทรงของปล่องยังเป็นปล่องตรง ซึ่งมีงานวิจัยเกี่ยวกับการจำลองโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (solar chimney power plant) โดย Hassan et al. [3] ทดลองปรับเปลี่ยนรูปทรงของปล่องให้บานออก รายละเอียดดังรูปที่ 3 พบว่าทำให้อัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้นจากเดิมที่ปล่องตรง



รูปที่ 2 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกระโจม [2]



รูปที่ 3 solar chimney power plant [3]

อย่างไรก็ตามงานวิจัยในการปรับปรุงรูปทรงของปล่องมีอยู่แค่ในการศึกษา solar chimney power plant เท่านั้น

ดังนั้นในงานวิจัยฉบับนี้จึงสนใจการจำลองเครื่องอบแห้งปล่องลมแดดรูปทรงของปล่องแบบต่างๆ โดยใช้โปรแกรม ANSYS Fluent เวอร์ชัน 18 ในการจำลอง เพื่อศึกษาผลการของอุณหภูมิและอัตราการไหลของอากาศภายในเครื่องอบแห้งปล่องลมแดดรูปทรงต่างๆ ซึ่งผลที่คาดว่าจะได้รับคือ ได้รูปทรงของปล่องลมแดดที่มีอัตราการไหลของอากาศภายในห้องอบแห้งสูงขึ้น

2. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

2.1 ตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม

บทความนี้นำเสนอการจำลองเครื่องอบแห้งปล่องลมแดดโดยใช้การจำลองแบบ 3D ด้วยโปรแกรม ANSYS Fluent เวอร์ชัน 18 ซึ่งในการจำลองจำเป็นต้องใช้ radiation model , Discrete Ordinates (DO) , solar ray tracing และ RNG k-E turbulence [3] ที่เหมือนกับงานวิจัยโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (solar chimney power plant) จึงได้จำลองงานวิจัยดังกล่าวเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม

	Haaf W.[4]	present	%error
V (m/s)	7	7.3	4.28
ΔT ₁₂ (°C)	14.8	14	5.4

2.2 ค่าเลขกราชอฟ (The Grashof Number)

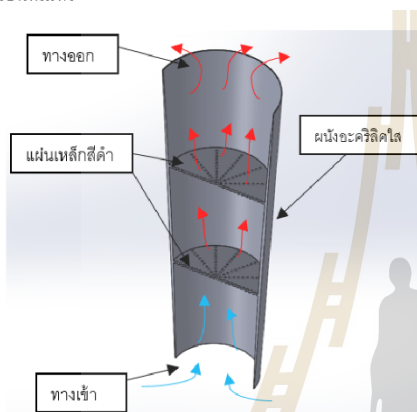
การพิจารณาว่าการไหลจะอยู่ในช่วงของการไหลแบบราบเรียบหรือแบบปั่นป่วนสามารถพิจารณาได้จากขนาดของค่าเลขกราชอฟ สำหรับการไหลโดยพาอิสระผ่านแผ่นร้อนในแนวตั้งนั้น ค่าเลขกราชอฟต้องไม่มากกว่า 1x10⁹ จึงจะเป็นการไหลในช่วงราบเรียบ หากมากกว่านี้จะเป็นการไหลในช่วงปั่นป่วน [5] ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 1

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2} \quad (1)$$

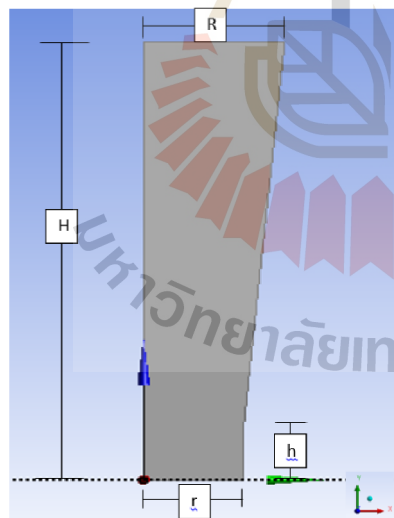
- เมื่อ g = ความเร่งเนื่องจากสนามแรงโน้มถ่วง, m/s²
- β = สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตร, 1/K (สำหรับแก๊สในอุดมคติมีค่าเท่ากับ 1/T)
- T_s = อุณหภูมิของพื้นผิว, K
- T_∞ = อุณหภูมิของของไหลที่อยู่ไกลจากพื้นผิว, K
- L = ความยาวลักษณะของโครงสร้าง, m
- ν = ความหนืดจลนศาสตร์ของของไหล, m²/s

2.3 ขนาดเครื่องอบแห้งปล่องลมแดด

เครื่องอบแห้งปล่องลมแดดมีลักษณะดังรูปที่ 4 และ 5 โดยผนังทำจากแผ่นอะคริลิกใส มีภาคตะแกรงเหล็กอยู่ด้านใน ทางเข้าอยู่ด้านล่าง ส่วนทางออกอยู่ด้านบน ทำการจำลองให้ มีลักษณะหุบเข้าและบานออกโดยกำหนดอัตราส่วนพื้นที่ทางออกต่อทางเข้า (area ratio, AR) เป็น 0.5, 1, 2, 4 และ 5 และกำหนดความสูงทางเข้าจากพื้นดินเป็น 10, 15, 20 เซนติเมตร



รูปที่ 4 Section view เครื่องอบแห้งปล่องลมแดด



รูปที่ 5 front view เครื่องอบแห้งปล่องลมแดด

โดยเครื่องอบแห้งปล่องลมแดดมีขนาดดังแสดงในตารางที่ 2 ตารางที่ 2 ขนาดเครื่องอบแห้งปล่องลมแดด

Area ratio	0.5	1	2	3	4
รัศมีทางเข้า r (cm)	42.2	30	30	30	30
รัศมีทางออก R (cm)	30	30	42.2	52.6	60.4
ความสูงทางเข้า h (cm)		10	15	20	
ความสูงเครื่องอบแห้ง H (cm)			150		

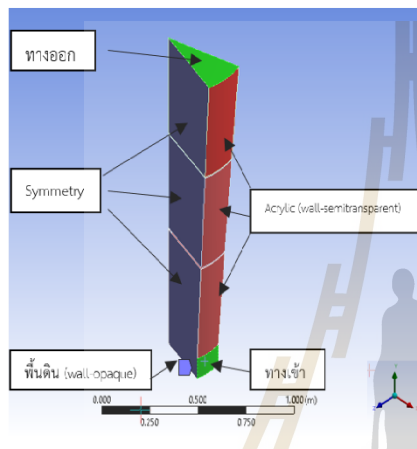
2.4 ขอบเขตและวิธีการจำลอง

ในการจำลองเครื่องอบแห้งปล่องลมแดดกำหนดให้จำลองที่พื้นที่จังหวัดนครราชสีมา เวลา 13.00 น. วันที่ 16 เมษายน โดยใช้ข้อมูลสภาพอากาศจากโปรแกรม TRNSYS (transient system simulation tool) ซึ่งเป็นโปรแกรมที่มีฐานข้อมูลสภาพอากาศและถูกใช้กันอย่างแพร่หลาย อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเท่ากับ 303K ค่าการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์เท่ากับ 311 w/m^2 และค่าคุณสมบัติของวัสดุ แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

คุณสมบัติ	ดิน	เหล็ก	อะคริลิก
ความหนาแน่น (kg/m^3)	1900	8030	1180
C_p (J/kg-K)	2200	502.48	840
Thermal conductivity (W/m-K)	1.83	16.27	0.2
Transmissivity	0	0	Visible = 0.92 Infra-red = 0.4
absorptivity	0.8	0.8	Visible = 0.4 Infra-red = 0.92

ในการสร้างแบบจำลองเครื่องอบแห้งปล่องลมแดด โดยใช้ ANSYS Fluent เวอร์ชัน 18 สร้างแบบจำลองเพียง 30 องศา เพื่อลดระยะเวลาในการคำนวณ และกำหนด boundary conditions รายละเอียดดังรูปที่ 5 ความดันรวม (total pressure) ที่ทางเข้าเท่ากับ 0 Pa และความดันสถิตย์ (static pressure) ที่ทางออกถูกกำหนดให้เท่ากับ 0 Pa เนื่องจากจำลองเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบการพาอิสระ (natural convection)



รูปที่ 5 แบบจำลองเครื่องอบแห้งปล่องลมแดด

การไหลแบบพาอิสระเป็นการไหลที่ค่าความหนาแน่นไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่ออุณหภูมิและความดันเปลี่ยนแปลง เกิดขึ้นจากแรงลอยตัว (buoyancy force) การไหลลักษณะนี้จะเลือกใช้ Boussinesq Model [6] ในการจำลอง และเลือก coupled ใน pressure-velocity coupling และ PRESTO! [7] ใน pressure ค่าอื่น ๆ กำหนดเป็น second order

2.5 Grid independence

ในการจำลองเครื่องอบแห้งปล่องลมแดดได้ทำ Grid independence เพื่อหาจำนวนกริดที่เหมาะสม แสดงดังตารางที่ 4 และรูปที่ 6 โดยพิจารณาจากอัตราการไหลภายในเครื่องอบแห้ง ซึ่งได้แสดงตัวอย่างจำนวนกริดที่เหมาะสมสำหรับเครื่องอบแห้งปล่องลมแดด AR2 คือ Grid 2 เพราะผลของอัตราการไหลเริ่มเปลี่ยนแปลงน้อย สังเกตได้จากค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 3%

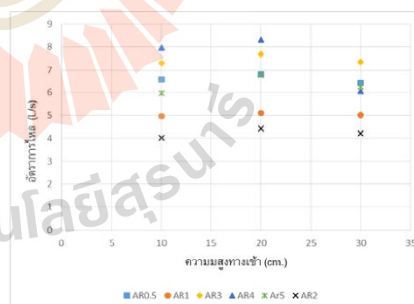
ตารางที่ 4 Grid independence ของ AR2

Grid No.	จำนวนกริด	อัตราการไหล x10 ³ (kg/s)	%error
Grid 1	25424	3.89	n/a
Grid 2	65249	4.57	14.65
Grid 3	207476	4.67	2.17
Grid 4	294576	4.77	2.15

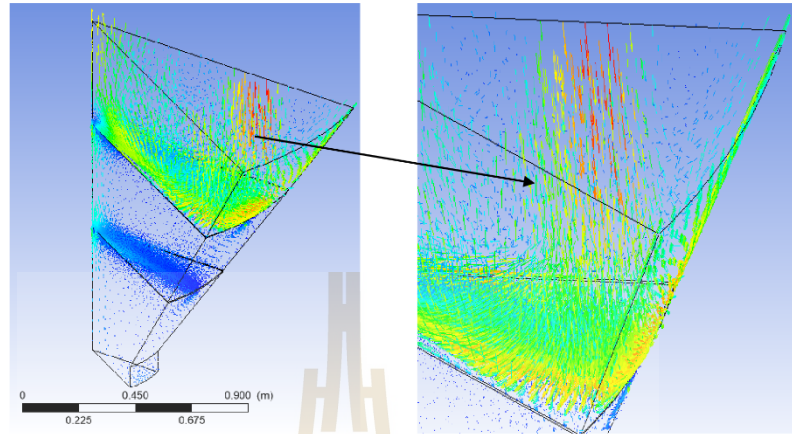
3. ผลการทดลองและอภิปราย

3.1 ผลของ area ratio และความสูงทางเข้าต่ออัตราการไหลของอากาศ

อัตราการไหลของอากาศที่ไหลอยู่ภายในเครื่องอบแห้งเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการอบแห้ง โดยถ้าอัตราการไหลเยอะจะส่งผลต่อการอบแห้ง ทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น ซึ่งจากผลที่ได้จากการจำลองพบว่า ที่ AR0.5 อัตราการไหลมีค่าเท่ากับ 6.5, 6.8, 6.4 ลิตรต่อวินาที เรียงตามลำดับความสูงทางเข้า 10, 20, 30 เซนติเมตร จะเห็นได้ว่าความสูงทางเข้ามีผลต่ออัตราการไหลที่เกิดขึ้น ซึ่งที่ความสูงทางเข้าเท่ากับ 20 เซนติเมตร ทำให้เกิดอัตราการไหลสูงสุดในทุก AR และเมื่อ AR เพิ่มขึ้นพบว่า ในภาพรวมอัตราการไหลเพิ่มขึ้น และอัตราการไหลสูงสุดเท่ากับ 8.3 ลิตรต่อวินาที ที่ AR4 และความสูงทางเข้าเท่ากับ 20 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 6 หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มขึ้นเป็น AR5 พบว่า อัตราการไหลลดลง เป็นผลมาจากที่ทางออกเริ่มเกิดการหมุนวนมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 7



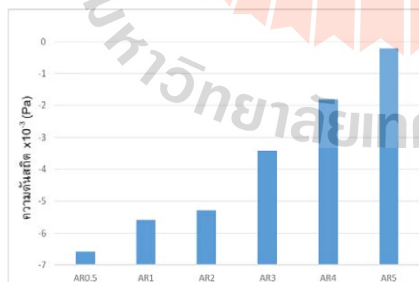
รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและความสูงทางเข้า



รูปที่ 7 เวกเตอร์ความเร็วของ AR5

3.2 ความดันสถิตที่ตำแหน่งใกล้ทางออก

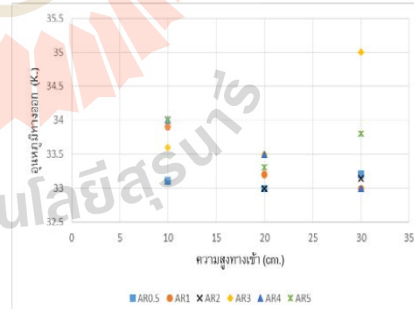
อากาศหรือของไหลนั้นจะไหลจากที่ที่มีความดันสูงไปความดันต่ำ ซึ่งจากจำลองพบว่าตำแหน่งใกล้ทางออก (ต่ำกว่าทางออก 10 เซนติเมตร) ความดันจะเพิ่มขึ้นเมื่อ AR เพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 8 การเพิ่มขึ้นของความดันส่งผลให้เกิดความแตกต่างระหว่างความดันที่ทางเข้า (0 Pa) กับความดันบริเวณใกล้ทางออก ซึ่งเมื่อ AR เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ปรากฏว่าความดันบริเวณใกล้ทางออกสูงกว่าที่ทางเข้า ซึ่งทำให้เกิดความดันต่อต้าน (Adverse Pressure Gradient) ความดันต่อต้านนี้หากมากพอจะทำให้การไหลบางส่วนเกิดการหมุนวน โดยเฉพาะของไหลที่อยู่ชิดผิวผนัง ซึ่งสอดคล้องตามหลักการเบอร์นูลลี (Bernoulli's principle) หากการไหลที่มีพื้นที่หน้าตัดเพิ่มขึ้น (บานออก) ความเร็วจะลดลง ความดันจะเพิ่มขึ้น



รูปที่ 8 ความดันสถิตที่ตำแหน่งใกล้ทางออก

3.3 ผลของ area ratio และความสูงทางเข้าต่ออุณหภูมิ

อุณหภูมิภายในห้องอบแห้งเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการอบแห้ง โดยยิ่งอุณหภูมิสูงจะส่งผลให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น แต่ในหลายกรณีการอบแห้งไม่ต้องการให้อากาศอุณหภูมิสูงเกินไปเพราะมีผลต่อสีและความกรอบของผลิตภัณฑ์ เช่น การอบแห้งธัญพืช พริก สมุนไพร เป็นต้น การอบแห้งเหล่านี้มีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ที่ 20 – 40 องศาเซลเซียส โดยจากผลการจำลองพบว่า อุณหภูมิที่ทางออกเครื่องอบแห้งของทุก AR มีค่าประมาณ 33 - 35 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 9 ซึ่งอุณหภูมิที่พอเหมาะแก่การอบแห้งดังกล่าว



รูปที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ทางออกและความสูงทางเข้า

4. สรุป

อัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่สำคัญในการอบแห้งซึ่ง ในงานวิจัยพบว่ อัตราการไหลสูงสุดเกิดขึ้นที่เครื่องอบแห้งปล่องลมแดดที่มี area ratio เท่ากับ 4 และความสูงทางเข้าเท่ากับ 20 เซนติเมตร มีค่าเท่ากับ 8.3 ลิตรต่อวินาที และอุณหภูมิที่ทางออกมีค่าประมาณ 33 – 35 องศาเซลเซียส ซึ่งอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ดังนั้นเครื่องอบแห้งปล่องลมแดด area ratio เท่ากับ 4 จึงเป็นรูปทรงที่เหมาะสมต่อการอบแห้ง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Afriyie, J. K., & Bart-Plange, A. (2012). Performance Investigation of a Chimney- Dependent Solar Crop Dryer for Different Inlet
- [2] Afriyie, J. K., & Kojo Atta A. (2016). Field Drying of Cassava in a Solar Tent Dryer equipped with a Solar Chimney. ResearchGate,2016
- [3] Hassan, A., Ali, M., & Waqas, A. (2018). Numerical investigation on performance of solar chimney power plant by varying collector slope and chimney diverging angle. Energy, 142, 411-425.
- [4] Haaf W. Solar chimneys: part II: preliminary test results from the Manzanares plant. Int J Sol Energ 1984;2:141-61.
- [5] Cengel, Y.A. (1998). Heat transfer: A practical approach (International ed.). McGraw-Hill.
- [6] ANSYS FLUENT user's guide, vol. 15317; 2017. p. 825-916. April.
- [7] ANSYS FLUENT user's guide, vol. 15317; 2017. p. 836. April.

อิทธิพลของรูปทรงสำหรับเครื่องอบแห้งปล่องลมแดด Effects of geometries on a solar chimney dryer

สรวิษ คล่องดี¹, อาทิตย์ กูณศรีสุข²

¹มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่อยู่ 111 ถนน มหาวิทยาลัย (ตำบล) สุรนารี (อำเภอ) เมือง จังหวัด นครราชสีมา รหัสไปรษณีย์ 30000

²มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่อยู่ 111 ถนน มหาวิทยาลัย (ตำบล) สุรนารี (อำเภอ) เมือง จังหวัด นครราชสีมา รหัสไปรษณีย์ 30000

*ติดต่อ: Sorawit-max@hotmail.com, 08-8374-8792

บทคัดย่อ

การอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เพราะประหยัดต้นทุนการอบและไม่ต้องเสียค่าไฟฟ้า โดยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ได้ถูกวิจัยและพัฒนาหลากหลายรูปแบบ รูปแบบหนึ่งที่น่าสนใจคือ เครื่องอบแห้งปล่องลมแดด เพราะมีสมรรถนะการอบแห้งดีกว่าเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีปล่องลมแดด นอกจากนี้ยังได้รับการพิสูจน์ว่าปล่องบานสามารถเพิ่มอัตราการไหลของระบบได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจการจำลองเครื่องอบแห้งปล่องลมแดดรูปทรงต่างๆ ด้วยวิธีการจำลองเชิงตัวเลขด้วยโมเดลสมมาตร 30 องศา โดยใช้โปรแกรม ANSYS-FLEUNT โดยปรับรูปทรงให้มีพื้นที่ทางออกต่อพื้นที่ทางเข้า (area ratio AR) เท่ากับ 0.5, 1, 2, 3, 4 และ 5 และปรับความสูงทางเข้าจากพื้นดินเท่ากับ 10, 20, 30 เซนติเมตร ผลการศึกษาพบว่า ความสูงทางเข้าเท่ากับ 20 เซนติเมตร ทำให้อัตราการไหลมากที่สุดเท่ากับ 8.3 ลิตรต่อวินาที ที่ AR4 และการเพิ่มขึ้นของ AR ทำให้อัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้นและยังเพิ่มความปั่นป่วนของอากาศ ส่วนอุณหภูมิที่ทางออกมีค่าเท่ากับ 33 – 35 องศาเซลเซียส ในทุก AR ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร

คำหลัก: เครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์; อบแห้ง; ปล่องลมแดด; พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ; ปล่องบาน

Abstract

The solar dryer is one of the promising options for drying various products. This study introduces a design of a solar chimney dryer, which is based on an optimal geometry concept found in the design of the chimney of solar chimney power plants. The simulations using ANSYS-FLUENT were implemented and validated with a result taken from the literature. The optimal area ratio (AR) between the chimney exit and chimney entrance is investigated. The height of the chimney entrance from the ground was varied in the range of 10 – 30 cm. It was found that the maximum air flow rate of 8.3 L/s can be obtained when the inlet height is 20 cm and AR = 4. It was also found that the increase of AR can increase the air flow rate. However, when AR exceeds a certain value, the flow recirculation occurs. This leads to the reduction of air flow rate. The temperatures outlet of the system are in the range of 33 – 35°C which is appropriate for drying agricultural products.

Keywords: Solar dryer; Drying; Solar chimney; CFD; Divergent chimney

1. บทนำ

ปัจจุบันสมุนไพรได้รับการสนใจนำไปใช้ในการรักษามากขึ้น โดยจากข้อมูลจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการสร้างเสริมสุขภาพ (สสส.) พบว่า สมุนไพรเจ้าใหญ่ๆ ของโลกปัจจุบัน

คือจีนและอินเดีย อันดับ 3 อาจจะมีญี่ปุ่นและเกาหลีได้ ในขณะที่ประเทศไทย ตลาดสมุนไพรโตขึ้นอย่างรวดเร็ว ในปี 2560 โตขึ้นถึงกว่า 30% และข้อมูลจากศูนย์ศึกษาการค้าระหว่างประเทศ มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย ระบุว่า ประเทศ

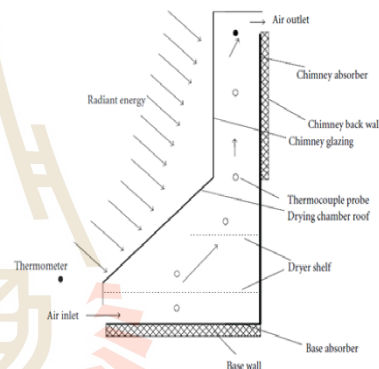
ไทยส่งออกสมุนไพรและสารสกัดปีละประมาณ 1,000 ล้านบาท ขณะที่ข้อมูลของ Euromonitor–Herbal/Traditional Products in Thailand ระบุว่า เมื่อปี 2559 ตลาดสมุนไพรทั้งเวชสำอาง อาหารเสริม เครื่องดื่มและสมุนไพรแห้ง สมุนไพรสด ในประเทศมีมูลค่าประมาณ 3.92 หมื่นล้านบาท และคาดว่าจะขยายตัวเป็น 5.69 หมื่นล้านบาท ในปี 2564 ซึ่งถือว่าการขยายตัวมีแนวโน้มที่ดีในเชิงเศรษฐกิจ แต่ผลผลิตทั้งหมดนี้ไม่สามารถขายได้ทั้งหมดเนื่องจากปัญหาในการเก็บรักษาผลผลิตเพราะผลผลิตบางส่วนเกิดความเสียหายจากการเน่าเสีย ทำให้เกษตรกรเสียหายได้ไปกับผลผลิตที่เน่าเสีย วิธีหนึ่งในการยืดอายุผลผลิตคือ การอบแห้งผลผลิต การอบแห้งเป็นกระบวนการหนึ่งที่สามารถใช้เพื่อถนอมและเก็บรักษาผลผลิตทางการเกษตรโดยผลผลิตที่ผ่านกระบวนการอบแห้งจะทำให้ความชื้นลดลง จุลินทรีย์ที่อยู่ในผลผลิตมีอัตราการเจริญเติบโตช้าลง ผลผลิตไม่เน่าเสียง่าย ซึ่งโดยทั่วไปการอบแห้งสมุนไพรใช้อุณหภูมิในการอบที่ 20 – 40 องศาเซลเซียส ในการอบ ต้น ใบ ดอก ส่วนการอบเปลือกและรากใช้อุณหภูมิที่ 30 – 65 องศาเซลเซียส (สำนักงานข้อมูลและสมุนไพร คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล)

ในปัจจุบันการอบแห้งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การอบแห้งด้วยลมร้อน การอบแห้งแบบฟลูอิดเซชัน การเร่งกระบวนการอบแห้งด้วยสนามไฟฟ้า การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ ฯลฯ เป็นต้น โดยกระบวนการอบแห้งที่กล่าวข้างต้นมีการผลิตเครื่องอบแห้งและมีขายทั่วไปในท้องตลาดแต่มีราคาค่อนข้างแพงและยังเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมจากการใช้พลังงานไฟฟ้าอีกด้วย

โดยทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ คือการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการอบแห้ง เพราะไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายด้านพลังงานในการอบแห้ง ไม่ต้องพึ่งพาไฟฟ้า จึงไม่จำเป็นต้องอยู่ใกล้กับแหล่งจ่ายไฟฟ้า เป็นการลดค่าใช้จ่ายในการอบแห้งของเกษตรกร เพื่อความสะดวกแล้วโดยทั่วไปการอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์เกษตรกรจะทำการตากผลผลิตไว้กลางแจ้ง แต่การตากกลางแจ้งส่วนใหญ่แล้วต้องใช้พื้นที่ค่อนข้างมากในการตากแห้งแต่ละครั้งและยังมีโอกาสเสี่ยงที่ผลผลิตจะเกิดความเสียหายจากปัจจัยอื่นๆ เช่น ปลิวหายจากลมแรง ผลผลิตขึ้นราจากการโดนฝน ผลผลิตปนเปื้อนเชื้อโรคจากการตอมของแมลง ดังนั้นการใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์จึงเป็นทางเลือกที่ดีในการใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานในการอบแห้งและไม่ต้อง

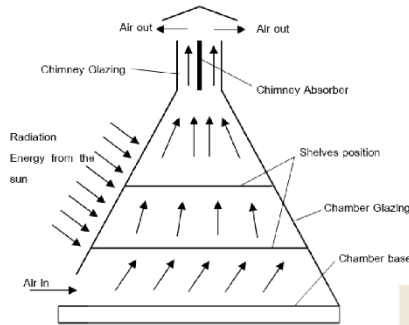
เสี่ยงกับปัจจัยต่างๆที่อาจส่งผลเสียต่อผลผลิตตั้งที่กล่าวมาข้างต้น

Afriyie et al. [1] ได้ศึกษาพบว่าเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีงบประมาณและค่าใช้จ่ายด้านพลังงานค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งชนิดอื่น อย่างไรก็ตามพบว่าเครื่องอบแห้งพลังงานแสงสมรรถนะการอบแห้งยังไม่ดีเนื่องจากไม่มีอุปกรณ์ให้ความร้อนหรือพัดลมที่เป็นตัวช่วยในการอบแห้ง อาศัยเพียงการถ่ายเทอากาศโดยธรรมชาติ (natural ventilation) ซึ่งปัจจัยในการอบแห้งที่ดีนั้นจะขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิของอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ และอัตราการไหลของอากาศภายในเครื่องอบแห้ง จึงนำเสนอเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบใหม่โดยการติดปล่อง (chimney) เข้าไป รายละเอียดแสดงดังรูปที่ 1 พบว่าอุณหภูมิและอัตราการไหลของอากาศภายในห้องอบแห้งเพิ่มขึ้น

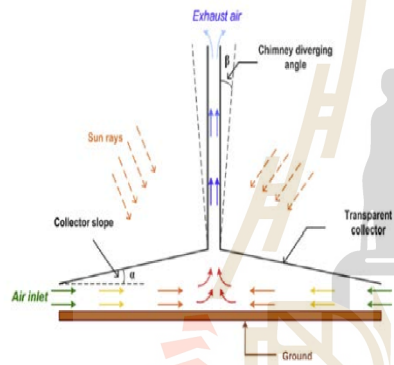


รูปที่ 1 เครื่องอบแห้งปล่องลมแดด [1]

Afriyie and Aikins [2] ได้นำเสนอเครื่องแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกระโจมโดยมีถาดวางผลผลิตอยู่ด้านใน รายละเอียดแสดงดังรูปที่ 2 พบว่าอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งสูงกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 20 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นปัจจัยที่ดีสำหรับกระบวนการอบแห้ง อย่างไรก็ตามรูปทรงของปล่องยังเป็นปล่องตรง ซึ่งมีงานวิจัยเกี่ยวกับการจำลองโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (solar chimney power plant) โดย Hassan et al. [3] ทดลองปรับเปลี่ยนรูปทรงของปล่องให้บานออก รายละเอียดดังรูปที่ 3 พบว่าทำให้อัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้นจากเดิมที่ปล่องตรง



รูปที่ 2 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกระโจม [2]



รูปที่ 3 solar chimney power plant [3]

อย่างไรก็ตามงานวิจัยในการปรับปรุงรูปทรงของปล่องมีอยู่แค่ในการศึกษา solar chimney power plant เท่านั้น

ดังนั้นในงานวิจัยฉบับนี้จึงสนใจการจำลองเครื่องอบแห้งปล่องลมแดดรูปทรงของปล่องแบบต่างๆ โดยใช้โปรแกรม ANSYS Fluent เวอร์ชัน 18 ในการจำลอง เพื่อศึกษาผลการของอุณหภูมิและอัตราการไหลของอากาศภายในเครื่องอบแห้งปล่องลมแดดรูปทรงต่างๆ ซึ่งผลที่คาดว่าจะได้รับคือ ได้รูปทรงของปล่องลมแดดที่มีอัตราการไหลของอากาศภายในห้องอบแห้งสูงขึ้น

2. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

2.1 ตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม

บทความนี้นำเสนอการจำลองเครื่องอบแห้งปล่องลมแดดโดยใช้การจำลองแบบ 3D ด้วยโปรแกรม ANSYS Fluent เวอร์ชัน 18 ซึ่งในการจำลองจำเป็นต้องใช้ radiation model , Discrete Ordinates (DO) , solar ray tracing และ RNG k-E turbulence [3] ที่เหมือนกับงานวิจัยโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (solar chimney power plant) จึงได้จำลองงานวิจัยดังกล่าวเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม

	Haaf W.[4]	present	%error
V (m/s)	7	7.3	4.28
ΔT_{12} (°C)	14.8	14	5.4

2.2 ค่าเลขกราชอฟ (The Grashof Number)

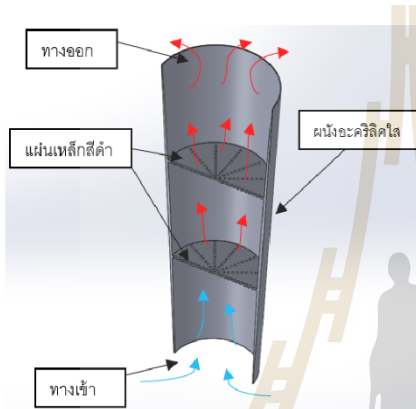
การพิจารณาว่าการไหลจะอยู่ในช่วงของการไหลแบบราบเรียบหรือแบบปั่นป่วนสามารถพิจารณาได้จากขนาดของค่าเลขกราชอฟ สำหรับการไหลโดยการพาอิสระผ่านแผ่นร้อนในแนวตั้งนั้น ค่าเลขกราชอฟต้องไม่มากกว่า 1×10^9 จึงจะเป็นการไหลในช่วงราบเรียบ หากมากกว่านี้จะเป็นการไหลในช่วงปั่นป่วน [5] ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 1

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2} \quad (1)$$

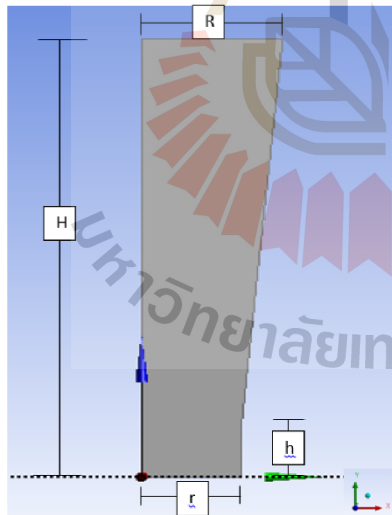
- เมื่อ g = ความเร่งเนื่องจากสนามแรงโน้มถ่วง, m/s^2
- β = สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตร, $1/K$ (สำหรับแก๊สในอุดมคติมีค่าเท่ากับ $1/T$)
- T_s = อุณหภูมิของพื้นผิว, K
- T_∞ = อุณหภูมิของของไหลที่อยู่ไกลจากพื้นผิว, K
- L = ความยาวลักษณะของโครงสร้าง, m
- ν = ความหนืดจลนศาสตร์ของของไหล, m^2/s

2.3 ขนาดเครื่องอบแห้งปล่องลมแดด

เครื่องอบแห้งปล่องลมแดดมีลักษณะดังรูปที่ 4 และ 5 โดยผนังทำจากแผ่นอะคริลิกใส มีภาคตะแกรงเหล็กอยู่ด้านใน ทางเข้าอยู่ด้านล่าง ส่วนทางออกอยู่ด้านบน ทำการจำลองให้ มีลักษณะหุบเข้าและบานออกโดยกำหนดอัตราส่วนพื้นที่ ทางออกต่อทางเข้า (area ratio, AR) เป็น 0.5 ,1 ,2 ,4 และ 5 และกำหนดความสูงทางเข้าจากพื้นดินเป็น 10, 15, 20 เซนติเมตร



รูปที่ 4 Section view เครื่องอบแห้งปล่องลมแดด



รูปที่ 5 front view เครื่องอบแห้งปล่องลมแดด

โดยเครื่องอบแห้งปล่องลมแดดมีขนาดดังแสดงในตารางที่ 2 ตารางที่ 2 ขนาดเครื่องอบแห้งปล่องลมแดด

Area ratio	0.5	1	2	3	4
รัศมีทางเข้า r (cm)	42.2	30	30	30	30
รัศมีทางออก R (cm)	30	30	42.2	52.6	60.4
ความสูงทางเข้า h (cm)		10	15	20	
ความสูงเครื่องอบแห้ง H (cm)			150		

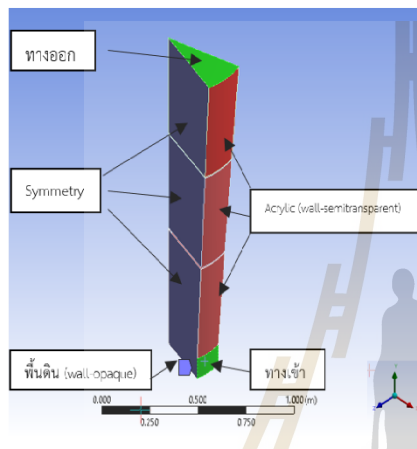
2.4 ขอบเขตและวิธีการจำลอง

ในการจำลองเครื่องอบแห้งปล่องลมแดดกำหนดให้จำลองที่พื้นที่จังหวัดนครราชสีมา เวลา 13.00 น. วันที่ 16 เมษายน โดยใช้ข้อมูลสภาพอากาศจากโปรแกรม TRNSYS (transient system simulation tool) ซึ่งเป็นโปรแกรมที่มีฐานข้อมูลสภาพอากาศและถูกใช้กันอย่างแพร่หลาย อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเท่ากับ 303K ค่าการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์เท่ากับ 311 w/m² และค่าคุณสมบัติของวัสดุ แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

คุณสมบัติ	ดิน	เหล็ก	อะคริลิก
ความหนาแน่น (kg/m ³)	1900	8030	1180
C _p (J/kg-K)	2200	502.48	840
Thermal conductivity (W/m-K)	1.83	16.27	0.2
Transmissivity	0	0	Visible = 0.92 Infra-red = 0.4
absorptivity	0.8	0.8	Visible = 0.4 Infra-red = 0.92

ในการสร้างแบบจำลองเครื่องอบแห้งปล่องลมแดด โดยใช้ ANSYS Fluent เวอร์ชัน 18 สร้างแบบจำลองเพียง 30 องศา เพื่อลดระยะเวลาในการคำนวณ และกำหนด boundary conditions รายละเอียดดังรูปที่ 5 ความดันรวม (total pressure) ที่ทางเข้าเท่ากับ 0 Pa และความดันสถิตย์ (static pressure) ที่ทางออกถูกกำหนดให้เท่ากับ 0 Pa เนื่องจากจำลองเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบการพาอิสระ (natural convection)



รูปที่ 5 แบบจำลองเครื่องอบแห้งปล่องลมแดด

การไหลแบบพาอิสระเป็นการไหลที่ค่าความหนาแน่นไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่ออุณหภูมิและความดันเปลี่ยนแปลงไป เกิดขึ้นจากแรงลอยตัว (buoyancy force) การไหลลักษณะนี้จะเลือกใช้ Boussinesq Model [6] ในการจำลอง และเลือก coupled ใน pressure-velocity coupling และ PRESTO! [7] ใน pressure ค่าอื่น ๆ กำหนดเป็น second order

2.5 Grid independence

ในการจำลองเครื่องอบแห้งปล่องลมแดดได้ทำ Grid independence เพื่อหาจำนวนกริดที่เหมาะสม แสดงดังตารางที่ 4 และรูปที่ 6 โดยพิจารณาจากอัตราการไหลภายในเครื่องอบแห้ง ซึ่งได้แสดงตัวอย่างจำนวนกริดที่เหมาะสมสำหรับเครื่องอบแห้งปล่องลมแดด AR2 คือ Grid 2 เพราะผลของอัตราการไหลเริ่มเปลี่ยนแปลงน้อย สังเกตได้จากค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 3%

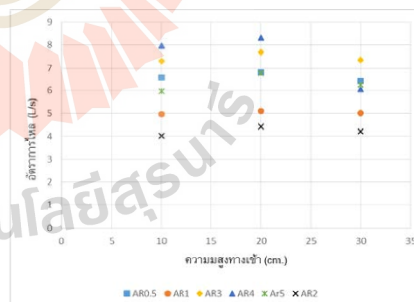
ตารางที่ 4 Grid independence ของ AR2

Grid No.	จำนวนกริด	อัตราการไหล x10 ³ (kg/s)	%error
Grid 1	25424	3.89	n/a
Grid 2	65249	4.57	14.65
Grid 3	207476	4.67	2.17
Grid 4	294576	4.77	2.15

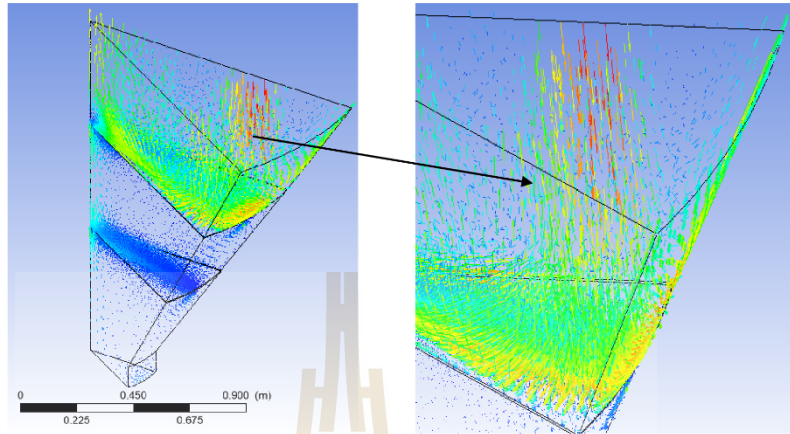
3. ผลการทดลองและอภิปราย

3.1 ผลของ area ratio และความสูงทางเข้าต่ออัตราการไหลของอากาศ

อัตราการไหลของอากาศที่ไหลอยู่ภายในเครื่องอบแห้งเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการอบแห้ง โดยถ้าอัตราการไหลเยอะจะส่งผลต่อการอบแห้ง ทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น ซึ่งจากผลที่ได้จากการจำลองพบว่า ที่ AR0.5 อัตราการไหลมีค่าเท่ากับ 6.5, 6.8, 6.4 ลิตรต่อวินาที เรียงตามลำดับความสูงทางเข้า 10, 20, 30 เซนติเมตร จะเห็นได้ว่าความสูงทางเข้ามีผลต่ออัตราการไหลที่เกิดขึ้น ซึ่งที่ความสูงทางเข้าเท่ากับ 20 เซนติเมตร ทำให้เกิดอัตราการไหลสูงสุดในทุก AR และเมื่อ AR เพิ่มขึ้นพบว่า ในภาพรวมอัตราการไหลเพิ่มขึ้น และอัตราการไหลสูงสุดเท่ากับ 8.3 ลิตรต่อวินาที ที่ AR4 และความสูงทางเข้าเท่ากับ 20 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 6 หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มขึ้นเป็น AR5 พบว่า อัตราการไหลลดลง เป็นผลมาจากที่ทางออกเริ่มเกิดการหมุนวนมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 7



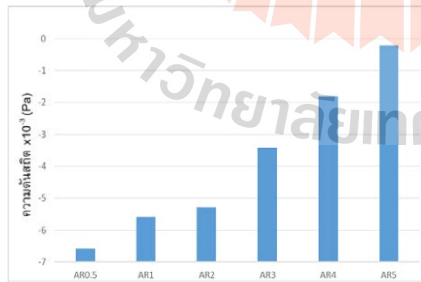
รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและความสูงทางเข้า



รูปที่ 7 เวกเตอร์ความเร็วของ AR5

3.2 ความดันสถิตที่ตำแหน่งใกล้ทางออก

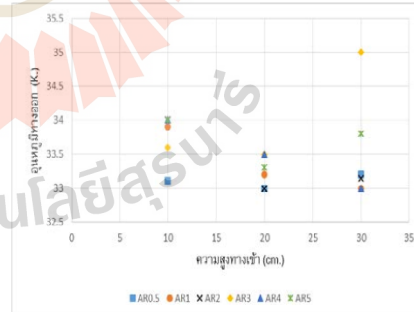
อากาศหรือของไหลนั้นจะไหลจากที่ที่มีความดันสูงไปความดันต่ำ ซึ่งจากจำลองพบว่าตำแหน่งใกล้ทางออก (ต่ำกว่าทางออก 10 เซนติเมตร) ความดันจะเพิ่มขึ้นเมื่อ AR เพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 8 การเพิ่มขึ้นของความดันส่งผลให้เกิดความแตกต่างระหว่างความดันที่ทางเข้า (0 Pa) กับความดันบริเวณใกล้ทางออก ซึ่งเมื่อ AR เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ปรากฏว่าความดันบริเวณใกล้ทางออกสูงกว่าที่ทางเข้า ซึ่งทำให้เกิดความดันต่อต้าน (Adverse Pressure Gradient) ความดันต่อต้านนี้หากมากพอจะทำให้การไหลบางส่วนเกิดการหมุนวน โดยเฉพาะของไหลที่อยู่ชิดผิวผนัง ซึ่งสอดคล้องตามหลักการเบอร์นูลลี (Bernoulli's principle) หากการไหลที่มีพื้นที่หน้าตัดเพิ่มขึ้น (บานออก) ความเร็วจะลดลง ความดันจะเพิ่มขึ้น



รูปที่ 8 ความดันสถิตที่ตำแหน่งใกล้ทางออก

3.3 ผลของ area ratio และความสูงทางเข้าต่ออุณหภูมิ

อุณหภูมิภายในห้องอบแห้งเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการอบแห้ง โดยยิ่งอุณหภูมิสูงจะส่งผลให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น แต่ในหลายกรณีการอบแห้งไม่ต้องการให้อากาศอุณหภูมิสูงเกินไปเพราะมีผลต่อสีและความกรอบของผลผลิต เช่น การอบแห้งธัญพืช พริก สมุนไพร เป็นต้น การอบแห้งเหล่านี้มีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ที่ 20 – 40 องศาเซลเซียส โดยจากผลการจำลองพบว่า อุณหภูมิที่ทางออกเครื่องอบแห้งของทุก AR มีค่าประมาณ 33 - 35 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 9 ซึ่งอุณหภูมิที่พอเหมาะแก่การอบแห้งดังกล่าว



รูปที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ทางออกและความสูงทางเข้า

4. สรุป

อัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่สำคัญในการออกแบบห้อง ซึ่งในงานวิจัยพบว่าการไหลสูงสุดเกิดขึ้นที่เครื่องอบแห้งปล่องลมแดดที่มี area ratio เท่ากับ 4 และความสูงทางเข้าเท่ากับ 20 เซนติเมตร มีค่าเท่ากับ 8.3 ลิตรต่อวินาที และอุณหภูมิที่ทางออกมีค่าประมาณ 33 – 35 องศาเซลเซียส ซึ่งอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ดังนั้นเครื่องอบแห้งปล่องลมแดด area ratio เท่ากับ 4 จึงเป็นรูปทรงที่เหมาะสมต่อการอบแห้ง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Afriyie, J. K., & Bart-Plange, A. (2012). Performance Investigation of a Chimney- Dependent Solar Crop Dryer for Different Inlet
- [2] Afriyie, J. K., & Kojo Atta A. (2016). Field Drying of Cassava in a Solar Tent Dryer equipped with a Solar Chimney. ResearchGate,2016
- [3] Hassan, A., Ali, M., & Waqas, A. (2018). Numerical investigation on performance of solar chimney power plant by varying collector slope and chimney diverging angle. Energy, 142, 411-425.
- [4] Haaf W. Solar chimneys: part II: preliminary test results from the Manzanares plant. Int J Sol Energ 1984;2:141-61.
- [5] Cengel, Y.A. (1998). Heat transfer: A practical approach (International ed.). McGraw-Hill.
- [6] ANSYS FLUENT user's guide, vol. 15317; 2017. p. 825-916. April.
- [7] ANSYS FLUENT user's guide, vol. 15317; 2017. p. 836. April.

The 10th TSME International Conference on Mechanical Engineering
10th – 13rd December 2019
Pattaya, Thailand



AECXXX

(this number will be assigned after full manuscript is accepted)

Design of a solar chimney dryer

Sorawit Klongdee, and Atit Koonsrisuk*

School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Muang District, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

*Corresponding Author: atit@sut.ac.th

Abstract. Drying is a common method for food preservation. A solar dryer which is in a similar shape to the chimney is proposed in this study. A numerical model using ANSYS-FLUENT was developed and validated with a result taken from the literature. The dryers which have a circular and a square cross-section were investigated and compared. An area ratio (AR) of the chimney outlet and chimney inlet, i.e. the dryer outlet and inlet, is used as a test parameter. It was found that the air velocity and temperature increase with the increase of AR. However, it was noted that higher ARs deteriorate the smoothness of the airflow by generating the recirculation zones near the chimney outlet. This reduces the rate of mass flow increase. The results show that the circular chimney with AR20 provides the highest mass flow rate.

Keywords: Solar dryer; Drying; Solar chimney; Computational Fluid Dynamics; Divergent chimney

1. Introduction

The drying is the removal of moisture from the agricultural products into the surrounding air. Microorganisms that are in the production have a slower growth rate. One popular drying method is the use of solar energy for drying because it's easy to manage no need to pay for energy, do not rely on electricity therefore do not need to be near the national electricity grid. This is to reduce the cost of drying of the farmers. In general, farmers will dry in open-sun drying. Outdoor drying requires a large amount of space in each drying process and there is a risk that the product will be damaged by other factors such as wind blowing, rain, and bug. Therefore, the use of solar dryers is a good alternative to drying problems in open areas. To reduce various risk factors that may adversely affect productivity as mentioned above.

Afriyie et al. [1] This study was found that the solar energy dryer has a relatively low investment budget and energy costs compared to other types of dryers. However, the drying efficiency of the solar dryer is not good. Because there is no heating device or fan. Flow depends only on natural ventilation. Which the good drying factor depends on air temperature relative humidity and the airflow rate. Therefore, it presented a new solar dryer by installing a chimney. Details shown in Fig. 1 showed that the temperature and airflow rate in the drying room increased.

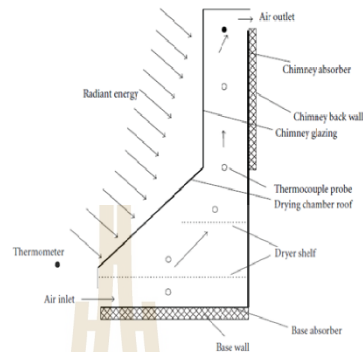


Figure 1. Solar chimney dryer [1]

Afriye and Aikins [2] presented a solar tent dryer with an inner tray details shown in Fig. 2 showed that the air temperature inside the dryer was 20°C higher than the environmental temperature, which is a good factor for the drying process. However, the shape of the chimney is still straight. Which has research on the simulation of solar chimney power plants by Hassan et al. [3] experiment to change the shape of the chimney to investigate the effects of the ratio of exit areas per entrance details as shown in Fig. 3 showed that the airflow rate increased from the original straight shaft. However, research on the shape of the chimney is only in the study of the solar chimney power plant.

Therefore, in this research then interested in the dryers which have a circular and a square cross-section were investigate. By using ANSYS Fluent Version 18 in the simulation to study the effect of temperature and flow rate of air inside the dryer for various types of solar chimneys and the number of trays, which the expected result is get the shape of the solar chimney with a higher airflow rate in the drying room.

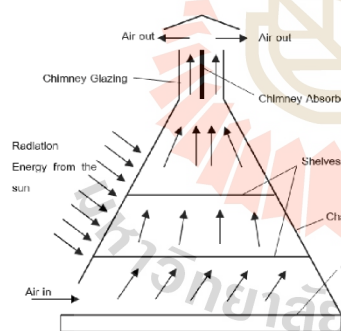


Figure 2. Solar tents drying machine [2]

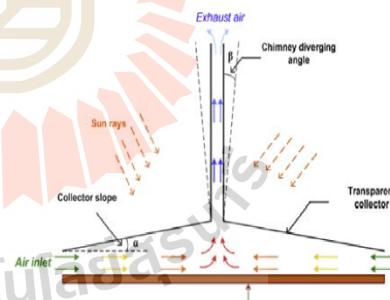


Figure 3. Solar chimney power plant [3]

2. Methodology

2.1 validation

This article presents the simulation of a solar chimney dryer using 3D simulation with ANSYS-Fluent version 18. In which simulation requires radiation model, Discrete Ordinates (DO), solar ray

tracing and RNG k- ϵ turbulence [3] that is similar to solar chimney power plant research and has simulated such research to check the accuracy of the program as shown in Table 1.

Table 1

Validation of outlet velocity and outlet temperature

	Haaf W [4]	present	%error
V (m/s)	7	7.3	4.28
ΔT_{12} (°C)	14.8	14	5.4

2.2 Dimensions of the solar chimney dryer

The solar chimney dryer shown in Fig. 4, 5 and 6, with the wall made of acrylic sheet. There is a steel grating tray on the inside. The entrance is below and the exit is at the top. The shape of the chimney has both circles and squares. To investigate the effects of the ratio of exit areas per entrance (area ratio, AR) to 2, 4, 8, 16, 20 and 25, determining the entrance height from the ground to 10, 15, 20 cm and the number of trays 2 - 3 trays

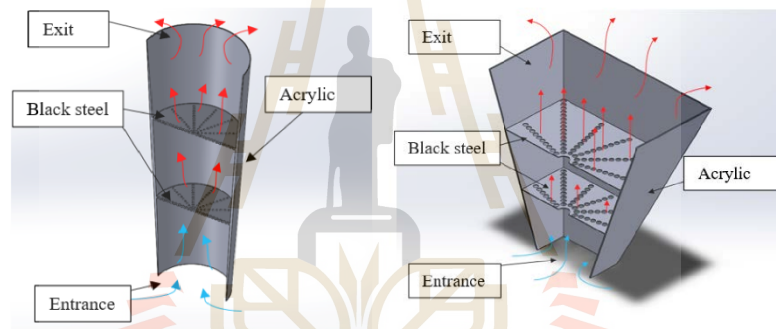


Figure 4. Section view of circular solar chimney dryer

Figure 5. Section view of square solar chimney dryer

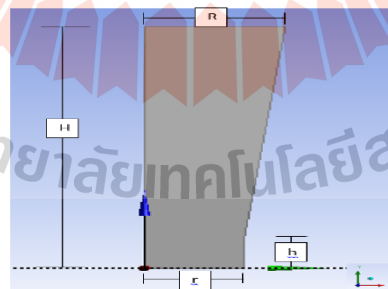


Figure 6. Section view of solar chimney dryer

The solar chimney dryer, as shown in Table 2 and 3

Table 2
Dimensions of circular solar chimney dryer

Area ratio	2	4	8	16	20	25
Entrance radius r (cm)	30	30	30	30	30	30
Exit radius R (cm)	42.2	60	84.9	120	134	300
Entrance height h (cm)	10, 20, 30					
Height H (m)	1.5, 2					

Table 3
Dimensions of square solar chimney dryer

Area ratio	2	4	8	16	20	25
Entrance length (cm)	53	53	53	53	53	53
Exit length (cm)	73	106	150	219	238	266
Entrance height h (cm)	10, 20, 30					
Height H (m)	1.5, 2					

2.3 Scope

Simulation of the solar chimney dryer is simulated in the area of Nakhon Ratchasima Province at 1:00 p.m. on April 16, using weather data from the TRNSYS (transient system simulation tool), which is a program with a weather database and is used as widespread. The environmental temperature is 30°C. The radiation radiated from the sun is 331 w/m² and the material properties. Shown in Table 4

Table 4
Physical properties of materials

Properties	Soil	Steel	Acrylic
Density (kg/m ³)	1900	8030	1180
C _p (J/kg-K)	2200	502.5	840
Thermal conductivity (W/m-K)	1.83	16.27	0.2
Transmissivity	0	0	Visible = 0.92 Infra-red = 0.4
absorptivity	0.8	0.8	Visible = 0.4 Infra-red = 0.92

Modeling the solar chimney dryer using ANSYS Fluent version 18, creating a model of only 30 degrees to reduce the time to calculate and define boundary conditions. Details as shown in Fig.7 total pressure at the entrance is equal zero Pa and static pressure at the exit are defined as 0 Pa because the simulation is a natural convection. Natural convection is a flow in which the density changes less when the temperature changes at constant pressure resulting from this kind of flow of buoyancy force. Choose the Boussinesq Model [6] to simulate and select coupled in pressure-velocity coupling and PRESTO! [7] In pressure. Other values are set to second order

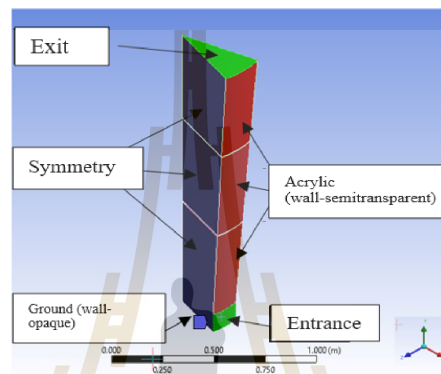


Figure 7. Model of the solar chimney dryer

2.4 Grid independence

Simulation of the solar chimney dryer was made with grid independence to determine the appropriate grid size. As shown in Table 5, based on the flow rate within the dryer, which shows an example of the number of grids that are suitable for the AR2 solar chimney dryer is grid 2 because the effect of the flow rate starts to change less can be observed from the error of less than 3%

Table 5
Grid independence of AR2

Grid No.	Cells count	Mass flow rate $\times 10^3$ (kg/s)	%Error
Grid 1	25424	3.89	n/a
Grid 2	65249	4.57	14.65
Grid 3	207476	4.67	2.17
Grid 4	294576	4.77	2.15

3. Results and discussion

3.1 The Effect of the area ratio on the performance of the solar chimney dryer

The flow rate of air flowing inside the dryer is one of the important factors in drying. The results from the simulation show that the area ratio affects the flow rate shown in Table 6 and Fig.8

Table 6
Effect of area ratio on air flow rate

Area ratio	Air flow rate (L/s)			
	1.5 meter		2 meter	
	Circle	Square	Circle	Square
2	3.89	1.95	3.75	2.35
4	4.09	2.08	3.8	2.39
8	5.41	4.17	5.37	5.07
16	5.98	4.18	6.93	5.51
20	5.9	4.12	6.96	5.54
25	5.63	3.7	6.74	5.3

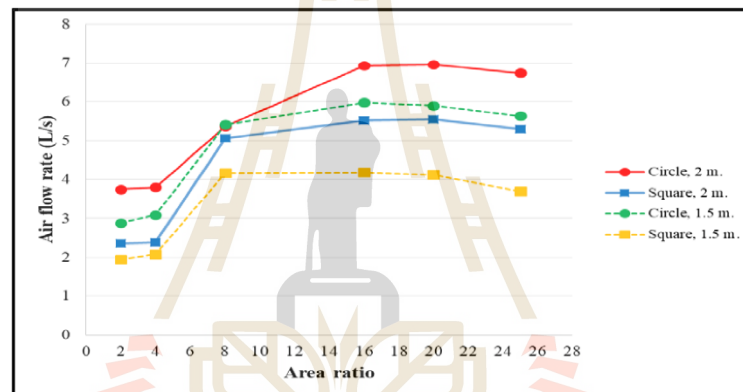


Figure 8. Effect of area ratio on air flow rate

Figure 8 shows the relationship between the air flow rate and the area ratio. It was found that the flow rate increases when the area ratio increases. At the height of 2 m., the maximum flow rate at AR20 is 6.93 L / s. At the chimney height is 1.5 m. the maximum flow at AR16 is 5.98 L / s. On the other hand, it was found that when AR increases too much, it causes the rotation of the exit area. Causing the flow rate to decrease, resulting from the recirculation zones near the chimney outlet As shown in Fig. 9. And the height of the dryer also cause the flow rate to increase by 15-30% due to the higher air temperature which will be discussed in the next section. And also it was found that the circular chimney has a higher airflow rate than the square chimney. It can be seen that the square chimney has a lower flow rate than the circular chimney about 20-30%. However, in practice, the circle chimney is difficult to create.

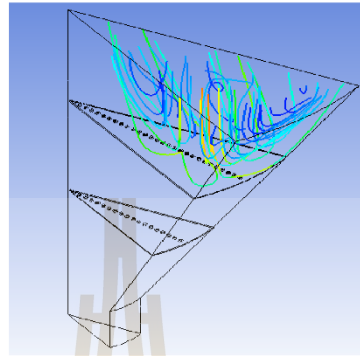


Figure 9. Recirculation zones near the chimney exit

The temperature of the air is another factor in drying. Fig. 10 and 11 shows the results of the temperature at various height positions within the dryer. For circular and square dryers, respectively it was found that the air temperature is about 33-36°C because when the air floated up inside the chimney the air will receive heat from the tray which will increase the air temperature. And the height of the dryer affects the temperature. The 2 m. dryer has a temperature higher than the 1.5 m. dryer, About 1-2°C in Fig. 10, indicating that the maximum temperature is 36°C and in Fig. 11 the maximum temperature is 35.8°C.

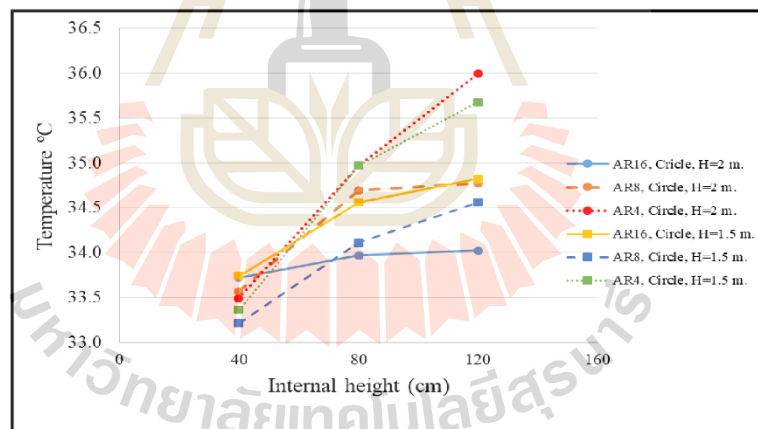


Figure 10. Effect of area ratio on temperature of circle dryer

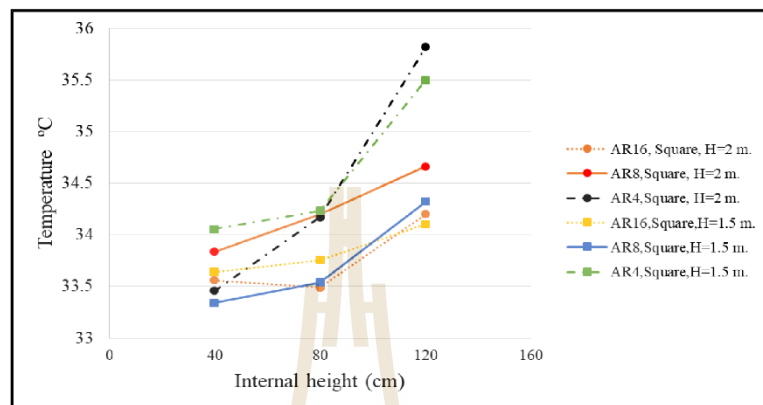


Figure 11. Effect of area ratio on temperature of square dryer

3.2 Static pressure at the position near the exit

According to the simulations, it was found that at the location near the exit (Less than 10 cm exit) the pressure increases when the AR increases as shown in Fig. 10. The increase in pressure results in the difference between the pressure at the entrance (0 Pa) and the pressure near the exit. Which, when the AR increases, the pressure near the exit is higher than at the entrance, which causes an adverse pressure gradient. It should be note that the pressures are negative.

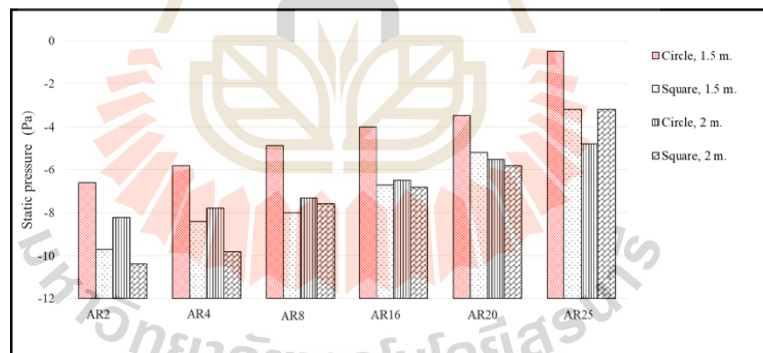


Figure 12. Static pressure at the position near the exit

This adverse pressure gradient, if there is a high value, will cause a partial flow to rotate especially the fluid that is close to the wall surface, which conforms to Bernoulli's principles if the flow with the cross-sectional area increases, the velocity will decrease. The pressure will increase.

3.3 Effect of entrance height on flow rate

Fig. 13 shows the relationship between the entrance height and the flow rate of the circular chimney. It was found that the maximum flow rate occurred at a height of 10 cm, which AR4 AR8 AR16 had a flow rate of 3.34, 5.21, 6.38 L / s, respectively. At the entrance, the height is 20 and 30 cm. Some of the air circulates at the entrance area due to excessive volume. As shown in Fig. 14 However, considering that the height of the entrance is 40 cm because the trend appears that the flow rate will increase as the entrance height increases. Found that the entrance height of 40 cm caused the flow rate to decrease because some of the air circulated at the entrance area due to excessive volume as mentioned above.

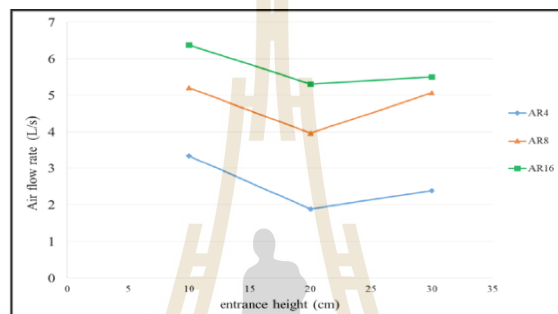


Figure 13. Effect of entrance height on air flow rate

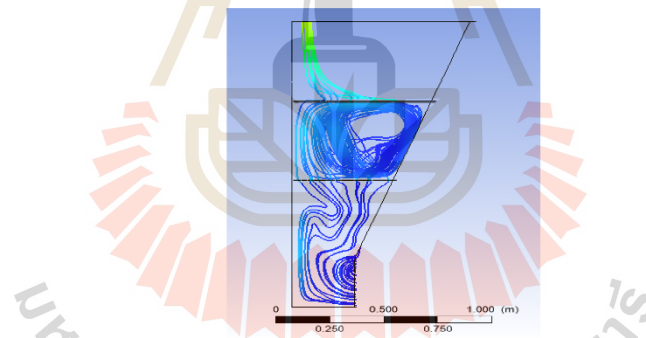


Figure 14. Recirculation zones near the chimney entrance

3.4 Effect of tray on flow rate and temperature

The number of trays for placing the products affects the design of the chimney dryer. Because it will result in a large amount of yield. However should consider the impact of the number of trays on flow rate and temperature because these two factors affect drying performance. From the simulation results found that When the number of trays increases from 2 trays to 3 trays, the flow rate decreases both circular shapes and squares, such as circular shapes, AR8, flow rate reduced from 6 L/s to 5.4 L/s Square shape AR8. Flow rate decreases from 5.6 L/s to 4.2 L/s , decreasing 10 - 25%, which is a relatively significant figure. Because the tray that is added is blocking the airflow. However when the number of trays increased, the temperature increased by about 1-2°C.

Conclusions

This article was designed for a solar chimney dryer that can be designed in 2 types circle and square, height 1.5, 2 meters. It was found that the circular chimney has an air flow rate of 20-30% higher than the square chimney and the solar chimney dryer can increase the performance from the increase of area ratio. It was found that the flow rate increased when the area ratio increased for the dryer size 2 m high. The maximum flow rate occurred at the circular chimney and the rectangle at AR20 was 6.96 L/s and 5.54 L/s respectively and the dryer size 1.5 m high. The maximum flow rate occurs at the circular chimney and the rectangle at AR16 is 5.98 L/s and 4.18 L/s respectively. Which, when the dryer size increased, the flow rate increased by 15-30% and the temperature increased to 1-2 °C. However, the increase in the area ratio also causes more recirculation zones near the chimney exit, resulting in reduced flow rates. And increasing the number of trays makes the air flowing inconvenient, causing the flow rate to drop by 10-25%. The entrance height, if too high, will cause the flow rate to drop. By the entrance height is 10 cm, causing the maximum flow rate. For the air temperature is about 33-36°C

reference

- [1] Afriyie, J. K., & Bart-Plange, A. (2012). Performance Investigation of a Chimney-Dependent Solar Crop Dryer for Different Inlet
- [2] Afriyie, J. K., & Kojo Atta A. (2016). Field Drying of Cassava in a Solar Tent Dryer equipped with a Solar Chimney. ResearchGate,2016
- [3] Hassan, A., Ali, M., & Waqas, A. (2018). Numerical investigation on performance of solar chimney power plant by varying collector slope and chimney diverging angle. *Energy*, 142, 411-425.
- [4] Haaf W. Solar chimneys: part II: preliminary test results from the Manzanares plant. *Int J Sol Energ* 1984;2:141-61.
- [5] Cengel, Y.A. (1998). *Heat transfer: A practical approach* (International ed.). McGraw-Hill.
- [6] ANSYS FLUENT user's guide, vol. 15317; 2017. p. 825-916. April.
- [7] ANSYS FLUENT user's guide, vol. 15317; 2017. p. 836. April.

ประวัติผู้เขียน

นายสรวิช คล่องดี เกิดเมื่อวันที่ 29 เมษายน พ.ศ. 2537 เติบโตในอำเภอพิมาย จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาชั้นปีที่ 1-6 จากโรงเรียนพิมายวิทยา จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล) จากสาขาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปี พ.ศ. 2559 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ณ สถาบันการศึกษาเดิม ในระหว่างศึกษาได้เป็นผู้ช่วยสอนปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล จำนวน 2 รายวิชา คือ วิชาปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล 1 และรายวิชาปฏิบัติการด้านความร้อนและของไหล

ผลงานในระดับปริญญาโท ได้นำเสนอบทความวิชาการ ดังนี้

ระดับชาติ

1) สรวิช คล่องดี และอาทิตย์ คุณศรีสุข. (2561). การจำลองเครื่องอบแห้งปล่องแคด. ในการประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 32 ระหว่างวันที่ 3-6 กรกฎาคม พ.ศ. 2561 ณ จังหวัดมุกดาหาร

2) สรวิช คล่องดี และอาทิตย์ คุณศรีสุข. (2562). อิทธิพลของรูปทรงสำหรับเครื่องอบแห้งปล่องลมแคด. ในการประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15 ระหว่างวันที่ 21-23 พฤษภาคม พ.ศ. 2562 ณ จังหวัดนครราชสีมา

3) สรวิช คล่องดี และอาทิตย์ คุณศรีสุข. (2562). การเพิ่มสมรรถนะของเครื่องอบแห้งปล่องแคด. ในการประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 10 เฉลิมพระเกียรติ เนื่องในโอกาสมหามงคลพระราชพิธีราชาภิเษก วันที่ 30 สิงหาคม พ.ศ. 2562 ณ จังหวัดนครราชสีมา

ระดับนานาชาติ

1) Sorawit Klongdee and Atit Koonsrisuk. (2019). Design of a Solar Chimney Dryer. At 10th Thai Society of Mechanical Engineers International Conference on Mechanical Engineering TSME-ICoME 2019, December 10th-13th, 2019