

การอบแห้งแครอทโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ

Drying of Carrots by Using a Vacuum Heat Pump Dryer

สิริธร สุภาคาร (Sirithon Supakarn)¹* รตินันท์ เหลือมพล (Ratinun Luampon)*

สมนึก ธีระกุลพิศุทธิ์ (Somnuk Theragulpisut)** อภิชาติ อาจนาสีวะ (Apichart Artnaseaw)***

บทคัดย่อ

การอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรมีหลายปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งซึ่งปัจจัยหนึ่งที่สำคัญคือ ความชื้นสมดุล ในการศึกษานี้จึงได้ศึกษาเพื่อหาความชื้นสมดุลของการอบแห้งแครอทด้วยเครื่องอบแห้งระบบสุญญากาศ โดยใช้ความร้อนจากเครื่องสุญญากาศ ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 50 55 และ 60 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 0.2 บาร์ และภายในห้องอบแห้งมีความชื้นสัมพัทธ์ในช่วง 10–75 %RH ซึ่งควบคุมโดยใช้สารละลายเกลืออิ่มตัว จากการทดลองในสภาวะความดันต่ำกว่าบรรยากาศ พบว่า เมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งต่ำ ทำให้ความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์และค่าความชื้นสัมพัทธ์ในห้องอบแห้งสูง จากข้อมูลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบสมการความสัมพันธ์ Oswin GAB Peleg Modified Oswin และ Modified GAB พบว่า รูปแบบสมการ Peleg สามารถทำนายความชื้นสมดุลได้ใกล้เคียงกับผลการทดลอง ($R^2 = 0.99$) จากการอบแห้งแครอทภายใต้สภาวะสุญญากาศ สามารถทำนายอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งแครอทได้โดยเมื่อใช้อุณหภูมิในการอบแห้งสูง มีผลให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นและใช้เวลาในการอบแห้งน้อยลง และจากการศึกษารูปแบบสมการการอบแห้งแบบชั้นบาง พบว่า รูปแบบสมการ Midilli อธิบายการอบแห้งของแครอทได้

ABSTRACT

Drying of agricultural products depends on several factors, one of which is the equilibrium moisture content (EMC). The main objective of this research is to experimentally determine the EMC of carrot under vacuum conditions by using a vacuum heat pump dryer. Experimental drying of the products was carried out at the pressures of 0.2 bar and the drying temperatures of 50, 55 and 60°C respectively. A saturated salt solution was used to control the drying relative humidity to be in the range of 10–75 %RH. From this study, it was discovered that under vacuum drying the equilibrium moisture content of the products and the relative humidity tended to increase as the drying temperature decreased and that both the EMC and RH tended to decrease with the drying pressure. Compare to the correlations proposed by Oswin, GAB, Peleg, modified Oswin and modified GAB, it was found that the functional form of Peleg fitted the data the best with R^2 of 0.99. The values of the moisture content of the products which were monitored at different times during drying were used with the EMC

¹ Correspondent author: s.sirithon@kkumail.com

* นักศึกษา หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

** รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

*** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

values obtained from the proposed equations to determine the moisture ratios of the product at different drying times. Among nine well-known correlations, the functional form proposed by Midilli gave the best results in predicting the drying of carrot under vacuum.

คำสำคัญ: ความชื้นสมดุล ออบแห้งสุญญากาศ ออบแห้งแครอท

Keywords: Equilibrium moisture content, Vacuum drying, Carrot drying

บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ทำให้มีผลผลิตทางการเกษตรหลายอย่างและเป็นสินค้าส่งออกหลายชนิด เช่น ข้าว มันสำปะหลัง ข้าวโพด ยางพารา เป็นต้น แต่ผลผลิตทางการเกษตรเหล่านี้มีการสูญเสียหลังการเก็บเกี่ยว เนื่องจากเป็นผลผลิตทางการเกษตรที่มีปริมาณความชื้นสูง จึงทำให้การทำแห้งเพื่อช่วยลดความสูญเสียระหว่างการขนส่งผลผลิต และยังเป็นการช่วยให้ผลผลิตนั้นสามารถเก็บรักษาได้นานขึ้น โดยการทำแห้งสามารถทำได้ทั่วไปคือ การตากแห้ง ซึ่งเป็นวิธีการที่มีค่าใช้จ่ายน้อยและนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในเขตพื้นที่ภูมิอากาศร้อน แต่การตากแห้งมีข้อเสียคือไม่สามารถควบคุมสภาวะอากาศและปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์ได้ จึงได้มีการใช้พลังงานอื่นๆ มาช่วยในการทำแห้งผลผลิตทางการเกษตร เช่น การทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง ซึ่งที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการอบแห้งผลิตภัณฑ์หลากหลายชนิด เช่น การอบแห้งกล้วยน้ำว้าโดยใช้ตู้อบแบบลมร้อน [1] การศึกษาการอบแห้งมะละกอและมะม่วงแช่อิ่มโดยใช้ปั๊มความร้อน [2] และการอบแห้งสมุนไพรด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟ [3] แครอทเป็นผลผลิตทางการเกษตรอีกชนิดหนึ่งที่มีความต้องการในการบริโภค เป็นผักที่มีคุณค่าทางอาหารสูงชนิดหนึ่งและกำลังได้รับความนิยมเนื่องจากอุดมไปด้วยเบต้าแคโรทีนและแอลฟาแคโรทีน รวมทั้งยังเป็นแหล่งของวิตามินและแร่ธาตุที่สำคัญต่อร่างกายต่างๆ เช่น วิตามิน A B C และ E รวมถึงธาตุเหล็ก แมกนีเซียม แมงกานีส ฟอสฟอรัส และที่สำคัญ คือมีสารต้านอนุมูลอิสระเป็นจำนวนมากและเป็นแหล่งของใยอาหารที่ดี [4] โดยสามารถนำมาประกอบอาหารได้

หลายอย่างเช่น รับประทานสดในสลัด ต้มจืด ต้มซุป ส้มตำ ผัดกับเนื้อสัตว์ ตักแต่งอาหารหรือขนมให้สวยงาม ใช้เป็นส่วนประกอบในการทำขนมเค้ก ข้าวเกรียบ และใช้ประโยชน์ในรูปแบบอื่นๆ เช่น เป็นส่วนผสมในตำรับยาจีนสำหรับรักษาโรคต่างๆ ได้แก่ ความดันโลหิตสูง โรคตาบอดกลางคืน ไอเรื้อรัง ท้องผูก รวมถึงเป็นอาหารสุขภาพสำหรับผู้ป่วยโดยการคั้นน้ำรับประทาน เป็นต้น หรือแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหารต่างๆ เช่น แครอทอบแห้ง แครอททอดกรอบ

การอบแห้งเป็นวิธีการหนึ่งในการเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ ซึ่งในปัจจุบันเครื่องอบแห้งได้มีการพัฒนาประยุกต์ใช้เทคโนโลยีที่ทันสมัย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ทั้งในเชิงคุณภาพของผลิตภัณฑ์หรือในเชิงของการใช้พลังงานให้คุ้มค่า Artinaseaw [5] ได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศต้นแบบขึ้น โดยใช้เครื่องสูบลมความร้อนเป็นอุปกรณ์ในการให้ความร้อน ซึ่งเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศอาศัยการปรับอุณหภูมิร่วมกับความดัน เพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ภายใต้สภาวะความดันต่ำกว่าความดันปกติ ใช้อุณหภูมิอบแห้งต่ำ มีอัตราการอบแห้งสูง สามารถช่วยรักษาคุณค่าทางอาหารและรูปร่างของผลิตภัณฑ์ได้

สำหรับการศึกษาการอบแห้งผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่องอบแห้งระบบสุญญากาศโดยใช้ความร้อนจากเครื่องสูบลมร้อนนั้น ปัจจัยหนึ่งที่สำคัญของการอบแห้งคือ ความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content หรือ EMC) ของผลิตภัณฑ์ ซึ่งความชื้นสมดุล คือความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในภาวะสมดุลกับอากาศที่แวดล้อม

ขณะนั้น โดยความชื้นสมดุลที่สภาวะบรรยากาศ จะขึ้นกับ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ และชนิดของ ผลึกภัณฑ์ และมีอิทธิพลต่ออัตราการแห้ง (Drying rate) ของผลึกภัณฑ์ ดังนั้น การศึกษานี้จึงทำการศึกษาความชื้น สมดุลภายใต้สภาวะสุญญากาศ เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบแห้งผลผลิตทางการเกษตรด้วยเครื่องอบแห้งระบบสุญญากาศโดยใช้ความร้อนจากเครื่องสูบลมความร้อน

ความชื้นสมดุลของผลึกภัณฑ์

ความชื้นสมดุล (EMC) คือปริมาณความชื้น เมื่อความดันของน้ำในผลึกภัณฑ์ ไปถึงจุดสมดุลกับ สิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นเอกลักษณ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ ที่มีความสำคัญต่อกระบวนการอบแห้ง เพื่อบอกปริมาณ ความชื้นน้อยสุดที่สามารถมีอยู่ได้ในผลึกภัณฑ์ ระหว่าง กระบวนการอบแห้ง ณ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ต่างๆ [6] หรือกล่าวได้ว่า ขณะที่ผลึกภัณฑ์อยู่ในสภาวะ สมดุลนั้น ความชื้นที่ผิวของผลึกภัณฑ์จะมีค่าเท่ากับ ความชื้นในอากาศที่อยู่รอบๆ และอุณหภูมิของผลึกภัณฑ์ ก็เท่ากับอุณหภูมิของอากาศรอบๆ ด้วย ซึ่งค่าความชื้น สมดุลขึ้นอยู่กับชนิดของผลึกภัณฑ์ อุณหภูมิ และความชื้น สัมพัทธ์ของอากาศ เพื่อให้ได้ผลึกภัณฑ์ที่มีความชื้น ตามที่ต้องการ

ความสัมพันธ์ของค่าความชื้นสมดุลของ ผลึกภัณฑ์และค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศสามารถ แสดงได้ในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ (ตารางที่ 1) เพื่อใช้ในการทำนายค่าความชื้นสมดุลของผลึกภัณฑ์ โดยสมการที่ใช้ในการทำนายค่าความชื้นสมดุลของ ผลึกภัณฑ์แต่ละชนิดมีรูปแบบแตกต่างกัน การเลือก รูปแบบสมการที่เหมาะสมที่สุดจึงจำเป็นต้องทำการ ทดลองพิตค่าที่ได้จากการทดลองเทียบกับรูปแบบสมการ หลายๆ แบบ แล้วทำการเปรียบเทียบหารูปแบบสมการ ที่เหมาะสมต่อผลึกภัณฑ์ที่ต้องการหาค่าความชื้นสมดุล มากที่สุด เมื่อ M_c คือ ความชื้นสมดุล RH คือ ความชื้น สัมพัทธ์ T คือ อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) และ A B C D คือ ค่าคงที่ของสมการ

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะถูกนำมาวิเคราะห์ กับรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ของความชื้นสมดุล 5 รูปแบบ โดยแต่ละรูปแบบสมการนั้นจะทำการพิจารณา ค่าทางสถิติ ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) และค่าความคาดเคลื่อน มาตรฐานของการประมาณค่า (Standard error of estimate, SEE) เพื่อเปรียบเทียบหารูปแบบสมการใด ที่จะสามารถทำนายความชื้นสมดุลได้ดีที่สุด โดยค่าความ คาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณค่า (SEE) สามารถ คำนวณได้จากสมการที่ 1

$$SEE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (M_{e(\text{exp})} - M_{e(\text{pre})})^2}{df}} \quad (1)$$

โดย $M_{e(\text{exp})}$ คือ ค่าความชื้นสมดุลที่ได้จากการ ทดลอง

$M_{e(\text{pre})}$ คือ ค่าความชื้นสมดุลที่ได้จากรูปแบบ สมการ

N คือ จำนวนข้อมูล

df คือ degree of freedom of regression model มีค่าเท่ากับ N-1

เครื่องมือและวิธีการ

การหาความชื้นสมดุลของแครอทสามารถ ทำได้โดยการควบคุมอุณหภูมิ ความดัน และความชื้น สัมพัทธ์ของอากาศให้คงที่ ซึ่งความชื้นสัมพัทธ์สามารถ ควบคุมให้คงที่ด้วยการใช้สารละลายเกลืออิ่มตัว และ อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง คือ 50 55 และ 60 องศาเซลเซียส โดยใช้ความดันในการอบแห้งคงที่ที่ 0.2 บาร์

เครื่องอบแห้งระบบสุญญากาศโดยใช้ความร้อนจากเครื่องสูบลมร้อน

สำหรับการศึกษาครั้งนี้ ใช้เครื่องอบแห้งระบบ สุญญากาศโดยมีเครื่องสูบลมร้อนเป็นแหล่งให้ ความร้อน ซึ่งห้องอบแห้งจะแยกออกจากเครื่องสูบลม ความร้อนและความร้อนที่ให้กับห้องอบแห้งจะผ่านทาง คอยล์ร้อน โดยมีพัดลมทำหน้าที่กระจายความร้อน

(ภาพที่ 1) และด้านนอกของเครื่องอบแห้งจะมีแผงควบคุม โดยสามารถควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ภายในระบบของเครื่องอบแห้งระบบสุญญากาศโดยใช้ความร้อนจากเครื่องสูบลมความร้อน และมีหน้าจอแสดงผลของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในห้องอบแห้ง

วิธีการเตรียมสารละลายเกลืออิ่มตัว

การศึกษาค่าความชื้นสมดุลของแครอท จะใช้สารละลายเกลืออิ่มตัวทั้งหมด 6 ชนิดในการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ โดยการเตรียมสารละลายเกลืออิ่มตัวแต่ละชนิดสามารถทำได้โดย ชั่งน้ำหนักเกลือและน้ำกลั่นตามสัดส่วน (ตารางที่ 2) จากนั้นคนสารละลายให้เข้ากันจนสารละลายเกลือไม่สามารถละลายได้อีก (สารละลายอิ่มตัว) บรรจุสารละลายที่ได้อลงในภาชนะแห้งชั้นล่าง

ขั้นตอนการดำเนินการทดลองหาความชื้นสมดุล

เมื่อได้สารละลายเกลืออิ่มตัวและทำการเตรียมชิ้นตัวอย่างของผลิตภัณฑ์เพื่อใช้ในการทดลองหาความชื้นสมดุล แล้วให้นำสารละลายเกลืออิ่มตัวครึ่งละ 1 ชนิดจากทั้งหมด 6 ชนิดใส่ในภาชนะแห้งชั้นล่าง และนำตัวอย่างแครอทที่ต้องการหาความชื้นสมดุล วางบนภาชนะแห้งชั้นบน จากนั้นทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 0.2 บาร์ จนกระทั่งน้ำหนักของตัวอย่างไม่เปลี่ยนแปลง แล้วนำตัวอย่างออกจากเครื่องอบแห้ง หลังจากนั้นทำการอบแห้งในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมงเพื่อหาน้ำหนักแห้งของตัวอย่าง จากนั้นทำการทดลองตามวิธีการข้างต้น แต่เปลี่ยนชนิดของสารละลายเกลืออิ่มตัว และเปลี่ยนอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง จากนั้นจึงนำผลการทดลองที่ได้จากการหาความชื้นสมดุลมาวิเคราะห์ด้วยสมการถดถอยและนำไปใช้ในการวิเคราะห์อัตราการอบแห้งต่อไป

การศึกษาการอบแห้งแครอท

นำตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่เตรียมไว้มาอบแห้งตามที่กำหนดไว้โดยการนำตัวอย่างผลิตภัณฑ์จัดเรียง

บนถาดตะแกรงแบบชั้นบาง และนำอีกส่วนหนึ่งไปหาความชื้นเริ่มต้นโดยนำไปอบด้วยตู้อบลมร้อน (hot air oven) ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง [7] จากนั้นลำเลียงถาดอบแห้งเข้าเครื่องอบแห้งระบบสุญญากาศโดยใช้ความร้อนจากเครื่องสูบลมความร้อน แล้วทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 0.2 บาร์ โดยในระหว่างการอบแห้งให้ทำการบันทึกน้ำหนักของตัวอย่างที่ไม่เปลี่ยนแปลง โดยแครอทที่มีปริมาณความชื้นไม่เกิน 10% มาตรฐานแห้ง และทำการทดลองตามขั้นตอนข้างต้น แต่เปลี่ยนอุณหภูมิ เป็น 55 และ 60 องศาเซลเซียส โดยใช้ความดันที่ 0.2 บาร์

ในการทดสอบการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรได้มีการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาประยุกต์ใช้เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์กับระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งของแต่ละสภาวะโดยการหาค่าความชื้นที่ได้จากการทดลองสามารถหาได้จาก

$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} \quad (2)$$

โดย MR คือ อัตราส่วนความชื้น (ไม่มีหน่วย) M คือ ค่าความชื้นของวัสดุที่เวลาใด ๆ (%db) M_o คือ ค่าความชื้นเริ่มต้น (%db) และ M_e คือ ค่าความชื้นสมดุล (%db)

สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาสมการการอบแห้งแบบชั้นบางนั้น จะใช้การหาค่าความสัมพันธ์ทางสถิติเพื่อเป็นตัวเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากรูปแบบสมการกับผลที่ได้จากการทดลอง โดยรูปแบบสมการการอบแห้งแบบชั้นบาง (ตารางที่ 3) ที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลจะใช้ค่าความสัมพันธ์ของค่า Correlation coefficient (R^2) ค่า Reduced chi-square (χ^2) และค่า Root mean square error (RMSE) เป็นตัวเปรียบเทียบในแต่ละสภาวะของการทดสอบ ซึ่งรูปแบบการหาค่าต่าง ๆ มีดังนี้

Reduced chi-square (χ^2) หาได้จาก

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp}} - MR_{\text{pre}})^2}{N - Z} \quad (3)$$

Root mean square error (RMSE) หาได้จาก

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp}} - MR_{\text{pre}})^2} \quad (4)$$

เมื่อ MR_{exp} คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง MR_{pre} คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากสมการ N คือ จำนวนของค่าที่ได้จากการบันทึกจากการทดลอง และ Z คือ จำนวนของค่าคงที่ในสมการ

ผลการศึกษาความชื้นสมดุลของแครอท

จากการทดลองหาค่าความชื้นสมดุลของแครอทด้วยเครื่องอบแห้งระบบสุญญากาศโดยใช้ความร้อนจากเครื่องสูบลมร้อน ได้ทำการทดลองอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 55 และ 60 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 0.2 บาร์ โดยกำหนดความเร็วของอากาศความดันต่ำภายในห้องอบแห้งให้คงที่ 1.2 เมตรต่อวินาที ความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องอบแห้งในช่วง 10–75 เปอร์เซ็นต์ ความชื้นสัมพัทธ์ เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อความชื้นสมดุลของแครอท และเมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองพลอตหาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลกับความชื้นสัมพัทธ์ พบว่า เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งต่ำ ความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้น เป็นผลให้ความชื้นสมดุลของแครอทเพิ่มขึ้นด้วย (ภาพที่ 2) เนื่องจากที่ความชื้นสัมพัทธ์สูง ทำให้ความชื้นในผลิตภัณฑ์ถ่ายเทออกสู่อากาศได้น้อยกว่า ส่งผลให้ความชื้นในแครอทที่อุณหภูมิอบแห้งต่ำเกิดการถ่ายเทความร้อนและมวลสารได้น้อยกว่าที่อุณหภูมิสูง ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยที่ทำการศึกษาค่าความชื้นสมดุลของพริก [8]

รูปแบบสมการความชื้นสมดุลของแครอท

จากการนำผลทดลองมาวิเคราะห์หารูปแบบสมการที่เหมาะสมกับค่าความชื้นสมดุลของแครอทที่ได้จากการทดลองนั้น จะได้ค่าคงที่และค่าความสัมพันธ์ทางสถิติที่ได้จากแต่ละรูปแบบสมการ ซึ่งจะพบว่ารูปแบบสมการ Peleg ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองมากที่สุด เนื่องจากมีค่า R^2 และมีค่า Standard error of estimate ต่ำกว่ารูปแบบสมการอื่นๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ (ตารางที่ 4) และได้ค่าคงที่และค่าความสัมพันธ์ทางสถิติที่ได้จากรูปแบบสมการ Peleg ที่สภาวะที่ใช้ในการศึกษาค่าความชื้นสมดุลของแครอท (ตารางที่ 5)

ผลของความชื้นสมดุลที่มีต่อการอบแห้งของแครอท

จากการอบแห้งแครอทด้วยเครื่องอบแห้งระบบสุญญากาศโดยใช้ความร้อนจากเครื่องสูบลมร้อน ได้ทำการทดลองอบแห้งภายใต้อุณหภูมิต่างๆ โดยอบแห้งที่อุณหภูมิ 50–60 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 0.2 บาร์ เพื่อศึกษาผลของความชื้นสมดุลที่มีต่อการอบแห้งของแครอท โดยการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความชื้นเทียบกับเวลาการอบแห้งในแต่ละอุณหภูมิ พบว่าเมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น เวลาของการอบแห้งมีแนวโน้มลดลง (ภาพที่ 3) เนื่องจากที่อุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น มีผลทำให้เกิดแรงขับในการถ่ายเทความร้อนและมวลสารมีค่าสูงขึ้นด้วยเช่นกัน โดยในช่วงแรกความชื้นของแครอทจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วและค่อยๆ ช้าลงเรื่อยๆ เนื่องจากในช่วงแรกเป็นช่วงที่แครอทมีความชื้นสูง และการถ่ายเทมวลและความร้อนส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่บริเวณผิว ซึ่งการถ่ายเทมวลและความร้อนที่บริเวณผิวของผลิตภัณฑ์นั้นจะง่ายกว่าการถ่ายเทมวลและความร้อนภายในผลิตภัณฑ์ โดยในการศึกษาครั้งนี้ให้ผลการทดลองสอดคล้องกับการอบแห้งแครอทที่ผ่านการอบแห้งแบบไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำและสุญญากาศ [9]

รูปแบบสมการการอบแห้งแบบชั้นบางของการอบแห้งแครอท

จากผลการอบแห้งแครอทด้วยเครื่องอบแห้งระบบสุญญากาศโดยอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 55 และ 60 องศาเซลเซียส ใช้ความดันคงที่ที่ 0.2 บาร์ พบว่าเมื่อทำการวิเคราะห์หารูปแบบสมการที่เหมาะสมกับค่าอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งแครอทโดยวิธีการ Nonlinear regression และจากการนำผลทดลองค่าอัตราส่วนความชื้นของแครอทมาวิเคราะห์หารูปแบบสมการนั้น จะได้ค่าคงที่และค่าความสัมพันธ์ทางสถิติที่ได้จากแต่ละรูปแบบสมการ (ตารางที่ 6) และค่าคงที่และค่าความสัมพันธ์ทางสถิติที่ได้จากสมการ Midilli ที่สภาวะอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองสำหรับการอบแห้งแครอท (ตารางที่ 7)

สรุปผลการศึกษา

จากการทดลองหาค่าความชื้นสมดุลของแครอทด้วยเครื่องอบแห้งระบบสุญญากาศโดยใช้ความร้อนจากเครื่องสูบลมความร้อน ได้ทำการทดลองภายใต้อุณหภูมิคือ อบแห้งที่อุณหภูมิ 50 55 และ 60 องศาเซลเซียส ที่ความดันในห้องอบแห้ง 0.2 บาร์ โดยกำหนดความเร็วของอากาศภายในห้องอบแห้งให้คงที่ 1.2 เมตรต่อวินาที ความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องอบแห้ง อยู่ในช่วง 10-75 เปอร์เซ็นต์ ความชื้นสัมพัทธ์ พบว่า อุณหภูมิ ความดัน และความชื้นสัมพัทธ์ ส่งผลต่อค่าความชื้นสมดุล โดยเมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งต่ำ ความชื้นสมดุลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้น และพบว่า รูปแบบสมการ Peleg ทำนายความชื้นสมดุลได้ใกล้เคียงกับการทดลองเนื่องจากมีค่า R^2 และมีค่า Standard error of estimate ต่ำกว่ารูปแบบสมการอื่นๆ และจากการศึกษาการอบแห้งแครอทโดยทำการทดลองอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 55 และ 60 องศาเซลเซียส ความดันในการอบแห้งเป็น 0.2 บาร์ พบว่า เมื่อใช้อุณหภูมิสูงในการอบแห้ง อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นและใช้เวลาในการอบแห้งน้อยลง และพบว่า รูปแบบสมการอบแห้งแบบชั้นบางที่มีรูปแบบสมการของ Midilli อธิบายการอบแห้งของแครอทได้ใกล้เคียงกับการทดลองที่สุด

เอกสารอ้างอิง

1. Bunpanya J. Influence of temperature and relative humidity of hot-air drying kinetics of banana [MEng thesis]. Chiang Mai: Chiang Mai University; 2010. Thai.
2. Achariyaviriya S. Study of Papaya Glace drying using heat pump [MEng thesis]. Chiang Mai: Chiang Mai University; 2010. Thai.
3. Tipyavimol T. Development of a microwave assisted heat pump dryer for herbal drying [PhD thesis]. Bangkok: Kasetsart University; 2008. Thai.
4. Howard LA. β -Carotene and Ascorbic Acid Retention in Fresh and Processed Vegetables. Journal of Food Science, 1999; 64(5): 929-936.
5. Artnaseaw A. Vacuum heat pump drying of herbs [PhD thesis]. Khon Kaen: Khon Kaen University; 2009. Thai.
6. Shivhare US, Arora S, Ahmed J, Raghavan GSV. Moisture adsorption isotherms for mushroom. Lebensm.-Wiss. u.-Technol. 2004; 37:133-137.
7. A.O.A.C. Official methods of analysis of AOAC international. Gaithersburg: AOAC international; 2002.
8. Kaleemullah S, Kailappan R. Moisture Sorption Isotherms of Red Chillies. Biosystems Engineering. 2004; 88(1): 95-104.
9. Panyawong S. Deformation Kinetics of Carrot Undergoing Low-pressure Superheated Steam Drying and Vacuum Drying. [MEng thesis]. Bangkok: King Mongkut's University of Technology Thonburi; 2004. Thai.
10. Al-Muhtaseb AH, McMin WAM, Magee TRA. Water sorption isotherms of starch powders Part 1, mathematical description of experimental data. Journal of Food Engineering. 2004; (6): 297-307.

11. Ghodake HM, Goswami TK, Chakraverty A. Moisture sorption isotherms, heat of sorption and vaporization of withered leaves, black and green tea. *Journal of Food Engineering*. 2007; (78): 827-835.
12. Siniya VR, Mishra HN. Moisture sorption isotherms and heat of sorption of instant (soluble) green tea powder and green tea granules. *Journal of Food Engineering*. 2008; (86): 494-500.
13. Iguaz A, Virseda P. Moisture desorption isotherms of rough rice at high temperatures. *Journal of Food Engineering*, 2007; (79): 794-802.
14. Oyelade OJ, Tunde-Akintunde TY, Igbeka JC, Oke MO, Raji OY. Modelling moisture sorption isotherms for maize flour. *Journal of Stored Products Research*. 2008; (44): 179-185.
15. Wolf A, Swift JB, Swinney HL, Vastano JA. Determining Lyapunov Exponents from a Time Series. Amsterdam: North-Holland Physics Publishing Division; 1985
16. O'Callaghan JR, Menzies DJ, Bailey HD. Digital simulation of agricultural dryer performance. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1971; 16(3): 223-244.
17. White GM, Ross IJ, Ponekert R. Fully exposed drying of popcorn. *Transactions of the ASAE*. 1981; (24): 466-468.
18. Yaldiz O, Ertekin C, Uzun HI. Mathematical modeling of Thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy*. 2001; (26): 457-465.
19. Wang CY, Singh RP. Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers*. 1978; (11): 668-672.
20. Togrul IT, Pehlivan D. Mathematical modeling of solar Drying of apricots in thin layers. *Journal of Food Engineering*. 2002; (55): 209-216.
21. Diamante LM, Munro PA. Mathematical modeling of hot air drying of sweet potato slices. *International Journal of Food Science and Technology*. 1991; (26): 99-109.
22. Henderson SM. Progress in developing the thin layer drying equation. *Transactions of ASAC*. 1974; (17): 1167-1172.
23. Midilli A, Kucuk H, Yapar Z. A New model for single layer drying. *Drying Technology*. 2002; 20(7): 1503-1513.

ตารางที่ 1 รูปแบบสมการของความชื้นสมดุล

สมการความชื้นสมดุล	รูปแบบสมการ	อ้างอิง
Oswin	$M_e = A \left[\frac{RH}{(1-RH)} \right]^B$	[10]
GAB	$M_e = \frac{ABC(RH)}{(1-B(RH))[(1-B(RH))+(BC(RH))]}$	[11]
Peleg	$M_e = A(RH)^B + C(RH)^D$	[12]
Modified Oswin	$M_e = (A+BT) \left[\frac{RH}{(1-RH)} \right]^{\frac{1}{C}}$	[13]
Modified GAB	$M_e = \frac{AB \left(\frac{C}{T} \right) (RH)}{(1-B(RH)) \left[(1-(RH)) + \left(\left(\frac{C}{T} \right) B(RH) \right) \right]}$	[14]

ตารางที่ 2 ปริมาณเกลือและน้ำกลั่นที่ใช้ในการเตรียมสารละลายเกลืออิ่มตัว [15]

สารละลายเกลือ	ปริมาณเกลือ (กรัม)	ปริมาณน้ำ (มิลลิกรัม)
MgCl ₂	200	25
K ₂ CO ₃	200	90
Mg(NO ₃) ₂	150	30
KI	200	80
NaCl	200	60
KCl	200	80

ตารางที่ 3 รูปแบบสมการการอบแห้งชั้นบาง

สมการการอบแห้งแบบชั้นบาง	รูปแบบสมการ	อ้างอิง
1 Newton	MR = exp(-kt)	[16]
2 Modified Page	MR = exp(-kt) ⁿ	[17]
3 Approximation of diffusion	MR = a exp(-kt) + (1-a)exp(-k b t)	[18]
4 Wang and Singh	MR = 1 + at + bt ²	[19]
5 Logarithmic	MR = a exp(-kt) + c	[20]
6 Simplified Fick's diffusion	MR = a exp(-c(t/L ²))	[21]
7 Modified Page equation-II	MR = exp(-c(t/L ²) ⁿ)	[21]
8 Two-term model	MR = a exp(-k ₀ t) + b exp(-k ₁ t)	[22]
9 Midilli	MR = a exp(-kt ⁿ) + bt	[23]

ตารางที่ 4 ค่าคงที่และค่าความสัมพันธ์ทางสถิติที่ได้จากแต่ละรูปแบบสมการที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ความดันที่ 0.2 บาร์ที่ใช้ในการศึกษาค่าความชื้นสมดุลของแครอท

สมการ	ค่าคงที่				R^2	SEE
	A	B	C	D		
Oswin	0.119092	0.779054			0.9822	0.013371
GAB	2.307442	0.689570	0.157409		0.9690	0.017626
Peleg	2.064451	9.852015	0.220085	0.948766	0.9963	0.005688
Modified Oswin	-1183436	21517	1		0.9888	0.044195
Modified GAB	0.676350	0.309360	28.1815		0.9789	0.081590

ตารางที่ 5 ค่าคงที่และค่าความสัมพันธ์ทางสถิติที่ได้จากรูปแบบสมการ Peleg ที่สภาวะที่ใช้ในการศึกษาค่าความชื้นสมดุลของแครอท

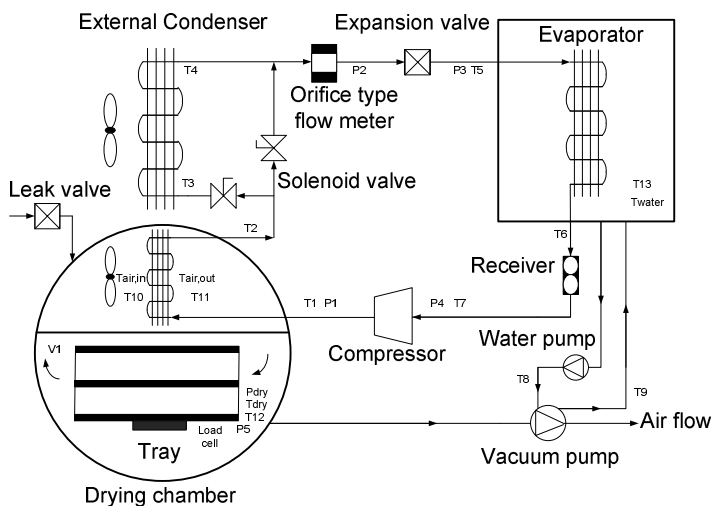
สภาวะที่ใช้ในการอบแห้ง	ค่าคงที่ที่ได้จากสมการ				ค่าความสัมพันธ์ทางสถิติ	
	A	B	C	D	R^2	SEE
50°C	0.694327	1.948119	-0.197261	1.948194	0.9456	0.024793
55°C	2.064451	9.852015	0.220085	0.948766	0.9963	0.005688
60°C	0.201178	0.853554	1.510019	9.009031	0.9912	0.007146

ตารางที่ 6 ค่าคงที่และค่าความสัมพันธ์ทางสถิติที่ได้จากรูปแบบสมการการอบแห้งแบบชั้นบาง โดยอบแห้งแครอท ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความดันในการอบแห้ง 0.2 บาร์

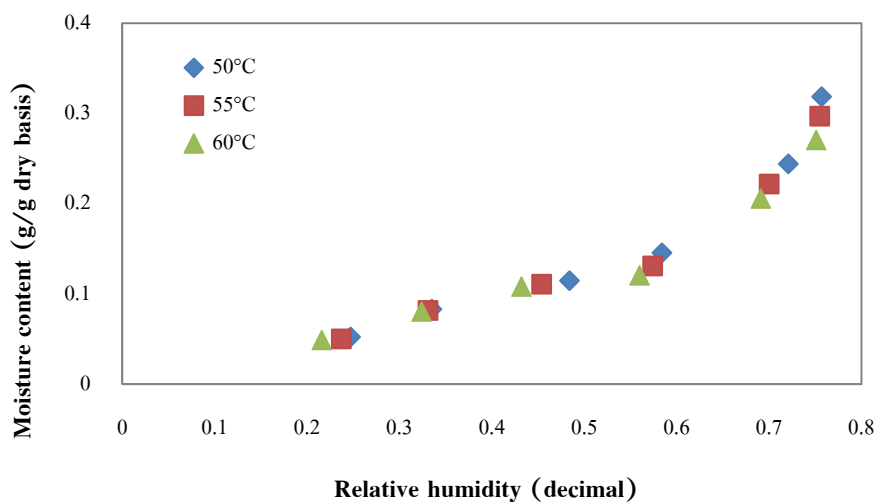
รูปแบบสมการ	ค่าคงที่ที่ได้จากรูปแบบสมการ						ค่าความสัมพันธ์ทางสถิติ		
	k	n	a	b	c	L	R^2	X^2	RMSE
1 Newton	0.005829						0.99320	0.00107	0.03200
2 Modified Page	0.072862	0.835916					0.99320	0.00113	0.03200
3 Approximation of diffusion	0.014512		0.30214				0.99530	0.00036	0.01816
4 Wang and Singh			-0.00428	0.00005			0.97550	0.00344	0.05580
5 Logarithmic	0.061580		0.91902		0.006814		0.99660	0.00119	0.03200
6 Simplified Fick's diffusion			0.94569		0.000146	-0.1631	0.99030	0.00088	0.02753
7 Modified Page equation-II		0.835913			0.86999	11.8266	0.99560	0.00034	0.01707
8 Two-term model	$k_0 = -0.00197$, $k_1 = 0.00635$		0.019446	0.95616			0.99670	0.00026	0.01457
9 Midilli	0.009615	0.919108	0.997208	0.00007			0.99730	0.00022	0.01320

ตารางที่ 7 ค่าคงที่และค่าความสัมพันธ์ทางสถิติที่ได้จากสมการ Midilli ที่สภาวะที่ใช้ในการอบแห้งแครอท

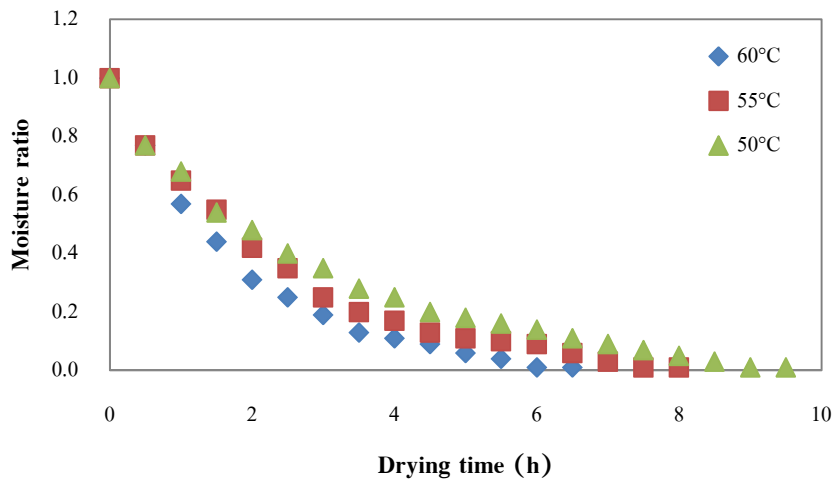
สภาวะที่ใช้ ในการอบแห้ง	ค่าคงที่ที่ได้จากรูปแบบสมการ				ค่าความสัมพันธ์ทางสถิติ		
	K	n	a	b	R^2	x^2	RMSE
50 °C	0.009615	0.919108	0.997208	0.000073	0.99730	0.00022	0.01320
55 °C	0.004888	1.093018	0.987092	0.000145	0.99670	0.00030	0.01537
60 °C	0.006687	1.088625	1.005041	0.000196	0.99940	0.00007	0.00698



ภาพที่ 1 องค์ประกอบเครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดสอบ



ภาพที่ 2 ความชื้นสมดุลของแครอทที่อุณหภูมิต่างๆ



ภาพที่ 3 อัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งแครอทที่อุณหภูมิต่างๆของการอบแห้ง