

การหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งเห็ดหอม

OPTIMIZED CONDITIONS FOR DRYING OF SHIITAKE MUSHROOM

นภาพร รัตนสมบูรณ์*, ศักรินทร์ ภูมิรัตน์** และ ทิพาพร อยู่วิทยา*

*ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

**ศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม

Naphaporn Rattanasomboon*, Sakarindr Bhumiratana**

and Tipaporn Yoovidhya*

**Department of Food Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Thonburi*

***National Center for Genetic Engineering and Biotechnology,
Ministry of Science, Technology and Environment*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาค่าปัจจัยที่มีผลต่อสาร Lenthionine เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งเห็ดหอม ซึ่งค่าปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อสารนี้คือความชื้นและอุณหภูมิภายในเห็ดหอมที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการอบแห้ง โดยค่าปัจจัยทั้งสองมีผลกระทบต่อการสร้างหรือการทำลายสาร Lenthionine จึงสมมติการเปลี่ยนแปลงเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรก เกิดการสร้างสาร Lenthionine พร้อมสารอื่น และเกิดกลไกการเปลี่ยนสาร Lenthionine เป็นสารอื่นในช่วงท้ายของปฏิกิริยาที่ 1 และขั้นตอนที่สอง การสร้างสารอื่นถูกทำลายไป แต่กลไกการสร้างสาร Lenthionine ยังคงสามารถดำเนินต่อไปได้ และในขณะเดียวกันก็เกิดการเปลี่ยนแปลงสาร Lenthionine ไปเป็นสารอื่น ซึ่งสามารถใช้ข้อมูลเหล่านี้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กึ่งทฤษฎี เพื่อทำนายปริมาณสาร Lenthionine ที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการอบแห้ง ผลจากการทำนาย พบว่า ควรอบแห้งเห็ดหอมที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 9 ชั่วโมง เพื่อให้ได้ปริมาณ Lenthionine สูงสุด และปริมาณความชื้นสุดท้ายประมาณ 13 เปอร์เซ็นต์ มาตรฐานแห้ง

ABSTRACT

This research aimed to study the parameters that influenced the occurrence of lenthionine; shiitake mushroom flavor. These parameters were both the temperature and moisture content in mushroom at any drying conditions. The experimental data showed that the two parameters had the effect on formation and destruction of lenthionine. As a result, it could be inferred that this changing of two stages, the first stage was the formation of lenthionine and other substances simultaneously, then lenthionine was changed to other derivatives. The second stage was that the mechanism which produced other substances was terminated but the mechanisms which produced lenthionine and the one that changed lenthionine to other derivatives were continued. To explicate all of these mechanisms the semi-empirical model was derived to predict the amount of lenthionine that changed throughout the drying process. From mathematical model, the optimum condition in term of drying temperature and drying time was 70°C at 9 hours in order to obtain the highest amount of lenthionine whereas the moisture content of dried mushroom was about 13% dry basis.

บทนำ

เห็ดหอม (*Lentinus edodes*) เป็นเห็ดที่มีคุณค่าสูง นิยมบริโภคในแถบเอเชียโดยเฉพาะจีนและญี่ปุ่น ราคาสูงเนื่องจากเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลาย กลิ่นหอม รสชาติอร่อย และมีคุณค่าทางอาหารสูง ทั้งยังมีการอ้างว่ามีสรรพคุณทางยา จากเหตุผลข้างต้นจึงทำให้เห็ดหอมเป็นที่ต้องการของตลาดอย่างมากทั้งในและต่างประเทศ การแปรรูปเห็ดหอมมักอยู่ในรูปการทำแห้งอาจใช้วิธีการตากด้วยแสงอาทิตย์ หรือการใช้เครื่องอบแห้ง แต่เห็ดหอมแห้งที่ได้จากการใช้แสงอาทิตย์จะมีกลิ่นไม่หอมนัก เมื่อเทียบกับการอบในเครื่องอบแห้งที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นได้ บรรณ บวรชนบท [1] กล่าวว่า ควรเริ่มทำการอบเห็ดหอมที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แล้วค่อยๆ ปรับ

อุณหภูมิให้สูงขึ้น หลังจากอบนาน 4-5 ชั่วโมง จะต้องทำการกลีบดอกเพื่อรักษารูปทรง และในช่วงสุดท้ายของการอบควรเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นเพื่อรักษากลิ่นและสีของเห็ดหอมแห้ง ทั้งยังเป็นการทำลายจุลินทรีย์และแมลงอีกด้วย

พิมพ์กานต์ อร่ามพงศ์พันธ์ และ อุทัย จันผกา [2] ได้รายงาน ถึงการผลิตเห็ดหอมแห้งให้ได้คุณภาพดีว่าอุณหภูมิเริ่มแรกที่ใช้ประมาณ 30 องศาเซลเซียส ค่อยๆ เพิ่มอุณหภูมิทีละ 1-2 องศาเซลเซียส ทุกๆ ชั่วโมงจนกระทั่ง 50 องศาเซลเซียส ซึ่งใช้เวลาประมาณ 12-13 ชั่วโมง จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิให้ถึง 60 องศาเซลเซียส รักษาระดับอุณหภูมิไว้นานประมาณ 1 ชั่วโมง เพื่อช่วยเพิ่มรสชาติและดอกเห็ดเป็นเงาสวยงาม

เจริญขวัญ วนะบดีมิตร [3] ได้อบแห้งเห็ดหอมที่อุณหภูมิ 40-70 องศาเซลเซียส พบว่าทั้งอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการอบแห้งมีผลต่อคุณภาพของเห็ดหอมแห้ง โดยถ้าเวลาในการอบแห้งนานขึ้นหรืออุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้น จะทำให้ปริมาณสาร Lenthionine ลดลง ส่วนในกรณีการอบแห้งเห็ดหอม โดยเริ่มจากอุณหภูมิต่ำแล้วเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นในตอนท้าย คือ อบแห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วเปลี่ยนเป็น 60 องศาเซลเซียส ต่อเป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่า สามารถพัฒนาคุณภาพทางกลั่นดีกว่าการอบแห้งด้วยอุณหภูมิกคงที่ตลอดระยะเวลาการอบแห้ง

กระบวนการอบแห้งมีผลต่อการพัฒนาสารให้กลิ่นในเห็ดหอม โดยจากงานวิจัยของเจริญขวัญ [3] พบว่าเห็ดหอมสดมีกลิ่นน้อย แต่เมื่อนำมาอบแห้ง กลิ่นของเห็ดหอมจะเด่นชัดขึ้น Morita และ Kobayashi [4] ได้สกัดกลิ่นของเห็ดหอมแห้ง โดยใช้ Methylene Chloride สกัด แล้ววิเคราะห์ด้วยวิธีแก๊สโครมาโตกราฟีได้สารที่มีจุดหลอมเหลว 60-61 องศาเซลเซียส มีกลิ่นของเห็ดหอม และได้ให้ชื่อว่า Lenthionine ซึ่งมีสูตรโมเลกุลคือ $C_2H_4S_5$ (1,2,3,5,6- Pentathiepane) ต่อมา Wada และคณะ [5] พบว่า สารนี้ไม่ละลายในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว และทดสอบจะได้กลิ่นของสาร Lenthionine เมื่อสารละลายมีความเข้มข้นมากกว่า 0.24 ppm ในน้ำและสูงกว่า 12.5 ppm ในน้ำมันพืช

ในปี 1971 Yasumoto และคณะ [6] [7] ได้สรุปขั้นตอนการเกิดสาร Lenthionine นั้น อาศัยเอนไซม์ 2 ชนิด คือ γ -Glutamyltransferase และ Cysteine Sulfoxide Lyase (C-S Lyase) เป็นตัวกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาและมีการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นไปเป็นสารตัวกลาง (Intermediate) และสารต่างๆ มากมาย หลังจากนั้นสารตัวกลาง จึงถูกเปลี่ยนไปเป็นสาร Lenthionine โดยปฏิกิริยาที่ไม่ใช้

เอนไซม์

จากข้อมูลข้างต้นทำให้ทราบว่ากลไกการเปลี่ยนแปลงสารให้กลิ่นในเห็ดหอมเป็นปฏิกิริยาที่ซับซ้อน มีผลเนื่องมาจากการทำงานของเอนไซม์ และในระหว่างกระบวนการอบแห้งความชื้นและอุณหภูมิภายในเห็ดหอมมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ซึ่งน่าจะมีผลต่อการทำงานของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยา โดยตรงงานวิจัยนี้จึงศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร Lenthionine ระหว่างการอบแห้งเห็ดหอม และเสนอการทำนายสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งเห็ดหอม เพื่อใช้ปรับปรุงกระบวนการผลิตในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

อุปกรณ์และวัตถุดิบ

1. เครื่องอบแห้งชนิดถาด (Tray-Dryer)
2. เครื่องวัดความเร็วลมแบบขดลวดร้อน (Hot Wire Anemometer) วัดได้ในช่วง 0-50 เมตร/วินาที ช่วงอุณหภูมิใช้งาน 0-80 องศาเซลเซียส เครื่องมือวัดได้ละเอียด ± 5 เปอร์เซ็นต์
3. เครื่องบันทึกอุณหภูมิยี่ห้อ Yokogawa รุ่น HR 1300 ใช้บันทึกและแสดงค่าอุณหภูมิที่ได้จากการใช้เทอร์โมคัปเปิล สามารถอ่านค่าได้ละเอียด 0.1 องศาเซลเซียส
4. ชุดเครื่องมือวิเคราะห์ไขมัน (Soxtec) ยี่ห้อ Tecator System HT6, Extraction Unit รุ่น HI 1043, Service Unit รุ่น HI 1046 และ Sample Mill รุ่น HI 1093
5. เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas Chromatograph) ประเภท FID (Flame Ionization Detectors) ยี่ห้อ Shimadzu Model 94 และ Integrator ยี่ห้อ Shimadzu Model CR-34 ใช้วิเคราะห์ปริมาณสารที่อยู่ในรูปของสารละลาย

คอลัมน์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ เป็นคอลัมน์แก้วที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 3 มม. ความยาว 1.6 เมตร บรรจุด้วย 3% ของ OV-17 บน Chromosorb WAW/DCMS 80/100 mesh บรรจุโดย บริษัท พาราวิเนเซอร์ จำกัด

6. สาร Lenthionine มาตรฐาน (1,2,3,5,6-Pentathiepane)

7. เห็ดหอมสด ซื้อจากห้างอิเซตัน กรุงเทพฯ
วิธีการทดลอง

คัดขนาดหมวกดอกเห็ดหอมให้อยู่ในช่วง 4-6 เซนติเมตร นำเรียงในถาดอบแห้ง โดยเสียบเทอร์โมคัปเปิลที่กลางดอกเห็ดหอม บันทึกอุณหภูมิตลอดการอบแห้ง อุณหภูมิอบแห้งมี 4 สภาวะคือ 40, 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส มีการเก็บตัวอย่างเป็นช่วงเวลา แล้วนำตัวอย่างมาหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ ส่วนหนึ่งนำไปวิเคราะห์ความชื้น และอีกส่วนหนึ่งนำไปวิเคราะห์ปริมาณสาร Lenthionine ตามวิธีของเจริญขวัญ [3] แต่ได้ปรับปรุงวิธีการสกัดให้เหมาะสมยิ่งขึ้น โดยการนำตัวอย่างไปแช่น้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 นาทีแทนการนำไปแช่ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เนื่องจากการแช่เห็ดหอมที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน อาจทำให้เกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงจากสารตั้งต้นไปเป็นสาร Lenthionine มากขึ้น ทำให้ปริมาณสาร Lenthionine ที่วิเคราะห์ได้คลาดเคลื่อนจากการทดลองจริง

ผลการทดลองและวิจารณ์

ในขั้นแรกของการศึกษา ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลา และอุณหภูมิภายในเห็ดหอมกับเวลา เพื่อนำไปใช้ประโยชน์สำหรับการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายปริมาณสาร Lenthionine ที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการอบแห้งต่อไป
การศึกษาการเปลี่ยนแปลงความชื้นในเห็ดหอม

จากการอบแห้งเห็ดหอม ซึ่งมีความชื้นเริ่มต้น 688-742 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง ช่วงความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม 60-80 เปอร์เซ็นต์ พบว่าความชื้นแปรผกผันกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ในการทดลองนี้ได้อบแห้งเห็ดหอมจนได้ความชื้นสุดท้ายประมาณ 13 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานโคเด็กซ์ และได้สร้างแบบจำลองในการทำนายความชื้นของเห็ดหอม สัมพันธ์กับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ดังนี้

$$M = M_0 \exp(-ct) \quad (1)$$

ซึ่ง c = ค่าคงที่ของการอบแห้ง

t = เวลา, ชั่วโมง

M = ปริมาณความชื้นที่เวลาใด ๆ, มาตรฐานแห้ง

M_0 = ปริมาณความชื้นที่เวลาเริ่มต้น, มาตรฐานแห้ง

ซึ่งจากการใช้แบบจำลองนี้ในการทำนายความชื้นของเห็ดหอม พบว่าสามารถทำนายได้ใกล้เคียงกับผลการทดลอง เมื่อนำค่า c ที่ได้จากแต่ละสภาวะการทดลอง มาหาความสัมพันธ์กับอุณหภูมิอบแห้ง สามารถอ้างอิงความสัมพันธ์นี้ โดยใช้สมการของอาร์เนียส

$$c = 4.8 \times 10^3 \exp(-3.2 \times 10^3 / (273.15 + T_D)) \quad (2)$$

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเห็ดหอมระหว่างการอบแห้ง

เมื่อพิจารณาการถ่ายโอนความร้อนในเห็ดหอม จะเห็นได้ว่าเป็นการถ่ายโอนความร้อนโดยการนำ มีการส่งถ่ายความร้อนจากผิวเห็ดหอมเข้าสู่ภายในเห็ดหอม ถือว่าเห็ดหอมมีอุณหภูมิเริ่มต้นสม่ำเสมอทั่วทั้งดอก และเมื่อเห็ดหอมเริ่มเข้าสู่กระบวนการอบแห้ง อุณหภูมิที่ผิวเห็ดหอมเท่ากับอุณหภูมิอบแห้ง เมื่อพิจารณาการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิพบว่าเป็นแบบ Exponential โดยอุณหภูมิภายในเห็ดหอม มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ

เริ่มต้นของเห็ดหอม ($T_O, ^\circ\text{C}$) อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง ($T_D, ^\circ\text{C}$) และเวลา (t) สำหรับทุก ๆ สภาวะอุณหภูมิอบแห้งดังนี้

$$T = T_D - (T_D - T_O) \exp(-0.2574t) \quad (3)$$

ค่าคงที่ในแบบจำลองไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ จึงใช้ได้กับทุกสภาวะการอบแห้ง ซึ่งแสดงว่าอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิในเห็ดหอมเหมือนกันไม่ว่าจะมีการเปลี่ยนอุณหภูมิอบแห้งใดก็ตาม

การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและความชื้นที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสาร Lenthionine ในเห็ดหอม

พบว่าในการอบแห้งที่สภาวะใด ๆ ความชื้นของเห็ดหอมและเวลาในการอบแห้งมีผลกระทบต่อปริมาณสาร Lenthionine โดยตรง นอกจากนี้ ปริมาณสาร Lenthionine ยังมีการเปลี่ยนแปลงตลอดการอบแห้ง ซึ่งที่การอบแห้งแต่ละสภาวะจะให้ผลในทิศทางเดียวกัน แต่ที่สภาวะอุณหภูมิต่ำปฏิกิริยาจะดำเนินได้ช้ากว่าที่อุณหภูมิสูง

เพื่อให้การเปรียบเทียบข้อมูลแต่ละสภาวะการทดลองเข้าใจได้ง่ายขึ้น จึงแสดงผลของปริมาณสาร Lenthionine ในรูปของสัดส่วนโดยมวล (ปริมาณสาร Lenthionine / ปริมาณสารตั้งต้น) โดยอ้างอิงจากงานวิจัยของ Yasumoto และคณะ [4] ซึ่งได้แสดงไว้ว่า ปริมาณสารตั้งต้น (Lentinic Acid) 3.3 โมล เมื่อผ่านปฏิกิริยาแล้วจะให้สาร Lenthionine 1 โมล และเนื่องจากไม่ได้มีการวิเคราะห์ปริมาณสารตั้งต้น (Lentinic Acid) จึงสมมติให้ปริมาณสาร Lenthionine สูงสุดที่วิเคราะห์ได้ในแต่ละชุดการทดลอง เปลี่ยนแปลงมาจากสารตั้งต้นทั้งหมด (ซึ่งจุดที่วิเคราะห์ได้อาจไม่ใช่จุดที่ได้ปริมาณ Lenthionine สูงสุดที่แท้จริง และในการสร้างแบบจำลองสำหรับงานวิจัยนี้ ทำเพื่อให้ทราบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลง

ปริมาณสาร Lenthionine ในระหว่างการอบแห้ง) จึงได้ค่าดังแสดงในรูปที่ 1-3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสาร Lenthionine กับเวลา ปริมาณสาร Lenthionine กับอุณหภูมิภายในเห็ดหอม และปริมาณสาร Lenthionine กับความชื้น

ปริมาณสาร Lenthionine มีการเปลี่ยนแปลงโดยเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนค่อนข้างคงที่ ในช่วงกลางของการอบแห้งในขณะที่อุณหภูมิภายในเห็ดหอมยังคงเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ พบว่าเกิดอัตราการสร้างสาร Lenthionine ที่สูงมาก แต่เป็นช่วงระยะเวลาเพียงสั้น ๆ จากนั้นลดปริมาณลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งในช่วงนี้สังเกตเห็นว่า ปริมาณความชื้นลดต่ำมากและอุณหภูมิเริ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งที่แต่ละสภาวะการทดลองที่อุณหภูมิ 40, 50 และ 70 องศาเซลเซียส ให้ผลการทดลองที่เหมือนกัน ส่วนที่สภาวะอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พบแต่การสร้างสาร Lenthionine สูงสุดเนื่องจากเวลาในการอบแห้งสิ้นสุดก่อนเกิดการเปลี่ยนแปลงสาร Lenthionine ไปเป็นสารอื่น ดังนั้นหากอบแห้งต่อไปจึงน่าจะพบช่วงปริมาณสาร Lenthionine ลดลง

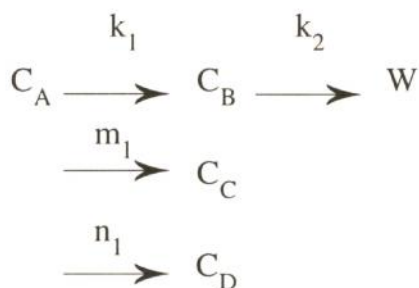
เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับงานวิจัยของ Yasumoto และคณะในปี 1971 [5] ซึ่งได้ทำการทดลองเพื่อศึกษากลไกการเกิดสาร Lenthionine เช่นเดียวกัน โดยได้สกัดเอนไซม์จากเห็ดหอมสด นำมาทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส พบว่าในช่วงต้นของปฏิกิริยา ปริมาณสาร Lenthionine มีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งถึงจุดสูงสุด จึงลดปริมาณลงเรื่อยๆ จนกระทั่งมีปริมาณคงที่ ปฏิกิริยาเกิดขึ้นในสภาวะที่ไม่มีผลกระทบข้างเคียง แต่กลไกการดำเนินปฏิกิริยาในเห็ดหอม จะได้รับผลกระทบของอุณหภูมิซึ่งเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา รวมทั้งความชื้นที่ลดลงเรื่อยๆ

จากข้อมูลข้างต้น และจากขั้นตอนปฏิกิริยาของสาร Lenthionine (Pathway) การเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร Lenthionine ที่เกิดขึ้นมีผลกระทบ

มาจากค่าปัจจัย 2 ตัว คือ อุณหภูมิภายในเห็ดหอม และความชื้น โดยมีผลต่ออัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยา คือ ค่าปัจจัยมีความสัมพันธ์อยู่ในเทอมของค่าคงที่ของอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยา ($k=f(M,T)$) แต่จะทำให้การแก้สมการยุ่งยากและซับซ้อนมากขึ้น จึงสมมุติว่าการเปลี่ยนแปลงสาร Lenthionine เกิดขึ้นในสภาวะการอบแห้งคงที่ (อุณหภูมิในการอบแห้งคงที่) และมีการเปลี่ยนแปลงสาร Lenthionine เป็น 2 ปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาที่ 1 จะดำเนินจนกระทั่งถึงเวลา t_c (Critical Time) จากนั้นจะเข้าสู่ปฏิกิริยาที่ 2 ซึ่งจากสภาวะการทดลองที่อุณหภูมิอบแห้ง 40, 60 และ 70 องศาเซลเซียส ปรากฏช่วงการเปลี่ยนปฏิกิริยาชัดเจน แต่ที่สภาวะการทดลองที่อุณหภูมิอบแห้ง 50 องศาเซลเซียส ไม่ปรากฏชัดเจน จึงนำเวลาที่เกิดการเปลี่ยนปฏิกิริยาเฉพาะ 3 สภาวะการทดลอง มาหาความสัมพันธ์ ได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงดังนี้

$$t_c = 31.39 - 0.34T_D \quad (4)$$

จากข้อมูล นำมาเขียนปฏิกิริยาได้โดยปฏิกิริยาขั้นที่ 1 มีการสร้างสาร Lenthionine พร้อมสารอื่น และปรากฏการเปลี่ยนสาร Lenthionine เป็นสารอื่น (W) ซึ่งขั้นตอนนี้จะดำเนินตั้งแต่เริ่มต้น (t_0) จนกระทั่ง t_c โดยจากขั้นตอนของปฏิกิริยาพบว่าสารตั้งต้น (Lentinic Acid), C_A เปลี่ยนเป็นสาร 3 ตัว คือ Lenthionine ($C_2H_4S_5$), C_B , CH_2S_6 , C_C และ $C_3H_3S_4$, C_D ซึ่งเขียนปฏิกิริยาได้ดังนี้



ค่า k_1 , m_1 และ n_1 เป็นค่าคงที่ของอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยา k_2 เป็นค่าคงที่ของอัตราเร็วในการ

การเปลี่ยนสาร Lenthionine เป็นสารอื่น สามารถสร้างแบบจำลองในการทำนายปริมาณสาร Lenthionine ในปฏิกิริยาที่ 1 ได้ดังสมการ

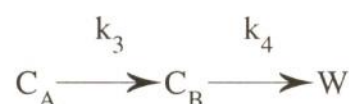
$$X_{BC} = X_{BO} \exp(-k_2 t) + [k_1 / (k_2 - k_1)] [\exp(-k_1 t) - \exp(-k_2 t)] \quad (5)$$

X_{BO} = สัดส่วนโดยมวลของปริมาณสาร Lenthionine เริ่มต้นต่อปริมาณสารตั้งต้น

X_{BC} = สัดส่วนโดยมวลของปริมาณสาร Lenthionine ที่เวลา t_c ต่อปริมาณสารตั้งต้น

$$\text{โดยที่ } k_t = k_1 + m_1 + n_1$$

ขั้นตอนที่ 2 ปฏิกิริยาจะดำเนินเข้าสู่สมดุลใหม่ โดยการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นไปเป็นสารผลิตภัณฑ์อื่นอีกสองชนิดและถูกทำลาย แต่ปฏิกิริยาการเกิดสาร Lenthionine ยังคงสามารถดำเนินไปได้ และพบการเปลี่ยนแปลงสาร Lenthionine เป็นสารอื่น (W) ในขณะเดียวกัน ซึ่งจากข้อมูลการทดลองพบว่าปริมาณสาร Lenthionine มีการเพิ่มขึ้นในปริมาณที่สูงสุด และลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงท้ายของการอบแห้ง ซึ่งปฏิกิริยาขั้นนี้ดำเนินต่อจากปฏิกิริยาที่ 1 จนสิ้นสุดกระบวนการอบแห้ง และเนื่องจากเป็นการเข้าสู่สมดุลใหม่ ดังนั้นค่าคงที่ของอัตราเร็วของปฏิกิริยาจึงเปลี่ยนไปด้วย โดยเปลี่ยนเป็น k_3 และค่า k_4 เป็นค่าคงที่ของอัตราเร็วในการเปลี่ยนสาร Lenthionine ไปเป็นสารอื่น (W)



สามารถสร้างแบบจำลองแสดงปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงสาร Lenthionine ในขั้นตอนที่ 2

$$X_B = X_{BC} \exp(-k_4(t-t_c)) + [k_3 / (k_4 - k_3)] [\exp(-k_3(t-t_c)) - \exp(-k_4(t-t_c))] \quad (6)$$

จากสมการ 5 และ 6 ซึ่งสมมุติว่า ปฏิกิริยาเกิดที่สภาวะการอบแห้งคงที่ (อุณหภูมิอบแห้งคงที่) แต่อุณหภูมิภายในเห็ดหอมมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาและไม่พิจารณาผลกระทบของความชื้น เนื่องจากไม่ทราบกลไกชัดเจน และไม่สามารถแยกข้อมูลให้เห็นผลกระทบของอุณหภูมิและความชื้นออกจากกันได้ จึงพิจารณาเฉพาะผลของอุณหภูมิที่มีอิทธิพลต่อการทำงานของเอนไซม์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนสารตั้งต้น (Lenticic Acid) ให้เป็นสาร Lenthionine ดังนั้นจึงให้ค่าคงที่ของสมการทุกตัว เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิภายในเห็ดหอม (T) และมีความสัมพันธ์ตามสมการของอาร์เนียส คือ

$$K_i = A_i \exp (-B_i/T) \quad (7)$$

เมื่อ $i = 1, 2, 3, 4, m$

ซึ่งในการหาค่าคงที่ของสมการนี้ ใช้วิธี Non Linear Regression ได้ค่าคงที่ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงค่าคงที่ที่ได้จากการใช้แบบจำลองในการทำนายผลการทดลอง

ค่าคงที่จากแบบจำลอง									
A_1	B_1	A_2	B_2	A_t	B_t	A_3	B_3	A_4	B_4
0.189	104.679	2.226	105.11	1.630	192.678	1.610	109.096	1.463	40.871

และเปรียบเทียบปริมาณสาร Lenthionine ในรูปสัดส่วนโดยมวล ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการใช้แบบจำลองในการทำนายได้ค่าดังรูปที่ 4-7

สรุป

เมื่ออบแห้งเห็ดหอมที่สภาวะอบแห้งใด ๆ พบว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในเห็ดหอมและความชื้น มีผลกระทบต่อการทำงานของเอนไซม์ที่ทำให้เกิดสาร Lenthionine ปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงของ

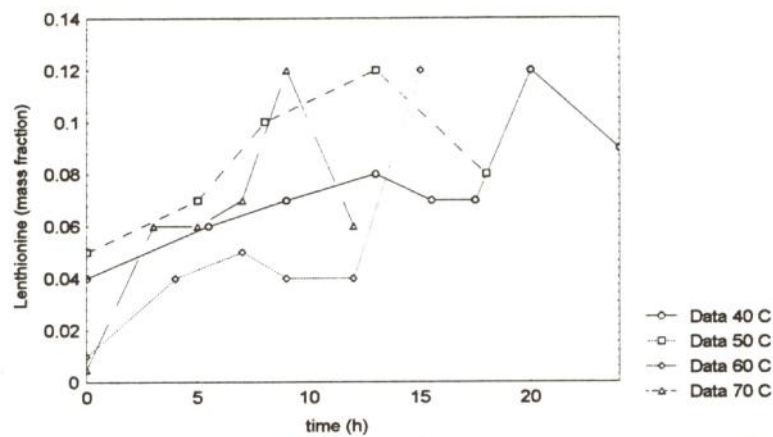
สาร Lenthionine ที่เกิดขึ้นมีลักษณะคล้ายคลึงกัน แต่ช่วงเวลาในการสิ้นสุดปฏิกิริยาต่างกันโดยที่อุณหภูมิอบแห้งต่ำปฏิกิริยาจะดำเนินไปอย่างช้า ๆ ที่อุณหภูมิอบแห้งสูง ปฏิกิริยาจะดำเนินไปได้เร็วกว่า จึงได้เสนอปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงของสาร Lenthionine ในเห็ดหอม ได้เป็น 2 ปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาที่ 1 เกิดการสร้างสาร Lenthionine และสารอื่นไปพร้อมกันพร้อมทั้งการทำลายด้วย และปฏิกิริยาที่ 2 การสร้างสารอื่นถูกทำลายไปปรากฏการสร้างสาร Lenthionine เพียงอย่างเดียว และหลังจากนั้น เมื่ออุณหภูมิภายในเห็ดหอมเพิ่มขึ้นและความชื้นลดลงมากแล้ว สาร Lenthionine จึงถูกเปลี่ยนเป็นสารอื่น จากข้อมูลดังกล่าวได้นำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กึ่งทฤษฎีและใช้ทำนายปริมาณสาร Lenthionine ที่เวลาต่างๆ ในระหว่างการอบแห้ง พบว่า ปริมาณสาร Lenthionine สูงสุดที่ได้จากการอบแห้งที่สภาวะต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกัน หากพิจารณาคุณภาพทางด้านกลิ่นเป็นหลัก ก็อาจทำการอบแห้งที่ระดับอุณหภูมิอบแห้ง 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 9 ชั่วโมง เพื่อให้ได้ปริมาณสาร Lenthionine สูงสุด และความชื้นสุดท้าย 13.5 เปอร์เซ็นต์ มาตรฐานแห้ง

กิตติกรรมประกาศ

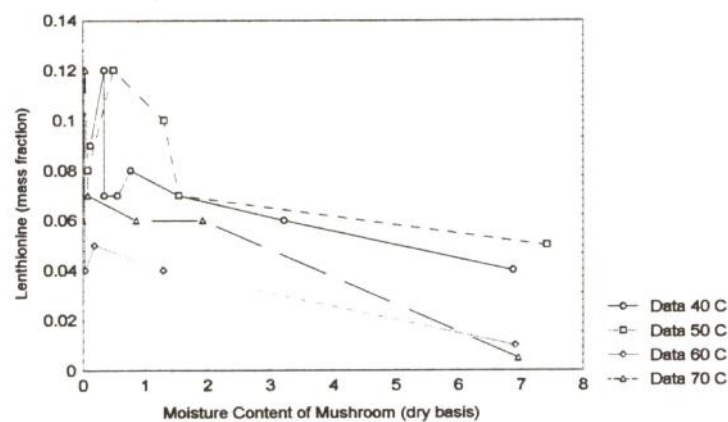
ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ศ.ดร.ยอดหทัย เทพธรานนท์ อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล และ รศ.ดร.สุทธพรณตริรัตน์ หัวหน้าหน่วยปฏิบัติการวิจัยเห็ด จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์สารมาตรฐาน (Lenthionine) และขอขอบพระคุณ ศ.ดร.สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องอบแห้ง

เอกสารอ้างอิง

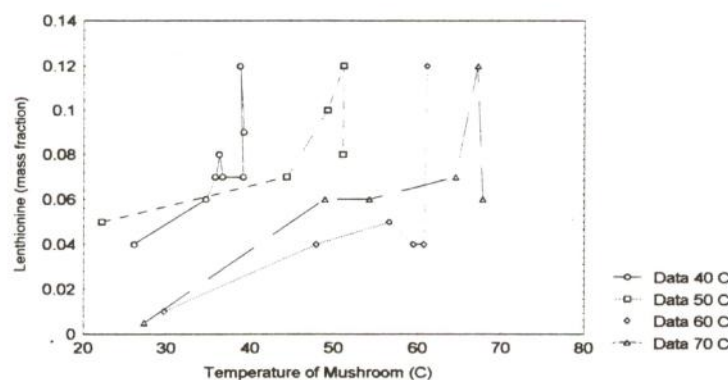
1. บรรณ บุระชนบท, 2535, เห็ดหอม, พิมพ์ครั้งที่ 2, ม.ป.ท., หน้า 1-130.
2. พิมพ์กานต์ อร่ามพงศ์พันธ์ และ อุทัย จันผกา, 2528, "เห็ดหอม : *Lentinus edodes* (Berk.) Sing," วนสาร, Vol. 43, No.1, pp.9-12.
3. เจริญขวัญ วนะบดีนิมิตร, 2536, "การอบแห้งเห็ดหอม : ผลของการอบแห้งต่อสารไทกิลิน (Lenthionine)," วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี, หน้า 1-85.
4. Morita, K., Kobayashi, S., 1966, "Isolation and Synthesis of Lenthionine and Odorous Substance of Shiitake, an Edible Mushroom," Tetrahedron Letters, No. 6, pp. 573-577.
5. Wada, S., Nakatani, H. and Morita, K., 1967, "a New Aroma Bearing Substance from Shiitake, an Edible Mushroom," Journal of Food Science, Vol. 32, No. 4, pp. 559-561.
6. Yasumoto, K., Iwami, K. and Mitsuda, H., 1971, "a New Sulfur Containing Peptide From *Lentinus edodes* Acting as Precursor for Lenthionine," Agricultural and Biological Chemistry, Vol. 35, No. 13, pp. 2059-2069.
7. Yasumoto, K. and Mitsuda, H., 1971, "Enzyme-Catalized Evolution of Lenthionine from Lentinic Acid," Agricultural and Biological Chemistry, Vol. 35, No. 13, pp. 2072-2080.



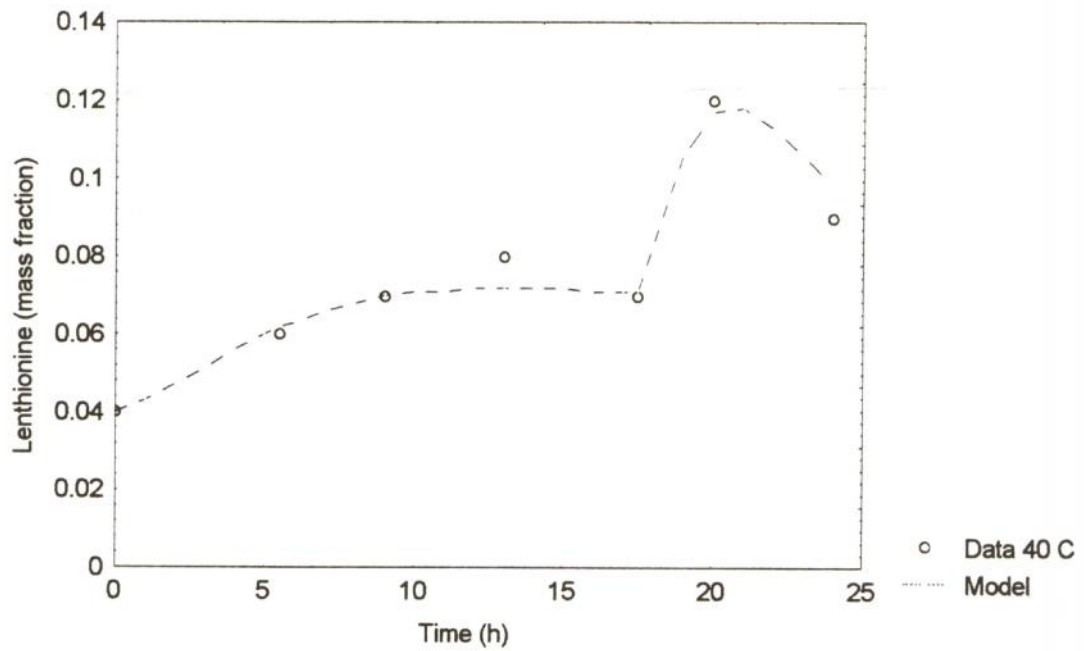
รูปที่ 1 ปริมาณสาร Lenthionine ที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการอบแห้ง ที่อุณหภูมิ 40-70 องศาเซลเซียส



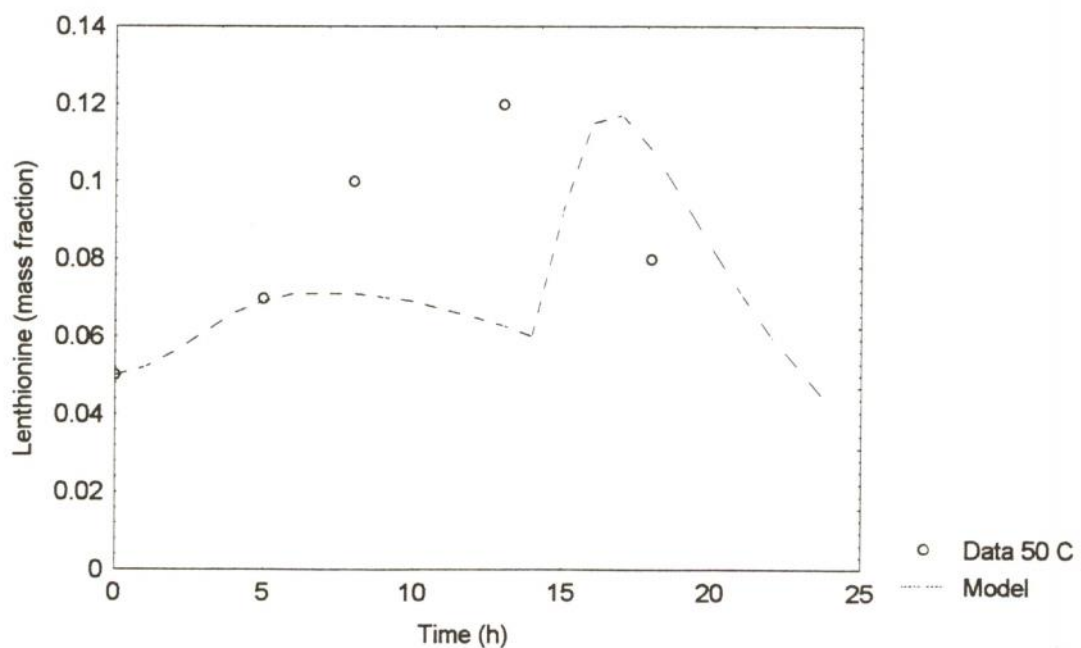
รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสาร Lenthionine และความชื้นภายในเห็ดหอม ที่อุณหภูมิอบแห้ง 40-70 องศาเซลเซียส



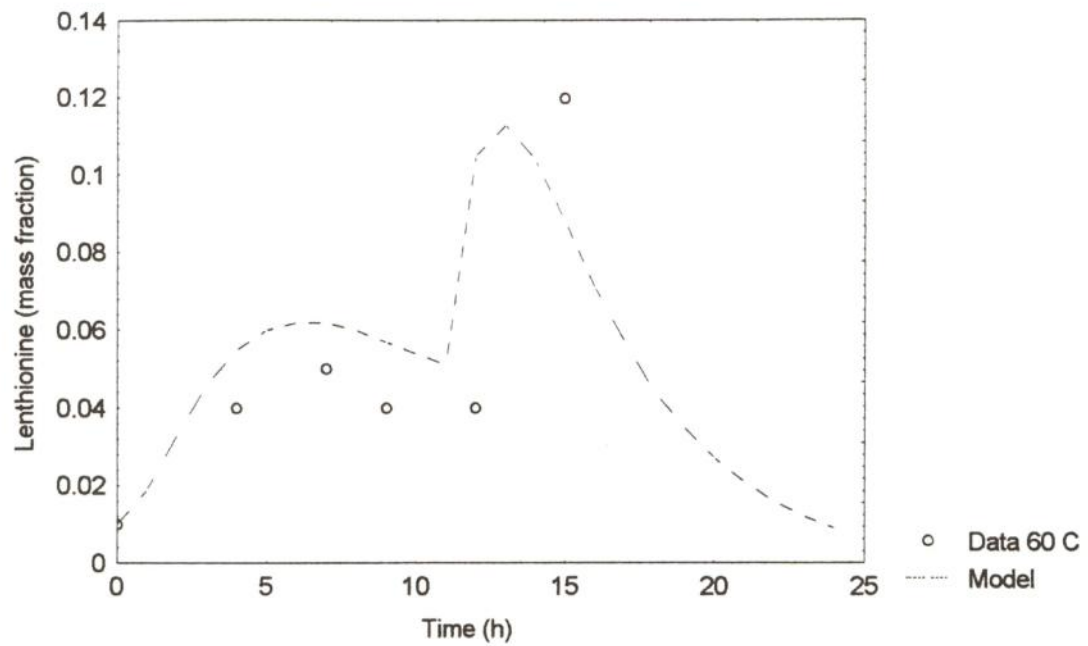
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสาร Lenthionine และอุณหภูมิภายในเห็ดหอม ที่อุณหภูมิอบแห้ง 40-70 องศาเซลเซียส



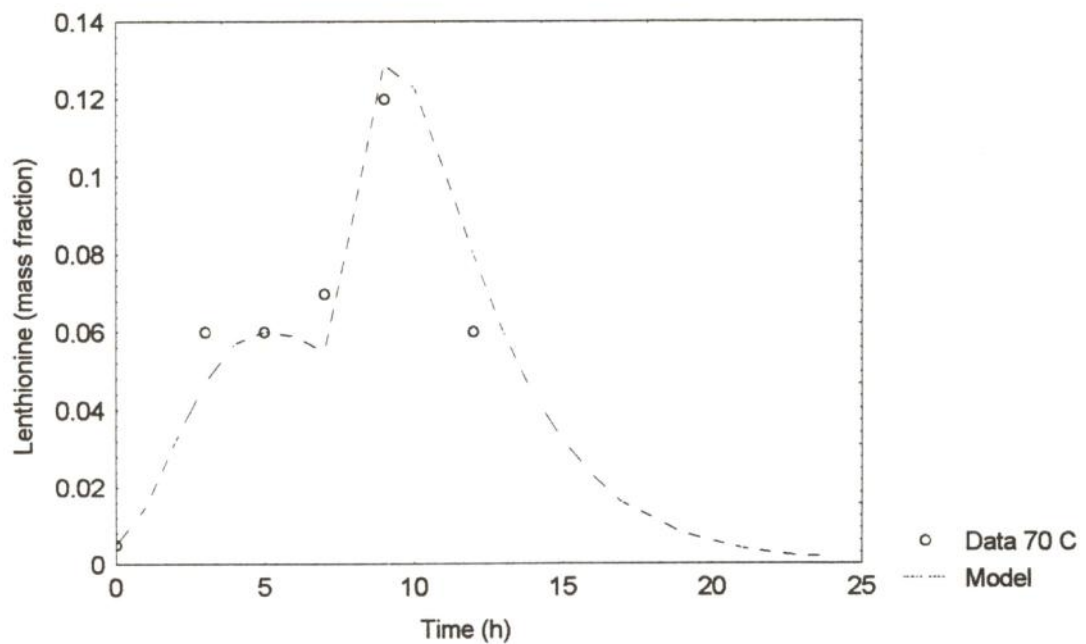
รูปที่ 4 สัดส่วนโดยมวลของสาร Lenthionine ที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับสัดส่วนโดยมวลของสาร Lenthionine ที่ได้จากการใช้แบบจำลอง ที่สภาวะอุณหภูมิอบแห้ง 40 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5 สัดส่วนโดยมวลของสาร Lenthionine ที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับสัดส่วนโดยมวลของสาร Lenthionine ที่ได้จากการใช้แบบจำลอง ที่สภาวะอุณหภูมิอบแห้ง 50 องศาเซลเซียส



รูปที่ 6 สัดส่วนโดยมวลของสาร Lenthionine ที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับสัดส่วนโดยมวลของสาร Lenthionine ที่ได้จากการใช้แบบจำลอง ที่สภาวะอุณหภูมิอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส



รูปที่ 7 สัดส่วนโดยมวลของสาร Lenthionine ที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับสัดส่วนโดยมวลของสาร Lenthionine ที่ได้จากการใช้แบบจำลอง ที่สภาวะอุณหภูมิอบแห้ง 70 องศาเซลเซียส