



โครงการย่อยที่ 1 เครื่องอบกล้วยน้ำว้าแบบควบคุมการกระจายอุณหภูมิโดยการประยุกต์ใช้ท่อความร้อนในระบบพลังงานร่วมจากแสงอาทิตย์และก๊าซปิโตรเลียมเหลว

Banana Dryer with Temperature Distribution Controller by Using Heat Pipe Heat Exchanger in Combined Energy of Solar and LPG



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ แย้มเม่น

Ph.D. (Electrical Engineering)

Vanderbilt University, USA

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร  
จังหวัดพิษณุโลก

โทรศัพท์ 0-5596-4377 โทรศัพท์มือถือ 08-9703-4377

โทรสาร 0-5596-4377 E-mail: sucharty@nu.ac.th

## บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ ได้ออกแบบและสร้างเครื่องอบหรือตู้อบล้างน้ำว่าที่ควบคุมการกระจายลมร้อนและอุณหภูมิในห้องอบผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อใช้ผลิตอากาศร้อนบริสุทธิ์ป้อนเข้าสู่ห้องอบล้างน้ำว่า โดยที่อากาศจะรับการถ่ายโอนความร้อนจากน้ำร้อนภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งน้ำร้อนที่ได้รับมาจากการถ่ายโอนความร้อนของการเผาไหม้ด้วยก๊าซแอลพีจีและน้ำร้อนที่ได้รับมาจากการถ่ายโอนความร้อนของท่อฮีทไปป์ด้วยแผงตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ จากผลการทดลองอบล้างน้ำว่าดิบ 76.3 kg ด้วยการควบคุมค่าอุณหภูมิตั้งไว้ที่ 55 °C ในช่วงเวลา 9.00 น. – 17.00 น. ของวันแรก และในช่วงเวลา 9.00 น. – 15.00 น. ของวันที่สอง พบว่าเครื่องอบที่พัฒนาสามารถผลิตลมร้อนในห้องอบได้อุณหภูมิเฉลี่ย 57.0 °C และ 56.8 °C ในวันที่หนึ่งและสอง ตามลำดับ ด้วยค่าความผิดพลาดสมบูรณ์ 1.9 °C และใช้พลังงานจำเพาะเพียง 10.0 MJ/kg ซึ่งน้อยกว่าการใช้พลังงานจำเพาะ (14.1 MJ/kg) ในการอบล้างของเครื่องอบจากผู้ประกอบการ และมีการใช้เวลาในการอบล้าง (14 ชั่วโมง) ต่อบการผลิตรลดลง 41.7% เมื่อเทียบกับการใช้เวลาในการอบล้าง (24 ชั่วโมง) ของเครื่องอบจากผู้ประกอบการภายใต้เงื่อนไขคุณภาพทางกายภาพของผลผลิตกัล้วยอบทั้ง 2 วิธีเหมือนกัน

## Abstract

This research project has designed and built a banana dryer which controls hot air distribution and temperature in the drying cupboard through a heat exchanger. The heat exchanger produces hot air which enters the drying cupboard. The hot air is obtained from hot water derived from the heat transfer from either a heating pipe in a solar panel or from an LPG gas heater. Testing results were derived from drying 76.3 kg of raw bananas at a temperature of 55 °C from 9 am to 5 pm on the first day and subsequently 9 am to 3 pm on the second day. The results showed that the developed dryer can produce hot air within the drying cupboard at temperatures of 57 °C and 56.8 °C on both days, with an absolute error of 1.9 °C and with a specific energy of 10.0 MJ/kg. The specific energy from the dryer is less than that of a dryer commonly used by SME's at the moment (which is 14.1 MJ/Kg). This clearly indicates that the developed dryer has greater efficiency than the commonly used dryer. The time to dry bananas (14 hours per production cycle) was shown to decrease by 41.7% compared to the commonly used dryer (24 hours per production cycle) giving the same physical quality of the dried bananas in both cases.

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการทำกรวิจัย

กล้วยน้ำว้าเป็นผลไม้แปรรูปชนิดหนึ่งโดยนำกล้วยน้ำว้ามาปมจนสุกอมแล้วนำมาตากแดด หลังจากนั้นจึงนำเข้าอบในตู้อบที่อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ลมร้อนลดความชื้นจนเหลือประมาณร้อยละ 15 - 20 ต่อมาจึงนำมาบรรจุในบรรจุภัณฑ์เพื่อจัดจำหน่ายต่อไป แม้ว่ากล้วยตากจะเป็นสินค้าเศรษฐกิจที่มีการผลิตและจำหน่ายมากในจังหวัดพิษณุโลก แต่อย่างไรก็ตามยังพบปัญหาในกระบวนการผลิต เช่น การตากกล้วย ซึ่งส่วนมากจะใช้วิธีการตากแดดแบบธรรมชาติหรือตากในตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์เป็นเวลา 4 - 5 วัน โดยตอนเช้านำกล้วยมาตากแดดและตอนเย็นเก็บใส่ในถุงพลาสติก เนื่องจากอาศัยพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งบางครั้งไม่สม่ำเสมอตลอดเวลาโดยเฉพาะช่วงฤดูฝน ปัจจุบันมีการแก้ปัญหาช่วงฝนตกด้วยการสร้างโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก (นิรุช ล้ำเลิศ, 2549) แต่ปัญหาที่พบการอบกล้วยด้วยวิธีการนี้ก็ต้องหมั่นตรวจและทำความสะอาดเรือนกระจกอยู่ตลอดเวลาด้วยเหตุดังกล่าวจึงได้มีการพัฒนากระบวนการอบแห้งด้วยการใช้ตู้อบแห้งที่อาศัยก๊าซแอลพีจี (LPG) เป็นแหล่งนำพาความร้อนไปยังห้องอบ (สุเมธ รุจินินนาทและคณะ, 2545) และระบบการอบแบบเดิมไม่สามารถป้องกัน ฝุ่น แมลง ต่างๆ การเกิดเชื้อรา ยีสต์และแบคทีเรียได้อย่างสมบูรณ์ ทำให้สินค้าเกิดการเน่าเสียไม่ได้มาตรฐานและใช้เวลาในการผลิตมาก จึงมีการพัฒนากระบวนการผลิตด้วยการลดระยะเวลาการตากลงและเพิ่มระยะเวลาการอบกล้วยในตู้อบ อย่างไรก็ตามสำหรับการอบแห้งกล้วยน้ำว้าในตู้อบนั้น จะต้องมีการควบคุมอุณหภูมิให้พอเหมาะเพื่อให้ได้สีของกล้วยเป็นสีน้ำตาลอ่อนและมีความชื้นที่เหมาะสมซึ่งมีผลต่อความเหนียวของเนื้อกล้วย แต่ในปัจจุบันใช้ตู้อบกล้วยที่อาศัยก๊าซแอลพีจี (LPG) เป็นแหล่งความร้อน โดยเป่าก๊าซร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแอลพีจีผ่านเข้าสู่ห้องอบทางด้านล่างของตู้อบโดยตรง ทำให้อุณหภูมิการอบกล้วยในแต่ละชั้นไม่สม่ำเสมอ โดยกล้วยที่อบอยู่ช่วงชั้นล่างจะมีสีคล้ำและไหม้ บริเวณช่วงชั้นกลางจะมีอุณหภูมิเหมาะสมพอดี ส่วนกล้วยที่อยู่ช่วงชั้นบนจะไม่แห้ง จึงต้องใช้วิธีการสลับชั้นโดยใช้แรงงานคน เนื่องจากเป็นการอัดลมร้อนจากการเผาไหม้แอลพีจีเข้าสู่สัมผัสกับผิวกล้วยโดยตรง ซึ่งลมร้อนนี้ไม่สะอาดมีสารพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ เขม่าควัน และฝุ่นปะปนอยู่ ทำให้ไม่สามารถควบคุมผลิตภัณฑ์ให้สะอาดได้ตามมาตรฐานสากล และการเปิดตู้เพื่อสลับชั้นอบกล้วยในขณะที่เครื่องทำงานนั้นเป็นการสูญเสียพลังงานความร้อนจากตู้อบทำให้สิ้นเปลืองเชื้อเพลิงแอลพีจีและเพิ่มค่าใช้จ่ายในการผลิต ดังนั้น โครงการวิจัยนี้ จึงต้องการพัฒนาเครื่องอบกล้วยน้ำว้าที่สามารถควบคุมการกระจายลมร้อนและอุณหภูมิในตู้อบโดยการประยุกต์ใช้ท่อความร้อนในระบบพลังงานร่วมจากแสงอาทิตย์และเชื้อเพลิงแอลพีจีผลิตอากาศบริสุทธิ์ร้อนป้อนเข้าสู่ห้องอบ เพื่อให้ได้ตู้อบที่มีอุณหภูมิสม่ำเสมอทุกชั้นและใช้อากาศบริสุทธิ์ร้อนในการอบกล้วย ซึ่งจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์กล้วยตากที่สะอาด มีสี และความชื้นของกล้วยตากที่เหมาะสม และสามารถลดต้นทุนในการผลิต อันเนื่องจากการนำพลังงานหมุนเวียนมาใช้ร่วมกับเชื้อเพลิงแอลพีจี ทำให้สามารถประหยัดเชื้อเพลิงแอลพีจีลงได้ รวมทั้งเป็นการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศ ซึ่งเป็นที่มาของปัญหาภาวะโลกร้อนและความแปรปรวนสภาพอากาศโลก

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องอบหรือตู้อบกล้วยน้ำว้าที่ควบคุมการกระจายลมร้อนและอุณหภูมิในห้องอบผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อใช้ผลิตอากาศร้อนบริสุทธิ์ป้อนเข้าสู่ห้องอบกล้วยน้ำว้าโดยที่อากาศจะรับการถ่ายโอนความร้อนจากน้ำร้อนภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งน้ำร้อนที่ได้รับมาจากการถ่ายโอนความร้อนของการเผาไหม้ด้วยก๊าซแอลพีจีและน้ำร้อนที่ได้รับมาจากการถ่ายโอนความร้อนของท่อฮีทไปป์ด้วยแผงตัวรับรังสีแสงอาทิตย์

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัยตลอดทั้งโครงการ

- 1.3.1 เครื่องอบหรือตู้อบล้วนน้ำว่าสามารถป้อนกล้วยน้ำว่าได้อย่างน้อย 30 กิโลกรัมต่อรอบการอบ และกล้วยน้ำว่าหลังอบมีความชื้นประมาณร้อยละ 14 ของมาตรฐานเปียก โดยใช้ระยะเวลาสูงสุดในการอบ 13 ชั่วโมงต่อรอบการอบ
- 1.3.2 เครื่องอบหรือตู้อบล้วนน้ำว่ามีการกระจายอุณหภูมิภายในตู้อย่างสม่ำเสมอ และสามารถควบคุมอุณหภูมิภายในตู้ได้ที่ประมาณ 50-60 องศาเซลเซียส
- 1.3.3 การผลิตอากาศร้อนบริสุทธิ์ป้อนเข้าสู่ตู้อบล้วนน้ำว่าอาศัยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อติดครีป โดยถ่ายโอนความร้อนมาจากน้ำร้อนที่ได้จากระบบผลิตน้ำร้อนด้วยก๊าซแอลพีจีทำงานร่วมกับระบบผลิตน้ำร้อนที่ได้รับจากแผงรับรังสีแสงอาทิตย์แบบท่อฮีทไปป์เพื่อประหยัดเชื้อเพลิงแอลพีจี

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการวิจัย

กลุ่มเกษตรกรและผู้ประกอบการค้าธุรกิจทำกล้วยน้ำว่าอบขายจะได้ประโยชน์จากโครงการนี้โดยตรงซึ่งจะทำให้กล้วยน้ำว่าอบที่ส่งออกขายนั้นมีคุณภาพดียิ่งขึ้น และสามารถลดต้นทุนการใช้เชื้อเพลิงแอลพีจีลงได้ จึงทำให้รายได้เพิ่มขึ้น ในส่วนอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องจักรกลเกษตรทั้งรายย่อยและรายใหญ่ตามท้องถิ่นต่างๆ ทั้งประเทศ และคณาจารย์วิทยาลัยเกษตรกรรมทั่วประเทศ จะได้รับการถ่ายทอดเทคโนโลยีการผลิตจากโครงการที่จะเผยแพร่ออกไปสู่ผู้สนใจต่างๆ นิสิตภาควิชาวิศวกรรมเกษตรทั้งปริญญาตรีและปริญญาโท ที่จะเข้ามาช่วยทำโครงการนี้ จะได้รับความรู้ขั้นตอนการวิจัยและพัฒนาสิ่งประดิษฐ์ซึ่งจะเป็นการสร้างนักวิจัยรุ่นใหม่ต่อไป

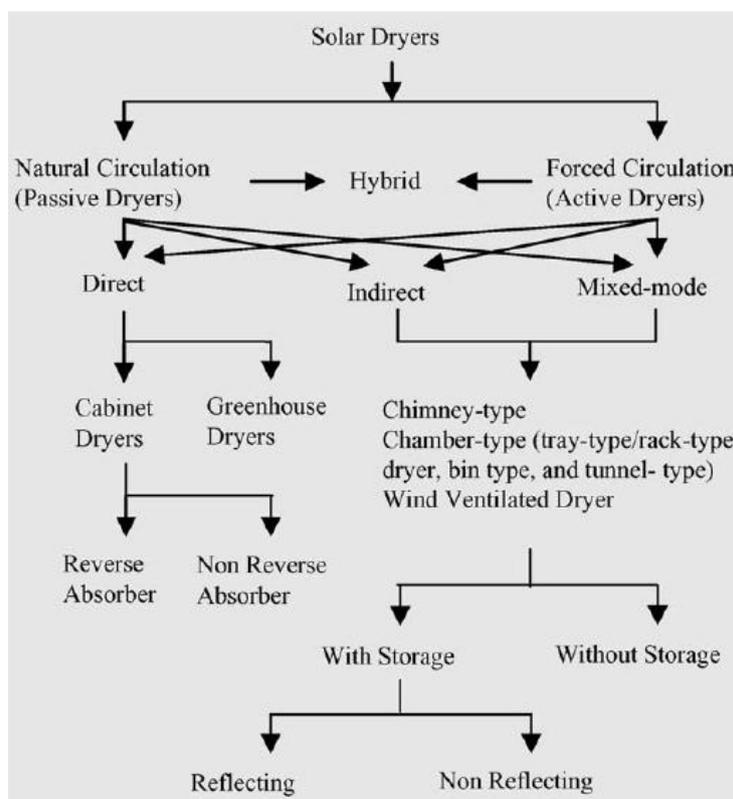
## บทที่ 2

### การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

เพื่อชี้ให้เห็นว่าต้องมีผู้ดำเนินการวิจัยในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับเครื่องอบกล้วยน้ำว้าที่ได้ผลิตและทำการวิจัยนั้นเป็นไปในทิศทางใด มีความก้าวหน้าไปในระดับใดบ้างแล้ว ยังจำเป็นที่จะต้องมีการวิจัยเพิ่มเติมในเรื่องใดอยู่บ้าง และงานวิจัยของโครงการนี้จะเข้าไปมีส่วนช่วยเติมเต็มในด้านใดบ้าง ทีมงานผู้วิจัยจึงได้ศึกษาและทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับเทคโนโลยีการอบแห้งเพื่อนำมาประยุกต์ในการออกแบบ พัฒนา และสร้างตู้อบกล้วยน้ำว้าที่มีความสามารถในควบคุมการกระจายลมร้อนและอุณหภูมิในห้องอบให้สม่ำเสมอ จากบทความวิจัย เอกสาร ตำรา และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง โดยมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

#### 2.1 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีการอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

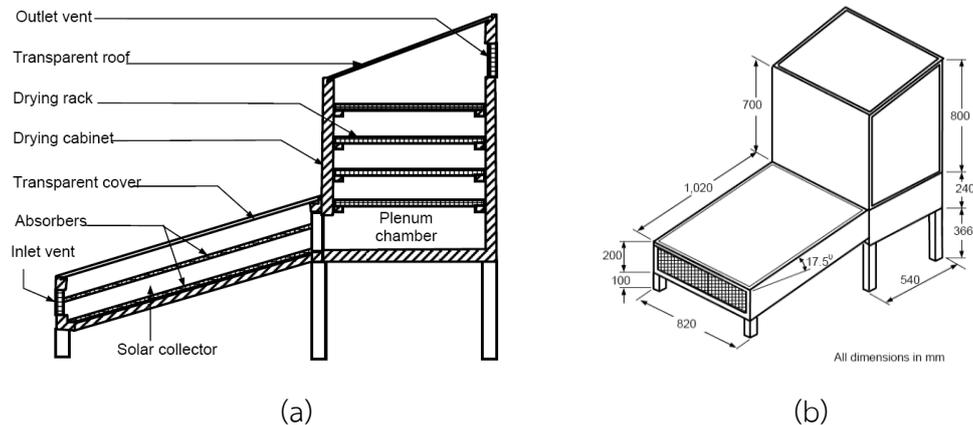
ในปัจจุบันได้มีการคำนึงถึงพลังงานความร้อนที่มาจากแสงอาทิตย์มากขึ้น จึงได้มีการพัฒนาและคิดค้นเทคโนโลยีมาใช้ในกระบวนการอบแห้ง สามารถที่จะแบ่งวิธีการอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ออกเป็น 4 รูปแบบด้วยกัน คือ การอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์โดยตรง (direct solar dryers) การอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ทางอ้อม (indirect solar dryers) การอบแห้งแบบผสม (mixed-mode dryers) และการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริด (hybrid solar dryers) อีกทั้งยังสามารถแบ่งประเภทของเครื่องอบแห้งจากการประยุกต์ใช้ความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ (A. Fudholi, 2010) ดังแผนภาพ 2.1



ภาพ 2.1 ประเภทเครื่องอบแห้งจากการประยุกต์ใช้ความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ [A. Fudholi (2010)]



Bukola O. Bolaji and Ayoocha P. Olalusi (2008) ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสม ส่วนประกอบและขนาดของตู้อบแห้งเป็นดังภาพ 2.4(a) และ (b) โดยให้แสงอาทิตย์ส่องผ่านกล่องกักเก็บความร้อนที่ทำจากวัสดุโปร่งแสง ผลจากการทดสอบอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งหลังเวลา 12.00 น. ไปอีกเพียง 3 ชั่วโมง อุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 74% พบว่าอัตราในการอบแห้งเท่ากับ 0.62 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และประสิทธิภาพของระบบอยู่ที่ 57.5%



ภาพ 2.4 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสม (a) ส่วนประกอบ และ (b) ขนาดของตู้อบ [Bukola O. Bolaji and Ayoocha P. Olalusi (2008)]

จารุวัฒน์ เจริญจิต (2011) ได้ทำการออกแบบและทดสอบสมรรถนะของตู้อบแห้ง และกลั่นความชื้นรังสีอาทิตย์แบบเทอร์โมไซฟอน สำหรับอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร เครื่องอบแห้งดังกล่าวเป็นเครื่องอบแห้งแบบ Passive ทำงานในระบบปิด ที่ปิดคลุมด้วยแผ่นกระจกเอียงทำมุมกับพื้นระดับ 12 องศา เพื่อให้สามารถรับพลังงานจากแสงอาทิตย์ได้สูงสุดและแผ่นอะคริลิกใส ตัวเครื่องอบแห้งมีขนาด 83 x 77 x 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยทำการออกแบบโครงสร้างของเครื่องอบแห้ง ประกอบด้วยถาด 5 ชั้น มีรางรองรับความชื้นที่ควมแน่นบริเวณกระจกด้านบนและด้านหน้ารวมทั้งระบายออกภายนอกตู้อบดังภาพ 2.5

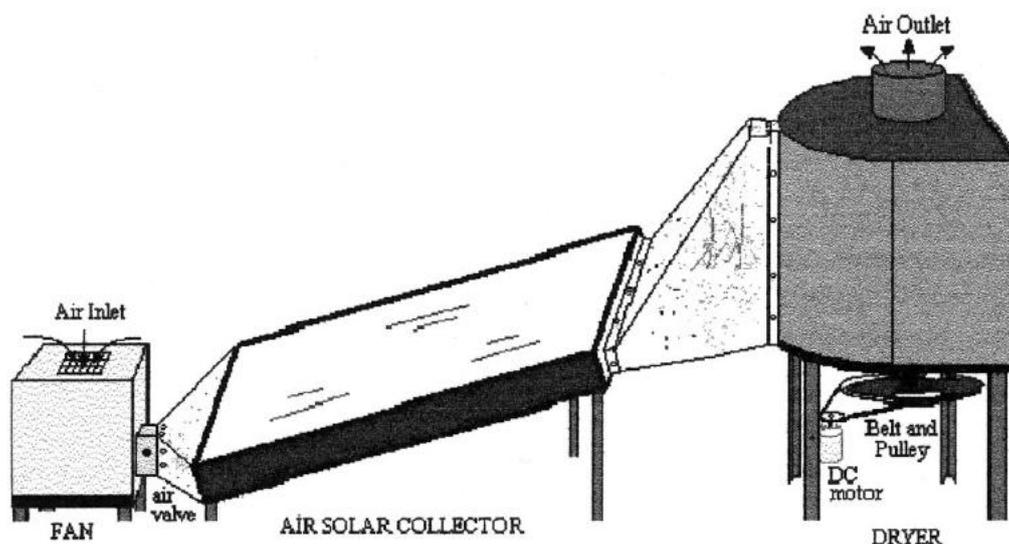


ภาพ 2.5 ตู้อบแห้งและกลั่นความชื้นรังสีอาทิตย์แบบเทอร์โมไซฟอน [จารุวัฒน์ เจริญจิต (2011)]

สำหรับพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะการอบแห้ง คือ ระยะเวลาการอบแห้ง และอัตราการอบแห้ง ทำการเก็บรวบรวมข้อมูล ในช่วงเวลา 09.00-15.00 น. เป็นเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน ผลจากการศึกษาพบว่า การอบแห้งด้วยตู้อบแห้งและกลั่นความชื้น รังสีอาทิตย์แบบเทอร์โมไซฟอน จากผลการทดลองพบว่าเครื่องอบแห้งนี้สามารถอบแห้งพริกชี้หูสด 5 กิโลกรัม ที่มีความชื้นเฉลี่ย 5 ชั้น 300% (d.b.) จนเหลือประมาณ 26% (d.b.) ภายในเวลา 3 วัน (18 ชั่วโมง) โดยไม่มีการสลับถาดทั้ง 5 เมื่อเทียบกับการตากแห้งตามธรรมชาติเหลือประมาณ 52 % (d.b.) เมื่อวิเคราะห์จากรายละเอียดของความชื้นแต่ละชั้นพบว่า ผลของการแยกชั้นของอุณหภูมิในตู้ส่งผลให้ ชั้นบนสุดหรือชั้นที่ห้า มีอัตราการอบแห้งสูงที่สุด และระยะเวลาการอบแห้งสั้นที่สุด ตามมาด้วยชั้น 4, 3 , 2 และ 1 ตามลำดับ ดังนั้นตู้อบแห้งนี้สามารถอบแห้งพริกชี้หูสดเพิ่มเป็น 8-10 กิโลกรัม ให้แห้งภายในเวลา 3 วัน (18 ชั่วโมง) ขึ้นกับรังสีอาทิตย์

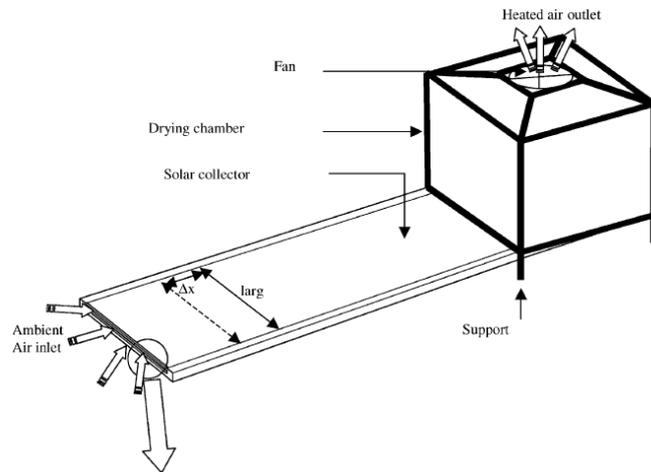
### 2.1.2 เครื่องอบแห้งหมุนเวียนลมร้อนแบบบังคับ (Forced convection dryers)

C. Sarsilmaz et al. (2000) ได้ออกแบบเครื่องอบแห้งผลแอปเปิ้ลที่มียูนิทอบแห้งเป็นรูปทรงกระบอกที่สามารถหมุน (RCCD) โดยมีตัวกักเก็บอากาศร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ (ASC) มาเป็นส่วนในการทำความร้อน ดังแสดงไว้ในภาพ 2.6 ประกอบด้วย เครื่องเป่าอากาศ ตัวกักเก็บอากาศร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ และห้องอบแห้ง ในการอบแห้งแอปเปิ้ลที่ความชื้นที่ควบคุมอยู่ที่ 25 เปอร์เซ็นต์ พบว่าสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งลงครึ่งหนึ่งเมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบปกติ และคุณภาพแอปเปิ้ลอบแห้งมีสีที่สม่ำเสมอด้วย

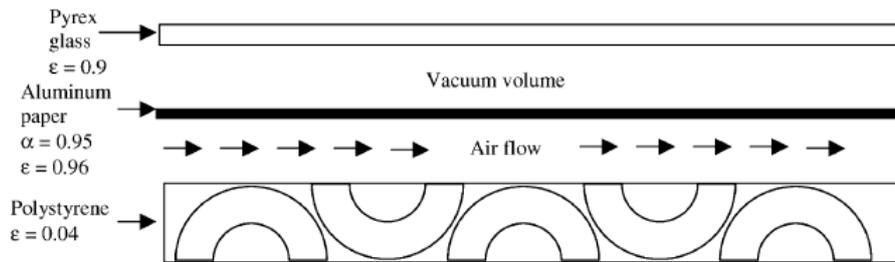


ภาพ 2.6 เครื่องอบแห้งผลแอปเปิ้ลที่มียูนิทอบแห้งเป็นรูปทรงกระบอกที่สามารถหมุน (RCCD) โดยมีตัวกักเก็บอากาศร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ (ASC) [C. Sarsilmaz et al. (2000)]

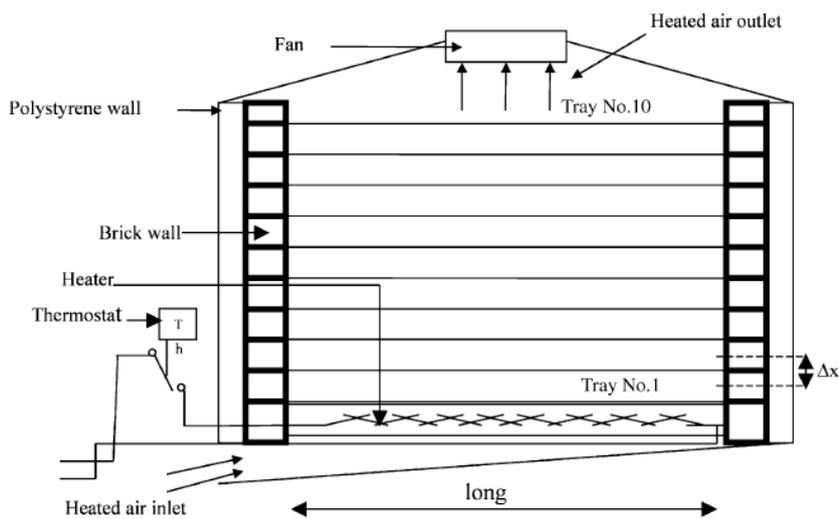
Lyes Bennamoun and Azeddine Belhamri (2003) ได้ทำการออกแบบและจำลองหลักการทำงานของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับผลผลิตทางการสินค้าเกษตร ในการออกแบบเครื่องอบพลังงานแสงอาทิตย์เป็นไปตามภาพ 2.7 ซึ่งพื้นที่รับแสงแดดของตัวกักเก็บความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ เท่ากับ 3 ตารางเมตร และสามารถทำอุณหภูมิในตู้อบแห้งได้ 50 องศาเซลเซียส ซึ่งตู้อบแห้งนี้สามารถบรรจุพืชผลทางการเกษตรได้ 250 กิโลกรัมต่อวัน



(a) ส่วนประกอบเครื่องอบแห้งพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์



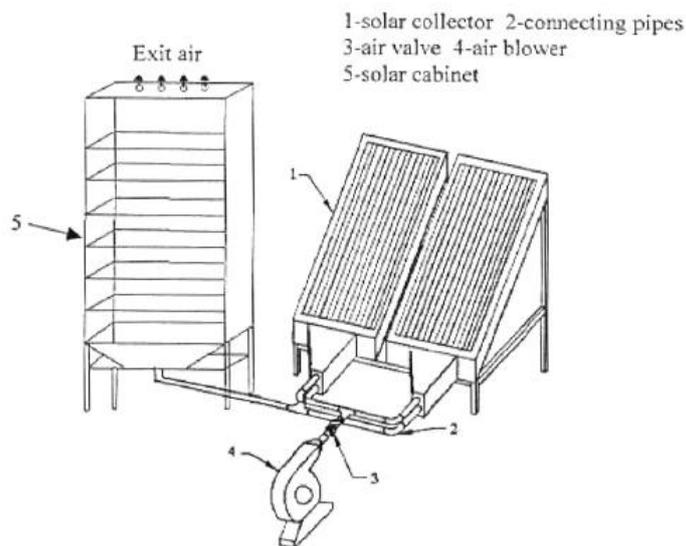
(b) ส่วนประกอบตัวกักเก็บความร้อน



(c) ส่วนประกอบภายในห้องอบแห้ง

ภาพ 2.7 เครื่องอบแห้งพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์สำหรับผลผลิตทางการสินค้าเกษตร [Lyes Bennamoun and Azeddine Belhamri (2003)]

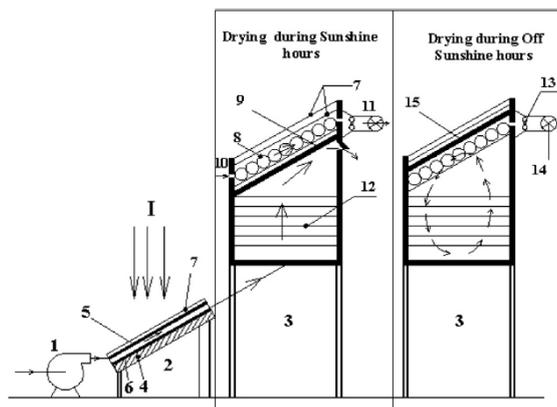
Khalil E. J. Al-Juamily et al. (2007) ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งผักและผลไม้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ในประเทศอิรัก โดยตัวเครื่องอบแห้งประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ส่วนกักเก็บความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ส่วนของห้องอบแห้งและส่วนเครื่องเป่าลมร้อน ตามภาพ 2.8 โดยส่วนกักเก็บความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์มีขนาด 2.4 ตารางเมตร และส่วนของห้องอบแห้งมีขนาดกว้าง 1 เมตร ลึก 0.33 เมตร และสูง 2 เมตร ระยะห่างระหว่างถาดอยู่ที่ 0.3 เมตร



ภาพ 2.8 เครื่องอบแห้งผักและผลไม้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ [Khalil E. J. Al-Juamily et al. (2007)]

การทดสอบผลการอบแห้งแอปพริคคือทปริมาณ 10 กิโลกรัม พบว่า สามารถลดความชื้นลงจาก 80% เหลือ 18% โดยใช้ระยะเวลาในการอบเพียง 1.30 วัน ที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลม 0.3 เมตรต่อวินาที และความชื้นสัมพัทธ์ 25% สามารถวิเคราะห์ประสิทธิภาพของห้องอบแห้งได้เท่ากับ 33% ในขณะที่การอบแห้งองุ่น 10 กิโลกรัม ประสิทธิภาพของห้องอบจะเหลือ 20% ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 0.3 เมตรต่อวินาที โดยมีความชื้นสัมพัทธ์อยู่ที่ 30% ใช้ระยะเวลาในการอบถึง 2.30 วัน

V. Shanmugam and E. Natarajan (2007) ได้ทำการศึกษาทดสอบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์โดยประยุกต์ใช้สารดูดความชื้นมาใช้ในกระบวนการอบแห้งโดยอาศัยหลักการพาความร้อนทางอ้อมด้วยเครื่องเป่าลมร้อนพาความร้อนจากตัวกักเก็บความร้อนแสงอาทิตย์ที่มีขนาด 1.2 เมตร x 2.4 เมตร ทำมุม 30 องศา กับแนวระดับพาความร้อนด้วยเครื่องเป่าลมขนาด 300 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงไปยังห้องอบแห้งที่มีขนาดเท่ากับ 1.2 เมตร x 1.2 เมตร ซึ่งภายในห้องอบแห้งนั้นมีสารดูดความชื้นมาช่วยลดความชื้น โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 รูปแบบด้วยกัน คือ รูปแบบแรกในช่วงที่มีแสงอาทิตย์จะอาศัยการพาความร้อนจากตัวกักเก็บความร้อนไปยังห้องอบแห้ง และรูปแบบสุดท้ายเป็นช่วงที่ไม่มีแสงอาทิตย์จะไม่ใช้เครื่องเป่าอากาศร้อนในการพาความร้อนจากเครื่องกักเก็บความร้อนไปยังห้องอบแห้ง แต่จะอาศัยหลักการไหลเวียนของอากาศภายในห้องอบแห้งผ่านพัดลมหมุนเวียนอากาศภายในห้องอบแห้งแทน ดังภาพ 2.9 ซึ่งจากผลการทดสอบกล้วยเขียวและสับปะรดจำนวน 20 กิโลกรัม สามารถลดชั่วโมงการอบแห้งลงได้ 2 และ 4 ชั่วโมง ตามลำดับ ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งอยู่ในช่วง 43% - 55%



ภาพ 2.9 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์โดยประยุกต์ใช้สารดูดความชื้นมาใช้ในกระบวนการอบแห้ง [V. Shanmugam and E. Natarajan (2007)]

### 2.1.3 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริด (Hybrid solar dryers)

#### 2.1.3.1 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกักเก็บความร้อน (Solar drying system with thermal storage)

Segun R. (2009) ได้ทำการพัฒนาเครื่องอบอุณหภูมิต่ำด้วยการใช้ระบบทำน้ำร้อนจากรังสีแสงอาทิตย์ ประกอบไปด้วย ตู้อบ ถังสะสมน้ำร้อน และตัวกักเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์ ดังภาพ 2.10 โดยการใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ทำจากท่อทองแดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 12.5 มิลลิเมตร ตัดท่อทองแดงโค้งงอที่ระยะห่างระหว่างท่ออยู่ที่ 50 มิลลิเมตร ขนาดของตัวเก็บรังสีแสงอาทิตย์เท่ากับ 680 x 450 x 100 มิลลิเมตร มุมเอียงของตัวเก็บรังสีอาทิตย์เท่ากับ 50 องศา จากแนวระดับ อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 0.25 ลิตรต่อนาที



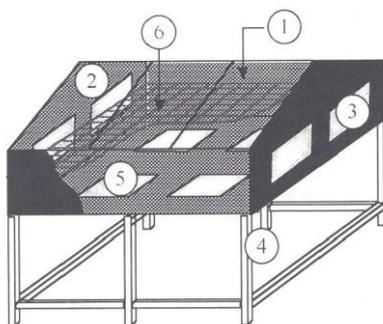
ภาพ 2.10 เครื่องอบอุณหภูมิต่ำด้วยการใช้ระบบทำน้ำร้อนจากรังสีแสงอาทิตย์ [Segun R. (2009)]

จากผลการทดสอบประสิทธิภาพการสะสมความร้อนของตัวเก็บรังสีแสงอาทิตย์ เท่ากับ 51.82% ที่ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ 689.23 วัตต์ต่อองศาเซลเซียส ความร้อนสะสมได้อยู่ที่ 563.85 วัตต์ต่อองศาเซลเซียส สูญเสียไป 116.39 วัตต์ต่อองศาเซลเซียส และพลังงานความร้อนถ่ายเทความร้อนที่ได้น้ำสะสมที่ 292.26 วัตต์ต่อองศาเซลเซียส ค่าความจุความร้อนรายวัน เท่ากับ 582.83 กิโลจูล พลังงานความร้อนที่ส่งผ่านไป

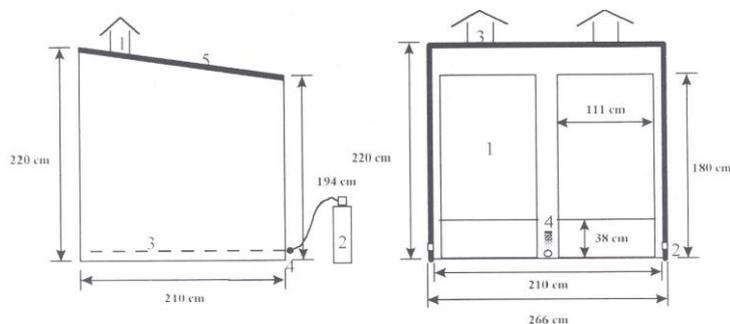
ยังห้องอบ เท่ากับ 147.07 กิโลจูล สามารถคิดประสิทธิภาพของระบบโดยรวมที่ได้รับเท่ากับ 25.24 เปอร์เซ็นต์ ผลจากการทดสอบประสิทธิภาพโดยรวมของทั้งระบบอยู่ที่ 25.98% และอุณหภูมิที่ทำได้ออกเท่ากับ 72 °C

### 2.1.3.2 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบมีส่วนเสริม (Solar drying system with auxiliary unit)

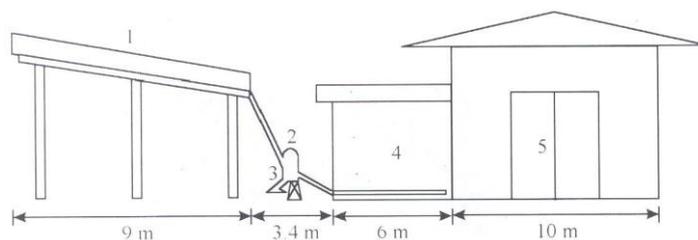
Somchart Soponronnarit (1997) ได้นำเสนอผลของการเปรียบเทียบผลของการอบกล้วยออกเป็น 3 แบบ ได้แก่ แบบที่ 1 เครื่องอบกล้วยแบบพาความร้อนจากธรรมชาติ (Solar natural convection dryer : SNCD) แบบที่ 2 เครื่องอบกล้วยแบบพาความร้อนจากก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG natural convection dryer : LPGD) และแบบที่ 3 เครื่องอบกล้วยแบบผสมผสานกันระหว่างการพาความร้อนจากธรรมชาติร่วมกับการพาความร้อนจากก๊าซปิโตรเลียมเหลว (Solar forced convection dryer with LPG as stand-by auxiliary : SFCD + LPG) ตามภาพ 2.11, ภาพ 2.12 และ ภาพ 2.13 ตามลำดับ



ภาพ 2.11 เครื่องอบกล้วยแบบพาความร้อนจากธรรมชาติ (Solar natural convection dryer: SNCD)



ภาพ 2.12 เครื่องอบกล้วยแบบพาความร้อนจากก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG natural convection dryer: LPGD)



ภาพ 2.13 เครื่องอบกล้วยแบบผสมผสานกันระหว่างการพาความร้อนจากธรรมชาติร่วมกับก๊าซปิโตรเลียมเหลว (Solar forced convection dryer with LPG as stand-by auxiliary : SFCD + LPG)

ผลการเปรียบเทียบการอบกล้วยทั้ง 3 แบบ เป็นไปผลลัพธ์ในตาราง 2.1 และผลการเปรียบเทียบการคำนวณในเชิงเศรษฐศาสตร์ได้ผลลัพธ์ในตาราง 2.2

ตาราง 2.1 ผลการทดสอบการอบกล้วยแบบ SNCD, LPGD และ SFCD+LPG

Parameter Data	SNCD	LPGD	SFCD+LPG
Initial weight of bananas (kg)	25	192	360
Final weight of bananas (kg)	9	73	141.1
Water evaporation loss (kg)	16	119	218.9
Total solar radiation at collector surface	292	-	1814.9
Total energy consumption of LPG (MJ)	-	971	1060.4
Total electrical consumption of fan (MJ)	-	-	393.8
Total energy consumption (MJ)	292	971	3269.1
Latent heat of evaporation (MJ/kg)	2.4	2.4	2.4
Drying efficiency (%)	13.1	29.4	16.1
Specific energy consumption (MJ/kg of water evaporated)	18.3	8.2	14.9
Average drying efficiency (%)	12.5	30	16.1

ตาราง 2.2 ผลการคำนวณเชิงเศรษฐศาสตร์การอบกล้วยแบบ SNCD, LPGD และ SFCD+LPG

Items	SNCD	LPGD	SFCD+LPG
Project life, year	5	10	10
Fixed cost			
Land rent, bath/year (increase 20% every 5 years)	250.0	250.0	1,000.0
Number of dryers	7.0	5.0	1.0
Dryer cost, baht	28,000.0	125,000.0	1,350,000.0
Variable cost			
Labor cost, baht/year (increase 10% every 5 years)	18,000.0	84,000.0	84,000.0
Operating cost, baht/year	4,836.0	25,916.0	75,430.0
Banana cost, bath/year (3.2 baht/kg, increase 0.5 baht/kg every 2 years)	27,900.0	196,416.0	571,680.0
LPG cost, bath/year (12 baht/kg, increase 10% every year)	-	87,978.0	101,085.3
Electricity cost, baht/year (2.5 baht/unit)	-	-	42,262.2
Maintenance cost, baht/year	515.0	500.0	6,000.0
Others, baht/year	500.0	500.0	20,000.0
Incomes			
Amount of dried bananas per year	3,348.0	24,893.0	56,012.0
Dried banana cost, baht/year (19 baht/kg, increase 10% ever 2 years)	63,612.0	472,967.0	1,064,228.0
Remark : 1 US\$ = 25 baht			

จากผลการทดสอบทั้งหมดสามารถหาค่าประสิทธิภาพของการอบกล้วยแบบพาความร้อนจากก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPGD) การอบกล้วยแบบพาความร้อนจากธรรมชาติ (SNCD) และการอบกล้วยแบบผสมผสานระหว่างการพาความร้อนจากธรรมชาติร่วมกับการพาความร้อนจากก๊าซปิโตรเลียมเหลว (SFCD+LPG) อยู่ที่ 30.0% 12.5% และ 16.1% ตามลำดับ จากผลการทดสอบยังพบว่าเมื่อนำสีของกล้วยมาทำการตรวจวัดด้วยกระบวนการ R.H.S. พบว่าการอบกล้วยที่ผ่านกระบวนการอบแบบพาความร้อนจากธรรมชาติ (SNCD) ที่อุณหภูมิ  $43^{\circ}\text{C}$  จะให้สีเทา-เหลืองอยู่ที่ 162 ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่ม B และสีของกล้วยหลังจากผ่านกระบวนการอบแบบพาความร้อนจากก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPGD) ที่อุณหภูมิ  $55^{\circ}\text{C}$  และการอบกล้วยแบบผสมผสานกันระหว่างการพาความร้อนจากธรรมชาติร่วมกับการพาความร้อนจากก๊าซปิโตรเลียมเหลว (SFCD+LPG) ที่อุณหภูมิ  $53^{\circ}\text{C}$  จะให้สีเทาส้มที่ 163 ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่ม A

A. G. Ferreira (2007) ได้ทำการทดลองกล้วยอบด้วยเครื่องไฮบริดจ์ ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนของตัวสะสมพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีขนาดกว้าง 1.50 เมตร ยาว 1.40 เมตร และสูง 0.20 เมตร ทำมุม 30 องศา กับแนวระดับ และส่วนของห้องอบกล้วยมีขนาด กว้าง 1.20 เมตร x ยาว 0.90 เมตร x สูง 0.96 เมตร ในส่วนของพลังงานไฟฟ้าได้ใช้หลอดไส้ขนาด 100 วัตต์ จำนวน 20 หลอด สามารถบรรจุกล้วยสุกได้ 12 kg ตามภาพ 2.14 จากผลการทดสอบปริมาณความชื้นของกล้วยอยู่ที่ 20% (มาตรฐานเปียก) จากปริมาณความชื้นของกล้วยเริ่มต้นที่ 69% (มาตรฐานเปียก) ซึ่งเวลาที่ใช้ในการอบกล้วยด้วยเครื่องไฮบริดจ์จะอยู่ที่ 4 ชั่วโมง ส่วนในการอบกล้วยด้วยเครื่องที่ใช้พลังงานไฟฟ้านั้นจะอยู่ที่ 8.5 ชั่วโมง และเครื่องอบกล้วยแบบใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์โดยตรงจะอยู่เกินกว่า 10 ชั่วโมง เมื่อนำมาคิดในแง่ของการประหยัดพลังงานจะพบว่าสามารถประหยัดพลังงานได้ถึง 38% เทียบกับเครื่องอบกล้วยแบบไฟฟ้าแบบเดิม



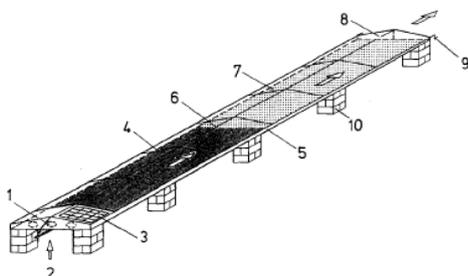
ภาพ 2.14 เครื่องอบไฮบริดจ์ พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานไฟฟ้า [A. G. Ferreira (2007)]

### 2.1.3.3 เครื่องอบแห้งไฮบริดความร้อนใต้พิภพหรือความร้อนจากน้ำทิ้ง (Hybrid with geothermal or waste waters)

D. Ivanova et al. (2003) ได้พัฒนาเครื่องอบแห้งผักและผลไม้แบบไฮบริดและทำการศึกษาประสิทธิภาพทางด้านพลังงานและทางด้านเศรษฐศาสตร์ โดยแหล่งพลังงานความร้อนใช้ในการอบแห้งได้แก่ความร้อนจากใต้พิภพหรือความร้อนจากน้ำทิ้ง เมื่อกำหนดความคุ้มค่าจะพบว่าสามารถคืนทุนภายในระยะเวลา 2.4 ปี ในการรักษาอุณหภูมิในการอบแห้งให้อยู่ที่  $60^{\circ}\text{C}$  ในตอนกลางวันสามารถใช้ความร้อนใต้พิภพที่มีอุณหภูมิ  $68^{\circ}\text{C}$  ได้ 32.2% ส่วนในตอนกลางคืนการใช้พลังงานความร้อนใต้พิภพหรือความร้อนจากน้ำทิ้งที่อุณหภูมิ  $68^{\circ}\text{C}$  จะใช้ได้อยู่เพียงแค่ 26% ถ้าเปรียบเทียบกับแหล่งพลังงานความร้อนแบบดั้งเดิมในช่วงระยะเวลากลางคืนจะพบว่าสามารถประหยัดได้ถึง 11%

### 2.1.3.4 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบมีโซลาร์เซลล์ (Solar drying system with photovoltaic)

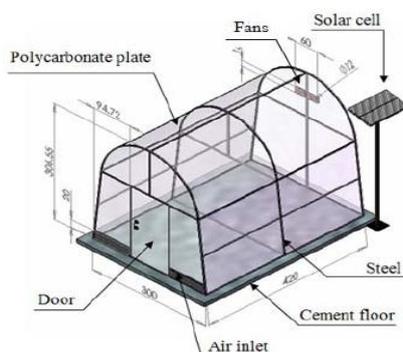
P. Schirmer (1996) ได้ศึกษาและทำการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องอบกล้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบอูโมงค์ลม โดยการออกแบบเครื่องอบกล้วยดังภาพ 2.15



ภาพ 2.15 เครื่องอบกล้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบอูโมงค์ลม [P. Schirmer (1996)]

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบกล้วยน้ำว้าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 เซนติเมตรและยาวขนาด 10 เซนติเมตร ความชื้นเริ่มต้นของกล้วย 69% w.b. และน้ำตาลในกล้วยอยู่ที่ 27° Brix ขึ้นอยู่ความสุกของกล้วย จำนวน 300 กิโลกรัม เมื่อผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบกล้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบอูโมงค์ลม ให้มีความชื้นสุดท้ายของกล้วย 30% w.b. ค่าน้ำตาลจะเพิ่มขึ้น 55° Brix โดยเครื่องอบสามารถทำอุณหภูมิได้อยู่ในช่วง 40 ถึง 65 องศาเซลเซียส ซึ่งระยะเวลาในการอบแต่ละรอบอยู่ที่ 3-5 วัน ซึ่งสามารถลดระยะเวลาการอบกล้วยจากปกติที่การอบกล้วยแบบแสงอาทิตย์ธรรมชาติซึ่งใช้ระยะเวลาในการอบแต่ละรอบอยู่ที่ 5-7 วัน ช่วงเวลาทดสอบอยู่ที่ 8.00 น. ถึงเวลา 17.00 น. เดือน มีนาคมถึงเมษายน พ.ศ. 2538 เมื่อนำมาคิดคำนวณเชิงเศรษฐศาสตร์ค่าความคุ้มทุนของเครื่องอบกล้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบอูโมงค์ลมอยู่ที่ 3 ปี

Monrudee Boonyasri et al. (2011) ทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพและผลการประเมินทางเศรษฐศาสตร์ของโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ในการทำหมอบแห้ง โรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แห่งนี้ติดตั้งที่จังหวัดกาฬสินธุ์ในประเทศไทย มีฐานคอนกรีตขนาด 12.6 ตารางเมตร ใช้มอเตอร์กระแสตรงขนาด 30 วัตต์ จำนวน 4 เครื่อง ในการระบายอากาศ ตามภาพ 2.16



ภาพ 2.16 โครงสร้างและขนาดของโรงอบแห้งพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ [Monrudee Boonyasri et al. (2011)]

จากผลการทดสอบโรงอบแห้งพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์สามารถทำอุณหภูมิอยู่ในช่วง 40 ถึง 53 °C ทดสอบอบหมอบจากความชื้น 210% เหลือ 70% ในระยะเวลา 260 นาที และต้องใช้เวลา

อีก 320 นาที ในการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ให้เหลือความชื้นที่ 18.8% ประสิทธิภาพในการแห้งและโรงอบแห้ง เท่ากับ 55.7% และ 42.8% ตามลำดับ สำหรับการวิเคราะห์ในเชิงเศรษฐศาสตร์พบว่าระยะเวลาคืนทุนอยู่ที่ 1.15 ปี

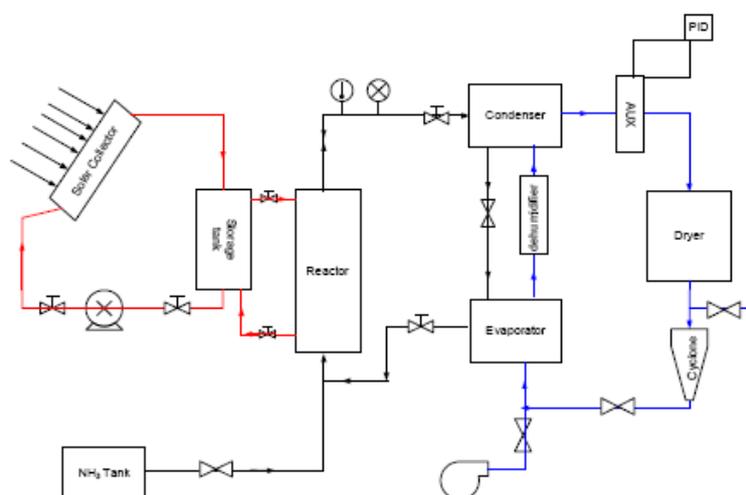
### 2.1.3.5 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบมีปั๊มความร้อน (Solar drying system with heat pump)

Ilhan Ceylan I et al. (2007) ได้ทำการวิเคราะห์ค่าพลังงานของเครื่องอบแห้งไม้ป้อปลาและไม้สน โดยก่อนผ่านการอบจะมีความชื้น เท่ากับ 1.28 กิโลกรัมแห้งต่อกิโลกรัมน้ำ และ 0.60 กิโลกรัมแห้งต่อกิโลกรัมน้ำ เมื่อผ่านการอบแห้งจะเหลือความชื้นอยู่ที่ 0.15 กิโลกรัมแห้งต่อกิโลกรัมน้ำ ซึ่งเดินปั๊มความร้อนในระยะเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็วลม 0.8 เมตรต่อวินาที ซึ่งในการอบไม้ป้อปลาจากความชื้น 1.28 กิโลกรัมแห้งต่อกิโลกรัมน้ำเหลือความชื้น 0.15 กิโลกรัมแห้งต่อกิโลกรัมน้ำ จะใช้ระยะเวลาในอบทั้งหมด 70 ชั่วโมง และการอบไม้สน จากความชื้น 0.60 กิโลกรัมแห้งต่อกิโลกรัมน้ำ เมื่อผ่านการอบแห้งแล้วจะเหลือความชื้นอยู่ที่ 0.15 กิโลกรัมแห้งต่อกิโลกรัมน้ำ ซึ่งใช้ระยะเวลาในการอบ 50 ชั่วโมง

M. Fatouh et al. (2006) ได้ทำการอบแห้งสมุนไพรด้วยปั๊มความร้อนในการอบแห้ง ใช้สาร R134a ในระบบปั๊มความร้อน ผลการทดสอบพบว่าผลผลิตของขาได้สูงสุด 5.4 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ชั่วโมง ภายใต้อุณหภูมิที่ 28 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ความเร็วลม 2.7 เมตรต่อวินาที ที่อุณหภูมิอากาศ 55 °C การเปรียบเทียบลักษณะการอบแห้งสมุนไพรจะแตกต่างกันโดยผักชีฝรั่งต้องการพลังงานน้อยที่สุด 3,684 กิโลจูลต่อกิโลกรัมน้ำ ตามมาด้วยมัน 3,982 กิโลจูลต่อกิโลกรัมน้ำ และचना 4,029 กิโลจูลต่อกิโลกรัมน้ำ

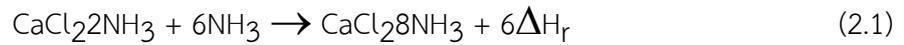
### 2.1.3.6 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบมีปั๊มเคมีน้ำร้อน (Solar drying system with chemical heat pump)

M. Ibrahim et al. (2008) ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีปั๊มเคมีความร้อนมาช่วยในการอบแห้ง ประกอบไปด้วยสี่ส่วนด้วยกัน คือ ส่วนของตัวกักเก็บความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (ชนิดหลอด) ถังเก็บน้ำ สารเคมี และห้องอบแห้ง ดังภาพ 2.17



ภาพ 2.17 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีปั๊มเคมีความร้อนมาช่วยในการอบแห้ง [M. Ibrahim et al. (2008)]

ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในการทดสอบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีปัมเคมีความร้อนมาช่วยในการอบแห้ง เป็นไปตามสมการ (2.1)

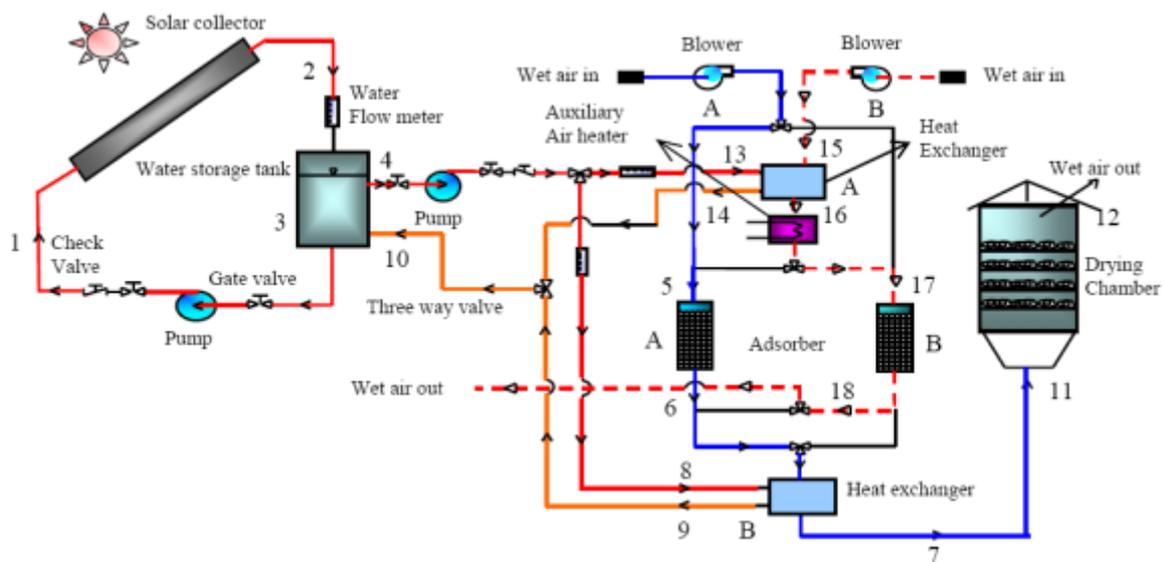


เมื่อ  $H_f$  คือ เอนทัลปีของการเกิดปฏิกิริยาเคมีสำหรับปัมเคมีร้อน

จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบ พบว่าค่า COP และ SF ทั้งระบบอยู่ 1.8 และ 0.4 ซึ่งมีพื้นที่รับแสงอาทิตย์ 10 ตารางเมตร และมีประสิทธิภาพตัวกักเก็บความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดหลอดอยู่ที่ 64%

### 2.1.3.7 เครื่องอบแห้งระบบลดความชื้นด้วยความร้อนของแสงอาทิตย์ (Solar-Assisted dehumidification system)

M. Yahya et al. (2008) ทำการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบลดความชื้นพลังงานแสงอาทิตย์ของใบข้าวบด โดยเครื่องที่ใช้ทำการทดสอบประกอบไปด้วย ตัวกักเก็บความร้อนของแสงอาทิตย์ ถึงเก็บพลังงาน เครื่องทำความร้อนด้วยไฟฟ้า เครื่องเป่าลมร้อน 2 ตัว ตัวดูดซับแบบคอลัมน์ 2 ตัว เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของน้ำและอากาศ 2 เครื่อง ปัมหมุนเวียนน้ำ จำนวน 2 ตัว ห้องอบแห้งและส่วนประกอบอื่นๆ ตามภาพ 2.18



ภาพ 2.18 โครงสร้างระบบลดความชื้นพลังงานแสงอาทิตย์ [M. Yahya et al. (2008)]

ในการคำนวณหาประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง ได้ใช้โปรแกรม MATLAB มาช่วยประมวลผลและจากการวิเคราะห์ผลการทดสอบพบว่าค่าสูงสุด  $\eta_p$ , SF และ COP มีค่าเท่ากับ 70%, 97% และ 0.3 ตามลำดับ ที่ความชื้นเปียกของใบข้าวบดเริ่มต้นที่ 88% และเมื่อผ่านการอบจะเหลือความชื้นอยู่ที่ 15% ด้วยความเร็วอากาศ เท่ากับ 3.25 เมตรต่อวินาที

### บทที่ 3 ระเบียบวิธีดำเนินการวิจัย

โครงการวิจัยนี้ มุ่งเน้นการออกแบบและสร้างต้นแบบเครื่องอบกล้วยน้ำว้าแบบควบคุมการกระจายอุณหภูมิ โดยการประยุกต์ใช้ท่อความร้อนในระบบพลังงานร่วมจากแสงอาทิตย์และก๊าซปิโตรเลียมเหลว โดยมีข้อมูลรายละเอียดของขั้นตอนดำเนินการวิจัย ดังต่อไปนี้

#### 3.1 ศึกษาทฤษฎีและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ทำการศึกษาความรู้ทฤษฎี ผลงานต่างๆ และวิวัฒนาการใหม่ๆ ที่เกี่ยวกับเทคโนโลยีในการอบกล้วยน้ำว้าดั้งเดิมและเทคโนโลยีเครื่องอบตามที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบและสร้างต้นแบบควบคุมการกระจายอุณหภูมิโดยการประยุกต์ใช้ท่อความร้อนในระบบพลังงานความร้อนร่วมจากแสงอาทิตย์และก๊าซปิโตรเลียมเหลวซึ่งเป็นเทคโนโลยีสมัยใหม่ที่ยังไม่เคยมีการวิจัยเครื่องอบกล้วยน้ำว้าในลักษณะนี้มาก่อน

#### 3.2 ศึกษาข้อมูลพื้นฐานการแปรรูปด้วยการอบกล้วยน้ำว้า

ทำการศึกษาข้อมูลพื้นฐานของสายพันธุ์กล้วยน้ำว้าที่นิยมนำมาทำเป็นผลิตภัณฑ์แปรรูปกล้วยอบ ศึกษาการคัดแยกกล้วยน้ำว้าและทำการศึกษากระบวนการอบกล้วยน้ำว้าเพื่อทำความเข้าใจกระบวนการผลิตกล้วยน้ำว้าอบจากผู้ประกอบการของร้านเจ็มวอยซึ่งตั้งอยู่ที่บ้านเลขที่ 14 หมู่ 5 ตำบลบางระกำ อำเภอบางระกำ จังหวัดพิษณุโลก อีกทั้งยังนำผลการศึกษาดังกล่าวเหล่านี้มาเป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบ พัฒนา และสร้างต้นแบบของเครื่องอบกล้วยน้ำว้าแบบควบคุมการกระจายอุณหภูมิโดยการประยุกต์ใช้ท่อความร้อนในระบบพลังงานร่วมจากแสงอาทิตย์และก๊าซปิโตรเลียมเหลว

##### 3.2.1) สายพันธุ์กล้วยน้ำว้าที่นิยมนำมาแปรรูปเป็นกล้วยอบ

สายพันธุ์กล้วยน้ำว้าที่นิยมนำมาแปรรูปเป็นกล้วยอบอย่างแพร่หลายในจังหวัดพิษณุโลกอาทิเช่นกล้วยน้ำว้าสายพันธุ์มะลิอ่อน ซึ่งเป็นสายพันธุ์ที่มีการปลูกมากในจังหวัดพิษณุโลกและมีลักษณะเด่น คือ เนื้อกล้วยจะมีสีขาว ใส่กลางสีขาว เนื้อนุ่ม มีรสหวาน ไม่มีเมล็ด อีกทั้งกล้วยน้ำว้าพันธุ์มะลิอ่อน 1 ผล ยังให้พลังงานถึง 100 แคลอรี ตัวกล้วยน้ำว้าสายพันธุ์มะลิอ่อนยังมีน้ำตาลธรรมชาติอยู่ 3 ชนิด ได้แก่ ซูโครส ฟรุคโทส และกลูโคส รวมไปถึงเส้นใยและกากอาหาร นอกจากนี้กล้วยน้ำว้ามะลิอ่อนยังอุดมไปด้วย วิตามินบี 6 ที่ช่วยกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกันต้านทาน แอมแร่ธาตุอย่างแมกนีเซียมและโพแทสเซียม ที่ช่วยป้องกันโรคความดัน และในบรรดากกล้วยทั้งหมด กล้วยน้ำว้ามะลิอ่อนในวิตามินเอสูงสุด รวมทั้งวิตามินบี 1, บี 2 และซี จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นเป็นเหตุให้ผู้ประกอบการแปรรูปกล้วยน้ำว้าอบส่วนใหญ่ เลือกกล้วยน้ำว้าสายพันธุ์มะลิอ่อนมาทำเป็นกล้วยน้ำว้าอบส่งขายให้ผู้บริโภคทั้งในและต่างประเทศจนเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลาย

##### 3.2.2) การคัดเลือกกล้วยน้ำว้าสายพันธุ์มะลิอ่อน

ในการคัดกล้วยน้ำว้าสายพันธุ์มะลิอ่อนเพื่อนำมาอบ จะต้องใช้กล้วยที่แก่จัด ลูกใหญ่ตัดเป็นหรีๆ วางเรียงบนพื้นที่ปูด้วยกระดาษหรือกระดาษใช้เวลา 5 วันถึง 7 วัน กล้วยจึงสุกอมพอดี และทำการปลอกกล้วยน้ำว้าสายพันธุ์มะลิอ่อนโดยการดึงเส้นใยข้างกล้วยออกให้หมด เนื่องจากเมื่อทำการอบจะทำให้กล้วยมีสีดำเข้ม

##### 3.2.3) ศึกษาขั้นตอนการอบกล้วยน้ำว้า

เมื่อวันจันทร์ที่ 5 เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2555 ทีมงานวิจัยในโครงการ (ผศ.ดร.บุญส่ง แสงอ่อน ผศ.ดร.สุชาติ แย้มเม่น รศ.ดร. ปิยะนันท์ เจริญสุวรรณ และผศ.ดร.พีระศักดิ์ ฉายประสาท) ได้เดินทางไปศึกษาและดูงานตู้อบของ ร้านเจ็มวอย (นางอารมณีนาคเทีย) ซึ่งตั้งอยู่ที่ 14 หมู่ 5 ตำบลบางระกำ อำเภอบางระกำ

จังหวัดพิษณุโลก จากผลการศึกษาและดูงานงาน พบว่า ขนาดตู้อบล้วยเท่ากับ กว้าง 144 ซม. X ลึก 87 ซม. X สูง 155 ซม. มี 10 ชั้น (2 ถาดต่อชั้น) ทำการอบกล้วยดิบ 300 กิโลกรัม เป็นกล้วยสุก 80 กิโลกรัม รวมใช้เวลาทั้งหมด 24 ชั่วโมง ด้วย 4 ขั้นตอน ดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1 หลังจากการคัดเลือกและปลอกกล้วยน้ำว้าดังแสดงไว้ในภาพ 3.1 เป็นที่เรียบร้อยแล้ว จึงนำกล้วยน้ำว้ามาจัดวางลงบนถาดรองรับกล้วย ดังแสดงไว้ในภาพ 3.2 แล้วนำมาอบด้วยอุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง แล้วจึงทำการพักกล้วยให้เย็นตัวด้วยอุณหภูมิปกติไว้หนึ่งคืน



ภาพ 3.1 การคัดเลือกและปลอกกล้วยน้ำว้า



ภาพ 3.2 กล้วยน้ำว้าที่ผ่านการปลอกแล้วนำมาจัดวางลงบนถาดรองรับกล้วย

- ขั้นตอนที่ 2 นำกล้วยน้ำว้าที่พักไว้หนึ่งคืนมาทำการกลับกล้วยดังแสดงไว้ในภาพ 3.3 แล้วทำการอบด้วยอุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง แล้วจึงทำการพักกล้วยให้เย็นตัวด้วยอุณหภูมิปกติไว้หนึ่งคืน



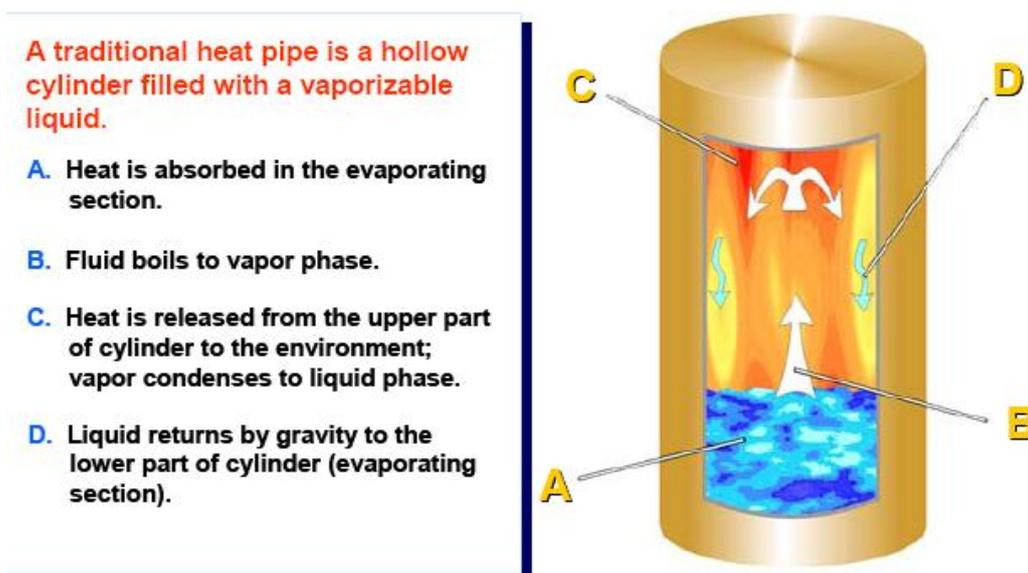
ภาพ 3.3 การกลับกล้วยน้ำว้าด้วยมือคน

- ขั้นตอนที่ 3 นำกล้วยน้ำว้าที่ปักไว้หนึ่งคืนมากลับ หลังจากนั้นจึงนำกล้วยมาอบด้วยอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง
- ขั้นตอนที่ 4 นำกล้วยน้ำว้าที่ผ่านขั้นตอนที่ 3 มาแล้วมาทำการชุปน้ำเกลือซึ่งมีอัตราส่วน น้ำเปล่า 6 ส่วน ต่อ น้ำเกลือ 1 ส่วน แล้วจึงนำกล้วยมาอบด้วยอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

จากการศึกษาข้อมูลแบบเดิมนี้ พบว่า ก๊าซร้อนจากการเผาไหม้แอลพีจีจะสัมผัสกับกล้วยน้ำว้าโดยตรง จึงมักมีสิ่งปนเปื้อน เช่น เศษผงโลหะของใบพัด ตะกั่ว รวมทั้งการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงแอลพีจีเนื่องจากไม่มีฉนวนภายในท่อระบายลมร้อนทั้งสองปล่อง ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานความร้อนไหลออกจากตู้อบมาก

### 3.3 ศึกษาข้อมูลพื้นฐานระบบแผงของฮีทไปป์ปรับรังสีแสงอาทิตย์เพื่อผลิตน้ำร้อน

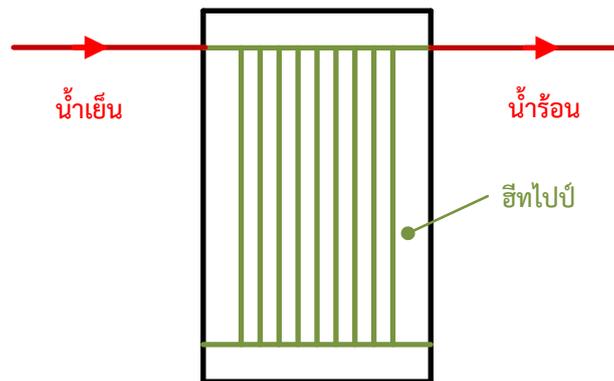
ทีมวิจัยได้ศึกษาฮีทไปป์เพื่อผลิตน้ำร้อนเข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยให้ลมผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนี้เข้าสู่เตาอบกล้วย ฮีทไปป์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนหรือส่งถ่ายความร้อนได้โดยไม่ต้องใช้พลังงานจากภายนอกส่วนประกอบของฮีทไปป์จะเป็นท่อโลหะที่ปิดหัวท้ายภายในเป็นสุญญากาศที่มีสารทำงาน (Working Fluid) บรรจุอยู่ภายใน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้น้ำ การทำงานของฮีทไปป์อาศัยหลักการเปลี่ยนสถานะจากการระเหยและควบแน่นร่วมกับแรงโน้มถ่วงของสารทำงานโดยไม่ใช้พลังงานจากภายนอก กล่าวคือสารทำงานในท่อด้านที่ต่ำกว่าเมื่อได้รับความร้อนก็จะระเหยเป็นไอลอยขึ้นอีกด้านที่สูงกว่าแล้วคายความร้อนออก ทำให้ไอของสารทำงานมีอุณหภูมิลดลงถึงจุดควบแน่น แล้วกลายเป็นของเหลวตกลงสู่ด้านที่ต่ำกว่าอีกครั้ง และด้วยเหตุนี้จึงเรียกด้านที่อยู่ต่ำกว่าว่าด้านระเหย และเรียกด้านที่อยู่สูงกว่าว่าด้านควบแน่นดังแสดงไว้ในภาพ 3.4



ภาพ 3.4 โครงสร้างภายในของฮีทไปป์

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (โครงการพัฒนาประสิทธิภาพการใช้พลังงานในภาคอุตสาหกรรมและธุรกิจ)

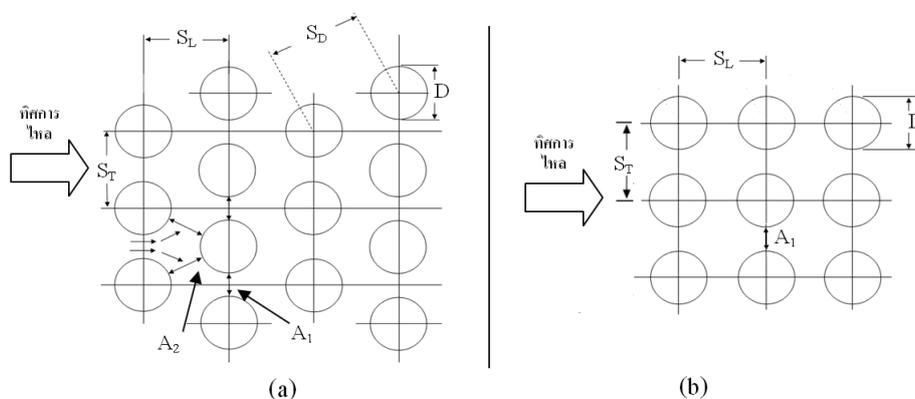
เมื่อนำฮีทไปป์จำนวน 30 หลอดแก้วสุญญากาศต่อกันเป็นแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ดังแสดงไว้ในภาพ 3.5 แผงฮีทไปป์ที่ติดตั้งจะมีน้ำไหลเข้าและน้ำไหลออกเมื่อผ่านฮีทไปป์ส่วนนี้ อุณหภูมิของน้ำที่ท่อขาออกจะสูงกว่าอุณหภูมิของน้ำที่ท่อขาเข้าหากแผงฮีทไปป์เหล่านี้รับรังสีแสงอาทิตย์ตามที่กล่าวมาแล้วในหลักการทำงานของฮีทไปป์ข้างต้น ถ้ารังสีแสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้ผลต่างระหว่างอุณหภูมิของน้ำที่ท่อขาออกกับที่ท่อขาเข้ามีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งมีผลทำให้น้ำที่ท่อขาออกมีอุณหภูมิสูงขึ้น ต่อจากนั้นจึงนำน้ำร้อนป้อนเข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อผลิตลมร้อนป้อนเข้าสู่ตู้อบกล้วยน้ำว่าต่อไป



ภาพ 3.5 โครงสร้างการต่อฮีทไปป์จำนวน 30 หลอดแก้วสุญญากาศเป็นแผงรับรังสีแสงอาทิตย์

### 3.4 ศึกษาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อผลิตลมร้อนเข้าสู่ตู้อบกล้วย

ทีมงานวิจัยได้ศึกษาการไหลของลมผ่านกลุ่มท่อน้ำร้อนเพื่อผลิตลมร้อนเข้าสู่ตู้อบกล้วยในตัวแลกเปลี่ยนความร้อนที่อาศัยการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำร้อนในท่อและลมภายนอกท่อ กลุ่มท่อที่ใช้แบ่งเป็นการจัดเรียงแนวตรงกันและการจัดเรียงแนวเหลื่อมกันดังแสดงในภาพ 3.6 กลุ่มท่อพิจารณาตามแนวทิศทางการไหลโดยจำนวนแถวแนวตั้ง ( $N_L$ ) วัดจากจำนวนแถวที่มีทิศตั้งฉากกับการไหล จำนวนแถวแนวนอน ( $N_T$ ) วัดจากจำนวนแถวตามทิศการไหล ระยะพิตซ์ตามยาว ( $S_L$ ) วัดตามแนวทิศการไหล ระยะพิตซ์ตามขวาง ( $S_T$ ) วัดตามแนวตั้งฉากกับทิศการไหล และระยะพิตซ์ตามแนวทแยงมุม ( $S_D$ ) เป็นระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางท่อในแนวแถวที่ประกอบด้วยท่อจัดเรียงแนวเหลื่อมกัน



ภาพ 3.6 การจัดเรียงของกลุ่มท่อ

ที่มา: Incropera F. P. and DeWitt D. P. (2002)

นอกจากนี้ ทีมวิจัยยังได้ศึกษาอัตราการถ่ายเทความร้อนจากผิวท่อสู่ของไหลผ่านกลุ่มท่อ เมื่อพิจารณาให้อุณหภูมิผิวท่อคงที่ที่  $T_s$  ของไหลไหลเข้ากลุ่มท่อที่อุณหภูมิ  $T_{\infty 1}$  และไหลออกที่อุณหภูมิ  $T_{\infty 2}$  จากสมมูลของพลังงาน (จำนวนท่อทั้งหมดในกลุ่มท่อเท่ากับ  $N$  ท่อและท่อที่มีความยาว ( $L$ ) อัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดระหว่างท่อกับของไหลสามารถแสดงได้ดังสมการ (3-1)

$$\dot{Q} = \dot{m}_{\text{total}} c_p (T_{\infty 2} - T_{\infty 1}) = h_m N \pi D L \Delta T_{\text{lm}} \quad (3-1)$$

เมื่อ  $h_m$  คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยและพิจารณา  $\Delta T_{\text{lm}}$  ได้จากสมการ (3.2)

$$\Delta T_{\text{lm}} = \frac{(T_s - T_{\infty 1}) - (T_s - T_{\infty 2})}{\ln[(T_s - T_{\infty 1}) / (T_s - T_{\infty 2})]} \quad (3-2)$$

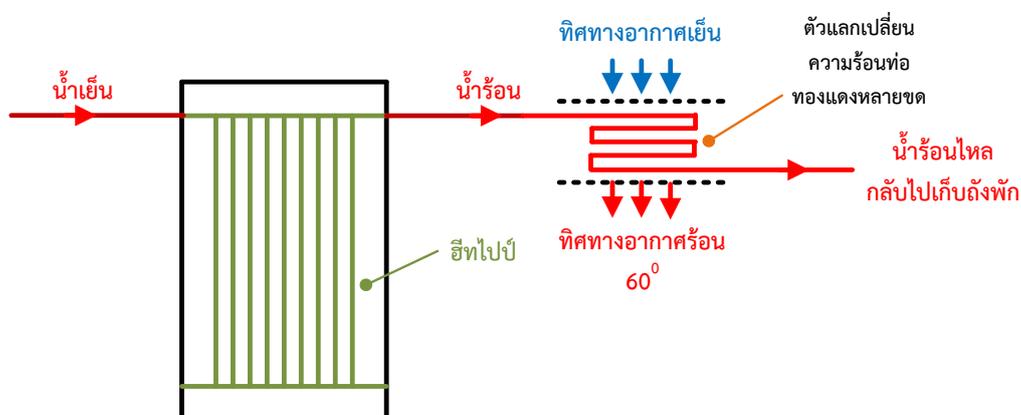
โดยที่  $N$  คือจำนวนท่อทั้งหมดและหาได้จาก  $N = N_T \times N_L$  ประสิทธิภาพของกลุ่มท่อเหล่านี้สามารถหาได้จากดัชนีที่ใช้บ่งบอกสมรรถนะซึ่งนิยมใช้ค่าประสิทธิภาพ (Effectiveness) ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการ (3.3)

$$Q_{\text{max}} = C_{\text{min}} \Delta T_{\text{max}} \quad (3-3)$$

โดยที่  $C_{\text{min}}$  คือผลคูณของอัตราการไหลเชิงมวลกับความจุความร้อนจำเพาะของของไหลที่มีค่าน้อย  $(\dot{m} c_p)_{\text{min}}$  [W/K] จะสามารถหาประสิทธิภาพได้ดังสมการ (3.4)

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{\text{max}}} = \frac{Q}{C_{\text{min}} \Delta T_{\text{max}}} = \frac{Q}{(\dot{m} c_p)_{\text{min}} \Delta T_{\text{max}}} \quad (3-4)$$

โดยที่  $\varepsilon$  คือประสิทธิภาพของกลุ่มท่อและ  $\Delta T_{\text{max}}$  คือผลต่างของอุณหภูมิสูงสุด [K] เมื่อนำท่อน้ำร้อนขาออกจากแผงฮีทไปป์ต่อเข้ากับท่อท่อแดงขาเข้าของตัวแลกเปลี่ยนความร้อนดังภาพ 3.7 โดยให้อากาศไหลผ่านตัวแลกเปลี่ยนความร้อนจะทำให้อุณหภูมิร้อนขึ้น



ภาพ 3.7 การต่อร่วมกันระหว่างแผงของฮีทไปป์กับตัวแลกเปลี่ยนความร้อน

### 3.5 ออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบระบบอบกล้วยน้ำว้าแบบควบคุมการกระจายอุณหภูมิด้วยกลุ่มท่อความร้อนในระบบพลังงานร่วมจากแสงอาทิตย์และก๊าซปิโตรเลียมเหลว

การออกแบบและสร้างต้นแบบเครื่องอบกล้วยน้ำว้าแบบควบคุมการกระจายอุณหภูมิโดยใช้ท่อความร้อนในระบบพลังงานร่วมจากแสงอาทิตย์และก๊าซปิโตรเลียมเหลว มีการดำเนินงานดังนี้

#### 3.5.1) ออกแบบระบบแผงของฮีทไปป์รับรังสีแสงอาทิตย์เพื่อผลิตน้ำร้อน

ในการคำนวณหาอุณหภูมิน้ำร้อนที่ได้รับจากแผงรับรังสี เริ่มด้วยการกำหนดคุณลักษณะสมบัติและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังตาราง 3.1 เมื่อนำค่าพารามิเตอร์มาคำนวณหาผลต่างอุณหภูมิแผงที่ 1 จะได้ผลลัพธ์ดังตาราง 3.2 ต่อมาโดยการใช้สมการ (3.5) จะได้ว่า

$$(\text{eff of collector}) \times Q_{\text{solar}} \times (\text{Absorber area}) = m \times C_p \times (T_o - T_i) \quad (3.5)$$

สามารถคำนวณหาอุณหภูมิขาออกแผงที่ 1 ได้เท่ากับ

$$T_o = T_i + \frac{(\text{eff of collector}) \times Q_{\text{solar}} \times (\text{Absorber Area})}{m \times C_p} = 69.739 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

ตาราง 3.1 กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาอุณหภูมิน้ำร้อน

มาตรฐานการคำนวณอัตราการไหลเข้าแผงรับรังสีอาทิตย์	0.02	L/s/m <sup>2</sup>
พื้นที่รับรังสี (Absorber Area) แผงรับรังสี	3.8	m <sup>2</sup>
1 แผง มีพื้นที่ Absorber Area จำนวน 2.4 m <sup>2</sup> ดังนั้นอัตราการไหลเท่ากับ	0.076	L
อัตราการไหลต่อชุดแผงเท่ากับ (m)	0.076	L/s (kg/s)
ค่าความจุความร้อนของน้ำ (C <sub>p</sub> )	4.18	KJ/Kg.K
C <sub>p</sub> x m	0.318	
T <sub>a</sub>	25	C
ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ย (ค่าแดด อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก)	18.47	MJ/m <sup>2</sup> -day
ช่วงเวลาที่รับพลังงานแสงอาทิตย์ (12.00 น. - 16.00 น.)	4	hr
คิดเป็นค่าความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ย	4.618	MJ/m <sup>2</sup> /hr

ตาราง 3.2 ผลลัพธ์การคำนวณหาผลต่างอุณหภูมิแผงที่ 1

อุณหภูมิน้ำเข้าแผงที่ 1 (T <sub>i</sub> )	25	C
ค่าความเข้มแสงแดด	1282.639	W/m <sup>2</sup>
ประสิทธิภาพเริ่มต้นของแผงรับรังสี	0.81	
(T <sub>i</sub> - T <sub>a</sub> )/Gt	0	
ประสิทธิภาพแผง eff = 0.81*(2.55*((T <sub>i</sub> - T <sub>a</sub> )/Gt))	0.81	

จากนั้น นำค่าอุณหภูมิขาออกแผงที่ 1 ร่วมกับค่าพารามิเตอร์ มาคำนวณหาผลต่างอุณหภูมิแผงที่ 2 จะได้ผลลัพธ์ดังตาราง 3.3

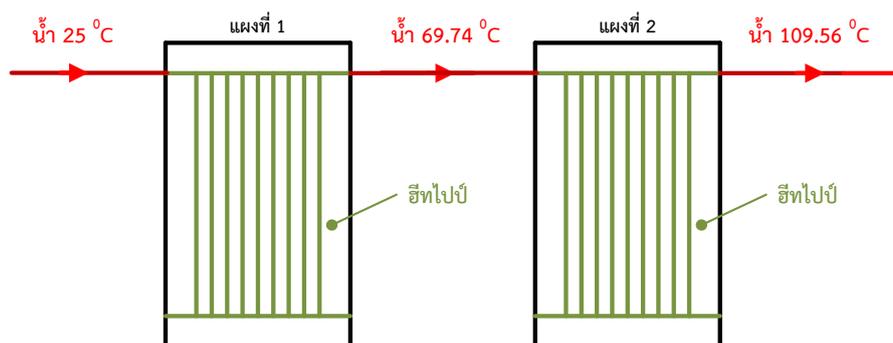
ตาราง 3.3 ผลลัพธ์การคำนวณหาผลต่างอุณหภูมิแผงที่ 2

อุณหภูมิน้ำเข้าแผงที่ 2 ( $T_i$ )	69.739	C
ค่าความเข้มแสงแดด	1282.639	W/m <sup>2</sup>
$(T_i - T_a)/G_t$	0.035	
ประสิทธิภาพแผง $eff = 0.81 \cdot (2.55 \cdot ((T_i - T_a)/G_t))$	0.721	

โดยการใช้สมการ (3.5) สามารถคำนวณหาอุณหภูมิขาออกแผงที่ 1 ได้เท่ากับ

$$T_o = T_i + \frac{(\text{eff of collector}) \times Q_{\text{solar}} \times (\text{Absorber Area})}{m \times C_p} = 109.565 \text{ } [^{\circ}\text{C}]$$

เมื่อต่ออนุกรมสองแผงเข้าด้วยกันดังภาพ 3.8 สามารถทำให้อุณหภูมิของน้ำขาเข้าแผงที่ 1 จากอุณหภูมิ 25  $[^{\circ}\text{C}]$  เป็นอุณหภูมิของน้ำขาออกแผงที่ 1 เป็น 69.739  $[^{\circ}\text{C}]$  และน้ำส่งต่อผ่านแผงที่ 2 จะได้รับอุณหภูมิของน้ำขาออกแผงที่ 2 เท่ากับ 109.565  $[^{\circ}\text{C}]$

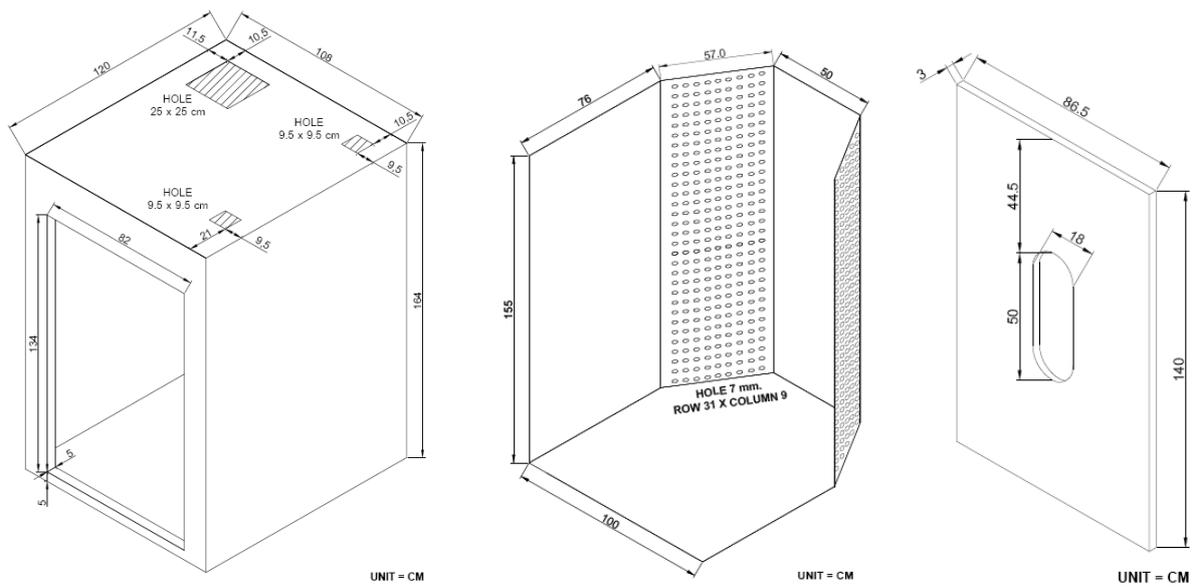


ภาพ 3.8 การต่อร่วมกันระหว่างแผงของฮีทไปป์ทั้งสองแผง

ดังนั้น จะได้รับแผงรับรังสีแสงอาทิตย์แบบหลอดแก้ว (Heat Pipe Solar Collector) ขนาดพื้นที่ช่องรับแสง 3.8 ตารางเมตร/แผง และพื้นที่ช่องรับแสงรวมเท่ากับ 11.48 ตารางเมตร โดยมีคุณลักษณะสมบัติของแต่ละแผง ดังนี้ มีขนาดของแผงยาว 2000 มิลลิเมตร x กว้าง 2380 มิลลิเมตร x สูง 180 มิลลิเมตร น้ำหนักของแผงเท่ากับ 100 กิโลกรัม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหลอดแก้วเท่ากับ 58 มิลลิเมตร (ขอบนอก) และ 47 มิลลิเมตร (ขอบใน) จำนวนหลอดแก้วต่อแผงเท่ากับ 30 หลอด และระยะห่างระหว่างหลอดสุญญากาศเท่ากับ 22 มิลลิเมตร เป็นต้น

### 3.5.2) ออกแบบและสร้างตู้อบล้างน้ำว่าตันแบบ

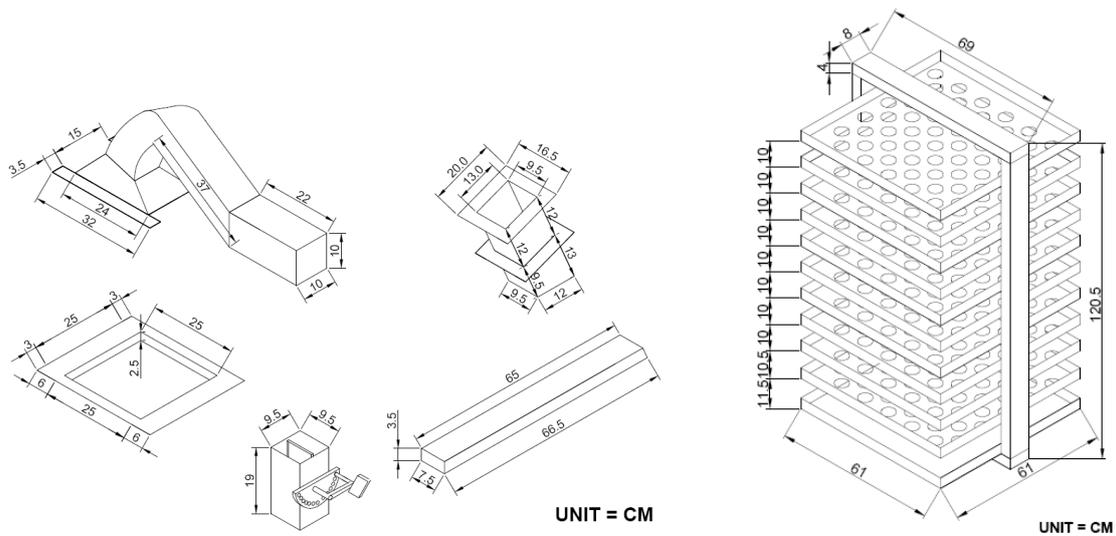
เพื่อให้ตู้อบล้างน้ำว่าตันสามารถบรรจุและอบล้างน้ำว่าตันได้ปริมาณมวล 70 กิโลกรัม คณะผู้วิจัยจึงได้คำนวณในการออกแบบและสร้างตู้อบล้างน้ำว่าตันแบบที่มีโครงสร้างของตู้อบ คือ ขนาดความลึก 120 เซนติเมตร x ความกว้าง 108 เซนติเมตร x ความสูง 164 เซนติเมตร ซึ่งจะประกอบไปด้วยขนาดภายนอกตู้อบล้างน้ำว่าตัน ขนาดภายในตู้อบล้างน้ำว่าตัน ขนาดประตูเปิดตู้อบ ขนาดท่อพาความร้อนหมุนเวียนออกและเข้าตู้อบ และขนาดถาดรองรับกล้วยอบตั้งแสดงไว้ในภาพ 3.9(a), 3.8(b), 3.8(c), 3.8(d) และ 3.8(e) ตามลำดับ



(a) ขนาดภายนอกตู้อบกล้วย

(b) ขนาดภายในตู้อบกล้วย

(c) ขนาดประตูปิดเปิด

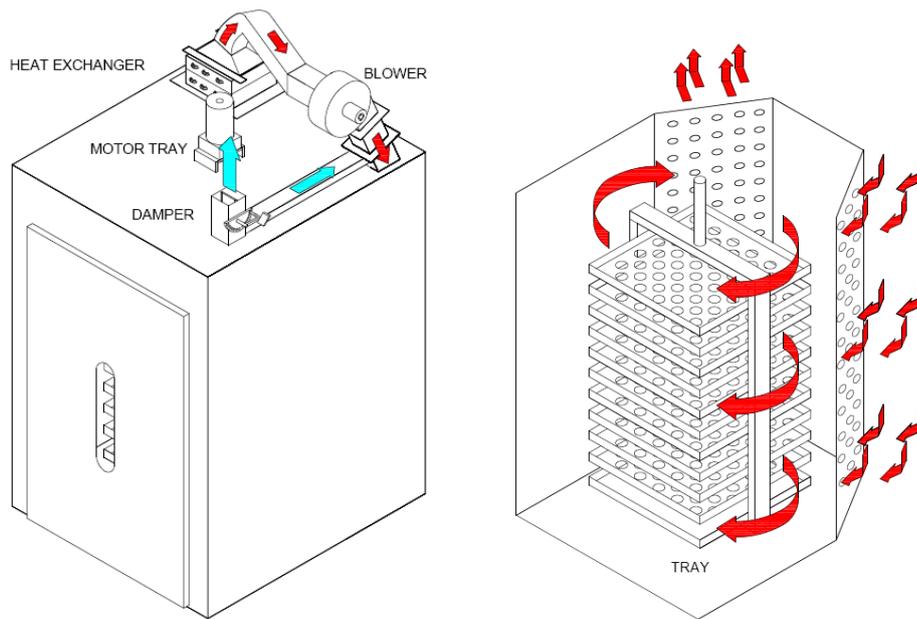


(d) ขนาดท่อพาความร้อนออกและเข้าตู้อบ

(e) ขนาดถาดรองรับกล้วยอบ

ภาพ 3.9 ขนาดโครงสร้างของตู้อบกล้วยน้ำว้าต้นแบบ

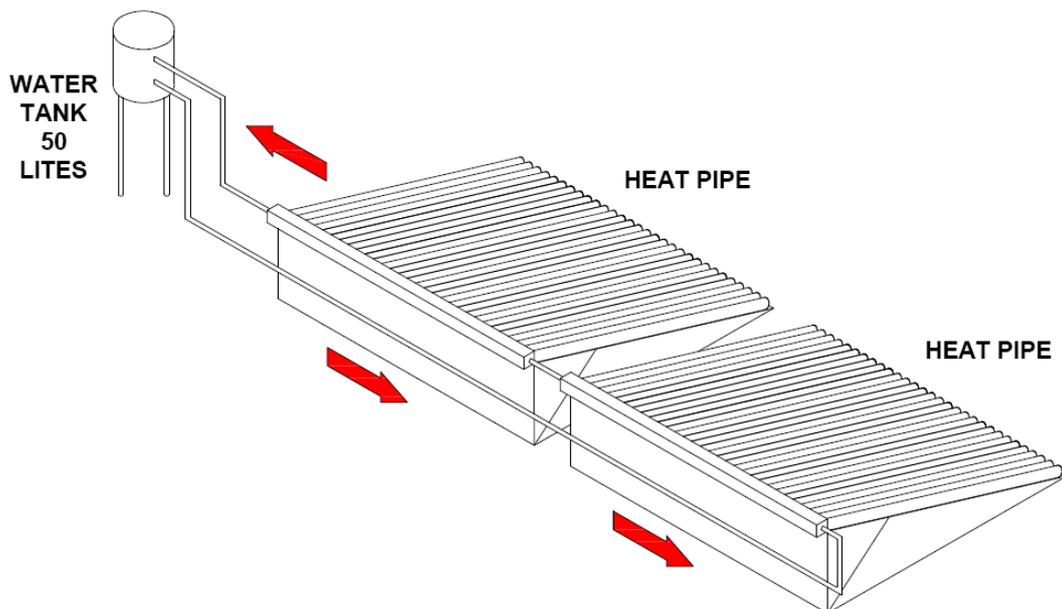
ส่วนลักษณะการไหลเวียนอากาศร้อนของในตู้อบกล้วยน้ำว้า คณะผู้วิจัยได้ออกแบบและคำนึงถึงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนให้สามารถทำหน้าที่เป็นสื่อกลางในการถ่ายโอนอากาศร้อน หรืออากาศร้อนที่แพร่ออกมาสามารถถูกพัดลมดูดอากาศเย็นที่ผ่านเข้าและพาอากาศร้อนออกเพื่อป้อนเข้าสู่ภายในห้องอบผ่านทางรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 มิลลิเมตร โดยอากาศร้อนที่ผ่านเข้ามายังห้องอบจะไหลเวียนในทิศทางเดียวกับการหมุนของถาดรองรับกล้วยอบน้ำว้าดังหัวลูกศรแสดงการไหลเวียนอากาศร้อนในตู้อบกล้วยน้ำว้าดังภาพ 3.10



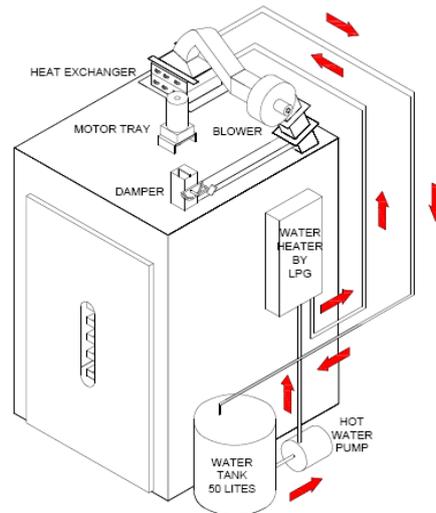
ภาพ 3.10 ลักษณะการไหลเวียนอากาศร้อนของตู้บกล้ำยน้ำว่า

3.5.3) ออกแบบระบบบกล้ำยน้ำว่าแบบควบคุมการกระจายอุณหภูมิโดยการใช้ท่อความร้อนในระบบพลังงานร่วมจากแสงอาทิตย์และก๊าซปิโตรเลียมเหลว (แอลพีจี)

เพื่อผลิตน้ำร้อนหมุนเวียนแบบธรรมชาติผ่านถังเก็บน้ำร้อนปริมาณ 50 ลิตร ขณะที่มีงานวิจัยจึงได้ออกแบบระบบแผงของฮีทไปป์รับรังสีแสงอาทิตย์ดังแสดงไว้ในภาพ 3.11 ซึ่งตั้งอยู่บนดาดฟ้าของอาคาร และได้ ออกแบบระบบผลิตน้ำร้อนด้วยแก๊สปิโตรเลียมเหลวไปยังเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและหมุนเวียนผ่านปั้มน้ำเพื่อจัดเก็บน้ำร้อนลงถังเก็บน้ำร้อนปริมาณ 50 ลิตร ซึ่งตั้งอยู่บนพื้นดินข้างต้อบที่พัฒนาขึ้นดังแสดงไว้ในภาพ 3.12

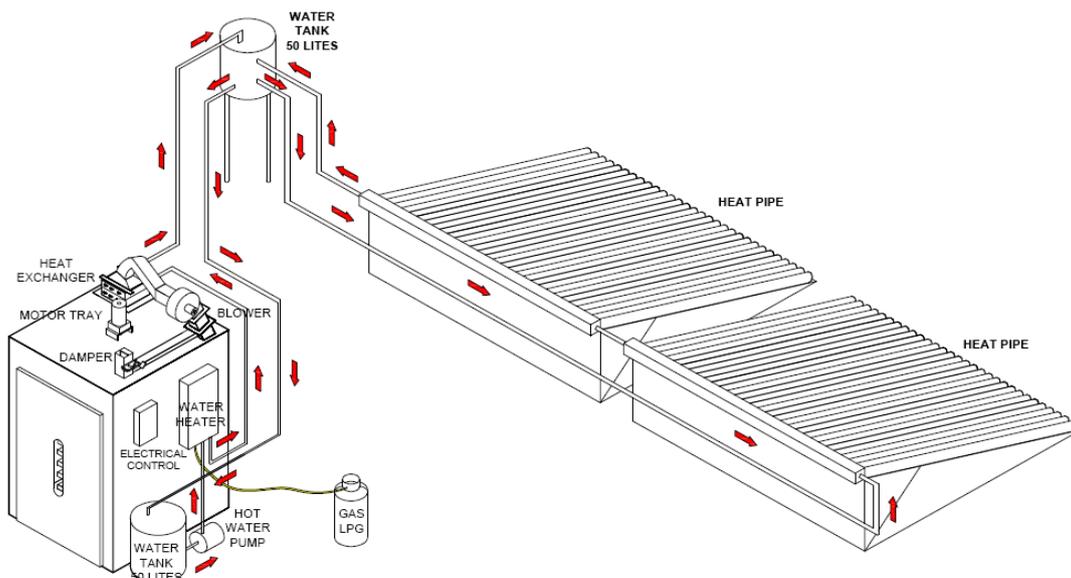


ภาพ 3.11 แผนผังระบบแผงของฮีทไปป์รับรังสีแสงอาทิตย์เพื่อผลิตน้ำร้อนหมุนเวียนแบบธรรมชาติ



ภาพ 3.12 แผนผังระบบผลิตน้ำร้อนด้วยแก๊สปิโตรเลียมเหลวร่วมกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและปั้มน้ำ

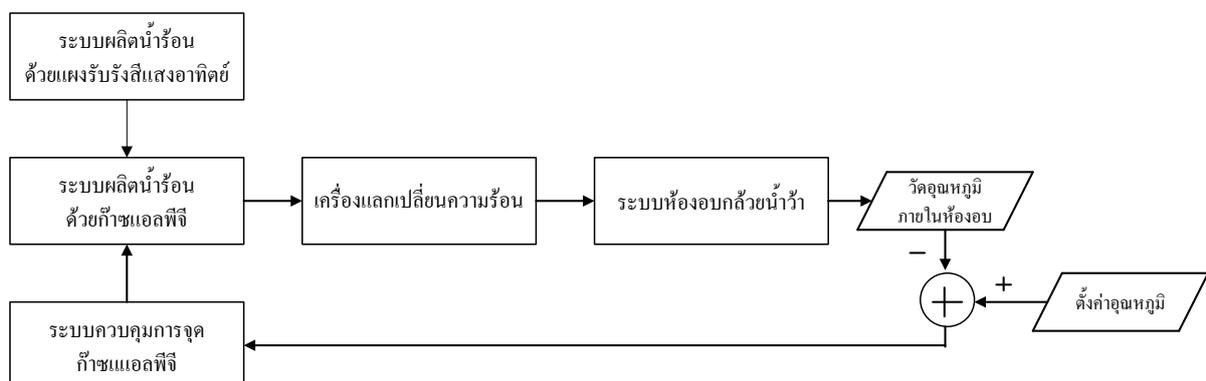
หลังการเก็บข้อมูลส่วนที่เกี่ยวข้องกับระบบแผงรับรังสีแสงอาทิตย์เพื่อผลิตน้ำร้อนหมุนเวียนแบบธรรมชาติ พบว่า มีบางช่วงเวลาและบางฤดูกาลที่ค่าความเข้มของแสงอาทิตย์มีค่าน้อยมาก คณะผู้วิจัยจึงได้วิเคราะห์ ออกแบบ และพัฒนาระบบผลิตน้ำร้อนด้วยแก๊สปิโตรเลียมเหลวมาช่วยเสริมความร้อนแก่น้ำร้อนเดิมให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นตามที่กำหนด หรืออาจสามารถใช้ระบบแผงรับรังสีแสงอาทิตย์เพื่อผลิตน้ำร้อนในช่วงมีแสงแดดเพียงอย่างเดียว ทำให้ช่วยประหยัดแก๊สปิโตรเลียมเหลว ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงนำทั้ง 2 ระบบทำงานร่วมกันเป็นระบบออบกัลยน้ำว่าดังแสดงไว้ในภาพ 3.13 ซึ่งควบคุมการกระจายลมร้อนและอุณหภูมิในห้องอบผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อใช้ผลิตอากาศร้อนบริสุทธิ์ป้อนเข้าสู่ห้องอบกัลยน้ำว่าโดยที่อากาศจะรับการถ่ายโอนความร้อนจากน้ำร้อนภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งน้ำร้อนที่ได้รับมาจากการถ่ายโอนความร้อนของการเผาไหม้ด้วยก๊าซแอลพีจีและน้ำร้อนที่ได้รับมาจากการถ่ายโอนความร้อนของท่อฮีทไปป์ด้วยแผงตัวรับรังสีแสงอาทิตย์



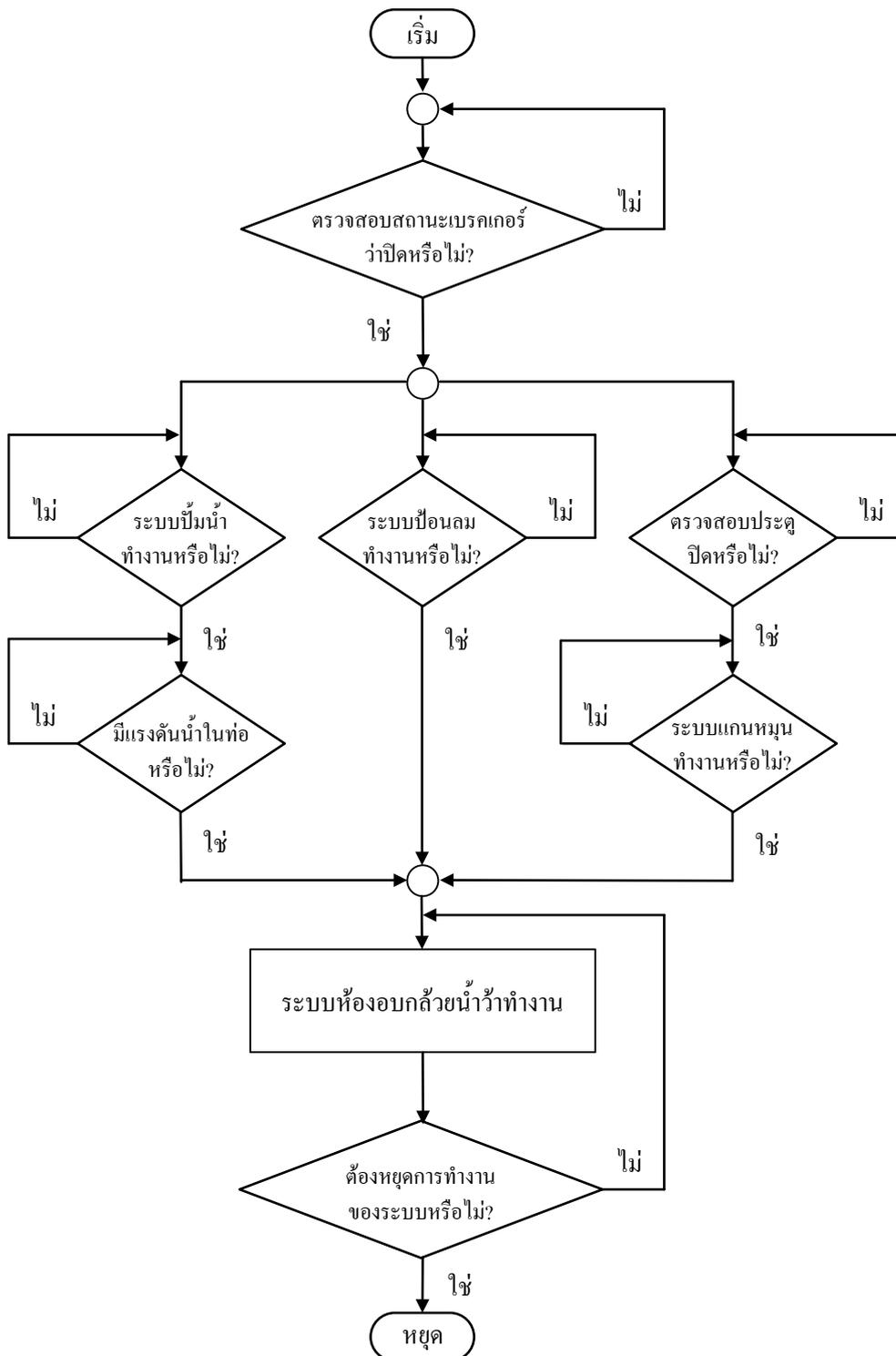
ภาพ 3.13 แผนผังระบบตู้อบกัลยน้ำว่าด้วยการใช้พลังงานความร้อนร่วมจากแสงอาทิตย์และก๊าซแอลพีจี

### 3.6 ออกแบบระบบควบคุมการทำงานของเครื่องต้นแบบระบบอบกล้วยน้ำว้าแบบควบคุมการกระจายลมร้อนและอุณหภูมิด้วยกลุ่มท่อความร้อนในระบบพลังงานร่วมจากแสงอาทิตย์และก๊าซปิโตรเลียมเหลว

ในการออกแบบระบบควบคุมการทำงานของเครื่องอบกล้วยที่พัฒนาขึ้นนี้ คณะผู้วิจัยได้คำนึงถึงระบบควบคุมการทำงานที่ไม่ซับซ้อน ราคาถูก และการบำรุงรักษาอุปกรณ์ได้โดยไม่ต้องใช้ความรู้ความชำนาญพิเศษโดยวงจรระบบควบคุมอุณหภูมิภายในห้องอบกล้วยน้ำว้า จะถูกออกแบบมาจากความเชื่อมโยงการทำงานของ 4 ระบบ คือ ระบบผลิตน้ำร้อนด้วยแผงรับรังสีแสงอาทิตย์และแก๊สปิโตรเลียมเหลว ระบบปั้มน้ำร้อนเพื่อไหลเวียนเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการถ่ายโอนความร้อนนี้ให้กับอากาศ ระบบป้อนอากาศร้อน และระบบแกนกลางหมุนถาดรองรับกล้วยน้ำว้า เพื่อให้การกระจายลมร้อนกระทบกับกล้วยน้ำว้ามากที่สุด สำหรับการทำงานพื้นฐานของวงจรระบบควบคุมอุณหภูมิภายในห้องอบกล้วยน้ำว้า เริ่มต้นด้วยการตรวจสอบความพร้อมการทำงานของระบบห้องอบกล้วยน้ำว้าตามขั้นตอนการทำงานในภาพ 3.15 คณะผู้วิจัยได้ออกแบบวงจรตรวจสอบสถานะความพร้อมในการป้อนพลังงานไฟฟ้าเข้าสู่อุปกรณ์ในระบบต่างๆ ผ่านทางสวิตซ์ตัดตอนไฟฟ้าก่อน ต่อมาได้ออกแบบและสร้างวงจรรวมการควบคุมการทำงานของระบบปั้มน้ำร้อนที่ใช้ไหลเวียนในระบบโดยที่น้ำร้อนเหล่านี้ผลิตมาจากการถ่ายโอนความร้อนจากของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์และแก๊สปิโตรเลียมเหลว จากนั้นออกแบบและสร้างวงจรรวมการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ปั้มน้ำร้อนเข้าสู่ห้องอบกล้วยน้ำว้าโดยที่อากาศร้อนที่ได้รับมาจากอากาศหมุนเวียนภายในห้องอบที่ไหลผ่านกลุ่มท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งได้รับการถ่ายโอนความร้อนมาจากน้ำร้อน รวมทั้งได้ออกแบบและสร้างวงจรรวมระบบแกนกลางหมุนถาดรองรับกล้วยน้ำว้าพร้อมทั้งได้ออกแบบและสร้างระบบรักษาความปลอดภัยซึ่งมีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดสถานะการปิดเปิดประตูห้องอบด้วย กล่าวคือ ถ้ามีการเปิดประตูทิ้งไว้มอเตอร์สำหรับขับเคลื่อนแกนกลางจะไม่ทำงาน หลังจากนั้น ได้ออกแบบและสร้างระบบควบคุมอุณหภูมิภายในห้องอบกล้วยน้ำว้าตามภาพ 3.14 หากอุณหภูมิของอากาศร้อนภายในห้องอบมีค่าสูงกว่าค่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้ ระบบควบคุมการจุดก๊าซแอลพีจี จะสั่งการให้หยุดผลิตน้ำร้อนด้วยก๊าซแอลพีจีโดยจะใช้น้ำร้อนที่ผลิตจากแผงรับรังสีแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว แต่ถ้าอุณหภูมิอากาศภายในห้องอบต่ำกว่าค่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้ ระบบควบคุมการจุดก๊าซแอลพีจี จะสั่งการให้ระบบผลิตน้ำร้อนด้วยก๊าซแอลพีจีทำงานร่วมกับระบบผลิตน้ำร้อนที่ได้รับจากแผงรับรังสีแสงอาทิตย์



ภาพ 3.14 แผนผังระบบควบคุมอุณหภูมิภายในห้องอบกล้วยน้ำว้า



ภาพ 3.15 แผนผังขั้นตอนการควบคุมการทำงานของระบบห้องอบกลั่นน้ำว่า

## บทที่ 4 ผลการวิจัย

ในบทนี้ จะกล่าวถึงผลการวิจัยที่ได้รับจากการทดลองและทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องอบกล้วยน้ำว้าแบบควบคุมการกระจายอุณหภูมิโดยการประยุกต์ใช้ท่อความร้อนในระบบพลังงานร่วมแสงอาทิตย์และก๊าซปิโตรเลียมเหลวที่ได้พัฒนาขึ้นตามระเบียบวิธีการออกแบบทั้งภาคฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ในบทที่ 3 รวมทั้งนำเสนอผลการทดลองด้านเทคนิค (ในแง่ของต้นทุนพลังงาน) และด้านเศรษฐศาสตร์ (ในแง่ของความคุ้มค่าในการลงทุน) ของเครื่องที่พัฒนาขึ้นดังแสดงไว้ในภาพ 4.2 มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้รับจากเครื่องของผู้ประกอบการดังแสดงไว้ในภาพ 4.1 จากร้านเจ็ม่วยภายใต้เงื่อนไขสัดส่วนการระเหยของน้ำอยู่ภายในกล้วยดิบเท่ากัน



ภาพ 4.1 เครื่องอบกล้วยน้ำว้าแบบเผาตรงด้วยก๊าซปิโตรเลียมเหลวของผู้ประกอบการจากร้านเจ็ม่วย



(ก) ด้านหน้าตู้อบ

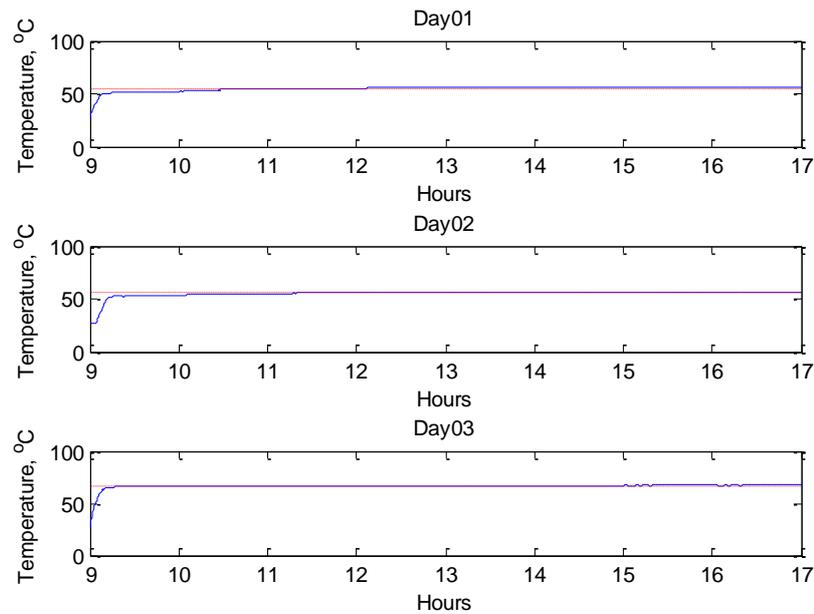


(ข) ภายในตู้อบ

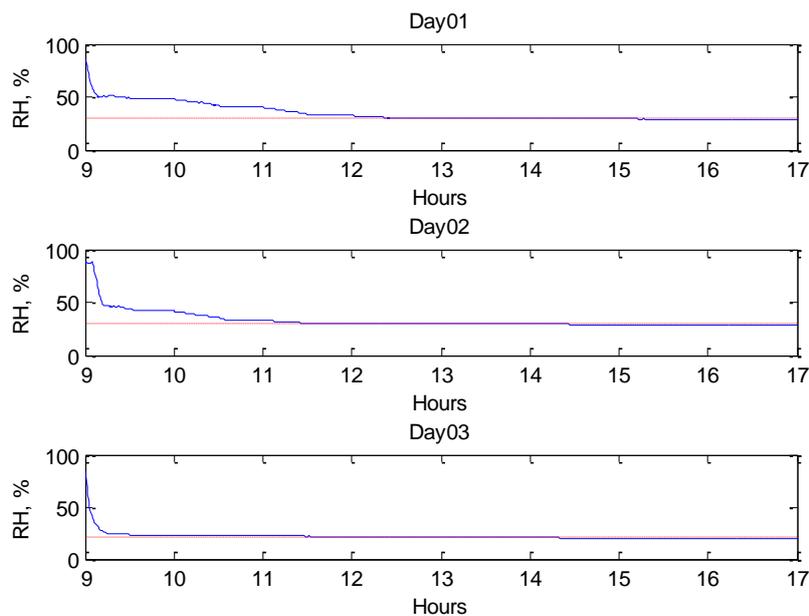
ภาพ 4.2 เครื่องอบกล้วยน้ำว้าแบบควบคุมการกระจายอุณหภูมิโดยการประยุกต์ใช้ท่อความร้อนในระบบพลังงานร่วมแสงอาทิตย์และก๊าซปิโตรเลียมเหลวที่ได้พัฒนาขึ้น

#### 4.1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพเครื่องอบกล้วยน้ำว้าของผู้ประกอบการจากร้านเจ็มว้ย

เมื่อนำกล้วยน้ำว้าดิบปริมาณ 60.9 กิโลกรัม (kg) วางกระจายสม่ำเสมอบนถาดแต่ละชั้นภายในตู้อบแบบเผาตรงด้วยก๊าซปิโตรเลียมเหลวของผู้ประกอบการจากร้านเจ็มว้ย และใช้เวลาในการอบกล้วยน้ำว้าเหล่านี้ 24 ชั่วโมง จำนวน 3 วัน ด้วยการควบคุมอุณหภูมิ 60 °C ในช่วงเวลา 9.00 – 17.00 น. ของวันที่หนึ่งและวันที่สอง และควบคุมอุณหภูมิ 70 °C ในช่วงเวลา 9.00 – 17.00 น. ของวันที่สาม ในแต่ละวันได้ทำการบันทึกข้อมูลของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในตู้อบได้ดังแสดงไว้ในภาพ 4.3 และภาพ 4.4 ตามลำดับ



ภาพ 4.3 ค่าของอุณหภูมิภายในตู้อบกล้วยน้ำว้าของผู้ประกอบการในแต่ละวัน



ภาพ 4.4 ค่าของความชื้นสัมพัทธ์ภายในตู้อบกล้วยน้ำว้าของผู้ประกอบการในแต่ละวัน

จากผลข้อมูลอุณหภูมิในภาพ 4.3 จะเห็นได้ว่าในแต่ละวันของการอบกล้วยของผู้ประกอบการมีค่าอุณหภูมิเท่ากับ  $27.8^{\circ}\text{C}$ ,  $27.6^{\circ}\text{C}$  และ  $27.8^{\circ}\text{C}$  ในวันที่หนึ่ง สอง และสาม ตามลำดับ ส่วนผลข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ในภาพ 4.4 พบว่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในตู้อบแต่ละวันมีค่าเท่ากับ 85.7%, 85.7% และ 83.5% ในวันที่หนึ่ง สอง และสาม ตามลำดับ หลังจากสิ้นสุดการทดลองการอบกล้วยในแต่ละวัน คณะผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลปริมาณค่าของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในตู้อบดังแสดงไว้ในตาราง 4.1

ตาราง 4.1 ปริมาณอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้รับจากการอบกล้วยของผู้ประกอบการ

วันที่ทดสอบ	อุณหภูมิ [ $^{\circ}\text{C}$ ]				ความชื้นสัมพัทธ์ [%]		
	ตั้งค่า	เริ่มต้น	เฉลี่ย	สุดท้าย	เริ่มต้น	เฉลี่ย	สุดท้าย
หนึ่ง	60.0	27.8	55.2	55.8	85.7	29.9	28.7
สอง	60.0	27.6	55.5	55.9	87.7	29.4	28.7
สาม	70.0	27.8	66.8	67.4	83.5	20.5	19.0

ต่อมาในแต่ละวันได้บันทึกผลข้อมูลปริมาณการใช้พลังงานในรูปแบบพลังงานไฟฟ้าในหน่วยไฟฟ้า (kwh) และพลังงานความร้อนโดยการใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) ในหน่วยมวลของก๊าซ (kg) ซึ่งการบันทึกผลข้อมูลมวลของกล้วยที่ใช้อบและพลังงานต่างๆ ที่ใช้ในแต่ละวันได้แสดงไว้ในตารางที่ 4-2 ซึ่งจะพบว่าวัตถุดิบของกล้วยน้ำว้าก่อนอบได้เท่ากับ 60.9 kg และเมื่อได้ผ่านการอบด้วยตู้อบกล้วยของผู้ประกอบการวันละ 8 ชั่วโมง รวมระยะเวลาการอบกล้วยทั้งหมด 24 ชั่วโมง ได้วัตถุดิบของกล้วยเท่ากับ 26.6 kg ทำให้ทราบว่ามีมวลของกล้วยที่หายไปเกิดขึ้นจากมวลของน้ำที่ระเหยออกจากตู้อบเท่ากับ 34.3 kg หรือคิดเป็น 56.32% ของมวลของกล้วยที่เริ่มต้น โดยใช้พลังงานไฟฟ้าจำนวน 8.9 kwh และใช้ก๊าซก๊าซปิโตรเลียมเหลวจำนวน 9 kg

ตาราง 4.2 ผลการบันทึกข้อมูลปริมาณมวลกล้วยและค่าพลังงานที่ใช้กับเครื่องอบกล้วยของผู้ประกอบการ

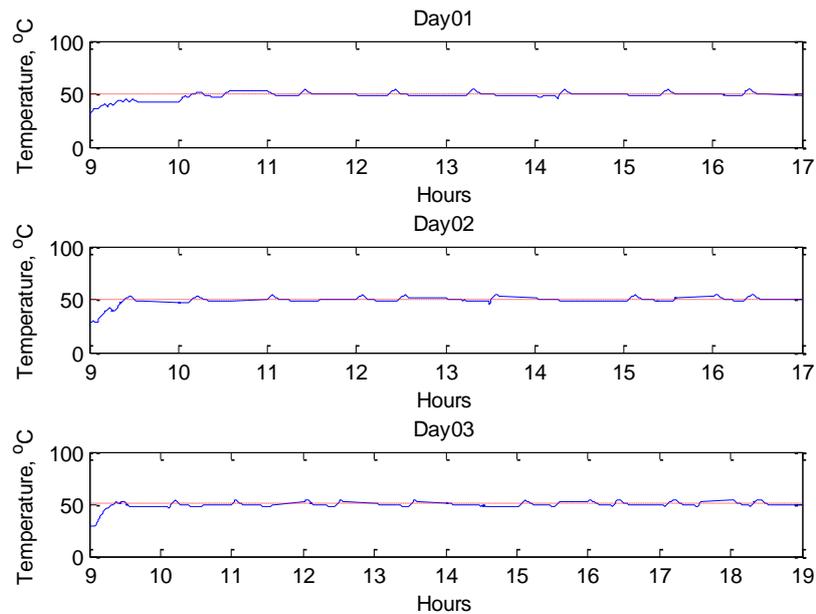
วันที่ทดสอบ	อุณหภูมิตั้งค่า [ $^{\circ}\text{C}$ ]	ปริมาณกล้วย (kg)			หน่วยไฟฟ้า (kwh)			ก๊าซ LPG (kg)		
		เริ่มต้น	สุดท้าย	ลดลง	เริ่มต้น	สุดท้าย	เพิ่มขึ้น	เริ่มต้น	สุดท้าย	ลดลง
หนึ่ง	60	60.9	55.0	5.9	1.8	4.7	2.9	29.0	25.8	3.2
สอง	60	55.0	31.1	23.9	4.7	7.6	2.9	25.8	23.2	2.6
สาม	70	31.1	26.6	4.5	7.6	10.7	3.1	23.2	20.0	3.2
			รวม	34.3		รวม	8.9		รวม	9.0

#### 4.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพเครื่องอบกล้วยน้ำว้าที่คณะผู้วิจัยพัฒนาขึ้น

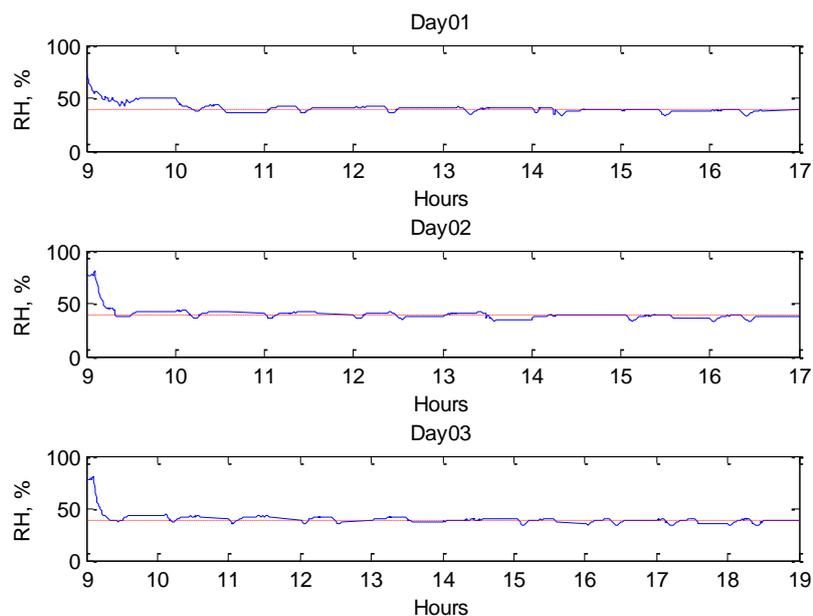
เนื่อหาบทส่วนย่อยนี้ คณะผู้วิจัยได้ทดลองการเดินตู้อบที่พัฒนาขึ้นด้วยอัตราการไหลของน้ำผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในระบบคงที่เท่ากับ 2.75 ลิตรต่อวินาที อัตราการไหลของอากาศภายในตู้อบกล้วยคงที่เท่ากับ 1 เมตรต่อวินาที และอัตราการหมุนของถาดบนแกนหมุนกลางคงที่เท่ากับ 5 รอบต่อวินาที รวมทั้งได้ทดสอบการอบกล้วยดิบ 2 กรณี คือ กรณีแรก การอบกล้วยดิบปริมาณมวล 69.9 kg ที่ควบคุมอุณหภูมิตั้งค่า  $50.0^{\circ}\text{C}$  รวมเวลาการอบ 26 ชั่วโมง และกรณีสอง การอบกล้วยดิบปริมาณมวล 76.3 kg ที่ควบคุมอุณหภูมิตั้งค่า  $55.0^{\circ}\text{C}$  รวมเวลาการอบ 14 ชั่วโมง ภายใต้เงื่อนไขสัดส่วนการระเหยของน้ำในกล้วยดิบเท่ากันกับกรณีการอบที่ได้รับจากร้านเจมวี่ซึ่งได้แสดงผลการทดสอบดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อย่อย 4.1

4.2.1 กรณีที่หนึ่ง: ผลการอบกล้วยดิบ 69.9 kg ที่ควบคุมอุณหภูมิตั้งค่า 50 °C ระยะเวลา 26 ชั่วโมง

เมื่อป้อนกล้วยดิบ (กล้วยน้ำว้า) ปริมาณ 69.9 kg วางกระจายสม่ำเสมอบนถาดแต่ละชั้นที่ยึดติดกับแกนหมุนกลางภายในตู้อบที่พัฒนาขึ้น และใช้เวลาในการอบกล้วยดิบนานถึง 26 ชั่วโมง จำนวน 3 วัน ด้วยการควบคุมอุณหภูมิตั้งค่าคงที่เท่ากับ 50 °C ในช่วงเวลา 9.00 – 17.00 น. ของวันที่หนึ่งและวันที่สอง สำหรับวันที่สามต้องใช้เวลาเพิ่มขึ้นโดยเวลาการอบเริ่มจาก 9.00 น. ถึง 19.00 น. ในแต่ละวัน ได้ทำการบันทึกข้อมูลของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่เกิดขึ้นภายในตู้อบดังแสดงไว้ในภาพ 4-5 และภาพ 4-6 ตามลำดับ



ภาพ 4.5 ค่าของอุณหภูมิภายในตู้อบกล้วยน้ำว้าในแต่ละวันของเครื่องอบที่พัฒนาขึ้นกรณีหนึ่งที่หนึ่ง

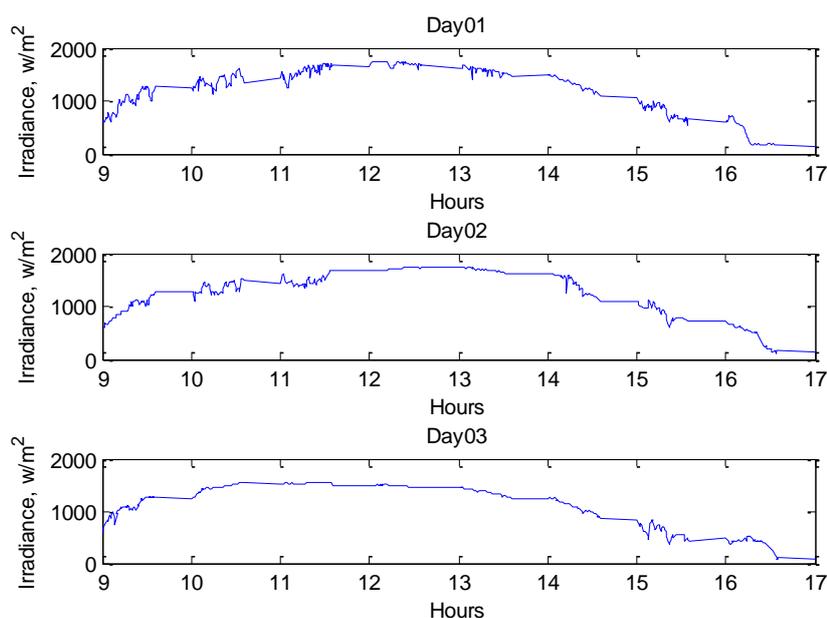


ภาพ 4.6 ค่าของความชื้นสัมพัทธ์ภายในตู้อบกล้วยน้ำว้าในแต่ละวันของเครื่องอบที่พัฒนาขึ้นกรณีหนึ่งที่หนึ่ง

จากผลข้อมูลอุณหภูมิในภาพ 4.5 ในแต่ละวันของการอบกล้วยดิบของตูบที่พัฒนาขึ้นจะพบว่ามีค่าของอุณหภูมิเริ่มต้นภายในตูบเท่ากับ 30.4 °C, 29.0 °C และ 28.4 °C ในวันที่หนึ่ง สอง และสาม ตามลำดับ ส่วนผลข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ในภาพ 4.6 จะเห็นได้ว่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในตูบแต่ละวันมีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 72.9%, 77.5% และ 77.5% ในวันที่หนึ่ง สอง และสาม ตามลำดับ หลังจากสิ้นสุดการทดลองการอบกล้วยในแต่ละวัน คณะผู้วิจัยได้เก็บรวบรวมข้อมูลปริมาณค่าของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในตูบดังแสดงไว้ในตาราง 4-3 นอกจากนี้ยังได้บันทึกค่าความเข้มของแสงอาทิตย์บริเวณแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ที่สอดคล้องกับช่วงเวลาที่ดำเนินการอบกล้วยแต่ละวันดังแสดงเป็นเส้นโค้งข้อมูลในภาพ 4.7

ตาราง 4.3 ปริมาณอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้รับจากการอบกล้วยของคณะผู้วิจัยกรณีทีหนึ่ง

วันที่ทดสอบ	อุณหภูมิ [°C]				ความชื้นสัมพัทธ์ [%]		
	ตั้งค่า	เริ่มต้น	เฉลี่ย	สุดท้าย	เริ่มต้น	เฉลี่ย	สุดท้าย
หนึ่ง	50.0	30.4	49.8	49.2	72.9	38.9	38.9
สอง	50.0	29.0	49.9	49.4	77.5	38.5	38.4
สาม	50.0	28.4	50.1	49.3	77.5	38.2	38.1



ภาพ 4.7 ค่าความเข้มของแสงอาทิตย์ที่ใช้ในการอบกล้วยแต่ละวันของเครื่องอบที่พัฒนาขึ้นกรณีทีหนึ่ง

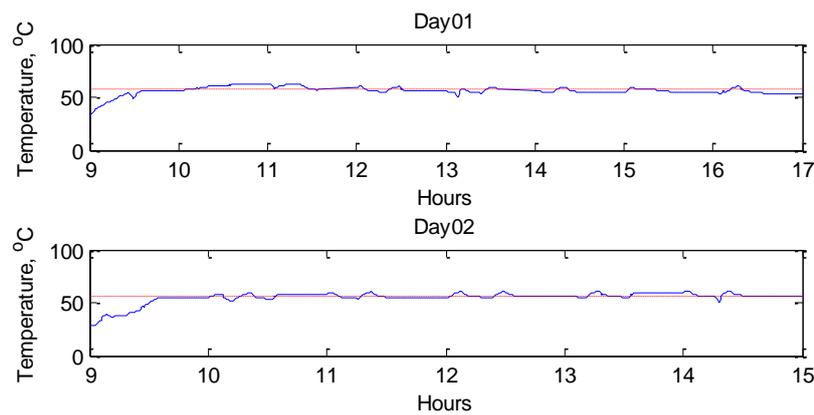
ต่อมาในแต่ละวันได้บันทึกผลข้อมูลปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในหน่วยไฟฟ้าและพลังงานความร้อนในหน่วยมวลของก๊าซซึ่งการบันทึกผลข้อมูลมวลของกล้วยที่ใช้ออบและพลังงานต่างๆ ที่ใช้ในแต่ละวันได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.4 ซึ่งพบว่าวัตถุมวลของกล้วยน้ำว้าก่อนการอบได้เท่ากับ 66.9 kg และเมื่อได้ผ่านการอบด้วยตูบกล้วยที่พัฒนาขึ้นทั้ง 3 วัน รวมระยะเวลาการอบ 26 ชั่วโมง ได้วัตถุมวลของกล้วยเท่ากับ 32.4 kg ทำให้ทราบว่ามีมวลของน้ำที่ระเหยออกจากตูบเท่ากับ 37.5 kg หรือคิดเป็น 53.6% ของมวลของกล้วยที่เริ่มต้น โดยใช้พลังงานไฟฟ้าจำนวน 22.1 kwh และใช้ก๊าซก๊าซปิโตรเลียมเหลวจำนวน 6.2 kg

ตาราง 4.4 ผลการบันทึกข้อมูลปริมาณมวลกล้วยและค่าพลังงานที่ใช้กับเครื่องอบกล้วยที่พัฒนาขึ้นกรณีที่หนึ่ง

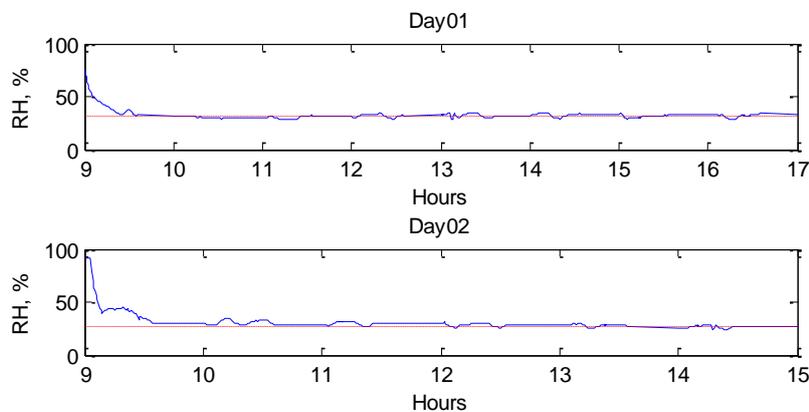
วันที่ทดสอบ	อุณหภูมิตั้งค่า [°C]	ปริมาณกล้วย (kg)			หน่วยไฟฟ้า (kwh)			ก๊าซ LPG (kg)		
		เริ่มต้น	สุดท้าย	ลดลง	เริ่มต้น	สุดท้าย	เพิ่มขึ้น	เริ่มต้น	สุดท้าย	ลดลง
หนึ่ง	50	69.9	68.4	1.5	162.6	169.2	6.6	32.0	30.0	2.0
สอง	50	68.4	41.2	27.2	169.2	175.5	6.3	30.0	27.9	2.1
สาม	50	41.2	32.4	8.8	175.5	184.7	9.2	27.9	25.8	2.1
			รวม	37.5		รวม	22.1		รวม	6.2

4.2.2 กรณีที่สอง: ผลการอบกล้วยดิบ 76.3 kg ที่ควบคุมอุณหภูมิตั้งค่า 55 °C ระยะเวลา 14 ชั่วโมง

เมื่อป้อนกล้วยดิบ (กล้วยน้ำว้า) ปริมาณ 76.3 kg วางกระจายสม่ำเสมอบนนภาแต่ระดับที่ยึดติดกับแกนหมุนกลางภายในตู้อบที่พัฒนาขึ้น และใช้เวลาในการอบกล้วยดิบนานถึง 14 ชั่วโมง จำนวน 2 วัน ด้วยการควบคุมอุณหภูมิตั้งค่าคงที่เท่ากับ 55 °C ในช่วงเวลา 9.00 – 17.00 น. ของวันที่หนึ่งและสำหรับวันที่สอง ใช้เวลาลดลงโดยเวลาการอบเริ่มจาก 9.00 น. ถึง 15.00 น. ในแต่ละวัน ได้ทำการบันทึกข้อมูลของค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่เกิดขึ้นภายในตู้อบดังแสดงไว้ในภาพ 4.8 และภาพ 4.9 ตามลำดับ



ภาพ 4.8 ค่าของอุณหภูมิภายในตู้อบกล้วยน้ำว้าในแต่ละวันของเครื่องอบที่พัฒนาขึ้นกรณีที่สอง

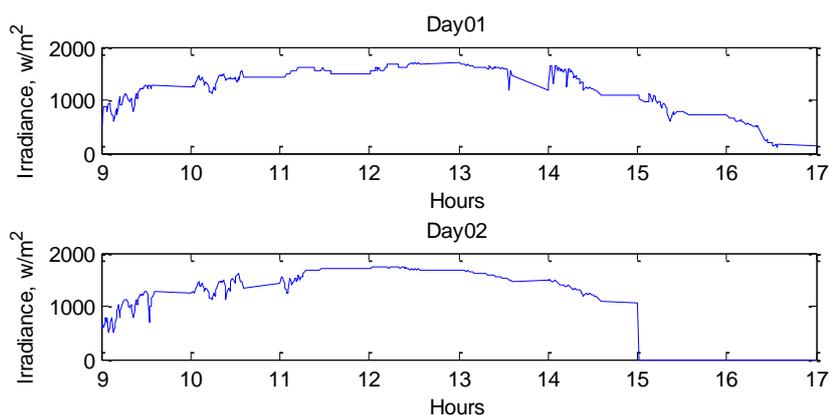


ภาพ 4.9 ค่าของความชื้นสัมพัทธ์ภายในตู้อบกล้วยน้ำว้าในแต่ละวันของเครื่องอบที่พัฒนาขึ้นกรณีที่สอง

จากผลข้อมูลอุณหภูมิในภาพ 4.8 ในแต่ละวันของการอบกล้วยดิบของตู้อบที่พัฒนาขึ้น จะเห็นได้ว่ามีค่าของอุณหภูมิเริ่มต้นภายในตู้อบเท่ากับ  $31.6^{\circ}\text{C}$  และ  $29.0^{\circ}\text{C}$  ในวันที่หนึ่งและสอง ตามลำดับ ส่วนผลข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ในภาพ 4.9 จะเห็นได้ว่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในตู้อบแต่ละวันมีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 75.0% และ 91.0% ในวันที่หนึ่งและสอง ตามลำดับ หลังจากสิ้นสุดการทดลองการอบกล้วยในแต่ละวัน คณะผู้วิจัยได้เก็บรวบรวมข้อมูลปริมาณค่าของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในตู้อบดังแสดงไว้ในตาราง 4.5 นอกจากนี้ยังได้บันทึกค่าความเข้มของแสงอาทิตย์บริเวณแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ที่สอดคล้องกับช่วงเวลาที่กำลังดำเนินการอบกล้วยแต่ละวันดังแสดงเป็นเส้นโค้งข้อมูลในภาพ 4.10

ตาราง 4.5 ปริมาณอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้รับจากการอบกล้วยของคณะผู้วิจัยกรณีที่สอง

วันที่ทดสอบ	อุณหภูมิ [ $^{\circ}\text{C}$ ]				ความชื้นสัมพัทธ์ [%]		
	ตั้งค่า	เริ่มต้น	เฉลี่ย	สุดท้าย	เริ่มต้น	เฉลี่ย	สุดท้าย
หนึ่ง	55.0	31.6	57.0	53.4	75.0	32.0	33.7
สอง	55.0	29.0	56.8	55.7	91.0	27.6	27.6



ภาพ 4.10 ค่าความเข้มของแสงอาทิตย์ที่ใช้ในการอบกล้วยแต่ละวันของเครื่องอบที่พัฒนาขึ้นกรณีที่สอง

ในแต่ละวันระหว่างการอบกล้วย ทีมงานของคณะผู้วิจัยได้บันทึกข้อมูลปริมาณการใช้พลังงานของตู้อบที่พัฒนาขึ้นลงในตารางที่ 4.6 ซึ่งจะพบว่าวัตถุดิบของกล้วยน้ำว้าก่อนการอบได้เท่ากับ 76.3 kg และเมื่อได้ผ่านการอบด้วยตู้อบกล้วยที่พัฒนาขึ้นทั้ง 2 วัน รวมระยะเวลาการอบ 14 ชั่วโมง ได้วัตถุดิบของกล้วยเท่ากับ 33.3 kg ทำให้ทราบว่ามีผลของน้ำที่ระเหยออกทางปล่องระบาย 43.0 kg หรือคิดได้เป็น 56.4% ของมวลของกล้วยที่เริ่มต้น โดยมีค่าพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 11.0 kwh และใช้ก๊าซก๊าชปิโตรเลียมเหลวจำนวน 7.8 kg

ตาราง 4.6 ผลการบันทึกข้อมูลปริมาณมวลกล้วยและค่าพลังงานที่ใช้กับเครื่องอบกล้วยที่พัฒนาขึ้นกรณีที่สอง

วันที่ทดสอบ	อุณหภูมิตั้งค่า [ $^{\circ}\text{C}$ ]	ปริมาณกล้วย (kg)			หน่วยไฟฟ้า (kwh)			ก๊าซ LPG (kg)		
		เริ่มต้น	สุดท้าย	ลดลง	เริ่มต้น	สุดท้าย	เพิ่มขึ้น	เริ่มต้น	สุดท้าย	ลดลง
หนึ่ง	50	76.3	47.9	28.4	79.8	85.9	6.1	21.5	16.1	5.4
สอง	50	47.9	33.3	14.6	85.9	90.8	4.9	16.1	13.7	2.4
		รวม		43.0	รวม		11.0	รวม		7.8

#### 4.3 ผลการเปรียบเทียบข้อมูลพารามิเตอร์ในการอบกล้วยของตู้อบที่พัฒนาขึ้นกับตู้อบของผู้ประกอบการ

เพื่อหาประสิทธิภาพการใช้พลังงานของตู้อบที่พัฒนาขึ้นกับตู้อบกล้วยของผู้ประกอบการจากร้านเจ็ม่วย คณะผู้วิจัยได้นำผลข้อมูลการใช้พลังงานในการอบกล้วยดังตาราง 4.2, 4.4 และ 4.6 มาเปรียบเทียบดังแสดง รายละเอียดปริมาณต่างๆ ของข้อมูลพารามิเตอร์ไว้ในตาราง 4.7 จะเห็นได้ว่าค่าพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการอบกล้วยต่อมวลของน้ำที่ระเหยออกจากกล้วยเท่ากับ 14.1 MJ/kg สำหรับเครื่องอบจากร้านเจ็ม่วย, 10.4 MJ/kg สำหรับเครื่องอบกล้วยซึ่งคณะผู้วิจัยพัฒนาขึ้น (เดินเครื่องตามเงื่อนไขที่หนึ่ง) และ 10.0 MJ/kg สำหรับเครื่องอบกล้วยซึ่งคณะผู้วิจัยพัฒนาขึ้น (เดินเครื่องตามเงื่อนไขที่สอง)

ตาราง 4.7 การเปรียบเทียบข้อมูลพารามิเตอร์ในการอบกล้วยของตู้อบที่พัฒนาขึ้นกับตู้อบของผู้ประกอบการ

ข้อมูลพารามิเตอร์	ปริมาณที่ได้รับจากเครื่องอบกล้วย		
	ร้านเจ็ม่วย	กรณีที่หนึ่ง	กรณีที่สอง
1) จำนวนวัน (วัน)	3.0	3.0	2.0
2) จำนวนชั่วโมง (ชั่วโมง)	24.0	26.0	14.0
3) มวลของกล้วยดิบเริ่มต้น (กิโลกรัม)	60.9	69.9	76.3
4) มวลของกล้วยหลังการอบ (กิโลกรัม)	26.6	32.4	33.3
5) มวลของน้ำที่ระเหยออกจากกล้วย (กิโลกรัม)	34.3	37.5	43.0
6) ค่าพลังงานของก๊าซ LPG ที่ใช้ในการอบ			
6.1) ในหน่วยกิโลกรัม (kg)	9.0	6.2	7.8
6.2) ในหน่วยเมกะจูล (MJ)	452.1	311.4	391.8
7) ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบ			
7.1) ในหน่วยไฟฟ้า (kwh)	8.9	22.1	11.0
7.2) ในหน่วยเมกะจูล (MJ)	32.0	79.6	39.6
8) ค่าพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการอบ (MJ)	484.1	391.0	431.4
9) ค่าพลังงานทั้งหมดที่ใช้ต่อมวลของกล้วยดิบ (MJ/kg)	7.9	5.6	5.7
10) ค่าพลังงานทั้งหมดที่ใช้ต่อมวลกล้วยหลังการอบ (MJ/kg)	18.2	12.1	13.0
11) ค่าพลังงานทั้งหมดที่ใช้ต่อมวลของน้ำที่ระเหยออกจากกล้วย (MJ/kg)	14.1	10.4	10.0
12) ราคาต้นทุนของการสร้างเครื่องอบกล้วย			
12.1) เครื่องต้นแบบ (บาทต่อเครื่อง)	150,000	680,000	680,000
12.2) เครื่องเพื่อผลิตเชิงพาณิชย์หรือหลายเครื่อง (บาทต่อเครื่อง)	150,000	330,000	330,000
13) ค่าบำรุงรักษาเครื่องอบกล้วย (บาทต่อเครื่องต่อปี)	500	500	500

**หมายเหตุ:** ค่าพลังงานความร้อนของก๊าซปิโตรเลียมจำนวน 1 kg เท่ากับ 50.23 MJ และค่าพลังงานความร้อนของพลังงานไฟฟ้าจำนวน 1 kwh เท่ากับ 3.6 MJ โดยที่ขนาดของเครื่องอบมีความกว้าง $\times$ ลึก $\times$ สูง เท่ากับ 1.44 $\times$ 0.87 $\times$ 1.55 (1.94 เมตร<sup>3</sup>) และ 1.08 $\times$ 1.20 $\times$ 1.64 (2.13 เมตร<sup>3</sup>) ของร้านเจ็ม่วยและเครื่องที่นักวิจัยพัฒนาขึ้น ตามลำดับ

4.4 ผลการเปรียบเทียบข้อมูลทางกายภาพและเคมีของกล้วยตากที่ผ่านกระบวนการอบด้วยตู้อบที่พัฒนาขึ้น กับตู้อบของผู้ประกอบการ

เพื่อเปรียบเทียบคุณภาพของกล้วยตากที่ผ่านกระบวนการอบด้วยตู้อบที่พัฒนาขึ้นเทียบกับตู้อบของผู้ประกอบการ พบว่า คุณภาพของกล้วยตากที่ผ่านกระบวนการอบด้วยตู้อบที่พัฒนาขึ้นมีคุณภาพใกล้เคียงกับผู้ประกอบการ (เจ็มว่ย) ทั้งทางด้านกายภาพ ได้แก่ ขนาดความกว้าง ยาว น้ำหนัก ความแน่นเนื้อ และค่าสี (ตารางที่ 4.8-4.14) ด้านเคมี ได้แก่ ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ Water Activity (AW) และความชื้น เมื่อนำไปวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติพบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ซึ่งชี้ให้เห็นว่า ผู้ประกอบการสามารถนำตู้อบที่พัฒนาขึ้นไปใช้แทนตู้อบเดิมที่มีอยู่ได้ โดยจะสามารถผลิตกล้วยตากที่มีคุณภาพดีไม่แตกต่างจากตู้อบของผู้ประกอบการ ซึ่งนอกจากได้กล้วยตากที่มีคุณภาพดี สม่่าเสมอเป็นที่ต้องการของตลาดแล้ว กล้วยตากยังปราศจากการปนเปื้อนที่เกิดจากตู้อบบแบบเดิมอีกด้วย

ตารางที่ 4.8 การเปรียบเทียบขนาดความกว้างของกล้วยตากที่ผ่านกระบวนการอบด้วยตู้อบที่พัฒนาขึ้นกับตู้อบของผู้ประกอบการ

กลุ่มผู้ผลิต	ระยะเวลาในการอบด้วยตู้อบเพียงอย่างเดียว		t-test
	0 ชั่วโมง	24 ชั่วโมง	
ร้านเจ็มว่ย	2.74±0.00	2.34±0.21	4.3027
มหาวิทยาลัยนเรศวร	2.52±0.00	1.95±0.03	4.3027

ตารางที่ 4.9 การเปรียบเทียบขนาดความยาวของกล้วยตากที่ผ่านกระบวนการอบด้วยตู้อบที่พัฒนาขึ้นกับตู้อบของผู้ประกอบการ

กลุ่มผู้ผลิต	ระยะเวลาในการอบด้วยตู้อบเพียงอย่างเดียว		t-test
	0 ชั่วโมง	24 ชั่วโมง	
ร้านเจ็มว่ย	7.00±0.00	5.93±0.18	4.3027
มหาวิทยาลัยนเรศวร	8.44±0.00	6.90±0.20	4.3027

ตารางที่ 4.10 การเปรียบเทียบน้ำหนักของกล้วยตาก (กรัม/ลูก) ที่ผ่านกระบวนการอบด้วยตู้อบที่พัฒนาขึ้นกับตู้อบของผู้ประกอบการ

กลุ่มผู้ผลิต	ระยะเวลาในการอบด้วยตู้อบเพียงอย่างเดียว		t-test
	0 ชั่วโมง	24 ชั่วโมง	
ร้านเจ็มว่ย	39.60±0.01	19.20±1.06	4.3027
มหาวิทยาลัยนเรศวร	42.00±0.01	20.67±1.15	4.3027

ตารางที่ 4.11 การเปรียบเทียบค่าความแน่นเนื้อของกล้วยตากที่ผ่านกระบวนการอบด้วยตู้อบที่พัฒนาขึ้นกับตู้อบของผู้ประกอบการ

กลุ่มผู้ผลิต	ระยะเวลาในการอบด้วยตู้อบเพียงอย่างเดียว		t-test
	0 ชั่วโมง	24 ชั่วโมง	
ร้านเจ็ม่วย	0.098±1.39	0.306±0.02	4.3027
มหาวิทยาลัยนเรศวร	0.068±0.01	0.296±0.03	4.3027

ตารางที่ 4.12 การเปรียบเทียบค่าที่แสดงความเป็นสีแดงหรือเขียว (a\*) ของกล้วยตากที่ผ่านกระบวนการอบด้วยตู้อบที่พัฒนาขึ้นกับตู้อบของผู้ประกอบการ

กลุ่มผู้ผลิต	ระยะเวลาในการอบด้วยตู้อบเพียงอย่างเดียว		t-test
	0 ชั่วโมง	24 ชั่วโมง	
ร้านเจ็ม่วย	15.16±0.00	22.91±0.45	4.3027
มหาวิทยาลัยนเรศวร	16.24±0.00	20.45±0.90	4.3027

หมายเหตุ +a หมายถึง แสดงความเป็นสีแดง

- a หมายถึง แสดงความเป็นสีเขียว

ตารางที่ 4.13 การเปรียบเทียบค่าที่แสดงความเป็นสีเหลืองหรือน้ำเงิน (b\*) ของกล้วยตากที่ผ่านกระบวนการอบด้วยตู้อบที่พัฒนาขึ้นกับตู้อบของผู้ประกอบการ

กลุ่มผู้ผลิต	ระยะเวลาในการอบด้วยตู้อบเพียงอย่างเดียว		t-test
	0 ชั่วโมง	24 ชั่วโมง	
ร้านเจ็ม่วย	26.26±0.00	24.74±0.75	4.3027
มหาวิทยาลัยนเรศวร	26.70±0.00	24.61±1.03	4.3027

หมายเหตุ +b หมายถึง แสดงความเป็นสีเหลือง

- b หมายถึง แสดงความเป็นสีน้ำเงิน

ตารางที่ 4.14 การเปรียบเทียบค่าความสว่าง (L\*) ของกล้วยตากที่ผ่านกระบวนการอบด้วยตู้อบที่พัฒนาขึ้นกับตู้อบของผู้ประกอบการ

กลุ่มผู้ผลิต	ระยะเวลาในการอบด้วยตู้อบเพียงอย่างเดียว		t-test
	0 ชั่วโมง	24 ชั่วโมง	
ร้านเจ็ม่วย	40.76±0.00	30.94±1.42	4.3027
มหาวิทยาลัยนเรศวร	46.28±0.00	31.26±1.21	4.3027

หมายเหตุ 0 หมายถึง แสดงสีมืดที่สุด

100 หมายถึง แสดงสว่างที่สุด

ตารางที่ 4.15 การเปรียบเทียบปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ( $^{\circ}$ brix) ของกล้วยตากที่ผ่านกระบวนการอบด้วยตูบที่พัฒนาขึ้นกับตูบของผู้ประกอบการ

กลุ่มผู้ผลิต	ระยะเวลาในการอบด้วยตูบเพียงอย่างเดียว		t-test
	0 ชั่วโมง	24 ชั่วโมง	
ร้านเจี๊ม่วย	26.87±0.01	70.22±4.59	4.3027
มหาวิทยาลัยนเรศวร	22.00±0.01	54.62±1.98	4.3027

ตารางที่ 4.16 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความชื้นของกล้วยตากที่ผ่านกระบวนการอบด้วยตูบที่พัฒนาขึ้นกับตูบของผู้ประกอบการ

กลุ่มผู้ผลิต	ระยะเวลาในการอบด้วยตูบเพียงอย่างเดียว		t-test
	0 ชั่วโมง	24 ชั่วโมง	
ร้านเจี๊ม่วย	63.914±0.58	21.632±0.35	4.3027
มหาวิทยาลัยนเรศวร	64.581±0.00	21.780±2.31	4.3027

ตารางที่ 4.17 การเปรียบเทียบค่า Water Activity (AW) ของกล้วยตากที่ผ่านกระบวนการอบด้วยตูบที่พัฒนาขึ้นกับตูบของผู้ประกอบการ

กลุ่มผู้ผลิต	ระยะเวลาในการอบด้วยตูบเพียงอย่างเดียว		t-test
	0 ชั่วโมง	24 ชั่วโมง	
ร้านเจี๊ม่วย	0.911±0.00	0.640±0.01	4.3027
มหาวิทยาลัยนเรศวร	0.916±0.00	0.699±0.02	4.3027

## บทที่ 5 อภิปรายและวิจารณ์ผล

ผลการทดลองและผลการวิจัยในการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องอบกล้วยน้ำว้าแบบควบคุมการกระจายอุณหภูมิของอากาศร้อนที่ไหลเวียนภายในตู้อบด้วยการใช้พลังงานความร้อนร่วมของแผงรับรังสีจากแสงอาทิตย์กับก๊าซปิโตรเลียมเหลวโดยการควบคุมการตั้งค่าอุณหภูมิที่  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  ในช่วง 3 วันของการอบกล้วย และ  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$  ในช่วง 2 วันของการอบกล้วย เปรียบเทียบผลการวิจัยของการทดสอบประสิทธิภาพที่ได้รับจากการอบกล้วยแบบเผาตรงด้วยก๊าซปิโตรเลียมเหลวของเครื่องอบกล้วยจากร้านเจ้ม่วยโดยการตั้งค่าอุณหภูมิควบคุมที่  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  ในช่วง 2 วันแรก และปรับตั้งค่าที่  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  ในวันที่สามของการอบกล้วย

### 5.1 อภิปรายและวิจารณ์ผลการทดสอบประสิทธิภาพเครื่องอบกล้วยน้ำว้าของผู้ประกอบการจากร้านเจ้ม่วย

จากผลการทดสอบในภาพ 4.3 และ 4.4 กับตาราง 4.1 และ 4.2 เมื่อนำกล้วยน้ำว้าดิบจำนวน 60.9 kg เข้าตู้อบแบบเผาตรงด้วยก๊าซปิโตรเลียมเหลวของร้านเจ้ม่วยเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จำนวน 3 วัน ด้วยการควบคุมค่าอุณหภูมิตั้งไว้  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  ในช่วงเวลา 9.00 – 17.00 น. ของสองวันแรก และปรับตั้งค่าเพิ่มขึ้นเป็น  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  ในช่วงเวลา 9.00 – 17.00 น. ของวันที่สาม พบว่าสามารถผลิตอากาศร้อนไหลเวียนภายในตู้อบโดยทำอุณหภูมิเฉลี่ยได้เท่ากับ  $55.2\text{ }^{\circ}\text{C}$  และ  $55.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  ในช่วงสองวันแรก และทำอุณหภูมิเฉลี่ยได้  $66.8\text{ }^{\circ}\text{C}$  ในวันที่สาม ซึ่งน้อยกว่าค่าที่ตั้งไว้ทั้ง 3 วัน โดยที่มีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดสมบูรณ์ระดับ  $\pm 4.16\text{ }^{\circ}\text{C}$  และต้องใช้พลังงานไฟฟ้าจำนวน 8.9 kwh และก๊าซปิโตรเลียมเหลวจำนวน 9 kg เพื่อให้มวลของน้ำระเหยออกจากกล้วยน้ำว้าจำนวน 34.3 kg ซึ่งต้องใช้พลังงานจำเพาะ (ค่าพลังงานทั้งหมดที่ใช้ต่อมวลของน้ำที่ระเหยออกจากกล้วย) เท่ากับ  $14.1\text{ MJ/kg}$  โดยที่กำหนดให้ค่าพลังงานความร้อนของก๊าซปิโตรเลียมเหลวจำนวน 1 kg เท่ากับ  $50.23\text{ MJ}$  และค่าพลังงานความร้อนของพลังงานไฟฟ้าจำนวน 1 kwh เท่ากับ  $3.6\text{ MJ}$

### 5.2 อภิปรายและวิจารณ์ผลการทดสอบประสิทธิภาพเครื่องอบกล้วยน้ำว้าที่คณะผู้วิจัยพัฒนาขึ้น

จากผลการทดสอบในภาพ 4.5 ถึง 4.7 กับตาราง 4.3 และ 4.4 เมื่อนำกล้วยน้ำว้าดิบจำนวน 69.9 kg เข้าเครื่องอบกล้วยน้ำว้าแบบควบคุมการกระจายอุณหภูมิของอากาศร้อนที่ไหลเวียนภายในตู้อบด้วยการใช้พลังงานความร้อนร่วมระหว่างแผงรับรังสีจากแสงอาทิตย์และก๊าซปิโตรเลียมเหลวเป็นเวลา 26 ชั่วโมง เป็นเวลา 3 วัน ด้วยการควบคุมค่าอุณหภูมิตั้งไว้คงที่  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  ในช่วงเวลา 9.00 – 17.00 น. ของสองวันแรก และในช่วงเวลา 9.00 น. ถึง 19.00 น. ของวันที่สาม พบว่าสามารถผลิตอากาศร้อนไหลเวียนภายในตู้อบโดยทำอุณหภูมิเฉลี่ยทั้ง 3 วันได้เท่ากับ  $49.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $49.9\text{ }^{\circ}\text{C}$  และ  $50.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าของอุณหภูมิที่ตั้งไว้ด้วยค่าเฉลี่ยความผิดพลาดสมบูรณ์ระดับ  $\pm 0.15\text{ }^{\circ}\text{C}$  และต้องใช้พลังงานไฟฟ้าจำนวน 22.1 kwh และก๊าซปิโตรเลียมเหลวจำนวน 6.2 kg เพื่อให้มวลของน้ำระเหยออกจากกล้วยน้ำว้าจำนวน 37.5 kg ซึ่งต้องใช้พลังงานจำเพาะเท่ากับ  $10.4\text{ MJ/kg}$  โดยที่แผงรับรังสีแสงจากดวงอาทิตย์อยู่ในระดับความเข้มของแสงอาทิตย์ใกล้เคียงกันในแต่ละช่วงเวลาของการอบกล้วยในแต่ละวัน

จากผลการทดสอบในภาพ 4.8 ถึง 4.10 กับตาราง 4.5 และ 4.6 เมื่อนำกล้วยน้ำว้าดิบจำนวน 76.3 kg เข้าเครื่องอบกล้วยน้ำว้าแบบควบคุมการกระจายอุณหภูมิของอากาศร้อนที่ไหลเวียนภายในตู้อบด้วยการใช้พลังงานความร้อนร่วมระหว่างแผงรับรังสีจากแสงอาทิตย์และก๊าซปิโตรเลียมเหลวเป็นเวลา 14 ชั่วโมง เป็นเวลา 2 วัน ด้วยการควบคุมค่าอุณหภูมิตั้งไว้คงที่  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$  ในช่วงเวลา 9.00 – 17.00 น. ของวันแรก และในช่วงเวลา 9.00 – 15.00 น. ของวันที่สอง พบว่าสามารถผลิตอากาศร้อนไหลเวียนภายในตู้อบโดยทำอุณหภูมิเฉลี่ยทั้ง 2 วันได้เท่ากับ  $57.0\text{ }^{\circ}\text{C}$  และ  $56.8\text{ }^{\circ}\text{C}$  ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าของอุณหภูมิที่ตั้งไว้  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$  ด้วยค่าเฉลี่ยความผิดพลาดระดับ  $\pm 1.90\text{ }^{\circ}\text{C}$  และ

ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าจำนวน 11.0 kwh และก๊าซปิโตรเลียมเหลวจำนวน 7.8 kg เพื่อให้มวลของน้ำระเหยออกจากกล้วยน้ำว้าจำนวน 43.0 kg ซึ่งต้องใช้พลังงานจำเพาะเท่ากับ 10.0 MJ/kg โดยที่แผงรับรังสีแสงจากดวงอาทิตย์อยู่ในระดับความเข้มของแสงอาทิตย์ใกล้เคียงกันในแต่ละช่วงเวลาของการอบกล้วยในแต่ละวัน

### 5.3 อภิปรายและวิจารณ์ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตู้อบที่พัฒนาขึ้นกับตู้อบของผู้ประกอบการ

เพื่อหาประสิทธิภาพการอบกล้วยของเครื่องอบที่พัฒนาขึ้นและเปรียบเทียบประสิทธิภาพตู้อบของร้านเจ็มวอย จากข้อมูลพารามิเตอร์ที่ได้สรุปไว้ในตาราง 4.7 พบว่าค่าพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการอบกล้วยต่อมวลของน้ำที่ระเหยออกจากกล้วยเท่ากับ 10.4 MJ/kg และ 10.0 MJ/kg สำหรับเครื่องอบกล้วยที่พัฒนาขึ้นในการเดินเครื่องอบตามเงื่อนไขที่หนึ่งและกรณีที่สองตามลำดับ จะมีค่าการใช้พลังงานในการอบกล้วยทั้ง 2 กรณี ต่ำกว่าค่าการใช้พลังงานในการอบจากเครื่องอบของร้านเจ็มวอยซึ่งมีค่าการใช้พลังงานเท่ากับ 14.1 MJ/kg จะเห็นได้ว่าค่าการใช้พลังงานของเครื่องอบที่พัฒนาขึ้นมีค่าเท่ากับถ้าคิดที่ระดับความผิดพลาดเป็นเลขจำนวนเต็มและระยะเวลาการอบลดลง  $(3 - 2) = 1$  วัน ในขณะที่ได้รับคุณภาพของกล้วยอบใกล้เคียงกัน ถึงแม้ว่าเครื่องอบที่พัฒนาขึ้นเชิงพาณิชย์ (ราคาเครื่องละ 330,000 บาท) จะมีต้นทุนสูงกว่าเครื่องอบแบบดั้งเดิม (ราคาเครื่องละ 150,000 บาท) อยู่ 2 เท่า หรือผลต่างของราคาเพียง 180,000 บาท แต่ในแง่การเดินเครื่องจักรระยะยาวแล้ว จะประหยัดต้นทุนผันแปรด้านการใช้พลังงานลดลง จากปริมาณของข้อมูลพารามิเตอร์ที่ได้รับจากเครื่องอบกล้วยที่พัฒนาขึ้นในกรณีที่สองเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องอบที่ได้รับจากร้านเจ็มวอย นอกจากนี้ จะเห็นได้ว่าเครื่องที่พัฒนาขึ้นใช้ระยะเวลาการอบลดลงถึง  $(24 - 14) = 10$  ชั่วโมงในแต่ละรอบการผลิต และมีค่าพลังงานจำเพาะลดลงถึง  $(14.1 - 10.0) = 4.1$  MJ/kg อีกทั้งยังมีค่าพลังงานทั้งหมดที่ใช้ต่อมวลของกล้วยดิบเริ่มต้นลดลงถึง  $(7.9 - 5.7) = 2.2$  MJ/kg

## บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและสร้างเครื่องอบกล้วยน้ำว้าที่ควบคุมการกระจายลมร้อนและอุณหภูมิภายในตู้อบผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อถ่ายโอนความร้อนจากก๊าซร้อนของการเผาไหม้เชื้อเพลิงแอลพีจีมายังอากาศบริสุทธิ์และป้อนเข้าสู่ห้องอบกล้วยน้ำว้าและถ่ายโอนความร้อนจากน้ำร้อนที่ได้รับมาจากแผงตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ นอกจากนี้ได้ทดสอบประสิทธิภาพในการอบกล้วยของเครื่องอบที่พัฒนาขึ้นกับเครื่องอบจากร้านเจ็มวอยในจำนวนของกล้วยดิบเริ่มต้นด้วยขนาดของมวลเดียวกันเพื่อให้ได้รับคุณภาพของกล้วยอบ (กล้วยที่ผ่านกระบวนการอบเสร็จเรียบร้อยแล้วจนสามารถเป็นผลิตภัณฑ์ได้) ใกล้เคียงกัน จากผลการทดสอบพบว่าเครื่องอบที่พัฒนาขึ้น (ซึ่งมีค่าพลังงานจำเพาะ 10.0 MJ/kg และค่าเฉลี่ยความผิดพลาดในการควบคุมอุณหภูมิอยู่ที่ระดับ  $\pm 1.90^{\circ}\text{C}$ ) มีประสิทธิภาพหรือสมรรถนะสูงกว่าการทำงานของเครื่องอบที่ใช้ในร้านเจ็มวอย (ซึ่งมีค่าพลังงานจำเพาะ 14.1 MJ/kg และค่าเฉลี่ยความผิดพลาดในการควบคุมอุณหภูมิอยู่ที่ระดับ  $\pm 4.16^{\circ}\text{C}$ ) และมีการใช้พลังงานทั้งหมดต่อผลผลิตในแต่ละรอบการผลิตลดลงจาก 18.2 MJ/kg เป็น 13.0 MJ/kg ภายใต้งี้อุ่นใจจำนวนกล้วยดิบเริ่มต้นขนาดของมวลระดับเดียวกันและได้รับคุณภาพของผลิตภัณฑ์ใกล้เคียงกัน และยังพบว่ามีการใช้เวลาในการอบกล้วย (14 ชั่วโมง) ของเครื่องที่พัฒนาขึ้นลดลง 10 ชั่วโมงต่อรอบการผลิต หรือคิดเป็น 41.7% เมื่อได้เปรียบเทียบกับการใช้เวลาในการอบกล้วย (24 ชั่วโมง) ของเครื่องอบจากร้านเจ็มวอย ทั้งนี้เครื่องอบที่พัฒนาต้องใช้แผงตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ในการผลิตน้ำร้อนเพื่อลดการใช้ก๊าซแอลพีจีในช่วงเวลากลางวันหรือช่วงที่มีแสงแดด จึงทำให้มีราคาต้นทุนในการสร้างเครื่องอบ (ซึ่งมีราคาต้นทุนคงที่ 330,000 บาท) สูงกว่าอยู่ 180,000 บาทต่อเครื่อง เมื่อเทียบกับราคาต้นทุนในการสร้างตู้อบของร้านเจ็มวอย (ซึ่งมีราคาต้นทุนคงที่อยู่ 150,000 บาท) แต่อย่างไรก็ตามเมื่อมีการเดินเครื่องอบที่พัฒนาขึ้นในระยะยาวจะมีต้นทุนแปรผันในด้านต้นทุนพลังงานถูกลงกว่า 28.8% เทียบกับพลังงานที่ใช้ต่อผลผลิต ระยะเวลาที่ใช้ในการอบกล้วยลดลง 41.7% เทียบกับเวลาที่ใช้ในการอบของเครื่องอบจากร้านเจ็มวอย และได้ผลิตลมร้อนบริสุทธิ์ภายในตู้อบตามหลักเกณฑ์และวิธีการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดีมากกว่าลมร้อนที่ได้รับจากการเผาไหม้อากาศร้อนด้วยก๊าซแอลพีจีโดยตรงจากเครื่องอบของร้านเจ็มวอยซึ่งมีผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องอบกล้วยที่พัฒนาขึ้นให้ดียิ่งขึ้นในแง่ของการประหยัดพลังงาน คณะผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการวิจัยในขั้นต่อไป คือ การวิเคราะห์หาแนวทางการลดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้กับมอเตอร์ในการเดินปั้มน้ำร้อน (ปัจจุบันอุณหภูมิของน้ำร้อนที่ใช้ในระบบอยู่ในช่วง  $25^{\circ}\text{C}$  ถึง  $90^{\circ}\text{C}$ ) เพื่อป้อนน้ำร้อนเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศกับน้ำร้อนผ่านแผ่นคลัสตริงฝั่งโดยที่น้ำร้อนจะผลิตมาจากการแลกเปลี่ยนความร้อนของหม้อต้มผ่านเชื้อเพลิงก๊าซแอลพีจีหรือการแลกเปลี่ยนความร้อนของท่อฮีทไปป์ผ่านตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ นอกจากนี้ เรายังสามารถนำเครื่องอบที่พัฒนาขึ้นนี้ไปใช้ในการอบวัสดุหรือผลผลิตทางการเกษตรอื่นๆ ที่ต้องการลมร้อนที่มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง  $40^{\circ}\text{C}$  ถึง  $70^{\circ}\text{C}$  สำหรับการอบ เช่น พริก สมุนไพร และผลไม้ ได้อีกด้วย

### บรรณานุกรม

- A. Fudholi, K. Sopian, M. H. Ruslan, M. A. Alghoul and M. Y. Sulaiman. (2010). "Review of solar dryers for agricultural and marine products". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, pp 1-30.
- A. G. Ferreira, A. L. T. Charbel, R. L. Pires, J. G. Silva and C. B. Maia. (2007). "EXPERIMENTAL ANALYSIS OF A HYBRID DRYER". *Thermal Engineering*, Vol. 6, No. 02, December 2007, pp 03-07.
- B. O. Bolaji (2005). "Development and Performance Evaluation of a Box-type Absorber Solar Air Collector for Crop Drying". *Journal of Food Technology*, vol. 3, Issue4, pp 595-600.
- Bukola O. Bolaji and Ayoola P. Olalusi. (2008). "Performance Evaluation of a Mixed-Mode Solar Dryer". *AU J.T.* 11, pp 225-231.
- C. Sarsilmaz, C. Yildiz and D. Pehlivan. (2000). "Drying of apricots in a rotary column cylindrical dryer (RCCD) supported with solar energy". *Renewable Energy* 21, pp 117-127.
- D. Ivanova, Kr Enimanev and K. Andonov. (2003). "Energy and economic effectiveness of a fruit and vegetable dryer". *Energy Conversion and Management* 44, pp 763-769.
- İlhan Ceylan, Mustafa Aktaş and Hikmet Doğan. (2007). "Energy and exergy analysis of timber dryer assisted heat pump". *Applied Thermal Engineering* 27, pp 216-222.
- Khalil E. J., Al-Juamili, Abdul Jabbar N. Khalifa and Tadahmun A. Yassen. (2007). "Testing of the performance of a fruit and vegetable solar drying system in Iraq". *Desalination* 209, pp 163-170.
- Lyes Bennamoun and Azeddine Belhamri. (2003). "Design and simulation of a solar dryer for agriculture products". *Journal of Food Engineering* 59, pp 259-66.
- M. Fatouh, M. N. Metwally, A. B. Helali and M. H. Shedid. (2006). "Herbs drying using a heat pump dryer". *Energy Conversion and Management* 47, pp 2629-43.
- M. Ibrahim, K. Sopian, W. R. W. Daud, M. Yahya, M. A. Alghoul and A. Zaharim. (2008) "Performance Predication of Solar Assisted Chemical Heat Pump Drying System in Tropical Region". 2nd WSEAS/IASME International Conference on RENEWABLE ENERGY SOURCES (RES'08). Corfu, Greece, October 26-28, 2008.
- M. Yahya, K. Sopian, W. R. W. Daud, M. Y. Othman and B. Yatim. (2008) "Performance of a solar assisted dehumidification system for Centella Asiatica L". 8<sup>th</sup> WSEAS International Conference on POWER SYSTEM (PS 2008), Santander, Cantabria, Spain, September 23-25, 2008.
- Morudee Boonyasri, Charoerporn Lertsatitthanankorn, Lamul Wiset and Nattapol Poomsa-ad. (2011) "Performance analysis and economic evaluation of greenhouse dryer for pork drying". *KUU Engineering Journal* Vol.38, No. 4, pp 433-442.
- P. Gbaha, H. Yobouet Andoh, J. Kouassi Saraka, B. Kaménan Koua and S. Touré. (2007). "Experimental investigation of a solar dryer with natural convective heat flow". *Renewable Energy* 32, pp 1817-1829.

- P. Schirmer, S. Janjai, A. Esper, R. Smitabhindu and W. Muhlbauer. (1996). "EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE PERFORMANCE OF THE SOLAR TUNNEL DRYER FOR DRYING BANANAS". Renewable Energy, Vol. 7, No. 2, pp 119-129.
- Segun R. BELLO and Simon Ogbache ODEY. (2009) "Development of Hot Water Solar Oven for Low Temperature Thermal Processes". Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies. Issue 14, January-June 2009, pp 73-84.
- Somchart Soponronnarit, Adisak Nathakaranakule, Weeravout Limtrakool, Woravit Rungjiwaruk, Ukrudee Nathakaranakule and Wattanapong Rakwichien. (1997). "Banana Fruit Drying". RERIC International Energy Journal, Vol. 19, No.2, December 1997.
- V. Shanmugam and E. Natarajan. (2007). "Experimental study of regenerative desiccant integrated solar dryer with and without reflective mirror". Applied Thermal Engineering 27, pp 1543-1551.
- จรรูวัฒน์ เจริญจิต, ยะผาด ดุสะเหมี้า, สุพัฒน์ เดชโสภา และสุริยา ช่วยอินทร์. (2554). ตู้อบแห้งและกลั่นความชื้นรังสีอาทิตย์แบบเทอร์โมไซฟอน. วิศวกรรมสาร มช. ปีที่ 38. ฉบับที่ 1. มกราคม-มีนาคม 2554. 35-42
- นิรุช ล้ำเลิศ. (2549). การปรับปรุงสมรรถนะและการพัฒนาแบบจำลองการอบแห้ง ของเครื่องอบแห้งแบบเรือนกระจกที่ปิดคลุมด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนต. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร
- สุเมธ รุจินินนาท, สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ และสมเกียรติ ปรีชญาวรากร (2545). การอบแห้งผลไม้ด้วยเครื่องอบแห้งแบบตู้ที่ใช้ก๊าซแอลพีจีเป็นเชื้อเพลิง. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. ปีที่ 9. ฉบับที่ 1. มกราคม-มิถุนายน. 42-49