



การศึกษากระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับไมโครเวฟและลมหมุนอัดตัวสำหรับการ
เตรียมข้าวกล้องกึ่งสำเร็จรูป

วิทยานิพนธ์
ของ
ปริญญ์ ชุปวา

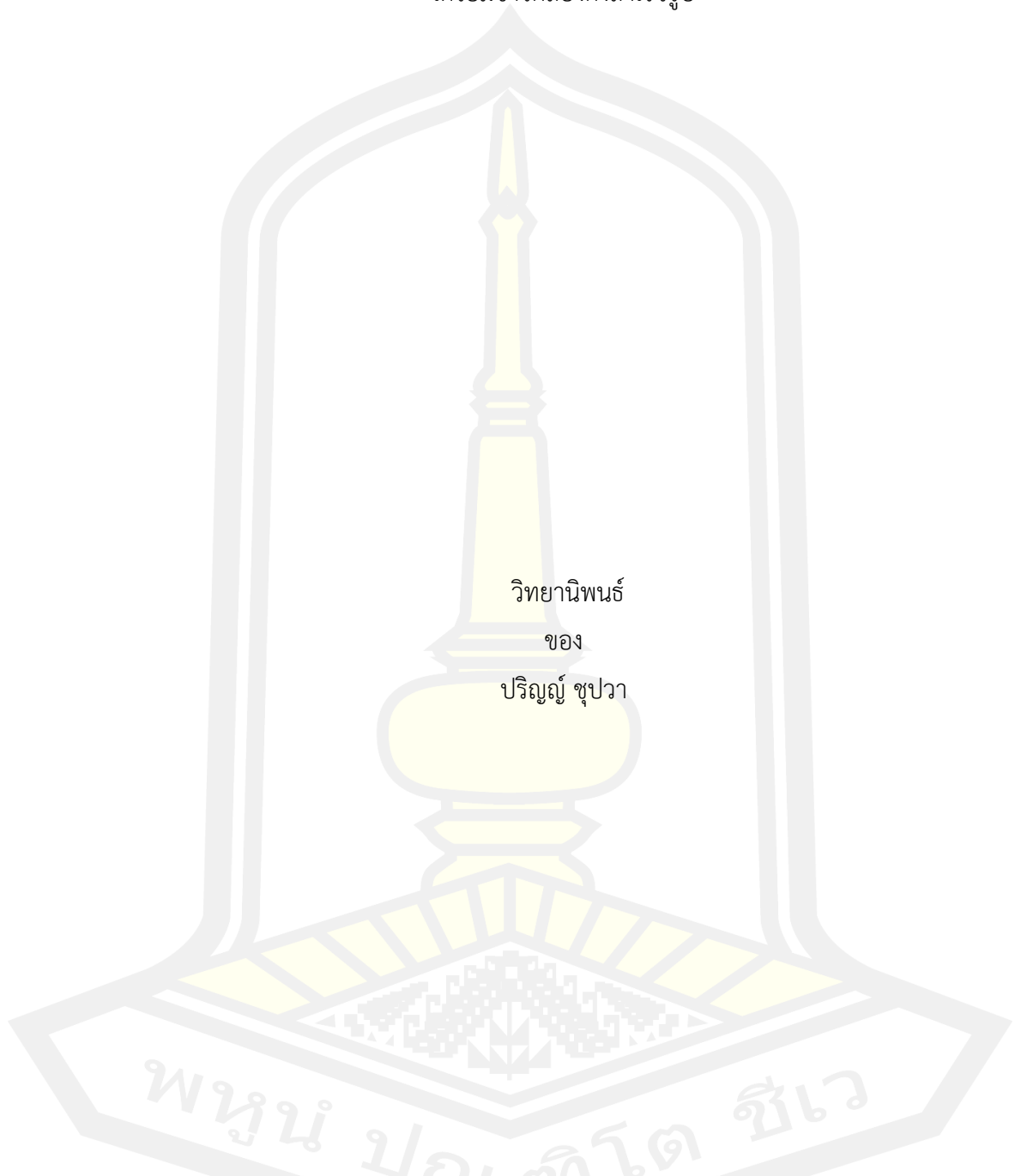
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

พฤษภาคม 2564

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การศึกษากระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบตร่วมกับไมโครเวฟและลมหมุนอัดตัวสำหรับการ
เตรียมข้าวกล้องกึ่งสำเร็จรูป



เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

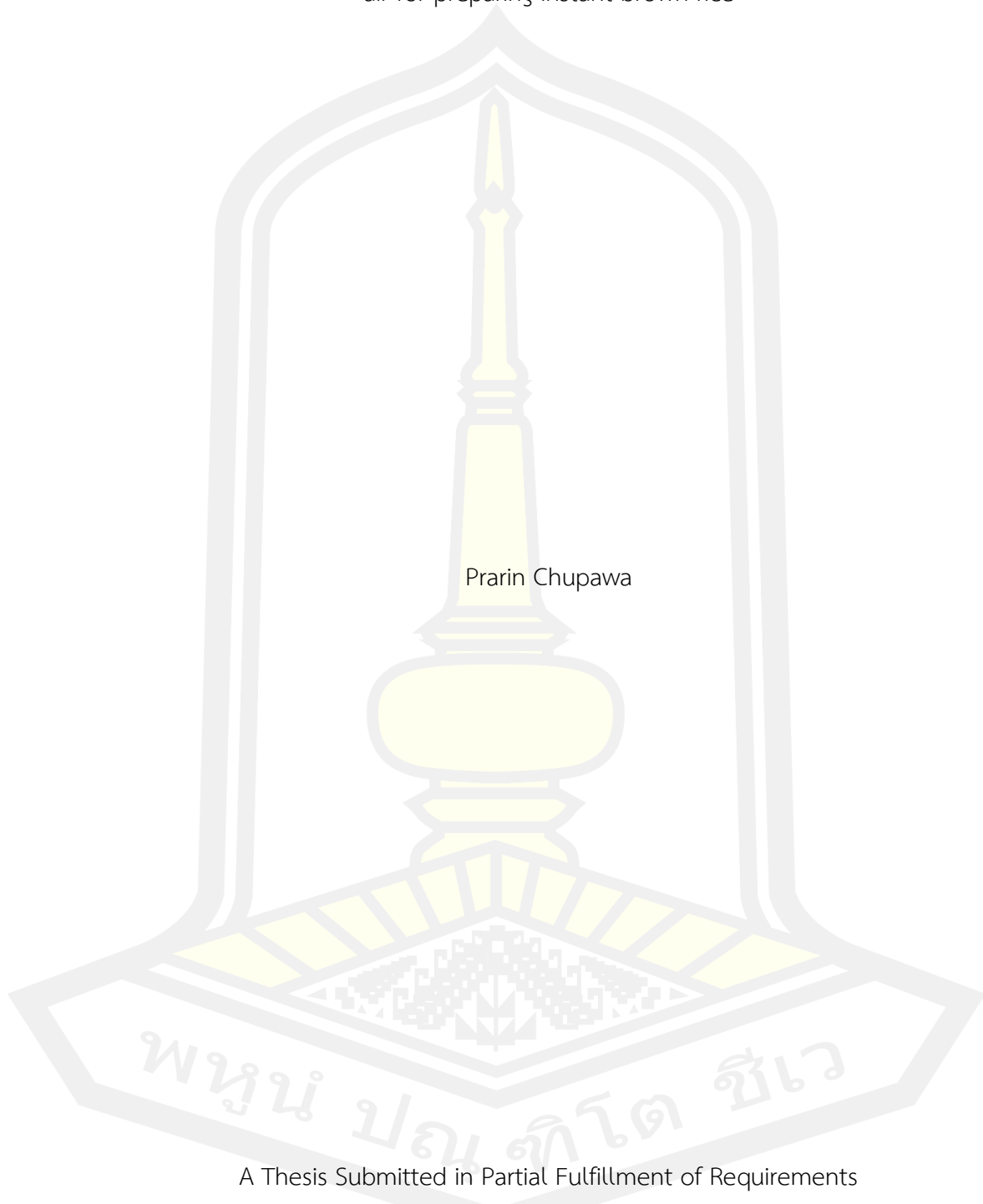
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

พฤษภาคม 2564

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Investigation of fluidized-bed drying assisted with microwave and compressed-swirling
air for preparing instant brown rice

Prarin Chupawa



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for Doctor of Philosophy (Mechanical Engineering)

November 2021

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายปริญญา ชูปวา แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. ดลฤดี ใจสุทธิ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รศ. ดร. วสันต์ ดำรงคำจันทร์)

.....กรรมการ

(รศ. ดร. เกียรติสิน กาญจนวนิชกุล)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. ณัฐพล ภูมิสะอาด)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. ละมุล วิเศษ)

มหาวิทยาลัยขอนแก่นให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร ปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

.....
(รศ. ดร. เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

.....
(รศ. ดร. กิรสิน ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	การศึกษากระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับไมโครเวฟและลมหมุน อัดตัวสำหรับการเตรียมข้าวกล้องกึ่งสำเร็จรูป		
ผู้วิจัย	ปริญญา ชูปวา		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. วสันต์ ต้วงค์จันทร์		
ปริญญา	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2564

บทคัดย่อ

ข้าวกล้องประกอบด้วยสารอาหารและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพมากมาย อย่างไรก็ตาม การบริโภคข้าวกล้องยังประสบปัญหาเรื่องเวลาในการหุงสุกค่อนข้างนาน อีกทั้งข้าวกล้องหุงสุกที่ได้ยังมีเนื้อสัมผัสเหนียวเนื่องจากรำที่ยังไม่ผ่านการสี ดังนั้นข้าวกล้องกึ่งสำเร็จรูปจึงเป็นผลิตภัณฑ์ทางเลือกใหม่สำหรับผู้บริโภคที่ต้องการความเร่งด่วนและความสะดวกสบาย ขั้นตอนการผลิตข้าวกล้องกึ่งสำเร็จรูปประกอบด้วย การเตรียมตัวอย่าง การหุงสุก และการอบแห้ง การอบแห้งเป็นขั้นตอนสำคัญที่สุดที่ส่งผลต่อเวลาในการคั้นรูปและคุณภาพทางประสาทสัมผัส ที่ผ่านมามีนักวิจัยมากมายพยายามแก้ปัญหาดังกล่าวโดยการใช้เทคนิคการอบแห้งมากมาย โดยพบว่าวิธีการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับไมโครเวฟช่วยปรับปรุงคุณภาพของข้าวด้านการคั้นรูป แต่ยังคงพบปัญหาการเกาะติดกันของข้าวสุกในระหว่างการอบแห้ง ซึ่งทำให้ยากต่อการเกิดฟลูอิดไดซ์เซชัน ดังนั้นจุดมุ่งหมายของงานวิจัยนี้ คือ การออกแบบกระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับไมโครเวฟและลมหมุนอัดตัว และหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมข้าวกล้องกึ่งสำเร็จรูป

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับไมโครเวฟโดยมีลมหมุนอัดตัวเพื่อแก้ปัญหาการเกาะติดกันและการเตรียมตัวอย่างก่อนอบแห้งที่ยุ่งยากซับซ้อน ข้าวกล้องที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ข้าวหอมมะลิแดง การอัดอากาศจากภายนอกเข้าไปยังฐานห้องอบแห้งในลักษณะทิศทางสัมผัสกับเส้นรอบรูปของท่ออบแห้ง ส่งผลให้เกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางและการกระทบกันระหว่างเมล็ดข้าว และระหว่างเมล็ดข้าวกับผนังห้องอบแห้ง ทำให้เมล็ดข้าวหุงสุกแยกออกจากกันในระหว่างการอบแห้ง การศึกษาแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ 1) การศึกษาการเตรียมข้าวหอมมะลิแดงกึ่งสำเร็จรูปด้วยกระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับลมหมุนอัดตัว 2) การศึกษาการเตรียมข้าวหอมมะลิแดงกึ่งสำเร็จรูปด้วยกระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับลมหมุนอัดตัวและการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ และ 3) การศึกษาความสูงเบดลอยตัวและการควบคุมความคงตัวของ

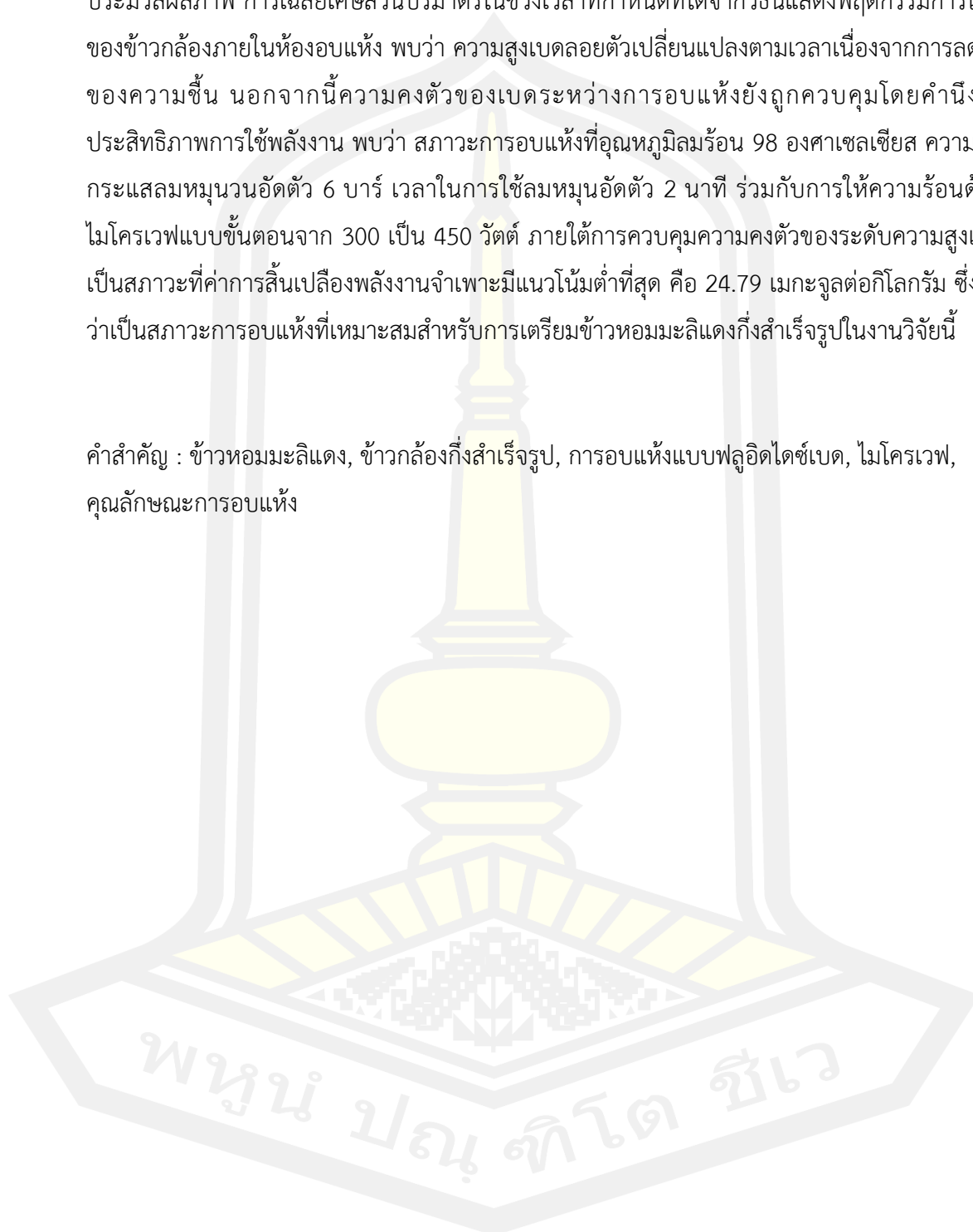
เบตด้วยวิธีการประมวลผลภาพ

สำหรับการศึกษาการเตรียมข้าวหอมมะลิแดงด้วยกระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบตร่วมกับลมหมุนอัดตัว ปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วยอุณหภูมิร้อน (90-120 องศาเซลเซียส) และความดันลมหมุนอัดตัว (4-6 บาร์) ที่มีผลต่อพารามิเตอร์ของสมการการอบแห้งของ Page (k และ n) และค่าสัมประสิทธิ์แพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_{eff}) พบว่า สภาวะการอบแห้งที่มีความดันลมหมุนอัดตัว 6 บาร์ ส่งผลต่อพารามิเตอร์ของสมการการอบแห้งของ Page และค่าสัมประสิทธิ์แพร่ความชื้นประสิทธิผลที่มีแนวโน้มสูงที่สุด ($k = 0.15072$ $n = 0.89014$ และ $D_{eff} = 5.94 \times 10^{-8}$ ตารางเมตรต่อวินาที) ดังนั้น จึงใช้ความดันลมหมุนอัดตัว 6 บาร์ สำหรับการศึกษาค่าของอุณหภูมิร้อน (90-120 องศาเซลเซียส) และเวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัว (2-10 นาที) ต่อคุณสมบัติทางกายภาพ อัตราส่วนการคืนรูป และคุณสมบัติสารต้านอนุมูลอิสระของข้าวหอมมะลิแดงกิ่งสำเร็จรูป อีกทั้งหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยดังกล่าวด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง พบว่า สภาวะการอบแห้งที่อุณหภูมิร้อน 98.5 องศาเซลเซียส ความดันกระแสลมหมุนอัดตัว 6 บาร์ และเวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัว 2 นาที ส่งผลต่อค่า Desirability สูงสุด คือ 0.603 ดังนั้นจึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาการเตรียมข้าวหอมมะลิแดงด้วยกระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบตร่วมกับลมหมุนอัดตัว อย่างไรก็ตามการตั้งค่าอุณหภูมิร้อน 98.5 องศาเซลเซียส อาจยากต่อศึกษาในทางปฏิบัติ ดังนั้นจึงเลือกใช้อุณหภูมิร้อน 98 องศาเซลเซียส สำหรับการศึกษาดังกล่าว

ศึกษาค่าของอุณหภูมิร้อนกิ่งสำเร็จรูปด้วยกระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบตร่วมกับลมหมุนอัดตัวและการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ (0-450 วัตต์) ที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แพร่ความชื้นประสิทธิผล พบว่า สภาวะการอบแห้งด้วยอุณหภูมิร้อน 98 องศาเซลเซียส และการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ 450 วัตต์ ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แพร่ความชื้นประสิทธิผลสูงสุด คือ 8.33×10^{-8} ตารางเมตรต่อวินาที นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้กำลังวัตต์ไมโครเวฟคงที่ การอบแห้งแบบขั้นตอนแบบเพิ่มขึ้นจาก 300 เป็น 450 วัตต์ ให้ค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำที่สุด คือ 25.49 เมกะจูลต่อกิโลกรัม เมื่อพิจารณาคุณภาพต่างๆ ได้แก่ ค่าสี ร้อยละการหดตัว คุณสมบัติการคืนรูป และคุณสมบัติเนื้อสัมผัส พบว่า สภาวะการอบแห้งที่อุณหภูมิร้อน 98 องศาเซลเซียส ร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟแบบขั้นตอนจาก 300 เป็น 450 วัตต์ มีผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงสีน้อยที่สุด ร้อยละการหดตัวที่มีแนวโน้มต่ำที่สุด คือ ร้อยละ 51 คุณสมบัติการคืนรูปที่มีแนวโน้มสูงที่สุด คือ 0.5105 และคุณสมบัติเนื้อสัมผัสที่มีแนวโน้มใกล้เคียงกับข้าวหุงสุกที่สุด ดังนั้นจึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมข้าวกล้องกิ่งสำเร็จรูปด้วยกระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบตร่วมกับลมหมุนอัดตัวและการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ

สุดท้ายความสูงเบตลอยตัวถูกวิเคราะห์และความคงตัวของเบตถูกควบคุมโดยวิธีการประมวลผลภาพ การเฉลี่ยเศษส่วนปริมาตรในช่วงเวลาที่กำหนดที่ได้จากวิธีนี้แสดงพฤติกรรมการไหลของข้าวกล้องภายในห้องอบแห้ง พบว่า ความสูงเบตลอยตัวเปลี่ยนแปลงตามเวลาเนื่องจากการลดลงของความชื้น นอกจากนี้ความคงตัวของเบตระหว่างการอบแห้งยังถูกควบคุมโดยค่านิ่งถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงาน พบว่า สภาวะการอบแห้งที่อุณหภูมิร้อน 98 องศาเซลเซียส ความดันกระแสลมหมุนวนอัดตัว 6 บาร์ เวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัว 2 นาที ร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟแบบขั้นตอนจาก 300 เป็น 450 วัตต์ ภายใต้การควบคุมความคงตัวของระดับความสูงเบตเป็นสภาวะที่ค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีแนวโน้มต่ำที่สุด คือ 24.79 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งถือว่าเป็นสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมข้าวหอมมะลิแดงกิ่งสำเร็จรูปในงานวิจัยนี้

คำสำคัญ : ข้าวหอมมะลิแดง, ข้าวกล้องกิ่งสำเร็จรูป, การอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด, ไมโครเวฟ, คุณลักษณะการอบแห้ง



TITLE	Investigation of fluidized-bed drying assisted with microwave and compressed-swirling air for preparing instant brown rice		
AUTHOR	Prarin Chupawa		
ADVISORS	Associate Professor Wasan Duangkhamchan , Ph.D.		
DEGREE	Doctor of Philosophy	MAJOR	Mechanical Engineering
UNIVERSITY	Maharakham University	YEAR	2021

ABSTRACT

Brown rice contains many nutrients and bioactive compounds. However, consumption of brown rice still faces problematic long time cooking. In addition, the cooked brown rice has a sticky texture due to rice bran in unpolished rice. Therefore, instant brown rice is a new alternative product for consumers who need urgency and convenience. The instant brown rice production steps consists of preparation, cooking and drying. Drying is the most important step that affects rehydration time and sensory quality. Up to date, many researchers have attempted to solve this problem using various drying techniques. It was found that the fluidized bed drying method in combination with microwave improved the rehydration quality. However, the problem of cooked rice agglomeration during drying which made it difficult for fluidization is still encountered. Therefore, the objectives of this research were to design a fluidized-bed drying process assisted with microwave and swirling compressed air and to optimize the condition for preparing the instant brown rice..

In this research, a fluidized-bed dryer assisted with microwave and compressed swirling air to solve agglomeration and complicated preparation. Red jasmine rice was used in this research. Introduction of compressed air from the outside entered the drying chamber base in the tangential direction resulted in centrifugal force and collision between the grains and between the grain and the drying chamber wall. This caused the cooked rice grains to separate during drying. The study was divided into 3 parts: 1) the study of the instant red jasmine rice

prepared by fluidized-bed drying assisted with swirling compressed air 2) the study of the instant red jasmine rice prepared by a fluidized-bed drying assisted with microwave and swirling compressed air and 3) the study of controlling an expanded-bed height and its stability by image processing method.

For the study of preparing instant red jasmine using a fluidized bed drying assisted with the swirling compressed air, factors tested were the hot air temperature (90-120°C) and pressure of swirling compressed air (4-6 bar) which influenced the parameters of the Page drying model (k and n value), and the effective diffusivity (D_{eff}). It was found that drying conditions with swirling compressed air pressure of 6 bar mostly affected the Page drying model parameters and effective diffusivity ($k = 0.15072$, $n = 0.89014$, $D_{\text{eff}} = 5.94 \times 10^{-8} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$). Therefore, swirling compressed air pressure of 6 bar was further used to study the influence of hot air temperature (90-120°C) and supply time of swirling compressed air (2-10 minute) on physical properties, rehydration ratio and antioxidant properties of instant red jasmine rice. In addition, the optimization of such factors were determined by the response surface method. The result showed that drying conditions at hot air temperature 98.5°C, swirling compressed air pressure of 6 bar, the supply time of swirling compressed air of 2 minute resulted in the highest desirability value of 0.603. Therefore, this conditions were suitable for the study of preparing instant red jasmine rice using a fluidized-bed drying process assisted with swirling compressed air. However, due to difficulty in practice, the suitable hot air temperature of 98.5°C was set to 98°C for further study.

Preparation of instant red jasmine rice using fluidized-bed drying assisted with swirling compressed air and microwave heating microwave heating (0-450 watts) and its effect on the effective diffusivity were studied. It was found that the drying conditions with hot air temperature of 98°C and the microwave power of 450 watts mostly affected the effective diffusivity coefficient of $8.33 \times 10^{-8} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$. In addition, compared to constant microwave power mode, stepwise drying using a step-up mode of 300 to 450 W gave the lowest specific energy consumption of 25.49 MJ/kg.

When considering the qualities such as color, shrinkage percentage, rehydration ratio and texture properties, it was found that drying conditions at hot air temperature of 98°C combined with stepwise microwave heating from 300 to 450 watts led to minimal color change, lowest shrinkage percentage of 51%, the highest rehydration ratio of 0.5105 and texture properties comparable to conventionally cooked rice. Thus, this condition was suitably used for preparing for the instant red jasmine rice using a fluidized-bed drying process assisted with swirling compressed air and microwave heating.

Finally, the expanded-bed height was analyzed, and bed stability was controlled by image processing method. The time-averaged volume fraction obtained from this method showed the flow behavior of brown rice within the drying chamber. It was found that the expanded-bed height changed with time due to the reduction of moisture content. In addition, the bed stability during drying was controlled with respect to energy efficiency. The result showed that drying conditions at hot air temperature of 98°C, swirling compressed air pressure of 6 bar, the supply time of swirling compressed air of 2 minute, stepwise microwave heating from 300 to 450 watts under the bed stability control gave the lowest of specific energy consumption of 24.79 MJ/kg, which was considered to be the suitable drying condition for preparing instant red jasmine rice in this research.

Keyword : Red jasmine rice, Instant brown rice, Fluidized bed drying, Microwave, Drying characteristics

พหุบัณฑิต ชีวะ

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความอนุเคราะห์จากทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้อง ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ซึ่งให้การสนับสนุนทุนสำหรับการทำวิจัย ตลอดจน รองศาสตราจารย์ ดร.วสันต์ ดั่งวงศ์จันทร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ชี้แนะแนวทางการความกรุณาให้ความรู้ คำแนะนำอย่างเอาใจใส่ในทุกขั้นตอนของการทำวิทยานิพนธ์ทั้งในการทดลอง การเขียนวิทยานิพนธ์ ตลอดจนการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชลฤดี ใจสุทธิ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.เกียรติสิน กาญจนวนิชกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพล ภูมิสะอาด และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ละมุล วิเศษ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งให้ความกรุณาตรวจสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนการสอนวิชาการความรู้ต่าง ๆ แนะนำการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ และประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ในด้านต่าง ๆ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ บิดา และมารดา ที่คอยให้กำลังใจ เอาใจใส่ดูแลและสนับสนุนทุกสิ่งทุกอย่างด้วยดี โดยเฉพาะการให้กำลังใจ และคำแนะนำในการดำเนินชีวิตแก่ข้าพเจ้าตลอดมา

หากเนื้อหาหรือข้อมูลต่าง ๆ ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นประโยชน์แก่ผู้สนใจศึกษาและผู้วิจัยท่านอื่น ๆ ข้าพเจ้าขอยกคุณความดีทั้งหลายนี้ให้แก่บุคคลทุกท่านที่กล่าวมา ท้ายสุดหากวิทยานิพนธ์เล่มนี้มีข้อบกพร่องหรือผิดพลาดประการใด ข้าพเจ้ากราบขออภัยไว้ ณ ที่นี้

ปริญญ์ ชูปวา

พหุบัน ปณฺ ทิโต ชิว

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ช
กิตติกรรมประกาศ.....	ญ
สารบัญ.....	ฎ
สารบัญตาราง.....	ด
สารบัญภาพประกอบ.....	ถ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 หลักการและเหตุผล	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 แผนการดำเนินการศึกษา.....	3
1.6 สถานที่ดำเนินการศึกษา	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับข้าวและข้าวหอมมะลิแดง	5
2.1.1 ข้าว.....	5
2.1.2 การจำแนกชนิดข้าว.....	5
2.1.3 องค์ประกอบของเมล็ดข้าว	6
2.1.4 สารสี (Pigment) ในข้าว	7
2.1.5 ข้าวหอมมะลิแดง.....	7
2.2 กระบวนการผลิตข้าวที่สำเร็จรูป.....	8

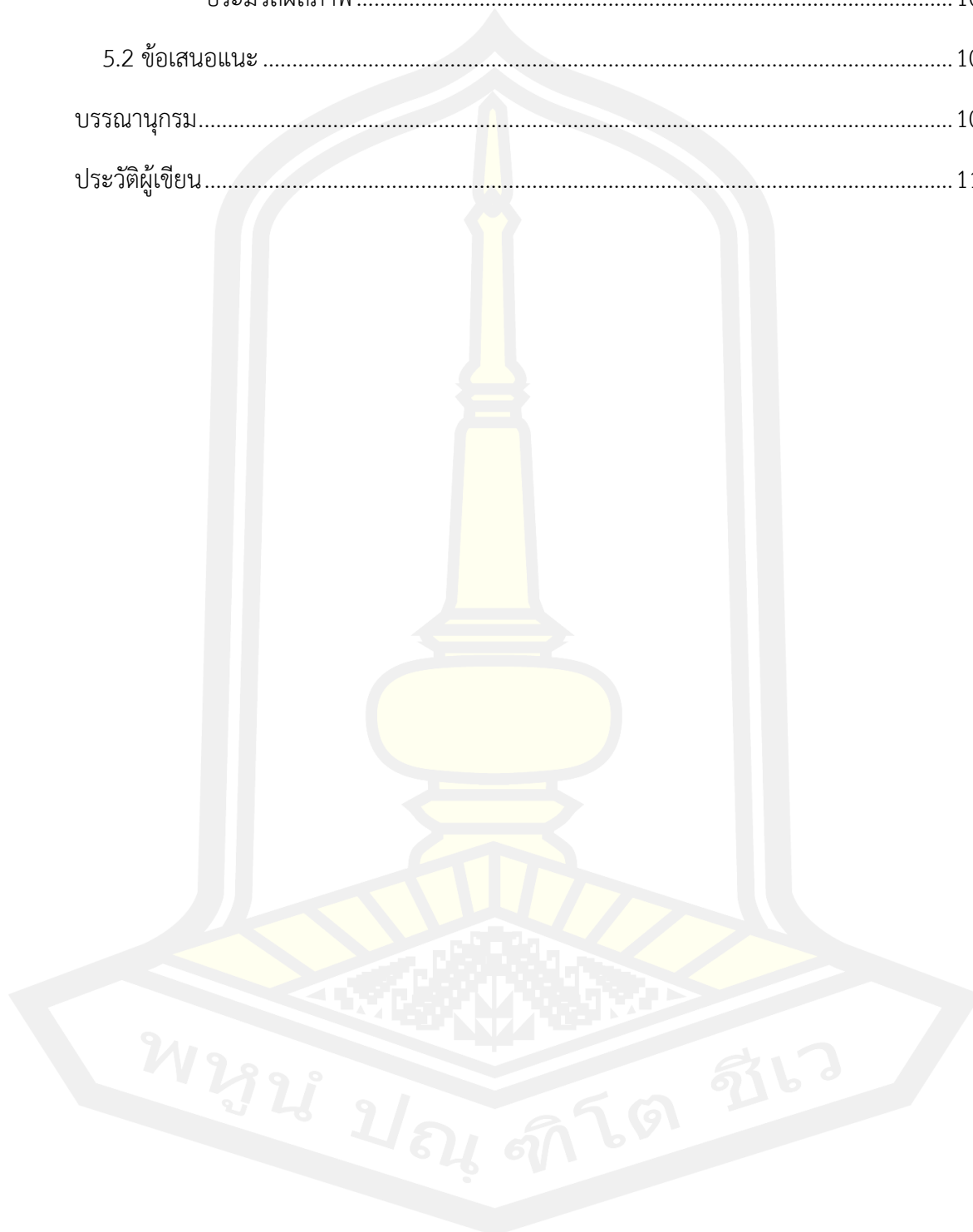
2.2.1 การแช่ การต้ม และการอบแห้ง.....	8
2.2.2 การทำให้ข้าวขยายตัว (Expanded and pregelatinize rice)	9
2.2.3 การรีดหรือตำ (Rodling or bumping treatment).....	10
2.2.4 การผ่านลมร้อนขณะแห้ง (Dryheat treatment).....	10
2.2.5 การแช่แข็งแล้วละลายน้ำแข็ง (Freeze-thaw process).....	10
2.2.6 การใช้ Puffing gun	11
2.2.7 การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying).....	11
2.2.8 การใช้สารเคมี (Chemical treatment).....	11
2.3 ทฤษฎีการอบแห้ง	12
2.3.1 ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant rate)	12
2.3.2 ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate).....	12
2.4 ทฤษฎีการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ	13
2.4.1 การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ (Microwave drying)	14
2.4.2 ข้อจำกัดของการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ.....	16
2.4.3 การใช้พลังงานไมโครเวฟร่วมในการอบแห้งด้วยลมร้อน.....	16
2.4.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับการใช้คลื่นไมโครเวฟ.....	16
2.4.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบการอบแห้งชนิดอื่นๆ	18
2.5 วิธีพื้นผิวตอบสนอง	20
2.5.1 การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central composite design)	21
2.5.2 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken design).....	21
2.5.3 การออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูป.....	22
2.6 เทคนิคการประมวลผลภาพดิจิทัล	23
2.6.1 ภาพดิจิทัล	23
2.6.2 การประมวลผลภาพดิจิทัล.....	26

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	30
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการศึกษา	34
3.1 วิธีการเตรียมตัวอย่าง.....	34
3.1.1 การเตรียมตัวอย่างควบคุม.....	34
3.1.2 การเตรียมข้าวหอมมะลิแดงหุงสุกสำหรับผลิตข้าวกล้องกึ่งสำเร็จรูป.....	35
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	35
3.2.1 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับลมหมุนอัดตัว	35
3.2.2 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับไมโครเวฟและกระแสลมหมุนอัด	36
3.2.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูล	38
3.2.4 ชุดวิเคราะห์ความสูงเบด.....	38
3.2.5 ชุดควบคุมความคงตัวของเบด	39
3.3 วิธีการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูล	41
3.3.1 การวิเคราะห์ความชื้น.....	41
3.3.2 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำอิสระ	42
3.3.3 ค่าสี L^* a^* b^* และ ΔE	42
3.3.4 ค่าร้อยละการแตกหักและการเกาะติดกัน	42
3.3.5 ค่าร้อยละการหดตัว.....	43
3.3.6 อัตราส่วนการคืนรูป.....	43
3.3.7 คุณสมบัติเนื้อสัมผัสหลังการคืนรูป.....	44
3.3.8 การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก.....	44
3.3.9 การวิเคราะห์ปริมาณฟลาโวนอยด์	44
3.3.10 การวิเคราะห์ปริมาณแอนโทไซยานิน.....	45
3.3.11 การวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ.....	45
3.3.12 อัตราการระเหยน้ำจำเพาะและค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ	45

3.3.13	จลนศาสตร์การอบแห้ง.....	46
3.3.14	การวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น	47
3.3.15	จลนศาสตร์การคั้นรูป.....	48
3.3.16	การหาสภาวะที่เหมาะสม	49
3.4	การเตรียมข้าวหอมมะลิแดงกิ่งสำเร็จรูปโดยใช้กระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับ ลมหมุนอัดตัว	50
3.4.1	การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิการอบแห้งและความดันของลมหมุนอัดตัว.....	50
3.4.2	การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการอบแห้งและเวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัว	51
3.4.3	การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมข้าวหอมมะลิแดงด้วยกระบวนการ อบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับลมหมุนอัดตัว.....	52
3.5	การเตรียมข้าวหอมมะลิแดงกิ่งสำเร็จรูปโดยใช้กระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับ ลมหมุนอัดตัวและการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ	52
3.5.1	การศึกษาอิทธิพลของการให้ความร้อนเสริมด้วยไมโครเวฟ.....	53
3.5.2	การศึกษาสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลที่มีผลต่อการอบแห้งของอุณหภูมิในการ อบแห้งและการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ.....	53
3.5.3	การศึกษาประสิทธิภาพการใช้พลังงานของอุณหภูมิในการอบแห้งและการให้ความร้อน ด้วยไมโครเวฟที่ต่างกัน.....	54
3.5.4	การศึกษาคุณภาพของข้าวหอมมะลิแดงกิ่งสำเร็จรูปที่สภาวะการอบแห้งที่ต่างกัน....	54
3.6	การศึกษาความสูงเบดลอยตัวและการควบคุมความคงตัวของเบดด้วยวิธีการประมวลผลภาพ	54
3.6.1	การศึกษาความสูงเบดลอยตัวของข้าวหอมมะลิแดงหุงสุกระหว่างกระบวนการอบแห้ง แบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับลมหมุนอัดตัว	54
3.6.2	การศึกษาอิทธิพลของการควบคุมความสูงเบดลอยตัวต่อค่าการใช้พลังงานระหว่าง กระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับลมหมุนอัดตัวและไมโครเวฟ	58
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	61

4.1 ผลการศึกษาการเตรียมข้าวหอมมะลิแดงด้วยกระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับ ลมหมุนอัดตัว	61
4.1.1 ผลของอุณหภูมิการอบแห้งและความดันของลมหมุนอัดตัว	61
4.1.2 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งและเวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัว	64
4.1.3 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมข้าวหอมมะลิแดงด้วยกระบวนการอบแห้งแบบฟลู อิดไดซ์เบดร่วมกับลมหมุนอัดตัว.....	76
4.2 ผลการศึกษาการเตรียมข้าวหอมมะลิแดงด้วยกระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับ ลมหมุนอัดตัวและการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ	77
4.2.1 ผลของการให้ความร้อนเสริมด้วยไมโครเวฟต่อจลนศาสตร์การอบแห้ง	78
4.2.2 ผลของสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลที่มีผลต่อการอบแห้งของอุณหภูมิในการอบแห้ง และการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ	83
4.2.3 ผลของประสิทธิภาพการใช้พลังงานของอุณหภูมิในการอบแห้งและการให้ความร้อน ด้วยไมโครเวฟที่ต่างกัน.....	88
4.2.4 ผลของคุณภาพของข้าวหอมมะลิแดงกึ่งสำเร็จรูปที่สภาวะการอบแห้งที่ต่างกัน	91
4.3 ผลการศึกษาความสูงเบดลอยตัวและการควบคุมความคงตัวของเบดด้วยวิธีการประมวลผล ภาพ.....	93
4.3.1 ผลการศึกษาความสูงเบดสำหรับกระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่ต่างกัน.....	93
4.3.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการอบแห้งภายใต้การควบคุม และปราศจากการควบคุมความคงตัวของระดับความสูงเบดในระหว่างการอบแห้งแบบ ฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับลมหมุนอัดตัวและการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่ต่างกัน	98
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	101
5.1 สรุปผล.....	101
5.1.1 สรุปผลการศึกษาการเตรียมข้าวหอมมะลิแดงด้วยกระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์ เบดร่วมกับลมหมุนอัดตัว	101
5.1.2 สรุปผลการศึกษาการเตรียมข้าวหอมมะลิแดงด้วยกระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์ เบดร่วมกับลมหมุนอัดตัวและการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ.....	101

5.1.3	สรุปผลการศึกษาความสูงเบดลอยตัวและการควบคุมความคงตัวของเบดด้วยวิธีการ ประมาณผลภาพ	103
5.2	ข้อเสนอแนะ	103
	บรรณานุกรม.....	104
	ประวัติผู้เขียน.....	118

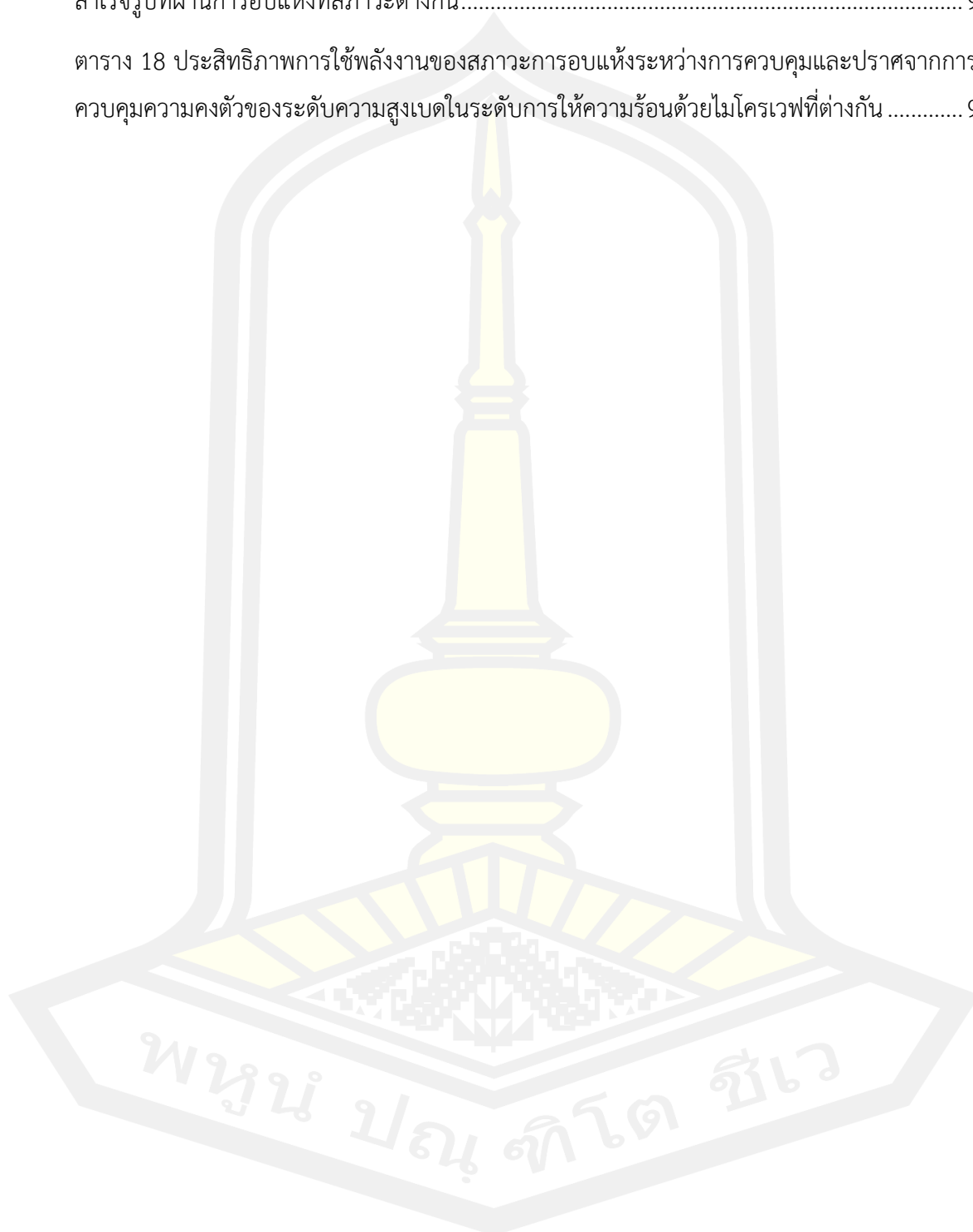


สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 แผนการดำเนินการศึกษา	3
ตาราง 2 ตัวอย่างแผนการทดลอง 2^3 แฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ	23
ตาราง 3 ลำดับการทดลองของอนุกรมของการอบแห้งและความดันของลมหมุนอัดตัวภายใต้การ ออกแบบแฟกทอเรียล	50
ตาราง 4 ปัจจัยการอบแห้งและค่ารหัสที่สอดคล้องกับที่ใช้ในการทดลอง	51
ตาราง 5 สภาวะการทดลองสำหรับการอบแห้งของการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟแบบขั้นตอน	53
ตาราง 6 พารามิเตอร์ของสมการการอบแห้งของ Page ค่าสัมประสิทธิ์แพร่ความร้อนประสิทธิผล และ ค่าพลังงานกระตุ้นที่มีผลต่อความดันลมหมุนอัดตัว และอนุกรมลมร้อน.....	61
ตาราง 7 การออกแบบการทดลองและค่าของคุณสมบัติทางกายภาพและการคืนรูป	64
ตาราง 8 ผลลัพธ์ของ ANOVA ของ Fitted Model สำหรับคุณสมบัติทางกายภาพและการคืนรูปใน การอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับลมหมุนอัดตัวของข้าวหอมมะลิแดงกิ่งสำเร็จรูป.....	65
ตาราง 9 การออกแบบทดลองและค่าของคุณสมบัติของสารต้านอนุมูลอิสระ	71
ตาราง 10 ผลลัพธ์ของ ANOVA ของ Fitted model สำหรับคุณสมบัติของสารต้านอนุมูลอิสระใน การอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับลมหมุนอัดตัวของข้าวหอมมะลิแดงกิ่งสำเร็จรูป.....	73
ตาราง 11 สภาวะการอบที่เหมาะสมและพารามิเตอร์เอาต์พุตที่สอดคล้องกัน	77
ตาราง 12 พารามิเตอร์ทางสถิติและความผิดพลาดของแบบจำลอง และพารามิเตอร์ของสมการการ อบแห้งของ Page.....	81
ตาราง 13 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล และ R^2 ที่สภาวะการอบแห้งแตกต่างกัน.....	87
ตาราง 14 การประมาณเวลาในการอบที่อุณหภูมิอากาศแบบฟลูอิดไดซ์ 98 องศาเซลเซียส และกำลัง วัตต์ไมโครเวฟที่ต่างกัน.....	89
ตาราง 15 ค่าการใช้พลังงานที่สภาวะการอบแห้งที่ต่างกัน	89
ตาราง 16 ค่าสีของข้าวหอมมะลิแดงกิ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการอบแห้งที่สภาวะแตกต่างกัน.....	91

ตาราง 17 คำร้อยละการหดตัว คุณสมบัติการคืนรูปและคุณสมบัติเนื้อสัมผัสของข้าวหอมมะลิแดงกิ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการอบแห้งที่สภาวะต่างกัน..... 92

ตาราง 18 ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของสภาวะการอบแห้งระหว่างการควบคุมและปราศจากการควบคุมความคงตัวของระดับความสูงเบตในระดับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่ต่างกัน 99



สารบัญภาพประกอบ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 ลักษณะของข้าวหอมมะลิแดง.....	8
ภาพประกอบ 2 อัตราการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และอัตราการอบแห้งลดลง	13
ภาพประกอบ 3 ระบบการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ	15
ภาพประกอบ 4 แผนผังการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ.....	19
ภาพประกอบ 5 ระบบการอบแห้งแบบสเปาเตดเบตร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ.....	20
ภาพประกอบ 6 การออกแบบส่วนประสมกลาง	21
ภาพประกอบ 7 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน.....	21
ภาพประกอบ 8 รูปทรงเรขาคณิตสำหรับแผนการทดลอง 2^3 แฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ.....	22
ภาพประกอบ 9 จุดพิกัดบนภาพดิจิทัล.....	24
ภาพประกอบ 10 ภาพไบนารี.....	24
ภาพประกอบ 11 ภาพระดับเทา	25
ภาพประกอบ 12 ภาพสี.....	25
ภาพประกอบ 13 ภาพเมล็ดข้าวที่มีแหล่งกำเนิดแสง.....	27
ภาพประกอบ 14 ความเข้มแสงเทียบกับค่าที่ได้จากเซลล์รับภาพ.....	27
ภาพประกอบ 15 การกำจัดสัญญาณรบกวน	28
ภาพประกอบ 16 การหาขอบภาพ	28
ภาพประกอบ 17 การแยกบริเวณ	30
ภาพประกอบ 18 ภาพรวมของขั้นตอนการศึกษา.....	34
ภาพประกอบ 19 ขนาดของเครื่องอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบตสำหรับห้องปฏิบัติการ	36
ภาพประกอบ 20 โครงสร้างไดอะแกรมของระบบลมหมุนวนอัตโนมัติ.....	36

ภาพประกอบ 21 ชุดเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับกระแสลมหมุนวนอัดตัวและการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟสำหรับการเตรียมข้าวหอมมะลิแดงกิ่งสำเร็จรูป.....	37
ภาพประกอบ 22 อุปกรณ์สำหรับกระบวนการวิเคราะห์ความสูงเบด	39
ภาพประกอบ 23 ชุดควบคุมความคงตัวของเบดโดยด้วยวิธีประมวลผลภาพ.....	40
ภาพประกอบ 24 ตัวอย่างการแสดงผลหน้าตาโปรแกรมสำหรับการความคงตัวของเบด.....	41
ภาพประกอบ 25 วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์	41
ภาพประกอบ 26 ตัวอย่างกระบวนการประมวลผลภาพเฉลี่ยในช่วงเวลาที่กำหนด	56
ภาพประกอบ 27 แผนผังกระบวนการประมวลผลภาพสำหรับวิเคราะห์ความสูงเบด	57
ภาพประกอบ 28 ตัวอย่างกระบวนการหาความสูงเบดของภาพในช่วงเวลาที่กำหนด.....	58
ภาพประกอบ 29 ตัวอย่างการประมวลผลภาพสำหรับกระบวนการควบคุมความคงตัวของเบด.....	60
ภาพประกอบ 30 การพล็อตกราฟสามมิติของของคุณสมบัติทางกายภาพและการคืนรูป	67
ภาพประกอบ 31 ภาพตัดขวางของข้าวหอมมะลิแดงอบแห้งภายใต้สภาวะการอบแห้งต่างๆ.....	70
ภาพประกอบ 32 การพล็อตกราฟสามมิติของคุณสมบัติของสารต้านอนุมูลอิสระ.....	74
ภาพประกอบ 33 เส้นของฟังก์ชันค่า Desirability.....	76
ภาพประกอบ 34 จลนศาสตร์การอบแห้งของข้าวหอมมะลิแดงสุกที่สภาวะการอบแห้งแตกต่างกัน	79
ภาพประกอบ 35 อัตราการอบแห้งที่สภาวะการอบแห้งแตกต่างกัน.....	80
ภาพประกอบ 36 การเปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นที่เวลาการอบแห้งใดๆ จากการทดลองและแบบจำลองของ Page ที่อุณหภูมิร้อนเท่ากับ 98 องศาเซลเซียส	82
ภาพประกอบ 37 สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (D_{eff}) ที่อุณหภูมิร้อน 98 องศาเซลเซียส	85
ภาพประกอบ 38 สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (D_{eff}) ที่อุณหภูมิร้อน 98 องศาเซลเซียส และกำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟ 150 วัตต์	85
ภาพประกอบ 39 สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (D_{eff}) ที่อุณหภูมิร้อน 98 องศาเซลเซียส และกำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟ 300 วัตต์	86
ภาพประกอบ 40 สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (D_{eff}) ที่อุณหภูมิร้อน 98 องศาเซลเซียส และกำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟ 450 วัตต์	86

ภาพประกอบ 41 การเฉลี่ยภาพในช่วงเวลาต่างๆ ของสภาวะอุณหภูมิความร้อน 90 องศาเซลเซียส... 94
ภาพประกอบ 42 การเฉลี่ยภาพในช่วงเวลาต่างๆ ของสภาวะอุณหภูมิความร้อน 98 องศาเซลเซียส... 95
ภาพประกอบ 43 การเฉลี่ยภาพในช่วงเวลาต่างๆ ของสภาวะอุณหภูมิความร้อน 105 องศาเซลเซียส. 95
ภาพประกอบ 44 การเฉลี่ยภาพในช่วงเวลาต่างๆ ของสภาวะอุณหภูมิความร้อน 120 องศาเซลเซียส. 96
ภาพประกอบ 45 ความสัมพันธ์ของความสูงเบตและเวลาการอบแห้งของสภาวะการอบแห้งที่ต่างกัน 97



บทที่ 1

บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผล

ปัจจุบันผู้บริโภคข้าวกล้องกันมากขึ้นเนื่องจากประกอบด้วยสารอาหารและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพมากมาย ข้าวหอมมะลิแดงเป็นหนึ่งในพันธุ์ข้าวกล้องของประเทศไทยที่มีสารต้านอนุมูลอิสระในกลุ่มของโพลีฟีนอลสูง [1]–[4] ดังนั้นข้าวหอมมะลิแดงจึงถูกบริโภคเพื่อประโยชน์ต่อสุขภาพและกลิ่นหอมที่เป็นเอกลักษณ์เด่นของสายพันธุ์ข้าวหอมมะลิ อย่างไรก็ตามข้าวหอมมะลิแดงยังไม่เป็นที่นิยมต่อผู้บริโภคเนื่องจากการหุงข้าวที่ค่อนข้างนานประมาณ 40-45 นาที และข้าวหุงสุกที่ได้ยังมีเนื้อสัมผัสเหนียว [5] ข้าวหอมมะลิแดงจึงสำเร็จรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่แปรรูปจากข้าวหอมมะลิแดงโดยก่อนบริโภคจะทำการหุงต้มหรือคั้นรูปโดยใช้เวลาน้อย หลังจากคั้นรูปจะยังคงรสชาติ กลิ่น และเนื้อสัมผัส ที่ใกล้เคียงกับข้าวหุงสุกทั่วไป [6] ดังนั้นข้าวหอมมะลิแดงจึงสำเร็จรูปจึงเป็นผลิตภัณฑ์ทางเลือกใหม่ที่สะดวกต่อวิถีชีวิตของผู้บริโภคยุคใหม่ [6], [7]

การอบแห้งมีบทบาทสำคัญในการผลิตข้าวกล้องสำเร็จรูปเนื่องจากส่งผลต่อคุณสมบัติการคั้นรูปและคุณสมบัติทางประสาทสัมผัส [6]–[9] จึงทำให้มีนักวิจัยมากมายที่พยายามปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องสำเร็จรูป [5], [7], [8] การอบแห้งด้วยวิธีการแช่เยือกแข็ง (Freeze drying) ถือเป็นวิธีการอบแห้งในอุดมคติที่ถูกนำมาใช้เพื่อผลิตข้าวกล้องสำเร็จรูปเนื่องจากทำให้ข้าวเกิดโครงสร้างความเป็นรูพรุนสูงและสารอาหารคงเหลืออยู่สูงเมื่อคั้นรูปเทียบกับข้าวหุงสุกใหม่ [9]–[11] อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวใช้ต้นทุนสูงและใช้เวลากการอบแห้งนาน [11] จึงจำเป็นต้องสำรวจหาวิธีการอบแห้งอื่น การอบแห้งด้วยลมร้อนจึงถูกนำมาใช้เนื่องจากเป็นวิธีการอบแห้งที่ไม่ซับซ้อนและใช้ต้นทุนต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งด้วยวิธีการแช่เยือกแข็ง [7], [12] แม้ว่าวิธีนี้สามารถปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องสำเร็จรูปได้ด้วยอัตราการอบแห้งสูงโดยใช้อุณหภูมิลมร้อนสูง แต่อย่างไรก็ตามวิธีดังกล่าวใช้เวลากการอบแห้งนานและประสิทธิภาพการใช้พลังงานต่ำ [13] เมื่อใช้อุณหภูมิลมร้อนสูงมากเกินไปอาจจะส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี ทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องสำเร็จรูปลดลง รวมถึงการเกิด Case hardening การหดตัว และการเปลี่ยนสี [14], [15] ข้อจำกัดดังกล่าวนำไปสู่การนำเทคโนโลยีการอบแห้งด้วยไมโครเวฟสำหรับการผลิตข้าวกล้องสำเร็จรูป ถึงแม้ว่าการใช้คลื่นไมโครเวฟในการอบแห้งทำให้ช่วยป้องกันไม่ให้คุณภาพอาหารลดลงและช่วยกระจายความร้อนในวัสดุได้อย่างรวดเร็ว [16]–[18] แต่อย่างไรก็ตามอาจได้รับความร้อนไม่สม่ำเสมอทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของไดอิเล็กตริกและทางอุณหพลศาสตร์ [19] ทั้งนี้การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ

ได้กลายเป็นวิธีการที่ใช้ได้จริงเนื่องจากให้อัตราการอบแห้งสูงสุดและมีโครงสร้างความเป็นรูพรุนมากที่สุด [20], [21] อย่างไรก็ตามการเตรียมตัวอย่างหลายขั้นตอนและความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอภายในเครื่องอบแห้งนี้ยังคงเป็นความท้าทายที่กำลังเผชิญอยู่

การอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดทำให้เกิดกลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลสูง อนุภาคภายในเกิดการกระจายความร้อนอย่างทั่วถึง ส่งผลให้อัตราการอบแห้งสูงและใช้เวลาอบแห้งสั้นเมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ อย่างไรก็ตามวิธีการอบแห้งนี้ไม่เหมาะสำหรับการอบแห้งข้าวกล้องสำเร็จรูปเนื่องจากการเกาะติดกันของผิวเมล็ดข้าวหุงสุก จึงได้มีงานวิจัยที่นำเสนอวิธีการเตรียมตัวอย่างก่อนอบแห้งด้วยวิธีนี้ เช่น ข้าวถูกล้างด้วยน้ำประปาเย็นก่อนอบแห้ง [9], [21], [22] การแช่แข็งข้าวในอุณหภูมิต่ำกว่า -18 องศาเซลเซียส [20] การงอก [23] การใช้เอนไซม์ [24], [25] และการใช้พลาสมาแรงดันต่ำ [5] เพื่อลดการเกาะติดกันของข้าว [6], [9], [20] เนื่องจากประสิทธิภาพที่ดีและความไม่ซับซ้อนของการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดเมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ ดังนั้นจึงมีการนำลมหมุนอัดตัวมาใช้ร่วมกับการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด เพื่อป้องกันการเกาะติดกันของเมล็ดในระหว่างการอบแห้งโดยไม่มีขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง กระบวนการอบแห้งนี้ถูกนำมาใช้เพื่อผลิตข้าวไรซ์เบอร์รี่สำเร็จรูป [26] พบว่า อุณหภูมิการอบแห้ง (70-90 องศาเซลเซียส) และแรงดันอากาศอัดแบบหมุนวน (2-4 บาร์) ส่งผลต่อคุณลักษณะการอบแห้งและจลนพลศาสตร์การเสื่อมสภาพของแอนโทไซยานินอย่างมีนัยสำคัญ [26] กระบวนการผลิตข้าวกล้องสำเร็จรูปดังกล่าวยังจำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับจลนศาสตร์การอบแห้งภายใต้อุณหภูมิการอบแห้งและลมหมุนอัดตัวที่สูงขึ้น เพื่อการประเมินผลการคงอยู่ของสารประกอบออกฤทธิ์ทางชีวภาพต่อการอบแห้ง นอกจากนี้การอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับไมโครเวฟควรเป็นสิ่งที่ต้องการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับจลนศาสตร์การอบแห้ง และพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดจากการพิจารณาคุณสมบัติต่างๆ

ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอการศึกษากระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับไมโครเวฟและลมหมุนอัดตัวสำหรับการเตรียมข้าวกล้องสำเร็จรูป เพื่อลดปัญหาการเตรียมตัวอย่างที่ซับซ้อนในขณะที่ยังให้อัตราการอบแห้งที่สูงและใช้เวลาการอบแห้งสั้น และเพื่อพิจารณาสภาวะการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับไมโครเวฟและลมหมุนอัดตัวที่เหมาะสมจากคุณสมบัติด้านต่างๆ

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษา ออกแบบ กระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับไมโครเวฟและลมหมุนอัดตัว

1.2.2 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมข้าวกล้องสำเร็จรูปด้วยวิธีอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับไมโครเวฟและลมหมุนอัดตัว

1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1.3.1 ขี้วากล้องที่ใช้ในการทดสอบ คือ ขี้ววหอมมะลีดง
- 1.3.2 เครื่องอบแห้งที่ใช้เป็นแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับกระแสมหุมนวนอัดตัวและการให้ควมร้อนด้วยไมโครเวฟขนาดระดับห้องปฏิบัติการ
- 1.3.3 อุณหภูมิของลมร้อนที่ใช้อยู่ในช่วง 90-120 องศาเซลเซียส
- 1.3.4 ความดันลมกระแสวนที่ใช้ 4-6 บาร์
- 1.3.5 กำลังวัตต์ไมโครเวฟที่ใช้อยู่ในช่วง 150-450 วัตต์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทราบถึงเทคนิคการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับกระแสมหุมนวนอัดตัวและการให้ควมร้อนด้วยไมโครเวฟ
- 1.4.2 ลดปัญหาในเรื่องของการเตรียมตัวอย่างที่ซับซ้อนในขณะที่ยังให้อัตราการอบแห้งที่สูงใช้เวลาในการอบแห้งสั้น

1.5 แผนการดำเนินการศึกษา

ตาราง 1 แผนการดำเนินการศึกษา

รายการ	ระยะเวลา														
	ภาคเรียนที่ 1/2563					ภาคเรียนที่ 2/2563					ภาคเรียนที่ 1/2564				
	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.
1.5.1 ศึกษา รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง	←				→										
1.5.2 การออกแบบสร้างชุดอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับกระแสมหุมนวนอัดตัวและการให้ควมร้อนด้วยไมโครเวฟ		←			→										
1.5.3 สอบโครงร่างวิทยานิพนธ์				←	→										
1.5.4 การศึกษาจลนศาสตร์การอบแห้ง						←		→							

รายการ	ระยะเวลา														
	ภาคเรียนที่ 1/2563					ภาคเรียนที่ 2/2563					ภาคเรียนที่ 1/2564				
	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.
1.5.5 รายงาน ความก้าวหน้าต่อ คณะกรรมการ ฌ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย มหาสารคาม															
1.5.6 การศึกษาผล ของสภาวะการ อบแห้งต่อคุณภาพ ทางกาย เคมีและทาง เนื้อสัมผัสของข้าว กล้องหอมมะลิแดงกิ่ง สำเร็จรูป															
1.5.7 สรุปผลการทำ วิจัย จัดทำรูปเล่ม และส่งตีพิมพ์ใน วารสารที่อยู่ใน ฐานข้อมูล ISI															
1.5.8 สอบ วิทยานิพนธ์															

1.6 สถานที่ดำเนินการศึกษา

1.6.1 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย
จังหวัดมหาสารคาม

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการและทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในวิทยานิพนธ์ ได้แก่ ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับข้าวและข้าวหอมมะลิแดง กระบวนการผลิตข้าวทั้งสำเร็จรูป ทฤษฎีการอบแห้ง ทฤษฎีการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ วิธีพ่นผิวตบสอง เทคนิคการประมวลผลภาพดิจิทัล และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับข้าวและข้าวหอมมะลิแดง

2.1.1 ข้าว

ข้าวเป็นอาหารหลักของคนกว่าครึ่งโลก เมล็ดข้าวประกอบด้วยส่วนเปลือกที่ห่อหุ้มภายนอก ถัดเข้าไปจะเป็นชั้นรำที่เป็นเยื่อบางๆ ห่อหุ้มเมล็ดข้าวขาวและจมูกข้าวไว้ [27] เมล็ดข้าวขาวที่เราบริโภคกันประกอบขึ้นจากโมเลกุลของแป้งที่อัดกันแน่นเป็นอนุภาคเล็กๆ นับล้านล้านอนุภาค และส่วนของจมูกข้าวจะอยู่ปลายเมล็ด ซึ่งเป็นส่วนของต้นอ่อนที่จะเจริญงอกงามเป็นต้นข้าวต่อไป ในจมูกข้าวหรือคัพภะของข้าวนี้เป็นแหล่งของเอนไซม์ วิตามินและเกลือแร่ที่เกี่ยวข้องกับการงอกของเมล็ด สำหรับส่วนของรำข้าวนี้เป็นชั้นที่อุดมด้วยไขมันรำข้าว โปรตีน กากใยอาหาร และวิตามิน ซึ่งเป็นที่น่าเสียดายที่เทคโนโลยีการขัดสีข้าวสมัยใหม่ได้ขัดเอาชั้นรำสีคล้านี้ทิ้งไปพร้อมกับจมูกข้าวเหลือแต่ข้าวขาวที่เป็นแป้งล้วนๆ ให้เรารับประทานกัน ผลของการขัดสีข้าวทำให้วิตามินบี 1 วิตามินบี 3 และวิตามินบี 6 หายไปถึงร้อยละ 90 ธาตุแมงกานีสและฟอสฟอรัสหายไปร้อยละ 50 ธาตุเหล็กหายไปร้อยละ 60 ส่วนกากใยอาหารหายไปเกือบทั้งหมด

2.1.2 การจำแนกชนิดข้าว

ข้าวสามารถจำแนกได้ตามลักษณะส่วนประกอบทางเคมี ดังนี้

1) ข้าวเหนียว (Glutinous rice หรือ Waxy rice) เมล็ดข้าวสารจะมีลักษณะขุ่น สีส้มส่วนประกอบทางเคมีของอะไมโลสประมาณร้อยละ 0.2 และปริมาณสารอะไมโลเพคตินเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งเมื่อข้าวหุงสุกจะเกิดความนุ่ม จับตัวติดเหนียวเป็นก้อน และมีลักษณะใส อีกทั้งยังมีแป้งอะไมโลสอยู่เพียงเล็กน้อยหรือไม่มีเลย

2) ข้าวเจ้า (Non-glutinous rice) เมล็ดข้าวสารจะมีสีขาวใส มีปริมาณอะไมโลสเป็นสัดส่วนประกอบทางเคมีประมาณร้อยละ 20-34 ที่เหลือเป็นอะไมโลเพคติน ซึ่งมีผลให้ข้าวสารที่นำไปหุงเป็นข้าวสุกจะมีสีขาวขุ่น มีลักษณะร่วนไม่เกาะติดกัน

อัตราส่วนของส่วนประกอบทางเคมีทั้งสองชนิดนี้จะเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ข้าวมีคุณสมบัติการหุงต้มที่ต่างกัน คือ ข้าวที่มีอะไมโลสสูงจะดูดน้ำและขยายปริมาตรในระหว่างการหุงต้มได้มากกว่า ข้าวอะไมโลสต่ำ ส่งผลให้ข้าวสุกมีลักษณะร่วน ส่วนข้าวที่มีอะไมโลสต่ำจะดูดน้ำและขยายตัวได้น้อยกว่าข้าวที่มีอะไมโลสสูง ข้าวจะเหนียวและนุ่มกว่า

2.1.3 องค์ประกอบของเมล็ดข้าว

เมล็ดข้าวเป็นผลชนิด Caryopsis เนื่องจากส่วนที่เป็นเมล็ดเดี่ยว (Single seed) ติดแน่นอยู่กับผนังของรังไข่หรือเยื่อหุ้มผล (Pericarp) เมล็ดข้าวประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ คือ

1) ส่วนที่ห่อหุ้ม เรียกว่า แกลบ (Hull หรือ Husk) ประกอบด้วย เปลือกใหญ่ (Lemma) เปลือกเล็ก (Palea) หาง (Awn) ชั่วเมล็ด (Rachilla) และกลีบรองเมล็ด (Sterile lemmas)

2) ส่วนที่รับประทานได้ เรียกว่า ข้าวกล้อง (Caryopsis หรือ Brown rice) หรือเมล็ดข้าวที่เอาเปลือกออกแล้ว ประกอบด้วย

2.1) เยื่อหุ้มผล (Pericarp) หรือ Fruit coat ประกอบด้วยเนื้อเยื่อ 3 ชั้นด้วยกัน คือ Epicarp mesocarp และ Endocarp ซึ่งเยื่อหุ้มผลมีลักษณะเป็น Fibrous ผนังเซลล์ประกอบด้วยโปรตีน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส

2.2) เยื่อหุ้มเมล็ด (Tegmen หรือ Seed coat) อยู่ถัดจาก Pericarp เข้าไปอุดมด้วยเนื้อเยื่อสองชั้นเรียงกันเป็นแถวเป็นที่อยู่ของสารประเภทไขมัน (Fatty material)

2.3) เยื่อแอลิวโรน (Aleurone) อยู่ต่อจาก Tegmen ห่อหุ้มข้าวสาร (Starchy endosperm) และคัพภะ (Embryo) ชั้นแอลิวโรนมีโปรตีนสูง นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยไขมัน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส

2.4) ส่วนที่เป็นแป้ง (Starch endosperm) หรือส่วนที่เป็นข้าวสารอยู่ชั้นในสุดของเมล็ดประกอบด้วยแป้งเป็นส่วนใหญ่และมีโปรตีนอยู่บ้าง แป้งในเมล็ดข้าวมี 2 ชนิด คือ อะไมโลเปคติน ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ของ D-glucose ที่ต่อกันเป็น Branch chain และอะไมโลสซึ่งเป็นพอลิเมอร์ของ D-glucose ที่ต่อกันเป็น Linear chain สำหรับส่วนประกอบของแป้งทั้ง 2 ชนิด มีสัดส่วนแตกต่างกันไปตามชนิดข้าว ในข้าวเหนียวจะมีอะไมโลสอยู่ประมาณร้อยละ 0-2 ส่วนที่เหลือเป็นอะไมโลเปคติน ข้าวเจ้ามีอะไมโลสมากกว่าคือประมาณร้อยละ 7-33 ของน้ำหนักข้าวสาร

2.5) คัพภะ (Embryo) อยู่ติดกับ Endosperm ทางด้าน Lemma เป็นส่วนที่จะเจริญเป็นต้นต่อไป คัพภะประกอบด้วยต้นอ่อน (Plumule) รากอ่อน (Radicle) เยื่อหุ้มต้นอ่อน (Coleoptile) เยื่อหุ้มรากอ่อน (Coleorhiza) ท่อน้ำท่ออาหาร (Epiblast) และใบเลี้ยง (Scutellum) คัพภะเป็นส่วนที่มีโปรตีนและไขมันสูง

2.1.4 สารสี (Pigment) ในข้าว

สารสีของเปลือกและเมล็ดข้าว ประกอบด้วยสารสีหลายประเภทตามขั้นตอนการพัฒนาของเมล็ด โดยมีการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ระยะข้าวน้ำนมที่มีสีของเปลือกเมล็ดเป็นสีเขียว ซึ่งสารสีเขียวนี้เป็นสารสีกลุ่มคลอโรฟิลล์ (Chlorophyll pigment) เมื่อเข้าสู่ระยะข้าวเმაเปลือกเริ่มเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีเขียวอมเหลืองอมน้ำตาลของสารสีกลุ่มแคโรทีนอยด์ (Carotenoid pigment) จากนั้นเมื่อเมล็ดแก่เต็มที่สีเปลือกเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลทอง เหลืองทอง น้ำตาลเข้ม น้ำตาลม่วง น้ำตาลดำ ขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าวซึ่งสารสีที่พบคือสารสีแอนโทไซยานิน (Anthocyanin pigment) สำหรับเมล็ดข้าว เนื้อในเมล็ดมีสีข้าว ส่วนผิวของเมล็ดข้าวในส่วนเยื่อหุ้มผล มีสารสีเป็นส่วนประกอบทำให้ข้าวกล้องมีสีเหลืองอ่อน น้ำตาล แดง และม่วงเข้ม ซึ่งสารสีน้ำตาล แดง และม่วงเข้ม เป็นสารสีของแอนโทไซยานินเช่นกัน [28]

2.1.5 ข้าวหอมมะลิแดง

ข้าวหอมมะลิแดง (ดังภาพประกอบ 1) เป็นข้าวพันธุ์พื้นเมืองที่เกิดจากการกลายพันธุ์มาจากข้าวขาวดอกมะลิ 105 [29] โดยธรรมชาติมีลักษณะเป็นข้าวเจ้าที่ไวต่อช่วงแสง มีความต้านทานโรคและแมลงสูง ลำต้นสูงประมาณ 120-130 เซนติเมตร เมล็ดข้าวมีความกว้าง ความยาว และความหนา โดยเฉลี่ย 2.1 7.5 และ 1.7 มิลลิเมตร ตามลำดับ มีปริมาณอะไมโลสร้อยละ 16.9 สำหรับประเทศไทยนิยมปลูกในแถบภาคกลาง ภาคตะวันตก และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ข้าวสุกที่ได้มีลักษณะนุ่ม เหนียวและมีกลิ่นหอมเหมือนข้าวขาวดอกมะลิ 105 แต่มีลักษณะเด่น คือ เยื่อหุ้มเมล็ดข้าวกล้องมีสีแดง ลักษณะของสีแดงนี้อาจเกิดจากพฤษเคมีบางชนิด

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ข้าวพันธุ์ที่มีสีจะมีปริมาณใยอาหาร [30] และสารต้านออกซิเดชันในปริมาณที่สูง [31]–[33] จึงช่วยในการป้องกันและรักษาโรคต่างๆ เช่น ยับยั้งการเติบโตของเซลล์มะเร็ง ลดปริมาณคลอเรสเตอรอล ควบคุมภาวะของการเกิดโรคหัวใจ และควบคุมเบาหวาน ได้ดีกว่าข้าวขาวทั่วไป [34]–[36] นอกจากนี้ข้าวกล้องหอมมะลิแดงได้ถูกปรับปรุงพันธุ์ให้มีสารต้านอนุมูลอิสระในกลุ่มของโพลีฟีนอลมากกว่าข้าวหอมมะลิ 105 ถึง 13 เท่า [37], [38] และให้สีแตกต่างกันตั้งแต่สีแดง น้ำเงิน และม่วง ขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรดต่าง [39]



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 1 ลักษณะของข้าวหอมมะลิแดง
 (ก) ข้าวเปลือกหอมมะลิแดง (ข) ข้าวหอมมะลิแดง
 ที่มา: หอมหวาน ดาสาโรจน์ (2557) [38]

เนื่องด้วยข้าวหอมมะลิแดงมีคุณค่าทางโภชนาการสูง ได้มีนักวิจัยแปรรูปในลักษณะผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้แก่ น้ำทิพย์ (2557) [40] ได้พัฒนาผลิตภัณฑ์กระยาสารจากข้าวหอมมะลิแดง จีราภรณ์ และ วรพงศ์ (2560) [41] ได้ประยุกต์ใช้น้ำมันรำข้าวและสารสกัดจากรำข้าวหอมมะลิแดง ในเครื่องสำอาง 3 ผลิตภัณฑ์ คือ ครีมสำหรับผิวธรรมดา ครีมสำหรับผิวแห้ง และครีมสำหรับผิวมัน สุขาดา และ ขวัญชัย (2555) [42] ได้พัฒนาผลิตภัณฑ์แคร์กเกอร์จากข้าวกล้องหอมมะลิและข้าวแดง (อังคัก) อำพรธม และ อรชูล (2552) [43] ผลิตนมเปรี้ยวพร้อมดื่มจากข้าวกล้องพันธุ์หอมมะลิ พันธุ์ มั่นปู้ และพันธุ์สาลีให้ น้ำทิพย์ และ ปวีณา (2558) [44] ผลิตข้าวทอดกรอบจากข้าวหอมมะลิแดง และข้าวไรซ์เบอร์รี่

2.2 กระบวนการผลิตข้าวกึ่งสำเร็จรูป

ข้าวกึ่งสำเร็จรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่แปรรูปจากข้าวโดยก่อนบริโภคจะทำการหุงต้มหรือคั้นรูป โดยใช้เวลาน้ำสั้น ลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังการคั้นรูปจะยังคงรสชาติ กลิ่น และเนื้อสัมผัส ใกล้เคียงกับข้าวที่หุงสุกโดยทั่วไป และสามารถเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ไว้ได้นาน ซึ่งขั้นตอนการแปรรูปค่อนข้างมีวิธีการหลากหลายโดย งามชื่น คงเสรี [45] ได้รวบรวมข้อมูลไว้ดังนี้

2.2.1 การแช่ การต้ม และการอบแห้ง

กระบวนการนี้เป็นขั้นตอนแรกที่ใช้ในการผลิตข้าวกึ่งสำเร็จรูปตามวิธีของ Ozai-durrani [46] ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ การแช่ข้าวสาร การให้ความร้อนเพื่อให้สุก และการอบแห้ง วิธีการนี้ถูกนำมาพัฒนาปรับปรุงต่อในหลายวิธี เช่น การพยายามทำให้เมล็ดข้าวเกิดรอยร้าวมากขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิแทรกซึมผ่านเข้าสู่เมล็ดข้าวได้ง่ายขึ้น ข้อดี คือ ช่วยลดเวลาในการหุงต้ม การแช่

(Soaking) โดยทั่วไปการแช่จะทำให้เมล็ดข้าวดูดน้ำจนมีความชื้นประมาณร้อยละ 28 การที่ข้าวจะดูดซึมน้ำได้มากน้อยนั้นขึ้นอยู่กับระยะเวลาและอุณหภูมิของน้ำในการแช่ ทั้งนี้การแช่แบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ การแช่โดยใช้และไม่ใช้ความร้อน ในระหว่างการแช่อาจมีการเติมสารเคมีโดยมีจุดประสงค์ คือ เพื่อปรับโครงสร้างของโปรตีนโดยการลดหรือทำลายโครงสร้างโปรตีนเพื่อให้ข้าวดูดน้ำได้มากขึ้น สารเคมีที่นิยม ได้แก่ Disodium phosphate Sodium tripolyphosphate และ Calcium citrate ทั้งนี้ได้มีรายงานทางวิชาการสำหรับกรรมวิธีการแช่ข้าวดังนี้

Robert และคณะ (1952) [47] ได้พัฒนากระบวนการผลิตข้าวกล้องสำเร็จรูป โดยทำการแช่ข้าวสารในน้ำที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นหุงด้วยน้ำร้อนเป็นเวลา 1-3 นาที จนกระทั่งข้าวมีความชื้นประมาณร้อยละ 45-55 ฐานเปียก หลังจากนั้นอบแห้งที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เพื่อต้องการลดความชื้นจากบริเวณผิวให้เร็วกว่าที่ดูดซึมน้ำจากข้างใน ทำให้เกิดลักษณะขอบแข็ง โดยใช้ระยะเวลาในการอบ 1-3 นาที เพื่อป้องกันการไหม้ของเมล็ดข้าว และขั้นตอนที่สองอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จนกระทั่งความชื้นสุดท้ายเหลือร้อยละ 10-15 ฐานเปียก ซึ่งพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถคืนรูปได้ในเวลา 5 นาที

Yasumatsu และคณะ (1971) [48] ทดลองโดยการแช่ข้าวสารในน้ำที่อุณหภูมิห้อง แล้วหุงข้าวด้วยการใช้น้ำที่ความดันบรรยากาศ และข้าวถูกนำมาแช่อีกครั้งที่สองในน้ำที่มีน้ำหอมระเหย หลังจากนั้นข้าวถูกนำมาหุงด้วยหม้อนึ่งความดันจนกระทั่งสุกและเกิดเจลลาตินซ์ การใช้น้ำมันหอมระเหยช่วยในการแยกเมล็ดข้าวออกเป็นเมล็ดหลังจากที่ผ่านการหุง เพื่อให้สะดวกในการอบแห้ง และขั้นตอนสุดท้ายนำข้าวหุงสุกไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จนกระทั่งความชื้นสุดท้ายเหลือร้อยละ 8-12 ฐานเปียก

การอบแห้งถือได้ว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องสำเร็จรูป ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์โดยเฉพาะคุณภาพทางด้านเนื้อสัมผัสหลังการคืนรูป โดยทั่วไปแล้วการอบแห้งข้าวกล้องสำเร็จรูปอาจทำได้ 2 วิธีหลักๆ ได้แก่

- 1) การอบแห้งในขั้นตอนเดียว เป็นการอบแห้งที่ใช้ความร้อนประมาณ 70 องศาเซลเซียส แต่ใช้ระยะเวลาอบแห้งนานประมาณ 2-3 ชั่วโมง
- 2) การอบแห้งแบบหลายขั้นตอน ในขั้นตอนแรกเป็นการใช้ความร้อนสูงภายในระยะเวลาอันสั้นเพื่อให้โครงสร้างอยู่ตัว อาจเกิด Case hardening ภายในเมล็ดข้าวจะเกิดรูพรุนขนาดใหญ่ แล้วจึงตามด้วยการใช้อุณหภูมิต่ำซึ่งจะช่วยให้โครงสร้างอยู่ตัวโดยที่ข้าวไม่เกิดการไหม้

2.2.2 การทำให้ข้าวขยายตัว (Expanded and pregelatinize rice)

หลักการของวิธีการนี้ คือ การนำข้าวสารมาผ่านการทำให้เกิดเจลก่อนโดยการให้ความร้อนด้วยวิธีการต่างๆ ทำให้เมล็ดข้าวที่ได้ในขั้นตอนนี้มีลักษณะแข็งใส หดตัว และมีความหนาแน่นมาก

หลังจากนั้นทำให้พองโดยการใช้อุณหภูมิสูง ข้าวที่ได้จึงมีเมล็ดที่ขนาดใหญ่กว่าเดิม 4 เท่า น้ำหนักเบาและมีรูพรุน ใช้เวลาในการคั้นรูปเพียง 3-4 นาที โดยมีงานวิจัยที่ศึกษาหลักการนี้ คือ

Robert และคณะ (1955) [49] ทดลองแช่ข้าวสารจนกระทั่งมีความชื้นร้อยละ 30 ฐานเปียก หลังจากนั้นนำไปหุงด้วยไอน้ำที่ความดัน 10-15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 5-20 นาที และอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จนกระทั่งความชื้นสุดท้ายเหลือร้อยละ 8-14 ฐานเปียก เมล็ดข้าวที่ได้มีลักษณะหดตัว ใสแน่น หลังจากขั้นตอนนี้แล้วเป็นกระบวนการทำให้เมล็ดข้าวเกิดการพองตัวด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 200-250 องศาเซลเซียส พบว่าข้าวกึ่งสำเร็จรูปที่ได้มีลักษณะการพองตัวขยายตัว โครงสร้างภายในเมล็ดข้าวมีรูพรุนมาก และใช้เวลาในการคั้นรูปน้อยเพียง 2-3 นาที

2.2.3 การรีดหรือตำ (Rodling or bumping treatment)

เป็นกรรมวิธีการผลิตโดยนำข้าวหนึ่งหรือข้าวที่สุกแล้วระดับหนึ่งมาแช่น้ำ ผ่านการนึ่งด้วยไอน้ำหรือทั้งแช่น้ำและนึ่งด้วยไอน้ำพร้อมกัน เพื่อให้ข้าวมีความชื้นร้อยละ 40 จากนั้นทำการใช้กดหรือบดผ่านลูกกลิ้งให้แบนลงประมาณร้อยละ 30-80 ของความหนาเดิมเพื่อให้ได้พื้นที่หน้าตัดที่บางก่อนลดความชื้นด้วยการอบแห้งให้ได้ความชื้นร้อยละ 10-14 ที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้ข้าวที่มีความเป็นรูพรุนมาก

2.2.4 การผ่านลมร้อนขณะแห้ง (Dryheat treatment)

ข้าวกึ่งสำเร็จรูปที่ผลิตโดยวิธีนี้ผ่านกระบวนการให้ความร้อนเพียงอย่างเดียว เช่น ใช้ลมร้อนเป่าข้าวที่อุณหภูมิ 65-82 องศาเซลเซียส นาน 10-13 นาที หรืออุณหภูมิ 272 องศาเซลเซียส นาน 18 วินาที ส่งผลให้เมล็ดข้าวเกิดรอยร้าวเล็กๆ (Fissures) และเกิดการขยายตัวเพื่อช่วยลดระยะเวลาหุงต้ม วิธีนี้ใช้เวลาเตรียมประมาณ 10 นาที จึงทำให้เกิดการหุงสุกไวได้ง่ายเนื่องจากความชื้นแทรกซึมได้เร็วขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการแช่ การต้ม และการอบแห้ง พบว่า วิธีการผ่านลมร้อนขณะแห้งมีขั้นตอนการผลิตที่ไม่ซับซ้อนและให้คุณสมบัติทางสีที่ดีกว่า แต่ใช้เวลาในการอบแห้งที่นานกว่าวิธีการแช่ การต้ม และการอบแห้ง

2.2.5 การแช่แข็งแล้วละลายน้ำแข็ง (Freeze-thaw process)

ต้มข้าวให้สุกแล้วนำไปแช่แข็ง ละลายน้ำแข็ง แล้วจึงลดความชื้นด้วยการอบแห้ง ในการแช่แข็งให้อุณหภูมิของข้าวลดลงถึง 0 องศาเซลเซียส และคงไว้ที่อุณหภูมินี้นาน 1-3 ชั่วโมง ในระหว่างที่เกิดการแข็งตัวซ้ำๆ นี้ ทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ และผลให้เกิดโครงสร้างความเป็นรูพรุน จากนั้นทำการลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็ว ทำให้น้ำทั้งหมดในเมล็ดข้าวเกิดการแข็งตัวอย่างสมบูรณ์ และนำข้าวที่แข็งตัวนี้ไปทำการละลาย (Thawed) ภายใต้อากาศที่ไม่มีการทำแห้งเพื่อป้องกันเมล็ดข้าวติดกัน เช่น ที่อุณหภูมิห้อง หรือใช้กระแสลมอ่อน เป็นเวลาอย่างน้อย 5 ชั่วโมง และนำไปทำให้แห้งโดยใช้กระแสลมร้อนที่ 43-121 องศาเซลเซียส ให้ได้ความชื้นประมาณร้อยละ 8 ดังนั้นข้อดีของวิธีนี้ คือสามารถคั้นรูปข้าวหุงสุกเร็วได้ภายใน 5 นาที

2.2.6 การใช้ Puffing gun

อุปกรณ์ที่ใช้ในวิธีการนี้เรียกว่า Puffing gun ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีลักษณะการพองตัว หลักการทำงานของ Puffing gun แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ใช้ไอน้ำ (Steam chamber) เมื่อวัตถุดิบผ่านเข้ามาจะมีการลดความดันเพื่อที่จะดึงอากาศออกจากวัตถุดิบก่อน ไอน้ำจะถูกส่งออกมา เพื่อให้ข้าวเกิดเจลาติไนซ์ จากนั้นผลิตภัณฑ์จะถูกส่งออกไปยังห้องสุญญากาศ (Expansion chamber) ข้าวที่ผ่านเข้ามาจะเกิดการขยายตัวทันที เพราะความดันลดลงอย่างรวดเร็ว ข้อดีของวิธีนี้คือ ข้าวกึ่งสำเร็จรูปที่ได้จะมีขนาดใหญ่ประมาณ 2-3 เท่า ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับน้ำมากในระหว่างการคืนรูป ดังนั้นข้าวกึ่งสำเร็จรูปที่ได้จึงคืนตัวในระยะเวลาอันสั้น แต่ข้อเสียคือ ลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากการไล่อากาศออกจาก Expansion chamber ทำได้ไม่ทันที ในขณะที่เมล็ดข้าวถูกบ้อนเข้า [50]

2.2.7 การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying)

วิธีนี้ข้าวที่ผ่านการทำให้สุกครั้งแรกนำมาทำให้เย็นจัดที่จุดเยือกแข็ง (0 องศาเซลเซียส) โดยการสัมผัสกับ Plate ที่เย็นจัดภายใต้ Vacuum Chamber หลังจากนั้นทำให้แห้งที่ความดันบรรยากาศ โดยมีการหมุนเวียนลมเย็นที่ไม่มี ความชื้นผ่านข้าว เพื่อลดความชื้นของข้าวขณะที่อยู่สภาพแช่แข็งจนกระทั่งข้าวมีความชื้นร้อยละ 10-20 จากนั้นนำไปเป่าด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 150-315 องศาเซลเซียส ข้อดีของวิธีนี้คือ เกิดโครงสร้างรูพรุนในเมล็ดข้าวสูง ทำให้เกิดผิวที่กรอบและการคืนสภาพอย่างรวดเร็ว รวมถึงการรักษาคุณค่าสารอาหารและรสชาติที่ดีไว้ ข้อเสียของวิธีนี้คือ การใช้เวลานานกว่าที่น้ำแข็งจะระเหิดกลายเป็นไอน้ำจึงต้องใช้พลังงานสูง และต้นทุนในการดำเนินการค่อนข้างแพง

2.2.8 การใช้สารเคมี (Chemical treatment)

นอกจากการใช้ความร้อนในการทำให้ข้าวสุกแล้ว ยังมีวิธีการใช้สารเคมีเพื่อช่วยให้ข้าวสุกเร็วขึ้น หรือทำให้มีเนื้อสัมผัสและรสชาติที่ดีขึ้น เช่น การใช้เกลือโซเดียมคลอไรด์ การใช้เอนไซม์เอมิเซลลูเลส และการใช้สารประเภทเอสเทอร์ของกรดไขมัน เป็นต้น ตัวอย่างกรรมวิธีที่ใช้ในการแปรรูปคือการนำข้าวมาแช่สารละลายฟอสเฟตหรือพอลิฟอสเฟตที่ pH 7.6-8.2 อุณหภูมิ 20-30 องศาเซลเซียส จากนั้นนำขึ้นจากสารละลายมาต้มกับสารละลายฟอสเฟต (ร้อยละ 0.05-0.5) แซ็กคาไรด์ (ร้อยละ 0.3-10) และสารช่วยลดแรงตึงผิว (ร้อยละ 0.1-0.5) จนข้าวสุกประมาณร้อยละ 70 มีความชื้นร้อยละ 50-70 นำข้าวที่ได้มาผ่านการให้ความร้อนด้วยไอน้ำจนข้าวสุกร้อยละ 100 และทำการอบแห้งอย่างรวดเร็ว

2.3 ทฤษฎีการอบแห้ง

การอบแห้ง คือ กระบวนการลดความชื้นออกจากตัวอาหารหรือผลิตผลทางการเกษตรเป็นกรรมวิธีถนอมอาหารที่รู้จักกันมาช้านาน ส่วนใหญ่ใช้ความร้อนถ่ายเทความร้อนไปยังอาหารโดยการพาความร้อน และเกิดการนำความร้อนในตัวอาหารและน้ำระเหยออกจากอาหารโดยการแพร่ของน้ำ จนทำให้ความชื้นลดลงในระดับที่ปลอดภัยต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์และการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของอาหารที่เกิดขึ้นน้อยมาก เนื่องจากค่าปริมาณน้ำอิสระ (Water activity) ของอาหารลดลงตามความชื้นที่สูญเสียไป นอกจากนี้น้ำหนักและปริมาตรของอาหารลดลงด้วย ทำให้อาหารมีความง่ายต่อการเก็บ การบรรจุ การขนส่ง และลดต้นทุน เนื่องจากการขนส่งผลิตภัณฑ์บางชนิดในสภาพสด จะเปลืองเนื้อที่และการดูแลรักษาลำบาก นอกจากนี้ยังสร้างความเป็นเอกลักษณ์เฉพาะให้กับผลิตภัณฑ์ด้วย [51]–[54]

การอบแห้งสามารถแบ่งได้ 2 ลักษณะ คือ การอบแห้งโดยการพาความร้อน (Convective drying) ของไหลร้อนและอากาศ จะเป็นตัวสำคัญในการให้ความร้อนซึ่งจำเป็นต้องใช้ในการระเหยน้ำออกจากผิวหน้าของอาหาร การอบแห้งในลักษณะนี้มีที่รู้จักกันในชื่อของการอบแห้งโดยใช้ลมร้อน (Hot air drying) และอีกรูปแบบ คือ การอบแห้งโดยการนำความร้อน (Conductive drying) เกิดขึ้นจากอาหารสัมผัสกับผิวหน้าร้อนโดยตรง ทำให้น้ำเกิดการระเหยอย่างรวดเร็ว ได้แก่ การอบแห้งแบบลูกกลิ้ง (Drum drying) [53]

กลไกการอบแห้งแบ่งออกเป็น 2 ช่วงใหญ่ๆ คือ ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant-rate period) และช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling-rate period)

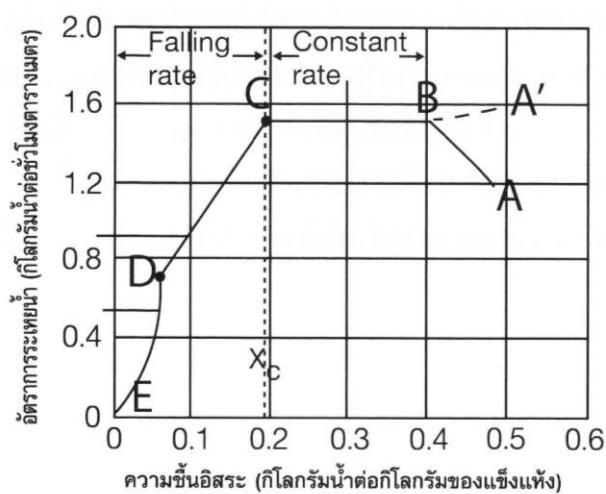
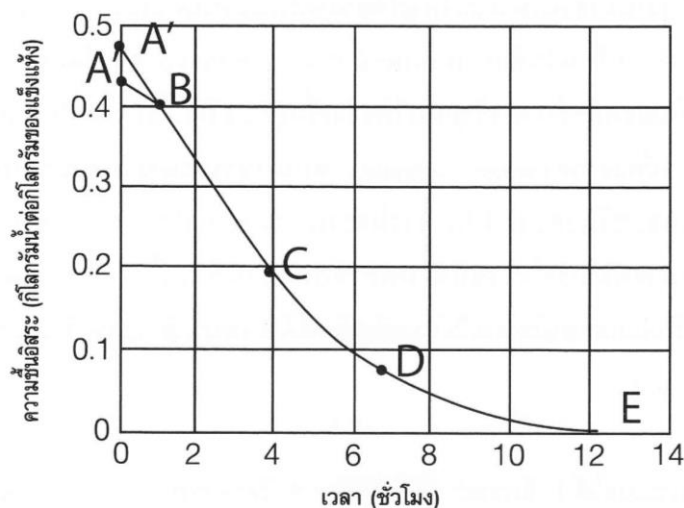
2.3.1 ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant rate)

ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่นั้น ความชื้นภายในโครงสร้างอาหารสามารถเคลื่อนที่ได้เร็วพอที่จะทำให้ผิวหน้าของอาหารยังคงอิมมิดด้วยน้ำ ความชื้นของวัสดุลดลงอย่างชัดเจน และอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์มีค่าคงที่และเท่ากับอุณหภูมิฐานเปียกของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง อัตราการระเหยของไอน้ำที่ผิวหน้ามีค่าเท่ากับอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำ (ของเหลว) ภายในวัสดุพรมที่มาเติมเต็มที่ผิวหน้า ค่าความชื้นช่วงปลายของคาบเวลานี้เข้าใกล้ค่าความชื้นวิกฤต (Critical moisture content) ซึ่งค่าความชื้นวิกฤตนี้มีค่าหลายค่า อันเนื่องมาจากความหนาของผลิตภัณฑ์ สภาพการอบแห้ง ชนิดของโครงสร้าง การยึดเกาะของความชื้นภายในวัสดุ และความสามารถในการเคลื่อนตัวของความชื้นภายในโครงสร้างวัสดุ [54], [55]

2.3.2 ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate)

ความชื้นของวัสดุของช่วงอัตราการอบแห้งนี้น้อยกว่าความชื้นวิกฤตดังแสดงในภาพประกอบ 2 โดยช่วงอัตราการอบแห้งนี้ใช้เวลามากกว่าช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ [56] การถ่ายเทความร้อนและมวลนั้นไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะที่ผิววัสดุเท่านั้นแต่เกิดภายในเนื้อวัสดุด้วย อัตราการเคลื่อนที่ของน้ำภายใน

โครงสร้างมีค่าน้อยกว่าอัตราการระเหยของน้ำที่ผิวหน้า ความชื้นในวัสดุที่เคลื่อนตัวไปยังผิวหน้า ภายใต้อิทธิพลการแพร่กระจายตัวความชื้นจากภายในสู่ผิวหน้าวัสดุ อุณหภูมิของวัสดุเริ่มสูงกว่า อุณหภูมิฐานเปียก การแพร่ของความชื้นจากภายในโครงสร้างวัสดุเป็นปัจจัยควบคุมอัตราการอบแห้ง [51], [54], [55]



ภาพประกอบ 2 อัตราการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และอัตราการอบแห้งลดลง
ที่มา: Okos และคณะ (2007) [57]

2.4 ทฤษฎีการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ

ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ทำให้เกิดความร้อนในอาหารได้อย่างรวดเร็ว ใช้เวลาสั้น ประหยัดเวลา ดังนั้นจึงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตได้มากยิ่งขึ้น อุณหภูมิสูงขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ในเวลาสั้นทำให้สามารถรักษาคูณภาพด้านสี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัสได้ดีกว่าวิธีการใช้ความร้อนแบบ

ดั้งเดิม การสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการต่ำกว่าวิธีดั้งเดิม ประหยัดพลังงาน ควบคุมได้ง่าย ปลอดภัย ตัวเครื่องมีขนาดเล็กและเบา ยืดอายุผลิตภัณฑ์ได้ยาวนานขึ้น ใช้กับผลิตภัณฑ์ได้หลากหลาย และสามารถสร้างเครื่องมือได้เองภายในประเทศ [58]

การใช้คลื่นไมโครเวฟในการแปรรูปอาหารถือเป็นเทคโนโลยีที่ทันสมัย ในต่างประเทศได้ประยุกต์ใช้ไมโครเวฟในกระบวนการให้ความร้อนในอุตสาหกรรมต่างๆ อย่างแพร่หลาย เช่น เกษตร อาหาร ยางพารา สิ่งทอ ไม้ กระดาษ พลาสติก อีกทั้งในวงการแพทย์ และเคมี อย่างไรก็ตามสำหรับในประเทศไทยนิยมใช้ไมโครเวฟภายในครัวเรือนและร้านค้าบริการอาหารเท่านั้น การนำเทคโนโลยีดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมยังไม่แพร่หลาย เนื่องจากเตาไมโครเวฟในระดับอุตสาหกรรมยังมีราคาสูง ประกอบกับการวิจัยทางด้านนี้น้อยและมีความซับซ้อนสูง การนำคลื่นไมโครเวฟมาใช้ในการแปรรูปอาหาร ผู้ปฏิบัติต้องมีความเข้าใจเกี่ยวกับอาหาร เครื่องจักร กระบวนการผลิต และบรรจุภัณฑ์ รวมถึงอันตรายกิริยาระหว่างไมโครเวฟและอาหารอย่างลึกซึ้ง นอกจากนี้ยังต้องตรวจสอบการรั่วไหลของคลื่นไมโครเวฟ เพื่อความปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน และควบคุมการส่งกำลังไมโครเวฟภายในระบบที่ได้พัฒนาขึ้น [56], [59]

ในอุตสาหกรรมอาหารสามารถนำไมโครเวฟมาใช้ในการกระบวนการต่างๆ ได้หลายกระบวนการ ได้แก่ การลวก (Blanching) การทำให้สุก (Cooking) การทำแห้ง (Drying) การพาสเจอร์ไรซ์ (Pasteurizing) การสเตอริไลซ์ (Sterilizing) การละลายน้ำแข็ง (Thawing) การอบ (Baking) การทำพอง (Puffing) รวมทั้งกระบวนการอื่นๆ เนื่องจากข้อได้เปรียบในเรื่องการเกิดความร้อนในอัตราที่รวดเร็ว สามารถประหยัดพลังงานได้มาก และสามารถคงคุณค่าทางโภชนาการไว้ได้สูง [60] และสูญเสียคุณภาพด้านต่างๆ เช่น กลิ่น รส สี เนื้อสัมผัส และคุณค่าทางโภชนาการน้อยกว่าการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม ในปัจจุบันเนื่องจากกระแสความต้องการของผู้บริโภคทางด้านอาหารได้มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม โดยผู้บริโภคต้องการอาหารที่มีคุณภาพที่ใกล้เคียงกับของสด คุณภาพสูง สะดวกสบาย และรวดเร็วในการเตรียม อีกทั้งมีอายุการเก็บรักษาอย่างเพียงพอและต้องปลอดภัยในการบริโภค จึงทำให้มีการศึกษาวิจัยการใช้ไมโครเวฟในกระบวนการแปรรูปอาหารมากขึ้น

2.4.1 การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ (Microwave drying)

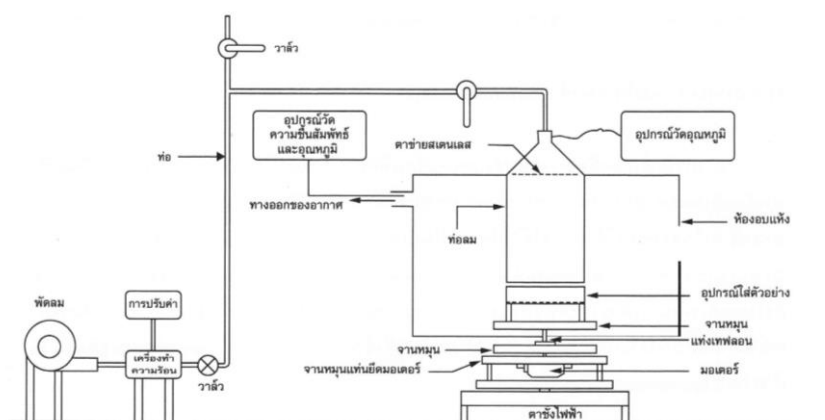
การกำจัดน้ำออกด้วยการอบแห้งแบบลมร้อนเป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่ผลเสียทางด้านลักษณะทางกายภาพ ทางประสาทสัมผัส อันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างและปฏิกิริยาทางเคมี ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้สำหรับการอบแห้งวิธีดังกล่าว แต่การใช้ไมโครเวฟในกระบวนการอบแห้งทำให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้น ช่วยปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้าย การหตุตัวเกิดขึ้นน้อยมาก และอาจพองตัวได้ อันเนื่องจากการอบแห้งด้วยไมโครเวฟสามารถเร่งกระบวนการแพร่ของน้ำในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง เพราะน้ำภายในวัสดุจะเกิดแรงดันไอน้ำได้ดีกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเนื่องจากอุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้นได้เร็วกว่า [60]

นักวิทยาศาสตร์บางท่านได้นำการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟมาใช้ร่วมกับกระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อนในผลิตภัณฑ์จำพวกผักและผลไม้ดังกล่าวประกอบ 3 กระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อนจะใช้เวลาในการอบแห้งที่ยาวนาน แต่หากนำคลื่นไมโครเวฟมาช่วยเพิ่มอัตราการอบแห้งที่ช่วงปลายของการอบแห้งหรือช่วงอัตราการอบแห้งลดลง จะสามารถช่วยย่นเวลาของการอบแห้งลงได้ อีกทั้งยังช่วยเพิ่มความสามารถในการดูน้ำกลับหลังจากการอบแห้ง และการหดตัวของผลิตภัณฑ์ลดลงด้วย นอกจากนี้ยังมีนักวิจัยอีกกลุ่มหนึ่งที่ประยุกต์ใช้คลื่นไมโครเวฟมาช่วยในกระบวนการอบแห้งร่วมกับกระบวนการอื่นๆ เพื่อเพิ่มคุณภาพและมูลค่าของผลิตภัณฑ์ เช่น การใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับการอบแห้งด้วยสภาวะสุญญากาศ หรือการใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับการอบแห้งในสภาวะเยือกแข็งสุญญากาศ (Microwave freeze drying) [60] ซึ่งกล่าวรายละเอียดในส่วนถัดไป

1) ช่วงเกิดความร้อน ซึ่งพลังงานไมโครเวฟถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนภายในวัสดุขึ้น และทำให้อุณหภูมิของวัสดุขึ้นเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาที่ผ่านไป เมื่อความดันไอน้ำของวัสดุสูงกว่าความดันของสิ่งแวดล้อม ณ ขณะนั้น วัสดุจึงเริ่มเกิดการสูญเสียความชื้นขึ้นไปอัตราที่น้อย

2) ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ เมื่ออุณหภูมิของวัสดุเริ่มสูงขึ้นอย่างคงที่ พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกใช้เพื่อการระเหยของความชื้น

3) ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง เกิดขึ้นเมื่อพลังงานที่ใช้ในการระเหยของความชื้นน้อยกว่าพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้น อุณหภูมิบางตำแหน่งของวัสดุจะเพิ่มขึ้นสูงกว่าจุดเดือดของน้ำ และทำให้เกิดความร้อนที่มากเกินไป [61] การอบแห้งด้วยไมโครเวฟทำให้อัตราการแพร่ของน้ำเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเกิดความร้อนที่มากภายในวัสดุ ระยะเวลาการอบแห้ง เนื่องจากผิวของวัสดุจะมีปริมาณความชื้นแพร่ไปมากกว่าการอบแห้งแบบปกติ ทำให้ลดการใช้พลังงานในการอบแห้ง [62]



ภาพประกอบ 3 ระบบการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ

ที่มา : Zhang และคณะ (2006) [61]

2.4.2 ข้อจำกัดของการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ถึงแม้ว่าคลื่นไมโครเวฟจะช่วยทำให้เกิดอัตราการอบแห้งที่รวดเร็ว แต่ข้อจำกัดของการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ นั่นคือ ความไม่สม่ำเสมอของอุณหภูมิหรือความชื้นของผลิตภัณฑ์ในระหว่างการอบแห้ง อันเนื่องมาจากความไม่สม่ำเสมอของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า อุณหภูมิของวัสดุบริเวณผิวหน้าหรือส่วนขอบจะร้อนเร็วมากทำให้เกิดการไหม้ อาจทำลายกลีกรสของผลิตภัณฑ์สุดท้ายได้ และผลิตภัณฑ์อาจเกิดการสูญเสียคุณภาพทางประสาทสัมผัส ในบางกรณีทำให้เกิดลักษณะ Puffing หรือการพองตัวของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นวัสดุหรืออาหารควรมีการเคลื่อนที่เพื่อป้องกันบริเวณที่เกิดความร้อนมากเกินไป นอกจากนี้การออกแบบเครื่องไม่เพียงแต่ออกแบบเพื่อคงคุณภาพของผลิตภัณฑ์เท่านั้น แต่ยังต้องพิจารณาถึงการสะท้อนกลับของคลื่นไมโครเวฟสู่แมกนีตรอนด้วย ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของแมกนีตรอนได้ [60], [61]

2.4.3 การใช้พลังงานไมโครเวฟร่วมในการอบแห้งด้วยลมร้อน

การใช้พลังงานไมโครเวฟร่วมในการอบแห้งด้วยลมร้อนประกอบด้วย 3 แนวทางดังนี้

1) การใช้พลังงานไมโครเวฟ ณ จุดเริ่มต้นของการระเหยน้ำภายในวัสดุ ภายในวัสดุจะเกิดความร้อนสูงอย่างรวดเร็วจนน้ำสามารถระเหยเป็นไอได้อย่างรวดเร็ว ไอน้ำจะถูกดันออกจากภายนอกทำให้เกิดการระเหยน้ำที่ผิวของวัสดุ อัตราการอบแห้งสูงขึ้นทำให้เกิดโครงสร้างความเป็นรูพรุนภายในวัสดุ ซึ่งส่งผลกระทบต่อเคลื่อนที่ของน้ำออกสู่ภายนอกหรือความสามารถการดูดซับน้ำของวัสดุในกระบวนการคืนรูป

2) การนำพลังงานไมโครเวฟมาใช้ร่วมกับลมร้อนในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant-rate period) เมื่อการอบแห้งด้วยลมร้อนทั่วไปอยู่ในช่วงนี้การระเหยน้ำจะช้ามากทำให้เสียเวลาและพลังงานในการอบแห้งมาก ดังนั้นการนำพลังงานไมโครเวฟมาใช้ในช่วงนี้จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์สูงขึ้น

3) การนำพลังงานไมโครเวฟมาใช้ร่วมกับลมร้อนในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling-rate period) ในกรณีนี้ผิววัสดุจะแห้งและมีความชื้นหนาแน่นบริเวณศูนย์กลางของวัสดุ ซึ่งการใช้พลังงานไมโครเวฟ ณ ช่วงเวลานี้จะทำให้เกิดความร้อนภายในจนแรงดันไอน้ำสามารถดันน้ำที่เหลือภายในเคลื่อนที่สู่ผิววัสดุพร้อมกับการระเหยด้วยลมร้อนต่อไป

2.4.4 งานวิจัยเกี่ยวข้องกับการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับการใช้คลื่นไมโครเวฟ

คลื่นไมโครเวฟถูกนำมาใช้ในการอบแห้งพาสต้าโดยหากใช้ระบบนี้ในการควบคุมความชื้นในกระบวนการอบแห้งผลิตภัณฑ์เส้นพาสต้าและมักกะโรนีจะใช้ระยะเวลาน้อยกว่า 1 ชั่วโมง ในขณะที่หากเป็นระบบดั้งเดิมต้องใช้เวลามากกว่า 8 ชั่วโมง และยังสามารถรองรับการอบแห้งผลิตภัณฑ์จำนวนปริมาณ 3,000 ปอนด์ต่อชั่วโมง โดยที่ใช้กำลังไฟฟ้า 60 กิโลวัตต์ และความถี่ 915 เมกะเฮิร์ต

จึงเป็นการประหยัดทั้งพลังงาน ค่าดำเนินการ และค่าบำรุงรักษา นอกจากนั้นยังเป็นที่ยอมรับให้ใช้ได้ ในผลิตภัณฑ์ทางด้านชีวภาพที่สามารถลดการปนเปื้อนอนุภาคขนาดเล็กและแมลงที่ติดมาได้เป็นอย่างดี [56]

สิริชัย และคณะ (2554) [63] ได้ศึกษาการอบแห้งของเส้นก๋วยเตี๋ยวด้วยเครื่องไมโครเวฟแบบสายพาน พบว่า อัตราการอบแห้งด้วยไมโครเวฟสูงกว่าอัตราการอบแห้งด้วยการอบแห้งแบบถาดมาก เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟจะทำให้โมเลกุลของน้ำสั่น เกิดความร้อนและระเหยตัวในทุกจุดของเส้นก๋วยเตี๋ยว แตกต่างจากการอบแห้งแบบถาดด้วยลมร้อนที่ต้องอาศัยการแพร่ของน้ำภายในชั้นอาหารจนถึงผิวหน้าแล้วจึงระเหยออกไป

เมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งลำไยด้วยลมร้อนและการใช้คลื่นไมโครเวฟด้วยระบบต่อเนื่อง โดยใช้ความเร็วสายพาน 0.02 เมตรต่อวินาที ณ กำลังไฟฟ้า 1 กิโลวัตต์ อบแห้งจนความชื้นลดลงต่ำกว่าร้อยละ 18 ฐานเปียก และค่าปริมาณน้ำอิสระไม่เกิน 0.6 พบว่าระยะเวลาอบแห้งลดลงร้อยละ 65.4 พลังงานและต้นทุนลดลงร้อยละ 88.5 เมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งด้วยลมร้อนโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบถาดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส [64]

สิริชัย และคณะ (2553) [65] ได้ทำการอบแห้งกล้วยและขนุน โดยพบว่า ใช้เวลาประมาณ 38 นาที ซึ่งการอบแห้งกล้วยด้วยไมโครเวฟใช้ระยะเวลาเร็วกว่าการอบแห้งด้วยวิธีการอบลมร้อนถึง 15 เท่า ส่วนขนุนใช้เวลาเร็วกว่าถึง 21 เท่า และสีของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้งจากทั้งสองวิธีนั้น ส่วนมากไม่แตกต่างกัน นอกจากนั้น สิริชัย และคณะ (2554) [66] ยังได้ศึกษาการอบแห้งเครื่องต้มยำ ได้แก่ ตะไคร้ ใบมะกรูด เห็ด พริกขี้หนู และข่า ซึ่งเวลาที่ใช้ในการอบแห้งนั้นมีค่าน้อยกว่าการอบด้วยตู้อบลมร้อนประมาณ 10-12 เท่า เมื่อนำไปต้มเครื่องต้มยำที่อบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟจะมีลักษณะทางประสาทสัมผัส และความสามารถในการดูดน้ำกลับที่ดีกว่า และค่าสีของผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งไมโครเวฟแบบสายพานไหลต่อเนื่อง มีค่าไม่แตกต่างกันกับกับอบแห้งแบบปกติตลอดอายุการเก็บรักษา

สิริชัย และคณะ (2554) [67] พบว่า การอบแห้งกุ้งด้วยลมร้อนทำให้ได้กุ้งแห้งที่ได้มีลักษณะแห้งแข็ง เนื้อเหนียว และไม่สามารถดูดน้ำกลับเมื่อนำกุ้งไปคืนรูป ดังนั้นจึงต้องมีการปฏิบัติต่อกุ้งโดยการเจาะรูจำนวนมากที่ตัวกุ้งและจุ่มในน้ำสัปดาห์ละครั้งเพื่อให้เอนไซม์บรอมีเลนย่อยโปรตีนบางส่วนในกุ้ง การอบแห้งกุ้งด้วยไมโครเวฟแบบสายพานไหลต่อเนื่องลดการใช้พลังงาน ลดระยะเวลา และลดค่าใช้จ่ายเมื่อเปรียบเทียบกับคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัส พบว่าทั้งการอบแห้งกุ้งด้วยเครื่องไมโครเวฟแบบสายพานไหลต่อเนื่องและการอบแห้งแบบลมร้อนไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

แต่การอบแห้งด้วยไมโครเวฟในบางผลิตภัณฑ์ยังมีข้อจำกัดอยู่บ้าง สิริชัย และคณะ (2553) [68] พบว่าการอบแห้งด้วยไมโครเวฟกับมะพร้าวชิ้นเล็ก มีคุณภาพของสีที่ด้อยกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน ซึ่งเกิดจากการที่มีรอยไหม้ แต่ในทางตรงข้าม เมื่อหั่นมะพร้าวให้หนาขึ้นกลับไม่พบปัญหาการ

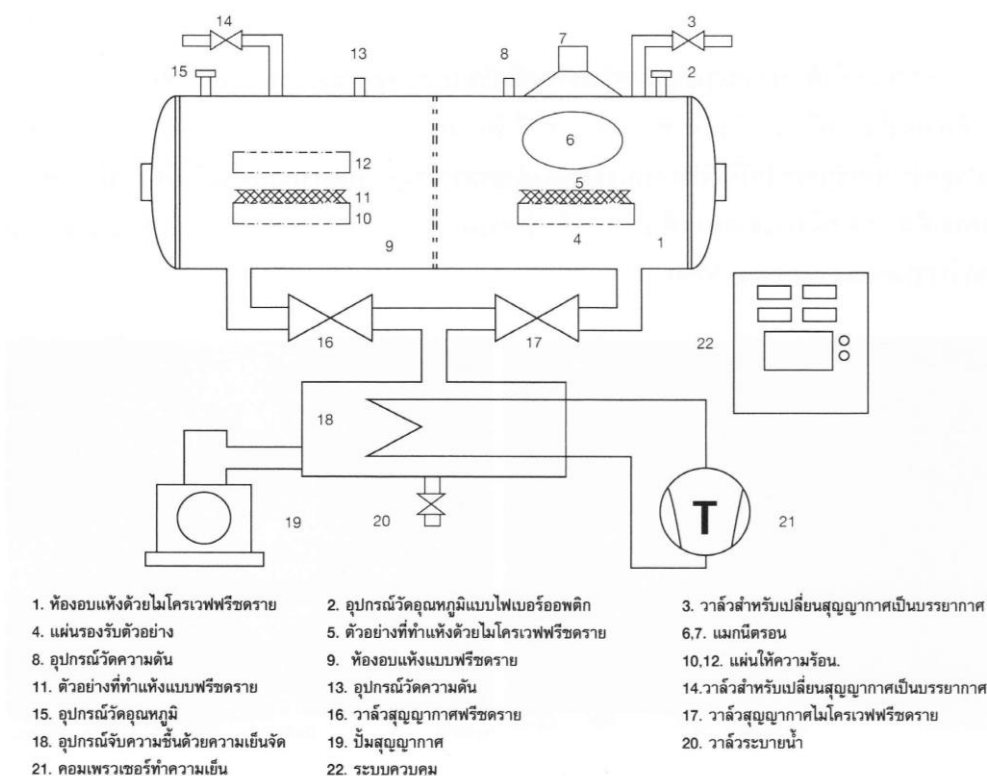
ใหม่ที่สูงขึ้นเมื่อผ่านคลื่นไมโครเวฟ ขณะเดียวกันเมื่อใช้ไมโครเวฟในการทำแห้งมะพร้าวขึ้น จะเร็วกว่าการทำแห้งแบบถาด 1.34 เท่า

2.4.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบการอบแห้งชนิดอื่นๆ

จากข้อดีและข้อจำกัดของการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ จึงมีการใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบอบแห้งแบบอื่นๆ เพื่อพัฒนาศักยภาพของการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยคำนึงถึงความเหมาะสมในการอบแห้ง คุณภาพของผลิตภัณฑ์ และการประหยัดพลังงาน เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าต่อเศรษฐกิจ และปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการและลดข้อจำกัดของพลังงานไมโครเวฟโดยใช้ระบบอื่นร่วม [56]

1) ระบบอบแห้งสุญญากาศร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ เพื่อลดปัญหาการเสื่อมคุณภาพทางกายภาพ เช่น การไหม้ หรือเกิดสีเข้มอันไม่พึงประสงค์ หรือแม้แต่ปัญหาการกระจายตัวของเม็ดความร้อนเนื่องจากการใช้ระบบสุญญากาศ ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของไอน้ำจำนวนมากที่ผิวหน้าของอาหารเพิ่มมากขึ้น [69] การอบแห้งด้วยระบบสุญญากาศร่วมกับคลื่นไมโครเวฟลดระยะเวลาการอบแห้งใบสาระแหน่ลงอย่างมาก อีกทั้งค่าความสว่าง ค่าสีเขียว และค่าสีเหลืองมีค่ามากกว่าการอบแห้งแบบปกติ ค่าการดูดซึมน้ำกลับของใบสาระแหน่ที่ผ่านการอบแห้งด้วยระบบสุญญากาศร่วมกับคลื่นไมโครเวฟมีค่าสูงกว่าการอบแห้งแบบปกติ นอกจากนี้ยังพบว่า การอบแห้งใบสาระแหน่ด้วยระบบดังกล่าวทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณรطوبةมากกว่า [70]

2) ระบบอบแห้งแช่เยือกแข็งร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ (Microwave-freeze drying) ดังภาพประกอบ 4 เป็นกระบวนการอบแห้งอาหารที่อยู่ในสถานะเยือกแข็ง ทำให้ผลิตภัณฑ์มีโครงสร้างแข็งแรงไม่หืดตัว และมีปริมาณรطوبةสูง ทำให้มีคุณสมบัติการดูดคืนน้ำกลับที่ดีและใกล้เคียงกับวัตถุดิบสดก่อนการอบแห้ง การใช้คลื่นไมโครเวฟสามารถช่วยลดระยะเวลาการระเหยน้ำและช่วยคงปริมาณสารอาหารได้ไม่แตกต่างจากการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งแบบปกติ ปัญหาหลักของการอบแห้งแบบนี้คือมีระยะเวลาการอบแห้งที่นาน ซึ่งต้องใช้พลังงานสูง อีกทั้งมีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำ ซึ่งการใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมในระบบการอบแห้งนี้ทำให้อัตราการให้ความร้อนเพิ่มขึ้น อบแห้งได้รวดเร็วขึ้นอย่างมาก [69], [71]

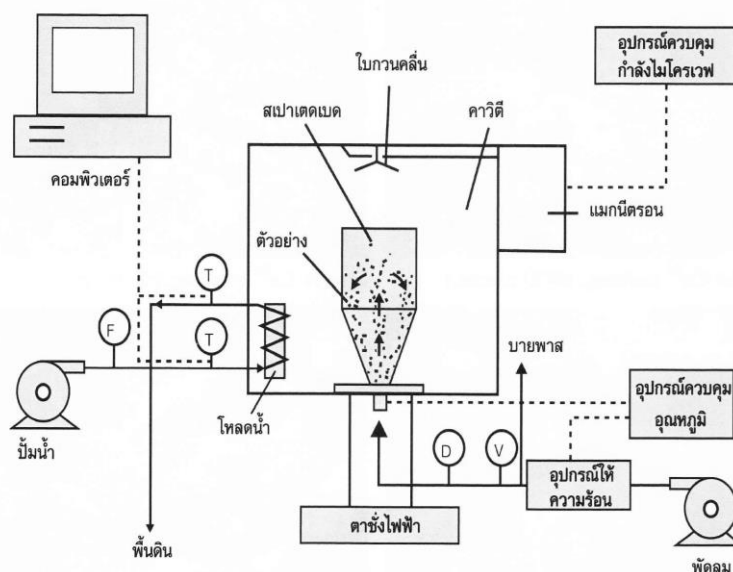


ภาพประกอบ 4 แผนผังการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ

ที่มา: Wang และคณะ (2010) [71]

จากการเปรียบเทียบการอบแห้งมันฝรั่งที่ผ่านและไม่ผ่านการลวกแบบแช่เยือกแข็งอย่างเดียวและร่วมกันคลื่นไมโครเวฟ พบว่า การอบแห้งโดยใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมทำให้ระยะเวลาการอบแห้งลดลงร้อยละ 37 เมื่อการอบแห้งร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ ตัวอย่างที่ผ่านการลวกมีอัตราการอบแห้งที่น้อยกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการลวก เนื่องจากสมบัติไดอิเล็กทริกของตัวอย่างมันฝรั่งเปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการลวก มีการสูญเสียองค์ประกอบของเคมี และเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอันเนื่องจากการเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ช อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้ไมโครเวฟร่วม กลับพบว่าปริมาณวิตามินซี น้ำตาลรีดิวซ์ (Reducing sugar) ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด และปริมาณสตาร์ชไม่แตกต่างกัน [71]

3) การอบแห้งแบบสเปาเตดเบด (Spouted bed) ร่วมกับไมโครเวฟ จากข้อจำกัดในการอบแห้งด้วยไมโครเวฟในเรื่องความไม่สม่ำเสมอของความร้อนและความชื้นในระหว่างการอบแห้ง ระบบการอบแห้งนี้ทำให้วัสดุเกิดการเคลื่อนที่ไปยังทุกส่วนของคาวิตี (Cavity) จากลมร้อนด้านล่างทำให้เกิดการผสมและกระจายตัวได้ดีดังแสดงในภาพประกอบ 5 ทำให้อัตราการอบแห้งรวดเร็วขึ้นและช่วยปรับปรุงคุณภาพสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ [61], [69]



D อุณหภูมิจุดน้ำค้าง F อัตราการไหล T อุณหภูมิ V ความเร็ว

ภาพประกอบ 5 ระบบการอบแห้งแบบสเปาเตดเบตร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ

ที่มา: Zhang และคณะ (2006)

การอบแห้งด้วยระบบสเปาเตดเบตร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ ทำให้ Parboiled wheat และ Parboiled bulgur มีโครงสร้างความเป็นรูพรุนเพิ่มมากขึ้น และความเป็นทรงกลมเพิ่มมากขึ้น แต่ความหนาแน่นปรากฏลดลง เมื่อเทียบกับการไม่ใช้คลื่นไมโครเวฟ [72]

โดยทั่วไปสมบัติทางกายภาพของ Parboiled wheat อบแห้งที่สภาวะอุณหภูมิสูง หรือใช้กำลังคลื่นไมโครเวฟมีความแตกต่างไปจากการอบแห้งแบบไม่ใช้คลื่นไมโครเวฟ อีกทั้งลดระยะเวลาการอบแห้งอย่างมาก แต่อย่างไรก็ตามต้องพิจารณาถึง %yield ของข้าวด้วย เนื่องจากปริมาณรูพรุนที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้ความแข็งแรงของตัวอย่างข้าวมีน้อยลงและแตกง่ายในระหว่างการสี และการอบแห้งร่วมกับคลื่นไมโครเวฟทำให้เกิดปริมาณรูพรุนและการเสีสภาพของโปรตีน และเกิดเป็นโครงสร้างเหมือนรังผึ้ง [72]

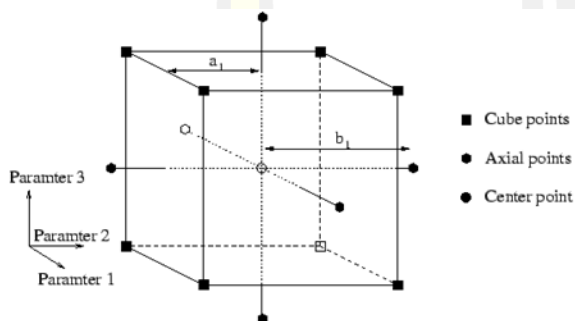
2.5 วิธีพื้นผิวตอบสนอง

วิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology) เป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์หรือสถิติที่เป็นประโยชน์ในการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ปัญหา ซึ่งแสดงผลตอบสนองต่อผลจากตัวแปรต่างๆ เพื่อที่จะได้ค่าที่ดีที่สุดหรือเหมาะสมที่สุดต่อผลนั้น โดยส่วนใหญ่วิธีพื้นผิวตอบสนองจะแสดงผลในรูปของกราฟ อาจจะเป็นโครงร่างของพื้นผิวตอบสนอง โดยปัญหาส่วนใหญ่จะไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างผิวตอบสนองกับตัวแปรอิสระ

RSM เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพกับกระบวนการที่มีความซับซ้อน จึงทำให้ง่ายในการจัดการและอธิบายผลเมื่อเทียบกับวิธีการอื่น การออกแบบการทดลองที่ส่วนใหญ่นิยมใช้จะเป็นการออกแบบการทดลองเพื่อหารูปแบบของสมการอันดับสอง โดยจะเน้นไปที่การสร้างแบบจำลองควอดราติก (Quadratic) ของผลตอบสนอง ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 2 วิธี คือ

2.5.1 การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central composite design)

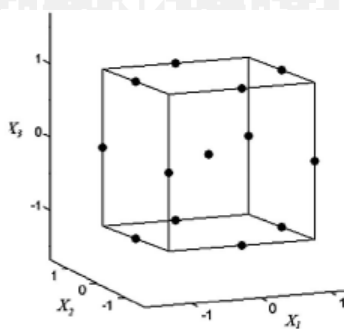
เป็นการออกแบบ 5 ระดับ $(-2, -1, 0, 1, 2)$ เป็นหนึ่งในวิธีการหาพื้นผิวตอบสนองที่นิยมใช้ เพื่อหากระบวนการที่เหมาะสมโดยทั่วไป จะประกอบด้วย 2^k แฟคทอเรียลที่มี nf รันซึ่ง 2^k รันในแนวแกนหรือแนวรูปตัวดาว และ nc รันที่จุดศูนย์กลางดังแสดงในภาพประกอบ 6



ภาพประกอบ 6 การออกแบบส่วนประสมกลาง

2.5.2 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken design)

เป็นการออกแบบ 3 ระดับ $(-1, 0, 1)$ สำหรับพิตพื้นผิวตอบสนอง การออกแบบนี้ถูกสร้างขึ้นจากการรวมการออกแบบแฟคทอเรียล 2^k กับการออกแบบบล็อกไม่สมบูรณ์ ผลของการออกแบบมีประสิทธิภาพในด้านจำนวนของการรันที่ต้องการ การออกแบบนี้จึงมีความสามารถในการหมุนหรือเกือบหมุนได้ เนื่องจากเป็นการออกแบบรูปทรงกลมที่มีจุดวางอยู่บนรูปทรงกลมรัศมี 2 ดังแสดงในภาพประกอบ 7

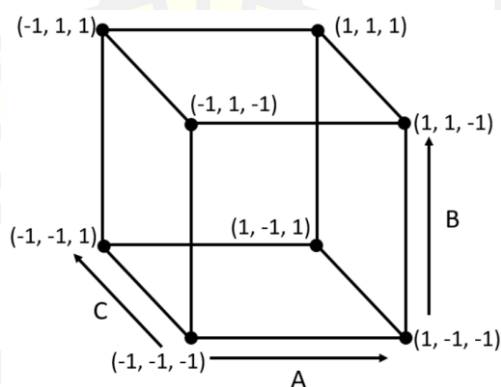


ภาพประกอบ 7 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

การออกแบบส่วนประสมกลางจะใช้ในกรณีการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนไม่เหมาะสม เนื่องจากการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนจะไม่รวมเอาจุดมุมของลูกบาศก์มา ส่วนข้อเปรียบเทียบระหว่างการออกแบบส่วนประสมกลางกับการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนนั้น สำหรับการสร้างแบบการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน จะใช้จำนวนน้อยกว่าการออกแบบส่วนประสมกลางเนื่องจากต้องการปัจจัยเพียง 3 ระดับ ต่างจากการออกแบบส่วนประสมกลางที่ต้องการถึง 5 ระดับ แต่ในด้านของคุณภาพนั้นการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน จะมีคุณภาพต่ำกว่าการออกแบบส่วนประสมกลาง เพราะว่าการออกแบบส่วนประสมกลางไม่มีจุดการทดลองที่มุมลูกบาศก์ซึ่งอาจมีประโยชน์เมื่อผู้ทดลองหลีกเลี่ยงปัจจัยที่มีความสำคัญสูง ราคาแพง และเป็นไปไม่ได้

2.5.3 การออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ

การทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบเป็นการทดลองที่สร้างขึ้นสำหรับศึกษาปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไปได้ทุกกรณีที่เป็นไปได้ สามารถศึกษาผลกระทบหลัก (Main effect) ซึ่งเป็นผลกระทบของปัจจัยเดี่ยว (Main factors) และผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่างปัจจัย (อันตรกิริยา หรือ Interaction factors) จำนวนวิธีปฏิบัติทั้งหมดที่เป็นไปได้ (จำนวนการทดลองโดยไม่ทำซ้ำ) มีค่าเท่ากับ a^k โดยที่ a = จำนวนระดับของแต่ละปัจจัยที่ศึกษา k = จำนวนปัจจัย ตัวอย่างเช่น การศึกษา 5 ปัจจัย แต่ละปัจจัยศึกษาที่ 3 ระดับ จำนวนของวิธีปฏิบัติทั้งหมดคือ 3^5 จะเรียกแผนการทดลองว่าการทดลอง 3^5 แฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (3^5 Full factorial experiment) ตาราง 2 แสดงตัวอย่างแผนการทดลอง 2^3 แฟกทอเรียล ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตได้ดังภาพประกอบ 8 อย่างไรก็ตามแผนการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full factorial experiment) มีข้อเสีย คือ ค่าใช้จ่ายสูง ใช้เวลา และทรัพยากรมากตามจำนวนระดับของปัจจัยและจำนวนปัจจัยที่ศึกษา



ภาพประกอบ 8 รูปทรงเรขาคณิตสำหรับแผนการทดลอง 2^3 แฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ

ตาราง 2 ตัวอย่างแผนการทดลอง 2^3 แฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ

ลำดับ	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1
2	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1
3	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1
4	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1
5	+1	-1	-1	-1	-1	+1	-1
6	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1
7	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1

เทคนิค RSM มีประโยชน์ที่สำคัญ คือ จำนวนชุดการทดลองที่ออกแบบโดยใช้ RSM จะมีจำนวนชุดการทดลองที่น้อยกว่า เนื่องจาก RSM จะนำเสนอข้อมูลจำนวนมากจากการทดลองเพียงไม่กี่ครั้ง และ RSM มีความเป็นไปได้ที่จะเจอผลกระทบภายในจากตัวแปรอิสระ นอกจากนี้โมเดลสมการอย่างง่ายของ RSM จะเพิ่มความเข้าใจต่อผลที่เกิดจากการผสมกันของตัวแปรอิสระต่างๆ จึงอาจกล่าวได้ว่า RSM เป็นเครื่องมือที่เป็นประโยชน์สำหรับการหาจุดที่เหมาะสมของกระบวนการทางเคมีและกระบวนการทางชีวเคมี

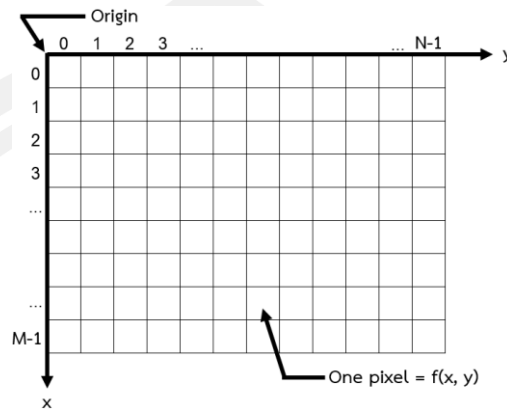
2.6 เทคนิคการประมวลผลภาพดิจิทัล

การประมวลผลภาพ เป็นการแปลงข้อมูลภาพให้อยู่ในรูปแบบข้อมูลดิจิทัล หรือข้อมูลเชิงตัวเลข โดยวัตถุประสงค์ของการประมวลผลภาพแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ การปรับปรุงคุณภาพของภาพเพื่อให้มนุษย์สามารถมองเห็นรายละเอียดได้ชัดเจนมากขึ้น และเพื่อให้คอมพิวเตอร์สามารถแปลความหมายภาพได้ (Computer interpretation) การประยุกต์ใช้งานด้านการประมวลผลสัญญาณภาพ เช่น ภาพนิ่ง หรือภาพวิดีโอ เพื่อให้คอมพิวเตอร์ทราบว่าภาพนั้นคือภาพอะไร หรือมีสิ่งที่น่าสนใจอยู่ในภาพหรือไม่ โดยที่ไม่ต้องใช้สายตาของมนุษย์มาช่วยพิจารณา การคำนวณสำหรับการประมวลผลภาพมีหลายวิธี เช่น การแปลงข้อมูลภาพ การกรองภาพ การปรับคุณภาพของภาพ การแบ่งภาพและการหาขอบภาพในวัตถุ และอื่นๆ [73] ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.6.1 ภาพดิจิทัล

ภาพดิจิทัล คือ ภาพที่แสดงเป็นแอสเรย์ (Array) หลายมิติ หรือเป็นเมทริกซ์เชิงตัวเลข ภาพดิจิทัลจะแสดงในลักษณะสองมิติ จะมีขนาดความกว้างและความสูงของภาพบนแนวแกน X และแกน Y ส่วนจุดใดๆ ที่อยู่บนระนาบ XY จะเรียกแทนจุดนั้นว่า พิกเซล (Pixel) แต่ละพิกเซลจะแสดง

ค่าความเข้มแสงของภาพเป็นฟังก์ชัน (x, y) หรือ $f(x, y)$ ตัวอย่างดังภาพประกอบ 9 แสดงจุดพิกัดบนภาพดิจิทัลที่มี M แถว และ N คอลัมน์ มีจุดกำเนิด คือ $(x, y) = (0, 0)$



ภาพประกอบ 9 จุดพิกัดบนภาพดิจิทัล

ภาพมีการจำแนกภาพออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ ภาพขาวดำ ภาพระดับเทา และภาพสี ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1) ภาพขาวดำ (Black and white image) หรือภาพไบนารี (Binary) ที่แต่ละพิกเซลมีค่าหนึ่งบิต สามารถแสดงได้เพียงสองสี คือ สีขาวแทนด้วย 1 และสีดำแทนด้วย 0 แสดงดังภาพประกอบ 10



1	1	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0
0	0	1	0	0	0
0	0	0	1	0	0
0	0	0	1	1	0
0	0	0	0	0	1

ภาพประกอบ 10 ภาพไบนารี

ที่มา: McAndrew (2004) [74]

2) ภาพระดับเทา (Gray scale image) คือ ภาพที่มีระดับความเข้มแต่ละพิกเซลสอดคล้องกับความเข้มแสงปกติแสดงในระดับสีเทา ซึ่งแต่ละพิกเซลสามารถแสดงเฉดสีจาก 0 (สีดำ) ถึง 255 (สีขาว) มีขนาด 8 บิต หรือ 1 ไบต์ แสดงดังภาพประกอบ 11



230	229	232	234	235	232	148
237	236	236	234	233	234	152
255	255	255	251	230	236	161
99	90	67	37	94	247	130
222	152	255	129	129	246	132
154	199	255	150	189	241	147
216	132	162	163	170	239	122

ภาพประกอบ 11 ภาพระดับเทา

ที่มา: McAndrew (2004) [74]

3) ภาพสี (Color image) หรือภาพ RGB คือ ภาพสีที่แต่ละพิกเซลมีส่วนประกอบของเวกเตอร์แทนสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน แต่ละสีสามารถแสดงค่าความเข้มแสงได้ในช่วง 0-255 ทำให้แต่ละพิกเซลสามารถแสดงสีที่เป็นไปได้ทั้งหมด 256^3 เท่ากับ 16,777,216 สี และแต่ละพิกเซลมีขนาด 24 บิต แสดงดังภาพประกอบ 12



49	55	56	57	52	53
58	60	60	58	55	57
58	58	54	53	55	56
83	78	72	69	68	69
88	91	91	84	83	82
69	76	83	78	76	75
61	69	73	78	76	76

Red

64	76	82	79	78	78
93	93	91	91	86	86
88	82	88	90	88	89
125	119	113	108	111	110
137	136	132	128	126	120
105	108	114	114	118	113
96	103	112	108	111	107

Green

66	80	77	80	87	77
81	93	96	99	86	85
83	83	91	94	92	88
135	128	126	112	107	106
141	129	129	117	115	101
95	99	109	108	112	109
84	93	107	101	105	102

Blue

ภาพประกอบ 12 ภาพสี

ที่มา: McAndrew (2004) [74]

2.6.2 การประมวลผลภาพดิจิทัล

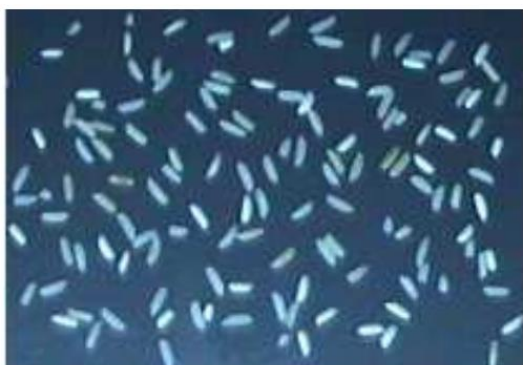
การประมวลผลภาพดิจิทัล เป็นการนำข้อมูลดิจิทัลผ่านขั้นตอนต่างๆ ด้วยคอมพิวเตอร์ เช่น การทำให้ภาพมีความคมชัดมากขึ้น การกำจัดสัญญาณรบกวนออกจากภาพ การแบ่งส่วนของวัตถุที่สนใจออกมาจากภาพ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ต้องการทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ ซึ่งจะเห็นได้ว่าขั้นตอนการประมวลผลภาพดิจิทัลมีหลายขั้นตอน แต่ในการทำงานแต่ละงานไม่จำเป็นต้องทำทุกขั้นตอนขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของงานนั้นๆ และสามารถอธิบายขั้นตอนพื้นฐานของการประมวลผลภาพด้วยคอมพิวเตอร์ดังต่อไปนี้

1) การจำกัดสภาพแวดล้อม (Scene constraint) เพื่อลดความซับซ้อนในการประมวลผลภาพให้มากที่สุด เนื่องจากความสามารถในการมองเห็นและรับรู้ของอุปกรณ์ประมวลผลมีจำกัดและไม่เทียบเท่ามนุษย์ จึงต้องช่วยลดความยุ่งยากของการประมวลผล ได้แก่

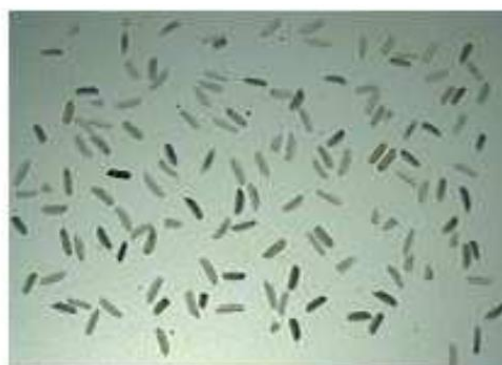
1.1) การจัดการกับวัตถุ ซึ่งหากไม่จัดการกับการวางตัวของวัตถุ อุปกรณ์ประมวลผลต้องหาทิศทางของวัตถุเอง

1.2) ระยะระหว่างกล้องหรือเลนส์ถึงวัตถุ ตัวแปรเหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดขนาดของวัตถุที่ระบบมองเห็น

1.3) การจัดการเรื่องแสง แสงเป็นองค์ประกอบสำคัญมาก เนื่องจากการมองเห็นภาพของระบบอัตโนมัติเกิดจากการที่แสงตกกระทบวัตถุ และสะท้อนผ่านเลนส์เข้าตัวเซนเซอร์รับภาพของกล้อง ซึ่งการจัดการเกี่ยวกับแสงนั้นจำเป็นต้องพิจารณาเรื่องการใช้แหล่งกำเนิดแสง ตัวอย่างเช่น งานวิจัยการจำแนกคุณภาพของแผ่นเทอร์ทิลลา [75] ใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ เนื่องจากให้แสงที่เป็นธรรมชาติของตอนกลางวันขนาด 18 วัตต์ มีอุณหภูมิสีประมาณ 6,500 เคลวิน หรือ D65 เป็นมาตรฐานของแสงที่ใช้ทั่วไปในงานวิจัยเกี่ยวกับอาหาร และให้ค่าสีที่เหมือนค่าสีจริงร้อยละ 95 สำหรับการตรวจสอบคุณภาพโดยทั่วไปจะทำการติดตั้งแหล่งกำเนิดแสงไว้ด้านเดียวกับกล้อง ส่องไปยังวัตถุที่ต้องการจับภาพ เรียกว่า Front lighting เพื่อดูแลเฉพาะความสมบูรณ์ของวัตถุในภาพตั้งภาพประกอบ 13(ก) แต่ก็มีบางงานวิจัยมีความจำเป็นต้องใช้แสงมาจากด้านหลังของวัตถุ เรียกว่า Back lighting เพื่อพิจารณาถึงความแตกต่างของวัตถุในภาพตั้งภาพประกอบ 13(ข) ตัวอย่างเช่น งานวิจัยการประเมินคุณภาพเมล็ดข้าว [76]



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 13 ภาพเมล็ดข้าวที่มีแหล่งกำเนิดแสง

(ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง

ที่มา: Sansomboonsuk และคณะ (2008) [76]

นอกจากการจัดสภาพแวดล้อมในการถ่ายภาพแล้ว งานบางชิ้นอาจต้องการใช้ภาพจากกล้องหลายๆ ตัว เพื่อใช้ตรวจสอบชิ้นงานหลายๆ มุมมอง เช่น ระบบการตรวจสอบรอยตำหนิบนผิวแอปเปิ้ล [77] ใช้กล้อง 2 ตัวติดตั้งด้านบนกับด้านล่างสายพาน

2) การดึงข้อมูลภาพ (Image acquisition) เป็นกระบวนการที่เริ่มตั้งแต่การถ่ายภาพ โดยกล้อง ตลอดจนถึงการดึงข้อมูลภาพเข้าสู่คอมพิวเตอร์ หรืออุปกรณ์ประมวลผล กระบวนการนี้มีองค์ประกอบที่สำคัญ คือ กล้องที่ใช้ในงานตรวจสอบวัตถุปัจจุบัน เป็นกล้องดิจิทัลซึ่งใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ที่เรียกว่า เซนเซอร์รับภาพ (Image sensor) ซึ่งจะประกอบด้วยไดโอดที่มีความไวต่อแสงเรียงตัวกันอยู่เป็นจำนวนมาก และในทันทีที่แสงมีการตกกระทบไดโอดแต่ละตัวไว้ ไดโอดนี้เรียกกันว่า เซลล์รับภาพพิกเซล (Pixel) ซึ่งหนึ่งเซลล์รับภาพจะให้ค่าความเข้มแสงที่ตกกระทบเพียงค่าหนึ่งเท่านั้น โดยทั่วไปค่าที่ได้จากเซลล์รับภาพจะมีค่าระหว่าง 0-255 เท่านั้น (ช่วงข้อมูลดังกล่าวสามารถแทนด้วยข้อมูลขนาด 1 ไบต์ หรือ 8 บิต ที่จะให้ความละเอียด 2^8 หรือ 256 ระดับ จะมีกล้องบางประเภทที่ให้ค่าความเข้มแสงที่มีความละเอียดสูงถึง 16 บิต) โดยหากค่าที่ได้มีค่าเท่ากับ 0 แสดงว่าที่เซลล์รับภาพนั้นมีความเข้มแสงต่ำสุด หรือเป็นด้านมืด และหากมีค่าเท่ากับ 255 ก็แสดงว่าที่เซลล์รับภาพที่ตำแหน่งนั้นมีความเข้มแสงสูงสุด หรือเป็นด้านสว่าง ดังแสดงในภาพประกอบ 14



ภาพประกอบ 14 ความเข้มแสงเทียบกับค่าที่ได้จากเซลล์รับภาพ

3) การประมวลผลภาพเบื้องต้น (Pre-processing) ประกอบด้วยหลากหลายกระบวนการ ตัวอย่างเช่น การลดสัญญาณรบกวนที่ปรากฏขึ้นในภาพแสดงดังภาพประกอบ 15 การตรวจจับขอบของวัตถุที่อยู่ในภาพแสดงดังภาพประกอบ 16 การแปลงคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น การหมุน การเลื่อน การย่อ และการขยาย เป็นต้น การแปลงสี การวิเคราะห์ภาพในเชิงความถี่ การบีบอัดภาพ และอื่นๆ



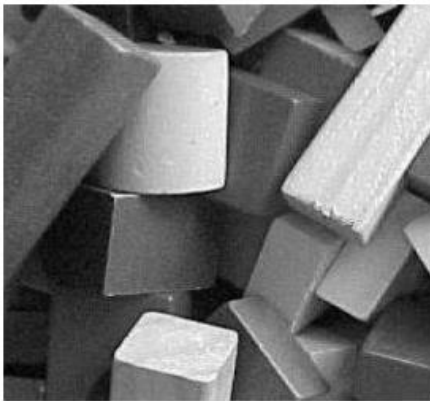
(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 15 การกำจัดสัญญาณรบกวน
(ก) ภาพต้นฉบับ (ข) ภาพหลังกำจัดสัญญาณรบกวน

ที่มา: McAndrew (2004) [74]



(ก)



(ข)

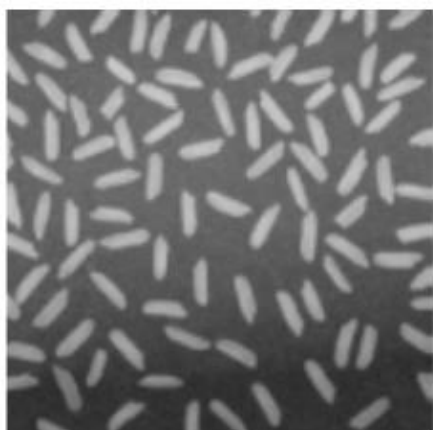
ภาพประกอบ 16 การหาขอบภาพ
(ก) ภาพต้นฉบับ (ข) ภาพหลังแยกขอบภาพ

ที่มา: McAndrew (2004) [74]

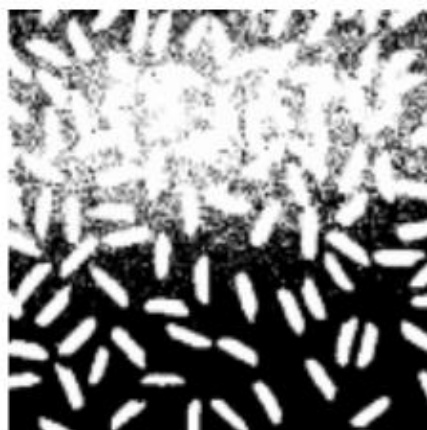
4) การแยกบริเวณ (Segmentation) เป็นกระบวนการแยกพื้นที่ภาพที่มีลักษณะร่วมกัน ออกเป็นส่วนๆ ซึ่งมุ่งเน้นในการแยกวัตถุออกจากพื้นหลัง สำหรับกระบวนการแยกมีด้วยกัน 2 วิธี คือ

4.1) การแยกบริเวณโดยใช้ค่าเทรชโฮลด์ (Threshold) เป็นค่าจำนวนเต็มระหว่าง 0 ถึง 255 เช่นเดียวกับค่าความเข้มแสงของพิกเซลที่อยู่ในภาพระดับเทา สำหรับการแยกบริเวณโดยใช้ค่าเทรชโฮลด์ กระทำโดยการแปลงภาพระดับเทาเป็นภาพไบนารี โดยมีเงื่อนไขว่าถ้าค่าความเข้มแสงที่พิกเซลตำแหน่งใดมีค่าต่ำกว่า หรือเท่ากับ ค่าเทรชโฮลด์ จะกำหนดให้ค่าพิกเซลในตำแหน่งนั้นมีค่าเป็น 0 หรือเปลี่ยนเป็นดำมืดไป และถ้าพิกเซลใดมีค่าสูงกว่าค่าเทรชโฮลด์แล้วให้ค่าพิกเซลนั้นมีค่าเป็น 255 หรือเปลี่ยนเป็นค่าสว่างไป ผลการแยกบริเวณของวัตถุภายในภาพ โดยใช้ค่าเทรชโฮลด์แสดงดังภาพประกอบ 17(ข) และ (ค)

4.2) การแยกบริเวณโดยใช้ขอบของวัตถุ (Edge based segmentation) สำหรับวิธีนี้ต้องคำนวณหาขอบภาพของวัตถุเสียก่อน ซึ่งขอบในความหมายของการประมวลผลภาพแบบดิจิทัล คือ พิกเซลที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงเกินค่าที่กำหนด ผลการแยกบริเวณของวัตถุภายในภาพโดยใช้ขอบของวัตถุแสดงดังภาพประกอบ 17(ง)



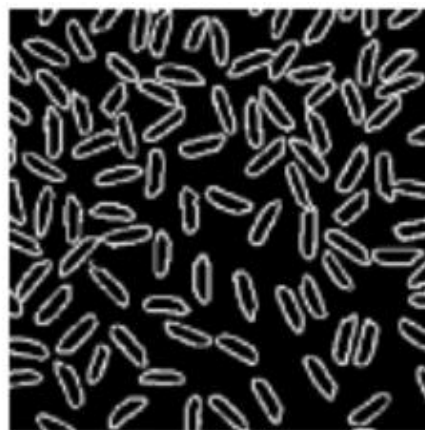
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพประกอบ 17 การแยกบริเวณ

(ก) ภาพระดับเทาต้นฉบับ (ข) ภาพไบนารีโดยใช้ค่าเทรชโฮลด์เท่ากับ 100

(ค) ภาพไบนารีโดยใช้ค่าเทรชโฮลด์เท่ากับ 153 (ง) ภาพไบนารีที่เกิดการใช้ตัวตรวจจับขอบ โดยใช้ค่าเทรชโฮลด์เท่ากับ 153

5) การคำนวณหาคุณลักษณะของวัตถุ (Feature extraction) เป็นการคำนวณหาหรือวัดคุณลักษณะต่างๆ ของแต่ละบริเวณ หรือของวัตถุแต่ละชิ้นที่อยู่ในภาพ

6) การจำแนกวัตถุและการแปลความหมาย (Classification and interpretation) คือ กระบวนการจัดกลุ่มให้วัตถุที่กำลังพิจารณาอยู่นั้นว่าเป็นวัตถุที่อยู่ในกลุ่มใด โดยอาศัยข้อมูลที่ได้จากการวัด หรือการคำนวณซึ่งเป็นคุณสมบัติของวัตถุนั้นๆ เปรียบเทียบกับวัตถุตัวอย่างที่อยู่ในแต่ละกลุ่ม ก่อนที่ระบบจะสามารถตัดสินใจดังกล่าวได้ ระบบจะต้องมีตัวอย่างของวัตถุในแต่ละกลุ่ม สำหรับงานวิจัยที่ผ่านมาที่เกี่ยวข้องกับการคัดแยกขนาดมีการจำแนกด้วยกันหลายวิธี ยกตัวอย่างเช่น ระเบียบวิธีของ k-Nearest Neighbor classifier (k-NN) เป็นตัวจำแนกที่ทำหน้าที่เปรียบเทียบระยะห่างระหว่างเวกเตอร์คุณสมบัติของวัตถุกับกลุ่มตัวอย่าง และจำแนกวัตถุนั้นๆ เข้ากับกลุ่มที่มีระยะใกล้ที่สุด เช่น การคัดเกรดแอปเปิ้ล [78] โดยใช้พีชชี ร่วมกับ k-NN ในการจำแนกเกรดแอปเปิ้ล ส่วนการจำแนกด้วยโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural network) ซึ่งเป็นวิธีการเลียนแบบการทำงานของสมองมนุษย์ เช่น ระบบการตรวจสอบรายตำหนิบนผิวแอปเปิ้ล [77] การตรวจสอบคุณภาพเมล็ดถั่ว [79] การวิเคราะห์สีและลักษณะผิวในการตรวจสอบและคัดแยกขนาดชา [80]

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่ผ่านมามุ่งเน้นศึกษาเทคนิคการอบแห้งที่ให้ผลิตภัณฑ์อบแห้งที่มีความเป็นรูพรุนสูง ซึ่งเป็นคุณลักษณะที่สำคัญของผลิตภัณฑ์อาหารกึ่งสำเร็จรูป

การอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying) เป็นกระบวนการอบแห้งในอุณหภูมิต่ำที่ผลิตผลิตภัณฑ์อาหารแห้งที่มีความเป็นรูพรุนสูง โดยกระบวนการดังกล่าวอาศัยหลักการระเหิดของน้ำที่อยู่ในอาหาร ซึ่งน้ำในอาหารจะเกิดการเปลี่ยนสถานะกลายเป็นของแข็ง (Ice crystal) ภายใต้อุณหภูมิต่ำกว่าความดันบรรยากาศและอุณหภูมิต่ำ [9]–[11] รูพรุนที่เกิดขึ้นจากการระเหิดของเกล็ดน้ำแข็งทำให้เกิดรูพรุนในผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องสำเร็จรูป ซึ่งส่งผลให้ข้าวคั้นรูปที่ได้มีคุณภาพและลักษณะปรากฏหลังจากการคั้นรูปใกล้เคียงกับข้าวที่หุงสุกด้วยวิธีทั่วไป [9] อย่างไรก็ตาม เนื่องจากกระบวนการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งยังเป็นกระบวนการที่มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง อีกทั้งเวลาในการอบแห้งยังใช้เวลานาน ดังนั้นเทคโนโลยีการอบแห้งแบบอื่นๆ ที่สามารถแก้ปัญหาดังกล่าวยังต้องการการศึกษาค้นคว้าต่อไป [10], [11]

ที่ผ่านมามีงานวิจัยมากมายที่ทำการศึกษาด้านเทคโนโลยีการอบแห้งรูปแบบใหม่ที่ให้อัตราการอบแห้งที่สูงเพื่อผลิตผลิตภัณฑ์อบแห้งที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นรูพรุน (Sponge-like structure) Luangmalawat และคณะ (2008) [81] ใช้เทคนิคการอบแห้งแบบลมร้อนที่อุณหภูมิในช่วง 50-120 องศาเซลเซียส ก่อนการอบแห้งทำการเตรียมตัวอย่างโดยนำข้าวหอมมะลิที่หุงด้วยเครื่องหุงข้าวในครัวเรือนไปล้างในน้ำเย็นเพื่อป้องกันการเกาะติดของเมล็ดข้าว จากผลการทดลองพบว่าความเป็นรูพรุนมีลักษณะที่แตกต่างกันเล็กน้อยเมื่อตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope) Prasert และ Suwannaporn (2009) [7] ได้ศึกษาการผลิตข้าวหอมมะลิสำเร็จรูปโดยการเพิ่มการเป็นเจลโดยการแช่ข้าวในน้ำก่อนทำการหุงต้มภายใต้ความดันสูง ข้าวสุกที่ได้ถูกนำเข้าสู่กระบวนการอบแห้งแบบลาดที่อุณหภูมิสูงประมาณ 166.4-233.4 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามกระบวนการอบแห้งแบบลาดดังกล่าวไม่สามารถเพิ่มคุณภาพด้านการคั้นตัวให้กับผลิตภัณฑ์ข้าวหอมมะลิสำเร็จรูปได้ ต่อมา Rewthong และคณะ (2011) [9] ทำการเตรียมตัวอย่างข้าวหลังจากหุงสุกแล้วด้วยการนำไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส แช่เย็นที่ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และล้างด้วยน้ำเย็นเป็นเวลา 30 วินาที ก่อนนำเข้าสู่การอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เนื่องจากขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างข้าวก่อนการอบแห้งเป็นขั้นตอนที่ค่อนข้างสำคัญ ดังนั้น Le และ Jittanit (2012) [20] จึงได้ทำการศึกษาด้านกระบวนการที่เหมาะสมโดยคำนึงถึงอัตราการแพร่ของความชื้นที่สูงและโครงสร้างรูพรุนของข้าวกล้องสำเร็จรูปที่ได้ นอกจากนั้นยังทำการศึกษาด้านการเตรียมตัวอย่างโดยแช่แข็งข้าวกล้องมะลิสุกที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส และทำการละลาย 2 ขั้นตอนก่อนนำเข้าสู่กระบวนการอบแห้งแตกต่างกัน จากผลการทดลองพบว่าการอบแห้งด้วยไมโครเวฟให้อัตราการอบแห้งและโครงสร้างรูพรุนสูงที่สุด นอกจากนั้น Chen และคณะ (2014) [5] ก็ใช้เทคนิคการอบแห้งด้วยไมโครเวฟในกระบวนการอบแห้งแบบหลายขั้นตอนเพื่อผลิตข้าวกล้องสำเร็จรูปเช่นเดียวกัน แต่ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างต่างจาก Le และ Jittani (2012) คือการแช่ข้าวก่อนการหุงต้ม แล้วล้างด้วยน้ำเย็นเพื่อป้องกันการเกาะติดของข้าวสุก จากนั้นนำข้าวสุกที่

ได้ออบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส จนกระทั่งได้ความชื้นร้อยละ 40 ฐานเปียก แล้วจึงทำการอบแห้งต่อด้วยไมโครเวฟจนกระทั่งความชื้นเท่ากับร้อยละ 20 ฐานเปียก ขั้นตอนสุดท้ายทำโดยตั้งความชื้นออกด้วยวิธีออสโมซิส Jiao และคณะ (2014) [21] ได้เปรียบเทียบเวลาและอัตราการคืนรูปของข้าวกึ่งสำเร็จรูปที่เตรียมโดยใช้วิธีการอบแห้งที่แตกต่างกัน โดยก่อนการอบแห้ง ทำการหุงสุกข้าวในน้ำเดือด ตามด้วยทำให้เย็นในน้ำที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเป็นเวลา 5 นาที เพื่อป้องกันการเกาะติดของเมล็ดข้าวสุก จากผลการทดลองพบว่า การอบแห้งด้วยลมร้อนที่ 80 องศาเซลเซียส ร่วมกับไมโครเวฟที่กำลังวัตต์เท่ากับ 300 วัตต์ เป็นสภาวะที่เหมาะสมเมื่อพิจารณาจากจลนศาสตร์การอบแห้งและการคืนรูป Le และ Jittanit (2015) [6] ได้ทำการเตรียมตัวอย่างข้าวหลายขั้นตอนก่อนการอบแห้งโดยแช่แข็งที่ -18 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที จากนั้นละลายน้ำแข็งที่ 6 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที และปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเป็นเวลา 20 นาที จากนั้นนำเข้าสู่กระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ จากผลการศึกษาพบว่าสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุดคือใช้อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 89.99 องศาเซลเซียส และกำลังไมโครเวฟเท่ากับ 499.8 วัตต์ ซึ่งเป็นสภาวะที่ให้คุณภาพด้านการคืนรูปและเนื้อสัมผัสที่ดีที่สุด

Gaewsondee และ Duangkhamchan (2019) [26] ได้พัฒนากระบวนการผลิตข้าวกล้องไรซ์เบอร์รี่กึ่งสำเร็จรูปโดยใช้เทคนิคการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับกระแสลมวนอัดตัว เพื่อลดปัญหาในเรื่องของการเตรียมตัวอย่างที่ซับซ้อนในขณะที่ยังให้อัตราการอบแห้งที่สูงใช้เวลาในการอบแห้งสั้น ผลงานวิจัยดังกล่าวนี้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิคการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับกระแสลมวนอัดตัว ซึ่งทำให้คุณภาพทั้งทางด้านกายภาพ เคมี และทางเนื้อสัมผัสอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ แต่อย่างไรก็ตาม ยังประสบปัญหาในเรื่องระยะเวลาในการคืนรูปรานาน (ประมาณ 10-11 นาที ในเตาอบไมโครเวฟ) ซึ่งอาจส่งผลมาจากโครงสร้างภายในของข้าวกึ่งสำเร็จรูปที่มีลักษณะความเป็นรูพรุนน้อย

นอกจากนี้ได้มีคณะนักวิจัยในการวิเคราะห์ และตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของอนุภาคที่อยู่ภายในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด ได้แก่ Watano และ Miyanami (1995) [82] นำกล้อง CCD เลนส์แบบเทเลโฟโต้ และชุดส่องสว่างที่เรียกว่า Stroboscope ซึ่งเป็นลักษณะการปล่อยลำแสงเป็นระยะๆ ในช่วงเวลาสั้นๆ ด้วยหลอดไฟซินอล ในการวิเคราะห์ และตรวจสอบการกระจาย ขนาด และรูปร่างของอนุภาคภายในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด สิ่งที่ได้จากกล้อง จะเปรียบเทียบกับการวัดขนาดและรูปร่างที่ได้จาก ตะแกรง (Sieve) แต่ละชั้น และควบคุมการทำงานของใบตัดของเครื่องด้วย Iheonye และคณะ (2020) [83] นำกล้องชนิด DSLR ที่ติดตั้งร่วมกับโทรศัพท์มือถือ ในการตรวจสอบการหดตัวของเมล็ดถั่วภายในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด โดยตั้งความเร็วลมคงที่ 10 เมตรต่อวินาที และระดับอุณหภูมิ 3 ระดับ ได้แก่ 50 55 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ Lackermeier และคณะ (2001) [84] นำเสนอภาพโครงสร้างการไหลภายในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดใน

สภาพการไหลจริง โดยได้นำกล้องที่มีความเร็วในการรับภาพสูง ร่วมกับ Endoscope ซึ่งเป็นใยแก้วนำแสงที่สามารถส่องสว่างเป็นเชิงเส้น 2 ชุด ทำมุมระหว่างกัน 90 องศา เพื่อให้เกิดมันแสงขึ้น ทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงภายในเครื่องลักษณะปิดทึบได้ชัดเจนมากขึ้น อย่างไรก็ตามก็ยังคงเกิดปัญหาในการใช้เทคนิคการประมวลผลภาพในการควบคุมตัวแปรภายในเครื่องอยู่

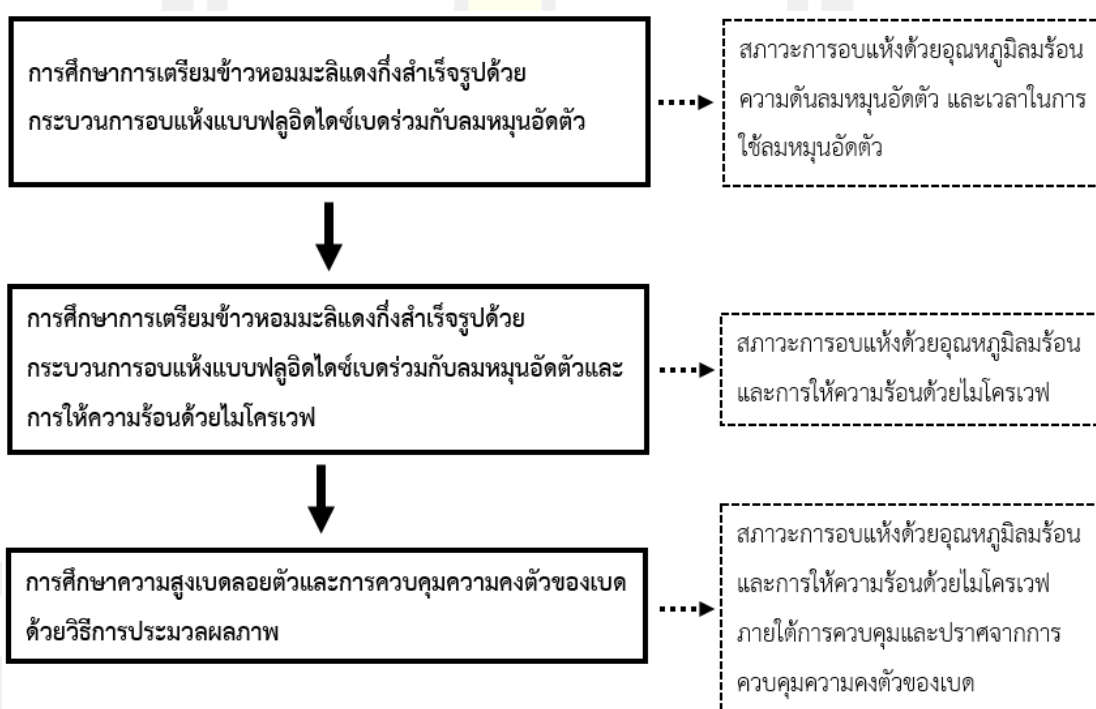
ถึงแม้ว่าวิธีการอบแห้งโดยทั่วไปร่วมกับการใช้ไมโครเวฟจะช่วยปรับปรุงคุณภาพของข้าวด้านการคั่วรูป แต่กระบวนการดังกล่าวยังมีข้อเสียคือประกอบด้วยขั้นตอนหลายขั้นตอน ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอการศึกษากระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับไมโครเวฟและลมหมุนอัดตัวสำหรับการเตรียมข้าวกล้องกึ่งสำเร็จรูป เพื่อลดปัญหาในเรื่องของการเตรียมตัวอย่างที่ซับซ้อนในขณะที่ยังให้อัตราการอบแห้งที่สูง ใช้เวลาในการอบแห้งสั้น



บทที่ 3

วิธีการดำเนินการศึกษา

ในบทนี้จะกล่าวถึง วิธีการเตรียมตัวอย่าง เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง วิธีการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูล ตลอดจนวิธีการดำเนินการศึกษา วิทยานิพนธ์นี้ได้แบ่งวิธีการดำเนินการศึกษา 3 ขั้นตอน ได้แก่ การเตรียมข้าวหอมมะลิแดงกึ่งสำเร็จรูปโดยใช้กระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับลมหมุนอัดตัว การเตรียมข้าวหอมมะลิแดงกึ่งสำเร็จรูปโดยใช้กระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับลมหมุนอัดตัวและการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ และ การศึกษาความสูงเบดลอยตัวและการควบคุมความคงตัวของเบดด้วยวิธีการประมวลผลภาพ โดยแสดงแผนผังภาพรวมดังภาพประกอบ 18 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้



ภาพประกอบ 18 ภาพรวมของขั้นตอนการศึกษา

3.1 วิธีการเตรียมตัวอย่าง

3.1.1 การเตรียมตัวอย่างควบคุม

คัดเลือกเมล็ดข้าวหอมมะลิแดงที่มีความสมบูรณ์ 150 กรัม จากนั้นหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวในครัวเรือนโดยใช้อัตราส่วนข้าวต่อน้ำเท่ากับ 1:2.5 เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นพักข้าวในหม้อหุง

ข้าวเป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้เกิดเจลลิตไนซ์ที่สมบูรณ์โดยยังคงรักษารูปร่างของข้าวเต็มเมล็ด จากนั้นนำข้าวที่พอกใส่ในถุงอลูมิเนียมพอยล์ปิดสนิท และเก็บใส่ตู้แช่เย็นที่อุณหภูมิ 4-5 องศาเซลเซียส เพื่อทำการวิเคราะห์คุณภาพ

3.1.2 การเตรียมข้าวหอมมะลิแดงหุงสุกสำหรับผลิตข้าวกล้องกึ่งสำเร็จรูป

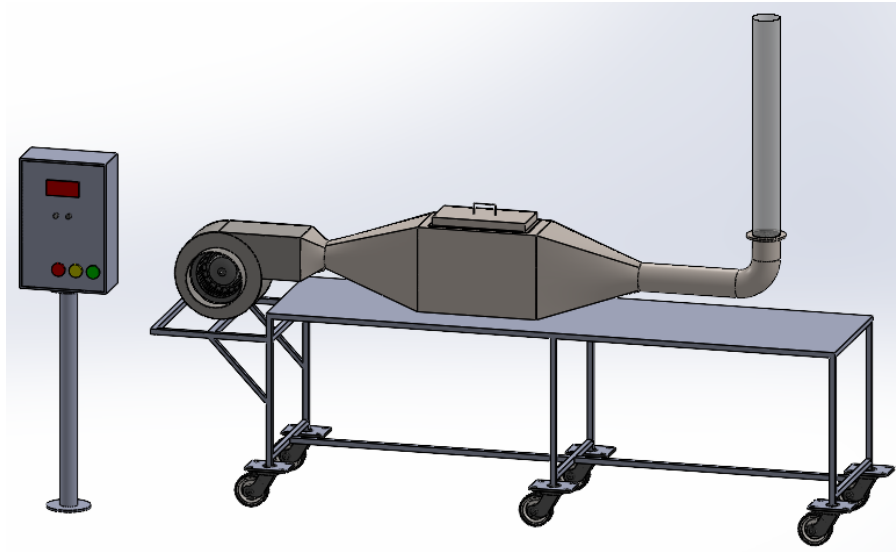
คัดเลือกเมล็ดข้าวหอมมะลิแดงที่มีความสมบูรณ์ 150 กรัม จากนั้นหุงข้าวด้วยหม้อหุงข้าวในครัวเรือนโดยใช้อัตราส่วนข้าวต่อน้ำเท่ากับ 1:2.5 เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นพักข้าวในหม้อหุงข้าวเป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้เกิดเจลลิตไนซ์ที่สมบูรณ์ ค่าความชื้นจะถูกวัดโดยอ้างอิงจากวิธีมาตรฐานของ AOAC และนำข้าวที่พอกใส่ในภาชนะปริมาณ 200 กรัม เคลี่ยข้าวทั่วภาชนะให้เรียบสม่ำเสมอ เพื่อนำไปสู่กระบวนการอบแห้งต่อไป

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

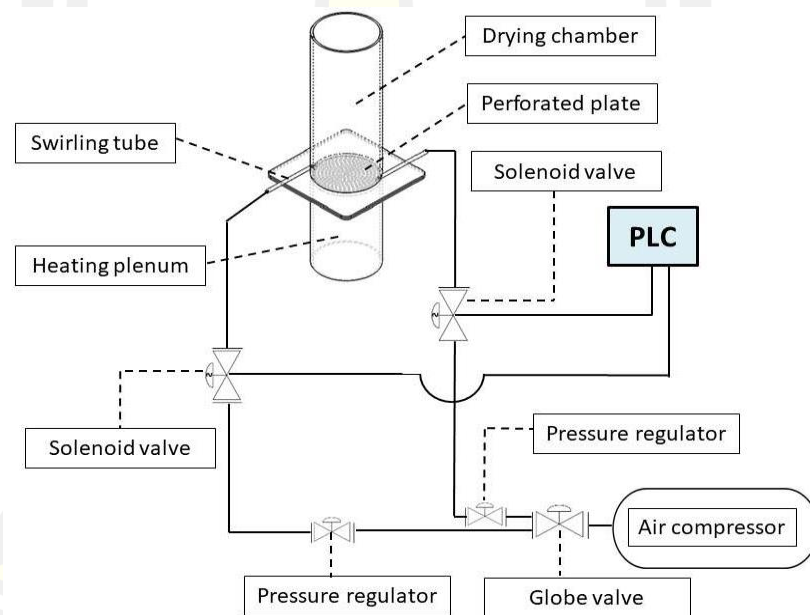
3.2.1 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับลมหมุนอัตโนมัติ

เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับลมหมุนอัตโนมัติเป็นขนาดต้นแบบที่ใช้ในระดับห้องปฏิบัติการ (ดังภาพประกอบ 19) ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ระบบลมร้อน (หมายเลข 2) ห้องอบแห้งทรงกระบอก (หมายเลข 3) และระบบลมหมุนอัตโนมัติ ลมภายนอกเข้าสู่ระบบโดยใช้พัดลม 3 เฟส ขนาด 1 แรงม้า (Mitsubishi Electric Automation (Thailand) Co., Ltd., Thailand) (หมายเลข 1) ความเร็วลมของพัดลมถูกควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ (Model H-3200 Series, Haitec Transmission Equipment Co., Ltd., China) ลมจะผ่านชุดทำความร้อนที่มีการติดตั้งฮีตเตอร์แบบครีบน้ำมัน 1 กิโลวัตต์ จำนวน 10 ตัว อุณหภูมิลมแบบฟลูอิดไดซ์จะถูกควบคุมโดยใช้ชุดควบคุมพีไอดี (Model MAC-3D, Shimax Co., Ltd., Japan) ลมร้อนแบบฟลูอิดไดซ์ถูกเป่าผ่านแผ่นเจาะรู (Distributor) จากด้านล่างของห้องอบแห้งที่ทำมาจากเหล็กสแตนเลสทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.12 เมตร ความหนา 5 มิลลิเมตร และความสูง 1 เมตร แสดงดังภาพประกอบ 19

ส่วนสำคัญของกระบวนการนี้ คือ ระบบลมหมุนอัตโนมัติ (แสดงดังภาพประกอบ 20) ซึ่งประกอบด้วยตัวควบคุมกระแสลมและปั๊มลม ระบบนี้สามารถป้องกันการรวมตัวของเมล็ดข้าวหุงสุก ระหว่างกระบวนการอบแห้งโดยใช้กระแสลมหมุนวนที่ปล่อยออกจากท่ออากาศจำนวน 2 ตัว ที่ติดตั้งบริเวณด้านล่างเบดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ลมถูกอัดตัวด้วยปั๊มลมขนาด 2 แรงม้า (Model PP-22, Puma Industrial Co., Ltd., Taiwan) ที่ถูกติดตั้งกับชุดปรับความดันลม ลมอัดตัวถูกควบคุมให้ปล่อยเป็นจังหวะด้วยชุดควบคุมพีแอลซี (Model Siemens Logo 6ED1052-1FB08-0BA0 Logic Module, Siemens, Germany) ก่อนเริ่มการทดลองทุกครั้งเปิดระบบเป่าลมและระบบให้ความร้อนตามสภาวะที่ต้องการก่อนเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้แน่ใจว่าสภาวะอยู่ในสถานะคงตัว



ภาพประกอบ 19 ขนาดของเครื่องอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดสำหรับห้องปฏิบัติการ

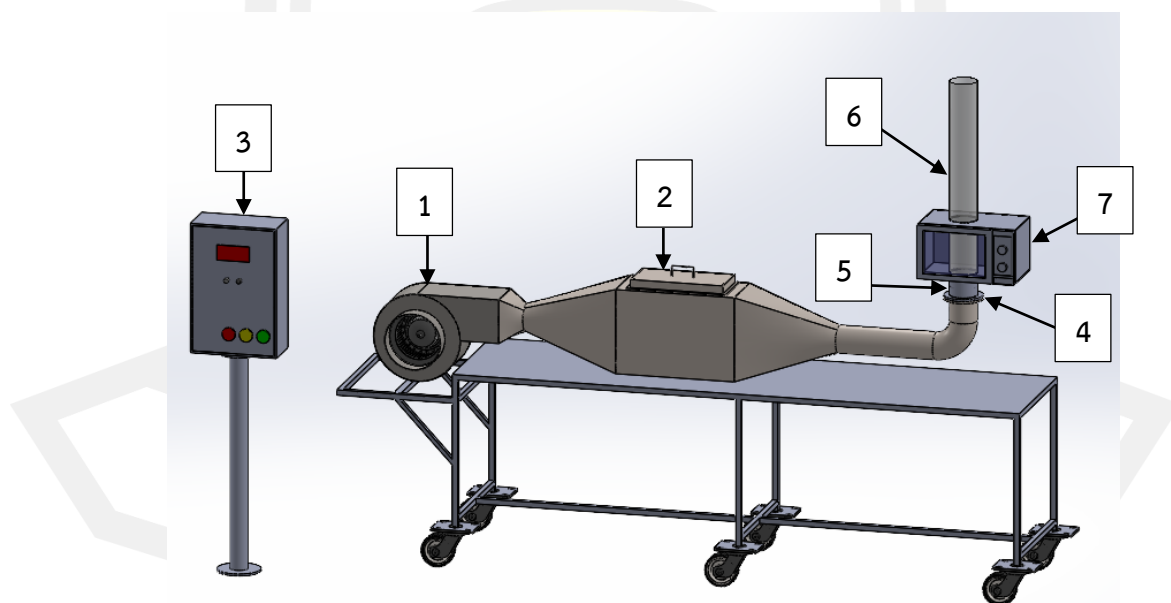


ภาพประกอบ 20 โครงสร้างไดอะแกรมของระบบลมหมุนวนอัดตัว

3.2.2 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับไมโครเวฟและกระแสมหมุนวนอัด

ชุดอบแห้งที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นขนาดต้นแบบที่ใช้ในระดับห้องปฏิบัติการ เทคนิคการอบแห้งเป็นการประยุกต์ใช้การอบแห้งสองระบบ ได้แก่ การอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดและการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับไมโครเวฟและกระแสมหมุนวนอัดขนาดระดับห้องปฏิบัติการดังภาพประกอบ 21 ประกอบด้วย

- หมายเลขที่ 1 พัดลม 3 เฟส ขนาด 1 แรงม้า สำหรับดูดอากาศภายนอกเข้าในระบบ ยี่ห้อ Mitsubishi Electric Automation, Thailand Co., Ltd.
- หมายเลขที่ 2 ชุดให้ความร้อนอากาศขนาด 10 กิโลวัตต์ ประกอบด้วย ฮีตเตอร์แบบครีป ขนาด 1 กิโลวัตต์ จำนวน 10 ตัว
- หมายเลขที่ 3 ชุดควบคุมความเร็วลมอากาศร้อน โดยใช้อินเวอร์เตอร์ (Model H-3200 series, Haitec Transmission Equipment Co., Ltd., China) และ ชุด ควบคุม อุณหภูมิแบบ PID (Model MAC-3D, Shimax Co., Ltd., Japan)
- หมายเลขที่ 4 ตะแกรงเหล็กเจาะรู ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเท่ากับ 1 มิลลิเมตร เพื่อใช้สำหรับกระจายลมให้สม่ำเสมอและป้องกันการร่วงหล่นของตัวอย่างข้าวขณะอบแห้ง
- หมายเลขที่ 5 ท่อสำหรับกระแสลมหมุนวน
- หมายเลขที่ 6 ห้องอบแห้งทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขอบด้านนอก 12 เซนติเมตร ความหนา 5 มิลลิเมตร และความสูง 1 เมตร
- หมายเลขที่ 7 ไมโครเวฟ ขนาดกำลังไฟฟ้าสูงสุด 800 วัตต์



ภาพประกอบ 21 ชุดเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับกระแสลมหมุนวนอัดตัวและการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟสำหรับการเตรียมข้าวหอมมะลิแดงกิ่งสำเร็จรูป

3.2.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูล

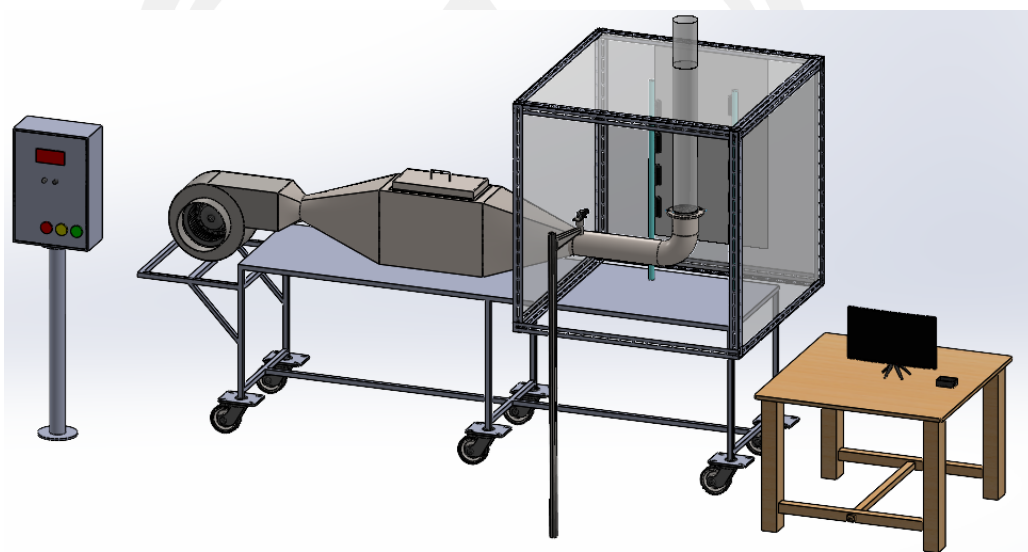
- 1) เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูลในการอบแห้ง
 - 1.1) เครื่องคอมพิวเตอร์ 1 ชุด
 - 1.2) เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล ความละเอียด 2 ตำแหน่ง
 - 1.3) เทอร์โมคัปเปิล Type K
 - 1.4) มิเตอร์วัดการใช้พลังงานไฟฟ้า
- 2) เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองหาความชื้นของข้าวหอมมะลิแดง
 - 2.1) ตู้อบลมร้อน (Hot air oven)
 - 2.2) ภาชนะสำหรับวัดความชื้น (Moisture can)
 - 2.3) เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอล ความละเอียด 3 ตำแหน่ง
- 3) เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองหาคุณภาพของผลิตภัณฑ์
 - 3.1) เครื่องวัดสี
 - 3.2) เครื่องวัดค่าปริมาณน้ำอิสระ (a_w)
 - 3.3) เครื่องวัดเนื้อสัมผัส

3.2.4 ชุดวิเคราะห์ความสูงเบด

อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับกระบวนการนี้ถูกติดตั้งร่วมกับเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดตั้งหัวข้อ

3.2.1 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดได้ถูกดัดแปลงโครงสร้างเล็กน้อย คือ ถอดไมโครเวฟออกแล้วติดตั้งห้องอบแห้งร่วมกับแผ่นกระจาย (Distributor) อุปกรณ์ที่ต่อร่วมกับโครงสร้างเครื่องต้นแบบแสดงดังภาพประกอบ 22 ประกอบด้วย กล้องชนิด CCD (Model acA1300-200uc, Basler AG, Germany) ที่มีขนาดภาพ คือ 1280 x 1024 พิกเซล และความเร็วในการรับภาพ 30 เฟรมต่อวินาทีติดตั้งโดยการหมุนกล้องในทิศทางตามเข็มนาฬิกา 90 องศา และหันหน้าเข้ากับห้องอบแห้งทรงกระบอกสำหรับถ่ายภาพข้าวหอมมะลิแดงที่อยู่ภายใน ชุดหลอดไฟแอลอีดีแบบรางยาว (Model BL00-240-3-W, imRN Asia Co., Ltd, Thailand) ที่มีอุณหภูมิสี 6500K ใช้สำหรับส่องสว่างห้องอบแห้งเพื่อกำจัดเงาของห้องอบแห้งทรงกระบอกและข้าวหอมมะลิแดงขณะอบแห้ง ถูกติดตั้งด้านข้างของฝั่งตรงข้ามกับกล้องและหันออก 45 องศา ไปยังกล้องที่บัสแสงสีขาวทรงสี่เหลี่ยมขนาด 100 x 100 x 125 เซนติเมตร ซึ่งถูกติดตั้งโดยกรอบบริเวณเบด (Bed region) เพื่อป้องกันแสงภายนอกเข้ามารบกวน อีกทั้งยังสามารถกรองแสงและกระจายแสงให้สม่ำเสมอขึ้น ค่าความสว่างของหลอดไฟถูกวัดจากระดับด้านล่างขึ้นด้านบนรอบห้องอบแห้งด้วย Light Meter (Model LT40, Extech Instruments, USA) ค่าความสว่างเฉลี่ยที่ได้รับ คือ 330 ลักซ์ อัตราส่วนระยะจริงและพิกเซลที่ได้จากภาพ (Meter to pixel ratio) คือ 0.00066 เมตรต่อพิกเซล

กล้องชนิด CCD ถูกเชื่อมต่อร่วมกับคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ต USB 3.0 สำหรับการรับภาพและบันทึกภาพลงในหน่วยความจำทุก 1 วินาที สำหรับทุกสภาวะการทดลอง ภาพที่ได้ในแต่ละสภาวะการทดลองจะถูกประมวลผลภาพด้วย OpenCV Library โดยใช้ภาษา C++ ในโปรแกรม Qt Creator บนคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก (Raspberry Pi 4 Model B, Raspberry Pi Foundation, England)



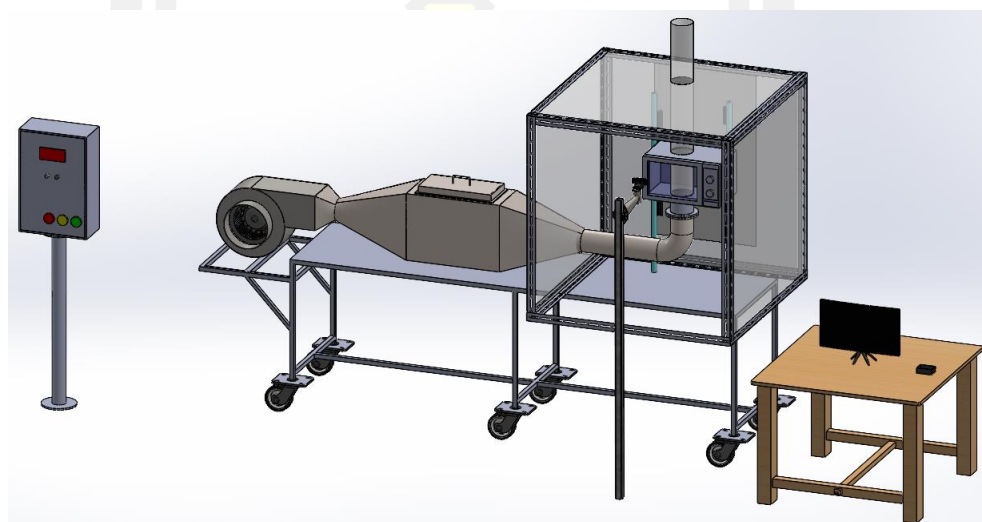
ภาพประกอบ 22 อุปกรณ์สำหรับกระบวนการวิเคราะห์ความสูงเบด

3.2.5 ชุดควบคุมความคงตัวของเบด

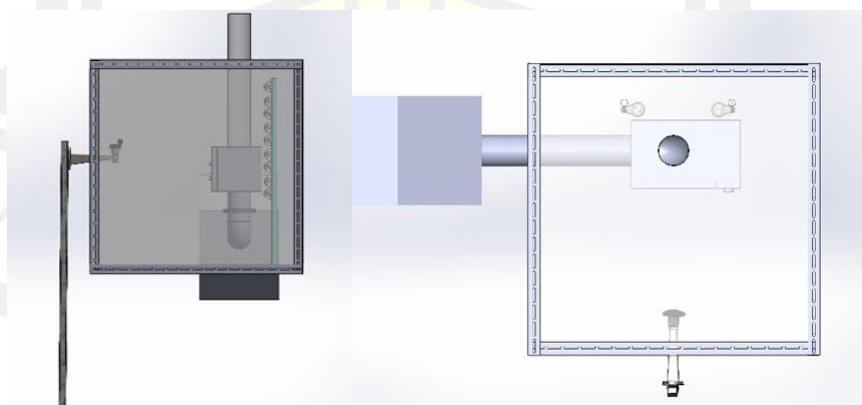
การควบคุมความคงตัวของเบด ณ ความสูงที่กำหนดไว้เกิดจากการทำงานร่วมกันระหว่างฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ สำหรับฮาร์ดแวร์ (ภาพประกอบ 23) ถูกติดตั้งร่วมกับเครื่องอบแห้งตั้งหัวข้อที่ 3.2.1 ฮาร์ดแวร์ส่วนใหญ่จะถูกติดตั้งและตั้งค่าเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.2.3 กล้องเว็บแคม (Model C615, Logitech, Switzerland) ที่มีขนาดภาพ คือ 640×480 พิกเซล และความเร็วในการรับภาพ 30 เฟรมต่อวินาที ถูกติดตั้งให้หันหน้าเข้ากับห้องอบแห้งทรงกระบอกสำหรับถ่ายภาพข้าวหอมมะลิแดงบริเวณเหนือไมโครเวฟภายในห้องอบแห้ง กล้องเว็บแคมถูกเชื่อมต่อร่วมกับคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก (Raspberry Pi 4 Model B, Raspberry Pi Foundation, England) ซึ่งเป็นหน่วยประมวลผลสำหรับคำนวณเศษส่วนปริมาตร (Volume fraction) ของภาพที่ได้รับจากกล้องเว็บแคม ซึ่งอัตราส่วนระยะจริงและพิกเซลที่ได้จากภาพ (meter to pixel ratio) คือ 0.00113 เมตรต่อพิกเซล ซอฟต์แวร์ถูกพัฒนาขึ้นบนคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก โดยเขียนโปรแกรมด้วยภาษา C++ พร้อมกับ OpenCV library สำหรับการประมวลผลภาพ นอกจากนี้โปรแกรมยังได้พัฒนาให้ง่ายต่อการใช้งานด้วยการสร้างหน้าต่าง Graphic user interface (GUI) ซึ่งหน้าต่างนี้สามารถควบคุมการทำงานของ

กล้องเว็บแคมสำหรับการวิเคราะห์ภาพด้วยฟังก์ชันต่างๆ แสดงดังภาพประกอบ 24 เช่น ช่องกำหนดเศษส่วนปริมาตร ช่องกำหนดความเร็วลมแก๊สผิวผิวนเริ่มต้น ช่องกำหนดเวลาการทำงานของโปรแกรม ช่องแสดงเศษส่วนปริมาตรปัจจุบัน ช่องแสดงเวลาการทำงานของโปรแกรมปัจจุบัน ช่องแสดงความเร็วลมแก๊สผิวผิวนปัจจุบัน ปุ่มเริ่ม-หยุดการทำงานของโปรแกรม ปุ่มเปิด-ปิดการประมวลผลภาพของกล้อง เป็นต้น

ไลบรารี Pulse width modulation (PWM) บนบอร์ด Raspberry Pi หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า “softPwm library” ถูกนำมาใช้สำหรับปรับความเร็วลมของพัดลม โดยการต่อร่วมระหว่างบอร์ด Raspberry pi และอินเวอร์เตอร์พัดลมของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดดังหัวข้อที่ 3.2.1 เพื่อควบคุมความคงตัวของระดับความสูงเบดแสดงภาพประกอบ 25



(ก)

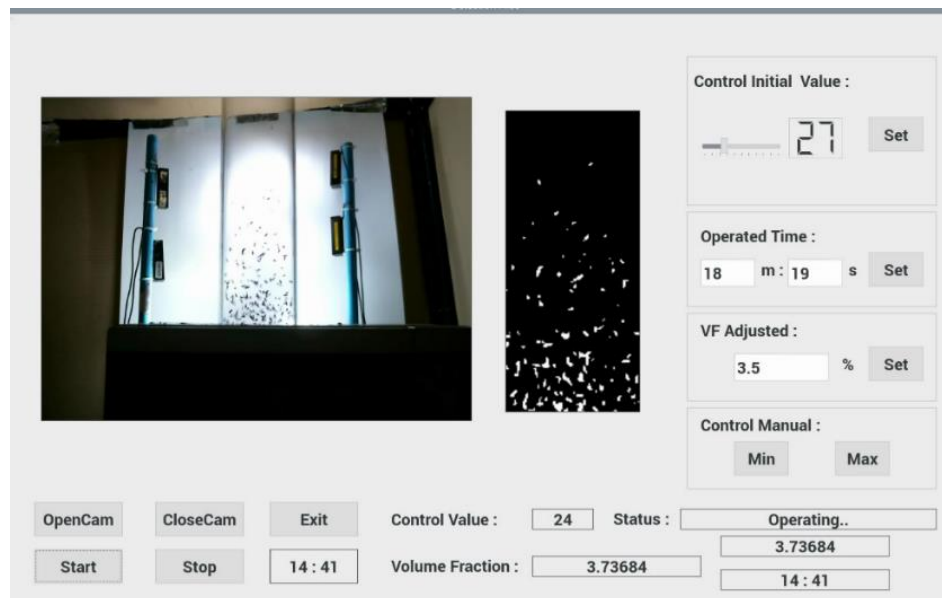


(ข)

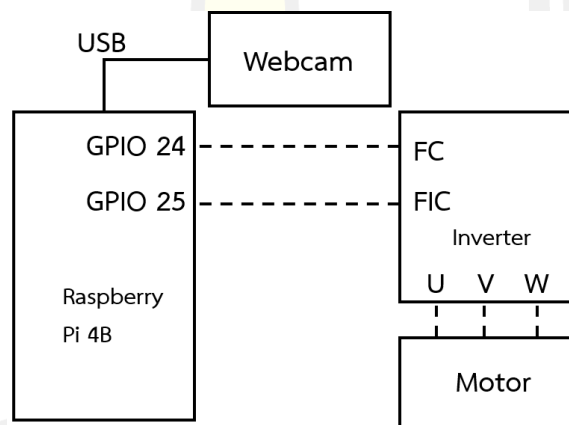
(ค)

ภาพประกอบ 23 ชุดควบคุมความคงตัวของเบดโดยด้วยวิธีประมวลผลภาพ

(ก) มุมมอง 3 มิติ (ข) มุมมองด้านข้าง และ (ค) มุมมองด้านบน



ภาพประกอบ 24 ตัวอย่างการแสดงผลหน้าต่างโปรแกรมสำหรับการควบคุมตัวของเบด



ภาพประกอบ 25 วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์

3.3 วิธีการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูล

3.3.1 การวิเคราะห์ความชื้น

การวิเคราะห์ความชื้น (ร้อยละฐานเปียก) สามารถวิเคราะห์ได้ตามมาตรฐาน AOAC จากการเก็บข้อมูลตั้งแต่ช่วงความชื้นข้าวหอมมะลิแดงเริ่มต้นจนกระทั่งความชื้นสุดท้ายประมาณร้อยละ 10 ฐานเปียก เริ่มจากการนำตัวอย่างข้าวหอมมะลิแดงปริมาณ 5 กรัม ใส่ในภาชนะอะลูมิเนียมที่ถูกชั่งน้ำหนักที่แน่นอน แล้วนำไปอบแห้งในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง จากนั้นนำภาชนะออกมาชั่งน้ำหนักที่แน่นอน และคำนวณความชื้นจากสมการ 1

$$MC = \frac{W_t - W_d}{W_w} \quad (1)$$

เมื่อ	MC	คือ	ความชื้น (ร้อยละฐานเปียก)
	W_t	คือ	น้ำหนักข้าวหอมมะลิแดงที่เวลาใดๆ (กรัม)
	W_d	คือ	น้ำหนักแห้งของข้าวหอมมะลิแดง (กรัม)
	W_w	คือ	น้ำหนักเปียกของข้าวหอมมะลิแดง (กรัม)

3.3.2 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำอิสระ

วิเคราะห์ปริมาณน้ำอิสระ (a_w) โดยการบดตัวอย่างและชั่งน้ำหนักประมาณ 3 กรัม จากนั้นใส่ในภาชนะโดยต้องให้ตัวอย่างปิดพื้นที่ฐานภาชนะและให้ปริมาณตัวอย่างอยู่สูงระดับครึ่งหนึ่งของภาชนะใส่ตัวอย่าง จากนั้นนำภาชนะใส่ในเครื่องวัดปริมาณน้ำอิสระรุ่น Aqualab (Decagon, United of Kingdom)

3.3.3 ค่าสี L^* a^* b^* และ ΔE

การวัดค่าสีของตัวอย่างข้าวหอมมะลิแดงโดยการบดตัวอย่างและชั่งน้ำหนักประมาณ 3 กรัม จากนั้นใส่ในภาชนะและทำการวัดสีในระบบ CIE (L^* a^* b^*) ด้วยเครื่อง Chroma meter รายงานค่าเป็น L^* (ค่าความสว่าง) a^* (ค่าความเป็น สีแดง) $-a^*$ (ค่าความเป็นสีเขียว) b^* (ค่าความเป็นสีเหลือง) $-b^*$ (ค่าความเป็น สีน้ำเงิน) โดยการทดลองจะทำการวัด 5 ซ้ำ และรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย

3.3.4 ค่าร้อยละการแตกหักและการเกาะติดกัน

การเก็บข้อมูลร้อยละการแตกหักและการเกาะติดกันของข้าวหอมมะลิแดงผ่านการอบแห้งทำได้โดยการคัดข้าวหอมมะลิแดงออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ ข้าวเต็มเมล็ด ข้าวที่เกาะติดกัน และข้าวที่แตกหัก เมื่อคัดแยกเสร็จแล้วทำการชั่งน้ำหนักตัวอย่างข้าวทั้ง 3 กลุ่ม รวมถึงการชั่งน้ำหนักรวมแล้วบันทึกข้อมูลเพื่อคำนวณหาร้อยละการแตกหักและการเกาะติดกันดังสมการต่อไปนี้

$$\%HRV = \frac{\text{Weight of HRV}}{\text{Total weight}} \times 100 \quad (2)$$

$$\%Broken\ rice = \frac{\text{Weight of broken rice}}{\text{Total weight}} \times 100 \quad (3)$$

$$\% \text{Agglomerate} = \frac{\text{Weight of agglomerate}}{\text{Total weight}} \times 100 \quad (4)$$

3.3.5 ค่าร้อยละการหดตัว

การวัดการหดตัวของข้าวกล้องสำเร็จรูปนั้นคิดเป็นร้อยละ โดยเปรียบเทียบปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไปของข้าวกล้องสำเร็จรูปและข้าวหุงสุก ซึ่งอาศัยหลักการแทนที่ของของเหลวโดยใช้ n-heptane ในการวัดปริมาตรของข้าวสุกก่อนทำการอบแห้งด้วยกระบอกตวงมาตรฐาน จากนั้นวัดปริมาตรอีกครั้งหลักจากการอบแห้งแล้วด้วยกระบอกตวงมาตรฐานเช่นเดิม การหดตัวสามารถคำนวณได้จากสมการ 5

$$\% \text{Shrinkage} = \frac{V_i - V_f}{V_i} \times 100 \quad (5)$$

เมื่อ V_i คือ ปริมาตรเริ่มต้นของข้าวหุงสุกก่อนการอบแห้ง
 V_f คือ ปริมาตรสุดท้ายของข้าวหลังการอบแห้ง

3.3.6 อัตราส่วนการคืนรูป

อัตราส่วนการคืนรูปเป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการดูดซับน้ำและการพองตัวของเมล็ดข้าวในระหว่างการคืนรูป โดยในการทดลองหาได้จากน้ำหนักของตัวอย่างที่คืนรูปแล้วต่อน้ำหนักของข้าวหอมมะลิแดงก่อนการคืนรูป อัตราส่วนการคืนรูปสามารถวิเคราะห์ได้โดยชั่งตัวอย่างข้าวหอมมะลิแดงแห้ง 10 กรัม จากนั้นเทใส่ภาชนะเก็บความร้อนและน้ำเดือดปริมาณ 100 มิลลิลิตร ทิ้งไว้เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำน้ำออกและซับน้ำด้วยผ้าฝ้ายเป็นเวลา 1 นาที จากนั้นชั่งน้ำหนักข้าวหลังคืนรูปและคำนวณหาอัตราส่วนการคืนรูปดังสมการ 6 [85]

$$\text{Rehydration ratio} = \frac{w_c - w_i}{w_i} \quad (6)$$

เมื่อ w_c คือ น้ำหนักข้าวหอมมะลิแดงหลังคืนรูป (กรัม)
 w_i คือ น้ำหนักข้าวหอมมะลิแดงแห้ง (กรัม)

3.3.7 คุณสมบัติเนื้อสัมผัสหลังการคั่วรูป

การวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Textural properties) โดยใช้วิธีทดสอบแบบ TPA (Texture Profile Analysis) โดยใช้เครื่อง Texture analyzer หัววัดทรงกระบอกขนาด 35 มิลลิเมตร ถูกประกอบเข้ากับเครื่อง Texture analyzer จากนั้นทดสอบเทียบแรงและความสูงของหัววัด ตั้งค่า Return distance ที่ 10 มิลลิเมตร ค่า Return to speed ที่ 1 มิลลิเมตรต่อวินาที และ Contact force ที่ 1 กรัม ตั้งค่าในส่วน of TA, Setting ด้วยการปรับ Target Mode เป็น Strain และตั้งค่าพารามิเตอร์ Strain เท่ากับร้อยละ 80 จากนั้นเรียงข้าวหอมมะลิแดงสุกจำนวน 20 เมล็ด ลงบนแผ่นฐานเรียบ แล้วกดปุ่ม Start test ซึ่งค่าเนื้อสัมผัสที่ได้จากกราฟ ได้แก่ ค่าความแข็ง (Hardness) หน่วยเป็น N คือ ค่าแรงสูงสุดที่ได้จากการกด และค่าความเหนียวติดกัน (Stickiness) หน่วยเป็น (N.Sec) คือ งานที่ใช้ในการถอนหัววัดออกจากตัวอย่างแสดงถึงความสามารถของผลิตภัณฑ์ในการเกาะติดกับองค์ประกอบอื่น เช่น ปาก และฟัน โดยจะวัดเป็นค่าความนุ่มของข้าว มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

3.3.8 การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก

วิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก ด้วยวิธีการซึ่งดัดแปลงมาจากวิธีการของ Singleton และ Rossi (1965) [86] โดยการนำสารสกัดตัวอย่างข้าวปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ผสมกับ Folin-Ciocalteu reagent ร้อยละ 10 ในปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร จากนั้นเขย่าให้เข้ากัน แล้วนำไปไว้ในที่มีด 1 นาที จากนั้นเติมโซเดียมคาร์บอเนตร้อยละ 7.5 ในปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรรวมด้วยน้ำกลั่นเป็น 4 มิลลิลิตร วางพักไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 765 นาโนเมตร โดยใช้เครื่อง UV-VIS Spectrophotometer นำค่าที่ได้เทียบกับกราฟมาตรฐานของสารประกอบฟีนอลิก (Gallic acid) โดยทำการวิเคราะห์ซ้ำตัวอย่างละ 3 ครั้ง คำนวณปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในรูปมิลลิกรัมของ Gallic acid equivalents (GAE) ต่อ 100 กรัมของน้ำหนักสดของตัวอย่างข้าว

3.3.9 การวิเคราะห์ปริมาณฟลาโวนอยด์

การวิเคราะห์ปริมาณฟลาโวนอยด์โดยวิธี Aluminum chloride colorimetric method [87] นำสารสกัดจากข้าวแต่ละตัวอย่าง ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร ใส่สารละลายผสมของ Methanol ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร Aluminum chloride ร้อยละ 10 ในปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร 1 M potassium acetate ในปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร และน้ำกลั่น 2.8 มิลลิลิตร ทั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที แล้วนำสารละลายไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 415 นาโนเมตร นำค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้มาเทียบกับสารละลายมาตรฐาน Quercetin แสดงปริมาณฟลาโวนอยด์ในค่าของ Quercetin equivalent (มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมของน้ำหนักแห้งของข้าว)

3.3.10 การวิเคราะห์ปริมาณแอนโทไซยานิน

วิเคราะห์ปริมาณแอนโทไซยานินโดยดัดแปลงตามวิธีการของ Lee และคณะ (2005) Sutharut และ Sudarat (2012) [88], [89] โดยนำสารสกัดข้าว 0.5 มิลลิลิตร ใส่หลอดทดลอง 2 หลอด หลอดที่ 1 เติมสารละลาย Potassium chloride buffer ที่มีค่า pH 1.0 ปริมาตร 4.5 มิลลิลิตร หลอดที่ 2 เติมสารละลาย Sodium acetate buffer ที่มีค่า pH 4.5 ปริมาตร 4.5 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 15 นาที จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร และ 700 นาโนเมตร โดยใช้เครื่อง UV-VIS Spectrophotometer ยี่ห้อ HITACHI รุ่น U1900 Spectrophotometer และใช้ Cyanidin-3-O-glucoside เป็นสารมาตรฐาน นำค่าการดูดกลืนแสงมาคำนวณปริมาณแอนโทไซยานิน

3.3.11 การวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ

การวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี DPPH radical scavenging activity ซึ่งทำตามวิธีของ Loypimai และคณะ (2010) [90] โดยเตรียมสารละลาย DPPH เข้มข้น 0.1 มิลลิโมล หลีกเลียงการถูกแสง ดูดตัวอย่างสารสกัดมา 1 มิลลิลิตร เติมสารละลาย DPPH ปริมาตร 3.0 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันแล้วไปตั้งไว้ในที่มืดนาน 30 นาที นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร โดยเครื่อง Spectrophotometer รายงานผลเป็นค่า %Scavenging คำนวณดังสมการ 7

$$\%Scavenging = \frac{A_{control} - A_{sample}}{A_{control}} \times 100 \quad (7)$$

เมื่อ A_{sample} คือ ค่าการดูดกลืนแสงของชุดทดสอบ
 $A_{control}$ คือ ค่าการดูดกลืนแสงของชุดควบคุม

3.3.12 อัตราการระเหยน้ำจำเพาะและค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (SMER) สามารถคำนวณได้หลังจากทราบค่าปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากข้าวหอมมะลิแดงด้วย (W_{evap}) ผลต่างของน้ำหนักตัวอย่างก่อนและหลังทดลองดังสมการ 8

$$SMER = \frac{W_{evap}}{1000 \times E} \quad (8)$$

ค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) คือ อัตราส่วนระหว่างพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งต่อปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุอบแห้ง สามารถคำนวณได้ดังสมการ 9

$$SEC = \frac{3.6 \times E}{W_{\text{evap}}} \times 1000 \quad (9)$$

เมื่อ	SEC	คือ	ค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (เมกะจูลต่อกิโลกรัม น้ำ)
	E	คือ	ปริมาณพลังงานที่ใช้ (กิโลวัตต์ชั่วโมง)
	W_{evap}	คือ	ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากข้าวหอมมะลิแดง (กิโลกรัม)
	3.6	คือ	ตัวเลขแปลงหน่วยของพลังงานไฟฟ้า

3.3.13 จลนศาสตร์การอบแห้ง

การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งข้าวหอมมะลิแดงสามารถทำได้โดยการวิเคราะห์ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง สมการของอัตราส่วนความชื้นโดยคำนวณจากสมการ 10

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (10)$$

เมื่อ	M_0	คือ	ความชื้นเริ่มต้น (ร้อยละฐานเปียก)
	M_t	คือ	ความชื้นที่เวลาใดๆ (ร้อยละฐานเปียก)
	M_e	คือ	ความชื้นสมดุล (ร้อยละฐานเปียก)

การวิเคราะห์หาสมการอบแห้งที่เหมาะสมของการอบแห้งข้าวหอมมะลิแดง ทำได้โดยนำค่าอัตราส่วนความชื้นที่เวลาใดๆ จากการทดลองเบื้องต้นเพื่อเปรียบเทียบสมการอบแห้งที่นำเสนอโดยนักวิจัยต่างพบว่า สมการอบแห้งของ Page เป็นสมการที่เหมาะสมเนื่องจากให้ค่า R^2 ที่สูง ($R^2 > 0.99$) และสะดวกต่อการนำไปประยุกต์ใช้เนื่องจากพารามิเตอร์เพียง 2 ตัวเท่านั้น ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้สมการอบแห้งของ Page ดังสมการ 11 ค่าความชื้นซึ่งอยู่ในรูปแบบสมการอบแห้งกึ่งทฤษฎี (Semi-Theoretical drying equation) โดยใช้โปรแกรม Statistica for windows version 14.0 (Trial version) ในการทำนายค่าความชื้น ซึ่งการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสมการ

อบแห้งใช้เทคนิควิเคราะห์ความถดถอยไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression) ซึ่งมีดัชนีบ่งชี้ความสามารถในการทำนายของสมการ คือ สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) โดยที่ R^2 มีค่าสูงแสดงถึงคุณภาพของรูปแบบสมการที่มีความเหมาะสมในการทำนาย ในขณะที่ χ^2 และค่า RMSE เป็นพารามิเตอร์ทางสถิติที่ใช้บ่งบอกความผิดพลาดในการทำนายค่าของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งที่มีความแม่นยำในการทำนายที่เหมาะสม ควรจะมีค่า R^2 สูงแต่มีค่า χ^2 และค่า RMSE ต่ำ มีความสัมพันธ์ดังสมการ 12 และ 13

$$MR = \exp(-kt^n) \quad (11)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_{obs,i} - V_{pre,i})^2} \quad (12)$$

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(V_{obs,i} - V_{pre,i})^2}{N - Z} \quad (13)$$

เมื่อ	k	คือ	ค่าคงที่อัตรา
	n	คือ	ค่าคงที่เลขชี้กำลัง
	V_{obs}	คือ	ค่าอัตราความชื้นจากการทดลอง
	V_{pre}	คือ	ค่าความชื้นที่ทำนายได้จากสมการ
	N	คือ	จำนวนค่าสังเกต
	Z	คือ	จำนวนค่าคงที่ในแบบจำลอง

3.3.14 การวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_{eff}) และค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) สมการกึ่งทฤษฎี (Semi-theoretical equation) ซึ่งจะมีรูปแบบความสัมพันธ์ในรูปกฎข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) สามารถใช้ในการหาอัตราส่วนความชื้น ดังแสดงในสมการ 14 สำหรับวัสดุที่มีชั้นบาง

$$MR = \frac{32}{\lambda_1^2 \pi^2} \exp\left(-(\lambda_1^2 + \beta_1^2) \frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{r^2} t\right) \quad (14)$$

เมื่อ	D_{eff}	คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (ตารางเมตรต่อวินาที)
	λ_1	คือ รากที่หนึ่งของฟังก์ชัน Bessel เท่ากับ 2.4048
	β_1	คือ อัตราส่วนรูปร่าง เท่ากับ $\frac{\pi r}{2l}$
	r	คือ รัศมีของข้าวหอมมะลิแดง (เมตร)
	l	คือ ความยาวของข้าวหอมมะลิแดง (เมตร)
	t	คือ เวลาอบแห้ง (นาที)

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_{eff}) เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิที่ข้าวหอมมะลิแดงดูดซับพลังงาน มีความสัมพันธ์ตามรูปแบบของสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) ถูกใช้ในการวิเคราะห์หาค่าพลังงานกระตุ้น (Activation energy for diffusion, E_a) ซึ่งบ่งบอกค่าความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะของมวลความชื้นในข้าวหอมมะลิแดง (Latent heat of vaporization) ในระหว่างกระบวนการอบแห้งโดยมีรูปแบบสมการดังแสดงในสมการ 15

$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (15)$$

เมื่อ	D_0	คือ ปัจจัยก่อนเลขชี้กำลัง (ตารางเมตรต่อวินาที)
	E_a	คือ พลังงานกระตุ้น (กิโลจูลต่อโมล)
	R	คือ ค่าคงที่ของก๊าซซึ่งมีค่าเท่ากับ 8.314 กิโลจูลต่อโมล
	T	คือ อุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง (เคลวิน)

3.3.15 จลนศาสตร์การคืนรูป

วิธีการเริ่มจากการนำตัวอย่างข้าวแห้งหรือข้าวกึ่งสำเร็จรูปมาทดสอบการคืนตัวปริมาณ 15 กรัม ในน้ำเดือด 1 ลิตร ทำการชั่งน้ำหนักทุกๆ 1 นาที โดยนำตัวอย่างออกมาบันทึกน้ำหนักหลังจากการดูดน้ำแต่ละช่วงเวลา ก่อนชั่งน้ำหนักตัวอย่าง กำจัดน้ำที่ผิวของเมล็ดข้าวโดยวางบนผ้าฝ้ายเป็นเวลาประมาณ 1 นาที ทำการวัด ชั่งน้ำหนักจนกระทั่งน้ำหนักของตัวอย่างข้าวหลังจากดูดน้ำกลับไม่เปลี่ยนแปลง (เข้าสู่สภาวะสมดุล)

น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นในระหว่างการคืนตัว (Weight gain on rehydration, WGR) สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการ 16 โดยที่ตัวห้อย e และ t แทนค่า ช่วงเวลาสมดุลและเวลา t ใดๆ ตามลำดับ W คือ น้ำหนักของตัวอย่าง (กิโลกรัม)

$$WGR = \frac{W_e - W_t}{W_e} \times 100 \quad (16)$$

น้ำหนักของตัวอย่างที่เวลาสมดุลและเวลาใดๆ ถูกพิตกับสมการจลนศาสตร์อันดับที่หนึ่ง (First-order kinetics equation) หรืออีกอย่างหนึ่งว่าสมการ Exponential equation แสดงในสมการ 17

$$WGR = WGR_e - (WGR_e - 1) \exp(-k_r t) \quad (17)$$

โดยที่

- WGR คือ อัตราส่วนน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นที่เวลา t ใดๆ
- WGR_e คือ อัตราส่วนน้ำหนักสมดุล
- k_r คือ คงที่อัตราการคืนตัว (min^{-1})
- t คือ เวลาการคืนตัว (วินาที)

3.3.16 การหาสภาวะที่เหมาะสม

เนื่องจากแต่ละปัจจัยการอบแห้งต่างส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกัน ดังนั้นการหาสภาวะที่ดีที่สุดหรือสภาวะที่เหมาะสม (Optimization) จึงเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบสภาวะวิทยานิพนธ์นี้ใช้วิธีผลตอบสนองพื้นผิว (Response surface method, RSM) ในการหาสภาวะที่เหมาะสม สมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยและผลตอบสนองเป็นแบบสมการโพลิโนเมียลอันดับสอง (Second-order polynomial equation) ดังนี้

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n a_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n a_{ij} x_i x_j \quad (18)$$

ในสมการ 18 สัมประสิทธิ์ a_0 คือ ค่าคงที่ a_i และ a_{ii} คือ ค่าคงที่ของ Linear และ Quadratic effect ตามลำดับ ในขณะที่ a_{ij} คือ Interaction effect ส่วน x_i คือ ค่าจริงของแฟคเตอร์ที่ i

ผลตอบสนองที่ประมาณค่าจากสมการ 18 ถูกนำมาเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของค่า Scale free value (d_i) ซึ่งเรียกว่าค่าการออกแบบ (Desirability) ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 โดยที่ค่า 0 แสดงผลตอบสนอง 1 หรือมากกว่า 1 ผลตอบสนองที่อยู่นอกขีดจำกัดที่ยอมรับได้ ในขณะที่ค่า 1 แทนสถานะในอุดมคติ ฟังก์ชันของ Desirability ($d_i(Y_i)$) ที่ใช้มีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับผลตอบสนองที่ต้องการ เช่น ค่ามากที่สุด ค่าน้อยที่สุด หรือค่าที่กำหนด เป็นต้น ดังนั้นค่า Desirability รวมที่ต้องการจึงเป็นการผสมผสานของแต่ละผลตอบสนอง ดังสมการต่อไปนี้

$$D = (d_1(Y_1)d_2(Y_2)\dots d_k(Y_k))^{1/k} \quad (19)$$

เมื่อ k คือ จำนวนของผลตอบสนอง

3.4 การเตรียมข้าวหอมมะลิแดงกิ่งสำเร็จรูปโดยใช้กระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับลมหมุนอัดตัว

3.4.1 การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิการอบแห้งและความดันของลมหมุนอัดตัว

1) อุณหภูมิของการอบแห้งและความดันของลมหมุนอัดตัวถูกศึกษาภายใต้การออกแบบแฟคทอเรียลโดยใช้ 2 ปัจจัยๆ ละ 3 ระดับ คือ อุณหภูมิลมร้อน 90 105 และ 120 องศาเซลเซียส และความดันกระแสลมหมุนอัดตัว 4 5 และ 6 บาร์ ทำการทดลอง 3 ซ้ำ แสดงดังตาราง 3 โดยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับลมหมุนอัดตัวถูกนำมาใช้สำหรับการศึกษานี้

ตาราง 3 ลำดับการทดลองของอุณหภูมิของการอบแห้งและความดันของลมหมุนอัดตัวภายใต้การออกแบบแฟคทอเรียล

ลำดับการทดลอง	อุณหภูมิลมร้อน (องศาเซลเซียส)	ความดันกระแสลมหมุนอัดตัว (บาร์)
1	90	4
2	90	5
3	90	6
4	105	4
5	105	5
6	105	6
7	120	4

ลำดับการทดลอง	อุณหภูมิร้อน (องศาเซลเซียส)	ความดันกระแสลมหมุนอัดตัว (บาร์)
8	120	5
9	120	6

2) ความชื้นของทุกสภาวะการทดลองถูกประเมินจลนศาสตร์การอบแห้งโดยใช้สมการอบแห้งแบบกึ่งทฤษฎีของ Page เพื่อเทียบเคียง (Fitted) กับอัตราส่วนความชื้น (MR) ที่เวลาการอบแห้งใดๆ จากการทดลอง จะได้พารามิเตอร์ของสมการของ Page คือ ค่าคงที่อัตรา (k) ค่าคงที่เลขชี้กำลัง (n)

3) อัตราส่วนความชื้นของทุกสภาวะการทดลองถูกประเมินค่าสัมประสิทธิ์แพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_{eff}) และค่าพลังงานกระตุ้น (E_a)

4) หาสมการการอบแห้งที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากพารามิเตอร์ของสมการการอบแห้งของ Page (k และ n) และค่าสัมประสิทธิ์แพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_{eff}) ที่มีค่าสูงที่สุด

3.4.2 การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการอบแห้งและเวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัว

1) อุณหภูมิของการอบแห้งและเวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัว ถูกศึกษาภายใต้การออกแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบโดยใช้ 2 ปัจจัย ละ 3 ระดับ คือ อุณหภูมิร้อน 90 105 และ 120 องศาเซลเซียส และเวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัว 2 6 และ 10 นาที ใช้ความดันที่เหมาะสมจากหัวข้อ 3.4.1 ทำการทดลอง 3 ซ้ำ แสดงดังตาราง 4 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับลมหมุนอัดตัวถูกนำมาใช้สำหรับการศึกษานี้

ตาราง 4 ปัจจัยการอบแห้งและค่ารหัสที่สอดคล้องกับที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	หน่วย	ค่ารหัสและช่วงของค่า		
		-1	0	1
อุณหภูมิร้อน, X_1	องศาเซลเซียส	90	105	120
เวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัว, X_2	นาที	2	6	10

2) ปัจจัยดังกล่าวถูกนำมาตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพ อัตราส่วนการคืนรูป และคุณสมบัติสารต้านอนุมูลอิสระ คุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ร้อยละการแตกหัก ร้อยละการเกาะติดกัน ร้อยละการหดตัว และคุณสมบัติสารต้านอนุมูลอิสระ ได้แก่ ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด ปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมด และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของข้าวหอมมะลิแดง

โดยใช้การวิเคราะห์ทางสถิติ การแสดงผลตอบสนอง 3 มิติ และการวิเคราะห์โครงสร้างความเป็นรูปทรงจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมผลการตอบสนองต่างๆ สำหรับการเตรียมข้าวหอมมะลิแดงด้วยกระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับลมหมุนอัดตัว

3.4.3 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมข้าวหอมมะลิแดงด้วยกระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับลมหมุนอัดตัว

จากการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยการอบแห้งจากหัวข้อ 3.4.2 ได้แก่ อุณหภูมิลมร้อนและเวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัว ผลการตอบสนองต่างๆ ได้แก่ คุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติการคั่วรูป และคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระทั้งหมดด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (RSM) ที่มีปัจจัยละ 3 ระดับ แสดงดังตาราง 4

3.5 การเตรียมข้าวหอมมะลิแดงกึ่งสำเร็จรูปโดยใช้กระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับลมหมุนอัดตัวและการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ

จากหัวข้อ 3.4 จะได้ว่าซึ่งสภาวะของอุณหภูมิของการอบแห้ง ความดันลมหมุนอัดตัว และเวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัวที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมข้าวหอมมะลิแดงด้วยกระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับลมหมุนอัดตัว ในการศึกษานี้ได้เพิ่มการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟแบบให้กำลังไฟฟ้าคงที่และแบบขั้นตอน (Stepwise drying) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม การอบแห้งแบบขั้นตอนมีวิธีการดังนี้

1) อบแห้งข้าวหอมมะลิแดงอุณหภูมิลมร้อนร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่สภาวะต่างๆ ได้แก่ การใช้อุณหภูมิร้อนอย่างเดียว และการใช้อุณหภูมิร้อนร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟแบบให้กำลังไฟฟ้าคงที่ 3 ระดับ ได้แก่ 150 300 และ 450 วัตต์

2) วิเคราะห์จลนศาสตร์การอบแห้งโดยใช้สมการอบแห้งแบบกึ่งทฤษฎีของ Page เทียบเคียงกับอัตราส่วนความชื้น (MR) ที่เวลาการอบแห้งใดๆ เพื่อคาดการณ์เวลาการอบแห้งของแต่ละสภาวะ

3) แบ่งช่วงการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟในลักษณะ Step up และ Step down ออกเป็น 2 ช่วง แสดงดังตาราง 5 เวลาการทำงานของกำลังไฟฟ้าจากไมโครเวฟช่วงที่ 1 คือเวลาเริ่มต้นการอบแห้งจนถึงเวลาที่ได้อัตราส่วนความชื้นร้อยละ 70 ของความชื้นเริ่มต้น เวลาการทำงานได้จากการคำนวณในสมการอบแห้งแบบกึ่งทฤษฎีของ Page ของสภาวะที่ให้กำลังไฟฟ้านั้น เวลาการทำงานของกำลังไฟฟ้าจากไมโครเวฟช่วงที่ 2 คือ เวลาเริ่มต้นหลังจากการเปลี่ยนแปลงของช่วงที่ 1 จนถึงเวลาที่ได้อัตราส่วนความชื้นสุดท้ายร้อยละ 10 เวลาการทำงานได้จากการคำนวณในสมการอบแห้งแบบกึ่งทฤษฎีของ Page ของสภาวะที่ให้กำลังไฟฟ้านั้นๆ

ตาราง 5 สภาวะการทดลองสำหรับการอบแห้งของการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟแบบขั้นตอน

ลำดับ	โหมดแบบ ขั้นตอน	กำลังไฟฟ้าจากไมโครเวฟ	
		ช่วงที่ 1 (วัตต์)	ช่วงที่ 2 (วัตต์)
1	Step up	150	300
2	Step up	150	450
3	Step up	300	450
4	Step down	450	150
5	Step down	450	300
6	Step down	300	150

การเตรียมข้าวหอมมะลิแดงด้วยกระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับลมหมุนอัดตัวและการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.5.1 การศึกษาอิทธิพลของการให้ความร้อนเสริมด้วยไมโครเวฟ

1) ศึกษาอุณหภูมิความร้อนที่ได้จากหัวข้อ 3.4 และการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟภายใต้การออกแบบแพคทอเรียล ปัจจัยการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ 4 ระดับ ได้แก่ การใช้อุณหภูมิความร้อนอย่างเดียว และการใช้อุณหภูมิความร้อนร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟแบบให้กำลังไฟฟ้างที่ 150 300 และ 450 วัตต์ ทำการทดลอง 3 ซ้ำ เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับไมโครเวฟและลมหมุนอัดถูกนำมาใช้สำหรับการศึกษานี้

2) ความชื้นของทุกสภาวะการทดลองถูกประเมินจลนศาสตร์การอบแห้งโดยใช้สมการอบแห้งแบบกึ่งทฤษฎีของ Page เพื่อเทียบเคียง (Fitted) กับอัตราส่วนความชื้นที่เวลาการอบแห้งใดๆ จากการทดลอง รวมถึงพารามิเตอร์ทางสถิติและค่าความผิดพลาดของสมการ จากสมการดังกล่าวนำไปสู่การคาดการณ์เวลาการอบแห้งของแต่ละสภาวะการทดลองเพื่อนำไปใช้ในขั้นตอนการอบแห้งแบบขั้นตอน การศึกษาสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลที่มีผลต่อการอบแห้ง การศึกษาประสิทธิภาพการใช้พลังงาน และการศึกษาคุนภาพทางด้านกายภาพ การคั้นรูป และเนื้อสัมผัส

3.5.2 การศึกษาสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลที่มีผลต่อการอบแห้งของอุณหภูมิในการอบแห้งและการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ

ศึกษาสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลที่มีผลต่อการอบแห้งของอุณหภูมิความร้อนและการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟจากจลนศาสตร์การอบแห้งในหัวข้อ 3.5.1 และค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (R^2) ที่ได้จากสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล

3.5.3 การศึกษาประสิทธิภาพการใช้พลังงานของอุณหภูมิในการอบแห้งและการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่ต่างกัน

ศึกษาประสิทธิภาพการใช้พลังงานของอุณหภูมิลมร้อนร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟแบบให้กำลังไฟฟ้าคงที่และแบบขั้นตอนที่ต่างกัน เวลาการอบแห้งได้จากการประมาณค่าสมการอบแห้งแบบกึ่งทฤษฎีของ Page ของสภาวะนั้นๆ ผลจากการทดลองนี้ คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากข้าวหอมมะลิแดง และค่าการใช้พลังงานของอุปกรณ์ทั้งหมด จากนั้นนำสองค่านี้คำนวณหาอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (SMER) และค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ผลการศึกษานี้ถูกใช้พิจารณาสภาวะการใช้ไมโครเวฟร่วมกับการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่มีการใช้ลมหมุนอัดตัวที่เหมาะสม

3.5.4 การศึกษาคุณภาพของข้าวหอมมะลิแดงถึงสำเร็จรูปที่สภาวะการอบแห้งที่ต่างกัน

ข้าวที่ยังไม่ผ่านการหุงสุก (Uncooked grain) ข้าวที่ผ่านการหุงสุกและพักข้าวแล้ว (Cooked grain) และข้าวหุงสุกที่ผ่านการอบแห้งที่ได้จากการทดลองในหัวข้อ 3.5.3 นำไปวิเคราะห์คุณภาพต่างๆ ดังนี้

- 1) ค่าสี
- 2) คุณสมบัติการคั้นรูป
- 3) ร้อยละการหดตัว
- 4) คุณสมบัติเนื้อสัมผัส

ผลการศึกษานี้ถูกใช้พิจารณาสภาวะที่เหมาะสมด้านคุณภาพทางด้านกายภาพ การคั้นรูป และเนื้อสัมผัสสำหรับการเตรียมข้าวหอมมะลิแดงถึงสำเร็จรูป

3.6 การศึกษาความสูงเบดลอยตัวและการควบคุมความคงตัวของเบดด้วยวิธีการประมวลผลภาพ

3.6.1 การศึกษาความสูงเบดลอยตัวของข้าวหอมมะลิแดงหุงสุกระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับลมหมุนอัดตัว

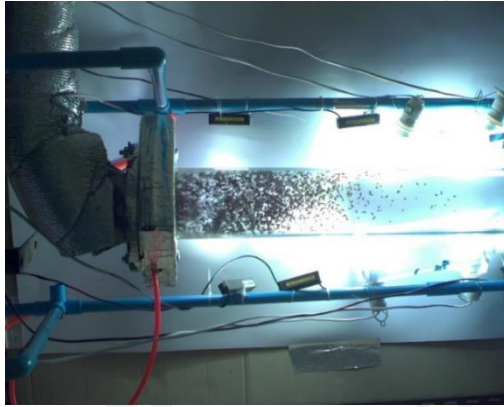
ศึกษาความสูงเบดสำหรับกระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่ต่างกันด้วยวิธีการเฉลี่ยภาพในช่วงเวลาที่กำหนด (Time-averaged) โดยใช้เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับลมหมุนอัดตัว ชุดวิเคราะห์ความสูงเบด และกระบวนการวิเคราะห์ความสูงเบดลอยตัว ความเร็วลมของพัดลมที่ใช้ในการศึกษานี้ คือ 7.27 เมตรต่อวินาที สภาวะการอบแห้งในการศึกษานี้ประกอบด้วย 4 สภาวะ ได้แก่

- 1.1) อุณหภูมิลมร้อน 90 องศาเซลเซียส เวลาอบแห้ง 30 นาที
- 1.2) อุณหภูมิลมร้อน 98 องศาเซลเซียส เวลาอบแห้ง 30 นาที
- 1.3) อุณหภูมิลมร้อน 105 องศาเซลเซียส เวลาอบแห้ง 25 นาที

1.4) อุณหภูมิลมร้อน 120 องศาเซลเซียส เวลาอบแห้ง 20 นาที

การวิเคราะห์ด้วยวิธีการประมวลผลภาพนี้ถูกใช้ร่วมกับชุดวิเคราะห์ความสูงเบตในหัวข้อ 3.2.3 ขั้นตอนแรกของการประมวลผลภาพ คือ กล้องทำการจับภาพ (ภาพประกอบ 26(ก)) จากนั้นทำการถูกหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา 90 องศา (ภาพประกอบ 26(ข)) แล้วตัดส่วนภาพ (Crop) เพื่อเน้นองค์ประกอบจุดเด่นของภาพ คือ พื้นที่เบตด้วยขนาดภาพ คือ 150 x 840 พิกเซล (หรือขนาดพื้นที่จริง คือ 10 x 55.5 เซนติเมตร ดังภาพประกอบ 26(ค)) หลังจากนั้นแปลงภาพเป็นภาพสีเทา (Grayscale) แสดงดังภาพประกอบ 26(ง) จากนั้นลดสัญญาณรบกวนของภาพสีเทาด้วย Gaussian Filter ขนาดรัศมี 5 x 5 พิกเซล แล้วทำการผสมภาพสีเทาก่อนและหลังลดสัญญาณรบกวนด้วยวิธีถ่วงน้ำหนักในอัตราส่วน 3:1 เพื่อให้เกิดความคมชัดของภาพมากขึ้นแสดงดังภาพประกอบ 26(จ) ต่อมาทำการแปลงภาพสีเทาเป็นภาพขาวดำ (Binary) โดยใช้วิธีการกำหนดค่าขีดเริ่มเปลี่ยน (Threshold) เพื่อแยกพื้นที่หลังจากข้าวหอมมะลิแดงขณะลอยตัวภายในห้องอบ ด้วยค่าคงที่เท่ากับ 140 แสดงภาพประกอบ 26(ฉ) สุดท้ายคือการบันทึกไฟล์ภาพขาวดำลงในหน่วยความจำ แพนผังการทำงานโดยรวมแสดงดังภาพประกอบ 27 ภาพขาวดำที่ได้แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของระบบ Gas-solid ขณะอบแห้ง ตำแหน่งพิกเซลสีขาวในภาพขาวดำแสดงให้เห็นถึงข้าวหอมมะลิแดงที่พบภายในห้องอบแห้ง และตำแหน่งพิกเซลสีดำภายในภาพขาวดำบ่งบอกถึงช่องว่าง (Gap) ของอากาศภายในห้องอบแห้ง วิธีการบีบอัดข้อมูลให้กระชับโดยไม่เกิดการสูญหายของข้อมูลวิธีหนึ่ง คือ การเฉลี่ยภาพในช่วงเวลาที่กำหนด (Time-averaged) ตำแหน่งพิกเซลที่มีระดับความเข้มสีภายในภาพที่ต่างกันบ่งบอกให้เห็นถึงเศษส่วนปริมาตรของข้าวหอมมะลิแดง (ของแข็ง) ที่อยู่ภายใน การศึกษานี้จะทำการเฉลี่ยเวลาทุก 10 วินาที หรือการเฉลี่ยค่าพิกเซลภายในภาพทุก 10 ภาพ เริ่มต้นจากการเริ่มการอบแห้ง (0 วินาที) จนถึงวินาทีสุดท้ายของการอบแห้ง

ทุกไฟล์ภาพขาวดำถูกแยกลงในแฟ้มข้อมูล แฟ้มข้อมูลละ 10 ไฟล์ภาพ จากนั้นสร้างเมทริกซ์เปล่าที่มีขนาด 150 x 840 พิกเซล ความละเอียด 8 บิต (ตั้งแต่ 0-255 หรือภาพสีเทา) เมทริกซ์เปล่าถูกสร้างขึ้นในทุกแฟ้มข้อมูล หลังจากนั้นตรวจสอบค่าในแต่ละไฟล์ภาพภายในแฟ้มข้อมูลและเปลี่ยนแปลงค่าในเมทริกซ์เปล่าแบบพิกเซลต่อพิกเซล ถ้าค่าของไฟล์ภาพ ณ พิกเซลนั้นเท่ากับ 255 (พบค่าสีขาว ณ พิกเซลนั้น) จะเพิ่มค่า คือ 25.5 ในเมทริกซ์เปล่า ณ พิกเซลนั้น ถ้าค่าของไฟล์ภาพ ณ พิกเซลนั้นเท่ากับ 0 (พบค่าสีดำ ณ พิกเซลนั้น) จะไม่เพิ่มค่าใดๆ ในเมทริกซ์เปล่า ณ พิกเซลนั้น ผลลัพธ์ข้อมูลที่ปรากฏภายในเมทริกซ์เปล่า คือ ภาพเฉลี่ยในช่วงเวลาที่กำหนดดังภาพประกอบ 26(ซ)



(ก)



(ข)



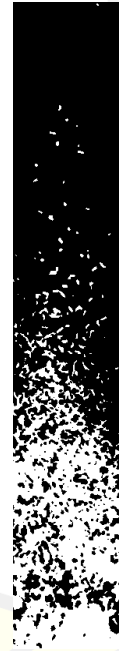
(ค)



(ง)



(จ)

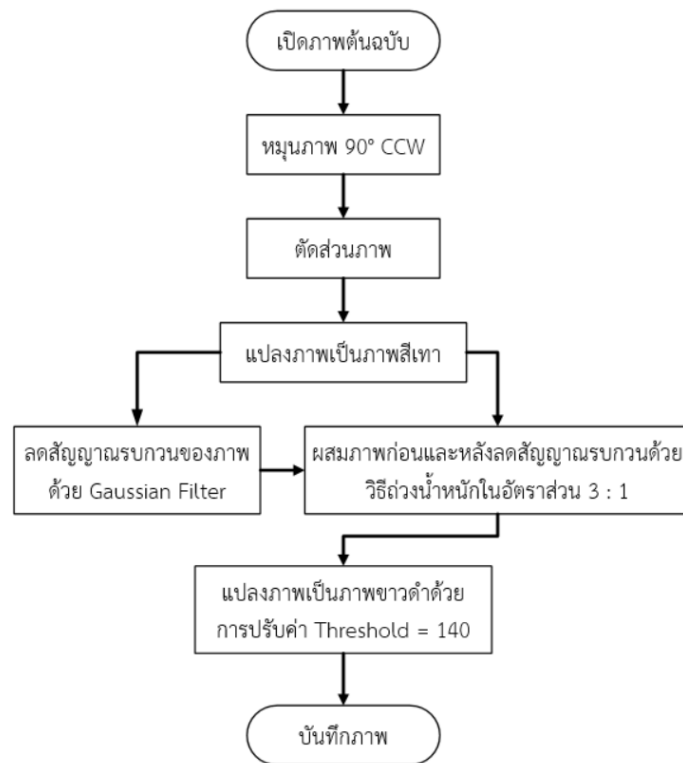


(ฉ)



(ช)

ภาพประกอบ 26 ตัวอย่างกระบวนการประมวลผลภาพเฉลี่ยในช่วงเวลาที่กำหนด
 (ก) ภาพตั้งฉบับ (ข) การหมุนภาพ 90 องศา (ค) ภาพที่ถูกตัดส่วน (ง) ภาพสีเทา (จ) ภาพที่ผ่าน
 กระบวนการความคมชัด (ฉ) ภาพขาวดำ และ (ช) ภาพเฉลี่ยในช่วงเวลาที่กำหนด



ภาพประกอบ 27 แผนผังกระบวนการประมวลผลภาพสำหรับวิเคราะห์ความสูงเบด

ภาพเฉลี่ยในช่วงเวลาที่กำหนดถูกแบ่งกลุ่มพื้นที่จากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบนด้วยขนาด 150×15 พิกเซล ความสูงจริง 1 เซนติเมตร แสดงดังภาพประกอบ 28(ก) แต่พื้นที่ที่จะถูกคำนวณหาเศษส่วนปริมาตร (Volume fraction, ϕ) ดังสมการ 20 เศษส่วนปริมาตรของแต่ละกลุ่มความสูงจะถูกนำมาสร้างความสัมพันธ์ในรูปแบบกราฟ (แนวแกน x คือ ความสูง และแนวแกน y คือ เศษส่วนปริมาตร) ความสูงเบดของภาพในช่วงเวลาที่กำหนดทราบจากการลากจุดตัดของเศษส่วนปริมาตรที่มีค่าลดลงใกล้เคียง 0 ซึ่งก็คือ จุดความสูงสุดท้ายที่ไม่มีปริมาณข้าวหอมมะลิแดงลอยตัวเหนือขึ้นไป แสดงดังภาพประกอบ 28(ข)

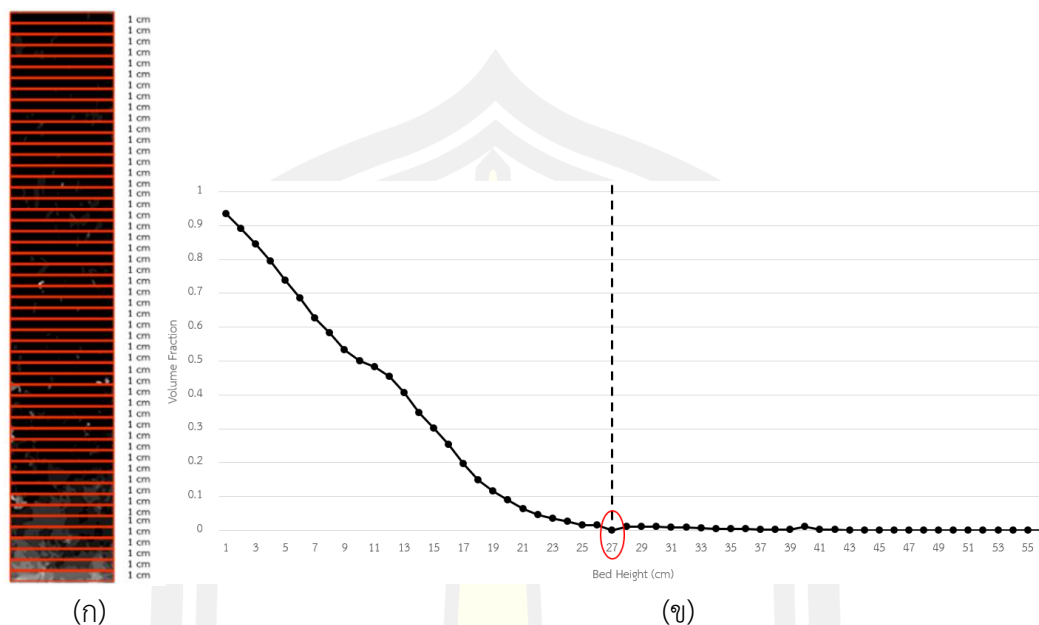
$$\phi = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n \times 255} \quad (20)$$

กำหนดให้

P คือ ค่าภายในพิกเซล

n คือ จำนวนพิกเซลทั้งหมดของภาพกลุ่มพื้นที่ ($150 \times 15 = 2250$)

255 คือ ค่าคงที่ของภาพที่มีขนาด 8 บิต



(ก)

(ข)

ภาพประกอบ 28 ตัวอย่างกระบวนการหาความสูงเบตของภาพในช่วงเวลาที่กำหนด
 (ก) การแบ่งพื้นที่ภาพเฉลี่ยในช่วงเวลาที่กำหนด และ (ข) จุดตัดระหว่างเศษส่วนปริมาตรที่เข้าใกล้ 0
 กับความสูงเบตของภาพในช่วงเวลาที่กำหนด

3.6.2 การศึกษาอิทธิพลของการควบคุมความสูงเบตลอยตัวต่อค่าการใช้พลังงานระหว่าง กระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบตร่วมกับลมหมุนอัดตัวและไมโครเวฟ

ศึกษาประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการอบแห้งภายใต้การควบคุมและปราศจาก
 การควบคุมความคงตัวของเบตในระหว่างการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบตร่วมกับลมหมุนอัดตัวและ
 การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ 5 สภาวะ ได้แก่ การอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบต การอบแห้งแบบฟลู
 อิดไดซ์เบตร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ 3 ระดับ ได้แก่ 150 300 และ 450 วัตต์ และการ
 อบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบตร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟแบบขั้นตอน (จากหัวข้อ 3.5)

เวลาการอบแห้งได้จากการคำนวณในสมการอบแห้งแบบกึ่งทฤษฎีของ Page ของสภาวะ
 นั้นๆ เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบตร่วมกับไมโครเวฟและกระแสลมหมุนอัด ชุดควบคุมความคงตัว
 ของเบต และกระบวนการควบคุมความสูงเบตลอยตัวถูกนำมาใช้ในการศึกษานี้ นอกจากนี้คุณสมบัติ
 ของการอบแห้ง ความดันลมหมุนอัดตัว และเวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัวที่เหมาะสมสำหรับการเตรียม
 ข้าวหอมมะลิแดงด้วยกระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบตร่วมกับลมหมุนอัดตัวถูกนำมาใช้ใน
 การศึกษานี้ด้วยเช่นกัน ตัวอย่างข้าวหอมมะลิแดงถูกควบคุมความคงตัวในระดับความสูง 23
 เซนติเมตร (ความสูงของห้องอบไมโครเวฟ) ข้าวหอมมะลิแดงที่ลอยตัวเหนือไมโครเวฟถูกวิเคราะห์

ภาพเพื่อหาเศษส่วนปริมาตรด้วยกล้องเว็บแคม หากร้อยละเศษส่วนปริมาตรที่ได้สูงกว่าร้อยละ 3.5 ก็คือ ข้าวหอมมะลิแดงเริ่มลอยตัวเหนือไมโครเวฟ ระบบจะทำการปรับความเร็วลมลดลงเพื่อลดระดับความสูงของเบตในระดับที่ต้องการ ความเร็วลมเริ่มต้นของพัดลมที่ใช้ คือ 7.27 เมตรต่อวินาที ผลที่ได้รับจากการศึกษานี้ คือ อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (SMER) และค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) สำหรับกระบวนการควบคุมความสูงเบตลอยตัวที่กำหนดไว้ด้วยผลลัพธ์ของเศษส่วนปริมาตร (Volume fraction) ของภาพที่ได้รับจากกล้องแบบเฟรมต่อเฟรมจากการสังเกตแบบเรียลไทม์ กระบวนการดังกล่าวเกิดจากการทำงานร่วมกันระหว่างฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ เริ่มต้นทางด้านซอฟต์แวร์ด้วยการรับภาพหนึ่งในระบบสี RGB ขนาด 640 x 480 พิกเซล ที่ได้รับจากกล้องเว็บแคม แสดงดังภาพประกอบ 29(ก) ภาพหนึ่งจะถูกตัดส่วนภาพ (Crop) เพื่อเน้นองค์ประกอบจุดเด่นของภาพคือ พื้นที่เบตด้วยขนาดภาพ คือ 98 x 219 พิกเซล (หรือขนาดพื้นที่จริง คือ 11 x 24.7 เซนติเมตร) ปรากฏดังภาพประกอบ 29(ข) หลังจากนั้นแปลงภาพเป็นภาพสีเทา (Grayscale) ดังภาพประกอบ 29(ค) ที่มีค่าความสว่างทั้งหมด 256 ระดับ (ตั้งแต่ 0-255) จากนั้นลดสัญญาณรบกวนของภาพสีเทาด้วย Gaussian filter ขนาดรัศมี 5 x 5 พิกเซล แล้วทำการผสมภาพสีเทาก่อนและหลังลดสัญญาณรบกวนด้วยวิธีถ่วงน้ำหนักในอัตราส่วน 3:1 เพื่อให้เกิดความคมชัดของภาพมากขึ้น (ภาพประกอบ 29(ง)) ต่อมาทำการแปลงภาพสีเทาเป็นภาพขาวดำ (Binary) โดยใช้วิธีการกำหนดค่าขีดเริ่มเปลี่ยน (Threshold) เพื่อแยกพื้นที่หลังจากข้าวหอมมะลิแดงขณะลอยตัวภายในห้องอบด้วยค่าคงที่เท่ากับ 140 (ภาพประกอบ 29(จ)) เมื่อได้ภาพขาวดำแล้วต่อมาทำการนับเฉพาะจำนวนพิกเซลสีขาวที่พบในภาพขาวดำทั้งหมด สุดท้ายนำมาคำนวณร้อยละเศษส่วนปริมาตร (Volume fraction percentage, VF) แสดงดังสมการ 21 ซึ่งกระทำในลักษณะเช่นนี้กับทุกเฟรมภาพหนึ่ง

$$VF = \frac{\sum_{i=1}^n W_i}{P_{crop}} \times 100 \quad (21)$$

เมื่อ	W	คือ	จำนวนพิกเซลสีขาวที่พบในภาพขาวดำ
	n	คือ	จำนวนพิกเซลสีขาวทั้งหมดในภาพขาวดำ
	P _{crop}	คือ	ขนาดของภาพขาวดำที่ผ่านการตัดส่วนภาพแล้ว



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

ภาพประกอบ 29 ตัวอย่างการประมวลผลภาพสำหรับกระบวนการควบคุมความคงตัวของเบต

(ก) ภาพตั้งฉบับ (ข) ภาพที่ถูกตัดส่วน (ค) ภาพสีเทา (ง) ภาพที่ผ่านกระบวนการความคมชัด
และ (จ) ภาพขาวดำ

พหุบัณฑิต ชีวะ

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้แบ่งผลการศึกษาออกเป็น 3 ส่วน ซึ่งประกอบด้วย ผลการศึกษาการเตรียมข้าวหอมมะลิแดงด้วยกระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบตร่วมกับลมหมุนอัดตัว ผลการศึกษาการเตรียมข้าวหอมมะลิแดงด้วยกระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบตร่วมกับลมหมุนอัดตัวและการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ และผลการศึกษาความสูงเบตลอยตัวและการควบคุมความคงตัวของเบตด้วยวิธีการประมวลผลภาพ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.1 ผลการศึกษาการเตรียมข้าวหอมมะลิแดงด้วยกระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบตร่วมกับลมหมุนอัดตัว

4.1.1 ผลของอุณหภูมิการอบแห้งและความดันของลมหมุนอัดตัว

แบบจำลองเอมพิริคัลหรือสมการการอบแห้งของ Page ถูกใช้อย่างแพร่หลายเพื่ออธิบายพฤติกรรมการอบแห้งของวัสดุชีวภาพ [91] สมการนี้ได้นำมาเปรียบเทียบกับอัตราส่วนความชื้นของการทดลองโดยมี 2 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิลมร้อน 3 ระดับ ได้แก่ 90 105 และ 120 องศาเซลเซียส ร่วมกับความดันลมหมุนอัดตัว 3 ระดับ ได้แก่ 4 5 และ 6 บาร์ ซึ่งจะได้พารามิเตอร์ของสมการของ Page คือ ค่าคงที่อัตรา (k) ค่าคงที่เลขชี้กำลัง (n) ตั้งสมการ 11 นอกจากนี้สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_{eff}) และค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) แสดงดังตาราง 6

ตาราง 6 พารามิเตอร์ของสมการการอบแห้งของ Page ค่าสัมประสิทธิ์แพร่ความชื้นประสิทธิผล และค่าพลังงานกระตุ้นที่มีผลต่อความดันลมหมุนอัดตัว และอุณหภูมิลมร้อน

SCAP	FAT	k	n	D_{eff}	E_a
4	90	0.10248±0.00175 ^{de}	0.83519±0.00812 ^{cd}	3.25±0.16 ^{de}	15.45±0.17 ^{ns}
	105	0.11983±0.00651 ^c	0.86152±0.01815 ^{bc}	4.22±0.53 ^{bc}	
	120	0.13104±0.00242 ^{bc}	0.87113±0.00618 ^{ab}	4.79±0.21 ^{bc}	
5	90	0.09745±0.00246 ^e	0.82108±0.00723 ^d	2.92±0.16 ^e	13.66±2.28 ^{ns}
	105	0.10887±0.00693 ^d	0.86671±0.01079 ^{ab}	3.91±0.42 ^{cd}	
	120	0.12217±0.00639 ^c	0.85033±0.01475 ^{bc}	4.11±0.45 ^{bcd}	
6	90	0.12511±0.00748 ^{bc}	0.84925±0.01741 ^{bc}	4.19±0.54 ^{bc}	13.81±0.17 ^{ns}

105	0.13544 ± 0.00815^b	0.87502 ± 0.02087^{ab}	5.03 ± 0.72^b
120	0.15072 ± 0.00784^a	0.89014 ± 0.02048^a	5.94 ± 0.79^a

หมายเหตุ : SCAP คือ ความดันลมหมุนอัดตัว (บาร์) FAT คือ อุณหภูมิลมร้อน (องศาเซลเซียส) D_{eff} คือ ค่าสัมประสิทธิ์แพร่ความชื้น ประสิทธิภาพ ($\times 10^{-3}$ ตารางเมตรต่อวินาที) E_a คือ ค่าพลังงานกระตุ้น (กิโลจูลต่อโมล) และสัญลักษณ์ตัวห้อยที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ค่าคงที่อัตรา (k) บ่งบอกถึงประสิทธิภาพการอบแห้ง โดยที่อัตราการอบแห้งสูงจะแสดงด้วยค่า k ที่สูง ดังนั้นพารามิเตอร์นี้ใช้เพื่อกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดโดยยึดตามค่า k สูงสุด จากตาราง 6 พบว่า ค่า k แปรผันตามสภาวะการอบแห้งที่แตกต่างกันและอยู่ในช่วง 0.09745-0.15072 ในแต่ละอุณหภูมิลมร้อนนั้น ค่า k ลดลงเมื่อใช้ความดันลมหมุนอัดตัวที่สูงขึ้นจาก 4 เป็น 5 บาร์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Gaewsondee และ Duangkhamchan (2019) [26] ที่ระบุว่า การลดลงของค่าคงที่อัตราเกิดจากการรบกวนของลมหมุนอัดตัว อย่างไรก็ตามที่ความดันลมหมุนอัดตัว 6 บาร์ ค่า k เพิ่มขึ้นทุกอุณหภูมิลมร้อนอาจเกิดจากการปะทะกันของข้าวหอมมะลิแดงที่อยู่ภายในห้องอบแห้งอย่างรุนแรง ซึ่งเป็นผลมาจากการฉุดลมด้วยความเร็วลมหมุนอัดตัวสูงของหัวฉีดลม 2 ตัวที่ติดตั้งบริเวณด้านล่างของเบด

การพาความร้อนในระบบฟลูอิดไดซ์เบดนั้นมีบทบาทสำคัญต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน อุทกพลศาสตร์สำหรับเฟสของแข็งและก๊าซมีความสัมพันธ์อย่างมากกับปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อน และสามารถปรับปรุงได้ด้วยการสร้างความปั่นป่วนจากอากาศภายนอกที่ไหลอย่างสม่ำเสมอมากขึ้นและประสิทธิภาพการผสม [92], [93] ที่ความดันลมหมุนอัดตัว 6 บาร์ ทำให้เกิดการปั่นป่วนเพิ่มขึ้น ซึ่งมีความสำคัญและส่งผลต่อปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนเมื่อเปรียบเทียบกับผลการรบกวนของความดันลมหมุนอัดตัว 4 และ 5 บาร์

การไหลเวียนสำหรับเฟสของแข็งและก๊าซในระบบฟลูอิดไดซ์เช่นนี้สามารถปรับปรุงได้ ซึ่งส่งผลให้เกิดประสิทธิภาพสูงขึ้น การเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากความเข้มข้นของสนามการไหลที่ปั่นป่วนเพิ่มขึ้นถูกนำมาใช้ในงานวิจัยต่างๆ [92]–[94] คำอธิบายที่เป็นไปได้อีกประการหนึ่งคือผลกระทบจากการปะทะจากปริมาณกระแสลมที่สูงบริเวณด้านล่างของเบดที่หนาแน่น แรงฉุดลมในทิศทางของเส้นสัมผัสวงได้จัดชั้นขอบความร้อนบนพื้นผิวเมล็ดข้าวหอมมะลิแดง ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลและความร้อนสูงขึ้น [95]–[97]

สมการการอบแห้งของ Page มีผลต่อกลไกการอบแห้งขึ้นอยู่กับประเภทวัสดุและสภาวะการอบแห้ง [21] จากตาราง 6 พบว่าค่าคงที่เลขชี้กำลัง (n) อยู่ระหว่าง 0.82108-0.89014 ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิลมร้อนที่สูงขึ้น แต่ความดันลมหมุนอัดตัวไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจน

สหสัมพันธ์ของค่าคงที่ k และ n ได้รับการประเมินจากสมการการอบแห้งของ Page พบว่า ค่าคงที่ทั้งสองมีความสัมพันธ์แบบกำลังสองกับอุณหภูมิลมร้อน (T) และความดันลมหมุนอัดตัว (P) โดยมีค่า R^2 อยู่ระหว่าง 0.6730-0.9059 เมื่อ

$$k=0.39744+(1.01 \times 10^{-3})T-(0.16458)P-(4.92 \times 10^{-5})TP+(5.11 \times 10^{-7})T^2+(0.01794)P^2 \quad (R^2=0.9059)$$

$$n=0.44849+(0.01467)T-(0.17758)P+(8.25 \times 10^{-5})TP-(6.62 \times 10^{-5})T^2+(0.017668)P^2 \quad (R^2=0.6730)$$

ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงในกระบวนการอบแห้ง (Falling rate) ความชื้นในวัสดุอาหารจะถ่ายเทไปยังพื้นผิวและออกสู่อากาศภายนอกด้วยค่าเฉลี่ยของการแพร่กระจายภายใน ซึ่งมีอีกชื่อหนึ่งว่า ค่าสัมประสิทธิ์แพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_{eff}) [98] จากตาราง 6 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์แพร่ความชื้นประสิทธิผลอยู่ระหว่าง $2.92-5.94 \times 10^{-8}$ ตารางเมตรต่อวินาที ซึ่งสูงกว่าช่วงปกติสำหรับวัสดุอาหารซึ่งอยู่ในช่วง $10^{-11}-10^{-9}$ ตารางเมตรต่อวินาที [99] โดยปกติแล้วค่า D_{eff} สอดคล้องกับค่าคงที่อัตราการอบแห้ง ซึ่งค่า D_{eff} สูงขึ้นหมายถึงการอบแห้งเร็วขึ้น ในสภาวะความดันลมหมุนอัดตัวคงที่ ค่า D_{eff} มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิลมร้อนที่สูงขึ้น (ดังแสดงในตาราง 6) สิ่งนี้มักพบเห็นได้ในกระบวนการอบแห้งเนื่องจากการถ่ายโอนมวลและความร้อนที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีแรงขับเคลื่อนที่สูงขึ้นโดยการเพิ่มพลังงานความร้อน [100] สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zielinska และ Michalska (2016) [98] ซึ่งรายงานว่าค่า D_{eff} เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิลมร้อนที่สูงขึ้นในการอบแห้งบลูเบอร์รี่

จากตาราง 6 พบว่า D_{eff} มีแนวโน้มลดลงเมื่อความดันลมหมุนอัดตัวเพิ่มขึ้นจาก 4 ถึง 5 บาร์ ในแต่ละอุณหภูมิลมร้อน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Gaewsondee และ Duangkhamchan (2019) [26] เมื่อการอบแห้งของลมหมุนอัดตัวนำไปสู่การลดอัตราการอบแห้งและค่าสัมประสิทธิ์แพร่ความชื้นประสิทธิผล อย่างไรก็ตามค่า D_{eff} เพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่อุณหภูมิเดียวกันเมื่อความดันอากาศอัดเพิ่มขึ้นถึง 6 บาร์ ตามที่ได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ คือ ความดันอากาศสูงทำให้เกิดความปั่นป่วนที่รุนแรงมากขึ้น ซึ่งช่วยเพิ่มการถ่ายโอนความร้อนในระบบ [92]–[94] การปะทะของอากาศก็เป็นคำอธิบายที่สมเหตุสมผลสำหรับข้อสังเกตนี้ แรงฉุดลมในทิศทางของเส้นสัมผัสผิวที่มีความเร็วสูงอาจขัดหรือลดชั้นขอบความร้อนบนพื้นผิวเมล็ดข้าวหอมมะลิแดงส่งผลให้ช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและมวล ในขณะที่ความดันลมหมุนอัดตัวและความเร็วลมสูงจะช่วยหลีกเลี่ยงการเกิดเปลือกแข็ง (Case Hardening) ส่งผลให้ความชื้นระเหยออกจากพื้นผิวเมล็ดข้าวหอมมะลิแดงเพิ่มขึ้น [95]–[97]

ในกระบวนการอบแห้งนั้น ความชื้นจะถูกเคลื่อนที่ออกจากวัสดุอาหารโดยใช้พลังงานกระตุ้นจากตาราง 6 แสดงถึงค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ได้แก่ 15.45 13.66 และ 13.81 กิโลจูลต่อโมล ที่ความดันลมหมุนอัดตัว 4 5 และ 6 บาร์ ตามลำดับ ค่าเหล่านี้อยู่ในช่วงทั่วไปสำหรับวัสดุอาหารอบแห้ง คือ ระหว่าง 12.7-110 กิโลจูลต่อโมล [101] อย่างไรก็ตามพลังงานกระตุ้นที่ได้รับไม่แตกต่างกันอย่างมี

นัยสำคัญทางสถิติที่ความดันลมหมุนอัดตัวต่างๆ ดังนั้นพารามิเตอร์ของสมการการอบแห้งของ Page (k และ n) และค่าสัมประสิทธิ์แพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_{eff}) ที่มีค่าสูงที่สุด คือ สภาวะที่มีความดันลมหมุนอัดตัว 6 บาร์ ซึ่งถูกเลือกในการเตรียมข้าวหอมมะลิแดงกิ่งสำเร็จรูป

4.1.2 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งและเวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัว

ผลของอุณหภูมิของการอบแห้งและเวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัวถูกตรวจสอบโดยใช้วิธีการตอบสนองพินผิว (RSM) ผลการตอบสนองของพารามิเตอร์อินพุต 2 ค่า ถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติการคั้นรูป และคุณสมบัติสารต้านอนุมูลอิสระ

4.1.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและอัตราส่วนการคั้นรูป

การออกแบบการทดลองและค่าการตอบสนองที่สอดคล้องกันซึ่งประเมินโดยใช้ ANOVA แสดงไว้ในตาราง 7 ในระหว่างกระบวนการหาสภาวะที่เหมาะสม (Optimization) ค่าการตอบสนองของคุณสมบัติทางกายภาพและการคั้นรูปจะถูกทำนายโดยสัมประสิทธิ์โดยประมาณสำหรับส่วนประกอบฟังก์ชันจริงแสดงดังตาราง 8 ผลการตอบสนองทั้งหมดมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลอง ($p < 0.01$) โดยมีค่า R^2 สูงกว่า 0.7

ตาราง 7 การออกแบบการทดลองและค่าของคุณสมบัติทางกายภาพและการคั้นรูป

ลำดับ	X_1	X_2	%การเกาะติดกัน	%การแตกหัก	%การหดตัว	อัตราส่วนการคั้นรูป
1	90	2	3.67	17.33	42.00	0.92
2	90	6	2.33	18.33	44.67	0.94
3	90	10	2.33	24.00	47.67	0.90
4	105	2	0.00	18.67	37.67	1.21
5	105	6	0.00	26.67	46.33	1.08
6	105	10	0.00	39.33	46.33	1.09
7	120	2	0.00	13.00	33.67	1.35
8	120	6	0.00	62.33	42.00	1.14
9	120	10	0.00	72.00	44.33	1.17

หมายเหตุ : X_1 คือ อุณหภูมิลมร้อน (องศาเซลเซียส) และ X_2 คือ เวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัว (นาที)

ผลลัพธ์ในตาราง 8 แสดงให้เห็นว่าเทอมของอุณหภูมิลมร้อนเชิงเส้นและอุณหภูมิลมร้อนกำลังสองสำหรับร้อยละการเกาะติดกันมีนัยสำคัญอย่างยิ่งที่ระดับ $p < 0.01$ ในขณะที่เทอมอื่นไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ค่า F value ในตาราง 8 พบว่า อุณหภูมิลมร้อนมีนัยสำคัญอย่างยิ่งต่อร้อยละการเกาะติดกัน ในขณะที่เวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัวไม่มีนัยสำคัญทางสถิติต่อร้อยละการเกาะติดกัน

สำหรับร้อยละการแตกหักนั้น เทอมของอุณหภูมิร้อนเชิงเส้นและเวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัว ตลอดจนเทอมที่มีปฏิสัมพันธ์กันมีนัยสำคัญอย่างยิ่งที่ระดับ $p < 0.01$ ในขณะที่เทอมกำลังสองทั้งหมดไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ

ค่า F value ของปัจจัยทั้งสองนี้มีค่าที่สูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิร้อนเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญที่สุด ในทำนองเดียวกันเทอมของปัจจัยการอบแห้งทั้งคู่แบบเชิงเส้นมีนัยสำคัญอย่างยิ่งต่อร้อยละการหดตัวที่ระดับ $p < 0.01$ ในขณะที่เทอมที่มีปฏิสัมพันธ์กัน และเทอมกำลังสองของอุณหภูมิร้อนไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ผลลัพธ์ในตาราง 8 ยังแสดงให้เห็นว่าเทอมของเวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัวกำลังสองมีนัยสำคัญที่ระดับ $p < 0.05$ และปัจจัยการอบแห้งนี้มีความสำคัญมากด้วยการยืนยันของค่า F value ที่สูง

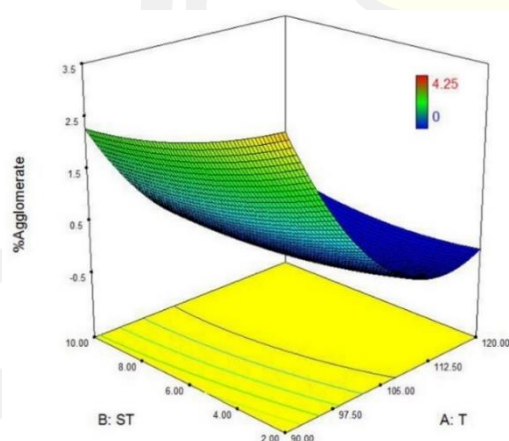
เทอมของอุณหภูมิร้อนและเวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัวเชิงเส้นต่ออัตราการคืนรูปยังมีนัยสำคัญที่ระดับ $p < 0.01$ และ $p < 0.05$ ตามลำดับ ในขณะที่เทอมอื่นไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ตามค่า F value ในตาราง 8 พบว่า อุณหภูมิร้อนเป็นสิ่งสำคัญที่สุด รองลงมา คือ เวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัว

ตาราง 8 ผลลัพธ์ของ ANOVA ของ Fitted Model สำหรับคุณสมบัติทางกายภาพและการคืนรูปในการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับลมหมุนอัดตัวของข้าวหอมมะลิแดงกิ่งสำเร็จรูป

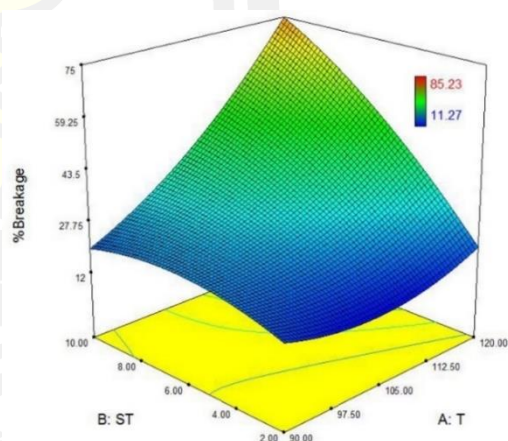
Source	ค่าสัมประสิทธิ์โดยประมาณ			
	ร้อยละการ เกาะติดกัน	ร้อยละการ แตกหัก	ร้อยละการหด ตัว	อัตราส่วนการ คืนรูป
Intercept				
(a ₀)	-0.15	31.59	45.04	1.09
Linear terms				
(a ₁) X ₁	-1.39 ^a	14.61 ^a	-2.39 ^a	0.15 ^a
(a ₂) X ₂	-0.22 ^{ns}	14.39 ^a	4.17 ^a	0.053 ^b
Interaction terms				
(a ₁₂) X ₁ X ₂	0.34 ^{ns}	13.08 ^a	1.25 ^{ns}	0.040 ^{ns}
Quadratic terms				
(a ₁₁) X ₁ ²	1.39 ^a	6.27 ^{ns}	-1.05 ^{ns}	-0.057 ^{ns}
(a ₂₂) X ₂ ²	0.22 ^{ns}	-5.05 ^{ns}	-2.39 ^b	0.053 ^{ns}
Lack-of-fit (p value)	0.3976 ^{ns}	0.0026 ^a	0.2375 ^{ns}	0.5095 ^{ns}

Source	ค่าสัมประสิทธิ์โดยประมาณ			
	ร้อยละการเกาะติดกัน	ร้อยละการแตกหัก	ร้อยละการหดตัว	อัตราส่วนการคืนรูป
Model (p value)	<0.0001 ^a	<0.0001 ^a	<0.0001 ^a	<0.0001 ^a
F value				
X_1	102.98	54.11	20.48	42.20
X_2	2.66	52.47	62.21	5.34
X_1X_2	4.00	28.92	3.72	2.00
X_1^2	34.33	3.33	1.33	2.01
X_2^2	0.89	2.16	6.82	1.78
R ²	0.8734	0.8704	0.8183	0.7175
Adj.R ²	0.8432	0.8395	0.7750	0.6502
Predicted R ²	0.7725	0.7841	0.6921	0.5417
C.V. (%)	62.72	26.00	5.24	9.00
Std. Dev.	0.58	8.43	2.24	0.098

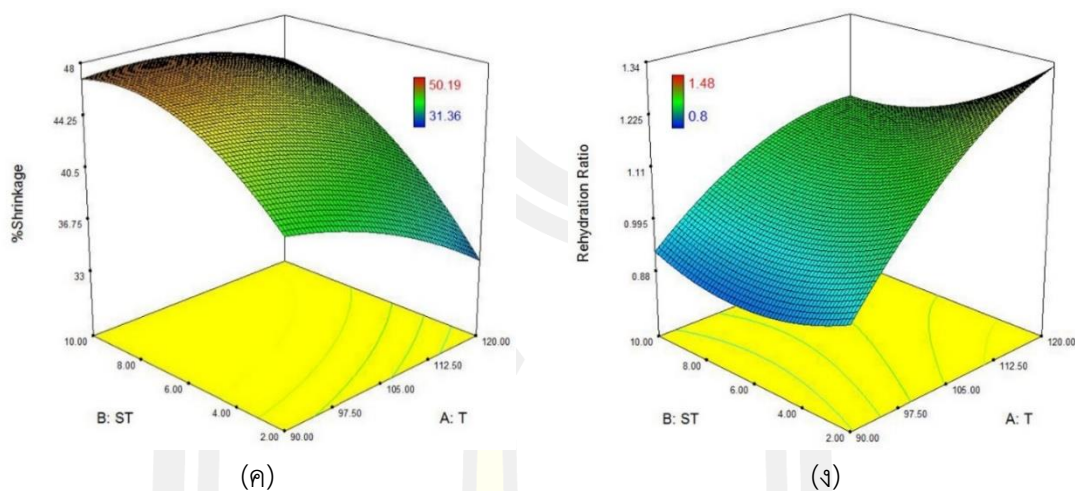
หมายเหตุ : X_1 คือ อุณหภูมิลมร้อน (องศาเซลเซียส) X_2 คือ เวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัว (นาที) ^{ns} คือ ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ^a คือ มีนัยสำคัญที่ร้อยละ 1 ($p < 0.01$ หรือมีนัยสำคัญมากที่สุด) และ ^b คือ มีนัยสำคัญที่ร้อยละ 5 ($p < 0.05$)



(ก)



(ข)



ภาพประกอบ 30 การพล็อตกราฟสามมิติของของคุณสมบัติทางกายภาพและการคืนรูป
(ก) ร้อยละการเกาะติดกัน (ข) ร้อยละการแตกหัก (ค) ร้อยละการหดตัว (ง) อัตราการคืนรูป ใน
รูปแบบฟังก์ชันของอุณหภูมิความร้อน (T, องศาเซลเซียส) และเวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัว (ST, นาที)

ภาพประกอบ 30 แสดงการพล็อตกราฟ 3 มิติของทุกผลการตอบสนองของคุณสมบัติทางกายภาพและการคืนรูปของอุณหภูมิความร้อนและเวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัว อุณหภูมิความร้อน (T) มีผลเชิงลบต่อร้อยละการเกาะติดกันของตัวอย่างข้าวหุงสุกที่ผ่านการอบแห้งแสดงดังภาพประกอบ 30(ค) ในขณะที่การเกาะติดกันไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญด้วยการเพิ่มเวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัว (ST) ที่อุณหภูมิสูงกว่า 90 องศาเซลเซียส

เวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัวที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสนั้น จะส่งผลต่อร้อยละการเกาะติดกันของเมล็ด (ประมาณร้อยละ 2.3-3.5) ยิ่งเวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัวนานร้อยละการเกาะติดกันของเมล็ดยิ่งต่ำ ผลลัพธ์นี้แตกต่างเล็กน้อยจากการศึกษาของ Gaewsondee และ Duangkhamchan (2019) [26] ที่ระบุถึงการเกาะติดกันของเมล็ดข้าวไรซ์เบอร์รี่ประมาณร้อยละ 0.8 ที่ความดันลมหมุนอัดตัว 4 บาร์ ความต่างเกิดจากการใช้เวลานานกว่าตั้งแต่เริ่มจนถึงสิ้นสุดกระบวนการอบแห้ง ในขณะที่เวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัวในวิทยานิพนธ์นี้ใช้เวลาเพียง 2-10 นาที ที่อุณหภูมิสูงกว่า 90 องศาเซลเซียสนั้น ข้าวหอมมะลิแดงไม่เกิดการจับตัวเป็นก้อนและเมล็ดข้าวแห้งอย่างรวดเร็วและถูกแยกออกจากกันโดยสมบูรณ์ด้วยแรงเฉือนสูงที่กระทำโดยกระแสลมอัด ดังนั้นอุณหภูมิความร้อนสูงที่มีเวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัวสั้นที่สุดจึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดเมื่อเทียบกับค่าร้อยละการเกาะติดกันที่มีแนวโน้มน้อยที่สุด

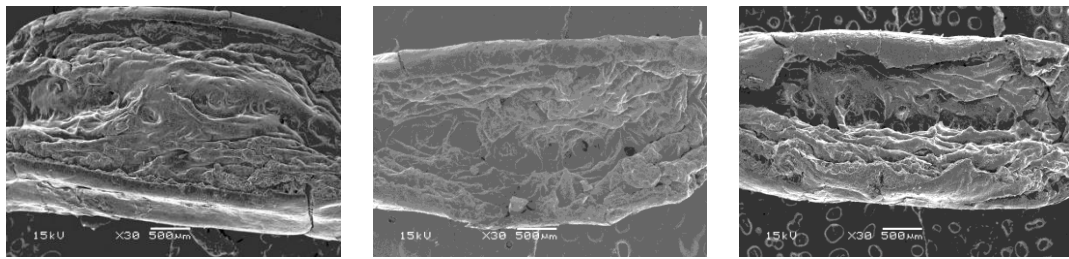
ภาพประกอบ 30(ข) แสดงผลของอุณหภูมิความร้อนและเวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัวต่อร้อยละการแตกหัก แนวโน้มที่ชัดเจนปรากฏขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิความร้อนที่สูงขึ้นและเวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัวที่นานขึ้น ค่าสูงสุดของร้อยละการแตกหักที่ร้อยละ 75 พบเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิ 120

องศาเซลเซียส และเวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัวเป็นเวลา 10 นาที ลมหมุนอัดตัวช่วยลดความเหนียวของพื้นผิวระหว่างการอบแห้งแต่ยังส่งผลให้เมล็ดเกิดการแตกหักเนื่องจากแรงเฉือนสูง ภาพประกอบ 30(ข) แสดงร้อยละการแตกหักของเมล็ดข้าวที่อุณหภูมิลมร้อนและเวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัวที่ต่างกัน ในขณะที่อุณหภูมิคงที่ทำให้เกิดการแตกหักเพิ่มขึ้นตามเวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัว ยกเว้นที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสซึ่งเกิดการแตกหักเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแต่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ อุณหภูมิลมร้อนส่งผลกระทบบ่อยอย่างรุนแรงต่อการแตกหักของเมล็ดซึ่งอยู่ในช่วงร้อยละ 17.33-24.00 18.67-39.33 และ 13.00-72.00 ที่อุณหภูมิลมร้อน 90 105 และ 120 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ในขณะที่เวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัวที่นานขึ้นที่อุณหภูมิเดียวกันส่งผลให้เกิดการแตกหักที่สูงขึ้น ดังนั้นอุณหภูมิลมร้อน 120 องศาเซลเซียส ด้วยเวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัว 2 นาที จึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่จะคงเมล็ดข้าวที่มีรูปร่างสมบูรณ์ไว้โดยไม่มีการจับตัวกันเป็นก้อน และร้อยละการแตกหักน้อยที่สุด

โดยทั่วไปของการหดตัวของวัสดุในระหว่างการอบแห้งนั้น มักเกิดจากการยุบตัวของเซลล์ภายในวัสดุโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิสูงขึ้น [102] การหดตัวของข้าวหอมมะลิแดงมีผลต่อปัจจัยการอบแห้งดังแสดงในภาพประกอบ 30(ค) พบว่า ร้อยละการหดตัวอยู่ในช่วงร้อยละ 33.67-47.67 ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิลมร้อนและเวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัว เวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัวมีผลเชิงบวกต่อร้อยละการหดตัว ในขณะที่อุณหภูมิลมร้อนมีผลเชิงลบต่อร้อยละการหดตัว ซึ่งร้อยละการหดตัวลดลงเล็กน้อย ตั้งแต่ร้อยละ 42.00-47.67 37.67-46.33 และ 33.67-44.33 ตามสภาวะอุณหภูมิลมร้อนสูงขึ้น ได้แก่ 90 105 และ 120 องศาเซลเซียส ตามลำดับ น้ำหรือความชื้นในระหว่างการอบแห้งถูกระเหยและเคลื่อนที่จากภายในสู่พื้นผิวของเมล็ดข้าวหอมมะลิแดง เนื่องจากความไม่สมดุลของแรงดันไอส่งผลให้เมล็ดข้าวเกิดการหดตัว ในขณะที่อุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้อัตราการอบแห้งสูง เนื่องจากการเกิดความร้อนที่รวดเร็วและความดันไอสะสมในเมล็ดข้าว ทำให้เกิดการหดตัวน้อยลงหรือแม้แต่การขยายตัวของปริมาตรซึ่งเรียกว่า การพองตัว การพองตัวส่งผลต่อโครงสร้างในระดับจุลภาคและช่วยให้เกิดประสิทธิภาพการคั้นรูป [7], [20] ร้อยละการหดตัวที่ลดลงเล็กน้อยด้วยอุณหภูมิลมร้อนที่สูงขึ้นซึ่งไม่เป็นไปตามงานวิจัยของ Le และ Jittanit (2012) [20] ซึ่งใช้อุณหภูมิลมร้อนในการอบแห้งที่ต่ำกว่า คือ 50-90 องศาเซลเซียส ร้อยละการหดตัวมากขึ้นตามปัจจัยการอบแห้งที่ใช้เวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัวนานขึ้นเป็นผลมาจากการรบกวนของลมหมุนอัดตัวที่เข้าไปในระบบเป็นระยะเวลาานซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Gaewsondee และ Duangkhamchan (2019) [26] พบว่า ร้อยละการหดตัวเพิ่มขึ้นตามการใช้เวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัวนานขึ้น เนื่องจากลมหมุนอัดตัวเข้าไปในระบบการอบแห้งเป็นระยะเวลาาน ส่งผลให้อัตราการอบแห้งลดลง ความชื้นถูกขจัดออกไปอย่างช้าๆ และผลลัพธ์ที่ตามมาคือ ข้าวหอมมะลิแดงเกิดการยุบตัวของเซลล์ทำให้เกิดการหดตัวมากขึ้น [102] ดังนั้นนอกเหนือจากแนวโน้มของร้อยละการเกาะติดกันและร้อยละการแตกหักที่ต่ำ

ที่สุดแล้ว ปัจจัยของอุณหภูมิความร้อน 120 องศาเซลเซียส และเวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัว 2 นาที เป็นสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมด้วยแนวโน้มของร้อยละการหดตัวที่น้อยที่สุด

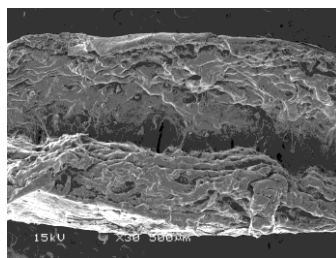
การคืนรูปเป็นลักษณะสำคัญของผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จรูปซึ่งปกติแล้วจะเกี่ยวข้องกับการหดตัวของวัสดุ [81] วัสดุที่มีการหดตัวน้อยจะทำให้เกิดโครงสร้างความเป็นรูพรุนสูง และช่วยให้ดูดซับน้ำได้ง่ายในระหว่างการคืนรูป จากภาพประกอบ 30(ง) พบว่า อุณหภูมิความร้อนมีผลเชิงบวกต่ออัตราการคืนรูป โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัวที่สั้นที่สุด ในขณะที่เวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัวส่งผลต่อการคืนรูปของข้าวเล็กน้อย จากตาราง 7 พบว่า อัตราการคืนรูปอยู่ในช่วงระหว่าง 0.90-1.35 โดยอัตราการคืนรูปสูงบ่งบอกถึงการดูดซับน้ำได้มากในระหว่างกระบวนการคืนรูป ผลของอัตราการคืนรูปในสภาวะการอบแห้งที่อุณหภูมิความร้อนคงที่มีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้เวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัวนานขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากการรบกวนของลมหมุนอัดตัวที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าที่ไหลเพิ่มเข้าไปในระบบด้วยระยะเวลาสั้น ทำให้การอบแห้งช้าลงและมีผลต่อโครงสร้างภายในเมล็ดข้าวหอมมะลิแดงอบแห้งในระดับจุลภาค ในสภาวะการอบแห้งแต่ละช่วงเวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัวนั้น อุณหภูมิความร้อนส่งผลต่ออัตราการคืนรูปอย่างมีนัยสำคัญและอัตราการคืนรูปมีค่าเพิ่มขึ้นตามสภาวะการอบแห้งเมื่ออุณหภูมิความร้อนสูงขึ้น โครงสร้างที่มีรูพรุนอาจเป็นคำอธิบายที่สมเหตุสมผลสำหรับค่าอัตราการคืนรูปที่สูงขึ้น สภาวะการอบแห้งของอุณหภูมิความร้อน 120 องศาเซลเซียส และเวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัว 2 นาที มีค่าอัตราการคืนรูปสูงสุด ทำให้อัตราการอบแห้งสูงเนื่องจากความชื้นภายในเมล็ดข้าวหุงสุกเคลื่อนตัวไปยังพื้นผิวอย่างรวดเร็ว และเซลล์ของเมล็ดข้าวหอมมะลิแดงเกิดการหดตัวน้อย ผลลัพธ์เหล่านี้ได้รับการยืนยันโดยภาพ SEM แสดงดังภาพประกอบ 31(ก-ญ) ซึ่งจะเห็นได้ว่าลักษณะรูพรุนเล็กๆ สามารถสังเกตได้จากภาพ SEM ของข้าวหอมมะลิแดงอบแห้งที่อุณหภูมิความร้อน 120 องศาเซลเซียส และเวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัว 2 นาที (ดังภาพประกอบ 31(ข)) เมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะของรูพรุนในข้าวที่ผ่านการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (ดังภาพประกอบ 31(ญ))



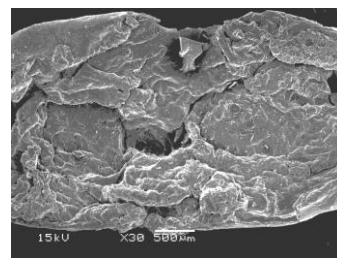
(ก)

(ข)

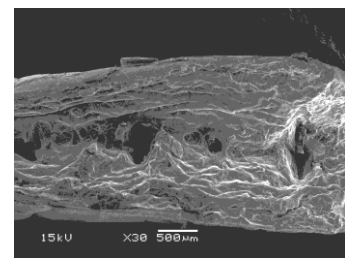
(ค)



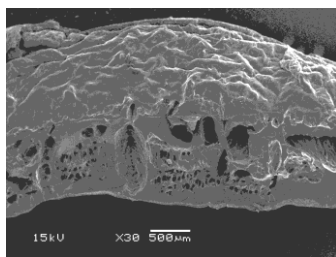
(ง)



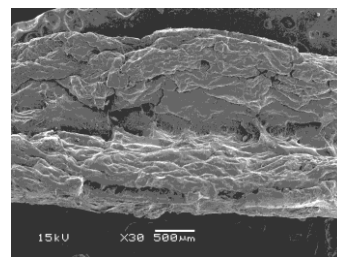
(จ)



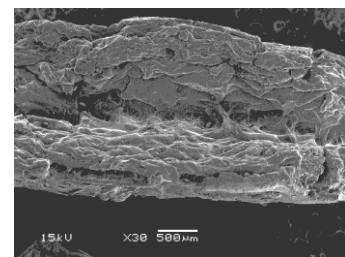
(ฉ)



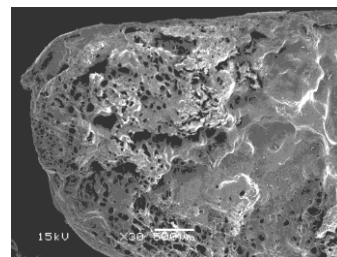
(ช)



(ซ)



(ฌ)



(ญ)

ภาพประกอบ 31 ภาพตัดขวางของข้าวหอมมะลิแดงอบแห้งภายใต้สภาวะการอบแห้งต่างๆ
 (ก) 90 องศาเซลเซียส 2 นาที (ข) 90 องศาเซลเซียส 6 นาที (ค) 90 องศาเซลเซียส 10 นาที
 (ง) 105 องศาเซลเซียส 2 นาที (จ) 105 องศาเซลเซียส 6 นาที (ฉ) 105 องศาเซลเซียส 10 นาที
 (ช) 120 องศาเซลเซียส 2 นาที (ซ) 120 องศาเซลเซียส 6 นาที (ฌ) 120 องศาเซลเซียส 10 นาที
 (ญ) ตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze-dried)

4.1.2.2 คุณสมบัติของสารต้านอนุมูลอิสระ

คุณสมบัติของสารต้านอนุมูลอิสระ ได้แก่ ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด (TPC) ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด (TFC) ปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมด (TAC) และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (DPPH) ของข้าวหอมมะลิแดงที่เปลี่ยนไปตามสภาวะการอบแห้งที่ต่างกันถูกแสดงดังตาราง 9 โดยทั่วไปอนุมูลอิสระมีบทบาทสำคัญที่สุดต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสารต้านอนุมูลอิสระ เนื่องจากอนุมูลอิสระเป็นปัจจัยในการเร่งปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดการสลายตัวออกซิเดชันหรือฤทธิ์ของสารประกอบทางชีวภาพ คุณสมบัติของสารต้านอนุมูลอิสระที่เปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะการอบแห้งด้วยอนุมูลอิสระมีอุณหภูมิพบในงานวิจัยต่างๆ พบว่า เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสารต้านอนุมูลอิสระที่ลดลง [103]–[106] หรือเพิ่มขึ้น [107], [108] ตามสภาวะการอบแห้งด้วยอนุมูลอิสระที่เพิ่มขึ้น

ตาราง 9 การออกแบบทดลองและค่าของคุณสมบัติของสารต้านอนุมูลอิสระ

ลำดับ	X ₁	X ₂	TPC	TFC	TAC	DPPH
1	90	2	483.26	26.73	35.24	53.71
2	90	6	484.95	27.18	35.22	53.75
3	90	10	488.07	27.11	34.52	53.73
4	105	2	475.55	26.29	34.68	51.19
5	105	6	474.81	26.67	34.35	51.81
6	105	10	479.60	26.86	34.29	52.21
7	120	2	471.97	24.85	34.31	50.50
8	120	6	471.22	24.84	34.08	50.58
9	120	10	478.06	25.22	33.76	51.09
ตัวอย่างข้าวหุงสุก			530.30	35.10	58.23	62.58
ตัวอย่างที่ผ่านการ Freeze drying			515.82	31.75	55.16	60.50

หมายเหตุ: TPC TFC TAC และ DPPH มีหน่วยเป็น mg GAE/100g mg QE/100g mg cy-3-glu/100g และ %scavenging ตามลำดับ

สารประกอบต้านอนุมูลอิสระ เช่น ฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ และแอนโทไซยานิน ส่วนใหญ่มักพบในข้าวที่มีสีคล้ำ เนื่องจากความคล้ำมีการเชื่อมโยงกับเปลือกของเมล็ด [109] ผลของความร้อนในกระบวนการอบแห้งนี้ต่อคุณสมบัติของสารต้านอนุมูลอิสระแสดงในตาราง 9 การอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying) เป็นกระบวนการในอุดมคติที่ทำให้วัสดุอบแห้งมีคุณภาพทางกายภาพและทางเคมีสูง [110] จากการเปรียบเทียบระหว่างข้าวที่ผ่านการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งและข้าวหุง

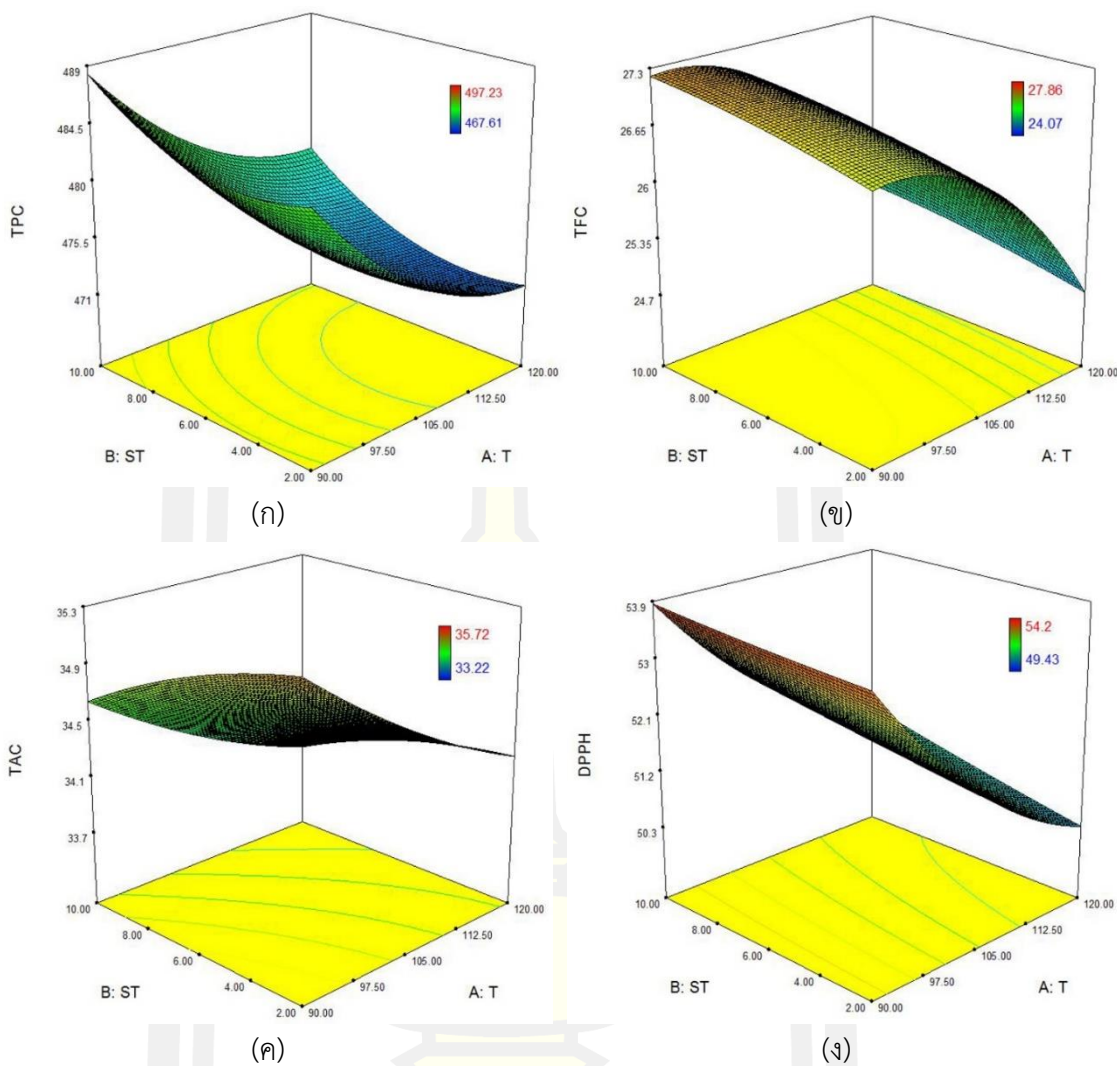
สุกใหม่ พบว่า คุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระทั้งหมดของข้าวที่ผ่านการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย นอกจากนี้ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด (TFC) ลดลงสูงสุดเมื่อเทียบกับข้าวหุงสุกใหม่ คือ ร้อยละ 9.5 ในขณะที่ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด (TPC) ปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมด (TAC) และ ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (DPPH) ลดลงเมื่อเทียบกับข้าวหุงสุกใหม่เพียงร้อยละ 2.7 5.3 และ 3.3 ตามลำดับ คุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระที่ลดลงเล็กน้อยเหล่านี้สอดคล้องกับการวิจัยก่อนหน้านี้โดยเน้นที่ผลของการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง [111]

นอกจากค่าของผลตอบสนองของคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติการคืนรูปแล้ว ตาราง 10 ยังแสดงผล ANOVA ของ Fitted model สำหรับคุณสมบัติสารต้านอนุมูลอิสระในการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์ร่วมกับลมอัดที่หมุนวนของข้าวหอมมะลิแดงกิ่งสำเร็จรูป พบว่า ผลของเทอมอุณหภูมิลมร้อนเชิงเส้นต่อค่า TPC มีนัยสำคัญที่ระดับ $p < 0.01$ ในขณะที่เทอมอื่นไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ค่า F value ของอุณหภูมิลมร้อนสูงกว่าเวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัว แสดงว่าอุณหภูมิลมร้อนเป็นปัจจัยการอบแห้งที่สำคัญที่สุด เมื่อพิจารณาการตอบสนองของค่า TFC เทอมของอุณหภูมิลมร้อนเชิงเส้นและเทอมกำลังสองมีนัยสำคัญที่ระดับ $p < 0.01$ และ $p < 0.05$ ตามลำดับ ในขณะที่เทอมอื่นไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ค่า F value ของอุณหภูมิลมร้อนสูงกว่าเวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัวอย่างมากแสดงให้เห็นถึงอุณหภูมิลมร้อนเป็นปัจจัยการอบแห้งที่มีผลต่อกระบวนการอบแห้งนี้ ค่า TAC ได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิลมร้อนและเวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัวที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 และ 0.05 ตามลำดับ ในขณะที่อุณหภูมิลมร้อนเป็นปัจจัยที่สำคัญกว่าเวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัวเนื่องจากค่า F value สูงกว่า ค่าสัมประสิทธิ์โดยประมาณของฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (DPPH) พบว่า เทอมของอุณหภูมิลมร้อนแบบเชิงเส้นอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ ($p < 0.01$) ซึ่งสอดคล้องกับค่า F value ที่สูงและบ่งชี้ว่าอุณหภูมิลมร้อนเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญมากดังตาราง 10

ตาราง 10 ผลลัพธ์ของ ANOVA ของ Fitted model สำหรับคุณสมบัติของสารต้านอนุมูลอิสระใน การอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับลมหมุนอัดตัวของข้าวหอมมะลิแดงกิ่งสำเร็จรูป

Source	ค่าสัมประสิทธิ์โดยประมาณ			
	TPC	TFC	TAC	DPPH
Intercept				
(a ₀)	475.04	26.64	34.50	51.72
Linear terms				
(a ₁) X ₁	-5.84 ^a	-1.02 ^a	-0.47 ^a	-1.50 ^a
(a ₂) X ₂	2.49 ^{ns}	0.22 ^{ns}	-0.28 ^b	0.27 ^{ns}
Interaction terms				
(a ₁₂) X ₁ X ₂	0.32 ^{ns}	-0.002 ^{ns}	0.043 ^{ns}	0.14 ^{ns}
Quadratic terms				
(a ₁₁) X ₁ ²	2.94 ^{ns}	-0.62 ^b	0.082 ^{ns}	0.49 ^{ns}
(a ₂₂) X ₂ ²	2.43 ^{ns}	-0.053 ^{ns}	-0.083 ^{ns}	0.025 ^{ns}
Lack-of-fit (p value)	0.9452 ^{ns}	0.8650 ^{ns}	0.6877 ^{ns}	0.7101 ^{ns}
Model (p value)	0.0016 ^a	0.0001 ^a	0.0012 ^a	0.0001 ^a
F value				
X ₁	21.99	61.03	22.25	98.21
X ₂	4.00	2.85	7.66	3.21
X ₁ X ₂	0.044	0.000	0.12	0.59
X ₁ ²	1.85	7.50	0.22	3.48
X ₂ ²	1.26	0.056	0.23	0.009
R ²	0.5813	0.7728	0.5921	0.8340
Adj.R ²	0.4816	0.7187	0.4950	0.7945
Predicted R ²	0.2928	0.6095	0.3246	0.7177
C.V. (%)	1.10	2.11	1.23	1.24
Std. Dev.	5.28	0.55	0.42	0.64

หมายเหตุ: ^{ns} คือ ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ^a คือ มีนัยสำคัญที่ร้อยละ 1 (p<0.01) หรือมีนัยสำคัญมากที่สุด และ ^b คือ มีนัยสำคัญที่ร้อยละ 5 (p<0.05)



ภาพประกอบ 32 การพล็อตกราฟสามมิติของคุณสมบัติของสารต้านอนุมูลอิสระ (ก) TPC, (ข) TFC, (ค) TAC และ (ง) DPPH ที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิร้อน (T, องศาเซลเซียส) และเวลาในการใช้สมุนไพรสดตัว (ST, นาที)

ภาพประกอบ 32(ก-ค) แสดงแผนภาพสามมิติของปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด (TPC) ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด (TFC) ปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมด (TAC) และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (DPPH) เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิร้อนและเวลาในการใช้สมุนไพรสดตัว อุณหภูมิร้อนมีผลเชิงลบอย่างชัดเจนต่อคุณสมบัติของสารต้านอนุมูลอิสระ ในขณะที่เวลาในการใช้สมุนไพรสดตัวไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ

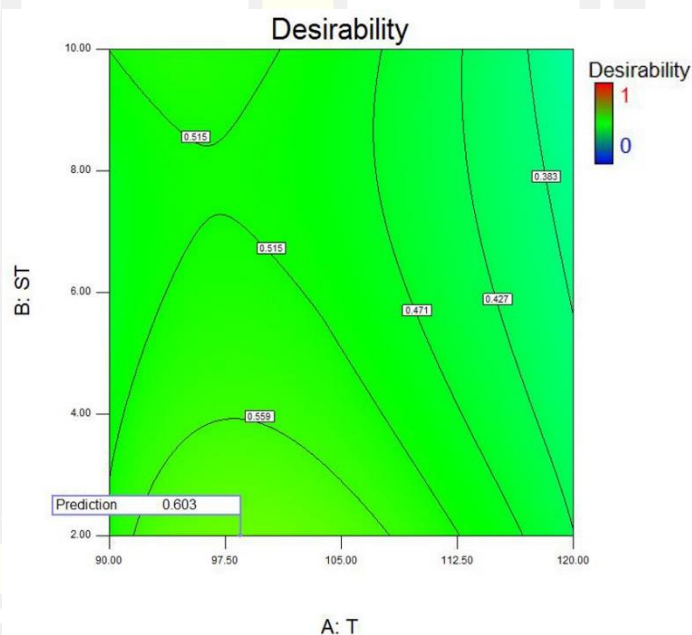
ภาพประกอบ 32(ก) แสดงถึงการคงอยู่สูงสุดของปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด (TPC) ระหว่าง 485-489 mg GAE ต่อ 100 กรัม ที่สภาวะการอบแห้งของอุณหภูมิร้อน 90 องศาเซลเซียส ในทุกเวลาการใช้สมุนไพรสดตัว อย่างไรก็ตามสภาวะการอบแห้งที่อุณหภูมิร้อนสูงสุดนั้น พบว่า

ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด (TPC) เพิ่มขึ้นตามเวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัวที่นานขึ้น เนื่องจากการรบกวนของลมหมุนอัดตัวเป็นเวลานาน ทำให้ความร้อนภายในระบบลดลงและส่งผลให้การเสื่อมสภาพของ TPC ลดลง ในทำนองเดียวกันอุณหภูมิมีผลอย่างมากต่อปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด (TFC) ของข้าวหอมมะลิแดงหุงสุกที่ผ่านการอบแห้งแล้ว (ภาพประกอบ 32(ข)) สภาวะการอบแห้งของเวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัวใดๆ พบว่า ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด (TFC) ลดลงเป็นสองเท่าเมื่ออุณหภูมิมีผลสูงขึ้น ข้อสังเกตนี้สอดคล้องกับผลลัพธ์ ANOVA ของอุณหภูมิมีผลแบบเชิงเส้นและแบบกำลังสอง (X_1 และ X_1^2 ตามลำดับ) ดังแสดงในตาราง 10 ค่าสูงสุดของ TFC คือ 27 mg QE ต่อ 100 กรัม โดยประมาณที่สภาวะการอบแห้งของอุณหภูมิมีผล 90 องศาเซลเซียส ปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมด (TAC) ลดลงเมื่ออุณหภูมิมีผลสูงขึ้นเช่นเดียวกับที่พบในค่าของ TPC และ TFC ค่าสูงสุดของ TAC คือ 35 mg cy-3-glu ต่อ 100 กรัม ที่สภาวะการอบแห้งของอุณหภูมิมีผล 90 องศาเซลเซียส เวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัว 2 นาที ผลของฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระจากปัจจัยการอบแห้งแสดงไว้ในภาพประกอบ 32(ง) พบว่า อุณหภูมิมีผลอย่างมากต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ในขณะที่เวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัวมีนัยสำคัญที่น้อยกว่า ค่าสูงสุดของร้อยละการยับยั้ง คือ ร้อยละ 54 ที่สภาวะการอบแห้งของอุณหภูมิมีผล 90 องศาเซลเซียส

หลังจากการอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับลมหมุนอัดตัว พบว่า คุณสมบัติของสารต้านอนุมูลอิสระทั้งหมดลดลงอย่างมีนัยสำคัญตามปัจจัยการอบแห้งที่ต่างกัน นอกจากนี้ยังพบว่า เกิดการลดลงเล็กน้อยของค่า TPC (ร้อยละ 8-11) TFC (ร้อยละ 23-29) และ DPPH (ร้อยละ 14-19) ในขณะที่ค่า TAC เกิดการลดลงอย่างมากที่ร้อยละ 40-42 สารต้านอนุมูลอิสระส่วนใหญ่ไวต่อปัจจัยแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ออกซิเจน และความชื้น [109] จากงานวิจัยของ Ratseewo และคณะ (2020) [112] รายงานว่า ค่า TPC TFC TAC และ DPPH มีค่าลดลงร้อยละ 21 25 53 และ 27.5 ตามลำดับ หลังจากข้าวหอมมะลิแดงผ่านการอบแห้งด้วยอุณหภูมิมีผลที่ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งการค้นพบนี้สอดคล้องกับการใช้งานกับตัวอย่างอื่นๆ เช่น ข้าวขาวและแกลบ [113] ใบหม่อน [114] ใบบลูเบอร์รี่ [115] และบลูเบอร์รี่ป่า [100] ด้วยอุณหภูมิมีผลที่ 90 องศาเซลเซียส และเวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัวทุกระดับเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้คุณสมบัติการต้านอนุมูลอิสระทั้งหมดลดลงในระดับต่ำสุดดังแสดงในภาพประกอบ 32 ในทางกลับกันสภาวะการอบแห้งของอุณหภูมิมีผล 120 องศาเซลเซียส และเวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัว 2 นาที พบว่า เกิดร้อยละการลดลงสูงสุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างข้าวหอมมะลิแดงหุงสุกใหม่

4.1.3 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมข้าวหอมมะลิแดงด้วยกระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับลมหมุนอัดตัว

ปัญหาการเกาะติดกันของเมล็ดข้าวหุงสุกเนื่องจากความเหนียวของผิวเมล็ดและขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างที่ซับซ้อนสามารถแก้ไขได้ด้วยเทคนิคการอบแห้งด้วยการใช้ลมหมุนอัดตัวเพื่อผลิตข้าวหอมมะลิแดงกิ่งสำเร็จรูปตามที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.1.1 และ 4.1.2 ปัจจัยการอบแห้งทั้งหมดส่งผลต่อทั้งคุณสมบัติทางกายภาพและสารต้านอนุมูลอิสระในรูปแบบต่างกัน ดังนั้นจึงมีการกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยการอบแห้ง ได้แก่ อุณหภูมิลมร้อน (T) และเวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัว (ST) และผลตอบสนองต่างๆ ได้แก่ คุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติการคั้นรูป และคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระทั้งหมด สภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมพิจารณาจากเกณฑ์ของค่าต่ำสุดของร้อยละการเกาะติดกัน การแตกหัก และการหดตัว ค่าสูงสุดของอัตราการคั้นรูปและคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระทั้งหมด



ภาพประกอบ 33 เส้นของฟังก์ชันค่า Desirability

ภาพประกอบ 33 แสดงกราฟ 2 มิติของฟังก์ชันค่า Desirability ที่ได้รับจากความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยการอบแห้งและการตอบสนองของร้อยละการเกาะติดกัน การแตกหัก การหดตัว อัตราการคั้นรูป ค่า TPC ค่า TFC ค่า TAC และ ค่า DPPH ตาราง 11 แสดงสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมโดยมีค่า Desirability สูงสุดอยู่ในช่วง 0.523-0.603 จากสภาวะดังกล่าวนี้ พบว่า สภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุด เท่ากับ 0.603 คือ อุณหภูมิลมร้อนที่ 98.5 องศาเซลเซียส และเวลาในการใช้ลมหมุน

อัดตัวที่ 2 นาที่ แต่อย่างไรก็ตามเพื่อให้สะดวกในทางปฏิบัติ วิทยานิพนธ์นี้จึงใช้สภาวะการอบแห้ง โดยใช้อุณหภูมิร้อนที่ 98 องศาเซลเซียส ความดันลมหมุนอัดตัว 6 บาร์ และเวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัว 2 นาที่ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการและเป็นสภาวะพื้นฐานสำหรับขั้นตอนการศึกษาต่อไป

ตาราง 11 สภาวะการอบที่เหมาะสมและพารามิเตอร์เอาต์พุตที่สอดคล้องกัน

T	ST	%Agglo	%Broke	%Shrink	RR	TPC	TFC	TAC	DPPH	Desirability
98.48	2	1.31	12.67	39.86	1.10	478.20	26.69	34.93	52.28	0.603
98.23	2	1.36	12.74	39.91	1.10	478.35	26.70	34.94	52.31	0.603
98.13	2	1.18	12.51	39.74	1.11	478.83	26.67	34.90	52.19	0.603
102.75	2	0.59	12.06	39.00	1.17	475.96	26.51	34.77	51.73	0.593
94.71	10	1.23	24.88	47.10	0.99	485.12	27.22	34.47	53.18	0.532

หมายเหตุ: T คือ อุณหภูมิร้อน (องศาเซลเซียส) ST คือ เวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัว (นาที่) %Agglo คือ ร้อยละการเกาะติดกัน %Broke คือ ร้อยละการแตกหัก %Shrink คือ ร้อยละการหดตัว RR คือ อัตราการคืนรูป TPC คือ ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด (mg GAE ต่อ 100 กรัม) TFC คือ ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด (mg QE ต่อ 100 กรัม) TAC คือ ปริมาณแอนโธไซยานินทั้งหมด (mg cy-3-glu ต่อ 100 กรัม) และ DPPH คือ ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (ร้อยละการยับยั้ง)

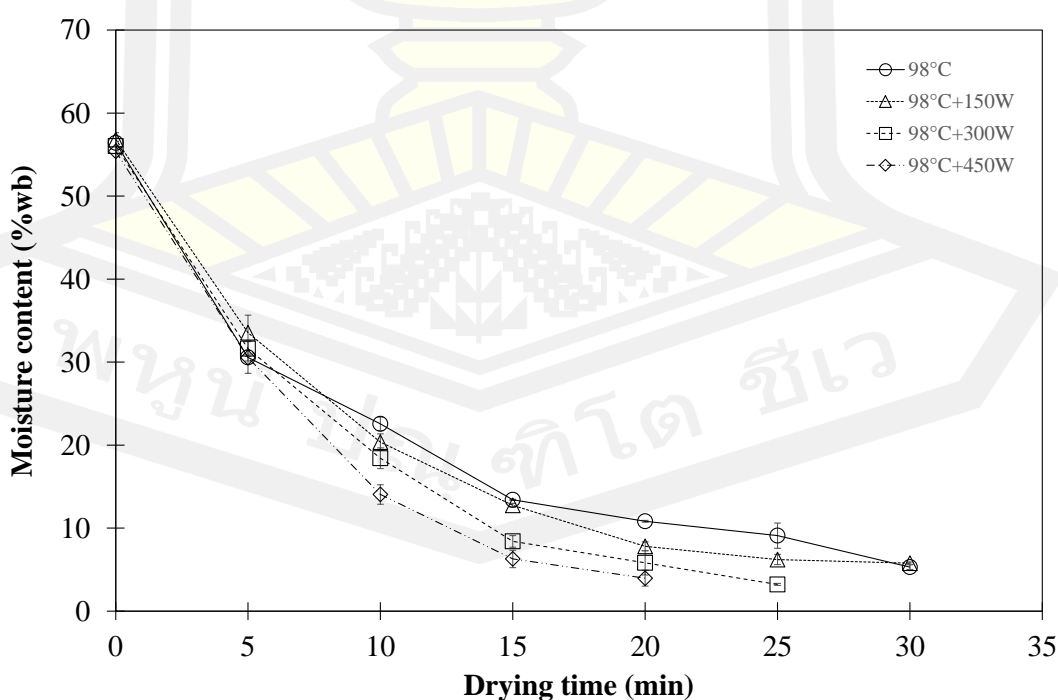
4.2 ผลการศึกษาการเตรียมข้าวหอมมะลิแดงด้วยกระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับลมหมุนอัดตัวและการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ

จากหัวข้อ 4.1 จะเห็นได้ว่ากระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับลมหมุนอัดตัวสามารถแก้ปัญหาการเกาะติดกันของเมล็ดข้าวสุกในระหว่างการอบแห้งได้ โดยสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสม คือ อุณหภูมิร้อนเท่ากับ 98.5 องศาเซลเซียส และลมหมุนอัดตัวที่ความดัน 6 บาร์ เป็นเวลา 2 นาที่ ซึ่งสภาวะการอบแห้งดังกล่าวนี้เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมข้าวหอมมะลิแดงกึ่งสำเร็จรูป ที่มีคุณลักษณะการอบแห้งดีที่สุด ในขณะที่ยังคงรักษาคุณภาพทั้งทางด้านกายภาพและเคมี อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงคุณสมบัติทางการคืนรูป พบว่า ประสิทธิภาพการคืนรูปยังไม่ดีเท่าที่ควร เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่เตรียมจากการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ดังนั้นในหัวข้อ 4.2 นี้จึงได้ศึกษาผลของการใช้ไมโครเวฟร่วมกับกระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับลมหมุนอัดตัว เพื่อปรับปรุงอัตราการระเหยของน้ำในระหว่างการอบแห้ง ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดโครงสร้างที่มีรูพรุนภายในเมล็ดข้าวหลังการอบแห้งได้ อย่างไรก็ตามเนื่องจากชุดการอบแห้งที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้มีข้อจำกัดของการตั้งค่าอุณหภูมิร้อนที่ระดับความถูกต้อง ± 1 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงใช้อุณหภูมิร้อนที่เหมาะสมเท่ากับ 98 องศาเซลเซียส สำหรับการศึกษาในขั้นตอนต่อไป แบบจำลองการอบแห้ง

เป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทดลอง หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าแบบจำลองการอบแห้งแบบชั้นบาง (Thin-layer drying model) มีงานวิจัยมากมายที่ได้นำเสนอแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับผลิตผลทางการเกษตรและอาหารในแต่ละชนิด [98], [100], [104], [116]–[118] สมการการอบแห้งของ Page เป็นหนึ่งในสมการเหล่านั้นที่ได้รับความนิยม เนื่องจากสามารถนำมาใช้ในการทำนายเวลาการอบแห้งได้ครอบคลุมวัสดุหลากหลายชนิด อีกทั้งมีความซับซ้อนและจำนวนของตัวแปรที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่นๆ เช่น แบบจำลองของ Midilli เป็นต้น [117]–[119] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้แบบจำลองของ Page มาใช้สำหรับวิเคราะห์และประเมินประสิทธิภาพของการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับลมหมุนอัดตัวและการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ

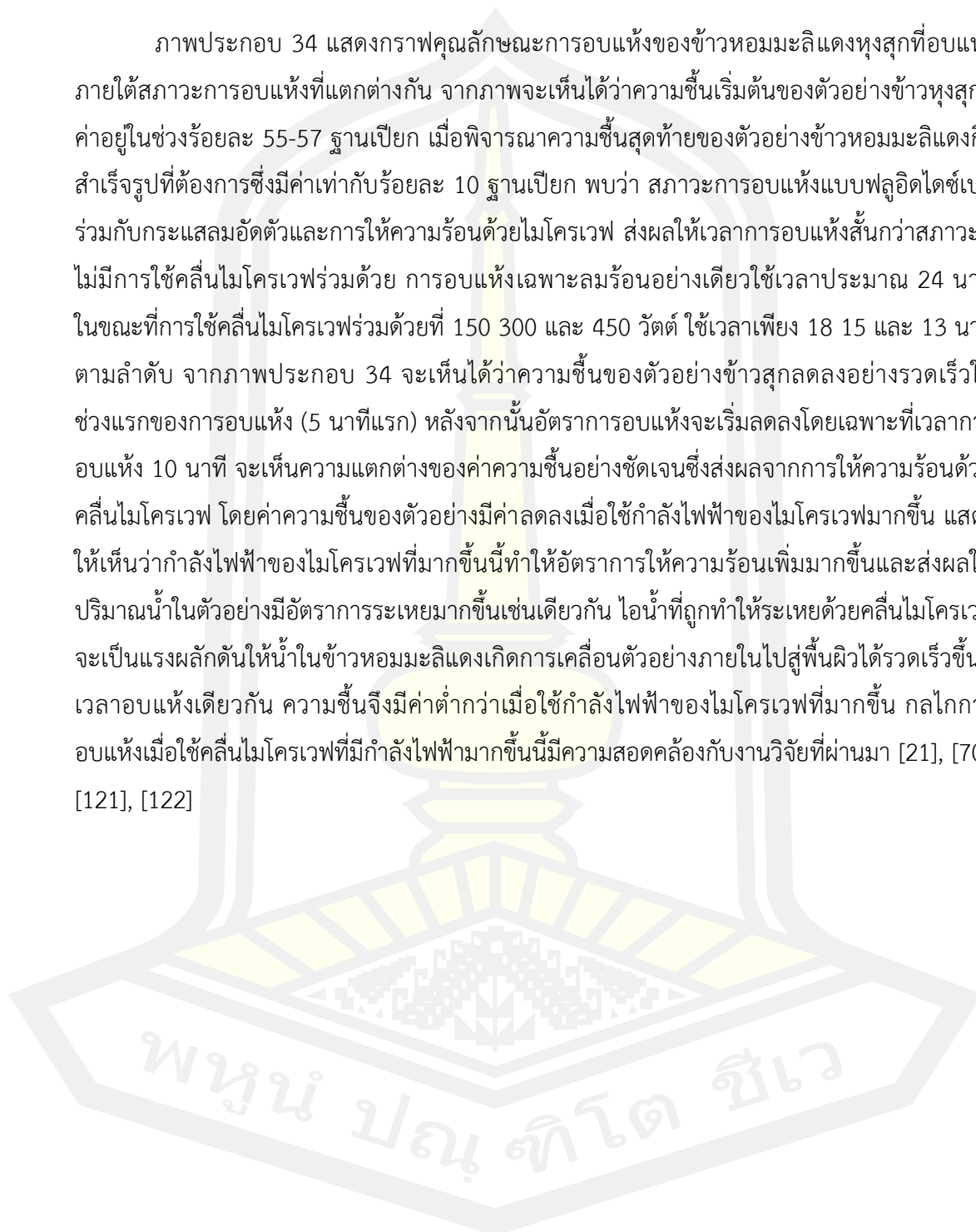
4.2.1 ผลของการให้ความร้อนเสริมด้วยไมโครเวฟต่อจลนศาสตร์การอบแห้ง

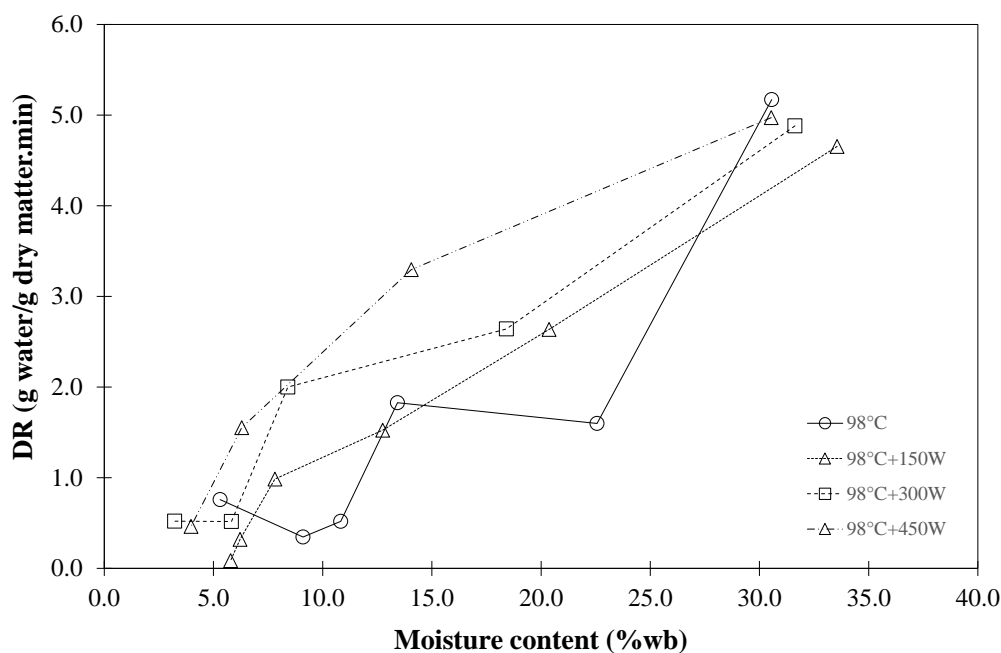
ภาพประกอบ 34 แสดงพฤติกรรมการอบแห้งของตัวอย่างข้าวหอมมะลิแดงหุงสุก โดยใช้กระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟและลมหมุนอัดตัว ที่อุณหภูมิความร้อนคงที่เท่ากับ 98 องศาเซลเซียส ลมหมุนอัดตัวภายใต้ความดันเท่ากับ 6 บาร์ เป็นเวลา 2 นาที ในขณะที่ใช้กำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟที่ต่างกันคือ 0 150 300 และ 450 วัตต์ จากภาพประกอบ 34 แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการอบแห้งที่เป็นไปตามทฤษฎีการอบแห้ง โดยความชื้นของข้าวหอมมะลิแดงหุงสุกมีค่าลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลตลอดระยะเวลาการอบแห้ง ซึ่งสอดคล้องกับคุณลักษณะการอบแห้งของผลิตผลทางการเกษตรและอาหารทั่วไป [12], [20], [21], [26], [70], [71], [120], [121]



ภาพประกอบ 34 จลนศาสตร์การอบแห้งของข้าวหอมมะลิแดงสุกที่สภาวะการอบแห้งแตกต่างกัน

ภาพประกอบ 34 แสดงกราฟคุณลักษณะการอบแห้งของข้าวหอมมะลิแดงสุกที่อบแห้งภายใต้สภาวะการอบแห้งที่แตกต่างกัน จากภาพจะเห็นได้ว่าความชื้นเริ่มต้นของตัวอย่างข้าวหอมมะลิแดงมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 55-57 ฐานเปียก เมื่อพิจารณาความชื้นสุดท้ายของตัวอย่างข้าวหอมมะลิแดงกึ่งสำเร็จรูปที่ต้องการซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 10 ฐานเปียก พบว่า สภาวะการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับกระแสลมอัดตัวและการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ ส่งผลให้เวลาการอบแห้งสั้นกว่าสภาวะที่ไม่มีการใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมด้วย การอบแห้งเฉพาะลมร้อนอย่างเดียวใช้เวลาประมาณ 24 นาที ในขณะที่การใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมด้วยที่ 150 300 และ 450 วัตต์ ใช้เวลาเพียง 18 15 และ 13 นาที ตามลำดับ จากภาพประกอบ 34 จะเห็นได้ว่าความชื้นของตัวอย่างข้าวสุกลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการอบแห้ง (5 นาทีแรก) หลังจากนั้นอัตราการอบแห้งจะเริ่มลดลงโดยเฉพาะที่เวลาการอบแห้ง 10 นาที จะเห็นความแตกต่างของค่าความชื้นอย่างชัดเจนซึ่งส่งผลจากการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยค่าความชื้นของตัวอย่างมีค่าลดลงเมื่อใช้กำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟมากขึ้น แสดงให้เห็นว่ากำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟที่มากขึ้นนี้ทำให้อัตราการให้ความร้อนเพิ่มมากขึ้นและส่งผลให้ปริมาณน้ำในตัวอย่างมีอัตราการระเหยมากขึ้นเช่นเดียวกัน ไอน้ำที่ถูกทำให้ระเหยด้วยคลื่นไมโครเวฟจะเป็นแรงผลักดันให้น้ำในข้าวหอมมะลิแดงเกิดการเคลื่อนตัวอย่างภายในไปสู่พื้นผิวได้รวดเร็วขึ้นที่เวลาอบแห้งเดียวกัน ความชื้นจึงมีค่าต่ำกว่าเมื่อใช้กำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟที่มากขึ้น กลไกการอบแห้งเมื่อใช้คลื่นไมโครเวฟที่มีกำลังไฟฟ้ามกขึ้นนี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [21], [70], [121], [122]





ภาพประกอบ 35 อัตราการอบแห้งที่สภาวะการอบแห้งแตกต่างกัน

ภาพประกอบ 35 แสดงกราฟอัตราการอบแห้งภายใต้สภาวะการอบแห้งแตกต่างกัน จากภาพประกอบดังกล่าวพบว่ากลไกการอบแห้งในทุกสภาวะอยู่ในช่วงการอัตราการลดลง (Falling-rate period) ซึ่งเป็นช่วงการอบแห้งที่พบส่วนใหญ่สำหรับผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรและอาหาร [100], [101], [116]–[118], [122] ในช่วงการอบแห้งแบบอัตราการลดลงนี้ น้ำหรือความชื้นในตัวอย่างช้าๆ หอมมะลิ แดง หุงสุก เคลื่อนที่จากภายในสู่ผิวภายนอกของวัสดุภายใต้กลไกการแพร่ [117], [122] ดังนั้นความสามารถในการแพร่ของน้ำในอาหาร (Diffusivity) เป็นพารามิเตอร์หลักที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์หรือประเมินประสิทธิภาพของระบบการอบแห้ง

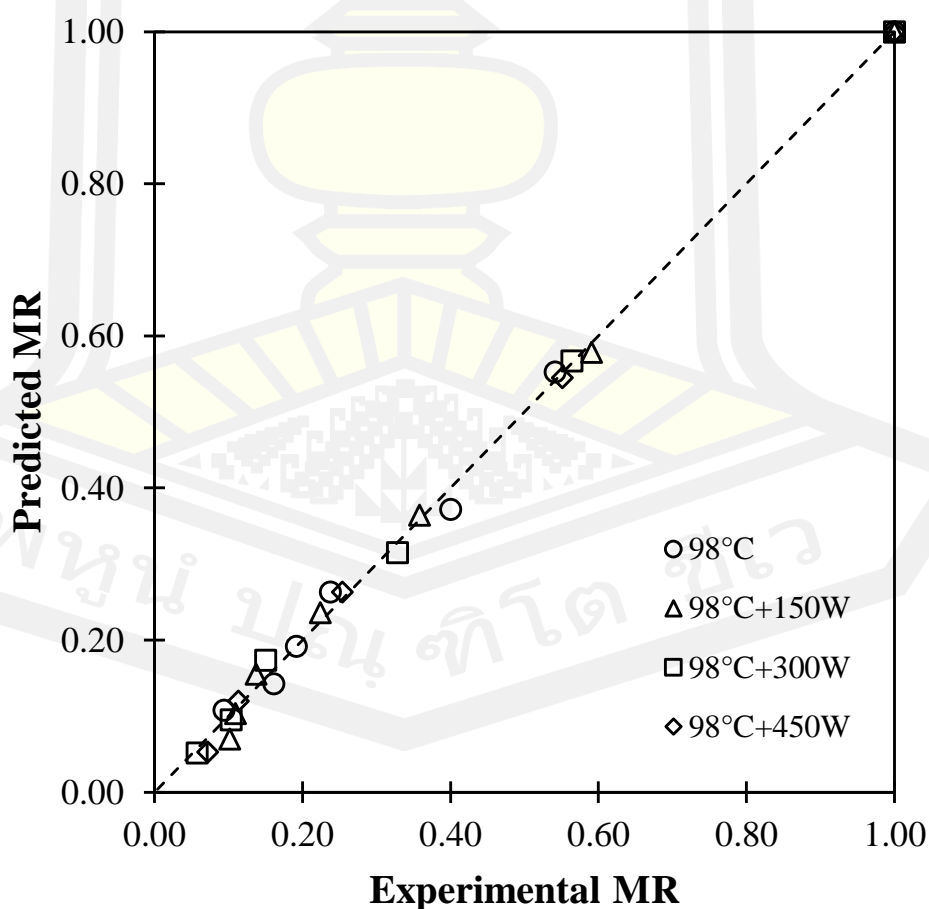
ตาราง 12 แสดงพารามิเตอร์ของแบบจำลองการอบแห้งของ Page พร้อมด้วยพารามิเตอร์ทางสถิติสำหรับการประเมินความแม่นยำในการทำนายอัตราส่วนความชื้นที่สภาวะการอบแห้งที่แตกต่างกัน จากตาราง 12 จะเห็นได้ว่าค่า R^2 มีค่ามากกว่า 0.99 ในทุกสภาวะการอบแห้ง แสดงให้เห็นว่าค่าสมการการอบแห้งของ Page เข้ากันได้ดีกับข้อมูลอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองในตาราง 12 อีกทั้งเมื่อพิจารณาค่าความผิดพลาดระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายพบว่า ค่า χ^2 ค่า RMSE ค่า MSE และค่า %P มีค่าต่ำ แสดงให้เห็นถึงระดับความถูกต้องที่ได้จากการใช้สมการการอบแห้งของ Page ในการทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นหรือใช้ในการทำนายเวลาการอบแห้งในกรณีที่กำหนดค่าความชื้นสุดท้ายของวัสดุที่ต้องการ ค่าความถูกต้องของสมการการอบแห้งของ Page ยืนยันได้จากภาพประกอบ 36 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทำนายและ

ค่าที่ได้จากการทดลอง โดยจะเห็นได้ว่าข้อมูลในทุกสภาวะอยู่บนแนวเส้นประซึ่งเป็นเส้นตรง ($y = x$) ที่บ่งบอกถึงความถูกต้องระหว่างข้อมูล

ตาราง 12 พารามิเตอร์ทางสถิติและความผิดพลาดของแบบจำลอง และพารามิเตอร์ของสมการการอบแห้งของ Page

สภาวะการอบแห้ง		พารามิเตอร์ทางสถิติและความผิดพลาดของแบบจำลอง					พารามิเตอร์ของแบบจำลอง	
FT	MW	R^2	χ^2	RMSE	%P	MSE	k	n
	0	0.9965	0.00042	0.01726	6.55676	0.00036	0.180807	0.738359
98	150	0.9974	0.00034	0.01558	8.38751	-0.00216	0.132246	0.882917
	300	0.9987	0.00021	0.01192	6.50040	-0.00045	0.108492	1.027443
	450	0.9991	0.00017	0.01021	7.37059	-0.00182	0.096970	1.139110

หมายเหตุ : FT คือ อุณหภูมิลมร้อน (องศาเซลเซียส) และ MW คือ กำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟ (วัตต์)



ภาพประกอบ 36 การเปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นที่เวลาการอบแห้งใดๆ จากการทดลองและแบบจำลองของ Page ที่อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 98 องศาเซลเซียส

จากตาราง 12 พบว่าค่าคงที่อัตรา (k) มีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสภาวะการอบแห้งที่ใช้ ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.096970–0.180807 ในขณะที่ค่าคงที่เลขยกกำลัง (n) อยู่ในช่วงระหว่าง 0.738359–1.139110 ดังนั้นสมการการอบแห้งที่ใช้สำหรับอธิบายลักษณะการอบแห้งของตัวอย่างข้าวหอมมะลิแดงหุงสุก สามารถเขียนสรุปได้ดังนี้

$$MR = \exp(-0.180807 t^{0.738359}) \text{ ที่อุณหภูมิลมร้อน } 98^{\circ}\text{C} \quad (20)$$

$$MR = \exp(-0.132246 t^{0.882917}) \text{ ที่อุณหภูมิลมร้อน } 98^{\circ}\text{C} \text{ ร่วมกับไมโครเวฟ } 150 \text{ วัตต์} \quad (21)$$

$$MR = \exp(-0.108492 t^{1.027443}) \text{ ที่อุณหภูมิลมร้อน } 98^{\circ}\text{C} \text{ ร่วมกับไมโครเวฟ } 300 \text{ วัตต์} \quad (22)$$

$$MR = \exp(-0.096970 t^{1.139110}) \text{ ที่อุณหภูมิลมร้อน } 98^{\circ}\text{C} \text{ ร่วมกับไมโครเวฟ } 450 \text{ วัตต์} \quad (23)$$

โดยทั่วไป ค่าคงที่อัตราการอบแห้ง (k) สามารถนำมาใช้เป็นดัชนีในการประเมินประสิทธิภาพของการอบแห้งของระบบได้ โดยค่าคงที่อัตราสูงแสดงถึงอัตราการอบแห้งที่สูง อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่าคงที่อัตราที่ได้จากการศึกษานี้ (ดังแสดงในตาราง 12) กลับพบว่าค่าคงที่อัตรามีค่าลดลงเมื่อใช้กำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟเพิ่มขึ้น ซึ่งขัดแย้งกับงานวิจัยที่ได้นำเสนอทั่วไปซึ่งค่าคงที่อัตราจะแปรผันตามกำลังไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟ [21], [70], [123]

แต่อย่างไรก็ตามมีบางงานวิจัยที่แสดงถึงค่าคงที่อัตราที่สอดคล้องกับการศึกษานี้ เช่นงานวิจัยของ Doymaz (2005) [124] ใช้แบบจำลองการอบแห้งของ Page สำหรับจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้งถั่วเขียว พบว่า อัตราามีค่าลดลงเมื่อใช้อุณหภูมิลมร้อนที่สูงขึ้น นอกจากนี้ข้อสังเกตดังกล่าวอาจอธิบายได้จาก Tapaneyasin และคณะ (2005) [125] ใช้แบบจำลองของ Page ในการจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้งกุ้งในเครื่องอบแห้งแบบเจตสเปาท์เตดเบต ทั้งในกรณีการอบแห้งที่อุณหภูมิคงที่ และกรณีการอบแห้งที่มีการลดอุณหภูมิลมร้อนลงหลังการอบแห้งผ่านไปได้ระยะหนึ่ง ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองของ Page สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของกุ้งระหว่างการอบแห้งได้ดีสำหรับการอบแห้งที่อุณหภูมิคงที่ ในทางตรงกันข้ามแบบจำลองไม่สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของกุ้งได้ดีเมื่อเป็นการอบแห้งที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิลมร้อน ทั้งนี้เนื่องจากการใช้แบบจำลองเอ็มพริกัลเป็นสมการที่ใช้ทำนายผลการเปลี่ยนแปลงความชื้นโดยอาศัยพารามิเตอร์ที่ได้จากการปรับเส้นโค้งให้ผลการจำลองสอดคล้องกับการทดลอง ซึ่งสามารถทำได้ดีเฉพาะกรณีที่เส้นโค้งนั้นไม่มีการเปลี่ยนค่าความชื้นอย่างทันทีทันใด

หรืออีกนัยหนึ่งคือ การอบแห้งไม่ได้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดอันเป็นผลเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะการอบแห้ง [126]

ในกระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับไมโครเวฟและลมหมุนอัดตัวนั้น ตัวอย่างข้าวหุงสุกมีความชื้นเริ่มต้นค่อนข้างสูง (ประมาณร้อยละ 60 ฐานเปียก) ในช่วงแรกของการอบแห้ง คลื่นไมโครเวฟทำให้โมเลกุลของน้ำภายในวัสดุเกิดการหมุนและความร้อนที่ระดับอุณหภูมิค่าหนึ่งซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกดูดซับด้วยโมเลกุลน้ำ ทำให้น้ำในวัสดุเกิดการระเหยและเคลื่อนที่ออกสู่อากาศภายนอก เมื่อการอบแห้งผ่านไประยะหนึ่งปริมาณน้ำที่ต้องดูดซับคลื่นไมโครเวฟที่ระดับกำลังวัตต์คงที่นั้นมีปริมาณลดลง ดังนั้นอุณหภูมิภายในวัสดุที่เกิดจากการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟจึงเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นที่สภาวะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเช่นนี้จึงไม่สามารถนำค่าคงที่อัตรามาใช้อธิบายประสิทธิภาพการอบแห้งได้เช่นเดียวกับสภาวะการอบแห้งที่มีอุณหภูมิอบแห้งคงที่ทั่วไป นอกจากนี้ลักษณะของเส้นโค้งการอบแห้งดังแสดงในภาพประกอบ 34 มีการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นอย่างทันทีทันใด พารามิเตอร์ของสมการอบแห้งของ Page ดังแสดงในตาราง 12 นั้นอาจเป็นแค่พารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการปรับเส้นโค้งเท่านั้น ไม่สามารถนำมาใช้ในการอธิบายอัตราการอบแห้งของระบบได้

อย่างไรก็ตามเนื่องจากช่วงการอบแห้งภายใต้สภาวะที่ศึกษาในงานวิจัยนี้พบว่า การอบแห้งตัวอย่างข้าวหอมมะลิแดงหุงสุกด้วยวิธีฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับไมโครเวฟและลมหมุนอัดตัวอยู่ในช่วงอัตราลดลงดังแสดงในภาพประกอบ 35 ซึ่งกลไกหลักที่ทำให้เกิดลดลงของความชื้นคือกระบวนการแพร่ของน้ำหรือไอน้ำในวัสดุ ดังนั้นค่าการแพร่ประสิทธิผล (Effective diffusivity, D_e) จึงนำมาใช้ในการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบอบแห้งต่อไป

4.2.2 ผลของสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลที่มีผลต่อการอบแห้งของอุณหภูมิในการอบแห้งและการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ

แม้จะมีทฤษฎีและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จำนวนมากซึ่งสามารถใช้อธิบายการถ่ายเทมวลสาร (ความชื้น) ภายในวัสดุระหว่างการอบแห้ง ในงานวิจัยนี้ได้นำเฉพาะแบบจำลองการแพร่ของของเหลวเนื่องมาจากความแตกต่างของความชื้นภายในวัสดุ (Liquid diffusion model) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย โดยการเคลื่อนที่หรือการถ่ายเทของความชื้นภายในวัสดุระหว่างการอบแห้งเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนและอาจเกิดขึ้นเนื่องมาจากกลไกหลายกลไก เช่น อาจเกิดเนื่องจากการเคลื่อนที่ของของเหลวในหลอดเล็ก (Capillary flow) การเคลื่อนที่ของของเหลวในรูปของการแพร่อันเนื่องมาจากความแตกต่างของความชื้นที่บริเวณต่างๆ ในวัสดุ (Liquid diffusion) การเคลื่อนที่ของของเหลวอันเนื่องมาจากการแพร่ของของเหลวบนผิวรูพรุนภายในวัสดุ (Surface diffusion) การเคลื่อนที่ของไอในรูปของการแพร่อันเนื่องมาจากความแตกต่างของความดันไอ (Vapor diffusion) และการเคลื่อนที่ของของเหลวหรือไออันเนื่องมาจากผลต่างของความดันอุทก

สถิตภายในวัสดุ (Hydrodynamic flow) ซึ่งอาจเกิดขึ้นในกรณีที่อัตราการระเหยของความชื้นกลายเป็นไอภายในวัสดุมีค่าสูงกว่าอัตราการเคลื่อนที่ของไอจากภายในวัสดุออกมายังผิววัสดุ ในทางปฏิบัติคงไม่สามารถระบุได้ว่าการเคลื่อนที่ของความชื้นภายในวัสดุนั้นเป็นไปโดยกลไกใดกลไกหนึ่งอย่างชัดเจน นอกจากนี้ยังเป็นไปได้ว่าในช่วงแรกของกระบวนการอบแห้ง ความชื้นอาจเคลื่อนที่โดยกลไกหนึ่ง เช่น โดยการเคลื่อนที่ของของเหลวในหลอดเล็กหรือโดยการแพร่ของของเหลว แต่เปลี่ยนไปเคลื่อนที่อีกกลไกหนึ่ง เช่น โดยการแพร่ของไอ ในช่วงท้ายของกระบวนการอบแห้ง [126]

ในกรณีของแบบจำลองการแพร่ของของเหลวนั้น เขียนสมการหลักของแบบจำลองได้โดยการเขียนแบบกฎของการแพร่ข้อที่สองของฟิคส์ (Fick's second law of diffusion)

$$\frac{\partial x}{\partial t} = D_{\text{eff}} \nabla^2 x \quad (24)$$

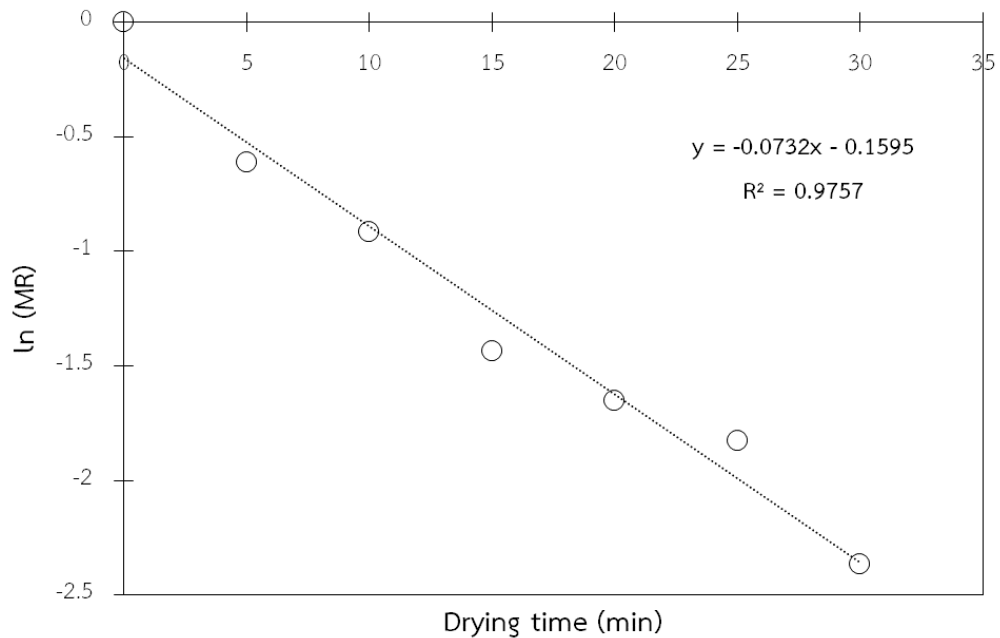
โดยที่ X คือความชื้นที่ตำแหน่งใดๆ ในวัสดุ t คือ เวลาการอบแห้ง และ D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (Effective diffusion coefficient)

หากสมมติให้ความต้านทานการถ่ายเทมวลสาร (ความชื้น) ภายนอกชิ้นวัสดุมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความต้านทานการถ่ายเทมวลสารภายในชิ้นวัสดุ อาจหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ (Analytical solution) ซึ่งก็คือผลเฉลยของสมการเชิงอนุพันธ์ที่คำนวณโดยไม่ต้องใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขสำหรับวัสดุที่มีรูปร่างต่างๆ ได้ ทั้งนี้มีเงื่อนไขเพิ่มเติมคือ การเคลื่อนที่ของความชื้นเป็นไปในทิศทางเดียวและความชื้นเริ่มต้น ณ ตำแหน่งต่างๆ ในชิ้นวัสดุมีค่าเท่ากันทั้งหมด เงื่อนไขที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลมีค่าคงที่และเท่ากันที่ทุกตำแหน่งในชิ้นวัสดุ และไม่เปลี่ยนแปลงตลอดกระบวนการอบแห้ง [127], [128]

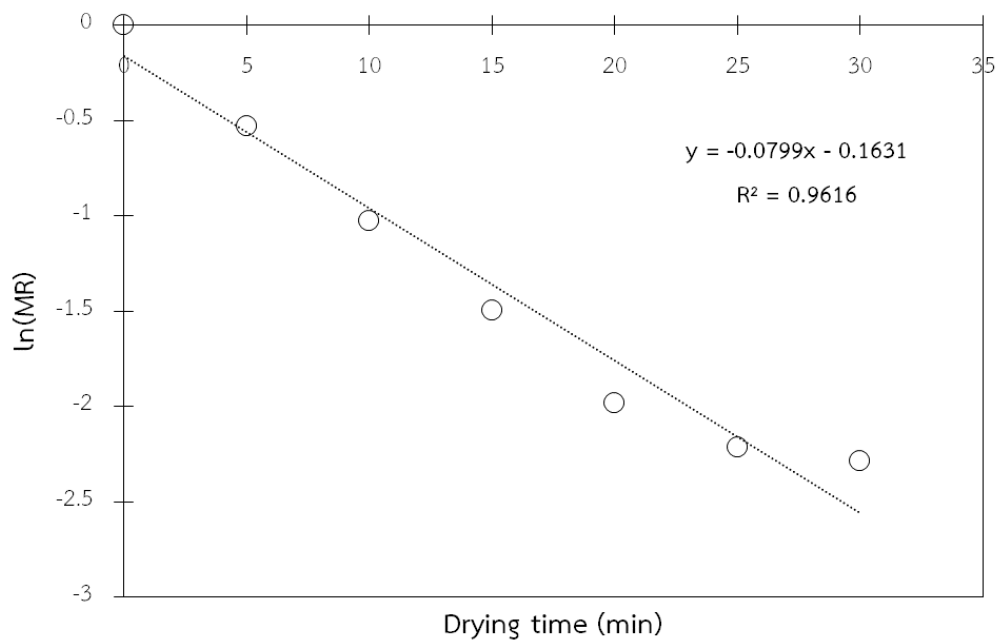
ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงในกระบวนการอบแห้ง (Falling rate) ความชื้นในวัสดุอาหารจะถ่ายเทไปยังพื้นผิวและออกสู่อากาศภายนอกด้วยค่าเฉลี่ยของการแพร่กระจายภายใน ซึ่งมีอีกชื่อหนึ่งว่า ค่าสัมประสิทธิ์แพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_{eff}) [98] ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ 15

ภาพประกอบ 37-40 เป็นการแสดงการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล ซึ่งได้จากการพล็อตกราฟเส้นตรงระหว่าง $\ln(MR)$ กับ t จากตาราง 13 แสดงให้เห็นค่าสัมประสิทธิ์แพร่ความชื้นประสิทธิผลอยู่ระหว่าง $4.45-8.33 \times 10^{-8}$ ตารางเมตรต่อวินาที ซึ่งสูงกว่าช่วงปกติที่คาดไว้ของ $10^{-11}-10^{-9}$ ตารางเมตรต่อวินาที สำหรับวัสดุอาหาร [99] ค่า D_{eff} มักเกี่ยวข้องกับค่าคงที่อัตราการอบแห้ง ซึ่งค่า D_{eff} สูงขึ้นหมายถึงการอบแห้งเร็วขึ้น ในสภาวะความดันลมหมุนอัดตัวคงที่ ค่า D_{eff} มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของการอบแห้งที่สูงขึ้น สิ่งนี้มักพบเห็นได้ในกระบวนการอบแห้งเนื่องจากการถ่ายโอนมวลและความร้อนที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีแรงขับเคลื่อนที่สูงขึ้นโดยการเพิ่มพลังงาน

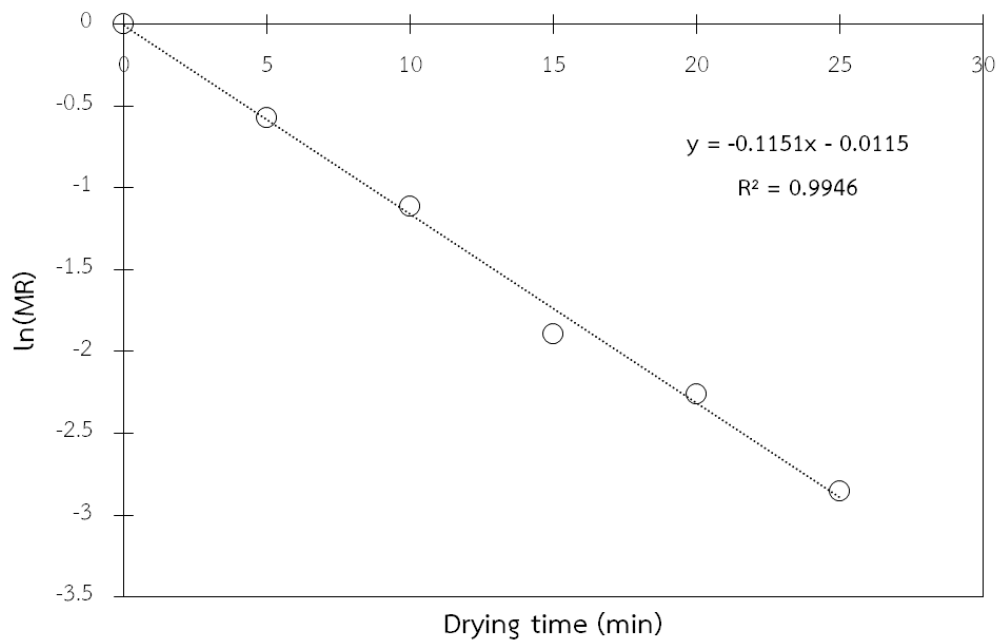
ความร้อน [100] Zielinska และ Michalska (2016) [98] รายงานว่าค่า D_{eff} เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอากาศที่สูงขึ้นในการอบลมร้อนของบลูเบอร์รี่



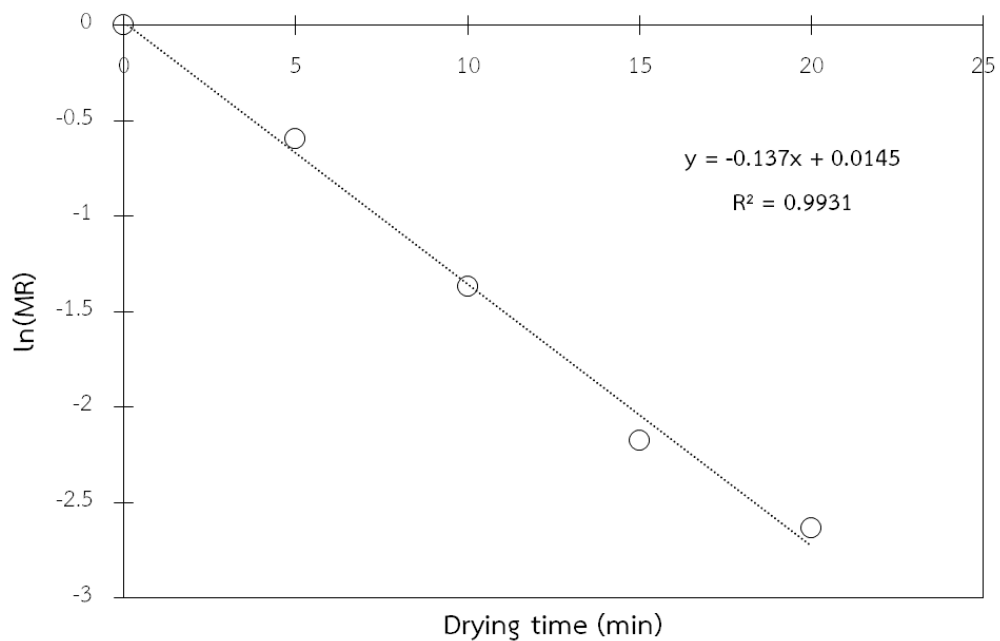
ภาพประกอบ 37 สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (D_{eff}) ที่อุณหภูมิลมร้อน 98 องศาเซลเซียส



ภาพประกอบ 38 สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (D_{eff}) ที่อุณหภูมิลมร้อน 98 องศาเซลเซียส และกำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟ 150 วัตต์



ภาพประกอบ 39 สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (D_{eff}) ที่อุณหภูมิร้อน 98 องศาเซลเซียส และกำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟ 300 วัตต์



ภาพประกอบ 40 สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (D_{eff}) ที่อุณหภูมิร้อน 98 องศาเซลเซียส และกำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟ 450 วัตต์

จากตาราง 13 พบว่า D_{eff} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟเพิ่มขึ้นจาก 0-450 วัตต์ ที่อุณหภูมิความร้อนคงที่เท่ากับ 98 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยทั่วไปที่กำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟที่เพิ่มขึ้นนี้ส่งผลให้แรงขับเคลื่อน (Driving force) ที่ทำให้การแพร่ของน้ำหรือความชื้นภายในวัสดุเคลื่อนที่ออกสู่ผิวได้มากและเร็วมากขึ้น

การลดความชื้นของวัสดุทางการเกษตรหรืออาหารด้วยการอบแห้งแบบลมร้อน เป็นวิธีที่นิยมใช้กันแพร่หลาย เนื่องจากมีขั้นตอนและเครื่องมือที่ง่ายต่อการทำงาน อีกทั้งใช้งบประมาณค่าใช้จ่ายไม่สูงมากนัก อย่างไรก็ตามการอบแห้งด้วยวิธีนี้มีผลเสียทางด้านลักษณะทางกายภาพ ทางประสาทสัมผัส อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างและปฏิกิริยาทางเคมีซึ่งไม่อาจเลี่ยงได้ แต่การใช้ไมโครเวฟในกระบวนการอบแห้งนั้น อัตราการอบแห้งมีค่ามากขึ้น ปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้าย การหดตัวเกิดขึ้นน้อยเมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวเนื่องจากกระบวนการอบแห้งด้วยไมโครเวฟสามารถเร่งกระบวนการแพร่ของน้ำในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (ดังแสดงในตาราง 13) เพราะน้ำภายในวัสดุจะเกิดแรงดันไอได้ดีกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน (เนื่องจากอุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้นได้เร็วกว่า) [60]

ตาราง 13 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล และ R^2 ที่สภาวะการอบแห้งแตกต่างกัน

สภาวะการอบแห้ง		D_{eff} ($\times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$)	R^2
FT	MW		
98	0	4.45	0.9757
	150	4.85	0.9616
	300	6.99	0.9946
	450	8.33	0.9931

หมายเหตุ : FT คือ อุณหภูมิความร้อน (องศาเซลเซียส) MW คือ กำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟ (วัตต์) และ D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล ($\times 10^{-8}$ ตารางเมตรต่อวินาที)

กระบวนการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟประกอบด้วย 3 ช่วง คือ 1) ช่วงเกิดความร้อน ซึ่งพลังงานไมโครเวฟถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนภายในวัสดุขึ้น และทำให้อุณหภูมิของวัสดุขึ้นเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาที่ผ่านมา เมื่อความดันไอน้ำของวัสดุสูงกว่าความดันของสิ่งแวดล้อม ณ ขณะนั้น วัสดุจึงเริ่มเกิดการสูญเสียความชื้นขึ้นในอัตราที่น้อย 2) ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ เมื่ออุณหภูมิของวัสดุเริ่มสูงขึ้นอย่างคงที่ พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกใช้เพื่อการระเหยของความชื้น 3) ช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเกิดขึ้นเมื่อพลังงานที่ใช้ในการระเหยของความชื้นน้อยกว่าพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้น อุณหภูมิบางตำแหน่งของวัสดุจะเพิ่มสูงขึ้นสูงกว่าจุดเดือดของน้ำ และทำให้เกิดความร้อน

ที่มากเกินไป [61] อบแห้งด้วยไมโครเวฟทำให้อัตราการแพร่ของน้ำเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเกิดความร้อนที่มากภายในวัสดุ ระยะเวลาการอบแห้ง เนื่องจากผิวของวัสดุจะมีปริมาณความชื้นแพร่ไปมากกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนแบบปกติ ทำให้ลดการใช้พลังงานในการอบแห้ง [62]

อย่างไรก็ตามการใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับการอบแห้งด้วยลมร้อนทั่วไปที่ไม่เหมาะสม อาจส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้าย เช่น การเสื่อมคุณภาพทั้งทางกายภาพและทางเคมีเนื่องจากการเกิดความร้อนที่มากเกินไป และอาจส่งผลต่อค่าการสิ้นเปลืองพลังงานในการอบแห้งได้ ดังนั้น จึงได้มีงานวิจัยมากมายที่นำการให้ความร้อนเสริมด้วยคลื่นไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้ร่วมกับลมร้อนทั่วไป โดยนำคลื่นไมโครเวฟมาช่วยเพิ่มอัตราการอบแห้งในช่วงปลายของการอบแห้ง หรือช่วงอัตราการอบแห้งลดลง จะสามารถช่วยย่นระยะเวลาของการอบแห้งลงได้ หรืออาจจะนำมาใช้ในช่วงแรกของการอบแห้ง ณ ช่วงที่มีปริมาณน้ำหรือความชื้นสูงๆ เพื่อให้มีน้ำหรือไอน้ำมีการแพร่ที่อัตราสูงขึ้น ส่งผลให้มีการหดตัวของผลิตภัณฑ์ลดลงและช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดน้ำกลับภายหลังการอบแห้งด้วย ดังนั้นหัวข้อต่อไปเป็นการศึกษาหาสภาวะการใช้คลื่นไมโครเวฟที่เหมาะสมโดยคำนึงถึงค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

4.2.3 ผลของประสิทธิภาพการใช้พลังงานของอุณหภูมิในการอบแห้งและการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่ต่างกัน

หัวข้อนี้เป็นการศึกษาหาสภาวะการใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับการอบแห้งแบบพลูอิดไดซ์เบดที่มีการใช้ลมหมุนอัดตัวที่เหมาะสม ซึ่งมีการปรับกำลังไฟฟ้าตามขั้นตอนการอบแห้งแบบขั้นตอน (แบบ Step up และ Step down) ดังหัวข้อ 3.3.12 โดยใช้ค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) เป็นเกณฑ์ในการพิจารณา

จากหัวข้อที่ 4.2.1 จะได้ซึ่งแบบจำลองเอมพีริคัลของ Page สำหรับการอบแห้งที่อุณหภูมิลมร้อน 98 องศาเซลเซียส และกำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟที่ต่างกัน (0 150 300 และ 450 วัตต์) จากแบบจำลองดังกล่าวสามารถประมาณเวลาในการอบแห้งจากความชื้นของตัวอย่างข้าวหอมมะลิแดง หุงสุกตามต้องการ โดยการศึกษานี้ได้กำหนดค่าความชื้นสำหรับการเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟที่ร้อยละ 70 ของความชื้นเริ่มต้น และกำหนดความชื้นสุดท้ายเท่ากับร้อยละ 10 ฐานเปียก ดังนั้นการประมาณเวลาการอบแห้งที่สภาวะต่างๆ แสดงรายละเอียดในตาราง 14

ผลการทดลองหาปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากข้าวหอมมะลิแดงด้วย (W_{evap}) อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (SMER) และค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) จากการคำนวณดังหัวข้อ 3.3.12 สำหรับการอบแห้งที่อุณหภูมิลมร้อน 98 องศาเซลเซียส และกำลังไฟฟ้าไมโครเวฟที่ต่างกันแสดงดังตาราง 15

ตาราง 14 การประมาณเวลาในการอบที่อุณหภูมิอากาศแบบฟลูอิดไดซ์ 98 องศาเซลเซียส และกำลังวัตต์ไมโครเวฟที่ต่างกัน

สภาวะที่ 1		สภาวะที่ 2	
MW	Time	MW	Time
0	1253	-	-
150	1100	-	-
300	886	-	-
450	751	-	-
150	123	300	761
150	123	450	655
300	134	150	922
300	134	450	655
450	18	150	922
450	18	300	761

หมายเหตุ: MW คือ กำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟ (วัตต์) และ Time คือ เวลาในการอบ (วินาที)

ตาราง 15 ค่าการใช้พลังงานที่สภาวะการอบแห้งที่ต่างกัน

Stepwise Mode	สภาวะที่ 1	สภาวะที่ 2	W _{evap} (kg/h)	การใช้พลังงาน		SMER	SEC
				(kWh)	(MJ)		
0	-	-	104.84±0.35 ^a	1.18±0.05 ^{ab}	4.25±0.18 ^{ab}	0.089±0.004 ^{bc}	40.51±1.81 ^{ab}
150	-	-	102.71±1.13 ^{bc}	1.09±0.01 ^b	3.94±0.04 ^b	0.094±0.002 ^{bc}	38.37±0.82 ^{ab}
300	-	-	101.70±1.36 ^c	0.96±0.01 ^{bc}	3.438±0.02 ^{bc}	0.106±0.002 ^b	33.81±0.70 ^{bcd}
450	-	-	104.41±1.81 ^{ab}	0.80±0.01 ^{cd}	2.88±0.05 ^{cd}	0.130±0.000 ^a	27.58±0.01 ^{cd}
150	300	-	103.09±0.56 ^{abc}	1.05±0.01 ^b	3.80±0.02 ^b	0.098±0.001 ^{bc}	36.84±0.45 ^{abc}
150	450	-	102.32±0.26 ^c	1.11±0.08 ^b	4.00±0.30 ^b	0.092±0.007 ^{bc}	39.05±2.89 ^{ab}
300	150	-	101.64±0.03 ^c	0.98±0.22 ^{bc}	3.53±0.79 ^{bc}	0.106±0.023 ^b	34.71±7.50 ^{bcd}
300	450	-	104.49±0.14 ^{ab}	0.74±0.03 ^d	2.66±0.09 ^d	0.141±0.005 ^a	25.49±0.94 ^d
450	150	-	102.67±0.11 ^{bc}	1.33±0.22 ^a	4.79±0.81 ^a	0.078±0.013 ^c	46.64±7.98 ^a

Stepwise		การใช้พลังงาน				
Mode		W _{evap} (kg/h)			SMER	SEC
สถานะ ที่1	สถานะ ที่2		(kWh)	(MJ)		
450	300	102.72±0.19 ^{bc}	1.03±0.16 ^b	3.73±0.59 ^b	0.101±0.016 ^{bc}	36.28±5.77 ^{bc}

หมายเหตุ : Stepwise Mode คือ ค่ากำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟแบบขั้นตอน (วัตต์) W_{evap} คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากข้าวหอมมะลิแดง (กรัม) SMER คือ อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (กิโลกรัมต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง) และ SEC คือ ค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)

ตาราง 15 แสดงอัตราการระเหยของน้ำหรือความชื้นภายในตัวอย่างข้าวหอมมะลิแดงหุงสุก จากตาราง 15 พบว่า ที่สภาวะที่แตกต่างกันส่งผลให้อัตราการระเหยของน้ำในตัวอย่างมีค่าต่างกัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 101.64–104.84 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ที่สภาวะการอบแห้งแบบกำลังไฟฟ้าไมโครเวฟคงที่ จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้กำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟเพิ่มขึ้นในช่วง 0–300 วัตต์ อัตราการระเหยของน้ำในตัวอย่างมีแนวโน้มลดลงทั้งๆ ที่กำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟเพิ่มขึ้น อัตราการระเหยของน้ำควรมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่เมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าเป็น 450 วัตต์ อัตราการระเหยน้ำกลับมีค่าเพิ่มขึ้น จากผลการทดลองที่ได้นี้อาจอธิบายได้ว่า ที่กำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟ 150 และ 300 วัตต์ แรงขับเคลื่อนที่ส่งผลให้เกิดการแพร่ความชื้นจากภายในวัสดุไปยังผิวนอกของวัสดุช้ากว่าอัตราการระเหยของความชื้นที่ผิวของวัสดุออกสู่บรรยากาศ ทำให้เกิดการแข็งตัวที่ผิวของตัวอย่าง (Case harding) ซึ่งอาจเป็นตัวกั้นกลไกการแพร่ของน้ำออกสู่บรรยากาศ ส่งผลให้อัตราการระเหยของน้ำน้อยกว่า ในขณะที่ที่ใช้คลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 450 วัตต์ อัตราการให้ความร้อนและการแพร่ของน้ำมาากเพียงพอที่จะไม่ทำให้เกิดการแข็งตัวที่ผิวของตัวอย่าง ดังนั้นอัตราการระเหยน้ำจึงมีค่าสูง หรืออาจเป็นเพราะว่าที่ 450 วัตต์ ทำให้เกิดแรงขับเคลื่อนมากพอที่จะดันน้ำหรือไอน้ำที่อยู่ในช่วงสุดท้ายของการอบแห้งออกสู่ผิวของตัวอย่างได้

อย่างไรก็ตามสำหรับการพิจารณาสภาวะการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟที่เหมาะสมนั้น การศึกษานี้ใช้ค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะซึ่งคำนวณอัตราการระเหยของน้ำเทียบกับเวลาการอบแห้งที่ใช้ทั้งหมด ดังนั้นจากตาราง 15 จะเห็นได้ว่าถึงแม้ที่สภาวะการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนอย่างเดียวให้อัตราการระเหยน้ำสูง แต่เมื่อพิจารณาเทียบกับการใช้พลังงานแล้วพบว่ามีการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะค่อนข้างสูง ดังนั้น จึงสามารถสรุปสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมจากตาราง 15 ได้ว่า ที่สภาวะการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่มีการใช้ลมหมุนอัดตัวร่วมกับการใช้ไมโครเวฟแบบขั้นตอนเพิ่มจาก 300 เป็น 450 วัตต์ เป็นสภาวะที่ค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีแนวโน้มต่ำที่สุด ดังนั้น

จึงเลือกใช้สภาวะการอบแห้งแบบขั้นตอนโดยเพิ่มกำลังไฟฟ้าจาก 300 วัตต์ เป็น 450 วัตต์ สำหรับการศึกษาด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ข้าวหอมมะลิแดงกึ่งสำเร็จรูปต่อไป

4.2.4 ผลของคุณภาพของข้าวหอมมะลิแดงกึ่งสำเร็จรูปที่สภาวะการอบแห้งที่ต่างกัน

สำหรับการอบแห้งข้าวหอมมะลิแดงที่ได้หลังจากการอบแห้งที่อุณหภูมิ 98 องศาเซลเซียส และการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่ต่างกัน รวมถึงข้าวหอมมะลิแดงที่ยังไม่ได้ผ่านการหุง (Uncooked grain) เมื่อนำมาวัดค่าสีระบบ CIE (L^* a^* b^*) ด้วยเครื่อง Chroma meter รายละเอียดแสดงดังตาราง 16

ตาราง 16 ค่าสีของข้าวหอมมะลิแดงกึ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการอบแห้งที่สภาวะแตกต่างกัน

สภาวะการอบแห้ง		L^*	a^*	b^*	$^{\circ}$ Hue	Chroma	ΔE
FT	MW						
Uncooked grain		59.70±0.05 ^a	8.01±0.01 ^f	10.43±0.03 ^f	0.92±0.00 ^a	13.15±0.03 ^f	-
98	0	48.36±0.01 ^f	9.07±0.01 ^c	10.94±0.03 ^e	0.88±0.00 ^d	14.21±0.02 ^d	11.40±0.01 ^a
98	150	49.79±0.02 ^d	9.35±0.01 ^a	11.37±0.00 ^b	0.88±0.00 ^d	14.72±0.00 ^a	10.04±0.01 ^c
98	300	49.58±0.09 ^e	9.12±0.01 ^b	11.11±0.01 ^c	0.88±0.00 ^d	14.37±0.01 ^c	10.20±0.09 ^b
98	450	51.18±0.02 ^c	8.77±0.01 ^e	11.04±0.00 ^d	0.90±0.00 ^c	14.10±0.01 ^e	8.57±0.00 ^d
98	300-450	51.49±0.02 ^b	9.00±0.01 ^d	11.48±0.01 ^a	0.91±0.00 ^b	14.59±0.01 ^b	8.33±0.00 ^e

หมายเหตุ : FT คือ อุณหภูมิร้อน (องศาเซลเซียส) MW คือ กำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟ (วัตต์) และสัญลักษณ์ตัวห้อยที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95

จากตาราง 16 พบว่า ค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีแดงหรือสีน้ำเงิน (a^*) ค่าความเป็นสีเหลืองหรือสีเขียว (b^*) ค่า chroma และค่า ΔE ของทุกสภาวะมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ข้าวหอมมะลิแดงดิบมีค่า L^* a^* และ b^* เท่ากับ 59.70±0.05 8.01±0.01 และ 10.43±0.03 ตามลำดับ ข้าวหอมมะลิแดงเมื่อผ่านการอบแห้งในสภาวะต่างๆ พบว่าค่า L^* มีแนวโน้มที่ต่ำกว่าข้าวหอมมะลิแดงดิบ อย่างไรก็ตาม ค่า a^* และ b^* กลับมีแนวโน้มสูงกว่าข้าวหอมมะลิแดงดิบ ผลลัพธ์ดังกล่าวมีความคล้ายคลึงกับการศึกษาผลิตข้าวหนึ่งโดยการอบแห้งด้วยฟลูอิดซ์เบดด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟของ Saniso และคณะ (2020) [129] ที่ได้กล่าวถึงการเปลี่ยนแปลงของสีในขณะอบแห้ง พบว่า ค่าความเป็นสีแดงหรือสีน้ำเงิน (a^*) และค่าความเป็นสีเหลืองหรือสีเขียว (b^*) มีค่าเพิ่มขึ้นในขณะที่ค่าความสว่าง (L^*) มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับข้าวสารดิบ สภาวะที่มีการเพิ่มกำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟส่งผลให้ ค่า L^* a^* และ b^* มีแนวโน้มที่สูงขึ้น การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวบ่งบอกถึงสีของข้าวที่คล้ำเมื่อผ่านกระบวนการอบแห้งและปฏิกิริยาการเกิดสี

น้ำตาล [130], [131] นอกจากนี้ค่าองศา Hue ของข้าวหอมมะลิแดงดิบและข้าวหอมมะลิแดงที่ผ่านการอบแห้งที่สภาวะต่างๆ อยู่ช่วงระหว่าง 0.88 ± 0.00 - 0.92 ± 0.00 ทำให้ทุกสภาวะมีความสอดคล้องกันสำหรับค่าสีที่ไปในทิศทางเฉดสีแดง ค่า ΔE ที่บ่งบอกถึงความแตกต่างจากสีของข้าวหอมมะลิแดงดิบ จากตาราง 16 พบว่า ค่า ΔE มีแนวโน้มน้อยที่สุดที่สภาวะของอุณหภูมิร้อน 98 องศาเซลเซียส และการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟแบบขั้นตอนจาก 300 วัตต์ เป็น 450 วัตต์

สำหรับการอบแห้งข้าวหอมมะลิแดงที่ได้หลังจากการอบแห้งที่อุณหภูมิร้อน 98 องศาเซลเซียส และการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่แตกต่างกัน รวมถึงข้าวหอมมะลิแดงที่หุงสุก (Cooked grain) เมื่อนำมาวัดหาค่าร้อยละการหดตัว (%Shrinkage) อัตราส่วนการคืนรูป (Rehydration ratio) จลนศาสตร์การคืนรูป (Rehydration kinetics) และคุณลักษณะทางผิวสัมผัส ได้แก่ ความแข็ง และความเหนียว รายละเอียดแสดงดังตาราง 17

ตาราง 17 ค่าร้อยละการหดตัว คุณสมบัติการคืนรูปและคุณสมบัติเนื้อสัมผัสของข้าวหอมมะลิแดงกึ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการอบแห้งที่สภาวะต่างกัน

สภาวะการอบแห้ง		ร้อยละการหดตัว	คุณสมบัติการคืนรูป		คุณสมบัติเนื้อสัมผัส	
FT	MW		RR	k_r	Hardness	Stickiness ^{ns}
cooked grain		-			1523.14±178.39 ^{ab}	-3.72±1.44
98	0	78.93±2.50 ^a	0.5045±0.0017 ^a	0.1013±0.0055 ^{ab}	1513.79±283.49 ^{ab}	-2.41±0.99
98	150	62.90±8.69 ^b	0.4757±0.0057 ^b	0.0884±0.0004 ^c	1464.97±136.98 ^{ab}	-2.62±0.33
98	300	56.66±5.91 ^{bc}	0.4779±0.0201 ^b	0.0932±0.0017 ^{bc}	1111.61±230.06 ^b	-2.96±0.59
98	450	45.02±2.02 ^d	0.5178±0.0035 ^a	0.1054±0.0044 ^a	1595.75±164.81 ^a	-3.73±2.41
98	300-450	51.00±5.90 ^{cd}	0.5105±0.0163 ^a	0.1053±0.0107 ^a	1292.71±311.60 ^{ab}	-4.54±0.10

หมายเหตุ : FT คือ อุณหภูมิร้อน (องศาเซลเซียส) MW คือ กำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟ (วัตต์) RR คือ อัตราส่วนการคืนรูป k_r คือ ค่าคงที่อัตราการคืนรูป Hardness คือ ความแข็ง (กรัม) Stickiness คือ ความเหนียว (กรัมวินาที) และสัญลักษณ์ตัวห้อยที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95

สภาวะการอบแห้งสำหรับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่เพิ่มขึ้นในตาราง 17 แสดงให้เห็นถึงร้อยละการหดตัวที่ลดลง สภาวะการอบแห้งที่ส่งผลต่อร้อยละการหดตัวที่น้อยที่สุด คือ สภาวะของอุณหภูมิร้อน 98 องศาเซลเซียส และการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ 450 วัตต์ รองลงมา คือ สภาวะของอุณหภูมิร้อน 98 องศาเซลเซียส และการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟแบบขั้นตอนจาก 300 วัตต์ เป็น 450 วัตต์ ทั้งสองสภาวะการอบแห้งนี้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากข้าวหอมมะลิแดงที่อบแห้งภายใต้อุณหภูมิต่ำทำให้น้ำที่อยู่ผิวของข้าวหอมมะลิแดงจะ

ระเหยไปอย่างรวดเร็วทำให้ผิวที่อยู่ข้างนอกแห้งและเกิดการแข็งตัวที่ผิว ซึ่งการแข็งตัวที่ผิวนี้ช่วยรักษาสภาพรูปทรงและปริมาตรของข้าวหอมมะลิแดงไม่ให้เกิดการหดตัวมาก นอกจากนี้ด้วยเวลาที่ใช้ในการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิต่ำที่นานกว่าการอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูง ก็เป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้ร้อยละการหดตัวเพิ่มมากขึ้น

จากตาราง 17 พบว่า สภาวะการอบแห้งที่ส่งผลต่อคุณสมบัติการคั้นรูปสูง 3 อันดับแรก คือ การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ 450 วัตต์ การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟแบบขั้นตอนจาก 300 วัตต์ เป็น 450 วัตต์ และการอบแห้งด้วยอุณหภูมิลมร้อนอย่างเดียวย ตามลำดับ ทั้ง 3 สภาวะการอบแห้งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากสภาวะที่ให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่สูง ทำให้เกิดโครงสร้างความเป็นรูพรุนภายในค่อนข้างสูง จึงทำให้สามารถดูดซับน้ำหลังจากอบแห้งได้ในปริมาณมาก

สำหรับความแข็งและความเหนียวของข้าวหอมมะลิแดงหุงสุกที่ปรากฏในตาราง 17 มีค่าเท่ากับ 1523.14 กรัม และ -3.72 กรัมวินาที ตามลำดับ นอกจากนี้สภาวะที่ได้ค่าความแข็งน้อยที่สุดคือ สภาวะการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ 300 วัตต์ (1111.61 กรัม) สภาวะที่ได้ค่าความแข็งมากที่สุดคือ สภาวะการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ 450 วัตต์ (1595.75 กรัม) สภาวะที่ปราศจากการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ (-2.41 กรัมวินาที) เป็นสภาวะการอบแห้งที่ได้ค่าความเหนียวน้อยที่สุด สภาวะการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟแบบขั้นตอนจาก 300 วัตต์ เป็น 450 วัตต์ (-4.54 กรัมวินาที) เป็นสภาวะที่มีค่าความเหนียวมากที่สุด ความแข็งและความเหนียวของข้าวหอมมะลิแดงหุงสุกเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวหอมมะลิแดงที่ได้จากการอบแห้งทุกสภาวะไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ดังนั้นข้าวหอมมะลิแดงอบแห้งภายใต้สภาวะการอบแห้งที่ต่างกันเมื่อพิจารณาคุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน คุณภาพด้านสี ร้อยละการหดตัว คุณสมบัติการคั้นรูป และคุณสมบัติเนื้อสัมผัส พบว่า การอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่มีการใช้ลมหมุนอัดตัวร่วมกับการใช้ไมโครเวฟแบบขั้นตอนเพิ่มจาก 300 เป็น 450 วัตต์ เป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมข้าวหอมมะลิแดงด้วยกระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับลมหมุนอัดตัวและการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ

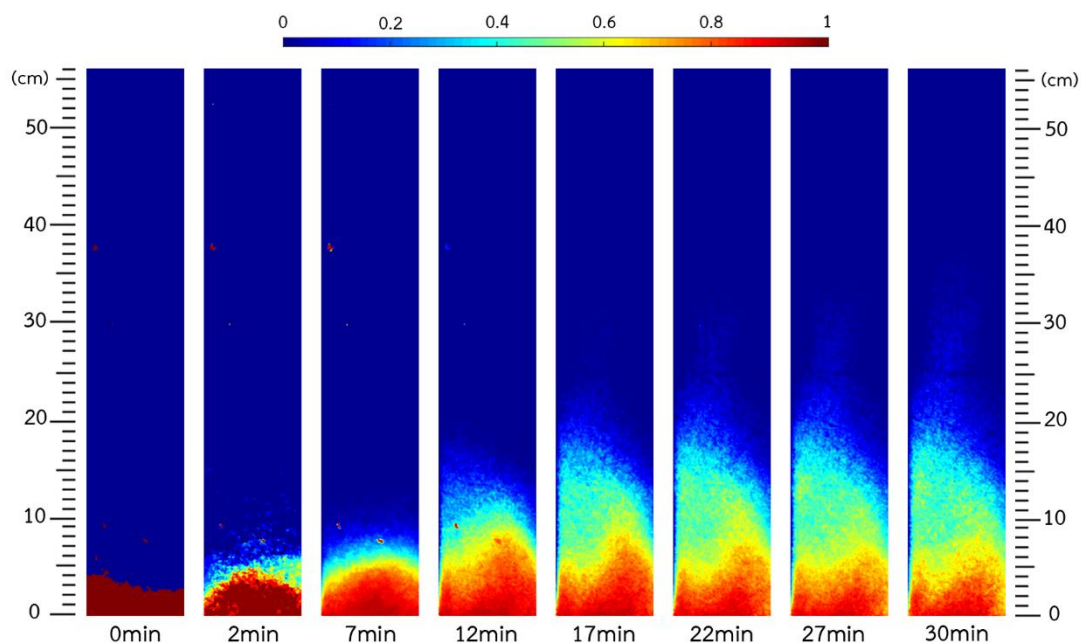
4.3 ผลการศึกษาความสูงเบตลอยตัวและการควบคุมความคงตัวของเบตด้วยวิธีการประมวลผลภาพ

4.3.1 ผลการศึกษาความสูงเบตสำหรับกระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่ต่างกัน

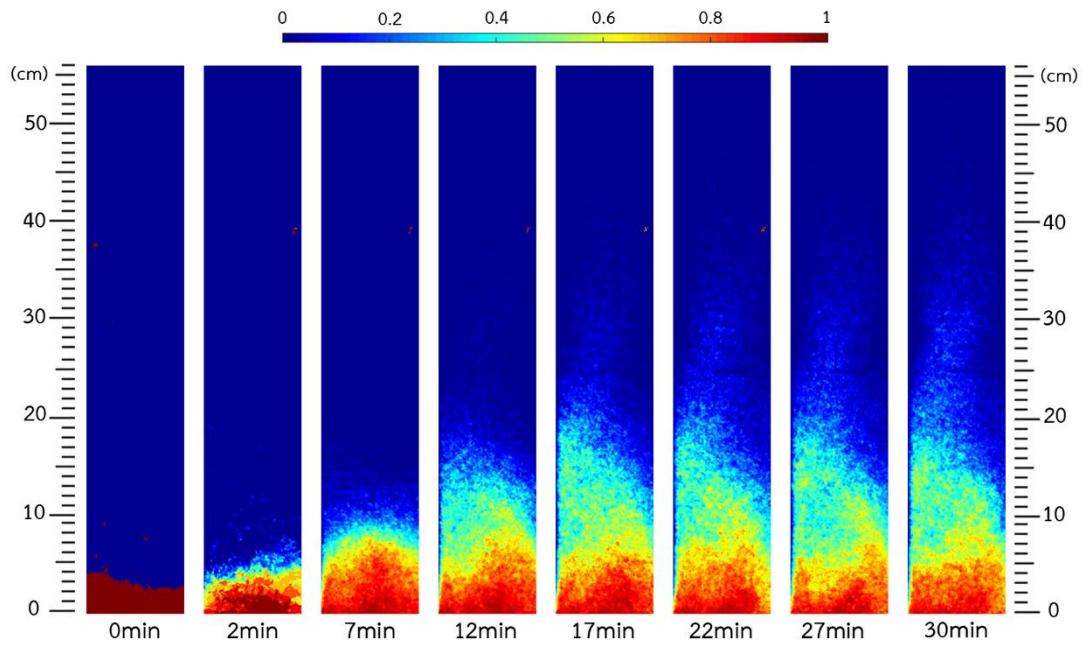
กระบวนการวิเคราะห์ความสูงเบตด้วยวิธีการเฉลี่ยภาพในช่วงเวลาที่กำหนด (Time-averaged) ถูกนำมาใช้สำหรับการศึกษาความสูงเบตของข้าวหอมมะลิแดงที่เปลี่ยนไปตามสภาวะการ

อบแห้ง 4 สภาวะ ได้แก่ 1)อุณหภูมิลมร้อน 90 องศาเซลเซียส เวลาการอบแห้ง 30 นาที 2)อุณหภูมิลมร้อน 98 องศาเซลเซียส เวลาการอบแห้ง 30 นาที 3)อุณหภูมิลมร้อน 105 องศาเซลเซียส เวลาการอบแห้ง 25 นาที 4)อุณหภูมิลมร้อน 120 องศาเซลเซียส เวลาการอบแห้ง 20 นาที

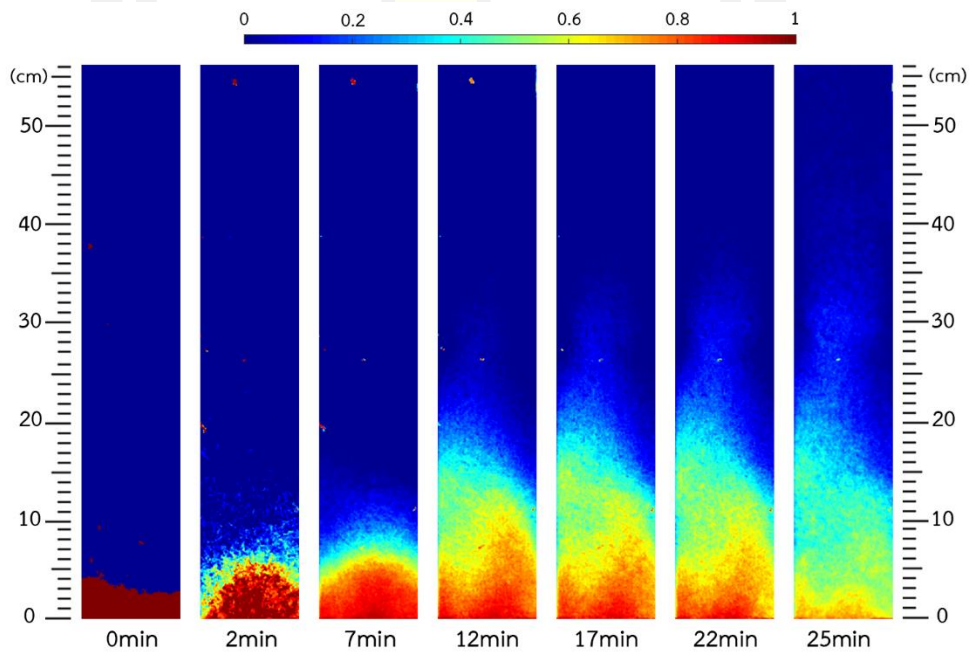
เนื่องด้วยภาพเฉลี่ยในช่วงเวลาที่กำหนดที่ได้จากกระบวนการวิเคราะห์ความสูงเบดเป็นภาพสีเทา ทำให้ยากต่อการจำแนกระดับความเข้มข้นภายในภาพ ดังนั้นภาพดังกล่าวจะถูกแปลงเป็นแผนที่สี (Color map) ซึ่งมีระดับความเข้มข้นต่ำสุดและสูงสุด คือ สีน้ำเงินเข้มและสีแดงเข้มตามลำดับ ระดับความเข้มข้นยังแสดงให้เห็นถึงเศษส่วนปริมาตรของข้าวหอมมะลิแดง (ของแข็ง) ที่พบบริเวณนั้น ภาพเฉลี่ยที่ผ่านการแปลงเป็นแผนที่สีถูกดำเนินการตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดกระบวนการอบแห้งของทุกสภาวะ แสดงดังภาพประกอบ 41-44



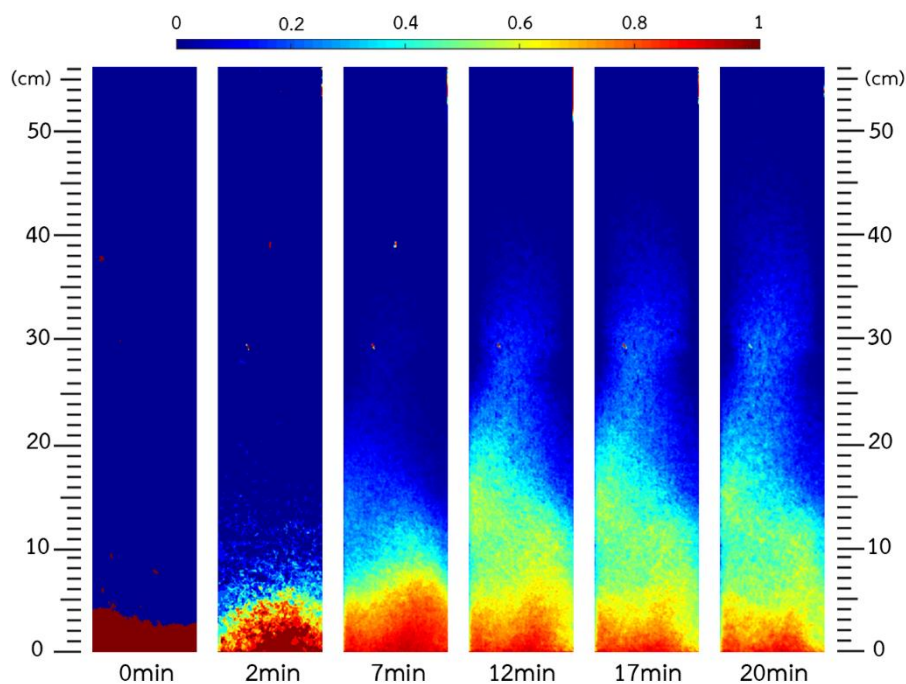
ภาพประกอบ 41 การเฉลี่ยภาพในช่วงเวลาต่างๆ ของสภาวะอุณหภูมิลมร้อน 90 องศาเซลเซียส



ภาพประกอบ 42 การเฉลี่ยภาพในช่วงเวลาต่างๆ ของสภาวะอุณหภูมิลมร้อน 98 องศาเซลเซียส



ภาพประกอบ 43 การเฉลี่ยภาพในช่วงเวลาต่างๆ ของสภาวะอุณหภูมิลมร้อน 105 องศาเซลเซียส

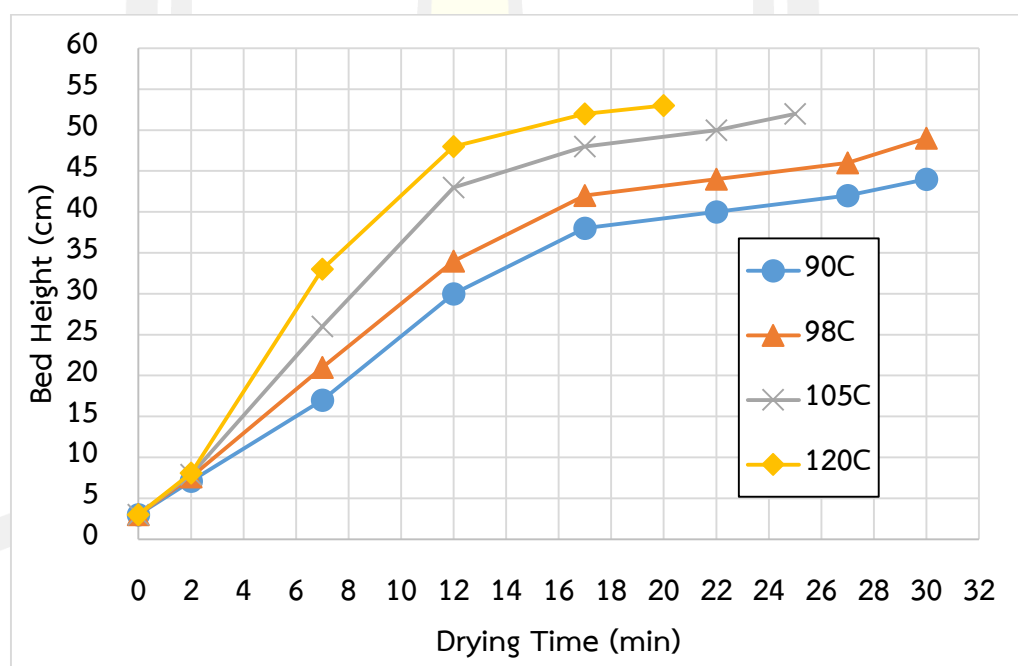


ภาพประกอบ 44 การเฉลี่ยภาพในช่วงเวลาต่างๆ ของสภาวะอุณหภูมิความร้อน 120 องศาเซลเซียส

จากภาพประกอบ 41-44 พบว่า เมื่อลมร้อนไหลเข้าสู่ด้านล่างของห้องอบแห้ง ทำให้ข้าวหอมมะลิแดงแสดงพฤติกรรมเหมือนของไหล [132] ข้าวหอมมะลิแดงภายในห้องอบแห้งเหนือแผ่นเจาะรูเกิดการเคลื่อนตัวในทิศทางต่างๆ และกระจายตัวอย่างอิสระ การพาความร้อนของกระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อนส่งผลให้ความสูงเบดลอยตัวของข้าวหอมมะลิแดงเปลี่ยนไปตามเวลาการอบแห้ง ผลของลมร้อนที่เกิดขึ้นภายในห้องอบแห้งตลอดเวลาแสดงให้เห็นถึงการเกิดฟลูอิดไดเซชันอย่างต่อเนื่อง ความสัมพันธ์ดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhao และคณะ (2010) [133] ที่ศึกษาและจำลองเชิงตัวเลขของลักษณะฟลูอิดไดซ์เบดระหว่างก๊าซและของแข็งที่ได้กล่าวถึงการผสมจนเป็นเนื้อเดียวกันระหว่างก๊าซและของแข็งในกระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด พื้นที่ที่มีเศษส่วนปริมาตรของแข็งต่ำของแผ่นที่สัมผัสกันเมื่อปริมาณลมร้อนที่อยู่บริเวณนั้นเป็นหลัก [134] พฤติกรรมการไหลนี้สอดคล้องกับรายงานของ Duangkhamchan และคณะ (2010) [135] ได้เปรียบเทียบและประเมินแบบจำลองการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมสำหรับการจำลองเศษส่วนปริมาตรของแข็งของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด พบว่า ลมร้อนภายในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เหนือแผ่นเจาะรูเกิดการไหลที่ไม่สมมาตรกัน นอกจากนี้อนุภาคกระจายตัวบริเวณใกล้ผนังมากกว่าตรงกลางของห้องอบแห้ง ความเร็วลมฝั่งขวาของห้องอบแห้งสูงกว่าฝั่งซ้าย ทำให้อนุภาคที่สัมผัสกับผนังห้องอบแห้งฝั่งขวาเคลื่อนตัวสูงกว่าอนุภาคที่สัมผัสกับผนังฝั่งตรงกันข้าม ผลลัพธ์ดังกล่าวสอดคล้องกับภาพประกอบ 41-44 พื้นที่ที่มีเศษส่วนปริมาตรของแข็งสูงเกิดขึ้นบริเวณด้านล่างของภาพเฉลี่ยเวลานานที่ 12 ขึ้นไป

ของสภาวะอุณหภูมิร้อน 90 และ 98 องศาเซลเซียส นานที่ 12-22 ของสภาวะอุณหภูมิร้อน 105 องศาเซลเซียส และนานที่ 7-12 ของสภาวะอุณหภูมิร้อน 120 องศาเซลเซียส

อย่างไรก็ตามได้พบข้อสังเกตหนึ่งสำหรับภาพเฉลี่ยสำหรับข้าวหอมมะลิแดงขณะลอยตัวสูงขึ้น พบว่า เศษส่วนปริมาตรมีแนวโน้มลดลงและเกิดการกระจายตัวฝั่งซ้ายมากกว่าฝั่งขวา พฤติกรรมดังกล่าวสามารถอธิบายได้ถึงการลอยตัวของข้าวหอมมะลิแดงที่สูงขึ้นตามน้ำหนักที่ลดลง เมื่อสัมผัสกับลมร้อนที่มีความเร็วสูงฝั่งขวา ส่งผลให้ข้าวหอมมะลิแดงเกิดแรงเหวี่ยงไปฝั่งตรงข้ามที่มีความเร็วลมร้อนต่ำกว่า ผลของแรงเหวี่ยงที่เกิดขึ้นทำให้ข้าวหอมมะลิแดงมีลักษณะการเคลื่อนตัวแบบก้นหอย ซึ่งคล้ายคลึงกับการศึกษาพฤติกรรมเบดที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันในเฟสของแก๊สและของแข็งสำหรับกระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดของ Du และคณะ (2003) [136] ที่กล่าวถึงการกระจายของอนุภาคที่ไม่สมมาตรกัน และความไม่สมมาตรกันนี้ทำให้การไหลของอนุภาคเป็นลักษณะการเคลื่อนตัวแบบก้นหอยภายในเบด ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างความสูงเบดลอยตัวของข้าวหอมมะลิแดงและเวลาอบแห้งของสภาวะการอบแห้งที่ต่างกันแสดงดังภาพประกอบ 45



ภาพประกอบ 45 ความสัมพันธ์ของความสูงเบดและเวลาการอบแห้งของสภาวะการอบแห้งที่ต่างกัน

จากภาพประกอบ 45 พบว่า ความสูงเบดของข้าวหอมมะลิแดงเริ่มต้นและความเร็วลมคงที่ของทุกสภาวะ คือ 3 เซนติเมตร และ 7.27 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ ความสูงเบดที่ได้จากการเฉลี่ยภาพในช่วงเวลาเริ่มต้น 2 7 12 17 22 27 และ 30 นาที ของสภาวะอุณหภูมิร้อน 90 องศาเซลเซียส ได้แก่ 3 7.1 17 30 38 40 42 และ 44 เซนติเมตร ตามลำดับ ความสูงเบดที่ได้จากการ

เฉลี่ยภาพในช่วงเวลาเริ่มต้น 2 7 12 17 22 27 และ 30 นาที ของสภาวะอุณหภูมิความร้อน 98 องศาเซลเซียส ได้แก่ 3 12 21 34 42 44 46 และ 49 เซนติเมตร ตามลำดับ ความสูงเบตที่ได้จากการเฉลี่ยภาพในช่วงเวลาเริ่มต้น 2 7 12 17 22 และ 25 นาที ของสภาวะอุณหภูมิความร้อน 105 องศาเซลเซียส ได้แก่ 3 18 26 43 48 50 และ 52 เซนติเมตร ตามลำดับ และความสูงเบตที่ได้จากการเฉลี่ยภาพในช่วงเวลาเริ่มต้น 2 7 12 17 และ 20 นาที ของสภาวะอุณหภูมิความร้อน 120 องศาเซลเซียส ได้แก่ 3 19 26 48 42 และ 53 เซนติเมตร ตามลำดับ

เวลาการอบแห้งใดๆ ของสภาวะอุณหภูมิความร้อนที่สูงขึ้น แสดงให้เห็นถึงการพาความร้อนของระบบฟลูอิดไดซ์เบตสูงทำให้อัตราส่วนความชื้นลดลงดังงานวิจัยที่ผ่านมาที่ศึกษาจลนศาสตร์การอบแห้งของกากมะกอกแบบฟลูอิดไดซ์เบตของ Meziane (2011) [116] พบว่า เมื่ออุณหภูมิอากาศแบบฟลูอิดไดซ์เพิ่มขึ้น ทำให้อัตราส่วนความชื้นลดลงและส่งผลกระทบต่อเวลาอบแห้งลดลง

นอกจากนี้เมื่อลมร้อนสัมผัสกับผิวเมล็ดข้าวหอมมะลิแดง ส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนและมวลภายในข้าวหอมมะลิแดง ทำให้น้ำหนักข้าวหอมมะลิแดงลดลงและเกิดการลอยตัวสูงขึ้น เหตุผลดังกล่าวจึงเป็นข้อสรุปถึงความสูงเบตที่สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญและมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างสม่ำเสมอในทุกสภาวะการอบแห้ง [137] ความสัมพันธ์ดังกล่าวสอดคล้องกับ Sahoo และ Sahoo (2014) [138] ที่ศึกษาลักษณะการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์ของอนุภาคหยาบและละเอียด พบว่าอนุภาคเกิดการยกตัวที่สม่ำเสมอในสภาวะอุณหภูมิความร้อนคงที่ สิ่งนี้บ่งบอกถึงลมร้อนที่เข้าสู่เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบตที่มีการกระจายความเร็วสม่ำเสมอ ทำให้เกิดการสร้างแรงลากและแรงลอยตัวขึ้น

4.3.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการอบแห้งภายใต้การควบคุมและปราศจากการควบคุมความคงตัวของระดับความสูงเบตในระหว่างการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบตร่วมกับลมหมุนอัดตัวและการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่ต่างกัน

ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการอบแห้งเป็นสิ่งหนึ่งที่สำคัญต่อการประเมินความคุ้มค่าของการผลิตผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป ดังนั้นผู้จัดทำจึงทำการศึกษาประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการอบแห้งภายใต้การควบคุมและปราศจากการควบคุมความคงตัวของระดับความสูงเบตในระหว่างการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบตร่วมกับลมหมุนอัดตัวและการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ ผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากข้าวหอมมะลิแดง (W_{evap}) การใช้พลังงานรวม (kWh) อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (SMER) และค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) แสดงดังตาราง 18

ตาราง 18 ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของสภาวะการอบแห้งระหว่างการควบคุมและปราศจากการควบคุมความคงตัวของระดับความสูงเบตในระดับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่ต่างกัน

MW		0	150	300	450	300-450
W _{evap}	No control	107.20±5.04 ^{bcA}	99.35±0.60 ^{aA}	98.99±2.13 ^{aA}	100.24±1.65 ^{aA}	105.01±0.37 ^{bA}
	Auto	110.98±2.91 ^{cB}	109.62±1.63 ^{bcB}	108.01±3.37 ^{bcB}	107.73±3.21 ^{bcB}	106.75±0.41 ^{bcB}
kWh	No control	1.16±0.04 ^{fA}	1.14±0.03 ^{fB}	0.94±0.00 ^{cdNS}	0.90±0.01 ^{cB}	0.94±0.04 ^{cdB}
	Auto	1.23±0.01 ^{gB}	1.09±0.03 ^{eA}	0.95±0.01 ^{dNS}	0.80±0.01 ^{bA}	0.73±0.01 ^{aA}
SMER	No control	0.092±0.001 ^{aNS}	0.087±0.003 ^{aA}	0.105±0.002 ^{bcA}	0.111±0.003 ^{cA}	0.112±0.005 ^{cA}
	Auto	0.090±0.003 ^{aNS}	0.100±0.002 ^{bB}	0.113±0.003 ^{cB}	0.135±0.002 ^{dB}	0.145±0.002 ^{dB}
SEC	No control	38.97±0.41 ^{fNS}	41.31±1.27 ^{gB}	34.19±0.73 ^{dB}	32.33±1.04 ^{cB}	32.22±1.34 ^{cB}
	Auto	39.92±1.51 ^{fgNS}	35.96±0.62 ^{eA}	31.84±0.76 ^{cA}	26.74±0.32 ^{bA}	24.79±0.33 ^{aA}

หมายเหตุ : MW คือ กำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟ (วัตต์) W_{evap} คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากข้าวหอมมะลิแดง (กรัม) SMER คือ อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (กิโลกรัมต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง) SEC คือ ค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (เมกะจูลต่อกิโลกรัม) สัญลักษณ์ตัวห้อย (ตัวพิมพ์เล็ก) ที่แตกต่างกันในแถวเดียวกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และสัญลักษณ์ตัวห้อย (ตัวพิมพ์ใหญ่) ที่แตกต่างกันในสภาวะเดียวกันของแต่ละผลตอบสนองแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95

จากตาราง 18 แสดงปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากข้าวหอมมะลิแดงที่มีผลต่อปราศจากการควบคุมและการควบคุมความคงตัวของระดับความสูงเบตมีค่าอยู่ในช่วง 98.99-107.20 และ 106.75-110.98 กรัม ตามลำดับ ทุกสภาวะการอบแห้งโดยควบคุมความคงตัวของระดับความสูงเบตไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และมีแนวโน้มที่ต่ำกว่าทุกสภาวะการอบแห้งโดยปราศจากการควบคุมความคงตัวของระดับความสูงเบตอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากปริมาณน้ำภายในข้าวหอมมะลิแดงถูกระเหยด้วยความดันไอในขณะอบแห้ง ทำให้ข้าวหอมมะลิแดงมีน้ำหนักที่ลดลงและเกิดการลอยตัวสูงขึ้น หากปราศจากการควบคุมความคงตัวของระดับความสูงเบต ทำให้ข้าวหอมมะลิแดงลอยตัวเหนือบริเวณห้องอบแห้งที่ติดตั้งไมโครเวฟอาจส่งผลต่อการแพร่ความร้อนที่ลดลงและน้ำระเหยออกจากข้าวหอมมะลิแดงในปริมาณน้อย หากข้าวหอมมะลิแดงได้รับการควบคุมการคงตัวในระดับความสูงเบตบริเวณห้องอบแห้งที่ติดตั้งไมโครเวฟ ทำให้ข้าวหอมมะลิแดงได้รับการพาความร้อนจากการฟลูอิดไดซ์และการนำความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟอย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ น้ำที่ระเหยออกจากข้าวหอมมะลิแดงในปริมาณมากด้วยการควบคุมอัตราการถ่ายเทไอน้ำภายในข้าวหอมมะลิแดงไปยังพื้นผิวในสภาวะสมดุลอย่างรวดเร็วยิ่งขึ้น [139]

อัตราการระเหยของน้ำหรือความร้อนภายในข้าวหอมมะลิแดงหุงสุกที่มีผลต่อปราศจากการควบคุมและการควบคุมความคงตัวของระดับความสูงเบตในตาราง 18 อยู่ในช่วงระหว่าง 0.087-0.112 และ 0.090-0.145 กิโลกรัมต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง ตามลำดับ ค่าอัตราการระเหยของน้ำสำหรับสภาวะการอบแห้งโดยปราศจากการควบคุมและการควบคุมความคงตัวของระดับความสูงเบตมี

แนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน คือ เมื่อใช้กำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟเพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการระเหยของน้ำเพิ่มขึ้น นอกจากนี้อัตราการระเหยของน้ำในทุกสภาวะการอบแห้งโดยควบคุมความคงตัวของระดับความสูงเบตมีแนวโน้มที่สูงกว่าทุกสภาวะการอบแห้งโดยปราศจากการควบคุมความคงตัวของระดับความสูงเบตอย่างมีนัยสำคัญ ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความสามารถการถ่ายเทความชื้นออกสู่พื้นผิวข้าวหอมมะลิแดงในอัตราที่สูงขึ้น เมื่อควบคุมการคงตัวในระดับความสูงบริเวณห้องอบแห้งที่ติดตั้งไมโครเวฟ

ค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำแสดงให้เห็นถึงความคุ้มค่าในการใช้พลังงานสูง จากตาราง 18 พบว่า ค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของสภาวะการอบแห้งโดยปราศจากการควบคุมและการควบคุมความคงตัวของระดับความสูงเบตอยู่ในช่วงระหว่าง 32.22-41.31 และ 24.79-39.92 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ สภาวะการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบตร่วมกับไมโครเวฟส่งผลให้เกิดค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำกว่าสภาวะการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบตเพียงอย่างเดียว ซึ่งผลลัพธ์ดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Zare และ Ranjbaran (2012) [140] ที่ศึกษาการอบแห้งถั่วเหลืองด้วยวิธีการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบตร่วมกับไมโครเวฟ พบว่า วิธีการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบตร่วมกับไมโครเวฟทำให้ประหยัดเวลาการอบแห้งได้ร้อยละ 83.39-98.07 และลดค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะร้อยละ 82.07-95.22 เมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบตเพียงอย่างเดียว Momenzadeh และคณะ (2011) [139] ที่รายงานการอบแห้งเปลือกข้าวโพดในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบตร่วมกับไมโครเวฟโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม ได้กล่าวถึงการเพิ่มอุณหภูมิร้อนและไมโครเวฟส่งผลให้ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน และอัตราการอบแห้งสูงขึ้น เนื่องจากการแทรกซึมของพลังงานไมโครเวฟเข้าไปในเปลือกข้าวโพด และการสร้างแรงดันไอน้ำที่ต่างกันมากระหว่างจุดศูนย์กลางและพื้นผิวของเปลือกข้าวโพด Chayjan และคณะ (2017) [141] ที่ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งถั่วพิสตาชิโอในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบตร่วมกับไมโครเวฟโดยใช้วิธีการตอบสนองพื้นผิว พบว่า การให้กำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการกระจายความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้นและเวลาอบแห้งลดลง เวลาอบแห้งลดลงส่งผลต่อค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ลดลงด้วย

นอกจากนี้ค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของทุกสภาวะการอบแห้งโดยควบคุมความคงตัวของระดับความสูงเบตมีแนวโน้มที่ต่ำกว่าทุกสภาวะการอบแห้งโดยปราศจากการควบคุมความคงตัวของระดับความสูงเบตอย่างมีนัยสำคัญเมื่อใช้กำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟเพิ่มขึ้น สภาวะการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบตที่มีการใช้ลมหมุนอัดตัวร่วมกับการใช้ไมโครเวฟแบบขั้นตอนเพิ่มจาก 300 เป็น 450 วัตต์ ภายใต้การอบแห้งโดยควบคุมความคงตัวของระดับความสูงเบต เป็นสภาวะที่ค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีแนวโน้มต่ำที่สุด

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองจากบทที่ผ่านมา บทนี้จะกล่าวถึงข้อสรุปและข้อเสนอแนะของการทดลอง ซึ่งได้แก่ การศึกษาการเตรียมข้าวหอมมะลิแดงด้วยกระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับลมหมุนอัดตัว การศึกษาการเตรียมข้าวหอมมะลิแดงด้วยกระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับลมหมุนอัดตัวและการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ และการศึกษาความสูงเบดลอยตัวและการควบคุมความคงตัวของเบดด้วยวิธีการประมวลผลภาพ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

5.1 สรุปผล

5.1.1 สรุปผลการศึกษาการเตรียมข้าวหอมมะลิแดงด้วยกระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับลมหมุนอัดตัว

กระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับลมหมุนอัดตัวเป็นกระบวนการทางเลือกหนึ่งในการผลิตข้าวหอมมะลิแดงกึ่งสำเร็จรูป พารามิเตอร์ของสมการการอบแห้งของ Page (k และ n) และค่าสัมประสิทธิ์แพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_{eff}) ที่มีค่าสูงที่สุด คือ สภาวะที่มีความดันลมหมุนอัดตัว 6 บาร์ ซึ่งถูกเลือกในการเตรียมข้าวหอมมะลิแดงกึ่งสำเร็จรูป

สภาวะการอบแห้งเมื่ออุณหภูมิลมร้อนเพิ่มขึ้นและเวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัวสั้นลงแสดงให้เห็นถึงอัตราการคืนรูปและโครงสร้างความเป็นรูพรุนสูงด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แต่อย่างไรก็ตามสภาวะการอบแห้งเมื่ออุณหภูมิลมร้อนเพิ่มขึ้นส่งผลต่อคุณสมบัติการต้านอนุมูลอิสระลดลง

สภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมถูกกำหนดโดยอาศัยความสัมพันธ์กันระหว่างคุณสมบัติทางกายภาพ อัตราส่วนการคืนน้ำ และคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระทั้งหมดด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง พบว่าสภาวะการอบแห้งด้วยอุณหภูมิลมร้อน 98.5 องศาเซลเซียส และเวลาในการใช้ลมหมุนอัดตัว 2 นาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมข้าวหอมมะลิแดงด้วยกระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับลมหมุนอัดตัว

5.1.2 สรุปผลการศึกษาการเตรียมข้าวหอมมะลิแดงด้วยกระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับลมหมุนอัดตัวและการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ

เนื่องจากชุดการอบแห้งที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้มีข้อจำกัดของการตั้งค่าอุณหภูมิลมร้อนที่ระดับความถูกต้อง ± 1 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงใช้อุณหภูมิลมร้อนที่เหมาะสมเท่ากับ 98 องศาเซลเซียส

สำหรับการศึกษานี้ แบบจำลองเอมพีริคัลของ Page ถูกใช้เทียบเคียงกับอัตราส่วนความชื้นที่เวลาการอบแห้งใดๆ เนื่องจากสามารถนำมาใช้ในการทำนายเวลาการอบแห้งได้ครอบคลุมวัสดุหลากหลายชนิด อีกทั้งมีความซับซ้อนและจำนวนของตัวแปรที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่นๆ พบว่าพฤติกรรมของการอบแห้งที่เป็นไปตามทฤษฎีการอบแห้ง โดยความชื้นของข้าวหอมมะลิแดงหุงสุกมีค่าลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลตลอดระยะเวลาการอบแห้ง ค่า R^2 มีค่ามากกว่า 0.99 ในทุกสภาวะการอบแห้ง แสดงให้เห็นว่าค่าสมการการอบแห้งของ Page เข้ากันได้ดีกับข้อมูลอัตราส่วนความชื้นที่ได้ อีกทั้งเมื่อพิจารณาค่าความผิดพลาดระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายพบว่า ค่า χ^2 ค่า RMSE ค่า MSE และค่า %P มีค่าต่ำ แสดงให้เห็นถึงระดับความถูกต้องที่ได้จากการใช้สมการการอบแห้งของ Page ในการทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นหรือใช้ในการทำนายเวลาการอบแห้งในกรณีที่กำหนดค่าความชื้นสุดท้ายของวัสดุที่ต้องการ

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลสูงสุดถูกพบในสภาวะการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับลมหมุนอัดตัวและการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ 450 วัตต์ เนื่องจากการแทรกซึมของคลื่นไมโครเวฟในระดับที่สูงช่วยเร่งการเคลื่อนตัวและชนกันของโมเลกุลของน้ำ ทำให้เกิดการถ่ายเทความชื้นจากภายในสู่พื้นผิวได้เร็วขึ้น

สภาวะของอุณหภูมิลมร้อน 98 องศาเซลเซียส และการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟแบบขั้นตอนจาก 300 วัตต์ เป็น 450 วัตต์ เป็นสภาวะที่มีอัตราการระเหยน้ำจำเพาะสูงสุดและค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ต่ำสุด คือ 0.141 กิโลกรัมต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง และ 25.49 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำ ตามลำดับ พารามิเตอร์ดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความคุ้มค่าในการใช้พลังงานสำหรับกระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับลมหมุนอัดตัวและการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ นอกจากนี้ค่า ΔE ที่บ่งบอกถึงความแตกต่างจากสีของข้าวหอมมะลิแดงดิบมีแนวโน้มน้อยที่สุดที่สภาวะของอุณหภูมิลมร้อน 98 องศาเซลเซียส และการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟแบบขั้นตอนจาก 300 วัตต์ เป็น 450 วัตต์

ข้าวหอมมะลิแดงอบแห้งภายใต้สภาวะการอบแห้งที่ต่างกันเมื่อพิจารณาคุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน คุณภาพด้านสี ร้อยละการหดตัว คุณสมบัติการคืนรูป และคุณสมบัติเนื้อสัมผัส พบว่า การอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่มีการใช้ลมหมุนอัดตัวร่วมกับการใช้ไมโครเวฟแบบขั้นตอนเพิ่มจาก 300 เป็น 450 วัตต์ เป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมข้าวหอมมะลิแดงด้วยกระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับลมหมุนอัดตัวและการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ

5.1.3 สรุปผลการศึกษาความสูงเบตลอยตัวและการควบคุมความคงตัวของเบตด้วยวิธีการประมวลผลภาพ

การเฉลี่ยภาพในช่วงเวลาต่างๆ ของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศแบบฟลูอิดไดซ์แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการไหลของข้าวหอมมะลิแดงภายในห้องอบแห้ง เมื่อลมร้อนไหลเข้าสู่ด้านล่างของห้องอบแห้งก่อให้เกิดการพาความร้อนทำให้ข้าวหอมมะลิแดงเคลื่อนที่ในทิศทางต่างๆ ส่งผลให้เกิดการสร้างแรงลากและแรงลอยตัวขึ้น เวลาการอบแห้งใดๆ ของสภาวะอุณหภูมิอากาศแบบฟลูอิดไดซ์ที่สูงขึ้นแสดงให้เห็นถึงการพาความร้อนของระบบฟลูอิดไดซ์ที่สูงขึ้นทำให้อัตราส่วนความชื้นลดลงเนื่องจากโมเลกุลของน้ำภายในข้าวหอมมะลิแดงถูกระเหยด้วยความดันไออย่างรวดเร็วทำให้น้ำหนักของข้าวหอมมะลิแดงเบาลงและเกิดการลอยตัวสูงขึ้น

สภาวะการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบตร่วมกับลมหมุนอัดตัวและการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟแบบเป็นขั้นตอน (300-450 วัตต์) ภายใต้การควบคุมความคงตัวของระดับความสูงเบต เป็นสภาวะที่ค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีแนวโน้มต่ำที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรมีการศึกษาการอบแห้งข้าวหอมมะลิแดงถึงสำเร็จรูปแบบฟลูอิดไดซ์เบตร่วมกับไมโครเวฟและกระแสลมหมุนอัดต่อการนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรมและมีความเป็นไปได้ในด้านธุรกิจให้มากขึ้น

5.2.2 การประเมินสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมข้าวหอมมะลิแดงด้วยกระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบตร่วมกับลมหมุนอัดตัวและการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ จากคุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน คุณภาพด้านสี ร้อยละการหดตัว คุณสมบัติการคั้นรูป และคุณสมบัติเนื้อสัมผัส คุณสมบัติสารต้านอนุมูลอิสระเป็นหนึ่งในคุณสมบัติที่สำคัญจำเป็นต่อพิจารณาสภาวะที่เหมาะสมด้วย

5.2.3 สำหรับการวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสโดยใช้คุณภาพของข้าวสุกเป็นเกณฑ์ ยังไม่สามารถใช้ประเมินคุณภาพของข้าวหอมมะลิแดงได้ดีมากนัก จึงควรใช้การทดสอบทางประสาทสัมผัสควบคู่ไปด้วยก่อนผลิตเพื่อการจำหน่ายจริง

บรรณานุกรม



- [1] S. Poosri, T. Thilavech, P. Pasukamonset, C. Suparpprom, and S. Adisakwattana, "Studies on Riceberry rice (*Oryza sativa* L.) extract on the key steps related to carbohydrate and lipid digestion and absorption: A new source of natural bioactive substances," *NFS J.*, vol. 17, pp. 17–23, 2019.
- [2] P. Goufo and H. Trindade, "Rice antioxidants: phenolic acids, flavonoids, anthocyanins, proanthocyanidins, tocopherols, tocotrienols, γ -oryzanol, and phytic acid.," *Food Sci. Nutr.*, vol. 2, no. 2, pp. 75–104, Mar. 2014.
- [3] J. Ratseewo, F. J. Warren, and S. Siriamornpun, "The influence of starch structure and anthocyanin content on the digestibility of Thai pigmented rice," *Food Chem.*, vol. 298, p. 124949, 2019.
- [4] X. Q. Chen, N. Nagao, T. Itani, and K. Irifune, "Anti-oxidative analysis, and identification and quantification of anthocyanin pigments in different coloured rice.," *Food Chem.*, vol. 135, no. 4, pp. 2783–2788, Dec. 2012.
- [5] H. H. Chen, "Investigation of Properties of Long-grain Brown Rice Treated by Low-pressure Plasma," *Food Bioprocess Technol.*, vol. 7, no. 9, pp. 2484–2491, 2014.
- [6] T. Q. Le and W. Jittanit, "Optimization of operating process parameters for instant brown rice production with microwave-followed by convective hot air drying," *J. Stored Prod. Res.*, vol. 61, pp. 1–8, 2015.
- [7] W. Prasert and P. Suwannaporn, "Optimization of instant jasmine rice process and its physicochemical properties," *J. Food Eng.*, vol. 95, pp. 54–61, Nov. 2009.
- [8] H. Dutta, Charu, and L. Mahanta, "Laboratory Process Development and Physicochemical Characterization of a Low Amylose and Hydrothermally Treated Ready-to-Eat Rice Product Requiring No Cooking," *Food Bioprocess Technol.*, vol. 7, pp. 212–223, Jan. 2014.
- [9] O. Rewthong, S. Soponronnarit, C. Taechapairoj, P. Tungtrakul, and S. Prachayawarakorn, "Effects of cooking, drying and pretreatment methods on texture and starch digestibility of instant rice," *J. Food Eng.*, vol. 103, no. 3, pp. 258–264, 2011.
- [10] F. Pei *et al.*, "Comparison of Freeze-Drying and Freeze-Drying Combined with Microwave Vacuum Drying Methods on Drying Kinetics and Rehydration

Characteristics of Button Mushroom (*Agaricus bisporus*) Slices,” *Food Bioprocess Technol.*, vol. 7, no. 6, pp. 1629–1639, 2014.

[11] L. Yu, M. S. Turner, M. Fitzgerald, J. R. Stokes, and T. Witt, “Review of the effects of different processing technologies on cooked and convenience rice quality,” *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 59, pp. 124–138, 2017.

[12] P. Luangmalawat, S. Prachayawarakorn, A. Nathakaranakule, and S. Soponronnarit, “Effect of temperature on drying characteristics and quality of cooked rice,” *LWT - Food Sci. Technol.*, vol. 41, no. 4, pp. 716–723, May 2008.

[13] L. Mayor and A. M. Sereno, “Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review,” *J. Food Eng.*, vol. 61, no. 3, pp. 373–386, 2004.

[14] A. E. Drouzas, E. Tsami, and G. D. Saravacos, “Microwave/vacuum drying of model fruit gels,” *J. Food Eng.*, vol. 39, no. 2, pp. 117–122, 1999.

[15] T. M. Lin, T. D. Durance, and C. H. Scaman, “Characterization of vacuum microwave, air and freeze dried carrot slices,” *Food Res. Int.*, vol. 31, no. 2, pp. 111–117, 1998.

[16] S. S. Ahmad, M. T. Morgan, and M. R. Okos, “Effects of microwave on the drying, checking and mechanical strength of baked biscuits,” *J. Food Eng.*, vol. 50, no. 2, pp. 63–75, 2001.

[17] H. H. Nijhuis *et al.*, “Research Needs and Opportunities in the Dry Conservation of Fruits and Vegetables,” *Dry. Technol.*, vol. 14, no. 6, pp. 1429–1457, Jan. 1996.

[18] M. N. Berteli and A. Marsaioli, “Evaluation of short cut pasta air dehydration assisted by microwaves as compared to the conventional drying process,” *J. Food Eng.*, vol. 68, no. 2, pp. 175–183, 2005.

[19] M. E. C. Oliveira and A. S. Franca, “Microwave heating of foodstuffs,” *J. Food Eng.*, vol. 53, no. 4, pp. 347–359, 2002.

[20] T. Le and W. Jittanit, “Drying characteristics of cooked jasmine brown rice and true densities of dried products,” *Kasetsart J. - Nat. Sci.*, vol. 46, pp. 256–271, Feb. 2012.

- [21] A. Jiao, X. Xu, and Z. Jin, "Modelling of dehydration–rehydration of instant rice in combined microwave-hot air drying," *Food Bioprod. Process.*, vol. 92, no. 3, pp. 259–265, 2014.
- [22] X. Chen, P. Qian, X.-J. Zhang, F.-N. Liu, and R.-R. Lu, "Improving Instant Rice Quality by Novel Combined Drying," *Dry. Technol.*, vol. 32, no. 12, pp. 1448–1456, Sep. 2014.
- [23] S. B. Patil and M. K. Khan, "Germinated brown rice as a value added rice product: A review," *J. Food Sci. Technol.*, vol. 48, no. 6, pp. 661–667, Dec. 2011.
- [24] M. Das, R. Banerjee, and S. Bal, "Evaluation of physicochemical properties of enzyme treated brown rice (Part B)," *LWT - Food Sci. Technol.*, vol. 41, no. 10, pp. 2092–2096, 2008.
- [25] M. Das, S. Gupta, V. Kapoor, R. Banerjee, and S. Bal, "Enzymatic polishing of rice – A new processing technology," *LWT - Food Sci. Technol.*, vol. 41, no. 10, pp. 2079–2084, 2008.
- [26] T. Gaewsondee and W. Duangkhamchan, "A Novel Process for Preparing Instant Riceberry Using Fluidized Bed Drying Assisted with Swirling Compressed-Air: Kinetic Aspects," *Food Bioprocess Technol.*, vol. 12, no. 8, pp. 1422–1434, 2019.
- [27] หทัยชนก ศรีประไพ, ฉัตรชนก บุญไชย, and ยศสินี หัวดวง, "การพัฒนาผลิตภัณฑ์พาสต้าสดจากแป้งข้าวกล้อง," *Thai J. Sci. Technol.*, vol. 7, no. 1, pp. 58–69, 2018.
- [28] V. S. Reddy, S. Dash, and A. R. Reddy, "Anthocyanin pathway in rice (*Oryza sativa* L): identification of a mutant showing dominant inhibition of anthocyanins in leaf and accumulation of proanthocyanidins in pericarp," *Theor. Appl. Genet.*, vol. 91, no. 2, pp. 301–312, 1995.
- [29] กรมการข้าว, "ข้าวหอมมะลิแดง," *กระทรวงเกษตรและสหกรณ์*, 2563. [Online]. Available: <https://www.thairicedb.com/rice-detail.php?id=11>.
- [30] ผาณิต รุจิรพิสิฐ, วิชชุดา สังข์แก้ว, and เสาวนีย์ เอี้ยวสกุลรัตน์, "คุณค่าทางโภชนาการของข้าว 9 สายพันธุ์," *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร*, vol. 43, no. 2, pp. 173–176, 2555.
- [31] S. Toyokuni *et al.*, "Protective Effect of Colored Rice over White Rice on Fenton Reaction-based Renal Lipid Peroxidation in Rats," *Free Radic. Res.*, vol. 36, pp. 583–592, Jun. 2002.

- [32] C. Hu, J. Zawistowski, W. Ling, and D. D. Kitts, "Black Rice (*Oryza sativa* L. indica) Pigmented Fraction Suppresses both Reactive Oxygen Species and Nitric Oxide in Chemical and Biological Model Systems," *J. Agric. Food Chem.*, vol. 51, no. 18, pp. 5271–5277, Aug. 2003.
- [33] S. H. Nam, S. P. Choi, M. Y. Kang, H. J. Koh, N. Kozukue, and M. Friedman, "Antioxidative activities of bran extracts from twenty one pigmented rice cultivars," *Food Chem.*, vol. 94, no. 4, pp. 613–620, 2006.
- [34] J.-M. Kong, L.-S. Chia, N.-K. Goh, T.-F. Chia, and R. Brouillard, "Analysis and biological activities of anthocyanins," *Phytochemistry*, vol. 64, no. 5, pp. 923–933, 2003.
- [35] W.-D. Wang and S.-Y. Xu, "Degradation kinetics of anthocyanins in blackberry juice and concentrate," *J. Food Eng.*, vol. 82, no. 3, pp. 271–275, 2007.
- [36] N. Kapcum, J. Uriyapongson, I. Alli, and S. Phimphilai, "Anthocyanins, phenolic compounds and antioxidant activities in colored corn cob and colored rice bran," vol. 23, pp. 2347–2356, Jan. 2016.
- [37] ศุภนุช ใส่แปง, นิรมล อุดมอ่าง, and ยุทธนา พิมลศิริผล, "ผลของสภาวะในการแช่ข้าวต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงงอก," in *การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48: สาขาอุตสาหกรรมเกษตร*, 2553, pp. 100–107.
- [38] หอมหวาน ตาสาโรจน์, "การคัดคุณภาพเมล็ดพันธุ์ข้าวสีแบบไม่ทำลาย กรณีศึกษาข้าวหอมแดงสุโขทัย 1," มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2557.
- [39] A. Castañeda-Ovando, M. de L. Pacheco-Hernández, M. E. Páez-Hernández, J. A. Rodríguez, and C. A. Galán-Vidal, "Chemical studies of anthocyanins: A review," *Food Chem.*, vol. 113, no. 4, pp. 859–871, 2009.
- [40] น้ำทิพย์ วงษ์ประทีป, "การพัฒนาผลิตภัณฑ์กระยาสารทจากข้าวกล้องมะลิแดง (ข้าวหอมมันปู)," in *การประชุมวิชาการระดับชาติ "พิบูลสงครามวิจัย"*, 2557, pp. 762–767.
- [41] จิราภรณ์ ทองตัน and วรพงศ์ ภู่งศ์, "การประยุกต์ใช้น้ำมันรำข้าวและสารสกัดจากรำข้าวหอมมะลิแดงในเครื่องสำอางสำหรับผิว," *วารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, vol. 12, no. 2, pp. 43–56, 2560.
- [42] สุชาดา ไม้สนธิ์ and ขวัญชัย คุณเจริญไพศาล, "การพัฒนาผลิตภัณฑ์แคแรกเกอร์จากข้าวกล้องหอมมะลิและข้าวแดง (อังกัก)," *วารสารวิจัยราชภัฏพระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, vol. 7, no. 2, pp. 26–40, 2555.

- [43] อําพรธณ ชัยกุลเสรีวัฒน์ and อรุชุล กอสะเกต, “การผลิตนมเปรี้ยวพร้อมดื่มจากข้าวกล้อง,” *วารสารเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยสยาม*, vol. 4, no. 1, pp. 34–41, 2552.
- [44] น้ําทิพย์ วงษ์ประทีป and ปวีณา น้อยทัพ, “การสร้างมูลค่าเพิ่มและการพัฒนาภูมิปัญญาการทำข้าวทอดอบกรอบรสสมุนไพร.” p. 72, 2559.
- [45] งามชื่น คงเสรี, “คุณภาพและการตรวจสอบข้าวหอมมะลิไทย กรมวิชาการเกษตร.”
- [46] A. K. Ozai-Durrani, “Quick-cooking rice and process for making same,” 1948.
- [47] R. L. Roberts, “Production of quick-cooking rice,” 2,610,124, 1954.
- [48] K. Yasumatsu, T. Sawada, K. Sawada, and S. Moritaka, “Preparation of quick-cooking rice,” 3,582,352, 1971.
- [49] R. L. Roberts, “Preparation of pre-cooked rice,” 2,715,579, 1955.
- [50] B. B. Reddy, B. C. Ghosh, and M. D. Reddy, “Effect of Transplanting Date and Seedling Age on Stand Establishment and Grain Yield of Rice in Rainfed Lowland (Intermediate Deep-Water) Conditions,” *Exp. Agric.*, vol. 23, no. 2, pp. 201–206, 1987.
- [51] สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, *การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท*. กรุงเทพมหานคร: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2540.
- [52] วิไล รังสาดทอง, *เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร*. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2547.
- [53] Z. Berk, *Food Process Engineering and Technology*, 1st ed. Oxford: Academic Press, 2009.
- [54] J. Srikiatden and J. S. Roberts, “Moisture Transfer in Solid Food Materials: A Review of Mechanisms, Models, and Measurements,” *Int. J. Food Prop.*, vol. 10, pp. 739–777, Oct. 2007.
- [55] R. Singh and D. R. Heldman, *Introduction to food engineering*, 5th ed. Amsterdam: Academic Press, 2014.
- [56] ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, *พื้นฐานการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ*. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2551.
- [57] M. Okos, O. Campanella, G. Narsimhan, R. K. Singh, and A. C. Weitnauer, “Food Dehydration,” in *Handbook of Food Engineering*, 2nd ed., D. R. Heldman and D. B. Lund, Eds. Boca Raton: CRC press, 2007, pp. 601–744.

- [58] J. Tang, “Unlocking Potentials of Microwaves for Food Safety and Quality,” *J. Food Sci.*, vol. 80, no. 8, pp. E1776–E1793, Aug. 2015.
- [59] สายสนม ประดิษฐ์ดวง, “การให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟและการฉายรังสีอาหาร,” in *วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหาร*, 3rd ed., คณะอาจารย์ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร, Ed. กรุงเทพมหานคร: คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน, 2543, pp. 173–195.
- [60] S. Chandrasekaran, S. Ramanathan, and T. Basak, “Microwave food processing—A review,” *Food Res. Int.*, vol. 52, no. 1, pp. 243–261, 2013.
- [61] M. Zhang, J. Tang, A. S. Mujumdar, and S. Wang, “Trends in microwave related drying of fruits and vegetables,” *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 17, pp. 524–534, 2006.
- [62] C. Kumar, A. Karim, and M. U.H.Joardder (Omar), “Intermittent Drying of Food Products: A Critical Review,” *J. Food Eng.*, Aug. 2014.
- [63] สิริชัย ส่งเสริมพงษ์, เจริญเหรียญ สงวนศรี, and อรอนงค์ นัยวิกุล, “การพัฒนากระบวนการผลิตกล้วยเดี่ยวเส้นเล็กและเส้นใหญ่แบบใหม่.” สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร, 2554.
- [64] สิริชัย ส่งเสริมพงษ์, นพรัตน์ ชีรสุนทรวัฒน์, and มนัสนันท์ ชื้อประเสริฐ, “การอบแห้งเนื้อลำไยสีทองด้วยเครื่องอบแห้งไมโครเวฟแบบสายพานไหลต่อเนื่อง,” in *เทคนิควิจัย (01052491)*, ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2555.
- [65] สิริชัย ส่งเสริมพงษ์, ญัฐธิชา ศรีสุกใส, and รังสิยา พรรคกลิน, “การเปรียบเทียบการอบแห้งกล้วยและขนุนด้วยไมโครเวฟและวิธีอบลมร้อน,” in *เทคนิควิจัย (01052491)*, ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2553.
- [66] สิริชัย ส่งเสริมพงษ์, นันทินิตย์ สุรพันธุ์, and จิราพร สุวรรณวงษ์, “การอบแห้งเครื่องต้มยำด้วยไมโครเวฟแบบสายพานไหลต่อเนื่อง,” in *เทคนิควิจัย (01052491)*, ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2553.
- [67] สิริชัย ส่งเสริมพงษ์, ชลธิชา เชื้อศิริ, and ฐิตาภา โพธิ์แจ้ง, “การอบแห้งกุ้งด้วยไมโครเวฟแบบสายพานไหลต่อเนื่อง,” in *เทคนิควิจัย (01052491)*, ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2554.
- [68] สิริชัย ส่งเสริมพงษ์, อุมาวดี เกตุงาม, and ฉันทย์ชนก วิศิษฐ์ศักดิ์, “เปรียบเทียบการทำแห้งมะพร้าวชิ้นเล็กอบแห้งและมะพร้าวเกล็ดโดยเครื่องไมโครเวฟแบบสายพานไหลต่อเนื่องกับเครื่องอบ

แห้งลมร้อน,” in *เทคนิควิจัย (01052491)*, ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2553.

[69] D. Wray and H. S. Ramaswamy, “Novel Concepts in Microwave Drying of Foods,” *Dry. Technol.*, vol. 33, no. 7, pp. 769–783, May 2015.

[70] N. Therdthai and W. Zhou, “Characterization of microwave vacuum drying and hot air drying of mint leaves (*Mentha cordifolia* Opiz ex Fresen),” *J. Food Eng.*, vol. 91, pp. 482–489, Apr. 2009.

[71] R. Wang, M. Zhang, and A. Mujumdar, “Effects of vacuum and microwave freeze drying on microstructure and quality of potato slices,” *J. Food Eng.*, vol. 101, pp. 131–139, Nov. 2010.

[72] L. Kahyaoglu, S. Sahin, and G. Sumnu, “Physical properties of parboiled wheat and bulgur produced using spouted bed and microwave assisted spouted bed drying,” *J. Food Eng.*, vol. 98, pp. 159–169, May 2010.

[73] วิกีพีเดีย สารานุกรมเสรี, “การประมวลผลภาพ,” 2562. [Online]. Available: <https://th.wikipedia.org/wiki/การประมวลผลภาพ>.

[74] A. McAndrew, *An Introduction to Digital Image Processing With Matlab*. Boston, MA, USA: Course Technology Press, 2004.

[75] D. Mery *et al.*, “Quality classification of corn tortillas using computer vision,” *J. Food Eng.*, vol. 101, no. 4, pp. 357–364, 2010.

[76] S. Sansomboonsuk and N. Afzulpurkar, “Machine vision for Rice Quality Evaluation,” in *Technology and Innovation for Sustainable Development Conference (TISD)*, 2008, pp. 343–346.

[77] Q. Li, M. Wang, and W. Gu, “Computer vision based system for apple surface defect detection,” *Comput. Electron. Agric.*, vol. 36, no. 2, pp. 215–223, 2002.

[78] D. Unay, B. Gosselin, O. Kleynen, V. Leemans, M.-F. Destain, and O. Debeir, “Automatic grading of Bi-colored apples by multispectral machine vision,” *Comput. Electron. Agric.*, vol. 75, no. 1, pp. 204–212, 2011.

[79] K. Kılıç, İ. H. Boyacı, H. Köksel, and İ. Küsmenoğlu, “A classification system for beans using computer vision system and artificial neural networks,” *J. Food Eng.*, vol. 78, no. 3, pp. 897–904, 2007.

- [80] G. S. Gill, A. Kumar, and R. Agarwal, "Monitoring and grading of tea by computer vision – A review," *J. Food Eng.*, vol. 106, no. 1, pp. 13–19, 2011.
- [81] P. Luangmalawat, S. Prachayawarakorn, A. Nathakaranakule, and S. Soponronnarit, "Effect of temperature on drying characteristics and quality of cooked rice," *LWT - Food Sci. Technol.*, vol. 41, no. 4, pp. 716–723, 2008.
- [82] S. Watano and K. Miyanami, "Image processing for on-line monitoring of granule size distribution and shape in fluidized bed granulation," *Powder Technol.*, vol. 83, no. 1, pp. 55–60, 1995.
- [83] A. Iheonye, Y. Garipey, and V. Raghavan, "Computer vision for real-time monitoring of shrinkage for peas dried in a fluidized bed dryer," *Dry. Technol.*, vol. 38, no. 1–2, pp. 130–146, Jan. 2020.
- [84] U. Lacknermeier, C. Rudnick, J. Werther, A. Bredebusch, and H. Burkhardt, "Visualization of flow structures inside a circulating fluidized bed by means of laser sheet and image processing," *Powder Technol.*, vol. 114, pp. 71–83, Jan. 2001.
- [85] วีระ ศรีอริยะกุล, "อิทธิพลของการพ่นไอน้ำก่อนที่มีต่อการผลิตข้าวเหนียวโดยใช้เทคนิคฟลูอิดเซชันที่ใช้อากาศร้อน," มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2549.
- [86] V. L. Singleton and J. A. Rossi, "Colorimetry of Total Phenolics with Phosphomolybdic-Phosphotungstic Acid Reagents," *Am. J. Enol. Vitic.*, vol. 16, no. 3, pp. 144 LP – 158, Jan. 1965.
- [87] C. C. Chang, M. H. Yang, H. M. Wen, and J. C. Chern, "Estimation of Total Flavonoid Content in Propolis by Two Complementary Colorimetric Methods," *J. Food Drug Anal.*, vol. 10, pp. 178–182, Sep. 2002.
- [88] J. Lee, R. Durst, and R. Wrolstad, "Determination of total monomeric anthocyanin pigment content of fruit juices, beverages, natural colorants, and wines by the pH differential method: Collaborative Study," *J. AOAC Int.*, vol. 88, pp. 1269–1278, Feb. 2005.
- [89] S. Jiapong and J. Sudarat, "Total anthocyanin content and antioxidant activity of germinated colored rice," *Int. Food Res. J.*, vol. 19, pp. 215–221, Jan. 2012.
- [90] P. Loypimai, T. Pasakul, and R. Mongkolthai, "Comparisons of Antioxidant Activities and Total Phenolic Content of Fruit Peels," *Agric. Sci. J.*, vol. 42, no. 2, pp. 385–388, 2011.

- [91] D. I. Onwude, N. Hashim, R. B. Janius, N. M. Nawi, and K. Abdan, "Modeling the Thin-Layer Drying of Fruits and Vegetables: A Review," *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, vol. 15, no. 3, pp. 599–618, May 2016.
- [92] J. M. Lee and E. W. C. Lim, "Heat transfer in a pulsating turbulent fluidized bed," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 174, p. 115321, 2020.
- [93] J. Ahn, E. M. Sparrow, and J. M. Gorman, "Turbulence intensity effects on heat transfer and fluid-flow for a circular cylinder in crossflow," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 113, pp. 613–621, 2017.
- [94] A. Stefanova, H. T. Bi, C. J. Lim, and J. R. Grace, "Heat transfer from immersed vertical tube in a fluidized bed of group A particles near the transition to the turbulent fluidization flow regime," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 51, no. 7, pp. 2020–2028, 2008.
- [95] G. Qiu, D. Wang, X. Song, Y. Deng, and Y. Zhao, "Degradation kinetics and antioxidant capacity of anthocyanins in air-impingement jet dried purple potato slices," *Food Res. Int.*, vol. 105, pp. 121–128, 2018.
- [96] W. Li, X. Pang, J. Xiao, X. Wang, R. He, and X. Zhao, "Degradation kinetics of pelargonidin-3-(p-coumaroyl) diglucoside-5-(malonyl)glucoside and pelargonidin-3-(feruloyl)diglucoside-5-(malonyl)glucoside in red radish during air-impingement jet drying," *LWT*, vol. 127, p. 109390, 2020.
- [97] Y. Zhang *et al.*, "Combined medium- and short-wave infrared and hot air impingement drying of sponge gourd (*Luffa cylindrical*) slices," *J. Food Eng.*, vol. 284, p. 110043, 2020.
- [98] M. Zielinska and A. Michalska, "Microwave-assisted drying of blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) fruits: Drying kinetics, polyphenols, anthocyanins, antioxidant capacity, colour and texture.," *Food Chem.*, vol. 212, pp. 671–680, Dec. 2016.
- [99] S. J. Babalis and V. G. Belessiotis, "Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs," *J. Food Eng.*, vol. 65, no. 3, pp. 449–458, 2004.
- [100] E. C. López-Vidaña, I. Pilatowsky Figueroa, F. B. Cortés, B. A. Rojano, and A. Navarro Ocaña, "Effect of temperature on antioxidant capacity during drying process

of mortiño (*Vaccinium meridionale Swartz*),” *Int. J. Food Prop.*, vol. 20, no. 2, pp. 294–305, Feb. 2017.

[101] E. Mirzaee-Ghaleh, S. Rafiee, A. Keyhani, and Z. Emam-Djomeh, “Determining of moisture diffusivity and activation energy in drying of apricots,” *Res. Agric. Eng.*, vol. 55, Jan. 2009.

[102] Ó. Rodríguez, J. V Santacatalina, S. Simal, J. V Garcia-Perez, A. Femenia, and C. Rosselló, “Influence of power ultrasound application on drying kinetics of apple and its antioxidant and microstructural properties,” *J. Food Eng.*, vol. 129, pp. 21–29, 2014.

[103] S. M. Demarchi, N. A. Quintero Ruiz, A. Concellón, and S. A. Giner, “Effect of temperature on hot-air drying rate and on retention of antioxidant capacity in apple leathers,” *Food Bioprod. Process.*, vol. 91, no. 4, pp. 310–318, 2013.

[104] M. Miranda, H. Maureira, K. Rodríguez, and A. Vega-Gálvez, “Influence of temperature on the drying kinetics, physicochemical properties, and antioxidant capacity of Aloe Vera (*Aloe Barbadensis* Miller) gel,” *J. Food Eng.*, vol. 91, no. 2, pp. 297–304, 2009.

[105] T. Kuljarachanan, S. Devahastin, and N. Chiewchan, “Evolution of antioxidant compounds in lime residues during drying,” *Food Chem.*, vol. 113, no. 4, pp. 944–949, 2009.

[106] T. Katsube, Y. Tsurunaga, M. Sugiyama, T. Furuno, and Y. Yamasaki, “Effect of air-drying temperature on antioxidant capacity and stability of polyphenolic compounds in mulberry (*Morus alba* L.) leaves,” *Food Chem.*, vol. 113, no. 4, pp. 964–969, 2009.

[107] A. Piga, A. Del Caro, and G. Corda, “From Plums to Prunes: Influence of Drying Parameters on Polyphenols and Antioxidant Activity,” *J. Agric. Food Chem.*, vol. 51, no. 12, pp. 3675–3681, Jun. 2003.

[108] E. C. López-Vidaña, B. A. Rojano, I. P. Figueroa, K. Zapata, and F. B. Cortés, “Evaluation of the Sorption Equilibrium and Effect of Drying Temperature on the Antioxidant Capacity of the Jaboticaba (*Myrciaria cauliflora*),” *Chem. Eng. Commun.*, vol. 203, no. 6, pp. 809–821, Jun. 2016.

- [109] M. Walter, E. Marchesan, P. F. S. Massoni, L. P. da Silva, G. M. S. Sartori, and R. B. Ferreira, "Antioxidant properties of rice grains with light brown, red and black pericarp colors and the effect of processing," *Food Res. Int.*, vol. 50, no. 2, pp. 698–703, 2013.
- [110] D. Nowak and E. Jakubczyk, "The Freeze-Drying of Foods—The Characteristic of the Process Course and the Effect of Its Parameters on the Physical Properties of Food Materials," *Foods*, vol. 9, no. 10, 2020.
- [111] N. M. Shofian *et al.*, "Effect of Freeze-Drying on the Antioxidant Compounds and Antioxidant Activity of Selected Tropical Fruits," *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 12, no. 7, 2011.
- [112] J. Ratseewo, N. Meeso, and S. Siriamornpun, "Changes in amino acids and bioactive compounds of pigmented rice as affected by far-infrared radiation and hot air drying," *Food Chem.*, vol. 306, p. 125644, 2020.
- [113] P. Wanyo, N. Meeso, and S. Siriamornpun, "Effects of different treatments on the antioxidant properties and phenolic compounds of rice bran and rice husk," *Food Chem.*, vol. 157, pp. 457–463, 2014.
- [114] P. Wanyo, S. Siriamornpun, and N. Meeso, "Improvement of quality and antioxidant properties of dried mulberry leaves with combined far-infrared radiation and air convection in Thai tea process," *Food Bioprod. Process.*, vol. 89, no. 1, pp. 22–30, 2011.
- [115] Y. Chen and A. Martynenko, "Combination of hydrothermodynamic (HTD) processing and different drying methods for natural blueberry leather," *LWT*, vol. 87, pp. 470–477, 2018.
- [116] S. Meziane, "Drying kinetics of olive pomace in a fluidized bed dryer," *Energy Convers. Manag.*, vol. 52, no. 3, pp. 1644–1649, 2011.
- [117] E. Akoy, "Experimental characterization and modeling of thin-layer drying of mango slices," *Int. Food Res. J.*, vol. 21, pp. 1911–1917, Jan. 2014.
- [118] D. A. Tzempelikos, A. P. Vouros, A. V Bardakas, A. E. Filios, and D. P. Margaris, "Case studies on the effect of the air drying conditions on the convective drying of quinces," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 3, pp. 79–85, 2014.

- [119] M. H. Khoshtaghaza, H. Darvishi, and S. Minaei, "Effects of microwave - fluidized bed drying on quality, energy consumption and drying kinetics of soybean kernels," *J. Food Sci. Technol.*, vol. 52, no. 8, pp. 4749–4760, 2015.
- [120] J. Sripinyowanich, A. Noomhorm, J. Jongyingcharoen, and A. Noomhorm, "Effects of freezing pretreatment, microwave-assisted vibro-fluidized bed drying and drying temperature on instant rice production and quality," *J. Food Process. Preserv.*, vol. 37, no. 4, pp. 314–324, Aug. 2013.
- [121] E. I. Goksu, G. Sumnu, and A. Esin, "Effect of microwave on fluidized bed drying of macaroni beads," *J. Food Eng.*, vol. 66, no. 4, pp. 463–468, 2005.
- [122] H. FENG and J. TANG, "Microwave Finish Drying of Diced Apples in a Spouted Bed," *J. Food Sci.*, vol. 63, no. 4, pp. 679–683, Jul. 1998.
- [123] Y. Soysal, "Microwave Drying Characteristics of Parsley," *Biosyst. Eng.*, vol. 89, no. 2, pp. 167–173, 2004.
- [124] İ. Doymaz, "Drying behaviour of green beans," *J. Food Eng.*, vol. 69, no. 2, pp. 161–165, 2005.
- [125] R. TAPANAYASIN, S. DEVAHASTIN, and A. TANSAKUL, "DRYING METHODS AND QUALITY OF SHRIMP DRIED IN A JET-SPOUTED BED DRYER," *J. Food Process Eng.*, vol. 28, no. 1, pp. 35–52, Feb. 2005.
- [126] สักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา, *การอบแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพ*. กรุงเทพมหานคร: บริษัท สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด, 2555.
- [127] J. Crank, *The Mathematics of Diffusion*. Clarendon Press, 1975.
- [128] R. B. Keey, *Introduction to Industrial Drying Operations*. Pergamon, 1978.
- [129] E. Saniso, S. Prachayawarakorn, T. Swasdisevi, and S. Soponronnarit, "Parboiled rice production without steaming by microwave-assisted hot air fluidized bed drying," *Food Bioprod. Process.*, vol. 120, pp. 8–20, 2020.
- [130] L. Lamberts, E. De Bie, V. Derycke, W. S. Veraverbeke, W. De Man, and J. A. Delcour, "Effect of Processing Conditions on Color Change of Brown and Milled Parboiled Rice," *Cereal Chem.*, vol. 83, no. 1, pp. 80–85, Jan. 2006.
- [131] L. Lamberts, I. Rombouts, K. Brijs, K. Gebruers, and J. A. Delcour, "Impact of parboiling conditions on Maillard precursors and indicators in long-grain rice cultivars," *Food Chem.*, vol. 110, no. 4, pp. 916–922, 2008.

- [132] M. I. Rosli, A. M. Abdul Nasir, M. S. Takriff, and L. P. Chern, "Simulation of a Fluidized Bed Dryer for the Drying of Sago Waste," *Energies*, vol. 11, no. 9, 2018.
- [133] Y. Zhao *et al.*, "Experimental and numerical simulation studies of the fluidization characteristics of a separating gas-solid fluidized bed," *Fuel Process. Technol.*, vol. 91, pp. 1819–1825, 2010.
- [134] E. Zhou, B. Lv, X. Deng, X. Qin, and C. Fang, "Hydrodynamic and separation performance of gas–solid separation fluidized bed with two-size-orifice distributor," *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 168, pp. 397–410, 2021.
- [135] W. Duangkhamchan, F. Ronsse, F. Depypere, K. Dewettinck, and J. G. Pieters, "Comparison and evaluation of interphase momentum exchange models for simulation of the solids volume fraction in tapered fluidised beds," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 65, no. 10, pp. 3100–3112, 2010.
- [136] B. Du, W. Warsito, and L.-S. Fan, "Bed nonhomogeneity in turbulent gas-solid fluidization," *AIChE J.*, vol. 49, no. 5, pp. 1109–1126, May 2003.
- [137] C. Sangdao, S. Songsermpong, and M. Krairiksh, "A Continuous Fluidized Bed Microwave Paddy Drying System Using Applicators with Perpendicular Slots on a Concentric Cylindrical Cavity," *Dry. Technol.*, vol. 29, no. 1, pp. 35–46, Dec. 2010.
- [138] P. Sahoo and A. Sahoo, "A Comparative Study on Fluidization Characteristics of Coarse and Fine Particles in a Gas - Solid Fluidized Bed: CFD Analysis," *Int. J. Eng. Sci. Innov. Technol.*, vol. 3, pp. 246–252, Mar. 2014.
- [139] L. Momenzadeh, A. Zomorodian, and D. Mowla, "Experimental and theoretical investigation of shelled corn drying in a microwave-assisted fluidized bed dryer using Artificial Neural Network," *Food Bioprod. Process.*, vol. 89, no. 1, pp. 15–21, 2011.
- [140] D. Zare and M. Ranjbaran, "Simulation and Validation of Microwave-Assisted Fluidized Bed Drying of Soybeans," *Dry. Technol.*, vol. 30, no. 3, pp. 236–247, Mar. 2012.
- [141] R. Amiri Chayjan, M. Kaveh, N. Dibagar, and M. Zarrin Nejad, "Optimization of Pistachio Nut Drying in a Fluidized Bed Dryer with Microwave Pretreatment Applying Response Surface Methodology," *Chem. Prod. Process Model.*, vol. 12, no. 3, 2017.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	ปริญญา ชูปวา
วันเกิด	19 เมษายน 2533
สถานที่เกิด	ขอนแก่น
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	178/32-33 หมู่4 ถนนประชาสโมสร ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัด ขอนแก่น 40000
ตำแหน่งหน้าที่การงาน	อาจารย์
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2556 ระดับปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต วิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2558 ระดับปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2564 ระดับปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ทุนวิจัย	-
ผลงานวิจัย	-

พูนุ ปณู ทิโต ชีเว