



การศึกษามรรณนะของเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนแบบสลับทิศทาง
ที่ผลิตจากเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง

STUDYING THE PERFORMANCE OF THE DIRECTION SWITCH AIR DRYER FOR FOOD
PRODUCT USING HOT AIR FROM THE HIGH EFFICIENCY BIOMASS GASIFIER STOVE

ภาสพงศ์ภัตต์ บุญรัตน์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การศึกษามรรณะของเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนแบบสลับทิศทาง
ที่ผลิตจากเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

STUDYING THE PERFORMANCE OF THE DIRECTION SWITCH AIR DRYER F
OR FOOD PRODUCT USING HOT AIR FROM THE HIGH EFFICIENCY BIOMA
SS GASIFIER STOVE



A Thesis Submitted in partial Fulfillment of Requirements
for MASTER OF ENGINEERING (Mechanical Engineering)
Faculty of Engineering Srinakharinwirot University

2018

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษามรรณนะของเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนแบบสลับทิศทาง
ที่ผลิตจากเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง

ของ

ภาสพงศ์ภัสส์ บุญรัตน์

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมมาส แก้วล้วน)

ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประชา บุญยวานิช
กุล)

ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาคภูมิ ศรีวรรณ)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จตุพร แก้วอ่อน)

ชื่อเรื่อง	การศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนแบบสลับทิศทาง
ผู้วิจัย	ที่ผลิตจากเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง
ปริญญา	ภาสพงศ์ภัตต์ บุญรัตน์
ปีการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	2561
	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมมาส แก้วล้วน

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนแบบสลับทิศทางที่ผลิตจากเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง เครื่องอบแห้งประกอบด้วยห้องอบจำนวน 4 ห้องแต่ละห้องสามารถบรรจุถาดวางผลิตภัณฑ์ได้จำนวน 5 ถาด แต่ละถาดมีขนาดกว้าง 50 เซนติเมตรยาว 56 เซนติเมตร และขอบถาดสูง 1 เซนติเมตร สามารถบรรจุกล้วยได้ถาดละ 300 กรัม ลมร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง 55, 65, 70, 75, 80, 85 °C ถูกป้อนเข้าห้องอบผ่านวาล์วสลับทิศทางการไหลสู่ห้องอบที่ 1-2-3-4 และเมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที ทิศทางการไหลของลมร้อนจะถูกสลับให้ไหลย้อนกลับจาก 4-3-2-1 ตามลำดับ ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่บรรจุอยู่ในแต่ละห้องอบแห้งสม่ำเสมอโดยไม่ต้องเปิดตู้อบมาสลับตำแหน่งถาดวางผลิตภัณฑ์ในการอบแห้งใช้เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงเป็นแหล่งผลิตความร้อนและถ่ายเทให้กับอากาศสำหรับอบแห้งผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวางเพื่อให้ได้อุณหภูมิอากาศสำหรับการอบแห้งโดยสมรรถนะของเครื่องอบแห้งนี้จะถูกเปรียบเทียบกับเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนร่วมกับระบบผลิตลมร้อนด้วยเตาชีวมวล และระบบจ่ายลมร้อนแบบสลับทิศทางการไหลกับเครื่องอบแห้งแบบดั้งเดิมและเครื่องอบแห้งแบบใช้แก๊สหุงต้ม (LPG รุ่น KB-8) เป็นเชื้อเพลิงและต้องทำการเปิดตู้อบเพื่อสลับถาดวางผลิตภัณฑ์ จากการทดลองอบแห้งกล้วยหั่นแว่นหนา 1 ถึง 2 มิลลิเมตร ที่น้ำหนักกล้วยก่อนอบ 6,000 กรัม ด้วยอุณหภูมิลมร้อน 65, 70, 75, 80, 85 °C ที่อัตราการไหล 830 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงเป็นเวลา 50 -130 นาที โดยมีอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่อยู่ในช่วง 2.7 – 4.1 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ผลจากการทดลองพบว่าน้ำหนักกล้วยหั่นแว่นแห้งมีค่า 1.8 กิโลกรัม ซึ่งกล้วยหั่นแว่นมีน้ำหนักรีดลดลง 70 % โดยมีอัตราการอบแห้งอยู่ในช่วง 1.93-5.06 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะอยู่ในช่วง 13.16 – 22.74 เมกะจูลต่อกิโลกรัมของน้ำระเหย ซึ่งค่าใช้จ่ายในการอบแห้งกล้วยประมาณ 3-5 บาทต่อกิโลกรัมกล้วยแห้ง เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งของชุมชนที่ใช้เชื้อเพลิง LPG ซึ่งมีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานประมาณ 11.5 -20.7 บาทต่อกิโลกรัมกล้วยแห้งซึ่งเครื่องอบแห้งสามารถลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานได้ 8.50-15.7 บาทต่อกิโลกรัมกล้วยแห้งและสามารถลดเวลาการอบแห้งได้ 1-3 ชั่วโมง

คำสำคัญ : การอบแห้ง, เตาแก๊สชีวมวล, ลมร้อนสลับทิศทาง, กลัวยั่นแฉ่น



Title	STUDYING THE PERFORMANCE OF THE DIRECTION SWITCH H AIR DRYER FOR FOOD PRODUCT USING HOT AIR FROM THE HIGH EFFICIENCY BIOMASS GASIFIER STOVE
Author	PARTSAPONGPHAT BOONRAT
Degree	MASTER OF ENGINEERING
Academic Year	2018
Thesis Advisor	Assistant Professor Dr. Sommas Kaewluan

This research is to study the performance of a bi-directional hot air dryer using hot air from a high efficiency biomass gasifier stove. The dryer was equipped with four drying chamber. Each drying chamber contained five product trays. The tray size is fifty centimeters wide, fiftysix centimeters long and one millimeters deep which can be contain slide banana with total weight of three hundred grams. Hot air at a temperature between fifty five, sixty five, seventy, seventy five, eighty and eighty five °C is fed to the drying chamber in a 1-2-3-4. At interval of fifteen minutes, the hot air flow direction was altered to a backward sequence of 4-3-2-1. The sliced banana was packed evenly in a drying chamber. The experiment was performed continually for two hours. For drying, the high efficiency biomass gasifier stove was used as a heat source and transfer heat to produce via hot air using a cross flow heat exchanger. The performance of the dryer is compared with the LPG-KB-8 tray dryer. The experiment was performed with a sliced banana of one - two millimeter thickness and total weight of six thousand grams. The drying condition controlled the hot air temperature at approximately 65, 70, 75, 80, 85 °C and a volume flow rate of 830 m³/hr for fifty to one hundred and thirty minutes. The biomass was fed to the high efficiency gasifier stove at the fuel feed rate of 225-341 grams for every five minutes. The total amount of fuel used during drying period is 2.7 – 4.1 kg/h. The experimental results showed that the dry weight of the sliced banana was 1,800 grams, the banana lost about of its weight of 70% and specific energy consumption about 13.16 – 22.74 MJ/kg H₂O_{evap}. The average drying cost was 3-5 baht/kg of dry product. In Comparison with the LPG tray dryer, the energy cost between 11.5 -20.7 baht/kg of dry products was calculated. The new design biomass tray dryer can reduce energy costs between 8.50-15.7 baht/kg of dry products and can reduce the drying time by up three hours.

Keyword : Drying, Gasifier Stove, Bi-directional Hot Air, Sliced Bana



กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์สำเร็จลุล่วงได้ความเมตตากรุณาช่วยเหลือและความเอาใจใส่อย่างดียิ่งตลอดจนการให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับการปรับแก้ไขข้อบกพร่องจากคณะกรรมการผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สมมาส แก้วล้วน และ ผศ.ดร.ภาคภูมิ ศรีรัมย์ ที่ได้ให้ความเมตตากรุณาเป็นที่ปรึกษาและให้ความช่วยเหลือชี้แนะแนวทางในสิ่งที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษา และการทำปริญญานิพนธ์ด้วยความเอาใจใส่ตลอดมา รวมทั้ง ผศ.ดร.ประชา บุญยวาณิชกุล และ ผศ.ดร.จตุพร แก้วอ่อน ที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะต่างๆเพิ่มเติมแก่ผู้วิจัย ทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์และกรรมการบริหารหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ได้กรุณาประสิทธิ์ประสาทความรู้ต่างๆ ให้ผู้วิจัย ตลอดจนให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ เพื่อนร่วมงาน ที่บัณฑิตวิทยาลัยสำหรับข้อมูลตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ รวมถึงความช่วยเหลือและกำลังใจให้กับผู้วิจัยตลอดมา

ขอขอบคุณ น้องๆ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล รวมถึงบุคคลอีกหลายท่านที่ไม่ได้กล่าวนามไว้ ณ ที่นี้ได้ให้ความช่วยเหลือกำลังใจให้กับผู้วิจัยตลอดมา

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอโน้มรำลึกถึงคุณของบิดามารดาและครูอาจารย์ ที่อบรมสั่งสอนให้ความรู้เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนผู้วิจัยด้วยดีตลอดมา

ภาสพงศ์ภัสส์ บุญรัตน์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ	ฌ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์และผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ทฤษฎีการอบแห้ง	5
2.2 การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้ง	8
2.3 การผลิตลมร้อนสำหรับเครื่องอบแห้ง	13
2.4 เชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับเตาชีวมวล.....	18
2.5 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	23
2.6 อุปกรณ์การสร้างอัตราการไหลของอากาศ.....	35
2.7 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับปริญญานิพนธ์ (Literature review)	40
บทที่ 3 เครื่องมือและวิธีการทดลองงานวิจัย	54
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทดลอง	54

3.2 วิธีการวิเคราะห์หาค่าความชื้น.....	59
3.3 วิธีการทดลองอบแห้งกล้วยหั่นแว่นโดยใช้เครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนแบบ สลับทิศทางการไหลที่ผลิตจากเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง	61
3.4 การวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องอบแห้ง	66
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	68
4.1 ผลการทดสอบสมรรถนะและมลพิษจากเตาชีวมวล.....	69
4.2 ผลการทดลองผลิตลมร้อนด้วยเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงที่ใช้กะลามะพร้าวเป็นเชื้อเพลิง และเตาแก๊ส LPG.....	71
4.3 ผลการอบแห้งกล้วยน้ำว้าหั่นแว่นด้วยลมร้อนในห้องอบแห้งและการลดลงของความชื้น ผลิตภัณฑ์เมื่อไม่มีการสลับทิศทางการไหลของลมร้อน	75
4.4 ผลการกระจายอุณหภูมิลมร้อนในห้องอบแห้งและการลดลงของความชื้นผลิตภัณฑ์เมื่อมี การสลับทิศทางการไหลของลมร้อนและเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิลมร้อน.....	79
4.5 ผลการกระจายอุณหภูมิลมร้อนในห้องอบแห้งและการลดลงของความชื้นผลิตภัณฑ์เมื่อมี การสลับทิศทางการไหลของลมร้อนและเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของลมร้อน.....	85
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	88
ข้อเสนอแนะ	90
บรรณานุกรม	91
ภาคผนวก.....	92
ประวัติผู้เขียน.....	179

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 แสดงค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลแต่ละชนิดในประเทศไทย.....	22
ตาราง 2 ค่าคงที่ของสมการ (2-18) สำหรับการไหลผ่านท่อหลายชั้น	26
ตาราง 3 ค่าตัวประกอบแก้ไข C_2 ของสมการ (2-18) สำหรับการไหลผ่านท่อหลายชั้น[9]	26
ตาราง 4 แสดงความสัมพันธ์ของ effectiveness สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน [9]	31
ตาราง 5 ความสัมพันธ์ของ NTU สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน[9] โดย $NTU = UA/C_{\min}$ และ $C_r = C_{\min} / C_{\max}$	32
ตาราง 6 ค่าแฟกเตอร์ความขรุขระของผิวท่อ (จากคณะวิศวกรรมกรรมการอาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์).....	33
ตาราง 7 แสดงคุณลักษณะและการทำงานของพัดลมแต่ละชนิด	38
ตาราง 8 แสดงค่าประสิทธิภาพเชิงกลของพัดลมโดยประมาณสำหรับพัดลมชนิดต่างๆ	40
ตาราง 9 สรุปสาระสำคัญของงานวิจัยที่ผ่านมา.....	50
ตาราง 10 ช่วงเวลาที่แนะนำสำหรับการอบหาค่าความชื้นกล้วยหั่นแวนด้วยตู้อบไมโครเวฟ	59
ตาราง 11 รายละเอียดการเก็บข้อมูลการทดลอง	65
ตาราง 12 องค์ประกอบของเชื้อเพลิง	69
ตาราง 13 ผลการทดลองเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงที่สภาวะการป้อนอากาศส่วนที่ 1 แตกต่างกัน	70

สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพประกอบ 1 การอบแห้งแบบใช้แก๊ส LPG (ก) และเครื่องอบแห้งแบบชาวบ้าน(ข).....	2
ภาพประกอบ 2 แสดงความสัมพันธ์อัตราส่วนความชื้นและอุณหภูมิของวัสดุอบแห้ง[14].....	6
ภาพประกอบ 3 องค์ประกอบภายนอก(ก) และภายในของเตาชีวมวล(ข)[13].....	15
ภาพประกอบ 4 กระบวนการทำงานของเตาชีวมวล[13].....	15
ภาพประกอบ 5 การเปิด-ปิดช่องรับอากาศส่วนที่1(ก)ปิดสุด(ข)เปิดเล็กน้อย(ค)เปิดสุด[13].....	15
ภาพประกอบ 6 มันทำปะหลัง	19
ภาพประกอบ 7 ยางพารา.....	19
ภาพประกอบ 8 ไม้ยูคาลิปตัส	20
ภาพประกอบ 9 กะลามะพร้าว	21
ภาพประกอบ 10 ลักษณะการไหลผ่านท่อหลายชั้น [9].....	23
ภาพประกอบ 11 ลักษณะการจัดวางท่อหลายชั้น (ก) และแบบวางในแนวเดียวกัน.....	23
ภาพประกอบ 12 สภาวะการไหลของท่อแบบ(ก) แนวเดียวกัน (ข) สลับกันหรือเอียงกัน [9].....	27
ภาพประกอบ 13 ตัวประกอบเสียดทาน f และตัวประกอบแก้ไข x สำหรับการจัดท่อแนว	28
ภาพประกอบ 14 ตัวประกอบเสียดทาน f และตัวประกอบแก้ไข x สำหรับ	28
ภาพประกอบ 15 แสดงพัลลภแบบไหลตามแกน.....	36
ภาพประกอบ 16 แสดงพัลลภแบบเหวี่ยง.....	37
ภาพประกอบ 17 แสดงพัลลภแบบใบพัดโค้งหลัง	37
ภาพประกอบ 18 แสดงพัลลภแบบใบพัดโค้งหน้า	38
ภาพประกอบ 19 เครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนแบบสลับทิศทางที่ผลิตจากเตาชีวมวล ประสิทธิภาพสูง	54

ภาพประกอบ 20 เครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนแบบสลับทิศทาง (ก)และเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง (ข).....	55
ภาพประกอบ 21 เครื่องชั่งน้ำหนักตั้งพื้น(ก)และเครื่องชั่งวิเคราะห์(ข)	57
ภาพประกอบ 22 ตู้อบไมโครเวฟ ELECTROLUX รุ่น EMM2009W	57
ภาพประกอบ 23 ตำแหน่งติดตั้งเซ็นเซอร์อุณหภูมิ.....	58
ภาพประกอบ 24 ลักษณะกล้วยหั่นแวนก่อนอบแห้ง (ก) และหลังอบแห้ง (ข)	60
ภาพประกอบ 25 ส่วนประกอบของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง.....	61
ภาพประกอบ 26 กล้วยน้ำว้าแช่น้ำเกลือ(ก) และกล้วยหั่นแวนเตรียมอบแห้ง(ข).....	63
ภาพประกอบ 27 แผนผังการไหลของแก๊สร้อนและลมร้อน	68
ภาพประกอบ 28 ผลการทดลองผลิตลมร้อนด้วยเตาแก๊ส LPG และเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงที่ใช้กะลามะพร้าวเป็นเชื้อเพลิงแต่ละองศาที่ออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	72
ภาพประกอบ 29 เปรียบเทียบค่าเชื้อเพลิงด้วยเตาแก๊ส LPG และเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงของอุณหภูมิที่มีอัตราการป้อนอากาศเทียบค่าประหยัดของเชื้อเพลิง	72
ภาพประกอบ 30 จากการทดลองเปรียบเทียบอัตราการไหลของอากาศลดลงร้อยละ 10 และ 20 ตามลำดับเข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	73
ภาพประกอบ 31 ต้นทุนค่าเชื้อเพลิงในการผลิตลมร้อนที่อุณหภูมิ 85 °C เมื่ออัตราการไหลของลมร้อนเปลี่ยนแปลง 3 ระดับคือ 830, 747 และ 664 m ³ /h.....	73
ภาพประกอบ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมร้อนกับอุณหภูมิลมร้อนเมื่ออัตราการ ป้อนลมที่ 830 m ³ /h	74
ภาพประกอบ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมร้อนเข้าห้องอบแห้งและอัตราการไหลของลมจากเครื่องเป่า	75
ภาพประกอบ 34 ผลการกระจายอุณหภูมิลมร้อนในห้องอบแห้งและการลดลงของความชื้นผลิตภัณฑ์เมื่อไม่มีการสลับทิศทางการไหลของลมร้อนที่อุณหภูมิ 55 °C	76
ภาพประกอบ 35 ผลการกระจายอุณหภูมิลมร้อนในห้องอบแห้งและการลดลงของความชื้นผลิตภัณฑ์เมื่อไม่มีการสลับทิศทางการไหลของลมร้อนที่อุณหภูมิ 65 °C	77

[illegible]

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม นับตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันมีผลผลิตทางการเกษตรหลากหลายชนิด ไม่ว่าจะเป็นพืชไร่ พืชสวน และผลไม้ต่างๆ ซึ่งเป็นสินค้าทางการเกษตรส่งออกที่ทำรายได้เข้าประเทศได้เป็นจำนวนมากในแต่ละฤดูกาลเก็บเกี่ยวจะมีผลผลิตมากจนล้นตลาด โดยมีปริมาณผลผลิตเกินกว่าความต้องการของผู้บริโภคภายในประเทศ จึงทำให้ผลผลิตเกิดความเสียหายอย่างมาก ซึ่งพบเห็นได้ คือ การเน่าเสียของผลผลิตทางการเกษตรที่ออกมาเป็นจำนวนมากในแต่ละฤดูกาลซึ่งยังส่งผลกระทบต่อราคาของผลผลิตโดยทำให้ราคาของผลผลิตตกต่ำ จึงส่งผลเสียต่อการจำหน่ายของผลผลิตและรายได้ของเกษตรกร

การอบแห้งเป็นกระบวนการลดความชื้นโดยการถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุที่ขึ้นภายใต้สภาวะที่มีควบคุมเพื่อไล่ความชื้นออกจากวัสดุโดยการระเหยของความร้อนภายในวัสดุโดยการใช้ความร้อนที่ได้รับจากความร้อนแฝงของการระเหย โดยปกติแล้วผลผลิตทางการเกษตรส่วนใหญ่ นั้นจะมีความชื้นที่ค่อนข้างสูง ในขณะที่มีการเก็บเกี่ยวผลผลิตจึงทำให้ต้องมีการเก็บรักษาผลผลิตให้ยาวนานขึ้น การอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรจึงเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญต่อการรักษาคุณภาพของผลผลิต ลดความสูญเสีย ลดปริมาตร ลดน้ำหนัก และสามารถยืดระยะเวลาการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร การอบแห้งนั้นถือเป็นกระบวนการที่ไม่ซับซ้อนมาก แต่การวางแผนดำเนินการอบแห้ง (Drying strategy) ภายใต้สภาวะอากาศและมีเงื่อนไขที่กำหนดไว้ก็ถือเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึง เพื่อให้การอบแห้งมีความเร็วและคุ้มค่าการดำเนินการมากที่สุด นอกจากนี้ การพิจารณาของแหล่งพลังงานที่ใช้สำหรับการอบแห้งก็ถือเป็นสิ่งที่สำคัญเช่นกันซึ่งทางผู้วิจัยได้พิจารณานำเชื้อเพลิงชีวมวลซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้เป็นแหล่งพลังงาน เพื่อสนองตอบต่อความต้องการของชุมชนในการลดต้นทุนด้านพลังงาน ซึ่งปัจจุบันมีการใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิง อีกทั้งยังช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการเปลี่ยนชนิดเชื้อเพลิงจากเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นเชื้อเพลิงชีวมวล ทางผู้วิจัยได้เข้าไปสำรวจและศึกษาข้อมูลเครื่องอบแห้งของชุมชน (กลุ่มอบแห้งกล้วย) พบว่า การอบแห้งของชุมชนดังกล่าวใช้เชื้อเพลิง LPG ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่มีราคาสูง อีกทั้งยังมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นในอนาคตอันใกล้ อีกทั้งลักษณะของเครื่องอบแห้งมีการกระจายลมที่ไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้การอบแห้งต้องมีการพลิกกลับผลิตภัณฑ์ในระหว่างอบ ซึ่งต้องทำการเปิดตู้อบเพื่อดำเนินการดังกล่าว จึงเป็นเหตุให้กระบวนการอบแห้งมี

ความยุ่งยากและสิ้นเปลืองเวลาและเกิดการสูญเสียพลังงานในระหว่างเปิดตู้อบดังกล่าวด้วย
 ดังภาพประกอบที่ 1



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 1 การอบแห้งแบบใช้แก๊ส LPG (ก) และเครื่องอบแห้งแบบชาวบ้าน(ข)

กล้วยเป็นพืชเศรษฐกิจที่นิยมปลูกทุกภาคทั่วประเทศ ปลูกง่าย โตเร็ว และให้ผลผลิตตลอดทั้งปี โดยมีผลผลิตประมาณ 2 ล้านตันต่อปี (ภาวดี อาทกรกิจวัฒน์, 2556) ผลกล้วยสามารถรับประทานได้ทั้งดิบและสุก ซึ่งเป็นแหล่งของสารอาหารที่มีคุณประโยชน์ทางโภชนาการหลายชนิด เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน วิตามิน และแร่ธาตุ ประเทศไทยมีการผลิตและจำหน่ายกล้วยทั้งภายในและส่งออกไปยังต่างประเทศอย่างต่อเนื่อง บางฤดูการมีปริมาณผลผลิตกล้วยมากเกินไป ความต้องการต่อผู้บริโภคของผลสด ซึ่งกล้วยสุกจะมีอายุการเก็บรักษาสั้นเพียง 5-7 วัน หลังจากนั้นก็จะเกิดการเน่าเสีย เกษตรกรจึงจำเป็นต้องจำหน่ายในราคาต่ำก่อให้เกิดการสูญเสียรายได้ การนำกล้วยดิบมาแปรรูปเป็นแป้งกล้วยจึงเป็นอีกช่องทางหนึ่งในการเพิ่มมูลค่าของกล้วยและลดปริมาณกล้วยสุกในตลาด อย่างไรก็ตามการนำกล้วยดิบมาแปรรูปเป็นแป้งกล้วยจะต้องอาศัยกระบวนการที่สำคัญคือกระบวนการอบแห้ง

แหล่งความร้อนที่จะนำมาใช้ผลิตลมร้อนเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อต้นทุนการอบแห้ง ผลผลิตการเกษตร แก๊สหุงต้ม (LPG) เป็นแหล่งพลังงานที่นิยมใช้ในการผลิตลมร้อนเพื่ออบแห้ง แม้ว่าแก๊สหุงต้มจะมีราคาสูง แต่ผู้ผลิตเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนก็ยังออกแบบและจำหน่ายตู้อบแห้งที่ใช้เชื้อเพลิงดังกล่าว เนื่องจากปัจจัยเรื่องความสะดวกสบายในการใช้งาน ทำให้ต้นทุนการอบแห้งผลิตภัณฑ์ของชุมชนสูงกว่าผลิตภัณฑ์อบแห้งของผู้ประกอบการรายใหญ่ที่ใช้ตู้อบที่ทันสมัยและมีประสิทธิภาพด้านพลังงานสูงกว่า ดังนั้นการศึกษานำเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง

ที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลมาประยุกต์ใช้ในการผลิตลมร้อนด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อผลิตลมร้อนสำหรับกระบวนการอบแห้งจึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการลดต้นทุนค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิง

เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตและลดต้นทุนค่าใช้จ่าย ทางผู้วิจัยจึงทำการศึกษาปัจจัยการอบแห้งกล้วยน้ำว้าดิบด้วยลมร้อน โดยลมร้อนผลิตมาจากเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และใช้ตู้อบแห้งแบบถาดที่มี 4 ห้องอบ และมีระบบจ่ายลมร้อนแบบสลับทิศทางการไหลซึ่งจะทำให้ผลิตภัณฑ์ในห้องอบทุกๆ ห้องอบแห้งพร้อมกันโดยไม่ต้องสลับถาดบรรจุ และใช้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยลง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนที่ใช้เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง ชนิด 4 ห้องอบแบบมีวาล์วสลับทิศทางการไหลของลมร้อน

1.2.2 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งของผลิตภัณฑ์จากกล้วยเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนผลิตจากเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง

1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะและเศรษฐศาสตร์ของเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนแบบสลับทิศทางที่ผลิตจากเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงและเครื่องอบแห้งแบบดั้งเดิมที่ใช้แก๊ส LPG เป็นเชื้อเพลิง

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.3.1 ตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะประกอบด้วย อุณหภูมิอบแห้ง , ความเร็วลม , ระยะเวลาสลับทิศทางการไหลของลมร้อน

1.3.2 ใช้กะลามะพร้าวเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเตาชีวมวล

1.3.3 ใช้แก๊สหุงต้ม (LPG) เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเตาหัวเร่ง KB-8

1.3.4 วัตถุประสงค์สำหรับการทดสอบการอบแห้ง คือ กล้วยหั่นแว่น

1.3.5 ให้สามารถปรับเปลี่ยนทิศทางการไหลของความร้อนของเตาอบได้ง่ายและสะดวกในการทดลอง

1.4 ประโยชน์และผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถนำระบบผลิตลมร้อนด้วยเตาชีวมวลไปใช้ประโยชน์ในการอบแห้งผลิตผลทางการเกษตร

1.4.2 สามารถเพิ่มสมรรถนะของเครื่องอบแห้งด้วยระบบสลับทิศทางการไหลของลมร้อนมาประยุกต์ใช้ได้

1.4.3 สามารถลดต้นทุนด้านพลังงานสำหรับกระบวนการอบแห้งผลิตภัณฑ์ของเกษตรกรชุมชนและอุตสาหกรรม

1.4.4 เพื่อเพิ่มความสามารถในการแข่งขันของเกษตรกรจากมาตรการลดต้นทุนการผลิตและเพิ่มสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

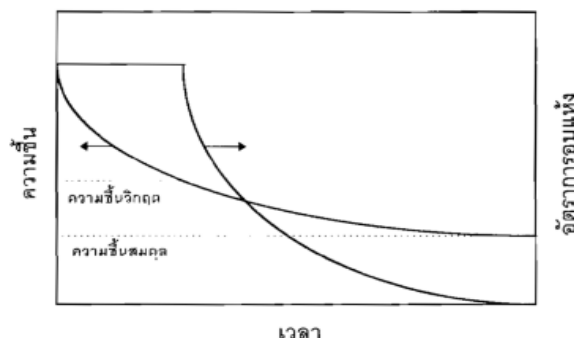
2.1 ทฤษฎีการอบแห้ง

2.1.1 การอบแห้ง

การอบแห้ง คือ กระบวนการลดความชื้นจะมีการถ่ายเทความร้อน โดยความร้อนทำให้น้ำระเหยออกจากวัสดุส่วนมากแล้วได้รับความร้อนมาจากความร้อนสัมผัสของอากาศและการถ่ายเทความร้อนจะมีทั้งการนำความร้อน การพาความร้อนและการแผ่รังสี โดยทั่วไปแล้วมักจะเป็นการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อนเป็นหลัก ซึ่งในการอบแห้งโดยทั่วไปมักใช้อากาศร้อนในการอบแห้ง เนื่องจากความร้อนจะถ่ายเทไปยังวัสดุ ซึ่งความร้อนส่วนใหญ่จะถูกนำไปใช้ในการระเหยของน้ำ โดยน้ำเป็นของเหลวที่อยู่ภายในวัสดุจะเคลื่อนที่ออกมายังผิววัสดุโดย Capillary Flow ซึ่งเป็นผลมาจากแรงตึงผิว Surface Force ส่วนไอน้ำในวัสดุจะเคลื่อนที่เนื่องจากความแตกต่างระหว่างของความเข้มข้นของความชื้น Vapor Diffusion และความดันไอ Partial Vapor of Pressure ที่ความแตกต่างระหว่างไอน้ำในวัสดุกับความชื้นถ้าผิววัสดุมีน้ำอยู่จำนวนมาก การลดลงของความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวก็จะคงที่จะส่งผลให้การอบแห้งคงที่ด้วยและเมื่อปริมาณน้ำที่ผิวของวัสดุลดลงมากอุณหภูมิและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวย่อมเปลี่ยนไป ดังกล่าวคือ อุณหภูมิของวัสดุเพิ่มขึ้นทำให้ความเข้มข้นของไอน้ำในวัสดุลดลงส่งผลให้อัตราการอบแห้งลดลงของความชื้นที่อยู่ระหว่างอัตราการอบแห้งคงที่และอัตราการอบแห้งลดลงเรียกว่าความชื้นวิกฤตและอัตราการอบแห้งจะลดลงตลอดระยะเวลาการอบแห้งจนกระทั่งความดันไอของของเหลวในวัสดุมีค่าไม่แตกต่างกับไอของอากาศในการอบแห้งความชื้นที่จุดสุดท้ายเรียกว่าความชื้นสมดุลเป็นจุดที่ไม่มีการถ่ายเทความชื้นอีกต่อไปจะมีอัตราการอบแห้งแบ่งได้เป็น 2 ช่วงคือ

2.1.1.1 ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ การถ่ายเทความร้อนและมวลจะเกิดขึ้นที่ผิวนอกวัสดุเท่านั้นน้ำจะเกาะติดอยู่ที่ผิววัสดุเป็นจำนวนมากเมื่อผ่านความเร็วลมที่ไหลผ่านวัสดุ จะให้ฟิล์มอากาศที่มีความหนาลดลงเป็นผลให้ความต้านทานต่อการไหลของความร้อนและมวลลดลงด้วยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของอากาศอบแห้งทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิววัสดุและของกระแสอากาศที่ไหลอย่างอิสระมีมากขึ้น

2. 1.1.2 ช่วงอัตราการอบแห้งลดลงการถ่ายเทความร้อนและมวลจะไม่เกิดอยู่ที่ผิวของวัสดุเท่านั้นแต่จะเกิดขึ้นภายในผิวและภายในเนื้อวัสดุด้วยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้งจะทำให้ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิมีมากขึ้น นอกจากนี้ยังมีผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ดังรูปที่ 2



ภาพประกอบ 2 แสดงความสัมพันธ์อัตราส่วนความชื้นและอุณหภูมิของวัสดุอบแห้ง[14]

2.1.2 จลนศาสตร์การอบแห้ง (Drying kinetics)

การอบแห้งส่วนใหญ่ใช้การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุที่ขึ้นเพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหย ความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการระเหย ปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการอบแห้ง ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ อัตราการไหลของอากาศ และประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง โดยพฤติกรรมการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนเป็นตัวนำพาความชื้นออกจากวัสดุดิบ เพื่อให้อุณหภูมิ ความชื้นและความเร็วของลมร้อนอยู่ในห้องอบแห้งจะทำให้เกิดการหมุนวนของความร้อนคงที่ทั้งกระบวนการและการถ่ายเทความร้อนของวัสดุดิบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของความชื้นในวัสดุดิบภายในห้องอบแห้ง โดยแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบคือ

ช่วงระยะ A-B เป็นช่วงระยะการเกิดสภาวะผิววัสดุดิบความชื้นสมดุลกับลมร้อนที่เกิดขึ้นเมื่อทำการอบแห้ง เมื่อลมร้อนไหลผ่านผิววัสดุดิบจะทำให้เกิดถ่ายเทความชื้นจากวัสดุดิบ ซึ่งความร้อนที่ให้กับวัสดุดิบจะอยู่ในรูปของความร้อนสัมผัสจะทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิกระเปาะเป็ยก ซึ่งมีความสมดุลความร้อนกับผิววัสดุดิบ

ช่วงระยะ B-C เป็นช่วงระยะอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant Rate Period of Drying) ช่วงระยะนี้ผิววัสดุดิบจะมีความชื้นของน้ำซึ่งจะถูกนำพาด้วยลมร้อนออกมาผิววัสดุดิบด้วยระเหยของการอบแห้งด้วยลมร้อนจะขึ้นอยู่กับการถ่ายเทความร้อน อัตราการถ่ายเทความร้อนของวัสดุดิบจะมีความสมดุลกับการถ่ายเทความร้อน จึงทำให้อุณหภูมิของผิววัสดุดิบของการอบแห้งคงที่กับอุณหภูมิกระเปาะเป็ยกของลมร้อนในการอบแห้ง

ช่วงระยะ C-D เป็นระยะอัตราการอบแห้งที่ความชื้นลดลง (Falling Rate Period) เนื่องจากปริมาณความชื้นในวัสดุดิบระเหยออกจากวัสดุดิบทำให้ความลดลง ดูจากกราฟ ที่จุด C จะมีอัตราการอบแห้งเริ่มจะลดลงของความชื้นของวัสดุดิบ จึงเรียกจุดนี้ว่า ความชื้นวิกฤต

(Critical Moisture Content) เมื่อการอบแห้งของวัตถุดิบไปเรื่อยๆ จะทำให้อุณหภูมิของวัตถุดิบจะเพิ่มมากขึ้น เพราะความชื้นลดลง ทำให้ช่วงระยะการอบแห้ง C-E ของวัตถุดิบจะแห้งและอัตราการอบแห้งจะลดลง และช่วงระยะ E-D การอบแห้งจะทำให้ความชื้นลดลงจนไม่มีความชื้นในวัตถุดิบ

อัตราการอบแห้งของวัตถุดิบที่ใช้ลมร้อนในการถ่ายเทความชื้นจะเกิดขึ้นเร็วหรือเกิดขึ้นช้าขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่สำคัญในการอบแห้ง คือ

2.1.2.1 รูปลักษณะของวัตถุดิบ ที่มีความสำคัญส่งผลต่อการอบแห้งที่จะส่งผลกระทบต่อการลดลงของความชื้นในวัตถุดิบ

2.1.2.2 ขนาดของวัตถุดิบ ที่ทำให้อัตราส่วนของขนาดส่งผลต่อเวลาในการอบแห้ง และปริมาตร ที่จะทำให้ความชื้นลดลงได้รวดเร็ว

2.1.2.3 ปริมาณและการจัดเรียงของวัตถุดิบ การจัดนำวัตถุดิบมาเรียงชั้นๆ ในถาด จะทำให้ปริมาณของวัตถุดิบต่อถาด จะต้องมียะห่างของวัตถุดิบ จะทำให้ความร้อนไหลผ่านวัตถุดิบสม่ำเสมอ

2.1.2.4 อุณหภูมิของความชื้น เมื่ออุณหภูมิของลมร้อนที่สูงขึ้นจะทำให้การอบแห้งได้เร็วขึ้นจึงทำให้การถ่ายเทความชื้นในวัตถุดิบเร็วขึ้น แต่นอกจากนี้ต้องคำนึงถึงความสมดุลระหว่างเวลากับอุณหภูมิความร้อนในการอบแห้ง

2.1.2.5 ความเร็วของลมร้อน เมื่อความเร็วของลมร้อนมีค่ามากจะทำให้เกิดการระเหยของความชื้นในวัตถุดิบได้เร็วขึ้นทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น

อัตราการอบแห้ง (Drying Rate) เป็นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งที่สามารถบอกถึงประสิทธิภาพของการอบแห้งของวัตถุดิบ ซึ่งใช้ระยะเวลาในการอบแห้งเป็นการแสดงค่าความชื้นที่ระเหยออกจากวัตถุดิบต่อหน่วยเวลา ซึ่งสามารถเทียบหน่วยกิโลกรัมต่อชั่วโมงโดยปกติ ในการอบแห้งของวัตถุดิบ จะมีอัตราอบแห้ง 2 แบบคือ

1 . Constant Rate Drying คือ การอบแห้งในช่วงที่มีอัตราการอบแห้งของการระเหยความชื้นที่เป็นการอบแห้งของวัตถุดิบที่มีความชื้นของผิววัตถุดิบให้ทันต่อเวลากับลมร้อนที่เข้ามาจากเครื่องแลกเปลี่ยน ส่วนใหญ่จะเป็นความชื้นผิวหรือความชื้นอิสระ

2 . Falling Rate Drying คือ การอบแห้งในช่วงปริมาณน้ำที่ผิววัตถุดิบแห้งลดลง ที่ความชื้นระเหยช้ากว่าอัตราการระเหยต่อหน่วยพื้นที่และเวลาการอบแห้ง ในช่วงที่อุณหภูมิสูงขึ้น ความชื้นของวัตถุดิบจะลดลงจะเหลืออยู่บางประเภทอาจจะมี Falling Rate Drying ของการอบแห้ง ทั้งนี้การอบแห้งของวัตถุดิบจะสิ้นสุดเมื่อความชื้นของวัตถุดิบลดลงถึงจุดสมดุล

2.2 การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้ง

2.2.1 อัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio: MR) หมายถึง ปริมาณของน้ำที่หลงเหลืออยู่ในวัสดุระหว่างการอบแห้งเทียบกับปริมาณน้ำทั้งหมดที่มีอยู่ในวัสดุที่สามารถระเหยได้ภายใต้สภาวะการอบแห้งหนึ่งนั้นๆ

$$MR = \frac{(M_t - M_e)}{(M_i - M_e)} \quad (2-1)$$

- เมื่อ MR = Moisture ratio
 M_t = ค่าความชื้นของวัสดุในห้อบแห้ง ณ เวลาใดๆ (% dry basis)
 M_i = ค่าความชื้นเริ่มต้นของวัสดุก่อนเริ่มอบแห้ง (% dry basis)
 M_e = ความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content; % dry basis)

2.2.2 การหาอัตราการอบแห้ง (Drying Rate: DR) คือ ความสามารถในการไล่ความชื้นออกจากวัสดุในช่วงเวลาการอบแห้ง

$$DR = \frac{(M_{in} - M_f)W_d}{t} \quad (2-2)$$

- เมื่อ MR = Moisture ratio
 M_{in} = ค่าความชื้นเริ่มต้นของวัสดุก่อนเริ่มอบแห้ง (% dry basis)
 M_f = ค่าความชื้นสุดท้ายของวัสดุ (% dry basis)
 W_d = น้ำหนักวัสดุแห้ง (kg)
 t = ระยะเวลาในการอบแห้ง (min)

2.2.3 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption: SEC) มีหน่วยเป็น MJ/kg ของน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุ

$$SEC = \frac{m_f \times LHV_f}{(M_{in} - M_f)W_d} \quad (2-3)$$

เมื่อ	m_f	= น้ำหนักของเชื้อเพลิงที่ใช้ (kg as receive)
	LHV_f	= ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ใช้ (MJ/kg as receive)
	M_{in}	= ค่าความชื้นเริ่มต้นของวัสดุก่อนเริ่มอบแห้ง (% dry basis)
	M_f	= ค่าความชื้นสุดท้ายของวัสดุ (% dry basis)
	W_d	= น้ำหนักวัสดุแห้ง (kg)
	t	= ระยะเวลาในการอบแห้ง (min)

2.2.4 ความชื้นในวัสดุ

ปริมาณความชื้นเป็นตัวบอกปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเมื่อเทียบกับมวลของวัสดุขึ้นหรือแห้ง ความชื้นในวัสดุสามารถแสดงได้เป็น 2 แบบ คือ

1. คำนวณหาค่าร้อยละของความชื้นมาตรฐานเปียก ค่าร้อยละของความชื้นมาตรฐานเปียก (M_w)สามารถหาได้จากสมการ

$$M_w = \frac{(M_{STI} - M_T) - (M_{STF} - M_T)}{(M_{STI} - M_T)} \times 100 \quad (2-4)$$

เมื่อ	M_w	คือ ความชื้นของกล้วยแห้งหลังมาตรฐานเปียก (% w.b)
	M_{STI}	คือ น้ำหนักวัสดุตัวอย่างพร้อมกล่องกระดาษก่อนอบแห้ง (g)
	M_{STF}	คือ น้ำหนักวัสดุตัวอย่างพร้อมกล่องกระดาษหลังอบแห้ง (g)
	M_T	คือ น้ำหนักกล่องกระดาษเปล่า (g)

2. คำนวณหาค่าร้อยละของความชื้นมาตรฐานแห้ง ค่าร้อยละของความชื้นมาตรฐานแห้ง (M_d)สามารถหาได้จากสมการ

$$M_d = \frac{(M_{STI} - M_T) - (M_{STF} - M_T)}{(M_{STF} - M_T)} \times 100 \quad (2-5)$$

2.2.5 การหาปริมาณความชื้น

การหาปริมาณความชื้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ วิธีทางตรง(Direct Method) และวิธีทางอ้อม(Indirect Method) วิธีทางตรงจะเป็นการนำความชื้นจากการอบแห้งระเหยจากวัตถุดิบและวัดค่าปริมาณความชื้นนั้น ในการหาค่าความชื้นคือ Oven method , Brown Duvel method , Infra-lamp method ส่วนวิธีทางอ้อมเป็นการใช้คุณสมบัติของวัตถุดิบที่สามารถสร้าง

ความสัมพันธ์กับความชื้นของวัตถุบ อยางเช่น ความต้านทานไฟฟ้าหรือคุณสมบัติทางไดอิเล็กตริก (Dielectric) วิธีนี้เป็นวิธีที่รวดเร็วแต่ค่าที่ได้มาจะไม่ถูกต้องเนื่องมาจากคุณสมบัติขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ดังนั้นการวัดค่าความชื้นของวัตถุบจะต้องมีการตรวจสอบกับค่าวิธีพื้นฐาน อยางเช่น การหาค่าความชื้นโดยอ้อม คือ Resistance method , Capacitance method , Relative Humidity method , Chemical method

2.2.6 ความชื้นสมดุล

ความชื้นสมดุลของวัสดุมีความสำคัญต่อการศึกษาระบวนการอบแห้ง เพราะ เมื่อทำการอบแห้งวัสดุโดยใช้อากาศที่สภาวะคงที่ (เช่น อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์คงที่) ความชื้นของวัสดุจะลดต่ำลงจนถึงจุดๆหนึ่งซึ่งไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะนั้นความชื้นในวัสดุมีความดันไอเท่ากับความดันไอของอากาศที่อยู่รอบๆ และอุณหภูมิของวัสดุก็เท่ากับอุณหภูมิของอากาศรอบๆ ด้วย เราเรียกความชื้นในขณะนั้นว่า ความชื้นสมดุล ค่าความชื้นสมดุลขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

2.2.7 วิธีการหาความชื้นสมดุล

การหาความชื้นสมดุลของวัสดุมีอยู่หลายวิธี ข้อมูลที่มีอยู่แล้วส่วนใหญ่ได้มาจากการทำให้เกิดความสมดุล ระหว่างความดันไอและอุณหภูมิของวัสดุและของอากาศแวดล้อม โดยการปล่อยให้วัสดุนั้นสัมผัสกับอากาศแวดล้อมที่สภาวะคงที่เป็นระยะเวลาานพอ ถ้าอากาศไม่มีการเคลื่อนไหว เราเรียกวิธีเชิงสถิต ถ้ามีการไหลของอากาศแวดล้อม เราเรียกวิธีเชิงจลน์ วิธีหลังมีข้อดีคือวัสดุและอากาศแวดล้อมจะเข้าสู่สมดุลได้เร็วกว่าวิธีแรก ทำให้เหมาะกับวัสดุที่มีความชื้นสูง ซึ่งถ้าปล่อยให้เวลานานเกินไปวัสดุนั้นอาจเกิดความเสียหายโดยเชื้อรา ทำให้ค่าที่วัดได้ผิดพลาดไป

2.2.8 ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ

ความร้อนแฝงของการระเหยหมายถึง ความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะของสารจากของเหลวให้เป็นไอที่อุณหภูมิและความดันคงที่ ความร้อนแฝงของการระเหยของน้ำในวัสดุอาหารจะมีค่าสูงกว่าน้ำที่อยู่อย่างอิสระโดยเฉพาะเมื่อวัสดุนั้นมีความชื้นต่ำ ดังนั้นปริมาณความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำในวัสดุ

$$Q = M_w h_{fg} \quad (2-6)$$

โดยที่ M_w = มวลของน้ำในวัสดุ

h_{fg} = ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำในวัสดุ

2.2.9 ความร้อนสัมผัส

คือ ปริมาณความร้อนจำนวนหนึ่งที่ทำให้วัสดุหนึ่งๆมีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง โดยไม่ทำให้สถานะของวัสดุนั้นเปลี่ยนแปลง โดยมีสมการดังนี้

$$Q = mc_p \Delta T \quad (2-7)$$

M = มวลของวัสดุ

C_p = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุ

ΔT = อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป

2.2.10 คุณสมบัติเชิงความร้อน

ความร้อนจำเพาะหมายถึง ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำให้วัสดุหนึ่งหน่วยมวลมีอุณหภูมิสูงขึ้นหนึ่งองศาที่ความดันหรือปริมาตรคงที่

2.2.10.1 ขนาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

$$Q = \frac{\text{น้ำหนักเชื้อเพลิงที่ใช้}}{\text{จำนวนเวลาที่ใช้เชื้อเพลิง}} \times \text{ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง} \quad (2-8)$$

2.2.10.2 ความต้านทานในท่อตรง ในขณะที่อากาศไหลในท่อตรง ความดันที่สูญเสียส่วนใหญ่มาจากความเสียดทานซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการของ Darcy – Weisbach

$$\Delta P = f_D \left(\frac{L}{D} \right) P_V \quad (2-9)$$

เมื่อ ΔP = ความดันรวมที่สูญเสีย , P

P_V = ความดันความเร็ว , Pa

f_D = แฟคเตอร์ความเสียดทาน

L = ความยาวท่อ , m

D = เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ , m

ในกรณีการไหลเป็นแบบราบเรียบ (ตัวเลขเรย์โนลด์ , Re มีค่าน้อยกว่า 2,000) จะสามารถคำนวณค่าแฟคเตอร์ความเสียดทานได้จาก

$$f_D = 64 / \text{Re} \quad (2-10)$$

ในกรณีการไหลแบบปั่นป่วน อาจใช้สมการของ Colebrook คำนวณหาแฟคเตอร์ความเสียดทาน สมการดังกล่าวเขียนได้ว่า

$$\frac{1}{f_D^{1/2}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{(\text{Re}) f_D^{1/2}} \right) \quad (2-11)$$

เมื่อ ε คือ แฟคเตอร์ความขรุขระของผิวท่อ , mm

เนื่องจากความยุ่งยากในการใช้สมการของ Colebrook ทำให้มีการสร้างแผนภาพ เพื่อหาค่าแฟคเตอร์ความเสียดทาน ซึ่งเราเรียกแผนภาพนี้ว่า Moody Diagram

ถ้าใช้ท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าสามารถใช้เส้นผ่าศูนย์กลางเทียบเท่าท่อกลมซึ่งคำนวณจากสมการ

$$d = 1.265 \left[\frac{(ab)^3}{a+b} \right]^{1/5} \quad (2-12)$$

เมื่อ d = เส้นผ่าศูนย์กลางเทียบเท่า , m

a และ b = ด้านทั้งสองของสี่เหลี่ยมผืนผ้า , m

ความดันความเร็วสามารถคำนวณได้โดยสมการ

$$P_V = \left(\frac{V}{1.29} \right)^2 \quad (2-13)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } P_V &= \text{ความดันความเร็ว, Pa} \\ V &= \text{ความเร็ว, m/s} \end{aligned}$$

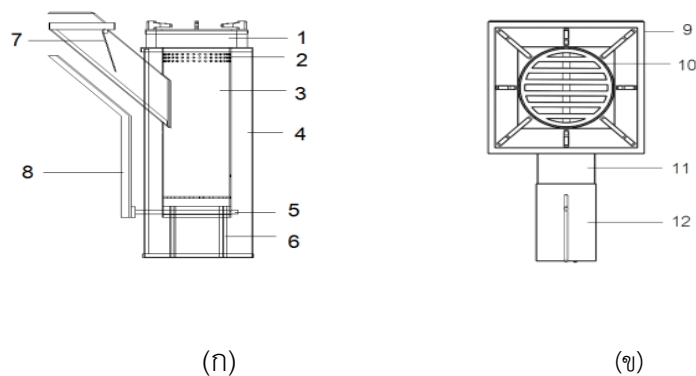
2.3 การผลิตลมร้อนสำหรับเครื่องอบแห้ง

2.3.1 เตาชีวมวล

การผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากเตาชีวมวล คือ การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลด้วยการจำกัดปริมาณอากาศในระหว่างการทำปฏิกิริยา ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ได้ผลผลิตเป็นแก๊สที่สามารถจุดติดไฟได้ มีขั้นตอนดังนี้ นำชีวมวลใส่เข้าไปในเตาและให้ความร้อน ความชื้นในชีวมวลถูกไล่ออก (Drying) ด้วยอุณหภูมิที่อยู่ในช่วง 100-135°C จากนั้นสารระเหยในชีวมวล เช่น น้ำมันดิน ไฮโดรคาร์บอน น้ำมันควันไม้ สารระเหยอื่นๆ ถูกไล่ออกจากชีวมวล (Devolatilization) ภายใต้อุณหภูมิ 450-600°C เมื่อเข้าสู่ขั้นตอนการเผาไหม้ ถ่านบางส่วน (Fixed Carbon) เกิดการสันดาปจนได้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนการปลดปล่อยพลังงานความร้อน และ CO₂ ในกระบวนการสุดท้ายถ่าน (C) จะทำปฏิกิริยากับ CO₂ และไอน้ำ (H₂O) ได้ก๊าซไฮโดรเจน (H₂) และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ปฏิกิริยาทั้งหมดนี้เป็นปฏิกิริยาในขั้นตอนรีดักชัน (Reduction) ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่า 600°C เตาชีวมวลในปัจจุบันมี 2 ระบบ คือ ระบบแก๊สไหลขึ้น (Updraft Biomass Gas Stove) และระบบแก๊สไหลลง (Downdraft Biomass Gas Stove) เตาชีวมวลระบบแก๊สไหลขึ้น สามารถใช้กับชีวมวลที่มีความชื้นสูง ได้ปริมาณเถ้าชีวมวลหลังเกิดปฏิกิริยาสูง แต่เนื่องจากก๊าซชีวมวลที่ได้ค่อนข้างสกปรก จึงเหมาะสำหรับการนำไปใช้ผลิตความร้อนในหม้อน้ำเพื่อใช้ทดแทนน้ำมันเตาหรือแก๊ส LPG [5] ส่วนเตาชีวมวลระบบแก๊สไหลลง ต้องใช้กับชีวมวลที่มีความชื้นต่ำ ปริมาณเถ้าชีวมวลหลังการเกิดปฏิกิริยาค่า ก๊าซชีวมวลที่ได้ค่อนข้างสะอาด มีปริมาณน้ำมันดินต่ำ เหมาะสำหรับนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์สันดาปภายใน [5] เนื่องจากวัสดุที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงนั้นไม่สามารถควบคุมความชื้นได้ เพราะเป็นการใช้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร นอกจากนั้นผู้ใช้เตาความร้อนไม่ต้องการใช้แหล่งพลังงานจากภายนอก เช่น พัดลม ดังนั้น เตาชีวมวลระบบแก๊สไหลขึ้นจึงเหมาะที่นำมาใช้ในการอบแห้ง

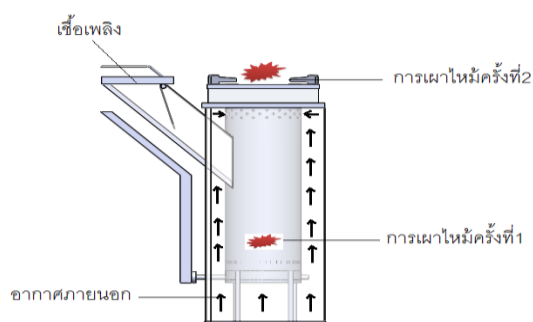
เตาชีวมวลระบบนี้ โดยทั่วไปมีลักษณะเป็นเตาผนัง 2 ชั้น คือ ส่วนของการเผาไหม้และช่องสำหรับให้อากาศไหลผ่านออกสู่ด้านบนของเตา นอกจากนั้นยังมีช่องระบายไ้ไ้้ออกและช่องด้านบนสำหรับใส่ชีวมวลอีกด้วย [6-7] แก๊สชีวมวลที่ได้จะลอยขึ้นสู่ด้านบน และเกิดการสันดาปด้านบนของเตา โดยอาศัยอากาศร้อน (อากาศส่วนที่เกิดจากการแลกเปลี่ยนความร้อน

จากห้องเผาไหม้) ที่ไหลจากด้านล่างของเตาเข้าสู่ช่องอุ่นอากาศ และไหลออกทางช่องด้านบนของเตา เมื่ออากาศที่ไหลออกจากด้านบนของช่องอุ่นอากาศมีอุณหภูมิสูงขึ้น การติดไฟของก๊าซชีวมวลในห้องสันดาปก็จะดีขึ้นด้วย [7-9] แต่ US Patent 6,336,449 [10] พบว่า การไหลของอากาศเข้าสู่ห้องปฏิกิริยาและช่องอุ่นอากาศไม่สามารถควบคุมได้ จึงเป็นเหตุให้นักวิจัยศึกษาการควบคุมอัตราการไหลของอากาศโดยการติดตั้งพัดลมเพื่อช่วยให้อากาศไหลเข้าสู่เตาชีวมวลได้อย่างสม่ำเสมอ เช่น สิทธิบัตรเลขที่ประกาศ 104672 [11] ได้ติดตั้งพัดลม เพื่อเป่าลมเข้าสู่กล่องเป่าซึ่งมีลิ้นสำหรับปรับปริมาณลม ลมที่เป่าจะพาแก๊สที่ได้จากการกลั่นเชื้อเพลิงแข็งภายในเตาขึ้นสู่หัวเตา อนุสิทธิบัตรเลขที่ 7017 ได้มีการติดตั้งพัดลม เพื่อเป่าอากาศไปยังห้องเผาไหม้ ผ่านท่อนำอากาศอย่างน้อย 2 ทาง ซึ่งแต่ละท่อจะทอดออกไปในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสสัมผัสกับหน้าตัดของห้องเผาไหม้ทำให้อนุภาคนขนาดเล็กที่อยู่ในห้องเผาไหม้มีการกระจายตัวสม่ำเสมอทำให้เกิดการเผาไหม้ได้ดี US Patent 6,619,215 เป็นอีกหนึ่งสิทธิบัตรที่ประดิษฐ์เตาชีวมวลโดยการติดตั้งพัดลมสำหรับส่งอากาศไปยังห้องเผาไหม้ ดังนั้นเพื่อลดความยุ่งยากที่เกิดจากการใช้พัดลมเป่าอากาศ สำหรับควบคุมลมในห้องเผาไหม้ของเตาชีวมวล คณะผู้วิจัยจึงได้จัดทำเตาชีวมวลดังแสดงในรูปที่ 1 โดยมีองค์ประกอบที่คล้ายกับเตาชีวมวลของศูนย์วิจัยพลังงาน มหาวิทยาลัยแม่โจ้, [7] ระบบเผาแก๊สที่สามารถเผาไหม้ได้ และเตาเผา [6] เตาเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลไร้มลภาวะระบบอุณหภูมิร้อน [9] และเตาถ่านเตาฟืนปรับความร้อนได้ [14] กล่าวคือ เป็นเตามีผนัง 2 ชั้น (ห้องปฏิกิริยาและช่องอุ่นอากาศ) มีห้องเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิง ช่องขึ้นแก๊สออก และช่องด้านบนสำหรับใส่ชีวมวล แต่แตกต่างจากเตาชีวมวลโดยทั่วไปคือ มีการเพิ่มวาล์วควบคุมการบ้อนอากาศส่วนที่ 1 เพื่อสามารถควบคุมปฏิกิริยาการสันดาปให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยไม่อาศัยพัดลมเป่าอากาศ โดยวาล์วนี้เป็นวาล์วที่ควบคุมการบ้อนอากาศส่วนที่ 1 เข้าสู่ห้องห้องปฏิกิริยา โดยสามารถหมุนปิดเปิดได้ในแนวแกนสามารถเร่งหรือความร้อนได้ในช่วง 3 - 4 kW และมีช่องที่ใช้สำหรับเติมเชื้อเพลิงบริเวณด้านหน้าเตา (ภาพประกอบที่ 3) สามารถเติมเชื้อเพลิงได้ง่ายและสามารถดูปริมาณเชื้อเพลิงคงเหลือในเตาได้ด้วย

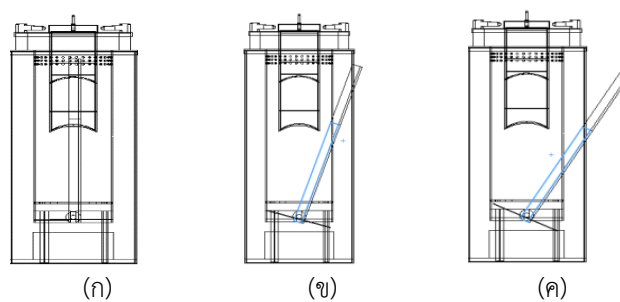


ภาพประกอบ 3 องค์ประกอบภายนอก(ก) และภายในของเตาชีวมวล(ข)[13]

- | | | |
|------------------------------|-----------------------------|---------------------|
| 1 .ฐานรองรับภาชนะ | 2 .ช่องเติมเชื้อเพลิง | 3 .ท่อสแตนเลส |
| 4 .ฉนวนเซรามิก | 5 . วาล์วปีกผีเสื้อ | 6 . ขาตั้ง |
| 7 . ที่กั้นช่องใส่เชื้อเพลิง | 8 . คันบังคับวาล์ว | 9 . ตะแกรงรองชีวมวล |
| 11 . ช่องใส่เชื้อเพลิง | 12 . ฝาปิดช่องใส่เชื้อเพลิง | |



ภาพประกอบ 4 กระบวนการทำงานของเตาชีวมวล[13]



ภาพประกอบ 5 การเปิด-ปิดช่องรับอากาศส่วนที่ 1(ก)ปิดสุด(ข)เปิดเล็กน้อย(ค)เปิดสุด[13]

2.3.2 การออกแบบเตาชีวมวล

โดยกระบวนการผลิตโปรตีนเชอร์แก๊ส เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี โดยเปลี่ยนเชื้อเพลิงชีวมวลให้กลายเป็นโปรตีนเชอร์แก๊ส ซึ่งปฏิกิริยาทางความร้อนแบบต่อเนื่อง ใน กระบวนการจะเริ่มต้นจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกับออกซิเจน ผลผลิตจากการเผาไหม้จะถูก บังคับ ให้ไหลผ่านชั้นของคาร์บอนร้อน และเกิดการรีดิวิชั่น กลายเป็นโปรตีนเชอร์แก๊ส โดย N.L. Panwar and N.S. Rathore [3] หาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ ห้องเผาไหม้ทรงกลมและความสูงของห้องเผาไหม้ได้ดังนี้

หาความสูงของห้องเผาไหม้ทรงกลมดังนี้

$$D = \left[\frac{1.27FCR}{SGR} \right]^{0.5} \quad (2-14)$$

หาความสูงของห้องเผาไหม้ทรงกลมดังนี้

$$H = \frac{SGR \times T}{\rho_{wood}} \quad (2-15)$$

2.3.3 การทดสอบประสิทธิภาพของเตาเชื้อเพลิง

เตาชีวมวลเตาแก๊สหุงต้มชนิดหัวเร่งประสิทธิภาพต่ำและประสิทธิภาพสูงได้รับการศึกษาประสิทธิภาพของเตาโดยการระเหยน้ำ [3-4,19] การทำงานของเตาชีวมวลเริ่มจากใส่ไม้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5-7.6 cm ลงไปทางด้านบนของห้องเผาไหม้แก๊สชีวมวลจำนวน 5 kg หมุนคันบังคับวาล์วไปตามแนวแกนเพื่อเปิดวาล์วปีกผีเสื้อให้สุดและหมุนคันบังคับวาล์วไปตามแนวเส้นรอบวงของเตาเพื่อเปิดวาล์ววงแหวนให้สุด แล้วจุดไฟด้านบนของห้องเผาไหม้แก๊สชีวมวลเมื่อไฟติด หรือวาล์วปีกผีเสื้อ เพื่อควบคุมการเกิดปฏิกิริยาในห้องปฏิกิริยา และหรือวาล์ววงแหวนเพื่อควบคุมการไหลของอากาศเข้าสู่ช่องอุ่นอากาศ และไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้แก๊สชีวมวล นำกระทะขนาด 66 cm ใส่ น้ำ 15 kg วางบนเตาชีวมวล เมื่อระเหยน้ำผ่านไป 1 ชั่วโมง จึงเริ่มเติมไม้เชื้อเพลิงลงไปในเตาผ่านทางช่องเชื้อเพลิง ทุกๆ 10 นาที จนกว่าไม้เชื้อเพลิงที่เหลืออีก 5 kg หหมด ระหว่างระเหยน้ำนั้นจะบันทึกอุณหภูมิของน้ำที่ต้มทุก 5 นาที เป็นเวลา 100 นาที เมื่อครบกำหนดเวลานำน้ำที่เหลือไปชั่งน้ำหนักและบันทึกผล ส่วนการทดสอบประสิทธิภาพเตาแก๊สหุงต้มชนิดหัวเร่ง

ประสิทธิภาพต่ำ และประสิทธิภาพสูง จะทำการทดลองเช่นเดียวกันกับการทดสอบประสิทธิภาพของเตาชีวมวล เพียงเปลี่ยนชนิดเชื้อเพลิงจากไม้เป็นแก๊สหุงต้ม ดังแสดงในรูปที่ 2.4

เมื่อทดสอบประสิทธิภาพของเตาความร้อนเสร็จเรียบร้อยแล้ว ข้อมูลปริมาณการใช้เชื้อเพลิง ปริมาณน้ำเริ่มต้นและปริมาณการระเหยน้ำ ถูกนำมาใช้คำนวณเพื่อหาพลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำ อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ต้นทุนเชื้อเพลิง ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานจำเพาะ และประสิทธิภาพเตา พลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำ เป็นผลคูณของปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้กับค่าความร้อนทางต่ำของเชื้อเพลิง (Lower heating value: LHV) จากนั้นนำพลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำและปริมาณการระเหยของน้ำมาใช้ในการคำนวณอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption: SEC) ดังแสดงในสมการที่ (2-16)

$$SEC(MJ/kg) = \frac{\text{พลังงานที่ใช้ในการระเหย}(MJ)}{\text{ปริมาณการระเหยของน้ำ}(kg)} \quad (2-16)$$

การคำนวณค่าใช้จ่ายด้านพลังงานจำเพาะ (Specific Cost Consumption: SCC) ดังแสดงในสมการที่ (2-17) ค่าที่นำมาใช้ในการคำนวณนั้นได้มาจาก ต้นทุนพลังงานเชื้อเพลิง (ผลคูณของจำนวนเชื้อเพลิงที่ใช้กับราคาเชื้อเพลิงต่อกิโลกรัม) และ ปริมาณการระเหยของน้ำ

$$SCC(\text{บาท}/kg) = \frac{\text{ต้นทุนเชื้อเพลิง}(\text{บาท})}{\text{ปริมาณการระเหยของน้ำ}(kg)} \quad (2-17)$$

การคำนวณประสิทธิภาพเตา(% η เตา) ดังแสดงในสมการที่ (2-18) ได้จากการนำค่าผลบวกของพลังงานในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำจากอุณหภูมิเริ่มต้นไปยังจุดเดือดและพลังงานในการเปลี่ยนสถานะของน้ำหารด้วยพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงตลอดช่วงการทดลอง

$$\% \eta_{\text{เตา}} = \frac{[m_1 \times C_p \times T][h_{fg} \times (m_1 - m_2)]}{m_{\text{เชื้อเพลิง}} \times LHV_{\text{เชื้อเพลิง}}} \times 100 \quad (2-18)$$

2.4 เชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับเตาชีวมวล

2.4.1 ชีวมวล (Biomass)

สารอินทรีย์โดยทั่วไปที่เป็นแหล่งกักเก็บของพลังงานจากธรรมชาติ และยังสามารถแปลงเป็นรูปพลังงานของวัสดุได้จากต้นไม้และพืชต่างๆ ที่เก็บสะสมเอาไว้มาใช้ประโยชน์ได้ ตัวอย่างของสารอินทรีย์เหล่านั้น เช่น แกลบ ชานอ้อย กะลามะพร้าว ปาล์ม ฟางข้าว กากมันสาปะหลัง ชังข้าวโพด เนื่องจากในประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมจึงมีชีวมวลมาก การที่เรานำชีวมวลมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า พลังงานความร้อน หรือไอน้ำจึงเป็นการเปลี่ยนของเสียให้กลายเป็นพลังงาน พลังงานชีวมวลที่สามารถนำมาผลิตพลังงานทดแทนในประเทศไทยมีประมาณ 7,000 เมกะวัตต์ ทั้งนี้ปริมาณชีวมวลจะมีผันแปรและขึ้นอยู่กับการผลิตทางการเกษตรของประเทศที่เกิดขึ้น ชีวมวลจัดว่าเป็นแหล่งเชื้อเพลิงที่มีราคาถูก ถ้ามีการนำมาใช้ประโยชน์ไม่ไกลจากแหล่งเชื้อเพลิงมากนัก ก็จะเป็นการลดต้นทุนจากการขนส่งชีวมวล และยังสามารถเปลี่ยนรูปพลังงานได้อีกหลายอย่าง เช่น ในขั้นตอนการสังเคราะห์แสงหรือเจริญเติบโตพืชใช้คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และแสงอาทิตย์และยังเปลี่ยนเป็นแป้งและน้ำตาลแล้วกักเก็บไว้ตามส่วนต่าง ๆ ของพืช ดังนั้นเมื่อนำพืชมาเป็นเชื้อเพลิงเราก็จะได้พลังงานออกมา ในการนำชีวมวลมาใช้ในการผลิตพลังงานเมื่อใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสมจะไม่ก่อให้เกิดมลภาวะอากาศหรือภาวะเรือนกระจก เนื่องจากมีการปลูกพืชทดแทนจึงทำให้เกิดการหมุนเวียนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไม่มีการปลดปล่อยก๊าซเพิ่มขึ้น ประโยชน์ของชีวมวลนอกจากจะช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมแล้วยังจะช่วยลดปัญหาผลผลิตทางการเกษตรและเศษเหลือใช้ โดยจะใช้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดใดชนิดหนึ่งทีกล่าวมาข้างต้นหรือหลายชนิดรวมกันก็ได้ชีวมวลจึงเป็นแหล่งเชื้อเพลิงราคาถูกหากมีการใช้ประโยชน์ในบริเวณที่ไม่ไกลจากแหล่งเชื้อเพลิงมากนักก็จะช่วยลดต้นทุนในการขนส่งชีวมวลที่มีอยู่ทั่วไปในประเทศไทยการนำชีวมวลมาใช้จึงช่วยลดการสูญเสียเงินตราต่างประเทศในการนำเข้าเชื้อเพลิงและสร้างรายได้ให้กับคนท้องถิ่นนอกจากนี้การผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวลด้วยเทคโนโลยีที่เหมาะสมและเรายังมุ่งหวังที่จะพัฒนาโครงการเกี่ยวกับชีวมวล เพื่อจะสามารถเสริมสร้างความเข้มแข็งและการมีส่วนร่วมของชุมชนได้อีกด้วย

2.4.1.1 จ้าวมันสำปะหลัง เป็นวัสดุที่เหลือจากการทำการเกษตร มันสำปะหลังเป็นพืชล้มลุกใช้ระยะเวลาในการให้ผลผลิตประมาณ 8-13 เดือนเศษวัสดุที่สามารถนำ มาใช้ในการผลิตพลังงานชีวมวล คือ เหง้าและลำต้น ดังภาพที่ 3.3 ซึ่งเหง้าและลำต้นของมันสำปะหลัง 2.2 ล้านตันสามารถให้พลังงานความร้อนเทียบเท่าน้ำมันเตา 450 ลิตร (มูลนิธิพลังงานเพื่อ

สิ่งแวดลอม, 2549: 44) เนื่องจากส่วประกอบอื่นๆ เช่น กากมัน เปลือกมันสำปะหลังมีการนำไปใช้ประโยชน์อย่างอื่น เช่น นำไปใช้ เพื่อการเลี้ยงสัตว์หรือผสมในดินเพื่อเพาะปลูก



ภาพประกอบ 6 มันสำปะหลัง

2.4.1.2 ไม้ฟืนจากไม้ยางพารา เป็นไม้ยืนต้นขนาดใหญ่และเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญของประเทศไทยเมื่อมีอายุประมาณ 25-30 ปี จะให้ผลผลิตลดลงจึงต้องโค่นทิ้งและปลูกใหม่และต้องใช้เวลาในการเพาะปลูกนานถึง 6-7 ปี จึงจะสามารถเริ่มให้ผลผลิตได้อีกครั้ง ดังนั้น เศษไม้ที่ สามารถนำมาผลิตเป็นพลังงานชีวมวลได้อย่างเหมาะสมคือปลายไม้ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 6 นิ้ว นอกจากปลายไม้ยางพาราแล้วยังมีส่วนที่เป็นปีกไม้ และชีเลื่อยจากไม้ ยางพารา โดยเฉพาะปีกไม้ ยางพารานั้นสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้เป็นอย่างดีเนื่องจากมีขนาดเล็กและมีความชื้นต่ำสำหรับต่อไม้และรากไม้ ยางพารานั้นสามารถให้พลังงานความร้อนได้ แต่ต้องเพิ่มขั้นตอนในการแปรรูปให้ต่อไม้ และรากไม้มีขนาดเล็กลง ดังรูปที่ 7



ภาพประกอบ 7 ยางพารา

2.4.1.3 ไม้พื้จากไม้ยูคาลิปตัส เป็นไม้พื้เมืองของประเทศออสเตรเลีย แต่ชนิดที่ปลูกในประเทศไทยมากที่สุดคือ พันธุ์คามาดูเลนซิส (Camaldulensis) เป็นไม้ที่ทนต่อความแห้งแล้งได้ดีใช้เวลาในการปลูก 4 ปี ให้ผลผลิตประมาณ 10-17 ต้นต่อไร่ ปัจจุบันการปลูกไม้ยูคาลิปตัสนั้นมุ่งเน้นไปที่การผลิตกระดาษและไม้อัดเศษวัสดุเหลือใช้ที่สามารถผลิตพลังงานชีวมวลได้ ประกอบด้วยเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่มีความชื้นสูงถึงร้อยละ 60 จึงต้องเอาไปผสมกับแกลบเพื่อลดความชื้นลงนอกจากนี้ในกระบวนการผลิตกระดาษจากไม้ ยูคาลิปตัสยังมีสารน้ำมันดาที่สามารถใช้แทนน้ำมันเตาได้เป็นอย่างดี



ภาพประกอบ 8 ไม้ยูคาลิปตัส

2.4.1.3 กะลามะพร้าว วัสดุเหลือใช้อย่างหนึ่งของมะพร้าวคือ “กะลามะพร้าว” ในอดีตเมื่อเอาเนื้อออกใช้ประโยชน์หมดแล้วก็เป็เศษวัสดุเหลือทิ้ง คนสมัยก่อนมักนำไปใช้ทำเป็นเชื้อเพลิงหรือทำเครื่องใช้ในครัวเรือน ความสำคัญของกะลามะพร้าวในสมัยก่อนมีค่าไม่มากนัก มะพร้าวเป็นพืชที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจชนิดหนึ่งของประเทศไทย ซึ่งคนไทยรู้จักเนื้อมะพร้าวในการบริโภคเป็นอาหารทั้งคาวและหวานในชีวิตประจำวัน จึงพบว่าในประเทศไทยจะบริโภคเนื้อมะพร้าวประมาณปีละ 8,273.2 กรัม หรือประมาณ 18 ผล/คน/ปี ซึ่งประเทศไทยมีพลเมือง 64 ล้านคน จะใช้ผลมะพร้าว 1,152 ล้านผล หรือประมาณ 65.70% ของผลผลิตทั้งหมด ส่วนที่เหลือประมาณ 35% ของผลผลิตทั้งหมด หรือเกือบ 500 ล้านผล ใช้ในรูปของอุตสาหกรรมหรือส่งออกต่อไป



ภาพประกอบ 9 กะลามะพร้าว

2.4.2 องค์ประกอบของชีวมวลหรือสสารทั่วไปจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักคือ

2.4.2.1 ความชื้น (Moisture) ความชื้นหมายถึงปริมาณน้ำที่มีอยู่ ชีวมวลส่วนมากจะมีความชื้นค่อนข้างสูงเพราะเป็นผลผลิตทางการเกษตร ถ้าต้องการนำชีวมวลเป็นพลังงานโดยการเผาไหม้ความชื้นไม่ควรเกิน 50 เปอร์เซ็นต์

2.4.2.2 ส่วนที่เผาไหม้ได้ (Combustible substance) ส่วนที่เผาไหม้ได้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ Volatiles matter คือส่วนที่ลุกเผาไหม้ได้ง่ายดังนั้นชีวมวลใดที่มีค่า Volatiles matter สูงแสดงว่าติดไฟได้ง่ายและ Fixed Carbon คือส่วนที่ให้ค่าความร้อน ยิ่งมีค่ามากความร้อนยิ่งสูง

2.4.2.3 ส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้คือขี้เถ้า (Ash) ชีวมวลส่วนใหญ่จะมีขี้เถ้าประมาณ 1 -3 เปอร์เซ็นต์ยกเว้นแกลบและฟางข้าว จะมีสัดส่วนขี้เถ้าประมาณ 10 -20 เปอร์เซ็นต์ซึ่งจะมีปัญหาในการเผาไหม้และกำจัดพอสมควร

ตาราง 1 แสดงค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลแต่ละชนิดในประเทศไทย

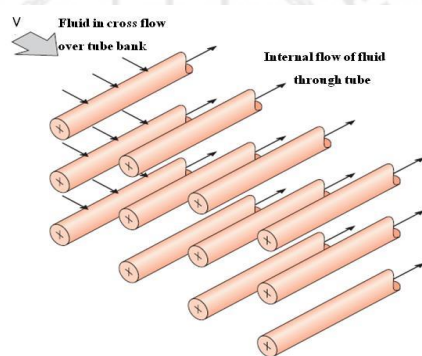
ชนิด	วัสดุเหลือใช้	ค่าความร้อน(MJ/kg)
อ้อย	ชานอ้อย	14.4
	ยอดและใบ	17.39
ข้าว	แกลบ	14.27
	ฟางข้าว	10.24
น้ำมันปาล์ม	ทะลายปาล์ม	17.86
	เส้นใย	17.62
	กะลา	18.46
	กากทาง	9.83
	ทะลายตัวผู้	16.33
มะพร้าว	เปลือก	16.23
	กะลา	17.93
	ทะลาย	15.4
	ทาง	16
มันสำปะหลัง	ต้น	18.42
ข้าวโพด	ชัง	18.04
ถั่วลิสง	เปลือก	12.66
ถั่วเหลือง	ลำต้นและใบ	19.44
ข้าวฟ่าง	ใบและต้น	19.23
เศษไม้	กิ่งก้าน	14.98

ที่มา :กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานกระทรวงพลังงาน

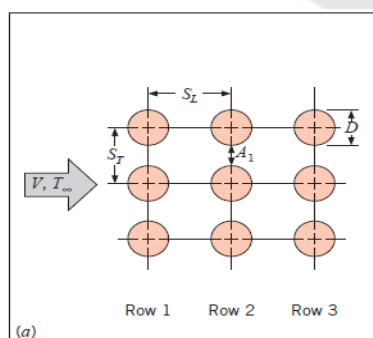
2.5 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

2.5.1 การไหลผ่านท่อหลายชั้น (Flow across banks of tubes)

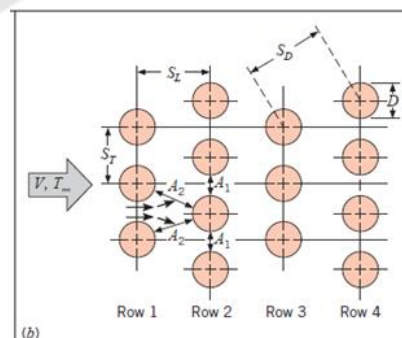
การถ่ายเทความร้อนเข้าสู่หรือออกจากชั้นท่อในแนวขวางใช้มากในระบบทางวิศวกรรม เช่น การผลิตไอน้ำในหม้อน้ำหรือในคอยล์เย็นของเครื่องปรับอากาศลักษณะการไหลผ่านท่อแสดงในรูปที่ 9 โดยที่ของไหลชนิดหนึ่งไหลภายในท่อในขณะที่ของไหลอีกชนิดหนึ่งที่อุณหภูมิต่างกันไหลในทางขวางไหลตัดภายนอกท่อ การจัดแถวท่อทำได้เป็น 2 แบบ คือ แบบวางในแนวเดียวกัน (Aligned) และแบบวางสลับหรือเยื้องกัน (Staggered) ในแนวทิศทางของความเร็วของไหล V ตามรูปที่ 10 ซึ่งมีรูปทรงลักษณะตามเส้นผ่านศูนย์กลาง D ระยะในแนวดิ่งระหว่างจุดศูนย์กลางของท่อ 2 ท่อ (Transverse pitch) S_T , ระยะในแนวนอนระหว่างจุดศูนย์กลางท่อ 2 ท่อ (Longitudinal pitch) S_L และระยะในแนวทแยง (Diagonal pitch) S_D



ภาพประกอบ 10 ลักษณะการไหลผ่านท่อหลายชั้น [9]



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 11 ลักษณะการจัดวางท่อหลายชั้น (ก) และแบบวางในแนวเดียวกัน

(ข) แบบวางเยื้องกัน [9]

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) ซึ่งเกี่ยวข้องกับท่อนี้คำนวณหาตามตำแหน่งของมันในชั้นท่อค่า h สำหรับท่อในแถวแรกประมาณว่าเท่ากับการไหลผ่านท่อเดียว ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) ที่มากขึ้นนั้นเกี่ยวข้องกับท่อต่างๆของแถวหลังๆ ท่อ 2 ถึง 3 แถวแรกจะทำให้เกิดมีเทอร์บูเลนซ์ขึ้นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) แถวหลังๆ เพิ่มขึ้นอย่างไรก็ตามเงื่อนไขต่างๆของการถ่ายเทความร้อนเสถียร จนกระทั่งมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเกิดขึ้นในค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย ($\bar{h}$) สำหรับท่อหลังแถวที่ 4 และ 5 โดยทั่วไปเราสนใจค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย ($\bar{h}$) สำหรับท่อทั้งระบบมากกว่า

$$\text{Re}_{D,\max} = \frac{\rho V_{\max} D}{\mu} \quad (2-19)$$

ค่า $\text{Re}_{D,\max}$ สำหรับสมการที่กล่าวมาแล้วถือตามค่าความเร็วสูงสุด $V_{\max}$ ที่เกิดขึ้นในท่อหลายชั้นสำหรับการจัดวางท่อในแนวเดียวกัน (Aligned arrangement) $V_{\max}$ เกิดที่ระนาบขวาง A_1 ตามรูปที่ 10 (ก) และมีค่า

$$V_{\max} = \frac{S_T}{S_T - D} V \quad (2-20)$$

สำหรับการจัดวางแบบเยื้องกัน (Staggered) ค่า $V_{\max}$ อาจเกิดที่ระนาบขวาง A_1 เหมือนแบบวางแนวเดียวกันก็ได้หรืออาจจะเกิดที่ระนาบทแยง A_2 ตามรูปที่ 10 (ข) ก็ได้และ $V_{\max}$ เกิดที่ A_2 ถ้า

$$S_D = \left[S_L^2 + \left(\frac{S_T}{2} \right)^2 \right]^{1/2} < \frac{S_T + D}{2} \quad (2-21)$$

กรณีนี้จะได้ $V_{\max}$ ในรูป

$$V_{\max} = \frac{S_T}{2(S_D - D)} V \quad (2-22)$$

เมื่อเร็ว ๆ นี้ Zukauskas ได้เสนอสหพันธ์เป็น

$$\overline{Nu}_D = C_1 Re_{D,\max}^m Pr^{0.36} \left(\frac{Pr_\infty}{Pr_s} \right)^{1/4} \quad (2-23)$$

สำหรับ

$$N_L \geq 20$$

$$0.7 < Pr < 500$$

$$1000 < Re_{D,\max} < 2 \times 10^6$$

โดยที่ค่าคุณสมบัติทั้งหมด (ยกเว้น Pr_s) คือค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิทางเข้าและทางออก ส่วนค่าคงที่ C_1 และ m กำหนดไว้ในตารางที่ 2 เหตุที่ต้องคิดคุณสมบัติของไหลที่ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิทางเข้า ($T_i = T_\infty$) และอุณหภูมิทางออก (T_o) เนื่องจากความจริงที่ว่าอุณหภูมิของไหลจะลดลงเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ท่อหรือจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากถ่ายเทความร้อนออกจากท่อ ดังนั้นถ้าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของไหล ($T_i - T_o$) สูงมากเมื่อคิดคุณสมบัติที่อุณหภูมิทางเข้าแล้วย่อมมีความผิดพลาดของผลลัพธ์สูงถ้า $N_L < 20$ จำเป็นต้องใช้ตัวประกอบแก้ไข (Correction factor) เข้าช่วย นั่นคือ

ตาราง 2 ค่าคงที่ของสมการ (2-18) สำหรับการไหลผ่านท่อหลายชั้น

รูปแบบการจัดวาง	$Re_{D,max}$	C_1	m
แนวเดียวกัน	$10 - 20^2$	0.8	0.4
เยื้องกัน	$10 - 20^2$	0.9	0.4
แนวเดียวกัน	$10^2 - 10^3$	ประมาณว่าเป็นทรงกระบอกกลมเดี่ยว (แยกกัน)	
เยื้องกัน	$10^2 - 10^3$		
แนวเดียวกัน	$10^3 - 2 \times 10^5$	0.27	0.63
$(S_T/S_L < 0.7)^*$			
เยื้องกัน	$10^3 - 2 \times 10^5$	$0.35(S_T/S_L)^{1/5}$	0.6
$(S_T/S_L < 2)$			
เยื้องกัน	$10^3 - 2 \times 10^5$	0.4	0.6
$(S_T/S_L > 2)$			
แนวเดียวกัน	$2 \times 10^5 - 2 \times 10^6$	0.021	0.84
เยื้องกัน	$2 \times 10^5 - 2 \times 10^6$	0.022	0.84

*สำหรับ $S_T/S_L > 0.7$ การถ่ายเทความร้อนไม่เพียงพอและท่อแบบแนวเดียวกันไม่ควรใช้ [9]

$$\overline{Nu}_{D(N_L < 20)} = C_2 \overline{Nu}_{D(N_L \geq 20)} \quad (2-24)$$

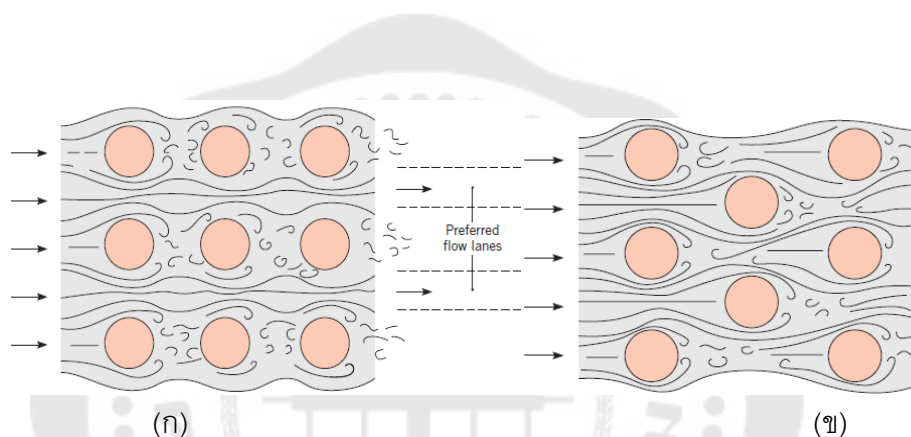
โดยที่ C_2 กำหนดไว้ในตารางที่ 2

ตาราง 3 ค่าตัวประกอบแก้ไข C_2 ของสมการ (2-18) สำหรับการไหลผ่านท่อหลายชั้น[9]

N_L	1	2	3	4	5	7	10	13	16
แนวเดียวกัน	0.7	0.8	0.86	0.9	0.92	0.95	0.97	0.98	0.99
เยื้องกัน	0.64	0.76	0.84	0.89	0.92	0.95	0.97	0.98	0.99

การไหลรอบๆท่อในแถวแรกของกลุ่มท่อจะเหมือนกับการไหลตัดผ่านท่อทรงกระบอกเดี่ยวอย่างไรก็ตามสำหรับแถวต่อมาการไหลขึ้นอยู่กับการจัดกลุ่มท่อเป็นอย่างมากตามรูปที่ 11 กลุ่มท่อแบบวางแนวเดียวกันที่อยู่หลังแถวแรกจะอยู่ในการไหลวนอย่างปั่นป่วนของท่อที่อยู่ข้างหน้าและสำหรับค่าพารามิเตอร์ของ S_L นั้นค่า h ที่เกี่ยวข้องกับแถวด้านหลังท่อจะมีค่าสูง

เนื่องจากการช่วยโดยความปั่นป่วนของการไหล ตัวอย่างเช่น ค่า h ของแถวหนึ่งจะเพิ่มตามการเพิ่มจำนวนแถวจนกระทั่งประมาณแถวที่ 5 หลังจากนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในความปั่นป่วนและสัมประสิทธิ์การพา อย่างไรก็ตามสำหรับค่า S_L น้อยๆ แถวข้างหน้าจะมีผลกันต่อแถวหลังจากกระแสน้ำไหลมากและมีผลกระทบต่อการถ่ายเทความร้อน นั่นคือ ทางเดินของการไหลจะอยู่ในช่องระหว่างท่อและผิวท่อส่วนมากไม่สัมผัสกับการไหลหลักด้วยเหตุผลนี้การจัดการกลุ่มท่อแบบเดียวกันโดยที่ $S_T/S_L > 0.7$ (ตารางที่ 3) จึงไม่เป็นที่ต้องการสำหรับการจัดแบบเยื้องหรือสลับกันทางเดินของการไหลหลักจนเวียนคดเคี้ยวและส่วนมากของพื้นที่ผิวของแนวท่อด้านหลังจะยังคง

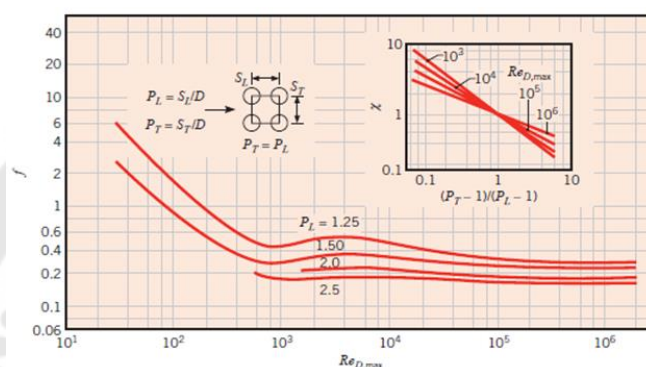


ภาพประกอบ 12 สภาวะการไหลของท่อแบบ(ก) แนวเดียวกัน (ข) สลับกันหรือเยื้องกัน [9]

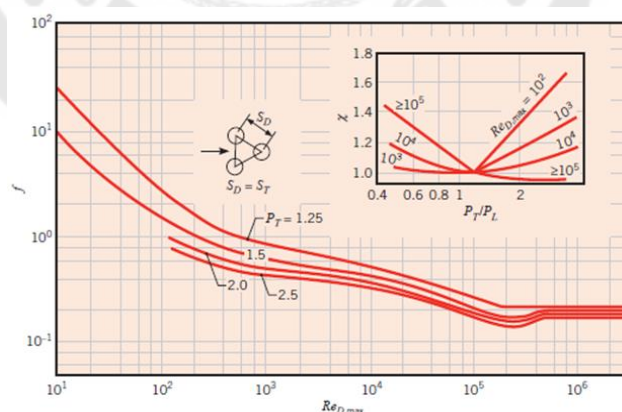
อยู่ในทางเดินนี้โดยทั่วไปการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนมักนิยมทำโดยให้เป็นการไหลแบบคดเคี้ยวตามการจัดแบบเยื้องกันหรือสลับกันโดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับค่าเรโนลด์ส์นับเบอร์ต่ำ ($Re_D < 100$) โดยทั่วไปเมื่อมีการไหลผ่านกลุ่มท่ออัดทำให้เกิดแรงเสียดทานสูงขึ้น จำเป็นต้องคำนวณหาความดันลด (pressure drop) ของการไหลผ่านท่อหลายชั้นเพราะว่ายิ่งความดันลดมากจำเป็นต้องใช้กำลังขับเคลื่อนของไหลมากค่าใช้จ่ายก็จะสูงขึ้น Zhukauskus ได้แนะนำความดันลดโดยกำหนดเป็น

$$\Delta p = N_L \chi \left(\frac{\rho V_{\max}^2}{2} \right) f \quad (2-25)$$

โดยที่ตัวประกอบเสียดทาน f (friction factor) และตัวประกอบแก้ไข χ (correction factor) ต่างแสดงในรูปที่ 6 และ 7 รูปที่ 6 เป็นการจัดท่อแนวเดียวกันแบบจัตุรัสโดยที่ระยะตามยาวและตามขวางไว้มีค่าคือ $P_L = S_L / D$ และ $P_T = S_T / D$ ต่างเท่ากันค่า χ พล็อตโดยแทรกในรูปเช่นกัน เช่นเดียวกับรูปที่ 2.6 ก็ใช้สำหรับการจัดวางท่อแบบสลับกันของท่อในรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า ($S_T = S_D$) และ χ ใช้สำหรับการจัดวางท่อแบบสลับกันอื่นๆ สังเกตว่าค่า Re ที่แสดงในรูปที่ 6 และ 7 คิดที่ความเร็วของไหลสูงสุด V_{max}



ภาพประกอบ 13 ตัวประกอบเสียดทาน f และตัวประกอบแก้ไข χ สำหรับการจัดท่อแนวเดียวกัน[9]



ภาพประกอบ 14 ตัวประกอบเสียดทาน f และตัวประกอบแก้ไข χ สำหรับการจัดท่อสลับกัน[9]

สำหรับการไหลผ่านทรงกระบอกกลม สมการเอมไพริกัลของ Hilpert ถูกใช้อย่างแพร่หลายคือ

$$\overline{Nu}_D = \frac{\bar{h}D}{k} \quad (2-26)$$

สำหรับการไหลภายในท่อกลมที่มีลักษณะฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ การไหลแบบลามินาร์ที่ปรับตัวเต็มที่แล้วค่าตัวเลขที่นัมเบอร์จะคงที่ไม่ขึ้นกับ Re_D , Pr และตำแหน่งตามแนวแกน x

$$\overline{Nu}_D = \frac{\bar{h}D}{k} = 4.36 \text{ สำหรับ } q_s'' \text{ คงที่} \quad (2-22)$$

2.5.2 การวิเคราะห์อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนด้วยวิธี Effectiveness-NTU

แนวความคิดของการแลกเปลี่ยนความร้อน “effectiveness” ซึ่งเกี่ยวข้องกับ “NTU” (Number of Transfer Units) นำมาใช้ครั้งแรกโดยนัสเซิลท์ (Nusselt) และปรับปรุงโดย Kays และ London ค่า effectiveness (ε) ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนิยามเป็นอัตราส่วนของความร้อนที่ถูกถ่ายเทจริงโดยเครื่องแลกเปลี่ยนต่อความร้อนที่ควรจะถูกถ่ายเทเป็นไปได้สูงสุด

$$effectiveness = \varepsilon \equiv \frac{q}{q_{max}} \quad (2-23)$$

โดยที่การถ่ายเทความร้อนจริง (q) หาได้จากการสมดุลพลังงานกระแสของไหลร้อนหรือกระแสของไหลเย็นก็ได้ : $q = \dot{m}_c c_{pc} (T_{co} - T_{ci}) = \dot{m}_h c_{ph} (T_{hi} - T_{ho})$ ส่วนค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่ควรจะเป็น (q_{max}) ซึ่งถูกจำกัดโดยกระแสของไหลที่มีอัตราความจุความร้อนน้อยที่สุด นั่นคือ

$$\begin{aligned} q_{max} &= \dot{m}_c c_{pc} (T_{hi} - T_{ci}) && \text{เมื่อ } \dot{m}_c c_{pc} < \dot{m}_h c_{ph} \\ \text{หรือ} \quad q_{max} &= \dot{m}_h c_{ph} (T_{hi} - T_{ci}) && \text{เมื่อ } \dot{m}_c c_{pc} > \dot{m}_h c_{ph} \\ \text{ดังนั้น} \quad \varepsilon &= (T_{co} - T_{ci}) / (T_{hi} - T_{ci}) && \text{ถ้า } \dot{m}_c c_{pc} < \dot{m}_h c_{ph} \end{aligned} \quad (2.24a)$$

หรือ
$$\varepsilon = (T_{hi} - T_{ho}) / (T_{hi} - T_{ci}) \text{ ถ้า } \dot{m}_c c_{pc} > \dot{m}_h c_{ph} \quad (2-24b)$$

ขนาดความร้อนสัมพัทธ์ของกระแสของไหลทั้งสองเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมากและเพื่อที่จะทำให้เป็นปริมาณที่น้อยกว่าหนึ่งเสมอ ดังนั้น อัตราความจุ (capacity ratio) นิยามเป็น

$$C_r = (\dot{m}c_p)_{\min} / (\dot{m}c_p)_{\max} \quad (2-25)$$

ผลคูณ UA แทนความจุการแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ต่อองศาของความแตกต่างอุณหภูมิ ขนาดความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนนี้สามารถทำเป็นรูปไร้มิติได้โดยอิงความจุของการเก็บสะสมของกระแสของไหลอันหนึ่งเนื่องจากกระแสนี้มีอัตราความจุความร้อนน้อยกว่าอีกอันจะจำกัดการถ่ายเทความร้อนสูงสุดจึงต้องใช้รูปไร้มิติได้ ดังนั้น จำนวนของหน่วยถ่ายเทของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (number of transfer units, NTU)

$$NTU = \frac{UA}{(\dot{m}c_p)_{\min}} \quad (2-26)$$

นิยามเป็น Kays และ London ได้แสดงความสัมพันธ์ของ effectiveness, NTU และ $C_{\min} / C_{\max}$ สำหรับการแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดต่างๆและบางส่วนของผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ของเขาได้แสดงเป็นแผนภูมิหรือกราฟ ถ้าต้องการค่าที่ละเอียดกว่าค่าที่อ่านจากกราฟก็อาจหาค่าได้โดยใช้คอมพิวเตอร์หาค่าจากสมการสำหรับแต่ละเงื่อนไขเพื่อหาค่า ε และ NTU ซึ่งได้สรุปรวมไว้ในตารางที่ 3 และ 4 ตามลำดับ

ตาราง 4 แสดงความสัมพันธ์ของ effectiveness สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน [9]

เงื่อนไขการไหล	ความสัมพันธ์
ไหลในท่อดังชั้น	
การไหลสวนทางกัน	$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 + C_r)]}{1 + C_r}$
การไหลสวนทางกัน, $C_r < 1$	$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 - C_r)]}{1 - C_r \exp[-NTU(1 - C_r)]}$
การไหลสวนทางกัน, $C_r = 1$	$\varepsilon = \frac{NTU}{1 + NTU}$
ไหลผ่านเปลือกและท่อ	
ผ่านเปลือก(Shell) 1 ครั้ง และผ่านท่อ 2, 4, 6 กลับ	$\varepsilon_1 = 2 \left\{ 1 + C_r + (1 + C_r^2)^{1/2} \times \frac{1 + \exp[-(NTU)_1(1 + C_r^2)^{1/2}]}{1 - \exp[-(NTU)_1(1 + C_r^2)^{1/2}]} \right\}^{-1}$
ผ่านเปลือก(Shell) n ครั้งและผ่านท่อ 2n, 4n, 6nกลับ	$\varepsilon = \left[\left(\frac{1 - \varepsilon_1 C_r}{1 - \varepsilon_1} \right)^n - 1 \right] \left[\left(\frac{1 - \varepsilon_1 C_r}{1 - \varepsilon_1} \right)^n - C_r \right]^{-1}$
ไหลตั้งฉากกัน	
ของไหลทั้งสองเป็น unmixed	$\varepsilon = 1 - \exp \left[\left(\frac{1}{C_r} \right) (NTU)^{0.22} \{ \exp[-C_r (NTU)^{0.78}] - 1 \} \right]$
$C_{\max}(\text{mixed}), C_{\min}(\text{unmixed})$	$\varepsilon = \left(\frac{1}{C_r} \right) (1 - \exp \{ -C_r [1 - \exp(-NTU)] \})$
$C_{\min}(\text{mixed}), C_{\max}(\text{unmixed})$	$\varepsilon = 1 - \exp \{ -C_r^{-1} [1 - \exp[-C_r (NTU)]] \}$
เครื่องทั้งหมด ($C_r = 0$)	$\varepsilon = 1 - \exp(-NTU)$

ตาราง 5 ความสัมพันธ์ของ NTU สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน[9] โดย $NTU = UA/C_{\min}$

และ $C_r = C_{\min}/C_{\max}$

เงื่อนไขการไหล	ความสัมพันธ์
ไหลในท่อสองชั้น	
การไหลตามกัน	$NTU = -\frac{\ln[1 - \varepsilon(1 + C_r)]}{1 + C_r}$
การไหลสวนทางกัน, $C_r < 1$	$NTU = \frac{1}{C_r - 1} \ln\left(\frac{1 - \varepsilon}{1 - \varepsilon C_r}\right)$
การไหลสวนทางกัน, $C_r = 1$	$NTU = \frac{\varepsilon}{(1 - \varepsilon)}$
ไหลผ่านเปลือกและท่อ	
ผ่านเปลือก(Shell) 1 ครั้ง และผ่านท่อ 2, 4, 6 กลับ	$NTU = -(1 + C_r^2)^{1/2} \ln\left(\frac{(2/\varepsilon - 1 - C_r - (1 + C_r^2)^{1/2})}{(2/\varepsilon - 1 - C_r + (1 + C_r^2)^{1/2})}\right)$
ไหลตั้งฉากกัน	
$C_{\max}(\text{mixed}), C_{\min}(\text{unmixed})$	$NTU = -\ln\left[1 + \left(\frac{1}{C_r}\right) \ln(1 - \varepsilon C_r)\right]$
$C_{\min}(\text{mixed}), C_{\max}(\text{unmixed})$	$NTU = -\left(\frac{1}{C_r}\right) \ln[1 + C_r \ln(1 - \varepsilon)]$
เครื่องทั้งหมด ($C_r = 0$)	$NTU = -\ln(1 - \varepsilon)$

ตาราง 6 ค่าแฟคเตอร์ความขรุขระของผิวท่อ (จากคณะวิศวกรรมกรรมการอาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์)

ชนิดของท่อ	Roughness	
	ft.	mm.
ท่อที่ได้จากการรีด ท่อทองเหลือง ท่อดีบุก หลอดแก้ว ท่อภายในที่เคลือบหรือฉาบด้วยบิทูมินัส ท่อซีเมนต์ที่หล่อโดยการเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง	0.000005	0.0015
ท่อเหล็กกล้าหรือท่อเหล็กเหนียวที่ขายในท้องตลาด	0.00015	0.046
ท่อเหล็กกล้าที่ขึ้นรูปโดยการเชื่อม	0.00015	0.046
ท่อเหล็กหล่อที่เคลือบหรือฉาบด้วยยางมะตอย	0.0004	0.12
ท่อเหล็กอาบสังกะสี	0.00085	0.15
ท่อเหล็กหล่อ	0.0006 - 0.003	0.25
ท่อไม้	0.0006 - 0.003	0.18 - 0.9
ท่อคอนกรีต	0.001 - 0.01	0.3 - 3
ท่อเหล็กกล้าที่ย้ำด้วยหมุด	0.003 - 0.03	0.9 - 9

ความร้อนจากจุดต่างๆ จากจุดหนึ่งสามารถเคลื่อนที่ไปยังอีกจุดหนึ่งได้ 3 วิธีด้วยกัน คือ การนำ การพา และการแผ่รังสี การเคลื่อนที่ของความร้อนทั้ง 3 วิธีนี้จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิเกิดขึ้น

2.5.3 การนำ (Conduction)

การนำความร้อน คือ วิธีการที่ความร้อนเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง ไปยังที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าภายในตัวกลางเดียวกัน หรือเป็นการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างตัวกลางที่ติดกัน แต่มีอุณหภูมิต่างกัน ในการนำความร้อน ความร้อนจะเคลื่อนที่ผ่านโมเลกุลของสสาร โดยที่โมเลกุลไม่เคลื่อนที่ การนำความร้อนจะเกิดขึ้นได้ดีมากในตัวกลางที่เป็นของแข็ง

$$Q = -ka \frac{dT}{dX} \quad (2-27)$$

Q = อัตราการถ่ายเทความร้อน

a = พื้นที่หน้าตัดที่ความร้อนไหลผ่าน

$\frac{dT}{dX}$ = อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับระยะทาง

k = ค่าการนำความร้อนของวัสดุ

2.5.4 การพา (Convection)

การพาคือวิธีการที่ความร้อนเคลื่อนที่ระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยของไหลจะเป็นตัวพาความร้อนมาให้ หรือ เป็นตัวพาความร้อนออกจากผิวของของแข็ง กลไกที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพาได้นั้น เกิดจากผลรวมของการนำความร้อน การสะสมพลังงานและการเคลื่อนที่ของของไหล การพาสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด

2.5.4.1 การพาโดยบังคับ (Force Convection) คือ การเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและผิวของของไหลโดยที่ของไหลจะถูกบังคับให้เคลื่อนที่ไปสัมผัสกับผิวของของแข็งโดยกลไกภายนอก เช่น พัดลมหรือเครื่องสูบน้ำ

2.5.4.2 การพาตามธรรมชาติ (Natural or Free Convection) คือ การเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยไม่มีกลไกใดมาทำให้ของไหลเคลื่อน แต่ของไหลจะเคลื่อนที่ได้เอง โดยอาศัยแรงลอยตัวที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิที่จุด 2 จุด โดยจะมีการถ่ายเทของอุณหภูมิจากที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปยังที่ ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยสมการสำหรับการคำนวณหาอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพา คือ

$$Q = hA(T_{\infty} - T_s) \quad (2-28)$$

Q = อัตราการนำความร้อน

h = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน

T_{∞} = อุณหภูมิของของไหล

T_s = อุณหภูมิที่ผิวของวัสดุ

2.5.4.3 การแผ่รังสี (Radiation) การถ่ายเทความร้อนวิธีนี้ เป็นผลเนื่องมาจากการแผ่รังสีในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Wave) ซึ่งสามารถเกิดขึ้นในสถานะที่เป็นสุญญากาศรวม เช่นเดียวกับกรณีที่เกิดขึ้นในตัวกลางชนิดหนึ่ง ผลที่ได้จากการทดลองได้พิสูจน์ให้เห็นว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีมีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ ค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ที่ยกกำลังสี่

$$Q = \sigma AT^4 \quad (2-29)$$

ตัวแผ่รังสีออกเชิงอุดมคติ (Ideal emitter) หรือ วัตถุดำ (Black body) จะมีการส่งถ่ายพลังงานที่เกิดจากการแผ่รังสี ซึ่งไม่เป็นไปตามสมการด้านบน ตามปกติแล้วผิวของวัตถุทุกชนิดจะมีการแผ่รังสีออก (Emit) จากผิวของวัตถุโดยส่วนใหญ่จะสามารถแสดงได้ด้วยสมการดังนี้

$$Q = \varepsilon \sigma AT^4 \quad (2-30)$$

เมื่อ ε คือค่าความสามารถในการแผ่รังสีออกของผิวของวัตถุมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1

2.6 อุปกรณ์การสร้างอัตราการไหลของอากาศ

ในระบบการทำเครื่องผลิตลมร้อนด้วยเตาชีวมวลแบบสลับทิศทางการไหล การที่จะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพมากที่สุด จำเป็นต้องอาศัยกระบวนการ การถ่ายเทความร้อน โดยการพาแบบบังคับซึ่งถ้าจะทำให้เกิดการพาแบบบังคับขึ้นได้นั้น จะต้องเป็นตัวกลางหรือของไหลมากระทำ หรือเราจะเรียกว่า ระบบถูกแรงจากภายนอกมากระทำให้เกิดการพาความร้อนขึ้นมา ซึ่งแรงภายนอกที่จะเข้ามามีการกระทำหรืออากาศที่จะไหลเข้ามานี้ เราต้องอาศัยอุปกรณ์สร้างอัตราการไหลของอากาศมาเป็นตัวช่วย ให้เกิดแรงภายนอกกระทำกับระบบ ที่เราเรียกว่าพัดลม (Blower)

2.6.1 พัดลมทำหน้าที่ป้อนพลังงาน (ในรูปของความดัน) ให้แก่อากาศเพื่อเอาชนะความต้านทานการไหลที่เกิดขึ้นในระบบ พัดลมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ พัดลมแบบไหลตามแกน (axial – flow fan) และพัดลมแบบเหวี่ยง (centrifugal fan)

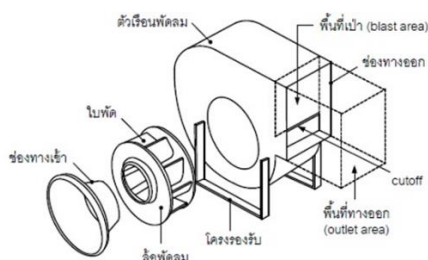
2.6.1.1 พัดลมแบบไหลตามแกน อากาศจะไหลขนานกับแกนของใบพัด และไหลตั้งฉากกับระนาบการหมุนของใบพัด พัดลมแบบนี้มีราคาถูก ไม่มีลักษณะที่มอเตอร์จะทำงาน

เกินกำลัง แต่การทำงานของพัดลมมีเสียงดังรบกวนเมื่อเทียบกับพัดลมแบบเหวี่ยง และมีช่วงของการทำงานที่ไม่มีเสถียรภาพ พัดลมแบบไหลตามแกนมีหลายแบบ เช่น แบบโพรเพลเลอร์ (propeller) ซึ่งเป็นพัดลมที่ใช้ในการระบายอากาศทั่วไป ไม่เหมาะกับงานอบแห้งที่ต้องการความดันสถิตสูงแบบท่อ (tube) และแบบเวน (vane) ซึ่งให้ความสถิตสูงกว่า คือประมาณ 0 – 1500 Pa ซึ่งอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความดันสูงสุด หรือเปอร์เซ็นต์ของกำลังงานสูงสุด หรือเปอร์เซ็นต์ของประสิทธิภาพ และเปอร์เซ็นต์ของปริมาตรที่เปิดกว้าง ที่ช่วงเปอร์เซ็นต์ปริมาตรที่เปิดกว้างประมาณ 30 – 50 % พบว่าความดันสถิต มีค่าลดลงแล้วเพิ่มขึ้น ดังนั้นพัดลมจะไม่มีเสถียรภาพหากทำงานในช่วงนี้ ช่วงที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำงานของพัดลม คือ ช่วงเปอร์เซ็นต์ปริมาตรที่เปิดกว้าง ระหว่าง 55 - 75 % ซึ่งเป็นช่วงที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด และมีเสถียรภาพ



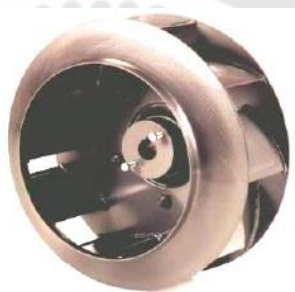
ภาพประกอบ 15 แสดงพัดลมแบบไหลตามแกน

2.6.1.2 พัดลมแบบเหวี่ยง อากาศจะไหลขนานกับแกนของใบพัดตรงทางเข้า และไหลตั้งฉากกับแกนของใบพัดตรงทางออก พัดลมแบบนี้สามารถแบ่งได้เป็น 3 แบบตามลักษณะของใบพัด คือ ใบพัดโค้งหลัง ใบพัดโค้งหน้า และใบพัดตรง ใบพัดที่นิยมใช้ในการอบแห้งทั่วไปคือ ใบพัดโค้งหน้าและใบพัดโค้งหลัง ซึ่งใช้กับอากาศที่สะอาด ส่วนใบพัดตรงเหมาะกับอากาศสกปรกหรือใช้ในงานขนถ่ายวัสดุซึ่งไหลผ่านตัวพัดลม



ภาพประกอบ 16 แสดงพัดลมแบบเหวี่ยง

2.6.1.3 ใบพัดโค้งหลัง พัดลมชนิดนี้มีราคาแพง แต่ก็มีข้อดีหลายอย่างเมื่อเปรียบเทียบกับพัดลมชนิดอื่น ตัวอย่าง เช่น การทำงานของพัดลมไม่ก่อให้เกิดเสียงดังเกินควร ความดันสถิตมีค่าสูง 0 – 3000 Pa ซึ่งพบว่าช่วงเปอร์เซ็นต์ปริมาตรที่เปิดกว้างที่เหมาะสมที่สุดคือ 50 – 65% ช่วงดังกล่าวให้ค่าประสิทธิภาพที่สูงสุด



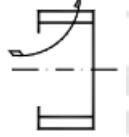
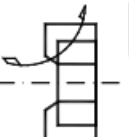
ภาพประกอบ 17 แสดงพัดลมแบบใบพัดโค้งหลัง

2.6.1.4 ใบพัดโค้งหน้า การทำงานของพัดลมชนิดนี้มีเสียงเบาที่สุดเมื่อเทียบกับพัดลมชนิดอื่นดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ข้อเสียของพัดลมแบบนี้คือ มีลักษณะที่มอเตอร์จะทำงานเกินกำลังได้ มีช่วงการทำงานของพัดลมที่ไม่มีเสถียรภาพ ความดันสถิตโดยทั่วไปมีค่าระหว่าง 0 – 1500 Pa ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพจะมีค่าสูงสุดที่ช่วงเปอร์เซ็นต์ปริมาตรที่เปิดกว้างระหว่าง 30– 50% ดังนั้นหากระบบอบแห้งมีการรั่วของท่อลมเกิดเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลให้มอเตอร์ทำงานเกินกำลัง พัดลมแบบนี้จึงไม่เหมาะกับระบบที่อัตราการไหลของอากาศเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา

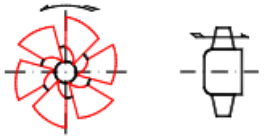
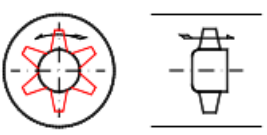
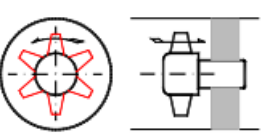


ภาพประกอบ 18 แสดงพัดลมแบบใบพัดโค้งหน้า

ตาราง 7 แสดงคุณลักษณะและการทำงานของพัดลมแต่ละชนิด

ชนิด	รูปร่างของใบพัด		ประสิทธิภาพ อะเดียบาติค รวม (%)	ปริมาณ อากาศ (m ³)	ความ ดัน (mmAq)	ความ เหมาะสมใน การใช้งาน
	ทิศทางการ หมุน	ทิศทาง อากาศไหล				
พัดลม หลายใบ (sirocco fan)			45-60	10- 2,000	10-125	ปรับอากาศ ระบาย อากาศ
โบลว์เวอร์ ใบพัดโค้ง หลัง			50-65	20- 3,200	10-150	ท่อลม ความเร็วสูง
พัดลม เวเดียล			40-50	3-20	1-8	งาน อุตสาหกรรม

ตาราง 7

พัดลมแบบ ใบพัด		40-50	10-50	1-6	พัดลมระบายอากาศ หอดึงเย็น
พัดลมแบบ ไหลตาม แนวแกน		50-60	15-1,000	1-55	ระบายอากาศเฉพาะที่
พัดลมแบบมี ท่อครอบและ ครีบน้ำ		55-75	15-1,000	1-55	ปรับอากาศ ระบาย อากาศ

2.6.2 อัตราการไหลของอากาศ

หมายถึง ปริมาณของอากาศที่ไหลผ่านอุปกรณ์ใดๆในระบบต่อหนึ่งหน่วยเวลา นิยมวัดเป็นอัตราการไหลเชิงปริมาตร (Volume flow rate : Q)

$$Q = AV \quad (2-31)$$

31)

A = พื้นที่หน้าตัดของช่องทางการไหล

V = ความเร็วเฉลี่ย

$$ME = (Q \times \Delta P_t) / BHP \quad (2-32)$$

ME = ประสิทธิภาพเชิงกล

ΔP_t = ความดันรวม

BHP = กำลังงานที่ให้กับแกนของพัดลม

2.6.3 กฎของพัดลม

เป็นกฎที่แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของขนาด(size) และความเร็วในการหมุน(rpm) ที่มีต่อสมรรถนะการทำงานของพัดลม

$$Q_2 = Q_1 \left(\frac{size_2}{size_1} \right)^3 \left(\frac{rpm_2}{rpm_1} \right) \quad (2-33)$$

$$BHP_2 = BHP_1 \left(\frac{size_2}{size_1} \right)^5 \left(\frac{rpm_2}{rpm_1} \right)^3 \quad (2.24) \quad (2-34)$$

ตาราง 8 แสดงค่าประสิทธิภาพเชิงกลของพัดลมโดยประมาณสำหรับพัดลมชนิดต่างๆ

ชนิดพัดลม	ค่าประสิทธิภาพเชิงกลของพัดลม (ME)
แบบซี่ใบพัดหน้าตรง (Radial Blade Fans)	0.65
แบบซี่ใบพัดโค้งหน้า (Forward Curve Blade Fans) และแบบซี่ใบพัดเอียงหลัง (Backward Inclined Blade Fans)	0.70
แบบไหลตามแนวแกน (Axial Fans)	0.75

2.7 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับปริญญานิพนธ์ (Literature review)

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องทำให้หัวข้อปริญญานิพนธ์นี้เป็นเอกสารทางวิชาการที่เกี่ยวข้องและสอดคล้องกับเรื่องการพัฒนาเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนแบบสลับทิศทางที่ผลิตจากเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง ข้อมูลดังกล่าวสามารถนำมาอ้างอิงเปรียบเทียบในการทำปริญญานิพนธ์ซึ่งได้ดำเนินการค้นคว้าและพัฒนาอยู่ โดยมีเอกสารที่เกี่ยวข้องกับปริญญานิพนธ์ ดังนี้

ธนากร ชีระพัฒนานนท์ จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒได้ศึกษาสภาวะการไหลของอากาศในเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน โดยวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล โดยได้การศึกษาถึงคุณสมบัติและรูปแบบการไหลรวมทั้งตำแหน่งทางเข้า – ออกของลมร้อนที่มีผลต่อการไหลของอากาศภายในเครื่องอบแห้งแบบ

ลมร้อน โดยใช้โปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล พบว่า ตำแหน่งทางเข้าของลมร้อนที่อยู่ชิดด้านบนและตำแหน่งทางออกของลมร้อนที่ชิดด้านล่าง จะมีผลทำให้การกระจายตัวของอากาศภายในห้องอบแห้งและการกระจายตัวของอุณหภูมิ มีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอกว่าแบบจำลองอื่นๆ นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มความเร็วลมร้อนให้สูงขึ้นที่อุณหภูมิเท่าเดิมจะมีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิเพียงเล็กน้อย

สมมาส แก้วล้วน และคณะ พ.ศ.2556 ได้ทำการศึกษา ทดสอบ และเปรียบเทียบสมรรถนะของเตาชีวมวลขนาด 20 kW ที่ใช้ไม้ยูคาลิปตัสเป็นเชื้อเพลิงกับเตาแก๊สหุงต้มชนิดหัวเร่ง KB-5) และประสิทธิภาพต่ำ (ประสิทธิภาพสูง (SG5) ที่ใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลว (LPG) เป็นเชื้อเพลิงเตาชีวมวลที่ใช้ทดสอบสมรรถนะประกอบด้วยตัวเตาที่มีผนัง 2 ชั้น (ห้องปฏิกิริยาและช่องอุ่นอากาศ) ห้องเผาไหม้แก๊สชีวมวล ช่องปากเตาสำหรับป้อนชีวมวล ช่องใต้เตาสำหรับถ่ายชี้ไถ้ออก นอกจากนี้ยังมีวาล์วควบคุมการป้อนอากาศส่วนที่ 1 เข้าสู่ห้องปฏิกิริยา และวาล์วควบคุมการป้อนอากาศส่วนที่ 2 เข้าสู่ช่องอุ่นอากาศด้วย จากการทดสอบต้มระเหยน้ำ 15 kg ในเวลา 100 นาที โดยใช้เตาชีวมวลและเตาแก๊สหุงต้มชนิดหัวเร่งประสิทธิภาพต่ำ (KB-5) และประสิทธิภาพสูง (SG5) ตามลำดับ ผลการทดสอบพบว่า เตาชีวมวลมีประสิทธิภาพทางความร้อนต่ำกว่าเตาแก๊สหุงต้มชนิดหัวเร่งประสิทธิภาพต่ำ (KB-5) และต่ำกว่าเตาหุงต้มชนิดหัวเร่งประสิทธิภาพสูง (SG5) ประมาณ 29% และ 41% ตามลำดับ ในขณะที่ค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงต่ำกว่าเตาแก๊สหุงต้มชนิดหัวเร่งประสิทธิภาพต่ำ (KB-5) และต่ำกว่าเตาแก๊สหุงต้มชนิดหัวเร่งประสิทธิภาพสูง (SG5) ประมาณ 67% และ 60% ตามลำดับ เมื่อคิดราคาแก๊ส LPG ที่ 18 บาทต่อกิโลกรัม หากราคาแก๊ส LPG ปรับตัวเพิ่มขึ้นเป็น 30 บาทต่อกิโลกรัมจะส่งผลให้การใช้เตาชีวมวลมีค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงต่ำกว่าการใช้เตาแก๊สหุงต้มทั้งสองแบบ 80% และ 76% ตามลำดับ ดังนั้นการนำเตาชีวมวลมาใช้แทนเตาแก๊สหุงต้มจึงสามารถลดต้นทุนค่าใช้จ่ายให้ครัวเรือนได้อย่างมาก จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่มีความเหมาะสมในการนำเตาชีวมวลมาใช้เป็นเตาความร้อนสำหรับการประกอบอาหารในครัวเรือนหรือประกอบกิจการร้านอาหารขนาดเล็ก นอกจากนั้นการใช้เตาชีวมวลยังมีส่วนช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เตาแก๊สหุงต้มที่ใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นเชื้อเพลิงอีกด้วย

อนิรุทธิ์ ต่ายขาว และสมบัติ ที่มทรัพย์ ได้ศึกษาการเปรียบเทียบหลักการทำงานของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบธรรมชาติและชนิดพาความร้อนแบบบังคับ หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งชนิดพาความร้อนแบบธรรมชาติ คือ จากการศึกษ พบว่าเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบการพาความร้อนแบบธรรมชาติ ซึ่งมีลักษณะเป็นเครื่อง

อบแห้งที่ไม่มีการใช้พัดลมเพื่อการระบายอากาศการระบายอากาศภายในเครื่องอบแห้งอาศัยหลักการของความหนาแน่นของอากาศ โดยอากาศร้อนภายในเครื่องอบแห้งจะลอยตัวสูงขึ้นและถูกแทนที่ด้วยอากาศเย็นนอกเครื่องอบแห้ง หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบนี้ คือ อากาศภายในเครื่องอบแห้งเมื่อได้รับความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์แล้ว ทำให้อากาศมีความหนาแน่นลดลงลอยตัวสูงขึ้น ผ่านชั้นวางผลิตภัณฑ์ที่ต้องการอบแห้ง อากาศร้อนนี้จะพาความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์แล้วไหลออกจากเครื่องอบแห้งไปสู่อากาศแวดล้อมโดยเครื่องอบแห้งแบบการพาความร้อนแบบธรรมชาติมีอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเครื่องแห้งอยู่ในช่วง 30-40 ในขณะที่มีอุณหภูมิอากาศแวดล้อม 32.3 อัตราเร็วลม 0.45 m/s ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ 650.5 W/m² ซึ่งเหมาะกับผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการอุณหภูมิที่มาก ๆ โดยสามารถประยุกต์ใช้เกี่ยวกับอุตสาหกรรมในครัวเรือนที่เป็นขนาดเล็ก เพราะสามารถลดระยะเวลา ในการอบแห้งทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพมีราคาเมื่อนำมาวางจำหน่ายตามท้องตลาดได้เป็นอย่างดี อีกทั้งมี ค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องที่ต่ำเหมาะสมใช้อบแห้งกับผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องใช้อุณหภูมิสูงมาก ส่วนพาความร้อนแบบบังคับ เป็นเครื่องอบแห้งที่มีพัดลมช่วยระบายความร้อนภายในเครื่องอบแห้ง โดยมีการออกแบบให้มีความสามารถในการกำหนดอัตราการไหลของอากาศภายในเครื่องอบแห้งได้ เพื่อ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง เครื่องอบแห้งที่มีการพาความร้อนแบบบังคับนี้มักจะมีแผงรับรังสี แยกออกจากตัวเครื่อง และมีการหมุนวนที่ตัวเครื่องเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน ลักษณะของแผงรับ รังสีโดยเครื่องอบแห้งแบบการพาความร้อนแบบบังคับมีอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเครื่องแห้งอยู่ในช่วง 45-65 ในขณะที่มีอุณหภูมิอากาศแวดล้อม 32.3 อัตราเร็วลม 0.56-0.94 m/s ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ 650.5 W/m² ซึ่งเหมาะกับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการอุณหภูมิที่สูง มากๆโดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้เกี่ยวกับอุตสาหกรรมที่เป็นขนาดใหญ่ในโรงงานอุตสาหกรรมเพราะ สามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งมีกำลังการผลิตที่มากขึ้น อีกทั้งช่วยเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ส่งผลให้ มีราคาสูงขึ้น

จากรูวรรณ กุลวิศว , สมเกียรติ ปรัชญาวรรกร และสมชาติ ไสภณรณฤทธิ์ จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ ม.เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีทำการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อสมบัติการแพร่ความร้อน การเปลี่ยนแปลงปริมาณสารประกอบที่ระเหยง่าย ได้แก่ ethyl acetate, butyl acetate และ isoamyl acetate และคุณภาพของกล้วยแผ่นทางด้านการหัดตัวสีและเนื้อสัมผัส โดยใช้กล้วยหอมทองระยะสุก 5 หั่นตามขวางหนา 3 มิลลิเมตร ทำการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 70, 80, 90 และ 100°C จากการทดลอง พบว่า เมื่อใช้อุณหภูมิการอบแห้งสูง และความชื้นสูงจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อน ประสิทธิภาพสูง มีการหัดตัวน้อย กรอบมากและความแข็งน้อยลง ขณะที่ใช้น้ำตาลเข้มข้น สำหรับปริมาณ isoamyl acetate ลดลงมาก

เมื่อใช้อุณหภูมิการอบแห้งสูงขึ้น ในขณะที่ ethyl acetate และ butyl acetate ลดลงน้อย ยกเว้นที่อุณหภูมิ 100°C butyl acetate มีค่าเพิ่มขึ้น จากตอนเริ่มต้น

นายณพรัตน์ อมัตริรัตน์ จากคณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ได้ การศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนระหว่างสารทำความเย็น R- 22 กับ COLD – 22 จากศึกษาพบว่า ระบบที่ใช้คอมเพรสเซอร์ 2 ลูก สามารถลดความร้อนในคอมเพรสเซอร์ของระบบปั๊มความร้อนดีกว่าระบบที่ใช้คอมเพรสเซอร์ 1 ลูก คิดเป็น 21.68 % ผลจากความร้อนในคอมเพรสเซอร์ลดลง ทำให้ความดันสารทำความเย็นในระบบด้านต่ำและสูงลดลง คิดเป็น 13.84 % และ 2.5 % ตามลำดับ แต่การใช้คอมเพรสเซอร์ 2 ลูก ทำงานสลับกันที่ลูก ส่งผลใช้ความถี่การสตาร์ทตัวของ คอมเพรสเซอร์สูงขึ้น ทำให้ใช้กำลังไฟฟ้าสูงกว่าการใช้เพรสเซอร์ 1 ลูก คิดเป็น 4.70 %

จากนั้นทำการศึกษาตามขั้นตอนที่สองพบว่า ระบบที่ใช้สารทำความเย็น COLD -22 มีประสิทธิภาพ ด้านความสิ้นเปลืองพลังงานดีกว่าระบบที่ใช้สารทำความเย็น R-22 คิดเป็น 30.83 % และสารทำความเย็น COLD -22 ยังสามารถลดความร้อนในคอมเพรสเซอร์ดีกว่า R-22 คิดเป็น 27.84 % ผลจากร้อนใน คอมเพรสเซอร์ลดลง ทำให้กำลังงานที่ป้อนให้แก่เครื่องอัดไอความดันสารทำความเย็นด้านต่ำและด้านสูง ลดลง คิดเป็น 32.16 % , 45.09%, และ 47.92 % ตามลำดับ แต่การใช้สารทำความเย็น COLD -22 ส่งผลให้ อุณหภูมิในตู้อบแห้งต่ำกว่าการใช้สารทำความเย็น R-22 คิดเป็น 20.51 % ดังนั้นสารทำความเย็น ในระบบนี้ ความร้อนสามารถเปลี่ยนจาก R-22 เป็น COLD -22 ได้แต่ต้องพิจารณาให้เหมาะสมกับอุณหภูมิที่ ต้องการในกระบวนการอบแห้ง

อาภาภรณ์ ศรีสระคู จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ได้ ทำการจำลองการอบแห้งลำไยโดยใช้วิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนเปอร์เซ็นต์การเปิด ช่องปล่อยอากาศทิ้งและอุณหภูมิในการอบต่อการกระจายอุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งลำไยและ ปริมาณพลังงานที่ใช้ของอบ โดยใช้โปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ถูกนำไปใช้แบบจำลองแบบ 2 มิติ สร้างขึ้นทั้งหมด 9 แบบจำลอง โดยเปลี่ยนอุณหภูมิการอบแห้งเท่ากับ 70, 75 และ 80 องศาเซลเซียส จาก ผลการวิเคราะห์การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล พบว่า ผลของอุณหภูมิในที่อุณหภูมิสูง จะทำให้เกิดการ กระจายตัวของอุณหภูมิในการอบได้ดี ซึ่งพบว่าที่อุณหภูมิในการอบที่ 75 องศาเซลเซียส จะทำให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำพวบน้อยที่สุด

ปรีดา พัฒนະแสง และ จริญญา รักเพื่อน จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขา วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ได้ศึกษาลักษณะการไหลของอากาศในเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน โดยทำการ ทดลองการวัดการวัดการกระจายอุณหภูมิและความเร็วของอากาศ ซึ่งตัวแปร คือ ระดับความเร็วของอากาศ และระยะห่างจากช่องทางเข้าของอากาศเพื่อจะได้ทราบถึงลักษณะการกระจายของอากาศและได้ทำการทดลองการไหลของอากาศโดยใช้โปรแกรม CFD เพื่อศึกษาการกระจายอุณหภูมิ ความเร็วและความดัน ภายในเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนโดยการ ใช้ในสภาวะเป็น Turbulent ได้ผลการจำลองการไหลโดยโปรแกรม วิเคราะห์การไหลเชิงตัวเลข และผลที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียง พบว่าอุณหภูมิของอากาศที่อยู่ในห้องอบจะแปรผันกับความเร็วของที่ทางเข้าห้องอบแห้งและจากโปรแกรมวิเคราะห์เชิงตัวเลขจะพบว่าเกิดการไหลหมุนวนขึ้นในห้องอบแห้งที่ด้านหน้าและหลังถาดอบแห้ง

พิทักษ์ จันทรเจริญ จากงานวิจัยโปรแกรมวิชา วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบัน ราชภัฏสวนดุสิต ได้ทำการวิเคราะห์การทำแห้งหน่อไม้ไผ่ตรงโดยเครื่องอบแห้งชนิดถาดแบบลม ร้อน ขนาดกว้าง 0.86 เมตร ยาว 1.21 เมตร สูง 1.90 เมตร ภายในมีถาดอบแห้งที่สามารถวาง เรียงถาดกันได้ ด้านหน้าของตู้อบแห้ง มีประตูสำหรับเปิดเปิดเพื่อนำถาดอบแห้งเข้าหรือออกจากตู้ ถาดอบแห้งเป็นถาดสี่เหลี่ยม ขนาดกว้าง 0.78 เมตร ยาว 0.98 เมตร ตะแกรงทำด้วยสแตนเลสมี ช่องสำหรับการถ่ายเทของอากาศมีขอบสูงประมาณ 0.04 เมตร เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะ ต่างๆ(อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม การกระจายตัวของลมร้อนภายในตู้อบและ ระยะเวลาในการอบแห้ง) ที่เหมาะสมของการอบแห้งหน่อไม้ไผ่ตรง ที่ประมาณ 1 เซนติเมตร โดย ใช้อบแห้งชนิดถาด (Tray dryer) ที่อุณหภูมิ 50,55,60 และ 65 องศาเซลเซียส จากการศึกษา พบว่า สีของผลิตภัณฑ์ หน่อไม้ไผ่ตรงที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิที่ 4 ระดับ ไม่มีความแตกต่างกัน แต่ ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งแตกต่างกัน อุณหภูมิและระยะเวลาที่มีความเหมาะสมในการ อบแห้งหน่อไม้ไผ่ตรงคือ 60 ละ 65 องศาเซลเซียส เวลาประมาณ 8-9 ชั่วโมง

สุภวรรณ ภูริระวณิชกุลและคณะ จากสถานวิจัยเทคโนโลยีพลังงาน คณะ วิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ได้ศึกษาการอบแห้งขนุนด้วยพลังงานความร้อน ร่วมของรังสีอินฟราเรด/ไมโครเวฟ และลมร้อน : จลนพลศาสตร์คุณภาพและการทดสอบประสาท สัมผัสปัจจัยของสภาวะในการอบแห้งต่อจลนพลศาสตร์ และคุณภาพของขนุนแห้งสายพันธุ์ทอง ประเสริฐ ด้วยสภาวะการทดลองอบแห้งที่แตกต่างกัน 4 เงื่อนไข ได้แก่ การอบแห้งด้วยรังสี อินฟราเรด การอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมระหว่างรังสีอินฟราเรดและลมร้อน การอบแห้ง แบบสองขั้นตอนด้วย ไมโครเวฟและลมร้อน และสุดท้ายคือการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียว โดย

ในทุกการทดลองที่อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดจะใช้กำลังเท่ากับ 1,000 W และกำลังของไมโครเวฟที่ 90 W (โดยใช้เวลาอบแห้ง 3 นาที) สำหรับกรณีที่ใช้ลมร้อนจะใช้ความเร็วของอากาศเท่ากับ 1.1 m/s และทุกเงื่อนไขของการอบแห้ง จะทดลองอบแห้งขนุนในช่วงอุณหภูมิ 40-60°C โดยมีค่าความชื้นเริ่มต้นของขนุนอยู่ในช่วง 300-400% dry-basis (d.b.) และอบแห้งจนค่าความชื้นสุดท้ายของขนุนอยู่ในช่วง 12-19% dry-basis จากผลการทดลอง พบว่า อัตราการอบแห้งขนุนขึ้นกับอุณหภูมิอบแห้งอย่างมากเมื่อเทียบกับความชื้นเริ่มต้นของตัวอย่าง สำหรับการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งชั้นบางของขนุน พบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งขนุนแบบชั้นบางโดยใช้สมการแบบ Logarithmic, Approximation of Diffusion และ Modified Page สามารถใช้อธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งขนุนด้วยรังสีอินฟราเรด การอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมระหว่างรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน และการอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอนด้วยคลื่นไมโครเวฟกับลมร้อนได้เป็นอย่างดี ตามลำดับ เมื่อพิจารณาแหล่งพลังงานที่ใช้ พบว่า การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดมี อัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งด้วยแหล่งพลังงานอื่นๆ นอกจากนี้ พบว่าการอบแห้งด้วยอุณหภูมิอบแห้งที่สูงจะมีความสิ้นเปลืองพลังงานต่ำกว่ากรณีการอบแห้งด้วยอุณหภูมิต่ำ สำหรับการวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ การหดตัว สี และความยอมรับในการบริโภคพบว่า เมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น ค่าความสว่าง (L^*) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) เพิ่มขึ้น และการเปลี่ยนแปลงสีรวม (ΔE^*) เพิ่มขึ้น ในทางตรงข้าม พบว่าค่าความเป็นสีแดง (a^*) และการหดตัวมีค่าลดลง นอกจากนี้ การทดสอบทางประสาทสัมผัสโดยการชิมและความยอมรับได้ในการบริโภคในแต่ละสภาวะอบแห้ง พบว่าขนุนอบแห้งทุกเงื่อนไขการทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญโดยไม่ขึ้นกับอุณหภูมิอบแห้ง (ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%) และร้อยละของการหดตัวของผลิตภัณฑ์

จำลองเอกธนศ สบายวงศ์, ไพโรเดชเทพพลผลและสรวิษฐ์ แซดวง จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒได้ศึกษาการผลิตลมร้อนด้วยเตาชีวมวลสำหรับกระบวนการอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชน จากการทดลองผลิตลมร้อนด้วยเตาชีวมวล ซึ่งได้ทดลองเปิดวาล์วอากาศป้อนเข้าเตาชีวมวลที่มุมต่างๆดังนี้ ที่มุม 0, 45, 90 องศา พบว่ามีอัตราการใช้เชื้อเพลิง 12.48 kg/hr, 19.88 kg/hr และ 20.84 kg/hr ตามลำดับ และสามารถให้อุณหภูมิของเสียเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 120 องศาเซลเซียส, 165 องศาเซลเซียส, 210 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากการทดลองอบแห้งมะม่วงน้ำหนัก 77 kg ที่อุณหภูมิ 60 °C ทดลองอบเป็นเวลา 8 ชั่วโมง พบว่ามีอัตราการอบแห้ง 5.44 kg/hr ใช้เชื้อเพลิงไปทั้งหมด 152.7 kg เมื่อมีการสลับทิศทางการไหลของลมร้อนทุกๆ 15 นาที

ปี พ.ศ. 2557 ดร.วิสาชา ภูจินดา สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์ การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมและผลตอบแทนทางสังคมจากการลงทุนจากการนำชีวมวลเพื่อผลิตพลังงานใช้ในระดับครัวเรือนและระดับชุมชนโดยทำการศึกษาสถานการณ์การใช้พลังงานชีวมวลในรูปแบบต่างๆในระดับชุมชนและระดับครัวเรือนซึ่งจะนำไปสู่การเสนอแนวทางการใช้พลังงานชีวมวลในระดับชุมชนและครัวเรือนที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุดและมีผลตอบแทนทางสังคมจากการลงทุนดีที่สุดโดยทำการสัมภาษณ์เชิงลึกผู้เชี่ยวชาญและผู้แทนของหน่วยงานที่เกี่ยวข้องด้านพลังงานชีวมวล จำนวน 9 คน และสำรวจการใช้พลังงานชีวมวลด้านพลังงานความร้อนและด้านการผลิตไฟฟ้า 6 พื้นที่ได้แก่ครัวเรือนเผาถ่านครัวเรือนใช้เตาแก๊สซีพีเออร์ชุมชนบ้านเตาปิ้งย่างประสิทธิภาพสูงวิสาหกิจชุมชนเผาถ่านชุมชนผลิตไฟฟ้าโครงการผลิตไฟฟ้า

ผลการศึกษาพบว่าเมื่อพิจารณาการนำชีวมวลมาใช้ประโยชน์ในการผลิตพลังงานนั้นจะมี 2 อย่างคือการนำมาผลิตความร้อน และผลิตไฟฟ้าโดยผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของการนำมาผลิตไฟฟ้าจะมากกว่าการนำมาผลิตความร้อนและเมื่อเทียบผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมในระดับชุมชนและระดับครัวเรือนนั้นผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมจากการผลิตพลังงานจากชีวมวลในระดับชุมชนจะมากกว่าระดับครัวเรือนเพราะมีขั้นตอนที่ยุ่งยากกว่าและใช้ชีวมวลในปริมาณที่มากกว่าสำหรับผลตอบแทนทางสังคมจากการลงทุนนั้นการผลิตพลังงานความร้อนทั้งในระดับครัวเรือนและระดับชุมชนมีผลตอบแทนทางสังคมจากการลงทุน 0.45-6.40 และเมื่อเทียบผลตอบแทนทางสังคมจากการลงทุนในระดับครัวเรือนจะมากกว่าระดับชุมชน ทั้งนี้เพราะประโยชน์ที่ได้รับในระดับครัวเรือนจะมากกว่าชุมชนและสามารถประเมินค่าได้ง่ายกว่าชุมชนแต่สำหรับการผลิตไฟฟ้าจากชีวมวลมีผลตอบแทนทางสังคมจากการลงทุน 0.26-1.78 เพราะใช้ การลงทุนที่สูงแต่ผลประโยชน์ที่ได้น้อยกว่าผลิตพลังงานความร้อน

ข้อเสนอแนะการพัฒนาการผลิตพลังงานจากชีวมวลนั้นควรมีการประเมินความเหมาะสมของการนำชีวมวลมาใช้ประโยชน์เทียบกับบริบทของชุมชนในมิติต่างๆ ทั้งด้านกายภาพของชุมชน ด้านเศรษฐกิจของชุมชนด้านวิถีชีวิตของชุมชนและผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมที่จะเกิดขึ้นควรมีการสร้างความรู้ความเข้าใจให้กับชุมชนและครัวเรือนและชี้ให้เห็นถึงผลตอบแทนทางสังคมจากการลงทุนที่จะได้รวมถึงการจัดการผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้น

สุทธิพร เนียมพงษ์พานิชและหอม นิตติรงค์ เอนก สุขเจริญ การพัฒนาประสิทธิภาพของเตาชีวมวลโดยใช้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ งานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) โดยใช้โปรแกรม Fluent เข้ามาช่วยทำนายพฤติกรรมการไหลของอากาศ

สำหรับแบบจำลองโครงสร้างเตาผลิตก๊าซชีววมวลปี้บหรือเตาเผาชีวมวลขนาดเล็กขึ้น (Updraft Gasifier) เพื่ออธิบายพฤติกรรมบริเวณทางออกด้านข้างของเตาผลิตก๊าซชีววมวลที่ไม่เกิดการเผาไหม้ และปรับปรุงโครงสร้างของเตาผลิตก๊าซชีววมวลใหม่ ให้มี โครงสร้างที่เหมาะสมทำให้ทุกทางออกเกิดการเผาไหม้จากผลที่ได้ จากการวิเคราะห์พลศาสตร์การไหลของแบบจำลองโครงสร้างเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบเก่าทำให้เห็นถึงปัญหาที่ทำให้ไม่เกิดการเผาไหม้ซึ่งเกิดจากอากาศที่ไหลออกมาจากบางทางออกมีความเร็วต่ำทำให้ไม่สามารถผสมกับก๊าซเชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้ ได้ หลังจากนั้นจึงปรับปรุงแบบจำลองโครงสร้างเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบใหม่และวิเคราะห์พลศาสตร์การไหลของอากาศและผลที่ได้จากแบบจำลองโครงสร้างเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบใหม่ทำให้อากาศสามารถไหลออกที่ทางออกมีความเร็วที่สูงขึ้นและกระจายทุกทางออก

พ.ศ.2555 สุภวรรณ ฐิระวณิชกุล สากีนา ลาแมปะ ยุทธนา ฐิระวณิชกุล คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาปัจจัยของสภาวะในการอบแห้งต่อจลนพลศาสตร์และคุณภาพของขนุนแห้งสายพันธ์ ทองประเสริฐด้วยสภาวะการทดลองอบแห้งที่แตกต่างกัน 4 เงื่อนไข ได้แก่การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดการอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมระหว่างรังสีอินฟราเรดและลมร้อนการอบแห้งแบบสองขั้นตอนด้วยไมโครเวฟและลมร้อนและสุดท้ายคือการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียว โดยในทุกการทดลองที่อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดจะใช้กำลังเท่ากับ 1,000 W และกำลังของไมโครเวฟที่ 90 W (โดยใช้เวลาอบแห้ง 3 นาที) สำหรับกรณีที่ใช้ลมร้อนจะใช้ความเร็วของอากาศเท่ากับ 1.1 m/s และทุกเงื่อนไขของการอบแห้ง จะทดลองอบแห้งขนุนในช่วงอุณหภูมิ 40-60°C โดยมีค่าความชื้นเริ่มต้นของขนุนอยู่ในช่วง 300-400% dry-basis (d.b.) และอบแห้งจนค่าความชื้นสุดท้ายของขนุนอยู่ในช่วง 12-19% dry-basis จากผลการทดลอง พบว่า อัตราการอบแห้งขนุนขึ้นกับอุณหภูมิอบแห้งอย่างมากเมื่อเทียบกับความชื้นเริ่มต้นของ ตัวอย่าง สำหรับการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งชั้นบางของขนุน พบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งขนุนแบบชั้นบางโดยใช้สมการแบบ Logarithmic, Approximation of Diffusion และ Modified Page สามารถใช้อธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งขนุนด้วยรังสีอินฟราเรด การอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมระหว่างรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน และการอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอนด้วยคลื่นไมโครเวฟกับลมร้อนได้เป็นอย่างดี ตามลำดับ เมื่อพิจารณาแหล่งพลังงานที่ใช้ พบว่า การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งด้วยแหล่งพลังงานอื่นๆ นอกจากนี้ พบว่าการอบแห้งด้วยอุณหภูมิอบแห้งที่สูงจะมีความสิ้นเปลืองพลังงานต่ำกว่ากรณีการอบแห้งด้วยอุณหภูมิต่ำ สำหรับการวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ การหัดตัว สี และความยอมรับในการ

บริเวณ พบว่า เมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น ค่าความสว่าง (L^*) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) เพิ่มขึ้น และการเปลี่ยนแปลงสีรวม (ΔE^*) เพิ่มขึ้น ในทางตรงข้าม พบว่า ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และการหดตัวมีค่าลดลง นอกจากนี้ การทดสอบทางประสาทสัมผัสโดยการชิมและความยอมรับได้ในการบริโภคในแต่ละสภาวะอบแห้ง พบว่าขนมอบแห้งทุกเงื่อนไขการทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญโดยไม่ขึ้นกับอุณหภูมิอบแห้ง (ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%) และร้อยละของการหดตัวของผลิตภัณฑ์

ปี 2551 เวียง อากรณี พิมล วุฒิสินธ์ ชุศักดิ์ ชาวประดิษฐ์ ตัญญู กองช่าง บัณฑิต สาขา แสงวงษา สอนง อมฤกษ์ พุทธินันท์ จารุวัฒน์ ได้ทำการพัฒนารูปแบบเครื่องอบแห้งลำไยเนื้อสีทองเพื่อเป็นตัวอย่างและแนวทางให้เกษตรกรปรับใช้โดยนำหลักการอบแห้งลำไยเนื้อสีทองที่มีประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์มาผสมผสานกับเครื่องอบแห้งแบบที่ชาวบ้านใช้เดิมซึ่งได้เครื่องอบแห้งลำไยเนื้อสีทองแบบอุโมงค์ที่ใช้วัสดุที่ราคาถูกลงใช้ลมร้อนจากระบบแลกเปลี่ยนความร้อนจากเตาชีวมวลตัวเครื่องอบแห้งแบ่งเป็น 2 ส่วนคือห้องอบแห้งจะอยู่ส่วนล่างมีขนาด 1.30x6.00x1.40 เมตร (กว้างxยาวxสูง) ก่อด้วยอิฐมอญฉาบปูนด้านนอก ด้านในและพื้นปูด้วยกระเบื้องบรรจุร้อนขึ้นได้ 4 คั่นส่วนห้องลมร้อนแลกเปลี่ยนความร้อนจะอยู่ ในส่วนบนมีขนาด 1.30x6.00x0.80 เมตร (กว้างxยาวxสูง) ด้านในมีท่อแลกเปลี่ยนลมร้อนผนังทำด้วยเหล็กกรุฉนวนห้องลมร้อนนั้นนอกจากแลกเปลี่ยนความร้อนแล้วยังเวียนลมร้อนบางส่วนกลับมาใช้ใหม่ด้วยพัดลมกระจายลมร้อนแบบกรงกระรอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.45 เมตร ยาว 1.00 เมตร มอเตอร์ไฟฟ้าต้นกำลังเฟสเดียว 3 แรงม้ารอบใบพัดลม 967 รอบต่อวินาทีสร้างลมร้อนปริมาณ 2 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาทีหรือความเร็วลมประมาณ 1.10 เมตรต่อวินาทีชั้นวางเนื้อลำไยเป็นรถเข็นมีขนาด 0.90x1.00x1.25 เมตร (กว้างxยาวxสูง) มีลูกล้อ 4 ล้อในการเคลื่อนที่ทั้งบนพื้นและในห้องอบแห้งมีชั้นวางถาดบรรจุลำไย 9 ชั้นเพื่อรองรับถาดบรรจุลำไยตะแกรงสแตนเลสลักษณะ 0.9x1.00 เมตร (กว้างxยาว)เตาชีวมวลมีขนาด 0.74x0.87x1.31 เมตร (กว้างxยาวxสูง) ก่อด้วยอิฐฉาบปูนด้านบนมีท่อแลกเปลี่ยนความร้อนติดตั้งเพื่อนำความร้อนเข้าสู่ห้องลมร้อนโดยท่อแลกเปลี่ยนความร้อนนี้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.30 เมตร มีช่วงความยาวรวมในห้องแลกเปลี่ยนลมร้อน 15 เมตร หรือคิดเป็นพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนประมาณ 14 ตารางเมตร ส่วนของท่อแลกเปลี่ยนลมร้อนอุณหภูมิสูงจากเตาถึงทางเข้าห้องแลกเปลี่ยนลมร้อนต้องมีฉนวนกันความร้อนสูญเสียส่วนท่อด้านทางออกจากห้องลมร้อนจะยกสูงเป็นปล่องดูดอากาศร้อนลอยตัวสูงประมาณ 5 เมตร อัตราการใช้เชื้อเพลิงพื้นลำไย 25 กิโลกรัมต่อชั่วโมงจากการทดสอบประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนอยู่ที่ประมาณ 5เปอร์เซ็นต์ความสามารถในการผลิตลำไยเนื้อสีทองอบแห้ง 120

กิโลกรัมต่อวัน จากผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ พบว่า ราคาลำไยผลสดจะเป็นปัจจัยหลักในการกำหนดต้นทุนการผลิตลำไยอบแห้งเนื้อสีทองในการวิเคราะห์นี้คิดราคาลำไยผลสด 15 บาทต่อกิโลกรัมต้นทุนการผลิตลำไยเนื้อสีทองอบแห้งจะอยู่ที่ 203.49 บาทต่อกิโลกรัมของลำไยอบแห้ง โดยต้นทุนจุดคุ้มทุนและระยะเวลาคืนทุน คิดจากราคาขายลำไยเนื้อสีทองอบแห้ง 250 บาทต่อกิโลกรัมจุดคุ้มทุนอยู่ที่ลำไยอบแห้งเนื้อสีทอง 573.15 กิโลกรัมต่อปี ระยะเวลาคืนทุนอยู่ที่ 0.67 ปี หรือประมาณ 1ฤดูกาลอัตราผลตอบแทนการลงทุน 148.83 เปอร์เซ็นต์ต่อปี

ปี 2555 วิเชียร ดวงสีเสน, เทวรัตน์ ทิพย์วิมล และวีรชัย อาจหาญ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุน (Rotary Screen Dryer) การทดลองครั้งนี้ใช้เครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุนซึ่งมีขนาดรูตะแกรง 3 mm และมีรูความจุ m^3 การดำเนินการวิจัยประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอน คือ (1) การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของกากมันสำปะหลัง คือ ความชื้นและความหนาแน่นของกากมันสำปะหลัง (2) การลดความชื้นทางกลโดยใช้เครื่องเอ็กทูเดอร์ (3) การทดสอบการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบตะแกรง โดยศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการอบแห้งได้แก่ อุณหภูมิในการอบแห้ง (100 และ $120^{\circ}C$) ความเร็วรอบในการหมุน (2 , 4 และ 6) และปริมาณกากมันสำปะหลังภายในถังอบ (20 ,40 และ 60)

ผลการทดลองพบว่า กากมันสำปะหลังสดที่ออกจากโรงงานแปรรูปมันสำปะหลังมีลักษณะชื้นมากและจับตัวเป็นก้อน โดยมีความชื้นเฉลี่ยคือ 372.53% d.b และมีความหนาแน่นเท่ากับ $712.50 \text{ Kg}/m^3$ เมื่อผ่านการลดความชื้นทางกล พบว่า กากมันสำปะหลังมีความชื้นลดลงเหลือ 216.11% d.b และมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ $571.45 \text{ Kg}/m^3$ สภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้ง คือ ความเร็วรอบ 6 rpm อุณหภูมิ $100^{\circ}C$ และ น้ำหนักป้อนนกากมันสำปะหลัง 40 kg (14%ของปริมาตรถัง) จะใช้เวลาในการอบแห้งคือ 1.5 hr อัตราการอบแห้ง $7.84 \text{ kg}_{\text{dry/solid/hr}}$ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำคือ $5.94 \text{ MJ/kg}_{\text{water}}$ กากมันสำปะหลังที่ได้มีสองส่วน คือ ส่วนที่ร่วงผ่านรูตะแกรงของถังอบ 56.20% ความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 107.21%d.b และส่วนที่ค้างภายในตะแกรงของถังอบทรงกระบอก 43.80% ความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 14.55%d.b

ตาราง 9 สรุปสาระสำคัญของงานวิจัยที่ผ่านมา

นักวิจัย	ความสอดคล้องกับ การพัฒนา	วัสดุที่ใช้ใน การทดลอง	ประโยชน์ที่ได้รับ	ค่าใช้จ่าย
ธนากร ชีระ วัฒนานนท์	ศึกษาสภาวะการไหล ของอากาศใน เครื่องอบแห้งแบบลม ร้อนโดยวิธีการ คำนวณทาง พลศาสตร์ของไหล	-	การเพิ่มความเร็วลม ร้อนให้สูงขึ้นที่ อุณหภูมิเท่าเดิมจะมี ผลต่อกระจายตัวของ อุณหภูมิเพียง เล็กน้อย	-
สมมาส แก้วล้วน และคณะ	ทำการศึกษา ทดสอบ และเปรียบเทียบ สมรรถนะของเตาชีว มวลขนาด 20 kW	ไม้ยูคาลิปตัส	การนำเตาชีวมวลมา ใช้เป็นเตาความร้อน สำหรับการประกอบ อาหารในครัวเรือน	เตาชีวมวลมี ค่าใช้จ่าย ด้าน เชื้อเพลิงต่ำ กว่าการใช้ เตาแก๊สหุง ต้ม
อนิรุทธิ์ ต่ายขาว และสมบัติ ทิฆม ทรัพย์	เปรียบเทียบหลักการ ทำงานของเครื่องอบ แห้งพลังงาน แสงอาทิตย์	-	เหมาะกับผลิตภัณฑ์ที่ ต้องการอุณหภูมิที่สูง มากๆสามารถนำไป ประยุกต์ใช้กับ อุตสาหกรรมที่มี ขนาดใหญ่	-

ตาราง 9 (ต่อ)

นักวิจัย	ความสอดคล้องกับ การพัฒนา	วัสดุที่ใช้ใน การทดลอง	ประโยชน์ที่ได้รับ	ค่าใช้จ่าย
จากรุวรรณ กุลวิศว , สมเกียรติ ปรัชญาวารการ และสมชาติ โสภณวรรณฤทธิ์	ศึกษาผลของอุณหภูมิ อบแห้งที่มีต่อ สัมประสิทธิ์ การแพร่ ความชื้น	กล้วยแผ่น	เมื่อใช้อุณหภูมิการ อบแห้งสูง และ ความชื้นสูงจะให้ค่า สัมประสิทธิ์การแพร่ ความชื้น ประสิทธิภาพ สูง	-
นาย นพรัตน์ อมิตร์รัตน์	ศึกษาและ เปรียบเทียบ ประสิทธิภาพ เครื่องอบแห้งแบบปั๊ม ความร้อน	-	สารทำความเย็น COLD -22 ยัง สามารถลดความร้อน ในคอมเพรสเซอร์ ดีกว่า R-22	-
อาภาภรณ์ ศรี สระคู	ทำการจำลองการ อบแห้งลำไยโดยใช้ วิธีการคำนวณทางพล ศาสตร์เพื่อ	ลำไย	ผลของอุณหภูมิในที่ อุณหภูมิสูง จะทำให้ เกิดการ กระจายตัว ของอุณหภูมิในการ อบได้ดี	-
ปรีดา พัฒนนะแสง และ จริญญา รัก เพื่อน	ศึกษาลักษณะการ ไหลของอากาศใน เครื่องอบแห้งแบบลม ร้อน	-	อุณหภูมิของอากาศที่ อยู่ในห้องอบจะแปร ผันกับความเร็วของที่ ทางเข้าห้องอบแห้ง	-

ตาราง 9 (ต่อ)

นักวิจัย	ความสอดคล้องกับ การพัฒนา	วัสดุที่ใช้ใน การทดลอง	ประโยชน์ที่ได้รับ	ค่าใช้จ่าย
พิทักษ์ จันทร เจริญ	วิเคราะห์เครื่อง อบแห้งชนิดถาดแบบ ลมร้อน	หน่อไม้ไผ่ตรง	ระยะเวลาที่ใช้ในการ อบแห้งแตกต่างกัน	-
จำลองเอกธนศ สภายวงษ์, พีร เดช เทพพลูผล	ศึกษาการผลิตลมร้อน ด้วยเตาชีวมวลสำหรับ กระบวนการอบแห้ง	มะม่วง	พบว่าอัตราการ อบแห้ง 5.44kg/hr ใช้ เชื้อเพลิงไปทั้งหมด 152.7 kg เมื่อมีการ สลับทิศทางการไหล ของลมร้อนทุกๆ 15 นาที	-
ดร. วิสาขา ภู จินดา สถาบัน บัณฑิตพัฒนบริ หารศาสตร์	ศึกษาผลกระทบด้าน สิ่งแวดล้อมและ ผลตอบแทนทางสังคม	ชีวมวล	การนำมาผลิตความ ร้อน และผลิตไฟฟ้า	
สุทธิพร เนียม พงษ์พานิชและ หอม นิตรงค์ เอนก สุขเจริญ	การพัฒนา ประสิทธิภาพของเตา ชีวมวลโดยใช้ แบบจำลองพลศาสตร์ ของไหลเชิงคำนวณ	-	ได้แบบจำลอง โครงสร้างเตาผลิต ก๊าซชีวมวลแบบใหม่ ทำให้อากาศสามารถ ไหลออกที่รูทางออกมี ความเร็วที่สูงขึ้นและ กระจายทุกรูทางออก	

ตาราง 9 (ต่อ)

นักวิจัย	ความสอดคล้องกับ การพัฒนา	วัสดุที่ใช้ใน การทดลอง	ประโยชน์ที่ได้รับ	ค่าใช้จ่าย
สุภวรรณ ภูริะ วณิชย์กุล สากีนา ลาแมปะ ยุทธนา ภูริะวณิชย์กุล	ศึกษาปัจจัยของ สภาวะในกาอบแห้ง ต่อจลนพลศาสตร์และ คุณภาพของขนุนแห้ง	ขนุนแห้ง	พบว่าการอบแห้งด้วย อุณหภูมิอบแห้งที่สูง จะมีความสิ้นเปลือง พลังงานต่ำกว่ากรณี การอบแห้งด้วย อุณหภูมิต่ำ	
เวียง อากรชี พิมล วุฒิสินธ์ ชู ศักดิ์ ชวประดิษฐ์ ตัณญู กองช่าง บัณฑา แสงวงษา สนอง อมฤกษ์ พุทธินันท์ จารุวัฒน์	ทำการพัฒนารูปแบบ เครื่องอบแห้งลำไย เนื้อสีทองเพื่อเป็น ตัวอย่างและแนวทาง ให้เกษตรกรปรับใช้	ลำไยเนื้อสีทอง	ความสามารถในการ ผลิตลำไยเนื้อสีทอง อบแห้ง 120 กิโลกรัม ต่อวัน	

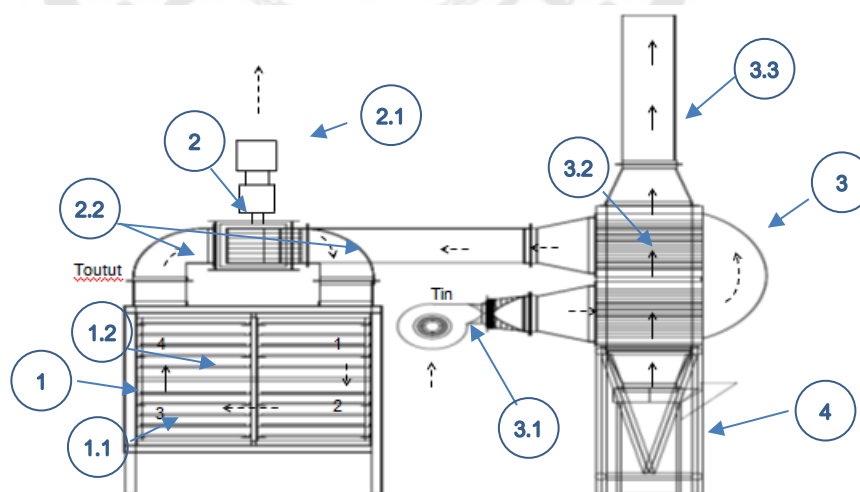
บทที่ 3

เครื่องมือและวิธีการทดลองงานวิจัย

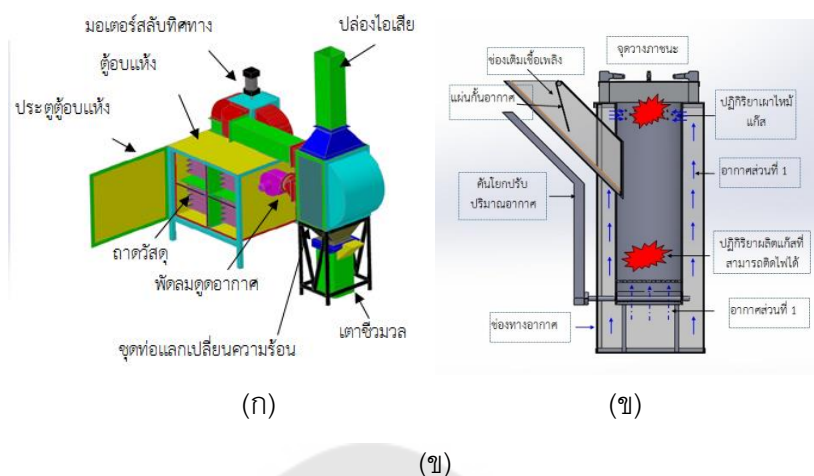
การดำเนินการของงานวิจัยนี้จะประกอบด้วย การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนที่ใช้เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง โดยมีห้องอบแห้ง 4 ห้องอบแห้ง และมีวาล์วสลับทิศทางการไหลของลมร้อน เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งผลิตภัณฑ์จากกล้วยหั่นแว่นด้วยเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนโดยใช้ลมร้อนที่ผลิตจากเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง และเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะและความคุ้มค่าเศรษฐศาสตร์ของเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนแบบสลับทิศทางโดยลมร้อนผลิตจากเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงและเครื่องอบแห้งแบบดั้งเดิมที่ใช้แก๊ส LPG เป็นเชื้อเพลิง

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทดลอง

3.1.1 เครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนแบบสลับทิศทางที่ผลิตจากเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสามารถแบ่งส่วนประกอบหลักได้เป็น 4 ส่วน คือ 1. ส่วนของตู้อบแห้ง 2. ส่วนปั๊มลมร้อนแบบสลับทิศทาง 3. ส่วนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และ 4. ส่วนเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง ซึ่งแต่ละส่วนประกอบมีหน้าที่และหลักการทำงานแสดงดังรูปที่ 19



ภาพประกอบ 19 เครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนแบบสลับทิศทางที่ผลิตจากเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง



ภาพประกอบ 20 เครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนแบบสลับทิศทาง (ก)และเตาชีวมวล
ประสิทธิภาพสูง (ข)

3.1.1.1 ส่วนของตู้อบแห้ง มีขนาดกว้าง 1100 mm ยาว 900 mm และสูง 950 mm ผนังตู้อบแห้งทำจากสแตนเลสภายนอกพ่นทึบด้วยสีฉนวนกันความร้อน ภายในตู้อบแห้งมีการแบ่งเป็นห้องจำนวน 4 ห้อง (หมายเลข 1.1) แต่ละห้องสามารถใส่ถาด (หมายเลข 1.2) สำหรับบรรจุวัตถุดิบสำหรับอบแห้งได้ 5 ถาด (รวม 4 ห้อง 20 ถาด) และถาดบรรจุผลิตภัณฑ์ทำจากวัสดุสแตนเลสแบบมีรูพรุน โดยถาดมีขนาดกว้าง 540 mm ยาว 520 mm และสูง 10 mm ลมร้อนจากวาล์วสลับทิศทาง (หมายเลข 2) สามารถไหลตามลำดับห้องอบแห้งจาก 1-2-3-4 หรือไหลสวนลำดับห้องอบแห้งจาก 4-3-2-1 ได้ตามจังหวะการทำงานของวาล์วสลับทิศทางการไหลของลมร้อน

3.1.1.2 ส่วนบ้อนลมร้อนแบบสลับทิศทาง (หมายเลข 2) ทำหน้าที่ควบคุมจังหวะการ บ้อนลมร้อนที่รับมาจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (หมายเลข 3) เข้าสู่ห้องอบแห้ง โดยจังหวะ แรกลมร้อนจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนไหลผ่านวาล์วสลับทิศทางการไหลของลมร้อนและไหล เข้าสู่ห้องอบแห้งที่ 1-2-3-4 และไหลออกภายนอกผ่านวาล์วสลับทิศทางการไหลของลมร้อน ขณะที่จังหวะที่สองลมร้อนจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนไหลผ่านวาล์วสลับทิศทางการไหลของ ลมร้อนและไหลเข้าสู่ห้องอบแห้งที่ 4-3-2-1 และไหลออกภายนอกผ่านวาล์วสลับทิศทางการไหล ของลมร้อน โดยวาล์วสลับทิศทางการไหลของลมร้อนถูกขับให้หมุนด้วยมอเตอร์และหยุดหมุนด้วย สวิตช์จำกัดระยะ โดยที่ช่วงเวลางานการทำงานของวาล์วกำหนดโดยสวิตช์ตั้งเวลา

3.1.1.3 ส่วนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (หมายเลข 3) ประกอบด้วยชุดกลุ่มท่อแลกเปลี่ยนความร้อนทำด้วยวัสดุสแตนเลสจำนวน 2 ชุด โดยแต่ละชุดมีท่อแลกเปลี่ยนความร้อนจำนวน 10 ท่อ โดยท่อมีความยาว 540.5 mm เส้นผ่าศูนย์กลาง 50 mm ทำหน้าที่ผลิตลมร้อน

โดยรับลมเย็นมาจากเครื่องเป่าลมรุ่น CF-150 (หมายเลข 3.1) ซึ่งมีอัตราการไหลลมสูงสุด 830 m³/h โดยลมเย็นไหลผ่านภายในกลุ่มท่อแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ 2 กลับ (หมายเลข 3.2) เพื่อผลิตลมร้อนส่งไปยังวาล์วสลับทิศทางการไหลของลมร้อน (หมายเลข 2) โดยแก๊สร้อนจากเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง (หมายเลข 4) เป็นแหล่งความร้อนที่ป้อนเข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนผ่านฉนวนนอกท่อแลกเปลี่ยนความร้อนและไหลออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนผ่านปล่องไอเสีย (หมายเลข 3.3) ออกสู่บรรยากาศ

3.1.1.4 ส่วนเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง (หมายเลข 4) หรือเตาแก๊สชีวมวลคือเตาความร้อนที่มีการทำงานแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือขั้นตอนการแปรสภาพเชื้อเพลิงแข็งเป็นแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ และขั้นตอนการเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์เพื่อผลิตความร้อน แสดงดังรูปที่ 3.1 เตาแก๊สชีวมวลซึ่งเป็นเตาที่มีผนัง 2 ชั้น (ห้องปฏิบัติการและช่องอุ่นอากาศ) มีห้องเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิง ช่องขึ้นไถ่ออก และช่องสำหรับใส่ชีวมวล มีการเพิ่มวาล์วควบคุมการป้อนอากาศส่วนที่ 1 เพื่อสามารถควบคุมปฏิบัติการสันดาปให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยไม่อาศัยพัดลมเป่าอากาศ โดยวาล์วนี้เป็นวาล์วที่ควบคุมการป้อนอากาศส่วนที่ 1 เข้าสู่ห้องห้องปฏิบัติการ โดยสามารถหมุนปิดเปิดได้ในแนวแกนสามารถเร่งหรือความร้อนได้และมีช่องที่ใช้สำหรับเติมเชื้อเพลิงบริเวณด้านหน้าเตาที่สามารถเติมเชื้อเพลิงได้ง่ายและสามารถดูปริมาณเชื้อเพลิงคงเหลือในเตาได้ด้วย เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง ทำหน้าที่การผลิตแก๊สร้อนป้อนเข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (หมายเลข 3)

3.1.2 เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง

3.1.2.1 เครื่องชั่งน้ำหนักตั้งพื้น SDS รุ่น IDS01 สำหรับชั่งน้ำหนักวัสดุอบแห้งและเชื้อเพลิงชีวมวล สามารถชั่งน้ำหนักได้สูงสุด 150 kg ความละเอียด 0.01 kg และเครื่องชั่งวิเคราะห์ OHAUS Pioneer series รุ่น PA413 สามารถชั่งน้ำหนักได้สูงสุด 410 g ความละเอียด 0.001 g ใช้สำหรับชั่งน้ำหนักวัสดุเพื่อวิเคราะห์หาหาค่าความชื้นของวัสดุ



(ก) เครื่องชั่งตั้งพื้น



(ข) เครื่องชั่งวิเคราะห์

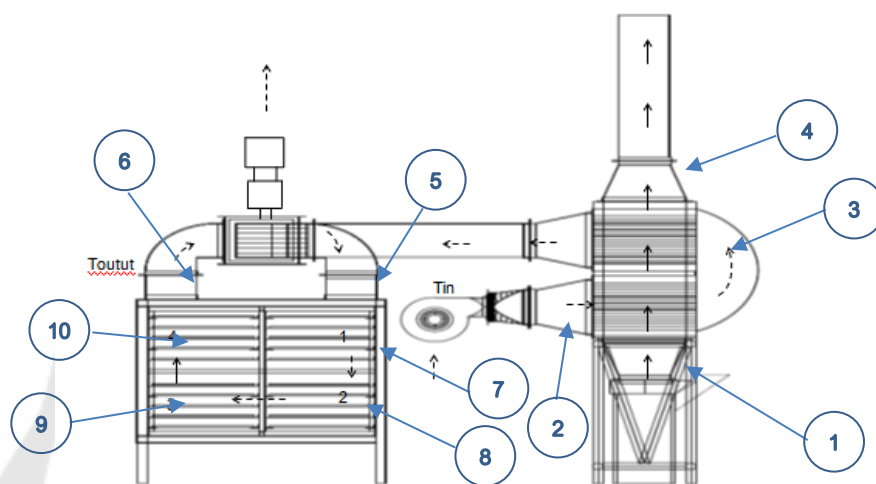
ภาพประกอบ 21 เครื่องชั่งน้ำหนักตั้งพื้น(ก)และเครื่องชั่งวิเคราะห์(ข)

3.1.2.2 ตู้อบไมโครเวฟ ELECTROLUX รุ่น EMM2009W กำลังไฟไมโครเวฟขาออก สูงสุด 700 วัตต์ ที่สามารถปรับระดับกำลังไฟได้ 5 ระดับ ใช้สำหรับหาค่าความชื้นวัสดุอบแห้ง และชีวมวล โดยประยุกต์หลักการวิเคราะห์หาค่าความชื้นตามมาตรฐาน ASTM E1358-97 (Standard Test Method for Determination of Moisture Content of Particulate Wood Fuels Using a Microwave Oven)



ภาพประกอบ 22 ตู้อบไมโครเวฟ ELECTROLUX รุ่น EMM2009W

3.1.2.3 เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิความร้อนภายในเครื่องอบแห้งทุกจุดถูกวัดด้วยเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิล ชนิด K Model S-3 ที่สามารถวัดอุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน 600 °C ยกเว้นอุณหภูมิแก๊สร้อนเหนือเตาชีวมวลวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิล ชนิด K Model S13 โดยทำจากสแตนเลส 316 สามารถวัดอุณหภูมิได้สูงถึง 1200 °C โดยตำแหน่งติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิแสดงในภาพประกอบที่ 23



ภาพประกอบ 23 ตำแหน่งติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ

โดยมีรายละเอียดตำแหน่งติดตั้งดังนี้

- 1.ตำแหน่งที่ 1 เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิเหนือเตาชีวมวล
- 2.ตำแหน่งที่ 2 เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิลมเย็นก่อนเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
- 3.ตำแหน่งที่ 3 เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
- 4.ตำแหน่งที่ 4 เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิของท่อปล่องไอเสีย
- 5.ตำแหน่งที่ 5 เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิของท่อทางเข้า/ออก ห้องอบแห้งที่ 1
- 6.ตำแหน่งที่ 6 เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิของท่อทางออก/เข้า ห้องอบแห้งที่ 4
- 7.ตำแหน่งที่ 7 เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิของห้องอบแห้งที่ 1
- 8.ตำแหน่งที่ 8 เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิของห้องอบแห้งที่ 2
- 9.ตำแหน่งที่ 9 เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิของห้องอบแห้งที่ 3
- 10.ตำแหน่งที่ 10 เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิของห้องอบแห้งที่ 4

3.2 วิธีการวิเคราะห์หาค่าความชื้น

การวิเคราะห์หาค่าความชื้นของวัสดุชีวมวลสามารถดำเนินการได้โดยนำเอามาตรฐาน ASTM E1358-97 (Standard Test Method for Determination of Moisture Content of Particulate Wood Fuels Using a Microwave Oven) มาประยุกต์ใช้เนื่องจากการหาค่าความชื้นด้วยวิธีดังกล่าวใช้เวลาในการวิเคราะห์น้อยกว่า 5 นาที เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีวิเคราะห์โดยใช้ตู้อบ (Hot air Oven) ซึ่งใช้เวลาในการหาค่าความชื้นหลายชั่วโมง อย่างไรก็ตามช่วงเวลาในการอบแห้งด้วยตู้อบไมโครเวฟแต่ละรอบจำเป็นต้องปรับเพื่อให้เหมาะสมกับกลัวยหั่นแฉ้น ดังแสดงในตารางที่ 10

ตาราง 10 ช่วงเวลาที่แนะนำสำหรับการอบหาค่าความชื้นกลัวยหั่นแฉ้นด้วยตู้อบไมโครเวฟ

Pine			Hardwood		Banana
Chips (Average Moisture Control 48 %)	Sawdust (Average Moisture Control 46 %)	Sawdust and Bark (Average Moisture Control 42 %)	Hogged (Average Moisture Control 23 %)	Hogged (Average Moisture Control 12 %)	Chips (Average Moisture Control 60 %)
4:00 A	2:00 A	2:00 A	1:00 A	1:00 A	1:00 A
1:00 A	2:00 A	1:00 A	1:00 A	1:00 A	0:30 A
0:30 in addition to	2:00 A	1:00 A	1:00 A	0:30 A	0:10 A
	0:30 A	0:30 A	0:30 A	in addition to	0:10 A
	in addition to	in addition to	in addition to		in addition to

^A Remove from oven, weigh, and stir.

3.2.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์หาค่าความชื้น

1. ใช้วัสดุตัวอย่าง (กลัวยหั่นแฉ้น) ประมาณ 5 ช้อน จากแต่ละห้องอบ (ถาดละ 1 ช้อน)
2. หาน้ำหนักของกล่องกระดาษที่ต้องการใส่วัสดุเพื่อทดสอบหาค่าความชื้นและบันทึกเป็นมวลของกล่องกระดาษ (M_T)
3. ใส่วัสดุตัวอย่าง (กลัวยหั่นแฉ้น) จำนวน 5 ช้อน ลงในกล่องกระดาษและหาน้ำหนักเริ่มต้น และบันทึกค่าเป็นน้ำหนักของวัสดุตัวอย่างและกล่องกระดาษเริ่มต้น (M_{STI})
4. นำกล่องที่ใส่วัสดุตัวอย่างเข้าไปในไมโครเวฟและให้ความร้อนตามตารางที่ 3.1 เมื่ออบเสร็จแล้วนำตัวอย่างออกมาจากเตาอบ หลังจากนั้นมาพักให้เย็นลงและนำตัวอย่างไปชั่ง

น้ำหนักอีกรอบ ทำซ้ำไปเรื่อยๆจนกว่ามวลของตัวอย่างที่นำมาชั่ง จะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 0.001 g และบันทึกค่าเป็นน้ำหนักหลังอบ (M_{STF})

3.2.2 การคำนวณค่าความชื้น

1. คำนวณหาค่าร้อยละของความชื้นมาตรฐานเปียก ค่าร้อยละของความชื้นมาตรฐานเปียก (M_w)สามารถหาได้จากสมการ

$$M_w = \frac{(M_{STI} - M_T) - (M_{STF} - M_T)}{(M_{STI} - M_T)} \times 100 \quad (3-1)$$

เมื่อ M_w คือ ความชื้นของกล้วยหั่นแว่นหลังมาตรฐานเปียก (% w.b)
 M_{STI} คือ น้ำหนักวัสดุตัวอย่างพร้อมกล่องกระดาษก่อนอบแห้ง (g)
 M_{STF} คือ น้ำหนักวัสดุตัวอย่างพร้อมกล่องกระดาษหลังอบแห้ง (g)
 M_T คือ น้ำหนักกล่องกระดาษเปล่า (g)

2. คำนวณหาค่าร้อยละของความชื้นมาตรฐานแห้ง ค่าร้อยละของความชื้นมาตรฐานแห้ง (M_d)สามารถหาได้จากสมการ

$$M_d = \frac{(M_{STI} - M_T) - (M_{STF} - M_T)}{(M_{STF} - M_T)} \times 100 \quad (3-2)$$



(ก)



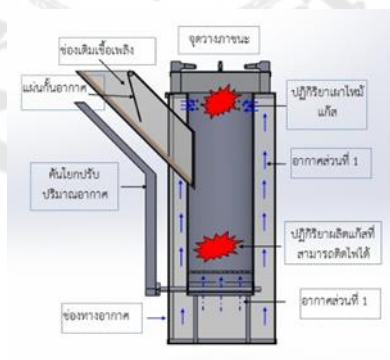
(ข)

ภาพประกอบ 24 ลักษณะกล้วยหั่นแว่นก่อนอบแห้ง (ก) และหลังอบแห้ง (ข)

3.3 วิธีการทดลองอบแห้งกล้วยหั่นแว่นโดยใช้เครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนแบบสลับทิศทางการไหลที่ผลิตจากเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง

3.3.1 วิธีการทำงานของเตาชีวมวล

- การเริ่มต้นทำงานของเตาชีวมวลโดยเตรียมชิ้นกะลามะพร้าวสับประมาณ 300 g เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเริ่มต้นการทำงานของเตาชีวมวล
- ปรับคันโยกปรับปริมาณอากาศไปทางซ้ายหรือขวาให้สุดเพื่อเปิดวาล์วป้อนอากาศส่วนที่ 1 เข้าสู่เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง
- จุดไฟด้วยวัสดุติดไฟง่าย เช่น กระดาษ จากนั้นค่อยๆ ใส่ชิ้นกะลามะพร้าวสับลงไป ในเตาชีวมวล
- เมื่อเตาชีวมวลร้อนและเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้แก๊สบริเวณส่วนบนของเตาชีวมวล
- ค่อยๆ เติมเชื้อเพลิงกะลามะพร้าวหรือเชื้อเพลิงชีวมวลอื่นๆ ลงไปในเตาชีวมวลผ่านทางช่องเติมเชื้อเพลิง
- ปรับคันโยกปรับปริมาณอากาศไปมาตำแหน่งกลาง ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เปิดวาล์วป้อนอากาศส่วนที่ 1 ต่ำสุดเข้าสู่เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง
- เติมเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาชีวมวลเมื่อเปลวไฟบริเวณส่วนเหนือเตาชีวมวลเริ่มหรือลง ซึ่งเป็นช่วงที่ชีวมวลภายในเตามีปริมาณน้อย โดยเติมครั้งละ 300 g



ภาพประกอบ 25 ส่วนประกอบของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง

3.3.2 การทดลองผลิตลมร้อนด้วยเตาชีวมวลและเตาแก๊สหุงต้ม (LPG-KB8)

- เลื่อนเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงไปยังตำแหน่งด้านล่างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
- เปิดเครื่องเป่าลม 100% ที่อัตราการไหลของลม 830 m³/h เพื่อเป่าลมเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
- เร่งหรือหิวาล์วควบคุมอากาศส่วนที่ 1 เพื่อเร่งหรือหิวาล์วเตาชีวมวลเพื่อให้ได้อุณหภูมิลมร้อนที่ออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าเฉลี่ยประมาณ 65, 70, 75, 80 และ 85 °C
- ชั่งน้ำหนักเชื้อเพลิงที่ใช้ในแต่ละรอบการทดสอบ (1 ชั่วโมง)
- ปรับอัตราการไหลของเครื่องเป่าลมลงจาก 100% เป็น 90% และ 80% ตามลำดับ โดยการปรับความเร็วรอบพัดลมด้วย Inverter และใช้เครื่องมือวัดความเร็วลมในท่อประกอบการปรับความเร็วรอบ โดยให้อุณหภูมิลมร้อนเฉลี่ยประมาณ 85 °C
- ชั่งน้ำหนักเชื้อเพลิงที่ใช้ในแต่ละรอบการทดสอบ (2 ชั่วโมง)
- ทดสอบผลิตลมร้อนลักษณะเดียวกันกับการใช้เตาชีวมวลแต่เปลี่ยนเป็นเตาแก๊สหุงต้ม (LPG-KB8)

3.3.3 การเตรียมวัสดุอุปกรณ์สำหรับอบแห้ง

- นำผลกล้วยน้ำว้าแบบห่ามมาปอกเปลือกออก และทำการแช่น้ำเกลือเพื่อไม่ให้กล้วยมีสีดำ
- นำผลกล้วยมาหั่นเป็นแว่น ความหนาประมาณ 1 mm ด้วยอุปกรณ์การหั่น
- นำแผ่นกล้วยที่ผ่านขั้นตอนการหั่นมาจัดเรียงในถาดขนาด 540x520 mm ให้ได้จำนวนทั้งหมดจำนวน 20 ถาดดังรูปที่ 3.9 โดยการจัดเรียงแบบ 11 แถว x 12 คอลัมน์ หรือ 11 แถว x 13 คอลัมน์
- ชั่งน้ำหนักกล้วยที่บรรจุในแต่ละถาด
- นำถาดใส่ในตู้อบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนฯ
- ปิดตู้อบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนฯ ให้แน่นเพื่อพร้อมสำหรับการอบแห้ง



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 26 กล้วยน้ำว่าห้นน้ำเกลือ(ก) และกล้วยห้นแวนเตรียมอบแห้ง(ข)

3.3.4 การทดลองอบแห้งกล้วยห้นแวนด้วยเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนที่ผลิตจากเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงเมื่อไม่มีการสลับทิศทางการไหลของลมร้อน

- นำกล้วยน้ำว่าห้นแวนจัดเรียงในถาดจำนวน 20 ถาด
- ชั่งน้ำหนักเริ่มต้น ของกล้วยแต่ละถาด
- นำถาดไปใส่ในห้องอบแห้งทั้ง 4 ห้อง
- สุ่มตัวอย่างขึ้นกล้วยน้ำว่าห้นแวนจากแต่ละห้องอบ (ถาดละ 1 ชิ้น) มาทำการวิเคราะห์หาค่าความชื้นด้วยตู้อบไมโครเวฟตามมาตรฐาน ASTM E1358

- ปิดตู้อบแห้ง
- ปิดระบบสลับทิศทางการไหลของวาล์วสลับทิศทางการไหลของลมร้อนอัตโนมัติ
- จุดเตาชีวมวลให้พร้อมสำหรับการทดลอง
- เปิดเครื่องเป่าลมให้ทำงานที่ความเร็วรอบสูงสุดเพื่อให้ได้อัตราการไหลสูงสุดที่ 830 m^3/h
- เปิดเครื่องบันทึกค่าอุณหภูมิอัตโนมัติ
- เลื่อนเตาชีวมวลเข้าสู่ตำแหน่งป้อนความร้อนให้กับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อผลิตลมร้อนสำหรับการอบแห้ง

- กำหนดอุณหภูมิลมร้อนเริ่มต้นที่ 55 °C
- ทำการเปิดตู้อบแห้งทุกๆ 5 นาทีแล้วสุ่มตัวอย่างขึ้นกล้วยน้ำว่าห้นแวนจากแต่ละห้องอบ (ถาดละ 1 ชิ้น) มาทำการวิเคราะห์หาค่าความชื้น

- หยุดการทดลองเมื่อเวลาอบแห้งครบ 2 ชั่วโมง หรือจนกว่าขึ้นวัสดุมีความชื้นน้อยกว่า 14%

- บันทึกน้ำหนักกล้วยหั่นแวนหลังการทดลอง
- บันทึกการใช้เชื้อเพลิง
- บันทึกอุณหภูมิตลอดการทดลอง
- ทำการทดลองลักษณะเดิมโดยเปลี่ยนอุณหภูมิลมร้อนเป็น 65 และ 75 °C

ตามลำดับ

3.3.5 การทดลองอบแห้งกล้วยหั่นแวนด้วยเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนที่ผลิตจากเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงเมื่อมีการสลับทิศทางการไหลของลมร้อน

- นำกล้วยน้ำว้าหั่นแวนจัดเรียงในถาดจำนวน 20 ถาด
- ชั่งน้ำหนักเริ่มต้น ของกล้วยแต่ละถาด
- นำถาดไปใส่ในห้องอบแห้งทั้ง 4 ห้อง
- สุ่มตัวอย่างขึ้นกล้วยน้ำว้าหั่นแวนจากแต่ละห้องอบ (ถาดละ 1 ชั้น) มาทำการวิเคราะห์หาค่าความชื้นด้วยตู้อบไมโครเวฟตามมาตรฐาน ASTM E1358

- ปิดตู้อบแห้ง
- เปิดระบบสลับทิศทางการไหลของวาล์วสลับทิศทางการไหลของลมร้อนอัตโนมัติ

ทุกๆ 5 นาที

- จุดเตาชีวมวลให้พร้อมสำหรับการทดลอง
- เปิดเครื่องเป่าลมให้ทำงานที่ความเร็วรอบสูงสุดเพื่อให้ได้อัตราการไหลสูงสุดที่ 830

m³/h

- เปิดเครื่องบันทึกค่าอุณหภูมิอัตโนมัติ
- เลื่อนเตาชีวมวลเข้าสู่ตำแหน่งป้อนความร้อนให้กับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อผลิตลมร้อนสำหรับการอบแห้ง

- กำหนดอุณหภูมิลมร้อนเริ่มต้นที่ 65 °C
- ทำการเปิดตู้อบแห้งทุกๆ 5 นาทีแล้วสุ่มตัวอย่างขึ้นกล้วยน้ำว้าหั่นแวนจากแต่ละห้องอบ (ถาดละ 1 ชั้น) มาทำการวิเคราะห์หาค่าความชื้น

- หยุดการทดลองเมื่อเวลาอบแห้งครบ 2 ชั่วโมง หรือจนกว่าขึ้นวัสดุมีความชื้นน้อยกว่า 14%

- บันทึกน้ำหนักกล้วยหั่นแวนหลังการทดลอง

- บันทึกการใช้เชื้อเพลิง
- บันทึกอุณหภูมิตลอดการทดลอง
- ทำการทดลองลักษณะเดิมโดยเปลี่ยนอุณหภูมิลมร้อนเป็น 70, 75, 80 และ 85 oC

ตามลำดับ

- ทำการทดลองลักษณะเดิม โดยให้อุณหภูมิลมร้อนคงที่ที่ 85 oC และเปลี่ยนอัตราการไหลลดลงจากค่าสูงสุด 10% และ 20% ตามลำดับ สอดคล้องกับอัตราการไหลของลมเป็น 747 m³/h และ 664 m³ ตามลำดับ

ตาราง 11 รายละเอียดการเก็บข้อมูลการทดลอง

รายละเอียดการเก็บข้อมูล	วิธีการเก็บข้อมูล	ตัวชี้วัด
น้ำหนักของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการอบแห้ง	-ชั่งน้ำหนักเชื้อเพลิงก่อนทำการทดลองและหลังการทดลอง แล้วนำน้ำหนักก่อนมาลบน้ำหนักหลังใช้	-ความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อน
ความชื้นของกล้วยแห้งก่อนเข้าอบแห้ง	-สุ่มเก็บตัวอย่างทั้งหมด 4 ห้องอบ ห้องอบละ 5 ชิ้น หาค่าความชื้นด้วยเครื่องอบไมโครเวฟ	-ความชื้นเริ่มต้น -น้ำหนักน้ำเริ่มต้น -น้ำหนักมวลแห้งเริ่มต้น
ความชื้นของกล้วยแห้งที่ทำการอบแห้ง	-สุ่มเก็บตัวอย่างโดยเก็บทุกๆ 5 นาทีหาค่าความชื้นในห้องอบแห้งด้วยเครื่องไมโครเวฟ จนกว่าจะครบ 2 ชั่วโมงหรือความชื้นลดลงต่ำกว่า 14 % d.b	-ความชื้นเฉลี่ยของกล้วยแห้ง ณ เวลาที่ทำการสุ่มตัวอย่าง -น้ำหนักที่หายไประหว่างลดความชื้น -น้ำหนักของกล้วยแห้งที่เวลาต่างๆ

ตาราง 11 (ต่อ)

รายละเอียดการเก็บข้อมูล	วิธีการเก็บข้อมูล	ตัวชี้วัด
อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง	-เก็บค่าอุณหภูมิแต่ละจุดด้วยเครื่อง Data logger เพื่อจะหาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ลมร้อน และ อุณหภูมิ ในห้องอบ	-ได้จากกราฟการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

3.4 การวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องอบแห้ง

3.4.1 อัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio: MR) หมายถึง ปริมาณของน้ำที่หลงเหลืออยู่ในวัสดุระหว่างการอบแห้งเทียบกับปริมาณน้ำทั้งหมดที่มีอยู่ในวัสดุที่สามารถระเหยได้ภายใต้สภาวะการอบแห้งหนึ่งนั้นๆ

$$MR = \frac{(M_t - M_e)}{(M_i - M_e)} \quad (3-3)$$

- เมื่อ MR = Moisture ratio
- M_t = ค่าความชื้นของวัสดุในห้องอบแห้ง ณ เวลาใดๆ (% dry basis)
- M_i = ค่าความชื้นเริ่มต้นของวัสดุก่อนเริ่มอบแห้ง (% dry basis)
- M_e = ความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content; % dry basis)

3.4.2 การหาอัตราการอบแห้ง (Drying Rate: DR) คือ ความสามารถในการไล่ความชื้นออกจากวัสดุในช่วงเวลาการอบแห้ง

$$DR = \frac{(M_{in} - M_f)W_d}{t} \quad (3-4)$$

- เมื่อ MR = Moisture ratio
- M_{in} = ค่าความชื้นเริ่มต้นของวัสดุก่อนเริ่มอบแห้ง (% dry basis)
- M_f = ค่าความชื้นสุดท้ายของวัสดุ (% dry basis)
- W_d = น้ำหนักวัสดุแห้ง (kg)

t = ระยะเวลาในการอบแห้ง (min)

3.4.3 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption: SEC) มีหน่วยเป็น MJ/kg ของน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุ

$$SEC = \frac{m_f \times LHV_f}{(M_{in} - M_f) W_d} \quad (3-5)$$

เมื่อ m_f = น้ำหนักของเชื้อเพลิงที่ใช้ (kg as receive)
 LHV_f = ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ใช้ (MJ/kg as receive)
 M_{in} = ค่าความชื้นเริ่มต้นของวัสดุก่อนเริ่มอบแห้ง (% dry basis)
 M_f = ค่าความชื้นสุดท้ายของวัสดุ (% dry basis)
 W_d = น้ำหนักวัสดุแห้ง (kg)
 t = ระยะเวลาในการอบแห้ง (min)

บทที่ 4

ผลการทดลอง

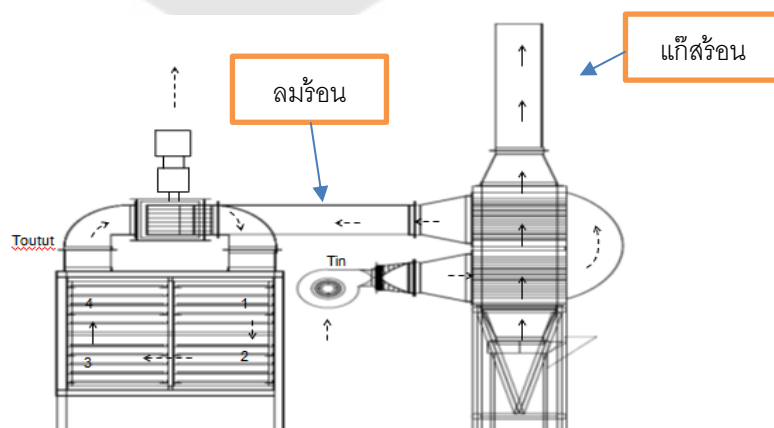
จากการทดลองอบแห้งกล้วยน้ำว้าหั่นแว่นด้วยลมร้อนที่ผลิตจากเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงและเตาแก๊สหุงต้ม (LPG) ซึ่งเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงใช้กะลามะพร้าวเป็นเชื้อเพลิง โดยกะลามะพร้าวมีค่าความร้อนทางต่ำ (LHV) 16.31 MJ/kg และแก๊สหุงต้มมีค่าความร้อนทางต่ำ 45.45 MJ/kg

การทดลองอบแห้งกล้วยน้ำว้าหั่นแว่นแบ่งออกเป็น 3 ส่วน

ส่วนที่ 1 เป็นการศึกษาผลของอุณหภูมิลมร้อนที่ 3 ระดับ คือ 55, 65 และ 75 °C เมื่อกำหนดให้ลมร้อนไหลทิศทางเดียวผ่านห้องอบแห้งที่ 1-2-3-4 ตามลำดับ ลมร้อนมีอัตราการไหล 830 m³/h (ความเร็วลมในห้องอบแห้ง ณ อุณหภูมิอากาศทางเข้า = 0.88 m/s)

ส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาผลของอุณหภูมิลมร้อนที่ 5 ระดับ คือ 65, 70, 75, 80 และ 85 °C เมื่อกำหนดให้ลมร้อนไหลแบบสลับทิศทางทุกๆ 5 นาที ผ่านห้องอบแห้งที่ 1-2-3-4 และ 4-3-2-1 ตามลำดับ โดยลมร้อนมีอัตราการไหล 830 m³/h (ความเร็วลม ณ อุณหภูมิอากาศทางเข้า = 0.88 m/s)

ส่วนที่ 3 เป็นการศึกษาผลของความเร็วลม 3 ระดับที่อัตราการไหล 830, 747, 664 m³/h ที่อุณหภูมิลมร้อนเข้าห้องอบแห้ง 85 °C ซึ่งสัมพันธ์กับความเร็วลม คือ 1.043, 0.934, 0.834 m/s ลมร้อนไหลแบบสลับทิศทางทุกๆ 5 นาที ผ่านห้องอบแห้งที่ 1-2-3-4 และ 4-3-2-1 ตามลำดับ



ภาพประกอบ 27 แผนผังการไหลของแก๊สร้อนและลมร้อน

4.1 ผลการทดสอบสมรรถนะและมลพิษจากเตาชีวมวล

จากการทดสอบสมรรถนะและมลพิษของเตาชีวมวลใช้เชื้อเพลิงทดสอบจำนวน 2 ชนิด ประกอบด้วย กิ่งไม้ยูคาลิปตัส และกะลามะพร้าว โดยกิ่งไม้และกะลามะพร้าวจะถูกลดขนาดให้สามารถป้อนเข้าสู่ช่องเติมเชื้อเพลิงของเตาชีวมวลได้โดยมีขนาดหน้าตัดไม่เกิน 6.5 cm x 6.5 cm และ ยาวไม่เกิน 7.5 cm เชื้อเพลิงทุกชนิดมีสภาพแห้งโดยมีความชื้นมาตรฐานเปียกน้อยกว่า 15% เชื้อเพลิงที่ใช้ทดสอบสมบัติทางเคมีดังนี้

ตาราง 12 องค์ประกอบของเชื้อเพลิง

องค์ประกอบ	กิ่งไม้ยูคาลิปตัส	กะลามะพร้าว
คาร์บอน: $x_{C,db}$	0.4730	0.5202
ไฮโดรเจน: $x_{H,db}$	0.0620	0.0566
ออกซิเจน: $x_{O,db}$	0.4530	0.3828
ไนโตรเจน: $x_{N,db}$	0.0012	0.0020
ซัลเฟอร์: $x_{S,db}$	0.0003	0.0003
เถ้า: $x_{A,db}$	0.0105	0.0381
ความชื้น: $x_{M,ar}$	0.1145	0.1470
อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎี: AFR_T	4.96	5.33
ค่าความร้อนทางสูงของเชื้อเพลิง: HHV_{db} (MJ/kg)	19.11	20.79
ค่าความร้อนทางต่ำของเชื้อเพลิง: LHV_{ar} (MJ/kg)	15.43	16.31
ความหนาแน่นปรากฏ (kg/m^3)	150	200

ค่าความร้อนทางสูง (Higher Heating Value: HHV) สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 1 ซึ่งเป็นสมการการทดลองของ Channiwala and Parikh [5เพิ่มในเอกสารอ้างอิง] ในขณะที่ค่าความร้อนทางต่ำ (Lower Heating Value: LHV) สามารถหาได้จากสมการที่ 2

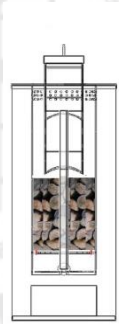
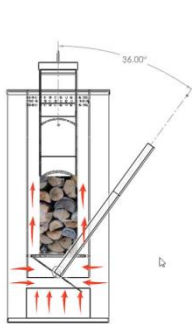
$$HHV_{db} = 34.91x_{C,db} + 117.83x_{H,db} - 10.34x_{O,db} - 1.51x_{N,db} + 10.05x_{S,db} - 2.11x_{A,db}$$

(1)

$$LHV_{ar} = HHV_{db}(1 - x_{M,ar}) - 2.447 * 9.01 * x_{H,db}(1 - x_{M,ar}) - 2.447 * x_{M,ar}$$

(2)

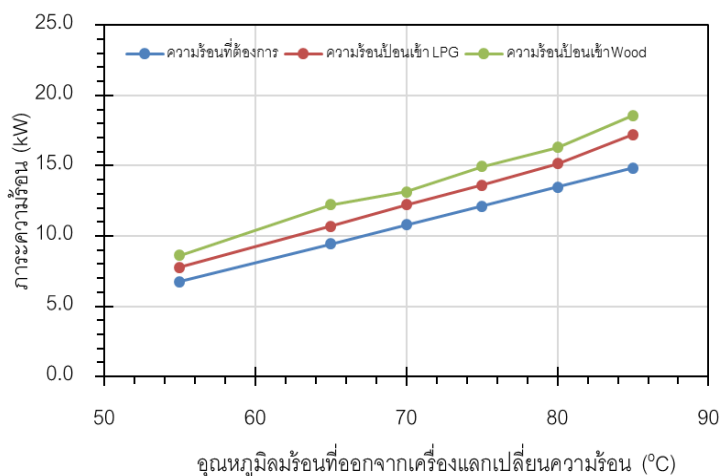
ตาราง 13 ผลการทดลองเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงที่สามารถการป้อนอากาศส่วนที่ 1 แตกต่างกัน

รายละเอียดการทดสอบ	การทดลองที่		
	1	2	3
เชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับทดสอบ	กะลามะพร้าว	กะลามะพร้าว	กะลามะพร้าว
ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงทางต่ำ: LHV:	16.31	16.31	16.31
MJ/kg			
ปริมาณการป้อนอากาศส่วนที่ 1	น้อย	ปานกลาง	มาก
			
ปริมาณการป้อนอากาศส่วนที่ 2	ไม่ควบคุม	ไม่ควบคุม	ไม่ควบคุม
ปริมาณการใช้เชื้อเพลิง: kg	4.04	6.52	8.18
เวลาในการทดสอบ: h	2	2	2
อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง: kg/h	2.02	3.26	4.14
พลังงานที่ป้อนเข้าเตาชีวมวล: kW	9.06	14.77	18.76
O ₂ ส่วนเกินในไอเสีย: %	7.65	6.74	4.84
CO ในไอเสีย: ppm	256	665	1264
NO _x ในไอเสีย: ppm	126	118	108

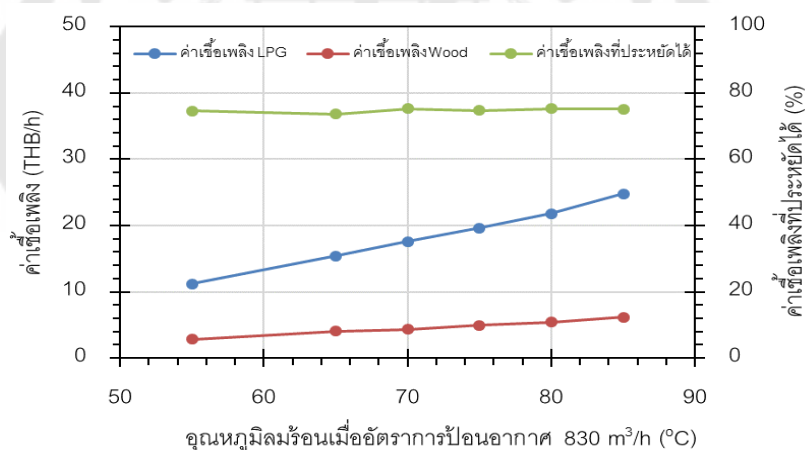
เมื่อพิจารณาการเผาไหม้และการปลดปล่อยแก๊สมลพิษจากเตาชีวมวล เมื่อใช้ กะลามะพร้าวเป็นเชื้อเพลิงและมีการควบคุมปริมาณอากาศป้อนเข้าสู่ห้องปฏิกิริยาผลิตแก๊ส เพื่อเพิ่มอัตราการผลิตแก๊สด้วยการปรับวาล์วควบคุมอากาศป้อนที่ระดับน้อย ปานกลาง และ มาก ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอัตราการใช้เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นตามปริมาณอากาศป้อนที่ เพิ่มขึ้น โดยมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นจาก 2.02 kg/h, 3.26 kg/h และ 4.14 kg/h ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับพลังงานป้อนเข้าจากชีวมวล 9.06 kW, 14.77 kW และ 18.76 kW ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาผลการเผาไหม้และการปลดปล่อยมลพิษ พบว่าค่าก๊าซออกซิเจน ส่วนเกินในไอเสียในช่วง 7.65-4.87% ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามปริมาณอากาศส่วนเกินที่ลดลง ในขณะที่ แก๊สมลพิษที่ประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าอยู่ในช่วง 256-1,264 ppm และก๊าซ ไนโตรเจนออกไซด์มีค่าอยู่ในช่วง 126-108 ppm

4.2 ผลการทดลองผลิตลมร้อนด้วยเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงที่ใช้กะลามะพร้าวเป็น เชื้อเพลิงและเตาแก๊ส LPG

จากการทดลองผลิตลมร้อนเมื่อให้ลมร้อนที่อัตราการไหล 830 m³/h อุณหภูมิ 30 °C ไหล เข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและรับความร้อนจากเตาแก๊สหุงต้ม (KB-8) หรือ เตาชีวมวล ประสิทธิภาพสูงซึ่งใช้กะลามะพร้าวเป็นเชื้อเพลิง และลมร้อนไหลออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความ ร้อนที่ระดับอุณหภูมิแตกต่างกัน 6 ระดับคือ 55, 65, 70, 75, 80 และ 85 °C ตามลำดับ อีกทั้งมี การทดลองผลิตลมร้อนเมื่อให้ลมร้อนที่อัตราการไหล 3 ระดับคือ 830, 747 และ 664 m³/h ไหล เข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่อุณหภูมิ 30 °C และรับความร้อนจากเตาแก๊สหุงต้ม (KB-8) หรือ เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงซึ่งใช้กะลามะพร้าวเป็นเชื้อเพลิง และลมร้อนไหลออกจากเครื่อง แลกเปลี่ยนความร้อนที่ระดับอุณหภูมิ 85 °C โดยผลการทดลองทั้ง 2 กรณีแสดงดังภาพประกอบที่



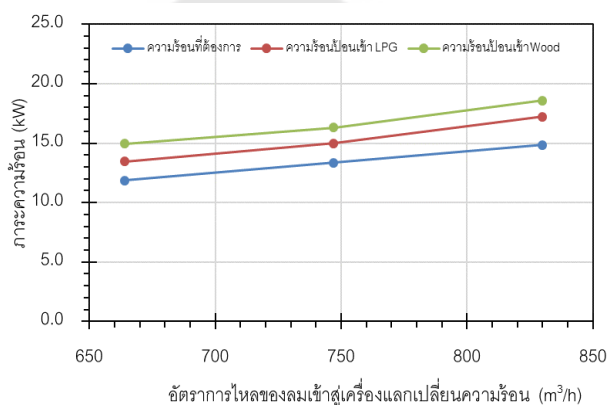
ภาพประกอบ 28 ผลการทดลองผลิตความร้อนด้วยเตาแก๊ส LPG และเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงที่ใช้กะลามะพร้าวเป็นเชื้อเพลิงแต่ละองศาที่ออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



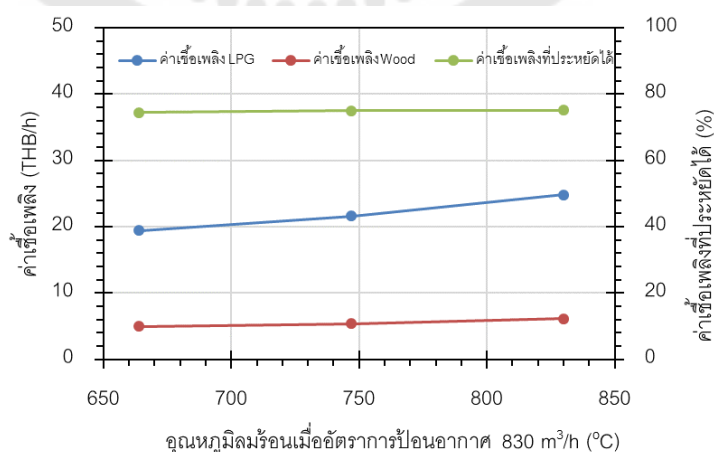
ภาพประกอบ 29 เปรียบเทียบค่าเชื้อเพลิงด้วยเตาแก๊ส LPG และเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงของอุณหภูมิที่มีอัตราการป้อนอากาศเทียบค่าประหยัดของเชื้อเพลิง

จากผลการทดลองผลิตความร้อนอุณหภูมิต่างกัน 6 ระดับ คือ 55, 65, 70, 75, 80 และ 85 °C ที่อัตราการไหลของลม 830 m³/h ผลการทดลองพบว่าพลังงานจากเชื้อเพลิงของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงและเตาแก๊สหุงต้ม (LPG-KB8) ที่ป้อนให้เครื่องแลกเปลี่ยนมีปริมาณที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของลมร้อนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเชื้อเพลิงชีวมวลและเชื้อเพลิงแก๊สหุงต้มมีค่าความร้อนต่อน้ำหนักที่ต่างกันอีกทั้งราคาต่อหน่วยน้ำหนักที่ต่างกัน ดังนั้นจึงส่งผลให้ต้นทุนในการ

ผลิตลมร้อนแตกต่างกันด้วย จากการคำนวณต้นทุนเชื้อเพลิงในการผลิตลมร้อนที่ 55, 65, 70, 75, 80 และ 85 °C อัตราการไหลของลม 830 m³/h พบว่าการใช้ชีวมวลมีต้นทุนเชื้อเพลิงต่ำกว่าการใช้แก๊สหุงต้มประมาณ 75% โดยต้นทุนค่าเชื้อเพลิงแก๊สหุงต้มมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 12, 16, 18, 20, 22 และ 25 บาทต่อชั่วโมง ตามลำดับ และ ต้นทุนค่าเชื้อเพลิงชีวมวลมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 3, 3.5, 4, 4.5, 5 และ 6 บาทต่อชั่วโมง ตามลำดับ เมื่อกำหนดให้ราคาไม้ฟืนประมาณ 1.5 THB/kg (บาทต่อกิโลกรัม) และ ราคาแก๊สหุงต้ม 25 THB/kg



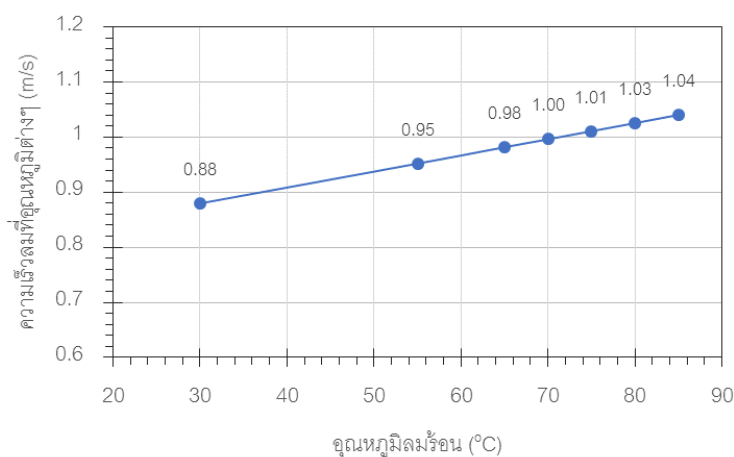
ภาพประกอบ 30 จากการทดลองเปรียบเทียบอัตราการไหลของอากาศลดลงร้อยละ 10 และ 20 ตามลำดับเข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



ภาพประกอบ 31 ต้นทุนค่าเชื้อเพลิงในการผลิตลมร้อนที่อุณหภูมิ 85 °C เมื่ออัตราการไหลของลมร้อนเปลี่ยนแปลง 3 ระดับคือ 830, 747 และ 664 m³/h

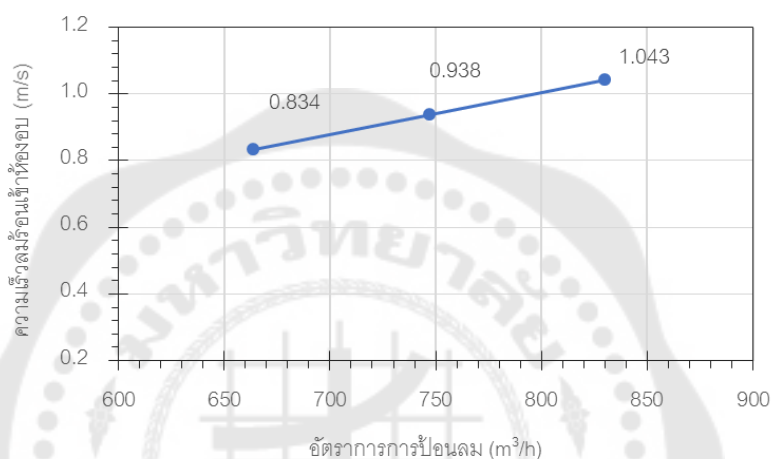
จากผลการทดลองผลิตลมร้อนอุณหภูมิ 85 °C ที่อัตราการไหลของลม 3 ระดับดังนี้ 830, 747 และ 664 m³/h ผลการทดลองพบว่าพลังงานจากเชื้อเพลิงของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงและเตาแก๊สหุงต้ม (LPG-KB8) ที่ป้อนให้เครื่องแลกเปลี่ยนมีปริมาณที่ลดลงตามอัตราการไหลของลมที่ลดลง เนื่องจากเชื้อเพลิงชีวมวลและเชื้อเพลิงแก๊สหุงต้มมีค่าความร้อนต่อน้ำหนักที่ต่างกัน อีกทั้งราคาต่อหน่วยน้ำหนักที่ต่างกัน ดังนั้นจึงส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตลมร้อนแตกต่างกัน ด้วย จากการคำนวณต้นทุนเชื้อเพลิงในการผลิตลมร้อนที่ 85 °C อัตราการไหลของลม 3 ระดับ 830, 747 และ 664 m³/h พบว่าการใช้ชีวมวลมีต้นทุนเชื้อเพลิงต่ำกว่าการใช้แก๊สหุงต้มประมาณ 75% โดยต้นทุนค่าเชื้อเพลิงแก๊สหุงต้มมีค่าลดลงจาก 25, 22, และ 19.5 บาทต่อชั่วโมง ตามลำดับ และ ต้นทุนค่าเชื้อเพลิงชีวมวลมีค่าลดลงจาก 6, 5, และ 4 บาทต่อชั่วโมง ตามลำดับ

จากการสอบเทียบความเร็วลมก่อนเข้าห้องอบแห้งเมื่อลมจากเครื่องเป่าลมถูกเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นจาก 30 °C เป็นระดับอุณหภูมิที่ต้องการสำหรับการทดลอง โดยเครื่องเป่าลมมีอัตราการไหลสูงสุดที่ 830 m³/h ซึ่งสามารถหาความเร็วลมที่ทางเข้าห้องอบได้เท่ากับ 0.88 m/s และเมื่อลมจากพัดลมถูกให้ความร้อนจนมีระดับอุณหภูมิตามต้องการสามารถหาความเร็วลมร้อนเข้าห้องอบแห้งได้ดังแสดงในภาพประกอบที่ 32



ภาพประกอบ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมร้อนกับอุณหภูมิลมร้อนเมื่ออัตราการป้อนลมที่ 830 m³/h

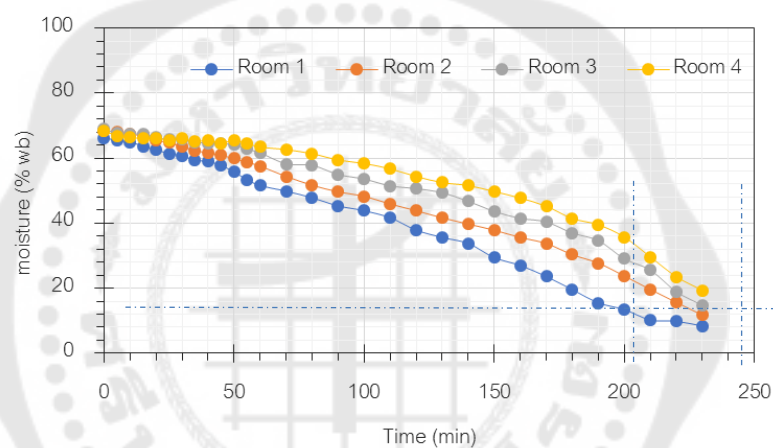
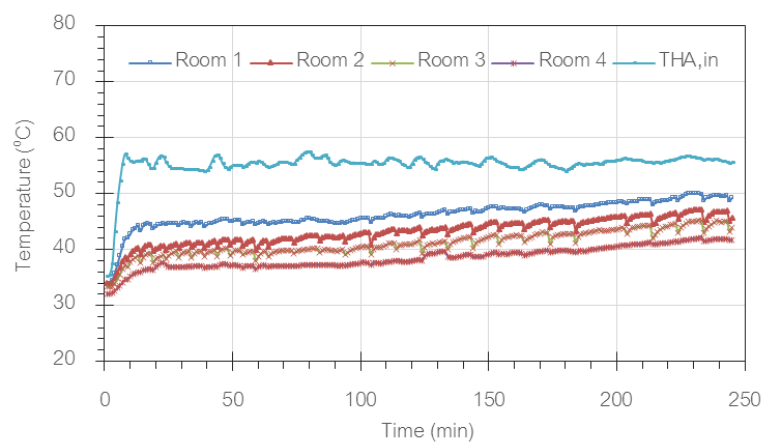
เพื่อให้ได้ข้อมูลความเร็วลมเมื่อเครื่องเป่าลมทำงานที่สภาวะต่ำกว่าอัตราการป้อนลมสูงสุด ($830 \text{ m}^3/\text{h}$) โดยในที่นี้กำหนดให้อัตราการป้อนลมลดลงร้อยละ 10 และ 20 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับอัตราการไหลของเครื่องเป่าลมที่ 747 และ $664 \text{ m}^3/\text{h}$ และเมื่อกำหนดอุณหภูมิลมร้อนที่เข้าสู่ห้องอบแห้งมีค่าคงที่ที่ 85°C จึงสามารถหาค่าความเร็วลมร้อนเข้าสู่ห้องอบแห้งได้โดยแสดงผลดังภาพประกอบที่ 33



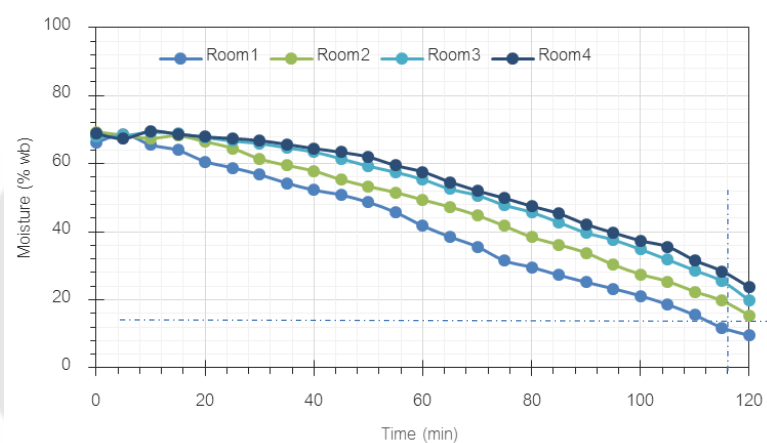
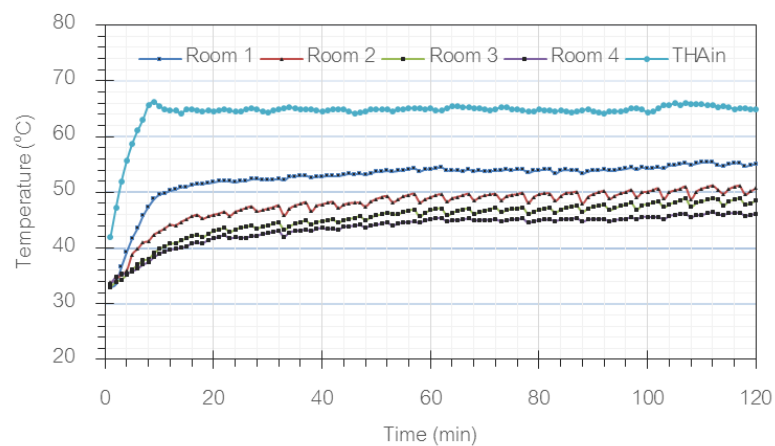
ภาพประกอบ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมร้อนเข้าห้องอบแห้งและอัตราการไหลของลมจากเครื่องเป่า

4.3 ผลการอบแห้งกล้วยน้ำว้าหั่นแว่นด้วยลมร้อนในห้องอบแห้งและการลดลงของความชื้นผลิตภัณฑ์เมื่อไม่มีการสลับทิศทางการไหลของลมร้อน

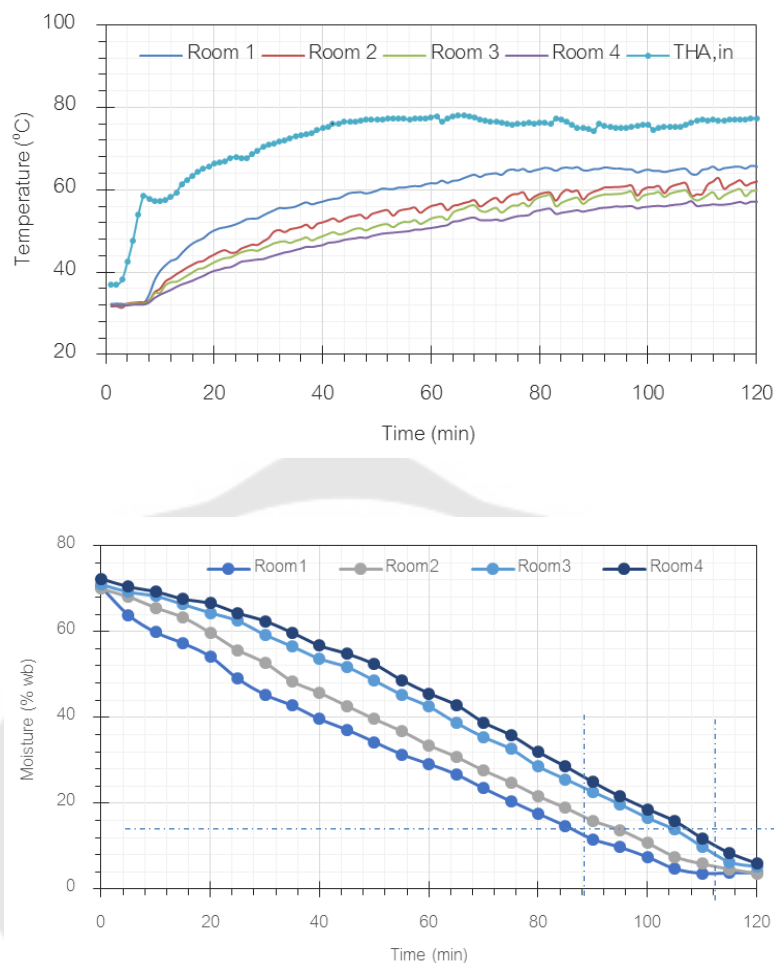
ผลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิลมร้อนที่ 3 ระดับ คือ 55 , 65 และ 75°C เมื่อกำหนดให้ลมร้อนไหลทิศทางเดียวผ่านห้องอบแห้งที่ 1-2-3-4 ตามลำดับ ลมร้อนมีอัตราการไหล $830 \text{ m}^3/\text{h}$ (ความเร็วลมในห้องอบแห้ง ณ อุณหภูมิอากาศทางเข้า = 0.88 m/s) ค่าอุณหภูมิลมร้อนในห้องอบทั้ง 4 ห้อง และความชื้นห้องกล้วยหั่นแว่น ตลอดช่วงระยะเวลาในการอบแห้งแสดงในภาพประกอบที่ 28



ภาพประกอบ 34 ผลการกระจายอุณหภูมิลมร้อนในห้องอบแห้งและการลดลงของความชื้นผลิตภัณฑ์เมื่อไม่มีการสลับทิศทางการไหลของลมร้อนที่อุณหภูมิ 55 °C



ภาพประกอบ 35 ผลการกระจายอุณหภูมิลมร้อนในห้องอบแห้งและการลดลงของความชื้นผลิตภัณฑ์เมื่อไม่มีการสลับทิศทางการไหลของลมร้อนที่อุณหภูมิ 65 °C



ภาพประกอบ 36 ผลการกระจายอุณหภูมิลมร้อนในห้องอบแห้งและการลดลงของความชื้นผลิตภัณฑ์เมื่อไม่มีการสลับทิศทางการไหลของลมร้อนที่อุณหภูมิ 75 °C

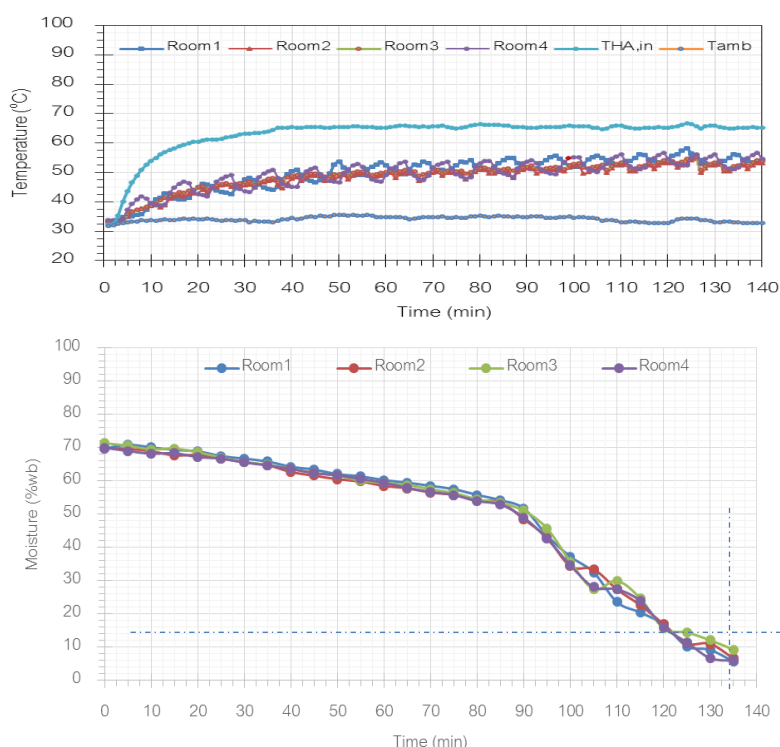
ผลการทดลองพบว่า เมื่อไม่สลับทิศทางการไหลของลมร้อน ผลการตรวจวัดอุณหภูมิเข้า-ออกห้องอบแห้ง และความชื้นในห้องอบแห้งที่ 1-4 แต่ละองศา แสดงดังรูปที่ 34-36 ซึ่งจากกราฟที่ได้ พบว่า เมื่อลมร้อนที่ป้อนเข้าสู่ห้องอบแห้งมีอุณหภูมิประมาณ 55 oC, 65 oC, 75 oC เริ่มต้นโดยไหลเข้าห้องอบแห้งที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ เมื่ออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ทำให้อุณหภูมิภายในห้องอบแห้งมีแนวโน้มลดลงตามทิศทางการไหลของลมร้อน ซึ่งอุณหภูมิในห้องอบแห้งที่ 4 จะต่ำสุด โดยลมร้อนการอบแห้ง ซึ่งมีความแตกต่างในแต่ละห้องอบแห้ง (ภาพประกอบที่ 34-36) และอุณหภูมิในห้องอบที่ 1 จะสูงสุดเมื่อเทียบกับอีก 3 ห้องช่วงของการอบแห้ง และระดับอุณหภูมิลดลงตามลำดับในห้องอบแห้งที่ 2, 3 และ 4 โดยความชื้นของการอบแห้ง ซึ่งมีความแตกต่างในแต่ละ

ละห้องอบแห้ง (รูปที่ 34-36) และระดับความชื้นลดลงตามลำดับในห้องอบแห้งที่ 2, 3 และ 4 ซึ่งทำให้ความชื้นกล้วยหั่นแวนของห้องอบแห้งที่ 4 มีความชื้นลดลงน้อย

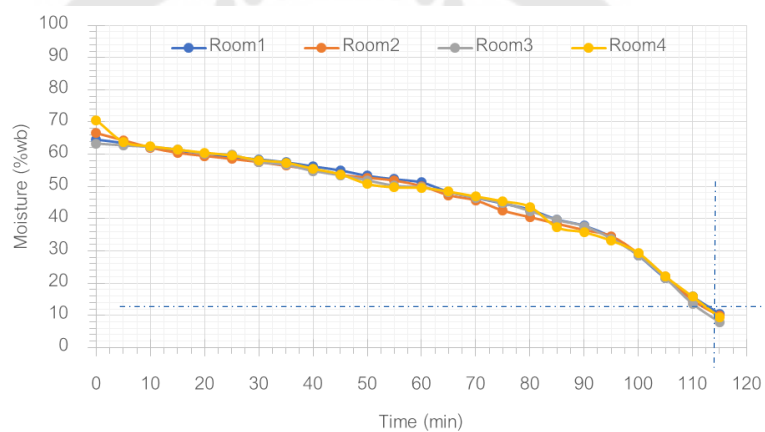
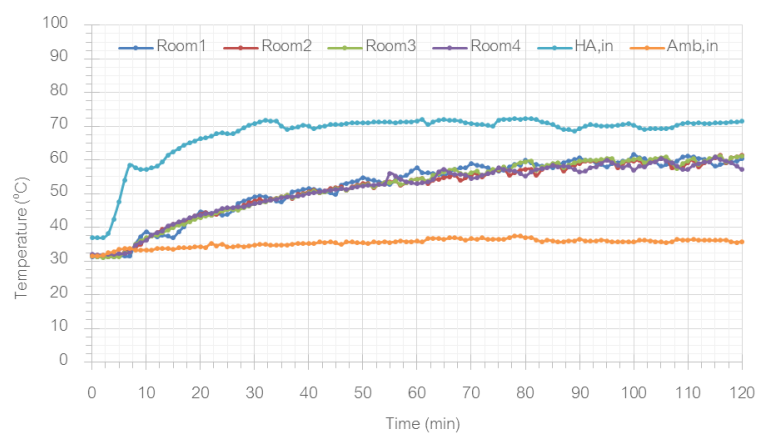
ดังนั้น อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะทำให้กล้วยหั่นแวนแห้งเร็วขึ้นในห้องแรกและจะทำให้กล้วยหั่นแวนในห้องแรกแห้งเร็วกว่าห้องอื่น จึงให้ห้องอบแห้งห้องแรกจะเกิดรอยไหม้ตรงขอบของกล้วยหั่นแวนและจะแห้งลดลงตามลำดับ

4.4 ผลการกระจายอุณหภูมิลมร้อนในห้องอบแห้งและการลดลงของความชื้นผลิตภัณฑ์เมื่อมีการสลับทิศทางการไหลของลมร้อนและเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิลมร้อน

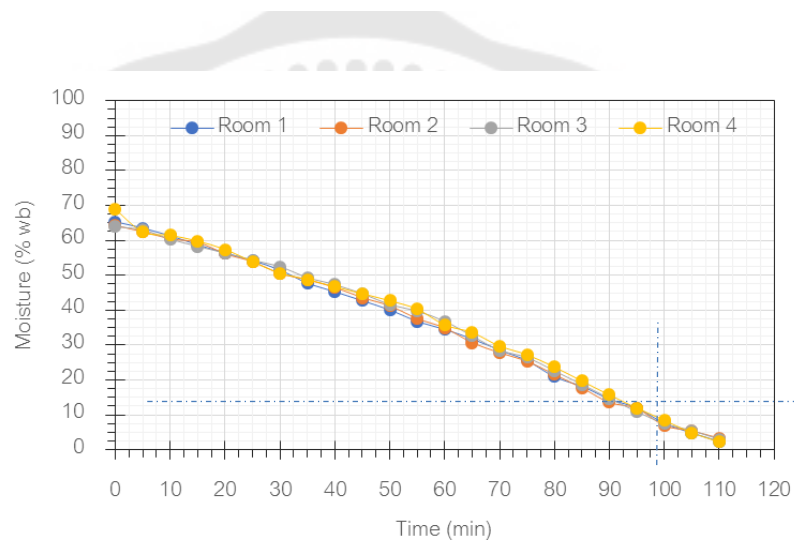
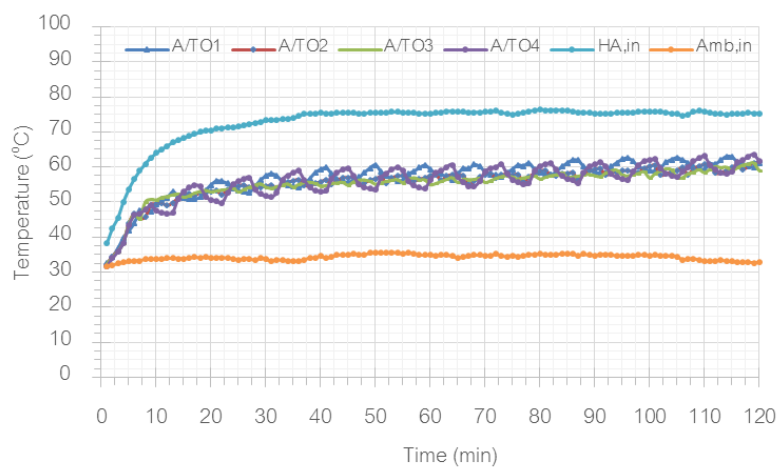
ผลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิลมร้อนที่ 5 ระดับ คือ 65°C , 70°C , 75°C , 80°C และ 85°C เมื่อกำหนดให้ลมร้อนไหลแบบสลับทิศทางทุกๆ 5 นาที ผ่านห้องอบแห้งที่ 1-2-3-4 ตามลำดับ และเมื่อวาร์วสลับทิศทางทำงานทำให้ลมร้อนไหลผ่านห้องอบแห้งที่ 4-3-2-1 ตามลำดับ ลมเย็นมีอัตราการไหลคงที่ที่ $830 \text{ m}^3/\text{h}$ (ความเร็วลมในห้องอบแห้ง ณ อุณหภูมิอากาศทางเข้า = 0.88 m/s) ค่าอุณหภูมิลมร้อนในห้องอบทั้ง 4 ห้อง และความชื้นห้องกล้วยหั่นแวนตลอดช่วงเวลาในการอบแห้งแสดงในภาพประกอบที่ 37-41



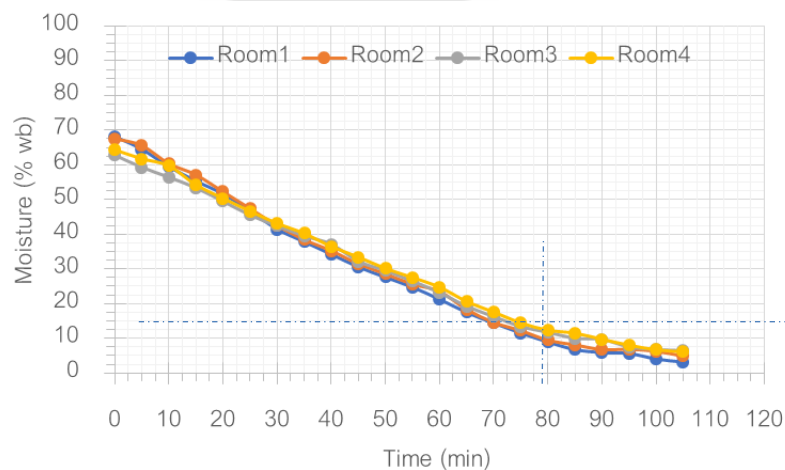
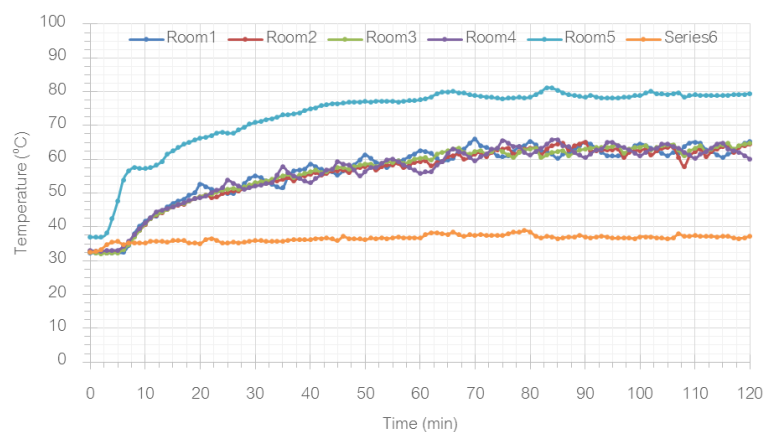
ภาพประกอบ 37 ผลการกระจายอุณหภูมิลมร้อนในห้องอบแห้งและการลดลงของความชื้นผลิตภัณฑ์เมื่อมีการสลับทิศทางการไหลของลมร้อนทุกๆ 5 นาที ลมร้อนมีอุณหภูมิเฉลี่ย 65°C และความเร็วลมร้อนภายในห้องอบแห้งมีค่าประมาณ 0.98 m/s



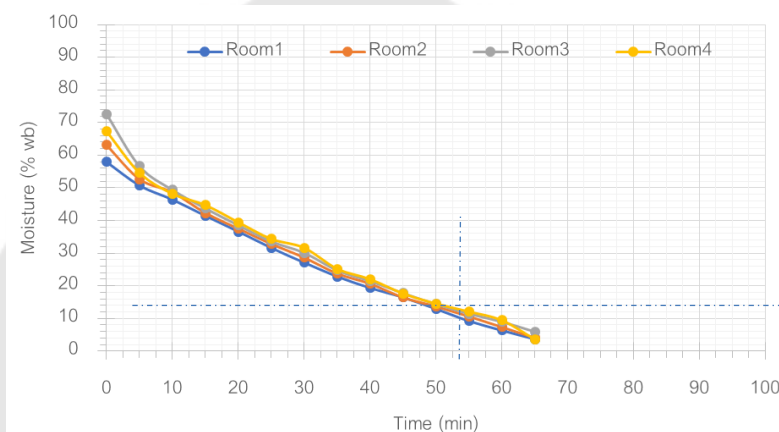
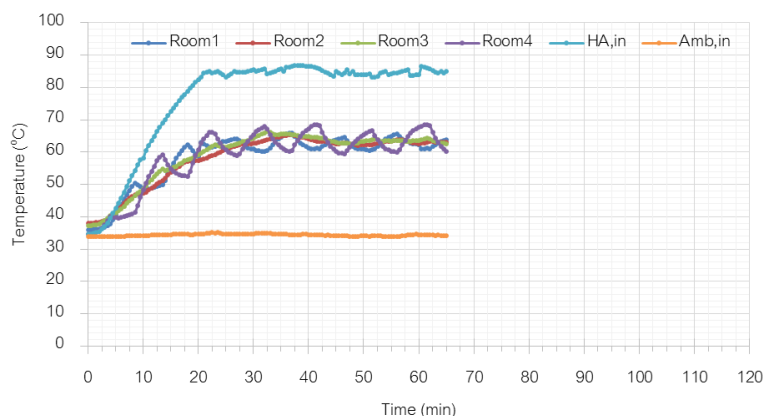
ภาพประกอบ 38 ผลการกระจายอุณหภูมิลมร้อนในห้องอบแห้งและการลดลงของความชื้น
ผลิตภัณฑ์เมื่อมีการสลับทิศทางการไหลของลมร้อนทุกๆ 5 นาที ลมร้อนมีอุณหภูมิเฉลี่ย 70 °C
และความเร็วลมร้อนภายในห้องอบแห้งมีค่าประมาณ 1.00 m/s



ภาพประกอบ 39 ผลการกระจายอุณหภูมิลมร้อนในห้องอบแห้งและการลดลงของความชื้นผลิตภัณฑ์เมื่อมีการสลับทิศทางการไหลของลมร้อนทุกๆ 5 นาที ลมร้อนมีอุณหภูมิเฉลี่ย 75 °C และความเร็วลมร้อนภายในห้องอบแห้งมีค่าประมาณ 1.01 m/s



ภาพประกอบ 40 ผลการกระจายอุณหภูมิลมร้อนในห้องอบแห้งและการลดลงของความชื้น
ผลิตภัณฑ์เมื่อมีการสลับทิศทางการไหลของลมร้อนทุกๆ 5 นาที ลมร้อนมีอุณหภูมิเฉลี่ย 80 °C
และความเร็วลมร้อนภายในห้องอบแห้งมีค่าประมาณ 1.03 m/s



ภาพประกอบ 41 ผลการกระจายอุณหภูมิความร้อนในห้องอบแห้งและการลดลงของความชื้น
ผลิตภัณฑ์เมื่อมีการสลับทิศทางการไหลของลมร้อนทุกๆ 5 นาที ลมร้อนมีอุณหภูมิเฉลี่ย 85°C
และความเร็วลมร้อนภายในห้องอบแห้งมีค่าประมาณ 1.043 m/s

เมื่อพิจารณากราฟแสดงอุณหภูมิการอบแห้งและความชื้นของผลิตภัณฑ์ตลอดช่วง
ระยะเวลาการอบแห้ง เมื่อการอบแห้งดำเนินการโดยสลับทิศทางการไหลของลมร้อนทุก 5 นาที ที่
อุณหภูมิความร้อนเปลี่ยนแปลง 5 ระดับคือ 65°C , 70°C , 75°C , 80°C และ 85°C ซึ่งสอดคล้อง
กับความเร็วลมร้อนเข้าสู่ห้องอบแห้งที่ 0.98 , 1.00 , 1.01 , 1.03 และ 1.04 m/s ตามลำดับ

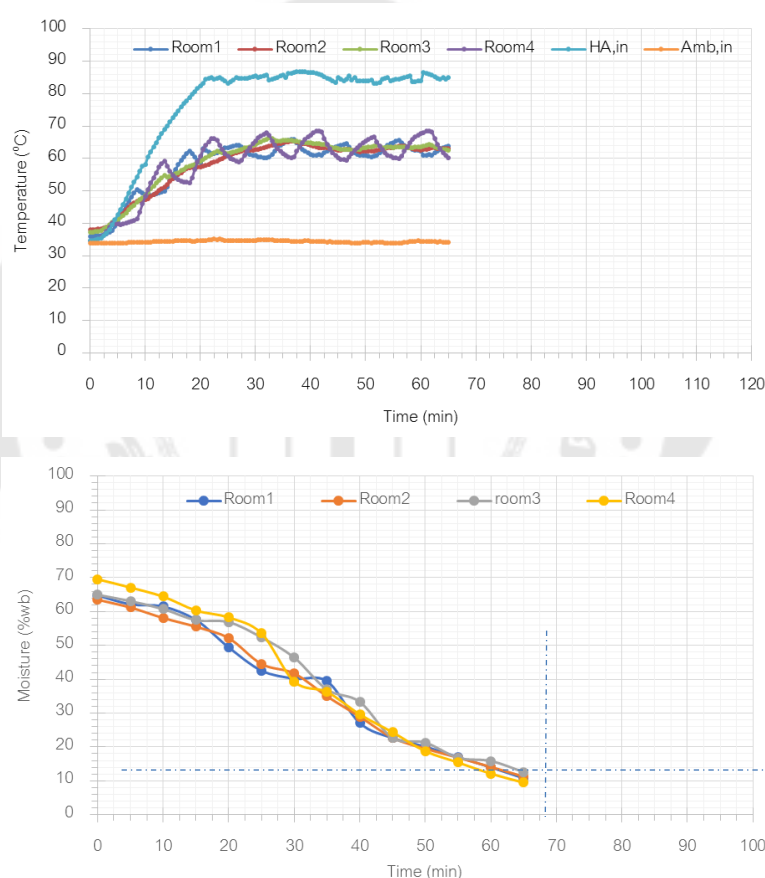
เมื่ออุณหภูมิความร้อนที่ป้อนเข้าสู่เครื่องอบแห้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น พบว่าระยะเวลาการ
อบแห้งมีแนวโน้มลดลง ที่ความเร็วลมร้อนมีค่า 65°C การลดความชื้นกล้วยหั่นแวนที่ความชื้น
เริ่มต้นประมาณ $60\text{--}70\text{ wb}$ และมีความชื้นเป้าหมายประมาณ 14 wb ใช้ระยะเวลาการอบแห้ง
ประมาณ 115 นาที เมื่ออุณหภูมิความร้อนเข้าสู่ห้องอบแห้งเพิ่มขึ้นตามลำดับสู่ค่า 70°C , 75°C ,

80°C และ 85°C พบว่าระยะเวลาที่ทำให้กล้วยหั่นแว่นมีความชื้นลดลงสู่ความชื้นเป้าหมาย 14%wb ใช้เวลาในการอบแห้งประมาณ 130, 95, 75, และ 50 นาที ตามลำดับ ในขณะที่ต้นทุนด้านพลังงานการอบแห้งเมื่อใช้แก๊สหุงต้มเป็นเชื้อเพลิงโดยพิจารณาระยะเวลาในการอบแห้งจนถึงความชื้นเป้าหมาย (14%wb) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.11-4.15 และต้นทุนค่าเชื้อเพลิงในการผลิตลมร้อนดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.6 พบว่าเมื่อเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิลมร้อนเข้าสู่ห้องอบ 5 ระดับคือ 65°C, 70°C, 75°C, 80°C และ 85°C ตามลำดับ (อัตราการไหลของลมเย็นคงที่ที่ 830 m³/h) มีต้นทุนการอบแห้งกรณีใช้แก๊สหุงต้มเป็นเชื้อเพลิงมีค่า 15.4, 17.6, 19.6 21.8 และ 24.8 บาทต่อชั่วโมง หรือเมื่อพิจารณาตลอดระยะเวลาการอบแห้งพบว่ามีค่าใช้จ่ายในการอบแห้งแต่ละกรณีคือ 33.4, 32.3, 31.0 และ 20.7 บาท ตามลำดับ เมื่อพิจารณาถึงต้นทุนการอบแห้งแต่ละกรณีพบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิลมร้อนเข้าสู่ห้องอบที่ 85 °C มีต้นทุนการอบแห้งต่ำสุด ในขณะที่ต้นทุนการอบแห้งกรณีใช้เตาชีวมวลและใช้กะลามะพร้าวเป็นเชื้อเพลิง พบว่ามีค่าต้นทุนด้านพลังงานในการผลิตลมร้อนที่ 4.1, 4.4 5.0 5.4 และ 6.2 บาทต่อชั่วโมง หรือเมื่อพิจารณาตลอดระยะเวลาการอบแห้งพบว่ามีค่าใช้จ่ายในการอบแห้งแต่ละกรณีคือ 8.9, 8.1, 7.9, 6.8 และ 5.2 บาท ตามลำดับ เมื่อพิจารณาถึงต้นทุนการอบแห้งแต่ละกรณีพบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิลมร้อนเข้าสู่ห้องอบที่ 85 °C มีต้นทุนการอบแห้งต่ำสุดและกรณีใช้เชื้อเพลิงชีวมวลร่วมกับเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงเปรียบเทียบกับกรณีใช้เตาแก๊สหุงต้มพบว่ามีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานลดลง 75%

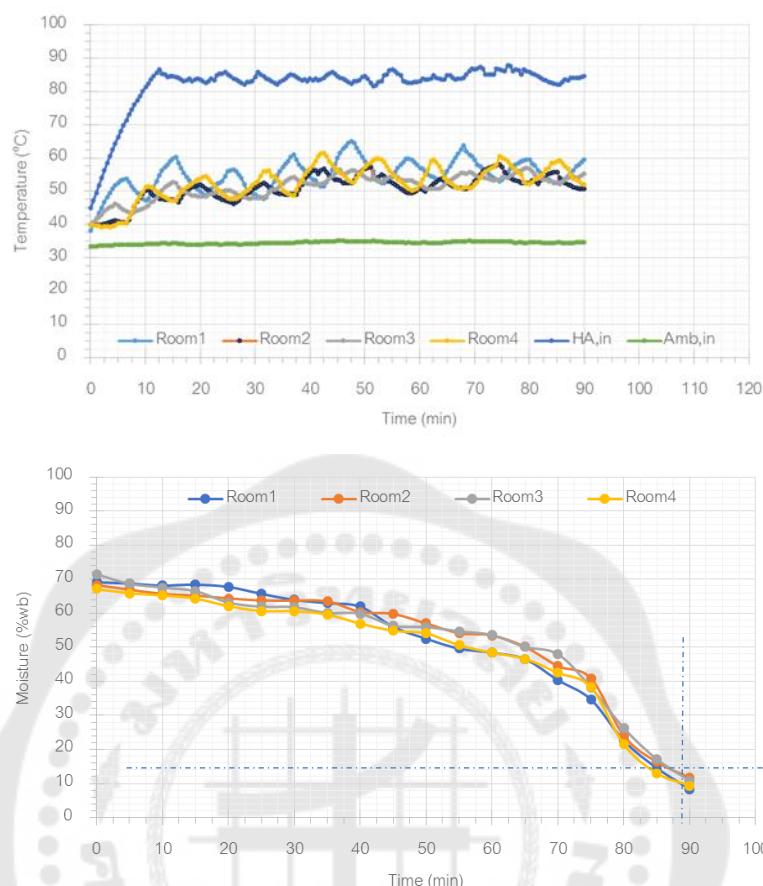
จากการสังเกตจะเห็นได้ชัดว่าที่อุณหภูมิลมร้อนเข้าสู่ห้องอบแห้งที่ 85 °C จะทำให้ความชื้นวัตถุดิบลดลงอย่างรวดเร็วและใช้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด ซึ่งเมื่อดูจากกราฟเปรียบเทียบกับ 65 °C และ 70 °C, 75 °C, 80 °C เพราะว่า อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะทำให้กล้วยหั่นแว่นแห้งเร็วขึ้นและการสลับทิศทางการไหลของลมร้อนทุกๆ 5 นาที ทำให้ระดับอุณหภูมิในแต่ละห้องร้อนแห้งและเย็นขึ้นสลับกันไป ซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยทั้งสี่ห้องอบแห้งมีค่าใกล้เคียงกันจึงทำให้กล้วยหั่นแว่นในแต่ละห้องแห้งในเวลาใกล้เคียงกัน ซึ่งแตกต่างจากการอบแห้งแบบไม่สลับทิศทางการไหลของลมร้อนอย่างชัดเจนและไม่พบรอยไหม้บริเวณขอบกล้วยหั่นแว่นแม้ว่าอุณหภูมิลมร้อนที่ใช้ในการอบจะสูงถึง 85 °C

4.5 ผลการกระจายอุณหภูมิลมร้อนในห้องอบแห้งและการลดลงของความชื้นผลิตภัณฑ์เมื่อมีการสลับทิศทางการไหลของลมร้อนและเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของลมร้อน

ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งและผลของการลดลงของความชื้นของขึ้นกล้วยหั่นแว่นเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมร้อนที่ป้อนเข้าสู่ห้องอบแห้งที่ 3 ระดับ คือ 1.043, 0.938 และ 0.834 m/s ซึ่งสอดคล้องกับอัตราการไหลของลมเย็นจากเครื่องเป่าลมที่ 830, 747 และ 664 m³/h เมื่อกำหนดให้ลมร้อนออกจากเครื่องผลิตลมร้อนที่อุณหภูมิเฉลี่ย 85 °C และมีการสลับทิศทางการไหลของลมร้อนทุกๆ 5 นาที ค่าอุณหภูมิลมร้อนในห้องอบทั้ง 4 ห้อง และความชื้นห้องกล้วยหั่นแว่น ตลอดช่วงเวลาในการอบแห้งแสดงในภาพประกอบที่ 41-43



ภาพประกอบ 42 ผลการกระจายอุณหภูมิลมร้อนในห้องอบแห้งและการลดลงของความชื้นผลิตภัณฑ์เมื่อมีการสลับทิศทางการไหลของลมร้อนทุกๆ 5 นาที ลมร้อนมีอุณหภูมิเฉลี่ย 85 °C และความเร็วลมร้อนภายในห้องอบแห้งมีค่าประมาณ 0.938 m/s



ภาพประกอบ 43 ผลการกระจายอุณหภูมิลมร้อนในห้องอบแห้งและการลดลงของความชื้น
ผลิตภัณฑ์เมื่อมีการสลับทิศทางการไหลของลมร้อนทุกๆ 5 นาที ลมร้อนมีอุณหภูมิเฉลี่ย 85 °C
และความเร็วลมร้อนภายในห้องอบแห้งมีค่าประมาณ 0.834 m/s

เมื่อพิจารณากราฟแสดงอุณหภูมิการอบแห้งและความชื้นของผลิตภัณฑ์ตลอดช่วง
ระยะเวลาการอบแห้ง เมื่อการอบแห้งดำเนินการโดยสลับทิศทางการไหลของลมร้อนทุก 5 นาที ที่
อุณหภูมิลมร้อน 85 °C และเปลี่ยนแปลงความเร็วลมร้อนที่เข้าสู่ห้องอบแห้ง 3 ระดับคือ คือ
1.043, 0.938 และ 0.834 m/s ตามลำดับ เมื่อความเร็วลมร้อนที่ป้อนเข้าสู่เครื่องอบแห้งมี
แนวโน้มลดลง พบว่าระยะเวลาการอบแห้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ที่ความเร็วลมร้อนมีค่า 1.043 m/s
การลดความชื้นกล้วยหั่นแฉ่งที่ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 60-70%wb และมีความชื้นเป้าหมาย
ประมาณ 14%wb ใช้ระยะเวลาการอบแห้งประมาณ 50 นาที เมื่อความเร็วลมร้อนเข้าสู่ห้อง
อบแห้งลดลงตามลำดับสู่ค่า 0.938 และ 0.834 m/s พบว่าระยะเวลาที่ทำให้กล้วยหั่นแฉ่งมี
ความชื้นลดลงสู่ความชื้นเป้าหมาย 14%wb ใช้เวลาในการอบแห้งประมาณ 65 นาที และ 85 นาที
ตามลำดับ ในขณะที่ต้นทุนด้านพลังงานการอบแห้งเมื่อใช้แก๊สหุงต้มเป็นเชื้อเพลิงโดย

พิจารณาระยะเวลาในการอบแห้งจนถึงความชื้นเป้าหมาย (14%wb) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.15-4.17 และต้นทุนค่าเชื้อเพลิงในการผลิตลมร้อนดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.5 พบว่าเมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วลมเข้าสู่ห้องอบ 3 ระดับคือ 1.043, 0.938 และ 0.834 m/s ตามลำดับ (เปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของลมร้อน 3 ระดับคือ 830, 747 และ 664 m³/h) มีต้นทุนการอบแห้งกรณีใช้แก๊สหุงต้มเป็นเชื้อเพลิงมีค่า 24.8, 21.6 และ 19.4 บาทต่อชั่วโมง หรือเมื่อพิจารณาตลอดระยะเวลาการอบแห้งพบว่ามีค่าใช้จ่ายในการอบแห้งแต่ละกรณีคือ 20.7, 23.4 และ 27.5 บาทตามลำดับ เมื่อพิจารณาถึงต้นทุนการอบแห้งแต่ละกรณีพบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิลมร้อนเข้าห้องอบที่ 85 °C และความเร็วลมร้อน 1.043 m/s มีต้นทุนการอบแห้งต่ำสุด ในขณะที่ต้นทุนการอบแห้งกรณีใช้เตาชีวมวลและใช้กะลามะพร้าวเป็นเชื้อเพลิง พบว่ามีค่าต้นทุนด้านพลังงานในการผลิตลมร้อนที่ 6.2, 5.4 และ 5.0 บาทต่อชั่วโมง หรือเมื่อพิจารณาตลอดระยะเวลาการอบแห้งพบว่ามีค่าใช้จ่ายในการอบแห้งแต่ละกรณีคือ 5.2, 5.9 และ 7.1 บาทตามลำดับ เมื่อพิจารณาถึงต้นทุนการอบแห้งแต่ละกรณีพบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิลมร้อนเข้าห้องอบที่ 85 °C มีต้นทุนการอบแห้งต่ำสุดและกรณีใช้เชื้อเพลิงชีวมวลร่วมกับเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงเปรียบเทียบกับกรณีใช้เตาแก๊สหุงต้มพบว่ามีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานลดลง 75%

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

เครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนแบบสลับทิศทางที่ผลิตจากเตาชีวมวล ประสิทธิภาพสูงถูกออกแบบและสร้างโดยการประยุกต์ใช้ทฤษฎีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่าง ลมร้อนจากการเผาเชื้อเพลิงกับอากาศสำหรับอบแห้งภายในชุดกลุ่มท่อแลกเปลี่ยนความร้อนโดย ใช้ร่วมกับเตาชีวมวล ซึ่งสามารถเร่งหรือความร้อนได้ เชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตความร้อนด้วยเตาชีวมวลคือกะลามะพร้าวที่มีค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง 16.31 เมกะจูล/กิโลกรัม สามารถบรรจุ ถ้วยแห้งแผ่นความหนา 1-2 mm ได้จำนวน 20 ถาด และมีน้ำหนักเริ่มต้นประมาณ 6 kg และ น้ำหนักผลิตภัณฑ์แห้งที่ความชื้น 14%wb ประมาณ 1.8 kg

การอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนแบบสลับทิศทางที่ผลิตจากเตาชีวมวล ประสิทธิภาพสูง เมื่อมีการสลับทิศทางการไหลของลมร้อนทุก 5 นาที ที่อุณหภูมิลมร้อน เปลี่ยนแปลง 5 ระดับคือ 65°C , 70°C , 75°C , 80°C และ 85°C ซึ่งสอดคล้องกับความเร็วลม ร้อนเข้าสู่ห้องอบแห้งที่ 0.98, 1.00, 1.01, 1.03 และ 1.04 m/s ตามลำดับ เมื่ออุณหภูมิลมร้อนที่ บ้อนเข้าสู่เครื่องอบแห้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น พบว่าระยะเวลาการอบแห้งมีแนวโน้มลดลง ที่ความเร็ว ลมร้อนมีค่า 65°C การลดความชื้นกล้วยแห้งที่ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 60-70%wb และมีความ ชื้นเป้าหมายประมาณ 14%wb ใช้ระยะเวลาการอบแห้งประมาณ 115 นาที เมื่ออุณหภูมิลม ร้อนเข้าสู่ห้องอบแห้งเพิ่มขึ้นตามลำดับสู่ค่า 70°C , 75°C , 80°C และ 85°C พบว่าระยะเวลาที่ทำให้ กล้วยแห้งมีความชื้นลดลงสู่ความชื้นเป้าหมาย 14%wb ใช้เวลาในการอบแห้งประมาณ 130, 110, 95, 75, และ 50 นาที ตามลำดับ ในขณะที่ต้นทุนการอบแห้งกรณีใช้เตาชีวมวลและใช้ กะลามะพร้าวเป็นเชื้อเพลิง พบว่ามีค่าต้นทุนด้านพลังงานในการผลิตลมร้อนที่ 4.1, 4.4 5.0 5.4 และ 6.2 บาทต่อชั่วโมง หรือเมื่อพิจารณาตลอดระยะเวลาการอบแห้งพบว่ามีค่าใช้จ่ายในการ อบแห้งแต่ละกรณีคือ 8.9, 8.1, 7.9, 6.8 และ 5.2 บาท ตามลำดับ เมื่อพิจารณาถึงต้นทุนการ อบแห้งแต่ละกรณีพบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิลมร้อนเข้าห้องอบที่ 85°C มีต้นทุนการอบแห้ง ต่ำสุดและกรณีใช้เชื้อเพลิงชีวมวลร่วมกับเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงเปรียบเทียบกับกรณีใช้เตา แก๊สหุงต้มพบว่ามีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานลดลง 75%

จากการสังเกตจะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิลมร้อนเข้าสู่ห้องอบแห้งที่ 85°C จะทำให้ความชื้น วัตถุดิบลดลงอย่างรวดเร็วและใช้ระยะในการอบแห้งน้อยที่สุด เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ กล้วยแห้งแห้งเร็วขึ้นและการสลับทิศทางการไหลของลมร้อนทุกๆ 5 นาที ทำให้ระดับอุณหภูมิ

ในแต่ละห้องร้อนแห้งและเย็นขึ้นสลับกันไป ซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยทั้งสี่ห้องอบแห้งมีค่าใกล้เคียงกันจึงทำให้กล้วยแห้งในในแต่ละห้องแห้งในเวลาใกล้เคียงกัน ซึ่งแตกต่างจากการอบแห้งแบบไม่สลับทิศทางการไหลของลมร้อนอย่างชัดเจนและไม่พบรอยไหม้บริเวณขอบกล้วยแห้ง เครื่องอบแห้งมีอัตราการอบแห้งอยู่ระหว่าง 1.93-5.06 กิโลกรัมต่อชั่วโมงและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะอยู่ในช่วง 13.16 – 22.74 เมกะจูลต่อกิโลกรัมของน้ำระเหย

การเปลี่ยนแปลงความเร็วลมร้อนที่เข้าสู่ห้องอบแห้ง 3 ระดับคือ คือ 1.043, 0.938 และ 0.834 m/s ตามลำดับ ที่อุณหภูมิลมร้อนเข้าห้องอบแห้งที่ 85 °C เมื่อความเร็วลมร้อนที่ป้อนเข้าสู่เครื่องอบแห้งมีแนวโน้มลดลง พบว่าระยะเวลาการอบแห้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ที่ความเร็วลมร้อนมีค่า 1.043 m/s การลดความชื้นกล้วยแห้งที่ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 60-70%wb และมีความชื้นเป้าหมายประมาณ 14%wb ใช้ระยะเวลาการอบแห้งประมาณ 50 นาที เมื่อความเร็วลมร้อนเข้าสู่ห้องอบแห้งลดลงตามลำดับสู่ค่า 0.938 และ 0.834 m/s พบว่าระยะเวลาที่ทำให้กล้วยแห้งมีความชื้นลดลงสู่ความชื้นเป้าหมาย 14%wb ใช้เวลาในการอบแห้งประมาณ 65 นาที และ 85 นาที

เมื่อพิจารณาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการผลิตลมร้อนด้วยเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงที่ใช้กะลามะพร้าวเป็นเชื้อเพลิงเปรียบเทียบกับการใช้เตาแก๊สหุงต้ม (LPG รุ่น KB8) พบว่าต้นทุนในการผลิตลมร้อนมีค่าแตกต่างกัน จากการคำนวณต้นทุนเชื้อเพลิงในการผลิตลมร้อนที่ 55, 65, 70, 75, 80 และ 85 °C อัตราการไหลของลมเย็น 830 m³/h พบว่าการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลร่วมกับเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงมีต้นทุนเชื้อเพลิงต่ำกว่าการใช้แก๊สหุงต้มประมาณ 75% โดยต้นทุนค่าเชื้อเพลิงแก๊สหุงต้มมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 12, 16, 18, 20, 22 และ 25 บาทต่อชั่วโมงตามลำดับ และ ต้นทุนค่าเชื้อเพลิงชีวมวลมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 3, 3.5, 4, 4.5, 5 และ 6 บาทต่อชั่วโมงตามลำดับ เมื่อกำหนดให้ราคาไม้ฟืนประมาณ 1.5 THB/kg (บาทต่อกิโลกรัม) และ ราคาแก๊สหุงต้ม 25 THB/kg

เมื่อพิจารณาการเผาไหม้และการปลดปล่อยแก๊สมลพิษจากเตาชีวมวล เมื่อใช้กะลามะพร้าวเป็นเชื้อเพลิงและมีการควบคุมปริมาณอากาศป้อนเข้าสู่ห้องปฏิบัติการผลิตแก๊สเพื่อเพิ่มอัตราการผลิตแก๊สด้วยการปรับวาล์วควบคุมอากาศป้อนที่ระดับน้อย ปานกลาง และมาก ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอัตราการใช้เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นตามปริมาณอากาศป้อนที่เพิ่มขึ้น โดยมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นจาก 2.02 kg/h, 3.26 kg/h และ 4.14 kg/h ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับพลังงานป้อนเข้าจากชีวมวล 9.06 kW, 14.77 kW และ 18.76 kW ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาผลการเผาไหม้และการปลดปล่อยมลพิษ พบว่าค่าก๊าซออกซิเจน

ส่วนเกินไนโอเซียในช่วง 7.65-4.87% ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามปริมาณอากาศส่วนเกินที่ลดลง ในขณะที่แก๊สมลพิษที่ประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าอยู่ในช่วง 256-1,264 ppm และก๊าซไนโตรเจนออกไซด์มีค่าอยู่ในช่วง 126-108 ppm

ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งวัสดุทางการเกษตรอย่างอื่นเพิ่มเติม เช่นการอบแห้งมะม่วงกวน กระท้อน เป็นต้น
2. ควรศึกษาระยะเวลาในการสลับทิศทางการไหลให้มากขึ้นเพื่อหาระยะเวลาการสลับทิศทางการไหลให้เหมาะสมกับความหนาวัสดุอบแห้ง
3. ควรศึกษาการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิลมร้อนที่มากกว่า 85 °C



บรรณานุกรม

- 1.ภาวดี อาทกรกิจวัฒน์. ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี; 2556
- 2 Kassirin Saensree, http://53011711152.blogspot.com/2012/06/blog-post_19.html
- 3 Eng.sut.ac.th (2015, September 18), <http://ieneryguru.com/2015/09/drying/>.
- 4 สุานิตย์เมธิยานนท์(2541). การอบแห้งโดยใช้ป้มความร้อนในระดับอุตสาหกรรม.วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตกรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2541
- 5 สันติ สุดเฉลียว(2550) การศึกษาการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาสารคาม: มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- 6 <http://www.roasterproject.com/2010/01/heat-transfer-the-basics/>
- 7 วิบูลย์ เทเพนทร์, กลุ่มวิจัยวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยว สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการ เกษตรวิศวกรรม
- 8 ชนนท์ ราชภูมิยม, สุนทร สีบคำ, คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร, มหาวิทยาลัยแม่โจ้, เชียงใหม่, 50290.
- 9 สมมาส แก้วล้วน ดำรง ศักดิ์จันทสิทธิ์, สุรัช จันทรศรีและเวดิน ปียรรัตน์. (2558)"การทดสอบสมรรถนะเตาชีวมวลขนาด20kW".วิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. 8(1): 24-33.
- 10 ไพโรจน์ พิพัฒน์สุวรรณ. (2560). การพัฒนาเครื่องผลิตไอน้ำความดันต่ำสำหรับ กระบวนการอบฆ่าเชื้อในโรงเรือนเพาะเห็ดฟางโดยใช้เตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง ปริญญานิพนธ์ วศ.ม. (วิศวกรรมเครื่องกล). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- 11 บริษัท ซาปะะ เอ็นจิเนียริง จำกัด. (2559). พัดลมถังกลม. สืบค้นเมื่อ มกราคม 2559 www.sapaengineer.com/articles/41991388
- 12 ธนากร วีระวัฒนานนท์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
- 13 ชิษณุพงศ์ จิตตาคม¹ จักรวรรุ เมตตา² ณัฐนันท์ วิมลสุตร์³ ณัฐพล แสงทอง⁴ และสมมาส แก้วล้วน¹¹ผลกระทบของชนิดเชื้อเพลิงและอัตราการไหลของอากาศปฐุมภูมิต่อมลพิษและสมรรถนะของเตาชีวมวลแบบอากาศไหลขึ้นตามธรรมชาติ1 ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

14 อนิรุทธิ์ ต่ายขาว และสมบัติ ที่มทรัพย์ (2548). “การเปรียบเทียบหลักการทำงานของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบธรรมชาติและชนิดพาความร้อนแบบบังคับ”, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย

15 จารุวรรณ กุลวิศ, สมเกียรติ ปรัชญาวารการ และสมชาติ ไสภณรณฤทธิ์, จากคณะ วิศวกรรมศาสตร์ ม.เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี “ผลของอุณหภูมิอบแห้งที่มีต่อสมบัติการแพร่ความร้อน” วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ฉบับพิเศษ ปีที่ 30 ฉบับที่ 4 (2550).

16 นาย นพรัตน์ อมัตติรัตน์, (2554) การศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนระหว่างสารทำความทำความเย็น R- 22 กับ COLD – 22, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

17 อาภาภรณ์ ศรีสระคู, (2549) “การจำลองการอบแห้งผลลำไยโดยใช้การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล” วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

18 ปรีดา พัฒนแสง และ จริญญา รักเพื่อน, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี “ลักษณะการไหลของอากาศในเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน”

19 พัทธ์ จันทรเจริญ, สถาบันราชภัฏสวนดุสิต. การวิเคราะห์การทำแห้งผลไม้สดโดยเครื่องอบแห้งชนิดถาดแบบลมร้อน.

20.สุภาวรรณ ฐิระวณิชกุล และคณะ, (2555). การอบแห้งขนุนด้วยพลังงานความร้อนร่วมของรังสี
 ฝนพลศาสตร์คุณภาพและการทดสอบประสิทธิภาพสัมพัทธ์,
 นครินทร์.

ทพพลผลและสรวิษฐ์ แหวง, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขา
 วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ “การผลิตลมร้อนด้วยเตาชีวมวลสำหรับกระบวนการ
 อบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชน”.

22 ดร. วิสาขา ภูจินดา (2557), สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์, ศึกษาผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม
 และผลตอบแทนทางสังคมจากการลงทุนจากการนำชีวมวลเพื่อผลิตพลังงาน.

23 สุทธิพร เนียมพงษ์พานิชและ หอม นิตินรงค์ เอนก สุขเจริญ, การพัฒนาประสิทธิภาพของเตา
 ชีวมวลโดยใช้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

24 สุภาวรรณ ฐิระวณิชกุล สาเกีนา ลาแมปะ ยุทธนา ฐิระวณิชกุล, (2555). คณะวิศวกรรมศาสตร์,
 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, “ศึกษาปัจจัยของสภาวะในการอบแห้งต่ออุณหภูมิและคุณภาพของ
 ขนุนแห้งสายพันธ์ ทองประเสริฐด้วยสภาวะการทดลองอบแห้งที่แตกต่างกัน”.

25 เวียง อากรชี พิมล วุฒิสินธ์ ชูศักดิ์ ขวประดิษฐ์ ตัญญู กองช่าง บัณฑิตา แสงวงษา สมอง

อมฤกษ์ พุทธินันท์ จารุวัฒน์, (2551). “วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการอบแห้งลำไยแบบชาวบ้าน”, กลุ่มวิจัยวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยวสถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร.

26 วิเชียร ดวงสีเสน, เทวรัตน์ ทิพย์วิมล และวีรชัย อัจหาญ (2555) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ‘งานวิจัยเพื่อศึกษาการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุน (Rotary Screen Dryer)’

27 Incropera, Frank, P. and David, P.D. 1996. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. John Wiley & Sons, New York, 419-461.





ภาคผนวก ก
รายการสัญลักษณ์



รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์

MR	=	Moisture ratio
M_{in}	=	ค่าความชื้นเริ่มต้นของวัสดุก่อนเริ่มอบแห้ง (% dry basis)
M_f	=	ค่าความชื้นสุดท้ายของวัสดุ (% dry basis)
W_d	=	น้ำหนักวัสดุแห้ง (kg)
t	=	ระยะเวลาในการอบแห้ง (min)
m_f	=	น้ำหนักของเชื้อเพลิงที่ใช้ (kg as receive)
LHV_f	=	ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ใช้ (MJ/kg as receive)
M_{in}	=	ค่าความชื้นเริ่มต้นของวัสดุก่อนเริ่มอบแห้ง (% dry basis)
M_f	=	ค่าความชื้นสุดท้ายของวัสดุ (% dry basis)
W_d	=	น้ำหนักวัสดุแห้ง (kg)
t	=	ระยะเวลาในการอบแห้ง (min)
M_w	=	ความชื้นของกล้วยหั่นแว่นหลังมาตรฐานเปียก (% w.b)
M_{STI}	=	น้ำหนักวัสดุตัวอย่างพร้อมกล่องกระดาษก่อนอบแห้ง (g)
M_{STF}	=	น้ำหนักวัสดุตัวอย่างพร้อมกล่องกระดาษหลังอบแห้ง (g)
M_T	=	น้ำหนักกล่องกระดาษเปล่า (g)
M_w	=	มวลของน้ำในวัสดุ
h_{fg}	=	ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำในวัสดุ
M	=	มวลของวัสดุ
C_p	=	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุ
ΔT	=	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป
ΔP	=	ความดันรวมที่สูญเสีย , P
P_V	=	ความดันความเร็ว , Pa
f_D	=	แฟคเตอร์ความเสียหาย
L	=	ความยาวท่อ , m
D	=	เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ , m
Q	=	อัตราการถ่ายเทความร้อน
a	=	พื้นที่หน้าตัดที่ความร้อนไหลผ่าน

$\frac{dT}{dX}$	=	อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับระยะทาง
k	=	ค่าการนำความร้อนของวัสดุ
Q	=	อัตราการนำความร้อน
h	=	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน
T_{∞}	=	อุณหภูมิของของไหล
T_s	=	อุณหภูมิที่ผิวของวัสดุ
A	=	พื้นที่หน้าตัดของช่องทางการไหล
V	=	ความเร็วเฉลี่ย
ME	=	ประสิทธิภาพเชิงกล
ΔP_t	=	ความดันรวม
BHP	=	กำลังงานที่ให้กับแกนของพัดลม

ภาคผนวก ข

การตารางและตัวอย่างการคำนวณการอบแห้งของเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลม
ร้อนแบบสลับทิศทางที่ผลิตจากเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง

**1. ตารางอุณหภูมิและความชื้นจากการทดลองของเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วย
ลมร้อนแบบสลับทิศทางที่ผลิตจากเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง**

ตารางที่ 1.1 ค่าข้อมูลของอุณหภูมิจากการอบแห้งแบบสลับทิศทางการไหลของลมร้อนของกล้วย

หันแวนที่ 55 °C

Time	Room 1	Room 2	Room 3	Room 4
5	30.5	30.4	30.4	29.8
10	30.7	30.2	30	29.8
15	30.8	31	30.8	34.3
20	36.5	32.4	32.3	32.8
25	34.3	33.2	33.4	38
30	38.8	33.7	34.4	34.9
35	35.9	33.8	34.9	39.7
40	41.2	35.9	36	36.9
45	37.9	35.9	36.6	42.8
50	42.8	36.8	37.6	38.6
55	40	37.2	38.3	43.7
60	44.3	37.6	37.8	40.6
65	40.8	38.6	39	45.7
70	46.3	39.1	39.7	41.7
75	42.8	40.3	40.4	47.3
80	47.8	40.8	40	43.5
85	43.7	41.2	40.2	49.5
90	49.4	42.1	41.5	45.1
95	45.9	42.6	41.2	49.6
100	49.9	42.3	43	45.2
105	45	42.4	43	49.3
110	49.6	43.1	44	46
115	44.9	42.9	42.5	48.6
120	48.5	43.5	43.2	44.2
125	44.5	43.2	43.4	48.4
130	48.3	44.4	43.3	44
135	45	43.2	44.1	48.6
140	48.2	44.2	44.9	43.8
145	44.8	44.2	44	48.5
150	48.1	43.7	44	44.7
155	44.5	44.5	45.2	48.2
160	47.9	43.2	44.4	45.9

ตารางที่ 1.2 ค่าข้อมูลของความชื้นจากการอบแห้งแบบสลับทิศทางการไหลของลมร้อนของกล้วย
 หนัาแห้งที่ 55 °C

Time	Room 1		Room 2		Room 3		Room 4	
	% w.b	% d.b	% w.b	% d.b	% w.b	% d.b	% w.b	% d.b
เริ่มต้น	62.5	166.67	62.24	164.83	65.38	188.89	65.91	193.32
5	62.22	164.69	62.2	164.55	62.53	166.9	63.4	173.22
10	61.05	156.74	61.23	157.93	62.3	165.25	62.42	166.1
15	60.56	153.55	60.8	155.1	61.6	160.42	62.16	164.27
20	59.56	147.28	59.9	149.38	61.16	157.47	61.7	161.1
25	58.55	141.25	59.3	145.7	60.7	154.46	60.35	152.2
30	57.34	134.41	58.5	140.96	59.5	146.91	59.7	148.14
35	56.32	128.94	57.4	134.74	58.4	140.39	58.42	140.5
40	55.56	125.02	56.8	131.48	57.5	135.3	57.92	137.64
45	54.38	119.2	55.7	125.73	56.6	130.42	56.4	129.36
50	53.38	114.5	54.6	120.26	55.52	124.82	55.54	124.92
55	52.53	110.66	53.5	115.05	54.38	119.2	54.56	120.07
60	51.57	106.48	52.7	111.42	53.3	114.13	53.21	113.72
65	50.54	102.18	51.4	105.76	52.75	111.64	52.19	109.16
70	49.53	98.14	50.9	103.67	51.7	107.04	51.69	107
75	48.51	94.22	49.6	98.41	50.34	101.37	50.56	102.27
80	47.52	90.55	48.8	95.31	49.6	98.41	49.61	98.45
85	46.42	86.64	47.6	90.84	48.06	92.53	48.49	94.13
90	45.49	83.45	46.7	87.62	47.8	91.57	47.04	88.82
95	44.39	79.83	45.9	84.84	46.35	86.39	46.11	85.56
100	42.79	74.79	43.36	76.55	45.75	84.33	45.03	81.92
105	42.23	73.1	43.2	76.06	44.8	81.16	44.45	80.02
110	34.41	52.46	35.5	55.04	32.73	48.65	31.37	45.71
115	25.13	33.56	26.3	35.68	22.26	28.63	24.59	32.6
120	10	11.11	14.2	16.55	13.7	15.87	14.4	16.82
125	15.87	18.86	18.86	23.25	17.5	21.21	14.63	17.14
130	8.54	9.33	6.14	6.54	7.36	7.95	8.82	9.67
135	11.5	12.99	13.6	15.74	14.31	16.7	8.76	9.6
140	11.26	12.68	14.7	17.23	13.9	16.14	11.06	12.43
145	7.32	7.89	9.6	10.62	10.2	11.36	5.63	5.96
150	10.09	11.22	11.31	12.75	13.89	16.13	7.46	8.06

ตารางที่ 1.3 ค่าข้อมูลของอุณหภูมิจากการอบแห้งแบบสลับทิศทางการไหลของลมร้อนของกล้วย
 ให้น้ำหนักที่ 65 °C

Time	Room 1	Room 2	Room 3	Room 4
5	30.5	30.4	30.4	29.8
10	30.7	30.2	30	29.8
15	30.8	31	30.8	34.3
20	36.5	32.4	32.3	32.8
25	34.3	33.2	33.4	38
30	40.2	34.6	34.8	35.3
35	37.1	36.2	36	43.5
40	46.1	37.3	37.2	40
45	40.7	37.9	38.7	46.7
50	48.6	38.7	39.5	42
55	44.4	39.7	40.3	49.7
60	49.9	40.5	41.1	44.2
65	45.4	41.2	42.2	50.2
70	50.7	42	42.2	45.2
75	46.2	42.7	42.7	51.9
80	51.7	43.3	43.8	46.5
85	47.9	43.6	43.2	52.6
90	52	44.4	44.2	47.3
95	47.9	44.9	44.5	52.7
100	51.9	44.9	45.4	47.9
105	47	45.9	46.1	51.6
110	50.8	46	46	47.5
115	48.4	45.4	45.8	50.6
120	50.5	46.2	46.9	50.3

ตารางที่ 1.4 ค่าข้อมูลของความชื้นจากการอบแห้งแบบสลับทิศทางการไหลของลมร้อนของกล้วย
 หนัาแห้งที่ 65 °C

Time	Room 1		Room 2		Room 3		Room 4	
	% w.b	% d.b	% w.b	% d.b	% w.b	% d.b	% w.b	% d.b
เริ่มต้น	69.79	231.03	69.85	231.68	71.36	249.13	69.98	233.06
5	70.88	243.43	69.7	230.04	70.62	240.31	69.04	223
10	70.14	234.93	68.95	222.06	69.52	228.03	68.22	214.68
15	69.35	226.22	67.7	209.6	69.74	230.5	68.35	215.96
20	68.94	221.97	67.84	210.95	68.65	218.98	67.21	204.93
25	67.5	207.69	66.79	201.11	67.06	203.59	66.74	200.66
30	66.73	200.57	65.63	190.95	65.75	191.93	65.57	190.44
35	65.85	192.83	64.73	183.53	64.84	184.41	64.71	183.37
40	64.3	180.08	62.72	168.24	63.73	175.71	63.62	174.88
45	63.43	173.45	61.6	160.42	62.41	166.03	62.38	165.82
50	62.08	163.7	60.54	153.42	61.62	160.55	61.72	161.23
55	61.4	159.07	59.84	149	60.12	150.76	60.61	153.87
60	60.27	151.7	58.54	141.2	59.42	146.43	59.51	146.97
65	59.5	146.92	57.82	137.08	58.81	142.78	57.91	137.59
70	58.54	141.2	56.54	130.1	57.51	135.35	56.73	131.11
75	57.55	135.57	55.82	126.35	56.38	129.25	55.81	126.3
80	55.8	126.24	54.07	117.74	54.5	119.76	53.97	117.26
85	54.24	118.53	53.57	115.38	53.37	114.45	52.92	112.4
90	52.53	110.66	52.26	109.47	52.62	111.06	49.91	99.65
95	43.6	77.31	42.96	75.3	45.71	84.2	42.64	74.34
100	33.92	51.34	30.94	44.8	31.52	46.03	29.74	42.33
105	6.45	6.9	7.62	8.25	8.42	9.19	9.17	10.1
110	13.52	15.64	16.46	19.7	15.71	18.64	13.52	15.64
115	3.5	3.63	7.84	8.51	9.75	10.8	7.89	8.56
120	6.44	6.88	10.93	12.27	9.64	10.67	10.36	11.55

ตารางที่ 1.5 ค่าข้อมูลของอุณหภูมิจากการอบแห้งแบบสลับทิศทางการไหลของลมร้อนของกล้วย
 หั่นแฉ้งที่ 70 °C

Time	Room 1	Room 2	Room 3	Room 4
5	32.3	31.4	31.3	32
10	32.5	31.7	31.4	32.1
15	33.6	32.2	31.8	37.7
20	40.3	34	34	35.5
25	37.8	35.6	35.6	42.7
30	44.6	36.3	36.4	39
35	40	37.8	38	47
40	48.3	38.7	39	42.1
45	42.2	40.3	40.4	49.3
50	51.6	41.8	42.4	43.8
55	44.9	42.9	43.2	53.7
60	55.6	43.3	44.4	45.8
65	46.5	44.4	45	56.7
70	57.8	45.1	46.4	47.3
75	49.8	46.5	47.5	59.1
80	60.8	47.4	48.2	51
85	52.7	48.5	49.2	61.3
90	61.7	49.3	50.5	54.7
95	53.4	50.3	51.6	61.3
100	61.6	51.4	52	54.2
105	54.5	52.8	53.1	60.1
110	59.7	53.6	54.5	55
115	57.1	54	55.6	55.5

ตารางที่ 1.6 ค่าข้อมูลของความชื้นจากการอบแห้งแบบสลับทิศทางการไหลของลมร้อนของกล้วย
 หนัาแห้งที่ 70 °C

Time	Room 1		Room 2		Room 3		Room 4	
	% w.b	% d.b	% w.b	% d.b	% w.b	% d.b	% w.b	% d.b
เริ่มต้น	64.56	182.18	66.57	199.15	63.33	172.73	70.62	240.38
5	63.5	173.97	64.34	180.43	62.78	168.67	63.85	176.63
10	62.14	164.12	62.07	163.64	62.27	165.04	62.5	166.67
15	61.13	157.26	60.46	152.91	61.52	159.88	61.4	159.07
20	60.19	151.19	59.51	146.97	60.17	151.07	60.51	153.23
25	59.17	144.92	58.57	141.37	59.83	148.94	59.6	147.53
30	58.41	140.44	57.61	135.91	57.68	136.3	58.16	139.01
35	57.52	135.41	56.41	129.41	56.72	131.05	57.41	134.8
40	56.24	128.52	55.25	123.46	54.83	121.39	55.51	124.77
45	55.01	122.27	53.65	115.75	53.52	115.15	53.81	116.5
50	53.31	114.18	52.74	111.6	51.92	107.99	50.82	103.33
55	52.27	109.51	51.85	107.68	50.26	101.05	49.71	98.85
60	51.27	105.21	50.15	100.6	49.73	98.92	49.6	98.41
65	48.36	93.65	47.32	89.81	48.31	93.46	48.41	93.84
70	46.51	86.95	45.71	84.2	46.5	86.93	46.91	88.36
75	44.75	81	42.53	74.01	44.91	81.52	45.42	83.22
80	42.8	74.83	40.51	68.1	42.41	73.64	43.7	77.62
85	39.78	66.06	38.45	62.47	39.61	65.59	37.34	59.59
90	37.81	60.8	36.51	57.51	37.72	60.57	35.82	55.81
95	34.31	52.23	34.61	52.93	33.86	51.19	33.21	49.72
100	28.61	40.08	29.21	41.26	28.64	40.13	29.41	41.66
105	21.51	27.4	22.09	28.35	21.62	27.58	22.15	28.45
110	15.78	18.74	14.72	17.26	13.64	15.79	15.83	18.81
115	10.54	11.78	9.82	10.89	7.91	8.59	9.38	10.35

ตารางที่ 1.7 ค่าข้อมูลของอุณหภูมิจากการอบแห้งแบบสลับทิศทางการไหลของลมร้อนของกล้วย
 แห้งที่ 75 °C

Time	Room 1	Room 2	Room 3	Room 4
5	32.3	31.4	31.3	32
10	36.6	34.2	35.3	38.7
15	44.3	36	36	37.5
20	38.8	37.6	38.6	45.7
25	47.6	39.8	39.4	41
30	43	40.8	41	49
35	50.5	41.8	41.5	44
40	44.6	42.3	43.4	52.4
45	55.5	43.8	44.5	46.8
50	47.8	45.7	45.9	55.8
55	58.4	46.7	47	49.8
60	50.8	48.5	48.8	60.3
65	61.3	49.9	50.6	52.4
70	54.7	51.3	52.5	63.7
75	65	53	54.2	56
80	56.4	54.3	55.6	65.3
85	65.2	55.7	56.1	57.9
90	58	56.9	57.4	66
95	64.9	57	57.5	58.1
100	57.8	58.2	58.5	64.4
105	65.1	57.5	58.7	58.5
110	59.1	57.6	58.9	60.8

ตารางที่ 1.8 ค่าข้อมูลของความชื้นจากการอบแห้งแบบสลับทิศทางการไหลของลมร้อนของกล้วย
 หนัาแห้งที่ 75 °C

Time	Room 1		Room 2		Room 3		Room 4	
	% w.b	% d.b	% w.b	% d.b	% w.b	% d.b	% w.b	% d.b
เริ่มต้น	65.34	188.54	64.3	180.11	63.97	177.56	68.9	221.53
5	63.56	174.42	62.52	166.84	63.03	170.49	62.42	166.07
10	61.35	158.73	60.51	153.23	60.36	152.27	61.45	159.4
15	58.75	142.42	59.46	146.67	58.35	140.09	59.82	148.88
20	56.41	129.41	56.21	128.36	56.37	129.2	57.41	134.8
25	54.25	118.58	53.92	117.01	54.36	119.11	53.89	116.87
30	51.53	106.31	50.56	102.27	52.47	110.39	50.64	102.59
35	47.78	91.51	48.74	95.08	49.36	97.47	48.82	95.39
40	45.31	82.85	46.53	87.02	47.35	89.94	46.72	87.69
45	42.74	74.64	43.62	77.37	44.73	80.93	44.75	80.99
50	40.09	66.92	41.27	70.27	41.67	71.44	42.73	74.61
55	36.84	58.33	37.63	60.33	39.74	65.95	40.31	67.53
60	34.52	52.72	34.95	53.73	36.86	58.38	35.81	55.79
65	31.8	46.63	30.73	44.36	32.64	48.46	33.61	50.63
70	28.6	40.06	27.85	38.6	28.53	39.92	29.74	42.33
75	25.57	34.35	25.35	33.96	26.46	35.98	27.25	37.46
80	20.95	26.5	21.63	27.6	22.63	29.25	23.72	31.1
85	18.21	22.26	17.74	21.57	18.74	23.06	19.72	24.56
90	14.56	17.04	13.62	15.77	14.74	17.29	15.72	18.65
95	12.03	13.68	11.85	13.44	10.95	12.3	11.98	13.61
100	7.63	8.26	6.98	7.5	7.56	8.18	8.48	9.26
105	4.86	5.11	5.45	5.76	5.54	5.86	4.93	5.18
110	2.45	2.51	3.36	3.48	3.05	3.14	2.31	2.36

ตารางที่ 1.9 ค่าข้อมูลของอุณหภูมิจากการอบแห้งแบบสลับทิศทางการไหลของลมร้อนของกล้วย
 หนัาน้ำที่ 80 °C

Time	Room 1	Room 2	Room 3	Room 4
5	38.1	33.2	32.9	33.8
10	36.8	35.6	35.6	40.7
15	45.9	37.2	37.2	37.5
20	41.7	38.5	38.8	48.6
25	49.4	39.6	39.7	42.8
30	44.2	40.7	41.6	51.2
35	53	42.7	43.4	46.9
40	48	44.8	45	54
45	57.2	46.6	47.5	49.2
50	50	47.3	48.2	59.5
55	59.9	48.7	49.5	51.2
60	52.2	49.7	50.9	61.6
65	61.6	51.4	52.4	53.9
70	54.1	53	53	63.7
75	65	53	53.2	55
80	55.2	53.7	54	65
85	65.2	55.7	56.1	55.9
90	56	56.9	56.4	66
95	64.9	56.4	56.5	56.1
100	56.2	57.6	57.4	65.5
105	64.2	56.6	57.4	59.5

ตารางที่ 1.10 ค่าข้อมูลของความชื้นจากการอบแห้งแบบสลับทิศทางการไหลของลมร้อนของ
กล้วยหั่นแฉ่งที่ 80 °C

Time	Room1		Room2		Room3		Room4	
	% w.b	% d.b	% w.b	% d.b	% w.b	% d.b	% w.b	% d.b
เริ่มต้น	68.18	214.29	67.58	208.47	62.8	168.85	64.35	180.5
5	64.54	182.01	65.57	190.44	59.31	145.74	61.78	161.62
10	59.47	146.73	60.37	152.33	56.44	129.58	59.72	148.26
15	55.34	123.92	57.15	133.38	53.38	114.5	54.25	118.58
20	51.64	106.78	52.24	109.38	49.52	98.1	50.37	101.49
25	46.71	87.65	47.41	90.15	45.53	83.59	46.63	87.37
30	41.45	70.79	42.51	73.94	42.41	73.64	43.13	75.84
35	37.83	60.85	38.41	62.36	39.51	65.32	40.24	67.34
40	34.23	52.05	35.26	54.46	37.13	59.06	36.46	57.38
45	30.56	44.01	31.45	45.88	32.21	47.51	33.42	50.19
50	27.61	38.14	28.57	40	29.53	41.9	30.14	43.14
55	24.73	32.86	25.61	34.43	26.51	36.07	27.53	37.99
60	21.24	26.97	23.52	30.75	23.15	30.12	24.73	32.86
65	17.47	21.17	18.31	22.41	19.26	23.85	20.63	25.99
70	14.36	16.77	14.56	17.04	16.26	19.42	17.57	21.32
75	11.51	13.01	12.21	13.91	13.41	15.49	14.45	16.89
80	8.93	9.81	9.46	10.45	11.74	13.3	12.35	14.09
85	6.74	7.23	7.31	7.89	9.62	10.64	11.48	12.97
90	5.87	6.24	6.74	7.23	10.45	11.67	11.59	13.11
95	5.63	5.97	6.82	7.32	8.61	9.42	11.24	12.66
100	4.03	4.2	6.24	6.66	9.18	10.1	6.68	7.16
105	3.14	3.24	4.85	5.1	6.65	7.13	6.93	7.45

ตารางที่ 1.11 ค่าข้อมูลของอุณหภูมิจากการอบแห้งแบบสลับทิศทางการไหลของลมร้อนของ
กล้วยแห้งแฉ่งที่ 85 °C

Time	Room 1	Room 2	Room 3	Room 4
5	38.1	33.2	32.9	33.8
10	39.8	35.6	35.6	45.7
15	48.9	39.2	39.2	42.5
20	45.7	41.5	41.8	52.6
25	54.4	43.6	43.7	47.8
30	49.9	45.4	45.4	58.1
35	59.2	47.8	47.9	52.6
40	53.1	49.7	49.8	60.1
45	62.6	51.3	51.4	54.4
50	56.5	53	52	64.7
55	67.6	53.9	53.5	56.9
60	59.3	54.9	54.6	68.4
65	70.2	55.1	55.5	60.3
70	60.7	56.1	57	70.9
75	71.2	56.3	57.7	61.4
80	61.3	57.6	58.9	71.8
85	66.3	60.1	60.7	59.2

ตารางที่ 1.12 ค่าข้อมูลของความชื้นจากการอบแห้งแบบสลับทิศทางการไหลของลมร้อนของ
กล้วยหั่นแฉ่งที่ 85 °C

Time	Room 1		Room 2		Room 3		Room 4	
	% w.b	% d.b	% w.b	% d.b	% w.b	% d.b	% w.b	% d.b
เริ่มต้น	57.93	137.7	63.09	170.93	72.55	264.31	67.34	206.18
5	50.74	103	52.67	111.28	56.63	130.57	54.62	120.36
10	46.41	86.6	48.65	94.74	49.38	97.55	48.21	93.09
15	41.45	70.79	42.32	73.37	43.71	77.66	44.73	80.93
20	36.62	57.78	37.51	60.03	38.53	62.68	39.46	65.18
25	31.63	46.26	32.83	48.88	33.57	50.54	34.36	52.34
30	27.11	37.2	28.64	40.14	30.1	43.06	31.64	46.28
35	22.85	29.61	23.77	31.18	24.73	32.85	25.22	33.73
40	19.36	24.01	20.63	25.99	21.45	27.31	22.03	28.25
45	16.46	19.7	16.43	19.65	17.75	21.58	17.65	21.43
50	12.94	14.86	13.68	15.85	14.39	16.81	14.53	17.01
55	9.22	10.15	10.62	11.88	11.46	12.94	12.09	13.75
60	6.34	6.77	7.36	7.95	8.98	9.87	9.45	10.44
65	3.68	3.82	4.06	4.23	5.93	6.3	3.62	3.75

2. ตารางอุณหภูมิและความชื้นจากการทดลองของเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนแบบไม่สลับทิศทางที่ผลิตจากเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง

ตารางที่ 2.1 ค่าข้อมูลของอุณหภูมิจากการอบแห้งแบบไม่สลับทิศทางการไหลของลมร้อนของกล้วยหั่นแฉ่งที่ 55 °C

Time	Room 1	Room 2	Room 3	Room 4
เริ่มต้น	32.79	32.42	32.42	32
1	32.92	32.3	32.41	32.07
2	33.42	32.4	32.66	32.18
3	34.82	32.99	33.36	32.57
4	36.33	33.79	34.33	33.12
5	38	34.66	35.3	33.59
6	39.58	35.43	36.33	34.16
7	40.97	36.2	37.21	34.6
8	41.06	35.81	36.85	34.69
9	41.78	36.77	37.78	35.14
10	42.51	37.24	38.25	35.53
11	42.81	37.6	38.63	35.75
12	43.32	37.86	38.9	36.04
13	42.33	36.56	37.71	35.89
14	43.22	37.56	38.65	36.3
15	43.57	38.05	39.12	36.37
16	43.73	38.22	39.28	36.51
17	43.55	38.31	39.35	36.58
18	42.74	36.69	38.17	36.29
19	43.18	37.33	38.59	36.93
20	43.41	37.61	38.9	37.25
21	43.49	37.81	39.13	37.56
22	43.7	38.02	39.17	37.68
23	43.55	37.31	38.48	37.28
24	43.72	37.98	38.99	36.97
25	43.65	38.22	39.23	36.82
26	43.7	38.46	39.42	36.84
27	43.68	38.61	39.57	36.91
28	43.32	37.58	38.87	36.79
29	43.64	38.26	39.36	36.92
30	43.79	38.47	39.54	36.96
31	43.74	38.56	39.71	36.93
32	43.73	38.72	39.81	37.01
33	43.15	37.49	39	36.85
34	43.7	38.27	39.45	37.06
35	43.87	38.6	39.7	37.01
36	43.72	38.68	39.78	37
37	43.84	38.72	39.75	37.09
38	43.06	37.74	38.83	36.76
39	43.47	38.43	39.38	36.97

ตารางที่ 2.1 ค่าข้อมูลของอุณหภูมิจากการอบแห้งแบบไม่สลับทิศทางการไหลของลมร้อนของ
กล้วยหั่นแวนที่ 55 °C (ต่อ)

40	43.65	38.58	39.68	36.93
41	43.7	38.71	39.89	36.92
42	43.93	38.89	40.1	37.15
43	44.01	37.82	39	36.95
44	44.22	38.79	39.96	37.19
45	44.32	39.06	40.32	37.35
46	44.37	39.14	40.37	37.37
47	44.36	39.13	40.36	37.28
48	43.94	37.9	39.38	37.05
49	44.11	38.56	39.99	37.22
50	44.16	38.82	40.25	37.22
51	44.22	38.76	40.31	37.03
52	44.19	38.82	40.33	37.14
53	43.42	38.04	39.24	36.72
54	43.73	38.38	39.5	37.01
55	43.89	38.55	39.97	37.11
56	43.92	38.65	40.14	37.05
57	43.95	38.74	40.25	37.06
58	43.43	36.95	38.5	36.45
59	43.75	37.73	38.99	36.94
60	43.92	38.29	39.74	37.11
61	44.08	38.57	40.14	37.17
62	43.93	38.64	40.18	37.04
63	43.5	37.68	38.91	36.89
64	43.7	38.27	39.7	37.06
65	43.83	38.54	39.99	37.02
66	43.76	38.63	40.14	37.06
67	43.86	38.74	40.33	37.08
68	43.81	38.77	40.42	37.03
69	43.98	38.8	40.48	37.03
70	44.06	38.85	40.53	37.06

ตารางที่ 2.1 ค่าข้อมูลของอุณหภูมิจากการอบแห้งแบบไม่สลับทิศทางการไหลของลมร้อนของ
กล้วยหั่นแว่นที่ 55 °C (ต่อ)

71	44.05	38.84	40.52	37.1
72	43.96	38.84	40.55	37.1
73	43.76	38.35	39.7	37.06
74	43.87	38.63	40.2	37.06
75	43.94	38.76	40.5	37.05
76	44.16	38.92	40.63	37.27
77	44.28	38.96	40.78	37.22
78	44.54	39.03	40.99	37.24
79	44.6	39.11	41.08	37.29
80	44.43	39.2	40.99	37.32
81	44.36	39.13	40.98	37.3
82	44.2	39.13	40.98	37.31
83	44.05	38.45	40.1	37.24
84	44.11	38.79	40.64	37.3
85	44.1	38.98	40.89	37.3
86	43.97	38.96	40.86	37.3
87	43.84	38.91	40.82	37.28
88	43.78	38.8	40.76	37.17
89	43.66	38.76	40.69	37.19
90	43.73	38.72	40.71	37.07
91	43.7	38.85	40.82	37.12
92	43.93	38.97	40.99	37.26
93	43.75	38.06	40	37.11
94	43.88	38.56	40.6	37.27
95	44.05	38.79	40.83	37.22
96	44.22	38.98	41.03	37.41
97	44.16	39.15	41.14	37.44
98	44.35	39.31	41.3	37.44
99	44.54	39.42	41.41	37.54
100	44.57	39.54	41.58	37.77
101	44.55	39.52	41.53	37.61
102	44.53	39.49	41.56	37.53
103	43.81	38.19	39.42	37.2
104	44.48	39.05	40.73	37.62
105	44.62	39.36	41.16	37.62
106	44.65	39.42	41.3	37.6
107	44.6	39.48	41.44	37.52
108	44.68	39.56	41.58	37.6
109	44.88	39.85	41.84	37.83

ตารางที่ 2.1 ค่าข้อมูลของอุณหภูมิจากการอบแห้งแบบไม่สลับทิศทางการไหลของลมร้อนของ
กล้วยหั่นแว่นที่ 55 °C (ต่อ)

110	45.16	40.07	42.03	37.86
111	45.24	40.16	42.12	37.89
112	45.23	40.23	42.21	37.98
113	44.88	39.09	41.44	37.99
114	45.08	39.74	41.87	38.06
115	45.02	39.83	41.87	37.89
116	44.97	39.89	41.87	37.87
117	44.95	39.92	41.91	37.87
118	44.82	39.91	41.84	37.86
119	44.89	39.91	41.9	37.92
120	45.16	40.21	42.14	38.08
121	45.41	40.38	42.34	38.14
122	45.58	40.61	42.48	38.2
123	44.81	38.35	41.04	37.96
124	45.24	39.43	41.53	38.81
125	45.31	39.75	41.82	39.19
126	45.31	39.94	42.02	39.35
127	45.35	40.1	42.06	39.37
128	45.27	40.05	42.01	39.32
129	45.61	40.13	42.15	39.46
130	45.7	40.31	42.24	39.58
131	45.89	40.3	42.35	39.6
132	46.03	40.48	42.44	39.64
133	45.36	39.1	41.23	38.79
134	45.63	39.9	41.89	38.61
135	45.73	40.37	42.21	38.63
136	45.78	40.51	42.41	38.63
137	45.91	40.71	42.56	38.7
138	46.04	40.84	42.77	38.83
139	46.03	41	42.85	38.96
140	46.12	41.07	42.94	39.05

ตารางที่ 2.1 ค่าข้อมูลของอุณหภูมิจากการอบแห้งแบบไม่สลับทิศทางการไหลของลมร้อนของ
กล้วยหั่นแฉ่งที่ 55 °C (ต่อ)

141	46.17	41.2	43.02	39.13
142	46.21	41.19	43.09	39.06
143	45.47	39.18	41.65	38.65
144	45.81	40.22	42.24	38.79
145	45.64	40.42	42.38	38.65
146	45.77	40.63	42.51	38.67
147	45.94	40.86	42.79	38.82
148	46.34	41.15	43.02	39.07
149	46.45	41.31	43.21	39.16
150	46.62	41.52	43.36	39.27
151	46.64	41.59	43.44	39.47
152	46.58	41.59	43.43	39.46
153	46.18	40.01	42.13	39.08
154	46.36	40.78	42.76	39.32
155	46.39	41.12	43.07	39.32
156	46.22	41.17	43.09	39.18
157	46.28	41.26	43.15	39.27
158	46.32	41.41	43.23	39.4
159	46.3	41.42	43.26	39.4
160	46.34	41.59	43.32	39.49
161	46.2	41.48	43.3	39.44
162	46.07	41.38	43.17	39.25
163	45.76	40.26	42.08	39
164	46	40.84	42.66	39.13
165	46.24	41.16	42.95	39.28
166	46.53	41.34	43.21	39.38
167	46.57	41.61	43.37	39.48
168	46.88	41.74	43.53	39.65
169	46.93	41.88	43.67	39.73

ตารางที่ 2.1 ค่าข้อมูลของอุณหภูมิจากการอบแห้งแบบไม่สลับทิศทางการไหลของลมร้อนของ

กล้วยหั่นแวนที่ 55 °C (ต่อ)

170	46.97	42.09	43.79	39.69
171	46.84	41.99	43.83	39.8
172	46.85	42.03	43.89	39.93
173	46.18	39.98	42.47	39.51
174	46.57	41.21	43.09	39.65
175	46.57	41.47	43.34	39.73
176	46.68	41.63	43.41	39.78
177	46.6	41.72	43.48	39.82
178	46.56	41.76	43.54	39.83
179	46.5	41.79	43.55	39.83
180	46.43	41.72	43.51	39.79
181	46.42	41.78	43.54	39.69
182	46.51	41.85	43.55	39.72
183	45.85	40.15	41.83	39.4
184	46.48	41.27	42.86	39.7
185	46.72	41.78	43.31	39.88
186	46.72	41.87	43.37	39.65
187	46.75	42	43.45	39.71
188	46.83	41.98	43.54	39.88
189	46.79	42.18	43.72	40
190	46.9	42.27	43.77	40.06

ตารางที่ 2.2 ค่าข้อมูลของความชื้นจากการอบแห้งแบบไม่สลับทิศทางการไหลของลมร้อนของ
กล้วยหั่นแฉ่งที่ 55 °C

Time	Room 1		Room 2		Room 3		Room 4	
	% w.b	% d.b	% w.b	% d.b	% w.b	% d.b	% w.b	% d.b
เริ่มต้น	66.26	196.35	62.53	205.87	67.85	211	67.48	207.51
5	65.48	189.69	68.15	202.95	69.75	206.57	65.92	208.42
10	64.96	185.39	69.7	201.06	69.44	206.21	66.31	207.84
15	63.68	175.33	66.95	196.56	68.74	201.86	67.09	205.86
20	62.48	166.52	65.54	190.19	68.4	198.5	68.11	203.53
25	61.45	159.4	64.74	183.61	66.72	195.47	65.61	198.77
30	60.71	154.52	63.6	174.73	66.86	190.78	65.99	196.06
35	59.37	146.13	62.34	167.53	65.87	186	65.04	195.05
40	58.97	140.72	61.62	160.55	64.69	181.21	65.54	190.19
45	57.76	132.74	60.9	154.75	64.52	175.84	64.64	185.82
50	55.76	124.04	59.87	147.19	64.1	170.57	65.46	180.52
55	53.37	114.46	58.72	140.25	62.78	165.67	64.56	176.17
60	51.59	106.57	57.54	131.52	61.64	157.69	63.42	170.38
65	49.84	99.36	54.39	121.24	58.25	149.52	62.63	164.59
70	47.82	91.64	51.67	112.91	57.82	139.08	61.37	158.87
75	45.32	82.88	49.66	102.65	54.98	132.11	59.45	149.6
80	43.84	75.06	48.25	93.24	53.57	121.38	58.35	140.1
85	41.67	68.43	45.91	84.87	51.48	113.08	56.73	131.11
90	37.87	60.95	43.84	78.06	50.63	106.55	54.37	124.16
95	35.61	55.3	41.64	71.35	49.34	97.39	52.48	116.44
100	33.76	50.97	39.74	65.95	46.74	87.76	51.57	106.48
105	29.43	41.69	37.85	60.9	43.63	79.4	49.73	98.92
110	27	36.99	35.62	55.33	41.48	71.88	47.73	91.31
115	23.6	30.89	33.74	50.92	40.38	65.73	45.22	82.55
120	19.57	24.33	30.31	43.49	36.96	58.62	41.45	70.79
125	15.51	18.36	27.73	38.37	34.64	51	39.52	65.34
130	13.41	15.49	23.75	31.15	29.04	40.92	35.73	55.59
135	10.24	11.41	19.61	24.39	25.57	34.35	29.63	42.11
140	7.62	8.25	15.62	18.51	18.92	23.33	23.53	30.77
145	9.01	9.9	11.74	13.3	14.74	17.29	19.35	23.99

ตารางที่ 2.3 ค่าข้อมูลของอุณหภูมิจากการอบแห้งแบบไม่สลับทิศทางการไหลของลมร้อนของ
กล้วยหั่นแฉ่งที่ 65 °C

Time	Room 1	Room 2	Room 3	Room 4
เริ่มต้น	30.5	30.4	30.4	29.8
2	30.5	30.5	30.3	29.9
3	30.7	30.2	30	29.8
4	31.9	30.4	30.4	30.4
5	31.8	31	30.8	33.3
6	32.1	31.7	31.6	35.2
7	32.5	32.4	32.3	36.8
8	32.9	32.7	32.6	37.9
9	34.3	33.2	33.4	37
10	36.2	33.5	33.7	35.5
11	37.8	33.7	34.4	34.9
12	38.3	33	34	34.8
13	39.9	33.8	34.9	35
14	38.8	35.1	35.4	39
15	38.2	35.9	36	40.9
16	37.9	36.4	36.8	42.1
17	37.9	35.9	36.6	42.8
18	38.3	36.7	37.3	42.4
19	40.3	36.8	37.6	39.6
20	41.9	37	38.1	38.6
21	43	37.2	38.3	38.3
22	42.9	36.1	37.4	37.8
23	42.3	37.6	37.8	40.6
24	41	38.2	38.6	42.9
25	40.3	38.6	39	44
26	40	38.9	39.4	44.6
27	39.7	38.1	38.9	45
28	41.6	38.2	39.2	41.6
29	43.2	38.3	39.4	40.3
30	44.5	38.5	39.6	39.7
31	45.1	38.8	40	39.5
32	44.5	37.9	38.8	40.7
33	42.8	39.1	39.6	44.4
34	41.9	39.7	40.2	45.6
35	41.4	40.1	40.8	46.3
36	41.1	40.4	41.2	46.9
37	42.1	38.8	40.3	44.2
38	43.7	38.7	39.9	42.2
39	45.4	39.3	40.4	41.4
40	46.3	39.8	40.8	41

ตารางที่ 2.3 ค่าข้อมูลของอุณหภูมิจากการอบแห้งแบบไม่สลับทิศทางการไหลของลมร้อนของ
กล้วยหั่นแวนที่ 65 °C (ต่อ)

41	46.8	40.3	41.2	41.2
42	45.1	39.1	40.3	44.6
43	43.7	40.2	41	46.4
44	43	40.9	41.5	47.3
45	42.6	41	41.7	47.6
46	43.3	40.9	41.3	45.5
47	44	39	40.6	43
48	45.5	39.5	40.7	42.2
49	46.7	40.2	41.3	41.9
50	47.6	40.6	41.5	41.6
51	45.7	41.2	41.6	44.9
52	44.4	39.5	40.8	46.2
53	43.6	40.9	41.8	47.3
54	43.1	41.4	42.3	47.8
55	43.3	41.6	42.3	46.9
56	45	41.3	41.9	44
57	45.8	40	41.1	42.7
58	46.8	40.6	41.5	42.2
59	47.5	40.9	41.9	41.9
60	46.4	41.6	42.2	44.1
61	45	41.9	42.4	46.4
62	45	40.2	41.5	46.9
63	43.8	41.4	42.5	48
64	43.3	41.9	43	48.6
65	45	41.6	42.4	45.1
66	46.6	41.6	42.3	43.8
67	46.5	39	40.9	42.5
68	47.7	40	41.3	42.4
69	47.1	41.2	41.9	43.9
70	45.6	41.8	42.5	46.7
71	44.8	42.2	43	47.7
72	44.8	40.8	41.6	48
73	44.1	41.8	42.5	48.7
74	45.3	41.8	42.4	46
75	46.4	41.7	42.4	44.4
76	47.6	41.9	42.7	43.7
77	47.3	39.7	41.6	43
78	48.1	41.3	42.1	43.5
79	46.4	42.1	42.7	46.8
80	45.5	42.8	43.3	48.3

ตารางที่ 2.3 ค่าข้อมูลของอุณหภูมิจากการอบแห้งแบบไม่สลับทิศทางการไหลของลมร้อนของ
กล้วยหั่นแฉ่งที่ 65 °C (ต่อ)

81	44.9	43.1	43.6	48.8
82	44.7	41.7	43.1	49
83	45.7	41.5	42.6	47.1
84	47.1	42.1	42.9	45.4
85	48.2	42.2	43.2	44.5
86	49	42.4	43.4	44.2
87	48.9	40.2	42.6	43.4
88	47.1	42	43.1	46.5
89	46.2	42.9	43.5	48.2
90	45.6	43.3	43.8	48.7
91	45.2	43.5	44.3	49.3
92	45.5	41.7	43.1	48.1
93	47.1	42.3	43.2	46
94	48.2	42.5	43.4	45.1
95	49.2	42.9	43.7	44.7
96	49.6	43	43.9	44.3
97	48.6	42.7	43.5	46.7
98	47.1	42.5	43.2	48.5
99	46.4	43.7	44.3	49.7
100	45.9	44.2	44.9	50.1
101	45.9	44.5	45.1	50.2
102	46.8	41.7	43.7	47.7
103	48.4	42.2	43.5	46.2
104	49.1	42.6	43.9	45.5
105	49.7	43	44.2	45.2
106	49	43.8	44.7	46.6
107	48.2	41.9	42.9	47.9
108	47.1	43.5	44.1	49.6
109	46.7	44.3	44.8	50.5
110	46.4	44.7	45.5	51.1
111	47.9	44.6	45.2	48.6
112	47.9	42.3	43	47.2
113	49	42.4	43	46.3
114	50	43.1	44	46
115	49.9	43.9	44.5	46.7
116	48.5	44.5	45.2	49.2
117	47.9	43.2	44.4	49.9
118	47.3	44.4	45.3	51
119	47	45.2	46.1	51.6
120	48.2	45.2	45.9	49.8
121	49.8	45.2	46	48.5
122	50.1	43.7	45	47.7
123	51.4	44.4	45.8	47.6
124	52.1	45.3	46.5	47.5
125	50.5	46.2	46.9	50.3
126	49.7	46.6	47.2	51.1

ตารางที่ 2.4 ค่าข้อมูลของความชื้นจากการอบแห้งแบบไม่สลับทิศทางการไหลของลมร้อนของ
กล้วยหั่นแฉ่งที่ 65 °C

Time	Room 1		Room 2		Room 3		Room 4	
	% w.b	% d.b	% w.b	% d.b	% w.b	% d.b	% w.b	% d.b
เริ่มต้น	66.26	216.35	69.37	221.45	67.92	217.71	68.81	220.57
5	68.67	208.2	68.37	216.2	68.2	214.49	67.38	218.56
10	65.54	198.16	67.44	207.11	69.23	211.99	69.56	216.51
15	63.98	188.62	68.21	198.57	68.78	208.31	68.7	215.48
20	60.63	177.99	66.48	190.33	67.7	201.6	67.87	211.24
25	58.82	168.84	64.54	180	66.67	192.03	67.42	201.94
30	56.81	158.54	61.42	169.2	65.95	183.68	66.8	194.2
35	54.29	147.77	59.52	157.04	64.66	173.27	65.68	184.38
40	52.26	139.47	57.86	147.28	63.46	161.67	64.46	173.37
45	50.84	127.42	55.31	138.76	61.45	153.41	63.37	165
50	48.67	116.82	53.31	129.18	59.28	141.58	61.99	157.06
55	45.72	105.53	51.57	116.48	57.49	132.24	59.49	146.85
60	41.73	94.61	49.39	105.59	55.37	119.07	57.61	133.89
65	38.51	82.63	47.3	95.75	52.56	109.8	54.6	120.28
70	35.64	75.37	44.83	87.26	50.71	97.88	52.04	108.51
75	31.51	68.01	41.73	76.62	47.83	87.68	49.88	99.52
80	29.62	56.08	38.44	65.43	45.72	76.23	47.51	86.51
85	27.25	49.46	36.2	56.74	42.75	64.67	45.36	73.02
90	25.19	38.67	33.82	51.1	39.69	57.81	42.18	62.95
95	23.29	30.36	30.35	43.58	37.65	49.38	39.72	55.89
100	21.19	26.89	27.52	37.97	34.84	36.47	37.38	46.69
105	18.63	22.9	25.43	34.1	31.82	26.67	35.62	35.33
110	15.52	18.37	22.41	28.88	28.63	23.11	31.59	26.18
115	11.82	13.41	19.75	24.61	25.48	14.19	28.42	19.7
120	9.57	10.58	15.45	18.27	19.87	12.8	23.75	11.15

ตารางที่ 2.5 ค่าข้อมูลของอุณหภูมิจากการอบแห้งแบบไม่สลับทิศทางการไหลของลมร้อนของ
กล้วยหั่นแฉ่งที่ 75 °C

Time	Room 1	Room 2	Room 3	Room 4
1	32.3	31.7	31.5	32.1
2	32.4	31.7	31.3	31.9
3	32.3	31.4	31.1	31.9
4	32.3	31.4	31.3	32
5	32.4	31.6	31.4	32.1
6	32.5	31.7	31.4	32.1
7	32.5	31.7	31.4	32.2
8	34.6	32.2	31.8	32.7
9	38.1	33.2	32.9	33.8
10	40.3	34	34	34.5
11	41.7	34.8	34.8	35.1
12	42.8	35.6	35.6	35.7
13	43.2	35.5	35.7	36.4
14	44.6	36.3	36.4	37
15	45.9	37.2	37.2	37.5
16	47	37.8	38	38
17	47.7	38.5	38.8	38.6
18	48.3	38.7	39	39.1
19	49.4	39.6	39.7	39.8
20	50.2	40.3	40.4	40.3
21	50.7	41	41	40.6
22	50.9	41.4	41.4	41.1
23	51.2	40.7	41.6	41.2
24	51.6	40.8	42.3	41.8
25	52.2	41.8	42.9	42.6
26	52.9	42.3	43.2	42.7
27	53	42.7	43.4	42.9
28	53.1	42.7	43.2	43.1
29	53.8	43.5	43.9	43.2
30	54.4	44.3	44.4	43.6
31	55	44.8	45	44
32	55.6	45.3	45.4	44.4
33	55.5	44.8	45.5	44.8
34	55.7	45.4	46.1	45
35	55.9	45.7	46.6	45.4
36	56.5	46	47	45.7
37	57	46.6	47.5	46.2
38	56.5	45.6	46.7	46.1
39	56.8	46.8	47.3	46.4
40	57.2	47.1	47.8	46.6

ตารางที่ 2.5 ค่าข้อมูลของอุณหภูมิจากการอบแห้งแบบไม่สลับทิศทางการไหลของลมร้อนของ
กล้วยหั่นแฉ่งที่ 75 °C (ต่อ)

41	57.6	47.6	48.3	47.1
42	57.8	48.1	48.7	47.3
43	58	47.3	48.2	47.5
44	58.6	47.9	48.5	47.9
45	59.2	48.5	49	48.1
46	59.4	48.7	49.5	48.2
47	59.5	48.9	49.6	48.5
48	59.1	48.1	49.1	48.3
49	59.4	49.1	49.8	48.8
50	59.8	49.5	50.2	49.1
51	60.3	49.9	50.6	49.4
52	60.2	50.1	50.6	49.5
53	60.2	48.7	49.9	49.6
54	60.6	49.9	50.8	49.7
55	60.6	50.2	51.2	49.9
56	60.8	50.4	51.2	50
57	60.9	50.7	51.7	50.3
58	60.9	49.5	50.7	50.3
59	61.4	50.3	51.3	50.6
60	61.6	51.1	52.1	50.7
61	61.6	51.4	52.4	50.9
62	62.3	51.6	52.5	51.2
63	61.7	50.1	51.7	51.4
64	62.2	51.1	53.5	52.3
65	62.3	51.4	54.1	52.4
66	62.9	51.8	54.4	52.8
67	63.3	52.1	55.1	53.1
68	63.7	52.5	55.2	53.3
69	63.1	51	54	52.7
70	63.7	51.7	53.7	52.6
71	63.9	52.6	54.2	52.6
72	64	53	54.6	52.8
73	63.6	51.9	53.5	52.5
74	64.7	53.1	54.4	52.9
75	65	53.9	55.2	53.3
76	64.7	54	55.2	53.6
77	65.1	54.4	55.8	53.7
78	64.4	52.5	55	53.9
79	64.7	53.3	56.5	54.7
80	65	54	57.2	55

ตารางที่ 2.5 ค่าข้อมูลของอุณหภูมิจากการอบแห้งแบบไม่สลับทิศทางการไหลของลมร้อนของ
กล้วยหั่นแฉ่งที่ 75 °C (ต่อ)

81	65.4	54.3	57.6	55.3
82	65.2	54.3	57.7	55.4
83	64.6	52.4	55	54.2
84	65.3	54.1	55.9	54.4
85	65.4	55	56.4	54.6
86	65.3	55.5	56.9	54.9
87	65.5	55.8	57.1	55.1
88	64.8	53.7	55.6	54.7
89	64.7	54.9	56.5	55
90	65.1	55.6	57.2	55.2
91	65.1	56	57.6	55.5
92	65.5	56.6	57.9	55.7
93	65.3	56.6	57.9	55.8
94	65.2	56.7	58	56
95	65.2	56.7	58.1	55.9
96	65	56.9	58.4	56
97	64.9	57	58.5	56.1
98	64.2	54.6	56.4	55.5
99	64.7	56.1	57.5	55.8
100	64.9	56.6	58	55.9
101	64.6	56.6	58.1	56.1
102	64.6	56.9	58.5	56.1
103	64.3	55.2	57.3	56
104	64.6	56.6	58.1	56.2
105	64.8	57.2	58.5	56.4
106	65.1	57.5	58.7	56.5
107	65.1	57.6	58.9	56.8
108	63.9	54.6	57.2	57.3
109	63.7	51.9	55.4	56.1
110	64.9	55	56.9	56.2
111	65.1	56.3	57.8	56.3
112	65.7	57	58.4	56.5
113	64.8	54.9	56.8	56.4
114	65.3	56.3	57.6	56.4
115	65.4	57.1	58.4	56.5
116	65.6	57.7	58.9	56.8
117	65.6	58.3	59.2	57.1
118	65.2	56.1	57.5	56.7
119	65.8	57.6	58.6	57.1
120	65.7	58	58.9	57.1
121	65.4	58.4	59.3	57.1
122	65.4	58.7	59.7	57.4
123	65.2	56.7	58	56.9
124	65.5	58	58.9	57.1
125	65.7	58.7	59.4	57.4
126	65.6	58.9	59.6	57.6

ตารางที่ 2.6 ค่าข้อมูลของความชื้นจากการอบแห้งแบบไม่สลับทิศทางการไหลของลมร้อนของ
กล้วยหั่นแฉ่งที่ 75 °C

Time	Room 1		Room 2		Room 3		Room 4	
	% w.b	% d.b	% w.b	% d.b	% w.b	% d.b	% w.b	% d.b
เริ่มต้น	70.41	237.93	69.94	232.69	70.99	244.75	72.32	261.24
5	63.85	176.66	68.12	213.7	69.23	225	70.46	238.5
10	59.83	148.94	65.56	190.37	68.26	215.11	69.31	225.83
15	57.28	134.08	63.29	172.41	66.33	197.02	67.59	208.5
20	54.17	118.2	59.72	148.26	64.36	180.58	66.57	199.13
25	49.04	96.25	55.72	125.84	62.51	166.74	64.31	180.17
30	45.31	82.84	52.72	111.51	59.24	145.36	62.47	166.45
35	42.76	74.7	48.38	93.72	56.52	129.99	59.74	148.39
40	39.61	65.59	45.74	84.3	53.66	115.8	56.74	131.14
45	37.12	59.03	42.65	74.37	51.73	107.17	54.85	121.48
50	34.28	52.16	39.61	65.59	48.6	94.55	52.4	110.08
55	31.39	45.75	36.81	58.25	45.28	82.75	48.71	94.97
60	29.15	41.14	33.51	50.4	42.52	73.97	45.61	83.86
65	26.72	36.46	30.82	44.55	38.74	63.24	42.92	75.19
70	23.48	30.68	27.62	38.16	35.41	54.82	38.85	63.53
75	20.48	25.75	24.85	33.07	32.65	48.48	35.86	55.91
80	17.57	21.31	21.64	27.62	28.57	40	31.94	46.93
85	14.72	17.26	18.92	23.33	25.61	34.43	28.57	40
90	11.61	13.13	15.92	18.93	22.64	29.27	24.93	33.21
95	9.74	10.79	13.75	15.94	19.75	24.61	21.58	27.52
100	7.47	8.07	10.74	12.03	16.59	19.89	18.63	22.89
105	4.74	4.98	7.54	8.15	13.83	16.05	15.82	18.79
110	3.65	3.79	5.87	6.24	9.94	11.04	11.85	13.44
115	2.76	2.84	3.65	3.79	4.31	4.51	5.41	5.71
120	3.85	4	3.6	3.74	5.21	5.5	6.01	6.4

3.1 ตัวอย่างการคำนวณและการออกแบบ

3.1.1 หลักการในการออกแบบ

ในการออกแบบของเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนแบบสลับทิศทางที่ผลิตจากเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง ในงานวิจัยนี้จะเป็นการออกแบบเพื่อเป็นการพัฒนาสมรรถนะของอบแห้งให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานและสามารถทำให้ความร้อนภายในห้องอบแห้งมีอุณหภูมิอย่างสม่ำเสมอ นอกจากนี้การออกแบบเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนแบบสลับทิศทางที่ผลิตจากเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง ยังนำเอาระบบสลับทิศทางการไหลลมร้อนเข้ามาในระบบอบแห้ง เพื่อให้ลมร้อนจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนไหลผ่านสู่ห้องอบแห้งมีความทั่วถึงมากยิ่งขึ้น ดังนั้นในการออกแบบเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนแบบสลับทิศทางที่ผลิตจากเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง ในโครงการนี้จึงต้องคำนึงถึง

- การออกแบบเตาเผาชีวมวลสำหรับผลิตลมร้อน เพื่อประสิทธิภาพของระบบให้สูงขึ้น จึงมีการติดตั้งพัดลม เพื่อให้อากาศที่ถูกนำเข้ามาใช้ในการพาความร้อน
- ความสามารถในการป้องกันการถ่ายเทความร้อนออกนอกระบบของฉนวน จะต้องออกแบบโดยดูคุณสมบัติของฉนวนและราคาเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่พอเหมาะในราคาทุนที่น้อยที่สุด
- ปริมาณลมและระดับอุณหภูมิที่เหมาะสมของลมร้อนที่ออกจากเครื่องอบแห้ง ผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนแบบสลับทิศทางที่ผลิตจากเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะต้องสามารถทำการถอด ประกอบหรือเคลื่อนย้ายและทำการบำรุงรักษาได้ง่าย เพื่อความสะดวก
- การออกแบบท่อที่พาความร้อนเข้าสู่ตู้อบ ระบบสลับทิศทางการไหล และจากตู้ที่จะนำอากาศที่ใช้แล้วมาใช้อีกจะต้องมีขนาดที่พอเหมาะเพื่อราคาที่ไม่ว่างเกินไป
- การออกแบบระบบสลับทิศทาง
- การออกแบบระบบท่อ
- การออกแบบระบบวัดและระบบควบคุม

3.2 ขั้นตอนในการออกแบบ

- การออกแบบอุปกรณ์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ควรจะให้มีความเหมาะสมกับเตาชีวมวลที่นำมาใช้ เนื่องจากต้องการให้ความร้อนไหลเวียนอยู่ภายในท่อคงที่และมีประสิทธิภาพ เพราะฉะนั้นจึงออกแบบให้มีพื้นที่ 2.86 m^2 ส่วนประกอบของโครงสร้างจะประกอบขึ้นจากเหล็กกล่อง โดยมีส่วนประกอบดังนี้

- ภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน มีลักษณะเป็นท่อยาวจำนวน 10 ท่อ เป็นจำนวนสองชุด โดยท่อมีความยาว 0.500 m เส้นผ่าศูนย์กลาง 50 mm ซึ่งการใช้ท่อเป็นอุปกรณ์รับความร้อนเพื่อให้การไหลของอากาศไม่มีสิ่งเจือปนเข้าสู่ระบบการไหล

- ข้อต่อของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ที่จุดการไหลทั้งทางเข้าและทางออกของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน จะออกแบบให้ท่อมีขนาดลดลงเพื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศและยังเป็นการลดขนาดทางเดินของอากาศให้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสามารถต่อเข้ากับท่อทางเดินของอากาศได้ โดยจะมีปะเก็นแบบ PTFE

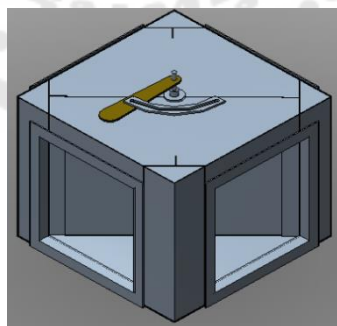
- การออกแบบตู้อบ ควรจะให้มีความหนาที่ไม่ใหญ่มากเนื่องจากจะทำให้ความร้อนที่เข้ามาในตู้สามารถใช้ประโยชน์ในการอบได้เต็มที่และสามารถควบคุมความร้อนได้ง่าย

- ตู้อบจะทำด้วยโครงเหล็กขนาด $1.200 \times 1.000 \times 1.340 \text{ m}^3$ โดยจะเป็นแผ่นฉนวนประกบติดกันที่บริเวณด้านบนและด้านข้างโดยฉนวนเป็นแบบ Sandwich Panel (Strong joint) ฉนวนเป็นแบบโฟมโพลียูรีเทน

- ขนาดของพื้นที่ช่องสำหรับใส่ถาดมีขนาด $0.540 \times 0.540 \text{ m}^2$

- ขนาดของถาด $0.540 \times 0.520 \times 0.200 \text{ m}^3$

- ระบบสลับทิศทางการไหล จะอยู่บริเวณด้านบนของตู้อบ โค้งเพื่อให้อากาศเคลื่อนที่ได้ดียิ่งขึ้น

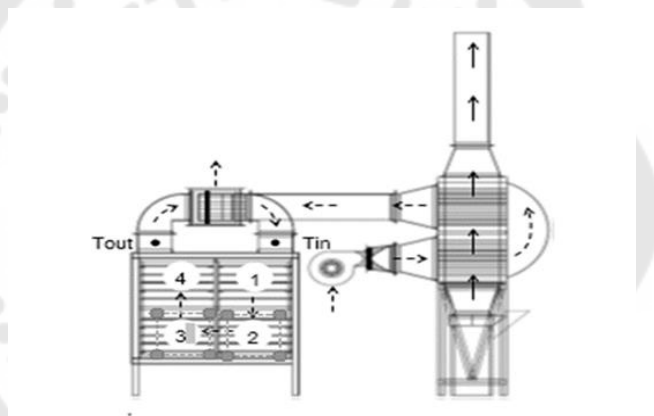


รูปที่ 3.1 วาล์วสลับทิศทางการไหลของลมร้อน

- การออกแบบวาล์วสลับทิศทางการไหลแบบเป็นท่อเหลี่ยม ตัวท่อที่ใช้เป็นทางเดินของอากาศจะทำจากเหล็กอบสังกะสี ซึ่งท่อนี้จะมีขนาด $0.200 \times 0.200 \times 0.750 \text{ m}^3$ โดยใช้เหล็กฉากประกบเข้าติดกันด้วย Bolt ตัวท่อทางเดินที่จะต่อกับพัดลมจะถูกขยายปากออกและบริเวณที่ออก

จากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะถูกหุบปากลงเพื่อเพิ่มความเร็วของอากาศ โดยที่ส่วนนี้จะทำจากเหล็ก

- การออกแบบให้แก๊สร้อนจากการเผาไหม้จะลอยขึ้นผ่านชุดท่อแลกเปลี่ยนความร้อนชุดที่หนึ่งและชุดที่สองต่อนั้นระบายออกสู่ภายนอกผ่านปล่องไอเสียในเวลาเดียวกันพัดลมดูดอากาศสำหรับอบแห้งเข้าไปรับความร้อนจากชุดท่อแลกเปลี่ยนความร้อนชุดที่หนึ่ง ต่อนั้นไหลวนกลับเข้าไปรับความร้อนเพิ่มด้วยชุดท่อแลกเปลี่ยนความร้อนชุดที่สอง และอากาศร้อนจะถูกป้อนสู่ห้องอบแห้งผ่านวาล์วสลับทิศทางการไหลเพื่อควบคุมอากาศร้อนเข้าสู่ห้องอบแห้งที่ 1-2-3-4 และระบายออกสู่ภายนอกผ่านช่องระบายอากาศด้านหลังตู้อบ ปรับวาล์วสลับทิศทางการไหลให้อากาศร้อนไหลย้อนกลับ จากห้องอบแห้งที่ 4-3-2-1 และระบายออกสู่ภายนอกผ่านช่องระบายอากาศด้านหลังตู้อบตามลำดับ



รูปที่ 3.2 ทิศทางการไหลของลมร้อน

3.3 การคำนวณหาค่าความชื้น

1. คำนวณหาค่าร้อยละของความชื้นมาตรฐานเปียก ค่าร้อยละของความชื้นมาตรฐานเปียก (M_w) สามารถหาได้จากสมการ

$$M_w = \frac{(M_{STI} - M_T) - (M_{STF} - M_T)}{(M_{STI} - M_T)} \times 100$$

$$M_w = \frac{(1.029 - 0.01) - (0.386 - 0.01)}{(1.029 - 0.01)} \times 100$$

$$M_w = 63 \% \text{ w. b}$$

- เมื่อ M_W คือ ความชื้นของกล้วยแห้งแล้วหลังจากมาตรฐานเปียก (% w.b)
 M_{STI} คือ น้ำหนักวัสดุตัวอย่างพร้อมกล่องกระดาษก่อนอบแห้ง (g)
 M_{STF} คือ น้ำหนักวัสดุตัวอย่างพร้อมกล่องกระดาษหลังอบแห้ง (g)
 M_T คือ น้ำหนักกล่องกระดาษเปล่า (g)

2. คำนวณหาค่าร้อยละของความชื้นมาตรฐานแห้ง ค่าร้อยละของความชื้นมาตรฐานแห้ง (M_d)สามารถหาได้จากสมการ

$$M_d = \frac{(M_{STI} - M_T) - (M_{STF} - M_T)}{(M_{STF} - M_T)} \times 100$$

$$M_d = \frac{(1.029 - 0.01) - (0.386 - 0.01)}{(0.386 - 0.01)} \times 100$$

$$M_d = 171.01 \% db$$

3.4 การคำนวณการวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องอบแห้ง

1. อัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio: MR) อัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio: MR) หมายถึง ปริมาณของน้ำที่หลงเหลืออยู่ในวัสดุระหว่างการอบแห้งเทียบกับปริมาณน้ำทั้งหมดที่มีอยู่ในวัสดุที่สามารถระเหยได้ภายใต้สภาวะการอบแห้งหนึ่งนั้นๆ

$$MR = \frac{(M_t - M_e)}{(M_i - M_e)}$$

$$MR = \frac{(56.75 - 6.44)}{(72 - 6.44)}$$

$$= 76.7 \% \text{ dry basis}$$

- เมื่อ MR = Moisture ratio
 M_t = ค่าความชื้นของวัสดุในห้องอบแห้ง ณ เวลาใดๆ (% dry basis)
 M_i = ค่าความชื้นเริ่มต้นของวัสดุก่อนเริ่มอบแห้ง (% dry basis)
 M_e = ความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content; % dry basis)

2. การหาอัตราการอบแห้ง (Drying Rate: DR) อัตราการอบแห้งคือความสามารถในการไล่ความชื้นออกจากวัสดุในช่วงเวลาการอบแห้ง

$$DR = \frac{(M_{in} - M_f)W_d}{t}$$

$$DR = \frac{(1500 - 420)1.8}{2}$$

$$DR = 972 \text{ g/h}$$

เมื่อ MR = Moisture ratio
 M_{in} = ค่าความชื้นเริ่มต้นของวัสดุก่อนเริ่มอบแห้ง (% dry basis)
 M_f = ค่าความชื้นสุดท้ายของวัสดุ (% dry basis)
 W_d = น้ำหนักวัสดุแห้ง (kg)
 t = ระยะเวลาในการอบแห้ง (min)

3. ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption: SEC) มีหน่วยเป็น MJ/kg ของน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุ

$$SEC = \frac{m_f \times LHV_f}{(M_{in} - M_f)W_d}$$

$$SEC = \frac{1.9 \times 16.31}{(1500 - 420)1.8}$$

$$= 51.64 \text{ MJ/kg}$$

เมื่อ m_f = น้ำหนักของเชื้อเพลิงที่ใช้ (kg as receive)
 LHV_f = ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ใช้ (MJ/kg as receive)
 M_{in} = ค่าความชื้นเริ่มต้นของวัสดุก่อนเริ่มอบแห้ง (% dry basis)
 M_f = ค่าความชื้นสุดท้ายของวัสดุ (% dry basis)
 W_d = น้ำหนักวัสดุแห้ง (kg)
 t = ระยะเวลาในการอบแห้ง (min)

4. การหาอัตราการไหลของลมร้อน

(อัตราการไหล 830 m³/h อุณหภูมิภายนอก 30 °C) ไหลเข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนหรือ เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงซึ่งใช้กะลามะพร้าวเป็นเชื้อเพลิง และลมร้อนไหลออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ระดับอุณหภูมิแตกต่างกัน 6 ระดับคือ 55, 65, 70, 75, 80 และ 85 °C ตามลำดับ

หาพื้นที่หน้าตัดลมร้อนไหลผ่าน ($0.55 \times 0.475 = 0.26125 \text{ m}^2$)

$$Q = \frac{\text{อัตราการไหล}}{t}$$

$$Q = \frac{830}{3600} = 0.2305 \text{ m}^3/\text{s}$$

ดังนั้น

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0.2305}{0.26125} = 0.8825 \text{ m/s}$$

เมื่อลมร้อนไหลออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ระดับอุณหภูมิ 85 °C

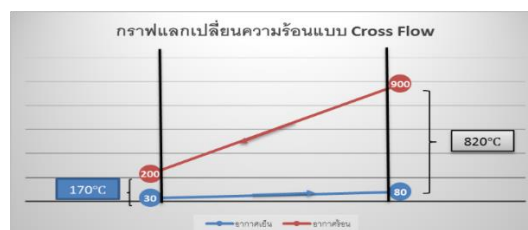
$$V_{hot\ air} = V \frac{(T_{in} - 273)}{(T_{out} - 273)}$$

$$V_{hot\ air} = 0.8825 \frac{(85 - 273)}{(30 - 273)}$$

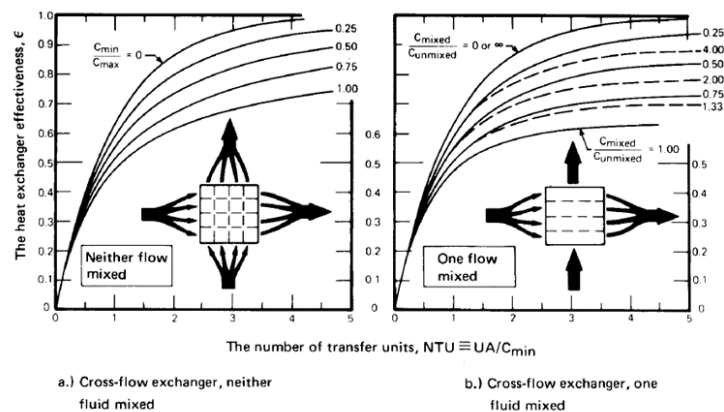
$$V_{hot\ air} = 1.040 \text{ m/s}$$

3.5 การคำนวณเพื่อการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ต้องการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งมีท่อจำนวน 17 ท่อ $S_T = S_T = 0.0762 \text{ m}$ $\frac{S_T}{D} = \frac{S_L}{D} = 1.5$ ซึ่งมีเส้นศูนย์กลางท่อ 50mm ซึ่งทำการแลกเปลี่ยนอากาศ เย็นเป็นอากาศร้อนเพื่อนำไปอบแห้งผลิตภัณฑ์ $S_{in} = 30 \text{ °C}$ เป็น $T_{out} = 80 \text{ °C}$ โดยอากาศความชื้น



รูปที่ 3.3 กราฟแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Cross Flow



รูปที่ 3.4 ค่าปรับแก้สำหรับการไหลต่างๆ

ที่มา: M. Necati Özişik. (1985). Heat Transfer : A Basic Approach

$$\begin{aligned}
 Q_{air} &= \dot{m}_c c_p \Delta T \\
 &= (0.23)(1.007)(80 - 30) \\
 &= 11.58 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

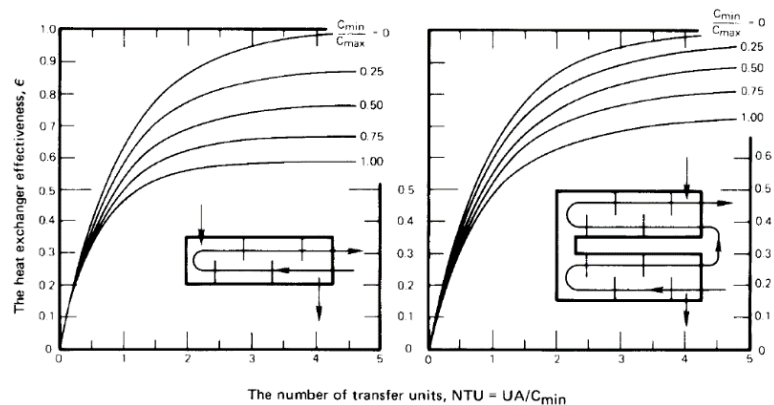
$$\begin{aligned}
 Q_{\max} &= (\dot{m}_c c_p)_{\min} (T_{n,\text{in}} - T_{c,\text{in}}) \\
 &= [(0.0132)(1.185)][(900 - 30)] \\
 Q_{\max} &= 14.39 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น } \epsilon = \frac{Q}{Q_{\max}} = \frac{11.58 \text{ kW}}{14.39 \text{ kW}} = 0.804 \text{ (80.4\%)}$$

$$C_c = \dot{m}_c c_p = (0.23)(1007) = 231.61 \text{ W/}^{\circ}\text{C}$$

$$C_h = \dot{m}_c c_p = (0.0132)(1185) = 15.64 \text{ W/}^{\circ}\text{C}$$

$$\text{ดังนั้น } C = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} = \frac{15.64}{231.61} = 0.067$$



รูปที่ 3.5 ค่าปรับแก้สำหรับการไหลต่างๆ

ที่มา: M. Necati Özisik. (1985). Heat Transfer : A Basic Approach

ดังนั้น

$$NTU = 1.7$$

จากอัตราการไหลของพัลลม

$$\dot{m} = 0.23 \text{ kg/s}$$

อากาศเย็น ที่อุณหภูมิ 350 K

$$\rho = 1.06 \text{ kg/m}^3$$

$$C_p = 1007 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$$

$$\mu = 2 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$$

$$K = 0.03003 \text{ W/m} \cdot \text{K}$$

$$Pr = 0.697$$

$$Pr_s = 0.695$$

$$k_s = 0.03003 \text{ W/m} \cdot \text{K}$$

$$K_{\text{สแตนเลส}} = 16 \text{ W/m} \cdot \text{K}$$

$$\text{คำนวณหา } Nu \text{ จาก } \bar{Nu} = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}$$

$$\begin{aligned} \text{Re} &= \frac{\rho V D}{\mu} \\ &= \frac{(1.06)(7.182)(0.0476)}{2 \times 10^{-5}} = 18,118 \end{aligned}$$

$$\bar{Nu} = 0.023(18,118)^{0.8} (0.697)^{0.4}$$

$$\bar{Nu} = 50.52$$

จาก $\bar{Nu} = \frac{h_i D}{K}$

$$\begin{aligned} h_i &= \frac{\bar{Nu} K}{D} \\ &= \frac{(50.52)(0.03)}{0.0476} = 31.51 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned}$$

อากาศร้อน ที่อุณหภูมิ 850 K

$$\rho = 0.4149 \text{ kg/m}^3$$

$$C_p = 11095 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$$

$$\mu = 3.765 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$$

$$K = 6.028 \times 10^{-2} \text{ W/m} \cdot \text{K}$$

$$\text{Pr} = 0.692$$

$$\text{Re}_{\max} = \frac{U_{\max} D}{V}$$

$$\text{Re}_{\max} = \frac{(9)(0.05)}{3.765 \times 10^{-5}} = 20,507$$

จาก $Nu = 0.97 C \text{Re}_{\max}^m \text{Pr}^{0.36} \left(\frac{0.707}{0.695} \right)^{0.25}$

$$Nu = 152.82$$

จาก $h_o = \frac{Nu K}{D}$

$$= \frac{(152.82)(0.03003)}{0.05} = 91.98 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$\begin{aligned}
 \text{จาก} \quad U &= \frac{1}{\frac{1}{h_o} + \frac{1}{h_i}} \\
 &= \frac{1}{\frac{1}{91.78} + \frac{1}{31.51}} = 23.46 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{K}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{จาก} \quad L &= \frac{NTU \cdot C_{\min}}{U_m N \pi D} \\
 &= \frac{(1.7)(15.14)}{(23.46)(17)\pi(0.0476)} = 0.45 \text{ m}
 \end{aligned}$$

3.6 การคำนวณหาการสูญเสียความดัน (Pressure Drop) ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

$$\begin{aligned}
 G_{\max} &= \rho V_{\max} \\
 &= (0.9980)(9) \\
 &= 8.982 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} \\
 Re &= \frac{DG_{\max}}{V} \\
 &= \frac{(0.050)(8.982)}{2.075 \times 10^{-5}} = 21,648
 \end{aligned}$$

ที่ค่า Re ในห้องอบ เท่ากับ 21,648 จะเป็นลักษณะการไหลแบบ Turbulent จะใช้การอ่านแผนภาพ Moody diagram เพื่อหาค่าแฟคเตอร์ความเสียดทาน (f_D) จะต้องทำการหาค่า $\frac{\epsilon}{D}$ เพื่อให้สามารถอ่านกราฟได้โดยที่ค่า ϵ ของท่อสแตนเลสมีค่าเท่ากับ 0.015 mm.

$\therefore \frac{\epsilon}{D}$ ของเหล็กอบสังกะสีมีค่าเท่ากับ

$$\frac{\epsilon}{D} = \frac{0.015 \text{ mm}}{500 \text{ mm}}$$

$$\frac{\epsilon}{D} = 3.0 \times 10^{-5}$$

เมื่ออ่านค่าจาก Moody Diagram จะได้ค่าแฟคเตอร์ความเสียดทานของห้องอบแห้งอากาศ
 สังกะสี $f_D = 0.046$

$$\begin{aligned}\Delta P &= f \left(\frac{DG_{\max}}{V} \right); \\ &= 0.046 \left(\frac{(17)(8.982)^2}{V} \right) \\ &= 31.607 \text{ N/m}^3\end{aligned}$$

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจำนวน 2 ชุด จะได้ $\Delta P = 2(31.607)$
 $= 63.21 \text{ Pa}$

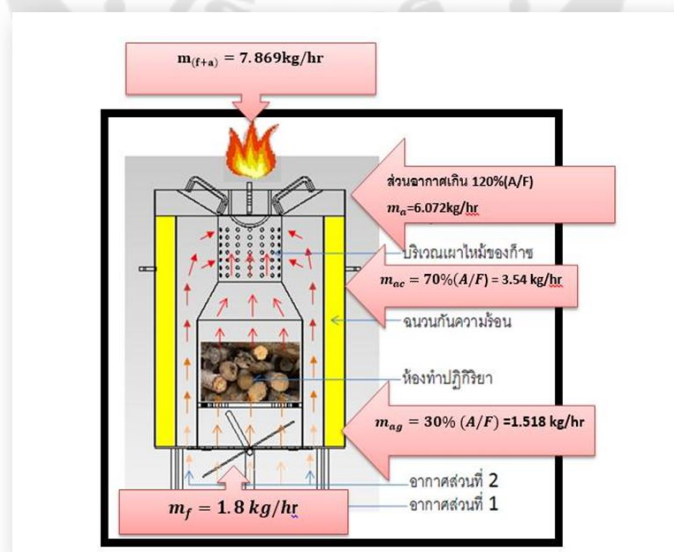
3.7 การคำนวณพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน

จาก

$$A = 2\pi r L N$$

$$A = 2\pi(0.025)(0.45)(17)$$

$$A = 1.2 \text{ m}^2$$



รูปที่ 3.6 ค่าอัตราการไหลเชิงมวลในแต่ละส่วนของเตาชีวมวล

ที่มา:สมมาส แก้วล้วน และคณะ (2556) การทดสอบสมรรถนะเตาชีวมวลขนาด 20 kW

กำหนด (A/F) ของไม้ยูคาลิปตัส เท่ากับ 5.06 และเนื่องจากรู้ค่าตัวแปรในการคำนวณประสิทธิภาพเตาชีวมวลคือ Q_u , m_f , m_a

$$Q_u = 11.58 \text{ kW}$$

$$m_f = 0.00106 \text{ kg/s}$$

$$Q_{in} = m_f HV$$

$$Q_{in} = 0.00106 \text{ kg/s} (15.83 \times 10^3 \text{ kJ/kg})$$

$$Q_{in} = 16.30 \text{ kW}$$

$$m_a = m_{ag} 30\% (A/F) + m_c 70\% (A/F)$$

$$m_a = 1.518 + 3.54$$

$$m_a = 5.058 \text{ kg/h}$$

$$m_a = \frac{5.058}{3600} = 0.001405 \text{ kg/s}$$

$$Q_{ex} = m_{f+a} c_p \Delta T$$

$$Q_{ex} = (0.00106 \text{ kg/s} + 0.001405 \text{ kg/s})(1185)(200 - 30)$$

$$Q_{ex} = 0.49 \text{ kW}$$

จากสมดุลพลังงาน

$$Q_{in} = Q_{out}$$

$$Q_{in} = Q_u + Q_{loss} + Q_{ex}$$

$$16.30 \text{ kW} = 11.58 \text{ kW} + Q_{loss} + 0.49 \text{ kW}$$

$$Q_{loss} = 4.27 \text{ kW}$$

$$\text{ดังนั้น จะได้ประสิทธิภาพ} = \frac{Q_u}{m_f HV \times 0.85}$$

โดยกำหนดประสิทธิภาพเตาชีวมวล เท่ากับ 85 %

$$= \frac{11.58 \text{ kW}}{16.30 \text{ kW} \times 0.85}$$

$$= 0.83 \quad \text{หรือ} \quad 83 \%$$

3.8 การคำนวณเพื่อการออกแบบเตาชีวมวล

พื้นที่หน้าตัดของเตาชีวมวล (Area of heart grate)

$$Q = mf \times \text{LHV}$$

$$28.50 \text{ kW} = mf \times 15.83 \text{ MJ/kg}$$

$$mf = 1.80 \text{ kg/hr}$$

$$\text{SGR} = \frac{\text{Weight of eucalyptus use}}{\text{Reac Area} \times \text{hr}}$$

$$A = \frac{1.8 \text{ kg/hr}}{\text{SGR}}$$

กำหนดค่า SGR ของไม้ยูคาลิปตัส $\approx 120 \text{ kg/m}^2\text{hr}$

$$= \frac{1.8 \text{ kg/hr}}{120 \text{ kg/m}^2\text{hr}}$$

$$A = 0.015 \text{ m}^2$$

เส้นผ่าศูนย์กลางของเตาชีวมวล (Diameter of heart)

$$\text{Area} = \frac{\pi}{4} d^2$$

$$0.015 = \frac{\pi}{4} d^2$$

$$d = \sqrt{\frac{0.015 \times 4}{\pi}}$$

$$d = 13 \text{ cm}$$

ดังนั้น จะได้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเตาชีวมวลเท่ากับ 13 cm

กำหนด A/F ยูคาลิปตัส เท่ากับ 5.06

Q ที่ใช้;

$$Q = m_{f+a} c_p \Delta T$$

$$Q = (1.8 + 6.0696)(1,007)(900 - 200)$$

$$Q = 5,547.281 \text{ kW}$$

$$m_f = 1.8 \text{ kg/hr}$$

$$m_a \text{ ใช้อากาศเกิน 120\%} = 5.058 \times 1.2 = 6.0696 \text{ kg/hr}$$

$$m_{ac} = 70\% \left(\frac{A}{F} \right) = 5.06 \left(\frac{70}{100} \right) = 3.54 \text{ kg/hr}$$

$$= 30\% \left(\frac{A}{F} \right) = 5.06 \left(\frac{30}{100} \right) = 1.518 \text{ kg/hr}$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{exhaust}} &= m_a c_p \Delta T \\ &= (6.0696)(1,007)(200 - 30) \\ &= 1,039.054 \text{ kW} \end{aligned}$$

จาก สมดุลพลังงาน

$$Q_{\text{in}} = Q_{\text{out}}$$

$$Q_{\text{in}} = Q_u + Q_{\text{ex}} + Q_{\text{loss}}$$

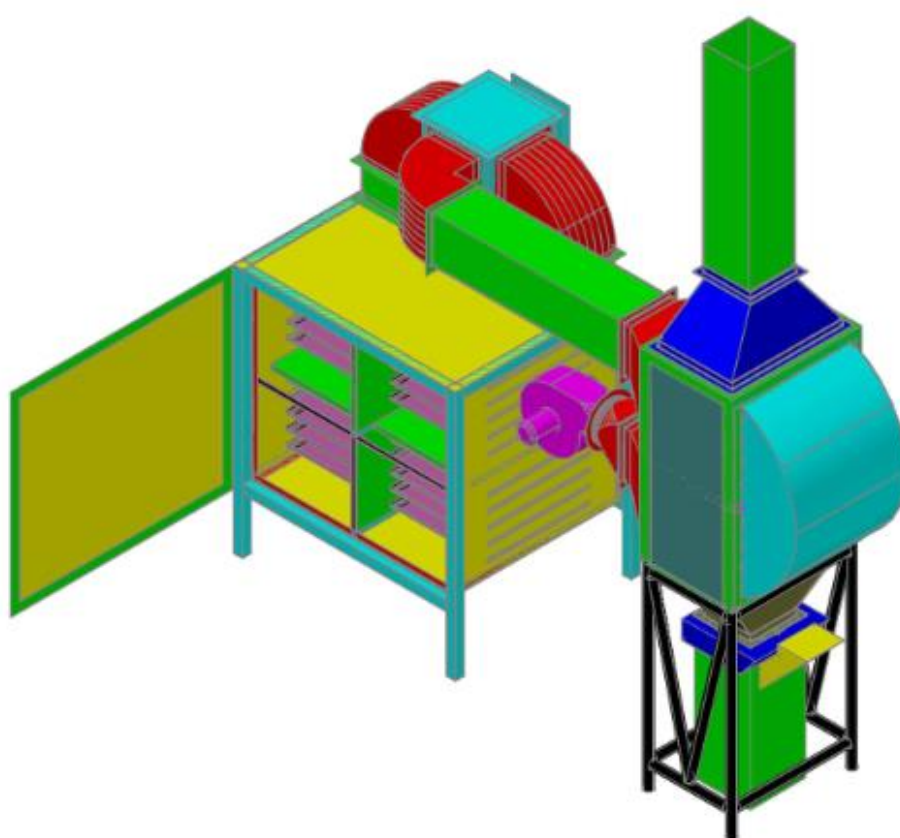
$$28,494 \text{ kW} = 5,547.281 + 1,039.054 + Q_{\text{loss}}$$

$$Q_{\text{loss}} = 21,907 \text{ kW}$$

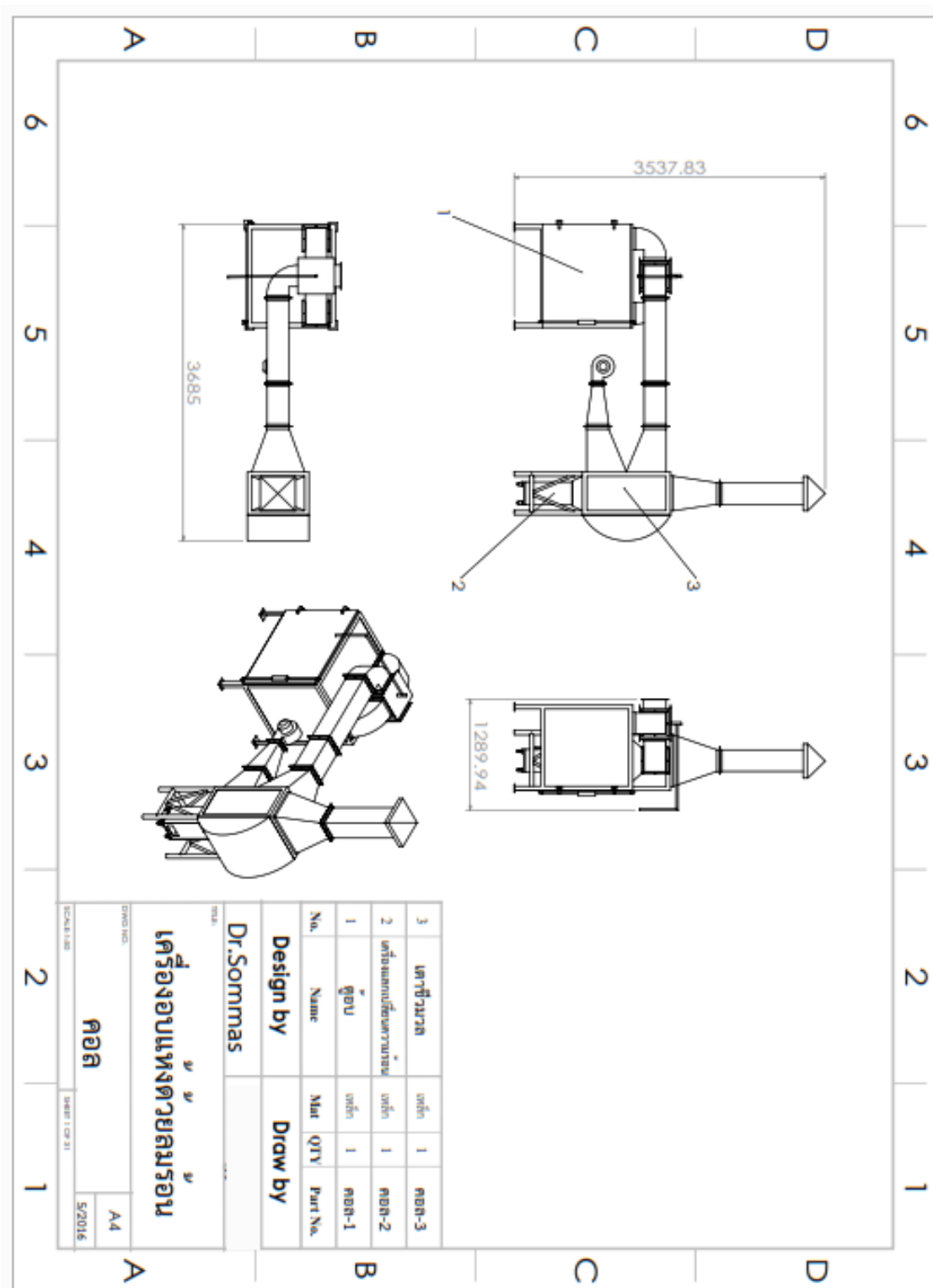
ดังนั้นจะได้ความร้อนที่สูญเสียในระบบเท่ากับ 21,907 kW



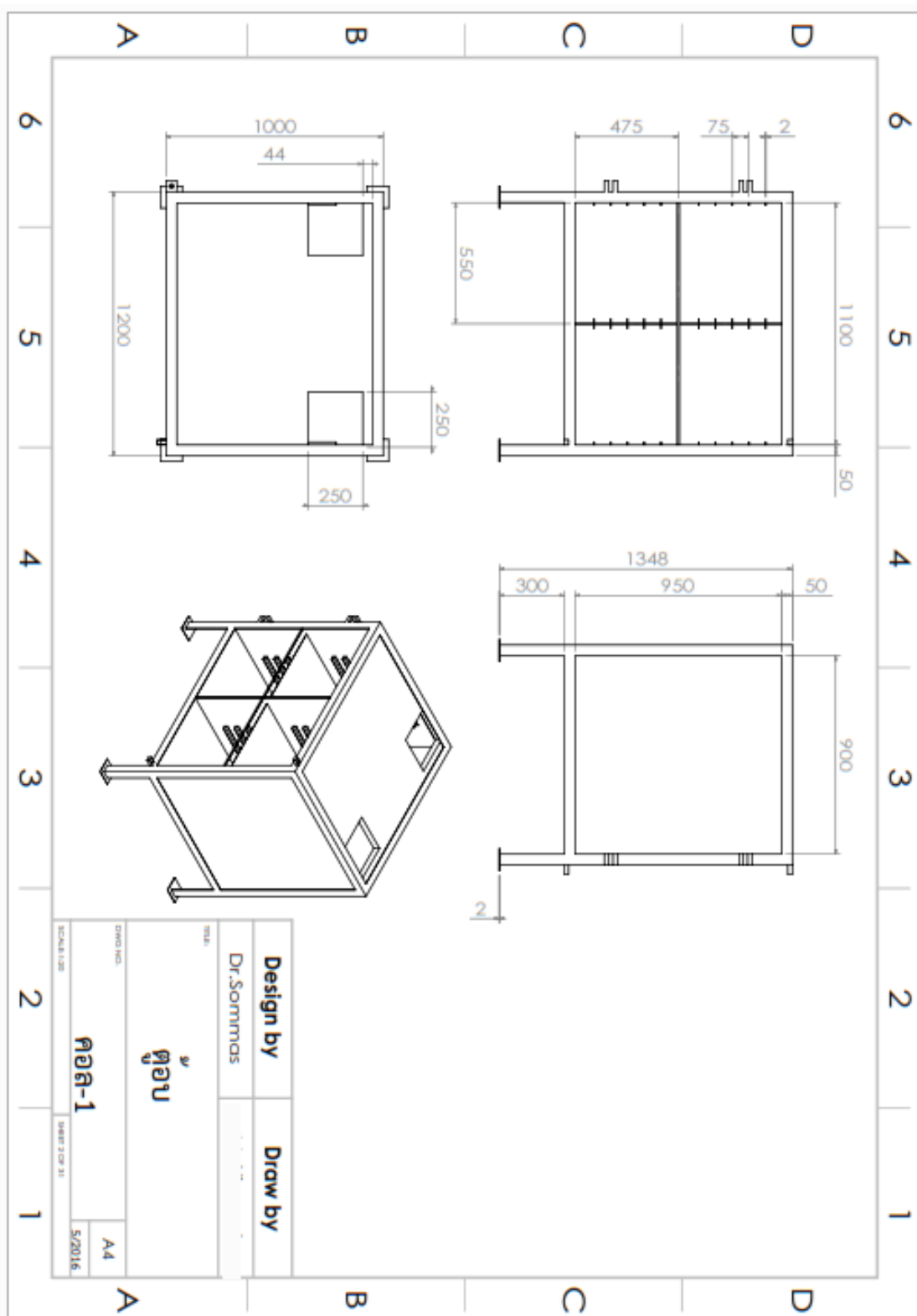
ภาคผนวก ค
แบบเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนแบบสลับทิศทางที่ผลิตจากเตาชีวมวล
ประสิทธิภาพสูง



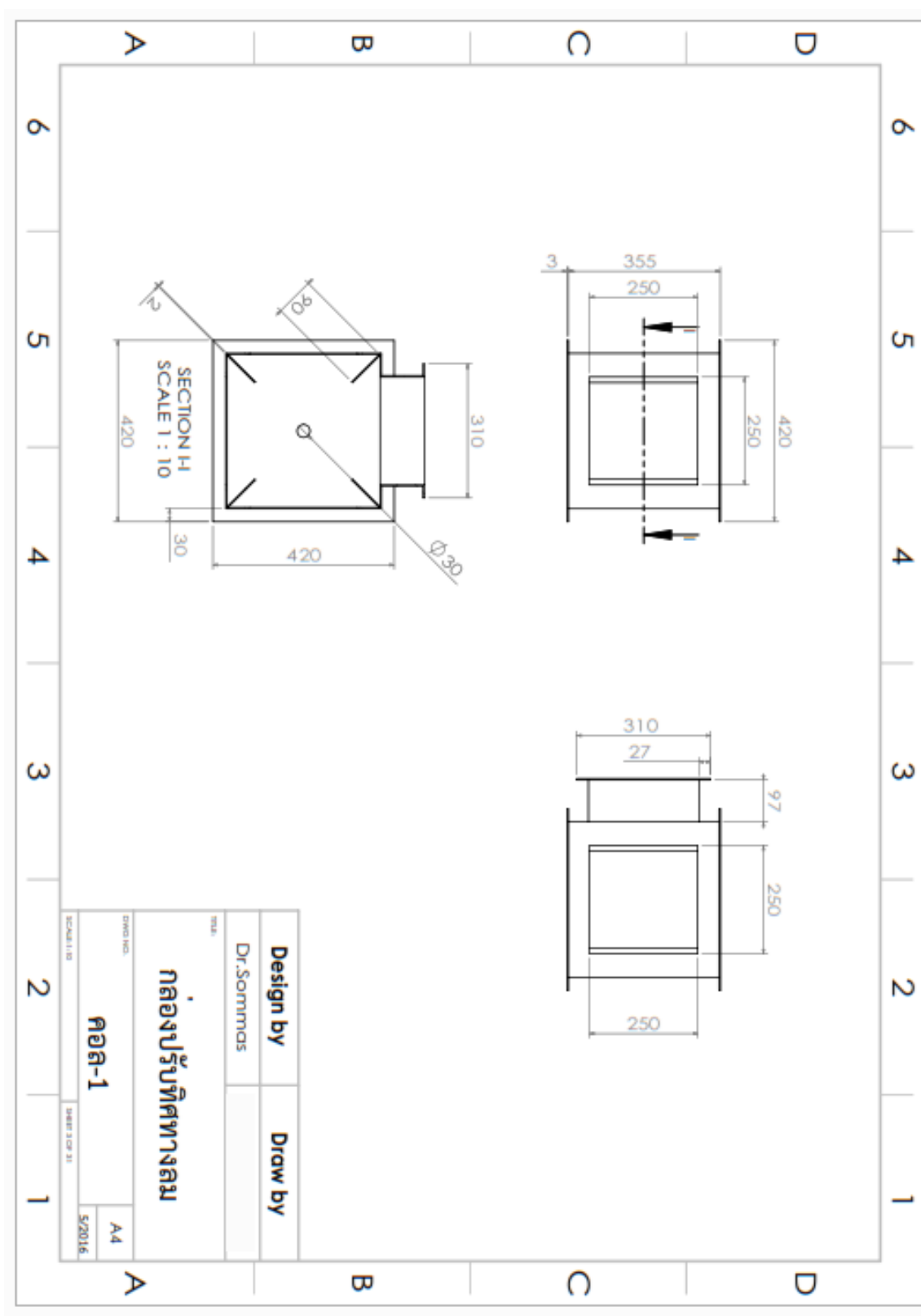
แบบเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนแบบสลับทิศทางที่ผลิตจากเตาชีวมวล
ประสิทธิภาพสูง



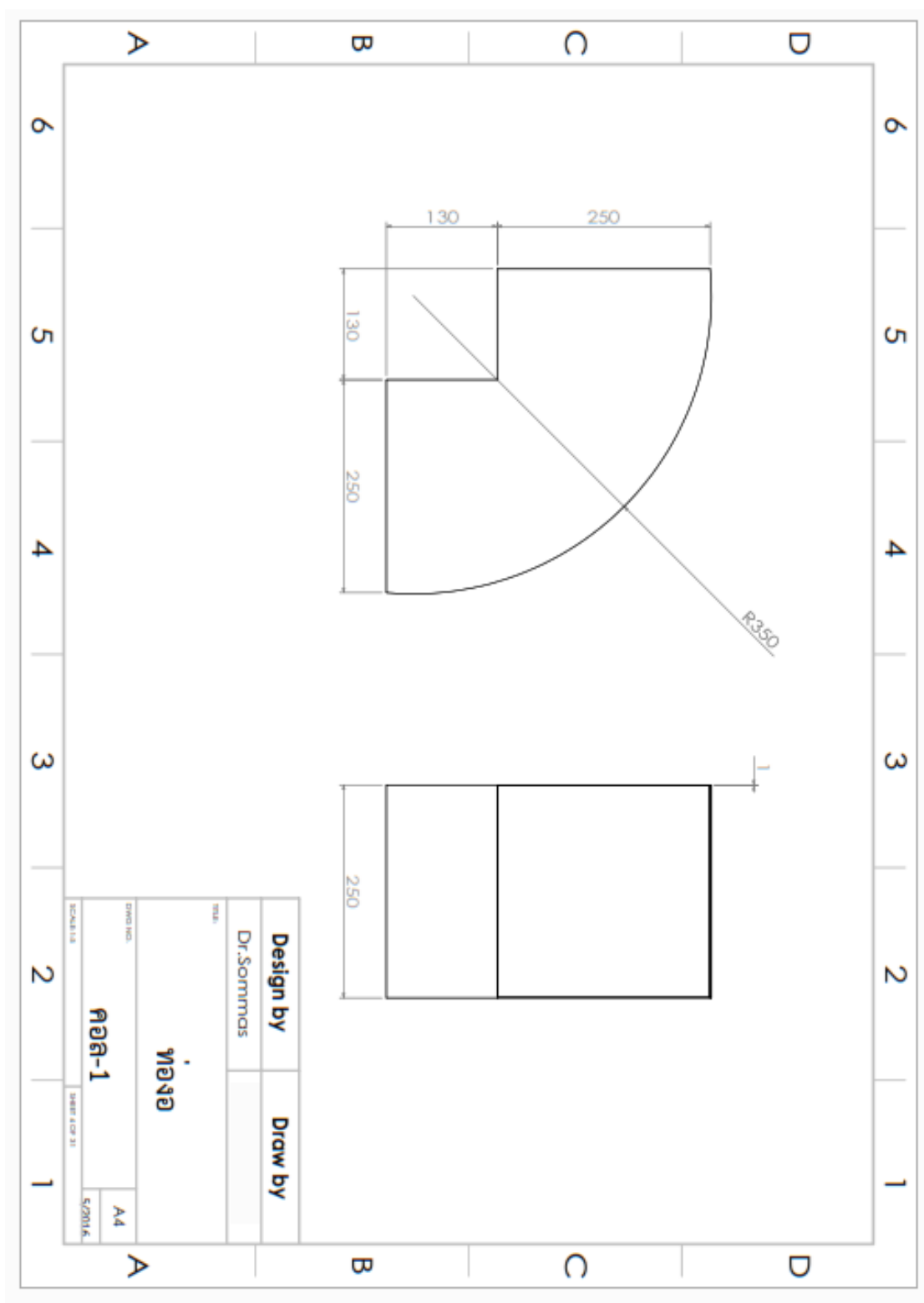
เครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนแบบสลับทิศทางที่ผลิตจากเตาชีวมวล
ประสิทธิภาพสูง



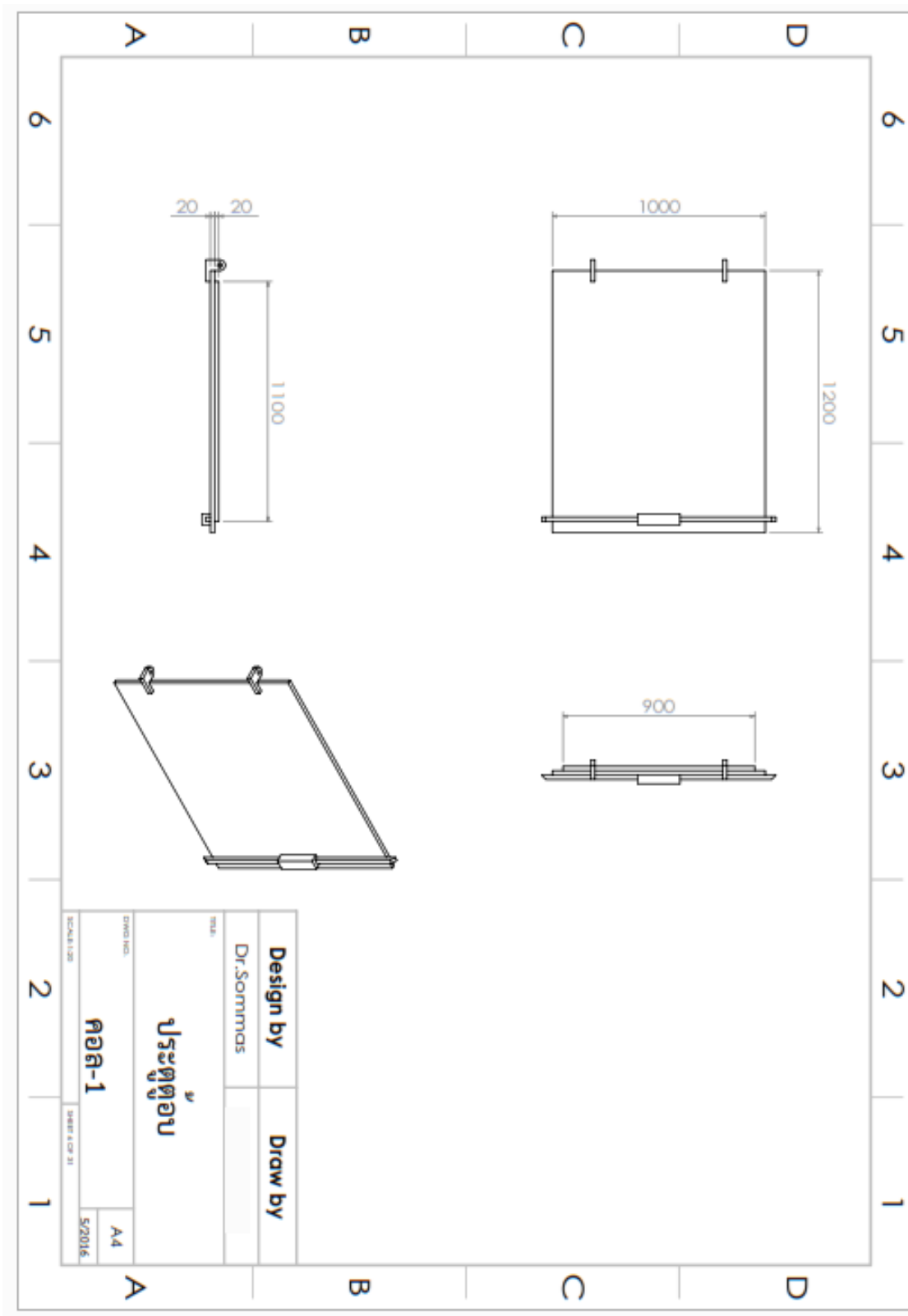
ตู้อบของเครื่องแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนแบบสลับทิศทางที่ผลิตจากเตาชีวมวล
ประสิทธิภาพสูง



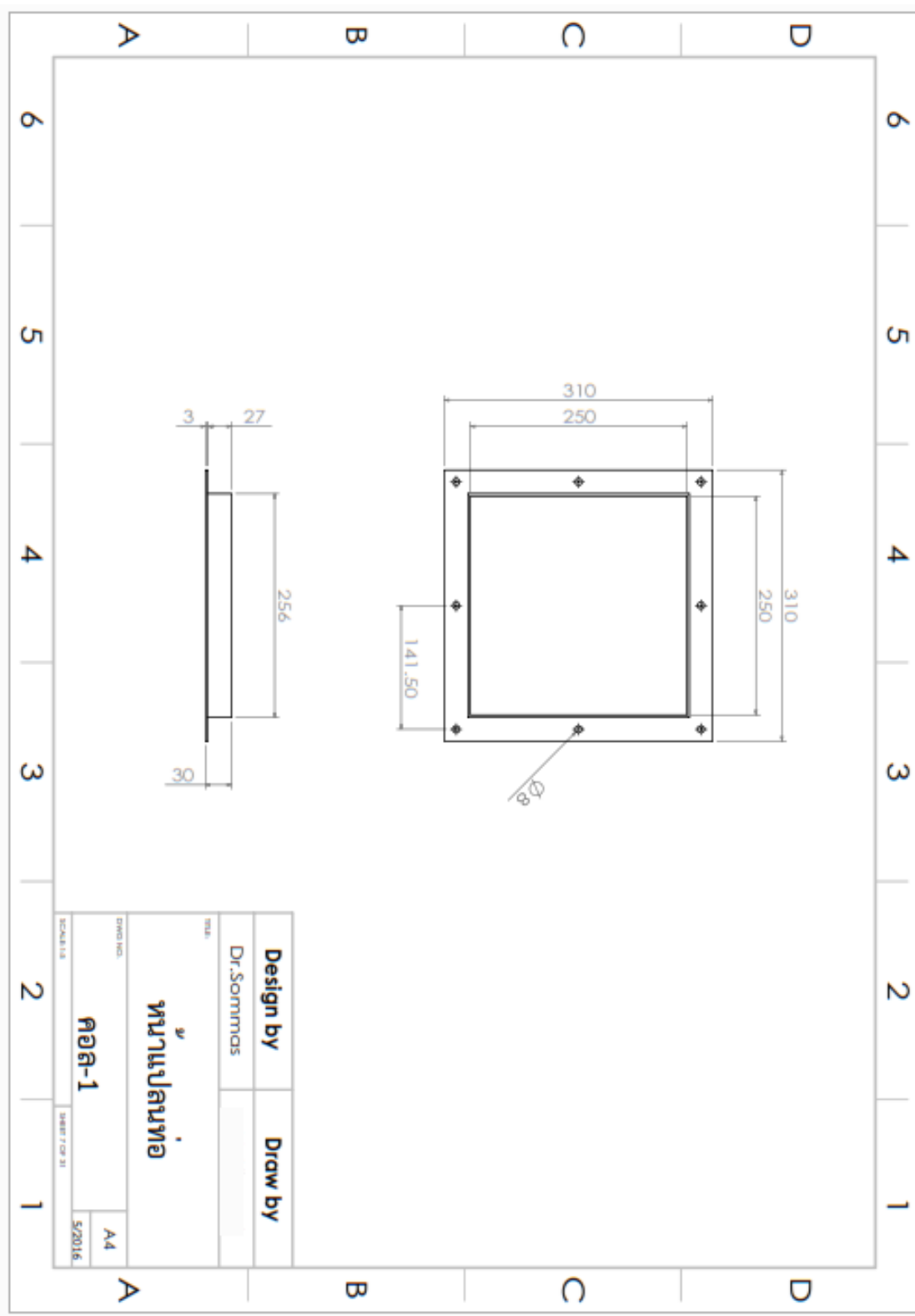
วาล์วสลับทิศทางไหลของเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนแบบสลับทิศทางที่
ผลิตจากเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง



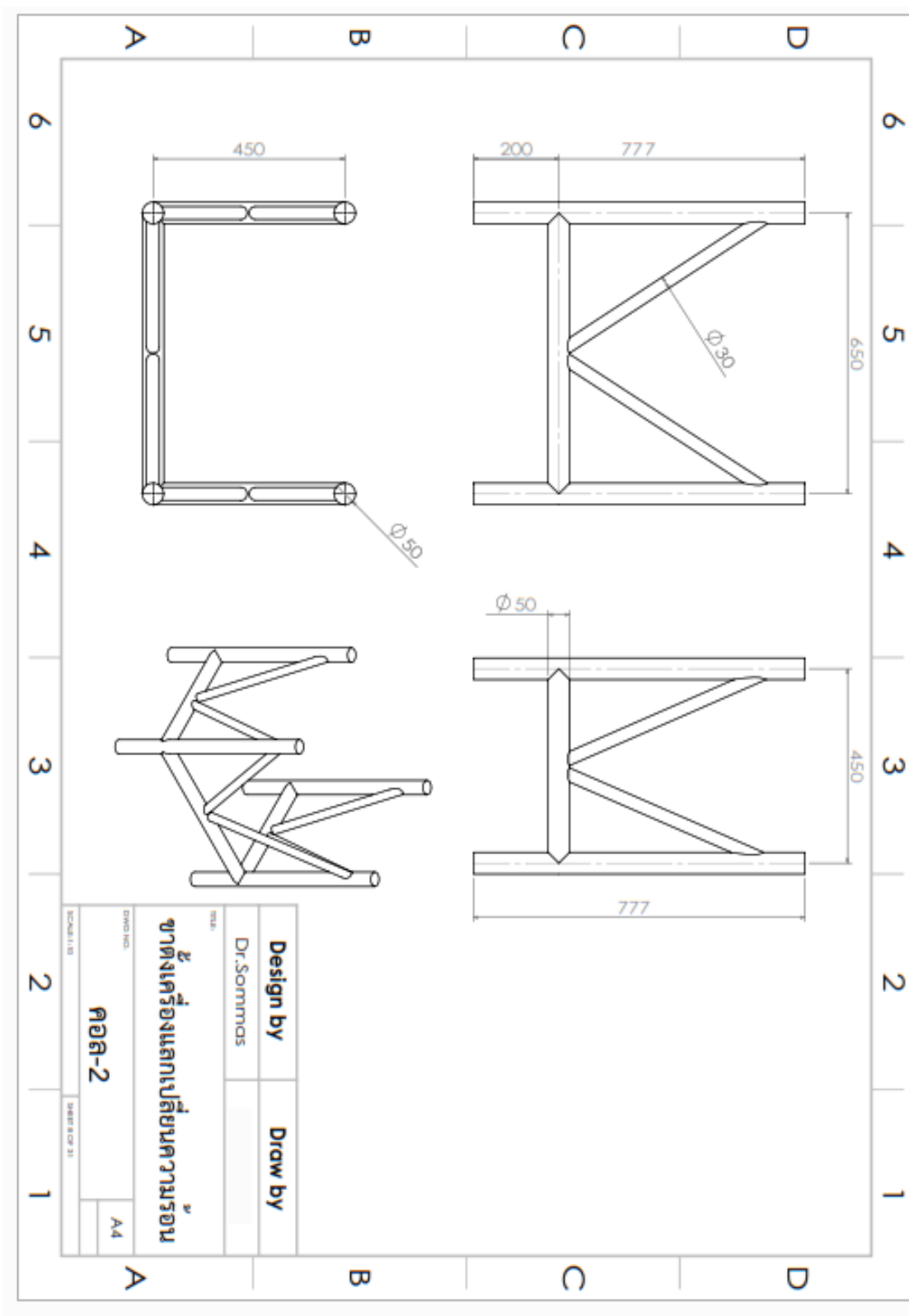
ห้องอบของห้องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนแบบสลับทิศทางที่ผลิตจากเตาชีวมวล
ประสิทธิภาพสูง



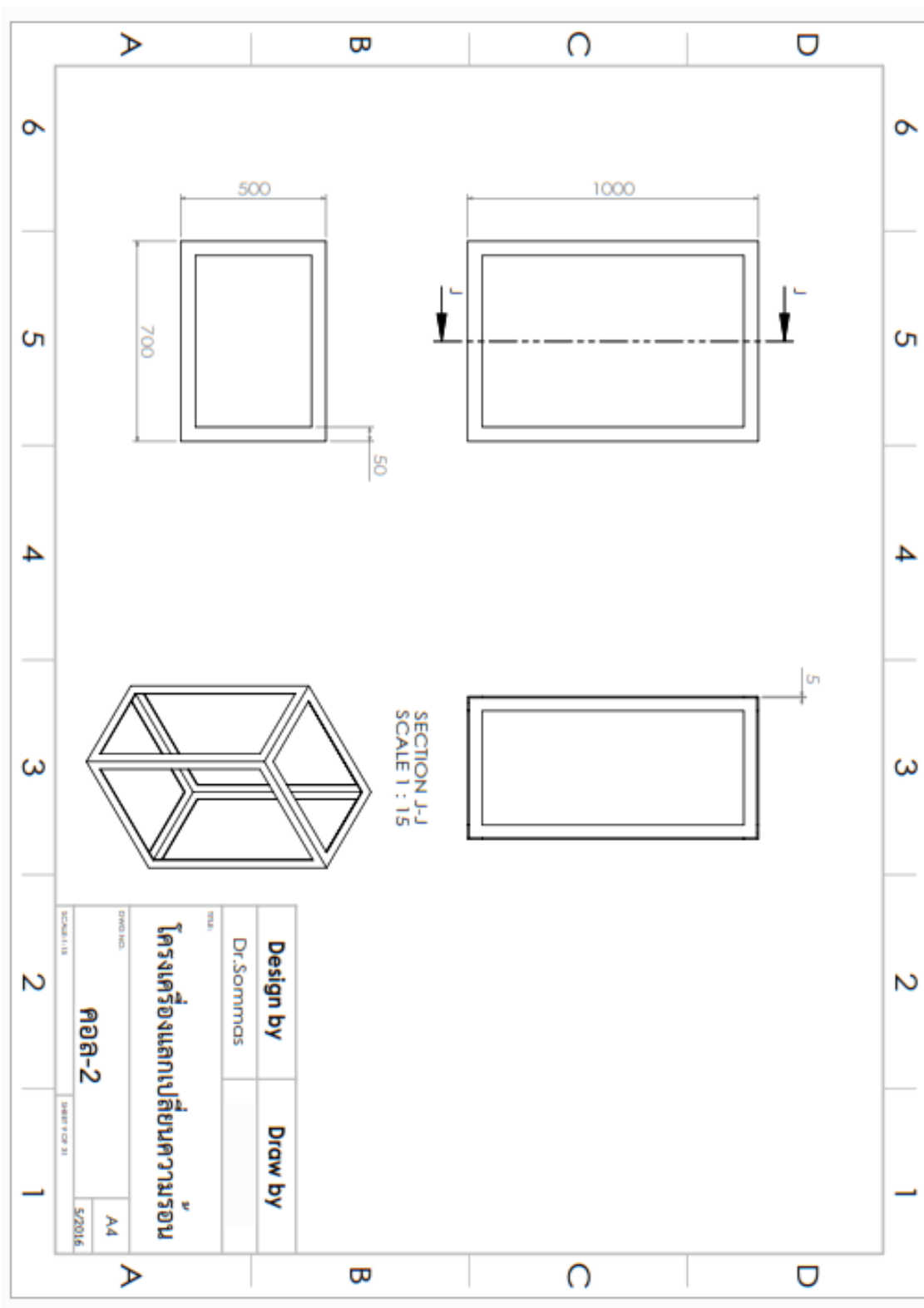
ประตูของห้องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนแบบสลับทิศทางที่ผลิตจากเตาชีวมวล
ประสิทธิภาพสูง



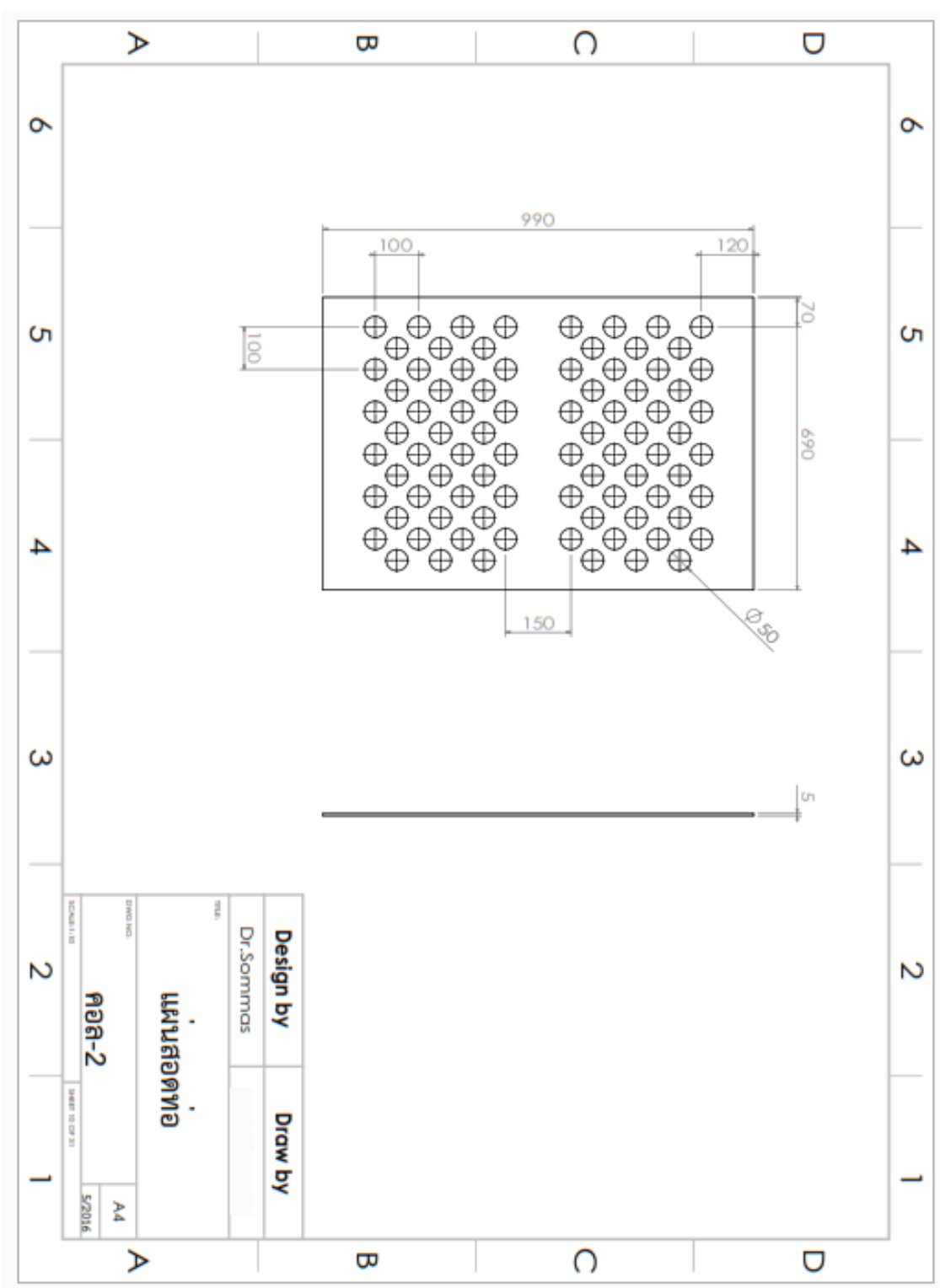
หน้าแปลนท่อของห้องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนแบบสลับทิศทางที่ผลิตจาก
เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง



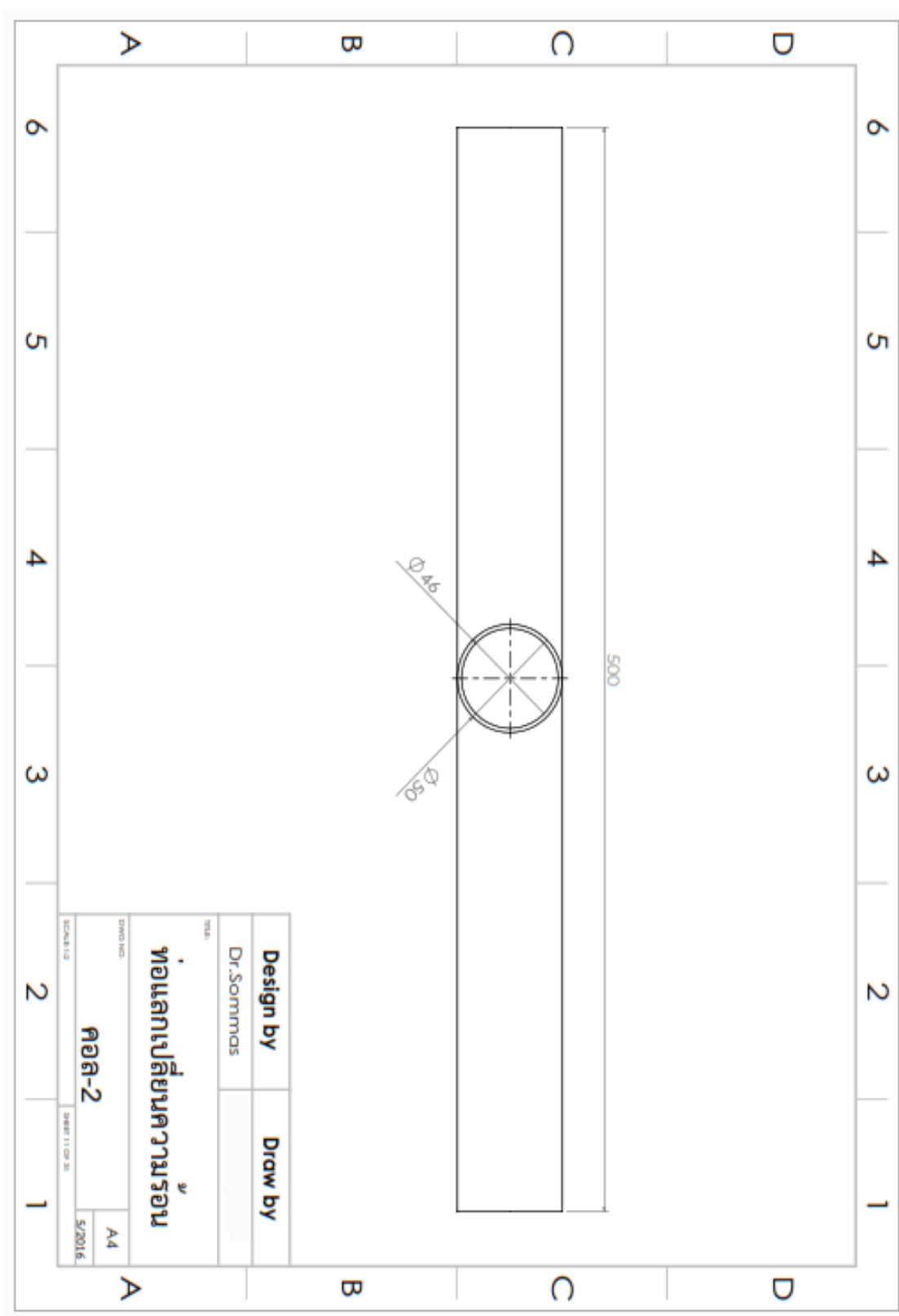
ขำตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของห้องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนแบบสลับ
ทิศทางที่ผลิตจากเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง



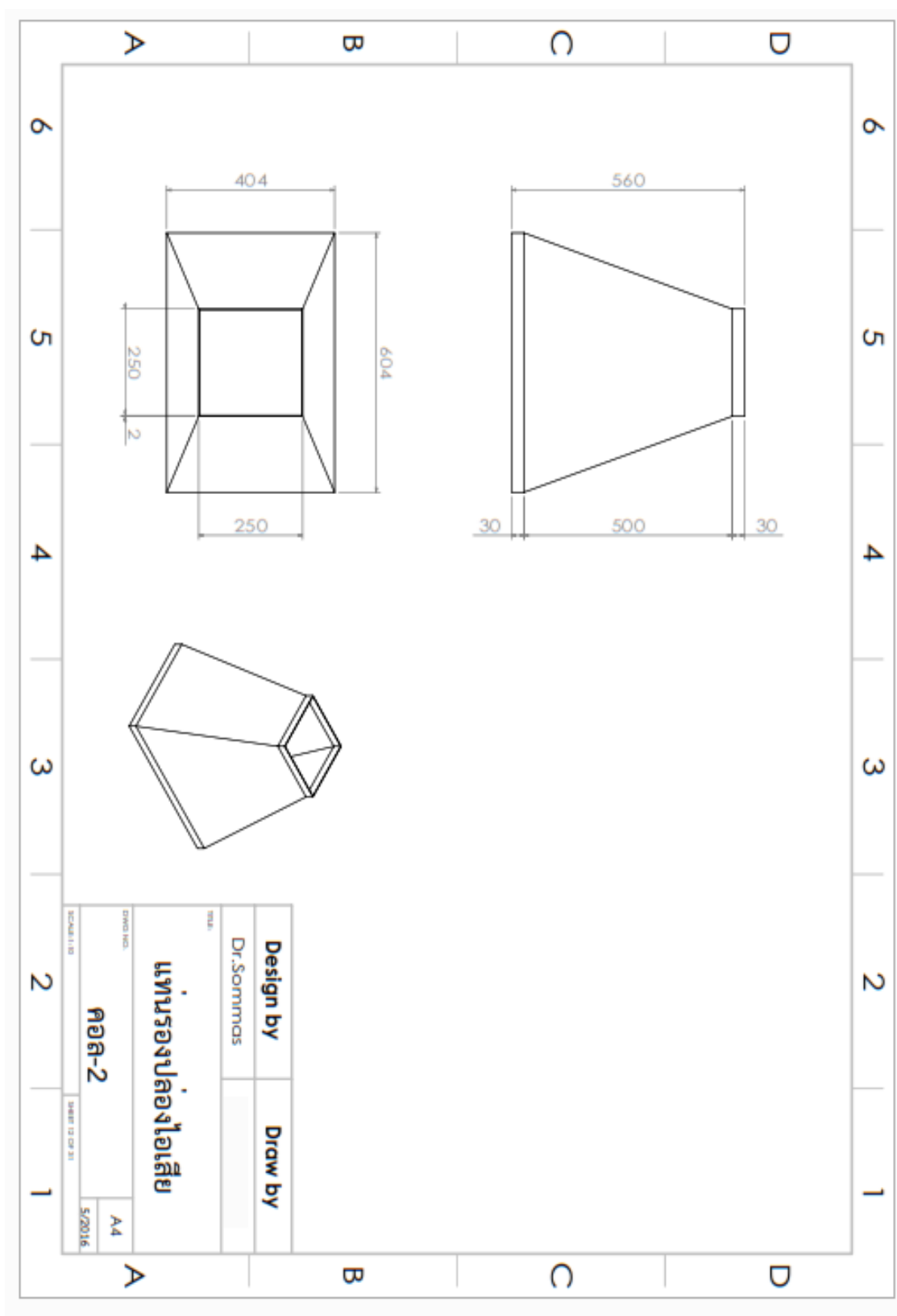
โครงการแลกเปลี่ยนความร้อนของห้องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนแบบสลับ
ทิศทางที่ผลิตจากเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง



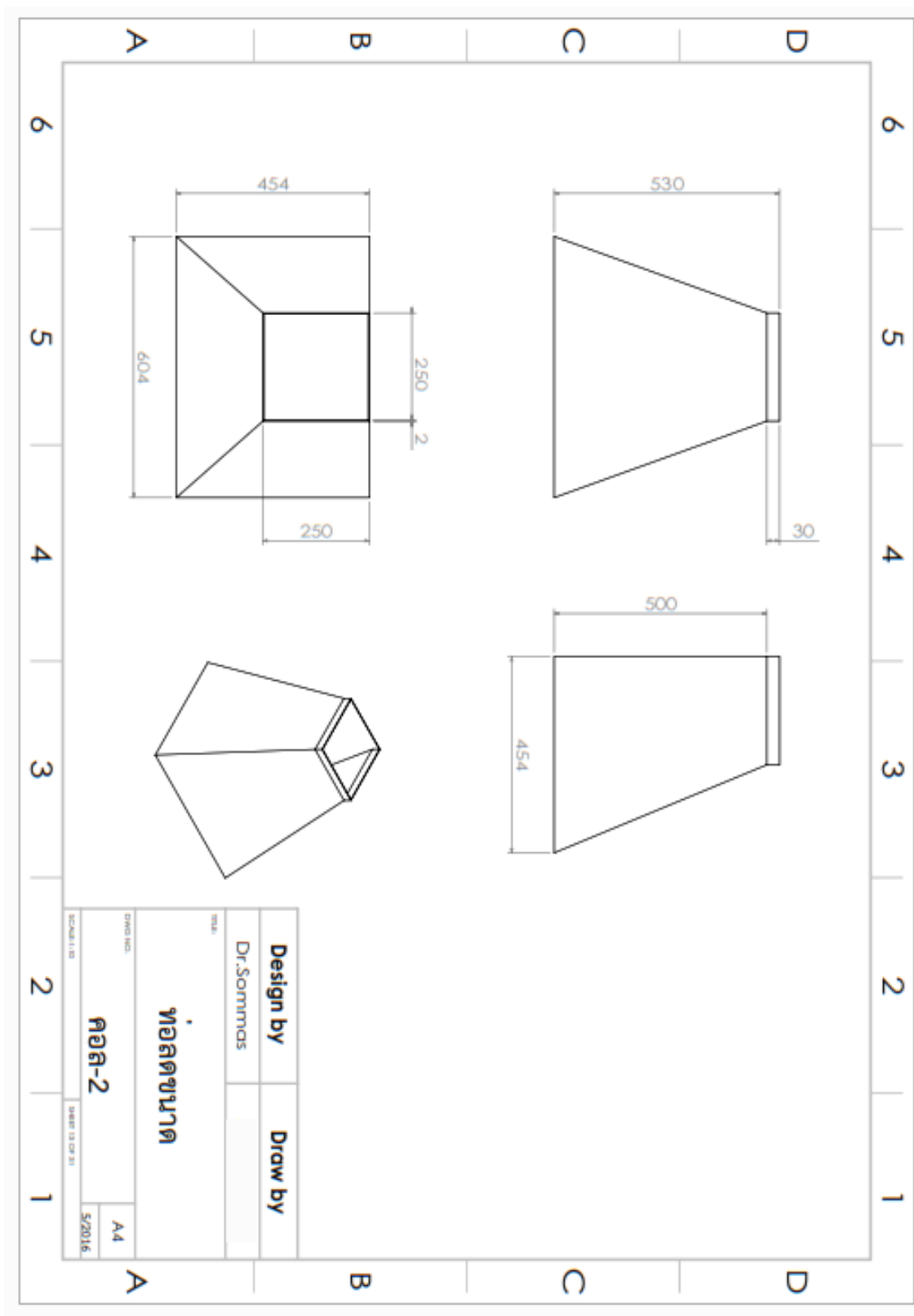
แผ่นสอตท่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของห้องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อน
แบบสลับทิศทางที่ผลิตจากเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง



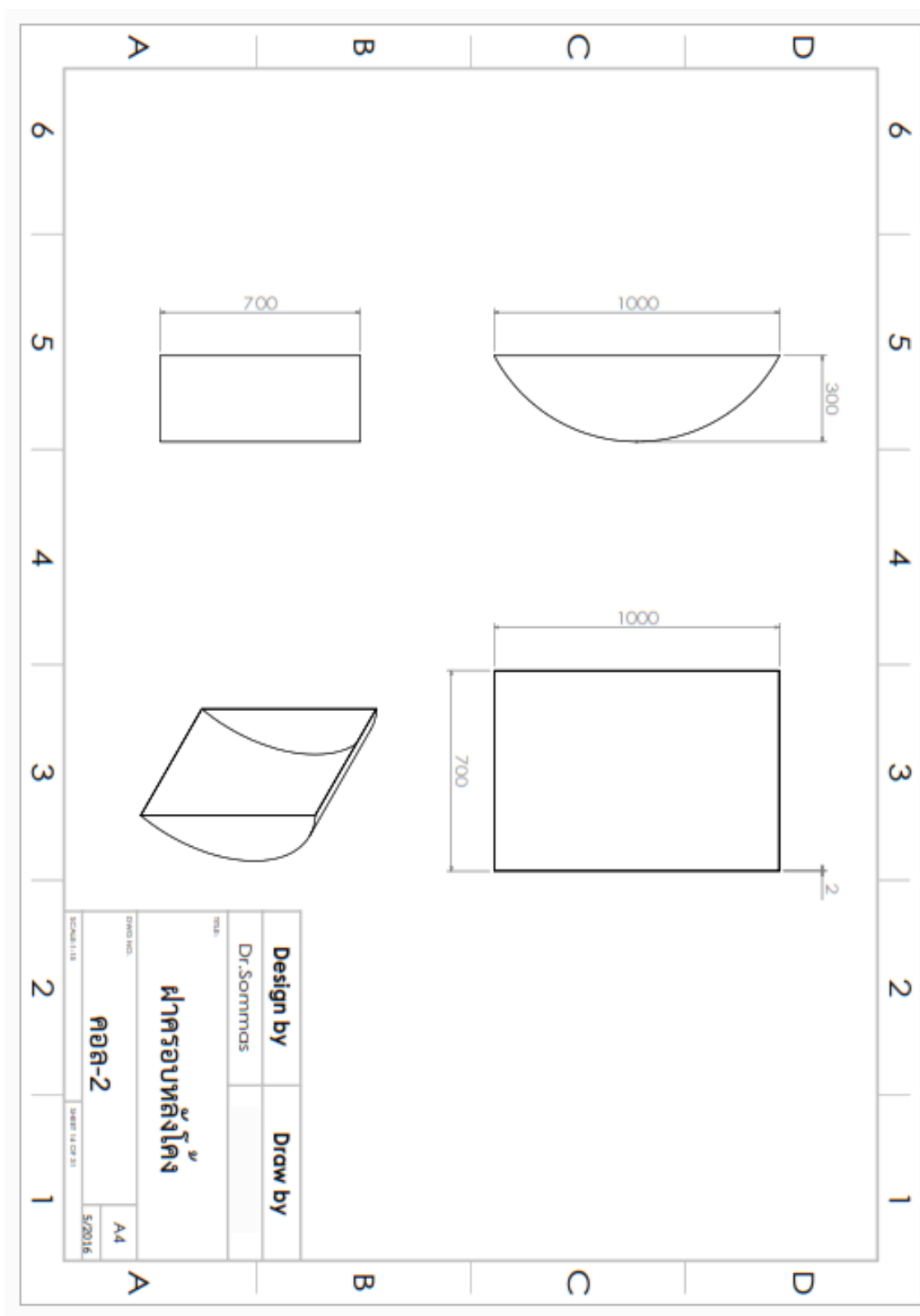
ท่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของห้องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนแบบสลับ
ทิศทางที่ผลิตจากเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง



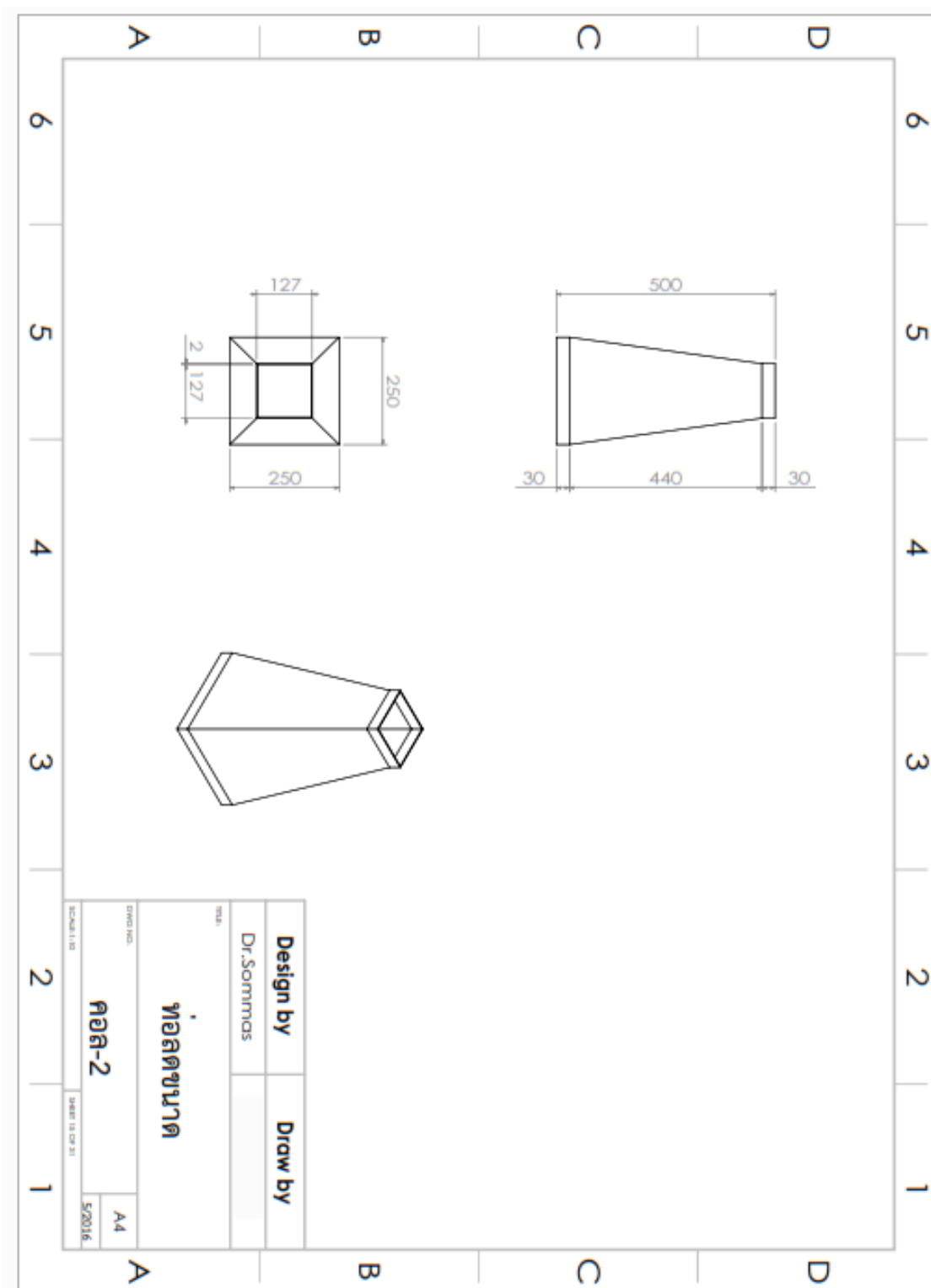
ท่อรองปล่องไอเสียของห้องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนแบบสลับทิศทางที่ผลิต
จากเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง



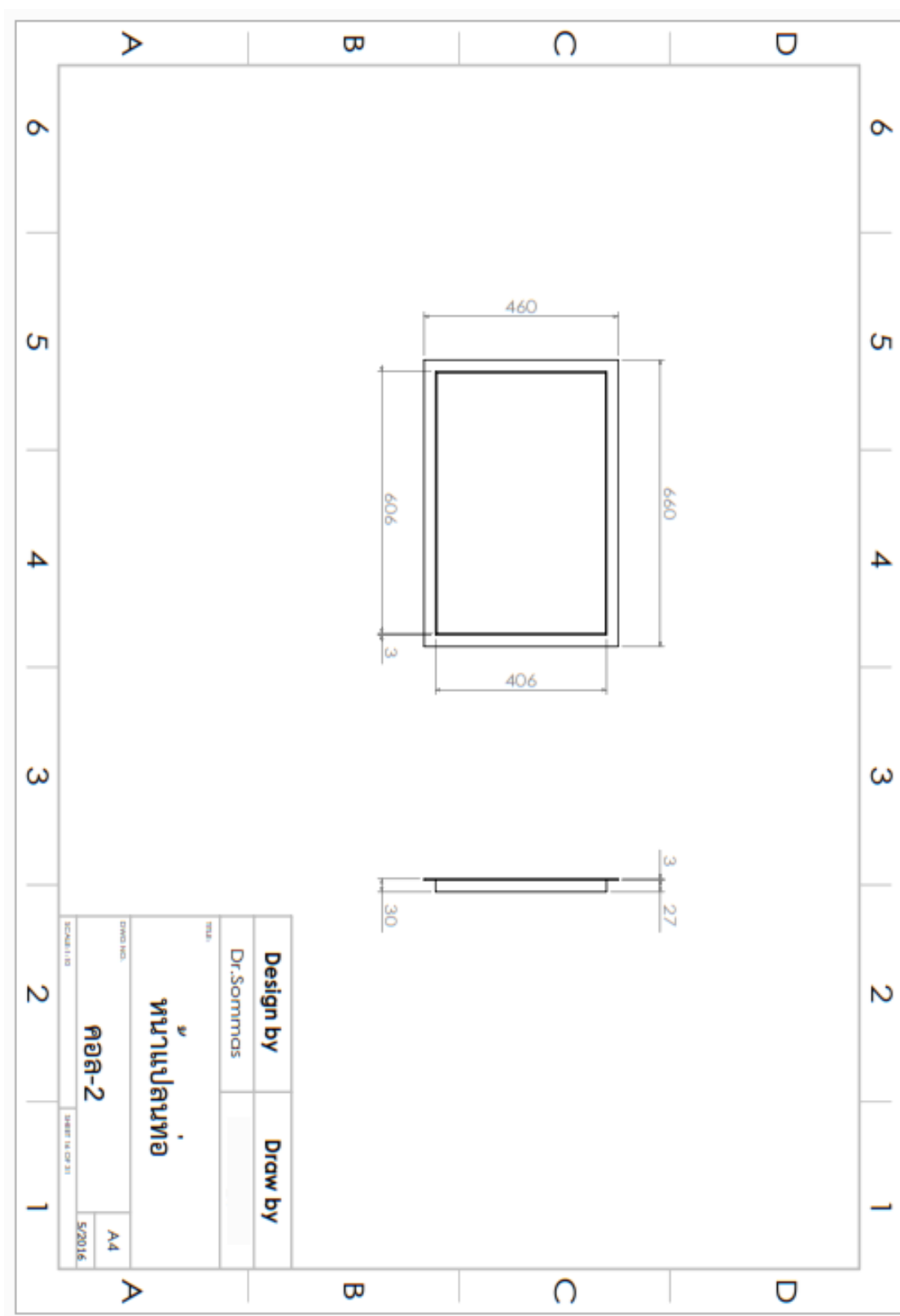
ท่อลดขนาดของห้องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนแบบสลับทิศทางที่ผลิตจากเตา
ชีวมวลประสิทธิภาพสูง



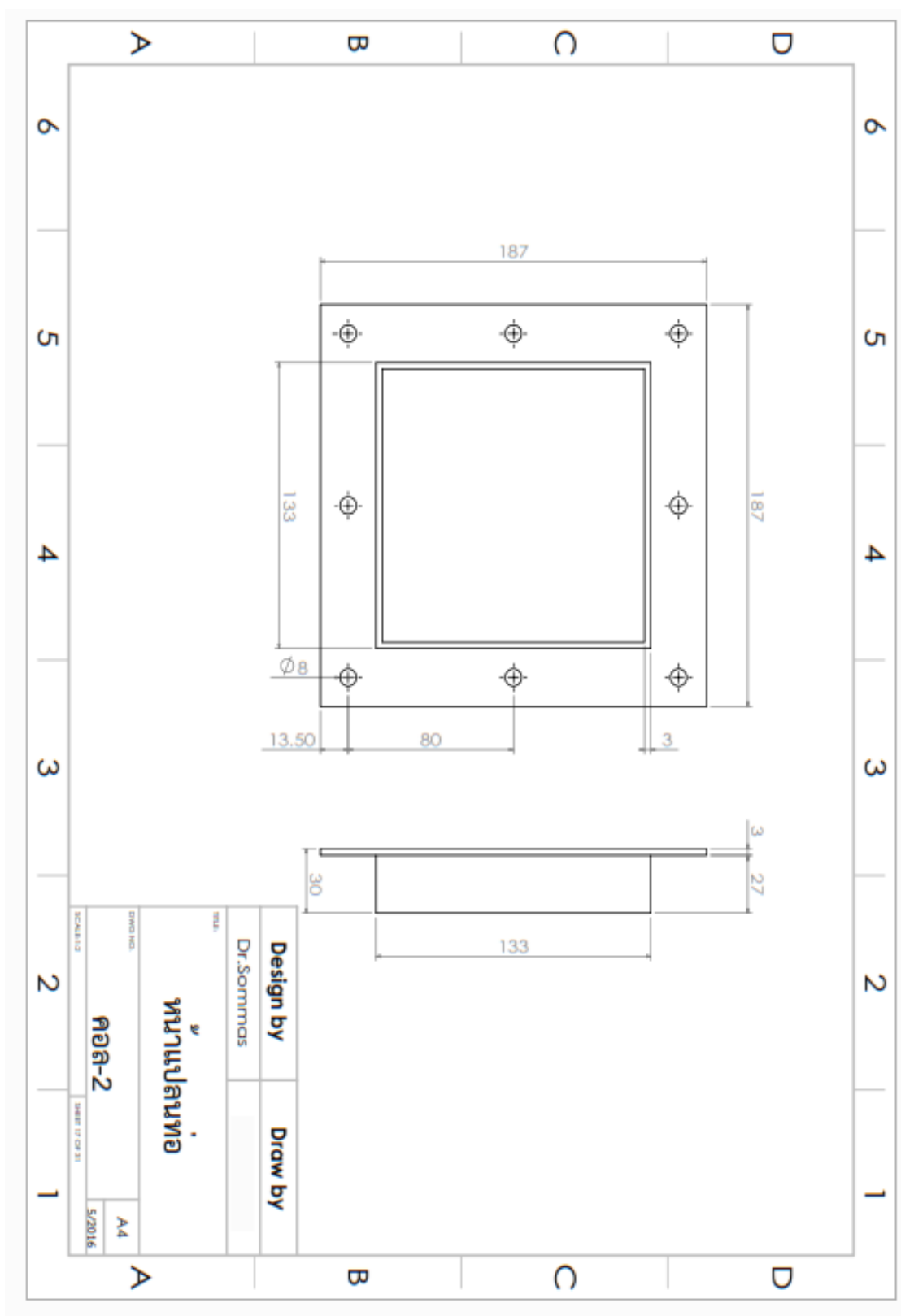
ฝักรอบหลังโค้งของห้องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนแบบสลับทิศทางที่ผลิตจาก
เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง



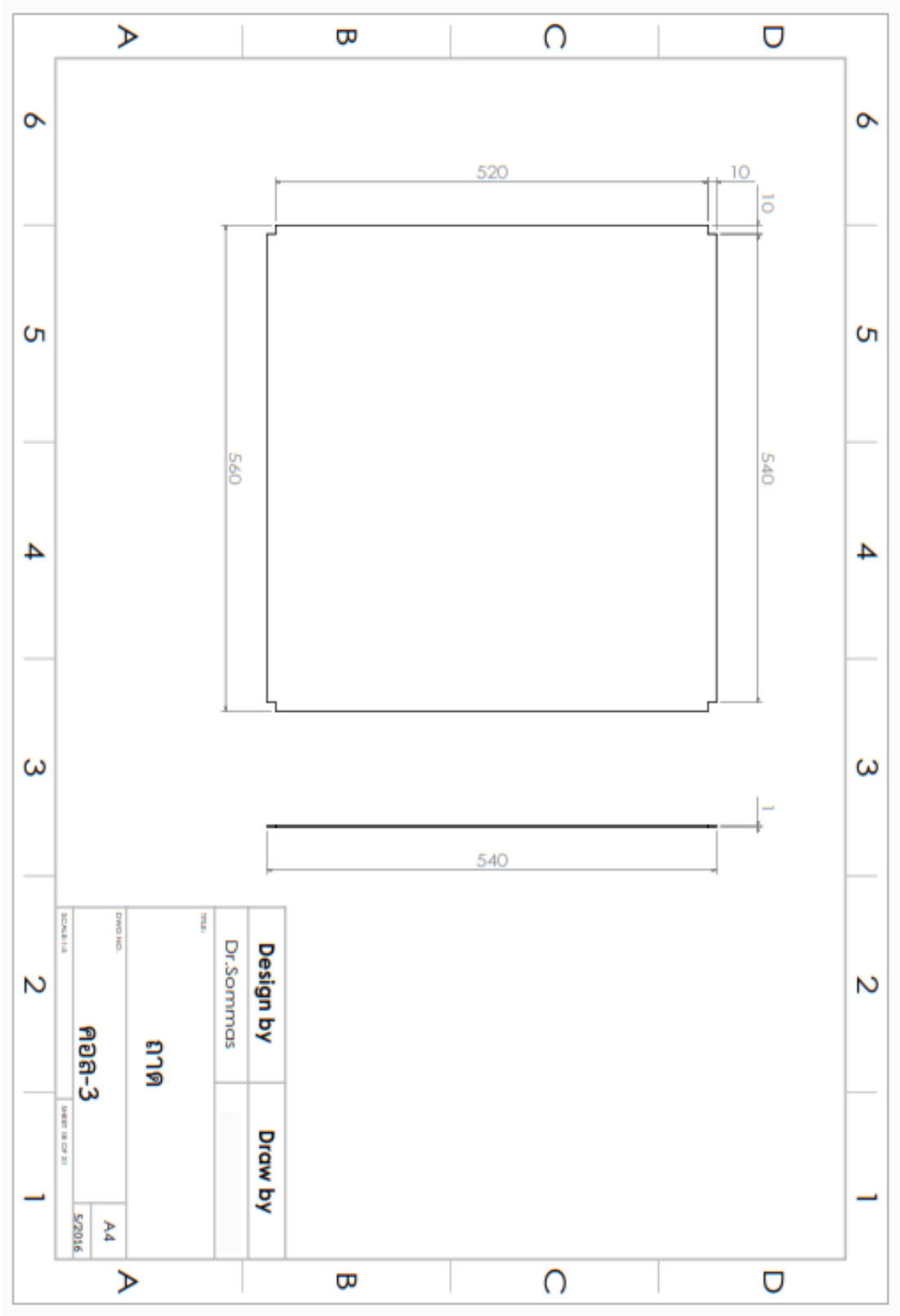
ท่อดขนาดของห้องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนแบบสลับทิศทางที่ผลิตจากเตา
ชีวมวลประสิทธิภาพสูง



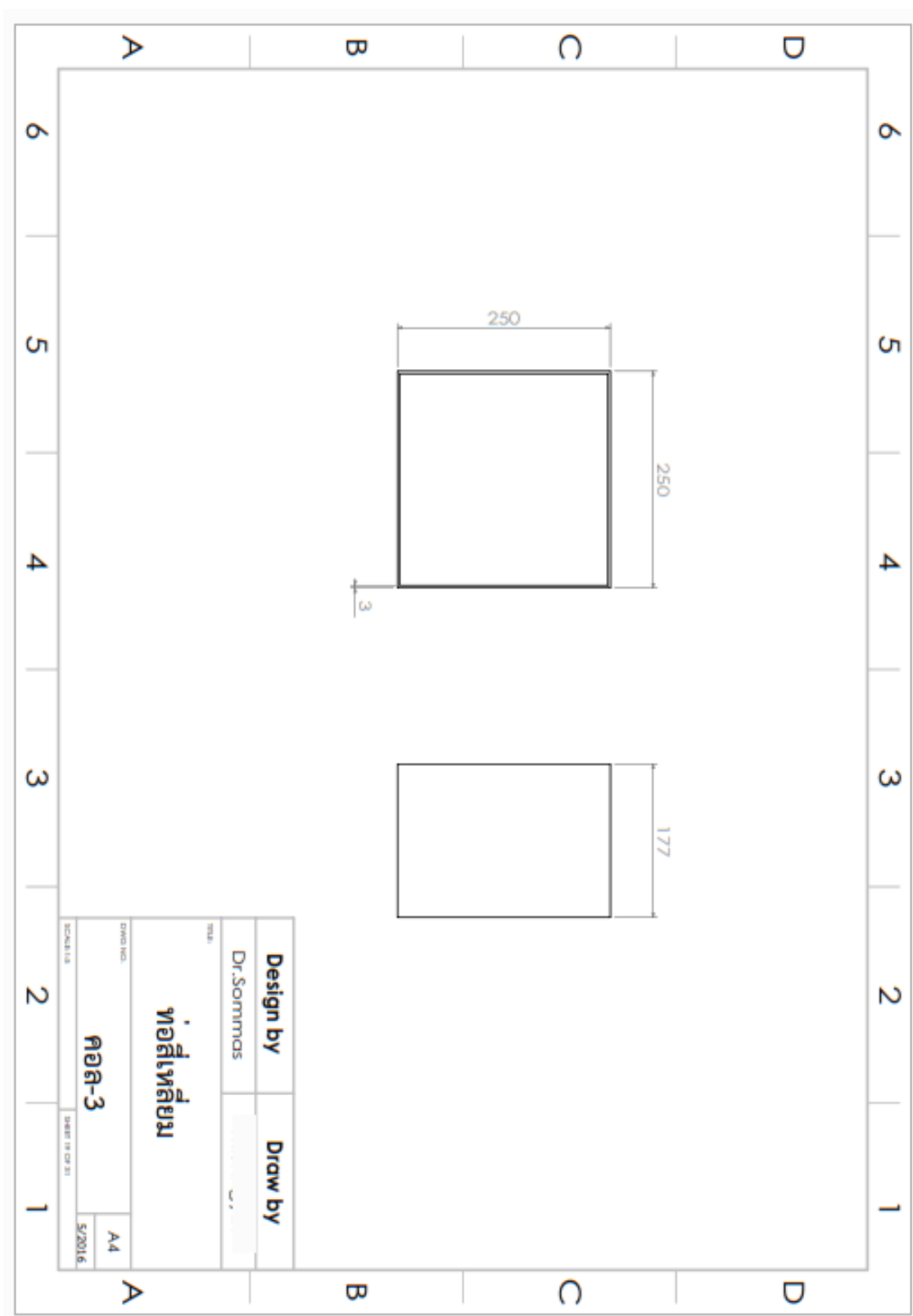
หน้าแปลนท่อของห้องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนแบบสลับทิศทางที่ผลิตจาก
เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง



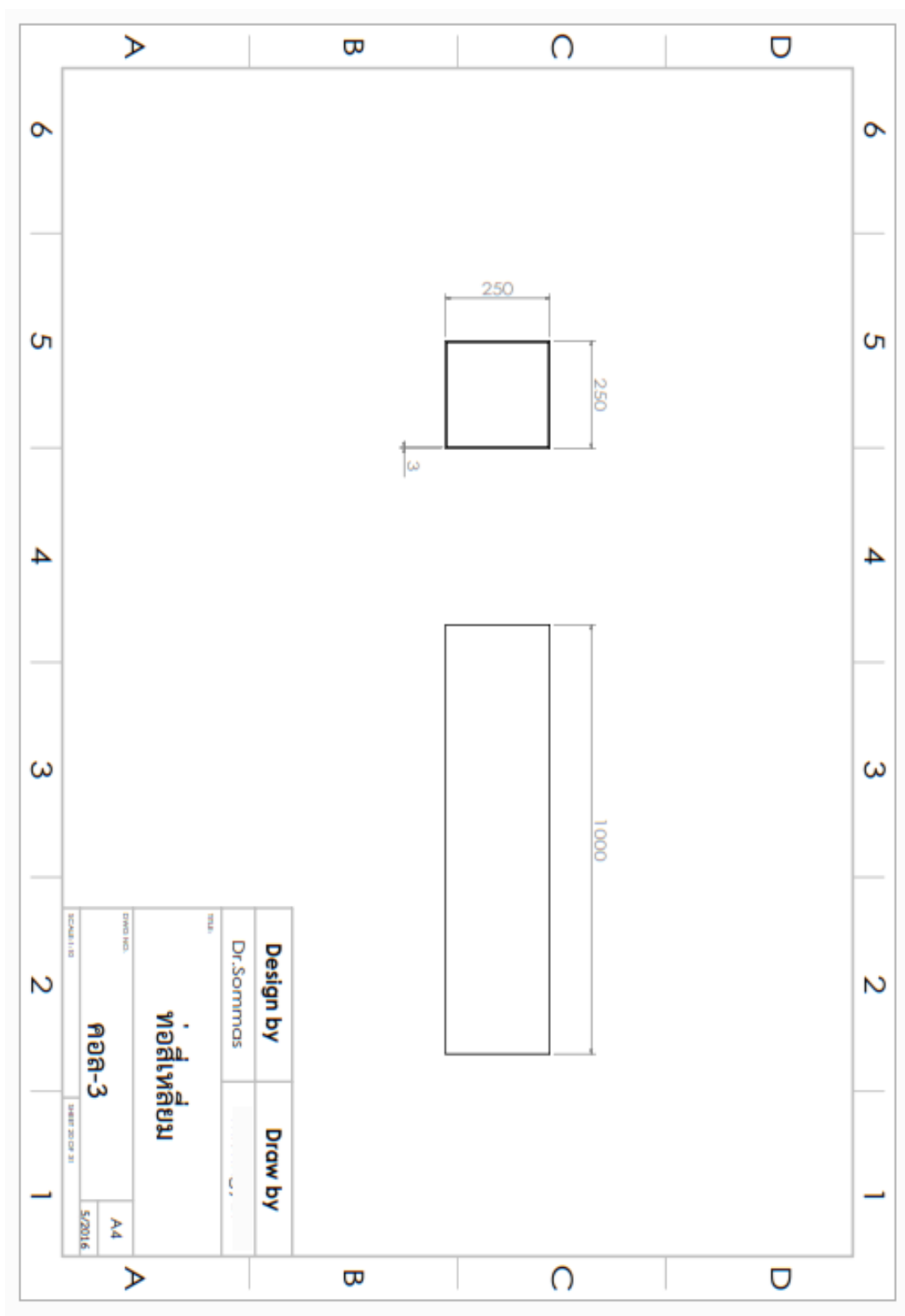
หน้าแปลนท่อของห้องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนแบบสลับทิศทางที่ผลิตจาก
เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง



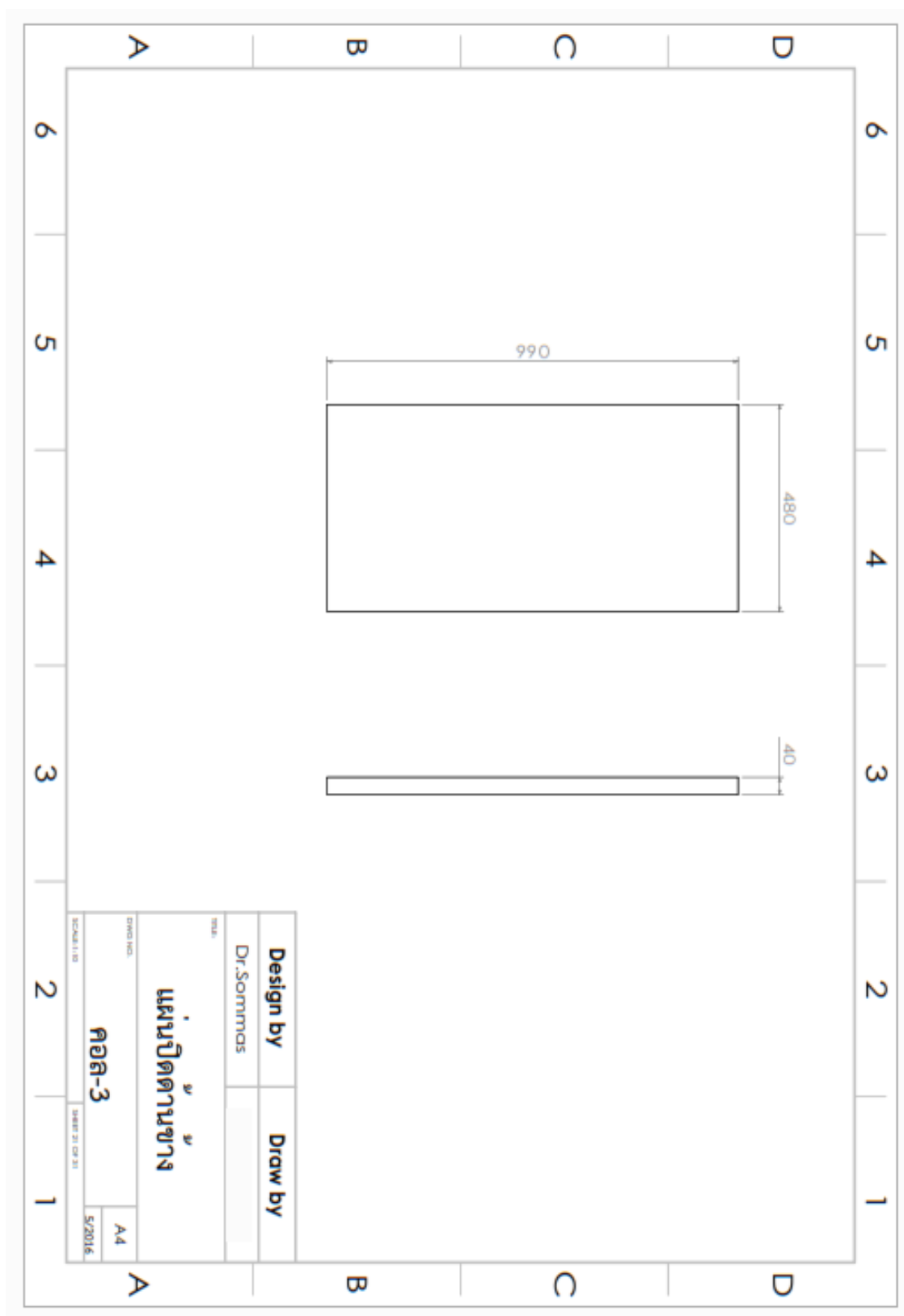
ภาคของห้องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนแบบสลับทิศทางที่ผลิตจากเตาชีวมวล
ประสิทธิภาพสูง



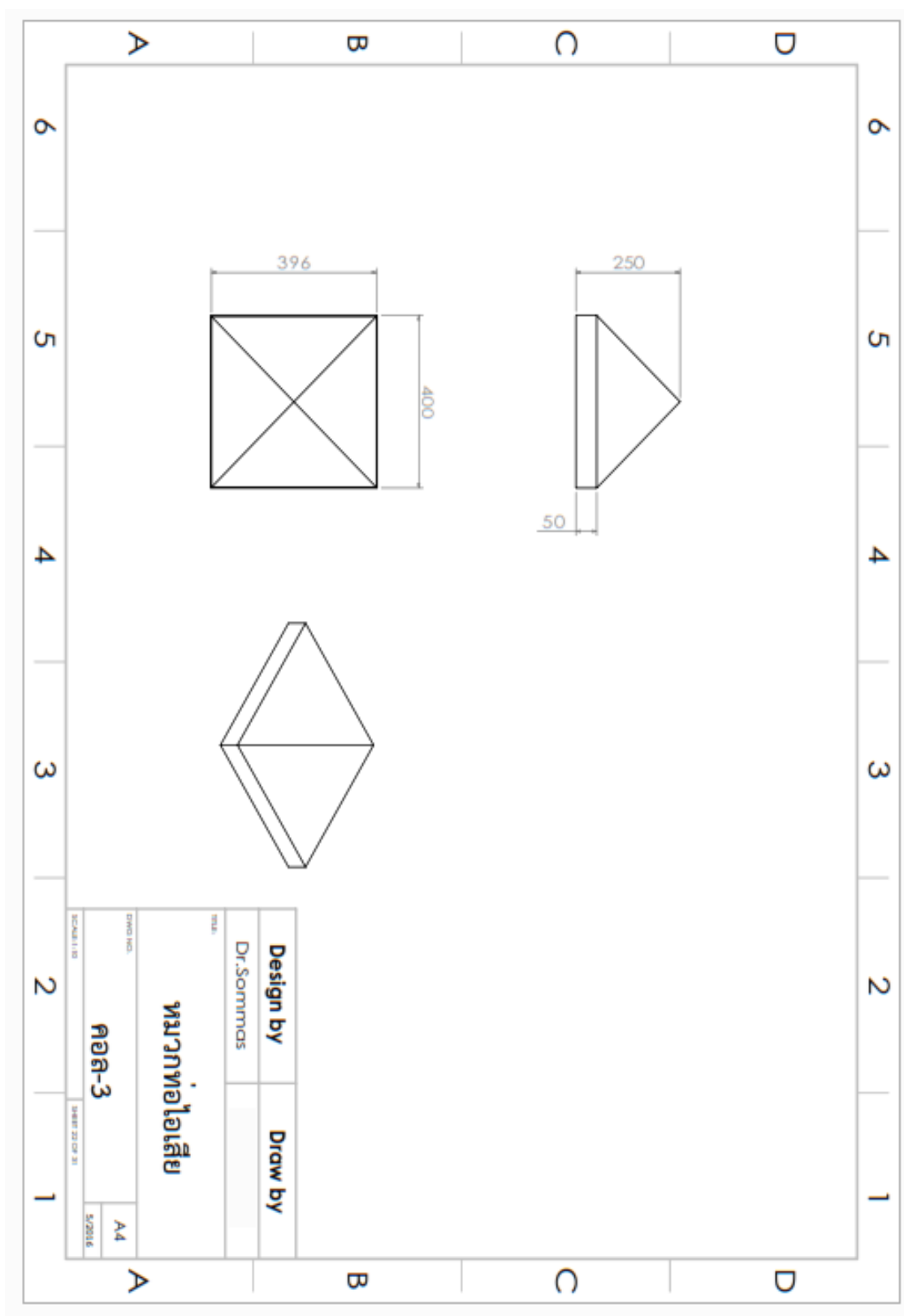
ท่อสี่เหลี่ยมของห้องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนแบบสลับทิศทางที่ผลิตจากเตา
ชีวมวลประสิทธิภาพสูง



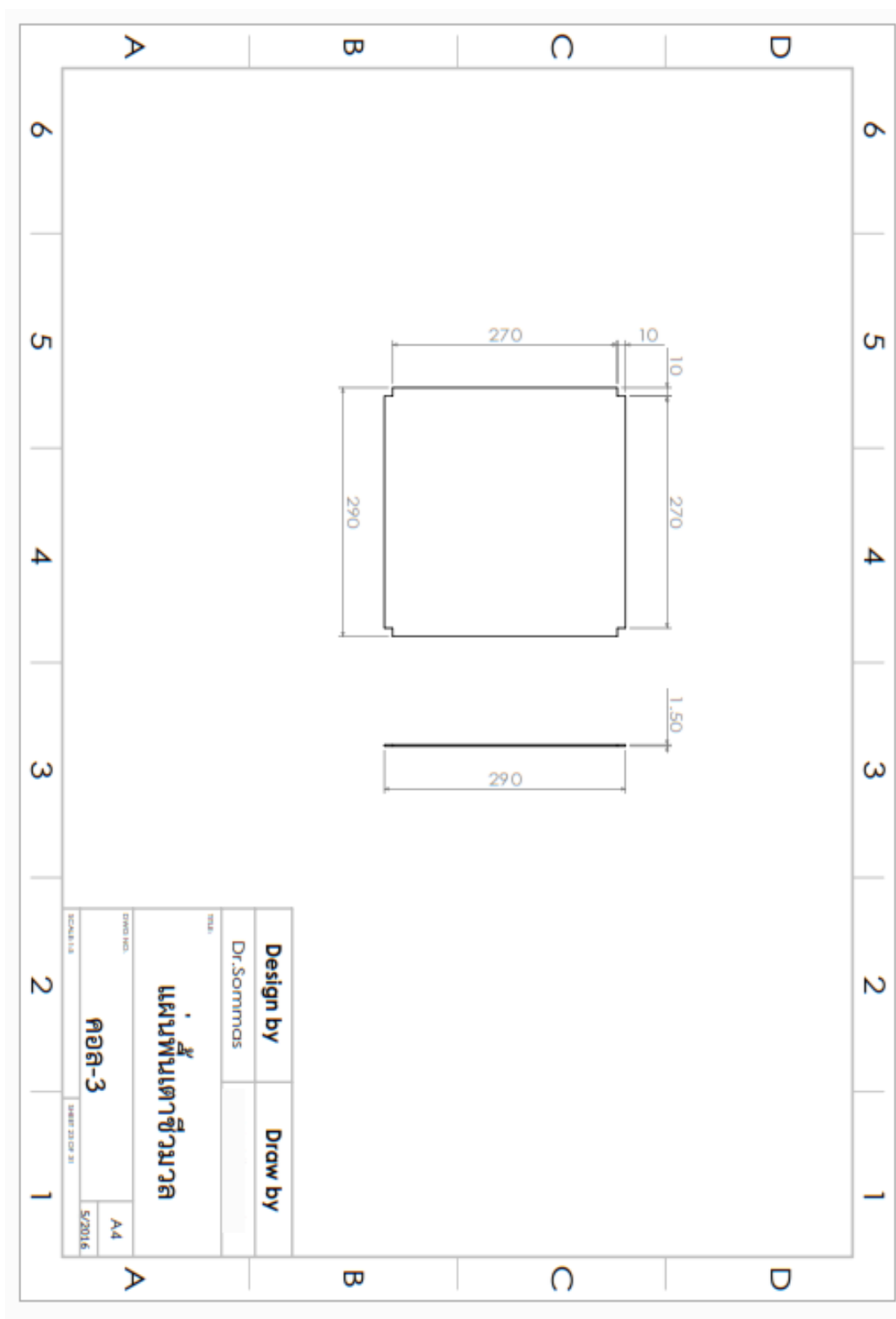
ทอสีเหลี่ยมของห้องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนแบบสลับทิศทางที่ผลิตจากเตา
ชีวมวลประสิทธิภาพสูง



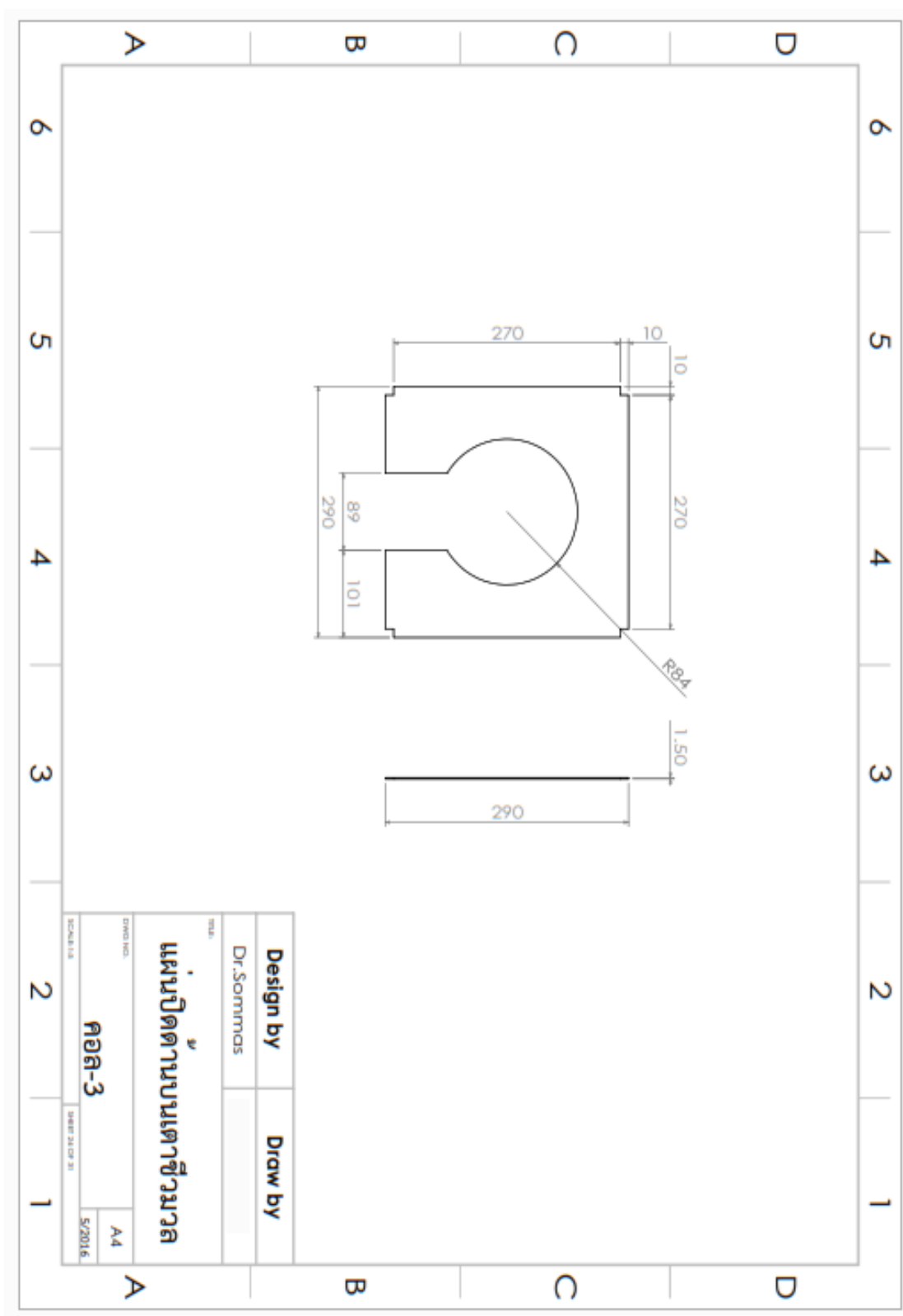
แผ่นปิดด้านข้างของห้องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนแบบสลับทิศทางที่ผลิตจาก
เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง



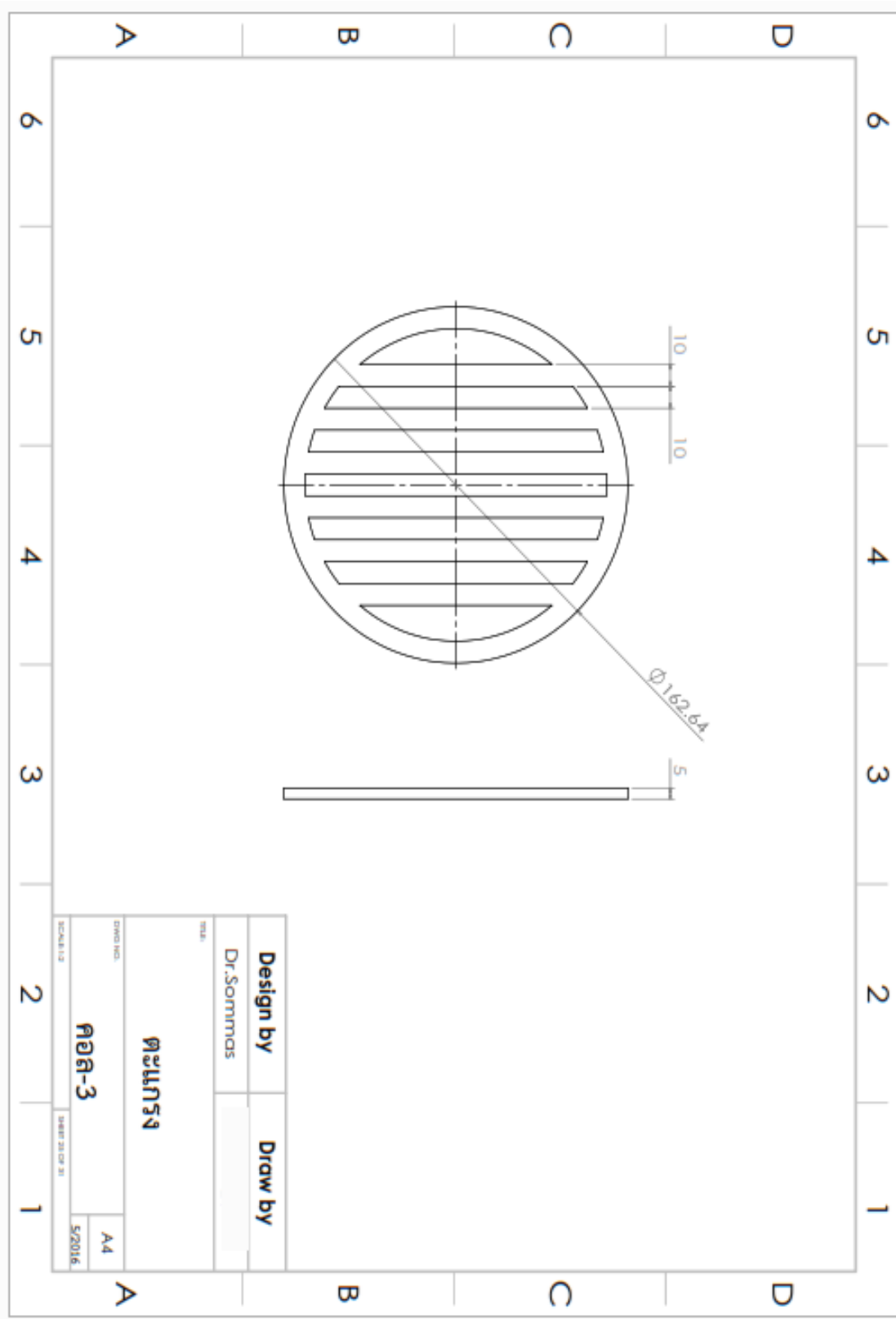
หมวดท่อไอเสียของห้องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนแบบสลับทิศทางที่ผลิตจาก
เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง



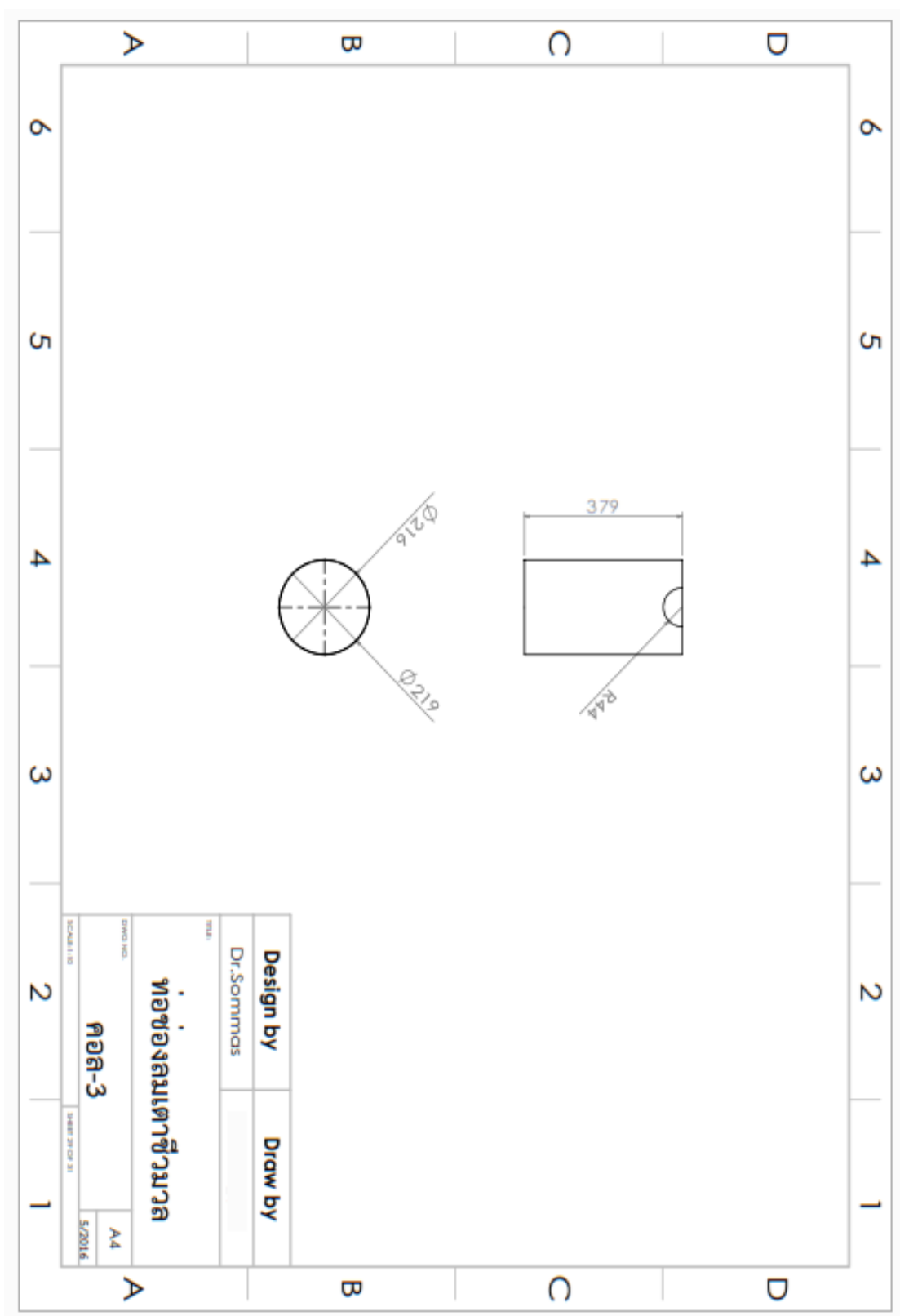
แผ่นพื้นเตาชีวมวลของห้องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนแบบสลับทิศทางที่ผลิต
จากเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง



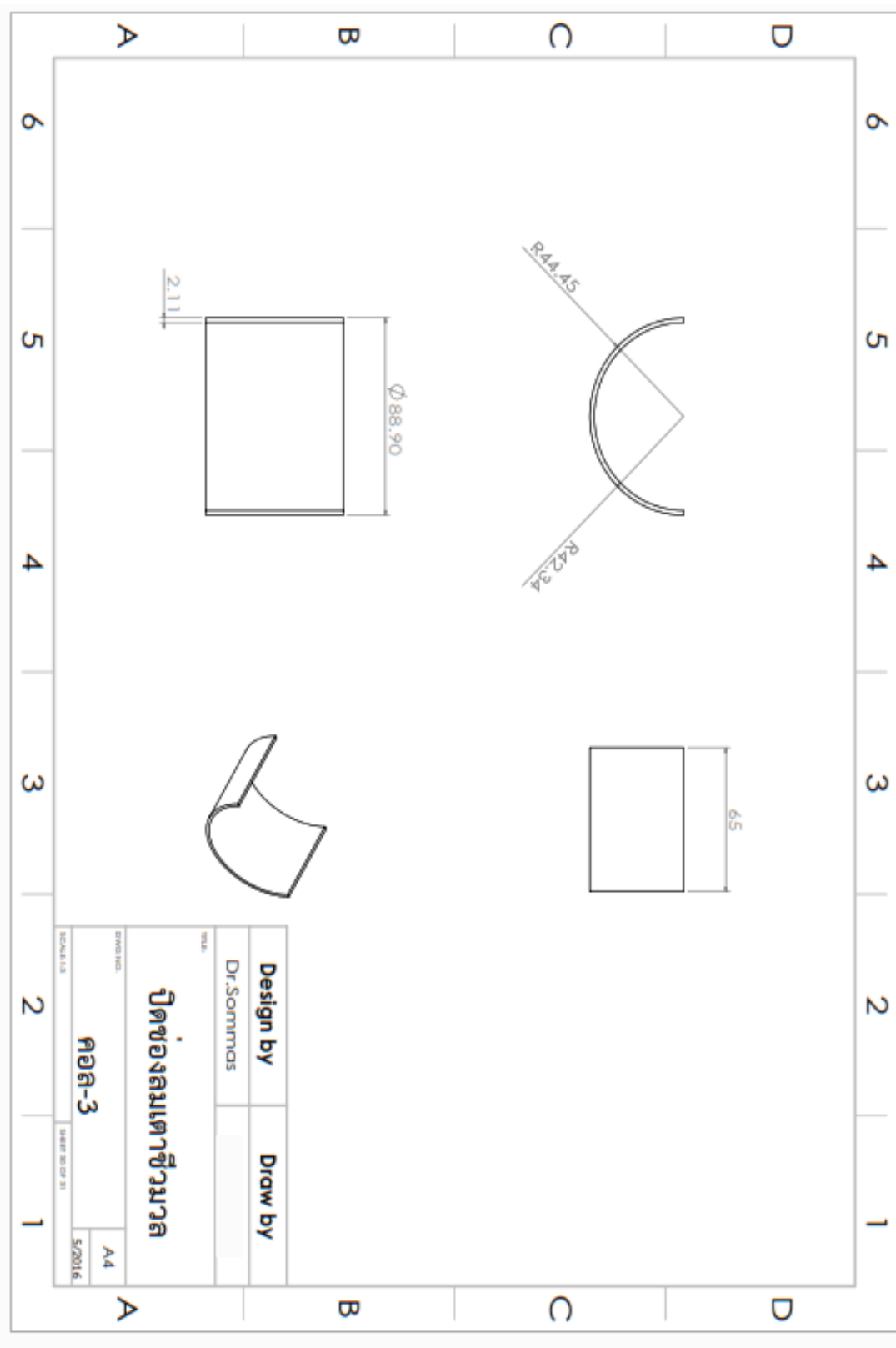
แผ่นปิดด้านบนเตาชีวมวลของห้องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนแบบสลับทิศทาง
ที่ผลิตจากเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง



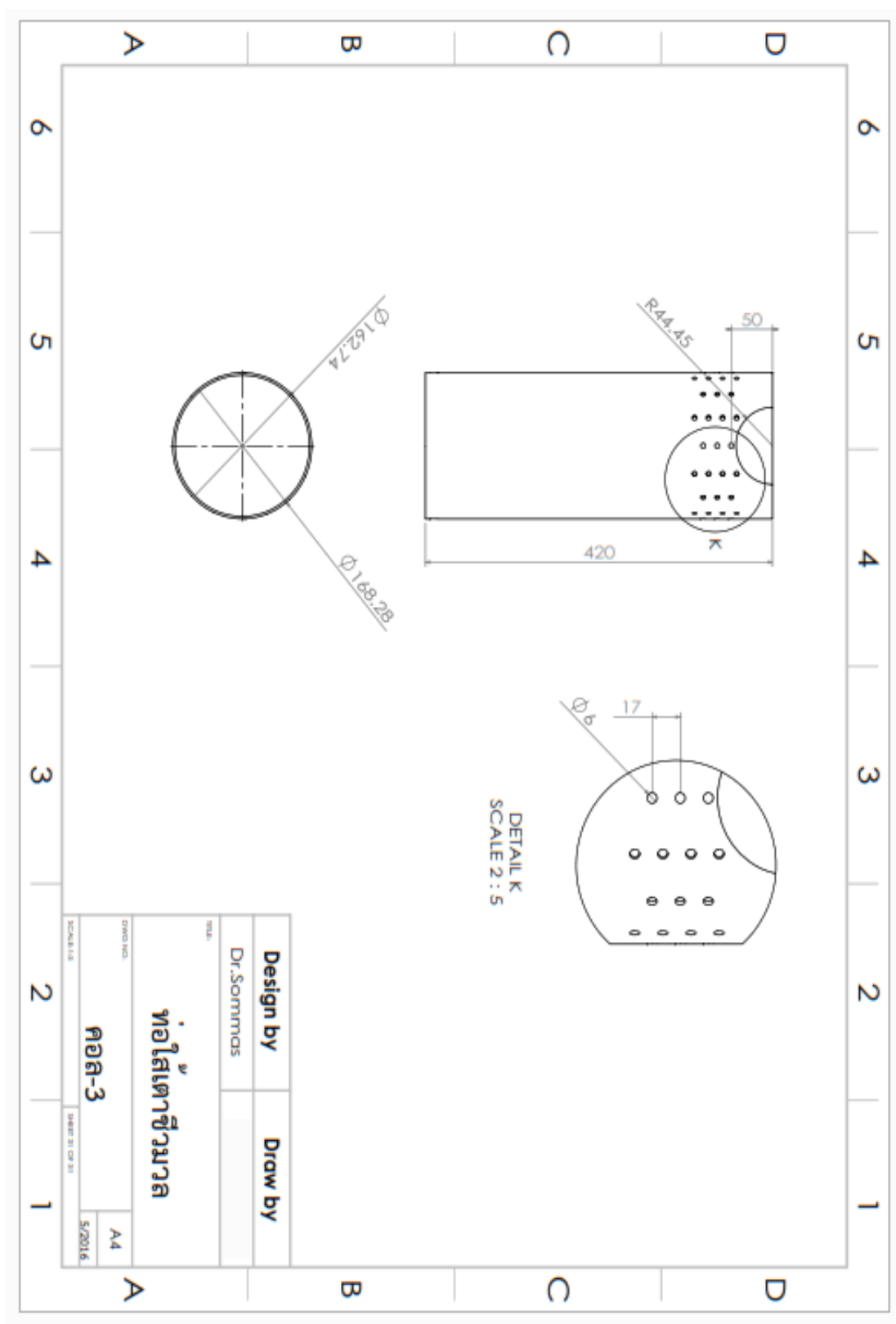
ตะแกรงเตาชีวมวลของห้องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนแบบสลับทิศทางที่ผลิต
จากเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง



ท่อช่องลมเตาชีวมวลของห้องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนแบบสลับทิศทางที่ผลิตจากเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง



ตัวปิดช่องลมเตาชีวมวลของห้องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนแบบสลับทิศทางที่ผลิตจากเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง



ท่อใส่เตาชีวมวลของห้องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนแบบสลับทิศทางที่ผลิตจากเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง



ภาคผนวก ง
บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

ข้อบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

ภาสพงศ์ภัตต์ บุญรัตน์^{1*} สมมาส แก้วล้วน¹ ภาควิชา ศึกษาศาสตร์¹ การศึกษาสมรรถนะของเครื่อง
อบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนแบบสลับทิศทางที่ผลิตจากเตาชีวมวลประสิทธิภาพ
สูง การประชุมสัมมนาวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 10 หน้า
192-199



TREC-10
The 10th Thailand Renewable Energy for Community Conference

BEA 4.0

irpc
The Public Company Limited

pvt
Public Utility

nva
Public Utility

FT

การประชุมเสวนาวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 10

พลังงานยุคเปลี่ยนผ่าน เล่าขานวิถีพอเพียง หล่อเลี้ยงชุมชนยั่งยืน

ขอขอบเกียรติบัตรนี้เพื่อแสดงว่า

นายภาสพงศ์ภัสส์ บุญรัตน์

ได้เข้าร่วมนำเสนอผลงานวิจัยภาคบรรยาย

การศึกษาศาสตร์ของเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยอากาศร้อนแบบสลับทิศทางที่ผลิตจากเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง

ณ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง อำเภอป่าพะยอม จังหวัดพัทลุง

ให้ไว้ ณ วันที่ 30 พฤศจิกายน 2560





การศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยอากาศร้อนแบบสลับทิศทางที่ผลิตจาก
เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง
Studying the Performance of the Direction Switch Air Dryer for Food Product Using
Hot Air from the High Efficiency Biomass Gasifier Stove

ภาสพงษ์ศักดิ์ วัณรัตน์¹ ภาณุภูมิ ศรีธรรมรัตน์¹ และสมมกล แก้วล้วน^{1*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ นครนายก 26120

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยอากาศร้อนแบบสลับทิศทางที่ผลิตจากเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง เครื่องอบแห้งประกอบด้วยห้องอบจำนวน 4 ห้องแต่ละห้องสามารถบรรจุภาชนะผลิตภัณฑ์ได้จำนวน 5 ถาด แต่ละถาดมีขนาดกว้าง 50 เซนติเมตรยาว 56 เซนติเมตร และขอบถาดสูง 1.5 เซนติเมตร สามารถบรรจุกล้วยได้ถาดละ 300 กรัม ลมร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง 60 ถึง 70 °C ถูกป้อนเข้าห้องอบผ่านวาล์วสลับทิศทางการไหลสู่ห้องอบที่ 1-2-3-4 และเมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที ทิศทางการไหลของลมร้อนจะถูกสลับให้ไหลย้อนกลับจาก 4-3-2-1 ตามลำดับ ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่บรรจุอยู่ในแต่ละห้องอบแห้งสม่ำเสมอโดยไม่ต้องเปิดตู้อบมาสลับตำแหน่งภาชนะผลิตภัณฑ์ในการอบแห้งใช้เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงเป็นแหล่งผลิตความร้อนและถ่ายเทให้กับอากาศสำหรับอบแห้งผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวางเพื่อให้ได้อุณหภูมิอากาศสำหรับการอบแห้งโดยสมรรถนะของเครื่องอบแห้งนี้จะถูกเปรียบเทียบระหว่างเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนร่วมกับระบบผลิตลมร้อนด้วยเตาชีวมวล และเตาแก๊สหุงต้ม (รุ่น KB-8)

จากการทดลองอบแห้งกล้วยหั่นแว่นหนา 2 ถึง 3 มิลลิเมตร ที่น้ำหนักกล้วยก่อนอบ 6,000 กรัมและมีความชื้นมาตรฐานเปียกก่อนอบที่ 72% ด้วยอุณหภูมิลมร้อน 60 ถึง 70 °C ที่อัตราการไหล 830 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงเป็นเวลา 2 ชั่วโมงโดยใช้เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงที่มีอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ 200-300 กรัมทุกๆ 5 นาที รวมปริมาณเชื้อเพลิงกะละมะพร้าวที่ใช้ตลอดช่วงการอบแห้งเท่ากับ 4.8 กิโลกรัม ผลจากการทดลองอบแห้งแบบสลับทิศทางการไหลของลมร้อนพบว่าน้ำหนักกล้วยแห้งมีค่า 1,813 กรัม ความชื้นสุดท้ายในห้องที่ 1-4 มีค่า 6.44, 7.93, 7.64 และ 7.36 % ตามลำดับ และมีอัตราการอบแห้ง 523 g/h ใกล้เคียงกันทั้ง 4 ห้อง ในขณะที่อบแห้งแบบไม่สลับทิศทางการไหลของลมร้อนพบว่าน้ำหนักกล้วยแห้งมีค่า 1,872 กรัม ความชื้นสุดท้ายในห้องที่ 1-4 มีค่า 5.85, 9.60, 12.21 และ 14.01 % ตามลำดับ และมีอัตราการอบแห้งที่อบแห้งที่ 1-4 เท่ากับ 527, 520, 511 และ 506 g/h ตามลำดับ โดยมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะที่ 1.15 kg/kg ของน้ำที่ระเหย มีอัตราการอบแห้งที่ 2.1 kg/h ซึ่งค่าใช้จ่ายในการอบแห้งกล้วยประมาณ 2.56 บาทต่อกิโลกรัมกล้วยแห้ง เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งที่ใช้เชื้อเพลิง LPG ซึ่งมีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานประมาณ 16.5 บาทต่อกิโลกรัมกล้วยแห้งซึ่งเครื่องอบแห้งสามารถลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานได้ 14 บาทต่อกิโลกรัมกล้วยแห้ง

คำสำคัญ: การอบแห้ง, เตาแก๊สชีวมวล, ลมร้อนสลับทิศทาง, กล้วยหั่นแว่น

*Corresponding author: Tel.: 089-7659091. E-mail address: sommas@g.swu.ac.th

บทนำ

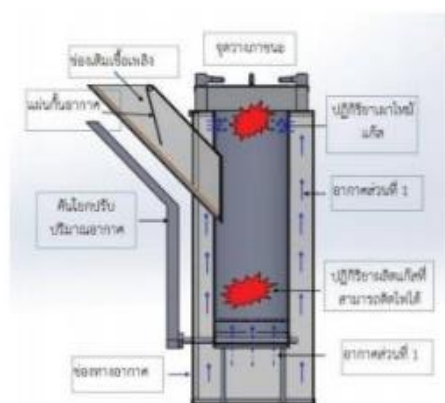
การอบแห้งเป็นกระบวนการลดความชื้นโดยการถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุที่ขึ้นภายใต้สภาวะที่ควบคุมเพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหยโดยใช้ความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการระเหยซึ่งโดยปกติแล้วผลิตผลทางการเกษตรส่วนใหญ่จำเป็นต้องมีความชื้นค่อนข้างสูงขณะทำการเก็บเกี่ยวทำให้เก็บรักษาได้ไม่ผ่านการอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการรักษาคุณภาพ ลดความสูญเสีย ลดปริมาณ ลดน้ำหนัก และยืดเวลาการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร การอบแห้งนั้นถือเป็นกระบวนการที่ไม่ซับซ้อนมาก แต่การวางแผนดำเนินการอบแห้ง (Drying strategy) ภายใต้สภาวะอากาศและเงื่อนไขที่กำหนดก็ถือเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงเพื่อให้ได้วิธีการดำเนินการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุด นอกจากนี้การพิจารณาแหล่งพลังงานสำหรับการอบแห้งก็ถือเป็นสิ่งที่จำเป็นเช่นกัน การวิจัยได้พัฒนานำเชื้อเพลิงชีวมวลซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้เป็นแหล่งพลังงาน เพื่อสนองตอบต่อความต้องการของชุมชนในการลดต้นทุนด้านพลังงานซึ่งปัจจุบันมีการใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงอีกทั้งยังช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการเปลี่ยนชนิดเชื้อเพลิงจากเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลได้วิจัยและศึกษาข้อมูลเครื่องอบแห้งของชุมชน (การอบแห้งกล้วยหั่น) พบว่าการอบแห้งของชุมชนดังกล่าวใช้เชื้อเพลิง LPG ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่มีราคาสูงอีกทั้งยังมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นในอนาคตอันใกล้อีกทั้งลักษณะของเครื่องอบแห้งมีการกระจายลมที่ไม่สม่ำเสมอส่งผลให้การอบแห้งต้องมีการพลิกกลับผลิตภัณฑ์ในระหว่างอบ ซึ่งต้องทำการเปิดตู้อบเพื่อดำเนินการดังกล่าวจึงเป็นเหตุให้กระบวนการอบแห้งมีความยุ่งยากและสิ้นเปลืองเวลาและเกิดการสูญเสียพลังงานในระหว่างเปิดตู้อบดังกล่าวด้วยในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่องอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อนต้องคำนึงถึงความเร็วลมและช่วงเวลาการสลับลมที่เหมาะสม ในการอบแห้งของกล้วยจากความชื้นเริ่มต้น 68.67%(w.b.)จนเหลือความชื้นสุดท้าย 14.00 %(w.b.) ใช้ความเร็วลม 0.88 m/s โดยไม่ต้องสลับลมร้อน [1]

ในขณะที่ราคาก๊าซ LPG สำหรับภาคครัวเรือน และวิสาหกิจชุมชนเป็นราคาที่เบี่ยงเบนจากราคาที่แท้จริงเนื่องจากมาตรการพยุงราคาตามนโยบายของรัฐบาล อย่างไรก็ตามในปี ค.ศ. 2015 ซึ่งประเทศไทยจะเข้าสู่ประชาคมเศรษฐกิจอาเซียน หรือ AEC (Asian Economic Community) ทำให้ประเทศไทยต้องปรับราคาก๊าซ LPG (วิสัย พรกิริติวัฒน์ 2555) ให้สะท้อนต้นทุนที่แท้จริงและใกล้เคียงกับประเทศในกลุ่มอาเซียน เพื่อหลีกเลี่ยงจากผลกระทบจากการปรับราคา LPG จึงมีการนำเชื้อเพลิงชีวมวลมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการอบแห้งเพื่อเป็นทางเลือกหนึ่งในการลดต้นทุนค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงโดยใช้เตาชีวมวลกานีดลมร้อนสำหรับการอบกล้วยขนาดบรรจุ 300 กิโลกรัมจากความชื้นเริ่มต้น 68.67%(w.b.)เหลือความชื้น 14.0 %(w.b.) ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 38 MJ/kg ของน้ำระเหย [2] และปรับปรุงสมรรถนะเครื่องอบแห้งโดยใช้แก๊ส LPG รุ่น KB-8 อบแห้งกล้วยหั่นที่ความชื้นเริ่มต้น 68.67 %db ลดลงเหลือร้อยละ 14%db พลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง 16.42 MJ/kgH₂Oevap พบว่าประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งเพิ่มขึ้นจาก 14% เป็น 19.8% และสามารถประหยัดเชื้อเพลิงชีวมวลในการอบแห้งได้ถึง 23% [3] เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตและลดต้นทุนค่าใช้จ่ายจากการวิจัยจึงทำการศึกษาการอบแห้งและการใช้เตาชีวมวลซึ่งใช้ไม้ฟืนเป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อน ร่วมกับการใช้ระบบจ่ายลมร้อนแบบสลับทิศทางไหลในการสลับทิศทางการไหลของความร้อน ซึ่งการใช้ไม้ฟืนเป็นเชื้อเพลิงในการอบแห้ง จะช่วยลดต้นทุนในการใช้เชื้อเพลิงได้เป็นอย่างมาก อีกทั้งระบบจ่ายลมร้อนแบบสลับทิศทางการไหลยังช่วยให้อบแห้งกล้วยแวนได้ทั่วถึงยิ่งขึ้น โดยระบบจ่ายลมร้อนแบบสลับทิศทางการไหลจะทำหน้าที่สลับทิศทางการไหลของลมร้อน ลมร้อนจะทำหน้าที่ลดความชื้นจากผลิตภัณฑ์ทำให้ความชื้นระเหยออกมาและพัดออกไปยัง

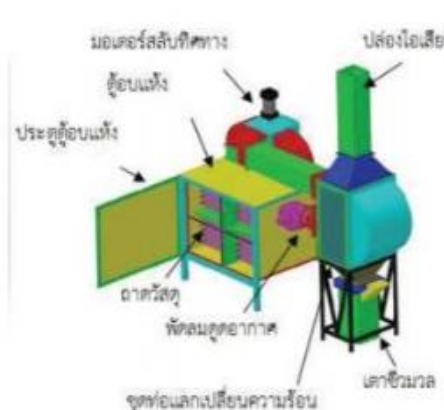
รวดเร็ว เนื่องจากระบบจ่ายลมร้อนแบบสลับทิศทางการไหลนั้นจะมีลมร้อนหมุนเวียนอยู่ในระบบตลอดเวลา นอกจากนี้สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบห้องผลิตผลทางการเกษตร คือ กลิ่น สี และเนื้อของผลิตผล ซึ่งต้องเป็นไปตามความต้องการของตลาด ตัวแปรที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตผลดังกล่าว ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นและระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง การผลิตลมร้อนสำหรับการอบแห้งผลิตภัณฑ์โดยใช้ระบบแลกเปลี่ยนความร้อนแบบชุดกลุ่มท่อ (Tube bank) เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างแหล่งผลิตความร้อนจากเตาเผาชีวมวลผสมกับอากาศ

เตาแก๊สชีวมวล [4]

เตาแก๊สชีวมวลคือเตาความร้อนที่มีการทำงานแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือขั้นตอนการแปรสภาพเชื้อเพลิงแข็งเป็นแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ และขั้นตอนการเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์เพื่อผลิตความร้อน แสดงดังภาพที่ 1 เตาแก๊สชีวมวลซึ่งเป็นเตาที่มีผนัง 2 ชั้น (ห้องปฏิบัติการและช่องอุณหอากาศ) มีห้องเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิง ช่องซีด้าออก และช่องสำหรับใส่ชีวมวล มีการเพิ่มวาล์วควบคุมการป้อนอากาศส่วนที่ 1 เพื่อสามารถควบคุมปฏิกิริยาการสันดาปให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยไม่อาศัยพัดลมเป่าอากาศ โดยวาล์วนี้เป็นวาล์วที่ควบคุมการป้อนอากาศส่วนที่ 1 เข้าสู่ห้องห้องปฏิบัติการ โดยสามารถหมุนเปิดได้ ในแนวแกนสามารถเร่งหรือความร้อนได้และมีช่องที่ใช้สำหรับเติมเชื้อเพลิงบริเวณด้านหน้าเตาที่สามารถเติมเชื้อเพลิงได้ง่ายและสามารถดูปริมาณเชื้อเพลิงคงเหลือในเตาได้ด้วย



ภาพที่ 1 เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง



ภาพที่ 2 เครื่องอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อนด้วยพลังงานชีวมวล



เครื่องอบแห้ง

เครื่องอบแห้งมีการไหลเวียนลมร้อนจากแหล่งผลิตลมร้อนด้วยเตาชีวมวลซึ่งลมร้อนจะลอยขึ้นผ่านชุดท่อแลกเปลี่ยนความร้อนชุดที่หนึ่งและชุดที่สองต่อนั้นระบายออกสู่ภายนอกผ่านปล่องไอเสียในเวลาเดียวกันพัดลมดูดอากาศสำหรับอบแห้งเข้าไปรับความร้อนจากชุดท่อแลกเปลี่ยนความร้อนชุดที่หนึ่ง ต่อนั้นไหลวนกลับเข้าไปรับความร้อนเพิ่มด้วยชุดท่อแลกเปลี่ยนความร้อนชุดที่สอง และป้อนอากาศร้อนสำหรับอบแห้งเข้าสู่ห้องอบแห้งผ่านวาล์วสลับทิศทาง การไหลเพื่อควบคุมอากาศร้อนเข้าสู่ห้องอบแห้งที่ 1-2-3-4 และระบายออกสู่ภายนอกผ่านช่องระบายอากาศด้านหลังตู้อบ ปรับวาล์วสลับทิศทางให้การไหลให้อากาศร้อนไหลย้อนกลับจากห้องอบแห้งที่ 4-3-2-1 และระบายออกสู่ภายนอกผ่านช่องระบายอากาศด้านหลังตู้อบตามลำดับ อากาศร้อนสำหรับอบแห้งมีการวัดอุณหภูมิทางเข้าและทางออกตู้อบแห้งตามภาพที่ 2

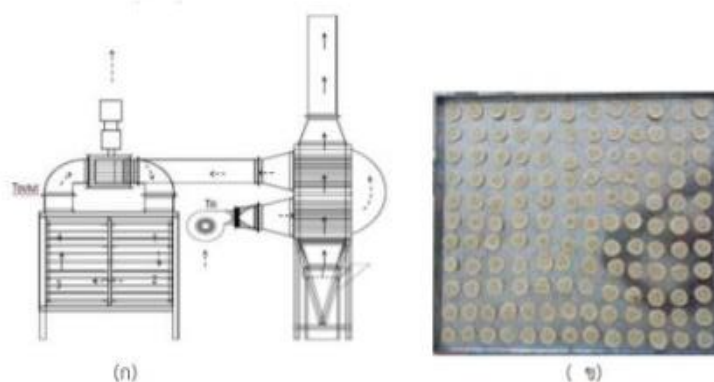
วิธีการวิจัย

การทดสอบสมรรถนะเครื่องอบแห้งพิจารณาจากตัวแปรอัตราการอบแห้ง อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ และอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะโดยเปรียบเทียบระหว่างเครื่องอบแห้งที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลกับเชื้อเพลิง LPG โดยการปรับอุณหภูมิเข้าตู้อบในช่วงอุณหภูมิ 60-70 °C ด้วยการปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิง

ทดสอบอบแห้งกล้วยหั่นแว่นหนา 1 ถึง 2 มิลลิเมตร จำนวน 20 ถาดน้ำหนักรวมก่อนอบแห้ง 6,000 กรัมด้วยอุณหภูมิลมร้อน 60 ถึง 70 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 830 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง อากาศร้อนถูกป้อนเข้าสู่ห้องอบแห้งผ่านวาล์วสลับทิศทางให้การไหลเข้าสู่ห้องอบแห้ง 1-2-3-4 และระบายออกสู่ภายนอกผ่านช่องระบายอากาศด้านหลังตู้อบเมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที ทิศทางการไหลของอากาศร้อนจะถูกลบแบบอัตโนมัติโดยวาล์วสลับทิศทาง อากาศร้อนไหลย้อนกลับจากห้องอบแห้ง 4-3-2-1 และระบายออกสู่ภายนอกผ่านช่องระบายอากาศด้านหลังตู้อบตามลำดับ ในเวลาเดียวกันเชื้อเพลิงจะลามะพร้าวถูกป้อนเข้าเตาชีวมวลที่ 200-300 กรัมทุกๆ 5 นาที เพื่อเป็นแหล่งความร้อนให้อากาศร้อน ซึ่งในแต่ละการทดลองใช้เวลาในการอบแห้ง 2 ชั่วโมง โดยตลอดช่วงเวลาที่ทำการทดลองจะทำการวัดอุณหภูมิด้วยเครื่องวัดและบันทึกอุณหภูมิทุกๆ 30 วินาที จนครบ 2 ชั่วโมง และมีการสุ่มตัวอย่างขึ้นกล้วยในแต่ละห้องอบมาทดสอบหาความชื้นทุก 5 นาที ตามมาตรฐาน ASTM E1358-97

ในขณะที่การทดสอบแห้งกล้วยหั่นแว่นแบบไม่สลับทิศทางไหลของอากาศร้อนก็กระทำเช่นเดียวกันแต่จะใช้แหล่งความร้อนจากเตาแก๊สชุดรุ่น KB-8 แทนเตาชีวมวล โดยเงื่อนไขอื่นๆ ยังคงเป็นเช่นเดิม

FC
021

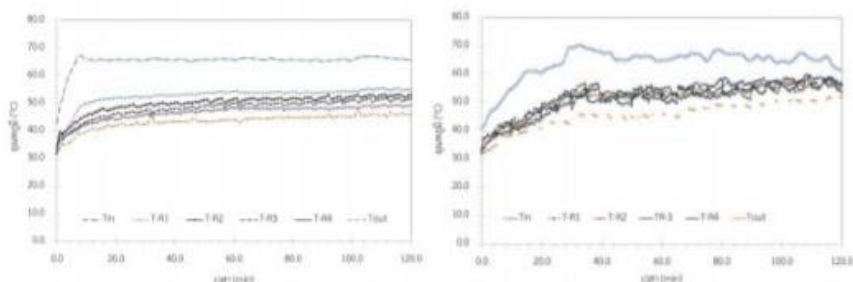


ภาพที่ 3 แสดงทิศทางการไหลเวียนของลมร้อนในเครื่องอบแห้ง (ก) ลักษณะก๊วยหันแว่นก่อนอบแห้ง (ข)

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

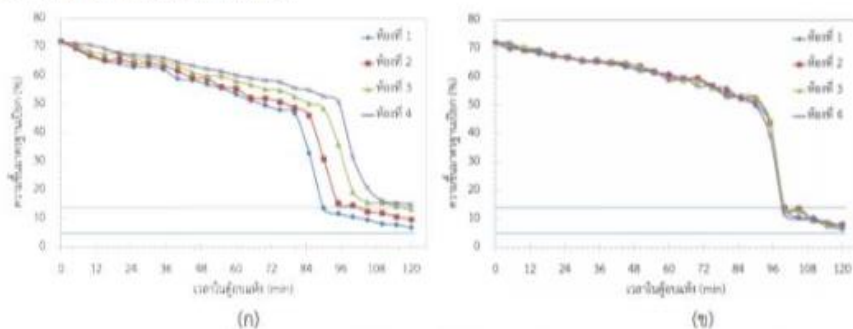
จากผลการทดลองอบแห้งกล้วยน้ำว้าหันแว่นด้วยอากาศร้อนที่ผลิตจากเตาซีมวอลประสิทธิภาพสูงซึ่งใช้กะลามะพร้าวเป็นเชื้อเพลิง โดยกะลามะพร้าวมีค่าความร้อนทางต่ำ 16.31 MJ/kg โดยการทดลองมีการสลับทิศทางการไหลของอากาศร้อนทุกๆ 5 นาที ผลการตรวจวัดอุณหภูมิเข้า-ออกห้องอบแห้ง และอุณหภูมิในห้องอบแห้งที่ 1-4 แสดงดังภาพที่ 4(ข) ซึ่งจากกราฟที่ได้ พบว่าอากาศร้อนที่ป้อนเข้าสู่ห้องอบแห้งมีอุณหภูมิประมาณ 65 °C เริ่มต้นโดยไหลเข้าห้องอบแห้งที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ และไหลออกจากห้องอบแห้ง โดยอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งมีแนวโน้มลดลงตามทิศทางการไหลของอากาศร้อน ซึ่งอุณหภูมิในห้องอบแห้งที่ 4 จะต่ำสุด เมื่อครบเวลา 5 นาที ทิศทางการไหลของอากาศร้อนจะถูกสลับแบบอัตโนมัติ อากาศร้อนจะไหลย้อนทิศทางเดิมโดยจะไหลเข้าห้องอบแห้งที่ 4,3,2 และ 1 โดยอุณหภูมิอากาศร้อนในห้องอบที่ 4 จะมีระดับสูงสุด และในห้องอบแห้งที่ 1 ต่ำสุด ซึ่งมีความแตกต่างจากกรณีที่มีการสลับทิศทางการไหลของอากาศร้อน (ภาพที่ 4(ก)) อุณหภูมิในห้องอบที่ 1 จะสูงสุดเมื่อเทียบกับอีก 3 ห้องช่วงของการอบแห้ง และระดับอุณหภูมิลดลงตามลำดับในห้องอบแห้งที่ 2, 3 และ 4

FC
021



ภาพที่ 4 อุณหภูมิในห้องอบแห้งที่ 1-4 เมื่อไม่มีการสลับทิศทางลมร้อน (ก) และมีการสลับทิศทางลมร้อน (ข)

จากภาพที่ 4(ก) แสดงให้เห็นการลดลงของอุณหภูมิเมื่อลมร้อนไหลผ่านห้องอบที่ 1-4 เมื่อไม่มีการสลับทิศทางลมของอากาศร้อนและอากาศร้อนไหลออกจากห้องอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำโดยเมื่อระยะเวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้น อุณหภูมิในห้องอบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากความชื้นในวัสดุมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่การอบแห้งแบบสลับทิศทางลมของอากาศร้อนพบว่าในช่วงแรกค่าอุณหภูมิในห้องอบแห้งที่ 1 สูง และค่อยลดลงไปในห้องอบที่ 2, 3 และ 4 หลังจากเวลาผ่านไปทุกๆ 5 นาที วาสลับทิศทางลมของลมร้อนทำงานทำให้ลมร้อนเข้าสู่ห้องอบที่ 4, 3, 2 และ 1 ตามลำดับ อุณหภูมิในห้องอบที่ 4 สูงสุดแล้วค่อยๆ ลดลงตามลำดับสู่ห้องอบแห้งที่ 3, 2 และ 1 การสลับทิศทางลมของลมร้อนทำให้อุณหภูมิของห้องอบที่ 1, 2, 3, 4 และมีอุณหภูมิที่สม่ำเสมอทั้ง 4 ห้อง ทำให้กล้วยน้ำว้าแห้งอย่างสม่ำเสมอ ส่วนการอบแห้งแบบไม่สลับทิศทางนั้น จากการผลการทดลองจะเห็นว่า การอบแห้งแบบไม่สลับทิศทางค่าของอุณหภูมิที่ 1, 2, 3 และ 4 จะแตกต่างกัน การไม่สลับทิศทางลมของลมร้อนทำให้อุณหภูมิในห้องอบแตกต่างกัน จึงทำให้กล้วยน้ำว้าแห้งอย่างไม่สม่ำเสมอ



ภาพที่ 5 การลดลงของความชื้นวัสดุในห้องอบแห้งที่ 1-4 เมื่อไม่มีการสลับทิศทางลมร้อน (ก) และมีการสลับทิศทาง (ข)

จากผลการทดลองการอบแห้งแบบสลับทิศทางและการอบแห้งแบบไม่สลับทิศทาง นำผลความชื้นมาตรฐานเปียกมาเปรียบเทียบโดยพิจารณาจากค่าความชื้นเริ่มต้นของกล้วยน้ำว้าก่อนอบแห้ง ระหว่างอบแห้ง และจุดสิ้นสุดการอบแห้ง โดยทำการวิเคราะห์หาค่าความชื้นทุกๆ 5 นาที จากตัวอย่างกล้วยน้ำว้าทั้ง 4 ห้อง จากกราฟผลการทดลอง (ภาพที่ 5) จะเห็นว่าค่าความชื้นของกล้วยน้ำว้าจากการอบแห้งแบบสลับทิศทางการไหลของอากาศร้อนในเวลา 120 นาที มีแนวโน้มลดลงอย่างสม่ำเสมอทั้งสี่ห้องอบ โดยความชื้นที่จุดสิ้นสุดการอบแห้งมีค่าใกล้เคียงกันเพราะอุณหภูมิในแต่ละห้องมีความสม่ำเสมอจากภาพที่ 4 ส่วนการอบแห้งแบบไม่สลับทิศทางจะเห็นว่าค่าความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ในแต่ละห้องมีความแตกต่างกันทั้งสี่ห้องเนื่องจากอุณหภูมิในห้องอบทั้งสองห้องที่ไม่สม่ำเสมอ

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยลมร้อนแบบสลับทิศทางที่ผลิตจากเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสำหรับวัตถุประสงค์ที่นำมาทดลอง คือ กล้วยน้ำว้าชนิดห่าม ส่วนเชื้อเพลิงที่ใช้ คือ กะลามะพร้าว โดยศึกษาผลจากการสลับทิศทางการไหลของลมร้อนที่ส่งผลต่ออุณหภูมิของร้อนภายในห้องอบแห้งทั้ง 4 ห้อง เพื่อหาอัตราการใช้เชื้อเพลิง และความสัมพันธ์ของค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์หลังอบแห้ง ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

จากการทดลองอบแห้งกล้วยน้ำว้าที่อุณหภูมิ $60^{\circ}\text{C} - 70^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบแห้งกล้วยน้ำว้าโดยทำการทดลองอบแห้งเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งได้ทำการทดลองสองแบบคือการสลับทิศทางและไม่สลับทิศทางการไหลของลมร้อน ซึ่งผลที่ได้เมื่อทำการสลับทิศทางการไหลของลมร้อนทุกๆ 5 นาที คือ วัสดุแห้งสม่ำเสมอในทุกห้องอบโดยมีค่าความชื้นสุดท้ายที่ 6.44-7.93% และกรณีไม่มีการสลับทิศทางการไหลของลมร้อนพบว่าความชื้นสุดท้ายในห้องที่ 1-4 มีค่า 5.85, 9.60, 12.21 และ 14.01 % ตามลำดับ ซึ่งถือว่าวัสดุแห้งไม่สม่ำเสมอ โดยทั้ง 2 กรณีมีค่าอัตราการใช้เชื้อเพลิงไม่แตกต่างกันคือมีค่าประมาณ 2.064-2.093 kg/h

ในการทดลองครั้งนี้เมื่อเทียบอัตราการใช้เชื้อเพลิงระหว่างชีวมวลกับ LPG พบว่า เตาชีวมวลใช้เชื้อเพลิงมากกว่าแก๊ส LPG ตลอดช่วงเวลารอบแห้ง โดยเตาชีวมวลใช้เชื้อเพลิงทั้งหมด 4.8 kg สำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์กล้วยน้ำว้าแห้ง 1.813 -1.872 kg ซึ่งเชื้อเพลิงมีราคาก็ใกล้เคียง 1 บาท คิดเป็นเงิน 4.8 บาท คิดเป็นค่าใช้จ่ายในการอบแห้งประมาณ 2.56 บาท/kg (ผลิตภัณฑ์แห้ง) และการอบแห้งที่ใช้แก๊ส LPG นั้น ใช้เชื้อเพลิงแก๊สทั้งหมดประมาณ 1.54 kg (ราคาเชื้อเพลิงมีค่าเท่ากับ 20 บาทต่อถัง 15kg) ซึ่งคิดเป็นค่าใช้จ่ายในการอบแห้งประมาณ 16.45 บาท/kg (ผลิตภัณฑ์) ดังนั้นการใช้เตาชีวมวลเป็นแหล่งความร้อนมีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานต่ำกว่าการใช้แก๊ส LPG ซึ่งสามารถลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานลงได้ประมาณ 13.89 บาท/kg (ผลิตภัณฑ์แห้ง)



กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ให้ทุนสนับสนุนเพื่อการนำเสนอผลงาน
ปริญญานิพนธ์ ระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

เอกสารอ้างอิง

- [1] สุนิย์รัตน์ ด้อยคา (2544) การอบแห้งลำไยแบบกะเป็ลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [2] ปรีชา อานันท์รัตนกุล และคณะ (2558) ออกแบบและพัฒนาเตาชีวมวลกำเนิดลมร้อนสำหรับเครื่องอบแห้งกาแฟอาราบิก้าแบบโรตารี. สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย.
- [3] พิทักษ์ จันทร์เจริญ. การวิเคราะห์การทำแห้งผลไม้สดโดยเครื่องอบแห้งชนิดถาดแบบลมร้อน. งานวิจัยโปรแกรมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันราชภัฏสวนดุสิต, 2546
- [4] สมมาส แก้วล้วน ดำรง ศักดิ์จันโทลี, สุรัชย์ จันทร์ศรีและเวทิน ปิยรัตน์. (2558). "การทดสอบสมรรถนะเตาชีวมวลขนาด 20kW". วิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. 8(1): 24-33.
- [5] ASTM E1358 (2006). Standard Test Method for Determination of Moisture Content of Particulate Wood Fuels Using a Microwave Oven. West Conshohocken, United States.
- [6] จารุวรรณ กุลวิศวะ ,สมเกียรติ ปรัชญาวารกร และสมชาติ โสภณ รณฤทธิ์. ผลของอุณหภูมิอบแห้งที่มีต่อสารระเหยง่าย และคุณภาพทางกายภาพในกล้วยแผ่น. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มจร., 2550

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล ภาสพงศ์ภัตต์ บุญรัตน์
วัน เดือน ปี เกิด 9 ธันวาคม 2525
สถานที่เกิด สตูล
วุฒิการศึกษา พ.ศ.2546 ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง
จาก วิทยาลัยสงขลาเทคโนโลยี
พ.ศ.2549 ปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
(วิศวกรรมเครื่องกล)
จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
พ.ศ.2549 ปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
(วิศวกรรมเครื่องกล)
จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ที่อยู่ปัจจุบัน 41 ม.4 ต. ควนกาหลง อ.ควนกาหลง จ. สตูล 91130