



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การผลิตขนมอบกรอบจากผลิตภัณฑ์ที่มีแป้งเป็น

องค์ประกอบหลักด้วยเทคนิคการอบแห้งแบบต่างๆ

Production of starch-based crispy products by different drying techniques

โดย ดร.จินดาพร จำรัสเลิศลักษณ์

ธันวาคม 2553

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การผลิตขนมอบกรอบจากผลิตภัณฑ์ที่มีแป้งเป็น
องค์ประกอบหลักด้วยเทคนิคการอบแห้งแบบต่าง ๆ
Production of starch-based crispy products by different drying
techniques

ดร.จินดาพร จำรัสเลิศลักษณ์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

Project Code : MRG4980056

(รหัสโครงการ)

Project Title : Production of starch-based crispy products by different drying
Techniques

(ชื่อโครงการ) : การผลิตขนมอบกรอบจากผลิตภัณฑ์ที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบหลักด้วยเทคนิคการอบแห้ง
แบบต่างๆ

Investigator : Dr.Jindaporn Jamradloedluk

(ชื่อนักวิจัย) ดร.จินดาพร จำรัสเลิศลักษณ์

E-mail Address : jindaporn.msu@gmail.com / jindaporn@engineer.msu.ac.th

Project Period : July, 2006 – June 2008

(ระยะเวลาโครงการ) 1 กรกฎาคม 2549 ถึง 30 มิถุนายน 2551

Abstract

Deep fried snacks are a popular product with continuously increasing demand and high market value. However, such products contain a substantial amount of fat, a major dietary contributor to many diseases. It is therefore interesting to study alternative methods for producing low fat snacks. Three starch based crops (pumpkin, taro, and sweet potato) with the dimension of 3 cm X3 cm were used as raw materials. Preliminary experiments were carried out to select the material with highest potential and such a material was then studied in detail. Different drying methods, viz. single stage low temperature drying (50-70°C), single stage high temperature drying (130-170°C), and two-stage drying (high temperature followed by low temperature drying) were used to prepare crispy products. Influences of drying parameters, namely drying temperature, drying medium (superheated steam and hot air), velocity (0.5-1 m/s), material thickness (1-3 mm), and surface characteristic (flat and crinkle) on drying kinetics and quality attributes of the product were investigated. The experimental result showed that taro cv. Chaingmai was highest potential material for producing crispy product by the drying process. Hot air drying at high temperature and velocity could enhance the moisture reduction rate of the material. The thinner and flat surface material gave the higher drying rate compared to the thicker and crinkle surface material. It was also found that effect of drying medium on properties of the dried product was more obvious than the effect of drying temperature. Superheated steam drying provided the product with more intense color, lower degree of

shrinkage, and harder, stiffer, and crispier texture. Effective diffusion coefficients of taro slices dried at temperatures of 130-150°C were in the ranges of 14.75×10^{-10} - 16.81×10^{-10} m²/s and 5.44×10^{-10} - 9.36×10^{-10} m²/s for hot air and superheated steam drying, respectively. Inversion temperature of the taro slices was 247°C. Taro chips prepared by two-stage drying (superheated steam drying at 150°C to the moisture content of 25% d.b. followed hot air drying at 70°C) had superior qualities in terms of color and shrinkage compared to those prepared by the other two drying methods. Three-dimensional mathematical model was developed to describe heat and mass transfer of taro slices during hot air drying at 70-110°C. Validation of the model could satisfactorily predict moisture content and temperature of taro during drying.

Keywords: drying, superheated steam, snack, taro

บทคัดย่อ

ขนมขบเคี้ยวประเภททอดกรอบเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้รับความนิยมชนิดหนึ่งโดยมีปริมาณความต้องการซื้อเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีมูลค่าทางตลาดที่สูง อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์ดังกล่าวมีไขมันเป็นองค์ประกอบในปริมาณที่มากซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดโรคต่างๆ มากมาย ดังนั้นจึงเป็นเรื่องน่าสนใจที่จะศึกษาวิธีการทางเลือกสำหรับการผลิตขนมขบเคี้ยวไขมันต่ำ งานวิจัยนี้ใช้พืชที่มีแบ่งเป็นองค์ประกอบหลัก 3 ชนิด (ฟักทอง เผือก และมันเทศ) ขนาดความกว้างและความยาวด้านละ 3 เซนติเมตร เป็นวัตถุดิบ โดยได้ทำการทดลองขึ้นต้นเพื่อคัดเลือกผลิตภัณฑ์ที่มีศักยภาพมากที่สุด แล้วจึงทำการศึกษาผลิตภัณฑ์ดังกล่าวโดยละเอียด กรรมวิธีการทางเลือกที่ใช้ในการผลิตขนมขบเคี้ยวไขมันต่ำสำหรับงานวิจัยนี้ได้แก่ การอบแห้งแบบขั้นตอนเดียวที่อุณหภูมิต่ำ (50-70 องศาเซลเซียส) การอบแห้งแบบขั้นตอนเดียวที่อุณหภูมิสูง (130-170 องศาเซลเซียส) และการอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอน (การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงต่อการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ) โดยได้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการอบแห้ง ได้แก่ อุณหภูมิอบแห้ง ตัวกลางในการอบแห้ง (ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง และอากาศร้อน) ความเร็ว (0.5-1 เมตรต่อวินาที) ความหนาของวัสดุ (1-3 มิลลิเมตร) และลักษณะพื้นผิวของวัสดุ (ผิวเรียบ และผิวลอน) ที่มีต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ จากผลการศึกษาพบว่า เผือกหอมพันธุ์เชียงใหม่มีศักยภาพในการนำมาเป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตขนมอบกรอบด้วยกระบวนการอบแห้งมากที่สุด การอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิและความเร็วลมสูงสามารถช่วยเพิ่มอัตราการลดความชื้นของวัสดุได้ วัสดุที่บางและมีผิวเรียบจะให้อัตราการอบแห้งที่สูงกว่าวัสดุที่หนาและมีผิวลอน นอกจากนี้ยังพบว่า อิทธิพลของตัวกลางในการอบแห้งที่มีต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์อบแห้งชัดเจนกว่าอิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้ง การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีสีเข้มกว่า หดตัวน้อยกว่า แข็งกว่า แกร่งกว่า และกรอบกว่า การอบแห้งด้วยอากาศร้อน สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของเผือกแผ่นซึ่งผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 130-150 องศาเซลเซียส มีค่าอยู่ในช่วง 14.75×10^{-10} - 16.81×10^{-10} ตารางเมตรต่อวินาที และ 5.44×10^{-10} - 9.36×10^{-10} ตารางเมตรต่อวินาที สำหรับการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ตามลำดับ อุณหภูมิผกผันของเผือกแผ่นมีค่าเท่ากับ 247 องศาเซลเซียส เผือกแผ่นอบกรอบที่เตรียมจากกระบวนการอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอน (การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส จนกระทั่งความชื้นลดลงเหลือ 25% d.b. ต่อด้วยการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส) มีคุณภาพด้านสีและการหดตัวที่ดีกว่าการอบแห้งอีก 2 วิธี นอกจากนี้ยังได้มีการพัฒนาแบบจำลองทางคณิต

แบบ 3 มิติ เพื่อทำนายการถ่ายเทความร้อนและถ่ายเทมวลสารของเปลือกแผ่นระหว่างการอบแห้งด้วย
อากาศร้อนที่อุณหภูมิ 70-110 องศาเซลเซียส ซึ่งจากผลการทดสอบแบบจำลองดังกล่าวพบว่า สามารถ
ทำนายความชื้นและอุณหภูมิของเปลือกแผ่นระหว่างการอบแห้งได้เป็นที่น่าสนใจ
คำสำคัญ: การอบแห้ง ขนหมขบเคี้ยว เปลือก ใอน้ำร้อนยวดยิ่ง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณนักวิจัยพี่เลี้ยง ศาสตราจารย์ ดร.สมชาติ โสภณธนฤทธิ์ ที่ช่วยอบรมสั่งสอน และชี้แนะแนวทางในการทำงานวิจัยให้กับผู้เขียนมาตั้งแต่ยังศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษาจนกระทั่งมาเป็น อาจารย์ประจำของมหาวิทยาลัย โดยผู้เขียนได้ยึดถือท่านเป็นทั้งต้นแบบของอาจารย์และนักวิจัยที่ดีมาโดยตลอด

ขอขอบคุณกองทุนสนับสนุนการวิจัย ที่ได้มอบต้นทุนชีวิตงานวิจัยให้กับนักวิจัยรุ่นใหม่รวมถึงนักวิจัยรุ่น กลางที่จะสานต่องานวิจัยของประเทศไทยให้เจริญก้าวหน้าต่อไป ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยมหาสารคาม ต้นสังกัด ที่ทำให้ผู้เขียนเข้าใจถึงปรัชญาที่ยิ่งใหญ่ของมหาวิทยาลัยแห่งนี้ “ผู้มีปัญญาพึงเป็นอยู่เพื่อมหาชน”

ขอขอบคุณนิสิตระดับปริญญาตรีและปริญญาโทของผู้เขียนที่ได้ร่วมแลกเปลี่ยนเรียนรู้และสรรค์สร้าง งานวิจัยนี้ร่วมกัน ขอขอบคุณสำหรับแรงกระตุ้น แรงบันดาลใจ รวมถึงแรงใจชั้นยอดที่มอบให้เสมอมา

สุดท้ายผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณครอบครัว จำรัสเลิศลักษณ์ ที่ได้อบรมเลี้ยงดูผู้เขียนมาด้วยความรัก อย่างเต็มเปี่ยม รวมถึงให้การสนับสนุนทุกอย่างที่ผู้เขียนสนใจ ขอขอบคุณคุณยายที่อบรมสอนสั่งแนวทางการ เป็นพุทธศาสนิกชนที่ดีให้กับผู้เขียนตั้งแต่วัยเยาว์ ทำให้ผู้เขียนใช้ชีวิตอย่างคุ้มค่าและมีความสุข

หากโครงการวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ในวิถีทางใดก็ตาม ผู้เขียนขอยกคุณงามความดีทั้งหมดทั้งปวงให้กับ บุคคลที่ได้กล่าวมาข้างต้น และหากโครงการวิจัยมีข้อบกพร่องประการใด ผู้เขียนขอน้อมรับและกราบขออภัยมา ณ โอกาสนี้

จินดาพร จำรัสเลิศลักษณ์

ธันวาคม 2553

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
2 วัสดุและวิธีการทดลอง.....	3
3 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล.....	5
การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้ง.....	5
การเลือกผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการอบแห้ง.....	5
การเลือกความหนาของผลิตภัณฑ์.....	7
อิทธิพลของอุณหภูมิและชนิดของตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้งที่มีต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งและสมบัติของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง.....	7
ผลการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งด้วยสมการรูปแบบต่างๆ	14
อัตราการอบแห้งและอุณหภูมิผกผัน.....	17
สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล.....	19
การอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิต่ำ.....	20
อิทธิพลของความหนาของผลิตภัณฑ์และอุณหภูมิอบแห้งที่มีต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งและสมบัติของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง.....	20
อิทธิพลของลักษณะพื้นผิวที่มีต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งและสมบัติของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง.....	23
การอบแห้งแบบสองขั้นตอนโดยการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงต่อด้วยการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ.....	25
จลนพลศาสตร์การอบแห้ง.....	26
สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล.....	26
คุณภาพด้านสี.....	28
คุณภาพด้านการหดตัว.....	29
คุณภาพด้านเนื้อสัมผัส.....	29
คุณภาพด้านการคั่วตัว.....	30
การวิเคราะห์ปรากฏการณ์การถ่ายเทของเผือกแผ่นระหว่างการอบแห้งด้วยโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	31
สมบัติทางกายภาพของเผือกที่ใช้ในการอบแห้ง.....	31
ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเผือกแผ่นอบแห้งโดยใช้ซอฟต์แวร์สำเร็จรูป COMSOL Multiphysics TM Software (Version 3.3a).....	32

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของความชื้นอุณหภูมิภายในเปลือกแผ่นอบแห้งโดยใช้ ซอฟต์แวร์สำเร็จรูป COMSOL Multiphysics TM Software (Version 3.3a).....	36
การทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งเปลือกแผ่นหึ่งโดยใช้ซอฟต์แวร์สำเร็จรูป COMSOL Multiphysics TM Software (Version 3.3a).....	41
4 สรุปผลการทดลอง.....	43
เอกสารอ้างอิง.....	44
Output ที่ได้จากโครงการ.....	46

บัญชีตาราง

ตาราง

หน้า

1	Proximate analysis of Taro cv. Chaingmai.....	6
2	Characteristics of pore developed during drying at different conditions...	11
3	Thickness of crust of the taro chip prepared at different drying conditions	13
4	Hardness, stiffness and crispiness of taro slices dried at various drying conditions.....	9
5	R^2 , χ^2 and RMSE of different mathematical models.....	15
6	Drying constants of different mathematical models.....	16
7	Effective diffusion coefficients of dried taro slices processed by superheated steam and hot air drying at different temperatures	19
8	Activation energy, D_0 , R^2 , χ^2 and RMSE.....	20
9	Physical properties of dried taro slices under various drying temperatures and taro slice thickness	22
10	Physical properties of taro slices dried at different drying conditions.....	25
11	Mechanical properties of taro slices dried at different drying conditions...	25
12	Effective diffusion coefficients of dried taro slices prepared by different drying conditions.....	28
13	Color parameters of taro slices dried by superheated steam and hot air drying at the 1 st stage followed by hot air drying at 70°C (final moisture content of 4-8 %d.b.)	28
14	Physical and thermal properties of fresh taro slices with the thickness of 1 and 3 mm.....	31

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ		หน้า
1	Pumpkin slices dried by (a) superheated steam (b) hot air at temperature of 130°C.....	5
2	Sweet potato slices dried by (a) superheated steam (b) hot air at temperature of 130°C.....	6
3	Taro slices dried by (a) superheated steam (b) hot air at temperature of 130°C.....	6
4	Drying kinetics and temperature evolution of taro slices undergoing (a) superheated steam drying (b) hot air drying.....	8
5	Effect of drying medium on drying kinetics and temperature evolution of taro slices dried at various drying conditions.....	8
6	SEM micrograph of taro slices dried at temperature of 150°C: (A) surface of the sample undergoing hot air drying (b) surface of the sample undergoing superheated steam drying (C) cross section of the sample undergoing hot air drying and (D) cross section of the sample undergoing superheated steam drying.....	10
7	Pore diameter distribution of taro slices dried at different drying Conditions.....	12
8	Validation of the Logarithmic model for hot air drying at 130-170°C.....	17
9	Validation of the Logarithmic model for superheated steam drying at 130-170°C	17
10	Effect of drying media on drying rate of taro slices at drying temperatures of 130-170°C.....	18
11	Constant drying rate of taro slices at various drying temperatures.....	19
12	Drying kinetics of taro slices (a) effect of drying temperature; (b) effect of taro slice thickness.....	21
13	Effect of drying temperature and taro slice thickness on physical properties of dried taro slices (a) shrinkage; (b) rehydration ability.....	23
14	Drying kinetics of taro slices (a) effect of drying temperature (crinkle cut sample at air velocity of 0.5 m/s) (b) effect of air velocity (flat cut sample) and (c) effect of material surface characteristic (air velocity of 1 m/s.....	24
15	Influences of drying medium and temperature of the 1 st stage drying on moisture changes of taro slices (a) Final moisture content of the 1 st stage drying of 25% d.b. b) Final moisture content of the 1 st stage drying of 67% d.b.....	26

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
16 Influence of intermediate moisture content on moisture changes in the 2 nd stage drying.....	27
17 Degree of shrinkage of taro slices dried by two stage drying process.....	29
18 Textural properties of of taro slices dried by two stage drying process at different conditions to the final moisture content of 4-8 %d.b.....	30
19 Degree of rehydration of taro slices dried by two stage drying process at different conditions to the final moisture content of 4-8 %d.b.....	31
20 Temperature gradient at the surface of 1 mm-taro slice dried at 70°C for 2 min.....	32
21 Temperature gradient at the surface of 1 mm-taro slice dried at 70°C for 350 min.....	33
22 Temperature gradient at the cross section of 1 mm-taro slice dried at 70°C for 2 min.....	33
23 Temperature gradient at the cross section of 1 mm-taro slice dried at 70°C for 350 min.....	34
24 Temperature gradient at the surface of 3 mm-taro slice dried at 70°C for 2 min.....	34
25 Temperature gradient at the surface of 3 mm-taro slice dried at 70°C for 350 min.....	35
26 Temperature gradient at the cross section of 3 mm-taro slice dried at 70°C for 2 min.....	35
27 Temperature gradient at the cross section of 3 mm-taro slice dried at 70°C for 350 min.....	36
28 Moisture gradient at the surface of 1 mm-taro slice dried at 70°C for 2 min.....	37
29 Moisture gradient at the surface of 1 mm-taro slice dried at 70°C for 350 min.....	37
30 Moisture gradient at the cross section of 1 mm-taro slice dried at 70°C for 2 min.....	38
31 Moisture gradient at the cross section of 1 mm-taro slice dried at 70°C for 350 min.....	38
32 Moisture gradient at the surface of 3 mm-taro slice dried at 70°C for 2 min.....	39

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
33 Moisture gradient at the surface of 3 mm-taro slice dried at 70°C for 350 min.....	39
34 Moisture gradient at the cross section of 3 mm-taro slice dried at 70°C for 2 min.....	40
35 Moisture gradient at the cross section of 3 mm-taro slice dried at 70°C for 350 min.....	40
36 Comparison of drying kinetics and product temperature obtained from drying experiments of 1 mm taro slices at temperatures of 70-110°C and the data predicted by <i>COMSOL Multiphysics</i> TM Software (Version 3.3a)...	41
37 Comparison of drying kinetics and product temperature obtained from drying experiments of 3 mm taro slices at temperatures of 70-110°C and the data predicted by <i>COMSOL Multiphysics</i> TM Software (Version 3.3a)...	42

บทที่ 1

บทนำ

แม้ว่าขนมขบเคี้ยว (snack) และผลิตภัณฑ์ทอดกรอบ (chip) จะเป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นที่นิยมสำหรับผู้บริโภคทั่วไป แต่ผลิตภัณฑ์ดังกล่าวมักไม่ได้รับความนิยมจากผู้บริโภคที่ใส่ใจในสุขภาพเป็นพิเศษ ทั้งนี้เนื่องจากผลิตภัณฑ์ทอดกรอบมักมีปริมาณน้ำมันหลงเหลืออยู่ (ประมาณ 1-8%) นอกจากนี้ปริมาณน้ำมันที่ตกค้างในผลิตภัณฑ์ยังก่อให้เกิดกลิ่นเหม็นหืนเมื่อเก็บไว้เป็นเวลานานเกินไป ปัญหาดังกล่าวทำให้เกิดแนวคิดในการนำเทคนิคการอบแห้งมาใช้ในการผลิตผลไม้หรืออาหารอบกรอบที่ปราศจากน้ำมัน (fat-free snack product) อย่างไรก็ตามงานวิจัยเกี่ยวกับการผลิตอาหารอบกรอบด้วยเทคนิคการอบแห้งยังมีจำนวนไม่มากนัก และมีจำกัดอยู่เพียงผลิตภัณฑ์บางประเภทเท่านั้น เช่น มันฝรั่ง tortilla chip และกล้วย เป็นต้น หนึ่งในเทคนิคการอบแห้งที่มีการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำมาใช้ผลิตอาหารอบกรอบคือ การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เป็นเทคนิคการอบแห้งที่ได้รับการยอมรับในอุตสาหกรรมกระดาษ ไม้ และถ่านหิน มาเป็นเวลานาน และปัจจุบันได้มีการนำไอน้ำร้อนยวดยิ่งมาประยุกต์ใช้อบแห้งผลิตภัณฑ์ทางอาหารมากขึ้น จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า เมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยอากาศร้อนแล้ว การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งสามารถปรับปรุงคุณภาพบางอย่างของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งได้ โดยสมบัติต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งด้วยตัวกลางในการอบแห้งทั้ง 2 ชนิดจะแตกต่างกันไปตามประเภทของผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิอินเวอร์ชันการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งยังมีอัตราการอบแห้งที่สูงกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อนอีกด้วย นอกเหนือจากการอบแห้งแบบขั้นตอนเดียวด้วยอากาศร้อนหรือไอน้ำร้อนยวดยิ่งแล้ว การอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอน โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงต่อการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ยังเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น การอบแห้งกุ้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งต่อการอบแห้งด้วยความร้อนพบว่า สามารถให้ผลิตภัณฑ์ที่มีการหดตัวและความแข็งต่ำ มีการคืนตัวสูง และมีสีแดงกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งแบบขั้นตอนเดียว (Namsanguan et al., 2002) อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกันสามารถให้ผลการทดลองที่แตกต่างกันได้ เช่น สำหรับการอบแห้งเนื้อหมูด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งต่อการอบแห้งด้วยความร้อน พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้แข็งกว่าในกรณีที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งเพียงอย่างเดียว (Uengkimbuan et al., 2005) สำหรับอาหารขบเคี้ยวหรืออาหารเช้าซีเรียล (breakfast cereal) นั้น ความกรอบเป็นดัชนีบ่งชี้คุณภาพที่สำคัญอย่างยิ่ง ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว ที่ระดับความชื้นเดียวกัน ผลิตภัณฑ์ที่พองตัว หรือมีความพรุนสูงมักจะกรอบกว่าผลิตภัณฑ์ที่มีการพองตัวหรือมีความพรุนต่ำกว่า ดังนั้นกระบวนการอบแห้งที่จะนำมาใช้ผลิตอาหารอบกรอบจึงควรสามารถให้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะพองตัวที่สูง การ puffing ซึ่งเป็นเทคนิคอย่างหนึ่งที่สามารถทำให้ผลิตภัณฑ์มีการพองตัวมากขึ้น จึงเป็นกระบวนการที่น่าสนใจนำมาประยุกต์กับกระบวนการอบแห้ง ซึ่งการ puffing โดยทั่วไปจะทำให้ อุณหภูมิสูง (170-200°C) เพื่อให้ไอน้ำในผลิตภัณฑ์เดือด ความดันไอน้ำในผลิตภัณฑ์ที่สูงขึ้นจะทำให้ผลิตภัณฑ์พองตัว

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเปรียบเทียบการอบแห้งแบบต่าง ๆ ได้แก่ การอบแห้งที่อุณหภูมิสูง (130-170°C) โดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้ง การอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิต่ำ (50-70°C) และการอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอนโดยการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง (130-150°C) ด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งหรืออากาศร้อนต่อการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิต่ำ (70°C) เพื่อใช้ผลิต

อาหารขบเคี้ยวหรืออาหารเข้าธัญพืช โดยผลิตภัณฑ์เป้าหมาย คือ ผลิตภัณฑ์ที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก (starch-based food) เช่น ฟักทอง เผือก มัน และกล้วยห่าม เป็นต้น และยังได้ทำการวิเคราะห์ปรากฏการณ์การถ่ายเทของวัสดุระหว่างการอบแห้งโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วย

บทที่ 2

วัสดุและวิธีการทดลอง

ได้ทำการทดลองเบื้องต้นเพื่อศึกษาศักยภาพของวัสดุอบแห้งหลาย ๆ ชนิด (ฟักทอง เผือกหอม พันธุ์เชียงใหม่ และมันเทศ) ในการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง แล้วคัดเลือกเฉพาะวัสดุอบแห้งที่มีแนวโน้มให้คุณภาพที่ดีไปศึกษาในรายละเอียด โดยได้ทำการทดลองอบแห้งผลิตภัณฑ์ขนาดความกว้างและยาวด้านละ 3 cm ด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิต่ำ เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ (50-70°C) ความหนาของผลิตภัณฑ์ (1-2 mm) และลักษณะพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ (ลอน/เรียบ) ที่ส่งผลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งและสมบัติต่างๆของผลิตภัณฑ์อบแห้งที่ได้ (จินดาพร และคณะ, 2552; จินดาพร และคณะ, 2553) ส่วนการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงได้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและชนิดของตัวกลางในการอบแห้งที่ส่งผลกระทบต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งและสมบัติของผลิตภัณฑ์อบแห้ง สำหรับการอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอน เป็นการศึกษาอิทธิพลของชนิดของตัวกลาง (ไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน) อุณหภูมิสำหรับการอบแห้งในขั้นตอนที่ 1 (130 และ 150°C) และความชื้นสุดท้ายในขั้นตอนที่ 1 (25 และ 67% d.b.) ที่ส่งผลกระทบต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งในขั้นตอนที่ 2 รวมถึงคุณสมบัติต่างๆของวัสดุหลังการอบแห้ง (มะลิ และคณะ, 2550) สมบัติของวัสดุหลังผ่านการอบแห้งที่ทำการศึกษา ได้แก่ ค่าสี ซึ่งแสดงผลในรูป L (ความสว่าง) a (ความแดง) และ b (ความเหลือง) โดยใช้เครื่องวัดสีแบบฮันเตอร์ (Mini Scan XE Plus, Hunter Associates Laboratory Inc., Reston – Virginia, USA) ลักษณะเนื้อสัมผัสวัดด้วยเครื่อง Texture analyzer (TA.XT.plus, Stable Micro Systems, UK) ซึ่งมีภาระ 1 kg ติดตั้งหัววัดแบบทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm กดด้วยความเร็ว 2 mm/s โดยกำหนดให้ค่าความแข็ง คือ แรงกดสูงสุด (N) ค่าความแกร่ง คือ ความชันเริ่มต้นของกราฟระหว่างแรงกับระยะทางกด (N/mm) และความกรอบ คือ จำนวนพีกที่แสดงในกราฟระหว่างแรงกับระยะทางกด การหัดตัวเชิงปริมาตรของวัสดุอบแห้ง วิเคราะห์โดยวิธีการแทนที่ด้วย n-heptane (Yan et al., 2008) เปอร์เซ็นต์การหัดตัวเชิงปริมาตร แสดงดังสมการ (1)

$$\% \text{Volume shrinkage} = (V_0 - V)/V_0 \quad (1)$$

โดยที่ V_0 = ปริมาตรของผลิตภัณฑ์ตอนเริ่มต้น

V = ปริมาตรของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง

สำหรับการทดสอบการคืนตัวของผลิตภัณฑ์ในนมพว่องมันเนยนั้นได้นำผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งจำนวน 4 ชิ้น ใส่ลงในบีกเกอร์ที่มีนมพว่องมันเนยปริมาตร 600 mL เป็นระยะเวลา 15 นาที จากนั้นจึงนำวัสดุอบแห้งออกมาชั่งน้ำหนักแล้วคำนวณเปอร์เซ็นต์การคืนตัว จากสมการ (2)

$$\% \text{Rehydration} = (W - W_d)/W_d \quad (2)$$

โดยที่ W = มวลของผลิตภัณฑ์หลังผ่านการคืนตัว (g)

W_d = มวลแห้งของผลิตภัณฑ์ (g)

โครงสร้างระดับจุลภาคของผลิตภัณฑ์อบแห้งทำการวิเคราะห์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (JEOL, model JSM-5800LV, Tokyo, Japan) ที่แรงดันไฟฟ้า 10 kV โดยการศึกษาทั้งบริเวณผิวและภาคตัดขวางของผลิตภัณฑ์ สำหรับการวิเคราะห์ลักษณะภาคตัดขวางได้นำผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งมาหักให้แตกแบบอิสระ ก่อนนำไปเคลือบทองและถ่ายภาพ แล้วจึงนำภาพถ่ายที่ได้ไปวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยและจำนวนรูพรุนเฉลี่ยต่อพื้นที่ ด้วยโปรแกรม Image analysis (Version 6.0)

บทที่ 3

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเปรียบเทียบการอบแห้งแบบต่าง ๆ ได้แก่ การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้ง การอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิต่ำ และการอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอนโดยการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงต่อการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ เพื่อใช้ผลิตอาหารขบเคี้ยวหรืออาหารเข้าธัญพืช โดยผลิตภัณฑ์เป้าหมาย คือ ผลิตภัณฑ์ที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก (starch-based food) เช่น ฟักทอง มัน และเผือก เป็นต้น

ผลการศึกษาที่ได้จากงานวิจัยแบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ 1. การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้ง 2. การอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิต่ำ 3. การอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอนโดยการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงต่อการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ และ 4. การวิเคราะห์ปรากฏการณ์การถ่ายเทของวัสดุระหว่างการอบแห้งโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

3.1 การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้ง การเลือกผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการอบแห้ง

ได้ทำการทดลองเบื้องต้นเพื่อเลือกชนิดของผลิตภัณฑ์โดยการนำ ฟักทอง มัน และเผือก มาล้างทำความสะอาดแล้วหั่นตามขวางด้วยเครื่องหั่น (Savioli, model 300S, Italy) ให้ได้ความหนา 3 mm จากนั้นจึงตัดด้วยแบบพิมพ์โลหะให้ได้ขนาด 30 mm×30 mm แล้วจึงนำผลิตภัณฑ์ใส่ตะแกรงสแตนเลสเข้าเครื่องอบแห้ง แล้วอบที่อุณหภูมิ 130°C ด้วยความเร็วของตัวกลาง 1 m/s ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังการอบแห้งจะมีลักษณะปรากฏดังต่อไปนี้

ฟักทอง เมื่อผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะมีสีเหลืองเข้ม มีการหดตัวมากและไม่มีการพองตัว แต่เมื่ออบแห้งด้วยอากาศร้อนจะมีสีดำไหม้ (ไม่น่ารับประทาน) มีการพองตัวเล็กน้อย (ดู Fig. 1)

มัน เมื่อผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะมีสีแดงเข้มมีการหดตัวน้อยไม่มีการพองตัว แต่เมื่ออบแห้งด้วยอากาศร้อนจะมีสีดำคล้ำและไม่มีการพองตัว (ดู Fig. 2)

เผือก เมื่อผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะมีสีแดงและสว่าง มีการหดตัวน้อยและมีการพองตัวมากเมื่อเทียบกับฟักทองและมัน แต่เมื่ออบแห้งด้วยอากาศร้อนจะมีสีขาวขุ่น มีการแตกหักง่ายไม่มีการพองตัว (ดู Fig. 3)



(a)



(b)

Fig. 1 Pumpkin slices dried by (a) superheated steam (b) hot air at temperature of 130°C

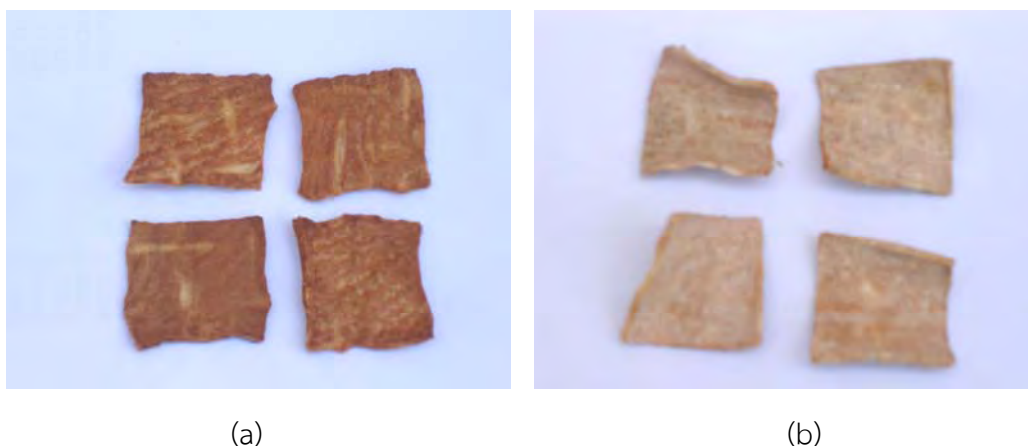


Fig. 2 Sweet potato slices dried by (a) superheated steam (b) hot air at temperature of 130°C



Fig. 3 Taro slices dried by (a) superheated steam (b) hot air at temperature of 130°C

จากการดูลักษณะปรากฏพบว่า เผือกเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างน้อย มีการพองตัวมากและมีสีสันทึมน่ารับประทาน ดังนั้นจึงเลือกเผือกเป็นวัสดุอบแห้ง โดยเผือกที่ใช้เป็นพันธุ์เผือกหอมเชียงใหม่ (*Xanthosoma sagittifolium*) ซึ่งมีองค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate analysis) ดังแสดงใน Table 1

Table 1 Proximate analysis of Taro cv. Chaingmai

Compositions	Percentage (%)
Protein	5.79
Carbohydrate	16.44
Fat	0.38
Moisture	73.51
Ash	3.88

การเลือกความหนาของผลิตภัณฑ์

ได้นำเปลือกแผ่นความหนาเริ่มต้น 1, 2 และ 3 mm มาผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 130°C และความเร็วของตัวกลาง 1 m/s พบว่า เปลือกความหนา 1 mm เมื่อผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะไม่มีอาการพองตัว ส่วนที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนจะมีการแตกหักเร็วมากยากในการตรวจวัด หรือไม่ก็จะมีการเสียรูปโดยการม้วนงอที่มุมทั้ง 4 ด้าน ส่วนเปลือกความหนา 2 mm เมื่อผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะมีการพองตัวอยู่บ้างแต่ไม่มากนัก ส่วนที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนก็มีการแตกหัก ในขณะที่เปลือกความหนา 3 mm เมื่อผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีการพองตัวมาก ส่วนที่ผ่านการอบแห้งอากาศร้อนยังคงมีการแตกหักอยู่บ้างแต่น้อยกว่าที่ความหนาอื่น เมื่อพิจารณาในภาพรวมถือว่า ความหนา 3 mm เป็นความหนาของเปลือกแผ่นที่เหมาะสมที่สุด ดังนั้นจึงเลือกความหนาดังกล่าวในการศึกษาต่อไป

อิทธิพลของอุณหภูมิและชนิดของตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้งที่มีต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งและสมบัติของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง

เมื่อนำเปลือกแผ่นซึ่งมีความชื้นเริ่มต้นในช่วง 275-318% d.b. มาผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 130-150°C พบว่า ด้วยตัวกลางในการอบแห้งเดียวกัน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นสามารถลดความชื้นในผลิตภัณฑ์ได้เร็วขึ้น ดังแสดงใน Fig. 4 นอกจากนี้ยังพบว่า สำหรับการอบแห้งด้วยอากาศร้อน อุณหภูมิของเปลือกแผ่นจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ และเข้าสู่อุณหภูมิอากาศร้อนที่ใช้ในการอบแห้งในที่สุด ในขณะที่การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งนั้น อุณหภูมิของเปลือกจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วตั้งแต่นาทีแรกของการอบแห้ง แล้วจะคงที่อยู่ที่อุณหภูมิจุดเดือดของน้ำระยะหนึ่ง จากนั้นอุณหภูมิของเปลือกจึงเข้าสู่อุณหภูมิของตัวกลางในการอบแห้ง ซึ่งผลที่ได้นี้มีลักษณะใกล้เคียงกับการอบแห้งมันฝรั่งของ Tang and Cenkowski (2000) และการอบแห้ง Tortilla chip ของ Li et al. (1999) การเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของอุณหภูมิผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งเกิดขึ้นเนื่องจากในช่วงต้นของการอบแห้ง ไอน้ำซึ่งมีอุณหภูมิสูงได้สัมผัสกับผิวของผลิตภัณฑ์ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำ ทำให้เกิดการควบแน่นที่ผิวของผลิตภัณฑ์ จากนั้นความร้อนจากการควบแน่นดังกล่าวจะแพร่ผ่านเข้าไปในตัวผลิตภัณฑ์ อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์จึงสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อพิจารณาอิทธิพลของตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้งพบว่า ในช่วงอุณหภูมิที่ทำการศึกษา (130-150°C) การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีอัตราการอบแห้งที่ต่ำกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อน โดยจะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เส้นกราฟความชื้นของตัวกลางในการอบแห้งทั้งสองเข้าใกล้กันมากขึ้น (ดู Fig. 5) นอกจากนี้ยังพบว่า ในช่วงต้นของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งนั้นความชื้นของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดการควบแน่น ในขณะที่การอบแห้งด้วยอากาศร้อนไม่เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าว โดยสำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งนั้นเมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้นจะทำให้ปริมาณความชื้นเนื่องจากการควบแน่นลดลง ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Uengkimbuan et al. (2006) และ Tang et al. (2005) ซึ่งเป็นการอบแห้งเนื้อหมูแผ่นและ Spent grain ตามลำดับ

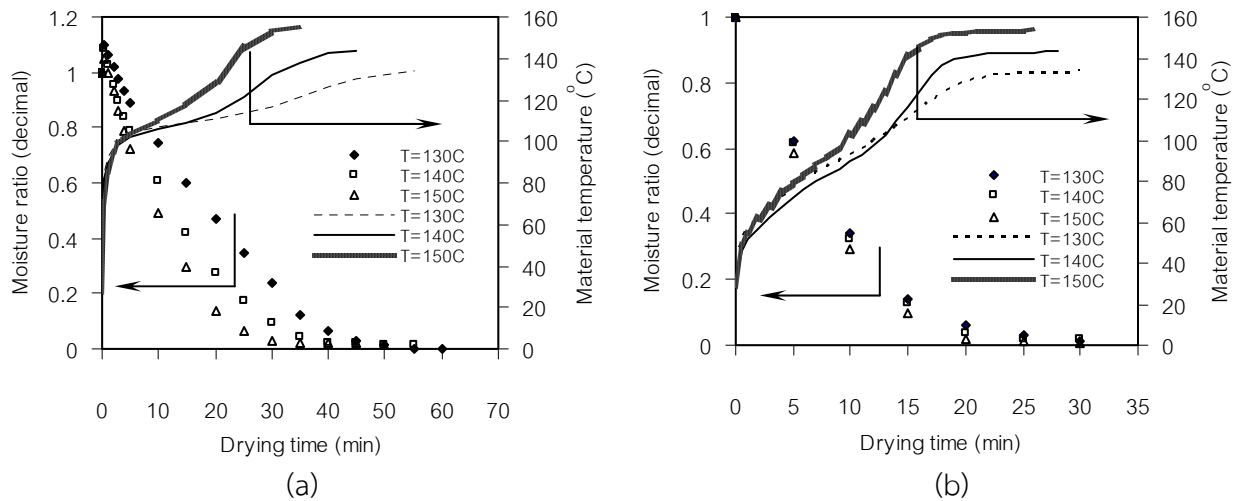


Fig. 4 Drying kinetics and temperature evolution of taro slices undergoing
(a) superheated steam drying (b) hot air drying

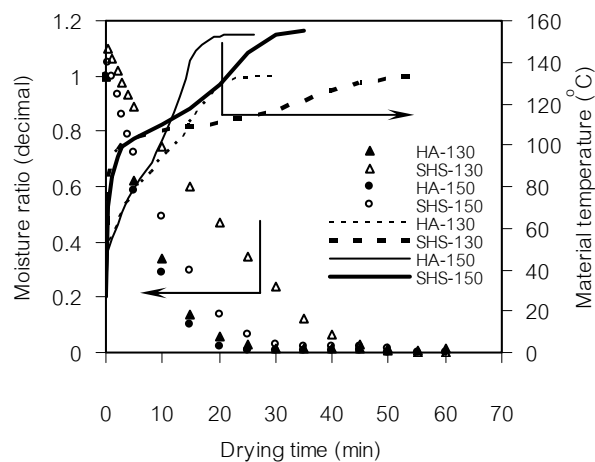


Fig. 5 Effect of drying medium on drying kinetics and temperature evolution of taro slices dried at various drying conditions

เมื่อนำผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งที่มีความชื้นประมาณ 7% d.b. ไปหาสมบัติเชิงคุณภาพด้านต่างๆ ได้ผลดังแสดงใน Table 1 ซึ่งจะเห็นว่า ด้วยตัวกลางในการอบแห้งเดียวกัน อุณหภูมิอบแห้งที่สูงขึ้นจะทำให้ผลิตภัณฑ์มีค่าความสว่าง (L) เพิ่มขึ้นในขณะที่ค่าสีแดง (a) ลดลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง (150°C) จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ (130°C) ดังนั้นระยะเวลาที่ผลิตภัณฑ์สัมผัสกับตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้งในกรณีอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะน้อยกว่า สีของผลิตภัณฑ์จึงอ่อนกว่า นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอบแห้งยังส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์การหดตัวในการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งด้วย โดยพบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเผือกจะมีการหดตัวน้อยลง ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้ น้ำในผลิตภัณฑ์เกิดการกลายเป็นไออย่างรวดเร็ว จึงเกิดช่องว่างอากาศภายในเนื้อวัสดุทำให้ความพรุนมากขึ้น ความหนาแน่นและการหดตัวจึงลดลง (Caixeta et al., 2002; Li et al., 1999) นอกจากนี้ยังพบว่า ตัวกลางในการอบแห้งมีอิทธิพลต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ กล่าวคือ การ

อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะให้ผลิตภัณฑ์ที่ต่ำกว่า แดงกว่า เหลืองกว่า และหดตัวน้อยกว่าผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งด้วยอากาศร้อน ทั้งนี้เนื่องจากการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์สูงขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากการควบแน่นของไอน้ำ ทำให้ผิวของผลิตภัณฑ์สัมผัสกับอุณหภูมิสูงตลอดการอบแห้ง ปฏิกิริยาสีน้ำตาลซึ่งถูกเร่งด้วยอุณหภูมิจึงเกิดขึ้นได้ง่าย (Jamradloedluk et al., 2007) ทำให้ในกรณีของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งสีของผลิตภัณฑ์เข้มกว่าในกรณีที่อบแห้งด้วยอากาศร้อน และด้วยอุณหภูมิที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็วนี้เองทำให้ผิวของผลิตภัณฑ์แห้ง ในขณะที่ด้านในของผลิตภัณฑ์ยังคงมีความชื้นอยู่มาก เมื่ออุณหภูมิถึงจุดเดือดของน้ำความชื้นเหล่านี้จะกลายเป็นไอน้ำ ทำให้ความดันในวัสดุสูงขึ้น ผลิตภัณฑ์จึงเกิดการพองตัวในบางส่วน การหดตัวจึงน้อยกว่าในกรณีของการอบแห้งด้วยอากาศร้อน จากการสังเกตจะเห็นว่า ผีอกที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะมีผิวที่มีลักษณะขรุขระและเป็นมันวาวมากกว่าผีอกที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อน

Table 1 Physical properties of dried taro slices processed by different drying conditions

Drying conditions		Properties of dried taro			
Drying medium	Drying temperature (°C)	Lightness (L)	Redness (a)	Yellowness (b)	%Shrinkage
Superheated steam	130	51.84±2.62 ^a	8.36±0.71 ^c	22.02±0.79 ^c	75.41±3.68 ^b
	140	54.34±1.51 ^b	7.93±0.37 ^d	21.68±1.36 ^c	71.22±3.34 ^a
	150	54.55±3.89 ^b	7.52±0.96 ^c	23.48±1.77 ^b	69.21±2.68 ^a
Hot air	130	72.38±3.00 ^c	2.26±0.58 ^c	10.54±0.89 ^b	78.21±2.60 ^c
	140	70.99±2.09 ^c	1.65±0.75 ^b	10.03±0.82 ^b	76.71±3.44 ^b
	150	76.24±2.27 ^b	1.01±0.44 ^a	9.07±1.09 ^a	76.58±2.99 ^b

**Values in the same column with different superscripts mean that the values are significantly different (p < 0.05)

เมื่อนำผีอกแผ่นที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนที่อุณหภูมิต่างๆไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาค พบว่า สำหรับทุกอุณหภูมิอบแห้งจะมีเม็ดแป้ง (Starch granule) เหลืออยู่ที่ผิวของผลิตภัณฑ์ซึ่งผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนมากกว่ากรณีที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (ดู Fig. 6-A และ B) ทั้งนี้เนื่องจากการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งเกิดการควบแน่นที่ผิวของผลิตภัณฑ์ทำให้ความชื้นและอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว การเกิด Gelatinization ของเม็ดแป้งจึงเร็วและสมบูรณ์กว่า (Iyota et al., 2001; Soponronnarit et al., 2006) จึงทำให้ไม่พบเม็ดแป้งเหลืออยู่ที่ผิวของผีอกแผ่น เมื่อพิจารณาภาพตัดขวางของผีอกแผ่นที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 150°C (ดู Fig. 6 C และ D) พบว่า การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะให้ผีอกแผ่นที่มีขนาดของรูพรุนใหญ่กว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อนอย่างเห็นได้ชัดและรูพรุนดังกล่าวยังมีขนาดที่ไม่สม่ำเสมออีกด้วย

เมื่อนำภาพถ่ายภาคตัดขวางของผีอกแผ่นซึ่งผ่านการอบแห้งที่สภาวะต่างๆไปวิเคราะห์เพื่อหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยและจำนวนรูพรุนเฉลี่ยต่อพื้นที่ ด้วยโปรแกรม Image analysis ได้ผลดังแสดงใน Table 2 ซึ่งจากตารางดังกล่าวจะเห็นว่า ส่วนใหญ่ผีอกแผ่นที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนใหญ่กว่าและมีจำนวนรูพรุนเฉลี่ยต่อพื้นที่มากกว่าผีอกแผ่นที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อน โดยผีอกแผ่นที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยและจำนวนรูพรุนเฉลี่ยต่อพื้นที่อยู่ในช่วง 19.18-28.89 μm และ 89.20 – 166.30 รู/mm^2 ตามลำดับ ในขณะที่ผีอกแผ่นที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยและจำนวนรูพรุนเฉลี่ยต่อพื้นที่อยู่ในช่วง 18.39-18.51 μm และ 124.78 – 133.85 รู/mm^2 ตามลำดับ

สาเหตุที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากการอบด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์จะสูงถึง 100°C ในเวลาอันรวดเร็ว ทำให้น้ำในผลิตภัณฑ์เกิดการเดือดกลายเป็นไอ มีความดันภายในวัสดุมากจึงส่งผลให้เกิดรูพรุนขนาดใหญ่และจำนวนรูพรุนที่มากกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อน อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิ 170°C นั้นจะเห็นว่า ผีอกแผ่นที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีจำนวนรูพรุนเฉลี่ยต่อพื้นที่ลดลงอย่างชัดเจน ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากว่าที่อุณหภูมิสูงดังกล่าวผลิตภัณฑ์เกิดการพองตัวค่อนข้างมาก ทำให้เกิดรูพรุนขนาดใหญ่ จำนวนรูพรุนต่อพื้นที่จึงลดลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อพิจารณาอิทธิของอุณหภูมิอบแห้งที่มีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนพบว่า อุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นมีแนวโน้มให้ผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดของรูพรุนใหญ่ขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับอิทธิพลของชนิดตัวกลางในการอบแห้งถือว่าอุณหภูมิอบแห้งมีอิทธิพลต่อขนาดของรูพรุนน้อยกว่าชนิดของตัวกลางในการอบแห้ง

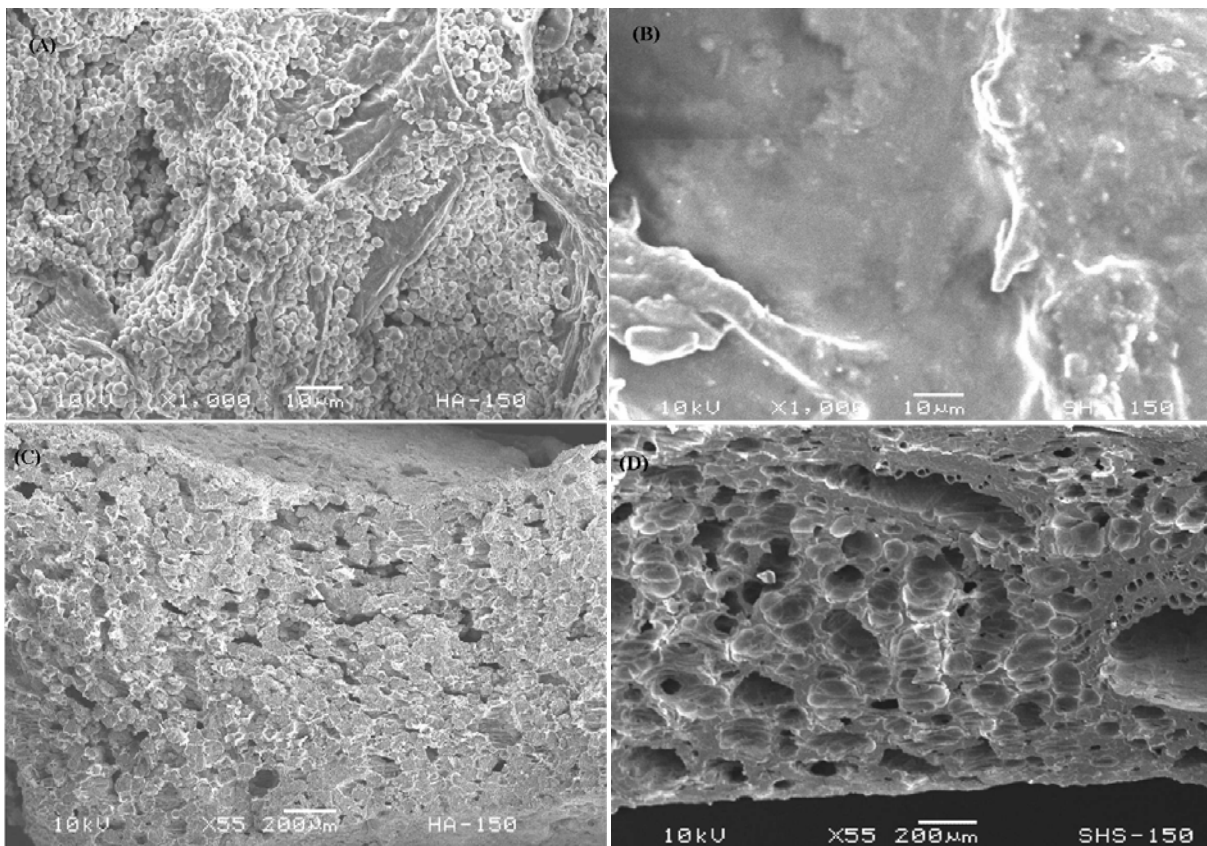


Fig. 6 SEM micrograph of taro slices dried at temperature of 150°C : (A) surface of the sample undergoing hot air drying (B) surface of the sample undergoing superheated steam drying (C) cross section of the sample undergoing hot air drying and (D) cross section of the sample undergoing superheated steam drying

Table 2 Characteristics of pore developed during drying at different conditions

Drying medium	Drying temperature (°C)	Average pore diameter (µm)	Average pore number per area (no./mm ²)
Superheated steam	130	19.18± 16.08	166.30±27.93
	150	24.68 ± 22.50	165.23±24.45
	170	28.45 ±45.86	89.00±20.58
Hot air	130	18.27 ± 18.49	124.78±75.01
	150	18.40± 18.91	133.63±23.23
	170	18.51± 19.49	133.85±29.61

เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนในแผ่นที่ผ่านการอบแห้งที่สภาวะต่างๆ ดังแสดงใน Fig. 7 พบว่า การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยิ่งจะให้ช่วงการกระจายตัวที่กว้างกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อนในทุกช่วงอุณหภูมิ (โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิ 170°C) ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานใน Table 2 ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยิ่งให้รูพรุนที่มีขนาดสม่ำเสมอน้อยกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อน โดยพบว่า สำหรับการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 130°C 150 °C และ 170°C รูพรุนส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 17.86 -18.92 µm 17.58-19.21 µm และ 17.76-19.26 µm ตามลำดับ ในขณะที่การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยิ่งที่อุณหภูมิ 130°C 150 °C และ 170°C รูพรุนส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 18.63-19.73 µm 23.80-25.05 µm และ 26.78-30.99 µm ตามลำดับ โดยแผ่นเปลือกที่ผ่านการอบแห้งทั้งหมดมีขนาดรูพรุนค่อนข้างเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นโฟมกล้วย (Banana foam mat) ซึ่งใช้สารก่อโฟม (Foaming agent) ที่ทำให้กล้วยปั่นมีความหนาแน่นเริ่มต้น 0.3 g/cm³ แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 60-80°C โดยแผ่นโฟมกล้วยอบแห้งดังกล่าวมีขนาดของรูพรุนอยู่ในช่วง 240-480 µm (Thuwapanichchayanan et al., 2008)

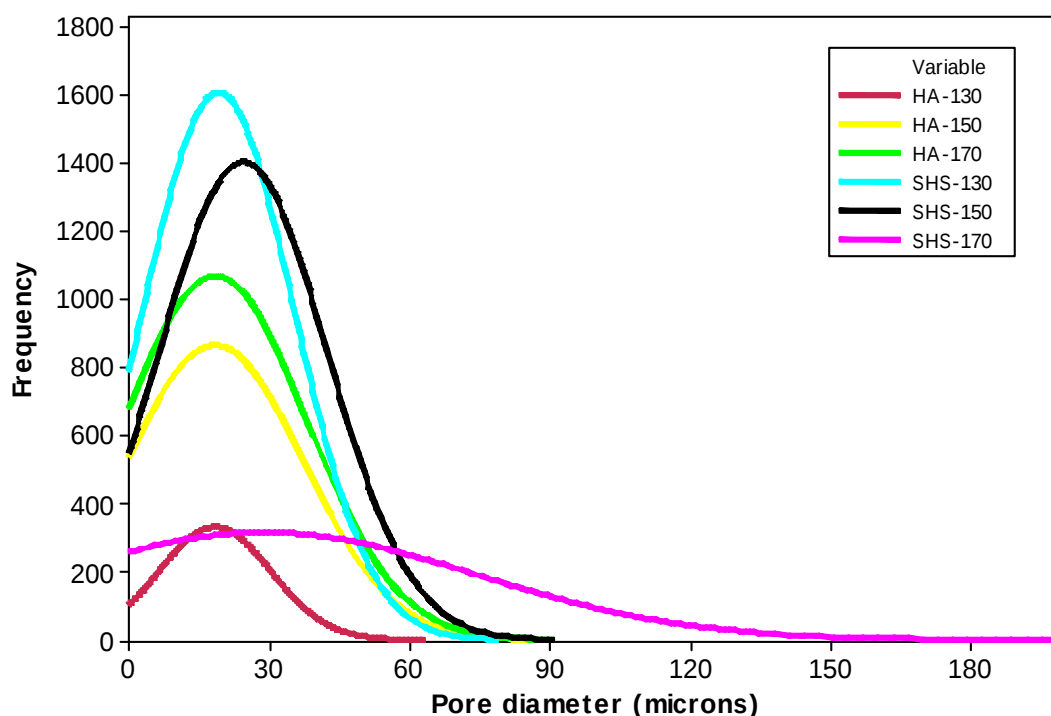


Fig. 7 Pore diameter distribution of taro slices dried at different drying conditions

ภาพตัดขวางของผลิตภัณฑ์นอกจากจะทำให้เห็นรูพรุนที่เกิดขึ้นแล้ว บริเวณที่ด้านบนและด้านล่างของภาพยังสามารถแสดงลักษณะการเกิดเป็นผิวแข็ง (Case hardening) ได้ด้วย Case hardening หรือ Crust formation นั้น เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นระหว่างการอบแห้ง โดยเมื่อขณะที่ความชื้นบริเวณผิวของผลิตภัณฑ์ลดลงจนกระทั่งผิวของผลิตภัณฑ์เริ่มเกิดการเปลี่ยนสภาพจากลักษณะที่อ่อน (Rubbery state) กลายเป็นลักษณะที่แข็ง (Glassy state) นั้น สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นภายใน (Internal moisture diffusivity) อาจไม่มากพอที่จะทำให้ความชื้นภายในผลิตภัณฑ์แพร่ออกมาที่ผิวได้ทัน ทำให้ผิวของผลิตภัณฑ์ต้องสัมผัสความร้อนจากตัวกลางในสภาพที่มีความชื้นน้อยมาก จึงทำให้เกิดการลักษณะที่เป็นแผ่นแข็งขึ้น (Achanta et al., 1997) ซึ่งส่วนใหญ่การเกิดเป็นผิวแข็งนั้นมักจะเกิดกับกระบวนการอบแห้งที่รวดเร็ว (Rapid drying) อย่างไรก็ตามสำหรับผลการศึกษาในงานวิจัยนี้ อาจให้ผลที่แตกต่างออกไป เนื่องจากถึงแม้ว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อนจะให้อัตราการอบแห้งที่สูงกว่า แต่ทว่าภาคตัดขวางของเปลือกแผ่น (ดู Fig. 6-D) แสดงให้เห็นว่า เกิดการเป็นผิวแข็งที่ชัดเจนกว่า (ดูจากรูพรุนที่เกิดขึ้นจะเกิดห่างจากบริเวณผิวมากกว่า) ซึ่งสิ่งที่เกิดขึ้นอาจจะอธิบายด้วยกลไกการไหลของเม็ดแป้งบริเวณที่ผิวและด้านในของแผ่นเปลือก ซึ่งการไหลดังกล่าวจะทำให้เกิดเป็นผิวปิดเกิดเป็นแผ่นแข็งขึ้น เมื่อนำภาพภาคตัดขวางที่แสดงลักษณะผิวแข็งมาหาขนาดความหนาของผิวแข็งดังกล่าว ได้ผลดังแสดงใน Table 3 ซึ่งจากตารางดังกล่าวจะเห็นได้ว่า เปลือกแผ่นที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีความหนาของผิวแข็ง (Crust) ที่มากกว่าเปลือกแผ่นที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตามสำหรับตัวกลางในการอบแห้งชนิดเดียวกันนั้น อุณหภูมิอบแห้งที่แตกต่างกันไม่ได้ส่งผลให้ความหนาของผิวแข็งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

Table 3 Thickness of crust of the taro chip prepared at different drying conditions

Drying medium	Drying temperature (°C)	Crust thickness (μm)
Superheated steam	130	30.10 ± 6.49 ^{a,b}
	150	45.46 ± 15.34 ^b
	170	53.01 ± 11.71 ^b
Hot air	130	24.72 ± 3.53 ^a
	150	26.45 ± 5.70 ^a
	170	26.66 ± 3.59 ^a

**Values in the same column with different superscripts mean that the values are significantly different (p < 0.05)

ผลการทดสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของเผือกแผ่นหลังการอบแห้งที่สภาวะต่างๆแสดงไว้ใน Table 4 ซึ่งจากตารางดังกล่าวพบว่า เผือกแผ่นที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะมีค่าความแข็ง ความแกร่ง และความกรอบมากกว่าเผือกแผ่นที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนในทุกช่วงอุณหภูมิ ทั้งนี้ เนื่องจากการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งให้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นแผ่นแข็งที่ผิว ซึ่งความหนาของแผ่น แข็งที่เกิดขึ้นจะเห็นได้อย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการอบแห้งด้วยอากาศร้อน (ดู Fig. 6 C และ D) ลักษณะการเป็นผิวแข็ง (Case hardening) ที่เกิดขึ้นนี้ส่งผลกระทบโดยตรงต่อค่าความแข็งและค่า ความแกร่งของผลิตภัณฑ์ โดยจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะทางในการกดของเผือก แผ่นที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง จะพบว่า ส่วนใหญ่ค่าแรงกดสูงสุดจะเกิดขึ้นที่พิกแรก (ไม่ได้แสดงผล) นั่นคือ วัสดุมีความแข็งมากที่สุดที่บริเวณผิว ขนาดของแรงกดที่สูงขึ้นในทันทีทำให้ได้ความชันของกราฟที่ สูง ดังนั้นค่าความแกร่งจึงสูงด้วยเช่นกัน ลักษณะการเกิด Gelatinization และแผ่นแข็งบริเวณผิวของ ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งนี้ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีขนาดของรูพรุนที่ใหญ่และไม่ สม่ำเสมอ ซึ่งลักษณะความแตกต่างของรูพรุนดังกล่าวนี้เองที่ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของค่าแรงกด (ระหว่างที่หัวกดเคลื่อนตัวลงไปในพื้นที่ทดสอบ) ซึ่งทำให้เกิดพิกขึ้นในกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง กับระยะทางในการกด

Table 4 Hardness, stiffness and crispiness of taro slices dried at various drying conditions

Drying medium	Drying temperature (°C)	Hardness (N)	Stiffness (N/mm)	Crispiness
Superheated steam	130	10.76± 3.25	19.08± 6.65	3 ± 1.50
	150	13.75 ± 4.46	23.56 ± 5.27	3 ± 1.61
	170	14.49 ± 4.03	24.38± 4.88	3 ± 1.72
Hot air	130	5.08 ± 3.61	11.62 ± 3.40	1.80 ± 1.20
	150	7.90 ± 3.75	13.75 ± 4.36	2.51 ± 1.48
	170	8.83 ± 3.30	13.52 ± 4.61	2.60 ± 1.78

ในงานวิจัยฉบับนี้ได้นิยามจำนวนพิกเป็นค่าความกรอบ ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่า เผือกแผ่นที่ผ่าน การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีค่าความกรอบมากกว่าเผือกแผ่นที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อน เมื่อ

พิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ พบว่า ความแข็งและความแกร่งของเปลือกแผ่นมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น สำหรับตัวกลางในการอบแห้งทั้งสองชนิด ส่วนค่าความกรอบนั้นอุณหภูมิอบแห้งส่งผลกระทบบนกรณีของการอบแห้งด้วยอากาศร้อนเท่านั้น โดยเปลือกแผ่นมีแนวโน้มกรอบมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งเมื่อพิจารณาในภาพรวมพบว่า ชนิดของตัวกลางในการอบแห้งส่งผลกระทบต่อคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสมากกว่าอุณหภูมิในการอบแห้ง

ผลการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งด้วยสมการรูปแบบต่างๆ

สำหรับงานวิจัยนี้ใช้สมการอบแห้ง 4 แบบ ในการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งที่ได้และใช้เทคนิคการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression) เพื่อหาค่าคงที่ของสมการอบแห้ง และใช้ค่า R^2 , Root Mean Square Error (RMSE) และ Chi Square (χ^2) เป็นดัชนีบ่งชี้ความแม่นยำของสมการอบแห้งที่นำมาอธิบายจลนพลศาสตร์ จากผลการศึกษาได้ค่าคงที่และดัชนีบ่งชี้ความแม่นยำดังแสดงใน Table 5-6 ซึ่งจากตารางดังกล่าวจะเห็นว่า สมการของ Page ให้ค่า R^2 มาก ในขณะที่ χ^2 และ RMSE น้อยกว่าสมการอื่นๆ ดังนั้นสมการของ Page จึงเหมาะสมในการใช้ทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งเปลือกแผ่นด้วยลมร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เมื่อนำค่า MR ที่ได้จากการทำนายโดยสมการ Page มาแสดงเปรียบเทียบกับ MR ที่ได้จากการทดลองจะได้กราฟดังแสดงใน Figs. 8-9

Table 5 R^2 , χ^2 and RMSE of different mathematical models

Model	Drying condition	R^2	χ^2	RMSE
Lewis $MR = \exp(-kt)$	HA-130	0.96824	0.004015	0.060228
	HA-150	0.94265	0.006637	0.099552
	HA-170	0.9325	0.007661	0.114921
	SHS-130	0.95041	0.008123	0.14621
	SHS-150	0.95701	0.009212	0.165812
	SHS-170	0.97023	0.006098	0.109772
Page $MR = \exp(-kt^n)$	HA-130	0.98021	0.002071	0.037751
	HA-150	0.97322	0.003147	0.04721
	HA-170	0.96993	0.003479	0.052186
	SHS-130	0.96888	0.005146	0.092632
	SHS-150	0.96178	0.008210	0.147786
	SHS-170	0.97115	0.005912	0.106421
Henderson $MR = a \exp(-kt)$	HA-130	0.96990	0.003809	0.057129
	HA-150	0.94821	0.006011	0.090161
	HA-170	0.93937	0.006906	0.103591
	SHS-130	0.99389	0.001024	0.018430
	SHS-150	0.98236	0.023271	0.068939
	SHS-170	0.98223	0.012709	0.065914
Logarithmic $MR = a \exp^{(-kt)} + c$	HA-130	0.99437	0.008380	0.010818
	HA-150	0.99477	0.009511	0.009319
	HA-170	0.99405	0.010171	0.010450
	SHS-130	0.99395	0.003619	0.018229
	SHS-150	0.98950	0.006399	0.041168
	SHS-170	0.99228	0.005630	0.028800

* HA-130 is hot air drying at 130°C

HA-150 is hot air drying at 150°C

HA-170 is hot air drying at 170°C

SHS-130 is superheated steam drying at 130°C

SHS-150 is superheated steam drying at 150°C

SHS-170 is superheated steam drying 170°C

Table 6 Drying constants of different mathematical models

Equation	Drying condition	Drying constant		
Lewis	HA-130 HA-150 HA-170 SHS-130 SHS-150 SHS-170	k		
		0.036597		
		0.039770		
		0.041540		
		0.022425		
		0.035159		
		0.040816		
Page	HA-130 HA-150 HA-170 SHS-130 SHS-150 SHS-170	k	n	
		0.957654	0.034751	
		0.923264	0.035988	
		0.914045	0.037056	
		1.162531	0.029083	
		1.155741	0.043435	
		1.108068	0.047295	
Henderson	HA-130 HA-140 HA-150 SHS-130 SHS-140 SHS-150	a	k	
		0.957654	0.034751	
		0.923264	0.035988	
		0.914045	0.037056	
		1.162531	0.029083	
		1.155741	0.043435	
		1.108068	0.047295	
Logarithmic	HA-130 HA-140 HA-150 SHS-130 SHS-140 SHS-150	a	k	c
		0.874697	0.060629	0.162421
		0.85144	0.074454	0.183599
		0.849607	0.079815	0.185166
		1.127191	0.030903	0.039027
		1.023129	0.063786	0.173487
		0.982494	0.072464	0.173442

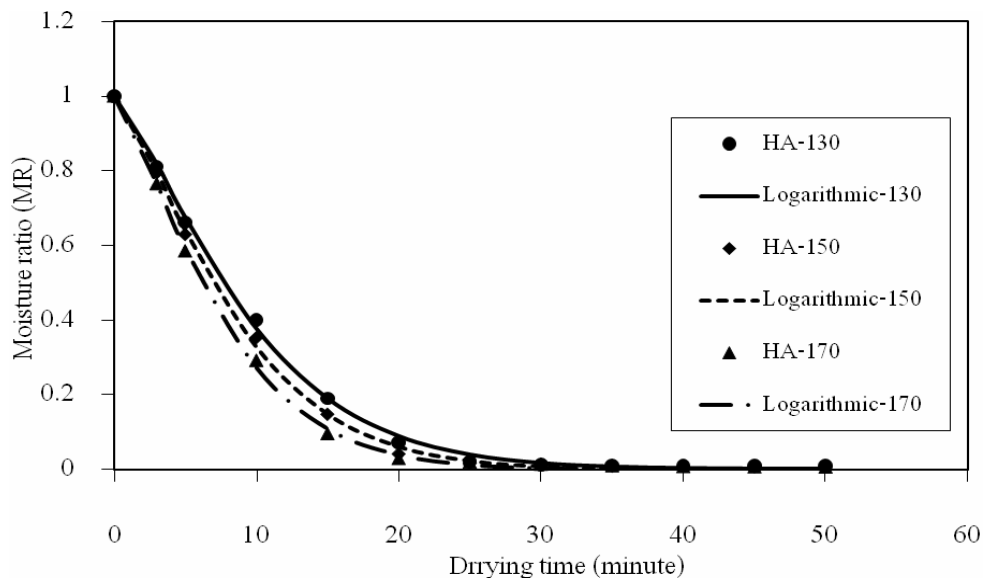


Fig. 8 Validation of the Logarithmic model for hot air drying at 130-170°C

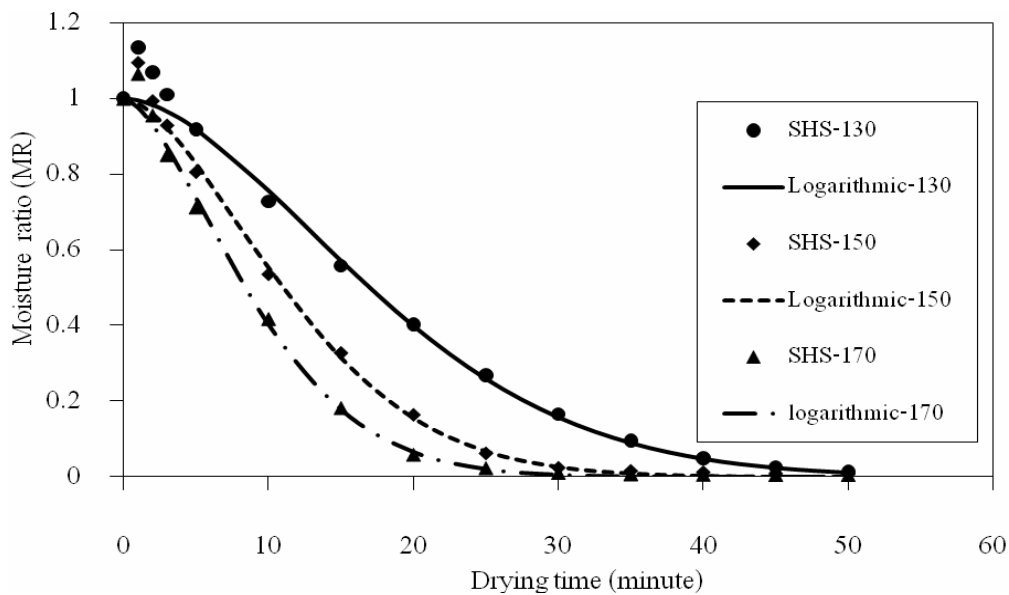


Fig. 9 Validation of the Logarithmic model for superheated steam drying at 130-170°C

อัตราการอบแห้งและอุณหภูมิผกผัน

อัตราการอบแห้ง (Drying rate) ของเนื้อเยื่อที่ผ่านการอบแห้งที่สภาวะต่างๆสามารถคำนวณได้โดยนำสมการการอบแห้งที่สามารถทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งของเนื้อเยื่อได้ดีที่สุดมาหาอนุพันธ์เทียบกับเวลา สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกสมการทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบของ Exponential มา 5 สมการ แล้วได้ทดสอบความแม่นยำในการทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นตั้งข้อมูลในหัวข้อ 4.2 ซึ่งจากผลดังกล่าวพบว่า สมการอบแห้งที่สามารถทำนายอัตราส่วนความชื้นของเนื้อเยื่อที่ผ่านการอบแห้ง

ด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ ได้ดีที่สุด คือ สมการ Logarithmic ซึ่งมีรูปแบบดังนี้

$$MR = a \exp^{-kt} + c$$

เมื่อหาอนุพันธ์ของสมการดังกล่าวเทียบกับเวลาจะได้อัตราการอบแห้ง (Drying rate) ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Drying rate} &= a \frac{d}{dt} \exp^{-kt} + c \\ &= a e^{-kt} \frac{d}{dt} - kt \end{aligned}$$

จะได้ $\text{Drying rate} = a e^{-kt} (-k)$

เมื่อแทนค่า a, k และ c ที่ได้จาก Logarithmic model พร้อมกับเวลาลงไปจะได้อัตราการอบแห้ง ณ เวลานั้น

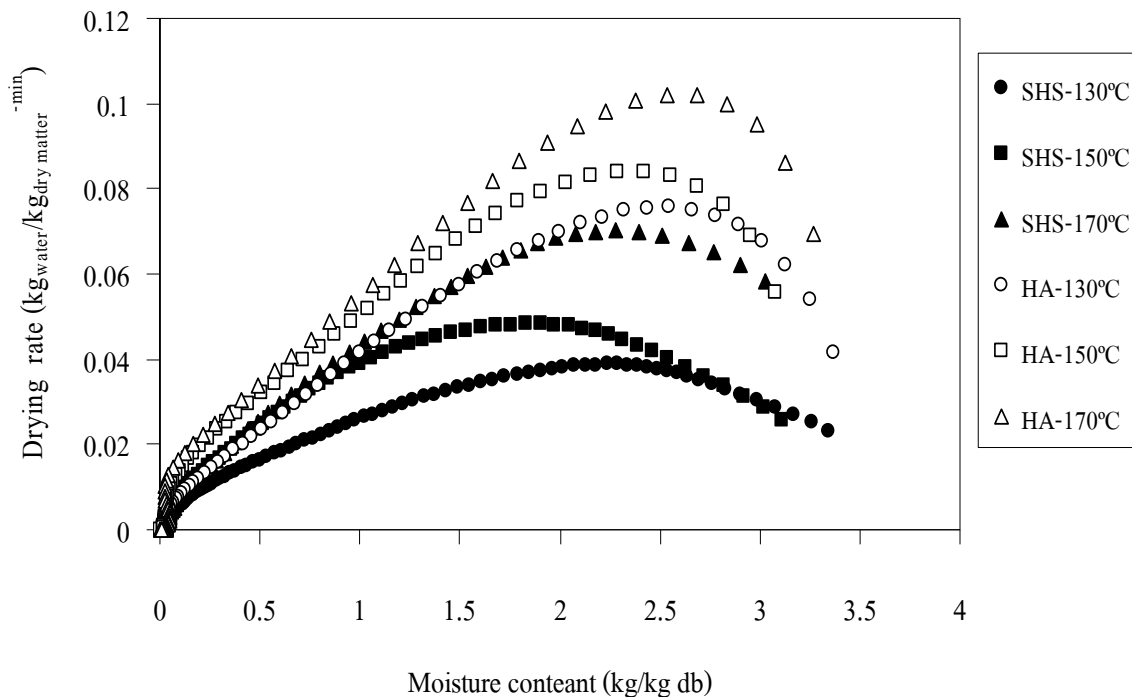


Fig. 10 Effect of drying media on drying rate of taro slices at drying temperatures of 130-170°C

เพื่อหาอุณหภูมิผกผันของเปลือกแผ่นได้ทำการอบแห้งเพิ่มเติมที่อุณหภูมิ 170, 190, 210, 230, และ 250°C แล้วหาอัตราการอบแห้งคงที่ที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งได้ผลดังแสดงใน Fig. 11 โดยจากรูปดังกล่าวพบว่า ในช่วงอุณหภูมิอบแห้งต่ำ การอบแห้งแบบอากาศร้อนมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งแบบไอน้ำร้อนยวดยิ่งมาก เมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น อัตราการอบแห้งของการอบแห้งทั้งสองแบบมีค่าต่างกัน น้อยลง จนกระทั่งถึงอุณหภูมิที่อัตราการอบแห้งของการอบแห้งทั้งสองแบบมีค่าเท่ากัน เรียกว่า อุณหภูมิผกผัน (Inversion temperature) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 247°C ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิผกผัน การอบแห้งแบบไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งแบบอากาศร้อน อุณหภูมิผกผันดังกล่าวถือว่าสูง

มากเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิผกผันของ Tortilla chip (Moreira, 2001) มันฝรั่ง (Tang et al., 2000) และกุ้ง (Prachayawarakorn et al., 2002) ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 130°C 145-165°C และ 140-150°C ตามลำดับ

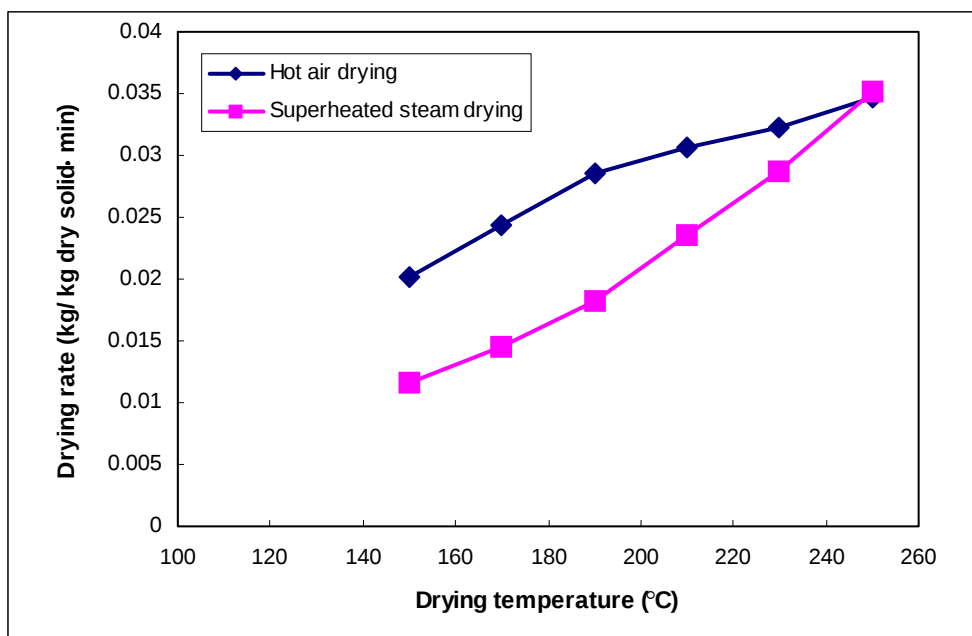


Fig. 11 Constant drying rate of taro slices at various drying temperatures

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลเป็นสมบัติที่ใช้แสดงลักษณะการแพร่ในของเหลวที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ โมเลกุลของตัวถูกละลายจะค่อยๆแพร่กระจายออกไปจนกว่าจะได้เป็นสารละลายเนื้อเดียวกันจึงหยุดการแพร่ซึ่งเป็นสภาวะสมดุล จาก Table 7 ซึ่งแสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของเผือกแผ่นที่ผ่านการ-

Table 7 Effective diffusion coefficients of dried taro slices processed by superheated steam and hot air drying at different temperatures

Drying Medium	T(°C)	D_{eff} (m^2/s)	R^2	χ^2	RMSE
Hot air	130	14.75×10^{-10}	0.9487	0.0027	0.0604
	140	15.29×10^{-10}	0.9458	0.0001	0.0622
	150	16.81×10^{-10}	0.9560	0.0003	0.0625
Superheated steam	130	5.44×10^{-10}	0.8207	0.4641	0.3732
	140	7.41×10^{-10}	0.8699	0.4741	0.3764
	150	9.36×10^{-10}	0.8822	0.5208	0.3822

อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่า เมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลจะเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงขึ้นความชื้นสามารถแพร่ออกมาจากผลิตภัณฑ์ได้เร็วขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลต่ำกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อนสำหรับทุกอุณหภูมิการอบแห้ง

จากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_{eff}) ของเปลือกแผ่นที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ ดังแสดงใน Table 6 และความสัมพันธ์ระหว่าง D_{eff} กับอุณหภูมิในการอบแห้งในรูปแบบของ Arrhenius สามารถหาค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) และ Arrhenius factor (D_0) ของการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่งได้โดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear Regression) ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ โดยได้ค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) และค่า Arrhenius factor (D_0) ของการอบแห้งเปลือกแผ่นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนดังแสดงใน Table 8

Table 8 Activation energy, D_0 , R^2 , χ^2 and RMSE

Drying medium	$D_0(m^2/s)$	$E_a(kJ/mol)$	R^2	χ^2	RMSE
Hot air	9.94×10^{-8}	14.291	0.6967	0.0029	0.054
Superheated steam	10.02×10^{-8}	16.819	0.6662	0.6389	0.799

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ D_0 และ ค่า E_a จาก Table 8 แทนกลับไปในสมการ Arrhenius จะได้สมการในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล ดังนี้

$$D_{eff} = 9.94 \times 10^{-8} \exp\left(\frac{-1719}{T}\right) \text{ สำหรับการอบแห้งด้วยอากาศร้อน}$$

$$D_{eff} = 10.02 \times 10^{-8} \exp\left(\frac{-2,023}{T}\right) \text{ สำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง}$$

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลพบว่า ในช่วงอุณหภูมิอบแห้งเดียวกัน ในกรณีการอบแห้งด้วยอากาศร้อนเปลือกแผ่นมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมากกว่าเนื้อหุ้มแผ่น โดยเนื้อหุ้มแผ่นมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลอยู่ในช่วง $8.61 \times 10^{-10} - 14.63 \times 10^{-10} m^2/s$ (Uengkimbuan et al., 2006) ในขณะที่สำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ $130^\circ C$ พบว่า เปลือกแผ่นมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมากกว่ามันฝรั่งแผ่น โดยมันฝรั่งแผ่นมีค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นประสิทธิผลอยู่ในช่วง $2.0 \times 10^{-10} - 2.2 \times 10^{-10} m^2/s$ (Caixeta et al., 2002)

2. การอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิต่ำ

อิทธิพลของความหนาของผลิตภัณฑ์และอุณหภูมิอบแห้งมีต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งและสมบัติของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง

เมื่อนำเปลือกแผ่นความหนา 1-3 mm มาทำการอบแห้งแบบชั้นบางที่อุณหภูมิ $50-70^\circ C$ และความเร็วลม $0.5 m/s$ ได้จลนพลศาสตร์การอบแห้งดังแสดงใน Fig. 12a-b ซึ่งจากภาพดังกล่าวพบว่า การใช้ความหนาของเปลือกแผ่นน้อย และอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าสูงมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งเปลือกแผ่นที่มีความหนามากและอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าต่ำ เนื่องจากความหนาของเปลือกแผ่นที่มีค่าต่ำ ทำให้น้ำสามารถแพร่จากภายในสู่ผิวของเปลือกโดยใช้ระยะทางสั้น และอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าสูง ทำให้เกิดผลต่างของอุณหภูมิระหว่างตัวกลางให้ความร้อนและผิวเปลือกแผ่นมีค่ามาก จึงเกิดการถ่ายเทความร้อนได้มาก โมเลกุลของน้ำในเปลือกแผ่นจะได้รับพลังงานอย่างรวดเร็ว จึงทำให้น้ำมีอัตราการแพร่และการ

ระเหยสูง ช่วงแรกของการอบแห้งทุกสภาวะ ความชื้นของเปลือกแผ่นลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากผลิตภัณฑ์ยังมีความชื้นอยู่มาก ทำให้อัตราการแพร่ของน้ำจากภายในมาสู่ผิวของผลิตภัณฑ์มีค่าเท่ากับอัตราการระเหยของน้ำที่ผิวของผลิตภัณฑ์ไปสู่อากาศร้อน และเมื่อเวลาการอบแห้งผ่านไป อัตราการอบแห้งมีค่าลดลงเนื่องจากน้ำในผลิตภัณฑ์ลดน้อยลง ส่งผลให้การแพร่ของน้ำจากภายในมาสู่ผิวของผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นช้ากว่าการระเหยของน้ำที่ผิวของผลิตภัณฑ์ไปสู่อากาศร้อน

เมื่อนำผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งมาทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพ พบว่าอุณหภูมิอากาศร้อนเข้ามีผลต่อค่าสีของผลิตภัณฑ์ได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่อใช้อุณหภูมิอากาศร้อนเข้าสูงขึ้น ทำให้ค่าความสว่างและค่าสีแดงลดลง แต่ค่าสีเหลืองเพิ่มขึ้น ดังแสดงใน Table 9 เนื่องจากการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิสูงเป็นการเร่งให้เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดสีน้ำตาลมากขึ้น นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงสีของเปลือกอาจเกิดขึ้นจากการเสื่อมสลายของสาร Anthocyanin ซึ่งเป็นรงควัตถุสีม่วงในเปลือกด้วย โดยความเข้มข้นของ Anthocyanin จะลดลงเมื่อสัมผัสกับความร้อน ยิ่งอุณหภูมิสูงอัตราการลดลงของความเข้มข้นของ Anthocyanin จะมากขึ้น (Verbeyst et al., 2010) อย่างไรก็ดี ความหนาของเปลือกแผ่นไม่มีผลต่อค่าสีของผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญ โดยผลการทดลองที่ได้นี้แตกต่างจากงานวิจัยของ Sa-adchom et al. (2011) ซึ่งเป็นการศึกษาอิทธิพลของความหนาของวัสดุ (1-2 mm) ที่มีต่อลักษณะสีของเนื้อหมูแผ่นที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 140°C ซึ่งจากการศึกษาดังกล่าวพบว่า ความหนาของวัสดุที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เนื้อหมูแผ่นอบแห้งมีค่าความสว่างลดลงในขณะที่ค่าสีแดงเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ก็เนื่องจากว่า ความหนาที่เพิ่มขึ้นทำให้ต้องใช้ระยะเวลาในการอบแห้งที่นานขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดได้มาก ส่งผลกระทบต่อลักษณะสีที่คล้ำขึ้น อย่างไรก็ตามสำหรับในงานวิจัยนี้เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งไม่ได้สูงมากจึงอาจให้ผลที่แตกต่างกัน

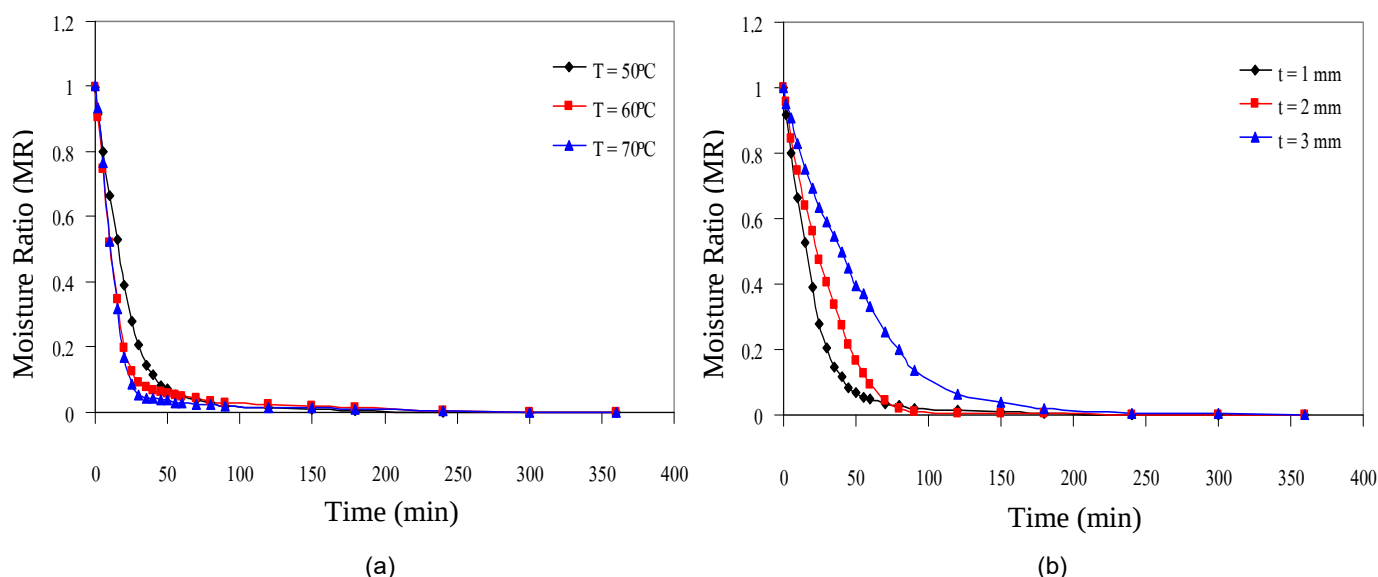


Fig. 12 Drying kinetics of taro slices (a) effect of drying temperature; (b) effect of taro slice thickness

เมื่อพิจารณาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ทางด้านเนื้อสัมผัสพบว่า ความหนาของเปลือกแผ่นมีผลต่อความแกร่งและความแข็งของผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญ โดยเปลือกแผ่นที่มีความหนามากจะมีความแข็งแรงของโครงสร้างมากกว่า จึงสามารถรับแรงได้มากกว่าเปลือกแผ่นที่มีความหนาน้อย เมื่อพิจารณาผล

ของอุณหภูมิอากาศร้อนเข้า พบว่าไม่มีผลต่อความแกร่งและความแข็งของผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังพบว่าไม่มีปัจจัยใดที่มีผลต่อค่าความกรอบของผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงใน Table 9

Table 9 Physical properties of dried taro slices under various drying temperatures and taro slice thickness

Drying conditions		Color			Textural properties		
Temp. (°C)	Thickness (mm)	L	a	b	Stiffness (N/mm)	Hardness (N)	Crispness (no. of peak)
50	1	70.92 ± 2.60 ^c	1.06 ± 0.24 ^c	9.24 ± 1.13 ^a	3.96±1.25 ^{ab}	1.42±0.56 ^a	1.40±0.68 ^a
	2	71.04 ±2.02 ^c	1.04 ± 0.25 ^c	9.20 ± 1.41 ^a	5.25±1.52 ^c	1.69±0.75 ^{ab}	1.30±0.57 ^a
	3	70.96± 2.06 ^c	1.05 ± 0.23 ^c	9.29 ± 1.24 ^a	8.08±1.63 ^e	2.71±0.62 ^{cd}	1.40±0.50 ^a
60	1	70.12 ± 1.40 ^b	0.96 ± 0.19 ^b	9.76 ± 0.89 ^b	3.64±1.16 ^a	1.63±0.53 ^{ab}	1.30±0.47 ^a
	2	69.99 ± 1.55 ^b	0.95 ± 0.25 ^b	9.68 ± 1.09 ^b	6.17±1.65 ^{cd}	2.63±0.83 ^c	1.30±0.57 ^a
	3	70.11 ± 1.59 ^b	0.94 ± 0.21 ^b	9.72 ± 0.91 ^b	8.10±1.83 ^e	2.83±0.97 ^d	1.30±0.57 ^a
70	1	68.46± 2.27 ^a	0.88 ± 0.16 ^a	10.26 ± 1.21 ^c	3.53±1.15 ^a	2.02±0.68 ^b	1.60±0.82 ^a
	2	68.49 ±1.84 ^a	0.85 ± 0.20 ^a	10.28 ± 0.98 ^c	4.11±1.41 ^b	2.27±0.98 ^{bc}	1.25±0.55 ^a
	3	68.51± 1.88 ^a	0.87 ± 0.22 ^a	10.33 ± 0.81 ^c	7.75±2.23 ^d	2.54±1.00 ^c	1.35±0.67 ^a

**Values in the same column with different superscripts mean that the values are significantly different (p < 0.05)

ในส่วนของการศึกษาการหดตัวและการคิ่นตัวในนมพว่องมันเนยของเผือกแผ่นอบแห้ง ได้นิยามเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรเป็นสัดส่วนระหว่างความแตกต่างของปริมาตรวัสดุก่อนและหลังการอบแห้งกับปริมาตรวัสดุก่อนการอบแห้ง ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การคิ่นตัวนิยามเป็นสัดส่วนระหว่างมวลของวัสดุอบแห้งที่เพิ่มขึ้นหลังผ่านการแช่ในนมพว่องมันเนยที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 นาที กับมวลแห้งของเผือกแผ่น โดยจากผลการศึกษาดังแสดงใน Fig. 13 a-b พบว่า ความหนาของเผือกแผ่นไม่มีผลต่อการหดตัวแต่มีผลต่อการคิ่นตัวในนมพว่องมันเนยของผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่อเผือกแผ่นมีความหนามากขึ้น จะมีความสามารถในการคิ่นตัวน้อยลง แสดงให้เห็นว่าแม้ความหนาของเผือกแผ่นจะไม่มีผลต่อปริมาตรปรากฏของผลิตภัณฑ์ แต่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของผลิตภัณฑ์ในระหว่างการอบแห้ง ทำให้มีความสามารถในการดูดซับน้ำนมของตัวผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกัน นอกจากนี้อาจเกิดเนื่องจากเผือกแผ่นที่มีความหนามาก ต้องใช้เวลาในการอบแห้งนาน อาจทำให้เกิดผิวแข็ง (Case hardening) ของผลิตภัณฑ์ได้มากกว่าเผือกแผ่นที่มีความหนาน้อย ทำให้ผลิตภัณฑ์ดูดซับน้ำนมได้ยากเมื่อนำมาทดสอบการคิ่นตัวในนมพว่องมันเนย (Achant and Okos, 1996) นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิอากาศร้อนเข้าไม่มีผลต่อการหดตัวและการคิ่นตัวในนมพว่องมันเนยของผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญ

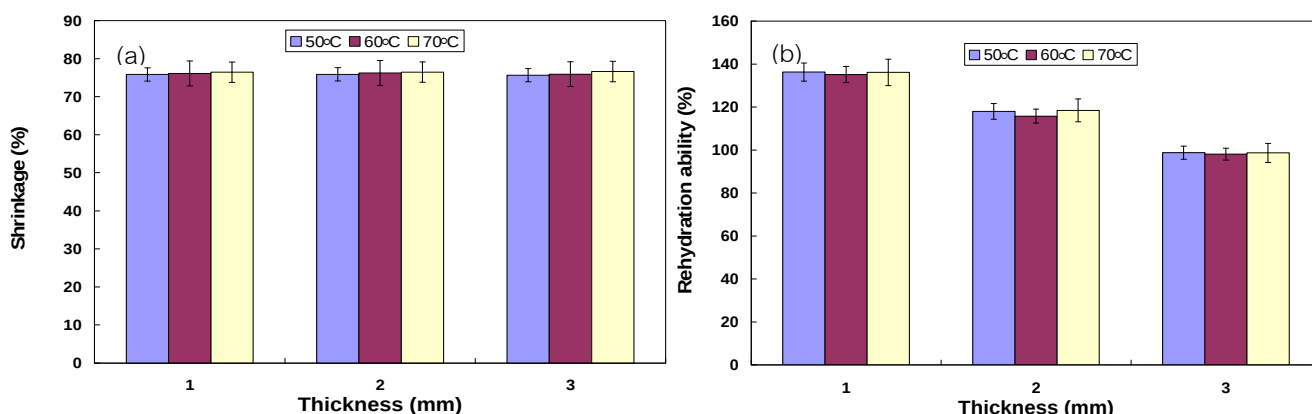


Fig. 13 Effect of drying temperature and taro slice thickness on physical properties of dried taro slices (a) shrinkage; (b) rehydration ability

อิทธิพลของลักษณะพื้นผิวที่มีต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งและสมบัติของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง

ได้ศึกษาอิทธิพลของลักษณะพื้นผิวของวัสดุโดยนำเผือกหอมพันธุ์เชียงใหม่มาล้างแล้วปอกเปลือก หลังจากนั้นนำมาหั่นตามแนวขวางด้วยเครื่องหั่นไฟฟ้า (Savioli, model 300S, Italy) ให้ได้ความหนา 2 mm อีกส่วนหนึ่งนำมาหั่นด้วยอุปกรณ์การหั่นแบบลอนที่สร้างขึ้นโดยเฉพาะ ที่ความหนาเท่ากัน หลังจากนั้นนำไปผ่านแบบพิมพ์สแตนเลสหั่นให้ได้ความกว้างและยาวด้านละ 3 cm แล้วจึงนำไปหาค่าความชื้นเริ่มต้นตามมาตรฐาน AOAC จากนั้นนำไปอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบภาดที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70°C ความเร็วลมร้อน 0.5 และ 1 m/s จนกระทั่งได้ความชื้นสุดท้ายอยู่ในช่วง 4-9% d.b. (แต่ละสภาวะการทดลองทำซ้ำ 2 ครั้ง) แล้วจึงนำเผือกแผ่นอบแห้งที่ได้ไปวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ต่อไป

จลนพลศาสตร์การอบแห้งเผือกแผ่นที่สภาวะต่างๆ ได้แสดงไว้ใน Fig. 14 โดยจากภาพประกอบดังกล่าวจะเห็นว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิและความเร็วลมสูงสามารถลดความชื้นในผลิตภัณฑ์ได้เร็วกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิและความเร็วลมต่ำ สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องจากว่าอุณหภูมิอบแห้งที่สูงส่งผลให้ผลต่างระหว่างอุณหภูมิของตัวกลางและผลิตภัณฑ์มีค่ามาก อัตราการถ่ายเทความร้อนจึงสูง ดังนั้นความชื้นในผลิตภัณฑ์จึงสามารถแพร่ออกมาได้เร็วกว่ากรณีอุณหภูมิอบแห้งที่ต่ำ ส่วนความเร็วลมที่สูงจะทำให้ลมร้อนสามารถสัมผัสกับผิวของผลิตภัณฑ์ได้ดีส่งผลให้อุณหภูมิแพร่ไปสู่กระแสมร้อนได้อย่างรวดเร็ว เมื่อพิจารณาอิทธิพลของลักษณะพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ที่ส่งผลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งพบว่า เผือกแผ่นผิวเรียบสามารถคายความชื้นในผลิตภัณฑ์ได้เร็วกว่าเผือกแผ่นผิวลอน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าพื้นผิวของเผือกแผ่นผิวเรียบสามารถสัมผัสกับกระแสมร้อนได้อย่างเต็มหน้าตัด ส่วนเผือกแผ่นผิวลอนแม้จะมีพื้นที่ผิวมากกว่าแต่ไม่สามารถสัมผัสกับกระแสมร้อนได้อย่างเต็มที่

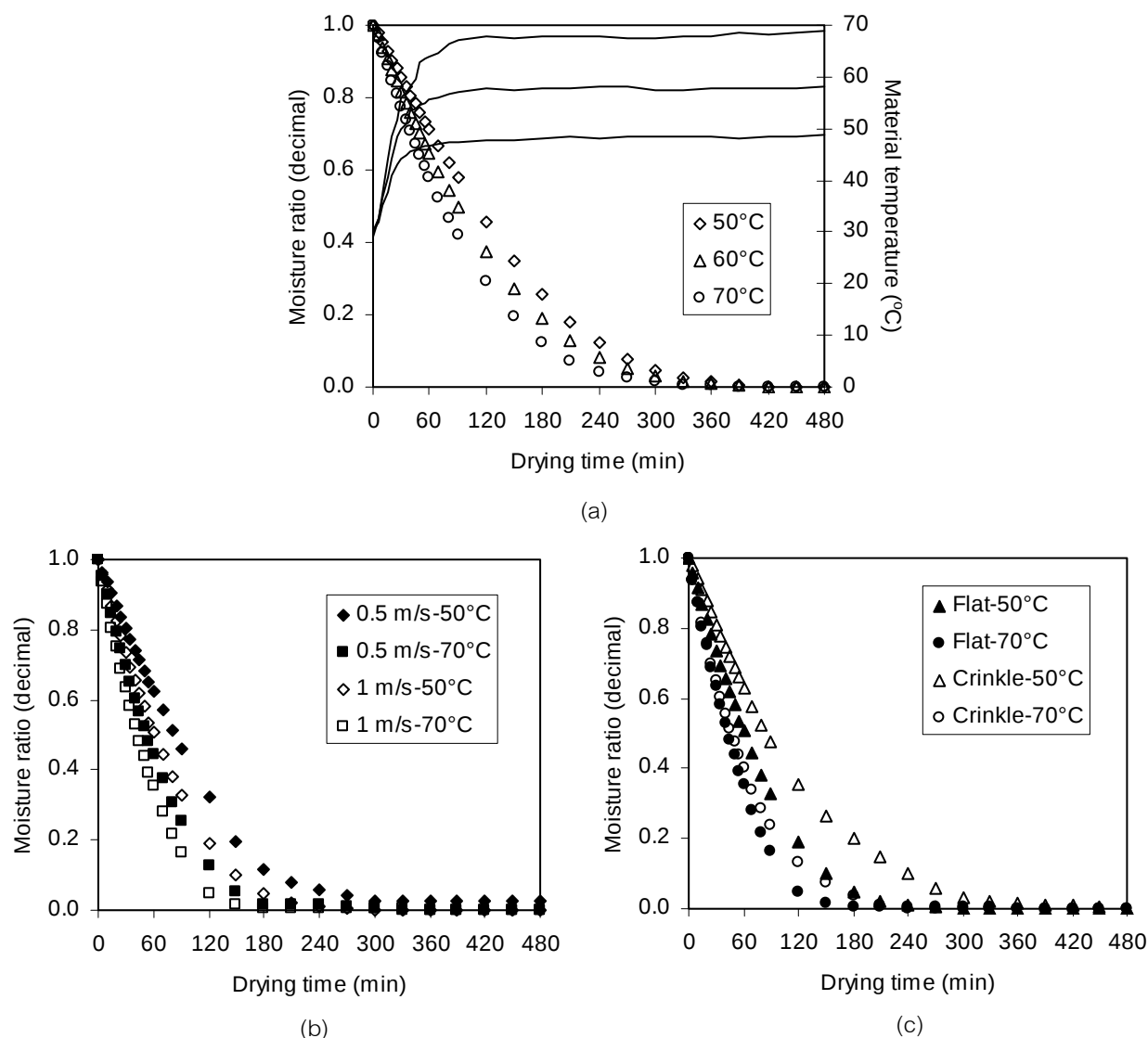


Fig. 14 Drying kinetics of taro slices (a) effect of drying temperature (crinkle cut sample at air velocity of 0.5 m/s) (b) effect of air velocity (flat cut sample) and (c) effect of material surface characteristic (air velocity of 1 m/s)

ลักษณะสีและเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรของเปลือกอบกรอบที่ได้แสดงไว้ใน Table 10 โดยจากตารางดังกล่าวพบว่า เมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้นค่าความสว่างและค่าสีแดงของผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ค่าสีเหลืองมีแนวโน้มสูงขึ้น ซึ่งลักษณะสีดังกล่าวอาจเป็นผลเนื่องจากผลิตภัณฑ์เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลและเกิดการเสื่อมสภาพของแอนโทไซยานินซึ่งเป็นรงควัตถุในเปลือก อย่างไรก็ตามเปลือกแผ่นที่ผ่านการอบแห้งที่ความเร็วลมต่างๆ กันมีค่าความสว่าง ค่าสีแดง และค่าสีเหลือง ที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) นอกจากนี้ยังพบว่า เปลือกแผ่นผิวเรียบมีค่าความสว่างมากกว่าเปลือกแผ่นผิวลอนเล็กน้อย แต่ในภาพรวมถือว่า ลักษณะพื้นผิวของวัสดุส่งผลน้อยมากต่อค่าสีของผลิตภัณฑ์ เมื่อพิจารณาการหดตัวเชิงปริมาตรของผลิตภัณฑ์พบว่า เปลือกแผ่นซึ่งผ่านการแห้งที่อุณหภูมิและความเร็วลมสูงมีการหดตัวมากกว่าเปลือกแผ่นซึ่งผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิและความเร็วลมต่ำ ทั้งนี้ก็เนื่องจากกว่าอุณหภูมิ

และความเร็วลมที่สูงส่งผลให้ความชื้นในเปลือกแผ่นลดลงอย่างรวดเร็วทำให้โครงสร้างของเปลือกแผ่นเกิดการทรุดตัว (Collapse) ระดับการหดตัวจึงสูง โดยการทรุดตัวของโครงสร้างของวัสดุทางการเกษตรจะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงกว่าอุณหภูมิในการทรุดตัว (Collapse temperature) ของวัสดุ (del Valle et al., 1998) อย่างไรก็ตามพบว่า ลักษณะพื้นผิวของวัสดุไม่ได้ส่งผลกระทบต่อเปอร์เซ็นต์การหดตัว

จากคุณสมบัติเชิงกลของเปลือกแผ่นที่ผ่านการอบแห้งที่สภาวะต่างๆ ดังแสดงใน Table 11 พบว่า อุณหภูมิและความเร็วลมที่สูงขึ้นส่งผลให้เปลือกแผ่นมีค่าความแข็งมากขึ้นแต่มีค่าความแกร่งและค่าความกรอบที่ไม่แตกต่างกันมากนัก โดยค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นอาจเป็นผลจากการเกิดแผ่นแข็ง (Crust) ที่ผิวของผลิตภัณฑ์ ในขณะที่เปลือกแผ่นผิวล่อนมีแนวโน้มให้ค่าความแข็งมากกว่าเปลือกแผ่นผิวเรียบเล็กน้อย

Table 10 Physical properties of taro slices dried at different drying conditions

Drying temperature (°C)	Air velocity (m/s)	Surface characteristics	Lightness (L)	Redness (a)	Yellowness (b)	Volumetric Shrinkage (%)
50	0.5	Flat	71.25±2.39 ^f	1.06±0.20 ^c	9.20±0.87 ^a	69.85±1.80 ^b
	1	Crinkle	70.53±2.44 ^{ef}	1.03±0.26 ^c	9.26±1.01 ^a	73.91±2.02 ^{de}
	0.5	Flat	70.53±1.94 ^{ef}	1.07±0.34 ^c	9.26±0.96 ^a	69.60±1.86 ^b
	1	Crinkle	70.08±1.84 ^{de}	1.04±0.38 ^{bc}	9.22±0.88 ^{ab}	72.45±1.83 ^c
60	0.5	Flat	69.26±2.20 ^{cd}	0.94±0.24 ^{abc}	9.59±1.07 ^{ab}	69.60±1.33 ^b
	1	Crinkle	69.36±1.77 ^{cd}	0.94±0.19 ^{abc}	9.70±0.73 ^{abc}	78.37±1.56 ^f
	0.5	Flat	68.86±1.60 ^{bc}	0.96±0.29 ^{abc}	9.83±1.07 ^{bc}	66.60±2.25 ^{bc}
	1	Crinkle	68.99±1.59 ^{abc}	0.96±0.32 ^{abc}	9.83±0.97 ^{bc}	70.07±2.70 ^{bc}
70	0.5	Flat	68.44±2.46 ^{abc}	0.83±0.13 ^a	10.39±1.07 ^{de}	75.49±1.95 ^e
	1	Crinkle	68.06±2.26 ^{ab}	0.84±0.14 ^a	10.20±1.37 ^{cd}	79.32±2.26 ^f
	0.5	Flat	67.68±1.55 ^a	0.88±0.42 ^a	10.22±1.46 ^{cd}	78.54±2.34 ^f
	1	Crinkle	67.76±1.33 ^a	0.90±0.34 ^{ab}	10.78±1.02 ^e	79.69±1.79 ^f

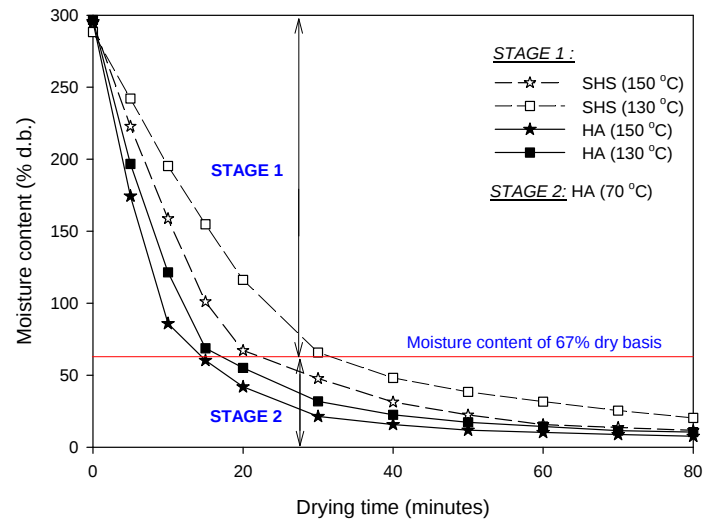
Table 11 Mechanical properties of taro slices dried at different drying conditions

Drying temperature (°C)	Air velocity (m/s)	Surface characteristics	Mechanical properties		
			Hardness (N)	Stiffness (N/mm ²)	Crispiness
50	0.5	Flat	4.92±1.80 ^{ab}	5.45±2.70 ^a	1.33±0.62 ^{ab}
	1	Crinkle	5.96±1.60 ^a	5.28±3.80 ^a	1.37±0.71 ^{ab}
	0.5	Flat	5.04±1.86 ^{bc}	4.90±3.35 ^a	1.33±0.81 ^{ab}
	1	Crinkle	6.95±1.83 ^{ab}	5.99±2.66 ^a	1.33±0.61 ^{bc}
60	0.5	Flat	6.20±1.33 ^{bcd}	3.87±3.29 ^a	1.57±0.75 ^{ab}
	1	Crinkle	7.42±1.56 ^{bc}	4.88±4.39 ^a	1.33±0.33 ^c
	0.5	Flat	7.25±2.25 ^{cde}	5.79±3.83 ^a	1.77±0.86 ^c
	1	Crinkle	7.87±2.70 ^{cde}	4.37±2.54 ^a	1.77±0.86 ^{ab}
70	0.5	Flat	7.71±1.65 ^{ef}	5.20±3.85 ^a	1.30±0.65 ^a
	1	Crinkle	9.01±1.52 ^{def}	5.02±3.57 ^a	1.13±0.33 ^{ab}
	0.5	Flat	8.84±2.04 ^f	5.71±4.45 ^f	1.23±0.50 ^{ab}
	1	Crinkle	9.77±2.01 ^f	5.28±3.71 ^f	1.27±0.73 ^{ab}

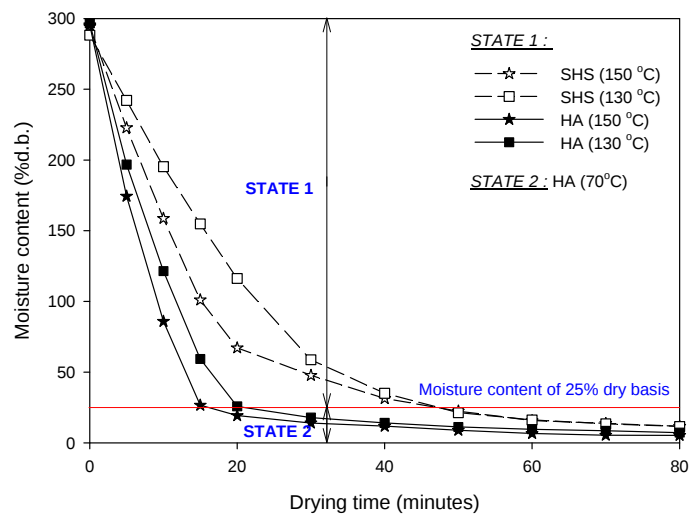
3. การอบแห้งแบบสองขั้นตอนโดยการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงต่อการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ

ได้นำเปลือกพันธุ์เสียงใหม่ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 298±2 %d.b. มาหั่นเป็นแผ่นขนาด 30 mm x 30 mm x 3 mm แล้วนำมาอบด้วยเทคนิคการอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอน กล่าวคือ ขั้นตอนที่ 1 อบด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 130 และ 150 °C ความเร็วของตัวกลางในการอบแห้งประมาณ 1.0 m/s จนกระทั่งได้ความชื้นประมาณ 25 และ 67 %d.b. ตามลำดับ ต่อจากนั้นนำเปลือกแผ่นที่ผ่านการอบแห้งในขั้นตอนที่ 1 ไปอบด้วยอากาศที่อุณหภูมิ 70°C ในขั้นตอนที่ 2 โดยใช้ความเร็วของอากาศ 0.5 m/s เพื่อให้ได้ค่าความชื้นสุดท้ายของเปลือกแผ่นประมาณ 4-8 % d.b. โดยในแต่ละเงื่อนไขการอบแห้งจะทดลอง 2 ซ้ำ

จลนพลศาสตร์การอบแห้ง



(a)



(b)

Fig. 15 Influences of drying medium and temperature of the 1st stage drying on moisture changes of taro slices (a) Final moisture content of the 1st stage drying of 25%d.b. b) Final moisture content of the 1st stage drying of 67%d.b.

NB:

** SHS (150°C) is superheated steam drying at 150°C

HA (130°C) is hot air drying at 130°C

จากการศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้ง พบว่า ความชื้นของเปลือกแผ่นที่ผ่านกระบวนการอบแห้ง ในขั้นตอนที่ 1 จะลดลง เมื่ออุณหภูมิของตัวกลางและเวลาของการอบแห้งเพิ่มขึ้น (ดังแสดงใน Fig. 15) และที่อุณหภูมิอบแห้งเดียวกันการอบแห้งด้วยอากาศร้อนจะสามารถลดปริมาณความชื้นได้เร็วกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ปรากฏการณ์นี้อาจมีสาเหตุเนื่องจากเม็ดแป้งที่ผิวของเปลือกแผ่นที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะเกิด Gelatinization ได้เร็วและสมบูรณ์กว่าจึงทำให้ยากต่อการถ่ายโอนความร้อนและ

การเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในออกมาสู่ตัวกลางอบแห้ง ดังนั้นการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจึงมีอัตราการอบแห้งที่ต่ำกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อน

หากพิจารณาอิทธิพลของความชื้นสุดท้ายในขั้นตอนที่ 1 ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นในขั้นตอนที่ 2 ดังแสดงใน Fig. 16 พบว่า ที่ความชื้นสุดท้ายในขั้นตอนที่ 1 ประมาณ 67 %d.b. ความชื้นในเนื้อเยื่อมีแนวโน้มลดลงได้มากกว่าที่ความชื้น 25 % d.b. เนื่องจากความชื้นในเนื้อเยื่อยังคงมีปริมาณที่มากกว่า นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อความชื้นหลังการอบแห้งในขั้นตอนที่ 1 สูง (67%d.b.) จะส่งผลให้ความชื้นสุดท้ายหลังการอบแห้งในขั้นตอนที่ 2 สูงด้วย โดยผลจะเห็นชัดเจนมากในกรณีการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งในขั้นตอนแรก

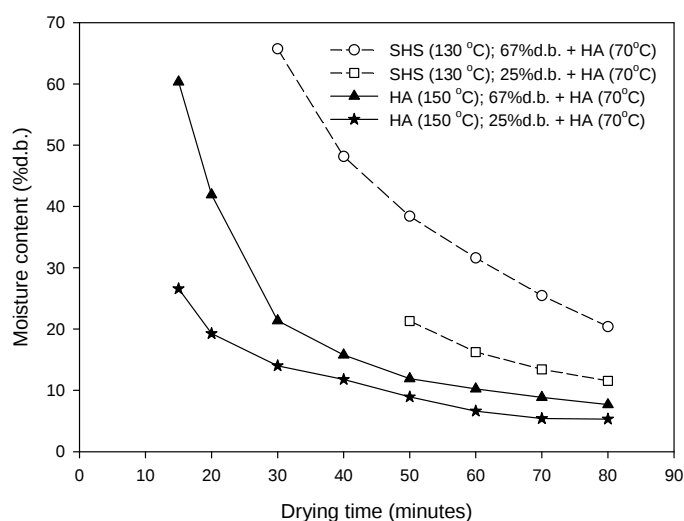


Fig. 16 Influence of intermediate moisture content on moisture changes in the 2nd stage drying

NB:

** SHS (130°C); 67%d.b. + HA (70°C) is superheated steam drying at 130°C to the moisture content of 67%d.b. followed by hot air drying at 70°C

** HA (150°C); 25%d.b. + HA (70°C) is hot air drying at 130°C to the moisture content of 25%d.b. followed by hot air drying at 70°C

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลเป็นลักษณะการแพร่ในของเหลวที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ โมเลกุลของตัวถูกละลายจะค่อยๆแพร่กระจายออกไปจนกว่าจะได้เป็นสารละลายเนื้อเดียวกันจึงหยุดการแพร่ซึ่งเป็นสภาวะสมดุล จาก Table 12 ซึ่งแสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของเนื้อเยื่อหลังการอบแห้งแบบสองขั้นตอน พบว่า เมื่ออุณหภูมิอบแห้งในขั้นตอนที่ 1 สูงขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลจะเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้ความชื้นสามารถแพร่ออกมาจากผลิตภัณฑ์ได้เร็วขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า เนื้อเยื่อที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งในขั้นตอนแรกมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลน้อยกว่ากรณีที่อบแห้งด้วยอากาศร้อน

Table 12 Effective diffusion coefficients of dried taro slices prepared by different drying conditions

Drying conditions**	Effective diffusivity (D_{eff}) (m^2/s)
SHS(150°C),25%d.b. +HA(70°C)	6.589×10^{-9}
SHS(130°C),25%d.b. +HA(70°C)	6.383×10^{-9}
SHS(150°C),67%d.b. +HA(70°C)	6.589×10^{-9}
SHS(130°C),67%d.b. +HA(70°C)	5.031×10^{-9}
HA (150°C), 25%d.b. +HA(70°C)	9.200×10^{-9}
HA (130°C), 25%d.b. +HA(70°C)	8.285×10^{-9}
HA (150°C), 67%d.b. +HA(70°C)	8.051×10^{-9}
HA (130°C), 67%d.b. +HA(70°C)	7.169×10^{-9}

** HA (130°C), 25%d.b. +HA (70°C) is hot air drying at 130°C to the moisture content of 25%d.b. followed by hot air drying at 70°C

คุณภาพด้านสี

จากการตรวจสอบคุณภาพด้านสีของเผือกก่อนและหลังกระบวนการอบแห้งแบบสองขั้นตอนพบว่า เผือกแผ่นที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งตามด้วยอากาศร้อนจะมีค่าสีแดง (a) และค่าสีเหลือง (b) มากกว่า ในขณะที่ค่าความสว่าง (L) น้อยกว่าเผือกแผ่นที่ผ่านการอบด้วยอากาศร้อนในทั้งสองขั้นตอน (ดู Table 13) และสำหรับกรณีการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งในขั้นตอนแรกพบว่า เมื่อเพิ่ม

Table 13 Color parameters of taro slices dried by superheated steam and hot air drying at the 1st stage followed by hot air drying at 70°C (final moisture content of 4-8 %d.b.)

Drying conditions**	Color parameters		
	L- value	a- value	b-value
SHS (150°C), 25%d.b.	61.47 ± 2.50^c	3.23 ± 0.44^b	16.00 ± 1.30^g
SHS (130°C), 25%d.b.	49.91 ± 5.08^a	6.05 ± 0.85^d	13.54 ± 0.98^d
SHS (150°C), 67%d.b.	52.49 ± 3.36^b	4.88 ± 0.97^c	16.02 ± 0.85^g
SHS (130°C), 67%d.b.	50.29 ± 4.25^a	6.14 ± 1.05^d	13.42 ± 3.57^d
HA (150°C), 25%d.b.	71.05 ± 0.95^{de}	1.09 ± 0.10^a	8.45 ± 0.56^b
HA (130°C), 25%d.b.	70.25 ± 1.31^{de}	1.18 ± 0.15^a	9.61 ± 0.68^c
HA (150°C), 67%d.b.	71.99 ± 2.49^e	1.13 ± 0.22^a	8.09 ± 1.04^b
HA (130°C), 67%d.b.	70.60 ± 2.59^{de}	1.12 ± 0.13^a	9.30 ± 0.36^c
Fresh taro slices	77.88 ± 1.53	1.78 ± 0.31	9.52 ± 0.71

**Values in the same column with different superscripts mean that the values are significantly different ($p < 0.05$)

อุณหภูมิอบแห้งในขั้นตอนที่ 1 จะส่งผลให้ค่า L และ b มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่า a มีแนวโน้มลดลง อย่างไรก็ตามในกรณีของการอบแห้งด้วยอากาศร้อนในขั้นตอนแรกนั้น ผลของอุณหภูมิอบแห้งในขั้นตอนที่ 1 ไม่ชัดเจนมากนัก นอกจากนี้ยังพบว่า ความชื้นหลังการอบแห้งในขั้นตอนที่ 1 มีผลน้อยมากต่อคุณภาพด้านสี เมื่อเปรียบเทียบกับอิทธิพลของชนิดของตัวกลางและอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งในขั้นตอนที่ 1

คุณภาพด้านการหดตัว

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของชนิดของตัวกลางในการอบแห้งในขั้นตอนที่ 1 ที่มีต่อการหดตัวของเผือก ดังแสดงใน Fig. 17 พบว่า เผือกแผ่นที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนจะมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวมากกว่าที่อบด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เนื่องจากการอบด้วยอากาศร้อน ปริมาณน้ำในเผือกแผ่นจะถูกดึงออกอย่างรวดเร็ว (Fig. 15) จึงทำให้โครงสร้างภายในเกิดการทรุดตัว (Collapse) ในขณะที่การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งนั้น อุณหภูมิผลิตภัณฑ์ที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็วอันเนื่องมาจากการควบแน่นที่ผิว จะทำให้น้ำภายในผลิตภัณฑ์กลายเป็นไอน้ำอย่างรวดเร็ว ส่งผลความดันภายในวัสดุสูงขึ้น ผลิตภัณฑ์จึงมีลักษณะการพองตัวบางส่วน ทำให้เปอร์เซ็นต์การหดตัวน้อย ผลการทดลองนี้มีลักษณะสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jamradloedluk et al. (2007) สำหรับอิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งในขั้นตอนที่ 1 ที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การหดตัวพบว่า อุณหภูมิที่สูงขึ้นมีแนวโน้มให้การหดตัวที่น้อยลง

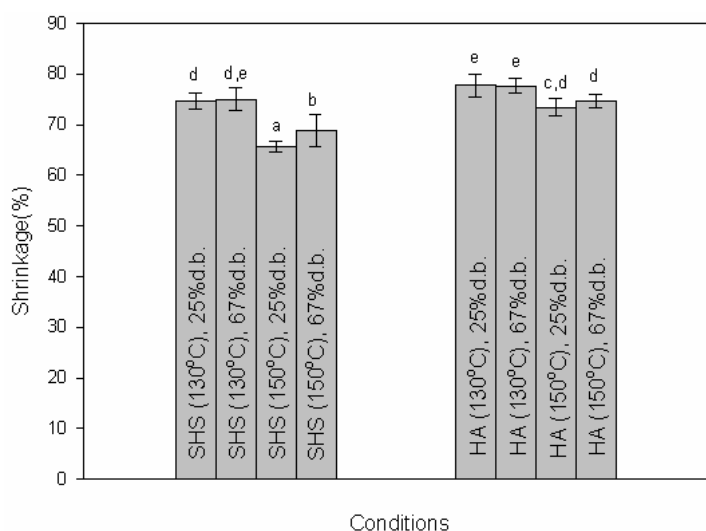


Fig. 17 Degree of shrinkage of taro slices dried by two stage drying process

คุณภาพด้านเนื้อสัมผัส

Fig. 18 แสดงการเปรียบเทียบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส ซึ่งได้แก่ ค่าความแกร่ง ความแข็ง และความกรอบ ของเผือกแผ่นหลังการอบแห้งที่สภาวะต่างๆ โดยจะเห็นว่า เผือกแผ่นที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งในขั้นตอนแรกจะมีค่าความแกร่ง ค่าความแข็งและความกรอบมากกว่าเผือกแผ่นที่ผ่านการอบด้วยอากาศร้อน ทั้งนี้อาจเนื่องจากว่าในกรณีของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งเม็ดแป้งที่ผิวจะเกิด gelatinization อย่างสมบูรณ์ และ crust ที่ผิวของผลิตภัณฑ์ค่อนข้างหนากว่ากรณีการอบด้วยอากาศร้อน ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งและความแกร่งมากกว่า ส่วนค่าความกรอบนั้น เนื่องจากการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์สูงขึ้นถึง 100 °C ในระยะเวลาอันรวดเร็ว ทำให้ความชื้นในผลิตภัณฑ์กลายเป็นไอน้ำ เกิดรูพรุนขนาดใหญ่จึงทำให้มีความกรอบมากกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อน

(Jamradloedluk et al., 2007) สำหรับอิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งในขั้นตอนที่ 1 และความชื้นหลังการอบแห้งในขั้นตอนที่ 1 ที่มีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสพบว่า อิทธิพลของทั้งสองตัวแปรจะปรากฏอย่างชัดเจนในกรณีของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งในขั้นตอนแรก กล่าวคือ อุณหภูมิที่สูงขึ้นหรือความชื้นหลังการอบแห้งในขั้นตอนที่ 1 ที่น้อยลงจะส่งผลให้ค่าความแกร่ง ค่าความแข็ง และค่าความกรอบลดลง ส่วนกรณีของการอบแห้งด้วยอากาศร้อนในขั้นแรกนั้น อุณหภูมิอบแห้งในขั้นตอนที่ 1 จะส่งผลต่อค่าความแกร่งเพียงอย่างเดียว ในขณะที่ความชื้นหลังการอบแห้งในขั้นตอนที่ 1 ไม่มีอิทธิพลต่อทั้งค่าความแกร่ง ค่าความแข็ง และค่าความกรอบ

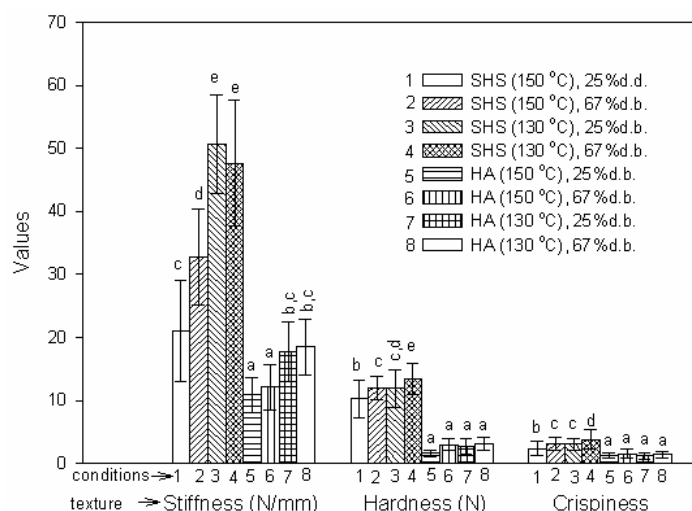


Fig. 18 Textural properties of taro slices dried by two stage drying process at different conditions to the final moisture content of 4-8 %d.b.

คุณภาพด้านการคั่ว

Fig. 19 ซึ่งแสดงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์การคั่ว พบว่า ในช่วงแรกของการคั่ว (0 - 1.5 นาที) อุณหภูมิอบแห้งในขั้นตอนที่ 1 จะไม่มีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์การคั่วมากนัก หลังจากนั้น (ช่วงเวลาที่มากกว่า 1.5 นาที) ผีอกแผ่นที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิสูงจะสามารถคั่วได้ดีกว่าผีอกที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ผลการทดลองนี้มีลักษณะสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nathakaranakule et al. (2006) ทั้งนี้เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะเกิดรูพรุนขนาดใหญ่จึงทำให้น้ำมันแทรกซึมเข้าไปได้ง่าย เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การคั่วของผีอกแผ่นหลังการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน พบว่า การอบแห้งด้วยอากาศร้อนจะให้เปอร์เซ็นต์การคั่วที่ดีกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ทั้งนี้เนื่องจากผีอกที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะมีผิวปิด เพราะการหลอมรวมกันของเม็ดแป้ง ทำให้น้ำมันซึมผ่านได้ยาก สำหรับอิทธิพลของความชื้นหลังการอบแห้งในขั้นตอนที่ 1 พบว่า ไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจนต่อเปอร์เซ็นต์การคั่ว

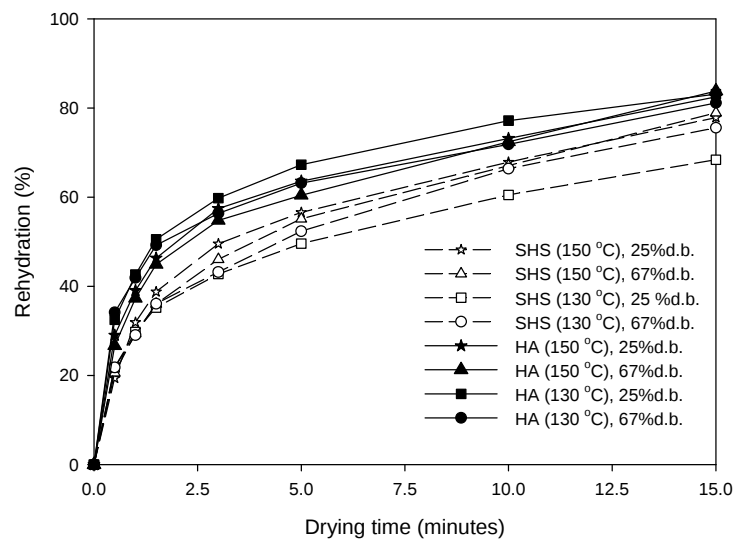


Fig. 19 Degree of rehydration of taro slices dried by two stage drying process at different conditions to the final moisture content of 4-8 %d.b.

4. การวิเคราะห์ปรากฏการณ์การถ่ายเทของเนื้อเยื่อระหว่างการอบแห้งโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

สมบัติทางกายภาพของเนื้อเยื่อที่ใช้ในการอบแห้ง

แผ่นเนื้อเยื่อที่ใช้ในการอบแห้งมีความกว้างและยาวด้านละ 3 cm หน้า 1 และ 3 mm มีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 288 -377 % d.b. โดยคุณสมบัติทางกายภาพและทางความร้อนของเนื้อเยื่อแผ่นได้แสดงไว้ใน Table 14

Table 14 Physical and thermal properties of fresh taro slices with the thickness of 1 and 3 mm

Material properties	Material thickness (mm)	Drying temperature (°C)		
		70	90	110
Thermal conductivity (W/mK)	1,3	0.735	0.735	0.735
Specific heat (J/kgK)	1,3	4,210.5	4,210.5	4,210.5
Density (kg/m ³)	1,3	1,482	1,482	1,482
Diffusion coefficient (m ² /s)	1	5.17 ×10 ⁻¹⁰	6.76 ×10 ⁻¹⁰	9.58 ×10 ⁻¹⁰
	3	2.60 ×10 ⁻¹⁰	3.99 ×10 ⁻¹⁰	5.97 ×10 ⁻¹⁰
Heat transfer coefficient (W/m ² K)	1	22.18	22.3	22.36
	3	22.18	22.3	22.36
Mass transfer coefficient (m/s)	1	1.54 ×10 ⁻⁵	1.83 ×10 ⁻⁵	1.90×10 ⁻⁵
	3	9.74×10 ⁻⁶	1.30 ×10 ⁻⁵	1.36 ×10 ⁻⁶

สำหรับคุณสมบัติต่างๆ ของเปลือกแผ่นสดใน Table 14 นั้นได้มาจากการวัดค่าโดยตรงและการคำนวณทางทฤษฎี ซึ่งค่าที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific heat) ค่าความหนาแน่น (Density) และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (Diffusion coefficient) ส่วนค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer coefficient) และ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร (Mass Transfer Coefficient)

ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเปลือกแผ่นอบแห้งโดยใช้ซอฟต์แวร์สำเร็จรูป COMSOL MultiphysicsTM Software (Version 3.3a)

การทำนายลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเปลือกแผ่นอบแห้งโดยใช้ซอฟต์แวร์สำเร็จรูป COMSOL MultiphysicsTM Software (Version 3.3a) ทำได้โดยการสมมติให้แผ่นเปลือกมีลักษณะเป็นแผ่นแบนเรียบ (Fat Plat) มีขนาดความยาวด้านละ 0.03 เมตร ความหนา 0.001 และ 0.003 เมตร ส่วนคุณสมบัติต่างๆ ของเปลือกแผ่นจะใช้ค่า ดังแสดงใน Table 14 ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมแสดงไว้ใน Figs. 20-27 โดยจากภาพประกอบดังกล่าว พบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงทำให้ความร้อนสามารถกระจายตัวจากที่ผิวเข้าสู่ใจกลางของวัสดุได้เร็วกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำโดยลักษณะการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะเริ่มจากบริเวณขอบและผิวด้านนอกของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากบริเวณเหล่านี้สัมผัสกับอากาศร้อนโดยตรง และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของความหนาที่มีผลต่อลักษณะการกระจายตัวของความร้อนจะพบว่า ที่อุณหภูมิและเวลาการอบแห้งเดียวกันผลิตภัณฑ์ที่บาง (1 mm) มีลักษณะการกระจายตัวของความร้อนได้เร็วกว่าผลิตภัณฑ์ที่หนา (3 mm)

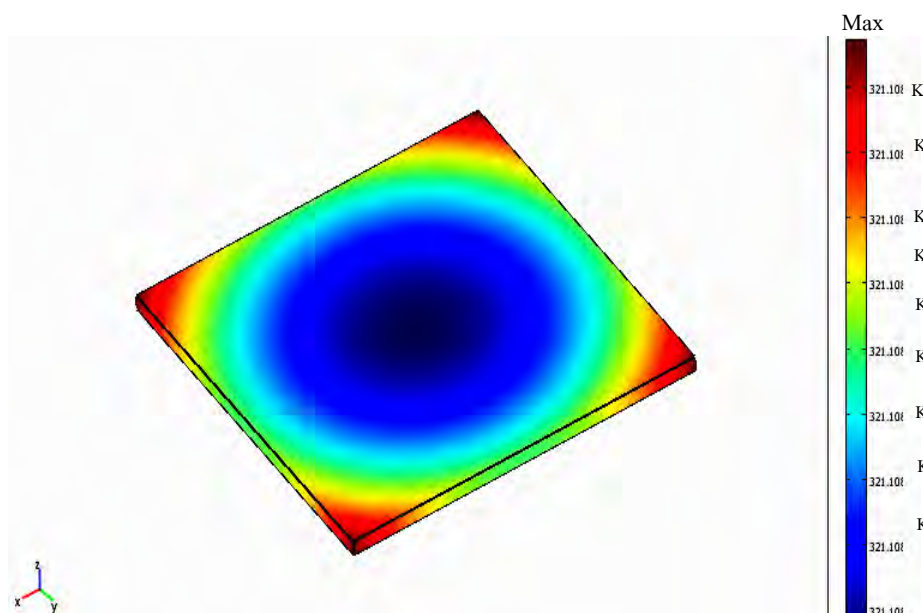


Fig. 20 Temperature gradient at the surface of 1 mm-taro slice dried at 70°C for 2 min

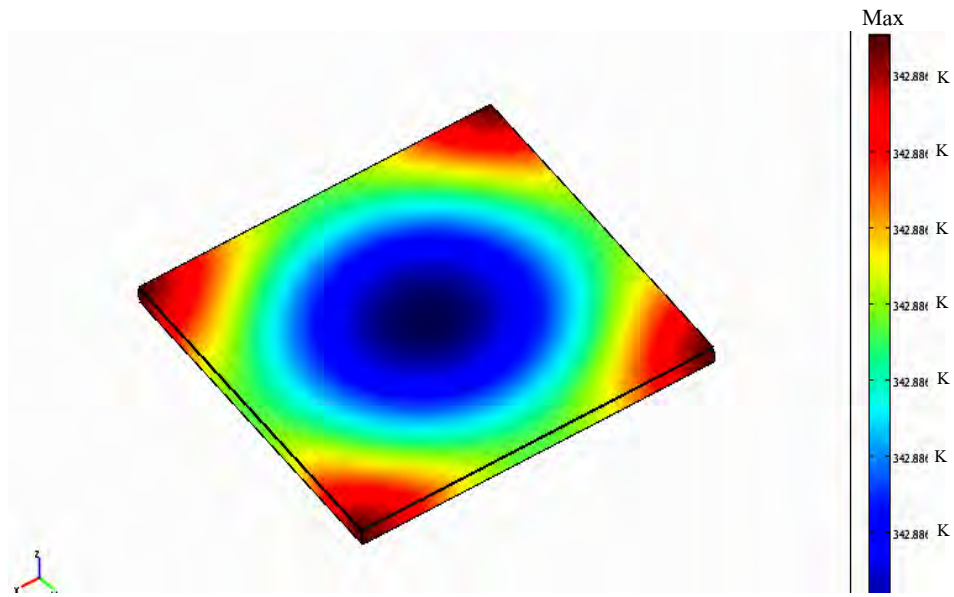


Fig. 21 Temperature gradient at the surface of 1 mm-taro slices dried at 70°C for 350 min

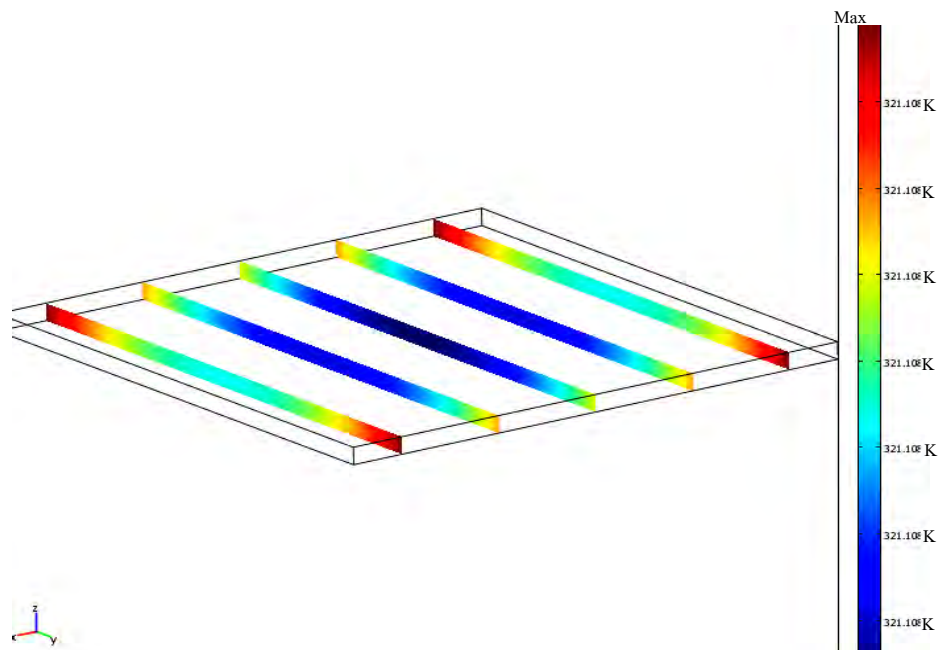


Fig. 22 Temperature gradient at the cross section of 1 mm-taro slice dried at 70°C for 2 min

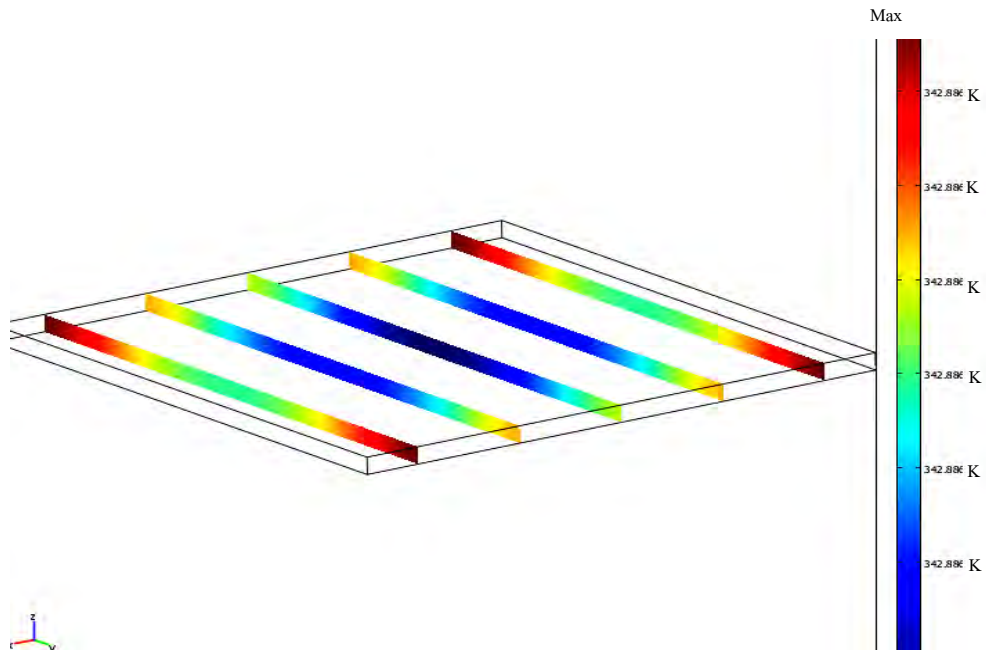


Fig. 23 Temperature gradient at the cross section of 1 mm-taro slice dried at 70°C for 350 min

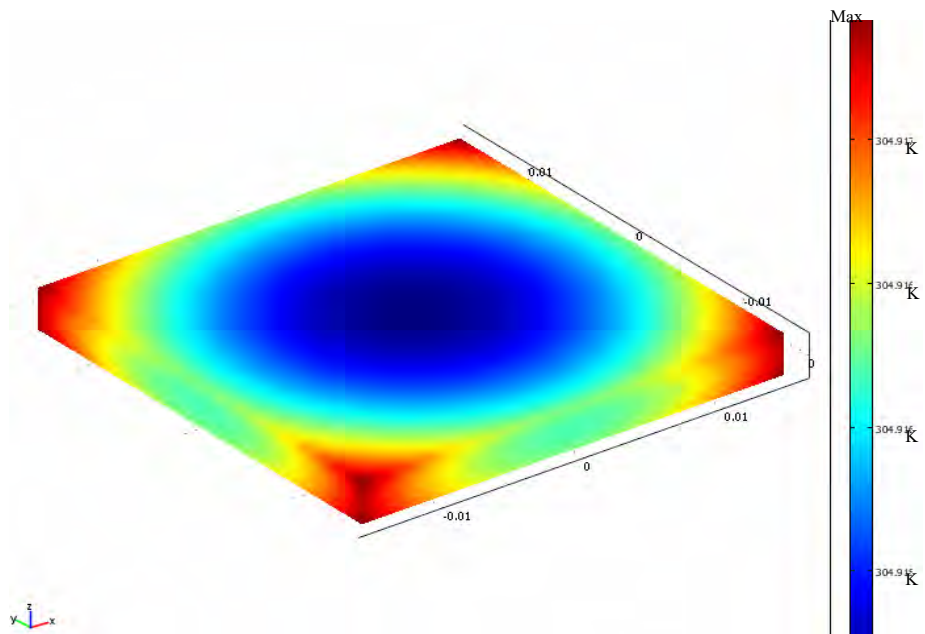


Fig. 24 Temperature gradient at the surface of 3 mm-taro slice dried at 70°C for 2 min

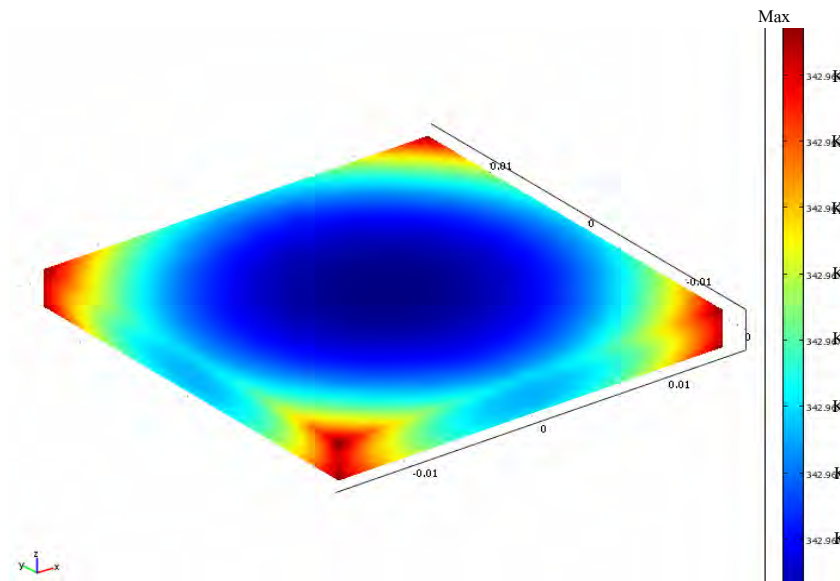


Fig. 25 Temperature gradient at the surface of 3 mm-taro slice dried at 70°C for 350 min

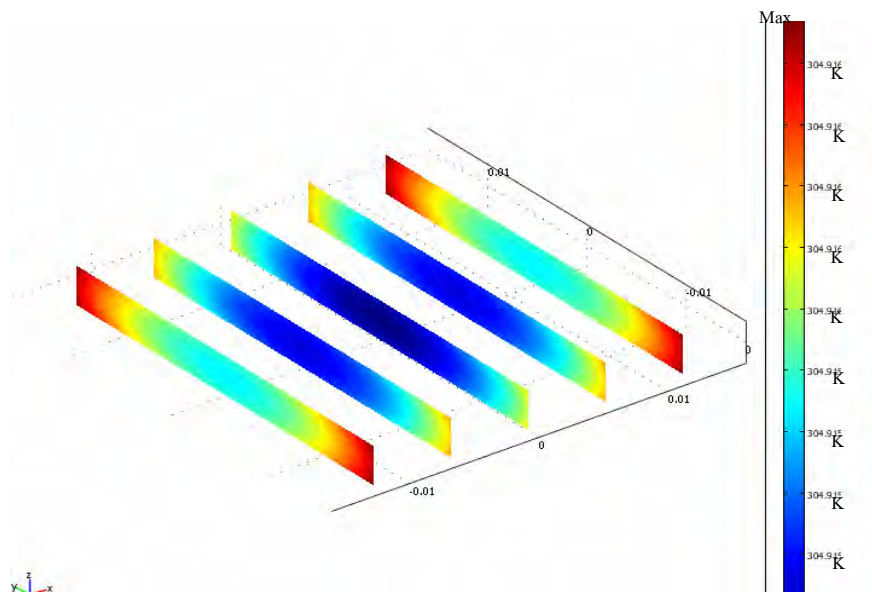


Fig. 26 Temperature gradient at the cross section of 3 mm-taro slice dried at 70°C for 2 min

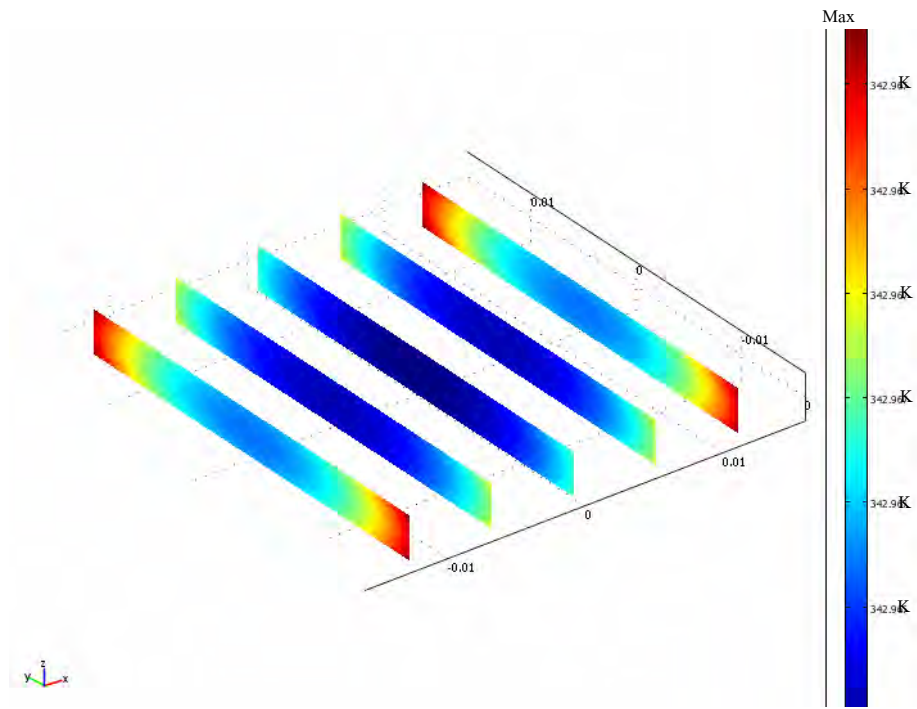


Fig. 27 Temperature gradient at the cross section of 3 mm-taro slice dried at 70°C for 350 min

ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของความชื้นภายในเปลือกแผ่นอบแห้งโดยใช้ซอฟต์แวร์สำเร็จรูป COMSOL MultiphysicsTM Software (Version 3.3a)

ลักษณะการกระจายตัวของความชื้นที่ได้จากการใช้ซอฟต์แวร์สำเร็จรูป COMSOL MultiphysicsTM Software (Version 3.3a) ในการคำนวณ ดังแสดงใน Fig. 28-35 พบว่า ความชื้นบริเวณผิวและขอบของเปลือกแผ่นจะลดลงก่อนบริเวณอื่น เนื่องจากบริเวณดังกล่าวจะสัมผัสกับอากาศร้อนก่อน เมื่ออบแห้งไปเป็นระยะเวลา 350 นาที จะเห็นว่า ความชื้นบริเวณตรงกลางของแผ่นเปลือกมีค่าที่สูงกว่าบริเวณผิวและขอบเล็กน้อย

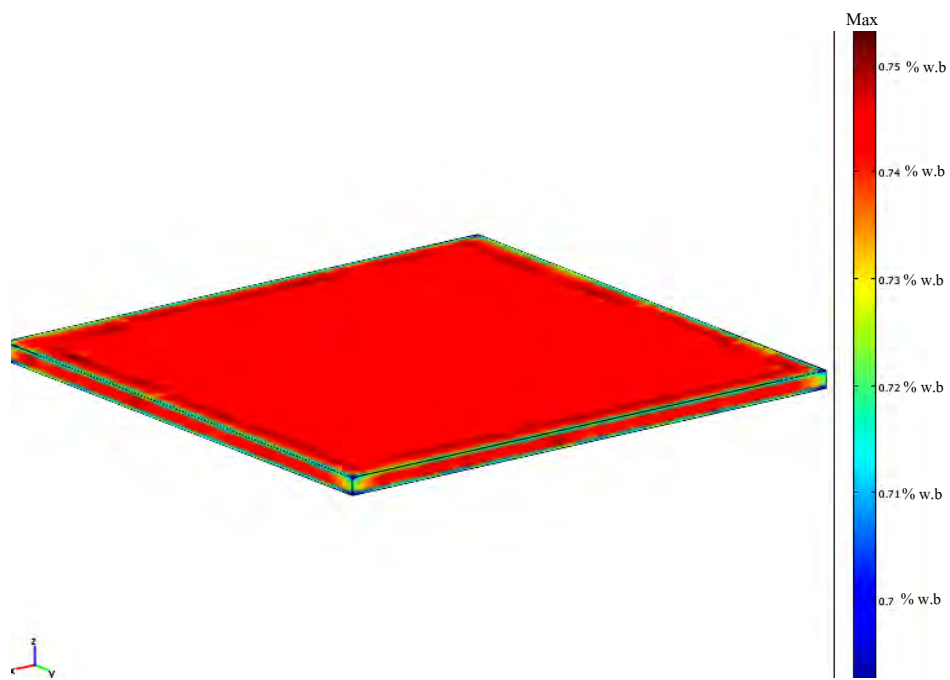


Fig. 28 Moisture gradient at the surface of 1 mm-taro slice dried at 70°C for 2 min

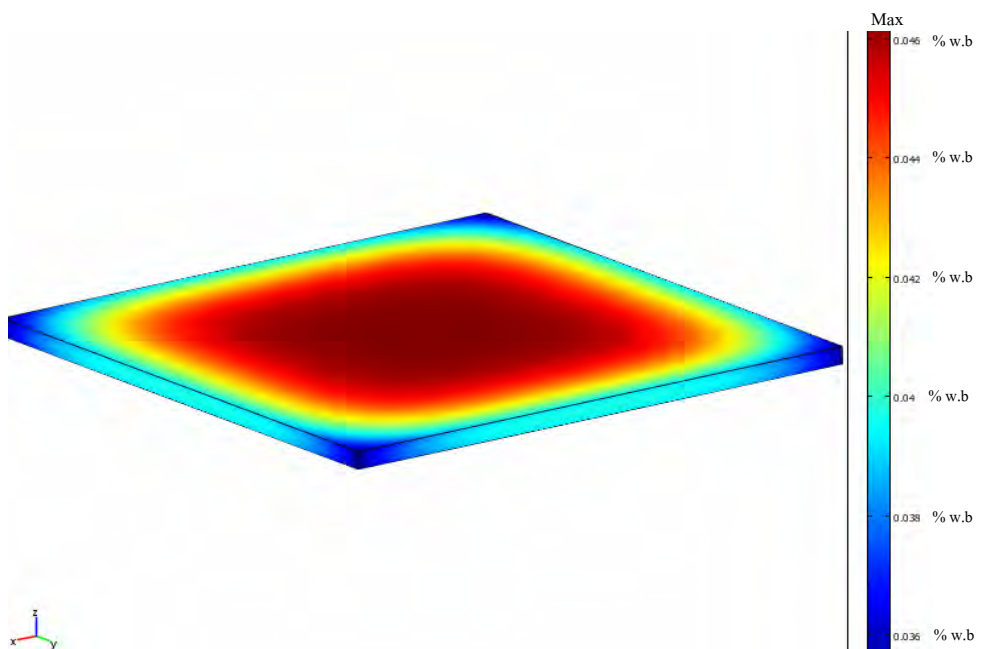


Fig. 29 Moisture gradient at the surface of 1 mm-taro slice dried at 70°C for 350 min

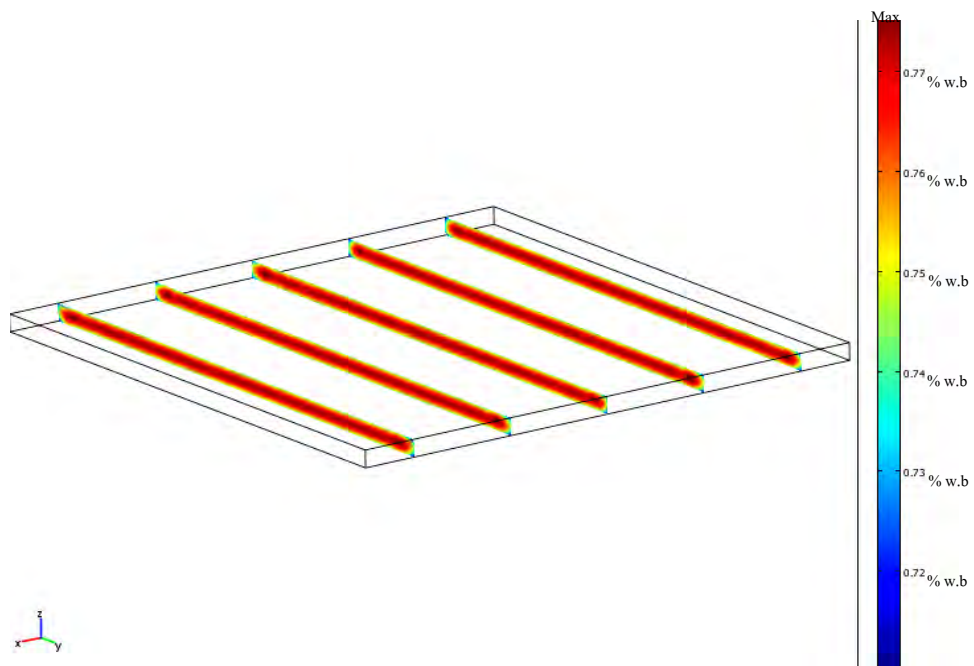


Fig. 30 Moisture gradient at the cross section of 1 mm-taro slice dried at 70°C for 2 min

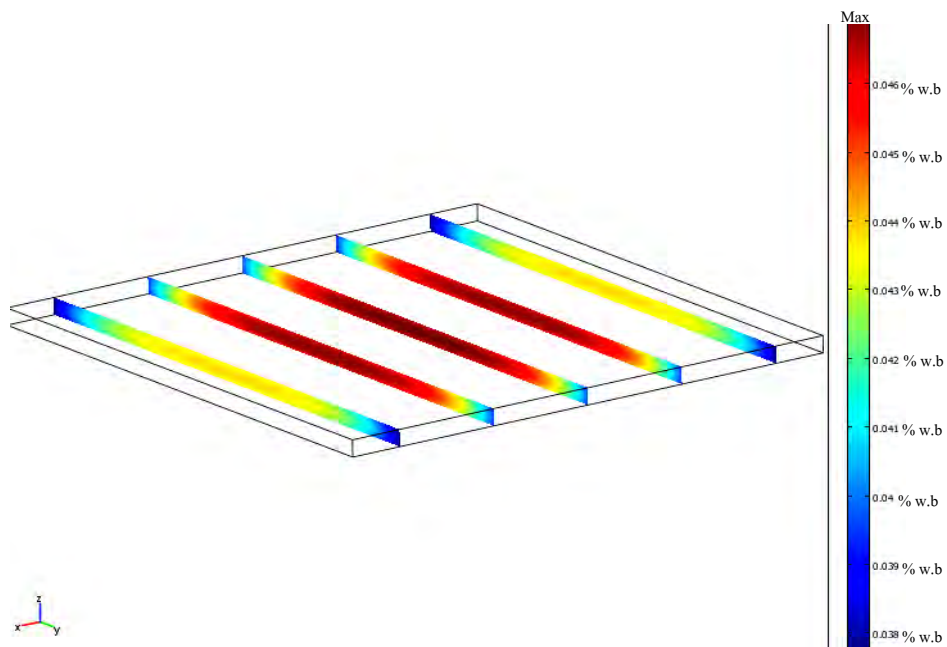


Fig. 31 Moisture gradient at the cross section of 1 mm-taro slice dried at 70°C for 350 min

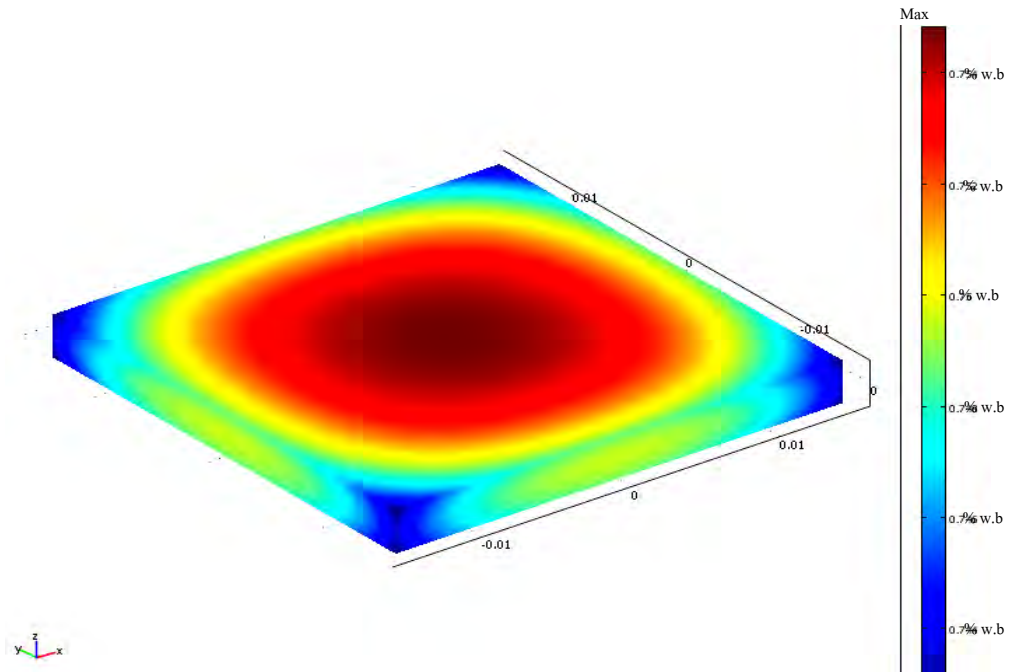


Fig. 32 Moisture gradient at the surface of 3 mm-taro slice dried at 70°C for 2 min

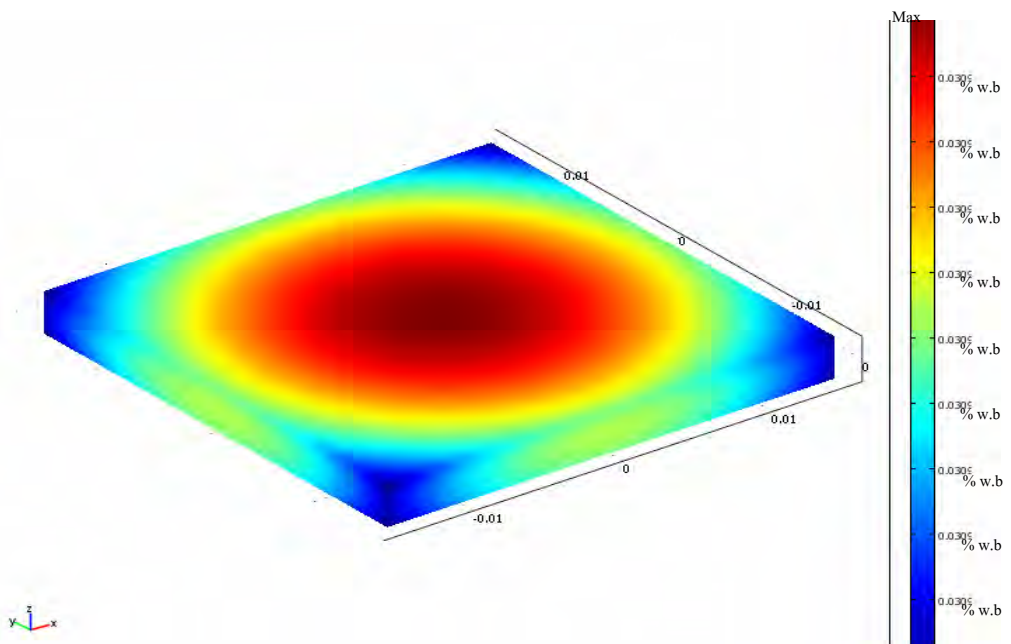


Fig. 33 Moisture gradient at the surface of 3 mm-taro slice dried at 70°C for 350 min

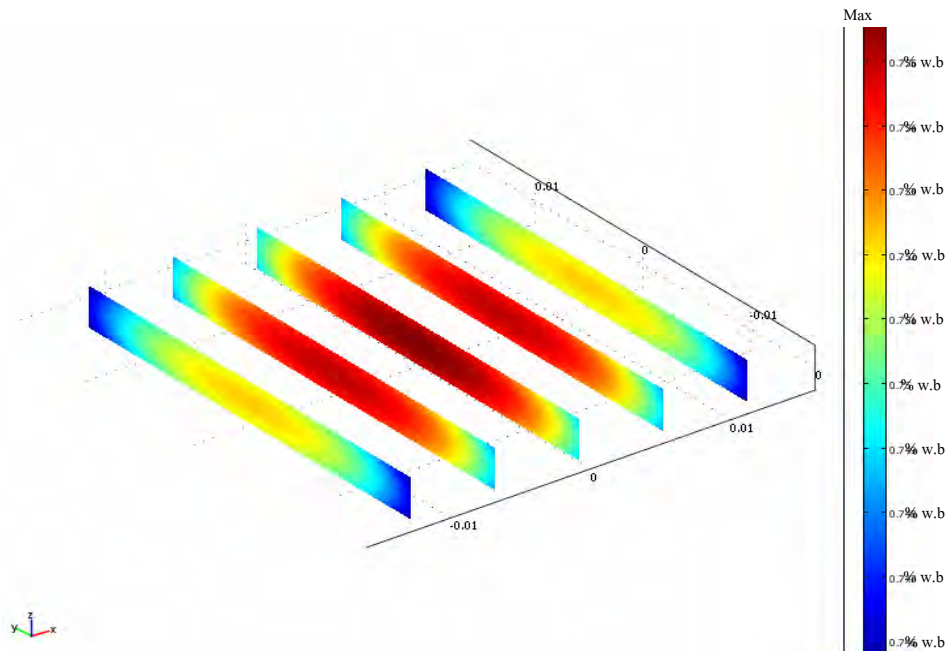


Fig. 34 Moisture gradient at the cross section of 3 mm-taro slice dried at 70°C for 2 min

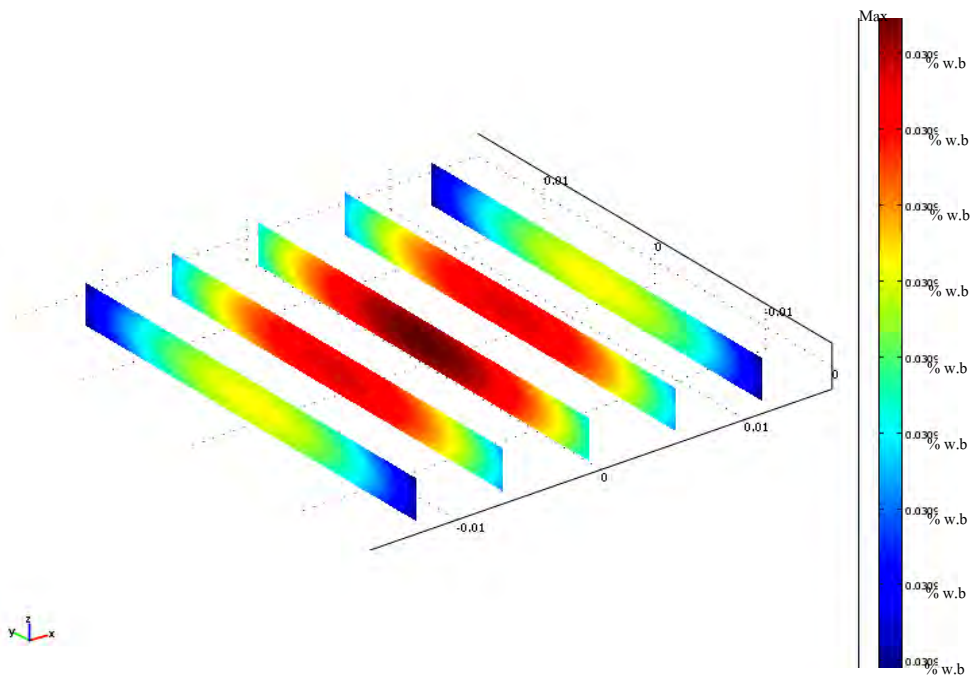


Fig. 35 Moisture gradient at the cross section of 3 mm-taro slice dried at 70°C for 350 min

การทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งของแผ่นเผือกโดยใช้ซอฟต์แวร์สำเร็จรูป COMSOL MultiphysicsTM Software (Version 3.3a)

งานวิจัยนี้ได้นำซอฟต์แวร์สำเร็จรูป COMSOL MultiphysicsTM Software (Version 3.3a) มาใช้ทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งของแผ่นเผือก โดยได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบ 3 มิติ เพื่อทำนายการถ่ายเทความร้อนและถ่ายเทมวลสารของเผือกแผ่นระหว่างการอบแห้ง โดยสมมุติให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของเผือกแผ่นมีค่าคงที่ พร้อมทั้งกำหนดให้ค่าการนำความร้อน ความหนาแน่น และค่าความจุความร้อนจำเพาะเป็นฟังก์ชันกับความชื้นของเผือกแผ่น และกำหนดให้อุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์ตอนเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 28°C จาก Figs. 36-37 แสดงให้เห็นว่า ผลการทำนายการถ่ายเทความร้อนจากซอฟต์แวร์มีค่าสูงกว่าผลการทดลองในทุกๆสภาวะการอบแห้ง (อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำนายมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิที่วัดจริงโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนที่ความหนา 1 mm และ 3 mm อยู่ในช่วง 0.21-0.47% และ 0.31-0.59% ตามลำดับหากพิจารณาผลการทำนายการถ่ายเทมวลสาร พบว่า ในช่วงต้นของการอบแห้งอัตราการถ่ายเทมวลสารที่ได้จากการทำนายมีค่าสูงกว่าผลการทดลอง (ความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำนายมีค่าต่ำกว่าความชื้นจริง) ในขณะที่ช่วงท้ายของการอบแห้งอัตราการถ่ายเทมวลสารที่ได้จากการทำนายมีค่าต่ำกว่าผลการทดลอง (ความชื้นที่ได้จากการทำนายมีค่าสูงกว่าค่าความชื้นจริง) โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนที่ความหนา 1 mm และ 3 mm อยู่ในช่วง 0.07-0.15% และ 0.10-0.19% ตามลำดับ สำหรับความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอาจเนื่องมาจากสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของเผือกแผ่น ทั้งนี้มีสาเหตุเนื่องมาจากการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าคงที่

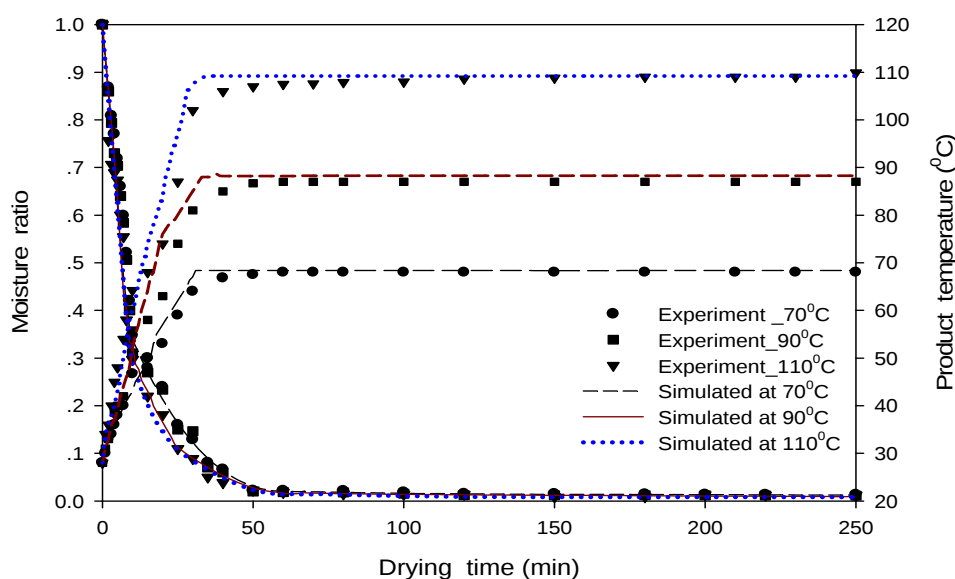


Fig. 36 Comparison of drying kinetics and product temperature obtained from drying experiments of 1 mm taro slices at temperatures of 70-110°C and the data predicted by COMSOL MultiphysicsTM Software (Version 3.3a)

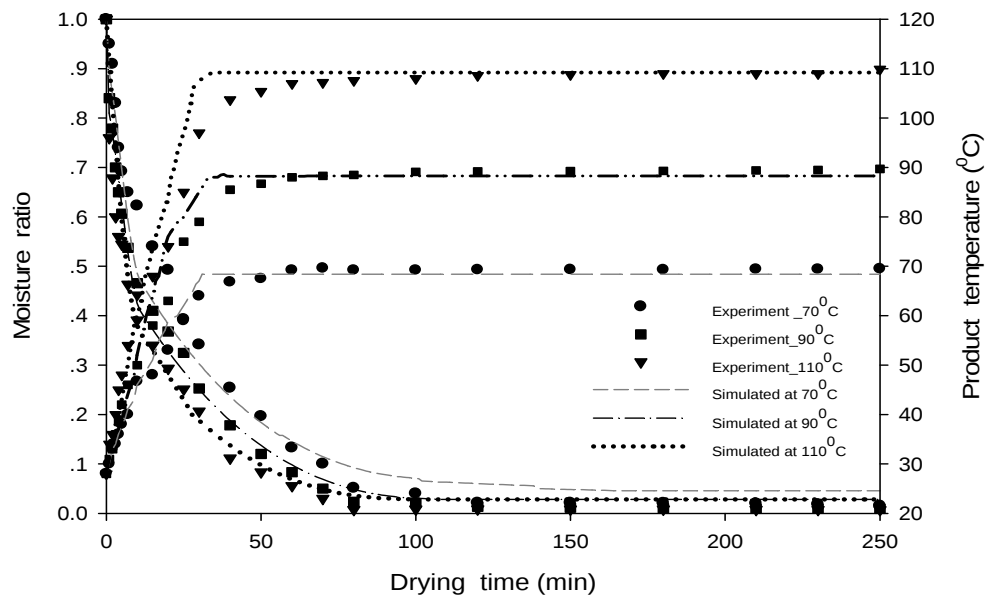


Fig. 37 Comparison of drying kinetics and product temperature obtained from drying experiments of 3 mm taro slices at temperatures of 70-110°C and the data predicted by *COMSOL Multiphysics*TM Software (Version 3.3a)

บทที่ 4

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากิจกรรมวิธีอบแห้งสำหรับเป็นทางเลือกในการผลิตขนมอบกรอบที่มีไขมันต่ำ โดยได้นำเปลือกหอมพันธุ์เชียงใหม่ มันเทศ และฟักทอง มาทดลองอบแห้งในชั้นต้นที่อุณหภูมิ 130°C เพื่อคัดเลือกวัสดุอบแห้งที่มีศักยภาพสูงสุดไปผ่านกระบวนการอบแห้ง 3 วิธี (การอบแห้งแบบขั้นตอนเดียวที่อุณหภูมิสูง การอบแห้งแบบขั้นตอนเดียวที่อุณหภูมิต่ำ และการอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอน) โดยได้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งและคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ ซึ่งจากผลการทดลอง พบว่า เปลือกเป็นวัสดุอบแห้งที่มีความเหมาะสมในการนำมาผลิตเป็นขนมอบกรอบด้วยกระบวนการอบแห้งมากที่สุด และจากผลการทดลองอบแห้งเปลือกแผ่นขนาด $30 \times 30 \times 3 \text{ mm}^3$ ความชื้นเริ่มต้น 275-318% d.b. ที่อุณหภูมิ 130-150 $^{\circ}\text{C}$ ด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน พบว่า ในช่วงต้นของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งนั้นความชื้นของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดการควบแน่น และเมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้นจะทำให้ปริมาณความชื้นเนื่องจากการควบแน่นลดลง อุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้อัตราการลดความชื้นเพิ่มขึ้น เมื่อนำผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งที่มีความชื้นสุดท้ายประมาณ 7% d.b. ไปทดสอบคุณภาพด้านต่างๆ พบว่า อุณหภูมิอบแห้งที่สูงขึ้นจะทำให้ผลิตภัณฑ์มีค่าความสว่าง (L) เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าสีแดง (a) ลดลง และเปลือกแผ่นที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะมีสีที่คล้ำกว่า แดงกว่า เหลืองกว่า เกิดการหดตัวน้อยกว่า มีขนาดรูพรุนใหญ่กว่า มีความหนาของผิวแข็ง (Crust) ค่าความแข็ง ความแกร่ง และความกรอบ ที่มากกว่าเปลือกแผ่นที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนในทุกช่วงอุณหภูมิ โดยอุณหภูมิผกผัน (Inversion temperature) ของเปลือกแผ่นมีค่าประมาณ 247 $^{\circ}\text{C}$

สำหรับการอบแห้งเปลือกแผ่นแบบขั้นตอนเดียวที่อุณหภูมิต่ำ พบว่า อุณหภูมิและความเร็วลมที่สูงขึ้น และความหนาของวัสดุอบแห้งที่น้อยลงส่งผลให้ได้อัตราการอบแห้งที่สูงขึ้น เมื่อนำผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งมาทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพ พบว่า อุณหภูมิอบแห้งมีผลต่อค่าสีของผลิตภัณฑ์ได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่อใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้น ทำให้ค่าความสว่างและค่าสีแดงลดลง แต่ค่าสีเหลืองเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความเร็วลมและลักษณะพื้นผิวของวัสดุอบแห้งส่งผลกระทบน้อยมากต่อสีของผลิตภัณฑ์ อุณหภูมิและความเร็วลมที่สูงขึ้นรวมถึงความหนาของวัสดุอบแห้งที่มากขึ้นมีแนวโน้มทำให้ผลิตภัณฑ์มีค่าความแข็งมากขึ้น ส่วนผลการอบแห้งเปลือกแผ่นด้วยกระบวนการอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอน พบว่า เปลือกแผ่นที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งตามด้วยอากาศร้อนจะมีค่าสีแดง (a) ค่าสีเหลือง (b) ค่าความแข็ง ค่าความแกร่ง และค่าความกรอบที่มากกว่า ในขณะที่มีค่าความสว่าง (L) และการหดตัวน้อยกว่าเปลือกแผ่นที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนในทั้งสองขั้นตอน อย่างไรก็ตามพบว่า ความชื้นหลังการอบแห้งในขั้นตอนที่ 1 มีผลน้อยมากต่อคุณภาพด้านต่างๆ ของเปลือกแผ่นอบแห้ง จากการวิเคราะห์ปรากฏการณ์การถ่ายเทของเปลือกแผ่นระหว่างการอบแห้ง พบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบ 3 มิติ ที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายการปริมาณความชื้นและอุณหภูมิของเปลือกแผ่นระหว่างการอบแห้งได้เป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

- จินดาพร จำรัสเลิศลักษณ์ ชลิดาเนียมน้อย และสมชาติ โสภณรณฤทธิ์. 2552. การผลิตเปลือกอบกรอบด้วยเทคนิคการอบแห้งแบบชั้นบาง. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร, ปีที่ 40 ฉบับที่ 1, หน้า 485-488.
- จินดาพร จำรัสเลิศลักษณ์ และสมชาติ โสภณรณฤทธิ์. 2553. อิทธิพลของลักษณะพื้นผิวของวัสดุที่มีผลต่อคุณภาพของเปลือกแผ่นอบแห้ง, วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร, ปีที่ 41 ฉบับที่ 1/3, หน้า 321-324.
- มะลิ นาชัยสินธุ์ จินดาพร จำรัสเลิศลักษณ์ และสมชาติ โสภณรณฤทธิ์. 2551. อิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งและสมบัติของเปลือกแผ่นที่ผ่านการอบแห้งแบบสองขั้นตอน. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 6, 8-9 พฤษภาคม 2551, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา
- Achanta, S., Okos, M., Cushman, J.H. & Kessler, D.P. Moisture transport in shrinking gels during saturated drying. *Bioengineering, Food and Natural Products* 1997; 43: 2112-2122.
- Caixeta, A.T., Moreira, R., & Castell-Perez, M.E. Impingement drying of potato chips. *Journal of Food Process Engineering* 2002; 25: 63-90.
- del Valle, J.M., Caudros, T.R.M. & Aguilera, J.M. Glass transitions and shrinkage during drying and storage of osmosed apple pieces. *Food Research International* 1999; 31: 191-204.
- Iyota, N., Nishimura N., Onuma T., and Nomura, T. Drying of sliced raw potatoes in superheated steam and hot air. *Drying Technology* 2001; 19: 1411-1424.
- Jamradloedluk, J., Soponronnarit, S., Nathakaranakule, A., & Prachayawarakorn, S. Influences of drying medium and temperature on drying kinetics and quality attributes of durian chip. *Journal of Food Engineering* 2007; 78: 198-205.
- Li, Y.B., Seyed-Yagoobi, J., Moreira, R.G., & Yamsaengsung, R. Superheated steam impingement drying of tortilla chips. *Drying Technology* 1999; 17: 191-213.
- Moreira, R.G. Impingement drying of foods using hot air and superheated steam. *Journal of Food Engineering* 2001; 49: 291-295.
- Namsanguan, Y., Tia, W., Devahastin, S., & Soponronnarit, S. Drying kinetics and quality of shrimp under different two-stage drying processes. *Drying Technology* 2003; 22: 759-778.
- Namsanguan, Y., Tia, W., Devahastin, S. & Soponronnarit, S. Quality assessment of dried shrimp using two-stage superheated steam and heat pump dryer. In proceedings of the International Conference on Innovations in Food Processing Technology and Engineering, 11-13 December 2002, AIT, Bangkok, Thailand.
- Prachayawarakorn, S., Soponronnarit, S., Wetchakama, S., & Jaisut, D. Desorption isotherms and drying characteristics of shrimp in superheated steam and hot air. *Drying Technology* 2002; 20: 669-684.

- Rordprapat, W., Nathakaranakule, A., Tia, W., & Soponronnarit, S. Comparative study of fluidized bed paddy drying using hot air and superheated steam. *Journal of Food Engineering* 2005; 71: 28-36.
- Sa-adchom, P., Swasdisevi, T., Nathakaranakule, A. & Soponronnarit, S. Drying kinetics using superheated steam and quality attributes of dried pork slices for different thickness, seasoning and fiber distribution. *Journal of Food Engineering* 2011; 104: 105-113.
- Soponronnarit, S., Nathakaranakule, A., Jirajindalert, A. & Taechapairoj, C. Parboiling brown rice using super heated steam fluidization technique. *Journal of Food Engineering* 2006; 75: 423-432.
- Tang, Z. & Cenkowski, S. Dehydration dynamics of potatoes in superheated steam and hot air. *Canadian Agricultural Engineering* 2000; 42: 6.1-6.13.
- Tang, Z., Cenkowski, S. & Lydorchyk, M. Thin-layer drying of spent grains in superheated steam. *Journal of Food Engineering* 2005; 67: 457-465.
- Thuwapanichayanan, R., Prachayawarakorn, S. & Soponronnarit, S. Drying characteristics and quality of banana foam mat. *Journal of Food Engineering* 2008; 86: 573-583.
- Uengkimbuan, N., Soponronnarit, S. & Prachayawarakorn, S. A comparative study of pork drying using superheated steam and hot air. *Drying Technology* 2006; 24: 1665-1672.
- Uengkimbuan, N., Soponronnarit, S., Prachayawarakorn, S. and Nathakaranakule, A., 2005, "Drying Kinetics and Physical Properties of Dried Pork Using Two-Stage Techniques", In proceedings of the 2nd International Conference on Innovations in Food Processing Technology and Engineering, 11-13 January, Bangkok, Thailand, pp. 320-328.
- Verbeyst, L., Oey, I., Van der Plancken, I., Hendrickx, M. & Loey, A.V. Kinetics study on the thermal and pressure degradation of anthocyanins in strawberries. *Food Chemistry* 2010; 123: 269-274.
- Yan, Z., Sousa-Gallagher, M.J., & Oliveira, F.A.R. Shrinkage and porosity of banana, pineapple and mango slices during air-drying. *Journal of Food Engineering* 2008; 84: 430-440.

Output ที่ได้จากโครงการ

1. วิศวกรรมบัณฑิตสาขาวิศวกรรมเครื่องกล จำนวน 14 คน
2. วิศวกรรมมหาบัณฑิตสาขาเทคโนโลยีพลังงาน จำนวน 2 คน
3. ผลงานวิจัยตีพิมพ์ในระดับชาติ จำนวน 5 เรื่อง
 - 3.1 จินดาพร จำรัสเลิศลักษณ์ ชลิดาเนียมัย และสมชาติ โสภณรณฤทธิ์. 2552. การผลิตเปลือกอบกรอบด้วยเทคนิคการอบแห้งแบบชั้นบาง. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร, ปีที่ 40 ฉบับที่ 1, หน้า 485-488.
 - 3.2 จินดาพร จำรัสเลิศลักษณ์ และชลิดา นียมมัย. 2552. การอบแห้งเปลือกแผ่นโดยใช้อุณหภูมิสูง. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร, ปีที่ 40 ฉบับที่ 1, หน้า 469-472.
 - 3.3 จินดาพร จำรัสเลิศลักษณ์ และสมชาติ โสภณรณฤทธิ์. 2550. การอบแห้งเปลือกแผ่นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร, ปีที่ 38 ฉบับที่ 6, หน้า 127-130.
 - 3.4 สิรินทร เนินซัด จินดาพร จำรัสเลิศลักษณ์ ชลิดา นียมมัย และสมชาติ โสภณรณฤทธิ์ 2553. จลนพลศาสตร์การอบแห้ง โครงสร้างระดับจุลภาค และลักษณะเนื้อสัมผัสของเปลือกแผ่นที่ผ่านการอบแห้งที่สภาวะต่างๆ. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย, ปีที่ 16, ฉบับที่ 1, ตอรับเพื่อตีพิมพ์
 - 3.5 จินดาพร จำรัสเลิศลักษณ์ และสมชาติ โสภณรณฤทธิ์ 2553. อิทธิพลของลักษณะพื้นผิวของวัสดุที่มีผลต่อคุณภาพของเปลือกแผ่นอบแห้ง, วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร, ปีที่ 41 ฉบับที่ 1/3, หน้า 321-324.
4. ผลงานวิจัยที่นำเสนอในที่ประชุมระดับชาติ จำนวน 2 เรื่อง
 - 4.1 มะลิ นาชัยสินธุ์ จินดาพร จำรัสเลิศลักษณ์ และสมชาติ โสภณรณฤทธิ์. 2551. อิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งและสมบัติของเปลือกแผ่นที่ผ่านการอบแห้งแบบสองขั้นตอน. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 6, 8-9 พฤษภาคม 2551, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา
 - 4.2 สิรินทร เนินซัด จินดาพร จำรัสเลิศลักษณ์ และสมชาติ โสภณรณฤทธิ์. 2551. จลนพลศาสตร์การอบแห้งและสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของเปลือกแผ่นที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 6, 8-9 พฤษภาคม 2551, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา
5. ผลงานวิจัยที่นำเสนอในที่ประชุมระดับนานาชาติ จำนวน 1 เรื่อง

Mali Nachaisin, Chalida Niamnuy, Somchart Soponronnarit, and Jindaporn Jamradloedluk, Drying temperature and material thickness affecting shrinkage behavior of taro (*Calocasia esculenta* (L.) schott) slices during thin layer drying. In proceedings of the International Conference on Green and Sustainable Innovation 2009. December, 2-4, 2009, Chaingrai, Thailand.