

เอกสารวิชาการฉบับที่ ๕/๒๕๕๘



Technical Paper No. 5/2015

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการอบแห้งด้วยตู้อบแห้ง
แบบลมร้อน: กรณีศึกษา: ปลาบดแผ่นอบแห้ง
Mathematical Model of Drying Process in Hot Air Dryer:
Case Study: Dried Minced Fish Sheet

พิสิฐ วงศ์สง่าศรี

เบญจวรรณ ธรรมธนารักษ์

สุทธิวัฒน์ แซ่ฮ้อ

Pisit Wongsangasri

Benjawan Thumthanaruk

Suttiwat Sae-Hor

กองวิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมสัตว์น้ำ
กรมประมง
กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

Fishery Technological Development Division
Department of Fisheries
Ministry of Agriculture and Cooperatives

เอกสารวิชาการฉบับที่ ๕/๒๕๕๘



Technical Paper No. 5/2015

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการอบแห้งด้วยตู้อบแห้ง

แบบลมร้อน: กรณีศึกษา :ปลาบดแผ่นอบแห้ง

Mathematical Model of Drying Process in Hot Air Dryer:

Case Study: Dried Minced Fish Sheet

พิสิฐ วงศ์สง่าศรี

เบญจวรรณ ธรรมธนารักษ์

สุทธิวัฒน์ แซ่ฮ้อ

Pisit Wongsangasri

Benjawan Thumthanaruk

Suttiwat Sae-Hor

กองวิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมสัตว์น้ำ

กรมประมง

๒๕๕๘

Fishery Technological Development Division

Department of Fisheries

2015

รหัสทะเบียนวิจัย 52-0807-52080

ii
สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	1
Abstract	2
คำนำ	3
วัตถุประสงค์	6
อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	6
1. วัสดุดิบ	6
2. เครื่องมือและอุปกรณ์	6
3. วิธีการทดลอง	7
ผลการทดลองและวิจารณ์ผล	12
1. การศึกษากระบวนการเตรียมตัวอย่างแมงกะพรุนและการผลิตโปรตีนไฮโดรไลเซต จากแมงกะพรุนก่อนการอบแห้ง	16
2. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตผงโปรตีนจากแมงกะพรุนไฮโดรไลเซต ด้วยวิธีอบแห้งแบบพ่นฝอย	27
3. การศึกษาคุณภาพทางเคมีกายภาพและจุลินทรีย์ของผงโปรตีนจากแมงกะพรุน และศึกษาการเก็บรักษา	33
สรุปผลการทดลอง	35
ข้อเสนอแนะ	37
เอกสารอ้างอิง	37
ภาคผนวก	41

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ค่าเฉลี่ยปริมาณผลผลิต (%Yield) ของแมงกะพรุนหนึ่งส่วนร่วม	12
2	ค่าเฉลี่ยปริมาณผลผลิต (%Yield) ของแมงกะพรุนหนึ่งส่วนขา	13
3	ค่าเฉลี่ยปริมาณผลผลิต (%Yield) ของแมงกะพรุนลอดช่องส่วนร่วม	13
4	ค่าเฉลี่ยปริมาณผลผลิต (%Yield) ของแมงกะพรุนลอดช่องส่วนขา	14
5	โปรตีนที่ละลายน้ำได้จากแมงกะพรุนหนึ่งส่วนร่วม	15
6	โปรตีนที่ละลายน้ำได้จากแมงกะพรุนหนึ่งส่วนขา	15
7	โปรตีนที่ละลายน้ำได้จากแมงกะพรุนลอดช่องส่วนร่วม	16
8	โปรตีนที่ละลายน้ำได้จากแมงกะพรุนลอดช่องส่วนขา	16
9	pH ของโปรตีนไฮโดรไลเซทจากแมงกะพรุนหนึ่งส่วนร่วม	17
10	pH ของโปรตีนไฮโดรไลเซทจากแมงกะพรุนหนึ่งส่วนขา	17
11	pH ของโปรตีนไฮโดรไลเซทจากแมงกะพรุนลอดช่องส่วนร่วม	18
12	pH ของโปรตีนไฮโดรไลเซทจากแมงกะพรุนลอดช่องส่วนขา	18
13	% DH ของโปรตีนไฮโดรไลเซทจากแมงกะพรุนหนึ่งส่วนร่วม (RB)	19
14	% DH ของโปรตีนไฮโดรไลเซทจากแมงกะพรุนหนึ่งส่วนขา (RL)	20
15	% DH ของโปรตีนไฮโดรไลเซทจากแมงกะพรุนลอดช่องส่วนร่วม (LB)	20
16	% DH ของโปรตีนไฮโดรไลเซทจากแมงกะพรุนลอดช่องส่วนขา (LL)	21

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ค่า L^* ของโปรตีนไฮโดรไลเซทของแมงกะพรุนหนัง ส่วนร่วม	22
2	ค่า L^* ของโปรตีนไฮโดรไลเซทของแมงกะพรุนหนัง ส่วนขา	22
3	ค่า L^* ของโปรตีนไฮโดรไลเซทของแมงกะพรุนหลอดช่องส่วนร่วม	22
4	ค่า L^* ของโปรตีนไฮโดรไลเซทของแมงกะพรุนหลอดช่องส่วนขา	23
5	ค่า b^* ของโปรตีนไฮโดรไลเซทของแมงกะพรุนหนัง ส่วนร่วม	23
6	ค่า b^* ของโปรตีนไฮโดรไลเซทของแมงกะพรุนหนัง ส่วนขา	23
7	ค่า b^* ของโปรตีนไฮโดรไลเซทของแมงกะพรุนหลอดช่อง ส่วนร่วม	24
8	ค่า b^* ของโปรตีนไฮโดรไลเซทของแมงกะพรุนหลอดช่อง ส่วนขา	24
9	องค์ประกอบของกรดอะมิโนในวัตถุดิบแมงกะพรุนหนังและหลอดช่อง ส่วนร่วมและขา (g/100 g ตัวอย่าง)	26
10	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขาเข้าและความเข้มข้นมอลโตเด็กซ์ทรินต่อ ร้อยละผลผลิตของผงโปรตีนจากแมงกะพรุนหนัง	28
11	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขาเข้าและความเข้มข้นมอลโตเด็กซ์ทรินต่อ ร้อยละผลผลิตของผงโปรตีนจากแมงกะพรุนหลอดช่อง	28
12	ปริมาณความชื้นของผงโปรตีนจากแมงกะพรุนหนัง	30
13	ปริมาณความชื้นของผงโปรตีนจากแมงกะพรุนหลอดช่อง	30
14	ผลความสัมพันธ์ของอุณหภูมิขาเข้าและความเข้มข้นมอลโตเด็กซ์ทรินต่อ ความสามารถในกละลายที่ 25 องศาเซลเซียส ของผงโปรตีนจากแมงกะพรุนหนัง	32
15	ผลความสัมพันธ์ของอุณหภูมิขาเข้าและความเข้มข้นมอลโตเด็กซ์ทรินต่อ ความสามารถในกละลายที่ 25 องศาเซลเซียส ของผงโปรตีนจากแมงกะพรุนหลอดช่อง	32
16	องค์ประกอบทางเคมีของผงโปรตีนจากแมงกะพรุน	33
17	ปริมาณความชื้นและ a_w ของผงโปรตีนจากแมงกะพรุนที่เก็บรักษาเป็นเวลา 3 เดือน	34
18	การวิเคราะห์ปริมาณจุลินทรีย์ของผงโปรตีนจากแมงกะพรุนเมื่อเก็บรักษาเป็นเวลา 3 เดือน	35

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการอบแห้งด้วยตู้อบแห้ง แบบลมร้อน: กรณีศึกษา :ปลาบดแผ่นอบแห้ง

พิสิฐ วงศ์สง่าศรี^๑ สุเมธ สุพิชญางกูร^๑ สุนีย์ พยอมแจ่มศรี^๒ และ สรเมษ ชโลวัฒน์^๒

^๑กลุ่มนวัตกรรมผลิตภัณท์สัตว์น้ำเชิงพาณิชย์ กองพัฒนาอุตสาหกรรมสัตว์น้ำ กรมประมง

^๒กลุ่มวิจัยและพัฒนาผลิตภัณท์สัตว์น้ำ กองพัฒนาอุตสาหกรรมสัตว์น้ำ กรมประมง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการผลิตปลาบดแผ่นอบแห้ง โดยวิเคราะห์หา Desorption Isotherm ของการอบแห้งปลาบดแผ่น และศึกษาจลพลศาสตร์ของการอบแห้ง (Drying kinetics) แปรอุณหภูมิในการอบ 3 ระดับ (45, 55 และ 60 องศาเซลเซียส) และพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการอบแห้ง ได้สมการทางคณิตศาสตร์การอบแห้งของแผ่นบดแผ่นในตู้อบลมร้อนสามารถแบ่งได้เป็นสองช่วง คือ ช่วงการอบแห้งที่มีอัตราการอบแห้งแบบคงที่ (Constant Drying Rate Period) และการอบแห้งที่มีอัตราการอบแห้งแบบลดลง (Falling Drying Rate Period)

ช่วงการอบแห้งที่มีอัตราการอบแห้งแบบคงที่เป็นช่วงที่ความชื้นสูงกว่า 7 decimal d.b. มีความถูกต้องใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองค่อนข้างสูงของทุกอุณหภูมิในการอบแห้ง (45 55 และ 60°C) และมีค่า experimental mass-transfer coefficients, k_p ของการอบแห้งที่อุณหภูมิ 45 55 และ 60°C เท่ากับ 9.027×10^{-8} 1.266×10^{-7} 1.290×10^{-7} $\text{kg/m}^2 \text{ s. Pa}$ ตามลำดับ โดยมีค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 อุณหภูมิเท่ากับ 1.153×10^{-7} $\text{kg/m}^2 \text{ s. Pa}$

ช่วงการอบแห้งที่มีอัตราการอบแห้งแบบลดลง จะได้ค่า D_m ที่อุณหภูมิในการอบแห้ง 45 55 60°C เท่ากับ 1.85×10^{-14} , 2.50×10^{-14} , และ 3.60×10^{-14} m^2/s ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาค่า D_m ของแต่ละอุณหภูมิ พบว่า ค่า D_m ลดลงเมื่อค่า Bi_m เพิ่มขึ้น และ ที่ค่า Bi_m เท่ากัน ค่า D_m จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งเพิ่มขึ้น โดย internal conductive resistance ภายในอาหาร มีผลมากกว่า external convective resistance และเมื่อนำค่า D_m มาหาความสัมพันธ์กับค่าอุณหภูมิในการอบแห้ง ด้วยสมการของ Arrhenius พบว่า ค่า Activation energy (E_a) มีค่าเท่ากับ 37.09 kJ/mol และมีค่า r^2 ที่ค่อนข้างสูงที่ 0.9357

คำสำคัญ ปลาบดแผ่น การพัฒนาผลิตภัณท์ การพัฒนากระบวนการผลิต การอบแห้ง

*ผู้รับผิดชอบ: เกษตรกลาง จตุจักร กรุงเทพฯ ๑๐๙๐๐ โทร: ๐-๒๙๔๐-๖๑๓๐-๔๕ ต่อ ๔๓๑๕

Email: fluke_w2001@yahoo.com, pisitw@fisheries.go.th

Mathematical Model of Drying Process in Hot Air Dryer: Case Study: Dried Minced Fish Sheet

Pisit Wongsangasri^{1*}, Sumate Supichayangure¹, Sunee Payomjamsri² and Soramate Chalowattana²

¹Innovative Technology of Fish and Fishery Products in Commercials Unit,

²Fish Processing and Product Development Unit ,

Abstract

The objectives of this study were to develop a mathematical model of drying process for the product. The desorption isotherm and drying kinetics of minced fish sheet product were studied. Drying temperatures were varied to 45, 55 and 60 degree celcius, resulting to drying process model. The drying equations comprised of 2 ranges, constant drying rate period and falling drying rate period.

The constant drying rate period started from the beginning of drying process until the moisture content reached 7 decimal (dry basis) which was highly accurate at every experimental temperatures (45, 55 and 60 degree celcius) and the experimental mass-transfer coefficients, k_p were 9.027×10^{-8} 1.266×10^{-7} 1.290×10^{-7} $\text{kg/m}^2 \text{ s. Pa}$ at 45, 55 and 60 degree celcius, respectively. The average k_p of all 3 temperatures was 1.153×10^{-7} $\text{kg/m}^2 \text{ s. Pa}$.

At the falling drying rate period, the diffusion coefficient (D_m) values at 45, 55 and 60 degree celcius were 1.85×10^{-14} , 2.50×10^{-14} , and 3.60×10^{-14} m^2/s , respectively. For each temperature, the D_m increased when Biot number (Bi_m) increased and at the same Bi_m value, the D_m increased when drying temperature increased. This showed that the internal conductive resistance had more impact to the mass-transfer rate than the external convective resistance. The Arrhenius expression was fitted to the experimental values of D_m as a function of $1/\text{Temperature}$. The Activation energy (E_a) was 37.09 kJ/mol with r^2 at 0.9357.

Key words: Minced fish sheet, Product development, Process development, Drying

*Corresponding author: Kaset-klang Chatuchak, Bangkok 10900 Tel: 0-2940-6130-45 ext. 4315

Email: fluke_w2001@yahoo.com, pisitw@fisheries.go.th

บทนำ

น้ำเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของอาหารและในอาหารส่วนใหญ่ จะมีน้ำเป็นองค์ประกอบที่มากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในผักและผลไม้ ซึ่งน้ำจะมีส่วนทำให้เกิดกระบวนการเสื่อมเสียทางจุลินทรีย์และปฏิกิริยาทางเคมีได้ (Fennema, 1996) ดังนั้นเพื่อที่จะควบคุมการเสื่อมเสียทางจุลินทรีย์และปฏิกิริยาทางเคมีของอาหาร ความชื้นในอาหารจำเป็นต้องถูกกำจัดออกในปริมาณที่มากพอ จนกระทั่งถึงระดับที่ทำให้ค่า water activity ของอาหารมีค่าอยู่ในช่วงที่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์และทำให้ปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆ อยู่ในระดับต่ำที่สุด

ปลาเป็นสินค้าที่สำคัญตัวหนึ่งของประเทศไทย มีการจับ เพาะเลี้ยงและแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมายเพื่อเพิ่มมูลค่าของสินค้าและให้มีความหลากหลายมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระดับผลิตภัณฑ์สัตว์น้ำพื้นเมือง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของปลาที่ใช้เป็นวัตถุดิบ แหล่งที่ผลิต ภูมิปัญญาพื้นบ้าน รวมถึงวัฒนธรรมในการบริโภคของแต่ละท้องถิ่น อย่างไรก็ตาม เนื่องด้วยปัญหาราคาน้ำมันที่สูงขึ้นและยังคงมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นในอนาคต ทำให้ต้นทุนการจับและการผลิตสูงขึ้น ดังนั้น วิธีการใดๆ ที่สามารถ ลดต้นทุนการผลิต หรือ เพิ่มมูลค่าของสินค้าได้ จะช่วยในการแก้ปัญหาดังกล่าวได้

ปลาบดแผ่น เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถเพิ่มมูลค่าของปลาได้ ปลาบดแผ่นจะมีลักษณะที่กรอบ มีสีน้ำตาลทอง ซึ่งมีแบบอย่างมาจาก หมูแผ่น โดยสามารถผลิตได้จากปลาหลายชนิด เช่น ปลา mackerel ชนิดลำตัวสั้น (*Rastrelliger brachysoma*) ปลา round scad (*Decapterus maruadsi*) เป็นต้น และมีการผสมเครื่องเทศต่างๆ ลงไปเพื่อเพิ่มกลิ่นและรสชาติของปลาบดแผ่น

นอกจากนี้ ในระดับอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดย่อม ซึ่งเกิดจากการรวมกลุ่มของชาวบ้านในพื้นที่และผลิตสินค้าอันมีพื้นฐานมาจากภูมิปัญญาชาวบ้าน มีการรายงานว่ามีปัญหาในเรื่องความไม่สม่ำเสมอของคุณภาพ อันเนื่องมาจากการควบคุมการผลิตในขั้นตอนต่างๆ ผู้ประกอบการขาดความรู้ที่เกี่ยวข้องในการแปรรูปอาหารอบแห้ง ยังมีการควบคุมในระหว่างกระบวนการแปรรูปที่ไม่ได้ใช้หลักทางวิชาการมากนัก โดยส่วนใหญ่จะอาศัยประสบการณ์อันเกิดจากการลองผิดลองถูก ทำให้เกิดการสูญเสีย ทั้งทางด้านเวลา ต้นทุนของวัตถุดิบและพลังงานที่ต้องเสียไป นอกจากนี้ เมื่อวัตถุดิบมีการเปลี่ยนแปลงไปทั้งในด้านกายภาพ เคมี หรือ ชีวเคมี หรือ มีความต้องการผลิตภัณฑ์ใหม่ หรือ สูตรอาหารเปลี่ยนไป การควบคุมกระบวนการอบแห้ง จะเปลี่ยนแปลงไป จะเกิดปัญหาการควบคุมปัจจัยการผลิตที่เหมาะสม โดยเฉพาะอย่างยิ่งเวลาในการอบแห้ง อันมีผลโดยตรงต่อค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์สุดท้าย ซึ่งใช้ในการควบคุมค่า water activity อีกชั้นหนึ่ง ส่งผลต่อคุณภาพและความปลอดภัยของอาหาร ทำให้ต้องหา optimal conditions ในการอบแห้งของผลิตภัณฑ์นั้นๆ ใหม่ทุกครั้ง

กระบวนการอบแห้งเป็นวิธีการถนอมอาหารที่เก่าแก่ที่สุดวิธีหนึ่ง ซึ่งเป็นการปรับลดปริมาณน้ำในผลิตภัณฑ์อาหารให้มีค่าต่ำจนกระทั่งไม่สามารถเกิดการเสื่อมเสียทางจุลินทรีย์ได้ รวมทั้ง เพื่อลดโอกาสในการเสื่อมเสียของอาหารอันเนื่องมาจากสาเหตุอื่นที่ไม่ได้เกิดจากจุลินทรีย์ เช่น ปฏิกิริยาทางเคมีและชีวเคมี เป็นต้น จุดประสงค์ในการอบแห้ง นอกเหนือจากการถนอมรักษาอาหาร ให้มีอายุการเก็บรักษาที่ยืนยาวขึ้นแล้ว การ

อบแห้งยังช่วยลดน้ำหนักและปริมาตรของผลิตภัณฑ์ ทำให้สามารถขนส่งและเก็บรักษาได้ในปริมาณที่มากขึ้น และมีประสิทธิภาพ และในบางครั้ง การอบแห้ง ยังช่วยให้เกิดความสะดวกในการบริโภคและนำไปใช้ต่อผู้บริโภค

การอบแห้งเป็นการนำเอาความชื้นออกจากตัวอาหาร ซึ่งต้องทำขึ้นในลักษณะที่ทำให้เกิดผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์น้อยที่สุด ในบางกรณี การอบแห้งต้องคำนึงถึงการคืนตัวของผลิตภัณฑ์อบแห้ง (Rehydration) เมื่อมีการทำให้ผลิตภัณฑ์คืนตัวแล้ว อาหารควรมีคุณภาพใกล้เคียงกับลักษณะเดิมก่อนการผ่านการอบแห้งมากที่สุด เพื่อที่จะบรรลุวัตถุประสงค์ต่าง ๆ ของการอบแห้งนั้น การถ่ายเทความร้อนและมวล (Heat and mass transfer) ภายในตัวผลิตภัณฑ์อาหารต้องเกิดขึ้นอย่างเหมาะสม การออกแบบกระบวนการอบแห้ง จำเป็นต้องวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและมวลที่เกิดขึ้น รวมทั้งต้องเข้าใจกระบวนการต่างๆ ที่เกิดขึ้นในการอบแห้งเพื่อที่จะได้ประสิทธิภาพสูงสุดและได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพตามที่ต้องการ

ในอดีต การทำแห้งส่วนใหญ่จะทำโดยการตากแดดซึ่งเกี่ยวข้องกับการแผ่รังสีความร้อน เป็นวิธีการที่ง่ายและประหยัดพลังงาน ในปัจจุบัน ถึงแม้ว่าวิธีการทำแห้งจะมีกระบวนการใหม่ๆ เกิดขึ้น เช่น การอบแห้งโดยใช้ลมร้อน (hot air drying) การทำแห้งโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (microwave heating), osmotic dehydration และ การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze drying) แต่การอบแห้งแบบเก่าก็ยังคงใช้กันอยู่ในปัจจุบัน (Salengke, 2000)

โดยทั่วไปแล้ว อัตราการกำจัดความชื้นออกจากผักและผลไม้ในระหว่างการอบแห้งจะมีค่าค่อนข้างต่ำ สำหรับการทำให้แห้งของผักและผลไม้ใช้อากาศร้อน (hot air drying) ค่าคงที่ของการแพร่ของความชื้นจะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 10^{-10} m²/s ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำ ทำให้การอบแห้งมีประสิทธิภาพต่ำและคุณภาพของอาหารที่ได้ต่ำลง ดังนั้นการควบคุมอัตราการกำจัดความชื้นจึงมีความสำคัญในการอบแห้ง (Saravacos and Charm, 1962; Saravacos and Raouzeos, 1986)

กระบวนการอบแห้ง เป็นกระบวนการแปรรูปที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในสินค้าผลิตภัณฑ์ประมงพื้นเมือง เนื่องจากราคาเครื่องอบแห้งไม่สูงมาก ประดิษฐ์ได้ง่าย ไม่สลับซับซ้อน ซึ่งในความเป็นจริงแล้ว กระบวนการอบแห้ง เป็นกระบวนการที่ค่อนข้างซับซ้อน ต้องอาศัยความรู้หลากหลายสาขาในการควบคุมกระบวนการผลิต เนื่องจากมีปัจจัยที่สำคัญหลายตัวที่มีผลต่อการอบแห้ง เช่น ปริมาณความชื้นของอาหารก่อนและหลังการอบแห้ง ค่าการนำความร้อน (thermal conductivity) ของตัวอาหารที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไประหว่างการอบแห้ง การแลกเปลี่ยนความร้อนแบบการนำและการพา (conductive and convective heat transfer) ค่าพื้นที่ผิวและความหนาของอาหารในการเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อน ค่าการพาความร้อนของอากาศร้อนภายในเครื่องอบแห้ง รวมถึงอุณหภูมิ ความชื้น และ ความเร็วของลมที่ใช้ในการอบแห้ง นอกจากนี้ ยังต้องอาศัยความรู้เรื่องการแพร่ (mass transfer) ของน้ำจากตัวอาหารสู่อากาศ เป็นต้น จากปัจจัยที่กล่าวมาทั้งหมด จะเห็นได้ว่า ในการควบคุมการอบแห้งจำเป็นต้องทราบค่าของปัจจัยต่างๆ รวมถึงผลของการเปลี่ยนแปลงของค่าเหล่านี้ต่อผลิตภัณฑ์สุดท้าย ซึ่งในปัจจุบัน ผู้ผลิตสินค้าผลิตภัณฑ์อบแห้งใช้ความเคยชินและประสบการณ์ในการควบคุมการผลิต ทำให้ต้องใช้วิธีการลองผิดลองถูกกว่าจะได้สินค้าออกมา ทำให้สูญเสียเวลาและทรัพย์สินเงินทอง และก็อาจจะไม่ได้สินค้าสุดท้ายที่มีคุณภาพไม่ดีเท่าที่ควรจะเป็น

ดังนั้น การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model) ที่น่าเชื่อถือ จะเป็นทางหนึ่งที่สามารถช่วยแก้ปัญหาเหล่านี้ได้ เพื่อให้มีการควบคุมการผลิตที่ง่ายและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์อบแห้งที่มีคุณภาพดีขึ้น โดยในงานวิจัยนี้ จะใช้ปลาบดแผ่นอบแห้งเป็นกรณีศึกษาเริ่มต้น เนื่องจากปลาบดแผ่นมีความเป็นเนื้อเดียวกันพอสมควร (Homogeneous) และสามารถควบคุมความหนาและพื้นที่ผิวในการแลกเปลี่ยนความร้อนและการแพร่ของน้ำได้สม่ำเสมอ ซึ่งจะทำให้ง่ายในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการอบแห้ง ซึ่งสามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าว ไปพัฒนาใช้กับสินค้าผลิตภัณฑ์ประมงอบแห้งที่มีลักษณะที่ซับซ้อนมากขึ้นต่อไป

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้ คือ ทำให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการควบคุมการผลิตปลาแผ่นอบแห้งที่เหมาะสมในเชิงพาณิชย์ นอกจากนี้ ยังสามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวไปประยุกต์ปรับใช้กับสินค้าผลิตภัณฑ์ประมงอบแห้งต่างๆ ที่มีลักษณะใกล้เคียงกันได้ เพื่อใช้กับโรงงานอุตสาหกรรมประมงขนาดกลางและขนาดย่อมในการเพิ่มมูลค่าสินค้าประมง รวมทั้งลดการสูญเสียอันเกิดจากการผลิตที่มีประสิทธิภาพต่ำในเรื่องของการควบคุมกระบวนการอบแห้ง

วัตถุประสงค์

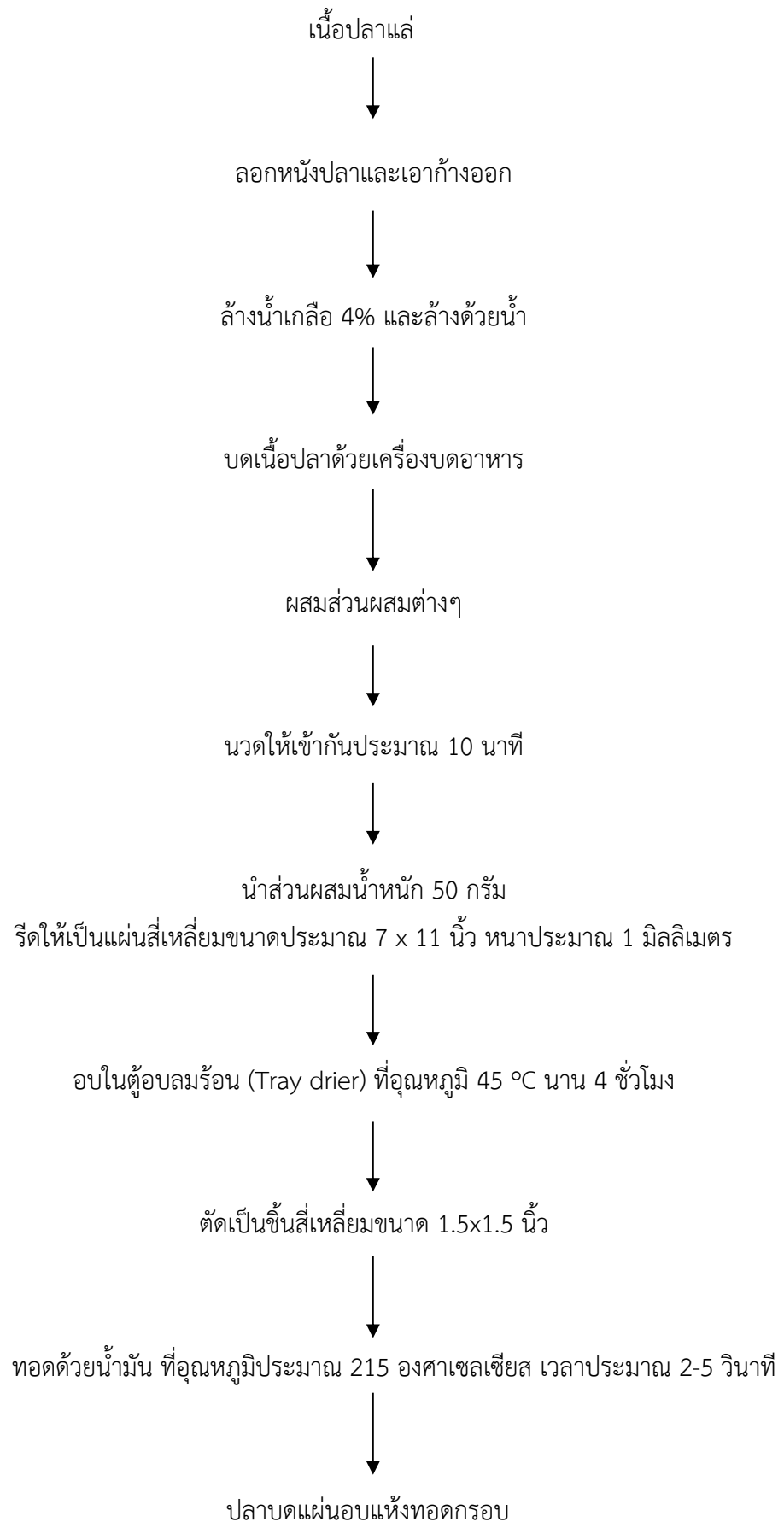
เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการผลิตปลาบดแผ่นอบแห้ง

การเตรียมวัตถุดิบและผลิตปลาบดแผ่นอบแห้ง

นำปลาสดทั้งตัวขนาด 3 ตัวต่อกิโลกรัม มาตัดหัวเอาไส้พุงออก ล้างน้ำให้สะอาด แล่นเนื้อปลาเป็นชิ้นตามความยาวของลำตัวปลา ลอกหนังและเอาก้างกลางออก ให้เหลือเฉพาะส่วนเนื้อปลาแล้ว นำไปผลิตปลาบดแผ่นอบแห้งตามสูตรพื้นฐานต่อไป

สูตรพื้นฐานของปลาบดแผ่นอบแห้งทอดกรอบ ประกอบด้วยเนื้อปลาดุกบดเป็นส่วนประกอบหลัก น้ำตาลทราย ซีอิ้วขาว พริกไทย ยี่หระ และเมล็ดผักชี (เพ็ญศรีและคณะ, 2549) นำปลามาแล่เอาส่วนเนื้อจากลำตัวทั้ง 2 ข้าง ลอกหนัง เอากระดูกออก ล้างด้วยน้ำเกลือ 4 % และล้างตามด้วยน้ำเปล่า ผึ่งให้สะเด็ดน้ำ นำมาบดละเอียด ชั่งน้ำหนักปลา นำเครื่องปรุงและเครื่องเทศตามอัตราส่วนมาผสมกับเนื้อปลาบด นวดให้เป็นเนื้อเดียวกันประมาณ 10 นาทีด้วยเครื่องนวด วางเนื้อปลาที่นวดแล้วประมาณ 50 กรัมบนถุงพลาสติกโพลีโพรพิลีนที่ตัดไว้ ริดเป็นแผ่นบางโดยใช้เฟรมที่ทำจาก stainless steel ช่วยให้มีความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร ลอกแผ่นพลาสติกด้านบนจากแผ่นปลาที่ริดไว้ นำไปอบแห้งในตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 45 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยพลิกด้านของแผ่นปลาทุก 2 ชั่วโมง ตัดแผ่นปลาอบแห้งเป็นชิ้นสี่เหลี่ยมขนาด 1.5 x 1.5 นิ้ว บรรจุสุญญากาศในถุงพลาสติก

เมื่อต้องการจะทดสอบผลิตภัณฑ์ นำแผ่นปลาอบแห้งที่บรรจุสุญญากาศมาทอดด้วยน้ำมันพืชในกระทะไฟฟ้าที่มีระบบควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิประมาณ 215°C เป็นเวลา 2-5 วินาที นำปลาบดแผ่นทอดกรอบขึ้นมาสะเด็ดน้ำมันและวางไว้ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อบริโภคต่อไป (แผนภูมิที่ 1 และภาพที่ 1)



แผนภูมิที่ 1 ขั้นตอนการผลิตพลาสติกแผ่นอบแห้งทอดกรอบ



แล่นเนื้อปลาตุ๋ก ลอกหนัง ล้างเนื้อปลาด้วยน้ำเกลือและล้างน้ำ บดให้ละเอียด ผสมเครื่องปรุงรส



นวดให้เป็นเนื้อเดียวกัน รีดเป็นแผ่นบาง อบให้แห้ง โดยใช้ตู้อบลมร้อนแบบถาด ตัดเป็นแผ่นสี่เหลี่ยม



ทอดให้สุก ได้ปลาบดแผ่นสีน้ำตาล วางผึ่งลมและสะเด็ดน้ำมัน บรรจุลงในถุงออลูมิเนียม-ฟอยด์

ภาพที่ 1 ขั้นตอนการทำปลาบดแผ่นอบแห้งทอดกรอบ

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

1. วิเคราะห์หาปริมาณความชื้นและค่า water activity (a_w) ของปลาบดแผ่นก่อนการอบแห้ง

วัสดุและอุปกรณ์

วัตถุดิบและส่วนผสม

ผลิตปลาบดแผ่นอบแห้งโดยใช้วัตถุดิบและส่วนผสมตามสูตรที่ดัดแปลงจากสูตรที่เคยผลิตภายในกองพัฒนาอุตสาหกรรมสัตว์น้ำ กรมประมง ดังนี้

เนื้อปลา	79.00%
น้ำตาลทราย	12.60%
ซีอิ๊วขาว	8.00%
พริกไทย	0.15%
ยี่หระ	0.13%
เมล็ดผักชี	0.12%

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่งสารทศนิยม 2 ตำแหน่ง (รุ่น PL3002 ยี่ห้อ Mettler Toledo, ประเทศสวิสเซอร์แลนด์)
2. เครื่องบดอาหาร (ยี่ห้อ Moulinex ประเทศฝรั่งเศส)
3. ตู้อบลมร้อนแบบมีพัดลม (รุ่น OF-02G ยี่ห้อ Jeio Tech ประเทศเกาหลี)
4. เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ (รุ่น 635 ยี่ห้อ Testo, ประเทศเยอรมัน)
5. เครื่องวัด a_w (รุ่น Pawkit ยี่ห้อ Decagon, ประเทศสหรัฐอเมริกา)
6. เครื่อง Infrared Thermometer (รุ่น Kiray 200 ยี่ห้อ KIMO, ประเทศฝรั่งเศส)
7. กระทะไฟฟ้าที่มีระบบควบคุมอุณหภูมิ (รุ่น MAG HS7 ยี่ห้อ Yellow Line ประเทศเยอรมัน)
8. เครื่องปิดผนึกถุง (รุ่น P-200 ยี่ห้อ Fiji Impulse ประเทศจีน)
9. ถุงพลาสติกชนิดโพลีโพรพิลีน
10. เครื่องครัว ได้แก่ ชาม ช้อน มีด เขียง ตะแกรง ถาด กระดาษทิชชู ไม้คี่งแป้งและกรรไกร เป็นต้น
11. เพรทที่ผลิตจาก stainless steel หนา 1 มิลลิเมตร (ใช้เป็นตัวกำหนดความหนาของปลาแผ่น)

วิธีดำเนินการ

การเตรียมวัตถุดิบและผลิตปลาบดแผ่นอบแห้ง

นำปลาสดทั้งตัวขนาด 3 ตัวต่อกิโลกรัม มาตัดหัวเอาไส้พุงออก ล้างน้ำให้สะอาด แล่นเนื้อปลาเป็นชิ้นตามความยาวของลำตัวปลา ลอกหนังและเอาก้างกลางออก ให้เหลือเฉพาะส่วนเนื้อปลาแล่น นำไปผลิตปลาบดแผ่นอบแห้งตามสูตรที่แสดงข้างต้น

สูตรของปลาบดแผ่นอบแห้งทอดกรอบประกอบด้วยเนื้อปลาคุกบดเป็นส่วนประกอบหลัก น้ำตาลทราย ซีอิ้วขาว พริกไทย ยี่หระ และเมล็ดผักชี นำปลามาแล่นเอาส่วนเนื้อจากลำตัวทั้ง 2 ข้าง ลอกหนัง เอากระดูกออก ล้างด้วยน้ำเกลือ 4 % และล้างตามด้วยน้ำเปล่า ผึ่งให้สะเด็ดน้ำ นำมาบดละเอียด ชั่งน้ำหนักปลานำเครื่องปรุงและเครื่องเทศตามอัตราส่วนมาผสมกับเนื้อปลาบด นวดให้เป็นเนื้อเดียวกันประมาณ 10 นาที ด้วยเครื่องนวด นำไปวิเคราะห์หาปริมาณความชื้น (AOAC, 1995) และค่า water activity (a_w) ด้วยเครื่องวัด a_w

2. ศึกษา Desorption Isotherm ของการอบแห้ง

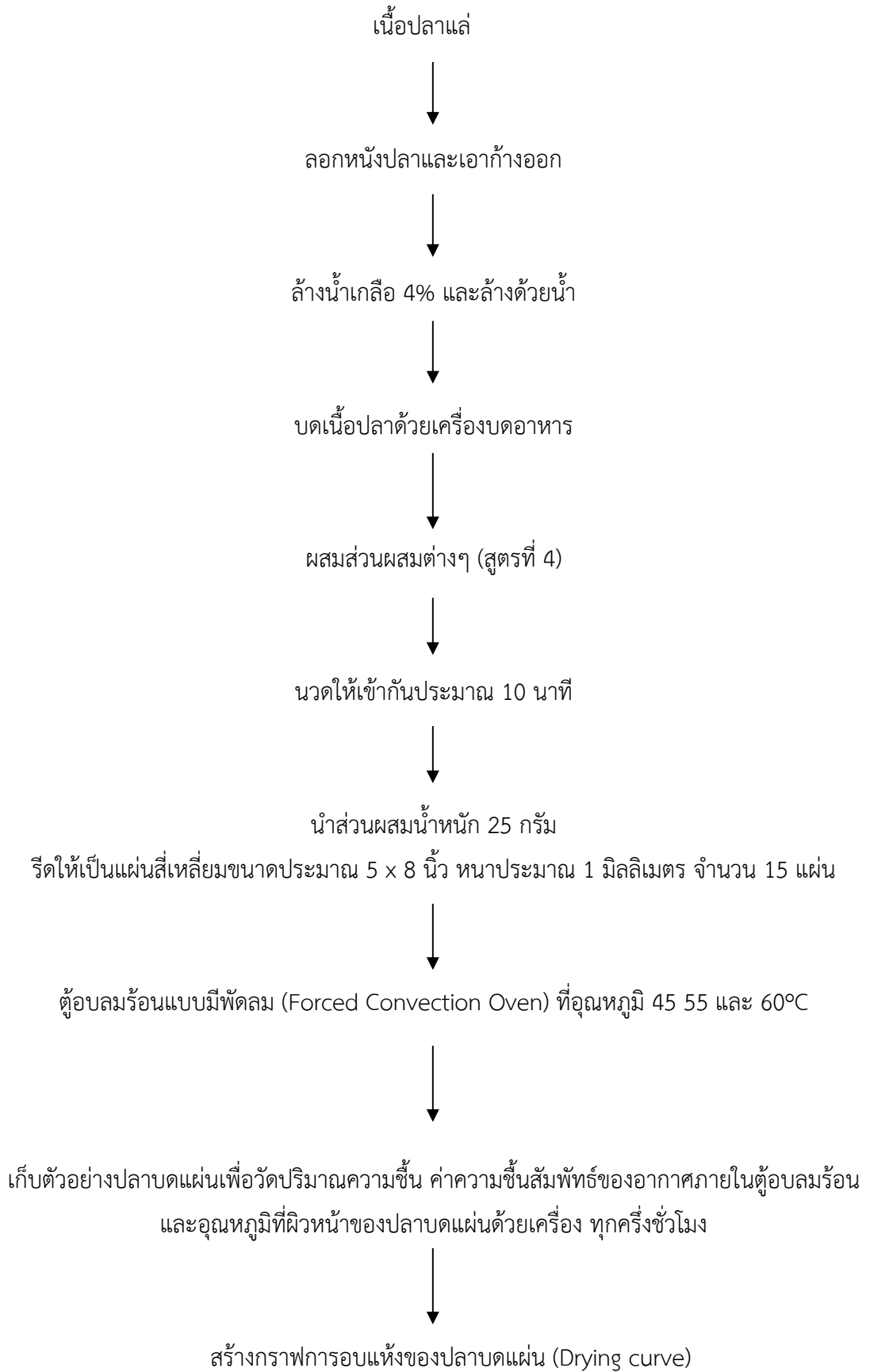
ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า moisture content (decimal dry basis) และ ค่า water activity (a_w) ในการอบแห้งเนื้อปลาบดที่ผสมเครื่องปรุงและเครื่องเทศที่นวดเป็นเนื้อเดียวกันแล้ว เพื่อใช้ในการหาค่าความชื้นสุดท้ายของการอบแห้งที่ทำให้ได้ค่า water activity ที่เหมาะสมในการเก็บรักษา โดยใช้เกณฑ์ (1) ค่า a_w ของผลิตภัณฑ์ ต่ำกว่า 0.85 สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราและแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรคได้เมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิในช่วงการแช่เย็น (refrigerated temperatures) และ (2) ค่า a_w ของผลิตภัณฑ์ ต่ำกว่า 0.70 สามารถหยุดการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์โดยส่วนใหญ่เป็นระยะเวลาอันยาวนานเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง (moderate room temperatures)

วิเคราะห์หา Desorption Isotherm ของการอบแห้งปลาบดแผ่นที่อุณหภูมิ 39°C ด้วยวิธี Dynamic Dewpoint Isotherm (DDI) ซึ่งวิเคราะห์ ณ บริษัทจาร์พาร์ เทคโนโลยีเซ็นเตอร์ จำกัด (AquaSorp Isotherm Generator, ยี่ห้อ Decagon devices, USA)

3. ศึกษาจลพลศาสตร์ของการอบแห้ง (Drying kinetics)

หลังจากเตรียมตัวอย่างปลาบดที่นวดรวมกับส่วนผสมทุกอย่างตามสูตร นำปลาบดน้ำหนักประมาณ 25 กรัมวางในถาดพลาสติกโพลีโพรพิลีนที่ตัดไว้ขนาด 5x8 นิ้ว ริดเป็นแผ่นบางโดยใช้เฟรมที่ทำจาก stainless steel ช่วยให้มีความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร จำนวน 15 แผ่น ลอกแผ่นพลาสติกด้านบนจากแผ่นปลาที่ริดไว้ นำไปอบในตู้อบลมร้อนแบบมีพัดลม (Forced Convection Oven) ภายในแบ่งเป็น 3 ชั้น แต่ละชั้นมีตะแกรงกันซึ่งลมร้อนสามารถวิ่งผ่านได้ ทุกการทดลอง มีการวัดค่าความชื้นเริ่มต้นของปลาบดแผ่นก่อนการอบ ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศและอุณหภูมิห้อง ตั้งค่าอุณหภูมิในการอบ 3 ระดับ (45, 55 และ 60 องศาเซลเซียส) โดยเก็บตัวอย่างปลาบดแผ่นเพื่อวัดปริมาณความชื้น (moisture content) ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในตู้อบลมร้อนด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิที่ผิวหน้าของปลาบด

แผ่นด้วยเครื่อง Infrared Thermometer ทุกครึ่งชั่วโมง นำข้อมูลทั้งหมดไปสร้างกราฟการอบแห้งของปลาบดแผ่น (Drying curve) (Fiorentini *et al.* 2008) ทำการทดลอง 2 ซ้ำ (แผนภูมิที่ 1 และภาพที่ 1)



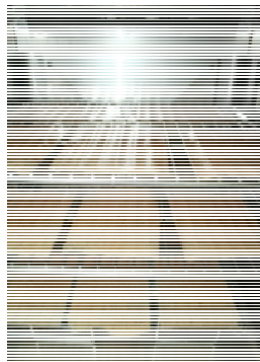
แผนภูมิที่ 1 ขั้นตอนการผลิตและศึกษาจลพลศาสตร์ของปลาบดแผ่นอบแห้ง



แล่นเนื้อปลาตุก ลอกหนัง ล้างเนื้อปลาด้วยน้ำเกลือและล้างน้ำ บดให้ละเอียด ผสมเครื่องปรุงรส



นวดให้เป็นเนื้อเดียวกัน ริดเป็นแผ่นบาง วางบนตะแกรงเพื่อนำไปอบให้แห้ง



อบแห้งโดยใช้ตู้อบลมร้อนแบบมีพัดลมทอด เก็บข้อมูลทุกครึ่งชั่วโมง

ภาพที่ 1 การศึกษาจลพลศาสตร์ของการอบแห้ง (Drying kinetics)

4. พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการอบแห้ง โดยแบ่งเป็น 2 ช่วงคือ

1. ช่วงการอบแห้งที่มีอัตราการอบแห้งแบบคงที่ (Constant Drying Rate Period)

ซึ่งเป็นช่วงเริ่มต้นของการอบแห้ง ปลาบดแผ่นมีความชื้นเริ่มต้นที่สูง อัตราการอบแห้งจะมีค่าค่อนข้างคงที่ (Pabis, 1999) ในช่วงการอบนี้ มีการใช้สมมติฐานที่ว่า ไม่มีค่าความแตกต่างของปริมาณความชื้นภายในชิ้นปลาบดแผ่นในมิติของความหนา และอัตราการอบแห้งถูกควบคุมด้วยความต้านทานการถ่ายเทมวล ณ ผิวของปลาบดแผ่น (Interfacial mass transfer resistance) ดังนั้น อัตราการระเหยของน้ำในปลาบดแผ่นสามารถแสดงได้ด้วย สมการดังนี้

$$-\left(\frac{\partial w}{\partial t}\right) = \alpha \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) - \beta \quad (1)$$

โดยที่

$\rho_{\text{air}}(\rho_{\text{a}})$ = ความดันไอน้ำคำนวณที่อุณหภูมิพื้นผิวของการระเหยของความชื้น T_s (Pa)

ρ_{a} = ความดันไอน้ำบางส่วนในอากาศ (Pa)

ρ_{a} = mass transfer coefficient (kg/s m² Pa)

A = mass transfer surface area (m²)

อย่างไรก็ตาม อัตราการระเหยของน้ำในอาหาร โดยทั่วไปแล้วสามารถแสดงได้ในรูปอัตราการแห้ง (drying rate) ดังสมการที่

$$\left(\frac{\rho_{\text{a}}}{\rho_{\text{a}}}\right) = \rho_{\text{a}} \left(\frac{\rho_{\text{a}}}{\rho_{\text{a}}}\right) \quad (2)$$

โดยที่

$\left(\frac{\rho_{\text{a}}}{\rho_{\text{a}}}\right)$ = อัตราการแห้งของอาหาร ซึ่งเป็นค่าความชันของสมการที่ plot ระหว่างค่าความชื้นเฉลี่ยของอาหาร (W) และเวลา (t)

ρ_{a} = ค่า constant dry matter ระหว่างการอบแห้ง

ρ_{a} = ค่าความชื้นเฉลี่ยของอาหาร

เมื่อแทนสมการที่ (2) ในสมการที่ (1) จะได้ดังสมการที่ (3)

$$-\left(\frac{\rho_{\text{a}}}{\rho_{\text{a}}}\right) = \frac{\rho_{\text{a}} \rho_{\text{a}}}{\rho_{\text{a}}} (\rho_{\text{a}}(\rho_{\text{a}}) - \rho_{\text{a}}) \quad (3)$$

โดยสมมติฐานที่ค่า $\rho_{\text{a}}(\rho_{\text{a}})$ คงที่ไม่เปลี่ยนแปลงในช่วงการอบแห้งที่มีอัตราการอบแห้งแบบคงที่และค่า ρ_{a} มีค่าใกล้เคียงกับค่า wet bulb temperature ของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง เมื่อทำการ *integrate* ในช่วงการอบแห้งที่มีการอบแห้งแบบคงที่และหารด้วยค่าปริมาณความชื้นเริ่มต้น (W_0) จะได้สมการเส้นตรงดังนี้

$$\left(\frac{\rho_{\text{a}}}{\rho_{\text{a}}}\right) = 1 - \frac{[\rho_{\text{a}}(\rho_{\text{a}}) - \rho_{\text{a}}]}{\rho_{\text{a}}} \quad (4)$$

โดยที่

ρ_{a} = ค่าปริมาณความชื้นเริ่มต้น decimal dry basis

- = ระยะเวลาการอบแห้งตั้งแต่เริ่มต้นในช่วงการอบแห้งที่มีอัตราการอบแห้งแบบคงที่จนถึงอาหารมีความชื้นวิกฤติ (critical moisture content, W_c) ก่อนที่การอบแห้งจะเข้าสู่ช่วงการอบแห้งที่มีอัตราการอบแห้งแบบลดลง

โดยจากสมการที่ (4) จะสามารถหาค่าคงที่ของการถ่ายเทมวลจากการทดลอง (mass transfer coefficient, k_p) ได้ ซึ่งจะสามารถนำไปใช้ในการออกแบบเครื่องมือสำหรับการอบแห้งอาหารประเภทเดียวกันหรือมีลักษณะใกล้เคียงกันได้ รวมทั้งสามารถใช้ในการ simulation การอบแห้งของอาหารดังกล่าวได้ด้วย

2. ช่วงการอบแห้งที่มีอัตราการอบแห้งแบบลดลง (Falling Drying Rate Period)

ซึ่งเป็นช่วงหลังจากสิ้นสุดช่วงการอบแห้งที่มีอัตราการอบแห้งแบบคงที่ โดยสามารถใช้แบบจำลองแบบ Fickian diffusion model ในการทำนายการเคลื่อนที่ภายในอาหารที่มีรูปร่างเป็นแบบ slab ในช่วงนี้ได้ (Simal *et al*, 1996) ดังสมการ (5)

$$\left(\frac{\square\square\square}{\square\square}\right) = \square\square \left(\frac{\square^2\square\square}{\square^2\square}\right) \quad (5)$$

โดยที่

$\square\square$ = ค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่เฉลี่ย (average diffusion coefficient) ในช่วงการอบแห้งที่มีอัตราการอบแห้งแบบลดลง (m^2/s)

$\square\square$ = ค่าปริมาณความชื้นอาหารชนิด local (local moisture content) ที่เวลา $t-t_c$

\square = ค่าความหนาเฉลี่ยของอาหารรูปทรง slab ซึ่งแทนค่าได้ด้วย d_m

ค่า initial และ boundary condition ของสมการที่ (5) คือ

$$\begin{aligned} t = t_0 & \quad \square\square = \square\square \quad 0 \leq x \leq \square\square \\ x = 0 & \quad \left(\frac{\square\square\square}{\square\square}\right) = 0 \quad \square > 0 \\ \square = \square\square & \quad - \square\square \left(\frac{\square^2\square\square}{\square^2\square}\right) = \square\square(\square\square\square(\square\square) - \square\square\square) \quad t > 0 \end{aligned} \quad (6)$$

แต่เนื่องจากการทดลอง ค่าความชื้นของอาหารที่วัดได้เป็นค่าความชื้นเฉลี่ยที่เวลาหนึ่ง ๆ (W) จำเป็นต้องคำนวณหาค่าปริมาณความชื้นอาหารชนิด local (W_L) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความหนาของอาหารและ

เวลา ($W_L = W_L(x, t)$) โดยการ integrate ตลอดปริมาตรของอาหารและแก้สมการแบบ analytical ตามวิธีของ Crank (1975) จะได้คำตอบของสมการที่ (5) ดังนี้

$$\begin{aligned} \square_{\square\square} &= \frac{\square - \square_{\square}}{\square_{\square} - \square_{\square}} \\ &= \sum_{\square=1}^{\square} \frac{2\square\square^2 \square\square\square \left[\left(-\square^2 \square_{\square} (\square - \square_{\square}) \right) / \square_{\square}^2 \right]}{(\square^2 + \square\square^2 + \square\square_{\square}) \square_{\square}^2} \end{aligned} \quad (7)$$

โดยที่

$\square_{\square\square}$ = ค่าปริมาณความชื้นแบบไร้มิติของอาหาร (dimensionless moisture content)

\square_{\square} = ค่าปริมาณความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content)

$\square\square_{\square}$ = ค่า mass-transfer Biot number

\square_{\square} = ค่าคำตอบลำดับที่ n ของสมการ trigonometric ดังนี้

$$f(\square_{\square}) = \square_{\square} \tan \square_{\square} - \square\square_{\square} = 0 \quad (8)$$

จะเห็นได้ว่าคำตอบของสมการที่ (8) จะขึ้นอยู่กับค่า mass-transfer Biot number (Crapiste and Rotstein, 1997) และคำตอบ 6 ลำดับแรกของสมการที่ (8) สามารถหาได้จาก Crank (1975)

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

1. วิเคราะห์หาปริมาณความชื้นและค่า water activity (a_w) ของปลาบดแผ่นก่อนการอบแห้ง

ผลิตปลาบดแผ่นก่อนอบแห้ง โดยใช้ส่วนประกอบของวัตถุดิบและวิธีการตามสูตรที่ 4 ที่ได้พัฒนาและปรับปรุงจากการทดลองในส่วนที่ 1 (ภาพที่ 2) พบว่า มีค่าปริมาณความชื้นเฉลี่ยที่ 61.78 ± 0.23 % (wet basis) และ 161.67 ± 1.60 % (dry basis) หรือ 16.17 decimal dry basis มีค่า water activity ที่ 0.95 และอบแห้งจนได้ปลาบดแผ่นที่มีค่า water activity น้อยกว่า 0.70

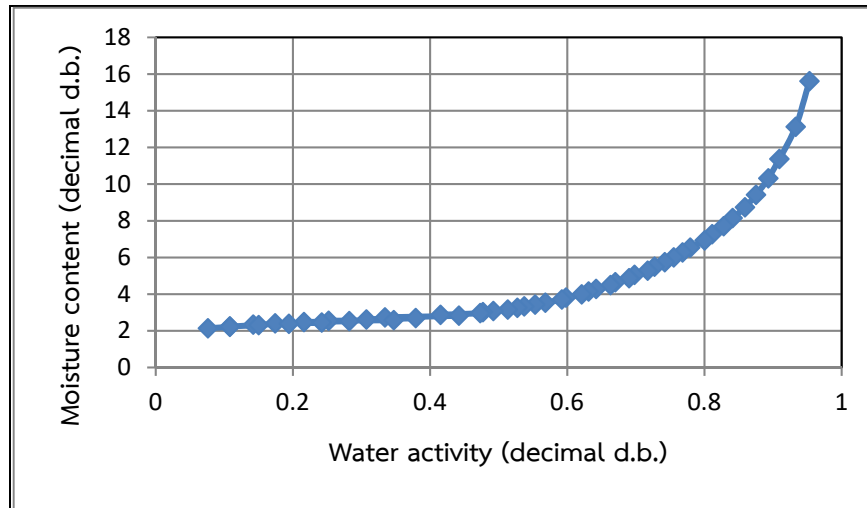


ภาพที่ 2 ปลายอดแผ่นสูตรที่ 4 ที่รีดเป็นแผ่นก่อนนำไปอบแห้งในตู้อบลมร้อน

2. ศึกษา Desorption Isotherm ของการอบแห้ง

Desorption Isotherm ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการเก็บรักษาปลายอดแผ่นอบแห้งแสดงในภาพที่ 3 โดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณความชื้นของปลายอดแผ่น (decimal dry basis) และ ค่า water activity ของปลายอดแผ่น ที่อุณหภูมิ 39°C ซึ่ง Desorption Isotherm นี้เป็นการหาโดยวิธี Brunauer–Emmett–Teller (BET) เพราะเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับอาหารที่มี solute content สูง (Kaya and Kahyaoglu, 2005)

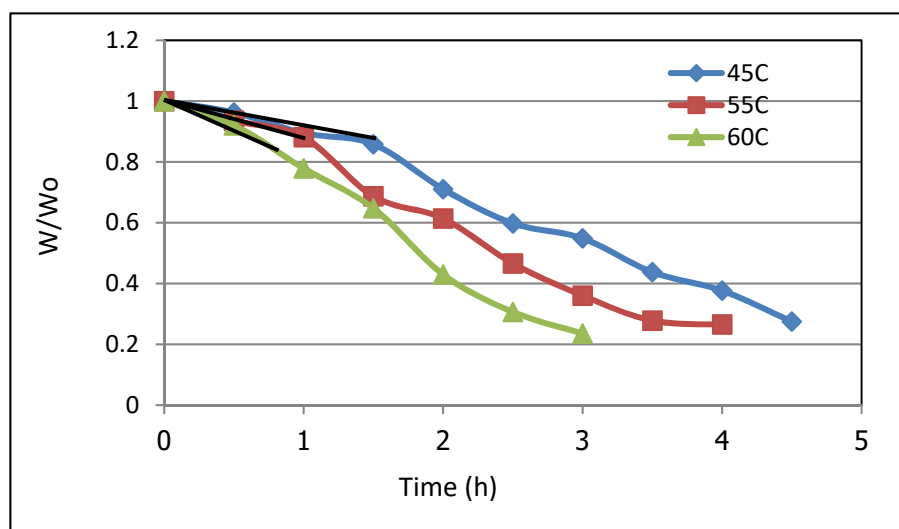
ในช่วงเริ่มต้นของ Isotherm มีค่า water activity ประมาณ 0.95 และค่าความชื้นเริ่มต้นประมาณ 16 decimal db และค่อยๆ ลดลงจนมีค่า water activity ประมาณ 0.05 และค่าความชื้นสุดท้ายประมาณ 2 decimal db ซึ่งไม่ได้แสดงให้เห็นช่วงที่ค่า water activity คงที่ในช่วงแรกอันเป็นช่วงของ constant drying rate อย่างชัดเจนนัก ทั้งนี้ ในผลิตภัณฑ์หลาย ๆ ชนิด จะมีช่วง constant drying rate ที่สั้นมาก จนบางครั้งไม่สามารถพบได้จาก Isotherm (Pabis, 1999)



ภาพที่ 3 กราฟ Desorption Isotherm ของปลาบดแผ่นอบแห้ง ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของค่าปริมาณความชื้นที่เป็นฟังก์ชันของ water activity ในสภาวะสมดุล

3. ศึกษาจลพลศาสตร์ของการอบแห้ง (Drying kinetics)

จากภาพที่ 4 พบว่า ทั้งสามอุณหภูมิของการอบแห้ง ในช่วงแรก กราฟมีรูปแบบเป็นเส้นตรง ตั้งแต่ค่า W/W_0 เท่ากับ 1 จน ถึงประมาณ W/W_0 เท่ากับ 0.85 ซึ่งเมื่อหาความสัมพันธ์กับกราฟ Desorption Isotherm ของแต่ละอุณหภูมิ พบว่า ที่ W/W_0 เท่ากับ 0.85 จะสัมพันธ์กับค่าความชื้นของปลาบดแผ่นที่ ประมาณ 7 decimal d.b. นอกจากนี้ จากการทดลองหาค่า W_e (Experimental equilibrium moisture) โดยการอบแห้งปลาบดแผ่นจนความชื้นเริ่มคงที่ พบว่าค่า W_e ของการอบแห้งที่อุณหภูมิ 45 55 และ 60°C มีค่าเท่ากับ 0.11 0.058 และ 0.05 ตามลำดับ



ภาพที่ 4 ค่าปริมาณความชื้นชนิด Normalized ของปลาบดแผ่นอบแห้งซึ่งเป็นฟังก์ชันของ เวลา ณ อุณหภูมิในการอบแห้งที่ 45 55 และ 60 องศาเซลเซียส

4. พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการอบแห้ง

1. ช่วงการอบแห้งที่มีอัตราการอบแห้งแบบคงที่ (Constant Drying Rate Period)

จากการทำ linear regression ในช่วงแรกของการอบแห้งซึ่งเป็นช่วงที่ความชื้นสูงกว่า 7 decimal d.b. พบว่าค่าที่ได้จากสมการการทำนาย (สมการที่ 4) มีความถูกต้องใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองค่อนข้างสูง ซึ่งค่า r^2 ในการทำ linear regression ของการอบแห้งที่อุณหภูมิ 45 55 และ 60°C มีค่าเท่ากับ 0.974 0.9429 และ 0.9811 ตามลำดับ และจากค่า slope ของสมการที่ 4 ทำให้สามารถหาค่า experimental mass-transfer coefficients, k_p ของการอบแห้งที่อุณหภูมิ 45 55 และ 60°C มีค่าเท่ากับ 9.027×10^{-8} 1.266×10^{-7} 1.290×10^{-7} $\text{kg/m}^2 \text{ s. Pa}$ ตามลำดับ โดยมีค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 อุณหภูมิเท่ากับ 1.153×10^{-7} $\text{kg/m}^2 \text{ s. Pa}$ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าแต่ไม่แตกต่างกันมากกับผลการทดลองของ Fiorentini *et al.* (2008) ที่ได้ค่า k_p เท่ากับ 1.266×10^{-7} $\text{kg/m}^2 \text{ s. Pa}$ โดยทดลองกับแผ่น tomato pectic gel และมีค่าสูงกว่าผลการทดลองของ Welti-Chanes *et al.* (2005) ที่ได้ค่า k_p เท่ากับ 0.829×10^{-7} $\text{kg/m}^2 \text{ s. Pa}$ โดยทดลองกับแผ่นแบบ flat plates

2. ช่วงการอบแห้งที่มีอัตราการอบแห้งแบบลดลง (Falling Drying Rate Period)

การอบแห้งในช่วงที่มีอัตราแบบลดลงเริ่มต้นเมื่อปริมาณความชื้นลดลงถึงประมาณ 7 decimal d.b. จนกระทั่งได้ความชื้นสุดท้าย (ภาพที่ 3 และ 4)

ค่า Diffusion coefficient (D_m) คำนวณได้จากการทำ optimization ด้วยโปรแกรม Solver ใน Excel version 2007 เพื่อหาค่า D_m ที่เหมาะสมสำหรับค่า Mass-transfer Biot number (Bi_m) ที่ค่าต่างๆ โดยค่าความหนาเฉลี่ยของปลาบดแผ่นที่มีรูปร่างเป็นแบบ slab มีค่าเท่ากับ 1×10^{-3} m ในการคำนวณช่วง falling drying rate อาศัย Shrinkage model โดยมีการใช้สมมติฐานว่า การลดลงของปริมาตรของอาหารมีค่าเท่ากับปริมาตรของน้ำที่ระเหยไป ซึ่ง model นี้เหมาะที่จะใช้กับวัสดุที่อยู่ใน rubbery region (Roos, 1995) และนำมาประยุกต์ใช้กับปลาบดแผ่นเนื่องจากมีลักษณะของการเป็นเจล โดยใช้เป็น one-dimensional shrinkage ที่มีการถ่ายเทความร้อนในทิศทางตามความหนาของปลาบดแผ่นซึ่งแนะนำโดย Kechaou *et al.* (1987)

จาก สมการที่ 7 และ 8 แบบจำลองถูกสร้างขึ้นในทุกอุณหภูมิการอบแห้ง (45 55 60°C) โดยการแปรผันค่า Biot number ตั้งแต่ค่า 0.5 1 2 และ 5 และให้โปรแกรม Solver คำนวณหาค่า D_m ที่เหมาะสม

ของแต่ละค่า สำหรับทุกค่าของ Biot number ในทุกอุณหภูมิการอบแห้ง โดยใช้ค่า Sum of square of the deviations (MSS) ที่เปรียบเทียบระหว่างค่าความชื้นที่ได้จากการทดลองและค่าความชื้นที่ได้จากการคำนวณ โดยโปรแกรม เป็นดัชนี ซึ่งจะเลือกค่า Bi_m ที่มีค่า MSS น้อยที่สุดในทุกอุณหภูมิการอบแห้งเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด และจากการทำ optimization จะได้ ค่า Bi_m ที่ 5.0 เพราะมีค่า Sum of MSS ต่ำที่สุดในทุกอุณหภูมิของการอบแห้ง โดยจะได้ค่า D_m ที่อุณหภูมิในการอบแห้ง 45 55 60°C เท่ากับ 1.85E-14, 2.50E-14, และ 3.60E-14 m²/s ตามลำดับ จากผลที่ได้ สะท้อนให้เห็นว่าทั้ง internal conductive resistance ภายในอาหารและ external convective resistance ที่ผิวหน้าของอาหาร มีผลต่อการถ่ายเทมวลจากการระเหยของน้ำของปลาบดแผ่นในช่วงการอบแห้งแบบ Falling rate โดย internal conductive resistance ภายในอาหาร มีผลมากกว่า external convective resistance ดังแสดงในตารางที่ 1 และเมื่อพิจารณาค่า D_m ของแต่ละอุณหภูมิ พบว่า ค่า D_m ลดลงเมื่อค่า Bi_m เพิ่มขึ้น และ ที่ค่า Bi_m เท่ากัน ค่า D_m จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งเพิ่มขึ้น

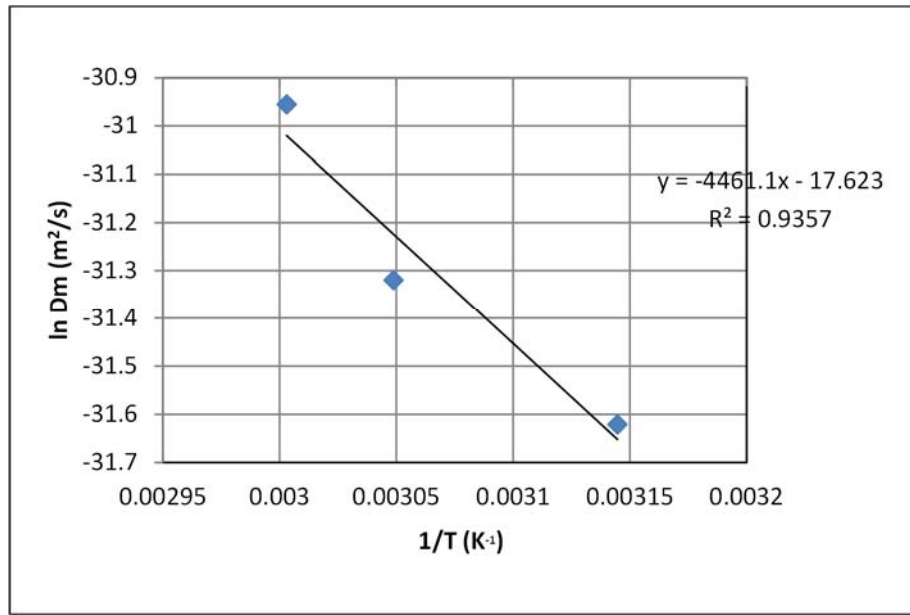
ตารางที่ 1 ค่า Diffusion coefficients ที่ผ่านการทำ optimization ที่ค่า mass-transfer Biot number ต่างๆ ณ อุณหภูมิการอบแห้งที่ 45 55 และ 60°C

Bi_m	45°C		55°C		60°C		Sum of MSS
	D_m (m ² /s)	MSS	D_m (m ² /s)	MSS	D_m (m ² /s)	MSS	
0.5	1.00E-13	1.268424	2.10E-13	1.126221	3.20E-13	1.107368	3.502013
1	7.89E-14	1.269218	1.30E-13	1.127065	2.40E-13	1.109316	3.505599
2	3.02E-14	1.268350	7.60E-14	1.126848	9.32E-14	1.107531	3.502729
5	1.85E-14	1.267245	2.50E-14	1.122585	3.60E-14	1.105684	3.497652

เมื่อนำค่า D_m มาหาความสัมพันธ์กับค่าอุณหภูมิในการอบแห้ง สามารถแสดงได้ด้วยสมการของ Arrhenius ซึ่งเป็นสมการความสัมพันธ์ของค่า $\ln D_m$ และ $1/T$ ดังสมการที่ 9

$$\ln D_m = \ln A - \frac{E_a}{R \cdot T} \quad (9)$$

และเมื่อสร้างเป็นกราฟจะแสดงได้ด้วยภาพที่ 5 โดยค่า D_0 มีค่าเท่ากับ 2.22×10^{-8} m²/s และค่า Activation energy (E_a) มีค่าเท่ากับ 37.09 kJ/mol ค่าคงที่ของแก๊ส (R) เท่ากับ 8.314×10^{-3} kJ/mol.K และมีค่า r^2 ที่ค่อนข้างสูงที่ 0.9357 ค่า Activation energy สะท้อนถึงพลังงานของการจับพันธะของน้ำในปลาบดแผ่นอบแห้ง ซึ่งมีค่าสอดคล้องกับผลการทดลองของ Gaston *et al.* (2004) และ Fiorentini *et al.* (2008)



ภาพที่ 5 Natural logarithm ของค่า Diffusion coefficients ของน้ำในพลาสติกแผ่นอบแห้ง ในช่วงการอบแห้งที่มีอัตราการอบแห้งแบบลดลง

สรุปผลการทดลอง

สมการทางคณิตศาสตร์การอบแห้งของแผ่นอบแห้งในตู้อบลมร้อนสามารถแบ่งได้เป็นสองช่วง คือ ช่วงการอบแห้งที่มีอัตราการอบแห้งแบบคงที่ (Constant Drying Rate Period) และการอบแห้งที่มีอัตราการอบแห้งแบบลดลง (Falling Drying Rate Period)

ช่วงการอบแห้งที่มีอัตราการอบแห้งแบบคงที่เป็นช่วงที่ความชื้นสูงกว่า 7 decimal d.b. มีความถูกต้องใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองค่อนข้างสูงของทุกอุณหภูมิในการอบแห้ง (45 55 และ 60°C) และมีค่า experimental mass-transfer coefficients, k_p ของการอบแห้งที่อุณหภูมิ 45 55 และ 60°C เท่ากับ 9.027×10^{-8} 1.266×10^{-7} 1.290×10^{-7} kg/m² s. Pa ตามลำดับ โดยมีค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 อุณหภูมิเท่ากับ 1.153×10^{-7} kg/m² s. Pa

ช่วงการอบแห้งที่มีอัตราการอบแห้งแบบลดลง จะได้ค่า D_m ที่อุณหภูมิในการอบแห้ง 45 55 60°C เท่ากับ 1.85×10^{-14} , 2.50×10^{-14} , และ 3.60×10^{-14} m²/s ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาค่า D_m ของแต่ละอุณหภูมิ พบว่า ค่า D_m ลดลงเมื่อค่า Bi_m เพิ่มขึ้น และที่ค่า Bi_m เท่ากัน ค่า D_m จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งเพิ่มขึ้น โดย internal conductive resistance ภายในอาหาร มีผลมากกว่า external convective resistance และเมื่อนำค่า D_m มาหาความสัมพันธ์กับค่าอุณหภูมิในการอบแห้ง ด้วยสมการของ Arrhenius พบว่า ค่า Activation energy (E_a) มีค่าเท่ากับ 37.09 kJ/mol และมีค่า r^2 ที่ค่อนข้างสูงที่ 0.9357

เอกสารอ้างอิง

- AOAC. 1995. Official methods of analysis. Vol. 2. 16th Ed., Chapter 35 and 39. Washington, D.C.
- Crank, J. 1975. The mathematics of diffusion. 2nd Edition. Oxford Clarendon Press. Oxford, UK. 414 pp.
- Crapiste, G.H. and E. Rotstein. 1997. Design and performance evaluation of dryer. In: Valentas, K.J., E. Rotstein and R.P. Singh. (eds), Handbook of Food Engineering Practice 4th Edition. CRC Press. New York. Pp 125-165.
- Fiorentini, C., E. Leiva Díaz, and S. A. Giner. 2008. A mass-transfer model for the drying of an innovative tomato gel. *Food Science and Technology International* 14(1): 39-46.
- Gaston, A. L., Abalone, R. M., Giner, S. A., and Bruce, D. M. 2004. Effect of modelling assumptions on the effective water diffusivity in wheat. *Biosystems Engineering*, 88(2): 175-185.
- Kaya, S. and T. Kahyaoglu. 2005. Thermodynamic properties and sorption equilibrium of pestil (grape leather). *J Food Engineering*. 71: 200-207.
- Kechaou, N., M. A. Roques, and J. F. Lambert. 1987. Diffusion in shrinking media: The case of drying of gels. *Physical properties of foods-2, Part. 1: Diffusion*, paper 4.
- Pabis, S. 1999. The initial phase of convection drying of vegetables and mushrooms and the effect of shrinkage. *J Agricultural Engineering Research*. 72: 187-195.
- Roos, Y.H. 1995. Phase transitions in foods. Academic Press. London. 349 pp.
- Simal, S., A. Mulet, J. Tarrazob and C. Rosello. 1996. Drying models for green peas. *Food Chemistry*. 55(2): 121-128.
- Welti-Chanes, J., Vergara-Balderas, F., & Bermúdez-Aguirre, D. 2005. Transport phenomena in food engineering: basic concepts and advances. *Journal of Food Engineering*, 67(1), 113-128.

