

ระบบควบคุมขีดจำกัดอุณหภูมิผิวและปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์สำหรับ
กระบวนการทำแห้งอาหาร

CONTROL SYSTEM OF PRODUCT SURFACE TEMPRATURE LIMIT AND MOISTURE
CONTENTS FOR FOOD IN DRYING PROCESS

ธัชพงษ์ พงศ์สุทธิยากร
THADCHAPONG PONGSUTTIYAKORN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2565

KMITL-2022-EN-D-118-081

CONTROL SYSTEM OF PRODUCT SURFACE TEMPERATURE LIMIT AND MOISTURE
CONTENTS FOR FOOD IN DRYING PROCESS

THADCHAPONG PONGSUTTIYAKORN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN FOOD ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2022
KMITL-2002-EN-D-118-081

COPYRIGHT 2022

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

| | |
|-----------------------------|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | ระบบควบคุมชนิดจำกัดอุณหภูมิผิวและปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์สำหรับกระบวนการทำแห้งอาหาร |
| นักศึกษา | นายรัชพงษ์ พงศ์สุทธิยากร |
| รหัสประจำตัว | 58601320 |
| ปริญญา | วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมอาหาร |
| พ.ศ. | 2565 |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ | ผศ. ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ |

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ นำเสนอวิธีการควบคุมความชื้นและขีดจำกัดอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์แบบอัตโนมัติในกระบวนการทำแห้งแบบลมร้อน

การออกแบบพร้อมสร้างแนวทางการสอบเทียบและชดเชยผลของอุณหภูมิต่อตัวรับรู้น้ำหนักโดยใช้สมการถดถอยและเปรียบเทียบตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำและตัวกรองกาลมานเพื่อเพิ่มความแม่นยำ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการประยุกต์ใช้วิธีการชดเชยผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิด้วยสมการถดถอยลำดับที่สามและตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำ นั้นเพียงพอต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตั้งแต่ 25 ถึง 70 องศาเซลเซียสมีความคลาดเคลื่อน 0.1 กรัม

การติดตามและควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์ไม่ให้สูงเกินขีดอุณหภูมิที่กำหนดเพื่อรักษาและป้องกันการสูญเสียคุณภาพอาหาร ด้วยการปรับค่าอุณหภูมิอากาศตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิผิวผลิตภัณฑ์ โดยใช้ค่าเวลาคงที่ร่วมกับอัลกอริทึมแบบเรียกซ้ำน้อยที่สุด พบว่าการควบคุมอุณหภูมิจึงมีความคลาดเคลื่อน ± 0.5 องศาเซลเซียส

ผลการทดสอบการทำแห้งเปลือกมังคุดบด เกลี่ยให้มีความหนาเฉลี่ย 5 มิลลิเมตร ความชื้นเริ่มต้น 63 เปอร์เซ็นต์ ทำแห้งจนกระทั่งความชื้นสุดท้ายเหลือ 5 เปอร์เซ็นต์ พบว่าการทำแห้งที่ควบคุมอุณหภูมิผิวที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส สามารถลดระยะเวลาได้ 22 และ 19 เปอร์เซ็นต์ และใช้พลังงานน้อยลง 40 และ 37 เปอร์เซ็นต์เมื่อเปรียบเทียบกับการควบคุมอุณหภูมิอากาศคงที่ พร้อมสร้างกราฟระหว่างปริมาณความชื้นและอัตราการทำแห้งได้อัตโนมัติ สำหรับผลของคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังทำแห้ง ปริมาณความชื้นมีค่าในช่วง 5.27 ถึง 5.41 เปอร์เซ็นต์ วอเตอร์แอกทิวิตีมีค่าในช่วง 0.2010 ถึง 0.2818 และค่ากรดสีอยู่ในช่วง 1.65 ถึง 1.78 ซึ่งเปลือกมังคุดหลังทำแห้งมีกรดสีอยู่ในช่วงของสีม่วงแดงถึงสีส้มแดง แสดงให้เห็นว่าการควบคุมความชื้นและขีดจำกัดอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์แบบอัตโนมัติสามารถนำมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสำหรับกระบวนการทำแห้งอาหารได้

| | |
|-----------------------|--|
| Thesis | Control System of Product Surface Temperature Limit and Moisture Contents for Food in Drying Process |
| Student | Mr.Thadchapong Pongsuttiyakorn |
| Student ID. | 58601320 |
| Degree | Doctor of Engineering |
| Program | Food Engineering |
| Year | 2022 |
| Thesis Advisor | Asst.Prof.Dr.Pimpen Pornchaloempong |

ABSTRACT

This thesis it presents an automatically control moisture and product surface temperature limits in hot air drying processes.

The design is ready to calibrate and compensate for the effect of temperature on the weight sensor by using regression equations and comparing the low-pass filter and the Kalman filter to increase accuracy. The results show that the application of the third-order regression equation and the low-pass filter is sufficient for temperature changes from 25 to 70 °C. error of 0.1 g

Monitoring and control of product surface temperature limit to maintain and prevent food quality. By adjusting the air temperature according to the increase in product surface temperature using time constants in conjunction with a recursive least squares algorithm It was found that the temperature control had an error of ± 0.5 °C.

The results of the mangosteen peel drying test were spread to an average thickness of 5 mm. The initial moisture content was 63 percent and dried until the final moisture content was 5 percent. It was found that surface temperature control at 50 and 60 °C reduced the duration by 22 and 19 percent and less energy by 40 and 37 percent compared to constant air temperature control. Ready to create graphs between moisture content and drying rate automatically. As for the effect of product quality after drying, moisture content ranged from 5.27 to 5.41 percent, water activity ranged from 0.2010 to 0.2818, and Hue angle ranged from 1.65 to 1.78 shades range from magenta to orange-red. It has been demonstrated that automatic control of product humidity and temperature limits can be used to increase the efficiency of the food drying process.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ ผศ. ดร.มาฤดี ผ่องพิพัฒน์พงศ์ รศ. ดร.นวกัทธา หนูนา และ ผศ. ดร.เอกสิทธิ์ ศรีธรรม กรรมการสอบหัวข้อและโครงร่างวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบพระคุณ รศ. ดร.ปิติเขต สุรักษา ที่คอยให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางการออกแบบ และสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์และระบบควบคุมซิดจังก์ชันอนุกรมวิธานและปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์

ขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย: สกว.) (The Thailand Research Fund: TRF) ที่ให้การสนับสนุนการวิจัยนี้

ขอขอบคุณพี่ ๆ น้อง ๆ ในโรงงานต้นแบบแห่งการเรียนรู้ (FACTory Classroom) ทุกคนที่ให้การช่วยเหลือในการทดลองและเป็นกำลังใจที่ดี

สุดท้ายต้องขอขอบคุณ บิดา มารดา พี่ น้อง ที่เป็นกำลังใจและแรงผลักดันที่ดีตลอดมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ธัชพงษ์ พงศ์สุทธิยากร

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย | I |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | II |
| กิตติกรรมประกาศ..... | III |
| สารบัญ..... | IV |
| สารบัญตาราง..... | VII |
| สารบัญภาพ..... | VIII |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... | 1 |
| 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา..... | 2 |
| 1.3 สมมติฐานของการศึกษา..... | 3 |
| 1.4 ขอบเขตของการวิจัย..... | 3 |
| 1.5 ขั้นตอนของการวิจัย..... | 3 |
| บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 4 |
| 2.1 การหาปริมาณความชื้นของอาหารแบบภายในห้องทำแห้ง..... | 4 |
| 2.1.1 ตัวรับรู้น้ำหนัก..... | 4 |
| 2.1.2 ชดเชยผลของอุณหภูมิต่อตัวรับรู้น้ำหนักให้มีความแม่นยำ..... | 6 |
| 2.1.3 ตัวกรองสัญญาณ (filter)..... | 7 |
| 2.2 การปรับอุณหภูมิอากาศเพื่อควบคุมขีดจำกัดอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์แบบ อัตโนมัติ..... | 13 |
| 2.2.1 ตัวรับรู้อุณหภูมิแบบไม่สัมผัส..... | 13 |
| 2.2.2 การปรับค่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์..... | 16 |
| 2.3 กระบวนการทำแห้ง (drying)..... | 24 |
| 2.3.1 กระบวนการทำแห้งแบบลมร้อน (Hot air drying)..... | 24 |
| 2.3.2 การทดสอบการทำแห้งเปลือกมังคุด..... | 30 |
| 2.3.3 ปริมาณการใช้พลังงานสำหรับกระบวนการทำแห้ง..... | 31 |
| บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย..... | 33 |
| 3.1 การสอบเทียบตัวรับรู้น้ำหนักสำหรับการวัดน้ำหนักและชดเชยผลของอุณหภูมิใน ห้องทำแห้ง..... | 33 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| 3.1.1 ตัวรับรู้น้ำหนัก..... | 33 |
| 3.1.2 บอร์ด Arduino..... | 34 |
| 3.1.3 การสอบเทียบตัวรับรู้น้ำหนักสำหรับการวัดน้ำหนักและชดเชยผลของ อุณหภูมิ..... | 34 |
| 3.2 การศึกษาแบบจำลองของการปรับอุณหภูมิอากาศเพื่อควบคุมขีดจำกัดอุณหภูมิ ผิวของผลิตภัณฑ์แบบอัตโนมัติในกระบวนการทำแห้งแบบลมร้อน..... | 37 |
| 3.2.1 ตัวรับรู้อุณหภูมิผิว..... | 37 |
| 3.2.2 ซอฟต์แวร์ Labview | 37 |
| 3.2.3 แบบจำลองของการปรับอุณหภูมิอากาศเพื่อเพิ่มอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์ แบบอัตโนมัติ..... | 38 |
| 3.2.4 การทดสอบระบบควบคุมอุณหภูมิอากาศในสถานะไม่มีวัสดุ..... | 42 |
| 3.3 วิธีการทดสอบระบบการควบคุมกระบวนการทำแห้งด้วยการทำแห้งเปลือกมังคุด. | 43 |
| 3.3.1 การประมาณปริมาณความชื้น..... | 43 |
| 3.3.2 อัตราการทำแห้ง..... | 44 |
| 3.3.3 การทดสอบการทำแห้ง..... | 44 |
| 3.3.4 การวิเคราะห์การใช้พลังงาน..... | 48 |
| 3.3.5 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม..... | 48 |
| 3.3.6 การวิเคราะห์ทางสถิติ..... | 50 |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล..... | 51 |
| 4.1 ผลการสอบเทียบตัวรับรู้น้ำหนักสำหรับการวัดน้ำหนักและชดเชยผลของอุณหภูมิ ในห้องทำแห้ง..... | 51 |
| 4.1.1 ผลการสอบเทียบตัวรับรู้น้ำหนักสำหรับการวัดปริมาณความชื้นภายในห้อง ทำแห้ง..... | 51 |
| 4.1.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพสำหรับตัวกรองต่อตัวรับรู้น้ำหนัก..... | 53 |
| 4.2 ผลการศึกษาแบบจำลองของการปรับอุณหภูมิอากาศเพื่อควบคุมขีดจำกัด อุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์แบบอัตโนมัติในกระบวนการทำแห้งแบบลมร้อน..... | 54 |
| 4.3 ผลการทดสอบระบบการควบคุมกระบวนการทำแห้งด้วยการทำแห้งเปลือกมังคุด | 59 |
| 4.3.1 พฤติกรรมการทำแห้งของการทำแห้งเปลือกมังคุด..... | 61 |
| 4.3.2 ผลของการทำแห้งที่มีต่อคุณภาพทางกายภาพของเปลือกมังคุด..... | 63 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 4.3.3 ผลการวิเคราะห์การใช้พลังงาน..... | 65 |
| 4.3.4 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม..... | 66 |
| บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ..... | 68 |
| 5.1 สรุปผลการศึกษา..... | 68 |
| 5.1.1 การสอบเทียบตัวรับรู้น้ำหนักสำหรับการวัดน้ำหนักและชดเชยผลของ อุณหภูมิในห้องทำแห้ง..... | 68 |
| 5.1.2 การศึกษาแบบจำลองของการปรับอุณหภูมิอากาศเพื่อควบคุมขีดจำกัด อุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์แบบอัตโนมัติในกระบวนการทำแห้งแบบลมร้อน | 68 |
| 5.1.3 การทดสอบระบบการควบคุมกระบวนการทำแห้งด้วยการทำแห้งเปลือก มังคุด..... | 69 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ..... | 69 |
| 5.2.1 การสอบเทียบตัวรับรู้น้ำหนักสำหรับการวัดน้ำหนักและชดเชยผลของ อุณหภูมิในห้องทำแห้ง..... | 69 |
| 5.2.2 การศึกษาแบบจำลองของการปรับอุณหภูมิอากาศเพื่อควบคุมขีดจำกัด อุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์แบบอัตโนมัติในกระบวนการทำแห้งแบบลมร้อน | 69 |
| 5.2.3 การใช้งานระบบควบคุมและข้อควรระวัง..... | 70 |
| เอกสารอ้างอิง..... | 72 |
| ภาคผนวก..... | 84 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|----------|------|
| 3.1 | 42 |
| 3.2 | 45 |
| 4.1 | 52 |
| 4.2 | 57 |
| 4.3 | 64 |
| 4.4 | 65 |
| 4.5 | 66 |
| 4.6 | 66 |
| 5.1 | 70 |

สารบัญภาพ

| ภาพที่ | หน้า |
|--------|------|
| 2.1 | 5 |
| 2.2 | 5 |
| 2.3 | 6 |
| 2.4 | 8 |
| 2.5 | 8 |
| 2.6 | 15 |
| 2.7 | 15 |
| 2.8 | 16 |
| 2.9 | 19 |
| 2.10 | 26 |
| 2.11 | 27 |
| 3.1 | 33 |
| 3.2 | 34 |
| 3.3 | 37 |
| 3.4 | 39 |
| 3.5 | 40 |
| 3.6 | 41 |
| 3.7 | 45 |
| 3.8 | 46 |
| 3.9 | 46 |
| 4.1 | 51 |
| 4.2 | 52 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.3 ความทนทานและมีประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีการในการเพิ่มความแม่นยำในการวัดที่ ผิดพลาด 0.1 กรัม (a) การเปรียบเทียบการกรองสัญญาณโดยใช้ข้อมูลดิบของตัวกรอง ความถี่ต่ำและตัวกรองคาลเมน (b) การเปรียบเทียบสัญญาณที่ได้จากการวัดค่าน้ำหนัก ด้วยตุ้มน้ำหนักมาตรฐานต่าง ๆ ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน..... | 53 |
| 4.4 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องทำแห้ง (สภาวะไม่มีวัสดุ) ที่ควบคุมอุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส..... | 55 |
| 4.5 ไฮโครเมตริกซาร์ทของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงภายในห้องทำ แห้ง (สภาวะไม่มีวัสดุ) ในแต่ละช่วง..... | 57 |
| 4.6 ไฮโครเมตริกซาร์ทของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงภายในห้องทำ แห้ง (สภาวะไม่มีวัสดุ)..... | 58 |
| 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศ (Ta) อุณหภูมิผิวผลิตภัณฑ์ (Ts) และความชื้น ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH) กับเวลาที่ใช้ในการทำแห้งแบบลมร้อน (a) การควบคุมแบบ CAT และควบคุมแบบ PSTL ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส (b) การควบคุมแบบ CAT และควบคุมแบบ PSTL ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส..... | 60 |
| 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและเวลาที่ใช้ในการทำแห้งของการทำแห้ง เปลือกมังคุดด้วยการควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์และการควบคุมอุณหภูมิอากาศคงที่ ที่ 50 และ 60 องศาเซลเซียส..... | 62 |
| 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการทำแห้งและปริมาณความชื้นของการทำแห้งเปลือก มังคุดด้วยการควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์และการควบคุมอุณหภูมิอากาศคงที่ที่ 50 และ 60 องศาเซลเซียส..... | 63 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กระบวนการทำแห้งเป็นการแปรรูปอาหาร ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อลดความชื้น ให้ต่ำกว่าระดับที่เชื้อจุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ลดปฏิกิริยาทางเคมีและชีวเคมีของอาหาร โดยจะช่วยให้อาหาร มีอายุการเก็บรักษานานขึ้น โดยทั่วไปจะมากกว่า 1 ปี นอกจากนั้นยังทำให้มีน้ำหนักเบา สะดวกต่อการขนส่ง วิธีการทำแห้งอาหาร ขึ้นอยู่กับตัวกลางความร้อน รูปแบบการถ่ายเทความร้อน และความดันบรรยากาศ ซึ่งกระบวนการทำแห้งแบบลมร้อน (hot air drying) เป็นวิธีการทำแห้งที่ใช้ อากาศร้อนเป็นตัวกลาง ถ่ายเทมวลจากอาหารด้วยการพาความร้อน ภายใต้ความดันบรรยากาศ

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อคุณภาพอาหาร และประสิทธิภาพ ที่ได้จากกระบวนการทำแห้งแบบลมร้อน ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และการไหลเวียนของอากาศให้เหมาะสมกับอาหารแต่ละชนิด ซึ่งปัจจัยที่สำคัญที่สุดจากที่กล่าวมานั้นคือ อุณหภูมิในกระบวนการทำแห้งเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารแห้ง เนื่องจากกระบวนการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำนั้นสามารถรักษาคุณภาพทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ได้ดีกว่ากระบวนการทำแห้งที่อุณหภูมิสูง ไม่ว่าจะเป็น สี กลิ่น รสชาติ หรือสารสำคัญ [1-3] แต่กระบวนการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำใช้เวลาในกระบวนการทำแห้งนาน จึงมีงานวิจัยที่พัฒนากระบวนการทำแห้งแบบลมร้อนด้วยปั๊มความร้อนเพื่อแก้ปัญหาข้างต้น [2, 4-5]

นอกจากปัจจัยของสภาวะในกระบวนการทำแห้งแล้วยังมีปัจจัยของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการทำแห้ง หนึ่งในนั้นคือ อุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์ ที่เป็นปัจจัยสำคัญในการบ่งบอกถึง ประสิทธิภาพในกระบวนการทำแห้งอันนำไปสู่ผลิตภัณฑ์อาหารแห้งคุณภาพสูง ดังมีงานวิจัยที่สนใจ อุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการทำแห้ง [6]

ประสิทธิภาพของการทำแห้งสามารถประเมินจาก อัตราการทำแห้ง ที่บ่งบอกถึงความสามารถในการดึงความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์ระหว่างกระบวนการทำแห้ง โดยสามารถคำนวณได้จากน้ำหนักที่เปลี่ยนไปของผลิตภัณฑ์ในแต่ละช่วงเวลา ซึ่งการหาน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปมีความยุ่งยาก เนื่องจากปกติจะนำตัวอย่างออกมาจากเครื่องทำแห้งเป็นระยะทำให้กระบวนการทำแห้งมีความผิดพลาดเกิดขึ้นได้ และในระหว่างกระบวนการทำแห้งไม่สามารถคาดเดาปริมาณความชื้นได้ สามารถหาได้จากการวัดคุณภาพความชื้นสุดท้ายของกระบวนการทำแห้ง ทำให้ยากต่อการระบุระยะ ในกระบวนการทำแห้งให้ได้ความชื้นตามเป้าหมาย

อีกสิ่งหนึ่งในการบอกประสิทธิภาพของการทำแห้ง คือ ระยะและพลังงานในการทำแห้ง ซึ่งการใช้เวลาในการทำแห้งสั้นและการประหยัดพลังงานเป็นสภาวะการควบคุมกระบวนการทำแห้งนั้นเป็นทางเลือกที่จึงเป็น มีงานวิจัยที่ศึกษาการปรับอุณหภูมิอากาศเพื่อเพิ่มอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์แบบอัตโนมัติ ทำให้ลดระยะเวลากระบวนการทำแห้งและเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ [7] และการวัดค่าน้ำหนักในการคำนวณหาความชื้นจะใช้เซนเซอร์น้ำหนักแต่ยังพบปัญหาเรื่องของความแปรปรวนของค่าน้ำหนักที่ได้เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการทำแห้ง [8-10] และยังเป็นปัญหาสำหรับกระบวนการทำแห้งแบบหลายอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการ

สิ่งที่สะท้อนถึงประสิทธิภาพของกระบวนการควบคุมการทำแห้ง คือ คุณภาพของวัสดุหลังการทำแห้ง ซึ่งการออกแบบระบบควบคุมนั้นจำเป็นต้องมีการทดสอบเพื่อให้แน่ใจว่ามีประสิทธิภาพและสามารถใช้งานได้จริง โดยวัสดุที่เลือกใช้ในการทดสอบที่เหมาะสมนี้คือ เปลือกมังคุดบดแช่แข็ง เนื่องจากเป็นวัสดุที่เหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูปที่สามารถสร้างมูลค่าเพิ่มได้ โดยนำมาบดเพื่อใช้ในการระเหยน้ำที่สม่ำเสมอและเก็บรักษาด้วยวิธีการแช่แข็งเพื่อควบคุมวัสดุเริ่มต้นให้เหมือนกัน เมื่อนำมาละลายก่อนการทำแห้งแล้วไม่มีการสูญเสีย น้ำ และเปลือกมังคุดยังสามารถตรวจสอบคุณภาพได้ทั้งในด้านกายภาพและเคมี

ดังนั้น วิทยานิพนธ์นี้จะนำไปสู่การหาคำตอบเพื่อการควบคุมกระบวนการทำแห้งในการควบคุมความชื้นและอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์แบบอัตโนมัติ โดยวิทยานิพนธ์นี้เน้นในการหาแบบจำลองคณิตศาสตร์และค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุด และทดลองทางภาคสนามใช้งานจริงกับผลิตภัณฑ์เชิงอุตสาหกรรมชุมชนที่คาดหวังว่า จะเป็นการสร้าง “เครื่องมือชนะ” ให้กับผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดย่อม (SME) เพื่อตอบโจทย์ประเทศไทย 4.0 อีกนัยหนึ่งเพื่อเป็นกรณีศึกษาโดยอาศัยหลักเชิงวิศวกรรมระบบควบคุมสำหรับใช้ในวิศวกรรมอาหาร

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาการสอบเทียบตัวรับรู้น้ำหนักสำหรับการวัดน้ำหนักและชดเชยผลของอุณหภูมิในห้องทำแห้ง
2. เพื่อศึกษาแบบจำลองของการปรับอุณหภูมิอากาศเพื่อควบคุมขีดจำกัดอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์แบบอัตโนมัติในกระบวนการทำแห้งแบบลมร้อน
3. เพื่อทดสอบระบบการควบคุมกระบวนการทำแห้งด้วยการทำแห้งเปลือกมังคุด

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ตั้งสมมติฐานไว้ว่าการควบคุมอุณหภูมิผิวและความชื้นของผลิตภัณฑ์แบบตามเวลาจริงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการทำแห้งในด้านระยะเวลาการทำแห้งและปริมาณการใช้พลังงานได้ เมื่อเปรียบเทียบกับการทำแห้งแบบควบคุมอุณหภูมิอากาศและเวลาในการทำแห้งเท่านั้น และสามารถนำไปใช้งานได้จริงด้วยการทดสอบการทำแห้งกับเปลือกมังคุด

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้จะนำไปสู่การหาคำตอบพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของระบบควบคุมกระบวนการทำแห้ง โดยศึกษาแบบจำลองของการปรับอุณหภูมิอากาศเพื่อเพิ่มอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์ร่วมกับวิธีการปรับพารามิเตอร์ในการประมาณค่าความชื้นแบบอัตโนมัติ และทดลองใช้งานจริงทางภาคสนามกับผลิตภัณฑ์เชิงอุตสาหกรรมชุมชนถึงผลกระทบของการเพิ่มอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์ร่วมกับการประมาณค่าความชื้นแบบอัตโนมัติในกระบวนการทำแห้งแบบลมร้อน

1.5 ขั้นตอนของการวิจัย

โดยในการศึกษาวิจัยได้เริ่มการวิจัยโดยแบ่งออกเป็นขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) ขั้นตอนการศึกษาทฤษฎีพื้นฐานและการใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์
 - ศึกษาทฤษฎีกระบวนการทำแห้ง
 - ศึกษากระบวนการทำแห้งแบบป้อนความร้อน
 - ศึกษาการวัดค่าน้ำหนักในกระบวนการทำแห้ง
 - ศึกษาการควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์
 - ศึกษาทฤษฎีตัวกรองสัญญาณ
- 2) ขั้นตอนการทดลอง
 - ออกแบบและสร้างระบบควบคุมการทำแห้ง
 - ทดสอบการทำแห้งด้วยผลิตภัณฑ์จริงเพื่อเก็บข้อมูล
 - วัดคุณภาพของผลิตภัณฑ์และเปรียบเทียบเชิงประสิทธิภาพ
 - ประเมินและวิเคราะห์ผลการทดลอง

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

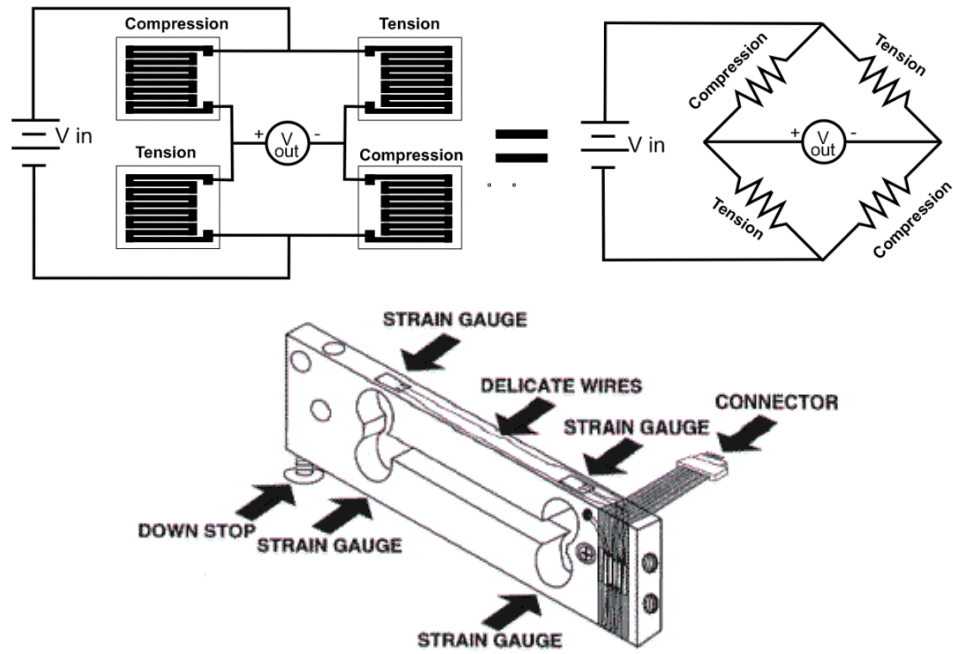
วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องให้สอดคล้องและสามารถออกแบบการวิจัยตามวัตถุประสงค์ในหัวข้อที่ 1.2 ได้ ซึ่งมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในหัวข้อที่ 2.1 - 2.3 โดยในหัวข้อย่อยที่ 2.1 เป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปริมาณความชื้นของอาหารแบบภายในห้องทำแห้ง ในหัวข้อย่อยที่ 2.2 เป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับอุณหภูมิอากาศเพื่อควบคุมชนิดจำกดอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์แบบอัตโนมัติ และในหัวข้อสุดท้ายหัวข้อย่อยที่ 2.3 เป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทำแห้ง

2.1 การหาปริมาณความชื้นของอาหารแบบภายในห้องทำแห้ง

ปริมาณความชื้นเป็นสิ่งสำคัญในผลิตภัณฑ์อาหารแห้งโดยส่งผลต่อคุณภาพและการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ ซึ่งการหาปริมาณความชื้นนั้นสามารถหาได้จากน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่เปลี่ยนไปในกระบวนการทำแห้ง ซึ่งการหาน้ำหนักของผลิตภัณฑ์สามารถใช้ตัวรับรู้น้ำหนัก (Load cell sensor) ในการประมาณค่า ซึ่งตัวรับรู้น้ำหนักนั้นมีหลายแบบทั้งวัสดุที่ใช้และปริมาณน้ำหนักที่รับได้ แต่ที่สำคัญที่สุดคือ อุณหภูมิในการวัดควรคงที่ซึ่งมีผลมากต่อความแม่นยำ และในงานวิจัยนี้จะมีการปรับค่าอุณหภูมิในกระบวนการทำแห้งที่ไม่คงที่ ดังนั้นการศึกษาเกี่ยวกับตัวรับรู้น้ำหนักและการชดเชยอุณหภูมิจึงมีดังนี้

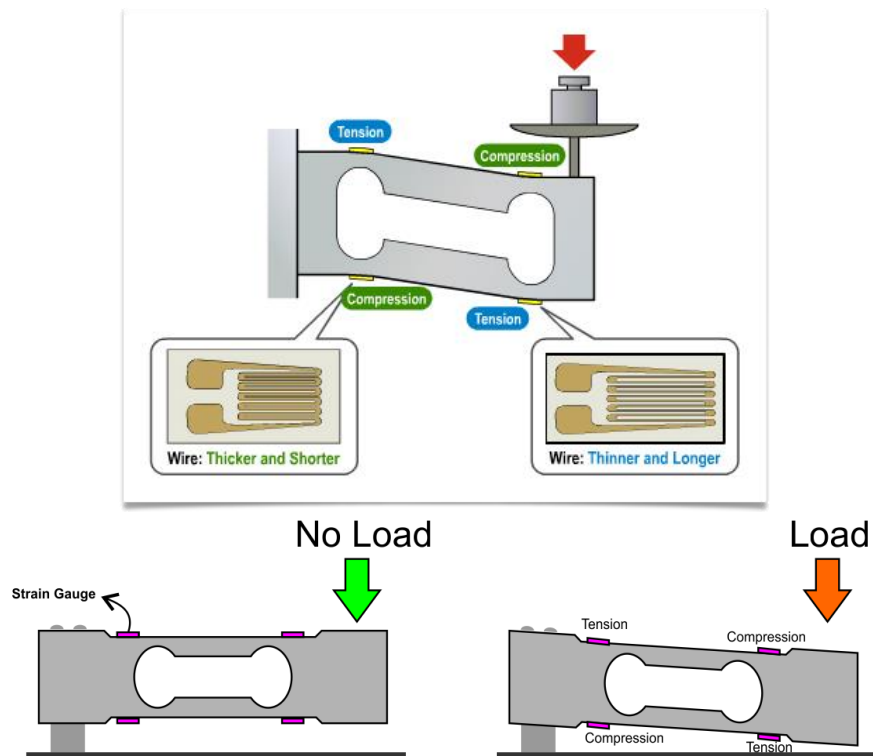
2.1.1 ตัวรับรู้น้ำหนัก

ตัวรับรู้น้ำหนัก (Load cell sensor) คืออุปกรณ์ที่สร้างจาก Strain Gauge ที่จัดเรียงวงจรในรูปแบบวงจรวีทสโตนบริดจ์ (Wheatstone Bridge) ที่ติดตั้งในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของ ตัวรับรู้น้ำหนักซึ่งสามารถแปลงค่าแรงกดหรือแรงดึงที่กระทำต่อตัวรับรู้น้ำหนักจะทำให้ Strain Gauge ที่ติดอยู่ในบริเวณที่มีการเปลี่ยนรูปทรงยืดหรือหดตัว ทำให้ค่าความต้านทานที่ตัว Strain Gauge เปลี่ยนไปเป็นผลให้ค่าสัญญาณไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง ซึ่งตัวรับรู้น้ำหนักสามารถเอาไปประยุกต์ทำเครื่องชั่งตวงในอุตสาหกรรมได้ (วัดแรงกด Compression) หรือใช้ทดสอบวัสดุ (วัดแรงดึง Tensile) ได้ [8-13]



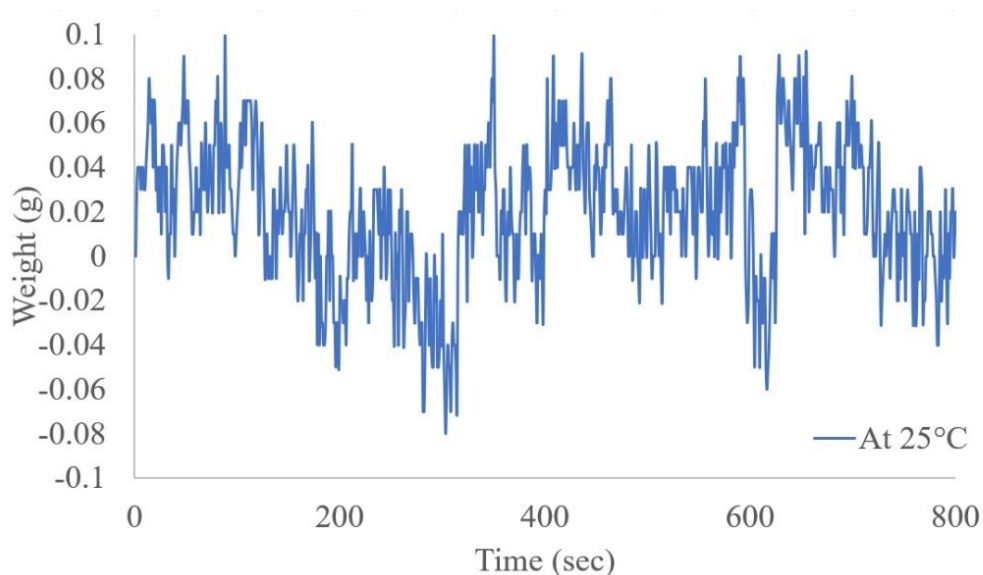
ภาพที่ 2.1 แผนผัง Strain gauge load cell

(ที่มา : <http://www.scalenet.com/applications/glossary.html>)



ภาพที่ 2.2 จุดที่ Strain Gauge ได้รับแรงกด (Compression) จะทำให้ Strain Gauge หดตัวเข้าหากัน (ที่มา : <https://thaieasyelec.com>)

ตัวรับรู้น้ำหนักที่ใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมประกอบด้วยวีทสโตนบริดจ์ที่ใช้ในการวัดค่าความเครียดเป็นกระแสไฟฟ้าจำนวน 4 จุด ซึ่งวีทสโตนบริดจ์จะมีความผิดปกติของเกจวัดความเครียดทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานตามสัดส่วนกับความเครียด และทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณไฟฟ้าที่เป็นเอาต์พุตของวงจรตัวรับรู้น้ำหนัก [12, 13] ในทางปฏิบัติสัญญาณที่วัดได้นั้นจะมีการปนด้วยสัญญาณรบกวนเข้ามาซึ่งอาจเกิดจากสัญญาณไฟฟ้าหรือความร้อนจากสิ่งแวดล้อมและการสั่นสะเทือนทางกลได้ ในการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการกำจัดสัญญาณรบกวนได้มีการศึกษาเพื่อให้ได้ความแม่นยำที่สูงขึ้น [13–15] ในช่วงอุณหภูมิการทำงานปกติของตัวรับรู้น้ำหนักที่ได้รับจากผู้ผลิตอยู่ระหว่าง -10 ถึง $+40$ องศาเซลเซียส ซึ่งข้อมูลเกี่ยวกับตัวรับรู้น้ำหนักต้นทุ่นตัวนี้ไม่ได้มีการให้ข้อมูลไว้อย่างสมบูรณ์ โดยข้อมูลของสัญญาณที่เพิ่มขึ้น $0.017-0.020\%$ ต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียส ในภาพที่ 2.3 แสดงให้เห็นถึงการเกิดขึ้นของลักษณะสัญญาณรบกวนที่ได้จากตัวรับรู้น้ำหนักที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยไม่มีการวัดค่าน้ำหนัก



ภาพที่ 2.3 ข้อมูลของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นของโหลดเซลล์ในการทำงานที่ 25 องศาเซลเซียส

2.1.2 ขดเซยผลของอุณหภูมิต่อตัวรับรู้น้ำหนักให้มีความแม่นยำ

องค์ความรู้เกี่ยวกับปริมาณความชื้นมีบทบาทสำคัญในกระบวนการของอุตสาหกรรมอาหาร และเป็นค่าที่จำเป็นค่าหนึ่งในการใช้ทำนายพฤติกรรมของผลิตภัณฑ์ในระหว่างกระบวนการ [1-7] โดยเฉพาะในระหว่างกระบวนการทำแห้งที่ทราบกันดีว่าสามารถวัดปริมาณความชื้นในวัสดุอาหารจากมวลของน้ำในอาหาร ด้วยการวัดค่าน้ำหนักของอาหารก่อนและหลังการระเหยน้ำออกจากอาหาร ซึ่งความถูกต้องในการคำนวณขึ้นอยู่กับคุณภาพและข้อจำกัดทางกายภาพของตัวรับรู้น้ำหนัก [12]

นอกจากนั้นในกระบวนการทำแห้งอาหารที่เป็นการพาความร้อนจำเป็นต้องหาปริมาณความชื้นเป็นระยะเพื่อหาอัตราการทำแห้งของผลิตภัณฑ์ตามเวลา [8-9, 16] โดยใช้ผลของน้ำหนักคำนวณหาความชื้นฐานแห้งซึ่งการหาค่านี้มีความยุ่งยาก เนื่องจากจำเป็นต้องทราบน้ำหนักตลอดกระบวนการทำแห้งเพื่อคำนวณ ซึ่งโดยทั่วไปขั้นตอนการทำต้องเปิดและปิดห้องทำแห้งหรือเครื่องทำแห้งเพื่อตัวอย่างออกมาชั่งน้ำหนักเป็นระยะซึ่งอาจส่งผลให้เกิดค่าผิดพลาดในการวัด เพื่อจัดการกับปัญหานี้ ได้มีงานวิจัยที่นำตัวรับรู้ในการวัดค่าน้ำหนักจะถูกติดตั้งโดยแขวนไว้ด้านนอกเครื่องทำแห้ง [17, 18] และต่อมาได้มีงานวิจัยที่พัฒนาการวัดค่าน้ำหนักให้มีความแม่นยำโดยนำตัวรับรู้น้ำหนักมาติดตั้งกับเครื่องทำแห้งทั้งภายในและภายนอก

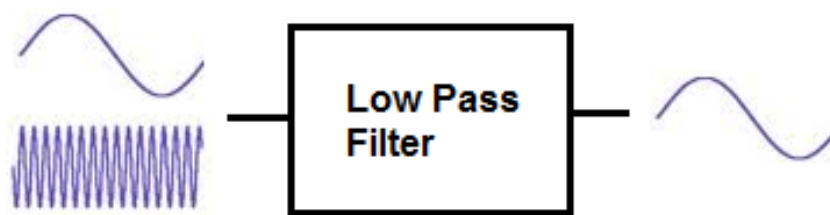
และจากมุมมองที่ใช้งานจริงถ้าการวัดค่าน้ำหนักสามารถนำตัวรับรู้น้ำหนักไปวางไว้ในห้องทำแห้งจะทำให้ง่ายต่อการตรวจสอบน้ำหนักและคำนวณปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ตามระยะเวลาจริง โดยในความเป็นจริงวัสดุที่ใช้เป็นส่วนประกอบของโพลีเมอร์จะถูกเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติตามอุณหภูมิ [11, 19, 20] ดังนั้นความร้อนแบบพลวัตในห้องทำแห้งระหว่างกระบวนการทำแห้งแบบหลายขั้นตอนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทำให้ผลการวัดค่าน้ำหนักเกิดค่าผิดพลาด [6-7] ซึ่งเห็นได้ชัดว่าผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในสภาพแวดล้อมของการทำงานตั้งแต่ -35 ถึง 80 องศาเซลเซียส ส่งผลต่อความผิดพลาดของน้ำหนักที่วัดได้จากผลิตภัณฑ์ [18] เช่นเดียวกับอีกงานวิจัยที่ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมตั้งแต่ -40 ถึง 85 องศาเซลเซียส มีค่าผิดพลาดเกิดขึ้นกับสัญญาณของตัวรับรู้น้ำหนัก [21]

2.1.3 ตัวกรองสัญญาณ (filter)

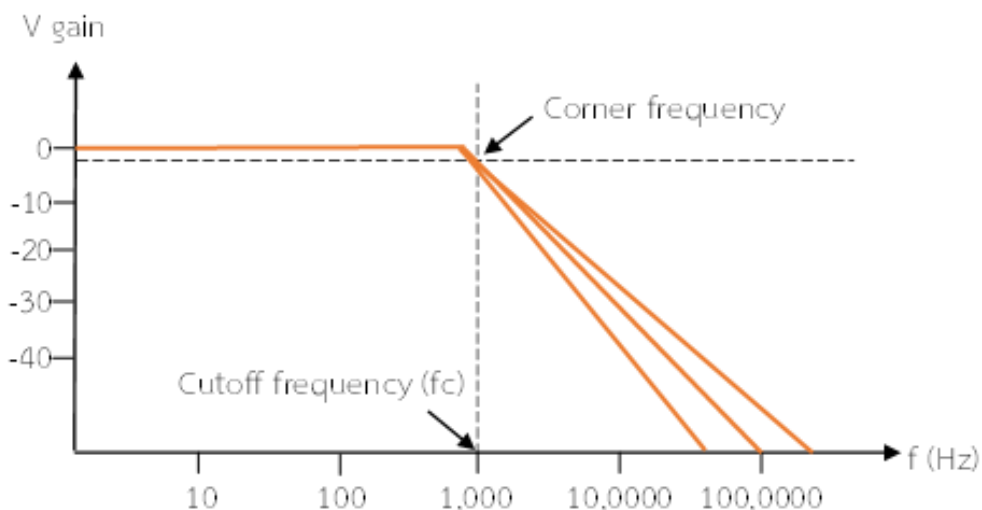
จากการเปลี่ยนแปลงแรงที่กระทำกับตัวรับรู้น้ำหนักเป็นสัญญาณไฟฟ้า สามารถนำค่าสัญญาณไฟฟ้าที่ได้มาคำนวณเปลี่ยนเป็นค่าของแรงที่กระทำและเปลี่ยนเป็นน้ำหนัก แต่ถึงอย่างไรการเปลี่ยนค่าสัญญาณไฟฟ้าเป็นน้ำหนักยังมีความแปรปรวนเนื่องจากค่าสัญญาณรบกวน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกระบวนการที่มีสภาพแวดล้อมรบกวน จึงมีงานวิจัยเพื่อหาตัวกรองสัญญาณทำให้ได้ค่าสัญญาณไฟฟ้าที่แม่นยำและเที่ยงตรงมากขึ้น ฉะนั้นในงานวิจัยนี้สนใจศึกษาตัวกรองความถี่ต่ำ (Low-pass filter) และตัวกรองคาลมาน (Kalman filter) ซึ่งเป็นตัวกรองสัญญาณที่นิยมใช้มากทางด้านวิศวกรรมศาสตร์

2.1.3.1 ตัวกรองความถี่ต่ำ (Low-pass filter)

ตัวกรองความถี่ต่ำ คือตัวกรองความถี่ ที่จะปล่อยคลื่นความถี่ต่ำผ่านไป และตัดสัญญาณความถี่ที่สูงกว่าที่กำหนดออก



ภาพที่ 2.4 ไดอะแกรมของตัวกรองความถี่ต่ำ



ภาพที่ 2.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความต่างศักย์กับลำดับการลดทอนความถี่ในวงจรกรองความถี่ต่ำ

การคำนวณหาค่าความถี่ตัด (Cutoff frequency) ในวงจรกรองความถี่ต่ำ สามารถทำได้โดยใช้สมการที่ 2.1

$$\omega_c = \frac{1}{RC} = 2\pi f_c \quad (2.1)$$

โดย ω_c คือ ความถี่ตัดเชิงมุม (rad/s)
 f_c คือ ความถี่ตัดเชิงเส้น (Hz)
 R คือ ความต้านทานไฟฟ้า (Ω)
 C คือ ความจุของตัวเก็บประจุ (F)

ในปี พ.ศ. 2541 Lisa C. Brereton และ Stuart M. McGill ได้ศึกษาการหดตัวของกล้ามเนื้อ โดยกำหนดฟังก์ชันการตอบสนองของสัญญาณความถี่ของกล้ามเนื้อกระดูกสันหลังส่วนบนและส่วนล่างที่ความยาวและความตึงต่างกัน โดยใช้คลื่นไฟฟ้าที่ผ่านการกรองแล้วกรองความถี่ต่ำ สิ่งนี้จะช่วยให้สามารถประมาณค่าแรงได้อย่างแม่นยำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระหว่างการหดตัวแบบฉับพลันของกล้ามเนื้อ ซึ่งสัญญาณคลื่นไฟฟ้าได้รับการปรับปรุงและกรองความถี่ต่ำซ้ำหลายรอบด้วยความถี่ตัดจาก 1 ถึง 3 Hz ที่ 0.5 Hz เพิ่มขึ้นเพื่อหาปริมาณการตอบสนองความถี่ พบว่าสัญญาณคลื่นไฟฟ้าผ่านตัวกรองความถี่ต่ำแบบธรรมดาไม่สามารถแก้ปัญหาเอาต์พุตของคลื่นไฟฟ้าที่วัดได้ จำเป็นต้องคำนวณแบบแปรผันตามเวลาที่มีความสัมพันธ์กันโดยเพิ่มขึ้นทีละ 1 มิลลิวินาที เพื่อที่จะกำหนดฟังก์ชันการถ่ายโอนของคลื่นไฟฟ้า และความถี่ตัดที่เหมาะสมที่สุดโดยการค้นหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ข้ามสูงสุด และเชิงคุณภาพ ผลการวิจัยพบว่า การตอบสนองความถี่ของกระดูกสันหลังทั้งบนและล่างสามารถจำลองได้ด้วยความถี่คutoff ระหว่าง 2 ถึง 2.5 เฮิร์ตซ์ และค่าเหล่านี้ไม่ได้ถูกปรับอย่างมีนัยสำคัญโดยการเปลี่ยนแปลงความยาวหรือความตึงเครียดของกล้ามเนื้อ [22]

ในปี พ.ศ. 2556 Christian Scheidl และคณะได้ศึกษาการวิเคราะห์แบบจำลองผลกระทบของการไหลของตะกอนที่ปรับเปลี่ยนได้ โดยใช้วิธีการสร้างแบบจำลองขนาดเล็ก แรงกระแทกถูกวัดด้วยตัวรับรู้น้ำหนัก ซึ่งติดตั้งอุปกรณ์อะลูมิเนียม 24 ชิ้นพร้อมเกจวัดความต้านทาน ความเร็วการไหล ความสูงของการไหล และแรงกระแทกในแนวนอนถูกสุ่มตัวอย่างด้วยความถี่ 2.4 kHz ชุดข้อมูลย่อยสุ่มตัวอย่างถูกกำหนดโดยการใช้ตัวกรองความถี่ต่ำในการกรองสัญญาณเฉลี่ย นอกจากนี้ เปรียบเทียบค่าแรงดันสูงสุดโดยประมาณและค่าสัมประสิทธิ์เชิงประจักษ์ของแบบจำลองการกระแทกของไฮดรอลิก [10]

ในปี พ.ศ. 2557 Przemysław Pietrzak และคณะได้ศึกษาตัวกรองความถี่ต่ำในการลดสัญญาณรบกวนจากการสั่นสะเทือนของตัวรับรู้น้ำหนักในการตรวจสอบน้ำหนักในระบบสายพานลำเลียง สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นของระบบดังกล่าวสะท้อนให้เห็นในรูปแบบสเปกตรัมกำลังที่มาก ซึ่งมักจะอยู่ในช่วงความถี่ต่ำ ซึ่งผู้วิจัยแสดงให้เห็นถึงวิธีการขจัดสัญญาณรบกวนจากตัวรับรู้น้ำหนักผ่านตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำแบบแปรผันตามเวลา และเมื่อได้รับการปรับค่าพารามิเตอร์อย่างถูกต้องทำให้สามารถวัดค่าน้ำหนักได้อย่างถูกต้องสำหรับสภาพการใช้งานที่หลากหลาย [8]

และในปี พ.ศ. 2562 İlhan Kelemence และ Müştak Erhan Yalçın ได้ศึกษาปัญหาการประเมินน้ำหนักของสินค้าที่ผลิตขณะเคลื่อนที่ อุปกรณ์ที่ทำงานนี้เรียกว่าเครื่องตรวจสอบน้ำหนักบนสายพานชนิดสายพานลำเลียง และความเร็วเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับสายการผลิต จึงจำเป็นต้องใช้เทคนิคการประมวลผลสัญญาณขั้นสูงโดยใช้ตัวกรองการตอบสนองแบบไม่จำกัดเวลา (infinite impulse response: IIR) ได้รับการออกแบบจากของตัวกรองความถี่ต่ำจะเปลี่ยนจากแบนด์วิดท์กว้างเป็นแบนด์-วิดท์แคบ พารามิเตอร์ของตัวกรองที่ออกแบบนั้นแปรผันตามช่วงเวลา ซึ่งให้ผลการซึ่ง

น้ำหนักในช่วงข้อผิดพลาดที่ต้องการด้วยวิธีที่เร็วที่สุดถูกเมื่อเทียบกับตัวกรองแบบที่ไม่แปรผันตามเวลา [9]

2.1.3.2 ตัวกรองคาลมาน (Kalman filter)

ตัวกรองคาลมาน (Kalman Filter) เป็นอัลกอริทึมที่ใช้หลักการของความน่าจะเป็นในการสร้างสมมติฐานของสถานะที่กำลังจะเกิดขึ้นโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากสถานะก่อนหน้านี้กับค่าของตัวรับรู้ที่ได้จากสถานะปัจจุบัน นำมาคำนวณด้วยแบบจำลองที่สร้างโดยแบบจำลองที่จำเป็นต้องสร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในตัวกรองคาลมานมีด้วยกัน 2 แบบจำลองคือ แบบจำลองระบบ (System model or State transition model) และแบบจำลองการวัด (Measurement model) ซึ่งหลักการทำงานของอัลกอริทึมมีขั้นตอนแบบจำลองระบบการปรับค่าตามเวลาดังนี้

- 1) ประมาณค่าโดยใช้แบบจำลองระบบ

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + w_k \quad (2.2)$$

- 2) คำนวณค่าความผิดพลาดของค่าความแปรปรวนร่วม

$$P_{k+1}^- = H_k x_k + v_k \quad (2.3)$$

และแบบจำลองการวัดสำหรับการปรับค่าตามข้อมูลที่ได้นี้

- 1) คำนวณค่าคาลมาน (Kalman gain)

$$K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + R_k)^{-1} \quad (2.4)$$

- 2) ปรับค่าการประมาณจากตัวรับรู้

$$\hat{x}_k = x_k^- + K(z_k - H_k \hat{x}_k^-) \quad (2.5)$$

- 3) ปรับค่าความผิดพลาดของความแปรปรวนร่วม

$$P_k = (I - K_k H_k) P_k^- \quad (2.6)$$

| | | |
|-----|-------------|--------------------------------|
| โดย | x | คือ ค่าเมทริกซ์ในปัจจุบัน |
| | x_k | คือ ค่าปัจจุบัน |
| | x_{k+1} | คือ ค่าในอนาคต |
| | \hat{x}_k | คือ ค่าประมาณการ |
| | A | คือ ค่าเมทริกซ์การเปลี่ยนแปลง |
| | B | คือ ค่าเมทริกซ์ควบคุม |
| | u | คือ ค่าตัวแปรควบคุม |
| | w | คือ ค่าสัญญาณรบกวนเฉลี่ย |
| | P | คือ ค่าผิดพลาด |
| | P^- | คือ ค่าผิดพลาดในการประมาณ |
| | H | คือ ค่าเมทริกซ์ในการวัด |
| | v | คือ ค่าสัญญาณรบกวนจากการสังเกต |
| | K | คือ ค่าคาลเมน |
| | R | คือ ค่าผิดพลาดที่ได้จากการวัด |
| | z | คือ ค่าตัวแปรในการวัด |
| | I | คือ ค่าเมทริกซ์ความเหมือนกัน |

ในปี พ.ศ. 2538 M. Halimic and W. Balachandran ได้ออกแบบและใช้ตัวกรองคาลมาน ซึ่งจะช่วยลดความผันผวนและการสั่นสะเทือนของการชั่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการชั่งน้ำหนักแบบไดนามิก ผลที่ได้สามารถเพิ่มความแม่นยำในการชั่งน้ำหนักขณะเดียวกันก็รักษาหรือเพิ่มความเร็วในการผลิตได้อย่างถูกต้อง นอกจากนี้ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าตัวกรองคาลมานอาจเป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพสำหรับวิธีการทั่วไปโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อระบบเป็นสัญญาณเสียงไม่เป็นเชิงเส้นและมีความถี่ต่ำที่รวมอยู่ในแบนด์วิดธ์ของสัญญาณที่มีประโยชน์ [23]

ในปี พ.ศ. 2551 Yoshiyuki Noda และคณะได้ศึกษาวิธีการประมาณอัตราการใช้สำหรับระบบการเทอัตโนมัติแบบกระสวยเอียงที่ใช้ในอุตสาหกรรมการหล่อ ในการเทโลหะหลอมเหลวลงในแม่พิมพ์ได้อย่างแม่นยำ ดังนั้นพวกเขาจึงใช้เทคนิคการตรวจจับน้ำหนักของของเหลวในทัพพีและมุมเอียงของทัพพีจะวัดโดยตัวรับรู้น้ำหนักและตัวเข้ารหัสตามลำดับ จากนั้น ประเมินอัตราการไหลโดยใช้ตัวกรองคาลมานแบบขยายและฟังก์ชันของตัวรับรู้น้ำหนัก โดยแบบจำลองอัตราการไหลถูกสร้างขึ้นในระบบไม่เชิงเส้น ข้อดีของระบบที่เสนอคือสามารถประมาณอัตราการไหลได้อย่างแม่นยำ สร้างได้ง่าย และตัวรับรู้น้ำหนักไม่เสียหายง่าย เนื่องจากไม่ได้สัมผัสโดยตรงกับโลหะหลอมเหลว [24]

ในปี พ.ศ. 2556 Ahmed M. Harb ได้ศึกษาสายการผลิตอัตโนมัติที่มีระบบตรวจวัดน้ำหนักแบบพลวัตบนสายพานถูกรวมเข้ากับสายการผลิตเพื่อควบคุมน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ให้ถูกต้อง โดยการรับสัญญาณน้ำหนักจากตัวรับรู้น้ำหนักแต่ยังได้รับผลกระทบจากสัญญาณรบกวนและการสั่นสะท้านต่าง ๆ ดังนั้นการออกแบบและใช้ตัวกรองคาลมานซึ่งช่วยลดความผันผวนและการสั่นสะเทือนของน้ำหนักผลิตภัณฑ์ และเพิ่มประสิทธิภาพของระบบชั่งน้ำหนักแบบพลวัตในเวลาจริง (real-time dynamics) ให้ถูกต้อง ซึ่งระบบนี้จะเพิ่มความแม่นยำในการชั่งน้ำหนักในขณะที่เพิ่มความเร็วในการผลิตได้ โดยได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องตรวจสอบน้ำหนักบนสายพานและตัวรับรู้น้ำหนัก ผลลัพธ์ที่ได้ แสดงว่าตัวกรองคาลมานอาจให้ทางเลือกที่มีประสิทธิภาพให้การแก้ปัญหานี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อระบบไม่เป็นเชิงเส้นและมีสัญญาณรบกวนความถี่ต่ำรวมอยู่ในแบนด์วิดธ์ของสัญญาณที่ต้องการ [25]

ในปี พ.ศ. 2563 Syed Riaz un Nabi Jafri และคณะได้ศึกษาเทคนิคการวัดแรงแทรกของเข็มบนพื้นผิวทดสอบเพื่อตรวจสอบความแข็งแรงของเข็ม โดยการใช้ตัวรับรู้น้ำหนักร่วมกับตัวรับรู้ออกแบบและประดิษฐ์ขึ้นประกอบด้วยมอเตอร์ที่ประกอบกับแขนข้อต่อในแนวตั้ง เข็มทดสอบถูกติดตั้งไว้ที่ปลายแขน การเคลื่อนไหวของแขนถูกควบคุมด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์เพื่อสร้างแรงกดโดยเข็มไปยังพื้นผิวการทดสอบ ข้อมูลการวัดทางประสาทสัมผัสที่สร้างขึ้นในระหว่างกระบวนการนี้ได้รับการเก็บรวบรวมโดยใช้ฮาร์ดแวร์อิเล็กทรอนิกส์แบบฝังตัวที่ใช้ Arduino ในการตรวจสอบพบว่าระบบที่พัฒนาขึ้นในการทดสอบด้วยเข็มที่แตกต่างกัน ผลลัพธ์ในรูปแบบของแรงทะลุและแรงเสียดทานได้รับการตรวจสอบจากการทดลองและเปรียบเทียบกับเครื่องวัดแรงมาตรฐาน การวิเคราะห์เปรียบเทียบแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบและมีต้นทุนถูกกว่าเครื่องมือวัดมาตรฐาน [26]

ในปี พ.ศ. 2564 Feng Cao และคณะได้ศึกษาค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบสลับโหมดพร้อมช่วงเวลาผันแปร เพื่อลดผลกระทบของสัญญาณรบกวนของกระแสมอเตอร์ที่วัดได้ เพื่อช่วยเพิ่มความมั่นใจในการประมาณค่าแรงบิดเอาต์พุตร่วม ช่วงเวลาของตัวกรองจะปรับอย่างต่อเนื่องระหว่างเวลาตอบสนองและความแม่นยำของการประมาณค่าแบบเรียลไทม์อย่างเหมาะสมที่สุด โดยนำเสนอตัวกรองคาลมานแบบปรับได้ตามช่วงเวลาผันแปรที่ประกอบด้วยค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ที่เสนอและตัวกรองคาลมานแบบคลาสสิก ขั้นตอนการสอบเทียบสำหรับตัวกรองคาลมานแบบปรับได้ โดยคำนึงถึงสัญญาณรบกวนของกระแสไฟของมอเตอร์ที่วัดได้และข้อผิดพลาดในข้อมูลความเร็วจากข้อต่อ พบว่าวิธีการตรวจจับแรงและแรงบิดที่รวมกันทำให้ข้อผิดพลาดในการประมาณค่าและเวลาตอบสนองลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการวัดแบบเดิม และผลจะดีขึ้นอีกเมื่อน้ำหนักวัตถุเพิ่มขึ้น วิธีการที่เสนอนี้สามารถนำไปใช้กับหุ่นยนต์ควบคุม ไต ๆ ก็ได้ทราบเท่าที่มีข้อมูลมอเตอร์ [27]

2.2 การปรับอุณหภูมิอากาศเพื่อควบคุมขีดจำกัดอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์แบบอัตโนมัติ

กระบวนการทำแห้งแบบลมร้อนที่ใช้การถ่ายเทความร้อนจากอากาศร้อนเข้าสู่ผิวของวัสดุ แพร่เข้าสู่ใจกลางของวัสดุ ทำให้มีงานวิจัยที่ศึกษากระบวนการทำแห้งโดยสนใจอุณหภูมิผิวของวัสดุ เพื่อให้ได้คุณภาพที่ดีที่สุดและลดระยะเวลากระบวนการทำแห้ง โดยในปี พ.ศ. 2553 Serghei Cernișev ได้ศึกษาผลของการอบแห้งมะเขือเทศต่อการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่มีเอนไซม์ช่วยที่อุณหภูมิ 50 ถึง 90°C ซึ่งอิทธิพลของความชื้นและอุณหภูมิของผิววัสดุมีผลต่อการเปลี่ยนสีระหว่างการอบแห้ง และจากการวิเคราะห์ของข้อมูลการทดลองในกระบวนการทำแห้งมะเขือเทศทำให้ได้การพัฒนากระบวนการทำแห้งที่อุณหภูมิอากาศลดลงเป็นขั้นตอนเพื่อให้ได้อุณหภูมิผิวของมะเขือเทศไม่เกินระดับที่ยอมรับได้ ทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์สูงขึ้นและเวลาในการอบแห้งสั้นลงเมื่อเทียบกับกระบวนการทำแห้งที่อุณหภูมิอากาศคงที่ [7]

ในปี พ.ศ. 2553 El-Shehawy, Sh. M. และ H. E. El-Mashad ได้ศึกษาผลกระทบบของสภาวะการทำแห้งของแครอทต่อปริมาณแคโรทีนที่มีรูปร่างลูกบาศก์ ขึ้น และฝอย เปรียบเทียบการลวกและไม่ลวก และอุณหภูมิผิวของการทำแห้งที่ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลมคงที่ที่ 2 เมตรต่อวินาที จากการศึกษาพบว่ากระบวนการลวกทำให้เกิดการสูญเสียแคโรทีนที่สำคัญ และได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการทำแห้งแครอทและแคโรทีนที่ผิวเพื่อทำนายระยะเวลาในการทำแห้ง [28]

นอกจากนั้นในปี พ.ศ. 2558 Nuñez และคณะ ได้มีการทดสอบสร้างแบบจำลองสำหรับการอบแห้งแอปเปิ้ลสไลด์ด้วยวิธีการพาความร้อนของผักและผลไม้ ที่สนใจในการพัฒนาอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นที่ผิวของผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลิตภัณฑ์ที่มีความละเอียดอ่อนต่อความร้อน ใช้อุณหภูมิสูงในระยะแรกของการอบแห้ง เนื่องจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศและอุณหภูมิกระเปาะเปียกของผลิตภัณฑ์มีค่าต่างกันมาก การควบคุมอัตโนมัติของอุณหภูมิผิวสามารถช่วยควบคุมอุณหภูมิสูงสุด ที่สามารถยอมรับเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดกับผลิตภัณฑ์ให้มีคุณภาพสูง การใช้แบบจำลองนี้ นำไปสู่การลดลงของเวลาในการอบแห้งอย่างมีนัยสำคัญและอาจเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ [6]

2.2.1 ตัวรับรู้อุณหภูมิแบบไม่สัมผัส

ตัวรับรู้อุณหภูมิแบบไม่สัมผัสเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้เทคโนโลยีอินฟราเรดซึ่งถูกใช้ในชีวิตประจำวันและในอุตสาหกรรมเพื่อวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน โดยสัญญาณอินฟราเรดไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตามนุษย์ การแผ่รังสีอินฟราเรดของสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 0.75 ไมโครเมตร ถึง 1,000 ไมโครเมตร สสารที่มีอุณหภูมิมากกว่า 0 องศาเซลเซียส จะปล่อยรังสีอินฟราเรด ออกมาจากตัวมันเองเสมอ

รังสีอินฟราเรด สามารถแบ่งช่วงความยาวคลื่นได้เป็น 5 ช่วง คือ

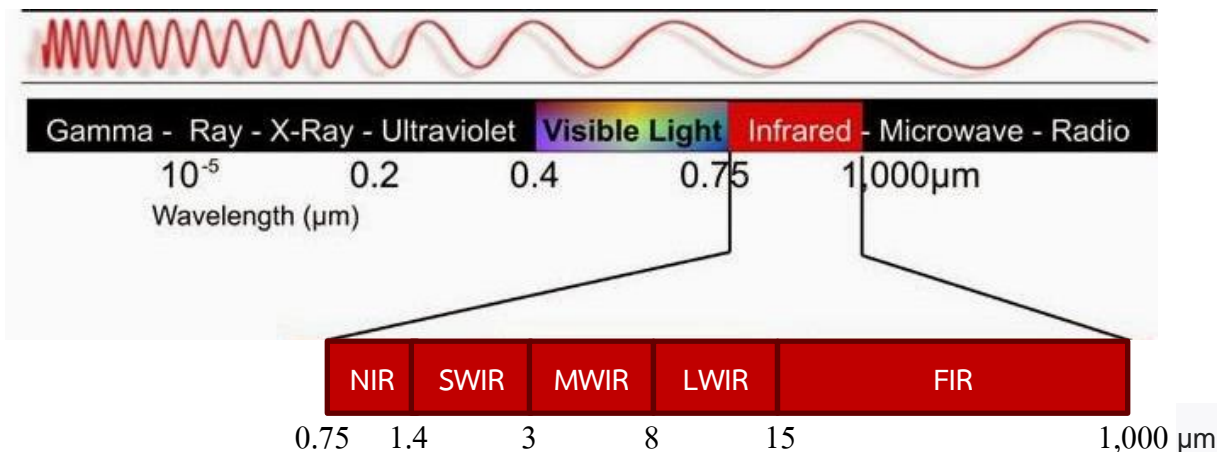
1. รังสีอินฟราเรดช่วงคลื่นใกล้ (Near Infrared: NIR, IR-A) มีความยาวคลื่นประมาณ 0.75 ถึง 1.4 ไมโครเมตร ความถี่มีตั้งแต่ 214 ถึง 400 เทระเฮิร์ตซ์ พลังงานโฟตอน 886 ถึง 1,653 อิเล็กตรอนโวลต์ ช่วงอุณหภูมิ 1,797 ถึง 3,591 องศาเซลเซียส ใช้ในการสื่อสารโทรคมนาคม สามารถเพิ่มความเข้มของภาพมีความอ่อนไหวต่อพื้นที่ของสเปกตรัมนี้ และสเปกโทรสโกปีใกล้อินฟราเรดเป็นอีกหนึ่งแอปพลิเคชันทั่วไป

2. รังสีอินฟราเรดช่วงคลื่นสั้น (Short-wavelength Infrared: SWIR, IR-B) มีความยาวคลื่นประมาณ 1.4 ถึง 3 ไมโครเมตร ความถี่มีตั้งแต่ 100 ถึง 214 เทระเฮิร์ตซ์ พลังงานโฟตอน 413 ถึง 886 อิเล็กตรอนโวลต์ ช่วงอุณหภูมิ 693 ถึง 1,797 องศาเซลเซียส ช่วงความยาวคลื่น 1.53 ถึง 1.56 ไมโครเมตรเป็นสเปกตรัมที่โดดเด่นสำหรับการสื่อสารทางไกล

3. รังสีอินฟราเรดช่วงคลื่นกลาง (Mid-wavelength Infrared: MWIR, IR-C) มีความยาวคลื่นประมาณ 3 ถึง 8 ไมโครเมตร ความถี่มีตั้งแต่ 37 ถึง 100 เทระเฮิร์ตซ์ พลังงานโฟตอน 155 ถึง 413 อิเล็กตรอนโวลต์ ช่วงอุณหภูมิ 89 ถึง 693 องศาเซลเซียส ช่วงความยาวคลื่น 3 ถึง 5 ไมโครเมตรใช้ในเทคโนโลยีชีปนาเวรนำวิถี ด้วยการค้นหาความร้อนแบบพาสซีฟ IR ได้รับการออกแบบมาให้ทำงาน โดยอิงตามค่าอินฟราเรดของเครื่องบินเป้าหมาย ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะเป็นเครื่องยนต์ไอพ่น และสามารถเรียกอีกอย่างชื่อว่า “อินฟราเรดความร้อน” ซึ่งนิยมนำไปประยุกต์ใช้ในงานวัดอุณหภูมิความร้อน

4. รังสีอินฟราเรดช่วงคลื่นยาว (Long-wavelength Infrared: LWIR, IR-C) มีความยาวคลื่นประมาณ 8 ถึง 15 ไมโครเมตร ความถี่มีตั้งแต่ 20 ถึง 37 เทระเฮิร์ตซ์ พลังงานโฟตอน 83 ถึง 155 อิเล็กตรอนโวลต์ ช่วงอุณหภูมิ -80 ถึง 89 องศาเซลเซียส เป็นอีกช่วงที่เป็น “อินฟราเรดความร้อน” หรือการถ่ายภาพความร้อน ซึ่งเซนเซอร์สามารถรับภาพความร้อนที่แผงอยู่ของวัตถุได้อย่างสมบูรณ์ และมีความละเอียดสูง เช่น ร่างกายมนุษย์

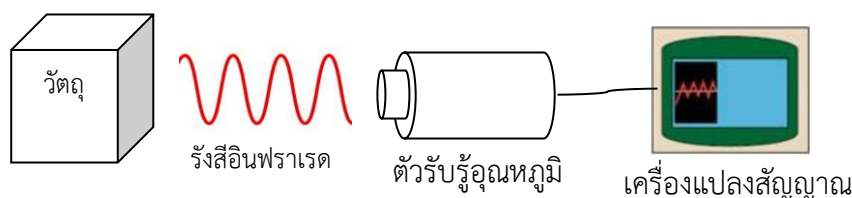
5. รังสีอินฟราเรดช่วงคลื่นไกล (Far Infrared: FIR) มีความยาวคลื่นประมาณ 15 ถึง 1,000 ไมโครเมตร ความถี่มีตั้งแต่ 0.3 ถึง 20 เทระเฮิร์ตซ์ พลังงานโฟตอน 1.2 ถึง 83 อิเล็กตรอนโวลต์ ช่วงอุณหภูมิ -270.15 ถึง -80.15 องศาเซลเซียส มีการประยุกต์ใช้ในสเปกโทรสโกปีเทอร์เฮิร์ตซ์ การถ่ายภาพเทอร์เฮิร์ตซ์ และการวินิจฉัยฟิสิกส์พลาสมาฟิวชั่น สามารถใช้ตรวจจับวัตถุระเบิดและสารทำสงครามเคมี โดยใช้อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี หรือเพื่อประเมินความหนาแน่นของพลาสมาโดยใช้เทคนิคอินเตอร์เฟอโรเมทรี



ภาพที่ 2.6 สเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้าของรังสีอินฟราเรด

ซึ่งตัวรับรู้อุณหภูมิแบบไม่สัมผัสนั้นจะวัดรังสีอินฟราเรดช่วงคลื่นสั้นเพื่อวัดอุณหภูมิของวัตถุ ซึ่งมีข้อดีคือ การวัดโดยไม่ต้องสัมผัสกับวัตถุโดยตรงทำให้สามารถป้องกันการปนเปื้อนได้ มีการตอบสนองได้เร็วขึ้น มีความแม่นยำสามารถใช้งานได้ง่ายขึ้นโดยลดผลกระทบการสั่นสะเทือนของวัตถุและสามารถแยกความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมออกจากวัตถุและมีความปลอดภัย

หลักการการทำงานของตัวรับรู้อุณหภูมิแบบไม่สัมผัสนั้นจะเป็นตัวรับรู้อินฟราเรดแบบพาสซีฟ โดยมีอุปกรณ์ตรวจจับรังสีอินฟราเรด หรือ thermopile ในการจับรังสีอินฟราเรดเพื่อเปลี่ยนเป็นความร้อนและเปลี่ยนค่าความร้อนเป็นกระแสไฟฟ้าเพื่อใช้ในการคำนวณค่าอุณหภูมิต่าง ๆ



ภาพที่ 2.7 หลักการทำงานของตัวรับรู้อุณหภูมิแบบไม่สัมผัส

ช่วงของการวัดอุณหภูมิของตัวรับรู้อุณหภูมิแบบไม่สัมผัสเป็นสิ่งสำคัญเพื่อความแม่นยำในการวัด โดยสามารถเลือกได้จากช่วงของอุณหภูมิในการวัด ค่าการแผ่รังสีอินฟราเรดของวัตถุ (Emissivity Factor) ซึ่งวัตถุแต่ละชนิดจะมีค่าการแผ่รังสีที่ไม่เท่ากันสามารถพิจารณาได้จาก

$$T_m = \frac{(E_s \times T_s)}{E_i} \tag{2.7}$$

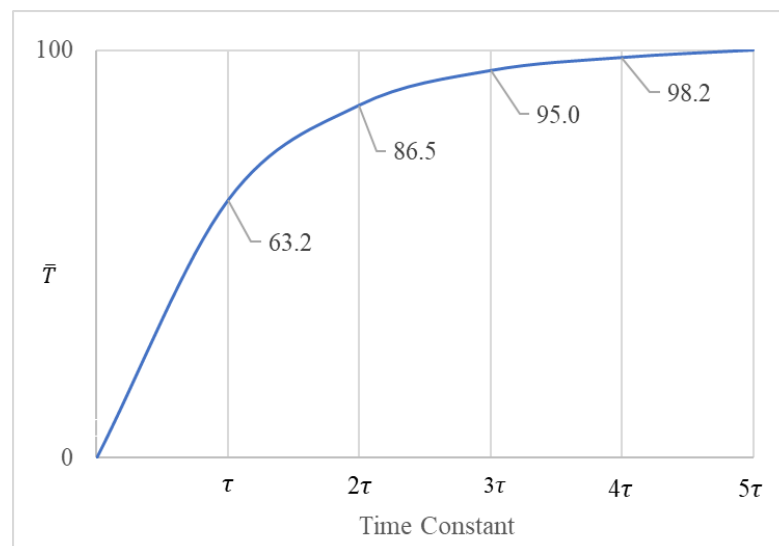
| | | |
|-----|-------|--|
| โดย | T_m | คือ อุณหภูมิที่อ่านได้จากตัวรับรู้ |
| | T_s | คือ อุณหภูมิจริงที่ผิวของวัตถุ |
| | E_s | คือ ค่าการแผ่รังสีอินฟราเรดของวัตถุ |
| | E_i | คือ ค่าการแผ่รังสีอินฟราเรดในการคำนวณค่าอุณหภูมิ |

และอัตราส่วนระยะทางในหน่วยใด ๆ ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นที่ในการวัดในหน่วย นั้น ๆ (Distance to Spot Ratio: D:S)

2.2.2 การปรับค่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์

2.2.2.1 การตั้งค่าการปรับสภาพโดยใช้ค่าคงที่เวลา

ในกระบวนการทำแห้งการควบคุมโดยทั่วไปใช้รูปแบบลำดับแรกสำหรับการตอบสนองต่ออุณหภูมิ สมมติว่าเราใช้พลังงานความร้อนอินพุตคงที่กับความเร็วพัดลมคงที่ในแต่ละขั้นตอน ขั้นตอนเฉพาะนี้ได้รับการออกแบบโดยมีการปรับค่าอุณหภูมิตามค่าเวลาคงที่ของกระบวนการ (Time Constant : τ) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.8 ที่มาจาก Lumped element model [29, 32]



ภาพที่ 2.8 กราฟค่าเวลาคงที่ของการบวนการ

$$\bar{T} = \frac{T - T_i}{T_f - T_i} = 1 - e\left(\frac{-t}{\tau}\right) \quad (2.8)$$

| | | |
|-------|-----------|-----------------------------------|
| เมื่อ | \bar{T} | คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ของกระบวนการ |
| | T | คือ ค่าอุณหภูมิที่เวลานั้น ๆ (°C) |
| | T_i | คือ ค่าอุณหภูมิเริ่มต้น (°C) |
| | T_f | คือ ค่าอุณหภูมิสุดท้าย (°C) |
| | t | คือ เวลาของกระบวนการ |
| | τ | คือ ค่าเวลาคงที่ของกระบวนการ |

ในปี พ.ศ. 2536 Julio C. Moreira ได้ตรวจสอบและใช้ตัวควบคุมแบบปรับได้ใหม่สำหรับการแก้ไขค่าคงที่เวลาของโรเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณความถี่ส่วนเกินของการควบคุมเชิงในภาคสนามทางอ้อม (Indirect Field Oriented Control: IFOC) ของเครื่องเหนี่ยวนำ การใช้งานคอนโทรลเลอร์จะขึ้นอยู่กับฟลักซ์ช่องว่างอากาศของเครื่องจักร โดยไม่มีการใช้ตัวรับรู้ และมีการคำนวณที่ไม่ซับซ้อนแต่จำเป็นต้องเข้าถึงการเชื่อมต่อที่เป็นกลางของสเตเตอร์เท่านั้น ซึ่งวัดโดยการตรวจจับส่วนประกอบฮาร์มอนิกที่สามของแรงดันไฟฟ้าเฟสสเตเตอร์ ตัวควบคุมแบบปรับได้ที่เสนอขึ้นอยู่กับค่าประมาณพารามิเตอร์ที่วัดได้ง่ายเท่านั้น นอกจากนี้ยังเสนอกลยุทธ์การแก้ไขเพื่อชดเชยการเปลี่ยนแปลงของการเหนี่ยวนำแม่เหล็กเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับฟลักซ์ช่องว่างอากาศ กลยุทธ์ดังกล่าวขึ้นอยู่กับฟังก์ชันที่เกี่ยวข้องกับค่าของการเหนี่ยวนำนี้กับแอมพลิจูดของส่วนประกอบแรงดันไฟฟ้าฮาร์มอนิกสเตเตอร์ที่สาม [29]

ในปีพ.ศ. 2543 Vladimir Székely และ Márta Rencz ได้ศึกษาสเปกตรัมและค่าคงที่เวลาที่เป็นประโยชน์เกี่ยวกับพฤติกรรมการระบายความร้อนแบบไดนามิกของโครงสร้างไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งพวกเขาได้นำเสนออัลกอริทึมที่สามารถใช้สำหรับการคำนวณสเปกตรัมคงที่เวลาในโปรแกรมจำลองความร้อน สเปกตรัมค่าคงที่เวลาที่ได้สามารถเป็นพื้นฐานของการคำนวณพฤติกรรมของไดอะแกรมความต้านทานความร้อนและการสร้างโครงสร้างใหม่ [30]

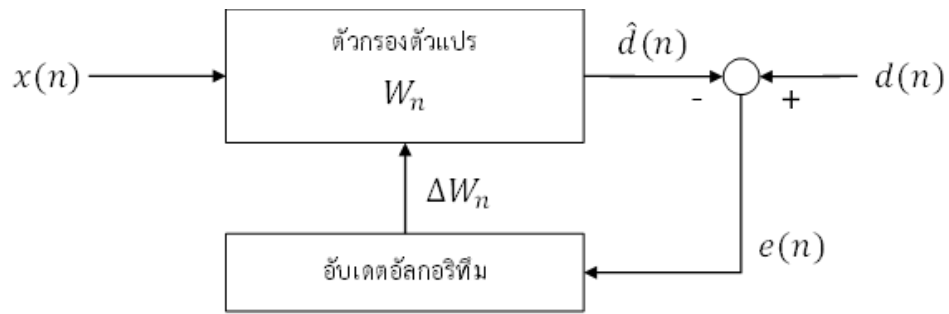
ในปีพ.ศ. 2554 Sanjay P. Nair และคณะได้ศึกษาเทคนิคอีลาสโตกราฟีแบบใหม่ สำหรับการถ่ายภาพพฤติกรรมเชิงกลชั่วขณะของเนื้อเยื่อ เทคนิคเหล่านี้มักเกี่ยวข้องกับการใช้วิธีการปรับให้พอดีส่วนโค้งกับข้อมูลที่มีสัญญาณรบกวนเพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ โดยทั่วไปเข้าไปและไม่เหมาะสำหรับการใช้งานทางคลินิก และคุณภาพของภาพที่ได้ของเทคนิคอีลาสโตกราฟีแบบใหม่นี้ยังไม่เป็นที่ชัดเจน พวกเขาจึงเสนอตัวประมาณค่าคงที่เวลาอีลาสโตกราฟีแบบใหม่ ซึ่งใช้วิธีการปรับให้พอดีส่วนโค้งน้อยที่สุด และกฎการปรับให้เหมาะสมกับข้อมูลอีลาสโตกราฟีที่มีสัญญาณรบกวน อัลกอริทึมทำงานบนหน่วยประมวลผลกราฟิกเอนกประสงค์ขนาดใหญ่ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพแบบเรียลไทม์ตัวประมาณจะถูกวิเคราะห์โดยใช้การจำลอง ผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าเครื่อง

ประมาณค่าอีลาสโตกราฟีแบบใหม่สามารถสร้างการประมาณค่าคงที่เวลาอีลาสโตกราฟีแบบใหม่ได้อย่างแม่นยำและมีความละเอียดแบบเรียลไทม์ถึงแม้จะมีสัญญาณรบกวนสูง [31]

ในปีพ.ศ. 2551 Quoc-Hung Nguyen และคณะได้ศึกษาการออกแบบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับวาล์วแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อลดพลังงานควบคุมที่จะนำไปใช้กับขดลวดเพื่อควบคุมแรงดันตกคร่อมของวาล์ว ซึ่งเป็นไปตามแรงดันตกคร่อมที่ระบุและข้อกำหนดค่าคงที่เวลาอุปนัย แรงดันที่ลดลงจะได้รับบนพื้นฐานของแบบจำลองบิงแฮมของของเหลวแม่เหล็กไฟฟ้า จากนั้นจะได้พลังงานควบคุมซึ่งเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์และค่าคงที่เวลาอุปนัย แล้วทำการเพิ่มประสิทธิภาพโดยใช้อัลกอริทึมอัตราส่วนโกลด์เดนสองและเทคนิคการปรับกำลังสองพื้นฐาน และสร้างการออกแบบพารามิเตอร์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เชิงพาณิชย์ การใช้เครื่องมือเพิ่มประสิทธิภาพที่พัฒนาขึ้นในการศึกษานี้ จะระบุการกำหนดค่าวาล์วแม่เหล็กไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งจำกัดอยู่ที่ปริมาตรทรงกระบอกเฉพาะที่กำหนดโดยรัศมีและความสูง นอกจากนี้ได้เสนอผลลัพธ์ในการปรับวาล์วแม่เหล็กไฟฟ้าให้เหมาะสมกับค่าแรงดันตกที่ต้องการและปริมาตรที่จำกัดแตกต่างกัน [32]

2.2.2.2 กำลังสองน้อยที่สุดแบบเรียกซ้ำ (Recursive least squares: RLS)

ระเบียบวิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบเรียกซ้ำ (RLS) เป็นอัลกอริทึมตัวกรองแบบปรับได้ที่ค้นหาค่าสัมประสิทธิ์แบบเรียกซ้ำซึ่งลดฟังก์ชันเริ่มต้นกำลังสองน้อยที่สุดเชิงเส้นถ่วงน้ำหนักที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณอินพุต วิธีการนี้ตรงกันข้ามกับอัลกอริทึมอื่น ๆ เช่น ระเบียบวิธีกำลังสองของค่าเฉลี่ยน้อยที่สุด (LMS) ที่มุ่งลดข้อผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย ในการได้มาของระเบียบวิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบเรียกซ้ำนั้นสัญญาณอินพุตจะถูกพิจารณากำหนดไว้ โดยการเลือกค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองอย่างเหมาะสมและการอัปเดตตัวกรองเมื่อมีข้อมูลใหม่ดังภาพที่ 2.9 ในขณะที่ระเบียบวิธีกำลังสองของค่าเฉลี่ยน้อยที่สุดหรืออัลกอริทึมที่คล้ายคลึงกันนั้นได้จากเป็นสัญญาณแบบสุ่ม ซึ่งระเบียบวิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบเรียกซ้ำจะลู่ออกหาคำตอบที่ถูกต้องได้เร็วที่สุด แต่ระเบียบวิธีนี้ก็มีข้อจำกัดในการทำงาน เช่น การคำนวณที่ค่อนข้างซับซ้อน ทำให้ระเบียบวิธีนี้ไม่เป็นที่นิยมจะนำมาใช้กันมากนัก แต่ในงานที่ต้องการความเร็วในการหาคำตอบสูงระเบียบวิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบเรียกซ้ำเป็นหนึ่งในตัวเลือกที่น่าสนใจอย่างยิ่ง



ภาพที่ 2.9 หลักการทำงานของระเบียบวิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบเรียกซ้ำ (RLS)
(ที่มา : ดัดแปลงจาก S.S. Haykin [28])

โดยระเบียบวิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบเรียกซ้ำสามารถคำนวณได้จากข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น $e(n)$ กับค่าสัมประสิทธิ์การกรองผ่านการประมาณค่า $\hat{d}(n)$:

$$e(n) = d(n) - \hat{d}(n) \quad (2.9)$$

ซึ่งสมการของ $e(n)$ ที่มีสมการข้อผิดพลาดกำลังสองน้อยที่สุด C ที่สามารถย่อได้จะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรอง:

$$C(W_n) = \sum_{i=0}^n \lambda^{n-i} e^2(i) \quad (2.10)$$

เมื่อ $0 < \lambda \leq 1$ ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญน้อยกว่าแบบทวีคูณกับข้อผิดพลาดเก่า และสมการที่มีค่าน้อยที่สุดด้วยการหาอนุพันธ์ k ของเวกเตอร์สัมประสิทธิ์ W_n และตั้งค่าผลลัพธ์เป็น 0

$$\frac{\partial C(W_n)}{\partial w_n(k)} = \sum_{i=0}^n 2\lambda^{n-i} e(i) \cdot \frac{\partial e(i)}{\partial w_n(k)} = -\sum_{i=0}^n 2\lambda^{n-i} e(i)x(i-k) = 0, \quad k = 0, 1, \dots, p \quad (2.11)$$

จากนั้นแทนค่า $e(n)$

$$\sum_{i=0}^n \lambda^{n-i} [d(i) - \sum_{l=0}^p w_n(l)x(i-l)]x(i-k) = 0, \quad k = 0, 1, \dots, p \quad (2.12)$$

จัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\sum_{l=0}^p w_n(l) \left[\sum_{i=0}^n \lambda^{n-i} x(i-l)x(i-k) \right] = \sum_{i=0}^n \lambda^{n-i} d(i)x(i-k),$$

$$k = 0, 1, \dots, p \quad (2.13)$$

สามารถแสดงในรูปของเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$R_x(n)w_n = r_{dx}(n) \quad (2.14)$$

เมื่อ $R_x(n)$ คือเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมตัวอย่าง $x(n)$ และ $r_{dx}(n)$ คือค่าประมาณสำหรับค่าความแปรปรวนร่วมระหว่าง $d(n)$ และ $x(n)$ และสามารถลดรูปสมการได้ดังนี้

$$w_n = R_x^{-1}(n)r_{dx}(n) \quad (2.15)$$

จากการกำหนดเวกเตอร์สัมประสิทธิ์ซึ่งลดรูปสมการให้เหลือน้อยที่สุด ในส่วนนี้สามารถหาคำตอบแบบเรียกซ้ำได้ดังนี้

$$w_n = w_{n-1} + \Delta w_{n-1} \quad (2.16)$$

เมื่อ Δw_{n-1} คือปัจจัยแก้ไข ณ เวลา $n - 1$ และอัลกอริทึมแบบเรียกซ้ำที่แสดงความแปรปรวนร่วม $r_{dx}(n)$ ในเทอมของ $r_{dx}(n - 1)$ ดังนี้

$$r_{dx}(n) = \sum_{i=0}^{n-1} \lambda^{n-1} d(i)x(i) + \lambda^0 d(n)X(n) = \lambda r_{dx}(n - 1) + d(n)X(n)$$

$$(2.17)$$

เมื่อ $X(i)$ คือ $p + 1$ มิติของเวกเตอร์ข้อมูล

$$X(i) = [x(i), x(i - 1), \dots, x(i - p)]^T \quad (2.18)$$

ในทำนองเดียวกันสามารถแสดง $R_x(n)$ ในเทอมของ $R_x(n - 1)$ ได้ดังนี้

$$R_x(n) = \sum_{i=0}^n \lambda^{n-i} X(i)X^T(i) = \lambda R_x(n - 1) + X(n)X^T(n) \quad (2.19)$$

จากนั้นอินเวอร์สเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วม ภายใต้เงื่อนไขดังนี้

$$A = \lambda R_x(n-1) \text{ คือ } (p+1) \text{ ต่อ } (p+1) \quad (2.20)$$

$$U = X(n) \text{ คือ } (p+1) \text{ ต่อ } 1 \text{ (เวกเตอร์ในแนวคอลัม)} \quad (2.21)$$

$$V = X^T(n) \text{ คือ } 1 \text{ ต่อ } (p+1) \text{ (เวกเตอร์ในแนวแถว)} \quad (2.22)$$

$$C = I_1 \text{ คือ } 1 \text{ ต่อ } 1 \text{ (เมทริกซ์เอกลักษณ์)} \quad (2.23)$$

เมทริกซ์เอกลักษณ์ของ Woodbury มีดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} R_x^{-1}(n) &= [\lambda R_x(n-1) + X(n)X^T(n)]^{-1} \\ &= \lambda^{-1}R_x^{-1}(n-1) - \lambda^{-1}R_x^{-1}(n-1)X(n)\{1 + \\ &\quad X^T(n)\lambda^{-1}R_x^{-1}(n-1)X(n)\}^{-1}X^T(n)\lambda^{-1}R_x^{-1}(n-1) \end{aligned} \quad (2.24)$$

แทนค่าและจัดรูปสมการใหม่ดังนี้

$$P(n) = R_x^{-1}(n) = \lambda^{-1}P(n-1) - g(n)X^T(n)\lambda^{-1}P(n-1) \quad (2.25)$$

เมื่อค่าเวกเตอร์ $g(n)$ คือ

$$\begin{aligned} g(n) &= \lambda^{-1}P(n-1)X(n)\{1 + X^T(n)\lambda^{-1}P(n-1)X(n)\}^{-1} \\ &= P(n-1)X(n)\{\lambda + X^T(n)P(n-1)X(n)\}^{-1} \end{aligned} \quad (2.26)$$

โดยคำจำกัดความแบบเรียกซ้ำของ $P(n)$ ในรูป $g(n) = P(n)X(n)$ ซึ่งเมื่อนำไปแทนค่าในตัวกรองเวกเตอร์จะได้

$$W_n = P(n)X(n) = \lambda P(n)r_{dx}(n-1) + d(n)P(n)X(n) \quad (2.27)$$

และจากนิยามแบบเรียกซ้ำของ $r_{dx}(n)$ และ $P(n)$ ร่วมกันรูปแบบอื่นของ $g(n)$ สามารถแทนค่าสมการได้เป็น

$$\begin{aligned}
W_n &= \lambda[\lambda^{-1}P(n-1) - g(n)X^T(n)\lambda^{-1}P(n-1)]r_{dx}(n-1) + \\
&\quad d(n)g(n) \\
&= P(n-1)r_{dx}(n-1) - g(n)X^T(n)P(n-1)r_{dx}(n-1) + \\
&\quad d(n)g(n) \\
&= P(n-1)r_{dx}(n-1) + g(n)[d(n)X^T(n)P(n-1)r_{dx}(n-1)]
\end{aligned} \tag{2.28}$$

เมื่อ $W_n = P(n-1)r_{dx}(n-1)$ อยู่ในรูปของการปรับปรุงสมการสามารถเขียนได้ดังนี้

$$W_n = W_{n-1} + g(n)[d(n) - X^T(n)W_{n-1}] \tag{2.29}$$

กำหนดให้ $\alpha(n) = [d(n) - X^T(n)W_{n-1}]$ จะได้

$$W_n = W_{n-1} + g(n)\alpha(n) \tag{2.24}$$

และข้อผิดพลาดในการคำนวณหลังจากปรับปรุงตัวกรองเป็นดังนี้

$$e(n) = d(n) - X^T(n)W_n \tag{2.25}$$

และปัจจัยการแก้ไขหลังจากปรับปรุงตัวกรองแล้วเป็นดังนี้

$$\Delta W_{n-1} = g(n)\alpha(n) \tag{2.26}$$

และระเบียบวิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบเรียกซ้ำของลำดับที่ p สามารถสรุปได้ดังนี้

p คือ ลำดับตัวกรอง

λ คือ ปัจจัยประกอบที่ได้รับ

δ คือ ค่าเริ่มต้น $P(0)$

โดยกำหนดให้ $W(0) = 0$,

$$x(k) = 0, k = -p, \dots, -1,$$

$$d(k) = 0, k = -p, \dots, -1$$

$$P(0) = \delta I \text{ เมื่อ } I \text{ คือ เมทริกซ์เอกลักษณ์ของอันดับที่ } p + 1$$

จากนั้นการคำนวณในลำดับที่ $n = 1, 2, \dots$

$$x(n) = \begin{bmatrix} x(n) \\ x(n-1) \\ \vdots \\ x(n-p) \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

$$\alpha(n) = d(n) - X^T(n)W(n-1) \quad (2.28)$$

$$g(n) = P(n-1)X(n)\{\lambda + X^T(n)P(n)X(n)\}^{-1} \quad (2.29)$$

$$P(n) = \lambda^{-1}P(n-1) + g(n)X^T(n)\lambda^{-1}P(n-1) \quad (2.30)$$

$$W(n) = W(n-1) + \alpha(n)g(n) \quad (2.31)$$

จากการศึกษาที่ผ่านมาในปีพ.ศ. 2551 Yongsong Xiao และคณะได้ศึกษาระเบียบวิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบเรียกซ้ำ ในแบบจำลองการถดถอยอัตโนมัติของการควบคุม และใช้ทฤษฎีการเบนเข้าหากันของการประมาณค่าพารามิเตอร์โดยระเบียบวิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบเรียกซ้ำและได้เงื่อนไขที่พารามิเตอร์ประมาณการมาบรรจบกันอย่างต่อเนื่องกับพารามิเตอร์จริงภายใต้สัญญาณรบกวนและความแปรปรวนที่แตกต่างกันของจำนวนเงื่อนไขไม่จำกัด สิ่งนี้ช่วยยืนยันสมมติฐานที่ว่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนจะคงที่และมีช่วงเวลาที่มิลำดับสูง โดยระเบียบวิธีที่เสนอได้ผลเป็นที่น่าพอใจและประเมินผลสำเร็จในระบบจำลองและทดลองหลายระบบ [33]

ในปีพ.ศ. 2551 Constantin Paleologu และคณะได้ศึกษาประสิทธิภาพของระเบียบวิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบเรียกซ้ำในการควบคุมปัจจัยที่คาดไม่ถึง พารามิเตอร์นี้นำไปสู่การยอมรับระหว่างความสามารถในการติดตาม การผิดพลาดและความเสถียร ซึ่งมีการเสนอระเบียบวิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบเรียกซ้ำในการควบคุมปัจจัยที่คาดไม่ถึงสำหรับการระบุระบบ โดยทั่วไปเอาต์พุตที่คาดไม่ถึงของระบบถูกมองว่าเป็นสัญญาณคล้ายสัญญาณรบกวนซึ่งจะทำให้การควบคุมผิดพลาด สัญญาณนี้ควรได้รับการกู้คืนในสัญญาณข้อผิดพลาดของตัวกรองแบบปรับได้หลังจากที่สัญญาณนี้เบนเข้ากับวิธีการแก้ปัญหาที่แท้จริง เงื่อนไขนี้ใช้เพื่อควบคุมค่าของปัจจัยที่คาดไม่ถึง ผลการจำลองบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพที่ดีและความทนทานของระเบียบวิธีการที่เสนอ [34]

ในปีพ.ศ. 2557 Cheng Wang และ Tao Tang ได้ศึกษาปัญหาการระบุคุณลักษณะของความผิดพลาดเอาต์พุตเชิงเส้นในพารามิเตอร์ของระบบค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ ความยากในการระบุตัวตน คือ มีตัวแปรที่ไม่รู้จักอยู่ในเวกเตอร์ข้อมูล ด้วยแนวคิดในการระบุแบบจำลองเสริม ระเบียบวิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบเรียกซ้ำที่ใช้แบบจำลองเสริมได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อระบุพารามิเตอร์ของระบบที่เสนอ ผลการจำลองยืนยันว่าระเบียบวิธีการกำลังสองน้อยที่สุดแบบเรียกซ้ำสามารถระบุความผิดพลาดของระบบค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ทั้งในระบบเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้วิธีการที่นำเสนอสามารถขยายผลไปยังระบบสเกลาร์หรือระบบพหุตัวแปรอื่น ๆ ที่เป็นเชิงเส้นหรือไม่เป็นเชิงเส้นได้ [35]

และในปีพ.ศ. 2559 Feng Ding และคณะได้ศึกษาระบบทางกายภาพจำนวนมากที่สามารถสร้างแบบจำลองไม่เชิงเส้นของ Wiener ซึ่งประกอบด้วยระบบไดนามิกเชิงเส้นตามด้วยฟังก์ชันสถิติที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งฟังก์ชันไม่เชิงเส้นของเอาต์พุตจะถือว่าต่อเนื่องและพลิกกลับได้ ระเบียบวิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบเรียกซ้ำถูกนำเสนอโดยอิงตามแนวคิดการระบุโมเดลเสริม เพื่อแก้ปัญหาความยากของเวกเตอร์ข้อมูลรวมถึงตัวแปรที่ไม่สามารถวัดได้ ค่าตัวแปรที่ไม่รู้จักในเวกเตอร์ข้อมูลจะถูกแทนที่ด้วยการประมาณค่า ซึ่งคำนวณผ่านการประมาณค่าพารามิเตอร์ก่อนหน้า [36]

2.3 กระบวนการทำแห้ง (drying)

กระบวนการทำแห้งเป็นวิธีการถนอมอาหาร (food preservation) ที่นิยมใช้มานาน โดยเป็นกระบวนการที่ใช้หลักการการถ่ายโอนความร้อนและมวลสารในการลดความชื้นของอาหารด้วยดีเอ็น้ำส่วนใหญ่ในอาหารออก จนถึงระดับที่เชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคไม่สามารถเจริญเติบโตได้ ซึ่งผลิตภัณฑ์จะมีค่าแอกทีวิตี (water activity : a_w) ต่ำกว่า 0.60 [37] ทำให้สามารถเก็บรักษาอาหารไว้ได้นานขึ้น อีกทั้งปริมาณลดลงทำให้อาหารมีน้ำหนักเบาสะดวกต่อการขนส่ง โดยผลิตภัณฑ์อาหารแห้ง การบริโภคหรือการนำไปเป็นวัตถุดิบในการแปรรูปต่อด้วยวิธีอื่น ๆ ด้วย ซึ่งในปัจจุบันมีวิธีการกระบวนการทำแห้งหลากหลายวิธี [38] โดยในงานวิจัยนี้จะขอกกล่าวถึงกระบวนการทำแห้งที่เกี่ยวข้อง คือ กระบวนการทำแห้งแบบลมร้อน (hot air drying)

2.3.1 กระบวนการทำแห้งแบบลมร้อน (Hot air drying)

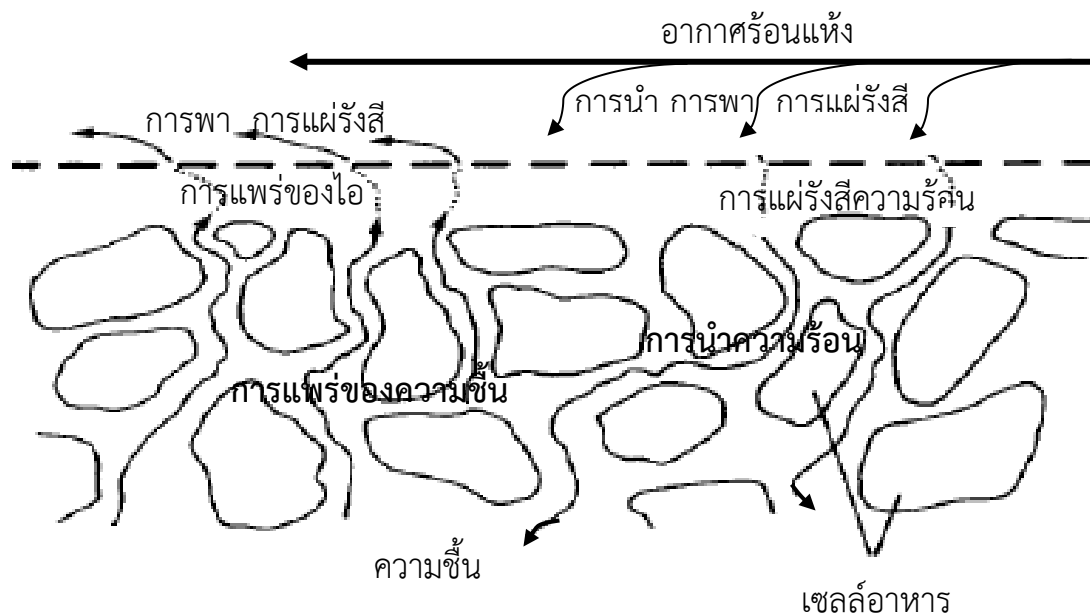
กระบวนการทำแห้งแบบลมร้อนเป็นวิธีการกระบวนการทำแห้งที่ใช้อากาศเป็นตัวกลางในการให้ความร้อนภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศ อากาศร้อนจะถ่ายเทความร้อนให้กับวัสดุที่เคลื่อนผ่าน โดยปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการทำแห้งคือ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วของอากาศ ซึ่งอากาศดังกล่าวส่วนใหญ่เป็นอากาศที่มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 50 – 90 องศาเซลเซียส [1-7, 37-42] กระบวนการทำแห้งแบบลมร้อนเป็นวิธีการกระบวนการทำแห้งที่เป็นที่นิยมมากที่สุดในอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นกระบวนการทำแห้งในอุตสาหกรรมมากกว่า 85 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากมีต้นทุนทั้งในการติดตั้งเครื่อง และการดำเนินการกระบวนการทำแห้งที่ต่ำ ซึ่งรวมถึงในอุตสาหกรรมอาหาร

2.3.1.1 การถ่ายเทความร้อนและมวลในกระบวนการทำแห้ง

การทำแห้งเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารไปกับเวลาที่ใช้ในการทำแห้ง โดยส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ทางเคมี หรือทางชีวเคมี รวมทั้งกลับไปส่งผลกระทบต่อกลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลสารเพิ่มอีกด้วย ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพวัสดุอาจเกิดการหดตัว (Shrinkage) การพองตัว (Puffing) การตกผลึก

(Crystallization) หรือการหลอมเหลว (Melting) ส่วนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีนั้นอาจนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงสี เนื้อสัมผัส (Texture) กลิ่นรสและคุณภาพอื่นๆ ของผลิตภัณฑ์ได้ด้วย สภาวะการทำแห้งที่แตกต่างกันอาจส่งผลให้ได้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalysts) ซึ่งมีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันโดยสิ้นเชิง ในกรณีของอาหารและวัสดุชีวภาพก็เช่นเดียวกัน กล่าวคือ สภาวะในการทำแห้งที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยอาจทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณลักษณะหรือฤทธิ์ทางชีวภาพที่เป็นที่ต้องการหรือไม่เป็นที่ต้องการได้

วิธีการในการถ่ายเทความร้อนให้กับวัสดุอาจมีได้หลากหลายวิธี ซึ่งการทำแห้งที่ศึกษานี้เป็นการทำแห้งแบบลมร้อนโดยการอาศัยตัวกลางที่เป็นอากาศในการพาความร้อน (Convective) เข้าสู่ผลิตภัณฑ์ ในส่วนของการถ่ายเทหรือการเคลื่อนที่ของความชื้น (ซึ่งมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ของการทำแห้งทั้งหมดเป็นน้ำ ในวัสดุนั้นอาจเป็นได้โดยหลายกลไก เช่น โดยการแพร่ของของเหลว (Liquid Diffusion) การแพร่ของไอ (Vapor Diffusion) การแพร่แบบ Knudsen (Knudsen Diffusion) นอกจากนี้ การเคลื่อนที่ของความชื้นยังอาจเกิดขึ้นเนื่องจากผลต่างของความดันอุทกสถิต (Hydrostatic Pressure) ซึ่งเกิดขึ้นในกรณีที่อัตราการระเหยของความชื้นภายในวัสดุมีค่าสูงกว่าอัตราการเคลื่อนที่ของไอน้ำผ่านโครงสร้างของวัสดุออกสู่ห้องทำแห้ง ดังในภาพที่ 2.10 ซึ่งแสดงกลไกในการถ่ายเทความร้อนและมวลสารที่อาจเกิดขึ้นได้ระหว่างกระบวนการทำแห้ง โดยอากาศร้อนได้ส่งผ่านความร้อนให้กับผลิตภัณฑ์ด้วยการนำ การพา และการแผ่รังสีความร้อนที่บริเวณผิวของผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้รับความร้อนส่งผ่านความร้อนไปใช้ในการระเหยความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์ด้วยการแผ่รังสี และการนำความร้อนเข้าจากผิวสู่ใจกลางผลิตภัณฑ์เป็นลำดับลงไปเมื่อปริมาณความชื้นบริเวณนั้นเหลือน้อย และผลิตภัณฑ์จะแพร่ความชื้นกลับขึ้นไปที่ผิวของผลิตภัณฑ์และการแพร่ของไอน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ให้กับอากาศร้อนแห้ง



ภาพที่ 2.10 การถ่ายเทความร้อนและมวลในกระบวนการทำแห้ง

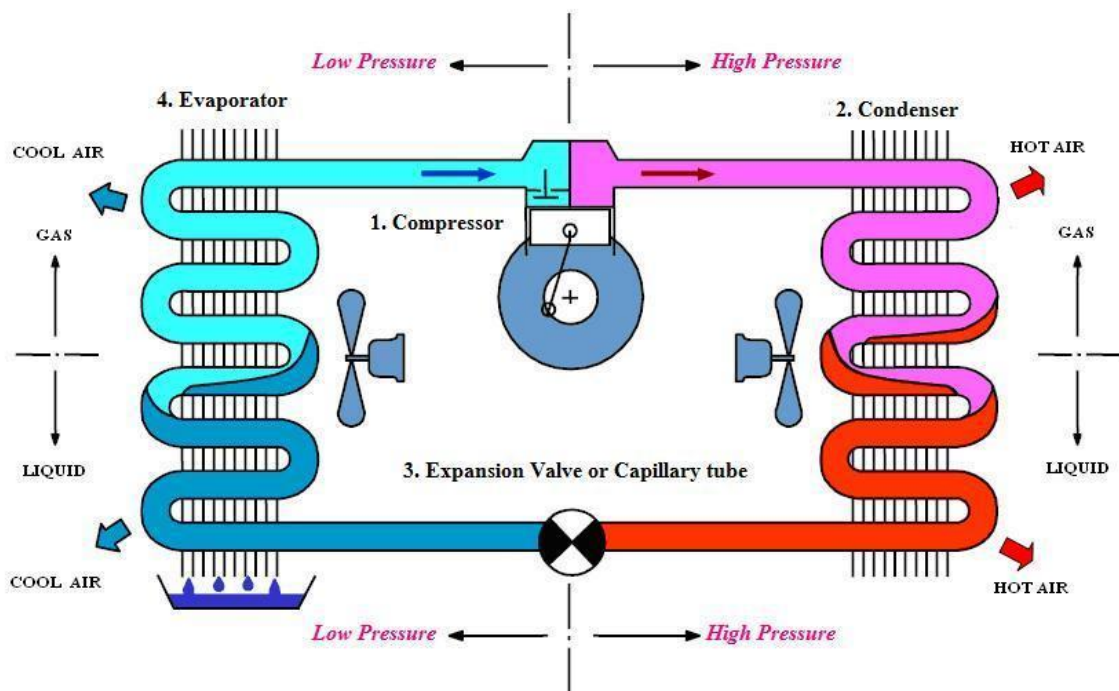
(ที่มา: <http://moisturecontrol.weebly.com/drying-curve.html>)

2.3.1.2 กระบวนการทำแห้งแบบลมร้อนที่ใช้ปั๊มความร้อน

กระบวนการทำแห้งจะใช้กระบวนการทำแห้งที่อุณหภูมิอากาศคงที่ ซึ่งกระบวนการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำทำให้ได้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ดีกว่าการใช้อุณหภูมิสูง แต่ระยะเวลาในกระบวนการทำแห้งนานขึ้น [43-44] จึงมีงานวิจัยที่พัฒนากระบวนการทำแห้งแบบลมร้อนที่ใช้ปั๊มความร้อน (Heat Pump Dryer, HPD) ได้รับความสนใจอย่างมากในอุตสาหกรรมอาหาร เนื่องจากสามารถนำเอาพลังงานมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง ด้วยการเก็บคืนความร้อนจากอากาศหลังการทำแห้งมาใช้ซ้ำ โดยทำงานในระบบปิดอย่างสมบูรณ์ ปั๊มความร้อนมีการสูญเสียปริมาณความร้อนจำเพาะต่ำ และกระบวนการทำแห้งแบบลมร้อนที่ใช้ปั๊มความร้อนเหมาะสมสำหรับวัตถุดิบที่ไวต่อความร้อนที่ต้องใช้อุณหภูมิต่ำผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพที่ดีในด้านสี กลิ่น และเนื้อสัมผัส สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการทำแห้ง และสภาพของอากาศภายนอกไม่มีผลต่อการทำแห้ง สามารถลดความชื้นในบรรยากาศได้ต่ำกว่ากระบวนการทำแห้งแบบลมร้อนอื่นๆ ปั๊มความร้อนทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงอุณหภูมิการทำแห้งที่ต่ำและช่วยประหยัดเวลา ซึ่งอยู่ระหว่าง 25 ถึง 70 องศาเซลเซียส ดังนั้นการศึกษานำปั๊มความร้อนมารวมกับการทำแห้งด้วยลมร้อนเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการทำแห้งและคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ

ระบบปั๊มความร้อนมีหลักการทำงานเช่นเดียวกับหลักการทำงานของระบบทำความเย็นทั่วไป และมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญของระบบเหมือนกันคือ เครื่องอัดไอ เครื่องควบแน่น วาล์วลดความดันและเครื่องทำระเหย แต่มีวัตถุประสงค์การใช้งานต่างกัน คือ ระบบทำความเย็นเป็นระบบที่

ต้องการลดอุณหภูมิภายในห้องลง แล้วดึงความร้อนผ่านเครื่องระเหยไปถ่ายเทด้านนอกห้องโดยผ่านทางเครื่องควบแน่น ขณะที่ระบบปั๊มความร้อนมีจุดประสงค์ที่ต้องการนำความร้อนที่ถ่ายเทผ่านเครื่องควบแน่นมาใช้ประโยชน์ ดังนั้น ระบบนี้จึงสามารถให้ความร้อนในการทำความแห้งได้ โดยใช้ความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องควบแน่น และทำการลดความชื้นสัมพัทธ์ด้วยเครื่องระเหย การทำความแห้งโดยใช้ปั๊มความร้อนเป็นการรวมระบบทำความแห้งและระบบปั๊มความร้อนเข้าด้วยกัน ซึ่งการทำงานของระบบหนึ่งส่งผลต่ออีกระบบอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ดังนั้นจะต้องวิเคราะห์ การทำงานของทั้งสองระบบไปพร้อมๆ กัน



ภาพที่ 2.11 ส่วนประกอบของวัฏจักรปั๊มความร้อนแบบอัดไอ

(ที่มา : <https://www.bloggang.com/m/viewdiary.php?id=supak-ttc20&month=03-2010&date=15&group=2&gblog=1>)

กระบวนการ 1-2 คือกระบวนการอัดไอที่ป้อนให้กับเครื่องอัดไอทำให้อุณหภูมิเอนทัลปีและความดันสารทำความเย็นเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งในทางทฤษฎีกระบวนการอัดไอจะเป็นกระบวนการเอนโทรปีคงที่แต่ในทางปฏิบัติกระบวนการอัดไอเป็นกระบวนการโพลีโทรปิกและเป็นกระบวนการที่ย้อนกลับไม่ได้ สาเหตุหลักมาจากเกิดการสูญเสียเนื่องมาจากการเสียดทานของอุปกรณ์ในเครื่องอัดไอซึ่งในความเป็นจริงสถานะของสารทำความเย็นที่เข้าสู่เครื่องอัดไอจะอยู่ในสถานะไอร้อนยวดยิ่งมากกว่าสถานะไออิ่มตัว

กระบวนการ 2-3 คือกระบวนการควบแน่นซึ่งสารทำความเย็นจะคายความร้อนให้กับอากาศ ทำแห้งเป็นการเพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศก่อนการทำแห้ง ในทางปฏิบัติความดันและอุณหภูมิของสารทำความเย็นจะไม่คงที่ตลอดทั้งเครื่องควบแน่น แต่จะลดลงไปตามระยะทางของท่อสารทำความเย็น และสารทำความเย็นที่ไหลภายในท่อจะมีลักษณะเป็นสองสถานะ สารทำความเย็นก่อนเข้าสู่วาล์วลดความดัน อาจอยู่ในสถานะที่สารทำความเย็นลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิของๆ เหลวอิมตัว ที่เรียกว่า Sub Cooling หรืออาจอยู่ในสถานะของเหลวอิมตัวก็ได้

กระบวนการ 3-4 คือกระบวนการที่สารทำความเย็นที่มีสถานะเป็นของเหลวจะถูกลดความดันลงโดยผ่านวาล์วลดความดัน ทำให้สารทำความเย็นมีอุณหภูมิลดลง และอยู่ในสถานะของผสมระหว่างของเหลวและไอน้ำ ซึ่งพร้อมที่จะรับความร้อนจากระบบกระบวนการ 3-4 เป็นกระบวนการเอนทัลปีคงที่

กระบวนการ 4-1 คือกระบวนการที่สารทำความเย็นรับความร้อนและสารทำความเย็น จะเปลี่ยนสถานะจากสารผสมเป็นไออิมตัว หรือในทางปฏิบัติมักจะเป็นไอร้อนยวดยิ่งก่อนเข้าสู่เครื่องอัดไอ เช่นเดียวกับกระบวนการ 2-3 ความดันและอุณหภูมิของสารทำความเย็นจะลดลงไปตามระยะทาง และสารทำความเย็นอยู่ในสถานะสองสถานะ

ในปี พ.ศ. 2549 Hawlader และคณะ (2006) พบว่าในการทำแห้งขิงด้วยปั๊มความร้อนแบบอัดแปรบรรยากาศที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 10 เปอร์เซ็นต์ ความเร็วลม 0.7 เมตรต่อวินาที ทำแห้งเป็นเวลา 8 ชั่วโมง พบว่าสามารถป้องกันการสูญเสียสารให้กลิ่นรสเฉพาะของขิง (6-gingerol) ได้สูงสุดเมื่อใช้ N_2 เปรียบเทียบกับ CO_2 และอากาศปกติตามลำดับ การใช้ N_2 สามารถป้องกันการเกิดปฏิกิริยาการเกิดออกซิเดชันในระหว่างการอบแห้ง เมื่อเทียบกับการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส ความดัน 600 ปาสคาล เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และการทำแห้งแบบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ความดัน 1,500 ปาสคาล เป็นเวลา 24 ชั่วโมง [4]

ในปี พ.ศ. 2552 Phatanayindee และคณะตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของถั่วแมคคาดาเมียที่ทำแห้งทั้งเปลือกโดยการใช้ปั๊มความร้อนที่ 38 องศาเซลเซียส และตามด้วยการทำแห้งแบบอุโมงค์ที่ 55 องศาเซลเซียส ทำแห้งจนความชื้นลดลงเหลือ 1-2% เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก พบว่าการทำแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมกับการทำแห้งแบบอุโมงค์สามารถลดระยะเวลาในการทำแห้งได้ สามารถรักษาคุณภาพของไขมันไม่อิ่มตัวชนิดดีและชะลอการเกิดสารให้กลิ่นรสที่ไม่ต้องการในผลิตภัณฑ์ถั่วแมคคาดาเมียอบแห้งได้ดีกว่าวิธีการทำแห้งแบบเดิมที่ใช้การทำแห้งแบบลมร้อนอย่างเดียวปริมาณกรดไขมันหลัก ค่าเปอร์ออกไซด์ ปริมาณกรดไขมันอิสระ และสี [2]

ในปีพ.ศ. 2552 Borompichaichartkul และคณะศึกษาการใช้ป้มความร้อนร่วมกับการทำแห้งด้วยลมร้อนในการทำแห้งถั่วแมคคาดาเมียทั้งกะลาพบว่าการใช้ป้มความร้อนที่ 40 องศาเซลเซียสร่วมด้วยเครื่องทำแห้งลมร้อนที่ 50 องศาเซลเซียส ทำแห้งจนความชื้นลดลงเหลือ 1-2 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก สามารถชะลอการเกิดกลิ่นหืนและสีน้ำตาลในเนื้อแมคคาเดเมียได้ดีกว่าวิธีที่ใช้ในอุตสาหกรรมซึ่งใช้เวลานานใน การอบแห้งถึง 17 วัน ในขณะที่การใช้ป้มความร้อนร่วมกับลมร้อนสามารถลดความชื้นลงให้อยู่ในระดับที่ต้องการได้ภายใน 3 วัน อุณหภูมิและความชื้นก่อนการทำแห้งมีผลต่อค่าเปอร์ออกไซด์อย่างมีนัยสำคัญ และอุณหภูมิการอบแห้งที่สูงขึ้นนำไปสู่ค่าเปอร์ออกไซด์ที่สูงขึ้น [45]

และในปี พ.ศ. 2553 Borompichaichartkul และคณะศึกษาการทำแห้งถั่วแมคคาดาเมียทั้งเปลือกด้วยป้มความร้อนแบบหลายขั้นตอนแบบปรับบรรยากาศ โดยใช้ก๊าซไนโตรเจนอากาศเป็นตัวกลางในการถ่ายโอนความร้อนให้แก่ถั่วแมคคาดาเมีย การทำแห้งใช้ป้มความร้อนทำแห้งแบบ 2 ขั้นตอนให้อุณหภูมิช่วงแรกเป็น 40 องศาเซลเซียสและปรับอุณหภูมิในช่วงที่ 2 เป็น 50 และ 60 องศาเซลเซียสทำแห้งจนกระทั่งความชื้นของถั่วแมคคาดาเมียลดลงเหลือ 1-2 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียกพบว่าสภาวะการทำแห้ง 40 องศาเซลเซียสตามด้วย 50 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการทำแห้งนานกว่า 40 องศาเซลเซียสตามด้วย 60 องศาเซลเซียสและการใช้ไนโตรเจนเป็นตัวกลางในการถ่ายโอนความร้อนเพียงอย่างเดียว สามารถรักษากลิ่นรสของแมคคาเดเมียได้ดีกว่าใช้อากาศเป็นตัวกลางทั้งสองขั้นตอน สำหรับค่าสี(L*, a*, b*) มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ซึ่งค่า L* และ a* ของภายในเมล็ดถั่วแมคคาดาเมีย ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) แต่อุณหภูมิและตัวกลางส่งผลต่อกลิ่นรสของแมคคาดาเมีย มากกว่าการเปลี่ยนแปลงสี การทำแห้งโดยใช้ป้มความร้อนแบบสองขั้นตอนร่วมกับการปรับบรรยากาศจึงเหมาะสมกับอาหารที่ไวต่อความร้อนที่มีไขมันสูงหรือสารหอมระเหย [56]

ในปี พ.ศ. 2565 Zhang และคณะได้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการทำแห้งเห็ดชิตาเกะที่อุณหภูมิแปรผันตามคะแนนที่ครอบคลุมในระบบการทำแห้งด้วยป้มความร้อนแบบสลับโหมด ได้ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อใช้งานโดยเฉพาะ กระบวนการทำแห้งด้วยอุณหภูมิแปรผันรวมถึงสี่ขั้นตอนที่อุณหภูมิการทำแห้ง 35 45 55 และ 65 องศาเซลเซียสตามลำดับ พบว่าเวลาในการทำแห้งที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดส่งผลต่ออัตราส่วนการคินตัวของเห็ดชิตาเกะแห้ง และระยะเวลาการทำแห้งที่ 35 องศาเซลเซียสเป็นปัจจัยสำคัญส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพของป้มความร้อน นอกจากนี้ ตามคะแนนที่ครอบคลุมเวลาอบแห้งที่เหมาะสมที่สุดก็คือ 2.4 3.3 5.6 และ 2.6 ชั่วโมง ตามลำดับคะแนนโดยรวมของกระบวนการทำแห้งที่เหมาะสมคือ 0.837 ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิกงที่ 49% [57]

2.3.2 การทดสอบการทำแห้งเปลือกมังคุด

เปลือกมังคุดเป็นวัสดุที่มีสารสำคัญอย่างเช่นแซนโทนที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูง ซึ่งเหมาะกับการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำ โดยมีการศึกษาผลของอุณหภูมิในการทำแห้งต่อปริมาณแซนโทนเช่นในปี พ.ศ. 2554 Peamsuk Suvarnakuta และคณะได้ศึกษาผลของวิธีการและสภาวะการทำแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระของแซนโทนในเปลือกมังคุด โดยเปลือกมังคุดผ่านการทำด้วยลมร้อน การทำแห้งแบบสุญญากาศ และการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งแรงดันต่ำที่อุณหภูมิ 60 75 และ 90 องศาเซลเซียส ปริมาณแซนโทนถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระประเมินโดยความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระวิธีการ DPPH และการวิเคราะห์ ABTS พบว่าวิธีการทำให้แห้งส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของแซนโทน และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระอย่างมีนัยสำคัญ โดยการทำแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นการทำแห้งที่เหมาะสมเพื่อรักษาแซนโทนในเปลือกมังคุด [47]

ในปีพ.ศ. 2555 Rungsinee Sothornvit ได้ศึกษาเปลือกมังคุดที่ประกอบด้วยสารประกอบโพลีฟีนอลที่เรียกว่าแซนโทน ซึ่งให้ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่มีประสิทธิภาพ ดังนั้นการผลิตเปลือกมังคุดผงอาจนำไปสู่ผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพและช่วยลดของเสียในอุตสาหกรรมอาหาร โดยกำหนดผลของกระบวนการทำแห้ง รวมถึงอุณหภูมิที่แตกต่างกันต่อคุณภาพของเปลือกมังคุดผงและผลของการเติมโพลีเมอร์ต่าง ๆ ซึ่งพบว่าการประเมินทางประสาทสัมผัสของเปลือกมังคุดผงที่ผ่านการทำแห้งแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 และ 80 องศาเซลเซียส ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อผ่านการทำแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จะแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งคุณภาพทางประสาทสัมผัสที่ดีที่สุดคือการทำแห้งแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และถูกนำมาศึกษาผลของการเติมโพลีเมอร์ต่อปริมาณแซนโทนต่อ โดยการรวมเวย์โปรตีนไฮโดรไลสเข้ากับเปลือกมังคุดผงเพิ่มปริมาณแซนโทน (15.20 มก./กก.) เมื่อเทียบกับการเติมมอลโทเดกซ์ทริน [48]

และในปีพ.ศ. 2563 Mo'nica Leon Garcí a และคณะได้ศึกษาสารต้านอนุมูลอิสระฟีนอลิกของเปลือกมังคุด ในระหว่างการแปรรูปด้วยกระบวนการทำแห้งและสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพสำหรับการหาสภาวะที่เหมาะสมเพื่อให้สามารถเพิ่มการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดจากเปลือกมังคุดแห้งให้สูงสุด โดยในกระบวนการทำให้แห้งเปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศที่ 50 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วลม 1 เมตรต่อวินาที กระบวนการสกัดทำภายใต้การสกัดแบบธรรมดาและด้วยอัลตราโซนิคที่ 400 วัตต์ ผลการศึกษาพบว่าสภาวะการทำงานที่ดีที่สุดในการเพิ่มความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของเปลือกมังคุดคืออุณหภูมิอากาศของการทำแห้งที่ 70 องศาเซลเซียส และใช้อัลตราโซนิคกำลังสูงเป็นวิธีสกัด [49]

2.3.3 ปริมาณการใช้พลังงานสำหรับกระบวนการทำแห้ง

ในการศึกษาถึงประสิทธิภาพของการทำแห้งหรือการควบคุมการทำแห้งอีกทางหนึ่งคือ การศึกษาปริมาณการใช้พลังงานของกระบวนการซึ่งมีงานวิจัยที่ศึกษาเปรียบเทียบมากมาย เช่น ในปีพ.ศ. 2554 Ali Motevali และคณะได้ศึกษาการประเมินการใช้พลังงานสำหรับการทำแห้งขึ้นเห็ดโดยใช้วิธีการทำให้แห้งแบบต่าง ๆ ได้แก่ ลมร้อน ไมโครเวฟ สุญญากาศ อินฟราเรด ไมโครเวฟ สุญญากาศ และอินฟราเรดลมร้อน พบว่าระดับการใช้พลังงานต่ำสุดและสูงสุดในการทำแห้งขึ้นเห็ดมีความสัมพันธ์กับเครื่องไมโครเวฟและเครื่องทำแห้งสุญญากาศตามลำดับ การใช้สุญญากาศร่วมกับการทำแห้งด้วยไมโครเวฟเพิ่มการใช้พลังงานเมื่อเทียบกับการทำแห้งด้วยไมโครเวฟเพียงอย่างเดียว การใช้พลังงานของเครื่องทำแห้งแบบลมร้อนมีแนวโน้มลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นและมีแนวโน้มสูงขึ้นตามความเร็วลมที่เพิ่มขึ้น สำหรับการทำแห้งขึ้นเห็ดโดยใช้รังสีอินฟราเรด พบว่าความเร็วลมที่เพิ่มขึ้นจะเพิ่มเวลาในการทำแห้งและส่งผลให้เพิ่มปริมาณการใช้พลังงาน การทำแห้งแบบลมร้อนร่วมกับการทำแห้งแบบอินฟราเรดช่วยลดการใช้พลังงานเมื่อเทียบกับการทำแห้งด้วยอินฟราเรดเพียงอย่างเดียวแต่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการทำแห้งแบบลมร้อน ในเครื่องทำลมแห้งแบบใช้ไมโครเวฟ-สุญญากาศแบบผสม เวลาในการทำให้แห้งและส่งผลให้สิ้นเปลืองพลังงานลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องทำแห้งแบบสุญญากาศ [50]

ในปีพ.ศ. 2559 Onu Chijioke E. และคณะได้ศึกษาการทำแห้งมันเทศแบบชั้นบางโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบลมร้อนหมุนเวียนเพื่อกำหนดความสามารถในการกระจายความชื้น พลังงาน กระตุ้น และการใช้พลังงานจำเพาะ ต่อผลของตัวแปรต่าง ๆ เช่น ความหนาของชั้น อุณหภูมิ และความเร็วลมในการทำแห้งมันเทศ พบว่าความเร็วลมและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราการทำให้แห้งเพิ่มขึ้น การกระจายความชื้นที่มีประสิทธิภาพอยู่ในช่วง 3.52×10^{-10} ถึง 6.76×10^{-10} ตารางเมตรต่อวินาที สำหรับความเร็วลมและอุณหภูมิที่แตกต่างกัน พลังงานกระตุ้นแตกต่างกันไปตั้งแต่ 28.06 ถึง 37.36 กิโลจูลต่อโมล ในขณะที่การใช้พลังงานจำเพาะอยู่ระหว่าง 166.72 ถึง 232.70 กิโลวัตต์ต่ออวกาศต่อกรัม [51]

ในปีพ.ศ. 2564 Lihua Ye และคณะได้ศึกษาเทคนิคการทำแห้งแบบลมร้อนที่สภาวะต่าง ๆ เพื่อกำหนดความต้องการพลังงานสำหรับการทำแห้งใบสะระแหน่ โดยศึกษาอุณหภูมิการทำแห้งที่ 30 40 และ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วลมที่ 1.0 1.5 และ 2.5 เมตรต่อวินาที เครื่องทำลมแห้งแบบอินฟราเรดและแบบไฮบริดดำเนินการที่ความชื้นอินฟราเรด 1,000 2,000 และ 4,000 วัตต์ต่อตารางเมตร พบว่าการใช้พลังงานลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศในการทำแห้ง ขณะที่การใช้พลังงานลดลงโดยการเพิ่มความชื้นของอินฟราเรดโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบไฮบริดและอินฟราเรด แต่ความเร็วลมที่เพิ่มขึ้นทำให้พลังงานเพิ่มขึ้น โดยปริมาณการใช้พลังงานจำเพาะของการทำแห้งที่ 50 องศาเซลเซียสและอินฟราเรดที่ความชื้น 4,000 วัตต์ต่อตารางเมตรขึ้นต่ำเท่ากับ 2.6

เมกะจูลต่อกิโลกรัม ในขณะที่ปริมาณการใช้พลังงานจำเพาะสูงสุดเท่ากับ 19.7 เมกะจูลต่อกิโลกรัม สำหรับการทำให้แห้งที่ 30 องศาเซลเซียสและอินฟราเรดที่ความเข้ม 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร ความเร็วลม 1 เมตรต่อวินาที พบว่าใช้เครื่องทำลมแห้งแบบไฮบริดมีการใช้ปริมาณพลังงานน้อยกว่า เครื่องทำแห้งแบบอินฟราเรดและแบบลมร้อนถึง 92.1 และ 49.4 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำให้แห้งสละแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสและอินฟราเรดที่ความเข้ม 4,000 วัตต์ต่อตารางเมตร ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที [52]

บทที่ 3

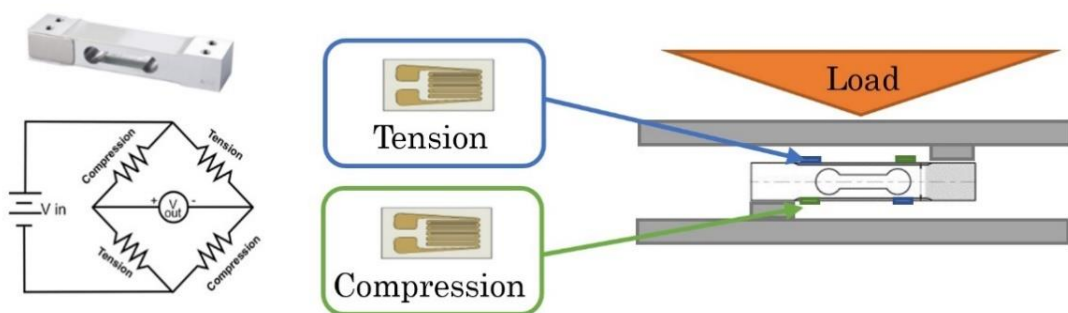
วิธีดำเนินการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ ได้ออกแบบวิธีดำเนินการวิจัยให้สอดคล้องตามวัตถุประสงค์ ซึ่งมีวิธีดำเนินการวิจัยในหัวข้อที่ 3.1 - 3.3 โดยในหัวข้อย่อยที่ 3.1 เป็นวิธีดำเนินการศึกษาการสอบเทียบปริมาณความชื้นของอาหารแบบภายในห้องทำแห้งและชดเชยผลของอุณหภูมิต่อตัวรับรู้น้ำหนักให้มีความแม่นยำ ในหัวข้อย่อยที่ 3.2 เป็นวิธีดำเนินการศึกษาแบบจำลองของการปรับอุณหภูมิอากาศเพื่อควบคุมขีดจำกัดอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์แบบอัตโนมัติในกระบวนการทำแห้งแบบลมร้อน และในหัวข้อสุดท้ายหัวข้อย่อยที่ 3.3 เป็นวิธีการทดสอบระบบการควบคุมกระบวนการทำแห้งด้วยการทำแห้งเปลือกมังคุด

3.1 การสอบเทียบตัวรับรู้น้ำหนักสำหรับการวัดน้ำหนักและชดเชยผลของอุณหภูมิในห้องทำแห้ง

3.1.1 ตัวรับรู้น้ำหนัก

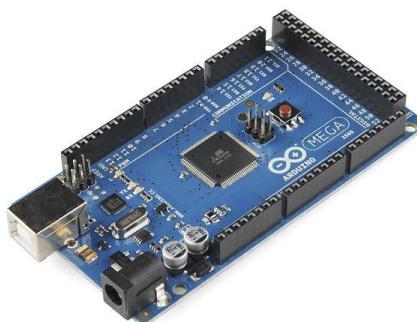
งานวิจัยนี้ใช้ตัวรับรู้น้ำหนักแบบจุดเดี่ยวที่ออกแบบเพื่อใช้กับแพลตฟอร์มขนาดเล็ก ซึ่งกำหนดให้ใช้สำหรับการวัดค่าน้ำหนักน้อยกว่า 1 ตัน เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งตัวรับรู้น้ำหนักควรได้รับการแก้ไขที่ศูนย์กลางของแพลตฟอร์ม ในงานวิจัยนี้ใช้ตัวรับรู้น้ำหนักรุ่น 61022-3KG-0000M (Sensortronics, USA) วัสดุทำจากอะลูมิเนียมที่มีความสามารถในการชั่งน้ำหนักสูงสุดได้ 3 กิโลกรัม สามารถใช้งานในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 0 ถึง 70 องศาเซลเซียส มีค่าสัญญาณขาออกทั้งหมด 3.0 มิลลิโวลต์ต่อโวลต์ ภาพที่ 3.1 แสดงแผนผังไดอะแกรมของวงจรส่วนประกอบและการกำหนดค่าการติดตั้ง



ภาพที่ 3.1 แผนผังไดอะแกรมของส่วนประกอบและการกำหนดค่าการติดตั้งของตัวรับรู้น้ำหนักแบบจุดเดี่ยว

3.1.2 บอร์ด Arduino

การแปลงสัญญาณไฟฟ้าเป็นน้ำหนักรจะให้การประมวลผลผ่านบอร์ด Arduino Mega 2560 ที่มีหน่วยประมวลผลหลักเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega2560 ขนาด 8 บิต 256 กิโลไบต์ มีช่องติดต่อสื่อสาร 4 ช่องสัญญาณและมีอัตราการรับส่งข้อมูล 16 เมกะเฮิร์ตซ์ หน่วยความจำหลัก 4 กิโลไบต์ และหน่วยความจำรอง 8 กิโลไบต์ มีช่องรับส่งสัญญาณอนาล็อก 16 ช่องสัญญาณและดิจิตอล 10 ช่องสัญญาณ ใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 4.5-5.5 โวลต์



ภาพที่ 3.2 บอร์ด Arduino Mega 2560

3.1.3 การสอบเทียบตัวรับรู้น้ำหนักสำหรับการวัดน้ำหนักและชดเชยผลของอุณหภูมิ

3.1.3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การรวบรวมข้อมูลสัญญาณจากตัวรับรู้น้ำหนักจะถูกส่งข้อมูลไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 ผ่านทางตัวขยายสัญญาณ HX711 และสามารถคำนวณค่าน้ำหนักได้โดยใช้สูตรดังสมการที่ 3.1 การหาค่าคงที่ของสมการโดยติดตั้งตัวรับรู้น้ำหนักในห้องทำแห้งสำหรับการควบคุมอุณหภูมิคงที่ที่ 25 องศาเซลเซียส แล้วใช้ตุ้มน้ำหนักมาตรฐานสำหรับการสอบเทียบที่ประกอบด้วยน้ำหนัก 200 1,000 และ 2000 กรัม เก็บข้อมูลจำนวน 1,000 ข้อมูล

$$W(t) = \frac{V-Z}{C} \quad (3.1)$$

| | | |
|-------|--------|---|
| เมื่อ | $W(t)$ | คือ น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม) |
| | V | คือ แรงดันสัญญาณที่ตรวจพบโดยตัวรับรู้น้ำหนัก (มิลลิโวลต์) |
| | Z | คือ ตัวแปรแก้ไขสำหรับชดเชยสัญญาณ (มิลลิโวลต์) |
| | C | คือ ตัวแปรแก้ไขเพื่อความแม่นยำในการวัด |

สำหรับการชดเชยผลของอุณหภูมิโดยศึกษาผลความผิดพลาดของสัญญาณไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิในห้องทำแห้งเปลี่ยนไป ซึ่งสามารถใช้สมการถดถอยมาปรับปรุงร่วมกับสมการที่ 3.1 โดยพิจารณาจากผลกระทบของอุณหภูมิในการวัดค่าน้ำหนักจะได้สมการต่อไปนี้

$$W(t) = \frac{V - Z_T - e_T}{c} \quad (3.2)$$

$$x = T - T_0 \quad (3.3)$$

$$e_T = y = a_0x^1 + a_1x^2 + a_2x^3 + a_3x^4 + \dots + a_nx^n + b \quad (3.4)$$

| | | |
|-------|----------------|---|
| เมื่อ | Z_T | คือ ตัวแปรแก้ไขสำหรับชดเชยสัญญาณ ณ อุณหภูมิเริ่มต้น (มิลลิโวลต์) |
| | e_T หรือ y | คือ สัญญาณผิดพลาด ณ อุณหภูมิที่วัดได้ (มิลลิโวลต์) |
| | T_0 | คือ อุณหภูมิสอบเทียบที่รู้จัก (องศาเซลเซียส) |
| | x | คือ ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิที่วัดได้ (องศาเซลเซียส) |

สำหรับการหาค่าคงที่ของสมการถดถอยในสมการที่ 3.4 ข้อมูลนำมากำหนดค่าสัมประสิทธิ์ของการถดถอย a_i และ b_i โดยที่ $i = 0, 1, \dots, n$ สามารถหาได้ด้วยการติดตั้งตัวรับรู้น้ำหนักในห้องทำแห้งสำหรับการควบคุมอุณหภูมิจากนั้นทำการเพิ่มอุณหภูมิในห้องทำแห้งตั้งแต่ 25 -70 องศาเซลเซียส เก็บข้อมูลทุก 0.1 วินาทีตลอดกระบวนการ ทำการทดสอบ 3 ครั้งแล้วนำมาคำนวณ

3.1.3.2 ตัวกรองสัญญาณ

การจัดสัญญาณรบกวนในระบบการวัดเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการวัด กล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ ระบบการส่งสัญญาณทั้งหมดที่มีสัญญาณตรวจจับเป็นอัตราส่วนสัญญาณ (signal) ต่อสัญญาณรบกวนสูง (Noise) สิ่งนี้สามารถทำได้โดยการใช้ตัวกรองในระบบ ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ตัวกรองความถี่ต่ำและตัวกรองคาลมานสำหรับการกรองสัญญาณที่ไม่ต้องการ ซึ่งอาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของระบบทำแห้งเนื่องจากการวางตัวรับรู้น้ำหนักภายในห้องทำแห้ง

1) ตัวกรองความถี่ต่ำ

ขั้นตอนแรกเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการวัดน้ำหนัก คือ การใช้ตัวกรองความถี่ต่ำ หรือ ตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving average filter) ที่ใช้การปรับข้อมูลสัญญาณขาเข้าที่ได้จากตัวรับรู้น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับเวลา ตัวกรองนี้มีการประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย เพราะช่วย

ลดสัญญาณรบกวนแบบสุ่มในขณะที่ยังคงตอบสนองการวัดน้ำหนักรให้แม่นยำที่สุด และนำสัญญาณขาออกจากรองรับสัญญาณมาคำนวณค่าน้ำหนักต่อไป ดังแสดงในสมการที่ 3.5

$$y[i] = \left(\frac{1}{M}\right) \sum_{j=0}^{M-1} x[i + j] \quad (3.5)$$

| | | |
|-------|-----|--|
| เมื่อ | M | คือ จำนวนจุดข้อมูลโดยเฉลี่ยเมื่อเทียบกับเวลา |
| | y | คือ สัญญาณขาออกจากรองรับสัญญาณ |
| | x | คือ สัญญาณขาเข้าจากรองรับน้ำหนัก |

2) ตัวกรองคาลมาน

ขั้นตอนที่สองที่นำมาใช้ คือ ตัวกรองคาลมาน ที่ใช้หลักการของความน่าจะเป็นในการสร้างสมมติฐานของสัญญาณที่กำลังจะเกิดขึ้น โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากสัญญาณก่อนหน้ากับค่าสัญญาณของตัวรับน้ำหนักปัจจุบันในการสร้างและปรับปรุงความน่าจะเป็น ซึ่งเป็นการประเมินที่ดีที่สุดที่แตกต่างจากตัวกรองความถี่ต่ำ โดยมีข้อได้เปรียบเหนือในแง่ที่เป็นตัวทำนายซึ่งมีประสิทธิภาพมากกว่าตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ โดยการกำหนดตัวกรองในรูปแบบพื้นที่ของสัญญาณในเวลาที่ไม่ต่อเนื่อง (k) และเวลาก่อนหน้า ($k - 1$) ซึ่งสามารถใช้ตัวกรองได้อย่างง่ายในสองส่วนหลักที่เป็นการทำนายและการปรับปรุงค่าการทำนาย จากนั้นใช้การวนซ้ำของขั้นตอนวิธีการโดยสรุปได้ในสามขั้นตอนดังสมการที่ 3.6 – 3.8

$$\text{คำนวณค่าคาลมาน : } K[k] = [P(k) + R(k)]^{-1}, 0 \leq K(k) \leq 1 \quad (3.6)$$

$$\text{ปรับปรุงการประมาณ : } X[k] = X(k - 1) + K(k)[W(k) - X(k - 1)] \quad (3.7)$$

$$\text{ปรับปรุงค่าผิดพลาดใหม่ในการประมาณ : } P[k] = P(k - 1)[1 - K(k)] \quad (3.8)$$

| | | |
|-------|--------|--|
| เมื่อ | K | คือ ค่าคาลมาน |
| | P | คือ ค่าผิดพลาดในการประมาณ |
| | $R(k)$ | คือ ค่าผิดพลาดที่ได้จากการวัด |
| | W | คือ ค่าน้ำหนักที่ได้จากการวัดด้วยตัวรับน้ำหนัก |
| | X | คือ ค่าประมาณน้ำหนัก |

วิธีการทำสอบเปรียบเทียบตัวกรองเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการวัดค่าน้ำหนักสามารถทำได้โดยการติดตั้งตัวรับน้ำหนักภายในห้องทำแห้ง แล้วทดสอบการควบคุมอุณหภูมิจากนั้นทำการเพิ่ม

อุณหภูมิในห้องทำแห้งตั้งแต่ 25 -70 องศาเซลเซียส การแล้วใช้ตุ้มน้ำหนักมาตรฐานสำหรับการเปรียบเทียบที่ประกอบด้วยน้ำหนัก 200 1,000 และ 2000 กรัม เก็บข้อมูล 1800 จุดที่น้ำหนัก 0 200 1,000 และ 2,000 กรัม

3.2 การศึกษาแบบจำลองของการปรับอุณหภูมิอากาศเพื่อควบคุมชนิดจำกัดอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์แบบอัตโนมัติในกระบวนการทำแห้งแบบลมร้อน

3.2.1 ตัวรับรู้อุณหภูมิผิว

ตัวรับรู้สำหรับการวัดอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้เป็นตัวรับรู้อุณหภูมิแบบไม่สัมผัส (Infrared Temperature sensor) รุ่น PC151MT-0 (Calex Electronics Ltd, United Kingdom) มีความละเอียดในการวัด 0.1 องศาเซลเซียส ค่าความคลาดเคลื่อน ± 0.5 องศาเซลเซียส สามารถวัดอุณหภูมิได้ในช่วง 0 – 250 องศาเซลเซียส สัญญาณที่วัดเป็นแบบ two-wire 4-20 mA ระยะการวัด 15 : 1 ใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 24 โวลต์



ภาพที่ 3.3 ตัวรับรู้วัดอุณหภูมิแบบไม่สัมผัสรุ่น PC151MT-0 (Calex Electronics Ltd, United Kingdom)

3.2.2 ซอฟต์แวร์ Labview

ซอฟต์แวร์ Labview เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ระบบวิศวกรรมสำหรับแอปพลิเคชันที่ใช้ในการวัดและควบคุมโดยสามารถเข้าถึงข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับฮาร์ดแวร์ได้อย่างรวดเร็ว โดยภาษาโปรแกรมที่ใช้ใน LabVIEW คือ ภาษา G ซึ่งเป็นการเขียนโปรแกรมแบบเส้นทางการไหลของข้อมูล (Dataflow) ด้วยการกำหนดโครงสร้างของแผนภาพแบบกราฟิกเชื่อมต่อโหนดฟังก์ชันต่าง ๆ ซึ่งสามารถประมวลผลแบบขนานได้ สามารถติดต่อกับฮาร์ดแวร์แบบมัลติโปรเซสซึ่งรวมทั้งมัลติเธรด นอกจากนี้ยังสามารถสร้างส่วนติดต่อกับผู้ใช้งานได้

3.2.3 แบบจำลองของการปรับอุณหภูมิอากาศเพื่อควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์แบบอัตโนมัติ

3.2.3.1 การปรับอุณหภูมิอากาศโดยใช้ค่าเวลาคงที่ (Time Constant : τ)

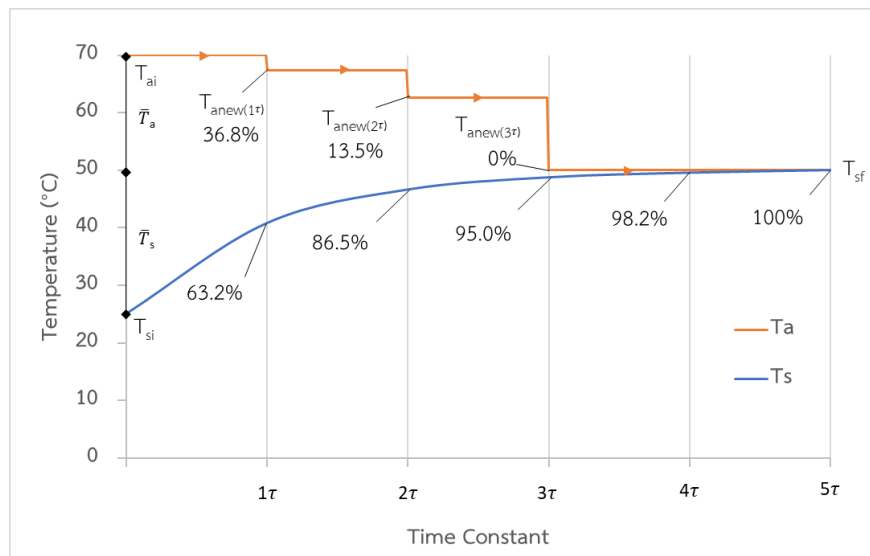
การศึกษานี้ออกแบบให้มีการปรับอุณหภูมิอากาศแบบขั้นตอนตามค่าเวลาคงที่ที่ตอบสนองต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิผิวผลิตภัณฑ์ ซึ่งสามารถคำนวณอัตราส่วนอุณหภูมิตามค่าเวลาคงที่ได้จากสมการที่ 3.9 ที่มาจาก Lumped element model [29, 32]

$$\bar{T} = \frac{T - T_i}{T_f - T_i} = 1 - e^{\left(\frac{-t}{\tau}\right)} \quad (3.9)$$

| | | |
|-------|-----------|--|
| เมื่อ | \bar{T} | คือ อัตราส่วนอุณหภูมิในกระบวนการทำแห้ง |
| | T | คือ ค่าอุณหภูมิที่เวลาใดๆ (องศาเซลเซียส) |
| | T_i | คือ ค่าอุณหภูมิเริ่มต้น (องศาเซลเซียส) |
| | T_f | คือ ค่าอุณหภูมิสุดท้าย (องศาเซลเซียส) |
| | t | คือ เวลาทั้งหมดของกระบวนการทำแห้ง (นาที) |
| | τ | คือ ค่าเวลาคงที่ |

โดยการตอบสนองในค่าเวลาคงที่ครั้งแรก τ เพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 63.2 เปอร์เซ็นต์ ในค่าเวลาคงที่สองเวลา 2τ การตอบสนองจะตรงกับ 86.5 เปอร์เซ็นต์ และที่ 3τ 4τ และ 5τ จะมีการตอบสนองที่ 95.98.2 และ 99.3 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งช่วงเวลาของ 3τ 4τ และ 5τ ค่ามีค่าใกล้เคียงกันและใกล้เคียงกับ 100 เปอร์เซ็นต์ เพื่อให้ง่ายต่อการควบคุมจึงรวมเป็นการตอบสนองเดียวกัน ดังนั้นการควบคุมอุณหภูมิอากาศจึงมีการปรับค่าอุณหภูมิอากาศในกระบวนการ 3 ครั้ง ที่ 1τ , 2τ และ 3τ ลักษณะของเวลาคงที่นี้นำมาใช้ในการตอบสนองอุณหภูมิในออกแบบ

โดยระบบควบคุมจะทำแห้งที่อุณหภูมิอากาศเริ่มต้นจนกระทั่งตรวจสอบพบอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์ที่เพิ่มขึ้นมาถึง 1τ (63.2 เปอร์เซ็นต์) ระบบควบคุมจะลดอุณหภูมิอากาศลง 1τ (36.8 เปอร์เซ็นต์) จากนั้นคงอุณหภูมิอากาศไว้จนกระทั่งตรวจสอบพบอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์ที่เพิ่มขึ้นมาถึง 2τ (86.5 เปอร์เซ็นต์) ระบบควบคุมจะลดอุณหภูมิอากาศลง 2τ (13.5 เปอร์เซ็นต์) และจากนั้นคงอุณหภูมิอากาศไว้จนกระทั่งตรวจสอบพบอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์ที่เพิ่มขึ้นมาถึง 3τ (95.0 เปอร์เซ็นต์) ระบบควบคุมจะลดอุณหภูมิอากาศลง 3τ (0 เปอร์เซ็นต์) ดังภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 กราฟค่าเวลาคงที่ของการบวนการในการควบคุม

3.2.3.2 สถาปัตยกรรมควบคุมและอัลกอริทึม (Control architecture and algorithm)

อัลกอริทึมที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองเพื่อการควบคุมกระบวนการทำแห้งขึ้นอยู่กับอัลกอริทึมแบบเรียกซ้ำน้อยที่สุดสำหรับการตรวจจับสัญญาณจากตัวรับรู้อุณหภูมิ อัลกอริทึมนี้มีประสิทธิภาพสูงต่อสัญญาณรบกวนและถือเป็นตัวสังเกตการณ์ที่ดีที่สุดที่ใช้ในวิศวกรรมการควบคุมและการสื่อสารมาอย่างยาวนาน ขั้นตอนของอัลกอริทึมแบบเรียกซ้ำน้อยที่สุดในรูปแบบเวลาไม่ต่อเนื่องมีดังต่อไปนี้

$$P(k+1) = [1/\lambda(k+1)][P(k) - K(k+1)][P(k)\phi(k+1)]^T \quad (3.10)$$

$$\theta(k+1) = \theta(k) + K(k+1)\epsilon(k+1) \quad (3.11)$$

$$\lambda(k+1) = \lambda_0\lambda(k) + (1 - \lambda_0) \quad (3.12)$$

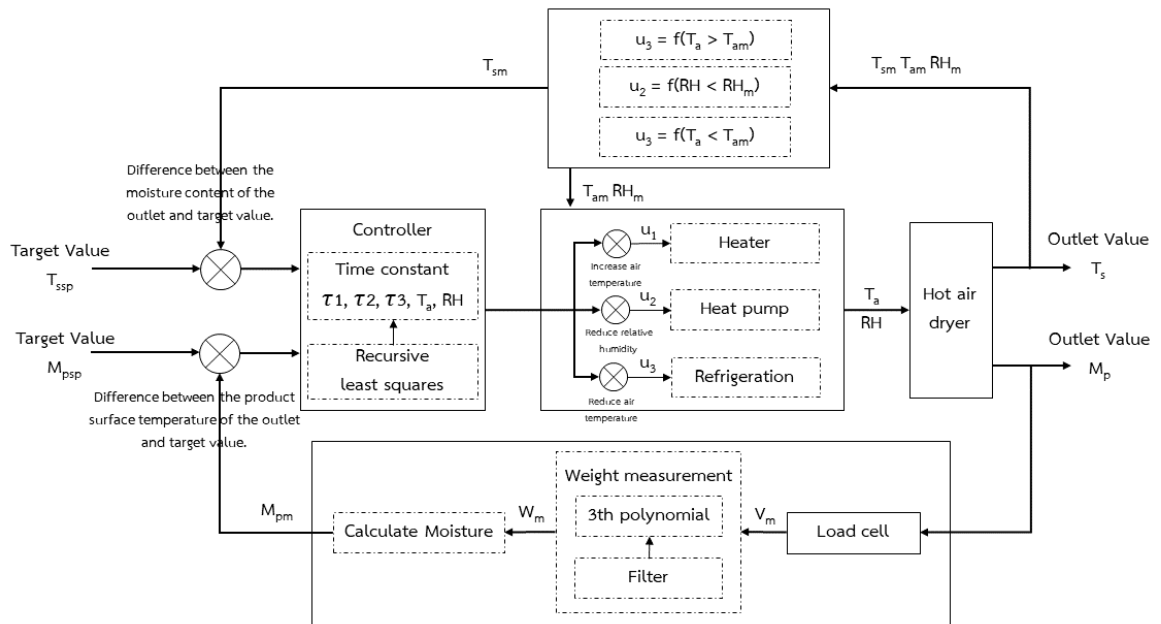
$$K(k+1) = [P(k)\phi(k+1)]/[\lambda(k+1) + [\phi^T(k+1)P(k)\phi(k+1)]] \quad (3.13)$$

$$\epsilon(k+1) = y(k+1) - \phi^T(k+1)\theta(k) = \text{The innovation sequence} \quad (3.14)$$

โดยที่ k คือเวลาที่ไม่ต่อเนื่อง และ P K θ λ และ ϵ เป็นการเรียกซ้ำตามสมการพีชคณิตคาลมาน เคนเวกเตอร์ พารามิเตอร์ปัจจัยการทำนาย และการปรับปรุงค่าทำนายตามลำดับ อัลกอริทึมแบบเรียกซ้ำน้อยที่สุดใช้เพื่อให้ได้รูปแบบกระบวนการเพื่อควบคุมสำหรับพื้นที่ที่สอดคล้องกันของค่าคงที่แต่ละครั้ง ในการควบคุมกระบวนการทำแห้งสำหรับการปรับค่าอุณหภูมิอากาศตามการ

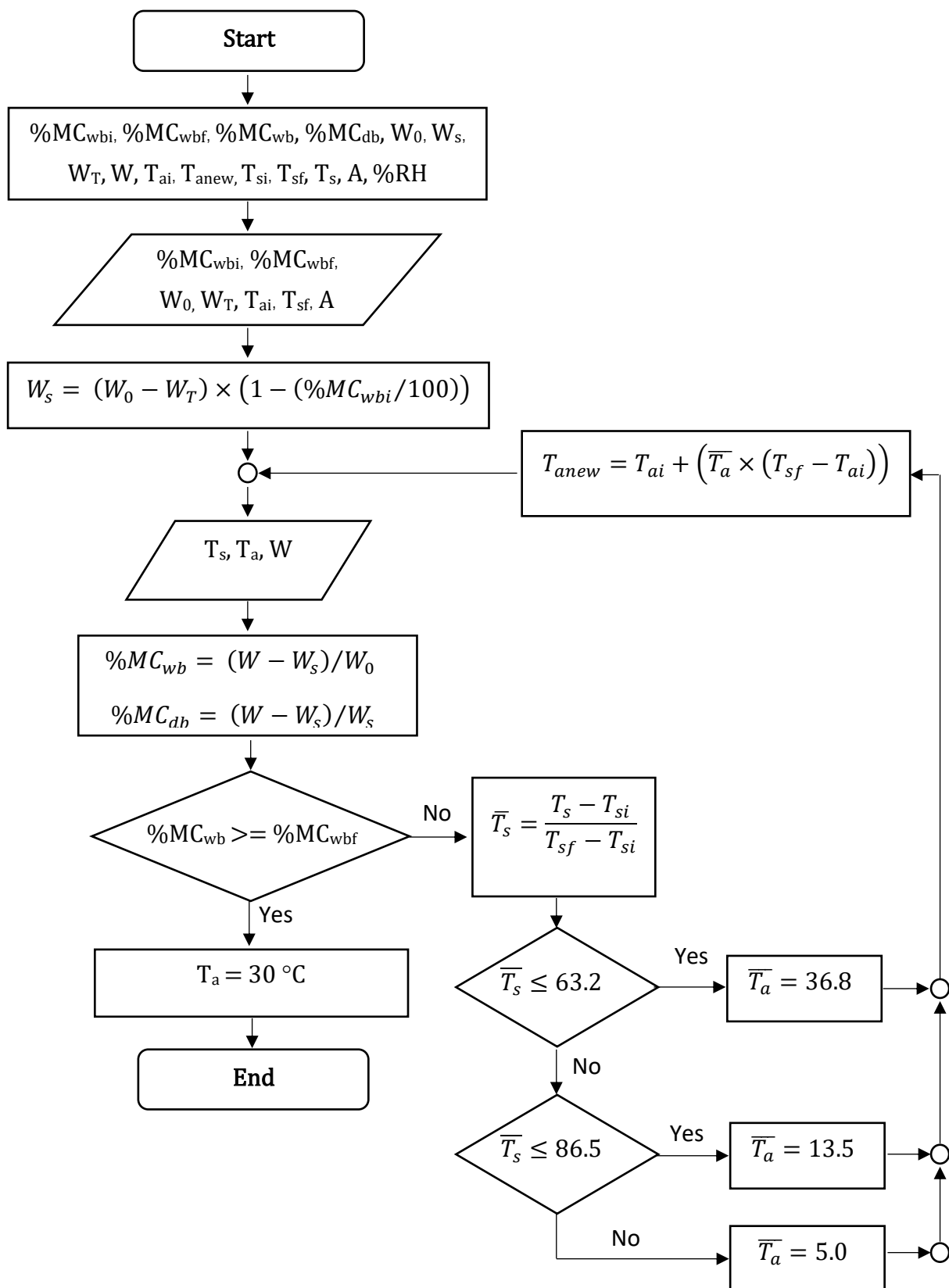
เพิ่มขึ้นของอุณหภูมิผิวผลิตภัณฑ์ แผนผังการควบคุมโดยรวมสำหรับการทำแห้งอาหารที่นำเสนอ แสดงไว้ในภาพที่ 3.5 และภาพที่ 3.6

ภาพที่ 3.5 แสดงกลไกการควบคุมการทำแห้งที่นำเสนอได้มีเป้าหมายเพื่อควบคุมขอบเขตของอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์ และควบคุมปริมาณความชื้นให้ถึงเป้าหมายที่กำหนดด้วยการปรับค่าอุณหภูมิอากาศตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์ โดยใช้อัลกอริทึมแบบเรียกซ้ำน้อยที่สุดในการวัดและประเมินค่าอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์ ร่วมกับการควบคุมแบบค่าเวลาคงที่ในการปรับลดอุณหภูมิอากาศ จากนั้นส่งให้ชุดควบคุม PLC ควบคุมเครื่องทำแห้งให้ใช้ระบบปั๊มความร้อนในการลดหรือเพิ่มอุณหภูมิอากาศ นอกจากนี้ในการวัดน้ำหนักและประเมินปริมาณความชื้นนั้นได้รับค่าสัญญาณไฟฟ้ามาผ่านตัวกรองสัญญาณแล้วคำนวณหาค่าน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่เปลี่ยนไปรวมกับการชดเชยผลของอุณหภูมิ ซึ่งทั้งหมดนี้จะควบคุมให้ไม่เกินค่าเป้าหมาย



- | | | |
|--|--|---|
| เมื่อ T_s คือ อุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์ขาออก | M_p คือ ปริมาณความชื้นขาออก | u_1 คือ ฟังก์ชันการเพิ่มอุณหภูมิอากาศ |
| T_{ssp} คือ อุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์เป้าหมาย | M_{psp} คือ ปริมาณความชื้นเป้าหมาย | u_2 คือ ฟังก์ชันการลดความชื้นสัมพัทธ์ |
| T_{sm} คือ อุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์ที่วัดค่าได้ | M_{pm} คือ ปริมาณความชื้นที่คำนวณได้ | u_3 คือ ฟังก์ชันการลดอุณหภูมิอากาศ |
| T_a คือ อุณหภูมิอากาศที่คำนวณได้ | W_{pm} คือ น้ำหนักที่คำนวณได้ | V_m คือ แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ |
| T_{am} คือ อุณหภูมิอากาศที่วัดค่าได้ | RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์ที่คำนวณได้ | RH_m คือ ความชื้นสัมพัทธ์ที่วัดค่าได้ |

ภาพที่ 3.5 สถาปัตยกรรมควบคุมสำหรับแผนภาพสเก็เมตริกไดอะแกรมของกระบวนการทำให้แห้งที่เสนอ



ภาพที่ 3.6 แผนผังการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นของผลิตภัณฑ์

และในภาพที่ 3.6 ได้แสดงแผนผังการไหลของระบบควบคุมที่ออกแบบในการตัดสินใจ สำหรับการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิและหยุดกระบวนการ โดยรับคำสั่งญาณจากตัวรับรูน้าหนักแล้ว นำมาคำนวณจนได้ค่าน้ำหนักที่แน่นอนมาแล้วนำมาคำนวณปริมาณความชื้นตรวจสอบเงื่อนไขปริมาณความชื้นได้ตามเป้าหมาย หากถึงค่าเป้าหมายแล้วให้หยุดกระบวนการทำแห้งแต่หากยังไม่ถึงจะทำการตรวจสอบค่าอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์โดยใช้อัลกอริทึมแบบเรียกซ้ำน้อยที่สุด เพื่อให้แน่ใจว่าอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์จะไม่เกินกว่าเป้าหมายที่กำหนด จากนั้นควบคุมด้วยค่าเวลาคงที่ตามการเพิ่มขึ้นของกระบวนการแล้ว ปรับลดค่าอุณหภูมิอากาศให้เหมาะสมตามการคำนวณ

3.2.4 การทดสอบระบบควบคุมอุณหภูมิอากาศในสถานะไม่มีวัสดุ

การทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมอุณหภูมิอากาศในสถานะที่ไม่มีวัสดุ (No load testing) โดยตั้งค่าอุณหภูมิอากาศ 3 ค่า เริ่มต้นช่วงแรกที่ 70 องศาเซลเซียส แล้วลดลงมาช่วงที่สอง 60 องศาเซลเซียสและช่วงที่สาม 50 องศาเซลเซียส แต่ละช่วงอุณหภูมิอากาศ จะคงอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นลดอุณหภูมิลงมาจนถึง 35 องศาเซลเซียส (ความเร็วลมคงที่เฉลี่ย 1.3 เมตรต่อวินาที) บันทึกค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศทุก 1 นาที ซึ่งมีขั้นตอนการทดสอบแสดงในดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ขั้นตอนการทดสอบสมรรถนะในสถานะที่ไม่มีวัสดุ

| ขั้นตอน | ตั้งค่าอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) | กำหนดค่า เวลา (ชั่วโมง) | การควบคุมการทำงาน |
|---------|-----------------------------------|----------------------------|--|
| 1 | 70 | 2 | เพิ่มอุณหภูมิภายในเครื่องทำแห้งโดยใช้แหล่งให้ความร้อนแบบปั๊มความร้อนในช่วงแรกจนถึงอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แล้วเปลี่ยนไปใช้ฮีตเตอร์เป็นแหล่งให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ |
| 2 | 60 | 2 | ลดอุณหภูมิด้วยระบบทำความเย็นจนถึงอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส แล้วเปลี่ยนไปใช้ปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ในการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ |
| 3 | 50 | 2 | ลดอุณหภูมิครั้งด้วยระบบทำความเย็น จนถึงอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แล้วเปลี่ยนไปใช้ปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ในการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ |
| 4 | 35 | - | ลดอุณหภูมิครั้งด้วยระบบทำความเย็นจนถึงอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส |

3.3 วิธีการทดสอบระบบการควบคุมกระบวนการทำแห้งด้วยการทำแห้งเปลือกมังคุด

การสร้างระบบควบคุมกระบวนการทำแห้ง ได้นำเอาตัวรับรู้น้ำหนักและ วิธีการชดเชยผลของอุณหภูมิต่อตัวรับรู้น้ำหนักให้มีความแม่นยำสำหรับกระบวนการทำแห้งในหัวข้อย่อยที่ 3.1 มาใช้ร่วมกับแบบจำลองของการปรับอุณหภูมิอากาศเพื่อควบคุมขีดจำกัดอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์แบบอัตโนมัติในกระบวนการทำแห้งแบบลมร้อนในหัวข้อย่อยที่ 3.2 โดยการเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอด้วยการควบคุมขีดจำกัดอุณหภูมิผิวผลิตภัณฑ์สูงสุด (Product surface temperature limit: PSTL) และการทำแห้งทั่วไป (Constant air temperature: CAT) ด้วยผลิตภัณฑ์เปลือกมังคุด

3.3.1 การประมาณปริมาณความชื้น

การหาปริมาณความชื้นนั้นสามารถหาได้จากน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนไปในกระบวนการทำแห้ง ซึ่งการหาน้ำหนักของวัสดุจะใช้ตัวรับรู้น้ำหนัก (Load cell sensor) ในการประมาณค่า โดยติดตั้งในห้องทำแห้งกระจาย 3 จุด และใช้ฟังก์ชันในการชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนจากอุณหภูมิในการทำแห้ง [53] นำค่าน้ำหนักมาประมาณปริมาณความชื้นโดย

คำนวณหาของแข็งสามารถคำนวณได้จากน้ำหนักตัวอย่างกับปริมาณความชื้นดังสมการที่

3.15

$$W_s = (W_0 - W_T) \times (1 - (\%MC_{wbi}/100)) \quad (3.15)$$

เมื่อ W_s = น้ำหนักของแข็งของตัวอย่าง (กรัม)

W_0 = น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น (กรัม)

W_T = น้ำหนักถาดทำแห้ง (กรัม)

$\%MC_{wbi}$ = ความชื้นฐานเปียกเริ่มต้นของตัวอย่าง (เปอร์เซ็นต์)

คำนวณปริมาณความชื้นของตัวอย่างสามารถคำนวณได้จากน้ำหนักตัวอย่างและน้ำหนักของแข็งของตัวอย่างเป็นดังสมการที่ 3.16 สำหรับความชื้นฐานเปียก และสมการที่ 3.17 สำหรับความชื้นฐานแห้ง

$$\%MC_{wb} = (W - W_s)/W_0 \quad (3.16)$$

$$\%MC_{db} = (W - W_s)/W_s \quad (3.17)$$

| | | |
|-------|-------------|-------------------------------------|
| เมื่อ | W | คือ น้ำหนักตัวอย่างที่วัดได้ (กรัม) |
| | $\%MC_{wb}$ | คือ ความชื้นฐานเปียก (เปอร์เซ็นต์) |
| | $\%MC_{db}$ | คือ ความชื้นฐานแห้ง (เปอร์เซ็นต์) |

3.3.2 อัตราการทำแห้ง

อัตราการทำแห้งของกระบวนการสามารถคำนวณได้จากมวลของเหลวที่ระเหยได้ต่อพื้นที่เกิดการระเหยต่อเวลาตามสมการที่ 3.18

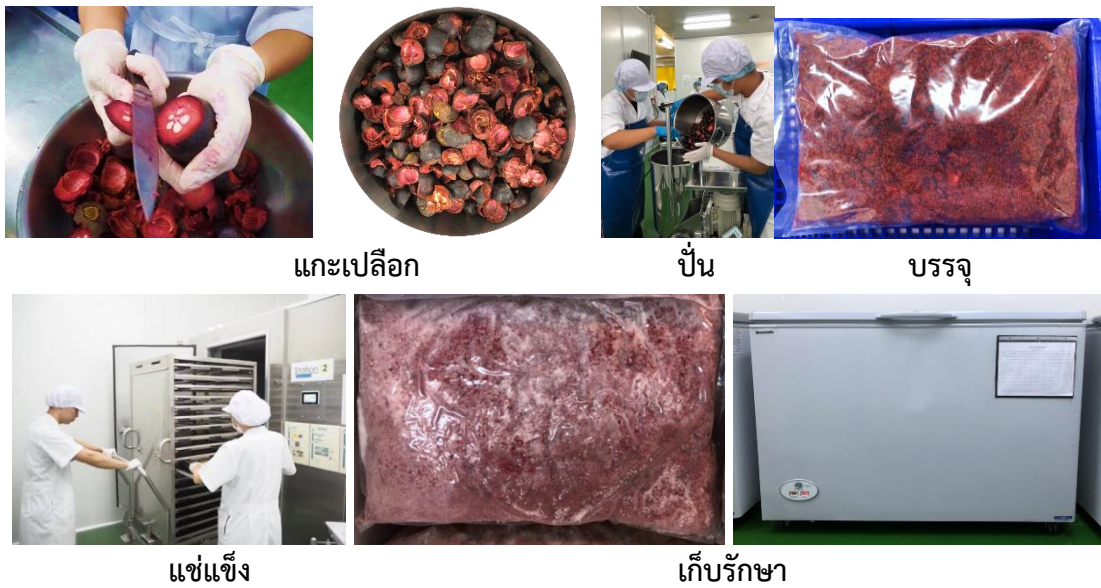
$$R = - \left(\frac{W_s}{A} \right) \left(\frac{dm}{dt} \right) \quad (3.18)$$

| | | |
|-------|-----------------|--|
| เมื่อ | R | คือ อัตราการแห้งหรืออัตราการระเหย (กิโลกรัมต่อตารางเมตร ชั่วโมง) |
| | A | คือ พื้นที่ผิวที่เกิดการระเหย (ตารางเมตร) |
| | W_s | คือ น้ำหนักของแข็งของตัวอย่าง (กิโลกรัม) |
| | $\frac{dm}{dt}$ | คือ มวลของน้ำที่ระเหยต่อหนึ่งหน่วยเวลา (กิโลกรัมต่อชั่วโมง) |

3.3.3 การทดสอบการทำแห้ง

3.3.3.1 เปลือกมังคุด

เปลือกมังคุดได้จากจังหวัดจันทบุรี โดยใช้มังคุดขนาดนำมาแกะเปลือกแยกเนื้อ จากนั้นนำส่วนเปลือกปั่นหยาบด้วยเครื่องปั่นสมุนไพรแบบ 6 ใบมีดความเร็ว 1400 รอบต่อนาที ปั่นรอบละประมาณ 2.5 กิโลกรัม เป็นเวลา 40 วินาทีต่อรอบ แบ่งบรรจุใส่ถุงลามิเนตขนาด 10x15 นิ้ว บรรจุถุงละ 2 กิโลกรัม จากนั้นนำไปแช่เยือกแข็งด้วยเครื่อง Air blast freezing ที่อุณหภูมิ -38 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส ก่อนการทำแห้งนำตัวอย่างมาละลายในตู้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง



แกะเปลือก

ปั่น

บรรจุ

แช่แข็ง

เก็บรักษา

ภาพที่ 3.7 เตรียมตัวอย่างเปลือกมังคุดแช่เยือกแข็ง

3.3.3.2 สภาวะการทำแห้ง

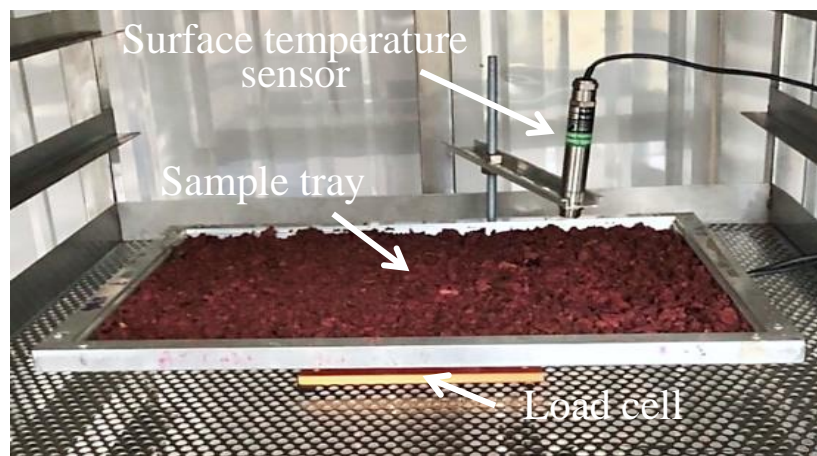
นำตัวอย่างเรียงบนตะแกรงสำหรับหาอัตรากระบวนการทำแห้งขนาด 0.37 x 0.27 เมตร ตะแกรงละ 500 กรัม จำนวน 3 ตะแกรง เรียงตัวอย่างให้กระจายเต็มตะแกรงให้มีความหนาเฉลี่ย 0.5 เซนติเมตร จากนั้นนำตะแกรงตัวอย่างวางบนเซนเซอร์น้ำหนัก กำหนดสภาวะการทำแห้งที่ความเร็วลมเท่ากับ 1.3 เมตรต่อวินาที ปริมาณความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์น้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ ฐานเปียก และกำหนดอุณหภูมิทำแห้งดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สภาวะการทำแห้ง

| ลำดับ | การควบคุมในการทำแห้ง | อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส) |
|-------|---|------------------------|
| 1 | ขีดจำกัดอุณหภูมิผิวผลิตภัณฑ์สูงสุด (PSTL) | 50 |
| 2 | ขีดจำกัดอุณหภูมิผิวผลิตภัณฑ์สูงสุด (PSTL) | 60 |
| 3 | อุณหภูมิอากาศคงที่ (CAT) | 50 |
| 4 | อุณหภูมิอากาศคงที่ (CAT) | 60 |



ภาพที่ 3.8 เครื่องทำแห้งที่ติดตั้งตัวรับรู้น้ำหนักและตัวรับรู้อุณหภูมิแบบไม่สัมผัส



ภาพที่ 3.9 ตำแหน่งของตัวรับรู้น้ำหนักและอุณหภูมิผิวในระหว่างกระบวนการทำแห้ง

หลังการทำแห้งเก็บตัวอย่างในถุงอลูมิเนียมฟอยล์ และควบคุมสถานะอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ เพื่อป้องกันการดูดความชื้นกลับของผลิตภัณฑ์ก่อนการตรวจวิเคราะห์คุณภาพ

3.3.3.3 วิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์

นำเปลือกมังคุดแห้งมาบดให้เป็นผงด้วยเครื่องเครื่องบดอาหารแห้ง (รุ่น HR2118, PHILIPS, ประเทศไทย) เบอร์ 5 เป็นเวลา 15 วินาที บรรจุลงในถุงอลูมิเนียมฟอยล์ เพื่อนำไปวิเคราะห์คุณภาพต่าง ๆ ได้แก่ ปริมาณความชื้น (moisture content) วอเตอร์แอกทิวิตี (water activity) และสี (color)

1. ปริมาณความชื้น (Moisture content) [44]

นำถั่วยอบเข้าสู่ตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง จากนั้นนำออกมาใส่โถดูดความชื้นและทิ้งให้เย็น ชั่งน้ำหนัก และบันทึกน้ำหนัก นำตัวอย่างเปลือกมังกุดก่อนทำแห้งและหลังการทำแห้งชั่งน้ำหนักประมาณ 2 กรัม จำนวนทั้งหมด 3 ซ้ำ ด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง ใสในถั่วยอบ บันทึกน้ำหนักแล้วนำเข้าตู้อบลมร้อน (hot air oven) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ ขณะอบเปิดฝาถั่วยอบออก เมื่อครบกำหนดเวลา นำถั่วยอบออกใส่ในโถดูดความชื้นและปิดฝาถั่วยอบ ปล่อยให้เย็น ชั่งและบันทึกน้ำหนักนำไปคำนวณเปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานเปียก และฐานแห้ง ดังสมการที่ 3.19 และ 3.20 ตามลำดับ

$$\%MC_{wb} = \frac{(W_1 - W_2)}{W_1} \times 100 \quad (3.19)$$

$$\%MC_{db} = \frac{(W_1 - W_2)}{W_2} \times 100 \quad (3.20)$$

เมื่อ W_1 คือ น้ำหนักตัวอย่างผลิตภัณฑ์ก่อนอบ (กรัม)

W_2 คือ น้ำหนักตัวอย่างผลิตภัณฑ์หลังอบ (กรัม)

2. วอเตอร์แอกทิวิตี (Water activity)

นำเปลือกมังกุดผงประมาณ 3-5 กรัม วัดค่าวอเตอร์แอกทิวิตีด้วยเครื่องวัดค่าวอเตอร์แอกทิวิตี (Decagon Model, AquaLab, USA) วัดตัวอย่าง 3 ซ้ำ

3. การวิเคราะห์สี (Color Analysis)

นำตัวอย่างเปลือกมังกุดก่อนทำแห้งและหลังทำแห้ง วัดสีด้วยเครื่องวัดสี (ColorFlex, Hunter Lab, USA) โดยใช้ระบบสี CIE L* a* และ b* ซึ่งวัดสีจำนวน 3 ซ้ำ นำค่า a* และ b* มาคำนวณค่ามุมเฉดสี (Hue angle) และค่าความเข้มของสี (Chroma) สามารถคำนวณได้ดังนี้สมการที่ 3.21 และ 3.22

| | | |
|-----------|-------------------------------|-------------------------|
| Hue angle | คือ arctangent (b*/a*) | เมื่อ a* > 0 และ b* ≥ 0 |
| | คือ arctangent (b*/a*) + 180° | เมื่อ a* < 0 |
| | คือ arctangent (b*/a*) + 360° | เมื่อ a* > 0 และ b* < 0 |

(3.21)

ค่า Hue angle หมายถึง ค่าที่แสดงถึงสีที่แท้จริงที่ปรากฏให้เห็น มีค่าอยู่ระหว่าง 0-360 องศา

| | | | |
|---------------|------------------------------|--------------|------------------------------|
| โดย 0-45 องศา | แสดงสีม่วงแดงถึงสีส้มแดง | 45-90 องศา | แสดงสีส้มแดงถึงสีเหลือง |
| 90-135 องศา | แสดงสีเหลืองถึงสีเหลืองเขียว | 135-180 องศา | แสดงสีเหลืองเขียวถึงเขียว |
| 180-225 องศา | แสดงสีเขียวถึงสีน้ำเงิน | 225-270 องศา | แสดงสีน้ำเงินเขียวถึงน้ำเงิน |
| 270-315 องศา | แสดงสีน้ำเงินถึงม่วง | 315-360 องศา | แสดงสีม่วงถึงม่วงแดง |

$$Chroma = (a^2 + b^2)^{1/2} \quad (3.22)$$

ค่า Chroma มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ หมายถึง วัตถุไม่มีสีชัดเจน (เทา) ถ้ามีค่าเข้าใกล้ 60 หมายถึง วัตถุมีสีเข้ม

3.3.4 การวิเคราะห์การใช้พลังงาน

การวิเคราะห์ปริมาณการใช้พลังงานในกระบวนการทำแห้ง ทำโดยการบันทึกกำลังไฟฟ้า และเวลาที่เครื่องทำแห้งทำงาน นำมาคำนวณหาปริมาณการใช้พลังงานดังสมการ 3.23 และสามารถคำนวณประสิทธิภาพพลังงาน (Energy efficiency) หรือค่าการใช้พลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption; SEC) ดังสมการ 3.24

$$E = P \times t \quad (3.23)$$

| | | |
|-------|-----|---|
| เมื่อ | E | คือ ปริมาณการใช้พลังงาน (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) |
| | P | คือ กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์) |
| | t | คือ เวลาที่ใช้ (ชั่วโมง) |

$$SEC = E/W \quad (3.24)$$

| | | |
|-------|-------|---|
| เมื่อ | SEC | คือ ค่าการใช้พลังงานจำเพาะ (กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อกิโลกรัม) |
| | W | คือ น้ำหนักน้ำที่กำจัดได้ในระหว่างการทำแห้ง (กิโลกรัม) |

3.3.5 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

ค่าใช้จ่ายในการทำงานคำนวณได้จาก ต้นทุนคงที่ (Fixed cost) ต้นทุนผันแปร (Variable cost) และจุดคุ้มทุน ซึ่งมีรายละเอียดการคำนวณ ดังนี้

3.3.5.1 ต้นทุนคงที่ (Fixed cost) ไม่รวมค่าใช้สถานที่โรงงาน

ต้นทุนคงที่ (Fixed cost) สามารถคิดได้จากค่าเสื่อมราคา (Depreciation, DP) แบบ Straight-line method โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการ 3.25

$$DP = (P - S) / L \quad (3.25)$$

| | | |
|-------|-----|---|
| เมื่อ | P | คือ ราคาซื้อของเครื่องจักร (บาท) |
| | S | คือ ราคาขายหรือคงเหลือเมื่อเครื่องจักรหมดอายุ (บาท) |
| | L | คือ อายุการใช้งานของเครื่องจักร (ปี) |

ดอกเบี้ยหรือค่าเสียโอกาส (Interest on investment) สามารถคำนวณได้ดังสมการ 3.26 และต้นทุนคงที่ (Fixed cost) สามารถคำนวณได้ดังสมการ 3.27

$$I = ((P+S) / 2) \times (i/100) \quad (3.26)$$

$$\text{Fixed cost} = DP + I \quad (3.27)$$

| | | |
|-------|-----|-------------------------------------|
| เมื่อ | i | คือ อัตราดอกเบี้ยต่อปี(เปอร์เซ็นต์) |
|-------|-----|-------------------------------------|

3.3.5.2 ต้นทุนผันแปร (Variable cost)

ต้นทุนผันแปร (Variable cost) สามารถคำนวณได้จากค่าบำรุงรักษา ค่าไฟฟ้า และค่าแรงงานที่ใช้งานต่อปี ได้ดังสมการที่ 3.28

$$\text{Variable cost} = (PM + (\text{Unit} \times \text{Pow}) + \text{Wages}) \times \text{day} \quad (3.28)$$

| | | |
|-------|----------------|---|
| เมื่อ | PM | คือ ค่าซ่อมแซมและบำรุงรักษา (บาทต่อวัน) |
| | Unit | คือ หน่วยไฟฟ้าเฉลี่ย (หน่วยต่อวัน) |
| | Pow | คือ ค่าไฟฟ้า (บาทต่อหน่วย) |
| | Wages | คือ ค่าจ้างแรงงาน (บาทต่อวัน) |
| | day | คือ จำนวนวันทำงานต่อปี (วัน) |

และต้นทุนรวมทั้งหมดสามารถคำนวณได้ดังสมการ 3.29 และค่าใช้จ่ายในการทำแห้งต่อ กิโลกรัมได้ดังสมการที่ 3.30

$$Total\ cost = Fixed\ cost + Variable\ cost \quad (3.29)$$

$$Production\ cost = Total\ cost / (Working\ time \times Capacity) \quad (3.30)$$

| | | |
|-------|------------------------|---|
| เมื่อ | <i>Production cost</i> | คือ ต้นทุนการผลิต (บาทต่อกิโลกรัม) |
| | <i>Working time</i> | คือ ระยะเวลาทำงาน (ชั่วโมง) |
| | <i>Capacity</i> | คือ กำลังการผลิตต่อวัน (กิโลกรัมต่อวัน) |

3.3.5.3 จุดคุ้มทุน (Break Even Point)

จุดคุ้มทุนจะคำนวณเปรียบเทียบต้นทุนระหว่างการควบคุมการทำแห้งแบบขีดจำกัดอุณหภูมิผิวผลิตภัณฑ์สูงสุด (PSTL) และการควบคุมการทำแห้งอุณหภูมิอากาศคงที่ (CAT) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.31

$$BEP = (Fixed\ cost + (Production\ cost_{CAT} \times Capacity) - Production\ cost_{PSTL} \times Capacity) / (15 \times day) \quad (3.31)$$

เมื่อ *BEP* คือ จุดคุ้มทุน (ปี)

3.3.6 การวิเคราะห์ทางสถิติ

ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้การวางแผนการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Experiment) ในการศึกษาวิธีการทำแห้งที่มีผลคุณภาพของเปลือกมังคุดผง ใช้โปรแกรม SPSS 20.0 สำหรับระบบ Windows เพื่อคำนวณการวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance ; ANOVA) โดยใช้วิธีของ Duncan เพื่อหาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

บทที่ 4

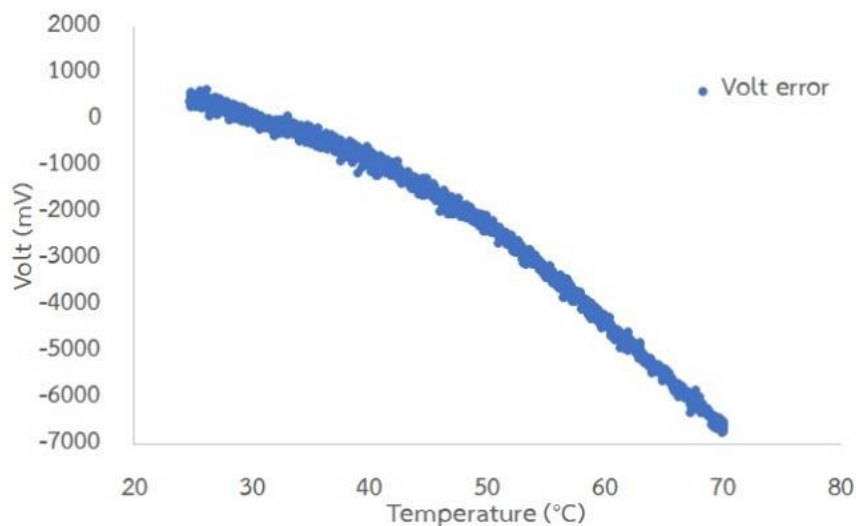
ผลการทดลองและการอภิปรายผล

4.1 ผลการสอบเทียบตัวรับรู้น้ำหนักสำหรับการวัดน้ำหนักและชดเชยผลของอุณหภูมิในห้องทำแห้ง

4.1.1 ผลการสอบเทียบตัวรับรู้น้ำหนักสำหรับการวัดปริมาณความชื้นภายในห้องทำแห้ง

ผลการสอบเทียบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเนื่องจากผลกระทบของอุณหภูมิ วัดค่าน้ำหนักที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยใช้ตุ้มน้ำหนักมาตรฐานคือ 200 1,000 และ 2,000 กรัม ในการสอบเทียบ โดยใช้สมการที่ 3.2 สำหรับการแปลงค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเป็นน้ำหนัก ได้ค่าตัวแปรแก้ไขสำหรับชดเชยสัญญาณ ณ อุณหภูมิเริ่มต้น (Z_T) เท่ากับ 8603554 มิลลิโวลต์ และค่าเฉลี่ยของตัวแปรแก้ไขเพื่อความแม่นยำในการวัด (C) ที่ทำให้การอ่านค่าน้ำหนักถูกต้อง เท่ากับ 734.76862

สำหรับผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 25 ถึง 70 องศาเซลเซียส สัญญาณแรงดันไฟฟ้าแบบไม่มีน้ำหนักต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ พบว่าค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าในภาพที่ 4.1 แสดงให้เห็นถึงข้อผิดพลาดสูงสุดของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีผลต่อสัญญาณแรงดันไฟฟ้าประมาณ 9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าแบบไม่มีน้ำหนักต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

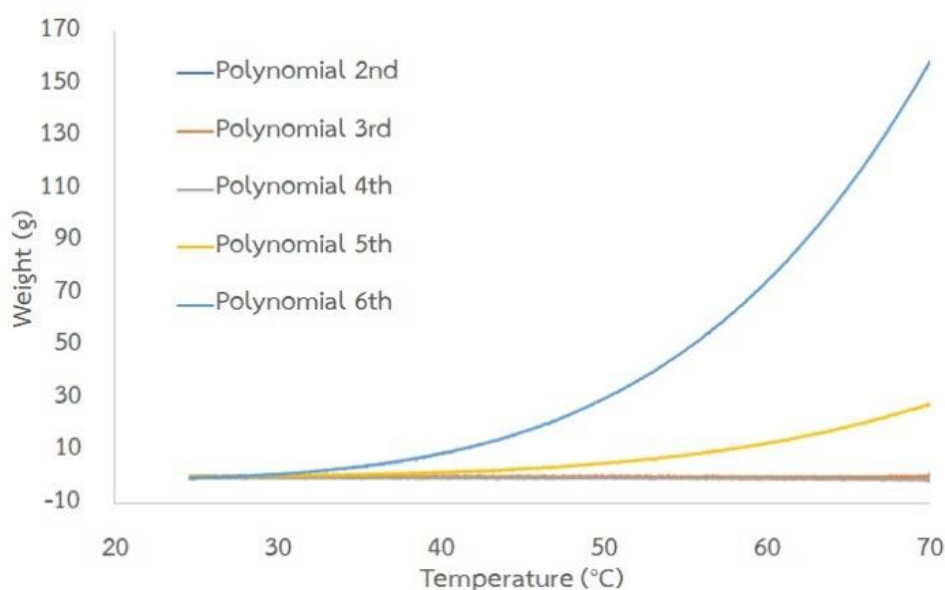
เนื่องมาจากอุณหภูมิมีผลต่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้การรับรู้สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Susceptibility: EMS) และสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

(Electromagnetic Interference: EMI) ลดลง ส่งผลให้ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Compatibility: EMC) นั้นลดลง ทำให้ตัวรับสัญญาณหรือตัวรับรูน้าหนักเกิดข้อผิดพลาดในการรับสัญญาณ

จากสมการถดถอยที่ 3.4 ใช้ในการชดเชยอุณหภูมิที่พหุนามลำดับ 2 ถึง 6 ได้ค่าสัมประสิทธิ์ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และในภาพที่ 4.2 แสดงให้เห็นถึงสมการถดถอยที่เหมาะสมที่สุดคือลำดับที่ 3 เนื่องจากค่าความพหุนามลำดับที่ 5 และ 6 มีความผิดพลาดมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และพหุนามลำดับที่ 2 ถึง 4 มีความแม่นยำใกล้เคียงกันแต่พหุนามลำดับ 3 มีความผิดพลาดน้อยที่สุด

ตารางที่ 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของพหุนามถดถอยลำดับต่าง 2 ถึง 6 ในการชดเชยอุณหภูมิ

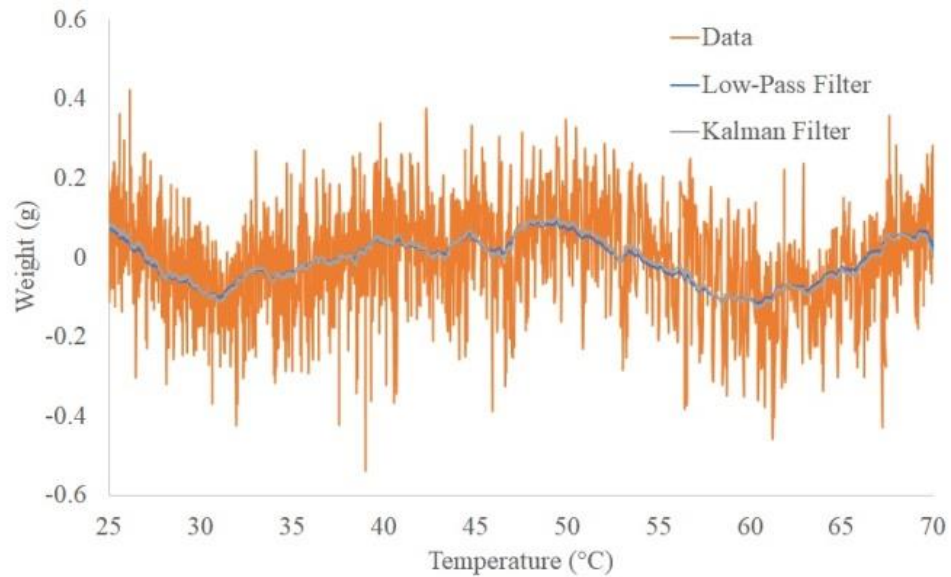
| | Polynomial 2 nd | Polynomial 3 rd | Polynomial 4 th | Polynomial 5 th | Polynomial 6 th |
|----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| R ² | 0.9981 | 0.9981 | 0.9985 | 0.9985 | 0.9985 |
| a1 | 75.367 | 0.0056 | -590.67 | -324.91 | 15.709 |
| a2 | -2.4624 | -3.248 | 20.821 | 8.5232 | -9.5046 |
| a3 | 0 | 0.0056 | -0.3474 | -0.0716 | 0.4748 |
| a4 | 0 | 0 | 0.0019 | -0.0011 | -0.0102 |
| a5 | 0 | 0 | 0 | 0.00001 | 0.00009 |
| a6 | 0 | 0 | 0 | 0 | -0.0000003 |
| b | 52.91 | -437.19 | 6904.1 | 4679.7 | 2527.2 |



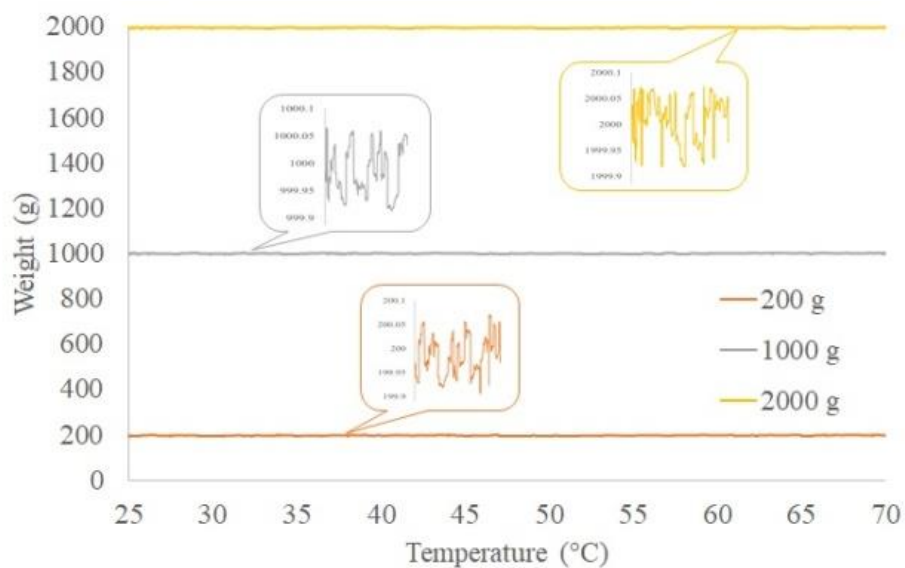
ภาพที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการชดเชยน้ำหนักข้อผิดพลาดของสัญญาณแรงดันไฟฟ้า หลังจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

4.1.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพสำหรับตัวกรองต่อตัวรับรู้น้ำหนัก

ผลการทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างตัวกรองความถี่ต่ำและตัวกรอง คาลมาน ตามที่กล่าวถึงในหัวข้อย่อยที่ 3.1.3.2



(a)



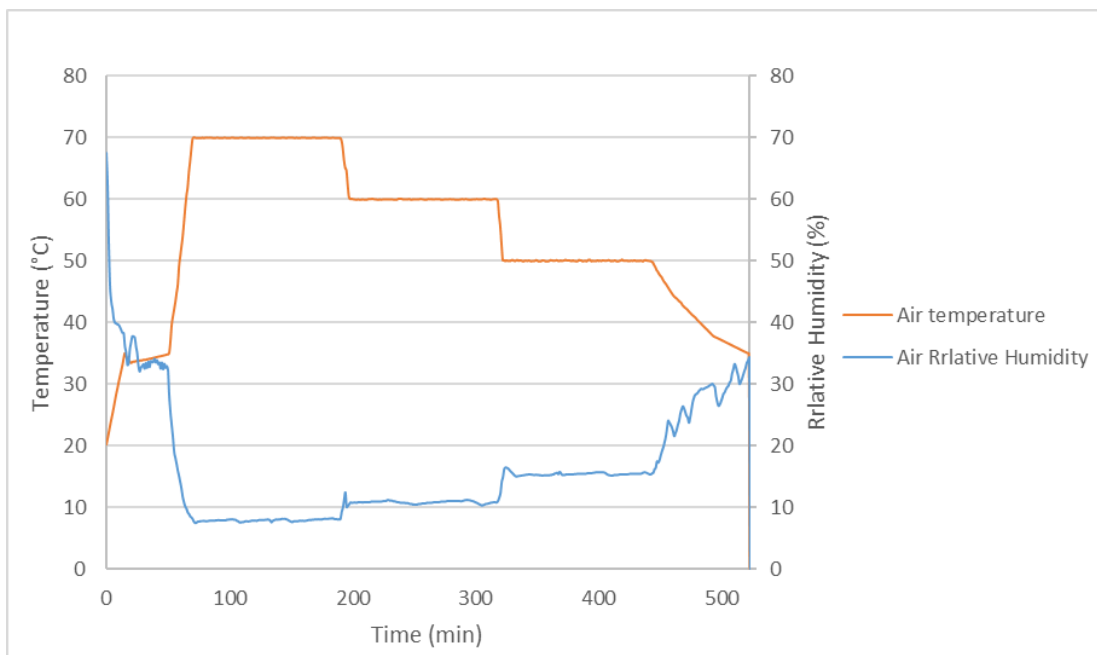
(b)

ภาพที่ 4.3 ความทนทานและมีประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีการในการเพิ่มความแม่นยำในการวัดที่ผิดพลาด 0.1 กรัม (a) การเปรียบเทียบการกรองสัญญาณโดยใช้ข้อมูลดิบของตัวกรองความถี่ต่ำและตัวกรองคาลมาน (b) การเปรียบเทียบสัญญาณที่ได้จากการวัดค่าน้ำหนักด้วยตุ้มน้ำหนักมาตรฐานต่าง ๆ ที่อุณหภูมิต่างกัน

โดยสำหรับตัวกรองความถี่ต่ำใช้ M เท่ากับ 10 ด้วยการเก็บข้อมูลสัญญาณแต่ละสัญญาณทุก ๆ 0.1 มิลลิวินาที และสำหรับตัวกรองคาลมานพารามิเตอร์เริ่มต้นคือ R เท่ากับ 0.129092915 และ P เท่ากับ 0.0001 และสำหรับเงื่อนไขอื่น ๆ เป็นตามที่อธิบายไว้ในหัวข้อย่อยที่ 4.1 ที่ถูกกำหนดโดยอุณหภูมิที่แตกต่างกันตั้งแต่ 25 ถึง 70 องศาเซลเซียส และเก็บข้อมูลสัญญาณเป็นเวลา 1800 วินาที ภาพที่ 4.3 (a) แสดงคุณสมบัติด้านประสิทธิภาพของตัวกรองทั้งสอง ซึ่งเห็นได้ว่าตัวกรองทั้งสองให้ผลลัพธ์ที่คล้ายกัน สิ่งนี้อาจเกิดขึ้นได้เนื่องจากตัวกรองทั้งสองนั้นเหมาะสมทั้งคู่สำหรับการหาจุดต่ำสุดการของความเบี่ยงเบนออกจากจุดอ้างอิงยกกำลังสองซึ่งจะทำให้สัญญาณมีความราบเรียบขึ้น เป็นที่ชัดเจนว่าการประยุกต์ขั้นต้นของวิธีการตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่นั้นเพียงพอสำหรับการกรองสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพและง่ายต่อการใช้งาน ดังที่แสดงในภาพที่ 4.3 (a) ผลลัพธ์ที่ได้จากการวัดค่าน้ำหนักที่ 0 กรัม ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ตั้งแต่ 25 ถึง 70 องศาเซลเซียส สามารถวัดอย่างแม่นยำภายใต้การยอมรับข้อผิดพลาด 0.1 กรัม นอกจากนี้ภาพที่ 4.3 (b) แสดงการวัดค่าน้ำหนักจากตุ้มน้ำหนักมาตรฐานที่อุณหภูมิต่าง ๆ ตั้งแต่ 25 ถึง 70 องศาเซลเซียส โดยใช้ตัวกรองความถี่ต่ำซึ่งแสดงให้เห็นถึงความทนทานและมีประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีการสำหรับการเพิ่มความแม่นยำในการวัดมากขึ้น

4.2 ผลการศึกษาแบบจำลองของการปรับอุณหภูมิอากาศเพื่อควบคุมขีดจำกัดอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์แบบอัตโนมัติในกระบวนการทำแห้งแบบลมร้อน

ผลทดสอบระบบควบคุมอุณหภูมิอากาศในสภาวะไม่มีวัสดุที่ออกแบบ โดยตั้งค่าอุณหภูมิให้มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียส พบว่าทำงานได้อย่างต่อเนื่องไม่พบปัญหาใด ๆ โดยการควบคุมอุณหภูมิอากาศสามารถควบคุมได้อย่างแม่นยำและมีความคลาดเคลื่อน ± 0.5 องศาเซลเซียส จากที่ตั้งค่า และเมื่อเริ่มการทดสอบในช่วงแรกที่มีการเพิ่มอุณหภูมิจนกระทั่งถึงช่วงที่สามใช้เวลาทั้งหมด 8 ชั่วโมง 42 นาที โดยแสดงผลการควบคุมอุณหภูมิอากาศถูกแสดงในภาพที่ 4.4 และตารางที่ 4.2



ภาพที่ 4.4 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องทำแห้ง (สภาวะไม่มีวัสดุ) ที่ควบคุมอุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส

ดังภาพที่ 4.5 และ 4.6 ไฮโครเมตริกชาร์ทในการทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมอุณหภูมิในสภาวะที่ไม่มีวัสดุ สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ค่าเอนทัลปี และอัตราส่วนความชื้น

ช่วงที่ 1 ของการเพิ่มอุณหภูมิ (Warming) จาก 20 องศาเซลเซียส จนถึง 35 องศาเซลเซียส ทำงานด้วยปั๊มความร้อนใช้เวลา 50 นาที สามารถลดความชื้นสัมพัทธ์ต่ำสุดได้ 33 เปอร์เซ็นต์ ค่าเอนทัลปี 67 กิโลจูลต่อกิโลกรัมอากาศแห้งและค่าอัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.012 กรัม น้ำต่อกิโลกรัมอากาศแห้ง จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิจากจุด ก ต่อด้วยฮีตเตอร์จาก 35 องศาเซลเซียสจนถึงอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสที่จุด ข ใช้เวลา 20 นาทีคงอุณหภูมิไว้ที่ 70 ± 0.79 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที พบว่าความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยเท่ากับ 8.17 ± 0.36 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่าเอนทัลปีเพิ่มขึ้นจาก 67 เป็น 115 กิโลจูลต่อกิโลกรัมอากาศแห้งและค่าอัตราส่วนความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 0.015 กรัม น้ำต่อกิโลกรัมอากาศแห้ง โดยเป็นการเพิ่มอุณหภูมิด้วยฮีตเตอร์อย่างเดียวทำให้อัตราส่วนความชื้นแต่ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำในสภาวะที่ไม่มีวัสดุ ส่งผลให้ค่าความร้อนแฝง (Latent Heat) และความร้อนสัมผัส (Sensible Heat) ในอากาศเพิ่มขึ้น

สำหรับช่วงที่ 2 ลดอุณหภูมิจาก 70 องศาเซลเซียสที่จุด ข จนถึงจุด ค ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 7 นาที คงอุณหภูมิไว้ที่ 60 ± 0.78 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที พบว่าความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยเท่ากับ 10.70 ± 0.46 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าเอนทัลปีลดลงจาก 115 เป็น 95 กิโล

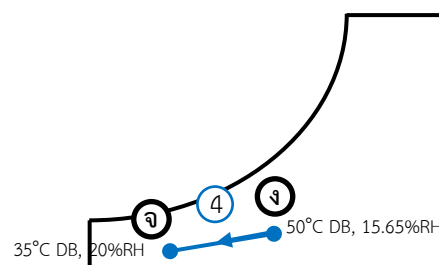
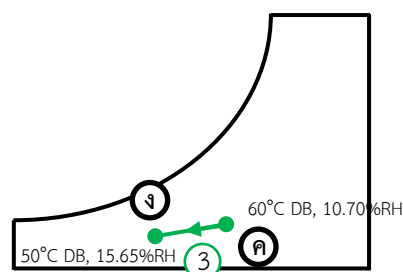
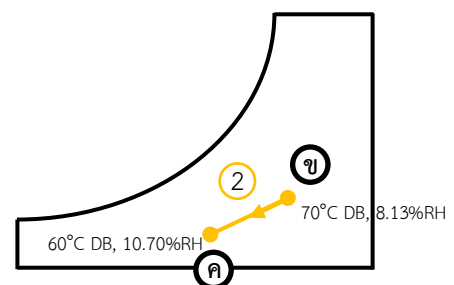
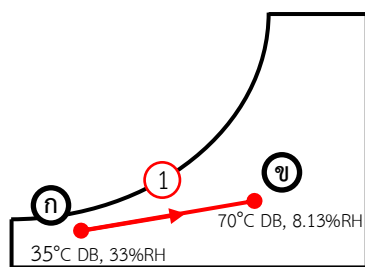
จุดต่อกิโลกรัมอากาศแห้ง และค่าอัตราส่วนความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 0.012 กรัม น้ำต่อกิโลกรัมอากาศแห้ง ส่งผลให้ค่าความร้อนแฝงและความร้อนสัมผัสในอากาศลดลง ซึ่งการลดอุณหภูมินั้นได้ใช้ฮีทปั๊มซึ่งช่วยในการลดความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศแต่เนื่องจากอุณหภูมิมารลดลงทำปริมาณความชื้นสัมพัทธ์กลับเพิ่มขึ้นแทนแต่ค่าอัตราส่วนความชื้นนั้นลดลงทำให้อากาศร้อนที่เกิดขึ้นนั้นสามารถดึงปริมาณความชื้นจากผลิตภัณฑ์ได้มากขึ้นอย่างต่อเนื่องถึงแม้อุณหภูมิจะลดลง

เช่นเดียวกันกับในช่วงที่ 3 ที่ลดอุณหภูมิจาก 60 องศาเซลเซียสที่จุด ค จนถึงจุด ง ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 5 นาที คงอุณหภูมิไว้ที่ 50 ± 0.75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที พบว่าความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยเท่ากับ 15.65 ± 0.96 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าเอนทัลปีลดลงจาก 95 เป็น 80 กิโลจูลต่อกิโลกรัมอากาศแห้ง และค่าอัตราส่วนความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 0.011 กรัม น้ำต่อกิโลกรัมอากาศแห้ง ส่งผลให้ค่าความร้อนแฝงและความร้อนสัมผัสในอากาศลดลง

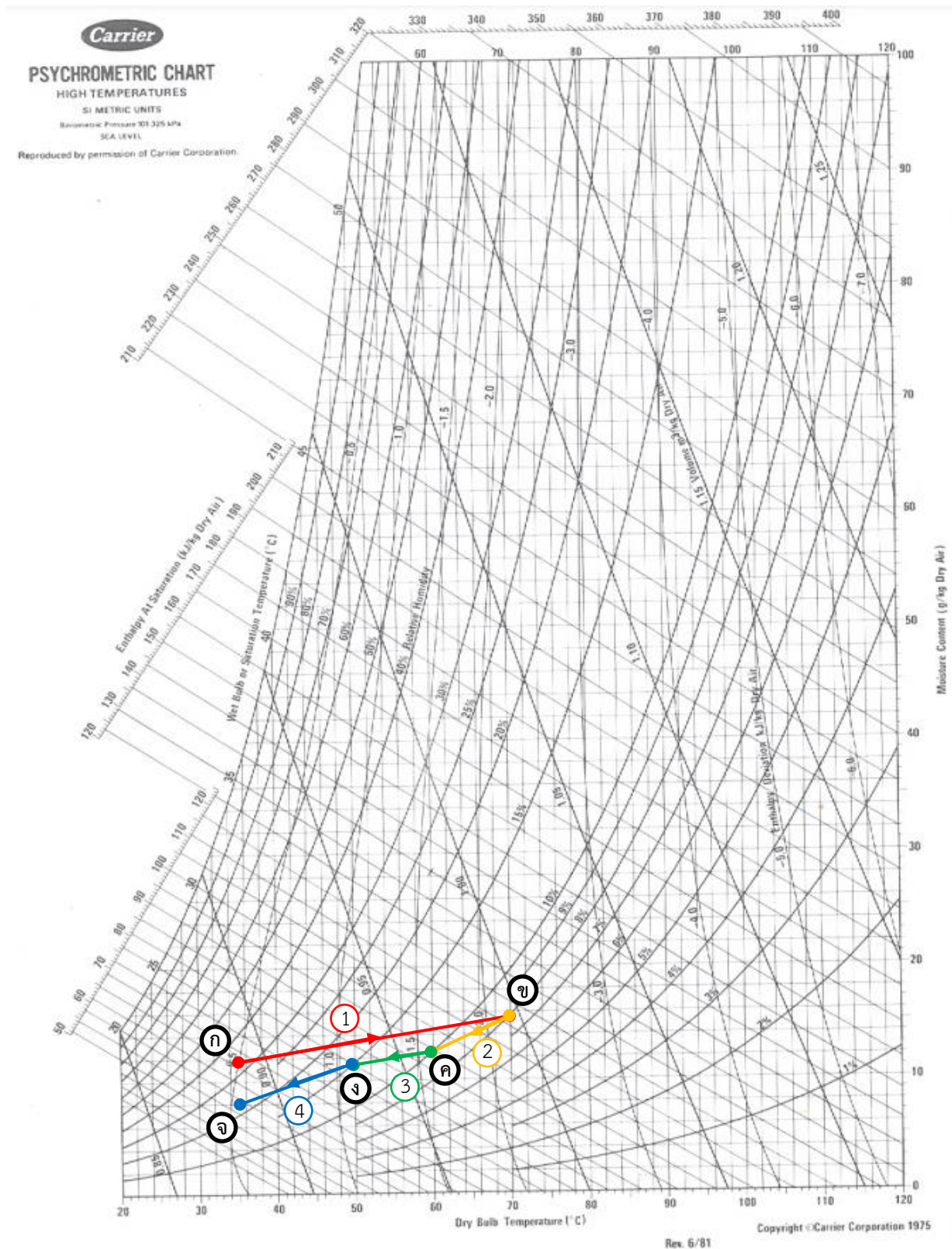
และช่วงที่ 4 ช่วงสุดท้ายของการลดอุณหภูมิจาก 50 องศาเซลเซียสที่จุด ง จนถึงจุด จ ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 80 นาที พบว่าความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 25 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าเอนทัลปีลดลงจาก 80 เป็น 55 กิโลจูลต่อกิโลกรัมอากาศแห้ง และค่าอัตราส่วนความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 0.008 กรัม น้ำต่อกิโลกรัมอากาศแห้ง ส่งผลให้ค่าความร้อนแฝงเพิ่มขึ้นแต่ความร้อนสัมผัสในอากาศลดลง ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับช่วงที่ 2 และ 3 และพบว่าการอุณหภูมิมิในการทำแห้งแบบปั๊มความร้อนสามารถลดค่าอัตราส่วนความชื้นได้ซึ่งทำให้สามารถดึงความชื้นจากผลิตภัณฑ์ได้มากขึ้นถึงแม้ค่าอุณหภูมิและเอนทัลปีจะลดลง

ตารางที่ 4.2 ผลของเวลาและค่าความชื้นสัมพัทธ์ในการควบคุมอุณหภูมิแบบไม่มีวัสดุทำแห้งในแต่ละช่วง

| ขั้นตอน | สถานะ | ช่วงอุณหภูมิ (°C) | ระบบที่ใช้ | อุณหภูมิในห้องทำแห้ง (°C) | ความชื้นสัมพัทธ์ (%) | เวลาที่ใช้ (min) |
|---------|----------------------|-------------------|---------------------|---------------------------|----------------------|------------------|
| 1 | เพิ่มอุณหภูมิ | 20 - 35 | Heat pump | - | 33 | 50 |
| | คงอุณหภูมิ (warming) | 35 - 70 | Heat pump Heater | - | - | 20 |
| | คงอุณหภูมิ | 70 | Heater | 70 ± 0.79 | 8.13 ± 0.36 | 120 |
| 2 | ลดอุณหภูมิ | 70 - 60 | Refrigeration | - | - | 7 |
| | คงอุณหภูมิ | 60 | Heat pump Heater | 60 ± 0.78 | 10.70 ± 0.46 | 120 |
| 3 | ลดอุณหภูมิ | 60 - 50 | Refrigeration | - | - | 5 |
| | คงอุณหภูมิ | 50 | Heat pump Heater | 50 ± 0.76 | 15.65 ± 0.96 | 120 |
| 4 | ลดอุณหภูมิ | 50 - 35 | Refrigeration | - | 20 | 80 |



ภาพที่ 4.5 ไชโครเมตริกชาร์ทของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงภายในห้องทำแห้ง (สภาวะไม่มีวัสดุ) ในแต่ละช่วง

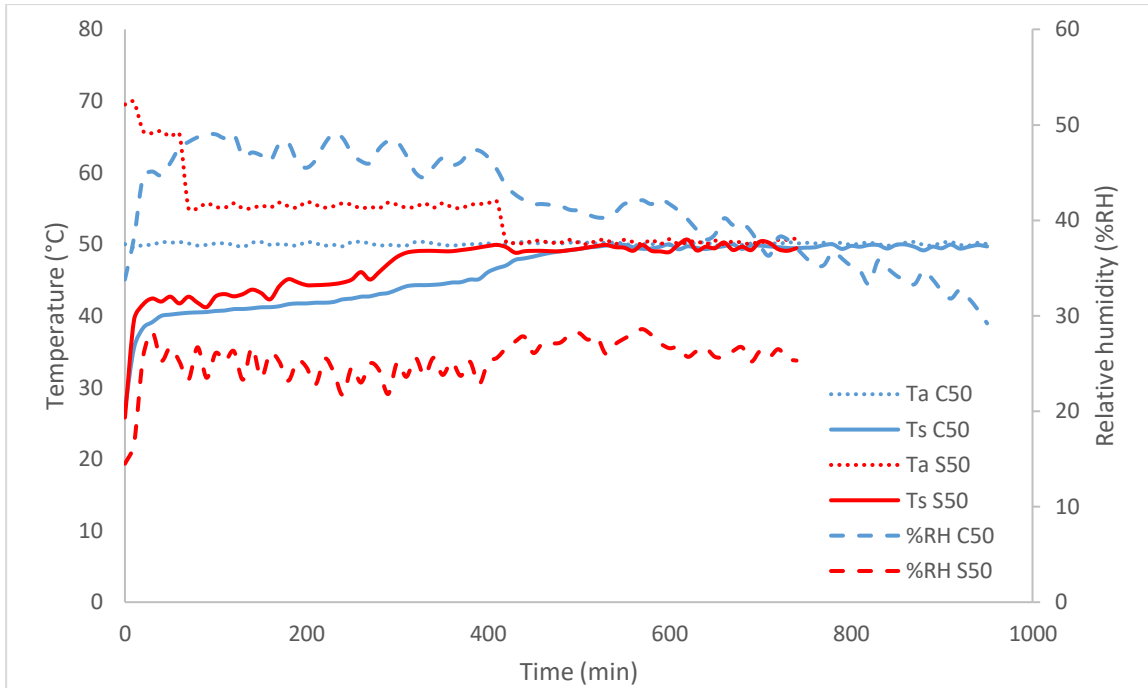


ภาพที่ 4.6 ไสโครเมตริกชาร์ทของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงภายในห้องทำ
 แห้ง (สภาวะไม่มีวัสดุ)

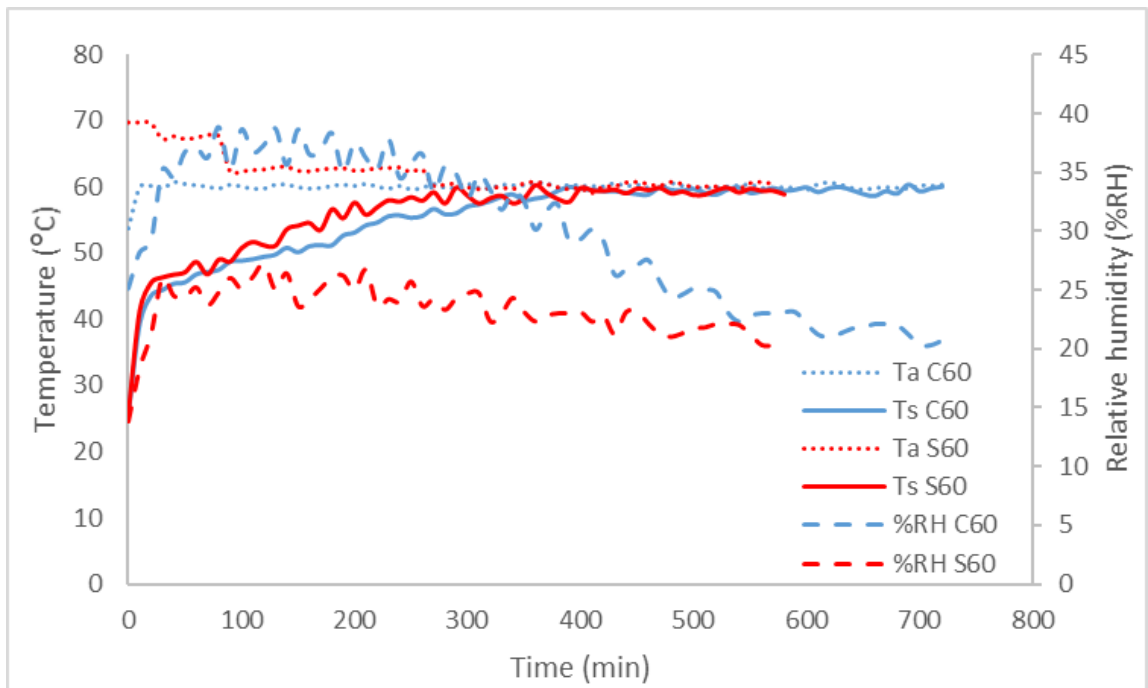
4.3 ผลการทดสอบระบบการควบคุมกระบวนการทำแห้งด้วยการทำแห้งเปลือกมังคุด

ในส่วนก่อนหน้านี้ได้แสดงการทดสอบระดับห้องปฏิบัติการสำหรับการสอบเทียบและการเลือกตัวกรองสำหรับการพัฒนาระบบควบคุม และการทดสอบสมรรถนะการควบคุมอุณหภูมิในการประมวลผลสัญญาณและข้อมูล โดยการชดเชยผลของอุณหภูมิต่อตัวรับรูน้าหนักด้วยการใช้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมและตัวกรองความถี่ต่ำ และใช้การควบคุมอุณหภูมิที่สร้างขึ้นร่วมกับการกำหนดปริมาณความชื้นอัตราการอบแห้งและอัลกอริทึม RLS สำหรับการพัฒนาระบบสำหรับสัญญาณควบคุมและการประมวลผลข้อมูลได้แสดงในส่วนก่อนหน้าให้ผลลัพธ์สำหรับการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอด้วยการควบคุมขีดจำกัดอุณหภูมิผิวผลิตภัณฑ์สูงสุด (Product surface temperature limit: PSTL) และการทำแห้งทั่วไป (Constant air temperature: CAT) ด้วยผลิตภัณฑ์เปลือกมังคุด ในสภาพแวดล้อมจริงภายในเครื่องทำแห้งแบบลมร้อน ซึ่งถูกสร้างขึ้นโดยใช้เทคโนโลยีการทำแห้งแบบบีบความร้อนร่วมกับฟังก์ชันฮีทเตอร์สำหรับการทำงานที่อุณหภูมิสูงซึ่งสามารถทำแห้งได้ระหว่าง 30 ถึง 70 องศาเซลเซียส

ในการทดลองนี้ได้ติดตั้งระบบตัวรับรูน้าหนักและน้ำหนักเพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลของเปลือกมังคุดที่ผ่านการเตรียมเป็นวัสดุอาหารสำหรับทดสอบและใช้การตั้งค่าการทำแห้งตามหัวข้อย่อยที่ 3.3 และผลการทดสอบให้ผลลัพธ์ที่น่าพอใจสำหรับการวัดค่าน้ำหนักที่อุณหภูมิต่าง ๆ สามารถวัดได้อย่างถูกต้องภายในความแม่นยำที่ยอมรับได้ โดยเส้นโค้งของปริมาณความชื้นและเส้นโค้งของอัตราการทำแห้งที่ปรากฏมีความต่อเนื่องอย่างปกติซึ่งหมายความว่าผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพและงานวิจัยนี้ตามบรรลู่วัตถุประสงค์ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความทนทานและมีประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีการที่เลือกใช้ ผลของค่าน้ำหนักสามารถนำมาใช้ในการคำนวณปริมาณความชื้นได้ดังแสดงในภาพที่ 4.8 และอัตราการทำแห้งในภาพที่ 4.9 โดยสังเขป จากการทำทดสอบการใช้งานจริงเพื่อความแม่นยำได้ตรวจสอบความถูกต้องของผลลัพธ์ด้วยการวัดค่าน้ำหนักซ้ำของผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้ายด้วยเครื่องชั่งที่ได้มาตรฐาน ซึ่งยืนยันว่าน้ำหนักของผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีความใกล้เคียงกันภายในความแม่นยำที่ 0.1 กรัม



(a)



(b)

ภาพที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศ (Ta) อุณหภูมิผิวผลิตภัณฑ์ (Ts) และความชื้นสัมพัทธ์ (%RH) กับเวลาที่ใช้ในการทำแห้งแบบลมร้อน

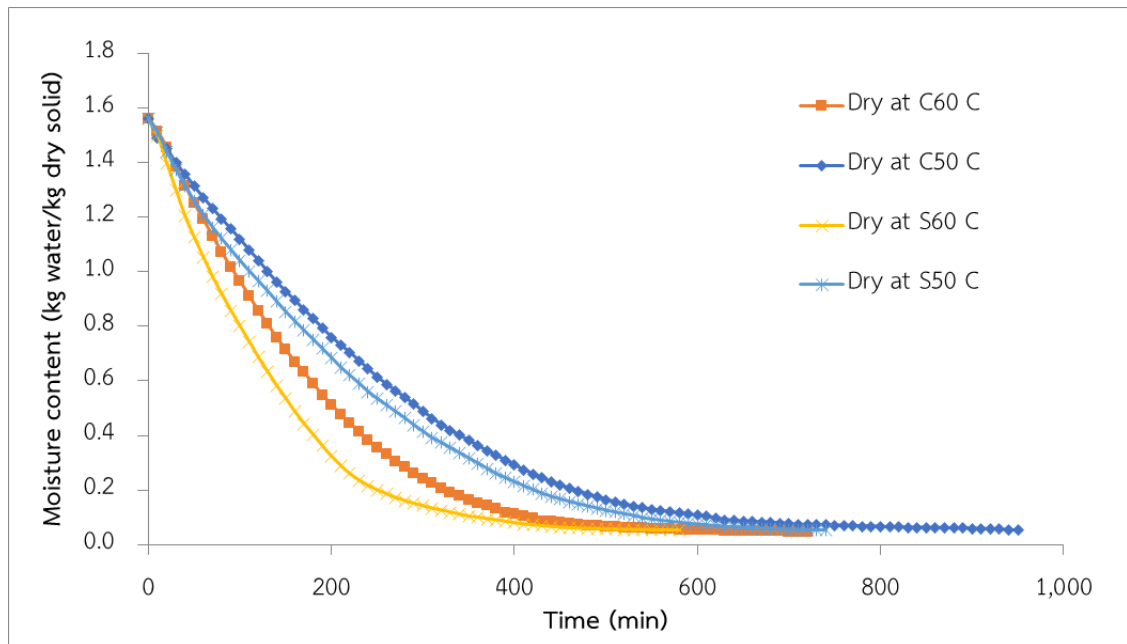
(a) การควบคุมแบบ CAT และควบคุมแบบ PSTL ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

(b) การควบคุมแบบ CAT และควบคุมแบบ PSTL ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

การทดสอบการทำแห้งด้วยการควบคุมอุณหภูมิแบบ PSTL เปรียบเทียบการควบคุมแบบ CAT โดยทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส ทำแห้งจนกระทั่งความชื้นของผลิตภัณฑ์มีค่าต่ำกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ผลของการควบคุมอุณหภูมิในการทำแห้งของแต่ละสภาวะเป็นดังภาพที่ 4.7 โดยการทำให้แห้งของการควบคุมอุณหภูมิแบบ PSTL ที่ 50 และ 60 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลา 740 และ 580 นาทีตามลำดับ และการทำให้แห้งของการควบคุมอุณหภูมิแบบ CAT ที่ 50 และ 60 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลา 950 และ 720 นาทีตามลำดับ ซึ่งการทำแห้งทั้ง 2 อุณหภูมิในการทดลองจะเห็นได้ว่าการควบคุมอุณหภูมิแบบ PSTL นั้นสามารถลดระยะเวลาในการทำแห้งลงได้ เนื่องจากการใช้อุณหภูมิสูงในช่วงแรกนั้นเป็นการให้พลังงานกับผลิตภัณฑ์ที่มากขึ้นและยังส่งผลให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศลดลงมากขึ้นด้วย ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทมวลความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์ได้เร็วกว่า และการทำให้แห้งที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศและอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์ที่มากขึ้นจะส่งผลให้เกิดการถ่ายเทมวลความชื้นได้มากขึ้นด้วย

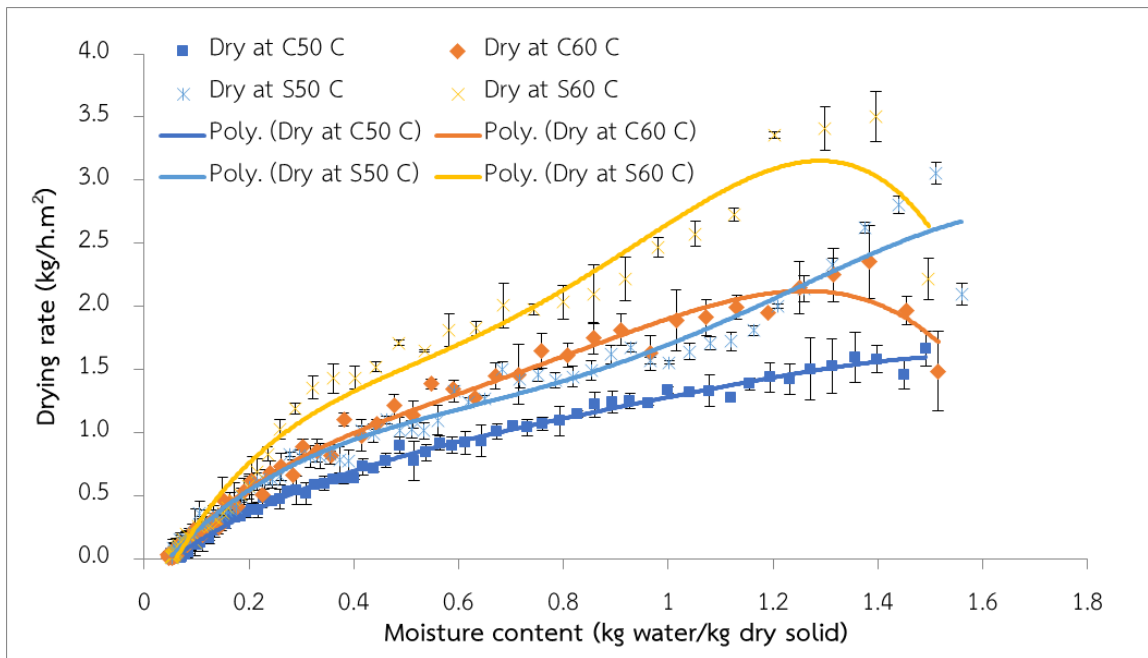
4.3.1 พฤติกรรมการทำแห้งของการทำให้แห้งเปลือกมังคุด

การทดสอบการทำแห้งแบบ PSTL เปรียบเทียบการควบคุมแบบ CAT แสดงให้เห็นถึงความต่างของพฤติกรรมทำแห้งของการทำให้แห้งผลิตภัณฑ์เปลือกมังคุดดังภาพที่ 4.8 และ 4.9 โดยการควบคุมแบบ PSTL นั้นมีการถ่ายเทความชื้นในช่วงแรกได้ดีกว่าและจะลดลงใกล้เคียงกับการควบคุมแบบ CAT เมื่อระยะเวลาผ่านไปซึ่งสอดคล้องกับผลของอุณหภูมิในการทำแห้งที่เกิดขึ้น โดยทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส ให้ผลของการควบคุมอุณหภูมิในการทำแห้งของแต่ละสภาวะเป็นดังภาพที่ 4.9 โดยการทำให้แห้งของการควบคุมแบบ PSTL ที่ 50 และ 60 องศาเซลเซียส ใช้เวลาน้อยกว่าการทำแห้งแบบ CAT ถึง 22% และ 19% เนื่องจากการควบคุมที่ออกแบบให้สามารถใช้อุณหภูมิสูงในช่วงแรกได้ ซึ่งเป็นการให้พลังงานกับผลิตภัณฑ์ที่มากขึ้นและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศลดลงมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทมวลความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์ได้มากกว่า และการทำให้แห้งที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศและอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์ที่มากขึ้นจะส่งผลให้เกิดการถ่ายเทมวลความชื้นได้มากขึ้น



ภาพที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและเวลาที่ใช้ในการทำแห้งของการทำแห้งเปลือกมังคุดด้วยการควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์และการควบคุมอุณหภูมิอากาศคงที่ที่ 50 และ 60 องศาเซลเซียส

นอกจากนั้นการทำแห้งทั้ง 2 สภาวะอุณหภูมิที่ 60 และ 50 องศาเซลเซียส ในช่วงแรกการควบคุมแบบ PSTL ให้อัตราการทำแห้งสูงกว่าการควบคุมแบบ CAT จากนั้นอัตราการทำแห้งมีลักษณะลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งในช่วงท้ายของกระบวนการมีค่าอัตราการทำแห้งที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากระบบมีการลดอุณหภูมิในการทำแห้งลงทำให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นจึงมีอัตราการถ่ายโอนมวลความชื้นหรืออัตราการทำแห้งลดลง ซึ่งการควบคุมแบบ PSTL ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสนั้นมีการปรับระดับอุณหภูมิอากาศลงภายในระยะเวลาไม่นานจากการเริ่มต้นกระบวนการทำแห้ง ทำให้อัตราการทำแห้งลดลงเร็วขึ้น แต่สำหรับการควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ที่มีการปรับอุณหภูมิลดลงช้ากว่า จึงทำให้ยังคงมีอัตราการทำแห้งที่สูงกว่าได้นานขึ้น



ภาพที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการทำให้แห้งและปริมาณความชื้นของการทำให้แห้งเปลือกมังคุดด้วยการควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์และการควบคุมอุณหภูมิอากาศคงที่ที่ 50 และ 60 องศาเซลเซียส

เมื่อสามารถใช้อุณหภูมิที่ใช้ในการทำให้แห้งเพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำให้แห้งเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งส่งผลโดยตรงต่ออัตราการทำให้แห้งของผลิตภัณฑ์ ทำให้การควบคุมแบบ PSTL สามารถเพิ่มอัตราการทำให้แห้งได้เมื่อเปรียบเทียบการควบคุมแบบ CAT ที่อุณหภูมิเดียวกัน

4.3.2 ผลของการทำให้แห้งที่มีต่อคุณภาพทางกายภาพของเปลือกมังคุด

การวิเคราะห์ผลคุณภาพของผลิตภัณฑ์เปลือกมังคุดอบแห้งของการทดสอบการทำให้แห้งแบบควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์เปรียบเทียบการควบคุมอุณหภูมิอากาศคงที่ นำผลิตภัณฑ์ไปบดให้เป็นผงด้วยเครื่องบดอาหารแห้งก่อนการวัดคุณภาพโดยผลการวัดคุณภาพของปริมาณความชื้นและค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้แสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ปริมาณความชื้นและวอเตอร์แอกทिवิตี

| สภาวะการทำแห้ง | ปริมาณความชื้น (%) | | วอเตอร์แอกทिवิตี |
|-----------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|
| | ความชื้นฐานเปียก | ความชื้นฐานแห้ง | |
| เปลือกมังคุดหลังละลาย | 63.57±0.36 | 174.50±2.71 | - |
| C50 | 5.41±0.17 ^{ns} | 5.71±0.19 ^{ns} | 0.2818±0.0033 ^a |
| C60 | 5.38±0.13 ^{ns} | 5.69±0.14 ^{ns} | 0.2040±0.0021 ^c |
| S50 | 5.30±0.14 ^{ns} | 5.60±0.16 ^{ns} | 0.2371±0.0019 ^b |
| S60 | 5.27±0.10 ^{ns} | 5.56±0.11 ^{ns} | 0.2010±0.0027 ^d |

หมายเหตุ ตัวอักษรที่แตกต่างกันแนวตั้ง a - c หมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$), ค่าที่แสดงในตารางคือ ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ผลคุณภาพของผลิตภัณฑ์เปลือกมังคุดอบแห้งได้กำหนดให้ปริมาณความชื้นสุดท้ายต่ำกว่า 5.3 เปอร์เซ็นต์ฐานแห้ง โดยผลของการวัดปริมาณความชื้นฐานแห้งที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับที่กำหนด และการควบคุมแบบ PSTL มีค่าน้อยกว่าการควบคุมแบบ CAT เพียงเล็กน้อยซึ่งไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ วอเตอร์แอกทिवิตีของผลิตภัณฑ์มีค่าสอดคล้องกับค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศสุดท้ายในการทำแห้งซึ่งจะเห็นได้ว่าการควบคุมแบบ PSTL นั้นให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์สุดท้ายของอากาศที่ต่ำกว่าการควบคุมแบบ CAT ซึ่งค่าความแตกต่างของอุณหภูมิเริ่มต้นกับอุณหภูมิสุดท้ายของการทำแห้งยังมีค่ามากทำให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ต่างกันมากขึ้น เนื่องจากการทำแห้งในช่วงแรกมีการให้อุณหภูมิที่สูงทำให้สามารถลดค่าความชื้นสัมพัทธ์ได้มาก

สำหรับค่าการวิเคราะห์สีจะเห็นได้ว่าเปลือกมังคุดผงมีค่าความสว่างลดลงและค่าความเป็นสีน้ำตาลอ่อนมากขึ้นดังค่าในตารางที่ 4.4 ที่มีค่าสีของเปลือกมังคุดหลังละลาย L^* a^* และ b^* เท่ากับ 22.05 16.10 และ 11.33 ตามลำดับ เมื่อนำมาคำนวณค่า Hue angle มีค่าเท่ากับ 35.14 และ Chroma มีค่าเท่ากับ 19.69 แสดงให้เห็นว่าสีของเปลือกมังคุดบดหลังผ่านการละลายมีเฉดสีอยู่ในช่วงของสีม่วงแดงถึงสีส้มแดง (0 - 45 องศา) และมีสีค่อนข้างเข้ม ซึ่งสอดคล้องกับสีของเปลือกมังคุดบดหลังผ่านการละลายที่มองเห็นด้วยสายตา คือส่วนผิวเปลือกมังคุดบดหลังผ่านการละลายมีสีออกม่วงแดง เนื่องจากมีรงควัตถุจำพวกแอนโทไซยานินเป็นรงควัตถุหลัก หลังจากผ่านกระบวนการทำแห้งด้วยการควบคุมอุณหภูมิแบบ PSTL และ CAT พบว่าการควบคุมอุณหภูมิแบบ PSTL ถึงแม้จะใช้อุณหภูมิสูงในช่วงแรกแต่ค่าสีไม่มีค่าแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส แต่ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งการทำแห้งควบคุมอุณหภูมิแบบ PSTL ให้ค่าที่ออกสีน้ำตาลมากกว่า ซึ่งหากความแตกต่างของอุณหภูมิเริ่มต้นกับอุณหภูมิสุดท้ายแตกต่างกันมากทำให้เริ่มเห็นถึงความเปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 4.4 ค่าสีของเปลือกมังคุดผง

| สภาวะการทำแห้ง | ค่าสี | | | | |
|---------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|
| | L* | a* | b* | Hue angle | Chroma |
| เปลือกมังคุดหลัง ละลาย | 22.05±0.15 | 16.10±0.88 | 11.33±0.83 | 0.70±0.05 | 19.69±1.03 |
| C50 | 46.67±0.04 ^{ns} | 15.81±0.09 ^{ns} | 26.16±0.15 ^b | 1.65±0.02 ^b | 30.57±0.09 ^b |
| C60 | 46.41±0.09 ^{ns} | 15.60±0.04 ^{ns} | 27.72±0.31 ^a | 1.78±0.02 ^a | 31.81±0.25 ^a |
| S50 | 46.22±0.07 ^{ns} | 15.77±0.10 ^{ns} | 27.54±0.22 ^a | 1.75±0.01 ^a | 31.73±0.24 ^a |
| S60 | 46.32±0.06 ^{ns} | 15.71±0.08 ^{ns} | 27.82±0.17 ^a | 1.77±0.01 ^a | 31.95±0.18 ^a |

หมายเหตุ ตัวอักษรที่ต่างกันแนวตั้ง a - c หมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$), ค่าที่แสดงในตารางคือ ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

โดยมีค่าความสว่าง (L*) อยู่ในช่วง 46.22 ถึง 46.67 ค่าสีแดง (a*) อยู่ในช่วง 15.60 ถึง 15.81 และค่าสีเหลือง (b*) อยู่ในช่วง 26.16 ถึง 27.82 เมื่อนำมาคำนวณหาค่า Hue angle พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 1.65 ถึง 1.78 แสดงให้เห็นว่าเปลือกมังคุดหลังผ่านการทำแห้งมีเฉดสีอยู่ในช่วงของสีม่วงแดงถึงสีส้มแดง (0 – 45 องศา) และมีค่า Chroma อยู่ในช่วง 30.57 ถึง 31.95 จึงแสดงให้เห็นว่ามีสีค่อนข้างเข้มโดยมีความสอดคล้องกับสีที่มองเห็นด้วยตา

4.3.3 ผลการวิเคราะห์การใช้พลังงาน

สำหรับตารางที่ 4.5 แสดงการวิเคราะห์การใช้พลังงานในกระบวนการทำแห้ง ซึ่งเห็นได้ว่าเมื่อกระบวนการทำแห้งมีอุณหภูมิสูงขึ้นการใช้ปริมาณไฟฟ้าจะลดลงเนื่องจากระยะเวลาในการทำแห้งน้อยลงทั้ง 2 รูปแบบการควบคุม นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบถึงการรูปแบบของการควบคุมกระบวนการทำแห้งแล้ว การควบคุมแบบ PSTL นั้นสามารถลดปริมาณการใช้พลังงานของกระบวนการลงได้ถึงประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากระยะเวลาในการทำแห้งที่ลดลง ถึงแม้ว่าจะมีการใช้อุณหภูมิในการทำแห้งในช่วงแรกสูงแต่คิดเป็นประมาณ 30 - 50 เปอร์เซ็นต์ ของกระบวนการเท่านั้น และปริมาณการใช้พลังงานจำเพาะมีปริมาณเป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยการควบคุมแบบ PSTL สามารถลดปริมาณการใช้พลังงานจำเพาะของกระบวนการลงได้ถึงประมาณ 37 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.5 วิเคราะห์การใช้พลังงาน

| สภาวะการทำแห้ง | ปริมาณการใช้พลังงาน (kW.h) | ปริมาณการใช้พลังงาน จำเพาะ (kW.h/kg) |
|----------------|-------------------------------|---|
| C50 | 70.93 ± 0.85 ^a | 3.65 ± 0.04 |
| C60 | 60.82 ± 0.79 ^b | 3.13 ± 0.04 |
| S50 | 42.81 ± 1.12 ^c | 2.20 ± 0.06 |
| S60 | 39.26 ± 1.04 ^d | 2.02 ± 0.05 |

หมายเหตุ ตัวอักษรที่ต่างกันแนวตั้ง a – d หมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$), ค่าที่แสดงในตารางคือค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

เป็นที่ชัดเจนว่าทั้งเวลาในการทำแห้ง คุณภาพผลิตภัณฑ์และการใช้พลังงานของการควบคุมแบบ PSTL ทั้งหมดประสบความสำเร็จและลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับการควบคุมแบบ CAT ซึ่งหมายความว่าใช้การควบคุมแบบ PSTL เป็นตัวบ่งชี้ขีดจำกัดสูงสุดเพื่อรักษาคุณภาพผลิตภัณฑ์ และยังลดระยะเวลาและการใช้พลังงานในกระบวนการทำแห้ง

4.3.4 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมถูกแสดงในตารางที่ 4.6 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าต้นทุนคงที่มีค่าเท่ากันเนื่องจากคำนวณจากเครื่องจักรเดียวกัน โดยต้นทุนคงที่เท่ากับ 94,250 บาทต่อปี สำหรับต้นทุนผันแปรนั้นจะคำนวณค่าจ้างแรงงานเท่ากับ 900 บาทต่อวันและวันทำงานเท่ากับ 261 วันต่อปีเท่ากับทุกการควบคุม แต่มีความแตกต่างกันเนื่องจากวิธีการควบคุมที่ทำให้ระยะเวลาในการทำแห้งและค่าไฟฟ้าไม่เท่ากัน โดยค่าไฟฟ้าคำนวณหน่วยละ 4.2218 บาท (การไฟฟ้านครหลวง 12/2565)

ตารางที่ 4.6 วิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

| สภาวะการทำแห้ง | ต้นทุนคงที่ (Bath/year) | ต้นทุนผันแปร (Bath/year) | ต้นทุนรวมทั้งหมด (Bath/kg) | จุดคุ้มทุน (year) |
|----------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|----------------------|
| C50 | 94,250.00 | 303,219.50 | 6.35 | 4.37 |
| S50 | 94,250.00 | 291,709.40 | 6.16 | |
| C60 | 94,250.00 | 291,928.64 | 6.17 | 6.34 |
| S60 | 94,250.00 | 283,999.46 | 6.04 | |

โดยต้นทุนผันแปรน้อยที่สุดคือการควบคุมแบบ PSTL ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสมีค่าเท่ากับ 283,999.46 บาทต่อปี รองมาเป็นการควบคุมแบบ PSTL ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสมีค่าเท่ากับ 291,709.40 บาทต่อปี ซึ่งใกล้เคียงกับการควบคุมแบบ CAT ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสมีค่าเท่ากับ 291,928.64 บาทต่อปี และสุดท้ายเป็นการควบคุมแบบ CAT ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสมีค่าเท่ากับ 303,219.50 บาทต่อปี และเมื่อนำต้นทุนคงที่และต้นทุนผันแปรมาคิดหาต้นทุนรวมทั้งหมดจากกำลังการผลิตและเวลาทำงานซึ่งมีแนวโน้มเดียวกับต้นทุนผันแปร โดยต้นทุนรวมทั้งหมดน้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ 6.04 6.16 6.17 และ 6.35 บาทต่อกิโลกรัมตามลำดับ และเปรียบเทียบจุดคุ้มทุนระหว่างการควบคุมการควบคุมแบบ PSTL กับการควบคุมแบบ CAT ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเท่ากับ 4.37 ปี และที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเท่ากับ 6.34 ปี ซึ่งการควบคุมแบบ PSTL ที่ 60 องศาเซลเซียสนั้นลดระยะเวลาในการทำแห่งนี้้อยกว่าและใช้หน่วยไฟฟ้ามากกว่าการทำแห่งนี้ 50 องศาเซลเซียสจึงทำให้จุดคุ้มทุนที่ 50 องศาเซลเซียสมีค่าน้อยกว่า แต่ถึงอย่างไรการควบคุมแบบ PSTL นั้นสามารถลดต้นทุนและเพิ่มความคุ้มทุนในการทำแห่งนี้ได้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้พยายามออกแบบและสร้างแนวทางที่เรียบง่ายในการสอบเทียบและชดเชยตัวรับรู้น้ำหนักให้มีความแม่นยำมากขึ้นสำหรับกระบวนการทำแห้ง และการออกแบบการดำเนินการจำกัดอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์อาหารที่เป็นไปได้ในกระบวนการทำแห้งที่สามารถรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารได้ดีที่สุด

5.1.1 การสอบเทียบตัวรับรู้น้ำหนักสำหรับการวัดน้ำหนักและชดเชยผลของอุณหภูมิในห้องทำแห้ง

การออกแบบและสร้างแนวทางปฏิบัติด้วยวิธีที่เรียบง่ายในการสอบเทียบและชดเชยตัวรับรู้น้ำหนักให้มีความแม่นยำมากขึ้น โดยใช้ตัวกรองสัญญาณในการกรองสัญญาณรบกวนสำหรับกระบวนการทำแห้งอาหาร ซึ่งการสอบเทียบแบบจำลองทางสถิติในวิทยานิพนธ์นี้แสดงให้เห็นว่าสมการถดถอยพหุนามลำดับที่สามเพียงพอที่จะชดเชยผลกระทบของอุณหภูมิต่อแบบจำลองทางสถิติของตัวรับรู้น้ำหนัก และผลของตัวกรองสัญญาณที่ได้จากการใช้ตัวกรองความถี่ต่ำแบบง่ายในการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับเวลานั้นดีเท่ากับผลที่ได้จากการใช้ตัวกรองคาบมานของการศึกษานี้ หมายความว่า การดำเนินการของตัวกรองความถี่ต่ำ เพียงพอสำหรับการชดเชยการวัดน้ำหนักในกระบวนการทำแห้งอาหาร

5.1.2 การศึกษาแบบจำลองของการปรับอุณหภูมิอากาศเพื่อควบคุมขีดจำกัดอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์แบบอัตโนมัติในกระบวนการทำแห้งแบบลมร้อน

สำหรับการออกแบบการดำเนินการจำกัดอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์อาหารที่เป็นไปได้ในกระบวนการทำแห้งที่สามารถรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารได้ดีที่สุด โดยเริ่มด้วยการทดสอบสมรรถนะอย่างต่อเนื่องในสถานะที่ไม่มีวัสดุพบว่าสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องไม่พบปัญหาใด ๆ โดยการควบคุมอุณหภูมิอากาศสามารถการควบคุมได้อย่างแม่นยำและมีความคลาดเคลื่อน ± 0.5 องศาเซลเซียส จากการตั้งค่า

5.1.3 การทดสอบระบบการควบคุมกระบวนการทำแห้งด้วยการทำแห้งเปลือกมังคุด

สุดท้ายในการทดสอบการทำแห้งผลิตภัณฑ์เปลือกมังคุดด้วยการเปรียบเทียบการควบคุมชนิดจำกัดอุณหภูมิผิวผลิตภัณฑ์สูงสุด (PSTL) และการทำแห้งทั่วไป (CAT) พบว่าในกระบวนการทำแห้งที่สามารถรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารได้ดีที่สุด คือ การควบคุมชนิดจำกัดอุณหภูมิผิวผลิตภัณฑ์สูงสุดของกระบวนการทำแห้ง โดยอัลกอริทึมของการควบคุมใช้การวนซ้ำน้อยที่สุดร่วมกับการปรับค่าอุณหภูมิตามค่าเวลาที่ของกระบวนการสำหรับการประเมินการอ้างอิงแบบจำลองและการสังเกตพารามิเตอร์ที่จะควบคุม แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่นำเสนอไม่เพียงแต่มีประสิทธิภาพในการรักษาคุณภาพของอาหารเท่านั้น แต่ยังลดระยะเวลาและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานส่งผลให้สามารถลดต้นทุนในการผลิตได้ดีกว่าวิธีการทำแห้งแบบทั่วไป โดยใช้อุณหภูมิคงที่เป็นพารามิเตอร์ในการติดตามของการใช้เปลือกมังคุดเป็นวัสดุทดสอบระบบการควบคุมที่สร้างขึ้นสำหรับกระบวนการทำแห้ง นอกจากนี้กระบวนการทำแห้งที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศและอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์ที่มากขึ้นจะส่งผลให้เกิดการถ่ายเทมวลความชื้นได้มากขึ้นด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การสอบเทียบตัวรับรู้น้ำหนักสำหรับการวัดน้ำหนักและชดเชยผลของอุณหภูมิในห้องทำแห้ง

สำหรับผลการศึกษาศึกษาการสอบเทียบและชดเชยผลของอุณหภูมิของตัวรับรู้น้ำหนักให้มีความแม่นยำมากขึ้นนั้นเป็นผลการศึกษาเฉพาะของการตัวรับรู้น้ำหนักกับเครื่องทำแห้งเครื่องที่วิจัยนี้เท่านั้น ซึ่งไม่จำเป็นเสมอไปที่สมการถดถอยพหุนามลำดับที่สามหรือการใช้ตัวกรองความถี่ต่ำแบบง่ายจะเพียงพอต่อการสอบเทียบและชดเชยผลของอุณหภูมิของตัวรับรู้น้ำหนักได้ แต่แนวทางปฏิบัติด้วยวิธีที่เรียบง่ายที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการสอบเทียบและชดเชยผลของอุณหภูมิเพื่อเพิ่มความแม่นยำขึ้นได้ โดยจำเป็นจะต้องมีการสอบเทียบใหม่ทุกครั้งเมื่อเปลี่ยนเครื่องทำแห้ง และยังจำเป็นจะต้องมีการทวนสอบเป็นระยะอย่างน้อย 1 ปี สำหรับสมการและค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการควบคุมเพื่อความแม่นยำอยู่เสมอ นอกจากนี้แนวทางปฏิบัตินี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการสอบเทียบและชดเชยผลของอุณหภูมิของตัวรับรู้น้ำหนักในการบวนการอื่น ๆ ได้อีกด้วย

5.2.2 การศึกษาแบบจำลองของการปรับอุณหภูมิอากาศเพื่อควบคุมชนิดจำกัดอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์แบบอัตโนมัติในกระบวนการทำแห้งแบบลมร้อน

สำหรับในส่วนของผลการศึกษาศึกษาการควบคุมการชนิดจำกัดอุณหภูมิผิวผลิตภัณฑ์สูงสุดของผลิตภัณฑ์อาหาร ในกระบวนการทำแห้งที่สามารถรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารได้ดีที่สุดนั้นสามารถนำวิธีการควบคุมไปใช้กับการเครื่องทำแห้งแบบลมร้อนได้ และสามารถประยุกต์ใช้วิธีการควบคุมนี้กับการควบคุมอุณหภูมิของกระบวนการทำแห้งอื่น ๆ ได้ แต่ถึงอย่างไรก็ตามการควบคุมที่

นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบภายใต้แนวคิดของการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ให้น้อยที่สุด เพื่อให้กระบวนการทำแห้งสามารถทำแห้งได้เร็วขึ้นและใช้การควบคุมของการควบคุมอุณหภูมิผิวผลิตภัณฑ์อย่างง่ายให้การป้องกันการเกิดผิวแข็งที่ตัวผลิตภัณฑ์ซึ่งจะเป็นการปิดกั้นการคายน้ำ ดังนั้น การนำค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมาร่วมในการคำนวณโดยตรงจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการควบคุมการบวนการทำแห้งให้ดียิ่งขึ้นได้

5.2.3 การใช้งานระบบควบคุมและข้อควรระวัง

สำหรับในส่วนการใช้งานระบบควบคุมที่นำเสนอ นั้นสามารถใช้งานได้กับผลิตภัณฑ์อาหารได้หลากหลาย โดยสามารถใช้การกำหนดค่าอุณหภูมิสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ซึ่งสามารถใช้ค่าอุณหภูมิผิวหรืออุณหภูมิอากาศในการทำแห้งสุดท้ายที่ดีที่สุดจากการศึกษาวิจัยอื่นได้ ตัวอย่างเช่นในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ตัวอย่างช่วงอุณหภูมิสำหรับการทำแห้งของผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ

| กลุ่มผลิตภัณฑ์ | ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ | ช่วงอุณหภูมิผิวที่เหมาะสม (°C) |
|----------------|-----------------------------|--------------------------------|
| สมุนไพร | เปลือกมังคุด [47-49] | 60 - 75 |
| | ชิงสไลด์ [58-60] | 60 - 70 |
| | กระเทียมดำ [61-63] | 60 - 85 |
| | ฟ้าทะลายโจร [64-66] | 55 - 60 |
| | มะตูม [67-69] | 60 - 65 |
| ธัญพืช | เมล็ดมะม่วงหิมพานต์ [70-72] | 55 - 75 |
| | อัลมอนต์ [73-75] | 60 - 70 |
| | เมล็ดทานตะวัน [76-78] | 55 - 65 |
| | เมล็ดฟักทอง [79-81] | 60 - 80 |
| | ลูกเดือย [82-84] | 60 - 75 |
| เนื้อสัตว์ | ปลาสด [85-87] | 40 - 60 |
| | กุ้ง [88-90] | 50 - 75 |
| | หมึก [91-93] | 50 - 60 |
| | เนื้อวัว [94-96] | 40 - 70 |
| | เนื้อหมู [97-99] | 55 - 80 |
| ผลไม้ | มะม่วง [100-102] | 60 |
| | กล้วย [103-105] | 50 - 60 |

| กลุ่มผลิตภัณฑ์ | ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ | ช่วงอุณหภูมิผิวที่เหมาะสม (°C) |
|----------------|------------------------|--------------------------------|
| | สตรอเบอร์รี่ [106-108] | 50 - 65 |
| | สับปะรด [109-111] | 60 - 70 |
| | ลูกเกต [112-114] | 50 - 60 |

และหากนำระบบไปใช้กับเครื่องทำแห้งอื่นๆ ควรระวังในการกำหนดค่าอุณหภูมิเริ่มต้นในการทำแห้งที่สูงเกินไปอาจทำให้เกินผิวแข็งที่ผิวของผลิตภัณฑ์ซึ่งเป็นการบล็อกการระเหยน้ำ ซึ่งอาจใช้ช่วงอุณหภูมิสูงสุดจากแผนการทดลองและในการใช้งานระบบตัวรับรู้น้ำหนักนั้นสามารถวัดค่าได้สูงสุดที่ 3 กิโลกรัมเท่านั้น แต่สามารถปรับเปลี่ยนตัวรับรู้น้ำหนักใหม่โดยต้องทำการสอบเทียบการวัดค่าน้ำหนักและการชดเชยผลของอุณหภูมิใหม่ร่วมด้วย และการนำระบบไปใช้กับเครื่องทำแห้งที่มีอุณหภูมิสูงตัวรับรู้ต่างๆ จะต้องสามารถทำงานได้ในช่วงสภาวะนั้นด้วย นอกจากนั้นตัวรับรู้น้ำหนักและอุณหภูมิเป็นอุปกรณ์ในการตรวจสอบความถูกต้องจึงจำเป็นต้องมีสอบเทียบใหม่ทุกปี

เอกสารอ้างอิง

- [1] V. Sosle, G. S. V. Raghavan, R. Kittler, “Low-Temperature Drying Using a Versatile Heat Pump Dehumidifier,” **Drying Technology**, Vol. 21, 2003, pp. 539 - 554.
- [2] S. Phatanayindee, C. Borompichaichartkul, G. Srzednicki, J. Craske, M. Wootton, “Changes of chemical and physical quality attributes of macadamia nuts during hybrid drying and processing,” **Drying Technology**, Vol. 30, 2012, pp. 1870 - 1880.
- [3] I. Zlatanović, M. Komatina, D. Antonijević, “Low-temperature convective drying of apple cubes,” **Applied Thermal Engineering**, Vol. 53, 2013, pp. 114 - 123.
- [4] M.N.A. Hawlader, C. Perena and M. Tian, “Comparison of the retention of 6 – gingerol in drying of ginger under modified atmosphere heat pump drying and other drying methods,” **Drying Technol**, Vol. 24 (No. 1), 2006, pp. 51 - 56.
- [5] B. Sturm, W.C. Hofacker, O. Hensel, “Automatic control of the drying process of biological materials using optical sensors to acquire surface temperature, color and shape,” **Annual International Meeting of the ASABE**, Reno, Nevada, USA, 21.06.-24.06.2009, Paper Number 096219.
- [6] A. M. Nuñez Vega, B. Sturm, W. Hofacker, “Simulation of the convective drying process with automatic control of surface temperature,” **Journal of Food Engineering**, Vol. 170, 2016, pp. 16 - 23.
- [7] S. Cernișev, “Effects of conventional and multistage drying processing on non-enzymatic browning in tomato,” **Journal of Food Engineering**, Vol. 96, 2010, pp. 114 - 118.
- [8] J. Johnston and K. Coffey, “Optimized performance is the result of a blend of good manufacturing processes, smart system integration, high-dynamic range A/D converters, and software compensation,” **Sensors**. Vol. 17, 2000, pp. 52 - 55.
- [9] P. Pietrzak, M. Meller, M. Niedźwiecki, “Dynamic mass measurement in checkweighers using a discrete time-variant low-pass filter,” **Mechanical Systems and Signal Processing**, Vol. 48 (1-2), 2014, pp. 67 - 76.
- [10] İ. Kelemençe and M.E. Yalçın, “Dynamic Weighing Using a Time-variant Low Pass Filter,” **2019 11th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)**, 2019, DOI: 10.23919/ELECO47770.2019.8990494.

- [11] C. Scheidl, M. Chiari, R. Kaitna, M. Müllegger, A. Krawtschuk, T. Zimmermann and D. Proske, “Analysing Debris-Flow Impact Models, Based on a Small Scale Modelling Approach,” **Surv Geophys**, Vol. 34, 2013, pp. 121 – 140.
- [12] H. Nanto, Y. Hamaguchi, M. Komura, Y. Takayama, T. Kobayashi, Y. Sekikawa, T. Miyatake, E. Kusano, T. Oyabu and A. Kinbara, “A Novel Chemosensor System Using Surface Plasmon Resonance Taste Sensor and Metal Oxide Odor Sensor for Quality Control of Vinegar,” **Sensors and Materials**, Vol. 14 (No. 1), 2002, pp. 1 – 10.
- [13] Y. Hasegawa, G. Yamanaka, K. Ando, and H. Uchida, “Ambient Temperature Effects on Evaluation of Plant Physiological Activity Using Plant Bioelectric Potential,” **Sensors and Materials**, Vol. 26 (No. 7), 2014 pp. 461 - 470.
- [14] M. Yasuura, Q. Shen, Y. Tahara, R. Yatabe, and K. Toko, “Development and Investigation of a Sweetness Sensor for Sugars -Effect of Lipids-” **Sensors and Materials**, Vol. 27 (No. 5), 2015 pp. 351 - 358.
- [15] D. Richiedi and A. Trevisani, “Shaper-Based Filters for the compensation of the load cellresponse in dynamic mass measurement” **Mechanical Systems and Signal Processing**, Vol. 98 (No. 1), 2018, pp. 281 - 291.
- [16] S. Phoungchandang, S. Saentaweek, “Effect of two stage, tray and heat pump assisted-dehumidified drying on drying characteristics and qualities of dried ginger,” **Food and Bioproducts Processing**, Vol. 89, 2011, pp. 429 – 437.
- [17] S. Eleeyah, S. Fameera, H. Radchadaporn, “Optimal Condition and Drying Kinetic Modeling of Betel Nut Drying Using Combined Thermal Energy,” **Journal of Yala Rajabhat University**, Vol. 7, 2012, pp. 105 – 115.
- [18] R. Assawarachan, “Effects of Temperature and Layer Thicknesses on Drying Kinetics of Coconut Residue,” **Thai Society of Agricultural Engineering Journal**, Vol. 22 (No.1), 2016, pp. 28 – 38.
- [19] G. E. David and P. R. Edgar, “Load cells temperature effect in force applications for automotive industry requirements,” *International Conference Cultivating metrological knowledge*, Vol. 27, 2007, pp. 17 - 19.
- [20] V. Matko, “ Determination of Porosity Using a Water Pycnometer with Capacitive Level Detection,” **Sensors and Materials**, Vol. 16 (No. 1), 2004, pp. 1 - 12.
- [21] Y. Fujimoto, H Chiba, R. Okawa, and K. Toko , “Effects of Different Heating Methods on Positional Differences in Taste, Texture, Color, and Palatability of

- Simmered Food: Comparison of Sensor Responses and Sensory Evaluation Results,” **Sens. Mater.**, Vol. 27 (No. 5), 2015, pp. 365 – 375.
- [22] L.C. Brereton and S.M. McGill, “Frequency response of spine extensors during rapid isometric contractions: effects of muscle length and tension,” **Journal of Electromyography and Kinesiology**, Vol. 8, 1998, pp. 227 – 232.
- [23] M. Halimic and W. Balachandran, “Kalman filter for dynamic weighing system,” **ISIE’95. Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics**, Jul.2, 1995, pp. 786 - 791.
- [24] Y. Noda, Y. Matsuo, K. Terashima and Y. Zheng, “A Novel Flow Rate Estimation Method using Extended Kalman Filter and Sensor Dynamics Compensation with Automatic Casting Pouring Process,” **Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control Seoul**, Vol. 17, 2008, pp. 710 – 715.
- [25] A.M. Harb, Enhancing The Performance of Dynamic Weighing Systems using Kalman Filter, A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Electrical Engineering, Islamic University of Gaza, 2013.
- [26] S.R. un N. Jafri, A. Jamshaid, S.M. un N. Jafri and J. Iqbal, “Estimation of Surgical Needle Insertion Force Using Kalman Filter,” **Journal of Electrical Engineering & Technology**, Vol. 15, 2020 pp. 899 – 906.
- [27] F. Cao, P.D. Docherty, S. Ni and X. Chen, “Contact force and torque sensing for serial manipulator based on an adaptive Kalman filter with variable time period,” **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, Vol. 72, 2021, 102210.
- [28] Sh.M. Elshehawy and H. E. Elmashad, “Effect of Carrot Drying Condition on Surface Carotene Content and Drying Curve,” **J. Food and Dairy Sciences**, Vol. 1 (No.6), 2010, pp. 355 – 366.
- [29] J.C. Moreira, “A New Method for Rotor Time Constant Tuning in Indirect Field Oriented Control,” **IEEE Transactions on Power Eletronics**, VOL. 8 (NO. 4), 1993, pp. 626 – 631.
- [30] V. Székely and M. Rencz, “Thermal Dynamics and the Time Constant Domain,” **IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies**, Vol. 23 (NO. 3), 2000, pp. 587 – 594.

- [31] S.P. Nair, X. Yang, T.A. Krouskop, and R. Righetti, "Performance Analysis of a New Real-Time Elastographic Time Constant Estimator," **IEEE Transactions on Medical Imaging**, Vol. 30 (No. 2), 2011, pp. 497 – 511.
- [32] Q.H. Nguyen, S.B. Choi and N.M. Wereley, "Optimal design of magnetorheological valves via a finite element method considering control energy and a time constant," **Smart Mater. Struct.**, Vol. 17, 2008, 025024.
- [33] Y. Xiao, F. Ding, Y. Zhou, M. Li and J. Dai, "On consistency of recursive least squares identification algorithms for controlled auto-regression models," **Applied Mathematical Modelling**, Vol. 32, 2008, pp. 2207 – 2215.
- [34] C. Paleologu, J. Benesty and S. Ciochin, "A Robust Variable Forgetting Factor Recursive Least-Squares Algorithm for System Identification," **IEEE Signal Processing Letters**, Vol 15, 2008, pp. 597 – 600.
- [35] C. Wang and T. Tang, "Recursive least squares estimation algorithm applied to a class of linear-in-parameters output error moving average systems," **Applied Mathematics Letters**, Vol. 29, 2014, pp. 36 – 41.
- [36] F. Ding, X. Liu and M. Liu, "The recursive least squares identification algorithm for a class of Wiener nonlinear systems," **Journal of the Franklin Institute**, Vol. 353, 2016, pp. 1518 – 1526.
- [37] A. S. Mujumdar, *Handbook of Industrial Drying*, Third Edition, LLC/Taylor & Francis Group: New York and Basel, 2006.
- [38] T. Kudra, and A.S. Mujumdar, 2009, *Advanced Drying Technology* 2nd ed. USA : CRC Press, Taylor & Francis Group.
- [39] F. A. N. Fernandes, S. Rodrigues, C. L. Law, A. S. Mujumdar, "Drying of exotic tropical fruits: a comprehensive review. A comprehensive review," **Food Bioprocess Technol**, Vol. 4 (No. 2), 2011, pp. 163 - 185.
- [40] M. K. Krokida, E. Tsami, Z. B. Maroulis, "Kinetics on color changes during drying of some fruits and vegetables." **Drying Technology**, Vol. 16 (3-5), 1998, pp. 667 - 685.
- [41] C. T. Kiranoudis, N. C. Markatos, "Pareto design of conveyor-belt dryers," **Journal of Food Engineering**, Vol. 46 (3), 2000, pp. 145 - 155.
- [42] H. H. Nijhuis, H. M. Topping, S. Muresan, D. Yuksel, C. Leguijt, W. Kloek, "Approaches to improving the quality of dried fruit and vegetables," **Trends in Food Science & Technology**, Vol. 9, 1998, pp. 13 - 20.

- [43] S. Inchuen, W. Narkrugsu and P. Pornchaloempong, "Effect of Drying Methods on Chemical Composition, Color and Antioxidant Properties of Thai Red Curry Powder," **Kasetsart J. (Nat. Sci.)**, Vol 44, 2010, pp. 142 – 151.
- [44] A.G. Pirbalouti, S. Salehia, and L. Craker, "Effect of drying methods on qualitative and quantitative properties of essential oil from the aerial parts of coriander." **Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants**, Vol 4, 2017, pp. 35 – 40.
- [45] C. Borompichaichartkul, K. Luengsoke, N. Chinprahast, and S. Devahastin, "Improving quality of macadamia nut (*Macadamia integrifolia*) through the use of hybrid drying process," **Journal of Food Engineering**, Vol. 93, 2009, pp. 348 – 353.
- [46] Phoungchandang, S., and Saentaweek, S., 2011. "Effect of two stage, tray and heat pump assisted-dehumidified drying on drying characteristics and qualities of dried ginger." **Food and Bioproducts Processing**, Vol 89, pp. 429 – 437.
- [47] P. Suvarnakuta, C. Chaweerungrat and S. Devahastin, "Effects of drying methods on assay and antioxidant activity of xanthenes in mangosteen rind," **Food Chemistry**, Vol. 125, 2011, pp. 240 – 247.
- [48] R. Sothornvit, "Drying Process and Mangosteen Rind Powder Product," **International Society for Horticultural Science**, Vol. 928, 2012, pp. 233 – 242.
- [49] M.L. García, M.H. Carrión, S. Escobar, A. Rodríguez and J.R. Cortina, "Optimization of the antioxidant capacity of mangosteen peels (*Garcinia mangostana* L.) extracts: Management of the drying extraction processes," **Food Science and Technology International**, Vol. 0, 2020, pp. 1 – 9.
- [50] A. Motevali, S. Minaei, M.H. Khoshtaghaza and H. Amirnejat, "Comparison of energy consumption and specific energy requirements of different methods for drying mushroom slices," **Energy**, Vol. 36, 2011, pp. 6433 – 6441.
- [51] E.O. Chijioke, K.I. Philomena and T.N. Joseph, "Effective Moisture Diffusivity, Activation Energy and Specific Energy Consumption in the Thin-Layer Drying of Potato," **International Journal of Novel Research in Engineering and Science**, Vol. 3 (No.2), 2016, pp. 10 – 22.
- [52] L. Ye, H.S. EL-Mesery, M.M. Ashfaq a, Y. Shi, H. Zicheng and W.G. Alshaer, "Analysis of energy and specific energy requirements in various drying process of mint leaves," **Case Studies in Thermal Engineering**, Vol. 26, 2021, 101113.

- [53] T. Pongsuttiyakorn, P. Sooraksa and P. Pornchaloempong, "Simple Effective and Robust Weight Sensor for Measuring Moisture Content in Food Drying Process," **Sens. Mater.**, Vol. 31 (No.7), 2019, pp. 2393 – 2404.
- [54] AOAC. 2000. "Feeds" Official methods of analysis of AOAC International. Gaithersburg, MD : AOAC International.
- [55] T. Pongsuttiyakorn, P. Sooraksa and P. Pornchaloempong, "Optimization of Temperature Sensors for Drying Mangosteen Peel," **Sens. Mater.**, Vol. 33 (No.12), 2021, pp. 4319 – 4329.
- [56] C. Borompichaichartkul, N. Chinprahast, S. Devahastin, L. Wiset, N. Poomsa-ad and T. Ratchapo, "Multistage Heat Pump Drying of Macadamia Nut under Modified Atmosphere," **Proceedings of IDS2010 – Drying 2010**, 2010, pp. 1853 – 1858.
- [57] L.Z. Zhang, L. Jiang, Z.C. Xu, X.J. Zhang, Y.B. Fan, M. Adnoui and C.B. Zhang, "Optimization of a variable-temperature heat pump drying process of shiitake mushrooms using response surface methodology," **Renewable Energy**, Vol. 198, 2022, pp. 1267 – 1278.
- [58] E. Jayashree, R. Visvanathan and T. John Zachariah, "Quality of dry ginger (*Zingiber officinale*) by different drying methods," **Journal of Food Science and Technology**, Vol. 51, 2014, pp. 3109 - 3198.
- [59] Z. Ren, X. Yu, A.E.A. Yagoub, O.A. Fakayode, H. Ma, Y. Sun and C. Zhou, "Combinative effect of cutting orientation and drying techniques (hot air, vacuum, freeze and catalytic infrared drying) on the physicochemical properties of ginger (*Zingiber officinale* Roscoe)," **LWT**, Vol. 144, 2021, 111238.
- [60] S. Zeng, B. Wang, W. Lv and Y. Wu, "Effects of microwave power and hot air temperature on the physicochemical properties of dried ginger (*Zingiber officinale*) using microwave hot-air rolling drying" **Food Chemistry**, Vol. 404 (Part B), 2023, 134741.
- [61] T.D. Widyaningsih, S.M. Akbar and N. Wijayanti, "Optimization of maltodextrin concentration, drying temperature and drying time on total flavonoid content and antioxidant activity of black garlic (*Allium sativum* L.) aqueous extract powder using response surface methodology," **Earth Environ. Sci.**, Vol 924, 2021, 012035.
- [62] S.E. Bae, S.Y. Cho, Y. D. Won and S.H. Lee, "Changes in S-allyl cysteine contents and physicochemical properties of black garlic during heat treatment," **LWT**, Vol. 55, 2014, pp. 397 - 402.

- [63] D. Wang, Y. Feng, J. Liu, J. Yan, M. Wang, J.I. Sasaki and C. Lu, "Black Garlic (*Allium sativum*) Extracts Enhance the Immune System," **Medicinal and Aromatic Plant Science and Biotechnology**, Vol. 4 (No.1), 2010, pp. 37 – 40.
- [64] M.N. Ibrahim and G.H. Chong, "Stability of Andrographolide in *Andrographis paniculata* Under Selected Storage Conditions," **International Journal of Engineering and Technology**, Vol. 5 (No.1), 2008, pp. 69 – 73.
- [65] Y.Y. Hee and G.H. Chong, "Drying behaviour of *Andrographis paniculata* in vacuum drying," *International Food Research Journal*, Vol. 22 (No.1), 2015, pp. 393 – 397.
- [66] R. Ubaid, S. Priya, P. Afsana, K.S. Saroj and S. Hemalatha, "Efficacy of *Andrographis paniculata* against extended spectrum β -lactamase (ESBL) producing *E. coli*," **BMC Complementary and Alternative Medicine** volume, Vol. 18 (No.244), 2018, pp. 1 – 9.
- [67] A. Singh, H.K. Sharma, N. Kumar, A. Upadhyay and K.P. Mishra, "Thin layer hot air drying of bael (*Aegle marmelos*) fruit pulp," **International Food Research Journal**, Vol. 22 (No.1), 2015, pp. 398 – 406.
- [68] S. Tanmay, S. Molla, H. Kumar, C. Tanupriya and C. Runu, "Comparative Approach of Artificial Neural Network and Thin Layer Modelling for Drying Kinetics and Optimization of Rehydration Ratio for Bael (*Aegle marmelos (L) correa*) Powder Production" **Economic Computation and Economic Cybernetics Studies and Research**, Vol. 55 (No.1), 2021, 166 – 184.
- [69] S.K. Hazra, T. Sarkar, M. Salauddin, H.I. Sheikh, S.Pati and R. Chakraborty, "Characterization of phytochemicals, minerals and in vitro medicinal activities of bael (*Aegle marmelos L.*) pulp and differently dried edible leathers" **Heliyon**, Vol. 6 (No.10), 2020, e05382.
- [70] N. Dimoso, E. Makule and N. Kassim, "Quality Assessment of Formulated Osmotically Dehydrated Cashew Apple (*Anacardium occidentale L.*) Slices Dried using Hot air and Solar Driers," *International Journal of Biosciences*, Vol. 17 (No.6), 2020, pp. 421 – 432.
- [71] S. Tirawanichakul, N. Saenaratana, P. Boonyakiat and Y. Tirawanichakul, "Microwave and hot air drying of cashew nut: Drying kinetics and quality aspects," **2011 IEEE Colloquium on Humanities, Science and Engineering**, 2011, pp. 825-830, doi: 10.1109/CHUSER.2011.6163851.

- [72] A.P. Olalusi and O. Erinle, "Influence of drying temperature and pretreatment on the drying characteristics and quality of dried cashew (*Anacardium occidentale* L.) apple slices," **Croatian journal of food science and technology**, Vol. 11 (No.1), 2019, pp. 97 – 103.
- [73] C. Chen, C. Liao, I. Wongso, W. Wang, R. Khir, G. Huang, F. Niederholze, L. Wang and Z. Pan, "Drying and disinfection of off-ground harvested almonds using step-down temperature hot air heating," **LWT**, Vol. 152, 2021, 112282.
- [74] C. Venkitasamy, C. Zhu, M.T. Brandl, F.J.A. Niederholzer, R. Zhang, T.H. McHugh, Z. Pan, "Feasibility of using sequential infrared and hot air for almond drying and inactivation of *Enterococcus faecium* NRRL B-2354," **LWT**, Vol. 95, 2018, pp.123 - 128.
- [75] M. Kaveh, A. Jahanbakhshi, Y. Abbaspour-Gilandeh, E. Taghinezhad and M.B.F. Moghimi, "The effect of ultrasound pre-treatment on quality, drying, and thermodynamic attributes of almond kernel under convective dryer using ANNs and ANFIS network," **Journal of Food Process Engineering**, Vol. 41 (No.7), 2018, e12868.
- [76] A.H. Mirzabe and G.R. Chegini, "Hot-Air Drying and Modeling The Drying Kinetics of Sunflower (*Helianthus Annus L.*) Petals," **Electronic Journal of Polish Agricultural Universities**, Vol. 23 (No.3), 2020, DOI:10.30825/5.EJPAU.190.2020.23.3.
- [77] N. Dibagar, S.J. Kowalski, R.A. Chayjan and A. Figiel, "Accelerated convective drying of sunflower seeds by high-power ultrasound: Experimental assessment and optimization approach," **Food and Bioproducts Processing**, Vol. 123, 2020, pp. 42 – 59.
- [78] M.J. Pakhritdinovich and S.E. Xasanovich, "Research of a Combined Energy-Saving Drum Dryer for Drying Sunflower Seeds," **Harvard Educational and Scientific Review**, Vol.2. (No.1), 2022, pp. 35 – 52.
- [79] M.J. Ortiz-Jerez, A.F. Sánchez and J.E.Z. Montoya, "Drying kinetics and sensory characteristics of dehydrated pumpkin seeds (*Cucurbita moschata*) obtained by refractance window drying," **Heliyon**, Vol. 8 (No.10), 2022, e10947.
- [80] K. Sacilik, "Effect of drying methods on thin-layer drying characteristics of hull-less seed pumpkin (*Cucurbita pepo L.*)," **Journal of Food Engineering**, Vol. 79 (No.1), 2007, pp. 23 – 30.

- [81] Z. Uddin, P. Suppakul and W. Boonsupthip “Effect of air temperature and velocity on moisture diffusivity in relation to physical and sensory quality of dried pumpkin seeds,” **Drying Technology**, 2016, Vol. 34 (No.12), 2016, pp. 1423 – 1433.
- [82] R. Wang, C. Chen and S. Guo, “Effects of drying methods on starch crystallinity of gelatinized foxtail millet (**Q**-millet) and its eating quality,” **Journal of Food Engineering**, Vol. 207, 2017, pp. 81 – 89.
- [83] J.O. Ojediran and A.O. Raji, “Thin layer drying of millet and effect of temperature on drying characteristics,” **International Food Research Journal**, Vol. 17, 2010, pp. 1095 – 1106.
- [84] Y. Wang, H. Zhao, X. Song, W. Zhang and F. Yan, “Drying Kinetics, Physicochemical Properties and Sensory Quality of the Instant Foxtail Millet as Affected by Drying Methods,” **Pol. J. Food Nutr. Sci.**, Vol. 72 (No.1), 2022, pp. 69 – 78.
- [85] P. Klinmalai, S. Fong-in, S. Phongthai and W. Klunklin, “Improving the Quality of Frozen Fillets of Semi-Dried Gourami Fish (*Trichogaster pectoralis*) by Using Sorbitol and Citric Acid,” **Foods**, Vol. 10 (No.11), 2021, doi.org/10.3390/foods10112763.
- [86] S. Wasasiri, J. Runglerdkriangkrai, and N. Pansawat, “Screening of Factors Affecting Snakeskin Gourami (*Trichogaster pectoralis*) Fish Chips Prepared by Using Conveyor Oven and Microwave Oven,” **Proceedings of 53rd Kasetsart University Annual Conference**, 2015, pp. 1227 - 1235.
- [87] Y.S. Yean, R. Pruthiarenun, P. Doe, T. Motohiro and K. Gopakumar, *Dried and Smoked Fish Products*. USA : CRC Press, Taylor & Francis Group.
- [88] K. Prashob, D.S. Aniesrani Delfiya, S. Murali, P.V. Alfiya and M.P. Samuel, “Drying of shrimp using hot air-assisted continuous infrared drying system,” **Journal of Food Processing and Preservation**, Vol. 46 (No.9), 2022, e16364.
- [89] S. Prachayawarakorn, S. Soponronnarit, S. Wetchacama and D. Jaisut, “Desorption Isotherms and Drying Characteristics of Shrimp in Superheated Steam and Hot Air,” **Drying Technology**, Vol. 20 (No.3), 2002, pp. 669 – 684.
- [90] Y. Namsanguan, W. Tia, S. Devahastin and S. Soponronnarit, “Drying Kinetics and Quality of Shrimp Undergoing Different Two-Stage Drying Processes,” **Drying Technology**, Vol. 22 (No.4), 2004, pp. 759 – 778.

- [91] P. Viji, M. Sumath Yadav, D. Jesmi and B. Madhusudana Rao, "Effects of microwave vacuum drying and conventional drying methods on the physicochemical and microstructural properties of squid shreds," **Journal of the Science of Food and Agriculture**, Vol. 99 (No.13), 2019, pp. 5778 – 5783.
- [92] H. Chen, M. Zhang, Z. Fang and Y. Wang, "Effects of Different Drying Methods on the Quality of Squid Cubes," **Drying Technology**, Vol. 31 (No.16), 2013, pp. 1911 – 1918.
- [93] Y. Wang, M. Zhang, A.S. Mujumdar and H. Chen, "Drying and Quality Characteristics of Shredded Squid in an Infrared-Assisted Convective Dryer," **Drying Technology**, Vol. 32 (No.15), 2014, pp. 1828 – 1839.
- [94] S. Shi, J. Feng, G. An, B. Kong, H. Wang, N. Pan and X. Xia, "Dynamics of heat transfer and moisture in beef jerky during hot air drying," **Meat Science**, Vol. 182, 2021, 108638.
- [95] F. C. Muga, T.S. Workneh and M.O. Marenya, "Modelling the Thin-Layer Drying of Beef Biltong Processed Using Hot Air Drying," **Journal of Biosystems Engineering**, Vol. 45, 2020, pp. 362 – 373.
- [96] E. Aykın-Dinçer, B. Atlı, Ö. Çakmak, S. Canavar and A. Çalışkan, "Drying kinetics and quality characteristics of microwave-assisted hot air dried beef chips," *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, Vol. 55 (No.3), 2021, pp. 219-235.
- [97] E.A. Sánchez-Torres, B. Abril, J. Benedito J. Bon, M. Toldrà, D. Parés and J.V.García-Pérez, "Airborne ultrasonic application on hot air-drying of pork liver. Intensification of moisture transport and impact on protein solubility," **Ultrasonics Sonochemistry**, Vol. 86, 2022, 106011.
- [98] Y. Kim, H. Jang, S. Lim, and S. Hong, "Effect of Starch Noodle (*Dangmyeon*) and Pork Intestines on the Rehydration Stability of Korean Blood Sausage (*Sundae*)," **Food Sci Anim Resour**, Vol. 41 (No.1), 2021, pp. 153 – 163.
- [99] K. An, J.H. Choi, Y.S. Choi, D.J. Han, H.Y. Kim, M.A. Lee, S.Y. Kim, T.H. Kim, and C.J. Kim, "Effects of Kimchi Powder on Quality Characteristics of Semi-dried Pork Jerky," **Food Science of Animal Resources**, Vol. 30 (No.2), 2010, pp. 198 – 205.
- [100] R. Sehrawat, P.K. Nema and B.P. Kaur, "Quality evaluation and drying characteristics of mango cubes dried using low-pressure superheated steam, vacuum and hot air drying methods," **LWT**, Vol. 92, 2018, pp.548 - 555.

- [101] B. de Ancos, C. Sánchez-Moreno, L. Zacarías, M.J. Rodrigo, S.S. Ayerdí, F.J.B. Benítez, J.A. Domínguez Avila and G.A. González-Aguilar, “Effects of two different drying methods (freeze-drying and hot air-drying) on the phenolic and carotenoid profile of ‘Ataulfo’ mango by-products,” **Journal of Food Measurement and Characterization**, Vol. 12, 2018, pp. 2145 – 2157.
- [102] Y.Y. Pu and D.W. Sun, “Combined hot-air and microwave-vacuum drying for improving drying uniformity of mango slices based on hyperspectral imaging visualisation of moisture content distribution,” **Biosystems Engineering**, Vol. 156, 2017, pp. 108 – 119.
- [103] R.P. Farias, R.S. Gomez, W.P. Silva, L.P.L. Silva, G.L. Oliveira Neto, I.B. Santos, J.E.F. Carmo, J.J.S. Nascimento and A.G.B. Lima, “Heat and Mass Transfer, and Volume Variations in Banana Slices during Convective Hot Air Drying: An Experimental Analysis” *Agriculture*, Vol. 10 (No.10), 2020, doi.org/10.3390/agriculture10100423.
- [104] J. Ahmed, L. Thomas and R. Khashawi, “Influence of hot-air drying and freeze-drying on functional, rheological, structural and dielectric properties of green banana flour and dispersions,” **Food Hydrocolloids**, Vol. 99, 2020, 105331.
- [105] R. Ghorani, M. Noshad and B.A. Behbahani, “Effects of aerosolized citric acid–radio frequency as a pretreatment on hot-air drying characteristics of banana,” **Food Science & Nutrition**, Vol. 9 (No.11) 2021, pp. 6382 – 6388.
- [106] M. Alonzo-Macías, A. Cardador-Martínez, S. Mounir, G. Montejano-Gaitán and K. Allaf, “Comparative Study of the Effects of Drying Methods on Antioxidant Activity of Dried Strawberry (*Fragaria* Var. Camarosa),” *Journal of Food Research*, Vol. 2 (No.2), 2013, pp. 92 – 107.
- [107] H.H. Orak, T. Aktas, H. Yagar, S. Selen İsbilir, N. Ekinçi, and F. Hasturk Sahin, “Effects of hot air and freeze drying methods on antioxidant activity, colour and some nutritional characteristics of strawberry tree (*Arbutus unedo* L) fruit,” **Food Science and Technology International**, Vol. 18 (No.4), 2012, pp. 391 – 402.
- [108] Y. Xu, M. Zhang, A.S. Mujumdar, X. Duan and S. Jin-cai, “A Two-Stage Vacuum Freeze and Convective Air Drying Method for Strawberries,” **Drying Technology**, Vol. 24 (No.8), 2006, pp. 1019 – 1023.
- [109] P. Malakritsanachalee, W. Choosri and T. Choosri, “Study on kinetics of flow characteristics in hot air drying of pineapple,” **Food Science and Biotechnology**, Vol. 27, 2018, pp. 1047 – 1055.

- [110] P. Rani and P.P. Tripathy, "Effect of ultrasound and chemical pretreatment on drying characteristics and quality attributes of hot air dried pineapple slices," **Journal of Food Science and Technology**, Vol. 56, 2019, pp. 4911 – 4924.
- [111] T. Sarkar, M. Salauddin, S.K. Hazra and R. Chakraborty, "Artificial neural network modelling approach of drying kinetics evolution for hot air oven, microwave, microwave convective and freeze dried pineapple," *SN Applied Sciences*, Vol. 2, 2020, doi.org/10.1007/s42452-020-03455-x.
- [112] A. Maskan, S. Kaya and M. Maskan, "Hot air and sun drying of grape leather (pestil)," **Journal of Food Engineering**, Vol 54 (No.1), 2002, pp. 81 – 88.
- [113] A. Giuseppina, S. Wijitha, L. Loredana, C. Alessio, A. Donatella and R. Paola, "The influence of abrasive pretreatment on hot air drying of grape," **Food and Nutrition Sciences**, Vol. 6 (No.3), 2015, pp. 355 - 364.
- [114] J.W. Bai, D.W. Sun, H.W. Xiao, A.S. Mujumdar and Z.J. Gao, "Novel high-humidity hot air impingement blanching (HHAIB) pretreatment enhances drying kinetics and color attributes of seedless grapes," **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, Vol. 20, 2013, pp. 230 – 237.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก ข้อมูลเครื่องทำแห้งที่ใช้งานการทดลอง

ก.1 รายละเอียดเครื่องทำแห้ง

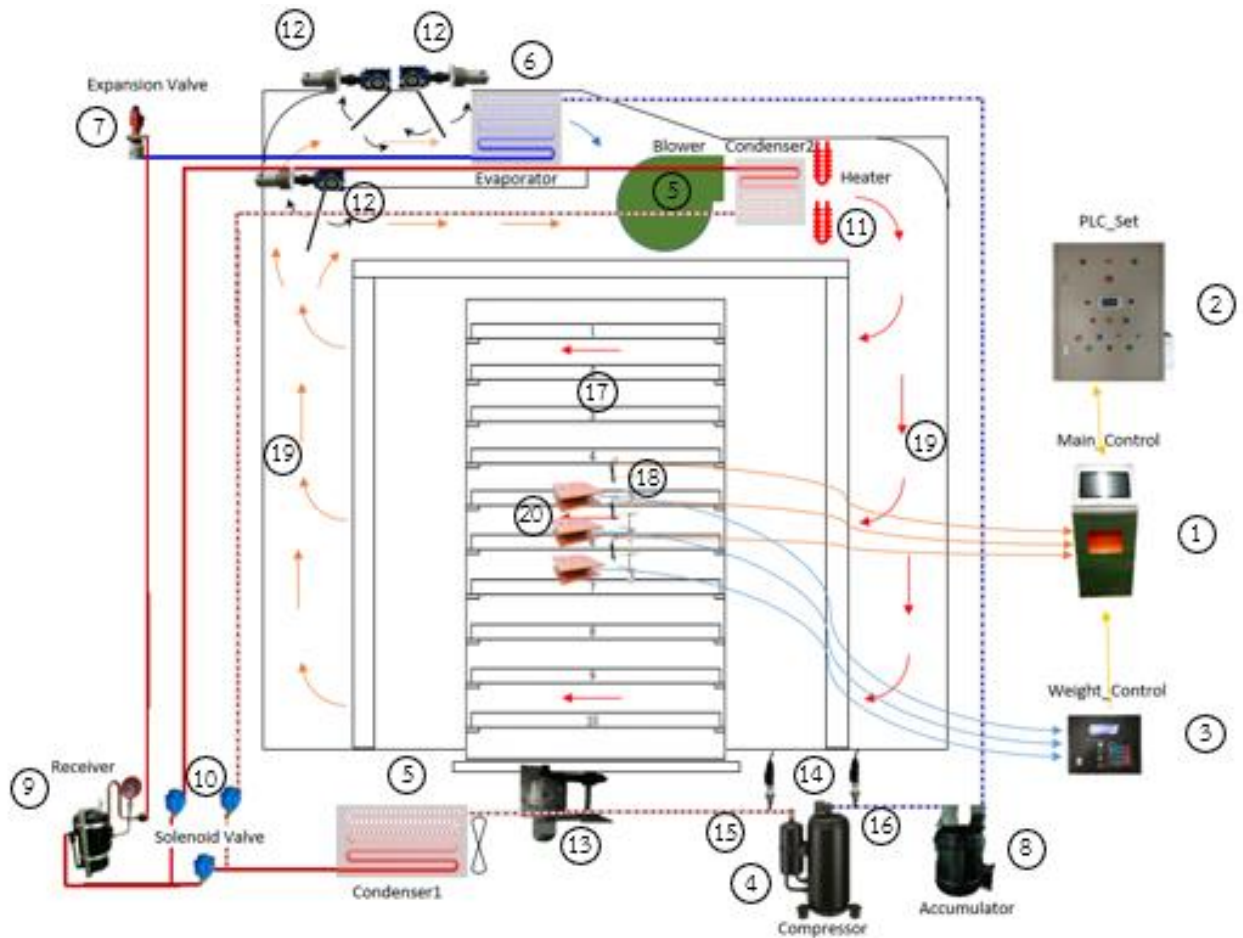
| | |
|---------------------------------------|--|
| - ขนาดภายนอกเครื่องทำแห้ง | : 2.15 X 1.35 X 2.68 เมตร ³ |
| - ขนาดห้องทำแห้ง | : 1.02 X 1.02 X 1.3 เมตร ³ |
| - ถาดทำแห้งมีขนาด | : 0.6 X 0.6 เมตร ² |
| - จำนวนถาด | : 10 ถาด |
| - วัสดุที่ใช้ทำส่วนที่สัมผัสผลิตภัณฑ์ | : สแตนเลส 304 |
| - สามารถใส่ของสดได้สูงสุด | : 10 กิโลกรัม |

ก.2 ขอบเขตการทำงานของเครื่องทำแห้ง

| | |
|--|---------------------------|
| - อุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งอยู่ในช่วง | : 40 - 70 องศาเซลเซียส |
| - ค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิ | : ± 2 องศาเซลเซียส |
| - ความเร็วลม | : 0.5 - 1.3 เมตรต่อวินาที |
| - วัดอุณหภูมิที่ผิวผลิตภัณฑ์ | : 3 ตำแหน่ง |
| - วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องทำแห้ง | : 1 ตำแหน่ง |
| - วัดน้ำหนักผลิตภัณฑ์ขณะทำแห้ง | : 3 ตำแหน่ง |
| - ความเร็วในการหมุนชั้นทำแห้ง | : 0.147 เมตรต่อวินาที |

ก.3 ลักษณะการทำงานของเครื่องทำแห้ง

เครื่องทำแห้งที่ใช้ในการทำสอบการทำงานของระบบควบคุมกระบวนการทำแห้งเป็นเครื่องทำแห้งที่พัฒนาขึ้นมาเพื่ออำนวยความสะดวกในการวิจัยกระบวนการทำแห้งแบบลมร้อน โดยเครื่องทำแห้งที่มีแหล่งให้ความร้อน 2 แบบคือป้อนความร้อนร่วมกับฮีทเตอร์ โดยเครื่องทำแห้งมีส่วนควบคุม PLC ที่เป็นการควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control) สำหรับการทำอากาศแห้ง และใช้การปรับอุณหภูมิแบบ PID สำหรับส่วนควบคุมจะใช้การควบคุมที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ โดยมีส่วนติดต่อส่งข้อมูลการปรับอุณหภูมิอากาศให้กับ PLC ไดอะแกรมเครื่องพร้อมต่อชุดควบคุมแสดงในภาพที่ ก.1 และรายการอุปกรณ์ของเครื่องทำแห้งมีดังนี้



ภาพที่ ก.1 แผนผังเครื่องทำแห้งพร้อมระบบควบคุม

- 1) ชุดควบคุมหลัก (Main control)
- 2) ชุด PLC (PLC set)
- 3) ชุดควบคุมและแปลงสัญญาณน้ำหนัก (Weight control)
- 4) คอมเพรสเซอร์ (Compressors)
- 5) คอนเดนเซอร์ (Condenser)
- 6) เครื่องระเหย (Evaporator)
- 7) อุปกรณ์ลดแรงดัน (Expansion Valve)
- 8) ถังแยกไอสารทำความเย็น (Suction Line Accumulator)
- 9) ถังรับสารทำความเย็นเหลว (Liquid Receiver)
- 10) โซลินอยด์วาล์ว (Solenoid Valve)
- 11) ฮีตเตอร์ (Heater)
- 13) มอเตอร์หมุนชั้นอบ (Rotate Motor)
- 14) เซนเซอร์วัดความดัน (Pressure sensor)
- 15) เซนเซอร์วัดอุณหภูมิสารทำความเย็นด้านความดันต่ำ (Suction temperature sensor)

- 16) เซนเซอร์วัดอุณหภูมิสารทำความเย็นด้านความดันสูง (Discharge Temperature sensor)
- 17) เซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศ (Temperature and Relative Humidity sensor)
- 18) เซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบไม่สัมผัส (Infrared temperature sensor)
- 19) เซนเซอร์วัดอุณหภูมิอากาศ (Temperature sensor)
- 20) เซนเซอร์น้ำหนัก (Load cell sensor)

ภาคผนวก ข การเขียนโปรแกรมของระบบควบคุมที่นำเสนอ

การเขียนโปรแกรมของระบบควบคุมด้วยโปรแกรม LabVIEW

ข.1 การเขียนโปรแกรมของระบบควบคุมด้วยโปรแกรม Arduino ในการตรวจสอบค่าตัวรับรู้ น้ำหนัก

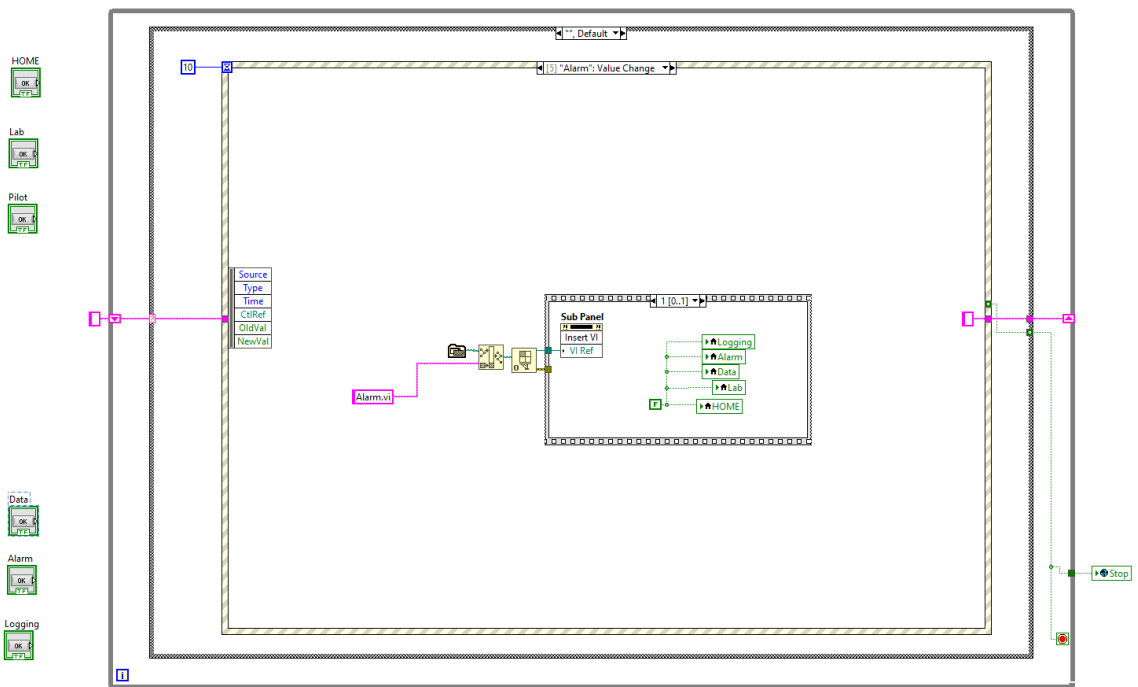
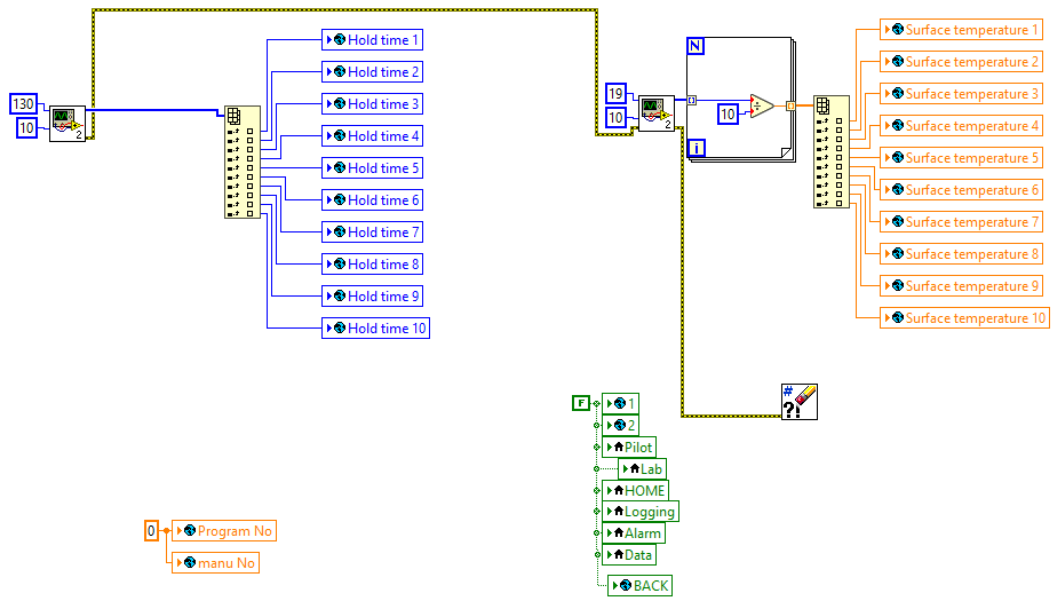
```
#include "HX711.h"
#include <Wire.h>

#define DOUT A3
#define CLK A2
#define DEC_POINT 2
#define STABLE 1
#define zeroFactor 8603554
float calibration_factor = 734.76862;
float offset=0;
int M;
int tempPin = 0;
float temp0;
float temp;
float tempD;
float weightR;
float weightF;
float weightC;
float calibration_temp;
```

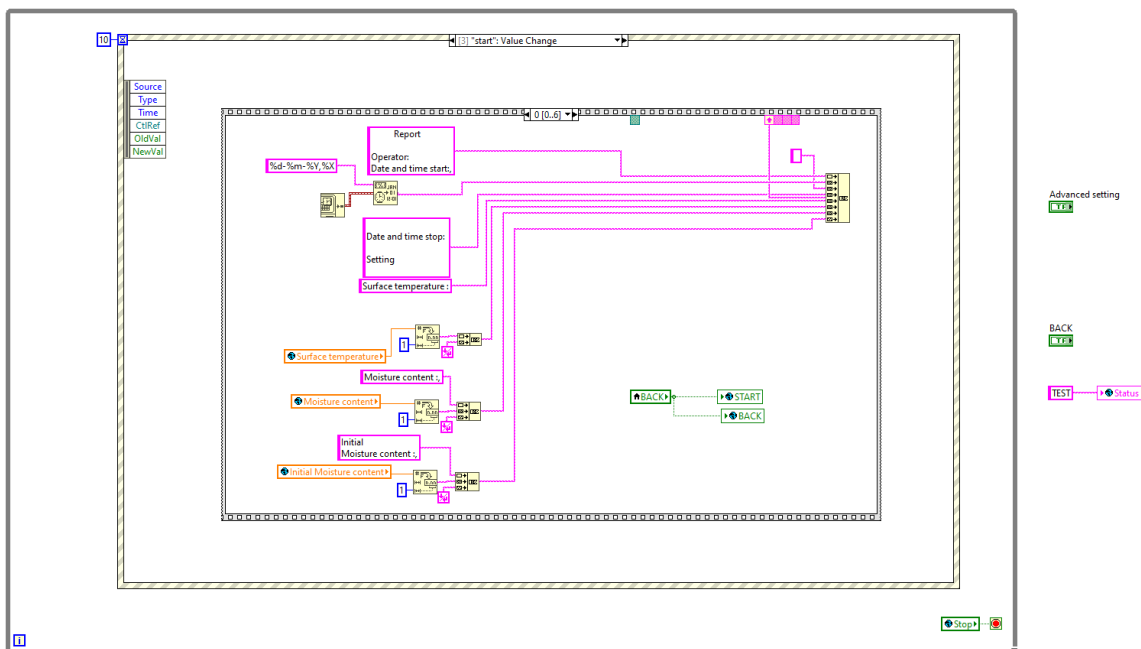
```
float a1 = 0.0056;
float a2 = -3.248;
float a3 = 0.0056;
float b = -437.19;

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  Temp0 = analogRead(tempPin);
  Temp0 = temp0 * 0.48828125;
}
void loop()
{
  For(int i = 0; i < M; i++){
    weightR = weightR + (scale.get_units)
  }
  temp = analogRead(tempPin);
  temp = temp * 0.48828125;
  tempD = temp - Temp0;
  calibration_temp = (a1* tempD) + (a2* tempD)^2 + (a3* tempD)^3 +b;
  weightF = (1/M)* weightR
  weightC = (weightF - zeroFactor - calibration_temp)/calibration_factor;
  delay(1000);
}
```

ข.2 การเขียนโปรแกรมของระบบควบคุมด้วยโปรแกรม LabVIEW



ภาพบล็อกไดอะแกรมหลักของการตั้งค่าเริ่มต้นและรับค่าจากการวัด



ภาพลือคไดอะแกรมของการควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์และปริมาณความชื้น

ภาคผนวก ค การทดสอบระบบการควบคุมกระบวนการทำแห้งด้วยการทำแห้งเปลือกมังคุด

ค.1 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศ อุณหภูมิผิวผลิตภัณฑ์ และความชื้นสัมพัทธ์กับเวลาที่ใช้ในการทำแห้งแบบลมร้อน

ตารางที่ ค.1 ข้อมูลกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศ อุณหภูมิผิวผลิตภัณฑ์ และความชื้นสัมพัทธ์ กับเวลาที่ใช้ในการทำแห้งแบบลมร้อนของการควบคุมแบบ CAT และการควบคุมแบบ PSTL ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

| Time | การควบคุมแบบ CAT 50 | | | การควบคุมแบบ PSTL 50 | | |
|------|---------------------|----------------------|------------------|----------------------|----------------------|------------------|
| | อุณหภูมิอากาศ | อุณหภูมิผิวผลิตภัณฑ์ | ความชื้นสัมพัทธ์ | อุณหภูมิอากาศ | อุณหภูมิผิวผลิตภัณฑ์ | ความชื้นสัมพัทธ์ |
| 0 | 50 | 26.98 | 33.8 | 69.5 | 25.78 | 14.5 |
| 10 | 49.5 | 35.52 | 38.2 | 69.8 | 39.43 | 16.6 |
| 20 | 49.9 | 38.28 | 44.6 | 65.8 | 41.58 | 25.7 |
| 30 | 49.9 | 39.09 | 45.1 | 65.5 | 42.41 | 28.3 |
| 40 | 50.3 | 39.98 | 44.7 | 65.8 | 41.98 | 25.3 |
| 50 | 50.2 | 40.16 | 46 | 65 | 42.67 | 26.7 |
| 60 | 50.3 | 40.30 | 47.6 | 65.4 | 41.72 | 25.2 |
| 70 | 50.1 | 40.42 | 48.2 | 55 | 42.66 | 23.3 |
| 80 | 49.8 | 40.47 | 48.7 | 55 | 41.82 | 26.7 |
| 90 | 49.9 | 40.52 | 49 | 55.7 | 41.20 | 23.5 |

| Time | การควบคุมแบบ CAT 50 | | | การควบคุมแบบ PSTL 50 | | |
|------|---------------------|--------------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|
| | อุณหภูมิ อากาศ | อุณหภูมิผิว ผลิตภัณฑ์ | ความชื้น สัมพัทธ์ | อุณหภูมิ อากาศ | อุณหภูมิผิว ผลิตภัณฑ์ | ความชื้น สัมพัทธ์ |
| 100 | 50.1 | 40.67 | 49 | 55.2 | 42.71 | 26.1 |
| 110 | 50.1 | 40.73 | 48.6 | 55.1 | 43.02 | 25.2 |
| 120 | 49.9 | 40.94 | 49 | 55.7 | 42.71 | 26.3 |
| 130 | 49.6 | 40.94 | 46.7 | 55 | 43.02 | 23.3 |
| 140 | 50.2 | 41.04 | 47.1 | 55 | 43.65 | 26.7 |
| 150 | 50.3 | 41.18 | 46.8 | 55.4 | 43.18 | 23.5 |
| 160 | 49.9 | 41.20 | 46.2 | 55.1 | 42.29 | 26.1 |
| 170 | 50 | 41.32 | 48 | 55.8 | 44.11 | 25.2 |
| 180 | 49.9 | 41.61 | 48.1 | 55.3 | 45.10 | 23.2 |
| 190 | 49.8 | 41.72 | 46.1 | 55.1 | 44.69 | 25.3 |
| 200 | 50.3 | 41.72 | 45.5 | 55.9 | 44.27 | 24.6 |
| 210 | 50.1 | 41.82 | 46.3 | 55.5 | 44.27 | 22.8 |
| 220 | 49.8 | 41.82 | 48 | 55.1 | 44.32 | 25.5 |
| 230 | 49.9 | 41.93 | 49.1 | 55.3 | 44.43 | 24.1 |
| 240 | 49.7 | 42.29 | 48.6 | 55.7 | 44.64 | 21.7 |
| 250 | 50.3 | 42.40 | 47 | 55.5 | 45.05 | 24.6 |
| 260 | 50.3 | 42.66 | 46.2 | 55 | 46.09 | 23 |
| 270 | 50.1 | 42.71 | 46 | 55.2 | 45.05 | 25 |
| 280 | 49.8 | 43.02 | 47.5 | 55 | 46.09 | 24.3 |
| 290 | 49.9 | 43.18 | 48.3 | 55.8 | 47.24 | 21.8 |
| 300 | 49.8 | 43.65 | 48.2 | 55.5 | 48.23 | 25.1 |
| 310 | 49.8 | 44.11 | 46.8 | 55.1 | 48.80 | 23.6 |
| 320 | 50.3 | 44.27 | 45 | 55.2 | 49.01 | 25.6 |
| 330 | 50.3 | 44.27 | 44.5 | 55.7 | 49.06 | 23.7 |
| 340 | 50.1 | 44.32 | 45.6 | 55.1 | 49.06 | 25.6 |
| 350 | 49.9 | 44.43 | 46.5 | 55.7 | 49.01 | 23.8 |
| 360 | 49.8 | 44.64 | 45.8 | 55.2 | 49.01 | 25.2 |
| 370 | 49.9 | 44.69 | 46.1 | 55 | 49.17 | 23.7 |
| 380 | 50 | 45.05 | 47.2 | 55.5 | 49.32 | 25.2 |
| 390 | 50 | 45.10 | 47.3 | 55.6 | 49.53 | 22.8 |
| 400 | 50.1 | 46.09 | 46.6 | 55.7 | 49.74 | 25.1 |
| 410 | 49.9 | 46.64 | 45.3 | 55.9 | 49.90 | 25.6 |
| 420 | 50 | 47.03 | 43.6 | 50.3 | 49.58 | 26.6 |
| 430 | 50.2 | 47.80 | 42.7 | 50.2 | 48.80 | 27.3 |

| Time | การควบคุมแบบ CAT 50 | | | การควบคุมแบบ PSTL 50 | | |
|------|---------------------|--------------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|
| | อุณหภูมิ อากาศ | อุณหภูมิผิว ผลิตภัณฑ์ | ความชื้น สัมพัทธ์ | อุณหภูมิ อากาศ | อุณหภูมิผิว ผลิตภัณฑ์ | ความชื้น สัมพัทธ์ |
| 440 | 50.3 | 48.01 | 42.1 | 50.1 | 49.01 | 27.8 |
| 450 | 50.1 | 48.26 | 41.7 | 50.5 | 49.06 | 26.1 |
| 460 | 50.2 | 48.56 | 41.7 | 50.4 | 49.06 | 27.1 |
| 470 | 50.3 | 48.81 | 41.6 | 50.2 | 49.01 | 27.1 |
| 480 | 50.1 | 49.01 | 41.5 | 50.2 | 49.01 | 27.2 |
| 490 | 50.2 | 49.17 | 41.1 | 50.6 | 49.17 | 28 |
| 500 | 50.3 | 49.32 | 41 | 50.2 | 49.32 | 28.2 |
| 510 | 50.2 | 49.53 | 40.6 | 50 | 49.53 | 27.5 |
| 520 | 50.1 | 49.64 | 40.3 | 50.5 | 49.74 | 27.8 |
| 530 | 50.2 | 49.80 | 40.3 | 50.6 | 49.90 | 26 |
| 540 | 50.2 | 49.83 | 40.8 | 50 | 49.58 | 27 |
| 550 | 50.1 | 49.91 | 41.7 | 50.6 | 49.51 | 27.6 |
| 560 | 49.8 | 49.57 | 41.8 | 50.3 | 49.07 | 28.1 |
| 570 | 50 | 49.34 | 42.1 | 50 | 49.89 | 28.6 |
| 580 | 50 | 49.40 | 41.7 | 50.6 | 49.07 | 28 |
| 590 | 50 | 49.66 | 42.2 | 50 | 48.99 | 27.1 |
| 600 | 49.9 | 49.97 | 41.7 | 50.7 | 48.91 | 26.6 |
| 610 | 49.8 | 49.28 | 41 | 50 | 49.95 | 26.7 |
| 620 | 50.2 | 49.70 | 40.1 | 50.3 | 50.63 | 25.7 |
| 630 | 50.1 | 49.48 | 39 | 50.4 | 49.13 | 26.3 |
| 640 | 50.3 | 49.31 | 38 | 50 | 49.65 | 26.6 |
| 650 | 49.8 | 49.53 | 38.5 | 50.5 | 49.43 | 25.7 |
| 660 | 50 | 49.71 | 40.2 | 50 | 50.24 | 25.7 |
| 670 | 50 | 49.97 | 39.5 | 50.4 | 49.18 | 26.3 |
| 680 | 49.9 | 49.33 | 39.7 | 50.2 | 49.65 | 26.7 |
| 690 | 50.1 | 49.80 | 38.8 | 50 | 49.17 | 25.2 |
| 700 | 50.3 | 49.79 | 37.3 | 50.4 | 50.38 | 26.3 |
| 710 | 50.3 | 49.68 | 36.3 | 50 | 50.18 | 25.7 |
| 720 | 50 | 49.58 | 38.2 | 50.6 | 49.28 | 26.5 |
| 730 | 50.3 | 49.47 | 38 | 50.6 | 49.07 | 25.5 |
| 740 | 50.1 | 49.44 | 37.1 | 50.8 | 49.44 | 25.3 |
| 750 | 50.2 | 49.51 | 36.1 | | | |
| 760 | 50.1 | 49.55 | 35.3 | | | |
| 770 | 50.2 | 49.86 | 35.3 | | | |

| Time | การควบคุมแบบ CAT 50 | | | การควบคุมแบบ PSTL 50 | | |
|------|---------------------|--------------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|
| | อุณหภูมิ อากาศ | อุณหภูมิผิว ผลิตภัณฑ์ | ความชื้น สัมพัทธ์ | อุณหภูมิ อากาศ | อุณหภูมิผิว ผลิตภัณฑ์ | ความชื้น สัมพัทธ์ |
| 780 | 50 | 49.97 | 36.7 | | | |
| 790 | 50.2 | 49.33 | 36 | | | |
| 800 | 49.9 | 49.75 | 35.2 | | | |
| 810 | 50.1 | 49.64 | 34.7 | | | |
| 820 | 50.2 | 49.89 | 33.3 | | | |
| 830 | 50 | 49.87 | 35.8 | | | |
| 840 | 49.8 | 49.39 | 35 | | | |
| 850 | 49.9 | 49.91 | 34.2 | | | |
| 860 | 50.2 | 49.95 | 33.7 | | | |
| 870 | 50.3 | 49.63 | 33.3 | | | |
| 880 | 49.9 | 49.13 | 34.7 | | | |
| 890 | 49.8 | 49.65 | 33.8 | | | |
| 900 | 50.2 | 49.43 | 32.6 | | | |
| 910 | 50.3 | 49.94 | 31.8 | | | |
| 920 | 49.9 | 49.38 | 32.7 | | | |
| 930 | 49.8 | 49.65 | 31.8 | | | |
| 940 | 50.2 | 49.87 | 30.6 | | | |
| 950 | 50 | 49.68 | 29.2 | | | |

ตารางที่ ค.2 ข้อมูลกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศ อุณหภูมิผิวผลิตภัณฑ์ และความชื้นสัมพัทธ์ กับเวลาที่ใช้ในการทำแห้งแบบลมร้อนของการควบคุมแบบ CAT และการควบคุมแบบ PSTL ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

| Time | การควบคุมแบบ CAT 60 | | | การควบคุมแบบ PSTL 60 | | |
|------|---------------------|--------------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|
| | อุณหภูมิ อากาศ | อุณหภูมิผิว ผลิตภัณฑ์ | ความชื้น สัมพัทธ์ | อุณหภูมิ อากาศ | อุณหภูมิผิว ผลิตภัณฑ์ | ความชื้น สัมพัทธ์ |
| 0 | 53.8 | 25.78 | 25.1 | 68.7 | 23.23 | 13.8 |
| 10 | 60 | 39.43 | 28.2 | 68.3 | 39.95 | 18.3 |
| 20 | 60.2 | 43.58 | 29.1 | 68.5 | 43.28 | 21.2 |
| 30 | 59.8 | 44.44 | 35.2 | 66.2 | 42.76 | 26 |
| 40 | 60.8 | 45.41 | 34.5 | 67.8 | 43.91 | 24.5 |
| 50 | 60.5 | 45.62 | 36.7 | 67.2 | 45.57 | 24.3 |
| 60 | 60.3 | 46.82 | 37.1 | 67.4 | 44.48 | 25.2 |
| 70 | 60.1 | 47.19 | 36.2 | 67.8 | 47.55 | 23.7 |
| 80 | 59.8 | 47.51 | 38.8 | 67.3 | 45.26 | 24.8 |

| Time | การควบคุมแบบ CAT 60 | | | การควบคุมแบบ PSTL 60 | | |
|------|---------------------|--------------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|
| | อุณหภูมิ อากาศ | อุณหภูมิผิว ผลิตภัณฑ์ | ความชื้น สัมพัทธ์ | อุณหภูมิ อากาศ | อุณหภูมิผิว ผลิตภัณฑ์ | ความชื้น สัมพัทธ์ |
| 90 | 60.4 | 48.75 | 35.2 | 67.9 | 47.97 | 23 |
| 100 | 60.1 | 48.88 | 38.6 | 67.4 | 45.94 | 24.1 |
| 110 | 59.8 | 49.11 | 36.7 | 67.8 | 48.96 | 23.7 |
| 120 | 59.8 | 49.49 | 37.3 | 63.3 | 45.89 | 28 |
| 130 | 60.4 | 49.80 | 38.7 | 62.3 | 44.38 | 28.1 |
| 140 | 60.4 | 50.83 | 35.6 | 61.5 | 44.11 | 29.2 |
| 150 | 60 | 50.17 | 38.6 | 62.6 | 47.08 | 26.8 |
| 160 | 59.8 | 51.07 | 36.5 | 63.9 | 46.93 | 24.5 |
| 170 | 59.9 | 51.25 | 36.8 | 63 | 45.52 | 26.2 |
| 180 | 60.2 | 51.20 | 38.3 | 62.1 | 44.84 | 27 |
| 190 | 60.4 | 52.70 | 35 | 61.3 | 45.10 | 27.6 |
| 200 | 60.2 | 53.14 | 37.5 | 63.6 | 48.80 | 24.6 |
| 210 | 60.5 | 54.22 | 36.2 | 63.7 | 47.55 | 25.1 |
| 220 | 60.1 | 54.64 | 35.2 | 62.8 | 46.46 | 26.1 |
| 230 | 59.8 | 55.59 | 37.8 | 62.1 | 46.09 | 27.2 |
| 240 | 60.2 | 55.72 | 34.5 | 61.5 | 45.94 | 28 |
| 250 | 59.7 | 55.36 | 35.7 | 61.8 | 47.50 | 26.7 |
| 260 | 59.9 | 55.63 | 36.5 | 63.8 | 49.95 | 23.6 |
| 270 | 60.5 | 56.71 | 33.3 | 63.9 | 48.85 | 24.2 |
| 280 | 59.9 | 55.89 | 35.5 | 63.2 | 48.18 | 25.3 |
| 290 | 59.9 | 56.03 | 34.8 | 62.6 | 47.76 | 26.3 |
| 300 | 60.5 | 57.07 | 32.7 | 62 | 47.66 | 26.7 |
| 310 | 59.9 | 57.35 | 34.8 | 61.4 | 47.55 | 26.7 |
| 320 | 59.8 | 57.86 | 33.5 | 62.3 | 50.36 | 25.3 |
| 330 | 60.4 | 58.54 | 31.8 | 63.9 | 51.61 | 23 |
| 340 | 60.3 | 58.88 | 33.3 | 63.4 | 50.16 | 24.3 |
| 350 | 60.3 | 58.02 | 32.5 | 62.3 | 48.96 | 24.8 |
| 360 | 60.6 | 58.27 | 30.1 | 61.5 | 48.80 | 25.6 |
| 370 | 60.6 | 58.60 | 31.7 | 62.7 | 52.03 | 23.5 |
| 380 | 59.9 | 59.45 | 32.2 | 64 | 52.50 | 22.1 |
| 390 | 60.4 | 60.00 | 29.1 | 63.2 | 51.25 | 23.5 |
| 400 | 60.2 | 59.75 | 29.3 | 62.1 | 50.57 | 24.5 |
| 410 | 60.2 | 59.60 | 30.1 | 61.3 | 50.78 | 24.8 |
| 420 | 60.1 | 59.39 | 29.2 | 63.5 | 54.84 | 21.6 |

| Time | การควบคุมแบบ CAT 60 | | | การควบคุมแบบ PSTL 60 | | |
|------|---------------------|--------------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|
| | อุณหภูมิ อากาศ | อุณหภูมิผิว ผลิตภัณฑ์ | ความชื้น สัมพัทธ์ | อุณหภูมิ อากาศ | อุณหภูมิผิว ผลิตภัณฑ์ | ความชื้น สัมพัทธ์ |
| 430 | 60.6 | 59.36 | 26.3 | 63.9 | 53.96 | 21.5 |
| 440 | 60.2 | 59.17 | 26.7 | 62.9 | 52.86 | 22.8 |
| 450 | 60.4 | 58.93 | 27.1 | 61.9 | 52.50 | 23.6 |
| 460 | 59.9 | 58.86 | 27.5 | 61.5 | 53.65 | 24 |
| 470 | 59.8 | 59.95 | 25.7 | 63.8 | 57.24 | 20.5 |
| 480 | 60.6 | 59.57 | 24.3 | 63.8 | 56.15 | 21.1 |
| 490 | 60.2 | 59.48 | 24.6 | 62.8 | 55.10 | 22.2 |
| 500 | 59.9 | 59.70 | 25.1 | 61.9 | 54.58 | 22.7 |
| 510 | 59.9 | 59.12 | 25 | 61.8 | 57.40 | 21.5 |
| 520 | 59.9 | 58.85 | 24.8 | 61.7 | 56.87 | 21.5 |
| 530 | 60.1 | 59.63 | 23.1 | 61.7 | 56.87 | 21.5 |
| 540 | 60.3 | 59.94 | 22.3 | 61.8 | 56.88 | 21.2 |
| 550 | 60.4 | 59.10 | 22.8 | 61.8 | 56.77 | 21.2 |
| 560 | 59.9 | 59.38 | 23 | 61.8 | 56.67 | 21.6 |
| 570 | 59.9 | 59.85 | 23 | 61.7 | 56.82 | 21.5 |
| 580 | 60 | 59.44 | 23.1 | | | |
| 590 | 59.9 | 59.59 | 23.1 | | | |
| 600 | 59.6 | 59.95 | 22.1 | | | |
| 610 | 60.5 | 59.25 | 21.2 | | | |
| 620 | 60.7 | 59.83 | 21 | | | |
| 630 | 60.4 | 60.00 | 21.3 | | | |
| 640 | 59.9 | 59.53 | 21.7 | | | |
| 650 | 59.6 | 58.96 | 21.8 | | | |
| 660 | 59.9 | 58.65 | 22.1 | | | |
| 670 | 60 | 59.39 | 22.1 | | | |
| 680 | 59.9 | 59.01 | 22 | | | |
| 690 | 59.8 | 60.36 | 21.2 | | | |
| 700 | 60.3 | 59.35 | 20.3 | | | |
| 710 | 60.2 | 59.78 | 20.3 | | | |
| 720 | 60.4 | 60.05 | 20.7 | | | |

ค.2 ข้อมูลพฤติกรรมกรรมการทำแห้งของการทำแห้งเปลือกมังคุด

ตารางที่ ค.3 ข้อมูลปริมาณความชื้นและอัตราการทำแห้งของการทำแห้งเปลือกมังคุดด้วยการควบคุมแบบ CAT ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

| เวลา (นาที) | น้ำหนัก (กรัม) | | | ปริมาณความชื้นฐานแห้ง | | | | | อัตราการทำแห้ง | | | | |
|----------------|----------------|-------|-------|-----------------------|--------|--------|--------|------|----------------|--------|--------|--------|--------|
| | ภาค 1 | ภาค 2 | ภาค 3 | ภาค 1 | ภาค 2 | ภาค 3 | เฉลี่ย | SD | ภาค 1 | ภาค 2 | ภาค 3 | เฉลี่ย | SD |
| 0 | 764.4 | 755.9 | 768.0 | 156.02 | 156.02 | 156.02 | 156.02 | 0.00 | - | - | - | - | - |
| 10 | 754.7 | 750.8 | 751.9 | 149.45 | 152.61 | 145.47 | 149.18 | 0.04 | 2.1894 | 1.1354 | 3.5176 | 1.6624 | 0.1392 |
| 20 | 749.3 | 744.0 | 745.5 | 145.79 | 148.00 | 141.33 | 145.04 | 0.03 | 1.2204 | 1.5378 | 1.3808 | 1.4593 | 0.1134 |
| 30 | 742.7 | 736.6 | 736.3 | 141.28 | 143.03 | 135.29 | 139.87 | 0.04 | 1.5057 | 1.6569 | 2.0144 | 1.5813 | 0.1070 |
| 40 | 736.2 | 728.9 | 731.7 | 136.91 | 137.83 | 132.26 | 135.67 | 0.03 | 1.4558 | 1.7356 | 1.0116 | 1.5957 | 0.1978 |
| 50 | 730.2 | 721.4 | 725.3 | 132.79 | 132.79 | 128.08 | 131.22 | 0.03 | 1.3766 | 1.6817 | 1.3939 | 1.5291 | 0.2157 |
| 60 | 724.3 | 714.0 | 720.2 | 128.79 | 127.77 | 124.76 | 127.11 | 0.02 | 1.3313 | 1.6749 | 1.1055 | 1.5031 | 0.2430 |
| 70 | 718.4 | 707.3 | 715.3 | 124.80 | 123.26 | 121.51 | 123.19 | 0.02 | 1.3336 | 1.5041 | 1.0859 | 1.4188 | 0.1206 |
| 80 | 712.4 | 700.5 | 711.0 | 120.74 | 118.70 | 118.71 | 119.38 | 0.01 | 1.3517 | 1.5198 | 0.9329 | 1.4358 | 0.1189 |
| 90 | 706.5 | 694.2 | 706.4 | 116.69 | 114.46 | 115.70 | 115.62 | 0.01 | 1.3517 | 1.4141 | 1.0050 | 1.3829 | 0.0442 |
| 100 | 700.9 | 688.5 | 701.2 | 112.89 | 110.61 | 112.30 | 111.93 | 0.01 | 1.2679 | 1.2837 | 1.1317 | 1.2758 | 0.0112 |
| 110 | 695.4 | 682.2 | 694.8 | 109.16 | 106.36 | 108.08 | 107.87 | 0.01 | 1.2430 | 1.4186 | 1.4070 | 1.3308 | 0.1242 |
| 120 | 689.6 | 676.4 | 690.0 | 105.22 | 102.42 | 104.92 | 104.19 | 0.02 | 1.3155 | 1.3130 | 1.0553 | 1.3142 | 0.0018 |
| 130 | 683.7 | 670.4 | 683.0 | 101.27 | 98.37 | 100.35 | 100.00 | 0.01 | 1.3177 | 1.3512 | 1.5228 | 1.3345 | 0.0237 |
| 140 | 678.3 | 664.9 | 676.7 | 97.61 | 94.67 | 96.23 | 96.17 | 0.01 | 1.2204 | 1.2343 | 1.3764 | 1.2273 | 0.0098 |
| 150 | 673.0 | 659.1 | 672.3 | 93.99 | 90.80 | 93.33 | 92.71 | 0.02 | 1.2068 | 1.2905 | 0.9657 | 1.2486 | 0.0592 |
| 160 | 667.8 | 653.3 | 668.5 | 90.45 | 86.89 | 90.85 | 89.40 | 0.02 | 1.1796 | 1.3040 | 0.8281 | 1.2418 | 0.0879 |
| 170 | 662.7 | 647.6 | 664.1 | 87.00 | 83.03 | 88.00 | 86.01 | 0.03 | 1.1502 | 1.2882 | 0.9504 | 1.2192 | 0.0976 |
| 180 | 657.6 | 642.6 | 659.5 | 83.51 | 79.65 | 84.97 | 82.71 | 0.03 | 1.1660 | 1.1264 | 1.0116 | 1.1462 | 0.0281 |
| 190 | 652.4 | 638.1 | 653.9 | 79.99 | 76.62 | 81.29 | 79.30 | 0.02 | 1.1728 | 1.0095 | 1.2279 | 1.0911 | 0.1155 |
| 200 | 647.9 | 633.2 | 648.4 | 76.91 | 73.32 | 77.73 | 75.99 | 0.02 | 1.0279 | 1.1016 | 1.1864 | 1.0648 | 0.0521 |
| 210 | 643.5 | 628.4 | 644.7 | 73.94 | 70.07 | 75.27 | 73.09 | 0.03 | 0.9917 | 1.0836 | 0.8193 | 1.0377 | 0.0650 |
| 220 | 638.9 | 623.7 | 641.8 | 70.80 | 66.90 | 73.37 | 70.36 | 0.03 | 1.0460 | 1.0567 | 0.6336 | 1.0514 | 0.0075 |

| เวลา (นาที) | น้ำหนัก (กรัม) | | | ปริมาณความชื้นฐานแห้ง | | | | | อัตราการทำแห้ง | | | | |
|----------------|----------------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|--------|------|----------------|--------|--------|--------|--------|
| | ภาค 1 | ภาค 2 | ภาค 3 | ภาค 1 | ภาค 2 | ภาค 3 | เฉลี่ย | SD | ภาค 1 | ภาค 2 | ภาค 3 | เฉลี่ย | SD |
| 230 | 634.2 | 619.4 | 637.3 | 67.65 | 64.01 | 70.43 | 67.36 | 0.03 | 1.0506 | 0.9645 | 0.9810 | 1.0075 | 0.0609 |
| 240 | 629.7 | 615.6 | 632.0 | 64.60 | 61.48 | 66.93 | 64.33 | 0.03 | 1.0189 | 0.8453 | 1.1667 | 0.9321 | 0.1227 |
| 250 | 625.4 | 611.8 | 626.5 | 61.65 | 58.91 | 63.37 | 61.31 | 0.02 | 0.9826 | 0.8543 | 1.1886 | 0.9185 | 0.0907 |
| 260 | 621.6 | 607.6 | 623.0 | 59.08 | 56.09 | 61.09 | 58.75 | 0.03 | 0.8558 | 0.9420 | 0.7603 | 0.8989 | 0.0609 |
| 270 | 617.7 | 603.4 | 620.6 | 56.46 | 53.23 | 59.46 | 56.38 | 0.03 | 0.8762 | 0.9533 | 0.5440 | 0.9147 | 0.0545 |
| 280 | 613.8 | 599.9 | 616.5 | 53.80 | 50.85 | 56.81 | 53.82 | 0.03 | 0.8853 | 0.7936 | 0.8849 | 0.8395 | 0.0648 |
| 290 | 609.9 | 596.9 | 612.7 | 51.16 | 48.86 | 54.33 | 51.45 | 0.03 | 0.8808 | 0.6632 | 0.8259 | 0.7720 | 0.1538 |
| 300 | 606.2 | 592.7 | 608.5 | 48.61 | 46.04 | 51.56 | 48.74 | 0.03 | 0.8513 | 0.9420 | 0.9242 | 0.8967 | 0.0641 |
| 310 | 602.5 | 589.5 | 603.9 | 46.15 | 43.84 | 48.56 | 46.18 | 0.02 | 0.8196 | 0.7352 | 0.9985 | 0.7774 | 0.0597 |
| 320 | 599.3 | 586.4 | 600.0 | 43.95 | 41.75 | 46.00 | 43.90 | 0.02 | 0.7336 | 0.6970 | 0.8543 | 0.7153 | 0.0259 |
| 330 | 596.3 | 582.9 | 597.0 | 41.91 | 39.43 | 44.05 | 41.80 | 0.02 | 0.6792 | 0.7734 | 0.6511 | 0.7263 | 0.0666 |
| 340 | 593.5 | 580.1 | 594.8 | 39.98 | 37.54 | 42.56 | 40.03 | 0.03 | 0.6453 | 0.6295 | 0.4981 | 0.6374 | 0.0112 |
| 350 | 590.5 | 577.4 | 591.6 | 37.98 | 35.73 | 40.50 | 38.07 | 0.02 | 0.6657 | 0.6048 | 0.6860 | 0.6352 | 0.0431 |
| 360 | 587.8 | 574.6 | 588.4 | 36.12 | 33.82 | 38.42 | 36.12 | 0.02 | 0.6204 | 0.6363 | 0.6926 | 0.6283 | 0.0112 |
| 370 | 585.0 | 572.1 | 585.9 | 34.22 | 32.15 | 36.73 | 34.37 | 0.02 | 0.6362 | 0.5553 | 0.5637 | 0.5958 | 0.0572 |
| 380 | 582.3 | 569.6 | 583.1 | 32.44 | 30.42 | 34.91 | 32.59 | 0.02 | 0.5932 | 0.5778 | 0.6096 | 0.5855 | 0.0109 |
| 390 | 579.8 | 567.5 | 580.0 | 30.72 | 29.06 | 32.87 | 30.88 | 0.02 | 0.5728 | 0.4541 | 0.6795 | 0.5135 | 0.0839 |
| 400 | 577.1 | 565.5 | 576.8 | 28.85 | 27.68 | 30.80 | 29.11 | 0.02 | 0.6226 | 0.4609 | 0.6904 | 0.5418 | 0.1144 |
| 410 | 574.7 | 563.2 | 573.8 | 27.24 | 26.10 | 28.84 | 27.39 | 0.01 | 0.5389 | 0.5261 | 0.6533 | 0.5325 | 0.0090 |
| 420 | 572.4 | 561.3 | 570.9 | 25.66 | 24.85 | 26.95 | 25.82 | 0.01 | 0.5275 | 0.4159 | 0.6314 | 0.4717 | 0.0789 |
| 430 | 570.3 | 559.4 | 568.4 | 24.25 | 23.55 | 25.29 | 24.36 | 0.01 | 0.4687 | 0.4362 | 0.5528 | 0.4524 | 0.0230 |
| 440 | 568.1 | 557.3 | 566.1 | 22.77 | 22.17 | 23.77 | 22.90 | 0.01 | 0.4936 | 0.4586 | 0.5069 | 0.4761 | 0.0247 |
| 450 | 566.6 | 555.4 | 564.2 | 21.74 | 20.88 | 22.51 | 21.71 | 0.01 | 0.3442 | 0.4294 | 0.4195 | 0.3868 | 0.0603 |
| 460 | 564.8 | 553.8 | 562.4 | 20.51 | 19.79 | 21.38 | 20.56 | 0.01 | 0.4098 | 0.3642 | 0.3780 | 0.3870 | 0.0322 |
| 470 | 563.0 | 552.3 | 560.7 | 19.32 | 18.78 | 20.24 | 19.44 | 0.01 | 0.3985 | 0.3372 | 0.3802 | 0.3679 | 0.0433 |
| 480 | 561.5 | 550.8 | 559.2 | 18.28 | 17.80 | 19.24 | 18.44 | 0.01 | 0.3442 | 0.3260 | 0.3321 | 0.3351 | 0.0128 |
| 490 | 560.1 | 549.4 | 557.6 | 17.35 | 16.81 | 18.23 | 17.46 | 0.01 | 0.3125 | 0.3305 | 0.3387 | 0.3215 | 0.0128 |

| เวลา (นาที) | น้ำหนัก (กรัม) | | | ปริมาณความชื้นฐานแห้ง | | | | | อัตราการทำแห้ง | | | | |
|----------------|----------------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|--------|------|----------------|--------|--------|--------|--------|
| | ภาค 1 | ภาค 2 | ภาค 3 | ภาค 1 | ภาค 2 | ภาค 3 | เฉลี่ย | SD | ภาค 1 | ภาค 2 | ภาค 3 | เฉลี่ย | SD |
| 500 | 558.5 | 548.0 | 556.1 | 16.27 | 15.89 | 17.23 | 16.46 | 0.01 | 0.3600 | 0.3058 | 0.3343 | 0.3329 | 0.0384 |
| 510 | 557.2 | 546.9 | 554.7 | 15.38 | 15.16 | 16.32 | 15.62 | 0.01 | 0.2966 | 0.2451 | 0.3015 | 0.2708 | 0.0364 |
| 520 | 555.8 | 545.9 | 553.6 | 14.40 | 14.44 | 15.62 | 14.82 | 0.01 | 0.3260 | 0.2406 | 0.2338 | 0.2833 | 0.0604 |
| 530 | 554.7 | 544.7 | 552.3 | 13.69 | 13.68 | 14.76 | 14.05 | 0.01 | 0.2355 | 0.2518 | 0.2862 | 0.2436 | 0.0115 |
| 540 | 553.6 | 543.9 | 551.4 | 12.93 | 13.14 | 14.18 | 13.42 | 0.01 | 0.2536 | 0.1821 | 0.1945 | 0.2178 | 0.0505 |
| 550 | 552.7 | 542.8 | 550.7 | 12.32 | 12.39 | 13.68 | 12.80 | 0.01 | 0.2038 | 0.2496 | 0.1660 | 0.2267 | 0.0324 |
| 560 | 552.1 | 542.0 | 550.5 | 11.93 | 11.82 | 13.54 | 12.43 | 0.01 | 0.1313 | 0.1889 | 0.0481 | 0.1601 | 0.0407 |
| 570 | 551.5 | 541.0 | 550.0 | 11.47 | 11.18 | 13.23 | 11.96 | 0.01 | 0.1540 | 0.2158 | 0.1027 | 0.1849 | 0.0437 |
| 580 | 550.7 | 540.1 | 549.7 | 10.98 | 10.58 | 13.01 | 11.53 | 0.01 | 0.1630 | 0.1978 | 0.0721 | 0.1804 | 0.0246 |
| 590 | 550.0 | 539.2 | 549.3 | 10.49 | 9.95 | 12.76 | 11.07 | 0.01 | 0.1630 | 0.2113 | 0.0852 | 0.1872 | 0.0342 |
| 600 | 549.4 | 538.7 | 548.6 | 10.09 | 9.59 | 12.33 | 10.67 | 0.01 | 0.1336 | 0.1192 | 0.1420 | 0.1264 | 0.0102 |
| 610 | 548.9 | 538.2 | 548.0 | 9.74 | 9.29 | 11.93 | 10.32 | 0.01 | 0.1177 | 0.1012 | 0.1355 | 0.1095 | 0.0117 |
| 620 | 548.4 | 537.6 | 546.5 | 9.36 | 8.90 | 10.94 | 9.74 | 0.01 | 0.1245 | 0.1281 | 0.3277 | 0.1263 | 0.0026 |
| 630 | 547.7 | 537.2 | 544.6 | 8.94 | 8.60 | 9.69 | 9.08 | 0.01 | 0.1426 | 0.1012 | 0.4173 | 0.1219 | 0.0293 |
| 640 | 547.0 | 536.8 | 544.4 | 8.43 | 8.36 | 9.54 | 8.78 | 0.01 | 0.1675 | 0.0809 | 0.0503 | 0.1242 | 0.0612 |
| 650 | 546.6 | 536.6 | 543.9 | 8.16 | 8.20 | 9.25 | 8.54 | 0.01 | 0.0928 | 0.0517 | 0.0961 | 0.0723 | 0.0291 |
| 660 | 546.5 | 536.3 | 543.7 | 8.10 | 7.99 | 9.11 | 8.40 | 0.01 | 0.0181 | 0.0697 | 0.0481 | 0.0439 | 0.0365 |
| 670 | 546.3 | 536.0 | 543.5 | 7.94 | 7.82 | 8.95 | 8.24 | 0.01 | 0.0543 | 0.0585 | 0.0524 | 0.0564 | 0.0029 |
| 680 | 546.1 | 535.6 | 543.3 | 7.81 | 7.52 | 8.85 | 8.06 | 0.01 | 0.0430 | 0.0989 | 0.0328 | 0.0710 | 0.0395 |
| 690 | 545.8 | 535.6 | 542.8 | 7.65 | 7.52 | 8.50 | 7.89 | 0.01 | 0.0521 | 0.0022 | 0.1180 | 0.0272 | 0.0352 |
| 700 | 545.6 | 535.4 | 541.7 | 7.48 | 7.40 | 7.81 | 7.57 | 0.00 | 0.0566 | 0.0382 | 0.2294 | 0.0474 | 0.0130 |
| 710 | 544.9 | 535.1 | 541.7 | 7.01 | 7.17 | 7.79 | 7.32 | 0.00 | 0.1562 | 0.0787 | 0.0066 | 0.1175 | 0.0548 |
| 720 | 544.8 | 535.0 | 541.7 | 6.97 | 7.14 | 7.77 | 7.30 | 0.00 | 0.0136 | 0.0090 | 0.0066 | 0.0113 | 0.0032 |
| 730 | 544.7 | 535.0 | 541.5 | 6.91 | 7.09 | 7.70 | 7.24 | 0.00 | 0.0204 | 0.0157 | 0.0240 | 0.0181 | 0.0033 |
| 740 | 544.6 | 534.7 | 541.5 | 6.84 | 6.94 | 7.68 | 7.16 | 0.00 | 0.0226 | 0.0495 | 0.0066 | 0.0361 | 0.0190 |
| 750 | 544.6 | 534.7 | 541.3 | 6.83 | 6.92 | 7.54 | 7.09 | 0.00 | 0.0045 | 0.0090 | 0.0481 | 0.0068 | 0.0032 |
| 760 | 544.3 | 534.4 | 541.3 | 6.63 | 6.75 | 7.54 | 6.97 | 0.00 | 0.0679 | 0.0562 | 0.0000 | 0.0621 | 0.0083 |

| เวลา (นาที) | น้ำหนัก (กรัม) | | | ปริมาณความชื้นฐานแห้ง | | | | | อัตราการทำแห้ง | | | | |
|----------------|----------------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|--------|------|----------------|--------|--------|--------|--------|
| | ภาค 1 | ภาค 2 | ภาค 3 | ภาค 1 | ภาค 2 | ภาค 3 | เฉลี่ย | SD | ภาค 1 | ภาค 2 | ภาค 3 | เฉลี่ย | SD |
| 770 | 544.1 | 534.4 | 541.2 | 6.46 | 6.71 | 7.49 | 6.89 | 0.01 | 0.0543 | 0.0135 | 0.0153 | 0.0339 | 0.0289 |
| 780 | 544.1 | 533.8 | 541.1 | 6.46 | 6.31 | 7.39 | 6.72 | 0.01 | 0.0000 | 0.1326 | 0.0328 | 0.0663 | 0.0938 |
| 790 | 544.0 | 533.7 | 540.8 | 6.44 | 6.25 | 7.24 | 6.64 | 0.01 | 0.0091 | 0.0202 | 0.0524 | 0.0146 | 0.0079 |
| 800 | 543.9 | 533.7 | 540.5 | 6.36 | 6.22 | 7.03 | 6.53 | 0.00 | 0.0249 | 0.0112 | 0.0699 | 0.0181 | 0.0097 |
| 810 | 543.7 | 533.5 | 540.3 | 6.22 | 6.12 | 6.88 | 6.41 | 0.00 | 0.0475 | 0.0315 | 0.0481 | 0.0395 | 0.0114 |
| 820 | 543.5 | 533.5 | 540.2 | 6.10 | 6.10 | 6.83 | 6.34 | 0.00 | 0.0408 | 0.0067 | 0.0175 | 0.0237 | 0.0240 |
| 830 | 543.5 | 533.4 | 540.0 | 6.09 | 6.07 | 6.66 | 6.27 | 0.00 | 0.0023 | 0.0112 | 0.0568 | 0.0068 | 0.0063 |
| 840 | 543.4 | 533.3 | 539.9 | 6.03 | 6.01 | 6.64 | 6.23 | 0.00 | 0.0204 | 0.0202 | 0.0066 | 0.0203 | 0.0001 |
| 850 | 543.4 | 533.2 | 539.8 | 6.03 | 5.91 | 6.55 | 6.16 | 0.00 | 0.0000 | 0.0315 | 0.0306 | 0.0157 | 0.0223 |
| 860 | 543.3 | 533.2 | 539.7 | 5.90 | 5.88 | 6.50 | 6.09 | 0.00 | 0.0430 | 0.0112 | 0.0153 | 0.0271 | 0.0225 |
| 870 | 543.2 | 533.1 | 539.7 | 5.89 | 5.82 | 6.50 | 6.07 | 0.00 | 0.0023 | 0.0180 | 0.0022 | 0.0101 | 0.0111 |
| 880 | 543.2 | 532.8 | 539.7 | 5.84 | 5.64 | 6.48 | 5.99 | 0.00 | 0.0181 | 0.0607 | 0.0066 | 0.0394 | 0.0301 |
| 890 | 543.1 | 532.8 | 539.6 | 5.82 | 5.61 | 6.44 | 5.96 | 0.00 | 0.0068 | 0.0112 | 0.0109 | 0.0090 | 0.0031 |
| 900 | 542.9 | 532.5 | 539.6 | 5.66 | 5.43 | 6.41 | 5.83 | 0.01 | 0.0543 | 0.0585 | 0.0109 | 0.0564 | 0.0029 |
| 910 | 542.9 | 532.4 | 539.3 | 5.63 | 5.37 | 6.25 | 5.75 | 0.00 | 0.0091 | 0.0202 | 0.0524 | 0.0146 | 0.0079 |
| 920 | 542.8 | 532.4 | 539.3 | 5.57 | 5.35 | 6.22 | 5.71 | 0.00 | 0.0204 | 0.0067 | 0.0109 | 0.0136 | 0.0096 |
| 930 | 542.7 | 532.3 | 538.8 | 5.52 | 5.31 | 5.89 | 5.58 | 0.00 | 0.0158 | 0.0135 | 0.1092 | 0.0147 | 0.0017 |
| 940 | 542.4 | 532.2 | 538.0 | 5.33 | 5.26 | 5.40 | 5.33 | 0.00 | 0.0634 | 0.0157 | 0.1660 | 0.0396 | 0.0337 |
| 950 | 542.1 | 532.2 | 537.8 | 5.13 | 5.22 | 5.22 | 5.19 | 0.00 | 0.0679 | 0.0157 | 0.0568 | 0.0418 | 0.0369 |

ตารางที่ ค.4 ข้อมูลปริมาณความชื้นและอัตราการทำแห้งของการทำแห้งเปลือกมังคุดด้วยการควบคุมแบบ CAT ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

| เวลา (นาที) | น้ำหนัก (กรัม) | | | ปริมาณความชื้นฐานแห้ง | | | | | อัตราการทำแห้ง | | | | |
|----------------|----------------|-------|-------|-----------------------|--------|--------|--------|------|----------------|--------|--------|--------|--------|
| | ภาค 1 | ภาค 2 | ภาค 3 | ภาค 1 | ภาค 2 | ภาค 3 | เฉลี่ย | SD | ภาค 1 | ภาค 2 | ภาค 3 | เฉลี่ย | SD |
| 0 | 761.9 | 751.6 | 751.5 | 156.02 | 156.02 | 156.02 | 156.02 | 0.00 | - | - | - | - | - |
| 10 | 755.4 | 746.8 | 743.3 | 151.56 | 152.73 | 150.20 | 151.50 | 0.01 | 1.4649 | 1.0803 | 1.9118 | 1.4857 | 0.3160 |
| 20 | 747.3 | 736.3 | 736 | 145.99 | 145.49 | 145.11 | 145.53 | 0.00 | 1.8340 | 2.3811 | 1.6740 | 1.9630 | 0.1131 |
| 30 | 735.6 | 726 | 727 | 137.91 | 138.48 | 138.77 | 138.38 | 0.00 | 2.6581 | 2.3069 | 2.0873 | 2.3508 | 0.2879 |
| 40 | 726.7 | 715.7 | 716.5 | 131.80 | 131.41 | 131.45 | 131.55 | 0.00 | 2.0083 | 2.3249 | 2.4083 | 2.2471 | 0.2110 |
| 50 | 715.8 | 706.1 | 708.7 | 124.33 | 124.83 | 125.91 | 125.03 | 0.01 | 2.4566 | 2.1628 | 1.8195 | 2.1463 | 0.2077 |
| 60 | 707.9 | 697.1 | 699.9 | 118.85 | 118.70 | 119.79 | 119.11 | 0.01 | 1.8023 | 2.0188 | 2.0134 | 1.9448 | 0.0038 |
| 70 | 699.1 | 687.8 | 691.7 | 112.80 | 112.35 | 114.03 | 113.06 | 0.01 | 1.9902 | 2.0863 | 1.8957 | 1.9907 | 0.0953 |
| 80 | 689.2 | 679.6 | 684.6 | 106.01 | 106.73 | 109.02 | 107.25 | 0.02 | 2.2325 | 1.8500 | 1.6486 | 1.9104 | 0.1424 |
| 90 | 682.3 | 671.2 | 675.1 | 101.28 | 100.95 | 102.33 | 101.52 | 0.01 | 1.5577 | 1.8995 | 2.2005 | 1.8859 | 0.2417 |
| 100 | 673 | 663.3 | 670.7 | 94.85 | 95.58 | 99.27 | 96.57 | 0.02 | 2.1125 | 1.7667 | 1.0044 | 1.6279 | 0.1390 |
| 110 | 665.9 | 655.4 | 661.8 | 89.99 | 90.17 | 93.01 | 91.06 | 0.02 | 1.6008 | 1.7802 | 2.0596 | 1.8135 | 0.1269 |
| 120 | 658.6 | 648 | 653.6 | 84.90 | 85.07 | 87.26 | 85.74 | 0.01 | 1.6732 | 1.6767 | 1.8911 | 1.7470 | 0.1248 |
| 130 | 651 | 640.9 | 647 | 79.70 | 80.23 | 82.64 | 80.85 | 0.02 | 1.7117 | 1.5934 | 1.5216 | 1.6089 | 0.0960 |
| 140 | 644.3 | 633.6 | 639.3 | 75.10 | 75.26 | 77.19 | 75.85 | 0.01 | 1.5125 | 1.6339 | 1.7895 | 1.6453 | 0.1388 |
| 150 | 636.4 | 627.1 | 634.4 | 69.64 | 70.83 | 73.77 | 71.41 | 0.02 | 1.7955 | 1.4584 | 1.1268 | 1.4602 | 0.2345 |
| 160 | 630.5 | 620.4 | 627.9 | 65.58 | 66.19 | 69.23 | 67.00 | 0.02 | 1.3336 | 1.5259 | 1.4939 | 1.4511 | 0.1030 |
| 170 | 624.2 | 614 | 623.6 | 61.28 | 61.83 | 66.22 | 63.11 | 0.03 | 1.4151 | 1.4336 | 0.9882 | 1.2790 | 0.0131 |
| 180 | 617.6 | 608.3 | 618.2 | 56.72 | 57.92 | 62.42 | 59.02 | 0.03 | 1.4989 | 1.2851 | 1.2515 | 1.3451 | 0.0238 |
| 190 | 611.9 | 602.3 | 611.7 | 52.80 | 53.82 | 57.83 | 54.81 | 0.03 | 1.2906 | 1.3504 | 1.5101 | 1.3837 | 0.0423 |
| 200 | 606.1 | 597.1 | 607.5 | 48.81 | 50.30 | 54.93 | 51.35 | 0.03 | 1.3109 | 1.1568 | 0.9536 | 1.1405 | 0.1090 |
| 210 | 600.8 | 592.2 | 601.8 | 45.16 | 46.95 | 50.88 | 47.66 | 0.03 | 1.2023 | 1.1028 | 1.3323 | 1.2124 | 0.0919 |
| 220 | 596.1 | 587.7 | 597 | 41.92 | 43.82 | 47.52 | 44.42 | 0.03 | 1.0642 | 1.0263 | 1.1037 | 1.0647 | 0.0387 |
| 230 | 591 | 583.4 | 593.6 | 38.36 | 40.88 | 45.12 | 41.46 | 0.03 | 1.1706 | 0.9678 | 0.7897 | 0.9760 | 0.1259 |
| 240 | 586.5 | 579.2 | 587.8 | 35.27 | 38.00 | 41.03 | 38.10 | 0.03 | 1.0189 | 0.9475 | 1.3438 | 1.1034 | 0.0505 |

| เวลา (นาที) | น้ำหนัก (กรัม) | | | ปริมาณความชื้นฐานแห้ง | | | | | อัตราการทำแห้ง | | | | |
|----------------|----------------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|--------|------|----------------|--------|--------|--------|--------|
| | ภาค 1 | ภาค 2 | ภาค 3 | ภาค 1 | ภาค 2 | ภาค 3 | เฉลี่ย | SD | ภาค 1 | ภาค 2 | ภาค 3 | เฉลี่ย | SD |
| 250 | 582.6 | 575.4 | 584.6 | 32.59 | 35.45 | 38.79 | 35.61 | 0.03 | 0.8808 | 0.8395 | 0.7366 | 0.8189 | 0.0292 |
| 260 | 578.3 | 571.9 | 581 | 29.66 | 33.05 | 36.32 | 33.01 | 0.03 | 0.9645 | 0.7900 | 0.8128 | 0.8557 | 0.0949 |
| 270 | 574.7 | 568.7 | 576.2 | 27.18 | 30.84 | 32.94 | 30.32 | 0.03 | 0.8151 | 0.7269 | 1.1129 | 0.8850 | 0.0623 |
| 280 | 571.3 | 565.7 | 573.9 | 24.82 | 28.81 | 31.33 | 28.32 | 0.03 | 0.7766 | 0.6684 | 0.5288 | 0.6579 | 0.1243 |
| 290 | 567.9 | 563.1 | 570.4 | 22.47 | 26.99 | 28.88 | 26.11 | 0.03 | 0.7721 | 0.5987 | 0.8081 | 0.7263 | 0.1120 |
| 300 | 565.1 | 560.3 | 567 | 20.60 | 25.07 | 26.47 | 24.04 | 0.03 | 0.6158 | 0.6302 | 0.7920 | 0.6793 | 0.0978 |
| 310 | 562.5 | 557.9 | 565.3 | 18.79 | 23.44 | 25.27 | 22.50 | 0.03 | 0.5955 | 0.5356 | 0.3948 | 0.5086 | 0.1030 |
| 320 | 560 | 555.8 | 561.7 | 17.05 | 22.02 | 22.76 | 20.61 | 0.03 | 0.5728 | 0.4681 | 0.8243 | 0.6218 | 0.1831 |
| 330 | 558.1 | 553.5 | 559 | 15.74 | 20.42 | 20.84 | 19.00 | 0.03 | 0.4279 | 0.5266 | 0.6327 | 0.5291 | 0.1024 |
| 340 | 556.3 | 551.8 | 557.1 | 14.50 | 19.25 | 19.53 | 17.76 | 0.03 | 0.4098 | 0.3826 | 0.4295 | 0.4073 | 0.0235 |
| 350 | 554.6 | 550 | 554.8 | 13.32 | 18.03 | 17.90 | 16.42 | 0.03 | 0.3872 | 0.4029 | 0.5380 | 0.4427 | 0.0829 |
| 360 | 553.1 | 548.2 | 551.9 | 12.30 | 16.80 | 15.86 | 14.99 | 0.02 | 0.3374 | 0.4029 | 0.6696 | 0.4699 | 0.1760 |
| 370 | 552 | 546.8 | 551 | 11.57 | 15.88 | 15.25 | 14.23 | 0.02 | 0.2377 | 0.3038 | 0.2009 | 0.2475 | 0.0522 |
| 380 | 550.8 | 545.6 | 549.3 | 10.75 | 15.02 | 14.03 | 13.27 | 0.02 | 0.2694 | 0.2813 | 0.3995 | 0.3167 | 0.0719 |
| 390 | 550 | 544.3 | 544.4 | 10.16 | 14.13 | 10.62 | 11.64 | 0.02 | 0.1947 | 0.2926 | 1.1222 | 0.2436 | 0.0692 |
| 400 | 549.6 | 543.1 | 544.1 | 9.87 | 13.30 | 10.37 | 11.18 | 0.02 | 0.0951 | 0.2746 | 0.0831 | 0.1848 | 0.1269 |
| 410 | 548.8 | 542 | 543.2 | 9.36 | 12.56 | 9.75 | 10.55 | 0.02 | 0.1698 | 0.2431 | 0.2055 | 0.2061 | 0.0518 |
| 420 | 547.9 | 540.9 | 540.9 | 8.72 | 11.82 | 8.16 | 9.57 | 0.02 | 0.2106 | 0.2431 | 0.5218 | 0.2268 | 0.0230 |
| 430 | 547.3 | 539.9 | 538.5 | 8.34 | 11.16 | 6.44 | 8.65 | 0.02 | 0.1223 | 0.2183 | 0.5657 | 0.1703 | 0.0679 |
| 440 | 547.2 | 538.9 | 538.1 | 8.26 | 10.48 | 6.19 | 8.31 | 0.02 | 0.0272 | 0.2228 | 0.0831 | 0.1110 | 0.1008 |
| 450 | 546.5 | 538.3 | 537.9 | 7.77 | 10.07 | 6.05 | 7.97 | 0.02 | 0.1608 | 0.1350 | 0.0439 | 0.1132 | 0.0614 |
| 460 | 546 | 537.8 | 537.8 | 7.42 | 9.70 | 5.99 | 7.70 | 0.02 | 0.1155 | 0.1215 | 0.0208 | 0.1185 | 0.0043 |
| 470 | 545.4 | 537.1 | 537.8 | 7.03 | 9.19 | 5.95 | 7.39 | 0.02 | 0.1291 | 0.1665 | 0.0115 | 0.1024 | 0.0809 |
| 480 | 545.2 | 536.2 | 537.4 | 6.84 | 8.59 | 5.69 | 7.04 | 0.01 | 0.0634 | 0.1981 | 0.0877 | 0.1164 | 0.0718 |
| 490 | 545 | 535.7 | 537.3 | 6.76 | 8.23 | 5.63 | 6.87 | 0.01 | 0.0249 | 0.1193 | 0.0185 | 0.1193 | 0.0667 |
| 500 | 544.8 | 535.2 | 537.1 | 6.56 | 7.89 | 5.51 | 6.65 | 0.01 | 0.0657 | 0.1103 | 0.0416 | 0.0725 | 0.0349 |
| 510 | 544.4 | 534.9 | 536.8 | 6.34 | 7.72 | 5.25 | 6.44 | 0.01 | 0.0725 | 0.0585 | 0.0831 | 0.0714 | 0.0123 |

| เวลา (นาที) | น้ำหนัก (กรัม) | | | ปริมาณความชื้นฐานแห้ง | | | | | อัตราการทำแห้ง | | | | |
|----------------|----------------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|--------|------|----------------|--------|--------|--------|--------|
| | ภาค 1 | ภาค 2 | ภาค 3 | ภาค 1 | ภาค 2 | ภาค 3 | เฉลี่ย | SD | ภาค 1 | ภาค 2 | ภาค 3 | เฉลี่ย | SD |
| 520 | 543.9 | 534.3 | 536.8 | 5.95 | 7.31 | 5.25 | 6.17 | 0.01 | 0.1291 | 0.1328 | 0.0023 | 0.0881 | 0.0743 |
| 530 | 543.8 | 534.1 | 536.7 | 5.91 | 7.18 | 5.22 | 6.10 | 0.01 | 0.0113 | 0.0450 | 0.0092 | 0.0219 | 0.0201 |
| 540 | 543.8 | 533.7 | 536.6 | 5.88 | 6.92 | 5.11 | 5.97 | 0.01 | 0.0113 | 0.0833 | 0.0369 | 0.0438 | 0.0365 |
| 550 | 543.8 | 533.4 | 536 | 5.87 | 6.68 | 4.73 | 5.76 | 0.01 | 0.0023 | 0.0788 | 0.1224 | 0.0678 | 0.0608 |
| 560 | 543.7 | 533.3 | 536 | 5.87 | 6.59 | 4.68 | 5.71 | 0.01 | 0.0023 | 0.0315 | 0.0185 | 0.0174 | 0.0147 |
| 570 | 543.6 | 533 | 535.9 | 5.78 | 6.43 | 4.66 | 5.62 | 0.01 | 0.0272 | 0.0518 | 0.0069 | 0.0286 | 0.0225 |
| 580 | 543.6 | 532.9 | 535.8 | 5.76 | 6.36 | 4.53 | 5.55 | 0.01 | 0.0068 | 0.0225 | 0.0416 | 0.0236 | 0.0174 |
| 590 | 543.4 | 532.8 | 535.6 | 5.60 | 6.27 | 4.40 | 5.43 | 0.01 | 0.0521 | 0.0293 | 0.0416 | 0.0410 | 0.0114 |
| 600 | 543.4 | 532.6 | 535.6 | 5.60 | 6.14 | 4.39 | 5.38 | 0.01 | 0.0000 | 0.0428 | 0.0046 | 0.0158 | 0.0235 |
| 610 | 543.3 | 532.3 | 535.5 | 5.58 | 5.90 | 4.33 | 5.27 | 0.01 | 0.0068 | 0.0788 | 0.0185 | 0.0347 | 0.0386 |
| 620 | 543.3 | 532.2 | 535.4 | 5.58 | 5.88 | 4.28 | 5.25 | 0.01 | 0.0000 | 0.0090 | 0.0162 | 0.0084 | 0.0081 |
| 630 | 543.3 | 532 | 535.1 | 5.55 | 5.74 | 4.10 | 5.13 | 0.01 | 0.0113 | 0.0450 | 0.0600 | 0.0388 | 0.0249 |
| 640 | 543.2 | 532 | 535.1 | 5.51 | 5.70 | 4.04 | 5.08 | 0.01 | 0.0136 | 0.0135 | 0.0208 | 0.0160 | 0.0042 |
| 650 | 543.2 | 531.8 | 535 | 5.46 | 5.57 | 4.02 | 5.02 | 0.01 | 0.0158 | 0.0405 | 0.0046 | 0.0203 | 0.0184 |
| 660 | 543 | 531.6 | 534.9 | 5.33 | 5.47 | 3.91 | 4.90 | 0.01 | 0.0430 | 0.0360 | 0.0369 | 0.0387 | 0.0038 |
| 670 | 542.9 | 531.5 | 534.8 | 5.30 | 5.38 | 3.89 | 4.86 | 0.01 | 0.0113 | 0.0270 | 0.0069 | 0.0151 | 0.0106 |
| 680 | 542.8 | 531.5 | 534.6 | 5.25 | 5.38 | 3.74 | 4.79 | 0.01 | 0.0158 | 0.0000 | 0.0485 | 0.0214 | 0.0247 |
| 690 | 542.8 | 531.5 | 534.6 | 5.22 | 5.38 | 3.74 | 4.78 | 0.01 | 0.0091 | 0.0023 | 0.0000 | 0.0038 | 0.0047 |
| 700 | 542.8 | 531.4 | 534.6 | 5.21 | 5.29 | 3.71 | 4.74 | 0.01 | 0.0023 | 0.0293 | 0.0115 | 0.0144 | 0.0137 |
| 710 | 542.7 | 531.2 | 534.5 | 5.15 | 5.15 | 3.64 | 4.65 | 0.01 | 0.0204 | 0.0450 | 0.0231 | 0.0295 | 0.0135 |
| 720 | 542.7 | 531.1 | 534.2 | 5.14 | 5.11 | 3.45 | 4.56 | 0.01 | 0.0045 | 0.0135 | 0.0623 | 0.0268 | 0.0311 |

ตารางที่ ค.5 ข้อมูลปริมาณความชื้นและอัตราการทำแห้งของการทำแห้งเปลือกมังคุดด้วยการควบคุมแบบ PSTL ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

| เวลา (นาที) | น้ำหนัก (กรัม) | | | ปริมาณความชื้นฐานแห้ง | | | | | อัตราการทำแห้ง | | | | |
|----------------|----------------|-------|-------|-----------------------|--------|--------|--------|------|----------------|--------|--------|--------|--------|
| | ภาค 1 | ภาค 2 | ภาค 3 | ภาค 1 | ภาค 2 | ภาค 3 | เฉลี่ย | SD | ภาค 1 | ภาค 2 | ภาค 3 | เฉลี่ย | SD |
| 0 | 764.4 | 755.9 | 768.0 | 156.02 | 156.02 | 156.02 | 156.02 | 0.00 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | | |
| 10 | 754.7 | 746.8 | 758.9 | 151.55 | 151.82 | 151.86 | 151.75 | 0.00 | 2.1894 | 2.0593 | 2.0380 | 2.0956 | 0.0820 |
| 20 | 740.3 | 732.0 | 744.5 | 144.91 | 144.94 | 145.33 | 145.06 | 0.00 | 3.2581 | 3.3767 | 3.2071 | 3.2806 | 0.0871 |
| 30 | 726.7 | 718.6 | 731.3 | 138.62 | 138.74 | 139.29 | 138.88 | 0.00 | 3.0906 | 3.0422 | 2.9607 | 3.0312 | 0.0656 |
| 40 | 713.2 | 704.9 | 717.7 | 132.42 | 132.38 | 133.07 | 132.62 | 0.00 | 3.0408 | 3.1219 | 3.0525 | 3.0717 | 0.0438 |
| 50 | 701.2 | 692.4 | 705.3 | 126.84 | 126.59 | 127.42 | 126.95 | 0.00 | 2.7351 | 2.8397 | 2.7726 | 2.7825 | 0.0530 |
| 60 | 689.3 | 681.0 | 694.2 | 121.36 | 121.28 | 122.37 | 121.67 | 0.01 | 2.6898 | 2.6054 | 2.4770 | 2.5907 | 0.1072 |
| 70 | 678.4 | 670.3 | 683.3 | 116.34 | 116.32 | 117.37 | 116.68 | 0.01 | 2.4657 | 2.4324 | 2.4568 | 2.4516 | 0.0172 |
| 80 | 668.4 | 660.5 | 673.0 | 111.74 | 111.80 | 112.68 | 112.07 | 0.01 | 2.2574 | 2.2208 | 2.3000 | 2.2594 | 0.0396 |
| 90 | 658.5 | 651.2 | 663.4 | 107.14 | 107.49 | 108.30 | 107.64 | 0.01 | 2.2574 | 2.1139 | 2.1500 | 2.1737 | 0.0746 |
| 100 | 649.9 | 642.5 | 655.0 | 103.17 | 103.45 | 104.46 | 103.69 | 0.01 | 1.9472 | 1.9819 | 1.8812 | 1.9368 | 0.0511 |
| 110 | 641.4 | 634.2 | 647.0 | 99.25 | 99.59 | 100.81 | 99.89 | 0.01 | 1.9223 | 1.8909 | 1.7917 | 1.8683 | 0.0682 |
| 120 | 633.6 | 626.4 | 639.0 | 95.65 | 95.96 | 97.16 | 96.26 | 0.01 | 1.7683 | 1.7839 | 1.7917 | 1.7813 | 0.0119 |
| 130 | 625.7 | 618.4 | 631.0 | 92.04 | 92.24 | 93.50 | 92.59 | 0.01 | 1.7706 | 1.8226 | 1.7961 | 1.7964 | 0.0260 |
| 140 | 618.3 | 610.9 | 623.7 | 88.63 | 88.77 | 90.17 | 89.19 | 0.01 | 1.6732 | 1.7043 | 1.6349 | 1.6708 | 0.0348 |
| 150 | 611.0 | 604.1 | 616.3 | 85.25 | 85.65 | 86.78 | 85.89 | 0.01 | 1.6596 | 1.5336 | 1.6618 | 1.6183 | 0.0734 |
| 160 | 603.8 | 596.3 | 608.5 | 81.92 | 82.03 | 83.23 | 82.39 | 0.01 | 1.6325 | 1.7748 | 1.7446 | 1.7173 | 0.0750 |
| 170 | 596.7 | 588.6 | 601.1 | 78.65 | 78.44 | 79.87 | 78.99 | 0.01 | 1.6030 | 1.7589 | 1.6461 | 1.6693 | 0.0805 |
| 180 | 589.6 | 581.6 | 593.5 | 75.35 | 75.19 | 76.39 | 75.65 | 0.01 | 1.6189 | 1.5951 | 1.7088 | 1.6409 | 0.0600 |
| 190 | 582.4 | 574.1 | 585.9 | 72.04 | 71.72 | 72.91 | 72.22 | 0.01 | 1.6257 | 1.7043 | 1.7066 | 1.6788 | 0.0461 |
| 200 | 574.9 | 567.2 | 578.4 | 68.56 | 68.52 | 69.52 | 68.87 | 0.01 | 1.7072 | 1.5700 | 1.6640 | 1.6471 | 0.0701 |
| 210 | 568.5 | 560.4 | 571.7 | 65.62 | 65.36 | 66.44 | 65.80 | 0.01 | 1.4445 | 1.5518 | 1.5117 | 1.5027 | 0.0542 |
| 220 | 562.0 | 553.7 | 565.1 | 62.62 | 62.25 | 63.43 | 62.76 | 0.01 | 1.4717 | 1.5245 | 1.4781 | 1.4915 | 0.0288 |
| 230 | 555.3 | 547.4 | 558.6 | 59.55 | 59.33 | 60.46 | 59.78 | 0.01 | 1.5034 | 1.4312 | 1.4535 | 1.4627 | 0.0370 |
| 240 | 548.8 | 540.6 | 552.3 | 56.55 | 56.20 | 57.57 | 56.77 | 0.01 | 1.4717 | 1.5382 | 1.4199 | 1.4766 | 0.0593 |

| เวลา (นาที) | น้ำหนัก (กรัม) | | | ปริมาณความชื้นฐานแห้ง | | | | | อัตราการทำแห้ง | | | | |
|----------------|----------------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|--------|------|----------------|--------|--------|--------|--------|
| | ภาค 1 | ภาค 2 | ภาค 3 | ภาค 1 | ภาค 2 | ภาค 3 | เฉลี่ย | SD | ภาค 1 | ภาค 2 | ภาค 3 | เฉลี่ย | SD |
| 250 | 542.5 | 533.8 | 545.8 | 53.63 | 53.05 | 54.63 | 53.77 | 0.01 | 1.4355 | 1.5473 | 1.4423 | 1.4750 | 0.0627 |
| 260 | 535.7 | 527.6 | 539.3 | 50.50 | 50.17 | 51.67 | 50.78 | 0.01 | 1.5351 | 1.4085 | 1.4512 | 1.4649 | 0.0644 |
| 270 | 528.8 | 521.4 | 532.9 | 47.33 | 47.28 | 48.71 | 47.77 | 0.01 | 1.5555 | 1.4199 | 1.4535 | 1.4763 | 0.0706 |
| 280 | 521.9 | 514.9 | 526.8 | 44.14 | 44.25 | 45.95 | 44.78 | 0.01 | 1.5645 | 1.4859 | 1.3549 | 1.4684 | 0.1059 |
| 290 | 516.0 | 508.9 | 521.0 | 41.42 | 41.49 | 43.31 | 42.08 | 0.01 | 1.3336 | 1.3539 | 1.2945 | 1.3273 | 0.0302 |
| 300 | 510.3 | 503.7 | 515.8 | 38.77 | 39.09 | 40.92 | 39.59 | 0.01 | 1.3042 | 1.1809 | 1.1713 | 1.2188 | 0.0741 |
| 310 | 504.7 | 498.5 | 510.2 | 36.17 | 36.64 | 38.38 | 37.07 | 0.01 | 1.2725 | 1.1992 | 1.2474 | 1.2397 | 0.0373 |
| 320 | 499.4 | 493.4 | 504.3 | 33.76 | 34.28 | 35.69 | 34.57 | 0.01 | 1.1864 | 1.1605 | 1.3236 | 1.2235 | 0.0877 |
| 330 | 494.4 | 487.9 | 498.3 | 31.45 | 31.76 | 32.96 | 32.05 | 0.01 | 1.1321 | 1.2378 | 1.3393 | 1.2364 | 0.1036 |
| 340 | 489.6 | 483.1 | 494.1 | 29.21 | 29.53 | 31.00 | 29.91 | 0.01 | 1.0981 | 1.0922 | 0.9585 | 1.0496 | 0.0789 |
| 350 | 484.6 | 478.4 | 489.9 | 26.93 | 27.35 | 29.11 | 27.80 | 0.01 | 1.1185 | 1.0672 | 0.9272 | 1.0376 | 0.0990 |
| 360 | 479.9 | 473.6 | 485.7 | 24.74 | 25.11 | 27.21 | 25.69 | 0.01 | 1.0732 | 1.0990 | 0.9339 | 1.0354 | 0.0888 |
| 370 | 475.1 | 469.1 | 481.2 | 22.52 | 23.04 | 25.12 | 23.56 | 0.01 | 1.0891 | 1.0171 | 1.0257 | 1.0440 | 0.0393 |
| 380 | 470.5 | 464.6 | 476.4 | 20.39 | 20.92 | 22.93 | 21.42 | 0.01 | 1.0460 | 1.0399 | 1.0728 | 1.0529 | 0.0175 |
| 390 | 466.9 | 460.5 | 472.3 | 18.76 | 19.06 | 21.06 | 19.63 | 0.01 | 0.7992 | 0.9147 | 0.9205 | 0.8781 | 0.0684 |
| 400 | 464.2 | 458.1 | 469.1 | 17.49 | 17.92 | 19.61 | 18.34 | 0.01 | 0.6226 | 0.5575 | 0.7077 | 0.6293 | 0.0753 |
| 410 | 461.8 | 455.2 | 466.1 | 16.40 | 16.56 | 18.25 | 17.07 | 0.01 | 0.5389 | 0.6690 | 0.6696 | 0.6258 | 0.0753 |
| 420 | 459.5 | 452.3 | 463.2 | 15.32 | 15.24 | 16.93 | 15.83 | 0.01 | 0.5275 | 0.6485 | 0.6472 | 0.6078 | 0.0695 |
| 430 | 457.4 | 449.4 | 460.7 | 14.37 | 13.87 | 15.78 | 14.67 | 0.01 | 0.4687 | 0.6690 | 0.5666 | 0.5681 | 0.1002 |
| 440 | 455.2 | 447.3 | 458.4 | 13.36 | 12.93 | 14.72 | 13.67 | 0.01 | 0.4936 | 0.4642 | 0.5196 | 0.4925 | 0.0277 |
| 450 | 453.7 | 445.4 | 456.5 | 12.66 | 12.04 | 13.84 | 12.85 | 0.01 | 0.3442 | 0.4346 | 0.4300 | 0.4029 | 0.0509 |
| 460 | 451.9 | 443.8 | 454.7 | 11.82 | 11.29 | 13.05 | 12.06 | 0.01 | 0.4098 | 0.3686 | 0.3874 | 0.3886 | 0.0206 |
| 470 | 450.1 | 442.3 | 453.0 | 11.01 | 10.60 | 12.26 | 11.29 | 0.01 | 0.3985 | 0.3413 | 0.3897 | 0.3765 | 0.0308 |
| 480 | 448.6 | 440.8 | 451.5 | 10.31 | 9.92 | 11.56 | 10.60 | 0.01 | 0.3442 | 0.3299 | 0.3404 | 0.3382 | 0.0074 |
| 490 | 447.2 | 439.4 | 449.9 | 9.67 | 9.24 | 10.86 | 9.92 | 0.01 | 0.3125 | 0.3345 | 0.3471 | 0.3314 | 0.0176 |
| 500 | 445.6 | 438.0 | 448.4 | 8.94 | 8.61 | 10.16 | 9.24 | 0.01 | 0.3600 | 0.3095 | 0.3427 | 0.3374 | 0.0257 |
| 510 | 444.3 | 436.9 | 447.0 | 8.34 | 8.10 | 9.53 | 8.66 | 0.01 | 0.2966 | 0.2480 | 0.3091 | 0.2846 | 0.0323 |

| เวลา (นาที) | น้ำหนัก (กรัม) | | | ปริมาณความชื้นฐานแห้ง | | | | | อัตราการทำแห้ง | | | | |
|----------------|----------------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|--------|------|----------------|--------|--------|--------|--------|
| | ภาค 1 | ภาค 2 | ภาค 3 | ภาค 1 | ภาค 2 | ภาค 3 | เฉลี่ย | SD | ภาค 1 | ภาค 2 | ภาค 3 | เฉลี่ย | SD |
| 520 | 442.9 | 435.9 | 445.9 | 7.67 | 7.61 | 9.04 | 8.11 | 0.01 | 0.3260 | 0.2435 | 0.2396 | 0.2697 | 0.0488 |
| 530 | 441.9 | 434.7 | 444.6 | 7.19 | 7.09 | 8.44 | 7.57 | 0.01 | 0.2355 | 0.2548 | 0.2934 | 0.2612 | 0.0295 |
| 540 | 440.7 | 432.9 | 442.7 | 6.67 | 6.25 | 7.58 | 6.83 | 0.01 | 0.2536 | 0.4119 | 0.4233 | 0.3629 | 0.0948 |
| 550 | 439.8 | 432.8 | 441.0 | 6.26 | 6.20 | 6.78 | 6.41 | 0.00 | 0.2038 | 0.0250 | 0.3942 | 0.2077 | 0.1846 |
| 560 | 439.3 | 432.0 | 439.8 | 5.99 | 5.81 | 6.22 | 6.01 | 0.00 | 0.1313 | 0.1911 | 0.2732 | 0.1986 | 0.0712 |
| 570 | 438.6 | 431.0 | 439.3 | 5.68 | 5.36 | 6.00 | 5.68 | 0.00 | 0.1540 | 0.2184 | 0.1053 | 0.1592 | 0.0568 |
| 580 | 437.9 | 430.1 | 439.0 | 5.34 | 4.96 | 5.85 | 5.38 | 0.00 | 0.1630 | 0.2002 | 0.0739 | 0.1457 | 0.0649 |
| 590 | 437.1 | 429.2 | 438.6 | 5.01 | 4.52 | 5.68 | 5.07 | 0.01 | 0.1630 | 0.2139 | 0.0873 | 0.1548 | 0.0637 |
| 600 | 436.5 | 428.7 | 437.9 | 4.74 | 4.27 | 5.38 | 4.80 | 0.01 | 0.1336 | 0.1206 | 0.1456 | 0.1333 | 0.0125 |
| 610 | 436.0 | 428.2 | 437.3 | 4.50 | 4.07 | 5.10 | 4.55 | 0.01 | 0.1177 | 0.1024 | 0.1389 | 0.1197 | 0.0183 |
| 620 | 435.5 | 427.6 | 436.8 | 4.25 | 3.80 | 4.87 | 4.31 | 0.01 | 0.1245 | 0.1297 | 0.1120 | 0.1221 | 0.0091 |
| 630 | 434.8 | 427.2 | 435.9 | 3.96 | 3.59 | 4.45 | 4.00 | 0.00 | 0.1426 | 0.1024 | 0.2038 | 0.1496 | 0.0511 |
| 640 | 434.1 | 426.8 | 435.7 | 3.61 | 3.43 | 4.35 | 3.80 | 0.00 | 0.1675 | 0.0819 | 0.0515 | 0.1003 | 0.0602 |
| 650 | 433.7 | 426.6 | 435.2 | 3.43 | 3.32 | 4.15 | 3.63 | 0.00 | 0.0928 | 0.0523 | 0.0985 | 0.0812 | 0.0252 |
| 660 | 433.6 | 426.3 | 435.0 | 3.39 | 3.18 | 4.05 | 3.54 | 0.00 | 0.0181 | 0.0705 | 0.0493 | 0.0460 | 0.0264 |
| 670 | 433.4 | 426.0 | 434.8 | 3.28 | 3.05 | 3.94 | 3.42 | 0.00 | 0.0543 | 0.0592 | 0.0537 | 0.0558 | 0.0030 |
| 680 | 433.2 | 425.6 | 434.6 | 3.19 | 2.85 | 3.87 | 3.30 | 0.01 | 0.0430 | 0.1001 | 0.0336 | 0.0589 | 0.0360 |
| 690 | 433.0 | 425.6 | 434.1 | 3.08 | 2.85 | 3.62 | 3.18 | 0.00 | 0.0521 | 0.0023 | 0.1209 | 0.0584 | 0.0596 |
| 700 | 432.7 | 425.4 | 434.0 | 2.97 | 2.77 | 3.60 | 3.11 | 0.00 | 0.0566 | 0.0387 | 0.0112 | 0.0355 | 0.0229 |
| 710 | 432.0 | 425.1 | 434.0 | 2.65 | 2.61 | 3.59 | 2.95 | 0.01 | 0.1562 | 0.0796 | 0.0067 | 0.0809 | 0.0748 |
| 720 | 432.0 | 425.0 | 434.0 | 2.62 | 2.59 | 3.57 | 2.93 | 0.01 | 0.0136 | 0.0091 | 0.0067 | 0.0098 | 0.0035 |
| 730 | 431.9 | 425.0 | 433.8 | 2.58 | 2.55 | 3.52 | 2.89 | 0.01 | 0.0204 | 0.0159 | 0.0246 | 0.0203 | 0.0044 |
| 740 | 431.8 | 424.9 | 433.8 | 2.57 | 2.53 | 3.50 | 2.87 | 0.01 | 0.0068 | 0.0114 | 0.0090 | 0.0090 | 0.0023 |

ตารางที่ ค.6 ข้อมูลปริมาณความชื้นและอัตราการทำแห้งของการทำแห้งเปลือกมังคุดด้วยการควบคุมแบบ PSTL ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

| เวลา (นาที) | น้ำหนัก (กรัม) | | | ปริมาณความชื้นฐานแห้ง | | | | | อัตราการทำแห้ง | | | | |
|----------------|----------------|-------|-------|-----------------------|--------|--------|--------|------|----------------|--------|--------|--------|--------|
| | ภาค 1 | ภาค 2 | ภาค 3 | ภาค 1 | ภาค 2 | ภาค 3 | เฉลี่ย | SD | ภาค 1 | ภาค 2 | ภาค 3 | เฉลี่ย | SD |
| 0 | 761.9 | 751.6 | 751.5 | 156.02 | 156.02 | 156.02 | 156.02 | 0.00 | - | - | - | - | - |
| 10 | 752.3 | 742.3 | 741.0 | 149.82 | 150.05 | 149.17 | 149.68 | 0.00 | 2.1668 | 2.0872 | 2.3958 | 2.2166 | 0.1602 |
| 20 | 736.7 | 725.7 | 726.5 | 139.72 | 139.51 | 139.76 | 139.66 | 0.00 | 3.5343 | 3.6892 | 3.2922 | 3.5053 | 0.2001 |
| 30 | 720.8 | 711.1 | 711.7 | 129.46 | 130.21 | 130.08 | 129.92 | 0.00 | 3.5887 | 3.2509 | 3.3855 | 3.4084 | 0.1700 |
| 40 | 705.9 | 696.1 | 696.9 | 119.78 | 120.69 | 120.51 | 120.33 | 0.00 | 3.3872 | 3.3310 | 3.3491 | 3.3558 | 0.0287 |
| 50 | 694.1 | 683.8 | 684.7 | 112.15 | 112.89 | 112.57 | 112.54 | 0.00 | 2.6694 | 2.7302 | 2.7780 | 2.7259 | 0.0544 |
| 60 | 682.2 | 672.6 | 673.6 | 104.48 | 105.75 | 105.33 | 105.19 | 0.01 | 2.6853 | 2.4966 | 2.5346 | 2.5721 | 0.0998 |
| 70 | 671.3 | 661.2 | 663.1 | 97.44 | 98.48 | 98.48 | 98.13 | 0.01 | 2.4634 | 2.5455 | 2.3958 | 2.4682 | 0.0750 |
| 80 | 662.0 | 650.3 | 653.7 | 91.40 | 91.58 | 92.40 | 91.79 | 0.01 | 2.1125 | 2.4143 | 2.1273 | 2.2180 | 0.1701 |
| 90 | 653.9 | 640.4 | 643.8 | 86.18 | 85.28 | 85.95 | 85.80 | 0.00 | 1.8272 | 2.2051 | 2.2570 | 2.0964 | 0.2346 |
| 100 | 644.6 | 632.0 | 634.6 | 80.10 | 79.90 | 79.97 | 79.99 | 0.00 | 2.1260 | 1.8802 | 2.0909 | 2.0324 | 0.1329 |
| 110 | 636.0 | 622.9 | 626.0 | 74.56 | 74.13 | 74.38 | 74.36 | 0.00 | 1.9381 | 2.0204 | 1.9544 | 1.9710 | 0.0436 |
| 120 | 626.3 | 614.6 | 617.3 | 68.30 | 68.87 | 68.69 | 68.62 | 0.00 | 2.1917 | 1.8379 | 1.9908 | 2.0068 | 0.1774 |
| 130 | 618.4 | 606.1 | 609.4 | 63.16 | 63.48 | 63.57 | 63.40 | 0.00 | 1.7955 | 1.8869 | 1.7929 | 1.8251 | 0.0536 |
| 140 | 610.5 | 597.4 | 601.9 | 58.06 | 57.90 | 58.71 | 58.22 | 0.00 | 1.7864 | 1.9537 | 1.6996 | 1.8132 | 0.1291 |
| 150 | 603.2 | 590.0 | 594.6 | 53.37 | 53.21 | 53.98 | 53.52 | 0.00 | 1.6415 | 1.6399 | 1.6563 | 1.6459 | 0.0091 |
| 160 | 595.6 | 582.3 | 587.2 | 48.44 | 48.31 | 49.15 | 48.63 | 0.00 | 1.7253 | 1.7156 | 1.6882 | 1.7097 | 0.0192 |
| 170 | 588.9 | 575.3 | 580.7 | 44.10 | 43.85 | 44.90 | 44.28 | 0.01 | 1.5170 | 1.5576 | 1.4880 | 1.5208 | 0.0350 |
| 180 | 582.1 | 569.1 | 574.5 | 39.71 | 39.95 | 40.91 | 40.19 | 0.01 | 1.5374 | 1.3662 | 1.3947 | 1.4328 | 0.0917 |
| 190 | 575.8 | 563.2 | 567.8 | 35.62 | 36.20 | 36.51 | 36.11 | 0.00 | 1.4287 | 1.3128 | 1.5403 | 1.4273 | 0.1137 |
| 200 | 570.1 | 556.7 | 562.0 | 31.93 | 32.02 | 32.75 | 32.24 | 0.00 | 1.2906 | 1.4597 | 1.3151 | 1.3551 | 0.0914 |
| 210 | 565.1 | 551.4 | 556.6 | 28.65 | 28.65 | 29.23 | 28.84 | 0.00 | 1.1479 | 1.1793 | 1.2332 | 1.1868 | 0.0431 |
| 220 | 560.5 | 547.2 | 551.8 | 25.68 | 25.98 | 26.09 | 25.91 | 0.00 | 1.0415 | 0.9368 | 1.0966 | 1.0250 | 0.0812 |
| 230 | 556.6 | 543.4 | 548.4 | 23.16 | 23.60 | 23.89 | 23.55 | 0.00 | 0.8808 | 0.8300 | 0.7713 | 0.8273 | 0.0548 |
| 240 | 553.3 | 540.9 | 545.0 | 21.05 | 22.01 | 21.73 | 21.60 | 0.00 | 0.7381 | 0.5585 | 0.7554 | 0.6840 | 0.1090 |

| เวลา (นาที) | น้ำหนัก (กรัม) | | | ปริมาณความชื้นฐานแห้ง | | | | | อัตราการทำแห้ง | | | | |
|----------------|----------------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|--------|------|----------------|--------|--------|--------|--------|
| | ภาค 1 | ภาค 2 | ภาค 3 | ภาค 1 | ภาค 2 | ภาค 3 | เฉลี่ย | SD | ภาค 1 | ภาค 2 | ภาค 3 | เฉลี่ย | SD |
| 250 | 550.7 | 538.7 | 542.2 | 19.37 | 20.59 | 19.90 | 19.95 | 0.01 | 0.5887 | 0.4962 | 0.6416 | 0.5755 | 0.0736 |
| 260 | 548.3 | 536.7 | 539.9 | 17.79 | 19.34 | 18.41 | 18.51 | 0.01 | 0.5502 | 0.4383 | 0.5210 | 0.5032 | 0.0580 |
| 270 | 546.9 | 534.1 | 537.8 | 16.88 | 17.64 | 17.04 | 17.19 | 0.00 | 0.3192 | 0.5919 | 0.4778 | 0.4630 | 0.1369 |
| 280 | 545.1 | 532.3 | 536.0 | 15.77 | 16.50 | 15.85 | 16.04 | 0.00 | 0.3894 | 0.4005 | 0.4164 | 0.4021 | 0.0135 |
| 290 | 543.5 | 530.9 | 534.3 | 14.71 | 15.62 | 14.74 | 15.02 | 0.01 | 0.3691 | 0.3071 | 0.3891 | 0.3551 | 0.0428 |
| 300 | 542.0 | 529.8 | 533.0 | 13.72 | 14.94 | 13.91 | 14.19 | 0.01 | 0.3464 | 0.2403 | 0.2889 | 0.2919 | 0.0531 |
| 310 | 540.1 | 528.5 | 532.0 | 12.50 | 14.08 | 13.24 | 13.27 | 0.01 | 0.4279 | 0.2982 | 0.2366 | 0.3209 | 0.0977 |
| 320 | 539.3 | 526.8 | 531.1 | 11.98 | 13.00 | 12.68 | 12.55 | 0.01 | 0.1834 | 0.3783 | 0.1957 | 0.2524 | 0.1091 |
| 330 | 538.6 | 525.0 | 530.1 | 11.52 | 11.86 | 12.01 | 11.80 | 0.00 | 0.1608 | 0.3983 | 0.2343 | 0.2645 | 0.1216 |
| 340 | 537.1 | 523.9 | 529.3 | 10.55 | 11.17 | 11.49 | 11.07 | 0.00 | 0.3374 | 0.2425 | 0.1820 | 0.2540 | 0.0783 |
| 350 | 536.0 | 522.8 | 528.0 | 9.87 | 10.50 | 10.66 | 10.35 | 0.00 | 0.2377 | 0.2336 | 0.2889 | 0.2534 | 0.0308 |
| 360 | 535.8 | 522.1 | 527.3 | 9.75 | 10.03 | 10.19 | 9.99 | 0.00 | 0.0430 | 0.1669 | 0.1661 | 0.1253 | 0.0713 |
| 370 | 535.0 | 521.3 | 526.4 | 9.19 | 9.52 | 9.63 | 9.45 | 0.00 | 0.1947 | 0.1780 | 0.1957 | 0.1895 | 0.0099 |
| 380 | 534.6 | 520.5 | 525.6 | 8.92 | 9.00 | 9.07 | 8.99 | 0.00 | 0.0951 | 0.1825 | 0.1957 | 0.1577 | 0.0547 |
| 390 | 533.8 | 519.7 | 524.8 | 8.44 | 8.50 | 8.55 | 8.50 | 0.00 | 0.1698 | 0.1736 | 0.1797 | 0.1744 | 0.0050 |
| 400 | 532.9 | 518.9 | 523.9 | 7.83 | 8.00 | 8.00 | 7.94 | 0.00 | 0.2106 | 0.1736 | 0.1957 | 0.1933 | 0.0186 |
| 410 | 532.3 | 518.1 | 523.2 | 7.48 | 7.51 | 7.51 | 7.50 | 0.00 | 0.1223 | 0.1713 | 0.1706 | 0.1547 | 0.0281 |
| 420 | 531.8 | 517.5 | 522.6 | 7.15 | 7.14 | 7.14 | 7.14 | 0.00 | 0.1177 | 0.1313 | 0.1274 | 0.1255 | 0.0070 |
| 430 | 531.5 | 517.0 | 522.1 | 6.95 | 6.82 | 6.82 | 6.86 | 0.00 | 0.0702 | 0.1113 | 0.1115 | 0.0976 | 0.0238 |
| 440 | 531.0 | 516.6 | 521.6 | 6.62 | 6.54 | 6.51 | 6.55 | 0.00 | 0.1155 | 0.0979 | 0.1115 | 0.1083 | 0.0092 |
| 450 | 530.4 | 516.3 | 521.3 | 6.25 | 6.32 | 6.28 | 6.28 | 0.00 | 0.1291 | 0.0757 | 0.0796 | 0.0948 | 0.0298 |
| 460 | 530.2 | 516.0 | 521.0 | 6.07 | 6.15 | 6.12 | 6.11 | 0.00 | 0.0634 | 0.0623 | 0.0546 | 0.0601 | 0.0048 |
| 470 | 529.9 | 515.8 | 520.8 | 5.93 | 6.00 | 5.98 | 5.97 | 0.00 | 0.0475 | 0.0512 | 0.0501 | 0.0496 | 0.0019 |
| 480 | 529.8 | 515.6 | 520.6 | 5.81 | 5.88 | 5.86 | 5.85 | 0.00 | 0.0430 | 0.0423 | 0.0410 | 0.0421 | 0.0010 |
| 490 | 529.6 | 515.4 | 520.5 | 5.73 | 5.78 | 5.76 | 5.76 | 0.00 | 0.0272 | 0.0356 | 0.0364 | 0.0331 | 0.0051 |
| 500 | 529.5 | 515.3 | 520.4 | 5.62 | 5.69 | 5.69 | 5.67 | 0.00 | 0.0385 | 0.0312 | 0.0250 | 0.0316 | 0.0067 |
| 510 | 529.3 | 515.1 | 520.2 | 5.52 | 5.60 | 5.60 | 5.57 | 0.00 | 0.0340 | 0.0312 | 0.0319 | 0.0323 | 0.0015 |

| เวลา (นาที) | น้ำหนัก (กรัม) | | | ปริมาณความชื้นฐานแห้ง | | | | | อัตราการทำแห้ง | | | | |
|----------------|----------------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|--------|------|----------------|--------|--------|--------|--------|
| | ถาด 1 | ถาด 2 | ถาด 3 | ถาด 1 | ถาด 2 | ถาด 3 | เฉลี่ย | SD | ถาด 1 | ถาด 2 | ถาด 3 | เฉลี่ย | SD |
| 520 | 529.3 | 515.0 | 520.1 | 5.49 | 5.52 | 5.49 | 5.50 | 0.00 | 0.0113 | 0.0267 | 0.0364 | 0.0248 | 0.0126 |
| 530 | 529.1 | 514.9 | 520.0 | 5.39 | 5.45 | 5.44 | 5.43 | 0.00 | 0.0340 | 0.0245 | 0.0182 | 0.0255 | 0.0079 |
| 540 | 529.1 | 514.8 | 519.9 | 5.36 | 5.40 | 5.38 | 5.38 | 0.00 | 0.0113 | 0.0200 | 0.0205 | 0.0173 | 0.0052 |
| 550 | 529.0 | 514.7 | 519.8 | 5.33 | 5.34 | 5.34 | 5.34 | 0.00 | 0.0113 | 0.0178 | 0.0159 | 0.0150 | 0.0033 |
| 560 | 529.0 | 514.7 | 519.8 | 5.29 | 5.30 | 5.30 | 5.30 | 0.00 | 0.0136 | 0.0156 | 0.0114 | 0.0135 | 0.0021 |
| 570 | 528.9 | 514.6 | 519.7 | 5.26 | 5.27 | 5.27 | 5.27 | 0.00 | 0.0113 | 0.0111 | 0.0114 | 0.0113 | 0.0001 |
| 580 | 528.9 | 514.6 | 519.7 | 5.23 | 5.24 | 5.23 | 5.23 | 0.00 | 0.0091 | 0.0111 | 0.0137 | 0.0113 | 0.0023 |

ค.3 ข้อมูลการวิเคราะห์ปริมาณความชื้น (Moisture Content)

ตารางที่ ค.7 ข้อมูลวิเคราะห์ปริมาณความชื้น

| สภาวะ การทำแห้ง | จำนวน ซ้ำ | ตัวอย่าง ก่อนอบ (g) | ตัวอย่าง หลังอบ (g) | ปริมาณความชื้น ฐานเปียก (%) | ปริมาณความชื้น ฐานแห้ง (%) |
|-------------------------------|----------------------|------------------------|------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| เปลือก มังคุดหลัง ละลาย | 1 | 3.0078 | 1.0891 | 63.79 | 176.17 |
| | 2 | 3.0088 | 1.0901 | 63.77 | 176.01 |
| | 3 | 3.0242 | 1.1143 | 63.15 | 171.40 |
| | ค่าเฉลี่ย | | | 63.57 | 174.53 |
| | ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | | | 0.36 | 2.71 |
| C50 | 1 | 3.066 | 2.8947 | 5.59 | 5.92 |
| | 2 | 3.0627 | 2.9019 | 5.25 | 5.54 |
| | 3 | 3.0644 | 2.8996 | 5.38 | 5.68 |
| | ค่าเฉลี่ย | | | 5.41 | 5.71 |
| | ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | | | 0.17 | 0.19 |
| C60 | 1 | 3.0377 | 2.8758 | 5.33 | 5.63 |
| | 2 | 3.0294 | 2.8619 | 5.53 | 5.85 |
| | 3 | 3.0552 | 2.8934 | 5.30 | 5.59 |
| | ค่าเฉลี่ย | | | 5.38 | 5.69 |
| | ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | | | 0.13 | 0.14 |
| S50 | 1 | 3.021 | 2.8657 | 5.14 | 5.42 |
| | 2 | 3.0237 | 2.8611 | 5.38 | 5.68 |
| | 3 | 3.0295 | 2.866 | 5.40 | 5.70 |
| | ค่าเฉลี่ย | | | 5.31 | 5.60 |
| | ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | | | 0.14 | 0.16 |
| S60 | 1 | 3.0339 | 2.875 | 5.24 | 5.53 |
| | 2 | 3.0352 | 2.8776 | 5.19 | 5.48 |
| | 3 | 3.034 | 2.8709 | 5.38 | 5.68 |
| | ค่าเฉลี่ย | | | 5.27 | 5.56 |
| | ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | | | 0.10 | 0.11 |

ค.4 ข้อมูลการวิเคราะห์ห่อเตอร์แอกทีวิตี้ (Water activity, aw)

ตารางที่ ค.8 ข้อมูลวิเคราะห์ห่อเตอร์แอกทีวิตี้

| สภาวะการทำแห้ง | จำนวนซ้ำ | ห่อเตอร์แอกทีวิตี้ |
|----------------|----------------------|--------------------|
| C50 | 1 | 0.2849 |
| | 2 | 0.2784 |
| | 3 | 0.2822 |
| | ค่าเฉลี่ย | 0.2818 |
| | ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 0.0033 |
| C60 | 1 | 0.2011 |
| | 2 | 0.2063 |
| | 3 | 0.2047 |
| | ค่าเฉลี่ย | 0.2040 |
| | ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 0.0027 |
| S50 | 1 | 0.2389 |
| | 2 | 0.2374 |
| | 3 | 0.2351 |
| | ค่าเฉลี่ย | 0.2371 |
| | ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 0.0019 |
| S60 | 1 | 0.2011 |
| | 2 | 0.1982 |
| | 3 | 0.2036 |
| | ค่าเฉลี่ย | 0.2010 |
| | ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 0.0027 |

ค.5 ข้อมูลการวิเคราะห์สีของเปลือกมังคุดผง (Color)

ตารางที่ ค.9 ข้อมูลการวิเคราะห์สีของเปลือกมังคุดผง

| สถานะการ ทำแห้ง | จำนวนซ้ำ | Color | | | | |
|-------------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-----------|--------|
| | | L* | a* | b* | Hue angle | Chroma |
| เปลือก มังคุดแห้ง ละลาย | 1 | 22.14 | 15.17 | 11.26 | 0.74 | 18.89 |
| | 2 | 21.88 | 16.92 | 12.19 | 0.72 | 20.85 |
| | 3 | 22.14 | 16.21 | 10.54 | 0.65 | 19.34 |
| | ค่าเฉลี่ย | 22.05 | 16.10 | 11.33 | 0.70 | 19.69 |
| | ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 0.15 | 0.88 | 0.83 | 0.05 | 1.03 |
| C50 | 1 | 46.70 | 15.91 | 26.06 | 1.64 | 30.53 |
| | 2 | 46.65 | 15.79 | 26.10 | 1.65 | 30.50 |
| | 3 | 46.67 | 15.74 | 26.33 | 1.67 | 30.68 |
| | ค่าเฉลี่ย | 46.67 | 15.81 | 26.16 | 1.65 | 30.57 |
| | ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 0.03 | 0.09 | 0.15 | 0.02 | 0.09 |
| C60 | 1 | 46.42 | 15.57 | 28.04 | 1.80 | 32.07 |
| | 2 | 46.49 | 15.65 | 27.42 | 1.75 | 31.57 |
| | 3 | 46.32 | 15.59 | 27.70 | 1.78 | 31.79 |
| | ค่าเฉลี่ย | 46.41 | 15.60 | 27.72 | 1.78 | 31.81 |
| | ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 0.09 | 0.04 | 0.31 | 0.02 | 0.25 |
| S50 | 1 | 46.16 | 15.85 | 27.60 | 1.74 | 31.83 |
| | 2 | 46.21 | 15.65 | 27.29 | 1.74 | 31.46 |
| | 3 | 46.30 | 15.80 | 27.72 | 1.75 | 31.91 |
| | ค่าเฉลี่ย | 46.22 | 15.77 | 27.54 | 1.75 | 31.73 |
| | ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 0.07 | 0.10 | 0.22 | 0.01 | 0.24 |
| S60 | 1 | 46.26 | 15.80 | 27.98 | 1.77 | 32.13 |
| | 2 | 46.33 | 15.67 | 27.85 | 1.78 | 31.96 |
| | 3 | 46.38 | 15.65 | 27.64 | 1.77 | 31.76 |
| | ค่าเฉลี่ย | 46.32 | 15.71 | 27.82 | 1.77 | 31.95 |
| | ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 0.06 | 0.08 | 0.17 | 0.01 | 0.18 |

ค.6 ข้อมูลการวิเคราะห์การใช้พลังงาน (Energy consumption)

ตารางที่ ค.10 ข้อมูลการวัดค่าการใช้พลังงาน

| สถานะการ ทำแห้ง | จำนวนซ้ำ | ปริมาณการใช้ พลังงาน (kW.h) | ปริมาณน้ำที่ กำจัดได้ (kg) | ปริมาณการใช้พลังงาน จำเพาะ (kW.h/kg) |
|--------------------|----------------------|--------------------------------|-------------------------------|---|
| C50 | 1 | 70.32 | 19.20 | 3.66 |
| | 2 | 70.56 | 19.53 | 3.61 |
| | 3 | 71.9 | 19.49 | 3.69 |
| | ค่าเฉลี่ย | 70.93 | 19.41 | 3.65 |
| | ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 0.85 | 0.18 | 0.04 |
| C60 | 1 | 61.62 | 19.40 | 3.18 |
| | 2 | 60.05 | 19.35 | 3.10 |
| | 3 | 60.78 | 19.45 | 3.13 |
| | ค่าเฉลี่ย | 60.82 | 19.40 | 3.13 |
| | ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 0.79 | 0.05 | 0.04 |
| S50 | 1 | 41.75 | 19.63 | 2.13 |
| | 2 | 42.71 | 19.11 | 2.23 |
| | 3 | 43.98 | 19.67 | 2.24 |
| | ค่าเฉลี่ย | 42.81 | 19.47 | 2.20 |
| | ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 1.12 | 0.31 | 0.06 |
| S60 | 1 | 39.28 | 19.53 | 2.01 |
| | 2 | 40.28 | 19.43 | 2.07 |
| | 3 | 38.21 | 19.46 | 1.96 |
| | ค่าเฉลี่ย | 39.26 | 19.47 | 2.02 |
| | ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 1.04 | 0.05 | 0.05 |

ประวัติผู้เขียน

| | |
|---------------------------------|--|
| ชื่อ-นามสกุล | นายธัชพงษ์ พงศ์สุทธิยากร |
| วัน เดือน ปีเกิด | 7 กุมภาพันธ์ 2530 ที่สมุทรสาคร |
| ที่อยู่ | 1029/26 ถ.วิเชียรโชฎก ตำบลมหาชัย อำเภอเมืองสมุทรสาคร จังหวัดสมุทรสาคร 74000 โทร.064-594-2651 |
| ประวัติการศึกษา | 2553 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2557 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| ความชำนาญเฉพาะด้าน | 1.) ระบบควบคุมกระบวนการ 2.) กระบวนการทำแห้งแบบลมร้อน 3.) การออกแบบกระบวนการทำแห้ง |
| ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย | |
| พ.ศ.2557-2559 | ตำแหน่งนักวิจัยบริษัท แอดเตรส แอนด์ ฮันซ์ จำกัด - ผลงานพัฒนาระบบควบคุมสภาวะอากาศในการเก็บรักษาอาหารแห้ง - ผลงานระบบควบคุมการทำแห้ง |
| พ.ศ.2559 | ตำแหน่งนักวิจัยศูนย์ความเป็นเลิศทางนวัตกรรมอาหาร สจล. - ผู้ร่วมวิจัยในโครงการ “การพัฒนาต้นแบบกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์สารสกัด กระชาย(ตรีกาลพิข)ผงอัดเม็ดสำเร็จรูป” - ผู้ร่วมวิจัยในโครงการ “การพัฒนาต้นแบบกระบวนการผลิตส้มตำผลไม้ที่ผ่าน กระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเชิงพาณิชย์” - ผู้ร่วมวิจัยในโครงการ “สัมมนาเชิงปฏิบัติการ เรื่อง นวัตกรรมอาหาร 4.0 สร้าง แบรนด์ไทยสู่ตลาดโลก กับ Kryo “D” Freezer” 2559 - ผลงานวิจัย “ผลของการทำแห้งแบบลมร้อน ฮีทปั๊มและห้องควบคุมสภาวะ อากาศที่มีต่อคุณภาพของฝอยทองกรอบ” การประชุมวิชาการสมาคม วิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ระดับชาติ ครั้งที่ 17 |
| พ.ศ.2560 | - ผู้ร่วมวิจัยในโครงการ “การพัฒนาผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตพริกแกงแดง ที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งสู่เชิงพาณิชย์” |

- ผู้ร่วมวิจัยในโครงการ “การพัฒนาผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตแกงเขียวหวานไก่ที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งสุ่เชิงพาณิชย์”
- ผู้ร่วมวิจัยในโครงการ “การพัฒนาผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตน้ำแกงส้มที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งสุ่เชิงพาณิชย์”
- ผู้ร่วมวิจัยในโครงการ “การพัฒนาผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตเครื่องดื่มผสมลูกสำรองที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งสุ่เชิงพาณิชย์”
- ผู้ร่วมวิจัยในโครงการ “การพัฒนาผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตมะม่วงผงที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งสุ่เชิงพาณิชย์”
- ผู้ร่วมวิจัยในโครงการ “การพัฒนาผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตเครื่องดื่มผักชนิดผงกึ่งสำเร็จรูปสุ่เชิงพาณิชย์”
- ผู้ร่วมวิจัยในโครงการ “การพัฒนาผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตต้มยำกุ้งที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งสุ่เชิงพาณิชย์”
- ผู้ร่วมวิจัยในโครงการ “การพัฒนาผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตซูปເຕີໂຄນູ່ປຸ່ນທຳແຫ່ງແບບຮ່ຳຍືອກຂຶ້ງສູ່ເຊິງພາຄີຊ໌”
- ผู้ร่วมวิจัยในโครงการ “การพัฒนาผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตน้ำกะทิทุเรียนที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งสุ่เชิงพาณิชย์”
- ผู้ร่วมวิจัยในโครงการ “การพัฒนาผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตต้มข้าวไก่ที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งสุ่เชิงพาณิชย์”
- ผู้ร่วมวิจัยในโครงการ “ระบบควบคุมการทำแห้งอัจฉริยะในผลิตภัณฑ์อาหารแห้งคุณภาพชั้นพรีเมียมสำหรับ SME”
- ผู้ร่วมวิจัยในโครงการ “การพัฒนาระบบการแปรรูปดอกกุหลาบเชิงพาณิชย์ด้วยเครื่องทำแห้งแบบระเหิด”
- ผู้ร่วมวิจัยในโครงการ “นวัตกรรมผลไม้แช่ร้อนของประเทศไทยเพื่อสร้างมูลค่าอย่างยั่งยืน : ปัญจสุวรรณผล”
- ผู้ร่วมวิจัยในโครงการ “การพัฒนาต้นแบบกระบวนการและบรรจุภัณฑ์เพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับผลิตภัณฑ์แปรรูปจากผลไม้แช่ร้อน”
- ผลงานวิจัย “Effect of drying methods on properties of green curry powder” MATEC Web of Conferences, Vol. 192, 2018, pp. 03023

พ.ศ.2561

- พ.ศ.2562
- ผู้ร่วมวิจัยในโครงการ “ชุดโครงการ นวัตกรรมแปรรูปผลไม้เขตร้อนมูลค่าเพิ่มสูงสำหรับเขตระเบียงเศรษฐกิจภาคตะวันออก โครงการย่อยที่ 2 นวัตกรรมชุดเครื่องจักรต้นแบบเพื่อแปรรูปผลไม้เขตร้อน ปีพ.ศ.2562
 - ผู้ร่วมวิจัยในโครงการ “การพัฒนากระบวนการผลิตดอกกุหลาบอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งในระดับอุตสาหกรรมสู่เชิงพาณิชย์”
 - ผู้ร่วมวิจัยในโครงการ “การพัฒนาผลิตภัณฑ์สินค้านวัตกรรมอาหารของจังหวัดปทุมธานี 10 ผลิตภัณฑ์ ภายใต้โครงการเสริมสร้างศักยภาพเมืองนวัตกรรมอาหารปทุมธานี (Food Innopolis) กิจกรรมพัฒนาสินค้านวัตกรรมอาหาร”
 - ผลงานวิจัย “Simple Effective and Robust Weight Sensor for Measuring Moisture Content in Food Drying Process” Sensors and Materials, Vol. 31, No. 7, 2019, pp. 2393 – 2404
- พ.ศ.2563
- ผู้ร่วมวิจัยในโครงการ “ชุดโรงงานพร้อมเครื่องจักรแปรรูปผลไม้ตัวต่อเพื่อธนาคารผลไม้เคลื่อนที่”
 - ผู้ร่วมวิจัยในโครงการ “หน่วยทดสอบมาตรฐานเครื่องจักรแปรรูปอาหาร”
- พ.ศ.2564
- ผู้ร่วมวิจัยในโครงการ “การทดสอบการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทำแห้งพลาสติกด้วยเครื่องทำแห้งอัจฉริยะ”
 - ผู้ร่วมวิจัยในโครงการ “การพัฒนากระบวนการผลิตกระเทียมดำบรรจุแคปซูลด้วยกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งสู่เชิงพาณิชย์”
 - ผู้ร่วมวิจัยในโครงการ “การเพิ่มมูลค่าเศษเหลือจากอุตสาหกรรมแปรรูปมะม่วงเป็นสารสกัดเชิงหน้าที่ด้วยชุดสกัดสเกลอุตสาหกรรม
 - ผลงานวิจัย “Surface Temperature Limit as Food Quality Control in Automatic Learning Model for Drying Process” 2021 7th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST), 2021, pp. 150 – 153
 - ผลงานวิจัย “Optimization of Temperature Sensors for Drying Mangosteen Peel” Sensors and Materials, Vol. 33, No. 12, 2021 4319–4329, pp. 4319 – 4329
- ปัจจุบัน
- ผู้ร่วมวิจัยในโครงการ “การจัดการระบบโซ่ความเย็นและการกระจายอุณหภูมิในระบบโลจิสติกส์เพื่อสร้างมาตรฐานรับรองการขนส่งผลิตผลเกษตรพรีเมียมทางอากาศ”

- ผู้ร่วมวิจัยในโครงการ “การพัฒนาพันธุ์ การพัฒนาศักยภาพการผลิต และการใช้ประโยชน์จากเบญจมาศ โครงการวิจัยย่อยที่ 3 การใช้ประโยชน์ และสร้างมูลค่าเพิ่มแก่เบญจมาศ”
- ผู้ร่วมบรรยายในหัวข้อ “ระบบการจัดการโรงงาน FACTory Classroom” ในงานอบรมเชิงปฏิบัติการ “การบริหารจัดการโรงงานต้นแบบแปรรูปผลิตผลทางการเกษตร”