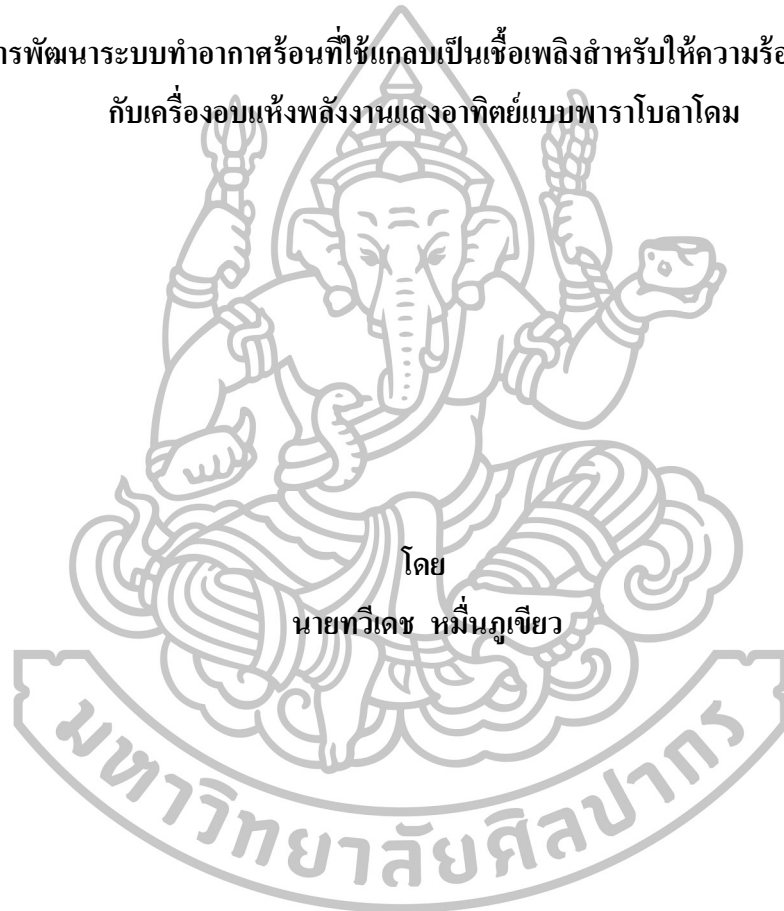




การพัฒนาระบบทำอากาศร้อนที่ใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงสำหรับให้ความร้อนเสริม
กับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาโดม



โดย
นายทวีเดช หมั่นภูเขียว

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์

ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การพัฒนาระบบทำอากาศร้อนที่ใช้แก๊สเป็นเชื้อเพลิงสำหรับให้ความร้อนเสริม
กับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาคอม



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์

ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

**DEVELOPMENT OF AN AIR HEATING SYSTEM USING RICE HUSK AS FUEL TO
SUPPLY AUXILIARY HEAT TO A PARABOLA DOME SOLAR DRYER**



**By
Mr. Tawedach Mundpookhier**

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree

Master of Science Program in Physics

Department of Physics

Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2015

Copyright of Graduate School, Silpakorn University

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “การพัฒนาระบบทำ
อากาศร้อนที่ใช้เกลือเป็นเชื้อเพลิงสำหรับให้ความร้อนเสริมกับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบ
พาราโบลาโดม” เสนอ โดย นายทวีเดช หมั่นภูเขียว เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปานใจ ชารท์สนวงศ์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

1. รองศาสตราจารย์ ดร. เสริม จันทร์ฉาย
2. อาจารย์ ดร. ประสาน ปานแก้ว

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. วิรุพห์ สายคณิต)

...../...../.....

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริชัย เทพา)

...../...../.....

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. เสริม จันทร์ฉาย)

...../...../.....

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร. ประสาน ปานแก้ว)

...../...../.....



56306201: สาขาวิชาฟิสิกส์

คำสำคัญ: ระบบทำอากาศร้อน/ แกลบ/ เครื่องอบแห้งแบบพาราโบลาโดม

ทวีเดช หมื่นภูเขียว : การพัฒนาระบบทำอากาศร้อนที่ใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงสำหรับให้ความร้อนเสริมกับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาโดม. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์: รศ.ดร. เสริม จันทรฉาย และ อ.ดร. ประสาน ปานแก้ว. 132 หน้า.

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้พัฒนาระบบทำอากาศร้อนโดยใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงสำหรับให้ความร้อนเสริมกับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาโดม ระบบทำอากาศร้อนดังกล่าวประกอบด้วย ห้องเผาไหม้ ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน ตัวป้อนเชื้อเพลิง และตัวนำแก๊สออก ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบสมรรถนะของระบบดังกล่าวโดยใช้ผลิตอากาศร้อนให้กับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาโดม ซึ่งทำการอบแห้งกล้วย 140 – 200 กิโลกรัม ผลการทดสอบพบว่าระบบดังกล่าวสามารถทำให้อากาศภายในเครื่องอบแห้งแบบพาราโบลาโดมมีอุณหภูมิตามที่กำหนดคือ 50 องศาเซลเซียส ซึ่งช่วยให้การอบแห้งดำเนินต่อไปได้ในช่วงเวลาที่ฝนตก โดยกล้วยที่อบแห้งในเครื่องอบแห้งใช้เวลาในการอบแห้ง 3 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับกล้วยที่ตากแดดตามธรรมชาติซึ่งใช้เวลา 5 วัน นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ทำการคำนวณประสิทธิภาพของระบบทำอากาศร้อนที่พัฒนาขึ้น พบว่ามีค่าประสิทธิภาพ 80% ขณะให้กำลังสูงสุด



ภาควิชาฟิสิกส์

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ 1.

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2558

56306201: MAJOR: PHYSICS

KEYWORD: AIR HEATING SYSTEM / RICE HUSK / PARABOLA DOME SOLAR DRYER

TAWEDACH MUNDPOOKHIER : DEVERLOPMENT OF AN AIR HEATING SYSTEM USING RICE HUSK AS FUEL TO SUPPLY AUXILIARY HEAT TO A PARABOLA DOME SOLAR DRYER. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. SERM JANJAI. AND DR. PRASAN PANKAEW
132 pp.

In this research work, an air heating system using rice husk as fuel to supply auxiliary heat to a parabola dome solar dryer was developed. The system is composed of a combustion chamber, an air-to-air heat exchanger, a rice husk feeder and an ash remover. To investigate its performance, the system was used to produce hot air for the parabola dome solar dryer for drying 140 - 200 kg of banana. It was found that the system can supply thermal energy to maintain air temperature inside the dryer to be 50°C, so that the drying process continued during raining periods. In addition, the drying time of banana dried in the dryer equipped with this air heating system was 3 days, as compared to 5 days needed for the open air sun drying. Finally, the efficiency of the heating system was evaluated. It was found that the efficiency of the system at the maximum power is 80%.



Department of Physics

Graduate School, Silpakorn University

Student's signature

Academic Year 2015

Thesis Advisor's signature 1.....2.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต โดยผู้วิจัยได้รับทุนผู้ช่วยวิจัยจากห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ เป็นอย่างสูง

ผู้วิจัยขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร. เสริม จันทร์ฉาย และอาจารย์ ดร. ประสาน ปานแก้ว ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาที่ช่วยให้คำแนะนำในด้านวิชาการ และจัดหาอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย ผู้วิจัยขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ ดร. วิรุฬห์ สายคณิต และรองศาสตราจารย์ ดร. ศิริชัย เทพาท ที่กรุณาเสียสละเวลามาเป็นกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร. สุมามาลย์ บรรเทียง อาจารย์ ดร. อิศระ มะศิริ อาจารย์ ดร. กรทิพย์ ไต้ะสิงห์ อาจารย์ ดร. สมเจตน์ ภัทรพานิชชัย อาจารย์ ดร. รุ่งรัตน์ วัตตาล และคุณยุทธศักดิ์ บุญรอด ที่ให้คำแนะนำต่างๆ

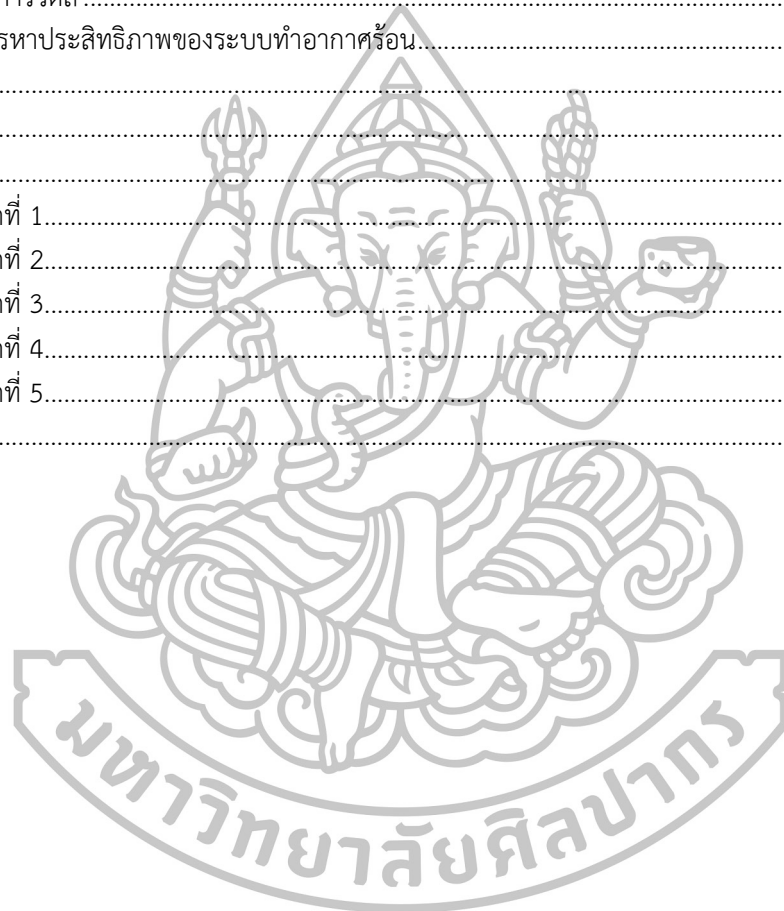
สุดท้ายผู้วิจัยขอขอบคุณบิดา-มารดาและครอบครัวที่เป็นแรงบันดาลใจและกำลังใจในการศึกษาในครั้งนี้



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญภาพ	ณ
บทที่	
1. บทนำ	1
ความสำคัญและความเป็นมาของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
ขอบเขตของงานวิจัย	2
2. หลักทฤษฎีและการดำเนินงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
พื้นฐานการอบแห้ง	3
สมบัติของวัตถุดิบ	3
ความชื้นของวัตถุดิบ	3
ลักษณะการเกาะตัวของน้ำบนวัตถุดิบ	3
ความชื้นสมดุล	4
วอเตอร์แอกทีวิตี	4
ขอบชั้นไฮโซโทม	5
ความร้อนแฝง	6
สมบัติของอากาศชื้น	7
ทฤษฎีการอบแห้ง	8
ผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการอบแห้ง	11
ประเภทของการอบแห้ง	11
การอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์	11
เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาโดม	14
งานวิจัยที่เกี่ยวกับการใช้เตาชีวมวลเพื่อให้ความร้อนเสริมกับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ..	15
3. วิธีดำเนินการวิจัย	21
การหาปริมาณความร้อนสำหรับใช้ในการอบแห้ง	21
การออกแบบเชิงแนวคิด (conceptual design) ระบบทำอากาศร้อน	23
การสร้างระบบทำอากาศร้อน	28
การทดสอบสมรรถนะของระบบทำอากาศร้อน	33
การติดตั้งระบบทำอากาศร้อน	34
อุปกรณ์การวัดและบันทึกข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะของระบบทำอากาศร้อน	35

บทที่	หน้า
ขั้นตอนการทดลอง	40
ผลการทดลอง	43
ผลการทดลองอบแห้งกล้วยน้ำว้าครั้งที่ 1 (วันที่ 21-23 กรกฎาคม พ.ศ. 2558).....	43
ผลการทดลองอบแห้งกล้วยน้ำว้าครั้งที่ 2 (วันที่ 28-30 กรกฎาคม พ.ศ. 2558).....	46
ผลการทดลองอบแห้งกล้วยน้ำว้าครั้งที่ 3 (วันที่ 4-6 สิงหาคม พ.ศ. 2558).....	49
ผลการทดลองอบแห้งกล้วยน้ำว้าครั้งที่ 4 (วันที่ 12-14 สิงหาคม พ.ศ. 2558).....	52
ผลการวัดสี	55
การหาประสิทธิภาพของระบบทำอากาศร้อน.....	56
4. สรุป.....	57
รายการอ้างอิง.....	58
ภาคผนวก	60
ภาคผนวกที่ 1.....	61
ภาคผนวกที่ 2.....	66
ภาคผนวกที่ 3.....	68
ภาคผนวกที่ 4.....	124
ภาคผนวกที่ 5.....	129
ประวัติผู้วิจัย	132



สารบัญญภาพ

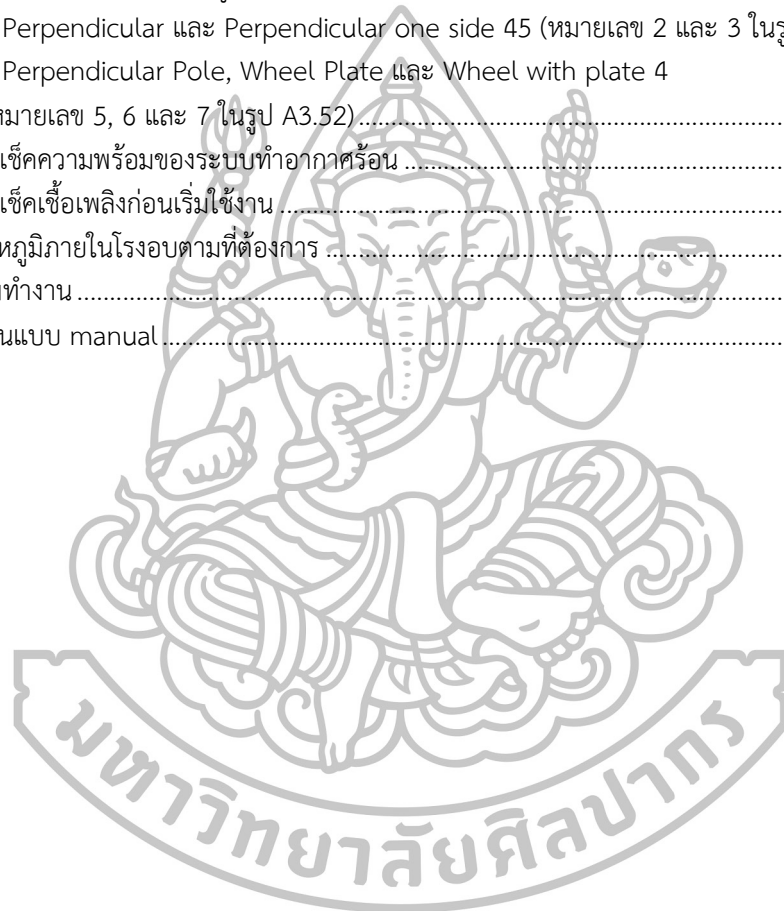
ภาพที่		หน้า
2.1	แผนภูมิน้ำประเภตต่างๆ ในวัตถุขึ้น.....	4
2.2	ขอบขันไอโซเทอมของผลิตภณท์การเกษตรทั่วไป	6
2.3	การแปรค่าของความร้อนแฝงของผลิตภณท์การเกษตร.....	7
2.4	แผนภูมิอากาศขันและการเปลี่ยนแปลงสมบัติของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง	8
2.5	การถ่ายเทมวลและความร้อนในการอบแห้ง.....	9
2.6	การลดลงของความขันในการอบแห้งผลิตผลการเกษตรทั่วไป.....	9
2.7	อัตราการแห้งของผลิตผลการเกษตรระหว่างการอบแห้ง	10
2.8	เครื่องอบแห้งแบบรับพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรง.....	12
2.9	เครื่องอบแห้งแบบรับพลังงานแสงอาทิตย์ทางอ้อม.....	13
2.10	เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ลม.....	13
2.11	หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาโดม.....	14
2.12	ส่วนประกอบของห้องอบแห้ง.....	15
2.13	เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์โดยการพาความร้อนแบบธรรมชาติและมีพลังงานความร้อนเสริมจากชีวมวล.....	16
2.14	(a) ภาพของเครื่องอบแห้งแบบใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานความร้อนจากชีวมวล (b) แผนภาพของเครื่องอบแห้ง.....	17
2.15	ก. เครื่องอบแห้งลำไยแบบพื้นบ้าน (ผนังทำจากสังกะสี) ข. เครื่องอบแห้งที่ผนังทำด้วยกระเบื้อง แผ่นเรียบและบุด้วยฉนวนโฟมเอทิลีน และ ค. เครื่องอบแห้งที่ผนังคอนกรีตบล็อกฉาบปูน	18
2.16	ลักษณะของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์.....	19
2.17	เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์และชีวมวลสำหรับอบแห้งยางพาราแผ่น	20
2.18	ลักษณะของเครื่องอบแห้งยางพาราแผ่น.....	20
3.1	แบบเชิงแนวคิดของเครื่องทำอากาศร้อน	24
3.2	ลักษณะของเครื่องทำอากาศร้อนที่ออกแบบตามแนวคิดที่กำหนด.....	25
3.3	ลักษณะของห้องเผาไหม้.....	25
3.4	ลักษณะของตัวแลกเปลี่ยนความร้อน (ลูกศรแสดงทิศทางการไหลของอากาศ)	26
3.5	ระบบป้อนเชื้อเพลิง.....	27
3.6	แผนภูมิแสดงการทำงานของระบบควบคุม.....	27
3.7	ลักษณะของห้องเผาไหม้และตัวลำเลียงเถ้า.....	28
3.8	การประกอบตัวแลกเปลี่ยนความร้อน.....	29
3.9	ตัวแลกเปลี่ยนความร้อนที่พัฒนาขึ้น (ลูกศรบอกทิศทางการไหลของอากาศ)	29
3.10	ลักษณะของตัวป้อนเชื้อเพลิง.....	30
3.11	ก. ระบบควบคุมการทำงาน ข. อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (temperature controller)	31
3.12	แผนภูมิผังการทำงานของระบบควบคุมอุณหภูมิ	32
3.13	ระบบทำอากาศร้อนที่ใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้.....	34

ภาพที่	หน้า
3.14	ท่อสำหรับกระจายลมร้อน 34
3.15	ลักษณะและส่วนประกอบของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาโดม..... 35
3.16	สายเทอร์โมคอปเปิลชนิดเค (K-type thermocouple) สำหรับวัดอุณหภูมิ..... 36
3.17	เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ ยี่ห้อ Elektronik รุ่น EE23 B..... 36
3.18	เครื่องวัดความเร็วลมแบบ hot wire ยี่ห้อ Airflow รุ่น TA5 37
3.19	ไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ KIPP&ZONEN รุ่น CM11 37
3.20	เครื่องบันทึกข้อมูล ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น DC100 38
3.21	ตู้อบไฟฟ้า ยี่ห้อ Fisher Scientific รุ่น ISOTEMP 38
3.22	เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล ยี่ห้อ KERN รุ่น 474-42..... 39
3.23	เครื่องวัดสียี่ห้อ HunterLab รุ่น MiniScan EZ..... 39
3.24	ตำแหน่งที่ทำการวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ (L คือจุดวัดรังสีอาทิตย์ T คือจุดวัดอุณหภูมิ rh คือจุดวัดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ และ M คือ จุดวัดมวลของตัวอย่าง)..... 40
3.25	กล้วยน้ำว้าในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาโดม 41
3.26	ตัวอย่างกล้วยที่ตากแดดตามธรรมชาติ 41
3.27	ทำการวัดสีกล้วยน้ำว้าที่ได้จากการเครื่องอบแห้งและตากแดดธรรมชาติ 42
3.28	สภาพท้องฟ้าในช่วงที่ทำการอบแห้งกล้วยน้ำว้า ระหว่างวันที่ 21-23 กรกฎาคม พ.ศ. 2558 44
3.29	การแปรค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ วันที่ 21-23 กรกฎาคม พ.ศ. 2558..... 45
3.30	การแปรค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในเครื่องอบแห้งกับอากาศแวดล้อม วันที่ 21-23 กรกฎาคม พ.ศ. 2558 45
3.31	การแปรค่าอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งกับอากาศแวดล้อม วันที่ 21-25 กรกฎาคม พ.ศ. 2558..... 45
3.32	การแปรค่าของความชื้นของกล้วยน้ำว้า ณ ตำแหน่งต่างๆ ของเครื่องอบแห้ง และของกล้วยที่ ตากตามธรรมชาติ วันที่ 21-25 กรกฎาคม พ.ศ. 2558..... 45
3.33	สภาพท้องฟ้าในช่วงที่ทำการอบแห้งกล้วยน้ำว้าระหว่างวันที่ 28-30 กรกฎาคม พ.ศ. 2558 วันที่ 21-23 กรกฎาคม พ.ศ. 2558..... 47
3.34	การแปรค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ วันที่ 28-30 กรกฎาคม พ.ศ. 2558..... 48
3.35	การแปรค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในเครื่องอบแห้งกับอากาศแวดล้อม วันที่ 28-30 กรกฎาคม พ.ศ. 2558..... 48
3.36	การแปรค่าอุณหภูมิของอากาศภายในเครื่องอบแห้งกับอากาศแวดล้อม วันที่ 28-30 กรกฎาคม พ.ศ. 2558 48
3.37	การแปรค่าของความชื้นของกล้วยน้ำว้า ณ ตำแหน่งต่างๆ ของเครื่องอบแห้ง และของกล้วยที่ ตากตามธรรมชาติ วันที่ 28 กรกฎาคม – 1 สิงหาคม พ.ศ. 2558 48
3.38	สภาพท้องฟ้าในช่วงที่ทำการอบแห้งกล้วยน้ำว้าระหว่างวันที่ 4-6 สิงหาคม พ.ศ. 2558 50
3.39	การแปรค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ วันที่ 4-6 สิงหาคม พ.ศ. 2558 51

ภาพที่	หน้า
3.40 การแปรค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในเครื่องอบแห้งกับอากาศแวดล้อม วันที่ 4-6 สิงหาคม พ.ศ. 2558.....	51
3.41 การแปรค่าอุณหภูมิของอากาศในเครื่องอบแห้งกับอากาศแวดล้อม วันที่ 4-6 สิงหาคม พ.ศ. 2558.....	51
3.42 การแปรค่าของความชื้นของกล้วยน้ำว้า ณ ตำแหน่งต่างๆ ของเครื่องอบแห้งและของกล้วยที่ ติดตามธรรมชาติ วันที่ 4-8 สิงหาคม พ.ศ. 2558.....	51
3.43 สภาพท้องฟ้าในช่วงที่ทำการอบแห้งกล้วยน้ำว้าระหว่างวันที่ 12-14 สิงหาคม พ.ศ. 2558	53
3.44 การแปรค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ วันที่ 12-14 สิงหาคม พ.ศ. 2558	54
3.45 การแปรค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในเครื่องอบแห้งกับอากาศแวดล้อม วันที่ 12-14 สิงหาคม พ.ศ. 2558	54
3.46 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งกับอากาศแวดล้อม วันที่ 12-14 สิงหาคม พ.ศ. 2558	54
3.47 การแปรค่าของความชื้นของกล้วยน้ำว้า ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของเครื่องอบแห้ง และของกล้วยที่ ติดตามธรรมชาติ วันที่ 12-16 สิงหาคม พ.ศ. 2558	54
3.48 แผนผังการการอ่านค่าสีของ Hunter Lab Miniscan EZ (L*, a*, b*)	55
A1.1 กราฟของพหุคูณไอโซเทอมของกล้วยน้ำว้า.....	62
A1.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln p_v$ กับ $\ln p_s$	63
A1.3 การแปรค่าของความชื้นสัมพัทธ์ (h_{fg}) กับความชื้นของกล้วย (M) ที่อุณหภูมิ 30 °C.....	64
A1.4 การแปรค่าความชื้นสัมพัทธ์ (h_{fg}) กับอุณหภูมิ (T).....	65
A2.1 ผลการวัดค่าความร้อนของแก๊สจากสถาบันสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี แห่งประเทศไทย (วว.).....	67
A3.1 ส่วนประกอบของเครื่องทำอากาศร้อน.....	69
A3.2 แบบของชุดฝาปิดด้านบน	70
A3.3 แบบของชุด Exhaust top (หมายเลข 7 ในรูปที่ A3.2).....	71
A3.4 แบบของชุด Over และ Top Exhaust (หมายเลข 1 และ 8 ในรูปที่ A3.2).....	72
A3.5 แบบของชุด Over Duck และ Over In (หมายเลข 2 และ 3 ในรูปที่ A3.2)	73
A3.6 แบบของชุด Over in with holes และ Duck Top (หมายเลข 5 และ 9 ในรูปที่ A3.2).....	74
A3.7 แบบของชุด Plate (หมายเลข 6 ในรูปที่ A3.2).....	75
A3.8 แบบของช่องดูดอากาศแวดล้อม.....	76
A3.9 แบบของ In air และ 25x25 Plate (หมายเลข 1 และ 2 ในรูป A3.8)	77
A3.10 แบบของ Top air และ Bend Junction (หมายเลข 3 และ 4 ในรูป A3.8).....	78
A3.11 แบบของ Centrifugal Blower (หมายเลข 5 ในรูป A3.8).....	79
A3.12 แบบของระบบแลกเปลี่ยนความร้อนชั้นที่ 1	80
A3.13 แบบของ Duck และ Part 5 (หมายเลข 4 และ 8 ในรูป A3.12).....	81

ภาพที่	หน้า
A3.14 แบบของ In top และ Small (หมายเลข 3 และ 6 ในรูป A3.12).....	82
A3.15 แบบของ Middle Top และ Exhaust top (หมายเลข 5 และ 10 ในรูป A3.12).....	83
A3.16 แบบของ Out top และ Tube (หมายเลข 7 และ 2 ในรูป A3.12).....	84
A3.17 แบบของ Plat 1 (หมายเลข 1 ในรูป A3.12).....	85
A3.18 แบบของระบบแลกเปลี่ยนความร้อนชั้นที่ 2	86
A3.19 แบบของ Duck และ Part 5 (หมายเลข 8 และ 4 ในรูป A3.18).....	87
A3.20 แบบของ Base และ Small (หมายเลข 6 และ 9 ในรูป A3.18).....	88
A3.21 แบบของ In และ Middle (หมายเลข 3 และ 5 ในรูป A3.18)	89
A3.22 แบบของ Out และ Tube (หมายเลข 2 และ 7 ในรูป A3.18).....	90
A3.23 แบบชุดต่อเพิ่มพื้นที่ห้องเผาไหม้.....	91
A3.24 แบบของ Base expand part และ Plate 20x4.85 (หมายเลข 3 และ 6 ในรูป A3.23).....	92
A3.25 แบบของ Burn level Expand และ Burn level Expand in (หมายเลข 1 และ 2 ในรูป A3.23)	93
A3.26 แบบของ 9.85 cm และ Small tube in air (หมายเลข 4 และ 5 ในรูป A3.23).....	94
A3.27 แบบของห้องเผาไหม้.....	95
A3.28 แบบของ Burn part 3 และ Tube_4_5_short (หมายเลข 2 และ 3 ในรูป A3.27).....	96
A3.29 แบบของ Bum Chamber และ Front Plat 2 (หมายเลข 4 และ 5 ในรูป A3.27).....	97
A3.30 แบบของ Tilt 3 และ tube_22.5 (หมายเลข 6 และ 7 ในรูป A3.27).....	98
A3.31 แบบของ Circle Plate และ tube 4 cm (หมายเลข 8 และ 10 ในรูป A3.27).....	99
A3.32 แบบของ Joint plate circle และ Plate2Hole (หมายเลข 11 และ 13 ในรูป A3.27).....	100
A3.33 แบบของระบบลำเลียงถ่าน.....	101
A3.34 แบบของ Plate2 Small Hole และ Gear (หมายเลข 1 และ 4 ในรูป A3.33)	102
A3.35 แบบของ Small and Gear Motor และ ASH Feed (หมายเลข 2 และ 3 ในรูป A3.33).....	103
A3.36 แบบของ Bearing House และ Plate Cut (หมายเลข 5 และ 6 ในรูป A3.33).....	104
A3.37 แบบของ Plate 22.5x12, Plate 12x6 และ Screw Stud (หมายเลข 7, 8 และ 9 ในรูป A3.33)	105
A3.38 แบบของระบบป้อนเชื้อเพลิง.....	106
A3.39 แบบของ Motor และ 40 cm (หมายเลข 1 และ 5 ในรูป A3.38).....	107
A3.40 แบบของ Joint plate circle และ TopofFeedIn (หมายเลข 6 และ 7 ในรูป A3.38).....	108
A3.41 แบบของ 16x16 และ Tilt 4 (หมายเลข 8 และ 9 ในรูป A3.38).....	109
A3.42 แบบของ Plate 18x14 และ Plate_with_hole (หมายเลข 10 และ 11 ในรูป A3.38).....	110
A3.43 แบบของ Plate 6x14 และ Tube-copy (หมายเลข 12 และ 13 ในรูป A3.38).....	111
A3.44 แบบของ Feeder blade Feed In และ Junction (หมายเลข 14 และ 15 ในรูป A3.38).....	112
A3.45 แบบของฉนวนกันความร้อนห้องเผาไหม้.....	113
A3.46 แบบของ Burn Level และ 99x69 (หมายเลข 1 และ 2 ในรูป A3.45).....	114
A3.47 แบบของ Burn Level in และ bottom in plane (หมายเลข 3 และ 4 ในรูป A3.45).....	115
A3.48 แบบของ Ash exhaust 2 และ bottom Top (หมายเลข 5 และ 7 ในรูป A3.45).....	116

ภาพที่	หน้า
A3.49	แบบของ 1.5 mm4cm และ 25cm 1 inch (หมายเลข 8 และ 9 ในรูป A3.45)..... 117
A3.50	แบบของ Blower Plate 3 inch และ 3 in 10cm (หมายเลข 10 และ 11 ในรูป A3.45)..... 118
A3.51	แบบของ Blower Plate และ Centrifugal Blower (หมายเลข 12 และ 13 ในรูป A3.45)..... 119
A3.52	แบบฐานของระบบทำอากาศร้อน..... 120
A3.53	แบบของ Perpendicular 2 และ Perpendicular one side 45 2 (หมายเลข 1 และ 4 ในรูป A3.52)..... 121
A3.54	แบบของ Perpendicular และ Perpendicular one side 45 (หมายเลข 2 และ 3 ในรูป A3.52) 122
A3.55	แบบของ Perpendicular Pole, Wheel Plate และ Wheel with plate 4 (หมายเลข 5, 6 และ 7 ในรูป A3.52)..... 123
A4.1	การตรวจเช็คความพร้อมของระบบทำอากาศร้อน 125
A4.2	การตรวจเช็คเชื้อเพลิงก่อนเริ่มใช้งาน 125
A4.3	ตั้งค่าอุณหภูมิภายในโรงอบตามที่ต้องการ 126
A4.4	กดปุ่มเริ่มทำงาน 127
A4.5	การทำงานแบบ manual..... 128



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของปัญหา

ประเทศไทยผลิตอาหารแห้ง จำพวกผัก ผลไม้ และสมุนไพรทั้งในระดับครัวเรือนและระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็กและขนาดกลาง ซึ่งการผลิตดังกล่าวเป็นกิจกรรมทางเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศ ตัวอย่างเช่น ในปี พ.ศ. 2553 มีการผลิตลำไยแห้งส่งออก 73,000 ตัน มีมูลค่าประมาณ 2,000 ล้านบาท อีกทั้งยังมีการผลิตอาหารทะเลแห้ง และสมุนไพรต่างๆ โดยบางส่วนได้ส่งออกต่างประเทศ อย่างไรก็ตามการผลิตผลิตภัณฑ์อบแห้งของประเทศไทยยังประสบปัญหาที่สำคัญ ได้แก่ เกษตรกร และผู้ประกอบการส่วนใหญ่ผลิตผลิตภัณฑ์อบแห้งโดยการตากแดดตามธรรมชาติ ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์แห้งที่ได้มีการปนเปื้อนจากสารปนเปื้อนของแมลง ฝุ่นละออง และความเสียหายจากการเปียกฝน ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ไม่ได้มาตรฐานสำหรับการส่งออกไปจำหน่ายต่างประเทศ ถึงแม้จะมีเกษตรกรบางส่วนเริ่มนำเครื่องอบแห้งแบบใช้แก๊สหรือหม้อไอน้ำซึ่งใช้น้ำมันหรือแก๊สเป็นเชื้อเพลิงมาใช้งาน แต่ก็ทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น

เนื่องจากประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตร้อนทำให้ได้รับรังสีอาทิตย์ในปริมาณมาก จึงมีความเหมาะสมที่จะใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อแก้ปัญหาการอบแห้งผลิตผลทางการเกษตร ดังนั้นนักวิจัยด้านพลังงานแสงอาทิตย์จึงได้ทำการพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์หลายแบบ แต่เครื่องอบแห้งส่วนใหญ่มีขนาดเล็กสามารถอบแห้งผลิตภัณฑ์ได้ปริมาณน้อย (Murthy, 2009; Sharma et al., 2009; Fndholi et al., 2010; Janjai and Bala, 2012; El-Sebaï and Shalaby, 2012) ด้วยเหตุนี้จึงไม่สามารถตอบสนองความต้องการในการอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรในปริมาณมากๆ ได้ เป็นเหตุผลให้นักวิจัยของภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้มีการพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาโดมเพื่ออบแห้งสินค้าเกษตรในเชิงพาณิชย์ (Janjai et al., 2004; Janjai et al., 2007; Janjai et al., 2009; Janjai et al., 2011; Janjai, 2012) โดยกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานได้ร่วมมือกับมหาวิทยาลัยศิลปากร จัดทำโครงการสนับสนุนเผยแพร่การใช้งานเครื่องอบแห้ง ซึ่งในปัจจุบันมีเกษตรกรและผู้ประกอบการใช้งานเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์กว่า 500 แห่ง อย่างไรก็ตามเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ทำงานโดยอาศัยแหล่งพลังงานจากรังสีอาทิตย์จึงมีสมรรถนะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะทางอุตุนิยมวิทยา โดยในช่วงฤดูฝนมักประสบปัญหาแสงแดดไม่เพียงพอ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเสนอที่จะพัฒนาระบบทำอากาศร้อนโดยใช้แก๊สเป็นเชื้อเพลิง เพื่อให้ความร้อนเสริมกับเครื่องอบแห้งดังกล่าวในช่วงเวลาที่แสงแดดไม่เพียงพอ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อพัฒนาระบบทำอากาศร้อนโดยใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงสำหรับให้พลังงานความร้อนเสริมกับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาโดม
- 2) เพื่อทดสอบสมรรถนะของระบบทำอากาศร้อนที่พัฒนาขึ้น

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้จะทำการพัฒนาระบบทำอากาศร้อนโดยใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงเพื่อให้ความร้อนกับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาโดม ซึ่งมีพื้นที่ฐาน $9 \times 12 \text{ m}^2$



บทที่ 2

หลักการทางวิชาการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้กล่าวถึงหลักการทางวิชาการเกี่ยวกับการอบแห้งต่างๆ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้แหล่งความร้อนเสริมจากเตาเผาชีวมวล ตามรายละเอียดดังนี้

2.1 พื้นฐานการอบแห้ง

การศึกษาการอบแห้งของวัตถุต่างๆ เป็นการศึกษาโดยใช้หลักการเกี่ยวกับการระเหยของน้ำออกจากวัตถุขึ้น

2.1.1 สมบัติของวัตถุขึ้น

2.1.1.1 ความชื้นของวัตถุขึ้น

วัตถุขึ้นประกอบด้วยของแข็งและความชื้นซึ่งโดยทั่วไปเป็นน้ำในสถานะของเหลว เราสามารถบอกปริมาณความชื้นของวัตถุขึ้นในรูปของความชื้นมาตรฐานเปียก (M_w) หรือมาตรฐานแห้ง (M_d) โดยความชื้นมาตรฐานเปียกคือ อัตราส่วนระหว่างมวลของน้ำในผลิตภัณฑ์ต่อมวลของผลิตภัณฑ์ที่อบแห้ง ส่วนความชื้นมาตรฐานแห้งคือ อัตราส่วนระหว่างมวลของน้ำในผลิตภัณฑ์ต่อมวลของของแข็งของผลิตภัณฑ์ (Bakker-Arkemar and Hall, 1974)

$$M_w = \frac{m_w}{m_w + m_s} \quad (2.1)$$

$$M_d = \frac{m_w}{m_s} \quad (2.2)$$

เมื่อ	M_w	คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก [kg/kg]
	M_d	คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง [kg/kg]
	m_w	คือ มวลของน้ำในปริมาตรที่พิจารณา [kg]
	m_s	คือ มวลของของแข็งในปริมาตรที่พิจารณา [kg]

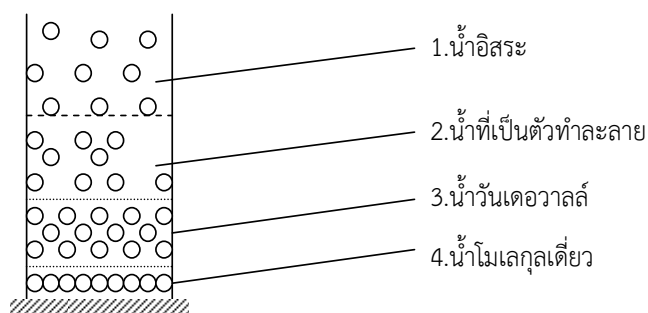
ความชื้นมาตรฐานเปียกมักนิยมใช้ในทางการค้าส่วนความชื้นมาตรฐานแห้งมักใช้ในการคำนวณและการศึกษาในเชิงวิทยาศาสตร์

2.1.1.2 ลักษณะการเกาะตัวของน้ำบนวัตถุขึ้น

น้ำที่เกาะตัวกับของแข็งในวัตถุขึ้นสามารถแบ่งได้เป็น 4 ชนิด คือ

- 1) น้ำอิสระ (free water)

- 2) น้ำที่เป็นตัวทำละลาย (solvent water)
- 3) น้ำที่เกาะตัวโดยแรงแวนเดอวาล์ (water attached with Van de Waal force)
- 4) น้ำโมเลกุลเดี่ยว (mono-molecule water)



รูปที่ 2.1 แผนภูมิน้ำประเภทต่างๆ ในวัสดุขึ้น (Bakker-Arkemar and Hall, 1974)

การเกาะของน้ำแบบน้ำอิสระจะอยู่ที่ชั้นนอกสุดของผิวของของแข็ง ส่วนการเกาะตัวของน้ำแบบอื่นๆ จะอยู่ถัดลงมาจนถึงการเกาะตัวของน้ำแบบน้ำโมเลกุลเดี่ยวซึ่งอยู่ที่บริเวณผิวสัมผัสของของแข็ง ในการแยกน้ำแบบอิสระจะใช้พลังงานน้อยที่สุด ส่วนน้ำแบบโมเลกุลเดี่ยวใช้พลังงานในการแยกน้ำออกจากวัสดุขึ้นมากที่สุด (เสริม จันทร์ฉาย, 2540)

2.1.1.3 ความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content)

วัสดุขึ้นมีการรับและดูดความชื้นจากอากาศรอบๆ จนกระทั่งความชื้นมีค่าคงที่หรืออยู่ในสภาวะสมดุลกับอากาศแวดล้อม เรียกความชื้นนี้ว่า ความชื้นสมดุล ความชื้นสมดุลขึ้นกับธรรมชาติของวัสดุ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ซึ่งสามารถหาได้โดยการทดลอง (Sodha et al., 1987)

2.1.1.4 วอเตอร์แอกติวิตี (water activity)

น้ำที่อยู่ในวัสดุขึ้นประเภทไฮโกรสโคปิกโดยความดันไอน้ำ (vapor pressure) ขึ้นอยู่กับปริมาณของน้ำ ชนิดของน้ำ โครงสร้างของวัสดุขึ้น และสภาพทางชีวเคมีของวัสดุขึ้นนั้นๆ ในทางเทคโนโลยีการอาหารมีการกำหนดพารามิเตอร์ที่บอกรอบทิศทางของน้ำในวัสดุขึ้นในรูปของวอเตอร์แอกติวิตี (water activity) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของความดันไอน้ำในวัสดุขึ้นต่อความดันไอน้ำของน้ำอิสระ (free water) หรือน้ำที่อยู่นอกวัสดุขึ้น หรือเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ (Iglesias and Chirife, 1982)

$$a_w = \frac{P}{P_0} \quad (2.3)$$

เมื่อ a_w คือ วอเตอร์แอกติวิตี [-]
 P คือ ความดันไอน้ำในวัสดุขึ้น [Pa]
 P_0 คือ ความดันไอน้ำของน้ำอิสระ [Pa]

เมื่อนำวัสดุขึ้นไปวางอยู่ในอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ rh และอุณหภูมิ T วัสดุจะดูดหรือคายความชื้นจนกระทั่งถึงจุดสมดุล ในสภาพดังกล่าววอเตอร์แอกติวิตีจะมีความสัมพันธ์กับความชื้นสัมพัทธ์ดังสมการ

$$a_w = \frac{rh}{100} \quad (2.4)$$

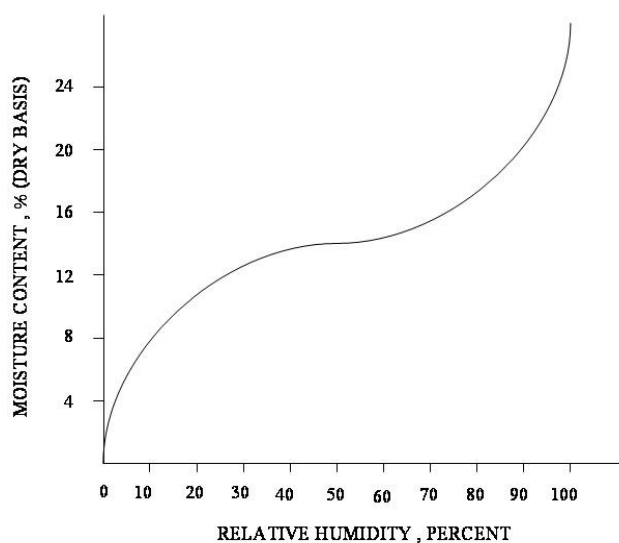
เมื่อ a_w คือ วอเตอร์แอกติวิตี [-]
 rh คือ ความชื้นสัมพัทธ์ [%]

เนื่องจากวอเตอร์แอกติวิตีเป็นค่าความดันไอน้ำในผลิตภัณฑ์เมื่อเทียบกับความดันไอน้ำของน้ำอิสระ ดังนั้นวอเตอร์แอกติวิตีจึงมีผลต่อคุณสมบัติทางฟิสิกส์และชีวเคมีของผลิตภัณฑ์ดังนี้

- 1) ผลต่อการเจริญเติบโตของราและแบคทีเรีย เช่น แบคทีเรียส่วนใหญ่ไม่สามารถเติบโตเมื่อค่าวอเตอร์แอกติวิตีของผลิตภัณฑ์มีค่าต่ำกว่า 0.60
- 2) ผลต่อปฏิกิริยาเอนไซเมติก (enzymatic reaction) โดยปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นต่ำ ไม่ต้องถูกกระตุ้นด้วยความร้อน โดยพบว่าปฏิกิริยานี้มีความสัมพันธ์กับวอเตอร์แอกติวิตีของผลิตภัณฑ์
- 3) ผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวัสดุขึ้น โดยมีผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าในผลิตภัณฑ์บางชนิด การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นผลมาจากวอเตอร์แอกติวิตีโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze drying)

2.1.1.5 ซอบซันไอโซเทอม (sorption isotherm)

โดยทั่วไป ความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์มีความสัมพันธ์กับวอเตอร์แอกติวิตี ถ้ากำหนดให้อุณหภูมิคงที่ กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลกับวอเตอร์แอกติวิตีเรียกว่า ซอบซันไอโซเทอม (sorption isotherm) โดยทั่วไปมีลักษณะเป็นกราฟรูปซิกมอยด์ (sigmoid) โดยเส้นของอุณหภูมิสูงอยู่ด้านล่าง (Sodha et al., 1987) ดังตัวอย่างในกราฟรูปที่ 2.2



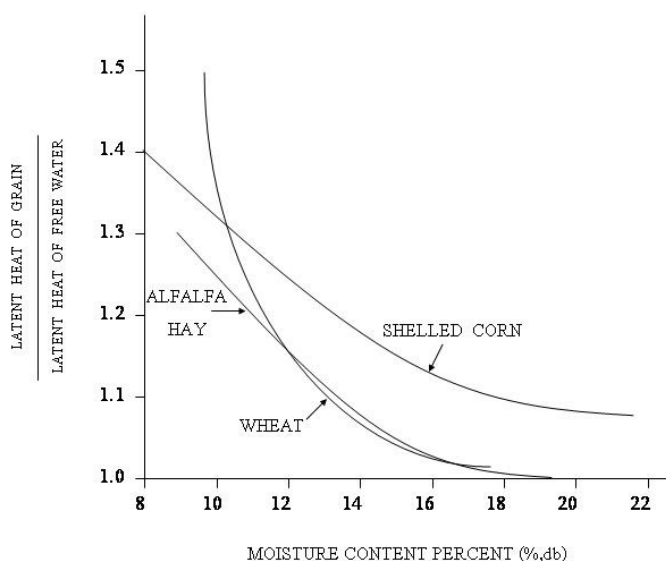
รูปที่ 2.2 ซอบชื้นไอโซเทอมของผลิตภัณฑ์การเกษตรทั่วไป (Sodha et al., 1987)

ในการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศสามารถทำได้โดยใช้กรดหรือสารละลายเกลืออิมตัวกรดซัลฟูริก (sulfuric acid) และกรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid) ที่มีความเข้มข้นต่างๆ ซึ่งสามารถควบคุมความชื้นของอากาศระหว่าง 0 ถึง 100% ได้ โดยความดันไอเหนือสารละลายกรดขึ้นกับความเข้มข้นและอุณหภูมิของกรด อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปไม่นิยมใช้กรดเพราะมีอันตรายและมีการเปลี่ยนแปลงของความชื้นสัมพัทธ์ในขณะทำการทดลอง เนื่องจากการเพิ่มหรือลดของความเข้มข้นของกรด

สารละลายเกลืออิมตัวมีความปลอดภัยในการใช้มากกว่าสารละลายกรดและสามารถควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ได้ดีเพราะความชื้นสัมพัทธ์เหนือสารละลายไม่เปลี่ยนแปลงขณะทำการทดลอง โดยเราสามารถเลือกใช้ชนิดต่างๆ ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ 10-95%

2.1.1.6 ความร้อนแฝง (latent heat)

ความร้อนแฝง คือปริมาณความร้อนที่ต้องใช้ในการระเหยน้ำออกจากวัตถุขึ้นซึ่งมีค่าขึ้นกับชนิดและความชื้นของวัตถุ ตัวอย่างความร้อนแฝงของผลิตภัณฑ์การเกษตรแสดงในรูปที่ 2.3 (Sodha et al., 1987)



รูปที่ 2.3 การแปรค่าของความร้อนแฝงของผลิตภัณฑ์การเกษตร (Sodha et al., 1987)
 ความร้อนแฝงของผลิตภัณฑ์การเกษตรสามารถเขียนในรูปของสมการเอมไพริคัลได้ดังนี้

$$\frac{L}{L'} = 1 + a \exp(-bM_d) \quad (2.5)$$

เมื่อ L คือ ความร้อนแฝงของวัสดุขึ้น [J/kg]

L' คือ ความร้อนแฝงของน้ำ [J/kg]

M_d คือ ความชื้นของวัสดุ [%, d.b.]

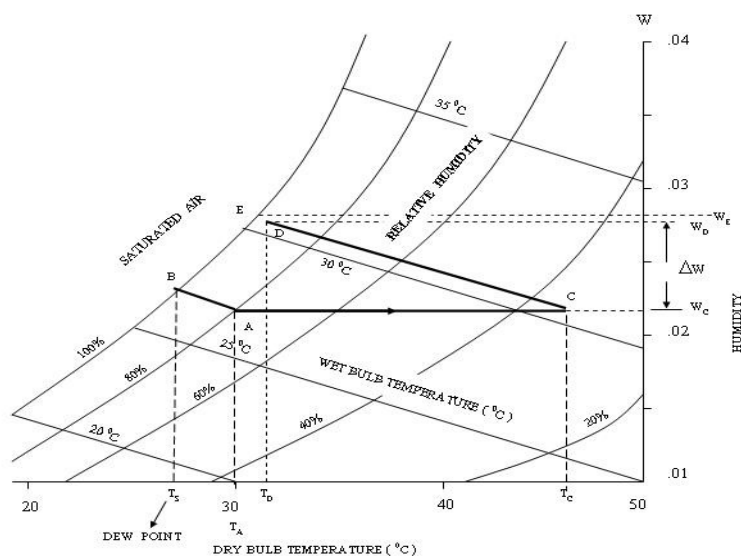
a, b คือ ค่าคงที่ขึ้นกับชนิดของวัสดุ [-]

2.1.2 สมบัติของอากาศชื้น (properties of moist air)

อากาศซึ่งใช้เป็นตัวกลางในการพาความร้อนไปสู่วัสดุขึ้นและพาความชื้นจากวัสดุขึ้นออกมาสู่ภายนอกประกอบด้วยอากาศแห้งและไอน้ำ โดยมีคุณสมบัติแสดงได้ด้วยตัวแปร 7 ตัว (Bakker-Arkemar and Hall, 1974) ดังนี้

- 1) อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (T_{ab})
- 2) อุณหภูมิกระเปาะเปียก (T_{wb})
- 3) อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (dew-point temperature)
- 4) ความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity, rh)
- 5) ความชื้นสัมบูรณ์ (absolute humidity) หรืออัตราส่วนความชื้น (humidity ratio)
- 6) เอนทัลปี (enthalpy) ซึ่งเป็นพลังงานที่สะสมอยู่ในอากาศชื้น
- 7) ปริมาตรจำเพาะ (specific volume) ซึ่งเป็นปริมาตรอากาศชื้นต่อน้ำหนักอากาศแห้ง

ตัวแปรทั้ง 7 มีความสัมพันธ์กันตามแผนภูมิอากาศชื้น (psychrometric chart) ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แผนภูมิอากาศชื้นและการเปลี่ยนแปลงสมบัติของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง
(Bakker-Arkemar and Hall, 1974)

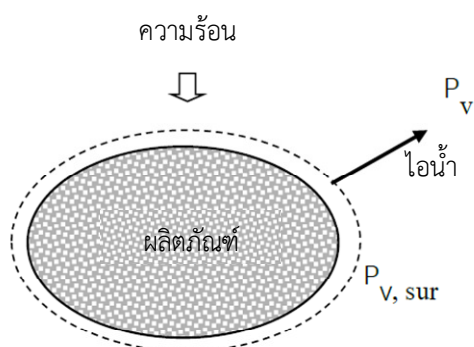
จากรูปที่ 2.4 แสดงแผนภูมิอากาศชื้นและการเปลี่ยนแปลงสมบัติของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง ซึ่งในกระบวนการอบแห้งอุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศลดลงเข้าหาอุณหภูมิจุดน้ำค้าง ในขณะที่อุณหภูมิกระเปาะเปียกมีค่าคงที่ดังเส้น AB เมื่ออากาศชื้นถูกทำให้ร้อนขึ้นโดยไม่มีการเพิ่มหรือลดปริมาณไอน้ำ อัตราส่วนความชื้นจะมีค่าคงที่ แสดงได้ด้วยเส้นตรง AC ถ้านำอากาศร้อนนี้ไปใช้ในการอบแห้ง อุณหภูมิกระเปาะแห้งจะลดลง และความชื้นสัมพัทธ์จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากอากาศถ่ายเทความร้อนให้กับวัตถุชื้นและรับความชื้นจากวัตถุนั้น การเปลี่ยนแปลงของอากาศนี้แทนได้ด้วยเส้นตรง CD

2.1.3 ทฤษฎีการอบแห้ง

การอบแห้ง เป็นการแยกน้ำออกจากวัตถุดิบ (moist material) โดยการทำให้น้ำเปลี่ยนสถานะเป็นไอโดยอาศัยความร้อน สำหรับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรมักเป็นการอบแห้งแบบการพาความร้อน (convective drying) โดยเป่าอากาศร้อนผ่านผลิตภัณฑ์ที่เป็นวัตถุดิบ ความร้อนจากอากาศจะถ่ายเทไปยังวัตถุทำให้วัตถุดิบมีอุณหภูมิสูงขึ้น น้ำในวัตถุจะเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำและระเหยออกมา การถ่ายเทมวลของน้ำจากวัตถุดิบไปยังอากาศจะหยุดเมื่อความดันไอน้ำที่ผิววัตถุเท่ากับความดันไอน้ำในอากาศ (เสริม จันทร์ฉาย, 2540)

$$P_{v, sur} = P_v \quad (2.6)$$

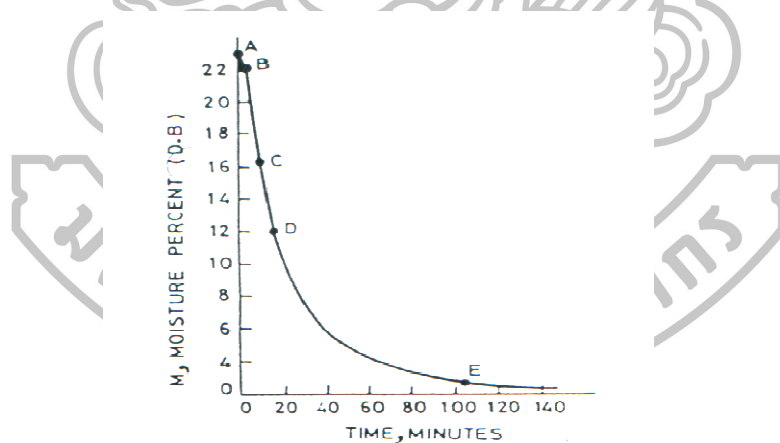
โดยที่ $P_{v, sur}$ คือ ความดันของไอน้ำที่ผิววัตถุ
 P_v คือ ความดันไอน้ำในอากาศ



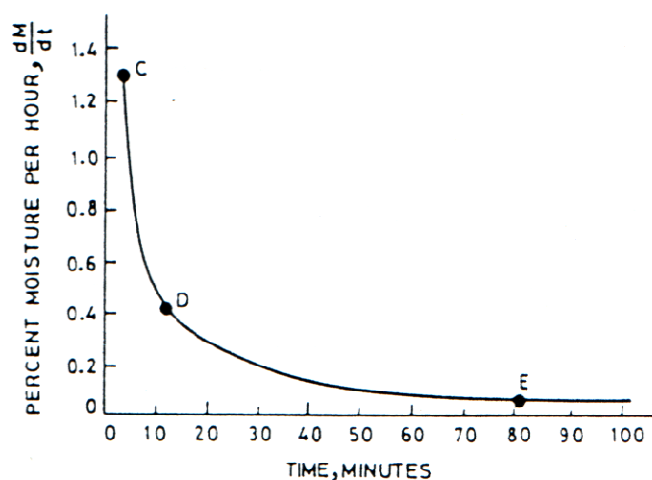
รูปที่ 2.5 การถ่ายเทมวลและความร้อนในการอบแห้ง (เสรีม จันทร์ฉาย, 2540)

การเคลื่อนตัวของน้ำจากภายในวัสดุขึ้นออกมาที่ผิวเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนและขึ้นกับโครงสร้างของวัสดุ กระบวนการที่เกิดขึ้น เช่น การแพร่ (diffusion) การไหลภายในท่อเล็กในโครงสร้างของวัสดุ (capillary flow) การไหลจากความดันออสโมติก (osmotic pressure) และการไหลเนื่องจากแรงโน้มถ่วง เป็นต้น ดังนั้นการออกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับอธิบายกระบวนการดังกล่าวจึงมีความซับซ้อนมากขึ้น

ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร การลดลงของความชื้นมีลักษณะดังรูปที่ 2.6 หรือแสดงในรูปของอัตราการแห้ง (drying rate) ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 การลดลงของความชื้นในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรทั่วไป (Sodha et al., 1987)



รูปที่ 2.7 อัตราการแห้งของผลิตภัณฑ์การเกษตรระหว่างการอบแห้ง (Sodha et al., 1987)

โดยทั่วไปอัตราการแห้งของผลิตภัณฑ์การเกษตรแบ่งได้เป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงอัตราการแห้งคงที่ (constant-rate regime) ซึ่งเป็นช่วงแรกของการอบแห้ง และช่วงอัตราการแห้งลดลง (falling-rate regime) ซึ่งต่อจากช่วงแรก ในช่วงอัตราการแห้งคงที่การระเหยของน้ำเกิดที่ผิวของผลิตภัณฑ์ โดยลักษณะการระเหยคล้ายกับการระเหยน้ำจากภาชนะ เราสามารถเขียนอัตราการแห้งในช่วงเวลานี้เป็นรูปสมการได้ดังนี้

$$\frac{dM}{dt} = \frac{h_c A}{L} (T_a - T_{sur}) \quad (2.7)$$

- เมื่อ dM/dt คือ อัตราการแห้ง [kg/s]
 h_c คือ การนำความร้อนของฟิล์มอากาศที่อยู่เหนือผิวผลิตภัณฑ์ (thermal conductance of air film) [$W/m^2 \cdot K$]
 A คือ พื้นที่ผิวของผลิตภัณฑ์ [m^2]
 L คือ ความร้อนแฝงของน้ำในผลิตภัณฑ์ [J/kg]
 T_a คือ อุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง [K]
 T_{sur} คือ อุณหภูมิที่ผิวของผลิตภัณฑ์ [K]

สำหรับช่วงที่อัตราการแห้งลดลง (falling-rate regime) โดยทั่วไปเราสามารถเขียนอัตราการแห้งในรูปสมการได้ดังนี้

$$\frac{dM}{dt} = -k (M - M_e) \quad (2.8)$$

- เมื่อ M_e คือ ความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์ [% w.b.]
 M คือ ความชื้นของผลิตภัณฑ์ [% w.b.]
 k คือ ค่าคงที่การอบแห้ง (drying constant) [-]

2.1.4 ผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อการอบแห้ง

ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการลดลงของความชื้นของวัตถุดิบดังนี้

- 1) อุณหภูมิอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง ถ้าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมีค่าสูง อัตราการแห้ง (drying rate) มีค่าสูงกว่ากรณีของอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำ
- 2) ความชื้นสัมพัทธ์ อากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำสามารถรับความชื้นที่ถ่ายเทจากวัตถุดิบได้มากกว่ากรณีที่อากาศมีความชื้นสัมพัทธ์สูง
- 3) ความเร็วอากาศที่ไหลผ่านวัตถุดิบ ถ้าความเร็วอากาศมีค่าสูงความชื้นจากวัตถุดิบถ่ายเทออกมาสู่อากาศได้ดีกว่ากรณีอากาศที่อยู่นิ่งหรือเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำ แต่ผลดังกล่าวมีค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับผลจากอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

2.1.5 ประเภทของการอบแห้ง

การอบแห้งแบบพาความร้อน โดยทั่วไปแบ่งได้เป็น 2 แบบ (Bakker-Arkemar and Hall, 1974) คือ

- 1) การอบแห้งชั้นบาง (thin layer drying)

การอบแห้งประเภทนี้ วัตถุดิบเรียงเป็นชั้นบางๆ หรือหนึ่งชั้น สำหรับการลดลงของความชื้นสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \exp(-kt) \quad (2.9)$$

เมื่อ M_t คือ ความชื้นขณะเวลา t [% w.b]

M_e คือ ความชื้นสมดุล [% w.b]

M_0 คือ ความชื้นเริ่มต้น [% w.b]

k คือ ค่าคงที่การอบแห้ง [-]

- 2) การอบแห้งชั้นหนา (deep bed drying)

เป็นการอบแห้งที่วัตถุดิบซ้อนกันหลายชั้น ตัวอย่างเช่น การอบแห้งข้าวในเครื่องอบแห้งแบบใช้อากาศแวดล้อม (in-bin drying) ในการคำนวณการลดลงของความชื้นในระบบอบแห้ง โดยทั่วไปพิจารณาว่า การอบแห้งชั้นหนาประกอบด้วย การอบแห้งชั้นบางหลายๆ ชั้น เรียงซ้อนกัน และทำการหาสมการสมดุลของมวลและพลังงานที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้น

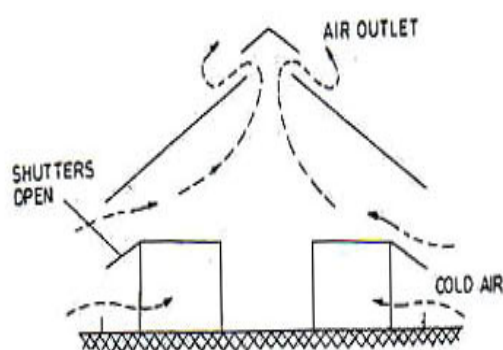
2.2 การอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (solar drying)

การอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เป็นการอบแห้งผลิตภัณฑ์โดยใช้ความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อระเหยน้ำจากผลิตภัณฑ์โดยทั่วไปอาศัยการพาความร้อน (convective heat transfer) ซึ่งสามารถแบ่งการอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาความร้อนได้เป็น 2 แบบ คือแบบการพาความร้อนตามธรรมชาติ (natural convection circulation) ซึ่งอาศัยแรงลอยตัวเนื่องจากการพาความร้อน และแบบการพาความร้อน

ร้อนโดยการบังคับอากาศ (forced-convection circulation) ซึ่งอาศัยแรงดันจากพัดลมเพื่อพาความร้อนไปยังผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ยังอาจแบ่งชนิดของการอบแห้งตามวิธีการรับรังสีโดยสามารถแบ่งได้ 4 แบบ ได้แก่ แบบรับรังสีโดยตรง (direct) แบบรับรังสีโดยอ้อม (indirect) แบบผสม (direct-indirect) และแบบเรือนกระจก สำหรับรายละเอียดของเครื่องอบแห้งชนิดต่างๆ กล่าวในรายละเอียดดังนี้

ก. แบบรับพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรง (direct mode)

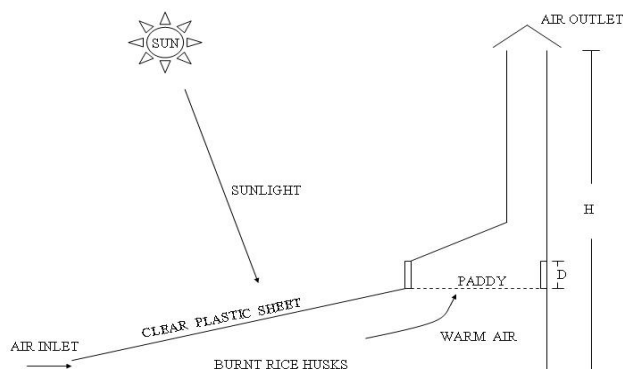
เครื่องอบแห้งประเภทนี้ รังสีอาทิตย์จะตกลงบนผลิตภัณฑ์ที่ต้องการอบแห้งโดยตรง ซึ่งความชื้นจากผลิตภัณฑ์จะถูกพาขึ้นไปด้านบนโดยการไหลของอากาศที่เกิดจากการพาความร้อนตามธรรมชาติ ซึ่งรังสีอาทิตย์ส่งผ่านวัสดุโปร่งแสงอาจเป็นพลาสติกหรือกระจกก็ได้ แผ่นโปร่งแสงดังกล่าว ทำหน้าที่ป้องกันการสูญเสียความร้อนโดยการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน ทั้งยังป้องกันฝุ่นละอองฝน และแมลงรบกวนต่างๆ ด้วย



รูปที่ 2.8 เครื่องอบแห้งแบบรับพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรง (Sodha et al., 1987)

ข. แบบรับพลังงานแสงอาทิตย์ทางอ้อม (indirect mode)

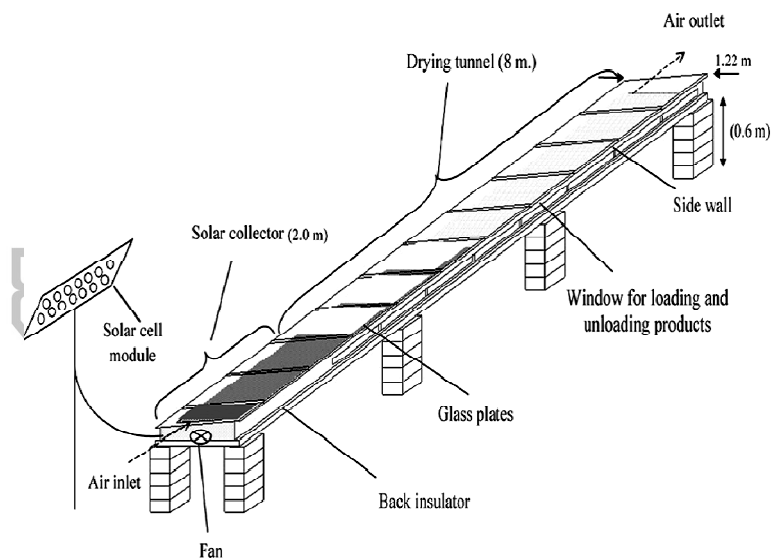
เครื่องอบแห้งประเภทนี้จะมีแผงรับรังสีอาทิตย์ซึ่งทำงานโดยอาศัยการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (natural convection) อากาศร้อนที่ได้จะลอยตัวและไหลผ่านผลิตภัณฑ์ที่ต้องการอบแห้ง



รูปที่ 2.9 เครื่องอบแห้งแบบรับพลังงานแสงอาทิตย์ทางอ้อม (Sodha et al., 1987)

ค. แบบผสม

เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสม ประกอบด้วยส่วนบรรจุผลิตภัณฑ์และส่วนแผงรับรังสีอาทิตย์ ตัวอย่างเช่น เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ลม (solar tunnel dryer) โดยผลิตภัณฑ์ได้รับพลังงานความร้อนทั้งจากแผงรับรังสีอาทิตย์และรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบผลิตภัณฑ์โดยตรง โดยมีพัดลมเป่าอากาศจากแผงรับรังสีอาทิตย์เข้าไปยังส่วนบรรจุผลิตภัณฑ์ (รูปที่ 2.10)



รูปที่ 2.10 เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ลม (Janjai et al., 2009)

ง. แบบเรือนกระจก (greenhouse solar dryer)

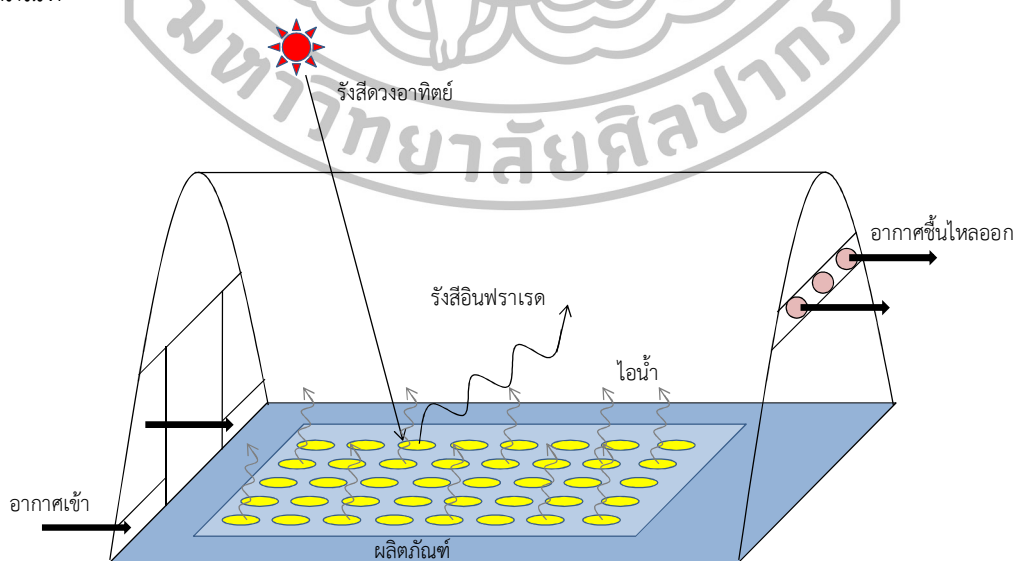
เครื่องอบแห้งแบบเรือนกระจกมีลักษณะเป็นโรงเรือนซึ่งปิดคลุมด้วยวัสดุโปร่งแสง เช่น กระจก หรือพลาสติกชนิดต่างๆ เมื่อรังสีอาทิตย์ส่องผ่านวัสดุดังกล่าวเข้าไปตกกระทบยังผลิตภัณฑ์ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น และแผ่รังสีอินฟราเรดออกมา แต่รังสีอินฟราเรดผ่านแผ่นวัสดุโปร่งแสงออกมาได้น้อย ทำให้ความร้อนถูกกักเก็บอยู่ภายในทำให้อุณหภูมิอากาศภายในสูงขึ้นซึ่งส่งผลให้ผลิตภัณฑ์แห้งเร็วขึ้น โดย

ความชื้นที่ออกมาจากผลิตภัณฑ์จะถูกดูดออกสู่อากาศแวดล้อมภายนอกด้วยพัดลมดูดอากาศ ตัวอย่างเครื่องอบแห้งแบบนี้ คือ เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาโดม

2.3 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาโดม

เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาโดม ได้รับการพัฒนาโดยมหาวิทยาลัยศิลปากร ร่วมกับกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน มีหลายขนาดโดยขนาดที่ใช้กันทั่วไปคือ ขนาดกลาง ซึ่งมีความกว้าง 9 เมตร ยาว 12 เมตร และสูง 3.5 เมตร เครื่องอบแห้งนี้ทำงานโดยอาศัยหลักการเรือนกระจก (greenhouse effect) กล่าวคือเมื่อรังสีอาทิตย์ส่องผ่านแผ่นโพลีคาร์บอเนตเข้าไปตกกระทบผลิตภัณฑ์ และส่วนประกอบต่างๆ ภายในเครื่องอบแห้ง ผลิตภัณฑ์และส่วนประกอบเหล่านั้นจะดูดกลืนรังสีอาทิตย์ทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นและแผ่รังสีอินฟราเรดซึ่งเป็นรังสีความร้อนออกมา แต่รังสีอินฟราเรดส่วนใหญ่ จะไม่สามารถผ่านแผ่นโพลีคาร์บอเนตได้ จึงถูกกักเก็บอยู่ภายในเครื่องอบแห้ง ทำให้อุณหภูมิอากาศและผลิตภัณฑ์ภายในเครื่องอบแห้งสูงขึ้น (รูปที่ 2.11) ซึ่งช่วยให้น้ำในผลิตภัณฑ์ระเหยออกมาได้เร็วกว่าการตากแดดตามธรรมชาติ ความชื้นที่ระเหยออกมาจะถูกพัดลมดูดออกไปภายนอกและอากาศภายนอกจะไหลเข้ามาแทนที่ทางช่องอากาศเข้าด้านหน้า แผ่นโพลีคาร์บอเนตเป็นฉนวนความร้อนที่ดี จึงช่วยลดการสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อน นอกจากนี้ยังช่วยป้องกันฝนและแมลงหรือสิ่งสกปรกต่างๆ นอกจากนี้แผ่นโพลีคาร์บอเนตเคลือบผิวด้วยสารป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ต ทำให้ผลิตภัณฑ์อบแห้งที่ได้ไม่มีสีคล้ำ อีกทั้งโครงสร้างรูปทรงพาราโบลาจะช่วยลดแรงต้านลม ก่อสร้างได้ง่ายและยังมีความสวยงาม

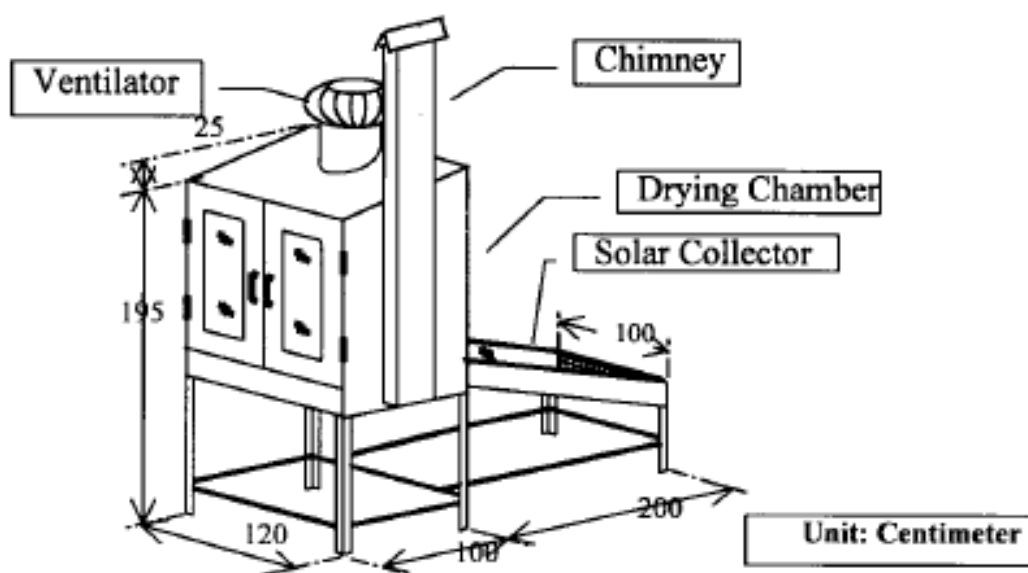
เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาโดมสามารถอบแห้งผักและผลไม้ โดยต้องเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถวางแผ่เป็นชั้นบางๆ บนตะแกรงได้ โดยเครื่องอบแห้งขนาดกลางสามารถอบผลิตภัณฑ์สดได้ประมาณ 200-600 กิโลกรัม และจะแห้งเร็วกว่าการตากแดดธรรมชาติ 1-3 วัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของผลิตภัณฑ์



รูปที่ 2.11 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาโดม

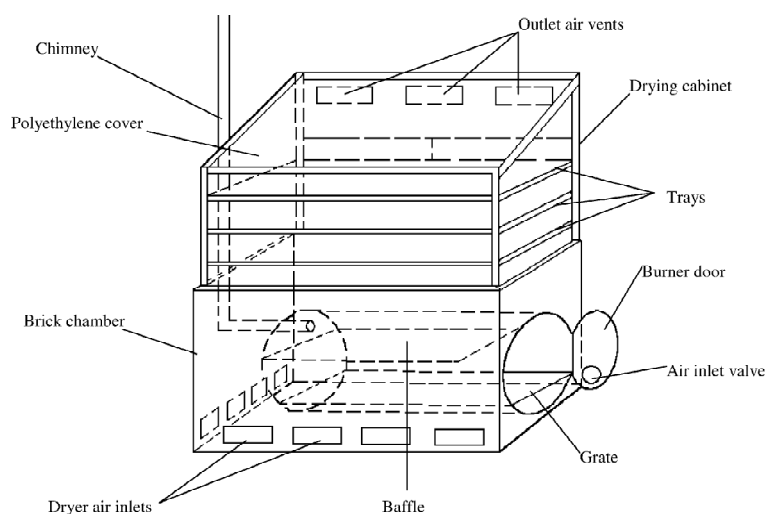
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการใช้เตาชีวมวลเพื่อให้ความร้อนเสริมกับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

Bhattacharya และคณะ (2000) ได้ทำการออกแบบเครื่องอบแห้งโดยใช้อากาศร้อนเพื่ออบแห้งผักและผลไม้ เครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นนี้จะใช้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ในช่วงเวลาที่มีแดด ส่วนกรณีที่มีเมฆมากและช่วงเวลากลางคืนจะใช้พลังงานความร้อนเสริมจากการเผาไหม้ชีวมวลเพียงอย่างเดียว โดยผู้วิจัยได้ทำการทดลองอบกล้วยและพริกอย่างละ 16 กิโลกรัม ซึ่งกรณีที่อบแห้งโดยใช้ความร้อนจากชีวมวลเพียงอย่างเดียวจะใช้เชื้อเพลิงชีวมวลประมาณ 2 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ซึ่งใช้เวลาในการอบประมาณ 20 ชั่วโมง โดยมีระยะเวลาที่ใช้อบแห้งประมาณ 18 และ 22 ชั่วโมงสำหรับกล้วยและพริก ตามลำดับ ขณะที่การอบแห้งแบบตากแดดธรรมชาติต้องใช้เวลา 66 ชั่วโมงสำหรับกล้วย และ 48 ชั่วโมงสำหรับการอบพริก



รูปที่ 2.12 ส่วนประกอบของเครื่องอบแห้งที่พัฒนาโดย Bhattacharya และคณะ (2000)

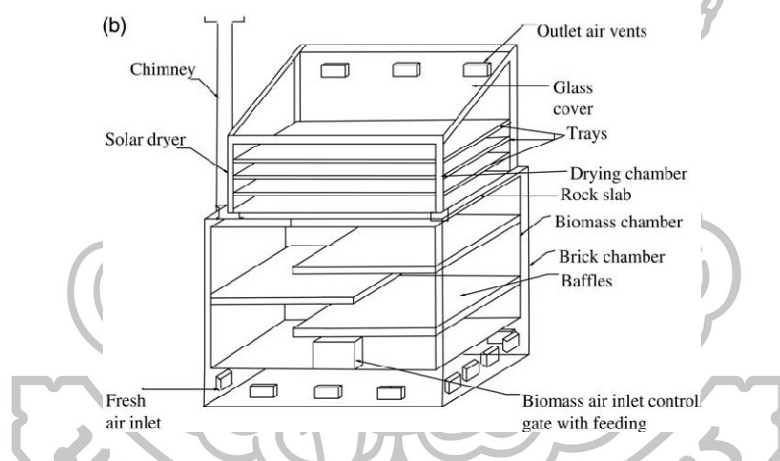
Benon และ Fuller (2002) ได้ทำการสร้างเครื่องอบแห้งที่ใช้ความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์และเตาชีวมวล โดยเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้น (รูปที่ 2.13) มีขนาดเล็กเหมาะกับการอบผลไม้แห้งและผัก ในการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งผู้วิจัยได้ทดลองอบสับปะรดสดจำนวน 20-22 กิโลกรัม เรียงอยู่ในชั้นเดียวกันสับปะรดแต่ละชั้นหนา 0.01 เมตร ประสิทธิภาพการอบแห้งโดยรวมของเครื่องอบแห้งมีค่าเท่ากับ 9% ส่วนประสิทธิภาพการอบแห้งของเครื่องอบแห้งที่ใช้ความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวมีค่าเท่ากับ 22% สำหรับประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งที่ใช้พลังงานความร้อนจากเตาชีวมวลมีค่าเท่ากับ 27%



รูปที่ 2.13 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์โดยการพาความร้อนแบบธรรมชาติและมีพลังงานความร้อนเสริมจากชีวมวล (Benon และ Fuller, 2002)

Jaishree และ Vijay (2005) ได้ทำการสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาความร้อนแบบธรรมชาติและใช้ความร้อนเสริมจากเตาชีวมวล (รูปที่ 2.14) ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการหาประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องอบแห้งโดยใช้ในการทดลองอบขิง ขมิ้น และบอระเพ็ด ในช่วงฤดูร้อนที่เมืองนิวเดลี ประเทศอินเดียผลที่ได้พบว่าในการอบขิง ขมิ้น และบอระเพ็ด ใช้เวลาในการอบ 33 36 และ 48 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยค่าความชื้นมีค่าลดลงจาก 319.74%, d.b. เป็น 11.8%, d.b. 259.96%, d.b. เป็น 8.8%, d.b. และจาก 257.45%, d.b. เป็น 9.67%, d.b. สำหรับขิง ขมิ้น และบอระเพ็ด ตามลำดับ





รูปที่ 2.14 (a) ภาพของเครื่องอบแห้งแบบใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานความร้อนจากชีวมวล (b) แผนภาพของเครื่องอบแห้งดังกล่าว (Jaishree และ Vijay, 2005)

ทวีชัย นิมาแสง และณัฐวุฒิ เนียมสอน (2010) ได้ทำการพัฒนาเครื่องอบแห้งเนื้อลำไยที่ใช้ฟืนเป็นเชื้อเพลิง 2 เครื่อง ซึ่งใช้วัสดุในการทำหน้าที่แตกต่างกัน แบบแรกมีผนังทำด้วยกระเบื้องแผ่นเรียบและบุด้วยฉนวนโฟมเอทธีลีน แบบที่สองเป็นผนังคอนกรีตบล็อกฉนวนปูน ผู้วิจัยทำการทดลองอบแห้งเนื้อลำไยเปรียบเทียบกับกรอบโดยเครื่องอบแห้งแบบพื้นบ้านชนิดผนังทำด้วยสังกะสี พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศร้อนที่ชั้นวางถาดล่างสุดของเครื่องอบแห้งแต่ละโรงมีค่าเฉลี่ย 66.4°C 70.2°C และ 72.6°C โดยมีอัตราการใช้เชื้อเพลิงไม้ฟืนเฉลี่ย 35.2 23.7 และ 20.8 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับ 19.97% 32.58% และ 39.74% ตามลำดับ



รูปที่ 2.15 ก. เครื่องอบแห้งลำไยแบบพื้นบ้าน (ผนังทำจากสังกะสี) ข. เครื่องอบแห้งที่ผนังทำด้วยกระเบื้องแผ่นเรียบและบุด้วยฉนวนโพลีเอทิลีน และ ค. เครื่องอบแห้งที่ผนังคอนกรีตบล็อกฉาบปูน (ทวีชัย นิมาแสง และณัฐวุฒิ เนียมสอน, 2010)

Madhlopa และ Ngwalo (2007) ได้ทำการสร้างเครื่องอบแห้งที่อาศัยการพาความร้อนแบบธรรมชาติ โดยมีเตาซึ่งใช้เชื้อเพลิงชีวมวลเป็นความร้อนเสริม (รูปที่ 2.16) โดยส่วนประกอบหลักของระบบอบแห้งพลังงานเสริม ได้แก่ ส่วนของเตาชีวมวล ที่เก็บสะสมมวลความร้อน (collector-storage thermal mass) และห้องสำหรับอบผลิตภัณฑ์ ในการทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งที่สร้างขึ้น ผู้วิจัยได้นำเครื่องที่สร้างขึ้นไปใช้ในการทดลองอบสับปะรดซึ่งแบ่งออกเป็น 3 การทดลอง คือ 1. กรณีใช้การพาความร้อนตามธรรมชาติ 2. กรณีที่ใช้ความร้อนจากเตาชีวมวล และ 3. กรณีที่ใช้ทั้งการพาความร้อนตามธรรมชาติและความร้อนจากเตาชีวมวล จากนั้นหาค่าความชื้นและวิตามินซี ของสับปะรดสดและแห้ง จากผลการทดลองพบว่า เครื่องอบแห้งที่อาศัยการพาความร้อนแบบธรรมชาติสามารถให้ความร้อนในการอบสับปะรดได้เพียงพอในวันที่ท้องฟ้าปราศจากเมฆ และเครื่องอบแห้งที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลเป็นความร้อนเสริมก็สามารถทำความร้อนได้เพียงพอในวันที่อากาศไม่เหมาะสมต่อการอบแห้ง โดยปริมาณความชื้นของสับปะรดลดลงจาก 669%, d.b. ไปถึง 11%, d.b. และสับปะรดแห้งมีคุณค่าทางโภชนาการสูง โดยค่าเฉลี่ยของความชื้นในวันสุดท้ายกรณีที่ใช้ความร้อนจากเตาชีวมวล และกรณีที่ใช้ทั้งการพาความร้อนตามธรรมชาติร่วมกับความร้อนจากเตาชีวมวลมีค่าเท่ากับ 15% 11% และ 13% สำหรับกรณีใช้การพาความร้อนตามธรรมชาติ ตามลำดับ



รูปที่ 2.16 ลักษณะของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่พัฒนาโดย Madhlopa และ Ngwalo (2007)

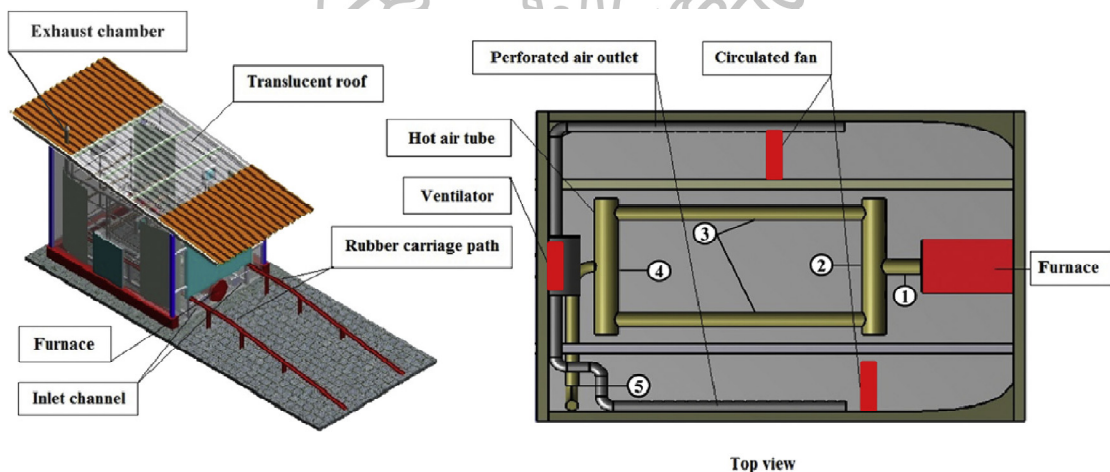
Sonthikun และคณะ (2016) ได้ออกแบบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้พลังงานความร้อนเสริมจากชีวมวลสำหรับอบแห้งยางพาราแผ่น เครื่องอบแห้งดังกล่าวประกอบด้วย 1. ส่วนของห้องอบแห้ง 2. ชุดแลกเปลี่ยนความร้อน และ 3. เตาชีวมวล โดยในการอบจะใช้ความร้อนทางอ้อมเพื่อไม่ให้ยางพาราสัมผัสกับควันโดยตรง นอกจากนี้ในขณะที่ทำการอบผู้วิจัยจะลดการใช้พลังงานจากชีวมวลให้ได้น้อยที่สุด โดยออกแบบเครื่องอบแห้งที่สามารถนำความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้งานซึ่งในการออกแบบห้องอบแห้ง (drying chamber) ผู้วิจัยได้ทำการจำลองอัตราการไหลทางไดนามิกส์ ได้แก่ การกระจายตัวของอนุภาคและอัตราการไหลของอากาศ เพื่อช่วยในการออกแบบห้องอบแห้งให้มีประสิทธิภาพสูงสุดโดยใช้โปรแกรม CFD สุดท้ายผู้วิจัยได้ทำการทดสอบเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นโดยทำการอบแห้งยางพาราจำนวน 100 แผ่น ผลที่ได้พบว่าปริมาณความชื้นของยางพารามีค่าลดลงจาก 34.26% (d.b.) เป็น 0.34% (d.b.) ในเวลา 48 ชั่วโมง สีและพื้นผิวของยางพารามีคุณภาพดีกว่าการอบโดยใช้วิธีรมควัน



(a) Front view

(b) Side view

รูปที่ 2.17 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์และชีวมวลสำหรับอบแห้งยางพาราแผ่น



รูปที่ 2.18 ลักษณะของเครื่องอบแห้งยางพาราแผ่น

จากการศึกษางานวิจัยด้านการอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ผ่านมา ยังไม่พบการพัฒนากระบวนการทำอากาศร้อนสำหรับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาล้อม ดังนั้นในงานนี้ผู้วิจัยจึงเสนอที่จะพัฒนากระบวนการทำอากาศร้อนสำหรับเครื่องอบแห้งดังกล่าวตามรายละเอียดในบทต่อไป

บทที่ 3

วิธีวิจัยและผล

3.1 การหาปริมาณความร้อนสำหรับใช้ในการอบแห้ง

ในปัจจุบันเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาโดมนิยมใช้เพื่อการอบแห้งกล้วยในเชิงพาณิชย์โดยทั่วไปกล้วยที่เริ่มอบจะมีความชื้นประมาณ 70%, w.b. ซึ่งในวันแรกต้องลดความชื้นลงให้เหลือประมาณ 50%, w.b. ในตอนเย็น มิฉะนั้นกล้วยจะขึ้นราในช่วงคืนแรก ถ้าในวันแรกท้องฟ้าครึ้มหรือฝนตกจะต้องมีแหล่งพลังงานความร้อนเสริม ดังนั้นผู้วิจัยจะออกแบบระบบทำอากาศร้อนโดยใช้แลกเปลี่ยนเชื้อเพลิงสำหรับให้ความร้อนเสริมกับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาโดม

ในการหาปริมาณพลังงานความร้อนที่ต้องการสำหรับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาโดม ผู้วิจัยได้ตั้งสมมติฐานว่า ระบบทำอากาศร้อนนี้ใช้สำหรับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาโดมขนาดกลาง (พื้นที่ฐาน $9 \times 12 \text{ m}^2$) ซึ่งมีประสิทธิภาพประมาณ 25% สามารถอบกล้วยได้ครั้งละ 200 กิโลกรัม โดยจะคำนวณพลังงานความร้อนที่ต้องการตามรายละเอียดดังนี้

- 1) หาปริมาณน้ำที่ต้องการระเหยภายในเวลา 1 วัน จะคำนวณจากสมการ

$$m_{\text{water}} = m_{\text{product}} \left(\frac{M_i - M_f}{100 - M_f} \right) \quad (3.1)$$

เมื่อ m_{water} คือ ปริมาณน้ำในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการระเหย [kg]

m_{product} คือ มวลของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการอบ [kg]

M_i คือ ความชื้นเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ [% , w.b.]

M_f คือ ความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ [% , w.b.]

ในกรณีนี้ผู้วิจัยจะแทนค่าของ $m_{\text{product}} = 200 \text{ kg}$, $M_i = 70\%$, w.b., $M_f = 50\%$, w.b. ลงในสมการ (3.1) จะได้ว่า

$$m_{\text{water}} = (200 \text{ kg}) \left(\frac{(70 - 50)\% , \text{w.b.}}{(100 - 50)\% , \text{w.b.}} \right)$$

$$m_{\text{water}} = 80 \text{ kg}$$

ดังนั้น ปริมาณน้ำที่ต้องการระเหยภายในเวลา 1 วันจะมีค่าเท่ากับ 80 kg (ในที่นี้คิดว่าเครื่องอบแห้งทำงานเป็นเวลา 10 ชั่วโมงต่อวัน)

2) หาความร้อนจำเพาะของการระเหยน้ำ (L) จากกล้วย ผู้วิจัยจะดำเนินการหาตามวิธีการในภาคผนวกที่ 1 ซึ่งจะได้ค่าความร้อนจำเพาะของการระเหยน้ำของกล้วยเฉลี่ยเท่ากับ 2,737.8 kJ/kg

3) หาพลังงานความร้อนที่ต้องป้อนให้กับเครื่องอบแห้ง (Q_{supply}) เริ่มต้นด้วยการคำนวณหาปริมาณพลังงานความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำ ($Q_{\text{evaporation}}$) จากสมการ

$$Q_{\text{evaporation}} = m_{\text{water}} \times L \quad (3.2)$$

เมื่อ $Q_{\text{evaporation}}$ คือ พลังงานความร้อนที่ต้องใช้ในการระเหยน้ำ [J]

L คือ ความร้อนจำเพาะของการระเหยน้ำของกล้วย [2,737.8 kJ/kg]

แทนค่า m_{water} และ L ที่ได้ลงในสมการ (3.2) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} Q_{\text{evaporation}} &= (80\text{kg}) \times (2,737.8\text{kJ/kg}) \\ &= 219,020 \text{ kJ} \end{aligned}$$

$$\text{หรือ } Q_{\text{evaporation}} = 219.02 \text{ MJ}$$

จากนั้นผู้วิจัยจะทำการคำนวณพลังงานความร้อนที่ต้องป้อนให้กับเครื่องอบแห้ง (Q_{supply}) โดยใช้สมการ

$$Q_{\text{supply}} = \frac{Q_{\text{evaporation}}}{\eta_{\text{dryer}}} \quad (3.3)$$

เมื่อ η_{dryer} คือ ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง (โดยตั้งสมมติฐานว่าเครื่องอบแห้งมี

ประสิทธิภาพ 25 % หรือ $\eta_{\text{dryer}} = 0.25$)

แทนค่า $Q_{\text{evaporation}}$ และ η_{dryer} ลงในสมการ (3.3) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} Q_{\text{supply}} &= \frac{219.02 \text{ MJ}}{0.25} \\ &= 876.08 \text{ MJ} \end{aligned}$$

4) หาปริมาณแกลบที่ต้องการใช้ โดยเริ่มจากการคำนวณปริมาณพลังงานความร้อนที่ต้องเผาแกลบจากสมการ

$$Q_{\text{stove}} = \frac{Q_{\text{supply}}}{\eta_{\text{stove}}} \quad (3.4)$$

เมื่อ Q_{stove} คือ พลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาแกลบ [J]

Q_{supply} คือ พลังงานความร้อนที่ต้องการ [J]

η_{stove} คือ ประสิทธิภาพของระบบทำอากาศร้อน (ในที่นี้ผู้วิจัยได้ตั้งสมมติฐานว่า

η_{stove} มีค่าเท่ากับ 0.7)

แทนค่าลงในสมการ (3.4) จะได้

$$Q_{\text{stove}} = \frac{876.08 \text{ MJ}}{0.7} = 1,251.54 \text{ MJ}$$

จากนั้นจะทำการคำนวณหาปริมาณแกลบที่ต้องการใช้ได้จากสมการ

$$m_{\text{husk}} = \frac{Q_{\text{stove}}}{q_{\text{husk}}} \quad (3.5)$$

เมื่อ m_{husk} คือ ปริมาณแกลบที่ต้องการใช้ [kg]

q_{husk} คือ ค่าความร้อนของแกลบ (heating value) [J/kg]

ในที่นี้ $Q_{\text{stove}} = 1,251.54 \text{ MJ}$, $q_{\text{husk}} = 15,899.2 \text{ kJ/kg}$ (q_{husk} ได้จากการวิเคราะห์ของสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ตามใบรับรองในภาคผนวกที่ 2) ดังนั้นจะได้ว่า

$$m_{\text{husk}} = \frac{1,251.54 \text{ MJ}}{15.89 \text{ MJ/kg}} = 79 \text{ kg}$$

ดังนั้นปริมาณแกลบที่ต้องใช้ภายในเวลา 1 วัน (คิด 10 ชั่วโมง) เท่ากับ 79 kg หรือคิดเป็นอัตราในการป้อนแกลบ 7.9 kg/hr

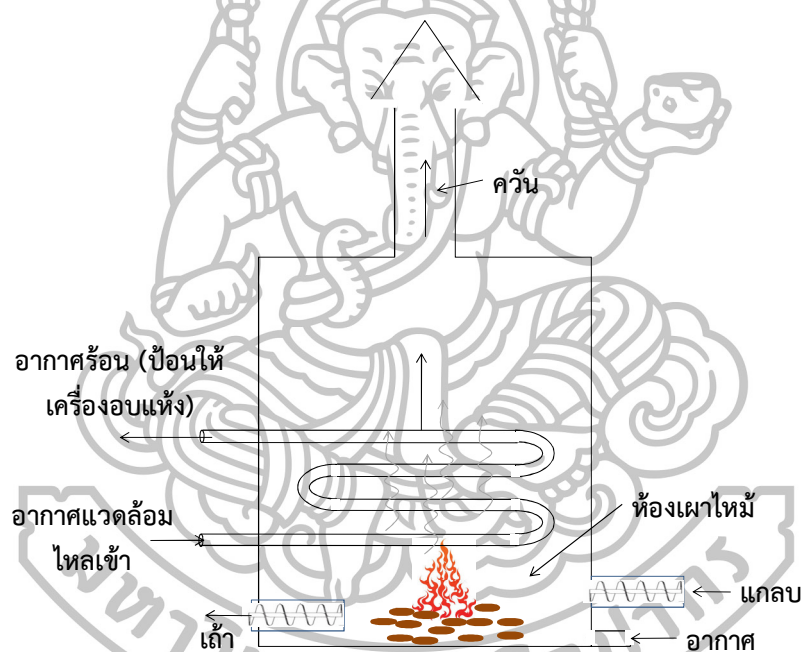
3.2 การออกแบบเชิงแนวคิด (conceptual design) ระบบทำอากาศร้อน

เมื่อทำการคำนวณปริมาณพลังงานความร้อนและปริมาณแกลบที่ต้องการแล้ว ผู้วิจัยจะทำการออกแบบเชิงแนวคิดโดยตั้งข้อกำหนด (criteria) ดังนี้

1. ใช้สแตนเลสในการสร้างระบบทำอากาศร้อน ทั้งนี้เพราะมีความทนทานต่อการเผาไหม้และการสึกกร่อน อีกทั้งสามารถหาซื้อได้ทั่วไป

2. ใช้หลักการแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนแบบอากาศสู่อากาศ (air-to-air) เพราะจะได้อากาศร้อนไปใช้ในเครื่องอบแห้งโดยตรง
3. ใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง เพราะเผาไหม้ง่ายและจัดหาได้ทั่วไป
4. ใช้สกรูลำเลียงสำหรับป้อนเชื้อเพลิง เพื่อให้สะดวกต่อการควบคุมปริมาณแกลบ
5. ใช้สกรูลำเลียงถ่าง เพื่อให้สะดวกต่อการนำถ่านออกมาภายนอก
6. ใช้อากาศเป็นฉนวน เพื่อลดค่าใช้จ่ายค่าฉนวน
7. ใช้ขดลวดความร้อน (electric heater) เพื่อจุดเชื้อเพลิงและเพื่อความสะดวกในการจุดเชื้อเพลิง
8. ใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติ เพื่อให้สะดวกในการใช้งาน

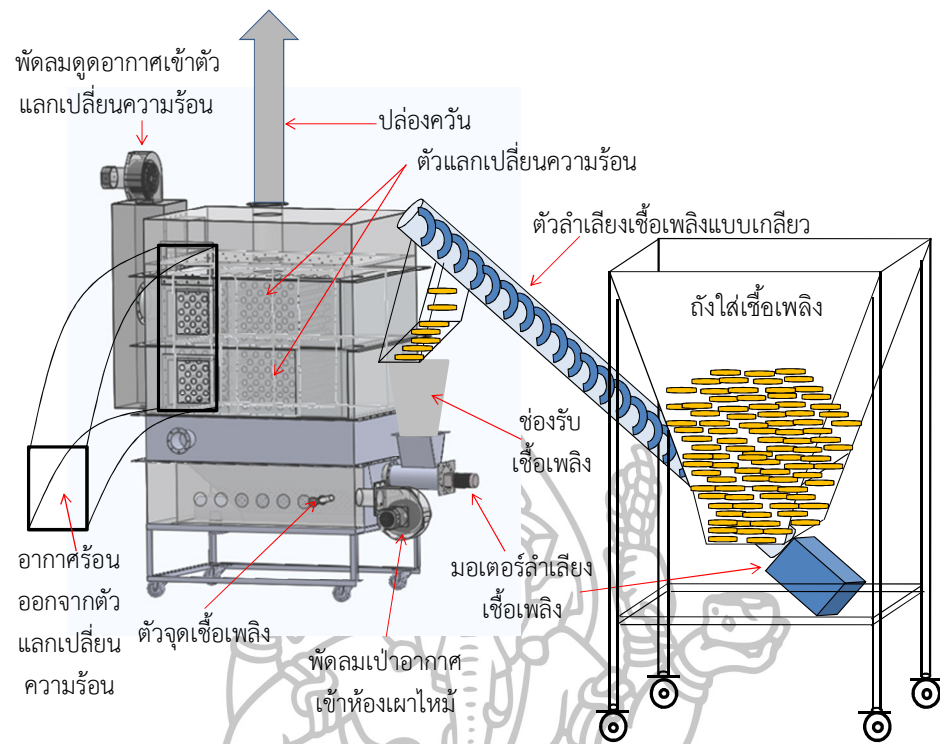
จากนั้นผู้วิจัยจะออกแบบเชิงแนวคิดของระบบทำอากาศร้อน โดยระบบดังกล่าวจะมีองค์ประกอบหลัก ได้แก่ ห้องเผาไหม้ (combustion chamber) และตัวแลกเปลี่ยนความร้อนแบบอากาศสู่อากาศ (air-to-air heat exchanger) ตามรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แบบเชิงแนวคิดของระบบทำอากาศร้อน

ผู้วิจัยจะใส่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อนไว้ในห้องเผาไหม้ ซึ่งจะใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง โดยมีตัวป้อนแกลบแบบเกลียว (screw feeder) และมีตัวนำถ่านที่เกิดจากการเผาไหม้ออกมาภายนอก ตัวนำถ่านจะออกแบบให้มีลักษณะเป็นเกลียว ห้องเผาไหม้จะมีพัดลมดูดอากาศจากภายนอกและเป่าเข้าไปในห้องเผาไหม้เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ได้ดี ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้จะถูกถ่ายเทไปให้อากาศในตัวแลกเปลี่ยนความร้อน อากาศร้อนที่ได้จะนำไปป้อนให้กับเครื่องอบแห้ง

จากนั้นผู้วิจัยจะออกแบบระบบทำอากาศร้อนตามแนวคิดที่กำหนดซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.2

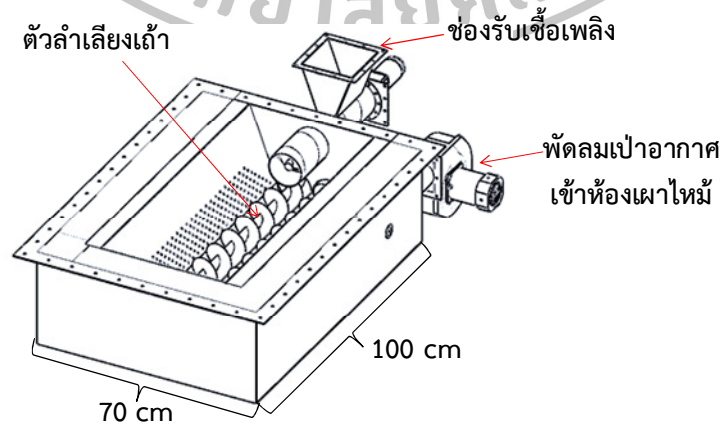


รูปที่ 3.2 ลักษณะของระบบทำอากาศร้อนที่ออกแบบตามแนวคิดที่กำหนด

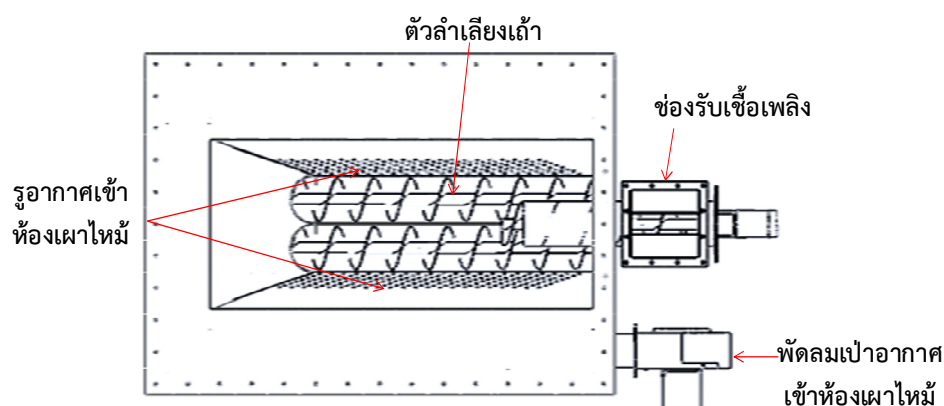
ระบบทำอากาศร้อนที่ผู้วิจัยได้ออกแบบประกอบด้วย

1) ห้องเผาไหม้

ผู้วิจัยจะออกแบบห้องเผาไหม้ที่ใช้สำหรับเผาไหม้แกลบ โดยให้บริเวณด้านล่างของห้องเผาไหม้มีลักษณะเป็นรูปเพื่อเป่าอากาศเข้าไปช่วยให้การเผาไหม้ดีขึ้น และใช้ตัวลำเลียงถั่วแบบเกลียวเพื่อนำถั่วออกจากห้องเผาไหม้ ลักษณะของห้องเผาไหม้แสดงได้ดังรูปที่ 3.3



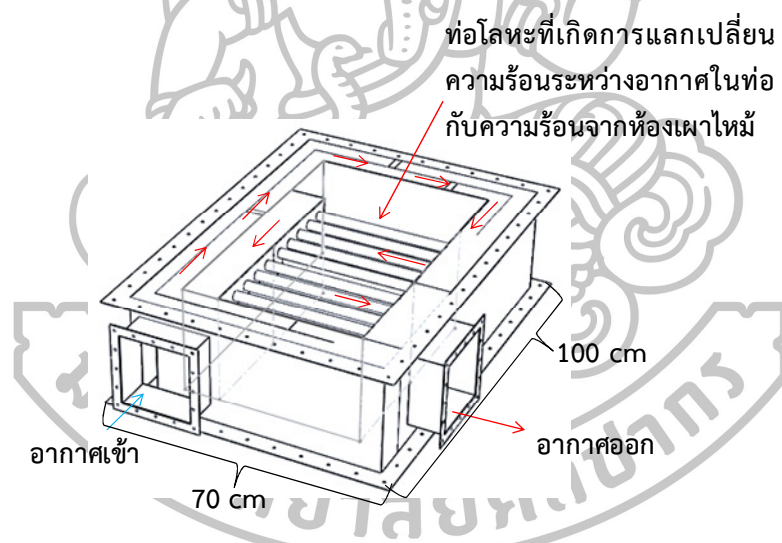
รูปที่ 3.3 ลักษณะของห้องเผาไหม้



รูปที่ 3.3 (ต่อ)

2) ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน

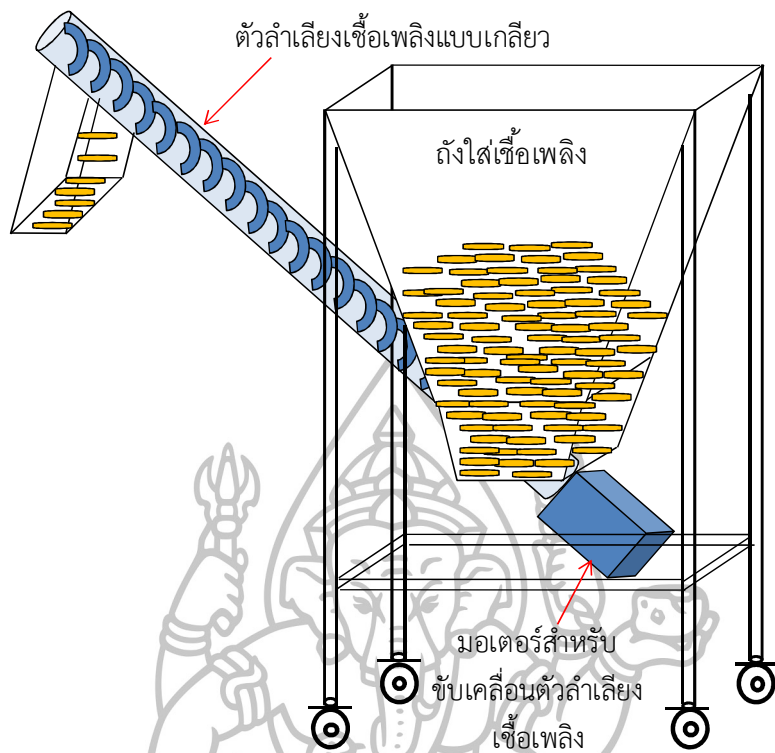
ผู้วิจัยออกแบบตัวแลกเปลี่ยนความร้อนให้มีลักษณะดังรูปที่ 3.4 โดยมีท่อสำหรับให้อากาศแวดล้อมเข้าไปไหลเวียนเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้



รูปที่ 3.4 ลักษณะของตัวแลกเปลี่ยนความร้อน (ลูกศรแสดงทิศทางการไหลของอากาศ)

3) ระบบป้อนเชื้อเพลิง

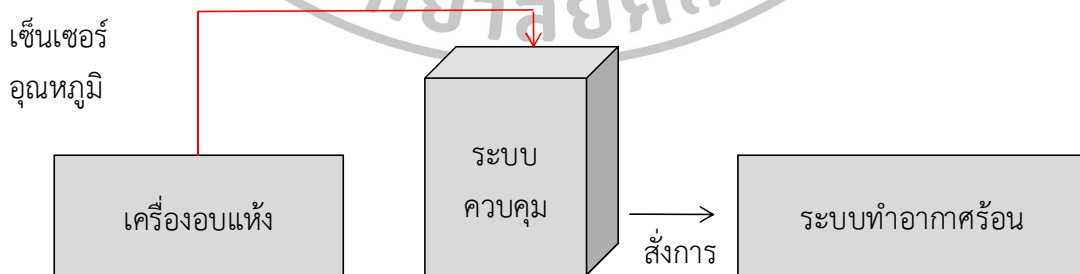
ผู้วิจัยได้ออกแบบระบบป้อนเชื้อเพลิงให้มีลักษณะเป็นถังขนาด 1 ลูกบาศก์เมตร สำหรับใส่ถ่าน และมีท่อสำหรับป้อนถ่านเข้าไปยังห้องเผาไหม้ ภายในท่อนำถ่านจะมีตัวนำถ่านแบบเกลียว ส่วนขาตั้งระบบป้อนเชื้อเพลิงจะติดตั้งล้อ เพื่อความสะดวกในการเคลื่อนย้าย ลักษณะของระบบป้อนเชื้อเพลิงแสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ระบบป้อนเชื้อเพลิง

4) ระบบควบคุมการทำงาน

ผู้วิจัยได้ออกแบบระบบควบคุมการทำงานของระบบทำอากาศร้อน โดยติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิไว้ภายในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ อุณหภูมิที่ได้จะเป็นตัวกำหนดให้ระบบควบคุมสั่งการให้ระบบทำอากาศร้อนทำงานตามแผนภูมิในรูปที่ 3.6 กล่าวคือ ถ้าอุณหภูมิอากาศในเครื่องอบแห้งต่ำกว่าที่กำหนดระบบควบคุมจะสั่งให้ระบบทำอากาศร้อนทำงาน และจะหยุดทำงานถ้าอุณหภูมิอากาศในเครื่องอบแห้งสูงกว่าที่กำหนด



รูปที่ 3.6 แผนภูมิแสดงการทำงานของระบบควบคุม

3.3 การสร้างระบบทำอากาศร้อน

ผู้วิจัยได้ทำการสร้างส่วนประกอบต่างๆ ตามแนวคิดในหัวข้อที่ 3.2 ตามรายละเอียดดังนี้

1) ห้องเผาไหม้

ผู้วิจัยได้ทำการสร้างห้องเผาไหม้โดยใช้สแตนเลสหนา 2 มิลลิเมตร ด้านล่างของห้องเผาไหม้จะเจาะเป็นรูเพื่อให้อากาศเข้าห้องเผาไหม้ และมีตัวลำเลียงแบบเกลียวโดยใช้มอเตอร์ที่รอบที่สามารถปรับความเร็วรอบได้ 2 ชุดเพื่อนำถ่านออกจากห้องเผาไหม้ ลักษณะของห้องเผาไหม้และตัวลำเลียงถ่านแสดงได้ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ลักษณะของห้องเผาไหม้และตัวลำเลียงถ่าน

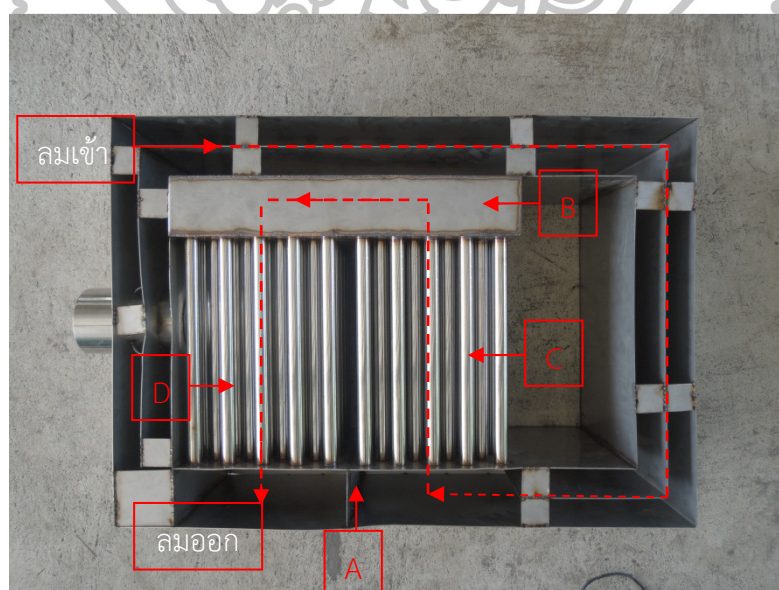
2) ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน

ผู้วิจัยได้สร้างตัวแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้ท่อสแตนเลสเชื่อมต่อกัน (รูปที่ 3.8) จากนั้นนำตัวแลกเปลี่ยนความร้อนวางซ้อนๆ กันในห้องเผาไหม้ โดยออกแบบให้ท่อดังกล่าวรับความร้อนจากการเผาไหม้แล้วถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศที่ไหลภายในท่อ และออกแบบให้ลักษณะการไหลของอากาศตามรูปที่ 3.9 ทั้งนี้เพื่อใช้อากาศเป็นฉนวนของตัวแลกเปลี่ยนความร้อนด้วย นอกจากนี้ได้แบ่งตัวแลกเปลี่ยนความร้อนเป็น 2 ชุด ซึ่งวางซ้อนกัน ทั้งนี้เพื่อให้สะดวกในการสร้างและซ่อมบำรุง



รูปที่ 3.8 การประกอบตัวแลกเปลี่ยนความร้อน

ตัวแลกเปลี่ยนความร้อนที่สร้างขึ้นนี้ ผู้วิจัยเลือกใช้ท่อสแตนเลสขนาด 1 นิ้ว ยาว 40 เซนติเมตร จำนวน 84 ท่อน โดย 42 ท่อนแรกต่อรวมเข้ากับท่อสแตนเลสด้านลมเข้า ส่วนอีก 42 ท่อนที่เหลือต่อรวมเข้ากับท่อสแตนเลสด้านลมร้อนออก ภายในกล่องสี่เหลี่ยมด้านที่มีท่อลมออกจะมีแผ่นสแตนเลสกันเพื่อ บังคับให้อากาศไหลเข้าในตัวแลกเปลี่ยนความร้อน (ฝั่ง A ในรูปที่ 3.9) ส่วนภายในกล่องสี่เหลี่ยมทางด้าน ปลายรวมท่ออีกด้าน (ฝั่ง B) จะไม่มีแผ่นกัน เนื่องจากจะทำให้อากาศที่ออกจากตัวแลกเปลี่ยนความร้อน (ฝั่ง C) ไหลไปยังท่อฝั่ง D แล้วไหลออกสู่ทางด้านท่อลมร้อนออก (รูปที่ 3.9)



รูปที่ 3.9 ตัวแลกเปลี่ยนความร้อนที่พัฒนาขึ้น (ลูกศรบอกทิศทางการไหลของอากาศ)

3) ตัวป้อนเชื้อเพลิง

ตัวป้อนเชื้อเพลิงนี้ ประกอบด้วยถังเก็บเชื้อเพลิงและตัวลำเลียงเชื้อเพลิง (รูปที่ 3.10) ถังเก็บเชื้อเพลิงทำหน้าที่บรรจุเชื้อเพลิง ซึ่งมีความจุเท่ากับ 1 ลูกบาศก์เมตร โดยในงานนี้ ผู้วิจัยได้ติดตั้งล้อเพื่อให้สะดวกในการเคลื่อนย้าย

ตัวป้อนเชื้อเพลิงเป็นแบบเกลียว ซึ่งขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ขนาด 1/4 แรงม้า โดยเชื้อเพลิงจะไหลลงมาในท่อลำเลียงบริเวณด้านล่างของถังเก็บเชื้อเพลิงซึ่งอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก จากนั้นเชื้อเพลิงจะถูกลำเลียงขึ้นยังปล่องปล่อยเชื้อเพลิง ระบบป้อนเชื้อเพลิงจะถูกควบคุมการทำงานโดยอุณหภูมิ กล่าวคือ ระบบป้อนเชื้อเพลิงจะป้อนเชื้อเพลิงเข้าไปยังห้องเผาไหม้เพื่อให้อุณหภูมิในเครื่องอบแห้งมีอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส คงที่ตลอดเวลา โดยอัตราการป้อนเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ 8.5 kg/hr



รูปที่ 3.10 ลักษณะของตัวป้อนเชื้อเพลิง

4) ระบบควบคุมการทำงานของระบบทำอากาศร้อน

ระบบทำอากาศร้อนที่สร้างขึ้นนี้มีขั้นตอนการทำงานที่ละเอียดอ่อน ดังนั้นจึงต้องควบคุมปริมาณพลังงานความร้อนให้สม่ำเสมอ โดยใช้อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (temperature controller) แสดงดังรูปที่ 3.11 อุปกรณ์ดังกล่าวทำหน้าที่ประมวลผลสัญญาณอินพุตจากเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ (temperature sensor) ที่ติดตั้งไว้ในเครื่องอบแห้ง อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมินี้จะส่งงานไปยังตัวป้อนเชื้อเพลิงและตัวจุดเชื้อเพลิง ระบบดังกล่าวจะควบคุมการทำงานโดยใช้ Programming Language Controller (PLC) หลักการทำงานของอุปกรณ์ดังกล่าวคือ temperature sensor ทำหน้าที่วัดอุณหภูมิแล้วส่งมาที่ temperature

controller หากอุณหภูมิไม่เป็นไปตามที่ตั้งไว้ temperature controller จะจ่ายแรงดันไปให้ระบบลำเลียงเชื้อเพลิงและขดลวดความร้อน (electric heater) เพื่อลำเลียงเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้และจุดเชื้อเพลิง เมื่อเชื้อเพลิงติดไฟแล้ว ระบบจะสั่งปิดขดลวดความร้อน และเปิดพัดลมดูดอากาศแวดล้อม (Blower) เข้าไปแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนในห้องเผาไหม้แล้วเป่าอากาศร้อนที่ได้เข้าไปในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ เมื่ออุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งมีค่าตามที่กำหนดไว้ temperature controller จะหยุดการทำงานของระบบทำอากาศร้อน แผนผังการทำงานของระบบควบคุมการทำงานของระบบทำอากาศร้อนแสดงดังรูปที่ 3.12

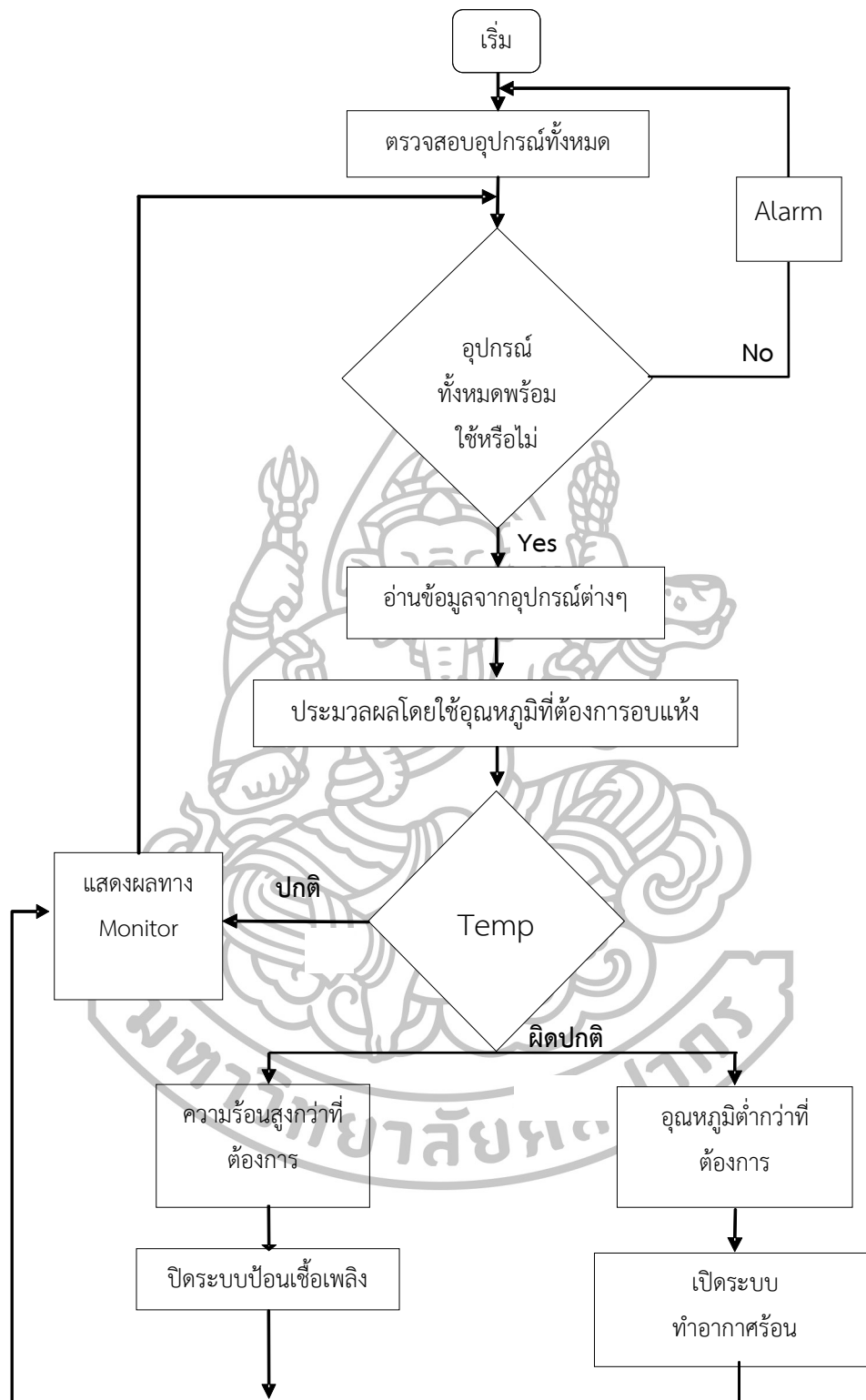


ก.



ข.

รูปที่ 3.11 ก. ระบบควบคุมการทำงาน ข. อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (temperature controller)



รูปที่ 3.12 แผนภูมิการทำงานของระบบควบคุมอุณหภูมิ

3.4 การทดสอบสมรรถนะของระบบทำอากาศร้อน

หลังจากการออกแบบและสร้างระบบทำอากาศร้อนเพื่อให้พลังงานความร้อนกับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาโดมแล้ว ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบสมรรถนะของระบบทำอากาศร้อน โดยใช้ระบบทำอากาศร้อนสำหรับให้ความร้อนกับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาโดมโดยไม่มีผลิตภัณฑ์ เพื่อหาพลังงานความร้อนที่ได้จากระบบทำอากาศร้อนในช่วงที่ความเข้มแสงอาทิตย์ไม่เพียงพอหรือฝนตก ในสภาพอากาศดังกล่าวเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ต้องการพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งหนึ่งวัน (10 ชั่วโมง) เท่ากับ 876.08 MJ ตามที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.1 การหาค่าพลังงานความร้อนของระบบทำอากาศร้อน สามารถหาได้จากสมการ

$$Q = mc\Delta T \quad (3.6)$$

เมื่อ	Q	คือ พลังงานความร้อน [J/hr]
	m	คือ มวลอากาศที่ไหลผ่านระบบทำอากาศร้อน [kg/hr]
	c	คือ ความร้อนจำเพาะของอากาศ [1,007 J/kg .K]
	ΔT	คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศขาเข้าและขาออกจากระบบทำอากาศร้อน [K]

การคำนวณหาพลังงานความร้อนที่ได้จากระบบทำอากาศร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการ (3.6) โดยแทนค่าต่างๆ ลงในสมการ

$$\begin{aligned} Q &= (3,791 \text{ kg/hr}) \times (1,007 \text{ kJ/kg.K}) \times (408 \text{ K} - 308 \text{ K}) \\ &= 381,753 \text{ kJ/hr} \end{aligned}$$

หรือ $Q = 106.04 \text{ kW}$

จากค่าพลังงานความร้อนที่ได้พบว่า ระบบทำอากาศร้อนจะให้ค่าพลังงานความร้อนใน 1 ชั่วโมงเท่ากับ 381.8 MJ ดังนั้นถ้าใช้ระบบทำอากาศร้อนเป็นเวลา 10 ชั่วโมง จะให้พลังงานความร้อนเท่ากับ 3,818 MJ จากผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าพลังงานความร้อนที่ระบบทำอากาศร้อนผลิตได้มีค่ามากกว่าพลังงานความร้อนที่เครื่องอบแห้งต้องการในกระบวนการอบแห้งในวันแรก (10 ชั่วโมง) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 876.08 MJ

ผลการทดลองดังกล่าวจะเห็นว่าระบบทำอากาศร้อนที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถนำไปใช้สำหรับให้ความร้อนเสริมกับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ในการอบแห้งสำหรับช่วงเวลาที่ไม่มีแดดหรือกรณีที่ฝนตกได้

จากนั้นผู้วิจัยได้ทำการทดสอบสมรรถนะของระบบทำอากาศร้อนโดยใช้ในการทดลองอบกล้วยน้ำว้าจำนวน 200 กิโลกรัม และใช้ระบบทำอากาศร้อนมาให้ความร้อนเสริมในช่วงที่ไม่มีแดดหรือฝนตก นอกจากนี้ยังได้ทำการหาประสิทธิภาพของระบบทำอากาศร้อนอีกด้วย ขั้นตอนในการทดสอบสมรรถนะของระบบทำอากาศร้อนมีรายละเอียดดังนี้

3.4.1 การติดตั้งระบบทำอากาศร้อน

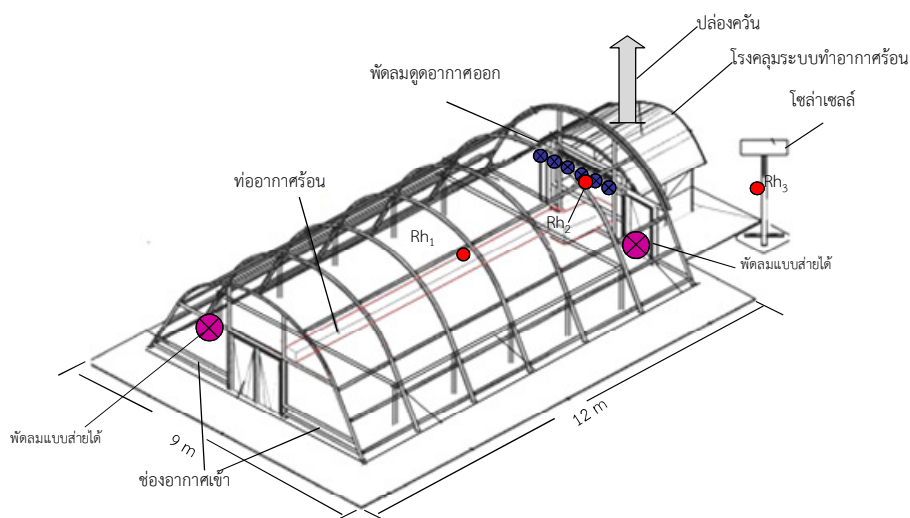
ผู้วิจัยได้ติดตั้งระบบทำอากาศร้อนที่ใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงเพื่อให้ความร้อนเสริมกับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาโดม (รูปที่ 3.13) โดยต่อท่อสำหรับทำอากาศร้อนจากระบบทำอากาศร้อนเข้าไปในเครื่องอบแห้ง (รูปที่ 3.14)



รูปที่ 3.13 ระบบทำอากาศร้อนที่ใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้



รูปที่ 3.14 ท่อสำหรับกระจายลมร้อน



รูปที่ 3.15 ลักษณะและส่วนประกอบของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลโดมที่ใช้ในงานวิจัยนี้

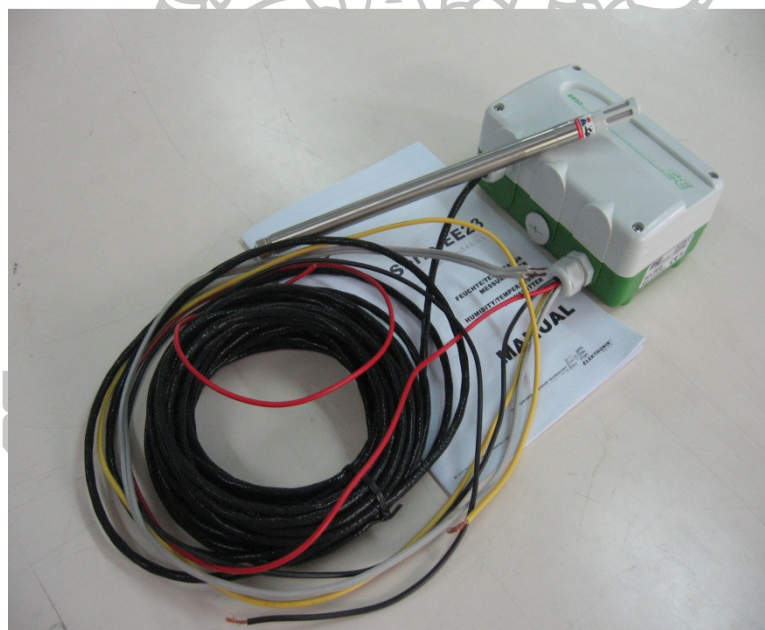
3.4.2 อุปกรณ์การวัดและบันทึกข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะของระบบทำอากาศร้อน

อุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลเพื่อทดสอบสมรรถนะของระบบทำอากาศร้อน มีดังนี้

- 1) สายเทอร์โมคัปเปิลชนิดเค (K-type thermocouple) สำหรับวัดอุณหภูมิอากาศในเครื่องอบแห้ง (รูปที่ 3.16)
- 2) เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ (hygrometer) ยี่ห้อ Elektronik รุ่น EE23B สำหรับวัดความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ (รูปที่ 3.17)
- 3) เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศแบบฮอตไวร์ (hot wire anemometer) ยี่ห้อ Airflow รุ่น TA5 (รูปที่ 3.18)
- 4) เครื่องวัดความเข้มรังสีอาทิตย์ (pyranometer) แบบเทอร์โมไพล์ (thermopile) รุ่น CM11 ของ Kipp&Zonen (รูปที่ 3.19)
- 5) เครื่องบันทึกข้อมูล (datalogger) ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น DC100 (รูปที่ 3.20)
- 6) ตู้อบไฟฟ้า ยี่ห้อ Fisher Scientific รุ่น ISOTEMP สำหรับหามวลแห้งของผลิตภัณฑ์ (รูปที่ 3.21)
- 7) เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล ยี่ห้อ KERN รุ่น 474-42 (รูปที่ 3.22) สำหรับชั่งน้ำหนักตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่อบแห้ง
- 8) เครื่องวัดสียี่ห้อ Hunter Lab รุ่น MiniScan EZ (รูปที่ 3.23) สำหรับวัดสีของผลิตภัณฑ์



รูปที่ 3.16 สายเทอร์โมคัปเปิลชนิดเค (K-type thermocouple) สำหรับวัดอุณหภูมิ



รูปที่ 3.17 เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ยี่ห้อ Elektronik รุ่น EE23B



รูปที่ 3.18 เครื่องวัดความเร็วลมแบบ hot wire ยี่ห้อ Airflow รุ่น TA5



รูปที่ 3.19 ไพรานอมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CM11



รูปที่ 3.20 เครื่องบันทึกข้อมูล ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น DC100



รูปที่ 3.21 ตู้อบไฟฟ้า ยี่ห้อ Fisher Scientific รุ่น ISOTEMP



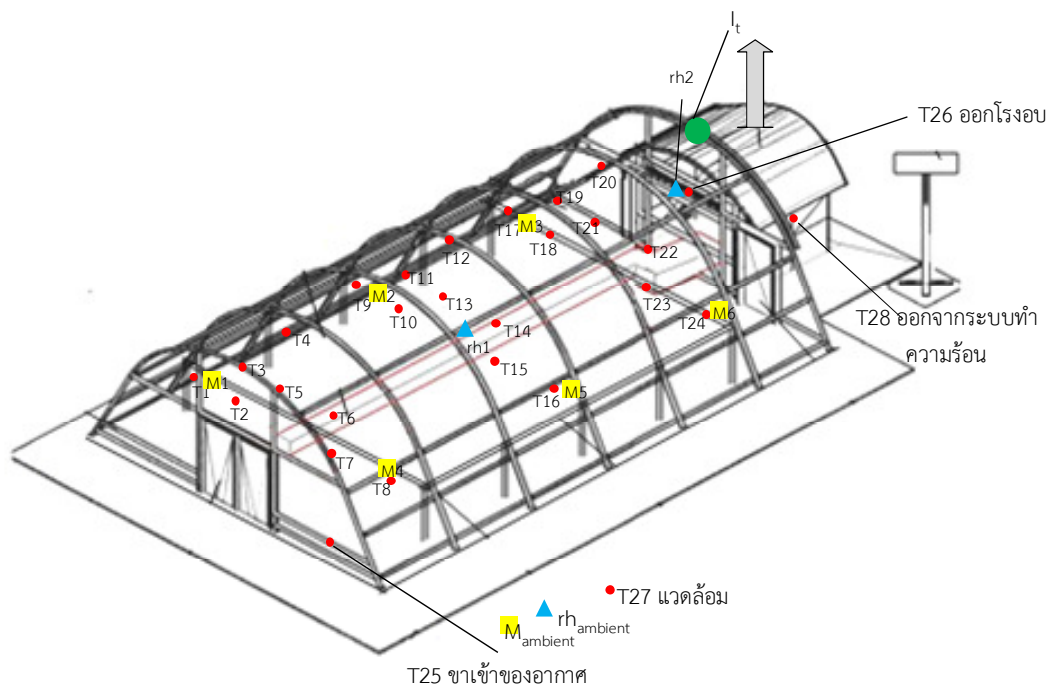
รูปที่ 3.22 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล ยี่ห้อ KERN รุ่น 474-42



รูปที่ 3.23 เครื่องวัดสียี่ห้อ Hunter Lab รุ่น MiniScan EZ

ในการดำเนินการทดลองเพื่อทดสอบสมรรถนะของระบบทำอากาศร้อนสำหรับเครื่องอบแห้ง จำเป็นต้องทราบข้อมูลต่างๆ ได้แก่ ความเข้มรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม อุณหภูมิในเครื่องอบแห้ง อุณหภูมิขาออกจากเครื่องอบแห้ง อุณหภูมิออกจากระบบทำอากาศร้อน มวลตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในเครื่องอบแห้ง และอัตราการไหลของอากาศ โดยอัตราการไหลของอากาศจะอ่านค่าจากอุปกรณ์พร้อมบันทึกข้อมูลทุกๆ 2 ชั่วโมง ส่วนมวลของตัวอย่างผลิตภัณฑ์จะชั่งน้ำหนักทุกๆ 2 ชั่วโมง สำหรับอุณหภูมิอากาศแวดล้อม อุณหภูมิในเครื่องอบแห้ง

อุณหภูมิอากาศที่ไหลออกจากเครื่องอบแห้ง ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในเครื่องอบแห้ง และความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จะถูกเก็บและบันทึกโดย datalogger ทุกๆ 10 นาที ตำแหน่งของจุดวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แสดงไว้ตามรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 ตำแหน่งที่ทำการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ (I_t คือจุดวัดความชื้นสัมพัทธ์ T คือจุดวัดอุณหภูมิ rh คือจุดวัดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ และ M คือ จุดวัดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์)

3.4.3 ขั้นตอนการทดลอง

ผู้วิจัยจะปลดก๊อกเปลี่ยนน้ำแล้วนำเข้าไปวางบนตะแกรงในเครื่องอบแห้งในตอนเช้า จำนวนประมาณ 200 กิโลกรัม พร้อมทั้งนำตัวอย่างกล้วย 0.5 กิโลกรัม ไปตากภายนอกเครื่องอบแห้งเพื่อใช้เปรียบเทียบผล จากนั้นผู้วิจัยได้ทำการเก็บข้อมูลต่างๆ ตามขั้นตอนต่อไปนี้

- 1) ชั่งน้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่จะอบในเครื่องอบแห้ง (รูปที่ 3.25) และที่ตากแดดตามธรรมชาติ (รูปที่ 3.26) ทุกๆ 2 ชั่วโมง ตั้งแต่เวลา 8:00-18:00 น.



รูปที่ 3.25 กล้วยน้ำว้าในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาโดม



รูปที่ 3.26 ตัวอย่างกล้วยที่ตากแดดตามธรรมชาติ

- 2) ปลอ่ยให้ผลิตภัณฑ์ดังกล่าวอยู่ในเครื่องอบแห้งทั้งในช่วงกลางวันและกลางคืน
- 3) ดำเนินการตามขั้นตอนที่ 1-2 จนกว่ามวลของผลิตภัณฑ์มีความชื้นสุดท้ายตามต้องการ (ประมาณ 14-18%, w.b.)
- 4) นำผลิตภัณฑ์ตัวอย่างที่แห้งแล้วทั้งที่อยู่ในเครื่องอบแห้งและตากแดดธรรมชาติมาวัดสี โดยใช้เครื่องวัดสีหือ Hunter Lab รุ่น MiniScan EZ



รูปที่ 3.27 การวัดสีกล้วยน้ำว้าที่ได้จากการเครื่องอบแห้งและตากแดดธรรมชาติ

- 5) นำตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อหามวลแห้ง

จากนั้นทำการหาความชื้นของผลิตภัณฑ์จากมวลแห้งที่ได้ในข้อ 5 โดยอาศัยสมการ

$$M(t) = \frac{m_p(t) - m_s}{m_p(t)} \quad (3.7)$$

โดย $M(t)$ คือ ความชื้นมาตรฐานเปียกที่เวลาใดๆ [% w.b.]

$m_p(t)$ คือ มวลของผลิตภัณฑ์ที่เวลาใดๆ [kg]

m_s คือ มวลแห้งของผลิตภัณฑ์ [kg]

หมายเหตุ: ในการทดลองนี้จะทำการควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลา 8:00-18:00 น. โดยจะให้ความร้อนเสริมเข้าไปในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ในช่วงที่ไม่มีแดดหรือในช่วงที่มีฝนตก หรือช่วงที่อุณหภูมิในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีค่าต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส ตลอดการทดลอง

3.4.4 ผลการทดลอง

ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบสมรรถนะของระบบทำอากาศร้อนสำหรับเครื่องอบแห้ง โดยการทดลองอบแห้งกล้วยน้ำว้า จำนวน 4 ครั้ง โดยมีผลการทดลองดังนี้

1) การทดลองอบแห้งกล้วยน้ำว้าครั้งที่ 1 (วันที่ 21-23 กรกฎาคม พ.ศ. 2558)

การทดลองครั้งที่ 1 ผู้วิจัยจะใช้กล้วยน้ำว้าจำนวน 200 กิโลกรัม ในการอบแห้งโดยมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 66-70%, w.b. ในช่วงที่ทำการทดลองห้องพามีเมฆมากและมีแดดบ้างเล็กน้อยสลับกันทั้งสามวันของการอบแห้ง (รูปที่ 3.28) ทำให้ความชื้นรังสีอาทิตย์มีค่าต่ำ (รูปที่ 3.29) จึงต้องทำการเปิดระบบทำอากาศร้อนให้แก่เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อให้อุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งมีอุณหภูมิตามที่กำหนด คือ 50 องศาเซลเซียส

สำหรับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในเครื่องอบแห้ง (รูปที่ 3.30) จะพบว่ามีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมเนื่องจากได้รับความร้อนจากระบบทำอากาศร้อน

ในด้านของอุณหภูมิอากาศที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในเครื่องอบแห้ง (รูปที่ 3.31) จะเห็นว่าในช่วงเวลาทำการทดลองจะมีการควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 50 องศาเซลเซียส ถึงแม้ว่าความชื้นรังสีอาทิตย์จะมีค่าต่ำ แต่อุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งจะมีค่ามากกว่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อมประมาณ 7-30 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิที่จุดต่างๆ ภายในเครื่องอบแห้งมีค่าใกล้เคียงกันทุกจุด

สำหรับความชื้นของผลิตภัณฑ์จะพบว่าอัตราการลดลงของความชื้นของกล้วยน้ำว้าจะค่อยๆ ลดต่ำลง (รูปที่ 3.32) โดยในการทดลองนี้จะใช้เวลาในการอบแห้ง 3 วัน (ความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์มีค่าประมาณ 14-18%, w.b.) ซึ่งใช้นานน้อยกว่าการตากแดดตามธรรมชาติที่ใช้เวลาในการอบ 5 วัน จากเส้นกราฟการลดลงของความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ตำแหน่งต่างๆ จะเห็นว่าในช่วงสุดท้ายจะได้ค่าความชื้นเกือบเท่ากัน แสดงว่าอัตราการแห้งของความชื้นผลิตภัณฑ์ที่ตำแหน่งต่างๆ มีค่าค่อนข้างสม่ำเสมอ เมื่อเปรียบเทียบกับการตากแดดธรรมชาติซึ่งค่าความชื้นลดลงช้ากว่า ดังนั้นจึงต้องใช้เวลาการอบแห้งมากกว่าการอบแห้งภายในเครื่องอบแห้ง หลังการอบแห้งเสร็จจะเหลือมวลของกล้วยน้ำว้าอบแห้งประมาณ 65.4 กิโลกรัม

วันที่ 21 กรกฎาคม พ.ศ. 2558



8:00

12:00

16:00

วันที่ 22 กรกฎาคม พ.ศ. 2558

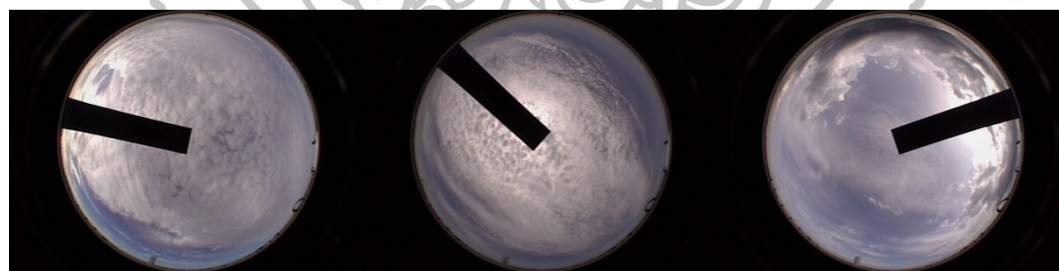


8:00

12:00

16:00

วันที่ 23 กรกฎาคม พ.ศ. 2558

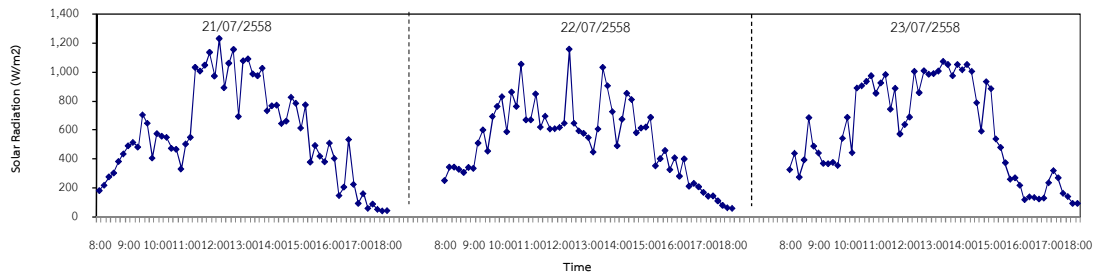


8:00

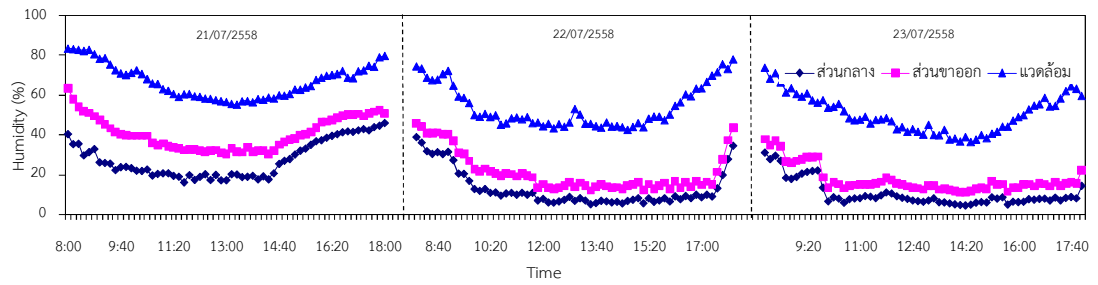
12:00

16:00

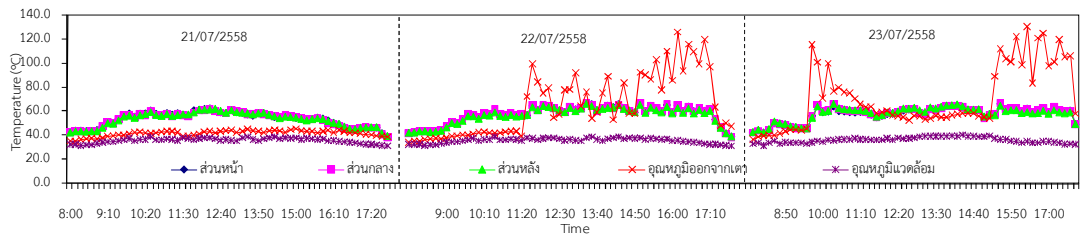
รูปที่ 3.28 สภาพท้องฟ้าในช่วงที่ทำการอบแห้งกล้วยน้ำว้า ระหว่างวันที่ 21-23 กรกฎาคม พ.ศ. 2558



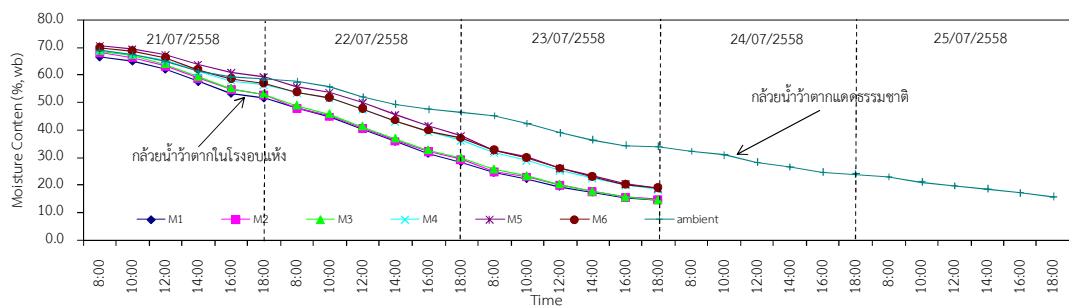
รูปที่ 3.29 การแปรค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ วันที่ 21-23 กรกฎาคม พ.ศ. 2558



รูปที่ 3.30 การแปรค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในเครื่องอบแห้งกับอากาศแวกดีลอม วันที่ 21-23 กรกฎาคม พ.ศ. 2558



รูปที่ 3.31 การแปรค่าอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งกับอากาศแวกดีลอม วันที่ 21-23 กรกฎาคม พ.ศ. 2558



รูปที่ 3.32 การแปรค่าของความชื้นของกล้วยน้ำว้า ณ ตำแหน่งต่างๆ ของเครื่องอบแห้ง และของกล้วยที่ตากตามธรรมชาติ วันที่ 21-25 กรกฎาคม พ.ศ. 2558

2) การทดลองอบแห้งกล้วยน้ำว้าครั้งที่ 2 (วันที่ 28-30 กรกฎาคม พ.ศ. 2558)

การทดลองครั้งที่ 2 ผู้วิจัยใช้กล้วยน้ำว้าจำนวน 178 กิโลกรัม ซึ่งมีความชื้นเริ่มต้น 68-70%, w.b. โดยในช่วงที่ทำการทดลองระหว่างวันที่ 28-29 กรกฎาคม พ.ศ. 2558 สภาพห้องฟามีเมฆปกคลุมเป็นส่วนใหญ่และมีแดดบ้างเล็กน้อย ส่วนในวันที่ 30 กรกฎาคม พ.ศ. 2558 มีฝนตกและเมฆปกคลุมห้องฟาดตลอดทั้งวัน (รูปที่ 3.33) ส่งผลให้ค่าความชื้นรังสีอาทิตย์มีค่าต่ำ (รูปที่ 3.34) ดังนั้นอุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งจึงมีค่าต่ำกว่าที่กำหนด (50 องศาเซลเซียส) ผู้วิจัยจึงต้องทำการเปิดระบบทำอากาศร้อนให้แก่เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อรักษาอุณหภูมิในเครื่องอบแห้งให้มีอุณหภูมิตามที่กำหนด

สำหรับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในเครื่องอบแห้งมีค่าต่ำกว่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม (รูปที่ 3.35) เนื่องจากภายในเครื่องอบแห้งได้รับพลังงานความร้อนจากระบบทำอากาศร้อน จึงช่วยให้ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในเครื่องอบแห้งมีค่าต่ำ

ในด้านของอุณหภูมิอากาศที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในเครื่องอบแห้ง (รูปที่ 3.36) พบว่าในช่วงเวลาที่ทำการทดลองมีการเปิดระบบทำอากาศร้อนเพื่อรักษาอุณหภูมิไม่ให้ต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส ดังนั้นอุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งมีค่ามากกว่าอากาศแวดล้อมประมาณ 5-25 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิที่จุดต่างๆ ภายในเครื่องอบแห้งจะมีค่าใกล้เคียงกัน

สำหรับความชื้นของผลิตภัณฑ์ พบว่าการลดลงของความชื้นของกล้วยน้ำว้าจะค่อยๆ ลดลงดังรูปที่ 3.37 ซึ่งจะใช้เวลาในการอบแห้ง 3 วัน (ความชื้นสุดท้ายผลิตภัณฑ์ มีค่าประมาณ 15-18%, w.b.) ซึ่งใช้เวลาน้อยกว่าการตากแดดตามธรรมชาติที่ใช้เวลาในการอบ 5 วัน จากกราฟความชื้นผลิตภัณฑ์ที่ตำแหน่งต่างๆ จะเห็นว่า ในช่วงสุดท้ายค่าความชื้นผลิตภัณฑ์จะมีค่าเกือบเท่ากัน แสดงว่าอัตราการแห้งของความชื้นผลิตภัณฑ์ที่ตำแหน่งต่างๆ ค่อนข้างสม่ำเสมอ เมื่อเปรียบเทียบกับการตากแดดธรรมชาติที่มีค่าความชื้นลดลงช้ากว่า โดยต้องใช้เวลาานกว่าการอบภายในเครื่องอบแห้ง หลังการอบแห้งเสร็จสิ้นจะเหลือมวลของกล้วยน้ำว้าอบแห้งประมาณ 65 กิโลกรัม



วันที่ 28 กรกฎาคม พ.ศ. 2558



8:00

12:00

16:00

วันที่ 29 กรกฎาคม พ.ศ. 2558

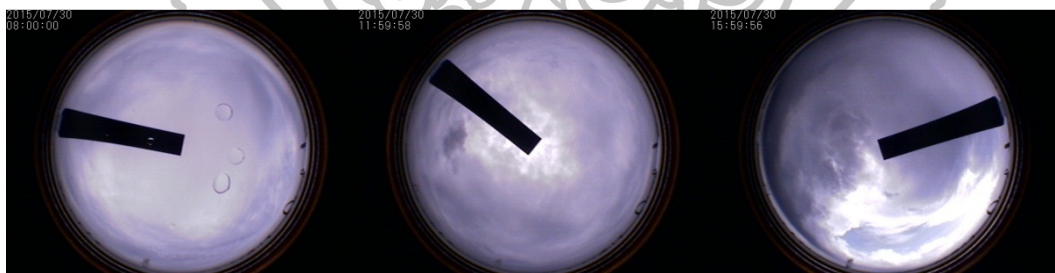


8:00

12:00

16:00

วันที่ 30 กรกฎาคม พ.ศ. 2558

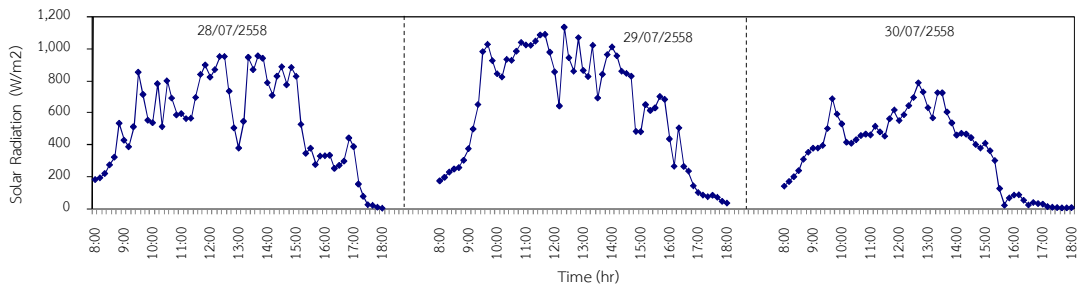


12:00

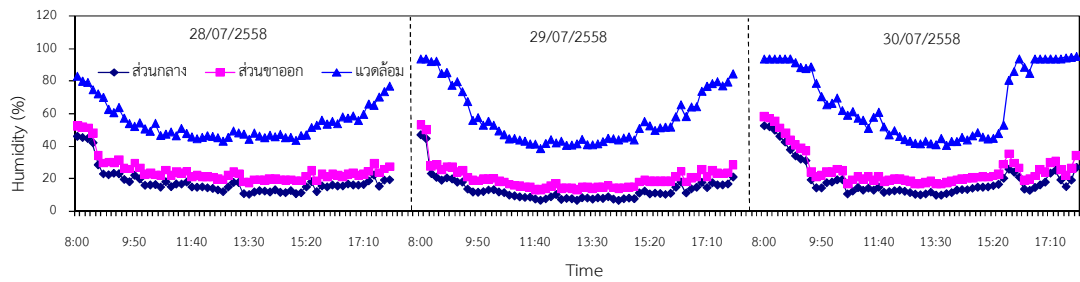
16:00

8:00

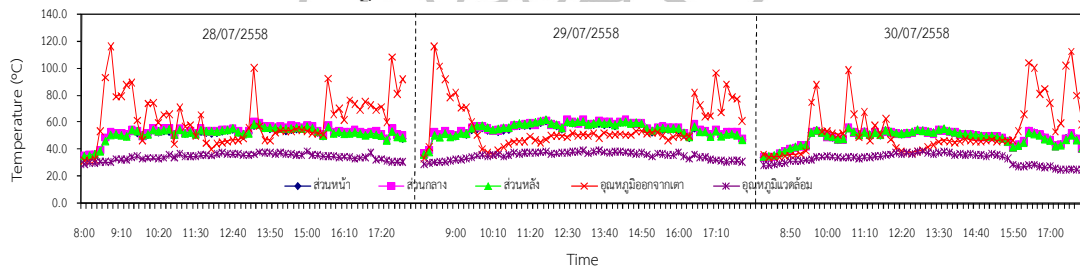
รูปที่ 3.33 สภาพท้องฟ้าในช่วงที่ทำการอบแห้งกล้วยน้ำว้าระหว่างวันที่ 28-30 กรกฎาคม พ.ศ. 2558



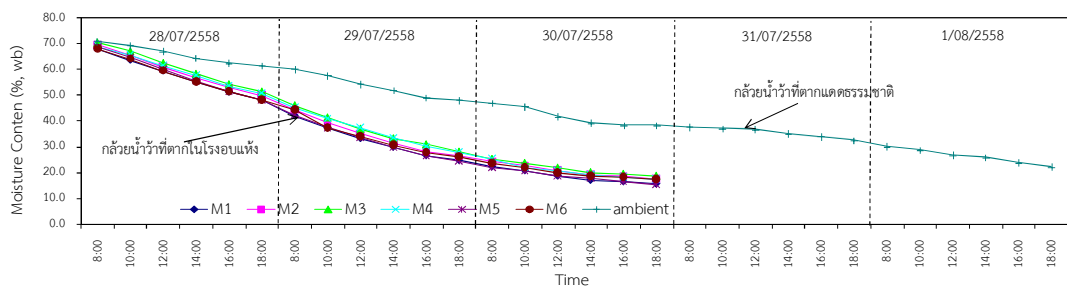
รูปที่ 3.34 การแปรค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ วันที่ 28-30 กรกฎาคม พ.ศ. 2558



รูปที่ 3.35 การแปรค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในเครื่องอบแห้งกับอากาศแวดล้อม วันที่ 28-30 กรกฎาคม พ.ศ. 2558



รูปที่ 3.36 การแปรค่าอุณหภูมิของอากาศภายในเครื่องอบแห้งกับอากาศแวดล้อม วันที่ 28-30 กรกฎาคม พ.ศ. 2558



รูปที่ 3.37 การแปรค่าของความชื้นของกล้วยน้ำว้า ณ ตำแหน่งต่างๆ ของเครื่องอบแห้ง และของกล้วยที่ตากตามธรรมชาติวันที่ 28 กรกฎาคม - 1 สิงหาคม พ.ศ. 2558

3) ผลการทดลองอบแห้งกล้วยน้ำว้าครั้งที่ 3 (วันที่ 4-6 สิงหาคม พ.ศ. 2558)

การทดลองครั้งที่ 3 ผู้วิจัยใช้กล้วยน้ำว้าจำนวน 140 กิโลกรัม โดยมีความชื้นเริ่มต้น 68-70%, w.b. ในระหว่างที่ทำการทดลองจะมีเมฆปกคลุมท้องฟ้าเกือบตลอดทั้งวันและมีแดดเป็นบางช่วง (รูปที่ 3.38) โดยมีการแปรค่าของความเข้มข้นสีอาทิตย์ค่อนข้างต่ำตลอดช่วงที่ทำการทดลอง (รูปที่ 3.39) ส่งผลให้อุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งมีค่าต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงต้องทำการเปิดระบบทำอากาศร้อนให้แก่เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อให้อุณหภูมิในเครื่องอบแห้งมีอุณหภูมิตามที่กำหนด

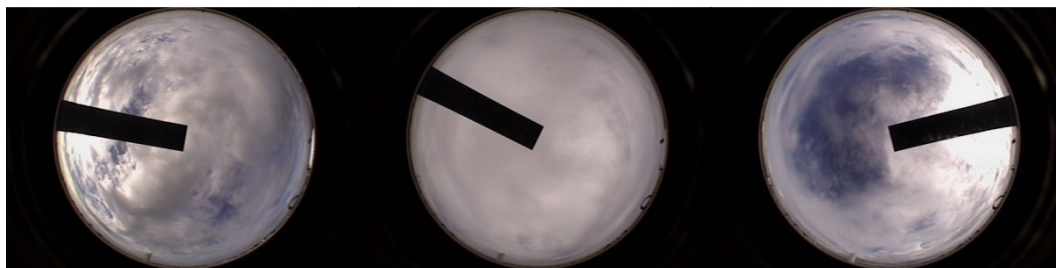
ในระหว่างการทดลองจะพบว่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในเครื่องอบแห้งจะมีค่าต่ำกว่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม (รูปที่ 3.40) เนื่องจากอากาศภายในเครื่องอบแห้งได้รับความร้อนจากระบบทำอากาศร้อนจึงทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ภายในเครื่องอบแห้งมีค่าต่ำ

สำหรับอุณหภูมิอากาศที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในเครื่องอบแห้ง (รูปที่ 3.41) จะเห็นว่าในช่วงเวลาทำการทดลองจะมีการเปิดระบบทำอากาศร้อนเพื่อควบคุมอุณหภูมิที่ไว้ 50 องศาเซลเซียส ส่งผลให้อุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งมีค่ามากกว่าอากาศแวดล้อม 5-25 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่จุดต่างๆ ภายในเครื่องอบแห้งมีค่าใกล้เคียงกัน

ในด้านของความชื้นผลิตภัณฑ์พบว่าการลดลงของความชื้นของกล้วยน้ำว้าจะค่อยๆ ลดลงดังรูปที่ 3.42 โดยใช้เวลาในการอบแห้ง 3 วัน ความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ มีค่าประมาณ 13-16%, w.b. ซึ่งใช้เวลาน้อยกว่าการตากแดดตามธรรมชาติที่ใช้เวลาในการอบ 5 วัน จากเส้นกราฟความชื้นผลิตภัณฑ์ที่ตำแหน่งต่างๆ จะเห็นว่า ความชื้นผลิตภัณฑ์ที่ตำแหน่งต่างๆ จะมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดในวันที่ 1-2 ของการทำการทดลอง แต่ในวันที่ 3 ของการทดลองจะสังเกตว่าค่าความชื้นจะลดลงน้อยมากจนค่าความชื้นที่ตำแหน่งต่างๆ มีค่าเกือบเท่ากัน แสดงว่าอัตราการแห้งของความชื้นผลิตภัณฑ์ที่ตำแหน่งต่างๆ มีค่าค่อนข้างสม่ำเสมอ เมื่อเปรียบเทียบกับการตากแดดธรรมชาติ ที่ค่าความชื้นลดลงได้ช้ากว่า และต้องใช้เวลาในการอบภายในเครื่องอบแห้ง หลังการอบแห้งเสร็จสิ้นจะเหลือมวลของกล้วยน้ำว้าอบแห้งประมาณ 47 กิโลกรัม



วันที่ 4 สิงหาคม พ.ศ. 2558



8:00

12:00

16:00

วันที่ 5 สิงหาคม พ.ศ. 2558

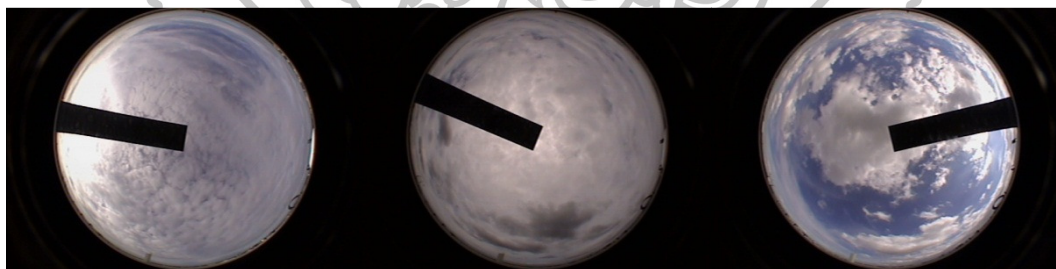


8:00

12:00

16:00

วันที่ 6 สิงหาคม พ.ศ. 2558

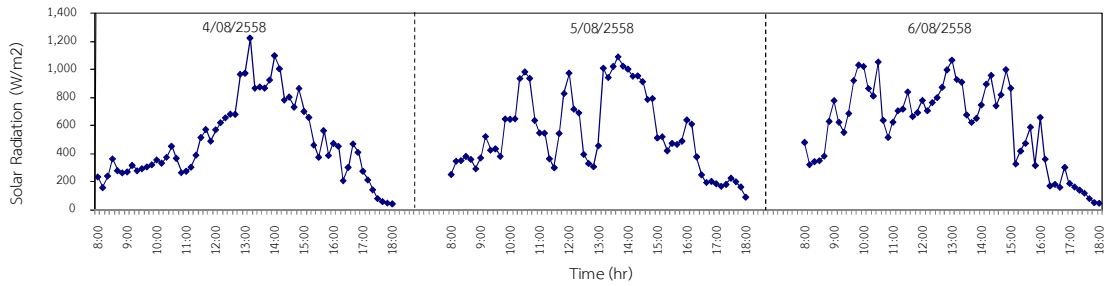


8:00

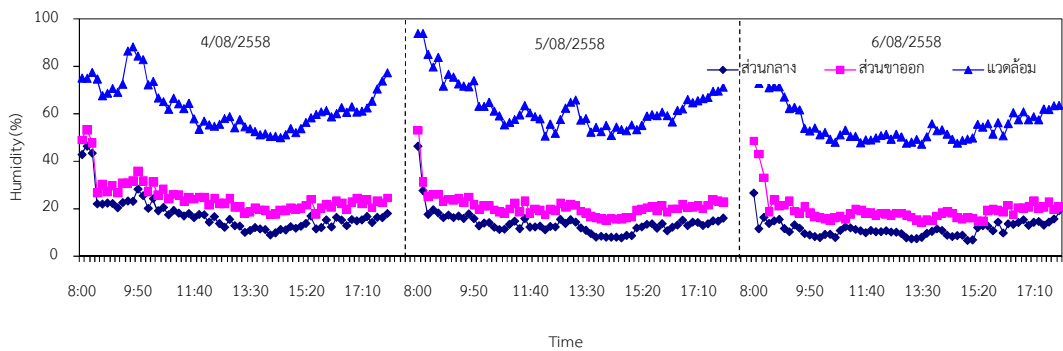
12:00

16:00

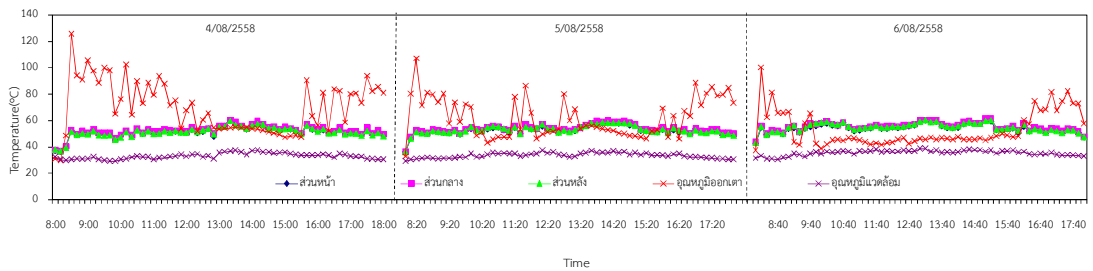
รูปที่ 3.38 สภาพท้องฟ้าในช่วงที่ทำการอบแห้งกล้วยน้ำว้าระหว่างวันที่ 4-6 สิงหาคม พ.ศ. 2558



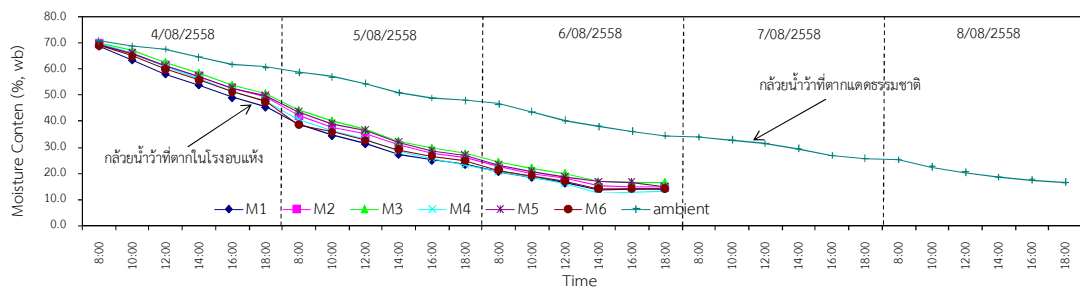
รูปที่ 3.39 การแปรค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ วันที่ 4-6 สิงหาคม พ.ศ. 2558



รูปที่ 3.40 การแปรค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในเครื่องอบแห้งกับอากาศแวดล้อม วันที่ 4-6 สิงหาคม พ.ศ. 2558



รูปที่ 3.41 การแปรค่าอุณหภูมิของอากาศในเครื่องอบแห้งกับอากาศแวดล้อม วันที่ 4-6 สิงหาคม พ.ศ. 2558



รูปที่ 3.42 การแปรค่าของความชื้นของกล้วยน้ำว้า ณ ตำแหน่งต่างๆ ของเครื่องอบแห้งและของกล้วยที่ตากตามธรรมชาติ วันที่ 4-8 สิงหาคม พ.ศ. 2558

4) ผลการทดลองอบแห้งกล้วยน้ำว้าครั้งที่ 4 (วันที่ 12-14 สิงหาคม พ.ศ. 2558)

การทดลองครั้งที่ 4 ผู้วิจัยใช้กล้วยน้ำว้าจำนวน 172 กิโลกรัม โดยมีความชื้นเริ่มต้น 70-73%, w.b. ในวันที่ 12 และ 14 สิงหาคม พ.ศ. 2558 ท้องฟ้ามีเมฆเล็กน้อย แต่ในวันที่ 13 สิงหาคม 2558 จะมีเมฆมากและในช่างบ่ายมีฝนตก (รูปที่ 3.43) ส่งผลให้การแปรค่าของความชื้นรังสีอาทิตย์มีค่าแตกต่างกัน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.44 โดยถ้าอุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งมีค่าต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส ผู้วิจัยจะทำการเปิดระบบทำอากาศร้อนให้กับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อช่วยให้อุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งมีอุณหภูมิตามที่กำหนด

สำหรับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในเครื่องอบแห้งจะมีค่าต่ำกว่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม (รูปที่ 3.45) ซึ่งเป็นผลมาจากอากาศภายในเครื่องอบแห้งได้รับพลังงานความร้อนจากระบบทำอากาศร้อน

ในด้านของอุณหภูมิอากาศที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในเครื่องอบแห้ง (รูปที่ 3.46) จะเห็นว่าในช่วงเวลาที่ทำการทดลองมีเมฆมากและมีฝนตกค่าความชื้นรังสีอาทิตย์จะมีค่าต่ำ ส่งผลให้อุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งมีค่าต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส ดังนั้นผู้วิจัยจึงต้องทำการเปิดระบบทำอากาศร้อนเพื่อควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 50 องศาเซลเซียส จากกราฟรูปที่ 3.47 จะเห็นว่าอุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งมีค่ามากกว่าอากาศแวดล้อม 5-26 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิที่จุดต่างๆ ภายในเครื่องอบแห้งมีค่าใกล้เคียงกัน

สำหรับด้านความชื้นผลิตภัณฑ์ พบว่าการลดลงของความชื้นของกล้วยน้ำว้า จะค่อยๆ ลดลง ดังรูปที่ 3.48 โดยใช้เวลาในการอบแห้ง 3 วัน ความชื้นสุดท้ายผลิตภัณฑ์ มีค่าประมาณ 14-15%, w.b. ซึ่งใช้เวลาน้อยกว่าการตากแดดตามธรรมชาติที่ใช้เวลาในการอบ 5 วัน จากกราฟจะเห็นการลดลงของความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ตำแหน่งต่างๆ โดยในช่วงสุดท้ายค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ตำแหน่งต่างๆ มีค่าเท่ากันแสดงว่าอัตราการแห้งของความชื้นผลิตภัณฑ์ที่ตำแหน่งต่างๆ มีค่าค่อนข้างสม่ำเสมอ และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับกราฟตากแดดธรรมชาติจะเห็นว่าค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ตากแดดธรรมชาติจะมีการลดลงที่ช้ากว่า ดังนั้นจึงต้องใช้เวลาในการอบภายในเครื่องอบแห้ง หลังการอบแห้งเสร็จสิ้นจะเหลือมวลของกล้วยน้ำว้าอบแห้งประมาณ 116 กิโลกรัม

วันที่ 12 สิงหาคม พ.ศ. 2558



8:00

12:00

16:00

วันที่ 13 สิงหาคม พ.ศ. 2558

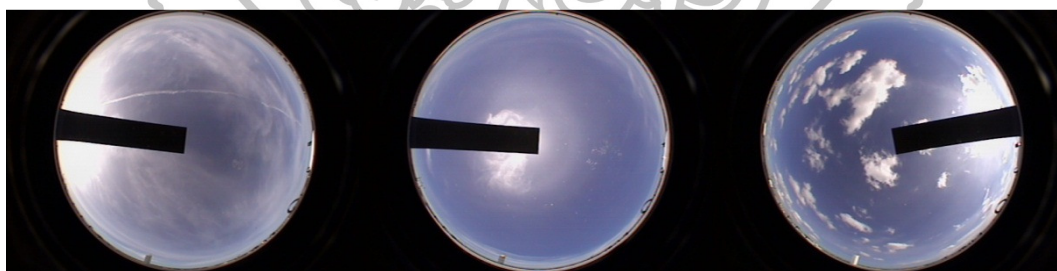


8:00

12:00

16:00

วันที่ 14 สิงหาคม พ.ศ. 2558

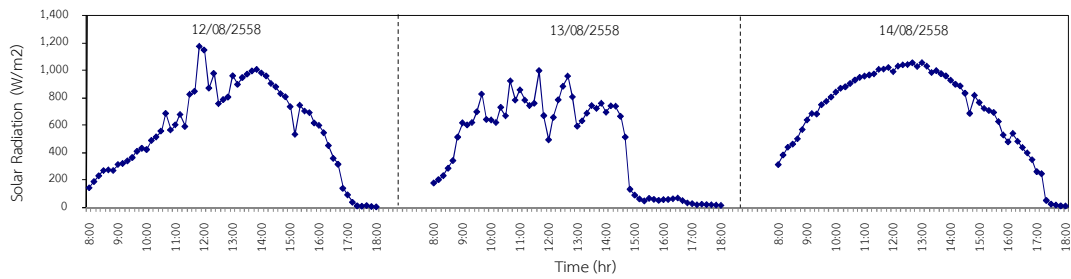


8:00

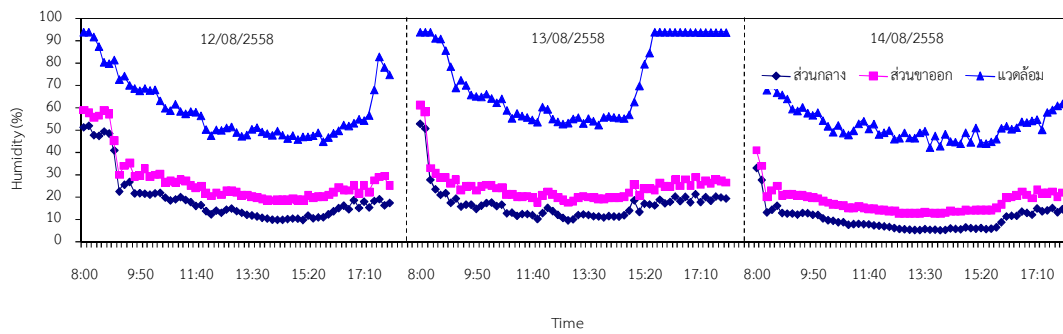
12:00

16:00

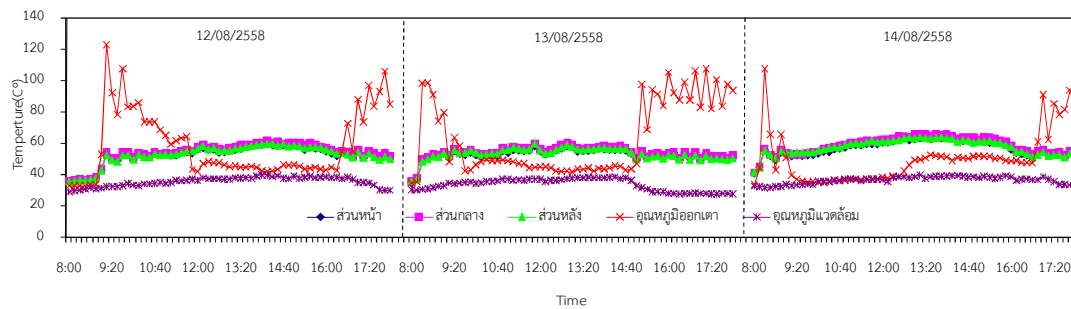
รูปที่ 3.43 สภาพท้องฟ้าในช่วงที่ทำการอบแห้งกล้วยน้ำว้าระหว่างวันที่ 12-14 สิงหาคม พ.ศ. 2558



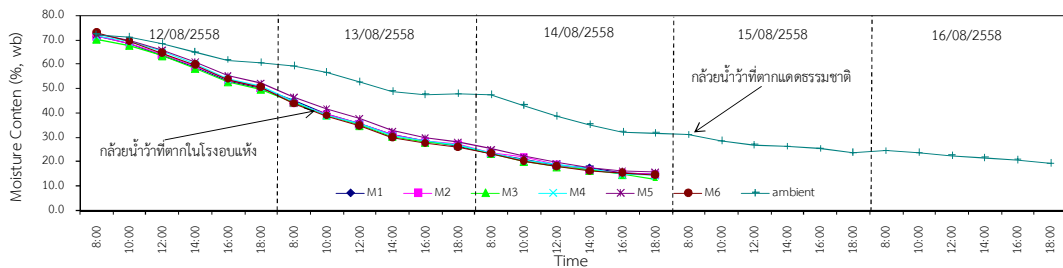
รูปที่ 3.44 การแปรค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ วันที่ 12-14 สิงหาคม พ.ศ. 2558



รูปที่ 3.45 การแปรค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในเครื่องอบแห้งกับอากาศแวดล้อม วันที่ 12-14 สิงหาคม พ.ศ. 2558



รูปที่ 3.46 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งกับอากาศแวดล้อม วันที่ 12-14 สิงหาคม พ.ศ. 2558



รูปที่ 3.47 การแปรค่าของความชื้นของกล้วยน้ำว้า ณ ตำแหน่งต่างๆ ของเครื่องอบแห้งและของกล้วยที่ตากตามธรรมชาติ วันที่ 12-16 สิงหาคม พ.ศ. 2558

3.4.5 ผลการวัดสี

ผู้วิจัยได้ทำการตรวจวัดคุณภาพสีของผลิตภัณฑ์ที่ได้ โดยทำการวัดค่าสีของกล้วยน้ำว้าที่ผ่านการอบแห้งจากเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาโดมโดยใช้ระบบทำอากาศร้อน และกล้วยน้ำว้าที่ตากแห้งโดยตากแดดตามธรรมชาติ ด้วยเครื่อง Hunter Lab รุ่น Miniscan EZ ค่าที่อ่านได้เป็นระบบการบอกสีแบบ 3 มิติ โดยที่แกน L^* จะบอกถึงความสว่าง (lightness) จากสีขาว ($+L^*$) ไปสีดำ ($-L^*$) และแกน a^* จะแสดงค่าของสีเขียว ($-a^*$) ไปถึงสีแดง ($+a^*$) ส่วนแกน b^* บอกถึงค่าของสีจากสีน้ำเงิน ($-b^*$) ไปถึงสีเหลือง ($+b^*$) ลักษณะแผนผังการอ่านค่าสีของ CIE แสดงได้ดังรูป 3.48 ผลจากการวัดสีกล้วยน้ำว้าที่ได้แสดงดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.48 แผนผังการการอ่านค่าสีของ Hunter Lab รุ่น Miniscan EZ (L^* , a^* , b^*)
(www.hunterlab.com)

ตารางที่ 3.1 การเปรียบเทียบค่าสีของกล้วยน้ำว้าที่อบแห้งโดยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาโดม โดยใช้ระบบทำอากาศร้อนและกล้วยน้ำว้าที่ตากแดดตามธรรมชาติ

Samples	Color value		
	L^*	a^*	b^*
ตากในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาโดม	47.03	11.26	28.65
ตากแดดตามธรรมชาติ	52.79	11.38	29.53

จากตารางที่ 3.1 พบว่ากล้วยน้ำว้าที่ตากในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาโดม โดยใช้ระบบทำอากาศร้อนและตากแดดตามธรรมชาติ มีค่า a^* และ b^* ใกล้เคียงกัน แต่กล้วยที่ตากในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีค่า L^* น้อยกว่ากล้วยที่ตากแดดธรรมชาติ (ดังตารางที่ 3.1) แสดงให้เห็นว่ากล้วยที่ตากในเครื่องอบแห้งจะมีความเป็นสีน้ำตาลแดงเข้มกว่ากล้วยที่ตากแดดตามธรรมชาติ ซึ่งเป็นสิ่งที่นิยมกันตามท้องตลาด

3.4.6 การหาประสิทธิภาพของระบบทำอากาศร้อน

พลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งในวันแรกของกระบวนการอบแห้ง (10 ชั่วโมงแรก) ต้องการใช้พลังงานความร้อนในการอบแห้งเท่ากับ 876.08 MJ ดังนั้น ระบบทำอากาศร้อนที่ผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้น จะต้องให้พลังงานความร้อนเพื่อใช้ในการอบแห้งในช่วง 10 ชั่วโมงแรก มากกว่าหรือเท่ากับ 876.08 MJ แม้ว่าสภาพอากาศในวันแรกจะมีเมฆมากหรือฝนตก

ประสิทธิภาพของระบบทำอากาศร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\text{ประสิทธิภาพของระบบทำอากาศร้อน} = \frac{\text{กำลังความร้อนที่ได้จากระบบทำอากาศร้อน}}{\text{กำลังความร้อนจากแก๊สที่ป้อนเข้าไปในระบบทำอากาศร้อน}} \quad (3.8)$$

ผู้วิจัยได้ทำการคำนวณกำลังความร้อนที่ได้จากระบบทำอากาศร้อนไว้แล้วในหัวข้อที่ 3.4 โดยมีค่าเท่ากับ 106.04 kW ในส่วนของกำลังความร้อนจากแก๊สที่ป้อนเข้าไปยังระบบทำอากาศร้อนสามารถหาได้จากผลคูณระหว่างอัตราการป้อนแก๊สกับค่าความร้อนของแก๊ส โดยที่ค่าความร้อน (heating value) ของแก๊สนั้น ผู้วิจัยได้นำแก๊สไปวัดค่าความร้อนที่สถาบันสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) โดยมีค่าเท่ากับ 3,800 kcal/kg (15,899.2 kJ/kg) ดังนั้นจะได้ว่า

$$\begin{aligned} \text{กำลังความร้อนที่ได้จากการเผาแก๊ส} &= \text{อัตราการป้อน (kg/hr)} \times \text{ค่าความร้อนของแก๊ส (kJ/kg)} \\ &= (30 \text{ kg/hr}) \times (15,899.2 \text{ kJ/kg}) \\ &= 132.5 \text{ kW} \end{aligned}$$

จากนั้นจะนำค่ากำลังความร้อนที่ได้จากระบบทำอากาศร้อนและกำลังความร้อนจากแก๊สที่ป้อนเข้าระบบทำอากาศร้อนที่คำนวณได้ไปแทนลงในสมการ (3.8) จะได้

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพของระบบทำอากาศร้อน} &= \frac{106.04 \text{ kW}}{132.5 \text{ kW}} \\ &= 0.80 \\ &\text{หรือ} = 80\% \end{aligned}$$

บทที่ 4

สรุป

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบ สร้าง และทดสอบสมรรถนะของระบบทำอากาศร้อนที่ใช้ แกลบเป็นเชื้อเพลิงสำหรับให้ความร้อนแก่เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาโดมที่คณะ วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม โดยระบบทำอากาศร้อนที่พัฒนาขึ้นสร้าง มาจากสแตนเลส ประกอบด้วยส่วนของห้องเผาไหม้ ระบบลำเลียงเถ้า ห้องแลกเปลี่ยนความร้อน และระบบ ป้อนเชื้อเพลิง นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาระบบควบคุมการทำงานของระบบทำอากาศร้อนดังกล่าว เพื่อให้สะดวกต่อการนำไปใช้งาน หลักการทำงานของระบบควบคุมคือ เมื่ออุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งต่ำ กว่าที่กำหนด ระบบควบคุมจะสั่งให้ระบบลำเลียงเชื้อเพลิงและเครื่องจุดเชื้อเพลิงทำงาน เพื่อลำเลียง เชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้และจุดเชื้อเพลิง จากนั้นจะใช้พัดลมเป่าอากาศเข้าไปแลกเปลี่ยนความร้อนในห้อง เผาไหม้แล้วเป่าอากาศร้อนที่ได้เข้าไปในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ แต่ถ้าอุณหภูมิในเครื่องอบแห้งสูง กว่าที่กำหนดระบบจะสั่งหยุดป้อนเชื้อเพลิง เพื่อให้อุณหภูมิลดลง และเมื่ออุณหภูมิลดลงต่ำกว่าที่กำหนด ระบบควบคุมจะสั่งให้ป้อนเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้เพื่อให้ได้อุณหภูมิตามที่กำหนดเช่นเดิม

สำหรับการทดสอบสมรรถนะของระบบทำอากาศร้อนที่พัฒนาขึ้น ผู้วิจัยได้นำระบบทำอากาศร้อน ดังกล่าวไปติดตั้งเพื่อให้ความร้อนเสริมกับเครื่องอบแห้ง ซึ่งเครื่องอบแห้งมีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปทรง พาราโบลาโดม ปิดคลุมทุกด้านด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนต มีขนาดพื้นที่ฐาน 9×12 ตารางเมตร และสูง 3.50 เมตร ด้านหน้ามีประตูกระจกสำหรับนำผลิตภัณฑ์เข้าออกและมีช่องระบายอากาศ ส่วนด้านหลังมีพัดลม ระบายอากาศเพื่อดูดอากาศขึ้นภายในเครื่องอบแห้งออกสู่อากาศแวดล้อมภายนอก พัดลมดังกล่าวใช้ กำลังไฟฟ้าจากแผงโซลาร์เซลล์ขนาด 50 วัตต์ จำนวน 3 แผง ซึ่งผู้วิจัยทำการเปิดระบบทำอากาศร้อน เพื่อให้ความร้อนกับเครื่องอบแห้งที่ไม่มีผลิตภัณฑ์ เพื่อหาปริมาณความร้อนที่ได้จากระบบทำอากาศร้อน พบว่าใน 1 ชั่วโมง ระบบสามารถทำความร้อนได้ 381.8 MJ จากนั้นผู้วิจัยได้ทำการอบแห้งกล้วยน้ำว้า จำนวน 4 ครั้ง ในช่วงวันที่ 21 กรกฎาคม – 14 สิงหาคม พ.ศ. 2558 ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ท้องฟ้ามีเมฆและฝน ตก โดยทำการอบกล้วยประมาณ 140-200 กิโลกรัม จากการทดลอง พบว่าระบบทำอากาศร้อนที่พัฒนาขึ้น สามารถผลิตอากาศร้อนเพื่อนำไปใช้ในการรักษาอุณหภูมิให้มีค่าตามที่ต้องการคือ 50 องศาเซลเซียส โดยค่า ความชื้นของกล้วยลดลงเหลือ 14-18%, w.b. จากค่าความชื้นเริ่มต้นประมาณ 60-70%, w.b. ได้ภายใน 3 วันในช่วงเดือนกรกฎาคม – สิงหาคม (ฤดูฝน) ซึ่งเร็วกว่าการตากแดดตามธรรมชาติซึ่งใช้เวลาประมาณ 5 วันผู้วิจัยได้ทำการวัดค่าสีของกล้วยน้ำว้าที่ผ่านการอบแห้ง ผลการวัดสีพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่อง อบแห้งมีคุณภาพดี นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้หาประสิทธิภาพของระบบทำอากาศร้อนพบว่า มีค่าเท่ากับ 80%

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาทดลองในมหาวิทยาลัย เพื่อศึกษาให้ได้ข้อมูลเทียบกับระบบทำอากาศ ร้อนจากเชื้อเพลิงแกลบที่ออกแบบเพื่อนำความความร้อนไปให้ความร้อนเสริมกับเครื่องอบแห้งแบบ พาราโบลาโดม โดยผลการทดลองเป็นที่น่าพอใจ และพบว่าสมรรถนะและประสิทธิภาพที่ได้เพียงพอต่อการ นำไปใช้อบแห้งในระดับอุตสาหกรรมครัวเรือนและชุมชน ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเสนอให้นำระบบทำอากาศร้อนจาก เชื้อเพลิงแกลบที่พัฒนาขึ้นในการศึกษานี้ไปประยุกต์ใช้กับการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรในระดับ อุตสาหกรรมและนำผลที่ได้ไปใช้เป็นแนวทางในการเผยแพร่ใช้งานของระบบทำอากาศร้อนสำหรับเครื่อง อบแห้งต่างๆ ให้กว้างขวางต่อไป

รายการอ้างอิง

- ASHRAE. *ASHRAE Handbook: Fundamentals*. American Society of Heating, SI Edition, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA., 1997.
- Bakker-Arkema, F.W. and Hall, C.W. *Drying Cereal Grains*. AVT, Westport, Connecticut., 1974.
- Benon, B., Fuller. R. J. Natural convection solar dryer with biomass back-up heater. *Solar Energy* 72, pp. 75–83, 2002.
- Bhattacharya, S.C., Tanit Ruangrungrachikul, and Pham, H.L., Design and performance of a hybrid solar/biomass energy powered dryer for fruits and vegetables. *World Renewable Energy Congress VI (WREC2000)*.
- El-Sebaili, A., and Shalaby, A. Solar drying of agricultural products. *A Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, pp. 37-43, 2012.
- Fudholi, A., Sopian, K., Rustas, M.H., Alghout, M.A., and Sulaiman, M.Y. Review of solar dryers for agricultural and marine products, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, pp. 1-30, 2010.
- Janjai, S., Chaichoet C., and Intawee P. Performance of a PV-ventilated greenhouse dryer for drying bananas, *Proceedings of the Joint International Conference on Sustainable Energy and Environmental*, 1-3 December, 2004.
- Jaishree, P., and Vijay, V.K. Experimental studies on drying of Zingiber officinale, Curcuma longa l. and Tinospora cordifolia in solar-biomass hybrid drier. *Renewable Energy* 30, pp. 2097-2109, 2005.
- Janjai, S., Khamvongsa, V., and Bala, B.K. Development, Design and Performance of a PV-Ventilated Greenhouse Dryer, *International Energy Journal* 8, pp. 249-258, 2007.
- Janjai, S., Lamlert, N., Intawee, P., Mahayothee, B., Boonrod, Y., Haewsuncharern, M., Bala, B.K., Nagle, M., and Muller, J. Solar drying of peeled longan using a side loading type solar tunnel dryer: Experimental and simulated performance, *Drying Technology* 27, pp. 595–605, 2009.
- Janjai, S., Lamlert, N., Intawee, P., Mahayothee, B., Bala, B.K., Nagle, M., and Muller, J. Experimental and simulated performance of a PV-ventilated solar greenhouse dryer for drying of peeled longan and banana, *Solar Energy* 83, pp. 1550-1565, 2009.
- Janjai, S., Intawee, P., Kaewkiew, J., Sritus, C., and Khamvongsa, V. A large-scale solar greenhouse dryer using polycarbonate cover: Modeling and testing in a tropical environment of Lao People's Democratic Republic. *Renewable Energy*, Vol. 36 (3), pp. 1053–1062, 2011.
- Janjai, S. A greenhouse type solar dryer for small-scale dried food industries: Development and dissemination, *International Journal of Energy and Environment* 3, pp. 383-398, 2012.

- Janjai, S., and Bala, B.K. Solar drying technology, *Food Engineering Reviews*, vol. 4, pp. 16- 54, 2012.
- Iglesias, H.A. and Chirife, J. *Handbook of Food isotherms*, Academic Press, New York, 1982.
- Murthy, M.V.R. A Review of new technologies, models and experimental investigations of solar driers, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13, 835 – 844, 2009.
- Madhlopa, A., and Ngwalo, G. Solar dryer with thermal storage and biomass-backup heater. *Solar Energy* 81, pp. 449–462, 2007.
- Othmer, D.F. Correlation of vapour pressure and latent heat. *Industrial and Engineering Chemistry*, Vol.32 (6).pp. 841–856, 1940.
- Perry, R. H. and Green D.W. *Perry's Chemical Engineering Handbook*, 8th edition, The McGraw-Hill Companies, Inc, United States of America, 2008.
- Smitabhindu, R. Optimization of a Solar-Assisted Drying System for Drying Bananas. Ph.D. thesis approval, Kasetsart University, Bangkok, Thailand, 2008.
- Sharma, G.P., Prasad, S., and Chahar, V.K. Moisture transport in gartic cloves undergoing microwave-convective drying. *Food Eng* 65 (3); pp. 413-425, 2009.
- Sodha, M.S., Bansal, N.K., Kumar, A., Bansal, P.K., and Malik, MAS. *Solar Crop Drying 1*. CRC Press, Boca Raton, Florida, 1987.
- Sonthikun, S., Phaochinnawat, C., Fardsin, K., Kirirat, P., Kumar, A., and Tekasakul, P. Computational fluid dynamic analysis of innovative design of solar biomass. *Renewable Energy* 92; pp. 185-191, 2016.
- Wang, C.Y. Simulation of thin layer and deep-bed drying of rough rice, Ph.D. thesis, University of California at David, USA, 1978.
- ทวีชัย นิมาแสง และ ณัฐวุฒิ เนียมสอน, การพัฒนาโรงอบแห้งเนื้อลำไยแบบมาตรฐานสำหรับวิสาหกิจชุมชน, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 50200, 2010.
- ประสาน ปานแก้ว ทวีเดช หมื่นภูเขียว และ เสริม จันทร์ฉาย, ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำของกล้วย, เอกสารการประชุมวิชาการ (Proceedings) ของการประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 12.





ในการหาค่าความร้อนแฝง ผู้วิจัยใช้หลักการที่เสนอโดย Othmer (1940) ซึ่งกล่าวว่าในสภาวะสมดุล ความดันไอน้ำ (vapour pressure) ในผลิตภัณฑ์ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับความร้อนแฝงในการระเหยน้ำของผลิตภัณฑ์นั้นตามสมการ

$$\ln p_v = \frac{h_{fg}}{h'_{fg}} \ln p_{vs} + c \quad (A1.1)$$

เมื่อ p_v คือ ความดันไอน้ำในผลิตภัณฑ์ [Pa]

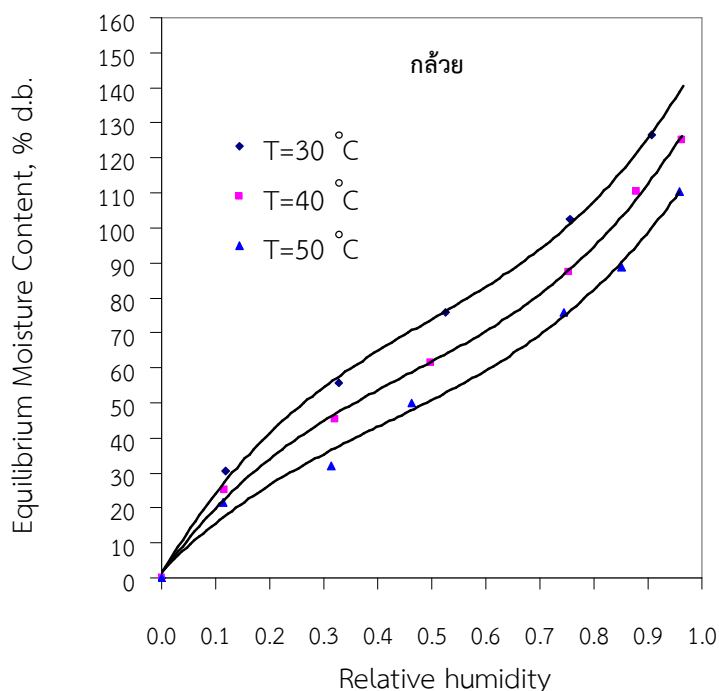
p_{vs} คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัว (saturated vapour pressure) [Pa]

h_{fg} คือ ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำของผลิตภัณฑ์ [J/kg]

h'_{fg} คือ ความร้อนแฝงของการระเหยของน้ำอิสระ (free water) [J/kg]

c คือ ค่าคงที่ [-]

ผู้วิจัยจะประยุกต์ใช้สมการ A1.1 เข้ากับกรณีของกล้วยน้ำว้า โดยใช้ข้อมูลซอฟต์แวร์ไอโซเทอม (sorption isotherm) ของกล้วยน้ำว้าที่หาโดย Smitabhindu (2008) ซึ่งเขียนในรูปแบบที่ได้ตามรูปที่ A1.1



รูปที่ A1.1 กราฟซอฟต์แวร์ไอโซเทอมของกล้วยน้ำว้า (Smitabhindu, R. 2008)

จากกราฟในรูปแบบที่ A1.1 พิจารณากราฟเส้นหนึ่ง (เช่นกราฟของอุณหภูมิ 50°C) แล้วอ่านค่าความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity) เช่นที่ ค่า 0.11 0.31 0.46, ... ซึ่งจะตรงกับค่าความชื้น 21.5 32.1 49.8%, d.b., ... ตามลำดับ จากนั้นคำนวณค่าความดันไอน้ำ (p_v) ที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ดังกล่าวโดยอาศัยสมการ

$$p_v = rh \cdot p_{vs} \quad (A1.2)$$

เมื่อ p_v คือ ความดันไอน้ำ [Pa]

p_{vs} คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัว [Pa]

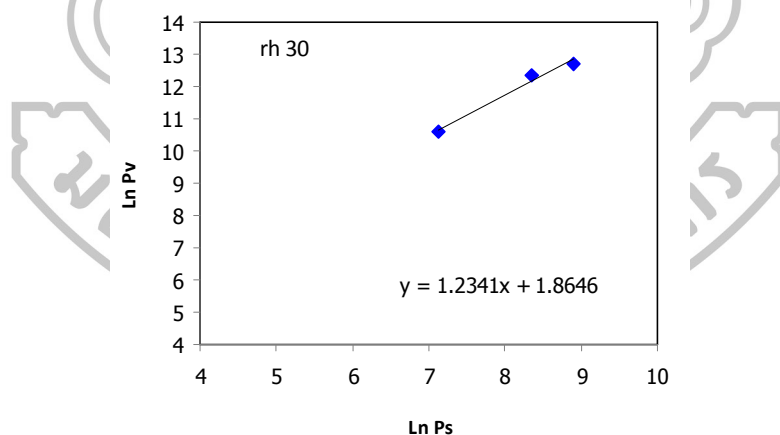
rh คือ ความชื้นสัมพัทธ์ [-]

เราสามารถคำนวณค่าความดันไอน้ำอิ่มตัวได้จากค่าอุณหภูมิ (T) โดยใช้สมการ (A1.3) (ASHRAE, 1997)

$$p_{vs} = e^{[49.20 - 6643/(T+273.15) - 4.522 \ln(T+273.15)]} \quad (A1.3)$$

เมื่อ T คือ อุณหภูมิ (°C)

จากสมการ (A1.2) และ (A1.3) ได้ค่าความดันไอน้ำ (p_v) และความดันไอน้ำอิ่มตัว (p_{vs}) ที่ตรงกับค่าความชื้นสัมพัทธ์ในกราฟชอพซันไอโซเทอม หลังจากนั้นเรานำค่า $\ln p_v$ ไปเขียนกราฟกับค่า $\ln p_{vs}$ ซึ่งจะได้กราฟเส้นตรงที่มีค่าความชัน (Slope) เท่ากับ h'_{fg}/h'_{fg} และจุดตัดแกนตั้งเท่ากับ A ในขั้นตอนสุดท้ายเราหาค่าความร้อนแฝงของผลิตภัณฑ์ (h'_{fg}) จากค่าความชันและค่าความร้อนแฝงของน้ำอิสระ (h'_{fg}) ซึ่งทราบค่า (Perry and Green, 2008) ผลที่ได้แสดงในรูปที่ A1.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln p_v$ กับ $\ln p_s$ เมื่อ p_v คือความดันไอน้ำ และ p_s คือความดันไอน้ำอิ่มตัว



รูปที่ A1.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln p_v$ กับ $\ln p_s$

จากการใช้วิธีการตามรายละเอียดข้างต้น ผู้วิจัยได้ค่าความร้อนแฝงที่ค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์และอุณหภูมิค่าต่าง ๆ ผลที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ A1.1 และตัวอย่างการแปรค่าตามกราฟในรูปที่ A1.3 และ A1.4

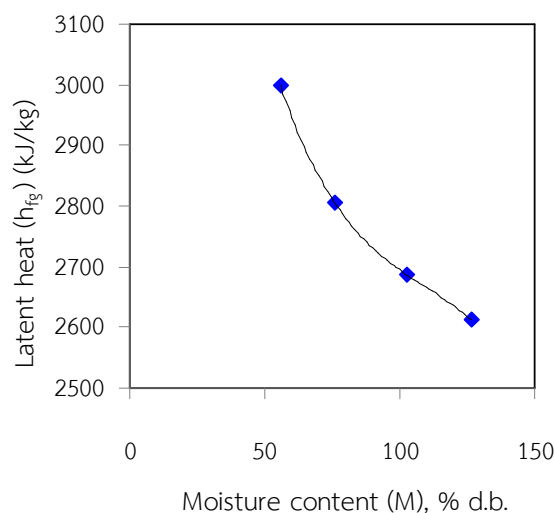
ตารางที่ A1.1 ค่าความร้อนแฝงของกล้วยที่อุณหภูมิต่าง ๆ (เมื่อ T คือ อุณหภูมิ และ M คือ ความชื้นของผลิตภัณฑ์)

T (°C)	Latent heat (kJ/kg)				
	M=10%, d.b.	M=30%, d.b.	M=50%, d.b.	M=70%, d.b.	M=90%, d.b.
30	2718.9	2998.3	2806.4	2687.3	2612.0
40	2692.3	2969.0	2778.9	2666.0	2586.4
50	2665.4	2939.3	2751.2	2634.4	2560.6

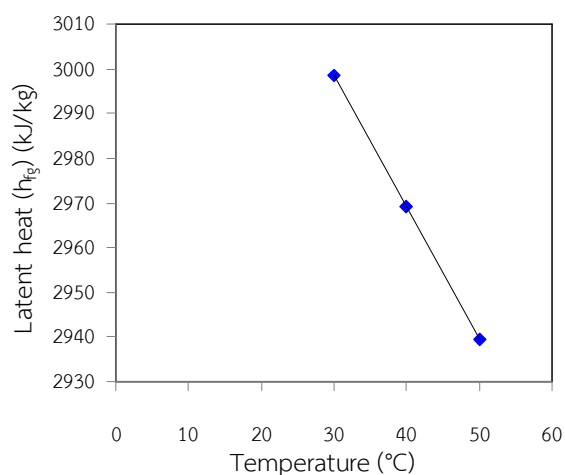
จากข้อมูลในตารางที่ A1.1 พบว่าค่าความร้อนแฝงของกล้วยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2737.8 kJ/kg (ประสาน ปานแก้ว และคณะ, 2016) ซึ่งมากกว่าค่าของความร้อนแฝงของน้ำซึ่งมีค่าเท่ากับ 2257 kJ/kg (Perry and Green, 2008) ทั้งนี้เพราะน้ำในผลิตภัณฑ์จะมีแรงยึดเกาะกับโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ที่ทำให้ต้องใช้พลังงานในการระเหยน้ำในผลิตภัณฑ์มากกว่าการระเหยน้ำอิสระ

Wang (1978) ได้หาความร้อนแฝงของน้ำในเมล็ดข้าวซึ่งได้ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3073.2 kJ/kg จะเห็นว่าค่าดังกล่าวสูงกว่าความร้อนแฝงของกล้วย ทั้งนี้เพราะโครงสร้างของเมล็ดข้าวต่างจากของกล้วย โดยการระเหยของน้ำในเมล็ดข้าวต้องใช้พลังงานสูงกว่ากรณีของกล้วย ผู้วิจัยได้นำค่าความร้อนแฝงของกล้วยไปกราฟกับความชื้นและเขียนกราฟกับอุณหภูมิผลที่ได้แสดงไว้ในรูป A1.3 และรูปที่ A1.4 ตามลำดับ จากกราฟรูปที่ A1.3 จะเห็นว่า ความร้อนแฝงมีค่าลดลงเมื่อความชื้นของผลิตภัณฑ์มีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นปริมาณน้ำในผลิตภัณฑ์จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้น้ำที่อยู่ในผลิตภัณฑ์มีปริมาณของน้ำอิสระ (free water) เพิ่มขึ้น และแรงยึดเหนี่ยวของน้ำดังกล่าวมีค่าน้อย ดังนั้นพลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำหรือความร้อนแฝงจึงมีค่าน้อยลงด้วย

ในด้านของอุณหภูมิ จะเห็นว่าถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นความร้อนแฝงจะมีค่าลดลง (รูปที่ A1.4) ทั้งนี้เพราะน้ำที่มีอุณหภูมิสูงขึ้น พลังงานจลน์ของการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำจะเพิ่มขึ้นทำให้แรงยึดเหนี่ยวของน้ำกับโครงสร้างของแข็งของผลิตภัณฑ์มีค่าลดลง ดังนั้นค่าความร้อนแฝงจึงมีค่าลดลงด้วย



รูปที่ A1.3 การแปรค่าของความร้อนแฝง (h_{fg}) กับความชื้นของกล้วย (M) ที่อุณหภูมิ 30°C



รูปที่ A1.4 การแปรค่าความร้อนแฝง (h_{fg}) กับอุณหภูมิ (T)

เพื่อความสะดวกในการใช้งาน ผู้วิจัยจึงได้หาความสัมพันธ์ข้อมูลความร้อนแฝงซึ่งแปรค่ากับอุณหภูมิและความชื้น ด้วยสมการเอมไพริคัล โดยสมการที่ทำให้ผลการหาความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดเขียนได้ดังสมการนี้ (ประสาน ปานแก้ว และคณะ 2016)

$$h_{fg} = (5496.19 - (16.505T))M^{-0.132} \quad (A1.4)$$

โดยมีค่า $R^2 = 0.81$

เมื่อ M คือ ความชื้นของกล้วย [% d.b.]

h_{fg} คือ ความร้อนแฝงของกล้วย [kJ/kg]







วว.

คำขอบริการที่ ฟทพ. 146/57

ที่ ฟทพ.พ. 544-545-08/57

รายงานผลการทดสอบและวิเคราะห์

ให้แก่

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยศิลปากร

การทดสอบ / วิเคราะห์ กระถินอัดเม็ด และ แกลบ

วิธีทดสอบ / วิเคราะห์ ASTM D 7582, D 5373 and D 5865

ภาวะการทดสอบ / วิเคราะห์: อุณหภูมิ - °C ความชื้นสัมพัทธ์ - %

ผลการทดสอบ / วิเคราะห์

ตัวอย่าง	คุณสมบัติ	สภาพน้ำส่ง	สภาพน้ำหนักแห้ง
กระถินอัดเม็ด	ความชื้น, %	7.5	-
	ค่าความร้อนสูง, กิโลแคลอรี/กก.	4,160	4,500
	ค่าความร้อนต่ำ, กิโลแคลอรี/กก.	3,830	4,140
แกลบ	ความชื้น, %	10.2	-
	ค่าความร้อนสูง, กิโลแคลอรี/กก.	3,410	3,800
	ค่าความร้อนต่ำ, กิโลแคลอรี/กก.	3,110	3,470

ผู้ทดสอบ / วิเคราะห์

1. ชุตติณี คำ อื้ออาม
2. จันทพงษ์ พรหมเขจร

ผู้ตรวจสอบ

ดร.ปริสุทธิ์ จันทรวงศ์ไพศาล
(ดร.ปริสุทธิ์ จันทรวงศ์ไพศาล)

ผู้รับรอง



(ดร.ชเนศ อภิสิทธิ์ธรรม)

รักษาการในตำแหน่ง

ผู้อำนวยการ ฝ่ายเทคโนโลยีพลังงาน

วันที่ 22 สิงหาคม 2557

ผลการทดสอบ/วิเคราะห์นี้ รับรองผลเฉพาะตัวอย่างที่ได้ทำการทดสอบ / วิเคราะห์เท่านั้น
ห้ามนำผลการทดสอบ / วิเคราะห์ ไปโฆษณาโดยมิได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจาก วว.

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

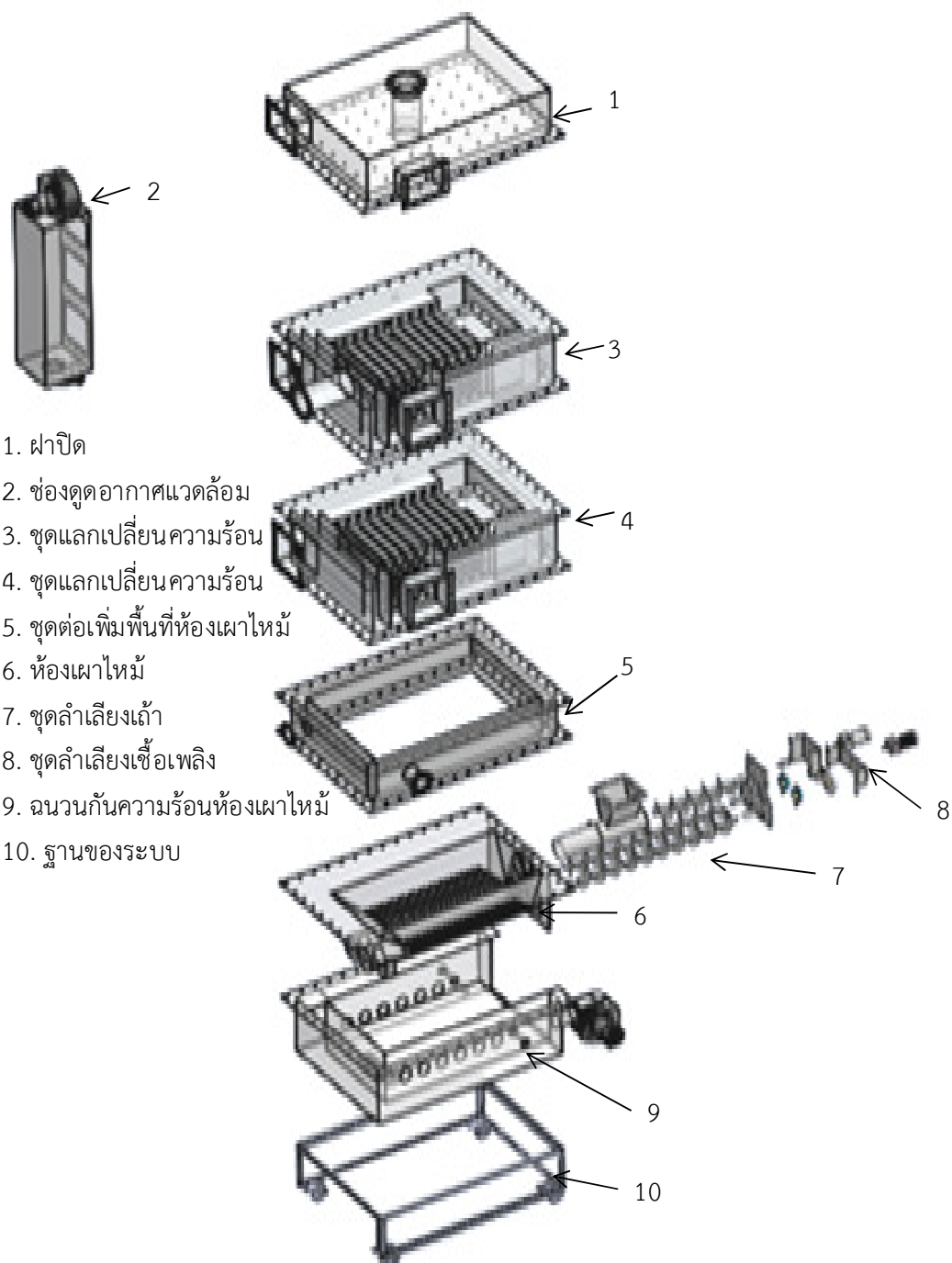
๓๕ หมู่ ๓ ตำบลในธานี ต.คลองห้า อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี ๑๒๑๒๐
โทร. (๒๖) ๐ ๒๕๓๗ ๙๐๐๐ โทรสาร ๐ ๒๕๓๗ ๙๐๐๙
E-mail : tistr@tistr.or.th Website : www.tistr.or.th

FM-ETD-21

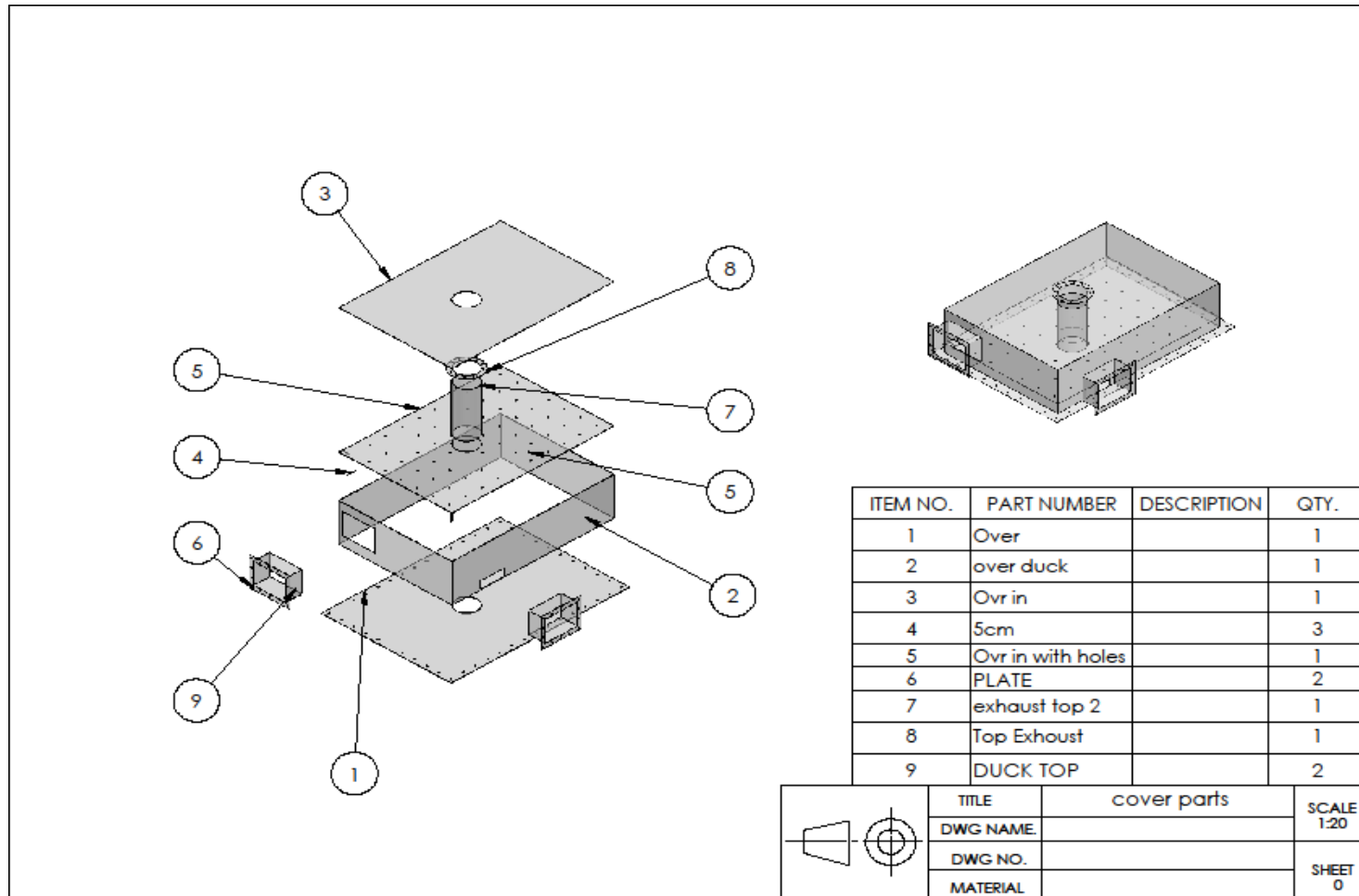
รูปที่ A2.1 ผลการวัดค่าความร้อนของแกลบจากสถาบันสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)



ภาคผนวกที่ 3
แบบชิ้นส่วนของระบบทำอากาศร้อน



รูปที่ A3.1 ส่วนประกอบของเครื่องทำอากาศร้อน



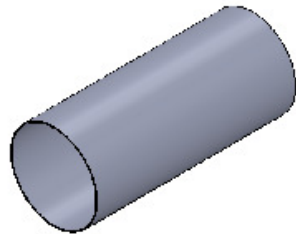
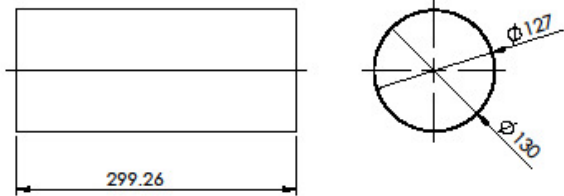
รูปที่ A3.2 แบบของชุดฝาปิดด้านบน

DWG.NAME :EXHAUSTTOP 22

DWG NO :7 QTY. 1

MATERIAL :-

SCALE : 1 :5

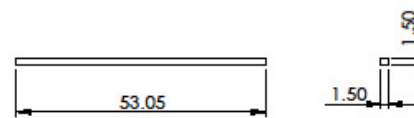


DWG.NAME : 5CM

DWG NO :4 QTY. 4

MATERIAL :-

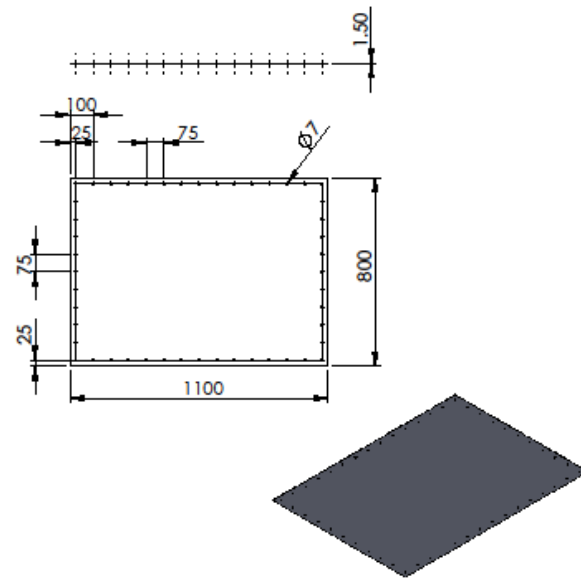
SCALE : 1 : 1



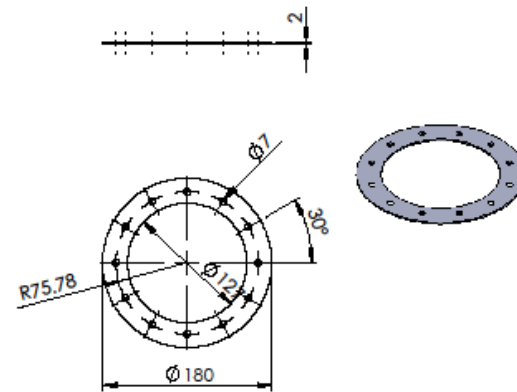
	TITLE	COVER PARTS	SCALE 1:1 ,1:5
	DWG NAME	EXHAUST TOP2,5CM	
	DWG NO.	4,7	SHEET 1
	MATERIAL		

รูปที่ A3.3 แบบของชุด Exhaust top (หมายเลข 7 ในรูปที่ A3.2)

DWG.NAME : OVER
 DWG.NO : 1 QTY. 1
 MATERIAL :-
 SCALE : 1 : 20

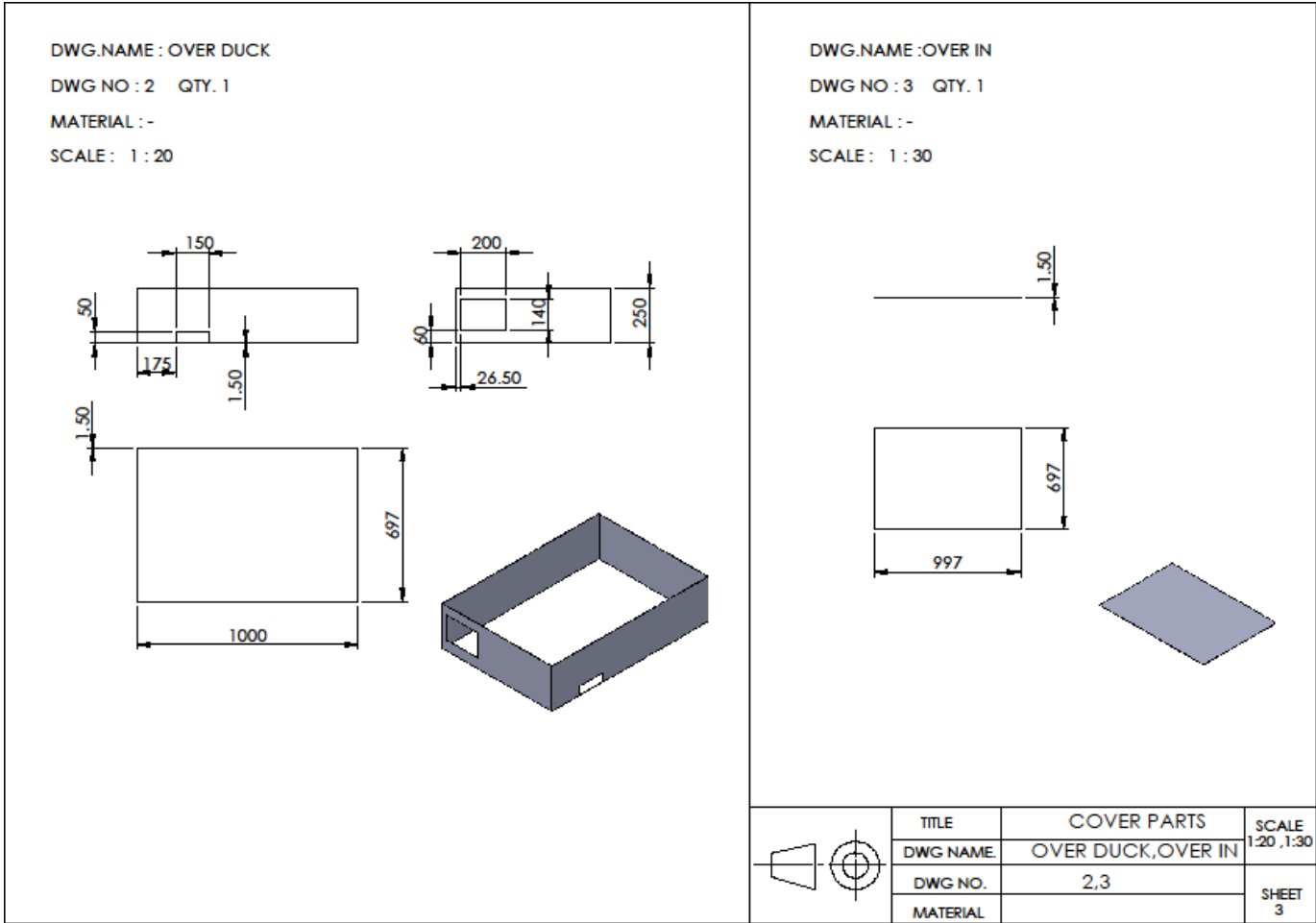


DWG.NAME : TOP EXHOUST
 DWG.NO : 8 QTY. 1
 MATERIAL :-
 SCALE : 1 : 5



	TITLE	COVER PARTS	SCALE 1:5, 1:20
	DWG NAME	OVER, TOPEXHOUST	
	DWG NO.	1,8	SHEET 2
	MATERIAL		

รูปที่ A3.4 แบบของชุด Over และ Top Exhaust (หมายเลข 1 และ 8 ในรูปที่ A3.2)



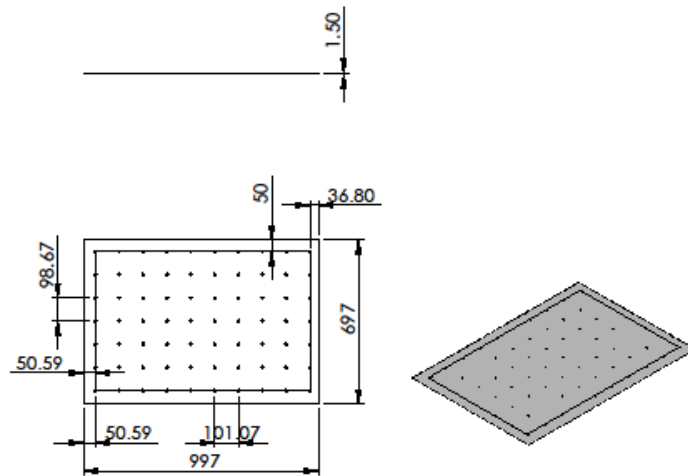
รูปที่ A3.5 แบบของชุด Over Duck และ Over In (หมายเลข 2 และ 3 ในรูปที่ A3.2)

DWG.NAME :OVR IN WITH HOLES

DWG NO : 5 QTY. 1

MATERIAL :-

SCALE : 1 :20

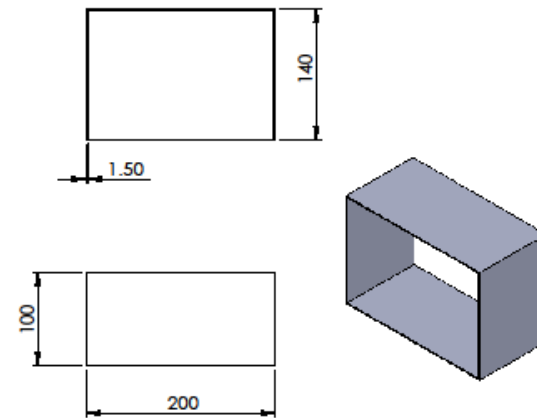


DWG.NAME : PLATE

DWG NO : 6 QTY. 1

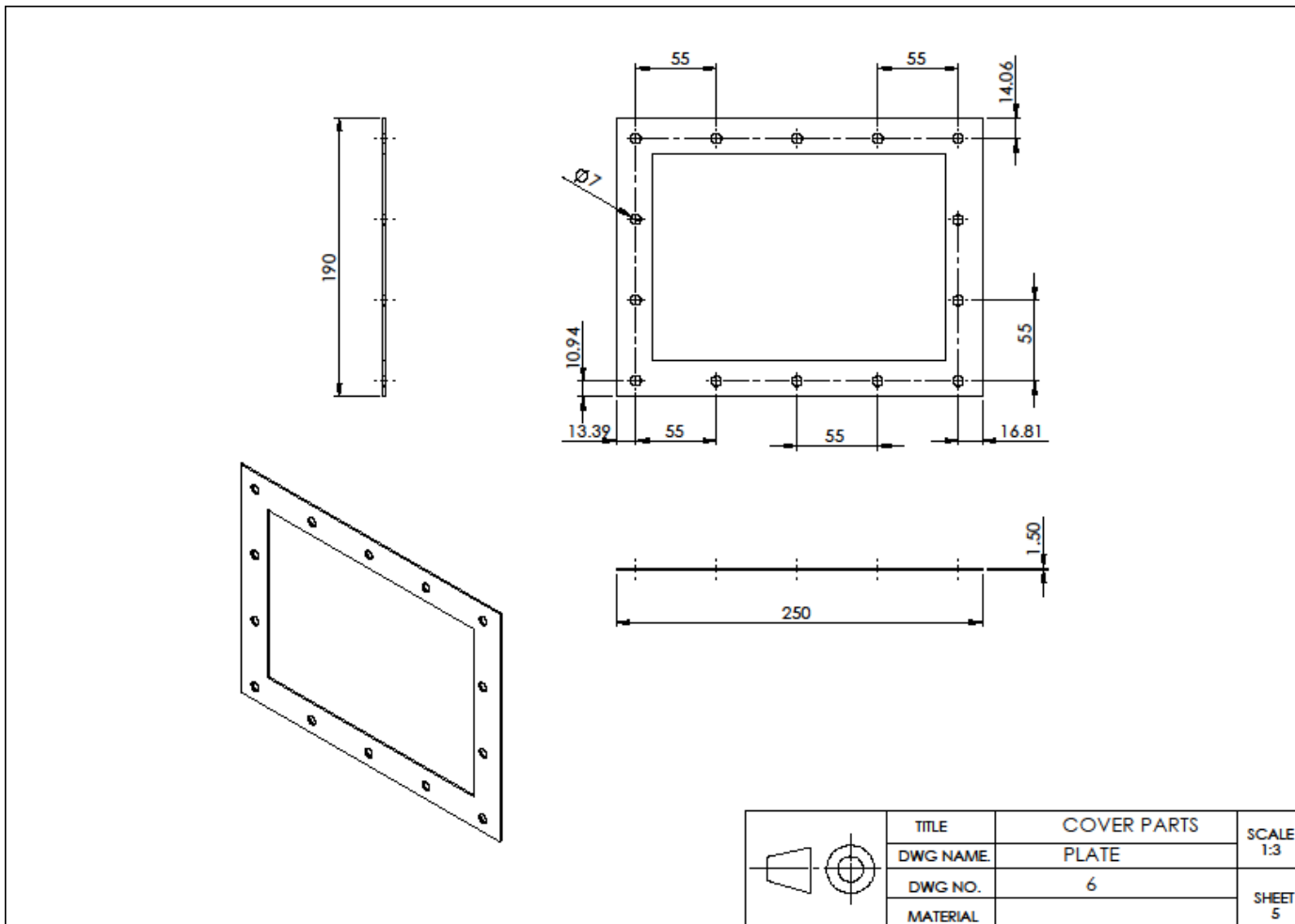
MATERIAL :-

SCALE : 1 : 1

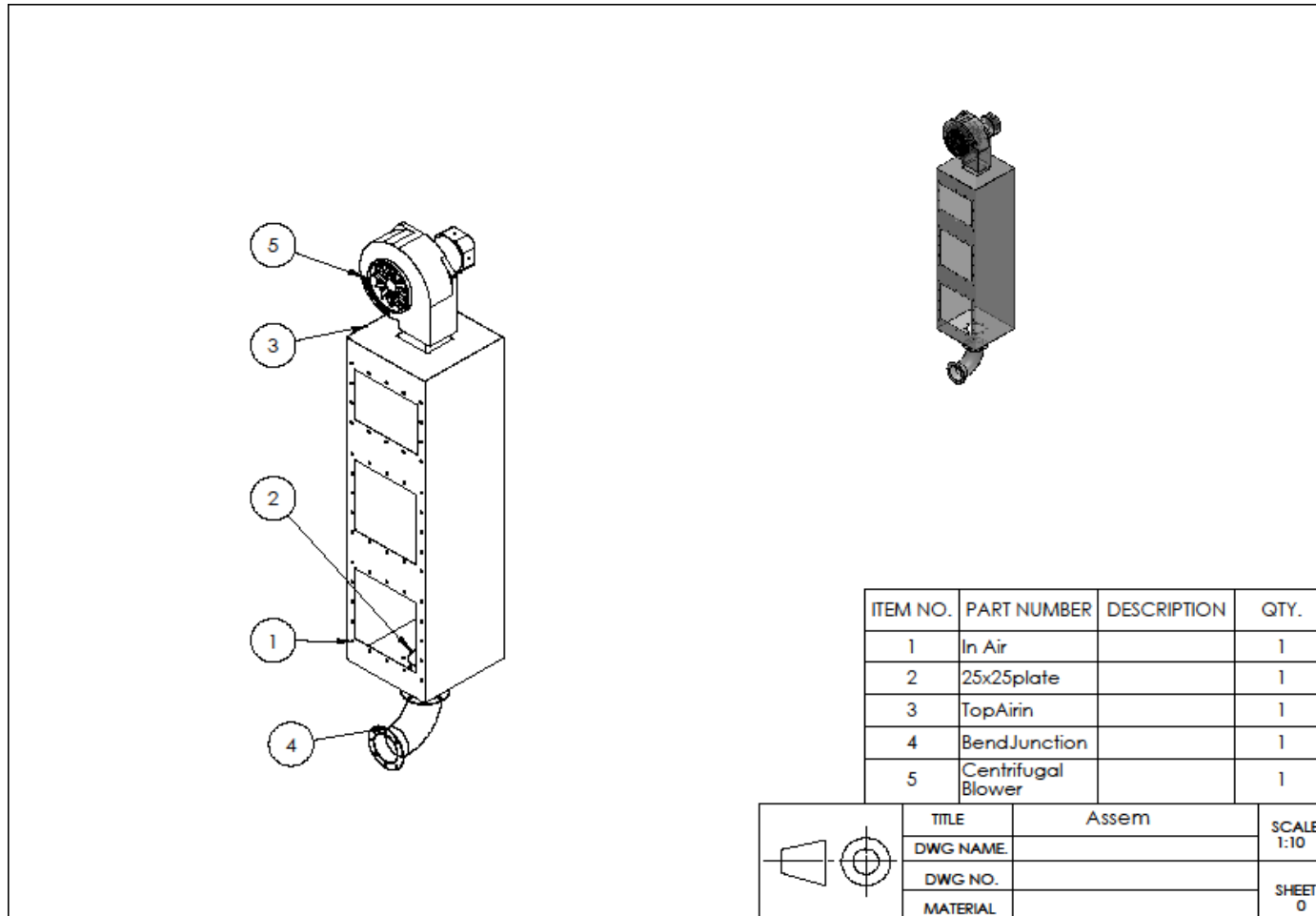


TITLE	COVER PARTS		SCALE 1:5 , 1:20
	DWG NAME	OVR IN WITH HOLES, DUCK TOP	
DWG NO.	5,9		SHEET 4
MATERIAL			

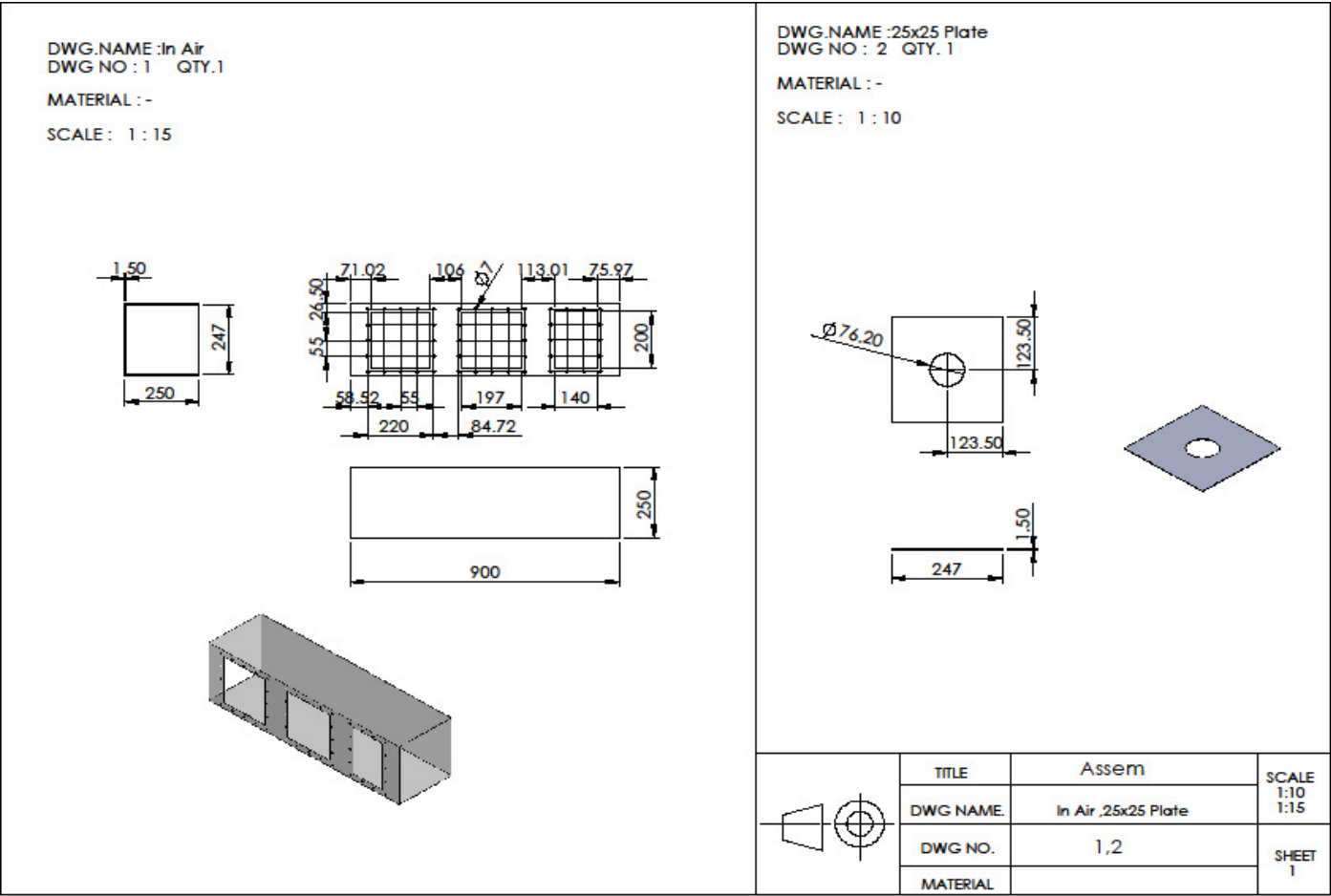
รูปที่ A3.6 แบบของชุด Over in with holes และ Duck Top (หมายเลข 5 และ 9 ในรูปที่ A3.2)



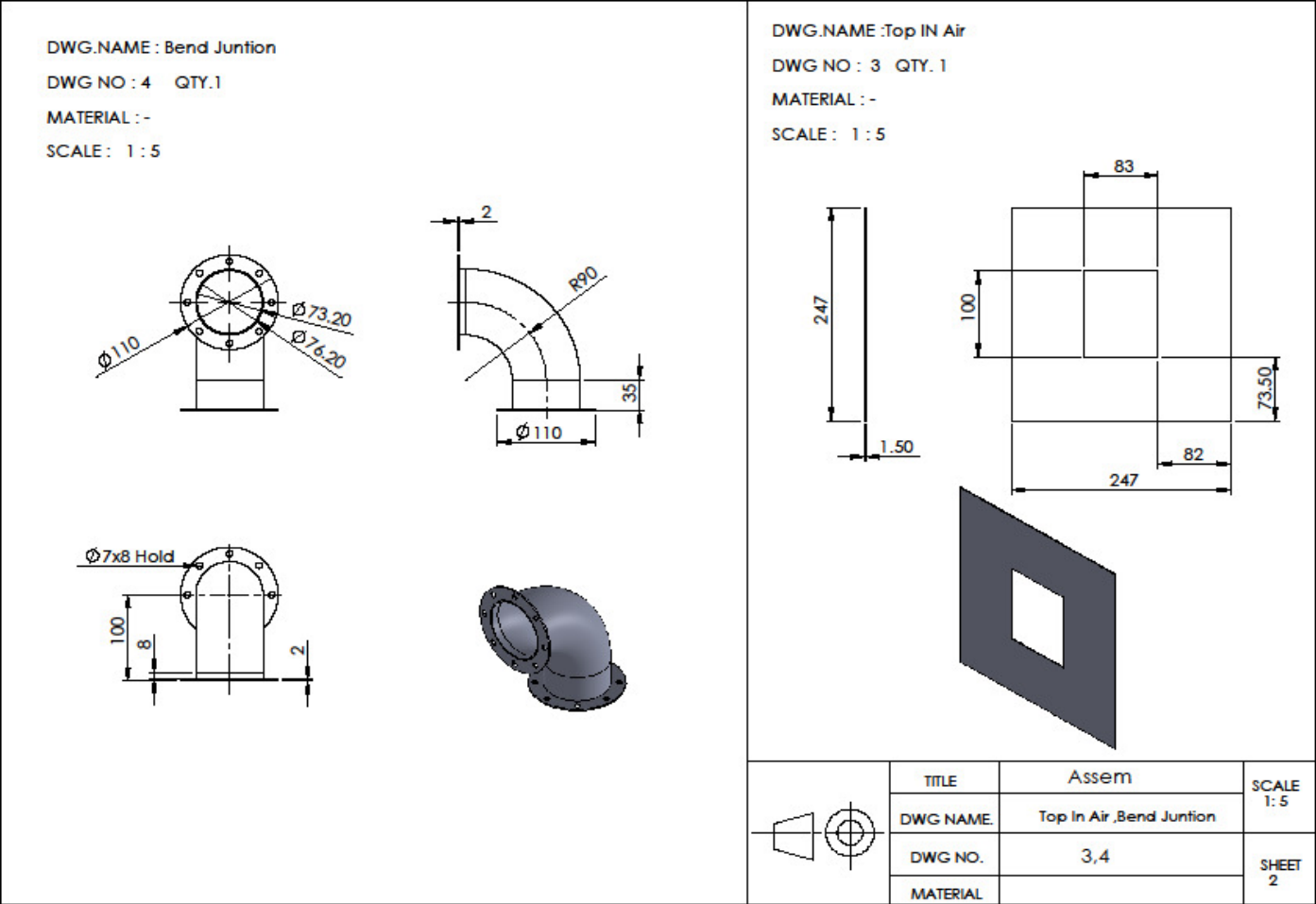
รูปที่ A3.7 แบบของชุด Plate (หมายเลข 6 ในรูปที่ A3.2)



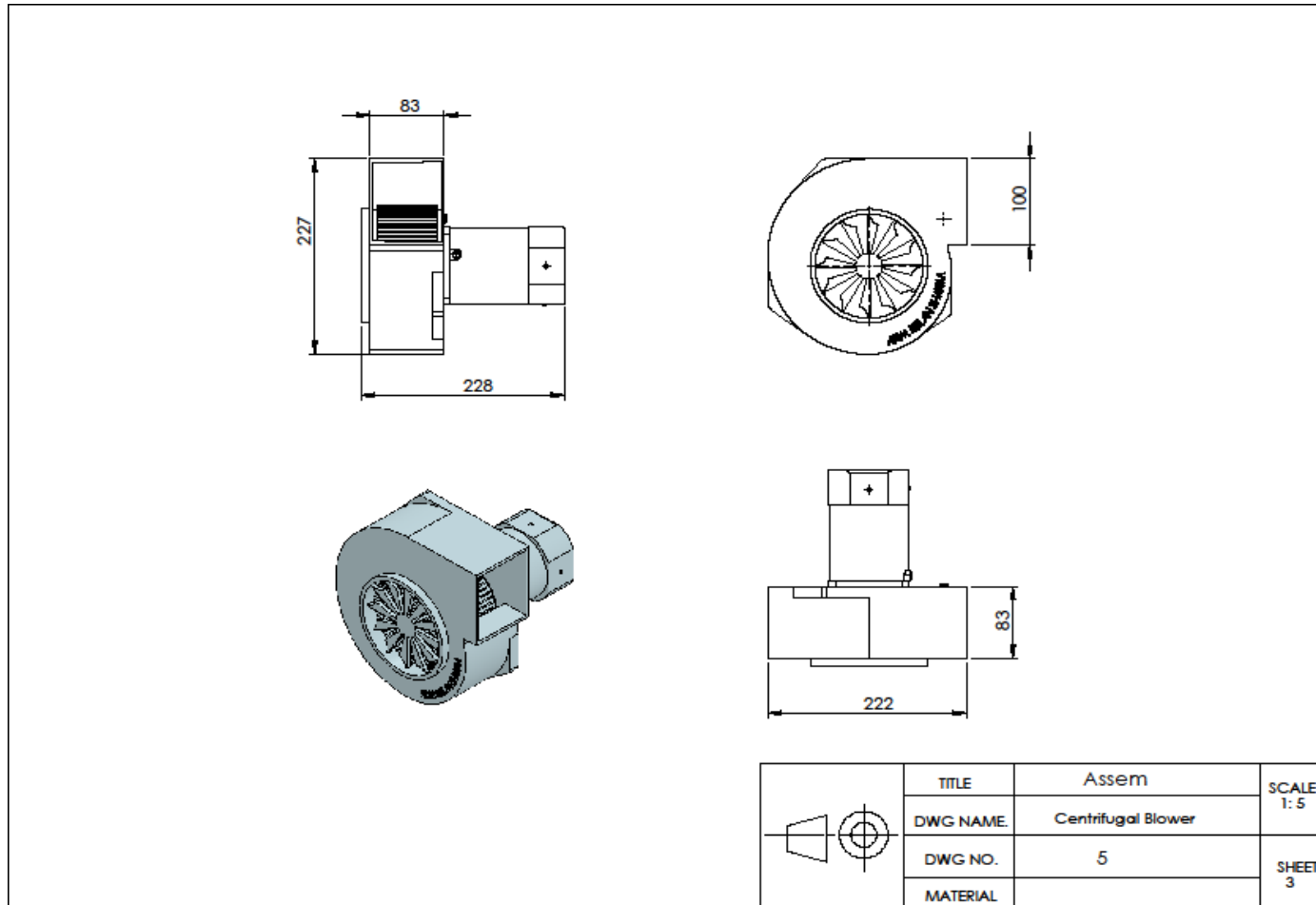
รูปที่ A3.8 แบบของช่องดูดอากาศแวดล้อม



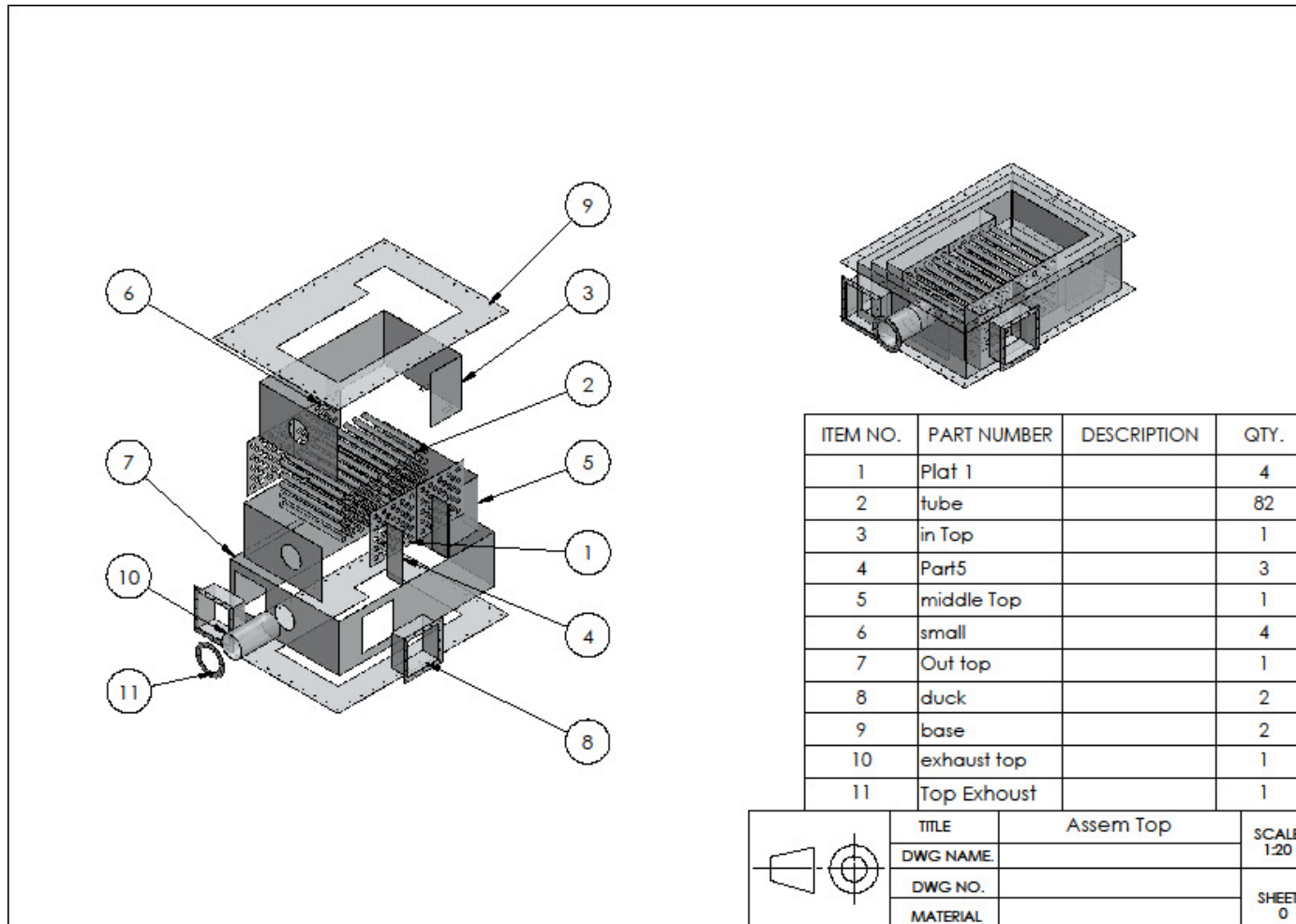
รูปที่ A3.9 แบบของ In air และ 25x25 Plate (หมายเลข 1 และ 2 ในรูป A3.8)



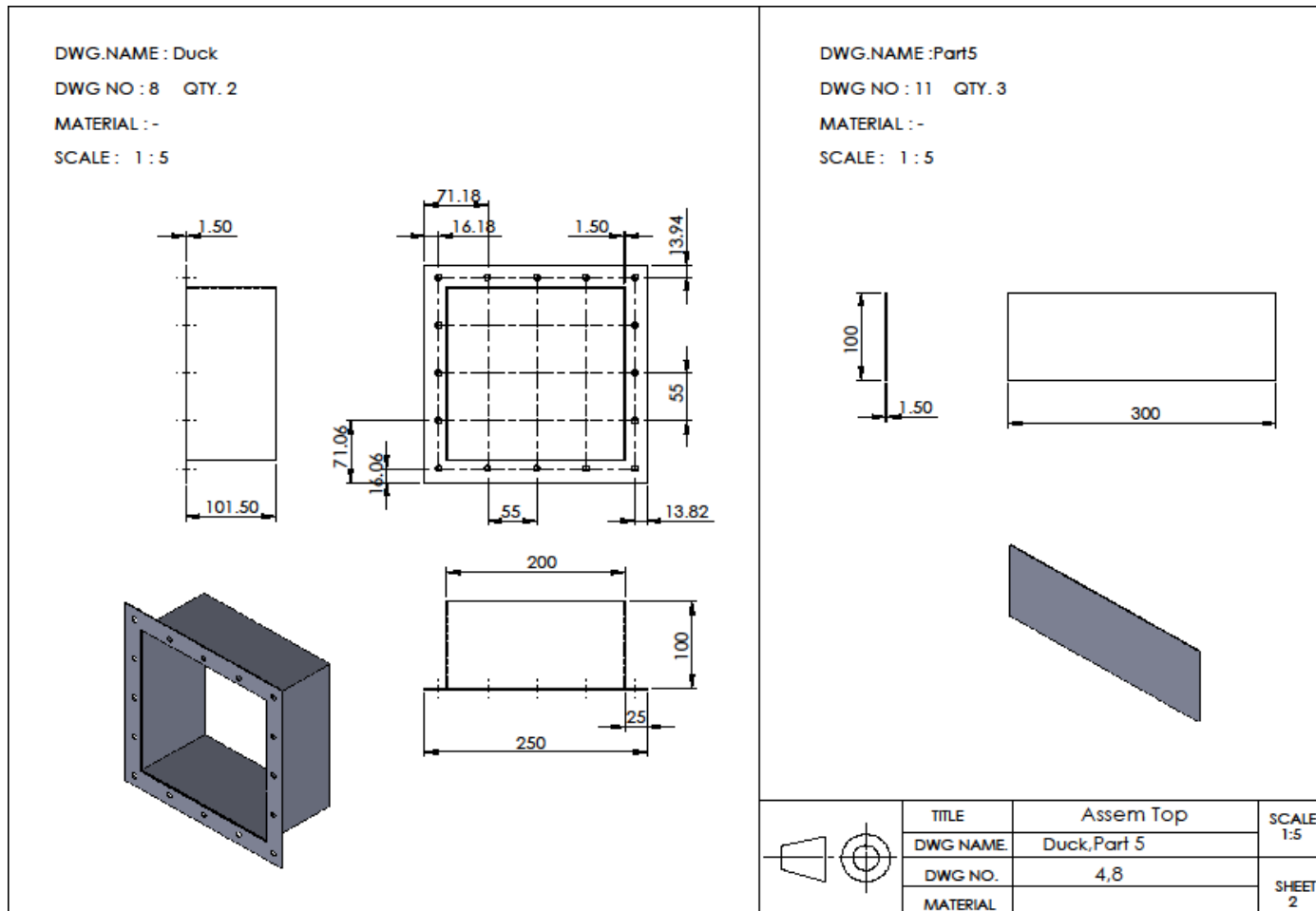
รูปที่ A3.10 แบบของ Top air และ Bend Juntion (หมายเลข 3 และ 4 ในรูป A3.8)



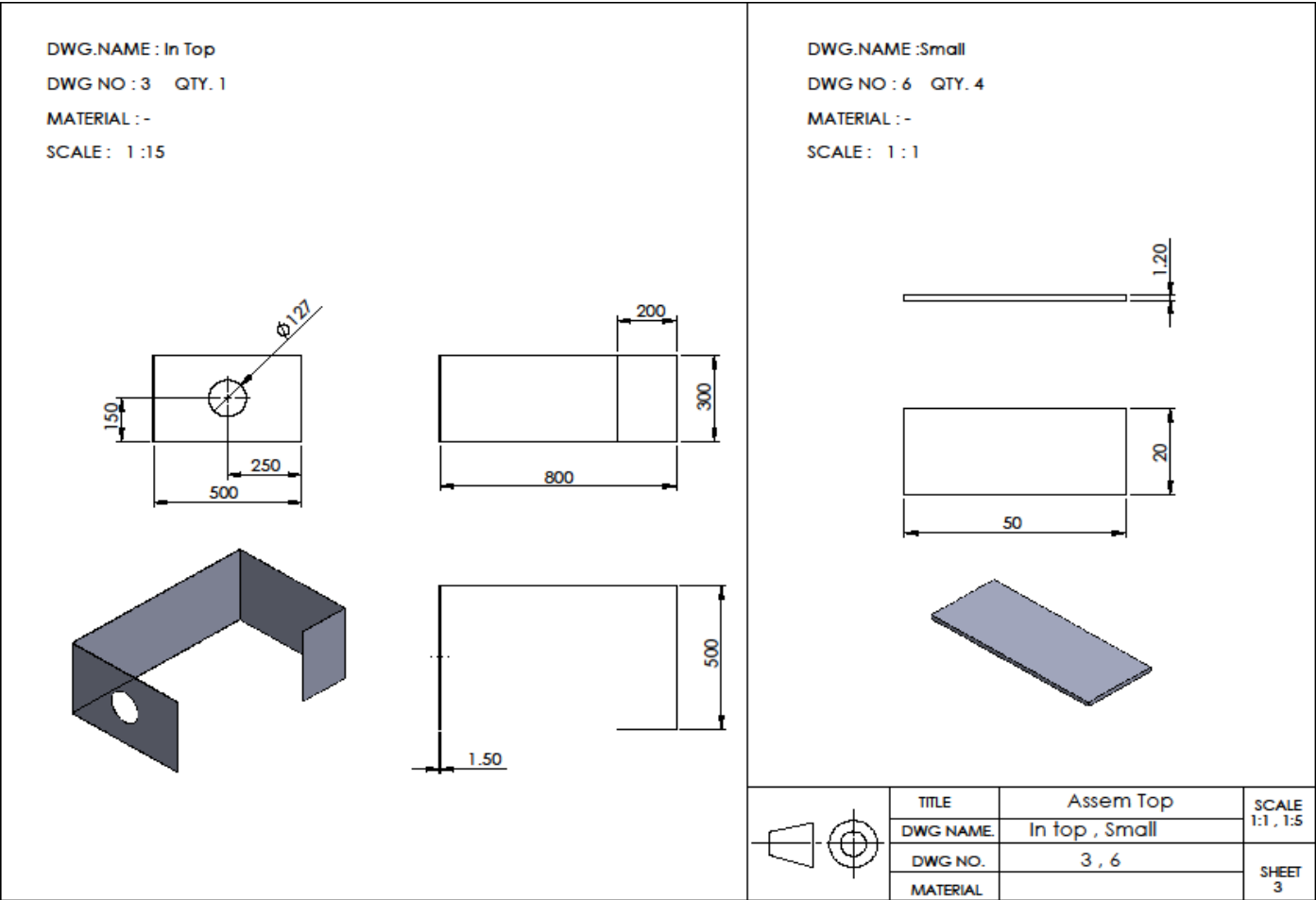
รูปที่ A3.11 แบบของ Centrifugal Blower (หมายเลข 5 ในรูป A3.8)



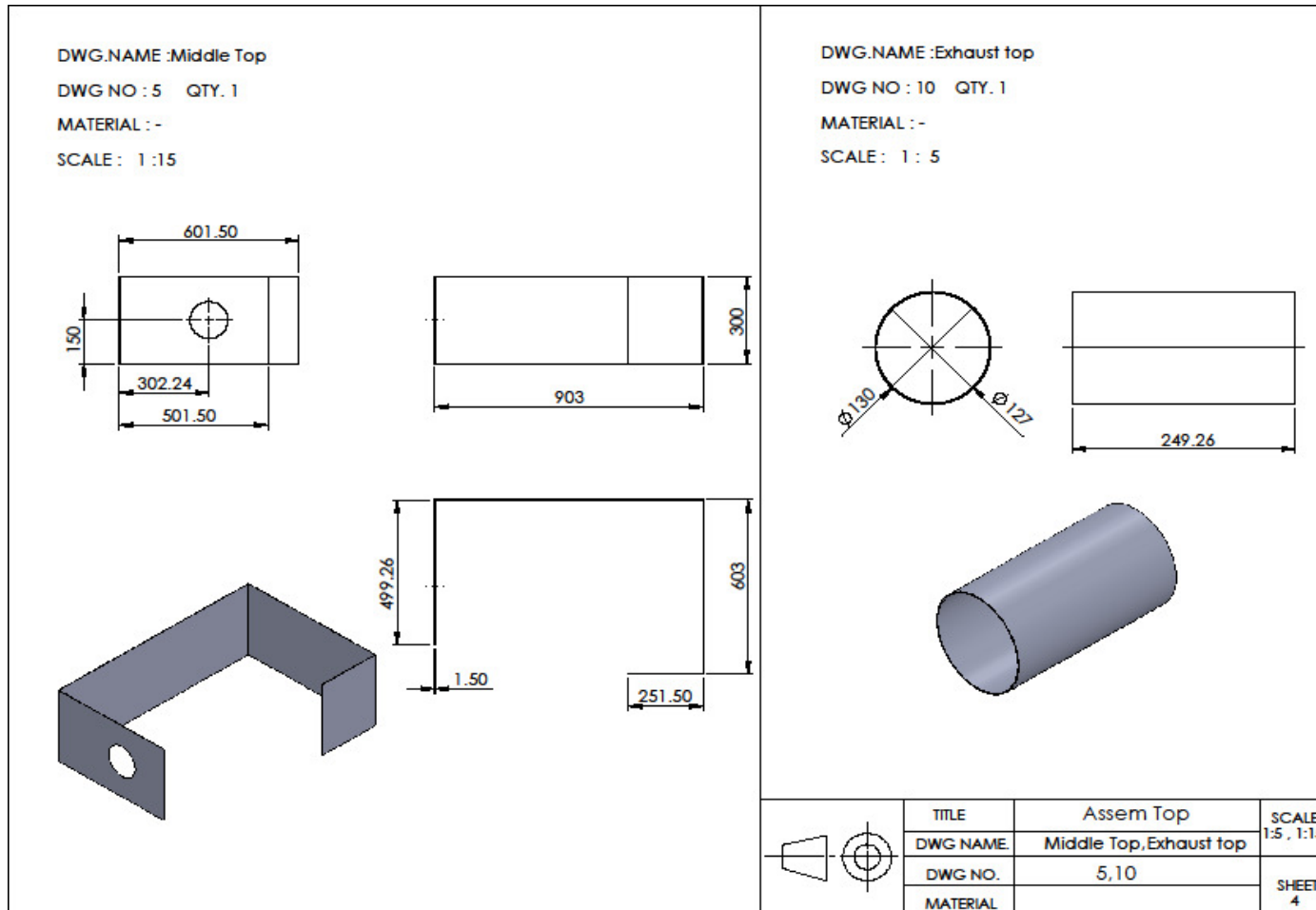
รูปที่ A3.12 แบบของระบบแลกเปลี่ยนความร้อนชั้นที่ 1



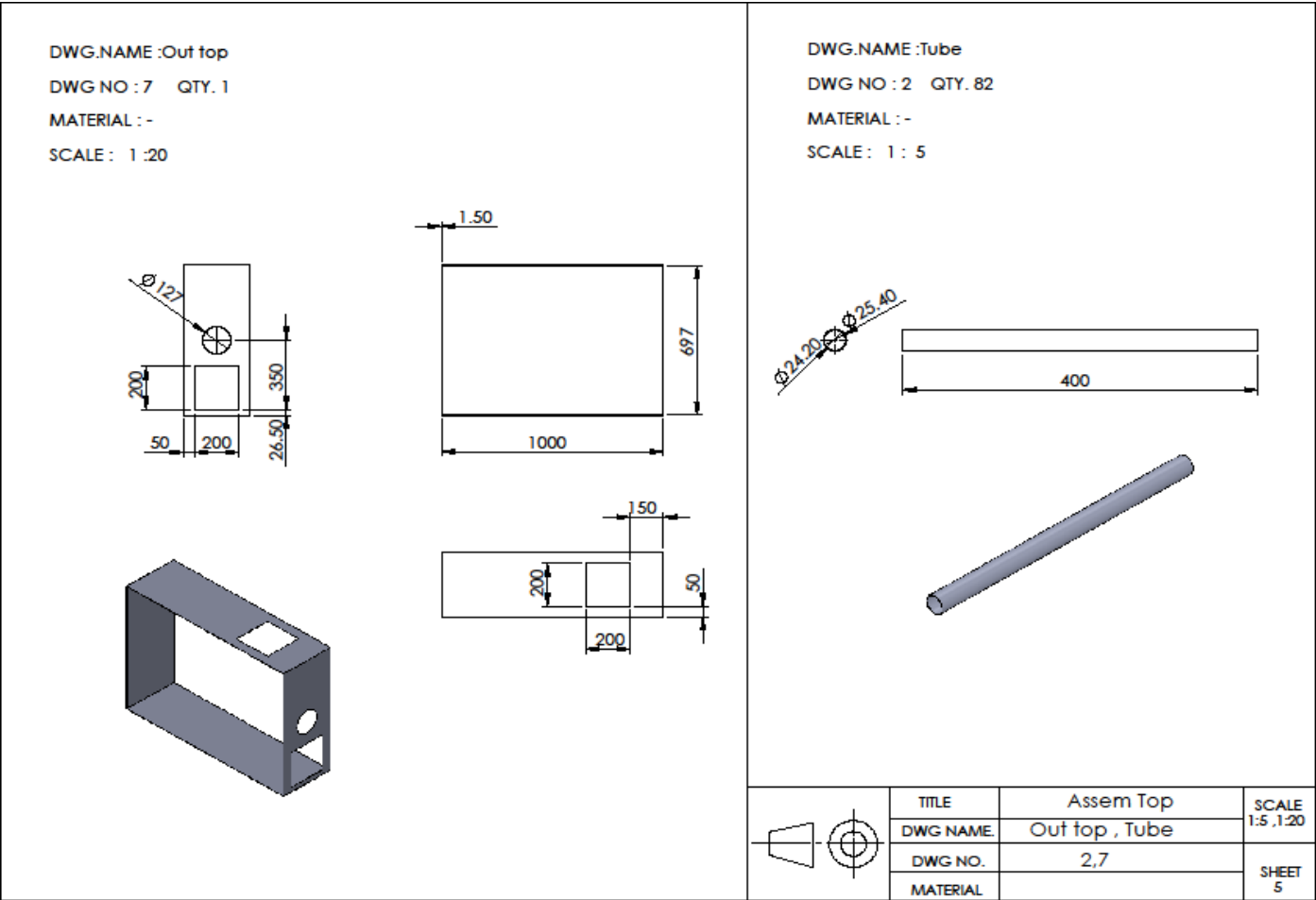
รูปที่ A3.13 แบบของ Duck และ Part 5 (หมายเลข 4 และ 8 ในรูป A3.12)



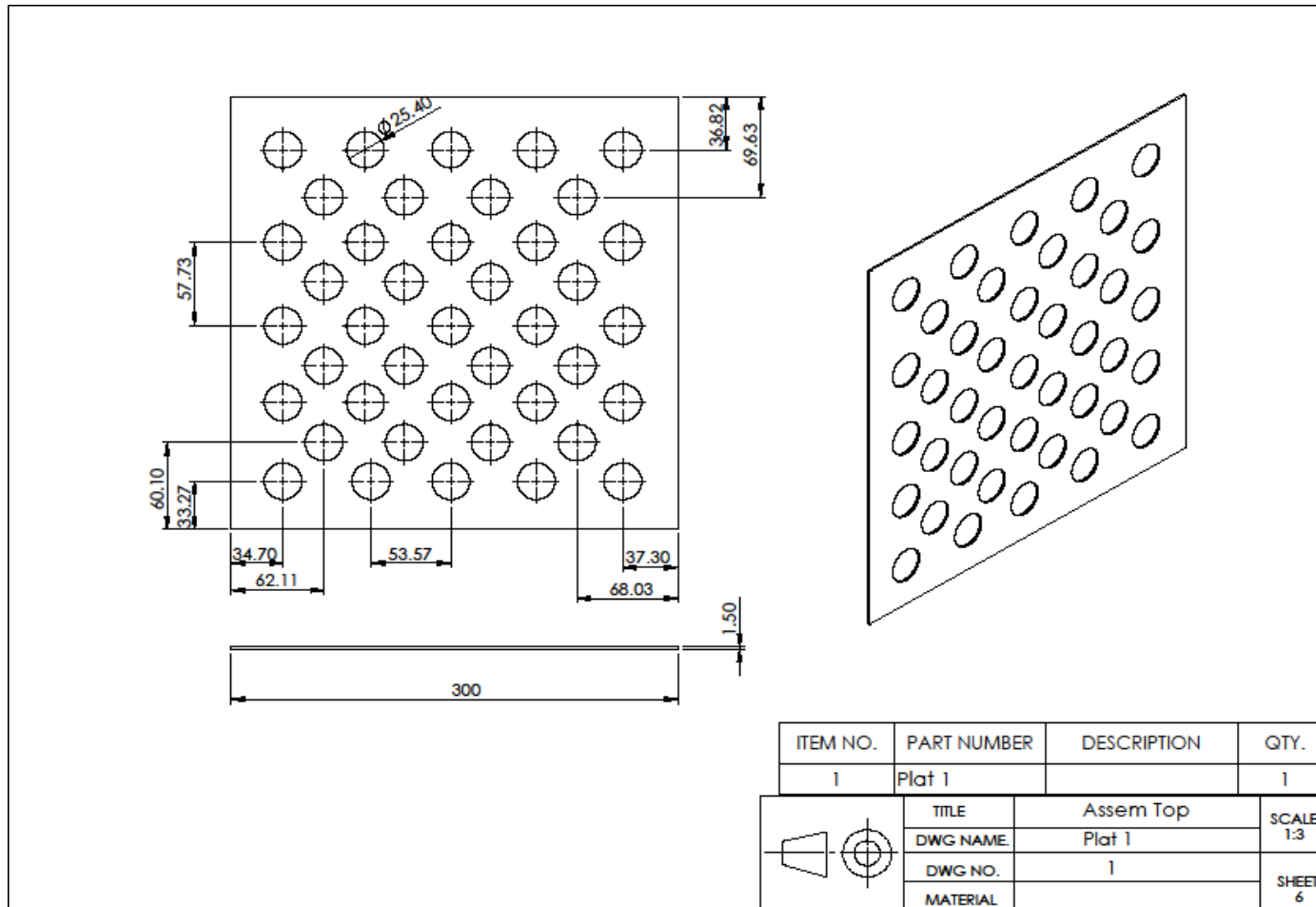
รูปที่ A3.14 แบบของ In top และ Small (หมายเลข 3 และ 6 ในรูป A3.12)



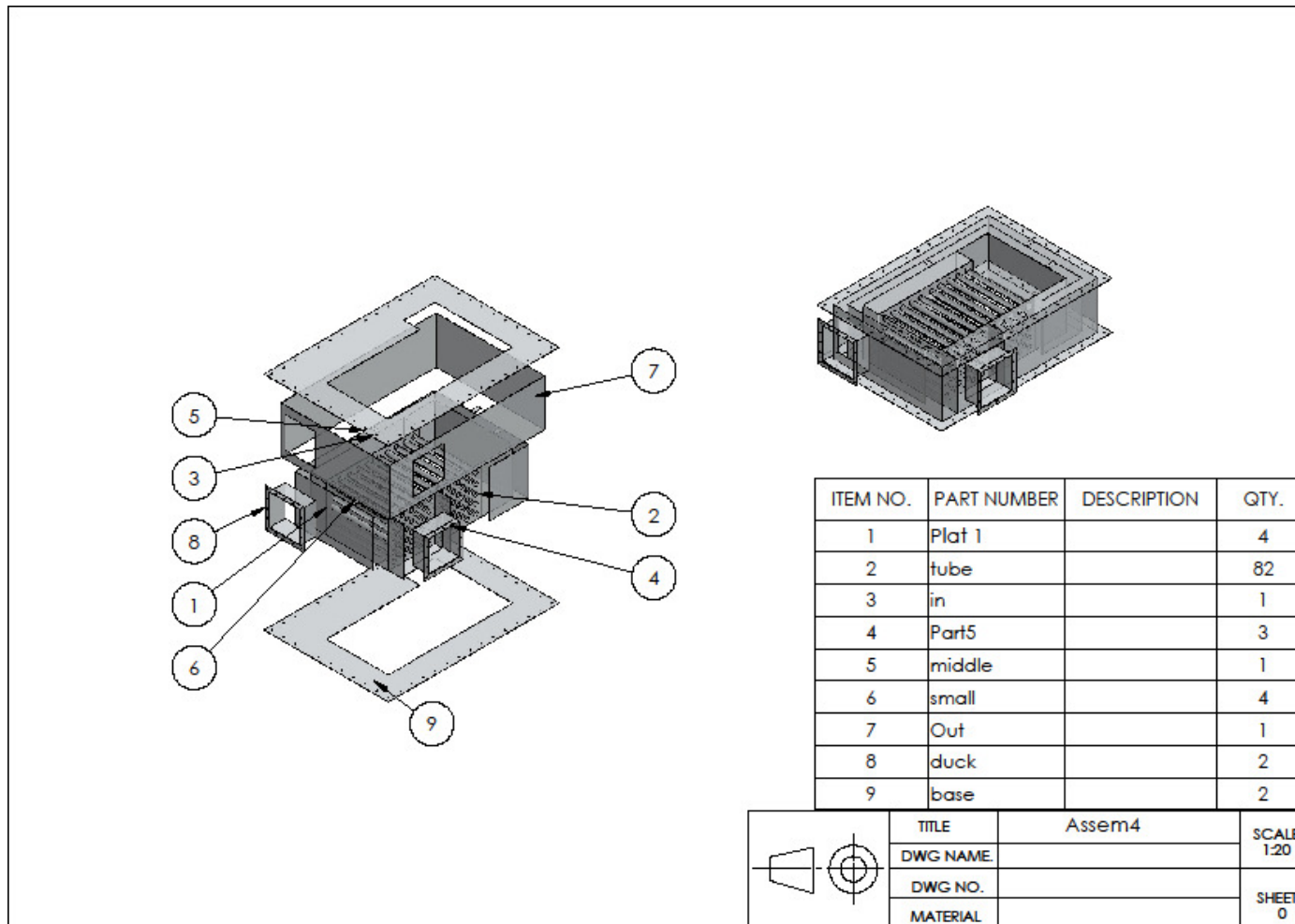
รูปที่ A3.15 แบบของ Middle Top และ Exhaust top (หมายเลข 5 และ 10 ในรูป A3.12)



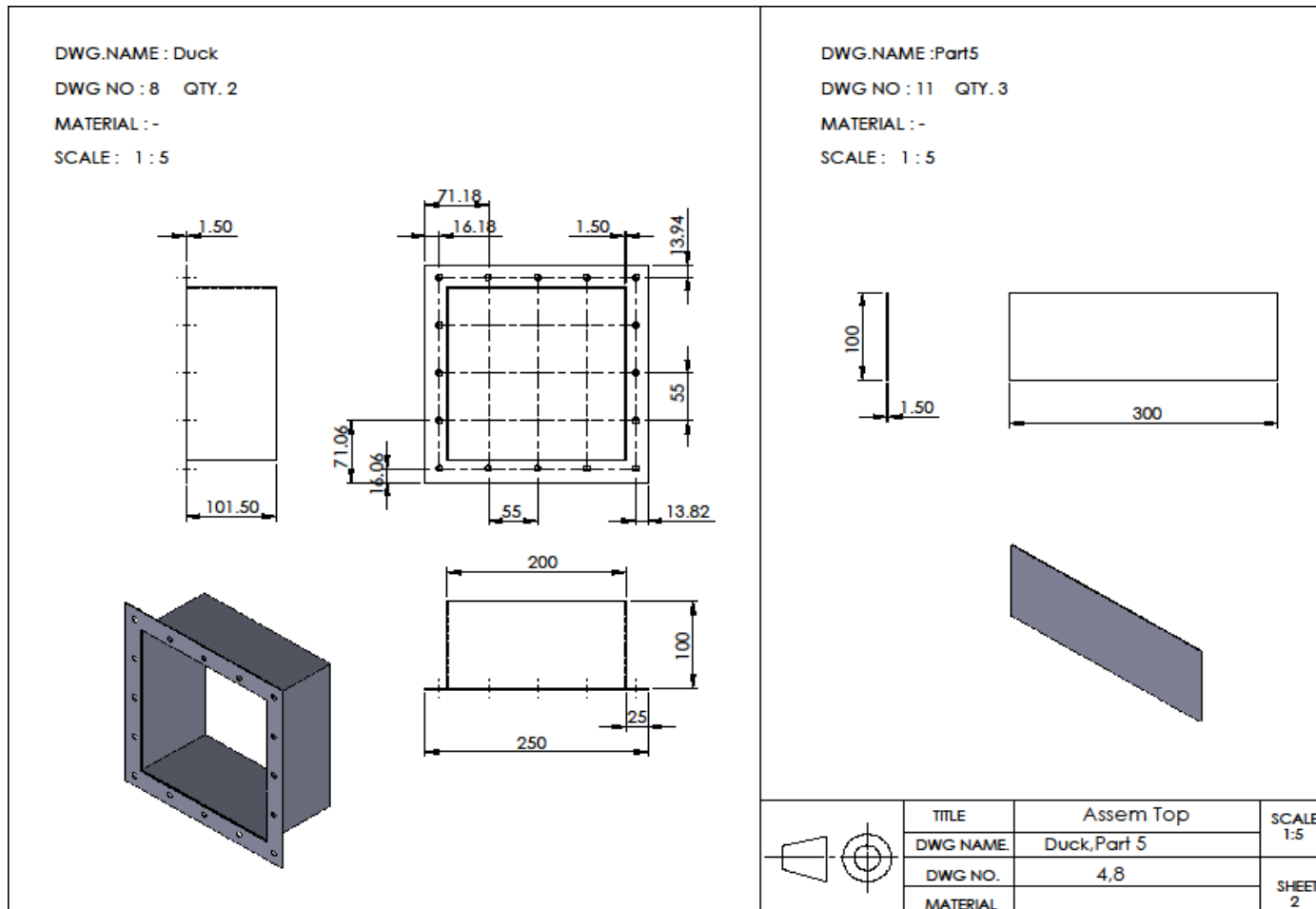
รูปที่ A3.16 แบบของ Out top และ Tube (หมายเลข 7 และ 2 ในรูป A3.12)



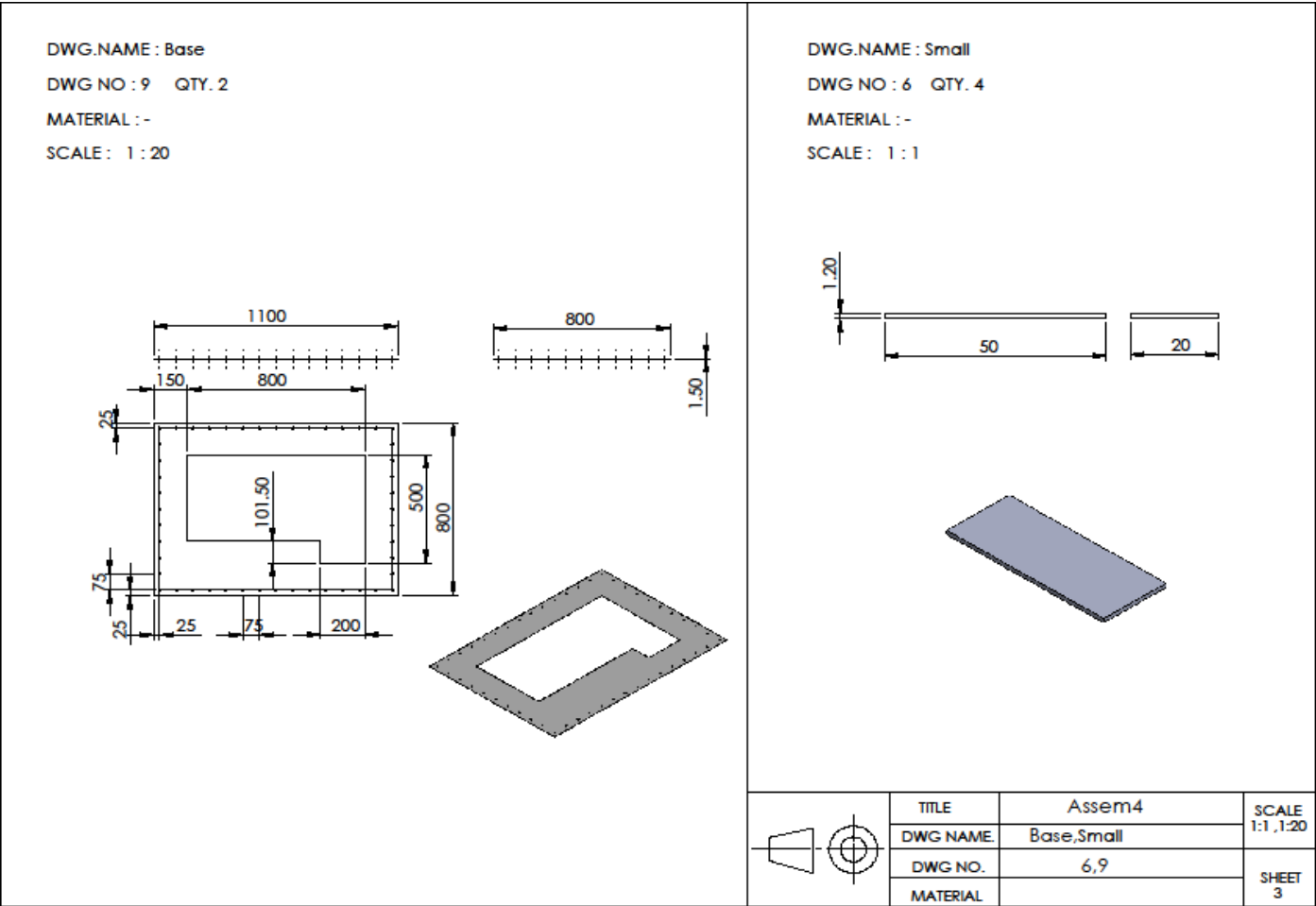
รูปที่ A3.17 แบบของ Plat 1 (หมายเลข 1 ในรูป A3.12)



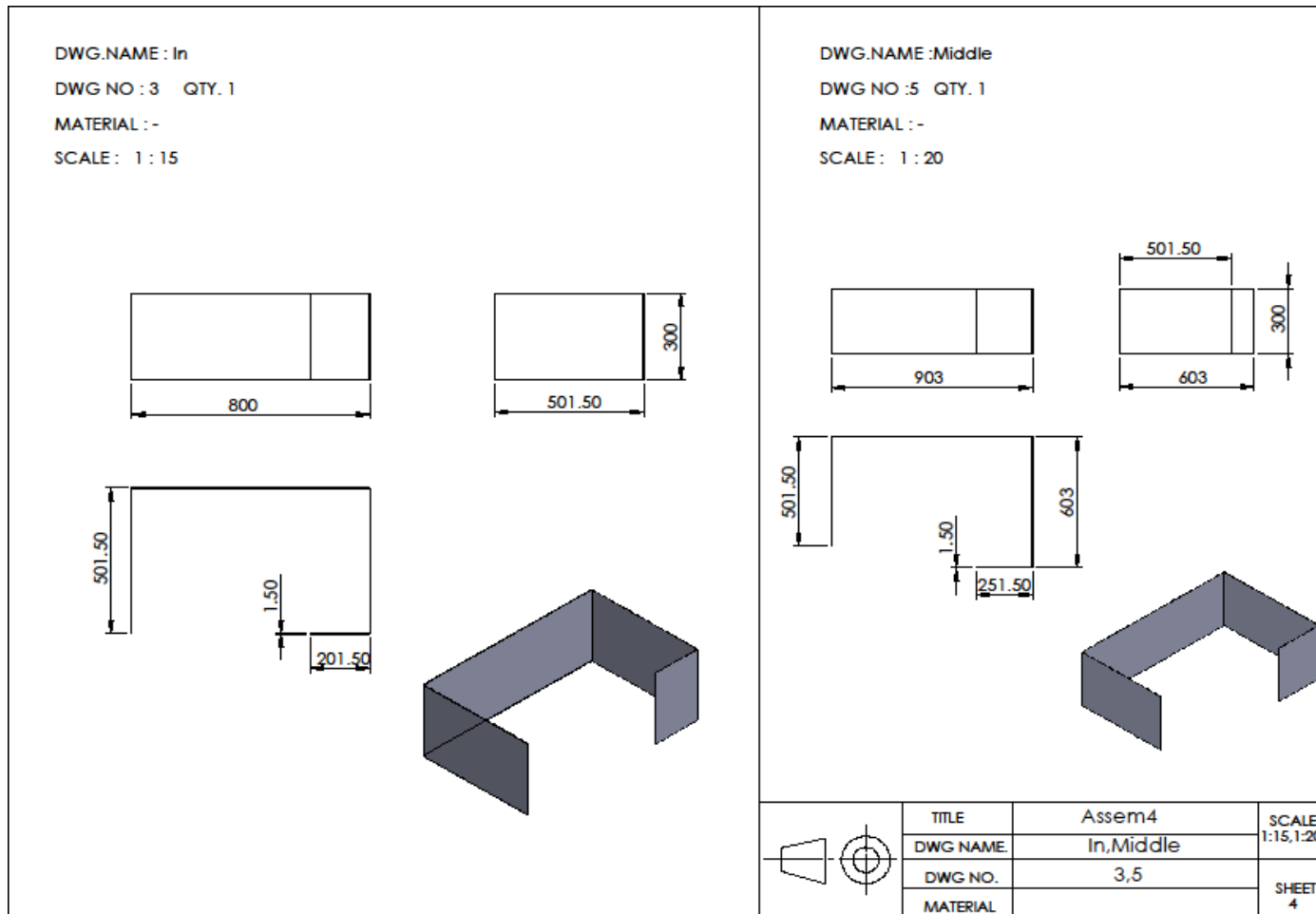
รูปที่ A3.18 แบบของระบบแลกเปลี่ยนความร้อนชั้นที่ 2



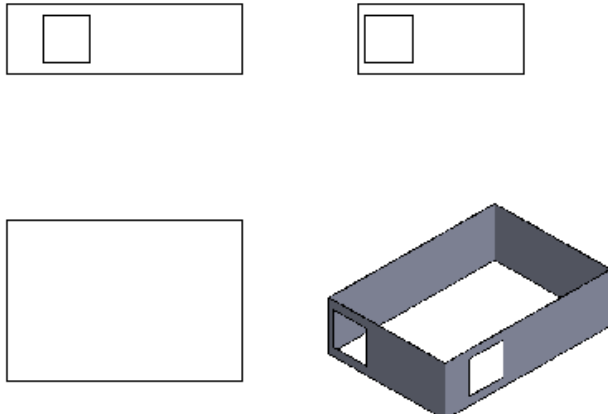
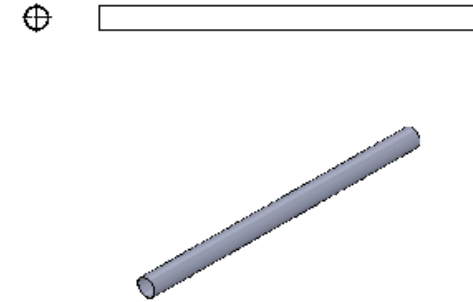
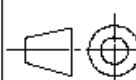
รูปที่ A3.19 แบบของ Duck และ Part 5 (หมายเลข 8 และ 4 ในรูป A3.18)



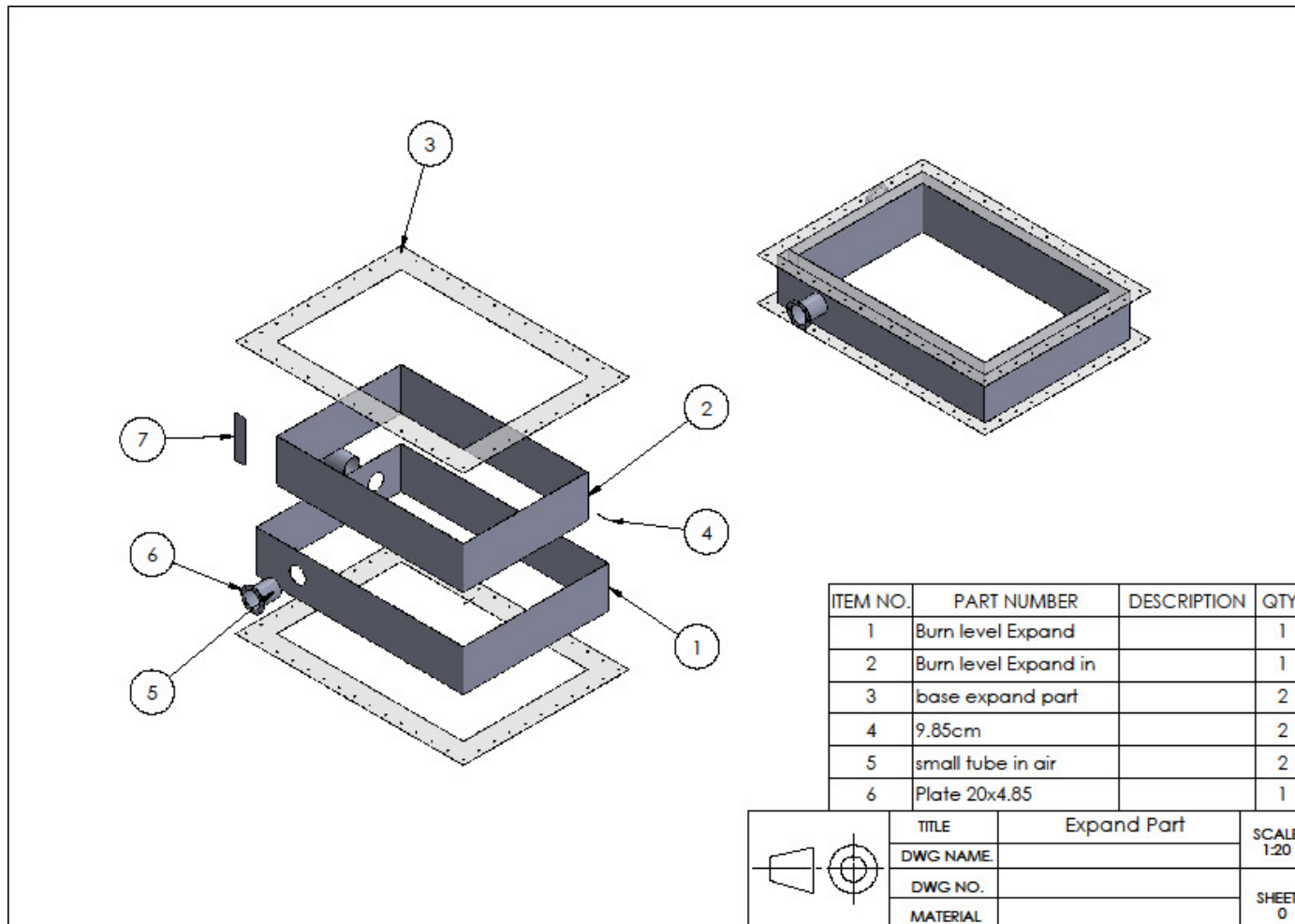
รูปที่ A3.20 แบบของ Base และ Small (หมายเลข 6 และ 9 ในรูป A3.18)



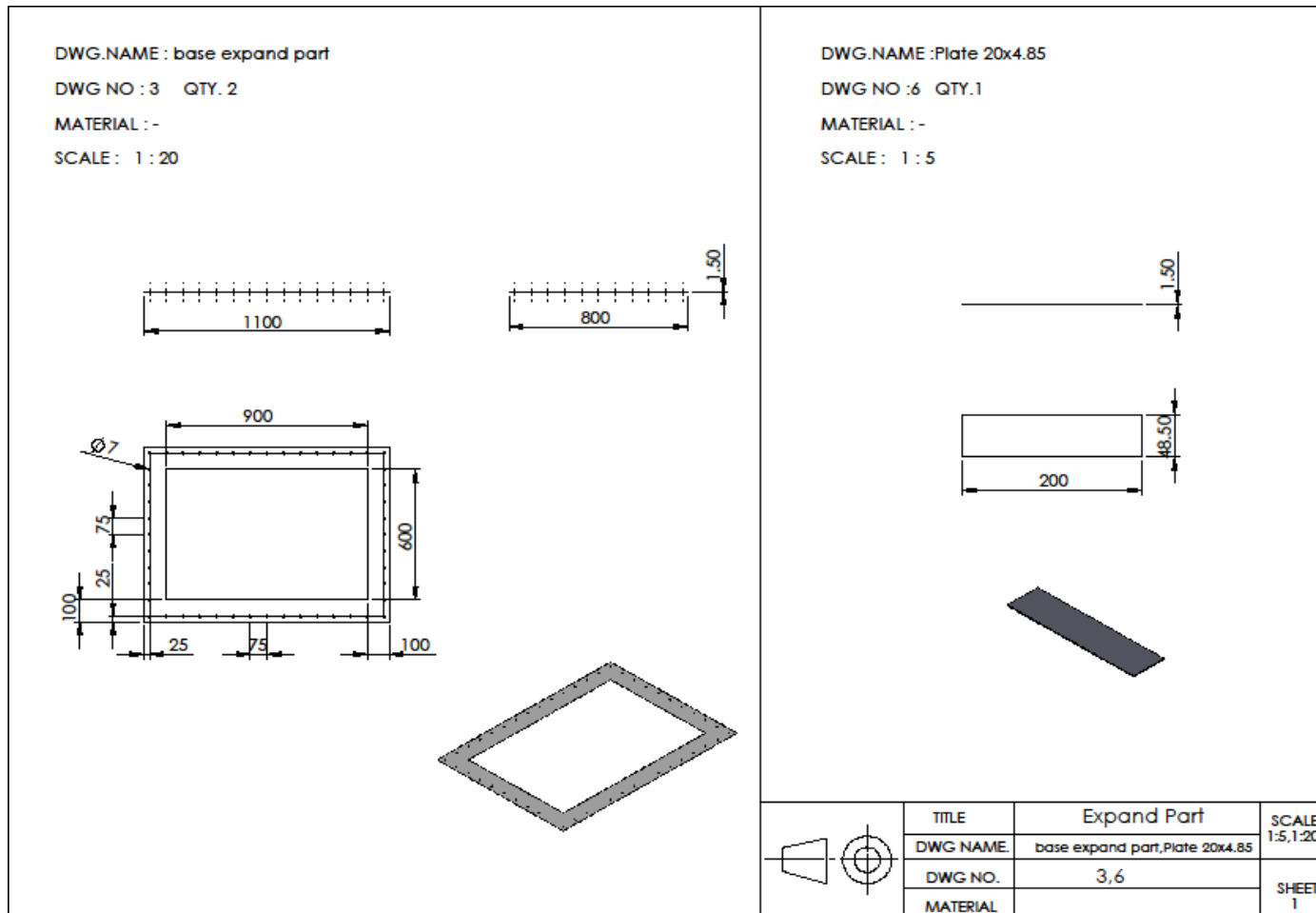
รูปที่ A3.21 แบบของ In และ Middle (หมายเลข 3 และ 5 ในรูป A3.18)

<p>DWG.NAME : Out DWG NO : 7 QTY. 1 MATERIAL :- SCALE : 1 : 5</p> 	<p>DWG.NAME : Tube DWG NO : 2 QTY. 82 MATERIAL :- SCALE : 1 : 20</p> 										
	<table border="1"> <tr> <td>TITLE</td> <td>Assem4</td> <td rowspan="2">SCALE 1:5,1:20</td> </tr> <tr> <td>DWG NAME.</td> <td>Out,Tube</td> </tr> <tr> <td>DWG NO.</td> <td>2,7</td> <td rowspan="2">SHEET 5</td> </tr> <tr> <td>MATERIAL</td> <td></td> </tr> </table>	TITLE	Assem4	SCALE 1:5,1:20	DWG NAME.	Out,Tube	DWG NO.	2,7	SHEET 5	MATERIAL	
TITLE	Assem4	SCALE 1:5,1:20									
DWG NAME.	Out,Tube										
DWG NO.	2,7	SHEET 5									
MATERIAL											

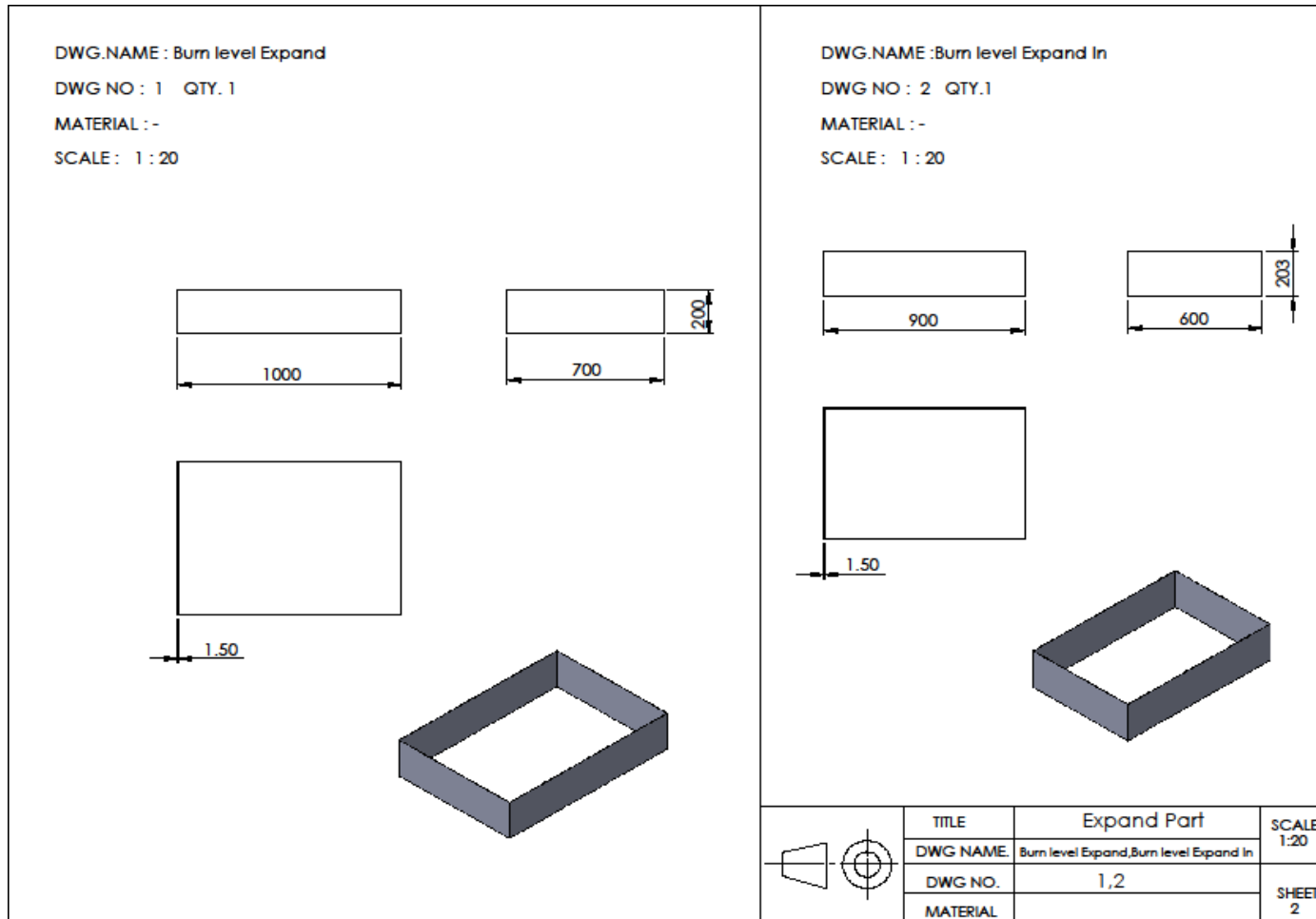
รูปที่ A3.22 แบบของ Out และ Tube (หมายเลข 2 และ 7 ในรูป A3.18)



รูปที่ A3.23 แบบชุดต่อเพิ่มพื้นที่ห้องเผาไหม้



รูปที่ A3.24 แบบของ Base expand part และ Plate 20 x 4.85 (หมายเลข 3 และ 6 ในรูป A3.23)



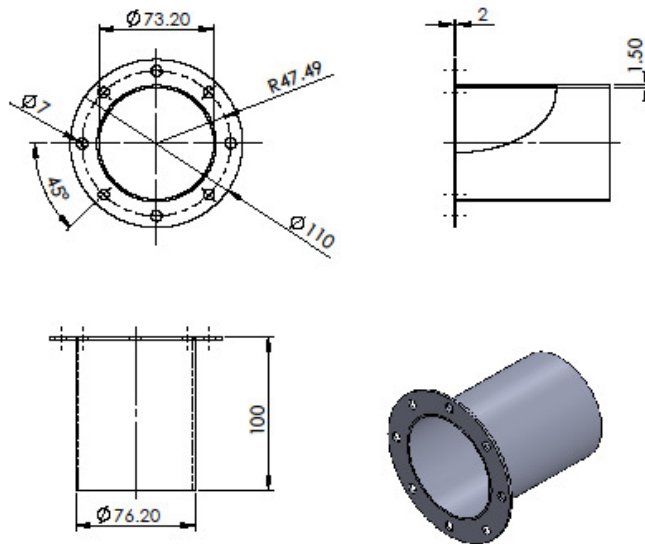
รูปที่ A3.25 แบบของ Burn level Expand และ Burn level Expand in (หมายเลข 1 และ 2 ในรูป A3.23)

DWG.NAME :Small tube in air

DWG NO : 5 QTY. 2

MATERIAL :-

SCALE : 1 : 3

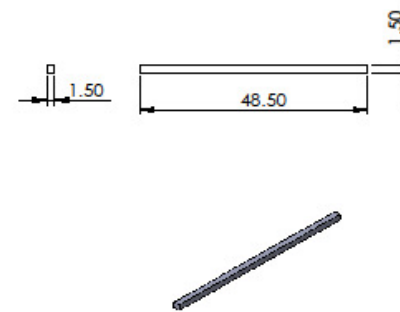


DWG.NAME : 9.85 cm

DWG NO : 4 QTY.2

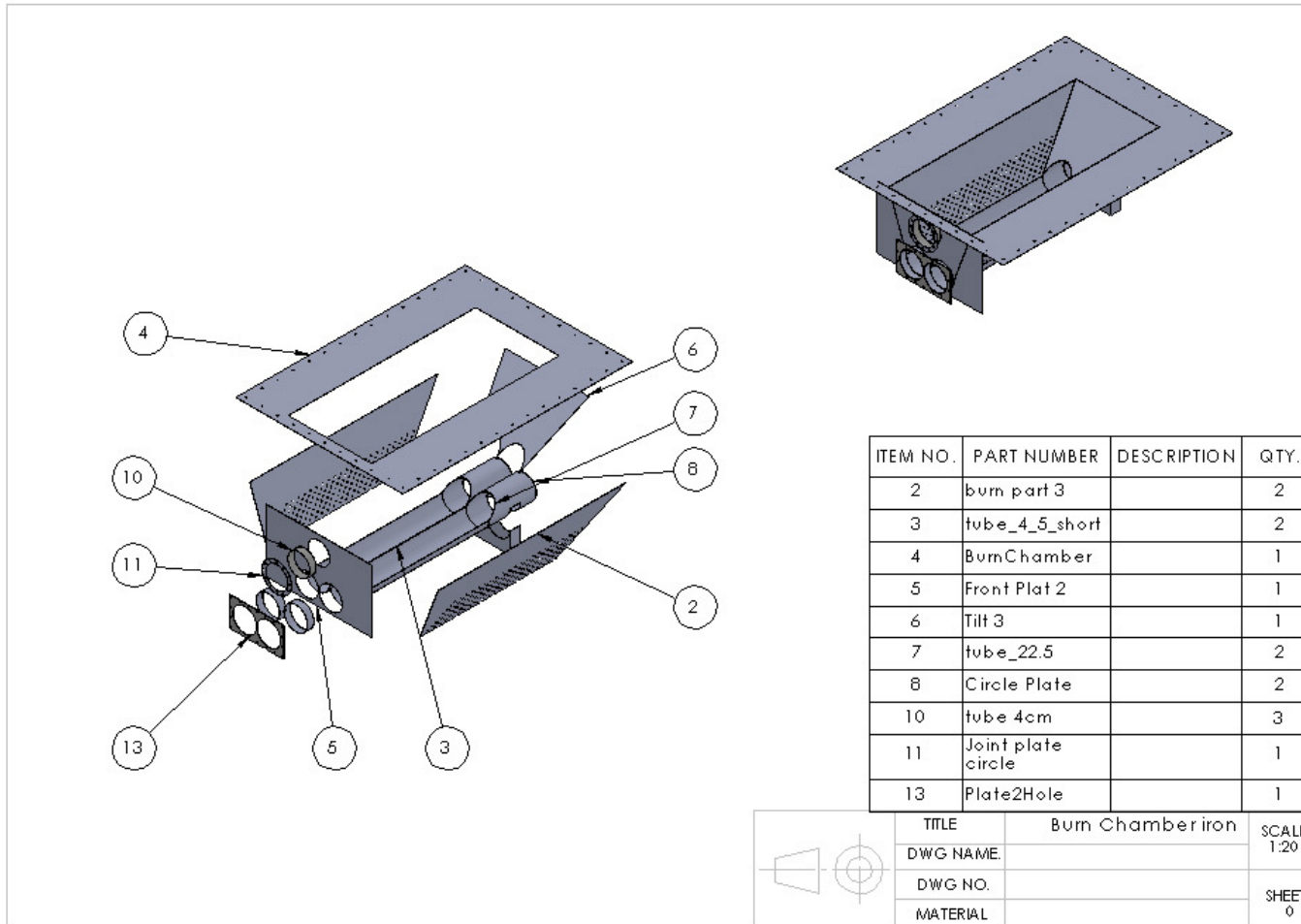
MATERIAL :-

SCALE : 1 : 1



	TITLE	Expand Part	SCALE 1:1,1:3
	DWG NAME	Small tube in air,9.85 cm	
	DWG NO.	4,5	SHEET 3
	MATERIAL		

รูปที่ A3.26 แบบของ 9.85 cm และ Small tube in air (หมายเลข 4 และ 5 ในรูป A3.23)



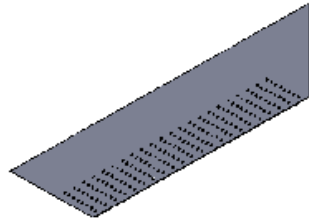
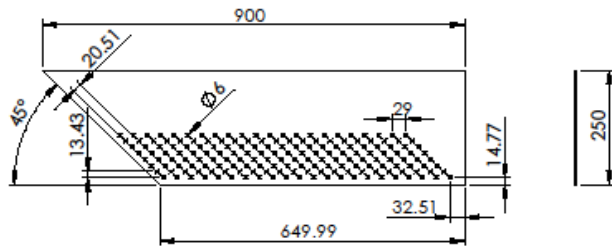
รูปที่ A3.27 แบบของห้องเผาไหม้

DWG.NAME :burn part 3h

DWG NO : 2 QTY. 2

MATERIAL : -

SCALE : 1 :10

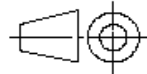
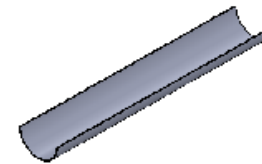
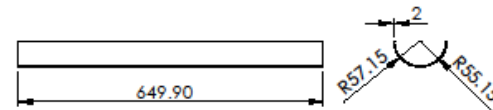


DWG.NAME : tube_4_5_short

DWG NO : 3 QTY. 2

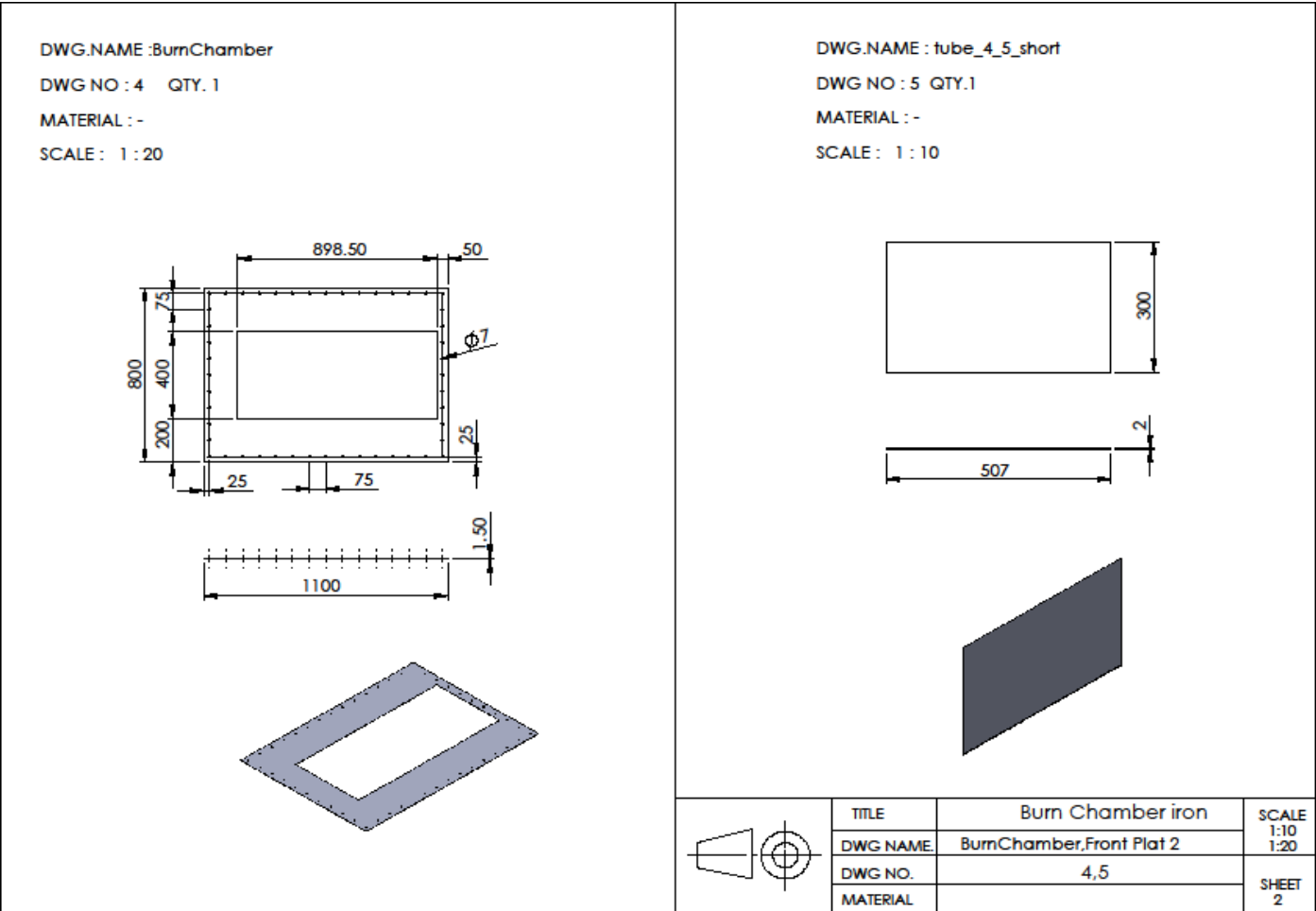
MATERIAL : -

SCALE : 1 :10



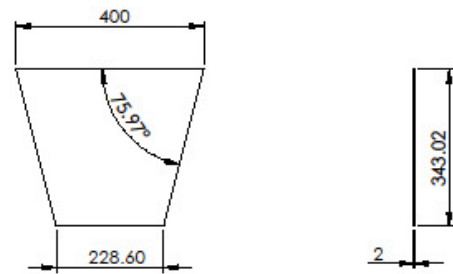
TITLE	Burn Chamber iron	SCALE	1:10
DWG NAME	Burn part 3,Tube_4_5_short	SHEET	1
DWG NO.	10,11		
MATERIAL			

รูปที่ A3.28 แบบของ Burn part 3 และ Tube_4_5_short (หมายเลข 2 และ 3 ในรูป A3.27)

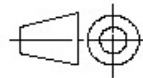
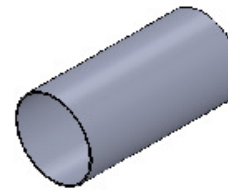
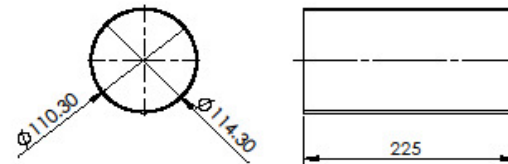


รูปที่ A3.29 แบบของ Bum Chamber และ Front Plat 2 (หมายเลข 4 และ 5 ในรูป A3.27)

DWG.NAME : Tilt 3
 DWG NO : 6 QTY. 1
 MATERIAL : -
 SCALE : 1 : 10

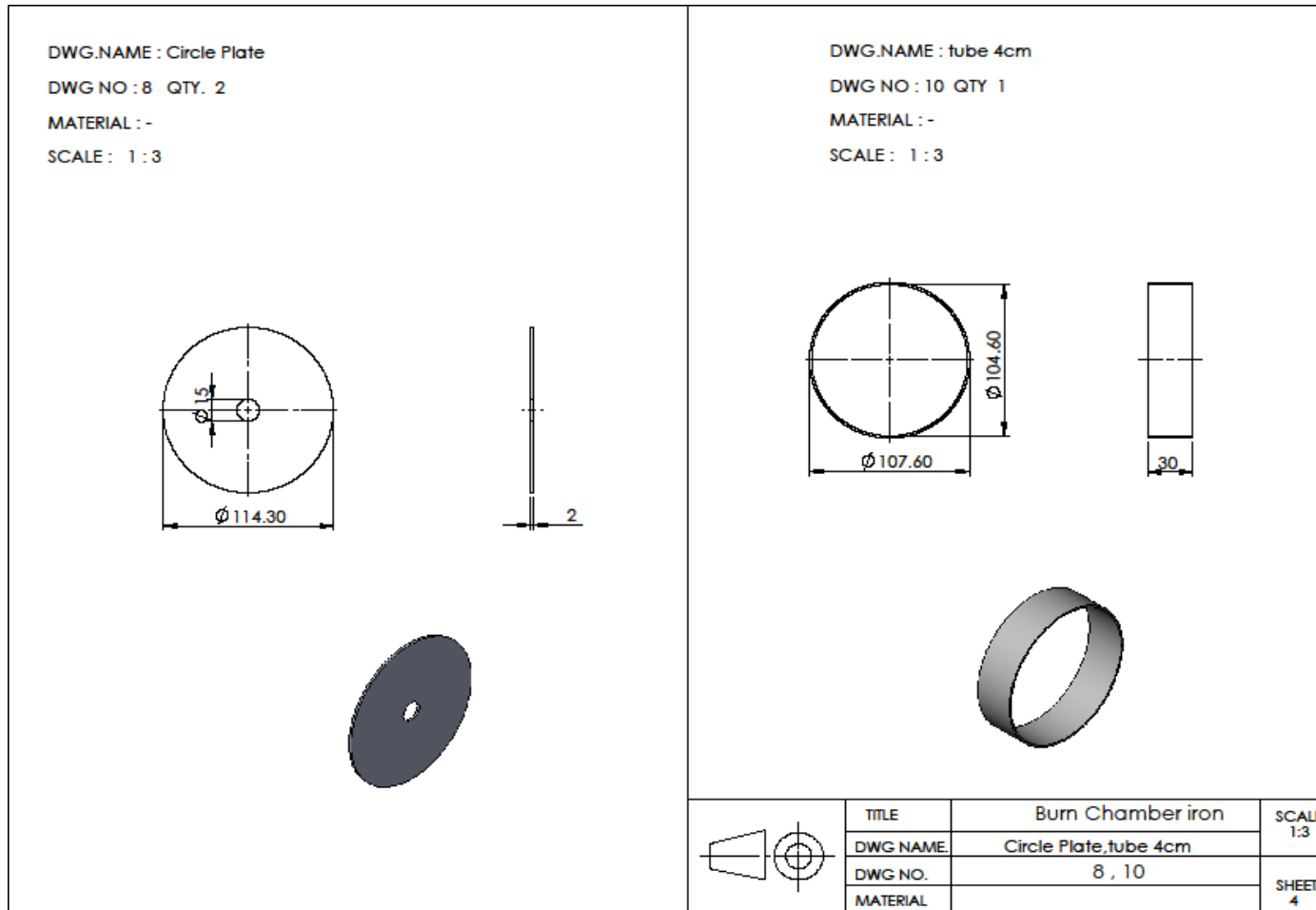


DWG.NAME : Tube_22.5
 DWG NO : 7 QTY. 2
 MATERIAL : -
 SCALE : 1 : 5



TITLE	Burn Chamber iron	SCALE	1:5
DWG NAME	Tilt 3 , tube_22.5		1:10
DWG NO.	6 , 7		
MATERIAL		SHEET	3

รูปที่ A3.30 แบบของ Tilt 3 และ tube_22.5 (หมายเลข 6 และ 7 ในรูป A3.27)



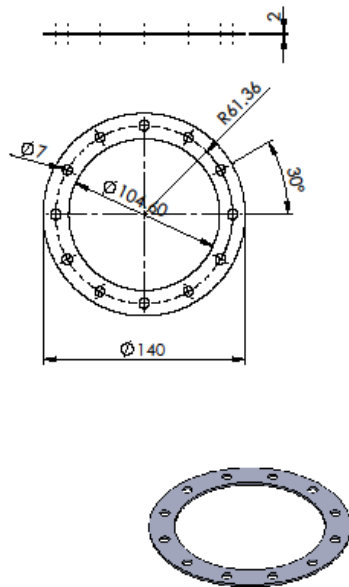
รูปที่ A3.31 แบบของ Circle Plate และ tube 4 cm (หมายเลข 8 และ 10 ในรูป A3.27)

DWG.NAME :Joint plate circle

DWG NO : 11 QTY. 1

MATERIAL :-

SCALE: 1:3

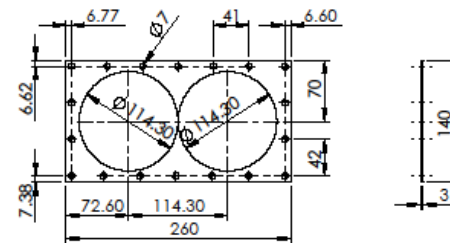


DWG.NAME :Plate2Hole

DWG NO : 13 QTY. 1

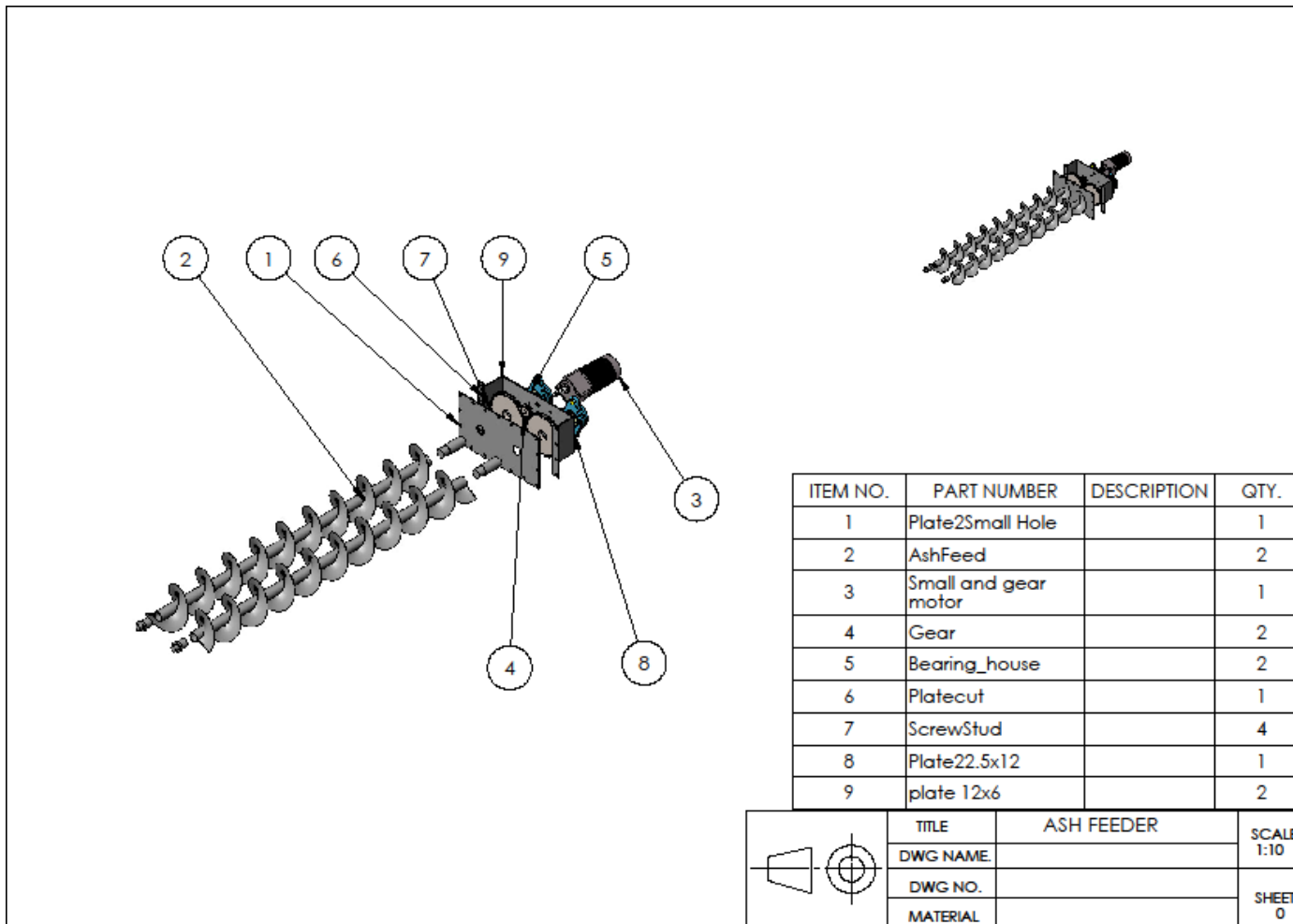
MATERIAL :-

SCALE: 1:5



	TITLE	Burn Chamber iron	SCALE
	DWG NAME	Joint plate circle , Plate2Hole	1:3
	DWG NO.	11,13	1:5
	MATERIAL		SHEET
			5

รูปที่ A3.32 แบบของ Joint plate circle และ Plate2Hole (หมายเลข 11 และ 13 ในรูป A3.27)



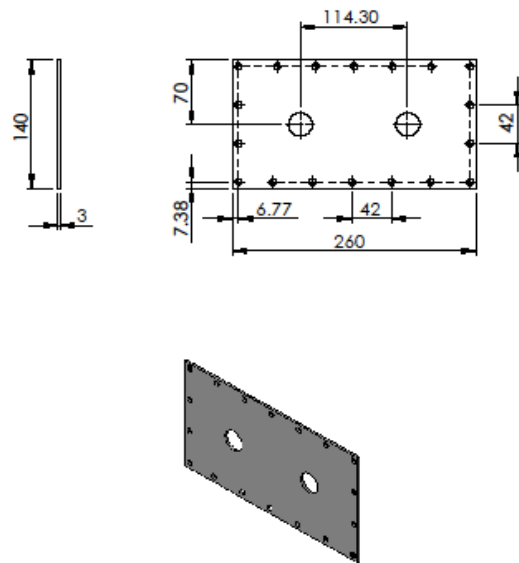
รูปที่ A3.33 แบบของระบบลำเลียงเถ้า

DWG.NAME : Plate2 Small Hole

DWG NO : 1 QTY.1

MATERIAL :-

SCALE : 1 : 5

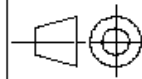
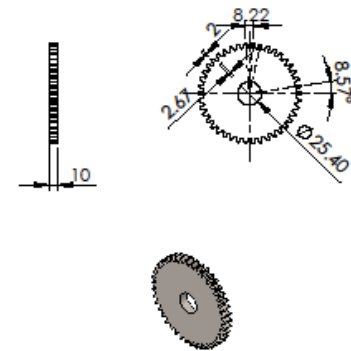


DWG.NAME : Gear

DWG NO : 4 QTY. 2

MATERIAL :-

SCALE : 1 : 5



TITLE	ASH FEEDER	SCALE
DWG NAME:	Plate2 Small Hole Gear	1:5
DWG NO.	1,4	SHEET
MATERIAL		1

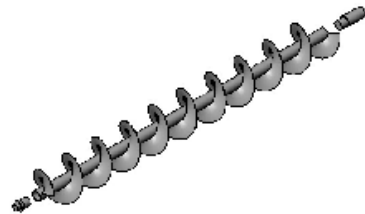
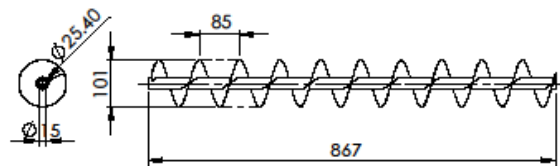
รูปที่ A3.34 แบบของ Plate2 Small Hole และ Gear (หมายเลข 1 และ 4 ในรูป A3.33)

DWG.NAME : ASH Feed

DWG NO : 2 QTY.2

MATERIAL :-

SCALE : 1 : 10

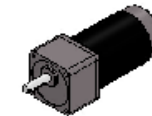
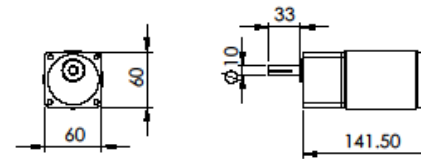


DWG.NAME : Small and Gear Motor

DWG NO : 3 QTY. 1

MATERIAL :-

SCALE : 1 : 5



	TITLE	Base and Wheel	SCALE 1:5 1:10
	DWG NAME.	Small and Gear Motor ASH Feed	
	DWG NO.	2,3	SHEET 2
MATERIAL			

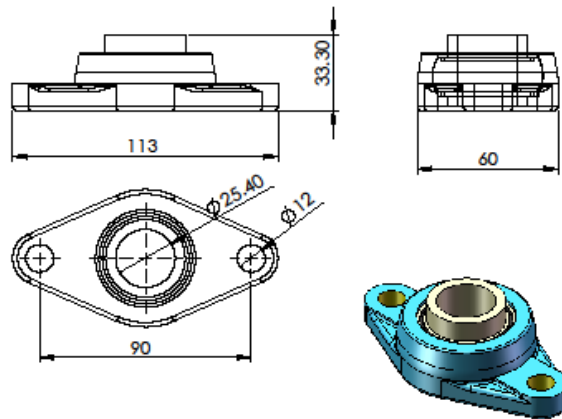
รูปที่ A3.35 แบบของ Small and Gear Motor และ ASH Feed (หมายเลข 2 และ 3 ในรูป A3.33)

DWG.NAME : Bearing House

DWG NO : 5 QTY.2

MATERIAL :-

SCALE : 1 : 2

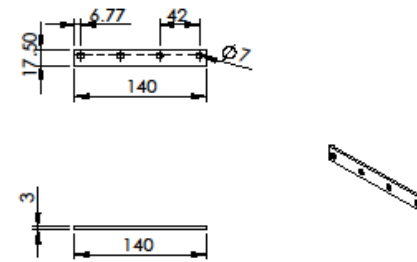


DWG.NAME : Plate Cut

DWG NO : 6 QTY. 2

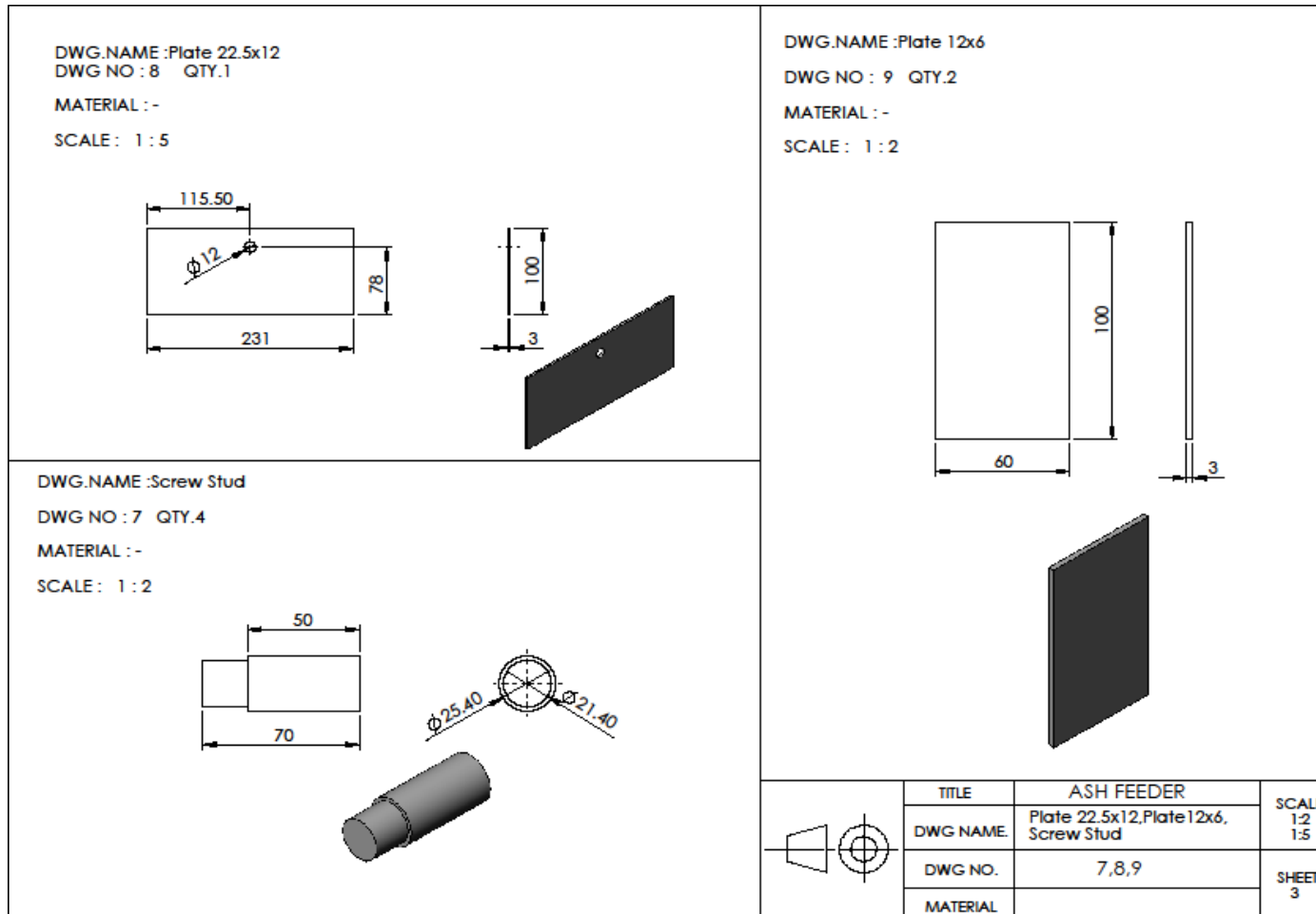
MATERIAL :-

SCALE : 1 : 5

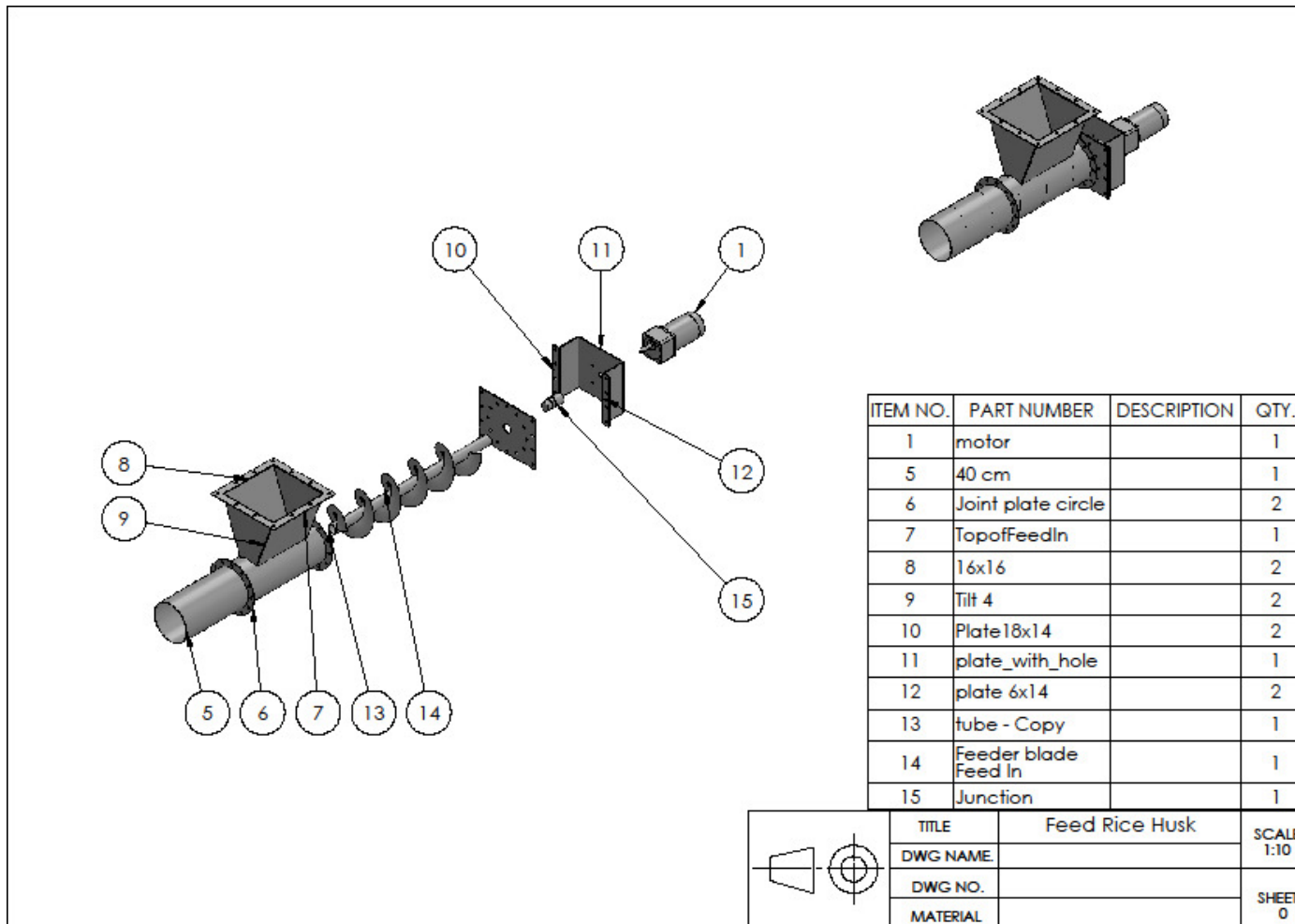


	TITLE	ASH FEEDER	SCALE
	DWG NAME.	Bearing House Plate Cut	1:2 1:5
	DWG NO.	5,6	SHEET
	MATERIAL		3

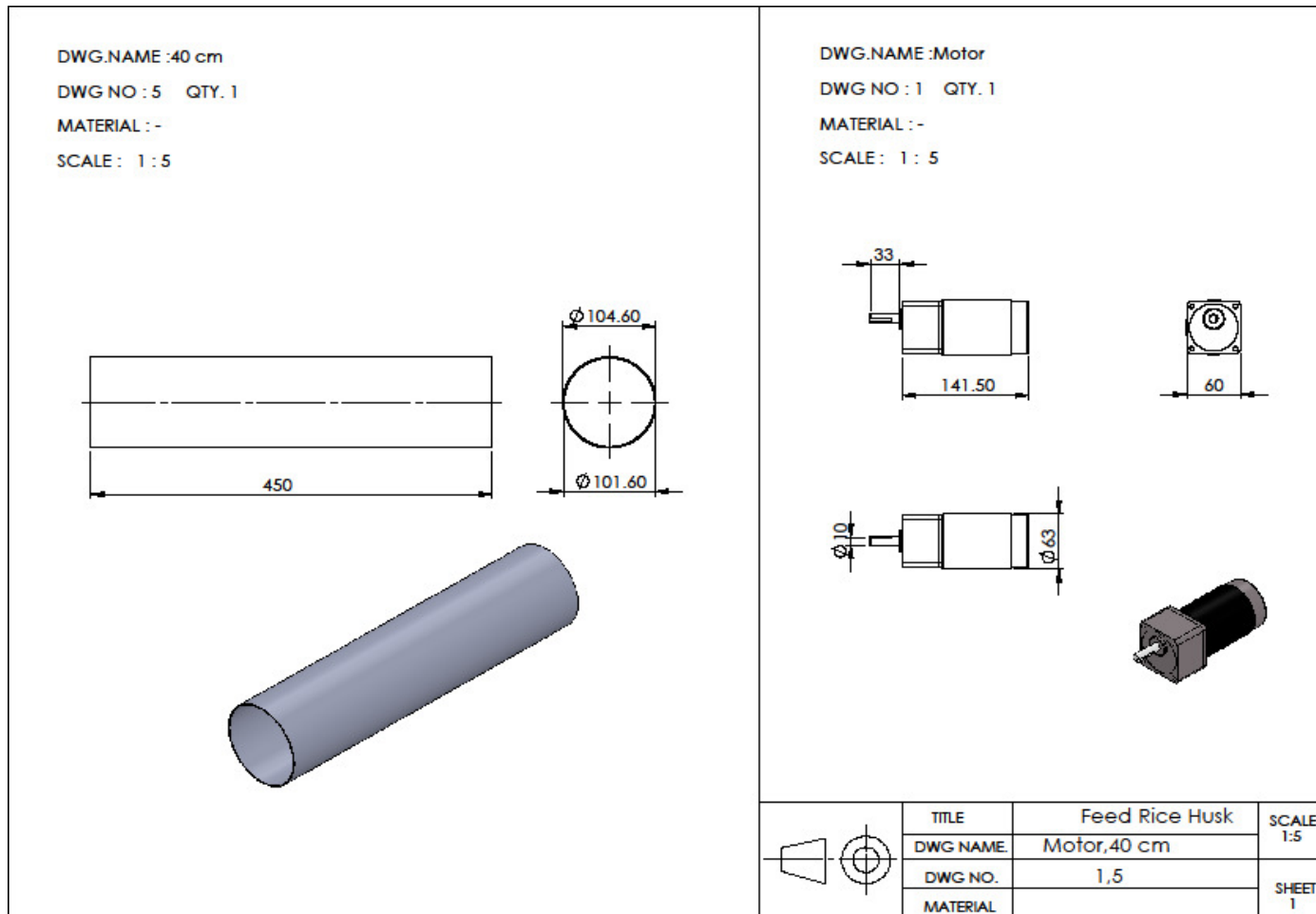
รูปที่ A3.36 แบบของ Bearing House และ Plate Cut (หมายเลข 5 และ 6 ในรูป A3.33)



รูปที่ A3.37 แบบของ Plate 22.5 x 12, Plate 12 x 6 และ Screw Stud (หมายเลข 7, 8 และ 9 ในรูป A3.33)



รูปที่ A3.38 แบบของระบบป้อนเชื้อเพลิง



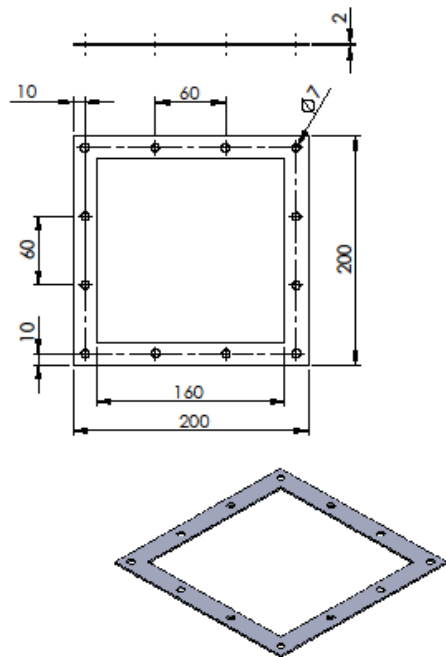
รูปที่ A3.39 แบบของ Motor และ 40 cm (หมายเลข 1 และ 5 ในรูป A3.38)

DWG.NAME : TopofFeedIn

DWG NO : 7 QTY. 1

MATERIAL :-

SCALE : 1 : 4

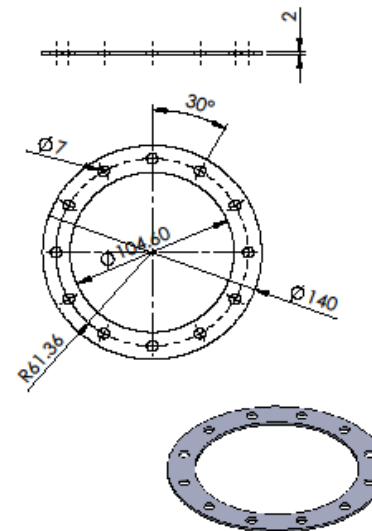


DWG.NAME : Joint plate circle

DWG NO : 6 QTY. 2

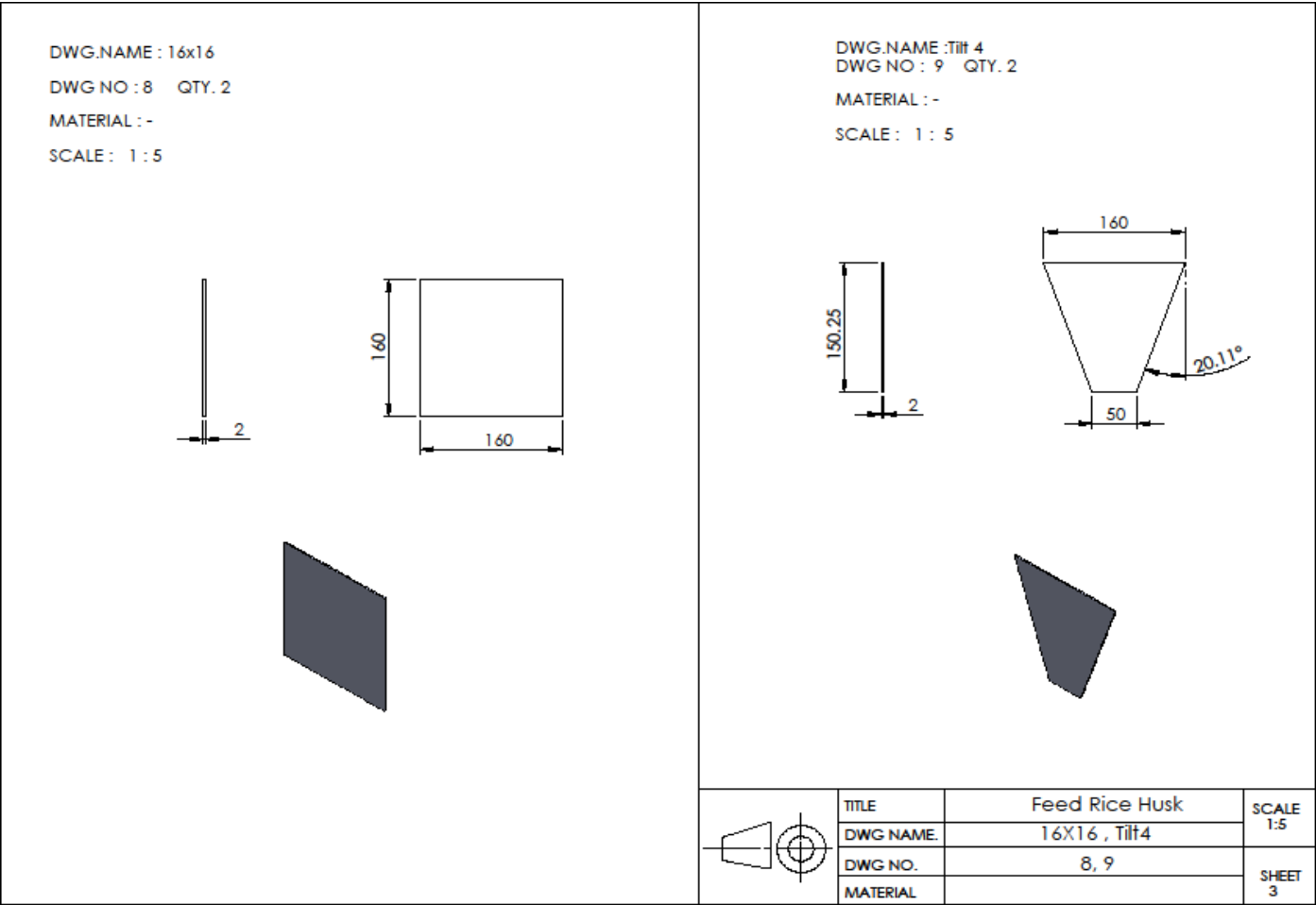
MATERIAL :-

SCALE : 1 : 4

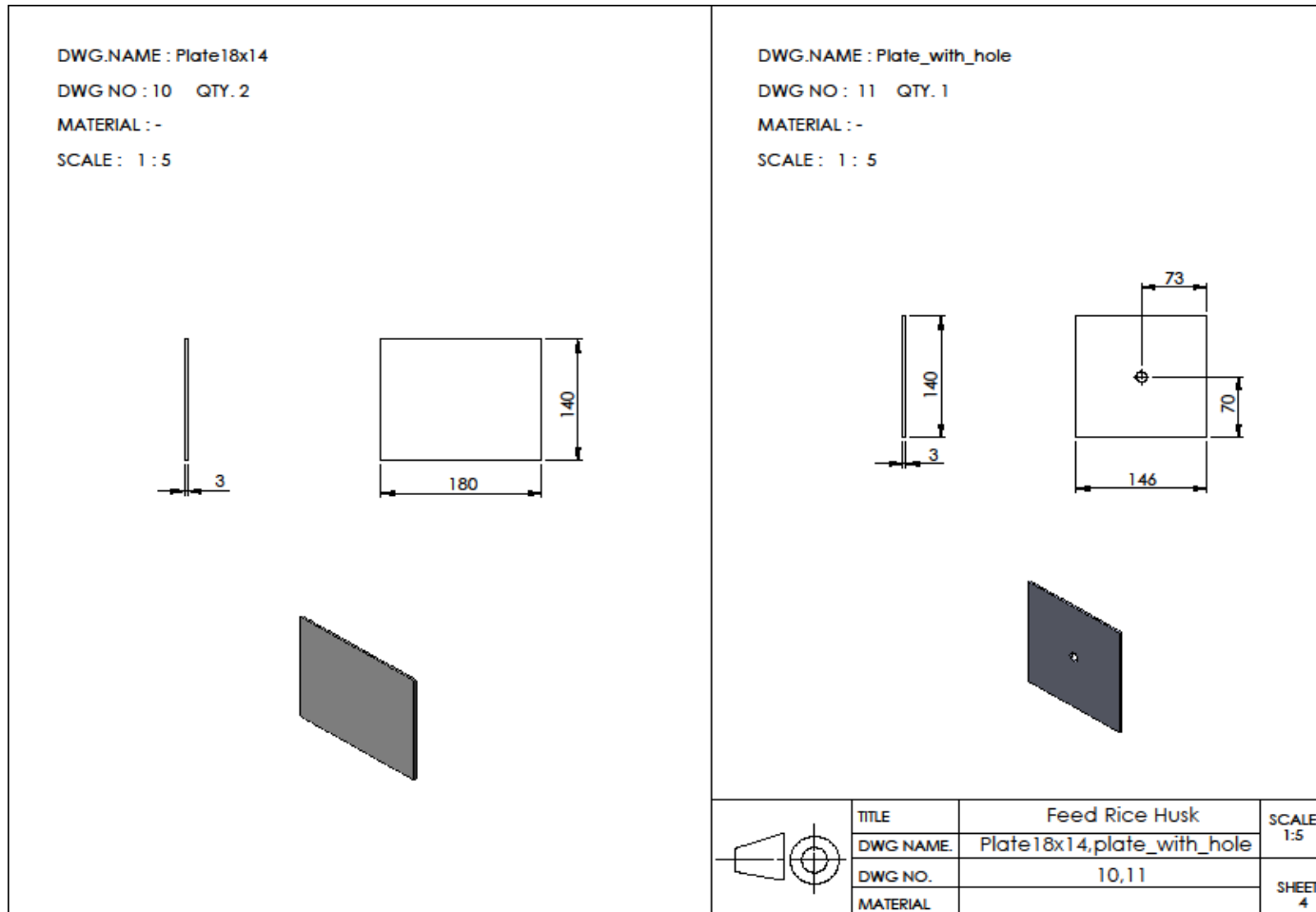


	TITLE	Feed Rice Husk	SCALE 1:4
	DWG NAME	Joint plate circle, TopofFeedIn	
	DWG NO.	6,7	SHEET 2
	MATERIAL		

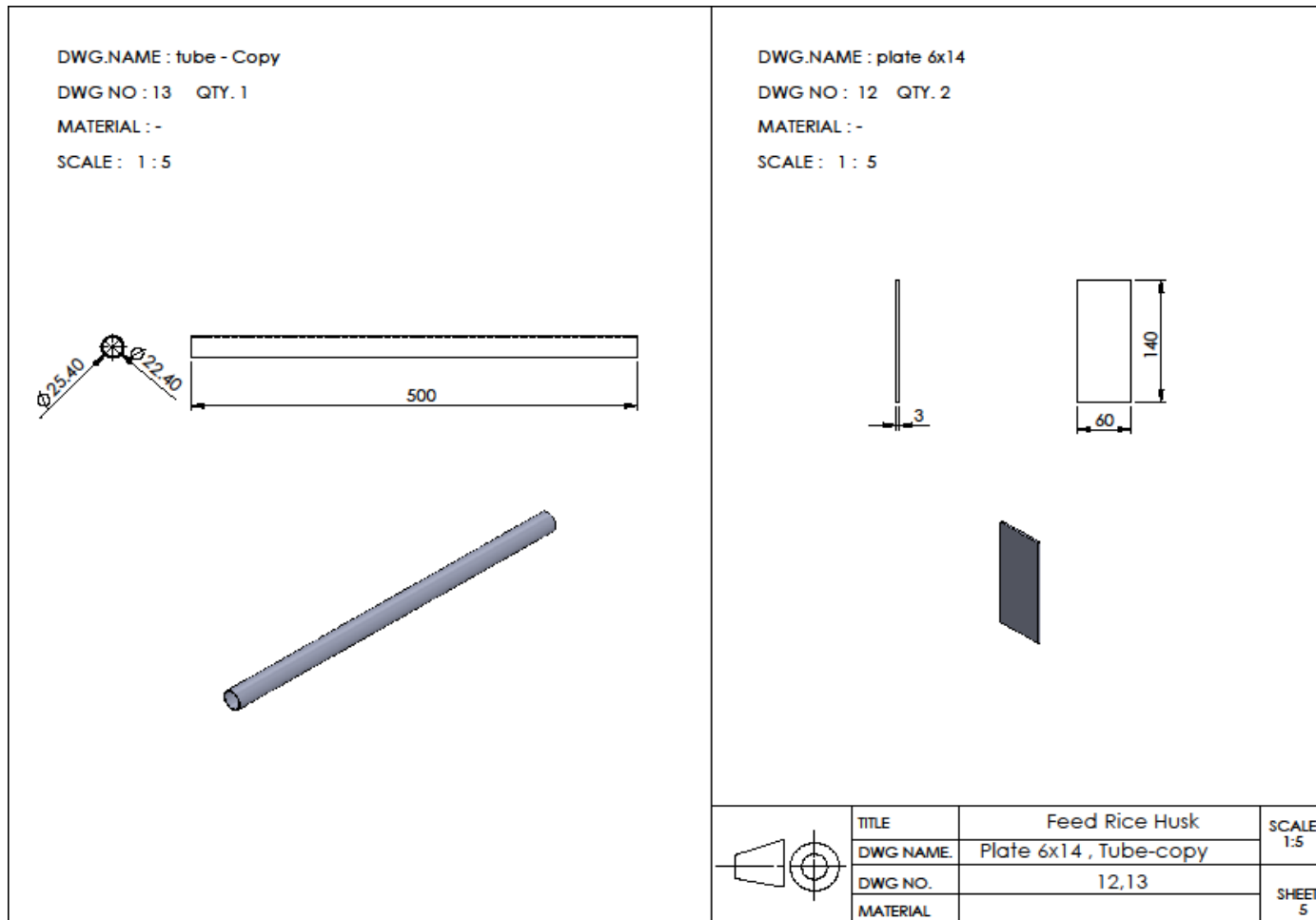
รูปที่ A3.40 แบบของ Joint plate circle และ Topof FeedIn (หมายเลข 6 และ 7 ในรูป A3.38)



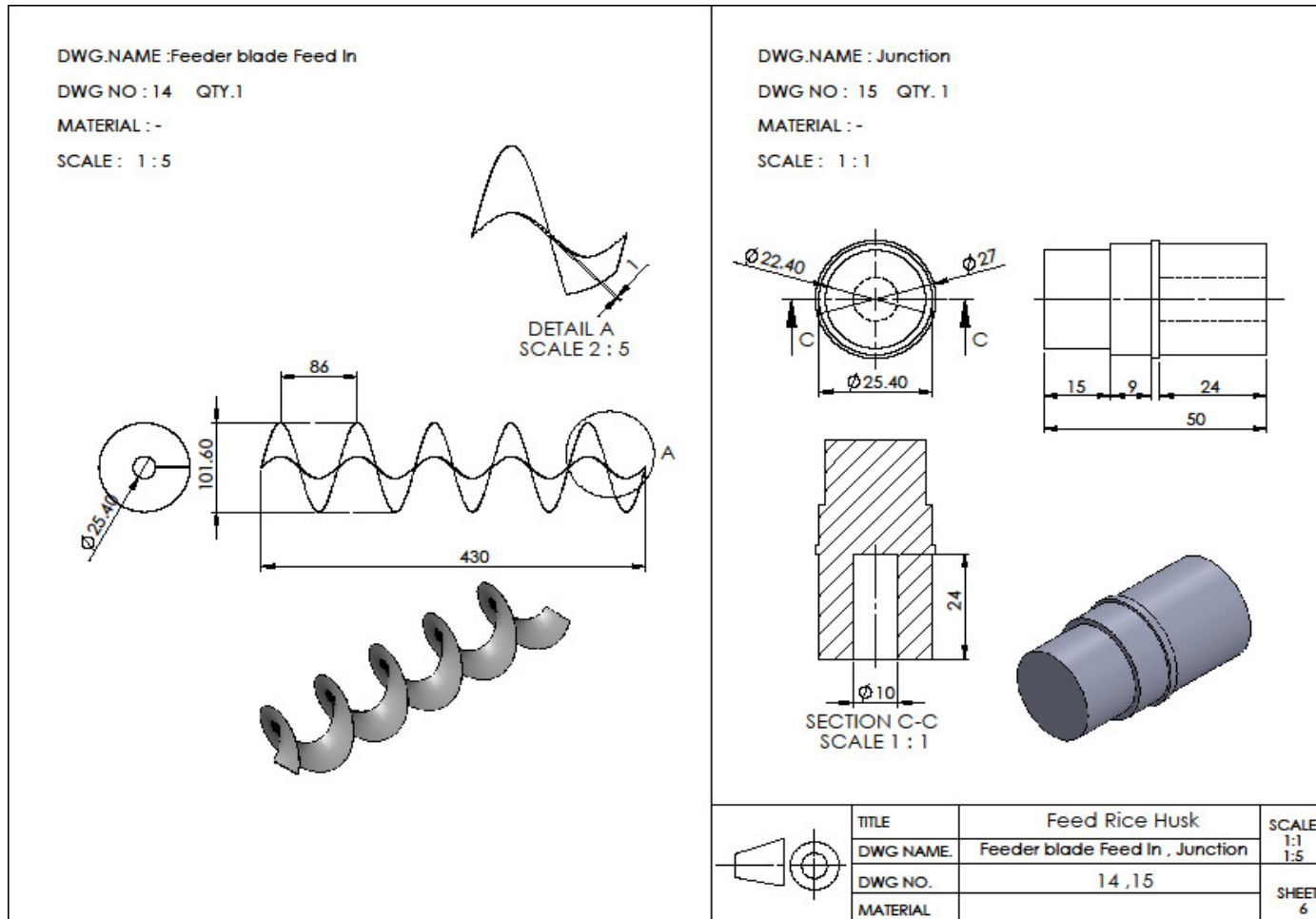
รูปที่ A3.41 แบบของ 16 x 16 และ Tilt 4 (หมายเลข 8 และ 9 ในรูป A3.38)



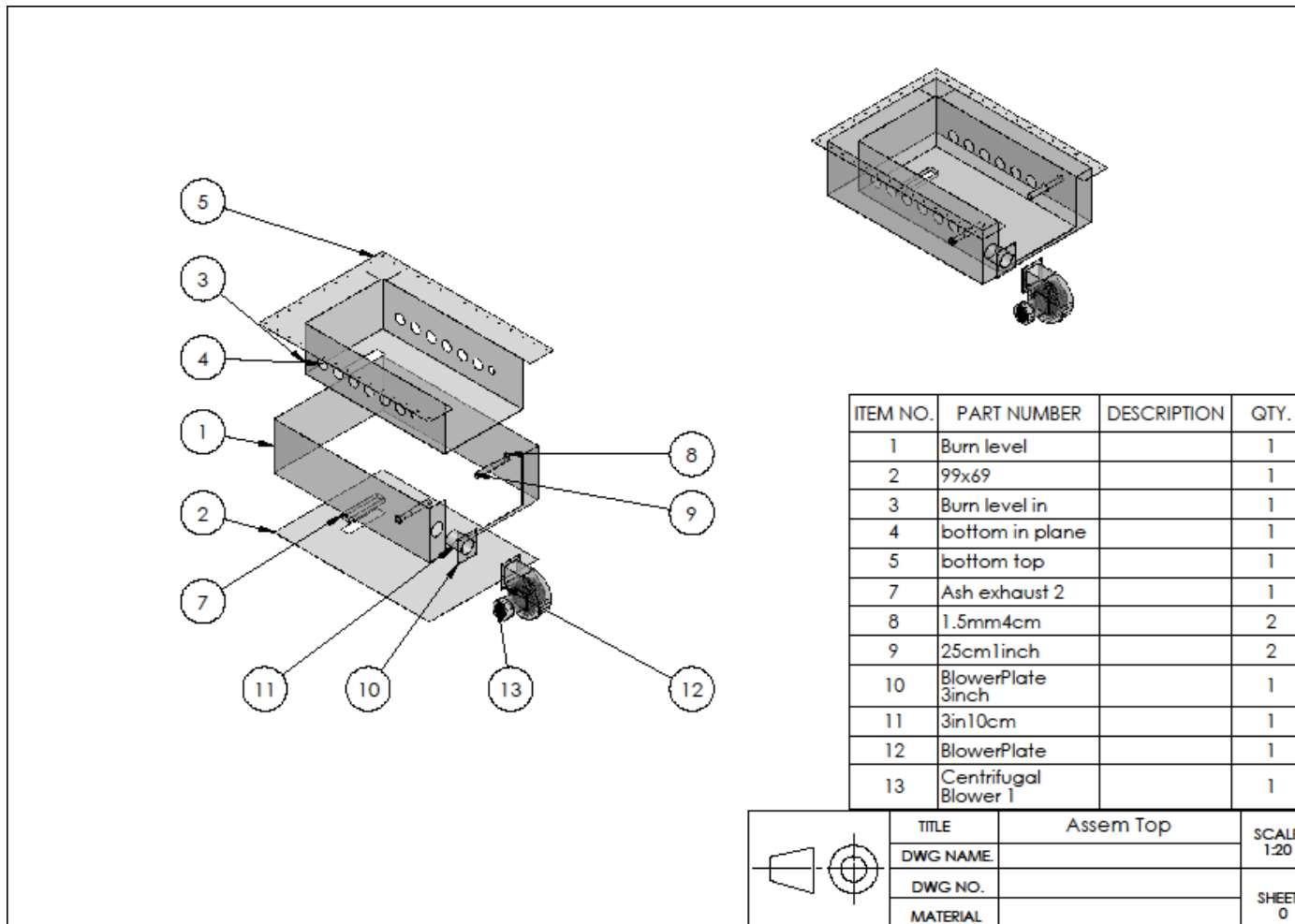
รูปที่ A3.42 แบบของ Plate 18 x 14 และ Plate_with_hole (หมายเลข 10 และ 11 ในรูป A3.38)



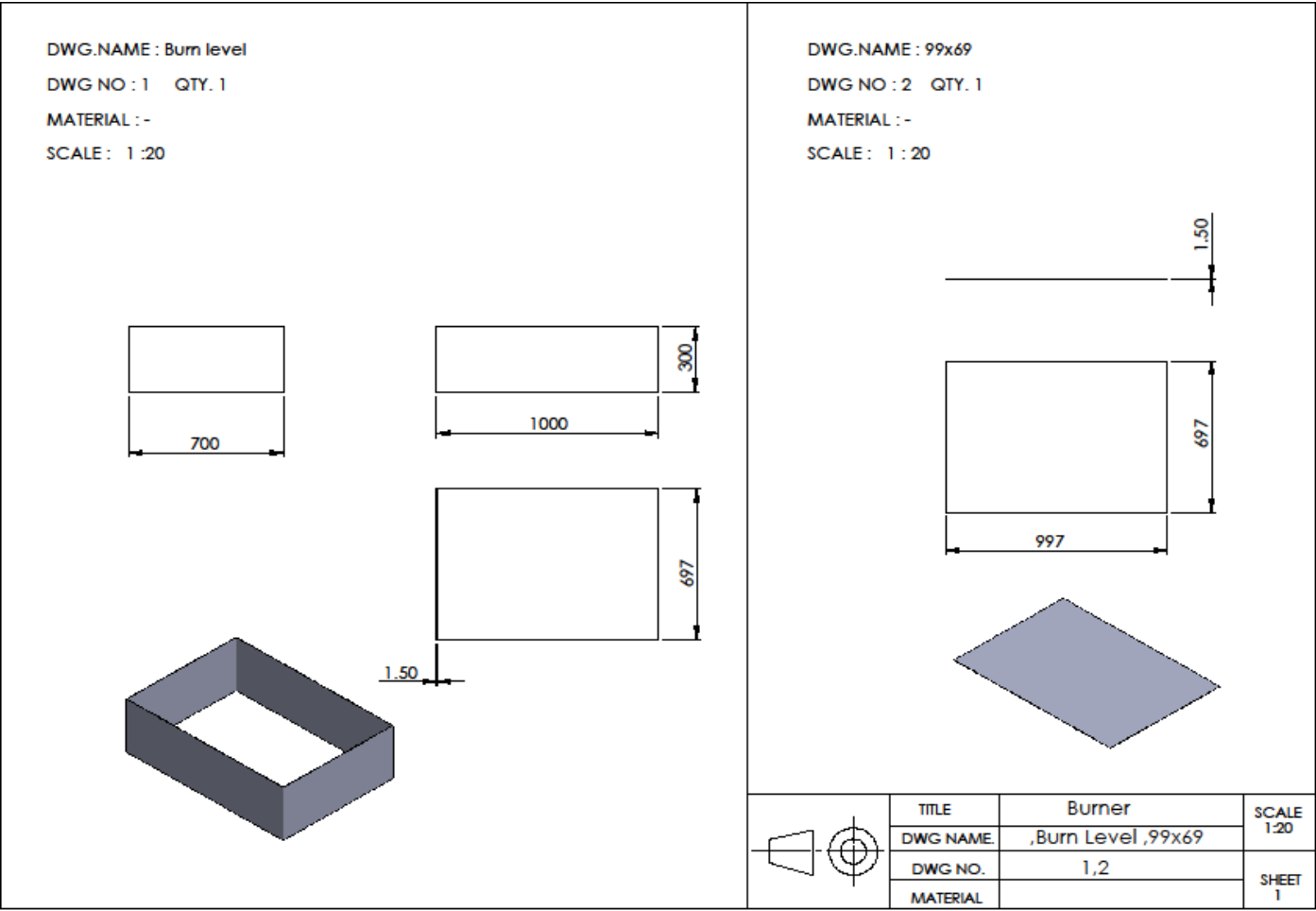
รูปที่ A3.43 แบบของ Plate 6 x 14 และ Tube-copy (หมายเลข 12 และ 13 ในรูป A3.38)



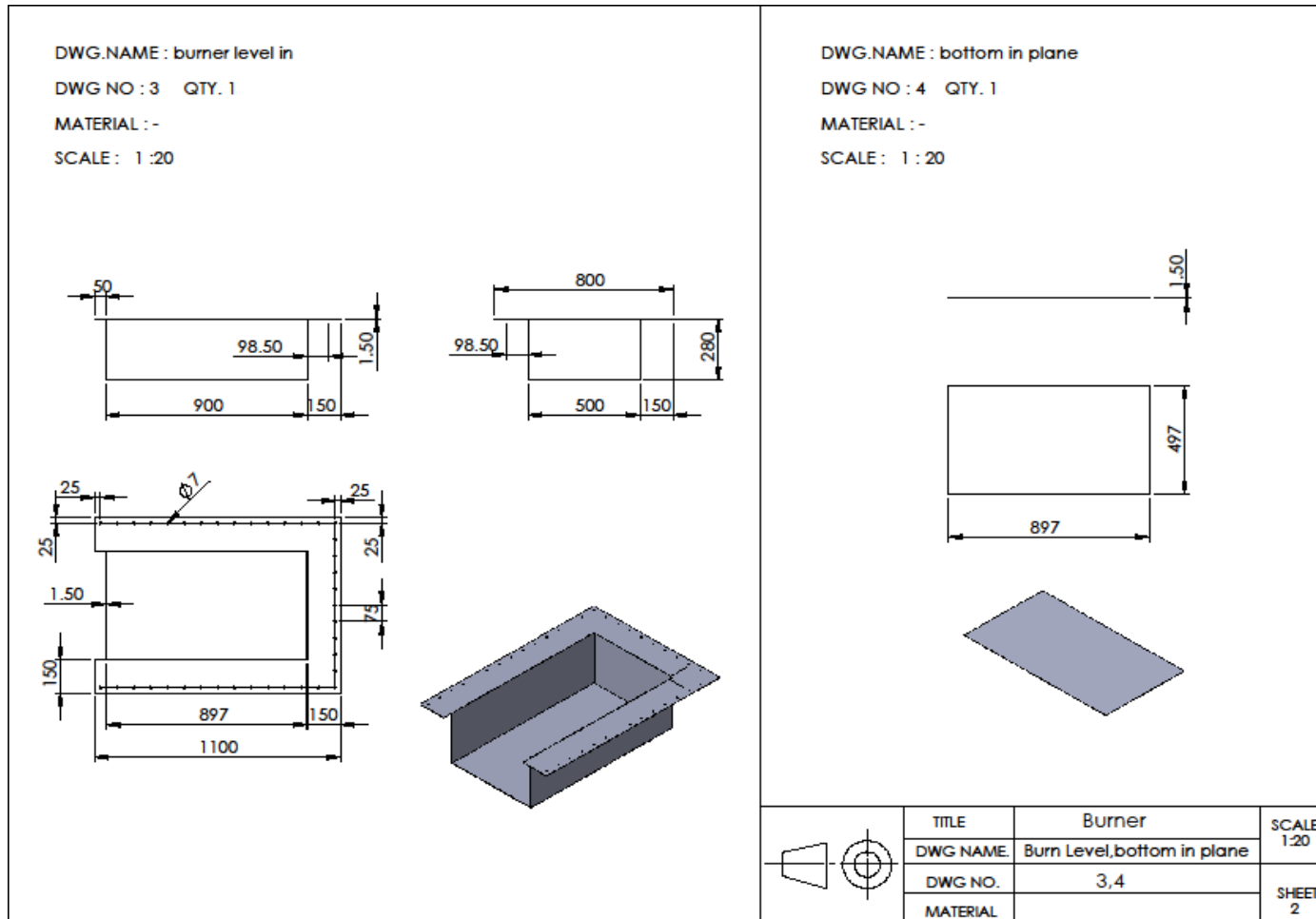
รูปที่ A3.44 แบบของ Feeder blade Feed In และ Junction (หมายเลข 14 และ 15 ในรูป A3.38)



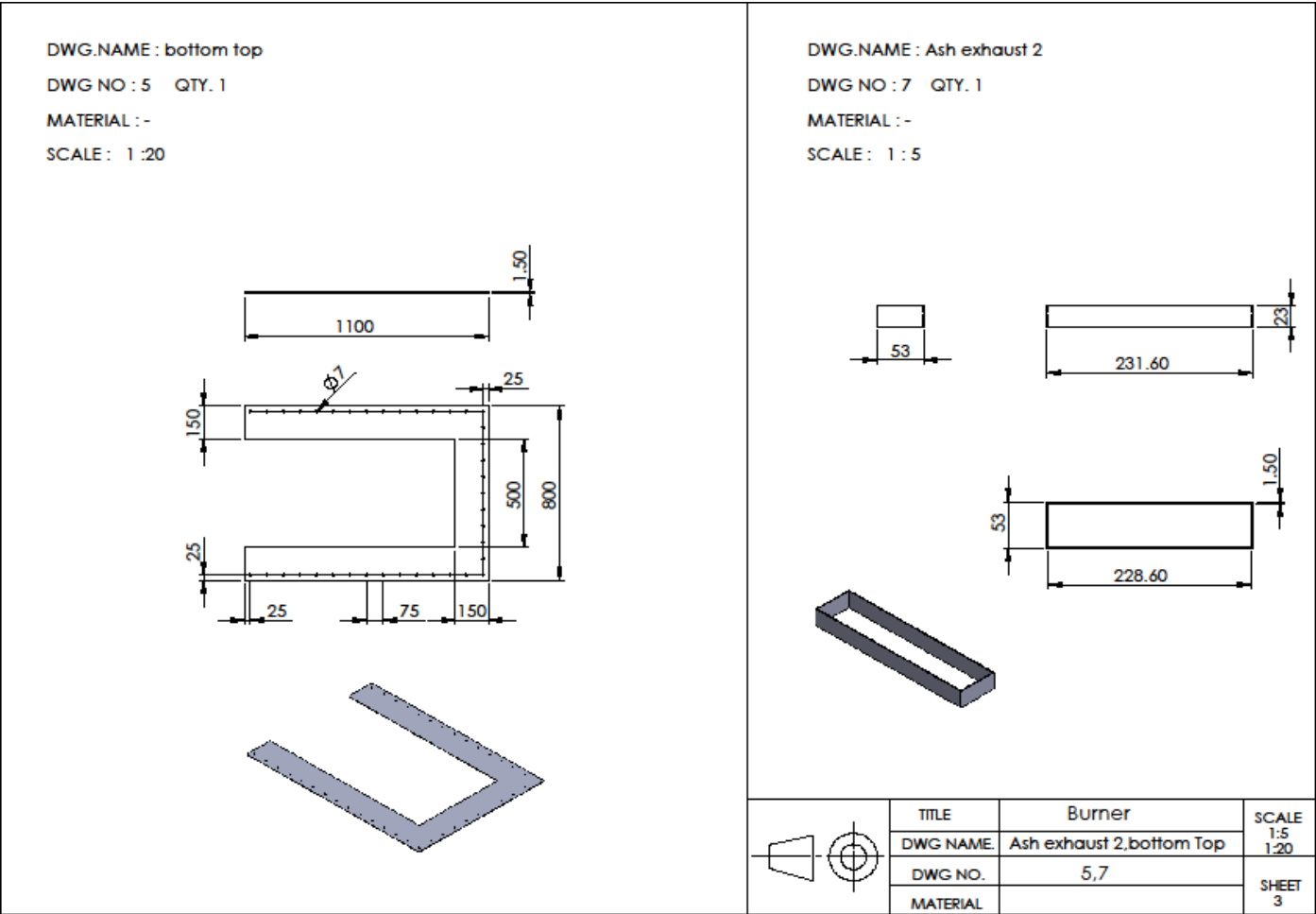
รูปที่ A3.45 แบบของฉนวนกันความร้อนห้องเผาไหม้



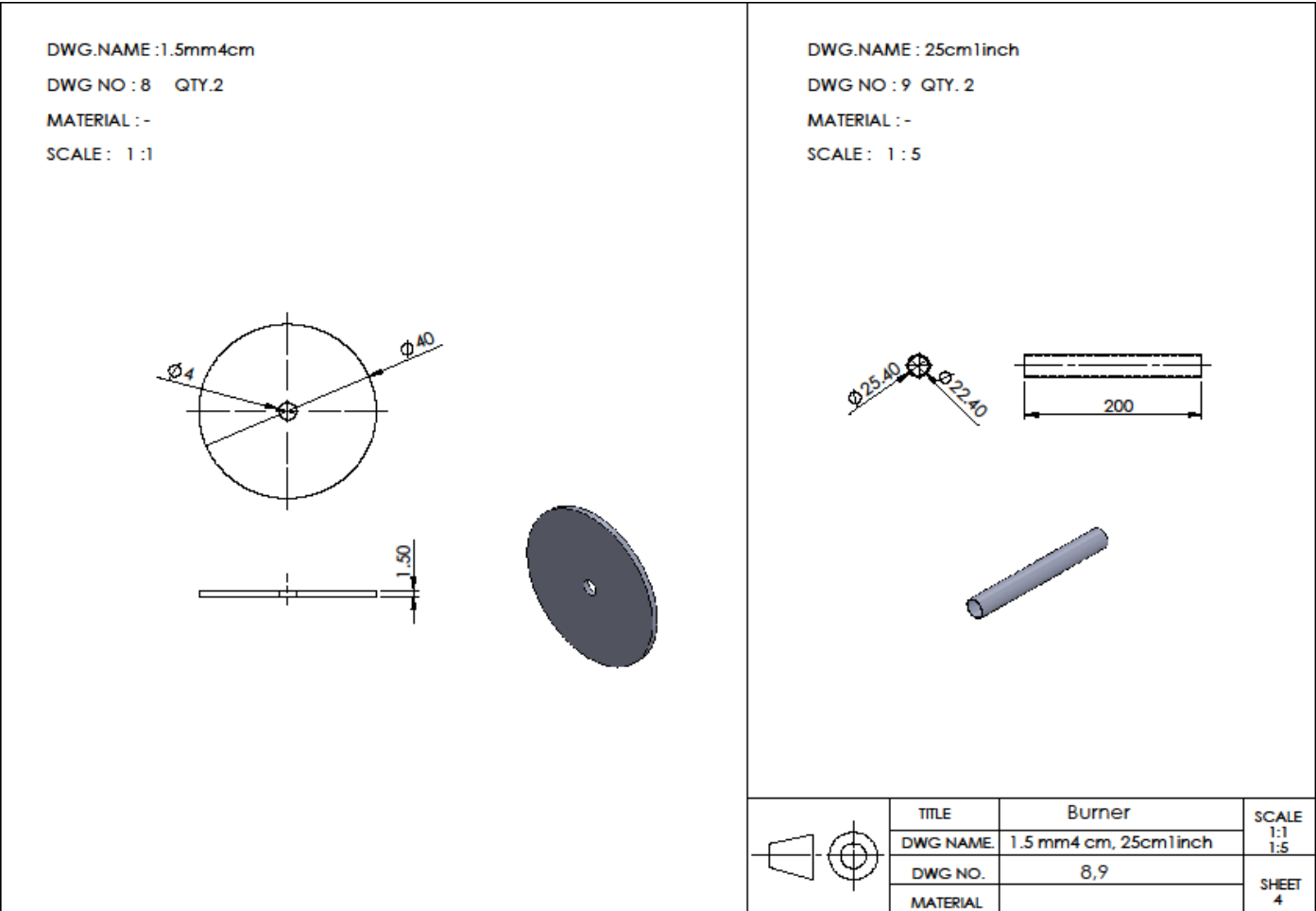
รูปที่ A3.46 แบบของ Burn Level และ 99 x 69 (หมายเลข 1 และ 2 ในรูป A3.45)



รูปที่ A3.47 แบบของ Burn Level in และ bottom in plane (หมายเลข 3 และ 4 ในรูป A3.45)



รูปที่ A3.48 แบบของ Ash exhaust 2 และ bottom Top (หมายเลข 5 และ 7 ในรูป A3.45)



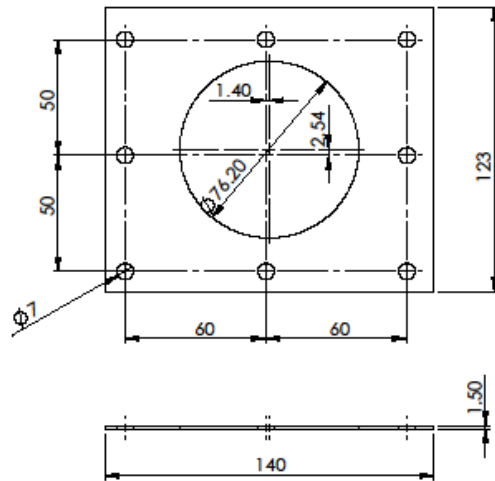
รูปที่ A3.49 แบบของ 1.5 mm 4 cm และ 25 cm 1 inch (หมายเลข 8 และ 9 ในรูป A3.45)

DWG.NAME : BlowerPlate 3inch

DWG NO : 10 QTY. 1

MATERIAL :-

SCALE : 1 : 5

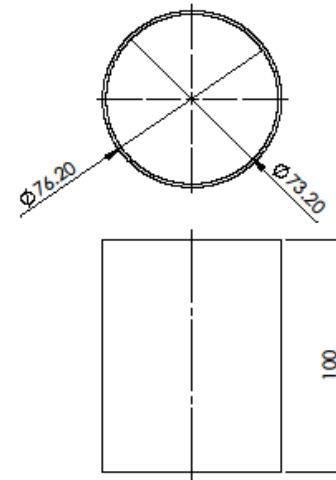
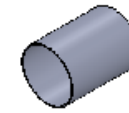


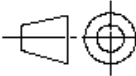
DWG.NAME : 3in10cm

DWG NO : 11 QTY. 1

MATERIAL :-

SCALE : 1 : 5



	TITLE	Burner	SCALE 1:2
	DWG NAME	BlowerPlate 3inch, 3in10cm	
	DWG NO.	10,11	SHEET 5
	MATERIAL		

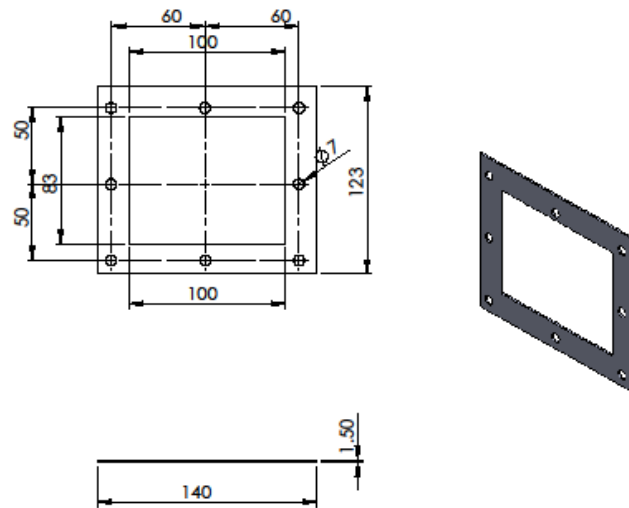
รูปที่ A3.50 แบบของ Blower Plate 3 inch และ 3 in 10 cm (หมายเลข 10 และ 11 ในรูป A3.45)

DWG.NAME :Blower Plate

DWG NO : 12 QTY. 1

MATERIAL : -

SCALE : 1 : 3

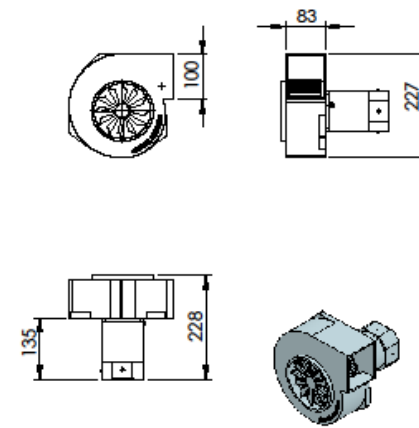


DWG.NAME : Centrifugal Blower 1

DWG NO : 13 QTY. 1

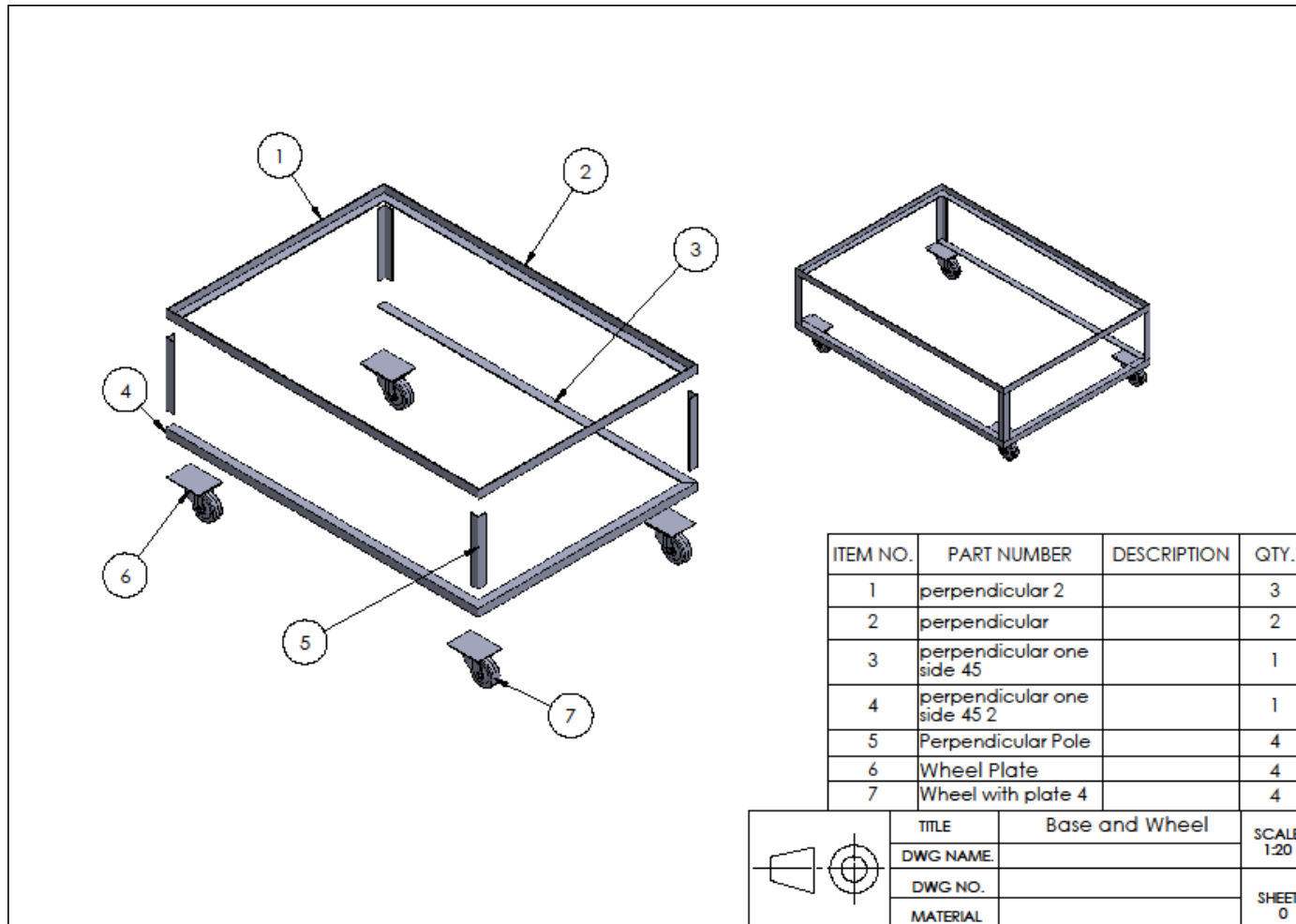
MATERIAL :-

SCALE : 1 : 5

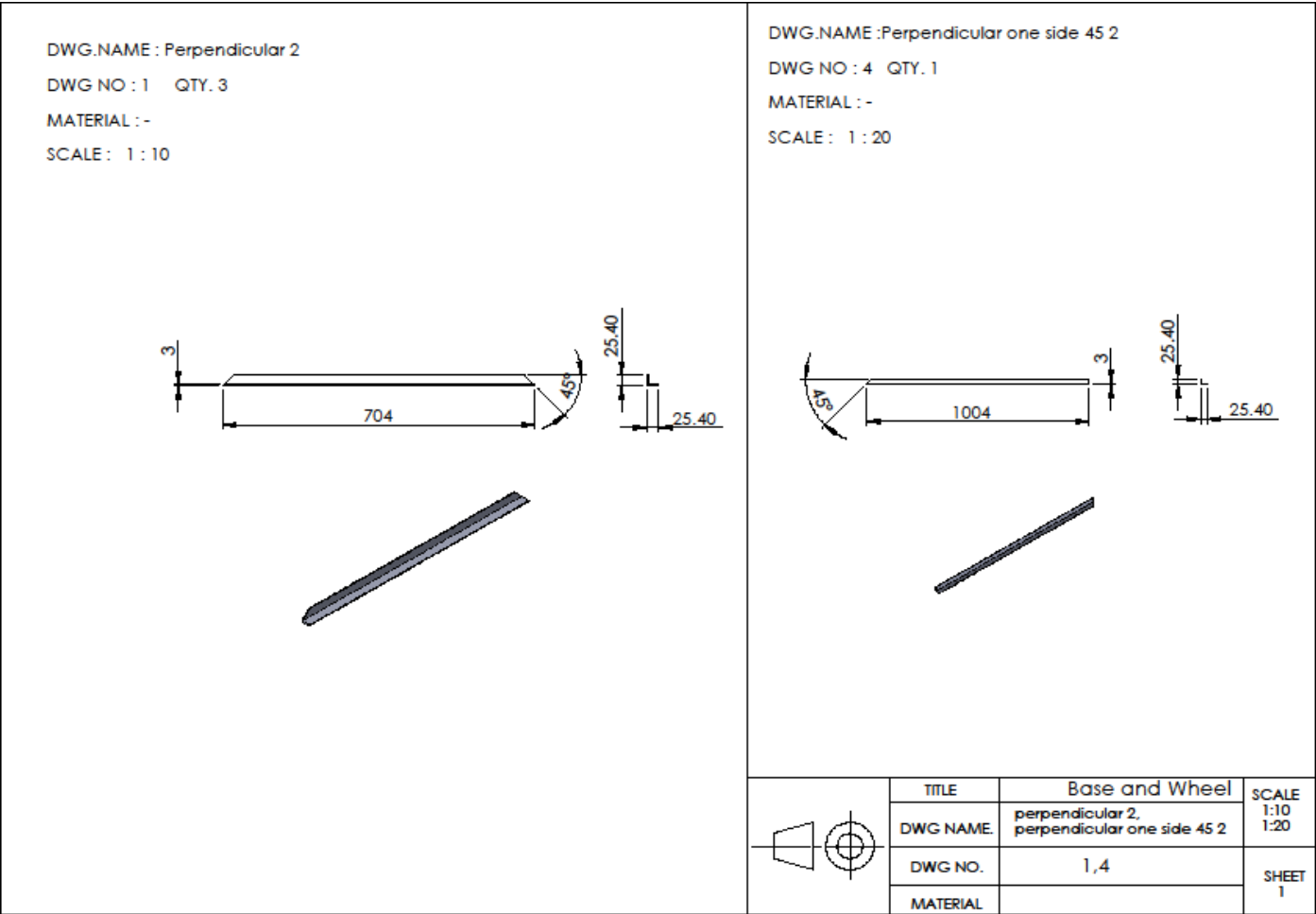


	TITLE	Burner	SCALE
	DWG NAME	BlowerPlate, Centrifugal Blower	1:3 1:5
	DWG NO.	12,13	SHEET
	MATERIAL		6

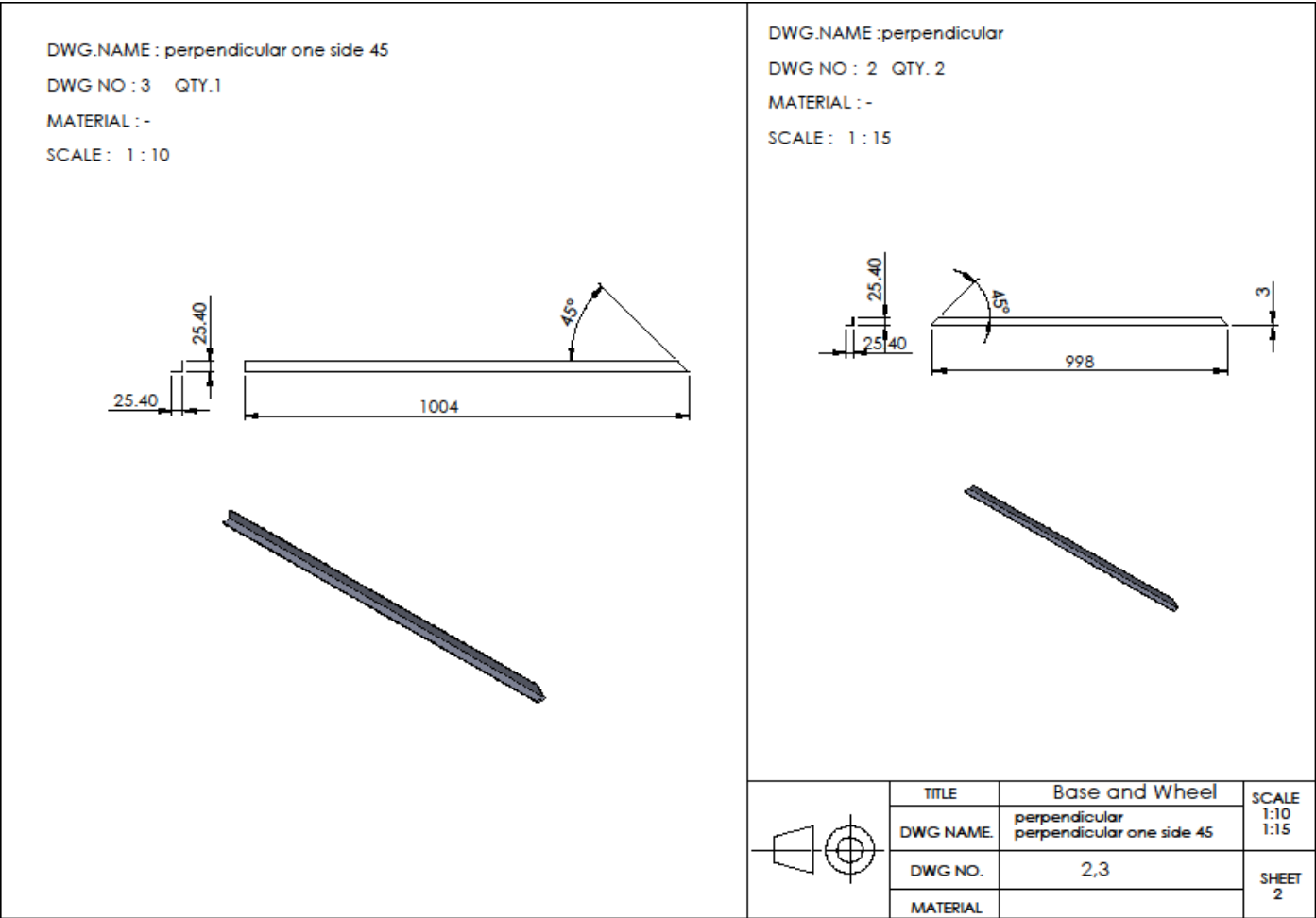
รูปที่ A3.51 แบบของ Blower Plate และ Centrifugal Blower (หมายเลข 12 และ 13 ในรูป A3.45)



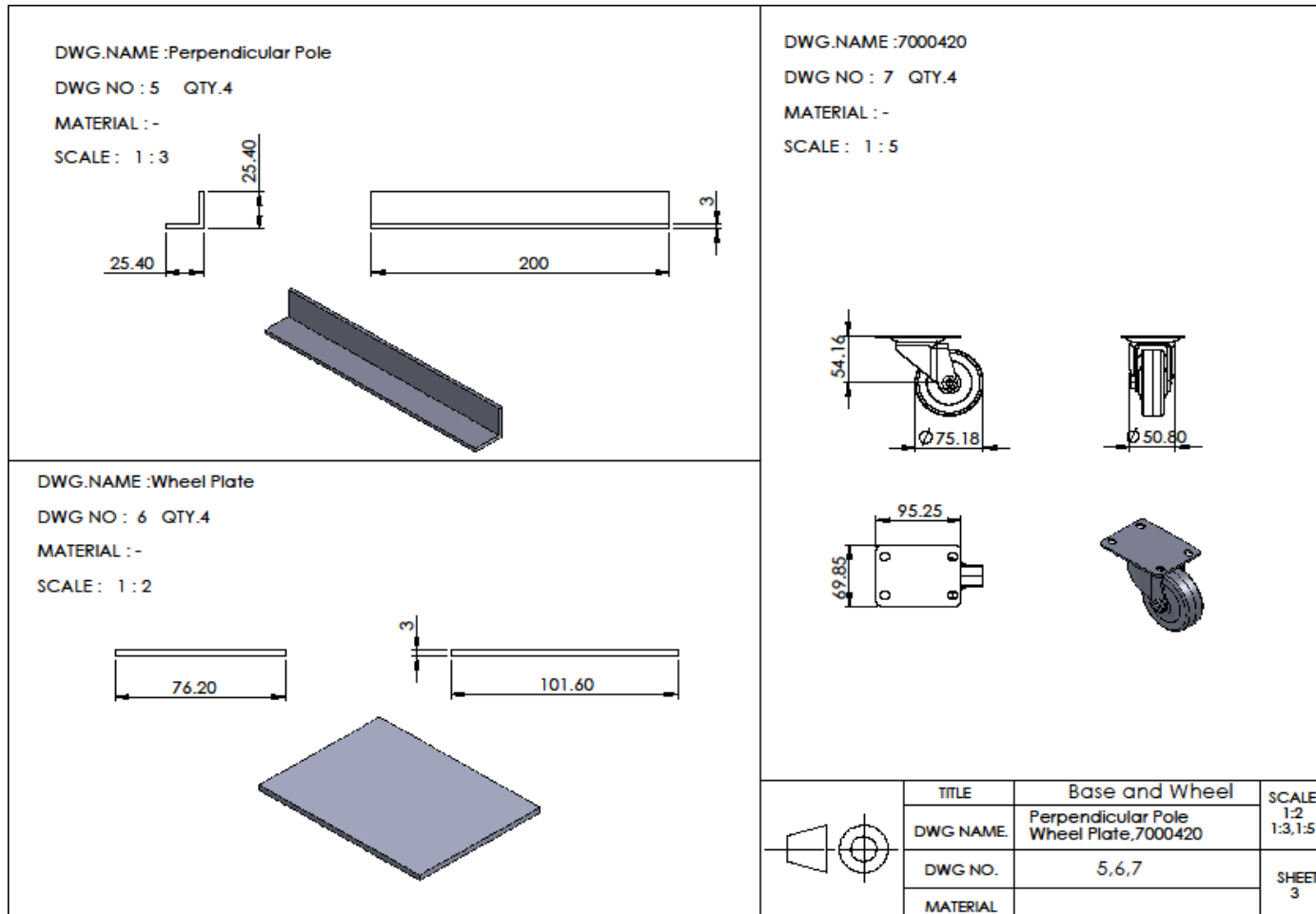
รูปที่ A3.52 แบบฐานของระบบทำอากาศร้อน



รูปที่ A3.53 แบบของ Perpendicular 2 และ Perpendicular one side 45 2 (หมายเลข 1 และ 4 ในรูป A3.52)



รูปที่ A3.54 แบบของ Perpendicular และ Perpendicular one side 45 (หมายเลข 2 และ 3 ในรูป A3.52)



รูปที่ A3.55 แบบของ Perpendicular Pole, Wheel Plate และ Wheel with plate 4 (หมายเลข 5, 6 และ 7 ในรูป A3.52)



การใช้งานของระบบทำอากาศร้อนมีรายละเอียดตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) ตรวจสอบความเรียบร้อยของระบบทำอากาศร้อนเสริมและส่วนประกอบต่าง ๆ เช่น ระบบควบคุมการทำงาน ชุดมอเตอร์ลำเลียง และระบบไฟฟ้า ว่าพร้อมใช้งานหรือไม่



รูปที่ A4.1 การตรวจสอบความพร้อมของระบบทำอากาศร้อน

- 2) ตรวจสอบดูเชื้อเพลิงในถังเก็บเชื้อเพลิง



รูปที่ A4.2 การตรวจสอบเชื้อเพลิงก่อนเริ่มใช้งาน

- 3) ทำการตั้งค่าอุณหภูมิภายในโรงอบจากตู้ควบคุมการทำงานของระบบทำอากาศร้อนตามที่ต้องการ



รูปที่ A4.3 ตั้งค่าอุณหภูมิภายในโรงอบตามที่ต้องการ

- 4) เมื่อตรวจสอบดูความเรียบร้อยของระบบทำอากาศร้อนและตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการแล้ว ให้กดปุ่มเริ่มใช้งาน (ปุ่มสีแดง) ที่หน้าตู้ควบคุมระบบการทำงาน





รูปที่ A4.4 กดปุ่มเริ่มทำงาน

- 5) เครื่องควบคุมระบบจะสั่งการให้ระบบทำอากาศร้อนทำงานโดยระบบจะสั่งการไประบบลำเลียงเชื้อเพลิงและฮีตเตอร์ (Heater) เพื่อลำเลียงเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้และเปิดฮีตเตอร์สำหรับจุดเชื้อเพลิง เมื่อเชื้อเพลิงติดไฟแล้ว ระบบจะสั่งปิดฮีตเตอร์ จากนั้นพัดลมจะดูดอากาศแวดล้อมเข้าไปแลกเปลี่ยนความร้อนในห้องเผาไหม้แล้วเป่าอากาศร้อนที่ได้เข้าไปในระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์
- 6) กรณีที่อุณหภูมิภายในโรงอบสูงกว่าที่กำหนดไว้ (50 องศาเซลเซียส) ระบบควบคุมจะสั่งการให้หยุดป้อนเชื้อเพลิงเข้าระบบทำอากาศร้อน เพื่อให้อุณหภูมิลดลง เมื่ออุณหภูมิลดลงต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส ตามที่ตั้งไว้ ระบบควบคุมจะสั่งให้ป้อนเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้เพื่อให้ได้อุณหภูมิตามที่กำหนดเช่นเดิม
- 7) กรณีที่ต้องการหยุดการทำงานของระบบทำอากาศร้อนให้กดปุ่มหยุดการทำงาน (ปุ่มสีแดง) ซึ่งเป็นปุ่มเดียวกันกับปุ่มเริ่มทำงาน (รูปที่ A4.4)
- 8) กรณีที่ไม่ต้องการให้ทำงานแบบอัตโนมัติ (automatic) ผู้ใช้งานสามารถควบคุมเองได้ (manual) โดยจะมีสวิตช์ให้ควบคุมระบบต่าง ๆ ที่หน้าตู้ระบบควบคุมดังนี้ 1) ใช้สำหรับลำเลียงเชื้อเพลิงจากถังเก็บเชื้อเพลิงส่งไปยังท่อลำเลียงเข้าระบบทำอากาศร้อน 2) ใช้สำหรับลำเลียงเชื้อเพลิงที่ได้จากข้อ 1) เข้าไปในห้องเผาไหม้ 3) ใช้สำหรับลำเลียงแก๊สออกจากระบบทำอากาศร้อน และ 4) ใช้สำหรับเปิดฮีตเตอร์เพื่อจุดเชื้อเพลิง



รูปที่ A4.5 การทำงานแบบ manual





สัญลักษณ์

A	= พื้นที่ผิวของผลิตภัณฑ์ [m^2]
a_w	= วอเตอร์แอกติวิตี [-]
a, b	= ค่าคงที่ ขึ้นกับชนิดของวัตถุ
c	= ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ [$J.m^{-3}.K^{-1}$]
dM/dt	= อัตราการแห้ง [kg/s]
h_c	= การนำความร้อนของฟิล์มอากาศที่อยู่เหนือผิวผลผลิต (thermal conductance of air film) [$W/m^2.K$]
l_t	= ความเข้มรังสีอาทิตย์ที่เวลาใดๆ [W/m^2]
K	= ค่าคงที่การอบแห้ง (drying constant)
L	= ความร้อนแฝงของวัตถุขึ้น [J/kg]
L'	= ความร้อนแฝงของน้ำ [J/kg]
m	= มวลอากาศที่ไหลผ่านเครื่องทำอากาศร้อน [m^3/hr]
m_s	= มวลแห้งของผลิตภัณฑ์ [kg]
m_{husk}	= ปริมาณแกลบ [kg]
$m_p(t)$	= มวลของผลิตภัณฑ์ที่เวลาใดๆ [kg]
$m_{product}$	= มวลของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการอบ [kg]
m_s	= มวลของของแข็งในปริมาตรที่พิจารณา [kg]
m_w	= มวลของของเหลว ในปริมาตรที่พิจารณา [kg]
m_{water}	= ปริมาณน้ำในผลิตภัณฑ์ [kg]
M	= ความชื้นของผลิตภัณฑ์ [%, w.b.]
M_d	= ความชื้นของวัตถุ [%, w.b.]
M_d	= ความชื้นมาตรฐานแห้ง [kg/kg]
M_e	= ความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์ (equilibrium moisture content) [%, w.b.]
M_f	= ความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ [%, w.b.]
M_i	= ความชื้นเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ [%, w.b.]
M_0	= ความชื้นเริ่มต้น [%, w.b.]
$M(t)$	= ความชื้นขณะเวลา t
$M(t)$	= ความชื้นมาตรฐานเปียกที่เวลาใดๆ [%, w.b.]
M_w	= ความชื้นมาตรฐานเปียก [kg/kg]
P	= ความดันไอน้ำในวัตถุขึ้น [Pa]
P_0	= ความดันไอน้ำของน้ำอิสระ [Pa]

- P_v = ความดันไอน้ำในอากาศ [Pa]
 $P_{v, sur}$ = ความดันไอน้ำที่ผิววัตถุ [Pa]
 Q = พลังงานความร้อน [J/hr]
 $Q_{evaporation}$ = ความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำ [J]
 q_{husk} = ค่าความร้อนของแกลบ (heating value) [J/kg]
 Q_{stove} = พลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาแกลบ [J]
 Q_{supply} = พลังงานความร้อนที่ต้องการ [J]
 rh = ความชื้นสัมพัทธ์ [%]
 T_a = อุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง [K]
 T_{sur} = อุณหภูมิที่ผิวของผลผลิต [K]
 ΔT = ความแตกต่างของอุณหภูมิขาเข้าและขาออกจากเครื่องทำอากาศร้อน [K]
 η_{dryer} = ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง [%]
 η_{stove} = ประสิทธิภาพของเครื่องทำอากาศร้อน [%]



ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ – สกุล ที่อยู่	นายทวีเดช หมื่นภูเขียว 30 หมู่ 12 ตำบลนาจาน อำเภอสีชมพู จังหวัดขอนแก่น 40220
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2552	จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาปีที่ 6 โรงเรียนนาจานศึกษา อำเภอสีชมพู จังหวัดขอนแก่น
พ.ศ. 2556	จบการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย จังหวัดเลย
พ.ศ. 2556	เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

