



## คุณลักษณะการอบแห้งของสาหร่ายเตาด้วยคลื่นไมโครเวฟ

### Microwave Drying Characteristics of *Spirogyra* spp.

ฤทธิชัย อัสวารชานย์<sup>1\*</sup>, ฉัตรชนก คงสิทธิ์<sup>1</sup>, ดวงพร อมรเลิศพิศาล<sup>2</sup>

Rittichai Assavarachan<sup>1\*</sup>, Chatchanok Kongsit<sup>1</sup>, Doungporn Amornlerdpison<sup>2</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิศวกรรมอาหาร, คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร, มหาวิทยาลัยแม่โจ้, สันทราย, เชียงใหม่, 50290

<sup>1</sup>Food Engineering Program, Faculty of Engineering and Agro-Industry; Maejo University, Sansai, Chiang Mai, Thailand, 50290.

<sup>2</sup>คณะเทคโนโลยีการประมงและทรัพยากรน้ำ, มหาวิทยาลัยแม่โจ้, สันทราย, เชียงใหม่, 50290

<sup>2</sup>Food Engineering Program, Faculty of Engineering and Agro-Industry; Maejo University, Sansai, Chiang Mai, Thailand, 50290.

\*Corresponding author: Tel: +66-8-5704-9146, Fax: +66-34-351-896, E-mail: [rittichai@mju.ac.th](mailto:rittichai@mju.ac.th)

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาคุณลักษณะการอบแห้งสาหร่ายเตาในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ ที่ระดับกำลังงานไมโครเวฟที่ 752.04±14.77, 465.15±9.08, 231.18±5.83 และ 164.34±3.81 วัตต์ ตามลำดับ จากความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 15.5142±0.4408 จนเหลือความชื้นที่ 0.1043±0.0907 กรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง โดยใช้เวลาในการอบแห้งเท่ากับ 25, 49, 91 และ 165 นาที ตามลำดับ การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยคลื่นไมโครเวฟซึ่งประกอบด้วยแบบจำลอง Lewis, Page และ Modified Page ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบของสมการกึ่งทฤษฎีของ Page มีความเหมาะสมมากที่สุด เนื่องจากมีค่า R<sup>2</sup> ในช่วง 0.9928-0.9973 ซึ่งมีค่ามากกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งแบบอื่นๆ และมีค่า  $\chi^2$  และ RMSE ระหว่าง 6.03 × 10<sup>-3</sup> ถึง 0.22 × 10<sup>-3</sup> และ 0.0149 ถึง 0.0774 ตามลำดับ และการทวนสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page ด้วยการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับ 605.81± 4.92 วัตต์ พบว่าความกลมกลืนกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีค่า  $\chi^2$  และ RMSE เท่ากับ 8.49 × 10<sup>-3</sup> และ 0.0921 ตามลำดับ

**คำสำคัญ:** สาหร่ายเตา, การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง

#### Abstract

This study was aimed to determine characteristics of *Spirogyra* spp during microwave drying at different microwave power of 752.04±14.77, 465.15±9.08, 231.18±5.83 and 164.34±3.81 watts. The time required to reduce moisture content of *Spirogyra* spp from 15.5142±0.4408 to 0.1043±0.0907 g/g dry matter was 25, 49, 91 and 165 min respectively. Three commonly used thin in layer drying models (Lewis, Page and Modified Page) were evaluated with the experimental date. The results indicated that the Page model was adequate to predict moisture transfer and represented the most satisfactory drying characteristics of *Spirogyra* spp during microwave drying. The values of R<sup>2</sup>,  $\chi^2$  and RMSE for Page model ranged from 0.9928-0.9973, 6.03 × 10<sup>-3</sup> to 0.22 × 10<sup>-3</sup> and 0.0149 to 0.0774, respectively. The validation of Page model was suitable in describing thin layer drying test at 605.81± 4.92 W. The values of  $\chi^2$  and RMSE were 8.49 × 10<sup>-3</sup> and 0.0921.

**Keyword:** *Spirogyra* spp, Microwave drying, Drying model

#### 1 บทนำ

สาหร่ายเตา หรือ เทา น้ำ หรือชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Spirogyra* spp. เป็นสาหร่ายน้ำจืดสีเขียวขนาดใหญ่ที่พบมากในแถบ

ภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย นิยมนำมารับประทานเป็นอาหารยาประเภทต่างๆ (สรฉัตร และยุวดี, 2552) สาหร่ายเตามีคุณค่าทางโภชนาการโดยมีโปรตีนอยู่ใน

ระดับสูงซึ่งใกล้เคียงกับปลาน้ำจืดรวมทั้งตรวจพบวิตามินและเกลือแร่ที่สำคัญหลายตัว ด้านเภสัชวิทยาพบว่า มีฤทธิ์ต้านการเกิดแผลในกระเพาะอาหาร การหดเกร็งของกล้ามเนื้อเรียบขยายหลอดเลือด ด้านการอักเสบ ระวังปวด และลดความดัน มีผลต่อความเสื่อมหรือการแก่ของเซลล์และยังเป็นสาเหตุสำคัญของ การเกิดภาวะแทรกซ้อนในโรคเบาหวาน (ดวงพร และคณะ, 2555) นอกจากนี้ยังตรวจพบสารประกอบฟีนอลิกในปริมาณมาก (ธีระวัฒน์ และคณะ, 2554)

การอบแห้งเป็นกระบวนการแปรรูปที่ช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีอายุ การเก็บรักษาที่ยาวนาน เนื่องจากมีค่าความชื้นต่ำในระดับที่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเน่าเสียในอาหาร นอกจากนี้ยังช่วยยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพในอาหารได้เป็นอย่างดี (ฤทธิชัย และคณะ, 2554) คลื่นไมโครเวฟจัดเป็นนวัตกรรม การสร้างความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงซึ่งสามารถสร้างความร้อนภายในตัวผลผลิตเกษตรได้ดี และไม่มีผลกระทบจากการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลาง ดังนั้นการประยุกต์คลื่นไมโครเวฟกับการอบแห้งจึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพของการอบแห้ง (ฤทธิชัย, 2554 ก) สอดคล้องกับผลการวิจัยของ Ozkan *et al.* (2007) และ Maskan (2001) ซึ่งพบว่า การอบแห้งผักขม (spinach) และกีวี แฝ่น (kiwifruits) ด้วยคลื่นไมโครเวฟจะช่วยเร่งอัตราการอบแห้งได้เร็วกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนและช่วยลดการสูญเสียของสารอาหารที่สำคัญในผลิตภัณฑ์ อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่เกี่ยวกับการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยคลื่นไมโครเวฟยังมีอยู่น้อย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์ในการศึกษาคุณลักษณะการอบแห้งของสาหร่ายเตาในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ และการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟของสาหร่ายเตาที่เหมาะสม โดยผลการศึกษาดังกล่าวจะเป็นแนวทางใช้ประโยชน์สำหรับการออกแบบสภาวะการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยคลื่นไมโครเวฟต่อไปในอนาคต

## 2 อุปกรณ์และวิธีการ

### 2.1 วัตถุดิบ

นำสาหร่ายเตาจากฟาร์มเพาะเลี้ยงสาหร่ายเตา คณะเทคโนโลยีการประมงและทรัพยากรน้ำ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ มาล้างด้วยน้ำสะอาด จำนวน 3 น้ำ จากนั้นนำไปเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยง (ยี่ห้อ Wasino) เพื่อไล่น้ำออกจากสาหร่ายเตา นำไปเก็บไว้ที่ตู้เย็น (ยี่ห้อ Haier รุ่น HP-921F) ที่อุณหภูมิ  $4 \pm 0.5$  องศา

เซลเซียสในระหว่างรอการอบแห้ง

### 2.2 การวิเคราะห์ค่าความชื้นเริ่มต้นของสาหร่ายเตา

การวิเคราะห์ค่าความชื้นเริ่มต้นของสาหร่ายเตาโดยนำสาหร่ายเตา จำนวน 5 กรัม ใส่ในถ้วยอะลูมิเนียมขนาด 3 ออนซ์ ที่ผ่านการอบเพื่อไล่ความชื้น จำนวน 30 ถ้วย นำไปอบแห้งด้วยตู้อบแห้งด้วยลมร้อน (ยี่ห้อ Memmert รุ่น 500/108) ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (AOAC, 2005) จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักสาหร่ายเตาด้วยตาชั่งระบบดิจิทัล 4 ตำแหน่ง (ยี่ห้อ Sartorius รุ่น CP2245) นำข้อมูลผลต่างของน้ำหนักสาหร่ายก่อนและหลังการอบแห้งมาคำนวณหาค่าความชื้นของสาหร่ายเตาโดยมีสมการความสัมพันธ์ตามที่แสดงในสมการที่ 1

$$MC(\% d.b.) = \frac{W_i - W_f}{W_f} \quad (1)$$

เมื่อ  $MC$  คือ ความชื้นของสาหร่ายเตาร้อยละฐานแห้ง และ  $W_i$ ,  $W_f$  คือ น้ำหนักของสาหร่ายเตาที่เวลาใดๆ และน้ำหนักสุดท้ายของสาหร่ายเตา ตามลำดับ

### 2.3 การอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยคลื่นไมโครเวฟ

เครื่องอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ใช้ในการศึกษาคั้งนี้ถูกพัฒนาโดยสาขาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ โดยติดตั้งระบบไมโครเวฟ (Mode Stirring) ที่เตาไมโครเวฟขนาด 800 วัตต์ (ยี่ห้อ Panasonic รุ่น NN-S235WF) วางบนฐานเหล็กโดยที่ฐานเหล็กจะติดตั้งตาชั่งระบบดิจิทัล (ยี่ห้อ Sartorius รุ่น CP3202S) บนที่กปริมาตรน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการอบแห้ง (รูปที่ 1) ทำการตรวจวัดระดับการดูดซับของพลังงานไมโครเวฟ ( $P_{mw}$ ) โดยใช้น้ำกลั่น จำนวน 1000 กรัม ในบีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร (ยี่ห้อ Pyrex No.1000) แล้วนำไปให้ความร้อนด้วยเครื่องอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟเป็นเวลา 60 วินาที ที่ระดับพลังงานไมโครเวฟต่างๆ แล้ววัดอุณหภูมิของน้ำกลั่นก่อนและหลังการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบพกพาที่ระดับความละเอียดทศนิยม 1 ตำแหน่ง (ยี่ห้อ LD Didactic GmbH รุ่น 524-0673) นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณค่า  $P$  โดยมีสมการความสัมพันธ์ตามที่แสดงในสมการที่ 2 (Ozkan *et al.*, 2007 และ Maskan, 2001)

$$P = \frac{mC_p\Delta T}{t} = \frac{4187\Delta T}{t} \quad (2)$$

เมื่อ  $P$  คือ การดูดซับพลังงานไมโครเวฟ (kW),  $m$  คือ น้ำหนักของน้ำกลั่น (1000 กรัม),  $C_p$  คือ ค่าความจุความร้อนของน้ำกลั่น

(4187 kJ/kg<sup>o</sup>K),  $\Delta T$  คือ ผลต่างของอุณหภูมิน้ำกลั่นก่อนและหลังการได้รับความร้อนด้วยคลื่น (องศาเซลเซียส, °C) และ  $t$  คือ เวลาที่น้ำกลั่นได้รับความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ (60 วินาที)

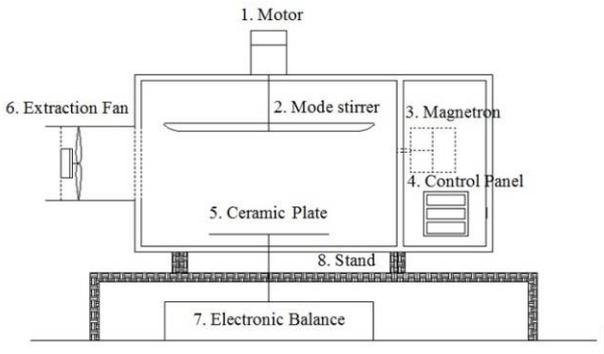


Figure 1 Diagram of Microwave Drying System.

เมื่อทราบระดับการดูดซับพลังงานไมโครเวฟ ทำการศึกษาการอบแห้งสาหร่ายด้วยคลื่นไมโครเวฟโดยนำสาหร่าย จำนวน 300 กรัม วางในภาชนะรามิครูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 20x20 ตารางเซนติเมตร (ยี่ห้อ Cuizimate) และสาหร่ายเตามีชั้นความหนาที่ประมาณ 0.37±0.08 เซนติเมตร นำไปเข้าเครื่องอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ (รูปที่ 1) ที่ระดับพลังงานไมโครเวฟที่ระดับต่างๆ จำนวน 4 ระดับ ทำการอบแห้งจนสาหร่ายเตามีความชื้นลดลงเหลือประมาณ 0.1045 – 1055 กรัม/กรัม น้ำหนักแห้ง (g/g dry matter)

2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟของสาหร่ายเตา

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งเป็นเครื่องมือที่สำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบระบบการอบแห้งแบบต่างๆ ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลสารและความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการอบแห้ง ตลอดจนการหาสภาพการณ์อบแห้งที่เหมาะสมของกระบวนการอบแห้ง (ฤทธิชัย และคณะ, 2554) การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งของสาหร่ายเตาด้วยคลื่นไมโครเวฟจะถูกระบุไว้ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง มีรูปแบบสมการของอัตราส่วนความชื้นที่แสดงในสมการที่ 3 โดยรูปแบบสมการดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wang et al. 2007 และ Ozkan et al. (2003)

$$MR = \frac{M - M_e}{M_i - M_e} = \frac{M}{M_i} \tag{3}$$

เมื่อ  $MR$  คือ อัตราส่วนความชื้น และ  $M, M_i, M_e$  คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ ความชื้นเริ่มต้น และความชื้นสมดุล ตามลำดับ ซึ่งในการศึกษาการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ ค่าความชื้นสมดุลจะสามารถพิจารณาให้มีค่าเท่ากับศูนย์ (Alibas. 2007)

Table 1 Mathematical models given by various authors curves.

Model name	Model	References
Lewis	$MR = \exp(-kt)$	Wang et al. (2007)
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Ozkan et al. (2003)
Modified Page	$MR = \exp(-kt)^n$	Alibas (2007)

จากการสำรวจเอกสารของรายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรด้วยคลื่นไมโครเวฟพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่นิยมใช้ในการศึกษาสำหรับการอบแห้งวัตถุดิบทางการเกษตรจำพวกผักและผลไม้ มักจะเลือกใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบของสมการกึ่งทฤษฎี (Semi – Theoretical Equation) และสมการเอมไพริคอล (Emperical Equation) อาทิเช่นแบบจำลองของ Lewis, Page และ Modified Page ซึ่งรูปแบบความสัมพันธ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Alibas, 2007. Wang et al., 2007. Ozkan et al. 2003) แสดงในตารางที่ 1

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) ค่า Chi-Square ( $\chi^2$ ) และค่า RMSE (Root Mean Square Error) เป็นพารามิเตอร์ทางสถิติซึ่งช่วยในการวิเคราะห์การเปรียบเทียบเพื่อหาค่าความแม่นยำในการทำนายค่าความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Wang et al. 2007, Cui et al. 2004, Ozkan et al. 2003 และ Maskan. 2001) โดยค่า  $R^2$  เป็นค่าพารามิเตอร์ทางสถิติที่สำคัญในการบ่งบอกคุณภาพของรูปแบบสมการในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง โดยยังมีค่าเข้าใกล้ 1.0 แสดงว่าแบบจำลองดังกล่าวมีความแม่นยำมาก ในขณะที่ค่า  $\chi^2$  และค่า RMSE เป็นพารามิเตอร์ทางสถิติที่ใช้บ่งบอกความผิดพลาดในการทำนายค่าของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งที่มีความแม่นยำในการทำนายที่เหมาะสม ควรจะมีค่า  $R^2$  มากแต่มีค่า  $\chi^2$  และค่า RMSE น้อยโดยสมการหาพารามิเตอร์ทั้งสามค่าแสดงในสมการที่ 4 – 6 (Assawarachan and Noomhorm. 2011, Wang et al. 2007, Cui et al. 2004)

$$R^2 = 1 - (\text{Residual SS})/(\text{Corrected total SS}) \tag{4}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pred,i})^2} \quad (5)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum (MR_{exp,i} - MR_{pred,i})^2}{N - n_p} \quad (6)$$

เมื่อค่า  $MR_{exp,i}$  และ  $MR_{pred,i}$  เป็นค่าอัตราส่วนความชื้นของการทดลอง และค่าอัตราส่วนความชื้นจากการทำนายของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ค่า  $N$  และ  $n_p$  เป็นจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ และจำนวนตัวแปรในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ตามลำดับ ส่วน  $SS$  คือ ผลรวมของค่าสังเกตยกกำลังสอง การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งด้วยเทคนิควิธีการแบบสมการถดถอยที่ไม่เชิงเส้น (Nonlinear Regression)

### 3 ผลและวิจารณ์

#### 3.1 คุณลักษณะการอบแห้งของสาหร่ายเตา

ความชื้นเริ่มต้นของสาหร่ายเตาที่ใช้ในการทดลองมีค่าเท่ากับ  $15.5142 \pm 0.4408$  กรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง (g/g dry matter) และระดับกำลังงานไมโครเวฟ ( $P$ ) ตามการคำนวณที่แสดงในสมการที่ 2 พบว่าที่เตาไมโครเวฟที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีระดับการดูดซับพลังงานเท่ากับ  $752.04 \pm 14.77$ ,  $465.15 \pm 9.08$ ,  $231.18 \pm 5.83$  และ  $164.34 \pm 3.81$  วัตต์ ตามลำดับ

เวลาที่ใช้ในการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับการดูดซับพลังงานไมโครเวฟทั้ง 4 ระดับจากความชื้นเริ่มต้นจนเหลือความชื้นที่  $0.1043 \pm 0.0907$  g/g dry matter เท่ากับ 25, 49, 91 และ 165 นาที ตามลำดับ โดยรูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นของสาหร่ายเตาที่เวลาใดๆ ในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังงานไมโครเวฟที่  $752.04 \pm 14.77$ ,  $465.15 \pm 9.08$ ,  $231.18 \pm 5.83$  และ  $164.34 \pm 3.81$  วัตต์ ตามลำดับ พบว่าที่ระดับกำลังงานไมโครเวฟที่  $752.04 \pm 14.77$  วัตต์ ซึ่งเป็นระดับพลังงานมากที่สุดจะใช้เวลาในการอบแห้งสาหร่ายเตาน้อยที่สุด โดยสามารถลดความชื้นจากความชื้นเริ่มต้น  $15.3673 \pm 1.401$  g/g dry matter ลดเหลือ  $0.1058 \pm 0.0031$  g/g dry matter และใช้เวลา 25 นาที แต่ในขณะที่ระดับพลังงาน  $164.34 \pm 3.81$  วัตต์ ใช้เวลาในการอบแห้งสาหร่ายเตาเป็นเวลา 165 นาที

รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งที่ระดับความชื้นต่างๆ ของการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยคลื่นไมโครเวฟทั้ง 4 ระดับ พบว่ามีอัตราการอบแห้งอยู่ในช่วง 0.0135 ถึง 4.2318

กรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้งต่อนาที (g/g dry matter \* min) โดยอัตราการอบแห้งสาหร่ายเตาจะขึ้นอยู่กับระดับกำลังงานของคลื่นไมโครเวฟ สาหร่ายเตาจัดเป็นวัสดุทางชีวภาพซึ่งมีรูปแบบโครงสร้างทางวิศวกรรมเป็นวัสดุพูน และมีความชื้นเริ่มต้นสูง ( $15.3673 \pm 1.401$  ถึง  $15.5142 \pm 0.4408$  g/g dry matter) จึงสามารถดูดซับพลังงานความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟได้ดี การเกิดความร้อนในสาหร่ายเตาในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟจะประกอบด้วยกลไกการเหนี่ยวนำเชิงไอออน (Ionic Conduction) และกลไกการหมุนของทั้งสองขั้ว (Dipolar Rotation) คลื่นไมโครเวฟจะเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนภายในตัววัสดุเมื่อเกิดอันตรกิริยากับสาหร่ายเตาซึ่งจัดอยู่ในประเภทของวัสดุไดอิเล็กทริกที่มีการสูญเสียของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Lossy Dielectrics Material)

ดังนั้นสาหร่ายเตาจึงสามารถดูดซับคลื่นไมโครเวฟและแปลงเป็นพลังงานความร้อนได้ดี (ผดุงศักดิ์, 2551) เมื่อคลื่นไมโครเวฟเหนี่ยวนำให้โมเลกุลของน้ำภายในสาหร่ายเตาจนเกิดการหมุนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขั้วไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว ผลของการหมุนนี้ทำให้เกิดการเสียดสีของโมเลกุลของน้ำภายในโครงสร้างเซลล์ชั้นในของสาหร่ายเตาเกิดเป็นพลังงานความร้อนได้อย่างรวดเร็ว (ฤทธิ์ชัย, 2554 ข) โดยค่าพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากคลื่นไมโครเวฟจะเป็นตัวเร่งอัตราการระเหยของไอน้ำที่ผิวหน้าของสาหร่ายเตา และมีค่าเท่ากับอัตราการเคลื่อนตัวของน้ำภายในโครงสร้างของสาหร่ายเตาที่มาเติมเต็มผิวหน้าโครงสร้างเซลล์สาหร่ายเตา ความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกถ่ายเทมวลสารในการแพร่กระจายตัวของความชื้นสู่ผิววัสดุ (Surface Diffusion) มีอัตราการระเหยน้ำที่สูงและคงที่ (Constant Rate Period) และมีการอบแห้งสาหร่ายเตาดำเนินการต่อไปเรื่อยๆ จนความชื้นของสาหร่ายเตาเข้าสู่ความชื้นวิกฤติ กระบวนการอบแห้งจะเข้าสู่คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลงอย่างสมบูรณ์ (Falling Rate Period)

#### 3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งของสาหร่ายเตาในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบสมการถดถอยที่ไม่เชิงเส้น (Nonlinear Regression) เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อบแห้งของ Lewis, Page และ Modified Page โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ), Chi-Square ( $\chi^2$ ) และ Root Mean Square Error (RMSE) เป็นพารามิเตอร์ทางสถิติที่ใช้เลือกแบบจำลองที่เหมาะสม

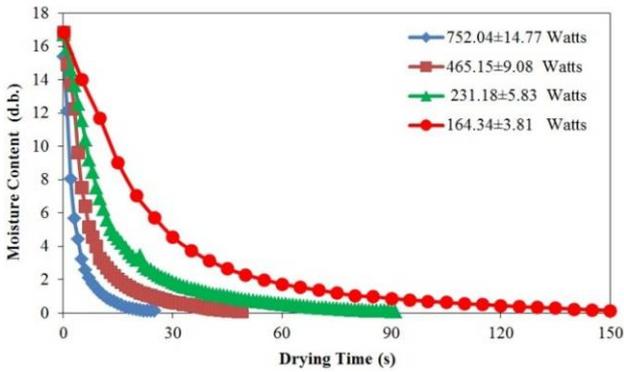


Figure 2 The microwave drying curve of *spirogyra* spp. on dry basis

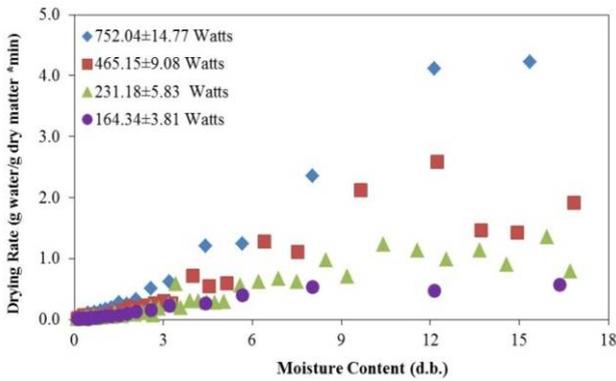


Figure 3 Drying rates of *spirogyra* spp. at different microwave power

ตารางที่ 2 แสดงค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์ทางสถิติของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบอื่นๆ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าแบบจำลองของ Page มีความเหมาะสมในการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเปลือกหับทิมได้ดีที่สุดโดยมีค่า  $R^2$  ในช่วง 0.9928-0.9973 ซึ่งมีค่ามากกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งแบบอื่นๆ และมีค่า  $\chi^2$  และ  $RMSE$  ระหว่าง  $6.03 \times 10^{-3}$  ถึง  $0.22 \times 10^{-3}$  และ 0.0149 ถึง 0.0774 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งของ Lewis และ Modified Page โดยที่ค่า  $R^2$  สามารถบ่งบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตาม โดยถ้าค่า  $R^2$  มีค่ามากจะแสดงว่าตัวแปรต้นสามารถอธิบายค่าตัวแปรตามได้ดี ในขณะที่ค่า  $\chi^2$  และ  $RMSE$  เป็นค่าพารามิเตอร์ในทางสถิติที่บ่งบอกความแตกต่างระหว่างข้อมูลและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งที่มีความแม่นยำควรจะมีค่า  $R^2$  มาก แต่มีค่า  $\chi^2$  และ  $RMSE$  น้อยกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบอื่น

### 3.3 การทวนสอบแบบจำลอง (Validation of Model)

แสดงว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งรูปแบบนั้นมีประสิทธิภาพสูงในการทำนายอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นเนื่องจากเป็นแบบจำลองที่มีความแม่นยำและค่าความผิดพลาดต่ำซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการทำนายค่าความชื้นและอัตราการระเหยด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Assawarachan and Noomhorm. 2011, Wang et al. 2007 และ Ozkan et al. 2003)

ผลการศึกษานี้พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบของสมการกึ่งทฤษฎีของ Page มีความเหมาะสมในการทำนายการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความชื้นที่เวลาใดๆ ของการอบแห้งสาหร่ายเตาดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับความถี่ 2.45 GHz ที่กำลังของคลื่นไมโครเวฟที่ 164.34±3.81 ถึง 752.04±14.77 วัตต์ มีความเหมาะสมมากที่สุดโดยค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง ซึ่งได้แก่ อัตราการอบแห้ง ( $k$ ) และค่าดัชนีการอบแห้ง ( $n$ ) ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับระดับกำลังงานของคลื่นไมโครเวฟ ( $P_{MW}$ ) โดยมีรูปแบบสมการตามที่แสดงในสมการที่ 7 และ 8

$$k = -0.0036 - 2.25 \times 10^{-5} P \tag{7}$$

$$n = 1.6519 - 1.41 \times 10^{-4} P \tag{8}$$

โดยการทวนสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบของสมการกึ่งทฤษฎีของ Page ของผลการศึกษานี้เลือกการอบแห้งสาหร่ายเตาดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับกำลังงานของไมโครเวฟที่  $605.81 \pm 4.92$  วัตต์ และนำไปคำนวณค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งในสมการที่ 7 และ 8 พบว่ามีค่า  $k = 0.01013$  และ  $n = 1.565$  ตามลำดับ การทวนสอบแบบจำลองการอบแห้งนิยมใช้เพื่อประเมินความเข้ากันได้ของแบบจำลองกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง หรือความกลมกลืน (Goodness of fit) ของแบบจำลอง พารามิเตอร์ที่นิยมใช้ได้แก่ ค่าการลดลงไคกำลังสอง ( $\chi^2$ ) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error,  $RMSE$ ) เป็นพารามิเตอร์ทางสถิติซึ่งช่วยในการวิเคราะห์การเปรียบเทียบเพื่อหาค่าความแม่นยำในการทำนายค่าความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อน (สุนทร และฤทธิชัย, 2554) โดยมีค่า  $\chi^2$  และ  $RMSE$  ของการทำนายอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งสาหร่ายเตาดด้วยคลื่นไมโครเวฟ ที่ระดับกำลังงานของไมโครเวฟที่  $605.81 \pm 4.92$  วัตต์ มีค่าระหว่าง  $8.49 \times 10^{-3}$  และ 0.0921 ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าแบบจำลองทาง

คณิตศาสตร์ในรูปแบบของสมการกึ่งทฤษฎีของ Page ที่มีสมการของการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับความถี่ 2.45 GHz และกำลังของคลื่นไมโครเวฟที่  $164.34 \pm 3.81$  ถึง  $752.04 \pm 14.77$  วัตต์ ได้อย่างเหมาะสม ซึ่งได้แก่ อัตราการอบแห้ง ( $k$ ) และค่าดัชนีการอบแห้ง ( $n$ ) ตามสมการที่ 7 และ 8 สามารถทำนายอัตราส่วนความชื้น

**Table 2** Statistical results of different thin-layer drying models for *Spirogyra* spp.

Model name	Microwave power (Watts)	Model constants	$R^2$	Chi-Square ( $\chi^2 \times 10^{-3}$ )	RMSE
Lewis	752.04±14.77	$k = 0.066$	0.9384	5.76	0.0759
	465.15±9.08	$k = 0.031$	0.9333	5.61	0.0749
	231.18±5.83	$k = 0.017$	0.9315	5.72	0.0756
	164.34±3.81	$k = 0.009$	0.9072	8.44	0.0918
Page	752.04±14.77	$k = 0.0142, n = 1.581$	0.9973	0.22	0.0149
	465.15±9.08	$k = 0.0051, n = 1.556$	0.9928	0.87	0.0295
	231.18±5.83	$k = 0.0017, n = 1.565$	0.9964	0.498	0.0223
	164.34±3.81	$k = 0.00085, n = 1.711$	0.9864	6.03	0.0774
Modified Page	752.04±14.77	$k = 0.068, n = 1.581$	0.9970	0.23	0.0152
	465.15±9.08	$k = 0.031, n = 1.556$	0.9921	0.89	0.0298
	231.18±5.83	$k = 0.017, n = 1.585$	0.9962	0.56	0.0235
	164.34±3.81	$k = 0.009, n = 1.711$	0.9864	5.98	0.0773

#### 4 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาคุณลักษณะการอบแห้งของสาหร่ายเตาในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับกำลังงานของคลื่นไมโครเวฟที่แตกต่างกัน จำนวน 4 ระดับ ( $752.04 \pm 14.77$ ,  $465.15 \pm 9.08$ ,  $231.18 \pm 5.83$  และ  $164.34 \pm 3.81$  วัตต์) จากความชื้นเริ่มต้นจนเหลือความชื้นที่  $0.1043 \pm 0.0907$  g/g dry matter เท่ากับ 25, 49, 91 และ 165 นาที ตามลำดับ โดยพบว่าระดับกำลังงานของคลื่นไมโครเวฟจะมีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้งในขณะที่การวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งของสาหร่ายเตาในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบสมการถดถอยที่ไม่เชิงเส้น (Nonlinear Regression) พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบของสมการกึ่งทฤษฎีของ Page ที่มีค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง ซึ่งได้แก่ อัตราการอบแห้ง ( $k$ ) และค่าดัชนีการอบแห้ง ( $n$ ) ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับระดับกำลังงานของคลื่นไมโครเวฟ ( $P$ ) โดยมีรูปแบบสมการ

$k = -0.0036 + 2.25 \times 10^{-5} P$  และ  $n = 1.6519 - 1.41 \times 10^{-4} P$  มีความเหมาะสมอย่างมากในการทำนายอัตราส่วนความชื้นของสาหร่ายเตาโดยทวนสอบแบบจำลองด้วยการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับ  $605.81 \pm 4.92$  วัตต์ พบว่าความกลมกลืน (Goodness of fit) กับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง มีค่า  $\chi^2$  และ RMSE เท่ากับ  $8.49 \times 10^{-3}$  และ 0.0921 ตามลำดับ

## 5 เอกสารอ้างอิง

ดวงพร อมรเลิศ, พิศาล ยุวดี, พีรพรพิศาล, จิตติกานต์ ปัญญาใหญ่, ชยากร ภูมาศ และสุดาพร ตงศิริ. 2555. ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและต้านการอักเสบของสาหร่ายเตา. วารสารวิทยาศาสตร์ มช 40(1), 228-235.

ผดุงศักดิ์ รัตน์เดโช. 2551. พื้นฐานการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรุงเทพมหานคร.

ธีระวัฒน์ รัตนพจน์, รัตนาภรณ์ จันทร์ทิพย์, เกียรติศักดิ์ เม่งอำพัน และดวงพร อมรเลิศพิศาล. 2554. การเปรียบเทียบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและกลุ่มสารสำคัญของสาหร่ายเตาใน 3 ฤดูกาล. หน้า 100-101. ในการประชุมวิชาการประมง ครั้งที่ 6 เรื่อง เพื่อความมั่นคงด้านวิชาการประมงและทรัพยากรทางน้ำ. 1-3 ธันวาคม 2554. คณะเทคโนโลยีการประมงและทรัพยากรทางน้ำ มหาวิทยาลัยแม่โจ้, เชียงใหม่.

ฤทธิชัย อัครราชันย์, ภาณุ แสงเจริญรัตน์, สุเนตร สืบคำ, เทียรณีย์ มั่งมูล และดวงกมล จนใจ. 2554. จลนพลศาสตร์การอบแห้งด้วยลมร้อนของเปลือกทับทิม. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย 17(1), 27-34.

ฤทธิชัย อัครราชันย์. 2554 ก. การอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรด้วยคลื่นไมโครเวฟ. วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต 1(2), 31-42.

ฤทธิชัย อัครราชันย์. 2554 ข. เทคโนโลยีการสร้างความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในการแปรรูปอาหาร. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย 17(1), 41-52.

สรฉัตร เทียมดาว และยุวดี พีรพรพิศาล. 2552. ความหลากหลายของสาหร่ายน้ำจืดกินได้ในแม่น้ำโขงและแม่น้ำน่าน. วารสารวิจัยเทคโนโลยีการประมง 3(1), 115-124.

สุเนตร สืบคำ และฤทธิชัย อัครราชันย์. 2554. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งสำหรับวัสดุพูน. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย 17(1), 59-68.

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

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.

Assawarachan, R. and Noomhorm, A. 2011. Mathematical models for vacuum microwave concentration behavior of pineapple juice. Journal of Food Process Engineering 34(5), 1485-1505.

Cui, Z.W., Xu, S.Y. and Sun, D.W. 2004. Microwave-vacuum drying kinetics of carrot slices. Journal of Food Engineering 65, 157-164.

Idris, A., Khalid, K. and Omar, W. 2004. Drying of silica sludge microwave heating. Applied Thermal Engineering 24, 905-918.

Maskan, M. 2001. Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying. Journal of Food Engineering 48, 177-182.

Ozkan, I.A., Akbudak, B. and Akbudak, N. 2007. Microwave drying characteristics of spinach. Journal of Food Engineering 78, 577-583.

Wang, Z., Sun, J., Chen, F., Liao, X. and Hu, X. 2007. Mathematical modeling on thin layer microwave drying of apple pomace with and without hot air pre-drying. Journal of Food Engineering 80, 536-544.