



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

อิทธิพลของวิธีการอบแห้งแบบต่าง ๆ ที่มีต่อคุณภาพของกล้วย

โดย

รศ.ดร. สมเกียรติ ประจักษ์วารากร

มิถุนายน พ.ศ. 2551

สัญญาเลขที่ RMU 4880002

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ อิทธิพลของวิธีการอบแห้งแบบต่าง ๆ ที่มีต่อคุณภาพของกล้วย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา
และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

น้ำมันที่คงเหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์กล้วยกรอบมีอยู่ในการเก็บรักษาสั้นเนื่องจากมีกลิ่นหืนซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน เพื่อเลี่ยงปัญหาดังกล่าวในงานวิจัยนี้จึงศึกษาวิธีการผลิตกล้วยกรอบด้วยวิธีการอบแห้งแบบต่างๆ การทำโฝมกล้วย นอกจากนี้ยังศึกษาถึงผลของการฟรียทรีทเมนต์กล้วยก่อนการอบแห้งเพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลต่อคุณภาพของกล้วยกรอบ

การอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูงในช่วงระหว่าง 110 ถึง 140°C เพียงอย่างเดียวเพื่อลดความชื้นจากความชื้นร้อยละ 250 มาตรฐานแห้ง เหลือความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 3 มาตรฐานแห้ง ซึ่งเป็นความชื้นที่ต้องการสำหรับของขบเคี้ยวทั่วไป พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสีน้ำตาลค่อนข้างเข้มแม้ว่ากล้วยจะผ่านการฟรียทรีทเมนต์ก่อนการอบแห้งด้วยกรดแอสคอร์บิก โซเดียมเมตาไบซัลไฟด์ และการลวก กล้วยแผ่นที่ผ่านการลวกจะมีความแข็งน้อยขณะที่มีการหดรัดมาก สีของผลิตภัณฑ์และคุณภาพทางด้านความกรอบ เช่นจำนวนของยอด และความชื้นเริ่มต้น ดีขึ้นเมื่อผ่านการอบแห้งแบบหลายขั้นตอน ซึ่งประกอบไปด้วย การอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิต่ำ เพื่อลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ลงมาระดับหนึ่ง จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการฟัฟฟิงด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิสูงประมาณ 180°C เป็นระยะเวลาสั้น ๆ และในขั้นตอนสุดท้ายเป็นการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำเพื่อลดความชื้นให้ได้ความชื้นตามที่ต้องการ เมื่อเปรียบเทียบการอบแห้งการอบแห้งวิธีนี้กับการอบแห้งแบบสูญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรด (vacuum FIR) และการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (FD) พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้งแบบหลายขั้นตอนมีความกรอบมากกว่าและหดรัดน้อยกว่าการอบแห้งแบบ vacuum FIR แต่สีที่ได้ค่อนข้างมีสีน้ำตาลเข้มกว่าโดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จัดอยู่ในกลุ่มสี Greyed-orange 163C กล้วยที่ผ่านการอบแห้งแบบ FD มีสีเหลืองอ่อน และไม่กรอบ สารประกอบที่ระเหยง่ายสูญเสียไปมากสำหรับการอบแห้งแบบหลายขั้นตอนและ vacuum FIR ขณะที่การอบแห้งด้วย FD สามารถรักษาสารประกอบที่ระเหยง่ายไว้ได้

นอกจากวิธีการอบแห้งดังกล่าวข้างต้นแล้ว การทำโฝมกล้วยก่อนนำมาอบแห้งสามารถผลิตกล้วยกรอบได้เช่นกัน แผ่นโฝมกล้วยหลังการอบแห้งมีความแข็งน้อยกว่ากล้วยที่ไม่ผ่านการทำโฝม และระดับความกรอบและความแข็งขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของแผ่นโฝมกล้วยเริ่มต้น อุณหภูมิในการอบแห้งซึ่งอยู่ในช่วงระหว่าง 60 ถึง 80°C ไม่มีผลต่อคุณภาพในด้านต่างๆ ของแผ่นโฝมกล้วย อย่างไรก็ตามแผ่นโฝมกล้วยที่ได้ค่อนข้างมีการหดรัดสูงถึงร้อยละ 50 ทั้งนี้เนื่องจากโฝมที่ก่อขึ้นมีการยุบตัวลงขณะอบแห้ง ในการผลิตแผ่นโฝมกล้วยกรอบควรใช้ความหนาแน่นของโฝมกล้วยเริ่มต้นประมาณ 0.5 g/cm³ และผ่านการอบแห้งที่ 80°C ที่เงื่อนไขดังกล่าวนี้ค่าความแข็งและความกรอบที่ได้ใกล้เคียงกับขนมปังกรอบที่ผลิตขายเป็นเชิงพาณิชย์ (Hi CrackTM)

จากผลงานวิจัยที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้นสามารถผลิตบัณฑิตในระดับคุณวุฒิตัวบัณฑิตเป็นจำนวน 1
ท่าน ระดับมหาบัณฑิตเป็นจำนวน 5 ท่าน และระดับบัณฑิตศึกษา 9 ท่าน พร้อมกับมีผลงานวิจัยที่
ตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติเป็นจำนวน 4 เรื่อง ในวารสารระดับชาติ 1 เรื่อง ในการประชุม
วิชาการระดับนานาชาติ 2 เรื่องและในการประชุมวิชาการระดับประเทศ 8 เรื่อง

ABSTRACT

The oil content remaining in deep-fried banana causes a short shelf life of the product due to lipid oxidation leading to rancidity. To alleviate this problem, this research was therefore to study the method to produce the crispy banana by using foaming technique and different drying techniques viz. hot air drying, vacuum far infrared drying (vacuum FIR), freeze drying (FD) and multistage drying. Furthermore, the pretreatment methods in order to prevent the browning reactions were also studied and considered their effect on the quality of crispy banana.

The banana slices after decreasing moisture content below 4% d.b., which is normally required for snack, using air temperatures of 110 to 140°C had intense brown although the samples before drying was pretreated with anti browning reagents viz. ascorbic acid, sodium metabisulphide and blanching. The banana sample pretreated by blanching had lower hardness but highest shrinkage as compared to other reagents. The finished product color and texture property in terms of number of peaks and initial slope (stiffness) from the force deformation curve can be significantly improved when the banana slices was processed with multistage drying. In multistage drying, the samples were dried with hot air at low temperature in order to reduce moisture to certain level. They were then dried or puffed with superheated steam at 180°C for a very short period of time and dried again to the desired moisture content using low-temperature drying. The finished product quality obtained by the multistage drying when compared to the above-mentioned drying methods was very different. The banana dried by multistage drying was crispier and lower shrinkage than the vacuum FIR-dried banana, but the product color was relatively browner, corresponding to the color group of grayed-orange 163C. However, the volatile compounds of finished product as measured by GC-MS device lost in a large quantity for the samples from the vacuum FIR and multistage drying, but could be maintained almost the same as those of fresh banana for the FD-dried product. However, the FD-dried product was not crispy.

In addition to the above drying methods, foaming banana before drying can produce the crisp banana. The fresh egg white was used as a foaming agent. The hardness of dried foamed banana was generally significantly smaller as compared to that of the finished product obtained from the above drying methods. The degree of crispness, as characterized by the number of peaks and initial slopes, and hardness of dried banana foam was depended on the banana foam density before drying. The drying temperature in the range of 60 to 80°C insignificantly affected the quality parameters such as texture and color. Due to instability of egg white foaming agent, the produced banana foam was collapsed during drying and consequently, the sample was shrunk by approximately 50% of the thickness at beginning of drying. To produce the crisp banana foam, it recommended to prepare the banana foam density of 0.5 g/cm³ and dry it at 80°C. The finished product obtained at the recommended condition had hardness and texture property similar to the Hi CrackTM commercial cracker.

One PhD student, 5 Master students and 9 undergraduate students were the output of this research work, along with 4 papers published in the international journal, one paper in local journal, 2 papers in the international conferences and 8 papers in the national conferences.

ปัญหาที่ทำการวิจัย และความสำคัญของปัญหา

กล้วยเป็นพืชล้มลุกที่สามารถออกผลได้ตลอดทั้งปี และเป็นที่ยอมรับปลูกกันอย่างแพร่หลาย ทำให้ผลผลิตที่ออกสู่ท้องตลาดมีมากเกินความต้องการของผู้บริโภค และการเก็บรักษากล้วยในลักษณะของสดเป็นสิ่งไม่ถาวรนัก เนื่องจากกล้วยจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในลักษณะของเนื้อสัมผัสและสีหลังจากที่กล้วยสุก กล่าวคือ กล้วยเขียวจะมีลักษณะของเนื้อกล้วยที่แข็ง จะเปลี่ยนเป็นกล้วยที่มีสีเหลือง พร้อมกับเนื้อที่มีลักษณะนุ่มและนุ่มขึ้น เมื่ออยู่ในช่วงที่ระดับความสุกที่เหมาะสม และเนื้อเยื่อจะมีลักษณะที่ยุ่ยมากเมื่อกล้วยสุกงอมมากเกินไป เนื่องจากคุณภาพของกล้วยลดลงและเน่าเสียอย่างรวดเร็วหลังจากที่มีการเก็บเกี่ยว การนำกล้วยที่สุกแล้วมาผ่านกระบวนการอบแห้งเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถลดปริมาณการสูญเสีย และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อได้ นอกจากนี้ประโยชน์ดังกล่าวแล้วการอบแห้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ดังกล่าวการจัดการอบแห้งกล้วยเป็นไปไม่ถาวรนัก เนื่องจากกล้วยเป็นพืชที่มีปริมาณน้ำตาลค่อนข้างสูง จากรายงานการวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการใช้อุณหภูมิสูงในการอบแห้งเป็นระยะเวลานานสำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการสูญเสีย กลิ่น สี คุณค่าทางโภชนาการ และ สมบัติการคืนตัวของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง

กล้วยแผ่นเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากมาย เช่น เป็นอาหารว่างเป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์สำหรับทานเป็นอาหารเช้า (breakfast cereals) นอกจากนี้ยังสามารถนำไปผ่านกระบวนการแปรรูปอื่นๆ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายตามที่ต้องการ เช่น เคลือบด้วยสารให้ความหวาน หรือการทอดในน้ำมัน คุณภาพของกล้วยแผ่นหลังการอบแห้งจึงมีลักษณะที่แตกต่างกันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ต้องการ อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะนำกล้วยมาผลิตเป็นอาหารว่าง หรือ ใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์สำหรับทานเป็นอาหารเช้า ลักษณะของผลิตภัณฑ์ดังกล่าวควรมีลักษณะของความกรอบและหวาน ลักษณะของเนื้อกล้วยไม่ควรที่จะนิ่มเกินไปหลังจากที่สัมผัสกับของเหลว จากลักษณะของสมบัติดังกล่าวในทางปฏิบัติทำได้โดยการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ แม้ว่าเทคนิคดังกล่าวจะประสบความสำเร็จในระดับหนึ่ง แต่ข้อปัญหาที่เกิดขึ้นตามมา คือ มีปริมาณน้ำมันยังคงเหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ ดังรายงานการวิจัยสำหรับการทอดผลิตภัณฑ์ชนิดต่าง ๆ นอกจากนี้การที่มีปริมาณน้ำมันคงค้างภายในผลิตภัณฑ์อาจทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้เกิด กลิ่นหืนและไม่เป็นที่ยอมรับสำหรับผู้บริโภคที่ใส่ใจในสุขภาพ

การไล่ความชื้นออกจากวัสดุสามารถกระทำได้ด้วยกันหลายวิธี เช่น การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน แต่ละรูปแบบของการให้ความร้อนทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของความชื้นที่ต่างกัน การเคลื่อนที่ของความชื้นอาจอยู่ในรูปของการแพร่ หรือเกิดขึ้นโดยอาศัยแรงคาปิลลารี ผลจากรูปแบบของการเคลื่อนที่ของความชื้นและวิธีการให้ความร้อนที่

แตกต่างกัน ทำให้ได้ลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์แตกต่างกัน การใช้ความร้อนในการอบแห้งมักพบว่าโครงสร้างของวัสดุมักจะเกิดขึ้นแข็งที่บริเวณผิวรอบนอกของวัสดุ และวัสดุมีการหดตัว การหดตัวของวัสดุจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งและปริมาณความชื้นที่สูญเสียไป และผลจากการหดตัวของวัสดุส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น สูญเสียสมบัติในการคืนรูปของวัสดุ อย่างไรก็ตามเมื่อทำการอบแห้งโดยใช้ บั้มความร้อนร่วมกับการใช้ความร้อนพบว่า สมบัติในการคืนรูปดีขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้อากาศร้อนเพียงอย่างเดียว สำหรับการให้ความร้อนโดยการแผ่รังสีนั้น รังสีที่ใช้ในปัจจุบันมีด้วยกัน 2 ชนิด คือ ไมโครเวฟ และอินฟราเรด ความยาวคลื่นที่ใช้ในการอบแห้งโดยทั่วไปอยู่ในช่วงระหว่าง 2.5 ถึง 30 μm สำหรับอินฟราเรด และในช่วงความยาวคลื่น 100 μm ถึง 1 m สำหรับไมโครเวฟ การให้ความร้อนด้วยวิธีการ แผ่รังสีนั้นสามารถลดการเกิดขึ้นแข็งที่บริเวณผิวรอบนอกซึ่งส่งผลให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้นและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ดีขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการให้ความร้อนภายในวัสดุ

จากรายงานวิจัยที่ผ่านมาจะเห็นว่า ส่วนใหญ่เน้นศึกษาผลกระทบของการอบแห้งที่มีต่อลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์หลังอบแห้ง แต่การศึกษาเกี่ยวกับสารระเหยง่ายที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ซึ่งมีส่วนสำคัญในการยอมรับคุณภาพของอาหารแต่ยังไม่แพร่หลายนัก แนนอนที่สุวิธีที่สามารถรักษากลิ่นของผลิตภัณฑ์ให้คงอยู่นั้นควรใช้อุณหภูมิและความดันต่ำในการอบแห้ง ซึ่งภายใต้เงื่อนไขดังกล่าวไม่อาจที่จะหลีกเลี่ยงได้ด้วยการใช้เทคนิคของการแช่เยือกแข็ง (freeze drying) อย่างไรก็ตามด้วยวิธีของการแช่เยือกแข็งนี้ มีค่าใช้จ่ายในการอบแห้งค่อนข้างสูงมากและใช้เวลาในการอบแห้งนาน ด้วยสาเหตุดังกล่าวในงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาวิธีการอบแห้งด้วยเทคนิคต่าง ๆ ที่มีผลต่อคุณภาพของกล้วยแผ่น โดยมีความคาดหวังเพื่อให้ได้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ใกล้เคียงกับคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแบบแช่เยือกแข็งแต่มีค่าใช้จ่ายในการอบแห้งต่ำกว่า

นอกจากการศึกษาวิธีการอบแห้งที่มีต่อคุณภาพของกล้วยแล้ว ขั้นตอนการเตรียมก่อนการอบแห้งก็มีส่วนสำคัญเช่นเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากในกล้วย ผลไม้และผักต่าง ๆ มีเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส (Polyphenol oxidase) โดยส่วนใหญ่เอนไซม์เหล่านี้มักอยู่ที่บริเวณชั้นรอบ ๆ นอกของเซลล์ ดังนั้นโอกาสที่เอนไซม์เหล่านี้จะไปสัมผัสกับออกซิเจนจึงเกิดขึ้นได้ง่าย ส่งผลให้เอนไซม์มีความว่องไวและเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบฟีนอลกับออกซิเจนทำให้เกิดเป็นสีน้ำตาล (Enzymatic browning reaction) ขึ้น ซึ่งสีที่เกิดขึ้นนี้ส่วนใหญ่เป็นผลมาจากขั้นตอนของการลอกเปลือกของผลไม้และการเก็บรักษา วิธีที่นิยมปฏิบัติกันทั่วไปสำหรับป้องกันปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่มีเอนไซม์เกี่ยวข้อง คือ นำผลิตภัณฑ์ก่อนการอบแห้งจุ่มลงในสารละลายที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ เช่น โซเดียม เมตาไบซัลไฟด์ (sodium metabisulfide) เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากเป็นวิธีที่ทำให้ประสิทธิภาพสูงและเป็นสารเคมีที่มีราคาไม่แพง อย่างไรก็ตามการจุ่มผักหรือผลไม้ลงในสารละลายนี้ ทำให้ความชื้นของผลิตภัณฑ์ก่อนนำมาอบแห้งมีความชื้นสูงขึ้นและเป็นผลทำให้มีความสิ้นเปลือง

พลังงานสูงขึ้นและเพิ่มเวลาในการอบแห้งนานขึ้น นอกจากนี้การใช้สารละลายที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบยังส่งผลต่อสุขภาพสำหรับบุคคลบางกลุ่มที่ไวต่อสิ่งกระตุ้นดังกล่าว

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเกี่ยวข้องกับการศึกษาการเตรียมตัวอย่างกล้วยก่อนการอบแห้ง รวมทั้งศึกษาถึงวิธีการอบแห้งโดยใช้เทคนิคต่าง ๆ เพื่อให้ได้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ดี สำหรับรายละเอียดของผลการศึกษาที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถอ่านได้จากบทความต่าง ๆ ที่ได้แนบมากับรายงานฉบับนี้

Drying kinetics and quality attributes of low-fat banana slices dried at high temperature

Somkiat Prachayawarakorn^{a,*}, Warunee Tia^b, Napaporn Plyto^b, Somchart Soponronnarit^b

^a Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology, Thonburi, 126 Pracha u-tid, Bangkok 10140, Thailand

^b School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology, Thonburi, 126 Pracha u-tid, Bangkok 10140, Thailand

Received 13 December 2006; received in revised form 8 August 2007; accepted 10 August 2007

Available online 23 August 2007

Abstract

High temperature drying may give rise to hydrostatic pressure gradients of moisture inside the dried sample and subsequently leads to large voids, resulting in crispy product. In this study, the drying characteristics as well as various quality attributes, namely, colors, shrinkage and textural property of banana slices dried at high temperatures (110–140 °C) in a tray dryer were explored. Banana slices were dried from the initial moisture content of 250–300% dry basis to the required final moisture content of 4% dry basis. The analysis of the drying rate evolution revealed three drying regimes, i.e., warming-up and two falling rate periods. The effective diffusion coefficient of banana was found to increase with a decrease of the moisture content until a certain moisture content after which the diffusivity decreased. In terms of quality, the large pore assembly was produced at higher temperature of 120 °C as observed from SEM micrographs. The drying temperature also significantly affected the colors, shrinkage and texture of bananas.
© 2007 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Keywords: Colors; Effective diffusivity; Snack; Texture

1. Introduction

Bananas are a favourite fruit widely grown in the areas of tropical and subtropical climates. After harvesting, the quality of bananas deteriorates rapidly. Drying is largely utilized to stabilize the product by reducing its moisture content. In addition to preservation, drying can also create new range of products and this indeed adds value to fresh bananas. Banana chips are one of the value-added products from fresh bananas. Banana chips can be consumed as a snack or used as an ingredient in breakfast cereal. To produce banana chips, thin-sliced bananas are normally fried with vegetable oil. However, the obtained product generally contains high oil content and cannot be kept for an extended period of time due to possible lipid oxidation leading to rancidity. To alleviate this problem, drying can be employed instead to produce banana chips. To obtain chips

with desired texture (crispness), high temperature drying is needed to generate internal pressure gradients.

Migration of moisture and transfer of heat induce stresses inside food materials, which consequently lead to many physical changes such as cell wall collapse and shrinkage (Lozano, Rotstein, & Urbricain, 1983; Panyawong & Devahastin, 2007; Tsami & Katsioti, 2000). Such deformations are the determinant of textural properties in foods. Several studies have reported that higher drying rates, obtained by higher drying temperatures, result in higher degrees of deformation of food products (Li, Seyed-Yagobi, Moreira, & Yamsaengsung, 1999; Markowski, Cenkowski, Hatcher, Dexter, & Edwards, 2003). Hofsetz and Lopes (2005) indeed reported that crispy bananas obtained by the combination of high temperature and short time drying stage required less force to break and exhibited many fracture points from the plot of force–deformation curve as drying temperature and time increased.

In addition to the above physical changes, other organoleptic properties including colors are altered when foods

* Corresponding author. Tel.: +662 470 9221; fax: +662 428 3534.
E-mail address: somkiat.pra@kmutt.ac.th (S. Prachayawarakorn).

Nomenclature

D	effective moisture diffusion coefficient, m^2/s	m_{ph}	mass of cylindrical tube with n -heptene, g
L	thickness of material, m	m_{phs}	mass of cylindrical tube including n -heptene and sample, g
M	moisture content, dry basis decimal	m_s	mass of sample, g
M_{in}	initial moisture content, dry basis decimal	t	drying time, s
M_{eq}	equilibrium moisture content, dry basis decimal	V	volume of sample, cm^3
M_s	moisture content at the surface of banana slice, dry basis decimal		
MR	moisture ratio, $\frac{M(t)-M_{\text{eq}}}{M_{\text{in}}-M_{\text{eq}}}$, dimensionless	<i>Greek Letter</i>	
m_p	mass of cylindrical tube, g	ρ_h	density of n -heptane, g/cm^3

are exposed to thermal treatment. The changes in colors of foods are the results of the browning reactions and pigment degradation (Barreiro, Milano, & Sandoval, 1997; Lopez et al., 1997; Maskan, 2001). The color changes, more or less, depend on the reducing sugar content, the temperature and the exposure time (Feng & Tang, 1998; Ibarz, Pagán, & Garza, 1999; Krokida, Tsami, & Urbricain, 1998; Márquez & AnWón, 1986). Spectrophotometer and tristimulus colorimeter are frequently used to examine the colors of the products. The latter method was used to determine the color changes of banana slices in the present work.

In this work, drying kinetics, color changes, morphology and textural properties of banana slices were studied. The Fick's second law of diffusion coupled with an optimization technique was also utilized to determine the effective diffusion coefficient of bananas undergoing high temperature drying.

2. Materials and methods

2.1. Experimental set-up

Banana slices were dried using a tray dryer consisting of a $0.3 \text{ m} \times 0.3 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$ drying chamber, a 13.5 kW electrical heater and a backward curved blade centrifugal fan driven by a 2.2 kW motor as schematically shown in Fig. 1. The samples were placed on a stainless steel tray. The bottom surfaces of the samples, which were contacted with the tray, were not exposed to hot air. The desired air

speed was controlled by a frequency inverter, which governed the rotation speed of the motor.

2.2. Material preparation

Gros Michel bananas were purchased from a local supermarket at the dark green stage and were allowed to ripen at room temperature. The fresh bananas contained soluble solids content of approximately 23–25° Brix as measured by a refractometer and had the yellow and green tip, corresponding to the color index no. 5 (Anon, 1972). The initial moisture content of bananas ranged between 250% and 300% dry basis. After peeling bananas were sliced to 3 mm thickness using a cutting machine.

2.3. Drying of banana slices

Before starting of each drying experiment, the drying system was warmed up until the required temperature was attained. Drying of banana slices was performed at the temperatures of 110, 120, 130 and 140 °C and at the superficial air velocity of 0.9 m/s. Inlet air temperature was controlled by a PID type controller with an accuracy of ± 1 °C. The samples were taken out from the dryer to determine their moisture content at every 5 min using an electronic balance with a precision of ± 0.01 g. At the end of each experiment, the moisture content of the samples was determined by drying them in an oven at 103 °C for 3 h. The drying experiments were performed in triplicate.

2.4. Color measurement

The colors of banana slices were measured both before drying and at different predetermined periods by a Minolta CR-300 colorimeter. Because the colors of the dried samples were not uniform throughout their surface, being rather brown near the central area and yellow near the periphery, the samples were ground before each color measurement. Each data point presented was obtained from the measurement of 10 samples. The colors were expressed as L -value (brightness/darkness), a -value (redness/greenness) and b -value (yellowness/blueness).

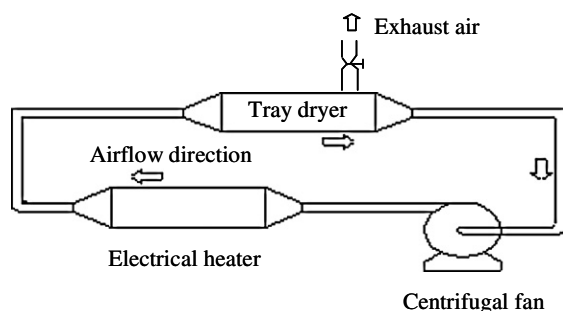


Fig. 1. Schematic diagram of tray drying system.

2.5. Texture measurement

Dried banana slices at moisture content of 4% dry basis were kept in sealed plastic bags at room temperature for two days prior to texture measurement. Textural attributes of banana were measured using a texture analyzer TAXT2i fitted with a 5-N load cell. The samples were fractured with a 2-mm cylindrical probe using a test speed of 1 mm/s. The probe moved down vertically and crossed over the sample slice placed on the base. The maximum compression force and the stiffness (initial slope) in the force–deformation curve of each sample were considered as an indication of the hardness and crispness of the sample, respectively. Ten measurements were performed on the samples obtained from each drying condition.

2.6. Microstructural evaluation

The morphology of fresh and dried bananas was characterized through the use of a scanning electron microscope [model JEOL 5800LV, Tokyo, Japan] at an accelerating voltage of 10 kV. Before scanning for the morphology of the fresh banana, the specimens were dehydrated in the ascending ethanol concentrations of 10%, 30%, 50%, 70%, 90% and 100%. The sample was then dried by the critical point method (Dinand, Chanzy, & Vignon, 1999; Silva & Luh, 1978) in a Tousimis Samdri b780 critical point dryer (Tousimis, Rockville, USA) operated with CO₂. For the dried samples, they were dipped into liquid N₂ for 5 s. Before photographing, the specimens were prepared and made into the dimensions of 5 × 5 mm² and then glued on the metal stub. The samples were then coated with gold (~20 nm thickness) and scanned and photographed.

2.7. Shrinkage measurement

Ten samples were used for each shrinkage measurement. Shrinkage was defined as the difference in volume of the original sample and that of the dried sample relative to that of the original volume:

$$\% \text{ shrinkage} = \frac{V_i - V}{V_i} \times 100 \quad (1)$$

where V_i and V are the volume of the fresh sample and the volume of the dried sample, respectively. The volume of each sample was measured using *n*-heptane as the replacement liquid. Each sample was first weighted and placed in a cylindrical tube. The sample volume, V , was then calculated using the following equation:

$$V = \frac{[m_{ph} - m_p] - [m_{phs} - m_p - m_s]}{\rho_h} \quad (2)$$

where m_{ph} is the mass of the cylindrical tube with *n*-heptane, m_p is the mass of empty cylindrical tube, m_{phs} is the mass of the cylindrical tube with sample and *n*-heptane, m_s is the mass of the sample and ρ_h is the density of *n*-hep-

tane. The average value of ten samples was reported. An error of the measurement was $\pm 2.0\%$ by volume.

2.8. Determination of moisture diffusivity of bananas

In this study, banana slices were assumed to have an infinite slab shape. Therefore, the moisture diffusion within each slice is described by the Fick's second law (Crank, 1975):

$$\frac{\partial M(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(M) \frac{\partial M(x, t)}{\partial x} \right) \quad (3)$$

or

$$\frac{\partial M(x, t)}{\partial t} = D(M) \frac{\partial^2 M(x, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial M(x, t)}{\partial x} \cdot \frac{\partial D(M)}{\partial x} \quad (4)$$

If the effective diffusion coefficient is constant, the last term on the right hand side of Eq. (4) needs not be considered. To calculate the moisture profiles inside each banana slice from Eq. (4), the initial and boundary conditions are required. In this work, it was assumed that the mass transfer resistance due to convection was negligible and the moisture diffusion occurred at an isothermal condition. During drying the evaporation of moisture occurred from the top surface, which was exposed to hot air, while no moisture evaporation took place at the bottom since the sample surface was covered with foil. The following initial and boundary conditions were then used:

$$M(x, t) = M_{in} \quad 0 \leq x \leq L \text{ at } t = 0 \quad (5)$$

$$M(L, t) = M_{eq} \quad x = L \text{ at } t > 0 \quad (6)$$

$$\text{and } \frac{\partial M(x, t)}{\partial x} = 0 \quad x = 0 \text{ at } t > 0 \quad (7)$$

Eq. (4) was discretized using a forward time central space method (FTCS):

Internal node:

$$\frac{M_i^{t+1} - M_i^t}{\Delta t} = D_i \left(\frac{M_{i+1}^t - 2M_i^t + M_{i-1}^t}{\Delta x^2} \right) + \left(\frac{M_{i+1}^t - M_{i-1}^t}{2\Delta x} \right) \left(\frac{D_{i+1}^t - D_{i-1}^t}{2\Delta x} \right) \quad (8)$$

At the top surface:

$$M_s^t = M_{eq} \quad (9)$$

At the bottom:

$$\frac{M_0^{t+1} - M_0^t}{\Delta t} = 2D_0^t \left(\frac{M_{i+1}^t - M_i^t}{\Delta x^2} \right) \quad (10)$$

To estimate the effective moisture diffusivity as a function of moisture content, the optimization technique using simplex method was used. Before optimization, it was necessary to identify the equation, which could describe the

relationship between the moisture and the diffusivity. Several equations reported by Sano and Yamamoto (1990) and Yoshida, Imakoma, and Okazaki (1991) were first tested and the calculated results showed that those equations inadequately fitted with the experimental results as indicated by R^2 values which were less than 0.5.

Another empirical form which could suitably describe the relationship between the diffusion coefficient and the moisture content as well as the temperature is

$$D = A \exp \left(bM + cM^2 + dM^3 + eM^4 + \frac{H}{T} \right) \quad (11)$$

where A , b , c , d , e and H are the constant parameters obtained from the optimization. Eq. (11) was found to adequately describe the diffusion coefficients of porous food materials, e.g., biscuit, bread, muffin and cooked rice (Ramesh, 2003; Tong & Lund, 1990). In the calculation the sample was divided into 20 nodes and Δt of 0.1 s was used.

3. Results and discussion

3.1. Drying characteristic curves

Fig. 2 shows the semi-log scale plot of drying curves of banana slices at temperatures of 110, 120, 130 and 140 °C. These curves reveal that the decrease of moisture content with time is in a non-linear fashion, indicating that the moisture movement is controlled by diffusion and that diffusion is dependent on the moisture content of the samples.

Improvement of drying rates was rather different at different drying temperatures. As shown in Fig. 2, the moisture decrease was slightly faster at 120 °C than at 110 °C. However, when the drying temperature shifted from 120 to 130 °C, much larger difference in the moisture reduction rates was observed. The higher capability of removing moisture at temperatures higher than 120 °C can possibly be explained by a couple of reasons. Firstly, banana morphology was different; large pores inside banana were

formed at temperature higher than 120 °C. These large pores facilitated the transport of moisture. The details of pore formation will be discussed later. The acceleration of the movement of water molecules at higher temperatures also took part in a more rapid decrease of the moisture content.

Fig. 3 presents the experimental drying rates of banana slices at different drying temperatures. Drying of banana slices exhibited three distinct drying periods, warming-up and two falling rate periods. In the warming-up period, the drying rates were almost constant as the moisture content of the sample reduced from the initial moisture content to approximately 220% dry basis. This drying period existed for a very short period of time, approximately 4–7 min depending on the drying temperature used.

In the latter drying periods, the drying rates decreased with a decrease in the moisture. During the first falling rate period, the drying rates decreased non-linearly with the moisture content until the moisture content reached approx. 80% dry basis as shown in Fig. 3. Then, the second falling rate started. The drying rates in the second falling rate period decreased linearly and more slowly than the first falling rate period.

Some early works relevant to banana drying have also reported three drying regimes although the drying conditions employed were different. Mowlah, Takano, Kamoi, and Obara (1983) and Jannot, Talla, Nganhon, and Puiggali (2004) found a warming up period followed by two falling rate periods. Sankat, Castaigne, and Maharaj (1996) observed the two falling rate periods when drying both fresh and osmotically-dehydrated banana slices. In their work, the critical moisture content, at which the decrease of the drying rate with the moisture content changed from the linear to non-linear fashion, was found at the moisture content around 100% dry basis which was relatively high compared with that observed in the present study (approx. 80% dry basis). The difference of the values of critical moisture content is possibly due to different moisture gradients and surface moistures, according to different drying conditions.

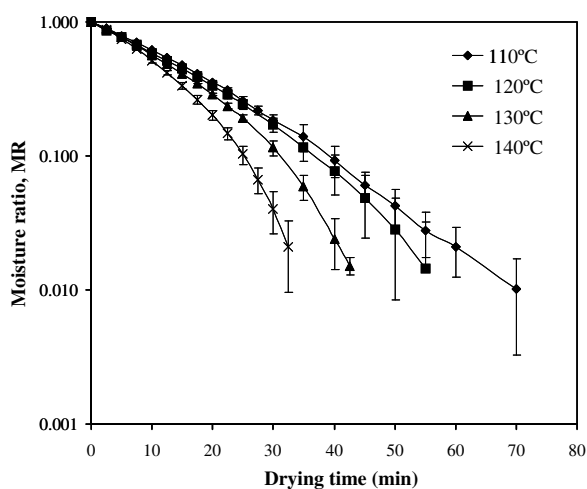


Fig. 2. Drying curves of banana slices at different temperatures.

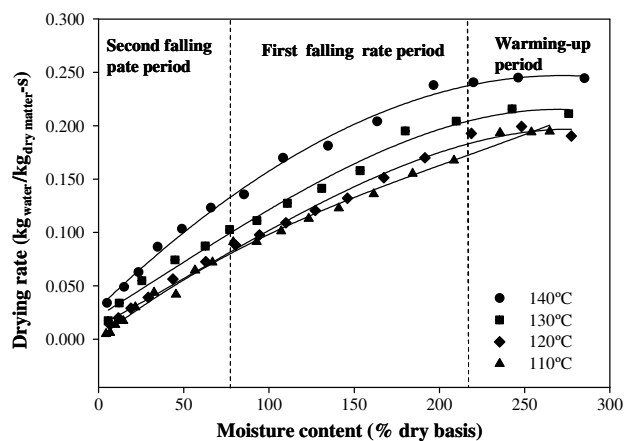


Fig. 3. Drying rates of banana slices at different temperatures.

As shown in Fig. 3, the drying rates of banana slices at the temperature of 120 °C are slightly higher than those at the temperature of 110 °C. Beyond 120 °C, the drying rates were greatly enhanced with increasing temperature throughout the entire range of moisture content.

3.2. Moisture diffusivity of bananas

Fig. 4 shows the dependence of effective diffusion coefficient on the moisture content and temperature. The effective diffusion coefficient increased with a decrease of the moisture content, then reached the maximum value at the range of the moisture content of 50–60% dry basis and eventually decreased with the moisture content. This trend of the change of moisture diffusivity with moisture content is similar to that reported in the case of drying porous granular Amioca (Karathanos, Villalobos, & Saravacos, 1990) and in the case of adsorption of water vapor by the dried biscuit (Guillard, Broyart, Guilbert, Bonazzi, & Gontard, 2004).

The trend of increasing moisture diffusivity noted in the present study is opposite to that reported in the literature, which shows the monotonic decrease of the moisture diffusivity as the moisture content decreases (Sankat et al., 1996). The different trends are possibly due to different drying conditions which may produce different mechanisms and morphologies of banana slices. The vapor diffusion of water is possibly the main mechanism of mass transfer in our work whereas liquid diffusion is dominant in low temperature drying ($T < 80$ °C). In addition, shrinkage of banana and the formation of pores facilitated the transport of moisture from the inside to the outside of the samples. At lower moisture contents of 60% dry basis, which was in the second falling rate period, the values of effective diffusion coefficient dropped sharply since water in the bananas was strongly bound on the sorption sites of the sample solid matrix.

The constant parameters in Eq. (11) obtained from the numerical method, together with R^2 value, are shown in

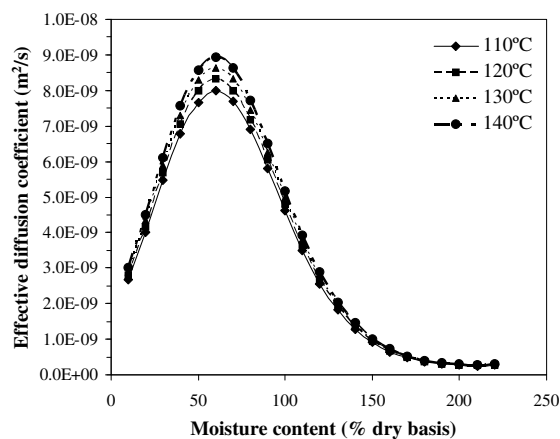


Fig. 4. Effective diffusion coefficients of banana slices at different temperatures.

Table 1

Constant parameters in Eq. (11) at drying temperatures

Constant parameters						R^2
A	b	c	d	e	H	
7.67×10^{-9}	5.53	-5.02	0.176	0.361	-595.43	0.954

Table 1. These constant parameters were reasonably used in the moisture range of 4–250% dry basis and the temperature range of 110–140 °C.

3.3. Morphology of bananas

Fig. 5 shows the morphologies of banana slices dried at the temperatures of 110, 120, 130 and 140 °C. After drying morphologies of banana slices were noticeably different from that of the reference sample; the dried samples became porous whilst the morphology of the reference sample was relatively dense. The pore formation after drying is possibly due to the evolution of the water vapor inside the samples. Such change in turn led to the development of the internal pressure and breakage of the sample tissues, resulting in pore formation. These pores might affect not only the transport properties such as the diffusivities of gases and liquids in the samples, but also the crisp texture of the samples, which is essentially required for snack foods.

As shown in Fig. 5, the produced pores were irregular in shape and random in size. The pore development depended strongly on the drying temperature used. The highly porous banana slices were obtained when using the temperatures higher than 120 °C, with larger pore sizes of 100 μm . The dried banana slices became less porous at lower drying temperatures, particularly at temperature 110 °C.

3.4. Colors

Fig. 6 shows the evolution of color parameters with the drying time and temperature. When the drying time was longer, the colors of banana slices changed from slight yellow to brown, which corresponded to increase in the ΔL -values and Δa -values, presenting darker and redder of banana slices. On the other hand, the Δb -values exhibited oscillatory feature, increasing during an early period of drying until reaching the maximum values and then dropping to the lowest values before rising up again at the later period of drying. According to the above changes, the L -values were the most sensitive color parameter during drying. This was followed by the a -values and the b -values, being the least sensitive color parameter. For example, ΔL -value, Δa -value and Δb -value of a dried banana slice were, respectively, 30, 16 and 4 at the drying temperature of 110 °C. Note that the L -, a - and b -values of fresh banana were 78 ± 2.2 , -2.6 ± 0.4 and 27 ± 1.7 , respectively.

The trends of the changes of L - and a -values with the drying time were similar to the color changes of kiwifruits

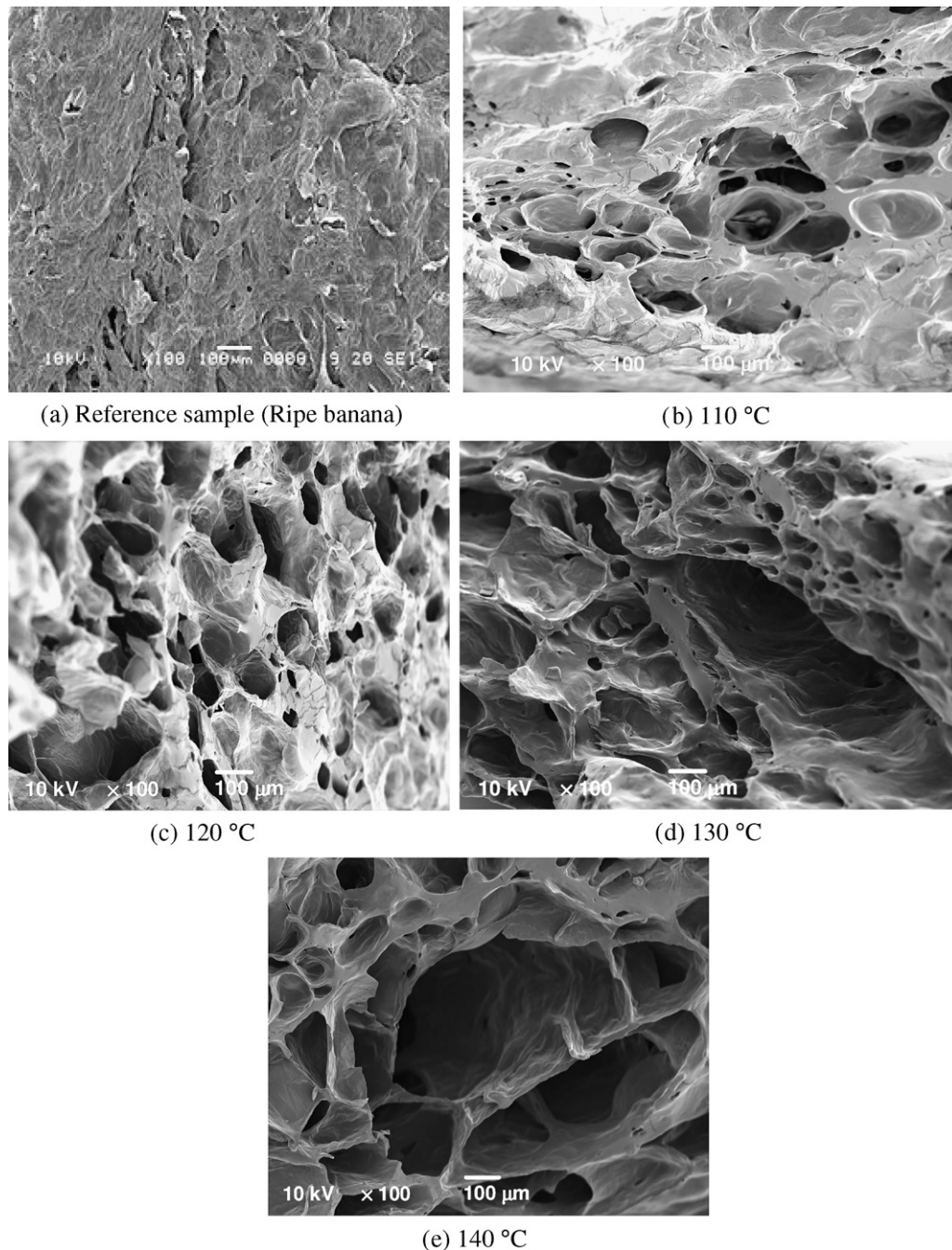


Fig. 5. Morphologies of banana slice after drying at different drying temperatures.

during microwave drying (Maskan, 2001). The reduced luminosity involves the destruction of thermolabile pigments, which consequently results in the formation of dark compounds (Barreiro et al., 1997). An increase of the a -value, on the other hand, may be due to the formation of brown pigments (Lopez et al., 1997; Maskan, 2000).

As shown in Fig. 6, the changes of L -, a - and b -values during the first 20 min of drying were only slightly different over the drying temperature range of 110–130 °C. This period of drying corresponded to higher moisture content than 100% dry basis, which covered the warming-up period and

some parts of the first falling rate period. In this moisture range, the moisture content of banana slices was sufficiently high and the product temperature during drying might not be very different within the drying temperature range of 110–130 °C; this is because the heat transferring to bananas was mostly utilized for vaporizing moisture instead of heating the bananas. Accordingly, the rates of browning reactions were not very different amongst the high and low temperature drying. Hence, color differences were still small. At lower moisture content, corresponding to the second falling rate period where drying rates

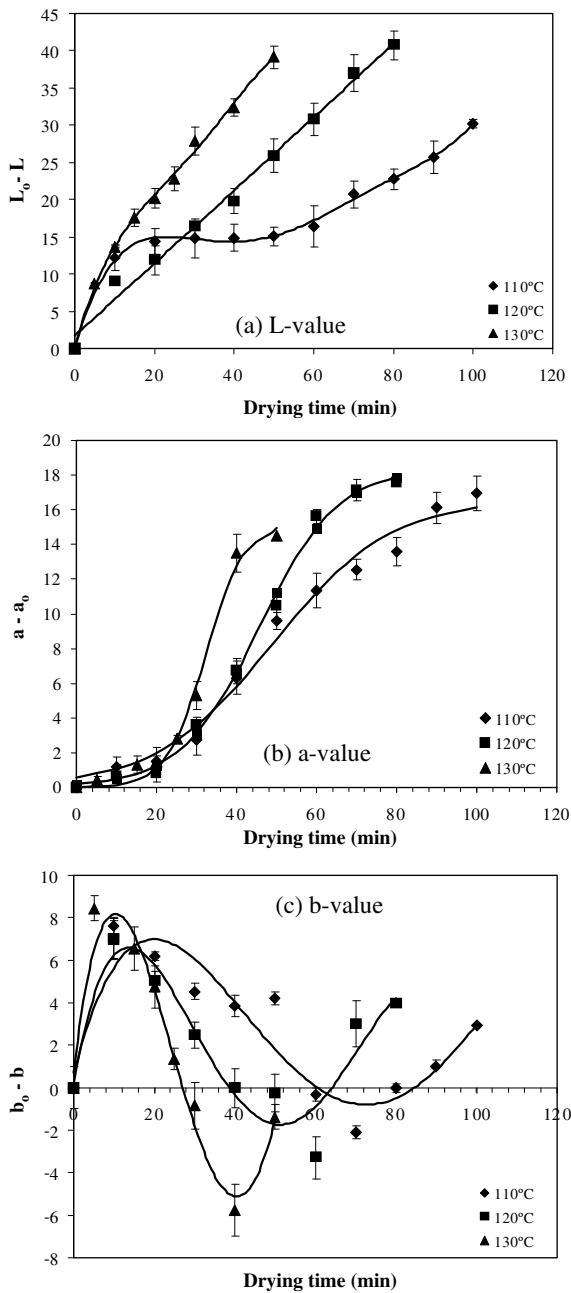


Fig. 6. Evolution of color parameters for banana slices with times and temperatures.

dropped rapidly (see Fig. 3), however, the color changes with time were rapid because the product temperature increased rapidly.

3.5. Shrinkage

Fig. 7 shows the shrinkage of dried banana slices. The initial thickness of bananas was 3 mm. When banana slices were exposed to heat, they shrunk. The shrinkage of bananas depended on the drying temperature used. A lesser extent of shrinkage was found at higher drying temperatures. The percentages of shrinkage for dried bananas were

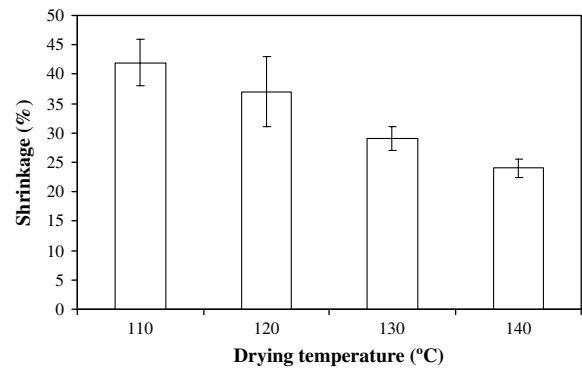


Fig. 7. Shrinkage of banana slices at different temperatures.

42% ± 4, 37% ± 6, 29% ± 2 and 24% ± 1.5 when using the drying temperatures of 110, 120, 130 and 140 °C, respectively. The lower shrinkage of bananas at higher drying temperatures can be attributed to the lower moisture content of the external surfaces, which might induce a rubbery-glass transition and the resulting formation of rigid crust at the outer layer that helped fixing the size of samples (Mayor & Sereno, 2004). On the other hand, as drying proceeded, the internal tissues split and broke, rendering the large pore formation as previously shown in Fig. 5. Wang and Brennan (1995), Del Valle, Cuadros, and Aguilera (1998) and Li et al. (1999) also noted the formation of larger pore sizes at higher temperatures.

3.6. Textural properties

Fig. 8 shows the hardness of banana slices at the end of drying. The final moisture content of banana slices taken to examine the texture ranged between 3% and 5% dry basis. The values of hardness were between 6 and 10 N for banana slices dried in the temperature range of 110–140 °C. The statistical analysis using Duncan's test indicated the insignificant effect of the drying temperature on the hardness ($P > 0.05$).

However, the effect of temperature on the stiffness was significant as shown in Fig. 9, revealing that high values of stiffness were obtained at higher drying temperatures.

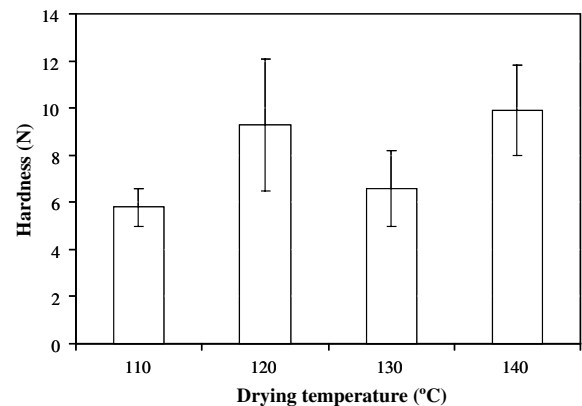


Fig. 8. Hardness of dried banana slices at different temperatures.

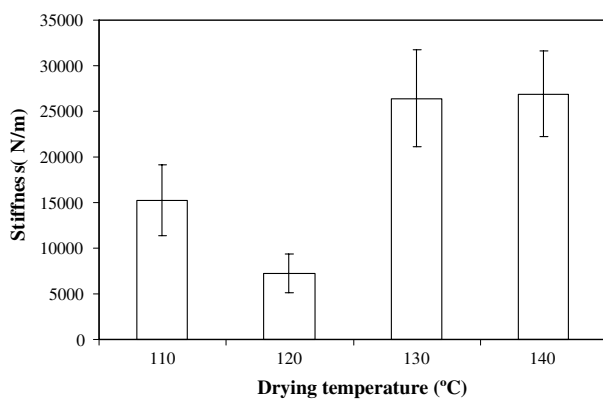


Fig. 9. Stiffness of dried banana slices at different temperatures.

The stiffness values were in the range of 2640–26,900 N/m when drying was performed at 130 and 140 °C and of 7200–15,000 N/m when drying was performed at 110 and 120 °C. According to these values, it implied that banana slices were crispier when drying was performed at temperatures higher than 120 °C.

4. Conclusions

The drying rates of banana slices at high drying temperatures can be divided into three regimes, warming-up period and two falling rate periods. The effective moisture diffusion coefficients of bananas were found to vary with the temperature and moisture of the samples. The formation of large pore assembly, as revealed by scanning electron microscopy, was noted at a higher drying temperature of 120 °C. The formed large pores led further to lower shrinkage, due to the formation of rigid outer structure. In addition, the values of the stiffness were significantly higher when drying was performed at higher temperatures of 120 °C whereas the hardness of dried banana slices was insignificantly affected by the drying temperature. Although some physical properties were superior, higher-temperature drying induced greater changes of banana colors as indicated by the lower *L*- and higher *a*-values. The colors of banana slices became especially brown when drying was in the second falling rate period.

Acknowledgements

The authors express their appreciation to the Commission on Higher Education and the Thailand Research Fund (TRF) for financial support. Thanks are also due to the Institute of Food Research and Product Development (IFRPD) of Kasetsart University, Thailand, for testing textural properties of the samples.

References

Anon (1972). Banana ripening guide. Rep. No. circular 8. Collingwood, Australia: Division of Food Research, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation.

Barreiro, J. A., Milano, M., & Sandoval, A. J. (1997). Kinetics of color change of double concentrated tomato paste during thermal treatment. *Journal of Food Engineering*, 33, 359–371.

Crank, J. (1975). *The mathematics of diffusion*. New York: Oxford University Press.

Del Valle, J. M., Cuadros, T. R. M., & Aguilera, J. M. (1998). Glass transitions and shrinkage during drying and storage of osmoted apple pieces. *Food Research International*, 31, 191–204.

Dinand, E., Chanzy, H., & Vignon, M. R. (1999). Suspensions of cellulose microfibrils from sugar beet pulp. *Food Hydrocolloids*, 13, 275–283.

Feng, H., & Tang, J. (1998). Microwave finish drying of diced apples in a spouted bed. *Journal of Food Science*, 63, 679–683.

Guillard, V., Broyart, B., Guilbert, S., Bonazzi, C., & Gontard, N. (2004). Moisture diffusivity and transfer modeling in a dry biscuit. *Journal of Food Engineering*, 64, 81–87.

Hofsetz, K., & Lopes, C. C. (2005). Crispy banana obtained by the combination of a high temperature and short time drying stage and a drying process. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 22, 285–292.

Ibarz, A., Pagán, S., & Garza, S. (1999). Kinetic models for colour changes in pear puree during heating at relatively high temperatures. *Journal of Food Engineering*, 39, 415–422.

Jannot, Y., Talla, A., Nganhon, J., & Puiggali, J. R. (2004). Modeling of banana convective drying by the drying characteristic curve (DCC) method. *Drying Technology*, 22, 1949–1968.

Karathanos, V. T., Villalobos, G., & Saravacos, G. D. (1990). Comparison of two methods of estimation of the effective moisture diffusivity from drying data. *Journal of Food Science*, 55, 218–231.

Krokida, M. K., Tsami, E., & Urbricain, M. J. (1998). Kinetics on colour changes during drying of some fruits and vegetables. *Drying Technology*, 16, 667–685.

Li, Y. B., Seyed-Yagoobi, J., Moreira, R. G., & Yamsaengsung, R. (1999). Superheated steam impingement drying of tortilla chips. *Drying Technology*, 17, 191–213.

Lopez, A., Pique, M. T., Boatella, J., Romero, A., Ferran, A., & Garcia, J. (1997). Influence of drying conditions on the hazelnut quality: III. Browning. *Drying Technology*, 15, 989–1002.

Lozano, J. E., Rotstein, E., & Urbricain, M. J. (1983). Shrinkage, porosity and bulk density of food stuffs at changing moisture contents. *Journal of Food Science*, 48, 1497–1502.

Markowski, M., Cenkowski, S., Hatcher, D. W., Dexter, J. E., & Edwards, N. M. (2003). The effect of superheated-steam dehydration kinetics on textural properties of Asian noodles. *Transactions of the ASAE*, 46, 389–395.

Márquez, G., & AnWón, M. C. (1986). Influence of reducing sugars and amino acids in the color development of fried potatoes. *Journal of Food Science*, 51, 157–160.

Maskan, M. (2000). Microwave/air and microwave finish drying of banana. *Journal of Food Engineering*, 44, 71–78.

Maskan, M. (2001). Kinetics of color change of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 48, 169–175.

Mayor, L., & Sereno, A. M. (2004). Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *Journal of Food Engineering*, 61, 373–386.

Mowlah, G., Takano, K., Kamoi, I., & Obara, T. (1983). Water transport mechanism and some aspects of quality changes during air drying of bananas. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, 16, 103–107.

Panyawong, S., & Devahastin, S. (2007). Determination of deformation of a food product undergoing different drying methods and conditions via evolution of a shape factor. *Journal of Food Engineering*, 78, 151–161.

Ramesh, M. N. (2003). Moisture transfer properties of cooked rice. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, 36, 245–255.

Sankat, C. K., Castaigne, F., & Maharaj, R. (1996). The air drying behaviour of fresh and osmotically dehydrated banana slices. *International Journal of Food Science and Technology*, 31, 123–135.

- Sano, Y., & Yamamoto, S. (1990). Calculation of concentration-dependent mutual diffusion coefficient in desorption of film. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 23, 331–338.
- Silva, D. C., & Luh, B. S. (1978). Scanning electron microscopy studies on starch granules of red kidney beans and bean spouts. *Journal of Food Science*, 43, 1405–1408.
- Tong, C. H., & Lund, D. B. (1990). Effective moisture diffusivity in porous materials as a function of temperature and moisture content. *Biotechnology Progress*, 6, 67–75.
- Tsami, E., & Katsioti, M. (2000). Drying kinetics for some fruits: Predicting of porosity and color during dehydration. *Drying Technology*, 18, 1559–1581.
- Wang, N., & Brennan, J. G. (1995). Changes in structure, density and porosity of potato during dehydration. *Journal of Food Engineering*, 24, 61–76.
- Yoshida, S., Imakoma, H., & Okazaki, M. (1991). Determination of diffusivity using the characteristics function for the regular regime. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 24, 720–726.

Drying characteristics and quality of banana foam mat

Ratiya Thuwapanichayanan^{a,*}, Somkiat Prachayawarakorn^b, Somchart Soponronnarit^a

^a School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 126 Pracha u-tid Road, Bangkok 10140, Thailand

^b Department of Chemical Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 126 Pracha u-tid Road, Bangkok 10140, Thailand

Received 12 July 2007; received in revised form 13 November 2007; accepted 14 November 2007

Available online 22 November 2007

Abstract

The combination of foaming and drying is an alternative method to produce crisp banana chips. The influences of whipping time and egg albumen concentration on the foam density were studied. The influences of foam density, drying temperature and egg albumen concentration on the drying characteristics and qualities of the final products in terms of shrinkage, texture and microstructure were subsequently evaluated. Banana puree with egg albumen, which was used as the foaming agent, was foamed to the densities of 0.3, 0.5 and 0.7 g/cm³. Banana foam mats with 5 mm thickness were then dried to the moisture content of 0.03 kg/kg db at 60, 70 and 80 °C and superficial air velocity of 0.5 m/s. The experimental results showed that the extensive porous structure of foams with lower densities resulted in higher drying rates, moisture diffusivities and shrinkage. Dried banana foams with lower foam densities also had lower hardness and crispness values. The drying temperature and the egg albumen concentration did not influence the textural properties of the final products, however. To produce banana chips, the initial foam density of 0.5 g/cm³ and drying temperature of 80 °C were recommended. © 2007 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Keywords: Crispness; Egg albumen; Microstructure; Moisture diffusivity; Shrinkage

1. Introduction

Bananas generally deteriorate rapidly after harvesting. The production of banana chips is an alternative way to preserve the quality and also to add value to bananas. Banana chips can be produced by various conventional methods, e.g., frying and hot air drying. However, there are some limitations of each method. Reduction of nutritional values is observed in dried products (Matz, 1976). The longer drying time is also required for low-temperature air drying (Sankat et al., 1996; Demirel and Turhan, 2003; Nguyen and Price, 2007). Also, air drying may yield the non-crisp product since its moisture content cannot be reduced to the desired value, approximately 0.04 kg/kg db, by low-temperature drying. Although high-temperature drying can produce crisp products, browning of the products, which is accelerated by high-temperature may occur (Tsami and Katsioti, 2000).

Vickers and Bourne (1976) demonstrated that dry crisp foods probably consist of cells or cavities, which are usually filled with air and a structural phase or cell walls that are formed by a brittle matrix. The combination of foaming and hot air drying is thus a feasible option to produce crisp banana chips because banana foams are very porous. In addition, the products can be dried rapidly to 0.04 kg/kg db, even at low-temperature, due to the less dense structure of the foams (Garcia et al., 1988; Sankat and Castaigne, 2004).

Foaming is a process by which liquid or semi solid foods are whipped to form foams. Many foods, e.g., egg white, beef extract and milk, naturally contain soluble proteins, which can be converted into stable foams when being whipped (Hart et al., 1963). Soluble proteins, known as foaming agents, contribute to the formation and stability of the foam structure. Proteins move through the aqueous phase and are spontaneously adsorbed at the air–aqueous interface where the viscoelastic films are subsequently formed. The outcome of proteins adsorption is a reduction in surface tension, which improves the foam formation

* Corresponding author. Tel.: +66 2 470 8695; fax: +66 2 470 8663.
E-mail address: t_ratiya@yahoo.com (R. Thuwapanichayanan).

(Prins, 1988). Moreover, the viscoelastic films are generally resistant to rupture and coalescence of gas bubbles dispersed in the liquid phase (Cherry and Mcwatters, 1981; Karim and Wai, 1999a).

Banana purees need to be incorporated with a foaming agent in order to be whipped to produce foams. Several foaming agents such as modified soybean protein (Gunther's D-100) (Bates, 1964), soy protein isolate (ICN Bio-medicals) (Sankat and Castaigne, 2004) and dried egg albumen (Garcia et al., 1988) can be used to produce foamed bananas. Foams must also retain the open structure during drying. If foam breaks or drains excessively, increase in the drying time and poor product qualities, e.g., extreme shrinkage, may occur (Hart et al., 1963).

As mentioned earlier, the foam structure plays a major role in moisture movement during drying and also on subsequent product quality. Most prior works have emphasized on the drying characteristics of foamed foods (Cooke et al., 1976; Garcia et al., 1988; Karim and Wai, 1999b; Sankat and Castaigne, 2004) and Fick's law of diffusion, assuming constant moisture diffusivity, was used to describe the moisture content evolution during drying. In spite of its importance, the information on the quality of dried foamed products has received much less attention, however.

The objectives of this work were therefore to study the effects of whipping time and egg albumen concentration on the foam density. Subsequently, the effects of foam density, drying temperature and egg albumen concentration on the drying characteristics and the qualities of the final products in terms of shrinkage, texture and microstructure were evaluated. The effective moisture diffusivity of the foams was also determined by the method of slope.

2. Materials and methods

2.1. Preparation of banana puree and foam

Gros Michel bananas (*Musa Sapientum* L.) at a mature stage of 5, which contained total soluble solids of approximately 23–25° Brix were used. Bananas were cut into slices with a slicing machine. To prevent discoloration during foaming, the sliced bananas were pretreated by immersing them in 1% (w/w) sodium metabisulphite solution for 2 min and then rinsed with distilled water for 30 s (Krokida et al., 2000). The pretreated banana slices were chopped into small pieces and then blended in a blender (Waring, model no. 8011 BU, Torrington, CT) for 1 min. About 800 g of the banana puree was then poured into a mixing bowl and fresh egg albumen, which was used as the foaming agent, was added to the banana puree at 2%, 5% and 10% (on a wet puree basis). The banana puree with egg albumen was whipped with a Kitchen Aid Mixer (model no. 5K5SS, Strombeek-Bever, Belgium) at its maximum speed to the foam densities of 0.3, 0.5 and 0.7 g/cm³.

Foam density was determined by measuring the mass of a fixed volume of the foam. The determination was performed carefully to avoid destroying the foam structure

and to ensure that there were no voids while filling the foam into the measuring beaker. The experiments were done in duplicate.

The moisture content of the foamed bananas was determined by the vacuum oven method 934.06 (AOAC, 1995).

2.2. Drying procedure

Based on the observation of the foam density, egg albumen at concentrations of 5% and 10% could produce the lowest foam density of 0.3 g/cm³. Both 5% and 10% of egg albumen were thus chosen to study the drying behavior of the foams.

Banana foam mats with a thickness of 5 mm were placed on a mesh tray, which was covered with aluminum foil, and then put into the drying chamber. The samples at three foam densities of 0.3, 0.5 and 0.7 g/cm³ were then dried to about 0.03 kg/kg db using the drying air temperatures of 60, 70 and 80 °C and a superficial air velocity of 0.5 m/s. Moisture loss from the samples was determined by weighing the sample tray outside the drying chamber using an electronic balance (± 0.01 g).

2.3. Determination of shrinkage

Four banana foam mats taken at different drying times were measured for their volumes. The volume was determined by the volumetric displacement method using glass beads with a diameter in the range of 0.106–0.212 mm as a replacement medium (Hwang and Hayakawa, 1980). In each measurement, one sample piece was used and the mean value of four samples was reported.

The volume ratio was used to describe shrinkage, which is defined as

$$\text{Volumetric Shrinkage} = V/V_0 \quad (1)$$

where V is the volume of the sample after drying (cm³) and V_0 is the initial volume of the sample before drying (cm³).

2.4. Texture analysis

The texture of dried banana foam mats was evaluated by a compressive test using a texture analyzer model TA.XT.plus (Stable Micro Systems, Surrey, UK). The sample was placed on the hollow planar base. The test applied a direct force to the sample using a 5 mm spherical probe at a constant crosshead speed of 2 mm/s. The hardness was defined as the maximum force in the force–deformation curve while the crispness was characterized by the number of peaks and the slope of the first peak. Eight samples were tested and the average values of hardness and crispness were reported.

2.5. Microstructural analysis

A scanning electron microscope (JEOL JSM-5600LV, Tokyo, Japan) was used to study the microstructure of dried

banana foam mats. The dried banana foam mats were placed on two-side adhesive tape attached to metal stubs and were coated with gold. SEM micrographs were taken at an accelerating voltage of 10 kV and a magnification of 35 $\times$.

2.6. Image analysis

To quantify the porous foam characteristics such as pore diameter and pore area, image analysis software (ImagePro + 5.0, MediaCybernetic, MD, USA) was used. Each pixel of SEM micrograph was assigned a value of gray intensity (0–255). Threshold-based segmentation technique was employed to distinguish the pore from the solid phase with an appropriate gray level threshold. A binary image was then generated. The pixels with gray levels lower than the selected threshold were assigned as pore, which appeared as black color in a binary image while the pixels with gray levels above the selected threshold were set as solid phase, which appeared as white color in a binary image. With an assumption of spherical shape, a pore diameter was estimated from the known pore area. The pore area was determined by counting the number of pixels filled in the specified space.

2.7. Statistical analysis

The data were analyzed using the analysis of variance (ANOVA). Duncan's test was used to establish the multiple comparisons of mean values. Mean values were considered at 95% significance level ($p < 0.05$).

3. Determination of moisture diffusivity

For the effective moisture diffusivity determination, banana foam mats were assumed to be infinite slabs. In addition, moisture movement during drying occurred only in the direction of material thickness. The external resistance to moisture transfer was negligible and the moisture distribution inside banana foams before drying was uniform.

When the plot of logarithm of moisture ratio ($\ln MR$) versus drying time is linear, the moisture diffusivity assumes an independent function of moisture content. In this case, the change of moisture content can be described by the following equation (Crank, 1975):

$$MR = \frac{M - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D t}{4L^2} \right] \quad (2)$$

where D is the effective moisture diffusivity (m^2/s), MR is the moisture ratio, M , M_{eq} and M_0 are the average, equilibrium and initial moisture contents (kg/kg db), respectively. Since the top surface of banana foam mats were only exposed to hot air, the length, L , in Eq. (2) was the thickness of the slabs.

In case of non-linear experimental drying curves, however, the effective moisture diffusivity is dependent on moisture content, which is usually the case for highly porous materials (Hamdami et al., 2004; Sakin et al., 2007). In such case, the effective moisture diffusivity at various moisture contents can be estimated using the method of slope (Karathanos et al., 1990). The calculation was based on the ratio of the slopes of the experimental drying curves to the slopes of the theoretical curves at the same moisture contents. The slopes of the experimental drying curves were calculated using experimental data points while the slopes of the theoretical curves were calculated by differentiating Eq. (2) with respect to Fo (dMR/dFo). The effective moisture diffusivity at a given moisture was then estimated by the following equation:

$$D_{eff} = [(dMR/dt)_{exp}/(dMR/dFo)_{th}]L^2 \quad (3)$$

where Fo is the Fourier number, $Fo = D_{eff}t/L^2$.

Since the thickness of banana foam mats changed during drying, L in Eq. (3) varied with time.

4. Results and discussion

4.1. Foam density

The effects of whipping time and concentration of egg albumen on the foam density are shown in Fig. 1. During the whipping process, air was brought into the liquid puree and entrapped in the liquid as bubbles. This led to a decrease of foam density as the whipping time increased as shown in Fig. 1; banana puree of minimum density was formed after 20 min of whipping. Beyond this time the foam density increased rapidly. The pattern of the banana foam density curves during whipping is similar to that of other foods, which are high in viscosity such as tomato paste foam. Labelle (1966) reported that tomato paste with 1% myverol used as foaming agent was foamed to the minimum density after 4 min of whipping; this was followed by an increase in the foam density. The increase in foam density was attributed to more liquid film thinning,

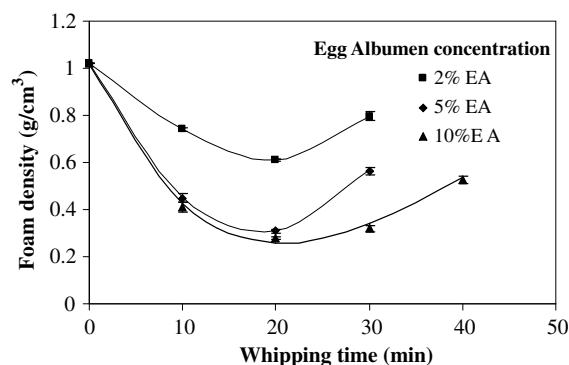


Fig. 1. Foam density as a function of fresh egg albumen (EA) concentration and whipping time.

more mechanical deformation and more bubble wall rupture during extended whipping (Lau and Dickinson, 2005).

As the concentration of egg albumen increased, the foam density decreased (Fig. 1). The foam density decreased to approximately 0.6, 0.3 and 0.27 g/cm³ after 20 min of whipping when using egg albumen concentrations of 2%, 5% and 10% (w/w), respectively. The high banana foam densities at low egg albumen concentrations were due to the fact that the movement of the foaming agent from the aqueous phase towards the air–aqueous interface was limited (Karim and Wai, 1999a), insufficient for the reduction in surface tension, which enhances the foam formation.

However, excessive egg albumen concentration beyond a certain value did not further reduce the foam density. As shown in Fig. 1, an increase in the egg albumen concentration from 5% to 10% led to lower foam density only by 3% whilst an increase in the egg albumen concentration from 2% to 5% could lower the foam density by up to 30%. The only slightly lower foam density when the egg albumen concentration increased from 5% to 10% might be due to the saturation of egg albumen solubility in banana puree under the given set of experimental conditions. The egg albumen solubility depends on the type of foods. Rajkumar et al. (2005) indeed reported that the egg albumen solubility in mango foam was in the range of 10–15%.

4.2. Drying characteristics of banana foam mats

The influences of foam density, drying temperature and egg albumen concentration on the drying characteristics of banana foam mats were studied. Fig. 2a–c shows the drying curves of banana foam mats at different initial foam densities using 5% egg albumen concentration. When the foamed bananas were dried at 60 °C, the time required for reducing their moisture content to about 0.03 kg/kg db was 120 and 300 min for the initial foam densities of 0.3 and 0.5 g/cm³, respectively. Beyond the initial foam density of 0.5 g/cm³, the required drying time was much longer than 540 min. As the drying temperature increased to 80 °C, the drying time was shorter by approximately 50%. These results show the importance of foam density and drying temperature on the moisture movement in which the diffusion of water through the low density foam was much easier and became faster when the higher drying temperatures were used.

The drying rate data presented in Fig. 3a–c show the presence of a heat up period at the early stage of drying (H); this was then followed by the falling rate period. In the heat up period, the drying rates increased as the moisture content of banana foam mats decreased from the initial moisture content to approximately 2.6 kg/kg db. Thereafter, the drying rates decreased with decreasing moisture content, signalling the beginning of the falling rate period. The falling rate period could be divided into two periods according to the change in the drying rate

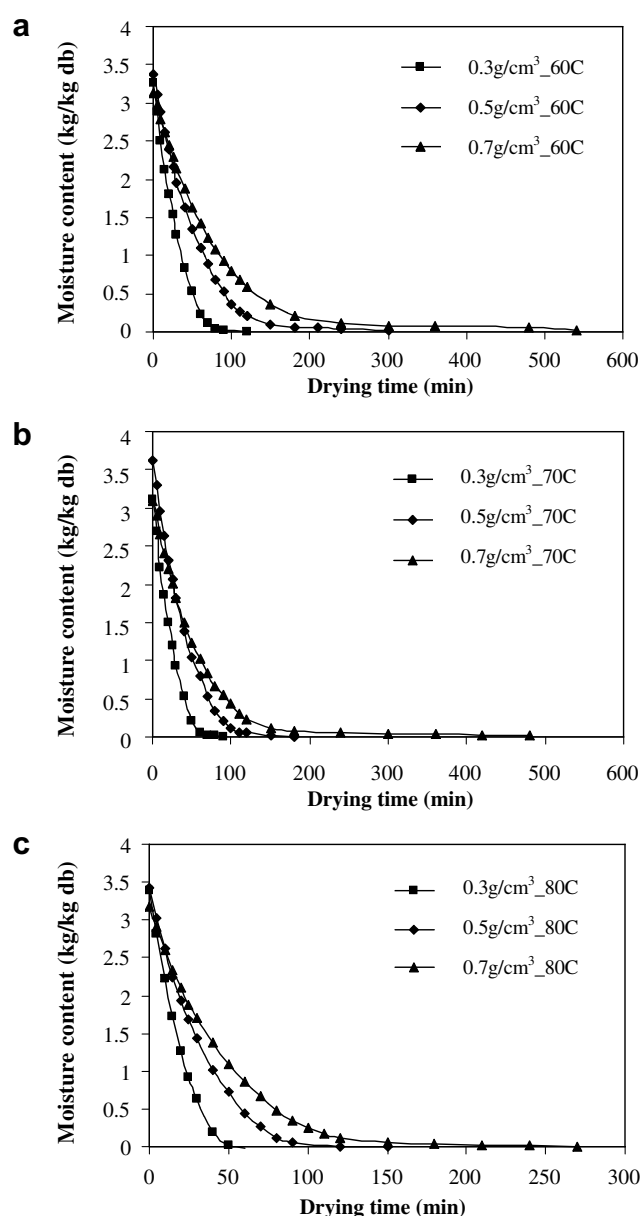


Fig. 2. Drying curves of banana foam mats at different initial foam densities and drying temperatures (5 mm foam thickness, at a superficial air velocity of 0.5 m/s and egg albumen concentration of 5%).

curves. First falling rate period (I), occurring between the moisture content of 0.35 and 2.6 kg/kg db, corresponded to the loss of free water. This water was freely available around the solid matrices that could easily transport by capillary flow and vapor diffusion. However, the removal of the water from the interior of banana foam mats to the exposed surface was not fast enough to keep the surface moist. Thus, the drying rates in this period decreased gradually with decreasing moisture content. At moisture contents below 0.35 kg/kg db, a decrease in drying rate was sharper, indicating that the drying was in the second falling rate period (II). Lim et al. (1995) reported that the moisture content corresponding to the bound water ranges from

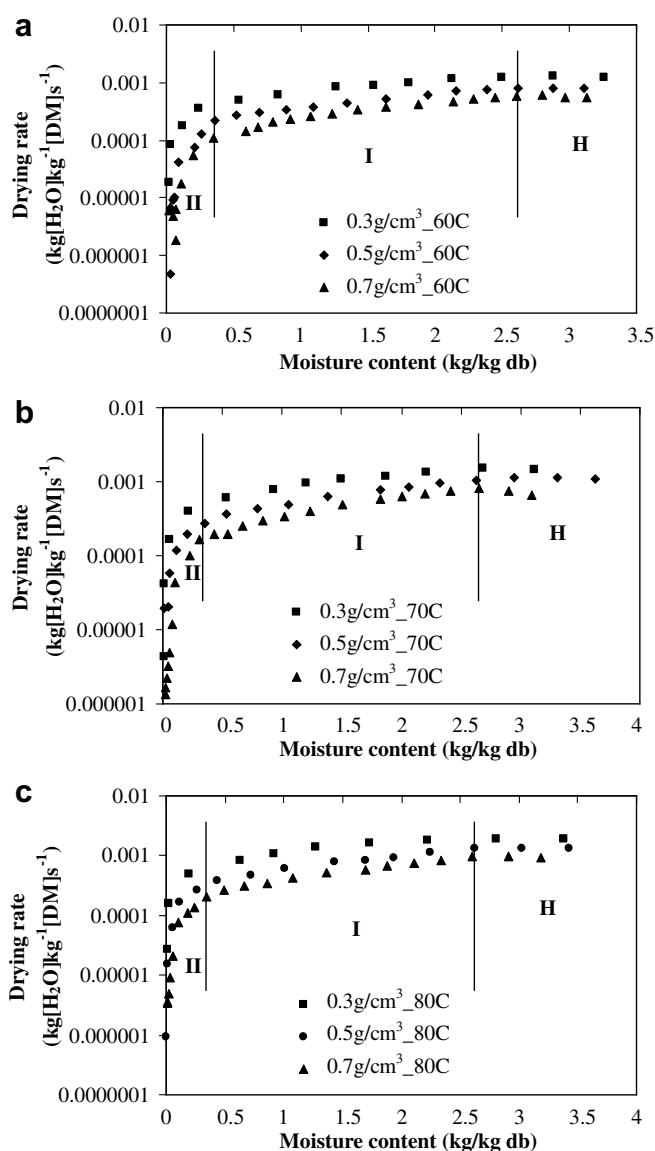


Fig. 3. Drying rate curves of banana foam mats at different initial foam densities and drying temperatures (5 mm foam thickness, at a superficial air velocity of 0.5 m/s and egg albumen concentration of 5%).

0.11 kg/kg db to 0.21 kg/kg db, depending on the type of fruit. Thus, the very low drying rate in the second falling rate period is probably because small free water is available and the diffusion of bound water is the main mechanism controlling the water transport.

The structure of banana foams also played an important role on the internal mass transfer rates. For higher foam density, e.g., 0.7 g/cm³, with small air voids, the quantity of water, which travelled through the void space was small. As the void space increased, leading to lower foam density, larger amount of water could travel. This led to higher values of the moisture diffusivity, resulting in high drying rates at lower foam densities as shown in Fig. 3a–c. In addition to the material structure, drying temperature also affected the drying rates. The drying rates of banana foam mats were higher when drying was performed at higher drying temperatures as can be seen in Fig. 3a–c.

Fig. 4 shows the drying curves of banana foam mats at 5% and 10% egg albumen concentrations. It can be seen that the egg albumen concentration had no significant effect on the drying characteristics whether drying was performed at lower or higher temperatures.

4.3. Effective moisture diffusivity

Fig. 5 shows the plot of logarithm of moisture ratio (ln MR) versus drying time of banana foam mats. It is evident that their relationship were non-linear. The non-linearity of the curves indicated the variation in effective diffusivity with moisture content.

The effective moisture diffusivity of banana foam mats was calculated from Eq. (3). The variation in effective diffusivity with moisture content is shown in Fig. 6a and b. At the initial stage of drying, the effective diffusivity increased with decreasing moisture content due to the rapid rise of product temperature. As drying progressed, the effective diffusivity decreased with decreasing moisture content. In addition to the moisture content, the effective moisture diffusivity was higher when the drying temperature increased and the initial foam density decreased.

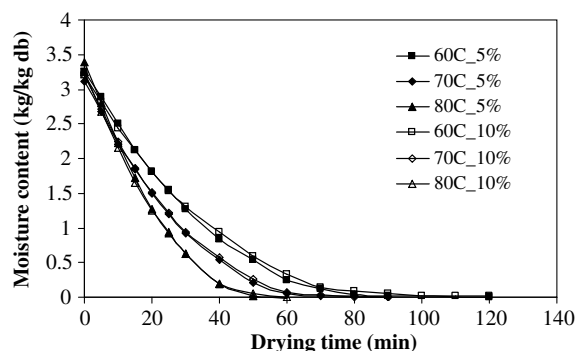


Fig. 4. Drying curves of banana foam mats at different egg albumen concentrations and drying temperatures (5 mm foam thickness, initial foam density of 0.3 g/cm³ and a superficial air velocity of 0.5 m/s).

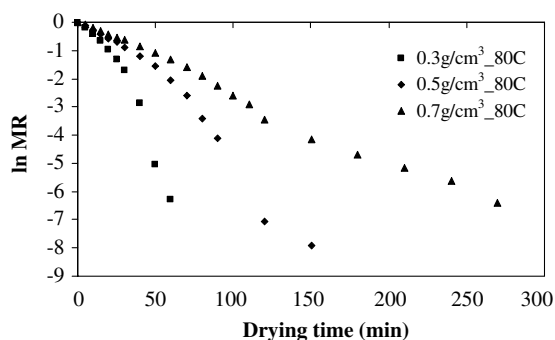


Fig. 5. Plot of logarithm of moisture ratio versus drying time of banana foam mats at different drying conditions (5 mm foam thickness, a superficial air velocity of 0.5 m/s and egg albumen concentration of 5%).

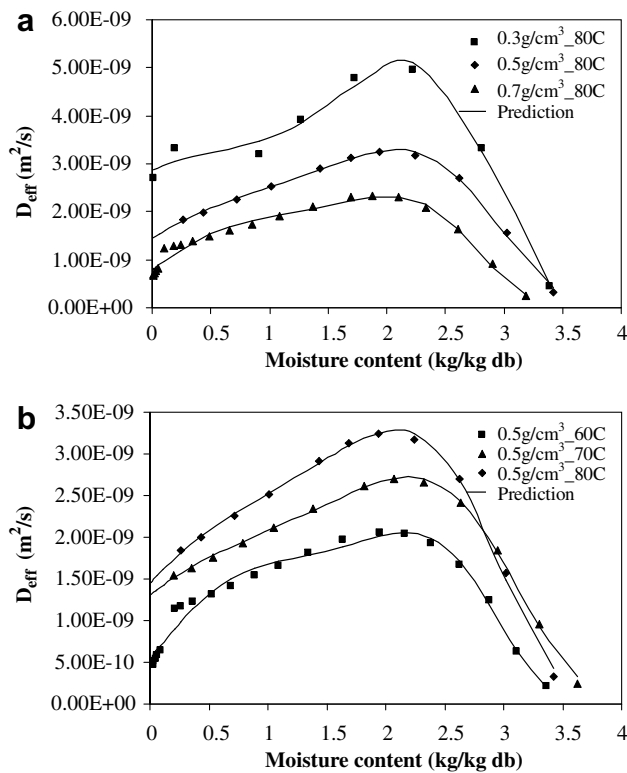


Fig. 6. Moisture diffusivity of banana foam mats at different drying conditions (5 mm foam thickness, a superficial air velocity of 0.5 m/s and egg albumen concentration of 5%).

The relationship between effective moisture diffusivity and moisture content of banana foams of various initial foam densities and drying temperatures is expressed by the following empirical equation:

$$D_{\text{eff}}(M) = a \exp \left(\sum_{i=1}^4 \alpha_i M^i \right) \quad (4)$$

where a and α_i are the empirical parameters, which were obtained through non-linear regression analysis of the experimental data; the results together with R^2 values are presented in Table 1. The proposed equation could adequately describe the relationship between the effective moisture diffusivity and moisture content of banana foams.

Table 1
Calculated values of a and α_i (Eq. (4)) for various foam densities and drying temperatures

Drying condition		Empirical parameter					R^2
Foam density (g/cm ³)	Temperature (°C)	$a \times 10^{-10}$	α_1	α_2	α_3	α_4	
0.3	60	20.4978	0.3823	−0.750	0.6042	−0.138	0.980
	70	25.4514	0.5247	−1.013	0.7768	−0.177	0.964
	80	28.5214	0.4324	−0.602	0.5060	−0.121	0.983
0.5	60	5.5042	2.8784	−2.8579	1.3158	−0.2218	0.974
	70	12.9837	0.8666	−0.6938	0.3734	−0.0763	0.998
	80	14.5071	1.0528	−0.8794	0.476	−0.099	0.996
0.7	60	3.3549	3.1578	−3.2075	1.5468	−0.2762	0.953
	70	4.4478	3.7392	−4.0588	1.9792	−0.3497	0.945
	80	7.879	2.2188	−2.2754	1.1498	−0.2157	0.973

Table 2

Average effective moisture diffusivity and activation energy at various drying conditions

Drying condition		$D_{\text{eff,avg}}$ (m ² /s)	Activation energy, E_a (kJ/mol)	R^2
Foam density (g/cm ³)	Temperature (°C)			
0.3	60	2.34×10^{-9}	21.08	0.997
	70	2.86×10^{-9}		
	80	3.60×10^{-9}		
0.5	60	1.49×10^{-9}	22.90	0.989
	70	1.98×10^{-9}		
	80	2.38×10^{-9}		
0.7	60	1.02×10^{-9}	25.19	0.973
	70	1.43×10^{-9}		
	80	1.70×10^{-9}		

4.4. Activation energy of banana foams

The activation energy of banana foams could be obtained through an Arrhenius type relationship, for which the average effective moisture diffusivity, $D_{\text{eff,avg}}$, relates to the drying air temperature:

$$D_{\text{eff,avg}} = D_0 \exp \left(\frac{-E_a}{RT_{\text{abs}}} \right) \quad (5)$$

where D_0 is the constant value (m²/s), E_a is the activation energy (kJ/kmol), R is the universal gas constant (8.314 kJ/kmol K) and T_{abs} is the absolute drying air temperature (K).

In order to estimate the activation energy, it is necessary to calculate the average effective moisture diffusivity from D_{eff} versus M curves. This can simply be done through the use of the following equation:

$$D_{\text{eff,avg}} = \frac{\int_{M_{\text{initial}}}^{M_{\text{final}}} D_{\text{eff}}(M) dM}{\int_{M_{\text{initial}}}^{M_{\text{final}}} dM} \quad (6)$$

The values of $D_{\text{eff,avg}}$ of all drying conditions are presented in Table 2. The average effective moisture diffusivity increased when the drying temperature increased and the initial foam density decreased, as expected.

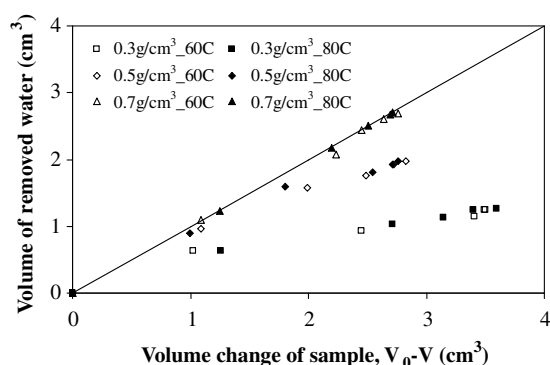


Fig. 7. Volume of removed water versus volume change of sample (V_0 is the initial volume of sample and V is the volume of sample at different drying times).

The values of activation energy for banana foam mats are presented in Table 2. E_a was 21.08, 22.90 and 25.19 kJ/mol for foam densities of 0.3, 0.5 and 0.7 g/cm³, respectively. E_a decreased with decreasing foam density; this indicated that at lower foam densities, water molecules could move easier than it could at higher foam densities.

The activation energy of the moisture diffusivity for hot air drying of banana slices was 34.7 ± 0.073 and 39.8 ± 4.6 kJ/mol when using the slab thickness of 1 cm and 2 cm, respectively. This indicates the unimportant effect of thickness on the activation energy (Nguyen and Price, 2007). According to this information, drying of banana slices requires higher energy for driving water out than did the banana foam mats.

4.5. Shrinkage of banana foams

As shown in Fig. 7, shrinkage or volume change of the samples at an initial foam density of 0.7 g/cm³ fully compensated the volume of removed water, as indicated by the experimental data close which lie to the diagonal line. In the case of low density foams, e.g., at initial foam densities of 0.3 and 0.5 g/cm³, shrinkage of such systems was accompanied by bubble collapse since the foam was non-rigid during drying. In such cases, shrinkage was more significant than the volume of removed water, as indicated by their values deviating from the diagonal line. The largest deviation could be observed when using an initial foam density of 0.3 g/cm³. These results indicate that shrinkage of lower density foam was due to the collapse of gas bubbles, besides the stress formation within the foams.

Fig. 8 shows the volume shrinkage of banana foams of different initial foam densities; the effect of drying temperature was also shown here. The drying temperature insignificantly affected shrinkage of the samples of the same

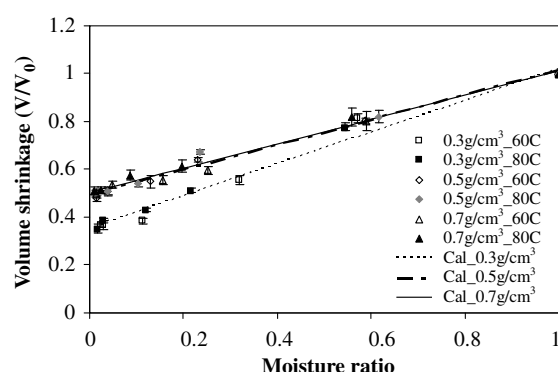


Fig. 8. Volume shrinkage of banana foam mats at different initial foam densities and drying temperatures (5 mm initial foam thickness and egg albumen concentration of 5%).

nificantly affected shrinkage of the samples of the same foam density. This is probably because the tested drying temperature (60–80 °C) might not be much different to cause any significant differences on the volume shrinkage. A decrease in the volume of banana foams was in a linear relation with the moisture content and its volume reduction could be described by the following equation:

$$V/V_0 = a + bM/M_0 \quad (7)$$

The values of parameters a and b were obtained by linear regression analysis of the experimental data. Both empirical parameters depended on the initial foam densities; the results are given in Table 3.

4.6. Texture of banana foams

The texture of banana foams was evaluated by a compressive test. The maximum force of rupture is defined as the hardness. The number of peaks was counted when that peak had a value higher than the threshold value, which was set at 30 g, and the slope of the first peak or steepness was used to describe the crispness of the samples. A crisp chip had a steep slope, representing more resistance to bending than a less crisp chip.

Banana foam mats, after drying to about 0.03 kg/kg db, except for samples with initial foam density of 0.7 g/cm³ and dried at 60 °C, which its final moisture content was 0.05 kg/kg db, were taken to examine their textural properties. It was noted that the textural properties were strongly affected by the sample porous structure. The samples with initial foam density of 0.3 g/cm³, characterized by a number of larger pores and more limited number of smaller pores, yielded the less dense structure and lower strength. Hence, hardness was smaller as compared with that of

Table 3
Calculated values of a and b (Eq. (7)) for various foam densities

$\rho_f = 0.3 \text{ g/cm}^3$			$\rho_f = 0.5 \text{ g/cm}^3$			$\rho_f = 0.7 \text{ g/cm}^3$		
a	b	R^2	a	b	R^2	a	b	R^2
0.349	0.702	0.977	0.496	0.521	0.983	0.503	0.507	0.984

the samples with higher initial foam densities (see Fig. 9a). For example, the maximum forces of samples dried at 80 °C were 2.23 ± 0.28 Fig. 9a, 5.90 ± 0.72 Fig. 9b and 18.06 ± 3.51 Fig. 9c N when using initial foam densities of 0.3, 0.5 and 0.7 g/cm³, respectively.

In terms of crispness, which is a desired textural characteristic of chips, the samples with lower initial foam densities had smaller numbers of peaks and lower slopes of the first peak as shown in Fig. 9b and c. The numbers of peaks of samples dried at 80 °C were 7 ± 2 Fig. 9a, 16 ± 3 Fig. 9b and 20 ± 7 Fig. 9c when using initial foam densities of 0.3, 0.5 and 0.7 g/cm³, respectively, and the slopes of the first peak of the samples dried at 80 °C were 3.58 ± 2.06 Fig. 9a, 11.00 ± 1.89 Fig. 9b and 19.03 ± 6.47 Fig. 9c N/mm for samples with initial foam densities of 0.3, 0.5 and 0.7 g/cm³, respectively. The small number of peaks and low initial slope obtained for samples at low initial foam density of 0.3 g/cm³ indicated that this banana foam was less crisp as compared with the samples produced with higher initial foam densities.

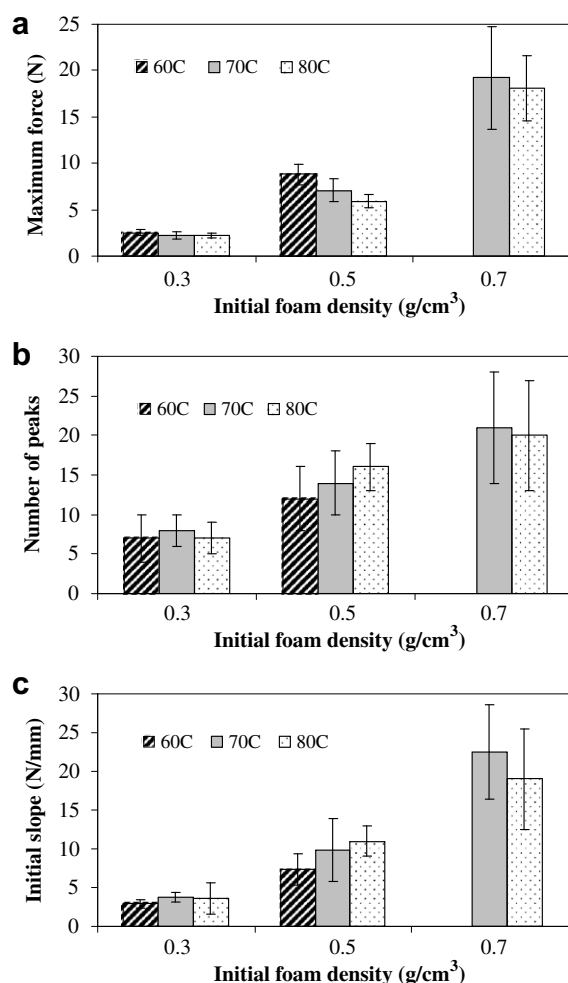


Fig. 9. Effect of initial foam density and drying temperature on (a) maximum force, (b) number of peaks and (c) initial slope of dried banana foam mat (egg albumen concentration of 5%).

Although the very porous structure was obtained for sample with the lowest initial foam density, the product was not crisp. These textural properties, in particular the steepness, were similar to those of freeze dried chips. Sham et al. (2001) found that freeze dried apple chips, with their very porous structure, were spongy and not crisp. As shown in Figs. 9 and 10, the drying temperature and egg albumen concentration did not influence the hardness and crispness. These results suggest that 5% egg albumen concentration is suitable for preparing banana foams and that drying should be conducted at the highest temperature in order to save the time and energy consumption.

As mentioned earlier, the low density of banana foams could lead to the soft texture but the high density, on the other hand, led to the hard texture. Too soft and too hard textures may not be suitable for crisp product. The commercial cracker (Hi Crack™) was examined for its textural properties and it was found that the values of the maximum force and number of peaks were 7.9 ± 1.23 and 10 ± 5 N, respectively. Both values corresponded to those

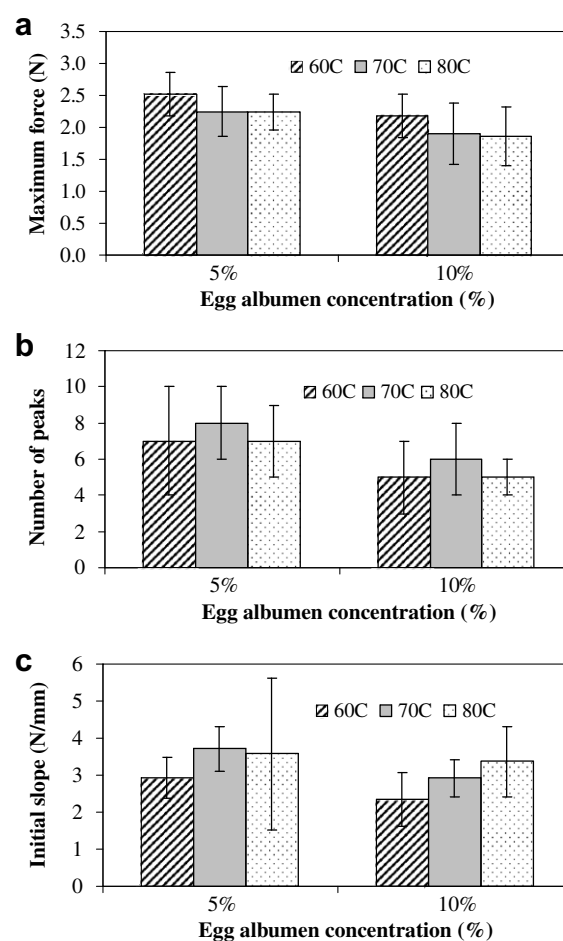


Fig. 10. Effect of egg albumen concentration on (a) maximum force, (b) number of peaks and (c) initial slope of dried banana foam mat (initial foam density of 0.3 g/cm³).

of banana foam mats prepared with the initial foam density of 0.5 g/cm^3 .

4.7. SEM micrographs and image analysis

SEM micrographs of banana foam mats containing 5% egg albumen and dried at different temperatures are shown in Fig. 11a–d for various initial foam densities. The binary images are illustrated in Fig. 11e–h. The

reconstructed porous structure of the dried banana foam mats in binary images reproduced adequately their original images.

The pore shape of banana foams before drying was spherical (not shown here). When the samples were dried, the pore shape changed. As shown in Fig. 11, the pore shape of dried banana foam mats was elongate, probably due to the stress formation during drying, which led to some distortion.

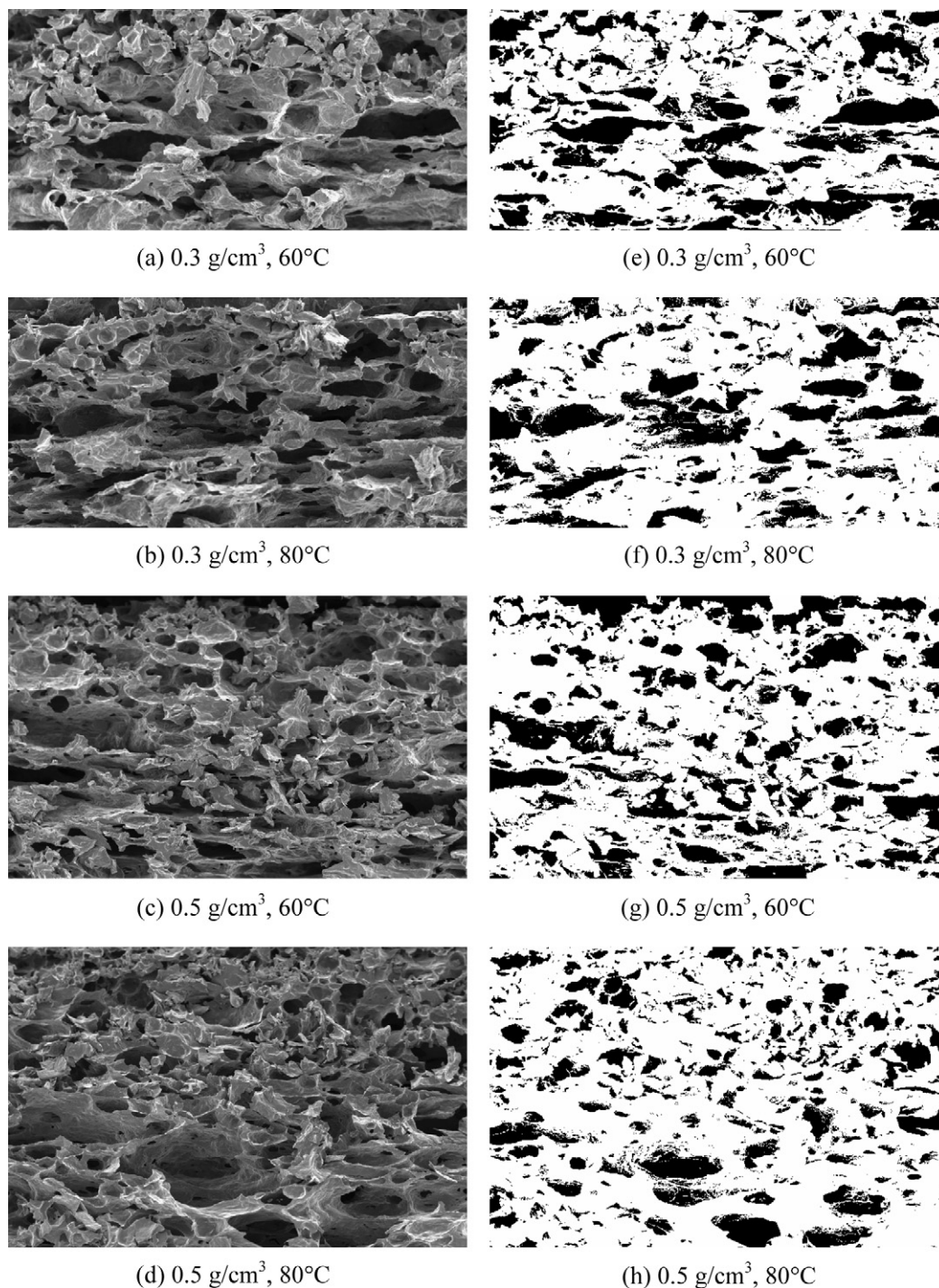


Fig. 11. (a–d) SEM micrographs of dried banana foam mats at different initial foam densities and drying temperatures and (e–h) binary image.

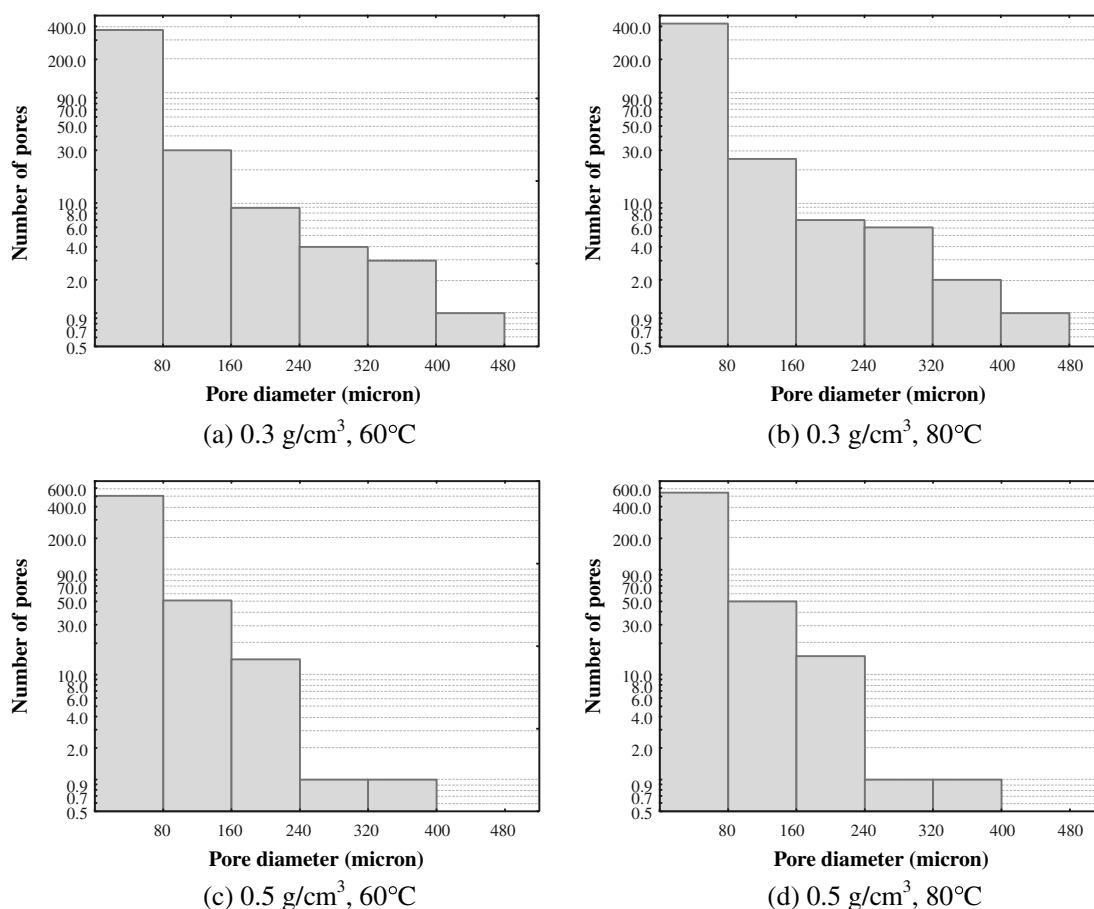


Fig. 12. Pore diameter distribution at different foam densities and drying temperatures.

The pore size distributions are shown in Fig. 12. The pore diameter was estimated from the known pore area by assuming a spherical shape. Considering the effect of initial foam density on the pore size of dried banana foam mats, it was observed that the samples with an initial foam density of 0.3 g/cm³ had a larger number of large pores in the range of 240–480 μm than those at higher initial foam densities. This large pore assembly might probably be generated from the coalescence of adjacent bubbles. However, the number of small pores, ranging from 10 to 240 μm, was lesser as compared with the samples with an initial foam density of 0.5 g/cm³. As shown in Fig. 12, the samples with an initial foam density of 0.5 g/cm³ had no pores with diameters larger than 400 μm. Although the total number of pores was smaller for samples with an initial foam density of 0.3 g/cm³, the void area fraction was relatively larger because of a greater number of large pore assemblies. The void area fraction of the samples dried at 60 °C was 22% and 18% for initial foam densities of 0.3 and 0.5 g/cm³, respectively.

As shown in Fig. 12, the porous structure was insignificantly different amongst the samples dried at higher and lower temperatures. This corresponded to other qualities, i.e., shrinkage and textural properties, in which those qualities were not dependent on the drying temperature.

5. Conclusions

Addition of egg albumen at concentrations of 5% and 10% could produce low density banana foams of 0.3 g/cm³ at an optimum whipping time of 20 min. Drying of banana foams mostly occurred in the falling rate period with higher drying rates at higher drying air temperatures and low foam densities. The initial foam density strongly affected the moisture diffusivity where the lower foam density, corresponding to larger void area and larger pore sizes of banana foams, provided higher values of effective diffusivity. In spite of efficient moisture transport, the very porous banana foams led to lower values of hardness and crispness. Shrinkage was also higher, except for the samples with initial foam densities beyond 0.5 g/cm³. The drying temperature had no significant effect on the textural properties, morphology and shrinkage, however. To produce crispy banana chips, the initial foam density of 0.5 g/cm³ and drying temperature of 80 °C was recommended.

Acknowledgement

The authors express their appreciation to the Thailand Research Fund (TRF) and the Commission on Higher Education for the financial support.

References

- AOAC, 1995. Official Methods of Analysis, 16th ed. Association of Official Agricultural Chemists, Washington, DC.
- Bates, R.P., 1964. Factors affecting foam production and stabilization of tropical fruit products. *Food Technology* 18, 93–96.
- Cherry, J.P., Mcwatters, K.H., 1981. Whippability and aeration. In: Cherry, J.P. (Ed.), *Protein Functionality in Foods*. American Chemical Society, Washington, DC, pp. 149–176.
- Cooke, R.D., Breag, G.R., Ferber, C.E.M., Best, P.R., Jones, J., 1976. Studies of mango processing I. The foam-mat drying of mango (*Alphonso cultivar*) puree. *Journal of Food Technology* 11, 463–473.
- Crank, J., 1975. *The Mathematics of Diffusion*. Clarendon Press, Oxford.
- Demirel, D., Turhan, M., 2003. Air-drying behavior of Draft Cavendish and Gros Michel banana slices. *Journal of Food Engineering* 59, 1–11.
- Garcia, R., Leal, F., Rolz, C., 1988. Drying of bananas using microwave and air ovens. *International Journal of Food Science and Technology* 23, 73–80.
- Hamdami, N., Monteau, J.Y., Bail, A.L., 2004. Transport properties of a high porosity model food at above and sub-freezing temperatures. Part 2: Evaluation of the effective moisture diffusivity from drying data. *Journal of Food Engineering* 62, 385–392.
- Hart, M.R., Graham, R.P., Ginnette, L.F., Morgan, A.I., 1963. Foams for foam-mat drying. *Food Technology* 17, 1302–1304.
- Hwang, M.P., Hayakawa, K.I., 1980. Bulk densities of cookies undergoing commercial baking processes. *Journal of Food Science* 45, 1400–1402.
- Karathanos, V.T., Villalobos, G., Saravacos, G.D., 1990. Comparison of two methods of estimation of the effective moisture diffusivity from drying data. *Journal of Food Science* 55, 218–223.
- Karim, A.A., Wai, C.C., 1999a. Characteristics of foam prepared from starfruit (*Averrhoa carambola* L.) puree by using methyl cellulose. *Food Hydrocolloids* 13, 203–210.
- Karim, A.A., Wai, C.C., 1999b. Foam-mat drying of starfruit (*Averrhoa carambola* L.) puree. Stability and air drying characteristics. *Food Chemistry* 64, 337–343.
- Krokida, M.K., Kiranoudis, C.T., Maroulis, Z.B., Marinos, D., 2000. Effect of pretreatment on color of dehydrated products. *Drying Technology* 18, 1239–1250.
- Labelle, R.L., 1966. Characterization of foams for foam-mat drying. *Food Technology* 20, 89–94.
- Lau, C.K., Dickinson, E., 2005. Instability and structural change in an aerated system containing egg albumen and invert sugar. *Food Hydrocolloids* 19, 111–121.
- Lim, L.T., Tang, J., He, J., 1995. Moisture sorption characteristics of freeze dried blueberries. *Journal of Food Science* 60, 810–814.
- Matz, S.A., 1976. *Snack Food Technology*. The AVI Publishing Company, Westport.
- Nguyen, M.H., Price, W.E., 2007. Air-drying of banana: influence of experimental parameters, slab thickness, banana maturity and harvesting season. *Journal of Food Engineering* 79, 200–207.
- Prins, A., 1988. Principles of foam stability. In: Dickinson, E., Stainsby, G. (Eds.), *Advances in Food Emulsions and Foams*. Elsevier Applied Science, New York, pp. 91–122.
- Rajkumar, P., Kailappan, R., Raghavan, G.S.V., Vishwanathan, R., Ratti, C., 2005. Foam mat drying of mango pulp (Totapuri). In: *Proceedings of the fourth Asia Pacific Drying Conference*, vol. 1. Allied Publishers Pvt. Ltd., New Delhi, pp. 479–495.
- Sakin, M., Ertekin, F.K., Ilcali, C., 2007. Modeling the moisture transfer during baking of white cake. *Journal of Food Engineering* 80, 822–831.
- Sankat, C.K., Castaigne, F., Maharaj, R., 1996. The air drying behaviour of fresh and osmotically dehydrated banana slices. *International Journal of Food Science and Technology* 31, 123–135.
- Sankat, C.K., Castaigne, F., 2004. Foaming and drying behaviour of ripe bananas. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie* 37, 517–525.
- Sham, P.W.Y., Scaman, C.H., Durance, T.D., 2001. Texture of vacuum microwave dehydrated apple chips as affected by calcium pretreatment, vacuum level and apple variety. *Journal of Food Science* 66, 1341–1347.
- Tsami, E., Katsioti, M., 2000. Drying kinetics for some fruits: predicting of porosity and color during dehydration. *Drying Technology* 18, 1559–1581.
- Vickers, Z.M., Bourne, M.C., 1976. A psychoacoustical theory of crispness. *Journal of Food Science* 41, 1158–1164.

Effects of pore size distribution and pore-architecture assembly on drying characteristics of pore networks

Somkiat Prachayawarakorn^{a,*}, Preeda Prakotmak^b, Somchart Soponronnarit^b

^a Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Suksawat 48 Road, Bangkok 10140, Thailand

^b School of Energy and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Suksawat 48 Road, Bangkok 10140, Thailand

Received 6 March 2006

Available online 20 September 2007

Abstract

Simulation of isothermal drying using two-dimensional networks comprised of interconnected cylindrical pores is presented. Transport of moisture inside pore segments was described by Fick's law. The results have shown that the shielding of large pores by the smaller pores in the stochastic pore network, which is supposed to be representative of real porous medium, causes the lower drying rate and hence lower effective diffusion coefficient as compared to those predicted from the idealized network of pores with a single size. The strength of shielding is found to vary with the characteristics of pore size distribution as interpreted by the moisture concentration experienced by the pores, which is remarkably different amongst the pore size distributions. The inefficient transport of moisture through the stochastic pore network can be improved or even better with the suitable architecturally assembled structure. The minimum shielding archetype network, appearing very high porous at particle surface, is predicted to enhance greatly the drying rate. On the other hand, the maximum shielding network, which is small pores allocated onto the network exterior, exhibits the slowest drying rate.
© 2007 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Keywords: Drying; Effective diffusion coefficient; Stochastic pore network

1. Introduction

Drying of porous materials has received much attention in a number of industrial applications including wood [1], pharmaceutical product [2], foodstuffs [3], and paper [4]. While material is dried, moisture inside the material transports through its interfacial void spaces to the surface and is carried away to the flowing stream. The transport of moisture may be occurred by several mechanisms of mass transfer, such as Knudsen diffusion, molecular diffusion, capillary flow, etc. All the drying mechanisms are lumped into the effective (apparent) diffusion coefficient [5–7] and the porous material is considered as a continuum. This consideration leads to formulation of partial differential equations which relate to the changes of quantities, i.e.

temperature and moisture content with time. By using the continuum models, the effective diffusion coefficient can experimentally be determined from the drying characteristic curve. The value of the effective diffusion coefficient varies from material to material although the drying conditions used, i.e. temperature and superficial air velocity, are all the same. The summary of the effective diffusion coefficients for products are given by [8]. However, the interpretation of those results have ignored the pore structural issues and relied on empirical representations. Such empiricisms may not be useful for providing detailed information on how moisture diffuses through void spaces, with different sizes and shapes, which dictate the diffusive pathways of moisture.

Thus, it is desirable to obtain the structural models that are capable of taking into accounts key geometrical and topological properties such as dead ends and variations in pore size and tortuous trajectories. When the structural model is combined with the transport equations, the flow

* Corresponding author. Tel.: +662 4270 9221; fax: +662 428 3534.
E-mail address: somkiat.pra@kmutt.ac.th (S. Prachayawarakorn).

Nomenclature

C	moisture content (decimal dry basis)
$\bar{C}$	average moisture content (decimal dry basis)
D	diffusion coefficient (m^2/s)
Fo	Fourier number, $\frac{D\Delta t}{\Delta x^2}$
N	drying rate, kg water/s, or number of pores in network
Pr	probability distribution function
L	material thickness (m)
l	pore length (m)
r	pore radius (m)
t	drying time (s)
x	distance along the pore length (m)

Greek symbols

σ	standard deviation (m)
μ	mean pore radius (m)
Γ	gamma function
κ	adjustable parameter of uniform distribution
ψ	adjustable parameter of uniform distribution
α	adjustable parameter of bimodal distribution
β	adjustable parameter of bimodal distribution

Subscripts

e	equilibrium
eff	effective

of substances through pore segments inside porous solid can numerically be predicted [9–11] and hence the effective properties are calculated, thereby providing the understanding of macroscopic properties. In such a way, network models can be used in the modeling of transport processes such as single-phase and two-phase fluid flow and pore diffusion [12–15].

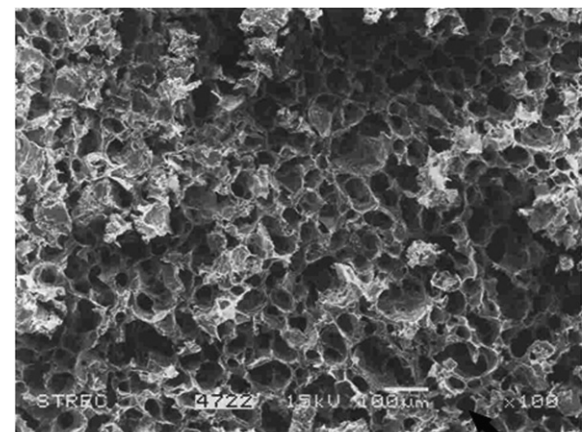
In this work, the drying of the random or stochastic pore network, which is supposed to be representative of pore spaces of real porous particle, is investigated. The moisture movement inside the pore segments is described by Fick's law and the drying process occurs under isothermal condition. The effect of pore size distributions on the drying characteristic curve and subsequent effective diffusivity is theoretically determined. In addition to the pore size distribution, the geometrical configuration of the pores, which is a full set of pores assembled in different ways onto the network, is explored how the diffusion of moisture through such geometrical structure exhibits different to that predicted from the stochastic pore network. This geometrical structure, sometimes called as pore architecture in this work, has similar pore size distribution to that employed in the stochastic pore network.

2. Network model

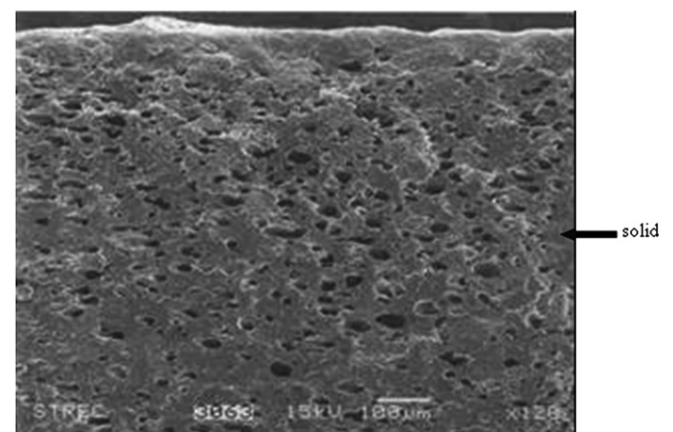
Fig. 1 shows an example of scanning electron micrograph (SEM) views of dried durian chip obtained from the freeze and hot air dryings. Pores shown in Fig. 1 are represented by black color and tissue by grey color. Porosity of the material appears to consist of a randomised assembly of pore spaces, which are more or less randomly interconnected. As shown from the figure, different drying techniques can produce remarkably different microstructures. Durian chip dried by the freeze-drying technique is more porous and larger pore sizes than that dried by hot air. With the hot air dried sample, the dense layer is formed and the small pores appear at the surface.

To understand the transport of moisture through the pore spaces, the pore sizes of the real solid is mapped onto

an array of lattices (shown in 2-D in Fig. 2). Each pore in the real solid becomes a bond in one of the lattices and each pore junction becomes a node. In this study, the pore shape assigned onto the network is assumed to be cylindrical geometry and all pores in the network are assumed to have



(a) freeze drying



(b) hot air drying

Fig. 1. SEM images of durian chip obtained from different drying techniques.

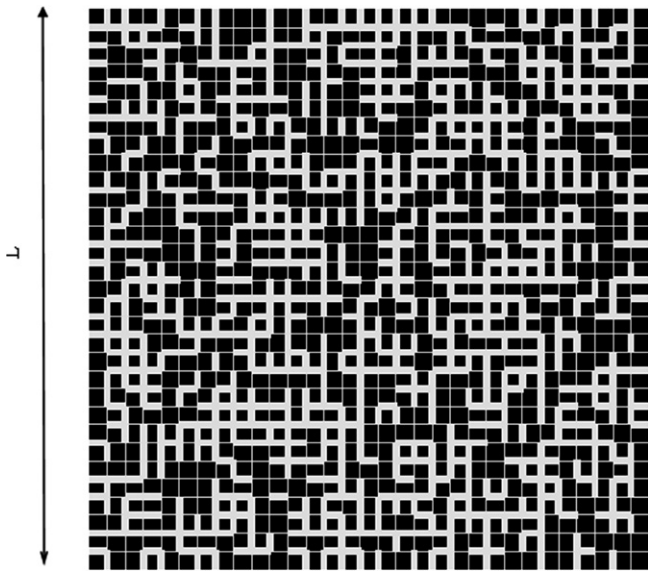


Fig. 2. 2-D 30 × 30 random pore network.

the same length. The pores with different sizes are randomly placed onto the network and this approach provides pore at any positions within the network independent to the neighboring pores. Fig. 2 illustrates 2-D pore network with a size of 30 × 30, consisting of 1860 pores. Each pore junction has a connectivity of 4. Real pore sizes of solid, which may determined by nitrogen adsorption or mercury porosimetry, are assigned to the bonds so that the real structure and the network model have the same pore size distribution. Let L is the average particle size of material. The length of each pore, l , is then calculated by dividing L by $N + 1$, where N is the network size. Moisture leaves from the network via all the pores at the network periphery, which open onto the drying medium.

2.1. Diffusion in single pores

When the pore network is established, the diffusion problem is solved by calculating the moisture content inside the individual pore in conjunction with the mass balance of moisture at the pore junctions. It is assumed that the moisture diffusing through pore with radius $r_{i,j}$, occurs under isothermal condition. The isothermal condition occurs when heat required for evaporation balances with heat from conduction and convection. The change of moisture inside individual pores of the network is described by the following equation:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

where C is the moisture content (decimal dry basis), D the diffusion coefficient (m^2/s), t the drying time (s) and x the distance along the pore length (m). The diffusion coefficient is assumed to be a constant value and the moisture concentration in the pores at the beginning is specially uniform along the pore axis. To determine the moisture profile

along the length, the forward finite difference is applied and Eq. (1) is thus expressed as

$$C_{m,r_{i,j}}^{p+1} = Fo \left(C_{m-1,r_{i,j}}^p + C_{m+1,r_{i,j}}^p \right) + (1 - 2Fo) C_{m,r_{i,j}}^p \quad (2)$$

where Fo is the Fourier number, $Fo = \frac{D\Delta t}{\Delta x^2}$, p and m the respective indexes of the present drying time and of nodal position along the pore. Eq. (2) is stable when Fo ranges between 0 and 0.5. The transfer rate $N_{i,j}$ of moisture, for any time t , diffusing into a pore with radius of $r_{i,j}$ can be calculated by

$$N_{r_{i,j}} = \pi r_{i,j}^2 D \left(\frac{dC_{r_{i,j}}(x,t)}{dx} \right)_{x=l} \quad (3)$$

2.2. Mass balance in the network

After drying starts, the pore ends positioned at the exterior network are exposed to the drying medium and have moisture equal to equilibrium moisture content, assuming negligible convective mass transfer resistance. This assumption allows the moisture contents of the exterior pores at any drying time to be calculated directly. For the interior pores, the calculation of their moisture contents is not straightforward since the moisture contents at the two ends of pore is not known. To determine the internal moisture contents, the mass balance of moisture content at inner nodes of the network is made, assuming the size of pore junctions being zero and no accumulation at the pore junctions within the network. The sum of all in and outflows, for a small time interval, at any node is accordingly zero. That is,

$$\sum_{j \in \{i\}} N_{r_{i,j}} = 0 \quad (4)$$

where $\{i\}$ refers to the set of i -adjacent nodes which are connected to node (i) in the network. By solving the moisture in every node together the specified boundary conditions around the network periphery, the average moisture content $\bar{C}_{\text{network}}$ of the network can readily be calculated. The calculation, based on the volume average, can be expressed by

$$\bar{C}(t)_{\text{network}} = \frac{\sum_{n=1}^N r_{i,j}^2 \int_0^l C_{r_{i,j}}(x,t) dx}{N \cdot l \sum_{n=1}^N r_{i,j}^2} \quad (5)$$

where N is the number of pore in the network and l is the pore length (m).

2.3. Effective diffusivity

If the diffusion is occurring through the slab-shaped porous solids, the effective diffusivity can be determined by Fick's second law of diffusion, which is expressed by

$$\frac{\bar{C}(t) - C_e}{C_i - C_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-(2n+1)^2 \frac{\pi^2 D_{\text{eff}} t}{L^2} \right] \quad (6)$$

where $\bar{C}(t)$ is the average moisture content of material (decimal dry basis), C_i the initial moisture content, C_e the equilibrium moisture content, D_{eff} the effective diffusion coefficient and L the material thickness. Eq. (6) presents the diffusion of moisture in one direction. The drying of pore network at the present study is, however, occurred in two directions and the solution is obtained from the product of the above diffusion equation itself, thus eventually yielding

$$\frac{\bar{C}(t) - C_e}{C_i - C_e} = \left(\frac{8}{\pi^2}\right)^2 \left[\exp\left(-2\pi^2 \frac{D_{\text{eff}} \times t}{L^2}\right) + \left(\frac{2}{9}\right) \exp\left(-10\pi^2 \frac{D_{\text{eff}} \times t}{L^2}\right) + \left(\frac{2}{25}\right) \exp\left(-26\pi^2 \frac{D_{\text{eff}} \times t}{L^2}\right) + \dots \right] \quad (7)$$

The first three terms of infinite series of Eq. (7) are employed to quantify the effective diffusivity and a trial-error method is used. The effective diffusivity is obtained when the difference between the value of moisture content predicted by Eq. (7), $\bar{C}(t)$, and that calculated from the network, $\bar{C}(t)_{\text{network}}$, is less than the acceptable value. By this method, the evolution of moisture content at pore level directly reflects on the effective diffusivity.

2.4. Pore size distribution

Pore size distribution defined in the range from a minimum to a maximum pore radius, $r_{\min}$ and $r_{\max}$, is described in terms of the number diameter probability density function which is given by

$$f(r) = \frac{d\left(\frac{N(r)}{N_T}\right)}{dr}, \quad r_{\min} < r < r_{\max} \quad (8)$$

where N_T is the total pores in the network and $N(r)$ presents the number of pores between r and $r + dr$. The integration of Eq. (8) from $r_{\min}$ to $r_{\max}$ equals to unity, $\int_{r_{\min}}^{r_{\max}} f(r) dr = 1$. The probability distribution function of all pores in the network with radius larger than a particular radius, $\text{Pr}(r_i)$, is

$$\text{Pr}(r_i) = \int_{r_i}^{r_{\max}} f(r) dr \quad (9)$$

The values of $\text{Pr}(r_i = r_{\min}) = 1$ and of $\text{Pr}(r_i = r_{\max}) = 0$. In this study, the following three types of pore size distribution, i.e. normal distribution, uniform distribution and bimodal distribution were used:

Normal size distribution:

$$f(r) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left[\frac{r-\mu}{\sigma}\right]^2\right), \quad -\infty < r < \infty \quad (10)$$

Uniform size distribution:

$$f(r) = \frac{1}{\kappa - \psi}, \quad \psi \leq r \leq \kappa \quad (11)$$

Bimodal size distribution:

$$f(r) = \frac{r^{\alpha_1-1}}{\Gamma(\alpha_1)\beta_1^{\alpha_1}} \exp\left(-\frac{r}{\beta_1}\right) + \frac{r^{\alpha_2-1}}{\Gamma(\alpha_2)\beta_2^{\alpha_2}} \exp\left(-\frac{r}{\beta_2}\right), \quad 0 \leq r \leq \infty \quad (12)$$

where σ is the standard deviation, μ the mean pore radius, $\Gamma(x)$ the gamma function and κ , ψ and α all the adjustable parameter.

Before investigating the diffusive flow behaviour within the network of pores, pore sizes are generated by the mapping of a sequence of uniformly distributed numbers in the range of 0 and 1 on the corresponding probability distribution function $\text{Pr}(r_i)$ and then are randomly distributed to the bonds.

3. Results and discussion

Drying simulations were performed on the pore network model. At the beginning, every pore within the network is assumed to have equal moisture content, with the value of 0.35 dry basis. When the drying starts, moisture content at the periphery pores immediately equilibrates to the surrounding air, which is assumed to be 0.165 dry basis in this study. The diffusivity value used in the simulations was $1 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$. To minimize the effect of periphery pores on the transport of moisture, size of the network should sufficiently be large. In addition, it enables to capture the moisture transport inside the large network closed to that occurring inside the real porous materials, consisting of many thousands of pores. A network size of 45×45 , consisting of 4140 pores in the network, was used in this study. For each set of results reported, 20–30 realisations were carried out and the average value was presented.

3.1. Influence of pore size distribution width

Pore size distribution is the important parameter not only in quality of foods but also in transport of moisture [16]. Their structures are given by a nature or through processing. To simplify the problem, this work assumes that the structure of foods does not change with time. Two case studies were performed; the first deals with the width of pore size distribution and the latter deals with the influence of characteristics of pore size distribution (see Section 3.2).

In the first case, the simulations were performed with the normal size distribution to determine the effect of pore size distribution width on the average moisture content. The width of distribution can be made by varying the value of standard deviation. A mean pore radius was given, with a size of 40 μm . The average moisture contents of the networks versus time are plotted in Fig. 3 for the values of standard deviation (σ) of 1, 7, and 12 μm . The moisture content of the network, for a given standard deviation, is rapidly decreased at the early drying period and slowly decreased afterwards. This trend is generally found in drying curve of porous materials.

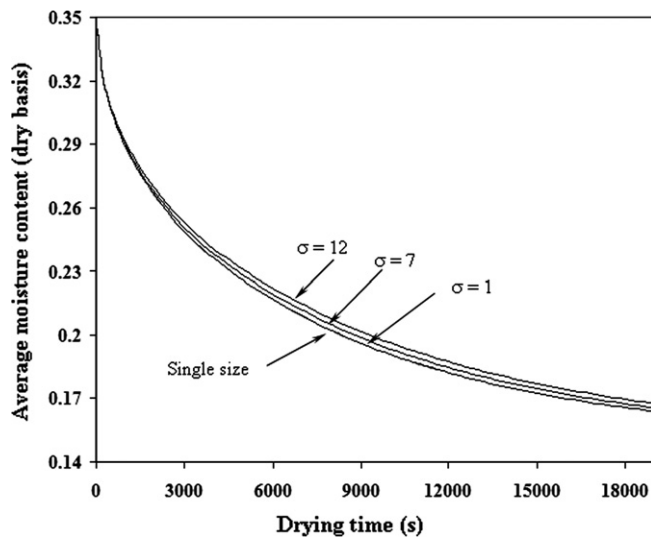


Fig. 3. Influence of pore size distribution width on moisture content (normal size distribution with $\mu = 40 \mu\text{m}$).

As shown in Fig. 3, difference in drying rate amongst pore size distribution widths is clearly evident after which moisture content of the networks is reduced below 0.25 dry basis. The moisture content is reduced faster with the narrower pore size distribution, corresponding to smaller standard deviation. When the standard deviation becomes unity, the decrease of moisture content is almost identical to that of the network of single-sized pore. The single-sized network is an ideal network where the moisture diffusing through any pore in the network is not interfered by their adjacent pores. These simulation results emphasize the less efficient transport of moisture within the network consisting of large and small pores, which are randomly connected. The poor transport is due to the larger pores shifted behind smaller ones and this effect is named as pore “shielding” [17]. Such shielding results in the moisture existing in the shielded pores difficult to move from the interior to the exterior because of the strong diffusional resistances in the surrounding pores.

However, the pore shielding effect is insignificant at the early drying period since the main portion of moisture removed at this time is present near the network periphery in which the moisture movement is not interfered by the disorder of void spaces within the network. Thus, the reduction of moisture content with time is nearly the same for the networks of pores that possess different standard deviations of pore size, as shown in Fig. 3.

The influence of the pore size distribution width on the drying curve presented in Fig. 3 is similar to that reported by Metzger and Tsotsas [18], exhibiting the strong effect of standard deviation of pore sizes on the drying behaviour. In their model, voids in porous material were represented as cylindrical shape and their arrangement was in parallel direction to fluid flow. The parallel capillaries were connected all along their length with no any resistance and fluid present in the capillaries was transported by the

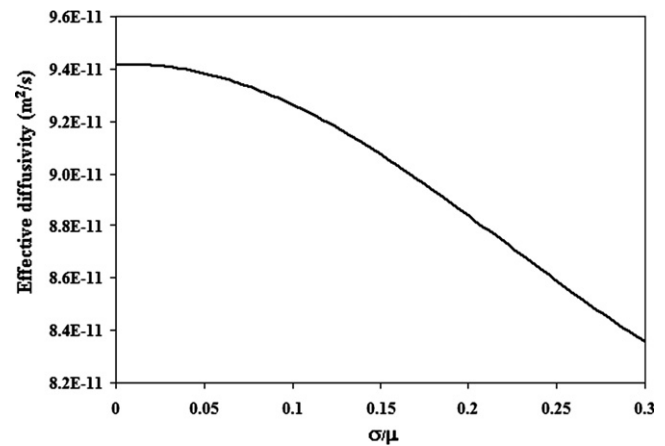


Fig. 4. Influence of pore size distribution width on transport property ($\mu = 40 \mu\text{m}$).

capillary and viscous forces. However, Segura and Toledo [19], who studied the isothermal drying of pore networks by assuming the dominant contribution of capillary forces over the viscous forces, reported the opposite results to the above studies. In their work, the simulation showed an insignificant effect of pore size distribution on the drying curves of the pore networks.

Fig. 4 shows the influence of width of pore size distribution on the effective diffusivity with a mean value of $40 \mu\text{m}$. The effective diffusivity of the network reduces as the value of σ/μ increases. The value of effective diffusivity decreases from $9.4 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ at the σ/μ of zero to $8.3 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ at the σ/μ of 0.3. These results respond to the similar way found in the drying curves, showing the faster drying rate with lower value of standard deviation.

3.2. Influence of type of pore size distribution

In this section, the change in moisture transport, while it diffuses through the network with different distributive pores, i.e. uniform, normal and bimodal distribution, is studied. In comparison, the networks of pores, which are characterized by different types of pore size distribution, have equal total pore volume and the network length is equal. The structural parameters required to generate pore size distributions are given as follows:

Normal size distribution: $\mu = 40 \mu\text{m}$ and $\sigma = 10 \mu\text{m}$

Uniform distribution: $\kappa = 74.13 \mu\text{m}$ and $\psi = 4.97 \mu\text{m}$

Bimodal distribution: $\beta_1 = 3 \mu\text{m}$, $\beta_2 = 10 \mu\text{m}$, $\alpha_1 = 2 \mu\text{m}$ and $\alpha_2 = 4.9 \mu\text{m}$

For the single-sized network, which is used as a baseline, the pore size of $40 \mu\text{m}$ was employed. Fig. 5 shows the number diameter probability density function of pores generated from different types of pore size distributions using the above structural parameters. In the bimodal distribution, the pore sizes are generally characterized by two groups, small and large pores. Pore sizes produced from

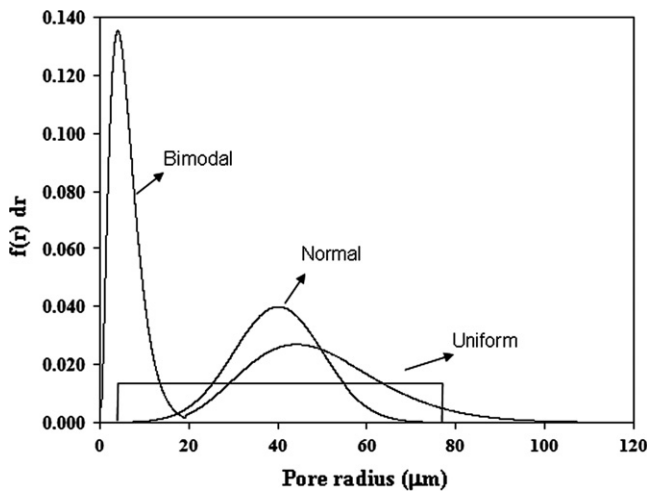


Fig. 5. Number diameter probability density function generated from different types of pore size distribution under the same total pore volume.

the structural bimodal parameters were given in the range of small pores from 0.34 to 17.3 μm , accounting for 36% of total number of pores allocated onto the network, and in the range of large from 17.3 to 121.8 μm , accounting

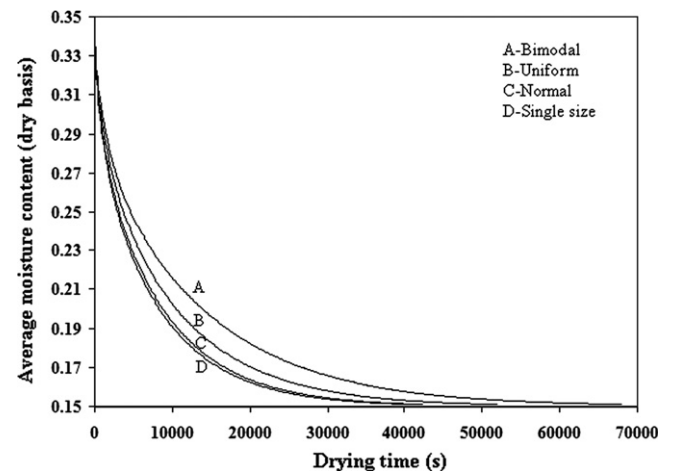


Fig. 6. Influence of type of pore size distribution on moisture content.

for 64% of total number of pores. For the uniform distribution, the generated pore sizes ranged between 1.9 and 71 μm .

Fig. 6 shows the influence of type of pore size distribution on reduction in moisture content, indicating the strong impact of pore size distribution on the moisture change.

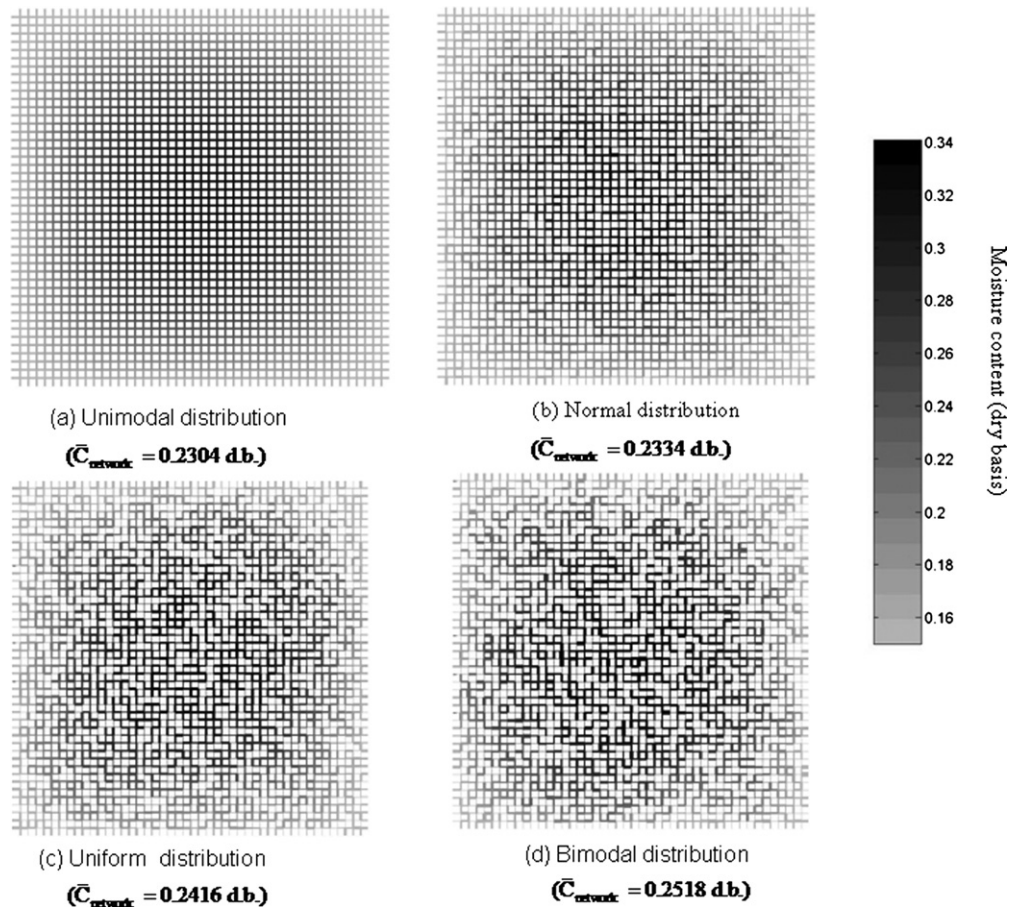


Fig. 7. Moisture content in 2-D pore networks with different distributions of pore sizes.

The rate of moisture reduction is lowest with the bimodal distribution and it becomes faster with the following uniform and normal distributions. Moreover, the fastest rate of moisture reduction exhibits in the single-sized network for which the shielded pores are absent. The moisture transport through the bimodal network is least efficient in spite of the larger pore sizes and higher pore volume in the large pore assembly, both of which normally serve high flow of moisture because of low resistance of moisture diffusion in the large pores. However, the slowest drying rate for the bimodal pores can be attributed to the fact that the large pore assembly ineffectively communicates itself throughout the network and some of them possibly allocate behind the smaller pores. Thus, the moisture diffusion from the inside to the outside for this pore size distribution is strictly limited. This description can be interpreted through the representation of network moisture gradients in voids which will be shown in Fig. 7.

The changes of average moisture content of the networks, with different pore size distributions, shown in Fig. 6 are selected for a particular drying time of 4500 s to visualize the moisture content of each pore positioned within the networks. The pictorialized representations of local moisture content are shown in Fig. 7. Each pore was colored according its moisture content. The representative colors with 21 shades from light grey to black were used for the corresponding range of moisture content from less than 0.16–0.34 dry basis. After drying is passed, difference in the detailed moisture contents amongst the networks of pores is shown up. As shown in Fig. 7d for the “bimodal” network, the inefficient connection of large and small pore assemblies exhibits the delay of moisture in percolating through the network once the drying front approaches the smaller pores. Irregular pattern of moisture content is also found with the bimodally distributed pores.

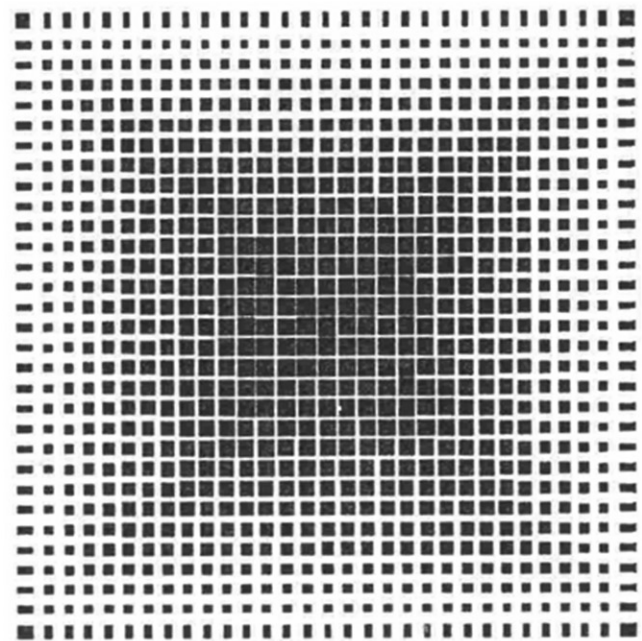
The results from the simulations also indicate that the moisture at the innermost pores of the “bimodal” network for the illustrative drying time of 4500 s is the same content as at the initial one (black), implying that drying at that area does not commence. With the other networks, the moisture at the innermost had already decreased, reducing from 0.34 to 0.32 dry basis which corresponds to the dark grey color.

3.3. Effect of structure re-ordering on the drying kinetics

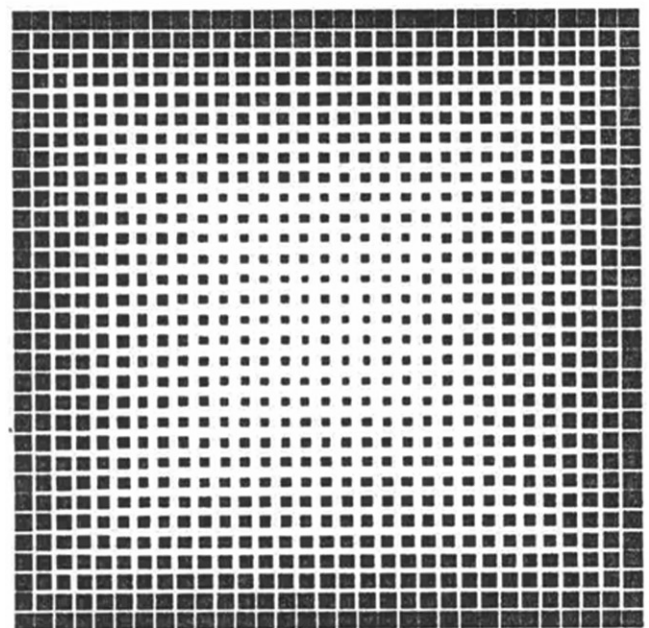
The food materials in particular fruit possess dense physical structure and sugar content. When it is conventionally dried, the crust or dense layer may possibly be formed near the material surface. This created structure does not facilitate internal moisture movement, thus resulting in long drying time, browning and darkening of product and large energy consumption. One approach to improve the drying rate is to change its physical structure, for example, making it more porous. This can be made by the foaming of fruit before drying [20]. In this section, the concept of pore network is utilised to show how the drying

rate can be changed when the physical structure of material is modified. Two illustrative structures are given to show the scope for this.

The first structure is shown in Fig. 8a whereby the full set of random pores, generated from the normal distribution ($\sigma = 10 \mu\text{m}$ and $\mu = 40 \mu\text{m}$), is assembled in rank order and then spirally wound into positions in the network, with the largest pore at the exterior and the smallest at the centre. This architectural structure, namely minimum shielding network, exhibits very more porous at the exterior



(a) minimum shielding network



(b) maximum shielding network

Fig. 8. Illustrative pore architectural structures.

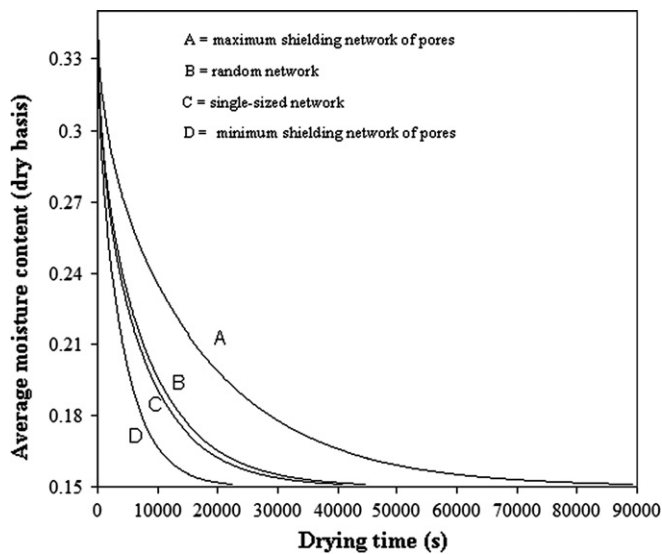


Fig. 9. Effect of pore architectural structure on the drying kinetics.

surface as shown in Fig. 8a. On the other hand, if the pores are allocated into the network, with the smallest size at the exterior surface and the largest at the centre, it can be visualized as a dense layer at the surface, which is shown in Fig. 8b, which is named as maximum shielding network. The outer dense layer of the later pore structure may possibly be similar to that occurring in the biomaterials containing high sugar content when dried with hot air. Both pore structures shown in Fig. 8 have exactly identical pore sizes used in the stochastic pore network. The simulation results obtained from the above archetypal pore structures are shown in Fig. 9. The transport of moisture through different configurations of pore assembly is strikingly different. The reduction of moisture content is very fast with the pore structure appearing very porous at the exterior (D) and extremely slowest with the dense structure at the exterior (A). The corresponding effective diffusivities are $1.57 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ and $3.81 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$.

The moisture content of each pore for the architectural configurations is shown in Fig. 10, for the illustrative drying time of 4500 s which is the same time as presented in Fig. 7. As shown in Fig. 10a for the minimum shielding network, the moisture content of the exterior pores at that time lies in between 0.16 and 0.2 dry basis, corresponding to the shade of grey color which increases intensity from light to medium grey. This result implies the architectural pore structure with very high porous at the outer surface facilitating the high diffusive flux of moisture, thereby enhancing the rapid fall in moisture content.

Because of high resistance of moisture diffusion in the small pores at the periphery for the maximum shielding network, the diffusion of moisture is restricted and this is clearly evident from Fig. 8b, showing the grey color shade only at the periphery pores whilst most inner pores have moisture contents above 0.3 dry basis.

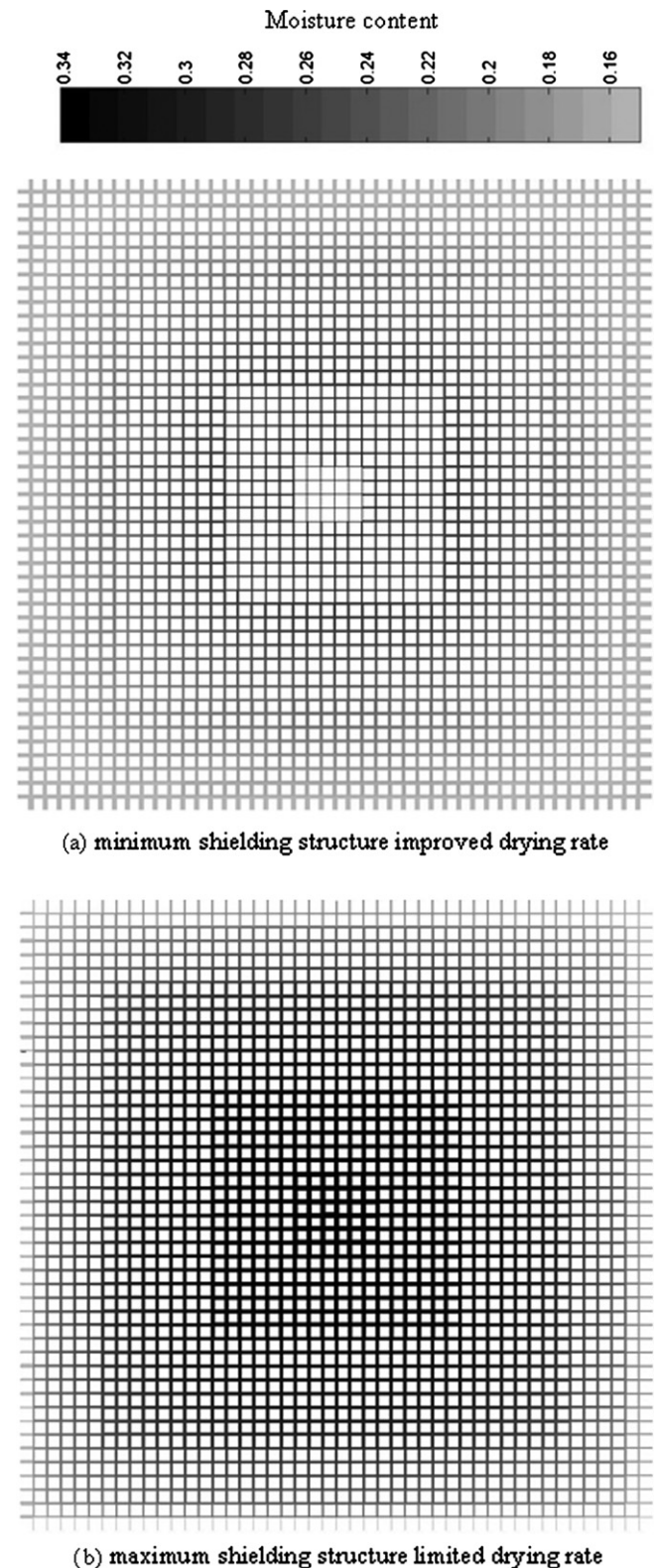


Fig. 10. Moisture content in 2-D network with different arrangements of pore assembly.

4. Conclusions

A 2-D pore network for the drying of moisture content under isothermal condition has been studied. The transport

of moisture within individual pore segments is described by Fick's second law. The simulation results have been shown that the effect of shielding inherent in typical random pore network results in slower decrease of moisture content and hence lower value of effective diffusion coefficient as compared to the single sized network for which the shielding is absent. Degree of shielding is different among pore size distributions and this effect causes the value of effective diffusion coefficient to be dependent on the distribution types. The strongest shielding effect is found with the pore network characterized by bimodal pore size distribution and this influence consequently results in drying of bidisperse porous structure relatively longer time than the other illustrative pore size distributions, i.e. uniform and normal distribution. The drying rate of the stochastic pore network can be improved through the proper pore structure. This superiority is greatest with the network of pores appearing highly porous at the exterior. On the other hand, porous particles, with a dense layer at the surface or consisting of small exterior pores, can be dried with lowest rate.

Acknowledgements

The authors express their sincere appreciation to the Thailand Research Fund and commission on higher education for financial support.

References

- [1] D. Elustondo, S. Avramidis, S. Shida, Predicting thermal efficiency in timber radio frequency vacuum drying, *Dry. Technol.* 22 (2004) 795–807.
- [2] K.H. Gan, R. Bruttini, O.K. Crosser, A.I. Liapis, Freeze-drying of pharmaceuticals in vials on trays: effects of drying chamber wall temperature and tray side on lyophilization performance, *Int. J. Heat Mass Transfer* 48 (2005) 1675–1687.
- [3] L.A. Campanone, V.O. Salvadori, R.H. Mascheroni, Food freezing with simultaneous surface dehydration: approximate prediction of freezing time, *Int. J. Heat Mass Transfer* 48 (2005) 1205–1213.
- [4] J. Seyed-Yagoobi, H. Noboa, Drying of uncoated paper with gas-fired infrared emitters – optimum emitters' location within a paper machine drying section, *Dry. Technol.* 21 (2003) 1897–1908.
- [5] G. Efremov, T. Kudra, Calculation of the effective diffusion coefficients by applying a quasi-stationary equation for drying kinetics, *Dry. Technol.* 22 (2004) 2273–2279.
- [6] Md. Raisul Islam, J.C. Ho, A.S. Mujumdar, Convective drying with time-varying heat input: simulation results, *Dry. Technol.* 21 (2003) 1333–1356.
- [7] S. Prachayawarakorn, P. Prachayawasin, S. Soponronnarit, Effective diffusivity and kinetics of urease inactivation and color change during processing of soybeans with superheated-steam fluidized bed, *Dry. Technol.* 22 (2004) 2095–2118.
- [8] N.P. Zogzas, Z.B. Maroulis, D. Marinou-Kouris, Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs, *Dry. Technol.* 14 (1996) 2225–2253.
- [9] M. Blunt, Flow in porous media-pore – network models and multiphase flow, *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.* 6 (2001) 197–207.
- [10] R. Mann, Development in chemical reaction engineering: issues relating to particle pore structures and porous materials, *Trans. IChemE* 71A (1993) 551–561.
- [11] M. Sahimi, G.R. Gavalas, T.T. Tsotsis, Statistical and continuum models of fluid–solid reactions in porous media, *Chem. Eng. Sci.* 45 (1990) 1442–1502.
- [12] S.C. Nowicki, H.T. Davis, L.E. Scriven, Microscopic determination of transport parameters in drying porous media, *Dry. Technol.* 10 (1992) 925–946.
- [13] J.B. Laurindo, M. Prat, Numerical and experimental network study of evaporation in capillary porous media. Drying rates, *Chem. Eng. Sci.* 53 (1998) 2257–2269.
- [14] M. Prat, Isothermal drying of non-hygroscopic capillary-porous materials as an inversion percolation process, *J. Multiphase Flow* 21 (1995) 875–892.
- [15] V.G. Mata, J.C.B. Lopes, M.M. Dias, Porous media characterization using mercury porosimetry simulation. 1. Description of the simulator and its sensitivity to model parameters, *Ind. Eng. Chem. Res.* 40 (2001) 3511–3522.
- [16] M.S. Rahman, O. Al-Amri, I.M. Al-Bulushi, Pores and physico-chemical characteristics of dried tuna produced by different methods of drying, *J. Food Eng.* 53 (2002) 301–313.
- [17] G.P. Androutsopoulos, R. Mann, Evaluation of mercury porosimeter experiments using a network pore structure model, *Chem. Eng. Sci.* 34 (1979) 1203–1212.
- [18] T. Metzger, E. Tsotsas, Influence of pore size distribution on drying kinetics: a simple capillary model, *Dry. Technol.* 23 (2005) 1797–1809.
- [19] L. Segura, P.G. Toledo, Pore-level modeling of isothermal drying of pore networks: effects of gravity and pore shape and size distributions on saturation and transport parameters, *Chem. Eng. J.* 111 (2005) 237–252.
- [20] C.K. Sanket, F. Castaigne, Foaming and drying behaviour of ripe bananas, *Lebensm.-Wiss. Univ. Technol.* 37 (2004) 517–525.

Modeling of Diffusion with Shrinkage and Quality

Investigation of Banana Foam Mat Drying

Ratiya Thuwapanichayanan^{1,*}, Somkiat Prachayawarakorn² and

Somchart Soponronnarit¹

¹School of Energy, Environment and Materials, ²Faculty of Engineering

King Mongkut's University of Technology Thonburi

126 Pracha u-tid Road, Bangkok 10140, Thailand

ABSTRACT

A diffusion model including shrinkage has been developed for predicting the change of moisture content in banana foam mats during drying. Two solution methods, moving boundary using variable grid and immobilizing boundary using the Lagrangian referential coordinate, were used in exploring their capabilities to predict the moisture change. Banana foam mats with initial foam densities of 0.3, 0.5 and 0.7 g/cm³ were dried at 60, 70 and 80°C and superficial air velocity of 0.5 m/s. The qualities of the final products in terms of texture and microstructure were determined. The moving boundary method can predict the moisture content more accurate than the immobilizing boundary method especially in the case of low density foam. The quality determinations showed that the initial foam density strongly affected hardness, crispness and morphology of dried banana foam mats whilst the drying temperature had no significant effect on those qualities.

Keywords diffusion model; immobilizing boundary; moisture diffusivity; moving boundary

* Correspondence: Ratiya Thuwapanichayanan, School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 126 Pracha u-tid Road, Bangkok 10140, Thailand; E-mail: t_ratiya@yahoo.com

INTRODUCTION

Banana is fast perishable after harvesting. Dehydration of banana can provide an extension of shelf-life and also reduce losses. Banana chip, one of the most favorite products, can be served as a snack food or added in cereal breakfast. The combination of foaming and hot air drying is an alternative method to produce banana chips.

Banana foam initially consists of gas bubbles and aqueous phase. When moisture in banana foam starts vaporization, porous structure appears. The creation of a porous structure can improve the textural properties of dry crisp foods in particular hardness and crispness. In addition, banana foam can be rapidly dried to 0.04 kg/kg db, which is a desired value for the crisp products [1]. Study of the drying process of banana foam is therefore important for producing crisp banana chips with desired quality. Design of efficient drying conditions can improve the product quality as well as reduce the energy consumption. Mathematical models are useful tools for pre-design that can reduce the trial and error efforts involved in experimentation.

The mathematical formulation of mass transfer in porous material during drying is often based on a Fick's second law. The moisture movement inside porous media can occur in forms of liquid and vapor [2]. Liquid diffusion, capillary flow and surface diffusion can take place in liquid phase. Molecular diffusion and Knudsen diffusion are possible mechanisms for vapor transport. These mechanisms are lumped into an effective diffusivity. In principle, the effective diffusivity can be determined experimentally. For the materials undergoing shrinkage, variations in volume must be considered in the effective diffusivity [3,4].

In case of banana foam, shrinkage is very severe because instability of gas bubbles yields bubble collapse, in addition to stresses-induced shrinkage. Shrinkage of material results in a shorter distance for the moisture travelling from inside to the

outside. Shrinkage effect should therefore be taken into account in the diffusion model, in order to successfully describe the transport of moisture inside the samples.

Several solution methods can be used for solving the diffusion model including shrinkage such as immobilizing boundary using the Lagrangian referential coordinate [3,4,5,6] and moving boundary using variable grid [7]. The latter method is more realistic to allow for changes in the dimensions. However, it is more complex as compared to the first method.

The objective of this work was therefore to evaluate the capability of two solution methods, moving boundary and immobilizing boundary, in predicting the moisture content in banana foam mats during drying. The important qualities of the final products, i.e. texture and microstructure were also reported.

MATERIALS AND METHODS

Preparation of banana puree and foam

Gros Michel bananas (*Musa Sapientum* L.) at a mature stage of 5, which contained total soluble solids of approximately 23-25°Brix, were used. Bananas were cut into slices with a slicing machine. To prevent discoloration during foaming, the sliced bananas were pretreated by immersing them in 1% (w/w) sodium metabisulphite solution for 2 min and then rinsed with distilled water for 30 sec [8]. The pretreated banana slices were chopped into small pieces and then blended with a blender (Waring, model no. 8011 BU, Torrington, CT) for 1 min. About 800 g of the banana puree was then poured into a mixing bowl and 5% fresh egg albumen (on a wet puree basis) used as the foaming agent was added to the banana puree. The banana puree with egg albumen was whipped by a Kitchen Aid Mixer (model no. 5K5SS, Strombeek-Bever, Belgium) at a maximum speed to foam densities of 0.3, 0.5 and 0.7 g/cm³.

Foam density was determined by measuring the mass of a fixed volume of the foam. Determination was performed carefully to avoid destroying the foam structure and to ensure that there were no voids while filling the foam into the measuring beaker. The experiments were done in duplicate.

The moisture content of the foamed banana is normally determined by the vacuum oven method 934.06 [9]. However, drying of foamed banana in a hot air oven at a temperature of 103°C for 3 hr was used instead of AOAC method [9]. The moisture content determined by the hot air oven was closed to that obtained by the vacuum oven method, the percentage error from two methods approximately 0.4%.

Drying procedure

Banana foam mats with a thickness of 5 mm were placed on a mesh tray, which was covered with aluminum foil, and then put into the drying chamber. The samples at three foam densities of 0.3, 0.5 and 0.7 g/cm³ were then dried to about 0.03 kg/kg db using the drying air temperatures of 60, 70 and 80°C and a superficial air velocity of 0.5 m/s. Moisture loss from the samples was determined by weighing the sample tray outside the drying chamber using an electronic balance (± 0.01 g).

Texture analysis

Banana foam mats, after drying to about 0.03 kg/kg db, were taken to examine their textural properties. The texture of dried banana foam mats was evaluated by a compressive test using a texture analyzer model TA.XT.plus (Stable Micro Systems, Surrey, UK). The sample was placed on the hollow planar base. The test applied a direct force to the sample using a 5 mm spherical probe at a constant crosshead speed of 2 mm/s. The hardness was defined as the maximum force of the force-deformation curve and the crispness was characterized by the number of peaks and the slope of the first peak. Eight samples were tested and the average values of hardness and crispness were presented.

Microstructural analysis

A scanning electron microscope (JEOL JSM-5600LV, Tokyo, Japan) was used to characterize the microstructure of dried banana foam mats. The dried banana foam mat was placed on two-side adhesive tape attached to metal stub and was coated with gold. SEM micrographs were taken at an accelerating voltage of 10 kV and a magnification of 35 $\times$.

MATHEMATICAL MODEL

A Fick's diffusion model was used to describe the transport of moisture inside a single banana foam mat. The main assumptions used in the proposed model were that the product shape was an infinite slab, the moisture transfer and volume change took place only in the thickness direction. In addition, the external resistance to moisture transfer was negligible and the moisture distribution inside banana foam before drying was spatially uniform. The moisture diffusion inside banana foam can be expressed by the following equation [10]:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_v^{\text{eff}} \frac{\partial M}{\partial x} \right), 0 < x < L(t) \quad (1)$$

where D_v^{eff} is the effective moisture diffusivity (m^2/s), $L(t)$ is the sample thickness varying with the moisture content (m), M is the local moisture content (kg/kg d.b.), x is the coordinate along the diffusion path and t is the drying time (s).

Since the effective moisture diffusivity is not constant, the space derivative of the product of D_v^{eff} and $\frac{\partial M}{\partial x}$ on the right side of Eq. (1) can then be written as:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_v^{\text{eff}} \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial M}{\partial x} \frac{\partial D_v^{\text{eff}}}{\partial x}, 0 < x < L(t) \quad (2)$$

SOLUTION METHODS

Two solution methods, moving boundary and immobilizing boundary, are presented for solving a diffusion model including shrinkage for banana foam mat. The two solution methods have been extensively used for shrinkage problem, however, slight modifications of both methods are needed for banana foam.

Moving boundary

Moving boundary is a method in which the domain of integration (x) is not constant. The variable grid central finite difference was used and the spacing between each grid point (Δx_i) was not equal and not constant. The number of grid points (Fig. 1) was kept constant during the time steps of calculation.

The values of moisture content at each grid point were solved from the nonlinear partial differential equation (Eq. (2)), together with the earlier mentioned assumptions. Eq. (2) was discretized in the positions by the variable grid central finite difference method in its explicit form as follows:

$$\frac{M_i^{j+1} - M_i^j}{\Delta t} = D_{v,i}^{\text{eff},j} \frac{\frac{M_{i+1}^j - M_i^j}{\Delta x_{i+1}^j} - \frac{M_i^j - M_{i-1}^j}{\Delta x_i^j}}{\frac{\Delta x_{i+1}^j}{2} + \frac{\Delta x_i^j}{2}} + \frac{M_{i+1}^j - M_{i-1}^j}{\Delta x_{i+1}^j + \Delta x_i^j} \cdot \frac{D_{v,i+1}^{\text{eff},j} - D_{v,i-1}^{\text{eff},j}}{\Delta x_{i+1}^j + \Delta x_i^j} \quad (3)$$

where subscript i and superscript j represent node and time indexes, respectively.

As the moisture content at each grid point was known, the spacing between each grid point was then adjusted according to the average moisture content of each section. From the experiments, it was found that a decrease in the thickness of banana foam mats was in a linear relation with the moisture content, which could be described by the following equation:

$$L/L_0 = a + bM/M_0 \quad (4)$$

where a is 0.349, 0.496 and 0.503, b is 0.702, 0.521 and 0.507 for the initial foam densities of 0.3, 0.5 and 0.7 g/cm³, respectively. L is the thickness of banana foam mat at a given moisture content (m), L₀ is the thickness of banana foam mat at the beginning (m) and M₀ is the initial moisture content of banana foam mat (kg/kg d.b.).

In this work, it was assumed that the relationship between spacing of each section and average moisture content in that section was in a linear function. It can be calculated by applying Eq. (4) for differential element and it can be written as:

$$\Delta x_i / \Delta x_0 = a + b(M_{av} / M_0) \quad (5)$$

where Δx_i is the spacing between each grid point (m), Δx_0 is the spacing between grid point at the beginning (m), M_{av} is the average moisture content of each section (kg/kg d.b.), M_0 is the initial moisture content at the beginning (kg/kg d.b.).

As the spacing between each grid point was adjusted, the thickness of banana foam mat was also updated; the sum of the new spacing of each section was the new thickness of banana foam mat. The average moisture content of banana foam mat at each time step was then calculated by integration of the local moisture content over the new thickness of banana foam mat. This calculation procedure was repeated until the desired final moisture content was achieved.

Immobilizing boundary

Immobilizing boundary is a method for solving shrinkage problems, in which the domain of integration of the diffusion equation is constant. In order to fix the domain of integration, the Lagrangian coordinate (ξ, t) was used instead of the Eulerian coordinate (x, t).

Considering many foodstuffs, i.e., potato, fish fillet and banana, it was assumed that no pores or air voids are present and these products consist of solid (dry matter) with volume V_s and liquid (water) with volume V_w . The variation of the material volume during drying is equal to the volume of evaporated water whilst V_s remains constant throughout the drying time. The volume of solid is thus chosen as the Lagrangian referential coordinate (ξ) for such system in order to fix the domain of

integration. The maximum value of ξ is the thickness of the dry product (zero moisture content) if the diffusion and the shrinkage are assumed to be unidirectional.

The Lagrangian coordinate and the Eulerian coordinate are related by the mass of the solid (m_s) [6,11] and it can be expressed by:

$$\rho_s A dx = \rho_s^\xi A d\xi \quad (6)$$

where A is surface area (m^2), ρ_s is the apparent density of the solid (kg/m^3), which is the ratio between the mass of the solid and its overall volume, and ρ_s^ξ is the apparent dry solid density (kg/m^3), which is the ratio between the mass of the solid and the volume of the dry product.

Rewriting Eq. (6), it is thus obtained:

$$\frac{\partial \xi}{\partial x} = \frac{\rho_s}{\rho_s^\xi} \quad (7)$$

The transformation of Eq. (1) into the Lagrangian coordinate can be obtained by using Eq. (7) and it can be expressed as:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \xi} \left(D_v^{\text{eff}} \left(\frac{\rho_s}{\rho_s^\xi} \right)^2 \frac{\partial M}{\partial \xi} \right), 0 < \xi < L_f \quad (8)$$

where L_f is the thickness of the dry product (m).

In case of the banana foam, its overall volume initially consists of volume of solid (V_s), volume of water (V_w) and volume of air voids (V_a) which were produced during the whipping process and not occupied by water. We have to determine the Lagrangian referential coordinate which is similar to the bi-constituent systems (solid and liquid) as described earlier, that is, the coordinate, which was chosen as the Lagrangian referential, must be constant during water diffusion. If the volume of the dry banana foam mat, which consisted of volumes of solid and air voids, was considered as the Lagrangian referential coordinate, both volumes remained constant throughout the drying time.

When the volumes of solid and air voids were fixed, the sample shrinkage occurred solely due to the moisture loss. The maximum value of ξ was the thickness of dry banana foam mat since the diffusion and the shrinkage were assumed to be one-dimension.

The relationship between ρ_s and ρ_s^ξ is given by:

$$\frac{\rho_s}{\rho_s^\xi} = \frac{V_f}{V} = \frac{L_f}{L} \quad (9)$$

Because the diameter of banana foam mat was constant, the volume change of banana foam mat occurred only in the thickness. V_f/V is then equal to L_f/L where V is the volume of banana foam mat at a given time (m^3) and V_f is the volume which was chosen as the Lagrangian referential coordinate.

The ratio of L_f and L can be derived from Eq. (4). Since a in Eq. (4) is the y-intercept which is equal to L_f/L_0 , so that Eq. (4) can be rearranged in form of L_f/L as:

$$L_f / L = \frac{1}{1 + \frac{b}{a}(M / M_0)} \quad (10)$$

where $\frac{b}{a}$ is called as the shrinkage coefficient (β).

Substituting Eq. (10) into Eq. (8), it yields:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \xi} \left(D_v^{\text{eff}} \frac{1}{(1 + \beta(M / M_0))^2} \frac{\partial M}{\partial \xi} \right), 0 < \xi < L_f \quad (11)$$

Eq. (11) was discretized in the positions by the central finite difference method in its explicit form and it can be expressed as:

$$\begin{aligned} \frac{M_i^{j+1} - M_i^j}{\Delta t} = & \frac{D_{v,i}^{\text{eff},j}}{\left(1 + \beta \frac{M_i^j}{M_0}\right)^2} \cdot \frac{(M_{i+1}^j - 2M_i^j + M_{i-1}^j)}{(\Delta \xi)^2} + \frac{1}{\left(1 + \beta \frac{M_i^j}{M_0}\right)^2} \cdot \frac{(M_{i+1}^j - M_{i-1}^j)(D_{v,i+1}^{\text{eff},j} - D_{v,i-1}^{\text{eff},j})}{4(\Delta \xi)^2} \\ & - \frac{2\beta D_{v,i}^{\text{eff},j}}{M_0 \left(1 + \beta \frac{M_i^j}{M_0}\right)^3} \cdot \frac{(M_{i+1}^j - M_{i-1}^j)^2}{4(\Delta \xi)^2} \end{aligned} \quad (12)$$

As the local moisture content was known, the average moisture content of banana foam mat at each time step was then calculated by integration of the local moisture content over the thickness of the dry banana foam mat.

The R-square (R^2) and root mean square error (RMSE) were used to estimate the accuracy of average moisture content prediction. The RMSE was calculated as follows:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_{\text{exp},i} - Y_{\text{pre},i})^2}{N}} \quad (13)$$

where $Y_{\text{exp},i}$ and $Y_{\text{pre},i}$ are respectively the experimental and predicted average moisture content of banana foam mats at a given time (kg/kg db) and N is the number of average moisture content measurements.

RESULTS AND DISCUSSION

Effective moisture diffusivity

The effective diffusivity of banana foam mats determined by the method of slopes is shown in Fig. 2 (a-b). The detail of calculation can be seen from Karathanos [12]. The effective diffusivity decreased with decreasing moisture content, except for the early stage of drying where the effective diffusivity increased with decreasing moisture content due to the rapid rise of product temperature. In addition to the moisture content, the effective moisture diffusivity was higher when the drying temperature increased and the initial foam density decreased.

The relationship between effective moisture diffusivity and average moisture content of banana foam is described by the following empirical equation:

$$D_{\text{eff}}(M) = a \exp\left(\sum_{i=1}^4 \alpha_i M^i\right) \quad (14)$$

where a and α_i are the empirical parameters. The a and α_i depended on the initial foam density and drying temperature and were obtained by non-linear regression analysis; the results together with R^2 values are presented in Table 1. The proposed equation could adequately describe their relationship with R^2 values being in the range of 0.945-0.998.

Model validation

Fig. 3 (a-c) shows the comparisons between experimental data and predictions of average moisture content of banana foam mats at different initial foam densities. It could be observed that the accuracy of predictions of the average moisture content throughout the drying time were different amongst the calculation methods, moving and immobilizing boundaries. The moving boundary method could predict the experimental results more accurate than the immobilizing boundary method especially for the case of

low initial foam densities. At initial foam density of 0.3 g/cm^3 and drying temperature of 80°C , R-square values (R^2) were 0.98 and 0.49 and root mean square error values (RMSE) were 0.14 and 0.66 for moving and immobilizing boundary methods, respectively. This is attributed to the simplified assumption of the immobilizing boundary method, that is, the volume of air voids presented in a banana foam mat remained constant throughout the drying time. As the volume of air voids was assumed to be fixed, the sample shrinkage occurred only due to the moisture loss. Nevertheless, the shrinkage of banana foam mats at initial foam density of 0.3 g/cm^3 did not follow this assumption. At this foam density, the reduced volume was larger than the volume of removed water (the data was not shown here) due to the collapse of gas bubbles which occurred during the non-rigid state of the foam.

When the immobilizing boundary method was applied to the higher initial foam densities, 0.5 and 0.7 g/cm^3 . The predictions of average moisture content of banana foam mats by this method approached to those predicted by the moving boundary method as shown in Fig. 3 (b-c), resulting in higher values of R^2 and lower values of RMSE as presented in Table 2. This is because the shrinkage of banana foam mats at higher initial foam densities was nearly equal to the volume of evaporated water. In addition, the predictions by immobilizing boundary method are satisfactory for high density foods, i.e., potato, fish fillets and purified chitosan [3,4,5,6].

The time required for reducing the moisture content of banana foam mats to about 0.03 kg/kg db was lesser when using lower initial foam densities (Fig. 3) due to the larger air voids which were produced at lower foam density (see SEM micrographs). A larger amount of water could easily travel through the larger voids, resulting in shorter drying time. As shown in Fig. 4, the drying time was also shorter when the banana foam mats were dried at higher drying temperature due to the higher moisture diffusivity. The

difference between experimental and simulated drying time when using the moving boundary method was within 6% in all cases.

Fig. 5 shows the comparisons between experimental data and predictions of thickness change of banana foam mats at different initial foam densities. It can be seen that the moving boundary method could predict the sample shrinkage corresponding to the experimental data. As depicted in Fig. 5, the samples at low initial foam density were more shrunk than those at higher initial foam densities.

Quality of dried banana foam mats

Fig. 6 (a-d) shows SEM micrographs of banana foam mats dried at different temperatures for various initial foam densities. It was observed that the pore shape of dried banana foam mats was elongate whilst the pore shape of banana foams before drying was spherical (not shown here). This is probably due to the stress formation during drying, which led to some distortion.

For the textural properties, it was found that hardness and crispness were strongly affected by their microstructures. The samples with initial foam density of 0.3 g/cm^3 , in which adhesive-forces between solid matrices were not strong, yielded the lesser dense structure and lower strength. Hence, the hardness was smaller as compared with that of the samples with higher initial foam densities (see Fig. 7a). In terms of crispness, the samples with lower initial foam densities had smaller number of peaks and lower slopes of the first peak as shown in Fig. 7 (b-c). The small number of peaks and low initial slope obtained from samples at low initial foam density of 0.3 g/cm^3 indicated that this banana foam was less crisp as compared with the samples at higher initial foam densities. The hardness and crispness of samples dried at higher or lower temperatures were not different because the morphology of these samples was

insignificantly different as previously shown in Fig. 6. However, the hardness and crispness of samples with initial foam density of 0.7 g/cm^3 and dried at 60°C were not reported since their moisture content could not be reduced to the desired value, approximately 0.04 kg/kg db , at which the products were not crisp [1].

CONCLUSIONS

The diffusion model including shrinkage solved by moving boundary method could predict the average moisture content more accurate than the immobilizing boundary method. The initial foam density strongly affected the moisture diffusivity where the lower foam density, corresponding to the larger voids, provided higher values of effective diffusivity and resulted in shorter drying time. Moreover, the initial foam density affected the morphology and textural properties of dried banana foam mats whilst the drying temperature had no significant effect on those qualities. The extensive porous structure of banana foam at lower densities led to lower values of hardness and crispness.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors express their appreciation to the Thailand Research Fund (TRF) and the Commission on Higher Education for the financial supports.

REFERENCES

1. Matz, S.A. *Snack Food Technology*; The AVI Publishing Company: Westport, 1976.
2. Waananen, K.M.; Litchfield, J.B.; Okos, M.R. Classification of drying models for porous solids. *Drying Technology* **1993**, *11*(1), 1-40.
3. Pinto, L.A.A.; Tobinaga, S. Diffusive model with shrinkage in the thin-layer drying of fish muscles. *Drying Technology* **2006**, *24*, 509-516.
4. Batista, L.M.; da Rosa, C.A.; Pinto, L.A.A. Diffusive model with variable effective diffusivity considering shrinkage in thin layer drying of chitosan. *Journal of Food Engineering* **2007**, *81*, 127-132.
5. Rovedo, C.O.; Suarez, C.; Viollaz, P.E. Drying simulation of a solid slab with three dimensional shrinkage. *Drying Technology* **1995**, *13*(1&2), 371-393.
6. Chemkhi, S.; Zagrouba, F.; Bellagi, A. Modelling and simulation of drying phenomena with rheological behaviour. *Brazilian Journal of Chemical Engineering* **2005**, *22*(2), 153-163.
7. Balaban, M. Effect of volume change in foods on the temperature and moisture content predictions of simultaneous heat and moisture transfer models. *Journal of Food Process Engineering* **1989**, *12*, 67-88.
8. Krokida, M.K.; Kiranoudis, C.T.; Maroulis, Z.B.; Marinos, D. Effect of pretreatment on color of dehydrated products. *Drying Technology* **2000**, *18*(6), 1239-1250.
9. AOAC. *Official Methods of Analysis* (16th ed.); AOAC International: Washington, D.C., 1995.
10. Crank, J. *The Mathematics of Diffusion*; Clarendon Press: Oxford, 1975.

11. Gekas, V.; Lamberg, I. Determination of diffusion coefficients in volume changing systems-application in the case of potato drying. *Journal of Food Engineering* **1991**, *14*, 317-326.
12. Karathanos, V.T.; Villalobos, G.; Saravacos, G.D. Comparison of two methods of estimation of the effective moisture diffusivity from drying data. *Journal of Food Science* **1990**, *55*(1), 218-223.

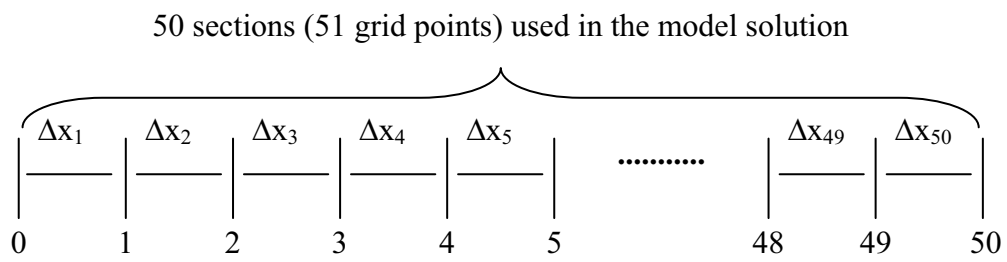
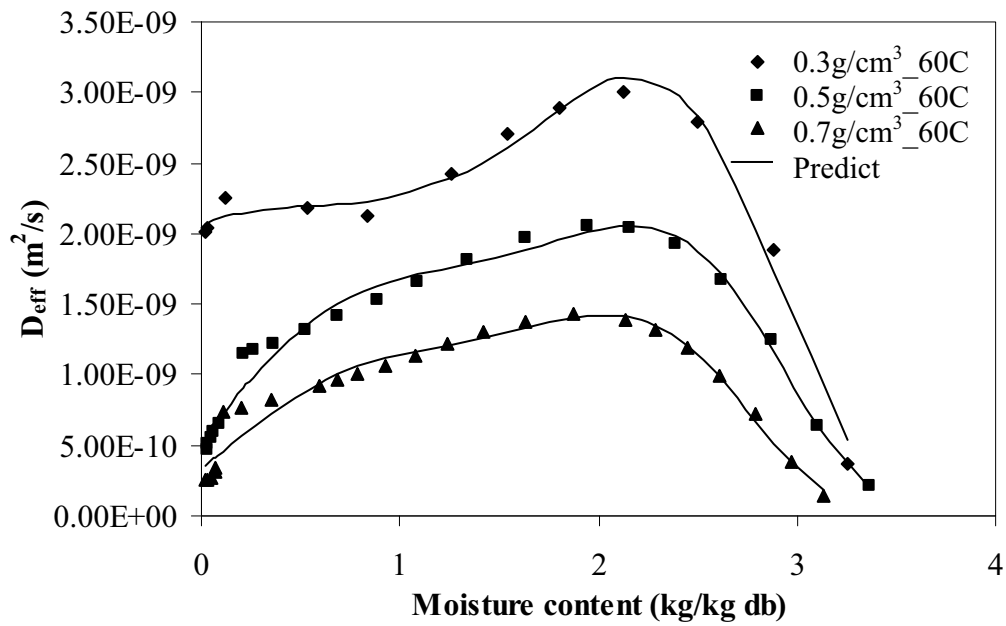
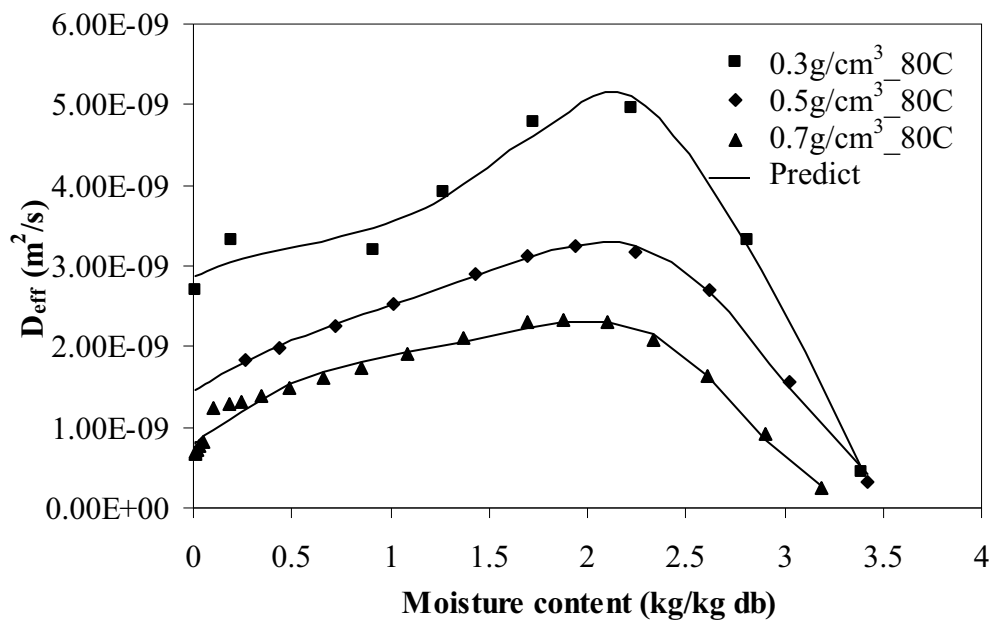


FIG. 1. Finite difference grid points (point 0 is the bottom and point 50 is the surface)



(a)



(b)

FIG. 2. Moisture diffusivity of banana foam mats at different drying conditions

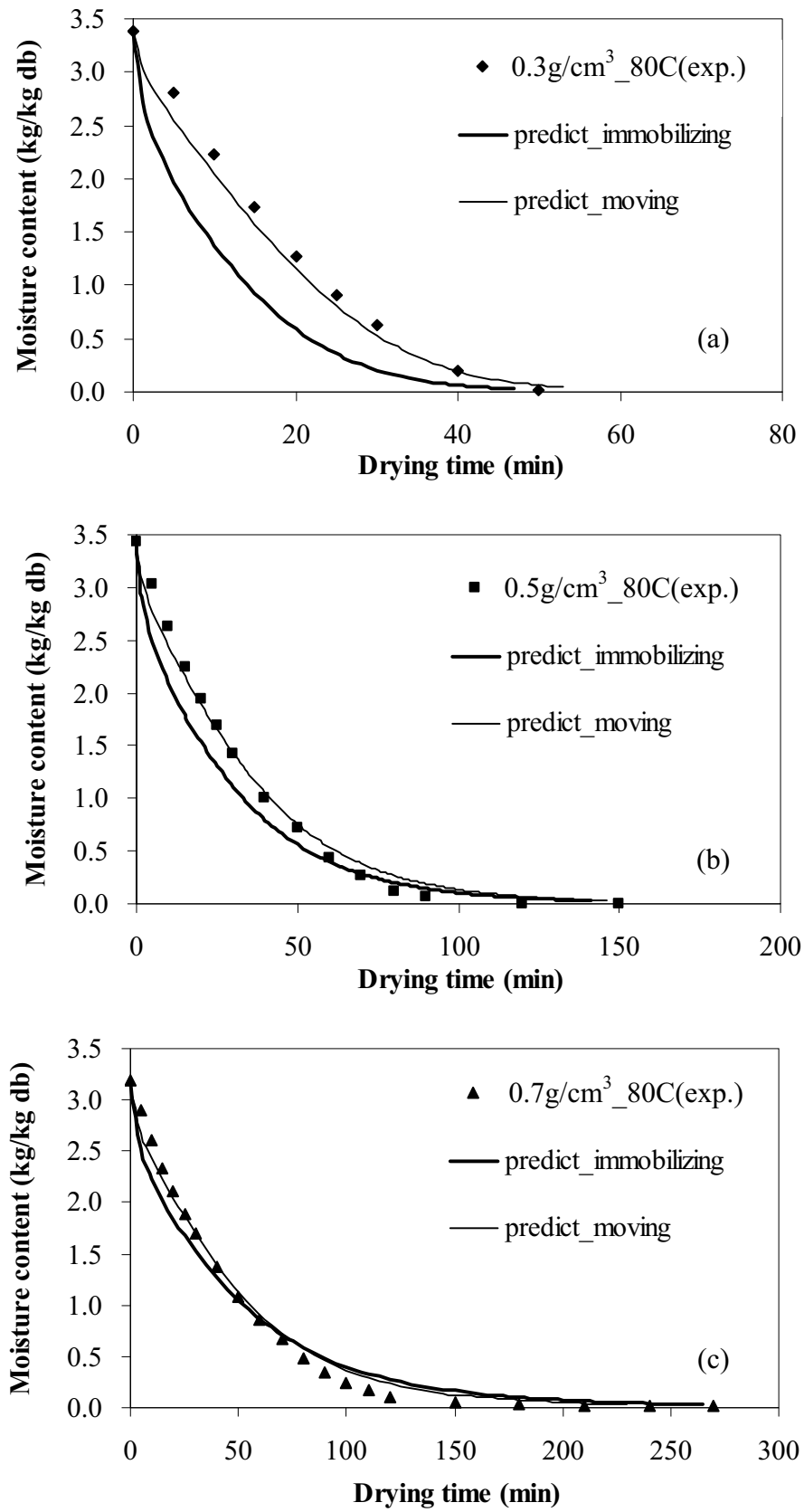


FIG. 3. The comparison between experimental data and predictions of average moisture content of banana foam mats at different initial foam densities

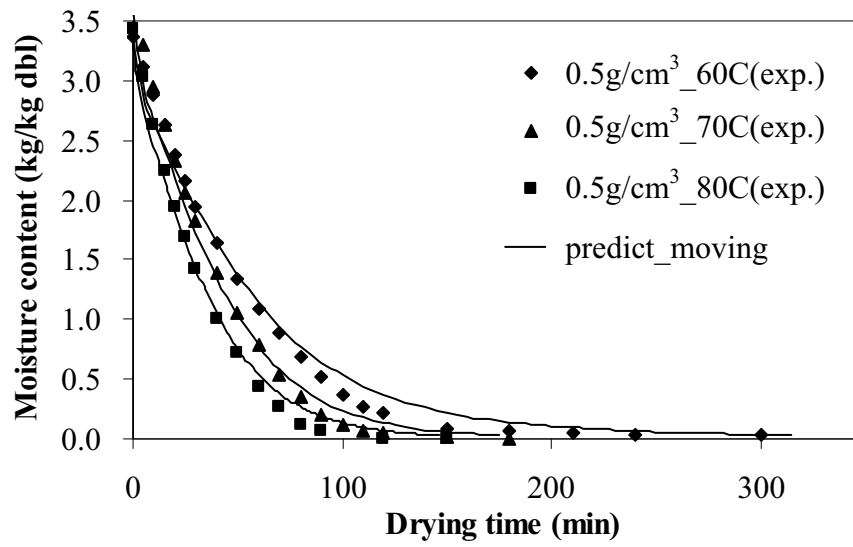


FIG. 4. The comparison between experimental data and predictions of average moisture content of banana foam mats at different drying temperatures

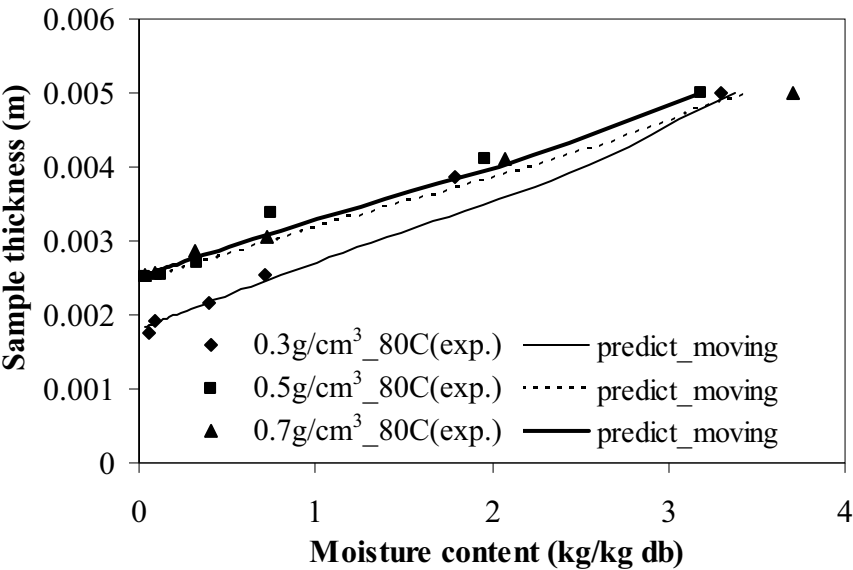
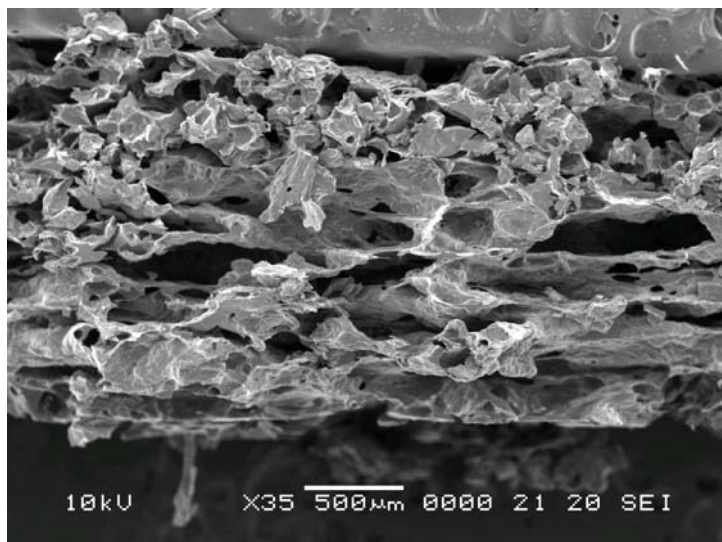
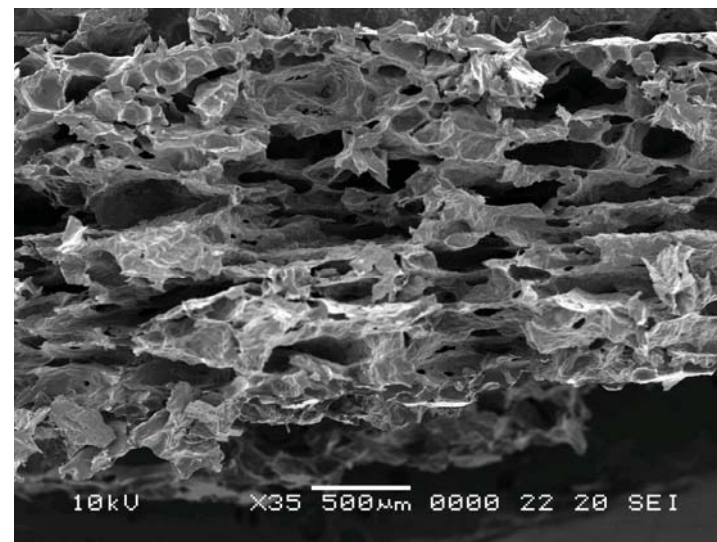


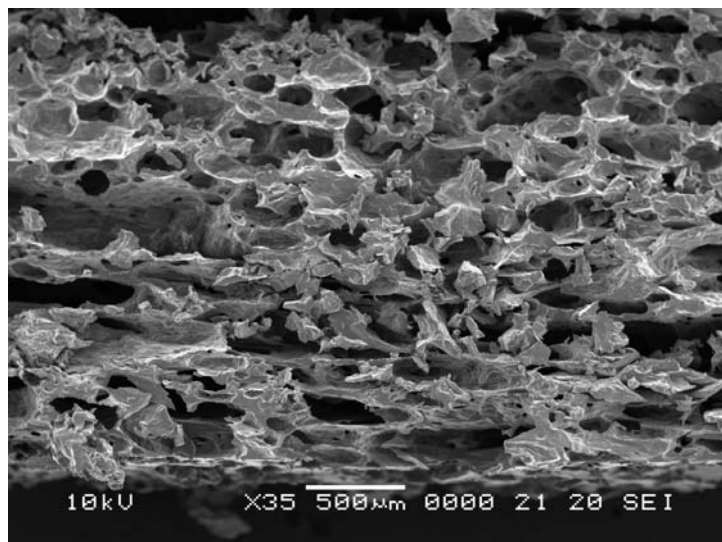
FIG. 5. The comparison between experimental data and predictions of thickness changes of banana foam mats at different drying conditions



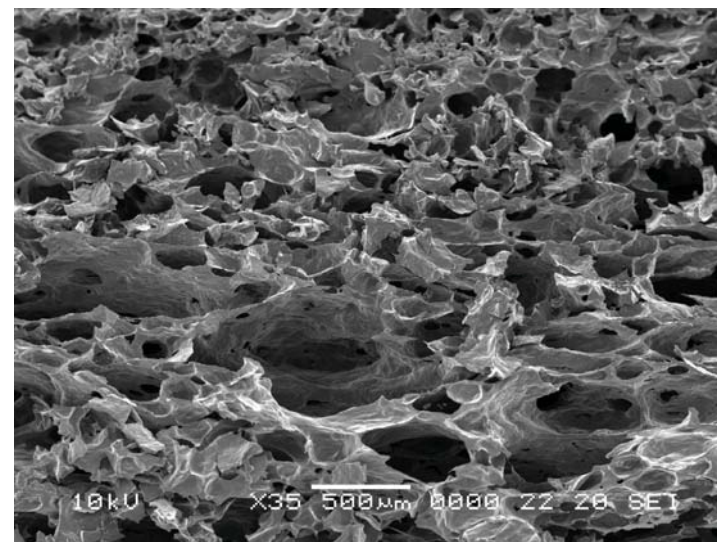
(a) 0.3 g/cm³, 60°C



(b) 0.3 g/cm³, 80°C

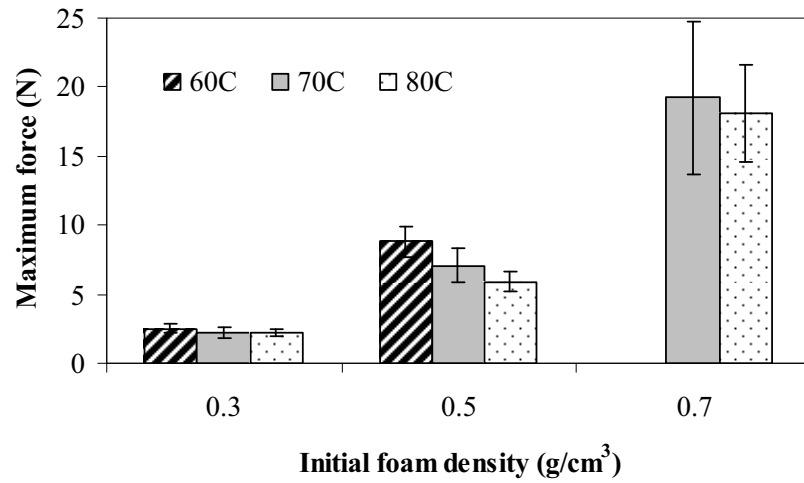


(c) 0.5 g/cm³, 60°C

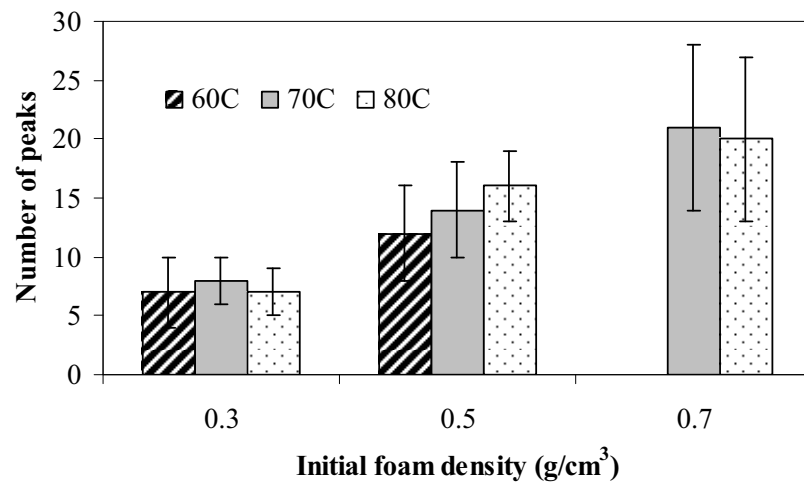


(d) 0.5 g/cm³, 80°C

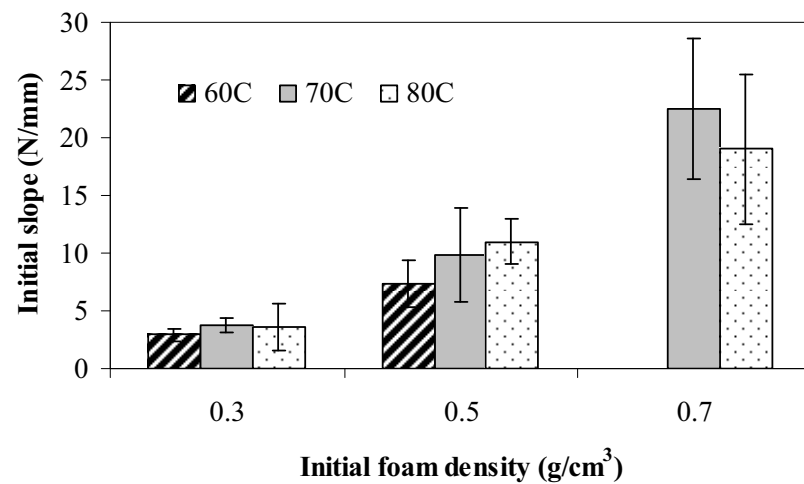
FIG. 6. (a-d) SEM micrographs of dried banana foam mats at different initial foam densities and drying temperatures



(a)



(b)



(c)

FIG. 7. Effects of initial foam densities and drying temperatures on (a) Maximum force, (b) Number of peaks and (c) Initial slope of dried banana foam mat

TABLE 1

The calculated values of a and α_i (Eq. (14)) for various foam densities and drying temperatures

Drying condition		Empirical parameter					
Foam density (g/cm ³)	Temperature (°C)	$a \times 10^{-10}$	α_1	α_2	α_3	α_4	R^2
0.3	60	20.4978	0.3823	-0.750	0.6042	-0.138	0.980
	70	25.4514	0.5247	-1.013	0.7768	-0.177	0.964
	80	28.5214	0.4324	-0.602	0.5060	-0.121	0.983
0.5	60	5.5042	2.8784	-2.8579	1.3158	-0.2218	0.974
	70	12.9837	0.8666	-0.6938	0.3734	-0.0763	0.998
	80	14.5071	1.0528	-0.8794	0.476	-0.099	0.996
0.7	60	3.3549	3.1578	-3.2075	1.5468	-0.2762	0.953
	70	4.4478	3.7392	-4.0588	1.9792	-0.3497	0.945
	80	7.879	2.2188	-2.2754	1.1498	-0.2157	0.973

TABLE 2

The R-square values (R^2) and root mean square error values (RMSE) of predictions of average moisture content by moving and immobilizing boundary methods

Drying condition		R^2		RMSE	
Foam density (g/cm ³)	Drying temperature (°C)	moving	immobilizing	moving	immobilizing
0.3	60	0.98	0.56	0.13	0.63
	70	0.98	0.43	0.14	0.65
	80	0.98	0.49	0.14	0.66
0.5	60	0.99	0.93	0.12	0.28
	70	0.98	0.93	0.14	0.30
	80	0.99	0.90	0.11	0.32
0.7	60	0.98	0.96	0.12	0.19
	70	0.99	0.96	0.12	0.19
	80	0.99	0.96	0.10	0.18

MODELING WITH SHRINKAGE AND QUALITY INVESTIGATION OF BANANA FOAM MAT DRYING

RATTYA THUWAPANICHAYANAN

*School of Energy, Environmental and Materials, King Mongkut's University of
Technology Thonburi, Bangkok, Thailand; email: t_ratiya@yahoo.com*

SOMKIAT PRACHAYAWARAKORN

*Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi,
Bangkok, Thailand.*

SOMCHART SOPONRONNARIT

*School of Energy, Environmental and Materials, King Mongkut's University of
Technology Thonburi, Bangkok, Thailand.*

The diffusion model including shrinkage has been developed for predicting the change of moisture content in banana foam mats during drying. The moving boundary using variable grid and the immobilizing boundary using an alternative frame of reference were used in exploring their capabilities to predict the moisture change. The moisture content of banana foam mats at three foam densities of 0.3, 0.5 and 0.7 g/ml dried at three temperatures of 60, 70 and 80°C and at a superficial air velocity of 0.5 m/s were monitored and validated with the proposed model. The qualities of the final product i.e. texture and microstructure were also investigated. The moving boundary method can predict the average moisture content more accurate than the immobilizing boundary method especially in the case of low density banana foam. The quality determinations have shown that the foam density significantly affected hardness, crispness and morphology of dried banana foam whilst the drying temperature did not influence on those qualities.

1. Introduction

Banana is fast deterioration after harvesting. The production of banana chips is an alternative way to preserve its quality and also to add its value. The combination of foaming and drying is an interesting method to produce the crisp banana chips because the banana foam can be dried rapidly to 4% dry basis, which is a desired value for the crisp product [1].

Banana foam mat initially consists of gas bubbles and aqueous phase. When moisture in banana foam starts vaporizing, porous structure appears. This microstructure plays an important role in the mechanism of internal mass transfer. The moisture can transfer in forms of liquid and vapor. These mechanisms are lumped into an effective diffusivity. When the moisture removes

from porous materials, a pressure unbalancing between the inner and the external of sample is produced, generating stresses that cause shrinkage. In specific case of banana foam, shrinkage of such system is very severe because instability of gas bubbles yields bubble collapse when the foam is a non-rigid state, in addition to stresses-induced shrinkage. This results in a shorter distance of traveling moisture from the inside to the outside. Shrinkage effect should therefore be taken into account in the diffusion model, in order to successfully describe the transport of moisture inside the samples and accurately simulate moisture content and drying time. Shrinkage of banana foam took place in one dimension and it depended only on the foam density in which the samples at low foam density were more shrunk than those at higher foam density [2]. Several solution methods can be used for solving the diffusion model including shrinkage such as immobilizing boundary and moving boundary.

The objective of this work is to evaluate the suitable solution method for solving a diffusion model including shrinkage for banana foam mat. Two solution methods, moving boundary and immobilizing boundary, are compared. The important qualities of the final product, i.e. texture and microstructure are also considered in this work.

2. Experimental Procedure

The banana puree with 5% of fresh egg albumin used as foaming agent was foamed to densities of 0.3, 0.5 and 0.7 g/ml. 5 mm thick banana foam mats placed on a mesh tray, which was covered with aluminum foil, were inserted into the drying chamber. The samples were then dried to about 3% (dry basis) using drying temperatures of 60, 70 and 80°C and a superficial air velocity of 0.5 m/s.

For quality determinations, the texture of dried banana foam mats was examined by a compressive test using a texture analyzer model TA-XT2i (Stable Micro Systems Ltd., UK). The sample was placed on the hollow planar base. The test applied a direct force to the sample using a 5 mm spherical probe at a constant rate of 2 mm/s. Eight samples were tested in each drying condition. The hardness was defined as a maximum force and the crispness were characterized by the slope of the first peak. The dried banana foam mats structure was characterized by SEM (JEOL JSM-5600LV, Tokyo, Japan).

3. Mathematical Model

A Fick's diffusion model including shrinkage was used to describe the transport of moisture inside the banana foam mat. The main assumptions used in the proposed model were that the product shape was an infinite slab; moisture transfer and volume change took place only in the thickness direction and the external resistance to moisture transfer was negligible. The moisture diffusion inside banana foam can be expressed by the following equation:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_v^{\text{eff}} \frac{\partial M}{\partial x} \right), 0 < x < L(t) \quad (1)$$

where D_v^{eff} is the effective moisture diffusivity (m^2/s), L is the sample thickness (m), M is the moisture content (kg/kg d.b.), x is the coordinate along the diffusion path, t is the time (s).

3.1. Solution methods

3.1.1. Moving boundary

50 sections (51 nodes) used in the model solution

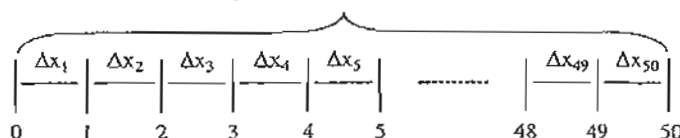


Figure 1. Finite difference nodes (node 0 is the bottom and node 50 is the surface)

Moving boundary is a method in which the domain of integration is not constant. The variable grid central finite difference was used, the distances of each section (Δx_i) are not equal and not constant during the time step of calculation, depending on moisture content in each section. At each time step, the value of moisture at each node was calculated by transforming Eq. (1) into finite difference and the explicit method was used, together with the assumption of equilibrium condition at the surface [3]. After each time step, the distances of each section were adjusted according to the average moisture between nodes assuming that the sample thickness is known as a function of moisture content as shown by the following equation:

$$L/L_0 = a + b(M/M_0) \quad (2)$$

where a is 0.349, 0.496 and 0.503, b is 0.702, 0.521 and 0.507 for 0.3, 0.5 and 0.7 g/ml initial foam densities, respectively [2], L_0 is the thickness of banana foam mat at the beginning (m) and M_0 is the initial moisture content (kg/kg d.b.).

3.1.2. Immobilizing boundary

Immobilizing boundary is a method in which the domain of integration is constant. The final volume of dried banana foam mat was used as the frame of reference in order to fix the domain of integration and the volume of section used as frame of reference remained constant throughout the drying time whilst the actual volume changed with time. The diffusion coefficient in the frame of reference (D_v^{eff}) was related to the actual volume diffusion coefficient (D_v^{eff}) by the following equation [4]:

$$D_r^{\text{eff}} = \frac{D_v^{\text{eff}}}{(V/V_f)^2} \text{ or } D_r^{\text{eff}} = \frac{D_v^{\text{eff}}}{(L/L_f)^2} \quad (3)$$

Since volume change occurred only in the thickness, then V/V_f equals L/L_f , where L_f is the final thickness of dried banana foam mat (m), V and V_f is the actual volume of banana foam mat and the final volume of dried banana foam mat (m^3).

So that the diffusion equation is expressed by:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_r^{\text{eff}} \frac{\partial M}{\partial x} \right), 0 < x < L_f \quad (4)$$

Taking Eq. (3) into Eq. (4), Eq. (5) was obtained:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{D_v^{\text{eff}}}{(L/L_f)^2} \frac{\partial M}{\partial x} \right), 0 < x < L_f \quad (5)$$

L/L_f can be derived from Eq. (2). Since a in Eq. (2) is the y-intercept which equals L_f/L_0 , so that Eq. (2) can be rearranged in form of L/L_f as follows:

$$L/L_f = 1 + \frac{b}{a} (M/M_0) \quad (6)$$

4. Results and Discussion

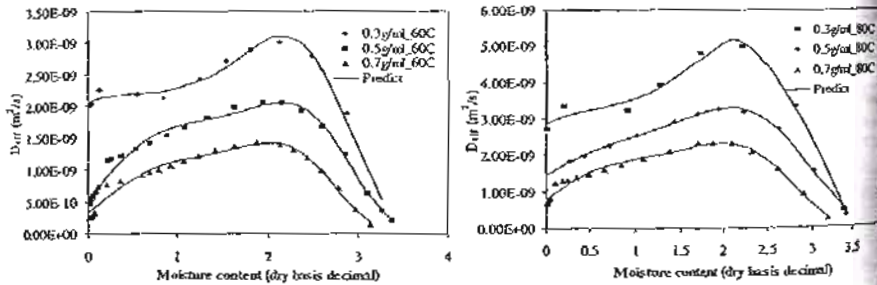


Figure 2. Moisture diffusivity of banana foam mats at different drying condition

The effective moisture diffusivity of banana foam mats, calculated by the method of slopes [5], was higher when the drying temperature increased and the initial foam density decreased as shown in Fig. 2. The relationship between effective moisture diffusivity and moisture content for various initial foam densities and drying temperatures was expressed by the following empirical equation:

$$D_{\text{eff}}(M) = a \exp \left(\sum_{i=1}^4 \alpha_i M^i \right) \quad (7)$$

where a and α_i are empirical parameters which can be obtained by the non-linear regression with the correlation (R^2) in the range of 0.945-0.998.

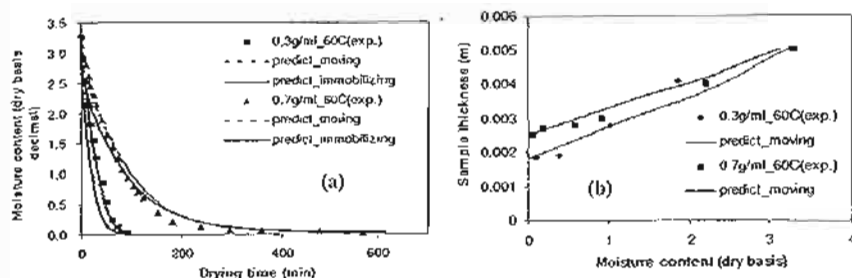


Figure 3. Experimental data and prediction for banana foam mat (a) drying curves (b) sample thickness (prediction by moving boundary method)

Fig. 3 (a) shows drying curves between experimental data and prediction for banana foam mats at initial foam densities of 0.3 and 0.7 g/ml. It can be observed that the accurate predictions of the average moisture content throughout the drying curve with moving boundary method and immobilizing boundary method were different. In the case of low foam density of 0.3 g/ml, the immobilizing boundary method predicted less accurate than the moving boundary method. The root mean square error values (RMSE) were 0.63 and 0.13 for immobilizing and moving boundary methods, respectively. This is because of the main assumption of immobilizing boundary, that is, the sample shrinkage is equal to the volume of water evaporated [6]. However, the shrinkage of the banana foam mat at initial foam density of 0.3 g/ml did not follow this assumption, the sample was more shrunk than the volume of water evaporated (the data was not shown) due to the bubble collapse.

When the immobilizing boundary method was applied to the high foam density of 0.7 g/ml, at which its shrinkage nearly equaled the volume of water evaporated, its prediction was insignificant different from that predicted by the moving boundary method. RMSE values were 0.19 and 0.12 for immobilizing and moving boundary methods, respectively.

The time required for reducing its moisture content to about 3% dry basis was less when dried at lower initial foam density due to the larger voids which were produced at lower foam density as shown in Fig. 4. A larger amount of water can easily transport through the larger voids, resulting in shorter drying time. The drying time was also shorter when the banana foam mats were dried at higher drying temperature due to the higher moisture diffusivity.

Fig. 3 (b) shows the sample thickness as a function of moisture content. The model can predict the sample thickness relatively well as compared to the experimental data. The samples at low foam density were more shrunk than those at higher foam density.

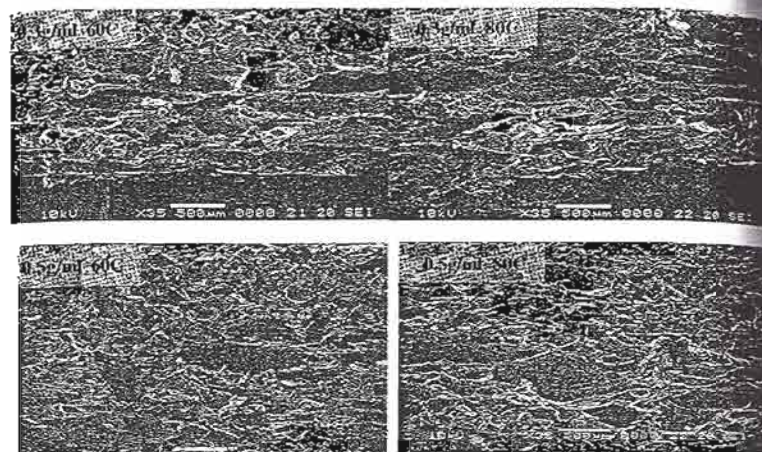


Figure 4. Scanning electron micrographs of dried banana foam mats

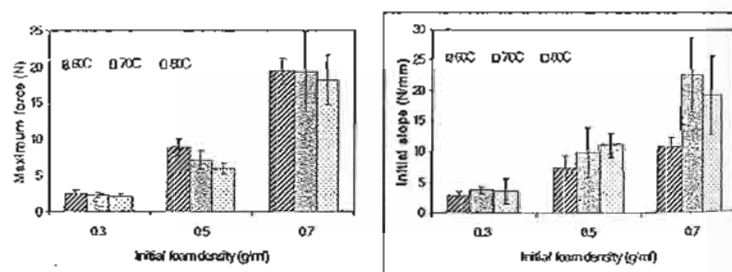


Figure 5. Hardness and crispness of dried banana foam mats at different foam densities and drying temperatures

For the textural properties as shown in Fig. 5, it was found that hardness and crispness are strongly affected by their microstructures. The samples at low initial foam density of 0.3 g/ml, characterizing large number of large pores as shown in Fig. 4, yielded the less dense structure. Hence, hardness was smaller as compared to the samples at higher initial foam density. In terms of crispness, the initial slope was very small for the samples at initial foam density of 0.3 g/ml. This indicated that the products were less crispy as compared to the samples at higher initial foam density since the cell walls of the samples looked smoother and thinner than those at higher initial foam density. However, hardness and crispness of dried banana foam mats were not different amongst the sample dried

at high and low temperature because the morphology of these samples was insignificantly different as shown in Fig. 4. Drying temperature had no significant effect on the morphology of dried banana foam since stresses generated from a pressure unbalancing between the inner and the external of sample dried at intermediate temperature (60°C-80°C) may not be large enough to affect the morphology. This result corresponded to the shrinkage, at which it was not dependent on the drying temperature [2].

5. Conclusions

The diffusion model including shrinkage using moving boundary method can predict the average moisture content more accurate than the immobilizing boundary method. For the quality determinations, the foam density significantly affected textural properties and morphology of dried banana foam mats whilst the drying temperature did not influence on those qualities. The samples at low initial foam density yielded the less dense structure so that the hardness and the crispness were small. Furthermore, it facilitated the transport of moisture, resulting in the higher moisture diffusivity and the shorter drying time.

Acknowledgments

The authors express their appreciation to the Thailand Research Fund (TRF) and the Commission on Higher Education for their financial supports.

References

1. Matz, S.A. *Snack Food Technology*; The Avi Publishing Company, inc.; Westport, Connecticut, 1976.
2. Thuwapanichayanan, R.; Prachayawarakorn, S.; Soponronnarit, S. Drying of foam-mat ripe banana. In *Proceedings of the International Conference on Innovations in Food and Bioprocess Technologies*, Bangkok, Thailand, December 12-14, 2006.
3. Garcia, R.; Leal, F.; Rolz, C. Drying of bananas using microwave and air ovens. *International Journal of Food Science and Technology* 1988, 23, 73-80.
4. Gekas, V.; Lamberg, I. Determination of diffusion coefficients in volume changing systems-application in the case of potato drying. *Journal of Food Engineering* 1991, 14, 317-326.
5. Karathanos, V.T.; Villalobos, G.; Saravacos, G.D. Comparison of two methods of estimation of the effective moisture diffusivity from drying data. *Journal of Food Science* 1990, 55(1), 218-223.
6. Rovedo, C.O.; Suarez, C.; Viollaz, P.E. Drying simulation of a solid slab with three dimensional shrinkage. *Drying Technology* 1995, 13(1&2), 371-393.

DRYING OF FOAM-MAT RIPE BANANA

Ratiya Thuwapanichayanan¹, Somkiat Prachayawarakorn² and Somchart Soponronnarit¹

¹ School of Energy and Materials King Mongkut's University of Technology, Thonburi Bangkok, Thailand

² Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology, Thonburi Bangkok, Thailand

ABSTRACT

The influences of foam densities and drying temperatures on drying rate, diffusivity and qualities of the final product i.e. shrinkage, texture and microstructure were investigated in this work. The banana puree with 5% of egg albumin used as foaming agent was foamed to the densities of 0.3, 0.5 and 0.7 g/ml. 5 mm thick banana foam mats were dried to about 3% (dry basis) at three temperatures of 60, 70 and 80 °C and at a superficial air velocity of 0.5 m/s. The experimental results have shown that the drying rate and the effective moisture diffusivity of banana foam mats were higher when the samples were dried at lower foam density and higher drying temperature. The morphologies of banana foam mats were not different amongst the samples dried at high and low temperature.

Considering shrinkage of banana foam mats, the samples at low foam density were more shrunk than those at higher foam density, probably due to foam collapse. However, the temperatures have no significant effect on shrinkage. Additionally, compressive tests showed that the initial foam density significantly affected the hardness and the crispness of dried banana foam mats while the drying temperature did not influence on the hardness and the crispness.

Keywords: Banana; crispness; foam-mat drying; shrinkage; SEM.

INTRODUCTION

Banana is one of the important tropical fruits. It is fast deterioration after harvesting. Drying is generally performed to preserve its quality and also to overcome the post harvest losses as well as to add value to it. Major problems of the dried banana slices are the unfavorable changes in color and texture due to long drying time. To facilitate the transfer of moisture, banana

was foamed before drying. This process is subject to be investigated in this study to produce the crisp banana chip with high quality.

Foaming is a process that liquid or semi solid is whipped to form stable foams. Foams are stable when low surface tension and high viscosity occurred at the air/aqueous interface (Cherry & Mcwatters, 1981). Many foods, i.e., egg white, beef extract and milk naturally contain soluble proteins which can be converted into stable foam when whipped (Hart et al., 1963). Soluble proteins known as foaming agent are spontaneously adsorbed at the air/aqueous interface. The outcome of proteins adsorption is a reduction in surface tension which improves the foam formation (Prins, 1986). Foam must also retain the open structure during drying. If foam breaks or drains excessively, increase in the drying time and poor product qualities may be occurred (Hart et al., 1963). As mentioned above, banana is therefore necessary to incorporate foaming agent into it with subsequent whipping to produce foams and retain the open structure after drying.

Garcia et al. (1988) reported that ripe banana puree with 1% w/w of dried egg albumin used as foaming agent can be foamed. Its volume was increased about three times. The drying rate for the foam was about twice as compared to the slices. However, no informations have been reported about the qualities of dried samples. Sankat and Castaigne (2004) found that ripe banana can be successfully foamed using soy protein isolate (ICN Biomedicals) as foaming agent and dried in a cross flow dryer.

The objective of this work is to study the influences of foam densities and drying temperatures on drying rate, diffusivity and qualities of the final product, considered in terms of shrinkage, texture and microstructure.

MATERIALS AND METHODS

Preparation of the banana puree and foam

Ripe banana of the Cavendish variety with a mature ripe stage of 5 contained total soluble solids approximately 23-25°Brix were cut into slices and pretreated by dipping in a 1% sodium metabisulphite solution for 2 min and rinsed with distilled water for 30 sec. The banana slices were blended to a puree in a Waring blender for 1 min. The banana puree with 5% of egg albumin used as foaming agent was whipped with the Kitchen Aid Mixer, Model 5K5SS (set at its maximum speed) to the densities of 0.3, 0.5 and 0.7 g/ml.

Foam density was determined by measuring the weight of a fixed volume of the foam. The experiments were done in duplicate.

The initial moisture content of the banana foam was determined by hot air oven at 103°C for 3 hr.

Drying characteristics

Five mm thick banana foam mats placed on a mesh tray which was covered with aluminum foil were inserted into the drying chamber in tray dryer. The samples were then dried to about 3% (dry basis) at three foam densities of 0.3, 0.5 and 0.7 g/ml, three drying temperatures of 60, 70 and 80°C and a superficial air velocity of 0.5 m/s. Moisture loss from the samples was determined by weighing the sample tray outside the drying chamber using an electronic balance (± 0.01 g). The banana moisture contents as a function of time were reported.

Determination of the effective moisture diffusivity

The effective moisture diffusivity at various moisture contents was determined by the method of slopes. The method of slopes is based on the solution of Fick's equation for unsteady state diffusion.

The banana foam mat is assumed to be an infinite slab. Furthermore, one-dimensional moisture movement without volume change and constant moisture diffusivity are assumed. The external resistance to moisture transfer is negligible and the initial moisture distribution at the beginning is uniform throughout the slab. An analytical solution for constant diffusivity can be given by the following equation (Crank, 1975):

$$MR = \frac{M - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D t}{4L^2}\right] \quad (1)$$

where D is the moisture diffusivity (m^2/s), MR is the moisture ratio, M , M_{eq} and M_0 are the average, equilibrium and initial moisture contents (kg/kg d.b.) at time t , respectively. Since the only top surface of the banana foam mats were exposed to hot air, the length, L , in equation (1) is the thickness of the slab.

In the method of slopes, the calculation was based on the ratio of the slopes of the experimental drying curve $(dMR/dt)_{\text{exp}}$ to the slopes of the theoretical curve $(dMR/dFo)_{\text{th}}$ at the same moisture content. The effective moisture diffusivity at a given moisture was estimated from the following equation:

$$D_{\text{eff}} = [(dMR/dt)_{\text{exp}} / (dMR/dFo)_{\text{th}}] L^2 \quad (2)$$

where Fo is the Fourier number, $Fo = Dt/L^2$

During drying, the volume of banana foam mats changed. Although the analytical solution was considered with an assumption that the volume is constant, the solution can incorporate the effect of shrinkage as recommended by Crank (1975) and Gekas and Lamberg (1991). To incorporate the effect of shrinkage, the following equation was applied:

$$D_{\text{ref}} = D_{\text{eff}} \left[\frac{\text{Initial volume}}{\text{Actual volume}} \right]^{2/n} \quad (3)$$

where D_{ref} is the diffusivity included shrinkage, n is the number of the directions of volume change taken as 1 for one-dimensional volume change.

Quality determination

Shrinkage

Four banana foam mats taken at different drying time were used for volume determination. The volume was determined by the volumetric displacement method using glass beads with a diameter in the range of 0.106-0.212 mm as a replacement medium (Hwang & Hayakawa, 1980). In each measurement, one piece was used. Four measurements were carried out at different drying time. The mean values of four samples were reported.

The volume ratio was used to describe the shrinkage using the equation as follows:

$$\text{Volumetric Shrinkage} = V/V_0 \quad (4)$$

where V is the volume of the sample after drying (m^3) and V_0 is the initial volume of the sample before drying (m^3).

Texture analysis

The compressive test was used to evaluate the texture of dried banana using a texture analyzer model TA-XT2i (Stable Micro Systems Ltd., USA). The sample was placed on the hollow planar base. The test applied a direct force to the sample using a 5 mm spherical probe at a constant rate of 2 mm/s. The hardness and the crispness are defined as a maximum force and number of peaks, respectively. Eight samples were tested and average values of hardness and crispness were reported.

Microstructure

SEM (JEOL JSM-5600LV, Tokyo, Japan) was used to study the dried banana foam mat structure. The dried banana foam mats were cut with a blade and then glued on the metal stubs and coated with gold. SEM micrographs were taken at an accelerating voltage of 10 kV and a magnification of 35X.

Statistical analysis

The data were analyzed using the analysis of variance (ANOVA). The Duncan's test was used to establish the multiple comparisons of mean values. Mean values were considered at 95% significant level ($p < 0.05$).

RESULTS AND DISCUSSIONS

Foam density

During the whipping process, air is brought into the liquid and it will be encapsulated into bubbles by the liquid. This made the decreased of foam density as the whipping time increased. From Figure 1, it is shown that the banana puree is foamed to densities of 0.7, 0.5 and 0.3 g/ml after 5, 9 and 20 min of whipping, respectively. Beyond 20 min of whipping, the foam density increases rapidly. This is caused by the collapse of some foams. Too long of mixing encourages the heat accumulation inside the banana foam which results in decrease in the viscosity of foam and the subsequent high surface tension. In this circumstance, foams are unstable (Cherry & Mcwatters, 1981).

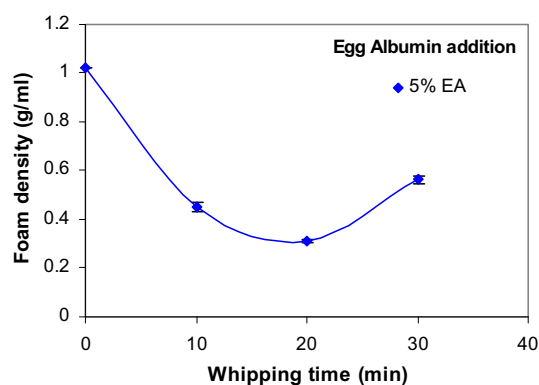


Figure 1. Foam density as a function of whipping time
(Fresh egg albumin, EA, concentration of 5%)

The pattern of the banana foam density curves during whipping is similar to other foods which are high in viscosity such as tomato paste foam. Labelle (1966) reported that tomato paste with 1% of myverol used as foaming agent was foam to minimum density after 4 min of whipping. The increase in foam density as whipping was noted beyond 4 min. For the foods with low viscosity such as apple and orange juices, the foam density decreased during the whole whipping process (Hart et al., 1963). This is caused by the controlling of the whipping temperature. Low viscosity foods should be whipped at the lowest temperature at which these foods are sufficiently fluid therefore heat could not be accumulated inside these foams. Foams are still stable.

Drying Characteristic and drying rate

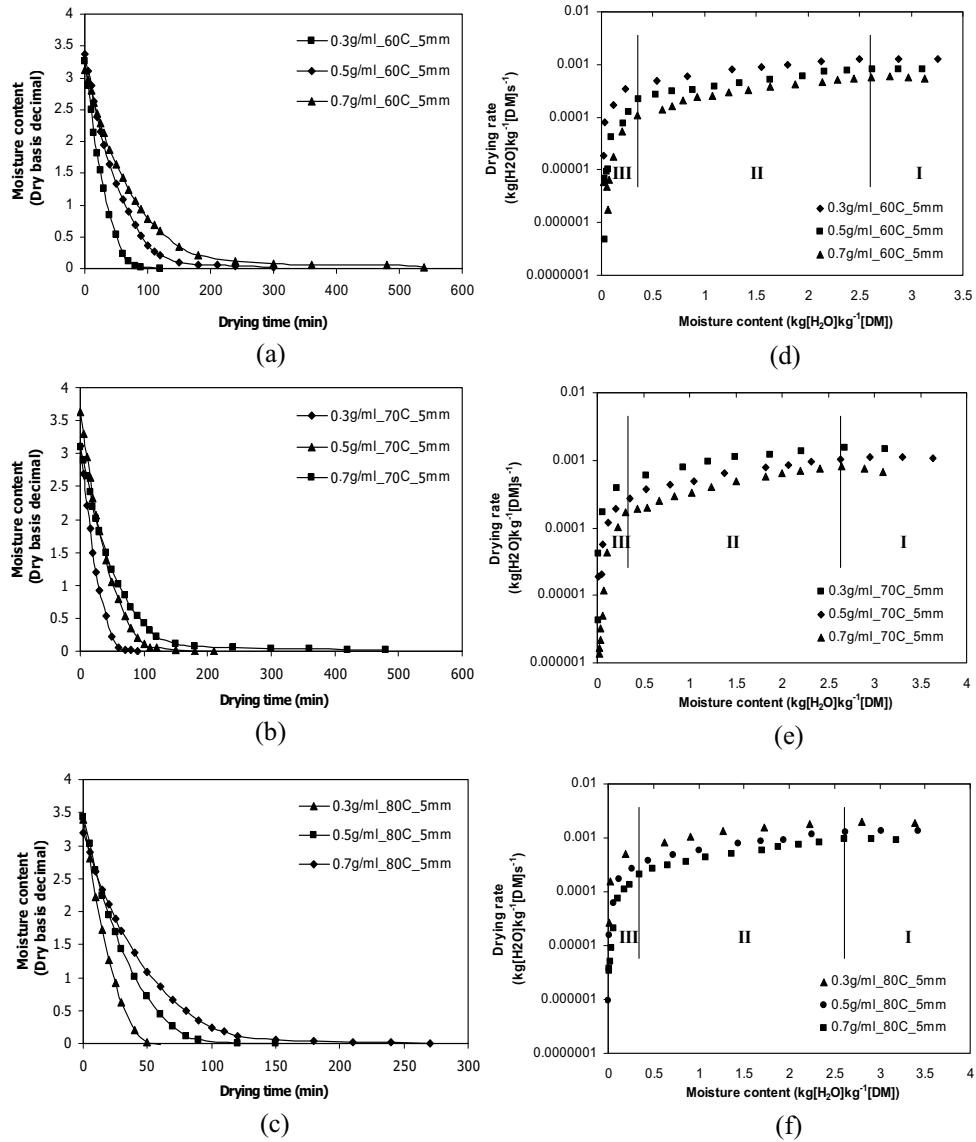


Figure 2. Drying curves (a-c) and drying rates (d-f) of banana foam mats at different initial foam densities and drying temperatures

The drying rate profiles (Figure 2 (d-f)) show the presence of a heat up period at the early stage of drying (I) followed by the falling rate drying period. Two falling rate drying periods were observed according to the change in the drying curve. First falling rate drying period (II) occurred between the moisture content of 0.35-2.6 kgH₂O/kgDM. Below 0.35 kgH₂O/kgDM, the drying rate was in the second falling rate drying period (III).

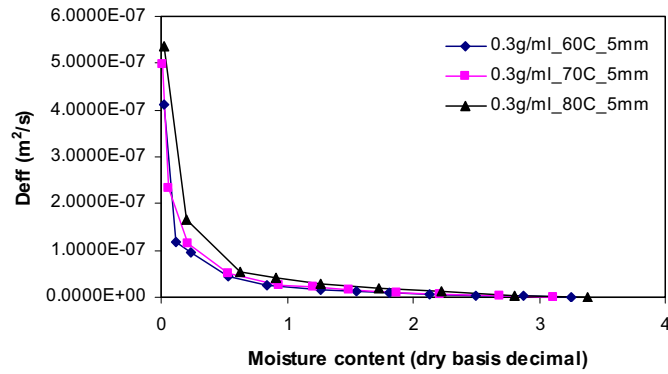
As shown in Figure 2 (d-f), the low foam density results in higher drying rate. This is due to the characteristics of porous structure which was produced at low foam density. This can be seen in Figure 6. In addition, the large bubbles can also retain their open structure during drying. The results corresponded to the images from scanning electron microscope (SEM) which show large voids for banana foam mats dried at low foam density. The large voids of banana foam mats facilitated the transfer of moisture inside the samples, resulting in enhancing the drying rate.

The drying rate of banana foam mats was higher when dried at higher drying temperature due to the higher moisture diffusivity as shown in Figure 3 (a-b). When the temperature rose from 60°C to 80°C, the drying time decreased by 60, 150 and 270 min for 0.3, 0.5 and 0.7 g/ml foam density, respectively.

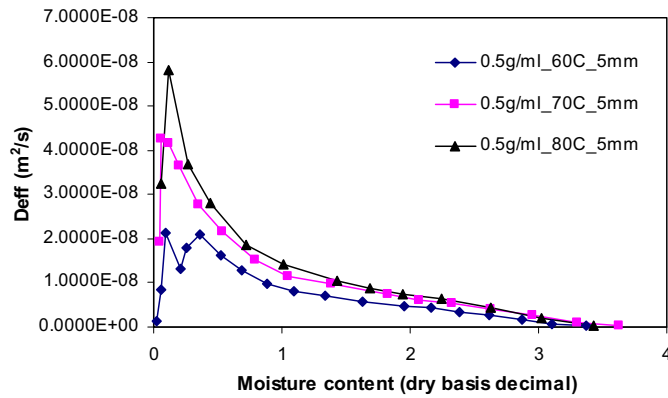
Moisture diffusivity

The water in the porous banana foam mats migrates in forms of liquid and gas. However, the water transfer in the gaseous phase by vapor diffusion would predominate. Therefore, the effective moisture diffusivity increased with decreasing moisture content as shown in Figure 3 (a-b). This observation was similar to the drying of porous sponge cakes Roca (2006).

As shown in Figure 3, the effective moisture diffusivity of banana foam mats were higher when the drying temperature increased and the foam density decreased.



(a)



(b)

Figure 3. Moisture diffusivity of banana foam mats at different drying temperatures

Shrinkage

In typical foods, once the moisture remove from porous sample through the pores, the capillary pressure is occurred that cause its deformation and shrinkage. The capillary pressure grows with decreasing moisture content (Sadoc & Rivier, 1999). This led to the sample volume decrease as the moisture content decrease as shown in Figure 4. Moreover, the pore size has an effect on the capillary pressure, high capillary force for the narrower pores. For

higher foam density, the narrow pores were obtained that the shrinkage is caused by the capillary pressure. At lower foam density, the large pores were produced that yield lower capillary force and smaller effect on the shrinkage. However, the higher rate of shrinkage at lower foam density was found since the weaker strength of very high porous materials, might not prevent the collapse of sample structure during dehydration.

The shrinkage was not different at the foam density of 0.5 and 0.7 g/ml. Moreover, the drying temperatures have no significant effect on shrinkage under the same foam density.

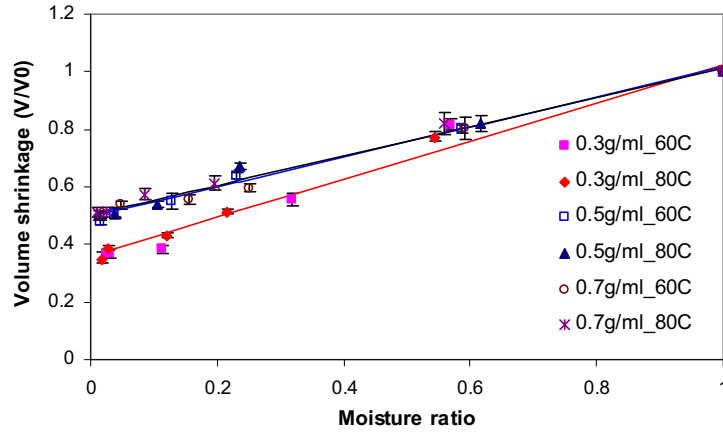


Figure 4. Volume shrinkage of banana foam mats at different initial foam densities and drying temperatures

As shown in Figure 4, shrinkage of banana foam mats was decreased in a linear form with moisture ratio, this indicated that the changes in volume were proportional to the changes in moisture content. Thus, the volume ratio can be expressed by:

$$V/V_0 = a + bM/M_0 \quad (5)$$

The values of parameters a and b were obtained for each foam density by linear regression, and are given in Table 1.

Table 1. The values of a and b for various foam densities

$\rho_f = 0.3 \text{ g/m}$			$\rho_f = 0.5 \text{ g/m}$			$\rho_f = 0.7 \text{ g/m}$		
a	b	R^2	a	b	R^2	a	b	R^2
0.349	0.702	0.977	0.496	0.521	0.983	0.503	0.507	0.984

Texture

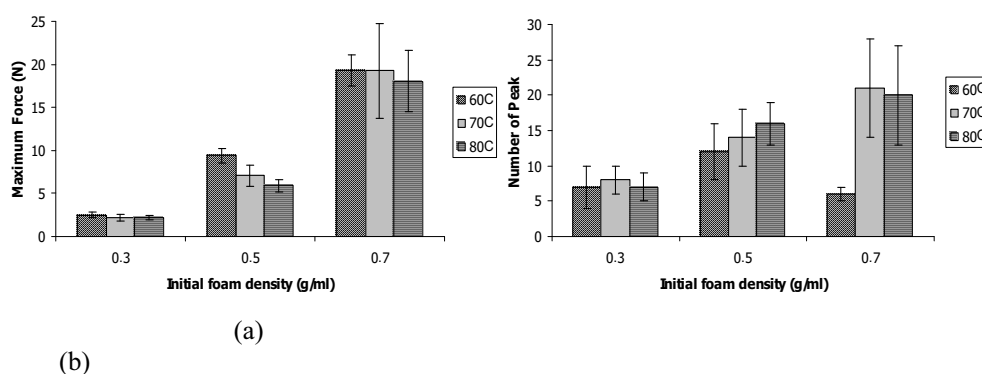


Figure 5. (a) Hardness and (b) Crispness of dried banana foam mats at different initial foam densities and drying temperatures

The texture of banana foam mats were evaluated by a compressive test. The maximum force of a rupture test was used to describe the hardness and the number of peaks of the force/ deformation curve was used to describe the crispness. The results are shown in Figure 5. It was found that the initial foam density significantly affected the hardness and the crispness of dried banana foam mats while the drying temperature did not influence on the hardness and the crispness. The lower initial foam density and the larger voids led to less dense structure. Both factors provided less hardness and crisper when compared to dried banana foam mats at high initial foam density.

SEM micrographs

SEM micrographs of banana foam mats containing 5% of egg albumin when dried at various densities and drying temperatures are shown in Figure 6. This figure shows that the decrease in foam density gave the larger voids. The

structure became less dense. However, the porous structure was no difference amongst the sample dried at high and low temperature.

It can also be seen from this figure that there is a wide range of pore sizes inside the samples. For samples dried at a foam density of 0.3 g/ml, the smallest diameter of pore is about 10 μm while the diameter of the biggest pore is about 450 μm . However, there are no large voids with diameters above 400 μm inside the samples dried at higher foam density.

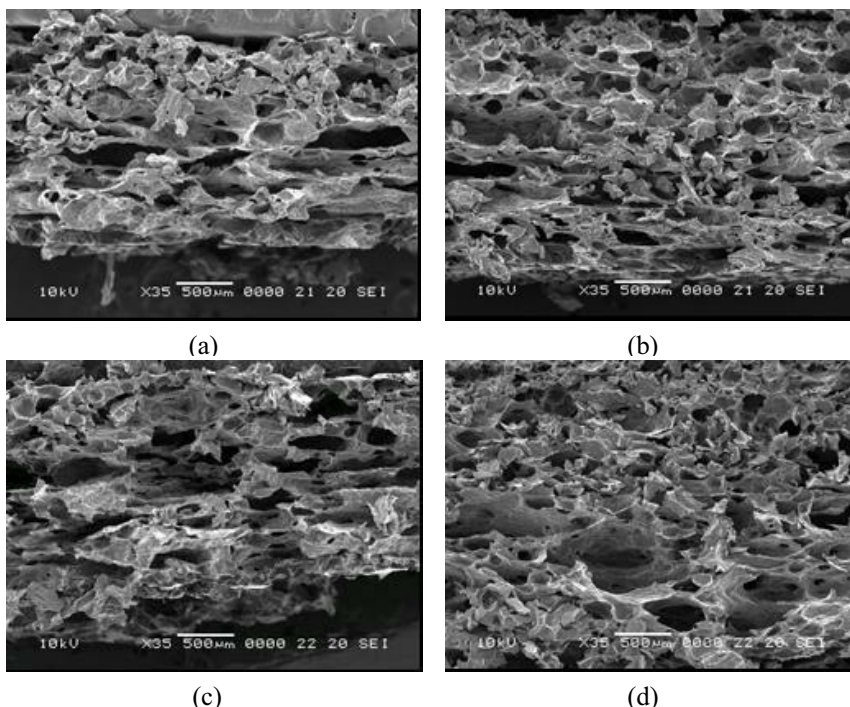


Figure 6. Scanning electron micrographs of dried banana foam mats.
 (a) Initial foam density 0.3 g/ml, drying temperature 60 °C
 (b) Initial foam density 0.5 g/ml, drying temperature 60 °C
 (c) Initial foam density 0.3 g/ml, drying temperature 80 °C
 (d) Initial foam density 0.5 g/ml, drying temperature 80 °C

CONCLUSIONS

Ripe banana was foamed to densities of 0.3, 0.5 and 0.7 g/ml by adding 5% fresh egg albumin as foaming agent. The lower foam density resulted in the larger voids and less dense structure of dried banana foam mat as manifested by scanning electron microscope. This microstructure facilitated the transport of moisture and yielded higher moisture diffusivity with the decrease in moisture content. It also provided the crispy product as characterized by less hardness and small number of peak. The sample was more shrunk at lower foam density of 0.5 g/ml, beyond which the shrinkage of sample was insignificantly different. The drying temperature had no significant effect on textural properties, morphology and shrinkage, except for drying characteristics which showed higher drying rate at higher temperature.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors express their appreciation to the Thailand Research Fund (TRF) and the Commission on Higher Education for the financial support.

REFERENCES

- Cherry, J.P. and Mcwatters, K.H. 1981. Protein Functionality in Foods. American Chemistry Society, 149-175.
- Crank, J. 1975. The Mathematics of Diffusion. Oxford: Clarendon Press.
- Garcia, R., Leal, F. and Rolz, C. 1988. Drying of bananas using microwave and air ovens. International Journal of Food Science and Technology, 23, 78-80.
- Gekas, V. and Lamberg, I. 1991. Determination of diffusion coefficients in volume changing systems-application in the case of potato drying. Journal of Food Engineering, 14, 317-326.
- Hart, M.R., Graham, R.P., Ginnette, L.F. and Morgan, A.I. 1963. Foams for foam-mat drying. Food Technology, 17, 1302-1304.
- Hwang, M.P. and Hayakawa, K.I. 1980. Bulk densities of cookies undergoing commercial baking processes. Journal of Food Science, 45, 1400-1402.
- Labelle, R.L. 1966. Characterization of foams for foam-mat drying. Food Technology, 20(8), 89-94.
- Prins, A. 1986. Principals of foam stability. In E. Dickinson, & G. Stainsby (Eds.), Advances in food emulsions and foams. New York: Elsevier.

- Roca, E., Guillard, V., Guilbert, S. and Gontard, N. 2006. Moisture migration in a cereal composite food at high water activity: Effects of initial porosity and fat content. *Journal of Cereal Science*, 43, 144-151.
- Sadoc, J.F. and Rivier, N. 1999. *Foams and Emulsions*. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Sankat, C.K. and Castaigne, F. 2004. Foaming and drying behaviour of ripe bananas. *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie*, 37, 517-525.

ผลของการพรีทรีทเมนต์ที่มีต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งและคุณภาพของกล้วยแผ่น

Effect of Pretreatment on Drying Kinetics and Quality of Banana Slices

นภาพรณ พลายนโ¹, สมเกียรติ ปรัชญารากร², วารุณี เตีย³, สมชาติ โสภณรณฤทธิ์⁴
Napaporn Plytho¹, Somkiat Prachayawarakorn², Warunee Tia³ and Somchart Soponronnarit⁴

ABSTRACT

Banana when exposed to the air is very sensitive to the enzymatic browning reaction. This browning can be limited by physical or chemical treatments. The objective of this research is to study the effect of pretreatment methods i.e. blanching, dipping in sodium metabisulfite solution and ascorbic solution, on drying kinetics and quality attributes of dried banana slices. Cavendish with a mature ripe stage of 5 containing 20-25% brix was peeled and sliced into approximately 3 mm thickness with the initial moisture content, before pretreatment, 250-300 %d.b. The treated banana samples were dried to the final moisture content was 4 %d.b. using the temperatures of 110 – 140°C. The experiment revealed that the sulfite treated slices dried at lower temperature of 120°C had the lowest drying rate, as compared to the other treatments. At elevated temperature, on the contrary, drying rate of the blanched slices became lowest. Crust formation resulted in relatively less shrinkage of banana slices dried at high temperature than that dried at the low temperature. The blanched sample after drying was the thinnest size. The pretreatment and drying temperature were insignificantly affected on the hardness and number of peaks ($p < 0.05$). To avoid the brown pigment formation, two-stage drying, high drying temperature at the first stage followed with low temperature drying, should be applied.

Key words: Banana slices, Enzymatic browning reaction, Pretreatment, Quality

บทคัดย่อ

กล้วยเมื่อสัมผัสอากาศจะเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ได้อย่างรวดเร็ว ปฏิกิริยานี้สามารถควบคุมได้ด้วยการพรีทรีทเมนต์ทางกายภาพและทางเคมี วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือเพื่อการศึกษาผลของการพรีทรีทเมนต์ เช่น การลวก การแช่ในสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์และการแช่ในสารละลายกรดแอสคอร์บิกที่มีต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งและคุณภาพของกล้วยแผ่นโดยใช้กล้วยหอมทองระยะสุกที่ 5 ความหวาน 20-25 %brix หั่นตามขวางหนา 3 มม ความชื้นเริ่มต้นของกล้วยแผ่นก่อนการพรีทรีทเมนต์มีค่า 250-300 %d.b. ทำการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 110-140 °C จนได้ความชื้นสุดท้ายประมาณ 4 %d.b. จากการทดลองพบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำกว่า 120°C กล้วยแผ่นที่พรีทรีทเมนต์ด้วยสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์มีอัตราการอบแห้งต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอื่น และการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงขึ้นกล้วยแผ่นที่พรีทรีทเมนต์ด้วยการลวกมีอัตราการอบแห้งต่ำที่สุด กล้วยแผ่นที่อบแห้งด้วยอุณหภูมิสูงเกิดการหดตัวน้อยกว่าที่อุณหภูมิต่ำ กล้วยแผ่นที่ผ่านการลวกหลังการอบแห้งมีความบางมากที่สุด การพรีทรีทเมนต์และอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งส่งผลต่อความแข็งและจำนวนยอดอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงการเกิดสีน้ำตาลสามารถใช่วิธีการอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอนโดยช่วงแรกอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูงแล้วตามด้วยการอบแห้งด้วยอุณหภูมิต่ำในช่วงที่สอง

คำสำคัญ : กล้วยแผ่น, การพรีทรีทเมนต์, คุณภาพ, ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์

¹นักศึกษา ²รองศาสตราจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ³รองศาสตราจารย์ ⁴ศาสตราจารย์ คณะพลังงานและวัสดุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 91 ถ.ประชาธิปไตย แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

¹Graduated student, ²Associate Professor, Faculty of Engineering, ³Assistant Professor, ⁴Professor, School of Energy and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 91 Prachautid, Tungkru, Bangkok 10140

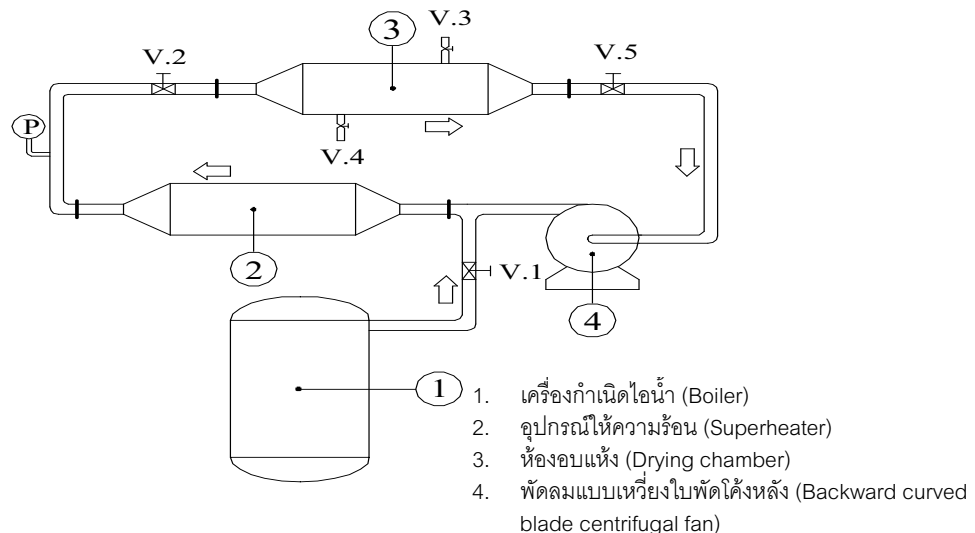
คำนำ

กล้วยเป็นพืชที่เน่าเสียได้ง่ายจึงควรนำกล้วยมาแปรรูปเพื่อให้สามารถเก็บรักษาได้นานขึ้นนอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับกล้วยได้อีกด้วย การแปรรูปกล้วยที่สำคัญได้แก่ การทำเป็นอาหารเหลวหรือพิวรี (puree) กล้วยอบ กล้วยตาก กล้วยฉาบ กล้วยกวนและกล้วยแผ่น กล้วยแผ่นที่มีขายตามท้องตลาดในปัจจุบันนี้นิยมใช้กล้วยดิบมาทำการแปรรูปโดยการทอดในน้ำมัน กล้วยแผ่นที่ได้จะไม่มีความหอมและรสหวานของกล้วย มักจะมีสีเข้ม สีไม่สม่ำเสมอ และเมื่อเก็บไว้นาน ๆ กล้วยแผ่นอาจเกิดกลิ่นเหม็นเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันกับออกซิเจน ซึ่งสามารถป้องกันการเกิดกลิ่นเหม็นของกล้วยแผ่นได้ด้วยการเปลี่ยนวิธีการแปรรูปเป็นการอบแห้งและเนื่องจากกล้วยเป็นผลไม้ที่ไวต่อปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ซึ่งปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเนื้อเยื่อสัมผัสกับอากาศ ปฏิกิริยานี้สามารถควบคุมหรือยับยั้งได้ด้วยการพรีทรีทเมนต์ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น การให้ความร้อนเพื่อยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ PPO (Martinez และ Whitaker, 1995) การลวกด้วยน้ำร้อนหรือน้ำ (Levi และคณะ, 1980 , Beveridge และ Weintraub , 1995) การใช้สารเคมีต่างๆ เช่น กรดซิตริก กรดแอสคอร์บิก อิทธิทธิก พุ่มาริกเพื่อปรับ pH ให้เป็น 4 หรือต่ำกว่า การใช้สารประกอบซัลไฟต์ (Demirel และ Turhan , 2003 , Torsresakul และ Siriwongwilaichat , 1997, Chan และ Cavaletto, 1978) การพรีทรีทเมนต์ที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมแปรรูปผักและผลไม้คือการใช้สารประกอบซัลไฟต์ แต่การบริโภคสารประกอบซัลไฟต์ในปริมาณที่มากเกินไปก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้บริโภคจึงควรที่จะหลีกเลี่ยงการใช้สารนี้ จากงานวิจัยมากมายที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการควบคุมหรือยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ด้วยการพรีทรีทเมนต์ก่อนการอบแห้ง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการพรีทรีทเมนต์โดยการลวก การแช่ในสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ และการแช่ในสารละลายกรดแอสคอร์บิกที่มีต่ออัตราการอบแห้งและคุณภาพของกล้วยแผ่น เช่น สี การหดตัว และความกรอบหลังการอบแห้ง เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาการแปรรูปผลิตภัณฑ์ในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

1. อุปกรณ์การทดลอง

การอบแห้งด้วยอากาศร้อนในการทดลองใช้เครื่องอบแห้งแบบไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่เป็นห้องอบแห้งแบบวงวด ซึ่งสามารถอบแห้งได้ทั้งอากาศร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่ง โดยลักษณะของระบบเครื่องอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง มีอุปกรณ์หลักแสดงไว้ดังรูปที่ 1 ดังนี้



รูปที่ 1 ระบบเครื่องอบแห้งแบบไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

เครื่องกำเนิดไอน้ำ (boiler) เพื่อผลิตไอน้ำความดันสูงกว่าบรรยากาศเล็กน้อย อุปกรณ์ให้ความร้อน (superheater) เพื่อทำให้ไอน้ำตัวกลายเป็นไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีขนาด 13.5 kW และควบคุมอุณหภูมิด้วยเครื่องควบคุมแบบ PID มีค่าความถูกต้อง $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ห้องอบแห้งแบบวงวด (Drying chamber) ขนาด $30 \times 30 \times 10 \text{ cm}^3$ พัดลม (Backward curved blade centrifugal fan) เป็นแบบแรงเหวี่ยงใบพัดโค้งหลัง อัตราการไหลของตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้งควบคุมโดยการปรับความเร็วรอบของพัดลมและอุปกรณ์อื่นๆ เช่น วาล์วควบคุมและมาตรวัดความดัน ในการอบแห้งจะทำการปิดวาล์วตัวที่ 1 (V.1) เพื่อใช้อากาศร้อน

สำหรับอบแห้งกล้วยแผ่น การทำงานของระบบเริ่มต้นด้วยการปล่อยอากาศร้อนไหลเวียนภายในระบบจนกระทั่งส่วนต่าง ๆ ของระบบอบแห้งมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ต้องการทำการอบแห้ง อากาศร้อนจะไหลผ่านห้องอบแห้งในแนวขนานกับวัสดุด้วยความเร็ว 0.87 m/s และทำการวัดอุณหภูมิภายในระบบที่บริเวณทางเข้าห้องอบแห้งโดยใช้ Thermocouple Type K ต่อเข้ากับเครื่องวัดอุณหภูมิ Yokogawa รุ่น 437012 μR 1800 Recorder มีความถูกต้อง $\pm 1.5^{\circ}C$ และการชั่งน้ำหนักกล้วยแผ่นจะใช้เครื่องชั่ง Sartorius รุ่น CP 3202 S มีความถูกต้อง ± 0.01 กรัม

2.การเตรียมวัสดุ

กล้วยหอมทองระยะสุกที่ 5 (CSIRO,1972) ซึ่งพิจารณาได้จากสีของเปลือกเป็นสีเหลืองแต่ปลายยังเป็นสีเขียว โดยความหวานของเนื้อกล้วยมีค่าประมาณ 23 – 25 %brix ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 25 mm ความชื้นเริ่มต้นของกล้วยแผ่นก่อนการพรีทรีตเมนต์ประมาณ 250-300 %d.b. ปอกเปลือกและหั่นตามขวางด้วยเครื่องหั่นกำหนดความหนาของชิ้นตัวอย่างมี 3 mm แบ่งกล้วยแผ่นที่ได้เป็น 4 กลุ่มดังนี้ กลุ่มที่ 1 ไม่พรีทรีตเมนต์ กลุ่มที่ 2 นำมาลวกด้วยน้ำร้อนนาน 5 นาที (Levi และคณะ,1980) กลุ่มที่ 3 แช่ในสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ความเข้มข้น 1% (w/w) นาน 2 นาที และกลุ่มที่ 4 แช่ในสารละลายกรดแอสคอร์บิกความเข้มข้น 0.1% (w/w) นาน 1 นาที (Demirel และ Turhan ,2003) หลังจากนั้นนำตัวอย่างของแต่ละกลุ่มมาล้างด้วยน้ำกลั่นนาน 30 วินาที ชับน้ำให้แห้งทิ้งไว้ 5 นาทีแล้วนำไปจัดเรียงบนตะแกรงที่รองด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์ก่อนเข้าเครื่องอบแห้ง (ห่าน้ำหนักแห้งของกล้วยแผ่นแต่ละกลุ่มก่อนการอบแห้งโดยนำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ $103^{\circ}C$ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง)

3.วิธีการทดลอง

ทำการอบแห้งกล้วยแผ่นที่ผ่านการพรีทรีตเมนต์ดังที่ได้กล่าวมาแล้วด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 110, 120, 130 และ $140^{\circ}C$ โดยชั่งน้ำหนักกล้วยแผ่นทุก ๆ 5 นาที จนกระทั่งเหลือความชื้นสุดท้าย 4 % d.b. หลังจากนั้นนำผลิตภัณฑ์อบแห้งที่ได้ไปทดสอบคุณภาพในด้านสี การหดตัวและเนื้อสัมผัส

4.การทดสอบคุณภาพด้านสีของผลิตภัณฑ์

นำตัวอย่างหลังอบแห้งมาบดให้เป็นผงแล้ววัดสีด้วยเครื่องวัดสีอาหาร MINOLTA รุ่น CR-300 โดยวัดค่าสีของกล้วยแผ่นในเทอมของตัวแปร L, a และ b หรือค่าสีระบบ Hunter Lab โดยค่า L (lightness Parameter) แสดงค่าความสว่าง ค่า a (Redness Parameter) แสดงค่าสีแดงหรือสีแดง และค่า b (Yellowness Parameter) แสดงค่าสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน ซึ่งทำการสอบเทียบ (Calibrate) เครื่องวัดสีอาหารก่อนทำการวัดสีของกล้วยแผ่นหลังอบแห้งด้วยแผ่นสีมาตรฐานที่มีลักษณะเป็นแผ่นสีขาว (L=96.98, a=0.03 ,b=1.84) ทำการวัดสีตัวอย่างละ 10 ครั้ง

5.การทดสอบคุณภาพด้านการหดตัวของผลิตภัณฑ์

การทดสอบคุณภาพด้านการหดตัวของกล้วยแผ่น จะใช้วิธีการแทนที่ปริมาตรของกล้วยแผ่นในช่องเหลวทั้งก่อนและหลังอบแห้งตัวอย่างละ 10 ชิ้น โดยของเหลวที่ใช้ทดสอบคือ n-heptane $[CH_3(CH_2)_5CH_3]$ โดยคำนวณหาค่าจากสมการ

$$\% \text{Shrinkage} = \frac{V_0 - V}{V_0} \times 100 \quad (1)$$

โดย V_0 คือ ปริมาตรของกล้วยแผ่นก่อนการอบแห้ง, m^3
 V คือ ปริมาตรของเนื้อกล้วยแผ่นจากการอบแห้ง, m^3

6.การทดสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส

การทดสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสหลังการอบแห้งจะทดสอบโดยใช้เครื่อง Tacture Analyser รุ่น TA-XT2i ค่าความถูกต้อง ± 0.001 N โดยจะทำการทดสอบในลักษณะของแรงกด โดยใช้หัวกดทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 mm และความเร็วในการกด 1 mm/s โดยกดจนกระทั่งกล้วยแผ่นแตกออกจากกัน พิจารณาคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของกล้วยแผ่นจากค่าความแข็ง (Hardness) และจำนวนยอด (Number of Peaks) ที่มีค่า Threshold force ตั้งแต่ 30 กรัมขึ้นไป

ผลและวิจารณ์การทดลอง

1. ลักษณะทางกายภาพของกล้วยแผ่นก่อนการอบแห้ง

วิธีการพรีทรีทเมนต์ที่ต่างกันส่งผลให้ลักษณะทางกายภาพของกล้วยแผ่นก่อนอบแห้งแตกต่างกัน ตารางที่ 1 แสดงคุณภาพสีของกล้วยแผ่นก่อนอบแห้งในทอมของตัวแปร L, a และ b ซึ่งทำการวัดสีของกล้วยแผ่นที่ไม่พรีทรีทเมนต์ทันทีหลังการหั่น สำหรับกล้วยแผ่นที่ผ่านการพรีทรีทเมนต์จะทำการวัดหลังจากพรีทรีทเมนต์และแช่ให้แห้งแล้วทิ้งไว้เป็นเวลา 5 นาที จะเห็นว่าเริ่มต้นกล้วยแผ่นที่ไม่ผ่านการพรีทรีทเมนต์จะมีความสว่างมาก (มีค่า L มาก) มีสีชาวมเหลือง ($L=81.09$ $a=-2.85$ และ $b=25.6$) จากการสังเกตพบว่ากล้วยที่ไม่ผ่านการพรีทรีทเมนต์เมื่อสัมผัสกับอากาศจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสีจากชาวมเหลืองไปเป็นสีดำคล้ำอย่างรวดเร็ว เนื่องจากปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ กล้วยแผ่นที่ผ่านการพรีทรีทเมนต์โดยการลวกจะมีลักษณะอ่อนนุ่ม มีการยุบตัวลง เนื้อกล้วยมีสีชาวมเหลืองแต่ไล่ซึ่งค่า L ลดลงจากเดิมเหลือเพียง 66.7 และเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นสีดำคล้ำเมื่อสัมผัสกับอากาศ หากทิ้งไว้ให้สัมผัสกับอากาศนานขึ้นจะเกิดสีดำคล้ำมากขึ้น ณ บริเวณรอบจุดศูนย์กลางของกล้วยแผ่นเนื่องจากบริเวณนี้มีน้ำตาลมากกว่าบริเวณอื่น ความชื้นหลังการพรีทรีทเมนต์จะเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก ประมาณ 50-100 % d.b. กล้วยแผ่นที่ผ่านการพรีทรีทเมนต์โดยการแช่ในสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ บริเวณผิวกล้วยจะมีลักษณะเหมือนมีเจลใส ๆ เคลือบอยู่ เนื้อกล้วยมีสีชาวมากขึ้นกว่าก่อนพรีทรีทเมนต์ ($L=78.75$) และเกิดการเปลี่ยนแปลงสีเป็นสีดำคล้ำน้อยมากแม้จะสัมผัสกับอากาศเป็นเวลานานก็ตาม สำหรับกล้วยแผ่นที่ผ่านการพรีทรีทเมนต์ด้วยการแช่ในสารละลายกรดแอสคอร์บิกนั้น สีของเนื้อกล้วยจะใกล้เคียงกับกล้วยที่ไม่พรีทรีทเมนต์ที่ทิ้งไว้เป็นเวลา 5 นาทีมากที่สุด ไม่มีความมันวาวที่ผิวกล้วย โดยมีค่า L ประมาณ 77.8 และยังคงเกิดการเปลี่ยนแปลงสีเป็นสีดำคล้ำได้อย่างรวดเร็วเมื่อสัมผัสกับอากาศ โดยความชื้นก่อนการอบแห้งของกล้วยแผ่นทั้งสองกรณีนี้จะมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 20-50 % d.b. สำหรับค่าความเหลืองของกล้วยแผ่นก่อนอบแห้งนั้นมีค่าใกล้เคียงกันซึ่งอยู่ในช่วง

23.47-25.60

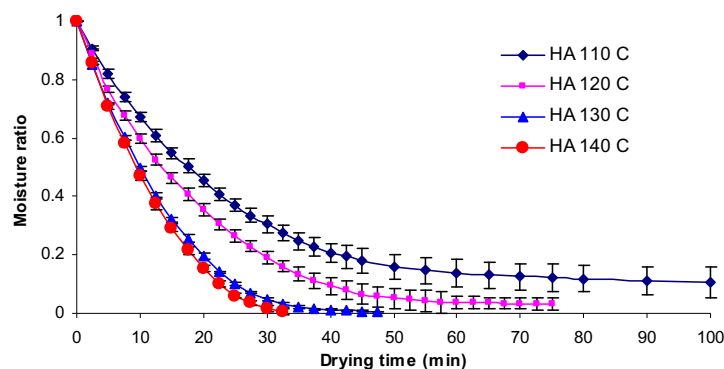
ตารางที่ 2 ผลของการวัดคุณภาพสีของกล้วยแผ่นก่อนการอบแห้ง

Pretreatment	L- value	a - value	b - value
Untreated sample	81.09±2.85	-2.85±0.20	25.60±1.50
Sulfite treated sample	78.75±2.33	-2.86±0.27	23.56±1.40
Ascorbic acid treated sample	77.76±2.20	-1.72±0.60	23.47±1.50
Blanched sample	66.71±3.53	-4.98±1.70	25.60±1.50

2. จลนพลศาสตร์การอบแห้ง

2.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการลดความชื้น

อัตราการระเหยของน้ำออกจากผลิตภัณฑ์สามารถหาได้จากน้ำหนักที่ลดลงโดยการชั่งน้ำหนักกล้วยแผ่นทุก ๆ 5 นาที ตลอดช่วงการอบแห้ง ซึ่งแสดงด้วยสัดส่วนความชื้น จากการทดลองพบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงสามารถลดความชื้น

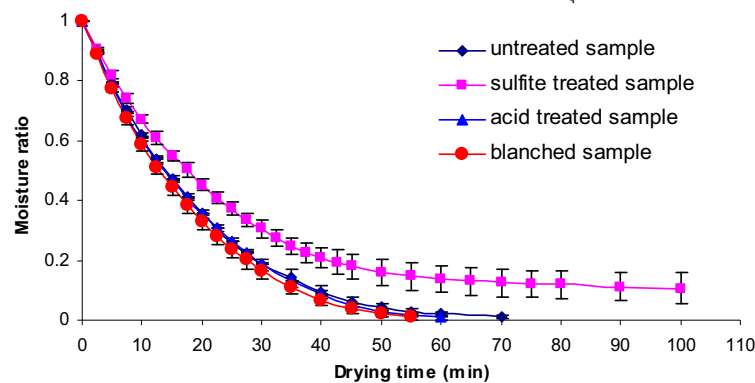


รูปที่ 2 เปรียบเทียบอัตราการลดความชื้นของการอบแห้งกล้วยแผ่นที่ผ่านการพรีทรีทเมนต์ด้วยการแช่ในสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์และอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 110-140 °C

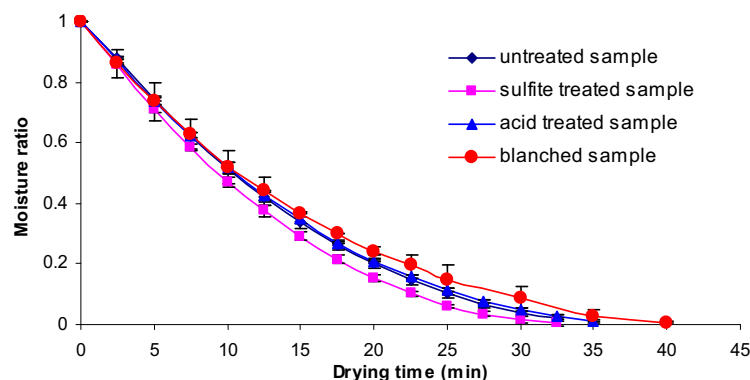
ของกล้วยแผ่นได้เร็วกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 2 เนื่องจากผลต่างของอุณหภูมิระหว่างอากาศร้อนกับกล้วยแผ่นในกรณีที่ใช้อุณหภูมิสูงในการอบแห้งมีค่าสูงกว่ากรณีที่ใช้อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนจึงมีค่าสูงกว่า ทำให้ความร้อนสามารถถ่ายเทจากอากาศร้อนไปยังกล้วยแผ่นเพื่อใช้ในการระเหยน้ำได้มากกว่า ส่งผลให้การระเหยน้ำในการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงเกิดขึ้นได้เร็วกว่าการระเหยน้ำที่อุณหภูมิต่ำ จากการทดลอง การอบแห้งเพื่อให้ได้กล้วยแผ่นที่มีความชื้นสุดท้าย 4 %d.b. นั้นที่อุณหภูมิ 110,120,130 และ 140 °C จะใช้เวลาในการอบแห้ง 100,75,47.5 และ 32.5 นาที ตามลำดับ

2.2 ผลของการพรีทรีทเมนต์ที่มีต่ออัตราการลดความชื้น

รูปที่ 3 แสดงอิทธิพลของการพรีทรีทเมนต์ต่าง ๆ ที่มีต่ออัตราการลดความชื้นของกล้วยแผ่น พบว่ากล้วยแผ่นที่ผ่านการพรีทรีทเมนต์ด้วยสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟด์จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งนานที่สุด เวลาที่ใช้ในการอบแห้งกล้วยแผ่นที่ไม่พรีทรีทเมนต์ และพรีทรีทเมนต์ด้วยการลวกและการแช่ในสารละลายกรดแอสคอร์บิกไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และการอบแห้งที่อุณหภูมิ 120 °C นั้นจะให้ผลเช่นเดียวกับอุณหภูมิ 110 °C ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3 ก่อนการอบแห้งกล้วยแผ่นที่ผ่านการลวกจะมีลักษณะอ่อนนุ่มและมีการยุบตัวลงเนื่องจากการลวกด้วยน้ำร้อนทำให้ผนังเซลล์แตกและเสียหายไป ภายในผนังเซลล์ของเนื้อกล้วยประกอบด้วยสารเพคตินที่ทำหน้าที่เชื่อมเซลล์ที่อยู่ข้างเคียงและให้ความแข็งแรงแก่ผนังเซลล์ (Leshem และคณะ, 1986 ; Seymourและคณะ, 1989, Knee และ Bartley, 1981) สารเพคตินนี้เป็นสารที่ไวต่อความร้อน เมื่อผ่านการลวกจึงเกิดการสูญเสียสารเพคตินที่ละลายน้ำได้ และจากการที่ผนังเซลล์แตกและเสียหายไปนั้นส่งผลให้น้ำภายในเนื้อกล้วยแผ่นเคลื่อนที่ออกมาได้เร็วกว่ากรณีอื่น กล้วยแผ่นที่ผ่านการพรีทรีทเมนต์ด้วยสารละลายกรดแอสคอร์บิกและกล้วยแผ่นที่ไม่ผ่านการพรีทรีทเมนต์จะมีอัตราการลดความชื้นใกล้เคียงกับการลวกโดยมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย และกล้วยแผ่นที่พรีทรีทเมนต์ด้วยสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟด์จะมีอัตราการลดความชื้นต่ำที่สุด



รูปที่ 3 เปรียบเทียบอัตราการลดความชื้นของการอบแห้งกล้วยแผ่นด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 110°C



รูปที่ 4 เปรียบเทียบอัตราการลดความชื้นของการอบแห้งกล้วยแผ่นด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 140°C

สำหรับการอบแห้งที่อุณหภูมิ 130 และ 140 °C จะให้ผลตรงข้ามกับกรณีอบแห้งด้วยอุณหภูมิต่ำซึ่งแสดงดังรูปที่ 4 กล้วยแผ่นที่พรีทรีทเมนต์ด้วยสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟด์จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด เนื่องมาจากวิธีการ พรีทรีทเมนต์ที่แตกต่างกันส่งผลให้ลักษณะผิวหน้าของกล้วยแผ่นหลังอบแห้งแตกต่างกันซึ่งเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่า 130 °C ในกรณีนี้อาจเป็นเพราะน้ำภายในกล้วยแผ่นจะระเหยออกมาอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ผิวหน้าของกล้วยแผ่นมีลักษณะขรุขระ จาก

การสังเกตกล้วยแผ่นที่พรีทรีทเมนต์ด้วยสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟด์จะมีความขรุขระมากที่สุด รองลงมาคือกล้วยแผ่นที่พรีทรีทเมนต์ด้วยสารละลายด้วยสารละลายกรดแอสคอร์บิกและกล้วยแผ่นที่ไม่ผ่านการพรีทรีทเมนต์ และสำหรับกล้วยแผ่นที่ผ่านการลวกนั้นผิวหน้าจะมีลักษณะที่ราบเรียบสม่ำเสมอ กล้วยแผ่นที่มีผิวหน้าขรุขระนั้นจะมีพื้นที่ในการระเหยนํ้ามากกว่ากรณีผิวหน้าที่ราบเรียบ ความขรุขระยิ่งเพิ่มมากขึ้นพื้นที่ในการระเหยนํ้าก็จะยิ่งเพิ่มมากขึ้นด้วย ดังนั้นกล้วยแผ่นที่พรีทรีทเมนต์ด้วยสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟด์จึงมีอัตราการลดความชื้นที่สูงที่สุด

3.คุณภาพของกล้วยแผ่นหลังการอบแห้ง

3.1 สี

กล้วยแผ่นที่ได้หลังการอบแห้งโดยรวมแล้วมีสีน้ำตาลค่อนข้างแดง แต่จะมีความอ่อน-แก่แตกต่างกันเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่า จากตารางที่ 2 แสดงผลของการวัดคุณภาพสีของกล้วยแผ่นหลังการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิและการพรีทรีทเมนต์แตกต่างกัน ซึ่งสีของกล้วยแผ่นแสดงในเทอมของตัวแปร L, a และ b จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งและการพรีทรีทเมนต์มีผลต่อคุณภาพสีของกล้วยแผ่นหลังการอบแห้ง เมื่อใช้อุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้นจะทำให้กล้วยแผ่นมีสีน้ำตาลเข้มมากขึ้นซึ่งสังเกตได้จากค่า L, b ที่ลดลง และค่า a ที่เพิ่มขึ้น โดยสีของกล้วยแผ่นที่อบด้วยอุณหภูมิ 110 °C มีสีน้ำตาลเข้มน้อยที่สุด ระดับความเข้มค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนมีสีน้ำตาลเข้มมากที่สุดเมื่ออบแห้งด้วยอุณหภูมิ 140 °C ทั้งนี้เนื่องมาจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงนั้นอิทธิพลของอุณหภูมิจะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลได้สูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ แม้ว่าการอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูงจะใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าก็ตาม สำหรับผลของการพรีทรีทเมนต์นั้นพบว่า กล้วยแผ่นที่พรีทรีทเมนต์ต่างกันจะให้คุณภาพทางด้านสีหลังการอบแห้งที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นผลมาจากระยะเวลาในการอบแห้งที่แตกต่างกัน กล้วยแผ่นที่ผ่านการลวกให้ค่าความสว่างน้อยที่สุดทุกอุณหภูมิของการอบแห้ง กล้วยแผ่นที่พรีทรีทเมนต์ด้วยสารละลายกรดแอสคอร์บิกจะให้ค่าความสว่างมากกว่าสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟด์ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกล้วยแผ่นที่ผ่านการพรีทรีทเมนต์กับกล้วยแผ่นที่ไม่ผ่านการพรีทรีทเมนต์หลังการอบแห้งพบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของการอบแห้ง การพรีทรีทเมนต์จะช่วยลดการเปลี่ยนแปลงสีเป็นสีน้ำตาลเข้มได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งการพรีทรีทเมนต์ด้วยสารละลายกรดแอสคอร์บิกจะช่วยลดการเปลี่ยนแปลงสีได้มากที่สุดที่สภาวะการอบแห้งเดียวกันโดยเฉพาะการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ และไม่จำเป็นต้องทำการพรีทรีทเมนต์กล้วยแผ่นก่อนอบแห้งหากทำการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงตั้งแต่ 110 °C ขึ้นไป เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสีของกล้วยแผ่นที่ได้หลังอบแห้งนั้นไม่ได้เกิดมาจากกิจกรรมของเอนไซม์แต่เป็นผลเนื่องมาจากอุณหภูมิสูงที่ใช้ในการอบแห้ง โดยค่า L, a และ b ของกล้วยแผ่นทุกการพรีทรีทเมนต์เมื่อสิ้นสุดการอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 -140 °C มีค่าอยู่ในช่วง 35.2±0.7-51.2±1.7, 12.8±0.4 - 16.9±0.7 และ 21.5±0.8 - 31.3±0.6 ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ p<0.05

ตารางที่ 2 สีของกล้วยแผ่นหลังการอบแห้ง

temperature (°C)	Pretreatment	L- value	a - value	b - value
110	Untreated	47.0±2.0 ^h	13.4±0.4 ^{bc}	29.7±0.7 ^g
	Sulfite	50.7±1.0 ⁱ	13.8±0.5 ^{de}	31.3±0.6 ⁱ
	Ascorbic acid	51.0±1.3 ^j	12.8±0.4 ^a	30.6±0.6 ^h
	Blanched	45.8±2.1 ^g	16.9±0.7 ⁱ	29.4±0.5 ^{fg}
120	Untreated	41.5±1.5 ^e	13.6±0.4 ^{bc}	28.9±0.6 ^{ef}
	Sulfite	39.5±1.1 ^d	14.0±0.4 ^{ef}	28.6±0.7 ^e
	Ascorbic acid	43.9±1.2 ^f	13.3±0.2 ^b	29.3±0.7 ^{fg}
	Blanched	40.9±0.6 ^e	14.8±0.3 ^g	27.0±0.5 ^c
130	Untreated	39.8±0.9 ^d	14.1±0.3 ^f	26.9±0.5 ^c
	Sulfite	38.7±0.8 ^{cd}	14.2±0.2 ^f	26.6±0.3 ^c
	Ascorbic acid	39.1±0.9 ^{cd}	14.7±0.3 ^g	27.9±0.5 ^d
	Blanched	37.0±0.6 ^b	15.5±0.2 ^h	25.3±0.8 ^b
140	Untreated	38.1±0.8 ^{bc}	13.7±0.5 ^{cde}	26.7±0.9 ^c
	Sulfite	51.2±1.7 ^j	12.9±0.3 ^a	29.8±1.2 ^g
	Ascorbic acid	43.3±1.5 ^f	13.8±0.3 ^{de}	27.9±0.9 ^d
	Blanched	35.2±0.7 ^a	13.7±0.3 ^{cde}	21.5±0.8 ^a

หมายเหตุ: อักขระภายในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ p<0.05

3.2 การหดตัว

ตารางที่ 3 แสดงผลของการวัดการหดตัวของกล้วยแผ่นหลังการอบแห้ง พบว่ากล้วยแผ่นเกิดการหดตัวมากเมื่อทำการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำซึ่งใช้เวลาในการอบแห้งนานกว่าการอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูง และจะมีการหดตัวน้อยลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการอบแห้ง ทั้งนี้เนื่องมาจากกล้วยแผ่นที่อบแห้งภายใต้อุณหภูมิที่ทำให้เกิดอัตราการอบแห้งที่รวดเร็วนั้น น้ำที่อยู่ในผิวของกล้วยแผ่นจะระเหยไปอย่างรวดเร็วทำให้ผิวที่อยู่ข้างนอกแห้งเกิดการแข็งตัวที่ผิว ซึ่งการแข็งตัวที่ผิวนี้นี้จะช่วยรักษาภาพรูปร่างและปริมาตรของกล้วยแผ่นไม่ให้เกิดการหดตัวมาก ดังนั้นกล้วยแผ่นที่ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยจึงมีการหดตัวน้อยกว่ากล้วยแผ่นที่ต้องใช้เวลาในการอบแห้งนาน นอกจากนี้การพรีทรีทเมนต์ส่งผลต่อการหดตัวของผลิตภัณฑ์อีกด้วย กล้วยแผ่นที่ผ่านการลวกจะมีการหดตัวมากที่สุด เนื่องจากมีการสูญเสียสารเพคตินและการเสื่อมสภาพของเซลล์ซึ่งเป็นผลจาก cooking effect (Levi และคณะ, 1980, Leshem และคณะ, 1986 ; Seymour และคณะ, 1989 ,Knee และ Bartley, 1981) รองลงมาคือกล้วยแผ่นที่พรีทรีทเมนต์ด้วยสารละลายกรดแอสคอร์บิกและสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ ตามลำดับ จากการทดลองพบว่ากล้วยแผ่นที่ผ่านการลวกและอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 °C มีการหดตัวมากที่สุดถึงร้อยละ 72.4

ตารางที่ 3 การหดตัวของกล้วยแผ่นหลังการอบแห้ง

temperature (°C)	Pretreatment	%Shrinkage
110	Untreated	42.9 ± 4.4 ^e
	Sulfite	52.2 ± 5.6 ^g
	Ascorbic acid	56.5 ± 2.9 ^h
	Blanched	72.4 ± 2.5 ⁱ
120	Untreated	37.2 ± 6.0 ^d
	Sulfite	32.8 ± 4.7 ^c
	Ascorbic acid	39.6 ± 6.9 ^{de}
	Blanched	55.3 ± 4.4 ^{gh}
130	Untreated	29.1 ± 2.4 ^{bc}
	Sulfite	23.9 ± 7.9 ^a
	Ascorbic acid	29.4 ± 3.3 ^{bc}
	Blanched	47.2 ± 6.4 ^f
140	Untreated	23.9 ± 1.5 ^a
	Sulfite	25.2 ± 2.2 ^{ab}
	Ascorbic acid	31.0 ± 2.0 ^c
	Blanched	37.1 ± 5.8 ^d

หมายเหตุ: อักษรภายในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ p<0.05

ตารางที่ 4 ความแข็ง (Hardness) และจำนวนยอด (Number of peaks) หลังการอบแห้ง

temperature (°C)	Pretreatment	Hardness (N)	Number of peaks
110	Untreated	5.8 ± 0.8 ^{ab}	3.6 ± 0.6 ^{ab}
	Sulfite	9.0 ± 2.4 ^c	4.3 ± 1.5 ^{abc}
	Ascorbic acid	6.0 ± 1.0 ^{ab}	4.0 ± 1.1 ^{abc}
	Blanched	6.1 ± 1.2 ^{ab}	4.3 ± 1.5 ^{abc}
120	Untreated	9.3 ± 2.8 ^c	3.5 ± 1.1 ^{ab}
	Sulfite	9.5 ± 1.4 ^c	3.7 ± 1.7 ^{ab}
	Ascorbic acid	6.1 ± 1.3 ^{ab}	4.5 ± 2.1 ^{abc}
	Blanched	5.6 ± 1.6 ^{ab}	3.5 ± 1.5 ^{ab}
130	Untreated	6.6 ± 1.5 ^b	2.8 ± 1.3 ^a
	Sulfite	7.3 ± 1.7 ^b	4.5 ± 1.6 ^{ab}
	Ascorbic acid	6.3 ± 0.2 ^{ab}	3.2 ± 1.3 ^{ab}
	Blanched	4.6 ± 1.2 ^a	3.9 ± 1.3 ^{abc}
140	Untreated	9.9 ± 0.7 ^c	4.9 ± 2.1 ^{abc}
	Sulfite	12.5 ± 1.5 ^d	6.1 ± 2.8 ^{cd}
	Ascorbic acid	9.1 ± 1.9 ^c	4.5 ± 2.7 ^d
	Blanched	9.1 ± 2.5 ^c	5.2 ± 1.9 ^{bcd}

หมายเหตุ: อักษรภายในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ p<0.05

3.3 คุณภาพด้านเนื้อสัมผัส

คุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของกล้วยแผ่นจะพิจารณาค่าความแข็ง (Hardness) และจำนวนยอด (Number of Peaks) ซึ่งจำนวนยอดนั้นแสดงถึงความกรอบของอาหาร หากมีจำนวนยอดมากก็แสดงว่าผลิตภัณฑ์มีความกรอบมาก เนื่องจากการเกิดจากการเปลี่ยนแปลงความชื้นของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะทางซึ่งการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่เกิดขึ้นเกิดจากผลิตภัณฑ์มีช่องว่างหรือโพรงอากาศภายในที่ค่อนข้างเปราะและแตกง่าย (Vickers, 1979) ผลิตภัณฑ์ที่มีความกรอบมากจะมีค่าความแข็งน้อยและมีจำนวนยอดมาก จากตารางที่ 4 แสดงความแข็งและจำนวนยอดหลังการอบแห้ง จากข้อมูลการทดลองที่ได้มีแนวโน้มว่าอุณหภูมิในการอบแห้งและวิธีของการฟรีทรีเมนต์ไม่มีผลกระทบต่อค่าความแข็งและจำนวนยอด ความแข็งที่ได้โดยส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 6 – 9 N และจำนวนยอดส่วนใหญ่อยู่ในช่วงประมาณ 3 – 5 นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบกับกล้วยแผ่นที่ได้จากทอดซึ่งมีขายตามท้องตลาดทั่วไป พบว่าค่าความแข็งและจำนวนยอดประมาณ 14 N และ 5 ตามลำดับ ซึ่งค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทอดมีค่าสูงกว่าที่ได้จากการทดลอง

สรุป

จากการศึกษาผลของการฟรีทรีเมนต์กล้วยแผ่นโดยการลวก การแช่ในสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์และการแช่ในสารละลายกรดแอสคอร์บิกที่มีต่ออัตราการอบแห้งและคุณภาพของกล้วยแผ่น สามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งและการฟรีทรีเมนต์มีผลต่ออัตราการลดความชื้น เมื่อทำการเปรียบเทียบอัตราการอบแห้งระหว่างกล้วยแผ่นที่ผ่านและไม่ผ่านการฟรีทรีเมนต์ พบว่ากล้วยแผ่นที่ผ่านการฟรีทรีเมนต์มีอัตราการอบแห้งสูงกว่าภายใต้สภาวะการอบแห้งเดียวกัน การอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 และ 120 °C กล้วยแผ่นที่ฟรีทรีเมนต์ด้วยสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์จะใช้เวลาในการอบแห้งนานที่สุด และการอบแห้งที่อุณหภูมิ 130 และ 140 °C กล้วยแผ่นที่ฟรีทรีเมนต์ด้วยสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์จะใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด สำหรับคุณภาพทางด้านสีนั้น อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งและการฟรีทรีเมนต์มีผลต่อคุณภาพสีของกล้วยแผ่นหลังการอบแห้ง กล้วยแผ่นมีการเปลี่ยนแปลงสีจากสีชาวมเหลืองเป็นสีน้ำตาลเข้มหลังการอบแห้งซึ่งสังเกตได้จากค่าความสว่าง (L) และค่าความเหลือง (b) ที่ลดลง การฟรีทรีเมนต์จะช่วยลดการเปลี่ยนแปลงสีเป็นสีน้ำตาลเข้มได้เพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกล้วยแผ่นที่ไม่ผ่านการฟรีทรีเมนต์ และพบว่ากล้วยแผ่นที่ฟรีทรีเมนต์ด้วยสารละลายกรดแอสคอร์บิกและอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 °C ให้สีที่น้ำตาลเข้มน้อยที่สุด และเมื่อพิจารณาคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสพบว่าอุณหภูมิและวิธีการฟรีทรีเมนต์ไม่มีผลต่อค่าความแข็งและจำนวนยอดของกล้วยแผ่นหลังการอบแห้ง กล้วยแผ่นที่ผ่านการลวกมีหตุ้มมากที่สุด การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงทำให้กล้วยแผ่นมีการหดตัวน้อยกว่ากล้วยแผ่นที่อบแห้งด้วยอุณหภูมิต่ำ จากงานวิจัยที่ได้แนะนำว่าไม่จำเป็นต้องทำการฟรีทรีเมนต์กล้วยแผ่นก่อนอบแห้งหากทำการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงตั้งแต่ 110 °C ขึ้นไปถ้าขั้นตอนการเตรียมไม่ใช้ระยะเวลานานเกินไป นอกจากนี้เพื่อลดความเป็นสีน้ำตาลลงและให้ได้กล้วยแผ่นที่มีคุณภาพดีอาจใช้วิธีการอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอนโดยทำการอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูงในช่วงแรกแล้วตามด้วยการอบแห้งด้วยอุณหภูมิต่ำในช่วงที่สอง

คำขอบคุณ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษาและสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้ทุนอุดหนุนการวิจัย ขอขอบคุณ นางพัชรี ตั้งตระกูล สถาบันคั้นคว้าและพัฒนาคุณภาพอาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ นายอาภาพงศ์ ชั่งจันทร์ และนายจุฑพล คงสอน ภาควิชาศึกษาทั่วไป สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน ที่ให้คำปรึกษาต่าง ๆ และขอขอบคุณ สายวิศาเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านเครื่องมือทดสอบทางอาหาร จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- Beveridge, T. and Weintraub, S.E. (1995). Effect of Blanching Pretreatment on Color and Texture of Apple Slices at Various Water Activities. *Food Research International*, 28(1), 83-86.
- Chan, H.T. and C.G. Cavaletto (1978). Dehydration and Storage Stability of Papaya Leather. *Journal of Food Science*, 43, 1723-1725.
- Demirel, D. and Turhan, M. (2003). Air-Drying Behavior of Dwarf Cavendish and Gros Michel Banana Slices. *Journal of Food Engineering*, 59, 1- 11.

- Knee,M. and Bartley, (1981). Composition and Metabolism of Cell Wall Polysaccharides in Ripening Fruits.131-145.
- Leshem,Y.A.,Halevy & C.Frenkel (1986) Process and Control of Plant Senescence. Elsevier,Amsterdum. 215
- Levi, A., J.R. Ramirez-Martinez & H. Padua. (1980). Influence of Heat and Sulfurdioxide Treatments on some Quality Characteristic of Intermediate Moisture Banana. *Journal of Food Technology*, 15, 557-566.
- Seymour, G.B.,H Wainwright & G.A. Tucker (1989). *Cell Wall Change in Ripening Mangoes*. Hort.Abstr, 59.1002.
- Torsresakul, L. and P. Siriwongwilaichat. (1997). The Effect of Citric Acid and Sodiummetabisulfite on Inhibition of Non - Enzymatic Browning Reaction in Osmotic Dehydrated Guava. In FoSTAT/Propak Asia'97 Food Conference : Challennges in Food Processing and Packaging, 22-24 May 1997. Queen Sirikit Nat. Convention Center, Bangkok , 1-6.

การพองของกล้วยโดยเทคนิคร่วมระหว่างอากาศร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่ง Puffing of banana using combined techniques of hot air and superheated steam

คำพันธ์ บัวละพันธ์^{1,*} สมชาติ โสภณธนฤทธิ์¹ สมเกียรติ ปรัชญาวารากร² วารุณี เตีย³

¹สาขาสหวิทยาการด้านพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

126 ถนนประชาธิปไตย แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10140

(E-mail: khamphans@hotmail.com^{*}, somchat.sop@kmutt.ac.th)

²ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

126 ถนนประชาธิปไตย แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10140

(E-mail: somkiat.pra@kmutt.ac.th)

³สาขาสหวิทยาการด้านการจัดการพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

126 ถนนประชาธิปไตย แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10140

(E-mail: warunee.tia@kmutt.ac.th)

*Corresponding author

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อการพองตัว(Puffing) ของกล้วยแผ่น โดยใช้เทคนิคการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนได้แก่ การอบแห้งด้วยลมร้อนในขั้นตอนแรกแล้วตามด้วยการทำให้กล้วยมีการพองตัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง และในขั้นสุดท้ายนำไปอบแห้งด้วยลมร้อนที่สภาวะเดียวกันกับในขั้นตอนแรก โดยศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ความชื้นของกล้วยและเวลาที่ใช้ในกระบวนการพองตัวที่มีผลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้ง และคุณภาพของผลิตภัณฑ์กล้วยแผ่น เช่น สี การหดตัว และเนื้อสัมผัส (ความแข็ง และความกรอบ) จากผลการทดลองพบว่า เมื่อใช้อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งสูงขึ้นและเวลาในกระบวนการพองตัวมาก ผลิตภัณฑ์กล้วยแผ่นที่ได้มีค่าความเป็นสีแดง(ค่า a) เพิ่มขึ้น ค่าความสว่าง(ค่า L) และ ค่าความเป็นสีเหลือง(b)ลดลง นอกจากนั้น กระบวนการพองตัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งยังทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีการหดตัวน้อย มีค่าความแข็งต่ำ มีความกรอบมาก และใช้เวลาในการอบแห้งสั้นลงเมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว สภาวะที่เหมาะสมที่ให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์กล้วยแผ่นที่ดีคือ ที่อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งเท่ากับ 170 และ 180°C เวลาที่ใช้ในการทำให้พองตัวน้อยกว่า 2 นาที

คำสำคัญ

กล้วย/ ปฏิกิริยาสีน้ำตาล/ การหดตัว/ เนื้อสัมผัส/ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง/ สี

Abstract

The purpose of this research was to investigate the effect of puffing process. In the puffing process, the banana was dried with three drying steps, i.e., hot air drying (HA) in the first stage followed by puffing with superheated steam (SSP) and dried again with hot air in the last stage. The influences of puffing temperature, puffing time and moisture content of banana before puffing on drying kinetics and product qualities in terms of

color, shrinkage and texture were evaluated. The results have shown that at the high puffing temperature and long puffing time caused high value of redness (a) and low value of lightness (L) and yellowness (b). The puffing process resulted in lower shrinkage, lower hardness, higher crispiness and shorter drying time as compared with the hot air drying alone. The optimal conditions for the products were the steam temperatures of 170 and 180°C and puffing time not longer than 2 min.

Keywords

Banana/ Browning reaction/ Shrinkage/ Texture/ Superheated steam/ Color

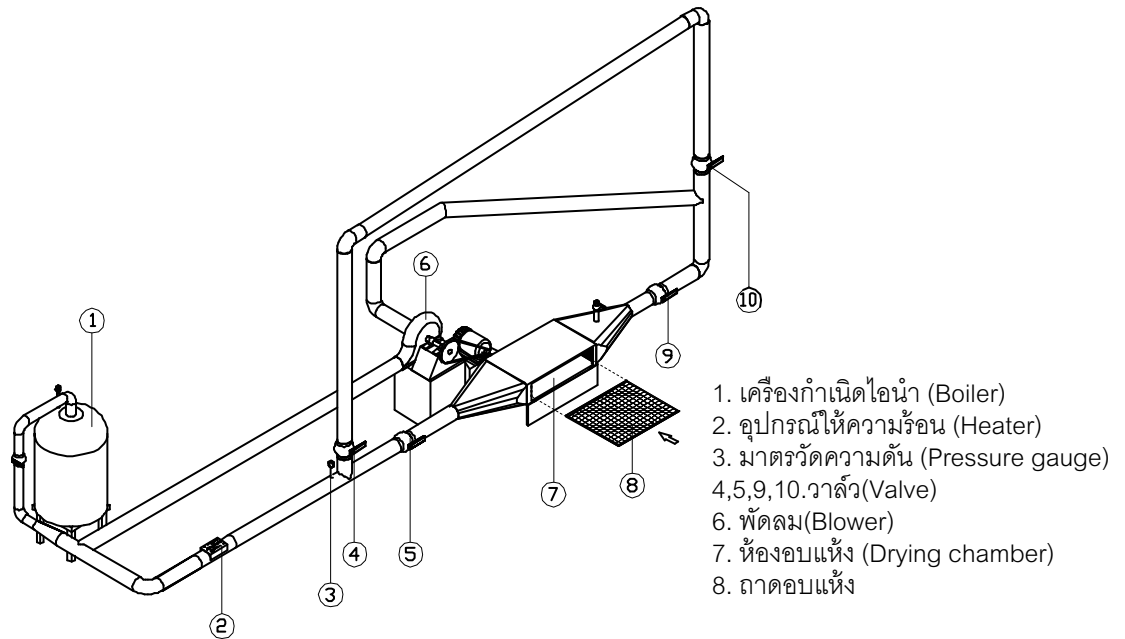
บทนำ

กล้วยเป็นผลไม้ที่นิยมบริโภคในรูปของกล้วยสดโดยเฉพาะกล้วยหอม แต่เนื่องจากกล้วยเป็นผลไม้ที่เน่าเสียได้ง่าย จึงนิยมนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น กล้วยอบ กล้วยตาก กล้วยฉาบ กล้วยแผ่น เป็นต้น กล้วยแผ่นที่มีขายตามท้องตลาดส่วนใหญ่ทำการแปรรูปโดยการทอดในน้ำมัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้มักจะมีสีเข้ม สีไม่สม่ำเสมอ เมื่อเก็บไว้นาน กล้วยแผ่นจะเกิดกลิ่นเหม็นเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันกับออกซิเจน ผลิตภัณฑ์อาหารว่างที่มีปริมาณไขมันสูงอาจไม่เป็นที่ต้องการของผู้บริโภคที่ใส่ใจสุขภาพ เพราะก่อให้เกิดปัญหาต่อสุขภาพ เช่น โรคหัวใจ ความดันโลหิตสูงและโรคอ้วน ดังนั้นผลิตภัณฑ์อาหารว่างที่ไม่มีไขมันจึงเป็นทางเลือกใหม่สำหรับผู้บริโภคที่ต้องการลดปริมาณแคลอรีและปัญหาสุขภาพ ผลิตภัณฑ์กล้วยที่มีลักษณะพองกรอบนั้นสามารถผลิตได้หลายวิธี แต่ละวิธีก็มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป การทอดในน้ำมันที่ความดันบรรยากาศถือเป็นวิธีที่ง่ายและประหยัด แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้มักจะมีสีน้ำตาลเข้มและมีปริมาณไขมันสูง การทอดด้วยน้ำมันที่สภาวะความดันต่ำกว่าบรรยากาศเป็นกรรมวิธีการผลิตที่ผลิตภัณฑ์มีปริมาณไขมันลดน้อยลงและคุณภาพด้านสี การพองตัวค่อนข้างดี (Nimmol et al., 2007) แต่เป็นเทคโนโลยีที่มีราคาแพง การอบแห้งด้วยลมร้อนสามารถกำจัดปริมาณไขมันในผลิตภัณฑ์ได้ แต่เมื่อใช้อุณหภูมิอากาศร้อนสูง ๆ จะทำให้คุณภาพด้านต่าง ๆ เช่น สี การหดตัว เนื้อสัมผัส และคุณค่าทางอาหารสูญเสียไปค่อนข้างมาก ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการนำเอาไอน้ำร้อนยวดยิ่งมาใช้เป็นตัวกลางอบแห้งแทนอากาศร้อน (Mujumdar, 1995) การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีข้อดีหลายประการเมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งด้วยอากาศร้อน (Tang และ Cenkowski, 2000) เช่น ประหยัดพลังงานในการอบแห้งเนื่องจากการนำเอาความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอล้อมกลับมาใช้ใหม่ ลดปัญหาสิ่งแวดล้อม เนื่องจากการทำงานสามารถทำเป็นระบบปิด และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ด้านต่าง ๆ เช่น ผลิตภัณฑ์มีรูพรุนมาก การหดตัวน้อยกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน (Prachayawarakorn et al., 2002, Uengkimbouan et al., 2006) การศึกษาครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีต่อการพองตัว(Puffing) ของกล้วยแผ่น โดยใช้เทคนิคการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

อุปกรณ์การทดลอง

เครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ใช้ในการทดลอง ดังรูปที่ 1 ประกอบด้วยอุปกรณ์หลักคือ เครื่องกำเนิดไอน้ำ เพื่อผลิตไอน้ำความดันสูงกว่าบรรยากาศเล็กน้อย อุปกรณ์ให้ความร้อน เพื่อให้ความร้อนกับอากาศ และทำให้ไอน้ำอิ่มตัวกลายเป็นไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ขนาด 13.5 kW โดยการควบคุมด้วย PID มีค่าความถูกต้อง $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ห้องอบแห้ง ขนาด $30 \times 30 \times 10 \text{ cm}^3$ พัดลมเป็นแบบเหวี่ยงใบพัดโค้งหลัง อัตราการไหลของตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้งควบคุมโดยการปรับความเร็วรอบของพัดลม และในระบบอบแห้งยังประกอบด้วยอุปกรณ์อื่น ๆ เช่น วาล์วควบคุมและมาตรวัดความดัน



รูปที่ 1 ไดอะแกรมระบบอบแห้งด้วยลมร้อนและไอน้ำร้อนอย่างต่อเนื่อง

การทำงานของระบบเริ่มต้นที่อบแห้งด้วยอากาศร้อนโดยการเปิดอุปกรณ์ให้ความร้อนและพัดลม ปิดวาล์ว 4, 10 และวาล์วที่เครื่องกำเนิดไอน้ำ เพื่อให้อากาศร้อนไหลเวียนในระบบจนกระทั่งส่วนต่าง ๆ ในระบบมีอุณหภูมิใกล้เคียงกันที่ 90°C จึงนำตัวอย่างที่เตรียมไว้แล้วเข้าห้องอบแห้ง อากาศร้อนจะไหลผ่านห้องอบแห้งในแนวขนานกับวัสดุด้วยความเร็วลมประมาณ 2 m/s อบแห้งกล้วยแผ่นให้เหลือความชื้น $25\% \text{ d.b.}$ แล้วนำออกมาเก็บไว้ในกล่องโฟมประมาณ 1 ชั่วโมง เพื่อปรับอุณหภูมิอากาศร้อนขึ้นเป็น $160\text{--}180^{\circ}\text{C}$ จากนั้นจึงปล่อยไอน้ำอ้อมตัวจากเครื่องกำเนิดไอน้ำเข้าสู่ระบบโดยผ่านอุปกรณ์ให้ความร้อนเพื่อทำให้อิอน้ำอ้อมตัวเปลี่ยนสภาพเป็นไอน้ำร้อนอย่างต่อเนื่องโดยควบคุมความดันในระบบให้คงที่ (ใช้ความดันในระบบสูงกว่าความดันบรรยากาศเล็กน้อย) เมื่ออุณหภูมิของไอน้ำร้อนอย่างต่อเนื่องในระบบคงที่ที่ $160\text{--}180^{\circ}\text{C}$ แล้วจึงปิดวาล์ว 5, 9 และ เปิดวาล์ว 4, 10 เพื่อนำตัวอย่างเข้าห้องอบแห้ง จากนั้นจึงเปิดวาล์ว 5, 9 และ ปิดวาล์ว 4, 10 เพื่อให้ไอน้ำร้อนอย่างต่อเนื่องเข้าห้องอบแห้ง เวลาที่ใช้ไอน้ำร้อนอย่างต่อเนื่องนี้อยู่ระหว่าง 1-3 นาที จากนั้นนำตัวอย่างมาเก็บไว้ในกล่องโฟมเดิมทำการปิดวาล์วที่เครื่องกำเนิดไอน้ำเพื่อจะทำการอบแห้งด้วยลมร้อนในขั้นตอนสุดท้าย โดยปรับลดอุณหภูมิลมร้อนลงมาที่ 90°C แล้วจึงนำตัวอย่างมาอบแห้งในขั้นตอนสุดท้ายให้เหลือความชื้นประมาณ $4\% \text{ d.b.}$

การเตรียมตัวอย่าง

กล้วยหอมทองระยะสุกที่ 3 ซึ่งพิจารณาได้จากสีของเปลือกจากเขียวออกเหลืองมากขึ้นแต่ยังมีสีเขียวมากกว่าสีเหลือง โดยความหวานของเนื้อกล้วยมีค่าประมาณ $14\text{--}18\% \text{ brix}$ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 25 mm ความชื้นเริ่มต้นของกล้วยแผ่นก่อนการพรีทรีตเมนต์ประมาณ $250\text{--}300\% \text{ d.b.}$ ปอกเปลือกและหั่นตามขวางด้วยเครื่องหั่นกำหนดความหนาของชิ้นตัวอย่างให้มีขนาด 35 mm พรีทรีตเมนต์ด้วยสารละลายกรดแอสคอร์บิกความเข้มข้น $0.1\% \text{ (w/w)}$ นาน 1 นาที (Demirel และ Turhan, 2003) หลังจากนั้นนำตัวอย่างมาล้างด้วยน้ำกลั่นนาน 30 วินาที ซับน้ำให้แห้งทิ้งไว้ 5 นาทีแล้วนำไปจัดเรียงบนตะแกรงก่อนเข้าเครื่องอบแห้ง

วิธีการทดลอง

ทำการอบแห้งกล้วยแผ่นที่ผ่านการพรีทรีทเมนต์ด้วยสารละลายกรดแอสคอร์บิกด้วยอากาศร้อนในขั้นตอนแรกที่อุณหภูมิ 90°C ให้เหลือความชื้น 25 %d.b แล้วทำให้พองตัว(puffing)ด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 160, 170 และ 180°C โดยใช้เวลา 1, 2 และ 3 นาที และในขั้นตอนสุดท้ายนำกลับไปอบแห้งด้วยลมร้อนที่สภาวะเดิมในตอนเริ่มต้นจนเหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 4% d.b. จากนั้นนำผลิตภัณฑ์กล้วยแผ่นที่ได้ไปทดสอบคุณภาพในด้านสี การหดตัว และเนื้อสัมผัส

การทดสอบคุณภาพด้านสี

สีของกล้วยแผ่นทำการวัดโดยใช้เครื่องวัดสีอาหาร HunterLab รุ่น ColorFlex โดยวัดค่าสีของกล้วยแผ่นตามระบบ Hunter ซึ่งแสดงในเทอมของตัวแปร L, a และ b โดยค่า L แสดงค่าความสว่าง, a แสดงค่าสีแดงและสีเขียว, b แสดงค่าสีเหลืองและน้ำเงิน การทดสอบจะใช้กล้วยแผ่นอบแห้ง 3 ตัวอย่างและวัดสีตัวอย่างละ 6 ครั้ง โดยก่อนจะวัดสีของกล้วยแผ่นด้วยเครื่องวัดสีดังกล่าว ต้องทำการทดสอบเปรียบเทียบ (Calibrate) ด้วยแผ่นสีมาตรฐานที่มีลักษณะเป็นแผ่นสีดำและสีขาว

การทดสอบคุณภาพด้านการหดตัว

การทดสอบคุณภาพด้านการหดตัวของกล้วยแผ่นใช้วิธีแทนที่ปริมาตรกล้วยแผ่นในของแข็งทั้งก่อนและหลังการอบแห้งตัวอย่างละ 10 ชิ้น โดยของแข็งที่ใช้ทดสอบคือ Glass beads มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.106-0.212 mm (Hwang และ Hayakawa, 1980) ร้อยละการหดตัวเทียบกับปริมาตรของกล้วยสด ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\% \text{Shrinkage} = \frac{V_0 - V}{V_0} \times 100 \quad (1)$$

โดย V_0 คือ ปริมาตรของกล้วยแผ่นสด, cm^3

V คือ ปริมาตรของกล้วยแผ่นหลังจากการอบแห้ง, cm^3

การทดสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส

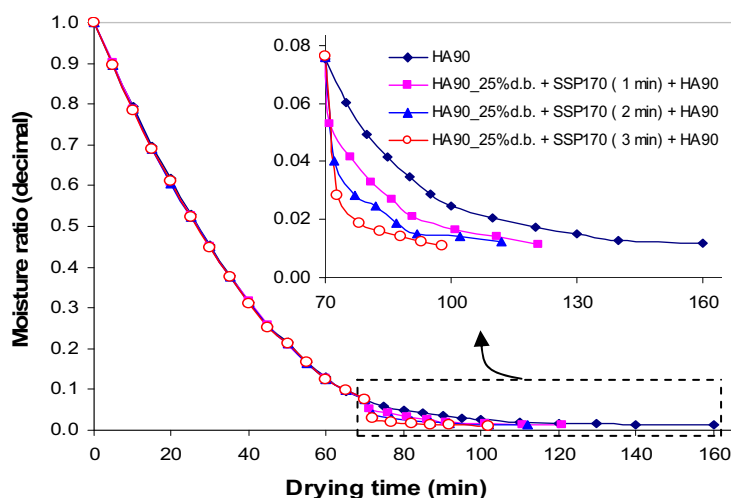
การทดสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของกล้วยแผ่นหลังการอบแห้งโดยใช้เครื่อง Texture Analyzer รุ่น TA.XT.plus (Stable Microsystems Texture Technologies Inc.,UK) ค่าความถูกต้อง ± 0.001 N โดยจะทำการทดสอบในลักษณะของแรงกดใช้หัวกดแบบตัด (Cutting probe) และความเร็วในการกด 2 m/s กดจนกระทั่งตัวอย่างแยกออกจากกัน พิจารณาคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของกล้วยแผ่นจากค่าความแข็ง (Hardness) จำนวนยอด (Number of peaks) ที่มีค่า Threshold force ตั้งแต่ 30 g ขึ้นไป และความชันเริ่มต้น (Initial slope)

ผลการทดลองและวิจารณ์

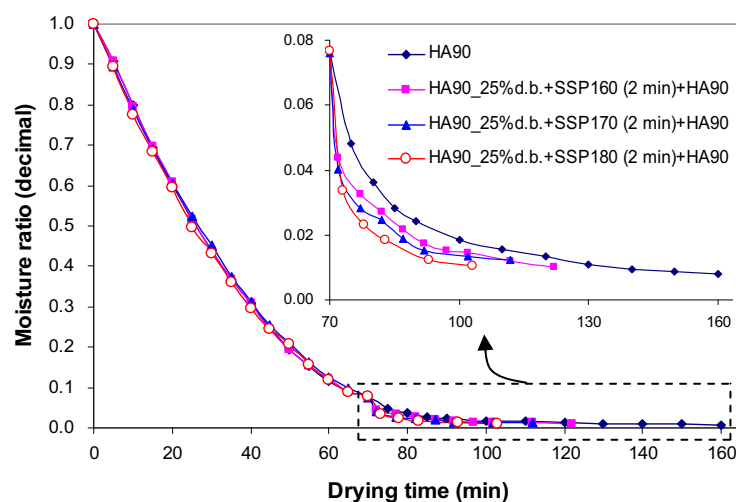
จลนพลศาสตร์การอบแห้ง

จากผลการทดลองอบแห้งกล้วยแผ่นด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 90°C โดยความชื้นของกล้วยแผ่นหลังจากการ พรีทรีทเมนต์ด้วยสารละลายกรดแอสคอร์บิกมีค่าประมาณ 300-360% d.b. อบแห้งให้เหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 4% d.b. พบว่าใช้เวลาในการอบแห้งทั้งหมดประมาณ 160 นาที โดยในช่วงแรกความชื้นของกล้วยจะลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งช่วงนี้กล้วยแผ่นยังมีความชื้นสูงโดยเฉพาะที่บริเวณผิวจะมีน้ำอยู่เป็นจำนวนมาก ดังนั้นการถ่ายเทความชื้นในช่วงนี้จะเป็นการระเหยน้ำที่บริเวณผิวซึ่งเกิดจากการแพร่เนื่องมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวและที่อากาศรอบนอก และการ

เปลี่ยนแปลงความชื้นของกล้วยแผ่นจะช้าลงเมื่อความชื้นของกล้วยแผ่นเข้าใกล้ความชื้นสุดท้ายที่ต้องการ เนื่องจากอัตราการระเหยน้ำจะถูกควบคุมโดยความต้านทานต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำในวัสดุเท่านั้น การนำพาน้ำจากภายในเนื้อวัสดุมาที่ผิวจะยากและช้ากว่าการระเหยน้ำจากผิวไปยังอากาศรอบนอกส่งผลให้เวลาการอบแห้งช้าลง จากการทดลองการอบแห้งกล้วยแผ่นด้วยลมร้อนร่วมกับการทำให้พองตัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะใช้เวลารวมการอบแห้งจะสั้นกว่าการอบแห้งกล้วยแผ่นด้วยลมร้อนอย่างเดียว เนื่องจากการทำให้พองตัวที่อุณหภูมิสูงทำให้ความชื้นลดลงได้มาก และเวลาการทำให้พองตัวมากขึ้นความชื้นจะลดลงได้มากขึ้นด้วย ดังรูปที่ 2 โดยเลือกที่ความชื้นของกล้วยก่อนการทำให้พองตัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีค่าเท่ากับ 25%d.b. เพราะให้คุณภาพสีของกล้วยแผ่นดีที่สุด โดยการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับการทำให้พองตัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ความชื้นก่อนการทำให้พองตัวที่ 25% d.b. อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ 170°C ที่เวลา 1, 2 และ 3 นาที จะใช้เวลารวมในการอบแห้งเท่ากับ 121, 112 และ 98 นาที ตามลำดับ



รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของกล้วยแผ่นที่อบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 90°C เหลือความชื้น 25%d.b.ร่วมกับการพองตัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 170°C เป็นเวลา 1, 2 และ 3 นาที

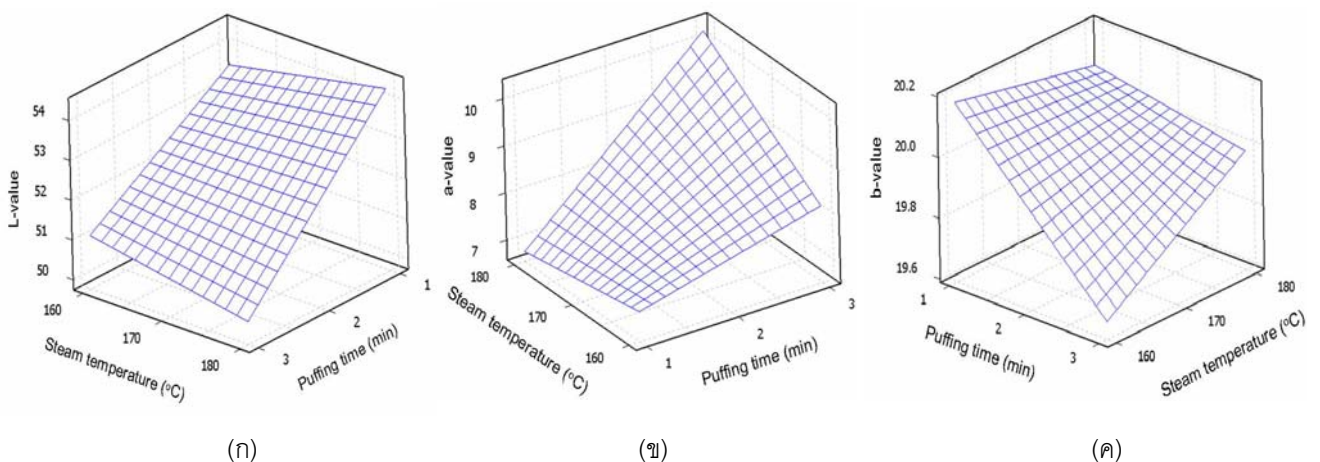


รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของกล้วยแผ่นที่อบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 90°C เหลือความชื้น 25%d.b.ร่วมกับการพองตัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 160°C 170°C แล 180°C เป็นเวลา 2 นาที

รูปที่ 3 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นของกล้วยแผ่นที่อบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียว และที่อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับการทำให้พองตัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ความชื้นก่อนการทำให้พองตัวที่ 25% d.b. อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 160°C 170°C และ 180°C และ เวลา 2 นาที โดยกราฟในส่วนขยายแสดงการลดลงของความชื้นในขั้นตอนที่สองและขั้นตอนที่สาม จากผลการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งสูงขึ้นส่งผลให้เวลารวมที่ใช้ในการอบแห้งสั้นลง เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงน้ำระเหยออกไปได้มากขึ้น ประกอบกับกล้วยแผ่นมีการพองตัว เกิดรูพรุนมากขึ้น โครงสร้างไม่เกิดการยุบตัว ทำให้น้ำเคลื่อนที่จากข้างในวัสดุมาที่ผิวง่าย ส่งผลให้เวลารวมที่ใช้ในการอบแห้งสั้นกว่ากรณีที่ใช้อุณหภูมิต่ำ

คุณภาพด้านสี

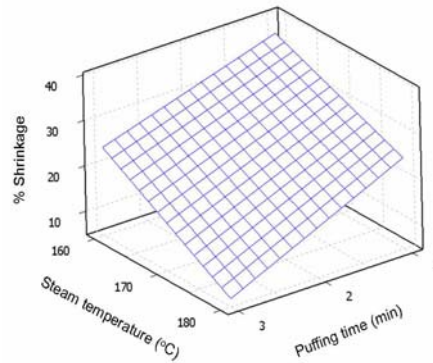
กล้วยแผ่นที่ได้หลังการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับการทำให้พองตัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะมีสีโดยรวมเป็นสีเหลืองปนน้ำตาลโดยบริเวณรอบจุดศูนย์กลางของกล้วยแผ่นจะมีสีน้ำตาลเข้มมากที่สุดเนื่องจากมีปริมาณน้ำตาลมากกว่าบริเวณอื่น กล้วยแผ่นจะมีสีน้ำตาลเข้มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งสูงขึ้นและเวลาการทำให้พองตัวมากขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากค่า L, a และ b แสดงในรูปที่ 4 เมื่ออุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งสูงขึ้น และเวลาการทำให้พองตัวมากขึ้น ความสว่าง (ค่า L) ลดลง และความเป็นสีแดง (ค่า a) เพิ่มขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงและเวลามากขึ้นอิทธิพลของอุณหภูมิจะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลสูงกว่าที่อุณหภูมิต่ำ โดยที่อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 180°C เวลา 3 นาที ความสว่างจะมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 50.11 และค่า a มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 10.67 ดังรูปที่ 4 (ก) และ (ข) สำหรับความเป็นสีเหลือง (ค่า b) จะเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่ออุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งสูงขึ้นและเวลามากขึ้นดังรูปที่ 4(ค) โดยค่า b ต่ำสุดเท่ากับ 19.25 และสูงสุดเท่ากับ 20.29 ตลอดเงื่อนไขการทดลอง



รูปที่ 4 สีของกล้วยแผ่นหลังการอบแห้งด้วยอากาศร้อนร่วมกับการพองตัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

คุณภาพด้านการหดตัว

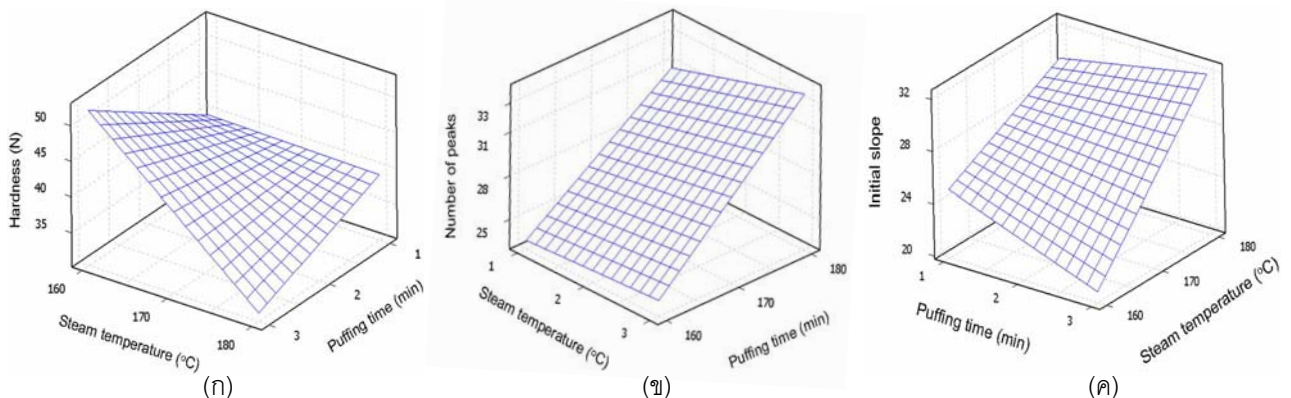
จากการทดลองพบว่า กล้วยแผ่นที่อบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียวจะมีร้อยละการหดตัวเท่ากับ 48.75 มากกว่ากล้วยแผ่นที่อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับการทำให้พองตัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง โดยมีร้อยละการหดตัวต่ำสุดเท่ากับ 3.48 ดังรูปที่ 5 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งและเวลาต่อการหดตัวของกล้วยแผ่น พบว่าเมื่ออุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งสูงขึ้นและใช้เวลาเพิ่มขึ้น กล้วยแผ่นจะหดตัวน้อยลง เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงและเวลาพองตัวมากขึ้นนั้นจะทำให้ให้น้ำในกล้วยแผ่นกลายเป็นไอน้ำอย่างรวดเร็วทำให้เกิดการพองตัวสูงและผิวข้างนอกแห้งและเกิดการแข็งตัวที่ผิว ซึ่งการแข็งตัวนี้จะช่วยรักษาสภาพรูปทรงและปริมาตรของกล้วยแผ่นไม่ให้เกิดการยุบตัว



รูปที่ 5 การหดตัวของกล้วยแผ่นหลังการอบแห้งด้วยอากาศร้อนร่วมกับการพองตัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

คุณภาพด้านเนื้อสัมผัส

คุณภาพด้านเนื้อสัมผัสกล้วยแผ่นจะพิจารณาค่าความแข็ง(Hardness) จำนวนยอด(Number of peaks) และ Initial slope โดยที่จำนวนยอด และ Initial slope แสดงถึงความกรอบของผลิตภัณฑ์ หากจำนวนยอด และ Initial slope มากก็แสดงว่าผลิตภัณฑ์มีความกรอบมาก เนื่องจากยอดเกิดจากการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะทาง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความชันเกิดจากผลิตภัณฑ์ที่มีช่องว่างหรือโพรงอากาศภายใน ผลิตภัณฑ์ที่มีความกรอบมากจะมีจำนวนยอดมากและมีค่าความแข็งน้อย รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งและเวลาต่อความแข็ง จำนวนยอด และ Initial slope ของกล้วยแผ่น พบว่าเมื่ออุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งสูงและใช้เวลามากขึ้นกล้วยแผ่นจะมีความแข็งน้อยลง แต่ที่อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งต่ำและใช้เวลามากขึ้นนั้นกล้วยแผ่นจะมีความแข็งมากขึ้น ดังรูปที่ 6(ก) ที่เป็นเช่นนั้นอาจเนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำน้ำในวัสดุจะเดือดได้น้อย โครงสร้างจะเกิดการพองและยุบตัวลง (collapse) ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลของการหดตัว โดยการหดตัวจะมากขึ้นที่อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งต่ำจึงเป็นสาเหตุให้กล้วยแผ่นแข็งขึ้น สำหรับจำนวนยอด และ Initial slope ดังแสดงในรูปที่ 6 (ข) และ (ค) มีแนวโน้มที่คล้ายกันมากคือเมื่ออุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งสูงขึ้นทำให้จำนวนยอด และ Initial slope มีค่ามากขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงน้ำในวัสดุจะกลายเป็นไอน้ำได้อย่างรวดเร็ว กล้วยแผ่นจะเกิดการพองตัวได้มาก โครงสร้างมีรูพรุนมากขึ้นทำให้กล้วยแผ่นกรอบมากขึ้น จำนวนยอด และ Initial slope จะลดลงเมื่อเวลามากขึ้นที่อุณหภูมิ 160°C และจะเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิ 180°C ที่เป็นเช่นนั้นอาจเนื่องจากความชื้นในวัสดุที่อยู่ในรูปของของเหลวและเดือดกลายเป็นไอน้ำได้ดีที่อุณหภูมิสูงในช่วงแรก ๆ เท่านั้น และเมื่อเวลาผ่านไปความชื้นจะอยู่ในรูปของไอน้ำอย่างเดียว ดังนั้นการพองตัวของกล้วยจะเกิดขึ้นช่วงระยะเวลาสั้นเท่านั้น เมื่อน้ำเดือดกลายเป็นไอน้ำหมดแล้วเวลาที่ใช้จึงมีผลน้อยมากต่อการพองตัว



รูปที่ 6 ความแข็ง จำนวนยอดของ และ Initial slope ของกล้วยแผ่นหลังการอบแห้งด้วยอากาศร้อนร่วมกับการพองตัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

สรุปผล

จากการศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีต่อการพองตัว(Puffing) ของกล้วยแผ่น โดยใช้เทคนิคการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไอน้ำร้อนยวดยิ่ง พบว่าเมื่อทำการอบแห้งกล้วยแผ่นด้วยลมร้อนร่วมกับการทำให้พองตัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ซึ่งเป็นการอบแห้งสามขั้นตอนนั้น จะใช้เวลารวมในการอบแห้งสั้นกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียว เนื่องจากกระบวนการทำให้พองตัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งนั้นความชื้นจะลดลงได้มาก ประกอบกับกล้วยแผ่นเกิดการพองตัวขึ้น เกิดรูพรุนมาก จึงทำให้น้ำเคลื่อนที่ออกจากกล้วยแผ่นได้ง่ายในขั้นตอนสุดท้ายของการอบแห้ง และเวลาในการทำให้พองตัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งนานจะทำให้ความสว่าง (ค่า L) และความเป็นสีเหลือง (ค่า b) ลดลง แต่ความเป็นสีแดง(ค่า a) จะเพิ่มมากขึ้นที่อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งสูง ๆ นอกจากนี้ยังพบว่าที่อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งสูงขึ้น เวลาทำให้พองตัวนานขึ้นกล้วยแผ่นจะมีการหดตัวน้อย ความแข็งต่ำและกรอบมากขึ้น จากงานวิจัยสภาวะที่แนะนำที่ให้คุณภาพของกล้วยแผ่นที่ดีคือ เวลาขณะการทำให้พองตัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งต้องไม่เกิน 2 นาที และ อุณหภูมิทำให้พองตัวที่ 170°C และ 180°C

ข้อเสนอแนะ

เพื่อให้งานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมได้ จึงควรทำการประเมินความชอบของผู้บริโภคด้วยวิธีการวัดทางประสาทสัมผัส(sensory test) และทำการวิเคราะห์ว่าคัมค่าทางเศรษฐศาสตร์หรือไม่

คำขอบคุณ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษาและสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้ทุนอุดหนุนการวิจัย และ ขอขอบคุณสำนักงานความร่วมมือเพื่อการพัฒนาระหว่างประเทศ (สพร) ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- Demirel, D. and Turhan, M. (2003). Air-drying behavior of dawrf cavendish and Gros Michel banana slices. *Journal of Food Engineering.*, 59(1), 1- 11.
- Hwang, M.P., & Hayakawa, K.I. (1980). Bulk densities of cookies undergoing commercial baking processes. *Journal of Food Science.*, 45(5), 1400-1402.
- Mujumdar, A.s. (1995). Superheated team drying. *Handbook of industrial drying*, Vol. 2, 2nd edition Macel Dekker, New York, pp. 1071-1086.
- Nimmol, C., Devahastin, S., Soponronarit, S. (2007). Drying of banana slice using combined low-pressure superheated steam and far-infrared radiation. *Journal of food Engineering.*, 81(3), 624-633.
- Prachayawarakorn, S., Soponronarit, S., Wetchacama, S.and Jaisut, D. (2002). Desorption isotherms and drying characteristics of shrimp in superheated steam and hot air. *Drying Technology.*, 20(3), 669-684.
- Tang, Z. and Cenkowski, S. (2000). Dehydration dynamics of potatoes in superheated steam and hot air. *Canadian Agricultural Engineering.*, 42(1), 6.1-6.13.
- Uengkimboun, N., Soponronarit, S., Prachayawarakorn, S. and Nathkaranakule, A. (20006). A Comparative study of pork dried using superheated steam and hot air. *Drying Technology.*, 24(12), 1665-1672.

ผลของอุณหภูมิอบแห้งที่มีต่อสารระเหยง่าย และคุณภาพทางกายภาพในกล้วยแผ่น

Effect of drying temperature on volatile compounds and physical qualities on banana slice

จารุวรรณ กุลวิศวะ^{1,*}, สมเกียรติ ปรัชญาวรรกร¹, สมชาติ โสภณธนฤทธิ์²

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์ ม.เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 126 ถ.ประชาธิปไตย บางมด กรุงเทพฯ 10140

²คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ ม.เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 126 ถ.ประชาธิปไตย บางมด กรุงเทพฯ 10140

(E-mail: jaruwan_kun@yahoo.com*;somkiat.pra@kmutt.ac.th;somchat.sop@kmutt.ac.th)

*Corresponding Author

บทคัดย่อ

กล้วยเป็นผลไม้ที่มีมากเกินความต้องการของผู้บริโภคจึงได้มีการนำมาแปรรูปเป็นกล้วยอบแผ่นเพื่อยืดอายุการเก็บรักษา ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาผลของอุณหภูมิอบแห้งที่มีต่อสมบัติการแพร่ความชื้น การเปลี่ยนแปลงปริมาณสารประกอบที่ระเหยง่าย ได้แก่ ethyl acetate, butyl acetate และ isoamyl acetate และคุณภาพของกล้วยแผ่นทางด้านการหดตัว สี และเนื้อสัมผัส โดยใช้กล้วยหอมทองระยะสุก 5 หั่นตามขวางหนา 3 มิลลิเมตร ทำการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 70, 80, 90 และ 100°C จากการทดลองพบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิการอบแห้งสูง และความชื้นสูงจะให้ค่าสมบัติการแพร่ความชื้นประสิทธิผลสูง มีการหดตัวน้อย กรอบมากและความแข็งน้อยลง ขณะที่มีความชื้นน้ำตาลเข้มข้น สำหรับปริมาณ isoamyl acetate ลดลงมากเมื่อใช้อุณหภูมิการอบแห้งสูงขึ้น ในขณะที่ ethyl acetate และ butyl acetate ลดลงน้อย ยกเว้นที่อุณหภูมิ 100°C butyl acetate มีค่าเพิ่มขึ้นจากตอนเริ่มต้น

คำสำคัญ

กล้วยหอม / สมบัติการแพร่ความชื้นประสิทธิผล / สารประกอบที่ระเหยง่าย / การอบแห้ง

Abstract

Drying is a classical method of food preservation, which provides an extension of shelf life. The influence of drying temperatures on the moisture diffusivity, volatile compounds (ethyl acetate, butyl acetate and isoamyl acetate) and the qualities of dried banana slices in terms of shrinkage, color and texture was studied. The banana with a mature ripe stage of 5 was sliced into 3 mm thickness and dried at four temperatures of 70, 80, 90 and 100°C. The experimental results have shown that the drying temperatures affected the moisture diffusivity and qualities of the final product. Drying at higher temperature and high moisture content resulted in high effective moisture diffusivity. In addition, the samples dried at high temperature had less shrinkage, less hardness and more crispness than those dried at low temperature. However, the high temperature caused the darker-brown product. Isoamyl acetate strongly decreased with increased temperature while both ethyl acetate and butyl acetate were decreased, except at 100°C at which the amount of butyl acetate showed the increase significant trend as compared to the value before drying.

Keywords

Banana / effective moisture diffusivity / volatile compounds / drying

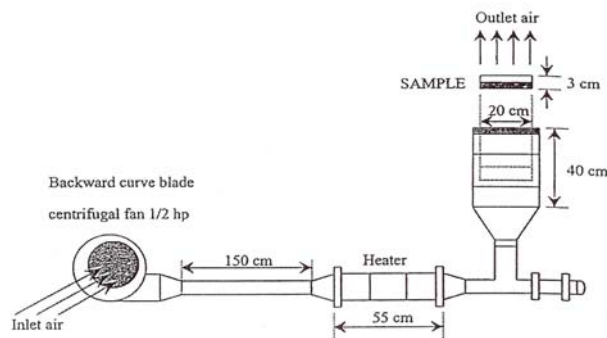
บทนำ

กล้วยเป็นผลไม้ที่มีมากเกินความต้องการอีกทั้งภายหลังการเก็บเกี่ยวจะเกิดการเน่าเสียได้ง่าย จึงได้มีวิธีการยืดอายุการเก็บรักษาและแปรรูปผลิตภัณฑ์ให้ดึงดูดผู้บริโภคแต่ยังคงคุณค่าทางโภชนาการเหมือนกับกล้วยสด วิธีการอบแห้งเป็นกระบวนการหนึ่งที่ใช้ในการถนอมอาหารแต่เป็นกระบวนการที่ควบคุมได้ยากเพราะว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง และระยะเวลาในการอบแห้งนาน เป็นสาเหตุสำคัญในการทำให้เกิดการสูญเสียรสชาติ สี สารอาหาร และความสามารถในการดูดคืนน้ำของผลิตภัณฑ์อบแห้ง (Maskan, 2000) นอกจากนี้มีการสูญเสียสารประกอบที่ให้กลิ่นระหว่างการอบแห้งของผลไม้ซึ่งเป็นส่วนที่จำเป็นจะต้องปรับปรุงเพื่อควบคุมให้สินค้ามีคุณภาพ ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปริมาณสารประกอบที่ให้กลิ่นประกอบไปด้วย ความดันไอของแต่ละสารประกอบ อุณหภูมิการอบแห้ง และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ (Boudhrioua et al., 2003) สารประกอบที่ระเหยง่าย ได้แก่ เอสเทอร์ กรด และแอลกอฮอล์ ซึ่งอาจจะเกิดการระเหยได้ระหว่างการอบแห้งเป็นผลทำให้ผลิตภัณฑ์มีกลิ่นเปลี่ยนแปลง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิในการอบแห้งที่มีต่อคุณภาพทางกายภาพของกล้วย เช่น สี เนื้อสัมผัส การหดตัว และปริมาณสารประกอบที่ระเหยง่าย เพื่อนำไปใช้เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้งานในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

อุปกรณ์การทดลอง

ในการทดลองศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง และคุณภาพของกล้วยแผ่นใช้เครื่องอบแห้งแบบชั้นบาง ดังรูปที่ 1. ประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก คือ อุปกรณ์ให้ความร้อนเพื่อให้ความร้อนกับอากาศ พัดลมเป็นแบบเหวี่ยงใบพัดโค้งหลัง อัตราการไหลของตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้งควบคุมโดยการปรับความเร็วรอบของพัดลม



รูปที่ 1 Schematic diagram of thin layer dryer

การทำงานของระบบเริ่มที่เปิดอุปกรณ์ให้ความร้อนและพัดลม รอจนกระทั่งความร้อนของระบบมีอุณหภูมิเท่ากับที่ต้องการ จึงนำตัวอย่างที่เตรียมไว้ใส่ถาด เข้าห้องอบแห้ง อากาศร้อนจะไหลผ่านห้องอบแห้งในแนวตั้งจากก้นด้วยความเร็วลมประมาณ 1.3 m/s อบแห้งกล้วยแผ่นให้เหลือความชื้นประมาณ 4%db

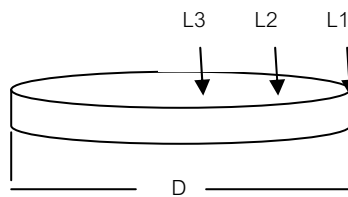
วิธีการทดลอง

วิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบที่ระเหยง่ายใช้กล้วยหอมทองระยะสุกความสุกต่างกันที่ 3, 5 และ 7 โดยสังเกตจากสีของเปลือกกล้วย บดเนื้อกล้วยให้ละเอียดสกัดด้วย SPME และวิเคราะห์สารประกอบที่ระเหยง่ายด้วย GC และกล้วยหอมทองระยะสุกที่ 5 พิจารณาได้จากสีของเปลือกเป็นสีเหลืองแต่ปลายยังเป็นสีเขียว ปอกเปลือกแล้วหั่นตามขวางด้วยเครื่องหั่น กำหนดความหนาไว้ที่ 3 มิลลิเมตร แช่ด้วยสารละลายกรดแอสคอร์บิกเข้มข้น 0.1%w/v 1 นาที นำมาอบด้วยอากาศร้อน ที่

อุณหภูมิ 70, 80, 90 และ 100°C ความเร็วลม 1.3 m/s ซึ่งน้ำหนักกล้วยแผ่นทุก ๆ 5 นาที จนกระทั่งเหลือความชื้นสุดท้าย 4% d.b. หลังจากนั้นนำผลิตภัณฑ์อบแห้งที่ได้ไปทดสอบคุณภาพในด้านสี เนื้อสัมผัส การหดตัวและปริมาณสารประกอบที่ระเหยง่าย (หาน้ำหนักแห้งของกล้วยแผ่นก่อนการอบแห้งโดยนำไปอบด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง)

การทดสอบการหดตัว

การทดสอบคุณภาพด้านการหดตัวของกล้วยแผ่นจะทดสอบทางด้านความหนาด้วย Caliper ซึ่งทำการวัดทางด้านความหนา 3 ระยะ จำนวน 3 ตัวอย่าง และทางด้านเส้นผ่านศูนย์กลางด้วยเวอร์เนีย (vernier) ซึ่งทำการวัดทางด้านเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 ตัวอย่าง ดังรูปที่ 2.



รูปที่ 2 แสดงการวัดการหดตัวของกล้วยแผ่น

การทดสอบคุณภาพด้านสีของผลิตภัณฑ์

การทดสอบคุณภาพทางด้านสีของกล้วยแผ่นด้วยเครื่องวัดสีอาหาร HunterLab รุ่น ColorFlex โดยวัดค่าสีของกล้วยแผ่นในเทอมของตัวแปร L, a และ b โดยค่า L (lightness Parameter) แสดงค่าความสว่าง ค่า a (Redness Parameter) แสดงค่าสีแดงหรือสีแดง และ ค่า b (Yellowness Parameter) แสดงค่าสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน ก่อนวัดสีของตัวอย่างให้ทำการสอบเทียบ (Calibrate) เครื่องวัดสีอาหารก่อนทำการวัดสีด้วยแผ่นสีขาวมาตรฐาน (L=96.98, a=0.03, b=1.84) ทำการวัดสีขึ้นตัวอย่างละ 3 ครั้ง เป็นจำนวน 10 ตัวอย่าง

การทดสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส

การทดสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสหลังการอบแห้งจะทดสอบโดยใช้เครื่อง Texture Analyser รุ่น TA.XT.Plus ค่าความถูกต้อง ± 0.001 N โดยจะทำการทดสอบในลักษณะของแรงกด โดยใช้หัวกดชนิดหัวตัด และความเร็วในการกด 2 m/s โดยกดจนกระทั่งกล้วยแผ่นแตกออกจากกัน พิจารณาคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของกล้วยแผ่นจากค่าความแข็ง (Hardness), จำนวนยอด (Number of Peaks) ที่มีค่า Threshold force ตั้งแต่ 30 g ขึ้นไป , ความชันเริ่มต้น (Initial slope) วัด 10 ตัวอย่าง

การสกัดตัวอย่าง

การหาสารประกอบที่ระเหยง่ายจะแยกได้โดยใช้ SPME โดยนำกล้วยสด 5 g บดให้เป็นเนื้อเดียวกันผสมน้ำกลั่น 5 ml ใส่ลงในขวดแก้วขนาด 20 ml ที่มีสารละลาย internal standard ที่ประกอบไปด้วย caproic acid ethyl ester 0.2 μ l ใน methanol 0.1% (v/v) สกัดกล้วยแผ่นอบแห้งใช้ 2 g บดให้ละเอียด ผสมกับน้ำกลั่น 8 ml ใส่ลงในขวดแก้วที่มีสารละลาย internal standard จากนั้นปิดด้วย silicone Teflon-lined septum ใช้เข็มของ SPME ที่เคลือบด้วยเส้นใย Carboxen/PDMS 85 μ l เจาะลงบน septum ให้อยู่เหนือตัวอย่างกวนด้วยแท่งแม่เหล็ก (magnetic bar) 30 นาที เพื่อทำการดูดซับสารจากนั้นนำไปฉีดเข้าเครื่อง GC

การวิเคราะห์สารประกอบที่ระเหยง่าย

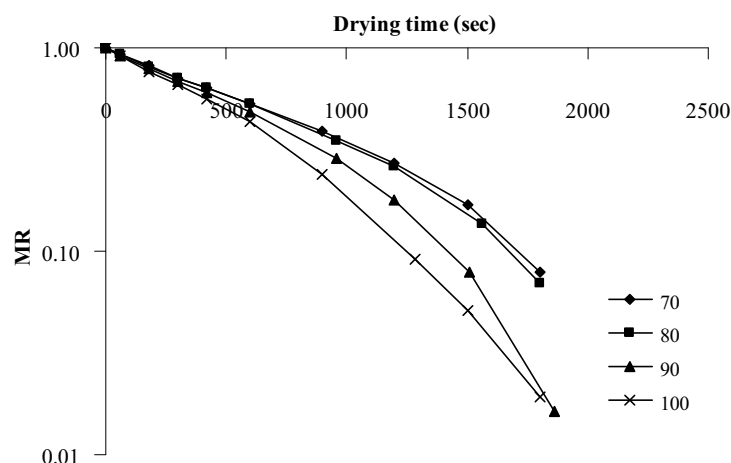
Gas chromatographic (GC) ที่ใช้ในการวิเคราะห์จะใช้ FID เป็นดีเทคเตอร์ ส่วนคอลัมน์ที่ใช้เป็น CP-Sil5CB เคลือบอยู่บนซิลิกาแคปิลลารีคอลัมน์ขนาด 30m x 0.25 mm i.d., หนา 0.25 μm โดยการคายซับสารประกอบที่ระเหยง่ายที่ดูดซับอยู่บน SPME ทันทดด้วยการเจาะลงบน injector port ที่มีอุณหภูมิ 250°C เป็นเวลา 5 นาที ในการแยกแบบ splitless mode อุณหภูมิของคอลัมน์ที่ใช้อยู่ที่ 35°C เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเพิ่มขึ้นจนมีอุณหภูมิ 120°C ด้วยอัตรา 3°C/min และเพิ่มขึ้นอีกจนมีอุณหภูมิ 180°C ด้วยอัตรา 20°C/min ส่วนดีเทคเตอร์จะใช้อุณหภูมิ 280°C แก๊สที่ใช้ในการพา คือฮีเลียมจะใช้อัตรา 1 ml/min จากนั้นเครื่องจะรายงานผลออกมาเป็นพีค นำไปเปรียบเทียบกับพีคมาตรฐานว่าเป็นสารใด

ผลและวิจารณ์การทดลอง

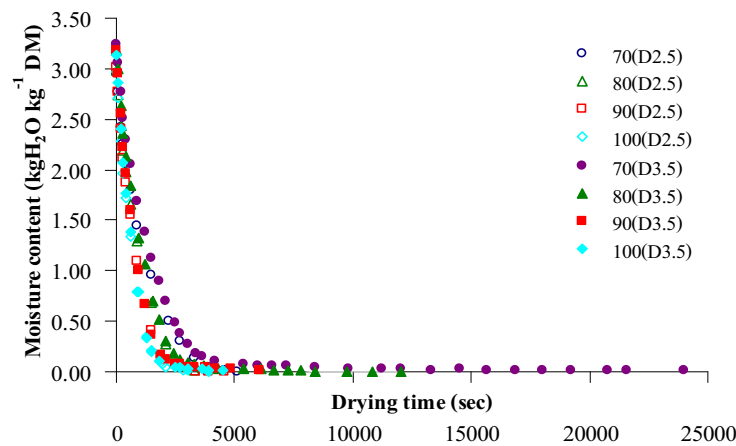
जनफलसर्कारोपहंङ

ผลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการลดความชื้น

จากการทดลองการอบแห้งกล้วยแผ่นด้วยอากาศร้อนสามารถทราบความชื้นได้โดยการชั่งน้ำหนักของตัวอย่างขณะอบแห้งที่เวลาต่าง ๆ พบว่าในช่วง 60 นาทีแรกของการอบแห้ง ความชื้นของกล้วยแผ่นจะลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากความชื้นสูงเมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการถ่ายเทมวลน้ำจากภายในชั้นกล้วยไปที่ผิวกล้วยและระเหยน้ำไปสู่อากาศหลังจากนั้นความชื้นของชั้นตัวอย่างเหลืออยู่น้อยทำให้การถ่ายเทมวลน้ำจากภายในชั้นกล้วยไปที่ผิวกล้วยมีน้อยจึงลดลงอย่างช้าๆ กราฟที่ได้มีลักษณะไม่เป็นเส้นตรง แสดงว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลเป็นฟังก์ชันกับความชื้น ดังรูปที่ 3 ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้น (MR) กับเวลาอบแห้งในสเกลของ semi log อีกทั้งยังพบว่าที่อุณหภูมิสูงสามารถลดความชื้นของกล้วยแผ่นได้เร็วกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำเนื่องจากผลต่างของอุณหภูมิระหว่างอากาศร้อนกับกล้วยแผ่น ในกรณีที่ใช้อุณหภูมิสูงในการอบแห้งมีค่าสูงกว่ากรณีที่ใช้อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนจึงมีค่าสูงกว่า ทำให้ความร้อนสามารถถ่ายเทจากอากาศร้อนไปยังกล้วยแผ่นเพื่อใช้ในการระเหยน้ำได้มากกว่า จึงทำให้การระเหยน้ำในการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงเกิดขึ้นได้เร็วกว่าการระเหยน้ำที่อุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งของการอบแห้งที่อากาศร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งยาวนานกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่ 80, 90 และ 100°C ตามลำดับ



รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงของความชื้นกล้วยที่อุณหภูมิต่างๆ (ความเร็วลม 1.3 m/s)



รูปที่ 4 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความชื้นกัลวียที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 และ 3.5 เซนติเมตร (ความเร็วลม 1.3 m/s)

จากรูปที่ 4 พบว่าเมื่อเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจาก 3.5 เป็น 2.5 เซนติเมตร การเปลี่ยนแปลงอัตราความชื้นเกิดการเปลี่ยนแปลงไม่ต่างกันแสดงว่าความชื้นมีการแพร่ทางด้านรัศมีน้อยมาก ดังนั้นเส้นผ่านศูนย์กลางของกัลวียที่นำมาใช้จะให้การเปลี่ยนแปลงอัตราการลดความชื้นไม่แตกต่าง

การหาสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล

เมื่อทำการทดลองการหดตัวของกัลวียแผ่นพบว่าทางด้านเส้นผ่านศูนย์กลางมีการหดตัวน้อยมากเมื่อเทียบกับทางด้านความหนา ดังแสดงในตารางที่ 1 ดังนั้นการแพร่ความชื้นของกัลวียแผ่นในรูปของสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (Effective diffusion coefficient) จะพิจารณารูปทรงของกัลวียแผ่นมีลักษณะเป็นแผ่นแบนซึ่งกว้างและยาวมาก (infinite slab) การถ่ายเทความชื้นและการหดตัวเกิดขึ้นในทิศทางความหนาเพียงทิศทางเดียว

ในกรณีที่ทำการพลอตกราฟระหว่าง $\ln MR$ กับ เวลา ได้เป็นเส้นตรงแสดงว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นไม่เป็นฟังก์ชันกับความชื้น การเปลี่ยนแปลงความชื้นสามารถอธิบายโดยสมการ (Crank, 1975):

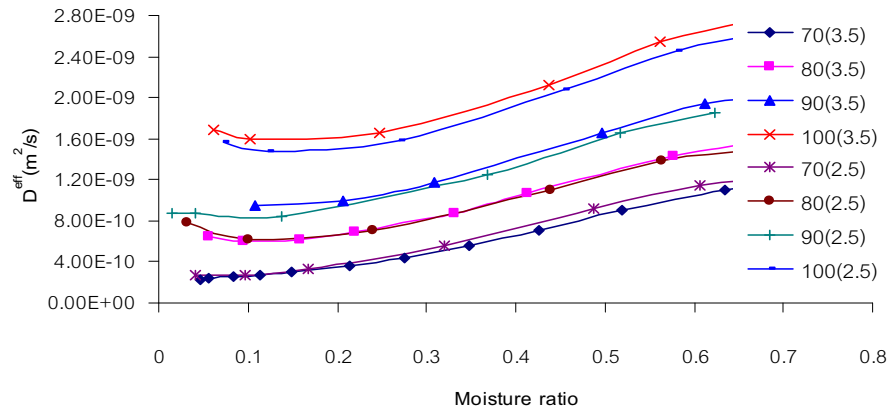
$$MR = \frac{M(t) - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D^{eff} t}{4L^2}\right] \quad (1)$$

เมื่อ D^{eff} คือค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (m^2/s) MR คืออัตราส่วนความชื้น $M(t)$ M_{eq} และ M_0 เป็นความชื้นเฉลี่ยในเวลาใดๆ สมดุล และเริ่มต้น (อ้างอิงมวลแห้ง) ตามลำดับ L คือความหนาของกัลวียแผ่น (m)

ในกรณีที่กราฟที่ได้ไม่เป็นเส้นตรง แสดงว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นเป็นฟังก์ชันกับความชื้น การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่แปรตามความชื้นนั้นจะใช้วิธีการของความชื้น (Karathanos *et al.*, 1990) ซึ่งคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างอัตราการอบแห้งที่ได้จากการทดลองและอัตราการอบแห้งทางทฤษฎี ณ ความชื้นเดียวกัน แสดงดังสมการ (2)

$$D^{eff} = [(dMR/dt)_{exp} / (dMR/dFo)_{th}] \times L^2 \quad (2)$$

เมื่อ Fo คือ the Fourier number ($Fo = D^{eff} t/L^2$) และ MR คือ อัตราส่วนความชื้นของกัลวียแผ่น
หมายเหตุ สำหรับความหนาของแผ่นโฟมกัลวีย (L) จะเป็นความหนาที่เปลี่ยนแปลงไปตามความชื้น



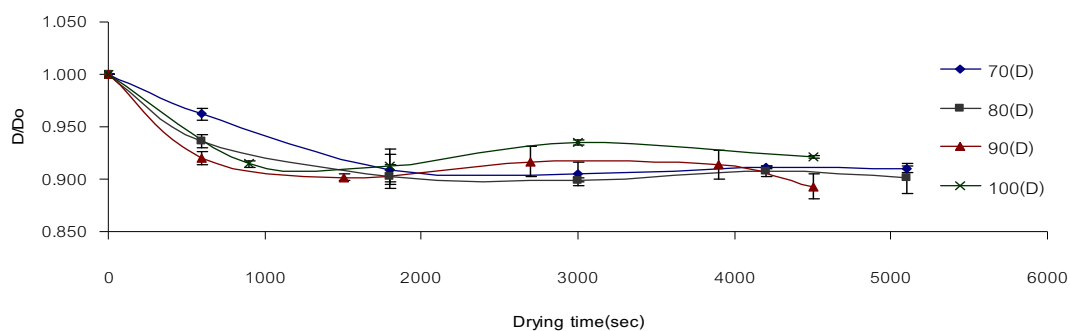
รูปที่ 5 สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของกล้วยแผ่นที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆ

รูปที่ 5 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กับความชื้นที่เส้นผ่านศูนย์กลางของกล้วยเท่ากับ 3.5 และ 2.5 เซนติเมตร พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของกล้วยแผ่นขึ้นอยู่กับความชื้น และอุณหภูมิการอบแห้ง ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลจะลดลงเมื่อความชื้นลดลงเป็นผลมาจากน้ำภายในชั้นกล้วยเหลืออยู่น้อย เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิที่มีต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลพบว่าเมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลสูงขึ้น สำหรับผลเส้นผ่านศูนย์กลางมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลน้อยเนื่องจากการแพร่ความชื้นส่วนใหญ่อยู่ในด้านของความหนา

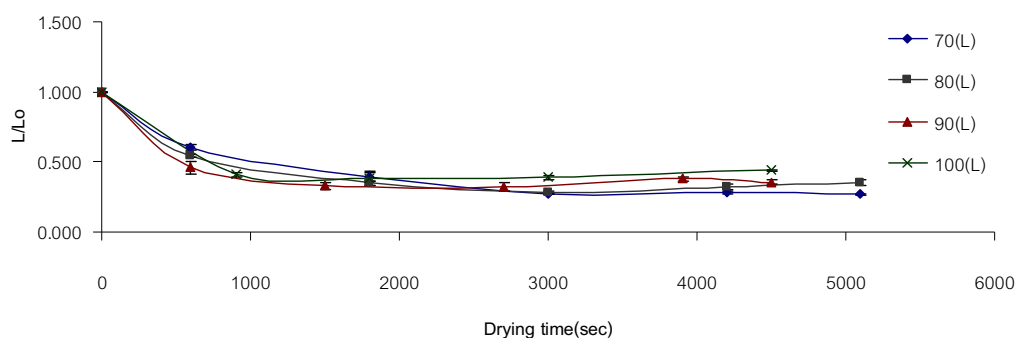
คุณภาพของกล้วยแผ่นหลังการอบแห้ง

การทดสอบคุณภาพด้านการหดตัว

การหดตัวของกล้วยแผ่นหลังการอบแห้งนั้นเป็นผลเนื่องมาจากความร้อนของตัวกลางของการอบแห้งที่กล้วยแผ่นได้รับขณะทำการอบแห้ง เกิดการเปลี่ยนแปลงความชื้นระหว่างการอบแห้ง และก่อให้เกิดความเครียดภายใน ทำให้กล้วยแผ่นเหี่ยวยุบและมีปริมาตรลดลง การสูญเสียนี้ทำให้เซลล์ของกล้วยแผ่นหดตัวจากผิวนอก โดยบริเวณขอบของกล้วยแผ่นเป็นส่วนที่แข็งจะคงสภาพไว้ และจะเว้าลงไปบริเวณรอบๆจุดศูนย์กลางซึ่งเป็นส่วนที่เนื้อกล้วยอ่อนกว่าส่วนที่เป็นขอบ กล้วยเป็นอาหารที่มีน้ำมากจึงเกิดการหดตัวบิดเบี้ยวได้มากดังแสดงในรูปที่ 6 และ 7 ซึ่งพบว่าจะเกิดการหดตัวเมื่อความชื้นลดลง โดยทางด้านเส้นผ่านศูนย์กลางจะหดตัวประมาณ 10% ส่วนทางด้านความหนาจะทำให้กล้วยแผ่นเกิดการหดตัว 60%



รูปที่ 6 แสดงการหดตัวของกล้วยแผ่นทางด้านเส้นผ่านศูนย์กลางที่อุณหภูมิการอบแห้งต่างๆ



รูปที่ 7 แสดงการหดตัวของกล้วยแผ่นทางด้านความหนาที่อุณหภูมิการอบแห้งต่างๆ

จากรูปที่ 7 พบว่าช่วงหลังที่มีการเพิ่มขึ้นของขนาดความหนาของแผ่นกล้วยเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงผลของอุณหภูมิมีผลต่อการหดตัวทางด้านขอบเป็นหลัก

ตารางที่ 1 แสดงผลของการวัดการหดตัวของกล้วยแผ่นหลังการอบแห้งพบว่ากล้วยแผ่นมีการหดตัวมากเมื่อทำการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิต่ำซึ่งจะใช้เวลาในการอบแห้งนานกว่าการอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูง และมีการหดตัวน้อยลงเมื่ออุณหภูมิสูง ทั้งนี้เนื่องจากกล้วยแผ่นที่อบแห้งภายใต้อุณหภูมิสูงทำให้เกิดการอบแห้งที่รวดเร็ว น้ำที่อยู่ผิวของกล้วยแผ่นจะระเหยไปอย่างรวดเร็วทำให้ผิวที่อยู่ข้างนอกแห้งและเกิดการแข็งตัวที่ผิว ซึ่งการแข็งตัวที่ผิวนี้จะช่วยรักษาสภาพรูปทรงและปริมาตรของกล้วยแผ่นไม่ให้เกิดการหดตัวมาก นอกจากนี้จากตารางที่ 1 กล้วยแผ่นมีการหดตัวทางด้านความหนามากกว่าทางด้านเส้นผ่านศูนย์กลางเนื่องจากทางด้านความหนามีพื้นที่การระเหยมากกว่าทางด้านเส้นผ่านศูนย์กลางซึ่งน้ำระเหยตัวได้ยากกว่า

ตารางที่ 1 เปอร์เซนต์การหดตัวของกล้วยหลังการอบแห้งทางด้านเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) และทางด้านความหนา (L)

Temperature(°C)	%Shrinkage(D)	%Shrinkage(L)
70	9.52±0.25	73.11±0.79
80	9.92±1.41	64.56±2.04
90	10.72±1.19	64.39±1.49
100	7.32±0.45	56.17±0.24

การทดสอบคุณภาพด้านสี

สำหรับการอบแห้งกล้วยแผ่นที่ได้หลังจากการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70, 80, 90 และ 100°C เมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าจะพบว่าที่อุณหภูมิ 90°C กล้วยแผ่นโดยรวมแล้วเริ่มจะมีสีน้ำตาลและมีสีน้ำตาลค่อนข้างแดงที่อุณหภูมิ 100°C ชัดเจนแต่มีความอ่อน-เข้มที่แตกต่างกันซึ่งสีที่เข้มที่สุดบริเวณรอบจุดศูนย์กลางของกล้วยเนื่องจากบริเวณนี้มีปริมาณน้ำตาลมากกว่าบริเวณอื่น เมื่อทำการเทียบสีของกล้วยแผ่นที่ได้หลังการอบแห้งกับสีมาตรฐาน R.H.S. Color Charts จะพบว่าสีของกล้วยแผ่นที่ได้ดังตารางที่ 2 ซึ่งแสดงผลของสีของกล้วยแผ่นหลังการอบแห้ง ในเทอมของตัวแปร L, a และ b นั้น จัดอยู่ในกลุ่ม GREYED- ORANGE 163C สำหรับอุณหภูมิการอบแห้งที่ 100°C โดยให้สีน้ำตาลเข้มมากกว่าที่อุณหภูมิต่ำสังเกตได้จากค่า L และ ค่า b ที่ลดลงและค่า a ที่เพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงนั้นอิทธิพลของอุณหภูมิจะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลได้สูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ แม้ว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะใช้เวลาในการอบแห้ง

น้อยกว่าก็ตาม และ GREYED-YELLOW 162C สำหรับอุณหภูมิการอบแห้งที่ 70 และ 80 °C ส่วน 90°C อยู่ในกลุ่ม GREYED-YELLOW 162B

ตารางที่ 2 สีของกล้วยแผ่นหลังการอบแห้งที่อุณหภูมิต่างๆ

Temperature(°C)	L-value	a-value	b-value
70	64.34±1.49 ^a	4.55±0.73 ^a	24.11±0.58 ^a
80	63.16±0.72 ^a	4.59±0.45 ^a	24.81±0.58 ^a
90	63.11±1.44 ^a	4.39±0.48 ^a	21.78±0.97 ^b
100	59.27±1.70 ^b	7.06±0.95 ^b	23.30±0.45 ^c

หมายเหตุ: อักษรที่เหมือนกันภายในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ 95%

การทดสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส

คุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของกล้วยแผ่นจะพิจารณาจากค่าความแข็ง (Hardness) จำนวนยอด (Number of peaks) ซึ่งจำนวนยอด และค่าความชันเริ่มต้น (Initial slope) จะแสดงถึงความกรอบของอาหาร หากมีจำนวนยอดมากและความชันเริ่มต้นมากก็แสดงว่าผลิตภัณฑ์มีความกรอบมาก เนื่องจากยอดเกิดจากการเปลี่ยนแปลงความชันที่เกิดจากผลิตภัณฑ์มีช่องว่างหรือโพรงอากาศภายในที่ค่อนข้างเปราะและแตกง่าย

ตารางที่ 3 ความแข็ง (Hardness) จำนวนยอด (Number of peaks) และค่าความชันเริ่มต้น (Initial slope)

Temperature(°C)	Hardness (N)	Number of peaks	Initial slope(N/mm)
70	N/A	N/A	N/A
80	74.03±26.84 ^b	18.00±6.00 ^{ab}	9.24±4.57 ^a
90	41.31±22.49 ^c	18.00±4.00 ^{ab}	9.39±9.87 ^a
100	24.49±4.09 ^c	20.00±3.00 ^b	9.23±5.35 ^a

หมายเหตุ: อักษรที่เหมือนกันภายในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ 95%

N/A หมายถึง ไม่ข้อมูลการทดลอง

จากตารางที่ 3 แสดงค่าความแข็ง จำนวนยอด และความชันเริ่มต้นหลังการอบแห้งพบว่าอุณหภูมิการอบแห้งมีแนวโน้มว่าไม่มีผลต่อความกรอบโดยสังเกตได้จากจำนวนยอด และความชันเริ่มต้นที่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ 95% แต่มีผลต่อความแข็งโดยอุณหภูมิสูงให้ค่าความแข็งน้อยกว่าอุณหภูมิต่ำ ส่วนที่อุณหภูมิ 70°C ไม่สามารถหาค่าได้เนื่องจากความชื้นของกล้วยแผ่นมากกว่า 4%db

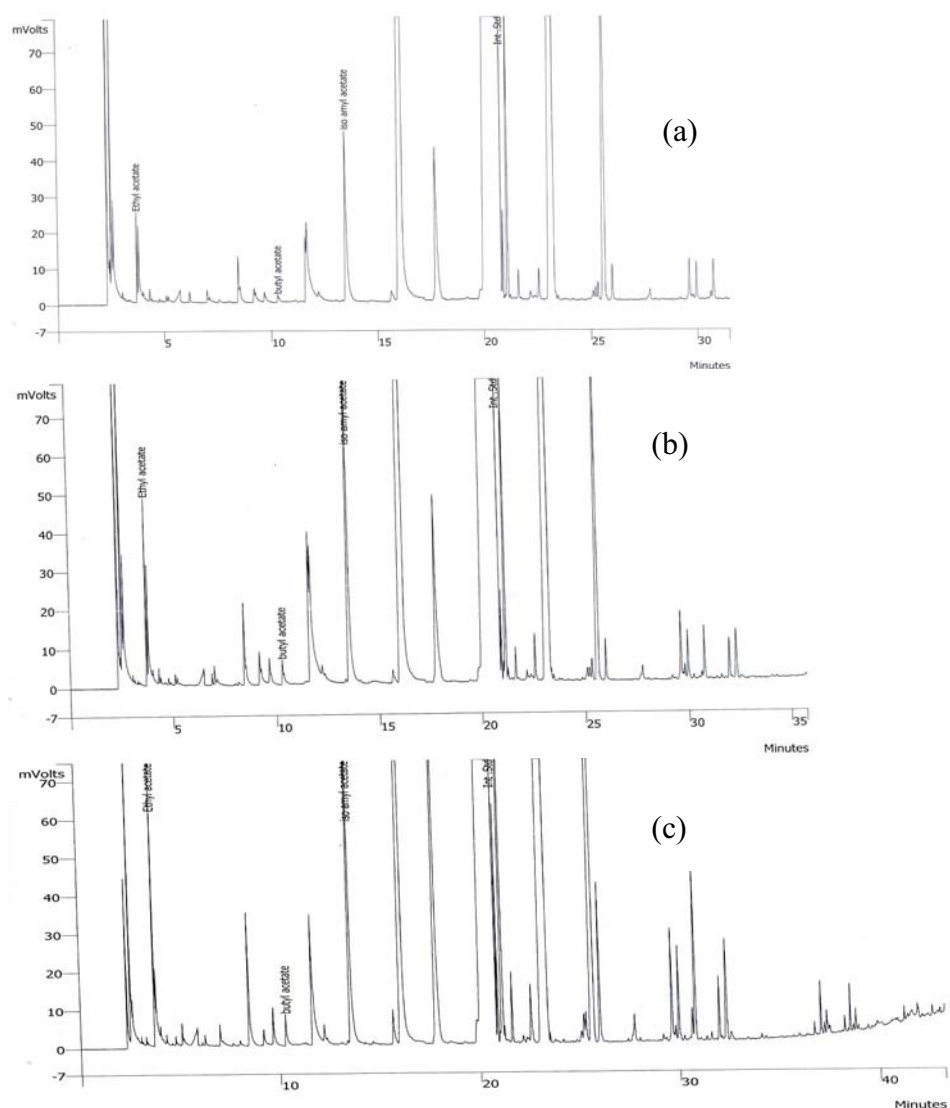
สารประกอบที่ระเหยง่าย

ในกล้วยหอมมีสารประกอบที่ให้กลิ่นอยู่มากโดยส่วนมากสารประกอบที่พบคือ ester, alcohols และ carbonyls โดยสารประกอบที่ระเหยง่ายที่สนใจที่จะวิเคราะห์ทางด้านปริมาณในงานวิจัยนี้เป็นสารประกอบพวก ester ประกอบด้วย Ethyl acetate, Butyl acetate และ Isoamyl acetate

จากรูปที่ 8 แสดงโครมาโทแกรมของสารประกอบที่ระเหยง่ายของกล้วยหอมระยะการสุกที่ 3, 5 และ 7 ที่วิเคราะห์ด้วย GC พบว่าให้พีคของสาร Ethyl acetate, Butyl acetate และ Isoamyl acetate ที่เวลา 4.38, 9.68 และ 11.56 นาที ตามลำดับ

โดยระยะการสุกที่ 3 จะให้พืชของสารประกอบที่ระเหยง่ายน้อยกว่า มีพื้นที่คือน้อยกว่าระยะการสุกที่เพิ่มขึ้น เนื่องมาจากระหว่างระยะการสุก metabolism ของกล้วยจะเปลี่ยนไปเป็น catabolism และรสชาติจะเริ่มเกิดขึ้น อีกทั้งปริมาณของลิปิด คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และกรดอะมิโน สามารถเกิดกระบวนการที่มีเอนไซม์เกี่ยวข้องเปลี่ยนไปเป็นกลิ่นที่ระเหยได้ ซึ่งกล้วยระยะที่ 3 ให้พื้นที่ที่พืชของ Ethyl acetate, Butyl acetate และ Isoamyl acetate น้อยกว่าในระยะที่ 7 95.7%, 215.83% และ 87.75% ตามลำดับ

จากตารางที่ 4 แสดงอัตราส่วนพื้นที่ที่พืชของกล้วยแผ่นก่อนการอบแห้งที่ระยะความสุก 3, 5 และ 7 จากข้อมูลการทดลองที่ได้แสดงว่ากล้วยที่สุกมากจะทำให้มีอัตราส่วนพื้นที่ที่พืชเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากกระบวนการทางชีวสังเคราะห์ (Biosynthesis) ของสารประกอบที่ให้กลิ่นจากกรดอะมิโน (amino acid) เช่น valine และ leucine และ β - oxidation หรือเนื่องมาจากกระบวนการการสลายตัวของกรดไขมัน (fatty acid) ระหว่างการสุก (Boudhrioua *et al.*, 2003)



รูปที่ 8 แสดงโครมาโทแกรมสารประกอบที่ระเหยง่าย, (a) กล้วยหอมระยะการสุกที่ 3, (b) กล้วยหอมระยะการสุกที่ 5, (c) กล้วยหอมระยะการสุกที่ 7

ตารางที่ 4 แสดงอัตราส่วนพื้นที่พีคของกล้วยแผ่นก่อนการอบแห้งที่ระยะความสูง 3, 5 และ 7

ระยะความสูงของกล้วย	Relative amounts of volatile compound		
	Ethyl acetate	Butyl acetate	Isoamyl acetate
3	0.001342794	0.000111199	0.002495957
5	0.001649759	0.000257042	0.003679016
7	0.00262781	0.0003512	0.004686142

หมายเหตุ: Relative amount = พื้นที่พีคของสารประกอบที่ระเหยง่ายหารด้วยพื้นที่พีค internal standard

จากตารางที่ 5 แสดงอัตราส่วนพื้นที่พีคของกล้วยแผ่นระยะการสุก 5 หลังการอบแห้งที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าปริมาณสารประกอบที่ระเหยง่ายที่สนใจมีการเปลี่ยนแปลงจากตอนเริ่มต้นโดย isoamyl acetate ลดลงมาก เมื่อใช้อุณหภูมิการอบแห้งสูงขึ้น ในขณะที่ ethyl acetate และ butyl acetate ลดลงน้อย ยกเว้นที่อุณหภูมิ 100°C butyl acetate มีค่าเพิ่มขึ้นจากตอนเริ่มต้น

ตารางที่ 5 แสดงอัตราส่วนพื้นที่พีคของกล้วยแผ่นหลังการอบแห้งที่อุณหภูมิต่างๆ

Temperature(°C)	Relative amounts of volatile compound		
	Ethyl acetate	Butyl acetate	Isoamyl acetate
เริ่มต้น	0.00360577	0.002317863	0.005812659
70	0.000763707	0.000189947	0.001343842
80	0.000528651	0.000241016	0.000528651
90	0.001856319	0.001187114	1.39281E-09
100	0.002484862	0.003931573	2.64993E-09

หมายเหตุ: Relative amount = พื้นที่พีคของสารประกอบที่ระเหยง่ายหารด้วยพื้นที่พีค internal standard

สรุป

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิอบแห้งที่มีต่อสารประกอบที่ระเหยง่าย และคุณภาพทางกายภาพในกล้วยแผ่น สามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมีผลต่ออัตราการลดความชื้น การหดตัว สี สารประกอบที่ระเหยง่ายโดยอุณหภูมิสูงสามารถลดความชื้นของกล้วยแผ่นได้เร็วกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำและใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่า คุณภาพทางด้านการหดตัวพบว่ากล้วยแผ่นมีการหดตัวทางด้านความหนามากกว่าทางด้านเส้นผ่านศูนย์กลาง และอุณหภูมิสูงมีการหดตัวน้อยกว่าอุณหภูมิต่ำคุณภาพทางด้านสีกล้วยแผ่นหลังการอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูงมีการเปลี่ยนแปลงสีจากสีขาวอมเหลืองเป็นสีน้ำตาลเข้มหลังการอบแห้งซึ่งสังเกตได้จากค่าความสว่าง (L) และค่าความเหลือง (b) ที่ลดลง เมื่อพิจารณาสารประกอบที่ระเหยง่ายพบว่าปริมาณ isoamyl acetate ลดลงมากเมื่อใช้อุณหภูมิการอบแห้งสูงขึ้น ในขณะที่ ethyl acetate และ butyl acetate ลดลงน้อย ยกเว้นที่อุณหภูมิ 100°C butyl acetate มีค่าเพิ่มขึ้นจากตอนเริ่มต้น ส่วนคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสพบว่าอุณหภูมิไม่มีผลต่อค่าเริ่มต้นและจำนวนยอดของกล้วยแผ่นหลังการอบแห้งแต่มีผลต่อความแข็งโดยอุณหภูมิสูงให้ค่าความแข็งน้อยกว่าอุณหภูมิต่ำ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษาและสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ให้การสนับสนุนเงินทุนที่ใช้ในงานวิจัยของโครงการนี้

เอกสารอ้างอิง

Boudhrioua, N., Giampaoli, P. and Bonazzi, C. (2003). Changes in aromatic components of banana during ripening and air-drying. *Lebensm.-Wiss. u. -Technol.*, Vol. 36, pp. 633-642.

Crank, J. (1975). *The Mathematics of Diffusion*. Clarendon Press, Oxford.

Karathanos, V.T., Villalobos, G. and Saravacos, G.D. (1990). Comparison of two methods of estimation of the effective moisture diffusivity from drying data. *Journal of Food Science*, 55(1), 218-223.

Maskan, M. (2000). Microwave/air and microwave finish drying of banana. *Journal of Food Engineering*, Vol. 44, pp. 71-78.

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งแผ่นโฟมกล้วย
และคุณภาพของแผ่นโฟมกล้วยอบแห้ง
Mathematical Model Including Shrinkage and Quality Investigation
of Banana Foam Mat Drying

รติยา ฐวพาณิชยานันท์^{1,*}, สมเกียรติ ปรัชญาวรากร² และสมชาติ โสภณธนฤทธิ์¹

¹สายวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ ม.เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

126 ถ.ประชาธิปไตย บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

(E-mail: t_ratiya@yahoo.com)

²ภาควิชาเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ม.เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 126 ถ.ประชาธิปไตย บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

(E-mail: somkiat.pra@kmutt.ac.th; somchart_sop@kmutt.ac.th)

*Corresponding Author

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของแผ่นโฟมกล้วยขณะอบแห้ง โดยรวมการหดตัวของวัสดุในแบบจำลองด้วย วิธีขอบเขตเคลื่อนที่และขอบเขตคงที่ที่ถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีการรวมการหดตัวของวัสดุ และเปรียบเทียบผลการทำนายด้วยวิธีดังกล่าวข้างต้นกับผลการทดลอง ในการทดลองนั้นได้ออบแห้งแผ่นโฟมกล้วยที่ความหนาแน่น 0.3, 0.5 และ 0.7 กรัมต่อมิลลิเมตร อุณหภูมิ 60, 70 และ 80 °C และความเร็วมวล 0.5 เมตรต่อวินาที สำหรับคุณภาพของแผ่นโฟมกล้วยอบแห้งที่ทำการศึกษาได้แก่คุณภาพด้านเนื้อสัมผัส และโครงสร้างระดับจุลภาค ผลที่ได้จากแบบจำลองแสดงให้เห็นว่า วิธีขอบเขตเคลื่อนที่สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของแผ่นโฟมกล้วยได้แม่นยำกว่ากรณีใช้วิธีขอบเขตคงที่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีโฟมกล้วยที่มีความหนาแน่นต่ำ สำหรับคุณภาพของแผ่นโฟมกล้วยอบแห้งนั้นพบว่า ความหนาแน่นของโฟมกล้วยส่งผลต่อความแข็ง ความกรอบ และลักษณะโครงสร้างภายใน ขณะที่อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งไม่ส่งผลต่อคุณภาพของแผ่นโฟมกล้วยในด้านดังกล่าวเมื่ออบแห้งที่ความหนาแน่นของโฟมกล้วยเดียวกัน

คำสำคัญ

การหดตัว/ แบบจำลอง/ โฟมกล้วย/ สมประสิทธิภาพแพร่ความชื้น

Abstract

The diffusion model including shrinkage has been developed for predicting the change of moisture content in banana foam mats during drying. The moving boundary using variable grid and the immobilizing boundary using an alternative frame of reference were used in exploring their capabilities to predict the moisture change. The moisture content of banana foam mats at three foam densities of 0.3, 0.5 and 0.7 g/ml dried at three temperatures of 60, 70 and 80 °C and at a superficial air velocity of 0.5 m/s were monitored and validated with the proposed models. The qualities of the final product i.e. texture and microstructure were also investigated. The moving boundary method can predict the average moisture content more accurate than the immobilizing

boundary method especially in the case of low density banana foam. The quality determinations have shown that the foam density significantly affected hardness, crispness and morphology of dried banana foam whilst the drying temperature did not influence on those qualities.

Keywords

Banana foam/ Modeling/ Moisture Diffusivity/ Shrinkage

บทนำ

กล้วยหอมเป็นผลไม้ที่เกิดการเน่าเสียได้ง่ายหลังการเก็บเกี่ยว การผลิตกล้วยแผ่นเป็นทางเลือกหนึ่งซึ่งช่วยยืดอายุในการเก็บรักษา อีกทั้งเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ การนำกระบวนการทำโฟมมาใช้ร่วมกับการอบแห้งเป็นวิธีที่น่าสนใจในการผลิตกล้วยแผ่นอบกรอบ เนื่องจากกล้วยที่ผ่านการทำโฟม (โฟมกล้วย) จะถูกอบแห้งให้เหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 0.04 (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง) ซึ่งเป็นความชื้นที่ต้องการสำหรับผลิตภัณฑ์อบกรอบ (Matz, 1976) ได้แม้อบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ หากไม่นำกระบวนการทำโฟมมาใช้ร่วมกับการอบแห้ง อาจต้องใช้อุณหภูมิในการอบแห้งค่อนข้างสูงเพื่อลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ให้ได้ตามที่ต้องการ ซึ่งอาจส่งผลต่อสีของผลิตภัณฑ์ได้ และถ้าใช้อุณหภูมิในการอบแห้งต่ำ ก็จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งค่อนข้างนาน โครงสร้างของโฟมกล้วยก่อนนำไปอบแห้งจะอยู่ในสภาพคอลลอยด์ นั่นคือมีฟองอากาศกระจายตัวอยู่ในวัฏภาคต่อเนื่อง (continuous phase) ในที่นี้คือกล้วยปั่นซึ่งมีลักษณะเป็นของเหลวข้นผสมกับไข่ขาวที่ใช้เป็นสารก่อโฟม และเมื่อนำโฟม กล้วยไปอบแห้ง น้ำจะเริ่มระเหยออกและโครงสร้างของโฟมกล้วยจะเปลี่ยนแปลงไป โดยส่วนที่เป็นฟองอากาศจะกลายเป็นโพรงหรือช่องว่างอากาศแทน ซึ่งโครงสร้างเหล่านี้จะส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของน้ำออกจากโฟมกล้วยขณะอบแห้ง โดยน้ำสามารถเคลื่อนที่ได้ทั้งในรูปของของเหลวและไอ สำหรับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นได้คิดรวมกลไกการเคลื่อนที่ของน้ำในรูปแบบต่างๆ เป็นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (Effective moisture diffusivity) เมื่อน้ำเคลื่อนที่ออกจากวัสดุพูนขณะอบแห้ง จะเกิดความไม่สมดุลกันของความดันระหว่างภายในและภายนอกวัสดุ ส่งผลให้วัสดุนั้นเกิดการหดตัว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของโฟมกล้วยพบว่า เกิดการหดตัวอย่างมาก เนื่องจากมีการยุบตัวของฟองอากาศร่วมกับความไม่สมดุลกันของความดันดังกล่าวข้างต้น (Thuwapanichayanan *et al.*, 2006) ซึ่งการหดตัวของโฟมกล้วยจะส่งผลให้ระยะทางการเคลื่อนที่ของความชื้นจากภายในสู่ภายนอกสั้นลง ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งแผ่นโฟมกล้วยจึงรวมการหดตัวของวัสดุเข้าไปด้วยเพื่อความถูกต้องและแม่นยำในการทำนายการลดลงของความชื้น และระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง สำหรับวิธีการที่ใช้ในการแก้ปัญหาในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งที่ได้รวมการหดตัวของวัสดุนี้มี 2 วิธี คือ วิธีขอบเขตเคลื่อนที่ (Balaban, 1989) และขอบเขตคงที่ (Rovedo *et al.*, 1995)

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของแผ่นโฟมกล้วยขณะอบแห้ง โดยรวมการหดตัวของวัสดุในแบบจำลองด้วย และเปรียบเทียบผลการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นระหว่างวิธีขอบเขตเคลื่อนที่และขอบเขตคงที่ และศึกษาอิทธิพลของความหนาแน่นของโฟมกล้วย และอุณหภูมิของอากาศร้อนที่มีผลต่อคุณภาพของแผ่นโฟมกล้วยอบแห้งในด้านเนื้อสัมผัส และลักษณะโครงสร้างภายใน

อุปกรณ์และวิธีการ

นำกล้วยหอมระยะสุกที่ 5 (ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ประมาณ 21-23°Brix) มาผ่านการพรีทรีตเมนต์ด้วยการแช่ในสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ความเข้มข้น 1% (w/w) นาน 2 นาที และล้างด้วยน้ำกลั่นนาน 30 วินาที (Krokida *et al.*,

2000) นำกล้วยที่ผ่านการพรีทรีทเมนต์มาสับให้ละเอียด และปั่นด้วยเครื่องปั่น (blender) เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นใส่ไข่ขาวลงในกล้วยปั่นปริมาณ 5% ใช้ช้อนกวนให้เข้ากัน แล้วนำไปผ่านการตีด้วยเครื่องผสม Kitchen Aid รุ่น 5K5SS ด้วยอัตราเร็วสูงสุด เพื่อลดความหนาแน่นของกล้วย โดยความหนาแน่นของโฟมกล้วยที่ใช้ในการอบแห้งคือ 0.3, 0.5 และ 0.7 g/ml จากนั้นนำแผ่นโฟมกล้วยไปอบแห้งในเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบตู้ โดยวางแผ่นโฟมกล้วยความหนา 5 mm บนตะแกรงลวดซึ่งหุ้มด้วยกระดาษฟอยล์ แล้วนำเข้าตู้อบแห้ง โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งคือ 60, 70 และ 80 °C (ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ โดยความชื้นสัมพัทธ์จะแปรตามอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง) ความเร็วลม 0.5 เมตรต่อวินาที อบแห้งจนกระทั่งเหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 0.03 (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง)

สำหรับการทดสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของแผ่นโฟมกล้วยอบแห้งนั้น จะทดสอบโดยใช้เครื่อง Texture Analyzer รุ่น TA.XT.plus ค่าความถูกต้อง $\pm 0.001\text{N}$ ทำการทดสอบในลักษณะของแรงกด โดยใช้ค่า Maximum Force เป็นตัวบอกความแข็ง (Maximum Force มากมีความแข็งมาก) และใช้ค่า Initial slope เป็นตัวบอกความกรอบ (Initial slope มากมีความกรอบมาก) สำหรับหัวกดที่ใช้ในการทดสอบเป็นหัวกดทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 mm ความเร็วของหัวกด 2 mm/s ใช้ตัวอย่างในการทดสอบ 8 ตัวอย่าง สำหรับการศึกษาลักษณะโครงสร้างภายในแผ่นโฟมกล้วยอบแห้ง ใช้ Scanning Electron Microscope (SEM) รุ่น JEOL JSM-5600LV ที่กำลังขยาย 35 เท่า

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งแผ่นโฟมกล้วย

ในงานวิจัยนี้ใช้สมการการแพร่ของ Fick ในการอธิบายการถ่ายเทความชื้นภายในแผ่นโฟมกล้วย โดยสมมติการแพร่ของน้ำออกจากแผ่นโฟมกล้วยเกิดจากเกรเดียนต์ของความเข้มข้นของความชื้น และสมมติให้แผ่นโฟมกล้วยมีลักษณะเป็นแผ่นแบนซึ่งกว้างและยาวมาก (infinite slab), การถ่ายเทความชื้นและการหดตัวเกิดขึ้นในทิศทางความหนาเพียงทิศทางเดียว และไม่คิดความต้านทานการถ่ายเทมวลที่ผิววัสดุ ดังนั้นสามารถเขียนสมการของการถ่ายเทมวลได้ดังนี้ (Crank, 1975)

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_v^{eff} \frac{\partial M}{\partial x} \right), 0 < x < L(t) \quad (1)$$

เมื่อ D_v^{eff} คือค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (m^2/s), L คือความหนาของแผ่นโฟมกล้วย (m), M คือความชื้นของแผ่นโฟมกล้วย (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง), x คือพิกัดตามทิศทางการแพร่ของน้ำ, t คือเวลา (s).

สำหรับการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่แปรตามความชื้นนั้นจะใช้วิธีการของความชื้น (Karathanos et al., 1990) โดยคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างอัตราการอบแห้งที่ได้จากการทดลองและอัตราการอบแห้งทางทฤษฎี ณ ความชื้นเดียวกัน แสดงดังสมการ (2)

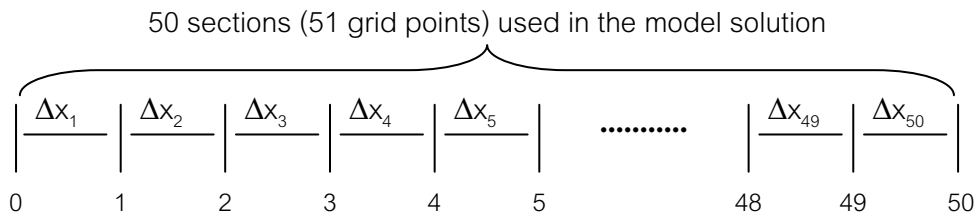
$$D_v^{eff} = [(dMR/dt)_{exp} / (dMR/dFo)_{th}] \times L^2 \quad (2)$$

เมื่อ Fo คือ the Fourier number ($Fo = D_v^{eff} t/L^2$) และ MR คือ อัตราส่วนความชื้นของแผ่นโฟมกล้วย หมายถึง สำหรับความหนาของแผ่นโฟมกล้วย (L) จะเป็นความหนาที่เปลี่ยนแปลงไปตามความชื้น

วิธีการหาคำตอบ

วิธีขอบเขตเคลื่อนที่ (Moving boundary method)

เป็นวิธีที่ระยะทางการแพร่ของความชื้นที่ใช้ในการคำนวณ (x) มีค่าไม่คงที่ในแต่ละเวลา โดยระยะระหว่าง node ต่างๆ (Δx) จะมีค่าไม่เท่ากันและไม่คงที่ ขึ้นอยู่กับความชื้นเฉลี่ยระหว่าง node นั้นๆ สำหรับการคำนวณหาความชื้นของแผ่นโฟมกล้วยที่เวลาต่างๆ นั้น เริ่มต้นจากการคำนวณหาความชื้นที่ node ต่างๆ ภายในแผ่นโฟมกล้วย โดยเขียนสมการ (1) ให้อยู่ในรูปของไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ แบบ Explicit และใช้ภาวะขอบเขตคือ ความชื้นที่ผิวมีค่าเท่ากับความชื้นสมดุล (Garcia *et al.*, 1988) ซึ่งคำตอบของสมการ (1) จะมีเสถียรภาพก็ต่อเมื่อ $0 < (D_v^{eff} \Delta t / \Delta x^2) < 0.5$ ดังนั้นในการคำนวณจะต้องกำหนดค่า Δt ให้เป็นไปตามข้อกำหนดดังกล่าว และเมื่อคำนวณ



รูปที่ 1 แสดง node ต่างๆ และระยะระหว่าง node ภายในแผ่นโฟมกล้วย

ค่าความชื้นที่ node ต่างๆ ภายในแผ่น โฟมกล้วยได้แล้ว จากนั้นทำการปรับระยะระหว่าง node ต่างๆ โดยสมมติให้ระยะระหว่าง node ต่างๆ เป็นฟังก์ชันของความชื้นเฉลี่ยระหว่าง node นั้นๆ ดังสมการ (3)

$$\Delta x_i / \Delta x_0 = a + b(M_{av} / M_0) \quad (3)$$

เมื่อ M_{av} คือความชื้นเฉลี่ยระหว่าง node นั้นๆ (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง), M_0 คือความชื้นเริ่มต้นระหว่าง node นั้นๆ (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง), Δx_i คือระยะระหว่าง node ต่างๆ (m) และ Δx_0 คือระยะเริ่มต้นระหว่าง node ต่างๆ (m) สำหรับค่าคงที่ a และ b สามารถหาได้จากการทดลองการหดตัวของแผ่นโฟมกล้วย (Thuwapanichayan et al., 2006) ซึ่งจากการทดลองพบว่าปริมาตรของแผ่นโฟมกล้วยจะลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นกับความชื้น แสดงดังสมการ (4)

$$V/V_0 = a + bM/M_0 \quad (4)$$

เนื่องจากการหดตัวของแผ่นโฟมกล้วยเกิดขึ้นในทิศทางความหนาเท่านั้น ดังนั้นสามารถเขียนสมการ (3) ให้อยู่ในรูปของความหนาของวัสดุได้ดังสมการ (5)

$$L/L_0 = a + bM/M_0 \quad (5)$$

โดยที่ a มีค่าเท่ากับ 0.349, 0.496 และ 0.503 b มีค่าเท่ากับ 0.702, 0.521 และ 0.507 ที่ความหนาแน่นของโฟมกล้วยเท่ากับ 0.3, 0.5 และ 0.7 g/ml ตามลำดับ L_0 คือความหนาเริ่มต้นของแผ่นโฟมกล้วย (m) M_0 คือความชื้นเริ่มต้นของแผ่นโฟมกล้วย (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง) V และ V_0 คือปริมาตรและปริมาตรเริ่มต้นของแผ่นโฟมกล้วย (m^3) ตามลำดับ

วิธีขอบเขตคงที่ (Immobilizing boundary method)

เป็นอีกหนึ่งวิธีที่ใช้ในการแก้ปัญหาสมการการถ่ายเทมวลกรณีที่วัสดุมีการหดตัว แต่วิธีนี้จะแตกต่างจากวิธีขอบเขตเคลื่อนที่คือ ระยะทางการแพร่ของความชื้น (x) จะมีค่าคงที่ตลอดการคำนวณ ซึ่งในความเป็นจริงขณะวัสดุเกิดการหดตัว ปริมาตรของวัสดุ (หรือความหนาของวัสดุกรณีการหดตัวเกิดขึ้นในทิศทางความหนาเท่านั้น) จะเปลี่ยนแปลงไปตลอดระยะเวลาในการอบแห้ง แต่ความหนาสุดท้ายของวัสดุจะคงที่ ดังนั้นจึงใช้ความหนาสุดท้ายของวัสดุเป็นระยะอ้างอิงสำหรับการใช้

คำนวณการแพร่ของความชื้น โดยสัมพันธ์กับการแพร่ความชื้นกรณีใช้ความหนาของวัสดุจริง (D_v^{eff}) และกรณีใช้ความหนาสุดท้ายของวัสดุเป็นระยะอ้างอิง (D_f^{eff}) มีความสัมพันธ์กันดังสมการ (6) โดยมีหลักการในการคำนวณคือ อัตราการระเหยน้ำจะมีค่าเท่ากัน ไม่ว่าจะใช้ระยะใดเป็นระยะอ้างอิงก็ตาม (Gekas and Lamberg, 1991)

$$D_f^{eff} = \frac{D_v^{eff}}{(V/V_f)^2} \text{ or } D_f^{eff} = \frac{D_v^{eff}}{(L/L_f)^2} \quad (6)$$

ดังนั้นสามารถเขียนสมการของการถ่ายเทมวลกรณีใช้ความหนาสุดท้ายของวัสดุเป็นระยะอ้างอิงได้ดังสมการ (7)

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_f^{eff} \frac{\partial M}{\partial x} \right), 0 < x < L_f \quad (7)$$

แทนค่า D_f^{eff} จากสมการ (6) ลงในสมการ (7) ดังนั้น

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{D_v^{eff}}{(L/L_f)^2} \frac{\partial M}{\partial x} \right), 0 < x < L_f \quad (8)$$

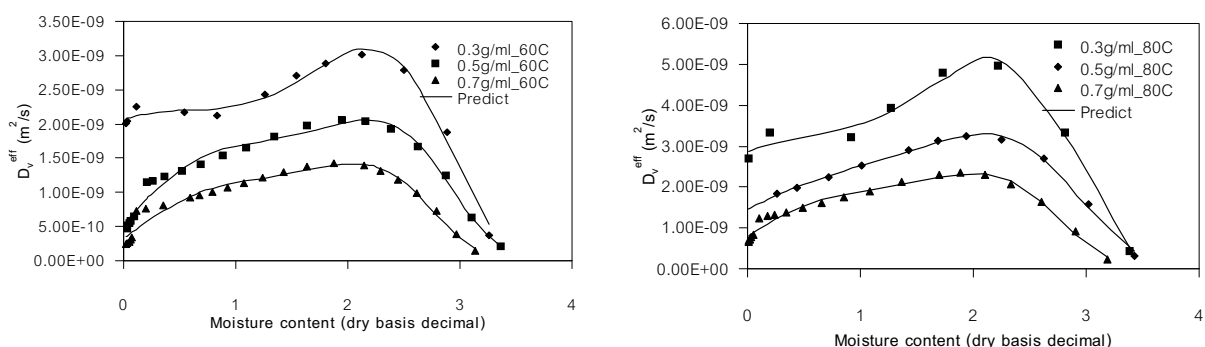
โดยที่ค่า L/L_f สามารถคำนวณได้จากสมการ (5) เนื่องจากค่า a ในสมการ (5) คือจุดตัดแกน y ซึ่งมีค่าเท่ากับ L_f/L_0 ดังนั้นสมการ (5) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ L/L_f ได้ดังนี้

$$L/L_f = 1 + \frac{b}{a} (M/M_0) \quad (9)$$

เมื่อ L_f คือความหนาสุดท้ายของแผ่นโฟมกล้วย (m) และ V_f คือปริมาตรสุดท้ายของแผ่นโฟมกล้วย (m^3)

ผลและวิจารณ์ ผลการทดลอง

จากการคำนวณหาความสัมพันธ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_v^{eff}) พบว่าค่า D_v^{eff} สูงเมื่อความหนาแน่นของโฟมกล้วยต่ำและอุณหภูมิของอากาศร้อนที่ใช้ในการอบแห้งสูง แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของแผ่นโฟมกล้วยที่เงื่อนไขการอบแห้งต่างๆ

จากรูปที่ 2 พบว่าในช่วงแรกของการอบแห้งค่า D_v^{eff} จะเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นลดลง เนื่องจากช่วงนี้เป็นช่วงที่อุณหภูมิของวัสดุเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นค่า D_v^{eff} จะลดลงตามความชื้นที่ลดลง ความสัมพันธ์ระหว่างค่า D_v^{eff} และความชื้นแสดงดังสมการ (10)

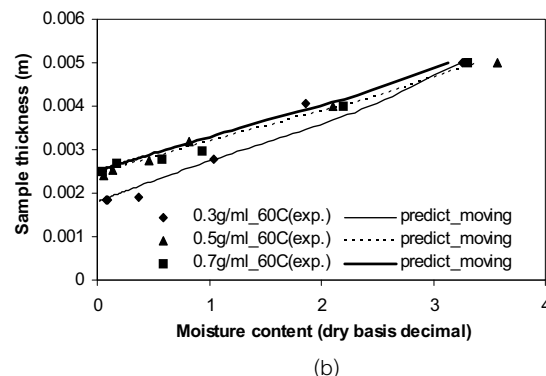
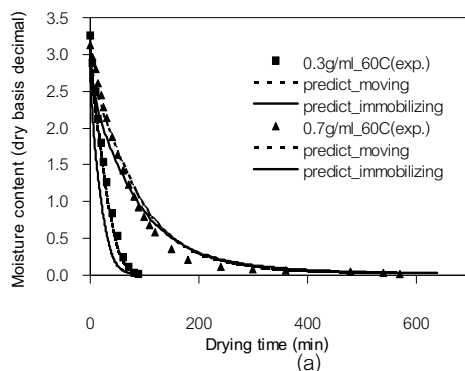
$$D_v^{eff}(M) = a \exp\left(\sum_{i=1}^4 \alpha_i M^i\right) \quad (10)$$

สำหรับค่า a และ α_i สามารถคำนวณได้ด้วยวิธี non-linear regression แสดงดังตารางที่ 1

รูปที่ 3 (a) แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นของแผ่นโฟมกลัวยขณะอบแห้งระหว่างการทดลองและการทำนายด้วยวิธีขอบเขตเคลื่อนที่และขอบเขตคงที่ที่ความหนาแน่นของโฟมกลัวยเท่ากับ 0.3 และ 0.7 g/ml จากรูปจะเห็นได้ว่าวิธีขอบเขตเคลื่อนที่สามารถทำนายการลดลงของความชื้นของแผ่นโฟมกลัวยได้ดีกว่าวิธีขอบเขตคงที่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความหนาแน่นของโฟมกลัวยเท่ากับ 0.3 g/ml ซึ่งค่า RMSE มีค่าเท่ากับ 0.13 และ 0.63 เมื่อใช้วิธีขอบเขตเคลื่อนที่และขอบเขตคงที่ในการทำนายตามลำดับ สาเหตุที่วิธีขอบเขตคงที่ทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของแผ่นโฟมกลัวยที่ความหนาแน่นเท่ากับ 0.3 g/ml ได้ไม่ดี เนื่องจากสมมติฐานของวิธีขอบเขตคงที่ที่กำหนดว่า ปริมาตรของวัสดุส่วนที่หดไปต้องมีค่าเท่ากับปริมาตรของน้ำที่ระเหยออก แต่จากการทดลองพบว่า ปริมาตรของแผ่นโฟมกลัวยที่ความหนาแน่นเท่ากับ 0.3 g/ml หดไปมากกว่าปริมาตรของน้ำที่ระเหยออก เนื่องจากมีการยุบตัวของฟองอากาศเข้าร่วมด้วย (ข้อมูลไม่ได้แสดง ณ ที่นี้) แต่เมื่อนำวิธีขอบเขตคงที่มาใช้ในการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของแผ่นโฟมกลัวยที่ความหนาแน่นเท่ากับ 0.7 g/ml พบว่าสามารถทำนายได้ใกล้เคียงกับวิธีขอบเขตเคลื่อนที่ โดย RMSE เมื่อใช้วิธีขอบเขตเคลื่อนที่และขอบเขตคงที่ในการทำนายมีค่าเท่ากับ 0.12 และ 0.19 ตามลำดับ เนื่องจากการหดตัวของแผ่นโฟมกลัวยที่ความหนาแน่นเท่ากับ 0.7 g/ml เป็นไปตามสมมติฐาน

ตารางที่ 1 ค่า a และ α_i (Eq. (10)) ที่ความหนาแน่นของโฟมกลัวยและอุณหภูมิของอากาศร้อนต่าง ๆ

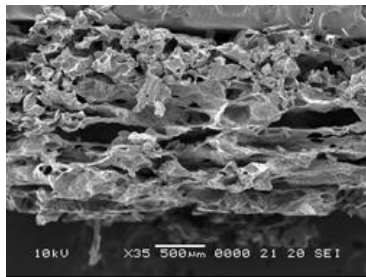
Drying condition		Empirical parameters					
Foam density, g/ml	Temperature, °C	$a \times 10^{-10}$	α_1	α_2	α_3	α_4	R ²
0.3	60	20.4978	0.3823	-0.750	0.6042	-0.138	0.980
	70	25.4514	0.5247	-1.013	0.7768	-0.177	0.964
	80	28.5214	0.4324	-0.602	0.5060	-0.121	0.983
0.5	60	5.5042	2.8784	-2.8579	1.3158	-0.2218	0.974
	70	12.9837	0.8666	-0.6938	0.3734	-0.0763	0.998
0.7	80	14.5071	1.0528	-0.8794	0.476	-0.099	0.996
	60	3.3549	3.1578	-3.2075	1.5468	-0.2762	0.953
	70	4.4478	3.7392	-4.0588	1.9792	-0.3497	0.945
	80	7.879	2.2188	-2.2754	1.1498	-0.2157	0.973



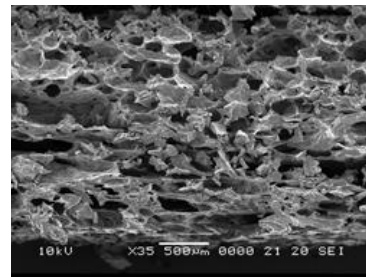
รูปที่ 3 (a) การเปลี่ยนแปลงความชื้น และ (b) การเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นโฟมกลัวยขณะอบแห้ง

รูปที่ 3 (b) แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นโฟมกัวยขณะอบแห้งระหว่างการทดลองและการทำนายด้วยวิธีขอบเขตเคลื่อนที่ (วิธีขอบเขตคงที่จะไม่สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นโฟมกัวยได้ เนื่องจากไม่ได้ใช้ความหนาของวัสดุจริงในการคำนวณ) จากรูปพบว่าวิธีขอบเขตเคลื่อนที่สามารถทำนายการหดตัวของแผ่นโฟมกัวยขณะอบแห้งได้อย่างแม่นยำ โดยแผ่นโฟมกัวยที่มีความหนาแน่นต่ำกว่า 0.5 g/ml จะเกิดการหดตัวมาก ขณะที่แผ่นโฟมกัวยที่มีความหนาแน่นตั้งแต่ 0.5 g/ml ขึ้นไป การหดตัวจะไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

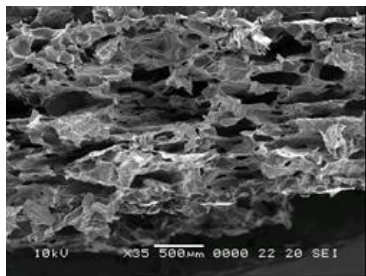
สำหรับระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งแผ่นโฟมกัวยจนกระทั่งเหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 0.03 (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง) พบว่าที่ความหนาแน่นของโฟมกัวยต่ำ จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้น เนื่องจากลักษณะโครงสร้างภายในของแผ่นโฟมกัวยที่มีความหนาแน่นต่ำจะมีรูพรุนขนาดใหญ่ (รูปที่ 4) ส่งผลให้น้ำสามารถเคลื่อนที่ออกสู่ตัวกลางได้ง่ายกว่ากรณีโฟมกัวยที่มีความหนาแน่นสูง และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิของอากาศร้อนที่ใช้ในการอบแห้งพบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิสูง จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นสูง



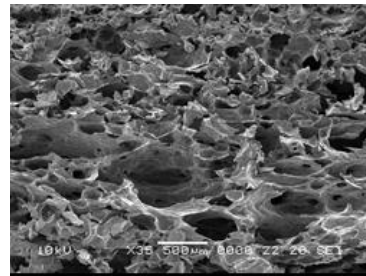
(a) Foam density 0.3 g/ml, drying at 60 °C



(b) Foam density 0.5 g/ml, drying at 60 °C

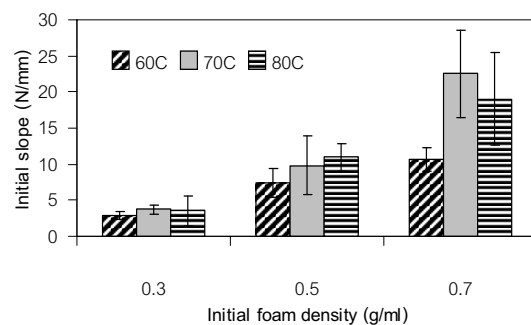
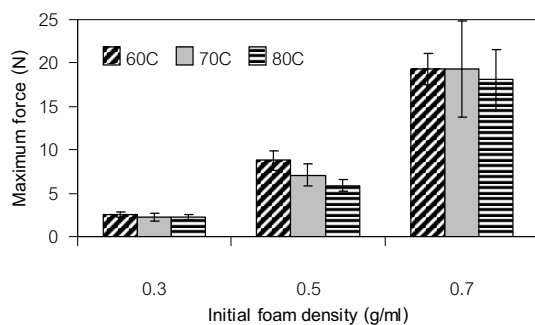


(c) Foam density 0.3 g/ml, drying at 80 °C



(d) Foam density 0.5 g/ml, drying at 80 °C

รูปที่ 4 Scanning electron micrographs ของแผ่นโฟมกัวยอบแห้ง



รูปที่ 5 (a) ความแข็ง และ (b) ความกรอบของแผ่นโฟมกัวยอบแห้งที่เงื่อนไขการอบแห้งต่างๆ

รูปที่ 5 แสดงค่าความแข็งและความกรอบของแผ่นโฟมกล้วยอบแห้ง จากรูปพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งและความกรอบของแผ่นโฟมกล้วยอบแห้งได้แก่ ความหนาแน่นของโฟมกล้วย โดยการอบแห้งที่ความหนาแน่นของโฟมกล้วยต่ำจะให้ความแข็งและความกรอบต่ำกว่าการอบแห้งที่ความหนาแน่นของโฟมกล้วยสูง เนื่องจากลักษณะโครงสร้างของแผ่นโฟมกล้วยที่มีความหนาแน่นต่ำ รูพรุนจะมีขนาดใหญ่และมีความแน่นของเนื้อน้อย ในขณะที่อุณหภูมิในการอบแห้งไม่ส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งและความกรอบ เนื่องจากลักษณะโครงสร้างของแผ่นโฟมกล้วยเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิดังกล่าว ($60-80^{\circ}\text{C}$) ไม่แตกต่างกัน (รูปที่ 4)

สรุปผล

วิธีอบแห้งเคลือบที่สามารถใช้งานได้สะดวกและกว้างกว่าวิธีอบแห้งคั่งที่ เนื่องจากไม่ต้องคำนึงถึงสมมติฐานการหดตัวของวัสดุที่กำหนดว่า ปริมาตรของวัสดุส่วนที่หดไปต้องมีค่าเท่ากับปริมาตรของน้ำที่ระเหยออก สำหรับการหาคุณภาพของแผ่นโฟมกล้วยพบว่า ความหนาแน่นของโฟมกล้วยส่งผลต่อความแข็ง ความกรอบ และลักษณะโครงสร้างภายในของแผ่นโฟมกล้วย อบแห้ง โดยการอบแห้งแผ่นโฟมกล้วยที่มีความหนาแน่นต่ำ จะให้ความแข็งและความกรอบต่ำกว่าการอบแห้งแผ่นโฟมกล้วยที่มีความหนาแน่นสูง เนื่องจากลักษณะโครงสร้างภายในของแผ่นโฟมกล้วยที่มีความหนาแน่นต่ำจะมีรูพรุนขนาดใหญ่ สำหรับอุณหภูมิในการอบแห้งจะไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสและลักษณะโครงสร้างภายใน แต่จะส่งผลต่ออัตราการอบแห้ง โดยอุณหภูมิสูงจะให้อัตราการอบแห้งสูง เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นสูง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาและสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่สนับสนุนเงินทุนในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- Balaban, M. (1989). Effect of volume change in foods on the temperature and moisture content predictions of simultaneous heat and moisture transfer models. *Journal of Food Process Engineering*, 12, 67-88.
- Crank, J. (1975). *The Mathematics of Diffusion*. Clarendon Press, Oxford.
- Garcia, R., Leal, F. and Rolz, C. (1988). Drying of bananas using microwave and air ovens. *International Journal of Food Science and Technology*, 23, 73-80.
- Gekas, V. and Lamberg, I. (1991). Determination of diffusion coefficients in volume changing systems-application in the case of potato drying. *Journal of Food Engineering*, 14, 317- 326.
- Karathanos, V.T., Villalobos, G. and Saravacos, G.D. (1990). Comparison of two methods of estimation of the effective moisture diffusivity from drying data. *Journal of Food Science*, 55(1), 218-223.
- Krokida, M.K., Kiranoudis, C.T., Maroulis, Z.B. and Marinos, D. (2000). Effect of pretreatment on color of dehydrated products. *Drying Technology*, 18(6), 1239-1250.
- Matz, S.A. (1976). *Snack Food Technology*. The AVI Publishing Company, Westport.
- Rovedo, C.O., Suarez, C. and Viollaz, P.E. (1995). Drying simulation of a solid slab with three dimensional shrinkage. *Drying Technology*, 13(1&2), 371-393.

Thuwapanichayanan, R., Prachayawarakorn, S. and Soponronnarit, S. (2006). Drying of foam-mat ripe banana. In *Proceedings of the International Conference on Innovations in Food and Bioprocess Technologies*. Bangkok.



Faculty of Engineering
Khon Kaen University



Thai Society of
Agricultural Engineering



American Society of
Agricultural and Biological Engineers

การอบแห้งแผ่นโฟมที่ทำจากกล้วยสุกโดยใช้ไข่ขาวเป็นสารก่อโฟม Drying of Foam-Mat Ripe Banana Using Fresh Egg Albumin as Foaming Agent

รติยา ฐวพานิชยานันท์¹ สมเกียรติ ปรัชญาวารากร² และ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์¹

Ratiya Thuwapanichayanant¹, Somkiat Prachayawarakorn² and Somchart Soponronnarit¹

¹ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ ² คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 91 ถ.ประชาธิปไตย แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ
¹ School of Energy and Materials ² Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140, Thailand

ABSTRACT

The drying time for banana slices is very long, which causes its unfavorable changes in color and texture. To facilitate the transfer of moisture, banana was foamed before drying. This process was investigated to produce the crisp banana chip with high quality. The influences of foam densities and drying temperatures on drying rate and qualities of the final product i.e. shrinkage, texture and microstructure were studied in this work. The banana puree with 5% of egg albumin used as foaming agent was foamed to the densities of 0.3, 0.5 and 0.7 g/ml. 5 mm thickness, banana foam mats were dried to about 3% (dry basis) at three temperatures of 60, 70 and 80°C and at a superficial air velocity of 0.5 m/s. The experimental results have shown that the drying rate of banana foam mats were higher when the samples were dried at lower foam density and higher drying temperature. The morphologies of banana foam mats were not different amongst the samples dried at high and low temperature. Considering shrinkage of banana foam mats, the samples at low foam density were more shrunk than those at higher foam density, probably due to foam collapse. However, the temperatures had no significant effect on shrinkage. Additionally, compressive tests showed that the initial foam density significantly affected the hardness and the crispness of dried banana foam mats while the drying temperature had no influence on the hardness and the crispness.

Keywords: Banana / Egg Albumin / Foam-mat drying / SEM / Shrinkage

บทคัดย่อ

การอบแห้งกล้วยหั่นชิ้นจะใช้เวลานานในการลดความชื้นจนกระทั่งได้เป็นผลิตภัณฑ์ขนมอบกรอบ ซึ่งอาจทำให้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพด้านสีและเนื้อสัมผัสไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้นแนวทางหนึ่งซึ่งช่วยลดระยะเวลาในการอบแห้งคือ นำกล้วยไปผ่านการทำให้เป็นฟองก่อนนำไปอบแห้ง เพื่อเพิ่มความมีรูพรุนให้กับเนื้อกล้วย งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำกระบวนการทำให้เป็นฟองมาใช้ร่วมกับกระบวนการอบแห้งในการผลิตกล้วยอบกรอบ โดยศึกษาอิทธิพลของความหนาแน่นของโฟมกล้วย และอุณหภูมิของอากาศร้อนที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง และคุณภาพของกล้วย เช่น การหดตัว, เนื้อสัมผัส และลักษณะโครงสร้างภายในของแผ่นโฟมกล้วยหลังการอบแห้ง สำหรับกระบวนการทำให้เป็นฟองนั้นจะใช้ไข่ขาวปริมาณ 5% เป็นสารก่อโฟม โดยผสมลงในกล้วยปั่นซึ่งมีลักษณะเป็นของเหลวข้น แล้วนำไปผ่านการตีด้วยเครื่องผสมยี่ห้อ Kitchen Aid รุ่น 5K5SS ด้วยอัตราเร็วสูงสุด เพื่อลดความหนาแน่นของโฟมกล้วย โดยความหนาแน่นของโฟมกล้วยที่ใช้ในการอบแห้งคือ 0.3, 0.5 and 0.7 g/ml และความหนาแน่นของแผ่นโฟมกล้วย 5 มิลลิเมตร ในส่วนของกระบวนการอบแห้งนั้นจะทำการอบแห้งด้วยอากาศร้อน ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้คือ 60, 70 และ 80 °C และความเร็วลม 0.5 เมตรต่อวินาที จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิของตัวกลางสูงและความหนาแน่นของโฟมกล้วยต่ำจะให้อัตราการอบแห้งสูง และใช้เวลาในการอบแห้งสั้น ขณะที่ลักษณะโครงสร้างภายในของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำไม่แตกต่างกัน สำหรับคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสและการหดตัวนั้นพบว่า การอบแห้งที่ความหนาแน่นของโฟมกล้วยต่ำจะให้ค่า ความแข็งต่ำกว่าการอบแห้งที่ความหนาแน่นของโฟมกล้วย สูง แต่ผลิตภัณฑ์จะมีการหดตัวมากกว่า ในขณะที่อุณหภูมิในการอบแห้งไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสและการหดตัว เมื่ออบแห้งที่ความหนาแน่นของโฟมกล้วยเดียวกัน

คำสำคัญ การหดตัว / การอบแห้ง / กล้วย / ไข่ขาว

การอบแห้งแผ่นโฟมที่ทำจากกล้วยสุกโดยใช้ไข่ขาวเป็นสารก่อโฟม Drying of Foam-Mat Ripe Banana Using Fresh Egg Albumin as Foaming Agent

รติยา ฐวพานิชยานันท์² สมเกียรติ ประชัยวารากร² และ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์¹
Ratiya Thuwapanichayanan¹, Somkiat Prachayawarakorn² and Somchart Soponronnarit¹

Abstract

The drying time for banana slices is very long that causes its unfavorable changes in color and texture. To facilitate the transfer of moisture, banana was foamed before drying. This process was investigated to produce the crisp banana chip with high quality. The influences of foam densities and drying temperatures on drying rate and qualities of the final product i.e. shrinkage, texture and microstructure were studied in this work. The banana puree with 5% of egg albumin used as foaming agent was foamed to the densities of 0.3, 0.5 and 0.7 g/ml. 5 mm thick banana foam mats were dried to about 3% (dry basis) at three temperatures of 60, 70 and 80 °C and at a superficial air velocity of 0.5 m/s. The experimental results have shown that the drying rate of banana foam mats were higher when the samples were dried at lower foam density and higher drying temperature. The morphologies of banana foam mats were not different amongst the samples dried at high and low temperature. Considering shrinkage of banana foam mats, the samples at low foam density were more shrunk than those at higher foam density, probably due to foam collapse. However, the temperatures have no significant effect on shrinkage. Additionally, compressive tests showed that the initial foam density significantly affected the hardness and the crispness of dried banana foam mats while the drying temperature did not influence on the hardness and the crispness.

KEYWORDS: Banana / Egg Albumin / Foam-mat drying / SEM / Shrinkage

บทคัดย่อ

การอบแห้งกล้วยหั่นชิ้นจะใช้เวลานานในการลดความชื้นจนกระทั่งได้เป็นผลิตภัณฑ์ขนมอบกรอบ ซึ่งอาจทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพด้านสีและเนื้อสัมผัสไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้นแนวทางหนึ่งซึ่งช่วยลดระยะเวลาในการอบแห้งคือ นำกล้วยไปผ่านการทำโฟมก่อนนำไปอบแห้ง เพื่อเพิ่มความมีรูพรุนให้กับเนื้อกล้วย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำกระบวนการทำโฟมมาใช้ร่วมกับการอบแห้งในการผลิตกล้วยอบกรอบ โดยศึกษาอิทธิพลของความหนาแน่นของโฟมกล้วย และอุณหภูมิของอากาศร้อนที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง และคุณภาพของกล้วย เช่น การหดตัว, เนื้อสัมผัส และลักษณะโครงสร้างภายในของแผ่นโฟมกล้วยหลังการอบแห้ง สำหรับกระบวนการทำโฟมนั้นจะใช้ไข่ขาวปริมาณ 5% เป็นสารก่อโฟม โดยผสมลงในกล้วยปั่นซึ่งมีลักษณะเป็นของเหลวข้น แล้วนำไปผ่านการตีด้วยเครื่องผสมยี่ห้อ Kitchen Aid รุ่น 5K5SS ด้วยอัตราเร็วสูงสุด เพื่อลดความหนาแน่นของโฟมกล้วย โดยความหนาแน่นของโฟมกล้วยที่ใช้ในการอบแห้งคือ 0.3, 0.5 and 0.7 g/ml และความหนาของแผ่นโฟมกล้วย 5 มิลลิเมตร ในส่วนของกระบวนการอบแห้งนั้นจะทำการอบแห้งด้วยอากาศร้อน ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้คือ 60, 70 และ 80 °C และความเร็วลม 0.5 เมตรต่อวินาที จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิของตัวกลางสูงและความหนาแน่นของโฟมกล้วยต่ำจะให้อัตราการอบแห้งสูง และใช้เวลาในการอบแห้งสั้น ขณะที่ลักษณะโครงสร้างภายในของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำไม่แตกต่างกัน สำหรับ คุณภาพด้านเนื้อสัมผัสและการหดตัวนั้นพบว่า การอบแห้งที่ความหนาแน่นของโฟมกล้วยต่ำจะให้ค่า ความแข็งต่ำกว่าการอบแห้งที่ความ

² คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ ² คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 91 ถ.ประชาธิปก แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

¹ School of Energy and Materials ² Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140, Thailand

หนาแน่นของโฟมกล้วย สูง แต่ผลิตภัณฑ์จะมีการหดตัวมากกว่า ในขณะที่อุณหภูมิในการอบแห้งไม่ส่งผลกระทบต่อ คุณภาพด้านเนื้อสัมผัสและการหดตัว เมื่ออบแห้งที่ความหนาแน่นของโฟมกล้วย เดียวกัน

คำสำคัญ การหดตัว / การอบแห้ง / กล้วย / ไซขาว

คำนำ

กล้วยหอมเป็นผลไม้ที่เกิดการเน่าเสียได้ง่ายหลังการเก็บเกี่ยว การอบแห้งกล้วยเป็นกระบวนการหนึ่งซึ่งทำให้สามารถเก็บรักษาไว้ได้นาน อีกทั้งเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ แต่ปัญหาสำคัญอย่างหนึ่งสำหรับการอบแห้งกล้วยหั่นชิ้นคือ จะใช้เวลาค่อนข้างนาน ซึ่งอาจทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพด้านสีและเนื้อสัมผัสไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้นแนวทางหนึ่งซึ่งช่วยลดระยะเวลาในการอบแห้งคือ นำกล้วยไปผ่านการทำโฟมก่อนนำไปอบแห้ง เพื่อเพิ่มความมีรูพรุนให้กับเนื้อกล้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำกระบวนการทำโฟมมาใช้ร่วมกับการอบแห้งในการผลิตกล้วยอบกรอบ

การทำโฟมเป็นกระบวนการที่ทำให้อาหารอยู่ในสภาพคอลลอยด์ (ปาริฉัตร, 2545) สำหรับอาหารบางชนิด เช่น ไซขาว นม สามารถทำให้เกิดฟองได้ด้วยการตีอัดอากาศ โดยฟองที่เกิดขึ้นมีความเสถียร (Hart *et al.*, 1963) เนื่องจากอาหารดังกล่าวประกอบด้วยโปรตีนที่ละลายน้ำได้ โดยโปรตีนที่ละลายน้ำได้จะช่วยเพิ่มความหนืดให้กับอาหารและจะถูกดูดซับที่บริเวณผิวร่วมระหว่างน้ำกับฟองอากาศ (air-water interface) ทำให้อาหารนั้นเกิดฟองได้ง่ายขึ้น และผลของการดูดซับโปรตีนที่บริเวณผิวร่วมจะช่วยลดแรงตึงผิวของฟองอากาศ ส่งผลให้ฟองอากาศมีความเสถียร (Cherry and Mcwatters, 1981) แต่สำหรับอาหารบางประเภทที่ไม่สามารถทำให้เกิดฟองได้เมื่อทำการตี และฟองที่เกิดขึ้นไม่มีความเสถียร ก็จำเป็นต้องเติมสารก่อโฟมซึ่งมีสมบัติในการทำให้เกิดฟองและฟองที่เกิดขึ้นมีความเสถียรลงไป สารดังกล่าว ได้แก่ Soy Protein Isolate, Glycerol Monostearate และ Tapioca starch เป็นต้น (Hart *et al.*, 1963) แต่อย่างไรก็ตามฟองอากาศที่เกิดขึ้นต้องสามารถคงความเสถียรไว้ได้แม้ผ่านกระบวนการอบแห้ง ถ้าฟองอากาศแตกเมื่อผ่านกระบวนการอบแห้ง อาจทำให้ไม่สามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งได้ และผลิตภัณฑ์ที่ได้อาจมีคุณภาพไม่ดีเท่าที่ควร

Sankat and Castaigne (2004) ใช้ Soy Protein Isolate, Glycerol Monostearate, Dream Whip และ Gelatin เป็นสารก่อโฟม จากการทดลองพบว่า Soy Protein Isolate เป็นสารก่อโฟมที่ดี ส่วน Garcia *et al.* (1988) ใช้ไซขาวผงปริมาณ 1 % (w/w) เป็นสารก่อโฟม จากการทดลองพบว่า ไซขาวผงเป็นสารก่อโฟมที่ดี สามารถลดความหนาแน่นของกล้วยได้ และเมื่อพิจารณาอัตราการอบแห้งของแผ่นโฟมกล้วยเปรียบเทียบกับกล้วยหั่นชิ้นพบว่า การอบแห้งแผ่นโฟมกล้วยจะให้อัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งกล้วยหั่นชิ้นถึง 2 เท่า แต่ไม่มีการศึกษาถึงคุณภาพของแผ่นโฟมกล้วยเมื่อผ่านการอบแห้ง

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำกระบวนการทำโฟมมาใช้ร่วมกับการอบแห้งในการผลิตกล้วยอบกรอบ โดยศึกษาอิทธิพลของความหนาแน่นของโฟมกล้วย และอุณหภูมิของอากาศร้อนที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง และคุณภาพของกล้วย เช่น การหดตัว, เนื้อสัมผัส และลักษณะโครงสร้างภายในของแผ่นโฟมกล้วยหลังการอบแห้ง

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การทำโฟม

นำกล้วยหอมระยะสุกที่ 5 ซึ่งเปลือกเป็นสีเหลืองแต่ปลายยังเป็นสีเขียว (ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ประมาณ 21-23°BRIX) มาปอกเปลือกและหั่นเป็นแผ่น จากนั้นทำการพรีทรีตเมนต์ด้วยการแช่ในสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ความเข้มข้น 1% (w/w) นาน 2 นาที (Krokida *et al.*, 2000) และล้างด้วยน้ำกลั่นนาน 30 วินาที นำกล้วยที่ผ่านการพรีทรีตเมนต์มาสับให้ละเอียด และปั่นด้วยเครื่องปั่น (Waring blending) เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นใส่ไซขาวลงในกล้วยปั่นซึ่งมีลักษณะเป็นของเหลวข้นประมาณ 5% ใช้ช้อนกวนให้เข้ากัน แล้วนำไปผ่านการตีด้วยเครื่องผสม Kitchen Aid รุ่น 5K5SS ด้วยอัตราเร็วสูงสุดเพื่อลดความหนาแน่นของกล้วย สำหรับการวัดความหนาแน่นของโฟมกล้วย ทำโดยตวงโฟมกล้วยใส่ภาชนะที่ทราบปริมาตรแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก ดังนั้นจะสามารถคำนวณหาความหนาแน่นของโฟมกล้วยได้ โดยความหนาแน่นของโฟมกล้วยที่ใช้ในการอบแห้งคือ 0.3, 0.5 และ 0.7 g/ml

2. การอบแห้งด้วยอากาศร้อน

วางแผ่นโฟมกล้วยความหนา 5 mm บนตะแกรงลวดซึ่งหุ้มด้วยกระดาษฟอยล์ จากนั้นนำไปอบแห้งในเครื่องอบแห้งแบบตู้ ซึ่งมีลักษณะการทำงานคือ อากาศภายในระบบจะถูกหมุนเวียนโดยพัดลม (Blower) ซึ่งสามารถปรับความเร็วรอบของพัดลมได้ โดยความเร็วลมที่ใช้ในการทดลองคือ 0.5 เมตรต่อวินาที และอากาศจะถูกทำให้ร้อนด้วยอุปกรณ์ให้ความร้อน (Heater) โดยมีเครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบ PID ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองคือ 60, 70 และ 80 °C โดยอบแห้งจนกระทั่ง

เหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 0.03 (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง) สำหรับการหาการเปลี่ยนแปลงความชื้นของแผ่นโฟมกล้วย ทำได้โดยนำแผ่นโฟมกล้วยออกมาชั่งน้ำหนักทุก 10 นาที

3. การหัดตัว

ทดสอบการหัดตัวโดยดูจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของแผ่นโฟมกล้วยตามระยะเวลาในการอบแห้ง สำหรับการหาปริมาตรของแผ่นโฟมกล้วยทำได้โดยใช้วิธีการแทนที่ใน Glass Bead ซึ่ง Glass Bead ที่ใช้ควรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วง 0.106-0.212 mm (Hwang & Hayakawa, 1980) โดยการแทนที่ใน Glass Bead แต่ละครั้งจะใช้แผ่นโฟมกล้วย 1 ชิ้น (ทำการทดลอง 4 ซ้ำ)

4. การทดสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส

การทดสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของแผ่นโฟมกล้วยหลังการอบแห้ง จะทดสอบโดยใช้เครื่อง Texture Analyzer รุ่น TAXTi 2 ค่าความถูกต้อง $\pm 0.001\text{N}$ ทำการทดสอบในลักษณะของแรงกด ซึ่งหัวกดที่ใช้ทดสอบเป็นหัวกดทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 mm ความเร็วของหัวกด 2 mm/s ใช้ตัวอย่างในการทดสอบ 8 ตัวอย่าง

5. การศึกษาลักษณะโครงสร้างภายในแผ่นโฟมกล้วย

ใช้ Scanning Electron Microscope (SEM) รุ่น JEOL JSM-5600LV ที่กำลังขยาย 35 เท่า

ผลและวิจารณ์

1 ความหนาแน่นของโฟมกล้วย

อากาศจะถูกเติมลงไปใ้ในกล้วยปั่นระหว่างกระบวนการตี และ ฟอรั่มตัวเป็นฟองเมื่อความเค้นเฉือนที่ใบกวนกระทำต่อกล้วยปั่นสามารถเอาชนะแรงตึงผิวของกล้วยปั่นได้ ส่งผลให้ความหนาแน่นของโฟมกล้วยลดลงเมื่อใช้เวลาในการตีนานขึ้น แสดงดังรูปที่ 1 จากผลการทดลองพบว่า ความหนาแน่นของโฟมกล้วยลดลงเหลือ 0.7 , 0.5 และ 0.3 g/ml เมื่อใช้เวลาในการตี 5, 9 และ 20 นาที ตามลำดับ แต่ทั้งนี้ไม่ควรใช้เวลาในการตีมากกว่า 20 นาที เพราะจะทำให้ความหนาแน่นของโฟมกล้วยเพิ่มขึ้น เนื่องจากการใช้เวลาในการตีนานเกินไปจะทำให้ฟองมีขนาดใหญ่ขึ้นมาก ส่งผลให้ฟองอยู่ชิดกันมากขึ้น และระยะห่างระหว่างฟองลดลง ซึ่งอาจทำให้ฟองที่มีขนาดใหญ่เกิดการยุบตัว หรืออาจทำให้ฟองที่อยู่ชิดกันเกิดการรวมตัวกันกลายเป็นฟองอากาศขนาดใหญ่ซึ่งไม่มีความเสถียร ส่งผลให้ความหนาแน่นของโฟมกล้วยเพิ่มขึ้นดังกล่าว โดยผลของความหนาแน่นของโฟมกล้วยที่เพิ่มขึ้นเมื่อใช้เวลาในการตีนานเกินไปสอดคล้องกับงานวิจัยของ Labelle (1966) และ Hart *et al.* (1963) โดย Labelle (1966) ทำการทดลองตีมะเขือเทศ โดยใช้ Myverol ปริมาณ 1% เป็นสารก่อโฟม พบว่าความหนาแน่นของโฟมลดลงต่ำสุดเมื่อใช้เวลาในการตี 4 นาที แต่เมื่อใช้เวลาในการตีนานกว่า 4 นาที พบว่าความหนาแน่นของโฟมเพิ่มขึ้น สำหรับ Hart *et al.* (1963) ทำการทดลองตีมะเขือเทศที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (Soluble Solids) 34% โดยใช้ Glyceryl Monostearate เป็นสารก่อโฟม พบว่าเมื่อใช้เวลาในการตีนานกว่า 12 นาที จะทำให้ความหนาแน่นของโฟมเพิ่มขึ้น

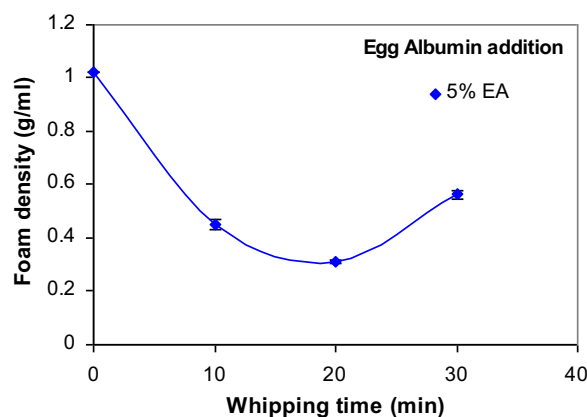


Figure 1 Foam density as a function of whipping time (Egg albumin addition 5%)

2 ผลการอบแห้งแผ่นโฟมกล้วยด้วยอากาศร้อนและอัตราการอบแห้ง

รูปที่ 2 (a-c) แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นของแผ่นโฟมกล้วยเมื่ออบแห้งที่ความหนาแน่นของโฟมกล้วยและอุณหภูมิอากาศร้อนแตกต่างกัน

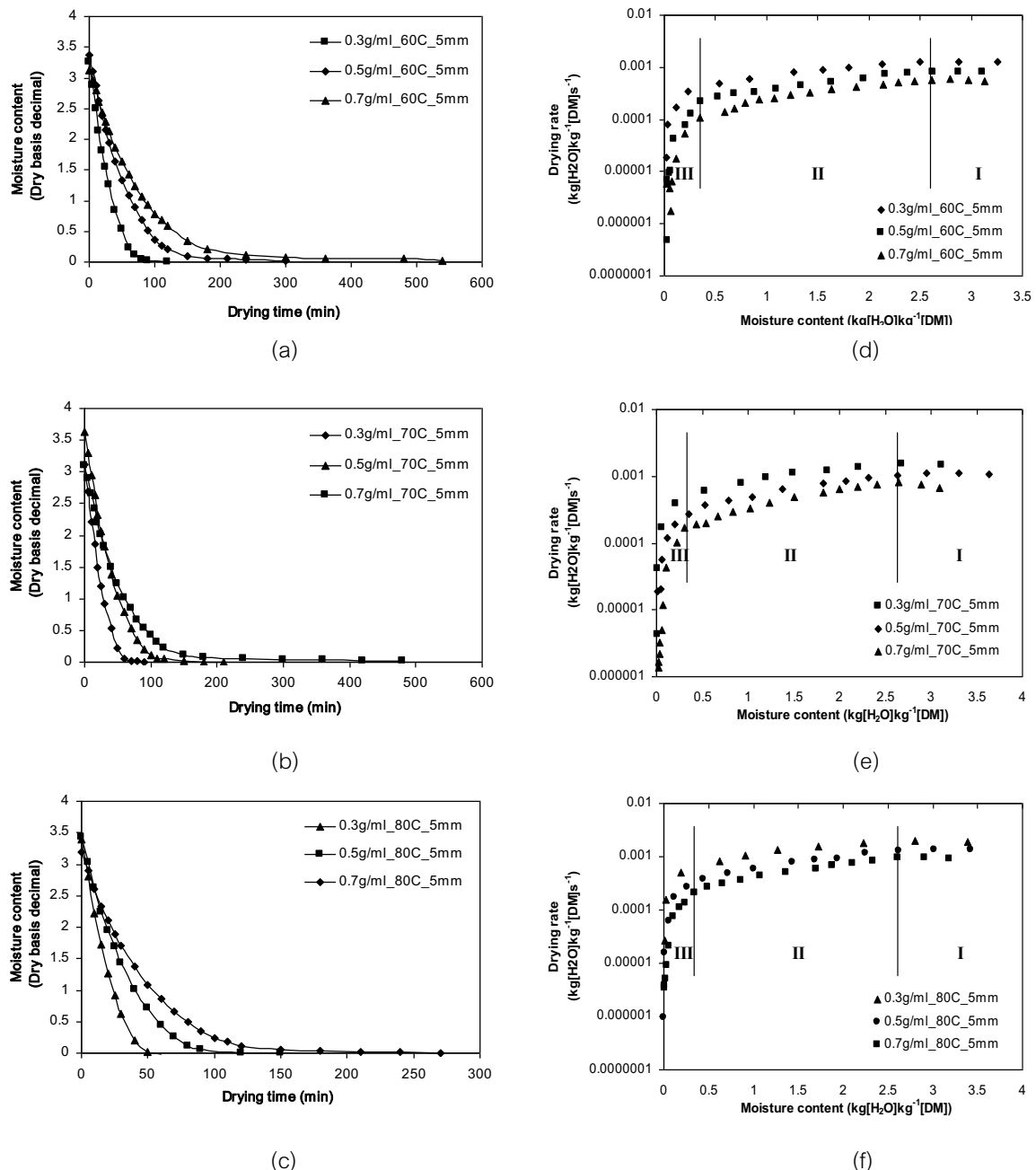


Figure 2 Drying curves (a-c) and drying rates (d-f) of banana foam mats at different initial foam densities and drying temperatures

จากการทดลองพบว่า เมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C ความหนาแน่นของโฟมกล้วย 0.3 และ 0.5 g/ml จะใช้เวลาในการอบแห้ง 120 และ 150 นาที ตามลำดับ จนเหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 0.03 (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง) ในขณะที่การอบแห้งที่ความหนาแน่นของโฟมกล้วย 0.7 g/ml ที่อุณหภูมิ 60 °C ไม่สามารถลดความชื้นให้เหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 0.03 (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง) ได้

รูปที่ 2 (d-f) แสดงอัตราการอบแห้งของแผ่นโฟมกล้วยเมื่ออบแห้งที่ความหนาแน่นของโฟมกล้วยและอุณหภูมิของอากาศร้อนแตกต่างกัน ถ้าพิจารณาจากกราฟแสดงอัตราการอบแห้งของแผ่นโฟมกล้วย จะสามารถแบ่งอัตราการอบแห้งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงเพิ่มอุณหภูมิวัสดุและช่วงอัตราการอบแห้งลดลง โดยช่วงเพิ่มอุณหภูมิวัสดุจะเกิดขึ้นในช่วง 5-10 นาทีแรกของการอบแห้ง ซึ่งเป็นช่วงที่อุณหภูมิของวัสดุเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นอัตราการอบแห้งจะลดลง เมื่อพิจารณาจากความชันของเส้นกราฟในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงพบว่า มีการเปลี่ยนแปลงความชันของเส้นกราฟที่ความชื้นประมาณ 0.35 (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง) แสดงว่าอัตราการอบแห้งลดลงที่เกิดขึ้นมีมากกว่า 1 ช่วง นั่นคือ ช่วงที่ความชื้นมีค่า 0.35-2.6 (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง) เป็นช่วงอัตราการอบแห้งลดลงช่วงแรก (First Falling Rate Drying Period) และช่วงที่ความชื้นต่ำ

กว่า 0.35 (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง) เป็นช่วงอัตราการอบแห้งลดลงช่วงที่สอง (Second Falling Rate Drying Period) โดยช่วงอัตราการอบแห้งลดลงช่วงแรกจะเป็น ช่วงที่แผ่นโฟมกล้วยยังมีความชื้นสูงอยู่ แต่ที่บริเวณผิวของ แผ่นโฟมกล้วยเริ่มมีบางส่วนที่แห้ง (ยังมีบางส่วนที่เปียก) ดังนั้นอัตราการระเหยน้ำจะถูกควบคุมโดยความต้านทานต่อการ เคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำในวัสดุหรือความแตกต่างของความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิววัสดุและที่อากาศรอบนอกหรือทั้งสองอย่าง แต่ในช่วงที่สองที่บริเวณผิว จะไม่มีส่วนที่เปียกอยู่แล้ว ดังนั้นอัตราการระเหยน้ำจะถูกควบคุมโดยความต้านทานต่อการ เคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำในวัสดุ เท่านั้น ซึ่งการถ่ายเทความชื้นจากภายในเนื้อวัสดุมาที่ผิวจะยากและช้ากว่าการระเหยน้ำจากผิว ไปยังอากาศรอบนอก ส่งผลให้อัตราการอบแห้งลดลงช่วงที่สองต่ำกว่าอัตราการอบแห้งลดลง ช่วงแรก Karim and Wai (1999) ศึกษาลักษณะเฉพาะของการอบแห้งมะเฟือง (starfruit) ที่ผ่านกระบวนการทำโฟมด้วยอากาศร้อน ที่อุณหภูมิ 70 และ 90 °C ความชื้นเริ่มต้นของแผ่นโฟมมะเฟืองประมาณ 0.9 (เศษส่วนมาตรฐานเปียก) พบว่า อัตราการอบแห้งของโฟมมะเฟืองที่เกิดขึ้นมี 2 ช่วงคือ ช่วงเพิ่มอุณหภูมิวัสดุและช่วงอัตราการอบแห้งลดลง โดยในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วงย่อย คือ ช่วงอัตราการอบแห้งลดลงช่วงแรก ซึ่งเป็นช่วงของการระเหยน้ำที่บริเวณชั้นผิว และช่วงอัตราการอบแห้งลดลงช่วงที่สอง ซึ่งเป็นช่วงที่น้ำบริเวณชั้นผิวลดลงอย่างมาก ดังนั้นในช่วงนี้จึงเป็นการเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในวัสดุมาที่ผิวนั่นเอง

นอกจากนี้จากการทดลองพบว่า เมื่อความหนาแน่นของโฟมกล้วยมีค่าต่ำ จะให้อัตราการอบแห้งสูง เนื่องจากลักษณะโครงสร้างภายในของแผ่นโฟมกล้วยที่มีความหนาแน่นต่ำจะมีรูพรุนขนาดใหญ่ ส่งผลให้น้ำสามารถเคลื่อนที่ออกสู่ตัวกลางได้ง่ายกว่ากรณีโฟมกล้วยที่มีความหนาแน่นสูง และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิของอากาศร้อนที่ใช้ในการอบแห้งที่มีต่ออัตราการอบแห้งพบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิสูง จะให้อัตราการอบแห้งสูง และใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ จากรูปที่ 2 (a-c) จะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของอากาศร้อนจาก 60 °C เป็น 80 °C จะใช้เวลาในการอบแห้งลดลง 60, 150 และ 270 นาที สำหรับแผ่นโฟมกล้วยที่มีความหนาแน่น 0.3, 0.5 และ 0.7 g/ml ตามลำดับ เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นสูง

3 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

เมื่อพิจารณารูปที่พล็อตระหว่าง InMR และเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (รูปที่ 3) พบว่า เส้นกราฟที่ได้มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น แสดงว่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะแปรตามความชื้น โดยการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การแพร่ที่แปรตามความชื้นนั้นจะใช้วิธีการของความชัน (The method of slopes)

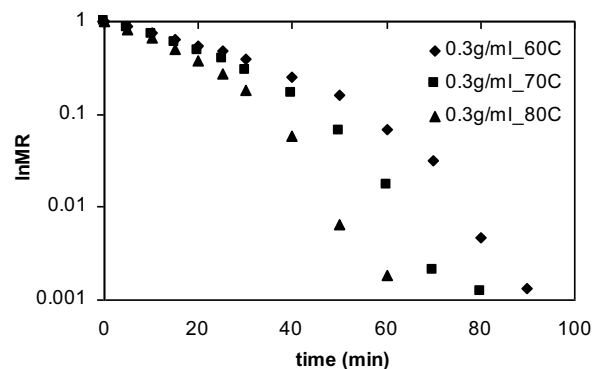


Figure 3 Plot of lnMR versus drying time for banana foam mats at different temperatures (foam density 0.3 g/ml)

การคำนวณหาสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลโดยวิธีการของความชันคือ การคำนวณอัตราส่วนระหว่างอัตราการอบแห้งที่ได้จากการทดลองและอัตราการอบแห้งทางทฤษฎี ณ ความชื้นเดียวกัน แสดงดังสมการ (1)

$$D_{\text{eff}} = [(dMR/dt)_{\text{exp}} / (dMR/dFo)_{\text{th}}] L^2 \quad (1)$$

เมื่อ D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (m^2/s), Fo คือ the Fourier number ($Fo = Dt/L^2$), L คือ ความหนาของแผ่นโฟมกล้วย (m), MR คือ อัตราส่วนความชื้นของแผ่นโฟมกล้วย และ t คือ เวลา

หมายเหตุ สำหรับความหนาของแผ่นโฟมกล้วย (L) จะเป็นความหนาที่เปลี่ยนแปลงไปตามความชื้น

จากการการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลสูงเมื่อความหนาแน่นของโฟมกล้วยต่ำและอุณหภูมิของอากาศร้อนที่ใช้ในการอบแห้งสูง แสดงดังรูปที่ 4

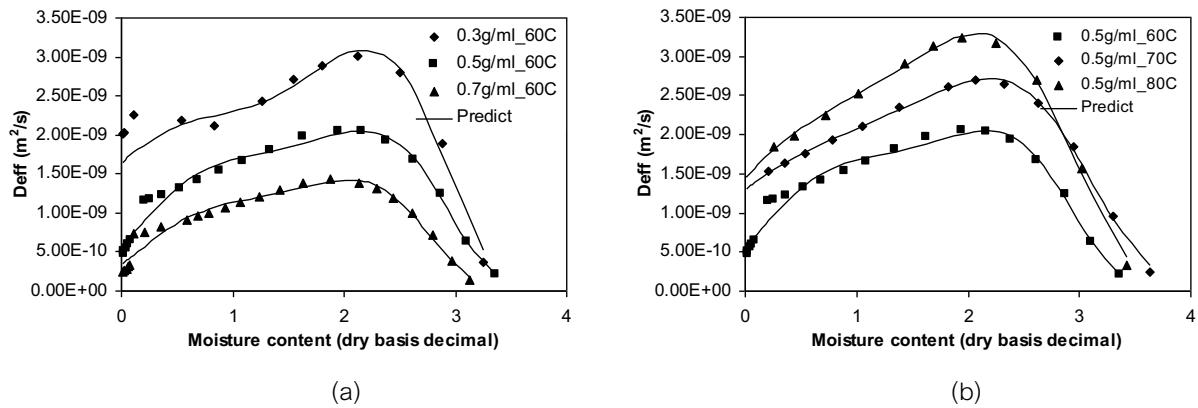


Figure 4 Moisture diffusivity of banana foam mats at different drying condition

จากรูปที่ 4 พบว่า ในช่วงแรกของการอบแห้งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นลดลง เนื่องจากช่วงนี้เป็นช่วงที่อุณหภูมิของวัสดุเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิภาพจะลดลงตามความชื้นที่ลดลง

4 การหดตัว

เมื่อน้ำเคลื่อนที่ออกจากวัสดุโดยเคลื่อนที่ผ่านรูพรุนภายในวัสดุ จะทำให้เกิดแรงคาปิลลารีขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุของการหดตัวของวัสดุ โดยแรงคาปิลลารีจะมีค่ามากขึ้นเมื่อความชื้นของวัสดุลดลง (Sadoc & Rivier, 1999) ส่งผลให้ปริมาตรของวัสดุลดลงเมื่อความชื้นลดลง แสดงดังรูปที่ 5 นอกจากนี้ขนาดของรูพรุนก็มีผลต่อแรงคาปิลลารี โดยแรงคาปิลลารีจะมีค่ามากเมื่อรูพรุนมีขนาดเล็ก ซึ่งจากการทดลองพบว่า กรณิโฟมกล้วยที่มีความหนาแน่นสูงจะมีรูพรุนขนาดเล็ก ซึ่งการหดตัวของแผ่นโฟมกล้วยในกรณีนี้จะมีสาเหตุเนื่องมาจากแรงคาปิลลารี แต่สำหรับกรณิโฟมกล้วยที่มีความหนาแน่นต่ำ รูพรุนจะมีขนาดใหญ่ ดังนั้นแรงคาปิลลารีน่าจะส่งผลต่อการหดตัวน้อย อย่างไรก็ตามแผ่นโฟมกล้วยที่มีความหนาแน่นต่ำกลับมีการหดตัวมาก เนื่องจากโครงสร้างของวัสดุที่มีรูพรุนขนาดใหญ่มีความแข็งแรงน้อย ซึ่งอาจทำให้อุณหภูมิเกิดการยุบตัว และส่งผลให้วัสดุเกิดการหดตัวมากดังกล่าว

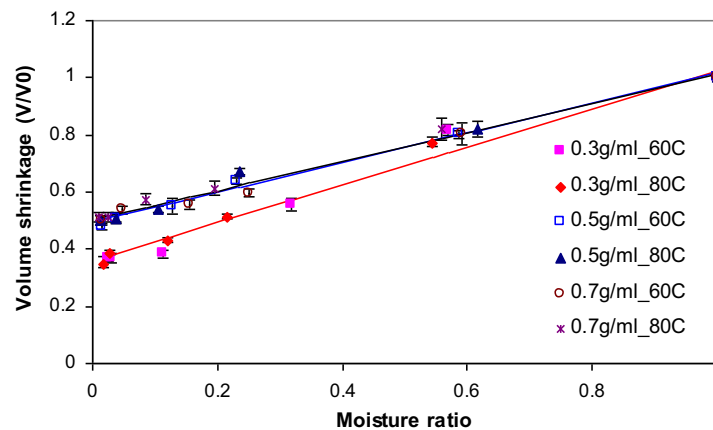


Figure 5 Volume shrinkage of banana foam mats at different initial foam densities and drying temperatures

นอกจากนี้จากการทดลองพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวของวัสดุและการลดลงของความชื้นมีลักษณะเป็นเชิงเส้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาตรของวัสดุที่หายไปนั้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาตรของความชื้นในวัสดุที่ระเหยไป โดยความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวของวัสดุและการลดลงของความชื้นแสดงได้ดังสมการ (2)

$$V/V_0 = a + bM/M_0 \quad (2)$$

เมื่อ V คือ ปริมาตรของวัสดุ, V_0 คือ ปริมาตรเริ่มต้นของวัสดุ, M คือ ความชื้นของวัสดุ และ M_0 คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ สำหรับค่าคงที่ a และ b แสดงในตารางที่ 1

Table 1

The values of a and b for various foam densities

$\rho_f = 0.3 \text{ g/ml}$			$\rho_f = 0.5 \text{ g/ml}$			$\rho_f = 0.7 \text{ g/ml}$		
a	b	R^2	a	b	R^2	a	b	R^2
0.349	0.702	0.977	0.496	0.521	0.983	0.503	0.507	0.984

5 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของแผ่นโฟมกล้วยหลังการอบแห้ง

การวัดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของแผ่นโฟมกล้วยหลังการอบแห้งนั้น จะทำการวัดค่าในลักษณะของแรงกด โดยให้ค่าแรงสูงสุดที่กระทำต่อวัสดุเป็นตัวนิยามความแข็ง (hardness) และจำนวนยอด (Number of peak) เป็นตัวนิยามความกรอบ (crispness) ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 6

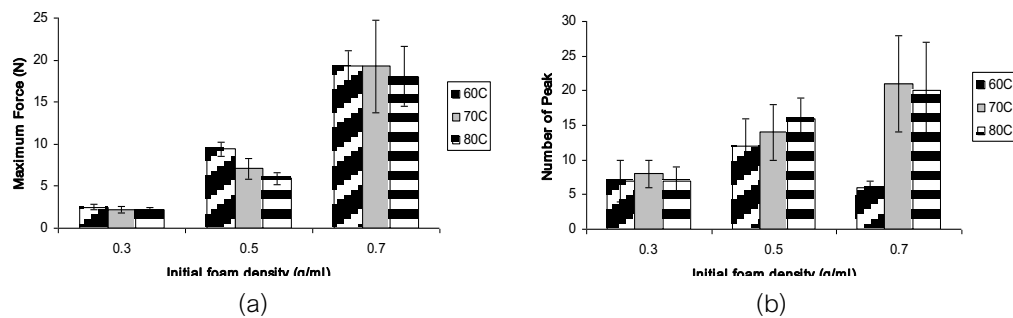


Figure 6 (a) Hardness and (b) Crispness of dried banana foam mats at different initial foam densities and drying temperatures

จากรูปที่ 6 พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งและความกรอบของแผ่นโฟมกล้วยอบแห้งได้แก่ ความหนาแน่นของโฟมกล้วย ในขณะที่ อุณหภูมิในการอบแห้งไม่ส่งผลกระทบต่อค่า ความแข็งและความกรอบ โดยการอบแห้งที่ความหนาแน่นของโฟมกล้วยต่ำ จะให้ค่า ความแข็งต่ำกว่าและความกรอบสูงกว่าการอบแห้งที่ความหนาแน่นของโฟมกล้วยสูง เนื่องจากลักษณะโครงสร้างของแผ่นโฟมกล้วยที่มีความหนาแน่นต่ำ รูพรุนจะมีขนาดใหญ่และมีความหนาแน่นของเนื้อน้อย

6 ลักษณะโครงสร้างภายในของแผ่นโฟมกล้วย

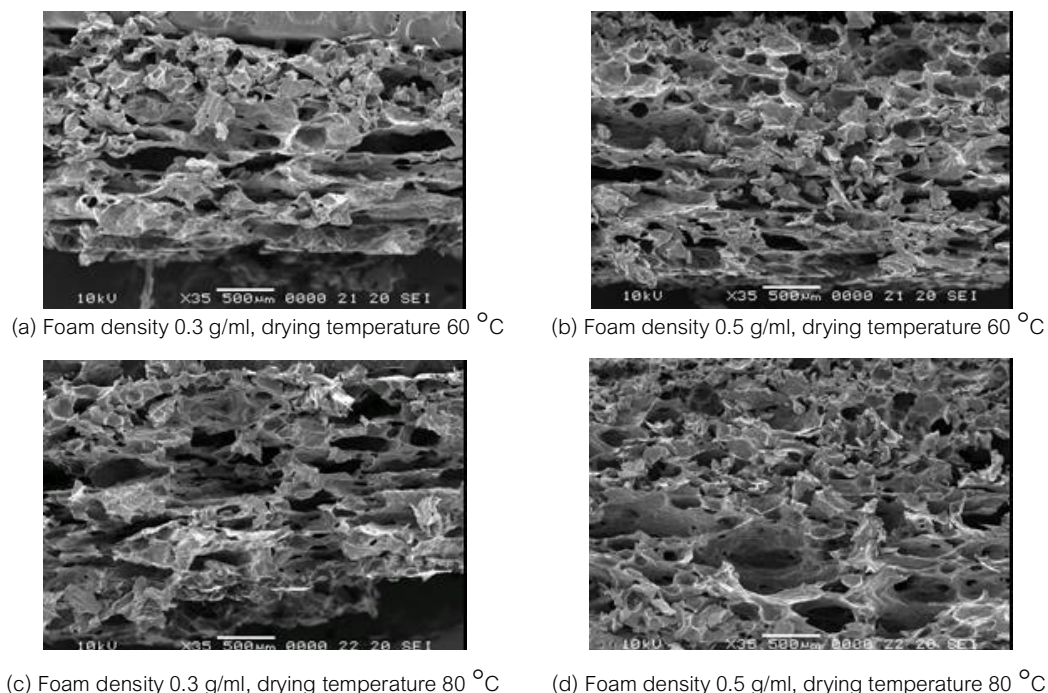


Figure 7 Scanning electron micrographs of dried banana foam mats

รูปที่ 7 (a) แสดงลักษณะโครงสร้างภายในของแผ่นโฟมกล้วยอบแห้งที่ ความหนาแน่นของโฟมและ อุณหภูมิของ ตัวกลางในการอบแห้งแตกต่างกัน จากรูปจะเห็นได้ว่า การอบแห้งแผ่นโฟมที่ความหนาแน่นของโฟมกล้วย 0.3 g/ml รูพรุนจะมี ขนาดตั้งแต่ 10 ไมครอน ถึง 450 ไมครอน ในขณะที่การอบแห้งแผ่นโฟมที่ความหนาแน่นของโฟมกล้วย 0.5 g/ml ไม่พบรูพรุนที่มี ขนาดใหญ่กว่า 400 ไมครอน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการอบแห้งแผ่นโฟมที่ความหนาแน่นของโฟมกล้วย ต่ำ จะให้รูพรุนที่มีขนาด ใหญ่กว่า ในขณะที่อุณหภูมิในการอบแห้งไม่ส่งผลต่อขนาดของรูพรุน

สรุป

กล้วยสุกสามารถทำเป็นโฟมได้โดยใช้ไข่ขาวสดปริมาณ 5 % (w/w) เป็นสารก่อโฟม โดยเมื่อใช้เวลาในการตีนานขึ้น ความหนาแน่นของโฟมกล้วยจะลดลง แต่ทั้งนี้ไม่ควรใช้เวลาในการตีมากกว่า 20 นาที เนื่องจากจะทำให้ความหนาแน่นของ โฟมกล้วยเพิ่มขึ้น และผลจาก SEM พบว่าการอบแห้งแผ่นโฟมที่ความหนาแน่นของโฟมกล้วย ต่ำ จะให้รูพรุนที่มีขนาดใหญ่ ส่งผลให้น้ำสามารถเคลื่อนที่ออกสู่ตัวกลางได้ง่าย ดังนั้นจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลสูง ทำให้อัตราการ อบแห้งสูงและใช้เวลาในการอบแห้งสั้นเมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งแผ่นโฟมที่ความหนาแน่นของโฟมกล้วยสูง นอกจากนี้ การอบแห้งแผ่นโฟมที่ความหนาแน่นของโฟมกล้วย ต่ำ จะให้ค่าความแข็งต่ำกว่าและความกรอบสูงกว่า สำหรับการหัตถ์ของ แผ่นโฟมกล้วยนั้นพบว่า แผ่นโฟมที่มีความหนาแน่นของโฟมกล้วย ต่ำกว่า 0.5 g/ml จะเกิดการหัตถ์มาก ในขณะที่แผ่นโฟมที่ มีความหนาแน่นของโฟมกล้วยตั้งแต่ 0.5 g/ml ขึ้นไป การหัตถ์จะไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

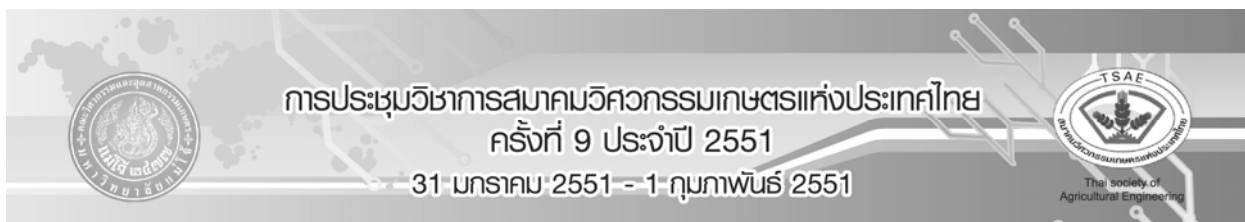
สำหรับอุณหภูมิในการอบแห้ง จะไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสและการหัตถ์เมื่ออบแห้งที่ความหนาแน่น ของโฟมกล้วยเดียวกัน แต่จะส่งผลต่ออัตราการอบแห้ง โดยอุณหภูมิสูงจะให้อัตราการอบแห้งสูง เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงจะให้ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นสูง

คำขอบคุณ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษาและสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ให้การสนับสนุนเงินทุนที่ใช้ ในงานวิจัยของโครงการนี้

เอกสารอ้างอิง

- ปาริฉัตร หงสประภาส. 2545. เคมีกายภาพของอาหาร คอลลอยด์ อิมัลชัน และเจล. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ. หน้า 6.
- Cherry, J.P. and Mcwatters, K.H. 1981. Protein Functionality in Foods. American Chemistry Society. 149-175.
- Garcia, R., Leal, F. and Rolz, C. 1988. Drying of Bananas Using Microwave and Air Ovens. *International Journal of Food Science and Technology*, 23, 78-80.
- Hart, M.R., Graham, R.P., Ginnette, L.F. and Morgan, A.I. 1963. Foams For Foam-Mat Drying. *Food Technology*, 17, 1302-1304.
- Hwang, M.P. and Hayakawa, K.I. 1980. Bulk densities of cookies undergoing commercial baking processes. *Journal of Food Science*, 45, 1400-1402.
- Karim, A.A. and Wai, C.C. 1999. Foam-Mat Drying of Starfruit (*Averrhoa carambola* L.) Puree Stability and Air Drying Characteristics. *Food Chemistry*, 64, 337-343.
- Krokida, M.K., Kiranoudis, C.T., Maroulis, Z.B. and Marinou, D. 2000. Effect of Pretreatment on Color of Dehydrated Products. *Drying Technology*, 18(6), 1239-1250.
- Labelle, R.L. 1966. Characterization of foams for foam-mat drying. *Food Technology*, 20(8), 89-94.
- Sankat, C.K. and Castaigne, F. 2004. Foaming and drying behaviour of ripe bananas. *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie*, 37, 517-525.
- Sadoc, J.F. and Rivier. N. 1999. Foams and Emulsions. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.



การหาสภาวะที่เหมาะสมของการพuffingกล้วยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

Optimization of the superheated steam puffing of banana

คำพันธ์ บัวละพัน¹, สมเกียรติ ปรัชญาวารากร², สมชาติ โสภณรณฤทธิ์³, วารุณี เตีย⁴

Khamphanh Boualaphanh¹, Somkiat Prachayawarakorn², Somchart Soponronnarit³ and Warunee Tia⁴

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เวลาในการพuffing (puffing) และ ความชื้นของกล้วยก่อนการพuffing ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของกล้วยแผ่นในด้านต่าง ๆ ได้แก่ การหดตัว เนื้อสัมผัส (ความแข็งและความกรอบ) และ สี โดยใช้เทคนิคการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับการพuffingด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนได้แก่ ในขั้นตอนแรกทำการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 90°C ความเร็วลม 2 m/s เพื่อลดความชื้นของกล้วยให้เหลือระหว่าง 20-30% d.b. ตามด้วยการพuffingด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 160, 170 และ 180°C เป็นเวลา 1, 2 และ 3 นาที และในขั้นสุดท้ายนำไปอบแห้งด้วยลมร้อนที่สภาวะเดียวกันกับในขั้นตอนแรกให้เหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 3 % d.b จากผลการทดลองพบว่า เมื่อใช้อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งสูงขึ้นและเวลาในการพuffingมากขึ้น ผลลัพธ์กล้วยแผ่นที่ได้มีค่าความเป็นสีแดง (ค่า a) เพิ่มขึ้น ค่าความสว่าง (ค่า L) และ ค่าความเป็นสีเหลือง (b) ลดลง การพuffingด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิสูง ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีการหดตัวน้อย มีค่าความแข็งต่ำ มีความกรอบมาก สภาวะที่เหมาะสมของการพuffingของกล้วยอยู่ที่อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งเท่ากับ 180°C เวลาที่ใช้ในการพuffingเท่ากับ 1.4 นาที และ ความชื้นของกล้วยก่อนการพuffingเท่ากับ 26.16 %d.b.

คำสำคัญ: กล้วย/ การพuffing/ การหดตัว/ เนื้อสัมผัส/ สี/ ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

ABSTRACT

The purpose of this research was to investigate the effects of superheated steam temperature and puffing time and moisture content of banana before puffing on physical properties of banana slice i.e. shrinkage, texture and color. The banana was dried with three drying steps, hot air drying at a temperature of 90°C and a velocity of 2 m/s in order to reduce moisture contents to the range of 20-30% d.b. followed by puffing it with superheated steam at temperatures of 160, 170 and 180°C and puffing time of 1, 2 and 3 minutes. After puffing step the samples were dried by hot air at the same conditions at the first step until its final moisture content reduced to 3% d.b. The results showed that the high puffing temperature and long puffing time caused high values of redness (a) and low values of both lightness (L) and yellowness (b). In addition, high puffing temperature resulted in low shrinkage, low hardness and high crispiness. The optimal puffing conditions were at the superheated steam temperatures of 180°C, puffing time of 1.4 min and moisture content of banana before puffing 26.16 %d.b.

KEYWORDS: Banana/ Color/ Puffing/ Shrinkage / Superheated steam/ Texture

¹Graduated student, ²Associate Professor, Faculty of Engineering, ³Professor, School of Energy and Materials,

⁴Associate Professor, School of Energy and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 126 Prachautid, Tungkru, Bangkok 10140

*Corresponding author. Tel.:0-0-2470-8695 ext.112; E-mail address: khamphans@hotmail.com

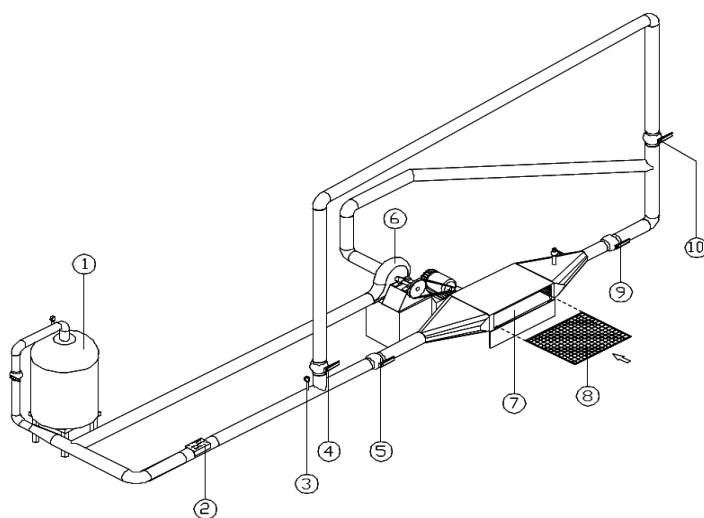
บทนำ

กล้วยเป็นผลไม้ที่นิยมบริโภคในรูปของผลสดโดยเฉพาะกล้วยหอม แต่เนื่องจากกล้วยเป็นผลไม้ที่เน่าเสียได้ง่าย จึงนิยมนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น กล้วยอบ กล้วยตาก กล้วยฉาบ กล้วยแผ่น เป็นต้น การแปรรูปมีความสำคัญยิ่งต่อการรักษาคุณภาพ ลดความสูญเสีย ยืดเวลาการเก็บผลิตภัณฑ์ให้นานขึ้น และทำให้ผลิตภัณฑ์หลังการแปรรูปมีมูลค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย ผลิตภัณฑ์กล้วยแผ่นที่มีขายตามท้องตลาดส่วนใหญ่ทำการแปรรูปโดยการทอดในน้ำมัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้มักจะมีสีเข้ม สีไม่สม่ำเสมอ เมื่อเก็บไว้นานกล้วยแผ่นจะเกิดกลิ่นหืนเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันกับออกซิเจน ในปัจจุบันผลิตภัณฑ์อาหารว่างที่มีปริมาณไขมันสูงอาจไม่เป็นที่ต้องการของผู้บริโภคที่ใส่ใจในสุขภาพ เพราะไขมันก่อให้เกิดโรคหัวใจ ความดันโลหิตสูงและโรคอ้วน ผลิตภัณฑ์กล้วยแผ่นที่มีขายตามท้องตลาดส่วนมากจะผลิตโดยการทอดในน้ำมันที่ใช้อุณหภูมิประมาณ 177 ถึง 200°C ผลิตภัณฑ์ที่ได้มักจะมีสีน้ำตาลเข้มและมีปริมาณไขมันสูง ในการผลิตอาหารว่างประเภทขนมขบเคี้ยวที่มีลักษณะพองกรอบ นั้นจะเกี่ยวข้องกับปริมาณความชื้น อุณหภูมิของตัวกลาง และเวลาที่ใช้ในกระบวนการ เช่น การทำข้าวเกรียบ โดยความชื้นที่เหมาะสมของข้าวเกรียบดิบคือ 12 % เมื่อทอดในน้ำมันร้อนที่อุณหภูมิ 180 °C โดยใช้เวลานานจะได้ผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบที่มีรูพรุนสม่ำเสมอ ความหนาแน่นต่ำ ถ้าทอดในน้ำที่อุณหภูมิต่ำข้าวเกรียบจะไม่พอง เพราะอุณหภูมิไม่สูงพอที่จะให้น้ำกลายเป็นไอน้ำได้อย่างรวดเร็ว ขณะเดียวกันหากความชื้นของข้าวเกรียบดิบสูงจะได้ผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบที่มีรูพรุนใหญ่บ้างเล็กบ้างไม่สม่ำเสมอ ซึ่งเป็นลักษณะของข้าวเกรียบคุณภาพต่ำ (เพลินใจ ดังคณะกุล, 2546) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตกล้วยแผ่นให้เป็นผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวที่ไม่มีไขมัน โดยจะทำการศึกษาถึงอิทธิพลของความชื้นของกล้วยแผ่นก่อนกระบวนการพффิง อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง และเวลาที่ใช้ ในกระบวนการพффิง

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

อุปกรณ์การทดลอง

เครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ใช้ในการทดลอง ดังรูปที่ 1 ประกอบด้วยอุปกรณ์หลักคือ เครื่องกำเนิดไอน้ำเพื่อผลิตไอน้ำความดันสูงกว่าบรรยากาศเล็กน้อย อุปกรณ์ให้ความร้อน เพื่อให้ความร้อนกับอากาศ และทำให้ไอน้ำอึดตัวกลายเป็นไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ขนาด 13.5 kW โดยการควบคุมด้วย PID มีค่าความถูกต้อง $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ห้องอบแห้ง ขนาด 30 x30 x10 cm³ พัดลมเป็นแบบเหวี่ยงใบพัดโค้งหลัง อัตราการไหลของตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้งควบคุมโดยการปรับความเร็วรอบของพัดลม และในระบบบอบแห้งยังประกอบด้วยอุปกรณ์อื่น ๆ เช่น วาล์วควบคุมและมาตรวัดความดัน



รูปที่ 1 โคอะแกรมระบบอบแห้งด้วยลมร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

1. เครื่องกำเนิดไอน้ำ (Boiler)
2. อุปกรณ์ให้ความร้อน (Heater)
3. มาตรวัดความดัน (Pressure gauge)
- 4,5,9,10. วาล์ว (Valve)
6. พัดลม (Blower)
7. ห้องอบแห้ง (Drying chamber)
8. ถาดอบแห้ง

การออกแบบการทดลอง และการหาสภาวะที่เหมาะสม

การทดลองอบแห้งกล้วยแผ่นด้วยลมร้อนร่วมกับการพuffingด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง โดยมี 3 ขั้นตอนคือ ในขั้นตอนแรกอบแห้งกล้วยแผ่นด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C โดยใช้ความเร็วเฉลี่ยของอากาศเข้าห้องอบแห้งประมาณ 2 m/s อบกล้วยแผ่นให้เหลือความชื้นประมาณ 20, 25 และ 30% d.b. ตามด้วยการ พuffingด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 160, 170 และ 180 °C ที่เวลาพuffing 1, 2 และ 3 นาที และในขั้นตอนสุดท้ายนำไปอบแห้งด้วยลมร้อนที่สภาวะเดียวกันกับในขั้นตอนแรก อบแห้งกล้วยแผ่นให้เหลือความชื้นประมาณ 3% d.b. ในการออกแบบการทดลองเป็นแบบ Full Factorial โดยมีการศึกษา 3 ตัวแปร 3 ระดับ จำนวนการทดลองทั้งหมด 27 การทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ต้องการศึกษา

Independent Variable	Symbol		Levels	
	Uncoded	Coded	Uncoded	Coded
Steam Temperature (°C)	Temperature	x_1	160	1
			170	2
			180	3
Puffing time (min)	time	x_2	1	1
			2	2
			3	3
Moisture content (% d.b.)	Moisture	x_3	20	1
			25	2
			30	3

การอบแห้งกล้วยหอมแผ่นด้วยลมร้อนร่วมกับการพuffingด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ปัจจัยที่ต้องการศึกษาได้แก่ อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ความชื้นก่อนการพuffing และเวลาพuffing ที่มีผลต่อคุณภาพของกล้วยด้าน เนื้อสัมผัส (Hardness, Number of peaks และ Initial slope) การหดตัว (Shrinkage) และสี (L, a และ b) ของกล้วยแผ่น ในงานวิจัยนี้ทำการหาสภาวะที่เหมาะสมด้วยวิธี Response Surface Methodology (RSM) การหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรกับผลตอบสนองในรูปสมการโพลิโนเมียลกำลังสอง โดยมีรูปแบบทั่วไปดังสมการ (1)

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (1)$$

โดยตัวแปรที่ต้องการศึกษามี 3 ตัวคือ อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (x_1) เวลาพuffing (x_2) และความชื้นของกล้วยก่อนการพuffing (x_3) จากสมการ (1) สามารถเขียนสมการได้ดังสมการ (2)

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_1^2 + \beta_5 x_2^2 + \beta_6 x_3^2 + \beta_7 x_1 x_2 + \beta_8 x_1 x_3 + \beta_9 x_2 x_3 \quad (2)$$

เมื่อ $\beta_0, \beta_1 \dots \beta_9$ เป็นค่าคงที่

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของสัมประสิทธิ์ถดถอยในสมการที่ (2) โดยการพิตกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง เพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยสำคัญทางสถิติในแต่ละเทอมของแบบจำลอง

สำหรับการหาสภาวะที่เหมาะสมของตอบสนองหลายค่า (Multiple response) จะใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจโดยรวม (Desirability Function) (Myers & Montgomery, 2002) เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัย ดังสมการที่ (3)

$$D = [d_1(y_1) \cdot d_2(y_2) \cdot \dots \cdot d_k(y_k)]^{\frac{1}{k}} \quad (3)$$

โดย k คือ จำนวนของผลตอบสนอง

$d_1(y_1)$, $d_2(y_2)$ และ $d_k(y_k)$ คือ ความพึงพอใจของผลตอบสนอง y_1 , y_2 และ y_k ตามลำดับ

การเตรียมตัวอย่าง

กล้วยหอมทองระยะสุกที่ 3 ซึ่งพิจารณาได้จากสีของเปลือกจากเขียวออกเหลืองมากขึ้นแต่ยังมีสีเขียวมากกว่าสีเหลือง โดยความหวานของเนื้อกล้วยมีค่าประมาณ 14–18 %Brix ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 25 mm ความชื้นเริ่มต้นของกล้วยแผ่นก่อนการพรีทรีตเมนต์เท่ากับ 250–300 %d.b. ปอกเปลือกและหั่นตามขวางด้วยเครื่องหั่น ความหนาของชิ้นตัวอย่างมีขนาด 35 mm ก่อนการทดลองทำการพรีทรีตเมนต์ตัวอย่างด้วยสารละลายกรดแอสคอร์บิกความเข้มข้น 0.1% (w/w) นาน 1 นาที (Demirel และ Turhan, 2003) หลังจากนั้นนำตัวอย่างมาล้างด้วยน้ำกลั่นนาน 30 วินาที ซับน้ำให้แห้งแล้วทิ้งไว้ 5 นาที จากนั้นนำไปจัดเรียงบนตะแกรงก่อนเข้าเครื่องอบแห้ง

วิธีการทดลอง

ทำการอบแห้งกล้วยแผ่นที่ผ่านการพรีทรีตเมนต์ด้วยสารละลายกรดแอสคอร์บิกด้วยอากาศร้อนในชั้นตอนแรกที่อุณหภูมิ 90°C ให้เหลือความชื้นเท่ากับ 20, 25 และ 30 %d.b แล้วทำให้พองตัว (puffing) ด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 160, 170 และ 180°C โดยใช้เวลา 1, 2 และ 3 นาที และในชั้นตอนสุดท้ายนำกลับไปอบแห้งด้วยลมร้อนที่สภาวะเดียวกับในตอนเริ่มต้นจนเหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 3% d.b. จากนั้นนำผลิตภัณฑ์กล้วยแผ่นที่ได้ไปทดสอบคุณภาพในด้านสี การหดตัว และเนื้อสัมผัส

การทดสอบคุณภาพด้านสี

สีของกล้วยแผ่นทำการวัดโดยใช้เครื่องวัดสีอาหาร HunterLab รุ่น ColorFlex โดยวัดค่าสีของกล้วยแผ่นตามระบบ Hunter ซึ่งแสดงในเทอมของตัวแปร L , a และ b โดยค่า L แสดงค่าความสว่าง, a แสดงค่าสีแดงและสีเขียว, b แสดงค่าสีเหลืองและน้ำเงิน การทดสอบจะใช้กล้วยแผ่นอบแห้ง 3 ตัวอย่างและวัดสีตัวอย่างละ 6 ครั้ง โดยก่อนจะวัดสีของกล้วยแผ่นด้วยเครื่องวัดสีดังกล่าวต้องทำการทดสอบเปรียบเทียบ (Calibrate) ด้วยแผ่นสีมาตรฐานที่มีลักษณะเป็นแผ่นสีดำและสีขาว

การทดสอบคุณภาพด้านการหดตัว

การทดสอบคุณภาพด้านการหดตัวของกล้วยแผ่นใช้วิธีแทนที่ปริมาตรกล้วยแผ่นในของแข็งทั้งก่อนและหลังการอบแห้ง ตัวอย่างละ 10 ชิ้น โดยของแข็งที่ใช้ทดสอบคือ Glass beads ซึ่งมีขนาดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.106–0.212 mm (Hwang และ Hayakawa, 1980) ร้อยละการหดตัวเทียบกับปริมาตรของกล้วยสด สามารถคำนวณได้จากสมการ (4)

$$\% \text{Shrinkage} = \frac{V_0 - V}{V_0} \times 100 \quad (4)$$

โดย V_0 คือ ปริมาตรของกล้วยแผ่นสด, cm^3

V คือ ปริมาตรของกล้วยแผ่นหลังจากการอบแห้ง, cm^3

การทดสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส

การทดสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของกล้วยแผ่นหลังการอบแห้งโดยใช้เครื่อง Texture Analyzer รุ่น TA.XT.plus (Stable Microsystems Texture Technologies Inc.,UK) ค่าความถูกต้อง ± 0.001 N โดยจะทำการทดสอบในลักษณะของแรงกด ใช้หัวกดแบบตัด (Cutting probe) และความเร็วในการกด 2 mm/s กดจนกระทั่งตัวอย่างแยกออกจากกัน พิจารณาคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของกล้วยแผ่นจากค่าความแข็ง (Hardness) จำนวนยอด (Number of peaks) ที่มีค่า Theshold force ตั้งแต่ 30 g ขึ้นไป และความชันเริ่มต้น (Initial slop)

การแปรปรวนของปัจจัยที่ต้องการศึกษา คือ อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เวลาฟัฟฟิง และความชื้นของกล้วยแผ่นก่อนการฟัฟฟิงต่อคุณภาพของกล้วยแผ่นดังตารางที่ 2 โดยเป็นผลการวิเคราะห์การถดถอยของแบบจำลองพบว่า เวลาฟัฟฟิงมีอิทธิพลต่อคุณภาพด้านสี (ค่า L, a, b) มากที่สุด โดยอิทธิพลที่มีต่อค่า L นั้น คือ เวลาฟัฟฟิงและความชื้นก่อนการฟัฟฟิง สำหรับอิทธิพลที่มีต่อค่า a มากที่สุดคือ เวลาฟัฟฟิง โดยเฉพาะผลรวมของเวลาฟัฟฟิงกับอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (ในเทอมของ Interaction) จะมีอิทธิพลต่อค่า a มาก สำหรับอิทธิพลของปัจจัยต่อค่า b ไม่เด่นชัดนัก จากการทดสอบจะได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ของสมการถดถอยคุณภาพของกล้วยแผ่นด้านความแข็ง และการหดตัวเท่ากับ 0.80 และ 0.87 ตามลำดับ ซึ่งทำให้สามารถใช้สมการที่ได้ไปทำนายคุณภาพของกล้วยแผ่นที่สภาวะต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่สำหรับสมการถดถอยคุณภาพของกล้วยแผ่น ด้านอื่น ๆ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจค่อนข้างต่ำ ซึ่งอาจทำให้มีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้างเมื่อนำไปใช้

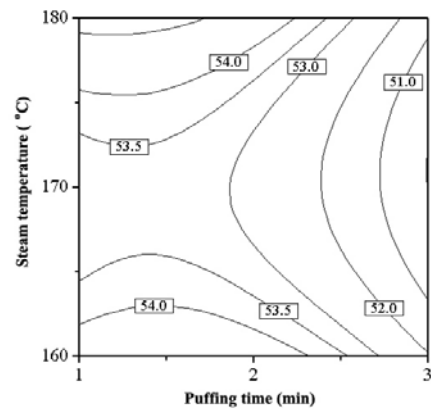
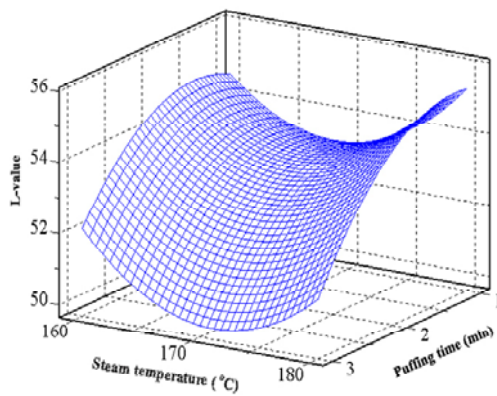
ตารางที่ 3 ค่าคงที่ต่าง ๆ ของสมการที่ (2) ซึ่งได้จากการวิเคราะห์การถดถอยสำหรับคุณภาพด้านต่าง ๆ

Coefficient	Texture			shrinkage	Color		
	Hardness	Number of Peaks	Initial slope		L-value	a-value	b-value
Intercept							
β_0	4208.59*	-1027.46*	-774.44*	1834.90*	517.61*	-17.368*	57.799*
Linear							
β_1	-52.166*	13.478*	10.458*	-17.981*	-5.720	0.431	-0.467
β_2	92.081	9.083	-38.625	-12.698*	3.648*	-6.614*	-0.206
β_3	17.614	-10.211	-6.293	-16.933*	1.893*	-0.714	0.206
Quadratic							
β_4	0.166*	-0.046	-0.035	0.049*	0.017	-0.0014	0.0014
β_5	-1.718	-4.278	-3.888	4.007	-1.209	0.212	-0.611*
β_6	0.208	-0.131	-0.037	0.261*	-0.049	0.0244	-0.0014
Interaction							
β_7	-0.468*	0.058	0.304	-0.139	-0.039	0.060*	0.011
β_8	-0.165*	0.100*	0.048	0.023	-0.0016	-0.0016	-0.0013
β_9	-0.211	-0.100	0.075	0.541	0.249	-0.135*	0.025
R^2	0.80	0.59	0.53	0.87	0.60	0.69	0.52

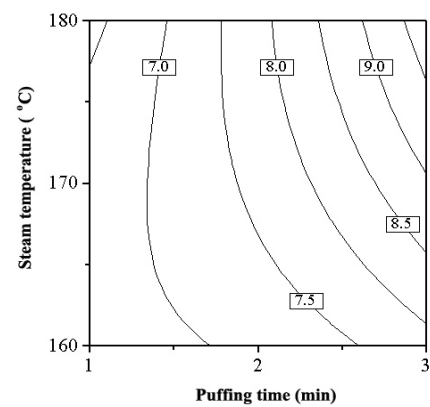
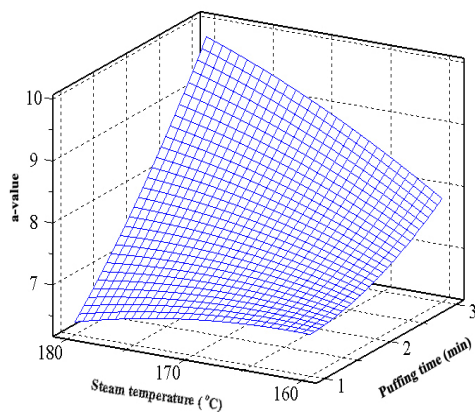
* Significant at 95% level

คุณภาพด้านสีของกล้วยแผ่น

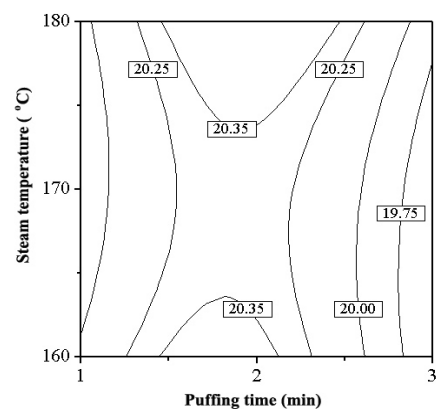
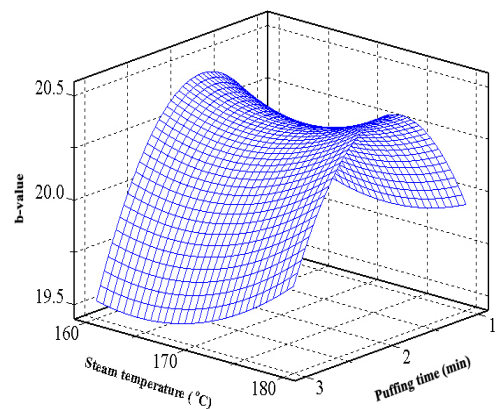
จากการทดลองพบว่าการเปลี่ยนสีของกล้วยแผ่นที่ได้หลังการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียว และการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับการฟัฟฟิงด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะมีสีโดยรวมเป็นสีเหลืองปนน้ำตาล โดยบริเวณรอบจุดศูนย์กลางของกล้วยแผ่นจะมีสีน้ำตาลเข้มมากที่สุด เนื่องจากมีปริมาณน้ำตาลมากกว่าบริเวณอื่น ๆ โดยผลของอุณหภูมิ เวลาฟัฟฟิง และความชื้นของกล้วยแผ่นก่อนการฟัฟฟิงต่อการเปลี่ยนแปลงสีของกล้วยแผ่นในเทอมของ L, a และ b ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งจะประกอบด้วย surface plot และ contour plot



(ก) การเปลี่ยนแปลงค่า L ของกล้วยแผ่น



(ข) การเปลี่ยนแปลงค่า a ของกล้วยแผ่น



(ค) การเปลี่ยนแปลงค่า b ของกล้วยแผ่น

รูปที่ 2 ผลของอุณหภูมิและเวลาพuffingต่อการเปลี่ยนสีของกล้วยแผ่น (ความชื้นของกล้วยแผ่นก่อนการพuffing 25% d.b.)

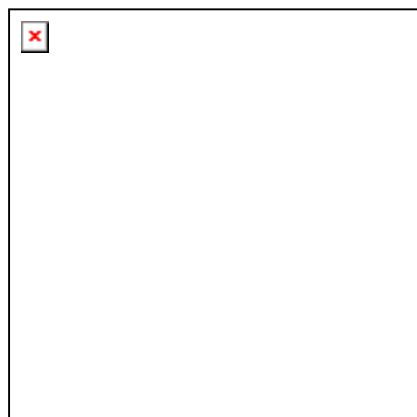
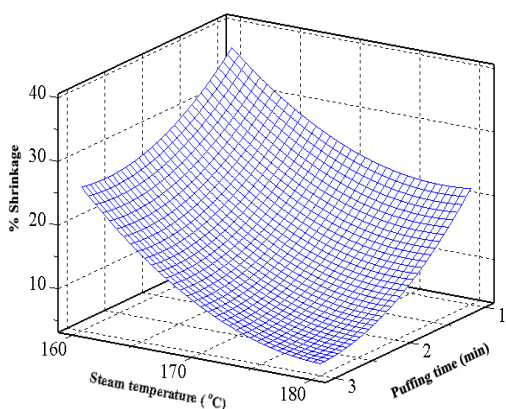
รูปที่ 2 (ก) แสดงผลของอุณหภูมิของไอน้ำร้อนขดยิ่ง และเวลาพuffingต่อการเปลี่ยนแปลงสีของกล้วยแผ่น พบว่าเวลาพuffingมีอิทธิพลต่อความสว่าง (ค่า L) มากกว่าอิทธิพลของอุณหภูมิไอน้ำร้อนขดยิ่ง เมื่อเวลาพuffingมากขึ้นค่า L ลดลง เนื่องมาจากที่เวลาพuffingนานขึ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลเพิ่มขึ้น สำหรับอิทธิพลของอุณหภูมิไอน้ำร้อนขดยิ่งนั้นพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิ

รูปที่ 2 (ข) แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง และเวลาพuffingต่อการเปลี่ยนแปลงค่า a ของกล้วยแผ่น พบว่า เมื่อเวลาพuffingนานและอุณหภูมิพuffingสูงขึ้น ค่าของ a ซึ่งแสดงความเป็นสีแดงมีค่าสูงขึ้น จากรูปจะเห็นว่า ที่เวลาพuffing 3 นาที เมื่ออุณหภูมิของการพuffingสูงขึ้น การเปลี่ยนแปลงของ a จะเป็นไปอย่างรวดเร็ว แต่ผลของอุณหภูมิจากไม่เด่นชัดนักเมื่อเวลาในการพuffingสั้น (1 นาที) จากรูปค่า a มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 6.12 ± 0.7 ที่อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 180°C และ เวลาในการพuffing 1 นาที

รูปที่ 2 (ค) แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง และเวลาพuffingต่อการเปลี่ยนแปลงค่า b ของกล้วยแผ่น พบว่าเวลาพuffingจะมีอิทธิพลต่อค่า b มากกว่าอิทธิพลของอุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง แต่อย่างไรก็ตามช่วงของค่า b ที่เปลี่ยนแปลงจะแคบมากโดยค่า b อยู่ระหว่าง 19.25 และ 20.29 ตลอดเงื่อนไขการทดลอง

การหาค่าของกล้วยแผ่น

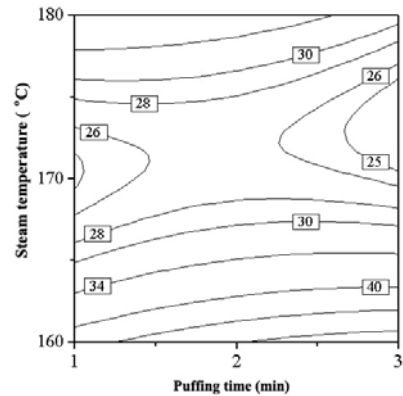
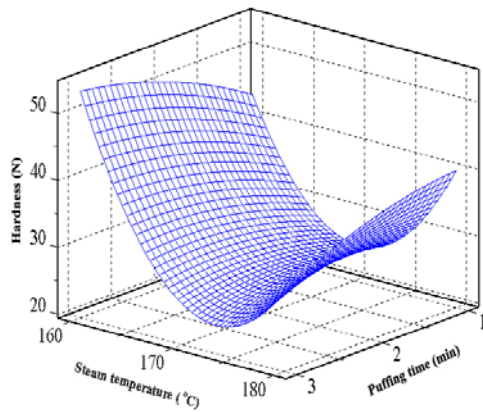
รูปที่ 3 แสดงอิทธิพลของเวลาพuffingและอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งต่อร้อยละการหดตัวของกล้วยแผ่น พบว่า เมื่ออุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง และเวลาพuffingนานขึ้น ส่งผลให้ร้อยละการหดตัวของกล้วยแผ่นน้อยลง เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงและเวลาพuffingนานขึ้นนั้นจะทำให้ไอน้ำในกล้วยแผ่นเดือดกลายเป็นไอน้ำอย่างรวดเร็ว เกิดความดันไอน้ำขึ้นภายในกล้วยแผ่น โครงสร้างมีการพองตัวขึ้น ในการพuffingที่อุณหภูมิสูง และเวลาพuffingนานขึ้น ความชื้นของกล้วยแผ่นหลังกระบวนการพuffingจะเหลืออยู่น้อยมากทำให้โครงสร้างมีเสถียรภาพมากขึ้นเมื่อนำไปอบแห้งในขั้นตอนสุดท้าย โครงสร้างจะไม่มีกรยุบตัวอีกทำให้ร้อยละการหดตัวมีน้อย



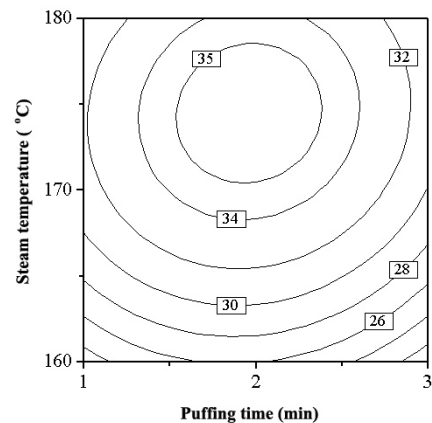
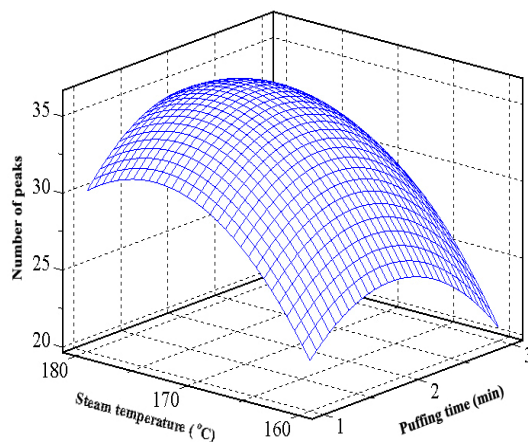
รูปที่ 3 ผลของอุณหภูมิและเวลาพuffingต่อการหดตัวของกล้วยแผ่น(ความชื้นของกล้วยแผ่นก่อนการพuffing 25% d.b.)

คุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของกล้วยแผ่น

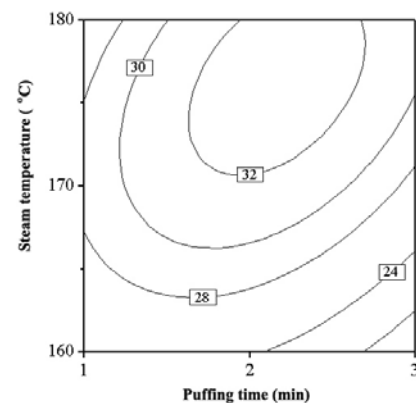
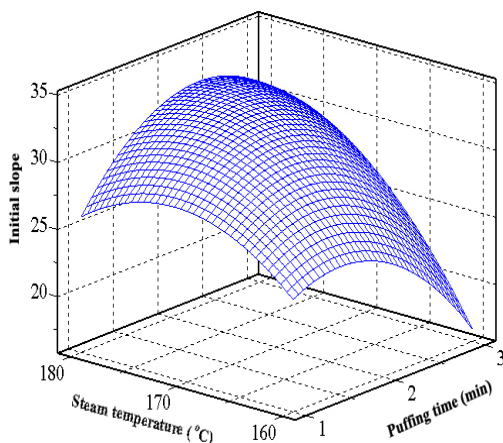
คุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของกล้วยแผ่นจะพิจารณาจากค่าความแข็ง จำนวนยอด และความชื้นเริ่มต้น โดยที่จำนวนยอด และความชื้นเริ่มต้น แสดงถึงความกรอบของผลิตภัณฑ์ หากจำนวนยอด และความชื้นเริ่มต้นมาก ก็แสดงว่าผลิตภัณฑ์มีความกรอบมาก เนื่องจากยอดเกิดจากการเปลี่ยนแปลงความชื้นของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะทาง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความชื้นเกิดจากผลิตภัณฑ์ที่มีช่องว่างหรือโพรงอากาศภายใน ผลิตภัณฑ์ที่มีความกรอบมากจะมีจำนวนยอดมากและมีค่าความแข็งน้อย



(ก) ผลของอุณหภูมิและเวลาพuffing ต่อความแข็งของกล้วยแผ่น



(ข) ผลของอุณหภูมิและเวลาพuffing ต่อจำนวนยอดของกล้วยแผ่น



(ค) ผลของอุณหภูมิและเวลาพuffing ต่อความชันเริ่มต้นของกล้วยแผ่น

รูปที่ 4 ผลของอุณหภูมิ และเวลาพuffing ต่อเนื้อสัมผัสของกล้วยแผ่น (ความชื้นของกล้วยแผ่นก่อนการพuffing 25% d.b.)

รูปที่ 4 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของไอน้ำร้อนขดขึงและเวลาพuffing ต่อคุณภาพด้านความแข็งโดยพิจารณาที่ความชื้นของกล้วยแผ่นก่อนการพuffing 25 %d.b. พบว่าอุณหภูมิของไอน้ำร้อนขดขึงมีผลต่อความแข็งของกล้วยแผ่นมากกว่าเวลาพuffing ซึ่งสังเกตได้จากความชันของเส้นกราฟ โดยที่พuffing ด้วยไอน้ำร้อนขดขึงที่อุณหภูมิต่ำกล้วยแผ่นจะมีความแข็งมากเนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำน้ำในวัสดุจะเดือดได้น้อย โครงสร้างเกิดการพองตัวได้น้อย ดังนั้นหลังกระบวนการพuffing กล้วยแผ่นเมื่อ

รูปที่ 4 (ข) และ (ค) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งและเวลาพืงค่อจำนวนยอด และความชันเริ่มต้นของกล้วยแผ่นที่ความชันของกล้วยแผ่นก่อนการพืงค่อ 25 %d.b. พบว่า อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีอิทธิพลต่อจำนวนยอด และความชันเริ่มต้นของกล้วยแผ่นมากกว่าอิทธิพลของเวลาพืงค่อ กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งสูงขึ้นจำนวนยอด และความชันเริ่มต้นมีค่ามากขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งสูงนั้น น้ำภายในวัสดุจะเกิดการเดือด ทำให้เกิดความดันไอล้นภายในกล้วยแผ่นมาก กล้วยแผ่นจะเกิดการพองตัว โครงสร้างมีรูพรุนเกิดขึ้นมากทำให้กล้วยแผ่นกรอบมากขึ้น และที่เวลาพืงค่อมากขึ้นจำนวนยอดและความชันเริ่มต้นจะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

การหาสถานะที่เหมาะสมของการทดลอง

การหาจุดที่เหมาะสมของคุณภาพกล้วยกรอบ จะใช้ ความพึงพอใจโดยรวม (Desirability Function) เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยโดยการกำหนดค่า Weight function ของแต่ละผลตอบสนองด้านคุณภาพ ได้แก่ คุณภาพด้านสี และการหัดตัว กำหนดค่า Weight เป็น 0.5 ด้วยเหตุผลที่ว่าในขั้นตอนการวัดสี และการหาค่าการหัดตัวของกล้วยแผ่นนั้นอาจมีความผิดพลาดอยู่บ้างทำให้ข้อมูลมีความแปรปรวนค่อนข้างมาก สำหรับคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสกำหนดค่า Weight เป็น 0.1 ด้วยเหตุผลที่ว่าลักษณะการพองตัวของกล้วยแผ่น ไม่สม่ำเสมอ ทำให้ข้อมูลที่ได้จากการวัดด้านเนื้อสัมผัสมีความแปรปรวนมาก และการกำหนด Importance ในงานวิจัยนี้จะให้ความสำคัญกับทุกผลตอบสนองเท่า ๆ กัน โดยค่า defaults ที่โปรแกรมกำหนดมาคือ 1

ตารางที่ 4 ผลที่ได้จากการทำ optimization

	Hardness	Peaks	slope	Shrinkage	L-value	a-value	b-value
Optimal value	37.081	33.982	30.025	17.019	54.615	7.000	20.238
Individual Desirability (d_i)	0.996	0.999	1.000	0.999	0.9777	1.000	0.981
Composite Desirability (D)	0.994						

ตารางที่ 4 แสดงผลของคุณภาพกล้วยแผ่นที่ได้จากการทำ Optimization โดยสถานะที่เหมาะสมสำหรับการพืงค่อกล้วยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งคือ อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งเท่ากับ 180.00°C เวลาพืงค่อเท่ากับ 1.41 นาที และ ความชันก่อนการพืงค่อเท่ากับ 26.16%d.b. ที่สถานะเงื่อนไขของกล้วยโดยความพึงพอใจโดยรวม (Composite Desirability) เท่ากับ 0.994

สรุปผล

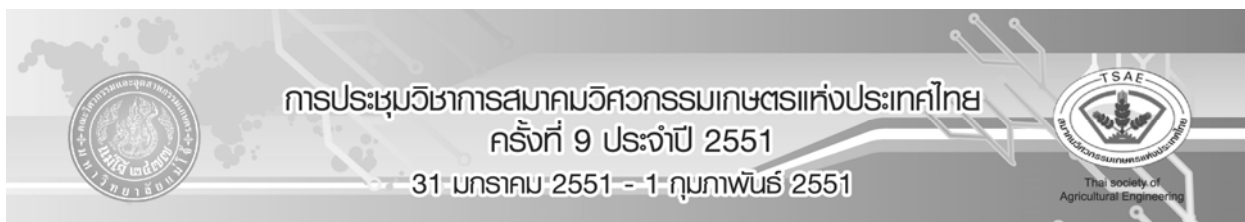
จากการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ในกระบวนการพืงค่อ คือ อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เวลาพืงค่อ และความชันของกล้วยแผ่นก่อนการพืงค่อที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพของกล้วยแผ่น พบว่า อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีอิทธิพลต่อคุณภาพของกล้วยแผ่นมากกว่าอิทธิพลของเวลาพืงค่อ สำหรับความชันของกล้วยแผ่นก่อนการพืงค่อมีอิทธิพลต่อคุณภาพของกล้วยแผ่นน้อยมาก เมื่อพืงค่อกล้วยแผ่นที่อุณหภูมิสูงขึ้นและเวลาพืงค่อนานคุณภาพด้านสี ค่า a เพิ่มขึ้น และค่า L และ ค่า b ลดลง และเมื่อพืงค่อกล้วยแผ่นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิสูง(เวลาพืงค่อสั้น ๆ) ทำให้คุณภาพของกล้วยแผ่นด้าน การหัดตัว และความแข็งแรงลดลง แต่ความกรอบเพิ่มขึ้น และคุณภาพด้านสีค่าความเป็นสีแดง(ค่า a) ต่ำ สถานะที่เหมาะสมของกระบวนการพืงค่อที่ให้ค่าการหัดตัวน้อย ค่าความแข็งแรงต่ำ มีความกรอบมาก และ สีที่ดีที่สุด คือที่อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งเท่ากับ 180°C เวลาที่ใช้ในการพืงค่อเท่ากับ 1.4 นาที และ ความ ชันของกล้วยก่อนการพืงค่อเท่ากับ 26.16%d.b.

คำขอบคุณ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษาและสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้ทุนอุดหนุนการวิจัย และ ขอขอบคุณสำนักงานความร่วมมือเพื่อการพัฒนาระหว่างประเทศ (สพร.) ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- เพลินใจ ตังคณะกุล. 2546. การทำข้าวเกรียบเป็นผลิตภัณฑ์คุณภาพ. อาหาร. 33(2): 90-93.
- Demirel, D. and Turhan, M. (2003). Air-drying behavior of dawrf cavendish and Gros Michel banana slices. *Journal of Food Engineering.*, 59(1), 1- 11.
- Hwang, M.P., & Hayakawa, K.I. (1980). Bulk densities of cookies undergoing commercial baking processes. *Journal of Food Science.*, 45(5), 1400-1402.
- Myers, R., & Montgomery, D.C. (2002). Response surface Methodology. New York, USA: Wiley.
- Prachayawarakorn, S., Soponronarit, S., Wetchacama, S. and Jaisut, D. (2002). Desorption isotherms and drying characteristics of shrimp in superheated steam and hot air. *Drying Technology.*, 20(3), 669-684.
- Tang, Z. and Cenkowski, S. (2000). Dehydration dynamics of potatoes in superheated steam and hot air. *Canadian Agricultural Engineering.*, 42(1), 6.1-6.13.



อิทธิพลของเทคนิคการอบแห้งที่มีต่อสารประกอบที่ระเหยง่ายและคุณภาพทางกายภาพของกล้วยแผ่น

Effect of drying techniques on volatile compounds and physical quality attributes on less fat banana crisp

จารุวรรณ กุลวิศว¹, สมเกียรติ ปรัชญาวารากร², สมชาติ โสภณรณฤทธิ์³

Jaruwan Kunwisawa¹, Somkiat Prachayawarakorn² and Somchart Soponronnarit³

บทคัดย่อ

จากการศึกษาเบื้องต้นถึงอุณหภูมิของการอบแห้งที่มีต่อคุณภาพกล้วยแผ่นพบว่าอุณหภูมิที่ 90°C เหมาะสมต่อการอบแห้งกล้วยแผ่นโดยที่สีของกล้วยแผ่นหลังการอบแห้งมีสีครีมซึ่งใกล้เคียงกับสีของกล้วยสด แต่ลักษณะของเนื้อสัมผัสที่ได้ค่อนข้างแข็งทั้งนี้เนื่องจากมีความพรุนน้อยภายในโครงสร้างของกล้วยแผ่นหลังการอบแห้ง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาวิธีการอบแห้งแบบต่างๆเพื่อให้ได้กล้วยแผ่นที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุน วิธีการอบแห้งที่ศึกษามีดังนี้ การอบแห้งโดยวิธีแช่เยือกแข็ง (FD) การอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรดไกล (Vacuum FIR) และการอบแห้งด้วยอากาศร้อนเพื่อลดความชื้นของกล้วยให้เหลือร้อยละ 25 มาตรฐานแห้ง ตามด้วยการพuffing โดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ 180°C เป็นเวลา 2 นาที จากนั้นในขั้นตอนสุดท้ายเป็นการอบแห้งด้วยอากาศร้อนจนกระทั่งกล้วยมีความชื้นร้อยละ 4 มาตรฐานแห้ง (HA/SSD/HA) คุณภาพของกล้วยแผ่นที่ศึกษาได้แก่ สี เนื้อสัมผัส ลักษณะ โครงสร้างของกล้วยแผ่น และปริมาณสารประกอบที่ระเหยง่าย (Isoamyl acetate, Isobutyl butanoate and butyl butyrate) จากผลการทดลองพบว่า กล้วยที่ผ่านการอบแห้งด้วย HA/SSD/HA มีรูพรุนขนาดใหญ่ และมีการหดตัวน้อย ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีความกรอบมาก แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสีน้ำตาลเข้ม เมื่ออบแห้งด้วย Vacuum FIR สีของผลิตภัณฑ์อ่อนลง แต่ผลิตภัณฑ์มีความกรอบน้อยกว่า HA/SSD/HA ในขณะที่กล้วยที่ผ่านการอบแห้งด้วย FD มีสีค่อนข้างซีด และไม่กรอบ ปริมาณสารประกอบที่ระเหยง่ายสูญเสียไปมากสำหรับการอบแห้งด้วย HA, HA/SSD/HA และ Vacuum FIR ในขณะที่การอบแห้งด้วย FD สามารถรักษาปริมาณสารประกอบที่ระเหยง่ายไว้ได้

คำสำคัญ : กล้วย การอบแห้ง ความกรอบ สารระเหยง่าย

ABSTRACT

A preliminary study of banana drying indicated that the drying temperature of 90°C was an appropriate condition for producing banana slices with maintaining its color closed to cream color. However, its texture in particular hardness was very high due to less porous structure. This work was extended from the previous work to study the different drying techniques in order to produce porous structures of banana slices. The proposed drying methods were freeze drying (FD), vacuum far infrared drying (Vacuum FIR) and multi-stage drying (HA/SSD/HA) where the banana slices were dried to 25% d.b. using hot air followed by puffing them in superheated steam at 180°C for 2 minutes and dried again at the last step to obtain 4% d.b. Four important quality parameters of banana slices i.e. color, texture, morphology and volatile compounds (Isoamyl acetate, Isobutyl butanoate and butyl butyrate) were quantitatively determined. The experimental results showed that the banana slices, which were dried by HA/SSD/HA, had larger voids and smaller shrinkage, resulting in a higher crisp product. However, these

products were darker brown. Vacuum FIR drying yielded a lighter coloured product. The products dried by Vacuum FIR, however, had smaller crispness than those dried by HA/SSD/HA. Whilst, the freeze-dried products were not crisp and their color was pale. The volatile compound losses were higher when the samples dried by HA, HA/SSD/HA and Vacuum FIR while freeze drying could maintain volatile compounds.

KEYWORDS : Banana Drying Crispy Volatile Compound

¹Graduated student, ²Associate Professor, Faculty of Engineering, ³Professor, School of Energy and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 126 Prachautid, Tungkru, Bangkok 10140

*Corresponding author. Tel.:0-0-2470-8695 ext.112; E-mail address: jaruwan_kun@yahoo.com

บทนำ

กล้วยหอมเป็นผลไม้ที่ปลูกมากในประเทศไทย ในบางฤดูกาลอาจมีปริมาณมากเกินความต้องการของผู้บริโภค อีกทั้งเป็นผลไม้ที่เกิดการเน่าเสียได้ง่ายหลังการเก็บเกี่ยว การผลิตกล้วยแผ่นอบกรอบเป็นวิธีการหนึ่งซึ่งช่วยยืดอายุในการเก็บรักษาและเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์

การผลิตกล้วยแผ่นอบกรอบมีหลายวิธี เช่น การอบแห้งด้วยอากาศร้อน อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง การอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศ และการอบแห้งแบบแช่แข็ง เป็นต้น ซึ่งในแต่ละวิธีมีข้อดี และข้อเสียแตกต่างกัน สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึง คือ คุณภาพของผลิตภัณฑ์ และค่าใช้จ่ายในการผลิต การอบแห้งด้วยอากาศร้อนเสียค่าใช้จ่ายน้อย แต่คุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ยังไม่ดีนักเนื่องจากใช้เวลาในการอบแห้งค่อนข้างนาน และโครงสร้างของผลิตภัณฑ์มีความเป็นรูพรุนน้อยทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งมาก และมีความกรอบน้อย (จารูวรรณ, 2550) การอบแห้งด้วยอากาศร้อนไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความกรอบมากแต่มีสีค่อนข้างเข้มเนื่องจากผลิตภัณฑ์ต้องสัมผัสกับตัวกลางในการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง (Prachayawarakorn, 2007) ดังนั้นจึงมีการนำอากาศร้อนมาใช้ร่วมกับไอน้ำร้อนยวดยิ่งเพื่อปรับปรุงคุณภาพด้านสี และเนื้อสัมผัสให้ดีขึ้น (คำพันธ์, 2550) สำหรับการอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศ และการอบแห้งแบบแช่แข็งจะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดี มีความเป็นรูพรุนมาก เกิดการหดตัวน้อย มีความกรอบมาก แต่มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง

อย่างไรก็ตามยังไม่มีงานวิจัยที่ศึกษาเปรียบเทียบคุณภาพของกล้วยแผ่นอบกรอบโดยใช้เทคนิคการอบแห้งทั้ง 4 แบบ คือ การอบแห้งแบบอากาศร้อน การอบแห้งแบบอากาศร้อนร่วมกับไอน้ำร้อนยวดยิ่ง การอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรดไกล และการอบแห้งแบบแช่แข็ง ดังนั้นในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบคุณภาพของกล้วยแผ่นที่ผ่านการอบแห้งด้วยเทคนิคดังกล่าว โดยคุณภาพของกล้วยแผ่นที่พิจารณาได้แก่ การหดตัว สี เนื้อสัมผัส โครงสร้างภายใน และปริมาณสารประกอบที่ระเหยง่าย ประโยชน์ที่ได้จากการศึกษานี้จะเป็นแนวทางในการพัฒนาในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

วิธีการทดลอง

ในการทดลองใช้กล้วยหอมทองระยะสุกที่ 5 ซึ่งพิจารณาได้จากสีของเปลือกเป็นสีเหลืองแต่ปลายยังเป็นสีเขียว ปอกเปลือกแล้วหั่นตามขวางด้วยเครื่องหั่นกำหนดความหนาไว้ที่ 3 มิลลิเมตร แช่ด้วยสารละลายกรดแอสคอร์บิกเข้มข้น 0.1% w/v 1 นาที (Demirel, 2003) นำมาอบแห้งด้วยเทคนิคต่างๆ ซึ่งนำหั่นกล้วยแผ่นทุก ๆ 5 นาที จนกระทั่งเหลือความชื้นสุดท้าย 4% (d.b.) หลังจากนั้นนำผลิตภัณฑ์อบแห้งที่ได้ไปทดสอบคุณภาพในด้านสี เนื้อสัมผัส การหดตัวและปริมาณสารประกอบที่ระเหยง่าย (หาค่าหนักแห้งของกล้วยแผ่นก่อนการอบแห้งโดยนำไปอบด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง)

การอบแห้งด้วยอากาศร้อน (HA)

การอบแห้งด้วยอากาศร้อน ที่อุณหภูมิ 90°C ความเร็วลม 1.3 m/s ซึ่งนำหั่นกล้วยแผ่นทุก ๆ 5 นาที จนกระทั่งเหลือความชื้นสุดท้าย 4% (d.b.)

การอบแห้งด้วยอากาศร้อนร่วมกับไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (HA/SSD/HA)

การอบแห้งด้วยอากาศร้อนร่วมกับไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นการอบแห้ง 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกอบแห้งที่อุณหภูมิของอากาศร้อน 90 °C ความเร็วเฉลี่ยของอากาศเข้าห้องอบแห้งประมาณ 2 m/s อบกล้วยแผ่นให้มีความชื้นความชื้นประมาณ 25% d.b. ขั้นตอนที่ 2 อบแห้งกล้วยแผ่นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 180 °C ความเร็วเฉลี่ยของอากาศเข้าห้องอบแห้ง 2 m/s เป็นเวลา 2 นาที ขั้นตอนที่ 3 อบแห้งกล้วยแผ่นด้วยอากาศร้อนที่สภาวะเดียวกับขั้นตอนแรก จนกระทั่งกล้วยแผ่นเหลือความชื้นประมาณ 4% d.b. (คำพันธ์, 2550)

การอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรดไกล (Vacuum FIR)

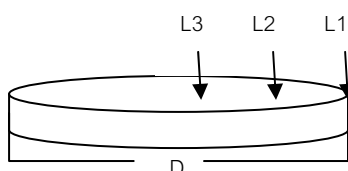
การอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรดไกลโดยตั้งค่าอุณหภูมิควบคุมที่ผิวของชิ้นกล้วยที่อุณหภูมิ 90°C ควบคุมอุณหภูมิในการอบแห้งด้วย PID จึงมีความถูกต้อง $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ความดันอากาศในห้องอบแห้งควบคุมไว้ที่ประมาณ 7 kPa บันทึกน้ำหนักวัสดุที่อบแห้งในห้องอบแห้งโดยการใช้ load cell ทุก 1 นาที อบแห้งจนได้ความชื้นสุดท้ายที่ 4% d.b. (Nimmol, 2007)

การอบแห้งแบบแช่แข็ง (FD)

การอบแห้งแบบแช่แข็งโดยแช่เยือกแข็งกล้วยแผ่นที่อุณหภูมิ -35°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่แข็ง Freeze Dryer รุ่น Lyolab 3000 ที่อุณหภูมิประมาณ -45 ถึง -50°C จนมีความชื้นเหลือประมาณ 4% d.b.

การทดสอบการหดตัว

ในการทดสอบการหดตัวของกล้วยแผ่นจะวัดทางด้านความหนาด้วย Caliper ซึ่งจะทำให้การวัดที่ระยะต่างๆเป็นจำนวน 3 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 2 โดยใช้จำนวนตัวอย่างทั้งหมด 3 ตัวอย่าง และวัดเส้นผ่านศูนย์กลางด้วยเวอร์เนีย (vernier) โดยใช้ตัวอย่างทั้งหมด 3 ตัวอย่าง



รูปที่ 1. การวัดการหดตัวของกล้วยแผ่น

การทดสอบคุณภาพด้านสีของผลิตภัณฑ์

สีของกล้วยแผ่นวัดด้วยเครื่องวัดสีอาหาร HunterLab รุ่น ColorFlex สีของกล้วยแผ่นแสดงในเทอมของตัวแปร L, a และ b โดยค่า L (lightness Parameter) แสดงค่าความสว่าง ค่า a (Redness Parameter) แสดงค่าสีแดงหรือสีเขียว และ ค่า b (Yellowness Parameter) แสดงค่าสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน ก่อนวัดสีของตัวอย่างได้ทำการสอบเทียบ (Calibrate) เครื่องวัดสีอาหารก่อนด้วยการวัดสีแผ่นสีขาวมาตรฐานซึ่งมีค่า $L^*=96.98$, $a^*=0.03$ และ $b^*=1.84$ ในการวัดสีจะใช้จำนวนตัวอย่างกล้วย 10 ตัวอย่างแต่ละตัวอย่างวัด 3 ครั้ง

การทดสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส

คุณภาพด้านเนื้อสัมผัสหลังการอบแห้งทดสอบโดยใช้เครื่อง Texture Analyser รุ่น TA.XT.Plus ค่าความถูกต้อง $\pm 0.001\text{ N}$ โดยจะทำการทดสอบในลักษณะของแรงกด โดยใช้หัวกดชนิดหัวตัด และความเร็วในการกด 2 mm/s โดยกดจนกระทั่งกล้วยแผ่นแตกออกจากกัน คุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของกล้วยแผ่นพิจารณาจากค่าความแข็ง (Hardness) จำนวนยอด (Number of Peaks) ที่มีค่า Threshold force ตั้งแต่ 30 g ขึ้นไป และ ความชันเริ่มต้น (Initial Slope) ในการทดสอบคุณภาพเนื้อสัมผัสจะใช้จำนวนตัวอย่างทั้งหมด 10 ตัวอย่าง

การทดสอบโครงสร้างด้วยเครื่อง SEM (Scanning Electron Microscope)

การทดสอบเริ่มจากนำตัวอย่างกล้วยแผ่นแห้งไปเตรียมตัวอย่างก่อนนำไปส่องดูโครงสร้าง โดยทำการดึงน้ำออกจากตัวอย่าง (Dehydration) เนื่องจากตัวอย่างที่จะนำมาศึกษาด้วย SEM จะต้องแห้งและปราศจากน้ำโดยสิ้นเชิง การดึงน้ำออกจากตัวอย่างทำได้โดยแช่ตัวอย่างในไนโตรเจนเหลว ซึ่งเรียกว่า ไครโอเจน (Cryogen) จากนั้นนำตัวอย่างกล้วยแผ่นที่ทำการหักแล้วไปทำการติดตัวอย่างลงบน stub (Mounting) ฉาบทองที่ผิวตัวอย่าง (Coating) นำกล้วยที่ฉาบทองแล้วเข้าไปส่องดูโครงสร้างด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (JEOL รุ่น JSM – 5800LV)

การแยกสารระเหยง่ายจากตัวอย่าง

การหาสารประกอบที่ระเหยง่าย ทำได้โดยนำกล้วยสด 5 g บดให้เป็นเนื้อเดียวกันผสมน้ำกลั่น 5 ml ใส่ลงในขวดแก้ว ขนาด 20 ml ที่มีสารละลาย internal standard ที่ประกอบไปด้วย caproic acid ethyl ester 0.2 µl ใน methanol 0.1% (v/v) ส่วน กล้วยแผ่นอบแห้งใช้ 1 g บดให้ละเอียด ผสมกับน้ำกลั่น 9 ml ใส่ลงในขวดแก้วที่มีสารละลาย internal standard จากนั้นปิดด้วย silicone Teflon-lined septum ใช้ส่วนเข็มของ Solid-Phase Microextraction (SPME) ที่ภายในเข็มมีเส้นใยของสาร Carboxen/Polydimethylsiloxen (PDMS) ความเข้มข้น 85 µl เจาะลงบน septum ให้อยู่เหนือตัวอย่าง จากนั้นกวนตัวอย่างด้วย แท่งแม่เหล็ก (magnetic bar) เป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 30°C เพื่อทำการดูดซับสาร จากนั้น นำไปฉีดเข้าเครื่อง GC-MS (Winnie, 2002)

การวิเคราะห์หาสารประกอบที่ระเหยง่าย

การวิเคราะห์สารประกอบที่ระเหยง่ายจะวิเคราะห์โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีรุ่น HP 6890 ต่อกับเครื่องตรวจวัดแบบแมสซีเลคทีฟรุ่น HP 5973 บริษัท HEWLETT คอลัมน์ที่ใช้ในการแยกสารประกอบระเหยง่ายเป็นซิลิกาแคปิลารีคอลัมน์ ชนิด HP-5 ที่มีขนาดความยาว 30 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 mm ความหนาของฟิล์ม 0.25 µm นำ SPME ที่ดูดซับ สารประกอบที่ระเหยง่ายเจาะลงบน injector port ที่มีอุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 5 นาที เพื่อทำการคายซับสาร ส่วนระบบที่ใช้ในการนำสารเข้าคอลัมน์เป็นแบบ split โดยปริมาตรสารเข้าคอลัมน์ 1 ส่วนในปริมาตรสารทั้งหมด 10 ส่วน อุณหภูมิของคอลัมน์ที่ใช้ตอนเริ่มต้นอยู่ที่ 40°C เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิของคอลัมน์เป็น 120°C ด้วยอัตรา 3°C/min และหลังจากนั้นเพิ่ม อุณหภูมิคอลัมน์ด้วยอัตรา 20°C/min จนคอลัมน์มีอุณหภูมิ 180°C คงที่อุณหภูมิไว้เป็นเวลา 11 นาที แก๊สที่ใช้ในการพาสารเข้า คอลัมน์คือฮีเลียมโดยใช้อัตราการไหล 1 ml/min

การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิเคราะห์ข้อมูลการทดลองทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS (version 12) การวิเคราะห์ที่ใช้เป็นแบบ ANOVA โดยเปรียบเทียบค่าที่ได้ด้วยวิธีของ Duncan ซึ่งพิจารณาว่าที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p=0.05$)

ผลและวิจารณ์การทดลอง

เวลาในการอบแห้ง

จากการทดลองอบแห้งกล้วยแผ่นด้วยเทคนิคต่างๆ พบว่ากล้วยที่ใช้อุณหภูมิในการอบแห้งสูงจะใช้เวลาในการอบแห้งต่ำโดยการอบแห้งแบบ HA/SSD/HA ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด ส่วน Vacuum FIR ใช้เวลาในการอบแห้งใกล้เคียงการอบแห้งแบบ HA ส่วนการอบแห้งแบบ FD เป็นการอบแห้งที่ใช้เวลานานที่สุด ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เวลาที่ใช้ในการอบแห้งกล้วยแผ่นด้วยเทคนิคการอบแห้งแบบต่างๆ

Drying method	Drying time (min)
HA	120
HA/SSD/HA	77
Vacuum FIR	110
FD	1320

การหาค่าของกล้วยแผ่น

การหาค่าของกล้วยแผ่นหลังการอบแห้งนั้นเป็นผลเนื่องมาจากความร้อนของตัวกลางของการอบแห้งที่กล้วยแผ่นได้รับขณะทำการอบแห้ง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความชื้นระหว่างการอบแห้ง และส่งผลให้เกิดความเครียดขึ้นภายในวัสดุ ทำให้กล้วยแผ่นเหี่ยวและปริมาตรลดลง

ตารางที่ 2 เปอร์เซ็นต์การหดตัวของกล้วยหลังการอบแห้งทางด้านเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) และทางด้านความหนา (L)

Drying method	%Shrinkage(D)	%Shrinkage(L)
HA	10.72±1.19 ^c	64.39±1.49 ^a
HA/SSD/HA	10.93±1.62 ^c	16.15±4.13 ^c
Vacuum FIR	6.23±0.48 ^b	29.37±0.74 ^b
FD	1.80±0.42 ^a	25.55±1.68 ^b

ตารางที่ 2 แสดงผลของการวัดการหดตัวของกล้วยแผ่นหลังการอบแห้งด้วยเทคนิคต่างๆ พบว่ากล้วยแผ่นมีการหดตัวทางด้านความหนามากกว่าทางด้านรัศมี เนื่องจากการระเหยน้ำส่วนใหญ่อยู่ในทิศทางความหนา นอกจากนี้ยังพบว่าเทคนิคการอบแห้งมีผลต่อการหดตัวของกล้วยแผ่นเมื่อพิจารณาการหดตัวทางด้านความหนาการอบแห้งแบบ HA ให้ค่าการหดตัวสูงที่สุด ส่วนการอบแห้งแบบ HA/SSD/HA มีขั้นตอนในการอบแห้งที่ใช้อุณหภูมิสูงซึ่งส่งผลต่อกล้วยแผ่นทำให้เกิดการพองตัว ค่าการหดตัวที่ได้จึงน้อย ทางด้านการอบแห้งแบบ Vacuum และ FD พบว่าค่าการหดตัวที่ได้มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ด้านการหดตัวทางรัศมีพบว่าการอบแห้งแบบ HA และ HA/SSD/HA ให้การหดตัวไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญและมีค่ามาก ส่วนการอบแห้งแบบ FD ให้ค่าการหดตัวน้อยที่สุด

สีของกล้วยแผ่น

สำหรับการอบแห้งด้วยเทคนิคที่ต่างกันพบว่าส่งผลต่อคุณภาพทางด้านสีโดยเมื่อเทียบสีของกล้วยแผ่นที่ได้หลังจากการอบแห้งกับแผ่นสีมาตรฐานพบว่าสีของกล้วยแผ่นที่ได้ดังตารางที่ 3 สำหรับการอบแห้งแบบ HA ที่อุณหภูมิ 90°C จัดอยู่ในกลุ่ม Greyed – orange 163D การอบแห้งแบบ HA/SSD/HA อยู่ในกลุ่ม Greyed - orange 163C สำหรับการอบแห้งแบบ Vacuum FIR จัดอยู่ในกลุ่ม Greyed - yellow 162B และการอบแห้งแบบ FD จัดอยู่ในกลุ่ม Yellow – orange 18D โดยการอบแห้งแบบ HA/SSD/HA ให้สีน้ำตาลมากกว่าการอบแห้งด้วยเทคนิคอื่นซึ่งสังเกตได้จากค่าความสว่าง และความเหลืองที่น้อยดังตารางที่ 3 เนื่องจากการอบแห้งแบบ HA/SSD/HA ใช้อุณหภูมิในการอบแห้งสูงจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลได้มากกว่า ส่วนการอบแห้งด้วย FD ให้สีครีมออกขาวโดยสังเกตได้จากค่าความสว่างที่มาก

ตารางที่ 3 สีของกล้วยแผ่นหลังการอบแห้งด้วยเทคนิคต่างๆ

Drying method	L-value	a-value	b-value
HA	63.16±1.57 ^b	4.37±0.52 ^b	21.86±1.03 ^b
HA/SSD/HA	51.67±1.65 ^a	6.78±0.62 ^c	18.92±0.42 ^a
Vacuum FIR	62.67±1.91 ^b	7.12±0.63 ^c	23.48±0.43 ^c
FD	76.34±1.24 ^c	2.20±0.21 ^a	19.07±0.55 ^a

หมายเหตุ: อักษรที่เหมือนกันภายในคอลัมน์เดียวกันหมายถึง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ 95%

เนื้อสัมผัสของกล้วยแผ่น

คุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของกล้วยแผ่นจะพิจารณาจากค่าความแข็ง จำนวนยอด ซึ่งจำนวนยอดและค่าความชันเริ่มต้นจะแสดงถึงความกรอบของอาหาร หากมีจำนวนยอดมากและความชันเริ่มต้นมากก็แสดงว่าผลิตภัณฑ์มีความกรอบมาก เนื่องจากยอดเกิดจากการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่เกิดจากผลิตภัณฑ์มีช่องว่างหรือโพรงอากาศภายใน

ตารางที่ 4 ความกรอบของกล้วยแผ่นหลังการอบแห้งด้วยเทคนิคต่างๆ

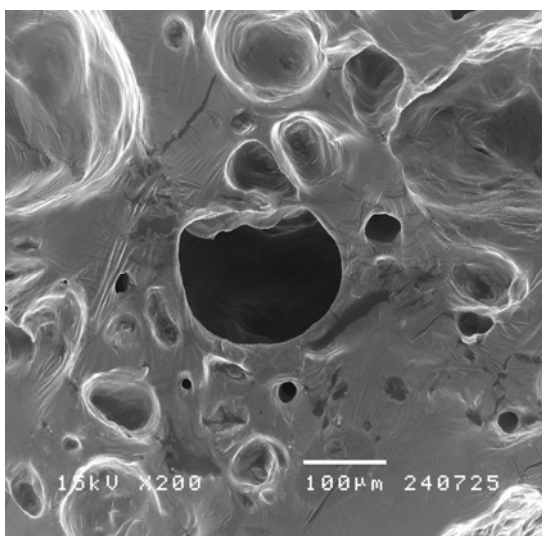
Drying method	Hardness(N)	Number of peaks	Initial slope(N/mm)
HA	41.3±22.5 ^b	19 ±4 ^{bc}	6.2±3.4 ^a
HA/SSD/HA	16.6±5.5 ^a	23±9 ^c	15.0±6.3 ^c
Vacuum FIR	18.5±4.4 ^a	17±4 ^b	10.8±3.1 ^b
FD	40.8±16.9 ^b	9±3 ^a	4.7±0.9 ^a

หมายเหตุ: อักษรที่เหมือนกันภายในคอลัมน์เดียวกันหมายถึง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ 95%

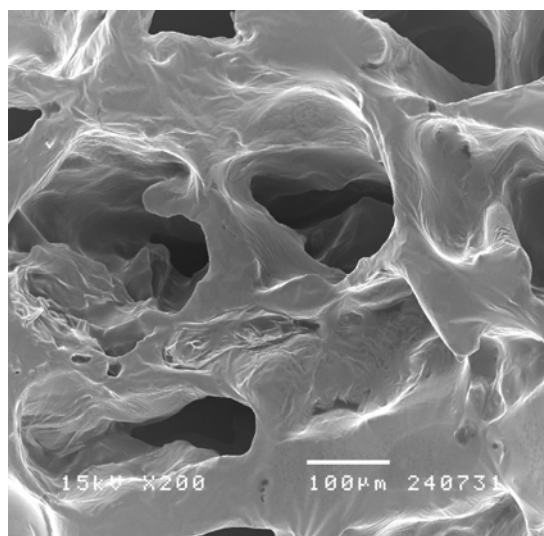
จากตารางที่ 4 แสดงค่าความแข็ง จำนวนยอด และค่าความชันเริ่มต้น หลังการอบแห้งด้วยเทคนิคต่างๆ พบว่ากล้วยที่อบแห้งแบบ HA และ FD ให้ค่าความแข็งมากกว่าการอบแห้งด้วยเทคนิคอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญที่ 95% ซึ่งค่าความแข็งที่เกิดขึ้นของการอบแห้งแบบ FD เนื่องมาจากวัสดุมีการโก่งงอเกิดขึ้น ส่วนผลของความกรอบซึ่งสังเกตได้จากจำนวนยอดและความชันเริ่มต้นพบว่าเทคนิคการอบแห้งที่ต่างกันทำให้ค่าความกรอบที่ได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยพบว่าการอบแห้งแบบ HA/SSD/HA ให้ค่าความกรอบมากที่สุด ส่วน FD มีค่าความกรอบน้อย

โครงสร้างภายในของกล้วยแผ่น

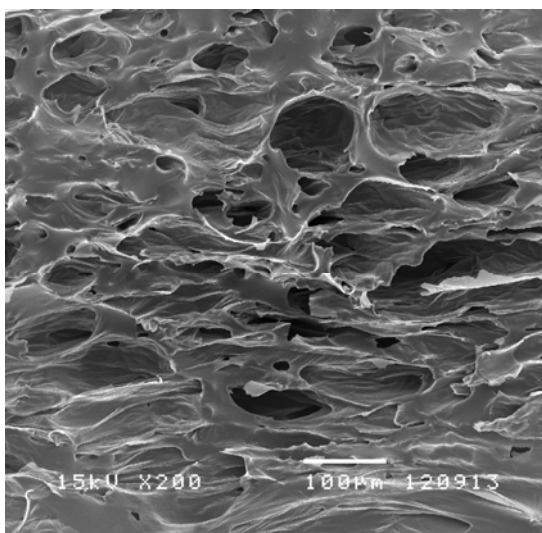
จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างภายในของกล้วยแผ่นหลังการอบแห้งด้วยเทคนิคต่างๆ ด้วยเครื่อง SEM นั้นมีรายละเอียดดังนี้ จากภาพถ่ายที่พิจารณาลักษณะ โครงสร้างของกล้วยแผ่นในแบบภาคตัดขวาง ดังรูปที่ 2 ซึ่งแสดงภาพถ่ายภาคตัดขวางของกล้วยแผ่นที่อบแห้งด้วยเทคนิคต่างๆ พบว่ากล้วยที่อบแห้งแบบ HA จะมีรูพรุนจำนวนน้อย และมีความแน่นเนื้อมาก แต่เมื่ออบแห้งด้วย HA/SSD/HA ให้ขนาดรูพรุนใหญ่ที่สุดและมีความแน่นเนื้อน้อยกว่าการอบแห้งด้วยเทคนิคอื่นๆ ส่วนการอบแห้งแบบ Vacuum FIR และการอบแห้งแบบ FD จะให้ลักษณะรูพรุนขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วไป ซึ่งจากผลของการวัดความกรอบดังตารางที่ 4 แสดงให้เห็นว่ากล้วยที่อบแห้งด้วย HA/SSD/HA ให้ความกรอบมากและแรงกดน้อย ซึ่งเป็นผลมาจากชั้นกล้วยที่ได้หลังการอบแห้งมีรูพรุนขนาดใหญ่ เพราะอุณหภูมิในการอบแห้งสูงน้ำภายในเนื้อกล้วยจึงเกิดการเดือดอย่างรุนแรงทำให้เกิดโพรงอากาศที่มีขนาดใหญ่



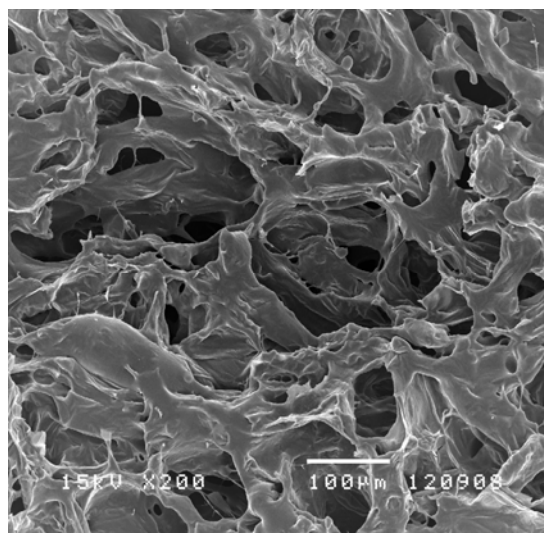
(ก) HA 90°C



(ข) HA/SSD/HA



(ค) Vacuum FIR

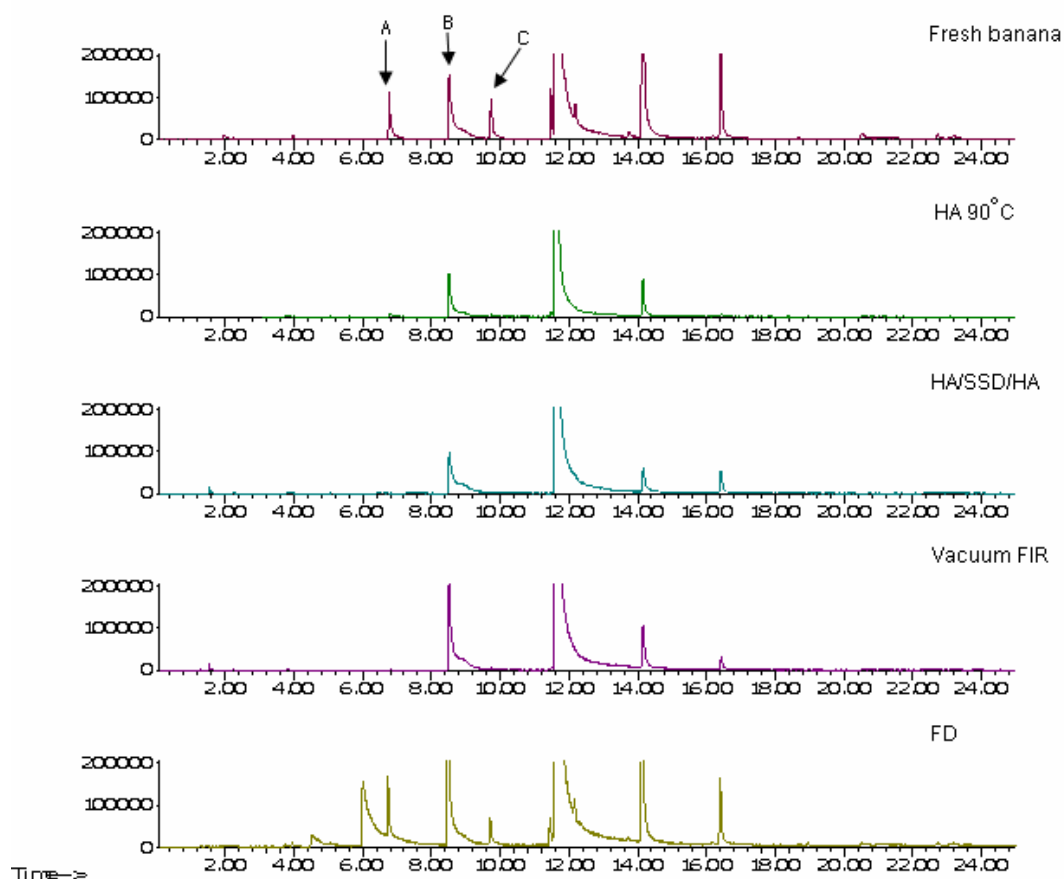


(ง) FD

รูปที่ 2. แสดงโครงสร้างภายในของก๊วยแผ่นหลังการอบแห้งด้วยเทคนิคต่างๆ

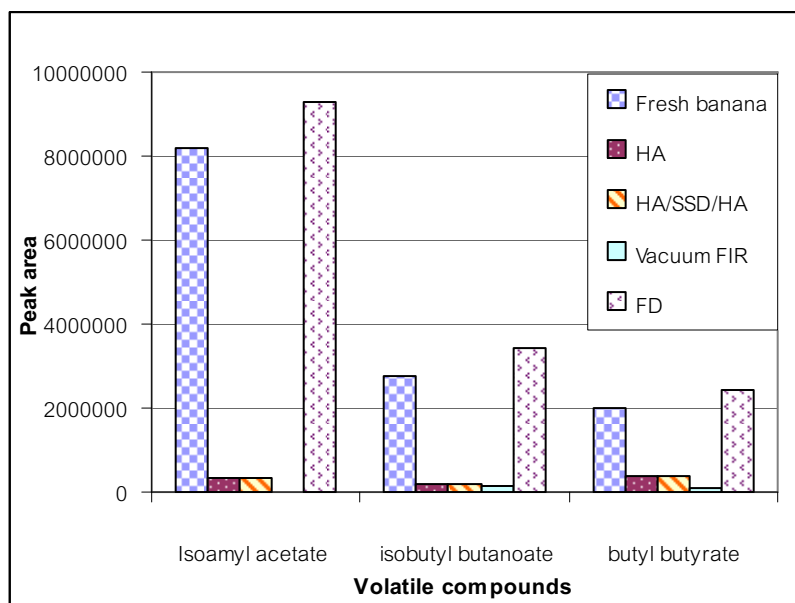
สารประกอบที่ระเหยง่าย

ในก๊วยหอมมีสารประกอบที่ให้กลิ่นอยู่มากโดยส่วนมากสารประกอบที่พบคือ ester, alcohols และ carbonyls โดยสารประกอบที่ระเหยง่ายที่สนใจที่จะวิเคราะห์ทางด้านปริมาณในงานวิจัยนี้เป็นสารประกอบพวก ester ประกอบด้วย Isoamyl acetate, Isobutyl butanoate และ Butyl butyrate



รูปที่ 3 โครมาโทแกรมของสารประกอบที่ระเหยง่ายก่อนและหลังการอบแห้งด้วยเทคนิคต่างๆ โดยที่ A คือ โครมาโทแกรมของ isoamyl acetate B คือ โครมาโทแกรมของ isobutyl butanoate และ C คือ โครมาโทแกรมของ butyl butyrate

จากรูปที่ 3 แสดงโครมาโทแกรมของสารประกอบที่ระเหยง่ายก่อนและหลังการอบแห้งด้วยเทคนิคต่างๆ โดยพีคของ isoamyl acetate จะแสดงพีคที่เวลา 6.7 นาที isobutyl butanoate จะแสดงพีคที่เวลา 9.7 นาที และ butyl butyrate จะแสดงพีคที่เวลา 11.4 นาที ซึ่งหลังจากการอบแห้งแล้วพบว่าพีคของสารประกอบที่ระเหยง่ายมีแนวโน้มลดลงจากตอนเริ่มต้น



รูปที่ 4. แสดงพื้นที่พีคของสารประกอบที่ระเหยง่ายก่อนและหลังการอบแห้งด้วยเทคนิคต่างๆ

รูปที่ 4 แสดงพื้นที่พีคของสารประกอบที่ระเหยง่ายเมื่อเทียบกับมวลแห้งของกล้วย 1 กรัม ก่อนและหลังการอบแห้งด้วยเทคนิคต่างๆ พบว่าสารประกอบที่ระเหยง่ายแต่ละชนิดมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงกับเทคนิคที่ใช้ในการอบแห้ง โดยพบว่าการอบแห้งแบบ HA, HA/SSD/HA และ Vacuum FIR ทำให้ปริมาณสารประกอบที่ระเหยง่ายที่สนใจทั้ง 3 ชนิด สูญเสียไปได้มากและมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญภายหลังการอบแห้ง สำหรับการอบแห้งแบบ FD พบว่าพีคของสารระเหยง่ายมีแนวโน้มใกล้เคียงกับกล้วยสด

สรุป

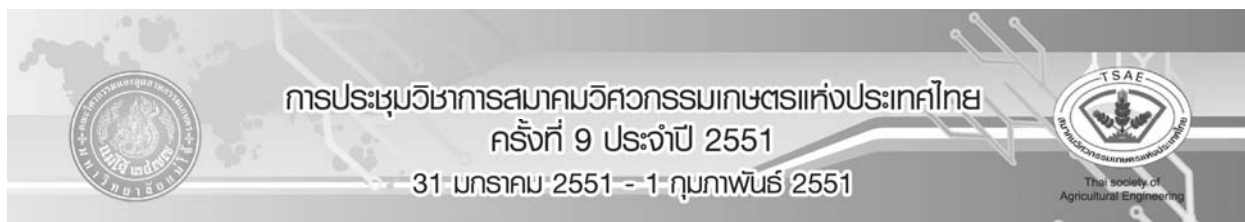
จากการศึกษาผลของเทคนิคการอบแห้งต่างๆ ที่มีต่อสารประกอบที่ระเหยง่าย และคุณภาพทางกายภาพในกล้วยแผ่น สามารถสรุปได้ว่าเทคนิคการอบแห้งที่ต่างกันทำให้ได้คุณภาพทางกายภาพ และปริมาณสารประกอบที่ระเหยง่ายที่ต่างกัน โดยการอบแห้งแบบ HA/SSD/HA ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด ส่วนการอบแห้งแบบ FD เป็นการอบแห้งที่ใช้เวลาในการอบแห้งนานที่สุด คุณภาพทางด้านการหัดตัวพบว่ากล้วยแผ่นมีการหัดตัวทางด้านความหนามากกว่าทางด้านรัศมี และการอบแห้งแบบ HA/SSD/HA ให้ค่าการหัดตัวทางด้านความหนา เนื่องจากกล้วยแผ่นเกิดการพองตัวจึงทำให้มีค่าการหัดตัวน้อย ด้านสีของกล้วยแผ่นที่ผ่านการอบแห้งแบบ HA/SSD/HA มีสีน้ำตาลเข้ม เนื่องจากใช้อุณหภูมิในการอบแห้งสูงซึ่งสังเกตได้จากค่าความสว่าง (L) ค่าความเหลือง (b) ที่ลดลง และค่าความแดง (a) ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่สีกล้วยที่ได้จากการอบแห้งแบบ FD ให้สีครีมออกขาวโดยสังเกตได้จากค่าความสว่างที่มาก สำหรับทางด้านเนื้อสัมผัสความกรอบที่ได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยพบว่าการอบแห้งแบบ HA/SSD/HA ให้ค่าความกรอบมากที่สุด ส่วนค่าความแข็งการอบแห้งแบบ HA และ FD ให้ค่ามากกว่าการอบแห้งด้วยเทคนิคอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญ ทางด้านโครงสร้างภายในพบว่ากล้วยที่อบแห้งแบบ Vacuum FIR และการอบแห้งแบบ FD จะให้ลักษณะรูพรุนขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วไป ส่วนการอบแห้งแบบ HA/SSD/HA ให้ขนาดรูพรุนใหญ่ที่สุดและมีความแน่นเหนือน้อยกว่าการอบแห้งด้วยเทคนิคอื่นๆ ปริมาณสารประกอบที่ระเหยง่ายสูญเสียไปมากที่สุดสำหรับการอบแห้งแบบ HA, HA/SSD/HA และ Vacuum FIR

คำขอบคุณ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาและสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ให้การสนับสนุนเงินทุนที่ใช้ในงานวิจัยของโครงการนี้

เอกสารอ้างอิง

- จารุวรรณ กุลวิศว และคณะ. 2550. ผลของอุณหภูมิการอบแห้งที่มีต่อสารระเหยง่าย และคุณภาพทางกายภาพในกล้วยแผ่น, *การประชุมวิชาการ ด้านพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ ครั้งที่ 1*, กรุงเทพฯ.
- Prachayawarakorn, S., Tia, W., Plyto, N., and Soponronnarit, S., 2007. Drying kinetic and quality attributes of low – fat banana slices dried at high temperature. Article in press.
- คำพันธ์ บัวละพันธ์ และคณะ. 2550. การพองของกล้วยโดยเทคนิคร่วมระหว่างอากาศร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่ง. *การประชุมวิชาการ ด้านพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ ครั้งที่ 1*. กรุงเทพฯ.
- Demirel, D. and Turhan, M.. 2003. Air-drying behavior of Dwarf Cavendish and Gros Michel banana slices. *Journal of Food Engineering*. Vol. 59. No.1. pp. 1-11.
- Nimmol, C., Devahastin, S., Swasdisevi, T., and Soponronnarit, S., 2007. Drying of banana slices using combined low-pressure superheated steam and far-infrared radiation. *Journal of food Engineering*. Vol. 81. No. 1. pp. 624 – 633.
- Winnie W.Y. Mui., Timothy D. Durance., and Christine H. Scaman., 2002. Flavor and texture of banana chips dried by combinations of hot air, vacuum, and microwave processing. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. Vol. 50. pp. 1883-1889.



การผลิตกล้วยอบกรอบโดยใช้เทคนิคการทำโฟม
Producing crisp banana chip using foaming technique

รติยา ฐวพาณิชนันท์^{1,*}, สมเกียรติ ปรัชญาวารากร², สมชาติ โสภณรฤทธิ³
Ratiya Thuwapanichayan^{1,}, Somkiat Prachayawarakorn² and Somchart Soponronnarit³*

บทคัดย่อ

การนำกระบวนการทำโฟมมาใช้ร่วมกับการอบแห้งเป็นทางเลือกหนึ่งที่มีความเป็นไปได้ในการปรับปรุงคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของกล้วยอบกรอบ เนื่องจากกล้วยที่ผ่านการทำโฟมจะมีความเป็นรูพรุนมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำกระบวนการทำโฟมมาใช้ร่วมกับการอบแห้งในการผลิตกล้วยแผ่นอบกรอบ โดยศึกษาอิทธิพลของความหนาแน่นของโฟมกล้วย อุณหภูมิของอากาศร้อน และชนิดของสารก่อโฟมที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง และคุณภาพของแผ่นโฟมกล้วย ได้แก่ การหดตัว เนื้อสัมผัส และลักษณะโครงสร้างภายในของแผ่นโฟมกล้วยหลังการอบแห้ง โดยใช้ไข่ขาว soy protein isolate และ whey protein concentrate เป็นสารก่อโฟม ความหนาแน่นของโฟมกล้วยที่ใช้ในการอบแห้งอยู่ในช่วง 0.3-0.7 g/ml ความหนาของแผ่นโฟมกล้วย 5 มิลลิเมตร ทำการอบแห้งด้วยอากาศร้อนอุณหภูมิ 60, 70 และ 80 °C และความเร็วลม 0.5 เมตรต่อวินาที อบแห้งจนกระทั่งเหลือความชื้น 0.03 (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง) จากการทดลองพบว่า เมื่อลดความหนาแน่นของโฟมกล้วย รูพรุนภายในแผ่นโฟมกล้วยจะมีขนาดใหญ่ ทำให้น้ำสามารถเคลื่อนที่ออกสู่ตัวกลางในการอบแห้งได้ง่าย ส่งผลให้อัตราการอบแห้งและการหดตัวสูงกว่ากรณีที่แผ่นโฟมกล้วยมีความหนาแน่นสูง สำหรับคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสพบว่า แผ่นโฟมกล้วยที่มีความหนาแน่นต่ำซึ่งมีรูพรุนขนาดใหญ่ จะมีความแข็งน้อยกว่าแผ่นโฟมกล้วยที่มีความหนาแน่นสูง แต่จะมีความกรอบน้อยกว่าโดยแผ่นโฟมกล้วยกรณีใช้ไข่ขาว และ whey protein concentrate เป็นสารก่อโฟม จะมีความแข็งน้อยกว่าแผ่นโฟมกล้วยกรณีใช้ soy protein isolate เป็นสารก่อโฟม สำหรับอุณหภูมิในการอบแห้งนั้นไม่ส่งผลกระทบต่อการหดตัว เนื้อสัมผัส และลักษณะโครงสร้างภายในของแผ่นโฟมกล้วยหลังการอบแห้ง

คำสำคัญ : การหดตัว การอบแห้ง ความกรอบ โฟมกล้วย สารก่อโฟม

ABSTRACT

The combination of foaming and drying is a feasible alternative to produce crisp banana chips because banana foams are very porous. The objective of this work was therefore to study the effects of foam density, drying temperature and type of foaming agent on the drying characteristics and the qualities of the final product in terms of shrinkage, texture and microstructure. Banana puree was added with different foaming agents (egg albumen, soy protein isolate and whey protein concentrate) and foamed to the densities in the range of 0.3-0.7 g/ml. Banana foam mats with a 5 mm thickness were dried to the moisture content of 0.03 kg/kg db at 60, 70 and 80 °C and a superficial air velocity of 0.5 m/s. The experimental results showed that the extensive porous structure of foams produced at low densities yielded the larger voids, resulting in higher drying rates and shrinkage. Considering the textural properties of banana foam mats, the samples with lower foam densities had smaller hardness than those at higher foam densities. However, the crispness, which was characterized by the initial slope

and number of peaks, was smaller. The hardness of samples when using egg albumen and whey protein concentrate as the foaming agent was smaller as compared with that of samples when using soy protein isolate. The drying temperature had no significant effect on the textural properties, morphology and shrinkage.

KEYWORDS : crispness drying foamed banana foaming agent shrinkage

¹Graduated student, School of Energy, Environment and Materials, ²Associate Professor, Faculty of Engineering, ³Professor, School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand. 10140

*Corresponding author. Tel.: 081-625-0994; E-mail address: t_ratiya@yahoo.com

บทนำ

กล้วยหอมเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศ ในบางฤดูกาลมีปริมาณมากเกินความต้องการ และเนื่องจากกล้วยหอมเป็นผลไม้ที่เกิดการเน่าเสียได้ง่ายหลังการเก็บเกี่ยว หากปล่อยทิ้งไว้จะก่อให้เกิดการสูญเสียทางเศรษฐกิจ ดังนั้นการแปรรูปจึงเป็นทางเลือกหนึ่งเพื่อช่วยยืดอายุในการเก็บรักษา อีกทั้งเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ ปัจจุบันการแปรรูปกล้วยที่สำคัญ ได้แก่ การทำเป็นกล้วยตาก กล้วยฉาบ กล้วยกวน กล้วยผง และกล้วยแผ่นอบกรอบ เป็นต้น สำหรับกล้วยแผ่นอบกรอบนั้นเป็นผลิตภัณฑ์ที่นิยมมากชนิดหนึ่ง สามารถรับประทานเป็นอาหารว่างหรือใช้เป็นส่วนผสมของอาหารเช้า ซึ่งการนำกระบวนการทำโฟมมาใช้ร่วมกับการอบแห้งเป็นทางเลือกหนึ่งที่มีความเป็นไปได้ในการผลิตกล้วยแผ่นอบกรอบ โดยกระบวนการทำโฟมจะช่วยเพิ่มความมีรูพรุนให้กับผลิตภัณฑ์ ดังนั้นจึงสามารถปรับปรุงคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสได้ โดยเฉพาะทางด้านความแข็งและความกรอบ นอกจากนี้ยังช่วยลดระยะเวลาในการอบแห้ง

การทำโฟมเป็นกระบวนการที่ทำให้อาหารอยู่ในสภาพคอลลอยด์ (ปาริฉัตร, 2545) ด้วยการตีอัดอากาศ สำหรับอาหารบางประเภทที่ไม่สามารถทำให้เกิดฟองได้เมื่อทำการตีนั้น จำเป็นต้องเติมสารก่อโฟมซึ่งมีสมบัติในการทำให้เกิดฟอง สารที่นิยมใช้เป็นสารก่อโฟม ได้แก่ สารจำพวกโปรตีน ซึ่งโปรตีนจะถูกดูดซับที่บริเวณผิวร่วมระหว่างน้ำและอากาศ (air-water interface) และช่วยลดแรงตึงผิวของอาหาร ทำให้อาหารนั้นเกิดฟองได้ง่าย และฟองที่เกิดขึ้นมีความเสถียร (Cherry and Mcwatters, 1981) อย่างไรก็ตามฟองอากาศที่เกิดขึ้นต้องสามารถคงความเสถียรไว้ได้แม้ผ่านกระบวนการอบแห้ง ถ้าฟองอากาศแตกเมื่อผ่านกระบวนการอบแห้ง อาจทำให้ไม่สามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งได้ และผลิตภัณฑ์ที่ได้อาจมีคุณภาพไม่ดีเท่าที่ควร

Sankat and Castaigne (2004) ใช้ Soy Protein Isolate เป็นสารก่อโฟม จากการทดลองพบว่าการใช้ Soy Protein Isolate ปริมาณ 10% (w/w) เป็นสารก่อโฟม สามารถลดความหนาแน่นของกล้วยเหลือประมาณ 0.5 g/ml ส่วน Garcia *et al.* (1988) ใช้ไข่ขาวผงปริมาณ 1% (w/w) เป็นสารก่อโฟม จากการทดลองพบว่า ไข่ขาวผงปริมาณ 1% (w/w) สามารถลดความหนาแน่นของกล้วยได้ 3 เท่า และอัตราการอบแห้งของแผ่น โฟมกล้วยเปรียบเทียบกับกล้วยหั่นชิ้นพบว่า การอบแห้งแผ่นโฟมกล้วยจะให้อัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งกล้วยหั่นชิ้นถึง 2 เท่า แต่ไม่มีการศึกษาถึงคุณภาพของแผ่น โฟมกล้วยหลังการอบแห้ง

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำกระบวนการทำโฟมมาใช้ร่วมกับการอบแห้งในการผลิตกล้วยอบกรอบ โดยศึกษาอิทธิพลของความหนาแน่นของโฟมกล้วย อุณหภูมิของอากาศร้อน และชนิดของสารก่อโฟมที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง และคุณภาพของแผ่น โฟมกล้วย ได้แก่ การหดตัว เนื้อสัมผัส และลักษณะโครงสร้างภายในของแผ่น โฟมกล้วยหลังการอบแห้ง

อุปกรณ์และวิธีการ

การทำโฟม

นำกล้วยหอมระยะสุกที่ 5 ซึ่งเปลือกเป็นสีเหลืองแต่ปลายยังเป็นสีเขียว (ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ประมาณ 21-23°BRIX) มาปอกเปลือกและหั่นเป็นแผ่น จากนั้นทำการพรีทรีทเมนต์ด้วยการแช่ในสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ความเข้มข้น 1% (w/w) นาน 2 นาที (Krokida *et al.*, 2000) และล้างด้วยน้ำกลั่นนาน 30 วินาที นำกล้วยที่ผ่านการพรีทรีทเมนต์มาล้างให้ละเอียด และปั่นด้วยเครื่องปั่น (blender) เป็นเวลา 1 นาที เติมสารก่อโฟม (ปริมาณ 5% สำหรับไข่ขาวสดและ whey protein concentrate และ 10% สำหรับ soy protein isolate) ลงในกล้วยปั่น ใช้ช้อนกวนให้เข้ากัน แล้วนำไปผ่านการตีด้วยเครื่องผสม Kitchen Aid รุ่น 5K5SS ด้วยอัตราเร็วสูงสุด เพื่อลดความหนาแน่นของกล้วย สำหรับการวัดความหนาแน่นของโฟมกล้วย ทำโดยดวงโฟมกล้วยใส่ภาชนะที่ทราบปริมาตร แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก ดังนั้นจะสามารถคำนวณหาความหนาแน่นของโฟมกล้วยได้ โดยความหนาแน่นของโฟมกล้วยที่ใช้ในการอบแห้งอยู่ในช่วง 0.3-0.7 g/ml

การอบแห้งด้วยอากาศร้อน

วางแผ่นโฟมกล้วยความหนา 5 mm บนตะแกรงลวดซึ่งหุ้มด้วยกระดาษฟอยล์ จากนั้นนำไปอบแห้งในเครื่องอบแห้งแบบถาด โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งคือ 60, 70 และ 80 °C ความเร็วลม 0.5 เมตรต่อวินาที อบแห้งจนกระทั่งเหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 0.03 (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง)

การหัดตัว

ทดสอบการหัดตัวโดยดูจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของแผ่นโฟมกล้วยตามระยะเวลาในการอบแห้ง สำหรับการหาปริมาตรของแผ่นโฟมกล้วยทำได้โดยใช้วิธีการแทนที่ใน Glass Bead ซึ่ง Glass Bead ที่ใช้ควรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วง 0.106-0.212 mm (Hwang & Hayakawa, 1980) ในการวัดการหัดตัวแต่ละครั้งจะใช้แผ่นโฟมกล้วย 1 ชิ้น (ทำการทดลอง 4 ซ้ำ)

การทดสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส

การทดสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของแผ่นโฟมกล้วยหลังการอบแห้ง จะทดสอบโดยใช้เครื่อง Texture Analyzer รุ่น TA.XT.plus ค่าความถูกต้อง $\pm 0.001\text{N}$ ทำการทดสอบในลักษณะของแรงกด โดยหัวกดที่ใช้ในการทดสอบเป็นหัวกดทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 mm ความเร็วของหัวกด 2 mm/s ใช้ตัวอย่างในการทดสอบ 8 ตัวอย่าง

การศึกษาลักษณะโครงสร้างภายในแผ่นโฟมกล้วย

ใช้ Scanning Electron Microscope (SEM) รุ่น JEOL JSM-5600LV ที่กำลังขยาย 35 เท่า

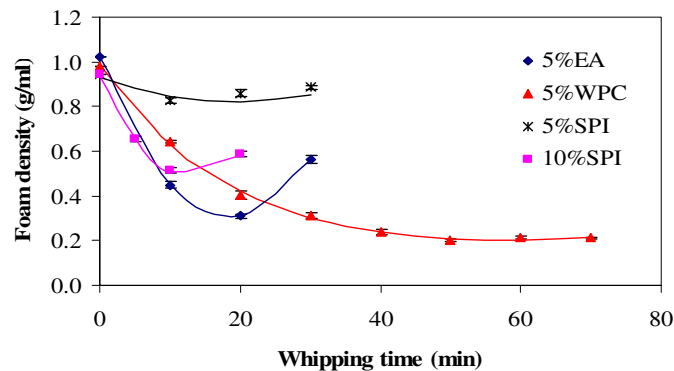
ผลการทดลองและวิจารณ์

ความหนาแน่นของโฟมกล้วย

อากาศจะถูกเติมลงไปโฟมกล้วยปั่นระหว่างกระบวนการตี โดยโปรตีนจะเคลื่อนที่ไปยังบริเวณผิวร่วมระหว่างน้ำและอากาศ และถูกดูดซับที่บริเวณผิวนั้น ซึ่งโปรตีนที่ถูกดูดซับจะคลายเกลียว (unfold) หรือเปลี่ยนสภาพไปจากเดิม (denature) โดยฟอร์มตัวเป็นฟิล์มที่มีความยืดหยุ่น (viscoelastic film) ส่งผลให้แรงดึงบริเวณรอยต่อระหว่างน้ำและอากาศ (interfacial tension) ลดลง ทำให้อากาศฟอร์มตัวเป็นฟองได้ ส่งผลให้ความหนาแน่นของโฟมกล้วยลดลงเมื่อใช้เวลานานในการตีขึ้น แสดงดังรูปที่ 1 จากผลการทดลองพบว่า เมื่อใช้ไข่ขาว (EA) และ Whey Protein Concentrate (WPC) ปริมาณ 5% เป็นสารก่อโฟม สามารถลดความหนาแน่นของโฟมกล้วยลงได้ต่ำสุดเท่ากับ 0.3 g/ml และ 0.2 g/ml ตามลำดับ แต่เมื่อใช้ Soy Protein Isolate (SPI) ปริมาณ 5% เป็นสารก่อโฟมพบว่า ไม่สามารถลดความหนาแน่นของโฟมกล้วยลงได้ตามต้องการ เนื่องจากปริมาณของโปรตีนที่เคลื่อนที่ไปยังบริเวณรอยต่อระหว่างน้ำและอากาศมีไม่เพียงพอที่จะลดแรงดึงบริเวณรอยต่อนั้น ทำให้เกิดฟองได้ยาก เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ SPI เป็น 10% พบว่าสามารถลดความหนาแน่นของโฟมกล้วยลงได้ต่ำสุดเท่ากับ 0.5 g/ml

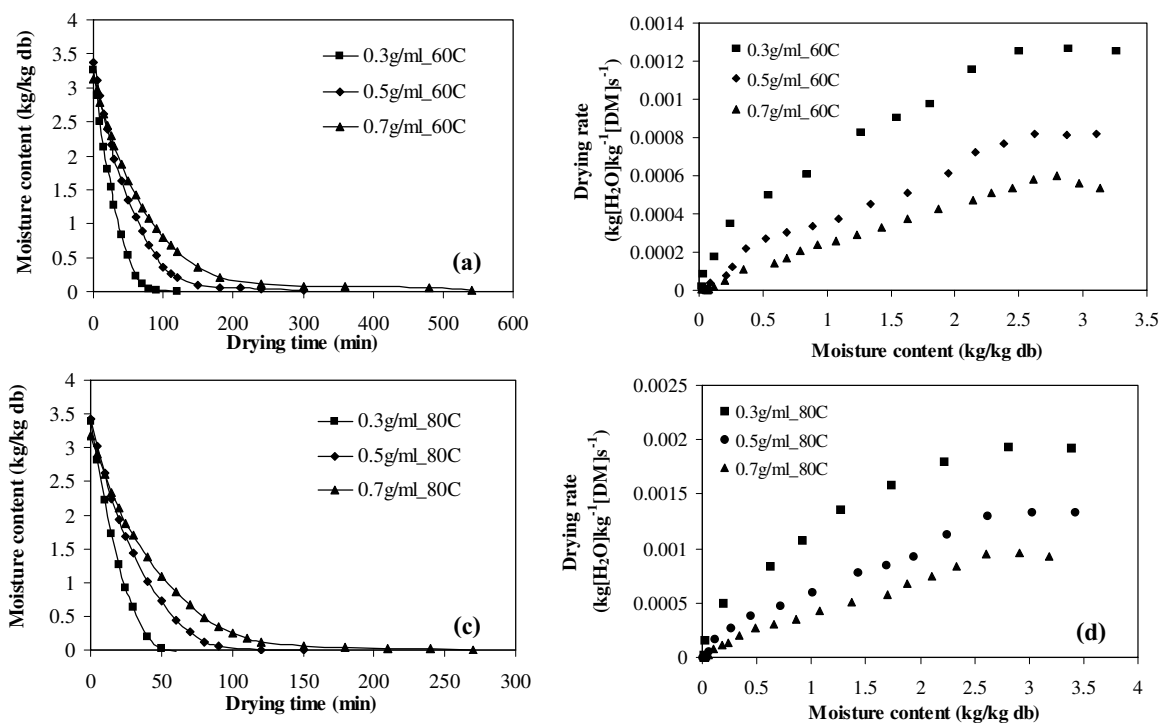
นอกจากนี้พบว่าอัตราการลดลงของความหนาแน่นของโฟมกล้วยแตกต่างกันเมื่อใช้สารก่อโฟมต่างกัน จากรูปที่ 1 จะเห็นได้ว่า กรณีใช้ EA และ SPI เป็นสารก่อโฟม อัตราการลดลงของความหนาแน่นของโฟมกล้วยจะสูงกว่ากรณีใช้ WPC เป็นสารก่อโฟม ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากโครงสร้างของ EA และ SPI มีความยืดหยุ่น (flexibility) มากกว่า WPC ดังนั้นการดูดซับของ EA และ SPI ที่บริเวณผิวร่วมระหว่างน้ำและอากาศจึงเกิดได้ง่ายกว่า ส่งผลให้อากาศฟอร์มตัวเป็นฟองได้เร็วกว่ากรณีใช้ WPC เป็นสารก่อโฟม แต่โปรตีนที่มีความยืดหยุ่นสูงจะมีความแข็งแรง (rigidity) ต่ำ (Cherry and Mcwatters, 1981; Mitchell, 1986) ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าความหนาแน่นของโฟมกล้วยกรณีใช้ EA และ SPI เป็นสารก่อโฟมจะเพิ่มขึ้น เมื่อใช้เวลานานในการตีขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากฟิล์มที่เกิดจากการคลายเกลียวของ EA และ SPI ที่ล้อมรอบฟองอากาศมีความแข็งแรงไม่มากพอที่จะทนต่อแรงเฉือนเนื่องจากการตีที่นานเกินไปได้ ทำให้ฟองอากาศแตก และนำไปสู่การยุบตัวของโฟม ส่งผลให้ความหนาแน่นของโฟมกล้วย

เพิ่มขึ้นดังกล่าว ในขณะที่กรณีใช้ WPC เป็นสารก่อโฟม ความหนาแน่นของโฟมกล้วยจะลดลงเรื่อยๆ จนคงที่ที่ประมาณ 0.2 g/ml โดยไม่มีแนวโน้มของการเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากฟิล์มที่เกิดจากการคลายเกลียวของ WPC ที่ล้อมรอบฟองอากาศมีความแข็งแรงสามารถทนต่อแรงเฉือนเนื่องจากการตีได้



รูปที่ 1 การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของโฟมกล้วยกรณีใช้ชนิดของสารก่อโฟมสารก่อโฟม ความเข้มข้นของสารก่อโฟม และเวลาในการตีแตกต่างกัน

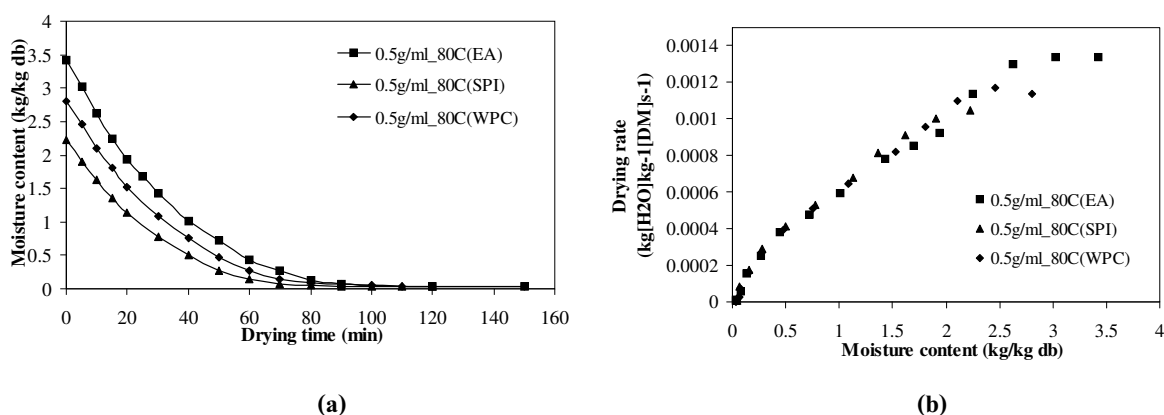
ผลการอบแห้งแผ่นโฟมกล้วยด้วยอากาศร้อนและอัตราการอบแห้ง



รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงความชื้นและอัตราการอบแห้งของแผ่นโฟมกล้วยเมื่ออบแห้งที่ความหนาแน่นของโฟมกล้วยและอุณหภูมิของอากาศร้อนแตกต่างกัน (ใช้ไข่ขาวปริมาณ 5% เป็นสารก่อโฟม)

รูปที่ 2 แสดงอิทธิพลของความหนาแน่นของโฟมกล้วยและอุณหภูมิของอากาศร้อน ที่มีผลต่อระยะเวลาในการอบแห้ง และอัตราการอบแห้ง จากผลการทดลองพบว่า เมื่อความหนาแน่นของโฟมกล้วยมีค่าต่ำ จะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นและให้อัตราการอบแห้งสูง เนื่องจากลักษณะโครงสร้างภายในของแผ่นโฟมกล้วยที่มีความหนาแน่นต่ำจะมีรูพรุนขนาดใหญ่ (รติยา, 2550) ส่งผลให้น้ำสามารถเคลื่อนที่ออกสู่ตัวกลางได้ง่ายกว่ากรณีโฟมกล้วยที่มีความหนาแน่นสูง และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิ

ของอากาศร้อนที่ใช้ในการอบแห้งพบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิสูง จะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นและให้อัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นสูง

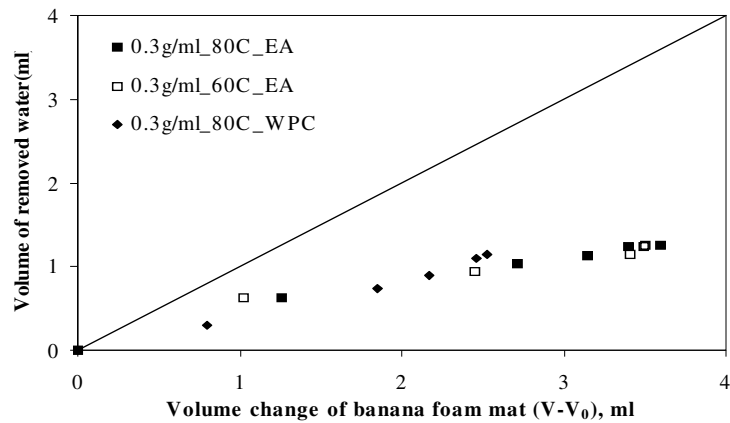


รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงความชื้นและอัตราการอบแห้งของแผ่นโฟมกล้วยเมื่อใช้สารก่อโฟมแตกต่างกัน (ความหนาแน่นของแผ่นโฟมกล้วย 0.5 g/ml และอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง 80°C)

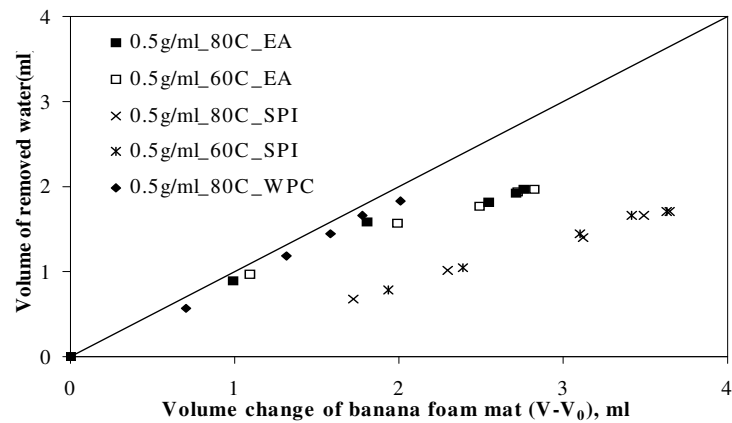
รูปที่ 3 แสดงอิทธิพลของชนิดของสารก่อโฟมที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้น และอัตราการอบแห้งของแผ่นโฟมกล้วย จากผลการทดลองพบว่า การอบแห้งแผ่นโฟมกล้วยกรณีใช้ SPI เป็นสารก่อโฟม จะใช้เวลาในการอบแห้งประมาณ 120 นาที และเมื่อใช้ EA เป็นสารก่อโฟม จะใช้เวลาในการอบแห้งประมาณ 150 นาที ส่วนกรณีใช้ WPC เป็นสารก่อโฟมจะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่ากรณีใช้ EA เป็นสารก่อโฟมเล็กน้อย เมื่อพิจารณาอัตราการอบแห้งพบว่า แผ่นโฟมกล้วยกรณีใช้ไข่ขาวเป็นสารก่อโฟมจะให้อัตราการอบแห้งสูงในช่วงแรกของการอบแห้ง รองลงมาคือกรณีใช้ WPC และ SPI เป็นสารก่อโฟมตามลำดับ เนื่องจากแผ่นโฟมกล้วยกรณีใช้ไข่ขาวเป็นสารก่อโฟมมีความชื้นเริ่มต้นสูง จึงมีความแตกต่างของความเข้มข้นของน้ำระหว่างตัวกลางและแผ่นโฟมมาก ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทมวลระหว่างตัวกลางและแผ่นโฟมได้ดี แต่เมื่ออบแห้งแผ่นโฟมกล้วยจนกระทั่งเหลือความชื้นประมาณ 1.5 (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง) อัตราการอบแห้งแตกต่างกันน้อยมากเมื่อใช้สารก่อโฟมต่างชนิดกัน เวลาที่ใช้ในการลดความชื้นจนกระทั่งเหลือความชื้นประมาณ 1.5 (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง) จะแตกต่างกัน กรณีใช้ EA เป็นสารก่อโฟม จะใช้เวลามากที่สุด รองลงมาคือกรณีใช้ WPC และ SPI เป็นสารก่อโฟมตามลำดับ ความแตกต่างดังกล่าวนี้ น่าจะเป็นผลมาจากความชื้นเริ่มต้นของแผ่นโฟมกล้วยแตกต่างกัน กรณีใช้ EA เป็นสารก่อโฟมจะมีความชื้นเริ่มต้นมากที่สุด ดังนั้นการอบแห้งแผ่นโฟมกล้วยกรณีใช้ EA เป็นสารก่อโฟม จึงใช้เวลาในการอบแห้งนานที่สุดดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

การหดตัว

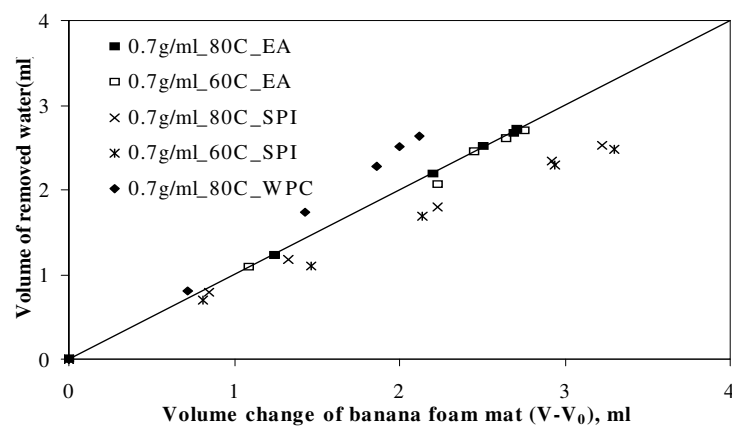
รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของแผ่นโฟมกล้วยที่เปลี่ยนแปลงไปกับปริมาตรของน้ำที่ระเหยออกเมื่อผ่านการอบแห้ง จากรูปจะเห็นได้ว่า ที่ความหนาแน่นของโฟมกล้วยเท่ากับ 0.3 g/ml (รูปที่ 4 (a)) ปริมาตรของแผ่นโฟมกล้วยส่วนที่หดไปมีค่ามากกว่าปริมาตรของน้ำที่ระเหยออกมากทั้งในกรณีที่ใช้ EA และ WPC เป็นสารก่อโฟม เนื่องจากโครงสร้างของโฟมกล้วยที่ความหนาแน่นต่ำ ฟองอากาศอยู่ชิดกันมาก ทำให้เกิดการรวมตัวกันกลายเป็นฟองอากาศขนาดใหญ่ได้ง่าย ซึ่งฟองขนาดใหญ่จะมีความเสถียรต่ำ ทำให้ฟองอากาศแตกออก และเกิดการยุบตัวของโครงสร้าง ส่งผลให้วัสดุเกิดการหดตัวมากกว่าปริมาตรของน้ำที่ระเหยออกดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น



(a) ความหนาแน่นเริ่มต้นของแผ่นโฟมกล้วย 0.3 g/ml



(b) ความหนาแน่นเริ่มต้นของแผ่นโฟมกล้วย 0.5 g/ml

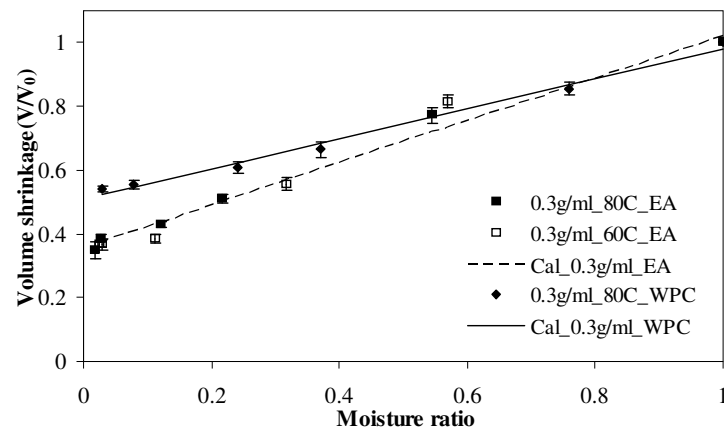


(c) ความหนาแน่นเริ่มต้นของแผ่นโฟมกล้วย 0.7 g/ml

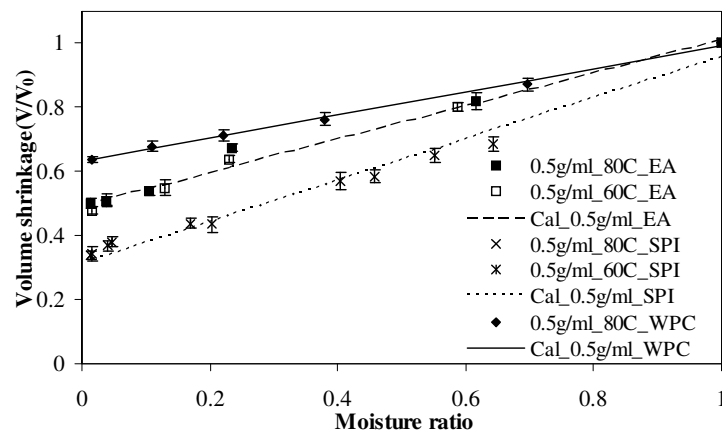
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของแผ่นโฟมกล้วยที่เปลี่ยนแปลงไปกับปริมาตรของน้ำที่ระเหยออกเมื่อผ่านการอบแห้ง

เมื่อความหนาแน่นของโฟมกล้วยเพิ่มขึ้น ปริมาตรของแผ่นโฟมกล้วยส่วนที่หายไปจะมีค่าใกล้เคียงกับปริมาตรของน้ำที่ระเหยออก เนื่องจากโอกาสที่ฟองอากาศแตกมีน้อยลง เพราะฟองอากาศอยู่ห่างกันมากขึ้น การรวมตัวกันกลายเป็นฟองอากาศ

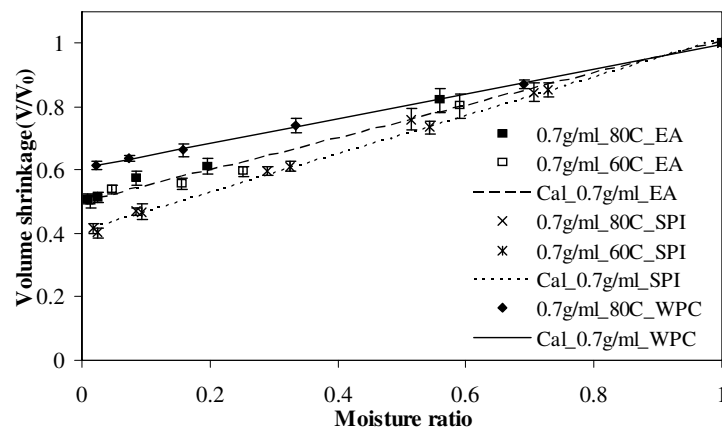
ขนาดใหญ่ซึ่งมีความเสถียรต่ำน้อยลง โดยปริมาตรของแผ่นโพลีกลัยส่วนที่หดไปจะมีค่าใกล้เคียงกับปริมาตรของน้ำที่ระเหยออกมาหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของสารก่อโพลี เช่น ที่ความหนาแน่นของโพลีกลัย 0.5 g/ml กรณีใช้ WPC เป็นสารก่อโพลี ปริมาตรของแผ่นโพลีกลัยส่วนที่หดไปมีค่าใกล้เคียงกับปริมาตรของน้ำที่ระเหยออกมามากที่สุด รองลงมาคือกรณีใช้ EA และ SPI เป็นสารก่อโพลี แสดงว่าการใช้ WPC เป็นสารก่อโพลี ทำให้ฟองอากาศที่เกิดขึ้นมีความเสถียรมากกว่าการใช้ EA และ SPI เป็นสารก่อโพลี ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากฟิล์มของ WPC ที่ล้อมรอบฟองอากาศไว้มีการยึดเกาะกันอย่างแข็งแรงมากกว่า ทำให้ฟองอากาศแตกได้ยากกว่า



(a) ความหนาแน่นเริ่มต้นของแผ่นโพลีกลัย 0.3 g/ml



(b) ความหนาแน่นเริ่มต้นของแผ่นโพลีกลัย 0.5 g/ml



(c) ความหนาแน่นเริ่มต้นของแผ่นโพลีกลัย 0.7 g/ml

รูปที่ 5 การหดตัวของแผ่นโพลีกลัยเมื่ออบแห้งที่ความหนาแน่นของโพลีกลัย อุณหภูมิของอากาศร้อน และใช้สารก่อโพลี

แตกต่างกัน

นอกจากนี้จากผลการทดลองพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวของแผ่นโฟมกล้วยและการลดลงของความชื้นมีลักษณะเป็นเชิงเส้นดังรูปที่ 5 โดยแผ่นโฟมกล้วยที่มีความหนาแน่นค่าจะเกิดการหดตัวมากกว่าแผ่นโฟมกล้วยที่มีความหนาแน่นสูง และแผ่นโฟมกล้วยกรณีใช้ WPC เป็นสารก่อโฟมจะเกิดการหดตัวน้อยที่สุด ในขณะที่แผ่นโฟมกล้วยกรณีใช้ SPI เป็นสารก่อโฟมจะเกิดการหดตัวมากที่สุด อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งไม่ส่งผลกระทบต่อการหดตัวของแผ่นโฟมกล้วย แสดงดังรูปที่ 5

ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวของแผ่นโฟมกล้วยและการลดลงของความชื้นแสดงได้ดังสมการ (2)

$$V/V_0 = a + bM/M_0 \quad (2)$$

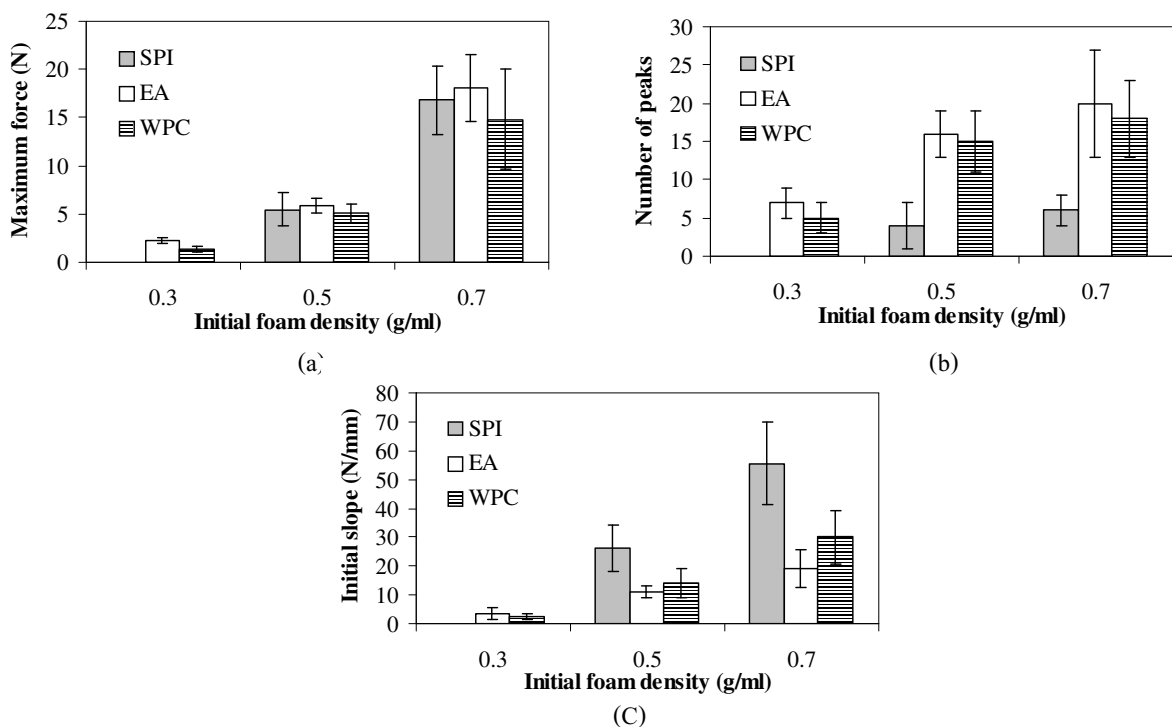
เมื่อ V คือ ปริมาตรของแผ่นโฟมกล้วย, V_0 คือ ปริมาตรเริ่มต้นของแผ่นโฟมกล้วย, M คือ ความชื้นของแผ่นโฟมกล้วย และ M_0 คือ ความชื้นเริ่มต้นของแผ่นโฟมกล้วย สำหรับค่าคงที่ a และ b แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าคงที่ a และ b (สมการที่ 2) สำหรับเงื่อนไขการอบแห้งแตกต่างกัน

	EA			SPI			WPC		
	0.3 g/ml	0.5 g/ml	0.7 g/ml	0.3 g/ml	0.5 g/ml	0.7 g/ml	0.3 g/ml	0.5 g/ml	0.7 g/ml
a	0.349	0.496	0.503	N.A.	0.319	0.411	0.509	0.632	0.606
b	0.702	0.521	0.507	N.A.	0.645	0.609	0.472	0.360	0.390
R^2	0.977	0.983	0.984	N.A.	0.982	0.994	0.991	0.997	0.999

คุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของแผ่นโฟมกล้วยหลังการอบแห้ง

การวัดคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของแผ่นโฟมกล้วยหลังการอบแห้งนั้น จะทำการวัดค่าในลักษณะของแรงกด โดยใช้ค่าแรงสูงสุด (Maximum Force) เป็นตัวบอกความแข็ง และใช้ค่าจำนวนยอด (Number of Peak) และ ความชันเริ่มต้น (Initial Slope) เป็นตัวบอกความกรอบ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 6

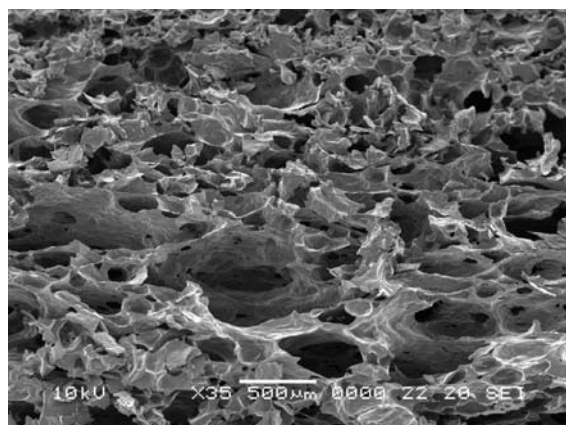


รูปที่ 6 ค่าความแข็งและความกรอบของแผ่นโฟมกล้วยเมื่ออบแห้งที่ความหนาแน่นของโฟมกล้วย อุณหภูมิของอากาศร้อน และ

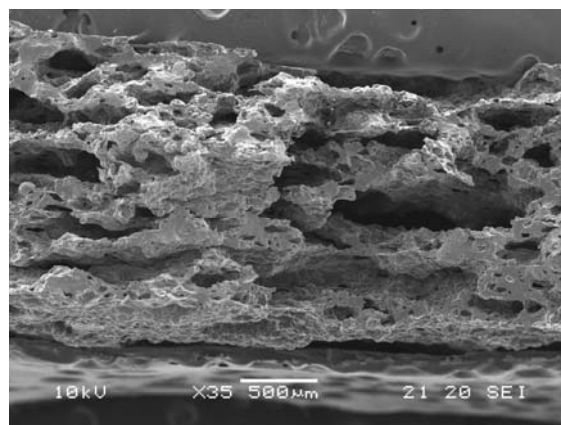
ใช้สารก่อโฟมแตกต่างกัน

จากรูปจะเห็นได้ว่าปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงและความกรอบของแผ่นโฟมกล้วยอบแห้ง ได้แก่ ความหนาแน่นของโฟมกล้วยและชนิดของสารก่อโฟม การอบแห้งที่ความหนาแน่นของโฟมกล้วยต่ำจะให้ค่าความแข็งแรงและความกรอบต่ำกว่าการอบแห้งที่ความหนาแน่นของโฟมกล้วยสูง เนื่องจากลักษณะ โครงสร้างของแผ่นโฟมกล้วยที่มีความหนาแน่นต่ำ ปริมาณของเนื้อของแข็งมีน้อย และรูพรุนมีขนาดใหญ่

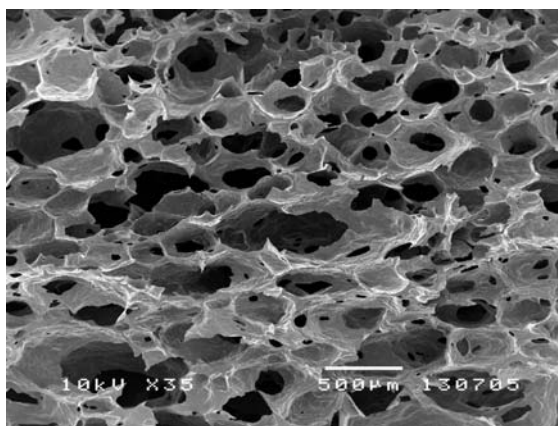
เมื่อพิจารณาค่าความแข็งแรงและความกรอบของแผ่นโฟมกล้วยกรณีใช้สารก่อโฟมแตกต่างกัน พบว่า แผ่นโฟมกล้วยกรณีใช้ EA และ WPC เป็นสารก่อโฟม มีความแข็งแรงและความกรอบไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นโฟมกล้วยกรณีใช้ SPI เป็นสารก่อโฟมพบว่า แผ่นโฟมกล้วยกรณีใช้ EA และ WPC เป็นสารก่อโฟมมีความแข็งแรงน้อยกว่าและมีความกรอบมากกว่าแผ่นโฟมกล้วยกรณีใช้ SPI เป็นสารก่อโฟม เนื่องจากลักษณะ โครงสร้างของแผ่นโฟมกล้วยกรณีใช้ EA และ WPC เป็นสารก่อโฟม มีความเป็นรูพรุนมากกว่าแผ่นโฟมกล้วยกรณีใช้ SPI เป็นสารก่อโฟม (รูปที่ 7) นอกจากนี้ความหนาแน่นของแผ่นโฟมกล้วยที่ผ่านการอบแห้งแล้วกรณีใช้ EA และ WPC เป็นสารก่อโฟมมีค่าต่ำกว่า (มีค่าเท่ากับ 0.22 0.20 และ 0.38 g/ml เมื่อใช้ EA WPC และ SPI เป็นสารก่อโฟมตามลำดับ) ในขณะที่อุณหภูมิในการอบแห้งไม่ส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงและความกรอบ เนื่องจากลักษณะ โครงสร้างของแผ่นโฟมกล้วยเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิดังกล่าว (60-80°C) ไม่แตกต่างกัน (รติยา, 2550)



(a) ใช้ EA เป็นสารก่อโฟม ความหนาแน่นเริ่มต้น 0.5 g/ml
อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง 80°C



(b) ใช้ SPI เป็นสารก่อโฟม ความหนาแน่นเริ่มต้น 0.5 g/ml
อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง 80°C



(c) ใช้ WPC เป็นสารก่อโฟม ความหนาแน่นเริ่มต้น 0.5 g/ml
อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง 80°C

รูปที่ 7 ภาพถ่าย SEM ของแผ่นโฟมกล้วยอบแห้งกรณีใช้สารก่อโฟมแตกต่างกัน

สรุป

สรุปผลการทดลอง

กล้วยสุกสามารถทำเป็นโฟมได้โดยใช้ไข่ขาวสด หรือ Whey Protein Concentrate ในปริมาณ 5% (w/w) เป็นสารก่อโฟม แต่ถ้าใช้ Soy Protein Isolate เป็นสารก่อโฟม จะต้องเพิ่มปริมาณเป็น 10% (w/w) โดยเมื่อใช้เวลาในการตีนานขึ้น ความหนาแน่นของโฟมกล้วยจะลดลง ซึ่งแผ่นโฟมกล้วยที่มีความหนาแน่นต่ำ รูพรุนจะมีขนาดใหญ่ ส่งผลให้น้ำสามารถเคลื่อนที่ออกสู่ตัวกลางได้ง่ายเมื่อนำไปอบแห้ง ทำให้อัตราการอบแห้งสูงและใช้เวลาในการอบแห้งสั้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรอบแห้งแผ่นโฟมกล้วยที่มีความหนาแน่นสูง การอบแห้งแผ่นโฟมกล้วยที่มีความหนาแน่นต่ำ จะให้ค่าความแข็งและความกรอบต่ำ แต่เกิดการหดตัวมากกว่าการอบแห้งแผ่นโฟมกล้วยที่มีความหนาแน่นสูง และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างแผ่นโฟมกล้วยกรณีใช้สารก่อโฟมแตกต่างกันพบว่า ลักษณะโครงสร้างของแผ่นโฟมกล้วยกรณีใช้ไข่ขาวและ Whey Protein Concentrate เป็นสารก่อโฟม มีความเป็นรูพรุนมากกว่า ทำให้มีความแข็งน้อยกว่าและมีความกรอบมากกว่า นอกจากนี้ยังเกิดการหดตัวน้อยกว่าแผ่นโฟมกล้วยกรณีใช้ Soy Protein Isolate เป็นสารก่อโฟม

อุณหภูมิในการอบแห้งไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสและการหดตัวเมื่ออบแห้งที่ความหนาแน่นของโฟมกล้วยเดียวกัน แต่จะส่งผลต่ออัตราการอบแห้ง โดยอุณหภูมิสูงจะให้อัตราการอบแห้งสูง

คำขอบคุณ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษาและสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ให้การสนับสนุนเงินทุนที่ใช้ในงานวิจัยของโครงการนี้

เอกสารอ้างอิง

- ปาริฉัตร หงสประภาส. 2545. เคมีกายภาพของอาหาร คอลลอยด์ อิมัลชัน และเจล. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ. หน้า 6.
- รติยา ฐวณิชชานันท์, สมเกียรติ ปรัญญาวารกร และ สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์. 2550. การอบแห้งแผ่นโฟมที่ทำจากกล้วยสุกโดยใช้ไข่ขาวเป็นสารก่อโฟม. การประชุมวิชาการครั้งที่ 8 สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. ขอนแก่น.
- Cherry, J.P. and Mcwatters, K.H. 1981. Whippability and aeration. In J.P. Cherry (Ed.) *Protein Functionality in Foods*. Washington, D.C.: American Chemical Society. 149-175
- Garcia, R., Leal, F. and Rolz, C. 1988. Drying of Bananas Using Microwave and Air Ovens. *International Journal of Food Science and Technology*, 23, 78-80.
- Hwang, M.P. and Hayakawa, K.I. 1980. Bulk densities of cookies undergoing commercial baking processes. *Journal of Food Science*, 45, 1400-1402.
- Krokida, M.K., Kiranoudis, C.T., Maroulis, Z.B. and Marinos, D. 2000. Effect of Pretreatment on Color of Dehydrated Products. *Drying Technology*, 18(6), 1239-1250.
- Mitchell, J.R. 1986. Foaming and emulsifying properties of proteins. In B.J.F. Hudson (Ed.) *Developments in Food Proteins-4*. New York: Elsevier Applied Science Publishers. 291-338.
- Sankat, C.K. and Castaigne, F. 2004. Foaming and drying behaviour of ripe bananas. *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie*, 37, 517-525.

