

การเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาหลังการเก็บเกี่ยวของเห็ดฟาง Postharvest Physiological Changes of Straw Mushroom

ธนุชา สัจจาสีล¹ และ กนกวรรณ เสรีภาพ^{1*}
Thanucha Satjaseel¹ and Kanogwan Seraypheap^{1*}

บทคัดย่อ

เห็ดฟางเป็นเห็ดที่นิยมนำมาประกอบอาหารสุขภาพทำให้ความต้องการผลผลิตของเห็ดฟางสดในท้องตลาดเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามผลผลิตเห็ดฟางสดนั้นเน่าและสูญเสียคุณภาพได้ง่ายหลังการเก็บเกี่ยวโดยมีอายุหลังการเก็บเกี่ยวสั้นเพียง 1-2 วันเท่านั้น ทำให้การยืดอายุการเก็บรักษาเห็ดฟางจึงยังคงเป็นปัญหาเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาอย่างรวดเร็วหลังการเก็บเกี่ยว ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาและชีวเคมีบางประการหลังการเก็บเกี่ยวและกระบวนการหายใจของเห็ดฟางในแต่ละระยะที่อุณหภูมิห้อง ผลการศึกษาพัฒนาการการเจริญของเห็ดฟาง พบว่า ตั้งแต่ระยะที่ 1 ถึงระยะที่ 7 หมวกเห็ดเริ่มผลิแตกออกจนดอกเห็ดบาน ก้านยืดยาว เยื่อหุ้มดอกเห็ดเหี่ยว เกิดการสูญเสียน้ำหนักกลืนและลักษณะสัมผัสเปลี่ยนแปลงระหว่างการพัฒนา นอกจากนี้อัตราการหายใจยังเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ปริมาณเอทีลินเพิ่มสูงระหว่างการพัฒนาของหมวกเห็ดและลดลงอย่างช้าๆ การเปลี่ยนแปลงของสีเห็ดฟางบริเวณส่วนหมวก ก้าน และเยื่อหุ้มเปลี่ยน เป็นสีน้ำตาลในระหว่างการพัฒนาของดอกเห็ดแต่เมื่อเห็ดฟางบานเต็มที่ พบว่าหมวกมีสีขาวเกือบเทา การศึกษากิจกรรมของเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดส พบว่าเพิ่มขึ้นในระหว่างการพัฒนาเห็ดฟางขึ้นเดียวกับปริมาณโปรตีนที่ละลายน้ำได้ในเห็ดฟาง

คำสำคัญ: เห็ดฟาง, กระบวนการหายใจ, หลังเก็บเกี่ยว, อุณหภูมิห้อง

Abstract

Straw mushroom is a widespread health food, and it's market demand is increasing. However, the fresh straw mushroom is perishable and rapidly deteriorates after harvested. The shelf life of the straw mushroom is between 1-2 days; hence extending the commercial period of this mushroom is still a problem since its physiological changes are rapid after harvested. In this study, physiological and biochemical changes involved in the deterioration of straw mushroom at ambient temperature were investigated. Results showed that from stage 1 to stage 7, several changes occurred including breaking and blooming of mushroom cap, stem elongation, and turning of volva to brown along with weight change. During storage, the odor, color, and texture of mushroom continuously changed at each stage. Moreover, straw mushrooms showed incremental respiration rate until cap blooming in contrast to ethylene production that gradually increased in 24 hours at stage 2 then decreased. The color of the cap, stem, and volva turned brown but showed their white cap when bloomed. Polyphenol oxidase activity of the mushroom increased during senescence similar to soluble protein content.

Keywords: *Volvariella volvacea*, senescence, postharvest, ambient temperature

คำนำ

เห็ดฟาง (*Volvariella volvacea*) เป็นเห็ดที่นิยมรับประทานมากในประเทศไทยเนื่องจากรสชาติดี มีเนื้อนุ่ม มีกลิ่นหอม มีคุณค่าทางโภชนาการสูง นอกจากนี้ ยังพบสารจำพวก *lovatoxin* ซึ่งมีฤทธิ์ต้านทานไวรัส ช่วยป้องกันโรคไข้หวัดใหญ่ และลดไขมันในเส้นเลือด จากความนิยมในการบริโภคอาหารสุขภาพในปัจจุบัน ทำให้ความต้องการผลผลิตเห็ดฟางสดเพิ่มขึ้นอย่างมาก อย่างไรก็ตาม เห็ดฟางสดนั้นเน่า สูญเสียคุณภาพและหมดอายุการเก็บรักษาอย่างรวดเร็วหลังการเก็บเกี่ยวเนื่องจากเห็ดฟางมีอัตราการหายใจสูง มีโครงสร้างบอบบาง และมีน้ำเป็นองค์ประกอบมาก ทั้งนี้ หลังการเก็บเกี่ยวเนื้อเยื่อเห็ดฟางจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลอย่างรวดเร็ว เนื้อนุ่มลง ดอกเห็ดบาน อีกทั้งยังส่งกลิ่นเหม็นเมื่อเก็บรักษาไว้นานขึ้น ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในระยะสุดท้ายของการเจริญนำไปสู่การตายอย่างถาวรของอวัยวะบางส่วนหรือเห็ดทั้งดอก โดยเห็ดฟางมีอายุการเก็บรักษาหลังการเก็บเกี่ยวประมาณ 1-2 วัน เท่านั้น ดังนั้นเพื่อให้ได้ผลผลิตเห็ดฟางที่สดใหม่และมีคุณภาพสูง

¹ ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

¹ Department of Botany, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Wangmai, Pathumwan, Bangkok 10330, Thailand

* Corresponding author: Kanogwan.k@chula.ac.th

กรรมวิธีการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวต่าง ๆ จึงเข้ามามีบทบาทในการรักษาคุณภาพของเห็ดฟางหลังการเก็บเกี่ยว เช่น การใช้รังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับการควบคุมความชื้น (Li *et al.*, 2017) และการใช้การเปลี่ยนแปลงสภาพบรรจุภัณฑ์ร่วมกับการใช้แคลเซียมคลอไรด์สามารถชะลอการเสื่อมสภาพของเห็ดฟางและเพิ่มอายุการเก็บรักษาได้ (Dhalsamant *et al.*, 2015) แต่จะเห็นได้ว่าเทคโนโลยีสำหรับการยืดอายุการเก็บรักษาของเห็ดฟางนั้นมีน้อยมากเมื่อเทียบกับเห็ดสายพันธุ์อื่น รวมทั้งยังขาดข้อมูลกระบวนการวางขายของเห็ดฟางตามอายุที่ถูกต้องครบถ้วน ทำให้การยืดอายุของเห็ดฟางทำได้ยากทั้งยังก่อให้เกิดขีดจำกัดต่อการวางขายผลิตภัณฑ์เห็ดฟางในท้องตลาดและการส่งออกเห็ดฟางไปยังต่างประเทศ การทดลองนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาและชีวเคมีบางประการหลังการเก็บเกี่ยวและการวางขายของเห็ดฟางที่อุณหภูมิห้องโดยศึกษาและวัดจากการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาบางประการของเห็ดฟาง ลักษณะสัมผัส การเปลี่ยนแปลงสีในส่วนหมวก ก้านและเยื่อหุ้ม ปริมาณโปรตีน รวมทั้งกิจกรรมของเอนไซม์ polyphenol oxidase เพื่อให้เกิดความรู้ความเข้าใจในกระบวนการวางขายของเห็ดฟาง และนำไปสู่การเก็บรักษาเห็ดฟางอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อประยุกต์ใช้ในการเพิ่มคุณภาพของผลผลิตในอุตสาหกรรมการค้าเห็ดฟางต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

การเก็บตัวอย่างเห็ดฟาง เก็บตัวอย่างเห็ดฟาง ณ ฟาร์มเห็ด จ.สระบุรี คัดเลือกเห็ดที่มีขนาด รูปร่าง และสีใกล้เคียงกัน ไม่มีตำหนิหรือความเสียหาย จำนวน 560 ดอก จากนั้นสังเกตการเปลี่ยนแปลงของเห็ดฟางหลังการเก็บเกี่ยว และบันทึกการเจริญเติบโตและพัฒนาของเห็ดฟาง (maturity index) ที่อุณหภูมิห้อง (27 ± 2 องศาเซลเซียส) โดยแบ่งการเจริญของเห็ดฟางตามการเปิดของหมวกเห็ดเป็น 7 ระยะ ดังนี้ ระยะที่ 1 เยื่อหุ้มดอกเห็ดติดกันแน่น ระยะที่ 2 เยื่อหุ้มดอกเห็ดส่วนมากติดกันแน่น ระยะที่ 3 เยื่อหุ้มดอกเห็ดเปิดน้อยกว่าครึ่ง ระยะที่ 4 เยื่อหุ้มดอกเห็ดเปิดมากกว่าครึ่ง ระยะที่ 5 เยื่อหุ้มดอกเห็ดเปิดเต็มที่ ระยะที่ 6 หมวกเห็ดเปิด ครีบบิดออก ระยะที่ 7 หมวกเห็ดเปิด ครีบบิดออกกว้าง (Gutherine, 1984)

การบันทึกลักษณะสัมผัส สังเกตลักษณะของเห็ดจากนั้นสัมผัสและคำนวณ Springiness index (ดัชนีวัดความแน่นเนื้อ) Tissue fluid leak pitting index (ดัชนีวัดความชื้น) และ Odor index (ดัชนีวัดกลิ่น) ตามเกณฑ์การให้คะแนนด้วยวิธีของ Wei และคณะ (2017) และคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ ดังนี้

$$\% = \sum_0^i c_i n_i / (c_i \sum_0^i n_i) \times 100\%$$

c_i คือ เกรตของเห็ด และ n_i คือ จำนวนของเห็ดในเกรตนั้น

การวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักสด ชั่งเห็ดฟางสดด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่งแล้วนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักสด ดังนี้ เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักสด = [(น้ำหนักวันแรก - น้ำหนักในแต่ละระยะ)/น้ำหนักวันแรก*100] (Li *et al.*, 2017)

การวัดอัตราการหายใจ นำเห็ดฟางสดมาบรรจุในขวดโหลแก้วขนาด 2.4 ลิตร จำนวน 1 ดอกต่อขวด เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นเก็บตัวอย่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้หลอดและเข็มฉีดยาแล้วนำแก๊สที่ได้ไปวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเครื่อง gas chromatography-8A (Shimadzu, Japan) และรายงานผลต่อน้ำหนักสด

การวัดปริมาณเอทิลีน นำเห็ดฟางสดมาบรรจุในขวดโหลแก้วขนาด 2.4 ลิตร จำนวน 1 ดอกต่อขวด เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นเก็บตัวอย่างแก๊สโดยใช้หลอดเข็มฉีดยาแล้วนำแก๊สที่ได้ไปวิเคราะห์ปริมาณเอทิลีนด้วยเครื่อง gas chromatography-8A (Shimadzu, Japan) และรายงานผลต่อน้ำหนักสด

การวัดสี วัดการเปลี่ยนแปลงสีของหมวก ก้าน และเยื่อหุ้ม 3 ด้านตามสมการดัชนีวัดสีน้ำตาล (Browning Index) ดังนี้ (Gao *et al.*, 2014) ด้วยเครื่อง Konica Minolta CR-10 model (Minolta, Japan)

$$BI = [100(x-0.31)]/0.172, x = (a^*+1.75L^*)/(5.645L^*+a^*-3.012b^*)$$

$L^*a^*b^*$ คือค่าระบบมาตรฐานที่ใช้ในการวัดสีโดย Commission Internationale de l'Eclairage (CIE)

เมื่อ L^* คือค่าความสว่าง/ความมืด a^* คือค่าสีแดง/ เขียว และ b^* คือค่าสีเหลือง/น้ำเงิน

การวัดปริมาณของโปรตีนที่ละลายน้ำได้ ชั่งเห็ดฟางน้ำหนักประมาณ 0.1 กรัม วัดปริมาณโปรตีนตาม Bradford (1976) โดยแช่ในน้ำกลั่นปริมาตร 1 มิลลิลิตร 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นปั่นเหวี่ยง (Hettich, Germany) 4000 rpm 20 นาที ที่ 25 องศาเซลเซียส ปิเปตสารละลายปริมาตร 800 ไมโครลิตร ใส่ในหลอดและดูดสารละลาย 40 ไมโครลิตร ผสมกับ Biorad protein assay dye reagent concentrate 160 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 10 นาที หลังจากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 595 นาโนเมตรด้วยเครื่องอ่านปฏิกิริยาไมโครเพลท (SMP6) โดยใช้ bovine serum albumin (BSA) เป็นสารละลายโปรตีนมาตรฐาน

การวิเคราะห์กิจกรรมของเอนไซม์ polyphenoloxidase ชั่งเห็ดฟางน้ำหนัก 0.1 กรัม (Pizzocaro *et al.*, 1993) ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 1 มิลลิลิตร pH 7.0 50 มิลลิโมลาร์ต่อลิตร นำไปปั่นเหวี่ยงที่ 10000 rpm เป็นเวลา 20 นาที ที่ 4 องศาเซลเซียส จากนั้นดูดส่วนใสปริมาตร 33 ไมโครลิตร ผสมกับแคทีคอล ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร

67 ไมโครลิตร จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 420 นาโนเมตร ด้วยเครื่องอ่านปฏิกิริยาไมโครเพลท (SMP6) เป็นเวลา 3 นาที โดยวัดทุก ๆ 30 วินาที (Siguemoto and Gut, 2017)

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของข้อมูลด้วยค่าความคลาดเคลื่อน standard deviation ($\pm$ SE)

ผล

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาของเห็ดฟางหลังการเก็บเกี่ยว (Figure 1A) พบว่า เห็ดฟางขยายขนาดความกว้างของดอกเพิ่มขึ้นจากดอกกลม (ระยะที่ 1) จนถึงหมวกเห็ดบานเต็มที่ (ระยะที่ 7) โดยพบการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญคือดอกเห็ดเริ่มปรากฏสีน้ำตาล เยื่อหุ้มดอกบางลงในระยะที่ 3 และดอกเห็ดเรียวยาวขึ้นคล้ายรูปไข่รวมทั้งเกิดการเลื่อนลงของเยื่อหุ้มดอกเห็ด ในระยะที่ 4 การเจริญเติบโตของก้านและหมวกดอกเป็นไปอย่างรวดเร็ว ส่วนบนของหมวกดอกเปลี่ยนเป็นสีเทาเกือบดำ มีขอบหมวกดอก ระยะที่ 5 ส่วนบนสุดของเยื่อหุ้มดอกแตกออกอย่างไม่เป็นระเบียบ (irregular) สีของผิวหมวกดอกเข้มขึ้น ฐานดอกเห็ดเริ่มบาน บริเวณกึ่งกลางจนถึงขอบหมวกเป็นสีขาว ผิวเรียบ ในระยะที่ 6 ก้านยาวเพิ่มขึ้น หมวกเห็ดบานมากกว่าเมื่อเทียบกับระยะที่ 5 และในระยะที่ 7 หมวกเห็ดบานกว้างขึ้นเมื่อเทียบกับระยะที่ 6 ด้านบนหมวกเป็นสีเทาและสีขาวตั้งแต่กึ่งกลางจนถึงขอบ พบครีbspสีขาวใต้ฐานหมวกเห็ด ก้านยืดยาว และเยื่อหุ้มดอกเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเข้มและเหี่ยว เมื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงดัชนีที่เกี่ยวข้องกับการวายของเนื้อเยื่อเห็ดฟางดังแสดงใน Figure 1B พบว่าเห็ดฟางเริ่มเข้าสู่กระบวนการวายอย่างรวดเร็วตั้งแต่ระยะที่ 2 ซึ่งมีค่าดัชนี tissue fluid leak pitting index เท่ากับ 31.03% จาก 0% ในระยะที่ 1 และเพิ่มมากขึ้นตั้งแต่ระยะที่ 3-7 โดยมีค่าเท่ากับ 37.93%, 48.15%, 60%, 66.67% และ 81.81% ตามลำดับ ทั้งยังพบการเปลี่ยนแปลงของลักษณะสัมผัสระหว่างการเจริญพัฒนาของเห็ด ซึ่งมีค่า springiness index สูงสุดในระยะที่ 1 (100%) จากนั้นลดลงเรื่อย ๆ จนมีค่าน้อยสุดในระยะที่ 7 (3.33 %) (Figure 1C) สอดคล้องกับผลการเปลี่ยนแปลงของกลิ่น (Figure 1D) ในระยะที่ 1 แสดงให้เห็นว่าเห็ดมีกลิ่นหอมด้วยค่าดัชนีสูงสุดที่ 100 และค่าดัชนีลดลงจนค่าดัชนีเท่ากับ 0% เมื่อถึงระยะที่ 3-4 เมื่อดอกเห็ดบานในระยะที่ 5-7 พบว่ามีค่าดัชนีเป็นลบเท่ากับ -3.57%, -26.08%, และ -160% ตามลำดับ

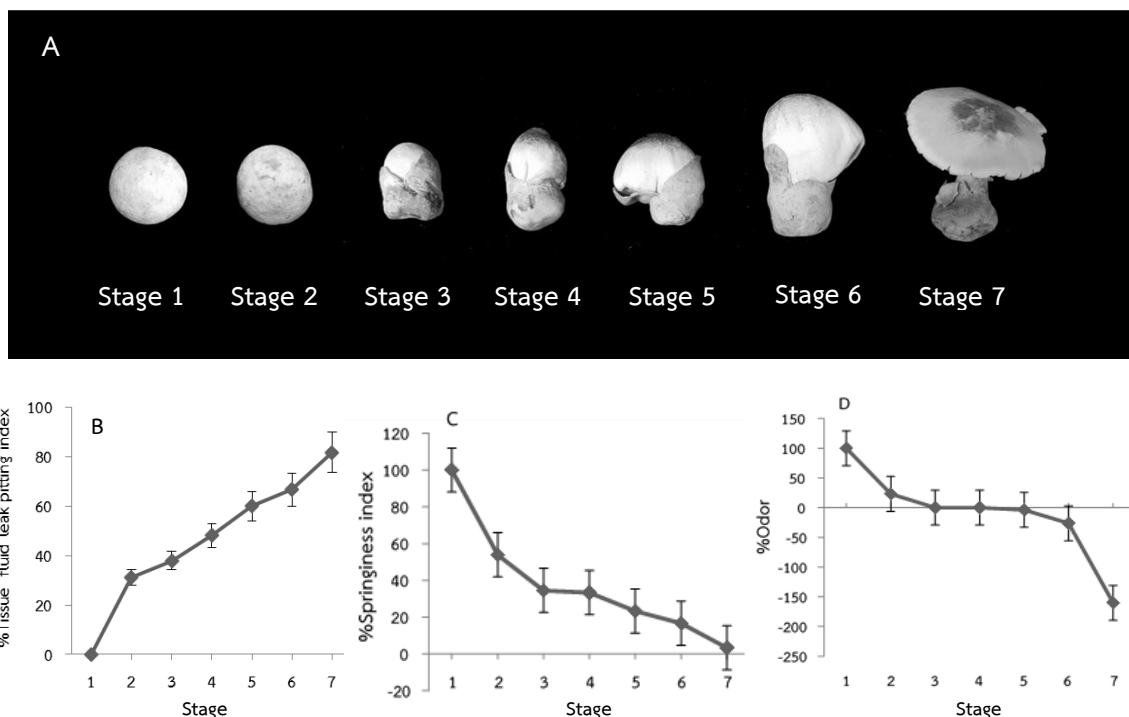


Figure 1 Physiological changes (A), tissue senescence (B), texture (C) and odor changes (D) of 7 stages development straw mushrooms during 3 days at ambient temperature. Bars indicate the standard error ($\pm$ SE).

การสูญเสียน้ำหนักสด ผลการทดลองพบว่า การสูญเสียน้ำหนักสดของเห็ดฟางมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาการเจริญพัฒนาของเห็ดฟางนานขึ้น (Figure 2A) โดยเกิดการสูญเสียน้ำหนักอย่างเห็นได้ชัดในระยะที่ 2 ที่ค่าเท่ากับ 26.74% และสูญเสียน้ำหนักสดมากที่สุดถึง 39.72% ในระยะที่ 4 หลังจากนั้นการสูญเสียน้ำหนักมีแนวโน้มลดลงในระยะที่ 6 และแสดงค่าสูญเสียน้ำหนักน้อยที่สุดในระยะที่ 7 ด้วยค่าการสูญเสียน้ำหนักเท่ากับ -90.97% ซึ่งสอดคล้องกับน้ำหนักสดของเห็ดฟาง (Figure 2B)

การเกิดสีน้ำตาล ผลการทดลองพบว่า การเปลี่ยนแปลงของสีหมวกเห็ดเปลี่ยนจากสีขาวเป็นสีน้ำตาลเมื่อเก็บรักษานานขึ้นจนเยื่อหุ้มดอกเห็ดบานในระยะที่ 4 จากนั้นเมื่อเยื่อหุ้มดอกเห็ดเปิดเต็มที่ เห็ดฟางจะมีสีขาวและพบสีน้ำตาลน้อยลง โดยมีสีเข้มบริเวณด้านบนหมวกเห็ดเท่านั้น จนเมื่อดอกเห็ดบาน ครีบเปิดเต็มที่ จะปรากฏสีน้ำตาลเพิ่มขึ้น ค่าการเกิดสีน้ำตาลของหมวกเห็ดมีค่าเพิ่มขึ้นหลังเก็บเกี่ยวจนถึงระยะที่ 4 จากนั้นจึงมีค่าลดลงต่ำที่สุดในระยะที่ 5 และไม่มี ความแตกต่างกันในระยะที่ 6 แต่ในระยะที่ 7 ค่าการเกิดสีน้ำตาลเพิ่มขึ้นแต่ยังแสดงค่าการเกิดสีน้ำตาลที่มากกว่าเมื่อเทียบกับค่าการเกิดสีน้ำตาลในระยะที่ 1 ซึ่งแสดงค่าต่ำที่สุดเช่นเดียวกัน (Figure 3) ส่วนการเกิดสีน้ำตาลในก้านนั้นจะพบอย่างรวดเร็วหลังเก็บเกี่ยวในระยะที่ 2 และ 3 จากนั้นการเกิดสีน้ำตาลในก้านจะมีแนวโน้มลดลงหลังจากระยะที่ 4 และลดลงต่ำสุดในระยะที่ 7 สำหรับเยื่อหุ้มดอกเห็ดพบการเกิดสีน้ำตาลอย่างรวดเร็วหลังเก็บเกี่ยวในระยะที่ 2 และ 3 เช่นเดียวกับก้านและหมวก และมีแนวโน้มการเกิดสีน้ำตาลสูงขึ้นระหว่างการเจริญจนกระทั่งดอกเห็ดโตเต็มที่และเกิดการวายของเนื้อเยื่อ

การสูญเสียน้ำหนักสด ผลการทดลองพบว่า การสูญเสียน้ำหนักสดของเห็ดฟางมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาการเจริญพัฒนาของเห็ดฟางนานขึ้น (Figure 2A) โดยเกิดการสูญเสียน้ำหนักอย่างเห็นได้ชัดในระยะที่ 2 ที่ค่าเท่ากับ 26.74% และสูญเสียน้ำหนักสดมากที่สุดถึง 39.72% ในระยะที่ 4 หลังจากนั้นการสูญเสียน้ำหนักมีแนวโน้มลดลงในระยะที่ 6 และแสดงค่าสูญเสียน้ำหนักน้อยที่สุดในระยะที่ 7 ด้วยค่าการสูญเสียน้ำหนักเท่ากับ -90.97% ซึ่งสอดคล้องกับน้ำหนักสดของเห็ดฟาง (Figure 2B)

การเกิดสีน้ำตาล ผลการทดลองพบว่า การเปลี่ยนแปลงของสีหมวกเห็ดเปลี่ยนจากสีขาวเป็นสีน้ำตาลเมื่อเก็บรักษานานขึ้นจนเยื่อหุ้มดอกเห็ดบานในระยะที่ 4 จากนั้นเมื่อเยื่อหุ้มดอกเห็ดเปิดเต็มที่ เห็ดฟางจะมีสีขาวและพบสีน้ำตาลน้อยลง โดยมีสีเข้มบริเวณด้านบนหมวกเห็ดเท่านั้น จนเมื่อดอกเห็ดบาน ครีบเปิดเต็มที่ จะปรากฏสีน้ำตาลเพิ่มขึ้น ค่าการเกิดสีน้ำตาลของหมวกเห็ดมีค่าเพิ่มขึ้นหลังเก็บเกี่ยวจนถึงระยะที่ 4 จากนั้นจึงมีค่าลดลงต่ำที่สุดในระยะที่ 5 และไม่มี ความแตกต่างกันในระยะที่ 6 แต่ในระยะที่ 7 ค่าการเกิดสีน้ำตาลเพิ่มขึ้นแต่ยังแสดงค่าการเกิดสีน้ำตาลที่มากกว่าเมื่อเทียบกับค่าการเกิดสีน้ำตาลในระยะที่ 1 ซึ่งแสดงค่าต่ำที่สุดเช่นเดียวกัน (Figure 3) ส่วนการเกิดสีน้ำตาลในก้านนั้นจะพบอย่างรวดเร็วหลังเก็บเกี่ยวในระยะที่ 2 และ 3 จากนั้นการเกิดสีน้ำตาลในก้านจะมีแนวโน้มลดลงหลังจากระยะที่ 4 และลดลงต่ำสุดในระยะที่ 7 สำหรับเยื่อหุ้มดอกเห็ดพบการเกิดสีน้ำตาลอย่างรวดเร็วหลังเก็บเกี่ยวในระยะที่ 2 และ 3 เช่นเดียวกับก้านและหมวก และมีแนวโน้มการเกิดสีน้ำตาลสูงขึ้นระหว่างการเจริญจนกระทั่งดอกเห็ดโตเต็มที่และเกิดการวายของเนื้อเยื่อ

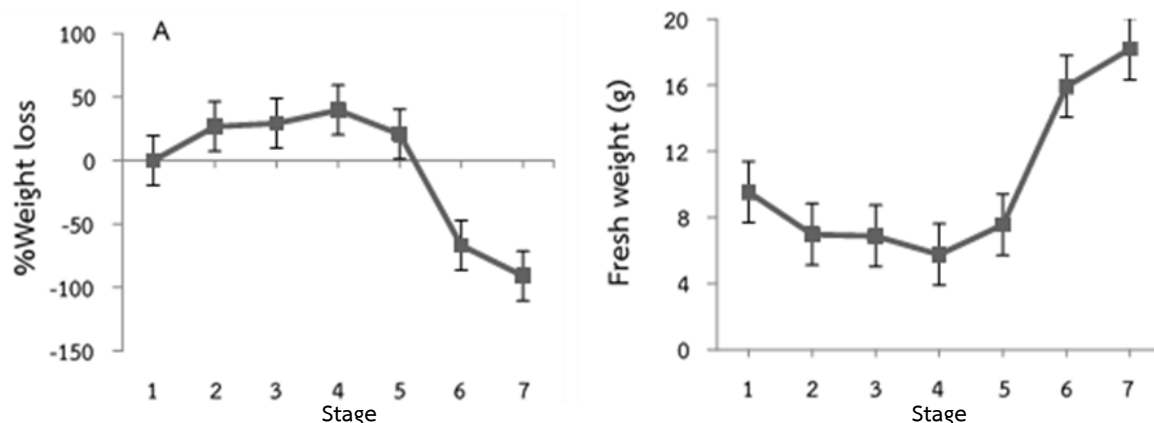


Figure 2 Weight loss (A) and fresh weight (B) of 7 stages development straw mushrooms during 3 days at ambient temperature. Each value represents the mean of ten replicates. Bars indicate the standard error ($\pm$ SE).

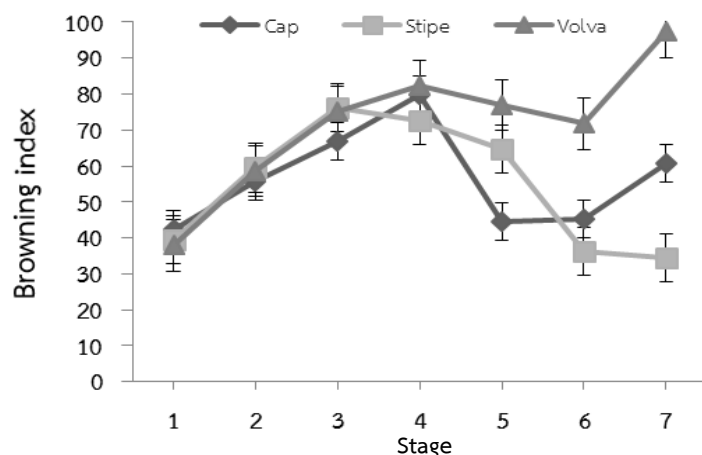


Figure 3 Browning index of 7 stages development straw mushrooms during 3 days at ambient temperature. Each value represents the mean of ten replicates. Bars indicate the standard error ($\pm$ SE).

อัตราการหายใจและปริมาณเอทิลีน จากการทดลองพบว่าเห็ดฟางมีอัตราการหายใจสูงขึ้นในแต่ละระยะ (Figure 4A) โดยพบว่าค่าอัตราการหายใจสูงที่สุดในระยะที่ 5 (12.11 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมชั่วโมง) และปริมาณการผลิตเอทิลีนในเห็ดฟางเพิ่มสูงขึ้นระหว่างการเจริญพัฒนาหลังการเก็บเกี่ยว โดยปริมาณเอทิลีนที่ผลิตได้สูงสุดคือระยะที่ 4 (0.24 ไมโครลิตรต่อกรัมต่อชั่วโมง) หลังจากนั้นปริมาณเอทิลีนลดลง เมื่อเห็ดฟางเข้าสู่ระยะดอกบาน (ระยะที่ 5) (Figure 4B)

ปริมาณโปรตีนที่ละลายน้ำได้ จากผลการทดลองพบว่าปริมาณโปรตีนที่ละลายน้ำได้ในเห็ดฟางลดลงเมื่อมีระยะการพัฒนานานขึ้น (Figure 4C) โดยปริมาณโปรตีนที่ละลายน้ำได้ลดลงตั้งแต่ระยะที่ 1-6 แต่เพิ่มขึ้นภายหลังเข้าสู่ระยะที่ 7

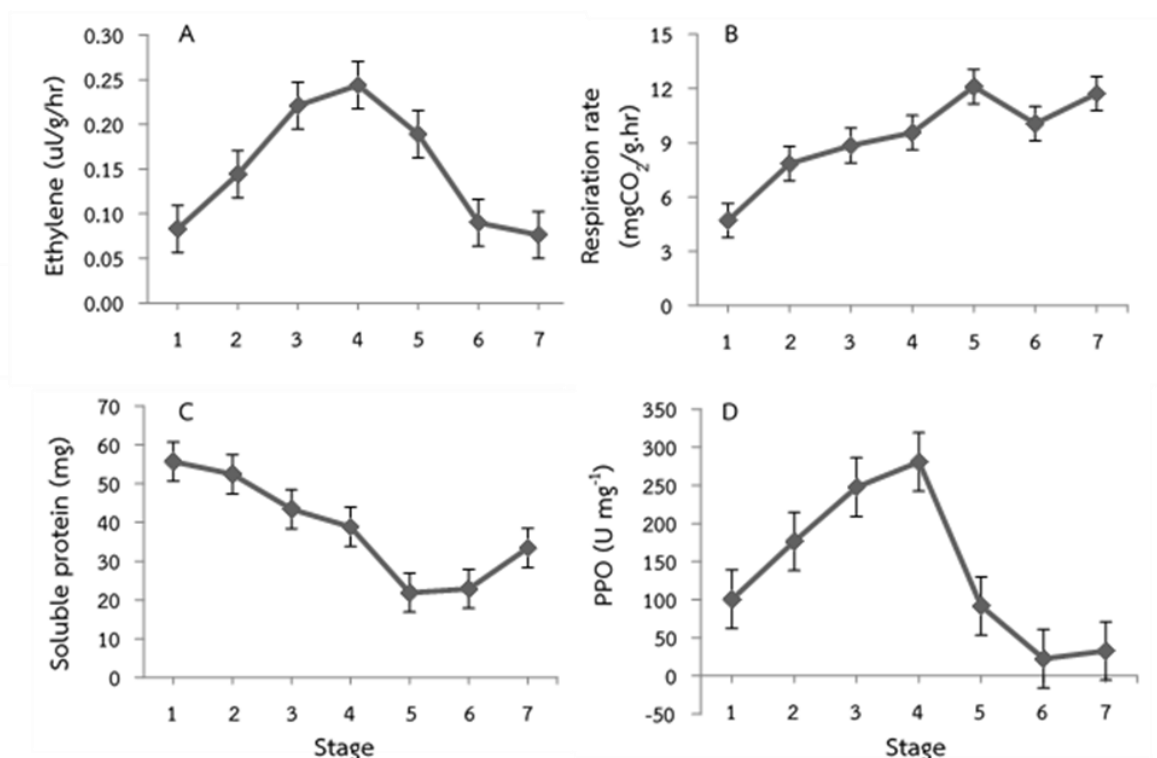


Figure 4 Ethylene (A), respiration rate (B), soluble protein (C) and PPO activity of 7 stages development straw mushrooms during 3 days at ambient temperature. Each value represents the mean of ten replicates. Bars indicate the standard error ($\pm$ SE).

กิจกรรมของเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดสจากผลการทดลองพบว่ากิจกรรมของเอนไซม์ PPO มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นระหว่างการเจริญหลังการเก็บเกี่ยวในระยะที่ 1 จนถึงระยะที่ 4 โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 100.56 หน่วยต่อมิลลิกรัม เป็น 280.78 หน่วยต่อมิลลิกรัม จากนั้นกิจกรรมของเอนไซม์มีค่าลดลง (Figure 4D)

วิจารณ์

เห็ดฟางเป็นผลิตผลสดที่ยังคงมีพัฒนาการเจริญของเนื้อเยื่อหลังการเก็บเกี่ยว เห็ดฟางจะพัฒนาจากเห็ดรูปร่างกลมที่เรียกว่าระยะกระดุมหรือระยะที่ 1 ซึ่งเป็นระยะที่ผู้บริโภคนิยมมากที่สุดไปเป็นดอกเห็ดบานเต็มที่ที่เกิดขึ้นจากการดันตัวและแบ่งตัวอย่างรวดเร็วของเนื้อเยื่อภายในจากฐานด้านล่างควบคู่ไปกับการเจริญอย่างช้า ๆ ของส่วนเยื่อหุ้มดอกจนเหี่ยวแห้ง โดยระหว่างการเจริญพัฒนานั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงของกลืนเห็ดฟางจากหอมจนมีกลิ่นเหม็น โดยมีการลดลงของค่าเปอร์เซ็นต์กลืน การเปลี่ยนแปลงลักษณะสัมผัสจากการลดลงของความเร็วในการคืนตัวของเนื้อเยื่อที่แสดงจากค่าเปอร์เซ็นต์คืนตัวของเนื้อเยื่อทั้งพบการเปลี่ยนแปลงของเนื้อเยื่อที่นำไปสู่การวายของเห็ดฟางทั้งดอกจากการเพิ่มขึ้นของค่าดัชนีการวัดการวายของเนื้อเยื่อ และการรั่วไหลของประจุที่แสดงจากค่าเปอร์เซ็นต์การไหลของของเหลวในเนื้อเยื่อที่เพิ่มขึ้นและการบานของหมวกเห็ดซึ่งเกี่ยวข้องกับการสูญเสียความสมบูรณ์ของเยื่อหุ้มเซลล์และการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบภายในเยื่อหุ้มเซลล์และการแตกหักของพันธะเคมีในโครงสร้างหลักและภายในของเหลวภายในเซลล์เห็ด (Hildebrand *et al.*, 1989) ควบคู่ไปกับการสูญเสียน้ำหนักระหว่างการรักษาอันเป็นผลมาจากการสูญเสียน้ำในเนื้อเยื่อไปยังสิ่งแวดล้อมภายนอก และผลจากการลดลงของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลน้ำและโมเลกุลอื่นที่ละลายน้ำได้รวมถึงการเกิด endogenous autolysin ทำให้ส่งผลต่อการเรียงตัวที่ติดกันแน่นของโมเลกุลในเนื้อเยื่อเห็ดฟาง กระทั่งเกิดการสลายของเยื่อหุ้มเซลล์และการทับซ้อนของเซลล์ เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการเรียงตัวของโมเลกุลภายในเซลล์ อีกทั้งเห็ดฟางเป็นผลผลิตที่จัดอยู่ในจำพวก climacteric ซึ่งมีอัตราการหายใจสูงในระหว่างการเจริญหลังการเก็บเกี่ยวถึง 12.11 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมชั่วโมง และสูงตลอดอายุ ซึ่งใช้สารอาหารจำพวกคาร์โบไฮเดรต โปรตีนและไขมันเป็นสารตั้งต้นในการเกิดกระบวนการเมแทบอลิซึมส่งผลให้สูญเสียมวลน้ำหนัก (Li *et al.*, 2017) เช่นเดียวกับผลการทดลองในเห็ดชิตาเกะเห็ดกระดุม และเห็ดฟาง (Jiang *et al.*, 2011; Gao *et al.*, 2014) ทั้งยังเกิดจากการที่เห็ดฟางมีโครงสร้างบาง ประกอบไปด้วยช่องว่างและรูจำนวนมากทำให้ไม่สามารถป้องกันการระเหยของน้ำได้ (Guillaume *et al.*, 2010)

นอกจากนั้นเห็ดฟางยังมีปริมาณเอทิลีนเพิ่มสูงขึ้นทีละน้อยในระหว่างการเจริญพัฒนาจากเห็ดดอกกลมในระยะกระดุมไปเป็นเห็ดฟางที่บานเจริญเติบโตเต็มที่โดยมีปริมาณสูงสุดระหว่างการเปิดออกของเยื่อหุ้มดอกเห็ด ซึ่งเอทิลีนอาจช่วยกระตุ้นการเจริญพัฒนาและส่งผลต่อการเน่าของเห็ดฟาง จากนั้นปริมาณเอทิลีนลดลงหลังหมวกเห็ดบานเต็มที่ ซึ่งอาจเกิดจากการที่เห็ดฟางเริ่มเข้าสู่กระบวนการวายของเนื้อเยื่อ ในระหว่างการเจริญพัฒนาของเห็ดฟางหลังการเก็บเกี่ยวขึ้นเกิดการเปลี่ยนแปลงของสีจากเห็ดฟางสีขาวในระยะที่ 1 ไปเป็นสีน้ำตาล ซึ่งสีเป็นปัจจัยสำคัญต่อการยอมรับของผู้บริโภคและคุณภาพของผลิตผลเห็ดฟางสด โดยหลังการเก็บเกี่ยวก่อนเนื้อเยื่อเห็ดฟางจะเจริญดันตัวและบานนั้น เห็ดฟางทั้งดอกจะเปลี่ยนจากสีขาวเป็นสีน้ำตาลอย่างรวดเร็วสอดคล้องกับการทดลองของเห็ดฟางอื่น ๆ (Hou *et al.*, 2018; Jamjumroon *et al.*, 2013; Li *et al.*, 2017) จากนั้นเมื่อเยื่อหุ้มดอกเห็ดเปิด ก้านเริ่มต้นตัว และครีบเปิดออก หมวกเห็ดบาน หมวกเห็ดจะมีขาวเป็นส่วนใหญ่โดยมีสีเทาเพียงเล็กน้อยที่บริเวณกึ่งกลางหมวกเท่านั้น เช่นเดียวกับก้านที่พองตัวขึ้นในระยะที่ 5 จะเป็นสีขาวทั้งหมดทำให้ค่าดัชนีการวัดสีน้ำตาลลดลงเนื่องมาจากเนื้อเยื่อเห็ดที่เกิดขึ้นใหม่และยังไม่มีมีการสลายของเนื้อเยื่อมากนักสัมพันธ์กับออกซิเจนซึ่งทำให้เกิดสีน้ำตาล

ในขณะที่เยื่อหุ้มดอกเห็ดเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลอย่างรวดเร็วตลอดการเจริญหลังเก็บเกี่ยว แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเก็บรักษาเห็ดฟางที่บานแล้วไว้นานขึ้น เห็ดฟางทั้งดอกจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเกือบดำและเหี่ยวจนเกิดการวายจนตายในที่สุด สอดคล้องกับผลการทดลองการเพิ่มขึ้นของกิจกรรมของเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดสที่เกี่ยวข้องกับการเกิดสีน้ำตาลในระหว่างการเจริญพัฒนาจากระยะที่ 1 ไปจนถึงระยะที่ 4 จากนั้นกิจกรรมของเอนไซม์จะลดลงเนื่องมาจากเห็ดเข้าสู่กระบวนการวายของเนื้อเยื่อ สำหรับการเปลี่ยนแปลงของโปรตีนที่ละลายน้ำได้ระหว่างการเจริญของเห็ดฟางนั้น พบว่าปริมาณโปรตีนที่ละลายน้ำได้ลดลงระหว่างการเจริญหลังการเก็บเกี่ยวสอดคล้องกับงานวิจัยในเห็ดฟางของ Li และคณะ ในปี 2017 และงานวิจัยในเห็ดหูหนูของ Wang และคณะในปี 2017 ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของกระบวนการเมแทบอลิซึม โดยเกี่ยวข้องกับการเพิ่มของอัตราการหายใจซึ่งนำไปสู่การสูญเสียสภาพความมั่นคงของเยื่อหุ้มเซลล์จากการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลโปรตีนและทำให้เกิดการสลายของเนื้อเยื่อแตกหักและการวายของเนื้อเยื่อ จะเห็นได้ว่าระยะการเติบโตของเห็ดฟางสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของสี กิจกรรมของเอนไซม์ ปริมาณเอทิลีน โดยเมื่อเห็ดฟางเติบโตจนกระทั่งบาน กิจกรรมเหล่านี้จะเพิ่มขึ้นทีละน้อยจนสูงสุดก่อนจะลดลงเมื่อเห็ดฟางบาน จากผลการทดลองจะเห็นได้ชัดว่าในระยะที่ 4 เนื้อเยื่อเห็ดฟางเปลี่ยนแปลงลักษณะทางสรีรวิทยาและกิจกรรมของเอนไซม์อย่างรวดเร็วและแสดงค่ากิจกรรมเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดสสูง โปรตีนที่ละลายน้ำลดลง รวมทั้งแสดงสีน้ำตาลและเปลี่ยนแปลงน้ำหนักอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งเป็นจุดเปลี่ยนที่สำคัญสอดคล้องกับผลการทดลองที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ เนื่องจากหลังการเติบโตในระยะนี้เห็ดฟางจะวายอย่างสมบูรณ์

สรุป

ในระหว่างการพัฒนาหลังการเก็บเกี่ยวของเห็ดฟางจากระยะที่ 1 ดอกเห็ดกลบไปจนถึงระยะที่ 7 ดอกเห็ดบานนั้น เห็ดฟางมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะสัมผัส กลิ่น และเริ่มเข้าสู่การวายของเนื้อเยื่ออย่างช้าๆ โดยเกิดการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้น น้ำหนักลดลง เนื้อเยื่อเห็ดฟางทั้งหมด ก้าน และเยื่อหุ้มดอกเห็ดเปลี่ยนจากสีขาวไปเป็นสีน้ำตาลและเปลี่ยนจากสีขาวไปเป็นเทาเมื่อหมวกเห็ดบาน โดยจะเห็นได้ชัดในระยะที่ 4 เช่นเดียวกับการเพิ่มขึ้นของกิจกรรมเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดสที่เกี่ยวกับการเกิดสีน้ำตาล การมีอัตราการหายใจสูง การเปลี่ยนแปลงปริมาณเอทิลินที่เพิ่มขึ้นก่อนหมวกเห็ดบาน และการลดลงของปริมาณโปรตีนที่ละลายน้ำได้ ซึ่งกระบวนการเหล่านี้จะนำไปสู่การวายของเนื้อเยื่อเห็ดและส่งผลกระทบต่ออายุการยอมรับของผู้บริโภคและคุณภาพของเห็ดฟางโดยจะต้องระมัดระวังในระยะที่ 4 เป็นสำคัญ เนื่องจากเป็นระยะที่เริ่มเกิดการวายของเนื้อเยื่อ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนเรียนดีวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย และขอขอบคุณศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านสิ่งแวดล้อมและสรีรวิทยาพืช ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเป็นอย่างสูงที่เอื้อเพื่อการใช้เครื่องมือ สารเคมีในการปฏิบัติงาน และห้องปฏิบัติการ

เอกสารอ้างอิง

- Bradford, M.M. 1976. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of proteins utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry* 72: 248-254.
- Dhalsamal, K., S.K. Dash, L.M. Bal and M.K. Panda. 2015. Effect of perforation mediated MAP of shelf life of mushroom (*Volvariella volvacea*). *Scientia Horticulturae* 189: 41-50.
- Sigumoto, E. S. and J. A. W. GUT. 2017. Validation of spectrophotometric microplate methods for polyphenol oxidase and peroxidase activities analysis in fruits and vegetables. *Food Science and Technology* 37: 148-153.
- Gao, M., L. Feng and T. Jiang. 2014. Browning inhibition and quality preservation of button mushroom (*Agaricus bisporus*) by essential oils fumigation treatment. *Food Chemistry* 149: 107-113.
- Guillaume, C., I. Schwab, E. Gastaldi and N. Gontard. 2010. Biobased packaging for improving preservation of fresh common mushrooms (*Agaricus bisporus* L.). *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 11: 690-696.
- Gutherie, B.D. 1984. Studies on the control of bacteria deterioration of fresh, washed mushroom (*Agaricus Bisporus*). M.S. Thesis, The Pennsylvania State University.
- Heath, R.L. and L. Packer. 1968. Photoperoxidation in isolated chloroplasts. *Archive of Biochemical and Biophysical* 125: 189-198.
- Hildebrand, D.F., J.G. Rodriguez, C.S. Legg, G.C. Brown and G. Bookjans. 1989. The effects of wounding and mite infestation on soybean leaf lipoxygenase levels. *Zeitschrift Für Naturforschung C-A Journal of Biosciences* 44: 655-659.
- Hou, L., J. Lin, L. Ma, S. Qu, H. Li and N. Jiang. 2018. Effect of ⁶⁰Co gamma irradiation on postharvest quality and selected enzyme activities of *Volvariella volvacea*. *Scientia Horticulturae* 235 : 382-390.
- Jamjumroon, S., C. Wongs-Aree, W.B. McGlasson, V. Srilaong, P. Chermklin and S. Kanlayanarat. 2013. Alleviation of cap browning of 1-MCP/High CO₂-treated straw mushroom buttons under MAP. *International Food Research Journal* 20: 581.
- Jiang, T., L. Feng and X. Zheng. 2011. Effect of chitosan coating enriched with thyme oil on postharvest quality and shelf life of shiitake mushroom (*Lentinus edodes*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 60: 188-196.
- Li, N., F. Chen, F. Cui, W. Sun, J. Zhang, L. Qian, Y. Yang and H. Yang. 2017. Improved postharvest quality and respiratory activity of straw mushroom (*Volvariella volvacea*) with ultrasound treatment and controlled relative humidity. *Scientia Horticulturae* 225: 56-64.

- Pizzocaro, F., D. Torreggiani and G. Gilardi. 1993. Inhibition of apple polyphenoloxidase (PPO) by ascorbic acid, citric acid and sodium chloride. *Journal of Food Process and Preservation* 17 : 21-30.
- Wang, Q., L. Chu and L. Kou. 2017. UV-C Treatment maintains quality and delays senescence of oyster mushroom. *Scientia Horticulturae* 225: 380-385.
- Wei, W., P. LV, Q. Xia, F. Tan, F. Sun, W. Yu, L. Jia and J. Cheng. 2017. Fresh-keeping effects of three types of modified atmosphere packaging of pine-mushrooms. *Postharvest Biology and Technology* 132 : 62-70.
- Zivanovic, S., R. W. Busher and K. S. Kim. 2000. Textural changes in mushrooms (*Agaricus bisporus*) associated with tissue ultrastructure and composition. *Journal of Food Science* 65 (8): 1404-1408.