

การอบแห้งพริกชี้ฟ้าด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ  
Hot Air-Microwave Combination Drying of Chili

เทวารัตน์ ทิพยวิมล<sup>1/</sup>

Tawarat Tipyavimol<sup>1/</sup>

สมยศ เชิญอักษร<sup>2/</sup>

Somyot Chirnakorn<sup>2/</sup>

---

**ABSTRACT**

This research was investigated the way to apply microwave power for hot air drying system. The household microwave oven was modified to be a hot air-microwave combination dryer. The dryer was tested to evaluate the drying performance by using chili. Chili samples were dried by hot air namely, hot air-microwave continuous drying, hot air-microwave preheating drying, hot air-microwave finish drying, and hot air-microwave pulse drying in the experimental dryer. Drying rate and energy consumption in term of specific moisture evaporation rate (SMER) were compared. All of hot air-microwave combination methods resulted in increased SMER and shortening of the drying time when compared with hot air drying at the same drying air temperature. The hot air-microwave pulse drying was the suitable method to apply microwave energy in conventional hot air drying of chili because it had the shortest drying time and highest of SMER and product was not damaged by microwave heating.

**Key words** : hot air, microwave, drying

**บทคัดย่อ**

ไมโครเวฟอบแห้งพริกชี้ฟ้า โดยการดัดแปลงตู้อบไมโครเวฟที่ใช้ในบ้านเรือน ให้เป็นตู้อบแห้งลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ ทำการอบแห้งพริกชี้ฟ้าซึ่งใช้เป็นวัสดุทดสอบด้วยลมร้อน ลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบต่อเนื่อง (continuous) ลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบให้ความร้อนในช่วงต้น (preheating drying)

---

<sup>1/</sup> นิสิตบัณฑิตศึกษา <sup>2/</sup> รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม 73140

<sup>1/</sup> Graduate student <sup>2/</sup> Associate Professor, Department of Agriculture Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University, Kamphaengsaen district, Nakhon Pathom province 73140.

ลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบให้ความร้อนช่วงท้าย (finish drying) และลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบเป็นช่วง (pulse drying) ประเมินประสิทธิภาพการอบแห้งจากค่าอัตราการอบแห้งและค่าอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (SMER) พบว่าการนำเอาไมโครเวฟมาร่วมกับลมร้อนช่วยลดเวลาในการอบแห้งและเพิ่มค่า SMER เมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิการอบแห้งเดียวกัน และยังพบว่า การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบเป็นช่วง มีความเหมาะสมในการอบแห้งมากที่สุด ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด และให้ค่า SMER สูงสุด โดยที่ไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อผลิตภัณฑ์

**คำหลัก:** ลมร้อน ไมโครเวฟ การอบแห้ง

### คำนำ

การอบแห้งเป็นกระบวนการหลังการเก็บเกี่ยวที่มีความสำคัญต่อผลิตผลทางการเกษตร การอบแห้งโดยทั่วไปจะเป็นลักษณะการให้ความร้อนโดยใช้กระแสลมร้อนเคลื่อนที่สัมผัสกับวัสดุที่จะทำการอบแห้งเพื่อให้ความชื้นระเหยออกจากวัสดุ ซึ่งการอบแห้งในลักษณะดังกล่าวนี้ ใช้พลังงานสูงในการให้ความร้อนกับอากาศ มีผลให้ประสิทธิภาพในการใช้พลังงานต่ำ ใช้เวลาในการอบแห้งนาน ถึงแม้จะทำ การอบแห้งที่อุณหภูมิสูง ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังการอบแห้งมีคุณภาพต่ำ เนื่องจากการสัมผัสกับลมร้อนเป็นเวลานาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุเกษตรที่มีความไวต่อความเสียหายเนื่องจากความร้อน

แนวทางหนึ่งในการแก้ปัญหาี้คือ การนำเอาไมโครเวฟเข้ามาช่วยในการอบแห้ง

ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่อยู่ในช่วง 300 MHz-300 GHz มีลักษณะเหมือนลำแสงเดินทางเป็นเส้นตรง เมื่อกระทบกับโลหะจะสะท้อนกลับ แต่สามารถทะลุผ่านแก้ว กระดาษและพลาสติกได้ ถูกดูดซับได้ดีในสารประกอบที่เป็นไดอิเล็กทริก (dielectric) เมื่อคลื่นไมโครเวฟสะท้อนกลับไม่ก่อให้เกิดความร้อนกับวัตถุนั้น แต่ถ้าสารใดสามารถดูดซับคลื่นไมโครเวฟได้ ก่อให้เกิดความร้อนภายในวัตถุนั้น (Schiffmann,1995) โดยกลไกที่ก่อให้เกิดความร้อนในวัตถุคือ ionic polarization และ dipole rotation อันเป็นผลเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของไอออน และการหมุนสลับขั้วของสารประกอบมีขั้วตามระดับความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ การเสียดสีที่เกิดจากความเร็วในการหมุนตัวของโมเลกุล และการเคลื่อนที่ของไอออนก่อให้เกิดความร้อนขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะการเกิดความร้อนที่สำคัญภายในเนื้อวัตถุ ที่ดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟไว้ โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน ซึ่งในวัสดุเกษตรนั้น ความชื้นหรือน้ำเป็นโมเลกุลที่มีขั้ว จึงมีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานไมโครเวฟได้

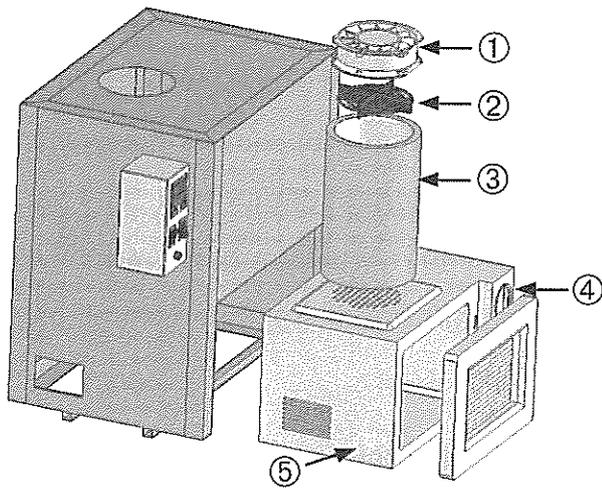
การอบแห้งด้วยลมร้อนเมื่อความชื้นลดลงจนถึงค่าความชื้นวิกฤต อัตราการอบแห้งจะลดลง อัตราการเคลื่อนที่ของความชื้นมาสู่ผิววัสดุจะช้าลง บริเวณผิวของวัสดุจะแห้งและเกิดการหดตัว ซึ่งส่งผลให้การเคลื่อนที่ของความชื้นเป็นไปได้อย่างขึ้น ทำให้ต้องใช้เวลาในการอบแห้งที่

ยาวนาน เพื่อแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น จึงมีการนำเอาไมโครเวฟมาช่วยในการอบแห้ง เนื่องจากไมโครเวฟเกิดความร้อนภายในเนื้อวัสดุได้ไม่เฉพาะแค่บริเวณผิวหน้าเท่านั้น Schiffmann (1995) ได้แนะนำการนำเอาไมโครเวฟมาใช้ร่วมกับการอบแห้งด้วยลมร้อนไว้ 3 แบบ คือ preheating drying เป็นการให้พลังงานไมโครเวฟก่อนที่วัสดุจะเคลื่อนที่เข้าสู่ห้องอบแห้ง booster drying เป็นการให้พลังงานไมโครเวฟแก่วัสดุ เมื่อทำการอบแห้งจนมาถึงช่วงของการอบแห้งลดลง (falling rate period) และ finish drying เป็นการให้พลังงานไมโครเวฟหลังจากทำการอบแห้งด้วยลมร้อน เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงการอบแห้งด้วยลมร้อนที่นานเกินไป ซึ่งการเสริมด้วยไมโครเวฟในการอบแห้งด้วยลมร้อนทั้งสามแบบ สามารถช่วยลดเวลาที่ใช้ในการอบแห้งและทำให้วัสดุหลังการอบแห้งมีความชื้นที่สม่ำเสมอ คุณภาพดีกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว จึงทำให้นักวิจัยสนใจศึกษาการนำเอาไมโครเวฟมาใช้กับการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรหลายชนิด ทั้งในรูปแบบการอบแห้งแบบเสริมพลังงานไมโครเวฟแบบต่อเนื่องตลอดช่วงการอบแห้ง (Tulasidas *et al.*, 1995 และ Shama and Prasad, 2001) และแบบ finish drying (Maskan, 2000; Maskan, 2001) ซึ่งผลจากการศึกษาพบว่า การเสริมพลังงานไมโครเวฟทั้งสองแบบ สามารถช่วยเพิ่มอัตราการอบแห้งทำให้ลดระยะเวลาในการอบแห้งลงได้

เนื่องจากยังไม่มีการศึกษาเปรียบเทียบรูปแบบการให้พลังงานไมโครเวฟ ร่วมกับลมร้อนในงานวิจัยใด ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาเพื่อหารูปแบบการเสริมพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมโดยประเมินจากค่าอัตราการอบแห้งและค่า SMER โดยใช้พริกชี้ฟ้าเป็นวัสดุในการทดลอง

### อุปกรณ์และวิธีการ

เครื่องอบแห้งลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟดัดแปลงจากตู้อบไมโครเวฟขนาด 700 W 2450 MHz (DAEWOO KOR-63D7) ปรับระดับการใช้พลังงานได้ 7 ระดับ โดยทำการต่อท่อลมร้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มม. ยาว 350 มม. ซึ่งติดตั้งขดลวดไฟฟ้าขนาด 1.5 กิโลวัตต์ไว้ภายในด้านบนติดตั้งลมแบบ axial flow ขนาด 40 W ปลายท่ออีกด้านติดตั้งอยู่ด้านบนของตู้ไมโครเวฟซึ่งเจาะเป็นตะแกรงขนาดรูตะแกรงมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มม. บริเวณด้านข้างเจาะเป็นรูตะแกรงสำหรับเป็นช่องลมออก ทำการหุ้มแผ่นเหล็กเพื่อป้องกันคลื่นร้าวออกด้านนอก วัดความเร็วอากาศอบแห้งโดย hot wire anemometer (Dwyer model 471) ควบคุมอุณหภูมิด้วยชุดควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิตอล (Shinko model JCS-33A-R/M) วัดอุณหภูมิของพริกด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด (Shinko model IRT-100-TA) วัดอุณหภูมิของอากาศโดยใช้สายเทอร์โมคัพเบิล Type K ต่อเข้ากับเครื่องวัดอุณหภูมิ Fluke (Figure 1)



**Figure 1.** Schematic diagram of hot air-microwave dryer : (1) fan, (2) heating element, (3) air duct, (4) microwave power control, (5) chamber, (6) hot air temperature control

## 1. การทดสอบหาค่าพลังงานไมโครเวฟ

เบื้องต้นทำการทดสอบเพื่อหาค่าพลังงานไมโครเวฟที่ระดับพลังงานต่างๆ ด้วยวิธี calorimetric method (Khraisheh *et al.*, 1997) โดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวดูดกลืนพลังงานไมโครเวฟซึ่งค่าพลังงานนี้สามารถคำนวณได้จากสมการ (1)

$$MW_{abs} = \frac{mC_p\Delta T}{\Delta t} \quad (1)$$

เมื่อ  $MW_{abs}$  = Power absorbed by water (W),

$m$  = mass of water (kg),

$C_p$  = specific heat of material  
(kJ kg<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>),

$\Delta T$  = temperature rise in the water  
load (°C),

$\Delta t$  = time (s)

## 2. การทดสอบหาแนวทางการอบแห้ง

### 2.1 การอบแห้งด้วยลมร้อน

ใช้พริกชี้ฟ้าแดงสดจำนวน 300 ก. จัดเรียงแบบชั้นบางบนตะแกรงพลาสติก ใช้อุณหภูมิลมร้อนในการอบแห้ง 50 60 และ 70 °ซ ความเร็วลมร้อนเฉลี่ย 1 ม./วินาที ในระหว่างอบแห้ง วัดอุณหภูมิและชั่งน้ำหนักของพริกทุก 2 ชม. ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอลความละเอียด 0.01 ก. จนกระทั่งน้ำหนักไม่เปลี่ยนแปลงสำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อน

### 2.2 การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ

ใช้พริกชี้ฟ้าแดงสดจำนวน 300 ก. จัดเรียงแบบชั้นบางบนตะแกรงพลาสติก อบแห้งโดยใช้พลังงานไมโครเวฟที่ระดับต่างๆ ทั้ง 7 ระดับในการอบแห้ง ชั่งน้ำหนักและวัดอุณหภูมิของพริกทุก 5 นาที

### 2.3 การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ

การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ จะทำการเสริมพลังงานไมโครเวฟระดับ 1 เข้าไปในการอบแห้งด้วยลมร้อนที่สภาวะเดียวกันกับข้อ 2.1 ในลักษณะต่างๆ กันดังนี้

2.3.1 การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบต่อเนื่อง จะเสริมพลังงานไมโครเวฟพร้อมกับการอบแห้งด้วยลมร้อนแบบต่อเนื่อง

2.3.2 การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบ preheating drying จะให้พลังงานไมโครเวฟเป็นเวลา 120 นาทีก่อนการอบแห้งด้วยลมร้อน

2.3.3 การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบ finish drying จะเสริมพลังงานไมโครเวฟในช่วงท้ายของการอบแห้ง โดยอ้างอิงค่าจากการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว ซึ่งในช่วงที่ให้พลังงานไมโครเวฟจะทำการปิด heater แต่ยังคงเปิดพัดลมไว้

2.3.4 การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบ pulse drying ให้พลังงานไมโครเวฟเป็นเวลา 15 นาทีทุกช่วงเวลา 120 นาที โดยในช่วงเวลาที่ให้พลังงานไมโครเวฟจะทำการปิดสวิตช์ heater แต่ยังคงเปิดพัดลมไว้

การประเมินประสิทธิภาพการอบแห้งด้วยวิธีต่างๆ ดังกล่าวข้างต้นจากเส้นคุณลักษณะการอบแห้ง (drying curve) อัตราการอบแห้งเฉลี่ย (DR) ตลอดช่วงการอบแห้งและค่าอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (Specific moisture evaporation rate, SMER) ซึ่งแสดงความสามารถในการระเหยน้ำออกจากวัสดุต่อหนึ่งหน่วยพลังงาน ที่ให้ (Kudra and Mujumdar, 2002) โดยค่า DR และค่า SMER หาได้จากสมการ (2) และ (3)

$$DR = \frac{W_i - W_f}{t} \quad (2)$$

$$SMER = \frac{W_i - W_f}{Pe} \quad (3)$$

เมื่อ  $W$  คือมวลของวัสดุ (g),

$t$  คือเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (h),

$Pe$  คือ ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง (kWh)

ตัวห้อย  $i$  และ  $f$  แทนก่อนและหลังการอบแห้ง

## ผลการทดลองและวิจารณ์

### 1. ผลการทดสอบหาค่าพลังงานไมโครเวฟ

ค่า output power ของพลังงานไมโครเวฟแต่ละระดับแสดงใน ผลจากการทดลองพบว่า ค่าพลังงานไมโครเวฟเพิ่มขึ้นตามระดับพลังงานที่กำหนดไว้บน control panel (Table 1)

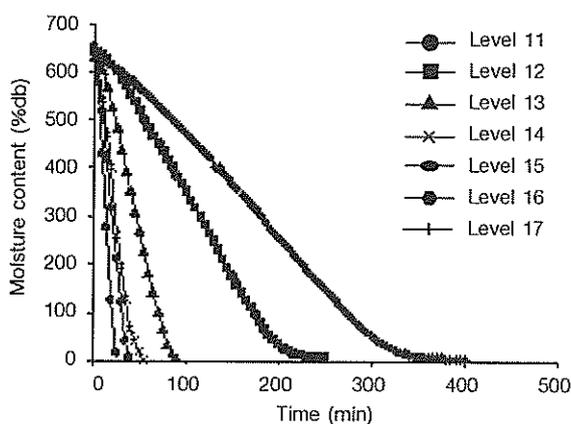
**Table 1.** Output power of microwave at different levels

Level	Output power (W)
1	106.93
2	154.45
3	249.49
4	350.48
5	445.52
6	540.57
7	594.03

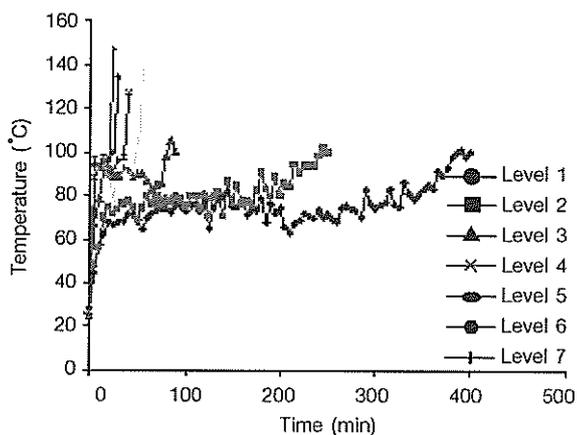
### 2. ผลการทดสอบหาแนวทางการอบแห้ง

ผลการอบแห้งพริกด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ระดับต่างๆ ทั้ง 7 ระดับ พบว่าระยะเวลาในการอบแห้งลดลงอย่างมากเมื่อทำการอบแห้งด้วยระดับพลังงานที่สูงกว่า (Figure 2) ทั้งนี้เนื่องจากเกิดความร้อนภายในอย่างรวดเร็ว ทำให้ภายในเนื้อวัสดุมีความดันไอบ้าง ส่งผลให้ในระหว่างการอบแห้งพริกเกิดการแตกระเบิด ทำให้มีเมล็ดพริกกระจายอยู่ภายในห้องอบ เมื่อทำการอบแห้งต่อไปพริกที่ได้หลังการอบแห้งเกิดรอยไหม้จนถึงติดไฟได้ จะเห็นว่าอุณหภูมิที่ผิวของพริกในช่วงท้ายของการอบแห้งจะมีค่าสูงมาก

โดยที่ระดับพลังงานสูงอุณหภูมิที่ผิวของพริกจะถึง 100 °ซ ก่อนที่ระดับต่ำกว่า (Figure 3) ซึ่งผลจากการทดสอบนี้ ทำให้ทราบว่าระดับพลังงานไมโครเวฟที่สูงเกินกว่าระดับ 1 ทำให้พริกเสียหายอย่างมากและก่อให้เกิดการติดไฟขึ้นภายในห้องอบได้ ดังนั้นในการทดสอบการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ จึงใช้พลังงานไมโครเวฟระดับ 1 เท่านั้น



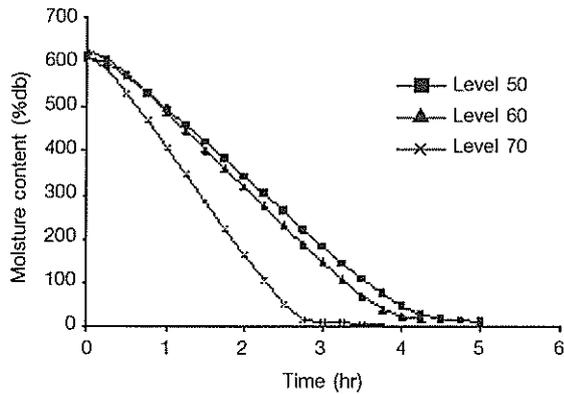
**Figure 2.** Drying curve of chili dried by different microwave power levels



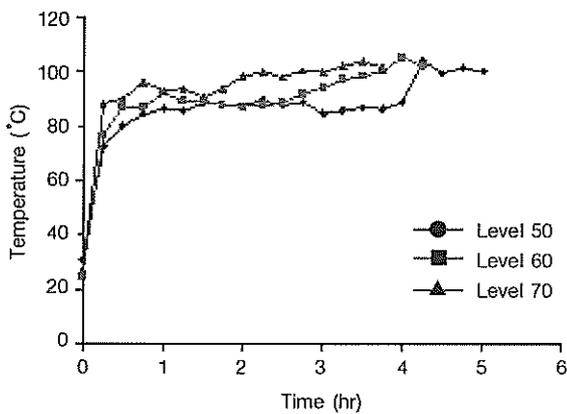
**Figure 3.** Surface temperature of chili dried by different microwave power levels

สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบต่อเนื่อง ซึ่งพบว่า การอบแห้งเกิดขึ้นได้เร็วกว่าการอบแห้งด้วยไมโครเวฟเพียงอย่างเดียว (ที่ระดับ 1) (Figure 4) ทั้งนี้เนื่องจากการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ ความชื้นจะถูกขับออกมาสู่บริเวณผิวหนังด้านนอกเมื่อมีลมร้อนไหลผ่าน ความชื้นที่บริเวณผิวหนังวัสดุจะระเหยออกไป จึงทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น และใช้เวลาในการอบแห้งลดลง แต่อย่างไรก็ตาม การให้พลังงานไมโครเวฟอย่างต่อเนื่องย่อมก่อให้เกิดความร้อนสะสมภายในเนื้อวัสดุ จะเห็นว่าอุณหภูมิที่ผิวด้านนอกของพริกค่อนข้างสูง (Figure 5) จึงเป็นสาเหตุทำให้ผลิตภัณฑ์เสียหาย ก่อนที่ความชื้นของพริกจะลดลงได้ตามที่ต้องการ คือน้อยกว่า 14% db และในระหว่างการอบแห้งผิวหนังของเม็ดพริกจะมีการแยกชั้นออกจากกัน มีการแตกของพริกเนื่องจากความดันไภายในสูงขึ้น และเกิดรอยไหม้เช่นเดียวกับการอบแห้งด้วยไมโครเวฟเพียงอย่างเดียวที่ระดับพลังงาน 1 โดยที่อุณหภูมิลมร้อนสูงกว่า (70 °ซ) ความเสียหายของพริกเนื่องจากความร้อนจะเกิดขึ้นเร็ว และมากกว่าที่อุณหภูมิลมร้อนต่ำ (50 °ซ)

ดังนั้นการอบแห้งด้วยไมโครเวฟเพียงอย่างเดียว และการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบต่อเนื่อง ด้วยเครื่องที่ทำการทดสอบไม่เหมาะสมต่อการอบแห้งพริก เนื่องจากส่งผลเสียหายต่อผลิตภัณฑ์ (Figure 6)

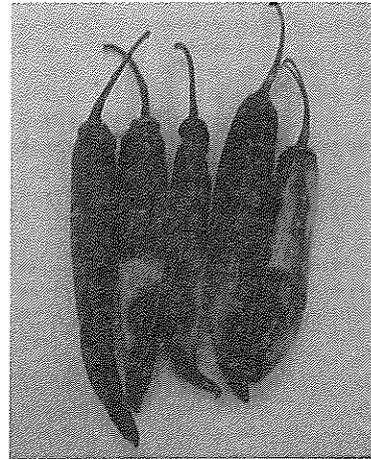


**Figure 4.** Drying curve of chili dried by hot air-microwave continuous drying



**Figure 5.** Surface temperature of chili by hot air-microwave continuous drying

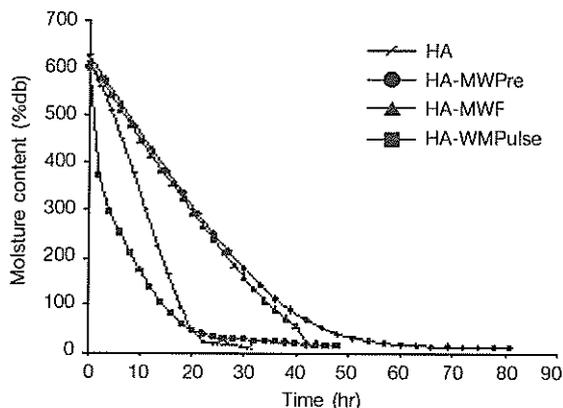
พฤติกรรมของการอบแห้งด้วยลมร้อน ลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบ preheating drying ลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบ finish drying และลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบ pulse drying ที่ระดับอุณหภูมิลมร้อน 50, 60 และ 70 °ซ. ซึ่ง จะเห็นว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนจะใช้ระยะเวลา ในการอบแห้งนานกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน ร่วมกับไมโครเวฟทุกๆแบบโดยเฉพาะในช่วงท้าย



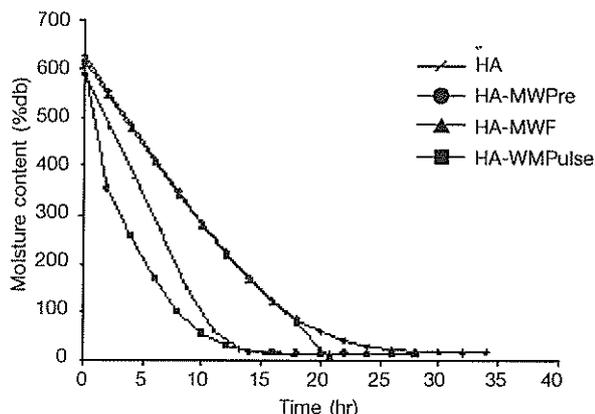
**Figure 6.** Chilies were damaged from microwave power

ของการอบแห้ง (Figure 7) เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ ทั้งสามแบบที่อุณหภูมิลมร้อนเดียวกันให้ผลดังนี้

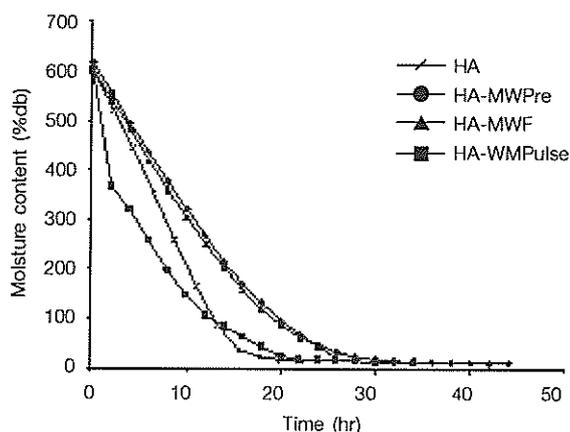
1. เมื่อเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยลมร้อน(HA) กับการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบ preheating drying (HA-MWPre) การเสริมไมโครเวฟในช่วงต้นของการอบแห้ง ช่วยทำให้ drying curve ชยับลดต่ำกว่าเส้นการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว ซึ่งการอบแห้งด้วยวิธีนี้ช่วยลดระยะเวลาการอบแห้งลงได้ถึง 10-40% เมื่อพิจารณาที่ความชื้นสุดท้าย 14%db ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิลมร้อนที่ใช้ร่วมด้วย โดยที่อุณหภูมิต่ำจะลดระยะเวลาการอบแห้งได้สูงกว่าที่อุณหภูมิสูง (ลดได้ 40.74% ที่อุณหภูมิ ลมร้อน 50 °ซ และ 11.76% ที่อุณหภูมิ 70 °ซ) แต่ถึงอย่างไรก็ตาม เมื่อมาถึงช่วงท้ายของการอบแห้งอัตราการลดลงของความชื้นจะลดลง การอบแห้งจึงดำเนินได้อย่างช้าๆในช่วงท้ายของการอบแห้ง เช่นเดียวกับการอบแห้งด้วยลมร้อน



a. Drying air temperature 50 °C



c. Drying air temperature 70 °C



b. Drying air temperature 60 °C

**Figure 7.** Drying kinetics of chili under hot air drying (HA), hot air-microwave preheating drying (HA-MWPre), hot air-microwave finish drying (HA-MWF), hot air-microwave pulse drying (HA-MWPulse)

2. การเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยลมร้อน(HA) กับลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบ finish drying (HA-MWF) พบว่าพฤติกรรมการอบแห้งวิธีนี้เป็นเช่นเดียวกับการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิเดียวกันในช่วงต้นเมื่อทำการให้พลังงานไมโครเวฟในช่วงท้ายพบว่าการลดความชื้นของพริกเกิดขึ้นเร็วกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว ทั้งนี้เนื่องจากในช่วงท้ายของการอบแห้งด้วยลมร้อน อัตราการระเหยความชื้นเกิดขึ้นได้ยาก การเพิ่มพลังงานไมโครเวฟทำให้ลดเวลาในการลดความชื้นพริกให้เหลือ 14%db ได้

ถึง 30-45% ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Maskan (2000) ที่พบว่า การเสริมพลังงานไมโครเวฟในช่วงท้ายของการอบแห้งด้วยลมร้อน สามารถลดเวลาการอบแห้งลงได้ถึง 64.3% หากมีการเสริมไมโครเวฟตั้งแต่ช่วงกลางๆ ของการอบแห้งด้วยลมร้อน อาจทำให้ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งลดลงได้มากขึ้น (Figure 7)

3. การเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยลมร้อน (HA) กับการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบ pulse drying (HA-MWPulse) พบว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบเป็นช่วงทำให้ drying curve มีความชันเพิ่มขึ้นและขยับลดลงและสามารถลดเวลาที่ใช้ในการอบแห้งพริกให้เหลือความชื้นสุดท้าย 14%

db ลงได้ถึง 47-60% ซึ่งถือว่าลดระยะเวลาในการอบแห้งได้สูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟอีกสองวิธีข้างต้น ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากการใช้ประโยชน์จากการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ ต้องคำนึงถึงขนาดของระดับพลังงาน และช่วงเวลาที่ใช้พลังงานไมโครเวฟกับวัสดุ ซึ่งจากรายงานของ Shivhare และคณะ (1992a,b) พบว่าการให้พลังงานไมโครเวฟ อย่างต่อเนื่อง จะมีค่าอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งแบบเป็นช่วงในการอบแห้งข้าวโพด แต่ก็ส่งผลเสียต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังการอบแห้งคือมีการแตกและเกิดการเปลี่ยนแปลงสีของเมล็ด และยังก่อให้เกิดความสิ้นเปลืองพลังงานที่มากกว่าอีกด้วย เพราะมีความร้อนสูญเสียเข้าสู่อากาศอบแห้ง จึงได้แนะนำว่าการอบแห้งโดยให้พลังงานไมโครเวฟแบบเป็นช่วงมีความเหมาะสมกว่า

อุณหภูมิที่ผิวของพริกซึ่งได้จากการอบแห้งวิธีต่างๆ (Figure 8) การอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิของพริกจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้น เข้าสู่อุณหภูมิของอากาศอบแห้ง (Figure 8a) การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบ preheating drying (Figure 8b) มีอุณหภูมิสูงในช่วงแรกซึ่งเป็นช่วงที่วัสดุยังมีความชื้นสูงอยู่ จึงทำให้วัสดุไม่เกิด overheating ขึ้น (Schiffmann, 1995) ส่วนการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบ finish drying นั้น เนื่องจากในช่วงทำวัสดุมีความชื้นลดลง จึงมีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานไมโครเวฟลดลง และการปิด heater แต่ยังคงเปิดพัดลมไว้ การไหล

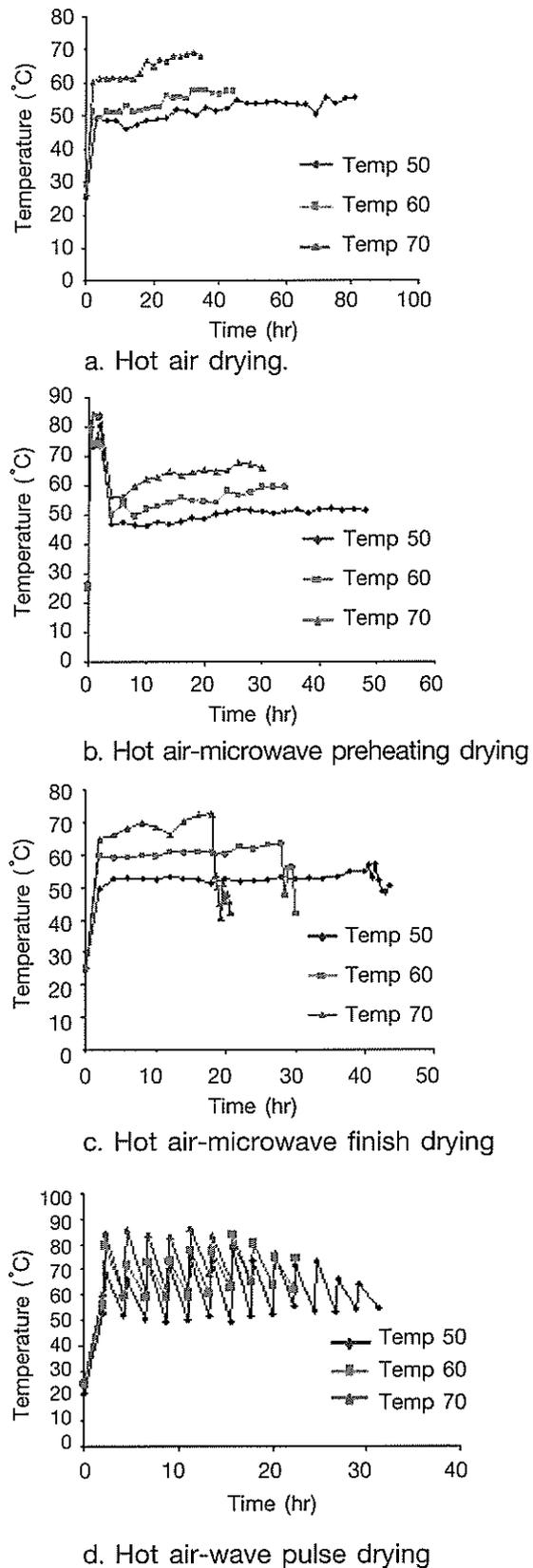


Figure 8. Surface temperature of chili

ผ่านของอากาศอุณหภูมิห้อง จึงช่วยทำให้ความชื้นของพริกไม่สูงจนทำให้เกิดความเสียหาย (Figure 8c) และการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบเป็นช่วงนั้นความร้อนเนื่องจากไมโครเวฟจะทำหน้าที่กระตุ้นให้มีการขับเคลื่อนความชื้นออกมาสู่ผิวด้านนอก และลมร้อนจะเป็นตัวพาความชื้นออกจากวัสดุ ดังนั้นอุณหภูมิของวัสดุจึงขึ้นลงตามช่วงเวลาที่ไม่โครเวฟและลมร้อน (Figure 8d)

การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟช่วยให้ประหยัดเวลาในการอบแห้งลงได้เนื่องจากไมโครเวฟทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในเนื้อวัสดุส่งผลให้เกิดความดันไอขับเคลื่อนน้ำจากภายในออกสู่ผิวของวัสดุซึ่ง Funebo และ Ohlsson (1998) เรียกว่า pumping effect of the micro-waves อัตราการอบแห้งเฉลี่ยตลอดการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟทุกวิธี มีค่าอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงลำพังทุกระดับอุณหภูมิ โดยการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบ เป็นช่วงให้อัตราการอบแห้งสูงสุด (Table 2)

**Table 2.** Drying rate (g/h) of chillies drying

Temp (°C)	HA	HA-MWPre	HA-MWF	HA-MWPulse
50	3.13	5.21	5.75	8.02
60	5.75	7.43	8.28	11.03
70	7.48	8.39	11.95	14.03

เมื่อพิจารณาด้านประสิทธิภาพการใช้พลังงาน จะเห็นว่า การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วม

กับไมโครเวฟทั้ง 3 แบบ คือ แบบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟในช่วงต้น (HA-MWPre) แบบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟในช่วงท้าย (HA-MWF) และแบบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบเป็นช่วง (HA-MWPulse) จะมีค่าอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (SMER) สูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว (Table 3) ซึ่งสอดคล้องกับค่าอัตราการอบแห้งที่ (Table 2) และการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบเป็นช่วงให้ค่า SMER สูงสุด และพบว่าการให้พลังงานไมโครเวฟแบบเป็นช่วงที่อุณหภูมิการอบแห้ง 50 °ซ สามารถเพิ่มอัตราการระเหยน้ำออกจากพริกได้ถึง 1.6 เท่าของการอบแห้งพริกด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 70 °ซ อีกทั้งยังใช้เวลาในการอบแห้งที่สั้นกว่า ดังนั้นการใช้พลังงานไมโครเวฟมาช่วยในการอบแห้ง ช่วยให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการอบแห้งได้

**Table 3.** SMER (g/kWh) of chillies drying

Temp (°C)	HA	HA-MWPre	HA-MWF	HA-MWPulse
50	8.93	14.31	16.08	22.12
60	11.41	15.91	18.37	24.12
70	13.79	15.21	22.68	25.62

SMER = Specific moisture evaporation rate

ผลที่ได้จากการทดสอบยังปรากฏว่า การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบให้ความร้อนในช่วงท้าย และการอบแห้งพริกด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบเป็นช่วง ทำให้ผิวของเม็ดพริกมีความเหนียวลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการอบแห้งด้วยลมร้อนความชื้นที่ผิวด้านนอก

ของพริกจะค่อยๆ ระเหยออกก่อนเมื่อสูญเสียความชื้นที่ผิวมีผลให้เกิดการหดตัวขึ้น และเกิดความต้านทานในการระเหยความชื้นออกจากพริกอีกทั้งลักษณะของพริกมีรูปแบบเป็นหลอดกลวงที่มีแกนกลางเป็นไส้ซึ่งมีความชื้นสูง การหดตัวของพริกจะกักความชื้นที่ไส้พริกเอาไว้ อาจเป็นเหตุให้พริกแห้งเกิดราขึ้นที่ไส้พริกได้ แต่การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ ความร้อนในไส้พริกอันเนื่องมาจากไมโครเวฟ ทำให้เกิดความดันไอน้ำจากภายในเม็ดพริกขับความชื้นออกมาสู่ผิวด้านนอก ทำให้ผิวของพริกที่ได้จากการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟทั้งสามวิธีนี้มีความเหนียวน้อยกว่า (Figure 9)



Figure 9. Chilies after drying

### สรุปผลการทดลอง

การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบให้ไมโครเวฟในช่วงต้น การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบให้ไมโครเวฟในช่วงท้าย การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบเป็นช่วง สามารถช่วยลดระยะเวลาในการอบแห้งพริกซีฟ้ำได้ เมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว โดยไม่ทำให้

พลังงานในการอบแห้งเพิ่มขึ้น แต่ยังสามารถประหยัดพลังงานที่ใช้ในการดำเนินการอบแห้งได้อีกด้วย โดยวิธีการเสริมพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสม คือการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบเป็นช่วง โดยที่พริกหลังการอบแห้งยังคงมีคุณภาพที่ดี คือ ไม่เกิดความเสียหายเนื่องจากความร้อนที่ได้รับจากพลังงานงานไมโครเวฟ

### คำขอบคุณ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน และสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย

### เอกสารอ้างอิง

- Funebo T. and T. Ohlsson. 1998. Microwave-assisted air dehydration of apple and mushroom. *J. of Food engineering*, 38: 353-367.
- Khraisheh M. A. M., T.J.R. Cooper and T.R.A. Magee. 1997. Microwave and air drying I. Fundamental Considerations and assumptions for the simplified thermal calculations of volumetric power absorption. *J. of Food Engineering*, 33 : 207-219.
- Kudra T. and A. S. Mujumdar. 2002. *Advanced Drying Technologies*. Marcel

- Dekker, Newyork. 459p.
- Maskan M. 2000. Microwave/air and microwave finish drying of banana. *Journal of Food Engineering*, 44 : 71-78.
- \_\_\_\_\_. 2001. Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying. *J. of Food Engineering*, 48 : 177-182
- Schiffmann, R. F. 1995. Microwave and Dielectric Drying, Pages 327-356. *In : Handbook of Industrial Drying*, (ed.) A.S. Mujumdar. Maecel Dekker, New York.
- Sharma G.P. and S. Prasad. 2001. Drying of garlic (*Allium sativum*) cloves by microwave-hot air combination. *J. of Food Engineering*, 50 : 99-105.
- Shivhare, U.S., G. S. V. Raghavan and R. G. Bosisio. 1992a. Microwave drying of corn: II. Constant power, continuous operation. *Transactions of the ASAE* 35(3) : 925-957.
- \_\_\_\_\_. 1992b. Microwave drying of corn: III. Constant Power, Intermittent Operation. *Transactions of the ASAE* 35(3):959-962.
- Tulasidas T. N., G. S. V. Raghavan and A. S. Mujumdar. 1995. Microwave drying of grapes in a single mode cavity at 2540 MHz-I: drying kinetics. *Drying Technology* 13(8&9) : 1949-1971.