



การศึกษาเชิงทดลองและเชิงตัวเลขของการอบแห้งหอยหลอด



โดย

นายพงศ์วิชัย ประภาโส

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2

ภาควิชาฟิสิกส์

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2568

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษาเชิงทดลองและเชิงตัวเลขของการอบแห้งหอยหลอด



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2

ภาควิชาฟิสิกส์

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2568

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF SOLAR DRYING OF  
RAZOR CLAMS



By  
Mr. Pongwanich PRAPASO

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for Master of Science PHYSICS  
Department of PHYSICS  
Academic Year 2025  
Copyright of Silpakorn University

|                      |   |
|----------------------|---|
| หัวข้อ               | การศึกษาเชิงทดลองและเชิงตัวเลขของการอบแห้งหอยหลอด |
| โดย                  | นายพงศัณิษฐ์ ประภาโส                              |
| สาขาวิชา             | ฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2                             |
| อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรรวรรณ์ อัมพร             |
| อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมเจตน์ ภัทรพานิชชัย       |

---

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กรกช ชันจิรกุล)

พิจารณาเห็นชอบโดย

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ณีฎฐ์ กาศยปนนท์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรรวรรณ์ อัมพร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมเจตน์ ภัทรพานิชชัย)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อีสระ มะศิริ)



660720024 : ฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2

คำสำคัญ : หอยหลอด, การอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์, แบบจำลองเชิงตัวเลข, ซอร์ฟซันไอโซเทอร์ม

นาย พงศ์วิชัย ประภาโส: การศึกษาเชิงทดลองและเชิงตัวเลขของการอบแห้งหอยหลอด  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรรวรรณ์ อัมพร

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการคายความชื้นของหอยหลอด (*Solen regularis*) และพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งหอยหลอดด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา เพื่อให้เข้าใจกลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลในกระบวนการอบแห้ง การศึกษาแบ่งออกเป็นสองส่วน ได้แก่ การศึกษาพฤติกรรมการคายความชื้นของหอยหลอดด้วยวิธีซอร์ฟซันไอโซเทอร์ม และการจำลองแบบการอบแห้งหอยหลอดด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้หลักการอนุรักษ์พลังงานและมวล การทดลอง การทดลองซอร์ฟซันไอโซเทอร์มดำเนินการที่อุณหภูมิ 50°C 60°C และ 70°C โดยใช้สารละลายเกลืออิ่มตัวจำนวน 5 ชนิด สำหรับควบคุมความชื้นสัมพัทธ์อากาศให้อยู่ในช่วง 10–90% ผลการทดลองพบว่าเส้นโค้งการคายความชื้นของหอยหลอดมีลักษณะ J-shape ซึ่งเป็นลักษณะทั่วไปของอาหารที่มีโปรตีนสูง การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่าแบบจำลอง GAB ให้ผลทำนายค่าความชื้นสมดุลได้แม่นยำที่สุด โดยมีค่า RMSE ระหว่าง 0.7–4% และค่า R<sup>2</sup> ระหว่าง 0.95–0.98 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ในงานนี้ใช้วิธีผลต่างจำกัด (Finite Difference Method; FDM) และเขียนโปรแกรมด้วยภาษา Fortran เพื่อคำนวณการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้นในแต่ละช่วงเวลา โดยพิจารณาองค์ประกอบหลักของระบบ ได้แก่ แผ่นโพลีคาร์บอเนต อากาศภายในเครื่องอบแห้ง ผลิตภัณฑ์ และพื้นเครื่องอบแห้ง ผลการจำลองพบว่าอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ย 10–15°C และพบว่าอัตราเร็วอากาศที่เหมาะสมคือ 0.3 m/s ผลการทดลองอบแห้งหอยหลอดพบว่าหอยหลอดซึ่งมีความชื้นเริ่มต้น 576% d.b. สามารถลดความชื้นลงเหลือประมาณ 7% d.b. ภายในระยะเวลา 2 วัน เมื่อเปรียบเทียบผลการจำลองกับการทดลองจริงพบว่ามีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี โดยมีค่า R<sup>2</sup> = 0.98 RMSE = 20.76% และ MBE = -16.89% แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีความถูกต้องและเชื่อถือได้ โดยสรุปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นในงานนี้สามารถอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งของหอยหลอดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

660720024 : Major PHYSICS

Keyword : Razor clam, solar drying, numerical modeling, sorption isotherm

Mr. Pongwanich PRAPASO : Experimental and numerical investigation of solar drying of razor clams Thesis advisor : Assistant Professor Orawan Aumporn, Ph.D.

This research aimed to study the moisture desorption behavior of razor clams (*Solen regularis*) and to develop a mathematical model for drying razor clams using a parabolic solar dryer, in order to better understand the heat and mass transfer mechanisms in the drying process. The study consisted of two parts: (1) investigation of the moisture desorption behavior of razor clams using sorption isotherm methods, and (2) simulation of razor clam drying in a solar dryer based on the principles of energy and mass conservation. For the experimental work, sorption isotherm tests were carried out at 3 different temperatures of 50°C, 60°C, and 70°C using 5 types of saturated salt solutions to control the relative humidity of the air within the range of 10–90%. The results showed that the desorption isotherm of razor clams exhibited a J-shaped curve, which is typical for high-protein food products. Mathematical model analysis indicated that the GAB model provided the most accurate prediction of equilibrium moisture content, with RMSE values between 0.7–4% and  $R^2$  values between 0.95–0.98, which are considered acceptable. The mathematical model of the solar dryer in this study was developed using the finite difference method (FDM) and implemented in Fortran to calculate the changes in temperature and moisture content over time. The main components of the system considered in the model included polycarbonate cover, air inside the dryer, product, and dryer floor. The simulation results showed that the air temperature inside the dryer was on average 10–15°C higher than the ambient temperature, and the optimal air velocity was found to be 0.3 m/s. Drying experiments of razor clams showed that the initial moisture content of 576% d.b. could be reduced to about 7% d.b. within 2 days. Comparison between the simulation and experimental results showed good agreement, with  $R^2 = 0.98$ , RMSE = 20.76%, and MBE = -16.89%, indicating that the model is accurate and reliable. In conclusion, the mathematical model developed in this study can effectively describe the drying behavior of razor clams.

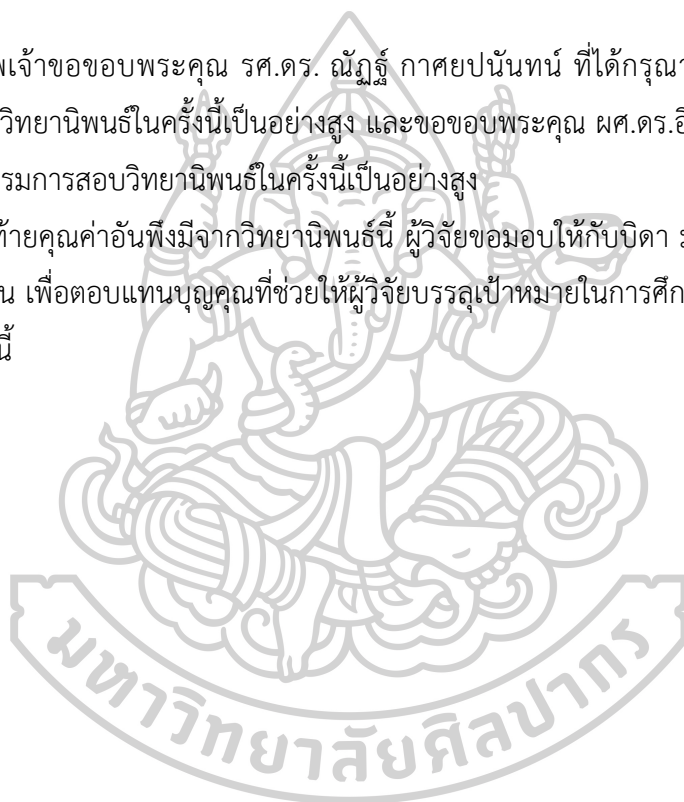
## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.อรรวรรณ์ อัมพร และ ผศ.ดร.สมเจตน์ ภัทรพานิชชัย ที่ได้ให้คำปรึกษาและคำแนะนำที่มีคุณค่าในการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ รวมทั้งความช่วยเหลือที่ท่านได้มอบให้ตลอดระยะเวลาในการทำวิจัย ขอขอบพระคุณในความกรุณาและการสนับสนุนที่เต็มเปี่ยมด้วยความเอื้ออาทร และขอขอบพระคุณภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ให้การสนับสนุนด้านทรัพยากรและสิ่งอำนวยความสะดวกในการดำเนินการวิจัยครั้งนี้ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้การวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รศ.ดร. ณีภุชฌ์ กาศยปนนท์ ที่ได้กรุณาสละเวลามาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้เป็นอย่างสูง และขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.อิสระ มะสิริ ที่ได้กรุณาสละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้เป็นอย่างสูง

สุดท้ายคุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดา ครูอาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน เพื่อตอบแทนบุญคุณที่ช่วยให้ผู้วิจัยบรรลุเป้าหมายในการศึกษาและประสบความสำเร็จในการศึกษาครั้งนี้

พงศ์วิณิชย์ ประภาโส



## สารบัญ

|  | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....   | ง    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....  | จ    |
| กิตติกรรมประกาศ.....   | ฉ    |
| สารบัญ.....  | ช    |
| สารบัญตาราง.....   | ฅ    |
| สารบัญรูปภาพ.....  | ฉ    |
| บทที่ 1 บทนำ.....  | 1    |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....                              | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....                                     | 2    |
| 1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....   | 2    |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....                           | 3    |
| 2.1 ความร้อน (Heat).....   | 3    |
| 2.1.1 ความร้อนแฝง (latent heat).....                                 | 3    |
| 2.1.2 ความร้อนสัมผัส (Sensible Heat).....                            | 3    |
| 2.2 อุณหภูมิ (Temperature).....                                      | 4    |
| 2.3 สมบัติทางความร้อน.....   | 4    |
| 2.3.1 ความจุความร้อนจำเพาะ (specific heat, $c_p$ ).....              | 4    |
| 2.3.2 ค่าการนำความร้อน (thermal conductivity, $k$ ).....             | 4    |
| 2.3.3 ค่าการแพร่กระจายความร้อน (thermal diffusivity, $\alpha$ )..... | 5    |
| 2.3.4 ความหนาแน่น (Density, $\rho$ ).....                            | 5    |
| 2.3.5 ค่าการแผ่รังสี (Emissivity, $\varepsilon$ ).....               | 5    |

|  |    |
|--|----|
| 2.4 การถ่ายเทความร้อน .....  | 6  |
| 2.4.1 การนำความร้อน.....   | 6  |
| 2.4.2 การพาความร้อน .....  | 6  |
| 2.4.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation).....                               | 8  |
| 2.5 พื้นฐานด้านการอบแห้ง.....  | 8  |
| 2.5.1 สมบัติของอากาศที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้ง .....                      | 8  |
| 2.5.2 วัสดุชื้น (Moist Material).....                                    | 11 |
| 2.5.3 การบอกปริมาณความชื้น (Moisture Content).....                       | 12 |
| 2.6 วอเตอร์แอกทิวิตี (water activity, $a_w$ ).....                       | 13 |
| 2.7 ความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content, EMC).....               | 13 |
| 2.8 ซอร์พชันไอโซเทอร์มของความชื้น (Moisture Sorption Isotherm, MSI)..... | 13 |
| 2.8.1 หลักการของ MSI.....  | 13 |
| 2.8.2 รูปแบบของเส้นโค้ง MSI.....   | 14 |
| 2.8.3 การวิเคราะห์ MSI.....  | 14 |
| 2.9 หลักการของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ .....                       | 15 |
| 2.9.1 ประเภทของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ .....                      | 16 |
| 2.10 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง .....                       | 17 |
| 2.10.1 สมการสมดุลพลังงาน (Energy Balance).....                           | 17 |
| 2.10.2 ประสิทธิภาพในการอบแห้ง (Drying Efficiency).....                   | 17 |
| 2.11 การตากแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งประเภทต่าง ๆ .....                     | 18 |
| 2.12 การจำลองแบบเครื่องอบแห้ง (Simulation of Drying Systems).....        | 19 |
| 2.12.1 แบบจำลองเชิงฟิสิกส์ (Physical Model) .....                        | 20 |
| 2.12.2 แบบจำลองเชิงตัวเลข (numerical model).....                         | 22 |
| 2.12.3 แบบจำลองเชิงประจักษ์ (empirical model).....                       | 24 |

|   |    |
|---|----|
| 2.12.4 แบบจำลองเชิงผสม (Semi-Empirical Model).....                      | 25 |
| บทที่ 3 การดำเนินงาน.....   | 27 |
| 3.1 การศึกษาไอโซเทอร์มการคายความชื้นของหอยหลอด.....                     | 27 |
| 3.1.1 การหาค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture contents, EMC).....   | 27 |
| 3.1.2 แบบจำลองซอร์พชันไอโซเทอร์ม.....                                   | 29 |
| 3.2 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา.....                      | 30 |
| 3.3 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....                                  | 31 |
| 3.3.1 สมมติฐานและเงื่อนไขของแบบจำลอง.....                               | 31 |
| 3.3.2 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....                                | 32 |
| 3.3.2.1 สมการสมดุลความร้อน.....   | 32 |
| 3.3.2.2 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน.....                              | 38 |
| 3.3.2.3 การหาผลเฉลยของแบบจำลอง.....                                     | 39 |
| 3.3.2.4 การเขียนโปรแกรมสำหรับการคำนวณหาผลเฉลย.....                      | 42 |
| 3.3.2.5 การตรวจสอบแบบจำลอง.....   | 44 |
| 3.4 การทดลองอบแห้งหอยหลอด.....  | 45 |
| 3.4.1 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดลอง.....               | 45 |
| 3.4.2 การทดลองอบแห้งหอยหลอด.....  | 46 |
| 3.4.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....                                    | 46 |
| 3.4.2.2 ขั้นตอนการทดลองอบแห้ง.....                                      | 48 |
| บทที่ 4 ผลและการอภิปรายผล.....  | 51 |
| 4.1 การศึกษาไอโซเทอร์มการคายความชื้นของหอยหลอด.....                     | 51 |
| 4.2 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งหอยหลอด.....            | 54 |
| 4.2.1 ผลของความเข้มรังสีอาทิตย์ที่มีต่ออุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้ง.....  | 54 |
| 4.2.2 ผลของอัตราเร็วอากาศต่อประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องอบแห้ง..... | 57 |

|  |    |
|--|----|
| 4.2.3 ผลจากการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ .....                  | 57 |
| 4.3 การทดลองอบแห้งหอยหลอด .....                            | 60 |
| 4.4 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ..... | 64 |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย .....                               | 67 |
| รายการอ้างอิง .....  | 69 |
| ประวัติผู้เขียน .....                                      | 73 |



## สารบัญตาราง

|  | หน้า |
|--|------|
| ตารางที่ 1 ความขึ้นสัมพันธ์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของสารละลายทั้ง 5 ชนิด.....                                 | 28   |
| ตารางที่ 2 แบบจำลองซอร์พชันไอโซเทอร์มที่เลือกใช้.....  | 29   |
| ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง RMSE และ $R^2$ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ที่ใช้ในการอบแห้ง<br>หอยหลอด..... | 52   |



## สารบัญรูปภาพ

|   | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 1 (ก) วัสดุขึ้นซึ่งประกอบด้วยน้ำและมวลของของแข็งและน้ำที่แทรกตัวอยู่ในวัสดุขึ้น<br>(ข) ปริมาณน้ำและของแข็งถ้าแยกน้ำและของแข็งออกจากกัน (Janjai 2017) | 12   |
| รูปที่ 2 ลักษณะของเส้นโค้ง MSI แต่ละชนิด (Aviara และ Ndubisi A 2020)  | 14   |
| รูปที่ 3 กราฟ Moisture sorption isotherm (Andrade และคณะ 2011)  | 15   |
| รูปที่ 4 เครื่องอบแห้งแบบรับรังสีอาทิตย์โดยตรง (www.โซล่าเซลล์.net)   | 16   |
| รูปที่ 5 เครื่องอบแห้งแบบทางอ้อม (www.tradeindia.com)   | 16   |
| รูปที่ 6 เครื่องอบแห้งแบบผสม (www.teriin.org)   | 17   |
| รูปที่ 7 ตู้อบไฟฟ้าที่มีระดับอุณหภูมิ   | 28   |
| รูปที่ 8 กล่องพลาสติกบรรจุสารละลายเกลือ 50°C 60°C และ 70°C อิมตัวและมวลตัวอย่างของหอย<br>หลอด 5-6 g   | 28   |
| รูปที่ 9 การชั่งมวลตัวอย่าง   | 29   |
| รูปที่ 10 แบบจำลองเครื่องอบแห้งแบบพาราโบลาที่ใช้ในงานวิจัยนี้   | 31   |
| รูปที่ 11 การถ่ายเทความร้อนของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา   | 33   |
| รูปที่ 12 การแบ่งส่วนในการพิจารณาอุณหภูมิขององค์ประกอบต่าง ๆ ของเครื่องอบแห้งพลังงาน<br>แสงอาทิตย์แบบพาราโบลาตามทิศทางการไหลของอากาศ                        | 39   |
| รูปที่ 13 แผนผังการทำงานของโปรแกรม  | 44   |
| รูปที่ 14 เครื่องอบแห้งแบบพาราโบลา  | 46   |
| รูปที่ 15 เทอร์โมคัปเปิลชนิดเค  | 46   |
| รูปที่ 16 เครื่องวัดความเข้มรังสีอาทิตย์แบบเทอร์โมพิลียีหือ Kipp and Zonen รุ่น CMP21   | 47   |
| รูปที่ 17 เครื่องบันทึกข้อมูลยี่ห้อ Yokogawa รุ่น DX2000  | 47   |
| รูปที่ 18 เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นยี่ห้อ E+E Elektronik  | 47   |
| รูปที่ 19 จำนวนหอยหลอดทั้งหมดที่ใช้ในการอบแห้ง และมวลหอยหลอดตัวอย่าง  | 48   |

|  |    |
|--|----|
| รูปที่ 20 การจัดวางหอยหลอดทั้งหมด และหอยหลอดตัวอย่าง   | 48 |
| รูปที่ 21 ก) ช่องอากาศเข้าด้านหน้าที่ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลชนิดเค ข) ตรงกลางเครื่องอบแห้งที่ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลชนิดเคและติดตั้งที่วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ยี่ห้อ E+E Elektronik ค) อากาศออกทางด้านหลังเครื่องอบแห้งที่ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลชนิดเค | 49 |
| รูปที่ 22 เครื่องวัด $a_w$ ยี่ห้อ Rotronic รุ่น HygroPalm  | 49 |
| รูปที่ 23 เครื่องอบแห้งไฟฟ้าอุณหภูมิ 103°C ที่นำหอยหลอดเข้าไปอบแห้ง  | 50 |
| รูปที่ 24 Moisture desorption isotherm ของหอยหลอดที่อุณหภูมิ 50°C 60°C และ 70°C .....  | 52 |
| รูปที่ 25 Moisture desorption isotherm ที่ได้จากแบบจำลองของ GAB และจากการทดลอง.....  | 54 |
| รูปที่ 26 ผลของปริมาณรังสีอาทิตย์ที่มีต่ออุณหภูมิแผ่นโพลีคาร์บอเนตที่ได้จากการจำลองแบบ.....  | 55 |
| รูปที่ 27 ผลของปริมาณรังสีอาทิตย์ที่มีต่ออุณหภูมิผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการจำลองแบบ   | 55 |
| รูปที่ 28 ผลของปริมาณรังสีอาทิตย์ที่มีต่ออุณหภูมิอากาศที่ได้จากการจำลองแบบ   | 56 |
| รูปที่ 29 ผลของปริมาณรังสีอาทิตย์ที่มีต่ออุณหภูมิพื้นเครื่องอบแห้งที่ได้จากการจำลองแบบ   | 56 |
| รูปที่ 30 ผลของปริมาณรังสีอาทิตย์ที่มีต่อประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องอบแห้ง  | 57 |
| รูปที่ 31 การแปรค่าของอุณหภูมิของหอยหลอดในเครื่องอบแห้งจากแบบจำลอง   | 58 |
| รูปที่ 32 ความเข้มรังสีอาทิตย์ตลอดช่วงระยะเวลาในการอบแห้ง  | 58 |
| รูปที่ 33 กราฟการแห้งของหอยหลอดที่ได้จากการจำลองแบบ  | 59 |
| รูปที่ 34 การแปรค่าของอุณหภูมิอากาศในแต่ละตำแหน่งภายในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์จากผลการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์  | 60 |
| รูปที่ 35 ความเข้มรังสีอาทิตย์ตลอดช่วงระยะเวลาในการอบแห้ง  | 61 |
| รูปที่ 36 การแปรค่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อมในช่วงการทดลอง  | 62 |
| รูปที่ 37 การแปรค่าอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้ง ด้านหน้า ตรงกลาง และด้านหลัง ในช่วงการทดลอง   | 62 |
| รูปที่ 38 การแปรค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมในช่วงการทดลอง   | 63 |
| รูปที่ 39 การแปรค่าความชื้นสัมพัทธ์ในเครื่องอบแห้งในช่วงการทดลอง   | 63 |
| รูปที่ 40 กราฟการแห้งของหอยหลอดที่ได้จากการทดลอง   | 64 |

รูปที่ 41 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณความชื้นของหอยหลอดจากการ  
ทดลองจริงและแบบจำลอง

65



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ผลิตภัณฑ์ความชื้นสูงคือผลิตภัณฑ์ที่มีระดับความชื้นภายในผลิตภัณฑ์สูงกว่ามาตรฐานหรือมีปริมาณน้ำมากกว่าปกติ เช่น ปลา เนื้อหมู และหอย เมื่อมีความชื้นสูงอาจทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดความเสียหายได้ง่ายเนื่องจากเชื้อราและแบคทีเรียสามารถเจริญเติบโตได้ดีในสภาวะความชื้นสูง การอบแห้งหรือลดความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์จึงมีความสำคัญสำหรับการเก็บรักษาและเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์

ในปัจจุบันผลิตภัณฑ์ความชื้นสูงมีการอบแห้งหลากหลายวิธี เช่น การใช้เครื่องอบแห้งไฟฟ้า ซึ่งต้องใช้พลังงานจำนวนมาก ต้นทุนที่สูง และสิ้นเปลืองพลังงาน การตากแห้งตามธรรมชาติที่มีต้นทุนต่ำแต่ไม่สามารถควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ เนื่องจากสภาพภูมิอากาศมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ซึ่งอาจทำให้กระบวนการตากแห้งไม่สม่ำเสมอ และอาจเกิดความเสียหายจากแมลงได้ จึงนำไปสู่การพัฒนาเครื่องอบแห้งที่ใช้แหล่งพลังงานหมุนเวียน เช่น เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีต้นทุนต่ำ ไม่สิ้นเปลืองพลังงาน และควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้

เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ออกแบบมาเพื่อใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ โดยอาศัยหลักการของปรากฏการณ์เรือนกระจก นั่นคือเมื่อรังสีอาทิตย์ส่งผ่านเข้าไปภายในเครื่องอบแห้งจะทำให้ห้องกระจกภายในเครื่องอบแห้งดูดกลืนรังสีอาทิตย์และปล่อยรังสีความร้อนออกมาทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนกับอากาศและผลิตภัณฑ์ภายในเครื่องอบแห้ง ทำให้เกิดสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ ซึ่งเทคโนโลยีนี้มีความสำคัญอย่างมากในการแก้ไขปัญหาการเน่าเสียของผลิตภัณฑ์

ในจังหวัดสมุทรสงคราม หอยหลอด (*Solen regularis*) เป็นอาหารทะเลที่มีชื่อเสียงและได้รับความนิยมบริโภคอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะบริเวณดอนหอยหลอดซึ่งเป็นแหล่งอาศัยตามธรรมชาติที่มีความอุดมสมบูรณ์ หอยหลอดจัดเป็นหอยทะเลกบคู่ในวงศ์ Solenidae มีคุณค่าทางโภชนาการสูง อุดมไปด้วยโปรตีน วิตามิน และแร่ธาตุ อีกทั้งยังสร้างรายได้ให้แก่ชุมชนชายฝั่งและมีศักยภาพในการส่งออก ถือเป็นทรัพยากรที่มีความสำคัญทั้งในเชิงเศรษฐกิจและสังคมของท้องถิ่น อย่างไรก็ตาม หอยหลอดสดมีปริมาณความชื้นเริ่มต้นสูง (มากกว่า 80–90% w.b.) จึงเสียหายได้ง่ายภายในเวลาอันสั้นหากไม่มีการเก็บรักษาที่เหมาะสม ปัญหานี้ส่งผลให้ผู้ประกอบการมักเผชิญกับการสูญเสียผลผลิตในปริมาณมาก การนำหอยหลอดสดมาแปรรูปโดยอาศัยการอบแห้งจึงมีบทบาทสำคัญในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ต่างๆ ให้มีคุณภาพจำเป็นต้องทราบเงื่อนไขในการอบแห้งที่เหมาะสม เช่น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งสามารถหาได้โดยอาศัยการศึกษาพฤติกรรมและการคาย

ความชื้น (sorption isotherm) ซึ่งเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุล และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายใต้สภาวะอุณหภูมิคงที่ ซึ่งมีความสำคัญในการทำความเข้าใจกระบวนการคายและดูดซับความชื้นในกระบวนการอบแห้ง ซอร์พชันไอโซเทอร์มแบ่งเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ moisture desorption isotherm คือการคายความชื้นจากอาหารที่มีความชื้นสูง และ moisture adsorption isotherm คือการดูดความชื้นกลับของอาหารแห้ง จากการศึกษาพบว่างานวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมการดูดและการคายความชื้นของหอยหลอดยังมีไม่แพร่หลาย ซึ่งข้อมูลเหล่านี้เป็นพื้นฐานสำคัญที่จำเป็นต่อการออกแบบกระบวนการอบแห้งที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับหอยหลอด เพื่อช่วยยืดอายุการเก็บรักษา และรักษาคุณภาพของหอยหลอดให้ได้มาตรฐาน

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นปัญหาที่พบในการอบแห้งผลิตภัณฑ์จำพวกของสด คือ ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่สูงมาก หากใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่เหมาะสมอาจทำให้การลดความชื้นของผลิตภัณฑ์เป็นไปได้ยาก เนื่องจากภายในเครื่องอบแห้งมีปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมากเกินไป อาจก่อให้เกิดการเน่าเสียของผลิตภัณฑ์ได้ ในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นสูง โดยใช้การจำลองแบบร่วมกับใช้ข้อมูลการคายความชื้นของหอยหลอด เพื่อหาพารามิเตอร์ของเครื่องอบแห้งที่เหมาะสมแก่การอบแห้งหอยหลอด

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการคายความชื้นของหอยหลอด
- 2) เพื่อสร้างแบบจำลองการอบแห้งหอยหลอดด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

### 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

งานวิจัยนี้มีขอบเขตการศึกษาดังนี้

- 1) ศึกษาพฤติกรรมการคายความชื้นของหอยหลอดโดยการอบแห้งในระดับห้องปฏิบัติการ
- 2) ศึกษาอัตราการไหลของอากาศที่ส่งผลต่ออัตราการแห้งของผลิตภัณฑ์
- 3) เปรียบเทียบผลการอบแห้งที่ได้จากแบบจำลองและจากการทดลองจริง

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้นำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้ง โดยครอบคลุมทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนและมวล แบบจำลองการอบแห้ง พื้นฐานการจำลองเชิงตัวเลข หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ และสมบัติทางความร้อนของวัสดุอย่างละเอียด รวมถึงซอร์พชันไอโซเทอร์มของความชื้นที่เกี่ยวข้องกับสมดุลของน้ำในวัสดุภายใต้สภาวะแวดล้อมต่าง ๆ

#### 2.1 ความร้อน (Heat)

ความร้อน คือ พลังงานรูปแบบหนึ่งสามารถเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานรูปแบบอื่น สามารถถ่ายเทจากที่มีอุณหภูมิสูงไปยังที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า จนกระทั่งมีระดับความร้อนเท่ากัน ซึ่งถือว่าเป็นสภาวะสมดุลความร้อน (thermal equilibrium) โดยความร้อนมีหน่วยเป็นจูล (Joule, J) ประกอบด้วย ความร้อนแฝง (latent heat), และความร้อนสัมผัส (sensible heat)

##### 2.1.1 ความร้อนแฝง (latent heat)

ความร้อนแฝงเป็นพลังงานที่วัสดุดูดซับหรือคายออกมาในขณะที่เกิดการเปลี่ยนสถานะ เช่น ของแข็งเป็นของเหลว หรือของเหลวเป็นไอ โดยที่อุณหภูมิของวัสดุไม่เปลี่ยนแปลงระหว่างกระบวนการดังกล่าว ความร้อนแฝงมีบทบาทสำคัญในการคำนวณพลังงานที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งที่เกี่ยวข้องกับการระเหยน้ำ

$$Q = mL \quad (2.1)$$

โดยที่  $Q$  = พลังงานความร้อนที่ใช้หรือปลดปล่อย (J)

$m$  = มวลของวัสดุที่เปลี่ยนสถานะ (kg)

$L$  = ความร้อนแฝงจำเพาะของวัสดุ (J/kg)

##### 2.1.2 ความร้อนสัมผัส (Sensible Heat)

ความร้อนสัมผัสเป็นพลังงานความร้อนที่ทำให้อุณหภูมิของวัสดุเปลี่ยนแปลง โดยไม่มีการเปลี่ยนสถานะของวัสดุ พลังงานนี้สามารถวัดได้ผ่านการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและสามารถสังเกตได้โดยตรงในการใช้งานจริง

$$Q = mc_p \Delta T \quad (2.2)$$

โดยที่  $Q$  = พลังงานความร้อน (J)

$m$  = มวลของวัสดุ (kg)

$c_p$  = ความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ (J/kg·K)

$\Delta T$  = ความแตกต่างของอุณหภูมิ (K หรือ °C)

## 2.2 อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิ คือ ปริมาณทางฟิสิกส์ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ทิศทางการถ่ายเทพลังงานความร้อนและอัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างวัตถุกับสภาพแวดล้อม โดยปริมาณความร้อนจะถ่ายเทจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปยังจุดที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า แต่ไม่ได้หมายความว่าวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจะมีปริมาณความร้อนมากกว่า เนื่องจากปริมาณความร้อนในวัตถุขึ้นกับความจุความร้อน (heat capacity) ของวัตถุ

## 2.3 สมบัติทางความร้อน

สมบัติทางความร้อนของวัสดุมีความสำคัญในการออกแบบและวิเคราะห์กระบวนการอบแห้ง เนื่องจากส่งผลโดยตรงต่อปริมาณความร้อนที่ต้องใช้และเวลาที่ใช้ในการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ สมบัติทางความร้อนที่สำคัญ ประกอบด้วย ความจุความร้อนจำเพาะ ค่าการนำความร้อน ค่าการแพร่กระจายความร้อน ความหนาแน่น และค่าการแผ่รังสี

### 2.3.1 ความจุความร้อนจำเพาะ (specific heat, $c_p$ )

ความจุความร้อนจำเพาะเป็นสมบัติทางกายภาพที่แสดงถึงปริมาณความร้อนที่ต้องใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุขึ้น 1 องศาเซลเซียสหรือ 1 เคลวิน โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะ ความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุแต่ละชนิดแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของสาร มวล และโครงสร้างของวัสดุ

$$Q = mc_p \Delta T \quad (2.3)$$

โดยที่  $Q$  = พลังงานความร้อน (J)

$m$  = มวลของวัสดุ (kg)

$c_p$  = ความจุความร้อนจำเพาะ (J/kg·K)

$\Delta T$  = ความแตกต่างของอุณหภูมิ (K หรือ °C)

### 2.3.2 ค่าการนำความร้อน (thermal conductivity, $k$ )

ค่าการนำความร้อน คือ ความสามารถของวัสดุในการถ่ายโอนพลังงานความร้อนผ่านวัสดุ โดยอาศัยกลไกการนำ (conduction) วัสดุที่มีค่าการนำความร้อนสูง เช่น โลหะ จะถ่ายเทความร้อนได้เร็ว ในขณะที่วัสดุที่มีค่าการนำความร้อนต่ำ เช่น ไม้หรือโฟม จะเป็นฉนวนความร้อน สมการพื้นฐานของการนำความร้อนตามกฎของฟูเรียร์ (Fourier's law) คือ

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.4)$$

โดยที่  $q$  = อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)

$k$  = ค่าการนำความร้อนของวัสดุ (W/m·K)

$A$  = พื้นที่หน้าตัด (m<sup>2</sup>)

$$\frac{dT}{dx} = \text{อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามระยะทาง}$$

### 2.3.3 ค่าการแพร่กระจายความร้อน (thermal diffusivity, $\alpha$ )

ค่าการแพร่กระจายความร้อน คือ อัตราความร้อนที่แพร่ผ่านวัสดุ ซึ่งบ่งบอกว่าวัสดุจะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเร็วเพียงใดเมื่อได้รับความร้อนหรือถูกทำให้เย็นลง ค่าการแพร่กระจายความร้อนเป็นสมบัติที่ขึ้นอยู่กับค่าการนำความร้อน ความหนาแน่น และความจุความร้อนจำเพาะคำนวณได้จาก

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (2.5)$$

โดยที่  $\alpha$  = ค่าการแพร่กระจายความร้อน ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$k$  = ค่าการนำความร้อนของวัสดุ ( $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ )

$\rho$  = ความหนาแน่นของวัสดุ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$c_p$  = ความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุ ( $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$ )

### 2.3.4 ความหนาแน่น (Density, $\rho$ )

ความหนาแน่น คือ มวลของวัสดุต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ซึ่งมีผลต่อการคำนวณสมบัติทางความร้อนอื่น ๆ เช่น ค่าการแพร่กระจายความร้อน และการถ่ายเทความร้อนโดยรวม

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.6)$$

โดยที่  $\rho$  = ความหนาแน่น ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$m$  = มวลของวัสดุ ( $\text{kg}$ )

$V$  = ปริมาตรของวัสดุ ( $\text{m}^3$ )

### 2.3.5 ค่าการแผ่รังสี (Emissivity, $\varepsilon$ )

ค่าการแผ่รังสี คือ สัดส่วนความสามารถของพื้นผิววัสดุในการแผ่รังสีความร้อนเมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุดำ (black body) ที่มีค่าการแผ่รังสีสูงสุด ( $\varepsilon = 1$ ) ค่าการแผ่รังสีมีบทบาทสำคัญในกระบวนการอบแห้งที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ เนื่องจากเกี่ยวข้องโดยตรงกับการดูดซับและการปล่อยรังสีความร้อนของวัสดุ สมการการแผ่รังสีตามกฎสเตฟาน-โบลต์ซมันน์คือ

$$q = \varepsilon \sigma A T^4 \quad (2.7)$$

โดยที่  $q$  = อัตราการแผ่รังสีความร้อน ( $\text{W}$ )

$\varepsilon$  = ค่าการแผ่รังสี (ไม่มีหน่วย,  $0 \leq \varepsilon \leq 1$ )

$\sigma$  = ค่าคงที่สเตฟาน-โบลต์ซมันน์ ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2\cdot\text{K}^4$ )

$A$  = พื้นที่ผิวของวัสดุ ( $\text{m}^2$ )

$$T = \text{อุณหภูมิสัมบูรณ์ของวัสดุ (K)}$$

## 2.4 การถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อน (heat transfer) คือ การที่พลังงานความร้อนถ่ายเทจากวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่วัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า พลังงานความร้อนจะหยุดถ่ายเทเมื่อวัตถุมีอุณหภูมิเท่ากัน ซึ่งเรียกว่าสมดุลทางความร้อน (thermal equilibrium) ซึ่งมีการถ่ายเทความร้อนมีอยู่ 3 รูปแบบ ได้แก่ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน

### 2.4.1 การนำความร้อน

การนำความร้อน (heat conduction) คือ ปรากฏการณ์ที่พลังงานความร้อนถ่ายเทภายในวัตถุหนึ่ง ๆ หรือระหว่างวัตถุสองชิ้นที่สัมผัสกัน โดยมีทิศทางการเคลื่อนที่ของพลังงานความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยที่ตัวกลางไม่มีการเคลื่อนที่ การนำความร้อนเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นบนชั้นอะตอมของอนุภาค เป็นหนึ่งในกระบวนการถ่ายเทความร้อนในโลหะ การนำความร้อนสามารถเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระหรือผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างโมเลกุล กล่าวคือการนำความร้อนเป็นลักษณะการถ่ายเทความร้อนผ่านโดยตรงจากวัตถุหนึ่งไปยังอีกวัตถุหนึ่งโดยการสัมผัสกัน เช่น การเอามือไปจับกาน้ำร้อน จะทำให้ความร้อนจากกาน้ำถ่ายเทไปยังมือ จึงทำให้รู้สึกร้อน เป็นต้น วัสดุใดจะนำความร้อนดีหรือไม่ดี ขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ( $k$ ) หาได้จากสมการ

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

โดยที่  $q$  = อัตราการนำความร้อน (W)

$k$  = สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/m·K)

$A$  = พื้นที่หน้าตัดของวัตถุ ( $m^2$ )

$\frac{dT}{dx}$  = อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามระยะ

### 2.4.2 การพาความร้อน

การพาความร้อน (heat convection) เป็นการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นได้ในสสารสองสถานะคือ ของเหลวและก๊าซ เนื่องจากเป็นสิ่งที่สามารถเคลื่อนที่ได้โดยจะมีทิศทางการลอยขึ้นเท่านั้น เนื่องจากเมื่อสสารได้รับความร้อนจะมีการขยายตัว ทำให้ความหนาแน่นต่ำลงและสสารที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าความหนาแน่นสูงกว่าก็จะลงมาแทนที่ การพาความร้อนแบ่งเป็น 2 รูปแบบ คือ

- การพาความร้อนตามธรรมชาติ (natural convection)

การพาความร้อนตามธรรมชาติเกิดจากความต่างของอุณหภูมิที่ทำให้เกิดความแตกต่างของความหนาแน่นของของไหลจนเกิดการไหลเวียนโดยธรรมชาติ เช่น อากาศร้อนลอยตัวขึ้น

$$Nu = C(Gr Pr)^n \quad (2.9)$$

โดยที่  $Nu$  = Nusselt number (ค่าที่ใช้ประเมินการพาความร้อน)

$Gr$  = Grashof number (ค่าที่ประเมินแรงลอยตัว)

$Pr$  = Prandtl number (ค่าที่แสดงอัตราส่วนของการแพร่ความร้อนต่อการแพร่โมเมนตัม)

ค่าของ  $C$  และ  $n$  ขึ้นอยู่กับสภาพของผนังและเรขาคณิตของวัตถุ

- การพาความร้อนแบบบังคับ (forced convection)

การพาความร้อนแบบบังคับเกิดจากการใช้แรงภายนอก เช่น พัดลม ปั๊มน้ำ หรือการอัดลม เพื่อให้ของไหลเคลื่อนที่และพาความร้อนออกไปจากพื้นผิว ได้จากสมการ

$$q = hA(T_s - T_\infty) \quad (2.10)$$

โดยที่  $q$  = อัตราการพาความร้อน (W)

$h$  = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $W/m^2 \cdot K$ )

$A$  = พื้นที่ผิวสัมผัส ( $m^2$ )

$T_s$  = อุณหภูมิผิววัตถุ (K)

$T_\infty$  = อุณหภูมิของของไหลโดยรอบ (K)

จากการวิเคราะห์เชิงมิติ (dimensional analysis) ของสมการอนุรักษ์มวลสาร พลังงาน และโมเมนตัมที่เกิดกับการพาความร้อนแบบบังคับ พบว่าเลขนูนเซลล์ ( $Nu$ ) มีความสัมพันธ์กับเลขเรย์โนลด์ส์ ( $Re$ ) และเลขพรานด์เทิล ( $Pr$ ) ในรูปสมการเอมไพริคัลดังนี้

$$Nu = C Re^m Pr^n \quad (2.11)$$

โดยที่  $Nu$  = Nusselt number (ค่าที่ใช้ประเมินการพาความร้อน)

$Re$  = Reynold number (ค่าที่แสดงลักษณะการไหล)

$Pr$  = Prandtl number (ค่าที่แสดงอัตราส่วนของการแพร่ความร้อนต่อการแพร่โมเมนตัม)

$C, m, n$  = ค่าคงตัวเอมไพริคัล ซึ่งขึ้นกับชนิดของการไหล

นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณค่า Nusselt number ได้จาก

$$Nu = \frac{hL}{k} \Rightarrow h = \frac{Nu \cdot k}{L} \quad (2.12)$$

โดยที่  $L$  คือ ความยาวลักษณะเฉพาะของระบบ (m)

$k$  คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหล (W/m·K)

### 2.4.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation)

การแผ่รังสีความร้อนเป็นการปล่อยพลังงานในรูปแบบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งไม่ต้องอาศัยตัวกลาง โดยวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 0 เคลวิน (K) จะมีการปล่อยรังสีความร้อนและดูดซับรังสีความร้อน ค่าการแผ่รังสีความร้อนสามารถคำนวณได้จากกฎของสเตฟาน-โบลทซ์มานน์ (Stefan-Boltzmann's law)

$$q = \varepsilon \sigma A (T^4 - T_{surr}^4) \quad (2.13)$$

โดยที่  $q$  = อัตราการแผ่รังสี (W)

$\varepsilon$  = ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของวัตถุ (emissivity)

$\sigma$  = ค่าคงที่สเตฟาน-โบลต์ซมันน์ ( $5.67 \times 10^{-8}$  W/m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>)

$A$  = พื้นที่ผิว (m<sup>2</sup>)

$T$  = อุณหภูมิของวัตถุ (K)

$T_{surr}$  = อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม (K)

### 2.5 พื้นฐานด้านการอบแห้ง

การอบแห้ง คือกระบวนการลดปริมาณความชื้นในวัสดุ โดยการให้ความร้อนเพื่อทำให้น้ำภายในวัสดุระเหยออกไป ซึ่งความร้อนที่ส่งให้วัสดุจะทำหน้าที่เพิ่มอุณหภูมิและกระตุ้นให้เกิดการระเหยของน้ำ ซึ่งต้องใช้ความร้อนแฝงของการระเหย (latent heat of vaporization) เพื่อเปลี่ยนสถานะน้ำจากของเหลวเป็นไอ เมื่อไอน้ำถูกพาออกจากผิววัสดุด้วยอากาศ ความชื้นในวัสดุจึงลดลงอย่างต่อเนื่อง

#### 2.5.1 สมบัติของอากาศที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้ง

อากาศชื้น (Moist Air) คือ อากาศที่ประกอบด้วยส่วนผสมของอากาศแห้ง (Dry Air) และไอน้ำ (Water Vapor) โดยที่ไอน้ำอยู่ในสถานะของไอ (vapor) ซึ่งยังไม่ควบแน่น ซึ่งอากาศในบรรยากาศทั่วไปมักจะเป็นอากาศชื้น เพราะจะมีไอน้ำปะปนอยู่เสมอ ไอน้ำนี้มาจากการระเหยของน้ำจากพื้นดิน แหล่งน้ำ หรือพืชพรรณในธรรมชาติ โดยตัวแปรของอากาศชื้น ได้แก่

- อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (Dry-bulb temperature)

อุณหภูมิกระเปาะแห้ง คืออุณหภูมิของอากาศที่วัดได้โดยไม่คำนึงถึงความชื้น หรือเป็นอุณหภูมิที่วัดได้ด้วยเทอร์โมมิเตอร์ธรรมดาทั่วไป อุณหภูมิกระเปาะแห้งเป็นค่าพื้นฐานที่ใช้เปรียบเทียบกับอุณหภูมิกระเปาะเปียกและใช้เป็นตัวกำหนดสถานะของอากาศ เช่น ใช้ในการหาค่าความชื้นสัมพัทธ์หรือวิเคราะห์พลังงานที่ต้องใช้ในการเปลี่ยนสถานะของน้ำในกระบวนการอบแห้ง

- อุณหภูมิกระเปาะเปียก (Wet-bulb temperature)

อุณหภูมิกระเปาะเปียก คืออุณหภูมิที่ได้จากการวัดด้วยเทอร์โมมิเตอร์ โดยที่ปลายของเทอร์โมมิเตอร์ถูกห่อด้วยผ้าชุบน้ำ และมีอากาศไหลผ่านต่อเนื่อง ซึ่งแสดงความสามารถของอากาศในการระเหยน้ำ ถ้าอากาศแห้ง อุณหภูมิกระเปาะเปียกจะต่ำกว่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งมาก แต่ถ้าอากาศชื้นทั้งสองอุณหภูมิจะมีค่าใกล้เคียงกัน โดยอุณหภูมิกระเปาะเปียกมักใช้สำหรับคำนวณอัตราการระเหย การออกแบบระบบทำความเย็นแบบระเหย และคำนวณความชื้นสัมพัทธ์

- ความดันไออิ่มตัว (Saturation vapor pressure,  $P_{sat}$ )

ความดันไออิ่มตัว คือความดันของไอน้ำเมื่ออยู่ในภาวะสมดุลกับของเหลว ที่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง ซึ่งหมายถึงอัตราการระเหยของน้ำมีค่าเท่ากับอัตราการควบแน่นของไอน้ำ (Janjai 2017) หาได้จาก

(1) สมการ Tetens เหมาะกับช่วงอุณหภูมิ 0–50°C

$$P_{ws} = 0.6108 \exp\left(\frac{17.27T}{T + 237.3}\right) \quad (2.14)$$

โดยที่  $P_{ws}$  = ความดันไออิ่มตัว (kPa)

$T$  = อุณหภูมิ (°C)

(2) สมการ Antoine เหมาะกับช่วงอุณหภูมิ 1–100°C

$$\log_{10} P_{ws} = 8.07131 - \frac{1730.63}{T + 233.426} \quad (2.15)$$

โดยที่  $P_{ws}$  = ความดันไออิ่มตัว (mmHg)

$T$  = อุณหภูมิ (°C)

- อัตราส่วนความชื้น (Humidity ratio,  $\omega$ )

แสดงสัดส่วนมวลของไอน้ำที่มีอยู่ต่อมวลของอากาศแห้ง (Janjai 2017) หาได้จาก

$$\omega = \frac{m_w}{m_a} \quad (2.16)$$

โดยที่  $\omega$  = อัตราส่วนความชื้น (kg ไอน้ำ / kg อากาศแห้ง)

$m_w$  = มวลของไอน้ำ (kg)

$m_a$  = มวลของอากาศแห้ง (kg)

- ปริมาตรจำเพาะ (Specific volume,  $v$ )

ปริมาตรจำเพาะ คืออัตราส่วนของปริมาตรต่อมวลของอากาศแห้ง (Janjai 2017) หาได้จากสมการ

$$v = \frac{R_a T}{P} \quad (2.17)$$

โดยที่  $v$  = ปริมาตรจำเพาะของอากาศ ( $m^3/kg$ )

$R_a$  = ค่าคงที่ของแก๊สสำหรับอากาศแห้ง (287.05 J/kg·K)

$T$  = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

$P$  = ความดันสัมบูรณ์ของอากาศ (Pa)

- ดีกรีความอิ่มตัว (Degree of Saturation)

ดีกรีความอิ่มตัว คือปริมาณที่ใช้บอกว่าอากาศชื้นมีไอน้ำมากเท่าใดเมื่อเทียบกับปริมาณไอน้ำที่อากาศจะสามารถถือไว้ได้เมื่ออิ่มตัว ณ อุณหภูมิและความดันเดียวกัน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคืออากาศชื้นมีความชื้นอยู่ที่เปอร์เซ็นต์ของสภาพที่อากาศนั้นสามารถอิ่มตัวได้ (Janjai 2017) หาได้จากสมการ

$$\mu = \frac{\omega}{\omega_s} \quad (2.18)$$

โดยที่  $\mu$  = ดีกรีความอิ่มตัว (-)

$\omega$  = อัตราส่วนความชื้นของอากาศจริง (kg ไอน้ำ / kg อากาศแห้ง)

$\omega_s$  = อัตราส่วนความชื้นของอากาศอิ่มตัวที่อุณหภูมิเดียวกัน

- ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity, RH)

ความชื้นสัมพัทธ์ คือสัดส่วนระหว่างปริมาณไอน้ำที่มีอยู่จริงในอากาศ กับปริมาณไอน้ำสูงสุดที่อากาศสามารถถือไว้ได้เมื่ออิ่มตัว ณ อุณหภูมิเดียวกัน โดยแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ (%) (Janjai 2017)

$$RH = \frac{P_v}{P_{sat}} \times 100\% \quad (2.19)$$

โดยที่  $RH$  = ความชื้นสัมพัทธ์ (%)

$P_v$  = ความดันไอของน้ำที่มีอยู่จริงในอากาศ (Pa)

$P_{sat}$  = ความดันไออิ่มตัวของน้ำที่อุณหภูมินั้น (Pa)

- เอนทัลปี (Enthalpy)

เอนทัลปี คือพลังงานรวมของระบบที่ใช้ในกระบวนการทางอุณหพลศาสตร์ ประกอบด้วย พลังงานภายใน (Internal Energy) และ พลังงานที่เกิดจากการทำงานโดยแรงดัน (Flow Work) (Janjai 2017) หาได้จากสมการ

$$h = c_{pa} \cdot T + \omega \cdot (h_{fg} + c_{pv} \cdot T) \quad (2.20)$$

โดยที่  $c_{pa}$  = ความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง ( $\approx 1.005$  kJ/kg·K)

$c_{pv}$  = ความร้อนจำเพาะของไอน้ำ ( $\approx 1.88$  kJ/kg·K)

$h_{fg}$  = ความร้อนแฝงของการระเหย ( $\approx 2500$  kJ/kg ที่  $0^{\circ}\text{C}$ )

$\omega$  = อัตราส่วนความชื้น

$T$  = อุณหภูมิของอากาศ ( $^{\circ}\text{C}$ )

### 2.5.2 วัสดุชื้น (Moist Material)

วัสดุชื้น หมายถึง วัสดุที่มีน้ำหรือความชื้นอยู่ในเนื้อวัสดุ ไม่ว่าจะอยู่ในรูปของน้ำอิสระ (Free water) หรือน้ำที่ถูกยึดเหนี่ยวด้วยแรงทางกายภาพหรือเคมี (Bound water) วัสดุเหล่านี้ไม่อยู่ในสถานะแห้งสนิท แต่ยังคงมีน้ำแทรกอยู่ภายในช่องว่างหรือเนื้อเยื่อของวัสดุ ซึ่งปริมาณความชื้นดังกล่าวมีผลโดยตรงต่อคุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และความร้อนของวัสดุนั้น ๆ ตัวอย่างของวัสดุชื้นจำพวก ผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เช่น ถั่วเขียวสด หอยหลอด เนื้อสัตว์ ผัก และผลไม้ รวมถึงวัสดุก่อสร้างหรือวัสดุธรรมชาติอื่น ๆ เช่น ดินเหนียว หรือไม้สด ซึ่งล้วนมีความชื้นอยู่ในระดับต่าง ๆ กัน ทั้งนี้ ความชื้นในวัสดุสามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

#### 1) น้ำอิสระ (Free water)

น้ำอิสระ หมายถึง น้ำที่อยู่ในช่องว่างหรือโพรงภายในของวัสดุ ซึ่งสามารถระเหยออกได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อนหรือลมแห้ง น้ำอิสระนี้เป็นส่วนที่ถูกกำจัดออกในช่วงแรกของการอบแห้ง

#### 2) น้ำเกาะติด (Bound water)

น้ำเกาะติด หมายถึง น้ำที่ยึดติดอยู่กับพื้นผิวของอนุภาควัสดุหรือผนังเซลล์ด้วยแรงทางเคมีหรือแรงฟิสิกส์ เช่น แรงยึดเหนี่ยวของโมเลกุลน้ำกับหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างคาร์โบไฮเดรต การกำจัดน้ำชนิดนี้ต้องใช้พลังงานมากกว่าน้ำอิสระ และมักเป็นช่วงสุดท้ายของการอบแห้ง

#### 3) ไอน้ำ (Vapor)

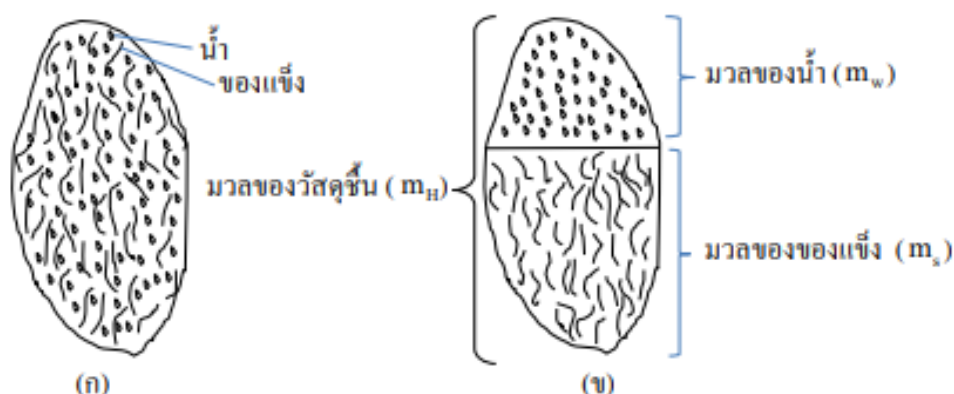
ไอน้ำ หมายถึง น้ำในสถานะแก๊ส ซึ่งเกิดจากการที่โมเลกุลของน้ำในสถานะของเหลวได้รับพลังงานความร้อนมากพอที่จะหลุดออกจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลและเปลี่ยน

สถานะเป็นไอ โดยไอน้ำสามารถเคลื่อนที่แพร่ออกจากพื้นผิววัสดุไปสู่อากาศได้ ซึ่งเป็นผลสำคัญต่อการถ่ายเทมวลในกระบวนการอบแห้ง

การทำความเข้าใจลักษณะของวัสดุซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการออกแบบและควบคุมกระบวนการอบแห้ง เนื่องจากปริมาณและสถานะของน้ำในวัสดุเป็นตัวกำหนดอัตราการคายน้ำ การถ่ายเทความร้อน และสมดุลความชื้นในสภาวะสมดุล ซึ่งเป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบอบแห้งต่อไป

### 2.5.3 การบอกปริมาณความชื้น (Moisture Content)

การบอกปริมาณความชื้น คือการระบุว่าวัสดุมีน้ำอยู่เท่าใด (รูปที่ 1) เมื่อเทียบกับมวลของวัสดุ โดยสามารถแสดงผลได้หลายรูปแบบ ซึ่งมีความสำคัญในการควบคุมคุณภาพสินค้า เช่น การอบแห้ง การเก็บรักษา และการผลิตในอุตสาหกรรมอาหาร เกษตรกรรม และวัสดุศาสตร์ วิธีการบอกปริมาณความชื้นมี 2 แบบ ได้แก่



รูปที่ 1 (ก) วัสดุชื้นซึ่งประกอบด้วยน้ำและมวลของของแข็งและน้ำที่แทรกตัวอยู่ในวัสดุชื้น

(ข) ปริมาณน้ำและของแข็งถ้าแยกน้ำและของแข็งออกจากกัน (Janjai 2017)

- ความชื้นมาตรฐานแห้ง (dry basis, d.b.) นิยมใช้ในกระบวนการอบแห้ง หาได้จากสมการ

$$M_{db} = \frac{m_w}{m_s} \times 100\% \quad (2.21)$$

โดยที่  $M_{db}$  = ความชื้นมาตรฐานแห้ง (kg/kg)

$m_w$  = มวลของน้ำ (kg)

$m_s$  = มวลแห้งของวัสดุ (kg)

- ความชื้นมาตรฐานเปียก (wet basis, w.b.) หาได้จากสมการ

$$M_{wb} = \frac{m_w}{m_H} \times 100\% \quad (2.22)$$

โดยที่  $M_{wb}$  = ความชื้นมาตรฐานเปียก (kg/kg)

$m_w$  = มวลของน้ำ (kg)

$m_H$  = มวลของวัสดุชิ้น (kg)

## 2.6 วอเตอร์แอกทิวิตี (water activity, $a_w$ )

วอเตอร์แอกทิวิตี คือปริมาณน้ำอิสระที่เป็นประโยชน์ต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ เป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมและป้องกันการเสื่อมสภาพของผลิตภัณฑ์ มีผลโดยตรงต่อการกำหนดอายุการเก็บรักษาและความปลอดภัยของอาหาร โดยหาได้จากสมการ

$$a_w = \frac{P}{P_{sat}} \quad (2.23)$$

โดยที่  $P$  = ความดันไอของน้ำเหนือผิววัสดุ (Pa)

$P_{sat}$  = ความดันไอของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิเดียวกัน (Pa)

## 2.7 ความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content, EMC)

เมื่อนำวัสดุชิ้นไปวางไว้ในอากาศที่มีอุณหภูมิและความชื้นค่าหนึ่งจะมีการถ่ายเทความชื้นระหว่างวัสดุกับอากาศโดยรอบ จนความดันไอของวัสดุเท่ากับความดันไอของอากาศวัสดุจะหยุดถ่ายเทความชื้นเรียกว่าความชื้นสมดุล (Janjai 2017)

## 2.8 ซอร์พชันไอโซเทอร์มของความชื้น (Moisture Sorption Isotherm, MSI)

ซอร์พชันไอโซเทอร์มของความชื้น (Moisture Sorption Isotherm, MSI) คือ ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลของวัสดุกับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศโดยรอบที่อุณหภูมิคงที่ โดยสามารถแสดงในรูปกราฟหรือสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งแสดงให้เห็นพฤติกรรมการดูดซับ (adsorption) หรือการคายความชื้น (desorption) ของวัสดุในสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน

การศึกษา MSI มีความสำคัญในกระบวนการอบแห้ง การเก็บรักษา การควบคุมคุณภาพ และการออกแบบบรรจุภัณฑ์ เนื่องจากช่วยให้สามารถกำหนดค่าความชื้นเป้าหมายของผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมในแต่ละสภาพอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ

### 2.8.1 หลักการของ MSI

เมื่อนำวัสดุไปไว้ในอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่างกัน วัสดุจะทำการดูดซับหรือคายความชื้นจนกว่าจะเข้าสู่สภาวะสมดุล ซึ่งปริมาณน้ำในวัสดุจะไม่เปลี่ยนแปลงอีก จุดสมดุลนี้เรียกว่า ความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content, EMC) และจะแตกต่างกันไปตามค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ เมื่อทำการวัด EMC ที่ RH ต่าง ๆ ภายใต้อุณหภูมิคงที่ แล้วนำมาเขียนเป็นกราฟ จะได้เส้นโค้งที่เรียกว่าไอโซเทอร์มของความชื้น (MSI)

### 2.8.2 รูปแบบของเส้นโค้ง MSI

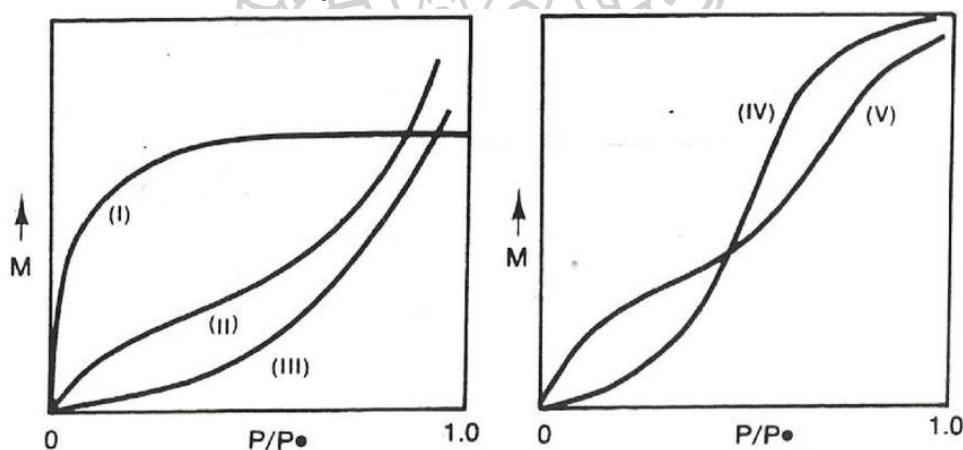
ลักษณะของเส้นโค้ง MSI ขึ้นอยู่กับประเภทของวัสดุ โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์อาหารมักมีลักษณะเป็น แบบ S-shape หรือ sigmoid curve ซึ่งแบ่งเป็น 5 ประเภทหลัก (Type I–V) (Aviara และ Ndubisi A 2020) (รูปที่ 2) ดังนี้

Type I – ลักษณะโค้งนูนขึ้นแล้วแบนราบอย่างรวดเร็วรูปร่างคล้ายตัว L มักพบในวัสดุที่สามารถดูดซับน้ำได้ดีมากตั้งแต่ RH ต่ำ เช่น เจลาติน หรือวัสดุที่มีโครงสร้างขนาดเล็ก

Type II – ลักษณะ sigmoidal เส้นโค้งรูปตัว S มักพบในอาหารและวัสดุชีวภาพ เช่น เมล็ดพืช ผลไม้แห้ง มีการดูดซับปานกลางในช่วงต้น และพุ่งสูงในช่วง RH สูง

Type III – ลักษณะโค้งชันตอนปลาย พบในวัสดุที่ไม่ดูดน้ำในช่วง RH ต่ำ เช่น น้ำตาล และสารละลายเข้มข้น

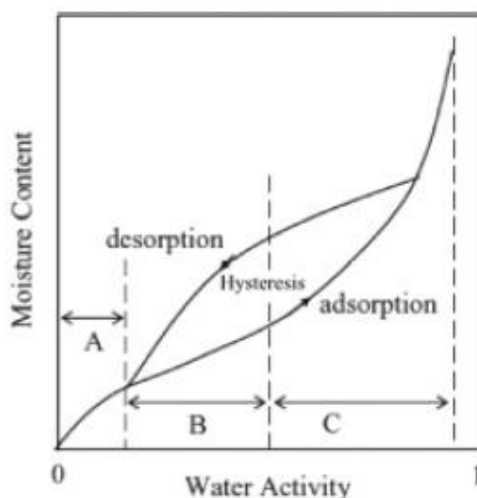
Type IV และ V – พบในวัสดุที่เกิดการควบแน่นของไอน้ำในรูพรุนขนาดเล็ก (capillary condensation) เช่น เจลหรือวัสดุดูดซับสังเคราะห์



รูปที่ 2 ลักษณะของเส้นโค้ง MSI แต่ละชนิด (Aviara และ Ndubisi A 2020)

### 2.8.3 การวิเคราะห์ MSI

กราฟ MSI สามารถใช้วิเคราะห์ได้ทั้งการดูดความชื้น (adsorption isotherm) และการคายความชื้น (desorption isotherm) โดยทั่วไปจะพบว่าเส้นโค้งทั้งสองไม่ซ้อนทับกันเกิดปรากฏการณ์ hysteresis (รูปที่ 2) ซึ่งอธิบายว่าโครงสร้างของวัสดุมีผลต่อการดูดและคายความชื้นไม่เท่ากัน (Janjai 2017)



รูปที่ 3 กราฟ Moisture sorption isotherm (Andrade และคณะ 2011)

## 2.9 หลักการของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Drying) เป็นกระบวนการลดความชื้นของวัสดุโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่สะอาดและไม่มีค่าใช้จ่ายในการใช้พลังงาน กระบวนการนี้ได้รับความนิยมอย่างมากในอุตสาหกรรมการเกษตร และการแปรรูปอาหาร โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีแสงแดดเพียงพอ เช่น ประเทศในเขตร้อนชื้น เช่น ประเทศไทย

การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์มีหลักการทำงานโดยอาศัยกลไกการถ่ายเทความร้อนจากรังสีอาทิตย์ไปยังวัสดุชิ้น ทำให้น้ำในวัสดุชิ้นระเหยออกสู่อากาศ จากนั้นอากาศร้อนที่อิ่มตัวด้วยไอน้ำจะถูกถ่ายเทออกไปและแทนที่ด้วยอากาศแห้งใหม่ที่สามารถระเหยน้ำได้อีก โดยอาศัยปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse Effect) ภายในเครื่องอบแห้ง (Janjai 2017) กล่าวคือเมื่อรังสีอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่นสั้น (ประมาณ 0.3–2.5  $\mu\text{m}$ ) ผ่านเข้าไปในวัสดุโปร่งใส เช่น กระจกหรือพลาสติกใส ซึ่งเป็นฝาครอบของเครื่องอบแห้ง รังสีเหล่านี้จะถูกวัสดุภายในดูดกลืน เช่น พื้นด้านล่างหรือวัสดุรองรับผลิตภัณฑ์ หลังจากนั้นวัสดุที่ดูดกลืนพลังงานความร้อนจะแผ่รังสีความร้อนกลับออกมาในรูปของคลื่นอินฟราเรดยาว (ประมาณ 4–100  $\mu\text{m}$ ) ซึ่งไม่สามารถผ่านฝาครอบออกไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้เกิดการสะสมของพลังงานภายในระบบ ส่งผลให้อุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งสูงขึ้นมากกว่าสภาพแวดล้อมภายนอก ผลที่ได้คืออุณหภูมิที่สูงขึ้นภายในห้องอบแห้งจะเร่งกระบวนการระเหยของน้ำในผลิตภัณฑ์ และลดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในเครื่องอบแห้ง ช่วยเพิ่มอัตราการแห้งและลดระยะเวลาในการอบแห้ง (SAHU และคณะ 2016)

### 2.9.1 ประเภทของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภทหลัก ได้แก่

- **เครื่องอบแห้งแบบรับรังสีอาทิตย์โดยตรง (Direct Solar Dryer)**

เครื่องอบแห้งแบบรับรังสีอาทิตย์โดยตรงใช้หลักการให้รังสีอาทิตย์ตกกระทบโดยตรงบนผลิตภัณฑ์ที่ต้องการอบแห้งเหมาะสำหรับวัสดุที่ไม่ไวต่อรังสี UV เนื่องจากว่าผลิตภัณฑ์ได้รับรังสีอาทิตย์โดยตรงจึงทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีคล้ำได้ (Janjai 2017) (รูปที่ 4)



รูปที่ 4 เครื่องอบแห้งแบบรับรังสีอาทิตย์โดยตรง (www.โซล่าเซลล์.net)

- **เครื่องอบแห้งแบบทางอ้อม (Indirect Solar Dryer)**

เครื่องอบแห้งแบบทางอ้อมใช้หลักการให้รังสีอาทิตย์ไม่ตกกระทบบนผลิตภัณฑ์โดยตรง แต่ถูกใช้ในการทำให้อากาศร้อนในแผงรับรังสี โดยอากาศร้อนจะไหลเข้าสู่ห้องอบแห้งเพื่อให้ความร้อนแก่ผลิตภัณฑ์ ทำให้คุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ดีกว่าเนื่องจากป้องกันแสงแดดโดยตรงที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีคล้ำ (Janjai 2017) (รูปที่ 5)



รูปที่ 5 เครื่องอบแห้งแบบทางอ้อม (www.tradeindia.com)

- **เครื่องอบแห้งแบบผสม (Hybrid Solar Dryer)**

เครื่องอบแห้งแบบผสม เป็นการผสมผสานกันระหว่างพลังงานแสงอาทิตย์กับพลังงานเสริมอื่น เช่น ฮีตเตอร์ไฟฟ้า หรือแก๊ส ใช้เมื่อพลังงานแสงอาทิตย์ไม่เพียงพอ เช่น ในช่วงเวลากลางคืนหรือ

วันที่มีเมฆมากช่วยเพิ่มความต่อเนื่องและเสถียรภาพของกระบวนการอบแห้ง ซึ่งเหมาะกับผลิตภัณฑ์ที่ต้องอบแห้งอย่างต่อเนื่อง (Janjai 2017) (รูปที่ 6)



รูปที่ 6 เครื่องอบแห้งแบบผสม (www.teriin.org)

## 2.10 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง

การประเมินประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เป็นขั้นตอนสำคัญในการวิเคราะห์ความสามารถของระบบในการถ่ายเทพลังงานเพื่อการระเหยน้ำจากผลิตภัณฑ์ โดยสามารถพิจารณาได้จาก 2 แนวทางหลัก ได้แก่ การวิเคราะห์สมดุลพลังงาน และการคำนวณประสิทธิภาพการอบแห้ง

### 2.10.1 สมการสมดุลพลังงาน (Energy Balance)

ในระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานที่เข้าสู่ระบบสามารถแบ่งออกเป็นพลังงานที่มีประโยชน์ ( $Q_{useful}$ ) เช่น พลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำ และพลังงานสูญเสีย ( $Q_{loss}$ ) (Janjai 2017) ซึ่งสามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$Q_{in} = Q_{useful} + Q_{loss} \quad (2.24)$$

โดยที่  $Q_{in}$  = พลังงานที่เข้าสู่ระบบทั้งหมด (kJ) ซึ่งได้จากรังสีอาทิตย์ในเวลานี้

$Q_{useful}$  = พลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำจากผลิตภัณฑ์ (kJ)

$Q_{loss}$  = พลังงานที่สูญเสียไปกับสิ่งแวดล้อม เช่น การพาความร้อน การแผ่รังสี และการนำความร้อนผ่านผนังเครื่องอบแห้ง (kJ)

การคำนวณพลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำ (latent heat) (Janjai 2017) หาได้จากสมการ

$$Q_{evap} = m_w h_{fg} \quad (2.25)$$

โดยที่  $m_w$  = มวลน้ำที่ถูกระเหย (kg)

$h_{fg}$  = ค่าความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ (kJ/kg)

### 2.10.2 ประสิทธิภาพในการอบแห้ง (Drying Efficiency)

ประสิทธิภาพในการอบแห้งเป็นการวัดว่าพลังงานที่เข้าสู่ระบบถูกใช้ในการระเหยน้ำได้มากน้อยเพียงใด โดยหาได้จากสมการ (Janjai 2017)

$$\eta = \frac{Q_{\text{useful}}}{Q_{\text{in}}} \times 100\% \quad (2.26)$$

หรืออีกแบบหนึ่งที่ใช้ในงานอบแห้งวัสดุขึ้น (Tiwari & Tiwari, 2007)

$$\eta = \frac{m_w \cdot h_{fg}}{I \cdot A \cdot t} \times 100\% \quad (2.27)$$

โดยที่  $I$  = ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$A$  = พื้นที่รับรังสีของเครื่องอบแห้ง ( $\text{m}^2$ )

$t$  = เวลาที่รับรังสีอาทิตย์ (s)

## 2.11 การตากแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งประเภทต่าง ๆ

การตากแห้งเป็นหนึ่งในกระบวนการแปรรูปและถนอมอาหารที่สำคัญในภาคเกษตรกรรม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดความชื้นในผลิตภัณฑ์ ชะลอการเน่าเสียจากจุลินทรีย์ และยืดอายุการเก็บรักษา วัสดุทางการเกษตรที่นิยมตากแห้ง ได้แก่ พืชสมุนไพร ผัก ผลไม้ เนื้อสัตว์ เมล็ดพืช หอมแดง พริก กลัวย มะม่วง มะเขือเทศ กุ้งแห้ง ปลาแห้ง เป็นต้น กระบวนการตากแห้งมีได้หลายรูปแบบ ตั้งแต่การตากแดดธรรมดาไปจนถึงการใช้เครื่องอบแห้งที่ออกแบบเฉพาะ เช่น เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบตรง แบบทางอ้อม และแบบผสม ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการแห้ง ควบคุมคุณภาพ และลดระยะเวลาในการตากแห้ง

- ตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตากแห้ง

Barghi Jahromi และคณะ (2022) ได้พัฒนาเครื่องอบแห้งแบบตู้พลังงานแสงอาทิตย์ (solar cabinet dryer) ที่ออกแบบให้เหมาะสำหรับเกษตรกรรายย่อยและผู้ประกอบการขนาดเล็ก โดยเน้นการประยุกต์ใช้ระบบเก็บสะสมพลังงานความร้อนด้วยวัสดุเปลี่ยนสถานะ (Phase Change Material, PCM) เพื่อช่วยรักษาอุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งให้คงที่ในช่วง  $40\text{--}60^\circ\text{C}$  โดยอบธัญพืช ผัก และผลไม้ หลากหลายชนิด แม้ในช่วงที่มีแสงอาทิตย์ไม่เพียงพอ พบว่าเครื่องอบแห้งแบบตู้สามารถป้องกันการปนเปื้อนจากฝุ่น แมลง และสิ่งแวดล้อมภายนอกได้ดีกว่าการตากแดดตามธรรมชาติ อีกทั้งยังช่วยให้การควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในกระบวนการอบมีความเสถียร โดยรวมแล้วประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบแห้งและตัวเก็บสะสมความร้อนที่มี PCM จะเพิ่มขึ้นประมาณ 2.98–39% และ 15.6–62% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับระบบที่ไม่มี PCM ส่งผลให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งสูงขึ้น Arslan Afzal และคณะ (2023) พัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสม (hybrid mixed-mode) สำหรับผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร โดยเครื่องอบที่พัฒนาใช้ทั้งพลังงานจากรังสีแสงอาทิตย์โดยตรง และการส่งอากาศร้อนผ่านธาตุผลิตภัณฑ์ที่เป็นหลักชนิดอ่อน ทำให้มีการถ่ายเทความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพ และมีแหล่งพลังงานเสริมคือแผงโซลาร์ที่ต่อกับแบตเตอรี่ เพื่อรองรับช่วงที่แสงอาทิตย์น้อยหรือมีเมฆให้เครื่องยังสามารถอบแห้งได้อย่าง

ต่อเนื่องแม้ในช่วงที่มีแสงแดดน้อย งานวิจัยได้ทำการออกแบบ สร้างต้นแบบ และทดสอบ ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งกับผลิตภัณฑ์หลายชนิด ได้แก่ ลูกพีชพันธุ์ Freestone peach แอปเปิลพันธุ์ Golden apple และพริกพันธุ์ Anaheim chili ผลการทดลองพบว่า เครื่องอบแห้ง แบบผสมสามารถรักษาอุณหภูมิภายในที่เหมาะสมระหว่าง 45–65 °C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสม ต่อการอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรส่วนใหญ่ และให้ประสิทธิภาพการอบแห้งสูงกว่าการตากแดด ตามธรรมชาติ โดยใช้เวลาอบแห้งประมาณ 14–17 ชั่วโมง ขึ้นอยู่กับชนิดของผลิตภัณฑ์ Sarsavadia (2007) พัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสมผสาน (solar-assisted dryer) เพื่ออบแห้ง หัวหอม โดยระบบใช้ทั้งพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานไฟฟ้าเสริมเพื่อควบคุมอุณหภูมิภายใน ผล การทดลองพบว่าเครื่องอบแบบผสมสามารถลดเวลาอบแห้งได้มากกว่า 40% เมื่อเทียบกับการตาก แดดทั่วไป และให้คุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ดีกว่า ทั้งด้านสี กลิ่น และความสม่ำเสมอ นอกจากนี้งานวิจัยยัง ใช้การวิเคราะห์พลังงาน (energy analysis) เพื่อประเมิน ประสิทธิภาพของระบบ ซึ่งพบว่ามีความ ค่า thermal efficiency สูงกว่า 30% แสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมของระบบในการใช้งานระดับชุมชน Etim และคณะ (2020) ได้ทำการออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบแอคทีฟ ชนิดทางอ้อม (active indirect solar dryer) สำหรับการอบกล้วยที่เมืองอุมูดีเก ประเทศไนจีเรีย โดยเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพของการไหลเวียนอากาศร้อนเพื่อให้การคายน้ำของผลิตภัณฑ์เกิดขึ้น อย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ ตัวเครื่องประกอบด้วยแผงดักจับพลังงานแสงอาทิตย์ (solar collector) แบบแผ่นราบ และห้องอบที่มีระบบพัดลมช่วยบังคับการไหลของอากาศร้อนเข้าสู่พื้นที่อบแห้ง ผลการ ทดลองพบว่าเครื่องอบแห้งสามารถลดปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์จาก 4.53 kg เหลือ 1.57 kg ภายใน 9-16 ชั่วโมง หลังการอบแห้ง ในขณะที่ปริมาณความชื้นลดลงจาก 68.97% w.b. จนเหลือ 12.00% w.b. โดยเครื่องอบแห้งสามารถประหยัดเวลาการอบแห้งผลิตภัณฑ์ได้เกือบ 40% เมื่อเทียบ กับการอบแห้งแบบตามธรรมชาติ ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งอยู่ในช่วง 13.85-31.84% และ พบว่าพื้นที่ทางเข้าอากาศของเครื่องอบแห้งมีผลต่อประสิทธิภาพการอบแห้งผลิตภัณฑ์ Echavarria และคณะ (2021) ได้ศึกษาซอร์ฟชันไอโซเทอร์มของไซเลจแห้งจากเครื่องในปลานิลแดง พบว่า แบบจำลอง GAB สามารถอธิบายพฤติกรรมความชื้นได้ดีที่สุดโดยมีอุณหภูมิและความชื้น สัมพัทธ์ของอากาศที่เหมาะสมต่อการอบแห้งคือ 60 °C และ 30-50% ตามลำดับ โดยใช้เวลาในการ อบแห้ง 2 วัน

## 2.12 การจำลองแบบเครื่องอบแห้ง (Simulation of Drying Systems)

การจำลองแบบเครื่องอบแห้งเป็นเครื่องมือสำคัญที่ช่วยในการออกแบบวิเคราะห์ระบบ อบแห้งโดยไม่จำเป็นต้องทดลองซ้ำจำนวนมาก แบ่งเป็น 4 วิธี ได้แก่ แบบจำลองเชิงฟิสิกส์ (physical model) (Simo-Tagne และคณะ 2017) แบบจำลองเชิงตัวเลข (numerical model) (Sadodin และ Kashani 2011) แบบจำลองเชิงประจักษ์ (empirical model) (Tarigan และคณะ 2018) และ

แบบจำลองเชิงผสม (semi-empirical model) (Zhang และคณะ 2016) ในการจำลองกระบวนการอบแห้ง (drying simulation) ไม่ว่าจะเป็นวิธีการเชิงประจักษ์ เชิงกึ่งประจักษ์ หรือเชิงฟิสิกส์ ล้วนต้องอาศัยสมการควบคุมหลัก (Governing Equations) ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญที่กำหนดพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนและมวลในระบบอบแห้งทุกประเภท ซึ่งสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความชื้น อัตราการไหลของอากาศ และปริมาณรังสีอาทิตย์ที่เข้าสู่ระบบ แม้ว่าวิธีการจำลองที่ต่างกันจะใช้ระดับความซับซ้อนของสมการไม่เท่ากัน แต่ทุกแนวทางก็มีพื้นฐานมาจากสมการควบคุมเดียวกันทั้งสิ้น

### 2.12.1 แบบจำลองเชิงฟิสิกส์ (Physical Model)

แบบจำลองเชิงฟิสิกส์ เป็นแบบจำลองที่ใช้สมการฟิสิกส์พื้นฐานในการอธิบายกระบวนการถ่ายเทความร้อนและความชื้นภายในระบบอบแห้ง โดยใช้หลักการอนุรักษ์พลังงานและอนุรักษ์มวล ซึ่งช่วยให้สามารถเข้าใจปรากฏการณ์ภายในระบบได้อย่างเป็นเหตุเป็นผลและสามารถนำไปใช้ในการออกแบบหรือปรับปรุงเครื่องอบแห้งได้จริง ความถูกต้องของแบบจำลองขึ้นกับความสมบูรณ์ของสมการทางฟิสิกส์ที่ใช้และค่าพารามิเตอร์ทางกายภาพของวัสดุที่เกี่ยวข้อง หัวใจสำคัญของการสร้างแบบจำลองทางฟิสิกส์ คือการกำหนดสมการควบคุมหลัก (Governing Equations) ที่ใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้นของผลิตภัณฑ์และอากาศในกระบวนการอบแห้ง (Simo-Tagne และคณะ 2017)

- สมการควบคุมหลัก (Governing Equations)

ในการจำลองแบบเชิงฟิสิกส์จำเป็นต้องกำหนดสมการควบคุมหลัก (Governing Equations) ที่อธิบายกระบวนการถ่ายเทพลังงานและความชื้นในระบบอบแห้ง โดยทั่วไปจะอาศัยสมการพื้นฐานทางฟิสิกส์ ได้แก่ สมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy conservation) สมการอนุรักษ์มวล (Mass conservation) สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Navier–Stokes equations for airflow) สมการการแพร่ (Diffusion Equation – Fick’s law) และสมการถ่ายเทความร้อนและมวล (Heat and mass transfer equations) ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

- (1) สมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy equation for air flow)

สมการนี้ใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ( $T$ ) ในของไหลหรือวัสดุเมื่อเกิดการถ่ายเทความร้อนแบบไม่คงที่ โดยคำนึงถึงทั้งการสะสมพลังงานในระบบ (storage) การพาความร้อน (convection) การนำความร้อน (conduction) และแหล่งกำเนิดความร้อนภายใน (heat generation) กล่าวอีกนัยหนึ่งสมการนี้คือสมการพลังงานในเชิงอนุพันธ์ย่อย (Energy Equation in Differential Form) ที่ใช้ในแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนและการอบแห้งในวัสดุ (Janjai และคณะ 2011)

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p v \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + S_T \quad (2.28)$$

โดยที่  $\rho$  = ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m<sup>3</sup>)

$T$  = อุณหภูมิ (K)

$v$  = เวกเตอร์ความเร็วอากาศ (m/s)

$k$  = ค่าการนำความร้อน (W/m·K)

$S_T$  = แหล่งกำเนิดความร้อน เช่น จากการระเหยน้ำ (W/m<sup>3</sup>)

(2) สมการอนุรักษ์มวล (Mass balance equation)

สมการนี้ใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นหรือสัดส่วนมวลของสาร ( $Y$ ) ในระบบ เมื่อมีการแพร่ (diffusion) และ การพา (convection) ของมวลในสภาวะไม่คงที่ (Patil และ Gawande 2017)

$$\frac{\partial Y}{\partial t} + v \cdot \nabla Y = D_{eff} \nabla^2 Y + S_m \quad (2.29)$$

โดยที่  $Y$  = humidity ratio (kg water/kg dry air)

$D_{eff}$  = ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นที่มีประสิทธิภาพ (m<sup>2</sup>/s)

$S_m$  = แหล่งกำเนิดไอน้ำ (จากผลิตภัณฑ์)

(3) สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Navier–Stokes equations for airflow)

อัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมของของไหลเท่ากับผลรวมของแรงต่าง ๆ ที่กระทำต่อของไหลนั้น โดยแรงที่กระทำ ได้แก่ แรงดัน (pressure force) แรงหนืดหรือแรงเฉือน (viscous force) และแหล่งกำเนิดแรงอื่น ๆ (external source) เช่น แรงโน้มถ่วงหรือแรงพัดลม (Angula และคณะ 2019)

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v \right) = -\nabla P + \mu \nabla^2 v + S_v \quad (2.30)$$

โดยที่  $P$  = ความดัน (Pa)

$\mu$  = ความหนืดของอากาศ (Pa·s)

$S_v$  = term จากแรงต้านหรือพัดลม

(4) สมการการแพร่ (Diffusion Equation – Fick's law)

สมการนี้อธิบายการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นภายในวัสดุตามเวลาอันเกิดจากการแพร่ (diffusion) ของความชื้นจากบริเวณที่มีความชื้นสูงไปยังบริเวณที่มีความชื้นต่ำ (janjai 2017)

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 M \quad (2.31)$$

โดยที่  $M$  = ความชื้นในผลิตภัณฑ์ (kg water/kg dry matter)

$D_{eff}$  = Effective diffusivity (m<sup>2</sup>/s)

(5) สมการถ่ายเทความร้อนและมวล (Heat and mass transfer equations)

ภายในเครื่องอบแห้ง อากาศจะแลกเปลี่ยนพลังงานและความชื้นกับผลิตภัณฑ์  
อธิบายได้ว่า

(5.1) พลังงานความร้อนที่อากาศสูญเสียไประหว่างการไหลผ่านระบบ เช่น เครื่อง  
แลกเปลี่ยนความร้อน หรือเครื่องอบแห้ง กล่าวคือพลังงานที่อากาศได้รับหรือคายออก =  
มวลอัตราการไหลของอากาศ × ความจุความร้อนจำเพาะ × ส่วนต่างของอุณหภูมิระหว่าง  
ทางเข้าและทางออก (janjai 2017)

$$\dot{Q}_{air} = \dot{m}_{air} C_{p,air} (T_{in} - T_{out}) \quad (2.32)$$

(5.2) สมการอนุรักษ์มวลน้ำในอากาศ กล่าวคือ ปริมาณน้ำที่อากาศได้รับระหว่างการไหล  
ผ่านเครื่องอบแห้งจะต้องเท่ากับปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุในช่วงเวลาเดียวกัน (janjai  
2017)

$$\dot{m}_{air} (Y_{out} - Y_{in}) = -\frac{dm}{dt} \quad (2.33)$$

โดยที่  $\dot{m}_{air}$  = อัตราการไหลของอากาศแห้ง (kg/s)

$C_{p,air}$  = ความร้อนจำเพาะของอากาศ (J/kg·K)

$T_{in}, T_{out}$  = อุณหภูมิอากาศขาเข้าและออก (K)

$Y_{in}, Y_{out}$  = humidity ratio (kg water/kg dry air)

Simo-Tagne และคณะ (2017) ได้สร้างแบบจำลองสำหรับเตาอบไม้ Iroko และ  
เปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองในภูมิภาคเขตร้อนที่ประเทศสาธารณรัฐแคเมอรูน พบว่าผลที่  
ใกล้เคียงกับการทดลองจริง โดยได้ทำการพัฒนาแบบจำลองแบบจำลองการแพร่ (Diffusion model)  
ในการแก้สมการที่ซับซ้อนและไม่เป็นเชิงเส้น ผู้วิจัยได้เลือกใช้วิธีเชิงตัวเลขแบบส่วนต่างจำกัด (Finite  
Difference Method: FDM) โดยใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ  
อากาศ อุณหภูมิผลิตภัณฑ์ และความชื้นของผลิตภัณฑ์ตามเวลา ผลลัพธ์จากการจำลองแบบพบว่ามี  
ความสอดคล้องกับข้อมูลการทดลองจริง โดยค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ แสดงให้  
เห็นว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถใช้อธิบายพฤติกรรมของกระบวนการอบแห้งได้อย่างมี  
ประสิทธิภาพ

### 2.12.2 แบบจำลองเชิงตัวเลข (numerical model)

แบบจำลองเชิงตัวเลขเป็นวิธีการจำลองแบบที่อาศัยการแก้สมการควบคุมหลัก (Governing  
Equations) เช่น สมการอนุรักษ์พลังงาน สมการอนุรักษ์มวล และสมการโมเมนตัม โดยใช้วิธีเชิง  
ตัวเลข (Numerical methods) ในการประมาณการคำตอบ เนื่องจากสมการเหล่านี้มักมีความ

ซับซ้อน ไม่สามารถหาคำตอบเชิงวิเคราะห์ (Analytical solution) ได้โดยตรง จึงต้องใช้วิธีการเชิงตัวเลขช่วยในการคำนวณ เช่น Finite Difference Method (FDM), Finite Volume Method (FVM) และ Finite Element Method (FEM) โดยแต่ละวิธีจะแปลงสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equations, PDEs) ให้กลายเป็นสมการเชิงพีชคณิตที่สามารถแก้ได้ด้วยคอมพิวเตอร์ นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้ Computational Fluid Dynamics (CFD) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลของอากาศ การกระจายอุณหภูมิ และการถ่ายเทความร้อนภายในเครื่องอบแห้ง (Bekkioui และคณะ 2020)

ในการแก้สมการสมการควบคุมหลักเหล่านี้นิยมใช้วิธี Finite Difference Method (FDM) ซึ่งจะแทนที่อนุพันธ์ด้วยผลต่างจำกัด (Castro และคณะ 2018) เช่น

$$\frac{\partial T}{\partial t} \approx \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t}, \quad \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \approx \frac{T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n}{(\Delta x)^2} \quad (2.34)$$

วิธีนี้ช่วยให้สามารถเขียนโค้ดคำนวณด้วยภาษา Fortran, MATLAB หรือซอฟต์แวร์ CFD เช่น ANSYS Fluent และ COMSOL Multiphysics ได้ โดยงานวิจัยของ Sadodin และ Kashani (2011) ได้ใช้แบบจำลองสมการอนุพันธ์ความร้อนและมวลแล้วแก้ด้วยวิธี finite difference method (FDM) ในโปรแกรม Compaq Visual FORTRAN 6.5 เพื่อจำลอง solar greenhouse tunnel dryer สำหรับการอบมะพร้าวแห้ง (copra) ผู้วิจัยพบว่าผลการจำลองแบบสอดคล้องกับการทดลองจริง โดยสามารถลดความชื้นจาก 52.2 % w.b. ไปเป็น 8 % w.b. ภายใน 55 ชั่วโมง ภายใต้สภาวะ full load conditions ในขณะที่ Bekkioui และคณะ (2020) เป็นการจำลองเชิงตัวเลข (numerical simulation) โดยใช้ ANSYS Fluent ของเครื่องอบไม้แบบใช้พลังงานแสงอาทิตย์ (solar wood dryer) ที่มีผนังหรือฝาครอบกระจก/แผ่นใส (glazed walls) เพื่อทำการทดลองภายใต้สภาพภูมิอากาศของประเทศโมร็อกโก โดยใช้ข้อมูลอุณหภูมิตลอดระยะเวลา 1 ปี เพื่อศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งไม้ชนิด *Tetraclinis articulata* (ไม้ Thuya) ซึ่งเป็นไม้พื้นถิ่นที่นิยมใช้ในงานหัตถกรรม เครื่องอบแห้งในงานวิจัยนี้ออกแบบให้เป็นระบบกึ่งปิดที่สามารถรับรังสีอาทิตย์ผ่านผนังกระจกและเก็บความร้อนไว้ภายในได้ตีผลการจำลองพบว่า ภายใต้ความเร็วลมเฉลี่ยประมาณ 1 m/s สามารถทำการอบไม้ได้ประมาณ 15 รอบต่อปี และเมื่อเพิ่มการระบายอากาศอย่างต่อเนื่องจำนวนรอบการอบเพิ่มขึ้นเป็น 33 รอบต่อปี อุณหภูมิภายในเครื่องอบในฤดูร้อนมีค่าสูงกว่าฤดูหนาวอย่างมีนัยสำคัญ ทำให้ระยะเวลาอบลดลงจากเฉลี่ย 600 ชั่วโมงในฤดูหนาวเหลือเพียงประมาณ 430 ชั่วโมงในฤดูร้อน งานวิจัยดังกล่าวชี้ให้เห็นถึงศักยภาพของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบมีผนังกระจกในการใช้พลังงานหมุนเวียนเพื่อทดแทนการใช้พลังงานไฟฟ้าหรือเชื้อเพลิงฟอสซิลในกระบวนการอบไม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

### 2.12.3 แบบจำลองเชิงประจักษ์ (empirical model)

แบบจำลองเชิงประจักษ์ (Empirical Models) เป็นการสร้างความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ระหว่างข้อมูลนำเข้า (input) และผลลัพธ์ (output) ของกระบวนการอบแห้ง โดยไม่จำเป็นต้องอธิบายรายละเอียดกลไกภายในด้วยสมการฟิสิกส์โดยตรง แบบจำลองลักษณะนี้จึงอาศัยข้อมูลการทดลองเป็นหลักในการพัฒนาและทดสอบความถูกต้อง ตัวอย่างที่ใช้บ่อยในงานวิจัยคือ สมการการอบแห้งชั้นบาง (Thin-layer drying models) ซึ่งได้มาจากการวิเคราะห์ข้อมูลการอบแห้งจริง เช่น Page model, Henderson–Pabis model, Logarithmic model, Two-term model รวมทั้งการประยุกต์ใช้แบบจำลองเชิงสถิติและเชิงปัญญาประดิษฐ์ที่ซับซ้อน เช่น แบบจำลอง ANN และ ARX ซึ่งสามารถอธิบายความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear relationships) ได้ดีกว่าแบบจำลองพื้นฐาน ตัวอย่างสมการการอบแห้งชั้นบาง (Ertekin & Yaldiz, 2004) ได้แก่

(1) Page Model

$$MR = \exp(-kt^n) \quad (2.35)$$

(2) Henderson–Pabis Model

$$MR = a \exp(-kt) \quad (2.36)$$

(3) Logarithmic Model

$$MR = a \exp(-kt) + c \quad (2.37)$$

โดยที่  $MR$  = Moisture Ratio

$k$  = ค่าคงที่การอบแห้ง

$n, a, c$  = ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการฟิตข้อมูลการทดลอง

$t$  = เวลาในการอบแห้ง (s)

Tarigan และคณะ (2018) ผู้วิจัยได้ทำการจำลองแบบเชิงประจักษ์เพื่อทำนายพฤติกรรมการอบแห้งของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรทั่วไป โดยใช้สมการการอบแห้งชั้นบาง (thin-layer models) หลายรูปแบบเพื่อตรวจสอบความเหมาะสม ผลการศึกษาพบว่า Page model สามารถอธิบายข้อมูลการทดลองได้แม่นยำที่สุดและมีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 56 °C ซึ่งเหมาะสมสำหรับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรทั่วไป ในขณะที่งานวิจัยโดย Chasiotis และคณะ (2021) ได้ทำการศึกษาเชิงตัวเลขและเชิงทดลองของกระบวนการอบแห้งแบบพาความร้อนที่ไม่คงอุณหภูมิ (non-isothermal convective drying) สำหรับใบ *Lavandula x allardii* ซึ่งเป็นพืชสมุนไพรหอมในตระกูลลาเวนเดอร์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนและมวลระหว่างอากาศร้อนกับวัสดุที่กำลังอบแบบจำลองที่ใช้เป็น แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนและมวลเชิงฟิสิกส์ (coupled heat and mass transfer model) ซึ่งอิงสมการอนุรักษ์พลังงานและสมการแพร่ความชื้น (Fick's law) ในวัสดุ การคำนวณเชิงตัวเลขทำโดยใช้ Finite Element Method (FEM) ใน COMSOL

Multiphysics เพื่อติดตามการกระจายของอุณหภูมิและความชื้นภายในเนื้อใบตลอดกระบวนการอบ ผลการทดลองและการจำลองพบว่าค่าความชื้นในใบลดลงอย่างไม่เป็นเชิงเส้น โดยอัตราการระเหยของน้ำจะสูงในช่วงต้นของการอบแล้วค่อย ๆ ลดลงเมื่อความชื้นใกล้สมดุล ผลการจำลองให้ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยต่ำ ( $RMSE \approx 0.03 - 0.05$ ,  $R^2 > 0.95$ ) เมื่อเทียบกับข้อมูลทดลอง ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่พัฒนาสามารถอธิบายกระบวนการถ่ายเทความร้อนและความชื้นภายในวัสดุพืชได้อย่างแม่นยำ

#### 2.12.4 แบบจำลองเชิงผสม (Semi-Empirical Model)

แบบจำลองแบบผสมเป็นการผสมผสานข้อดีของแบบจำลองเชิงฟิสิกส์ (physical model) และแบบจำลองเชิงประจักษ์ (empirical model) เข้าด้วยกัน เพื่อให้ได้ทั้งความถูกต้องแม่นยำในการทำนาย และความเข้าใจเชิงฟิสิกส์ของกระบวนการ โดยทั่วไปแบบจำลองลักษณะนี้จะใช้สมการทางฟิสิกส์เป็นโครงหลักในการอธิบายปรากฏการณ์ เช่น สมการอนุรักษ์มวลและพลังงานและใช้ข้อมูลการทดลองหรือเทคนิคเชิงสถิติมาช่วยในการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่ซับซ้อนหรือหายาก การประยุกต์ใช้แบบจำลองเชิงผสม ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรมักพบในกรณีที่ต้องการความเข้าใจเชิงฟิสิกส์ของระบบแต่ไม่สามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์ทุกตัวได้อย่างแม่นยำ เช่น การอบแห้งเมล็ดพืชหรือข้าว (Grain Drying) ในการอบแห้งเมล็ดข้าวหรือถั่ว ความแตกต่างของความชื้นระหว่างชั้นผิวและแกนกลางทำให้สมมติการณ์การนำความร้อนและการแพร่ไม่คงที่ การใช้สมการพลังงานและสมการแพร่ภายในร่วมกับค่าคงที่ทางประจักษ์จากการทดลองช่วยให้สามารถทำนายอุณหภูมิและความชื้นเฉลี่ยของเมล็ดได้อย่างแม่นยำ

Zhang และคณะ (2016) ได้ศึกษาพฤติกรรมของการอบแห้งของแอปเปิ้ลโดยใช้ แบบจำลองเชิงผสม (Semi-Empirical Model) ผลการฟิตข้อมูลแสดงว่าโมเดลสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าความชื้นและให้ความแม่นยำสูงกว่า empirical models แบบดั้งเดิม

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เลือกใช้แนวทางในการจำลองแบบเชิงผสม (Semi-Empirical Model) ระหว่างแบบจำลองเชิงฟิสิกส์และแบบจำลองเชิงตัวเลข สำหรับการอบแห้งหอยหลอด (Solen regularis) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นเริ่มต้นสูงและเน่าเสียง่าย โดยใช้สมการควบคุมหลัก ได้แก่ สมการอนุรักษ์มวล สมการอนุรักษ์พลังงาน และสมการถ่ายเทความร้อนและมวล เป็นพื้นฐานของการจำลองแบบ และแก้สมการด้วยวิธีเชิงตัวเลข Finite Difference Method ผ่านการเขียนโปรแกรมด้วยภาษา Fortran เพื่อทำนายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นของผลิตภัณฑ์ในระหว่างการอบแห้ง นอกจากนี้ยังใช้ข้อมูลการทดลอง sorption isotherm ของหอยหลอดที่ได้จากการทดลองในการปรับค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง เพื่อให้ผลจากการจำลองแบบมีความสอดคล้องกับพฤติกรรมการคายความชื้นของหอยหลอดมากที่สุด จากที่กล่าวมาข้างต้นแสดงถึงความเหมาะสมของการใช้

แนวทางแบบจำลองเชิงฟิสิกส์ร่วมกับแบบจำลองเชิงตัวเลข ซึ่งนอกจากจะช่วยให้เข้าใจกลไกการถ่ายเทความร้อนและความชื้นเชิงฟิสิกส์แล้ว ยังทำให้การทำนายประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นสูงมีความน่าเชื่อถือและสามารถนำไปประยุกต์ใช้จริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ



### บทที่ 3 การดำเนินงาน

การดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วยการศึกษาการจำลองแบบเชิงตัวเลขและการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งของหอยหลอด (*Solen regularis*) ในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ตลอดจนการพัฒนาแบบจำลองเชิงฟิสิกส์ที่สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของความชื้นและอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการอบแห้งได้ โดยขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้ การศึกษาไอโซเทอร์มการคายความชื้นของหอยหลอด การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และการทดลองอบแห้งหอยหลอด

#### 3.1 การศึกษาไอโซเทอร์มการคายความชื้นของหอยหลอด

การศึกษาไอโซเทอร์มการคายความชื้นของหอยหลอดเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลของหอยหลอดกับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม โดยมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนาแบบจำลองการอบแห้ง เนื่องจากข้อมูลไอโซเทอร์มการคายความชื้น (Moisture Desorption Isotherm) เป็นข้อมูลพื้นฐานที่ใช้กำหนดพฤติกรรมการแพร่ความชื้นภายในผลิตภัณฑ์ รวมถึงใช้ในการคำนวณสมการการถ่ายเทมวล อัตราการระเหย และค่าความชื้นสมดุลที่เกิดขึ้นในสภาวะต่าง ๆ ดังนั้น ก่อนการจำลองหรือวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งของหอยหลอด จึงจำเป็นต้องหาค่าความชื้นสมดุลภายใต้อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่ควบคุมได้ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องและสามารถนำไปใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่อไปได้

##### 3.1.1 การหาค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture contents, EMC)

การทดลองหาปริมาณความชื้นสมดุลของหอยหลอดจัดทำขึ้นที่ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม โดยใช้วิธี The static desiccator ซึ่งเป็นการเก็บตัวอย่างอาหารที่ทราบมวลแน่นอนในภาชนะปิดที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ ในช่วง 10-90% ที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ จากนั้นทำการบันทึกมวลของตัวอย่างในทุกช่วงเวลาที่กำหนด โดยจะใช้ตุ้บไฟฟ้าจำนวนสามตุ้บที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันออกไป ได้แก่ 50°C 60°C และ 70°C (รูปที่ 7) ภายในตุ้บไฟฟ้าแต่ละตุ้บจะมีกล่องตัวอย่างจำนวนตุ้บละ 5 กล่อง ซึ่งกล่องตัวอย่างจะเป็นกล่องพลาสติกแบบปิดสนิทบรรจุสารละลายเกลืออิ่มตัว 5 ชนิด ที่มีค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่แต่ละอุณหภูมิแตกต่างกัน (ตารางที่ 1) โดยในกล่องจะมีถาดสำหรับวางมวลตัวอย่าง ด้านล่างถาดมีฐานวาง เพื่อป้องกันไม่ให้สารละลายเกลืออิ่มตัวสัมผัสกับมวลตัวอย่าง มวลตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองนี้ คือหอยหลอดประมาณ 5-6 g ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 90%w.b. (รูปที่ 8)

ตารางที่ 1 ความชื้นสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของสารละลายทั้ง 5 ชนิด

| TEMP/RH | LiCl(%) | MgCl(%) | Na <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> (%) | NaCl(%) | KNO <sub>3</sub> (%) |
|---------|---------|---------|--|---------|----------------------|
| 50°C    | 11.60   | 32.10   | 49.80  | 75.40   | 87.90                |
| 60°C    | 11.10   | 30.54   | 46.30  | 74.43   | 85.29                |
| 70°C    | 10.95   | 29.26   | 43.00  | 74.50   | 82.00                |



รูปที่ 7 ตู้อบไฟฟ้าที่มีระดับอุณหภูมิ

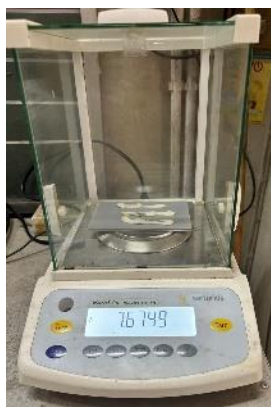


รูปที่ 8 กล่องพลาสติกบรรจุสารละลายเกลือ 50°C 60°C และ 70°C อิมตัวและมวลตัวอย่างของหอยหลอด 5-6 g

ในการทดลองได้ทำการชั่งมวลด้วยเครื่องชั่ง (Sartorius รุ่น BSA224S-CW,  $\pm 0.0001$  g) โดยจะทำการชั่งมวลตัวอย่างทุก ๆ 2 ชั่วโมง (รูปที่ 9) จนกระทั่งมวลตัวอย่างคงที่ หลังจากนั้นจึงนำมวลตัวอย่างที่แห้งแล้วเข้าเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อหาค่ามวลแห้ง ( $W_d$ ) ซึ่งจะนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ (moisture content) จากนั้นจึงนำมวลที่ชั่งในแต่ละช่วงเวลาไปหาความชื้นมาตรฐานแห้ง ( $M_{db}$ ) ของมวลตัวอย่าง ได้จากสมการ

$$M_{db}(\%) = \frac{W_o - W_d}{W_d} \times 100 \quad (3.1)$$

เมื่อ  $M_{db}$  คือความชื้นมาตรฐานแห้ง (% d.b.)  $W_o$  คือมวลเริ่มต้น (kg) และ  $W_d$  คือมวลแห้ง (kg)



รูปที่ 9 การชั่งมวลตัวอย่าง

### 3.1.2 แบบจำลองซอร์พชันไอโซเทอร์ม

ค่าความชื้นสมดุลที่ได้จากการทดลองจะนำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของซอร์พชันไอโซเทอร์ม เพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นสมดุลของวัสดุขึ้นกับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศตามอุณหภูมิที่กำหนด โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แบบจำลองซอร์พชันไอโซเทอร์มที่เลือกใช้

| Model name | Mathematical expression   | Ref.                    |
|------------|---|-------------------------|
| Oswin      | $M_e = b_0 \left( \frac{a_w}{1 - a_w} \right)^{b_1}$  | Toujani และคณะ (2011)   |
| Peleg      | $M_e = b_0 a_w^{b_1} + b_2 a_w^{b_3}$   | Toujani และคณะ (2011)   |
| GAB        | $M_e = b_0 \left( \frac{b_1 b_2 b_3 a_w}{(1 - b_3 a_w)(1 - b_3 a_w + b_2 b_3 a_w)} \right)$ | Tatar และคณะ (2014)     |
| BET        | $M_e = \frac{b_0 b_1 a_w}{(1 - a_w)(1 + (b_1 - 1)a_w)}$                                     | Toujani และคณะ (2011)   |
| Henderson  | $M_e = 0.01 \left[ \frac{-\log_{10}(1 - a_w)}{10^{b_0}} \right]^{\frac{1}{b_1}}$            | Echavria และคณะ (2021)  |
| Freundlich | $M_e = b_0 a_w^{\frac{1}{b_1}}$   | Echavria และคณะ (2021)  |
| Polynomial | $M_e = b_0 + b_1 a_w + b_2 a_w^2$   | Samapundo และคณะ (2007) |

เมื่อ  $M_e$  คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (% d.b.)  $a_w$  คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (%) และ  $b_0, b_1, b_2, b_3$  คือ ค่าคงที่

ในการวิเคราะห์ข้อมูลจำเป็นต้องใช้ค่าทางสถิติในการประกอบการตัดสินใจ ซึ่งในการทดลองนี้จะใช้ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (Root Mean Square Error, RMSE) ซึ่งใช้ในการวัดความแม่นยำของแบบจำลอง และค่าสัมประสิทธิ์ที่แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of Determination,  $R^2$ ) ในการอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลจริง (Janjai 2017)

โดยค่า RMSE หาได้จากสมการที่ (3.2)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (3.2)$$

และค่า  $R^2$  หาได้จากสมการที่ (3.3)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.3)$$

เมื่อ  $n$  คือจำนวนตัวอย่าง

$\hat{y}_i$  คือ ค่าที่คาดการณ์จากแบบจำลอง

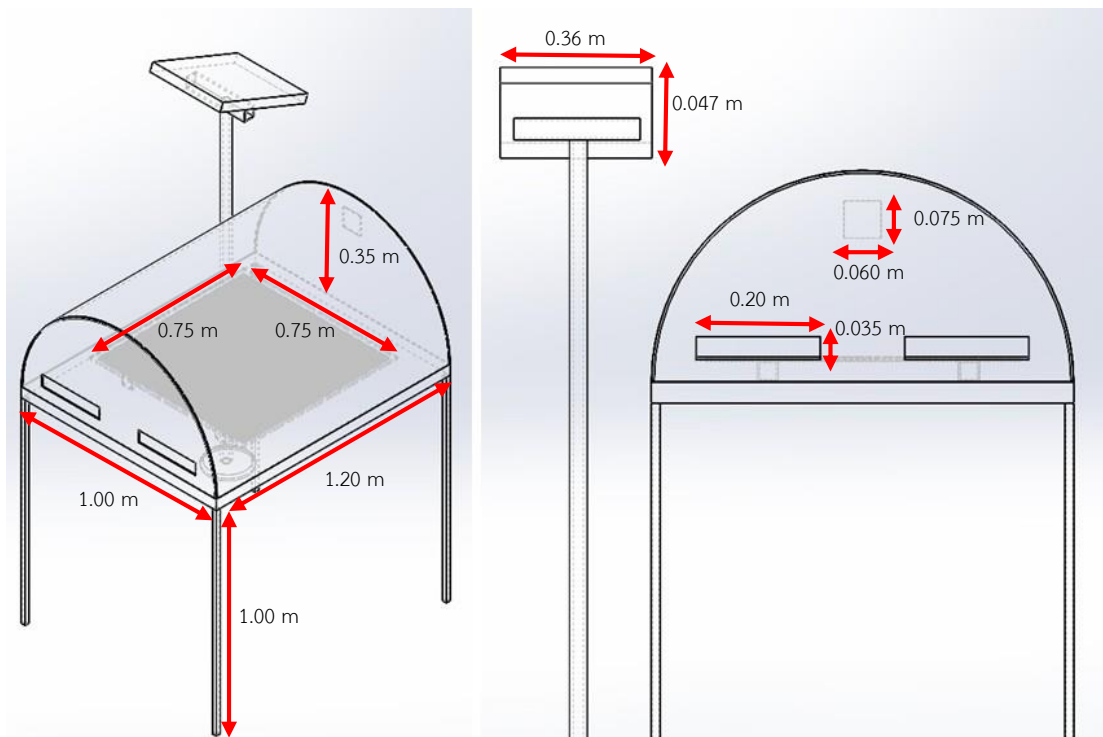
$y_i$  คือ ค่าจริงของตัวแปรเป้าหมาย

$\bar{y}$  คือ ค่าเฉลี่ยของค่าจริง

### 3.2 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา

ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาขนาดเล็ก โดยมีขนาดกว้าง 1.00 m ยาว 1.20 m สูง 0.35 m เครื่องอบแห้งตั้งสูงจากพื้น 1.00 m และด้านใต้เครื่องมีฉนวนที่ทำจาก polyurethane foam ขนาด 1.00×1.20 m<sup>2</sup> เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนออกจากเครื่องอบแห้ง โดยเครื่องอบแห้งนี้ประกอบไปด้วยองค์ประกอบหลัก 3 ส่วน ได้แก่ พื้นเครื่องอบแห้งขนาด 1.00×1.20 m<sup>2</sup> ทำหน้าที่ในการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ แผ่นโพลีคาร์บอเนตชนิดลูกฟูกแบบใสที่มีค่าการส่งผ่านแสงสำหรับรังสีคลื่นสั้นค่อนข้างสูง (0.8) ทำหน้าที่ป้องกันรังสียูวี (0.2-0.4 μm) เข้าสู่ภายในเครื่องอบแห้งและป้องกันรังสีคลื่นยาว (8-15 μm) ออกสู่สภาพแวดล้อมจึงทำให้รังสีความร้อนสะท้อนกลับไปกลับมาภายในเครื่องอบแห้งเกิดเป็นปรากฏการณ์ที่เรียกว่า “ปรากฏการณ์เรือนกระจก” ซึ่งทำให้อุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งมีค่าสูงขึ้น และอากาศภายในเครื่องอบแห้งทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการพาความร้อนไปสู่ผลิตภัณฑ์และพาความร้อนที่บริเวณผิวของผลิตภัณฑ์ออกสู่ภายนอกเครื่องอบแห้งด้วยพัดลมกระแสตรง (3 W) จำนวน 1 ตัว ที่ติดตั้งไว้ด้านหลังที่มีช่องอากาศออกขนาด 0.060×0.075 m<sup>2</sup> ซึ่งพัดลมทำงานโดยอาศัยพลังงานไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์ (20 W) จำนวน 1 แผง และบริเวณด้านหน้าของเครื่องอบแห้ง จะมีช่องอากาศจำนวน 2 ช่อง ขนาด 0.035×0.195 m<sup>2</sup> สำหรับให้อากาศแวดล้อมไหลเข้าสู่ภายในเครื่องอบแห้ง ภายในเครื่องอบแห้งมีถาดวางผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพลาสติกและอลูมิเนียมขนาด 0.75×0.75 m<sup>2</sup> ซึ่งสามารถ

อบแห้งหอยหลอดได้ทั้งหมดประมาณ 1.2 kg ภาพจำลองของเครื่องอบแห้งที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 แบบจำลองเครื่องอบแห้งแบบพาราโบลาที่ใช้ในงานวิจัยนี้

### 3.3 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เป็นเครื่องอบแห้งประเภทรังสีอาทิตย์โดยตรง โดยจะนำรังสีอาทิตย์มาใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อน ทำให้อุณหภูมิของส่วนประกอบต่าง ๆ มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมินั้นจะขึ้นอยู่กับความเข้มรังสีอาทิตย์ที่มีความแปรปรวนตามสภาวะอากาศที่เปลี่ยนแปลง ในการทำนายประสิทธิภาพในการทำความร้อนให้กับอากาศภายในเครื่องอบแห้ง จำเป็นต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณ ซึ่งในกรณีนี้ผู้วิจัยจะทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา ดังหัวข้อต่อไปนี้

#### 3.3.1 สมมติฐานและเงื่อนไขของแบบจำลอง

ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งหอยหลอดในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ผู้วิจัยได้กำหนดสมมติฐานและเงื่อนไขสำหรับการสร้างแบบจำลองเพื่อให้แบบจำลองมีความเรียบง่ายและสามารถแก้สมการได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนี้

**สมมติฐาน ได้แก่**

- (1) กระบวนการอบแห้งเกิดขึ้นแบบหนึ่งมิติ
- (2) ไม่มีการแบ่งชั้นของอากาศภายในเครื่องอบแห้ง
- (3) คุณสมบัติทางกายภาพและทางอุณหพลศาสตร์ของอากาศมีค่าคงที่

- (4) ขนาดและรูปร่างของผลิตภัณฑ์คงที่ในระหว่างการอบแห้ง
- (5) ไม่มีการเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือการเปลี่ยนแปลงทางชีวภาพในระหว่างการอบแห้ง
- (6) การสูญเสียความร้อนจากพื้นเครื่องอบแห้งสู่อากาศภายนอกมีค่าเพียงเล็กน้อย

**เงื่อนไขเริ่มต้น (Initial conditions) ได้แก่**

- (1) อุณหภูมิอากาศเริ่มต้นทุกส่วนของเครื่องอบแห้งมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมที่ 308 K
- (2) ความชื้นของผลิตภัณฑ์เริ่มต้นที่ 576% d.b.
- (3) ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในเริ่มต้นที่ 40%

**เงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions) ได้แก่**

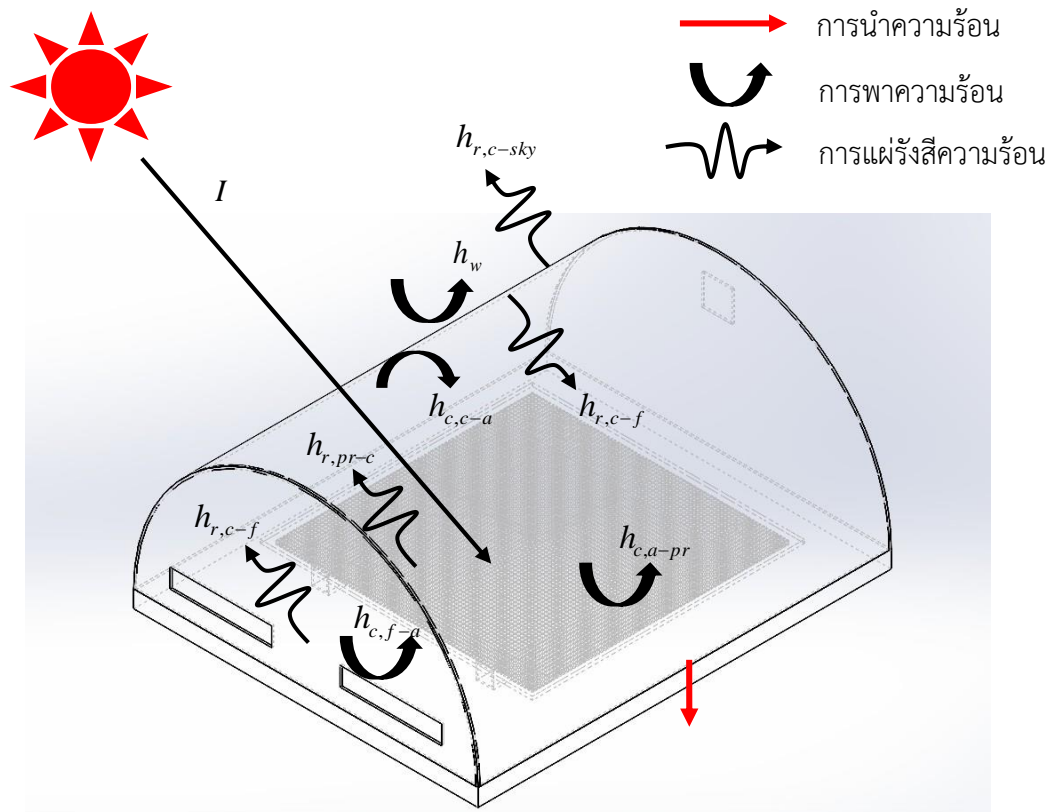
- (1) อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาเข้า คือข้อมูลสภาพอากาศจริง
- (2) อัตราเร็วอากาศขาเข้า 0.3 m/s
- (3) ใช้สมการในการคำนวณอุณหภูมิของอากาศในจุดก่อนหน้าอย่างต่อเนื่อง

### 3.3.2 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากที่กล่าวไว้ข้างต้น เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาเป็นเครื่องอบแห้งประเภทรับรังสีอาทิตย์โดยตรง ซึ่งหากพิจารณาการรับรังสีอาทิตย์จะสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ส่วน ได้แก่ แผ่นโพลีคาร์บอเนต อากาศภายในเครื่องอบแห้ง พื้นโลหะทาด้วยสีดำ และผลิตภัณฑ์ ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยได้ทำการสร้างสมการการถ่ายเทความร้อนของแต่ละส่วนดังนี้

#### 3.3.2.1 สมการสมดุลความร้อน

การถ่ายเทความร้อนภายในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาเกิดขึ้นจากอากาศที่ไหลเวียนภายในเครื่องอบแห้ง ซึ่งอากาศนี้จะได้รับความร้อนผ่านการถ่ายเทความร้อนจากพื้นโลหะทาด้วยสีดำกับแผ่นโพลีคาร์บอเนต และมีการสูญเสียความร้อนสู่อากาศแวดล้อม ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 การถ่ายเทความร้อนของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา  
สมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy Conservation Equation)

$$m_i C_{p,i} \left( \frac{\partial T_i}{\partial t} + \vec{v}_i \cdot \nabla T_i \right) = \sum_j h_{ij} A_{ij} (T_j - T_i) + q_i \quad (3.4)$$

เมื่อ  $m_i$  คือ มวลขององค์ประกอบที่  $i$  (kg)

$C_p$  คือ ความจุความร้อนจำเพาะขององค์ประกอบ  $i$  (kJ/kg·K)

$T_i$  คือ อุณหภูมิขององค์ประกอบ  $i$  (K)

$t$  คือ เวลา (s)

$\vec{v}_i \cdot \nabla T_i$  คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเนื่องจากการไหลของของไหล (K/s)

$T_i$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างองค์ประกอบ  $i$  และ  $j$  (W/m<sup>2</sup>·K)

$A_{ij}$  คือ พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างองค์ประกอบ  $i$  และ  $j$  (m<sup>2</sup>)

$q_i$  คือ แหล่งกำเนิดพลังงาน (W)

#### 1) สมการการถ่ายเทความร้อนของแผ่นโพลีคาร์บอเนต

สมการสมดุลพลังงานของแผ่นโพลีคาร์บอเนตถูกใช้เพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแผ่นตามเวลา โดยพิจารณาแหล่งพลังงานที่แผ่นได้รับและสูญเสีย ซึ่งรวมถึงการพาความร้อนกับอากาศภายนอก การแผ่รังสีกับท้องฟ้า การแผ่รังสีกับอากาศภายในและพื้นไม้ รวมถึงการดูดกลืน

พลังงานจากรังสีอาทิตย์ สมการนี้จึงเป็นพื้นฐานสำคัญที่เชื่อมโยงสภาวะแวดล้อมภายนอกกับอุณหภูมิภายในระบบบอบแห้ง สามารถอธิบายได้ดังนี้

อัตราการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของแผ่นโพลีคาร์บอเนต

= อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนระหว่างแผ่นโพลีคาร์บอเนตกับอากาศ  
 + อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนระหว่างแผ่นโพลีคาร์บอเนตกับอากาศแวดล้อม  
 + อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนระหว่างแผ่นโพลีคาร์บอเนตกับท้องฟ้า  
 + อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนระหว่างผลิตภัณฑ์กับแผ่นโพลีคาร์บอเนต  
 + อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนระหว่างแผ่นโพลีคาร์บอเนตกับพื้นเครื่องอบแห้ง

+ การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของแผ่นโพลีคาร์บอเนต

แทนค่าแต่ละส่วนของสมการ จะได้ตั้งสมการที่ (3.4)

$$m_c C_{p,c} \frac{\partial T_c}{\partial t} = A_c h_w (T_{amb} - T_c) + A_c h_{r,c-sky} (T_{sky} - T_c) + A_c h_{r,pr-c} (T_{pr} - T_c) \quad (3.5)$$

$$+ A_c h_{r,c-f} (T_f - T_c) + A_c h_{c,c-a} (T_a - T_c) + A_c \alpha_c I$$

เมื่อ  $A_c$  คือ พื้นที่ของแผ่นโพลีคาร์บอเนต ( $m^2$ )

$C_{p,c}$  คือ ความจุความร้อนจำเพาะของแผ่นโพลีคาร์บอเนต ( $J/kg \cdot K$ )

$h_{c,c-a}$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนระหว่างแผ่นโพลีคาร์บอเนตกับอากาศ ( $W/m^2 \cdot K$ )

$h_w$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนระหว่างแผ่นโพลีคาร์บอเนตกับอากาศแวดล้อม ( $W/m^2 \cdot K$ )

$h_{r,c-f}$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนระหว่างแผ่นโพลีคาร์บอเนตกับพื้น ( $W/m^2 \cdot K$ )

$h_{r,c-sky}$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนระหว่างแผ่นโพลีคาร์บอเนตกับท้องฟ้า ( $W/m^2 \cdot K$ )

$h_{r,pr-c}$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนระหว่างแผ่นโพลีคาร์บอเนตกับผลิตภัณฑ์ ( $W/m^2 \cdot K$ )

$I$  คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์ ( $W/m^2$ )

$m_c$  คือ มวลของแผ่นโพลีคาร์บอเนต ( $kg$ )

$T_a$  คือ อุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้ง ( $K$ )

$T_{amb}$  คือ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม ( $K$ )

$T_c$  คือ อุณหภูมิแผ่นโพลีคาร์บอเนต ( $K$ )

|            |  |
|------------|--|
| $T_f$      | คือ อุณหภูมิพื้นเครื่องอบแห้ง (K)                              |
| $T_{sky}$  | คือ อุณหภูมิท้องฟ้า (K)  |
| $T_{pr}$   | คือ อุณหภูมิผลิตภัณฑ์ (K)                                      |
| $t$        | คือ เวลา (s)   |
| $\alpha_c$ | คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของแผ่นโพลีคาร์บอเนต (-) |

## 2) สมการการถ่ายเทความร้อนของอากาศภายในเครื่องอบแห้ง

อากาศภายในระบบอบแห้งทำหน้าที่เป็นตัวกลางหลักในการรับและพาพลังงานไปยังผลิตภัณฑ์ ดังนั้นการพิจารณาพฤติกรรมทางความร้อนของอากาศจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการคาดการณ์อัตราการอบแห้ง สามารถอธิบายได้ดังนี้

อัตราการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของอากาศ

= อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนระหว่างแผ่นโพลีคาร์บอเนตกับอากาศ

+ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนระหว่างพื้นเครื่องอบแห้งกับอากาศ

+ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนระหว่างผลิตภัณฑ์กับอากาศ

+ การสูญเสียความร้อนสู่อากาศแวดล้อม

+ พลังงานที่ทำให้อุณหภูมิก๊าซมีการเปลี่ยนแปลง

$$m_a C_{p,a} \frac{\partial T_a}{\partial t} = A_c h_{c,c-a} (T_c - T_a) + A_f h_{c,f-a} (T_f - T_a) \quad (3.6)$$

$$+ A_{pr} h_{c,pr-a} (T_{pr} - T_a) + A_c U_c (T_{amb} - T_a) + PU$$

เมื่อ  $A_c$  คือ พื้นที่ของแผ่นโพลีคาร์บอเนต ( $m^2$ )

$A_f$  คือ พื้นที่ของพื้นเครื่องอบแห้ง ( $m^2$ )

$A_{pr}$  คือ พื้นที่ของผลิตภัณฑ์ ( $m^2$ )

$C_{p,a}$  คือ ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ ( $J/kg \cdot K$ )

$h_{c,c-a}$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนระหว่างแผ่นโพลีคาร์บอเนตกับอากาศ ( $W/m^2 \cdot K$ )

$h_{c,f-a}$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนระหว่างพื้นเครื่องอบแห้งกับอากาศ ( $W/m^2 \cdot K$ )

$h_{c,pr-a}$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนระหว่างผลิตภัณฑ์กับอากาศ ( $W/m^2 \cdot K$ )

$m_a$  คือ มวลของอากาศ (kg)

$PU$  คือ พลังงานที่ทำให้อุณหภูมิก๊าซมีการเปลี่ยนแปลง (W)

$T_a$  คือ อุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้ง (K)

|           |   |
|-----------|---|
| $T_{amb}$ | คือ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม (K)  |
| $T_c$     | คือ อุณหภูมิแผ่นโพลีคาร์บอเนต (K)   |
| $T_f$     | คือ อุณหภูมิพื้นเครื่องอบแห้ง (K)   |
| $t$       | คือ เวลา (s)  |
| $U_c$     | คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนจากอากาศภายในเครื่องอบแห้ง<br>สู่อากาศแวดล้อม ( $W/m^2 \cdot K$ ) |

### 3) สมการการถ่ายเทความร้อนของผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์เป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่สุดในกระบวนการอบแห้ง เนื่องจากเป็นตัวแปรที่กำหนดคุณภาพและเวลาการในการอบแห้งโดยตรง สามารถอธิบายได้ดังนี้

อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของผลิตภัณฑ์

$$\begin{aligned}
 &= \text{อัตราการถ่ายโอนความร้อนโดยการแผ่รังสีระหว่างอากาศแวดล้อมกับผลิตภัณฑ์} \\
 &+ \text{อัตราการถ่ายโอนความร้อนโดยการแผ่รังสีระหว่างแผ่นโพลีคาร์บอเนตกับผลิตภัณฑ์} \\
 &+ \text{อัตราการถ่ายโอนความร้อนโดยการแผ่รังสีระหว่างพื้นเครื่องอบแห้งกับผลิตภัณฑ์} \\
 &- \text{พลังงานที่สูญเสียไปในรูปของความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ} \\
 &+ \text{พลังงานรังสีอาทิตย์ที่ผลิตภัณฑ์ดูดกลืนโดยตรง}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 m_{pr} C_{p,pr} \frac{\partial T_{pr}}{\partial t} &= A_{pr} h_{c,a-pr} (T_a - T_{pr}) + A_{pr} h_{r,pr-c} (T_c - T_{pr}) \\
 &+ A_{pr} h_{r,pr-f} (T_f - T_{pr}) - L_v \left( \frac{\partial M}{\partial t} \right) + A_{pr} \tau_c \alpha_{pr} I
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

เมื่อ  $m_{pr}$  คือ มวลของผลิตภัณฑ์ (kg)

$C_{p,pr}$  คือ ความจุความร้อนจำเพาะของผลิตภัณฑ์ ( $J/kg \cdot K$ )

$A_{pr}$  คือ พื้นที่ผิวของผลิตภัณฑ์ ( $m^2$ )

$h_{c,a-pr}$  คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างอากาศกับผลิตภัณฑ์ ( $W/m^2 \cdot K$ )

$h_{r,pr-c}$  คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีระหว่างผลิตภัณฑ์กับแผ่นโพลีคาร์บอเนต ( $W/m^2 \cdot K$ )

$h_{r,pr-s}$  คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีระหว่างผลิตภัณฑ์กับพื้นเครื่องอบแห้ง ( $W/m^2 \cdot K$ )

$T_a$  คือ อุณหภูมิของอากาศภายในเครื่องอบ (K)

$T_{pr}$  คือ อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ (K)

$T_c$  คือ อุณหภูมิของแผ่นโพลีคาร์บอเนต (K)

$T_s$  คือ อุณหภูมิของพื้นเครื่องอบแห้ง (K)

$L_v$  คือ ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ ( $J/kg$ )

$\tau_c$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีของแผ่นโพลีคาร์บอเนต (-)

$\alpha_{pr}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีของผลิตภัณฑ์ (-)

$I$  คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์ ( $W/m^2$ )

#### 4) สมการการถ่ายเทความร้อนของพื้นเครื่องอบแห้ง

พื้นเครื่องอบแห้งทำหน้าที่เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่มีความสามารถในการสะสมพลังงานที่สูง ทำให้พื้นเป็นแหล่งความร้อนสำคัญที่ช่วยเพิ่มอุณหภูมิของอากาศภายในและถ่ายเทพลังงานสู่ผลิตภัณฑ์โดยตรงทั้งผ่านการพาและการแผ่รังสี ปริมาณพลังงานที่พื้นเครื่องอบแห้งดูดซับและคายออกจะมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง สามารถอธิบายได้ดังนี้

อัตราการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของพื้นเครื่องอบแห้ง

= อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนระหว่างพื้นคอนกรีตกับอากาศ

+ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีระหว่างพื้นเครื่องอบแห้งกับแผ่นโพลีคาร์บอเนต

+ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีระหว่างพื้นเครื่องอบแห้งกับผลิตภัณฑ์

+ การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของพื้นคอนกรีต

$$m_f C_{p,f} \frac{\partial T_f}{\partial t} = A_f h_{c,f-a} (T_a - T_f) + A_f h_{r,f-c} (T_c - T_f) + A_f h_{r,f-pr} (T_{pr} - T_f) + A_f \tau_c \alpha_f I \quad (3.8)$$

เมื่อ  $A_f$  คือ พื้นที่ของพื้นเครื่องอบแห้ง ( $m^2$ )

$C_{p,f}$  คือ ความจุความร้อนจำเพาะของพื้นเครื่องอบแห้ง ( $J/kg \cdot K$ )

$h_{r,f-c}$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนระหว่างพื้นเครื่องอบแห้งกับแผ่นโพลีคาร์บอเนต ( $W/m^2 \cdot K$ )

$h_{c,f-a}$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนระหว่างพื้นเครื่องอบแห้งกับอากาศ ( $W/m^2 \cdot K$ )

$I$  คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์ ( $W/m^2$ )

$m_f$  คือ มวลของพื้นเครื่องอบแห้ง ( $kg$ )

$T_a$  คือ อุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้ง (K)

$T_c$  คือ อุณหภูมิแผ่นโพลีคาร์บอเนต (K)

$T_f$  คือ อุณหภูมิพื้นเครื่องอบแห้ง (K)

$t$  คือ เวลา (s)

$\tau_c$  คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีอาทิตย์ของแผ่นโพลีคาร์บอเนต (-)

$\alpha_f$  คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของพื้นเครื่องอบแห้ง (-)

### 3.3.2.2 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

1) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีระหว่างแผ่นโพลีคาร์บอเนตกับพื้นเครื่องอบแห้ง ( $h_{r,c-f}$ ) หาได้จาก (Duffie และคณะ 2020)

$$h_{r,c-f} = \frac{\sigma(T_f^2 + T_c^2)(T_f + T_c)}{\frac{1 - \varepsilon_c}{\varepsilon_c} + \frac{1}{F_{c-f}} + \frac{(1 - \varepsilon_f)A_c}{\varepsilon_f A_f}} \quad (3.9)$$

โดยที่วิวแฟคเตอร์ (view factor) หาได้จาก (Janjai 2017)

$$F_{r,c-f} = \frac{1}{A_f} \iint_{A_f A_c} \frac{I_c \cos \theta_c \cos \theta_f}{r^2} dA_c dA_f \quad (3.10)$$

2) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนระหว่างพื้นเครื่องอบแห้งกับแผ่นโพลีคาร์บอเนต ( $h_{r,c-f}$ ) หาได้จาก (Duffie และคณะ 2020)

$$h_{r,c-f} = \frac{\sigma(T_c^2 + T_f^2)(T_c + T_f)}{\frac{1 - \varepsilon_f}{\varepsilon_f} + \frac{1}{F_{f-c}} + \frac{(1 - \varepsilon_c)A_f}{\varepsilon_c A_c}} \quad (3.11)$$

3) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีระหว่างแผ่นโพลีคาร์บอเนตกับท้องฟ้า ( $h_{r,c-sky}$ ) หาได้จาก (Sekyere และคณะ 2020)

$$h_{r,c-sky} = \varepsilon_c \sigma(T_c^2 + T_{sky}^2)(T_c + T_{sky}) \quad (3.12)$$

โดยที่อุณหภูมิท้องฟ้า ( $T_{sky}$ ) (Sekyere และคณะ 2020) หาได้จาก

$$T_{sky} = 0.552 T_{amb}^{1.5} \quad (3.13)$$

4) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนระหว่างอากาศภายในเครื่องอบแห้งกับแผ่นโพลีคาร์บอเนต ( $h_{c,c-a}$ ) หาได้จาก (Aumporn 2017)

$$h_{c,c-a} = 1.32 |T_c - T_a|^{0.25} \quad (3.14)$$

5) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนระหว่างอากาศภายในเครื่องอบแห้งกับพื้นเครื่องอบแห้ง (Aumporn 2017)

$$h_{c,f-a} = 1.86 |T_f - T_a|^{0.33} \quad (3.15)$$

6) สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนจากอากาศภายในเครื่องอบแห้งสู่อากาศแวดล้อม

$$U_c = \frac{\lambda_c}{L_c} \quad (3.16)$$

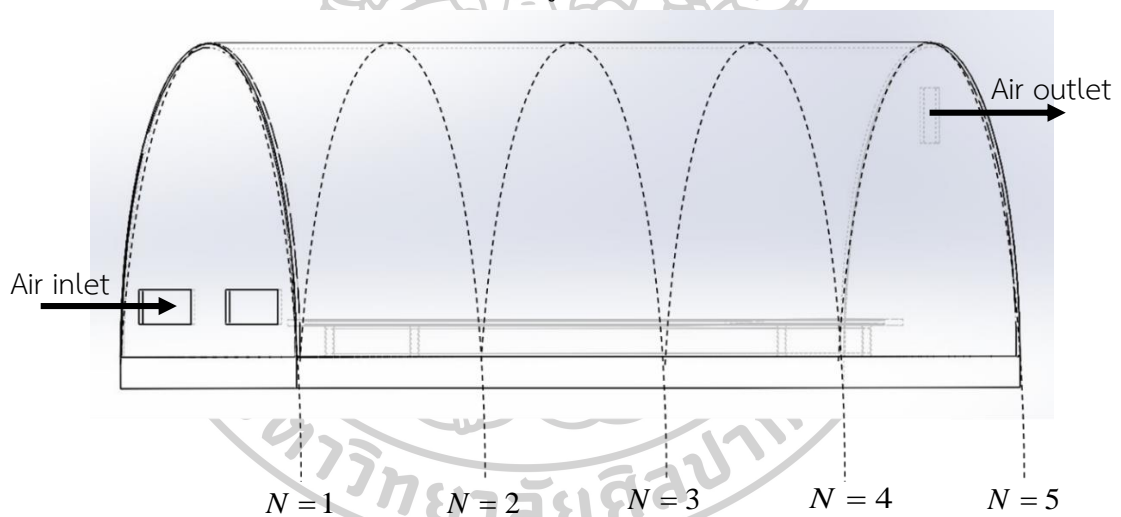
7) ประสิทธิภาพในการทำความร้อนของเครื่องอบแห้ง (Aumporn 2017)

$$\eta_s = \frac{Pu}{A_c I} \quad (3.17)$$

### 3.3.2.3 การหาผลเฉลยของแบบจำลอง

สมการที่ (3.5) – (3.8) เป็นสมการอนุพันธ์ซึ่งไม่สามารถหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ (analytical solution) ดังนั้นในการหาผลเฉลยของสมการอนุพันธ์ดังกล่าวผู้วิจัยจะใช้วิธีการเชิงตัวเลขด้วยระเบียบวิธีการผลต่างจำกัด (finite difference method) โดยหลักการของระเบียบวิธีการผลต่างจำกัดคือ การแทนค่าเทอมที่เป็นอนุพันธ์ด้วยผลต่างในช่วงแคบ ๆ และทำการคำนวณหาผลเฉลยที่ต้องการโดยผลที่ได้จะอยู่ในรูปของตัวเลขทั่วไป รายละเอียดในการหาผลเฉลยของสมการที่ (3.18) – (3.21) แสดงดังต่อไปนี้

ในการสร้างแบบจำลองเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์จะถูกแบ่งส่วน (discrete) เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณกำหนดให้อากาศของส่วนก่อนหน้าเป็นอากาศขาเข้าของส่วนถัดไป โดยแต่ละส่วนมีความยาวเท่ากับ 0.3 m ทำให้มีจำนวน  $N=5$  (รูปที่ 11)



รูปที่ 12 การแบ่งส่วนในการพิจารณาอุณหภูมิขององค์ประกอบต่าง ๆ ของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาตามทิศทางการไหลของอากาศ

ต่อมาผู้วิจัยจะทำการแก้สมการที่ (3.5) – (3.8) ด้วยระเบียบวิธีการผลต่างจำกัดแบบผลต่างทางหน้า (forward difference) ซึ่งจะได้ผลเฉลยออกมาแบบโดยปริยาย (implicit value) โดยเขียนให้อยู่ในรูปของสมการต่อไปนี้

1) สมการการถ่ายเทความร้อนของแผ่นโพลีคาร์บอเนต

$$\begin{aligned}
 m_c C_{p,c} \frac{(T_{c,t+\Delta t} - T_{c,t})}{\Delta t} &= A_c h_w (T_{amb,t+\Delta t} - T_{c,t+\Delta t}) + A_c h_{r,c-sky} (T_{sky,t+\Delta t} - T_{c,t+\Delta t}) \\
 &+ A_c h_{r,pr-c} (T_{pr,t+\Delta t} - T_{c,t+\Delta t}) + A_c h_{r,c-f} (T_{f,t+\Delta t} - T_{c,t+\Delta t}) \\
 &+ A_c h_{r,c-f} (T_{f,t+\Delta t} - T_{c,t+\Delta t}) + A_c \alpha_c I_{t+\Delta t}
 \end{aligned} \quad (3.18)$$

2) สมการการถ่ายเทความร้อนของอากาศภายในเครื่องอบแห้ง

$$m_a C_{p,a} \frac{(T_{a,t+\Delta t} - T_{a,t})}{\Delta t} = A_c h_{c,c-a} (T_{c,t+\Delta t} - T_{a,t+\Delta t}) + A_f h_{c,f-a} (T_{f,t+\Delta t} - T_{a,t+\Delta t}) \quad (3.19)$$

$$+ A_{pr} h_{c,a-pr} (T_{pr,t+\Delta t} - T_{a,t+\Delta t}) + A_c U_c (T_{amb,t+\Delta t} - T_{a,t+\Delta t}) + PU$$

3) สมการการถ่ายเทความร้อนของผลิตภัณฑ์

$$m_{pr} C_{p,pr} \frac{(T_{pr,t+\Delta t} - T_{pr,t})}{\Delta t} = A_{pr} h_{c,a-pr} (T_{a,t+\Delta t} - T_{pr,t+\Delta t}) \quad (3.20)$$

$$+ A_{pr} h_{r,pr-c} (T_{c,t+\Delta t} - T_{pr,t+\Delta t}) + A_{pr} h_{r,pr-ciel} (T_{ciel,t+\Delta t} - T_{pr,t+\Delta t})$$

$$+ A_{pr} h_{r,pr-f} (T_{f,t+\Delta t} - T_{pr,t+\Delta t}) - L_y \left( \frac{\partial M}{\partial t} \right) + h_{pr} \tau_c \alpha_{pr} I_t$$

4) สมการการถ่ายเทความร้อนของพื้นเครื่องอบแห้ง

$$m_f C_{p,f} \frac{(T_{f,t+\Delta t} - T_{f,t})}{\Delta t} = A_f h_{c,f-a} (T_{a,t+\Delta t} - T_{f,t+\Delta t}) + A_f h_{r,f-c} (T_{c,t+\Delta t} - T_{f,t+\Delta t}) \quad (3.21)$$

$$+ A_f h_{r,pr-f} (T_{pr,t+\Delta t} - T_{f,t+\Delta t}) + A_f \tau_c \alpha_f I_{t+\Delta t}$$

จากสมการที่ (3.18) - (3.21) จัดให้อยู่ในรูปแบบสมการเชิงเส้นของตัวแปร  $T_a$   $T_c$   $T_{pr}$  และ  $T_f$  ที่เวลา  $t + \Delta t$  ได้ดังนี้

1) สมการการถ่ายเทความร้อนของแผ่นโพลีคาร์บอเนต

$$\left( \frac{m_c C_{p,c}}{\Delta t} + A_c h_{c,c-a} + A_c h_w + A_c h_{r,c-sky} + A_c h_{r,c-f} + A_c h_{r,pr-c} \right) T_{c,t+\Delta t} \quad (3.22)$$

$$- A_c h_{c,c-a} T_{a,t+\Delta t} - A_c h_{r,c-f} T_{f,t+\Delta t}$$

$$= \frac{m_c C_{p,c}}{\Delta t} T_{c,t} + A_c h_w (T_{amb,t+\Delta t} - T_{c,t+\Delta t}) + A_c h_{r,c-sky} T_{sky,t+\Delta t} + A_c \alpha_c I_{t+\Delta t}$$

2) สมการการถ่ายเทความร้อนของอากาศภายในเครื่องอบแห้ง

$$\left( \frac{m_a C_{p,a}}{\Delta t} + A_c h_{c,c-a} + A_f h_{c,f-a} + A_c U_c \right) T_{a,t+\Delta t} \quad (3.23)$$

$$- A_c h_{c,c-a} T_{c,t+\Delta t} - A_f h_{c,f-a} T_{f,t+\Delta t}$$

$$= \frac{m_a C_{p,a}}{\Delta t} T_{a,t} + A_c U_c T_{amb,t+\Delta t} + PU$$

3) สมการการถ่ายเทความร้อนของผลิตภัณฑ์

$$\begin{aligned} & \left( \frac{m_{pr} C_{p,pr}}{\Delta t} + A_{pr} h_{c,pr-a} + A_{pr} h_{r,f-pr} + A_{pr} h_{r,pr-c} \right) T_{pr,t+\Delta t} \\ & - A_{pr} h_{r,pr-c} T_{c,t+\Delta t} - A_{pr} h_{c,pr-a} T_{a,t+\Delta t} - A_{pr} h_{r,f-pr} T_{f,t+\Delta t} \\ & = \frac{m_{pr} C_{p,pr}}{\Delta t} T_{pr,t} - L_v \left( \frac{\Delta M}{\Delta t} \right) + A_{pr} \alpha_{pr} \tau_t I_t \end{aligned} \quad (3.24)$$

4) สมการการถ่ายเทความร้อนของพื้นเครื่องอบแห้ง

$$\begin{aligned} & \left( \frac{m_f C_{p,f}}{\Delta t} + A_f h_{c,f-a} + A_f h_{r,f-c} \right) T_{f,t+\Delta t} - A_f h_{c,f-a} T_{a,t+\Delta t} - A_f h_{r,f-c} T_{c,t+\Delta t} \\ & = \frac{m_f C_{p,f}}{\Delta t} T_{f,t} + A_f \tau_c \alpha_f I_{t+\Delta t} \end{aligned} \quad (3.25)$$

จากสมการที่ (3.22) - (3.25) จัดให้อยู่ในระบบเมทริกซ์ (matrix) ดังสมการที่ (3.25) เพื่อนำมาหาผลเฉลยของสมการคือ  $T_a$   $T_c$   $T_{pr}$  และ  $T_f$  ที่เวลา  $t + \Delta t$

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{c,t+\Delta t} \\ T_{a,t+\Delta t} \\ T_{pr,t+\Delta t} \\ T_{f,t+\Delta t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

โดยที่  $a_{11} = \frac{m_c C_{p,c}}{\Delta t} + A_c h_w + A_c h_{r,c-sky} + A_c h_{r,pr-c} + A_c h_{r,c-f} + A_c h_{c,c-a}$

$$a_{12} = 0$$

$$a_{13} = -A_c h_{r,pr-c}$$

$$a_{14} = -A_c h_{r,c-f}$$

$$a_{21} = -A_c h_{c,c-a}$$

$$a_{22} = 1$$

$$a_{23} = -A_{pr} h_{c,a-pr}$$

$$a_{24} = -A_f h_{c,a-f}$$

$$a_{31} = -A_{pr} h_{r,pr-c}$$

$$a_{32} = 0$$

$$a_{33} = \frac{m_{pr} C_{p,pr}}{\Delta t} + A_{pr} h_{c,a-pr} + A_{pr} h_{r,pr-c} + A_{pr} h_{r,pr-f}$$

$$a_{34} = -A_{pr} h_{r,pr-f}$$

$$\begin{aligned}
a_{41} &= -A_f h_{r,f-c} \\
a_{42} &= 0 \\
a_{43} &= -A_f h_{r,pr-f} \\
a_{44} &= \frac{m_f C_{p,f}}{\Delta t} + A_f h_{c,a-f} + A_f h_{r,f-c} + A_{pr} h_{r,pr-f} \\
y_1 &= \frac{m_c C_{p,c}}{\Delta t} T_{c,t} + A_c h_w (T_{amb,t+\Delta t} - T_{c,t+\Delta t}) + A_c h_{r,c-sky} T_{sky,t+\Delta t} \\
&\quad + A_c h_{c,c-a} T_{a,t+\Delta t} + A_c \alpha_c I_{t+\Delta t} \\
y_2 &= \left( -A_{pr} h_{c,a-pr} - A_f h_{c,a-f} - A_c h_{c,c-a} - \frac{m_a C_{p,a}}{\Delta t} \right) T_{a,t+\Delta t} + \frac{m_a C_{p,c}}{\Delta t} T_{a,t} \\
y_3 &= \frac{m_{pr} C_{p,pr}}{\Delta t} T_{pr,t} + A_{pr} h_{c,a-pr} T_{a,t+\Delta t} - L_v \left( \frac{\partial M}{\partial t} \right) + A_{pr} \tau_c \alpha_{pr} I_{t+\Delta t} \\
y_4 &= \frac{m_f C_{p,f}}{\Delta t} T_{f,t} + A_f h_{c,a-f} T_{a,t+\Delta t} + A_f \tau_c \alpha_f I_{t+\Delta t}
\end{aligned}$$

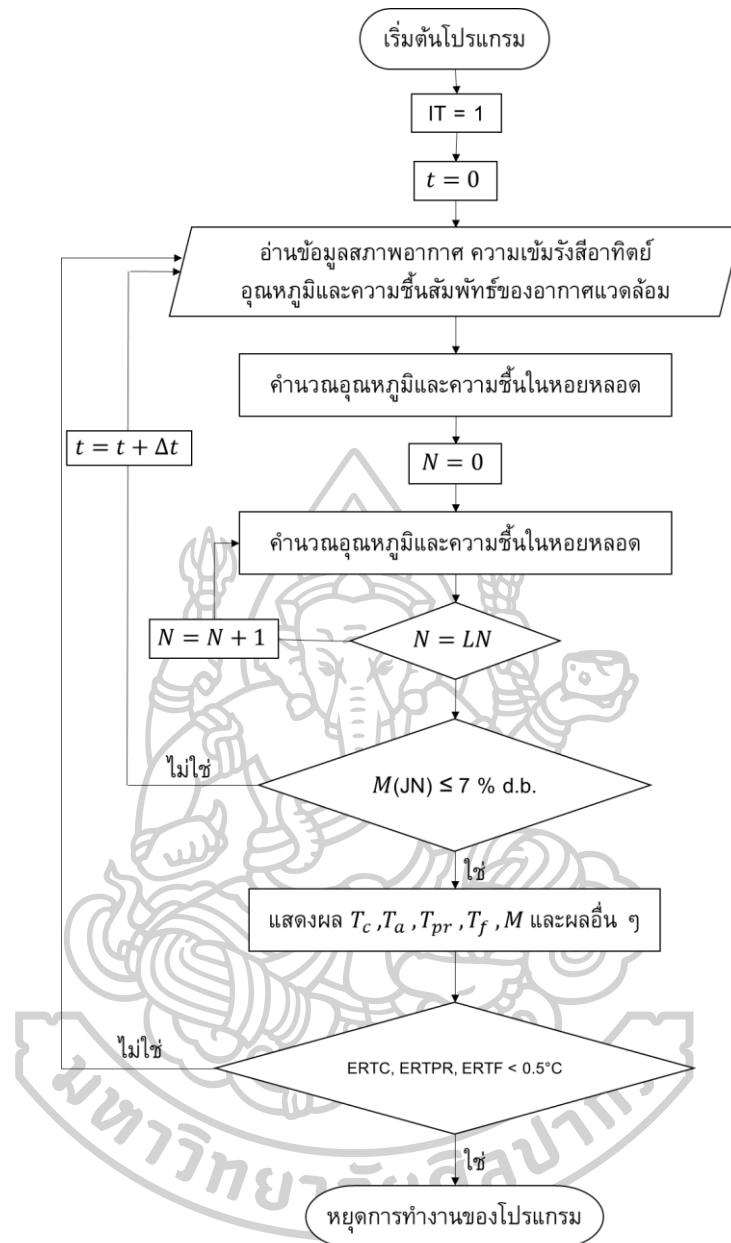
### 3.3.2.4 การเขียนโปรแกรมสำหรับการคำนวณหาผลเฉลย

เนื่องจากการคำนวณอุณหภูมิแผ่นโพลีคาร์บอเนต อากาศภายในเครื่องอบแห้ง ผลิตภัณฑ์ และพื้นเครื่องอบแห้ง มีขั้นตอนในการคำนวณหลายขั้นตอน และต้องทำซ้ำทุก  $\Delta t$  ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณหาผลเฉลยด้วยภาษาฟอร์แทรน โดยใช้คอมไพเลอร์เป็น Compaq Visual FORTRAN 6.5

การทำงานเริ่มต้นของโปรแกรมจะเริ่มต้นจากการกำหนดค่าเริ่มต้นของเวลา  $t=0$  และพารามิเตอร์ที่จำเป็นต่าง ๆ ของระบบ เช่น ขนาดของเครื่องอบแห้ง และคุณสมบัติทางฟิสิกส์และทางความร้อนขององค์ประกอบต่าง ๆ ถัดมาจะเป็นการกำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นของทุกองค์ประกอบในเครื่องอบแห้งให้เท่ากับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม และกำหนดค่าความชื้นเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ให้เท่ากับค่าที่ได้จากการทดลองจริง เพื่อใช้เป็นเงื่อนไขเริ่มต้นของการคำนวณการอบแห้ง หลังจากนั้นโปรแกรมจะตั้งค่าตัวนับตำแหน่ง  $N=0$  เพื่อใช้ในการคำนวณตามแนวการไหลของอากาศภายในเครื่องอบแห้ง ซึ่งในแต่ละตำแหน่งจะมีการคำนวณสมการอนุรักษ์พลังงานและสมการอนุรักษ์มวลขององค์ประกอบต่างๆ ได้แก่ แผ่นโพลีคาร์บอเนต อากาศภายใน ผลิตภัณฑ์ และพื้นเครื่องอบแห้ง การคำนวณอุณหภูมิของแต่ละองค์ประกอบจะทำโดยใช้วิธีเชิงตัวเลขแบบ Gaussian Elimination ซึ่งเป็นวิธีการแก้ระบบสมการเชิงเส้น 4 สมการ 4 ตัวแปรที่สัมพันธ์กัน ได้แก่ อุณหภูมิของแผ่นโพลีคาร์บอเนต อากาศ ผลิตภัณฑ์ และพื้นเครื่องอบแห้ง ในช่วงเวลาถัดไป จากนั้นจะคำนวณการเปลี่ยนแปลงของความชื้นในผลิตภัณฑ์ตามสมการไอโซเทอร์มการคายความชื้น (Desorption)

isotherm) และสมการการแพร่ความชื้นภายในเนื้อหอย เมื่อคำนวณครบทุกตำแหน่งในเครื่องอบแห้ง โปรแกรมจะเพิ่มค่าตัวนับ  $N=N+1$  เพื่อเลื่อนไปยังตำแหน่งถัดไป และเมื่อครบทุกตำแหน่งแล้วจะเพิ่มเวลาเป็น  $t=t+\Delta t$  เพื่อคำนวณในช่วงเวลาต่อไป การคำนวณจะดำเนินไปอย่างต่อเนื่องในรูปของเวลา และตำแหน่ง จนกระทั่งค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ในตำแหน่งสุดท้าย  $M(JN)$  มีค่าลดลงน้อยกว่าหรือเท่ากับ 7 %d.b. ซึ่งเป็นเกณฑ์ที่กำหนดว่าผลิตภัณฑ์แห้งสมบูรณ์ จากนั้นโปรแกรมจะหยุดการทำงาน และแสดงผลลัพธ์สุดท้าย โดยผลลัพธ์ที่ได้ประกอบด้วยอุณหภูมิของแต่ละองค์ประกอบ ได้แก่ อุณหภูมิของของแผ่นโพลีคาร์บอนเนต ( $T_c$ ) อุณหภูมิของอากาศภายในเครื่องอบแห้ง ( $T_a$ ) อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ ( $T_{pr}$ ) และอุณหภูมิของพื้นเครื่องอบแห้ง ( $T_f$ ) รวมถึงค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ ( $M$ ) และค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในเครื่องอบแห้ง ผลลัพธ์ทั้งหมดจะถูกบันทึกไว้เป็นไฟล์ข้อมูล เพื่อใช้ในการสร้างกราฟเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองจริง โดยแผนผังการทำงานของโปรแกรมแสดงดังรูปที่ 13





รูปที่ 13 แผนผังการทำงานของโปรแกรม

### 3.3.2.5 การตรวจสอบแบบจำลอง

ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ผู้วิจัยจะทำการจำลองแบบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาและนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับ การทดลอง สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่าง ๆ จะคำนวณตามสมการที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 3.3.2.2 และข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม รวมทั้งความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมจะใช้ค่าที่ได้จากการบันทึกข้อมูลของการทดลอง โดยผลที่ได้จากการจำลองแบบจะนำมาเปรียบเทียบกับค่าอุณหภูมิขององค์ประกอบของเครื่องอบแห้งที่ได้จากการทดลอง นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้ทำการหาค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้ง แผ่นโพลีคาร์บอเนต ผลิตภัณฑ์ และพื้น

เครื่องอบแห้ง โดยใช้พารามิเตอร์ทางสถิติได้แก่ ค่าความเอนเอียงเฉลี่ย (Mean Bias Error, MBE) สัมประสิทธิ์การอธิบาย (coefficient of determination,  $R^2$ ) และรากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square Error, RMSE) เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Janjai 2017)

$$R^2 = \frac{\sum_i (x_{\text{mod},i} - \bar{x}_{\text{mod}})^2}{\sum_i (x_{\text{meas},i} - \bar{x}_{\text{meas}})^2} \quad (3.22)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (x_{\text{mod},i} - x_{\text{meas},i})}{\frac{\sum_{i=1}^N x_{\text{meas},i}}{N}} \times 100 \quad (3.23)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_{\text{mod},i} - x_{\text{meas},i})^2}{\frac{\sum_{i=1}^N x_{\text{meas},i}}{N}}} \times 100 \quad (3.24)$$

โดยที่  $i$  คือ ลำดับของข้อมูล

$N$  คือ จำนวนข้อมูล

$x_{\text{mod},i}$  คือ ค่าที่ได้จากแบบจำลองของข้อมูลลำดับที่  $i$

$x_{\text{meas},i}$  คือ ค่าที่ได้จากการวัดของข้อมูลลำดับที่  $i$

### 3.4 การทดลองอบแห้งหอยหลอด

#### 3.4.1 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองผู้วิจัยได้ใช้เครื่องอบแห้งแบบพาราโบลาตั้งรูปที่ 14 โดยมีขนาดกว้าง 1.00 m ยาว 1.20 m และสูง 0.35 m มีพื้นที่ฐานเท่ากับ 1.20 m<sup>2</sup> ทางด้านหน้าเครื่องอบแห้งมีช่องอากาศเข้า 2 ช่อง มีขนาดกว้าง 3.5 cm และยาว 19.5 cm ทางด้านหลังเครื่องอบแห้งมีช่องอากาศออก 1 ช่อง ขนาดกว้าง 6.0 cm และยาว 7.5 cm โดยที่ภายในเครื่องอบแห้งมีภาตใส่ผลิตภัณฑ์ทำจากพลาสติก ขนาดกว้างและยาวด้านละ 0.75 m โดยเครื่องสูงจากพื้น.... m ด้านหลังมีพัดลมขนาด 3 W ต่อกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 20 W มีแผ่นปกคลุมทำมาจากโพลีคาร์บอเนตชนิดลูกฟูกแบบใส มีค่าส่งผ่านรังสีอาทิตย์ 0.8 พื้นทำจากโลหะทาสีดำมีค่าการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ (0.95)



รูปที่ 14 เครื่องอบแห้งแบบพาราโบลา

### 3.4.2 การทดลองอบแห้งหอยหลอด

ผู้วิจัยได้ทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในเครื่องอบแห้ง อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม และความเข้มรังสีอาทิตย์ โดยข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะนำไปตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง มีรายละเอียดดังนี้

#### 3.4.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1) เทอร์โมคัปเปิลชนิดเค (K-type thermocouple) (รูปที่ 15)
- 2) เครื่องวัดความเข้มรังสีอาทิตย์แบบเทอร์โมไพล์ (thermopile pyranometer) ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP21 (รูปที่ 16)
- 3) เครื่องบันทึกข้อมูล (data logger) ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น DX2000 (รูปที่ 17)
- 4) เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ยี่ห้อ E+E Elektronik (รูปที่ 18)



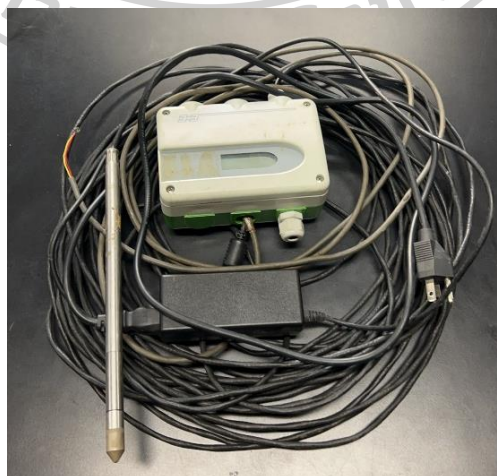
รูปที่ 15 เทอร์โมคัปเปิลชนิดเค



รูปที่ 16 เครื่องวัดความเข้มรังสีอาทิตย์แบบเทอร์โมไฟลีย์หือ Kipp and Zonen รุ่น CMP21



รูปที่ 17 เครื่องบันทึกข้อมูลหือ Yokogawa รุ่น DX2000



รูปที่ 18 เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นหือ E+E Elektronik

### 3.4.2.2 ขั้นตอนการทดลองอบแห้ง

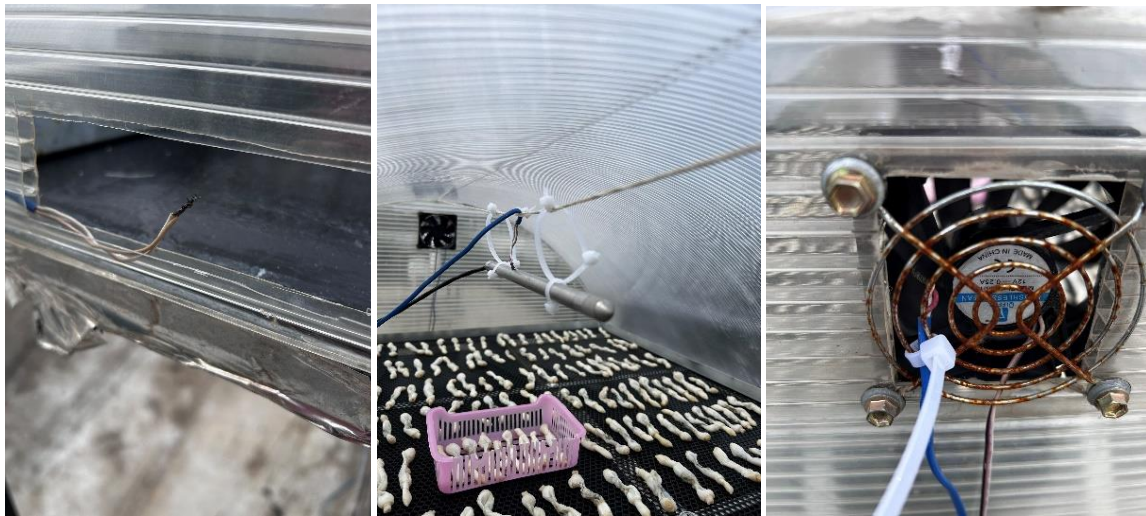
ผู้วิจัยทำการทดลองอบแห้งหอยหลอดที่ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม โดยหอยหลอดมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก มีความยาว 5-8 cm กว้าง ประมาณ 1 cm ผู้วิจัยซื้อหอยหลอดที่ตลาดล่างนครปฐม ผู้วิจัยได้ทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง โดยใช้หอยหลอดครั้งละประมาณ 1.2 kg และใช้มวลตัวอย่างประมาณ 37.52 g (รูปที่ 19) หอยหลอดจะถูกจัดวางบนตะแกรงตากโดยให้แต่ละตัวมีระยะห่าง 1-2 cm จากนั้นนำเข้าไปวางภายในเครื่องอบแห้ง (รูปที่ 20) ในการอบแห้งจะทำการชั่งมวลตัวอย่างทุก 1 ชั่วโมง จนกระทั่งมวลของหอยหลอดจะมีค่าคงที่ด้วยเครื่องชั่งยี่ห้อ Sartorius ในระหว่างการอบแห้งจะทำการบันทึกข้อมูลรังสีอาทิติย์ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ภายในและภายนอกเครื่องอบแห้ง โดยติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลชนิดเคไว้ภายในเครื่องอบแห้ง 3 จุด และภายนอก 1 จุด และติดตั้งหัววัดความชื้น E+E Elektronik ภายใน 1 จุด บริเวณตรงกลางเครื่องอบแห้งและภายนอก 1 จุด (รูปที่ 21) โดยเริ่มทำการทดลองที่เวลา 8.00 น. จนถึง 17.00 น. ติดตั้งเครื่องวัดความเข้มรังสีอาทิติย์แบบเทอร์โมไฟล์ยี่ห้อ Kipp and Zonen รุ่น CMP21 ไว้ที่ภายนอก 1 จุด โดยข้อมูลรังสีอาทิติย์อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์จะถูกบันทึกด้วยเครื่องบันทึกข้อมูล ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น DX2000 โดยจะบันทึกทุก ๆ วินาทีจากนั้นทำการเฉลี่ยเป็นข้อมูลราย 1 ชั่วโมง



รูปที่ 19 จำนวนหอยหลอดทั้งหมดที่ใช้ในการอบแห้ง และมวลหอยหลอดตัวอย่าง



รูปที่ 20 การจัดวางหอยหลอดทั้งหมด และหอยหลอดตัวอย่าง



ก)

ข)

ค)

รูปที่ 21 ก) ช่องอากาศเข้าด้านหน้าที่ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลชนิดเค ข) ตรงกลางเครื่องอบแห้งที่ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลชนิดเคและติดตั้งที่วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ยี่ห้อ E+E Elektronik ค) อากาศออกทางด้านหลังเครื่องอบแห้งที่ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลชนิดเค

หอยหลอดที่ตากแห้งจากเครื่องอบแห้งจะนำไปทดสอบ water activity ด้วยเครื่อง Rotronic รุ่น HygroPalm (รูปที่ 22) เพื่อหาปริมาณน้ำอิสระที่หลงเหลือ ก่อนนำไปเข้าตู้อบไฟฟ้าที่มีอุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (รูปที่ 23) เพื่อหาค่ามวลแห้ง เมื่อได้มวลแห้งของหอยหลอดแล้วจะนำไปใช้หาค่าความชื้นของหอยหลอดต่อไป จากนั้นจึงนำมวลที่ชั่งในแต่ละช่วงเวลาไปหาความชื้นมาตรฐานแห้งของมวลตัวอย่าง



รูปที่ 22 เครื่องวัด  $a_w$  ยี่ห้อ Rotronic รุ่น HygroPalm



รูปที่ 23 เครื่องอบแห้งไฟฟ้าอุณหภูมิ 103°C ที่นำหอยหลอดเข้าไปอบแห้ง



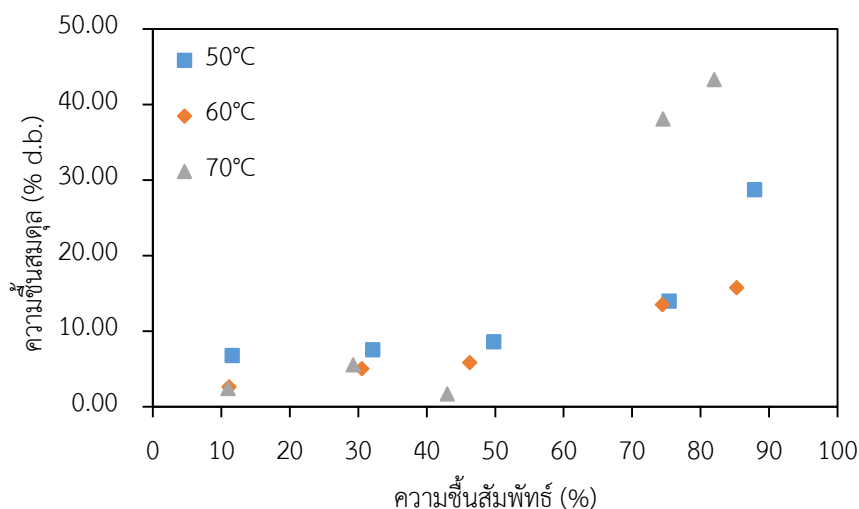
## บทที่ 4

### ผลและการอภิปรายผล

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอผลการศึกษาซอร์พชันไอโซเทอร์ม (Sorption Isotherm) ของหอยหลอด เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลและความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาแบบจำลอง จากนั้นได้นำเสนอการจำลองแบบเชิงคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนและมวลภายในเครื่องอบแห้ง รวมไปถึงการทดลองอบแห้งจริงภายใต้สภาวะอากาศจริง และการเปรียบเทียบผลการจำลองแบบกับการทดลองจริง เพื่อประเมินความแม่นยำของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น โดยจะมีการอภิปรายผลและอธิบายกลไกการอบแห้งที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงของกระบวนการ

#### 4.1 การศึกษาไอโซเทอร์มการคายความชื้นของหอยหลอด

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองอบแห้งหอยหลอดในระดับห้องปฏิบัติการ ภายใต้อุณหภูมิจาก 50°C ถึง 70°C โดยใช้สารละลายเกลืออิ่มตัวในการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ให้อยู่ในช่วง 10-90% ผลที่ได้จากการทดลองสามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลของหอยหลอดและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ หรือ moisture desorption isotherm ซึ่งพบว่าลักษณะการคายความชื้นของหอยหลอดมีรูปแบบตัวเจ (J-shaped curve) (รูปที่ 24) ซึ่งเป็นลักษณะทั่วไปของอาหารที่มีโปรตีนสูง โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content, EMC) ของหอยหลอดอย่างรวดเร็วในช่วงกลางของกราฟเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น จากรูปที่ 24 พบว่าค่า EMC มีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ไม่เกิน 50% ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีที่ว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้โมเลกุลน้ำเคลื่อนที่ออกจากวัสดุได้ง่าย (Kingsly และ Singh 2007) อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 70°C ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์สูงตั้งแต่ 70-90% EMC มีค่าสูงขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่สูงร่วมกับอุณหภูมิที่สูง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของหอยหลอด เช่น การทำให้หอยหลอดสุก ส่งผลให้โครงสร้างโปรตีนเกิดการเปลี่ยนแปลงและดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นในระดับความชื้นสัมพัทธ์สูง (Toujani และคณะ 2011)



รูปที่ 24 Moisture desorption isotherm ของหอยหloedที่อุณหภูมิ 50°C 60°C และ 70°C

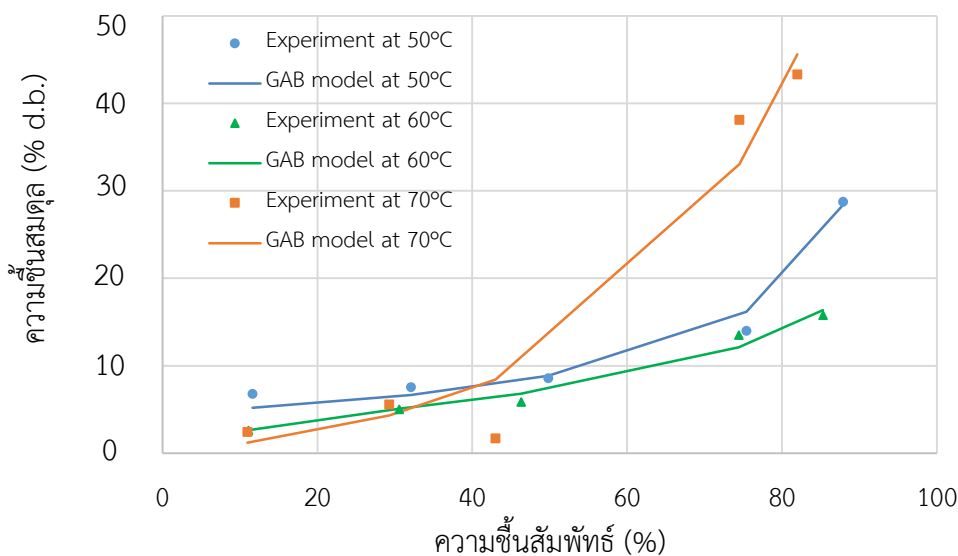
การหาแบบจำลองของซอร์พชันไอโซเทอร์มทำได้โดยการวิเคราะห์และเปรียบเทียบแบบจำลองทั้ง 7 แบบจำลอง กับผลที่ได้จากการทดลองในแต่ละอุณหภูมิที่ใช้อบแห้ง พารามิเตอร์ และค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละแบบจำลองแสดงดังตารางที่ 3 ซึ่งพบว่าแบบจำลอง GAB มีความสามารถในการอธิบายพฤติกรรมการคายความชื้นของหอยหloedได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะในช่วงที่อากาศมีความชื้นสัมพัทธ์ 40-70% ทั้งนี้ค่าคงที่ในสมการของ GAB สำหรับอุณหภูมิ 50°C 60°C และ 70°C ได้ถูกคำนวณและปรับพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับข้อมูลทดลอง และผลการวิเคราะห์พบว่าแบบจำลอง GAB มีค่า RMSE และค่า  $R^2$  คือ 0.7-4% และ 0.95-0.98 ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้สำหรับทุกอุณหภูมิซึ่งแสดงถึงความแม่นยำในการคาดการณ์ค่า EMC

ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง RMSE และ  $R^2$  ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ที่ใช้ในการอบแห้งหอยหloed

| Model | Temperature<br>(°C) | Coefficient |          |          |          | RMSE<br>(%) | $R^2$  |
|-------|---------------------|-------------|----------|----------|----------|-------------|--------|
|       |                     | $b_0$       | $b_1$    | $b_2$    | $b_3$    |             |        |
| Oswin | 50                  | 0.099605    | 0.505335 |          |          | 2.2730      | 0.9162 |
|       | 60                  | 0.073367    | 0.465685 |          |          | 0.8773      | 0.9837 |
|       | 70                  | 0.112217    | 0.935884 |          |          | 4.5526      | 0.9401 |
| Peleg | 50                  | -9.85968    | 1.44818  | 10.15609 | 1.44819  | 4.1347      | 0.7292 |
|       | 60                  | 0.175481    | 2.500086 | 0.046382 | 0.197622 | 0.5863      | 0.9955 |
|       | 70                  | 0.843714    | 3.180425 | 0.003888 | -0.7975  | 3.1658      | 0.9697 |
| GAB   | 50                  | 0.198       | 0.234    | 1032.246 | 0.951    | 1.2840      | 0.9696 |
|       | 60                  | 0.221526    | 0.221521 | 9.36961  | 0.837805 | 0.7978      | 0.9863 |

| Model      | Temperature<br>(°C) | Coefficient |          |          |          | RMSE<br>(%) | R <sup>2</sup> |
|------------|---------------------|-------------|----------|----------|----------|-------------|----------------|
|            |                     | $b_0$       | $b_1$    | $b_2$    | $b_3$    |             |                |
| BET        | 70                  | 1.919356    | 1.919364 | 0.034565 | 0.732467 | 3.9655      | 0.9549         |
|            | 50                  | 0           | 5035421  |          |          | 1.7880      | 0.9394         |
|            | 60                  | 0           | 1847168  |          |          | 1.8354      | 0.8959         |
| Henderson  | 70                  | 0.100796    | 1.110725 |          |          | 4.5791      | 0.9389         |
|            | 50                  | -1.73739    | 1.19939  |          |          | 3.1118      | 0.8449         |
|            | 60                  | -1.733      | 1.36716  |          |          | 0.7520      | 0.9822         |
| Freundlich | 70                  | -1.18325    | 0.63505  |          |          | 3.9968      | 0.9538         |
|            | 50                  | 0.296578    | 0.689445 |          |          | 4.1343      | 0.7292         |
|            | 60                  | 0.188807    | -0.82671 |          |          | 0.9423      | 0.9584         |
| Polynomial | 70                  | 0.816538    | 0.33481  |          |          | 3.3816      | 0.9663         |
|            | 50                  | 0.119575    | -0.38966 | 0.630143 |          | 2.3405      | 0.9095         |
|            | 60                  | 0.030829    | -0.01708 | 0.200049 |          | 0.5798      | 0.9949         |
|            | 70                  | 0.079063    | -0.57440 | 1.248846 |          | 3.0773      | 0.9705         |

รูปที่ 25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นสมดุลและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศสำหรับแบบจำลอง GAB ที่อุณหภูมิ 50°C 60°C และ 70°C โดยเปรียบเทียบค่าจากการทดลองกับค่าที่ได้จากแบบจำลอง พบว่าพฤติกรรมการคายความชื้นของหอยหลอดภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่ต่างกันจะมี EMC เพิ่มขึ้นเมื่อค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะทั่วไปของวัสดุที่สามารถดูดซับหรือคายความชื้น อย่างไรก็ตามอิทธิพลของอุณหภูมิที่ต่างกันส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลง EMC ของหอยหลอด โดยที่อุณหภูมิ 50°C และ 60°C ค่า EMC จะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 10-70% ซึ่งแสดงถึงอัตราการระเหยของน้ำที่เพิ่มขึ้นในสภาวะที่อุณหภูมิอากาศมีค่าสูงขึ้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์มากกว่า 80% พบว่าที่อุณหภูมิ 70°C ค่า EMC มีค่ามากกว่าที่อุณหภูมิ 50°C และ 60°C ซึ่งอาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของหอยหลอด เช่น การสุกของหอยหลอด ซึ่งส่งผลให้โครงสร้างของวัสดุเปลี่ยนแปลงไป ทำให้สามารถดูดซับน้ำได้มากขึ้นในสภาวะที่ความชื้นสัมพัทธ์สูง ซึ่งจากรูปที่ 25 พบว่าผลที่ได้จากการทดลองและจากการจำลองแบบมีความสอดคล้องกัน ดังนั้นแบบจำลอง GAB จึงสามารถนำมาใช้เพื่อศึกษาพฤติกรรมการคายความชื้นของหอยหลอดได้



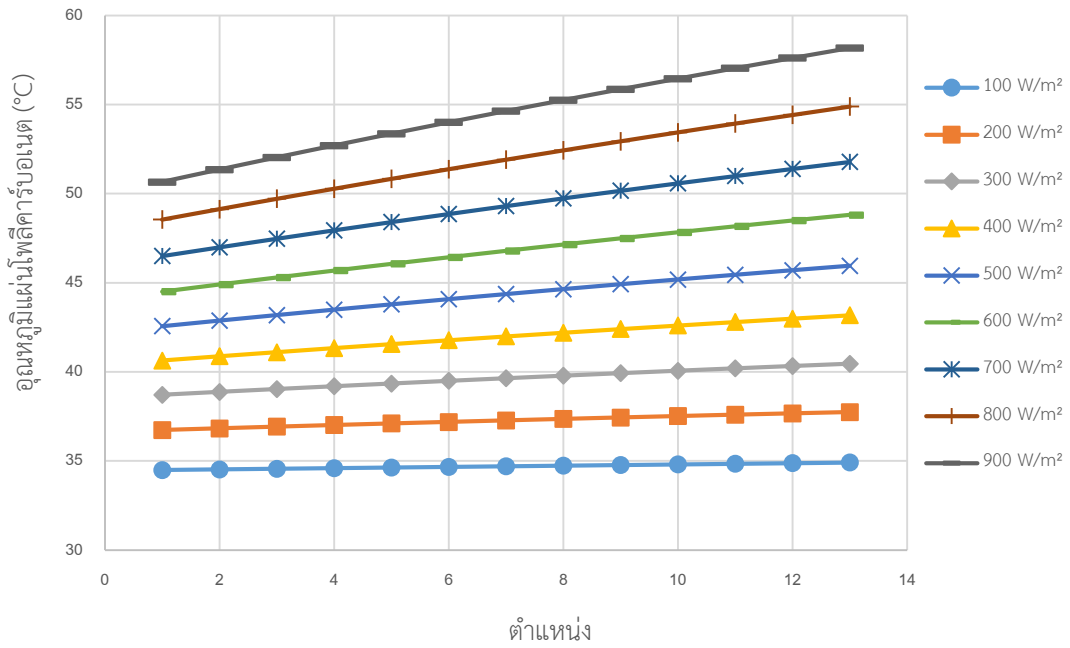
รูปที่ 25 Moisture desorption isotherm ที่ได้จากแบบจำลองของ GAB และจากการทดลอง

ผู้วิจัยได้ทำการทดลองหาค่าความชื้นสมดุลของหอยหลอด เพื่อศึกษาพฤติกรรมการคายความชื้นของหอยหลอด โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 50°C 60°C และ 70°C และค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศตั้งแต่ 10-90% จากผลที่ได้จากการทดลองพบว่า ค่าความชื้นสมดุลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ โดยอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่าความชื้นสมดุลลดลงในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 10-70% เนื่องจากความสามารถในการกักเก็บความชื้นของตัวอย่างลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อย่างไรก็ตามในช่วงความชื้นสัมพัทธ์มีค่ามากกว่า 80% ค่าความชื้นสมดุลที่อุณหภูมิ 70°C มีค่าสูง ซึ่งอาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของหอยหลอด จากการวิเคราะห์แบบจำลอง พบว่าแบบจำลอง GAB สามารถพยากรณ์ค่าความชื้นสมดุลได้อย่างแม่นยำ โดยเฉพาะการทำงานกับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในช่วง 10-70% โดยมีค่า RMSE และ  $R^2$  เท่ากับ 0.7-4% และ 0.95-0.98 ตามลำดับ

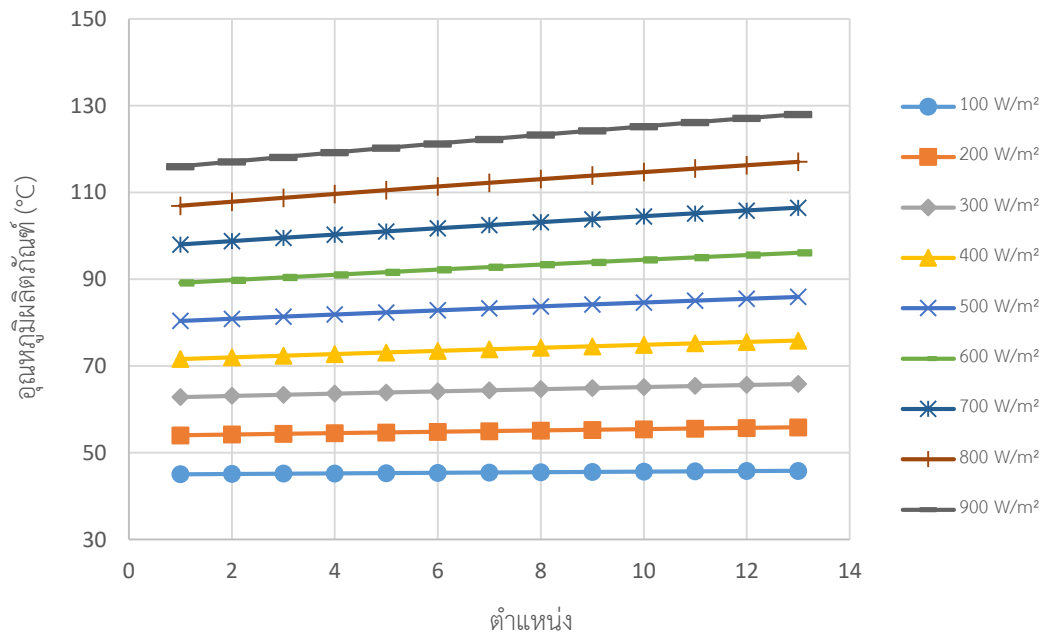
## 4.2 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งหอยหลอด

### 4.2.1 ผลของความเข้มรังสีอาทิตย์ที่มีต่ออุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้ง

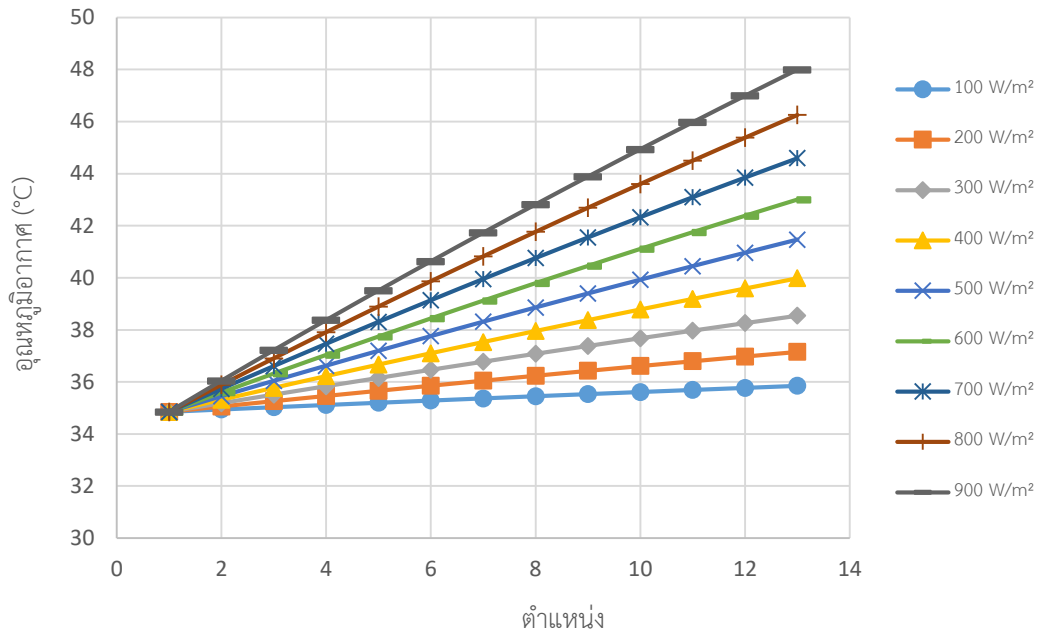
ผู้วิจัยได้ทำการแปรค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ในช่วง 100-900 W/m<sup>2</sup> โดยมีเงื่อนไขคือ อุณหภูมิแวดล้อมมีค่าคงที่เท่ากับ 35°C ความชื้นสัมพัทธ์มีค่าคงที่ 40% และอัตราเร็วอากาศที่ใช้ในการอบแห้งมีค่า 0.1 m/s เพื่อศึกษาผลของความเข้มรังสีอาทิตย์ที่มีต่ออุณหภูมิของส่วนประกอบต่างๆ ภายในเครื่องอบแห้ง พบว่าปริมาณรังสีอาทิตย์ส่งผลต่ออุณหภูมิของส่วนประกอบภายในเครื่องอบแห้งอย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่อปริมาณรังสีอาทิตย์สูงส่งผลให้อุณหภูมิมีค่าสูงเช่นกัน (รูปที่ 26-29)



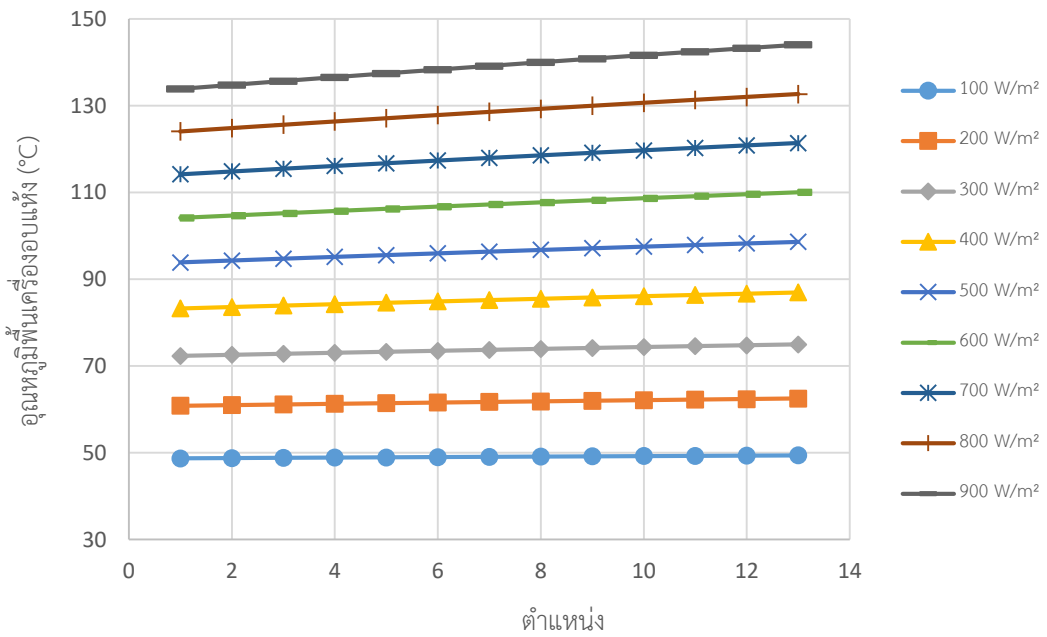
รูปที่ 26 ผลของปริมาณรังสีอาทิตย์ที่มีต่ออุณหภูมิแผ่นโพลีคาร์บอเนตที่ได้จากการจำลองแบบ



รูปที่ 27 ผลของปริมาณรังสีอาทิตย์ที่มีต่ออุณหภูมิผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการจำลองแบบ



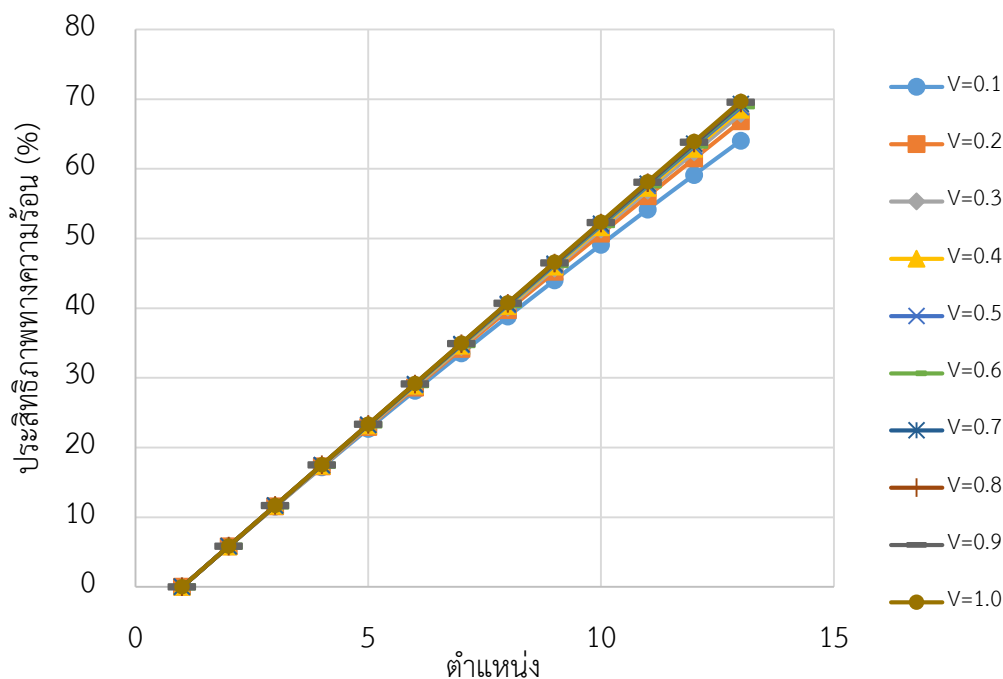
รูปที่ 28 ผลของปริมาณรังสีอาทิตย์ที่มีต่ออุณหภูมิอากาศที่ได้จากการจำลองแบบ



รูปที่ 29 ผลของปริมาณรังสีอาทิตย์ที่มีต่ออุณหภูมิพื้นเครื่องอบแห้งที่ได้จากการจำลองแบบ

#### 4.2.2 ผลของอัตราเร็วอากาศต่อประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องอบแห้ง

ในการจำลองแบบผู้วิจัยได้ทำการแปรค่าอัตราเร็วอากาศที่ใช้ในการอบแห้งหอยหลอดในช่วง 0.1-1.0 m/s โดยมีเงื่อนไขคือ อุณหภูมิแวดล้อม ความชื้นสัมพัทธ์ และความเข้มรังสีอาทิตย์มีค่าคงที่เท่ากับ 35°C 40% และ 500 W/m<sup>2</sup> ตามลำดับ เพื่อศึกษาผลของอัตราเร็วอากาศภายในเครื่องอบแห้งที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องอบแห้ง พบว่าที่อัตราเร็วอากาศต่ำกว่า 0.3 m/s ประสิทธิภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราเร็วอากาศมีค่ามากขึ้น ในขณะที่อัตราเร็วมากกว่า 0.3 m/s ไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพทางความร้อน ดังนั้นอัตราเร็วที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งคือ 0.3 m/s เนื่องจากไม่จำเป็นต้องใช้อัตราเร็วอากาศสูง ประสิทธิภาพทางความร้อนก็มีค่ามาก และสามารถลดการใช้พลังงานในการอบแห้งจริง ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกอบแห้งที่อัตราเร็วอากาศ 0.3 m/s

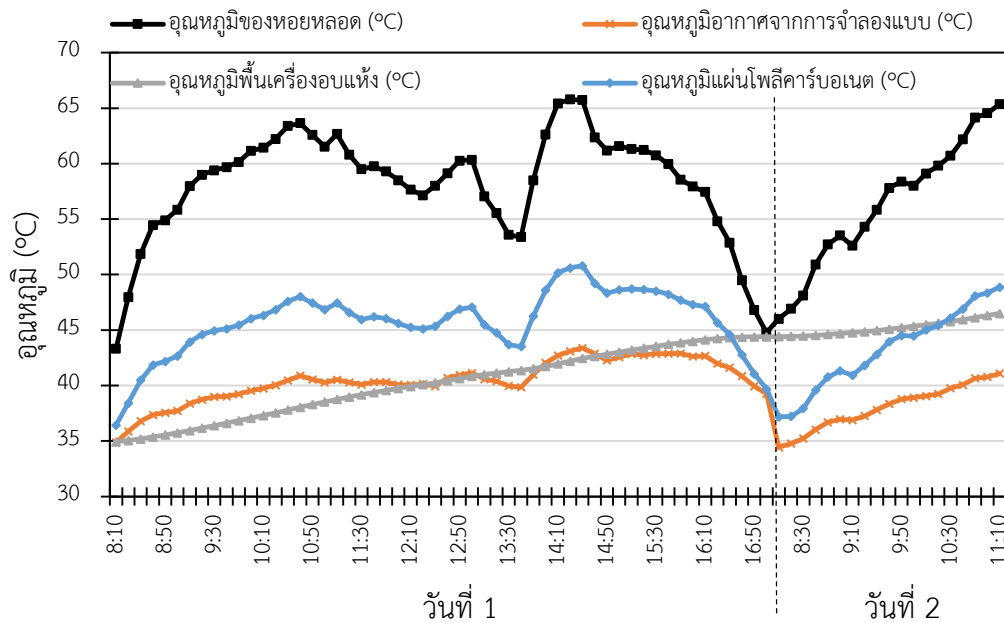


รูปที่ 30 ผลของปริมาณรังสีอาทิตย์ที่มีต่อประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องอบแห้ง

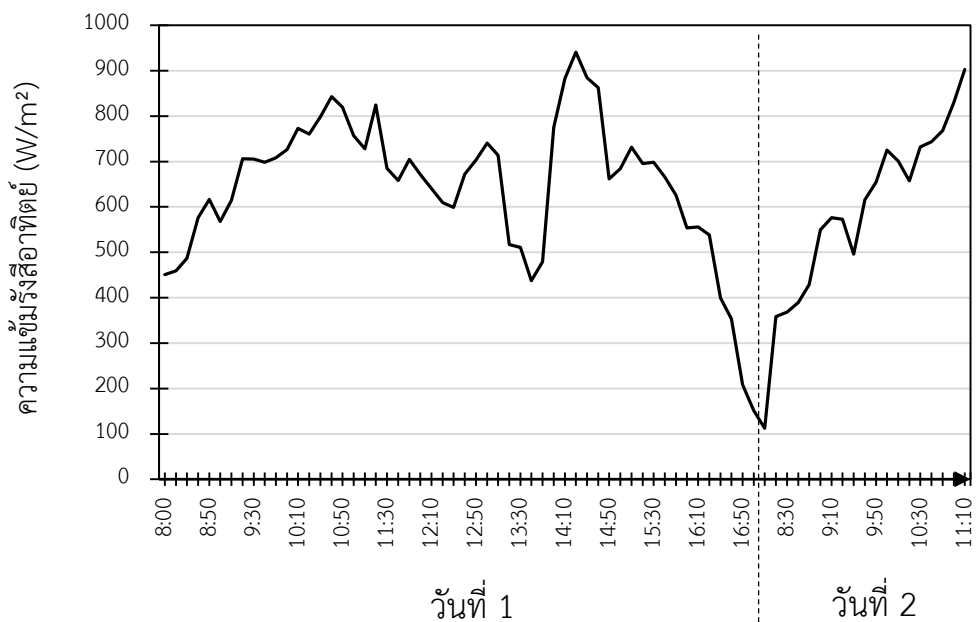
#### 4.2.3 ผลจากการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์

ผู้วิจัยได้ทำการจำลองแบบโดยใช้อัตราเร็วอากาศในการอบแห้ง 0.3 m/s โดยจะแสดงค่าอุณหภูมิของหอยหลอด อุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้ง อุณหภูมิพื้นเครื่องอบแห้ง และอุณหภูมิแผ่นโพลีคาร์บอเนต ณ จุดกึ่งกลางของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์จากการจำลองแบบ (รูปที่ 31) ผลจากการจำลองแบบแสดงให้เห็นว่าค่าอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งเพิ่มขึ้นตั้งแต่ช่วงเช้าประมาณ 40°C จนถึงช่วงกลางวันซึ่งมีค่าสูงสุดประมาณ 65°C และลดลงในช่วงบ่ายตามความเข้ม

ของรังสีอาทิตย์ (รูปที่ 32) ส่วนอุณหภูมิของพื้นเครื่องอบแห้งและแผ่นโพลีคาร์บอเนตมีค่าใกล้เคียงกัน โดยแผ่นโพลีคาร์บอเนตมีแนวโน้มอุณหภูมิสูงกว่าอากาศประมาณ 3–5°C เนื่องจากการดูดกลืนรังสีและการแผ่ความร้อนภายในเครื่องอบแห้ง



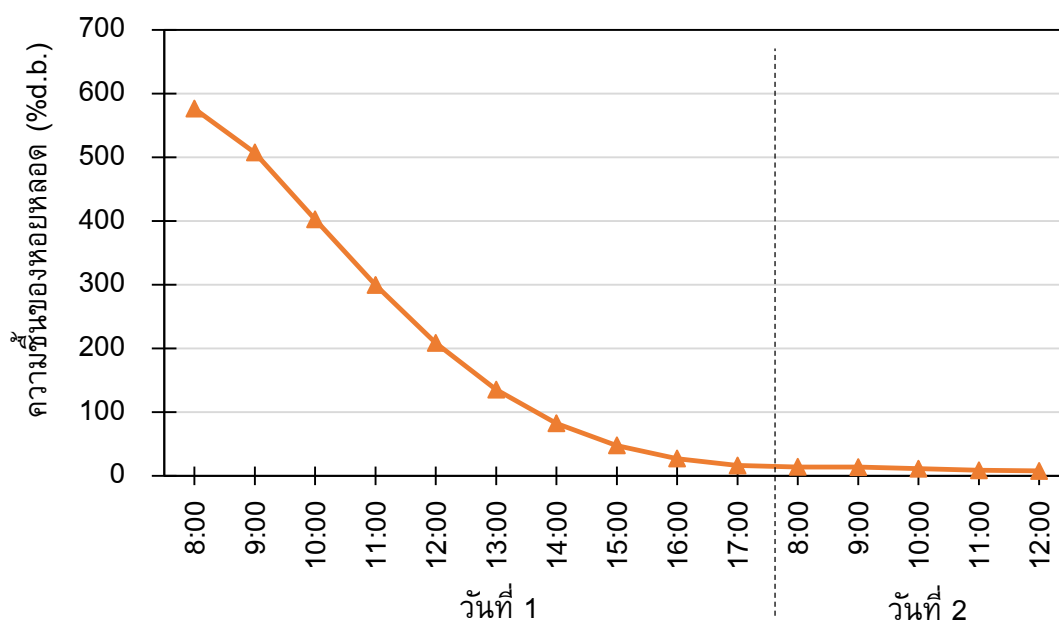
รูปที่ 31 การแปรค่าของอุณหภูมิของหอยหลอดในเครื่องอบแห้งจากแบบจำลอง



รูปที่ 32 ความเข้มรังสีอาทิตย์ตลอดช่วงระยะเวลาในการอบแห้ง

รูปที่ 33 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลา และปริมาณความชื้นของหอยหลอดในรูปของเปอร์เซ็นต์บนความชื้นมาตรฐานแห้ง (% d.b.) ซึ่งได้จากการคำนวณ โดยผลการจำลองแบบ

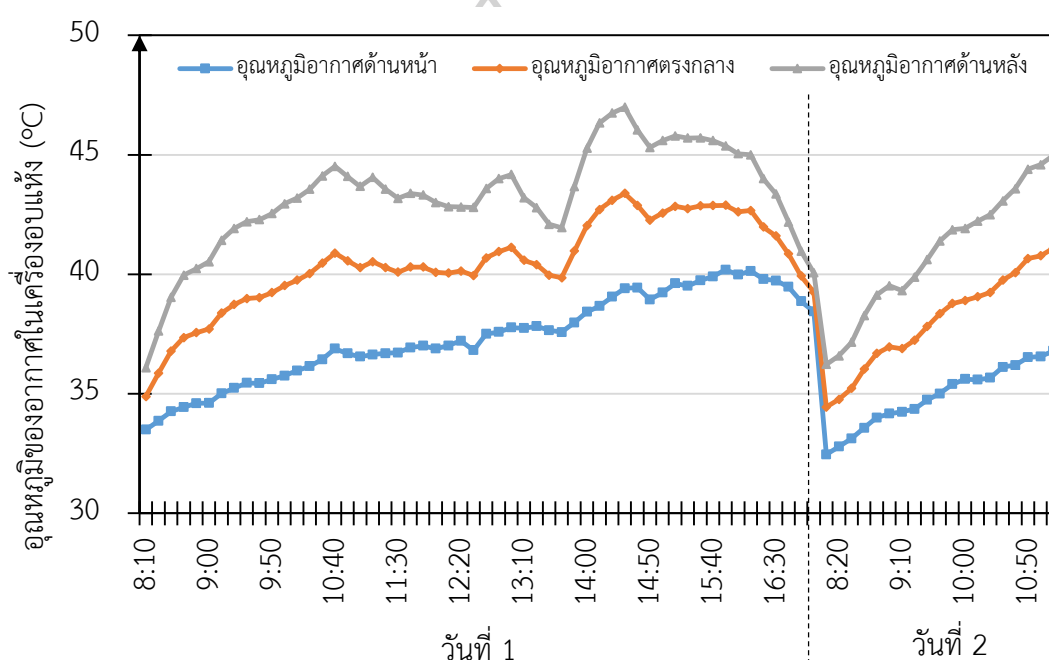
แสดงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของความชื้นที่ลดลงอย่างต่อเนื่องตลอดช่วงเวลาอบแห้ง โดยเริ่มตั้งแต่วันที่ 8:00 น. จนถึง 17:00 น. ในวันแรก และอบแห้งเสร็จในวันที่สองที่เวลา 11:10 น. จากกราฟพบว่าความชื้นเริ่มต้นของหอยหลอดมีค่า 576 %d.b. และลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงเวลา 8:00–11:00 น. ซึ่งเป็นช่วงที่น้ำบนผิวผลิตภัณฑ์ระเหยออกได้ง่าย เนื่องจากได้รับพลังงานความร้อนจากรังสีอาทิตย์และอากาศภายในเครื่องอบมีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง เมื่อเข้าสู่ช่วงเวลา 11:00–15:00 น. ปริมาณความชื้นลดลงต่อเนื่องแต่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงช้าลง และสุดท้ายในช่วงเวลาตั้งแต่ 15:00 จนถึง 12:00 น. ของอีกวัน หอยหลอดเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุลความชื้น (Equilibrium Moisture Content) ระหว่างผลิตภัณฑ์กับอากาศที่อบแห้ง โดยความชื้นสุดท้ายของหอยหลอดหลังการอบแห้งมีค่าประมาณ 7–12% db ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการเก็บรักษาและป้องกันการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์



รูปที่ 33 กราฟการแห้งของหอยหลอดที่ได้จากการจำลองแบบ

รูปที่ 34 แสดงผลการจำลองแบบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ในตำแหน่งด้านหน้า ด้านกลาง และด้านหลังของเครื่องอบแห้งตลอดเวลา 8:00–17:00 น. จากกราฟพบว่าอุณหภูมิอากาศในทุกตำแหน่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงเช้าและลดลงในช่วงบ่าย โดยมีค่ามากที่สุดในช่วงเวลาประมาณ 13:00–14:00 น. ซึ่งเป็นช่วงที่ความเข้มรังสีอาทิตย์สูงสุด (รูปที่ 33) อุณหภูมิอากาศที่คำนวณได้จากการจำลองมีค่าระหว่าง 35–48°C ตลอดการอบแห้ง ตำแหน่งด้านหลังของเครื่องอบมีอุณหภูมิสูงสุดในแต่ละช่วงเวลา โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 45–48°C รองลงมาคือตำแหน่งตรงกลาง 40–45°C และตำแหน่งด้านหน้า 35–40°C เนื่องจากอากาศ

ร้อนที่ไหลผ่านภายในเครื่องอบแห้งมีการสะสมความร้อนตามทิศทางการไหล ทำให้บริเวณด้านหลังเครื่องอบแห้งมีอุณหภูมิอากาศสูงกว่าบริเวณด้านหน้าและกึ่งกลางเครื่องอบแห้ง นอกจากนี้ พื้นที่บริเวณตรงกลางและด้านหลังยังได้รับรังสีอาทิตย์ที่ผ่านแผ่นโพลีคาร์บอเนตมากกว่า จึงมีการดูดกลืนพลังงานและแผ่รังสีกลับสู่ภายในเครื่องอบแห้งมากกว่าบริเวณด้านหน้า ในช่วงบ่ายประมาณเวลา 15:00–17:00 น. อุณหภูมิในทุกตำแหน่งลดลงตามการลดลงของรังสีอาทิตย์ โดยแบบจำลองสามารถจำลองแนวโน้มดังกล่าวได้อย่างถูกต้อง ทั้งนี้เส้นกราฟแสดงความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างตำแหน่งด้านหน้าและด้านหลังประมาณ 5–7°C ซึ่งถือว่าอยู่ในช่วงค่าที่เหมาะสมสำหรับการไหลเวียนของอากาศในเครื่องอบแห้งแบบพลังงานแสงอาทิตย์

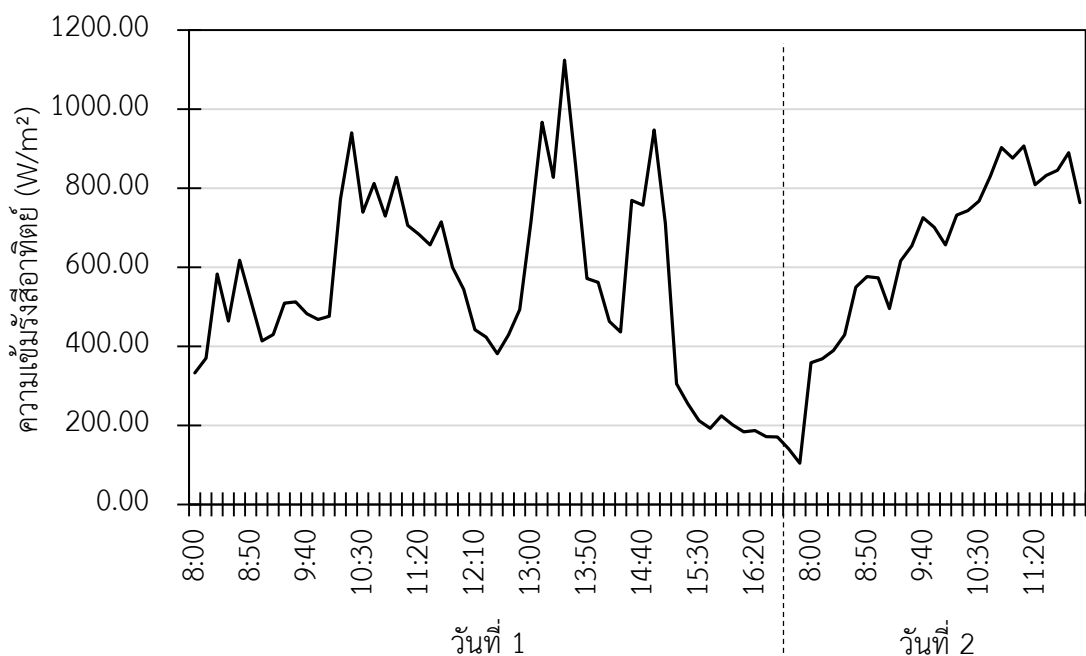


รูปที่ 34 การแปรค่าของอุณหภูมิอากาศในแต่ละตำแหน่งภายในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ จากผลการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์

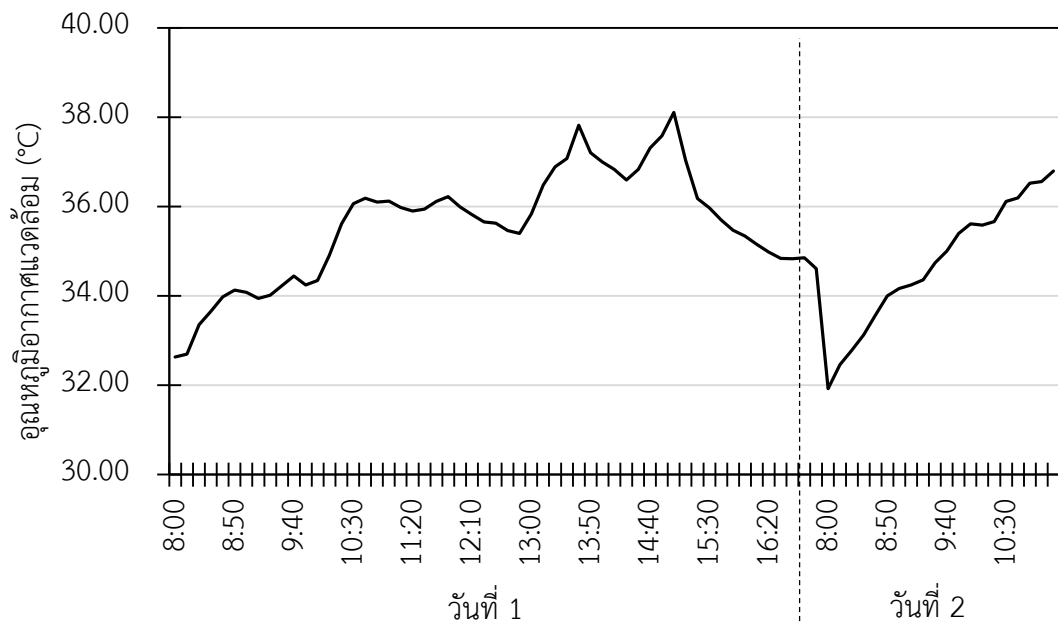
#### 4.3 การทดลองอบแห้งหอยหลอด

ในส่วนของการทดลองอบแห้งหอยหลอดผู้วิจัยได้ใช้มวลตัวอย่างเริ่มต้นที่ 37.52 g ผู้วิจัยได้อบแห้งหอยหลอดและบันทึกมวลตัวอย่างในทุก ๆ 1 ชั่วโมง จนกว่าหอยหลอดจะแห้งหรือมวลของหอยหลอดคงที่ ซึ่งในการอบแห้งครั้งนี้เหลือมวลตัวอย่าง 5.95 g จากนั้นผู้วิจัยได้นำมวลตัวอย่างที่แห้งแล้วไปหา  $a_w$  พบว่ามีค่า 0.37 แล้วนำไปเข้าเครื่องอบแห้งไฟฟ้าที่มีอุณหภูมิ 103°C จะได้มวลแห้ง 5.55 g จากนั้นผู้วิจัยจึงนำมวลแห้งไปหาค่าความชื้นภายในผลิตภัณฑ์ที่เวลาต่าง ๆ เพื่อนำไปสร้างกราฟการแห้ง (Drying curve) ต่อไป

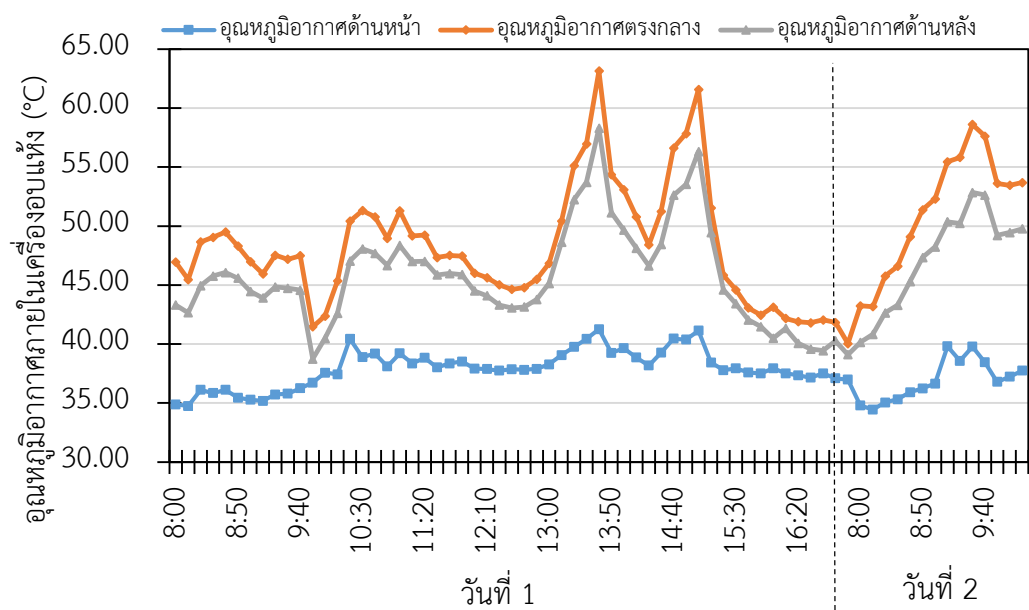
จากผลการทดลองพบว่าค่าความเข้มรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่วันที่ 08.00 น. และมีค่ามากที่สุดในช่วงประมาณ 12.00–13.00 น. (มากกว่า  $1000 \text{ W/m}^2$ ) ก่อนจะลดลงในช่วงบ่าย และต่ำลงตามลำดับ (รูปที่ 35) จากรูปที่ 36 พบว่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อมเพิ่มขึ้นจากประมาณ  $32 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ในช่วงเช้าเป็นค่าสูงสุดราว  $38 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ในช่วงเวลา 13.00–14.00 น. ก่อนจะลดลงในช่วงบ่าย ซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ โดยมีการลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 15.00–16.00 น. อันเนื่องมาจากสภาพอากาศแปรปรวน ซึ่งโดยรวมอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยตลอดวันอยู่ในช่วง  $34\text{--}36 \text{ }^{\circ}\text{C}$  จากกราฟอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้ง ด้านหน้า ตรงกลาง และด้านหลัง (รูปที่ 37) พบว่าอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งเพิ่มขึ้นตามเวลาและตำแหน่งการไหลของอากาศ โดยด้านท้ายมีค่าอุณหภูมิสูงสุดราว  $60\text{--}65 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ในช่วงเวลา 12.00–13.30 น. ซึ่งสอดคล้องกับช่วงที่ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์สูงสุด แสดงให้เห็นว่าเครื่องอบแห้งสามารถสะสมและถ่ายเทความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม (รูปที่ 38) มีแนวโน้มผกผันกับอุณหภูมิอากาศแวดล้อมเมื่ออุณหภูมิสูงความชื้นสัมพัทธ์จะลดลง เพราะอากาศสามารถกักเก็บไอน้ำได้มากขึ้น และความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายในเครื่องอบแห้ง (รูปที่ 39) มีแนวโน้มผกผันกับอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งเช่นเดียวกับภายนอก แต่มีการแปรค่าตามอัตราการระเหยน้ำของผลิตภัณฑ์ด้วย



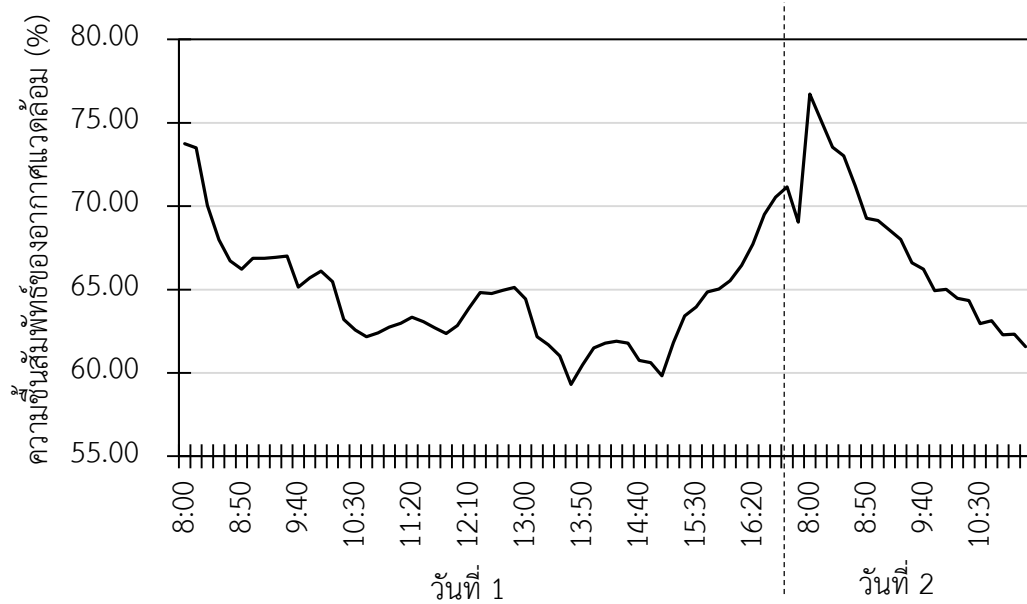
รูปที่ 35 ความเข้มรังสีอาทิตย์ตลอดช่วงระยะเวลาในการอบแห้ง



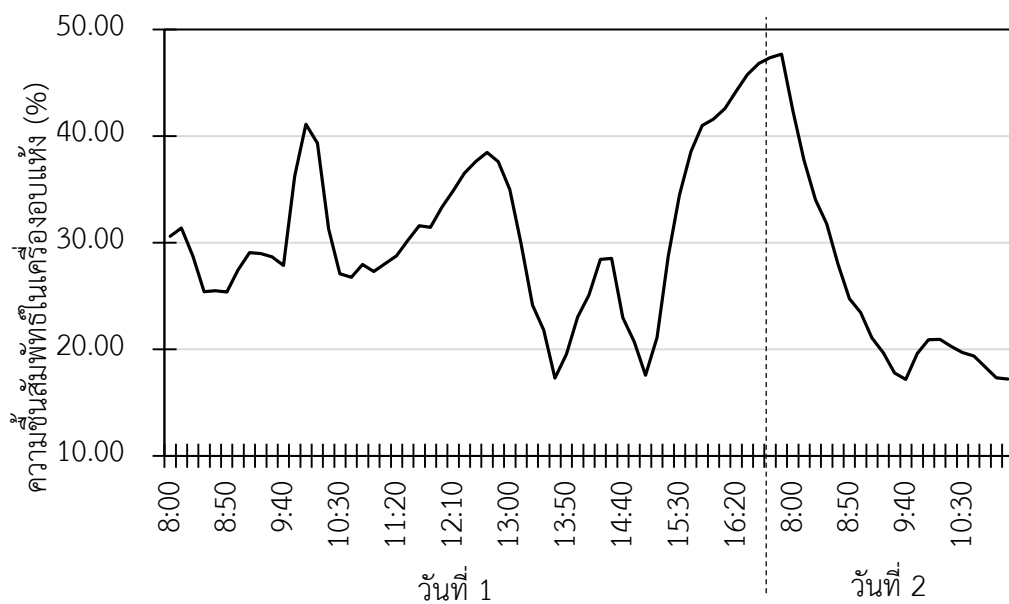
รูปที่ 36 การแปรค่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อมในช่วงการทดลอง



รูปที่ 37 การแปรค่าอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้ง ด้านหน้า ตรงกลาง และด้านหลัง ในช่วงการทดลอง



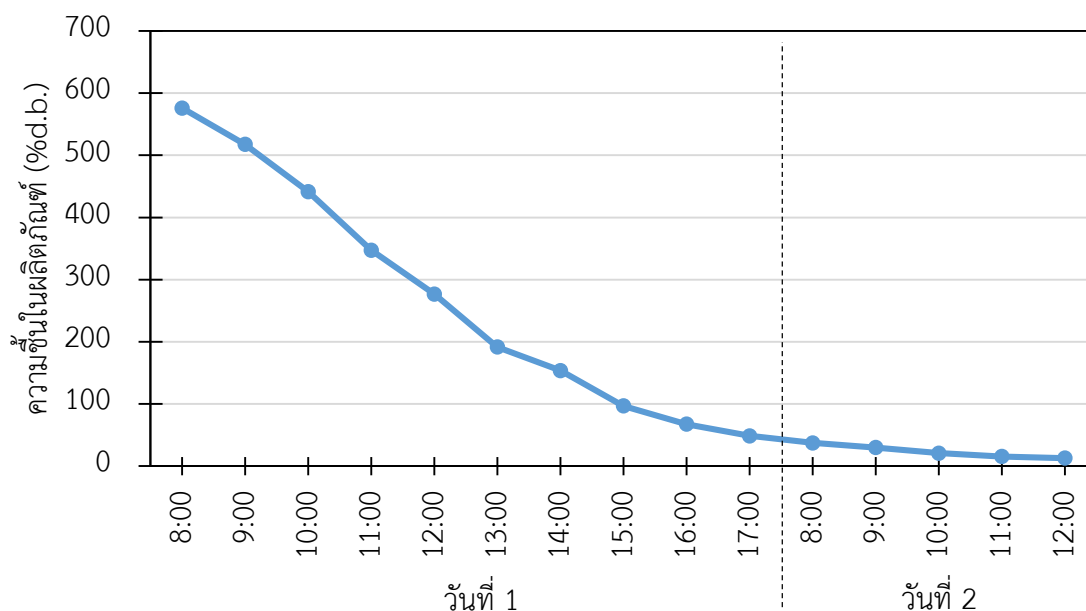
รูปที่ 38 การแปรค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมในช่วงการทดลอง



รูปที่ 39 การแปรค่าความชื้นสัมพัทธ์ในเครื่องอบแห้งในช่วงการทดลอง

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและความชื้นของหอยหลอด (รูปที่ 40) พบว่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ลดลงอย่างต่อเนื่องจาก 57.6 %d.b. เหลือประมาณ 7% d.b. โดยช่วงแรกของการอบแห้งมีอัตราการลดความชื้นสูงเนื่องจากน้ำผิวระเหยออกได้ง่าย และอัตราการอบแห้งจะค่อยๆ

ลดลง เมื่อสิ้นสุดการอบแห้งค่าความชื้นภายในผลิตภัณฑ์เข้าสู่สภาวะสมดุลกับอากาศที่อบแห้ง ซึ่งรูปแบบกราฟที่ได้เป็นไปตามลักษณะของกระบวนการอบแห้งทั่วไปของผลิตภัณฑ์อาหารที่มีความชื้นเริ่มต้นสูง และสอดคล้องกับผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในหัวข้อ 4.2

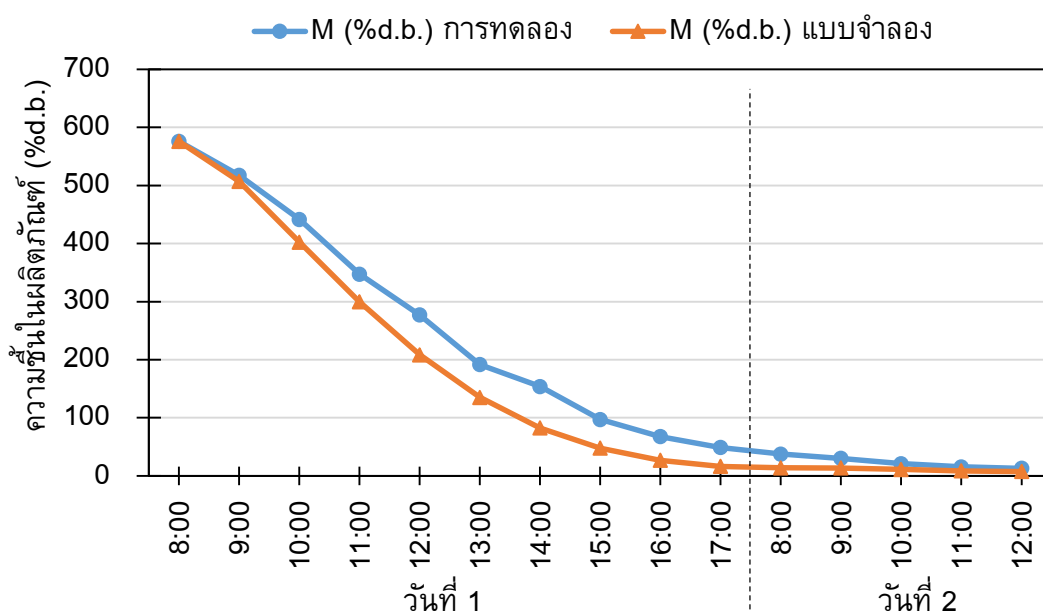


รูปที่ 40 กราฟการแห้งของหอยหลอดที่ได้จากการทดลอง

#### 4.4 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เพื่อประเมินความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาในหัวข้อ 4.2 ได้ทำการเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลองจริงของกระบวนการอบแห้งหอยหลอดในหัวข้อที่ 4.3 ในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้ค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ (%d.b.) เป็นตัวแปรหลักในการตรวจสอบความสอดคล้อง ผลการเปรียบเทียบแสดงในรูปที่ 41 ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณความชื้นของหอยหลอดจากการทดลองจริงและจากการคำนวณด้วยแบบจำลอง จากกราฟพบว่าแนวโน้มของค่าความชื้นที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการจำลองแบบมีลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยทั้งสองเส้นลดลงต่อเนื่องตามเวลา ซึ่งสะท้อนพฤติกรรมการระเหยของน้ำในกระบวนการอบแห้งได้อย่างถูกต้อง ช่วงแรกของการอบแห้งประมาณเวลา 8:00–11:00 น. ปริมาณความชื้นของหอยหลอดลดลงอย่างรวดเร็วจากประมาณ 600% d.b. เหลือราว 250% d.b. เนื่องจากในช่วงนี้มีการระเหยของน้ำที่อยู่บนผิวผลิตภัณฑ์เป็นหลัก ซึ่งเป็นช่วงที่อัตราการอบแห้งคงที่ แบบจำลองสามารถทำนายแนวโน้มการลดความชื้นได้ใกล้เคียงกับการทดลองจริง โดยมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยในบางจุดซึ่งอาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของรังสีอาทิตย์ในแต่ละช่วงเวลา

ในช่วงต่อมาประมาณเวลา 11:00–15:00 น. อัตราการอบแห้งเริ่มลดลงอย่างชัดเจน เนื่องจากความชื้นในเนื้อผลิตภัณฑ์ต้องแพร่จากภายในออกมาสู่ผิวก่อนระเหยออกไปสู่อากาศ ทำให้มีอัตราการอบแห้งที่ลดลง ผลการจำลองแบบให้แนวโน้มการลดลงของความชื้นใกล้เคียงกับค่าการทดลอง แต่ค่าจากการจำลองแบบมีแนวโน้มลดลงเร็วกว่าการทดลองเล็กน้อย ซึ่งอาจเนื่องมาจากสมมติฐานของแบบจำลองที่ไม่พิจารณาการหดตัวของเนื้อหอยและความต้านทานการแพร่ความชื้นที่เพิ่มขึ้นเมื่อเนื้อหอยหดแห้งลง เมื่อเข้าสู่ช่วงสุดท้ายของการอบแห้งประมาณเวลา 15:00–17:00 น. กราฟของทั้งสองแนวโน้มมีค่าความชื้นใกล้เคียงและเกือบคงที่ ซึ่งแสดงถึงสภาวะสมดุลความชื้นระหว่างหอยหดกับอากาศในการอบแห้ง โดยแบบจำลองสามารถทำนายจุดเข้าสู่สมดุลได้ตรงกับผลการทดลอง แสดงถึงความถูกต้องของแบบจำลองในช่วงท้ายของกระบวนการ การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทำโดยใช้ตัวชี้วัดทางสถิติ ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) และค่าความเอนเอียงเฉลี่ย (MBE) ผลการคำนวณพบว่าค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.98 แสดงถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นที่ดีระหว่างค่าการทดลองและค่าจากการจำลองแบบ ค่า RMSE เท่ากับ 20.76% บ่งชี้ว่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่รับได้ และค่า MBE เท่ากับ -16.89% ซึ่งหมายความว่าแบบจำลองมีแนวโน้มคาดว่าค่าต่ำกว่าการทดลองแต่อยู่ในเกณฑ์ที่รับได้ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นมีความถูกต้องและมีประสิทธิภาพในการทำนายพฤติกรรมการณ์การอบแห้งของหอยหลอดได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 41 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณความชื้นของหอยหลอดจากการทดลองจริงและแบบจำลอง

โดยสรุปแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ทำนายแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในตำแหน่งต่าง ๆ ของเครื่องอบได้อย่างใกล้เคียงกับผลการทดลองจริง แม้ว่าจะมีความแตกต่างของค่าอุณหภูมิเล็กน้อยในบางช่วงเวลา แต่รูปแบบการเปลี่ยนแปลงโดยรวมมีความสอดคล้องกัน ซึ่งยืนยันได้ว่าแบบจำลองนี้สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนและมวลภายในเครื่องอบแห้ง รวมถึงการประเมินประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งภายใต้สภาวะการทำงานที่แตกต่างกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

การศึกษาค้นคว้ามีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการคายความชื้นของหอยหลอด (*Solen regularis*) และเพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา โดยใช้ทั้งการทดลองจริงและการจำลองเชิงตัวเลขเพื่ออธิบายพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนและมวลในระหว่างกระบวนการอบแห้ง ผลการศึกษาพบว่า ลักษณะของเส้นโค้งซอร์พชันไอโซเทอร์มของหอยหลอดเป็นแบบ J-shape ซึ่งเป็นลักษณะทั่วไปของผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนประกอบของโปรตีนสูง การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่าแบบจำลอง Guggenheim–Anderson–de Boer (GAB model) ให้ผลสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการทดลองมากที่สุด โดยมีค่า RMSE อยู่ระหว่าง 0.7–4% และค่า  $R^2$  อยู่ระหว่าง 0.95–0.98 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ แสดงให้เห็นว่า GAB model เหมาะสมในการทำนายค่าความชื้นของหอยหลอดได้เป็นอย่างดี

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ในงานนี้อาศัยหลักการอนุรักษ์พลังงานและอนุรักษ์มวลขององค์ประกอบภายในระบบ ได้แก่ แผ่นโพลีคาร์บอเนต อากาศภายใน ผลิตภัณฑ์ และพื้นเครื่องอบแห้ง โดยแต่ละองค์ประกอบมีสมการสมดุลพลังงานเฉพาะและเชื่อมโยงกันผ่านสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน แบบจำลองเชิงตัวเลขได้รับการพัฒนาโดยใช้วิธีผลต่างจำกัด และนำไปเขียนโปรแกรมด้วยภาษา Fortran เพื่อจำลองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นภายในเครื่องอบแห้งในแต่ละช่วงเวลา การจำลองผลการอบแห้งพบว่าเครื่องอบแห้งสามารถเพิ่มอุณหภูมิภายในได้สูงกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเฉลี่ย 10–15°C โดยอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 60–65°C ในขณะที่อุณหภูมิพื้นเครื่องอบแห้งสูงกว่าอากาศภายในประมาณ 5°C ผลจากการจำลองยังแสดงให้เห็นว่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่เหมาะสมในการอบแห้งอยู่ที่ 500 W/m<sup>2</sup> และอัตราเร็วอากาศที่เหมาะสมในการอบแห้งอยู่ที่ 0.3 m/s เนื่องจากมีอุณหภูมิอากาศที่เหมาะสมในการอบแห้งและสามารถให้ประสิทธิภาพการอบใกล้เคียงกับที่อัตราเร็วอากาศสูงกว่า 0.3 m/s

จากการทดลองอบแห้งจริงพบว่า มวลของหอยหลอดลดลงอย่างต่อเนื่องจากประมาณ 37.52 g เหลือเฉลี่ย 6 g โดยความชื้นลดลงจาก 576 %d.b. เหลือ 7 %d.b. ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานสำหรับการเก็บรักษาได้ในระยะยาว อุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งมีค่ามากกว่าอุณหภูมิภายนอกตลอดระยะเวลาการอบ โดยบริเวณกึ่งกลางของเครื่องอบแห้งมีอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ย 60–65°C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการอบแห้งผลิตภัณฑ์ประเภทอาหารทะเล ทั้งนี้ การกระจายของอุณหภูมิในเครื่องอบแห้งค่อนข้างสม่ำเสมอและสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงความชื้นของผลิตภัณฑ์ในแต่ละตำแหน่ง

เมื่อเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลองจริง พบว่าแบบจำลองสามารถทำนายแนวโน้มของอุณหภูมิและความชื้นได้ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้ โดยมีค่า  $R^2 = 0.98$ ,  $RMSE = 20.76\%$  และ  $MBE = -16.89\%$  ซึ่งอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ แสดงว่าแบบจำลองมีความถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือในการใช้จำลองการอบแห้งของผลิตภัณฑ์จริง อย่างไรก็ตาม พบว่าแบบจำลองมีแนวโน้มทำนายค่าความชื้นต่ำกว่าค่าจริงเล็กน้อย ซึ่งอาจเนื่องมาจากสมมติฐานที่ไม่ได้คำนึงถึงการหดตัวของผลิตภัณฑ์หรือความต้านทานการแพร่ของไอน้ำภายในเนื้อหอยหลอด

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานนี้สามารถอธิบายพฤติกรรมของกระบวนการอบแห้งหอยหลอดได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถทำนายแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นได้ใกล้เคียงกับการทดลอง อีกทั้งสามารถนำไปใช้วิเคราะห์และออกแบบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดอื่นได้อย่างเหมาะสม แบบจำลอง GAB ที่ใช้ในการทำนายสมบัติสมดุลความชื้นของผลิตภัณฑ์ให้ผลแม่นยำและสอดคล้องกับแนวโน้มของผลิตภัณฑ์ประเภทอาหารทะเลที่มีโครงสร้างโปรตีนสูง ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์

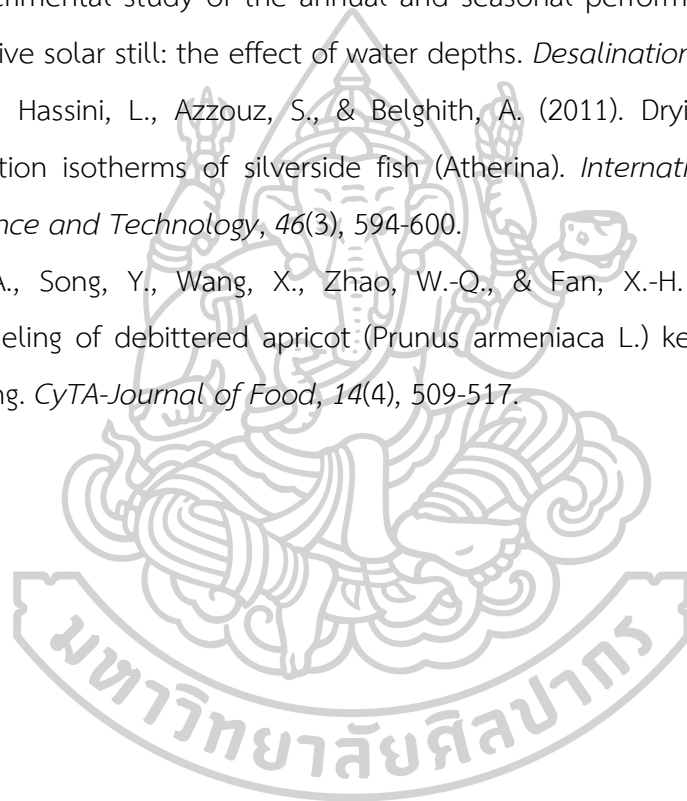


## รายการอ้างอิง

- Afzal, A., Iqbal, T., Ikram, K., Anjum, M. N., Umair, M., Azam, M., Akram, S., Hussain, F., ul Zaman, M. A., & Ali, A. (2023). Development of a hybrid mixed-mode solar dryer for product drying. *Heliyon*, 9(3).
- ANDRADE P, R. D., LEMUS M, R., & PÉREZ C, C. E. (2011). Models of sorption isotherms for food: uses and limitations. *Vitae*, 18(3), 325-334.
- Angula, J. P., Inambao, F., & Africa, S. (2019). Computational fluid dynamics in solar drying. *Int J Mech Eng Technol*, 10, 259-274.
- Aumporn, O. (2017). *Contribution à l'étude des performances d'un séchoir serre avec stockage de chaleur dans des matériaux à changement de phase* Université de Perpignan].
- Aviara, N. A. (2020). Moisture sorption isotherms and isotherm model performance evaluation for food and agricultural products. *Sorption in 2020s*, 143.
- Bekkioui, N., Rachadi, A., & Ez-Zahraouy, H. (2020). One-year simulation of a solar wood dryer with glazed walls in a Moroccan climate. *Renewable Energy*, 155, 770-782.
- Castro, A. M., Mayorga, E. Y., & Moreno, F. (2018). Mathematical modelling of convective drying of fruits: A review. *Journal of Food Engineering*, 223, 152-167.
- Chasiotis, V., Tzempelikos, D., Mitrakos, D., & Filios, A. (2021). Numerical and experimental analysis of heat and moisture transfer of *Lavandula x allardii* leaves during non-isothermal convective drying. *Journal of Food Engineering*, 311, 110708.
- Duffie, J. A., Beckman, W. A., & Blair, N. (2020). *Solar engineering of thermal processes, photovoltaics and wind*. John Wiley & Sons.
- Echavarria, J. A. C., Torres, A. M. R., & Montoya, J. E. Z. (2021). Sorption isotherms and thermodynamic properties of the dry silage of red tilapia viscera (*Oreochromis* spp.) obtained in a direct solar dryer. *Heliyon*, 7(4).
- Ertekin, C., & Yaldiz, O. (2004). Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of Food Engineering*, 63(3), 349-359.
- Etim, P. J., Eke, A. B., & Simonyan, K. J. (2020). Design and development of an active

- indirect solar dryer for cooking banana. *Scientific African*, 8, e00463.
- Jahromi, M. S. B., Kalantar, V., Akhijahani, H. S., & Kargarsharifabad, H. (2022). Recent progress on solar cabinet dryers for agricultural products equipped with energy storage using phase change materials. *Journal of Energy Storage*, 51, 104434.
- Janjai, S. (2017). *Solar Drying Tecnology*. Department of physics, Faculty of Science, Silpakorn University.
- Janjai, S., Lamlert, N., Mahayothee, B., Sruamsiri, P., Precoppe, M., Bala, B., & Muller, J. (2011). Experimental and simulated performances of a batch-type longan dryer with air flow reversal using biomass burner as a heat source. *Drying technology*, 29(12), 1439-1451.
- Kingsly, A., & Singh, D. (2007). Drying kinetics of pomegranate arils. *Journal of Food Engineering*, 79(2), 741-744.
- Patil, R. C., & Gawande, R. R. (2017). Mathematical modeling of solar drying systems. In *Solar Drying Technology: Concept, Design, Testing, Modeling, Economics, and Environment* (pp. 265-316). Springer.
- Sadodin, S., & Kashani, T. (2011). Numerical investigation of a solar greenhouse tunnel drier for drying of copra. *arXiv preprint arXiv:1102.4522*.
- SAHU, T., GUPTA, D., & SINGH, A. *A Review on Solar Drying Techniques and Solar Greenhouse Dryer*, 3, 13: 31-37,2016.
- Samapundo, S., Devlieghere, F., De Meulenaer, B., Atukwase, A., Lamboni, Y., & Debevere, J. M. (2007). Sorption isotherms and isosteric heats of sorption of whole yellow dent corn. *Journal of Food Engineering*, 79(1), 168-175.
- Sarsavadia, P. (2007). Development of a solar-assisted dryer and evaluation of energy requirement for the drying of onion. *Renewable Energy*, 32(15), 2529-2547.
- Sekyere, C., Adams, F., Davis, F., & Forson, F. (2020). Mathematical modelling and validation of the thermal buoyancy characteristics of a mixed mode natural convection solar crop dryer with back up heater. *Scientific African*, 8, e00441.
- Simo-Tagne, M., Zoulalian, A., Remond, R., Rogaume, Y., & Bonoma, B. (2017). Modeling and simulation of an industrial indirect solar dryer for Iroko wood (*Chlorophora excelsa*) in a tropical environment. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 19(1), 95-112.
- Tarigan, E. (2018). Mathematical modeling and simulation of a solar agricultural dryer

- with back-up biomass burner and thermal storage. *Case studies in thermal engineering*, 12, 149-165.
- Tatar, F., Cengiz, A., & Kahyaoglu, T. (2014). Effect of hemicellulose as a coating material on water sorption thermodynamics of the microencapsulated fish oil and artificial neural network (ANN) modeling of isotherms. *Food and Bioprocess Technology*, 7(10), 2793-2802.
- Tiwari, A. K., & Tiwari, G. (2007). Thermal modeling based on solar fraction and experimental study of the annual and seasonal performance of a single slope passive solar still: the effect of water depths. *Desalination*, 207(1-3), 184-204.
- Toujani, M., Hassini, L., Azzouz, S., & Belghith, A. (2011). Drying characteristics and sorption isotherms of silverside fish (*Atherina*). *International Journal of Food Science and Technology*, 46(3), 594-600.
- Zhang, Q.-A., Song, Y., Wang, X., Zhao, W.-Q., & Fan, X.-H. (2016). Mathematical modeling of debittered apricot (*Prunus armeniaca* L.) kernels during thin-layer drying. *CyTA-Journal of Food*, 14(4), 509-517.





## ประวัติผู้เขียน

|                 |   |
|-----------------|---|
| ชื่อ-สกุล       | พงศ์วิชัย ประภาโส   |
| วุฒิการศึกษา    | พ.ศ. 2565 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม<br>พ.ศ. 2566 ศึกษาต่อระดับปริญญาตรี สาขาวิชาฟิสิกส์บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม  |
| ผลงานตีพิมพ์    | อรรรรณ อัมพร, สมเจตน์ ภัทรพานิชชัย, พงศ์วิชัย ประภาโส, ธนิก สุขสำราญ, ภูธเนศ แสงจรรยา และ กนก หวลกำเนิด. การจำลองและออกแบบตัวแปรที่เหมาะสมของห้องเย็นพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีระบบเก็บสะสมความเย็น. การประชุมวิชาการระดับชาติ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและนวัตกรรม (มหาวิทยาลัยแม่โจ้) ครั้งที่ 4, 503-512, 2023.<br>พงศ์วิชัย ประภาโส, อรรรรณ อัมพร, เสริม จันทร์ฉาย (2568). การศึกษาไอโซเทอร์มการคายความชื้นของหอยหลอด. Proceedings ในการประชุมวิชาการระดับชาติ วิทยาศาสตร์วิจัย ครั้งที่ 16 วันที่ 27-28 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2568 มหาวิทยาลัยสารคาม จังหวัดมหาสารคาม. หน้า 710-718. |
| รางวัลที่ได้รับ | ได้รับรางวัลระดับดีมากการนำเสนอผลงานวิจัย ประเภทการนำเสนอแบบบรรยาย (Oral Presentation) กลุ่มวัสดุศาสตร์และฟิสิกส์ประยุกต์ ในงานประชุมวิชาการระดับชาติ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและนวัตกรรมครั้งที่ 4 ประจำปี 2566   |