

ผลของอุณหภูมิและเวลาทำแห้งด้วยลมร้อนต่อคุณภาพ
ของเห็ดเข็มทองผงที่ผลิตจากส่วนที่ไม่นิยมบริโภค
Effect of Hot Air Drying Temperature and Time on
Qualities of Enoki Mushroom (*Flammulina velutipes*)
Powder Produced from Uncommonly Consumed Part

วิชมณี ยืนยงพุททกาล*, กุลยา ลิ้มรุ่งเรืองรัตน์, ปณิดา ชัยปัน

และต่อลาภ ศรีเมือง

ภาควิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ตำบลแสนสุข อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20131

Wichamanee Yuenyongputtakal*, Kullaya Limroongreungrat, Panida Chaipan

and Tolap Srimuang

Department of Food Science, Faculty of Science, Burapha University, Saen Suk, Muang, Chon Buri 20131

บทคัดย่อ

ส่วนที่ไม่นิยมบริโภคของเห็ดเข็มทองในงานวิจัยนี้หมายถึงส่วนโคนลำต้นและส่วนเส้นใยเห็ดเข็มทองที่ผู้บริโภคมักตัดทิ้ง พบว่ามีองค์ประกอบของโปรตีน (73.60 g/100g db) สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (13.33 gGAE/100g db) และสารกาบา (gamma-aminobutyric acid) (0.61 g/100g db) และมีสมบัติการต้านอนุมูลอิสระ (54.98 %) สภาวะการอบแห้งด้วยลมร้อนที่ศึกษาแปรอุณหภูมิ (40-70 °C) และเวลา (180-300 นาที) จัดสิ่งทดลองแบบ central composite design (CCD) พบว่าสภาวะการทำแห้งมีผลต่อปริมาณผลผลิตของเห็ดเข็มทองผงที่ได้ ปริมาณความชื้น ค่า a_w ค่าสี ปริมาณโปรตีน ปริมาณกาบา ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และสมบัติการต้านอนุมูลอิสระ ($p < 0.05$) เมื่อใช้อุณหภูมิสูงและเวลาทำแห้งมากขึ้นปริมาณโปรตีนและปริมาณกาบามีแนวโน้มลดลง อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้อุณหภูมิการทำแห้งสูงขึ้นมีแนวโน้มให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและสมบัติต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้น โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณโปรตีน ปริมาณกาบา และปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดกับอุณหภูมิและเวลาทำแห้งด้วยสมการรีเกรสชันที่มีความน่าเชื่อถือโดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมาก ($R^2 \geq 0.75$)

คำสำคัญ : เห็ดเข็มทองผง; ส่วนที่ไม่นิยมบริโภค; สภาวะการทำแห้งด้วยลมร้อน

Abstract

Uncommonly consumed part of Enoki mushroom in this research was defined as the bottom part of fruiting body and mycelia of Enoki mushroom which were usually cut off by consumer. The

*ผู้รับผิดชอบบทความ : wich@buu.ac.th

chemical compositions of uncommonly consumed part of Enoki mushroom were analyzed. It was found that the compositions of protein (73.60 g/100g db) total phenolic compound (13.33 gGAE/100g db) GABA (Gamma-aminobutyric acid) (0.61 g/100g db) and antioxidant activity (54.98 %) still remains. Hot air drying condition of temperature (40-70 °C) and time (180-300 min) were carried out using central composite design (CCD). Results demonstrated a significant effect of drying condition on yield, moisture content, a_w , color value, protein content, GABA content, total phenolic compound content and antioxidant activity ($p < 0.05$). At higher temperature and time of drying trend to decreased protein content and GABA content. However, at higher temperature trend to decreased total phenolic compound content and antioxidant activity. Regression model expressing protein content, GABA content and total phenolic compound content as a function of drying temperature and time were satisfied with high coefficient of determination value ($R^2 \geq 0.75$).

Keywords: Enoki mushroom powder; uncommonly consumed part; hot air drying condition

1. บทนำ

เห็ดเป็นวัตถุดิบชนิดหนึ่งที่นิยมบริโภคและได้รับการยอมรับ เนื่องจากมีสรรพคุณทางยาและเป็นแหล่งสารพฤกษเคมีที่สำคัญ ได้แก่ กาบา (gamma aminobutyric acid, GABA) ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการทำหน้าที่เป็นสารสื่อประสาทในระบบประสาทส่วนกลาง โลวาสเตติน (lovastatin) ช่วยลดไขมันในเส้นเลือด และเออร์โกไธโอนิน (ergothionine) เป็นสารที่ร่างกายไม่สามารถสร้างเองได้ มีบทบาทสำคัญในการทำงานของระบบภูมิคุ้มกัน และต้านการอักเสบ [1,2] [3,4] เห็ดมีการเจริญเติบโตแบบเป็นเส้นใย โดยเส้นใยรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของดอกเห็ดต่อไป สันฐานวิทยาของเห็ดจะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนหมวกและลำต้น (fruiting body) และส่วนของรากหรือเส้นใย (mycelia) โดยปกติมักจะนำเฉพาะส่วนหมวกและลำต้นมาใช้บริโภค ส่วนของเส้นใยเป็นส่วนที่ไม่นิยมบริโภค มักตัดทิ้งไป [5] มีรายงานว่าเห็ดที่นำมาประกอบอาหารมักเพาะจนได้หมวกและลำต้นที่สมบูรณ์เพราะต้องใช้ส่วนหมวกและลำต้นในการบริโภค ส่วนเห็ดที่นำมาใช้ทำยาหรือผลิตภัณฑ์อาหาร

เสริม ไม่จำเป็นต้องเพาะจนได้หมวกและลำต้นสมบูรณ์ มักใช้ส่วนของเส้นใยเห็ด เนื่องจากส่วนของเส้นใยเห็ดมีสารพฤกษเคมีใกล้เคียงกับส่วนของหมวกและลำต้น [1,6] เห็ดเข็มทอง (*Flammulina velutipes*) เป็นเห็ดที่มีการปลูกเชิงการค้าและจากลักษณะสันฐานวิทยาของเห็ดเข็มทองซึ่งมีส่วนของรากหรือเส้นใยที่ต้องตัดทิ้งเป็นสัดส่วนค่อนข้างมาก และมีรายงานว่าส่วนที่บริโภคได้ของเห็ดเข็มทองมีคุณค่าทางโภชนาการ และมีสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ [7] แต่ยังไม่มียางานองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญจากส่วนที่ไม่นิยมบริโภคของเห็ดเข็มทองและการนำมาใช้ประโยชน์

การทำแห้งช่วยยืดอายุการเก็บรักษาอาหารได้ โดยการลดปริมาณน้ำและค่าออกซิเดชัน (water activity) ซึ่งมีผลต่อการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์และการทำงานของเอนไซม์ ในการทำแห้งอาหารปริมาณมากและจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ หากใช้เครื่องมือที่มีราคาแพง อาจต้องใช้ต้นทุนในการผลิตสูง การเลือกใช้เครื่องมือที่มีหลักการไม่ซับซ้อน ยุ่งยาก และราคาไม่แพง แต่ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดี น่าจะเป็นทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้

จริง จากแนวคิดนี้การทำแห้งที่เป็นที่นิยมมากวิธีหนึ่ง คือ การทำแห้งด้วยลมร้อน อย่างไรก็ตาม สภาพการทำแห้งด้านอุณหภูมิและเวลามักมีผลต่อคุณภาพ โดยเฉพาะการคงอยู่ขององค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของอาหาร จึงควรมีการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด [8] ในการศึกษาหาสภาวะการทำแห้งด้วยลมร้อนที่เหมาะสมให้ครอบคลุมระดับของปัจจัย (อุณหภูมิและเวลา) ในช่วงกว้างนั้น การวางแผนการทดลองโดยปกติ มักต้องมีจำนวนสิ่งทดลองที่ต้องดำเนินการทดลองเป็นจำนวนมาก แต่หากจัดสิ่งทดลองแบบ central composite design (CCD) จะสามารถช่วยแก้ปัญหาจำนวนสิ่งทดลองจำนวนมากได้ นอกจากนี้ยังเอื้อต่อการสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ศึกษา กับค่าตอบสนองที่ตรงจุด เพื่ออธิบายผลของปัจจัยต่อค่าตอบสนองได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาการทำแห้งด้วยลมร้อนต่อคุณภาพทางเคมีกายภาพของเห็ดเข็มทองผงที่ผลิตจากส่วนที่ไม่นิยมบริโภค

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 วัตถุดิบและอุปกรณ์

วัตถุดิบเห็ดเข็มทองสด จากบริษัท เอเวอร์ไทย แอกรีโปรดักส์ ใช้เห็ดที่มีความยาว 13-15 เซนติเมตร ตัดส่วนโคนที่มีก้านเชื้อเห็ดออกเล็กน้อย ส่วนที่ไม่นิยมบริโภคของเห็ดเข็มทองในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ส่วนโคนลำต้นและเส้นใยเห็ด ควบคุมคุณภาพโดยการวัดความยาวตั้งแต่ส่วนโคนขึ้นมาประมาณ 2 เซนติเมตร อุปกรณ์หลักที่ใช้ ได้แก่ ตู้อบลมร้อน (BINDER รุ่น FD-53, ประเทศสหรัฐอเมริกา) และเครื่องบดอาหารแห้งระบบใบมีดหมุนด้วยความเร็วสูง (บริษัท ไวก้าวหาญ, ประเทศไทย)

2.2 การวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของเห็ดเข็มทองส่วนที่ไม่นิยมบริโภค

นำส่วนที่ไม่นิยมบริโภคของเห็ดเข็มทองมาล้างด้วยน้ำสะอาดแล้วทำให้สะเด็ดน้ำ นำมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญ ได้แก่ ปริมาณโปรตีน [9] ปริมาณกาบา [10] ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด [11] และรายงานโดยเทียบกับน้ำหนักฐานแห้ง (db) รวมทั้งวิเคราะห์สมบัติการต้านอนุมูลอิสระโดยการทดสอบประสิทธิภาพการจับกับอนุมูลอิสระ DPPH [12,13]

2.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาการทำแห้งด้วยลมร้อนต่อปริมาณองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของเห็ดเข็มทองผงที่ผลิตจากส่วนที่ไม่นิยมบริโภค

แปรรูปอุณหภูมิการทำแห้งอยู่ในช่วง 40-70 องศาเซลเซียส และเวลาการทำแห้งอยู่ในช่วง 180-300 นาที โดยใช้ตู้อบลมร้อน จัดสิ่งทดลองแบบ CCD แบบพหุนกำลังสอง เป็นการศึกษาปัจจัยละ 5 ระดับ (ค่ารหัส -1.414, -1, 0, 1, +1.414) ได้สิ่งทดลองที่มีความแตกต่างกัน จำนวน 9 สิ่งทดลอง แสดงดังตารางที่ 1

การเตรียมตัวอย่างและการทำแห้งนั้น ดำเนินการดังนี้ นำเห็ดเข็มทองส่วนที่ไม่นิยมบริโภค มาล้างด้วยน้ำสะอาดแล้วทำให้สะเด็ดน้ำ หั่นเป็นชิ้นความยาวประมาณ 1 เซนติเมตร เคลี่ยบนถาดที่ใช้ทำแห้งแล้วนำมาทำแห้งโดยใช้ตู้อบลมร้อนตามอุณหภูมิและเวลาที่กำหนด นำเห็ดเข็มทองอบแห้งที่ได้มาบดให้เป็นผงโดยใช้เครื่องบดอาหารแห้ง และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 80 เมช แล้วบรรจุเห็ดเข็มทองผงในถุงออลูมิเนียมฟอยด์ เก็บไว้ที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส จนกว่าจะนำมาวิเคราะห์คุณภาพต่าง ๆ ดังนี้ ปริมาณผลได้ (% yield) ค่า water activity วัดด้วยเครื่อง water activity meter (Novasina รุ่น Thermo constanter TH200, ประเทศสวิตเซอร์แลนด์) ค่าสี วัดด้วยเครื่อง colorimeter (Hunter Lab รุ่น Mini Scan XP Plus, ประเทศสหรัฐอเมริกา) และรายงานเป็นค่า L^* a^* และ

b* วิเคราะห์ปริมาณความชื้น [9] รายงานโดยเทียบกับน้ำหนักฐานเปียก (wb) รวมทั้งวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญตามข้อ 1

นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's new multiple range test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 รวมทั้งวิเคราะห์สมการถดถอยแบบพหุ (multiple regression) เพื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ศึกษา (อุณหภูมิและเวลาการทำแห้ง) กับปริมาณองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญโดยโปรแกรม SPSS version 20 พิจารณานำเชื่อถือของสมการจาก R^2 (coefficient of determination) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ถ้ามีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าสมการมีความเหมาะสม ค่า model significance ซึ่งบอกความสัมพันธ์ระหว่างค่า Y และค่า X ถ้ามีค่าต่ำกว่า 0.05

แสดงถึงค่า Y และ X มีความสัมพันธ์กันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % และถ้ามีค่าต่ำกว่า 0.10 แสดงถึงค่า Y และ X มีความสัมพันธ์กันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 90 % [14] รวมถึงคำนวณค่า root mean square (RMS) ซึ่งบอกความคลาดเคลื่อนของการทำนายจากการใช้สมการ ถ้ามีค่าต่ำกว่า 20 % แสดงว่าค่าที่ได้จากการทำนายมีความคลาดเคลื่อนจากค่าจริงน้อย [15] ซึ่งคำนวณค่า RMS ได้จากสูตร

$$RMS = 100 \sqrt{\frac{\sum [(Y_{ex} - Y_{pred}) / (Y_{pred})]^2}{N}}$$

เมื่อ Y_{ex} คือ ค่าตอบสนองที่ได้จากการทดลอง; Y_{pred} คือ ค่าตอบสนองที่ได้จากการทำนาย; N คือ จำนวนข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

นำสมการที่น่าเชื่อถือมาสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนอง (response surface plot)) ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Statistica (trial version)

ตารางที่ 1 สิ่งทดลองที่ได้จากการแปรอุณหภูมิและเวลาการทำแห้ง โดยการจัดสิ่งทดลองแบบ CCD แบบพหุนกำลังสอง

สิ่งทดลอง	ค่ารหัส		สภาวะการทำแห้ง	
	อุณหภูมิ (X_1)	เวลา (X_2)	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	เวลา (นาที)
1	-1	-1	45	200
2	-1	1	45	285
3	1	-1	65	200
4	1	1	65	285
5	-1.414	0	40	240
6	1.414	0	70	240
7	0	-1.414	55	180
8	0	1.414	55	300
9	0	0	55	240

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์

3.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของเห็ดเข็มทองส่วนที่ไม่นิยมบริโภค

จากตารางที่ 2 แสดงให้เห็นแนวโน้มว่าเห็ดเข็มทองส่วนที่ไม่นิยมบริโภคซึ่งเป็นส่วนเหลือทิ้งจากการบริโภค ยังคงมีศักยภาพด้านเป็นแหล่งที่ดีของ

โปรตีน (73.60 g/100g db) สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (13.33 gGAE/100g db) และสารฟลักซ์เคมีที่สำคัญ โดยเฉพาะการมีสมบัติต้านอนุมูลอิสระ (54.98 %) และกาบา (0.61 g/100g db) สอดคล้องกับที่ Barros และคณะ (2008) รายงานว่าเห็ดเป็นแหล่งที่ดีของโปรตีน จากการวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนของเห็ดป่าและเห็ดที่นิยมบริโภคทางการค้าจำนวน 8 ตัวอย่างพบว่าปริมาณโปรตีนอยู่ในช่วง 17.18-80.93 g/100g db [16] Tsai และคณะ (2006) รายงานว่า ส่วนเหลือทิ้งที่เป็นส่วนเส้นใยของเห็ดโคนญี่ปุ่น (*Agrocybe cylindracea*) มีสมบัติการต้านอนุมูลอิสระที่รายงานเป็น % inhibition โดยเฉลี่ยอยู่ในช่วงที่กว้างตั้งแต่ 47.7-76.1 % ซึ่งจัดว่าเป็นวัตถุดิบที่มีศักยภาพในการนำมาใช้ประโยชน์เป็นส่วนผสมอาหารและยาได้ [17] โดย Kim และคณะ (2008) รายงานว่าเห็ดที่บริโภคได้มีสารประกอบฟีนอลิกที่มีสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระค่อนข้างหลากหลาย ส่วนใหญ่เป็นกลุ่มฟลาโวนอยด์และกรดกลลิก [18] สำหรับสารกาบาหรือแกมมาอะมิโนบิวทีริกแอซิด (gamma aminobutyric acid, GABA) เกิดจากการย่อยสลายกรดกลูตามิกโดยเอนไซม์กลูตาเมตดีคาร์บอกซิเลส (glutamate decarboxylase) โดยเกิดขึ้นได้มากในระหว่างการออก [19] ทั้งนี้ ชนิษฐา (2552) รายงานว่าในส่วนยอดหรือส่วนที่งอกใหม่ของพืช มักตรวจพบปริมาณกาบาได้มากกว่าส่วนอื่น เนื่องจากในระหว่างที่กระบวนการงอกเกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีที่ช่วยส่งเสริมให้เกิดการย่อยสลายกรดกลูตามิก ทำให้มีการสะสมของกาบาไว้ได้มากกว่าส่วนต่าง ๆ ของพืช [20] จากผลการวิเคราะห์ พบว่าเห็ดเข็มทองส่วนที่ไม่นิยมบริโภคยังคงตรวจพบสารกาบาในปริมาณมากด้วย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากส่วนที่ไม่นิยมบริโภคส่วนใหญ่เป็นส่วนของเส้นใยเห็ดซึ่งในระหว่างการเจริญของเห็ดจะเกิดการงอกใหม่ของเส้นใยในก้อนเชื้ออย่างต่อเนื่อง จึง

มีโอกาสดเกิดการย่อยสลายของกรดกลูตามิกได้เป็นสาร
กาบาสะสมอยู่นั่นเอง Cohen และคณะ (2014)
รายงานว่าการวิเคราะห์ปริมาณกาบาจากเห็ด
จำนวน 12 ชนิด พบว่าโดยเฉลี่ยมีปริมาณกาบาอยู่ใน
ช่วงกว้าง และพบว่าเห็ดถั่งเช่าสีทอง (*Cordyceps
militaris*) เห็ดนางรม (*Pleurotus ostreatus*) และ
เห็ดถั่วฝรั่ง (*Coprinus comatus*) มีปริมาณกาบาสูง
ที่สุดเท่ากับ 0.756, 1.305 และ 1.092 g/100g db
ตามลำดับ [21] จากผลการวิเคราะห์ในขั้นตอนนี้จึง
แสดงให้เห็นว่า ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญ
จากส่วนที่ไม่นิยมบริโภคของเห็ดเข็มทองมีอยู่ใน
ปริมาณใกล้เคียงกับกับส่วนเหลือทิ้งเห็ดของชนิดอื่น
จึงเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่ยังมีคุณค่าและมีศักยภาพในการ
นำมาเพิ่มมูลค่าและใช้ประโยชน์ต่อไป

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของเห็ดเข็มทอง
ส่วนที่ไม่นิยมนบริโภค

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ±SD
โปรตีน (g/100g db)	73.60±2.88
กาบา (g/100g db)	0.61±0.10
สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (gGAE/100g db)	13.33±0.89
สมบัตการต้านอนุมูลอิสระ (% inhibition)	54.98±0.32

3.2 ผลของอุณหภูมิและเวลาการทำแห้งด้วย

ลมร้อนต่อคุณภาพทางเคมีกายภาพและปริมาณ
องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของเส้นใยเห็ดเข็มทอง
ผง

3.2.1 ปริมาณผลได้ ปริมาณความชื้นและ

ค่า a_w

จากการทดลองพบว่าสภาวะการทำ
แห้งเห็ดเข็มทองตามสิ่งทดลองที่ 1, 2, 5 และ 7 ไม่

สามารถทำให้ตัวอย่างแห้งเพียงพอที่จะบดให้เป็นผงได้ ตัวอย่างยังคงมีลักษณะชิ้นมาก ในขณะที่สิ่งทดลองที่ 3, 4, 6, 8 และ 9 ได้ตัวอย่างที่แห้งและสามารถบดลดขนาดเป็นผงและร่อนผ่านตะแกรงได้ จากตารางที่ 3 พบว่าสิ่งทดลองดังกล่าวมีปริมาณผลได้อยู่ในช่วง 2.61-10.12 % แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) โดยพบว่าตัวอย่างจากสิ่งทดลองที่ 6 ที่ทำแห้งที่อุณหภูมิ 70 °C 240 นาที มีปริมาณผลได้มากที่สุด (10.12 %) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเป็นสภาวะการทำแห้งที่ใช้อุณหภูมิสูงสุด จึงทำให้เกิดอากาศร้อนที่

อุณหภูมิสูงเพียงพอพัดผ่านผิวหน้าอาหารที่เปียก ความร้อนจะถูกถ่ายเทไปยังผิวของอาหาร และระเหยออกมาด้วยความร้อนแฝงของการเกิดไอ สภาวะการทำแห้งที่รุนแรงเพียงพอจะทำให้ความดันไอที่ผิวหน้าของอาหารต่ำกว่าความดันไอด้านในอาหาร เป็นผลให้เกิดความแตกต่างของความดันไอน้ำ และเกิดแรงดันในการไล่ไอน้ำออกจากอาหารได้ จึงเป็นผลให้ตัวอย่างแห้งอย่างทั่วถึงสามารถบดเป็นผงละเอียดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 80 เมช ได้มากที่สุด

ตารางที่ 3 ปริมาณผลได้ ปริมาณความชื้น และค่า a_w ของเห็ดเข็มทองผงที่ผลิตจากส่วนที่ไม่นิยมบริโภคเมื่อใช้สภาวะการทำแห้งต่าง ๆ

สิ่งทดลอง	สภาวะการทำแห้ง		ค่าเฉลี่ย±SD		
	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	ปริมาณผลได้ (%)	ปริมาณความชื้น (g/100g wb)	ค่า a_w
1	45	200	-	53.06±1.35 ^b	0.93±0.00 ^b
2	45	285	-	35.41±0.35 ^c	0.87±0.01 ^c
3	65	200	5.15±0.15 ^c	12.66±0.46 ^e	0.48±0.00 ^f
4	65	285	9.67±0.77 ^a	9.41±0.16 ^g	0.35±0.00 ^h
5	40	240	-	69.26±1.38 ^a	0.97±0.00 ^a
6	70	240	10.12±0.88 ^a	8.31±0.23 ^g	0.30±0.00 ⁱ
7	55	180	-	35.77±0.10 ^c	0.83±0.00 ^d
8	55	300	6.98±0.22 ^b	11.00±0.57 ^f	0.38±0.00 ^g
9	55	240	2.61±0.10 ^d	14.33±0.84 ^d	0.50±0.03 ^e

^{a, b, ...} หมายถึง ค่าเฉลี่ยในแนวคอลัมน์เดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$); - หมายถึง ไม่สามารถคำนวณปริมาณผลได้

จากตารางที่ 3 พบว่า สภาวะการทำแห้งมีผลทำให้ปริมาณความชื้นและค่า a_w ของตัวอย่างแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) โดยสิ่งทดลองที่ 1, 2, 5 และ 7 ซึ่งมีลักษณะปรากฏยังไม่แห้งและไม่สามารถบดเป็นผงได้นั้น มีปริมาณความชื้น 35.41-69.26 g/100g wb และมีค่า a_w 0.83-0.97 โดยพิจารณาได้ว่าสิ่งทดลองดังกล่าวเป็นการใช้สภาวะการ

ทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำ (40-55 °C) และใช้เวลาการทำแห้งสั้น (180-285 นาที) จึงเป็นสภาวะที่ยังไม่รุนแรงเพียงพอที่จะทำให้เกิดสภาวะอากาศร้อนและเวลาที่เหมาะสมที่จะลดความชื้นออกจากตัวอย่างได้ และจากผลการทดลอง พบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิและเวลาการทำแห้งเพิ่มขึ้น ในสิ่งทดลองที่ 3, 4, 6, 8 และ 9 ทำให้ค่า a_w และปริมาณความชื้นลดลงอย่างมี

นัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) การทำแห้งด้วยลมร้อน เป็นการกำจัดความชื้นออกจากตัวอย่างโดยการให้ความร้อนเพื่อการระเหยความชื้นออกสู่ตัวกลางซึ่งเป็นอากาศร้อนและแห้ง โดยอากาศดังกล่าวนอกจากจะเป็นแหล่งความร้อนเพื่อการระเหยแล้ว ยังทำหน้าที่พาความชื้นจากการระเหยออกจากห้องอบด้วย โดยความชื้นสุดท้ายในตัวอย่างนั้นมากน้อยแตกต่างกันไป ขึ้นกับสภาวะในการทำแห้ง การใช้อุณหภูมิสูง น้ำจะมีโอกาสระเหยออกจากตัวอย่างได้มาก จากผลการทดลองพบว่าสิ่งทดลองที่ 6 ซึ่งอุณหภูมิ 70 °C 240 นาที ทำให้ได้ตัวอย่างที่มีค่า a_w และปริมาณความชื้นต่ำที่สุด คือ 0.30 และ 8.31 g/100g wb ตามลำดับ ด้านปริมาณความชื้น พบว่า สิ่งทดลองที่ 6 ไม่แตกต่างกับสิ่งทดลองที่ 4 ($p \geq 0.05$) โดยมีปริมาณความชื้นอยู่ในช่วง 8.31-9.41 g/100g wb และด้านค่า a_w พบว่า สิ่งทดลองที่ 6 มีค่า a_w ต่ำที่สุด รองลงมาคือ สิ่งทดลองที่ 4 และ 8 มีค่า a_w เท่ากับ 0.35 และ 0.38 ตามลำดับ

ค่า a_w เป็นน้ำอิสระที่จุลินทรีย์สามารถนำมาใช้ในการเจริญเติบโต มีความสำคัญต่ออายุการ

เก็บรักษา การเสื่อมเสีย และความปลอดภัยของอาหาร ส่วนปริมาณความชื้น เป็นค่าที่บ่งชี้ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในอาหาร แนวทางการแปรรูปให้อาหารมีอายุการเก็บได้นานและลดโอกาสการเสื่อมเสียจากปฏิกิริยาเคมีที่ไม่พึงประสงค์ คือ การลดปริมาณความชื้นและ a_w โดยทั่วไปอาหารควรมีปริมาณความชื้นต่ำแต่ก็ขึ้นอยู่กับชนิดอาหารด้วย และค่า a_w ต่ำสุดที่แบคทีเรียทั่วไปจะสามารถเจริญได้ คือ a_w เท่ากับ 0.81 [22] Sheikh และคณะ (2010) รายงานว่าในการเตรียมเห็ดผงเพื่อใช้เป็นส่วนผสมของขนมเค้กควบคุมความชื้นให้ไม่เกิน 10 g/100g wb และให้มีค่า a_w ต่ำ [23] จากเหตุผลที่กล่าวมาการทดลองนี้จึงกำหนดให้เห็ดเข็มทองควรมีปริมาณความชื้นไม่เกิน 10 g/100g wb และมีค่า a_w ต่ำ จากผลการทดลองพบว่าสิ่งทดลองที่ 4 ที่ใช้ อุณหภูมิ 65 °C 285 นาที และสิ่งทดลองที่ 6 ที่ใช้ อุณหภูมิ 70 °C 240 นาที มีปริมาณความชื้นและมีค่า a_w อยู่ในช่วงที่ต้องการ คือ มีปริมาณความชื้น 9.41 และ 8.31 g/100g wb ตามลำดับ มีค่า a_w เท่ากับ 0.35 และ 0.30 ตามลำดับ

ตารางที่ 4 ค่าสีของเห็ดเข็มทองผงที่ผลิตจากส่วนที่ไม่นิยมนบริโภคเมื่อใช้สภาวะการทำแห้งต่าง ๆ

สิ่งทดลอง	สภาวะการทำแห้ง		ค่าเฉลี่ย $\pm$ SD		
	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	L*	a*	b*
1	45	200	46.74 $\pm$ 0.72 ^h	5.51 $\pm$ 0.14 ^e	24.15 $\pm$ 0.42 ^f
2	45	285	37.25 $\pm$ 0.17 ⁱ	6.71 $\pm$ 0.24 ^c	23.08 $\pm$ 0.83 ^g
3	65	200	67.12 $\pm$ 0.15 ^d	6.85 $\pm$ 0.11 ^{bc}	33.02 $\pm$ 0.20 ^b
4	65	285	73.80 $\pm$ 0.05 ^b	6.33 $\pm$ 0.11 ^d	31.76 $\pm$ 0.31 ^d
5	40	240	51.22 $\pm$ 0.48 ^f	4.28 $\pm$ 0.10 ^g	23.03 $\pm$ 0.37 ^g
6	70	240	74.67 $\pm$ 0.04 ^a	7.56 $\pm$ 0.07 ^a	33.46 $\pm$ 0.14 ^b
7	55	180	47.73 $\pm$ 0.07 ^g	5.65 $\pm$ 0.15 ^e	30.26 $\pm$ 0.49 ^e
8	55	300	72.41 $\pm$ 0.17 ^c	5.28 $\pm$ 0.06 ^f	32.43 $\pm$ 0.28 ^c
9	55	240	63.80 $\pm$ 0.05 ^e	7.00 $\pm$ 0.05 ^b	34.66 $\pm$ 0.10 ^a

a, b, ... หมายถึง ค่าเฉลี่ยในแนวคอลัมน์เดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

3.2.2 ค่าสี

จากตารางที่ 4 พบว่าทุกตัวอย่างมีค่า a^* และ b^* เป็นบวก ซึ่งแสดงถึง มีสีออกทางแดงและเหลือง ซึ่งสอดคล้องกับสีที่มองเห็นด้วยตาเปล่า โดยพบว่าสภาวะการทำแห้งมีผลทำให้ค่าสี L^* , a^* และ b^* ของตัวอย่างแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) สิ่งทดลองที่ 1, 2, 5 และ 7 ซึ่งมีลักษณะปรากฏยังไม่แห้งและไม่สามารถบดเป็นผงได้นั้น มีแนวโน้มค่าสี L^* , a^* และ b^* ต่ำกว่าตัวอย่างสิ่งทดลองที่ 3, 4, 6, 8 และ 9 ซึ่งมีลักษณะแห้งสามารถบดเป็นผงละเอียดได้ การที่ส่วนเหลือทิ้งเห็ดเข็มทองในสิ่งทดลองที่ 1, 2, 5 และ 7 มีสีเหลืองคล้ำกว่า เนื่องจากส่วนที่ไม่นิยมบริโภคของเห็ดเข็มทองหลังการตัดแต่งก่อนนำไปทำแห้งนั้นมียีสสีเหลืองคล้ำอยู่แล้ว ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่มีเอนไซม์มาเกี่ยวข้อง (enzymatic browning reaction) ปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นเมื่อเซลล์ของผักผลไม้เกิดการชำรุดหรือฉีกขาด ทำให้สารประกอบฟีนอลิกที่มีอยู่ในผักผลไม้สัมผัสกับอากาศ โดยมีเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้เป็นสารสีน้ำตาลที่เรียกว่าเมลานิน (melanin) และการทำแห้งในสภาวะที่ไม่รุนแรงซึ่งใช้อุณหภูมิในการทำแห้งต่ำร่วมกับเวลาในการทำแห้งน้อย จึงทำให้ตัวอย่างหลังการทำแห้งยังคงมีลักษณะชื้นและฉ่ำน้ำ จึงมีสีเหลืองคล้ำกว่า

จากผลการทดลองพบว่าเห็ดเข็มทองผงที่ผลิตจากส่วนที่ไม่นิยมบริโภคมีแนวโน้มค่า L^* , a^* และ b^* มากขึ้น เมื่อสภาวะการทำแห้งรุนแรงขึ้น ตัวอย่างเช่น สิ่งทดลองที่ 6 ซึ่งทำแห้งที่อุณหภูมิ 70 °C เวลา 240 นาที ทำให้ได้ตัวอย่างที่มีแนวโน้มค่า L^* , a^* และ b^* มาก การที่ตัวอย่างเห็ดเข็มทองผงมีสีออกทางแดงและเหลืองมาก เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารประกอบฟีนอลิกของเส้นใยเห็ดผงระหว่างการอบ โดยในเห็ดมีสารประกอบฟีนอลิก และมีเอนไซม์โพลี-

ฟีนอลออกซิเดส (polyphenol oxidase) จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ เมื่อสารประกอบฟีนอลิกและออกซิเจนสัมผัสกัน โดยมีเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สารมอนอฟีนอล (monophenol) ซึ่งไม่มีสี จะถูกออกซิไดซ์ เป็นไดฟีนอล (diphenol) ซึ่งไม่มีสีและถูกออกซิไดซ์ต่อเป็น o-quinone ซึ่งจะทำปฏิกิริยาต่อกับกรดอะมิโนหรือโปรตีนได้เป็นสารสีน้ำตาล และจะรวมตัวกันเป็นพอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลใหญ่และมีสีน้ำตาล เช่น เมลานิน จึงทำให้ตัวอย่างเห็ดเข็มทองผงที่ได้มีสีออกทางแดงและเหลือง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ulzijaigal และคณะ (2013) ที่นำเส้นใยเห็ดการบูร (*Antrodia camphorate*) เห็ดกระดุมบราซิล (*Agaricus blazei*) เห็ดหัวลิง (*Hericium erinaceus*) และเห็ดกระถินพิมาน (*Phellinus linteus*) มาทำให้เป็นผงแห้งด้วยวิธีการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง พบว่าได้เส้นใยเห็ดผงมีสีออกน้ำตาล ซึ่งเป็นสีจากการคว่ตเฉพาะในเห็ด และสีน้ำตาลอาจเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารประกอบฟีนอลิกกับเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสของเห็ดในระหว่างการทำแห้ง [6] Pereira และคณะ (2012) รายงานว่าเห็ดเข็มทองมีรงควัตถุพวกแคโรทีนอยด์ ได้แก่ เบต้าแคโรทีน (beta-carotene) และไลโคปีน (lycopene) เท่ากับ 0.34 และ 0.02 mg/100g db [24] จากผลการทดลองพบว่าเมื่อสภาวะในการทำแห้งรุนแรงมากขึ้นมีผลให้เห็ดเข็มทองผงมีความสว่างมากขึ้น อาจเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารพวกแคโรทีนอยด์ ที่มีพันธะคู่จำนวนมาก เมื่อสัมผัสกับความชื้น แสง หรืออากาศ แคโรทีนอยด์ถูกออกซิไดซ์ จึงทำให้สีจางลง นอกจากนี้การเปลี่ยนโครงสร้างของแคโรทีนอยด์ที่เกิดจากการเปลี่ยนไอโซเมอร์จากทรานส์ (trans) ไปเป็นซิส (cis) เมื่อสัมผัสกับความชื้นก็มีผลให้สีจางลงได้ เนื่องจากโครงสร้างพันธะคู่แบบซิสเป็นผลให้สีจางลง [25] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ

เศรษฐกิจ (2554) รายงานว่าค่าสิ่งพองมีรังควัตถุสำคัญ คือ คลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์ การซีดจางลงของสี มีผลให้ค่าความสว่าง (L^*) สูงขึ้น เป็นผลสำคัญจากการ

เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของรงควัตถุในสภาวะที่มีอากาศและแสง [26]

ตารางที่ 5 ปริมาณโปรตีน ปริมาณกาบา ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และสมบัติการต้านอนุมูลอิสระของเห็ดเข็มทองผงที่ผลิตจากส่วนที่ไม่นิยมบริโภคเมื่อใช้สภาวะการทำแห้งต่าง ๆ

สิ่งทดลอง	สภาวะการทำแห้ง		ค่าเฉลี่ย±SD			
	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาท.)	ปริมาณโปรตีน (g/100g db)	ปริมาณกาบา (g/100g db)	ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (gGAE/100g db)	สมบัติการต้านอนุมูลอิสระ (% inhibition)
1	45	200	24.06±0.56 ^a	0.52±0.01 ^b	11.88±0.69 ^b	72.76±0.52 ^c
2	45	285	18.31±0.33 ^d	0.24±0.01 ^{ef}	6.70±0.35 ^f	57.65±0.91 ^g
3	65	200	18.58±0.66 ^d	0.14±0.01 ^g	10.59±0.35 ^c	74.82±0.30 ^b
4	65	285	18.33±0.04 ^d	0.23±0.01 ^{ef}	12.80±0.79 ^a	76.74±0.40 ^a
5	40	240	24.60±0.49 ^a	0.73±0.03 ^a	9.68±0.48 ^d	70.51±0.61 ^d
6	70	240	18.79±0.13 ^d	0.25±0.01 ^{de}	10.62±0.34 ^c	74.49±1.15 ^b
7	55	180	21.59±0.37 ^b	0.27±0.01 ^d	9.98±0.26 ^{cd}	69.25±0.11 ^e
8	55	300	19.61±0.22 ^c	0.31±0.03 ^c	9.44±0.35 ^d	72.56±0.72 ^c
9	55	240	18.93±0.19 ^d	0.21±0.01 ^f	7.80±0.65 ^e	63.02±0.69 ^f

a, b, ... หมายถึง ค่าเฉลี่ยในแนวคอลัมน์เดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

3.2.3 องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญ

จากตารางที่ 5 พบว่าสภาวะการทำแห้งมีผลทำให้ปริมาณโปรตีนและกาบาของเห็ดเข็มทองผงที่ผลิตจากส่วนที่ไม่นิยมบริโภคแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยพบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงไปในทางเดียวกัน คือ เมื่อสภาวะการทำแห้งรุนแรงมากขึ้น มีแนวโน้มให้ปริมาณโปรตีนและกาบาลดลง ในขณะที่สภาวะการทำแห้งรุนแรงน้อย มีแนวโน้มให้ปริมาณโปรตีนและกาบายังคงอยู่มากกว่าจากผลการทดลอง พบว่าการใช้อุณหภูมิทำแห้งระดับต่ำ (40-45 °C) และใช้ระยะเวลาทำแห้งสั้น (200-240 นาท.) ในสิ่งทดลองที่ 1 และ 5 ทำให้ตัวอย่างยังคงมี

ปริมาณโปรตีนมากที่สุด (24.06 และ 24.60 g/100g db ตามลำดับ) ($p < 0.05$) และพบว่าการใช้อุณหภูมิทำแห้งระดับต่ำที่สุด (40 °C) ร่วมกับการใช้เวลาทำแห้งสั้น (240 °C) ในสิ่งทดลองที่ 5 ทำให้ส่วนเหลือทิ้งเห็ดเข็มทองหลังการทำแห้งและบดยังคงมีปริมาณกาบามากที่สุด (0.73 g/100g db) ($p < 0.05$) โปรตีนในอาหารอาจสูญเสียโครงสร้างในระหว่างการทำแห้งได้ จากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโปรตีนในภาวะที่ได้รับความร้อนสูงเป็นเวลานาน ทำให้เกิดครอสลิง (crosslink) ระหว่างโมเลกุลของโปรตีน และความร้อนทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดอะมิโนบางชนิด ทำให้สูญเสียโครงสร้างไป จึงทำให้ปริมาณโปรตีนลดลงเมื่อสภาวะ

การทำแห้งรุนแรงขึ้น [25] สภาวะการทำแห้งมีผลต่อปริมาณกาบาโดยมีแนวโน้มลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ วรินธร และคณะ (2552) ศึกษาผลของอุณหภูมิในการลดความชื้นที่มีต่อปริมาณกรดกาบาซึ่งเป็นรูปหนึ่งของกรดอะมิโนกลูตามิกในข้าวกล้องงอกที่ผลิตขึ้นเพื่อการเพิ่มมูลค่าผลิตผลทางการเกษตร โดยแปรรูปอุณหภูมิในการลดความชื้นหรือการทำแห้งหลายระดับ ได้แก่ 20, 40, 80 และ 160 °C พบว่าการลดความชื้นที่อุณหภูมิสูง (160 °C) มีผลต่อการสูญเสียปริมาณกาบามากกว่าการลดความชื้นที่อุณหภูมิต่ำ [27]

สำหรับปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และสมบัติการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน แต่แตกต่างจากปริมาณโปรตีน และปริมาณกาบา จากตารางที่ 5 พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการทำแห้งสูงขึ้น ทำให้เกิดเข็มทองผงที่ผลิตจากส่วนที่ไม่นิยมบริโภคมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและสมบัติการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้น สำหรับปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดพบว่าสิ่งทดลองที่ 4 ซึ่งใช้อุณหภูมิในการทำแห้ง 65 °C เวลา 285 นาที มีปริมาณสูงที่สุด (12.80 gGAE/100g db) รองลงมา คือ สิ่งทดลองที่ 6 ซึ่งใช้อุณหภูมิในการทำแห้ง 70 °C เวลา 240 นาที (10.62 gGAE/100g db) สำหรับสมบัติการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระซึ่งแสดงเป็น % inhibition พบว่าสิ่งทดลองที่ 4 ซึ่งใช้อุณหภูมิในการทำแห้ง 65 °C เวลา 285 นาที มีค่าสูงที่สุด (76.74 %) รองลงมา คือ สิ่งทดลองที่ 6 ซึ่งใช้อุณหภูมิในการทำแห้ง 70 °C เวลา 240 นาที (74.49 %) อาจเนื่องจากการทำแห้งที่อุณหภูมิสูง เป็นสภาวะที่มีความร้อนเพียงพอในการตัดพันธะสารประกอบฟีนอลิกที่อยู่ในรูปที่ไม่แตกตัว (bound form) เช่น เอสเทอร์ไฟด์ (esterified) และไกลโคไซด์ (glycosylated) ทำให้มีสารประกอบฟีนอลิกอยู่ในรูปอิสระ (free form) เพิ่ม

มากขึ้น [28] และสารประกอบฟีนอลิกอาจเพิ่มมากขึ้นจากสารประกอบเชิงซ้อนโพลีฟีนอล ซึ่งเกิดในขั้นตอนสุดท้ายของปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (browning reaction) จึงทำให้มีสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดเพิ่มมากขึ้น [29] และเนื่องจากสารประกอบฟีนอลิกส่วนใหญ่มีสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ จึงทำให้มีสมบัติการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kim และคณะ (2013) ศึกษาการเปรียบเทียบวิธีการให้ความร้อนที่มีผลต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิกในกระเทียมดำ โดยนำกระเทียมดำที่ได้จากการบ่มที่อุณหภูมิและความชื้นต่างกันในแต่ละสิ่งทดลอง ได้แก่ (1) อุณหภูมิ 90 °C 100 % RH เวลาบ่ม 34 ชั่วโมง (2) อุณหภูมิ 60 °C 60 % RH เวลาบ่ม 6 ชั่วโมง (3) อุณหภูมิ 75 °C 70 % RH อุณหภูมิบ่ม 48 ชั่วโมง (4) อุณหภูมิ 70 °C 60 % RH เวลาบ่ม 60 ชั่วโมง และ (5) อุณหภูมิ 65 °C 50 % RH เวลาบ่ม 192 ชั่วโมง พบว่ากระเทียมที่นำไปบ่มทุกสิ่งทดลอง มีปริมาณสารฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์สูงกว่ากระเทียมสดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) [30]

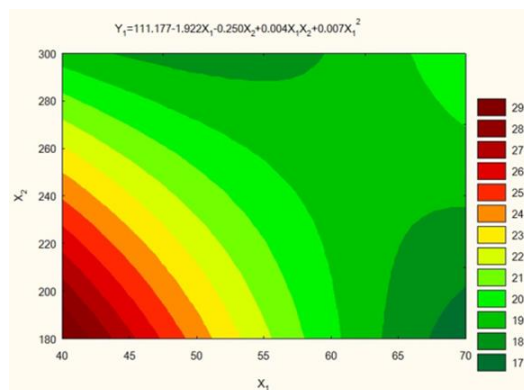
จากตารางที่ 6 พบว่าสมการของปริมาณโปรตีน ปริมาณกาบา และปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการทำนายความสัมพันธ์ได้โดย มีค่า R^2 มากกว่า 0.75 (0.90, 0.76 และ 0.84 ตามลำดับ) ค่า model significance ซึ่งบอกความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรพบว่าสมการของปริมาณโปรตีน และปริมาณกาบามีค่าต่ำกว่า 0.05 (0.01 และ 0.03 ตามลำดับ) แสดงว่าค่า Y และ X มีความสัมพันธ์กันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ส่วนค่า model significance ของปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดมีค่าต่ำกว่า 0.10 (0.09) แสดงว่าค่า Y และ X มีความสัมพันธ์กันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 90 % ค่า RMS ของการใช้สมการของปริมาณโปรตีน ปริมาณกาบา และปริมาณ

สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดเท่ากับ 0.11, 4.15 และ 0.40 % ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่า 20 % แสดงว่าสมการมีความน่าเชื่อถือและมีความแม่นยำในการทำนายค่า [15] สำหรับสมการของสมบัติการต้าน

อนุมูลอิสระมีค่า R^2 เท่ากับ 0.52 ค่า model significance เท่ากับ 0.19 ซึ่ง R^2 มีค่าน้อยกว่า 0.75 และ model significance มีค่ามากกว่า 0.05 สมการจึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการทำนายค่า

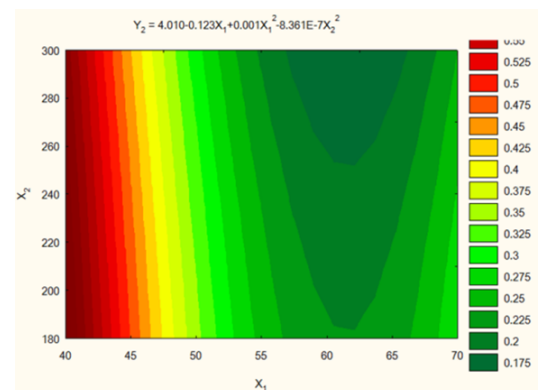
ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบพหุแสดงความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของเห็ดเข็มทองผงที่ผลิตจากส่วนที่ไม่นิยมบริโภค (Y_1 = ปริมาณโปรตีน, Y_2 = ปริมาณกาบา, Y_3 = ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และ Y_4 = สมบัติการต้านอนุมูลอิสระ) กับอุณหภูมิการทำแห้ง (X_1) และเวลาการทำแห้ง (X_2)

องค์ประกอบ	สมการ	R^2	model significance	RMS (%)
โปรตีน	$Y_1 = 111.177 - 1.922X_1 - 0.250X_2 + 0.004X_1X_2 + 0.007X_1^2$	0.90	0.01	0.11
กาบา	$Y_2 = 4.010 - 0.123X_1 + 0.001X_1^2 - 8.361E-7X_2^2$	0.76	0.03	4.51
สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด	$Y_3 = 113.314 - 2.155 X_1 - 0.383 X_2 + 0.014X_1^2 + 0.003X_1X_2 + 4.000E-4X_2^2$	0.84	0.09	0.40
สมบัติการต้านอนุมูลอิสระ	$Y_4 = 192.956 - 2.109X_1 - 0.579X_2 + 0.010X_1X_2$	0.52	0.19	0.11



รูปที่ 1 กราฟพื้นผิวตอบสนองความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโปรตีน (Y_1) กับอุณหภูมิการทำแห้ง (X_1) และเวลาการทำแห้ง (X_2)

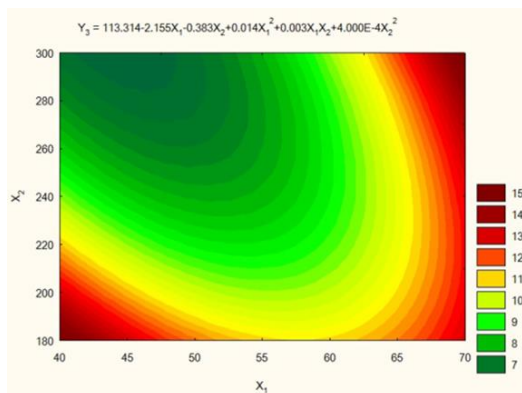
จากรูปที่ 1 พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการทำแห้งมีผลทำให้ปริมาณโปรตีนมีแนวโน้มลดลง และพบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิในการทำแห้งคงที่ หาก



รูปที่ 2 กราฟพื้นผิวตอบสนองความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกาบา (Y_2) กับอุณหภูมิการทำแห้ง (X_1) และเวลาการทำแห้ง (X_2)

เวลาในการทำแห้งเพิ่มขึ้น มีแนวโน้มให้ปริมาณโปรตีนลดลง เช่นเดียวกับเมื่อใช้เวลาในการทำแห้งคงที่ หากอุณหภูมิในการทำแห้งเพิ่มขึ้น มีแนวโน้มให้ปริมาณ

โปรตีนลดลง จากรูปที่ 2 พบว่ามีแนวโน้มคล้ายกับปริมาณโปรตีน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการทำแห้งมีผลทำให้ปริมาณกาบามีแนวโน้มลดลง แต่พบว่าปริมาณกาบามีผลจากการเปลี่ยนระดับอุณหภูมิมากกว่าการเปลี่ยนแปลงเวลาในการทำแห้ง สังเกตได้จากภาพว่าเมื่อใช้เวลาในการทำแห้งคงที่ หากอุณหภูมิในการทำแห้งเพิ่มขึ้น มีแนวโน้มให้ปริมาณกาบลดลง



รูปที่ 3 กราฟพื้นผิวตอบสนองความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Y_3) กับอุณหภูมิการทำแห้ง (X_1) และเวลาการทำแห้ง (X_2)

จากรูปที่ 3 พบว่าการใช้อุณหภูมิในการทำแห้งระหว่าง 40-64 °C ร่วมกับการใช้เวลาในการทำแห้งระหว่าง 200-300 นาที มีแนวโน้มทำให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของเห็ดเข็มทองผงที่ผลิตจากส่วนที่ไม่นิยมบริโภคมีปริมาณน้อย (7-9 gGAE/100g db) และพบว่าการใช้สภาวะการทำแห้งอุณหภูมิสูงตั้งแต่ 65-70 °C มีแนวโน้มทำให้สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดมีปริมาณมาก (12-15 gGAE/100g db) อย่างไรก็ตาม พบว่าการใช้สภาวะการทำแห้งอุณหภูมิต่ำร่วมกับเวลาในการทำแห้งน้อยสามารถคงปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดให้มีปริมาณมากขึ้น

4. สรุป

เห็ดเข็มทองส่วนที่ไม่นิยมบริโภคยังคงมีองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญจึงจัดเป็นส่วนเหลือทิ้งที่ยังมีคุณค่าและมีศักยภาพในการนำมาเพิ่มมูลค่าและใช้ประโยชน์ต่อไปได้ ในการผลิตเห็ดเข็มทองผงโดยการทำแห้งด้วยลมร้อน พบว่าสภาวะการทำแห้งมีผลต่อคุณภาพของเห็ดเข็มทองผงที่ได้ ($p < 0.05$) โดยการทำแห้งที่อุณหภูมิ 65 °C เป็นเวลา 285 นาที มีความเหมาะสมที่สุด ได้เห็ดเข็มทองผงที่มีปริมาณความชื้น 9.41 g/100g wb มีค่า a_w ระดับต่ำ เท่ากับ 0.35 มีปริมาณสารพิษทุกชนิด ได้แก่ ปริมาณกาบ เท่ากับ 0.23 g/100g db ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก เท่ากับ 12.80 gGAE/100g db และมีสมบัติการต้านอนุมูลอิสระ (% inhibition) เท่ากับ 76.74 %

5. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยที่ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ 2558 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 48/2558 คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

6. รายการอ้างอิง

- [1] Chen, S.Y., Ho, K.J., Hsieh, Y.J., Wang, L.T. and Mau, J.L., 2012, Contents of lovastatin, Gamma-aminobutyric acid and ergothioneine in mushroom fruiting bodies and mycelia, LWT Food Sci. Technol. 47: 274-278.
- [2] Wasser, S.P. and Wesis, A.L., 1999, Medicinal properties of substances occurring in higher Basidiomycetes

- mushroom: Current perspective (review), Int. J. Med. Mushrooms 1: 31-62.
- [3] Tseng, Y.H., Yang, J.H. and Mau, J.L., 2008, Antioxidant properties of polysaccharides from *Ganoderma tsugae*, J. Food Chem. 107: 732-738.
- [4] Vangkapun, W., Lomthaisong, K. and Sanoamuang, N., 2011, Enhancement of L-Ergothioneine in Khon (*Lentinus* spp.) and Inkcap (*Coprinus comatus*) mushrooms by fortifying substrate with L-histidine, Khon Kaen Agric. J. 39: 221-230.
- [5] อุดลย์ รัตนมันเกษม, 2543, การเพาะเห็ดขาย (พิมพ์ครั้งที่ 4), นานมีบุ๊คส์, กรุงเทพฯ, 154 น.
- [6] Ulzijjargal, E., Yang, J.H., Lin, L.Y., Chen, C.P. and Mau, J.L., 2013, Quality of bread supplemented with mushroom mycelia, J. Food Chem. 138: 70-76.
- [7] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิธิยา รัตนปณท์, 2552, เห็ดเข็มทอง, แหล่งที่มา : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/เห็ดเข็มทอง>, 14 กันยายน 2558.
- [8] Kong, K.W., Ismail, A., Tan, C.P. and Rajab, N.F., 2010, Optimization of oven drying conditions for lycopene content and lipophilic antioxidant capacity in a by-product of the pink guava puree industry using response surface methodology, LWT Food Sci. Technol. 43: 729-735.
- [9] AOAC, 2000, Official Method of Analysis of A.O.A.C. (17th Ed). Gaithersburg: The Association of official Analysis Chemists.
- [10] Watcharaparpai boon, W., Laohakunjit, N. and Kerdchochuen, O., 2010, An improved process for high quality and nutrition of brown rice production, Food Sci. Technol. Int. 16: 147-158.
- [11] Dewanto, V., Wu, X., Adom, K.K. and Liu, R.H., 2002, Thermal processing enhances the nutritional value of tomatoes by increasing total antioxidant activity, J. Agric. Food Chem. 50: 3010-3014.
- [12] Cotellet, J.A., Bernier, J.L., Catteau, J.B., Pommery, J., Wallet, J.C. and Gaydou, E.M., 1996, Free Radical, Biol. Med. 20: 35.
- [13] Fenglin, H., Ruili, L., Bao, H. and Liang, M., 2004, Free radical scavenging activity of extracts prepared from fresh leaves of selected Chinese medicinal plants, Fitoterapia 75: 14-23.
- [14] Hu, Y., 1999, Study on rough rice fissuring during intermittent drying, Drying Technol. Int. J. 17: 1779-1793.
- [15] Julian, J.F., 2004, Linear Models with R, London, Chapman and Hall, 240 p.
- [16] Lillian Barros, L., Cruz, T., Baptista, P., Estevinho, L.M. and Ferreira, I.C.F.R., 2008, Wild and commercial mushrooms as source of nutrients and nutraceuticals, Food Chem. Toxicol. 46: 2742-2747.
- [17] Tsai, S.Y., Huang, S.J. and Mau, J.L., 2006, Antioxidant properties of hot water extracts from *Agrocybe cylindracea*, Food Chem. 98: 670-677.
- [18] Kim, M.Y., Seguin, P., Ahn, J.K., Kim, J.J., Chun, S.C., Kim, E.H., Seo, S.H., Kang, E.Y.,

- Kim, S.L., Park, Y.J., Ro, H.M. and Chung, I.M., 2008, Phenolic compound concentration and antioxidant activities of edible and medicinal mushrooms from Korea, J. Agric. Food Chem. 56: 265-270.
- [19] Ohtsubo, K., Suzuki, K., Yasui, Y. and Kasumi, T., 2005, Bio-functional components in the processed pre-germinated brown rice by a twin-screw extruder, J. Food Comp. Anal. 18: 303-316.
- [20] ชนิษฐา วงศ์บาส, กมลวรรณ แจ่มชัด, อนุวัตร แจ่มชัด, พัชรดี ตระกูล และสุคันธรส ธาดากิตติสาร, 2552, ผลของ สภาวะในการงอกที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของข้าวเหนียวกล้องงอก, น. 630-638, ใน การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 47, กรุงเทพฯ.
- [21] Cohen, N., Cohen, J., Asatiani, M.D., Varshney, V.K., Yu, H.T., Yang, Y.C., Li, Y.H., Mau, J.L. and Wasser, S.P., 2014, Chemical composition and nutritional and medicinal value of fruit bodies and submerged cultured mycelia of culinary-medicinal higher Basidiomycetes mushrooms, Int. J. Med. Mushrooms 16: 273-291.
- [22] รุ่งนภา วิสิษฐอุดการ, 2540, สัดส่วนของน้ำที่แข็งตัวและค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้ของระบบน้ำ-มาโครโมเลกุล, น. 649-656, การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 35, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- [23] Sheikh, M.A.M., Kumar, A., Islam, M.M. and Mahomud, M.S., 2010, The effects of mushroom powder on the quality of cake, Prog. Agric. 21: 205-214.
- [24] Pereira, E., Barros, L., Martins, A. and Ferreira, I.C.F.R., 2012, Towards chemical and nutritional inventory of Portuguese wild edible mushrooms in different habitats, J. Food Chem. 130: 304-403.
- [25] รัชณี ตัณฑะพานิชกุล, 2535, เคมีอาหาร (พิมพ์ครั้งที่ 4), มหาวิทยาลัยรามคำแหง, กรุงเทพฯ.
- [26] เศรษฐการ นุชนิยม, 2554, การผลิตน้ำดำลิงผงโดยการทำแห้งแบบเยือกแข็ง, ว.วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 19(2): 51-63.
- [27] วรินทร์ ยิ้ม่อง, ไชยันต์ สิริกุล และสุนัน ปานสาคร, 2552, ศึกษาผลของอุณหภูมิในการลดความชื้นที่มีต่อปริมาณกรดแอมมาเอมิโนในปวทิริกในผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องงอกเพื่อการเพิ่มมูลค่าผลิตผลทางการเกษตร, คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ปทุมธานี.
- [28] Guihua, X., Xingquan, Y., Jiachu, C. and Donghong, L., 2007, Effect of heat treatment on the phenolic compounds and antioxidant capacity of citrus peel extract, J. Agric. Food Chem. 55: 330-335.
- [29] Robards, K., Prenzler, P.D., Tucker, G., Swatsitang, P. and Glover, W., 1999, Phenolic compounds and their role in oxidant processes in fruits, J. Food Chem. 66: 41-436.
- [30] Kim, J.S., Kang, O.J. and Gweon, O.C., 2013, Comparison of phenolic acids and flavonoids in black garlic at different thermal processing steps, J. Funct. Foods 5: 80-86.