



จลนพลศาสตร์การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟระบบสุญญากาศของสาหร่ายเตา

Microwave Vacuum Drying Kinetics of Dried *Spirogyra* sp.

ฤทธิชัย อัสวารชานย์*

Rittichai Assawarachan*

หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการอบแห้งและลดความชื้น คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ สันทราย เชียงใหม่ 50290

Drying and Dehydration Technology Research Unit; 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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟระบบสุญญากาศที่ระดับความเข้มข้นของกำลังงานคลื่นไมโครเวฟ 0.77, 1.55, 2.00 และ 2.50 W g⁻¹ โดยใช้สาหร่ายน้ำหนัก 300 g จากผลการศึกษาพบว่าเวลาที่ใช้ในการอบแห้งสาหร่ายเตาจากความชื้นเริ่มต้น 8.55±0.20 g_{water}/g_{dry matter} อบแห้งจนเหลือความชื้น 0.15±0.01 g_{water}/g_{dry matter} อยู่ในช่วง 5.0 ถึง 34.0 minutes สมการเอมพิริคัลที่นิยมใช้ในการศึกษาจลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งของผลผลิตทางการเกษตรและวัสดุชีวภาพจำนวน 7 สมการ ได้แก่ Newton, Page, Modified Page, Midilli et al., Henderson and Pabis, Logarithmic และ Wang and Singh ถูกนำมาใช้ในการศึกษาเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในการทำนายอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับกำลังงานต่างๆ ด้วยวิธีการปรับเส้นโค้ง พบว่าแบบจำลองของ Page มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงสุด (R²) ในขณะที่ค่าไคกำลังสอง (χ²) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) มีค่าต่ำสุด ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_{eff}) จะขึ้นอยู่กับระดับความเข้มข้นของกำลังงานคลื่นไมโครเวฟและมีความสัมพันธ์ตามสมการของอาร์เรเนียส ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของสาหร่ายเตาในระหว่างการอบแห้งมีค่าอยู่ในช่วง 0.62×10⁻⁶ ถึง 4.5×10⁻⁶ m² s⁻¹ และค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) เท่ากับ 2.61 W g⁻¹ จากผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคุณภาพสี พบว่าค่าสีแดง/สีเขียว (redness/greenness) และค่าความแตกต่างสีโดยรวม (total color difference) ของสาหร่ายเตาอบแห้งที่ระดับความเข้มข้นของกำลังงานไมโครเวฟระดับต่างๆ มีค่าเท่ากับ 1.91±0.24, 1.66±0.28, 1.78±0.22, 2.56±0.20 และ 20.15±0.31, 18.00±0.27, 19.40±0.22, 19.32±0.16 ตามลำดับ และปริมาณสารประกอบฟีนอลิกมีค่าเท่ากับ 1,667.42±22.43, 2078.34±28.23, 2254.34±32.21 และ 2347.16±42.27 mg_{GAE}/100 g_{dry weight} ตามลำดับ โดยที่ระดับความเข้มข้นของกำลังงานคลื่นไมโครเวฟเท่ากับ 2.00 W g⁻¹ เป็นสภาวะการอบแห้งสาหร่ายเตาที่เหมาะสมที่สุด

คำสำคัญ: สาหร่ายเตา, จลนพลศาสตร์การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ, สมการเอมพิริคัล, พลังงานกระตุ้น

Abstract

The aim of this study was to investigate the effect of microwave density on the kinetics of moisture ratio and quality change (color change and phenolic content) of dried *Spirogyra* sp. during microwave vacuum drying. The various microwave power densities ranging from 0.77, 1.55, 2.00 and 2.50 W g⁻¹ were used for drying of 300 g of *Spirogyra* sp. The time required to reduce moisture content from 8.55±0.20 g_{water}/g_{dry matter} to 0.15±0.01 g_{water}/g_{dry matter} was 5.0 to 34.0 minutes of microwave density levels from 0.77 to 2.50 W g⁻¹. Seven of the well known empirical models as Newton, Page, Modified Page, Midilli et al., Henderson and Pabis, Logarithmic and

Wang and Singh were fitted to the microwave vacuum drying of *Spirogyra* sp. The Page model had shown an excellent fit to predict drying behavior of the *Spirogyra* sp. because this model gave the highest coefficient of determination (R^2), the least chi-square (χ^2), and the lowest root mean square error (RMSE). The total drying occurs during falling period, signifying the influence of moisture diffusion during the drying. The effective diffusivity varied from 0.62×10^{-6} to $4.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ over the microwave power densities range. The microwave power densities dependence of the diffusivity was well documented by Arrhenius model. The activation energy of moisture diffusion during drying was found to be 2.61 W g^{-1} . The results of color change indicated that the a^* -values and the total color differences (TCD) were 1.91 ± 0.24 , 1.66 ± 0.28 , 1.78 ± 0.22 , 2.56 ± 0.2 , and 20.15 ± 0.31 , 18.00 ± 0.27 , 19.40 ± 0.22 , 19.32 ± 0.16 , respectively. The phenolic content were $1,667.42 \pm 22.43$, 2078.34 ± 28.23 , 2254.34 ± 32.21 and $2347.16 \pm 42.27 \text{ mg}_{\text{GAE}}/100 \text{ g}_{\text{dry weight}}$ respectively. The microwave power density at 2.00 W g^{-1} was chosen to be the most appropriate technique for microwave drying of *Spirogyra* sp.

Keywords: *Spirogyra* sp., Microwave drying kinetics, Empirical models, Activation energy

1 บทนำ

สาหร่ายเตา มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Spirogyra* sp. เป็นสาหร่ายน้ำจืดสีเขียวขนาดใหญ่มีลักษณะเป็นเส้นสายยาวสีเขียวสดที่พบมากในแถบภาคเหนือ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย รายงานวิจัยของสรณัฏ และยุวดี (2552) พบว่าสาหร่ายเตามีคุณค่าทางโภชนาการสูงประกอบด้วยโปรตีน 18-20% ไขมัน 5-6% คาร์โบไฮเดรต 56-58% เส้นใย 7-9% เถ้า 10-11% รวมทั้งยังมีรงควัตถุหลายชนิด เช่น คลอโรฟิลล์เอ และบี เบต้าแคโรทีน แซนโทฟิล นอกจากรายงานวิจัยของยุวดี และคณะ (2555) พบว่าสาหร่ายเตาอบแห้งมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) ฤทธิ์ลดน้ำตาลและไขมันในเลือดในภาวะเบาหวาน รวมทั้งยังมีฤทธิ์ต้านเอนไซม์ไทโรซิเนส ช่วยป้องกันการเกิดฝ้า และจุดด่างดำ ช่วยให้ผิวขาว มีสารเมือกหรือมอยเจอร์ไรเซอร์ช่วยให้ความชุ่มชื้นแก่ผิวหนัง และกระตุ้นการสร้างโปรคอลลาเจน (Procollagen) ที่มีผลต่อการสร้างเนื้อเยื่อผิวหนังจากคุณสมบัติของสารออกฤทธิ์ที่สำคัญในสารสกัดจากสาหร่ายเตาจึงได้รับความสนใจและนำมาใช้เป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางหลายชนิด (ดวงพร และคณะ, 2555) รวมทั้งผลิตภัณฑ์สปาที่กำลังได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย และอาหารเสริมเพื่อสุขภาพ ซึ่งเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์จากสาหร่ายเตา โดยผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง และอาหารเสริมทั้งหมดจะเตรียมจากสาหร่ายเตาที่ผ่านการอบแห้ง (น้ำฝน และคณะ, 2555) การอบแห้งเป็นกระบวนการที่สำคัญในการถนอมผลิตภัณฑ์ให้มีอายุการเก็บรักษาที่ยาวนานขึ้น โดยการลดความชื้นหรือปริมาณน้ำอิสระในผลิตภัณฑ์ซึ่งมีผลต่อจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุทำให้ผลิตภัณฑ์เน่าเสียไม่สามารถเจริญเติบโตได้

รวมทั้งยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ หรือชะลอปฏิกิริยาต่างๆ ทั้งทางเคมี และทางชีวเคมี นอกจากนั้นการอบแห้งยังช่วยลดน้ำหนักหรือปริมาตรของผลิตภัณฑ์ทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง และการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ (Assawarachan et al., 2013; Assawarachan and Noomhorm, 2011) การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟระบบสุญญากาศ (Microwave Vacuum Drying) เป็นนวัตกรรมการสร้างความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูง และเกิดอัตราการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ สามารถสร้างความร้อนทั้งบริเวณผิวนอกและภายในโครงสร้างเซลล์ของผลิตภัณฑ์จึงช่วยเร่งอัตราการอบแห้งได้เป็นอย่างดี (ผดุงศักดิ์, 2551; ฤทธิชัย, 2554ก) โดยไม่มีผลกระทบจากการถ่ายเทความร้อนในระหว่างการอบแห้ง การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟระบบสุญญากาศจึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพของการอบแห้ง และช่วยรักษาคุณภาพผลิตภัณฑ์อบแห้งได้ (Assawarachan and Noomhorm, 2008) การทำนายจลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์ในระหว่างการอบแห้งด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Modeling) เป็นวิธีการที่ประหยัดได้ทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดลอง สามารถวิเคราะห์หาข้อมูลจำนวนมากอย่างละเอียดซึ่งอาจจะเป็นข้อมูลที่วัดได้ยากหรือวัดไม่ได้เลยในห้องปฏิบัติการ (สีกมณ, 2555) ปัจจุบันการจำลองจลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์สามารถทำได้ด้วยวิธีการปรับเส้นโค้ง (Curve Fitting) ให้ผลการจำลองข้อมูลสอดคล้องกับผลการทดลอง โดยสามารถจำแนกได้เป็นแบบจำลองเชิงเส้น (Linear Model) แบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Model) และแบบจำลองพหุนาม (Polynomial

Model) เพื่อใช้การจำลองการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในระหว่างการอบแห้ง และอธิบายกระบวนการอบแห้ง ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและการออกแบบเครื่องอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Assawarachan et al. 2013; McMinn, 2006; Özbek and Dadali, 2007; Wang et al., 2007) ปัจจุบันรายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองการอบแห้งสาหร่ายเตายังขาดแคลนข้อมูล ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของสาหร่ายเตาในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟระบบสุญญากาศที่ระดับความเข้มข้นไมโครเวฟระดับต่างๆ การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ความชื้นประสิทธิผล และค่าพลังงานกระตุ้น ตลอดจนการศึกษาผลกระทบของระดับความเข้มข้นไมโครเวฟต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพสาหร่ายเตาอบแห้ง ซึ่งการศึกษาดังกล่าวจะใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาวิธีการอบแห้ง ตลอดจนการออกแบบสภาวะการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยคลื่นไมโครเวฟระบบสุญญากาศให้เหมาะสมในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่างสาหร่ายเตาที่นำมาศึกษาเก็บมาจากบ้านนาคูหา ตำบลสวนเขื่อน อำเภอเมือง จังหวัดแพร่ ซึ่งทำการพิสูจน์เอกลักษณ์แล้วว่าเป็นชนิด *Spirogyra neglecta* (Hassall) Kützing (ฐิติกานต์, 2550) เก็บตัวอย่างสาหร่ายจำนวน 25 kg นำมาล้างทำความสะอาดและเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยงเพื่อไล่น้ำออกจากนั้นนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ $4 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 h เพื่อให้สาหร่ายเตาเกิดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่สภาวะสมดุล ซึ่งเป็นแนวทางเดียวกับงานวิจัยของ Assawarachan et al. (2013), Ozkan et al. (2007), Özbek and Dadali (2007) ก่อนนำไปศึกษาในขั้นตอนต่อไป

2.2 การวิเคราะห์ค่าความชื้นเริ่มต้นของสาหร่ายเตา

นำสาหร่ายเตาจำนวน 2.5 g ใส่ในถ้วยอะลูมิเนียมขนาด 3 oz ที่ผ่านการอบไล่ความชื้น นำไปอบแห้งด้วยตู้อบแห้งด้วยลมร้อน (Memmert Model 500/108I) ที่อุณหภูมิ $105 \pm 2^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 h (AOAC, 2005) จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งระบบดิจิทัล (Sartorius Model CP2245) นำข้อมูลผลต่างของน้ำหนักสาหร่ายเตาก่อน และหลังการอบแห้ง มาคำนวณหาค่าความชื้นของสาหร่ายเตา โดยมีสมการดังแสดงใน Eq. (1)

$$MC = \frac{W_i - W_f}{W_f} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ MC คือ ความชื้น (ฐานแห้ง) ของสาหร่ายเตา ($g_{\text{water}}/g_{\text{dry matter}}$) และ W_i , W_f คือน้ำหนักเริ่มต้นของสาหร่ายเตาสด (g) และน้ำหนักสุดท้ายของสาหร่ายเตา (g) ตามลำดับ

อัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยคลื่นไมโครเวฟ สามารถคำนวณได้จาก Eq. (2) โดยรูปแบบสมการดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Özbek and Dadali (2007); Wang et al. (2007); Evin (2012)

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} = \frac{M_t}{M_i} \quad (2)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น และ M_t , M_i , M_e คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ ความชื้นเริ่มต้น และความชื้นสมดุล ตามลำดับ ซึ่งในการศึกษาการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟค่าความชื้นสมดุลจะสามารถพิจารณาให้มีความเท่ากับศูนย์ (Assawarachan et al., 2013; McMinn, 2006; Ozkan et al., 2007; Özbek and Dadali, 2007; Wang et al., 2007)

2.3 การอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยคลื่นไมโครเวฟ

เครื่องอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟระบบสุญญากาศที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้พัฒนาโดยสาขาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ โดยติดตั้งโถดูดความชื้นระบบสุญญากาศ (Vacuum Desicator) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm ในเตาไมโครเวฟขนาด 800 W (Panasonic Model: NN-S235WF) ที่ฝาโถดูดความชื้นติดตั้งด้วยซิลิโคน ประเก็นชนิดทนความร้อน และด้านบนของฝาโถดูดความชื้นจะติดตั้งกับท่อสุญญากาศ และอุปกรณ์ปรับแรงดันสำหรับระบบสุญญากาศ (Vacuum Regulator SMC Model: R105) ซึ่งถูกติดตั้งกับระบบปั๊มสุญญากาศ (JB Model: DV-42N USA) โถดูดความชื้นจะถูกวางบนฐานเหล็กโดยที่ฐานเหล็กจะติดเครื่องชั่งระบบดิจิทัล (Sartorius Model CP3202S) บันทึกปริมาณน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการอบแห้ง (Figure 1) โดยสามารถปรับระดับความเข้มข้นของกำลังงานคลื่นไมโครเวฟได้ 4 ระดับ ได้แก่ 0.77, 1.55, 2.00 และ 2.50 W g^{-1} (Assawarachan et al., 2013; ปองพล และฤทธิชัย, 2555; น้ำฝน และคณะ, 2556; ฤทธิชัย และคณะ, 2555) การอบแห้งสาหร่ายเตาเพื่อศึกษาผลของระดับความเข้มข้นของกำลังงานคลื่นไมโครเวฟ

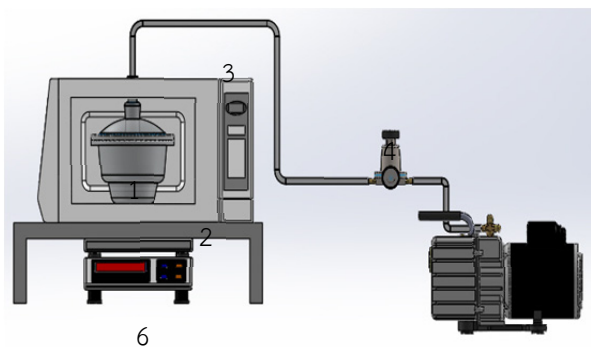


Figure 1 Diagram of microwave vacuum drying system. (1) Vacuum desiccator, (2) Microwave oven, (3) vacuum pipe, (4) vacuum regulator, (5) Vacuum pump, (6) digital weight balance.

โดยนำสาหร่ายเตาจำนวน 300 g วางในโถดูดความชื้น จากนั้นเปิดระบบการทำงานของระบบสุญญากาศ และการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับความเข้มคลื่นไมโครเวฟที่แตกต่างกัน 4 ระดับ 0.77, 1.55, 2.00 และ 2.50 W g⁻¹ อบแห้งจนเหลือความชื้นสุดท้าย 0.15±0.01 g_{water}/g_{Dry matter} จากนั้นนำไปบดด้วยเครื่องบดแบบ Hammer mill จนมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 250 μm จากนั้นนำไปตรวจวัดค่าสี และปริมาณประกอบพืชนอลิก ในขั้นต่อไป

2.4 แบบจำลองการอบแห้ง

แบบจำลองการอบแห้งเป็นการจำลองการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในระหว่างการอบแห้ง ซึ่งจะช่วยในการออกแบบระบบการอบแห้งต่างๆ จากการตรวจเอกสารรายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งอาหารหรือวัสดุชีวภาพด้วยคลื่นไมโครเวฟ พบว่าแบบจำลองการอบแห้งที่นิยมใช้ในการศึกษาอาหารหรือวัสดุชีวภาพจำพวกผักและผลไม้ ได้แก่ แบบจำลองในรูปของสมการเอมพิริคัล (Empirical Equation) เช่นแบบจำลองของ Newton Henderson and Pabis Page Modified Page Midilli et al. Wang and Singh และ Logarithmic ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ดัง Table 1 (Alibas, 2007; Assawarachan et al., 2013; McMinn, 2006; Ozkan et al., 2007; Özbek and Dadali, 2007; Wang et al., 2007) และสมการกึ่งทฤษฎี (Semi-Theoretical Equation) ซึ่งจะมีรูปแบบความสัมพันธ์ในรูปกฎข้อที่สองของฟิค (Fick's Second Law) สามารถใช้ในการหาอัตราส่วนความชื้นดังแสดงใน Eq. (3) สำหรับวัสดุที่มีรูปทรงเป็นแผ่นระนาบที่มีความยาวมากๆ (Infinite Slab) และมีความหนาครึ่งหนึ่งของตัวอย่างอาหารหรือวัสดุชีวภาพที่มีรูปร่างเป็นแผ่นระนาบ

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\pi^2 \frac{D_{eff} \cdot t}{4L^2}\right) \quad (3)$$

เมื่อ D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (m²s⁻¹), L คือ ความหนาของสาหร่ายเตา และ t คือ เวลาในการอบแห้ง (s)

Table 1 Mathematical models given by various authors.

Model name	Model equation
1. Newton	$MR = \exp(-kt)$
2. Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
3. Page	$MR = \exp(-kt^n)$
4. Modified Page	$MR = \exp(-(kt)^n)$
5. Midilli et al.	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$
6. Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$
7. Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$

การวิเคราะห์หาค่าพลังงานกระตุ้นสำหรับการแพร่ (Activation Energy for Diffusion, E_a) โดยใช้สมการอาร์เรเนียส (Arrhenius Equation) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ozkan et al. (2007); Özbek and Dadali (2007); ปองพล และฤทธิชัย (2555) ดังแสดงใน Eq. (4)

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E_a \cdot m}{P}\right) \quad (4)$$

เมื่อ k_0 คือ แฟกเตอร์ความถี่ (min⁻¹), E_a คือ พลังงานกระตุ้น (W g⁻¹), m คือ น้ำหนักของสาหร่ายเตา (g) และ P คือ พลังงานของคลื่นไมโครเวฟ (W)

การวิเคราะห์หาค่าคงที่ต่างๆ ของแบบจำลองการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยคลื่นไมโครเวฟใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบสมการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Regression) ด้วยวิธีปรับเส้นโค้ง (Alibas, 2007; Assawarachan et al., 2013; McMinn, 2006; Ozkan et al., 2007; Özbek and Dadali, 2007; Wang et al., 2007) และใช้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงสุด (R^2) ค่าไคกำลังสอง (χ^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) เป็นดัชนีบ่งบอกความแม่นยำในการทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไป ดังแสดงใน Eq. (5) และ Eq. (6)

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp i} - MR_{pre i})^2}{N - n_p} \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2} \quad (6)$$

เมื่อค่า $MR_{exp,i}$ และ $MR_{pre,i}$ เป็นค่าอัตราส่วนความชื้นจากการทดลอง และค่าอัตราส่วนความชื้นจากการทำนายของแบบจำลองการอบแห้ง ตามลำดับ

2.5 การวิเคราะห์พารามิเตอร์สี

วัดสีสำหรับตัวอย่างที่บดเป็นผงที่ ระดับความเข้มข้นของกำลังงานคลื่นไมโครเวฟระดับต่างๆ ด้วยเครื่อง Spectrophotometer (HunterLab Model MiniScan XE PLUS) ครึ่งละ 10 g โดยวัดค่าสีในระบบ CIE-Lab scale ในรูปแบบของค่าความสว่าง/ความมืด (L^*) ค่าความเป็นสีแดง/สีเขียว (a^*) ค่าความเป็นสีเหลือง/สีน้ำเงิน (b^*) และค่าความแตกต่างสีโดยรวม (ΔE) ของสาหร่ายเตอบแห้งที่พลังงานไมโครเวฟระดับต่างๆ โดยมีสมการความสัมพันธ์ตามที่แสดงใน Eq. (7)

$$\Delta E = \sqrt{(L_0^* - L_t^*)^2 + (a_0^* - a_t^*)^2 + (b_0^* - b_t^*)^2} \quad (7)$$

เมื่อ L_t^* , a_t^* และ b_t^* คือ ค่าพารามิเตอร์สีของสาหร่ายเตอบแห้งระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่เวลาใดๆ และ L_0^* , a_0^* และ b_0^* คือ ค่าพารามิเตอร์สีของสาหร่ายเตอบสด



Figure 2 Spectrophotometer (Hunter Lab Model: MiniScan XE PLUS).

2.6 การตรวจวิเคราะห์สารประกอบฟีนอลิก

นำสาหร่ายเตอบแห้งที่ผ่านการบดจำนวน 0.5 g ละลายในน้ำกลั่น จำนวน 5 mL ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกตะกอน ที่ความเร็วรอบ 2,500 rpm เป็นเวลา 10 minutes นำส่วนสารละลาย (Supernatant) มาทดสอบโดยวิธี Folin-Ciocalteu method ตามวิธีการของ Sachindra *et al.* (2010) ดังนี้ ใช้ตัวอย่างสารสกัดน้ำของสาหร่ายเตอบแห้งที่ละลายในน้ำกลั่นจำนวน 0.2 mL ใส่ในหลอดทดลองเติมสารละลาย Folin-Ciocalteu ความเข้มข้น 10% จำนวน 1 mL และเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3)

ความเข้มข้น 7.5% จำนวน 0.8 mL ผสมให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 1 h ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นอ่านค่าจากการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 765×10^{-9} m คำนวณปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดโดยเทียบกับสารมาตรฐานกรดแกลลิก (Gallic Acid)

3 ผลและวิจารณ์

3.1 ผลของระดับพลังงานคลื่นไมโครเวฟต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งสาหร่ายเตอบแห้ง

จากการศึกษาผลของระดับพลังงานคลื่นไมโครเวฟต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของสาหร่ายเตอบแห้งระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยสาหร่ายเตอบแห้งที่ใช้ในการทดลองมีความชื้นเริ่มต้น 8.55 ± 0.20 $g_{water}/g_{dry\ matter}$ อบแห้งสาหร่ายเตอบแห้งน้ำหนักคงที่ 300 g ที่ระดับความเข้มข้นของกำลังงาน 0.77, 1.55, 2.00 และ 2.50 $W\ g^{-1}$

Figure 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงความชื้นของสาหร่ายเตอบแห้งที่เวลาใดๆ ในระหว่างการอบแห้ง เวลาที่ใช้ในการอบแห้งสาหร่ายเตอบแห้งเหลือความชื้น 0.15 ± 0.01 $g_{water}/g_{dry\ matter}$ มีค่าเท่ากับ 34, 20, 10.5 และ 5 minutes ตามลำดับ พบว่าที่ระดับความเข้มข้นของกำลังงานคลื่นไมโครเวฟ 2.50 $W\ g^{-1}$ ซึ่งเป็นระดับที่มีพลังงานของคลื่นมากที่สุดจะใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด ซึ่งใช้เวลาในการอบแห้งสาหร่ายเตอบแห้ง 5 minutes แต่ที่ระดับความเข้มข้นของกำลังงานคลื่นไมโครเวฟ 0.77 $W\ g^{-1}$ จะใช้เวลาในการอบแห้งสาหร่ายเตอบแห้ง 34 minutes ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการอบแห้งสาหร่ายเตอบแห้งจะขึ้นอยู่กับระดับพลังงานคลื่นไมโครเวฟ เมื่อเพิ่มระดับพลังงานคลื่นไมโครเวฟสูงขึ้นจะทำให้เวลาในการอบแห้งลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Maskan, (2001); Dadal *et al.*, (2007)

Figure 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งที่ระดับความชื้นต่างๆ ของการอบแห้งสาหร่ายเตอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยอัตราการอบแห้งสาหร่ายเตอบแห้งจะขึ้นอยู่กับระดับพลังงานคลื่นไมโครเวฟ เมื่อระดับความเข้มข้นของกำลังงานคลื่นไมโครเวฟสูงจะทำให้อัตราการอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ทั้งนี้สาหร่ายเตอบแห้งจัดเป็นวัสดุทางชีวภาพซึ่งมีรูปแบบโครงสร้างทางวิศวกรรมเป็นวัสดุพรุน และมีค่าไดอิเล็กทริกสูงเนื่องจากสาหร่ายเตอบแห้งมีความชื้นเริ่มต้นปริมาณมาก จึงทำให้สามารถดูดซับพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟและเปลี่ยนเป็นความร้อนได้ดี โดยการเกิดความร้อนในสาหร่ายเตอบแห้งจะประกอบไปด้วย กลไกการเหนี่ยวนำเชิงไอออน (Ionic Conduction) และกลไกชนิดการหมุนของ

ทั้งสองขั้ว (Dipolar Rotation) ดังนั้นเมื่อสาหร่ายเตาได้รับพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟในระหว่างการอบแห้ง คลื่นไมโครเวฟจะเหนี่ยวนำให้โมเลกุลของน้ำภายในสาหร่ายเตาเกิดการหมุนจากการเปลี่ยนแปลงขั้วไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว ผลของการหมุนนี้ทำให้เกิดการเสียดสีของโมเลกุลของน้ำภายในโครงสร้างเซลล์ชั้นในของสาหร่ายเตาเกิดเป็นพลังงานความร้อนได้อย่างรวดเร็ว (ฤทธิชัย, 2554ช; ผดุงศักดิ์, 2551) โดยความร้อนที่เกิดขึ้นจะช่วยเร่งอัตราการระเหยของน้ำหรือความชื้นของสาหร่ายเตาที่ผิวหน้า และมีค่าเท่ากับอัตราการเคลื่อนตัวของน้ำภายในโครงสร้างที่มาเติมเต็มบริเวณผิวหน้าของสาหร่ายเตาทำให้มีอัตราการระเหยน้ำที่สูงและคงที่ (Constant Rate Period) และเมื่อการอบแห้งสาหร่ายเตาดำเนินการต่อไปเรื่อยๆ จนความชื้นของสาหร่ายเตาเข้าสู่ความชื้นวิกฤติกระบวนการอบแห้งจะเข้าสู่คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลงอย่างสมบูรณ์ (Falling Rate Period) (น้ำฝนและคณะ, 2555; ฤทธิชัย, 2554ช; Assawarachan et al., 2013)

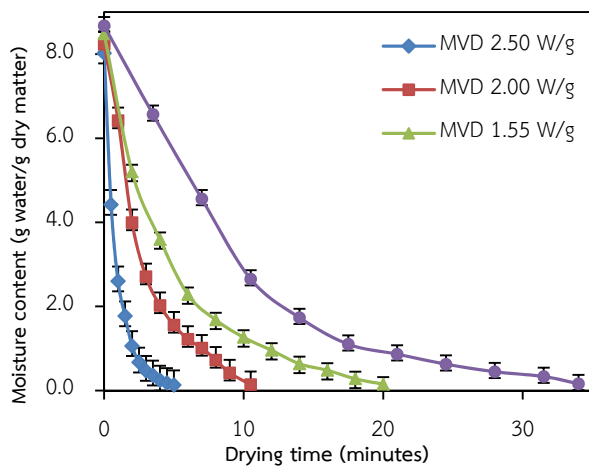


Figure 3 Drying curves of *Spirogyra* sp. at various microwave densities power levels.

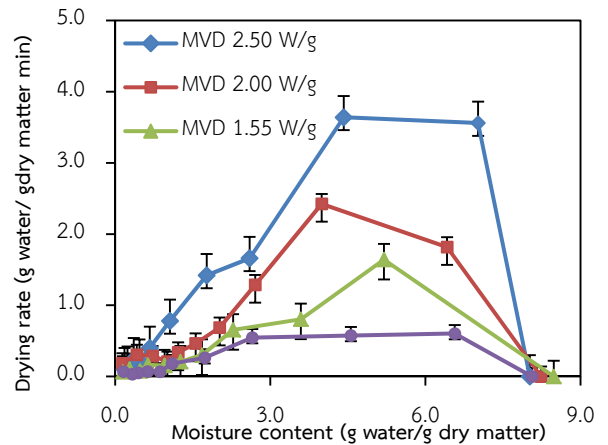


Figure 4 Drying rate curves of *Spirogyra* sp. during microwave vacuum drying process at different microwave densities power levels.

การวิเคราะห์ความแม่นยำของแบบจำลองการอบแห้งจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ค่าโคกำลังสอง (χ^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) เป็นดัชนีบ่งชี้ความแม่นยำของแบบจำลองในการทำนายค่าความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปในการอบแห้ง แบบจำลองที่มีความแม่นยำและเหมาะสมในการทำนายจะให้ค่า R^2 สูงที่สุด แต่ในขณะที่ค่า χ^2 และค่า RMSE จะมีค่าต่ำที่สุด Table 2 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และการวิเคราะห์ทางสถิติของแบบจำลองการอบแห้ง ซึ่งทำให้เห็นว่าแบบจำลองของ Page สามารถทำนายพฤติกรรมของการอบแห้งสาหร่ายเตาได้เหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงสุด (R^2) โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.9963 - 0.9998 ซึ่งมีค่ามากกว่าแบบจำลองการอบแห้งของ Newton, Modified Page Midilli et al., Henderson and Pabis และ Wang and Singh

ในขณะที่ค่า χ^2 และค่า RMSE ของแบบจำลอง Page มีค่าน้อยที่สุด และมีค่าระหว่าง 0.36×10^{-4} - 3.71×10^{-4} และ 0.0054 - 0.0174 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าแบบจำลองการอบแห้งอื่นๆ สอดคล้องกับผลงานวิจัยของการศึกษาแบบจำลองที่เหมาะสมในการทำนายอัตราการอบแห้งของน้ำสับปะรดชั้นระบบไมโครเวฟสุญญากาศ (Assawarachan and Noomhorm, 2011) เช่นเดียวกับผลการวิจัยของ Therdthai and Zhou, (2009) ซึ่งหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในการอบแห้งใบมินต์ในระหว่างการอบแห้งระบบไมโครเวฟสุญญากาศ เช่นเดียวกับผลงานวิจัยของ Bai-Ngew et al. (2011) ซึ่งพบว่าแบบจำลองของ Page มีความแม่นยำในการทำนายอัตราส่วน

ความชื้นที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการแปรรูปทุเรียนอบกรอบ
ด้วยการอบแห้งระบบไมโครเวฟสุญญากาศ

Table 2 Statistical analysis of models at various microwave power densities.

Drying Model	Microwave Power Levels (W)	Empirical Drying Model Constants	Analytical Parameters		
			R ²	χ ² (x10 ⁻⁴)	RMSE
Newton	0.77	k = 0.1052	0.9959	9.19	0.0289
	1.55	k = 0.2086	0.9973	5.13	0.0216
	2.00	k = 0.3354	0.9963	7.91	0.0268
	2.50	k = 1.0674	0.9976	3.74	0.0184
Page	0.77	k = 0.0682, n = 1.1793	0.9984	2.68	0.0174
	1.55	k = 0.2672, n = 0.8635	0.9996	0.79	0.0081
	2.00	k = 0.3279, n = 1.0178	0.9963	3.71	0.0167
	2.50	k = 1.0972, n = 0.8600	0.9998	0.36	0.0054
Modified Page	0.77	k = 0.1025, n = 1.1793	0.9984	3.68	0.0174
	1.55	k = 0.2169, n = 0.8635	0.9995	0.79	0.0081
	2.00	k = 0.3344, n = 1.0178	0.9963	8.71	0.0267
	2.50	k = 1.1139, n = 0.8600	0.9998	0.36	0.0054
Midilli et al.	0.77	k = 0.0805, n = 1.1556, a = 1.0701, b = 0.0007	0.9992	2.19	0.0118
	1.55	k = 0.3604, n = 0.7398, a = 1.1284, b = -0.0010	0.9997	0.84	0.0073
	2.00	k = 0.3282, n = 1.0634, a = 1.0123, b = 0.0027	0.9968	9.67	0.0248
	2.50	k = 1.1541, n = 0.8383, a = 1.0479, b = 0.0009	0.9996	0.79	0.0071
Henderson and Pabis	0.77	k = 0.1086, a = 1.0344	0.9971	7.18	0.0242
	1.55	k = 0.2033, a = 0.9750	0.9980	4.17	0.0185
	2.00	k = 0.3405, a = 1.0152	0.9065	8.19	0.0259
	2.50	k = 1.0489, a = 0.9825	0.9980	3.44	0.0168
Logarithmic	0.77	k = 0.1038, a = 1.0459, c = -0.0165	0.9971	7.85	0.0239
	1.55	k = 0.2242, a = 0.9579, c = 0.0286	0.9987	2.88	0.0145
	2.00	k = 0.3559, a = 1.0052, c = 0.0152	0.9968	8.54	0.0249
	2.50	k = 1.1401, a = 0.9674, c = 0.0238	0.9991	1.57	0.0107
Wang and Singh	0.77	a = -0.0739, b = 0.0014	0.9912	21.57	0.0420
	1.55	a = -0.1339, b = 0.0045	0.9743	7.15	0.0765
	2.00	a = -0.2357, b = 0.0143	0.9838	43.12	0.0594
	2.50	a = -0.5939, b = 0.0838	0.9566	109.38	0.0946

3.2 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของการอบแห้งสำหรับวัสดุระดับพลังงานคลื่นไมโครเวฟ และปริมาณน้ำหนักร้อยละต่างๆ สามารถวิเคราะห์ด้วยวิธีจตุรรูปแบบของ Eq. (3) ในรูปของฟังก์ชันลอการิทึมซึ่งรูปแบบสมการจะอยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ดังแสดงใน Eq. (8)

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(-\pi^2 \frac{D_{eff} \cdot t}{4L^2}\right) \quad (8)$$

สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของสำหรับเตาจากค่าความชื้นของกราฟเส้นตรงซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง ln(MR) และเวลาในการอบแห้ง (t) เมื่อ L คือ ความหนาของสำหรับ ดังแสดงใน Eq. (9)

$$\text{Slope} = \frac{\pi^2 \cdot D_{eff}}{4L^2} \quad (9)$$

ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของสาหร่ายเตาในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟระบบสุญญากาศ จากผลการศึกษาพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของสาหร่ายเตาในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟระบบสุญญากาศจะมีค่าเท่ากับ 0.62×10^{-6} , 1.04×10^{-6} , 1.93×10^{-6} และ $4.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ที่ระดับความเข้มของกำลังงานคลื่นไมโครเวฟที่แตกต่างกัน 4 ระดับ คือ 0.77, 1.55, 2.00 และ 2.50 W g^{-1} ตามลำดับ โดยที่ระดับความเข้มคลื่นไมโครเวฟสูงจะส่งผลต่อการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของสาหร่ายเตา เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟจะเป็นตัวเร่งอัตราการระเหยของน้ำที่ผิวหน้าของสาหร่ายเตา และมีค่าเท่ากับอัตราการเคลื่อนของน้ำภายในโครงสร้างที่เพิ่มเติมบริเวณผิวหน้า ความร้อนที่เกิดขึ้นจะถ่ายเทมวลสารในการแพร่กระจายตัวของความชื้นสู่ผิววัสดุ (Surface Diffusion) สอดคล้องกับรายงานวิจัยของปองพล และฤทธิชัย (2555) และงานวิจัยของ Özbek and Dadali (2007) ซึ่งศึกษาหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของใบกะเพราในระหว่างการอบแห้งด้วยไมโครเวฟที่ระดับกำลังงาน 164 - 752 W และการศึกษาหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของการอบแห้งใบสะระแหน่ด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับกำลังงาน 180 - 900 W ตามลำดับ

3.3 พลังงานกระตุ้น

การหาค่าพลังงานกระตุ้นของสาหร่ายเตาในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ สามารถคำนวณจากความสัมพันธ์ในรูปแบบฟังก์ชันลอการิทึมของสมการอาร์เรเนียส (Eq. (4)) โดยสมการจะอยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ดังแสดงใน Eq. (10)

$$\ln k = \ln k_0 - \left(-\frac{E_a \cdot m}{P} \right) \quad (10)$$

แฟกเตอร์ความถี่ (k_0) และค่าพลังงานกระตุ้นของสาหร่ายเตา (E_a) สามารถคำนวณจากค่าความชันของกราฟเส้นตรงที่พล็อตระหว่าง $\ln(k)$ และ น้ำหนักของสาหร่ายเตาต่อพลังงานของคลื่นไมโครเวฟ (m/P) พบว่าค่า k_0 และ E_a มีค่าเท่ากับ $0.59 \text{ minutes}^{-1}$ และ 2.61 W g^{-1} ดังแสดงใน Figure 5 ในขณะที่ค่า E_a ของการอบแห้งใบสะระแหน่ด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับพลังงาน 180 - 900 W (Özbek and Dadali, 2007) มีค่าอยู่ระหว่าง $11.05 - 12.28 \text{ W g}^{-1}$ ซึ่งมีค่ามากกว่า เนื่องจากใบสะระแหน่มีคุณลักษณะทางกายภาพ รวมทั้งโครงสร้างเซลล์

และองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างจากสาหร่ายเตา อีกทั้งใบสะระแหน่มีค่าความชื้นเริ่มต้นต่ำกว่าสาหร่ายเตา จึงทำให้ต้องใช้พลังงานกระตุ้นเพื่อระเหยน้ำมากกว่าสาหร่ายเตาถึง 4.70 เท่า ดังนั้น ค่า E_a ของการอบแห้งอาหารหรือวัสดุชีวภาพด้วยคลื่นไมโครเวฟจะขึ้นอยู่กับชนิดของอาหารหรือวัสดุชีวภาพ ระดับพลังงานคลื่นไมโครเวฟ และปริมาณน้ำหนักรวมที่ใช้ในการอบแห้ง

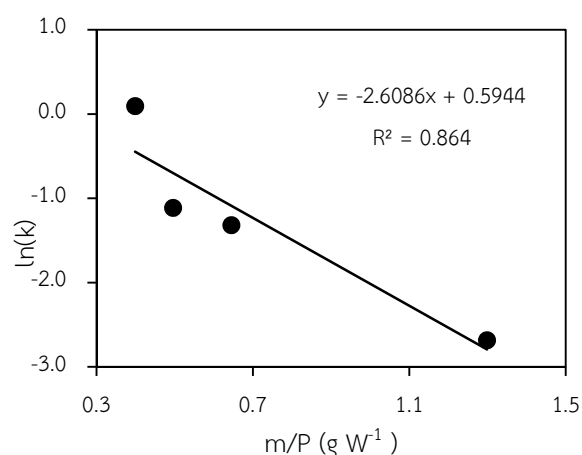


Figure 5 Arrhenius relationships of kinetic constants and microwave power densities levels.

3.4 ผลกระทบของความเข้มคลื่นไมโครเวฟต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงสีและปริมาณสารประกอบฟีนอลิก

3.4.1 การเปลี่ยนแปลงของค่าสี

การเปลี่ยนแปลงสีต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยคลื่นไมโครเวฟระบบสุญญากาศนั้นเป็นกระบวนการที่ขึ้นอยู่กับเวลา (Time-Dependent Process) และพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับสภาวะการอบแห้ง (Figure 6) จากผลการศึกษาพบว่า ค่าความสว่าง (L^* -values) ของสาหร่ายเตาอบแห้ง ที่ระดับความเข้มของคลื่นไมโครเวฟ 0.77, 1.55, 2.00 และ 2.50 W g^{-1} มีค่าเท่ากับ 37.96 ± 0.19 , 35.11 ± 0.27 , 36.36 ± 0.18 และ 35.23 ± 0.2 ตามลำดับ สอดคล้องกับค่าความเป็นสีเหลือง/สีน้ำเงิน (b^* -values) มีค่าเท่ากับ 26.04 ± 0.15 , 23.93 ± 0.24 , 23.91 ± 0.22 และ 19.81 ± 0.12 ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าค่า L^* -values ของสาหร่ายเตาอบแห้งด้วยระบบไมโครเวฟสุญญากาศจะมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในขณะที่ค่า b^* -values จะสามารถแบ่งกลุ่มออกได้เป็น 3 กลุ่ม โดยที่สาหร่ายเตาแห้งที่ความเข้มคลื่นไมโครเวฟที่ระดับ 1.55 และ 2.0 W g^{-1} ไม่มีความแตกต่างกันระหว่างกลุ่ม

อย่างมีนัยสำคัญ โดยการวัดค่าสีของสาหร่ายเตาอบแห้งมีค่า L*-values และ b*-values มากขึ้นเมื่อเทียบกับสาหร่ายเตาสด เนื่องจากสาหร่ายเตาสดมีปริมาณน้ำอิสระอยู่ในโครงสร้างเซลล์ที่มาก ส่งผลให้เป็นวัสดุทึบแสงแต่เมื่อมีการระเหยน้ำในกระบวนการอบแห้งจึงทำให้สาหร่ายเตาอบแห้งมีลักษณะเป็นวัสดุโปร่งแสงมากขึ้น (Translucent) ค่า L*-values จึงมีค่ามากขึ้น และเนื่องจากการอบแห้งด้วยระบบสุญญากาศทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยของการอบแห้งมีค่าต่ำจึงไม่ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลจากการได้รับความร้อนสูง สอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Ozkan et al. (2007) และ Therdthai and Zhou (2009) ซึ่งศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงของค่า L*-values และ b*-values ของผักขมและทุเรียนแผ่นด้วยวิธีการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ ระบบสุญญากาศพบว่าค่าความเป็นสีแดง/เขียว (a*-values) มีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งหมายความว่าจะมีค่าความเป็นสีแดงมากขึ้น แสดงถึงความเป็นสีเขียวลดลง สามารถบ่งบอกถึงอัตราการสลายตัวของรงควัตถุสีเขียวหรือปริมาณคลอโรฟิลล์ที่หลงเหลือของสาหร่ายเตาแห้ง ในขณะที่ค่าความแตกต่างสีโดยรวม (Total Color Difference) เป็นค่าที่บอกถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของสาหร่ายเตา โดยเปรียบเทียบกับค่าสีของสาหร่ายเตาสด (เมื่อสาหร่ายเตาสดมีค่า $L_0^* = 14.54$, $a_0^* = -3.37$ และ $b_0^* = 15.34$) จากผลการศึกษาพบว่า a*-values ของสาหร่ายเตาอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับความเข้มของกำลังงานคลื่นไมโครเวฟ 0.77, 1.55, 2.00 และ 2.50 W g⁻¹ มีค่าเท่ากับ 1.91±0.24, 1.69±0.28, 1.78±0.22 และ 2.56±0.2 ตามลำดับ

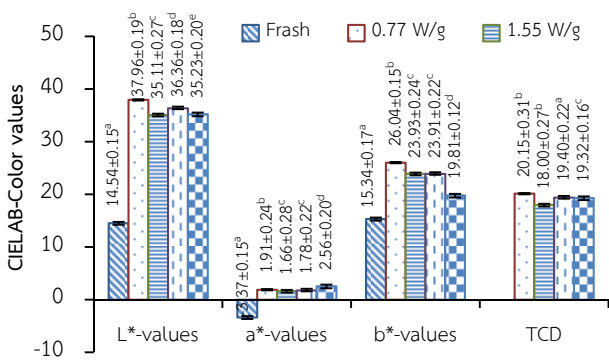


Figure 6 Effect of microwave power densities level on color changed of dried spirogyra sp.

ซึ่งจะพบว่าสาหร่ายเตาอบแห้งที่ความเข้มคลื่นไมโครเวฟที่ระดับ 1.55 W g⁻¹ จะมีค่าความเป็นสีเขียวมากที่สุด หรือมี a*-values น้อยที่สุด และการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าค่า a*-values ของสาหร่ายเตาแห้งที่ระดับความเข้มของกำลังงาน

คลื่นไมโครเวฟ 1.55 และ 2.00 W g⁻¹ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แต่มีความแตกต่างกันกับสาหร่ายเตาแห้งที่ระดับความเข้มของกำลังงานคลื่นไมโครเวฟที่ระดับ 0.77 และ 2.50 W g⁻¹ ค่าความแตกต่างสีโดยรวม (Total Color Difference) มีค่าเท่ากับ 20.15±0.31, 18.00±0.27, 19.40±0.22 และ 19.32±0.16 ตามลำดับ จากผลการศึกษาพบว่าค่า TCD ของสาหร่ายเตาแห้งที่ความเข้มคลื่นไมโครเวฟ 1.55 W g⁻¹ จะมีค่าน้อยที่สุด และที่ระดับความเข้มของกำลังงานคลื่นไมโครเวฟ 2.50 และ 2.00 W g⁻¹ มีค่ารองลงมา และสาหร่ายเตาแห้งที่ 0.77 W g⁻¹ มีมากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากการอบแห้งที่ระดับความเข้มของกำลังงานคลื่นไมโครเวฟที่ระดับ 0.77 W g⁻¹ ใช้เวลาในการอบแห้งนานที่สุด ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมมากที่สุด เมื่อเทียบกับระดับความเข้มของกำลังงานคลื่นไมโครเวฟอื่นๆ แม้ว่า สาหร่ายเตาแห้งที่ความเข้มคลื่นไมโครเวฟ 1.55 W g⁻¹ มีค่า TCD น้อยที่สุด แต่เมื่อเปรียบเทียบกับค่าพารามิเตอร์สี L*-values, a*-values และ b*-values กลับพบว่าสาหร่ายเตาอบแห้งที่ระดับความเข้มของกำลังงานคลื่นไมโครเวฟที่ 2.00 W g⁻¹ มีการเปลี่ยนแปลงสีที่ดีที่สุด เนื่องจากการอบแห้งสาหร่ายเตาที่ระดับความเข้มของกำลังงานคลื่นไมโครเวฟ 2.00 W g⁻¹ เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากที่ระดับความเข้มของกำลังงานคลื่นไมโครเวฟ 2.50 W g⁻¹ แม้ว่าจะใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุดแต่ก็อาจจะมีระดับความเข้มของกำลังงานมากเกินไปกว่าความต้องการในกระบวนการอบแห้ง ดังนั้นคลื่นไมโครเวฟในส่วนที่เกินก็จะเข้าไปทำลายรงควัตถุหรือทำให้คุณภาพสีของสาหร่ายเตาลดลง

3.4.2 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก

Figure 7 แสดงผลกระทบของระดับความเข้มของกำลังงานคลื่นไมโครเวฟต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิก (Phenolic Compound) ซึ่งเป็นสารที่ออกฤทธิ์ทางชีวภาพและมีคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) ในระหว่างการอบแห้งสาหร่ายเตาอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ จากผลการศึกษาพบว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกในสาหร่ายเตาอบแห้งเท่ากับ 1,667.42±22.43, 2078.34±28.23, 2254.34±32.21 และ 2347.16±42.27 mg_{GAE}/100 g_{dry weight} ในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับความเข้มของกำลังงานคลื่นไมโครเวฟ 0.77, 1.55, 2.00 และ 2.50 W g⁻¹ ตามลำดับ โดยที่ระดับความเข้มของกำลังงาน 2.50 W g⁻¹ มีความเหมาะสมในการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยคลื่นไมโครเวฟ เนื่องจากมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกมากที่สุด ในขณะที่ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างทาง

สถิติพบว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกของสาหร่ายเตาที่ระดับความเข้มข้นของกำลังงานคลื่นไมโครเวฟที่ 2.00 และ 2.50 W g⁻¹ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังนั้นการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยคลื่นไมโครเวฟระบบสุญญากาศที่ระดับความเข้มข้นของกำลังงานคลื่นไมโครเวฟ 2.00 W g⁻¹ เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด

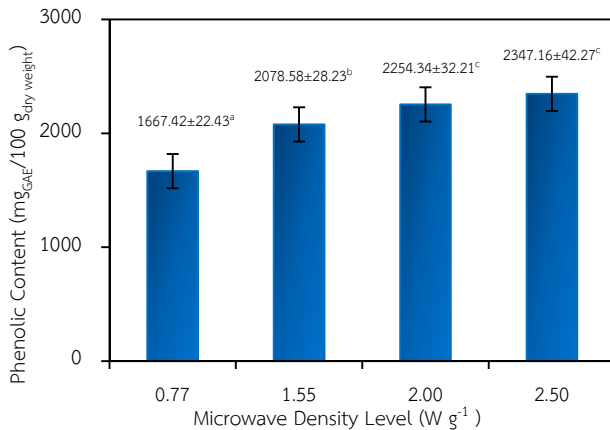


Figure 7 Effect of microwave power densities level on phenolic content degradation of dried *Spirogyra* sp.

4 สรุป

ผลการศึกษาแบบจำลองการอบแห้งแบบชั้นบางของการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยคลื่นไมโครเวฟระบบสุญญากาศ พบว่าเวลาที่ใช้ในการอบแห้งสาหร่ายเตาจากความชื้นเริ่มต้น 8.55 ± 0.20 g_{water}/g_{dry matter} จนเหลือความชื้น 0.15 ± 0.01 g_{water}/g_{dry matter} ใช้เวลาเท่ากับ 34, 20, 10.5 และ 5 minutes ที่ระดับความเข้มข้นของกำลังงานคลื่นไมโครเวฟ 0.77, 1.55, 2.00 และ 2.50 W g⁻¹ ตามลำดับ การศึกษาหาแบบจำลองการอบแห้งแบบชั้นบางที่เหมาะสมในการทำนายอัตราการเปลี่ยนแปลงพบว่าแบบจำลองของ Page สามารถทำนายพฤติกรรมของการอบแห้งสาหร่ายเตาได้เหมาะสมที่สุด ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_{eff}) ของสาหร่ายเตาในระหว่างการอบแห้งมีค่าอยู่ในช่วง 0.62×10^{-6} ถึง 4.5×10^{-6} m² s⁻¹ และค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) มีค่าเท่ากับ 2.61 W g⁻¹

ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคุณภาพสี พบว่าค่าความสว่าง/ความมืด (L*-values) ของสาหร่ายเตาอบแห้ง ที่ระดับความเข้มข้นของกำลังงานคลื่นไมโครเวฟ 0.77, 1.55, 2.00 และ 2.50 W g⁻¹ มีค่าเท่ากับ 37.96±0.19, 35.11±0.27, 36.36±0.18 และ 35.23±0.2 ตามลำดับ สอดคล้องกับค่าความเป็นสีเหลือง/สีน้ำเงิน (b*-values) มีค่าเท่ากับ 26.04±0.15,

23.93±0.24, 23.91±0.22 และ 19.81±0.12 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามค่าพารามิเตอร์สีที่สำคัญในการบ่งบอกถึงคุณภาพสีของสาหร่ายเตาอบแห้งจะพิจารณาที่ค่าสีแดง/สีเขียว (a*-values) และค่าความแตกต่างสีโดยรวม (TCD) ของสาหร่ายเตาอบแห้งที่ระดับความเข้มข้นของกำลังงานคลื่นไมโครเวฟระดับต่างๆ มีค่าเท่ากับ 1.91±0.24, 1.69±0.28, 1.78±0.22, 2.56±0.2 และ 20.15±0.31, 18.00±0.27, 19.40±0.22, 19.32±0.16 ตามลำดับ ในขณะที่การตรวจวัดปริมาณสารประกอบฟีนอลิก มีค่าเท่ากับ 1,667.42±22.43, 2078.34±28.23, 2254.34±32.21 และ 2347.16±42.27 mgGAE/100 g dry weight ตามลำดับ โดยที่ระดับความเข้มข้นของกำลังงานคลื่นไมโครเวฟเท่ากับ 2.00 W g⁻¹ เป็นระดับความเข้มข้นไมโครเวฟที่เหมาะสมในการอบแห้งสาหร่ายเตาของการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟระบบสุญญากาศ

5 กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ เรื่อง การพัฒนาชุดอุปกรณ์สำหรับการศึกษากระบวนการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟภายใต้สภาวะสุญญากาศ: กรณีศึกษา จลนพลศาสตร์การอบแห้งสาหร่ายเตาซึ่งได้รับงบประมาณเงินกองทุนอุดหนุนการวิจัย คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยแม่โจ้

6 เอกสารอ้างอิง

- ดวงพร อมรเลิศพิศาล, กฤษณา ดวงจันทร์, ดวงตา กาญจนโพธิ์, ธวัช แต่โสติกุล, ยุวดี พิรพรพิศาล. 2555. ฤทธิ์ปกป้องแผลกระเพาะอาหารของสาหร่ายเตา. วารสารวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 40(1), 236-241.
- ฐิติกานต์ ปัญญาใหญ่. 2550. กิจกรรมต้านออกซิเดชันของสาหร่ายเตา. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. เชียงใหม่: บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- น้ำฝน ไชยลังกา, รัตนาภรณ์ จันทร์ทิพย์, ดวงพร อมรเลิศพิศาล, กฤษณีย์ อัครวราชนันย์. 2555. ผลกระทบของระดับพลังงานไมโครเวฟต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของสาหร่ายเตาอบแห้ง. รายงานการประชุมวิชาการประมง ครั้งที่ 7 ประจำปี 2555, เชียงใหม่: คณะเทคโนโลยีการประมงและทรัพยากรทางน้ำ มหาวิทยาลัยแม่โจ้. 6-8 ธันวาคม 2555, เชียงใหม่.

- ปองพล สุริยะกันธร, ฤทธิชัย อัครวราชันย์. 2555. แบบจำลองการอบแห้งใบกะเพราด้วยคลื่นไมโครเวฟ. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. (1), 59-67.
- ผดุงศักดิ์ รัตน์เคโซ. 2551. พื้นฐานการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ. พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- ยุวดี พีรพรพิศาล, ฐิติกานต์ ปัญญาใหญ่, ดวงพร อมรเลิศพิศาล. 2555. ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและต้านการอักเสบของสารห่วยเตา. วารสารวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น 40(1), 228-235.
- ฤทธิชัย อัครวราชันย์, ฉัตรชนก คงสิทธิ์, ดวงพร อมรเลิศพิศาล. 2555. คุณลักษณะการอบแห้งของสารห่วยเตาด้วยคลื่นไมโครเวฟ. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย 18(1), 1-8.
- ฤทธิชัย อัครวราชันย์. 2554ก. เทคโนโลยีการสร้างความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในการแปรรูปอาหาร. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย 17(1), 41-51.
- ฤทธิชัย อัครวราชันย์. 2554ข. การอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรด้วยคลื่นไมโครเวฟ. วารสารวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต 1(2), 31-42.
- สั๊กมล เทพหัสดิน ณ อยุธยา. 2555. การอบแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพ. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ท็อป.
- สรณัฏร เทียมดาว, ยุวดี พีรพรพิศาล. 2552. ความหลากหลายของสารห่วยน้ำจืดกินได้ในแม่น้ำโขงและแม่น้ำน่าน. วารสารวิจัยเทคโนโลยีการประมง 3(1), 115-124.
- Alibas, I. 2007. Microwave air and combined microwave-air-drying parameters of pumpkin slices. LWT 40, 1445-1451.
- AOAC. 2005. Official Methods of Analysis. (18th Edn.). Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC: USA.
- Assawarachan, R., Nookong, M., Chailungka N, Amornlerdpison, D. 2013. Effects of microwave power on the drying characteristics color and phenolic content of Spirogyra sp. Journal of Food Agriculture & Environment 11(1), 1-4.
- Assawarachan, R., Noomhorm, A. 2008. Effect of operating condition on the kinetic of color change of concentrated pineapple juice by microwave vacuum evaporation. Journal of Food Agriculture & Environment 6(3&4), 47-53.
- Assawarachan, R., Noomhorm, A. 2011. Mathematical Models for Vacuum Microwave Concentration Behavior of Pineapple Juice. Journal of Food Process Engineering 34(5), 1485-1505.
- Bai-Ngew, S., Therdthai, N., Dhamvithee, P. 2011. Characterization of microwave vacuum-dried durian chips. Journal of Food Engineering 104, 114-122.
- Dadal, G., Apar, D.K., Özbek, B. 2007. Microwave drying kinetics of okra. Drying Technology 25(5), 917-924.
- Evin, D. 2012. Thin layer drying kinetics of Gundelia tournefortii L. Food and Bioproducts Processing 90, 323-332.
- Maskan, M. 2001. Drying shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying. Journal of Food Engineering 48, 177-182.
- McMinn, W.A.M. 2006. Thin-layer modeling of the convective, microwave, microwave-convective and microwave vacuum drying of lactose powder. Journal of Food Engineering 72, 113-123.
- Özbek, B., Dadali, G. 2007. Thin-layer drying characteristics and modelling of mint leaves undergoing microwave treatment. Journal of Food Engineering 83, 541-549.
- Ozkan, I.A., Akbudak, B., Akbudak, N. 2007. Microwave drying characteristics of spinach. Journal of Food Engineering 78, 577-583.
- Sachindra, N.M., Airanthi, M.K.W.A., Hosokawk, M., Miyashita, K. 2010. Radical scavenging and singlet oxygen quenching activity of extracts from Indian seaweeds. Journal of Food Science Technology 47, 94-99.
- Therdthai, N., Zhou, W. 2009. Characterization of microwave vacuum drying and hot air drying of mint leaves (*Mentha cordifolia* Opiz ex Fresen). Journal of Food Engineering 91, 482-489
- Wang, Z., Sun, J., Chen, F., Liao, X., 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.