

การอบแห้งเนื้อปลาสดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง Drying of Ground Fish Slices Using Superheated Steam

ภูมิใจ สอาดโฉม^{1*} ธนิต สวัสดิ์เสวี² ทศนะ ถมทอง³ ปฏิพล สมุทพารินทร์⁴ และสมชาติ โสภณรณฤทธิ์⁵

¹อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี กรุงเทพมหานคร 10140

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร 10140

³อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี กรุงเทพมหานคร 10140

⁴นักศึกษ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี กรุงเทพมหานคร 10140

⁵ศาสตราจารย์ สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร 10140

บทคัดย่อ

การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งได้รับความสนใจมากขึ้น เนื่องจากไม่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและมีการอบแห้งสูง งานวิจัยนี้นำเสนอการอบแห้งเนื้อปลาสดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง โดยศึกษาอิทธิพลของระดับอุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (120, 130 และ 140 °C) และระดับความหนาของเนื้อปลาสด (1.3 และ 2.2 มม.) ต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้ง ศึกษาสมบัติทางกายภาพของเนื้อปลาสดที่ได้หลังจากอบแห้ง และหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ประสิทธิภาพของเนื้อปลาสดที่ผ่านการอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ ผลการทดลอง พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลดความหนาของเนื้อปลาสดจะทำให้ความชื้นในเนื้อปลาสดลดลงได้เร็วขึ้น ในส่วนของคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังจากอบแห้ง พบว่า ค่าความสว่าง (ค่า L) มีค่าลดลง แต่ค่าสีแดง (ค่า a) เปรอร์เซ็นต์การหดตัว ความแข็ง และความเหนียวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของเนื้อปลาสดและอุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ประสิทธิภาพของเนื้อปลาสดมีค่ามากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งและความหนาของเนื้อปลาสด

Abstract

Superheated steam drying has gained more attention due to its absence of oxidative reactions and high drying rate. This research involved drying of ground fish slices using superheated steam. The influences of superheated steam temperature (120, 130 and 140 °C) and thickness of ground fish slices (1.3 and 2.2 mm) on drying kinetics and quality attributes of dried fish slices were studied. Effective moisture diffusion coefficients ($Deff$) of the ground fish slices dried at different conditions were also investigated. From the experimental results, it was seen that an increase in drying temperature and a decrease in thickness of ground fish slices led to faster moisture reduction. In terms of qualities, it was found that the lightness value (L -value) decreased. However, the redness value (a -value), percentage of shrinkage, hardness and toughness values increased when the thickness of ground fish slices and superheated steam temperature increased. Moreover, it was also found that the $Deff$ of the ground fish slices increased with the increase of superheated steam temperature and thickness of ground fish slice.

คำสำคัญ : การอบแห้ง เนื้อปลาสดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

Keywords : Drying, Ground Fish Slices, Superheated Steam

1. บทนำ

เนื้อปลาเป็นอาหารที่คนไทยนิยมบริโภค เนื่องจากหาซื้อได้ง่าย ราคาไม่แพง และมีคุณค่าทางโภชนาการสูง (มีกรดไขมันโอเมก้า 3 และมีโปรตีนสูง) โปรตีนในเนื้อปลาจะถูกนำไปใช้ในการเสริมสร้างเนื้อเยื่อและซ่อมแซมส่วนที่สึกหรอ ส่วนกรดไขมันโอเมก้า 3 จะช่วยลดความเสี่ยงโรคหลอดเลือดหัวใจอุดตัน ป้องกันโรคความจำเสื่อมในผู้สูงอายุ และช่วยสร้างเซลล์ประสาทของเด็ก และทารกในครรภ์ (สำนักงานกองทุนสนับสนุนการเสริมสุขภาพ, 2555) นอกจากนี้ ปลายังเป็นสัตว์เศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2554 ประเทศไทยมีปริมาณการนำเข้าปลาน้ำจืด 2,299.69 ตัน คิดเป็นมูลค่า 138.45 ล้านบาท และมีปริมาณการส่งออกปลาน้ำจืด 47,181.85 ตัน คิดเป็นมูลค่า 2,139.66 ล้านบาท (กลุ่มวิเคราะห์การค้าสินค้าประมงระหว่างประเทศ กรมประมง, 2555) อย่างไรก็ตาม ในบางครั้งมีการผลิตเนื้อปลาเกินความต้องการบริโภคซึ่งทำให้เนื้อปลามีราคาตกต่ำ ดังนั้น การแปรรูปเนื้อปลาให้เป็นเนื้อปลาอบแห้งจึงเป็นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยยืดระยะเวลาการเก็บรักษาและช่วยเพิ่มมูลค่าของเนื้อปลา

การอบแห้งเป็นกระบวนการที่ใช้ลดความชื้นผลิตภัณฑ์ วิธีการอบแห้งเนื้อปลาที่ง่ายที่สุด คือ การตากแดดตามธรรมชาติ ซึ่งวิธีนี้ต้องใช้ระยะเวลาการอบแห้งที่นานเนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของแสงแดด และมีปัญหาในเรื่องคุณภาพของผลิตภัณฑ์เนื่องจากฝุ่นและแมลง ทั้งยังมีข้อจำกัดเกี่ยวกับฤดูกาล ได้แก่ ปัญหาเนื่องจากฝนตก และข้อจำกัดเกี่ยวกับพื้นที่ที่ใช้ในการตากแห้งอีกด้วย โดยทั่วไปจะนิยมอบแห้งเนื้อปลาด้วยเครื่องอบแห้งแบบอากาศร้อนซึ่งใช้ระยะเวลาการอบแห้งสั้นกว่า

การตากแดดตามธรรมชาติ แต่เมื่ออบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิสูง ๆ จะส่งผลให้สมบัติทางด้านสี ความแข็ง และความเหนียวของผลิตภัณฑ์ด้อยลง (วันชลิ เพ็งพงศา, 2549) ด้วยเหตุนี้จึงมีแนวคิดในการนำไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (Superheated Steam) มาใช้เป็นตัวกลางในการอบแห้งแทนอากาศร้อน

การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (Superheated Steam Drying) เป็นการอบแห้งที่ใช้ไอน้ำที่มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิอิ่มตัว (Saturation Temperature) ที่ความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้ง การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีข้อดี คือ มีอากาศอยู่ภายในระบบน้อยมากจึงไม่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากอบแห้งดีขึ้น และสามารถฆ่าเชื้อโรคหรือกำจัดกลิ่นของอาหารได้อีกด้วย (ณรงค์ อังกิมบัวน, 2544) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งเนื้อสัตว์ด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีดังนี้ การอบแห้งเนื้อหมู (ณรงค์ อังกิมบัวน, 2544; พลสันต์ วงษ์ศรี, 2548; วันชลิ เพ็งพงศา, 2549) การอบแห้งเนื้อวัว (ศิริวัฒน์ ลินประเสริฐ, 2548) และการอบแห้งเนื้อไก่ (สุดาทิพย์ คงขำ, 2549) ซึ่งงานวิจัยส่วนใหญ่จะศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่มีต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งเนื้อสัตว์ และศึกษาสมบัติทางกายภาพของเนื้อสัตว์ที่ได้หลังจากอบแห้ง รวมทั้งหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของเนื้อสัตว์ที่ผ่านการอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ จากข้อดีของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและแนวทางการศึกษาของงานวิจัยต่าง ๆ ตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงศึกษาอิทธิพลของระดับอุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งและระดับความหนาของเนื้อปลาตบแผ่นต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งศึกษาสมบัติทางกายภาพของเนื้อปลาตบแผ่นที่

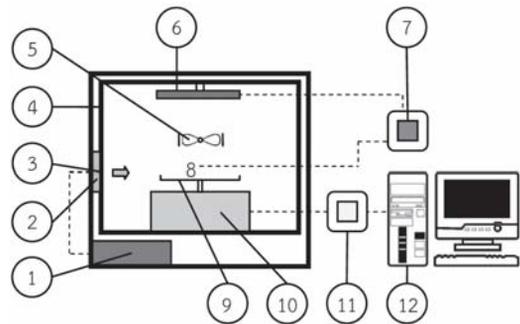
ได้หลังจากอบแห้งทางด้านสี การหดตัว ความแข็ง ความเหนียว และประเมินคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัส รวมทั้งหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนขึ้นประสิทธิผลของเนื้อปลาบดแผ่นที่ผ่านการอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ โดยเนื้อปลาบด (ปลาเนื้) ที่ใช้ในการอบแห้งมีขนาด 40x40 (กว้างxยาว) มม.หนา 1.3 และ 2.2 มม. ทำการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120, 130 และ 140 °ซ

2. วิธีการทดลอง

2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

การอบแห้งเนื้อปลาบดแผ่นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งยี่ห้อ Toshiba รุ่น ER-D300C แสดงดังรูปที่ 1 การทำงานของเครื่องอบแห้งนี้เริ่มจากน้ำที่อยู่ภายในกล่องใส่น้ำ (หมายเลข 1) จะถูกบีบผ่านตัวทำความร้อน (หมายเลข 2) เพื่อให้น้ำกลายเป็นไอน้ำร้อนยวดยิ่ง จากนั้นจะถูกปล่อยผ่านช่องปล่อย (หมายเลข 3) เข้าสู่ภายในห้องอบแห้ง (หมายเลข 4) ซึ่งมีความภายใน 40x30.5x45.5 (กว้างxยาวxสูง) ซม. ไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะถูกหมุนเวียนอยู่ภายในเครื่องอบแห้งด้วยพัดลมขนาดประมาณ 45 วัตต์ (หมายเลข 5) และมีช่องระบายไอน้ำร้อนยวดยิ่งอยู่ทางด้านซ้าย ด้านขวา และด้านหลังของตัวเครื่องอบแห้ง ทั้งนี้เพื่อควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งภายในห้องอบแห้งให้มีค่าตามต้องการ จึงได้ติดตั้งตัวทำความร้อนเสริมขนาด 2,000 วัตต์ (หมายเลข 6) ที่ผนังด้านบนของห้องอบแห้ง โดยควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบ PID ยี่ห้อ Linking รุ่น LT400 (หมายเลข 7) มีความถูกต้อง 1 °ซ ตำแหน่งที่ควบคุม

อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งอยู่เหนือผลิตภัณฑ์ 3 ซม. โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K (หมายเลข 8) เป็นตัววัดอุณหภูมิ นอกจากนี้ ถาดสำหรับวางผลิตภัณฑ์ (หมายเลข 9) มีขนาด 20x20 ซม. น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ขณะอบแห้งจะถูกวัดโดยใช้โหลดเซลล์พิคัด 5 กก. รุ่น 603 (หมายเลข 10) ต่อเข้ากับเครื่องวัดน้ำหนักรุ่น AD-4329 (หมายเลข 11) มีความละเอียด 0.001 กก. และต่อเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ (หมายเลข 12) ทั้งนี้เครื่องอบแห้งสามารถผลิตไอน้ำร้อนยวดยิ่งได้ประมาณ 0.5 กก./ชม.



รูปที่ 1 เครื่องอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง โดยที่ (1) กล่องใส่น้ำ (2) ตัวทำความร้อน (3) ช่องปล่อยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (4) ห้องอบแห้ง (5) พัดลม (6) ตัวทำความร้อน (7) เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (8) เทอร์โมคัปเปิล (9) ถาดสำหรับวางผลิตภัณฑ์ (10) โหลดเซลล์ (11) เครื่องวัดน้ำหนัก และ (12) เครื่องคอมพิวเตอร์

2.2 การเตรียมตัวอย่าง

นำเนื้อปลานิลสดมาตัดตามยาวให้เป็นแผ่นบาง ๆ และล้างด้วยน้ำเกลือ 0.3% (เกลือ 0.3 กรัม ต่อ น้ำ 100 มล.) แล้วนำชิ้นมาวางไว้เพื่อให้สะเด็ดน้ำ จากนั้นบดเนื้อปลาให้ละเอียดด้วยเครื่องบดยี่ห้อ Tesco รุ่น HB988L เป็นเวลา 1 นาที

ต่อจากนั้นนำเนื้อปลาบดผสมกับส่วนผสมต่าง ๆ ในอัตราส่วนของเนื้อปลาบด 71% น้ำตาลทราย 17% น้ำ 7.1% ซีอิ้วขาว 4.3% และเกลือป่น 0.6% โดยน้ำหนัก และบดผสมรวมกันเป็นเวลา 1 นาที ต่อจากนั้นนำเนื้อปลาบดที่เตรียมไว้มาบรรจุลงในถุงโพลีเอทิลีน (Polyethylene) แล้วรีดให้เป็นแผ่นขนาด 4x4 (กว้างxยาว) ซม.หนา 1.3 และ 2.2 มม. ด้วยเครื่องรีดที่ชื่อ Hope Win รุ่น HP-180F และเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาทีก่อนนำไปอบแห้ง

2.3 วิธีการทดลอง

นำเนื้อปลาบดแผ่นที่เตรียมไว้เข้าเครื่องอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120, 130 และ 140 °ซ อบแห้งจนเนื้อปลาบดแผ่นมีความชื้นต่ำกว่า 10 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง ทั้งนี้เนื้อปลาบดแผ่นที่ผ่านการอบแห้งแล้วจะเก็บไว้ในถุงโพลีเอทิลีนเพื่อไม่ให้สัมผัสกับอากาศแวดล้อม และห่อด้วยกระดาษฟลอยด์ ต่อจากนั้นนำไปทดสอบสมบัติทางกายภาพทางด้านสี การหดตัว ความแข็ง ความเหนียว และประเมินคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัส

2.4 การหาปริมาณความชื้นของตัวอย่าง

การหาน้ำหนักแห้งของเนื้อปลาบดแผ่นทำได้โดยนำเนื้อปลาบดแผ่นไปอบในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 103 °ซ เป็นเวลา 72 ชม. จนน้ำหนักคงที่ (AOAC, 1995) โดยชั่งน้ำหนักก่อนและหลังการอบแห้ง แล้วนำค่าน้ำหนักที่ได้ไปคำนวณหาความชื้นของเนื้อปลาบดแผ่นที่เวลาใดๆ ได้ดังสมการ (อำไพศักดิ์ ธิบุญมา และศักดิ์ชัย จงจำ, 2553)

$$M = \left(\frac{W-D}{D} \right) \times 100\%$$

โดยที่ M คือ ความชื้นของเนื้อปลาบดแผ่นที่เวลาใด ๆ (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง) W คือ น้ำหนักของเนื้อปลาบดแผ่นที่เวลาใด ๆ (กก.) และ D คือ น้ำหนักแห้งของเนื้อปลาบดแผ่น (กก.)

2.5 การทดสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์

(1) การทดสอบคุณภาพทางด้านสี จะใช้เครื่องมือวัดสีชื่อ Minolta รุ่น CR-400 วัดที่ผิวของเนื้อปลาบดแผ่นอบแห้งตามระบบ Hunter ซึ่งแสดงในเทอมของตัวแปร L a และ b โดยค่า L แสดงค่าความสว่าง a แสดงค่าสีแดงและสีเขียว และ b แสดงค่าสีเหลืองและน้ำเงิน ในการทดสอบจะใช้เนื้อปลาบดแผ่นอบแห้งจำนวน 4 ชิ้นต่อการทดสอบแต่ละครั้ง แล้วนำค่าที่ได้จากการทดสอบมาหาค่าเฉลี่ย และทำการวิเคราะห์ผล

(2) การทดสอบคุณภาพด้านการหดตัว จะใช้วิธีการวัดพื้นที่ของเนื้อปลาบดแผ่นหลังจากอบแห้งด้วยเครื่องวัดพื้นที่ชื่อ Ushikata รุ่น X-PLAN360C เปอร์เซนต์การหดตัวของเนื้อปลาบดแผ่นหลังจากอบแห้งคำนวณได้ดังสมการ

$$S = \left(1 - \left(\frac{A_{s,dried}}{A_{s,i}} \right) \right) \times 100$$

โดยที่ S คือ เปอร์เซนต์การหดตัวของเนื้อปลาบดแผ่นหลังจากอบแห้ง A_{s,dried} คือ พื้นที่ของเนื้อปลาบดแผ่นหลังจากอบแห้ง (ตร.ซม.) A_{s,i} คือ พื้นที่ของเนื้อปลาบดแผ่นก่อนการอบแห้ง (ตร.ซม.) ทั้งนี้การทดสอบจะใช้เนื้อปลาบดแผ่นอบแห้ง 4 ชิ้นต่อหนึ่งตัวอย่างทดสอบ แล้วหาค่าเฉลี่ยของแต่ละตัวอย่าง และทำการวิเคราะห์ผล

(3) การทดสอบคุณภาพทางด้านเนื้อสัมผัส (ความแข็งและความเหนียว) จะใช้เครื่อง Texture

Analyzer ยี่ห้อ Stable Micro Systems รุ่น TA-XT.Plus โดยความแข็งพิจารณาจากค่าแรงกดสูงสุด (Maximum Compressive Force) ที่กระทำต่อชิ้นเนื้อปลาบดแผ่นอบแห้ง ซึ่งหัวกดที่ใช้ทดสอบมีลักษณะเป็นทรงกระบอก (Cylinder) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มม. มีความเร็วในการกด 1 มม./วินาที ส่วนความเหนียวพิจารณาจากค่าแรงเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Force) ที่กระทำต่อชิ้นเนื้อปลาบดแผ่นอบแห้งจนแตกออกจากกัน ซึ่งหัวตัดจะมีลักษณะเป็นใบมีดตัด (Guillotine Blade) มีความเร็วในการตัด 5 มม./วินาที การทดสอบจะใช้เนื้อปลาบดแผ่นอบแห้ง 4 ชิ้นต่อตัวอย่าง แล้วหาค่าเฉลี่ยของแต่ละตัวอย่าง และทำการวิเคราะห์ผล

2.6 การประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์ทางด้านประสาทสัมผัส

จากผลการทดสอบคุณภาพทางด้านเนื้อสัมผัส เนื้อปลาบดแผ่นอบแห้งที่มีค่าความแข็งและความเหนียวน้อยที่สุดจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัสกับเนื้อปลาบดแผ่นที่ผ่านการทอดด้วยน้ำมันถั่วเหลือง (การเตรียมตัวอย่างของเนื้อปลาบดแผ่นที่ผ่านการทอดจะเหมือนกับการเตรียมตัวอย่างของเนื้อปลาบดแผ่นในงานวิจัยนี้ จากนั้นนำเนื้อปลาบดแผ่นมาอบแห้งด้วยอากาศร้อนในตู้อบไฟฟ้าที่ 50 °ซ เป็นเวลา 3 ชม. แล้วจึงนำมาทอดด้วยน้ำมันถั่วเหลือง) การประเมินคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัสจะใช้วิธี 9-point Hedonic Scale (Lawless and Heymann, 2010) โดยผู้ประเมิน คือ นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก จำนวน 50 คน แบบสอบถามในการทดสอบประกอบด้วยคำถาม 5 ข้อ ได้แก่

คุณลักษณะทางด้านสี ลักษณะปรากฏ กลิ่นรส เนื้อสัมผัส (ความกรอบ) และความชอบโดยรวม

2.7 การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

สมการ Fick's Second Law of Diffusion จะใช้ในการอธิบายค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่ออกจากผลิตภัณฑ์ และเมื่อพิจารณาถึงการแพร่ของความชื้นในวัสดุแผ่นแบนซึ่งกว้างและยาวมาก (Infinite Slab) จะได้สมการ (Crank, 2001)

$$\frac{dM}{dt} = D_{eff} \left(\frac{d^2M}{dx^2} \right)$$

มีสภาวะเริ่มต้นและสภาวะขอบเขต ดังนี้

$$t=0, \quad 0 \leq x \leq L, \quad M=M_i$$

$$t>0, \quad x=0, \quad \frac{dM}{dt} = 0$$

$$t>0, \quad x=L, \quad M=M_e$$

จะได้คำตอบของสมการ Fick's Second Law of Diffusion ที่สอดคล้องกับสภาวะเริ่มต้นและสภาวะขอบเขตดังนี้ (Singh and Gupta, 2007)

$$\begin{aligned} MR &= \frac{M - M_e}{M_i - M_e} \\ &= \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \end{aligned}$$

โดยที่ MR คือ อัตราส่วนความชื้น M คือ ความชื้นที่เวลาใด ๆ (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง) M_e คือ ความชื้นสมดุล (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง) M_i คือ ความชื้นเริ่มต้น (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง)

L คือ ครึ่งหนึ่งของความหนาของผลิตภัณฑ์ (เมตร)
 D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (ตร.ม./วินาที) n คือ จำนวนเทอมของสมการ t คือ เวลาการอบแห้ง (วินาที) และ x คือ ระยะทาง (เมตร)

2.8 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การทดสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ทางด้านสี การหดตัว ความแข็ง ความเหนียว และการประเมินคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัสจะใช้โปรแกรม SPSS วิเคราะห์ผลทางสถิติแบบ ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT)

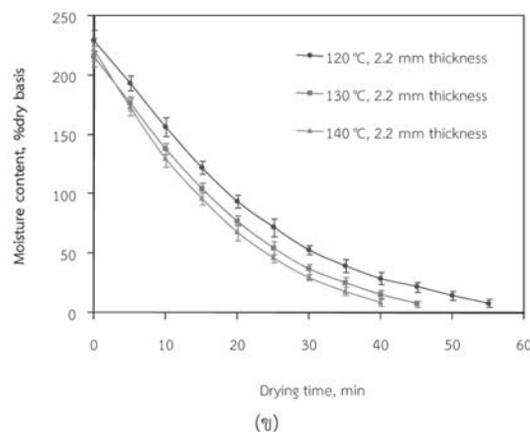
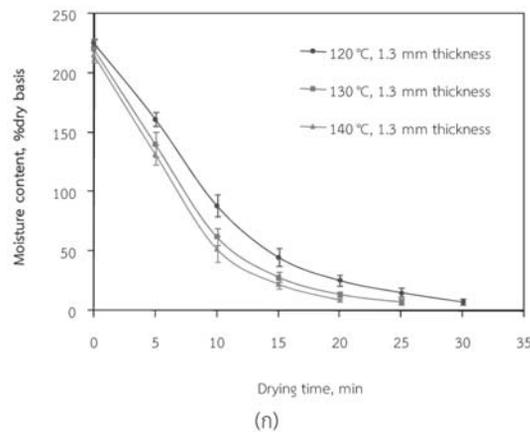
3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

3.1 จุลผลศาสตร์การอบแห้งเนื้อปลาตบแผ่นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

3.1.1 ผลของอุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้น

การอบแห้งเนื้อปลาตบแผ่นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ทำการทดลองโดยนำเนื้อปลาตบแผ่นมาอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120, 130 และ 140 °ซ จนเหลือความชื้นสุดท้ายต่ำกว่า 10 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง การเปลี่ยนแปลงความชื้นของเนื้อปลาตบแผ่นระหว่างการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งแสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งพบว่าเนื้อปลาตบแผ่นที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิสูงสามารถลดความชื้นได้เร็วกว่าเนื้อปลาตบแผ่นที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ผลต่างของอุณหภูมิตั้งแต่ไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับผลิตภัณฑ์มีค่าสูงขึ้น อัตราการถ่ายเทความร้อนจากตัวกลาง

ไปยังผลิตภัณฑ์จึงมีค่ามากขึ้น ส่งผลให้อัตราการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์สูงขึ้น ทั้งนี้ที่ระดับความหนาของเนื้อปลาตบแผ่น 1.3 มม. (ดูรูปที่ 2(ก)) พบว่า เนื้อปลาตบแผ่นที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ 120, 130 และ 140 °ซ ใช้เวลาการอบแห้ง 30, 25 และ 20 นาที ตามลำดับ และที่ระดับความหนาของเนื้อปลาตบแผ่น 2.2 มม. (ดูรูปที่ 2(ข)) พบว่า เนื้อปลาตบแผ่นที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ 120, 130 และ 140 °ซ ใช้เวลาการอบแห้ง 55, 45 และ 40 นาที ตามลำดับ



รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของเนื้อปลาตบแผ่นระหว่างการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ 120, 130 และ 140 °ซ โดยที่ (ก) อบแห้งเนื้อปลาตบแผ่นที่ความหนา 1.3 มม. และ (ข) อบแห้งเนื้อปลาตบแผ่นที่ความหนา 2.2 มม.

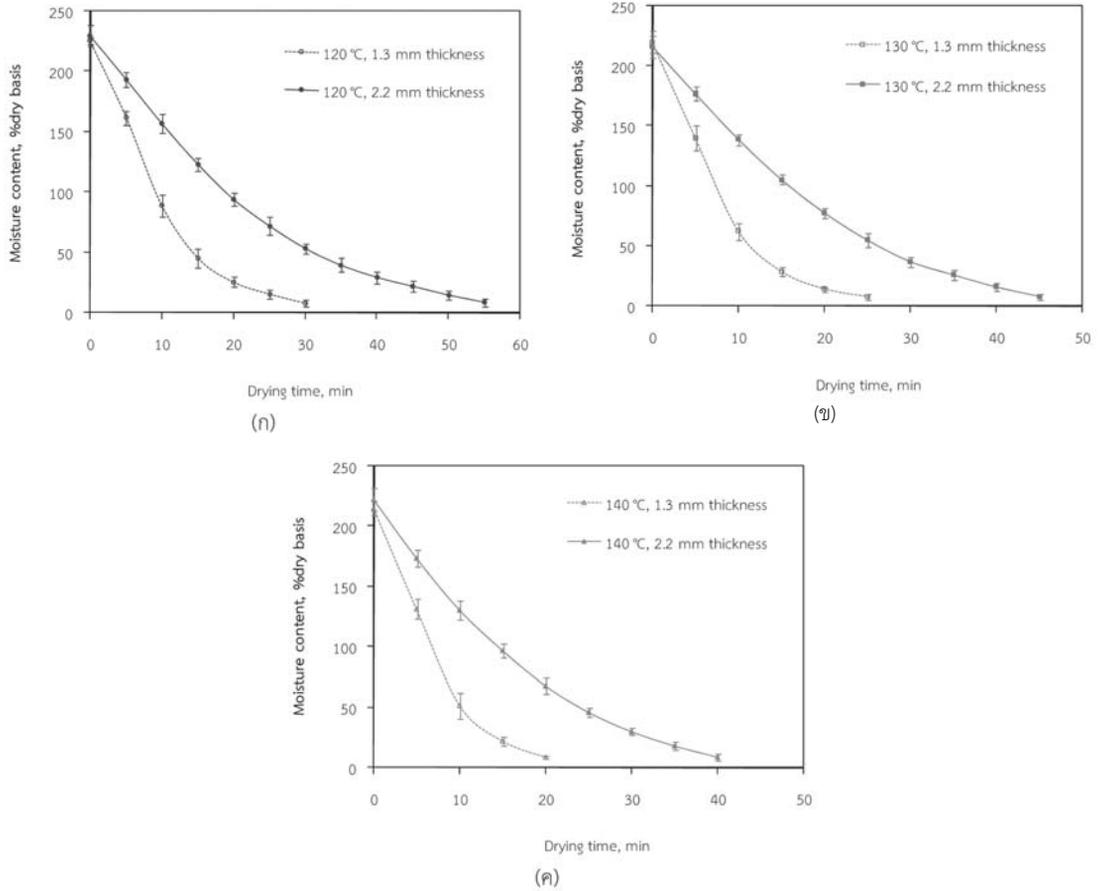
3.1.2 ผลของความหนาของเนื้อปลาบด แผ่นต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้น

รูปที่ 3 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเนื้อปลาบดแผ่นระหว่างการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เมื่อใช้เนื้อปลาบดแผ่นหนา 1.3 และ 2.2 มม. ซึ่งพบว่า เนื้อปลาบดแผ่นหนา 1.3 มม. ใช้เวลาการอบแห้งน้อยกว่าเนื้อปลาบดแผ่นหนา 2.2 มม. เนื่องจากเนื้อปลาบดแผ่นที่มีความหนาน้อยจะมีระยะทางที่ความชื้นต้องใช้ในการเคลื่อนที่จากภายในเนื้อปลาบดออกมายังผิวน้อย ดังนั้น ความชื้นจึงเคลื่อนที่ออกจากเนื้อปลาบดแผ่นได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ใช้เวลาการอบแห้งน้อย ทั้งนี้ที่ระดับอุณหภูมิ 120 °ซ (ดูรูปที่ 3(ก)) พบว่า เนื้อปลาบดแผ่นหนา 1.3 และ 2.2 มม. ใช้เวลาการอบแห้ง 30 และ 55 นาที ตามลำดับ ขณะที่ระดับอุณหภูมิ 130 °ซ (ดูรูปที่ 3(ข)) พบว่า เนื้อปลาบดแผ่นหนา 1.3 และ 2.2 มม. ใช้เวลาการอบแห้ง 25 และ 45 นาที ตามลำดับ และที่ระดับอุณหภูมิ 140 °ซ (ดูรูปที่ 3(ค)) พบว่า เนื้อปลาบดแผ่นหนา 1.3 และ 2.2 มม. ใช้เวลาการอบแห้ง 20 และ 40 นาที ตามลำดับ

3.2 การทดสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์

3.2.1 คุณภาพทางด้านสี

ผลการทดสอบคุณภาพทางด้านสีของเนื้อปลาบดแผ่นอบแห้งแสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งพบว่าที่ระดับความหนาเดียวกัน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าความสว่าง (ค่า L) มีค่าลดลง แต่ค่าสีแดง (ค่า a) มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะเร่งให้เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard Reaction) ซึ่งทำให้ผิวของผลิตภัณฑ์มีสีน้ำตาลเข้ม (Sa-adchom, 2010) อย่างไรก็ตาม ค่าสีเหลือง (ค่า β) ของเนื้อปลาบดแผ่นที่ถูกอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ 120, 130 และ 140 °ซ นี้ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) นอกจากนี้ยังพบว่าที่ระดับอุณหภูมิอบแห้งเดียวกัน เนื้อปลาบดแผ่นอบแห้งหนา 2.2 มม. มีค่าความสว่าง (ค่า L) และค่าสีเหลือง (ค่า β) น้อยกว่าเนื้อปลาบดแผ่นอบแห้งหนา 1.3 มม. อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) เนื่องจากเนื้อปลาบดแผ่นหนา 2.2 มม. ใช้ระยะเวลาการอบแห้งนานกว่า ทำให้เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดมากกว่าเนื้อปลาบดแผ่นหนา 1.3 มม. ทั้งนี้ค่าสีแดง (ค่า a) ของเนื้อปลาบดแผ่นหนา 1.3 และ 2.2 มม. นี้ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$)



รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของเนื้อปลาบดแผ่นหนา 1.3 และ 2.2 มม. โดยที่ (ก) อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ 120 °ซ (ข) อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ 130 °ซ และ (ค) อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ 140 °ซ

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบคุณภาพทางด้านสีของเนื้อปลาบดแผ่นหลังจากอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ

เนื้อปลาบดแผ่นอบแห้ง		สี		
ความหนา (มม.)	อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (°ซ)	ค่า L	ค่า a	ค่า b
1.3	120	55.21±1.37 ^a	12.48±1.20 ^a	28.43±1.57 ^a
	130	52.80±1.10 ^b	13.05±1.10 ^{ab}	27.12±1.19 ^a
	140	50.70±0.91 ^c	14.56±1.18 ^{bc}	27.31±0.87 ^a
2.2	120	45.77±1.54 ^d	13.40±0.84 ^{ab}	22.25±1.76 ^b
	130	43.48±1.29 ^e	14.14±1.05 ^{ab}	21.93±2.05 ^b
	140	40.65±0.94 ^f	15.82±1.06 ^c	21.46±1.05 ^b

หมายเหตุ: อักขระต่างกันในคอลัมน์เดียวกันจะให้ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (P<0.05)

3.2.2 คุณภาพทางด้านการหดตัว ความแข็งแรง และความเหนียว

ผลการทดสอบคุณภาพทางด้านการหดตัว ความแข็งแรง และความเหนียวของเนื้อปลาทอดแผ่นอบแห้งแสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งพบว่า ที่ระดับความหนาเดียวกัน เนื้อปลาทอดที่ถูกอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ 140 °ซ มีเปอร์เซ็นต์การหดตัวมากกว่าเนื้อปลาทอดแผ่นที่ถูกอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ 120 และ 130 °ซ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) เนื่องจากความร้อนส่งผลให้ความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยกล้ามเนื้อเกิดการหดตัว (วันชลิ เพ็งพงศา, 2549) ดังนั้น เมื่ออุณหภูมิการอบแห้งสูงขึ้น (โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ 140 °ซ) จึงทำให้ความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยกล้ามเนื้อเกิดการหดตัวมากขึ้น ทั้งนี้การหดตัวที่มากขึ้นยังทำให้เนื้อปลาทอดแผ่น (หนา 2.2 มม.) ที่ถูกอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ 140 °ซ มีความแข็งแรงและความเหนียว

มากกว่าเนื้อปลาทอดแผ่น (หนา 2.2 มม.) ที่ถูกอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งในช่วงแรกที่ 120 และ 130 °ซ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) อย่างไรก็ตาม ที่ระดับความหนา 1.3 มม. พบว่าความแข็งแรงและความเหนียวของเนื้อปลาทอดแผ่นที่ถูกอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ 120, 130 และ 140 °ซ นี้ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) นอกจากนี้ ยังพบว่าที่ระดับอุณหภูมิการอบแห้งเดียวกัน เนื้อปลาทอดแผ่นอบแห้งหนา 2.2 มม. มีเปอร์เซ็นต์การหดตัวมากกว่าเนื้อปลาทอดแผ่นอบแห้งหนา 1.3 มม. อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) เนื่องจากเนื้อปลาทอดแผ่นอบแห้งหนา 2.2 มม. ใช้ระยะเวลาการอบแห้งนาน เส้นใยกล้ามเนื้อจึงได้รับความร้อนเป็นระยะเวลานานด้วย ทำให้เส้นใยกล้ามเนื้อเกิดการหดตัวมาก ในงานวิจัยนี้ค่าความแข็งแรงและความเหนียวของเนื้อปลาทอดแผ่นอบแห้งจะถูกเปรียบเทียบกับที่ระดับความหนาเดียวกันเท่านั้น

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบคุณภาพทางด้านการหดตัว ความแข็งแรง และความเหนียวของเนื้อปลาทอดแผ่นหลังจากอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ

เนื้อปลาทอดแผ่นอบแห้ง		การหดตัว (%)	ความแข็งแรง (นิวตัน)	ความเหนียว (นิวตัน)
ความหนา (มม.)	อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (°ซ)			
1.3	120	50.16±1.77 ^a	3.23±1.07 ^a	5.32±1.09 ^a
	130	51.95±2.04 ^a	3.56±1.18 ^a	6.17±1.31 ^a
	140	54.87±1.45 ^b	3.77±1.04 ^a	8.47±1.46 ^a
2.2	120	61.33±1.89 ^c	14.42±2.17 ^b	405.25±18.97 ^b
	130	63.15±1.64 ^c	16.35±1.88 ^b	418.47±25.90 ^b
	140	67.25±1.53 ^d	19.95±2.08 ^c	445.42±18.86 ^c

หมายเหตุ: อักขระต่างกันในกลุ่มเดียวกันจะให้ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($P < 0.05$)

3.2.3 การประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์ทางด้านประสาทสัมผัส

เนือปลาบดแผ่น (หนา 1.3 มม.) อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ 120 °ซ ถูกนำมาประเมินคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัส เนื่องจากมีความแข็งและความเหนียวน้อยที่สุด (แสดงดังตารางที่ 2) ผลการประเมินคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัสของเนือปลาบดแผ่นอบแห้งแสดงดังตารางที่ 3 พบว่าเนือปลาบดแผ่นที่ถูกอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ 120 °ซ มีคะแนนทางด้านสี ลักษณะปรากฏ กลิ่นรส เนื้อสัมผัส (ความกรอบ) และความชอบโดยรวมน้อยกว่าเนือปลาบดแผ่นที่ผ่านการทอดด้วยน้ำมันถั่วเหลือง เนื่องจากเนือปลาบดแผ่นที่ผ่านการทอดมีความพองตัวและความกรอบมากกว่า

3.3 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลเป็นสมบัติที่ใช้แสดงลักษณะการแพร่ในของเหลวที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลจากบริเวณที่มีความ

เข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ โมเลกุลของตัวถูกทำลายจะค่อย ๆ แพร่กระจายออกไปจนกว่าจะได้เป็นสารละลายเนื้อเดียวกันจึงหยุดการแพร่ซึ่งเป็นสภาวะสมดุล (มะลิ นาชัยสินธุ์ และคณะ, 2551) จากตารางที่ 4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของเนือปลาบดแผ่นที่ผ่านการอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ ซึ่งพบว่า ที่ระดับความหนาเดียวกัน ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งสูงขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิมอบแห้งที่สูงขึ้นทำให้ความชื้นสามารถแพร่ออกจากผลิตภัณฑ์ได้เร็วขึ้น นอกจากนี้ ยังพบว่า ที่ระดับอุณหภูมิมอบแห้งเดียวกันเนือปลาบดแผ่นหนา 1.3 มม. มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลน้อยกว่าเนือปลาบดแผ่นหนา 2.2 มม. เนื่องจากเมื่อผลิตภัณฑ์ถูกอบแห้ง ผิวของผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาน้อยจะเกิดการแข็งตัวได้เร็ว ทำให้ความชื้นแพร่ออกจากผลิตภัณฑ์ได้ช้า (Jena and Das, 2007; Nguyen and Price, 2007; Shiby and Mishra, 2007)

ตารางที่ 3 ผลการประเมินคุณภาพของเนือปลาบดแผ่นอบแห้งทางด้านประสาทสัมผัส

ผลิตภัณฑ์	คุณลักษณะ				
	สี	ลักษณะปรากฏ	กลิ่นรส	เนื้อสัมผัส (ความกรอบ)	ความชอบโดยรวม
เนือปลาบดแผ่นอบแห้งที่ 120 °ซ	6.42±0.93	5.90±0.99	5.12±1.17	3.12±1.21	4.62±1.10
เนือปลาบดแผ่นที่ผ่านการทอด	7.20±1.14	7.62±0.92	7.58±0.91	7.64±0.83	7.52±0.89

หมายเหตุ: ระดับคะแนนของการประเมินคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัส: 1=ไม่ชอบมากที่สุด 2=ไม่ชอบมาก 3=ไม่ชอบปานกลาง 4=ไม่ชอบเล็กน้อย 5=เฉย ๆ 6=ชอบเล็กน้อย 7=ชอบปานกลาง 8=ชอบมาก และ 9=ชอบมากที่สุด

ตารางที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (Deff) ของเนื้อปลาบดแผ่นที่ผ่านการอบแห้งที่สภาวะต่างๆ

เนื้อปลาบดแผ่นอบแห้ง		$D_{eff} \times 10^{-10}$ (ตร.ม./วินาที)
ความหนา (มม.)	อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (°ซ)	
1.3	120	2.26
	130	2.84
	140	3.08
2.2	120	3.07
	130	3.52
	140	3.97

4. สรุป

จากการศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งเนื้อปลาบดแผ่นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง พบว่า อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งและความหนาของเนื้อปลาบดมีอิทธิพลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้ง โดยความชื้นในผลิตภัณฑ์จะลดลงได้เร็วเมื่อเพิ่มอุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งหรือลดความหนาของเนื้อปลาบด และจากการศึกษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งพบว่า ค่าความสว่างของเนื้อปลาบดแผ่นอบแห้งมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่ออุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งและความหนาของเนื้อปลาบดเพิ่มขึ้น พิจารณาที่ระดับความหนาของเนื้อปลาบด 2.2 มม. พบว่า เนื้อปลาบดที่ถูกอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ 140 °ซ มีเปอร์เซ็นต์การหดตัว ความแข็ง และความเหนียวมากกว่าเนื้อปลาบดแผ่นที่ถูกอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ 120 และ 130 °ซ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ อย่างไรก็ตามที่ระดับความหนา 1.3 มม. พบว่า ความแข็งและความเหนียวของเนื้อปลาบดแผ่นที่ถูกอบแห้งด้วย

ไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ 120, 130 และ 140 °ซ นี้ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้ ยังพบว่า ที่ระดับอุณหภูมิการอบแห้งเดียวกัน เนื้อปลาบดแผ่นอบแห้งหนา 2.2 มม. มีเปอร์เซ็นต์การหดตัวมากกว่าเนื้อปลาบดแผ่นอบแห้งหนา 1.3 มม. อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของเนื้อปลาบดแผ่นที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง พบว่า อยู่ในช่วง 2.26×10^{-10} - 3.97×10^{-10} ตร.ม./วินาที เนื้อปลาบดแผ่นอบแห้งที่ได้จากงานวิจัยนี้มีคะแนนทางด้านประสาทสัมผัสน้อยกว่าเนื้อปลาบดแผ่นที่ผ่านการทอด เนื่องจากเนื้อปลาบดแผ่นที่ผ่านการทอดมีความพองตัวและความกรอบมากกว่า ดังนั้น ในงานวิจัยครั้งต่อไปควรอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งแบบหลายขั้นตอนหรือนำกระบวนการพuffing (Puffing) มาใช้ร่วมกับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เพื่อทำให้ผลิตภัณฑ์อบแห้งที่ได้มีความพองตัวและความกรอบเพิ่มขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีโดยการสนับสนุนของโครงการการวิจัยภาคปฏิบัติและการพัฒนา (Project of Hands-on Research and Development) ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ทั้งนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร. ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ ที่ได้ให้คำแนะนำในการทำวิจัยอย่างต่อเนื่อง และสถาบันวิจัยเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องวัดสีและเครื่องวัดเนื้อสัมผัส

6. เอกสารอ้างอิง

- กลุ่มวิเคราะห์การค้าสินค้าประมงระหว่างประเทศ กรมประมง. วันที่สืบค้น 15 สิงหาคม 2555. การค้าสินค้าประมง. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: http://www.sheries.go.th/foreign/index.php?option=com_content&view=category&id=16&Itemid=14.
- ณรงค์ อั้งกิมบัว. 2544. การอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพลังงาน. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- พลสันต์ วงษ์ศรี. 2548. การอบแห้งเนื้อหมูด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพลังงาน. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- มะลิ นาชัยสินธุ์, สมชาติ โสภณธรณฤทธิ์ และจินดาพร จำรัสเลิศลักษณ์. 2551. อิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งและสมบัติของเปลือกที่ผ่าน
- การอบแห้งแบบสองขั้นตอน. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 6 วันที่ 8-9 พ.ค. 2551. หน้า 425-431. สงขลา: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- วันชลิ เพ็งพงศา. 2549. การอบแห้งเนื้อหมูปรุงรสด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งร่วมกับบีบความร้อน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพลังงาน. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ศิริวิดม ลินประเสริฐ. 2548. การศึกษาการอบแห้งเนื้อวัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพลังงาน. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สุดาทิพย์ คงขำ. 2549. การอบแห้งเนื้อไก่ปรุงรสด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งร่วมกับบีบความร้อน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพลังงาน. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สำนักงานกองทุนสนับสนุนการสร้างเสริมสุขภาพ. วันที่สืบค้น 15 สิงหาคม 2555. สสส.ชี้ปลาน้ำจืดมีโอเมก้า 3 สูงกว่าปลาทะเล. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.thaihealth.or.th/healthcontent/news/5552>.
- อำเภอศักดิ์ ธิบุญมา และศักชัย จงจำ. 2553. การอบแห้งซิงค์ด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. 15(2): 76-86.
- AOAC. 1995. Official Methods of Analysis of AOAC International. Virginia: Association of Official Analytical

- Chemists.
- Crank, J. 2001. **The Mathematics of Diffusion**. 2nd ed. Oxford: Oxford University Press.
- Jena, S. and Das, H. 2007. **Modelling for vacuum drying characteristics of coconut presscake**. J. Food Engineering. 79(1): 92-99.
- Lawless, H.T. and Heymann, H. 2010. **Sensory Evaluation of Food: Principles and Practices**. New York: Springer.
- Nguyen, M.H. and Price, W.E. 2007. **Air-drying of banana: influence of experimental parameters, slab thickness, banana maturity and harvesting season**. J. Food Engineering. 79(1): 200-207.
- Sa-adchom, P. 2010. **Meat product drying using superheated steam**. Ph.D. Thesis. King Mongkut's University of Technology Thonburi.
- Shiby, V.K. and Mishra, H.N. 2007. **Thin layer modelling of recirculatory convective air drying of curd (Indian yoghurt)**. Food and Bioproducts Processing. 85(3): 193-201.
- Singh, B. and Gupta, A.K. 2007. **Mass transfer kinetics and determination of effective diffusivity during convective dehydration of pre-osmosed carrot cubes**. J. Food Engineering. 79(2): 459-470.