การอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรด้วยคลื่นไมโครเวฟ
DRYING AGRICULTURAL PRODUCTS BY MICROWAVE

ฤทธิชัย อัศวราชันย์
ประธานหลักสูตรสาขาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร
มหาวิทยาลัยแม่โจ้

บทคัดย่อ

คลื่นไมโครเวฟจัดเป็นนวัตกรรมการสร้างความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงซึ่งสามารถสร้างความร้อนภายในตัวผลผลิตทางการเกษตรได้ดี และไม่มีผลกระทบจากการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลาง ดังนั้นการประยุกต์คลื่นไมโครเวฟมาใช้ในกระบวนการอบแห้งสำหรับผลผลิตทางการเกษตร จึงเป็นแนวทางเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการอบแห้ง เนื่องจากผลผลิตทางการเกษตรจัดเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติไดอิเล็กตริก ซึ่งสามารถสร้างความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟได้ดี บทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอหลักการของคลื่นไมโครเวฟและการประยุกต์ใช้ในกระบวนการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรชนิดต่างๆ หลักการทำงานของระบบพลังงานผสมระหว่างคลื่นไมโครเวฟและเทคโนโลยีการอบแห้งแบบอื่นๆ เพื่อลดระยะเวลาในการอบแห้งและเพื่อปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์ ตลอดจนการนำคลื่นไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบสุญญากาศสำหรับใช้อบแห้งผลผลิตทางการเกษตรที่มีมูลค่าสูง เพื่อเป็นแนวการพัฒนาเทคโนโลยีการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

คำสำคัญ: คลื่นไมโครเวฟ, ผลผลิตทางการเกษตร, กระบวนการอบแห้ง, ระบบพลังงานผสม

Abstract

The microwave is the heating innovation that has been established from the high efficiency electromagnetic wave and has been directly transmitted to the inner products which there is no heat loss of passing the medium. The use of the microwave for drying the agricultural products increases the drying efficiency because the agricultural product has the dielectric property which the heat can be easily generated by microwave. The objective of this article is focused on presenting the principle of the microwave and its usage for drying the agricultural products. The principle of the hybrid technology, the drying combination of microwave drying with the other drying technologies, is applied for decreasing the drying period and for improving the product quality. The microwave drying can be also combined

with the vacuum technique for drying the high value agricultural products which this can be developed for the industrial processes.

Keyword: Microwave, Agricultural product, Drying process, Hybrid system

1. บทนำ

การอบแห้งเป็นเทคโนโลยีที่มีบทบาทสำคัญในการแปรรูปผลผลิตเกษตรเพื่อที่ยืดอายุการเก็บรักษาผลผลิตให้ยาวนานขึ้นซึ่งจะช่วยรองรับปัญหาผลผลิตเกษตรล้นตลาดได้อีกทางหนึ่ง เทคโนโลยีการอบแห้งเป็นกระบวนการให้ความร้อนภายใต้สภาวะควบคุมกับผลผลิตเกษตรที่มีความชื้นสูงเพื่อลดปริมาณน้ำหรือความชื้นด้วยวิธีระเหยน้ำออกไปคุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้งจะขึ้นอยู่กับกลไกการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสารในระหว่างกระบวนการอบแห้ง การวิจัยและพัฒนาเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการอบแห้งจึงเป็นกุญแจสำคัญในการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้งที่ยังคงกลิ่นรสและคุณค่าทางโภชนาการไว้ใกล้เคียงกับผลผลิตสด [1] อย่างไรก็ตามการออกแบบระบบการอบแห้งให้เหมาะสมกับเงื่อนไขที่ต้องการจำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องทั้งในด้านวิธีการอบแห้งแหล่งพลังงานที่ใช้ และผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้ง

กลไกในการอบแห้งจะประกอบไปด้วยการให้ตัวกลางทางความร้อนเพื่อส่งถ่ายพลังงานความร้อนไปยังผลผลิตเกษตรจนปริมาณความชื้นในผลผลิตเกษตรระเหยและถ่ายเทความชื้นเข้าสู่ตัวกลางทางความร้อนในรูปแบบของการแลกเปลี่ยนมวลสารและความร้อนในลักษณะต่างๆ ซึ่งมีข้อจำกัดในด้านเทคนิคและความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ เนื่องจากการใช้เวลาในการอบแห้งนาน จะส่งผลเสียต่อคุณภาพของอาหารและผลิตภัณฑ์อบแห้ง ตลอดจนมีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานสูงจากสาเหตุดังกล่าวจึงได้มีความพยายามในการศึกษานวัตกรรมการให้ความร้อนด้วยวิธีการใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูงมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการอบแห้งเพื่อลดข้อจำกัดต่างๆ ของการอบแห้งแบบดั้งเดิมด้วยลมร้อน และเพื่อพัฒนานวัตกรรมทางความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงมีอัตราการอบแห้งที่รวดเร็ว และรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้งจึงได้มีการศึกษาและวิจัยแหล่งพลังงานที่มีประสิทธิภาพสูงในการถ่ายเทมวลและความร้อนในระหว่างกระบวนการอบแห้ง

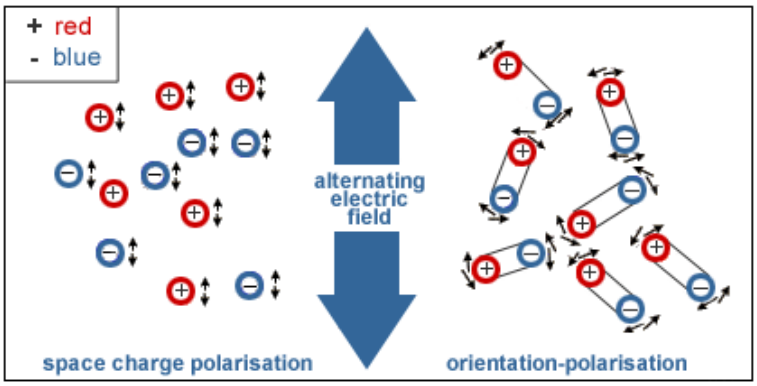
เทคโนโลยีการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave Drying Technology) เป็นนวัตกรรมการสร้างความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูง โดยคลื่นไมโครเวฟจะเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนในผลผลิตเกษตรที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุไดอิเล็กตริก จึงสามารถดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และแปลงเป็นพลังงานความร้อนได้ คลื่นไมโครเวฟจัดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีความถี่อยู่ระหว่าง 300 เมกะเฮิรตซ์- 300 จิกะเฮิรตซ์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงคลื่นเรดาร์ ทำให้ไปรบกวนระบบการสื่อสาร ดังนั้น องค์การ Federal Communication Commission โดยรัฐบาลประเทศสหรัฐอเมริกาจึงได้กำหนดช่วงความถี่ของคลื่นไมโครเวฟสำหรับกระบวนการให้ความร้อนไว้ที่ 2 ระดับ คือ 915±13 และ 2,450±50 เมกะเฮิรตซ์ แต่สำหรับกลุ่มประเทศแถบยุโรปอาจจะมีการใช้ที่ระดับความถี่ 896 เมกะเฮิรตซ์ [2]

2. กลไกการเกิดความร้อนของคลื่นไมโครเวฟ

คลื่นไมโครเวฟจะเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนภายในตัววัสดุเมื่อเกิดอันตรกิริยากับวัสดุ (Lossy Material) โดยกลไกการเกิดความร้อนของคลื่นไมโครเวฟจะประกอบไปด้วยกลไกการเหนี่ยวนำเชิงไอออน (Ionic Conduction) และกลไกชนิดการหมุนของทั้งสองขั้ว (Dipolar Rotation) รูปที่ 1 แสดงกลไกการเหนี่ยวนำเชิงประจุไอออนภายใต้สนามไฟฟ้าโดยผลจากการเหนี่ยวนำจะทำให้ประจุไอออนขั้วบวกกับขั้วลบเกิดการสั่นและการหมุน และเกิดการเสียดสีกันระหว่างโมเลกุลจนเกิดเป็นพลังงานความร้อน การเกิดความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟในผลผลิตเกษตรสามารถอธิบายได้ในลักษณะเดียวกันโดยคลื่นไมโครเวฟจะเหนี่ยวนำให้โมเลกุลของน้ำภายในวัสดุทางการเกษตรเกิดการหมุนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขั้วไฟฟ้าส่งผลให้เกิดการเสียดสีของโมเลกุลของน้ำภายในวัสดุ ก่อให้เกิดความร้อนในผลผลิตเกษตรอย่างรวดเร็ว [3]

ความชื้นในวัสดุจัดเป็นวัสดุประเภทที่มีคุณสมบัติอยู่ระหว่างตัวนำและฉนวนไฟฟ้าประเภทวัสดุไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Lossy Dielectrics) ดังนั้นความชื้นในวัสดุจึงสามารถดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและแปลงเป็นพลังงานความร้อนได้โดยทั่วไปความชื้นในชีววัสดุ (Biological Materials) คือสารที่สามารถระเหยได้เมื่อได้รับความร้อนประกอบไปด้วยน้ำ (Water) น้ำมันหอมระเหย (Volatile Oils) ยางเหนียว (Greases) แอลกอฮอล์ (Alcohols) ตัวทำละลายอินทรีย์ (Organic Solvents) และกลิ่นหอมระเหย (Flavors) ในจำนวนนี้น้ำถือเป็นองค์ประกอบหลักซึ่งมีมากถึงร้อยละ 50-80 ขึ้นอยู่กับชนิดและโครงสร้างเซลล์โมเลกุลของน้ำมีลักษณะโครงสร้างเชิงขั้ว จึงสามารถดูดซับพลังงานไมโครเวฟและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้

ง่าย น้ำในผลผลิตสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดได้แก่ น้ำอิสระ (Free Water) และน้ำที่อยู่ระหว่างโครงสร้างเซลล์ภายใน ดังนั้นผลผลิตเกษตรจึงจัดเป็นวัสดุไดอิเล็กตริกที่มีความสามารถในการเกิดความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟได้ดี

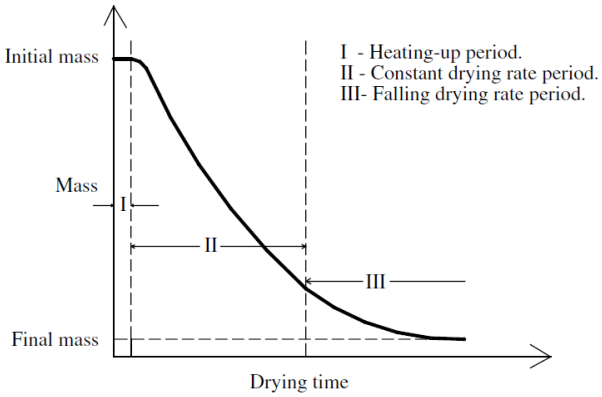


รูปที่ 1 กลไกการเหนี่ยวนำเชิงไอออนและกลไกลชนิดการหมุนของทั้งสองขั้ว
ที่มา : PÜSCHNER Microwave Power System, UK [4]

3. การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave Drying)

Idris *et al*., [5] อธิบายกลไกการเปลี่ยนแปลงมวลของผลผลิตเกษตรในระหว่างกระบวนการอบแห้งเป็น 3 คาบเวลา (รูปที่ 2) ได้แก่ คาบเวลาที่ 1 เกิดปรากฏการณ์ถ่ายเทพลังงานความร้อนให้ผลผลิตเกษตรจนถึงอุณหภูมิของการระเหย หรือเรียกว่าการให้ความร้อนช่วงต้น (Heating Up Period) จากนั้นน้ำอิสระบริเวณผิวหน้าของผลผลิตจะเกิดการระเหยโดยถ่ายเทมวลไปยังตัวกลางทางความร้อนเมื่อน้ำหรือความชื้นที่ผิวลดลง น้ำในโครงสร้างชั้นในเซลล์จะเคลื่อนที่มาแทนที่ผิวหน้าเพื่อทดแทนความชื้นที่เสียไปโดยที่อัตราการระเหยน้ำที่ผิวหน้าจะเท่ากับอัตราการเคลื่อนตัวของน้ำภายโครงสร้างเซลล์ชั้นในเรียกคาบเวลานี้ว่าคาบเวลาที่อัตราการอบแห้งคงที่ (Constant Rate Period) ซึ่งจะดำเนินต่อเนื่องไปจนกระทั่งค่าความชื้นเข้าสู่ความชื้นวิกฤติ (Critical Moisture Content) ซึ่งอัตราการถ่ายเทมวลของไอน้ำที่ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์มีค่าสูงกว่าอัตราการเคลื่อนตัวของน้ำภายโครงสร้างเซลล์ชั้นในเกิดเป็นชั้นของความแห้ง (Drying Front) กระบวนการอบแห้งจะเข้าสู่คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลง (Falling Rate Period) กลไกการถ่ายเทมวลของการอบแห้งด้วยลมร้อนจะเริ่มจากการถ่ายเทพลังงานจากลมร้อนเพื่อทำให้ความชื้นที่ผิวหน้าเข้าสู่อุณหภูมิระเหยส่วนความชื้นที่อยู่ภายในจะค่อย ๆแพร่กระจายมายังผิวโดยอัตราการแพร่กระจายความชื้นจะขึ้นอยู่กับศักยภาพของการถ่ายเทความร้อนและความแตกต่างของอุณหภูมิ เมื่อ

ความชื้นลดลงจนเข้าสู่ค่าความชื้นวิกฤติ และชั้นความแห้งเกิดขึ้น ประสิทธิภาพการถ่ายเทพลังงานจะลดต่ำลงอย่างมาก



รูปที่ 2 เส้นโค้งความสัมพันธ์ของเปลี่ยนแปลงความชื้นในระหว่างการอบแห้ง
ที่มา : Idris *et al*., [5]

การอบแห้งที่มีตัวกลางทางความร้อนเพื่อถ่ายเทพลังงานไปสู่ความชื้นภายในผลผลิตส่งผลให้อัตราการแพร่ความชื้นลดต่ำลงจึงต้องใช้เวลายาวนานในการระเหยความชื้นจากชั้นในโครงสร้างเซลล์ จำเป็นต้องเพิ่มพลังงานมากขึ้นซึ่งกลไกดังกล่าวเป็นข้อจำกัดของการอบแห้งด้วยลมร้อน ในขณะที่การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ จะเกิดการเหนี่ยวนำความร้อนของน้ำอิสระที่ชั้นผิวและภายในโครงสร้างเซลล์ เกิดเป็นไออย่างรวดเร็วโดยจะเกิดเป็นไอก่อนที่ความชื้นจะออกจากวัสดุ โดยเฉพาะหากผลผลิตเกษตรมีความชื้นเริ่มต้นสูงจะทำให้เกิดความแตกต่างของความดันเฉพาะส่วนของไอสูงมาก ซึ่งจะมีผลต่อเนื่องทำให้ความชื้นเคลื่อนที่ออกจากวัสดุไปอย่างรวดเร็ว กรณีนี้เรียกว่าปรากฏการณ์ปั๊มของเหลว (Pumping Effect) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่แรงดันไอทำให้ของเหลวเคลื่อนที่สู่ผิวหน้าเซลล์โดยตรงโดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงสถานะ [6] การอบแห้งผลผลิตเกษตรด้วยคลื่นไมโครเวฟ ถูกเผยแพร่มาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1960 เป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพสูงในการทำให้เกิดความร้อนภายใน จึงช่วยเร่งอัตราการอบแห้งได้เป็นอย่างดี และถูกนำมาใช้อบแห้งผลผลิตเกษตรชนิดต่างๆ อาทิ องุ่น แครอท สตอเบอร์รี่ แอปเปิ้ล ช่วยลดอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานของการอบแห้งได้มากถึงร้อยละ 25-90 เมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อน [7] นอกจากนี้ผลผลิตเกษตรที่อบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟยังมีคุณภาพในด้านคุณลักษณะทาง

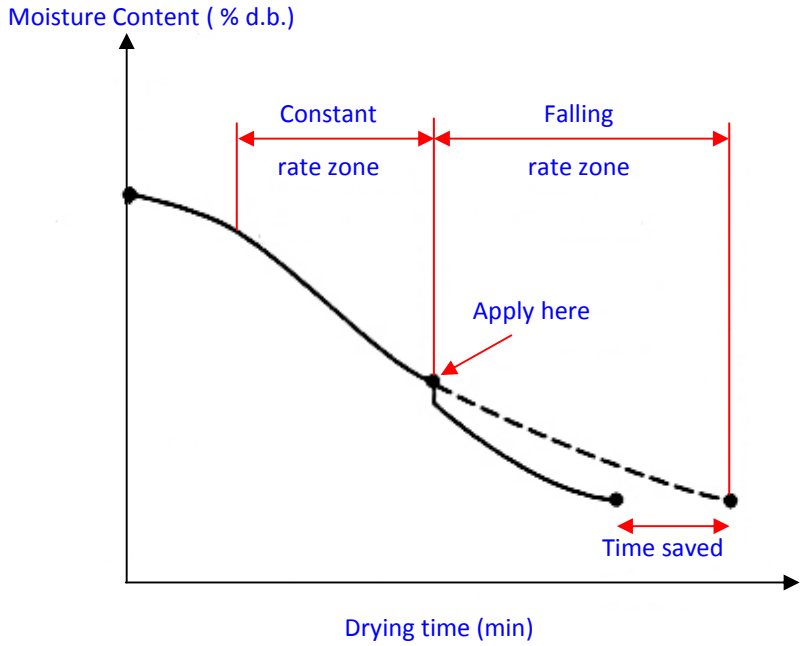
ประสาทสัมผัส (Sensory Quality) สี (Color) อัตราการคืนตัว (Rehydration ratio) และอัตราการหดตัว (Shrinkage) ดีกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนแบบดั้งเดิม

Arslam and Özcan [8] ได้เปรียบเทียบคุณสมบัติของแผ่นหัวหอมอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ การอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียสและการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ (210 วัตต์) ใช้เวลาในการอบแห้งประมาณ 19.2 นาที น้อยกว่าการอบแห้งวิธีการอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ และการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส ถึง 53.13, 46.88 และ 34.38 เท่าตามลำดับ และมีปริมาณของสารประกอบฟีนอลิก (Phenolic Content) เท่ากับ 1,664 และ 1,624 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมของตัวอย่างในตัวอย่างแผ่นหัวหอมเมื่ออบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ 210 และ 700 วัตต์ ตามลำดับในขณะที่การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และการอบแห้งด้วยลมร้อน (50 และ 70 องศาเซลเซียส) มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกเท่ากับ 472, 512 และ 780, 624 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมของตัวอย่างตามลำดับ สอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Maskan [9] ซึ่งพบว่าการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ (270 วัตต์) มีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน (60 องศาเซลเซียส) ถึง 65 เท่า นอกจากนี้ยังช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่เกิดจากการได้รับความร้อนเป็นเวลานานคุณภาพสีของตัวอย่างแผ่นกีวีสไลด์จึงมีค่าความสว่างและค่าความเป็นสีเขียวดีกว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้งด้วยลมร้อน จากรายงานวิจัยที่กล่าวมาแสดงให้เห็นว่าการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟสามารถลดเวลาในการอบแห้ง จึงช่วยรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้ง อย่างไรก็ตามการอบแห้งโดยใช้คลื่นไมโครเวฟเป็นแหล่งพลังงานเพียงอย่างเดียวจะมีข้อจำกัดในเรื่องความยุ่งยากในการทำงานของระบบและต้นทุนพลังงานตลอดจนความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ ดังนั้นจึงได้มีการประยุกต์ใช้ระบบผสมผสาน (Hybrid system) ระหว่างคลื่นไมโครเวฟและเทคนิคการอบแห้งแบบต่างๆ ขึ้นมาเพื่อสนับสนุนประสิทธิภาพการอบแห้งซึ่งกันและกัน [1,3,6]

4. ระบบการอบแห้งแบบพลังงานผสม (Hybrid Microwave Drying System)

การอบแห้งระบบพลังงานผสมเป็นที่นิยมทั้งในระดับการศึกษาวิจัย และการนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรมโดยเฉพาะการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับคลื่นไมโครเวฟเป็นระบบที่ได้รับความนิยมมากที่สุดเป็นการใช้อากาศร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงระเหยน้ำอิสระ (Free Water) ที่บริเวณผิวหน้าของผลผลิตเกษตรซึ่งจะช่วยเร่งอัตราการแพร่ความชื้นจากภายในได้ดี จึงเหมาะสมต่อการลดความชื้นในช่วงคาบเวลาที่อัตราการอบแห้งคงที่ (Constant rate period) จนกระทั่งความชื้นลดลงถึงค่าความชื้นวิกฤติ จากนั้นใช้คลื่นไมโครเวฟในการอบแห้งในช่วงคาบเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลง (Falling Rate Period) เพื่อเหนี่ยวนำให้ความชื้นที่อยู่ภายใต้ชั้นของความแห้งเกิดความร้อนและกลายเป็นไออย่างรวดเร็วโดยไอความชื้นที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ไปสู่ผิวหน้าของเซลล์โดยตรง

กลไกการเปลี่ยนแปลงมวลความชื้นของผลผลิตเกษตรนี้ สามารถแสดงได้ในเส้นโค้งความสัมพันธ์ของระบบการอบแห้งด้วยลมร้อน และการเร่งอัตราการอบแห้ง (Booster Drying) ด้วยคลื่นไมโครเวฟ (รูปที่ 3)



รูปที่ 3 เส้นโค้งความสัมพันธ์ของการอบแห้งระบบพลังงานผสม
ที่มา : ผดุงศักดิ์ [6]

การใช้คลื่นไมโครเวฟในการอบแห้งในคาบเวลาดังกล่าวจะช่วยเร่งอัตราการอบแห้งได้ดี ระบบพลังงานผสมนี้มีประสิทธิภาพในการอบแห้งที่สูงและยังช่วยรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารอบแห้งได้เป็นอย่างดี และด้วยเหตุผลของการเสริมกันของทั้งสองกลไกนี้จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมเพื่อให้เกิดข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟเพียงอย่างเดียวทั้งด้านประสิทธิภาพการอบแห้งและต้นทุนการดำเนินการ

Alibas [10] ศึกษาเทคนิคการอบแห้งระบบพลังงานผสมระหว่างลมร้อนและคลื่นไมโครเวฟ เพื่อศึกษาสภาวะการอบแผ่นฟักทองที่เหมาะสม โดยเปรียบเทียบอัตราการสิ้นเปลื้องพลังงานและการเปลี่ยนแปลงคุณภาพสีพบว่าสภาวะในการอบแห้งระบบผสม (ลมร้อน 70 องศาเซลเซียส และคลื่นไมโครเวฟ 350 วัตต์) มีอัตราสิ้นเปลื้องพลังงาน 0.175 กิโลวัตต์ ในขณะที่การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟและการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียวมีอัตราการสิ้นเปลื้องพลังงาน 0.232 และ 1.24 กิโลวัตต์ตามลำดับ คุณภาพสีของแผ่นฟักทองที่ผ่านการอบแห้งระบบผสมดีกว่าการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ และการอบแห้งด้วยลมร้อนตามลำดับ สอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Maskan [11] ซึ่งศึกษาความเป็นไปในการอบแห้งแผ่นกล้วยด้วยเทคนิคการอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอน โดยใช้ลมร้อน (อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.45 เมตรต่อวินาที) อบแห้งในช่วงที่ 1 เพื่อลดความชื้นในแผ่นกล้วยให้เหลือ 1.32 กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมวัสดุแห้ง (kg water/kg dry solids) จากนั้นนำมาอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ (350 วัตต์) จนแผ่นกล้วยมีความชื้นเหลือ 0.4 กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมวัสดุแห้ง พบว่าการอบแห้งระบบผสมผสานนี้ สามารถลดเวลาในการอบแห้งได้ร้อยละ 64.3 ของการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวและผลิตภัณฑ์แห้งมีคุณภาพสีที่ดีกว่าการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟเพียงอย่างเดียวจึงอาจกล่าวได้ว่าการอบแห้งแบบพลังงานผสมเป็นที่ยอมรับและถูกนำไปพัฒนาใช้ในระดับอุตสาหกรรม Silva *et al*. [12] นำการอบแห้งแบบพลังงานผสมด้วยคลื่นไมโครเวฟมาใช้ในการอบแห้งมะคาเดเมียนัท (Macadamia Nuts) โดยใช้เวลาในการอบแห้งเพียง 4.5-5.5 ชั่วโมง ในขณะที่การอบแห้งด้วยลมร้อนใช้เวลาถึง 144 ชั่วโมง โดยผลิตภัณฑ์แห้งมีคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสใกล้เคียงกัน (ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ) แต่มะคาเดเมียนัทที่อบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟแบบพลังงานผสมมีปริมาณกรดไขมันอิสระมากกว่า นอกจากนี้ยังพบรายงานวิจัยที่เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับเทคนิคการอบแห้งแบบอื่นๆ เช่น การนำคลื่นไมโครเวฟมาประยุกต์ร่วมกับการอบแห้งด้วยฟลูอิไดซ์เบดหรือสเปาเต็ดเบด ซึ่งมีความเหมาะสมกับผลผลิตเกษตรเชิงอนุภาค Feng *et al*. [13] ประยุกต์ใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับการ

การอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดซ์เบดทำให้สามารถลดเวลาในการอบแห้งได้มากกว่าร้อยละ 50 เมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยฟลูอิไดซ์เบดเพียงอย่างเดียว และยังรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้งได้ดีกว่า เช่นเดียวกับผลการวิจัยของ Assawarachan *et al*. [14] ซึ่งศึกษาระบบการอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลู-อิไดซ์เบดสั่นสะเทือน (Vibro-fluidized bed) ร่วมกับคลื่นไมโครเวฟเพื่ออบวัสดุทางการเกษตรที่มีขนาดเล็กและมีคุณสมบัติในการดูดกลืนคลื่นต่ำ (Low Lossy Material) โดยออกแบบแอพพลิเคเตอร์ (Applicator) ให้เป็นลักษณะเรโซเนนซ์โหมดเดียว (Single Resonant Mode) พบว่าสามารถลดเวลาในการอบแห้งได้มากถึง 6.9 เท่า

จากรายงานวิจัยที่กล่าวมา แสดงให้เห็นว่าการอบแห้งระบบผสมระหว่างไมโครเวฟและการอบแห้งด้วยลมร้อนเทคนิคต่างๆ เป็นแนวทางในการเพิ่มสมรรถนะของกระบวนการอบแห้งให้สูงขึ้น ซึ่งจะช่วยประหยัดเวลาในการอบแห้งและสามารถรักษาคุณภาพผลิตภัณฑ์อบแห้งได้ดี นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเพื่อพัฒนาประยุกต์คลื่นไมโครเวฟใช้ในการอบแห้งระบบสุญญากาศ (Vacuum Drying) และการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze Drying) สำหรับผลผลิตเกษตรที่ต้องการรักษาสารอาหารและคุณภาพผลิตภัณฑ์อบแห้งให้เทียบเท่าผลผลิตสด

5. ระบบการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟภายใต้สุญญากาศ

การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟภายใต้สภาวะสุญญากาศ (Microwave Vacuum Drying) นับเป็นการพัฒนานวัตกรรมการอบแห้งที่มีความสมบูรณ์แบบมากที่สุดเนื่องจากมีข้อได้เปรียบทั้งในด้านวิศวกรรมและความสามารถรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์แห้งซึ่งเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับผลผลิตทางการเกษตร เช่น พืชสมุนไพรที่นำไปสกัดเป็นตัวยา และการพัฒนาอาหารขบเคี้ยวเพื่อสุขภาพ โดยหลักการของการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟภายใต้สภาวะสุญญากาศจะเริ่มขึ้นเมื่อลดค่าความดันในระบบลง (หรือเข้าสู่ระบบสุญญากาศ) ปริมาณน้ำในผลผลิตทางการเกษตรจะเปลี่ยนเฟสจากของเหลวเป็นไอได้ที่อุณหภูมิต่ำลงซึ่งเมื่อรวมกับการการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่มีอัตราการอบแห้งที่สูงก็จะช่วงให้ผลผลิตทางการเกษตรเกิดอัตราถ่ายเทมวลสู่ระบบได้รวดเร็วที่อุณหภูมิต่ำส่งผลให้ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพเทียบเคียงกับผลผลิตสด วิธีนี้ช่วยพัฒนาทั้งในด้านการผลิตและคุณภาพของอาหารได้อย่างดี เช่น การรักษาสีและสารประกอบที่ให้กลิ่นและรสที่สำคัญในอาหาร นักวิจัยหลายท่านได้ศึกษาคุณภาพที่เปลี่ยนแปลงไปของผลผลิตทางการเกษตรด้วยการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟภายใต้สภาวะสุญญากาศซึ่งผลการศึกษาพบว่าการอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศจะให้อัตราการอบแห้งที่รวดเร็วอีกทั้งคุณภาพของผลผลิตทางการเกษตรที่ศึกษามีคุณภาพที่ดีเยี่ยม โดยสามารถรักษาความสดของสีและปริมาณสารประกอบที่ให้กลิ่นไม่ได้

Figiel [15] ศึกษาการอบแห้งตัวอย่างแผ่นกระเทียมด้วยคลื่นไมโครเวฟ (720 วัตต์) ภายใต้ระบบสุญญากาศ (4-6 กิโลปาสคาล) โดยตัวอย่างแผ่นกระเทียมมีอุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียส สามารถช่วยลดเวลาในการอบแห้งมากกว่าถึง 10 เท่า และมีอัตราสลายของน้ำมันหอมระเหย (Volatile Oil Content) เพียงร้อยละ 8.67 ในขณะการอบแห้งระบบผสมลมร้อน (70 องศาเซลเซียส) และคลื่นไมโครเวฟ (720 วัตต์) มีอัตราการสลายตัวมากถึงร้อยละ 67.6 เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณน้ำมันหอมระเหยในแผ่นกระเทียมสด เช่นเดียวกับผลการศึกษาคุณลักษณะของแผ่นทุเรียน ที่อบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟภายใต้ระบบสุญญากาศ (13.33 กิโลปาสคาล)

Bai-Ngew *et al*. [16] ใช้การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟระบบสุญญากาศมาช่วยใช้ในการพัฒนาคุณภาพของทุเรียนอบกรอบ ซึ่งมีคุณภาพสี กลิ่น รส และ ปริมาณไขมันที่เป็นประโยชน์ต่อร่างกายมนุษย์ได้ดีกว่าทุเรียนทอดกรอบทั่วไปตลอดมีค่าความแข็งที่เหมาะสมกว่า นอกจากนี้การ

อบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟภายใต้สภาวะสุญญากาศถูกนำไปใช้ร่วมกับวิธีการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง เพื่อใช้ลดพลังงานของการอบแห้งโดยสามารถลดพลังงานที่ใช้ในการระเหิดตัวอย่างอาหารได้มากถึงร้อยละ 39-54 มีคุณภาพสีที่ใกล้เคียงกับแผ่นทุเรียนสดและมีความมาแข็งน้อยกว่า [17]

ปัจจุบันการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟระบบสุญญากาศได้รับความนิยมอย่างสูงในการประยุกต์ใช้เพื่อผลิตอาหารขบเคี้ยวเพื่อสุขภาพด้วยวิธีการนำผลผลิตทางการเกษตรจำพวกผลไม้มาแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18 ถึง -20 องศาเซลเซียส จากนั้นนำมาอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟระบบสุญญากาศซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวเพื่อสุขภาพที่มี กลิ่น สี รสชาติ และคุณค่าทางโภชนาการที่เทียบเคียงผลไม้สด

6. สรุป

จากบทความข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้คลื่นไมโครเวฟในการอบแห้งเป็นการพัฒนาประสิทธิภาพการอบแห้งอีกรูปแบบหนึ่ง ซึ่งช่วยลดเวลาในการอบแห้งและส่งผลในการพัฒนาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ดีกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างไรก็ตามการใช้คลื่นไมโครเวฟเป็นแหล่งพลังงานในการอบแห้งก็ยังมีข้อจำกัดในเรื่องความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เนื่องจากอุปกรณ์กำเนิดคลื่นไมโครเวฟมีราคาแพงและมีอายุการใช้งานที่จำกัดจึงเกิดการพัฒนาระบบพลังงานผสมด้วยการนำคลื่นไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้ร่วมกระบวนการอบแห้งแบบต่างๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งให้ดีขึ้น ตัวอย่างเช่น การอบแห้งระบบพลังงานผสมระหว่างคลื่นไมโครเวฟและลมร้อนแบบ 2 ขั้นตอน โดยการใช้ลมร้อนในการอบแห้งที่คาบเวลาอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant Rate Period) และใช้คลื่นไมโครเวฟอบแห้งในคาบเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลง (Falling Rate Period) กลไกการอบแห้งของระบบพลังงานผสมแบบ 2 ขั้นตอนนี้เป็นที่ยอมรับในด้านประสิทธิภาพและการรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ตลอดจนมีความเป็นไปได้ในด้านความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ นอกจากนี้ยังมีการการนำคลื่นไมโครเวฟไปใช้ร่วมกับการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดเพื่อลดเวลาในการอบแห้ง เป็นการประหยัดพลังงาน และการใช้ร่วมกับการอบแห้งในสภาวะสุญญากาศสำหรับผลผลิตเกษตรที่มีมูลค่าสูง เช่น อาหารขบเคี้ยว พืชสมุนไพรเพื่อสกัดสารสกัดที่สำคัญในอุตสาหกรรมยาและเครื่องสำอาง เป็นต้น ดังนั้นการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟสำหรับผลผลิตเกษตรจึงมีความเหมาะสมและความเป็นไปได้สูงในการพัฒนาไปสู่ระดับอุตสาหกรรมต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ ดร.อรรถพล นุ่มหอม รองศาสตราจารย์ ดร. สุวิทย์ เตีย และรองศาสตราจารย์ ดร.ทิพาพร อยู่วิทยา ที่ให้การอบรมสั่งสอนและขัดเกลาความคิดสร้างสรรค์ในการทำงานวิจัยและการเขียนบทความวิชาการต่างๆ ตลอดจนการปลูกฝังจรรยาบรรณของการเป็นผู้ให้ความรู้

เอกสารอ้างอิง

[1] อรรถพล นุ่มหอม และ ฤทธิชัย อัศวราชันย์.2551. กระบวนการอบแห้งในอุตสาหกรรมอาหาร. Food Focus Thailand Magazine.ปีที่ 3 ฉบับที่ 25 หน้า 21- 25.

[2] อรรถพล นุ่มหอม และ ฤทธิชัย อัศวราชันย์.2550. คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า พลังงานความร้อนรูปแบบใหม่. Food Focus Thailand Magazine.ปีที่ 2 ฉบับที่ 16 หน้า 28- 33.

[3] Assawarachan, R and Noomhorm, A. 2008. Application electromagnetic radiation technologies in food processing: Paper presented at The 2nd R&DID* International Conference – 2008; University of the Thai Chamber of Commerce, Bangkok, Thailand; Theme: Global Competitiveness Through, Research and Development, Innovation, Design

[4] PÜSCHNER Microwave Power System. Available: http://www.pueschner.com/basics/phys_basics_ko.php (May 21, 2011)

[5] Idris A., Khalid, K and Omar, W. 2004.Drying of silica sludge using microwave heating.*Applied Thermal Engineering* 24:905-918.

[6] ผดุงศักดิ์ รัตน์เดโช.2551. พื้นฐานการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรุงเทพมหานคร.

[7] Wang, Y., Li. Y., Wang. S., Zhang. L., Gao, M and Tang, J., 2011. Review of dielectric drying of foods and agricultural products. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 4(1): 1-19.

[8] Arslan, D and Özcan, M.M. 2010. Study the effect of sun, oven and microwave drying on quality of onion slices. *LWT* 43: 1121-1127.

[9] Maskan, M. 2001. Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering* 48: 169-175.

[10] Alibas, I. 2007. Microwave, air and combined microwave-air-drying parameters of pumpkin slices. *LWT* 40:1445-1451.

[11] Maskan, M., 2000. Microwave/air and microwave finish drying of banana. *Journal of Food Engineering* 44, 71-78.

[12] Silvas, F.A., Marsaioli Jr. A., Maximo, G.J., Silva, M.A.A.P and Gonçalves L.A.G. 2006. Microwave assisted of macadamia nuts. *Journal of Food Engineering* 77: 550-558.

[13] Feng, H. Tang, J., Cavalieri, R. P. and Plumb, O. A. 2001. Heat and mass transport in microwave drying of porous materials in spouted bed. *A.I.Ch.E. Journal* 47(7): 1499-1512.

[14] Assawarachan, R. Sripinyowanich, J., Theppadungporn, K. and Noomhorm, A. 2011.Drying paddy by microwave vibro-fluidized drying using single mode applicator. *International Journal of Food, Agriculture & Environment* 9(2): 50-54.

[15] Figiel, A. 2009. Drying kinetics and quality of vacuum-microwave dehydrated garlic cloves and slices. *Journal of Food Engineering* 94: 98-104.

[16] Bai-Ngew, S., Therdthai, N. and Dhamvithee, P. 2011.Characterization of microwave vacuum-dried durian chips. *Journal of Food Engineering* 104: 114-122.

[17] Huang, L.L., Zhang, M., Mujumdar, A.S., Sun, D.F., Tan, G. W and Tang, S. 2009. Studies on decreasing Energy consumption for a Freeze-Drying process of Apple slices.*Drying Technology* 27(9): 938-946.

ประวัติผู้เขียนบทความ

อาจารย์ ดร. ฤทธิชัย อัศวราชันย์ ตำแหน่ง ประธานหลักสูตรสาขาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรม และอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ อ.สันทราย จ.เชียงใหม่ 50290 โทรศัพท์ : 0-5387-8123 โทรสาร : 0-5349-8908 อีเมล์ : rittichai@mju.ac.th

งานวิจัยที่สนใจ การออกแบบระบบให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในกระบวนการแปรรูปอาหาร อาทิเช่น Microwave Vacuum Processing, Microwave Vibro-Fluidized Drying, Ohmic Heating และเทคโนโลยีการอบแห้งในการแปรรูปอาหาร อาทิเช่น Flash Dryer, Hybrid Solar Dryer