# เทคโนโลยีการทำแห้งแบบผสมผสาน : การนำมาใช้เพื่อถนอมผลิตภัณฑ์อาหารที่ไวต่อความร้อน

**ชาลีดา บรมพิชัยชาติกุล***
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถนนพญาไท ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

## บทคัดย่อ

การทำแห้งเป็นกระบวนแปรรูปและถนอมอาหารที่สำคัญโดยลดความชื้นของผลิตภัณฑ์อาหาร และค่ากิจกรรมของน้ำ (water activity, $a_w$) เพื่อยับยั้งต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และการทำงานของเอนไซม์ที่ส่งผลให้อาหารเสื่อมเสีย แต่การทำแห้งผลิตภัณฑ์อาหารนั้น มักพบปัญหาทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างและองค์ประกอบที่สำคัญของอาหาร เช่น การหดตัว การสูญเสียสารหอมระเหย สี และคุณค่าทางโภชนาการ การทำแห้งแบบผสมผสาน (Hybrid drying) เป็นอีกทางเลือกหนึ่ง ที่นำมาแก้ไขข้อบกพร่องของการทำแห้งแบบขั้นตอนเดียว เช่น การใช้การทำแห้งแบบหลายขั้นตอน ซึ่งอาจจะใช้เครื่องอบแห้งชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้ การเปลี่ยนอุณหภูมิของการทำแห้งในแต่ละขั้นตอน การเปลี่ยนความดัน หรือการนำวิธีการทำแห้งแบบต่างๆ มาใช้ร่วมกัน เพื่อผสมผสานข้อดีของเครื่องอบแห้งแต่ละชนิด ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีขึ้น ในเอกสารนี้จะกล่าวถึงลักษณะของกระบวนการทำแห้งแบบผสมผสาน ตัวอย่างและผลของวิธีการทำแห้งแบบผสมผสานต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารที่ไวต่อความร้อนที่มีการนำมาใช้ในงานวิจัยและอุตสาหกรรมอาหาร เพื่อเป็นทางเลือกหนึ่งในการศึกษาวิจัยการอบแห้งกลุ่มผลิตภัณฑ์อาหารที่ไวต่อความร้อน

**คำสำคัญ :** การทำแห้งแบบผสมผสาน / อาหารที่ไวต่อความร้อน / คุณภาพ

* *Corresponding author. Email: Chaleeda.b@chula.ac.th*
*อาจารย์ ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์*

# Hybrid Drying Technology : Application for Preservation of Heat Sensitive Food Products

**Chaleeda Borompichaichartkul***

Chulalongkorn University, Phayathai Rd., Pathumwan, Bangkok 10330 Thailand.

## Abstract

Drying is an important process for food preservation as it can reduce moisture content and water activity of food in order to inhibit enzyme activity and growth of microorganisms that cause food deteriorations. However, during the drying process, changes in food products such as shrinkage, darkening of colour, or loss of volatile compounds and nutritional value can devalue the dried products. Hybrid drying is an alternative approach that can be used to solve problems that occur during conventional drying by employing multi-stage drying that may use the same or different types of dryers, step-wised changing of drying temperature, applying low pressure or vacuum conditions as well as a combination of different types of dryers to improve the final quality of the dried products. This paper will explain hybrid drying principles and its application as well as the effect of different hybrid drying methods on the quality of dried food products. The information presented in this paper suggests benefits and provides options for drying of heat sensitive food materials.

**Keywords :** Hybrid Drying / Sensitive Food Products / Quality

* *Corresponding author. E-mail: Chaleeda.b@chula.ac.th*

*Lecturer, Department of Food Technology, Faculty of Science.*

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันผู้บริโภคมีบทบาทที่สำคัญในการกำหนดคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารต่างๆ ผลิตภัณฑ์อาหารที่ผ่านการแปรรูปต้องมีคุณภาพทางโภชนาการสูง ปลอดภัย และมีอายุการเก็บที่นาน กระบวนการทำแห้งเป็นกระบวนการแปรรูปอาหารที่นิยมใช้ในการลดความชื้นของอาหารสด หรือแปรรูปอาหารเหลวให้เป็นอาหารผง เพื่อยืดอายุการเก็บรักษา สะดวกในการจัดเก็บ ขนส่ง เพิ่มความหลากหลายให้กับผลิตภัณฑ์อาหาร และเพิ่มความสะดวกในการนำมาใช้ในชีวิตประจำวันที่เร่งรีบของสังคมในปัจจุบัน เช่น กลุ่มอาหารแห้งประเภทกึ่งสำเร็จรูปที่เพียงแค่เติมน้ำก็สามารถบริโภคได้เลย แต่อาหารนั้นต้องมีคุณภาพปลอดภัยและมีลักษณะปรากฏเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค

การทำแห้งมีด้วยกันหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป เช่น การใช้ลมร้อนเป็นวิธีในการทำแห้งโดยทั่วไป ทำได้โดยตากแดด หรือใช้เครื่องทำแห้งลมร้อนแบบต่างๆ ได้แก่ เครื่องอบแบบถาด แบบอุโมงค์ ตู้อบลมร้อน เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย หรือใช้พลังงานแสงอาทิตย์ เครื่องอบเหล่านี้สามารถใช้ทำแห้งอาหารที่มีลักษณะเป็นก้อน ชิ้น ผง เส้นใย อาหารขึ้นรูป กึ่งเหลวกึ่งแข็ง ของเหลว และเมล็ดพืช การทำแห้งแบบนี้จะสิ้นเปลืองพลังงานมาก และทำให้อาหารสูญเสียคุณค่าทางอาหารได้ง่าย เนื่องจากใช้ความร้อนสูงในการอบแห้ง ดังนั้นวิธีการระเหยน้ำออกจากอาหารที่อุณหภูมิต่ำ เช่น การใช้สุญญากาศร่วมในการทำแห้งจะทำให้อัตราการทำแห้งเพิ่มขึ้น และใช้เวลาสั้นลง ช่วยในการรักษากลิ่น รสชาติ ลักษณะทางกายภาพเช่น สี รูปร่าง ให้คงอยู่ได้ดี ในการกระบวนการทำแห้งแบบนี้ประกอบด้วยห้องสุญญากาศ แหล่งความร้อน เครื่องทำสุญญากาศ อาหารที่นิยมใช้ทำแห้งแบบสุญญากาศ เช่น ผักและผลไม้ เนื้อสัตว์ สมุนไพร เครื่องเทศ และเห็ด ข้อเสียคือการติดตั้งปั๊มดูดอากาศที่มีประสิทธิภาพที่ดีนั้นมีราคาแพง

อาหารบางประเภทมีองค์ประกอบที่สลายตัวได้ง่ายหรือเสียโครงสร้างเมื่อได้รับความร้อน การใช้อุณหภูมิต่ำ เช่น การแช่เยือกแข็งจึงเป็นทางออกที่น่าสนใจในการทำแห้งร่วมกับการลดความดันบรรยากาศให้ต่ำลงในระดับที่น้ำแข็งสามารถระเหิดเป็นไอได้ การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying) เป็นวิธีที่ใช้ทำแห้งอาหารที่ไวต่อความร้อน เช่น กลุ่มอาหารราคาแพง โสมผง กาแฟ น้ำผลไม้ผง สตรอเบอรี่ กุ้งแห้งชั้นดี เห็ดแห้ง เป็นต้น การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งสามารถรักษาส่วนประกอบสำคัญของอาหารที่ถูกทำลายได้ง่ายด้วยความร้อน เช่น วิตามิน กลิ่น สี รักษารูปร่างและเนื้อสัมผัสของอาหารให้คงอยู่ใกล้เคียงกับของเดิม แต่ข้อเสียคือค่าใช้จ่ายในการลงทุนสูงและใช้เวลานานในการทำแห้ง

สำหรับผลิตผลที่มีปริมาณมากนิยมใช้การอบแห้งด้วยอากาศร้อนร่วมกับการทำแห้งโดยใช้อุณหภูมิต่ำ เช่น การอบแห้งข้าวด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับอบในโรงเก็บโดยใช้อากาศแวดล้อม หรือเป่าอากาศเย็นเพื่อรักษากลิ่นในข้าวหอมมะลิ การอบแห้งแมคคาดาเมียหรือถั่วที่มีปริมาณไขมันสูง ในโรงเก็บ (In-store drying) ต้องใช้อุณหภูมิต่ำประมาณ 40 – 60 °C เพื่อป้องกันการสลายของไขมันและเกิดกลิ่นหืน การอบแห้งในโรงเก็บมีข้อเสียคือใช้เวลานาน แต่สามารถรักษาคุณค่าทางอาหารและคุณภาพได้ เหมาะสมกับการอบแห้งผลิตผลที่มีประมาณมาก และความชื้นเริ่มต้นไม่ควรมากกว่า 20% (w.b.)

การทำแห้งผลิตภัณฑ์อาหารโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบขั้นตอนเดียว ยังมีข้อจำกัด ยกตัวอย่างเช่น การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง แม้ว่าทำให้ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่มีคุณภาพดี แต่ต้องใช้เวลาในการทำแห้งนาน หรือ การทำแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งใช้เวลาในการทำแห้งสั้นและช่วยลดการหดตัวของผลิตภัณฑ์ได้ แต่ยังพบปัญหาความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้า ทำให้เกิดการไหม้เป็นจุดๆ ได้ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาการทำแห้งแบบผสมผสาน เพื่อเป็นการแก้ไขข้อบกพร่องของการทำแห้งแบบขั้นตอนเดียว

## 2. การทำแห้งแบบผสมผสาน (Hybrid Drying)

การทำแห้งแบบผสมผสานเป็นการใช้เครื่องอบแห้งหลายลักษณะหรือหลายขั้นตอนในการทำแห้งผลิตภัณฑ์ชนิดใดชนิดหนึ่ง เพื่อเป็นการแก้ไขข้อบกพร่องของการทำแห้งแบบขั้นตอนเดียว โดยมีลักษณะการทำงานหลายรูปแบบ เช่น การใช้เครื่องอบแห้งชนิดเดียวกันแต่มีการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของการทำแห้งในแต่ละขั้นตอน การเปลี่ยนความดัน หรือการพักในที่อับอากาศระหว่างการทำแห้ง หรือการนำวิธีการทำแห้งแบบต่างๆ หรือใช้เครื่อง

อบแห้งต่างชนิดกันมาใช้ร่วมกัน เพื่อผสมผสานข้อดีของเครื่องอบแห้งแต่ละชนิด โดยมีจุดประสงค์เพื่อทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีขึ้น เพิ่มอัตราการทำแห้ง อีกทั้งลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและลดการใช้พลังงาน

Kudra และ Mujumdar (2009) [1] ได้แบ่งการทำแห้งแบบผสมผสานออกเป็น 3 ลักษณะใหญ่ๆ ได้แก่

**1. Combined modes of heat transfer :** การผสมผสานลักษณะการถ่ายเทความร้อนหลายๆ ประเภทเข้าด้วยกัน แบ่งเป็นลักษณะต่างๆ เช่น

Convection and conduction : การพาความร้อนร่วมกับการนำความร้อน

Convection and Microwave / Infrared radiation / Radio-frequency : การพาความร้อนร่วมกับการแผ่รังสี เช่น คลื่นไมโครเวฟ / รังสีอินฟราเรด / คลื่นวิทยุ

Simultaneous : การถ่ายเทความร้อนหลายแบบเกิดขึ้นในเวลาเดียวกัน

Sequential : การถ่ายเทความร้อนหลายแบบเกิดขึ้นเป็นขั้นตอนต่อเนื่องกัน

Continuous : การทำแห้งแบบต่อเนื่อง

Intermittent : การทำแห้งเป็นช่วงๆ ไม่ต่อเนื่อง มีการหยุดพัก

**2. Multistage dryers :** การทำแห้งแบบหลายขั้นตอน แบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

Each stage same dryer type : แต่ละขั้นตอนใช้เครื่องอบแห้งชนิดเดียวกัน เช่น Two-stage fluid bed หรือ Two-stage vibrofluid bed เป็นต้น

Each stage a different dryer : ใช้เครื่องอบแห้งหลายชนิดร่วมกันในขั้นตอนเดียว เช่น Flash / fluid bed หรือ Spray / fluid bed หรือ Fluid bed / packed bed

Different drying technologies per stage : ใช้เครื่องอบแห้งต่างชนิดกันในแต่ละขั้นตอน เช่น Super-heated steam dryer ตามด้วย Hot air drying

**3. Multiprocessing dryers :** การทำแห้งร่วมกับกระบวนการอื่นๆ เช่น

Drying ---> Cooling : อบแห้งร่วมกับการทำเย็น

Drying ---> Granulation/Agglomeration : อบแห้งร่วมกับการขึ้นรูปเป็นอนุภาคใหญ่ขึ้น

Drying ---> Coating : อบแห้งร่วมกับการเคลือบ

Drying ---> Filtration : อบแห้งร่วมกับการกรอง

งานวิจัยที่ใช้การทำแห้งแบบผสมผสานโดยส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับการนำเทคนิคการอบแห้งชนิดอื่นๆ มาทดแทนการอบแห้งโดยใช้ลมร้อน เนื่องจากการอบแห้งโดยใช้ลมร้อน เช่น เครื่องอบแห้งแบบตู้อบลมร้อน เป็นเครื่องอบแห้งที่ใช้หลักการในการพาความร้อนจากอากาศที่มีทิศทางการไหลแบบบังคับ เพื่อถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุที่ชื้น แต่การอบแห้งด้วยวิธีนี้มักส่งผลเสียต่อผลิตภัณฑ์อาหารในด้านเนื้อสัมผัส สี กลิ่นรส และคุณค่าทางโภชนาการบางอย่าง ดังนั้นการพัฒนาเทคโนโลยีการทำแห้งในปัจจุบันจึงมุ่งเน้นที่จะลดการเสื่อมเสียของอาหารจากปฏิกิริยาทางเคมี และเพิ่มความคงอยู่ของสารอาหารเพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพมากขึ้น โดยเฉพาะกลุ่มอาหารที่ไวต่อความร้อน

## 3. ผลิตภัณฑ์อาหารที่ไวต่อความร้อน

ผลิตภัณฑ์อาหารที่ไวต่อความร้อน หมายถึง อาหารที่เกิดการเสื่อมเสียคุณภาพได้ง่ายด้วยความร้อน เช่น ผัก ผลไม้ สมุนไพร อาหารที่มีสารหอมระเหย และผลิตภัณฑ์ยา เป็นต้น โดยสิ่งที่เป็นปัจจัยสำคัญที่ใช้ในการพิจารณาคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารประเภทนี้ ได้แก่

- คุณภาพด้านสีของผลิตภัณฑ์
- ลักษณะโครงสร้างของผลิตภัณฑ์
- ความสามารถในการดูดน้ำกลับและการคืนตัว
- ปริมาณสารหอมระเหย
- คุณค่าทางโภชนาการ เช่น วิตามิน โปรตีน แป้ง หรือ สารที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพต่างๆ

วิธีการทำแห้งที่เหมาะสมกับอาหารที่ไวต่อการเสื่อมเสียคุณภาพด้วยความร้อน ต้องเป็นวิธีที่ใช้อุณหภูมิต่ำในการทำแห้ง ทำให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีคุณภาพดี มีการทำลายโครงสร้างน้อย สามารถรักษาสารหอมระเหย สี และคุณค่าทางโภชนาการได้ใกล้เคียงผลิตภัณฑ์ก่อนทำแห้งได้มาก ซึ่งวิธีที่นิยมใช้คือ การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง แต่การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีข้อจำกัดในเรื่องของค่าใช้จ่ายในการลงทุนและการดำเนินการค่อนข้างมาก และต้องใช้เวลาในการทำแห้งนาน และมีผลต่อเนื้อสัมผัส

ของอาหารบางชนิดทำให้เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์แข็งและเหนียว หรือการทำแห้งโดยการใช้ระบบสุญญากาศ เนื่องจากระบบสุญญากาศทำให้จุดเดือดของน้ำลดต่ำลง น้ำจึงระเหยออกไปได้ที่อุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้ในระบบสุญญากาศยังมีออกซิเจนในปริมาณต่ำจึงลดการเสื่อมเสียจากปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ แต่มีข้อจำกัดในเรื่องของเนื้อสัมผัสของอาหารบางประเภทและเวลาที่ใช้ในการทำแห้งนาน ดังนั้นการใช้เทคนิคการทำแห้งแบบผสมผสาน โดยการนำจุดเด่นของหลักการอบแห้งแต่ละวิธีมาประกอบกันสำหรับอบแห้งอาหารที่ไวต่อความร้อนจึงเป็นเรื่องที่ท้าทาย เนื่องจากผลิตภัณฑ์อาหารแต่ละชนิดมีองค์ประกอบและการเสื่อมเสียที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาเทคโนโลยีการทำแห้งแบบผสมผสานที่เหมาะสมสำหรับอาหารแต่ละประเภท

มีนักวิจัยหลายกลุ่มที่นำเทคโนโลยีการทำแห้งแบบผสมผสานมาทดลองศึกษากับกลุ่มอาหารที่ไวต่อความร้อนและประสบความสำเร็จในการรักษาคุณภาพของอาหาร เช่น อาหารที่มีไขมันสูง มีสารหอมระเหยที่สำคัญ หรือสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ เทคโนโลยีการอบแห้งแบบผสมผสานที่ศึกษาได้แก่ การใช้ปั๊มความร้อนร่วมกับการอบแห้งด้วยลมร้อน (ถั่วแมคคาดาเมีย) การทำแห้งอาหารด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ (แครอท มะขามป้อม ใบโหระพา) และการทำแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศ (ใบโหระพา เห็ด ใบสะระแหน่ แครอท) ในที่นี้จะขอยกตัวอย่างเทคโนโลยีการทำแห้งแบบผสมผสานดังกล่าวและผลของการทำแห้งด้วยวิธีดังกล่าวต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารที่ไวต่อความร้อน

## 4. การอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับลมร้อน (Heat pump drying combined with convection hot air drying)

การอบแห้งโดยใช้ปั๊มความร้อน (Heat Pump Dryer, HPD) ได้รับความสนใจอย่างมากในอุตสาหกรรมอาหาร เนื่องจากสามารถนำเอาพลังงานมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงเนื่องจากมีการเก็บคืนความร้อนจากอากาศหลังการอบแห้ง เมื่อทำงานในระบบปิดอย่างสมบูรณ์ปั๊มความร้อนมีการสูญเสียปริมาณความร้อนจำเพาะต่ำที่สุด การอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนเหมาะสำหรับวัตถุดิบที่ไวต่อความร้อนที่ต้องใช้อุณหภูมิต่ำ ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพที่ดีในด้านสี กลิ่นและเนื้อสัมผัส เพิ่มประสิทธิภาพในการอบแห้ง และสภาพของอากาศภายนอกไม่มีผลต่อการอบแห้ง การใช้ปั๊มความร้อนมีข้อดีคือสามารถลดความชื้นในบรรยากาศได้ต่ำกว่าการใช้ตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิการอบแห้งเดียวกัน ปั๊มความร้อนจะปฏิบัติการได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงอุณหภูมิการอบแห้งที่ต่ำอยู่ระหว่าง 25 – 70 °C ซึ่งจะช่วยประหยัดเวลาในการอบแห้งเมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน แต่การอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนเป็นการอบแห้งที่ใช้กระแสไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงาน จึงอาจมีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่เพิ่มขึ้นหากใช้ปั๊มความร้อนเพียงขั้นตอนเดียวในการอบแห้ง

ดังนั้นการศึกษาการนำปั๊มความร้อนมาร่วมกับการอบแห้งด้วยลมร้อนเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการอบแห้งและคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ Borompichaichartkul และคณะ (2009) [2] ศึกษาการใช้ปั๊มความร้อนร่วมกับการอบแห้งด้วยลมร้อนในการอบแห้งถั่วแมคคาดาเมียทั้งกะลาพบว่าการใช้ปั๊มความร้อนที่ 40°C ร่วมด้วยตู้อบลมร้อนที่ 50°C อบแห้งจนกระทั่งความชื้นของถั่วแมคคาดาเมียลดลงเหลือ 1-2% (w.b.) สามารถชะลอการเกิดกลิ่นหืนและสีน้ำตาลในเนื้อแมคคาเดเมียได้ดีกว่าวิธีที่ใช้ในอุตสาหกรรมซึ่งใช้เวลานานในการอบแห้งถึง 17 วัน ในขณะที่การใช้ปั๊มความร้อนร่วมกับลมร้อนสามารถลดความชื้นลงให้อยู่ในระดับที่ต้องการได้ภายใน 3 วัน และพบว่าระดับความชื้นที่เหมาะสมในการเปลี่ยนขั้นตอนการอบแห้งจากปั๊มความร้อนเป็นลมร้อนโดยมีการเพิ่มอุณหภูมิคือ 10-11% (d.b.)

Phattanayindee และคณะ (2009) [3] ตรวจสอบคุณภาพของถั่วแมคคาดาเมียที่อบแห้งทั้งกะลาโดยการใช้ปั๊มความร้อนที่ 38°C และตามด้วยการอบแห้งแบบอุโมงค์ที่ 55°C อบแห้งจนกระทั่งความชื้นของถั่วแมคคาดาเมียลดลงเหลือ 1-2% (w.b.) พบว่าการอบแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมกับการอบแห้งแบบอุโมงค์สามารถรักษาคุณภาพของไขมันไม่อิ่มตัวชนิดดี เช่น กรดโอเลอิก และชะลอการเกิดสารให้กลิ่นรสที่ไม่ต้องการในผลิตภัณฑ์ถั่วแมคคาดาเมียอบแห้งได้ดีกว่าวิธีการอบแห้งแบบเดิมที่ใช้การอบแห้งแบบลมร้อนอย่างเดียว

นอกจากนี้มีการศึกษาการแทนที่อากาศในปั๊มความร้อนด้วยตัวกลางการให้ความร้อนอื่นๆ เช่น $N_2$ หรือ $CO_2$ ซึ่งเป็นวิธีการปรับบรรยากาศในการอบแห้งเพื่อลดและชะลอการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องกับออกซิเจนในอากาศ เช่น การเปลี่ยนสี ปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน เป็นต้น งานวิจัยของ Hawlader และคณะในปี 2006 [4] พบว่าในการอบแห้งขิงด้วยปั๊มความร้อนแบบดัดแปรบรรยากาศพบว่าสามารถป้องกันการสูญเสียสารให้กลิ่นรสเฉพาะของขิง (6-gingerol) ได้สูงสุดเมื่อใช้ $N_2$ เปรียบเทียบกับ $CO_2$ และอากาศปกติ ตามลำดับ การใช้ $N_2$ สามารถป้องกันการเกิดปฏิกิริยาการเกิดออกซิเดชันในระหว่างการอบแห้งได้

Borompichaichartkul และคณะ (2010) [5] ศึกษาการอบแห้งถั่วแมคคาดาเมียทั้งกะลาด้วยปั๊มความร้อนแบบหลายขั้นตอนแบบปรับบรรยากาศ โดยใช้ก๊าซไนโตรเจน (N) และ/หรือ อากาศ (A) เป็นตัวกลางในการถ่ายโอนความร้อนให้แก่ถั่วแมคคาดาเมีย การอบแห้งใช้ปั๊มความร้อนอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอนให้อุณหภูมิช่วงแรกเป็น 40°C และปรับอุณหภูมิในช่วงที่ 2 เป็น 50 หรือ 60°C อบแห้งจนกระทั่งความชื้นของถั่วแมคคาดาเมียลดลงเหลือ 1-2% (w.b.) พบว่าสภาวะการอบแห้ง 40-50°C ใช้เวลาในการอบแห้งนานกว่า 40 – 60°C และการใช้ไนโตรเจนเป็นตัวกลางในการถ่ายโอนความร้อนเพียงอย่างเดียว สามารถรักษากลิ่นรสของแมคคาเดเมียได้ดีกว่าใช้อากาศเป็นตัวกลางทั้งสองขั้นตอน เช่น สภาวะ 40N-50N (Peroxide value, PV = 0.38 meq$O_2$/kg oil) กับ 40A-50A (PV= 1.15 meq$O_2$/kg oil) และ 40N-60N (PV = 1.15 meq$O_2$/kg oil) กับ 40A-60A (PV= 1.53 meq$O_2$/kg oil) ส่วนการสลับตัวกลางไนโตรเจนและอากาศในขั้นตอนแรกหรือขั้นตอนที่สอง ค่า PV ที่ได้มีค่าไม่แตกต่างกัน สำหรับค่าสี *(L*, a*, b*)* มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ซึ่งค่า L* และ a* ของภายในเมล็ดถั่วแมคคาดาเมียไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ซึ่งแสดงว่าอุณหภูมิในการอบแห้งในช่วงที่เลือก 40 – 60°C สามารถรักษาคุณภาพของสีแมคคาดาเมียได้ใกล้เคียงกัน แต่อุณหภูมิและตัวกลางส่งผลต่อกลิ่นรสของแมคคาดาเมียมากกว่าการเปลี่ยนแปลงสี

การอบแห้งโดยใช้ปั๊มความร้อนแบบสองขั้นตอนร่วมกับการปรับบรรยากาศจึงเหมาะสมกับอาหารที่ไวต่อความร้อนที่มีไขมันสูงหรือสารหอมระเหย

## 5. การทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ (Low pressure superheated steam drying)

เทคโนโลยีการทำแห้งอาหารด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (Superheated Steam Drying, SSD) เป็นวิธีการทำแห้งที่ใช้ไอน้ำที่มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิอิ่มตัวที่ความดันใดความดันหนึ่ง ซึ่งมีสมบัติด้านการถ่ายเทความร้อนดีกว่าอากาศที่อุณหภูมิเดียวกัน มาเป็นตัวกลางในการทำแห้งเพื่อถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุ และพาน้ำในผลิตภัณฑ์ให้ระเหยออกมา ในระหว่างการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งความต้านทานการแพร่ความชื้น ซึ่งระเหยออกจากวัสดุเข้าสู่กระแสของไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะไม่เกิดขึ้น ดังนั้นอัตราการทำแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ จึงขึ้นอยู่กับอัตราการถ่ายเทความร้อนเพียงอย่างเดียว [1]

การทำแห้งอาหารด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ยังคงมีข้อจำกัดเมื่อนำมาใช้ทำแห้งวัสดุที่ไวต่อความร้อน (Heat-sensitive material) เช่น ผัก และผลไม้ ซึ่งมักได้รับความเสียหายได้ง่ายเมื่อทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ความดันบรรยากาศ (อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งสูงกว่า 100°C) ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการพัฒนาระบบการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ให้ผลิตไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ หรือให้ระบบการทำแห้งทำงานที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ เพื่อให้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีอุณหภูมิต่ำลง (อุณหภูมิต่ำกว่า 100°C) [6]

Davahastin และคณะ (2004) [7] ศึกษาเปรียบเทียบคุณภาพของแครอทที่ได้จากการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำและการทำแห้งด้วยระบบสุญญากาศโดยลดความชื้นของแครอทที่มีความชื้นเริ่มต้น 90% (w.b.) ทำแห้งจนมีความชื้นสุดท้าย 6.5% (w.b.) ศึกษาสภาวะความดัน 7, 10 และ 13 kPa อุณหภูมิของไอน้ำ 60, 70 และ 80°C นำผลิตภัณฑ์แครอทแห้งจากสภาวะต่างๆ มาเปรียบเทียบคุณภาพด้านปริมาตร ความหนาแน่นปรากฏ การหดตัว การดูดน้ำกลับ และสี พบว่าแครอทที่ผ่านการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำมีค่าความสว่างและสีแดงมากกว่าแครอทที่

ผ่านการทำแห้งด้วยระบบสุญญากาศ ซึ่งสีแดงนั้นมีความเกี่ยวข้องกับปริมาณ β-carotene ตัวอย่างที่มีค่าสีแดงมากแสดงว่ามีปริมาณ β-carotene คงอยู่มากด้วยเช่นกัน และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งที่ต่ำ (60°C) จะทำให้แครอทมีค่าสีแดงและค่าความสว่างมากกว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิสูง (80°C) ส่วนระดับความดันสุญญากาศที่ใช้ (7, 10 และ 13 kPa) มีผลต่อสีของแครอทเพียงเล็กน้อย และแครอทที่ผ่านการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำและการทำแห้งด้วยระบบสุญญากาศมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวใกล้เคียงกัน แต่รูปแบบการหดตัวแตกต่างกัน โดยพบว่าการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำมีลักษณะการหดตัวที่สม่ำเสมอมากกว่า เนื่องจากในระบบการอบแห้งมีไอน้ำอยู่มาก และเนื่องจากความดันไอที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วภายในผลิตภัณฑ์ ทำให้เซลล์เกิดการขยายตัว ผลิตภัณฑ์จึงไม่เสียรูปมากและมีความพรุนมากขึ้น นอกจากนี้การทำแห้งด้วยระบบสุญญากาศ ทำให้เกิดโครงสร้างที่จับตัวกันแน่นและแข็งเป็นชั้นที่อยู่รอบนอก ซึ่งจะไปขัดขวางการดูดน้ำกลับ ซึ่งจะส่งผลต่อความสามารถในการคืนตัวของผลิตภัณฑ์ โดยทำให้ค่าการดูดน้ำกลับมีค่าน้อยกว่าแครอทที่ทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ

สำหรับเวลาในการทำแห้ง Devahastin และคณะ (2004) [7] พบว่าการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำใช้เวลานานกว่าการทำแห้งด้วยระบบสุญญากาศในทุกสภาวะการทดลอง เนื่องในช่วงแรกของการทำแห้ง ไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่มีอุณหภูมิสูงสัมผัสกับผิวของผลิตภัณฑ์ที่มีอุณหภูมิต่ำ ทำให้เกิดการควบแน่นของไอน้ำบนผิวของผลิตภัณฑ์ได้ ส่งผลให้ต้องใช้เวลาในการทำแห้งเพิ่มขึ้น 10-15% ที่ความดันบรรยากาศ เพื่อระเหยน้ำในส่วนนี้ออกไปก่อน แต่สามารถแก้ไขได้โดยการให้ความร้อนแก่ห้องอบและผลิตภัณฑ์ในเบื้องต้นก่อน (Preheating)

Methakhup และคณะ (2004) [8] ศึกษาการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำกับเนื้อมะขามป้อมพบว่าการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำสามารถรักษาสีได้ดีกว่าการทำแห้งด้วยระบบสุญญากาศในทุกสภาวะ โดยมีค่าความสว่างและสีแดงมากกว่า แต่มีค่าสีเหลืองใกล้เคียงกับมะขามป้อมสด นอกจากนี้การทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำจะสามารถรักษาสีได้ดีกว่าที่อุณหภูมิสูง และความดันที่แตกต่างกัน (7, 10 และ 13 kPa) มีผลต่อสีของเนื้อมะขามป้อมเพียงเล็กน้อย แต่เนื้อมะขามป้อมที่ผ่านการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำและการทำแห้งด้วยระบบสุญญากาศในทุกสภาวะมีค่าความสว่างลดลงและมีค่าสีแดงเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับมะขามป้อมสด แต่เนื่องจากผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้เป็นเกล็ดมะขามป้อมสำหรับชงชา ดังนั้นผู้บริโภคจึงไม่กังวลเรื่องการเปลี่ยนแปลงสีมากนัก นอกจากนั้นผลการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำต่อคุณค่าทางโภชนาการในด้านของปริมาณกรดแอสคอร์บิก พบว่าเนื้อมะขามป้อมที่ผ่านการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำสามารถรักษาปริมาณกรดแอสคอร์บิกไว้ได้ดีกว่าการทำแห้งด้วยระบบสุญญากาศ เนื่องจากในระบบการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำนั้นปราศจากออกซิเจน จึงป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้เป็นอย่างดี กรดแอสคอร์บิกจึงยังคงอยู่ในปริมาณสูง ในขณะที่การทำแห้งด้วยระบบสุญญากาศแม้ว่าจะทำการดูดอากาศออกแล้ว แต่ยังมีออกซิเจนหลงเหลืออยู่ในระบบ จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดแอสคอร์บิกขึ้นได้ จึงทำให้มีปริมาณต่ำกว่า นอกจากนี้ความดันที่แตกต่างกัน (7, 10 และ 13 kPa) มีผลต่อปริมาณกรดแอสคอร์บิกของเนื้อมะขามป้อมเพียงเล็กน้อย แต่มีแนวโน้มที่พบว่าการทำแห้งที่ความดันต่ำมีปริมาณกรดแอสคอร์บิกคงเหลืออยู่ในเนื้อมะขามป้อมในปริมาณที่มากกว่าวิธีการทำแห้งที่สภาวะความดันปกติ

Barbieri และคณะ (2004) [9] ศึกษาการทำแห้งใบโหระพาด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำและการทำแห้งด้วยลมร้อน ต่อคุณภาพด้านปริมาณสารหอมระเหยหลักที่ให้กลิ่นในใบโหระพา ได้แก่ α-pinene, Limonene, 1,8-Cineole, p-Cymene, Linalool, Hexadecane, Methyl chavicol และ Methyl cinnamate พบว่าการทำแห้งใบโหระพาด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำสามารถรักษาปริมาณสารหอมระเหยส่วนใหญ่ไว้ได้มากกว่า 80% อีกทั้งยังสามารถสกัดสารหอมระเหยที่ระเหยออกไปจากผลิตภัณฑ์พร้อมกับไอน้ำและเข้าไปอยู่ในส่วนของไอน้ำร้อนยวดยิ่งกลับมาได้ ทำให้ลด

การสูญเสียสารหอมระเหยได้ดี ในขณะที่การทำแห้งด้วยลมร้อนทำให้สารหอมระเหยส่วนใหญ่คงอยู่ในปริมาณน้อยกว่า 40-60% เพราะเกิดการสูญเสียไปกับลมร้อนและไม่สามารถสกัดกลับมาได้ แต่ในสารหอมระเหยบางชนิดก็พบปรากฏการณ์ Thermal reaction เช่น Methyl chavicol ที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60°C ซึ่งพบว่ามีปริมาณมากกว่าในใบโหระพาสดอย่างมาก ซึ่งถือเป็นข้อดีของการทำแห้งผลิตภัณฑ์บางชนิดที่ต้องการ volatile compound ที่เกิดจาก Thermal reaction ที่อุณหภูมิสูง เช่น การคั่วเมล็ดกาแฟ และการคั่วป๊อปคอร์น เป็นต้น

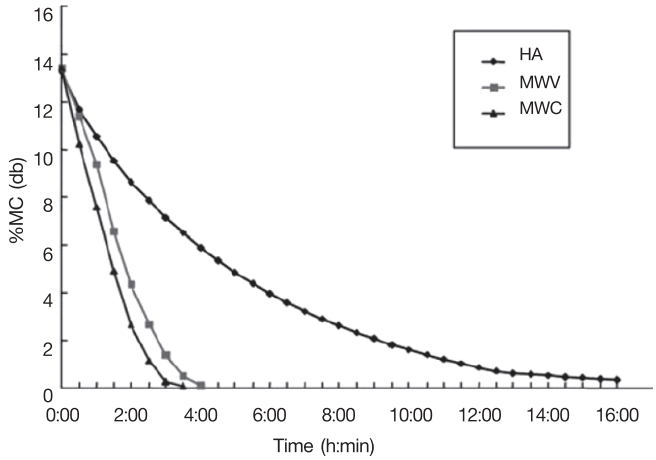
Suvarnakuta และคณะ (2005) [10] ศึกษาการทำแห้งแครอทด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ การทำแห้งด้วยระบบสุญญากาศ และการทำแห้งด้วยลมร้อน พบว่าการทำแห้งแครอทด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำจะมีการสูญเสีย β-carotene น้อยกว่าการทำแห้งด้วยระบบสุญญากาศ และการทำแห้งด้วยลมร้อน ตามลำดับ เนื่องจากในระบบการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำนั้นปราศจากออกซิเจน จึงป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดีกว่า ในขณะที่การทำแห้งด้วยระบบสุญญากาศ แม้ว่าจะทำการดูดอากาศออกแล้ว แต่ยังมีออกซิเจนหลงเหลืออยู่ในระบบ จึงทำให้ยังคงเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้บ้าง ส่วนการทำแห้งด้วยลมร้อนนั้น มีออกซิเจนอยู่มากในระบบจึงมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้มากกว่าวิธีอื่นๆ ปริมาณ β-carotene จึงมีค่าต่ำ

การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำเหมาะสมกับอาหารที่ไวต่อความร้อนที่ต้องการรักษาคุณภาพด้านสี เนื้อสัมผัส คุณค่าทางโภชนาการ สารหอมระเหย และที่สำคัญการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำให้ลักษณะความเป็นรูพรุนของอาหารที่ทำให้ชิ้นอาหารลดการหดตัวและมีการคืนตัวกลับที่ดี

## 6. การทำแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศ (Microwave-vacuum drying)

ข้อดีของคลื่นไมโครเวฟคือ ความสามารถในการเพิ่มอัตราการทำแห้ง เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟทำให้โมเลกุลของน้ำในผลิตภัณฑ์เกิดการสั่นสะเทือนและเกิดเป็นความร้อนขึ้น ซึ่งการเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิและความชื้นที่อยู่ภายในและภายนอกของผลิตภัณฑ์นี้ เป็นแรงผลักดันให้เกิดการเคลื่อนที่ของความชื้นในผลิตภัณฑ์ออกมาภายนอก จึงช่วยลดปัญหาการเกิดลักษณะเปลือกแข็งรอยแตกที่ผิวหน้า หรือจุดไหม้ที่เกิดจากการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบดั้งเดิม และเนื่องจากพลังงานคลื่นไมโครเวฟนั้นเข้าสู่ภายในวัสดุโดยตรง ดังนั้นจึงไม่มีการสูญเสียความร้อนไปกับสภาพแวดล้อมเหมือนการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบดั้งเดิม แต่เนื่องจากการทำแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟก็ยังมีค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับการลงทุนและการใช้งานของเครื่องมือค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับการทำแห้งแบบลมร้อน ดังนั้นจึงไม่นิยมใช้คลื่นไมโครเวฟเป็นแหล่งพลังงานเพียงอย่างเดียว โดยเฉพาะในการทำแห้งวัตถุดิบที่มีความชื้นสูง เช่น ในผักและผลไม้ ซึ่งต้องใช้เวลาในการทำแห้งเป็นเวลานาน อย่างไรก็ตามการใช้คลื่นไมโครเวฟในการทำแห้งวัตถุดิบที่มีความชื้นต่ำจะมีประสิทธิภาพดีกว่า และเพื่อเป็นการแก้ไขข้อจำกัดในด้านค่าใช้จ่าย จึงมีการศึกษาการใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับการทำแห้งแบบอื่นๆ ได้แก่ การใช้ร่วมกับการทำแห้งด้วยระบบสุญญากาศ (Microwave-vacuum drying)

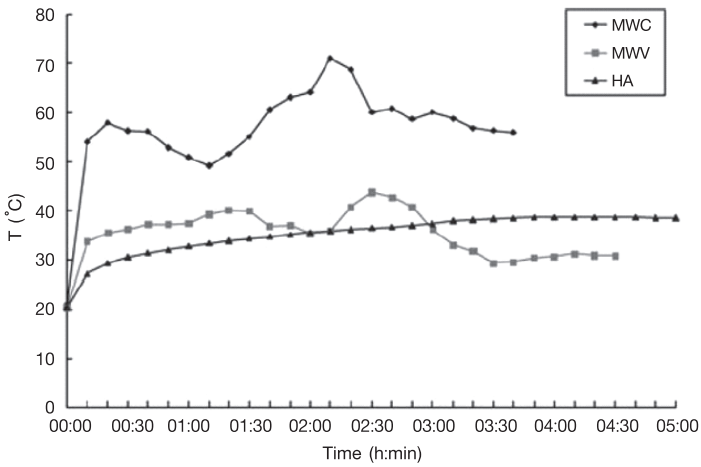
Arora และคณะ (2003) [11] ศึกษาการทำแห้งเห็ด (*Agaricus bisporus*) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3-5 เซนติเมตร ซึ่งมีความชื้นเริ่มต้น 93-93.6% (w.b.) ด้วยวิธีต่างๆ ได้แก่ การทำแห้งด้วยลมร้อน การทำแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน และการทำแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศต่ออัตราการทำแห้งและอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ พบว่าอัตราการทำแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน และการทำแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศมีค่าใกล้เคียงกัน และมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการทำแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว ส่วนระยะเวลาที่ใช้ในการทำแห้งเห็ดพบว่าการใช้คลื่นไมโครเวฟทำให้สามารถลดระยะเวลาในการทำแห้งลงได้จาก 17 ชั่วโมง เหลือเพียง 4 ชั่วโมง




**รูปที่ 1** กราฟการอบแห้งของเห็ดด้วยลมร้อน (HA) การทำแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศ (MWV) และการทำแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน (MWC)

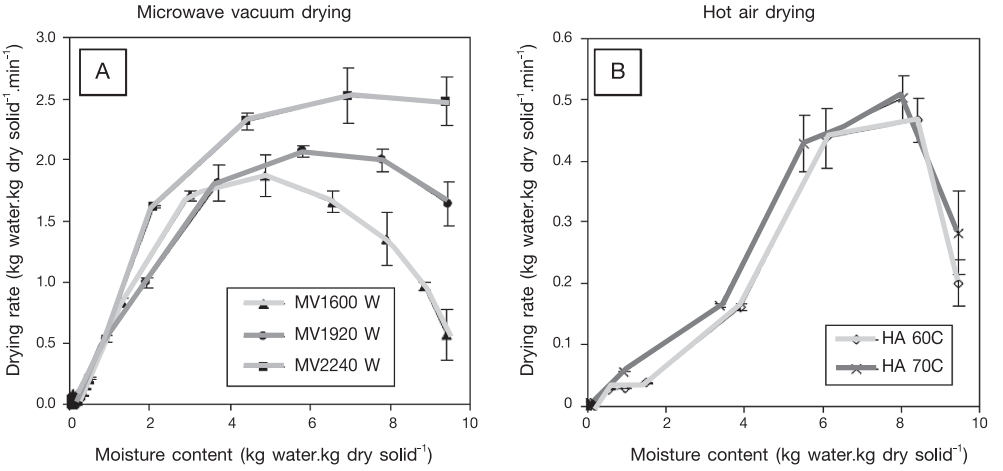
จากรูปที่ 1 จะเห็นได้ว่าการใช้เทคนิคการทำแห้งร่วมกันระหว่างการทำแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟและการทำแห้งด้วยลมร้อนสามารถปรับปรุงการถ่ายเทความร้อนให้ดีขึ้นได้มากกว่าการใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียว และอัตราการทำแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศมีค่าต่ำกว่าการทำแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน เนื่องจากการใช้ลมร้อนจะสามารถพัดพาเอาความชื้นที่ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ออกไปได้ดีกว่าจึงช่วยเร่งอัตราการทำแห้งให้เร็วขึ้นได้

แต่เมื่อพิจารณาค่าอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ที่ทำแห้งในระยะเวลา 5 ชั่วโมงแรก พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์เมื่อทำแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศมีค่าต่ำกว่าการทำแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน โดยพบว่าในสภาวะความดันสุญญากาศที่ 5.1 kPa ผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิสูงสุดเพียง 40°C ดังแสดงในรูปที่ 2




**รูปที่ 2** อุณหภูมิของเห็ดที่ทำแห้งด้วยลมร้อน (HA) การทำแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศ (MWV) และการทำแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน (MWC)

Therdthai และ Zhou (2009) [12] ศึกษาผลของการทำแห้งใบสะระแหน่ (*Mentha cordifolia* Opiz ex Fresen) ด้วยวิธีการทำแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศ ที่กำลังไมโครเวฟ 1600, 1920 และ 2240 W ความหนาแน่นของกำลังไมโครเวฟ 8.0, 9.6 และ 11.2 w/g ที่ความดันสุญญากาศ 13.33 kPa เปรียบเทียบกับการทำแห้งด้วยลมร้อน ที่อุณหภูมิ 60 และ 70°C พบว่าใบสะระแหน่ที่มีความชื้นเริ่มต้น 9.43 ± 0.02 kg water/kg dry solid เมื่อผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 และ 70°C ใช้เวลาในการทำแห้ง 90 และ 60 นาที ตามลำดับ ในขณะที่การทำแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศ ที่กำลังไมโครเวฟ 1600, 1920 และ 2240 W ใช้เวลาเพียง 13, 12 และ 10 นาที ตามลำดับ เพื่อลดความชื้นให้เหลือน้อยกว่า 0.1 kg water/kg dry sample สำหรับอัตราการทำแห้งของใบสะระแหน่ เมื่อใช้วิธีการทำแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศมีอัตราการทำแห้งสูงกว่าอัตราการทำแห้งที่ใช้การทำแห้งด้วยลมร้อนในทุกสภาวะการทดลอง โดยในช่วงแรกของการทำแห้งพลังงานไมโครเวฟจะถูกดูดซับโดยน้ำในผลิตภัณฑ์เป็นปริมาณมาก ทำให้มีความร้อนเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจนผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิสูงถึง 51.7°C และน้ำเริ่มระเหยกลายเป็นไอ และกรณีของการทำแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศนั้น การเพิ่มกำลังไมโครเวฟจาก 1600 W เป็น 2240 W มีผลทำให้อัตราการทำแห้งเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากกำลังไมโครเวฟที่มากขึ้น ส่งผลให้น้ำในผลิตภัณฑ์ถูกกระตุ้นให้กลายเป็นไอได้เร็วขึ้น จึงช่วยเร่งให้ความชื้นเคลื่อนที่ออกมาจากผลิตภัณฑ์ได้เร็วขึ้นด้วย ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิของการทำแห้งด้วยลมร้อนจาก 60°C เป็น 70°C ไม่ทำให้อัตราการทำแห้งเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3 และการที่อัตราการทำแห้งเพิ่มขึ้นในการทำแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศนั้นมีผลทำให้ระยะเวลาในการทำแห้งลดลงได้ถึง 85 – 95%




**รูปที่ 3** อัตราการทำแห้งของใบสะระแหน่ที่ทำแห้งโดยการใช้ (A) คลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศ เปรียบเทียบกับ (B) การทำแห้งด้วยลมร้อน

จากผลการทดลองที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้สังเกตเห็นได้ว่าการทำแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศสามารถลดระยะเวลาการทำแห้งลง และเพิ่มอัตราการทำแห้งให้สูงขึ้นได้เมื่อเปรียบเทียบกับการทำแห้งด้วยลมร้อนเนื่องจาก เมื่อผลิตภัณฑ์ได้รับคลื่นไมโครเวฟโมเลกุลของน้ำในผลิตภัณฑ์จะเกิดการสั่นสะเทือน ทำให้เกิดการเปลี่ยนพลังงานจลน์เป็นพลังงานความร้อน และการที่ระบบเป็นสุญญากาศทำให้จุดเดือดของน้ำลดต่ำลง น้ำจึงสามารถกลายเป็นไอได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100°C ไอน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ทำให้ความดันภายในผลิตภัณฑ์เพิ่ม

มากขึ้น และความแตกต่างระหว่างความดันไอภายในกับภายนอกผลิตภัณฑ์ จะเป็นแรงผลักดันให้น้ำในผลิตภัณฑ์เคลื่อนที่ออกไปภายนอกได้เร็วขึ้น จึงช่วยลดระยะเวลาในการทำแห้งลงและเพิ่มอัตราการทำแห้งขึ้นได้ ด้วยเหตุนี้ผลิตภัณฑ์จึงสามารถทำให้แห้งได้โดยไม่ต้องใช้อุณหภูมิสูง จึงเป็นการลดอุณหภูมิของกระบวนการทำแห้ง นอกจากนั้นการที่ระบบเป็นสุญญากาศจึงมีปริมาณออกซิเจนต่ำมากในระหว่างการทำแห้ง สามารถลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในผลิตภัณฑ์ จึงช่วยรักษาสีและคุณค่าทางโภชนาการได้

Lin และคณะ (1998) [13] ศึกษาผลของการทำแห้งแครอทแผ่นด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศต่อปริมาณ β-carotene เปรียบเทียบกับการทำแห้งด้วยลมร้อน พบว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนทำให้ปริมาณ β-carotene ของแผ่นแครอทลดลง 19.2% ซึ่งลดลงในปริมาณมากกว่าแผ่นแครอทที่ทำแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศ ซึ่งปริมาณ β-carotene ลดลงเพียง 3.2% เนื่องจากการทำแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศ ทำให้เกิดอัตราการทำแห้งที่รวดเร็ว จึงลดระยะเวลาการทำแห้งลง นอกจากนี้การที่ใช้ระบบสุญญากาศมีปริมาณออกซิเจนอยู่น้อย จึงลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ β-carotene และระบบสุญญากาศยังทำให้จุดเดือดของน้ำในผลิตภัณฑ์ลดต่ำลง น้ำจึงสามารถระเหยได้ที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นในสภาวะการทำแห้งที่มีออกซิเจนอยู่น้อยและอุณหภูมิต่ำ จึงทำให้การสลายตัวของ β-carotene ลดลง

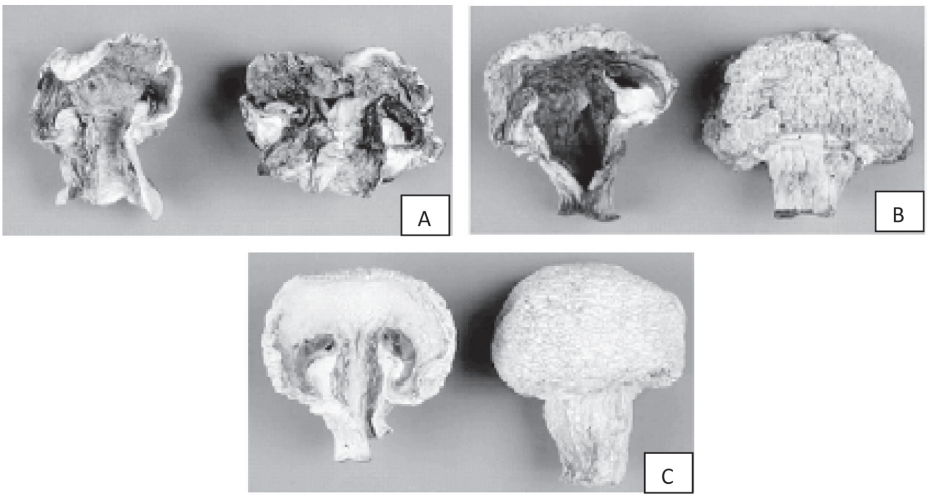
Yousif และคณะ (1999) [14] ศึกษาการทำแห้งใบโหระพา (*Ocimum basilicum* L.) ด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศเปรียบเทียบกับการทำแห้งด้วยลมร้อนต่อสารหอมระเหย ผลการทดลองที่ได้พบว่าใบโหระพาที่ผ่านการทำแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศ มีปริมาณสารหอมระเหยที่เป็นสารหลัก 2 ชนิดคือ Linalool และ Methylchavicol มากกว่าใบโหระพาที่ทำแห้งด้วยลมร้อน และพบมากกว่าในใบโหระพาสด เนื่องจากการทำแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศ ทำให้เกิดอัตราการทำแห้งที่รวดเร็ว จึงลดเวลาการแพร่ของสารหอมระเหยออกจากเนื้อเยื่อ นอกจากนี้การที่ใช้ระบบสุญญากาศ จึงทำให้ในระบบการทำแห้งมีปริมาณออกซิเจนอยู่น้อย จึงลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งทำให้เกิดการสลายตัวของสารหอมระเหย และในส่วนของปริมาณ Linalool ที่เพิ่มขึ้นน่าจะมีสาเหตุมาจากปฏิกิริยาการสังเคราะห์สารเนื่องจาก Thermal reaction ทำให้เกิดการเปลี่ยน Linalyl acetate ไปเป็น Linalool เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการทำแห้ง ปริมาณสารดังกล่าวจึงสูงกว่าที่พบในใบโหระพาสด โดยพบว่ามี Linalool เพิ่มขึ้นประมาณ 2.5 เท่า และ Methylchavicol เพิ่มขึ้นประมาณ 1.5 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับการทำแห้งด้วยลมร้อน

Arora และคณะ (2003) [11] รายงานว่าเมื่อวัดการเปลี่ยนแปลงค่าสีของเห็ดที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีต่างๆ พบว่าเห็ดที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนมีสีใกล้เคียงกับเห็ดสดมากที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าการทำแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศจะทำให้เห็ดมีค่าความสว่าง ($L^*$) และค่าความเหลือง ($b^*$) มากกว่าการทำแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน โดยพบว่าการใช้กำลังไมโครเวฟที่สูงขึ้น จะทำให้ค่าความสว่างของผลิตภัณฑ์ลดลง โดยสรุปพบว่าการทำแห้งเห็ดด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศ จะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพด้านสีดีกว่าเห็ดที่ทำแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน เนื่องจากอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ที่ทำแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับสุญญากาศมีค่าต่ำกว่า ในสภาวะที่มีความหนาแน่นของกำลังไมโครเวฟคงที่

งานวิจัยของ Therdthai และ Zhou (2009) [12] รายงานว่าใบสะระแหน่ที่ผ่านการทำแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศ มีความสว่างและสีเหลืองมากกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อน เนื่องจากการทำแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศใช้เวลาในการทำแห้งที่สั้นกว่า และการใช้ระบบสุญญากาศ ทำให้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์มีค่าต่ำกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อน ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีน้อยกว่า ทั้งนี้การอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 และ 70°C ให้ผลไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้อัตราการเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้ง เวลาที่ใช้ในการทำแห้ง และปริมาณออกซิเจนในระบบ โดยการทำแห้งที่ใช้อุณหภูมิสูง เวลานาน หรือการมีออกซิเจนในระบบในปริมาณมาก จะเป็นการกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีได้มากขึ้น ในกรณี

ของใบสะระแหน่อุณหภูมิสูงจะทำให้แมกนีเซียมในคลอโรฟิลล์หลุดออกไปและถูกแทนที่ด้วยไฮโดรเจน ทำให้คลอโรฟิลล์เปลี่ยนเป็น Pheophytins ซึ่งเป็นสาเหตุของการสลายตัวของคลอโรฟิลล์ ทำให้สีเขียวของใบสะระแหน่หายไป และกลายเป็นสีน้ำตาล เมื่อผ่านการทำแห้งที่อุณหภูมิสูง [15]

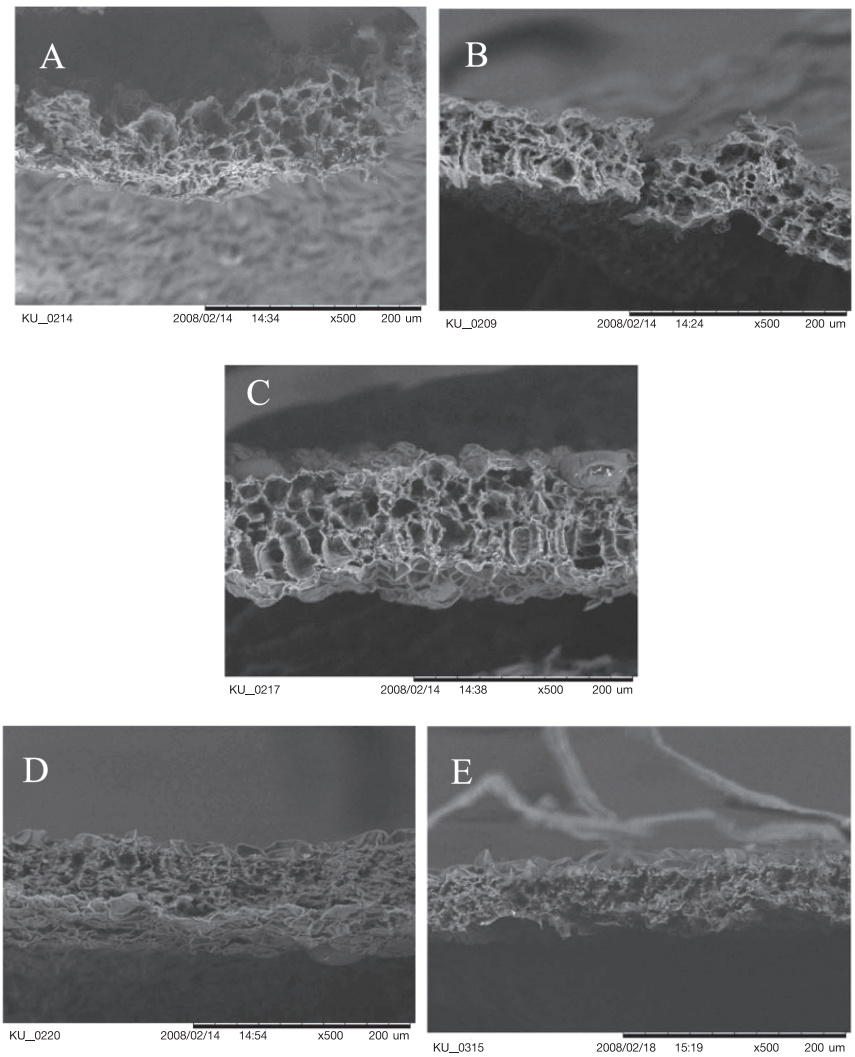
เมื่อศึกษาผลของวิธีการต่อคุณภาพในด้านลักษณะโครงสร้างของผลิตภัณฑ์พบว่า การทำแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศสามารถลดการหดตัวของผลิตภัณฑ์ได้ เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟทำให้โมเลกุลของน้ำในผลิตภัณฑ์เกิดการสั่นสะเทือน เกิดการเปลี่ยนพลังงานจลน์เป็นพลังงานความร้อนขึ้น ไอน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ทำให้ความดันภายในผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้นและความแตกต่างระหว่างความดันไอภายในกับภายนอกผลิตภัณฑ์ จะเป็นแรงผลักดันให้น้ำในผลิตภัณฑ์เคลื่อนที่ออกไปภายนอก ทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการพองตัว นอกจากนี้การที่ระบบเป็นสุญญากาศทำให้จุดเดือดของน้ำลดต่ำลง น้ำจึงสามารถกลายเป็นไอได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100°C จึงเกิดการทำลายโครงสร้างของผนังเซลล์น้อยกว่า เซลล์จึงยังคงรูปร่างไว้ได้ ด้วยเหตุนี้ผลิตภัณฑ์จึงเกิดการหดตัวเพียงเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งสังเกตเห็นได้ว่าเห็ดที่ผ่านการทำแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศมีโครงสร้างที่พองและมีการหดตัวน้อยกว่าเห็ดที่ทำแห้งด้วยลมร้อน และเห็ดที่ทำแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน




**รูปที่ 4** เห็ดที่ผ่านการทำแห้งด้วย (A) ลมร้อน (B) การทำแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน และ (C) การทำแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศ

ในงานวิจัยของ Therdthai และ Zhou (2009) [12] รายงานว่าใบสะระแหน่ที่อบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศเกิดโครงสร้างเป็นรูพรุน (porous structure) มากกว่าและมีลักษณะโปร่งมากกว่าใบสะระแหน่ที่อบแห้งด้วยลมร้อน รูพรุนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเกิดไอน้ำที่มีขนาดใหญ่ และเกิดการระเหยออกไปอย่างรวดเร็ว ทำให้โครงสร้างยังคงรูปอยู่ได้ และการเพิ่มกำลังไมโครเวฟให้มากขึ้น จะกระตุ้นให้น้ำกลายเป็นไอเร็วขึ้น ทำให้เกิดความดันไอมากขึ้น ส่งผลให้เกิดโครงสร้างเป็นรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ กรณีของการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 และ 70°C ทำให้เกิดโครงสร้างที่อัดตัวกันแน่น (packed structure) และอุณหภูมิทั้งสองระดับไม่ทำให้โครงสร้างที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน และเมื่อเพิ่มกำลังของไมโครเวฟจะทำให้ rehydration rate เพิ่มขึ้น การทำแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศที่ใช้กำลังของไมโครเวฟ 1920 และ 2240 W ทำให้ rehydration rate สูงกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 และ 70°C แต่การเพิ่มอุณหภูมิในการทำแห้งจาก 60 เป็น

70°C ไม่มีผลทำให้ rehydration rate ของใบสะระแหน่อบแห้งเพิ่มขึ้น รูปที่ 5 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างที่เป็นรูพรุนของใบสะระแหน่ ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการดูดน้ำกลับอย่างมีนัยสำคัญ การทำแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศทำให้โครงสร้างของใบสะระแหน่มีรูพรุนมากและรูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อเพิ่มกำลังไมโครเวฟให้สูงขึ้น ส่งผลให้อัตราการดูดน้ำกลับมากขึ้นด้วย ในขณะที่การทำแห้งด้วยลมร้อน มีโครงสร้างที่ค่อนข้างลีบแบน มีรูพรุนน้อย ดังนั้นความสามารถในการดูดน้ำกลับจึงน้อยกว่า




**รูปที่ 5** ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของใบสะระแหน่ที่ผ่านการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศที่กำลังไมโครเวฟ (A)1600 W, (B) 1920 W, (C) 2240 W และการทำแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ (D) 60°C และ (E) 70°C

การใช้ไมโครเวฟร่วมกับการทำแห้งแบบสุญญากาศจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจสำหรับอาหารที่ไวต่อความร้อนเนื่องจากสามารถรักษาสารหอมระเหย สี การหดตัว และผลิตภัณฑ์มีการคืนตัวกลับที่ดี และมีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งแต่ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดี และการใช้ไมโครเวฟร่วมกับสุญญากาศทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น ดังนั้นเวลาในการอบแห้งจึงลดลง

จากผลงานวิจัยที่ได้ศึกษาสามารถสรุปได้ว่าการทำแห้งแบบผสมผสานมีข้อได้เปรียบกว่ากระบวนการทำแห้งแบบขั้นตอนเดียวดังนี้

- ปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น ลดการเกิดเปลือกแข็ง และการหดตัวของผลิตภัณฑ์ รักษาสี และคุณค่าทางโภชนาการ
- ลดระยะเวลาในการทำแห้ง
- สามารถควบคุมอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ในแต่ละช่วงได้ง่ายขึ้น
- การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ

ปัจจัยที่สำคัญในการเลือกวิธีการอบแห้งแบบผสมผสานต่อผลิตภัณฑ์อาหารหนึ่งๆ มีดังนี้

- องค์ประกอบของอาหาร เช่น ไขมัน วิตามิน สารหอมระเหย ที่อุณหภูมิและเวลาในการทำแห้งมีผล
- การเสื่อมเสียของอาหารเมื่อได้รับความร้อน เช่น การเกิดสีน้ำตาล การเกิดกลิ่นหืน เนื้อสัมผัสแข็ง การหดตัว
- ระยะเวลาและอัตราในการทำแห้ง การทำแห้งแบบผสมผสานนั้นต้องประหยัดเวลาและพลังงาน
- คุณภาพของอาหารหลังอบแห้งและเมื่อคืนตัว เช่น สี การคืนตัวกลับ และคุณค่าทางโภชนาการ

## 7. สรุปผลการวิจัย

เทคโนโลยีการทำแห้งแบบผสมผสานสามารถนำมาใช้เพื่อแปรรูปและถนอมผลิตภัณฑ์อาหารที่ไวต่อความร้อนได้ โดยการเลือกใช้การทำแห้งแบบหลายขั้นตอน ซึ่งอาจจะใช้เครื่องอบแห้งชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้ การเปลี่ยนอุณหภูมิของการทำแห้งในแต่ละขั้นตอน การเปลี่ยนความดัน หรือการนำวิธีการทำแห้งแบบต่างๆ มาใช้ร่วมกัน เพื่อผสมผสานข้อดีของเครื่องอบแห้งแต่ละชนิดทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีขึ้น ปัจจัยสำคัญในการเลือกวิธีการทำแห้งเพื่อผสมผสานกันได้แก่ องค์ประกอบของอาหาร การเสื่อมเสียของอาหารเมื่อได้รับความร้อน ระยะเวลาและอัตราในการทำแห้ง และคุณภาพของอาหารหลังอบแห้งและเมื่อคืนตัว

## 8. เอกสารอ้างอิง

1. Kudra, T. and Mujumdar, A.S., 2009, *Advanced Drying Technology* 2nd ed, CRC Press Taylor & Francis Group. 462 p.

2. Borompichaichartkul, C., Luengsode, K., Chinprahast, N., and Devahastin, S., 2009, “Improving Quality of Macadamia Nut (*Macadamia integrifolia*) through the Use of Hybrid Drying Process”, *Journal of Food Engineering*, Vol. 93, pp. 348 – 353.

3. Hawlader, M.N.A, Perera, C.O., and Min Tian, 2006, “Comparison of Retention of 6-Gingerol in Drying of Ginger under Modified Atmosphere Heat Pump Drying and Other Methods”, *Drying Technology*, Vol. 24, pp. 51-56.

4. Phatanayindee, S., Borompichaichartkul, C., Srzednicki, G., Craske, J., and Wootton, M., 2009, “Improving Volatile and Lipid Quality of Macadamia Nut through the Use of Hybrid Drying” *Proceedings of The International Symposium Agricultural Engineering towards Sustainable Agriculture in Asia (AESA 2009)*, 18-20 November.

5. Borompichaichartkul, C., Chinprahast, N, Devahastin, S., Wiset, L., Poomsa-ad, N., and Ratchapo, T., 2010, “Multistage Heat Pump Drying of Macadamia Nut under Modified Atmosphere”, *Proceedings of IDS2010 – Drying 2010*, 3 – 6 October, Magdeburg, Germany, pp. 1853 – 1858.

6. Mujumdar, A.S., 2007, *Handbook of Industrial Drying*, 3rd ed, CRC Press Taylor & Francis Group.

7. Davahastin, S., Suvarnakuta, P., Soponronnarit,

S., and Mujumdar, A.S., 2004, "A Comparative Study of Low-pressure Superheated Steam and Vacuum Drying of a Heat-sensitive Material", *Drying Technology*, Vol. 22, No. 8, pp. 1845-1867.

8. Methakhup, S., Chiewchan, N., and Davhastin, S., 2005, "Effects of Drying Methods and Conditions on Drying Kinetics and Quality of Indian Gooseberry Flake", *LWT - Food Science and Technology*, Vol. 38, pp. 579-587.

9. Barbieri, S., Elustondo, M., and Urbicain, M., 2004, "Retention of Aroma Compounds in Basil Dried with Low Pressure Superheated Steam", *Journal of Food Engineering*, Vol. 65, pp. 109-115.

10. Suvarnakuta, S., Davahastin, S., and Mujumdar, A.S, 2005, "Drying Kinetics and β-carotene Degradation in Carrot Undergoing Different Drying Processes", *Journal of Food Science*, Vol. 70, No. 8, pp. 520-526.

11. Lin, T.M., Durance, T.D., and Scaman, C.H., 1998, "Characterization of Vacuum Microwave, Air and Freeze Dried Carrot Slices", *Food Research International*, Vol. 31, No. 2, pp. 111-117.

12. Arora, S., Shivhare, U.S., Ahmed, J., and Raghavan, G.S.V., 2003, "Drying Kinetics of *Agaricus bisporus", Transactions of the ASAE*, Vol. 46, No. 3, pp. 721-724.

13. Therdthai, N. and Zhou, W., 2009, "Characterization of Microwave Vacuum Drying and Hot Air Drying of Mint Leaves (*Mentha cordifolia* Opiz ex Fresen)", *Journal of Food Engineering*, Vol. 91, pp. 482-489.

14. Yousif, A.N., Scaman, C.H., Durance, T.D., and Girard, B., 1999, "Flavor Volatiles and Physical Properties of Vacuum-Microwave- and Air-Dried Sweet Basil *(Ocimum basilicum* L.*)" Journal of Agricultural and Food Chemistry*, Vol. 47, pp. 4777- 4781.

15. Rudra, S.G., Singh, H., Basu, S., and Shivhare, U.S., 2008, "Enthalpy Entropy Compensation during Thermal Degradation of Chlorophyll in Mint and Coriander Puree", *Journal of Food Engineering*, Vol. 86, pp. 379-387.