

การประเมินสมรรถนะเครื่องอบพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรด
สำหรับผลิตภัณฑ์ปลา



ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
มหาวิทยาลัยแม่โจ้
พ.ศ. 2562

การประเมินสมรรถนะเครื่องอบพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรด
สำหรับผลิตภัณฑ์ปลา



จิราภรณ์ แก้วเดียว

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

สำนักบริหารและพัฒนาระบบสารสนเทศ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

การประเมินสมรรถนะเครื่องอบพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรด
สำหรับผลิตภัณฑ์ปลา

จิราภรณ์ แก้วเดียว

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐภูมิ ดุษฎี)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชูรัตน์ ธารารักษ์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิกราน หอมดวง)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ประธานอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ ไชยชนะ)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการรับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ญาณิน โอภาสพัฒนกิจ)

รักษาการแทนรองอธิการบดี ปฏิบัติการแทน

อธิการบดีมหาวิทยาลัยแม่โจ้

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ชื่อเรื่อง	การประเมินสมรรถนะเครื่องอบพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรด สำหรับผลิตภัณฑ์ปลา
ชื่อผู้เขียน	นางสาวจิราภรณ์ แก้วเดียว
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ ดุษฎี

บทคัดย่อ

การพัฒนาเครื่องอบพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรดสำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง และความสัมพันธ์พลังงาน การประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์ปลา การศึกษาความชื้นสมดุลไอโซเทอมของปลาตาก การศึกษาจลนพลศาสตร์ และการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์สำหรับการอบแห้งปลาตากจำนวน 20 kg ที่มีความชื้นเริ่มต้น 275.56%db จนเหลือความชื้นสุดท้าย 20%db โดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG ซึ่งใช้หัวเผาแก๊สชนิดอินฟราเรดเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เครื่องอบแห้งดังกล่าวเป็นเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุนรูปทรงครึ่งพาราโบลา โดยภายในห้องอบแห้งมีปริมาตรรวมทั้งสิ้น 1.18 m³ และพื้นที่รับแสง 3.98 m² การทดลองอบแห้งปลาตากโดยแบ่งออกเป็น 2 ช่วงได้แก่ ทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 °C ในช่วงแรกจำนวน 5 h และอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C ในช่วงหลังจำนวน 8 h กำหนดความเร็วรอบของถาดหมุน 6 rpm อัตราการไหลอากาศ 0.049 m³/s และอัตราการนำอากาศกลับมาใช้ใหม่ 80% จากผลการทดลองพบว่า การอบแห้งปลาตากโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG มีปริมาณการใช้พลังงานสิ้นเปลืองในกระบวนการอบแห้งน้อยที่สุดคือ 16.70 MJ/kg H₂O evap มีอัตราการอบแห้ง 1.055 kg H₂O evap/h และประสิทธิภาพในการอบแห้ง 13.52% จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อนำพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์มาใช้ในกระบวนการอบแห้งร่วมกับพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG สามารถลดปริมาณการใช้แก๊ส LPG ได้ 57.14% การอบแห้งปลาตากโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนร่วมดังกล่าวมีความเหมาะสมต่อการใช้งานเชิงพาณิชย์ เนื่องจากใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้น อัตราการอบแห้งสูง ประสิทธิภาพการอบแห้งสูง และมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งน้อย

การวิเคราะห์คุณภาพผลิตภัณฑ์ปลาแห้งภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการอบแห้งด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน 4 วิธีพบว่า การประเมินคุณภาพผลิตภัณฑ์ปลาแห้งด้วยประสาทสัมผัสจากการสำรวจประชากรจำนวน 20 คน ด้วยวิธีการทดสอบการยอมรับโดยรวมของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์ปลาตาก

แห้งที่ผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุนอยู่ในระดับขอบมาก ซึ่งมีคะแนนความชอบโดยรวมต่อคุณลักษณะด้านรูปร่างของผลิตภัณฑ์ เนื้อสัมผัส และกลิ่นแตกต่างกันทางสถิติ ($P < 0.05$) ได้แก่ 4.20 3.75 และ 4.00 คะแนน ตามลำดับ การประเมินลักษณะสีของผลิตภัณฑ์ปลาแห้งโดยใช้สมุดคู่มือเทียบสีผลการประเมินพบว่า ผลิตภัณฑ์ปลาแห้งที่มีจำหน่ายทั่วไปตามท้องตลาด และผลิตภัณฑ์ปลาแห้งที่ได้จากการทดลองมีลักษณะสีที่อยู่ในกลุ่มเฉดสีเดียวกัน ได้แก่ GREYED-ORANGE GROUP 163 การประเมินคุณภาพด้านการคั่วตัวของผลิตภัณฑ์ปลาแห้ง โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าการคั่วตัวของผลิตภัณฑ์ปลาดุกแห้งที่จำหน่ายตามท้องตลาด และผลิตภัณฑ์ปลาดุกแห้งจากการทดลองมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ได้แก่ 40.75 และ 38.16% ตามลำดับ และการวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ปลาแห้งผลการวิเคราะห์พบว่า ผลิตภัณฑ์ปลาดุกแห้งที่ได้จากการทดลองมีปริมาณโปรตีน และไขมัน คือ 38.71 g ต่อ 100 g และ 24.38 g ต่อ 100 g ตามลำดับ ซึ่งมีความเหมาะสมต่อผู้บริโภค

การศึกษาความชื้นสมดุลไอโซเทอมของปลาดุกที่อุณหภูมิ 40 50 60 และ 70 °C โดยวิธีสถิติในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 0.1 - 0.9 ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวพบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Modified mujica สามารถอธิบายผลการทดลองได้ดีที่สุด การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งปลาดุกในรูปแบบของอัตราส่วนความชื้นพบว่า ความชื้นสมดุลในปลาดุกมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าความชื้นเริ่มต้น โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page สามารถอธิบายจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งปลาดุกด้วยพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG ได้ดีที่สุดในแง่ของความสัมพันธ์ของสมการดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการทำนายค่าความชื้นของวัสดุทดสอบ ณ เวลาใดๆ ได้อย่างถูกต้อง

การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์เมื่อมีการใช้เครื่องอบแห้งแบบถาดหมุน โดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG ทดแทนการตากแดดตามธรรมชาติพบว่า มีรายได้สุทธิ 189,486.98 บาท/ปี และระยะเวลาการคืนทุน 0.53 ปี

คำสำคัญ : เครื่องอบแห้งแบบถาดหมุน, พลังงานแสงอาทิตย์, รั้งสีอินฟราเรด, ปลาดุก, ความชื้นสมดุลไอโซเทอม, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุล, จลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง, สมการอบแห้งชั้นบาง

Title	PERFORMANCE EVALUATION OF SOLAR ENERGY COMBINED WITH INFRARED RADIATION DRYER FOR FISH PRODUCT
Author	Miss Jiraporn Kaewdiew
Degree	Master of Engineering in Renewable Energy Engineering
Advisory Committee Chairperson	Assistant Professor Dr. Natthawud Dussadee

ABSTRACT

In this study the solar energy combined with infrared dryer has evaluated dryer performance and energy consumption for drying. Evaluation of fish product quality, catfish equilibrium moisture isotherm, drying kinetic and economic analysis are included in this study. Using catfish 20 kg with initial moisture at 275.56%db solar energy combined with LPG infrared gas burner dryer as used to reduce moisture to 20%db. The dryer is a half parabola shaped rotary tray dryer with drying chamber volume at 1.18 m³ and solar absorbing area 3.98 m². Drying test sets the speed of rotary tray at 6 rpm with air flow rate 0.049 m³/s, and 80% of air recovery. Drying temperature was 70 °C for 5 h, after which 60 °C for 8 h. The result shows the lowest energy consumption at 16.70 MJ/kg H₂O evap, drying ratio at 1.055 kg H₂O evap/h and drying efficiency is 13.52%. Also solar energy combined with LPG is suitable for commercial use because it can reduce 57.14% LPG usage, takes shorter drying time while showing higher drying ratio and higher drying efficiency, but lower drying specific energy consumption.

Analyzing dried fish product quality 4 methods were used sensory evaluation survey, color evaluation, rehydration evaluation and nutrition evaluation. The results found that sensory evaluation from 20 surveyors on shape and color, texture, and odor satisfaction were 4.20, 3.75 and 4.00 points, respectively. The sensory evaluation results to shape and color, texture, and odor satisfaction appearance (p<0.05) were significant. Color evaluation using RHS color chart found

that commercial fish product and product from the experiment are in the same color shade which is Greyed-Orange group 163. For the rehydration evaluation, result shows that commercial fish product recovery and experimented fish product recovery have similar value at 40.75 and 38.16%, respectively. Nutrition test for experimented fish product contains protein and fat by 38.71g/100g and 24.38g/100g, respectively, which is appropriate for costumer.

Catfish equilibrium moisture isotherm study at temperature 40 50 60 and 70 °C by static method at relative humidity at 0.1-0.9. The result shown that Modified mujica mathematical models of equilibrium moisture content was at its best for the relative humidity. Drying kinetics study in term of moisture ratio found that catfish product has much less equilibrium moisture content than the initial catfish. Furthermore, the Page model was the best fitting to both experimental data of tiny anchovy drying with solar energy and infrared sources.

Comparing dried catfish product economic analysis between using combined rotary dryer and natural dried shows additional net income 189,486.98 Baht/year, 0.53 year of payback period.

Keywords : Rotary tray Dryer, Solar energy, Infrared radiation, Walking catfish, Equilibrium moisture isotherm, Mathematical models of equilibrium moisture content, Drying kinetics, Thin layer equation

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิรินุช จินดารักษ์ ซึ่งได้ให้เกียรติเป็นประธาน กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำปรึกษา และแนะนำแก้ไขปรับปรุงวิทยานิพนธ์

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐภูมิ ดุษฎี ที่ได้รับเป็นประธานที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ และกรุณาให้ความรู้คำแนะนำต่างๆ รวมถึงคำปรึกษา ตลอดจนให้ความดูแล และเอาใจใส่ จนวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์ลุล่วงสำเร็จไปด้วยดี

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชูรัตน์ ธารารักษ์ และขอขอบพระคุณ ผู้ช่วย ศาสตราจารย์ ดร.นิกราน หอมดวง ซึ่งให้เกียรติเป็นที่ปรึกษาร่วมในการทำวิทยานิพนธ์ และให้ คำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์รวมถึงตรวจแก้ไขรูปเล่มวิทยานิพนธ์นี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ให้ทุนอุดหนุนการทำวิทยานิพนธ์ใน "โครงการผลิตและพัฒนา ศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงาน ในกลุ่มประเทศอาเซียนในระดับ บัณฑิตศึกษา" ครั้งนี้

ขอขอบคุณ "ทุนอุดหนุนการวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปี 2561" ที่ให้ทุนอุดหนุนการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบคุณ อาจารย์ทุกท่าน รวมถึงบุคลากรวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ พร้อมให้คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลือหลายๆ ด้าน จนทำให้สำเร็จการศึกษาไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ กลุ่มอาสาสมัครสาธารณสุข (อสม.) ประจำหมู่บ้านโทกหัวช้าง ตำบลพระบาท อำเภอมือจ่ง จังหวัดลำปาง ในการให้ความอนุเคราะห์กรอกแบบสอบถามการประเมินคุณภาพผลิตภัณฑ์ ปลาแห้งด้วยประสาทสัมผัส

จิราภรณ์ แก้วเดียว

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ซ
สารบัญภาพ.....	ฎ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพผนวก.....	ด
สารบัญตารางภาคผนวก.....	ต
สัญลักษณ์และคำย่อ.....	ถ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	5
ขอบเขตของการวิจัย.....	5
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและการตรวจสอบเอกสาร.....	7
เทคโนโลยีการอบแห้ง.....	7
คุณสมบัติอากาศ.....	8
ความชื้นวัสดุ.....	14
ความชื้นสมดุล.....	16
การอบแห้งชั้นบาง.....	20
การออกแบบเครื่องอบแห้ง.....	25

รังสีอินฟราเรดและการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร.....	31
การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์	36
การตรวจสอบเอกสาร.....	38
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	50
วิธีดำเนินงานวิจัย	50
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	60
บทที่ 4 การออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุน	73
บทที่ 5 ผลและอภิปรายผลการทดลอง.....	89
การศึกษาวิธีการทำแห้งปลาตาก และการศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง... ..	90
การวิเคราะห์ผลการทดลองการอบแห้งปลาตากด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุน.....	94
การวิเคราะห์ความชื้นสมดุลของวัสดุทดสอบ	116
จลนพลศาสตร์ของการอบแห้งปลาตาก.....	122
การวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์ปลาแห้งภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการอบแห้ง	127
การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์.....	132
บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	144
สรุปผลการดำเนินงานวิจัย.....	144
ข้อเสนอแนะ และแนวทางแก้ไข.....	147
บรรณานุกรม.....	148
ภาคผนวก.....	153
ภาคผนวก ก รายชื่อสารละลายเกลือที่ใช้ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์	154
ภาคผนวก ข ตัวอย่างแบบประเมินคุณภาพอาหารด้วยประสาทสัมผัส (Sensory evaluation)...	160
ภาคผนวก ค แบบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรดสำหรับผลิตภัณฑ์ปลา	163
ภาคผนวก ง ตัวอย่างชุดข้อมูลจากการทดสอบการอบแห้งปลาตากด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุน และการคำนวณประสิทธิภาพการอบแห้ง	183

ภาคผนวก จ ผลการวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ปลาแห้ง.....	190
ภาคผนวก ฉ การเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ.....	193
ประวัติผู้วิจัย.....	212



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 สถิติการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่สำคัญของไทยปีพ.ศ.2559	1
ภาพที่ 2 ผลผลิตภัณฑ์ปลาจากกระบวนการแปรรูป	4
ภาพที่ 3 แผนภูมิอากาศชื้น (Psychrometric chart)	9
ภาพที่ 4 การอ่านค่าสมบัติความชื้นจากแผนภูมิอากาศชื้น (Psychrometric chart).....	12
ภาพที่ 5 การเปลี่ยนแปลงของกระบวนการทำความร้อนและทำความเย็นบนแผนภูมิอากาศชื้น.....	13
ภาพที่ 6 การเปลี่ยนแปลงของกระบวนการอบแห้งบนแผนภูมิอากาศชื้น.....	14
ภาพที่ 7 เส้นความชื้นสมดุลไอโซเทอม	16
ภาพที่ 8 กล่องบรรจุตัวอย่างสำหรับทดลองหาความชื้นสมดุล	17
ภาพที่ 9 ตู้อบไฟฟ้าสำหรับใช้ควบคุมอุณหภูมิ	18
ภาพที่ 10 การอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งแบบคงที่และลดลง.....	21
ภาพที่ 11 การอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง.....	21
ภาพที่ 12 ตำแหน่งของรังสีอินฟราเรดในสเปคตรัม.....	33
ภาพที่ 13 ความเข้มของการแผ่รังสีอินฟราเรดของหลอดอินฟราเรดช่วงไกล และหลอดอินฟราเรดช่วงใกล้.....	34
ภาพที่ 14 ไดอะแกรมขั้นตอนการดำเนินงาน.....	51
ภาพที่ 15 ไดอะแกรมเบื้องต้นการออกแบบเครื่องอบแห้ง.....	52
ภาพที่ 16 การเตรียมตัวอย่างปลาตุ๋กที่น้ำหนักเฉลี่ยเท่าๆ กัน	54
ภาพที่ 17 ตัวอย่างปลาตุ๋กภายในขวดแก้วปิดสนิทซึ่งบรรจุสารละลายเกลืออิ่มตัว 5 ชนิด.....	54
ภาพที่ 18 การควบคุมอุณหภูมิอากาศแวดล้อมโดยการนำขวดแก้วเข้าสู่ตู้อบลมร้อน	55
ภาพที่ 19 การเตรียมวัสดุทดสอบ	56
ภาพที่ 20 การจัดวางปลาตุ๋กบนถาดวางผลิตภัณฑ์.....	56
ภาพที่ 21 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วันอุณหภูมิ	58

ภาพที่ 22 การทดสอบคุณภาพด้านการคืนตัว	59
ภาพที่ 23 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบภาคหมุน	60
ภาพที่ 24 วัสดุทดสอบ.....	61
ภาพที่ 25 แก๊สหุงต้ม (LPG).....	61
ภาพที่ 26 เกจปรับแรงดันแก๊ส LPG แบบแรงดันสูง	62
ภาพที่ 27 หัวปรับแก๊สแรงดันต่ำ	62
ภาพที่ 28 ชุดหัวเผาแก๊สชนิดอินฟาเรด	63
ภาพที่ 29 ตู้ควบคุม.....	63
ภาพที่ 30 มิเตอร์ไฟฟ้า.....	64
ภาพที่ 31 เครื่องวัดพลังงานแสงอาทิตย์ (solar power mete).....	64
ภาพที่ 32 เครื่องวัด และบันทึกอุณหภูมิ (Temperature recorder).....	65
ภาพที่ 33 เครื่องวัดความเร็วลมแบบใบพัด (Anemometer).....	65
ภาพที่ 34 เทอร์โมมิเตอร์	66
ภาพที่ 35 เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้น (Thermo-hygrometer).....	66
ภาพที่ 36 สายเทอร์โมคัปเปิ้ล (Thermocouple type k).....	67
ภาพที่ 37 เครื่องชั่งดิจิตอลพิกัดกำลัง 30 kg ค่าละเอียด 1 g.....	67
ภาพที่ 38 เครื่องชั่งน้ำหนักพกพา ระบบดิจิตอลพิกัดกำลัง 10 kg ค่าละเอียด 0.1 g.....	68
ภาพที่ 39 เครื่องชั่งดิจิตอลทศนิยม 4 ตำแหน่ง	68
ภาพที่ 40 ตู้อบลมร้อน (Hot air oven)	69
ภาพที่ 41 สมุดคู่มือเทียบสี (RHS colour chart)	69
ภาพที่ 42 Magnesium Nitrate Hexahydrate ($Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$)	70
ภาพที่ 43 Sodium Chloride 99% (NaCl)	70
ภาพที่ 44 Magnesium Chloride Hexahydrate ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$).....	71

ภาพที่ 45 Lithium Chloride (LiCl).....	71
ภาพที่ 46 Potassium Nitrate (KNO ₃)	72
ภาพที่ 47 เกลือเสริมไอโอดีน	72
ภาพที่ 48 การอ่านค่าเอนธัลปีและอัตราส่วนความชื้นอากาศบนแผนภูมิอากาศชื้น	74
ภาพที่ 49 การอ่านค่าเอนธัลปีบนแผนภูมิอากาศชื้น (T _{db} 50 °C)	74
ภาพที่ 50 การอ่านค่าสมบัติอากาศชื้นบนแผนภูมิอากาศชื้น (T _{db} 40 °C).....	75
ภาพที่ 51 บริเวณด้านหน้าของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบถาดหมุน	82
ภาพที่ 52 บริเวณด้านหลังของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบถาดหมุน	83
ภาพที่ 53 บริเวณด้านข้างของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบถาดหมุน	83
ภาพที่ 54 บริเวณด้านบนของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบถาดหมุน	84
ภาพที่ 55 โครงสร้างของเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุน	85
ภาพที่ 56 โครงสร้างของระบบถาดหมุน	86
ภาพที่ 57 โครงสร้างของระบบท่ออากาศร้อน	87
ภาพที่ 58 ลินแบ่งลมหรือวาล์วปีกผีเสื้อ	88
ภาพที่ 59 การลดลงของความชื้นเทียบกับเวลาเมื่อทำแห้งปลาตากด้วยวิธีการตากแดด	90
ภาพที่ 60 อัตราการทำแห้งเทียบกับเวลาเมื่อทำแห้งปลาตากด้วยวิธีการตากแดด	91
ภาพที่ 61 อัตราการทำแห้งเทียบกับการลดลงของความชื้นเมื่อทำแห้งปลาตากด้วยวิธีการตากแดด	92
ภาพที่ 62 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในห้องอบแห้งเบื้องต้น	93
ภาพที่ 63 การลดลงของความชื้นเมื่ออบแห้งปลาตากที่อุณหภูมิคงที่ตลอดเวลา.....	97
ภาพที่ 64 การลดลงของความชื้นเมื่อแบ่งการอบแห้งออกเป็น 2 ช่วง.....	98
ภาพที่ 65 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของการอบแห้งปลาตาก โดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนร่วม	102
ภาพที่ 66 ปริมาณความลดความชื้นที่ลดลงเทียบกับเวลาเมื่ออบแห้งปลาตาก.....	103

หน้า

ภาพที่ 67 อัตราการอบแห้งเทียบกับเวลาเมื่ออบแห้งปลาตุกโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนร่วม ..	103
ภาพที่ 68 อัตราการอบแห้งเทียบกับการลดลงของความชื้นเมื่อใช้แหล่งพลังงานความร้อนร่วม	104
ภาพที่ 69 สัดส่วนการใช้พลังงานเมื่ออบแห้งปลาตุกโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนร่วม.....	105
ภาพที่ 70 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของการอบแห้งปลาตุกโดยใช้พลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG.....	106
ภาพที่ 71 ปริมาณ ความลดความชื้น ที่ลดลงเทียบกับเวลาเมื่ออบแห้งปลาตุกโดยใช้พลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG.....	107
ภาพที่ 72 อัตราการอบแห้งเทียบกับเวลาเมื่ออบแห้งปลาตุกโดยใช้พลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG	108
ภาพที่ 73 อัตราการอบแห้งเทียบกับการลดลงของความชื้นเมื่ออบแห้งปลาตุกโดยใช้พลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG.....	109
ภาพที่ 74 สัดส่วนการใช้พลังงานเมื่ออบแห้งปลาตุกโดยใช้พลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG	110
ภาพที่ 75 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของการอบแห้งปลาตุกโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์	111
ภาพที่ 76 ปริมาณความลดความชื้นที่ลดลงเทียบกับเวลาเมื่ออบแห้งปลาตุก.....	112
ภาพที่ 77 อัตราการอบแห้งเทียบกับเวลาเมื่ออบแห้งปลาตุกโดย	112
ภาพที่ 78 อัตราการอบแห้งเทียบกับการลดลงของความชื้นเมื่ออบแห้งปลาตุก	113
ภาพที่ 79 สัดส่วนการใช้พลังงานเมื่ออบแห้งปลาตุกโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์	114
ภาพที่ 80 ความชื้นสมดุลไอโซเทอมของปลาตุก	117
ภาพที่ 81 ความชื้นสมดุลไอโซเทอมของปลาตุก 3 มิติ	118
ภาพที่ 82 การเปรียบเทียบค่าความชื้นสมดุลจากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	120
ภาพที่ 83 ค่าความชื้นที่ได้จากผลการทดลองและสมการอบแห้งชั้นบางกึ่งทฤษฎี	123
ภาพที่ 84 อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากผลการทดลองและสมการอบแห้งชั้นบางกึ่งทฤษฎี	124
ภาพที่ 85 อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากผลการทดลอง และสมการอบแห้งชั้นบางแบบเอมพิริคัล	125

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ปริมาณและมูลค่าสัตว์น้ำจืดที่สำคัญทางเศรษฐกิจปี พ.ศ.2559.....	2
ตารางที่ 2 สถิติการส่งออกปลาและผลิตภัณฑ์ปลาน้ำจืดของประเทศไทยในปี พ.ศ.2555-2559	3
ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบหัวเผาแก๊ส	35
ตารางที่ 4 สรุปสาระสำคัญจากการสำรวจเอกสาร	42
ตารางที่ 5 ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ของสารละลายเกลืออิ่มตัว.....	53
ตารางที่ 6 ผลการคำนวณการออกแบบเครื่องอบแห้งเบื้องต้น	81
ตารางที่ 7 ผลวิเคราะห์อัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสมสำหรับเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุน	95
ตารางที่ 8 ผลวิเคราะห์สภาวะการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุนที่เหมาะสม	98
ตารางที่ 9 ผลวิเคราะห์อัตราการนำอากาศกลับมาใช้ใหม่ที่เหมาะสมกับการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุน	100
ตารางที่ 10 การทดลองเปรียบเทียบการใช้พลังงานสิ้นเปลืองจำเพาะในกระบวนการอบแห้ง.....	116
ตารางที่ 11 ผลการทดลองหาความชื้นสมดุลของปลาตุ๋ก	119
ตารางที่ 12 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุล.....	121
ตารางที่ 13 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุล.....	121
ตารางที่ 14 ค่าพารามิเตอร์ของสมการการอบแห้งชั้นบางแบบเอมพิริคัล	126
ตารางที่ 15 รูปแบบสมการการอบแห้งชั้นบางแบบเอมพิริคัล	126
ตารางที่ 16 ค่าเฉลี่ยด้านความชอบของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์ปลาแห้ง (n=20).....	128
ตารางที่ 17 การคืนตัวของผลิตภัณฑ์ปลาแห้ง	129
ตารางที่ 18 การประเมินลักษณะสีของผลิตภัณฑ์ปลาแห้งที่มีจำหน่ายทั่วไปตามท้องตลาดและผลิตภัณฑ์ปลาแห้งที่ได้จากการทดลอง	130
ตารางที่ 19 ผลการวิเคราะห์ค่าโปรตีนและไขมันในเนื้อปลา	131

หน้า

ตารางที่ 20 ข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์เมื่อทำการเพาะเลี้ยงปลาตู้ก
เพื่อจำหน่ายเนื้อปลา..... 133

ตารางที่ 21 ข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ของการอบแห้งปลาตู้กด้วย
เครื่องอบแห้งแบบถาดหมุนโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนร่วม..... 135

ตารางที่ 22 ข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ของการอบแห้งปลาตู้กด้วย
เครื่องอบแห้งแบบถาดหมุนโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG 138

ตารางที่ 23 การวิเคราะห์เปรียบเทียบทางด้านเศรษฐศาสตร์ของการอบแห้งปลาตู้กด้วยเครื่อง
อบแห้งแบบถาดหมุน 142

ตารางที่ 24 การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ตามความแปรปรวนของราคาผลิตภัณฑ์ 143



สารบัญภาพผนวก

	หน้า
ภาพผนวกที่ 1 แบบประเมินคุณภาพผลิตภัณฑ์ปลาด้วยประสาทสัมผัส.....	161
ภาพผนวกที่ 2 แบบแสดงภาพ Isometric.....	164
ภาพผนวกที่ 3 แบบแสดงภาพด้านหน้า ด้านข้าง และด้านบนของเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุน....	165
ภาพผนวกที่ 4 แบบแสดงภาพ Isometric ห้องอบแห้ง.....	166
ภาพผนวกที่ 5 แบบแสดงภาพ Isometric ระบบถาดหมุน	167
ภาพผนวกที่ 6 แบบแสดงภาพโครงสร้างฐานยึดจับถาดหมุน	168
ภาพผนวกที่ 7 แบบแสดงภาพด้านหน้า ด้านข้าง และด้านบนวงล้อถาดหมุน	169
ภาพผนวกที่ 8 แบบแสดงภาพด้านหน้า ด้านข้าง และด้านบนถาดบรรจุผลิตภัณฑ์	170
ภาพผนวกที่ 9 แบบแสดงภาพด้านหน้า ด้านข้าง และด้านบนหน้าแปลนยึดจับวงล้อถาดหมุน	171
ภาพผนวกที่ 10 แบบแสดงภาพ Isometric ระบบอากาศร้อน.....	172
ภาพผนวกที่ 11 แบบแสดงภาพด้านหน้า ด้านข้าง และด้านบนท่ออากาศร้อน 1	173
ภาพผนวกที่ 12 แบบแสดงภาพด้านหน้า ด้านข้าง และด้านบนท่ออากาศร้อน 2.....	174
ภาพผนวกที่ 13 แบบแสดงภาพด้านหน้า ด้านข้าง และด้านบนท่ออากาศร้อน 3.....	175
ภาพผนวกที่ 14 แบบแสดงภาพด้านหน้า ด้านข้าง และด้านบนท่ออากาศร้อน 4.....	176
ภาพผนวกที่ 15 แบบแสดงภาพด้านหน้า ด้านข้าง และด้านบนท่ออากาศร้อน 5.....	177
ภาพผนวกที่ 16 แบบแสดงภาพด้านหน้า ด้านข้าง และด้านบนท่ออากาศร้อน 6.....	178
ภาพผนวกที่ 17 แบบแสดงภาพด้านหน้า ด้านข้าง และด้านบนท่ออากาศร้อน 7.....	179
ภาพผนวกที่ 18 แบบแสดงภาพด้านหน้า ด้านข้าง และด้านบนท่ออากาศร้อน 8.....	180
ภาพผนวกที่ 19 แบบแสดงภาพด้านหน้า ด้านข้าง และด้านบนท่อสามทางอากาศร้อน.....	181
ภาพผนวกที่ 20 แบบแสดงภาพด้านหน้า ด้านข้าง และด้านบนวาล์วปีกผีเสื้อ	182
ภาพผนวกที่ 21 ผลการวิเคราะห์ผลิตปลาดุกแห้งจากการทดลอง.....	191
ภาพผนวกที่ 22 ผลการวิเคราะห์ผลิตปลาดุกแห้งที่มีจำหน่ายทั่วไปตามท้องตลาด.....	192

สารบัญตารางภาคผนวก

หน้า

ตารางภาคผนวกที่ 1 รายชื่อเกลือและค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้จากสารละลายอิ่มตัวของเกลือที่ อุณหภูมิค่าต่างๆ	155
ตารางภาคผนวกที่ 2 การวิเคราะห์ผลการทดลองการอบแห้งปลาตุกโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อน จากแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG.....	184



สัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
P_v	ความดันไอ	kPa
RH	ความชื้นสัมพัทธ์	%
h	เอนทัลปี	MJ/kg
w	อัตราส่วนความชื้น	kg H ₂ O/kg dry air
T_{ab}	อุณหภูมิกระเปาะแห้ง	°C
T_{wb}	อุณหภูมิกระเปาะเปียก	°C
T_{dp}	อุณหภูมิจุดน้ำค้าง	°C
v	ปริมาตรจำเพาะ	m ³ /kg
M_{wb}	ความชื้นมาตรฐานเปียก	%wb
M_{db}	ความชื้นมาตรฐานแห้ง	%db
W_i	น้ำหนักเริ่มต้น	kg
W_f	น้ำหนักสุดท้าย	kg
M_i	ความชื้นเริ่มต้น	%db
M_f	ความชื้นสุดท้าย	%db
M_t	ความชื้น ณ เวลาใดๆ	%db
M_{eq}	ความชื้นสมมูลของวัสดุ	%db
T	อุณหภูมิอากาศ	°C
C_1, C_2, C_3	ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของผลผลิตทางการเกษตร	
R	ค่าคงที่สากลของก๊าซ = 8.314	K
h_{fg}	ความร้อนแฝงการระเหยน้ำ = 2,2570	KJ/kg
MR	อัตราส่วนความชื้น	
k	ค่าคงที่การอบแห้ง	h ⁻¹
t	เวลา	h
m_w	น้ำหนักที่ต้องการระเหย	kg
\dot{m}_w	อัตราการระเหยน้ำ	kg/h
\dot{m}_a	ปริมาณลมที่ต้องใช้ในการอบแห้ง	kg air/h
\dot{Q}	ขนาดของแหล่งความร้อน	kW

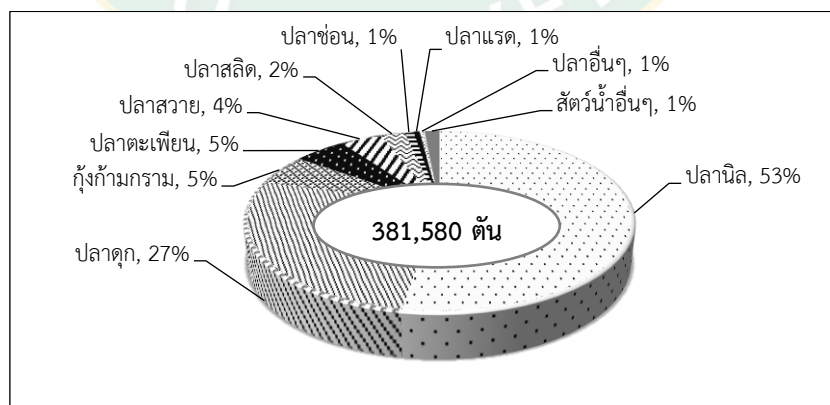
สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
\dot{m}_g	อัตราการไหลเชิงมวล	kJ/kg
LHV_g	ค่าความร้อนต่ำของแก๊ส LPG คือ 50.22	MJ/kg
E	ปริมาณพลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำ	kJ
A_c	พื้นที่ตัวรับรังสีอาทิตย์	m^2
I_t	ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์	W/m^2
A	พื้นที่หน้าตัดห้องอบ	m^2
V	ความเร็วอากาศไหลผ่านชั้นวัสดุอบ	m/s
\dot{V}	อัตราการไหลอากาศผ่านชั้นวัสดุ	m^3/s
m	มวลของวัสดุอบ	kg
d_p	ความหนาแน่นวัสดุอบ	kg/m^3
d	ความหนาวัสดุอบ	m
P_{motor}	ประสิทธิภาพของมอเตอร์	%
P_a	ความหนาแน่นอากาศ	kg/m^3
h_L	การสูญเสียความดัน	Pa
q	แรงโน้มถ่วงของโลก	m/s^2
η_m	ประสิทธิภาพของมอเตอร์	%
η_f	ประสิทธิภาพของพัดลมโบลเวอร์	%
η_{dry}	ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง	%
NPV	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ	
IRR	อัตราผลตอบแทนภายในโครงการ	

บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ประเทศไทยเป็นประเทศอุตสาหกรรมเกษตร โดยประชาชนส่วนใหญ่ประกอบอาชีพด้านการปลูกพืช และการเลี้ยงสัตว์ การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นอุตสาหกรรมที่มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ประเทศไทยเป็นหนึ่งในสิบอันดับแรกของการผลิตในภาคประมงโลก จากสถิติของผลผลิตสัตว์น้ำจืดในปี พ.ศ.2559 ของประเทศไทยซึ่งมีปริมาณรวม 381,580 ตัน มูลค่ารวมทั้งสิ้น 23,369.76 ล้านบาท (กลุ่มวิจัยและวิเคราะห์สถิติ กรมประมง ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารกรมประมง, 2561) เมื่อพิจารณาผลผลิตจำแนกตามชนิดของสัตว์น้ำเศรษฐกิจที่ทำการเพาะเลี้ยงพบว่า ปลานิลเป็นสัตว์น้ำจืดที่ผลิตได้มากที่สุด โดยมีปริมาณรวมทั้งสิ้นถึง 200,763 ตัน คิดเป็นร้อยละ 52.61 ของปริมาณการผลิตทั้งหมดมีมูลค่า 10,724.41 ล้านบาท รองลงมาคือ ปลาตูก มีปริมาณ 102,444 ตัน คิดเป็นร้อยละ 26.85 ของปริมาณการผลิตทั้งหมด มีมูลค่า 4,843.57 ล้านบาท และอันดับสามคือ กุ้งก้ามกราม มีปริมาณการผลิต 20,883 ตัน คิดเป็นร้อยละ 5.47 ของปริมาณการผลิตทั้งหมด มีมูลค่า 4,707,146 ล้านบาท โดยปริมาณ และมูลค่าสัตว์น้ำจืดที่สำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทยในปี พ.ศ.2559 สามารถแสดงภาพที่ 1 และตารางที่ 1 นอกจากนี้ยังมีสัตว์น้ำอื่นๆ ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจรองลงไป (กลุ่มวิจัยและวิเคราะห์สถิติ ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารกรมประมง, 2561)



ภาพที่ 1 สถิติการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่สำคัญของไทยปีพ.ศ.2559

ที่มา : กลุ่มวิจัยและวิเคราะห์สถิติ ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารกรมประมง (2561)

ตารางที่ 1 ปริมาณและมูลค่าสัตว์น้ำจืดที่สำคัญทางเศรษฐกิจปี พ.ศ.2559

ชนิดสัตว์น้ำ	ปริมาณ (ตัน)	มูลค่า (พันบาท)
รวมทั้งประเทศ	381,580.00	23,369,762.00
ปลานิล (Nile tilapia)	200,763.00	10,724,411.00
ปลาดุก (Walking catfish)	102,444.00	4,843,573.00
กุ้งก้ามกราม (Giant freshwater prawn)	20,883.00	4,707,146.00
ปลาตะเพียน (Common silver barb)	19,312.00	855,839.00
ปลาซวาย (Striped catfish)	15,497.00	544,940.00
ปลาสลิด (Snake skin gourami)	9,470.00	666,868.00
ปลาช่อน (Striped snake-head fish)	3,469.00	351,207.00
ปลาแรด (Giant gourami)	2,253.00	157,537.00
ปลาอื่นๆ (Others fish)	1,851.00	86,863.00
สัตว์น้ำอื่นๆ (Others)	5,638.00	431,378.00

ที่มา : กลุ่มวิจัยและวิเคราะห์สถิติ ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารกรมประมง (2561)

ประเทศไทยติดอยู่อันดับต้นๆ ของผู้ส่งออกสินค้าประมงมาตั้งแต่ปี พ.ศ.2541 (กลุ่มวิจัยและวิเคราะห์สถิติการประมง, 2555) การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมีความสำคัญเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากเป็นแนวทางหนึ่งในการช่วยเพิ่มผลผลิตทางการประมงเพื่อเป็นการทดแทน และช่วยบรรเทาปัญหาการขาดแคลนของทรัพยากรประมง การผลิต และส่งออกผลผลิตในภาคการประมงนับว่ามีบทบาทสำคัญในระบบเศรษฐกิจของประเทศเป็นอย่างมาก เนื่องจากในแต่ละปีจะมีปริมาณการส่งออกผลผลิตในภาคการประมงเป็นจำนวนมากซึ่งเป็นการสร้างรายได้ให้กับประเทศเป็นจำนวนมากมหาศาล การส่งออกปลา และผลิตภัณฑ์ปลาของประเทศไทยในปี พ.ศ.2559 ตลอดทั้งปีมีปริมาณการส่งออกรวม 972,776 ตัน คิดเป็นมูลค่า 10,966.31 ล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2560) โดยสถิติการส่งออกปลา และผลิตภัณฑ์ปลาของประเทศไทยในปี พ.ศ.2555-2559 สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สถิติการส่งออกปลาและผลิตภัณฑ์ปลาน้ำจืดของประเทศไทยในปี พ.ศ.2555-2559

การส่งออก	ปริมาณ (ตัน)	มูลค่า (ล้านบาท)
ปี พ.ศ.2555	1,174,864.68	13,136.88
ปี พ.ศ.2556	1,107,611.20	12,218.82
ปี พ.ศ.2557	1,136,748.48	12,024.67
ปี พ.ศ.2558	1,044,646.86	10,929.36
ปี พ.ศ.2559	972,776.25	10,966.31

ที่มา : กลุ่มวิจัยและวิเคราะห์สถิติ ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารกรมประมง (2561)

ผลิตภัณฑ์ปลาที่ทำการส่งออกนั้นเกิดมาจากกระบวนการการแปรรูปปลาซึ่งเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับปลาหลังจากการเพาะเลี้ยง โดยผลิตภัณฑ์จากการแปรรูปปลามีหลากหลายรูปแบบเช่น ปลาแช่แข็ง ปลาปรุงแต่ง ปลารมควัน น้ำพริก และปลาแห้ง เป็นต้น โดยประเทศที่นำเข้าผลิตภัณฑ์ปลาจากประเทศไทยที่ผ่านกระบวนการแปรรูปโดยการ นึ่ง ต้ม ใส่น้ำเกลือ ทำเค็ม ตากแห้ง และรมควัน ได้แก่ ประเทศจีน มีการนำเข้าผลิตภัณฑ์ปลาจากประเทศไทย 17,662 ตัน รองลงมาได้แก่ ประเทศมาเลเซีย และประเทศญี่ปุ่นมีการนำเข้าผลิตภัณฑ์ปลาจากประเทศไทย 14,933 และ 2,829 ตัน ตามลำดับ (กลุ่มวิจัยและวิเคราะห์สถิติ กรมประมง ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารกรมประมง, 2561) โดยการอบแห้งปลาเป็นกระบวนการหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในกระบวนการแปรรูปปลา การอบแห้งหรือการลดความชื้นเป็นกระบวนการที่มนุษย์รู้จัก และนำมาใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวันมาเป็นเวลานาน เริ่มจากการที่มนุษย์เรารู้จักการใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อการตากแห้งมาตั้งแต่สมัยโบราณ ซึ่งในปัจจุบันประเทศไทยมีผลผลิตทางการเกษตรหลายชนิด ได้แก่ พืช ผัก ผลไม้ และปลา ในบางฤดูกาลผลิตภัณฑ์มีปริมาณมากเกินความต้องการของผู้บริโภคทำให้ราคาของผลผลิตถูกลง และเมื่อจำหน่ายผลผลิตได้ไม่หมดในเวลาอันควรจะเกิดการเน่าเสียของผลผลิต การตากแห้งนับเป็นวิธีการหนึ่งซึ่งช่วยในการถนอมอาหารให้มีอายุมากขึ้น โดยการนำเอาอาหารต่างๆ มาตากกลางแจ้งแต่การตากแห้งทำให้ประสบปัญหาทางด้านการปนเปื้อนของฝุ่นละออง การรบกวนจากแมลงต่างๆ โดยปัญหาหลักของการตากกลางแจ้งคือไม่สามารถตากแห้งในเวลาที่ไม่แดดหรือฝนตก และผลิตภัณฑ์เสียหายเมื่อโดนฝน



ภาพที่ 2 ผลิตภัณฑ์ปลาจากกระบวนการแปรรูป

ที่มา : วสันต์ (2558)

การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่ถูกนำมาใช้เพื่อช่วยถนอมอาหาร และเก็บรักษาผลผลิตทางการเกษตร อีกทั้งยังช่วยในการเพิ่มมูลค่าของผลผลิตอีกด้วย นอกจากนี้การอบแห้งด้วยตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ยังช่วยแก้ปัญหาทางด้านการปนเปื้อนจากฝุ่นละออง การถูกรบกวนจากแมลงต่างๆ นอกจากนี้ยังสามารถลดระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งได้ด้วยการอบแห้งคือกระบวนการที่ความร้อนถูกถ่ายเทด้วยวิธีใดวิธีหนึ่งไปยังวัสดุที่มีความชื้นเพื่อไล่ความชื้นออกจากวัสดุ ซึ่งโดยทั่วไปความร้อนจะช่วยให้ไอน้ำภายในวัสดุเคลื่อนย้ายมาอยู่ที่ผิว และจะถูกทำให้ออกจากผิวโดยการระเหยซึ่งจะถูกพาออกไปโดยอากาศ ปริมาณความชื้นที่ถูกพาออกไปนั้นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอากาศ ความชื้นผลผลิต ความชื้นในอากาศ ชนิด และความสูงแก่ของผลผลิต (ณัฐวุฒิ, 2559) เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์จึงได้มีการพัฒนาให้มีการใช้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ร่วมพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG ซึ่งใช้หัวเผาแก๊สชนิดอินฟราเรดเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน การใช้หัวเผาแก๊สชนิดอินฟราเรดสามารถ

ประหยัดแก๊สได้เกือบสองเท่าของหัวแก๊สแบบธรรมดา นอกจากนี้แล้วในการใช้งานยังพบว่าไม่มีเขม่าควัน ไม่มีการเผาไหม้แบบเปลวไฟจึงไม่ทำให้เกิดมลพิษ ไม่ทำให้เกิดควันดำ ไม่ก่อให้เกิดมลพิษ ไม่เกิดปัญหาอุณหภูมิที่เตา สามารถทำความสะอาดได้ง่าย อีกทั้งยังมีความร้อนสูงซึ่งสามารถช่วยลดระยะเวลาในการอบแห้ง และผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพดี สำหรับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ปลานั้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้ต้องมีความชื้นมาตรฐานแห่งอยู่ในช่วง 20-30%db (วสันต์, 2558) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ปลาแบบกึ่งอัตโนมัติโดยใช้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG ซึ่งใช้หัวเผาแก๊สชนิดอินฟราเรดเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และได้ทำการประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ปลา การวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์ปลาภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการอบแห้ง การวิเคราะห์ความสิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งผลิตภัณฑ์ปลา รวมไปถึงการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์อีกด้วย

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ปลาโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรด
2. เพื่อประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรดสำหรับผลิตภัณฑ์ปลา
3. เพื่อประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์ปลาภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการอบแห้ง
4. เพื่อวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ และความสิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งผลิตภัณฑ์ปลาโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรด

ขอบเขตของการวิจัย

เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรดสำหรับผลิตภัณฑ์ปลา มีขอบเขตการศึกษาดังนี้

1. ผลิตภัณฑ์ปลาที่นำมาใช้ในการทดลองเป็นผลิตภัณฑ์ปลาน้ำจืดในจังหวัดเชียงใหม่
2. ศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งในช่วงอุณหภูมิ 50-70 °C
3. การวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์ปลาภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการอบแห้ง จะทำการวิเคราะห์ สี กลิ่น เนื้อสัมผัส และการคินตัว
4. การประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ปลา

5. การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์จะทำการวิเคราะห์จุดคุ้มทุน และผลตอบแทนจากการลงทุน

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ปลาที่ทำการพัฒนาขึ้นมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานในกระบวนการอบแห้งผลิตภัณฑ์ปลาโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรด สามารถช่วยลดระยะเวลาในการอบแห้งได้
2. มีแนวทางในการเพิ่มสมรรถนะของเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ปลาเพื่อให้สามารถทำการอบแห้งผลิตภัณฑ์ปลาให้ได้ทุกฤดูกาล
3. ผลิตภัณฑ์ปลาที่ได้ภายหลังกระบวนการอบแห้งมีคุณภาพที่ใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ปลาในท้องตลาด
4. เครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ปลาที่ทำการพัฒนาขึ้นถูกนำมาใช้ในกระบวนการอบแห้งผลิตภัณฑ์ปลาโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรด โดยสามารถช่วยลดปริมาณการใช้พลังงานสิ้นเปลืองในกระบวนการอบแห้งผลิตภัณฑ์ปลาได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและการตรวจเอกสาร

เทคโนโลยีการอบแห้ง

1. พื้นฐานการอบแห้ง

โดยทั่วไปจะเรียกกระบวนการที่ทำให้ความชื้นของวัสดุลดลงด้วยวิธีการทำให้น้ำระเหยออกมาว่า “การอบแห้ง” ถ้าการระเหยของน้ำเกิดจากความร้อนจะเรียกว่า การอบแห้งโดยใช้ความร้อน (Thermal drying) ซึ่งการอาศัยความร้อนจะเกิดกระบวนการ 2 กระบวนการพร้อมกัน ดังนี้

- 1) กระบวนการถ่ายเทพลังงาน ซึ่งส่วนใหญ่คือการถ่ายเทความร้อนจากสิ่งแวดล้อมไปสู่วัสดุขึ้น
- 2) กระบวนการถ่ายเทความชื้นจากภายในวัสดุขึ้นไปยังผิวของวัสดุ และถ่ายเทสู่อากาศแวดล้อม

พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทจากแหล่งพลังงานความร้อนไปสู่วัสดุขึ้นอาจเกิดโดยการพาความร้อน การนำความร้อนหรือการแผ่รังสีวิธีใดวิธีหนึ่งหรือหลายวิธีร่วมกัน

ในการนำน้ำในรูปแบบของไอน้ำออกจากผิววัสดุขึ้นไปสู่อากาศแวดล้อมจะขึ้นกับอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความดันอากาศ สำหรับการเคลื่อนตัวของความชื้นจากภายในวัสดุขึ้นไปออกมายังผิวของวัสดุขึ้นจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางกายภาพของวัสดุขึ้น อุณหภูมิ และความชื้นของวัสดุนั้นๆ โดยทั่วไปการเคลื่อนตัวของความชื้นจากภายในของวัสดุขึ้นไปออกมาที่ผิวของวัสดุขึ้นเกิดจากกลไกอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างพร้อมกันที่สำคัญมีดังนี้

- 1) การแพร่ของของเหลว (Liquid diffusion) ถ้าอุณหภูมิของวัสดุขึ้นมีค่าต่ำกว่าจุดเดือดของของเหลว
- 2) การแพร่ของไอน้ำ (Vapour diffusion) ถ้าน้ำระเหยกลายเป็นไอน้ำภายในวัสดุขึ้น
- 3) ความแตกต่างของความดันไฮโดรสแตติกส์ (Hydrostatic pressure) เกิดขึ้นเมื่ออัตราการระเหยของน้ำภายในวัสดุขึ้นมีมากกว่าอัตราการถ่ายเทมวลของไอน้ำที่ผิววัสดุขึ้นไปสู่อากาศแวดล้อม

เนื่องจากโครงสร้างทางกายภาพของวัสดุขึ้นอาจเปลี่ยนแปลงระหว่างการอบแห้ง ดังนั้นกลไกการถ่ายเทความชื้นจึงอาจเปลี่ยนแปลงระหว่างการอบแห้งได้

การอบแห้งคือ กระบวนการลดความชื้นซึ่งจะที่มีการถ่ายเทความร้อน และการถ่ายเทมวลสารเกิดขึ้นพร้อมกัน ความร้อนที่ทำให้น้ำระเหยออกจากวัสดุนั้นส่วนใหญ่ได้รับความร้อนจากความร้อนสัมผัส และการถ่ายเทความร้อนจะแบ่งออกเป็น 3 ประเภทด้วยกันคือ การนำความร้อน การพา

ความร้อน และการแผ่รังสีซึ่งในการอบแห้งส่วนใหญ่จะใช้การถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อนเป็นหลัก ตัวกลางที่นิยมใช้ในพาความร้อนคือ อากาศ อากาศร้อนจะถ่ายเทความร้อนให้กับวัสดุซึ่งความร้อนส่วนใหญ่จะถูกนำไปใช้ในการระเหยของน้ำ โดยของเหลวที่อยู่ภายในวัสดุจะเคลื่อนที่มายังพื้นผิวของวัสดุซึ่งเป็นผลมาจากแรงตึงผิว และไอน้ำในวัสดุจะเคลื่อนที่ เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น และความดันไอที่แตกต่างกันระหว่างไอน้ำในวัสดุกับความชื้น กล้าวคือ ความเข้มข้นของไอน้ำในวัสดุลดลง เมื่ออุณหภูมิของวัสดุเพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการอบแห้งลดลง และอัตราการอบแห้งจะลดลงตลอดระยะเวลาของการอบแห้งจนกระทั่งความดันไอของอากาศแวดล้อมในการอบแห้งไม่แตกต่างกับความดันไอของของเหลวในวัสดุ

ปัจจุบันเทคโนโลยีการอบแห้งมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อให้เหมาะสมกับวัตถุดิบ ทั้งการรักษาสภาพของวัตถุดิบคุณสมบัติด้านสี ตลอดจนคุณค่าทางอาหารให้คงอยู่มากที่สุด อีกทั้งการอบแห้งยังช่วยการเพิ่มเวลาในการจัดเก็บหรือการขนส่งให้มีความสะดวกมากขึ้น การอบแห้งเป็นกระบวนการลดน้ำออกจากวัตถุดิบหรืออาหาร ปัจจุบันมีการพัฒนาเทคโนโลยีการอบแห้งขึ้นมามากมายเพื่อตอบสนองต่อกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมเพื่อลดต้นทุน และลดเวลาการผลิตจากเทคโนโลยีการอบแห้ง และเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้ง ดังนั้นการเลือกเครื่องอบหรือวิธีการอบแห้งจึงเป็นต่อผู้ที่เกี่ยวข้องต้องเรียนรู้เพื่อให้กระบวนการอบแห้งมีประสิทธิภาพสูงสุดในอุตสาหกรรม

คุณสมบัติอากาศ

1. ความชื้นในอากาศ

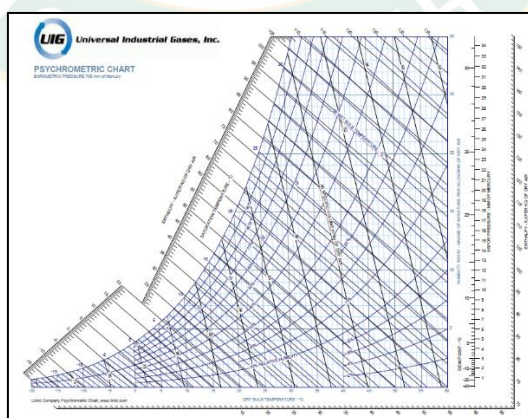
ปัจจัยที่สำคัญสำหรับการอบแห้งอีกประการหนึ่งคือ ความชื้นในอากาศ เนื่องจากในกระบวนการอบแห้งโดยทั่วไปจะใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการพาความชื้นออกจากวัสดุอบแห้ง ความชื้นในอากาศจึงเป็นตัวแปรหนึ่งที่ต้องพิจารณาเพราะอากาศที่มีความชื้นภายในมากจะมีความสามารถในการพาความชื้นออกจากวัสดุได้น้อยกว่าอากาศที่มีความชื้นภายในน้อย (ณัฐวุฒิ, 2559) สมบัติของอากาศชื้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้

- ความดันไอ (P_v) หมายถึง ส่วนของความดันย่อยที่กระทำต่อโมเลกุลไอน้ำในอากาศชื้น ถ้าอากาศนี้อิ่มตัวไอน้ำจะเรียกความดันไอนี้ว่าความดันไออิ่มตัว (P_{vs}) มีหน่วยเป็น kPa
- ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างความดันไอน้ำในอากาศต่อความดันไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิ และความดันบรรยากาศเดียวกัน มีหน่วยเป็นเศษส่วน
- เอนทัลปี (h) หมายถึง ปริมาณความร้อนของอากาศชื้นต่อหนึ่งหน่วยมวลของอากาศ มีหน่วยเป็น MJ/kg

- ปริมาตรจำเพาะ (V) หมายถึง ปริมาตรอากาศต่อหน่วยน้ำหนักของอากาศแห้ง มีหน่วยเป็น m^3/kg
- อัตราส่วนความชื้น (w) หมายถึง ปริมาณไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศหนึ่งหน่วยมวล มีหน่วยเป็น $\text{kg H}_2\text{O}/\text{kg dry air}$
- อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (T_{ab}) หมายถึง อุณหภูมิที่อ่านค่าได้จากเทอร์โมมิเตอร์ทั่วไป โดยปกติเมื่อกล่าวถึงอุณหภูมิโดยทั่วไปจะหมายถึงอุณหภูมิกระเปาะแห้ง มีหน่วยเป็น $^{\circ}\text{C}$
- อุณหภูมิกระเปาะเปียก (T_{wb}) หมายถึง อุณหภูมิที่อ่านค่าได้จากเทอร์โมมิเตอร์ที่กระเปาะหุ้มด้วยผ้าก๊อสปเปียก และมีความเร็วลมผ่านไม่น้อยกว่า 4.6 m/s อากาศขณะนั้นจะเป็นอากาศที่อิ่มตัวด้วยไอน้ำ มีหน่วยเป็น $^{\circ}\text{C}$
- อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (T_{dp}) หมายถึง อุณหภูมิที่ไอน้ำในอากาศเริ่มควบแน่นเป็นหยดน้ำเมื่ออากาศชื้นถูกทำให้เย็น มีหน่วยเป็น $^{\circ}\text{C}$

2. แผนภูมิอากาศชื้น (Psychrometric chart)

การวิเคราะห์สมบัติของอากาศชื้นนั้น ในทางปฏิบัติสามารถอ่านค่าคุณสมบัติอากาศชื้นได้จากแผนภูมิอากาศชื้น ซึ่งแผนภูมิอากาศชื้นนี้สร้างความสัมพันธ์ของสมบัติอากาศ 7 ค่า ดังนี้ อุณหภูมิกระเปาะแห้ง อุณหภูมิกระเปาะเปียก อุณหภูมิจุดน้ำค้าง อัตราส่วนความชื้น ความชื้นสัมพัทธ์ ปริมาตรจำเพาะ และเอนทัลปี ตัวอย่างของแผนภูมิอากาศชื้น แสดงดังภาพที่ 3 ซึ่งเป็นรูปแผนภูมิอากาศชื้นในหน่วย SI ที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในช่วงอุณหภูมิต่ำคือไม่เกิน 60°C



ภาพที่ 3 แผนภูมิอากาศชื้น (Psychrometric chart)

ที่มา : Brooker et al. (1992)

การอ่านค่าคุณสมบัติอากาศชื้นจากแผนภูมิอากาศชื้นจำเป็นต้องทราบคุณสมบัติอากาศชื้นเริ่มต้น 2 ค่า จากสมบัติอากาศชื้น 7 ค่าจุดตัดของทั้งสองนั้นแสดงดังภาพที่ 4 ตำแหน่ง ก ลากเส้นความสัมพันธ์จากจุดตัดบนแผนภูมิอากาศชื้น ตัวแปรต่างๆ ที่เหลือสามารถอ่านค่าได้ดังนี้

- อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (Dry bulb temperature) คือ อุณหภูมิของอากาศที่วัดได้ โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์ทั่วไปทั้งแบบกระเปาะ แบบหน้าปัทม์หรือเครื่องบันทึกอุณหภูมิแบบต่าง ๆ มีหน่วยเป็น °C หรือ °F การอ่านค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งบนแผนภูมิอากาศชื้นนั้น ได้จากเส้นตรงในแนวตั้ง โดยตัวเลขของอุณหภูมิจะอยู่ด้านล่างของแผนภูมิ ดังแสดงในภาพที่ 4 (ก)

- อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew point temperature) คือ อุณหภูมิที่อากาศมีไอน้ำอิ่มตัว ไอน้ำเริ่มจะกลั่นตัวเป็นหยดน้ำบนพื้นผิวที่อากาศสัมผัสมีหน่วยเป็น °C หรือ °F ในแผนภูมิอากาศชื้นอ่านได้จากเส้นตรงในแนวนอน ตัวเลขที่แสดงใช้ตัวเลขเดียวกันกับอุณหภูมิกระเปาะเปียก โดยแสดงอยู่บนส่วนโค้งด้านซ้ายของแผนภูมิหรือเส้นความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 100% ดังแสดงในภาพที่ 4 (ข)

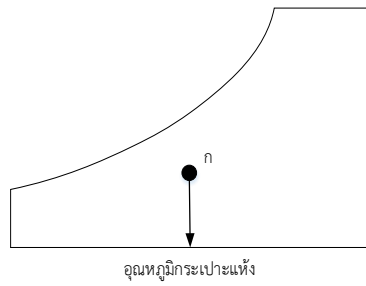
- อุณหภูมิกระเปาะเปียก (Wet bulb temperature) คือ อุณหภูมิของอากาศที่วัดได้จากเทอร์โมมิเตอร์ที่มีผิวเปียกน้ำหุ้มอยู่ที่กระเปาะวัด โดยอุณหภูมิที่วัดได้นี้จะอ่านค่าได้ต่ำกว่าอุณหภูมิกระเปาะแห้ง เมื่อวัดในเวลาเดียวกันทั้งนี้เนื่องจากเมื่อน้ำระเหยจากผ้าสู่อากาศจะดึงเอาความร้อนไปด้วยทำให้ผ้าที่หุ้มกระเปาะอยู่เย็นตัวลง สำหรับในกรณีที่อากาศมีไอน้ำอิ่มตัวแล้วหรือความชื้นสัมพัทธ์ 100% น้ำก็ไม่สามารถระเหยจากผ้าได้ ค่าที่อ่านได้จากอุณหภูมิกระเปาะเปียกจะเท่ากับที่อ่านได้จากกระเปาะแห้ง มีหน่วยเป็น °C หรือ °F ในแผนภูมิอากาศชื้นอ่านได้จากเส้นที่ลากขนานกับเส้นอุณหภูมิกระเปาะเปียกไปตัดเส้นความชื้นสัมพัทธ์ 100% แล้วลากลงตั้งฉากกับแกนราบ อ่านค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกจากแกนราบ ดังแสดงในภาพที่ 4 (ค)

- เอนทัลปี (Enthalpy) คือ ค่าปริมาณความร้อนที่มีอยู่ในอากาศขณะนั้น มีหน่วยเป็น kJ/kg dry air ในแผนภูมิจะใช้เส้นที่ลากขนานกับเอนทัลปีซึ่งเป็นเส้นในแนวเดียวกับ

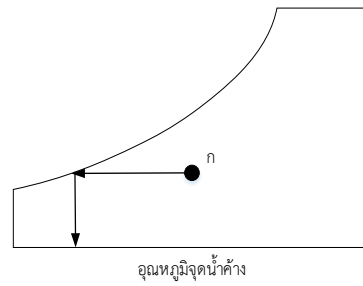
- เส้นอุณหภูมิกระเปาะเปียก ไปตัดเส้นเอนทัลปี อ่านค่าเอนทัลปีจากแกนเอนทัลปี ดังแสดงในภาพที่ 4 (ง)

- อัตราส่วนความชื้น (Humidity ratio) คือ อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศต่อน้ำหนักของอากาศแห้ง มีหน่วยเป็น kg H₂O/kg dry air โดยค่าอัตราส่วนความชื้นนี้จะบอกถึงปริมาณไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศในขณะใดขณะหนึ่ง ซึ่งค่านี้จะมีค่าสำคัญที่จะบอกว่าอากาศนั้น ๆ จะสามารถรับน้ำได้อีกเท่าใด ในแผนภูมิอากาศชื้นอ่านได้จากเส้นที่ลากขนานกับแกนราบให้ไปตัดเส้นอัตราส่วนความชื้นที่แกนอัตราส่วนความชื้นทางขวามือ อ่านค่าอัตราส่วนความชื้นจากแกนอัตราส่วนความชื้น ดังแสดงในภาพที่ 4 (จ)

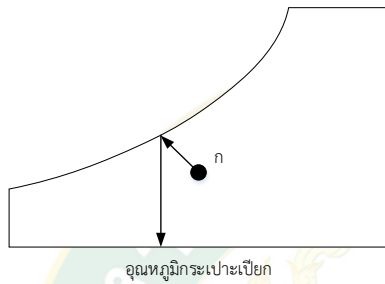
- ปริมาตรจำเพาะ (Specific volume) คือ ปริมาตรของอากาศขณะนั้นต่ออากาศแห้ง มีหน่วยเป็น $\text{m}^3/\text{kg dry air}$ จากแผนภูมิอ่านได้จากเส้นที่ลากขนานกับเส้นปริมาตรจำเพาะผ่านจุดที่กำหนด การอ่านค่าปริมาตรจำเพาะจะใช้วิธีการประมาณค่าจากตำแหน่งระหว่างเส้นปริมาตรจำเพาะ 2 เส้น ดังแสดงในภาพที่ 4 (ฉ)
- ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity, RH) คือ อัตราส่วนระหว่างความดันไอน้ำที่มีอยู่จริงในอากาศขณะนั้นกับความดันไอน้ำที่มีมากที่สุดอากาศนั้นจะสามารถรับไว้ได้ (ไอน้ำอิ่มตัว) มีหน่วยเป็น % จากแผนภูมิอ่านได้จากเส้นที่ลากขนานกับเส้นความชื้นสัมพัทธ์ผ่านจุดที่กำหนด การอ่านค่าความชื้นสัมพัทธ์จะใช้วิธีประมาณค่าจากตำแหน่งระหว่างเส้นความชื้นสัมพัทธ์ 2 เส้น เช่นเดียวกับการอ่านค่าปริมาตรจำเพาะ ดังแสดงในภาพที่ 4 (ช)
- ความดันไอน้ำ (Water vapour pressure) คือ ความดันที่เกิดขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศ โดยอากาศที่มีปริมาณไอน้ำมากจะมีความดันไอน้ำสูงกว่าอากาศที่มีปริมาณไอน้ำน้อย โดยปกติไอน้ำหรือความชื้นนี้จะถ่ายเทจากแหล่งที่มีความดันไอน้ำสูงไปยังแหล่งที่มีความดันไอน้ำต่ำกว่า ซึ่งเป็นหลักที่ใช้ในการลดความชื้น



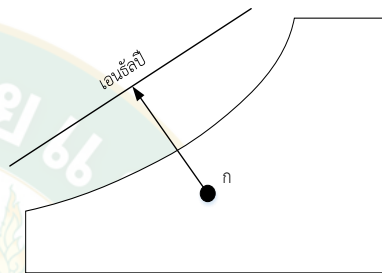
(ก) การอ่านค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้ง



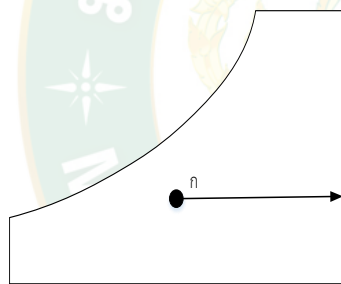
(ข) การอ่านค่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง



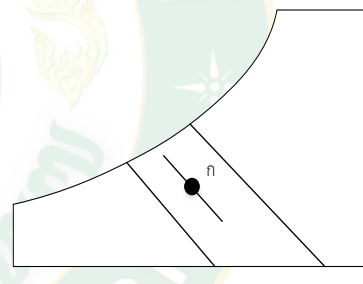
(ค) การอ่านค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียก



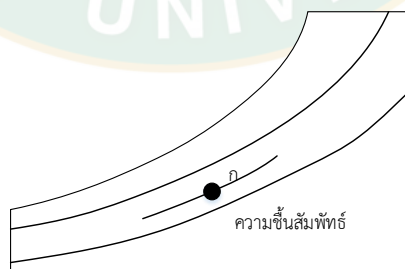
(ง) การอ่านค่าเอนทัลปี



(จ) การอ่านค่าอัตราส่วนความชื้น



(ฉ) การอ่านค่าปริมาตรจำเพาะ



(ซ) การอ่านค่าความชื้นสัมพัทธ์

ภาพที่ 4 การอ่านค่าสมบัติความชื้นจากแผนภูมิอากาศชื้น (Psychrometric chart)

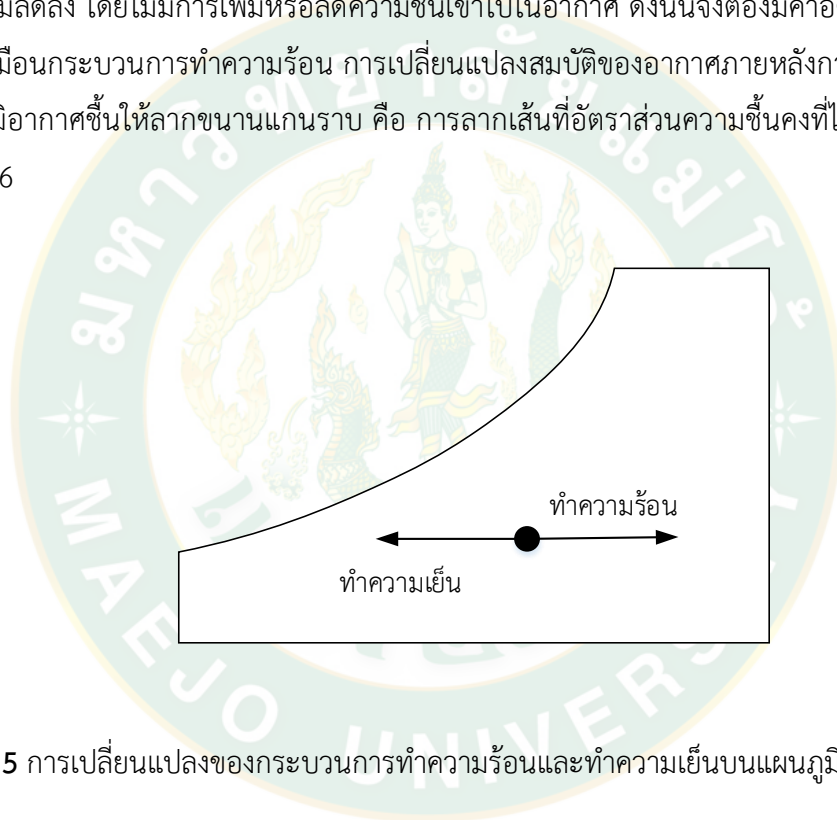
ที่มา : Brooker et al. (1992)

3. กระบวนการบนแผนภูมิอากาศชื้น (Psychrometric chart)

กระบวนการต่างๆ บนแผนภูมิอากาศชื้นที่จำเป็นต้องทราบสำหรับกระบวนการอบแห้งมีดังนี้

- กระบวนการทำความร้อน คือ กระบวนการที่ให้ความร้อนกับอากาศทำให้อากาศนั้นมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นโดยไม่มีการเพิ่มหรือลดความชื้นในอากาศ ดังนั้นจึงมีค่าอัตราส่วนความชื้นคงที่ การเปลี่ยนแปลงสมบัติของอากาศภายหลังการทำความร้อนในแผนภูมิอากาศชื้น ให้ลากเส้นขนานแกนราบ คือการลากเส้นที่อัตราส่วนความชื้นคงที่ไปทางขวามือ ดังภาพที่ 5

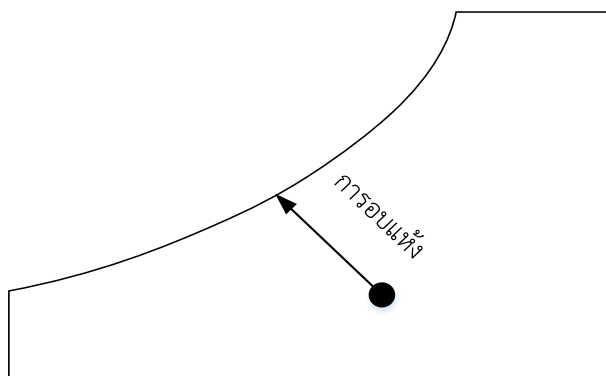
- กระบวนการทำความเย็น คือ กระบวนการดึงความร้อนออกจากอากาศทำให้อากาศนั้นมีอุณหภูมิลดลง โดยไม่มีการเพิ่มหรือลดความชื้นเข้าไปในอากาศ ดังนั้นจึงต้องมีค่าอัตราส่วนความชื้นคงที่เหมือนกระบวนการทำความร้อน การเปลี่ยนแปลงสมบัติของอากาศภายหลังการทำความเย็นในแผนภูมิอากาศชื้นให้ลากขนานแกนราบ คือ การลากเส้นที่อัตราส่วนความชื้นคงที่ไปทางซ้ายมือ ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 5 การเปลี่ยนแปลงของกระบวนการทำความร้อนและทำความเย็นบนแผนภูมิอากาศชื้น

ที่มา : Brooker et al. (1992)

- กระบวนการอบแห้ง เป็นกระบวนการดึงความชื้นออกจากวัสดุทำให้อากาศมีความชื้นในอากาศเพิ่มขึ้น และเป็นกระบวนการอเดียเบติก ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงสมบัติอากาศชื้นระหว่างกระบวนการบนแผนภูมิอากาศชื้นจะเป็นไปตามเส้นเอนทัลปีคงที่ ดังแสดงบนแผนภูมิอากาศชื้นในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 การเปลี่ยนแปลงของกระบวนการอบแห้งบนแผนภูมิอากาศชื้น

ที่มา : Brooker et al. (1992)

ความชื้นวัสดุ

1. ปริมาณน้ำที่อยู่ในสภาพเป็นองค์ประกอบของเนื้อเซลล์หรือเนื้อเยื่อของตัวอ่อน (Water of Composition)

ปริมาณน้ำที่อยู่ในสภาพเป็นองค์ประกอบของเนื้อเซลล์หรือเนื้อเยื่อของตัวอ่อน ความชื้นนี้จะอยู่ในผลผลิตแบบเป็นพันธะทางเคมี และโดยทั่วไปในการพิจารณาหรือวัดค่าความชื้นของผลผลิตจะไม่กล่าวถึงความชื้นในลักษณะนี้เนื่องจากว่าความชื้นดังกล่าวนี้จะถูกพิจารณาเป็นสารเนื้อเดียวกับผลผลิต (เกรียงไกร และคณะ, 2554)

2. ปริมาณน้ำในสภาพอยู่อย่างอิสระ (Free Water)

ปริมาณน้ำในสภาพอยู่อย่างอิสระ และปริมาณน้ำที่ยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของน้ำและผิวผลผลิต (Surface Force) เป็นปริมาณน้ำที่เกาะกันอยู่อย่างหลวมๆ ซึ่งในการตรวจวัดความชื้นนั้นจะหมายถึงการตรวจวัดปริมาณความชื้นจำนวนนี้เท่านั้น

ความชื้นเป็นตัวบอกปริมาณน้ำที่มีอยู่ในผลผลิตเมื่อเมื่อเทียบกับมวลของผลผลิต ซึ่งโดยทั่วไปจะแบ่งออกเป็น 2 แบบด้วยกัน คือเมื่อเทียบกับมวลของผลผลิตขึ้นก็จะเรียกว่า ความชื้นมาตรฐานเปียกเป็นความชื้นที่นิยมบอกในการค้าหรือการซื้อขายผลผลิตทางการเกษตรของเกษตรกรเมื่อเทียบกับมวลของผลผลิตแห้งก็จะเรียกว่าความชื้นมาตรฐานแห้งซึ่งเป็นความชื้นที่นิยมใช้ในเอกสารวิชาการ เนื่องจากว่ามวลแห้งจะมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาการอบแห้ง ดังนั้นจึงง่ายในการอ้างอิง (เกรียงไกร และคณะ, 2554) ซึ่งความชื้นทั้งสองมาตรฐานสามารถหาได้ดังต่อไปนี้

โดยที่มาตรฐานเปียก เขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$M_w = \frac{W-d}{W} \times 100$$

สมการที่ 1

และแบบมาตรฐานแห้ง เขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$M_d = \frac{W-d}{d} \times 100$$

สมการที่ 2

เมื่อ

M_w	คือ	ความชื้นมาตรฐานเปียก	%wb
M_d	คือ	ความชื้นมาตรฐานแห้ง	%db
W	คือ	มวลของวัสดุ	kg
d	คือ	มวลของวัสดุแห้ง	kg

จะได้ว่าปริมาณน้ำที่ต้องกำจัดออกไปมีค่าดังสมการ

$$W_w = m - d$$

สมการที่ 3

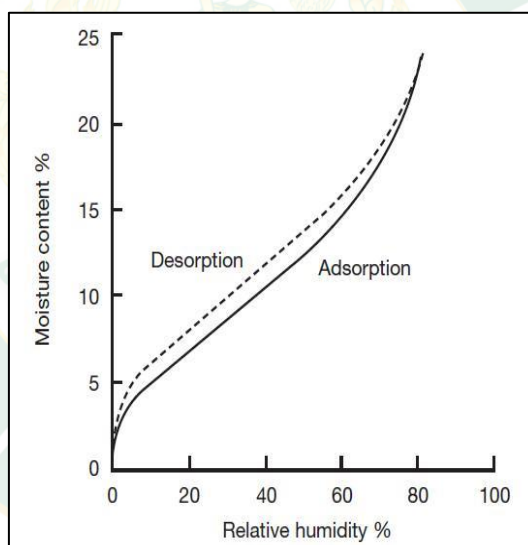
เมื่อ

W_w	คือ	มวลน้ำที่ถูกกำจัดออก	kg
d	คือ	น้ำหนักหลังการอบแห้ง	kg
m	คือ	น้ำหนักก่อนการอบแห้ง	kg

ความชื้นสมดุล

การศึกษากระบวนการในการอบแห้ง และการเก็บรักษาผลผลิตทางการเกษตร ค่าความชื้นสมดุลเป็นคุณสมบัติที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งค่าความชื้นสมดุลหมายถึงความชื้นของวัสดุขณะที่มีการนำไปไว้ในสถานที่ที่มีความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิคงตัวเป็นเวลานาน วัสดุจะเข้าสู่สภาวะสมดุลกับบรรยากาศรอบๆ นั้น ขณะที่เกิดสภาวะสมดุลนั้นความชื้นในวัสดุจะมีความดันไอเท่ากับความดันไอของอากาศขณะนั้น จะเรียกความชื้นนั้นว่าความชื้นสมดุล ซึ่งความชื้นสมดุลจะขึ้นอยู่กับชนิด พันธุ์ ความสูงแก่ทางสรีระวิทยาของผลผลิตทางการเกษตร ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิของอากาศ เป็นต้น

จากการทดลองพบว่า ความชื้นสมดุลจะเพิ่มขึ้นตามค่าความชื้นสัมพัทธ์ และจะลดลงเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์อากาศคงที่

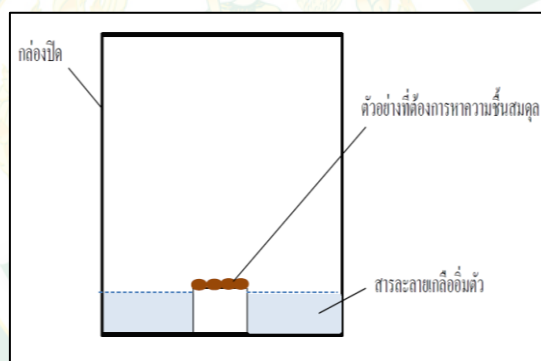


ภาพที่ 7 เส้นความชื้นสมดุลไอโซเทอม

ที่มา : Bala (1997)

1. การทดลองเพื่อหาความชื้นสมมูลของวัสดุขึ้น

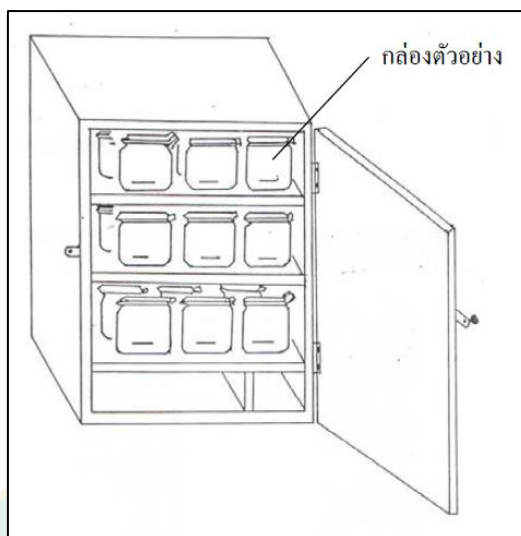
การหาความชื้นสมมูลมีหลายวิธี ในที่นี่จะอธิบายรายละเอียดวิธีแกวิเมตริก (Gravimetric method) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันทั่วไป วิธีดังกล่าวเราจะนำตัวอย่างของวัสดุที่ต้องการหาความชื้นสมมูลประมาณ 10-50 g ใส่ในกล่องปิดซึ่งภายในกล่องมีสารละลายเกลืออิ่มตัวอยู่ด้านล่างดังภาพที่ 8 และนำกล่องตัวอย่างไปใส่ในตู้อบไฟฟ้าดังภาพที่ 9 โดยสารละลายเกลือจะช่วยควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในกล่องและตู้อบไฟฟ้าจะช่วยควบคุมอุณหภูมิภายในกล่องตามต้องการ จากนั้นจะนำตัวอย่างวัสดุออกมาชั่งน้ำหนักทุก 1-3 h จนกว่าน้ำหนักตัวอย่างคงที่ซึ่งแสดงว่าตัวอย่างเข้าสู่สมดุลกับอากาศแวดล้อมภายในกล่องแล้ว หลังจากนั้นจะนำตัวอย่างไปหามวลแห้งเพื่อนำมาคำนวณค่าความชื้นสมมูลของตัวอย่างที่อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ที่ทำการทดลอง กรณีที่วัสดุเน่าเสียง่ายควรใช้พัดลมเป่าอากาศภายในกล่องให้ไหลเวียนผ่านตัวอย่าง เพื่อช่วยเร่งตัวอย่างให้เข้าสู่สมดุลได้เร็วยิ่งขึ้น



ภาพที่ 8 กล่องบรรจุตัวอย่างสำหรับทดลองหาความชื้นสมมูล

ที่มา : เสริม (2560)

ในการเตรียมสารละลายเกลืออิ่มตัว เราจะนำเกลือในสถานะของแข็งมาละลายน้ำตามอุณหภูมิที่กำหนดแล้วกวนน้ำจนกระทั่งสารไม่ละลายอีกต่อไปก็จะได้สารละลายเกลืออิ่มตัว รายชื่อของเกลือที่ให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ จะแสดงไว้ภาคผนวก ก



ภาพที่ 9 ตู้ไฟฟ้าสำหรับใช้ควบคุมอุณหภูมิ

ที่มา : เสริม (2560)

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุล

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุล นิยมนำทฤษฎีทางเทอร์โมไดนามิกส์ มาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นสมดุลของวัสดุกับอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในรูปของสมการหรือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่า แบบจำลองทางทฤษฎีไม่สามารถ อธิบายความสัมพันธ์นั้นได้อย่างถูกต้องตลอดในช่วงอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ แบบจำลองที่สร้างขึ้นจากการทดลองให้ความถูกต้องมากกว่าแบบจำลองทางทฤษฎี และกึ่งทฤษฎี โดยรูปแบบของสมการทางคณิตศาสตร์ที่นิยมใช้มีอยู่ 5 รูปแบบ คือ

1. สมการของ Halsey

รูปแบบสมการของ (Halsey, 1948) แสดงความสัมพันธ์ของความชื้นสมดุลในวัสดุเกษตรกับ ค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศ และอุณหภูมิดังนี้

$$M_{eq} = \left[\frac{-\exp(C_1 + C_2 T)}{\ln(RH)} \right]^{1/C_3}$$

สมการที่ 4

เมื่อ

RH	คือ	ความชื้นสัมพัทธ์	เศษส่วน
M_{eq}	คือ	ความชื้นสมมูลของวัสดุ	%db
T	คือ	อุณหภูมิอากาศ	°C
C_1, C_2, C_3	คือ	ค่าคงที่ของการอบแห้ง	

2. สมการของ Modified Oswin

รูปแบบสมการของ (Chen et al., 1989) แสดงความสัมพันธ์ของความชื้นสมมูลในวัสดุกับค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศ ดังนี้

$$M_{eq} = (C_1 + C_2 T) \left(\frac{RH}{1 - RH} \right)^{C_3}$$

สมการที่ 5

3. สมการ Modified Chung & Pfof

รูปแบบสมการ Modified Chung & Pfof (Chung et al., 1967) แสดงความสัมพันธ์ของความชื้นสมมูลในวัสดุเกษตรกับค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศ และอุณหภูมิ ดังนี้

$$M_{eq} = -\frac{1}{C_2} \ln(C_1) + \frac{1}{C_2} \ln \left[-R(T+273) \ln(RH) \right]$$

สมการที่ 6

4. สมการ Modified Henderson

รูปแบบสมการ Modified Henderson (Henderson, 1952) แสดงความสัมพันธ์ของความชื้นสมมูลในวัสดุเกษตรกับค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศ และอุณหภูมิ ดังนี้

$$M_{eq} = \left[\frac{\ln(1 - RH)}{-C_1 \times (T+273)} \right]^{\frac{1}{C_2}}$$

สมการที่ 7

5. สมการของ Mujica

รูปแบบสมการของ (Comaposada et al., 2000) แสดงความสัมพันธ์ของความชื้นสมดุลในวัสดุเกษตรกับค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศ และอุณหภูมิ ดังนี้

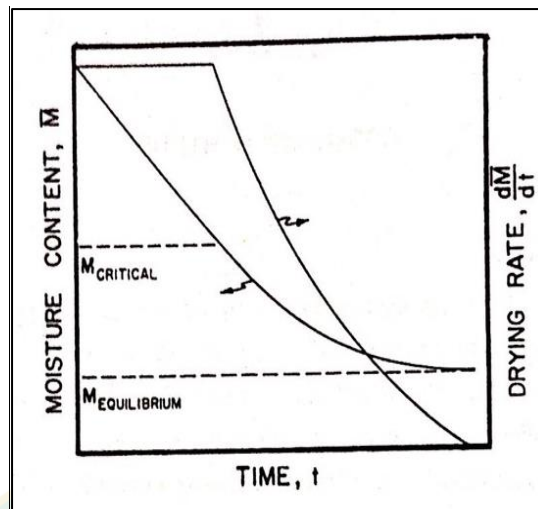
$$M_{eq} = \frac{1}{((C_1 T + C_2) - (C_3 T + C_4) RH)} \quad \text{สมการที่ 8}$$

การอบแห้งชั้นบาง

การอบแห้งแบบชั้นบางหมายถึงการอบแห้งที่มีการพิจารณาการอบแห้งของวัสดุเพียงหนึ่งเมล็ด หรือเพียงหนึ่งชั้นของวัสดุ ซึ่งการอบแห้งแบบชั้นบางนี้เป็นกระบวนการหนึ่งของการศึกษาการอบแห้งแบบชั้นหนา ซึ่งการอบแห้งของวัสดุเพียงหนาชั้นหรือที่เรียกว่าการอบแห้งแบบชั้นบางนั้นอยู่บนสมมุติฐานที่ว่าคุณสมบัติของอากาศมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเคลื่อนที่ผ่านชั้นของวัสดุในขณะอบแห้ง

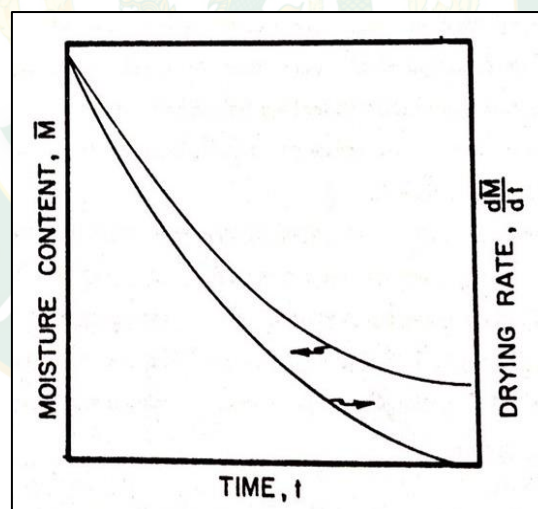
กระบวนการอบแห้งวัสดุแบบชั้นบางโดยทั่วไปจะแบ่งการอบแห้งออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ และช่วงอัตราการอบแห้งแบบลดลง โดยการเกิดแต่ละช่วงในการอบแห้งวัสดุโดยทั่วๆ ไปนั้น มักใช้อากาศเป็นตัวกลางในการอบแห้ง ความร้อนถ่ายเทจากกระแสอากาศไปยังผิววัสดุ ความร้อนส่วนใหญ่ถูกใช้ไปในกระบวนการระเหยน้ำ ในขณะที่เดียวกันไอน้ำจะเคลื่อนที่จากผิววัสดุมายังกระแสอากาศถ้าผิววัสดุมีปริมาณน้ำอยู่มาก อุณหภูมิ และความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวก็จะคงที่ซึ่งส่งผลให้อัตราการอบแห้งคงที่ด้วยถ้าอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วของกระแสอากาศคงที่เมื่อผิววัสดุมีปริมาณน้ำลดลงอุณหภูมิ และความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิววัสดุย่อมเปลี่ยนแปลงไป โดยที่อุณหภูมิจะสูงขึ้น และความเข้มข้นจะลดลง ซึ่งส่งผลให้อัตราการอบแห้งลดลง ความชื้นที่อยู่ระหว่างอัตราการอบแห้งคงที่ และอัตราการอบแห้งลดลงเรียกว่าความชื้นวิกฤต

การอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรโดยเฉพาะผลผลิตทางด้านพืชไร่ เช่น นาข้าว ถั่วเหลือง กระบวนการอบแห้งส่วนมากจะปรากฏเฉพาะช่วงอัตราการอบแห้งแบบลดลง เนื่องจากความชื้นของผลผลิตพืชไร่ที่นั้นภายหลังการเก็บเกี่ยวจะมีความชื้นค่อนข้างต่ำอยู่แล้วจึงไม่ค่อยปรากฏช่วงอัตรา การอบแห้งคงที่ แต่สำหรับผลผลิตทางด้านไม้ผลเช่น ลำไย ลิ้นจี่ ผลผลิตจะยังคงมีความชื้นสูงอยู่มาก ในขณะที่เก็บเกี่ยวดังนั้นจึงมักปรากฏช่วงอัตราการอบแห้งแบบคงที่อยู่ด้วย (ณัฐวุฒิ, 2559) ภาพที่ 10 และภาพที่ 11 แสดงการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งแบบคงที่ และอัตราการอบแห้งลดลง



ภาพที่ 10 การอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งแบบคงที่และลดลง

ที่มา : Brooker et al. (1992)



ภาพที่ 11 การอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง

ที่มา : Brooker et al. (1992)

1. ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่

ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่นี้ การระเหยน้ำจะเกิดที่ผิวของวัสดุ และเปรียบเสมือนว่าเหมือนกับเกิดการระเหยจากผิวน้ำโดยตรง สมการอัตราการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งแบบคงที่ที่สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{dW}{dt} = \frac{h_c A_s (T_a - T_{wb})}{h_{fg}}$$

สมการที่ 9

เมื่อ

$\frac{dW}{dt}$	คือ	ความชื้นที่ระเหย	kg/h
h_c	คือ	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน	$\text{kJ/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}$
A_s	คือ	พื้นที่	m^2
T_a	คือ	อุณหภูมิของกระแสอากาศ	$^\circ\text{C}$
T_{wb}	คือ	อุณหภูมิกระเปาะเปียก	$^\circ\text{C}$
h_{fg}	คือ	ความร้อนแฝงการระเหยน้ำ	kJ/kg

ในช่วงอัตราการอบแห้งแบบคงที่นี้ ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้งคือตัวแปรภายนอก ได้แก่ อุณหภูมิอบแห้ง ความชื้นอากาศอบแห้ง และความเร็วลมอากาศอบแห้ง กล่าวคือเมื่อเพิ่มความเร็วลมโดยทั่วไปแล้วค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะเพิ่มขึ้นทำให้น้ำสามารถระเหยออกจากผิววัสดุเร็วขึ้น การเพิ่มอุณหภูมิกระแสอากาศที่ใช้ออบแห้งจะทำให้เทอมผลต่าง $T_a - T_{wb}$ เพิ่มขึ้น ทำให้ความแตกต่างความดันระหว่างผิววัสดุ และอากาศร่อยมากขึ้นทำให้น้ำสามารถถูกพาออกจากผิววัสดุง่ายขึ้น การลดความชื้นอากาศอบแห้งทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อลดค่าความชื้นในอากาศทำให้ความสามารถในการรับความชื้นของอากาศสูงขึ้น ส่วนการลดขนาดวัสดุจะทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสของวัสดุกับอากาศเพิ่มขึ้นทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นเช่นกัน

2. ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง

เมื่อความชื้นวัสดุในขณะอบแห้งลดลงจนถึงความชื้นวิกฤต ตัวแปรภายในเนื้อวัสดุเริ่มมีอิทธิพลต่อการอบแห้งจะเรียกการอบแห้งหลังจากนี้ว่าเป็นช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ซึ่งเกิดเนื่องจากการแพร่ของน้ำภายในเนื้อวัสดุมาที่ผิววัสดุเกิดช้ากว่าการพาความชื้นจากผิววัสดุไปอากาศทำให้อัตราการอบแห้งลดลง ซึ่งอัตราการอบแห้งแบบลดลงนี้จะเป็นช่วงส่วนใหญ่ของการอบแห้ง

ซึ่งมีสมการอัตราการอบแห้งในช่วงนี้จะมีหลากหลาย ทั้งสมการการอบแห้งทางทฤษฎี ซึ่งจะกล่าวถึงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นเป็นหลัก สมการอบแห้งกึ่งทฤษฎี และสมการการอบแห้งที่ได้จากการทดลองที่เรียกว่าสมการการอบแห้งแบบเอมพิริคัล ซึ่งสมการอบแห้งนี้จะหามาจากการอบแห้งอบชิ้นบาง

3. สมการการอบแห้งชิ้นบางกึ่งทฤษฎี

จากสมการอบแห้งชิ้นบางทางทฤษฎี ในการหาคำตอบโดยคงเทอมต่างๆ ไว้เพียงเทอมเดียว จะเรียกว่าสมการอบแห้งชิ้นบางกึ่งทฤษฎี ซึ่งในทางปฏิบัติก็ให้ค่าที่ถูกต้องพอสมควรที่จะดูแนวโน้มของตัวแปรต่างๆ ได้ ซึ่งจากสมการเหล่านั้นสามารถจัดให้อยู่ในรูปของสมการดังต่อไปนี้

$$\overline{MR} = \frac{M - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} = \exp(-kt)$$

สมการที่ 10

เมื่อ

\overline{MR}	คือ	อัตราส่วนความชื้น	ไร้หน่วย
k	คือ	ค่าคงที่การอบแห้ง	h^{-1}
t	คือ	เวลา	h
a	คือ	ค่าคงที่ใดๆ	

โดยสามารถหาค่าความชื้นที่เวลาอบแห้งใดๆ ได้เมื่อทราบค่าคงที่การอบแห้งดังนี้

$$M_t = M_{eq} + (M_{in} - M_{eq}) \exp(-kt)$$

สมการที่ 11

4. สมการการอบแห้งชิ้นบางแบบเอมพิริคัล

สมการอบแห้งที่ได้จากการทดลองที่เรียกว่าสมการเอมพิริคัลนั้น สามารถใช้ทำนายผลการทดลองได้ดี แต่มีข้อจำกัดที่การนำไปใช้งานต้องอยู่ภายใต้สภาวะทดสอบที่ใช้สร้างสมการเท่านั้น โดยสมการเอมพิริคัลนั้นมีหลายรูปแบบ (Namsanguan et al., 2004; Tirawanichakul et al., 2007; Tirawanichakul et al., 2008) ดังต่อไปนี้

1. สมการของ Newton

$$\bar{MR} = \exp(-kt)$$

สมการที่ 12

เมื่อ

\bar{MR}	คือ	อัตราส่วนความชื้น	ไร้หน่วย
k	คือ	ค่าคงที่การอบแห้ง	h^{-1}
t	คือ	เวลา	h
k, n, a และ b	คือ	ค่าคงที่ใดๆ	

2. สมการของ Page

$$\bar{MR} = \exp(-kt^n)$$

สมการที่ 13

3. สมการของ Henderson and Pabis

$$\bar{MR} = a \exp(-kt)$$

สมการที่ 14

4. สมการของ Logistic

$$\bar{MR} = a / (1 + \exp(kt))$$

สมการที่ 15

5. สมการของ Logarithmic

$$\bar{MR} = a \exp(-kt) + b$$

สมการที่ 16

การออกแบบเครื่องอบแห้ง

ขั้นตอนการออกแบบเครื่องอบแห้ง (ณัฐวุฒิ, 2559) มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ปริมาณน้ำที่ต้องระเหยออกจากผลผลิต

การออกแบบเครื่องอบแห้งขั้นแรกต้องทราบปริมาณน้ำที่ต้องระเหยออกจากวัสดุขณะอบแห้ง ซึ่งจำเป็นต้องกำหนด ความชื้นเริ่มต้น ความชื้นสุดท้าย และปริมาณของผลผลิตที่ต้องการอบแห้งก็จะสามารถคำนวณน้ำหนักสุดท้ายหลังอบแห้ง แล้วนำไปคำนวณค่าปริมาณน้ำที่ต้องการระเหยออกจากผลผลิตได้ดังสมการที่ 17

$$W_f = \frac{W_i(100-M_i)}{(100-M_f)}$$

สมการที่ 17

$$m_w = W_i - W_f$$

สมการที่ 18

เมื่อ

W_f	คือ	น้ำหนักสุดท้ายหลังการอบแห้ง	kg
W_i	คือ	น้ำหนักก่อนการอบแห้ง	kg
M_f	คือ	ความชื้นสุดท้ายหลังการอบแห้ง	%wb
M_i	คือ	ความชื้นก่อนการอบแห้ง	%wb
m_w	คือ	น้ำหนักที่ต้องการระเหย	kg

2. อัตราการระเหยน้ำจากการอบแห้ง

เมื่อทราบปริมาณน้ำที่ต้องการระเหยออกแล้ว เราสามารถคำนวณหาอัตราการระเหยของน้ำออกจากวัสดุอบแห้ง โดยจะต้องมีกำหนดระยะเวลาที่ใช้ในอบแห้ง เพราะจะนำมาใช้ในการคำนวณหาอัตราการระเหยน้ำออกจากวัสดุอบแห้ง คำนวณได้จากสมการ

$$\dot{m}_w = \frac{m_w}{t}$$

สมการที่ 19

เมื่อ

\dot{m}_w	คือ	อัตราการระเหยน้ำ	kg/h
m_w	คือ	น้ำหนักของน้ำที่ต้องระเหย	kg
t	คือ	เวลาที่ใช้การอบ	h

3. ปริมาณลมที่ต้องใช้ในการอบแห้ง

เมื่อทราบอัตราการระเหยน้ำที่ได้จากการคำนวณจากสมการที่ 19 แล้ว สามารถนำมาคำนวณหาปริมาณลมที่ต้องใช้ในการพาความชื้นออกจากวัสดุอบแห้ง สามารถคำนวณได้จากอัตราการระเหยน้ำหารปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นในอากาศ ซึ่งปริมาณลมที่คำนวณได้สามารถนำไปเลือกขนาดของพัดลมได้

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{m}_w}{W_f - W_i}$$

สมการที่ 20

เมื่อ

\dot{m}_a	คือ	ปริมาณลมที่ต้องใช้ในการอบแห้ง	kg air/h
W_f	คือ	อัตราส่วนความชื้นอากาศหลังการอบแห้ง	kg H ₂ O/ kg air
W_i	คือ	อัตราส่วนความชื้นอากาศก่อนการอบแห้ง	kg H ₂ O/ kg air
\dot{m}_w	คือ	อัตราการระเหยน้ำ	kg H ₂ O /h

ปริมาณลมที่นิยมใช้บอกเป็นในหน่วยของปริมาตรต่อเวลา ดังนั้นสามารถเปลี่ยนปริมาณลมในหน่วยมวลต่อเวลาไปเป็นปริมาตรต่อเวลาได้โดยการใช้ค่าความหนาแน่นของอากาศที่อุณหภูมิอบแห้งไปหารซึ่งคำตอบที่ได้จะอยู่ในหน่วย m³/h แต่การเลือกขนาดของพัดลมนิยมบอกในหน่วย CFM ซึ่งก็สามารถเปลี่ยนได้

4. การคำนวณหาขนาดของแหล่งความร้อน

ในกระบวนการการอบแห้งนั้นจำเป็นต้องใช้ความร้อนสำหรับการทำให้น้ำระเหยออกจากวัสดุที่อบแห้ง ซึ่งขนาดของแหล่งกำเนิดความร้อนสามารถหาได้จากสมการนี้

$$\dot{Q} = \frac{(h_f - h_i)}{3,600} \dot{m}_a \quad \text{สมการที่ 21}$$

เมื่อ

h_f	คือ	ค่าเอนทัลปีอากาศที่อุณหภูมิอบแห้ง	KJ/kg
h_i	คือ	ค่าเอนทัลปีอากาศแวดล้อมก่อนนำ นำมาเพิ่มอุณหภูมิ	KJ/kg
\dot{m}_a	คือ	ปริมาณอากาศที่ใช้ออบแห้ง	kg/h
\dot{Q}	คือ	ขนาดของแหล่งความร้อน	kW

ขนาดของแหล่งกำเนิดความร้อนในทางปฏิบัติจะต้องออกแบบให้มากกว่าที่คำนวณได้ เนื่องจากการสูญเสียขณะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนของแหล่งพลังงานต่างๆ

5. การคำนวณหาขนาดของหัวเตาแก๊สอินฟราเรด

กระบวนการการอบแห้งนั้นเมื่อทราบขนาดของแหล่งความร้อนดังสมการที่ 21 แล้วนั้นสามารถคำนวณหาขนาดของหัวเตาแก๊สอินฟราเรดได้ดังสมการที่ 22 ต่อไปนี้

$$\dot{Q} = \dot{m}_g \times LHV_g \quad \text{สมการที่ 22}$$

เมื่อ

\dot{m}_g	คือ	อัตราการไหลเชิงมวล	kg
LHV_g	คือ	ค่าความร้อนต่ำของแก๊ส LPG คือ 50.22 (นัตยา และธนภฤต, 2558)	MJ/kg

6. การคำนวณหาพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง

พลังงานที่ใช้สำหรับการอบแห้งสามารถคำนวณได้จากขนาดของแหล่งความร้อนกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งดังสมการนี้

$$E = \dot{Q}t$$

สมการที่ 23

เมื่อ

E	คือ	ปริมาณพลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำ	kJ
t	คือ	เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง	s
\dot{Q}	คือ	ขนาดของแหล่งความร้อน	kW

7. พื้นที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์หรือปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการอบแห้ง

กรณีที่เป็นการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ จำเป็นต้องประเมินขนาดพื้นที่ตัวรับรังสีอาทิตย์ที่เหมาะสม โดยกำหนดประสิทธิภาพตัวรับรังสีอาทิตย์เบื้องต้น และพลังงานรวมที่ตกกระทบตัวรับรังสีสามารถหาได้จากสมการนี้

$$A_c = \frac{E}{I\eta}$$

สมการที่ 24

เมื่อ

A_c	คือ	พื้นที่ตัวรับรังสีอาทิตย์	m^2
I	คือ	พลังงานรวมแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบตัวรับรังสีอาทิตย์ในช่วงเวลาอบแห้ง	kJ/m^2
η	คือ	ประสิทธิภาพตัวรับรังสีอาทิตย์	%
E	คือ	พลังงานรวมที่ใช้ในการอบแห้ง	kJ

ในกรณีที่ใช้พลังงานอื่นๆ เช่นพลังงานชีวมวลหรือแก๊ส LPG จำเป็นต้องทราบค่าความร้อนของเชื้อเพลิง และประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงาน ซึ่งปริมาณเชื้อเพลิงสามารถประเมินได้จากสมการ

$$\eta = \frac{m_w h_{fg}}{m_{fuel} LHV_g}$$

สมการที่ 25

เมื่อ

η	คือ	ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานเป็นพลังงานความร้อน	
m_w	คือ	ปริมาณน้ำที่ต้องการระเหย	%
m_{fuel}	คือ	มวลของเชื้อเพลิง	kg
LHV_g	คือ	ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง	kJ/kg
h_{fg}	คือ	ค่าความร้อนแฝงในการระเหยน้ำ	kJ/kg

8. พื้นที่หน้าตัดของห้องอบ

พื้นที่หน้าตัดสามารถหาได้ถ้ากำหนดความเร็วลมที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัด ดังนั้นพื้นที่หน้าตัดหาจากอัตราการไหลเชิงมวลอากาศที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดต่อความเร็วอากาศที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดนั้นสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$A = \frac{\dot{V}}{V}$$

สมการที่ 26

เมื่อ

\dot{V}	คือ	อัตราการไหลอากาศผ่านชั้นวัสดุ	m^3/s
V	คือ	ความเร็วอากาศไหลผ่านชั้นวัสดุ	m/s
A	คือ	พื้นที่หน้าตัดห้องอบ	m^2

9. ปริมาตรห้องอบแห้งและความหนาของชั้นวัสดุอบแห้ง

ปริมาตรห้องอบแห้ง และความหนาของชั้นอบแห้งสามารถหาได้เมื่อทราบความหนาแน่นของวัสดุอบ และน้ำหนักของวัสดุอบ ซึ่งปริมาตรของวัสดุสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$V = \frac{m}{d_p}$$

สมการที่ 27

เมื่อ

V	คือ	ปริมาตรวัสดุอบ	m^3
m	คือ	มวลของวัสดุอบ	kg
d_p	คือ	ความหนาแน่นวัสดุอบ	kg/m^3

ความหนาแน่นของชั้นวัสดุอบคำนวณได้จากสมการ

$$d = \frac{V}{A}$$

สมการที่ 28

เมื่อ

d	คือ	ความหนาวัสดุอบ	m
V	คือ	ปริมาตรวัสดุอบ	m^3
A	คือ	พื้นที่หน้าตัดห้องอบ	m^2

ปริมาตรห้องอบจะต้องรวมพื้นที่ในการทำงานที่สะดวกเข้าไปด้วย นอกจากนั้นแล้วในกรณีที่เป็นเครื่องอบแห้งแบบตู้ที่ต้องวางวัสดุอบเป็นชั้นๆ ก็ให้คำนวณจากความหนาชั้นวัสดุ และพื้นที่รวมกับช่องว่างระหว่างชั้น เพื่อนำไปคำนวณหาปริมาตรห้องอบที่เหมาะสม

10. การคำนวณหาขนาดของมอเตอร์

การคำนวณหาประสิทธิภาพของมอเตอร์ของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$P_{\text{motor}} = \frac{P_a \times h_L \times q \times Q}{\eta_m \eta_f}$$

สมการที่ 29

เมื่อ

P_{motor}	คือ	ประสิทธิภาพของมอเตอร์	%
P_a	คือ	ความหนาแน่นอากาศ	kg/m^3
h_L	คือ	การสูญเสียความดัน	Pa
q	คือ	แรงโน้มถ่วงของโลก	m/s^2
Q	คือ	ปริมาณลม	m^3/s

η_m	คือ	ประสิทธิภาพของมอเตอร์	%
η_f	คือ	ประสิทธิภาพของพัดลมโบลเวอร์	%

11. การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้ง

การคำนวณหาประสิทธิภาพการอบแห้งของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\eta_{dry} = \frac{m_w \times h_{fg}}{I_t \times A_c} \times 100\%$$

สมการที่ 30

เมื่อ

η_{dry}	คือ	ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง	%
m_w	คือ	ปริมาณน้ำที่ถูกระเหย	kg/s
h_{fg}	คือ	ค่าความร้อนแฝงของการระเหยของไอน้ำ	kJ/kg
I_t	คือ	ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์	W/m ²
A_c	คือ	พื้นที่รับแสงอาทิตย์	m ²

รังสีอินฟราเรดและการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร

การแผ่รังสี (Radiation) คือพลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกจากสสาร (Matter) ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) หรือโฟตอน (Photon) เนื่องมาจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในอะตอมหรือโมเลกุล เป็นการถ่ายเทพลังงานโดยไม่ต้องอาศัยสารตัวกลาง ซึ่งมีความเร็วสูงสุดเท่ากับความเร็วแสง และเกิดได้ในสุญญากาศ การถ่ายเทพลังงานความร้อนนั้นเกิดจากรังสีที่ปลดปล่อยจากวัตถุต่างๆ เนื่องจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของตัวมันเอง และอุณหภูมิที่ล้อมรอบ รังสีอินฟราเรด (Infrared radiation, IR) เป็นพลังงานในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแยกตามความยาวคลื่นได้ 3 ระดับ คือ รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น (Near-infrared radiation, NIR) มีความยาวคลื่นระหว่าง 0.78-1.4 μm รังสีอินฟราเรดคลื่นกลาง (Mid-infrared radiation, MIR) มีความยาวคลื่นระหว่าง 1.4-3 μm และรังสีอินฟราเรดคลื่นยาว (Far-infrared radiation, FIR) มีความยาวคลื่นระหว่าง 3-1000 μm

กระบวนการทางความร้อนในอุตสาหกรรมอาหารในนั้นเทคนิคการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นยาว มักจะถูกใช้ในรูปของตัวทำความร้อนความยาวคลื่นระหว่าง 2.5-30 μm ความร้อนจะให้กับ

อาหารโดยการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านทางอากาศและถูกดูดกลืนโดยอาหาร คุณลักษณะเด่นของความร้อนจากรังสีอินฟราเรดได้แก่ถ่ายความร้อนสู่อาหารอย่างมีประสิทธิภาพจึงสามารถช่วยลดเวลาของกระบวนการและค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน อากาศภายในอุปกรณ์ ไม่ได้ถูกทำให้ร้อนและด้วยเหตุนี้อุณหภูมิอากาศโดยรอบจึงสามารถคงที่อยู่ในระดับปกติ มีความเป็นไปได้ที่จะออกแบบอุปกรณ์ให้มีขนาดกะทัดรัดและทำงานได้อย่างอัตโนมัติ ซึ่งสามารถควบคุมได้ง่าย และปลอดภัย ควบคุมความร้อนได้โดยตรงตามที่ต้องการ เป็นต้น (วัชรินทร์, 2556)

1. คุณลักษณะการดูดกลืนรังสีของอาหาร

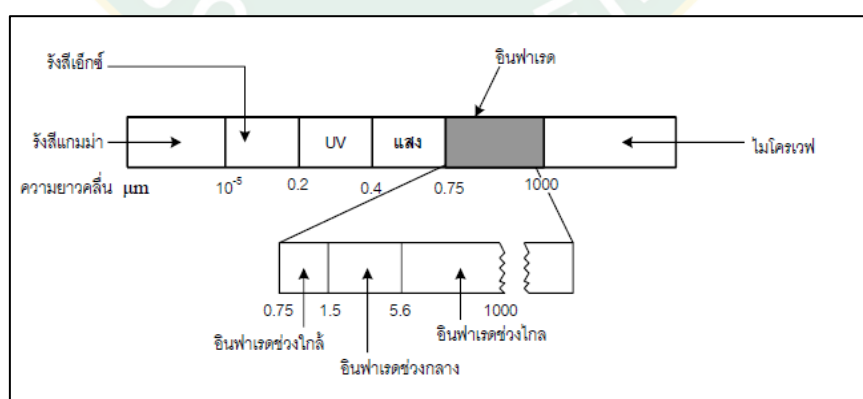
อาหารประกอบด้วยน้ำและอื่นๆ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีนและไขมัน เป็นต้น คุณลักษณะการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดนั้น พิจารณาจากการสั่นสะเทือนของพันธะภายในโมเลกุลของน้ำในอาหาร เมื่อเกิดการสั่นสะเทือนที่ความถี่ที่ตรงกับความถี่ของรังสีอินฟราเรด ก็จะทำให้เกิดการดูดกลืนรังสีความร้อนขึ้น การสั่นสะเทือน ของพันธะภายในโมเลกุลของน้ำในอาหารมี 3 ลักษณะคือ การสั่นสะเทือนที่ยืด-หดแบบสมมาตร การสั่นสะเทือนที่ยืด-หด แบบไม่สมมาตร และการสั่นสะเทือนที่เปลี่ยนมุมแบบสมมาตรอาหารโดยทั่วไปจะดูดกลืนพลังงานที่แผ่รังสีอินฟราเรดที่ความยาวคลื่นมากกว่า 2.5 μm ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่มีประสิทธิภาพสูง ผ่านทางกลไกของการเปลี่ยนแปลงสภาพของการสั่นสะเทือนของโมเลกุลเป็นพลังงานความร้อน (วัชรินทร์, 2556)

2. หลักการของรังสีอินฟราเรด

รังสีอินฟราเรดที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารได้แก่ รังสีอินฟราเรดคลื่นยาว ในระหว่างกระบวนการการอบแห้งนั้นจะมีการรับ และถ่ายเทพลังงาน ลักษณะการเปลี่ยนสภาพดังกล่าวนี้เป็นการเปลี่ยนเฟสของสาร ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงทางเคมี อุณหภูมิยิ่งสูงการเปลี่ยนสภาพก็จะเร็วขึ้น การส่งถ่ายพลังงานความร้อน (Heat transfer) เข้าสู่วัตถุนั้น ทำได้ 3 แบบ คือ การนำความร้อน (Heat conduction) การพาความร้อน (Heat convection) และการแผ่รังสีความร้อน (Heat Radiation) วิธีการอบแห้งแบบเป่าลมร้อนที่ใช้กันมานานนั้นเป็นการนำ และการพาความร้อน ในการส่งพลังงานให้วัตถุ ซึ่งความเร็วในการนำความร้อนนั้นจะมีขีดจำกัดการใช้การแผ่รังสีความร้อนสามารถส่งผ่านความร้อนได้อย่างรวดเร็วจึงได้ถูกนำมาใช้ในการอบแห้งด้วยรังสีต่างๆ ที่ใช้อยู่ก็มี รังสีอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งมีความยาวคลื่น และพลังงานสูงรังสีนี้จะสามารถก่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี คือ การรวม และการแยกตัวของโมเลกุลได้รังสีอีกชนิดหนึ่งคือ รังสีอินฟราเรดได้ถูกนำมาใช้ในการอบแห้งปัจจุบันที่มีใช้อย่างกว้างขวางในงานทางภาคอุตสาหกรรมโดยแหล่งกำเนิดรังสีอินฟราเรดที่ใช้กันมากเป็นการใช้หลอดอินฟราเรดซึ่งให้ความยาวคลื่นที่สั้นที่ทำให้ประสิทธิภาพของการดูดกลืน

ความร้อน และรังสีของวัตถุต่ำ หลอดอินฟราเรดยังให้แสงที่ตาไม่สามารถเห็นได้ จึงทำให้ประสิทธิภาพในการดูดกลืนความร้อนขึ้นอยู่กับวัตถุ

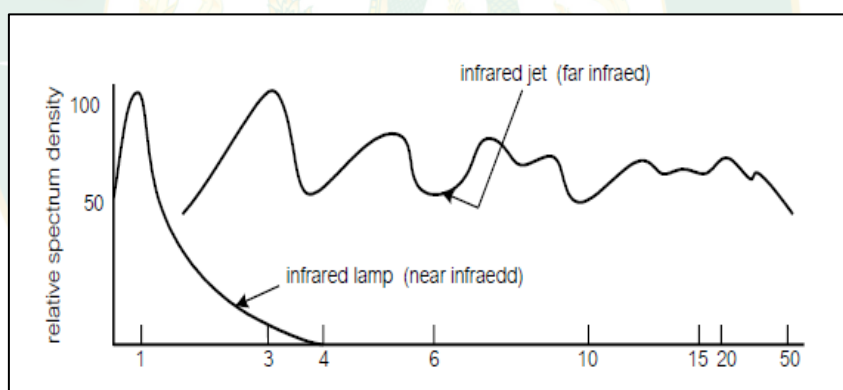
การวิเคราะห์ส่วนประกอบของสสารโดยอาศัยหลักการที่ว่าสสารที่มีการจับตัวทางเคมีที่เหมือนกันจะมีรูปแบบเหมือนกัน เมื่อส่องรังสีอินฟราเรดไปที่ชั้นของวัตถุ รังสีที่มีความยาวคลื่นตรงกับในวัตถุจะถูกดูดกลืนเข้าไปแล้วทำให้เกิดการสั่นสะเทือนของโมเลกุลซึ่งจะทำให้เกิดเป็นความร้อนขึ้นมา จากที่กล่าวมานี้ก็เป็นแสดงให้เห็นว่ารังสีอินฟราเรดนั้นสามารถจะถ่ายเทความร้อนไปยังชั้นของวัตถุได้อย่างรวดเร็ว นอกจากการเกิดสเปกตรัมแต่ละตำแหน่งสเปกตรัมที่มีพลังงานสูงสุดจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของสสารด้วยการแผ่รังสีจากของแข็งในย่านอินฟราเรดนั้นความยาวคลื่นของรังสีที่แผ่ออกมากับอุณหภูมิของสสารจะมีความสัมพันธ์กันโดยตรงกล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะเป็นตำแหน่งสเปกตรัมที่มีพลังงานสูงสุด และความยาวคลื่นจะสั้นลง ถ้าอุณหภูมิของสสารยิ่งสูงก็จะสามารถแผ่รังสีอินฟราเรดที่มีพลังงานสูงออกมาได้ เมื่อแยกรังสีของดวงอาทิตย์หรือรังสีที่แผ่ออกจากวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงออกเป็นสเปกตรัม สเปกตรัมส่วนที่อยู่ถัดออกไปจากแสงสีแดงและมีพลังงานความร้อนอยู่มากคือ รังสีอินฟราเรดโดยรังสีอินฟราเรดจะมีความยาวคลื่นระหว่าง $0.75 \mu\text{m}$ ถึง $1000 \mu\text{m}$ คือ ยาวกว่าแสงที่ตาคนเราเห็นได้แต่สั้นกว่าไมโครเวฟ ความยาวคลื่นที่ยาวกว่า $1 \mu\text{m}$ จะถูกดูดกลืนด้วยวัตถุ และทำให้เกิดความร้อนขึ้นจึงเรียกว่า รังสีความร้อนรังสีอินฟราเรดนั้น เมื่อแบ่งช่วงตามความสามารถของวัตถุอย่างกว้างๆ จะแบ่งได้เป็นความยาวคลื่นระหว่าง $0.75 - 4.00 \mu\text{m}$ เรียกว่าอินฟราเรดช่วงใกล้ (Near infrared) และความยาวคลื่นที่อยู่ระหว่าง $4.00 - 40.00 \mu\text{m}$ เรียกว่าอินฟราเรดช่วงไกล (Far infrared) นอกจากนี้ถ้าแบ่งตามช่วงความยาวคลื่น จะแบ่งได้เป็นอินฟราเรดช่วงใกล้ อินฟราเรดช่วงกลาง (Medium infrared) และอินฟราเรดช่วงไกล



ภาพที่ 12 ตำแหน่งของรังสีอินฟราเรดในสเปกตรัม

ที่มา : พงษ์ชัย และอิสระ (2552)

รังสีอินฟราเรดก็เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพราะฉะนั้นจะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง และมีการสะท้อนเหมือนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า นอกจากนี้ยังเป็นการให้ความร้อนโดยตรงแก่วัตถุโดยไม่ต้องผ่านตัวกลาง การดูดกลืน (Absorption) โดยทั่วไปสารจำพวกอาหาร น้ำมัน จะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้ดีในช่วงความยาวคลื่น 4-50 μm ซึ่งตรงกับช่วงที่ฮีตเตอร์อินฟราเรดช่วงไกลให้รังสีออกมา ถ้าพิจารณาด้านปฏิกิริยาเคมีจะมีอยู่ 2 แบบ คือ แบบที่ใช้ความร้อนทำให้ตัวทำละลายระเหยออกไปกับแบบที่ใช้แสงทำให้เกิดการโพลิเมอไรเซชัน (Polymerization) จากความจุความร้อนของวัตถุ และส่วนที่เป็นชั้นของวัตถุ อุณหภูมิของชั้นวัตถุจะเพิ่มขึ้นได้มากเท่าใดนั้นก็ขึ้นอยู่กับความเร็วในการเพิ่มอุณหภูมิของวัตถุที่ทำให้เกิดความร้อน วิธีการให้ความร้อนแบบใช้รังสีอินฟราเรดนั้นจะเป็นการให้ความร้อน โดยการฉายรังสีอินฟราเรดไปยังวัตถุ วัตถุจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดในช่วงความถี่ต่างๆ กัน ซึ่งทำให้โมเลกุลของวัตถุเกิดการสั่นสะเทือนส่งผลทำให้วัตถุนั้นเกิดความร้อนขึ้นในชั้นวัตถุอย่างสม่ำเสมอในช่วงเวลาอันสั้น โดยทั่วไปถ้าเป็นรังสีอินฟราเรดช่วงไกลนั้นพลังงานบางส่วนจะถูกดูดกลืนในชั้นของวัตถุเพียงประมาณ 10% และจะสะท้อนกลับมา 30% ที่เหลือจะส่งผ่านชั้นของวัตถุแต่ถ้าเป็นรังสีอินฟราเรดช่วงไกลพลังงานบางส่วนจะถูกดูดกลืนโดยชั้นของวัตถุประมาณ 50%



ภาพที่ 13 ความเข้มของการแผ่รังสีอินฟราเรดของหลอดอินฟราเรดช่วงไกล และหลอดอินฟราเรดช่วงใกล้

ที่มา : พงษ์ชัย และอิสระ (2552)

การสะท้อน (Reflection) รังสีอินฟราเรดเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงเพราะฉะนั้นจะสามารถอาศัยหลักการสะท้อนของแสงมารวมรังสีเข้าสู่วัตถุที่ต้องการได้ง่าย โดยถ้าออกแบบแผ่นสะท้อนให้เป็นแบบพาราโบลา รังสีที่สะท้อนออกไปก็จะเป็นลำแสงขนาน การใช้รังสีอินฟราเรดช่วงไกลเป็นการให้

ความร้อนที่ได้จากการแผ่รังสี เพราะฉะนั้นจะไม่เกี่ยวข้องกับอากาศที่อยู่ระหว่างกลาง โดยรังสีจะเคลื่อนตรงไปกระทบวัตถุแล้วทำให้เกิดความร้อนขึ้นในวัตถุนั้นเพราะฉะนั้น เต่าที่ใช้จึงไม่จำเป็นต้องปิดอย่างมิดชิด แล้วยังไม่ทำให้อากาศที่อยู่บริเวณรอบๆ ร้อนตามไปด้วย ซึ่งนับว่าเป็นข้อดีของวิธีนี้แต่ในทางตรงกันข้ามผิววัตถุส่วนที่ไม่ถูกฉายรังสีก็จะไม่ร้อนเพราะฉะนั้นถ้าเป็นวัตถุแบบ 3 มิติ ก็จำเป็นต้องออกแบบการวางตำแหน่งฮีตเตอร์ให้เหมาะสมเพื่อให้ความร้อนอย่างทั่วถึง

ดังนั้นกลไกของการเคลื่อนที่ของรังสีอินฟราเรดอาจกล่าวได้โดยอาศัยทฤษฎีของคลื่นได้ ดังนี้คือ ในการแผ่รังสี วัตถุจะเปลี่ยนพลังงานส่วนหนึ่งของตัวเองไปเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งก็เป็นพลังงานรูปแบบหนึ่ง เมื่อคลื่นเหล่านี้ไปกระทบกับวัตถุอื่นพลังงานส่วนหนึ่งของคลื่นเหล่านี้จะถูกดูดไว้แล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน วัตถุที่แผ่รังสีจะสูญเสียพลังงานของตัวเองถ้าหากวัตถุนั้นไม่ได้รับพลังงานจากแหล่งอื่นอุณหภูมิของวัตถุเองก็จะลดลง

3. หัวเตาแก๊สชนิดอินฟราเรด

หัวเตาแก๊สชนิดอินฟราเรดจะมีลักษณะเป็นรูพรุน ผลิตจากแผ่นเซรามิคทนความร้อนสามารถทนความร้อนได้ในระดับดี แต่ด้วยลักษณะ ที่เป็นรูพรุนอายุการใช้งานจะสั้นกว่าหัวเตาก๊าซชนิดธรรมดา โดยปกติอายุการใช้งานอยู่ที่ 5 - 6 ปี ในกรณีที่ใช้เป็นประจำ พลังงานความร้อนที่ให้จะให้น้อยกว่าหัวเตาก๊าซชนิดธรรมดา เนื่องจากหัวเตาแก๊สชนิดอินฟราเรดจะมีการทำงานแบบซึมแก๊สคือในการใช้งานแต่ละครั้งแก๊สจะถูกกักเก็บในหัวเตาก่อนแล้วค่อยๆ ปล่อยซึมแก๊สออกมาตามรูพรุนมากมายและด้วยลักษณะการซึมแก๊สนั้นจะช่วยทำให้สามารถประหยัดปริมาณแก๊สที่ใช้ประมาณ 30% (เกรียงไกร และคณะ, 2554)

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบหัวเผาแก๊ส

คุณสมบัติ	หัวเผาแก๊สชนิดธรรมดา	หัวเผาแก๊สชนิดอินฟราเรด
การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง	สิ้นเปลืองเชื้อเพลิง	ประหยัดเชื้อเพลิง
ค่าความร้อน	ความร้อนสูง	ความร้อนสูง
กลิ่น	มีกลิ่นแก๊ส	ไม่มีกลิ่น
การเผาไหม้	เผาไหม้ไม่สมบูรณ์	เผาไหม้สมบูรณ์
คราบเขม่า	เกิดคราบเขม่าดำ	ไม่เกิดคราบเขม่าดำ
ควัน	มีควัน	ไม่มีควัน
สีของเปลวไฟ	สีฟ้าแดง	สีแดง

การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

1. มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value : NPV)

มูลค่าปัจจุบันสุทธิบ่งชี้ถึง จำนวนผลประโยชน์สุทธิที่ได้รับตลอดระยะเวลาของโครงการ อาจจะมีค่าเป็นบวกหรือลบหรือศูนย์ได้ขึ้นอยู่กับขนาด (Magnitude) ของมูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์รวม (PVB) หักออกด้วยมูลค่าปัจจุบันของต้นทุนรวม (PVC) ของโครงการนั้น

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{B_t}{(1+r)^t} - \sum_{t=1}^k \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad \text{สมการที่ 31}$$

โดยกำหนดให้

t	คือ	ปี
m	คือ	อายุของโครงการ
k	คือ	ระยะเวลาในการก่อสร้างระบบ
r	คือ	อัตราดอกเบี้ยหรืออัตราคิดลดที่เหมาะสม
B_t	คือ	ผลประโยชน์ของโครงการในปีที่ t
C_t	คือ	ค่าใช้จ่ายในการลงทุนของโครงการในปีที่ t

หลักการตัดสินใจ (Decision rule) ที่แสดงว่าโครงการมีความเหมาะสมทางด้านเศรษฐกิจและการเงินหรือไม่นั้น ให้พิจารณาจากมูลค่าปัจจุบันสุทธิคือ เมื่อมูลค่าปัจจุบันสุทธิมีค่าเป็นบวก แสดงว่าโครงการนั้นมีความเหมาะสมที่จะลงทุนได้ กล่าวคือมูลค่าปัจจุบันผลประโยชน์รวมมากกว่ามูลค่าปัจจุบันของต้นทุนรวมนั่นเอง

2. อัตราผลตอบแทนภายในโครงการ (Internal Rate of Return : IRR)

อัตราผลตอบแทนภายในโครงการคือ ผลตอบแทนเป็นร้อยละต่อโครงการ หรือหมายถึงอัตราดอกเบี้ยในกระบวนการคิดลดที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันของโครงการมีค่าเท่ากับ 0 ณ จุดนี้จำเป็นต้องอธิบายเพิ่มเติมถึงความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราดอกเบี้ยกับขนาดของมูลค่าปัจจุบันสุทธิ ถ้าอัตราดอกเบี้ยระดับหนึ่งที่ใช้ในกระบวนการคิดลดแล้วทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิมีค่าลดลงแล้วทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิมีค่าเป็นบวก อัตราดอกเบี้ยระดับใหม่ที่สูงกว่าจะทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิมีค่าลดลง และลดลงต่อไปตราบเท่าที่อัตราดอกเบี้ยยังคงเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ ในที่นี้จะมีอัตราดอกเบี้ยระดับหนึ่งที่

ทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิมีค่าเท่ากับ 0 พอดี ซึ่งก็คือ อัตราผลตอบแทนภายในโครงการ เมื่อกำหนดให้ r คืออัตราผลตอบแทนภายในโครงการ และค่าของ r จะสามารถหาได้จากการแก้สมการข้างล่างนี้

$$\sum_{t=1}^n \frac{(B_t - C_t)}{(1+r)^t} = 0$$

สมการที่ 32

โดยกำหนดให้

t	คือ	ปี
r	คือ	อัตราดอกเบี้ยหรืออัตราคิดลดที่เหมาะสม
B_t	คือ	ผลประโยชน์ของโครงการในปีที่ t
C_t	คือ	ค่าใช้จ่ายในการลงทุนของโครงการในปีที่ t

หลักการตัดสินใจที่แสดงว่าโครงการมีค่าความเหมาะสม และคุ้มค่าทางด้านเศรษฐกิจ และด้านการเงินหรือไม่นั้น ให้พิจารณาจากอัตราผลตอบแทนภายในโครงการคือ เมื่ออัตราผลตอบแทนภายในโครงการสูงกว่าค่าเสียโอกาสของทุน

3. วิเคราะห์จุดคุ้มทุน

$$\text{จุดคุ้มทุน} = \frac{\text{มูลค่าเครื่องอบแห้ง}}{\text{รายได้จากการประหยัดเชื้อเพลิง}}$$

สมการที่ 33

เมื่อรายได้จากการประหยัดเชื้อเพลิง คือ $X_1 - X_2$

กำหนดให้

X_1 คือ ค่าใช้จ่ายของการใช้พลังงานสิ้นเปลืองจากกระบวนการอบแห้ง โดยใช้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG และกระบวนการอบแห้งที่ใช้พลังงานความร้อนจากจากแก๊ส LPG เพียงอย่างเดียว

X_2 คือ ค่าใช้จ่ายจากกระบวนการอบแห้งแบบดั้งเดิม

การตรวจสอบเอกสาร

ณัฐวดี (2534) ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งคือ อุณหภูมิ อากาศร้อนที่ใช้อบแห้ง อัตราการไหลจำเพาะของอากาศ อัตราการไหลเวียนกลับของอากาศ และพลังงานที่ใช้ การทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นบางส่วนในการอบแห้งกล้วย จากการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มอัตราการไหลจำเพาะของอากาศส่งผลให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเพิ่มขึ้น และเมื่ออัตราส่วนเวียนกลับของอากาศเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลง การอบแห้งกล้วยควรทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C โดยใช้อัตราการไหลจำเพาะของอากาศประมาณ 10.5 kg dry air/h อัตราส่วนอากาศเวียนกลับ 90-95% ผลผลิตทันทีที่ได้จะมีคุณภาพดี เวลาที่ใช้ในการอบแห้งสั้น และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าต่ำ จากการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์พบว่า จุดคุ้มทุนขึ้นอยู่กับความแตกต่างของราคากล้วยที่อบโดยวิธีธรรมชาติ และอบโดยใช้ตู้อบแห้ง เมื่อแยกพิจารณาเฉพาะส่วนตัวรับรังสีพบว่า จะมีจุดคุ้มทุน 0.8 ปี และโดยเฉลี่ยจะประหยัดพลังงานไฟฟ้าของตัวอุ่นอากาศได้ 23%

ศิรินุช (2536) ศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบโมดูลเพื่อใช้ในการอบแห้งปลาหมึก โดยเครื่องอบแห้งดังกล่าวมีการใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานความร้อนหลัก และใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานเสริม จากผลการศึกษาพบว่า สภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งปลาหมึกประมาณ 10 kg ที่ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 82%wb จนกระทั่งความชื้นสุดท้ายลดลง เหลือประมาณ 25%wb จะต้องแบ่งการอบแห้งออกเป็น 2 ช่วง โดยช่วงแรกทำการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง 60 °C เป็นเวลา 5 h และทำการอบแห้งต่อในช่วงที่ 2 โดยใช้อุณหภูมิ 40 °C เป็นเวลา 9 h จะได้ความชื้นสุดท้ายตามต้องการ อัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งคือ 0.048 kg/s และอัตราการไหลเวียนกลับของอากาศที่ผ่านการอบแห้งแล้วมีค่า 80% ของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งทั้งหมด เมื่อเปรียบเทียบการอบแห้งที่ไม่มีการนำอากาศร้อนที่ผ่านการอบแห้งแล้วกลับมาใช้ใหม่กับการอบแห้งที่มีการนำอากาศร้อนที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ 80% พบว่า สามารถประหยัดพลังงานได้ 25.86% ของพลังงานสิ้นเปลืองทั้งหมด

มนตรี และคณะ (2552) การศึกษากระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ปลาแผ่นปรุงรสจากปลานิล โดยศึกษาผลของอุณหภูมิ และระยะเวลา (องศาเซลเซียส:นาทิจ) ที่เหมาะสมในการอบปลาแผ่นปรุงรส จากการทดลองพบว่า การใช้อุณหภูมิ และเวลาที่แตกต่างกันมีผลทำให้ค่าสี (L^* a^* และ b^*) และปริมาณความชื้นมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) โดยการใช้อุณหภูมิ และเวลาที่ 60:60 มีความชื้นสูงสุดเท่ากับ 12.55 รองลงมาคือ 70:45 และ 80:30 ซึ่งมีปริมาณความชื้นเท่ากับ 10.75 และ 7.30 ตามลำดับ ผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสพบว่า ผู้บริโภคยอมรับผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิต่อเวลาเท่ากับ 70:45 มากที่สุด ซึ่งมีคะแนนการยอมรับด้านสีปรากฏ กลิ่น รสชาติ เนื้อ

สัมผัส และความชอบรวมเท่ากับ 5.62 5.82 6.26 5.79 และ 6.32 ตามลำดับ นอกจากนี้ผู้บริโภคยอมรับผลิตภัณฑ์ปลาแผ่นปรุงรสเสริมงาขาวร้อยละ 5 มากที่สุด ซึ่งมีปริมาณโปรตีน ความชื้น และไขมัน 25.92 12.33 และ 4.05% ตามลำดับ

เกรียงไกร และคณะ (2554) การพัฒนา และสร้างตู้อบแห้งเหี่ยวหวานโดยใช้แหล่งความร้อนจากแก๊สหุงต้มหรือพลังงานแสงอาทิตย์ จากผลการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิ 60 °C และความเร็วยรอบของพัดลมที่ 1,866 rpm เหี่ยวหวานมีค่าความชื้นสุดท้ายที่ 3.49%wb ประสิทธิภาพการทำงานอยู่ที่ 65.61% อัตราการสิ้นเปลืองของเชื้อเพลิง 0.2 kg ใช้เวลาในการอบแห้ง 60 นาที ผลจากการอบแห้งโดยใช้แหล่งความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์นั้นพบว่า อุณหภูมิโดยเฉลี่ยภายในตู้อบอยู่ที่ 48.59 °C เหี่ยวหวานมีความชื้นสุดท้ายที่ 4.30%wb ใช้เวลาในการอบแห้ง 450 นาที และจากการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์พบว่า ตู้อบเหี่ยวหวานมีระยะเวลาในการคืนทุนในเวลา 1 เดือน

ณัฐกิตติ์ และคณะ (2554) การพัฒนาตู้อบ และกระบวนการอบแห้งข้าวแต๋น โดยการใช้หัวเผาแก๊สชนิดอินฟราเรดซึ่งใช้แก๊ส LPG เป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อนแก่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ภายในห้องอบสามารถอบข้าวแต๋นได้ครั้งละ 30 ถาด จากการทดสอบสรุปได้ว่า ที่อุณหภูมิ 50 °C ที่ความเร็วยรอบ 1,480 rpm มีประสิทธิภาพในการลดความชื้นสูง โดยการลดความชื้นมีลักษณะเป็นแบบต่อเนื่องพบว่า ใช้เวลาในการลดความชื้น 330 นาที กำจัดความชื้น 40.13%wb น้ำหนักที่หายไป 17.9 kg อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า 4.2 บาทต่อครั้ง และอัตราการสิ้นเปลืองแก๊ส LPG 2.4 kg ซึ่งประหยัดกว่าตู้อบแบบเดิม 19.5 kg และเครื่องอบข้าวแต๋นสามารถคืนทุนภายในระยะเวลาประมาณ 2 เดือน

ประทีป และคณะ (2555) การศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งปลานิลด้วยลมร้อน และหาสมการการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้ง โดยได้ทำการทดลองอบแห้งภายใต้เงื่อนไขความเร็วลม 1.0 1.5 และ 2.0 m/s และอุณหภูมิอบแห้ง 50 60 และ 70 °C ซึ่งมีพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการศึกษา ได้แก่ อัตราการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ผลจากการศึกษาพบว่า เมื่อทำการเพิ่มความเร็วลมหรือเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งจะทำให้อัตราการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเพิ่มขึ้น โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 °C ใช้เวลาสั้นกว่าที่อุณหภูมิอบแห้ง 50 และ 60 °C ประมาณ 79 และ 27% ตามลำดับ

สุภวรรณ และคณะ (2555) ศึกษาปัจจัยของสภาวะในการอบแห้งขนุนแห้งสายพันธุ์ทองประเสริฐต่อจลนพลศาสตร์ ด้วยสภาวะการทดลองอบแห้งที่แตกต่างกัน 4 เงื่อนไข ได้แก่ การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด การอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมระหว่างรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน และการอบแห้งแบบสองขั้นตอนด้วยคลื่นไมโครเวฟกับลมร้อน โดยในทุกการทดลองที่อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดจะใช้กำลังเท่ากับ 1,000 W และกำลังของไมโครเวฟที่ 90 W ใช้เวลาในการอบแห้ง 3 นาที การอบแห้งจะทดลองอบแห้งขนุนในช่วงอุณหภูมิ 40-60 °C ซึ่งมีค่าความชื้นเริ่มต้นของขนุน

อยู่ในช่วง 300-400%db และอบแห้งจนค่าความชื้นสุดท้ายของขนุนอยู่ในช่วง 12-19%db จากผลการทดลองพบว่า การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งด้วยแหล่งพลังงานอื่นๆ และการอบแห้งด้วยอุณหภูมิอบแห้งที่สูงจะมีความสิ้นเปลืองพลังงานต่ำกว่ากรณีการอบแห้งด้วยอุณหภูมิต่ำ สำหรับการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งชั้นบางของขนุนพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งขนุนแบบชั้นบางโดยใช้สมการแบบ Logarithmic, Approximation of Diffusion และ Modified Page สามารถใช้อธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งขนุนได้เป็นอย่างดี

จุฑารัตน์ และคณะ (2557) ศึกษาแนวทางการอบแห้งปลาข้าวสารแทนการทอดด้วยน้ำมัน โดยใช้ตู้อบแห้งแบบถาดที่ใช้ลมร้อน และรังสีอินฟราเรดเป็นแหล่งพลังงานความร้อน และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัล ทำการศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิอบแห้งระหว่าง 50-70 °C และความเข้มของรังสีอินฟราเรดที่ 500-1,000 W ที่มีต่อการลดความชื้นของปลาข้าวสาร โดยความเร็วของลมร้อนที่เลือกใช้มีค่าเฉลี่ย 1.0 ± 0.2 m/s ความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายของปลาข้าวสารแห้งอยู่ในช่วงร้อยละ 150-155%db และร้อยละ 15.0 ± 2.0 %db ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่า การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดมีระยะเวลาในการอบแห้งที่สั้นกว่ากรณีการอบแห้งด้วยลมร้อน อีกทั้งอัตราการอบแห้งจะแปรผันกับอุณหภูมิอบแห้งและกำลังของรังสีอินฟราเรด และเมื่อนำผลการทดลองมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบไม่เชิงเส้น ผลการทดลองสรุปได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page อธิบายจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งปลาข้าวสารจากการทดลองอบแห้งด้วยลมร้อน และรังสีอินฟราเรดได้ดีที่สุด

สำรวย และวลัยรัตน์ (2558) การศึกษาการอบแห้งปลาหมึกกะตอย และเปรียบเทียบระหว่างการตากแดดกลางแจ้งกับการตากในตู้อบที่มีอากาศร้อนจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ ไหลผ่าน ผลิตภัณฑ์อบแห้งเป็นปลาหมึกกะตอยสดปริมาณ 1 kg ทำการทดลองในช่วงเวลา 8.00-17.00 น. มีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ตลอดวันเฉลี่ย 661 W/m^2 เริ่มต้นปลาหมึกมีความชื้น 400%db ผลการทดลองพบว่า หลังการตากแดดกลางแจ้งกับการตากในตู้อบที่มีอากาศร้อนจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ ผลิตภัณฑ์มีความชื้นเหลือ 170 และ 70%db โดยมีอัตราการลดความชื้นต่อชั่วโมงเป็น 23.4 และ 35.1% ตามลำดับ เมื่อนำปลาหมึกไปอบต่อในห้องอบด้วยความร้อนจากแก๊สเชื้อเพลิงจึงสามารถลดเวลาการอบแห้งจนได้ผลิตภัณฑ์มีความชื้นตามที่ต้องการทำให้การใช้พลังงานแก๊สเชื้อเพลิงลดลงโดยเฉลี่ยประมาณ 22.5%

สุพรพิศ (2558) การศึกษาการอบแห้งปลาเกลือด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานไฟฟ้าเพื่อต้องการทำกระบวนการผลิตปลาเกลือแห้งอนามัย การออกแบบเครื่องอบแห้งประกอบด้วยตู้อบชนิดทึบ ใช้หลอดอินฟราเรดสำหรับให้ความร้อนขนาด 50 W จำนวน 4 หลอด ทำการทดลองอบแห้งโดยควบคุมอุณหภูมิแบบพีไอดีในตู้อบที่ 50, 60 และ 70 °C จากผลการทดลองพบว่า การอบแห้งปลาเกลือแบบ

ควบคุมอุณหภูมิที่ 70 °C มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบน้อยที่สุด เท่ากับ 300 MJ/kg H₂O evap. โดยที่ยังคงได้ค่าความชื้นมาตรฐานแห้งทั่วไปประมาณ 20–30%db และมีประสิทธิภาพในการอบแห้ง 1.2% โดยใช้ระยะเวลาในการอบแห้ง 4 h ทั้งนี้ยังคงได้คุณภาพปลาเกลือบแห้งที่เนื้อและสีของปลาใกล้เคียงกับที่มีวางจำหน่ายตามท้องตลาด

มารีนา และคณะ (2558) ศึกษาความชื้นสมดุลไอโซเทอมของข้าวที่อุณหภูมิ 40 50 60 และ 70 °C โดยวิธีสถิตในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 0.1- 0.9 ในการหาค่าความชื้นสมดุลไอโซเทอม และศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความชื้นสมดุล 4 รูปแบบเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง จากผลการทดลองพบว่า ความชื้นสมดุลไอโซเทอมจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศเดียวกัน ส่วนที่อุณหภูมิเดียวกันความชื้นสมดุลไอโซเทอมจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศเพิ่มขึ้น และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Chung and Pfof (1967) ให้ค่าในการทำนายผลการทดลองได้ดีที่สุด โดยมีค่า R² เฉลี่ยเท่ากับ 0.994 ค่า SEE เฉลี่ยเท่ากับ 0.062 และค่า RMSE เฉลี่ยเท่ากับ 0.053

กมลทิพย์ (2559) การศึกษากระบวนการผลิตปลาซาร์ดีนแดดเดียวโดยใช้ตู้อบลมร้อน ทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C แทนการตากแดด จากผลการทดลองพบว่า เมื่อทำการอบแห้งโดยใช้ตู้อบลมร้อน ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนด้านประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ปลาซาร์ดีนแดดเดียวทั้ง 3 สภาวะไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) แต่สภาวะการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิ 60 °C พบว่า ผู้ทดสอบชิมให้คะแนน ด้านสี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบรวมสูงสุด การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพพบว่า มีค่าสี L*, a*, b* เท่ากับ 51.59 4.33 14.95 ค่า aw เท่ากับ 0.96 ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) เท่ากับ 6.66 ตามลำดับ ส่วนคุณสมบัติทางเคมีพบว่า มีค่าความชื้น ไขมัน โปรตีน ไนโตรเจน และเกลือเท่ากับร้อยละ 50.98 7.08 34.35 2.86 และ 4.73 ตามลำดับ

ตารางที่ 4 สรุปสาระสำคัญจากการสำรวจเอกสาร

ชื่อผู้วิจัย (ปี พ.ศ.)	หัวข้อที่ทำการศึกษา	การดำเนินงาน	ผลการศึกษา
ณัฐวุฒิ (2534)	การพัฒนากระบวนการอบแห้งผลไม้ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นพลังงานเสริม	ทำการออกแบบ และพัฒนาเครื่องอบแห้ง จากนั้นทำการทดสอบสมรรถนะของตู้โดยการอบกล้วย และ พิจารณาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง และพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้กับเครื่องอบแห้งเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม จากนั้นทำการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์	<ul style="list-style-type: none"> คุณภาพของกล้วยอบแห้งจะดีที่สุดที่อุณหภูมิ 60 °C การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าควรรอบแห้งที่ 60 °C โดยใช้อัตราการไหลจำเพาะของอากาศประมาณ 10.5 kg dry air/h อัตราส่วนอากาศเวียนกลับ 90-95% ผลิตรัศมีที่ได้จะมีคุณภาพดี
ศิรินุช (2536)	การศึกษาสมรรถนะของ เครื่องอบแห้งแบบโมเดูลเพื่อ การอบปลาหมึก	การศึกษาคู่มือของแบบโมเดูลมีลักษณะพิเศษ คือใช้อบแห้งผลิตภัณฑ์ได้หลายชนิด และสามารถทำงานได้ตลอด 24 โดยในขั้นตอนการอบแห้งจะแบ่ง การอบแห้งออกเป็น 2 ช่วง เพื่อให้ได้ความชื้นสุดท้ายตามต้องการ	<ul style="list-style-type: none"> การอบแห้งปลาหมึกช่วงแรกทำการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง 60 °C เป็นเวลา 5 h และในช่วงที่ 2 ใช้อุณหภูมิ 40 °C เป็นเวลา 9 h จะได้ความชื้นสุดท้ายตามต้องการ พลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งทั้งหมด 8.86 MJ/kg H₂O evap.

ตารางที่ 4 สรุปสาระสำคัญจากการสำรวจเอกสาร(ต่อ)

ชื่อผู้วิจัย (ปี พ.ศ.)	หัวข้อที่ทำการศึกษา	การดำเนินงาน	ผลการศึกษา
มนตรี และคณะ (2556)	ผลิตภัณฑ์ปลาอินทรีแผ่นปรุงรส เสริมใยอาหาร	ศึกษาผลของอุณหภูมิ และระยะเวลา(องศาเซลเซียส: นาที) ที่เหมาะสมในการอบปลาแผ่นปรุงรส โดย แบ่งเป็น 3 ระดับคือ 60:60 70:45 และ 80:30	<ul style="list-style-type: none"> เวลาที่ 60:60 มีความชื้นสูงสุดเท่ากับ 12.55%wb ผู้บริโภคยอมรับผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิต่อเวลาเท่ากับ 70:45 มากที่สุด
เกรียงไกร และ คณะ (2554)	การพัฒนาตู้อบแห้งหญ้า หวานโดยใช้แหล่งความร้อน จากก๊าซหุงต้มหรือพลังงาน แสงอาทิตย์	ทำการพัฒนา และสร้างตู้อบแห้งหญ้าหวานโดยใช้ แหล่งความร้อนจากแก๊สหุงต้มหรือพลังงาน	<ul style="list-style-type: none"> ที่อุณหภูมิ 60 °C และความเร็วนรอบของพัดลมที่ 1,866 rpm หญ้าหวานมีค่าความชื้นสุดท้ายที่ 3.49%wb ประสิทธิภาพการทำงานอยู่ที่ 65.61% อัตราการสิ้นเปลืองของเชื้อเพลิง 0.2 kg
ณัฐกิตติ์ และ คณะ (2554)	การพัฒนาตู้อบ และ กระบวนการอบแห้งข้าวแต๋น โดยใช้หัวเผาแก๊สชนิด อินฟราเรด	ทำอบข้าวแต๋นครั้งละ 30 ถาด ซึ่งสามารถบรรจุข้าว แต๋น ได้ประมาณ 45 kg โดยศึกษาจากความชื้น อุณหภูมิ สี เวลา ความเร็วนรอบของมอเตอร์พัดลม และปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในการอบข้าวแต๋น	<ul style="list-style-type: none"> ที่อุณหภูมิ 50 °C ที่ความเร็วนรอบ 1480 rpm มีประสิทธิภาพลดความชื้นสูง อัตราการสิ้นเปลืองก๊าซ LPG 2.4 kg ซึ่งประหยัดกว่าตู้เดิม 19.5 kg คืนทุนภายในระยะเวลาประมาณ 2 เดือน

ตารางที่ 4 สรุปสาระสำคัญจากการสำรวจเอกสาร(ต่อ)

ชื่อผู้วิจัย (ปี พ.ศ.)	หัวข้อที่ทำการศึกษา	การดำเนินงาน	ผลการศึกษา
ประทีป และคณะ (2555)	การศึกษาพฤติกรรม การ อบแห้งปลา นิล Tilapia nilotica (ด้วยลมร้อน)	ทำการศึกษาพฤติกรรม การอบแห้งปลา นิลด้วยลม โดยได้ทำการทดลองอบแห้งภายใต้เงื่อนไขความเร็ว ลม 1.0 1.5 และ 2.0 m/s และอุณหภูมิอบแห้ง 50 60 และ 70 °C	<ul style="list-style-type: none"> เมื่อเพิ่มความเร็วลม หรือเพิ่มอุณหภูมิ อบแห้งจะทำให้อัตราการอบแห้ง และ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเพิ่มขึ้น การอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 °C ใช้เวลาสั้น กว่าที่อุณหภูมิอบแห้งอื่นๆ
สุภวรรณ และ คณะ (2555)	การอบแห้งขนุนด้วยพลังงาน ความร้อนร่วมของรังสี อินฟราเรด/ไมโครเวฟ และลม ร้อน : จลนพลศาสตร์คุณภาพ และการทดสอบประสิทธิภาพ สัมพัทธ์	ทำการทดลองอบแห้งที่แตกต่างกัน 4 เงื่อนไข ได้แก่ การ อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด การอบแห้งด้วยพลังงาน ความร้อนร่วมระหว่างรังสีอินฟราเรด และลมร้อน การอบแห้งแบบสองขั้นตอนด้วยไมโครเวฟ และลม ร้อน และสุดท้ายคือการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่าง เดียว โดยในทุกการทดลองที่อบแห้งด้วยรังสี อินฟราเรดจะใช้กำลังเท่ากับ 1,000 W และกำลัง ของไมโครเวฟ ที่ 90 W	<ul style="list-style-type: none"> การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดมีอัตราการ อบแห้งสูงกว่าการอบแห้งด้วยแหล่ง พลังงานอื่นๆ การอบแห้งด้วยอุณหภูมิอบแห้งที่สูงจะมี ความสิ้นเปลืองพลังงานต่ำกว่าการณการ อบแห้งด้วยอุณหภูมิต่ำ

ตารางที่ 4 สรุปสาระสำคัญจากการสำรวจเอกสาร(ต่อ)

ชื่อผู้วิจัย (ปี พ.ศ.)	หัวข้อที่ทำการศึกษา	การดำเนินงาน	ผลการศึกษา
จุฑารัตน์ และ คณะ (2557)	แนวทางการพัฒนาปลา ข้าวสารกรอบด้วยกรอบแห้ง ลมร้อนและรังสีอินฟราเรด	ศึกษาแนวทางการอบแห้งปลาข้าวสารกรอบแทนการ ทอดด้วยน้ำมัน โดยใช้ตู้อบแห้งแบบถาดที่ใช้ลมร้อน และรังสีอินฟราเรดเป็นแหล่งพลังงานความร้อน และ สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเอมพีริคัล ทำการศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิอบแห้งระหว่าง 50-70 °C และความชื้นของรังสีอินฟราเรดที่ 500-1,000 W โดยความเร็วของลมร้อนที่เลือกใช้มี ค่าเฉลี่ย 1.0±0.2 m/s	<ul style="list-style-type: none"> • การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดมีระยะเวลา ในการอบแห้งที่สั้นกว่าการอบแห้งด้วย ลมร้อน • แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page อธิบายจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งปลา ข้าวสารจากการทดลองอบแห้งด้วยลมร้อน และรังสีอินฟราเรดได้ดีที่สุด
สำรวย และคณะ (2558)	การอบแห้งปลาหมึกทะเลทอด โดยใช้แสงอาทิตย์ เป็น พลังงานความร้อนร่วม	ทำการศึกษาการอบแห้งปลาหมึกทะเลทอด และ เปรียบเทียบระหว่างการตากแดดกลางแจ้งกับการ ตากในตู้อบที่มีอากาศร้อนจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบแผ่นราบไปหลบผ่าน	<ul style="list-style-type: none"> • การตากแดดกลางแจ้งผลิตภักดิ์ที่มีความชื้น เหลือ 170%db • การตากในตู้อบผลิตภักดิ์ที่มีความชื้นเหลือ 70%db • ประสิทธิภาพการอบแห้ง โดยเฉลี่ย 31%

ตารางที่ 4 สรุปสาระสำคัญจากการสำรวจเอกสาร(ต่อ)

ชื่อผู้วิจัย (ปี พ.ศ.)	หัวข้อที่ทำการศึกษา	การดำเนินงาน	ผลการศึกษา
สุพรพิศ (2558)	กระบวนการอบแห้งปลาเกลือ ด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานไฟฟ้าโดยใช้การควบคุมอุณหภูมิแบบพีเอชไอ	ทำการออกแบบเครื่องอบแห้งประกอบด้วยชุดชนิดที่บ ใช้หลอดอินฟราเรดสำหรับให้ความร้อนขนาด 50 W จำนวน 4 หลอด ทำการทดลองอบแห้งโดยควบคุมอุณหภูมิแบบพีเอชไอในตู้อบที่ 50 60 และ 70 °C	<ul style="list-style-type: none"> การอบแห้งปลาเกลือแบบควบคุมอุณหภูมิที่ 70 °C มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบน้อยที่สุดเท่ากับ 300 MJ/kg H₂O evap. มีประสิทธิภาพในการอบแห้ง 1.2%ระยะเวลาในการอบแห้ง 4 h
มารีนา และคณะ (2558)	ความชื้นสมดุลไอโซเทอมของข้าว	ศึกษาความชื้นสมดุลไอโซเทอมของข้าวที่อุณหภูมิ 40 50 60 และ 70 °C โดยวิธีสิดิในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 0.1- 0.9 และศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความชื้นสมดุล	<ul style="list-style-type: none"> ความชื้นสมดุลไอโซเทอมจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศเดียวกัน ส่วนที่อุณหภูมิเดียวกันความชื้นสมดุลไอโซเทอมจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศเพิ่มขึ้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Chung and Pfost (1967) ให้ค่าในการทำนายผลการทดลองได้ดีที่สุด โดยมีค่า R² เฉลี่ยเท่ากับ 0.994 ค่า SEE เฉลี่ยเท่ากับ 0.062 และค่า RMSE เฉลี่ยเท่ากับ 0.053

ตารางที่ 4 สรุปสาระสำคัญจากการสำรวจเอกสาร(ต่อ)

ชื่อผู้วิจัย (ปี พ.ศ.)	หัวข้อที่ทำการศึกษา	การดำเนินงาน	ผลการศึกษา
กมลทิพย์ (2559)	การพัฒนาผลิตภัณฑ์ปลาชาร์ทินแนดเด็วโดยใช้ตู้อบลมร้อน	ทำการศึกษาระบบการผลิตปลาชาร์ทินแนดเด็วโดยใช้ตู้อบลมร้อน โดยทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C แทนการตากแดด	<ul style="list-style-type: none">• ที่อุณหภูมิ 60 °C พบว่าผู้ทดสอบชิมไม่หัดคะแนนด้านสี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบรวมสูงสุด• คุณสมบัติทางกายภาพ ที่อุณหภูมิ 60 °C มีค่าสี L*, a*, b* เท่ากับ 51.59 4.33 14.95 ค่า aw เท่ากับ 0.96



จากการศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า มีการศึกษาการอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งความร้อน โดยเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนตามธรรมชาติ ซึ่งแหล่งพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์เพียงแหล่งเดียวอาจไม่เพียงพอต่อการอบแห้งเพราะต้องใช้ระยะเวลาในการอบแห้งนาน และสมรรถนะของเครื่องอบแห้งขึ้นอยู่กับสภาพอากาศแต่ละวันเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์จึงได้มีการพัฒนาให้มีการใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ร่วมกับแหล่งความร้อนอื่น โดยจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใช้รังสีอินฟราเรดในกระบวนการอบแห้งมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งด้วยแหล่งพลังงานอื่นๆ โดยส่วนใหญ่จะทำการทดลองการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50-70 °C ซึ่งรังสีอินฟราเรดที่ถูกนำมาใช้ในกระบวนการอบแห้งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่ ฮีตเตอร์อินฟราเรด และหัวเผาแก๊สชนิดอินฟราเรด โดยฮีตเตอร์อินฟราเรดมีข้อจำกัดในการใช้งานคือ หากกระแสไฟฟ้าไม่เสถียร พลังงานไฟฟ้าไม่เพียงพอในการอบแห้งจะทำให้ไม่สามารถใช้งานเครื่องอบแห้งได้ โดยการใช้หัวเผาแก๊สชนิดอินฟราเรดมีความเหมาะสมต่อการนำมาใช้ในกระบวนการอบแห้ง เนื่องจากการใช้หัวเผาแก๊สชนิดอินฟราเรดสามารถประหยัดแก๊สได้เกือบสองเท่าของหัวแก๊สแบบธรรมดา นอกจากนี้แล้วในการใช้งานยังพบว่า ไม่มีเขม่าควัน ไม่มีการเผาไหม้แบบเปลวไฟจึงไม่ทำให้ดับเมื่อเกิดลมพัด ไม่ทำให้เกิดควันดำ ไม่ก่อให้เกิดมลพิษ ไม่เกิดปัญหาอุณหภูมิที่เตา สามารถทำความสะอาดได้ง่าย อีกทั้งยังมีความร้อนสูงซึ่งสามารถช่วยลดระยะเวลาในการอบแห้ง และผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพดี ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการพัฒนาเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ปลาโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรด โดยได้ทำการศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง ได้แก่ 50 60 และ 70 °C และได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบเครื่องอบแห้งในสภาวะการทำงานที่แตกต่างกัน 3 เงื่อนไข ได้แก่ เครื่องอบแห้งที่ใช้รังสีอินฟราเรดในการอบแห้งเพียงอย่างเดียว เครื่องอบแห้งที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการอบแห้งเพียงอย่างเดียว และเครื่องอบแห้งที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรดในการอบแห้ง นอกจากนี้ยังได้ทำการประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ปลาโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรด การวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์ปลาภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการอบแห้ง การวิเคราะห์ความสิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งผลิตภัณฑ์ปลา รวมไปถึงการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์อีกด้วย

การศึกษาความชื้นสมดุลด้วยวิธีสถิตในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 0.1- 0.9 ผลการศึกษาพบว่า ความชื้นสมดุลจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศเดียวกัน ส่วนที่

อุณหภูมิเดียวกันความชื้นสัมพัทธ์ไอโซเทอมจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศเพิ่มขึ้น โดยค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้จากการทดลองสามารถนำไปพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาสมการที่เหมาะสมสำหรับการทำนายค่าความชื้นที่เวลาใดๆ ของผลิตภัณฑ์ได้อีกด้วย

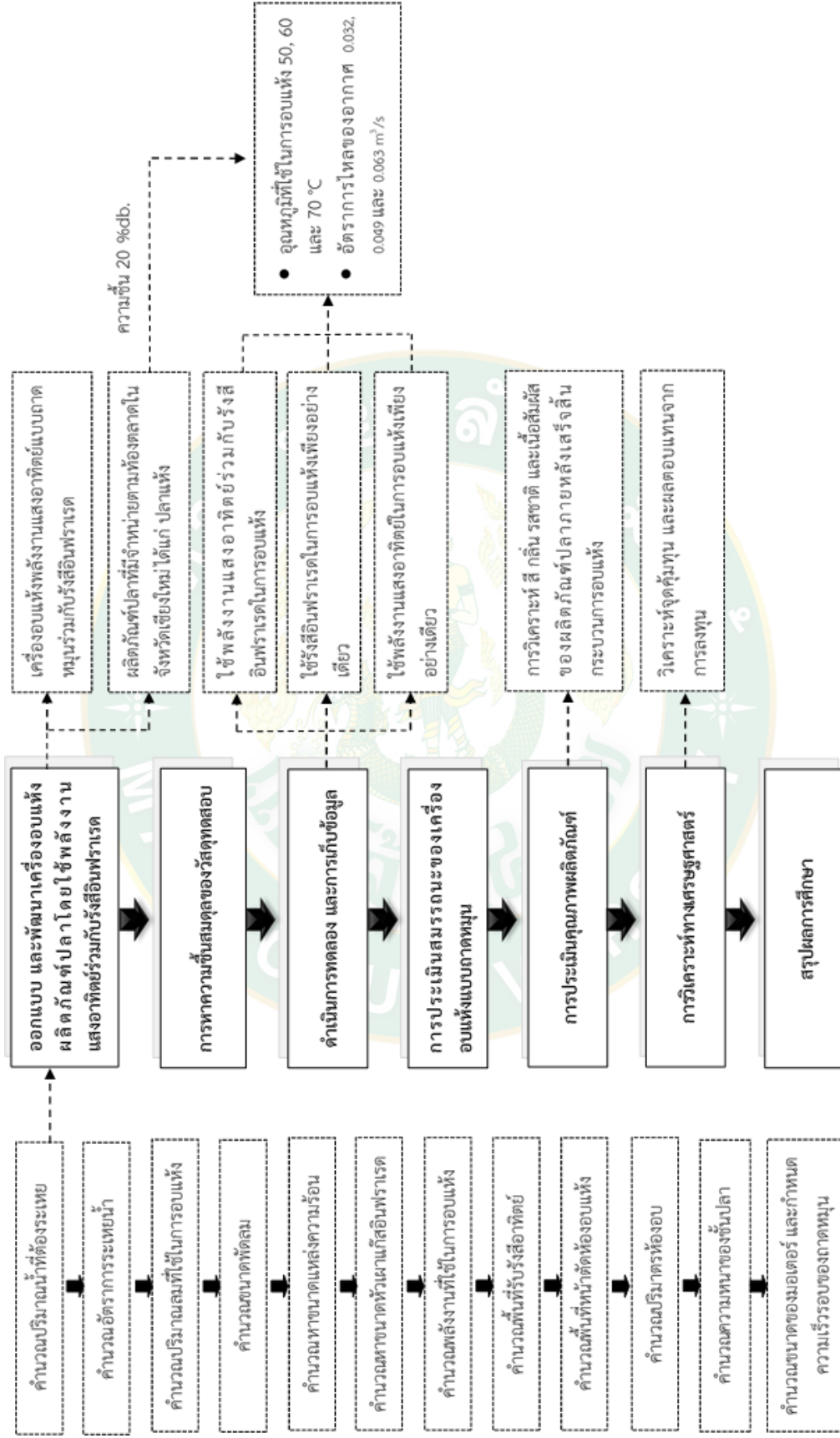


บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

วิธีดำเนินงานวิจัย

ภายหลังการศึกษา และรวบรวมข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับเทคโนโลยีการแปรรูปผลิตภัณฑ์ปลา รวมถึงเทคโนโลยีการออกแบบเครื่องอบแห้งที่มีการความเหมาะสมต่อการนำมาใช้งานในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ปลาพบว่า โดยทั่วไปแล้วการอบแห้งโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์เพียงแหล่งเดียวอาจไม่เพียงพอต่อการอบแห้งเพราะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งนาน และสมรรถนะของเครื่องอบแห้งยังขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศในแต่ละวัน (นพพร และคณะ, 2559) อีกทั้งการใช้กรรมวิธีการอบแห้งแบบเดิมไม่มีการควบคุมตัวแปรที่มีผลต่อการอบแห้งผลิตภัณฑ์ซึ่งตัวแปรดังกล่าว ได้แก่ อุณหภูมิ อัตราการไหลของอากาศ และยังรวมถึงการประหยัดพลังงานโดยการนำอากาศร้อนที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานให้กับเครื่องอบแห้งจึงต้องหาแหล่งพลังงานความร้อนอื่นเข้ามาเสริม (อนิรุทธิ์ และสมบัติ, ม.ป.ป.) โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ปลาแบบลาดหมุนที่มีการพาความร้อนแบบบังคับ สามารถกำหนดสถานะการอบแห้งในส่วนของอุณหภูมิ อัตราการไหลของอากาศ และอัตราการนำอากาศร้อนกลับมาใช้ใหม่ โดยเครื่องอบแห้งดังกล่าวใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG ซึ่งใช้หัวเผาแก๊สชนิดอินฟราเรดเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เนื่องจากผลิตภัณฑ์ปลาเป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้สำหรับการบริโภค ดังนั้นการเลือกใช้เทคโนโลยีจึงต้องคำนึงถึงความสะอาดซึ่งพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ และแก๊ส LPG เป็นพลังงานที่มีความสะอาด อีกทั้งยังมีความสิ้นเปลืองในการใช้พลังงานต่ำ และช่วยลดระยะเวลาในการอบแห้ง อีกทั้งผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพดีอีกด้วย

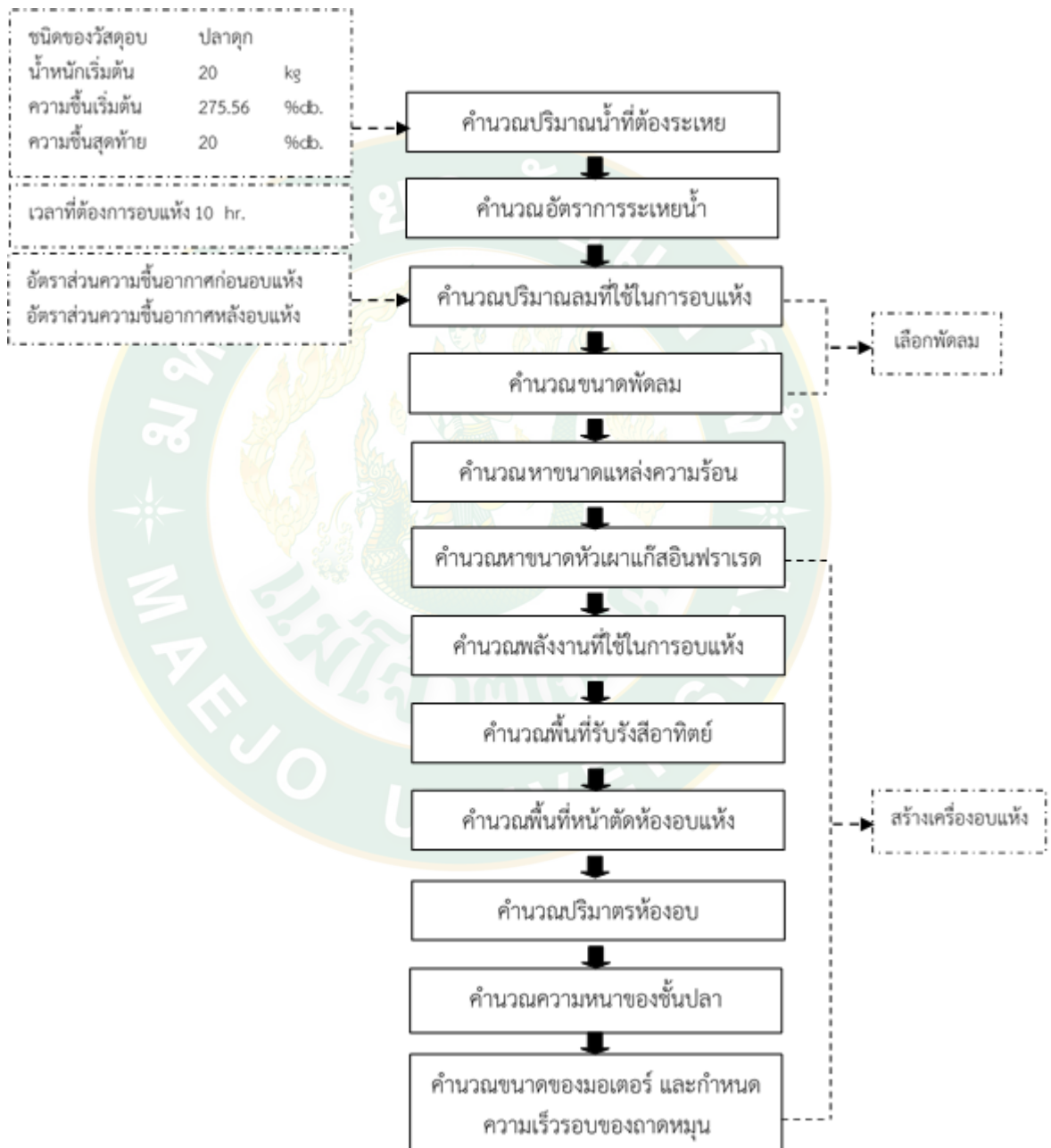
วิธีดำเนินการวิจัยได้ทำการศึกษาให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ที่ได้เสนอไว้ ได้ทำการออกแบบพัฒนาและทดสอบเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ปลาแบบลาดหมุน สำหรับการศึกษาสภาพที่เหมาะสมของการอบแห้งจะพิจารณาจาก ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงาน และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ปลาภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการอบแห้ง โดยขั้นตอนการดำเนินงานสามารถแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนแสดงดังภาพที่ 14 และรายละเอียดแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้



ภาพที่ 14 14 โดอะแกรมขั้นต้นตอนการดำเนินงาน

1. ออกแบบ และพัฒนาเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ปลาโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG

การออกแบบ และพัฒนาเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ปลาโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG มีขั้นตอนการออกแบบดังภาพที่ 15



ภาพที่ 15 ไดอะแกรมเบื้องต้นการออกแบบเครื่องอบแห้ง

2. การหาความชื้นสัมพัทธ์ของวัสดุทดสอบ

การหาความชื้นสัมพัทธ์ของวัสดุมีหลักการ คือ ปล่อยให้วัสดุสัมผัสกับอากาศจนความชื้นของวัสดุไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา การหาความชื้นสัมพัทธ์จะใช้วิธีสถิต ซึ่งเป็นวิธีการปล่อยให้วัสดุสัมผัสอากาศในขณะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของอากาศ โดยทำการทดลองในภาชนะปิดที่ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศให้คงที่ ซึ่งใช้สารละลายเกลืออิ่มตัวในการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ส่วนอุณหภูมิของอากาศจะถูกควบคุมด้วยตู้อบ โดยปลาดุกที่ใช้เป็นวัสดุทดสอบนั้นมีความชื้นเริ่มต้น 275.56%db ซึ่งค่าความชื้นเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลองทำการหาโดยการอบแห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 72 h

การศึกษาความชื้นสัมพัทธ์ไอโซเทอมของปลาดุกที่อุณหภูมิ 40 50 60 และ 70 °C โดยวิธีสถิตในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 0.1-0.9% เตรียมตัวอย่างปลาดุกที่น้ำหนักเฉลี่ยเท่าๆ กัน แล้วนำไปวางบนตะแกรงภายในขวดแก้วปิดสนิทซึ่งบรรจุสารละลายเกลืออิ่มตัว 5 ชนิด คือ LiCl, MgCl₂·6H₂O, NaCl, Mg(NO₃)₂·6H₂O และ KNO₃ ชนิดละ 3 ขวด ซึ่งจะให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ นำขวดแก้วเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 40 50 60 และ 70 °C ตามลำดับ และระหว่างการทดลองตัวอย่างของชิ้นปลาดุกจะถูกนำออกมาชั่งทุกๆ 24 h จนกระทั่งไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง จึงนำชิ้นปลาดุกไปหาค่าความชื้นด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 72 h

ตารางที่ 5 ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ของสารละลายเกลืออิ่มตัว

Temperature (°C)	Relative humidity (decimal)				
	LiCl	MgCl ₂ ·6H ₂ O	Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	NaCl	KNO ₃
40	0.1121	0.3160	0.4842	0.7468	0.8903
50	0.1110	0.3054	0.4630	0.7443	0.8478
60	0.1095	0.2926	0.4544	0.7450	0.8478
70	0.1080	0.2770	0.3940	0.8478	0.8478



ภาพที่ 16 การเตรียมตัวอย่างปลาตุ๋กที่น้ำหนักเฉลี่ยเท่าๆ กัน



ภาพที่ 17 ตัวอย่างปลาตุ๋กภายในขวดแก้วปิดสนิทซึ่งบรรจุสารละลายเกลืออิมตัว 5 ชนิด



ภาพที่ 18 การควบคุมอุณหภูมิอากาศแวดล้อมโดยการนำขวดแก้วเข้าสู่ตู้อบลมร้อน

3. วิธีดำเนินการทดลอง การเก็บข้อมูล และการประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง

การหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมในการอบแห้งปลาตาก โดยใช้เครื่องอบแห้งแบบถาดหมุนที่ใช้ความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ และแก๊ส LPG ซึ่งใช้หัวเผาแก๊สชนิดอินฟราเรดเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็นการทดลองหาตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งปลาตากที่ผ่านกระบวนการแปรรูป ซึ่งทำการอบแห้งปลาตากที่มีความชื้นเริ่มต้น 275.56%db ให้มีความชื้นเหลือประมาณ 20%db โดยจะพิจารณาความสัมพันธ์ของพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง ระยะเวลา และลักษณะปรากฏของปลาตากแห้ง ในการทดลองมีตัวแปรที่ควบคุม 2 ตัวแปร คือ

- อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง ได้แก่ 50 60 และ 70 °C
- อัตราการไหลของอากาศ ได้แก่ 0.032 0.049 และ 0.063 m³/s

ในการทดลองที่อุณหภูมิหนึ่งๆ จะใช้อัตราการไหลของอากาศ 3 ค่า โดยในการดำเนินการทดลอง และการเก็บข้อมูลมีดังต่อไปนี้

1) การเตรียมวัตถุดิบ

ทำการแปรรูปปลาตากโดยการนำไส้ออก จากนั้นทำการผ่าลำตัวปลาตาก และนำไปแช่น้ำเกลือในการเตรียมน้ำเกลือนั้นจะใช้น้ำ 30 L ต่อเกลือ 5 kg (ธีรเดช และคณะ, 2553) หลังจากผ่านการแช่น้ำเกลือแล้วนำมาล้างให้สะอาดก่อนนำไปอบแห้ง



ภาพที่ 19 การเตรียมวัสดุทดสอบ

- 2) หาความชื้นเริ่มต้นของปลาดุก โดยนำเข้าสู่ตู้อบเพื่ออบให้แห้งที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 72 h
- 3) เตรียมความพร้อมของเครื่องอบแห้ง โดยการตั้งอุณหภูมิ และปรับอัตราการไหลของอากาศให้ได้ตามต้องการ รวมไปถึงการเตรียมความพร้อมของเครื่องบันทึกข้อมูลด้วย
- 4) นำปลาดุกเข้าสู่ตู้อบ โดยวางปลาดุกบนภาชนะที่ระนาบของตัวปลาดุกตั้งฉากกับทิศทางการไหลของอากาศภายในห้องอบแห้ง



ภาพที่ 20 การจัดวางปลาดุกบนภาควางผลิตภัณฑ์

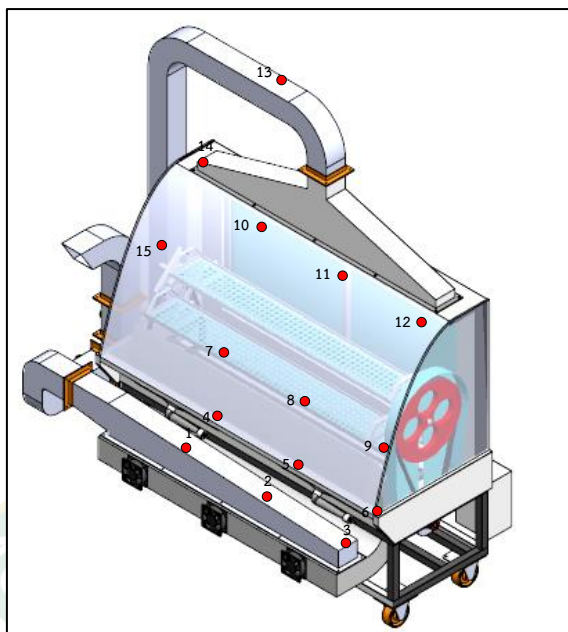
5) ทำการทดลองวันละ 10 h (ชั่วโมงที่มีแดด) ตั้งแต่เวลา 8.00-18.00 น. ทำการบันทึกข้อมูลทุกๆ 30 นาที โดยข้อมูลที่บันทึกค่าได้แก่

- อุณหภูมิที่บริเวณทางเข้าตำแหน่งที่ 1 ถึง 3 ดังภาพที่ 21
- อุณหภูมิของอากาศร้อนที่ถูกนำกลับมาใช้ใหม่ตำแหน่งที่ 4 ถึง 6
- อุณหภูมิอากาศภายในห้องอบแห้งตำแหน่งที่ 7 ถึง 12
- อุณหภูมิที่บริเวณทางออกตำแหน่งที่ 13 ถึง 15
- ความชื้นอากาศภายในห้องอบแห้ง
- ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์
- อุณหภูมิกระเปาะแห้ง และอุณหภูมิกระเปาะเปียกของบรรยากาศ และอากาศที่ออกจากตู้อบแห้ง เพื่อหาความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเข้า และออกจากตู้อบแห้ง
- อุณหภูมิอากาศแวดล้อม
- ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม
- ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง
- ปริมาณการป้อนเชื้อเพลิงแก๊ส LPG
- ปริมาณการใช้ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับพัดลมโบลเวอร์ และมอเตอร์ถาดหมุน

6) ทำการสุ่มตัวอย่างปลาตุก 3 ตัว เพื่อเป็นตัวอย่างอ้างอิงผลการทดลอง โดยชั่งน้ำหนักปลาตุกก่อนอบแห้ง และระหว่างการอบแห้งทุกๆ 1 ชั่วโมงตลอดทำการทดลอง เพื่อหาอัตราการอบแห้ง

7) เมื่อได้ค่าตัวแปรที่เหมาะสมในการอบแห้งปลาตุกเสร็จสิ้นแล้ว ทำการศึกษาเปรียบเทียบเครื่องอบแห้งในสภาวะการทำงานที่แตกต่างกัน 3 เงื่อนไข โดยทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1-6 ซึ่งสภาวะการทำงานที่แตกต่างกัน 3 เงื่อนไข ได้แก่

- การทดลองการอบแห้งปลาตุกโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ร่วมกับหัวเผาแก๊สชนิดอินฟราเรดซึ่งใช้แก๊ส LPG เป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อนแก่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน
- การทดลองการอบแห้งปลาตุกโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG ที่ใช้ร่วมกับหัวเผาแก๊สชนิดอินฟราเรด
- การทดลองการอบแห้งปลาตุกโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์



ภาพที่ 21 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วันอุณหภูมิตั้ง

4. การประเมินคุณภาพผลิตภัณฑ์

การวิเคราะห์คุณภาพผลิตภัณฑ์ปลาแห้งภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการอบแห้งสามารถแบ่งออกเป็น 4 วิธี ได้แก่

1) การประเมินคุณภาพอาหารด้วยประสาทสัมผัส (Sensory evaluation) ในที่นี้จะนำเสนอวิธีการทดสอบการยอมรับ (Acceptance testing) (Pangborn, 2003) ซึ่งเคยมีการนำมาใช้กับผลิตภัณฑ์แห้งที่ได้จากการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์ได้ผลดี (Side et al., 1993) โดยการประเมินคุณภาพผลิตภัณฑ์ปลาแห้งดังกล่าวจะทำการสำรวจจากประชากรจำนวน 20 คน ได้แก่ กลุ่มอาสาสมัครสาธารณสุข (อสม.) ประจำหมู่บ้านโทกหัวช้าง ตำบลพระบาท อำเภอเมืองจังหวัดลำปาง เนื่องจากกลุ่มประชากรดังกล่าวโดยส่วนใหญ่แล้วเป็นผู้ที่มีการใช้ผลิตภัณฑ์ปลาแห้งในการประกอบอาหารเป็นประจำ ซึ่งแบบประเมินคุณภาพผลิตภัณฑ์ปลาแห้งสามารถแสดงได้ตั้งภาคผนวก ข ในการให้คะแนนจะใช้เลขสากลเฮโดนิค 5 ระดับ (5-point Hedonic scale) หลังจากได้คะแนนจากผู้ประเมินแต่ละคนแล้วจะนำมาหาค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และแสดงผลเปรียบเทียบระหว่างผลิตภัณฑ์ปลาแห้งที่ได้จากการทดลอง และที่มีจำหน่ายทั่วไปตามท้องตลาด

2) การประเมินลักษณะสีของผลิตภัณฑ์ปลาแห้งโดยใช้สมุดคู่มือเทียบสี (RHS colour chart) รุ่นที่ 6 Sixth editon 2015 ซึ่งใน 1 ชุดจะประกอบไปด้วยกลุ่มสีจำนวน 4 กลุ่มสีหลัก (4 FAN) ได้แก่ กลุ่มสีเหลือง (FAN1) สีแดง (FAN2) สีเขียว (FAN3) และสีดำ (FAN4) และในแต่ละ FAN จะมี

แผ่นตัวอย่างสีที่มีเลขกำกับทุกแผ่น อีกทั้งยังมีแบ่งสีย่อยของแต่ละแผ่นสีอีก 4 โทนสีตามตัวอักษร A B C และ D โดยในการประเมินลักษณะสีของผลิตภัณฑ์ปลาแห้งในงานวิจัยนี้จะใช้กลุ่มสีดำ FAN4 เปรียบเทียบระหว่างสีของผลิตภัณฑ์ปลาแห้งที่มีจำหน่ายทั่วไปตามท้องตลาด และผลิตภัณฑ์ปลาแห้งที่ได้จากการทดลอง

3) การประเมินคุณภาพด้านการคืนตัวของผลิตภัณฑ์ปลาแห้ง เนื่องจากผลิตภัณฑ์ปลาแห้งเป็นวัตถุดิบที่ต้องนำไปผ่านกระบวนการปรุงรסק่อนถึงจะสามารถรับประทานได้ โดยขึ้นอยู่กับผู้บริโภคในการนำวัตถุดิบดังกล่าวไปปรุงอาหาร ซึ่งรสชาติของผลิตภัณฑ์ปลาแห้งจะขึ้นอยู่กับลักษณะการนำไปใช้ปรุงอาหารแต่ละประเภท โดยทั่วไปจะสังเกตได้ว่าผลิตภัณฑ์แห้งหลายๆ ชนิดไม่เหมาะกับการรับประทานโดยตรงเนื่องจากไม่มีรสชาติความกลมกล่อมแต่เมื่อนำไปผ่านกระบวนการปรุงอาหาร เช่น การนำไปต้มจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ดังกล่าวมีรสชาติที่ดีขึ้น ดังนั้นในการประเมินรสชาติของผลิตภัณฑ์ปลาแห้งที่มีความเหมาะสมสามารถทำได้ด้วยการทดสอบคุณภาพด้านการคืนตัว ใช้วิธีการคืนตัวโดยนำไปแช่ในน้ำที่อุณหภูมิประมาณ 70 °C เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นชั่งน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ปลาแห้ง (ชนิด และคณ, 2549) และทำการบันทึกน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ปลาแห้งเริ่มต้น และน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ปลาแห้งที่คืนตัว ณ เวลาใดๆ และนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณดังสมการต่อไปนี้

$$\text{Rehydration} = \frac{W_f \times W_d}{W_d} \times 100$$

สมการที่ 34

เมื่อ

W_f คือ น้ำหนักวัสดุหลังกระบวนการคืนตัว g

W_d คือ น้ำหนักวัสดุก่อนกระบวนการคืนตัว g



ภาพที่ 22 การทดสอบคุณภาพด้านการคืนตัว

4) การวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ปลาแห้งจะทำการวิเคราะห์ค่าโปรตีนและไขมันในเนื้อปลา เนื่องจากโปรตีนที่ได้จากเนื้อปลาจะมีคุณค่าทางโภชนาการที่สูงมาก เมื่อเทียบกับโปรตีนจากเนื้อสัตว์ประเภทอื่นๆ โดยเนื้อปลาจะประกอบไปด้วยกรดอะมิโนที่มีความจำเป็นต่อร่างกาย นอกจากนี้ภายในเนื้อปลายังมีไขมันที่มีคุณภาพดีประกอบไปด้วยกรดไขมันที่มีความจำเป็นต่อร่างกายอีกด้วย โดยจะทำการเปรียบเทียบค่าโปรตีน และไขมันของผลิตภัณฑ์ปลาดุกแห้งจากการทดลอง และผลิตภัณฑ์ปลาดุกแห้งที่มีจำหน่ายตามท้องตลาด การวิเคราะห์ดังกล่าวจะนำตัวอย่างส่งวิเคราะห์โดยสถาบันบริการตรวจสอบคุณภาพ และมาตรฐานผลิตภัณฑ์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ (IQS)

5. วิเคราะห์ความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์ และสรุปผลการวิจัย

หลังจากทำการวิเคราะห์ความเป็นไปได้เชิงเทคนิคในการใช้งานเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์โดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ร่วมกับร่วมกับพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG ที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานในกระบวนการอบแห้งผลิตภัณฑ์ปลาเสร็จสิ้นแล้ว ทำการการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ โดยเป็นการวิเคราะห์จุดคุ้มทุน และผลตอบแทนจากการลงทุน

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. อุปกรณ์สำหรับการทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุน

1) เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบถาดหมุนร่วมกับรังสีอินฟราเรดสำหรับผลิตภัณฑ์ปลา โดยเครื่องอบแห้งดังกล่าวมีรูปทรงเป็นครึ่งพาราโบลภายในห้องอบแห้งปริมาตร 1.18 m³ โดยเครื่องอบแห้งดังกล่าวเป็นระบบถาดหมุนที่สามารถบรรจุวัสดุทดสอบได้จำนวน 20 kg



ภาพที่ 23 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบถาดหมุน

2) ปลาตุก ปลาตุกที่นำมาใช้ในการทดลองผู้วิจัยได้ทำการเลือกใช้ปลาตุกที่มีน้ำหนักตัวเฉลี่ย 200 g มีขนาดลำตัว กว้าง 7 cm ยาว 15 cm



ภาพที่ 24 วัสดุทดสอบ

3) แก๊สหุงต้ม (LPG) ขนาด 15 kg ทำหน้าที่เป็นแหล่งพลังงานความร้อนเสริมในกรณีที่แสงอาทิตย์ไม่เพียงพอสำหรับกระบวนการอบแห้ง



ภาพที่ 25 แก๊สหุงต้ม (LPG)

4) เกจปรับแรงดันแก๊ส LPG แบบแรงดันสูง ยี่ห้อ SCG-SUPERGAS เกลียวทองเหลือง รุ่น R924 (รุ่นตัว T) ทำหน้าที่ในการปรับความดันขาเข้า 800 kPa ให้มีความดันขาออก 180 kPa



ภาพที่ 26 เกจปรับแรงดันแก๊ส LPG แบบแรงดันสูง

5) หัวปรับแก๊สแรงดันต่ำ ยี่ห้อ Lucky flame รุ่น L-326 ทำหน้าที่ปรับความดันทางเข้า 0.7 - 7 kg/cm² ให้มีความดันทางออก 250 - 450 mm-H₂O



ภาพที่ 27 หัวปรับแก๊สแรงดันต่ำ

6) ชุดหัวเผาแก๊สชนิดอินฟราเรด ยี่ห้อ Asia รุ่น A-402 ทำมาจากแผ่นเซรามิก 3 แผ่นเรียงต่อกัน ขอบแผ่นทำจากสแตนเลสทนความร้อน หัวแก๊สดังกล่าวมีปริมาณการใช้แก๊ส 0.11 kg/h ปริมาณความร้อน 1,350 kcal/h ขนาดหัวเบอร์เนอร์ 336 x 80 x 100 mm น้ำหนัก 3.2 kg หัวเบอร์เนอร์แก๊สอินฟราเรดใช้แผ่นเซรามิก ทำให้เผาไหม้สมบูรณ์ไม่เหม็นกลิ่นแก๊ส และประหยัดแก๊ส ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับตู้อบแห้ง



ภาพที่ 28 ชุดหัวเผาแก๊สชนิดอินฟราเรด

7) ตู้ควบคุมขนาด 30 X 45 X 17 cm ตู้ควบคุมวงจรมีหน้าที่ควบคุมการทำงานทั้งหมดของเครื่องอบแห้ง เช่น การสั่งจุดติดแก๊ส ควบคุมการทำงานของมอเตอร์พัดลม ควบคุมการทำงานของพัดลมโบลเวอร์ และแสดงผลอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งอีกด้วย



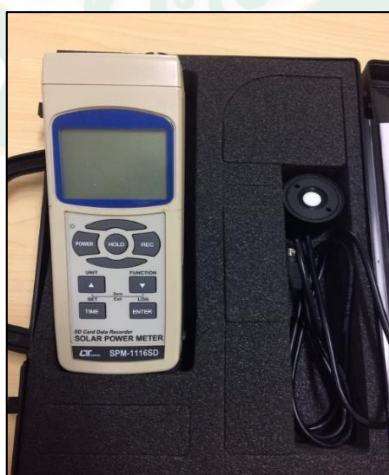
ภาพที่ 29 ตู้ควบคุม

8) มิเตอร์ไฟฟ้ารุ่น DD283 สำหรับวัดค่ากำลังไฟฟ้ากระแสสลับ ความถี่ 50 Hz ขนาด 1 เฟส ขนาดแรงดันไฟฟ้า 220-240 V มีหน้าที่สำหรับวัดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ของพัดลม และมอเตอร์เกียร์ของถาดหมุน



ภาพที่ 30 มิเตอร์ไฟฟ้า

9) เครื่องวัดพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar power mete) ยี่ห้อ Lutron รุ่น spm-1116sd ช่วงการวัด 0.0 ถึง 2000.0 W/m² ทำหน้าที่ตรวจวัดค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ในแต่ละช่วงเวลา



ภาพที่ 31 เครื่องวัดพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar power mete)

10) เครื่องวัด และบันทึกอุณหภูมิ (Temperature recorder) ยี่ห้อ Lutron รุ่น BTM-4208SD เครื่องวัดและบันทึกอุณหภูมิแบบ 12 channels ใช้งานร่วมกับ Thermocouple Type K J T R และ S ช่วงการวัดอุณหภูมิ -100 ถึง 1300 °C ทำหน้าที่ในการวัดอุณหภูมิในตำแหน่งต่างๆ



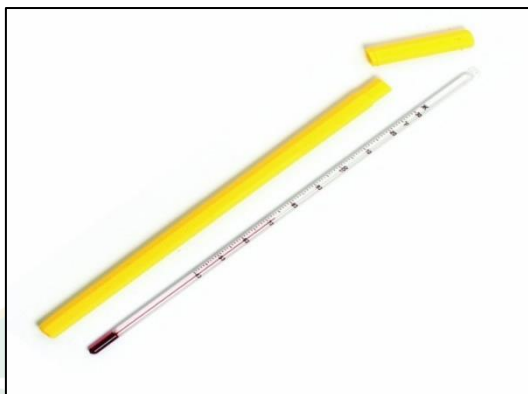
ภาพที่ 32 เครื่องวัด และบันทึกอุณหภูมิ (Temperature recorder)

11) เครื่องวัดความเร็วลมแบบใบพัด (Anemometer) ยี่ห้อ Lutron รุ่น YK-80AM ช่วงวัดความเร็วลม 0.4 ถึง 35.0 m/s ทำหน้าที่วัดความเร็วลมในตำแหน่งต่างๆ



ภาพที่ 33 เครื่องวัดความเร็วลมแบบใบพัด (Anemometer)

12) เทอร์โมมิเตอร์ ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ โดยเทอร์โมมิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองสามารถวัดอุณหภูมิได้ถึง $100\text{ }^{\circ}\text{C}$



ภาพที่ 34 เทอร์โมมิเตอร์

13) เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้น (Thermo-hygrometer) ยี่ห้อ: DeltaTrak รุ่น: Jumbo Display ช่วงการวัดอุณหภูมิ $0\text{--}50\text{ }^{\circ}\text{C}$ และช่วงการความชื้น $20\text{--}90\%$ ทำหน้าที่ในการวัดอุณหภูมิและความชื้นของอากาศแวดล้อม



ภาพที่ 35 เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้น (Thermo-hygrometer)

14) สายเทอร์โมคัปเปิ้ล (Thermocouple type k) สำหรับใช้วัดอุณหภูมิในการทดลองชนิด K ซึ่งสามารถวัดอุณหภูมิได้ในช่วง $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $1,370\text{ }^{\circ}\text{C}$ ต่อเข้ากับช่องสัญญาณของเครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ สำหรับการวัดอุณหภูมิในการทดลองจะแสดงผลออกมาในหน่วยองศาเซลเซียส $^{\circ}\text{C}$



ภาพที่ 36 สายเทอร์โมคัปเปิ้ล (Thermocouple type k)

15) เครื่องชั่งดิจิตอล ยี่ห้อ: CST รุ่น : CDR-30 พิกัดกำลัง 30 kg ค่าละเอียด 1 g



ภาพที่ 37 เครื่องชั่งดิจิตอลพิกัดกำลัง 30 kg ค่าละเอียด 1 g

16) เครื่องชั่งน้ำหนักพกพาระบบดิจิทัลยี่ห้อ Unbranded/Generic รุ่น: SF-400A Digital scale พิกัดกำลัง 10 kg ค่าละเอียด 0.1 g ทำหน้าที่ในการชั่งน้ำหนักพลาสติกตัวอย่างที่ใช้เป็นวัสดุทดสอบ



ภาพที่ 38 เครื่องชั่งน้ำหนักพกพาแบบดิจิทัลพิกัดกำลัง 10 kg ค่าละเอียด 0.1 g

2. อุปกรณ์สำหรับการศึกษาค่าความชื้นสมมูลของวัสดุทดสอบ

1) เครื่องชั่งดิจิทัลทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ OHAUS รุ่น PIONEER (PA214) พิกัดน้ำหนักสูงสุด 210 g ค่าละเอียด 0.0001 g ทำหน้าที่ในการชั่งน้ำหนักพลาสติกตัวอย่างที่ใช้เป็นวัสดุทดสอบ และชั่งน้ำหนักปริมาณสารเคมี



ภาพที่ 39 เครื่องชั่งดิจิทัลทศนิยม 4 ตำแหน่ง

2) ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) รุ่น UN75 ยี่ห้อ Memmert แบบมีพัดลม อุณหภูมิสูงสุด 300 °C



ภาพที่ 40 ตู้อบลมร้อน (Hot air oven)

3) สมุดคู่มือเทียบสี (RHS colour chart) รุ่นที่ 6 Sixth edition 2015 สำหรับการเปรียบเทียบสีของวัสดุทดสอบกับมาตรฐานของสี



ภาพที่ 41 สมุดคู่มือเทียบสี (RHS colour chart)

4) Magnesium Nitrate Hexahydrate ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) มวลโมเลกุล 256.41 g/mol
สำหรับการทดสอบค่าความชื้นสมมูลของปลาดุก



ภาพที่ 42 Magnesium Nitrate Hexahydrate ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)

5) Sodium Chloride 99% (NaCl) มวลโมเลกุล 58.44 g/mol สำหรับการทดสอบค่า
ความชื้นสมมูลของปลาดุก



ภาพที่ 43 Sodium Chloride 99% (NaCl)

6) Magnesium Chloride Hexahydrate ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) มวลโมเลกุล 203.30 g/mol
สำหรับการทดสอบค่าความชื้นสมมูลของปลาตาก



ภาพที่ 44 Magnesium Chloride Hexahydrate ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)

7) Lithium Chloride (LiCl) มวลโมเลกุล 42.40 g/mol สำหรับการทดสอบค่าความชื้น
สมมูลของปลาตาก



ภาพที่ 45 Lithium Chloride (LiCl)

8) Potassium Nitrate (KNO_3) มวลโมเลกุล 101.11 g/mol สำหรับการทดสอบค่าความชื้นสมมูลของปลาตาก



ภาพที่ 46 Potassium Nitrate (KNO_3)

9) เกลือ สำหรับการเสริมปริมาณไอโอดีนในกับเนื้อปลา



ภาพที่ 47 เกลือเสริมไอโอดีน

บทที่ 4

การออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุน

ในการออกแบบเครื่องอบแห้งนั้นต้องทำการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น โดยในบทความวิจัยนี้ ต้องการอบแห้งปลาดุกจำนวน 20 kg ให้แห้งภายใน 10 h (1 วันที่มีแดด) โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับแหล่งความร้อนจากแก๊ส LPG ซึ่งใช้หัวเผาแก๊สชนิดอินฟราเรดเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยกำหนดว่าใน 1 วัน มีค่าพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ย 16.17 MJ/m²-day ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยพลังงานแสงอาทิตย์ของจังหวัดเชียงใหม่ปี พ.ศ.2555–2559 (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2560) ต้องการอบแห้งปลาดุกที่มีความชื้นเริ่มต้น 275.56%db จนเหลือความชื้นสุดท้ายอยู่ในช่วง 20%db ซึ่งเป็นค่าความชื้นที่พบในผลิตภัณฑ์ปลาแห้งที่มีจำหน่ายทั่วไปตามท้องตลาดและกำหนดค่าอื่นๆ ดังนี้

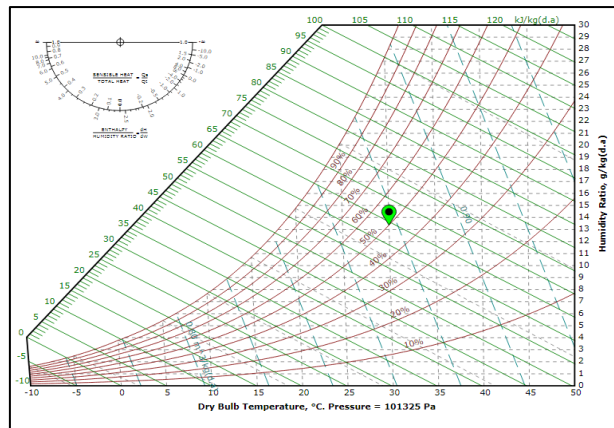
ชนิดของปลา	ปลาดุก
ความชื้นเริ่มต้น	275.56 %db
ความชื้นสุดท้าย	20 %db
อุณหภูมิที่ใช้อบแห้ง	50-70 °C
อุณหภูมิอากาศหลังอบแห้ง	40 °C
อากาศแวดล้อม	30 °C
ความชื้นอากาศสัมพัทธ์	50 %
เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง	10 h
พลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ย	16.17 MJ/m ² -day

ตัวอย่างการคำนวณการออกแบบเครื่องอบแห้งเมื่อต้องการความชื้นสุดท้าย 20%db และอุณหภูมิที่ใช้อบแห้ง 50 °C

ขั้นที่ 1 การหาคุณสมบัติอากาศชื้นอากาศแวดล้อม โดยการกำหนดจุดของอากาศแวดล้อมที่ 30 °C, RH 50% ลงบนแผนภูมิอากาศชื้นหลังจากนั้นอ่านค่าเอนทัลปี และอัตราส่วนความชื้นอากาศจะได้

ตำแหน่งที่ 1 อากาศแวดล้อม

จุด 1	T_{db}	=	30 °C	RH 50 %
อ่าน	h_1	=	64.32	kJ/kg
	w_1	=	0.0134	kg/kg dry air

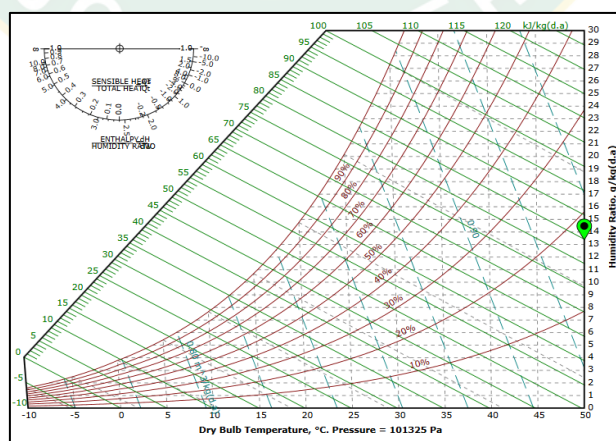


ภาพที่ 48 การอ่านค่าเอนทัลปีและอัตราส่วนความชื้นอากาศบนแผนภูมิอากาศชื้น

ขั้นที่ 2 การหาคุณสมบัติอากาศชื้นที่อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งคือ 50 °C ลากจุดบนแผนภูมิอากาศชื้นจากตำแหน่ง 1 ไปตำแหน่ง 2 ทางขวามือโดยที่ค่าอัตราส่วนความชื้นคงที่ ณ จุดตัดกันบนเส้นอุณหภูมิ 50 °C จะอ่านค่าสมบัติอากาศชื้น ได้ดังนี้

ตำแหน่งที่ 2 อากาศอบแห้ง

จุด 2	T_{db}	=	50	°C
	w_2	=	0.0134	kg/kg dry air
อ่าน	h_2	=	84.925	kJ/kg

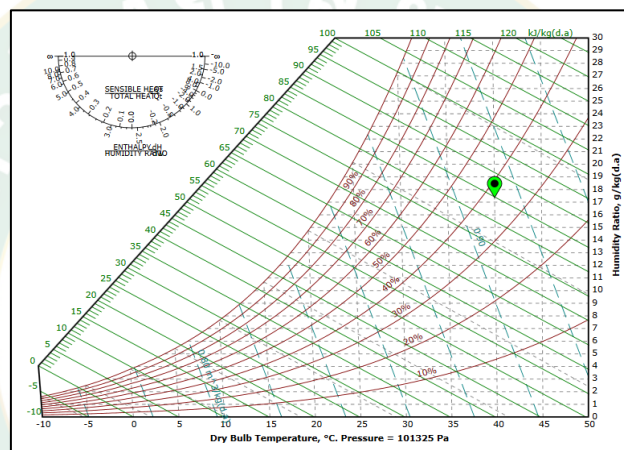


ภาพที่ 49 การอ่านค่าเอนทัลปีบนแผนภูมิอากาศชื้น (T_{db} 50 °C)

ขั้นที่ 3 การหาคุณสมบัติอากาศชื้นของอากาศหลังการอบแห้ง ลากจุดบนแผนภูมิอากาศชื้น จากตำแหน่ง 2 ไปยังตำแหน่ง 3 ไปตามเส้นเอนทัลปีคงที่ ณ จุดตัดกับเส้นอุณหภูมิจึงที่ 40 °C จะอ่านค่าสมบัติอากาศชื้น ได้ดังนี้

ตำแหน่งที่ 3 อากาศหลังการอบแห้ง

จุด 3	T_{db}	=	40	°C
	h_3	=	84.925	kJ/kg
อ่าน	w_3	=	0.0174	kg/kg dry air



ภาพที่ 50 การอ่านค่าสมบัติอากาศชื้นบนแผนภูมิอากาศชื้น (T_{db} 40 °C)

ขั้นที่ 4 คำนวณปริมาณน้ำที่ต้องการระเหยออกจากปลา

$$\begin{aligned} \text{หาน้ำหนักสุดท้ายที่เหลือ ได้จากสมการ} \quad W_f &= \frac{w_i(100-M_i)}{(100-M_f)} \\ W_f &= \frac{20 \text{ kg} (100-73.37\%wb)}{(100-16.67\%wb)} \\ W_f &= 6.39 \text{ kg} \\ \text{ปริมาณน้ำที่ต้องระเหย ได้จากสมการ} \quad m_w &= W_i - W_f \\ m_w &= 20 \text{ kg} - 6.39 \text{ kg} \\ \text{ดังนั้น ปริมาณน้ำที่ต้องระเหยเท่ากับ} \quad m_w &= 13.61 \text{ kg} \end{aligned}$$

ขั้นที่ 5 คำนวณหาอัตราการระเหยน้ำระหว่างการอบแห้ง

ในการอบแห้งต้องระเหยน้ำออก 13.61 kg ในเวลา 10 h ดังนั้น อัตราการระเหยน้ำสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}\dot{m}_W &= \frac{m_W}{t} \\ \dot{m}_W &= \frac{13.61 \text{ kg}}{10 \text{ h}} \\ \dot{m}_W &= 1.36 \text{ kg water/h}\end{aligned}$$

ดังนั้น จะต้องระเหยน้ำออกในอัตรา $\dot{m}_W = 1.36 \text{ kg water/h}$

ขั้นที่ 6 คำนวณปริมาณลมที่ต้องใช้ในการอบแห้ง

จากกระบวนการอบแห้งบนแผ่นภูมิอากาศชื้น อากาศก่อนอบแห้งมีอัตราส่วนความชื้น

$$\begin{aligned}w_1 &= 0.0134 \text{ kg/kg dry air} \\ \text{อากาศหลังอบแห้งมีอัตราส่วนความชื้น} \quad w_3 &= 0.0174 \text{ kg/kg dry air} \\ v_2 &= 0.935 \text{ m}^3/\text{kg dry air} \\ 1 \text{ m}^3/\text{h} &= 0.589 \text{ CFM}\end{aligned}$$

ดังนั้นปริมาณลมที่ต้องใช้ในการพาความชื้นออกจากปลา มีค่าเท่ากับปริมาณน้ำที่ต้องการระเหยต่อชั่วโมงหารด้วยปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นในอากาศ

$$\begin{aligned}\text{ปริมาณลมที่ต้องใช้ ได้จากสมการ} \quad \dot{m}_a &= \frac{\dot{m}_W}{W_f - W_i} \\ &= \frac{1.36 \text{ kg water/h}}{0.0174 \text{ kg/kg dry air} - 0.0134 \text{ kg/kg dry air}} \\ \dot{m}_a &= 339.98 \text{ kg air/h}\end{aligned}$$

$$\dot{m}_a = 0.0944 \text{ kg air/h}$$

$$\begin{aligned}\text{อัตราการไหลของอากาศ ได้จากสมการ} \quad \dot{V} &= \frac{\dot{m}_a}{V_2} \\ \dot{V} &= \frac{339.90 \text{ kg air/h}}{0.935 \text{ m}^3/\text{kg dry air}} \\ \dot{V} &= 363.62 \text{ m}^3/\text{h} \\ \dot{V} &= 214.02 \text{ CFM}\end{aligned}$$

ดังนั้น ปริมาณลมที่คำนวณได้นำไปเลือกขนาดพัดลม

ขั้นที่ 7 คำนวณหาขนาดของแหล่งความร้อน

กำลังของแหล่งกำเนิดความร้อนสามารถหาได้จากสมการผลคูณของผลต่างเอนทัลปีของอากาศก่อนและหลังการอบแห้ง และอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแห้งดังนี้

$$\begin{aligned}\dot{Q} &= \frac{(h_f - h_i)}{3600} \dot{m}_a \\ \dot{Q} &= \frac{(h_f - h_i)}{3600} \dot{m}_a \\ \dot{Q} &= \frac{(84.93 \text{ kJ/kg} - 64.32 \text{ kJ/kg})}{3600} 339.98 \text{ kg air/h} \\ \dot{Q} &= 1.95 \text{ kW}\end{aligned}$$

ขนาดของแหล่งกำเนิดความร้อนต้องไม่น้อยกว่า 1.95 kW ในทางปฏิบัติจะต้องออกแบบให้มากกว่าที่คำนวณเนื่องจากการสูญเสียขณะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนของแหล่งพลังงานต่างๆ

ขั้นที่ 8 การหาขนาดของหัวเตาแก๊สอินฟราเรด

จากสมการพลังงาน $\dot{Q} = \dot{m}_g \times \text{LHV}_g$

กำหนดเงื่อนไขการหาขนาดหัวเตาแก๊สอินฟราเรด

ค่า LHV_g 50.22 MJ/kg

แทนค่า $\dot{m}_g = \frac{1.95 \text{ kW}}{(50.22 \text{ MJ/kg} \times 1,000)}$

$$\dot{m}_g = 0.140 \text{ kg/h}$$

ดังนั้น จึงเลือกใช้เตาแก๊สอินฟราเรดที่มีอัตราการไหลเชิงมวลเท่ากับ 0.140 kg/h

ขั้นที่ 9 คำนวณหาพื้นที่ตัวรับรังสีเมื่อต้องการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

พลังงานที่ต้องใช้ในการอบแห้งทั้งหมดสามารถคำนวณได้จากผลคูณของกำลังของแหล่งกำเนิดความร้อนกับเวลา ดังนี้

$$\begin{aligned}E &= \dot{Q}t \\ E &= 1.95 \text{ kW} \times 10 \text{ h} \times 3,600 \text{ s} \\ E &= 70,040.019 \text{ kJ}\end{aligned}$$

ดังนั้น พลังงานที่ต้องการทั้งหมดในการอบแห้ง คือ 70,040.019 kJ

กำหนดเครื่องอบแห้งเป็นการรับรังสีอาทิตย์โดยตรง โดยผนังทั้ง 4 ด้านเป็นแบบโปร่งใสรังสีอาทิตย์สามารถเข้าไปยังห้องอบแห้งได้ประมาณ 80% กำหนดให้ตัวรับรังสีอยู่ในห้องอบแห้งมีประสิทธิภาพ 30% ความความเข้มรังสีอาทิตย์มีค่าเฉลี่ย $16.6 \text{ MJ/m}^2\text{day}$ จะสามารถคำนวณหาพื้นที่ตัวรับรังสีอาทิตย์ได้จากความสัมพันธ์ของพลังงานความร้อนต่อความเข้มรังสีอาทิตย์และประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{จาก} \quad A_c &= \frac{E}{\eta} \\ A_c &= 14.06 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

ดังนั้น พื้นที่ตัวรับรังสีอาทิตย์ คือ 14.06 m^2

ขั้นที่ 10 คำนวณหาพื้นที่หน้าตัดห้องอบ

พื้นที่หน้าตัดห้องสามารถหาได้ถ้ากำหนดความเร็วที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัด ซึ่งในที่นี้สมมุติว่าอากาศไหลผ่านชั้นผลิตภัณฑ์ด้วยความเร็วลม 0.1 m/s

ดังนั้น พื้นที่หน้าตัดหาจากอัตราการไหลเชิงมวลอากาศที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัด ในหน่วย m^3/s ต่อด้วยความเร็วอากาศที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดนั้น

$$\begin{aligned} \text{จาก} \quad A &= \frac{\dot{V}}{v} \\ A &= \frac{0.1010 \text{ m}^3/\text{s}}{0.1 \text{ m/s}} \\ A &= 1.0101 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

ดังนั้น พื้นที่หน้าตัดห้องอบ คือ 1.0101 m^2

ขั้นที่ 11 คำนวณปริมาตรห้องอบหรือความหนาของชั้นปลา

คำนวณหาความหนาแน่นปรากฏของปลา

เมื่อปลาดุก 1 ตัว มีน้ำหนักเฉลี่ย 200 g มีขนาดลำตัวกว้าง 7 cm ยาว 20 cm ถาดมีขนาด $25 \times 150 \times 2 \text{ cm}$ หรือ 0.0075 m^3 เพราะฉะนั้นเมื่อทำการวางแบบสลับพื้นปลา ในหนึ่งถาดจะสามารถวางปลาดุกได้เต็มที่ 41 ตัว แต่ในการอบแห้งปลาดุกนั้นจะต้องจัดระยะไม่ให้ปลาดุกวางชิดกันเกินไป เพื่อให้อากาศสัมผัสผิวของปลาดุกมากที่สุด ดังนั้นจึงได้กำหนดช่องว่างระหว่างปลาดุก 2 cm เพราะฉะนั้นในหนึ่งถาดจะสามารถวางปลาดุกได้เต็มที่ 29 ตัว หรือ 5.8 kg เมื่อต้องการอบแห้งปลาดุกจำนวน 20 kg ต้องมีทั้งหมด 4 ถาด จึงจะเพียงพอต่อการวางปลาดุกสำหรับการอบแห้ง โดยความเร็วรอบของถาดหมุน คือ 6 rpm

ดังนั้น ความหนาแน่นปรากฏของปลาได้จากพื้นที่ของภาคต่อหน้าหนึ่งของปลาใน 1 ภาค เท่ากับ 773.33 kg/m^3

ปริมาตรห้องอบและความหนาของชั้นอบแห้ง

ปริมาตรห้องอบและความหนาของชั้นอบแห้งสามารถหาได้เมื่อทราบความหนาแน่นของปลา เท่ากับ 773.33 kg/m^3 ปริมาตรของห้องอบแห้ง หาได้จากความสัมพันธ์ของมวลผลิตภัณฑ์อบแห้ง ต่อความหนาแน่นผลิตภัณฑ์อบแห้ง ดังนี้

$$V = \frac{m}{d_p}$$

$$V = \frac{20 \text{ kg}}{773.33 \text{ kg/m}^3}$$

$$V = 0.026 \text{ m}^3$$

ดังนั้น ห้องอบแห้งต้องมีปริมาตรต้องไม่น้อยกว่า 0.026 m^3

และความหนาของชั้นปลา สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ของ ปริมาณห้องอบแห้งต่อ พื้นที่หน้าตัดห้องอบแห้ง ได้ดังนี้

$$d = \frac{V}{A}$$

$$d = \frac{0.026 \text{ m}^3}{1.0101 \text{ m}^3}$$

$$d = 0.026 \text{ m}^2$$

ขั้นที่ 12 คำนวณขนาดของมอเตอร์

กำหนดให้การสูญเสียความดัน	90	Pa
ประสิทธิภาพพัดลม	50	%
ประสิทธิภาพมอเตอร์	70	%
ความหนาแน่นอากาศ	1.2	kg/m^3
แรงโน้มถ่วงของโลก	9.81	m/s^2

$$\begin{aligned}
 \text{จาก} \quad P_{\text{motor}} &= \frac{P_a \times h_L \times q \times Q}{\eta_m \eta_f} \\
 P_{\text{motor}} &= \frac{1.2 \text{ kg/m}^3 \times 90 \text{ Pa} \times 9.81 \text{ m/s}^2 \times 0.1010 \text{ m}^3/\text{s}}{0.5 \times 0.7} \\
 P_{\text{motor}} &= 305.76 \text{ W} \\
 P_{\text{motor}} &= 0.41 \text{ hp}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น ขนาดมอเตอร์เท่ากับ 0.41 hp

สรุปการออกแบบเครื่องอบแห้งที่ใช้สำหรับอบแห้งปลาดุกจำนวน 20 kg ให้แห้งภายใน 10 h เมื่อต้องการอบแห้งปลาดุกที่มีความชื้นเริ่มต้น 275.56%db จนเหลือความชื้นสุดท้ายอยู่ในช่วง 20%db โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งได้แก่ 50 °C

ขนาดของแหล่งกำเนิดความร้อน	1.95	kW
ขนาดพื้นที่ตัวรับรังสีอาทิตย์	14.06	m ²
ปริมาณลม	0.10	m ³ /s
พื้นที่หน้าตัดห้องอบแห้ง	1.01	m ²
ความหนาชั้นวัสดุ	0.03	m
ขนาดของมอเตอร์	0.41	hp

จากเงื่อนไขการออกแบบเครื่องอบแห้งเบื้องต้นในการอบแห้งปลาตากจำนวน 20 kg ที่มีความชื้นเริ่มต้น 275.56%db จนเหลือความชื้นสุดท้าย 20%db โดยกำหนดอุณหภูมิในการอบแห้ง 50-70 °C ให้แห้งภายใน 10 h (1 วันที่มีแดด) โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG ซึ่งใช้หัวเผาแก๊สชนิดอินฟราเรดเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ผลการคำนวณการออกแบบเครื่องอบแห้งเบื้องต้นสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 6

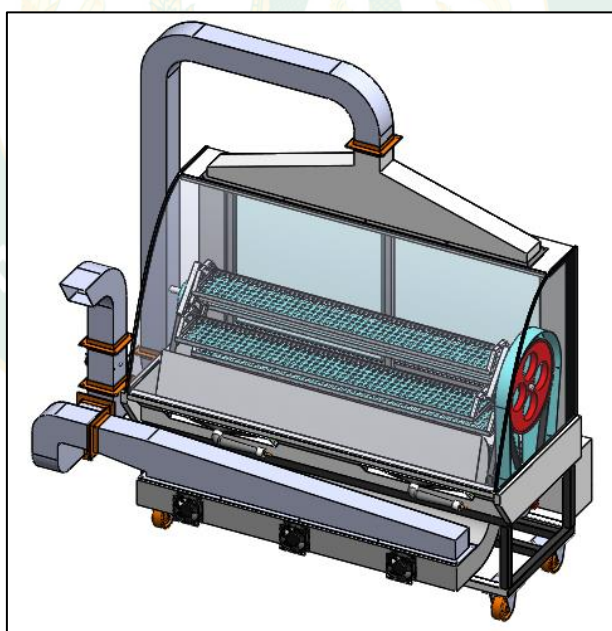
ตารางที่ 6 ผลการคำนวณการออกแบบเครื่องอบแห้งเบื้องต้น

เงื่อนไขเริ่มต้น	อุณหภูมิ (°C)		
	50	60	70
ปริมาณน้ำที่ต้องการระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ปลา (kg)	13.61	13.61	13.61
อัตราการระเหยน้ำระหว่างการอบแห้ง (kg/h)	1.36	1.36	1.36
ปริมาณลมที่ต้องใช้ในการอบแห้ง (kg air/s)	0.09	0.05	0.03
อัตราการไหลของอากาศ (m ³ /s)	0.10	0.05	0.03
ขนาดของแหล่งความร้อน (KW)	1.95	1.46	1.30
ขนาดของหัวเตาแก๊สอินฟราเรด (kg/h)	0.14	0.10	0.09
ขนาดของพื้นที่รับรังสีอาทิตย์ (m ²)	14.06	10.55	9.38
พื้นที่หน้าต่างห้องอบแห้ง เมื่อกำหนดให้ อากาศไหลผ่าน ชั้นผลิตภัณฑ์ด้วยความเร็วลม 0.1 m/s (m ²)	1.01	0.49	0.32
ปริมาตรห้องอบแห้ง (m ³)	0.03	0.03	0.03
ความหนาของชั้นผลิตภัณฑ์ปลา (m)	0.03	0.05	0.08
ขนาดของมอเตอร์ (hp)	0.41	0.20	0.13

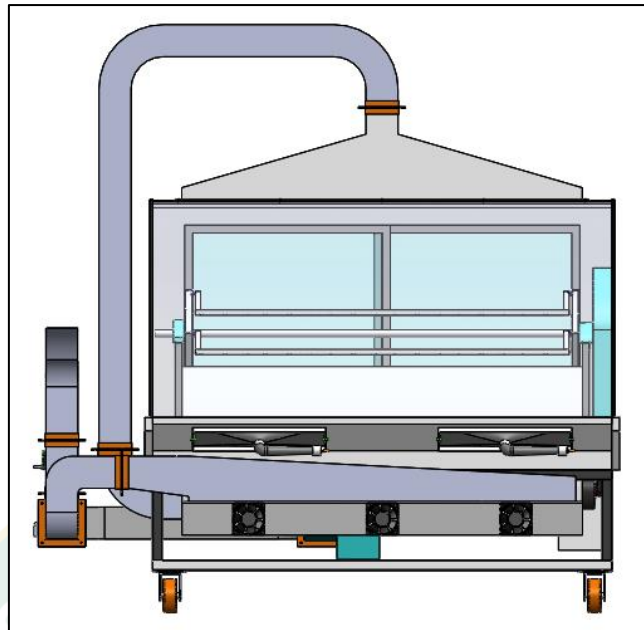
จากผลการคำนวณการออกแบบเครื่องอบแห้งตามเงื่อนไขเบื้องต้นดังตารางที่ 6 เครื่องอบแห้งที่ได้ทำการพัฒนาขึ้นได้ออกแบบให้มีการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในกระบวนการอบแห้ง โดยผลการคำนวณการออกแบบเครื่องอบแห้งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ปริมาณลมที่ใช้ในการอบแห้งที่อุณหภูมิอบแห้ง 50-70 °C อยู่ในช่วง 0.03 m³/s ถึง 0.10 m³/s
2. ขนาดของแหล่งความร้อนต้องไม่น้อยกว่า 1.95 kW
3. ขนาดของหัวเตาอินฟราเรดต้องมีปริมาณการใช้แก๊สไม่น้อยกว่า 0.14 kg/h
4. ในกรณีที่มีการใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar Collector) ขนาดพื้นที่รับรังสีอาทิตย์ต้องไม่น้อยกว่า 14.06 m²
5. ปริมาตรห้องอบแห้งต้องไม่น้อยกว่า 0.03 m³ โดยในการพัฒนาเครื่องอบแห้ง
6. ความหนาของชั้นผลิตภัณฑ์ปลาต้องไม่น้อยกว่า 0.03 m
7. ขนาดมอเตอร์ต้องไม่น้อยกว่า 0.41 hp
8. กำหนดความเร็วรอบของถาดหมุน คือ 6 rpm

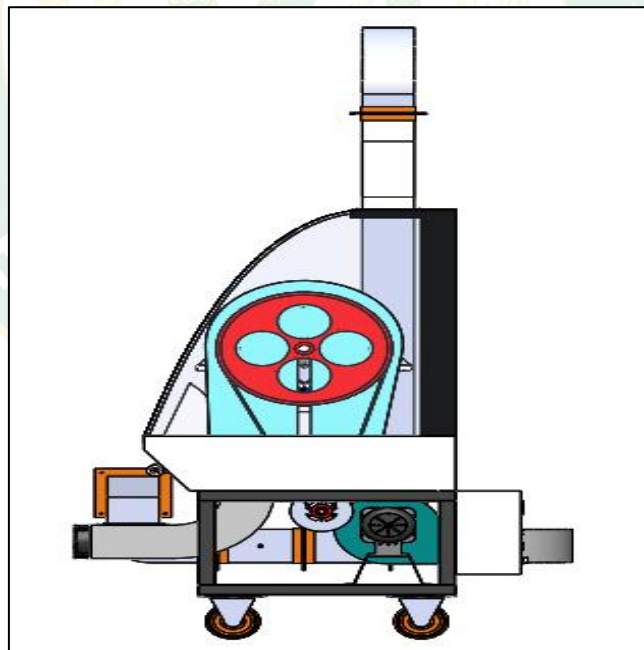
ลักษณะของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบถาดหมุนร่วมกับรังสีอินฟราเรดสำหรับผลิตภัณฑ์ปลา สามารถแสดงได้ดังภาพผนวก ค และภาพที่ 51-54 ดังต่อไปนี้



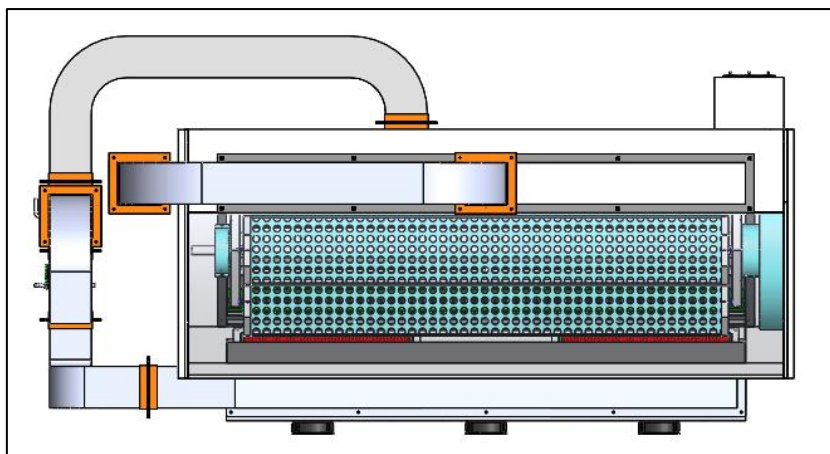
ภาพที่ 51 บริเวณด้านหน้าของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบถาดหมุน



ภาพที่ 52 บริเวณด้านหลังของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบภาคหมุน



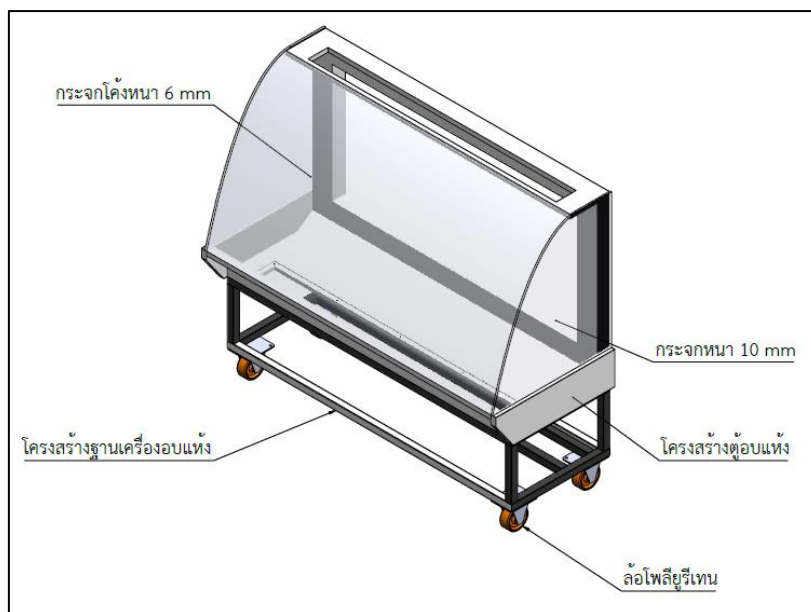
ภาพที่ 53 บริเวณด้านข้างของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบภาคหมุน



ภาพที่ 54 บริเวณด้านบนของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบภาคหมุน

เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบภาคหมุนร่วมกับพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG มีรายละเอียดของโครงสร้างแสดงดังภาคผนวก ค และมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. โครงสร้างฐานของเครื่องอบแห้ง โครงสร้างของเครื่องอบแห้งทำมาจากสแตนเลสทั้งหมด โดยเครื่องอบแห้งดังกล่าวมีรูปทรงเป็นครึ่งพาราโบลภายในห้องอบแห้งปริมาตร 1.18 m^3
2. ผนังของห้องอบแห้ง ภายในห้องอบแห้งได้ออกแบบให้สามารถรับพลังงานแสงอาทิตย์ได้โดยตรง (Natural solar drying) โดยผนังของห้องอบแห้งออกแบบให้เป็นกระจกใสรอบด้านเพื่อให้พลังงานแสงอาทิตย์สามารถทะลุผ่านเข้ามาได้เกือบทั้งหมด บริเวณด้านหน้ากระจกโค้งขนาดความหนา 6 mm และบริเวณด้านข้างเป็นกระจกขนาดความหนา 10 mm โดยลักษณะของโครงสร้างฐานของเครื่องอบแห้งสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 55



ภาพที่ 55 โครงสร้างของเครื่องอบแห้งแบบกาดหมุน

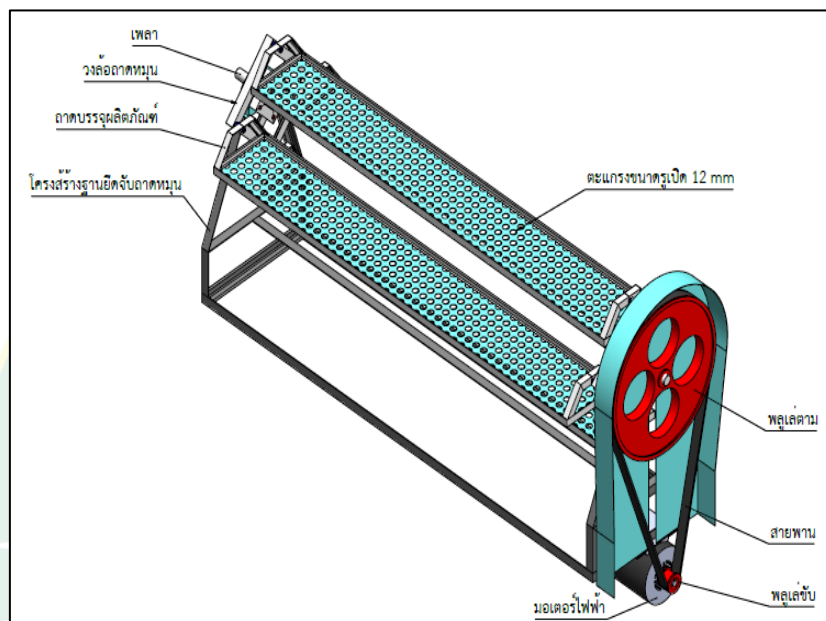
3. โครงสร้างของระบบกาดหมุน กาดวางผลิตภัณฑ์ได้ทำการออกแบบให้เป็นกาดหมุนเพื่อให้ผลิตภัณฑ์สามารถรับพลังงานความร้อนได้อย่างทั่วถึง จากข้อมูลเบื้องต้นพบว่าปลาตุ๊ก 1 ตัว มีน้ำหนักเฉลี่ย 200 g มีขนาดลำตัวกว้าง 7 cm ยาว 15 cm เมื่อกำหนดว่ากาดมีขนาด 25×150 cm เพราะฉะนั้นเมื่อทำการวางแบบสลับฟันปลา ในหนึ่งกาดจะสามารถวางปลาตุ๊กได้เต็มที่ 41 ตัว แต่ในการอบแห้งปลาตุ๊กนั้นจะต้องจัดระยะไม่ให้ปลาตุ๊กวางชิดกันเกินไป เพื่อให้อากาศสัมผัสผิวของปลาตุ๊กมากที่สุด ดังนั้นจึงได้กำหนดช่องว่างระหว่างปลาตุ๊ก 2 cm เพราะฉะนั้นในหนึ่งกาดจะสามารถวางปลาตุ๊กได้เต็มที่ 29 ตัว หรือ 5.8 kg เมื่อต้องการอบแห้งปลาตุ๊กจำนวน 20 kg ต้องมีทั้งหมด 4 กาด จึงจะเพียงพอต่อการวางปลาตุ๊กสำหรับการอบแห้ง โดยกำหนดความเร็วรอบของกาดหมุนคือ 6 rpm

โครงสร้างของระบบกาดหมุนประกอบไปด้วย

- กาดบรรจุผลิตภัณฑ์ที่มีตะแกรงขนาดรูเปิด 12 mm และมีความหนา 0.7 mm
- มุเกลย์ซี่ขนาด 2 nich และมุเกลย์ตามขนาด 16 nich
- สายพาน V-Belts ร่อง A ยาว 36 nich
- มอเตอร์เกียร์ขนาด 1/8 HP แรงดันไฟฟ้า 380 V ขนาดไฟฟ้า 3 เฟส รุ่น CH-S ยี่ห้อ

CPG (ไต้หวัน) และมีอัตราการทดรอบ 1:30 หรือ 50 rpm

- วงลวดถาดหมูนขนาด 23×23 cm ทำมาจากฉากสแตนเลสขนาด 1×1/8 nich และ 1.1/4×1/8 nich
- เพลากลามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3/4 nich และมีความยาว 155 nich
- โครงสร้างถาดยึดจับถาดหมู



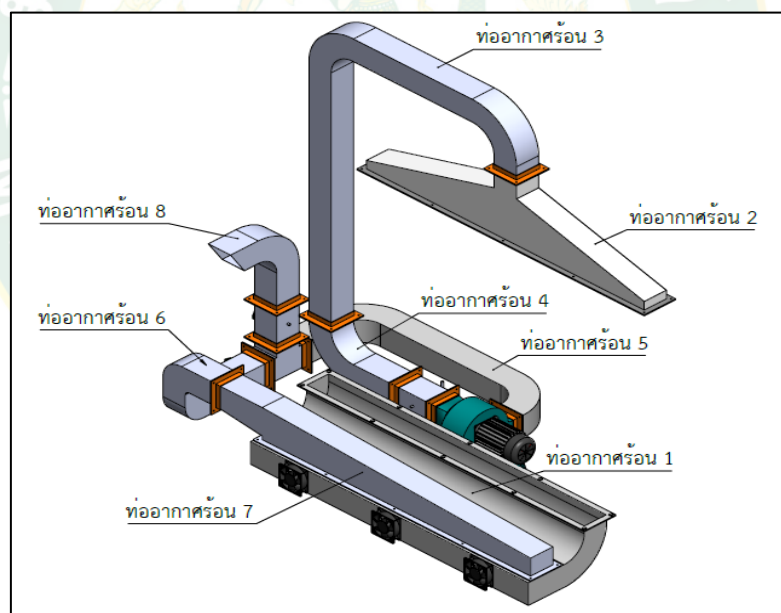
ภาพที่ 56 โครงสร้างของระบบถาดหมู

4. โครงสร้างของระบบท่ออากาศร้อน ระบบท่ออากาศร้อนของเครื่องอบแห้งแบบถาดหมู ถูกออกแบบขึ้นเพื่อทำหน้าที่นำอากาศร้อนเข้าสู่ห้องอบแห้ง อีกทั้งนำอากาศร้อน และความชื้นจากผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการอบแห้งออกจากห้องอบแห้ง โดยระบบดังกล่าวเป็นระบบการไหลเวียนอากาศแบบบังคับโดยใช้พัดลมโบลเวอร์ โครงสร้างของระบบท่ออากาศร้อนสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 57

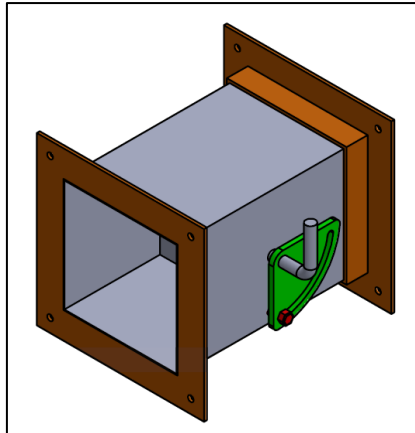
โครงสร้างของระบบท่ออากาศร้อนประกอบไปด้วย

- ท่ออากาศร้อน 1 ทำหน้าที่นำอากาศร้อนเข้าสู่ห้องอบแห้ง โดยอากาศร้อนดังกล่าวมาจากอากาศแวดล้อม และอากาศร้อนที่ผ่านกระบวนการอบแห้งโดยอากาศบางส่วนถูกนำมาใช้ใหม่ในกระบวนการอบแห้ง
- ท่ออากาศร้อน 2 ถึง 5 ทำหน้าที่นำอากาศร้อน และความชื้นจากผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการอบแห้งออกจากห้องอบแห้ง

- ท่ออากาศร้อน 6 และ 7 ทำหน้าที่นำอากาศร้อนบางส่วนที่ผ่านกระบวนการอบแห้งแล้วนำกลับมาใช้ใหม่
- ท่ออากาศ 8 ทำหน้าที่นำอากาศร้อน และความชื้นจากผลิตภัณฑ์บางส่วนออกจากกระบวนการอบแห้ง โดยไม่ถูกนำกลับมาใช้ใหม่
- พัดลมพัดลมโบว์เวอร์ ยี่ห้อVENZ รุ่น SC-164, มอเตอร์ 1/4 HP, ขนาดใบพัด 6 nich ปริมาณลม 423 cfm ทำหน้าที่ดูดอากาศร้อนส่งไปยังห้องอบแห้ง
- พัดลม ขนาด 4.5 nich จำนวน 3 ตัว ทำหน้าที่ดูดอากาศร้อนจากอากาศแวดล้อมส่งไปยังห้องอบแห้ง โดยพัดลมดังกล่าวถูกติดตั้งอยู่บริเวณด้านหน้าของท่ออากาศร้อนตำแหน่งที่ 1
- ลี้นแบ่งลม ทำหน้าที่แบ่งลมเพื่อจะนำอากาศร้อนกลับมาอุ่นอากาศภายในห้องอบแห้ง และทำการแบ่งอากาศที่มีความชื้นทิ้งไป โดยในการศึกษาได้ออกแบบ ให้มีการนำอากาศร้อนที่ผ่านการอบแห้งกลับมาใช้ใหม่ 70-80 % โดยลีนแบ่งลมที่ทำหน้าที่หมุนเวียนอากาศกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการอบแห้งอยู่บริเวณท่ออากาศร้อนที่ 6 และ 8 ดังแสดงในภาพที่ 57



ภาพที่ 57 โครงสร้างของระบบท่ออากาศร้อน



ภาพที่ 58 ถิ้นแปงลมหรือวาร์ลปึกฝืเสื่อ



บทที่ 5

ผลและอภิปรายผลการทดลอง

การวิเคราะห์ผลการทดลองในงานวิจัยนี้สามารถแบ่งออกเป็น 5 ส่วนได้แก่

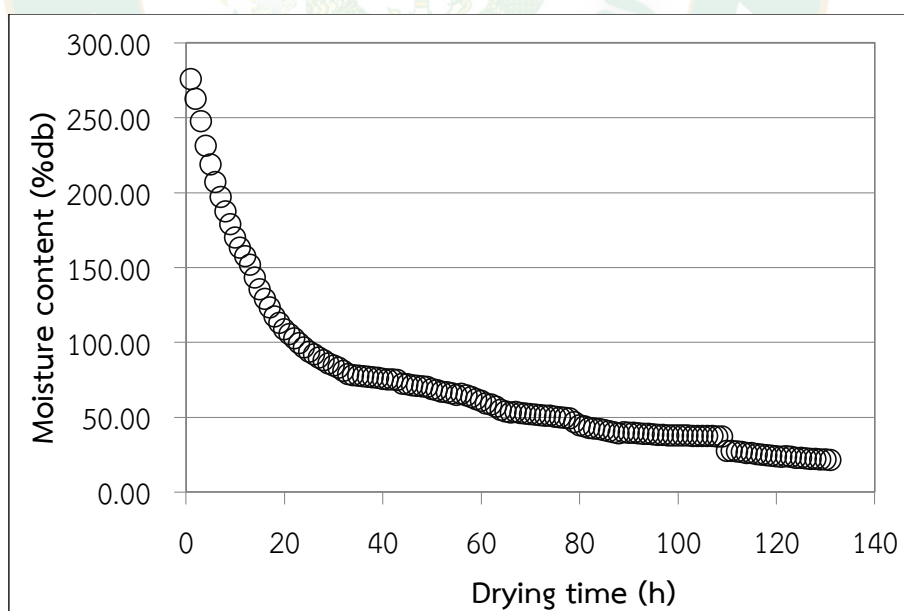
1. การศึกษาวิธีการอบแห้งปลาตากด้วยวิธีการตากแดดตามธรรมชาติ และการศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งเบื้องต้น
2. การวิเคราะห์ผลการทดลองการอบแห้งปลาตากด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุน
 - 2.1. การวิเคราะห์ผลการทดลองการอบแห้งปลาตากโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG
 - 2.2. การวิเคราะห์ผลการทดลองการอบแห้งปลาตากโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG เป็นแหล่งความร้อนเสริมซึ่งใช้หัวเผาแก๊สชนิดอินฟราเรดเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน
 - 2.3. การวิเคราะห์ผลการทดลองการอบแห้งปลาตากโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์
3. การวิเคราะห์ความชื้นสมดุลของวัสดุทดสอบ
4. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง
5. การวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์ปลาภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการอบแห้ง
6. การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์การทดลองอบแห้งปลาตากด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุนโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG ซึ่งใช้หัวเผาแก๊สชนิดอินฟราเรดเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็นการวิเคราะห์เพื่อหาสภาวะเบื้องต้นที่มีความเหมาะสมสำหรับการอบแห้งปลาตาก ทั้งนี้เพื่อกำหนดสภาวะการทำงานของเครื่องอบแห้ง จากนั้นทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าความสิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง ซึ่งใช้แหล่งพลังงานความร้อนที่แตกต่างกัน 3 กรณี ได้แก่ การอบแห้งโดยใช้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG การอบแห้งโดยใช้พลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG เพียงอย่างเดียว และการอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ภายในงานวิจัยได้ทำการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์เพื่อหาความคุ้มค่าในการลงทุนสำหรับการอบแห้งปลาตากด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุนอีกด้วย

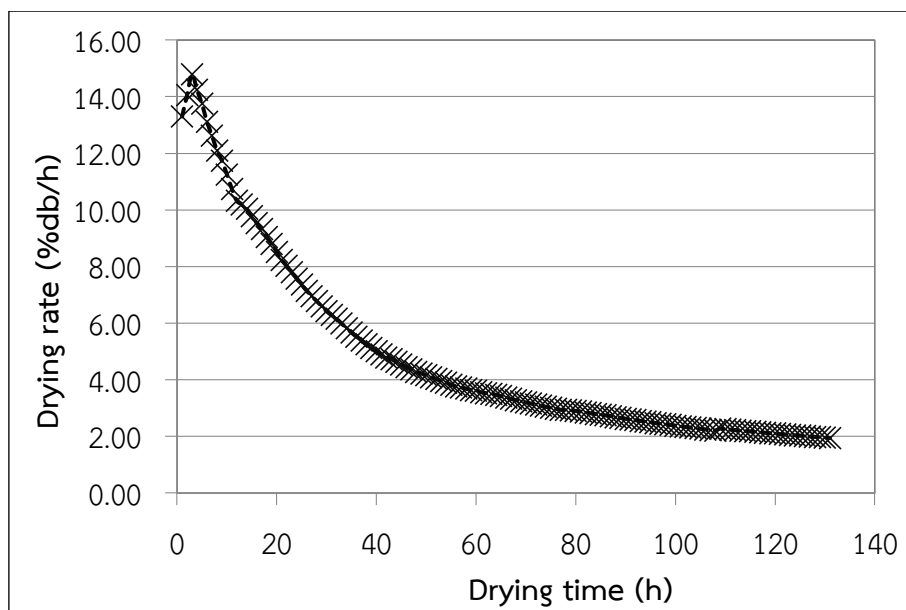
การศึกษาวิธีการทำแห้งปลาตุก และการศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง

1. การศึกษาวิธีการทำแห้งปลาตุกด้วยวิธีการตากแดดตามธรรมชาติ

การศึกษาวิธีการทำแห้งปลาตุกด้วยวิธีการตากแดดทำการทดลองโดยการนำปลาตุกที่ผ่านกระบวนการแปรรูปแล้วมาตากแดดในพื้นที่โล่งแจ้งตั้งแต่เวลา 8.00-18.00 น. เป็นระยะเวลา 10 h โดยมีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ย 580.21 W/m^2 อุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ย $32.87 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และความชื้นอากาศสัมพัทธ์เฉลี่ย 36.59% จากผลการทดลองพบว่า การนำปลาตุกจำนวน 10.110 kg มีความชื้นเริ่มต้น 275.56%db มาตากแดดกลางแจ้งจะใช้ระยะเวลาในการทำแห้ง 131 h หรือ 13 วัน เพื่อให้ปลาตุกมีความชื้นสุดท้ายลดลงเหลือ 20%db. และน้ำหนักสุดท้ายคงเหลือ 3.199 kg จากผลการพิจารณาค่าความชื้นที่ลดลง และอัตราการทำแห้งปลาตุกพบว่า ความชื้น และอัตราการทำแห้งจะแปรผกผันกับระยะเวลา กล่าวคือ เมื่อระยะเวลาในการทำแห้งเพิ่มมากขึ้นค่าความชื้นในวัสดุทดสอบ และอัตราการทำแห้งผลิตภัณฑ์จะมีค่าลดลง (ณัฐกิตติ์ และคณะ, 2554) จากการทดลองข้างต้นการทำแห้งปลาตุกด้วยวิธีการนำมาตากแดดตามธรรมชาติมีอัตราการทำแห้งเฉลี่ย $1.95\% \text{ db/h}$ หรือ $0.053 \text{ kg H}_2\text{O evap/h}$ โดยผลการพิจารณาการลดลงของความชื้น และอัตราการทำแห้งปลาตุกแสดงในภาพที่ 59 และ 60

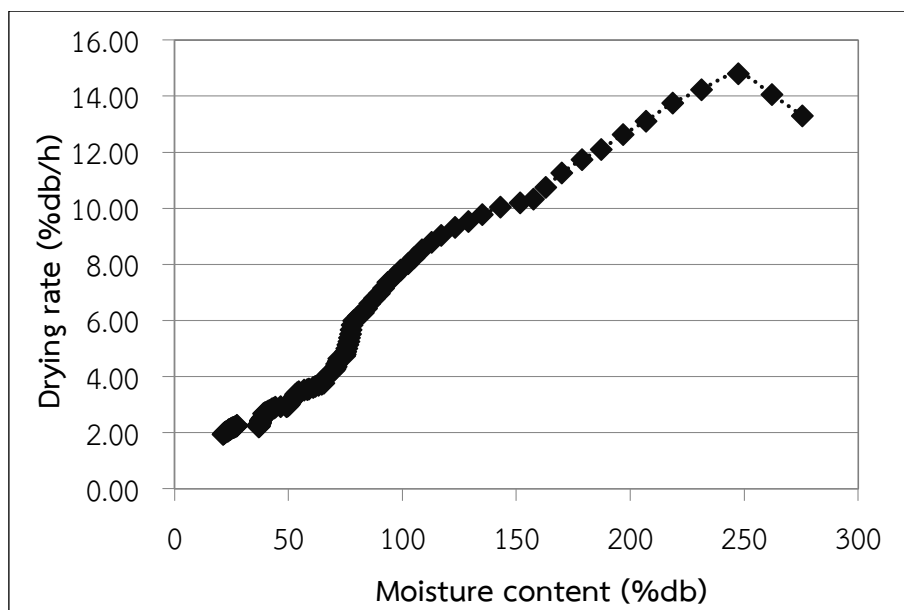


ภาพที่ 59 การลดลงของความชื้นเทียบกับเวลาเมื่อทำแห้งปลาตุกด้วยวิธีการตากแดด



ภาพที่ 60 อัตราการทำแห้งเทียบกับเวลาเมื่อทำแห้งปลาตุกด้วยวิธีการตากแดด

การวิเคราะห์อัตราการทำแห้งเทียบกับการลดลงของความชื้น เมื่อทำแห้งปลาตุกด้วยวิธีการตากแดดตามธรรมชาติพบว่า อัตราการทำแห้งจะแปรผันตรงกับการลดลงของความชื้นกล่าวคือ ในช่วงแรกของการนำปลาตุกมาตากแดดในพื้นที่โล่งแจ้งนั้นจะมีอัตราการทำแห้งในปริมาณมาก เนื่องจากภายในปลาตุกมีปริมาณความชื้นสูง ดังนั้นความต้องการระเหยน้ำออกจากวัสดุทดสอบจึงมีปริมาณมาก เมื่อระยะเวลาผ่านไปภายในวัสดุทดสอบมีค่าความชื้นลดน้อยลงจึงส่งผลให้ความต้องการระเหยน้ำออกจากวัสดุทดสอบมีปริมาณที่น้อยลงไปด้วย (นพพร และคณะ, 2559) ผลการวิเคราะห์อัตราการทำแห้งเทียบกับการลดลงของความชื้นแสดงดังภาพที่ 61



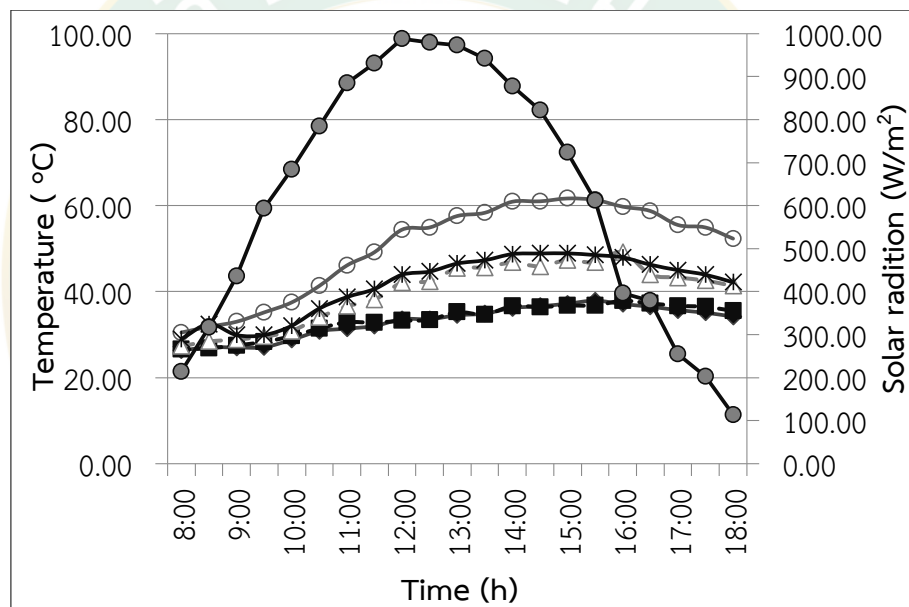
ภาพที่ 61 อัตราการทำแห้งเทียบกับการลดลงของความชื้นเมื่อทำแห้งปลาตากด้วยวิธีการตากแดด

2. การศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งเบื้องต้น

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ เทียบกับค่าความเข้มรังสีอาทิตย์รายชั่วโมงของการทดสอบการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งดังแสดงในภาพที่ 62 การทดลองจะนำเครื่องอบแห้งแบบภาดหมุนมาทดสอบในพื้นที่โล่งแจ้ง โดยมีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ย 624.17 W/m^2 อุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ย $33.03 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และความชื้นเฉลี่ย 27.76% จากผลการทดลองพบว่า แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ มีความสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ได้แก่ เมื่อค่าความเข้มรังสีอาทิตย์มีค่าเพิ่มสูงขึ้นอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตาม (อนิรุทธิ์ และสมบัติ, ม.ป.ป.) จากภาพที่ 62 แสดงให้เห็นว่าช่วงเวลา 13.00-18.00 น. ความเข้มรังสีอาทิตย์มีค่าลดลงแต่ในขณะเดียวกัน อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ มีค่าเพิ่มสูงขึ้นทั้งนี้เนื่องมาจากการสะสมพลังงานความร้อนในช่วงเวลา 8.00-13.00 น. (สำรวย และวัลย์รัตน์, 2558) และมีการคายพลังงานความร้อนออกมาในช่วงเวลา 13.00-18.00 น.

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ พบว่า อุณหภูมิอากาศแวดล้อม และอุณหภูมิบริเวณทางเข้าของเครื่องอบแห้งมีอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกันได้แก่ 33.30 และ $33.48 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ของอุณหภูมิอากาศแวดล้อม และอุณหภูมิบริเวณทางเข้าตามลำดับ โดยอุณหภูมิอากาศบริเวณด้านล่างของห้องอบแห้งมีอุณหภูมิต่ำกว่า อุณหภูมิอากาศบริเวณด้านบนของห้องอบแห้งซึ่งมีผลต่างระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ย $10.46 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ทั้งนี้เนื่องมาจากการลอยตัวของอากาศร้อนที่มีความหนาแน่นต่ำ (อนิรุทธิ์ และสมบัติ, ม.ป.ป.) อุณหภูมิอากาศบริเวณด้านล่าง และด้านบนของห้องอบแห้งมีอุณหภูมิเฉลี่ย 39.83 และ

50.26 °C ตามลำดับ โดยภายในห้องอบแห้งมีอุณหภูมิเฉลี่ย 45.06 °C และความชื้นเฉลี่ย 20.83% หากต้องการอบแห้งด้วยอุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C การใช้เครื่องอบแห้งแบบถาดหมุนโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์จะสามารถทดแทนการใช้พลังงานสิ้นเปลืองได้ 90.12 75.1 และ 64.37% ของการอบแห้งด้วยอุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C ตามลำดับ โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C สามารถใช้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ทดแทนการใช้พลังงานสิ้นเปลืองได้มากที่สุด ทั้งนี้ในการกำหนดสภาวะการทำงานของเครื่องอบแห้งที่เหมาะสมต้องพิจารณาถึงผลต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศบริเวณด้านล่าง และด้านบนของห้องอบแห้งด้วย เพื่อให้วัสดุทดสอบในถาดหมุนสัมผัสกับอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกันอย่างสม่ำเสมอ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาอุณหภูมิที่ทางออกของห้องอบแห้งพบว่า มีอุณหภูมิเฉลี่ย 41.53 °C และมีความชื้นเฉลี่ย 46.92%



ภาพที่ 62 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในห้องอบแห้งเบื้องต้น

เมื่อ

- | | | | |
|---|---|---|---|
| ◆ | อุณหภูมิอากาศแวดล้อม (°C) | ■ | อุณหภูมิอากาศทางเข้า (°C) |
| △ | อุณหภูมิอากาศบริเวณด้านล่างของห้องอบแห้ง (°C) | ○ | อุณหภูมิอากาศบริเวณด้านบนของห้องอบแห้ง (°C) |
| ✱ | อุณหภูมิอากาศทางออก (°C) | ● | ความเข้มรังสีอาทิตย์ (W/m ²) |

การวิเคราะห์ผลการทดลองการอบแห้งปลาตากด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุน

การทดลองอบแห้งปลาตากที่ผ่านกระบวนการแปรรูป ผู้วิจัยจะทำการบรรจุปลาตากลงในถาดวางผลิตภัณฑ์เพียงบางส่วน เนื่องจากเป็นการทดลองเพื่อหาอุณหภูมิ และอัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งเบื้องต้น วิธีการทดลองอบแห้งดังกล่าวเป็นการอบแห้งแบบต่อเนื่อง กำหนดให้ถาดหมุนมีความเร็วรอบ 6 rpm โดยในการทดลองมีตัวแปรที่ควบคุม 2 ตัวแปร คือ

- อัตราการไหลของอากาศ ได้แก่ 0.032 0.049 และ 0.063 m³/s
- อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง ได้แก่ 50 60 และ 70 °C

ในขั้นตอนการทดลองเพื่อกำหนดสภาวะการทำงานของเครื่องอบแห้งที่เหมาะสมจะทำการอบแห้งปลาตากที่มีน้ำหนักเริ่มต้น 10 kg และความชื้นเริ่มต้น 275.56%db จนมีความชื้นสุดท้ายคงเหลือ 20%db เมื่อพิจารณาถึงปัจจัยของอัตราการไหลของอากาศที่มีผลต่อกระบวนการอบแห้งพบว่า ที่อุณหภูมิเดียวกันเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจะส่งผลให้มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่อุณหภูมิเดียวกันเมื่อพิจารณาที่อัตราการไหลของอากาศเดียวกันหากอุณหภูมิอบแห้งเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเพิ่มมากขึ้นตาม จากผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 7 พบว่า ที่อุณหภูมิตอบแห้ง 70 °C และอัตราการไหลของอากาศ 0.063 m³/s มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสูงที่สุดได้แก่ 48.93 MJ/kg H₂O evap และที่อุณหภูมิตอบแห้ง 50 °C อัตราการไหลของอากาศ 0.032 m³/s มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยที่สุดได้แก่ 19.91 MJ/kg H₂O evap

เนื่องจากเครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดลองต้องทำการควบคุมอุณหภูมิ และการปรับอัตราการไหลของแก๊ส LPG โดยการปรับด้วยมือ ดังนั้นจึงได้ทำการพิจารณาถึงความเป็นไปได้ทางเทคนิคของการใช้งานซึ่งปัจจัยที่มีความสำคัญต้องพิจารณาได้แก่ อุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ ได้แก่ อุณหภูมิบริเวณด้านล่าง และอุณหภูมิบริเวณด้านบน ซึ่งถาดวางผลิตภัณฑ์ถูกออกแบบให้สัมผัสกับอุณหภูมิทั้ง 2 ตำแหน่ง ความร้อนภายในห้องอบแห้งจะลอยตัวขึ้นด้านบนส่งผลให้บริเวณด้านบนของห้องอบแห้งมีอุณหภูมิที่สูงกว่าบริเวณด้านล่าง ดังนั้นจึงต้องทำการพิจารณาถึงผลต่างระหว่างอุณหภูมิ และอัตราการไหลของอากาศที่มีความเหมาะสมจากผลการทดลองพบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C มีผลต่างระหว่างอุณหภูมิของบริเวณด้านล่าง และบริเวณด้านบนภายในห้องอบแห้งเฉลี่ย 10.55 °C กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิบริเวณด้านล่างถูกควบคุมที่ 50 °C บริเวณด้านบนจะมีอุณหภูมิไม่น้อยกว่า 60 °C อีกทั้งเมื่อทำการปิดหัวเผาแก๊สชนิดอินฟราเรดส่งผลให้อุณหภูมิบริเวณด้านล่างของห้องอบแห้งมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่กำหนด และลดลงอย่างรวดเร็วทำให้การอบแห้งไม่สม่ำเสมอ เนื่องมาจากความหนาแน่นของอากาศที่แตกต่างกัน 2 บริเวณ (อนิรูทธ์ และสมบัติ, ม.ป.ป.) เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิตอบแห้งเดียวกันพบว่า เมื่ออัตราการไหลอากาศ

เพิ่มมากขึ้นผลต่างระหว่างอุณหภูมิจะมีค่าน้อยลง โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C ที่อัตราการไหลอากาศ 0.032 0.049 และ 0.063 m³/s มีผลต่างระหว่างอุณหภูมิ 8.97 5.43 และ 5.68 °C ตามลำดับ และการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 °C อัตราการไหลอากาศ 0.032 0.049 และ 0.063 m³/s มีผลต่างระหว่างอุณหภูมิ 8.41 5.36 และ 5.95 °C ตามลำดับ จากผลการทดลองข้างต้นพบว่า อัตราการไหลของอากาศที่มีความเหมาะสมสำหรับกระบวนการอบแห้งในช่วงอุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C ได้แก่ 0.049 m³/s

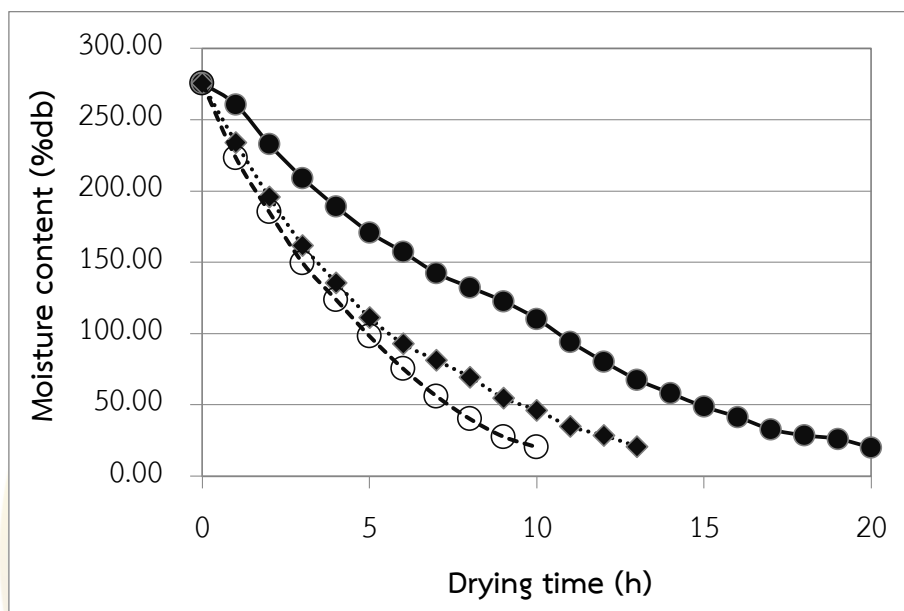
ตารางที่ 7 ผลวิเคราะห์อัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสมสำหรับเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุน

T (°C)	\dot{m}_a (m ³ /s)	t (h)	W _i (kg)	M _i (%db)	W _f (kg)	M _f (%db)	Drying rate (kg H ₂ O evap/h)	SEC (MJ/kg H ₂ O evap)
50	0.032	20.00	10.080	275.56	3.206	20.53	0.34	19.91
	0.049	18.00	10.039	275.56	3.198	20.23	0.38	26.54
	0.063	17.00	10.045	275.56	3.210	20.68	0.40	32.93
60	0.032	14.00	10.050	275.56	3.193	20.05	0.49	29.39
	0.049	13.00	10.062	275.56	3.217	20.94	0.53	36.63
	0.063	11.00	10.075	275.56	3.214	20.83	0.62	46.42
70	0.032	13.00	10.087	275.56	3.194	20.08	0.69	28.40
	0.049	9.00	10.067	275.56	3.205	20.49	0.76	37.51
	0.063	9.00	10.102	275.56	3.213	20.79	0.77	48.93

เมื่อพิจารณาถึงระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง คุณภาพของผลิตภัณฑ์ภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการ และปริมาณพลังงานสิ้นเปลืองที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งจากผลการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิเดียวกันเมื่ออัตราการไหลอากาศเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้การใช้พลังงานสิ้นเปลืองในกระบวนการอบแห้งสูงขึ้นตามสอดคล้องกับการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา (ประทีป และคณะ, 2555) เมื่อพิจารณาการอบแห้งปลาตุ๋กที่อุณหภูมิตั้งที่ตลอดเวลาดังภาพที่ 63 และตารางที่ 8 พบว่า ปลาตุ๋ก

ที่ได้จากการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 °C จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นที่สุด ได้แก่ 10 h มีอัตราการอบแห้งมากที่สุด 0.70 kg H₂O evap/h แต่ในขณะเดียวกันปริมาณพลังงานสิ้นเปลืองที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งมีค่ามากตามไปด้วย ได้แก่ 35.64 MJ/kg H₂O evap นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ปลาแห้งที่ได้ยังมีลักษณะแข็ง และผิวสัมผัสของผลิตภัณฑ์มีความขรุขระเป็นรูพรุน ทั้งนี้เนื่องจากปลาถูกเป็นปลาที่มีไขมันเป็นส่วนใหญ่ (เพชรรัตน์ และคณะ, 2550) ดังนั้นเมื่อทำการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานจะทำให้เกิดการปะทุของน้ำมันออกมาที่ผิวของเนื้อปลาเช่นเดียวกับการนำปลาไปทอด เมื่อพิจารณาการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C ใช้ระยะเวลาในการอบแห้ง ได้แก่ 13 h มีอัตราการอบแห้ง 0.53 kg H₂O evap/h และปริมาณพลังงานสิ้นเปลืองที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง ได้แก่ 29.39 MJ/kg H₂O evap นอกจากนี้จะได้ผลิตภัณฑ์ปลาแห้งที่มีคุณภาพใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ปลาแห้งที่มีจำหน่ายทั่วไปตามท้องตลาด (เสกสรรค์ และคณะ, 2551) ทั้งนี้เมื่อทำการวิเคราะห์อัตราการอบแห้งของปลาดุกในชั่วโมงต่างๆ พบว่า ปลาดุกจะมีอัตราการระเหยน้ำที่ต่ำมาก และเมื่อพิจารณาการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C พบว่า จะใช้ระยะเวลาการอบแห้งนานที่สุด ได้แก่ 20 h โดยมีอัตราการอบแห้งน้อยที่สุด ได้แก่ 0.35 kg H₂O evap/h แต่ในขณะเดียวกันการอบแห้งในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวสามารถประหยัดปริมาณพลังงานสิ้นเปลืองที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งได้มากที่สุด ได้แก่ 19.92 MJ/kg H₂O evap แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีกลิ่นคาว (อีลีหัยะ และคณะ, 2556) จากผลการทดลองดังภาพที่ 63 และตารางที่ 8 แสดงให้เห็นว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C ไม่มีความเหมาะสมในการกำหนดเป็นเงื่อนไขในการอบแห้ง ทั้งนี้เนื่องมาจากความซับซ้อนทางด้านเทคนิคของการทำงานของเครื่องอบแห้ง รวมไปถึงปัจจัยของระยะเวลา คุณภาพของผลิตภัณฑ์ภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการ และปริมาณพลังงานสิ้นเปลืองที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง จากภาพที่ 63 สังเกตได้ว่าที่อุณหภูมิอบแห้ง 60 และ 70 °C ในช่วง 5 h แรก ปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์ลดลงอย่างรวดเร็ว และในช่วงหลังของการอบแห้งปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์จะลดลงอย่างช้าๆ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้กำหนดเงื่อนไขการอบแห้งโดยแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ ทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 °C ในช่วงแรก และอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C ในช่วงหลัง ดังแสดงในภาพที่ 64 จากผลการทดสอบพบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 °C ในช่วงแรกเป็นระยะเวลา 5 h ผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นเริ่มต้น 275.56%db มีความชื้นลดลงเหลือ 123.63 %db มีอัตราการอบแห้ง ได้แก่ 0.81 kg H₂O evap/h และปริมาณพลังงานสิ้นเปลืองที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง ได้แก่ 10.10 MJ/kg H₂O evap ในขณะที่การอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C ในช่วงหลังเป็นระยะเวลา 8 h ผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้น 123.63%db เมื่อเวลาดำเนินผ่านไปจะมีความชื้นลดลงเหลือ 20.87%db มีอัตราการอบแห้ง ได้แก่ 0.34 kg H₂O evap/h และปริมาณพลังงานสิ้นเปลืองที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง ได้แก่ 16.88 MJ/kg H₂O evap โดยตลอดทั้งกระบวนการใช้ระยะเวลาในการอบแห้งทั้งหมด 13 h มีอัตราการอบแห้ง ได้แก่ 0.52 kg H₂O evap/h และปริมาณพลังงานสิ้นเปลืองที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง ได้แก่ 26.98 MJ/kg H₂O evap

เมื่อเปรียบเทียบการใช้พลังงานสิ้นเปลืองจำเพาะในกระบวนการอบแห้งพบว่า เมื่อแบ่งการอบแห้งออกเป็น 2 ช่วงส่งผลให้สามารถประหยัดปริมาณพลังงานสิ้นเปลืองจำเพาะได้มากกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิคงที่ตลอดเวลา จากผลการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมดังกล่าวสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 8 ดังต่อไปนี้



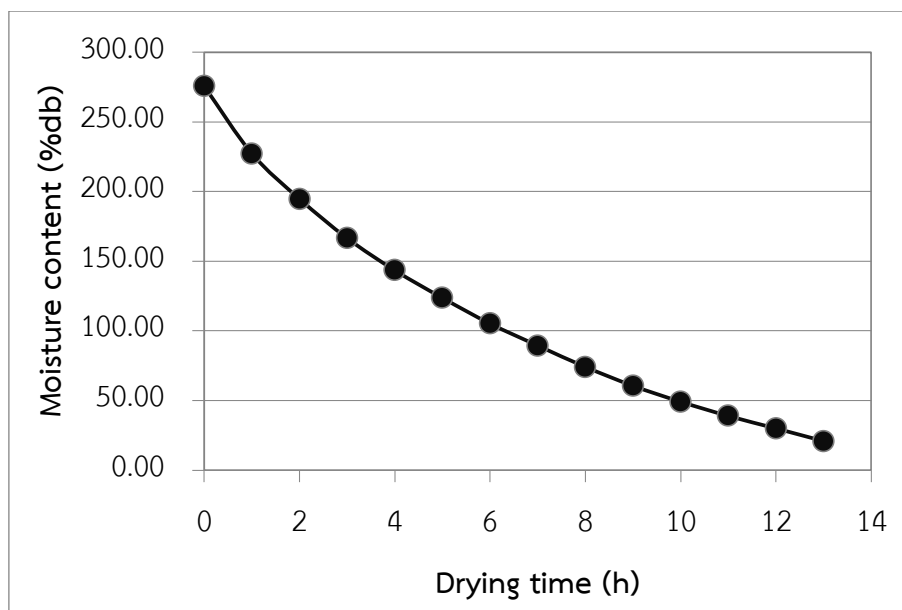
ภาพที่ 63 การลดลงของความชื้นเมื่ออบแห้งปลาตุกที่อุณหภูมิคงที่ตลอดเวลา

เมื่อ

● อุณหภูมิอบแห้ง 50 °C

◆ อุณหภูมิอบแห้ง 60 °C

○ อุณหภูมิอบแห้ง 70 °C



ภาพที่ 64 การลดลงของความชื้นเมื่อแบ่งการอบแห้งออกเป็น 2 ช่วง

ตารางที่ 8 ผลวิเคราะห์สภาวะการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุนที่เหมาะสม

T (°C)	\dot{m}_a (m ³ /s)	t (h)	W _i (kg)	M _i (%db)	W _f (kg)	M _f (%db)	Drying rate (kg H ₂ O evap/h)	SEC (MJ/kg H ₂ O evap)
พิจารณาอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งที่เหมาะสม								
50	0.049	20.00	10.078	275.56	3.193	20.07	0.35	19.92
60	0.049	13.00	10.067	275.56	3.201	20.74	0.53	29.39
70	0.049	10.00	10.101	275.56	3.197	20.33	0.70	35.64
พิจารณาเงื่อนไขที่เหมาะสมเมื่อแบ่งการอบแห้งออกเป็น 2 ช่วง								
70	0.049	5.00	10.015	275.56	5.963	123.63	0.81	10.10
60	0.049	8.00	5.963	123.63	3.223	20.87	0.34	16.88

จากผลการทดลองอบแห้ง และการพิจารณาความเป็นไปได้ทางเทคนิคข้างต้นจึงได้กำหนดเงื่อนไขการอบแห้งโดยแบ่งการอบแห้งออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ ทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 °C ในช่วงแรก และอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C ในช่วงหลัง โดยผลิตภัณฑ์ปลาแห้งที่ได้จะมีคุณภาพตรงตามที่ต้องการ และใช้ปริมาณพลังงานสิ้นเปลืองน้อยลง ซึ่งเงื่อนไขของการอบแห้งปลาคูมีดังนี้

- อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งปลาคูจะทำการแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือ ทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 °C ในช่วงแรกเป็นระยะเวลา 5 h และอบแห้งปลาคูที่อุณหภูมิ 60 °C ในช่วงหลังเป็นระยะเวลา 8 h

- อัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งที่เหมาะสม สำหรับการอบแห้งปลาคูด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุนคือ 0.049 m³/s

เมื่อได้เงื่อนไขของอุณหภูมิ และอัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งปลาคูแล้วนั้น ตัวแปรสำคัญที่ต้องทำการพิจารณาต่อไปได้แก่ การนำอากาศที่ผ่านกระบวนการอบแห้งแล้วกลับมาใช้ใหม่ โดยในการทดลองจะพิจารณาอัตราการนำอากาศกลับมาใช้ใหม่ 3 สภาวะได้แก่ 60 70 และ 80% เมื่อพิจารณาอัตราส่วนการนำอากาศกลับมาใช้ใหม่พบว่า เมื่อนำอากาศกลับมาใช้ใหม่ในปริมาณที่มากจะส่งผลให้ปริมาณพลังงานสิ้นเปลืองที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งมีปริมาณลดน้อยลง (สวัสดี และเรวัต, 2557; อีลีหย๊ะ และคณะ, 2556) โดยจะพิจารณาถึงปริมาณการใช้แก๊ส LPG และปริมาณพลังงานไฟฟ้าจากผลการทดลองพบว่า อัตราการนำอากาศกลับมาใช้ใหม่ 80% ของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งทั้งหมดมีปริมาณการใช้พลังงานสิ้นเปลืองน้อยที่สุดคือ 24.06 MJ/kg H₂O evap ในขณะที่การนำอากาศกลับมาใช้ใหม่ 60 และ 70% มีการใช้พลังงานสิ้นเปลือง 37.84 และ 25.82 MJ/kg H₂O evap ตามลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบการอบแห้งที่มีการปล่อยอากาศทิ้ง 100% พบว่า การอบแห้งที่มีอัตราการนำอากาศกลับมาใช้ใหม่ 80% สามารถประหยัดพลังงานสิ้นเปลืองที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งได้ถึง 57.35% โดยคุณภาพของผลิตภัณฑ์ปลาแห้งภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการมีคุณภาพตามที่ต้องการ (สวัสดี และเรวัต, 2557) อีกทั้งผลต่างระหว่างอุณหภูมิบริเวณด้านล่าง และด้านบนภายในห้องอบแห้งมีผลต่างระหว่างอุณหภูมิ 4.22 °C ส่งผลให้ปลาคูภายในถาดหมุนสัมผัสกับอุณหภูมิอากาศที่ใกล้เคียงกันอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นสภาวะการอบแห้งที่ดีที่สุดของเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุนโดยใช้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG ซึ่งใช้หัวเผาแก๊สชนิดอินฟราเรดเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนคือ กำหนดอัตราการไหลของอากาศ 0.049 m³/s อบแห้งที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 5 h และอบแห้งปลาคูที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 8 h รวมทั้งสิ้น 13 h และอัตราการนำอากาศกลับมาใช้ใหม่ 80% ของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งทั้งหมด โดยผลิตภัณฑ์ปลาแห้งที่ได้จากการอบแห้งที่สภาวะดังกล่าว เนื้อสัมผัสจะมีความขรุขระน้อย ไม่มีกลิ่นคาว และมีสีน้ำตาลเหลือง ซึ่งตรงกับลักษณะของผลิตภัณฑ์

ปลาแห้งที่มีจำหน่ายตามท้องตลาด จากผลการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมดังกล่าวสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 9

เงื่อนไขการอบแห้งดังกล่าวจะนำไปพิจารณาการอบแห้งปลาตากที่มีน้ำหนักเริ่มต้น 20 kg ความชื้นเริ่มต้น 275.56%db ทำการอบแห้งจนมีความชื้นสุดท้ายคงเหลือ 20%db และกำหนดความเร็วรอบของพัดลม 6 rpm โดยนำไปใช้พิจารณาการทดลองอบแห้งที่แตกต่างกัน 3 สภาวะได้แก่

1) การทดลองการอบแห้งปลาตากโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG

2) การทดลองการอบแห้งปลาตากโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG ซึ่งใช้หัวเผาแก๊สชนิดอินฟราเรดเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

3) การทดลองการอบแห้งปลาตากโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์

ตารางที่ 9 ผลวิเคราะห์อัตราการนำอากาศกลับมาใช้ใหม่ที่เหมาะสมกับการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบพัดลม

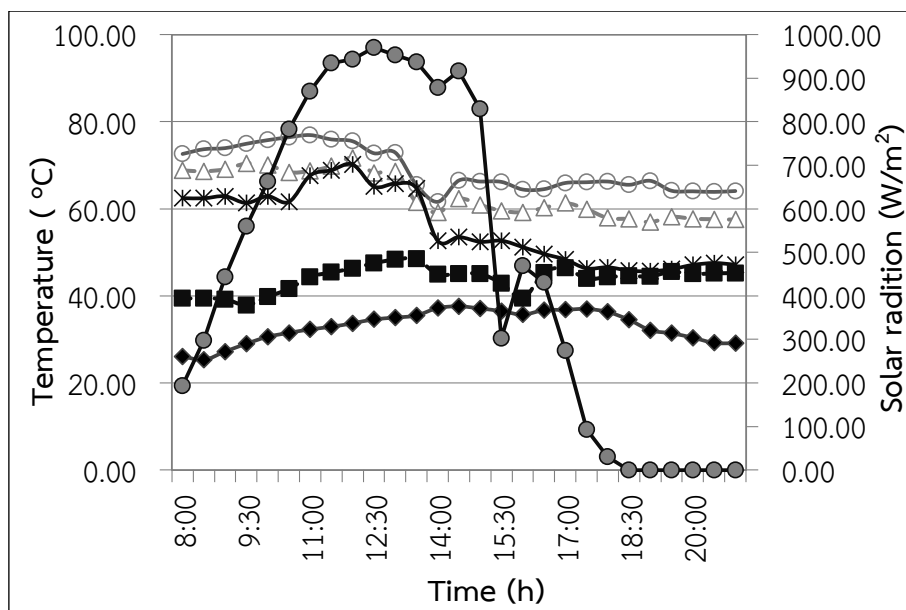
Recycle (%)	t (h)	W_i (kg)	M_i (%db)	W_f (kg)	M_f (%db)	Drying rate (kg H ₂ O evap/h)	SEC (MJ/kg H ₂ O evap)
0	13	10.115	275.56	3.213	20.79	0.53	41.95
60	13	10.098	275.56	3.197	20.19	0.53	37.84
70	13	10.067	275.56	3.201	20.34	0.53	25.82
80	13	10.103	275.56	3.195	20.11	0.53	24.06

1. การวิเคราะห์ผลการทดลองการอบแห้งปลาตุกโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG

การอบแห้งปลาตุกที่มีน้ำหนักเริ่มต้น 20 kg และใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG ซึ่งใช้หัวเผาแก๊สชนิดอินฟราเรดเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน การทดลองดังกล่าวอยู่ภายใต้เงื่อนไขของการอบแห้งที่เหมาะสมได้แก่ ทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 °C ในช่วงแรกจำนวน 5 h และอบแห้งปลาตุกที่อุณหภูมิ 60 °C ในช่วงหลังจำนวน 8 h กำหนดอัตราการไหลของอากาศคือ 0.049 m³/s และอัตราการนำอากาศนำมาใช้ใหม่ 80% แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ เทียบกับค่าความเข้มรังสีอาทิตย์รายชั่วโมงดังแสดงในภาพที่ 67 ผู้วิจัยทำการทดลองตั้งแต่วันที่ 8.00 - 21.00 น. เป็นระยะเวลา 13 h ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ย 472.87 W/m² อุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ย 33.01 °C จากผลการทดลองพบว่า เมื่อค่าความเข้มรังสีอาทิตย์มีค่าเพิ่มสูงขึ้นอุณหภูมิอากาศแวดล้อมจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามในขณะที่อุณหภูมิภายในห้องอบแห้งสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ตามที่ต้องการ (เกรียงไกร และคณะ, 2554)

พิจารณาอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 65 พบว่า อุณหภูมิบริเวณทางเข้าของเครื่องอบแห้งมีอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำที่สุดได้แก่ 43.89 °C ดังที่กล่าวไว้ข้างต้นว่าการอบแห้งจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง เมื่อพิจารณาการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 °C พบว่า อุณหภูมิอากาศบริเวณด้านล่างและอุณหภูมิอากาศบริเวณด้านบนของห้องอบแห้งมีผลต่างระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ย 5.37 °C ทั้งนี้เนื่องมาจากการลอยตัวของอากาศร้อน ซึ่งอุณหภูมิอากาศบริเวณด้านล่าง และด้านบนของห้องอบแห้งมีอุณหภูมิเฉลี่ย 69.29 และ 74.66 °C ตามลำดับ โดยมีอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งเฉลี่ย 71.98 °C เมื่อพิจารณาอุณหภูมิที่ทางออกของห้องอบแห้งพบว่า มีอุณหภูมิเฉลี่ย 64.63 °C

เมื่อพิจารณาการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C พบว่า อุณหภูมิอากาศบริเวณด้านล่าง และอุณหภูมิอากาศบริเวณด้านบนของห้องอบแห้งมีผลต่างระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ย 5.87 °C ซึ่งอุณหภูมิอากาศบริเวณด้านล่าง และด้านบนของห้องอบแห้งมีอุณหภูมิเฉลี่ย 59.21 และ 65.07 °C ตามลำดับ โดยมีอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งเฉลี่ย 62.14 °C เมื่อพิจารณาอุณหภูมิที่ทางออกของห้องอบแห้งพบว่า มีอุณหภูมิเฉลี่ย 49.83 °C



ภาพที่ 65 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของการอบแห้งปลาตาก
โดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนร่วม

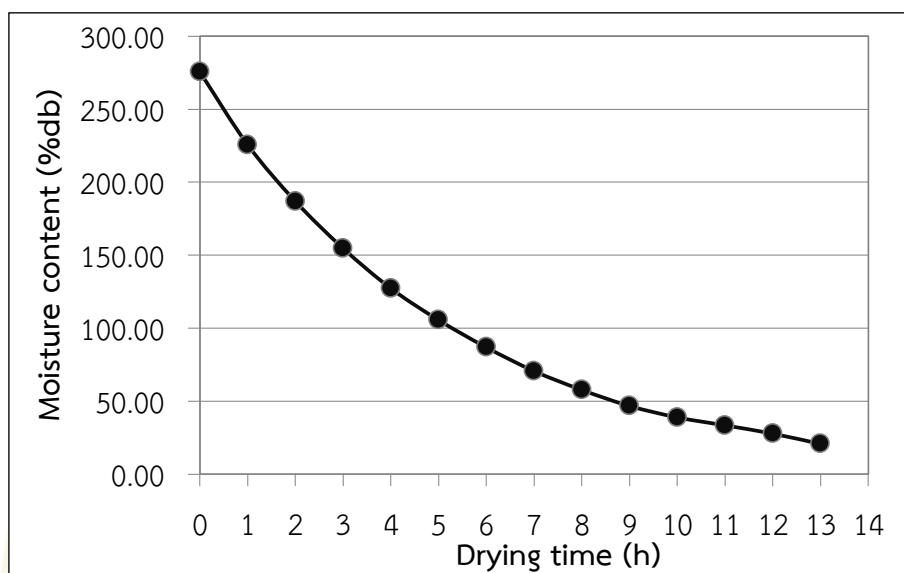
เมื่อ

- | | | | |
|---|---|---|---|
| ◆ | อุณหภูมิอากาศแวดล้อม (°C) | ■ | อุณหภูมิอากาศทางเข้า (°C) |
| △ | อุณหภูมิอากาศบริเวณด้านล่างของ
ห้องอบแห้ง (°C) | ○ | อุณหภูมิอากาศบริเวณด้านบนของ
ห้องอบแห้ง (°C) |
| ✱ | อุณหภูมิอากาศทางออก (°C) | ● | ความเข้มรังสีอาทิตย์ (W/m ²) |

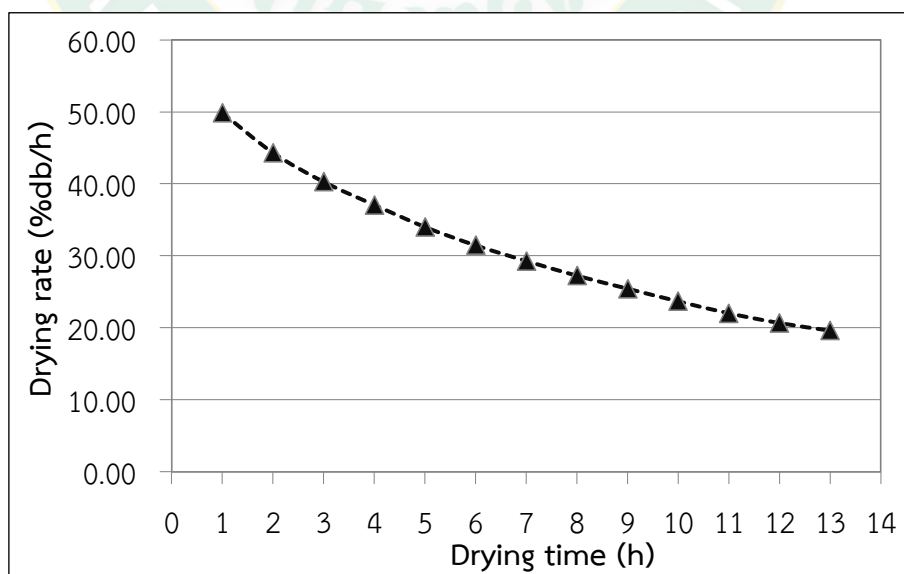
พิจารณาการลดลงของความชื้น และอัตราการอบแห้งปลาตากเทียบกับระยะเวลาดังแสดงใน
ภาพที่ 66 และ 67 จากผลการทดลองพบว่า การนำปลาตากที่มีน้ำหนักเริ่มต้น 20.125 kg ความชื้น
เริ่มต้น 275.56%db มาผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุนภายหลังเสร็จสิ้น
กระบวนการปลาตากดังกล่าวมีน้ำหนักสุดท้ายคงเหลือ 6.415 kg และความชื้นสุดท้ายคงเหลือ
20.36%db

การอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 °C ในช่วงแรกจำนวน 5 h พบว่า ที่ความชื้นเริ่มต้น 275.56%db
มีความชื้นลดลงเหลือ 105.56%db โดยอัตราการอบแห้งเฉลี่ย 34.00%db/h ในขณะที่ห้องอบแห้งที่
อุณหภูมิ 60 °C ในช่วงหลังจำนวน 8 h ที่ความชื้น 105.56%db มีความชื้นสุดท้ายลดลงเหลือ
20.71%db และมีอัตราการอบแห้งเฉลี่ย 10.61%db/h จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าในช่วงแรก

มีอัตราการอบแห้งที่สูงกว่าการอบแห้งในช่วงหลังเนื่องจากปริมาณความชื้นภายในผลิตภัณฑ์ที่ลดลง (เกรียงไกร และคณะ, 2554) โดยตลอดกระบวนการอบแห้งมีอัตราการอบแห้งเฉลี่ย 19.63%db/h หรือ 1.055 kg H₂O evap/h

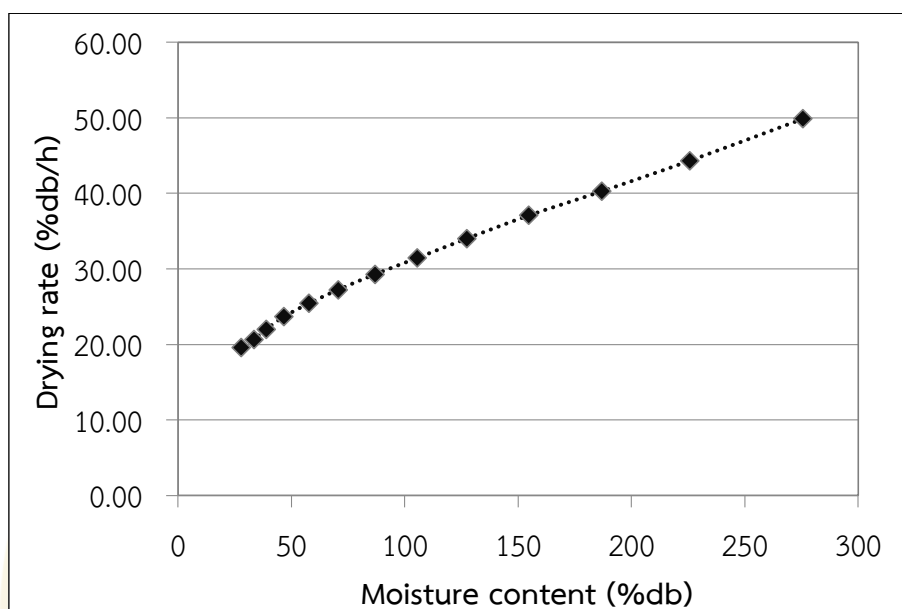


ภาพที่ 66 ปริมาณความลดความชื้นที่ลดลงเทียบกับเวลาเมื่ออบแห้งปลาตุก โดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนร่วม



ภาพที่ 67 อัตราการอบแห้งเทียบกับเวลาเมื่ออบแห้งปลาตุกโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนร่วม

อัตราการอบแห้งเทียบกับการลดลงของความชื้นดังแสดงในภาพที่ 68 แสดงให้เห็นว่า อัตราการอบแห้งจะแปรผันตรงกับการลดลงของความชื้นกล่าวคือ หากภายในผลิตภัณฑ์มีปริมาณความชื้นมากจะส่งผลให้อัตราการอบแห้งมีปริมาณมากตาม (ธีรเดช และคณะ, 2553)

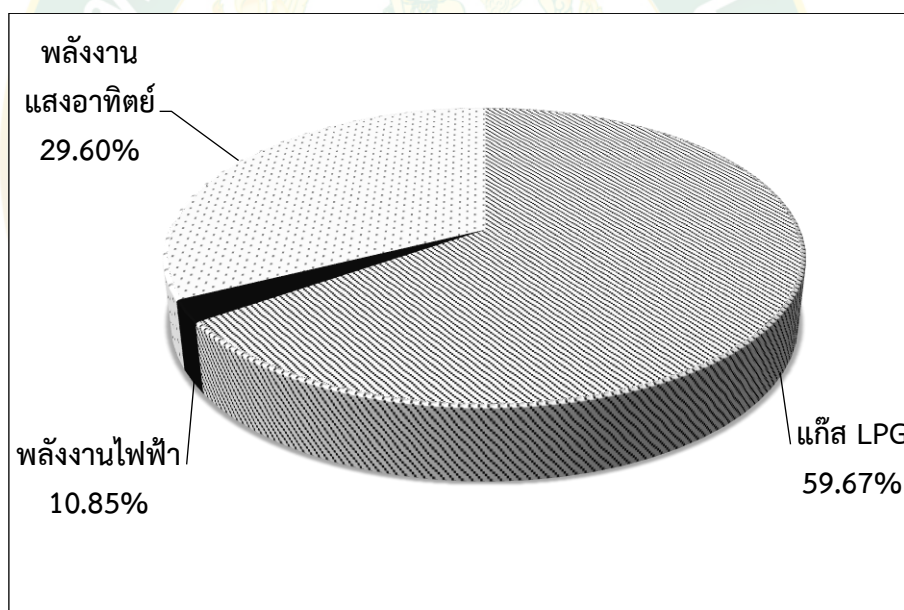


ภาพที่ 68 อัตราการอบแห้งเทียบกับการลดลงของความชื้นเมื่อใช้แหล่งพลังงานความร้อนร่วม

สัดส่วนการใช้พลังงานเมื่ออบแห้งปลาตากโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG ดังแสดงในภาพที่ 69 แหล่งพลังงานที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งดังกล่าวมี 3 รูปแบบได้แก่ พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ พลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG และพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์พัดลม และพัดลมโบลเวอร์ จากผลการทดลองพบว่าตลอดกระบวนการมีปริมาณการใช้พลังงานสิ้นเปลือง 228.94 MJ และพลังงานความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ได้แก่ 16.70 MJ/kg H₂O evap จากภาพที่ 69 แสดงให้เห็นว่าในกระบวนการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุนมีการใช้พลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG เป็นพลังงานหลัก เนื่องจากในกระบวนการอบแห้งต้องการใช้อุณหภูมิสูง ดังนั้นการใช้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวจึงไม่เพียงพออีกทั้งช่วงเวลาที่ทำการทดสอบดังกล่าวอยู่ในช่วงฤดูหนาวที่มีสภาพอากาศแปรปรวนส่งผลให้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์มีค่าพลังงานความร้อนเพียงคือ 67.76 MJ ซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับการทดสอบในช่วงฤดูร้อน โดยสัดส่วนของการใช้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ พลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG และพลังงานไฟฟ้าได้แก่ 29.60 59.67 และ 10.85% ของพลังงานทั้งหมด ตามลำดับ โดยช่วงเวลาที่มีการใช้พลังงานความร้อนจาก

แสงอาทิตย์คือ ช่วงเวลา 8.00-18.00 น. และช่วงเวลาที่มีการใช้พลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG มากที่สุด ช่วงเวลา 18.00-21.00 น. ซึ่งตลอดกระบวนการอบแห้งมีการใช้พลังงานไฟฟ้าอย่างสม่ำเสมอ

เมื่อพิจารณาการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 °C ในช่วงแรกจำนวน 5 h พบว่า การอบแห้งในช่วงเวลาดังกล่าวมีปริมาณการใช้พลังงานสิ้นเปลือง 128.47 MJ โดยสัดส่วนของการใช้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ พลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG และพลังงานไฟฟ้าได้แก่ 33.91 58.94 และ 7.14% ของการใช้พลังงานทั้งหมดตามลำดับ ในขณะที่การอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C ในช่วงหลังจำนวน 8 ชั่วโมงพบว่า มีปริมาณการใช้พลังงานสิ้นเปลือง 100.47 MJ โดยสัดส่วนของการใช้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ พลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG และพลังงานไฟฟ้าได้แก่ 36.79 49.77 และ 13.44% ของการใช้พลังงานทั้งหมดตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 °C มีปริมาณการใช้พลังงานที่มากกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (อิลีหัยะ และคณะ, 2556)

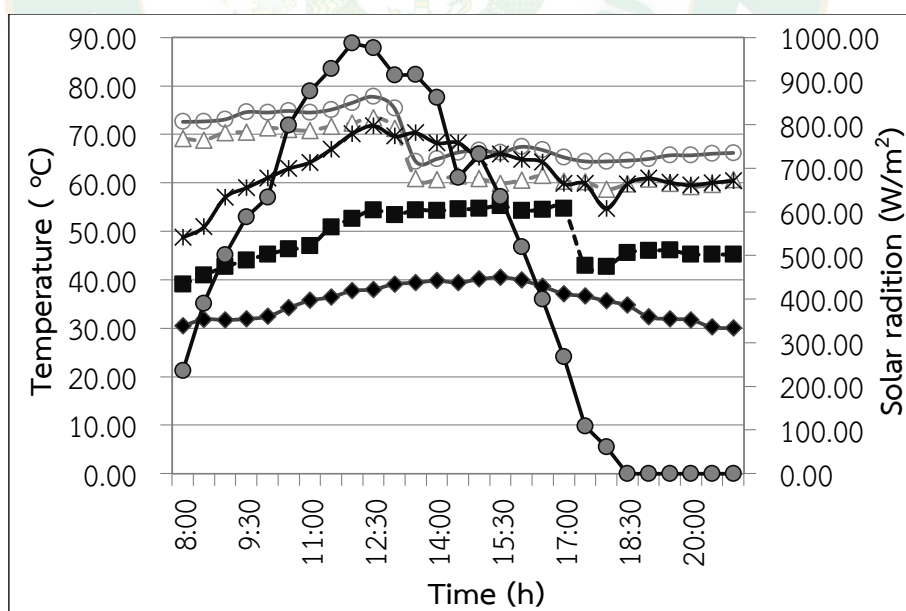


ภาพที่ 69 สัดส่วนการใช้พลังงานเมื่ออบแห้งปลาตุกโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนร่วม

2. การวิเคราะห์ผลการทดลองการอบแห้งปลาตากโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG ซึ่งใช้หัวเผาแก๊สชนิดอินฟราเรดเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ เทียบกับค่าความเข้มรังสีอาทิตย์รายชั่วโมงดังแสดงในภาพที่ 70 การทดสอบในวันที่มีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ย 481.50 W/m^2 อุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ย $35.45 \text{ }^{\circ}\text{C}$ พิจารณาอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ พบว่า อุณหภูมิบริเวณทางเข้าของเครื่องอบแห้งมีอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำที่สุดได้แก่ $48.57 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เมื่อพิจารณาการอบแห้งที่อุณหภูมิ $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ พบว่า อุณหภูมิอากาศบริเวณด้านล่าง และ อุณหภูมิอากาศบริเวณด้านบนของห้องอบแห้งมีผลต่างระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ย $3.72 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งอุณหภูมิอากาศบริเวณด้านล่าง และด้านบนของห้องอบแห้งมีอุณหภูมิเฉลี่ย 70.95 และ $74.67 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ โดยมีอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งเฉลี่ย $72.81 \text{ }^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิที่ทางออกของห้องอบแห้งพบว่า มีอุณหภูมิเฉลี่ย $61.99 \text{ }^{\circ}\text{C}$

เมื่อพิจารณาการอบแห้งที่อุณหภูมิ $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ในช่วงหลังจำนวน 8 h พบว่า อุณหภูมิอากาศบริเวณด้านล่าง และอุณหภูมิอากาศบริเวณด้านบนของห้องอบแห้งมีผลต่างระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ย $5.34 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งอุณหภูมิอากาศบริเวณด้านล่าง และด้านบนของห้องอบแห้งมีอุณหภูมิเฉลี่ย 60.28 และ $65.61 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ โดยมีอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งเฉลี่ย $62.94 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และอุณหภูมิที่ทางออกของห้องอบแห้งมีอุณหภูมิเฉลี่ย $62.61 \text{ }^{\circ}\text{C}$



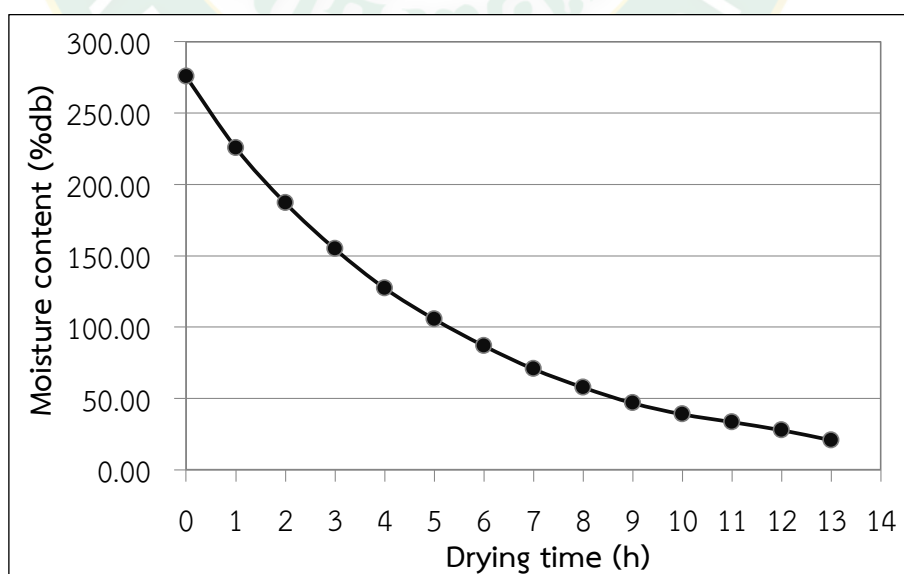
ภาพที่ 70 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของการอบแห้งปลาตากโดยใช้พลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG

เมื่อ

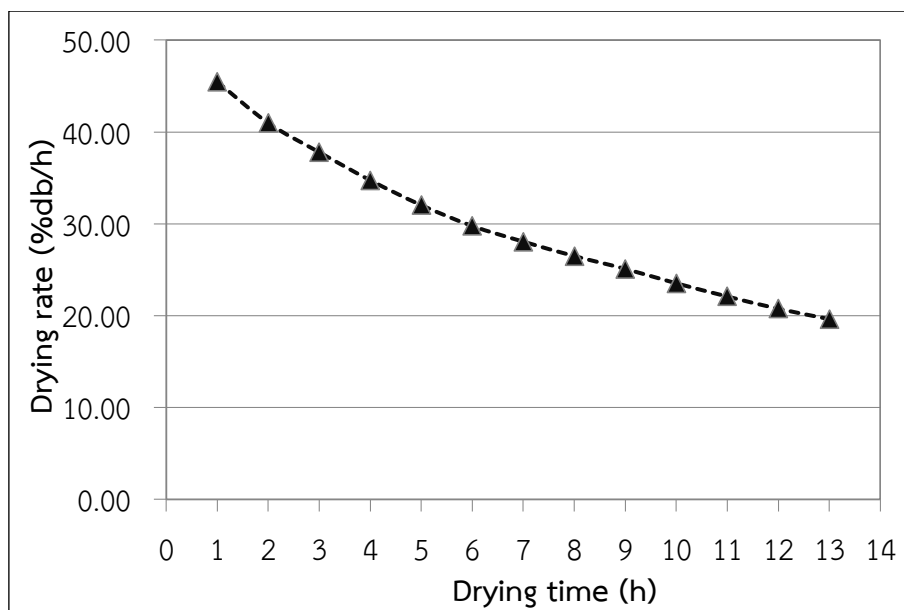
- | | | | |
|---|---|---|---|
| ◆ | อุณหภูมิอากาศแวดล้อม (°C) | ■ | อุณหภูมิอากาศทางเข้า (°C) |
| △ | อุณหภูมิอากาศบริเวณด้านล่างของห้องอบแห้ง (°C) | ○ | อุณหภูมิอากาศบริเวณด้านบนของห้องอบแห้ง (°C) |
| * | อุณหภูมิอากาศทางออกห้องอบแห้ง (°C) | ● | ความชื้นรังสีอาทิตย์ (W/m ²) |

การลดลงของความชื้น และอัตราการอบแห้งผลิตภัณฑ์เทียบกับระยะเวลาดังแสดงในภาพที่ 71 และ 72 จากผลการทดลองพบว่า การนำปลาตุกที่มีน้ำหนักเริ่มต้น 20.066 kg มาผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุน ภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการปลาตุกดังกล่าวมีน้ำหนักสุดท้ายคงเหลือ 6.423 kg และความชื้นสุดท้ายคงเหลือ 20.51%db

เมื่อพิจารณาการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 °C พบว่า ที่ความชื้นเริ่มต้น 275.56%db มีความชื้นลดลงเหลือ 114.50 โดยมีอัตราการอบแห้งเฉลี่ย 32.03%db/h ในขณะที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C ที่ความชื้น 114.50%db มีความชื้นสุดท้ายลดลงเหลือ 20.51%db และมีอัตราการอบแห้งเฉลี่ย 11.87%db/h จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าในช่วงแรกมีอัตราการอบแห้งที่สูงกว่าการอบแห้งในช่วงหลังเนื่องจากปริมาณความชื้นภายในผลิตภัณฑ์มีปริมาณมาก โดยตลอดกระบวนการอบแห้งอัตราการอบแห้งเฉลี่ย 19.62%db/h หรือ 1.049 kg H₂O evap/h

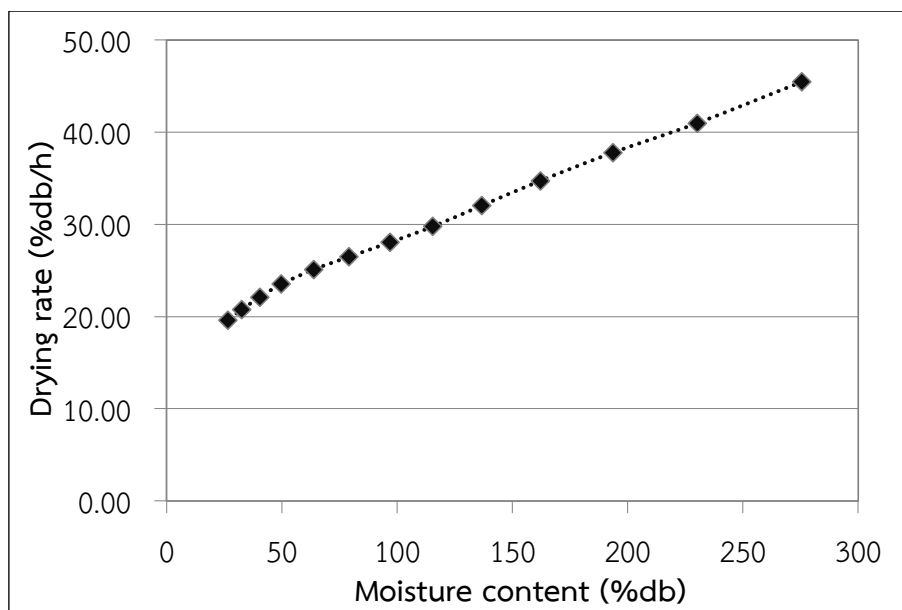


ภาพที่ 71 ปริมาณความลดความชื้นที่ลดลงเทียบกับเวลาเมื่ออบแห้งปลาตุก โดยใช้พลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG



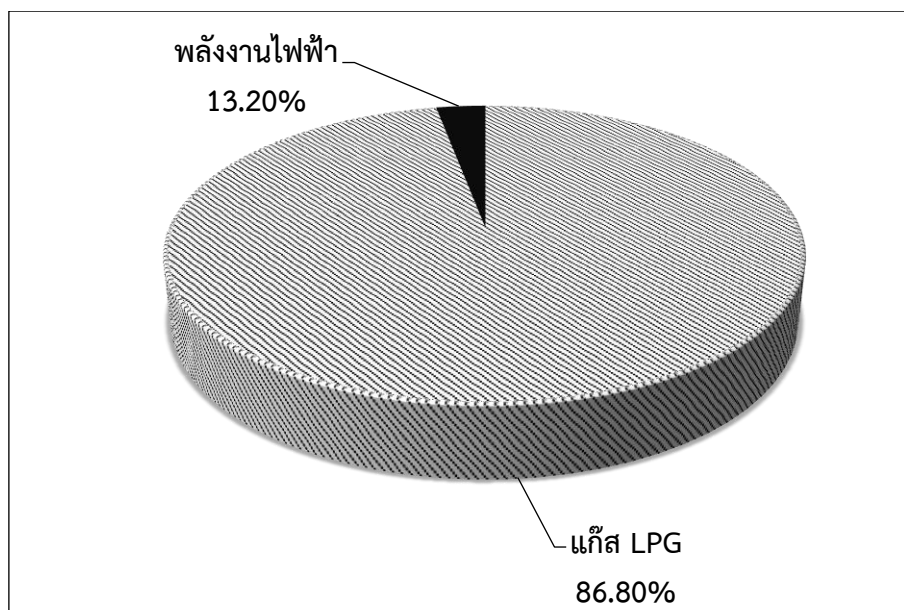
ภาพที่ 72 อัตราการอบแห้งเทียบกับเวลาเมื่ออบแห้งปลาตุกโดยใช้พลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG

อัตราการอบแห้งเทียบกับการลดลงของความชื้นเมื่ออบแห้งปลาตุกโดยใช้พลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG เพียงอย่างเดียว ดังแสดงในภาพที่ 73 พบว่า อัตราการอบแห้งจะแปรผันตรงกับการลดลงของความชื้นกล่าวคือ ในช่วงแรกของการนำปลาตุกมาอบแห้งจะมีอัตราการอบแห้งในปริมาณมาก เนื่องจากภายในปลาตุกมีปริมาณความชื้นสูง ดังนั้นความต้องการระเหยน้ำออกจากวัสดุทดสอบจึงมีปริมาณมาก เมื่อระยะเวลาผ่านไปภายในวัสดุทดสอบมีค่าความชื้นลดน้อยลงจึงส่งผลให้ความต้องการระเหยน้ำออกจากวัสดุทดสอบมีปริมาณที่น้อยลงไปด้วย (จุฑารัตน์ และคณะ, 2557; อีระเดช และคณะ, 2553)



ภาพที่ 73 อัตราการอบแห้งเทียบกับการลดลงของความชื้นเมื่ออบแห้งปลาตุก โดยใช้พลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG

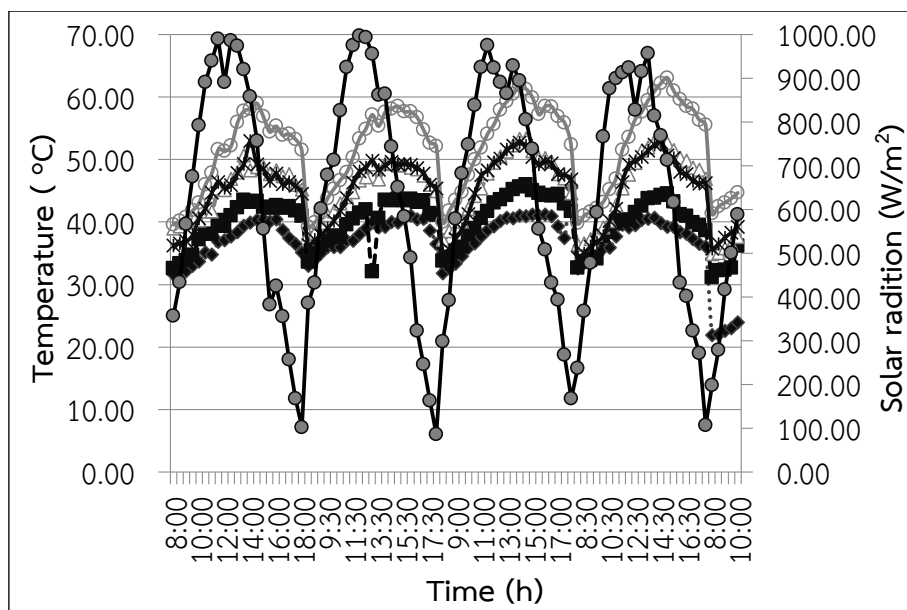
สัดส่วนการใช้พลังงานเมื่ออบแห้งปลาตุกโดยใช้พลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG เพียงอย่างเดียว ดังแสดงในภาพที่ 74 แหล่งพลังงานที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งดังกล่าวมี 2 รูปแบบ ได้แก่ พลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG และพลังงานไฟฟ้า จากผลการทดลองพบว่า การอบแห้งดังกล่าวมีปริมาณการใช้พลังงานสิ้นเปลืองทั้งหมด 275.41 MJ พลังงานความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ได้แก่ 20.19 MJ/kg H₂O evap โดยกระบวนการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุนมีการใช้พลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG มากที่สุด ซึ่งสัดส่วนของการใช้พลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG และพลังงานไฟฟ้าได้แก่ 86.80 และ 13.20% ของการใช้พลังงานทั้งหมดตามลำดับ เมื่อพิจารณาการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 °C พบว่า การอบแห้งในช่วงเวลาดังกล่าวมีปริมาณการใช้พลังงานสิ้นเปลืองทั้งหมด 146.60 MJ โดยสัดส่วนของการใช้พลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG และพลังงานไฟฟ้าได้แก่ 93.86 และ 6.14% ของการใช้พลังงานทั้งหมด ในขณะที่การอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C มีปริมาณใช้พลังงานสิ้นเปลืองทั้งหมด 128.81 MJ โดยสัดส่วนของการใช้พลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG และพลังงานไฟฟ้าได้แก่ 78.76 และ 20.54% ของการใช้พลังงานทั้งหมด



ภาพที่ 74 สัดส่วนการใช้พลังงานเมื่ออบแห้งปลาตุกโดยใช้พลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG

3. การวิเคราะห์ผลการทดลองการอบแห้งปลาตุกปลาโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์

แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ เทียบกับค่าความเข้มรังสีอาทิตย์รายชั่วโมงดังแสดงในภาพที่ 75 จากการทดลองอบแห้งปลาตุกที่มีน้ำหนักเริ่มต้น 20 kg จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งทั้งหมด 42 h การทดสอบในวันที่มีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ย 626.50 W/m^2 อุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ย $36.86 \text{ }^\circ\text{C}$ โดยการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งได้ตามต้องการ จึงส่งผลให้ต้องใช้ระยะเวลาในการอบแห้งเป็นเวลานาน (ฮาติมี และคณะ, 2559) เมื่อพิจารณาอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ พบว่า อุณหภูมิบริเวณทางเข้าของเครื่องอบแห้งมีอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำที่สุดได้แก่ $39.86 \text{ }^\circ\text{C}$ อุณหภูมิอากาศบริเวณด้านล่าง และอุณหภูมิอากาศบริเวณด้านบนของห้องอบแห้งมีผลต่างระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ย $6.39 \text{ }^\circ\text{C}$ ซึ่งอุณหภูมิอากาศบริเวณด้านล่าง และด้านบนของห้องอบแห้งมีอุณหภูมิเฉลี่ย 45.33 และ $51.72 \text{ }^\circ\text{C}$ ตามลำดับ โดยอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งเฉลี่ย $48.53 \text{ }^\circ\text{C}$ เมื่อพิจารณาอุณหภูมิที่ทางออกของห้องอบแห้งพบว่า มีอุณหภูมิเฉลี่ย $44.98 \text{ }^\circ\text{C}$

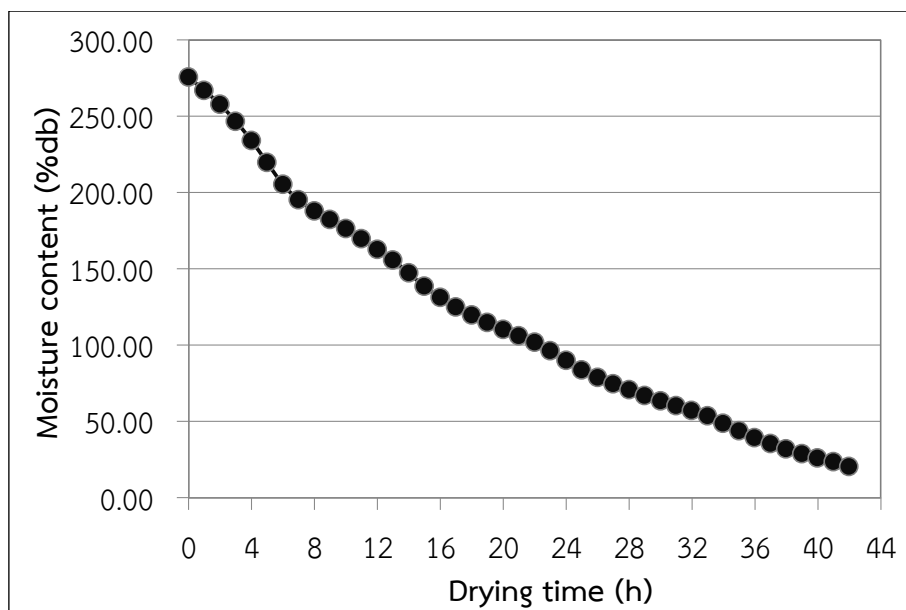


ภาพที่ 75 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของการอบแห้งปลาตุ๊ก โดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์

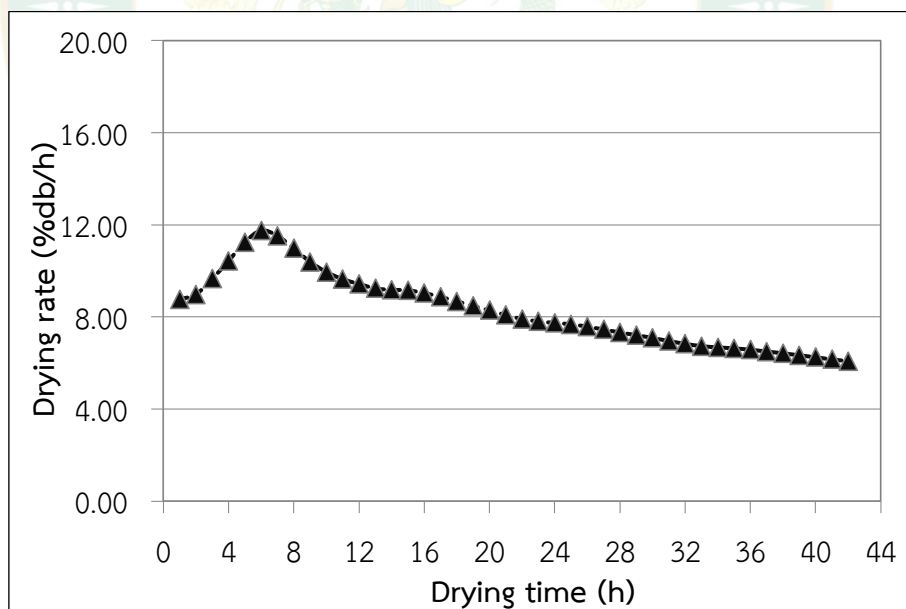
เมื่อ

- | | | | |
|---|---|---|---|
| ◆ | อุณหภูมิอากาศแวดล้อม (°C) | ■ | อุณหภูมิอากาศทางเข้า (°C) |
| △ | อุณหภูมิอากาศบริเวณด้านล่างของห้องอบแห้ง (°C) | ○ | อุณหภูมิอากาศบริเวณด้านบนของห้องอบแห้ง (°C) |
| ✱ | อุณหภูมิอากาศทางออกห้องอบแห้ง (°C) | ● | ความเข้มรังสีอาทิตย์ (W/m ²) |

การลดลงของความชื้น และอัตราการอบแห้งผลิตภัณฑ์เทียบกับดังแสดงในภาพที่ 76 และ 77 จากผลการทดลองพบว่า การนำปลาตุ๊กที่มีน้ำหนักเริ่มต้น 20.093 kg ความชื้นเริ่มต้น 275.56%db มาผ่านกระบวนการอบแห้งภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการปลาตุ๊กดังกล่าวมีน้ำหนักสุดท้ายคงเหลือ 6.399 kg และความชื้นสุดท้ายเหลือ 20.06%db โดยใช้ระยะเวลาในการอบแห้งทั้งหมด 42 h และอัตราการอบแห้งเฉลี่ย 6.08%db/h หรือ 0.326 kg H₂O evap/h

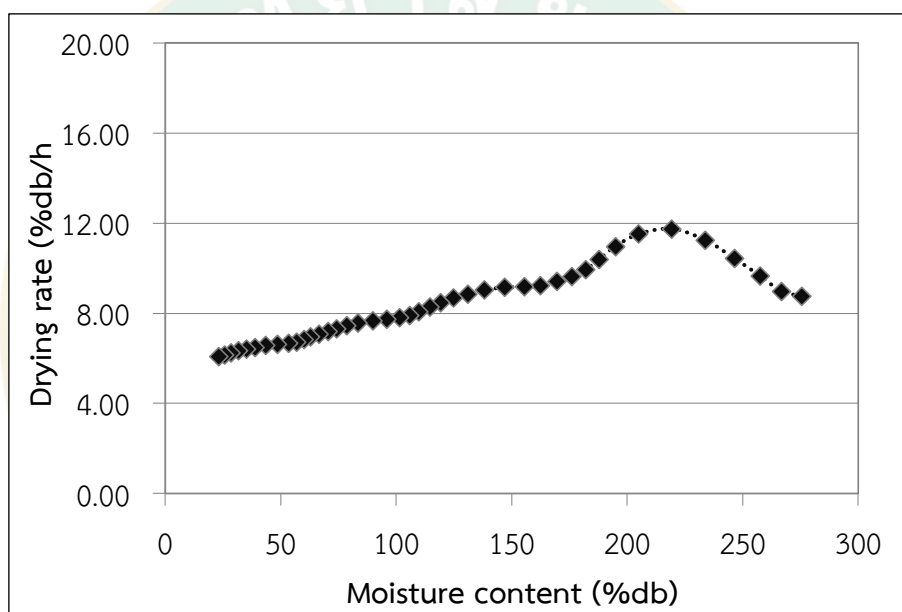


ภาพที่ 76 ปริมาณความลดความชื้นที่ลดลงเทียบกับเวลาเมื่ออบแห้งปลาตุกโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์



ภาพที่ 77 อัตราการอบแห้งเทียบกับเวลาเมื่ออบแห้งปลาตุกโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์

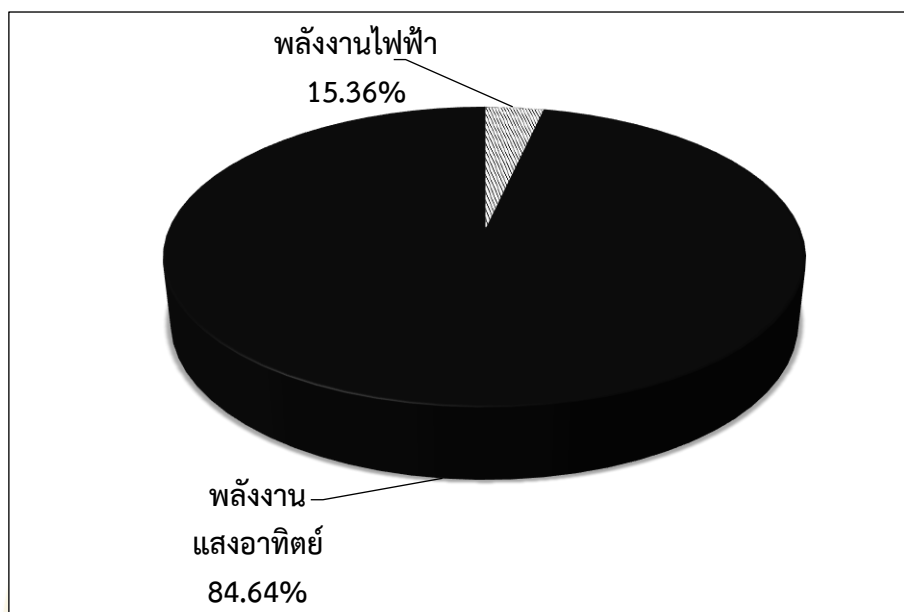
อัตราการอบแห้งเทียบกับการลดลงของความชื้นเมื่ออบแห้งปลาตุกโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวดังแสดงในภาพที่ 78 พบว่า อัตราการทำแห้งจะแปรผันตรงกับ การลดลงของความชื้น กล่าวคือ ช่วงแรกของการอบแห้งมีการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ใน ปริมาณที่มาก ในเวลาต่อมาเมื่อความชื้นในผลิตภัณฑ์มีค่าลดลงจะส่งผลให้การระเหยน้ำออกจาก ผลิตภัณฑ์ในปริมาณที่น้อยสอดคล้องกับทำให้อัตราการทำแห้งลดน้อยลง (จุฑารัตน์ และคณะ, 2557) จากภาพที่ 78 แสดงให้เห็นว่าในช่วงเวลา 5 h แรกของการอบแห้งมีอัตราการอบแห้ง และอัตราการ ลดความชื้นในปริมาณที่ต่ำทั้งนี้เป็นผลมาจากค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ และอุณหภูมิแวดล้อมขณะทำ การทดลอง



ภาพที่ 78 อัตราการอบแห้งเทียบกับการลดลงของความชื้นเมื่ออบแห้งปลาตุก โดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์

พิจารณาสัดส่วนการใช้พลังงานเมื่ออบแห้งปลาตุกโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวดังแสดงในภาพที่ 79 แหล่งพลังงานที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งดังกล่าวมี 2 รูปแบบได้แก่ พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้า จากผลการทดลองพบว่าการอบแห้งดังกล่าวมีปริมาณการใช้พลังงานสิ้นเปลืองทั้งหมด 445.42 MJ พลังงานความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ได้แก่ 32.53 MJ/kg H₂O evap โดยสัดส่วนของการใช้พลังงานความ

ร้อนจากแสงอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าได้แก่ 84.64 และ 15.36% ของการใช้พลังงานทั้งหมดตามลำดับ



ภาพที่ 79 สัดส่วนการใช้พลังงานเมื่ออบแห้งปลาตุกโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์

จากผลการทดลองการอบแห้งปลาตุกที่มีน้ำหนักเริ่มต้น 20 kg ที่มีความชื้นเริ่มต้น 275.56%db จนมีความชื้นสุดท้าย 20%db โดยพิจารณาการใช้พลังงานความร้อนในการอบแห้ง 3 สภาวะที่แตกต่างข้างต้น การทดลองอบแห้งปลาตุกโดยแบ่งการอบแห้งออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ ทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 °C ในช่วงแรกจำนวน 5 h และอบแห้งปลาตุกที่อุณหภูมิ 60 °C ในช่วงหลังจำนวน 8 h กำหนดความเร็วรอบของพัดลม 6 rpm อัตราการไหลอากาศ 0.049 m³/s และอัตราการนำอากาศกลับมาใช้ใหม่ 80% ทำการทดลองในสภาวะที่แตกต่างกัน 3 สภาวะ จากผลการทดลองพบว่า การอบแห้งปลาตุกโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG มีปริมาณการใช้พลังงานสิ้นเปลืองในกระบวนการอบแห้งน้อยที่สุดคือ 228.97 MJ ซึ่งในกระบวนการดังกล่าวมีการใช้แก๊ส LPG ทั้งสิ้น 2.72 kg โดยมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้ง 16.70 MJ/kg H₂O evap และประสิทธิภาพในการอบแห้ง 13.52% เมื่อเทียบกับการอบแห้งปลาตุกที่ใช้พลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG เพียงอย่างเดียว ถึงแม้จะมีระยะเวลาการอบแห้งเท่ากันคือ 13 h แต่มีปริมาณการใช้พลังงานสิ้นเปลืองที่มากกว่าได้แก่ 275.41 MJ ซึ่งในกระบวนการดังกล่าวมีการใช้แก๊ส LPG ทั้งสิ้น 4.76 kg โดยมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้ง 20.19 MJ/kg H₂O evap และประสิทธิภาพในการอบแห้ง 11.18%

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อนำพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์มาใช้ในกระบวนการอบแห้งร่วมกับพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG จะทำให้มีการลดปริมาณการใช้แก๊ส LPG ในกระบวนการอบแห้งได้ 57.14%

พิจารณาการอบแห้งปลาตากโดยใช้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวจะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งนานที่สุดคือ 42 h มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้ง 32.53 MJ/kg H₂O evap มีอัตราการอบแห้งเฉลี่ย 6.08%db/h หรือ 0.326 kg H₂O evap/h และประสิทธิภาพในการอบแห้ง 6.94% เมื่อทำการเปรียบเทียบกับวิธีการทำแห้งปลาตากด้วยวิธีการตากแดดตามธรรมชาติจะใช้ระยะเวลาในการทำแห้งจำนวน 131 h หรือ 13 วัน เพื่อให้มีความชื้นสุดท้ายลดลงเหลือ 20%db โดยมีอัตราการทำแห้งเฉลี่ย 1.95%db/h หรือ 0.053 kg H₂O evap/h จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุนจะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยกว่าการตากแดดธรรมชาติ และมีอัตราการอบแห้งที่มากกว่าตากแดดธรรมชาติอีกด้วย

เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างการอบแห้งปลาตากโดยใช้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว วิธีการตากแดดธรรมชาติ และการอบแห้งปลาตากโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG พบว่า การอบแห้งปลาตากโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG มีความเหมาะสมต่อการใช้งานเชิงพาณิชย์ (อิลิฮัยะ และคณะ, 2556) เนื่องจากใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้น อัตราการอบแห้งสูง ประสิทธิภาพการอบแห้งที่สูง และมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งน้อย (จุฑารัตน์ และคณะ, 2557) อีกทั้งผลิตภัณฑ์ปลาแห้งที่ได้มีคุณภาพต้องตามความต้องการ และมีลักษณะทางกายภาพที่ใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ปลาแห้งที่มีจำหน่ายตามท้องตลาดอีกด้วย โดยผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 10 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 10 การทดลองเปรียบเทียบการใช้พลังงานสิ้นเปลืองจำเพาะในกระบวนการอบแห้ง

Heat source	t (h)	W_i (kg)	W_f (kg)	M_f (%db)	Drying rate (kg H ₂ O evap/h)	SEC (MJ/kg H ₂ O evap)	η (%)
พลังงานความร้อนร่วม	13	20.125	6.415	20.36	1.055	16.70	13.52
แก๊ส LPG	13	20.066	6.423	20.51	1.049	20.19	11.18
แสงอาทิตย์	42	20.093	6.399	20.06	0.326	32.53	6.94

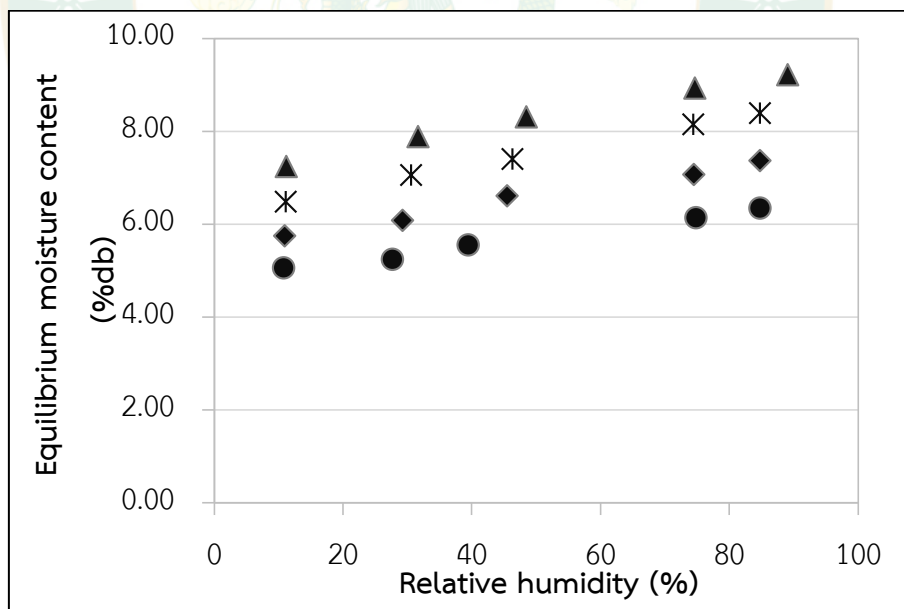
การวิเคราะห์ความชื้นสมดุลของวัสดุทดสอบ

การศึกษาความชื้นสมดุลไอโซเทอมของปลาตากที่อุณหภูมิ 40 50 60 และ 70 °C โดยวิธี Static desiccator isotherm method หรือวิธีเชิงสถิติในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 0.1 - 0.9 ในการวิเคราะห์ค่าความชื้นสมดุลไอโซเทอมของปลาตาก และนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความชื้นสมดุล 5 รูปแบบ ได้แก่ Modified Halsey, Modified Oswin, Modified Mujica, Modified Chung & Pfof และ Modified Henderson มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้ (Ponwiboon et al., 2017) ในการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความชื้นสมดุลด้วยโปรแกรม SigmaPlot 10.0 จะนำผลการทดลองมาวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้นแบบกำลังสองน้อยที่สุด ทำการเปรียบเทียบสมการต่างๆ โดยใช้ค่า Coefficient of determination (R^2), Standard Error of Estimate (SEE) และค่า Root mean square error (RMSE) สำหรับการพิจารณาสมการที่มีค่า R^2 สูงสุด มีค่า SEE และ RMSE ต่ำที่สุด สามารถอธิบายผลการทดลองได้ดีที่สุด (ชนันท์ และสุนทร, 2555) ผลการทดลองหาความชื้นสมดุลของปลาตากที่อุณหภูมิ 40 50 60 และ 70 °C ดังแสดงในภาพที่ 80 และ 81 พบว่า ที่อุณหภูมิเดียวกันค่าความชื้นสมดุลจะขึ้นอยู่กับค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ โดยค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ต่ำจะส่งผลให้ค่าความชื้นสมดุลของปลาตากมีปริมาณต่ำ ในขณะที่เดียวกันหากค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีค่าสูงจะส่งผลให้ค่าความชื้นสมดุลของปลาตากสูงขึ้นตาม เมื่อทำการพิจารณาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อความชื้นสมดุลของปลาตากพบว่า ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเดียวกันหากอุณหภูมิมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าความชื้นสมดุลของปลาตากจะมีค่าลดลง (มารีนา และคณะ, 2558) ซึ่งเป็นผลมาจาก

สภาวะการกระตุ้นที่สูงขึ้นเนื่องจากโมเลกุลของน้ำที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดการลดลงของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของน้ำ

เมื่อวิเคราะห์ค่าความชื้นสมดุลของปลาจากผลการทดลองพบว่า การทดลองที่อุณหภูมิ 40 °C ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 11.21 31.60 48.4 74.68 และ 89.03% มีค่าความชื้นสมดุล 7.25 7.89 8.31 8.94 และ 9.22%db ตามลำดับ การทดลองที่อุณหภูมิ 50 °C ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 11.10 30.54 46.30 74.43 และ 84.78% มีค่าความชื้นสมดุล 6.49 7.06 7.41 8.16 และ 8.39%db ตามลำดับ การทดลองที่อุณหภูมิ 60 °C ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 10.95 29.26 45.44 74.50 และ 84.78% มีค่าความชื้นสมดุล 5.75 6.09 6.62 7.07 และ 7.38%db ตามลำดับ และการทดลองที่อุณหภูมิ 70 °C มีค่าความชื้นสมดุล 5.07 5.25 5.56 6.14 และ 6.35%db ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 10.80 27.70 39.40 74.78 และ 84.78% ตามลำดับ โดยค่าความชื้นสมดุลจะมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความชื้นเริ่มต้นในปลาสดสอดคล้องกับการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา (Ponwiboon et al., 2017)

ผลการทดลองหาความชื้นสมดุลของปลาที่อุณหภูมิ 40 ถึง 70 °C สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 11



ภาพที่ 80 ความชื้นสมดุลไอโซเทอมของปลาสด

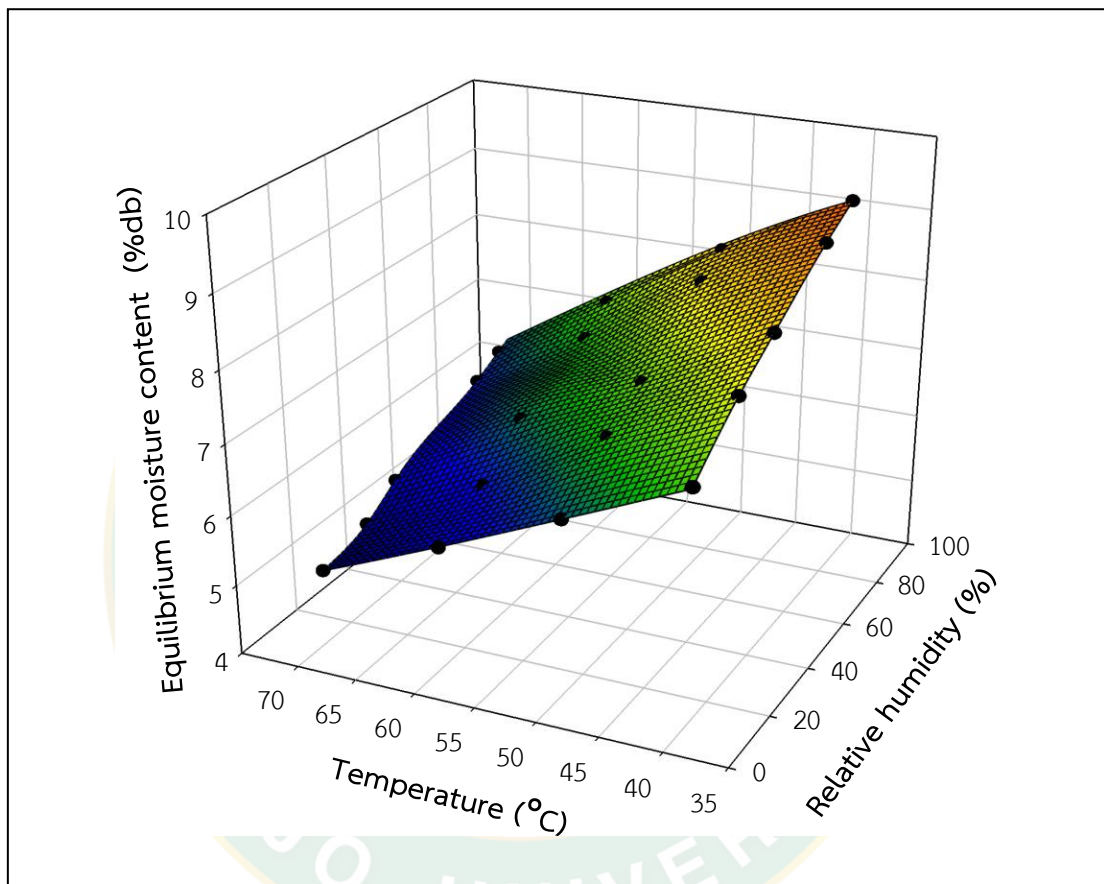
เมื่อ

▲ การทดลองที่อุณหภูมิ 40 °C

◆ การทดลองที่อุณหภูมิ 50 °C

✱ การทดลองที่อุณหภูมิ 60 °C

● การทดลองที่อุณหภูมิ 70 °C

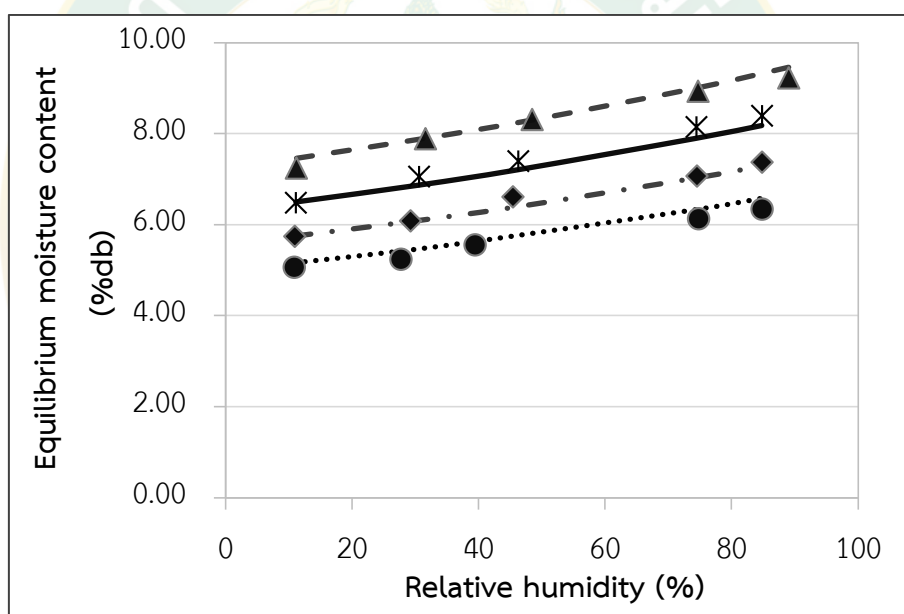


ภาพที่ 81 ความชื้นสมดุลไอโซเทอมของปลาตาก 3 มิติ

ตารางที่ 11 ผลการทดลองหาความชื้นสมดุลของปลาตุ๊ก

T (°C)	RH (%)	Equilibrium moisture content (%db)					
		Experiment	Modified Halsey	Modified Oswin's	Modified Mujica	Modified Chung & Pfoest	Modified Henderson
40	11.21	7.25	6.60	6.15	7.46	6.15	6.07
	31.60	7.89	7.03	6.64	7.90	6.60	6.76
	48.42	8.31	7.36	7.05	8.30	6.93	7.12
	74.68	8.94	8.05	7.68	9.01	7.57	7.63
	89.03	9.22	8.82	8.03	9.46	8.22	7.97
50	11.10	6.49	6.57	6.11	6.50	6.12	6.05
	30.54	7.06	6.99	6.58	6.87	6.56	6.72
	46.30	7.41	7.29	6.96	7.21	6.86	7.06
	74.43	8.16	8.02	7.63	7.90	7.54	7.60
	84.78	8.39	8.49	7.88	8.18	7.95	7.83
60	10.95	5.75	6.55	6.09	5.75	6.10	6.02
	29.26	6.09	6.94	6.53	6.07	6.51	6.67
	45.44	6.62	7.25	6.92	6.38	6.82	7.02
	74.50	7.07	7.99	7.61	7.03	7.52	7.58
	84.78	7.38	8.47	7.86	7.29	7.93	7.81
70	10.80	5.07	6.53	6.07	5.16	6.07	6.00
	27.70	5.25	6.89	6.47	5.42	6.46	6.61
	39.40	5.56	7.11	6.75	5.63	6.69	6.88
	74.78	6.14	7.98	7.60	6.34	7.51	7.56
	84.78	6.35	8.44	7.84	6.58	7.90	7.79

เมื่อทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าความชื้นสมดุลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้ง 5 รูปแบบกับค่าความชื้นสมดุลจากการทดลอง โดยค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 12 จากผลการศึกษาพบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลของ Mujica สามารถอธิบายผลการทดลองที่อุณหภูมิ 40 50 60 และ 70 °C ได้ดีที่สุดตามความสัมพันธ์คือ $M_{eq} = 1 / [(0.0021T + 0.0555) - (6.7445 \times 10^{-006}T + 9.398610^{-005})RH]$ มีค่า R^2 สูงที่สุด ได้แก่ 0.9910 โดยมีค่า SEE และ RMSE ต่ำที่สุด ได้แก่ 0.1763 และ 0.0124 ซึ่งมีความเหมาะสมในการทำนายค่าความชื้นสมดุลของปลาดุกที่อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ สอดคล้องกับการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา (Chen et al., 1994) ผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าความชื้นสมดุลที่ได้จากการทดลอง และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Mujica สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 82 และตารางที่ 12 และตารางที่ 13



ภาพที่ 82 การเปรียบเทียบค่าความชื้นสมดุลจากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เมื่อ

- | | | | |
|-------|--------------------------------|-------|--------------------------------|
| ▲ | การทดลองที่อุณหภูมิ 40 °C | ✖ | การทดลองที่อุณหภูมิ 50 °C |
| ◆ | การทดลองที่อุณหภูมิ 60 °C | ● | การทดลองที่อุณหภูมิ 70 °C |
| --- | Mujica model ที่อุณหภูมิ 40 °C | — | Mujica model ที่อุณหภูมิ 50 °C |
| -.-.- | Mujica model ที่อุณหภูมิ 60 °C | | Mujica model ที่อุณหภูมิ 70 °C |

ตารางที่ 12 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุล

ค่าพารามิเตอร์	Modified Halsey	Modified Oswin's	Modified Mujica	Modified Chung & Pfost	Modified Henderson
C_1	6.4686×10^{-9}	2.6215	0.0021	3.5179×10^7	13.5580
C_2	-10.1171	-0.0196	0.0555	-141.9563	3.3314
C_3	-	-0.2285	6.7445×10^{-6}	-	-
C_4	-	-	9.3986×10^{-5}	-	-
R^2	0.6122	0.7075	0.9910	0.6791	0.5132
SEE	1.3699	0.9022	0.1763	1.1147	3.3096
RSME	0.5480	0.3458	0.0124	0.4459	1.3238

ตารางที่ 13 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุล

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	รูปแบบสมการไอโซเทอมของการอบแห้งปลาดุก
Modified Halsey	$M_{eq} = \left[\frac{\ln(RH) \times R(T+273)}{-6.4686 \times 10^{-9}} \right]^{\frac{1}{-10.1171}}$
Modified Oswin	$M_{eq} = (-6.8627 - 0.0282T) \left(\frac{RH}{1-RH} \right)^{1.1976}$
Modified Mujica	$M_{eq} = \frac{1}{\left((0.0021T+0.555) - (6.7445 \times 10^{-6}T+9.3986 \times 10^{-5})RH \right)}$
Modified Chung & Pfost	$M_{eq} = -\frac{1}{-141.9563} \ln(3.5179 \times 10^7) + \frac{1}{-141.9563} \ln[-R(T+273)\ln(RH)]$
Modified Henderson	$M_{eq} = \left[\frac{\ln(1-RH)}{-13.5580 \times (T+273)} \right]^{\frac{1}{3.3314}}$

จลนพลศาสตร์ของการอบแห้งปลาตาก

1. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการการอบแห้งชั้นบางกึ่งทฤษฎี

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งปลาตากในรูปแบบของอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio ,MR) ซึ่งเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลของน้ำในวัสดุเทียบกับความชื้นเริ่มต้นเมื่อเวลาอบแห้งดำเนินไปที่เวลาต่างๆ จากผลการศึกษาค่าความชื้นสมดุลของปลาตากพบว่า ความชื้นสมดุลในปลาตากมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าความชื้นเริ่มต้น ในกระบวนการอบแห้งปลาตากด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุนในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้การอบแห้งแบ่งออกเป็น 2 ช่วงได้แก่ การอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 และ 60 °C ดังนั้นค่าความชื้นสมดุลที่นำมาพิจารณาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งปลาตากจะสอดคล้องกับอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งได้แก่ การอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 °C ในช่วงแรกจำนวน 5 h มีค่าความชื้นสมดุล 1.05%db และการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C ในช่วงหลังจำนวน 8 h มีค่าความชื้นสมดุล 1.65%db

อัตราส่วนความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการอบแห้งที่สภาวะต่างๆ แสดงในภาพที่ 83 และ 84 แสดงให้เห็นว่า การอบแห้งปลาตากเป็นการอบแห้งแบบอัตราการอบแห้งลดลง เนื่องจากปริมาณความชื้นในปลาตากเกิดการถ่ายเทอย่างรวดเร็วในช่วงต้นของการทดลองในขณะที่มีความชื้นสูง ทำให้การถ่ายเทมวลของน้ำจากตัวปลาตากไปยังผิวหน้าเกิดขึ้นได้ง่าย และรวดเร็ว (Ahmat et al., 2014; จุฑารัตน์ และคณะ, 2557) เมื่อระยะเวลาการอบแห้งยาวนานขึ้นความชื้นบริเวณผิว และภายในปลาตากจะมีค่าต่ำลง อัตราการถ่ายเทมวลของน้ำจากตัวปลาตากไปยังผิวหน้าจะลดลงอย่างช้าๆ ซึ่งอัตราการลดลงของความชื้นในช่วงเวลาการอบแห้งจะมีความสัมพันธ์ไม่เชิงเส้นกับเวลาการอบแห้ง และสามารถแสดงในรูปความสัมพันธ์แบบเอกซ์โพเนนเชียล (Baysal et al., 2003; Wang, 2002)

สมการอบแห้งชั้นบางกึ่งทฤษฎีสามารถคำนวณหาค่าความชื้นได้เมื่อทราบเวลา จากการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังแสดงในรูปที่ 83 และ 84 พบว่า แบบจำลองดังกล่าวสามารถทำนายผลการทดลองได้อย่างถูกต้อง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายค่าความชื้นที่เวลาใดๆ ของการอบแห้งปลาตากมีค่าคงที่ของการอบแห้ง $k = 0.2101$ สามารถจัดรูปสมการได้ดังต่อไปนี้

$$M_t = M_{eq} + (M_{in} - M_{eq}) \exp (-0.2101t)$$

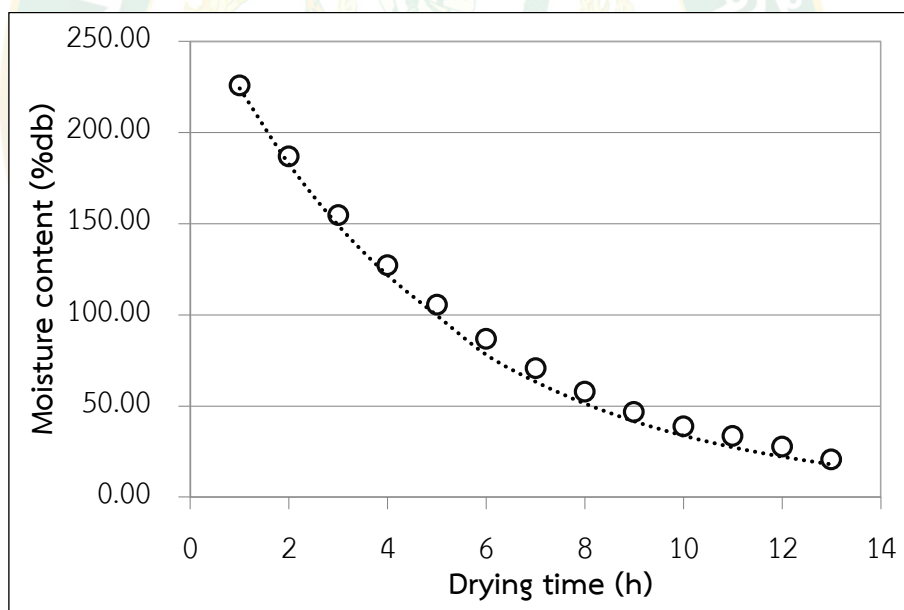
การอบแห้งปลาตุกที่อุณหภูมิ 70 °C มีค่าความชื้นสมดุล 5.08%db โดยปลาตุกมีความชื้นเริ่มต้น 275.56%db สมการอบแห้งชั้นบาง ณ เวลาใดๆ คือ

$$M_t = 5.08 + (275.56 - 5.08) \exp(-0.2101t)$$

การอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C มีค่าความชื้นสมดุล 5.81%db โดยปลาตุกมีความชื้นเริ่มต้น 275.56%db สมการอบแห้งชั้นบาง ณ เวลาใดๆ คือ

$$M_t = 5.81 + (275.56 - 5.81) \exp(-0.2101t)$$

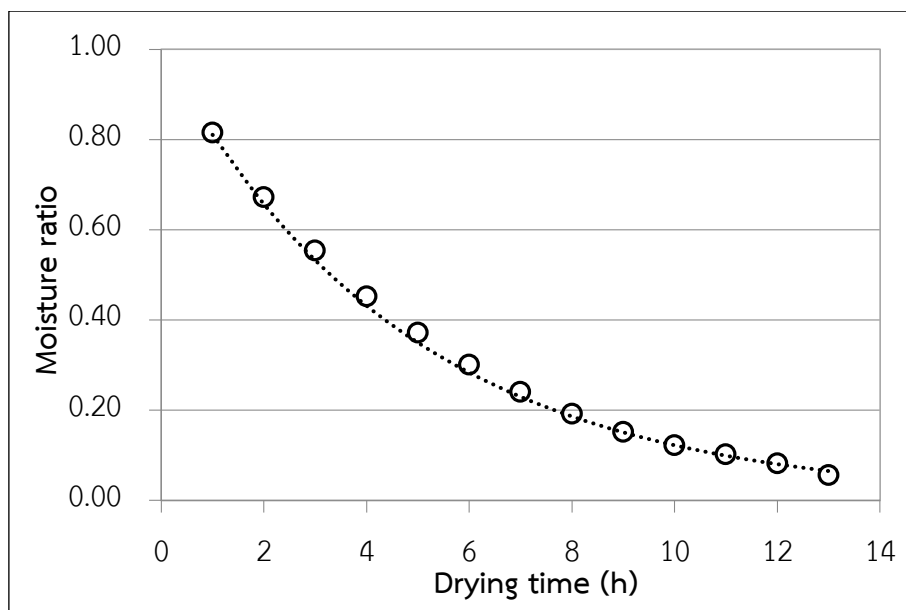
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวมีความสัมพันธ์แบบเอกซ์โพเนนเชียลโดยมีค่า $R^2 = 0.995$ และมีค่า $RMSE = 8.916 \times 10^{-5}$



ภาพที่ 83 ค่าความชื้นที่ได้จากการทดลองและสมการอบแห้งชั้นบางกึ่งทฤษฎี

เมื่อ

- ความชื้นของปลาตุกที่ได้จากการทดลอง ความชื้นของปลาตุกจากสมการอบแห้งชั้นบางกึ่งทฤษฎี



ภาพที่ 84 อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากผลการทดลองและสมการออบแห้งชั้นบางกึ่งทฤษฎี

เมื่อ

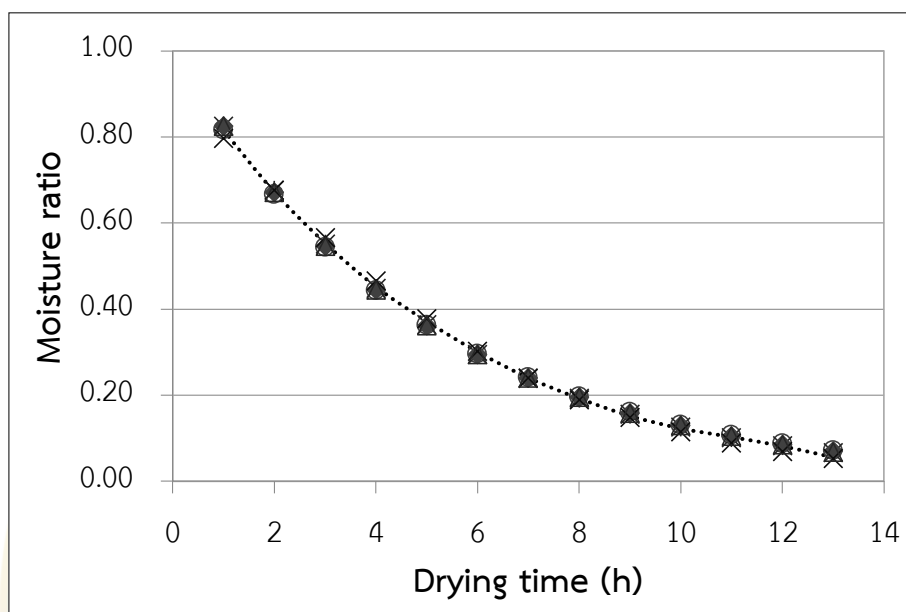
- อัตราส่วนความชื้นจากผลการทดลอง อัตราส่วนความชื้นจากสมการออบแห้งชั้นบางกึ่งทฤษฎี

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการการอบแห้งชั้นบางแบบเอมพิริคัล

การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยการนำข้อมูลการทดลองมาใช้ในการพัฒนาสมการการอบแห้งชั้นบางแบบเอมพิริคัลของการอบแห้งปลาตาก โดยเลือกใช้สมการเอมพิริคัลที่นิยมใช้ทั่วไปทางด้าน การอบแห้ง 5 สมการ ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SigmaPlot 10.0 แสดงค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 14 โดยค่าคงที่ของสมการการอบแห้งชั้นบางแบบเอมพิริคัลคือ ค่า k แสดงรูปแบบสมการที่แปรผันโดยตรงกับอุณหภูมิการอบแห้งตามรูปแบบสมการอาร์เรเนียส (Nuthong et al., 2011; จุฑารัตน์ และคณะ, 2557)

การศึกษาเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความชื้นของปลาตากจากผลการทดลอง และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้ง 5 รูปแบบ ดังแสดงภาพที่ 85 และตารางที่ 15 เมื่อพิจารณาค่า R^2 และค่า RMSE เพื่อเปรียบเทียบหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความเหมาะสมสำหรับการอธิบายจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งปลาตากพบว่า แบบจำลองของ Page มีค่า R^2 มากที่สุด และมีค่า RMSE น้อยที่สุด ได้แก่ 0.9997 และ 1.5800×10^{-4} ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Shen et al., 2011;

Tirawanichakul et al., 2009; อนุสรฯ และคณะ, 2555) โดยแบบจำลองดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุดจึงมีความเหมาะสมสำหรับการทำนายสมการอบแห้งปลาตากด้วยพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานความจากแก๊ส LPG



ภาพที่ 85 อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง และสมการอบแห้งชั้นบางแบบเอมพิริคัล

เมื่อ

- | | | | |
|-------------|------------------------------|---|---------------------------|
|■..... | อัตราส่วนความชื้นจากการทดลอง | ○ | Newton Model |
| * | Newton Model | ◆ | Henderson and Pabis Model |
| × | Logistic Model | △ | Logarithmic Model |

ตารางที่ 14 ค่าพารามิเตอร์ของสมการการอบแห้งชั้นบางแบบเอมพิริคัล

ค่าพารามิเตอร์	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์				
	Newton	Page	Henderson and Pabis	Logistic	Logarithmic
k	0.2030	0.1910	0.2060	0.2709	0.2060
a	-	-	1.0144	1.8410	1.0144
b	-	-	-	-	4.3297×10^{-13}
n	-	1.0350	-	-	-
R ²	0.9994	0.9997	0.9995	0.9992	0.9995
SEE	0.0082	0.0059	0.0077	0.0104	0.0081
RSME	3.3390×10^{-4}	1.5800×10^{-4}	2.6970×10^{-4}	4.9790×10^{-4}	2.4850×10^{-4}

ตารางที่ 15 รูปแบบสมการการอบแห้งชั้นบางแบบเอมพิริคัล

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	สมการทางคณิตศาสตร์
Newton	$MR = \exp(-0.2030t)$
Page	$MR = \exp(-0.1910t^{1.0350})$
Henderson and Pabis	$MR = 1.0144 \exp(-0.2060t)$
Logistic	$MR = 1.8410 / (1 + \exp(0.2709t))$
Logarithmic	$MR = 1.0144 \exp(-0.2060t) + 4.3297 \times 10^{-13}$

การวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์ปลาแห้งภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการอบแห้ง

การวิเคราะห์คุณภาพผลิตภัณฑ์ปลาแห้งภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการอบแห้งจะทำการแบ่งออกเป็น 4 วิธี ได้แก่

1. การประเมินคุณภาพผลิตภัณฑ์ปลาแห้งด้วยประสาทสัมผัส (Sensory evaluation)
2. การประเมินลักษณะสีของผลิตภัณฑ์ปลาแห้ง
3. การประเมินคุณภาพด้านการคืนตัวของผลิตภัณฑ์ปลาแห้ง
4. การวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ปลาแห้ง

ผลการวิเคราะห์คุณภาพผลิตภัณฑ์ปลาแห้งภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการอบแห้งในแต่ละวิธีมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การประเมินคุณภาพผลิตภัณฑ์ปลาแห้งด้วยประสาทสัมผัส

การประเมินคุณภาพผลิตภัณฑ์ปลาแห้งด้วยประสาทสัมผัสจากการสำรวจประชากรจำนวน 20 คน ได้แก่ กลุ่มอาสาสมัครสาธารณสุข (อสม.) ประจำหมู่บ้านโทกหัวช้าง ตำบลพระบาท อำเภอเมือง จังหวัดลำปาง โดยวิธีการทดสอบการยอมรับ (Acceptance testing) ทำการประเมินคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ปลาแห้งที่มีจำหน่ายตามท้องตลาดเทียบกับคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ปลาแห้งที่ผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุน

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคความแปรปรวน (Analysis of variance) (สุรชัย และคณะ, 2558) จากผลการสำรวจประชากรจำนวน 20 คน โดยแบบทดสอบ 5 ระดับ (5-point Hedonic scale) ต่อคุณลักษณะด้านรูปร่าง และสีของผลิตภัณฑ์ เนื้อสัมผัส และกลิ่น ผลการวิเคราะห์พบว่า คุณลักษณะความชอบด้านรูปร่าง และสีของผลิตภัณฑ์ปลาตุ๋กแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุนมีคะแนนความชอบแตกต่างกันทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยคะแนนความชอบรวมมากที่สุดคือ 4.20 คะแนน ซึ่งอยู่ในระดับชอบมาก ทั้งนี้เนื่องมาจากผลิตภัณฑ์ปลาตุ๋กแห้งจากการทดลองมีสีที่สดกว่า ผลิตภัณฑ์ปลาตุ๋กแห้งที่มีจำหน่ายตามท้องตลาดซึ่งมีคะแนนความชอบไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$) โดยมีคะแนนความชอบรวม 3.70 คะแนน เมื่อพิจารณาคคุณลักษณะความชอบด้านเนื้อสัมผัส และกลิ่น ผลการวิเคราะห์พบว่า คะแนนความชอบโดยรวมต่อคุณลักษณะทั้ง 2 ด้านมีค่าที่ใกล้เคียงกันซึ่งคะแนนความชอบแตกต่างกันทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยคะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัสคือ 3.80 และ 3.75 คะแนน ของผลิตภัณฑ์ปลาตุ๋กแห้งตามท้องตลาด และผลิตภัณฑ์ปลาตุ๋กแห้งจากการทดลองตามลำดับ ในขณะที่คะแนนความชอบด้านกลิ่นมีคะแนนความชอบแตกต่างกันทางสถิติ ($P < 0.05$) คือ 3.95 และ 4.00 คะแนน ของผลิตภัณฑ์ปลาตุ๋กแห้งตามท้องตลาด และผลิตภัณฑ์ปลา

ดุกแห้งจากการทดลองตามลำดับ ซึ่งผลการยอมรับโดยรวมของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์ปลาแห้งที่ผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุนอยู่ในระดับชอบมาก ผลการประเมินคุณภาพผลิตภัณฑ์ปลาแห้งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 16

ตารางที่ 16 ค่าเฉลี่ยด้านความชอบของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์ปลาแห้ง (n=20)

คุณสมบัติ	ผลิตภัณฑ์ปลาแห้ง ที่จำหน่ายตามท้องตลาด	ผลิตภัณฑ์ปลาแห้ง จากการทดลอง
รูปร่างของผลิตภัณฑ์	3.70±0.47	4.20 ^a ±0.62
เนื้อสัมผัส	3.80 ^b ±0.52	3.75 ^c ±0.55
กลิ่น	3.95 ^a ±0.51	4.00 ^b ±0.46

หมายเหตุ ค่าของข้อมูล คือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงว่ามีค่าแตกต่างกันทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

2. การประเมินคุณภาพด้านการคินตัวของผลิตภัณฑ์ปลาแห้ง

การประเมินคุณภาพด้านการคินตัวของผลิตภัณฑ์ปลาแห้ง โดยนำไปแช่ในน้ำที่อุณหภูมิประมาณ 70 °C เป็นเวลา 15 นาที (ธนิต และคณะ, 2549) ผลการทดสอบคุณภาพด้านการคินตัวพบว่า ผลิตภัณฑ์ปลาแห้งที่จำหน่ายตามท้องตลาดที่ผ่านกระบวนการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำจะสามารถคินตัวได้มากกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงด้วยกระบวนการอบแห้งโดยเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุน เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะทำให้โปรตีนจับตัวกันแน่น และหดตัวมากกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำทำให้มีช่องว่างระหว่างเส้นใยกล้ามเนื้อน้อยจึงทำให้น้ำแทรกซึมเข้าไปในเนื้อของผลิตภัณฑ์ปลาแห้งได้ยากกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ (ธนิต และคณะ, 2549) จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ค่าการคินตัวของผลิตภัณฑ์ปลาแห้งจากการทดลองที่อบแห้งด้วยอุณหภูมิสูงมีค่าน้อยกว่าผลิตภัณฑ์ปลาแห้งที่จำหน่ายตามท้องตลาดที่ผ่านกระบวนการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำ โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าการคินตัวของผลิตภัณฑ์ปลาแห้งที่จำหน่ายตามท้องตลาด และผลิตภัณฑ์ปลาแห้งจากการทดลองมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ได้แก่ 40.75 และ 38.16% ตามลำดับ นอกจากนี้ค่าการคินตัวดังกล่าวสามารถบ่งบอกถึงความสามารถในการให้รสชาติอีกด้วย โดยทั่วไปจะสังเกตได้ว่าผลิตภัณฑ์แห้งหลายๆ ชนิดไม่เหมาะกับการรับประทานโดยตรงเนื่องจากไม่มีรสชาติความกลมกล่อม แต่เมื่อนำไปผ่านกระบวนการปรุงอาหาร เช่น การนำไปต้มจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ดังกล่าวมีรสชาติที่ดี

ขึ้น ดังนั้นค่าการคืนตัวดังกล่าวจึงแสดงถึงความสามารถในการให้รสชาติกับอาหาร (จรัสกริ, 2543) ผลการทดสอบการคืนตัวของผลิตภัณฑ์ปลาแห้งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 17

ตารางที่ 17 การคืนตัวของผลิตภัณฑ์ปลาแห้ง





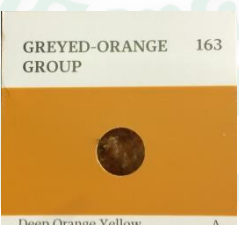

ผลิตภัณฑ์ปลาแห้ง	การคืนตัว (%)
ผลิตภัณฑ์ปลาแห้งที่จำหน่ายตามท้องตลาด	40.75 ± 1.99
ผลิตภัณฑ์ปลาแห้งจากการทดลอง	38.16 ± 1.85

หมายเหตุ ค่าของข้อมูล คือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

3. การประเมินลักษณะสีของผลิตภัณฑ์ปลาแห้งโดยใช้สมุดคู่มือเทียบสี (RHS colour chart)

การประเมินลักษณะสีของผลิตภัณฑ์ปลาแห้งโดยใช้สมุดคู่มือเทียบสี (RHS colour chart) รุ่นที่ 6 Sixth editon 2015 โดยในการประเมินลักษณะสีของผลิตภัณฑ์ปลาแห้งในงานวิจัยนี้จะใช้กลุ่มสีค่า FAN4 เปรียบเทียบระหว่างสีของผลิตภัณฑ์ปลาแห้งที่มีจำหน่ายทั่วไปตามท้องตลาด และผลิตภัณฑ์ปลาแห้งที่ได้จากการทดลอง ผลการประเมินลักษณะสีของผลิตภัณฑ์ปลาแห้งดังกล่าวพบว่า ผลิตภัณฑ์ปลาแห้งที่มีจำหน่ายทั่วไปตามท้องตลาด และผลิตภัณฑ์ปลาแห้งที่ได้จากการทดลองมีลักษณะสีที่อยู่ในกลุ่มเฉดสีเดียวกัน ได้แก่ GREYED-ORANGE GROUP 163 โดยผลิตภัณฑ์ปลาแห้งตามท้องตลาดจัดอยู่ในโทนสีเดียวกันทั้งหมด ได้แก่ Deep Orange Yellow A คือ โทนสีที่แสดงความเป็นสีส้มมากกว่าสีเหลือง เมื่อพิจารณาลักษณะสีของผลิตภัณฑ์ปลาแห้งที่ได้จากการทดลองพบว่า ลักษณะของสีสามารถแบ่งออกเป็น 2 โทน ได้แก่ Deep Orange Yellow A และ Strong Orange Yellow B ซึ่งเป็นโทนสีที่แสดงความเป็นสีเหลืองมากกว่าสีส้ม จากผลการประเมินลักษณะสีข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า ผลิตภัณฑ์ปลาแห้งทั้ง 2 รูปแบบมีลักษณะสีที่ใกล้เคียงกัน โดยผลการประเมินลักษณะสีของผลิตภัณฑ์ปลาแห้งดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 18 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 18 การประเมินลักษณะสีของผลิตภัณฑ์ปลาแห้งที่มีจำหน่ายทั่วไปตามท้องตลาดและผลิตภัณฑ์ปลาแห้งที่ได้จากการทดลอง

ผลิตภัณฑ์ปลาแห้ง	ผลิตภัณฑ์ปลาแห้ง ที่จำหน่ายตามท้องตลาด	ผลิตภัณฑ์ปลาแห้ง จากการทดลอง
ตัวอย่างที่ 1		
ตัวอย่างที่ 2		
ตัวอย่างที่ 3		

4. การวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ปลาแห้ง

การวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ปลาแห้งจะทำการวิเคราะห์ค่าโปรตีนและไขมันในเนื้อปลา เนื่องจากโปรตีนที่ได้จากเนื้อปลาจะมีคุณค่าทางโภชนาการที่สูงมาก เมื่อเทียบกับโปรตีนจากเนื้อสัตว์ประเภทอื่นๆ นอกจากนี้ภายในเนื้อปลายังมีไขมันที่มีคุณภาพดีประกอบไปด้วยกรดไขมันที่มีความจำเป็นต่อร่างกายอีกด้วย โดยจะทำการเปรียบเทียบค่าโปรตีน และไขมันของผลิตภัณฑ์ปลาดุกแห้งจากการทดลอง และผลิตภัณฑ์ปลาดุกแห้งที่มีจำหน่ายตามท้องตลาด

การวิเคราะห์ดังกล่าวจะนำตัวอย่างส่งวิเคราะห์โดยสถาบันบริการตรวจสอบคุณภาพและมาตรฐานผลิตภัณฑ์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ (IQS) จากผลการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า คุณค่าทางโภชนาการของปลาดุกโดยมาตรฐานแล้วต้องมีปริมาณโปรตีน 23 g ต่อ 100 g และมีปริมาณไขมัน 2.4 g ต่อ 100 g (กองโภชนาการ กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, 2541) ซึ่งปลาดุกจัดอยู่ในกลุ่มของปลาที่มีไขมันสูง ผลการวิเคราะห์พบว่า ผลิตภัณฑ์ปลาดุกแห้งที่ได้จากการทดลองมีปริมาณโปรตีน และไขมันคือ 38.71 g ต่อ 100 g และ 24.38 g ต่อ 100 g ตามลำดับ เมื่อเทียบกับคุณค่าทางโภชนาการของปลาดุกตามมาตรฐานแสดงให้เห็นว่ามีปริมาณโปรตีน และปริมาณของไขมันที่มีความเหมาะสมต่อผู้บริโภค เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าโปรตีน และไขมันของผลิตภัณฑ์ปลาดุกแห้งจากการทดลอง และที่มีจำหน่ายตามท้องตลาดพบว่า ผลิตภัณฑ์ปลาดุกแห้งที่มีจำหน่ายตามท้องตลาดมีปริมาณของโปรตีน และไขมันที่สูงกว่าผลิตภัณฑ์ปลาดุกแห้งที่ได้จากการทดลอง ทั้งนี้เนื่องมาจากอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง และปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญได้แก่ ปริมาณโปรตีน และไขมันในอาหารที่ใช้ในกระบวนการเพาะเลี้ยงปลาดุกของกลุ่มเกษตรกรที่แตกต่างกันออกไป (กองโภชนาการ กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, 2541) โดยผลการวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ปลาดุกแห้งแสดงได้ดังตารางที่ 19

ตารางที่ 19 ผลการวิเคราะห์ค่าโปรตีนและไขมันในเนื้อปลา

รายการทดสอบ	วิธีทดสอบ	ผลการทดสอบ	
		ผลิตภัณฑ์ปลาดุกแห้งที่มีจำหน่ายตามท้องตลาด	ผลิตภัณฑ์ปลาดุกแห้งจากการทดลอง
โปรตีน	AOAC (2012), 991.20	46.72 g ต่อ 100 g	38.71 g ต่อ 100 g
ไขมัน	AOAC (2012), 945.18	30.47 g ต่อ 100 g	24.38 g ต่อ 100 g

การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ของการอบแห้งปลาตากด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุน โดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG ซึ่งใช้หัวเผาแก๊สชนิดอินฟราเรดเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และการอบแห้งปลาตากด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุนโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG เพียงอย่างเดียว ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ผลตอบแทนสุทธิ (Net Present Value: NPV), อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR) และระยะเวลาคืนทุน การวิเคราะห์ค่าผลตอบแทนสุทธิจะแสดงให้เห็นว่าเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุนที่กำลังพิจารณามีมูลค่าปัจจุบันสุทธิของการลงทุนเป็นมูลค่าเท่าไรเมื่อสิ้นสุดการทำงานถ้าหากผลตอบแทนสุทธิมีค่าเป็นบวกมากแสดงว่าการลงทุนดังกล่าวสมควรแก่การลงทุน และการวิเคราะห์ค่าอัตราผลตอบแทนภายในเป็นการหาค่า Discount rate (i) ที่ทำให้ค่าผลตอบแทนสุทธิมีค่าเท่ากับศูนย์หากค่าอัตราผลตอบแทนภายในมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าของทุน Discount rate (i) ถือได้ว่าการลงทุนดังกล่าวมีความเหมาะสมในการลงทุน

1. การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์เมื่อทำการเพาะเลี้ยงปลาตากเพื่อจำหน่ายเนื้อปลา

จากข้อมูลการสัมภาษณ์เกษตรกรผู้เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำทราบว่า การเลี้ยงปลาในบ่อดินของกลุ่มเกษตรกรสามารถทำการเพาะเลี้ยงได้ 2 รอบ/ปี โดยเกษตรกรต้องระมัดระวังปัญหาเรื่องน้ำเน่าเสีย อีกทั้งต้องระมัดระวังเรื่องโรคระบาดของปลา โดยปัญหาต่างๆ เหล่านี้ส่งผลให้ปลาตายเป็นจำนวนมาก ซึ่งเกษตรกรผู้เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำได้ให้ข้อมูลว่าในการเลี้ยงปลาในแต่ละรอบจะมีอัตราการรอด 70% ทำให้รายได้จากการขายเนื้อปลาลดลง โดยเงื่อนไขเบื้องต้นของการพิจารณาผลตอบแทนจากการเพาะเลี้ยงปลาตากในบ่อดินมีรายละเอียดดังตารางที่ 20 และสมมติฐานเบื้องต้นดังนี้

1. การลงทุนสำหรับการขุดบ่อดิน จากข้อมูลการสัมภาษณ์เกษตรกรผู้เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำทราบว่าเกษตรกรมีพื้นที่เป็นของตนเอง อีกทั้งในการขุดบ่อเป็นการขุดเพื่อนำดินไปทับถมที่นอกจากเกษตรกรจะได้อายุได้จากการจำหน่ายดินแล้วการได้บ่อดินสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำยังเป็นผลพลอยได้จากการกระทำดังกล่าว ทำให้เกษตรกรไม่มีเงินลงทุนในด้านการขุดบ่อ อีกทั้งการสูบน้ำเข้าบ่อเป็นการนำน้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติเข้ามาใช้ ดังนั้นในการพิจารณาผลตอบแทนในการเพาะเลี้ยงปลาตากในบ่อดินจึงพิจารณาเพียงเงินลงทุนในการซื้อลูกปลา และราคาอาหารปลาเท่านั้น

2. จำนวนปลาตากที่ทำการปล่อยครั้งแรกในบ่อดิน ได้แก่ 12,000 ตัว/รอบ โดยมีอัตราการรอด 70%

3. ระยะเวลาการเลี้ยง 180 วัน ราคาซื้อลูกปลา และราคาขายเนื้อปลา ได้แก่ 0.70 บาท/ตัว และ 50.00 บาท/กิโลกรัม ตามลำดับ

4. ในช่วงที่ปลายังอายุน้อยๆ จะต้องการโปรตีนปริมาณสูงกว่าปลาที่โตแล้ว ดังนั้นสำหรับการให้อาหารปลาในช่วงแรกๆ จึงต้องให้กินอาหารที่มีโปรตีนสูง และมีขนาดเล็กที่สุด หรือที่เรียกว่าเม็ดโฟม โดยราคาอาหารปลาสำหรับระยะเวลาการเลี้ยง 30-90 วัน มีราคา 28 บาท/กิโลกรัม ในขณะที่ราคาอาหารปลาสำหรับระยะเวลาการเลี้ยง 90 วันขึ้นไป มีราคา 25.80 บาท/กิโลกรัม

ตารางที่ 20 ข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์เมื่อทำการเพาะเลี้ยงปลาตกเพื่อจำหน่ายเนื้อปลา

ลำดับ	รายการ	จำนวน	หน่วยนับ
1	จำนวนปลา	12,000.00	ตัว/รอบ
2	ราคาซื้อลูกปลา	0.70	บาท/ตัว
3	ระยะเวลาการเลี้ยง	180.00	วัน/รอบ
4	ราคาอาหารปลา	25.80	บาท/กิโลกรัม
5	ราคาขายปลา	50.00	บาท/kg
6	จำนวนรอบการเลี้ยง	2.00	รอบ/ปี
7	ผลผลิต, น้ำหนัก	4,800.00	กิโลกรัม/ปี
8	ปริมาณอาหาร	7,439.99	กิโลกรัม/ปี

จากผลการวิเคราะห์พบว่า รายได้สุทธิเมื่อเกษตรกรทำการจำหน่ายปลาตกสดโดยไม่ผ่านกระบวนการแปรรูป ได้แก่ 31,248.26 บาท/ปี ซึ่งเป็นมูลค่าที่น้อยมากเมื่อเทียบกับมูลค่าของเงินลงทุน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบรายได้สุทธิ เมื่อเกษตรกรทำการแปรรูปปลาจำหน่ายในรูปแบบของผลิตภัณฑ์ปลาแห้ง ทั้งนี้เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ และเพิ่มรายได้ให้กับเกษตรกร อีกทั้งยังเป็นการส่งเสริมการใช้เทคโนโลยีพลังงานทดแทนในชีวิตประจำวันอีกด้วย โดยการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์เมื่อทำการเพาะเลี้ยงปลาตกเพื่อจำหน่ายเนื้อปลาแสดงได้ดังนี้

พิจารณาเงินลงทุนจากการเพาะเลี้ยงปลาตกเพื่อจำหน่ายเป็นเนื้อปลา

1) รายจ่ายค่าพันธุ์ลูกปลา จากเงื่อนไขเบื้องต้นกำหนดให้จำนวนปลาตกที่ทำการปล่อยครั้งแรกในรอบปี ได้แก่ 12,000 ตัว/รอบ ใน 1 ปีสามารถทำการเพาะเลี้ยงได้ 2 รอบ/ปี และราคาซื้อลูกปลาเท่ากับ 0.70 บาท/ตัว ดังนั้นรายจ่ายค่าพันธุ์ลูกปลาสามารถพิจารณาได้จาก

$$\begin{aligned} \text{รายจ่ายค่าพันธุ์ลูกปลา} &= 12,000 \text{ ตัว/รอบ} \times 2 \text{ รอบ/ปี} \times 0.70 \text{ บาท/ตัว} \\ \text{รายจ่ายค่าพันธุ์ลูกปลา} &= 16,800.00 \text{ บาท/ปี} \end{aligned}$$

2) รายจ่ายค่าอาหารปลา กำหนดให้การเพาะเลี้ยงปลาทุกมีปริมาณการให้อาหาร ได้แก่ 7,439.99 kg/ปี โดยราคาอาหารเท่ากับ 25.80 บาท/kg ดังนั้นรายจ่ายค่าอาหารปลาสามารถพิจารณาได้จาก

$$\begin{aligned} \text{รายจ่ายค่าอาหารปลา} &= 7,439.99 \text{ กิโลกรัม/ปี} \times 25.80 \text{ บาท/กิโลกรัม} \\ \text{รายจ่ายค่าอาหารปลา} &= 191,951.74 \text{ บาท/ปี} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น เงินลงทุนจากการเพาะเลี้ยงปลาทุกเพื่อจำหน่ายเป็นเนื้อปลา ได้แก่} \\ \text{เงินลงทุน} &= 16,800.00 + 191,951.74 \text{ บาท/ปี} \\ \text{เงินลงทุน} &= 208,751.74 \text{ บาท/ปี} \end{aligned}$$

พิจารณารายได้จากการเพาะเลี้ยงปลาทุกเพื่อจำหน่ายเป็นเนื้อปลา

1) รายได้จากการเพาะเลี้ยงปลาทุกเพื่อจำหน่ายเป็นเนื้อปลา เมื่อการเลี้ยงปลาทุกในบ่อดินมีอัตราการรอด 70% ปริมาณผลผลิตปลาใน 1 ปี ได้แก่ 4,800.00 กิโลกรัม/ปี และจำหน่ายปลาทุกในราคาเท่ากับ 50.00 บาท/กิโลกรัม ดังนั้น รายได้จากการจำหน่ายเนื้อปลาสามารถพิจารณาได้จาก

$$\begin{aligned} \text{รายได้จากการจำหน่ายเนื้อปลา} &= 4,800.00 \text{ กิโลกรัม/ปี} \times 50.00 \text{ บาท/กิโลกรัม} \\ \text{รายได้จากการจำหน่ายเนื้อปลา} &= 240,000.00 \text{ บาท/ปี} \end{aligned}$$

2) รายได้สุทธิ เมื่อเกษตรกรมีเงินลงทุนรวมทั้งสิ้นเท่ากับ 208,751.74 บาท/ปี และมีรายได้จากการจำหน่ายเนื้อปลาทุกเท่ากับ 240,000.00 บาท/ปี

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น รายได้สุทธิ} &= 240,000.00 - 208,751.74 \text{ บาท/ปี} \\ \text{รายได้สุทธิ} &= 31,248.26 \text{ บาท/ปี} \end{aligned}$$

2. การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์เมื่ออบแห้งปลาทุกด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุนโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG

การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์เมื่ออบแห้งปลาทุกด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุนโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนร่วม โดยข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ดังแสดงในตารางที่ 21 โดยได้กำหนดมูลค่าซาก และดอกเบี้ยในการกู้เงินมาลงทุนขึ้นมาด้วย เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบแทนสุทธิ (NPV) และอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR)

ตารางที่ 21 ข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ของการอบแห้งปลาตากด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุนโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนร่วม

ลำดับ	รายการ	จำนวน	หน่วยนับ
1	ระยะเวลาในการอบแห้งใน 1 วัน	13.00	ชั่วโมง/วัน
2	ระยะเวลาในการอบแห้งใน 1 เดือน	20.00	วัน/เดือน
3	ระยะเวลาในการอบแห้งใน 1 ปี	12.00	เดือน/ปี
4	จำนวนปลาดุกที่ทำการอบแห้ง	20.00	กิโลกรัม/วัน
5	น้ำหนักสุดท้ายหลังจากการอบแห้ง	6.50	กิโลกรัม/วัน
6	ราคาซื้อปลาดุก	50.00	บาท/กิโลกรัม
7	ราคาขายปลาดุกแห้ง	350.00	บาท/กิโลกรัม
8	ปริมาณการใช้ไฟฟ้า	1.40	กิโลวัตต์/วัน
9	ราคาค่าไฟฟ้า	4.00	บาท/กิโลวัตต์
10	ปริมาณการใช้แก๊สหุงต้ม (LPG)	2.72	กิโลกรัม/วัน
11	ราคาค่าแก๊สหุงต้ม (LPG)	26.33	บาท/กิโลกรัม
12	ปริมาณการใช้เกลือ	5	กิโลกรัม/วัน
13	ราคาเกลือ	20	บาท/กิโลกรัม
14	ค่าแรง	300	บาท/วัน
15	เงินลงทุนสร้างเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุน	100,000.00	บาท
16	ค่าบำรุงรักษา	2,000.00	บาท/ปี
17	อายุการใช้งาน	10.00	ปี
18	มูลค่าซาก	5,000.00	บาท
19	ดอกเบี้ยในการกู้เงินมาลงทุน	8.50	%

เมื่อทำการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ของการอบแห้งปลาดุกด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุนโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG พบว่ามูลค่าของเงินลงทุน และรายได้จากการจำหน่ายผลิตภัณฑ์ปลาดุกแห้ง ได้แก่ 356,513.02 และ 546,000.00 บาท/ปี โดยมีรายได้สุทธิ 189,486.98 บาท/ปี

การพิจารณารายได้สุทธิจากการจำหน่ายผลิตภัณฑ์ปลาดุกแห้งเทียบกับการจำหน่ายเนื้อปลาดุกสดพบว่า การแปรรูปปลาดุก และจำหน่ายเป็นผลิตภัณฑ์ปลาแห้งเกษตรกรจะมีรายได้เพิ่มขึ้น

158,238.72 บาท/ปี หรือมีรายได้เพิ่มขึ้นเป็น 6 เท่าจากเดิมที่มีการจำหน่ายเป็นเนื้อพลาสติก โดยมีผลตอบแทนสุทธิ 1,163,290.00 บาท อัตราผลตอบแทนภายใน 60.80% ค่าผลตอบแทนสุทธิ และอัตราผลตอบแทนภายในแสดงให้เห็นว่าการลงทุนดังกล่าวมีความเหมาะสมในการลงทุน โดยการใช้เครื่องอบแห้งแบบถาดหมุนในการอบแห้งปลาตากจะมีระยะเวลาการคืนทุน 0.53 ปี ด้วย จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการแปรรูปผลิตภัณฑ์ปลาตากด้วยกระบวนการอบแห้งเป็นอีกหนึ่งแนวทางในการเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ อีกทั้งยังสามารถเพิ่มรายได้ให้กับเกษตรกรได้อีกด้วย โดยการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์เมื่ออบแห้งปลาตากด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุนโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนร่วมสามารถแสดงได้ดังนี้

พิจารณาเงินลงทุนสำหรับกระบวนการอบแห้งผลิตภัณฑ์ปลา

1) รายจ่ายค่าปลาดุกสด จากเงื่อนไขเบื้องต้นกำหนดให้จำนวนปลาดุกที่ทำการอบแห้ง ได้แก่ 20.00 กิโลกรัม/วัน โดยทำการอบแห้งเท่ากับ 20.00 วัน/เดือน และราคาซื้อปลาดุกเท่ากับ 50.00 บาท/กิโลกรัม ดังนั้นรายจ่ายค่าปลาดุกสดสามารถพิจารณาได้จาก

$$\begin{aligned} \text{รายจ่ายค่าปลาดุกสด} &= 20.00 \text{ กิโลกรัม/วัน} \times 20.00 \text{ วัน/เดือน} \times 12 \text{ เดือน/ปี} \times \\ & 50.00 \text{ บาท/กิโลกรัม} \\ \text{รายจ่ายค่าปลาดุกสด} &= 240,000.00 \text{ บาท/ปี} \end{aligned}$$

2) เงินลงทุนค่าไฟฟ้า ในกระบวนการอบแห้งมีปริมาณการใช้ไฟฟ้า ได้แก่ 1.40 กิโลวัตต์/วัน และราคาค่าไฟฟ้าเท่ากับ 4.00 บาท/กิโลวัตต์ ดังนั้นเงินลงทุนค่าไฟฟ้าสามารถพิจารณาได้จาก

$$\begin{aligned} \text{เงินลงทุนค่าไฟฟ้า} &= 1.40 \text{ กิโลวัตต์/วัน} \times 20.00 \text{ วัน/เดือน} \times 12 \text{ เดือน/ปี} \times \\ & 4.00 \text{ บาท/กิโลวัตต์} \\ \text{เงินลงทุนค่าไฟฟ้า} &= 1,324.80 \text{ บาท/ปี} \end{aligned}$$

3) เงินลงทุนค่าแก๊ส LPG ในกระบวนการอบแห้งมีปริมาณการใช้แก๊ส LPG ได้แก่ 2.72 กิโลกรัม/วัน และราคาค่าแก๊ส LPG เท่ากับ 26.33บาท/กิโลกรัม ดังนั้นเงินลงทุนค่าแก๊ส LPG สามารถพิจารณาได้จาก

$$\begin{aligned} \text{เงินลงทุนค่าแก๊ส LPG} &= 2.72 \text{ กิโลกรัม/วัน} \times 20.00 \text{ วัน/เดือน} \times 12 \text{ เดือน/ปี} \times \\ & 26.33 \text{ บาท/กิโลกรัม} \\ \text{เงินลงทุนค่าแก๊ส LPG} &= 17,188.22 \text{ บาท/ปี} \end{aligned}$$

4) เงินลงทุนค่าแรงงาน เมื่อทำการรอบแห้ง 20.00 วัน/เดือน โดยค่าแรงงานสำหรับ 1 คน ได้แก่ 300 บาท/วัน ดังนั้นเงินลงทุนค่าแรงงานสามารถพิจารณาได้จาก

$$\begin{aligned} \text{เงินลงทุนค่าแรงงาน} &= 300 \text{ บาท/วัน} \times 20.00 \text{ วัน/เดือน} \times 12 \text{ เดือน/ปี} \\ \text{เงินลงทุนค่าแรงงาน} &= 72,000.00 \text{ บาท/ปี} \end{aligned}$$

5) เงินลงทุนค่าเกลือสำหรับการเตรียมวัตถุดิบ ในขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบทดสอบจำนวน 20 kg ใช้เกลือในปริมาณ 5 กิโลกรัม/วัน กำหนดให้ราคาเกลือเท่ากับ 20บาท/กิโลกรัม ดังนั้นเงินลงทุนค่าเกลือสำหรับการเตรียมวัตถุดิบสามารถพิจารณาได้จาก

$$\begin{aligned} \text{เงินลงทุนค่าเกลือ} &= 5 \text{ กิโลกรัม/วัน} \times 20 \text{ บาท/กิโลกรัม} \times 20.00 \text{ วัน/เดือน} \times \\ &12 \text{ เดือน/ปี} \end{aligned}$$

$$\text{เงินลงทุนค่าเกลือ} = 24,000.00 \text{ บาท/ปี}$$

6) เงินลงทุนค่าบำรุงรักษาเครื่องอบแห้ง กำหนดให้ใน 1 ปี มีค่าบำรุงรักษาเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุนได้แก่ 2,000.00 บาท/ปี

ดังนั้น เงินลงทุนสำหรับกระบวนการอบแห้งผลิตภัณฑ์ปลา ได้แก่

$$\text{เงินลงทุน} = 356,513.02 \text{ บาท/ปี}$$

พิจารณารายได้จากการจำหน่ายผลิตภัณฑ์ปลาแห้ง

1) รายได้จากการจำหน่ายผลิตภัณฑ์ปลาแห้ง ในกระบวนการอบแห้งปลาสดจำนวน 20 กิโลกรัม จะได้ผลิตภัณฑ์ปลาแห้งที่มีน้ำหนัก 6.50 กิโลกรัม กำหนดให้ราคาขายผลิตภัณฑ์ปลาแห้งเท่ากับ 350 บาท/กิโลกรัม ดังนั้นรายได้จากการจำหน่ายผลิตภัณฑ์ปลาแห้งสามารถพิจารณาได้จาก

$$\begin{aligned} \text{รายได้จากการจำหน่ายผลิตภัณฑ์ปลาแห้ง} &= 6.50 \text{ กิโลกรัม/วัน} \times 20.00 \text{ วัน/เดือน} \times 12 \\ &\text{เดือน/ปี} \times 350 \text{ บาท/กิโลกรัม} \end{aligned}$$

$$\text{รายได้จากการจำหน่ายผลิตภัณฑ์ปลาแห้ง} = 546,000.00 \text{ บาท/ปี}$$

2) รายได้สุทธิ เมื่อเงินลงทุนสำหรับกระบวนการอบแห้งผลิตภัณฑ์ปลารวมทั้งสิ้น 356,513.02 บาท/ปี และมีรายได้จากการจำหน่ายผลิตภัณฑ์ปลาแห้ง 546,000.00 บาท/ปี

$$\text{ดังนั้น รายได้สุทธิ} = 546,000.00 - 356,513.02 \text{ บาท/ปี}$$

$$\text{รายได้สุทธิ} = 189,486.98 \text{ บาท/ปี}$$

3) จุดคุ้มทุน เมื่อรายได้สุทธิจากการจำหน่ายผลิตภัณฑ์ปลาแห้ง ได้แก่ 189,486.98 บาท/ปี โดยเครื่องอบแห้งมีมูลค่า 100,000.00 บาท

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น จุดคุ้มทุน} &= \frac{189,486.98 \text{ บาท/ปี}}{100,000.00 \text{ บาท}} \\ \text{จุดคุ้มทุน} &= 0.53 \text{ ปี} \end{aligned}$$

3. การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์เมื่ออบแห้งปลาตากด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุนโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG

การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์เมื่ออบแห้งปลาตากด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุนโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG โดยข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ ดังแสดงในตารางที่ 22

ตารางที่ 22 ข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ของการอบแห้งปลาตากด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุนโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG

ลำดับ	รายการ	จำนวน	หน่วยนับ
1	ระยะเวลาในการอบแห้งใน 1 วัน	13.00	ชั่วโมง/วัน
2	ระยะเวลาในการอบแห้งใน 1 เดือน	20.00	วัน/เดือน
3	ระยะเวลาในการอบแห้งใน 1 ปี	12.00	เดือน/ปี
4	จำนวนปลาตากที่ทำการอบแห้ง	20.00	กิโลกรัม/วัน
5	น้ำหนักสุดท้ายหลังจากการอบแห้ง	6.50	กิโลกรัม/วัน
6	ราคาซื้อปลาตาก	50.00	บาท/กิโลกรัม
7	ราคาขายปลาตากแห้ง	350.00	บาท/กิโลกรัม
8	ปริมาณการใช้ไฟฟ้า	2.02	กิโลวัตต์/วัน
9	ราคาค่าไฟฟ้า	4.00	บาท/กิโลวัตต์
10	ปริมาณการใช้แก๊สหุงต้ม (LPG)	4.76	กิโลกรัม/วัน
11	ราคาค่าแก๊สหุงต้ม (LPG)	26.33	บาท/กิโลกรัม
12	ปริมาณการใช้เกลือ	5	กิโลกรัม/วัน
13	ราคาเกลือ	20	บาท/กิโลกรัม
14	ค่าแรง	300	บาท/วัน

ลำดับ	รายการ	จำนวน	หน่วยนับ
15	เงินลงทุนสร้างเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุน	100,000.00	บาท
16	ค่าบำรุงรักษา	2,000.00	บาท/ปี
17	อายุการใช้งาน	10.00	ปี
18	มูลค่าซาก	5,000.00	บาท
19	ดอกเบี้ยในการกู้เงินมาลงทุน	8.50	%

เมื่อทำการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ของการอบแห้งปลาตากด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุนโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG พบว่า มูลค่าของเงินลงทุน และรายได้จากการจำหน่ายผลิตภัณฑ์ปลาตากแห้ง ได้แก่ 370,018.59 และ 546,000.00 บาท/ปี โดยมีรายได้สุทธิ 175,981.41 บาท/ปี

การพิจารณารายได้สุทธิจากการจำหน่ายผลิตภัณฑ์ปลาตากแห้งเทียบกับการจำหน่ายเนื้อปลาตากสดพบว่า การแปรรูปปลาตาก และจำหน่ายเป็นผลิตภัณฑ์ปลาแห้งเกษตรกรจะมีรายได้เพิ่มขึ้น 144,733.15 บาท/ปี หรือมีรายได้เพิ่มขึ้นเป็น 6 เท่าจากเดิมที่มีการจำหน่ายเป็นเนื้อปลาสด โดยมีผลตอบแทนสุทธิ 613,479.74 บาท อัตราผลตอบแทนภายใน 41.10% ค่าผลตอบแทนสุทธิ และอัตราผลตอบแทนภายในแสดงให้เห็นว่าการลงทุนดังกล่าวมีความเหมาะสมในการลงทุน โดยการใช้เครื่องอบแห้งแบบถาดหมุนในการอบแห้งปลาตากจะมีระยะเวลาการคืนทุน 0.57 ปี ด้วย โดยการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์เมื่ออบแห้งปลาตากด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุนโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนร่วมสามารถแสดงได้ดังนี้

พิจารณาเงินลงทุนสำหรับกระบวนการอบแห้งผลิตภัณฑ์ปลา

1) รายจ่ายค่าปลาตากสด จากเงื่อนไขเบื้องต้นกำหนดให้จำนวนปลาตากที่ทำการอบแห้ง ได้แก่ 20.00 กิโลกรัม/วัน โดยทำการอบแห้งเท่ากับ 20.00 วัน/เดือน และราคาซื้อปลาตากเท่ากับ 50.00 บาท/กิโลกรัม ดังนั้นรายจ่ายค่าปลาตากสดสามารถพิจารณาได้จาก

$$\text{รายจ่ายค่าปลาตากสด} = 20.00 \text{ กิโลกรัม/วัน} \times 20.00 \text{ วัน/เดือน} \times 12 \text{ เดือน/ปี} \times 50.00 \text{ บาท/กิโลกรัม}$$

$$\text{รายจ่ายค่าปลาตากสด} = 240,000.00 \text{ บาท/ปี}$$

2) เงินลงทุนค่าไฟฟ้า ในกระบวนการอบแห้งมีปริมาณการใช้ไฟฟ้า ได้แก่ 2.02 กิโลวัตต์/วัน และราคาค่าไฟฟ้าเท่ากับ 4.00 บาท/กิโลวัตต์ ดังนั้นเงินลงทุนค่าไฟฟ้าสามารถพิจารณาได้จาก

$$\text{เงินลงทุนค่าไฟฟ้า} = 2.02 \text{ กิโลวัตต์/วัน} \times 20.00 \text{ วัน/เดือน} \times 12 \text{ เดือน/ปี} \times 4.00 \text{ บาท/กิโลวัตต์}$$

$$\text{เงินลงทุนค่าไฟฟ้า} = 1,939.20 \text{ บาท/ปี}$$

3) เงินลงทุนค่าแก๊ส LPG ในกระบวนการอบแห้งมีปริมาณการใช้แก๊ส LPG ได้แก่ 4.76 กิโลกรัม/วัน และราคาค่าแก๊ส LPG เท่ากับ 26.33บาท/กิโลกรัม ดังนั้นเงินลงทุนค่าแก๊ส LPG สามารถพิจารณาได้จาก

$$\text{เงินลงทุนค่าแก๊ส LPG} = 4.76 \text{ กิโลกรัม/วัน} \times 20.00 \text{ วัน/เดือน} \times 12 \text{ เดือน/ปี} \times 26.33 \text{ บาท/กิโลกรัม}$$

$$\text{เงินลงทุนค่าแก๊ส LPG} = 30,079.39 \text{ บาท/ปี}$$

4) เงินลงทุนค่าแรงงาน เมื่อทำการอบแห้ง 20.00 วัน/เดือน โดยค่าแรงงานสำหรับ 1 คน ได้แก่ 300 บาท/วัน ดังนั้นเงินลงทุนค่าแรงงานสามารถพิจารณาได้จาก

$$\text{เงินลงทุนค่าแรงงาน} = 300 \text{ บาท/วัน} \times 20.00 \text{ วัน/เดือน} \times 12 \text{ เดือน/ปี}$$

$$\text{เงินลงทุนค่าแรงงาน} = 72,000.00 \text{ บาท/ปี}$$

5) เงินลงทุนค่าเกลือสำหรับการเตรียมวัตถุดิบ ในขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบทดสอบจำนวน 20 กิโลกรัม ใช้เกลือในปริมาณ 5 กิโลกรัม/วัน กำหนดให้ราคาเกลือเท่ากับ 20บาท/กิโลกรัม ดังนั้นเงินลงทุนค่าเกลือสำหรับการเตรียมวัตถุดิบสามารถพิจารณาได้จาก

$$\text{เงินลงทุนค่าเกลือ} = 5 \text{ กิโลกรัม/วัน} \times 20 \text{ บาท/กิโลกรัม} \times 20.00 \text{ วัน/เดือน} \times 12 \text{ เดือน/ปี}$$

$$\text{เงินลงทุนค่าเกลือ} = 24,000.00 \text{ บาท/ปี}$$

6) เงินลงทุนค่าบำรุงรักษาเครื่องอบแห้ง กำหนดให้ใน 1 ปี มีค่าบำรุงรักษาเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุนได้แก่ 2,000.00 บาท/ปี

ดังนั้น เงินลงทุนสำหรับกระบวนการอบแห้งผลิตภัณฑ์ปลา ได้แก่

$$\text{เงินลงทุน} = 370,018.59 \text{ บาท/ปี}$$

พิจารณารายได้จากการจำหน่ายผลิตภัณฑ์ปลาแห้ง

1) รายได้จากการจำหน่ายผลิตภัณฑ์ปลาแห้ง ในกระบวนการอบแห้งปลาสดจำนวน 20 กิโลกรัม จะได้ผลิตภัณฑ์ปลาแห้งที่มีน้ำหนัก 6.50 กิโลกรัม กำหนดให้ราคาขายผลิตภัณฑ์ปลาแห้งเท่ากับ 350 บาท/กิโลกรัม ดังนั้นรายได้จากการจำหน่ายผลิตภัณฑ์ปลาแห้งสามารถพิจารณาได้จาก

$$\text{รายได้จากการจำหน่ายผลิตภัณฑ์ปลาแห้ง} = 6.50 \text{ กิโลกรัม/วัน} \times 20.00 \text{ วัน/เดือน} \times 12 \text{ เดือน/ปี} \times 350 \text{ บาท/กิโลกรัม}$$

$$\text{รายได้จากการจำหน่ายผลิตภัณฑ์ปลาแห้ง} = 546,000.00 \text{ บาท/ปี}$$

2) รายได้สุทธิ เมื่อเงินลงทุนสำหรับกระบวนการอบแห้งผลิตภัณฑ์ปลารวมทั้งสิ้น 370,018.59 บาท/ปี และมีรายได้จากการจำหน่ายผลิตภัณฑ์ปลาแห้ง 546,000.00 บาท/ปี

$$\text{ดังนั้น รายได้สุทธิ} = 546,000.00 - 370,018.59 \text{ บาท/ปี}$$

$$\text{รายได้สุทธิ} = 175,981.41 \text{ บาท/ปี}$$

3) จุดคุ้มทุน เมื่อรายได้สุทธิจากการจำหน่ายผลิตภัณฑ์ปลาแห้ง ได้แก่ 189,486.98 บาท/ปี โดยเครื่องอบแห้งมีมูลค่า 100,000.00 บาท

$$\text{ดังนั้น จุดคุ้มทุน} = \frac{175,981.41 \text{ บาท/ปี}}{100,000.00 \text{ บาท}}$$

$$\text{จุดคุ้มทุน} = 0.57 \text{ ปี}$$

เมื่อทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบการอบแห้งปลาสดด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุนโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG ซึ่งใช้หัวเผาแก๊สชนิดอินฟราเรดเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และการอบแห้งปลาสดด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุนโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG เพียงอย่างเดียวเทียบกับการจำหน่ายเนื้อปลาสด ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบพบว่า เมื่อมีการใช้เครื่องอบแห้งแบบถาดหมุนโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนร่วมในกระบวนการแปรรูปปลาสด และจำหน่ายเป็นผลิตภัณฑ์ปลาแห้งเกษตรกรจะมีรายได้เพิ่มขึ้น เป็น 6 เท่าจากเดิมที่มีการจำหน่ายเป็นเนื้อปลาสด โดยมีรายได้สุทธิ 189,486.98 บาท/ปี และมีระยะเวลาการคืนทุนสั้น ได้แก่ 0.53 ปี ในขณะที่การใช้เครื่องอบแห้งแบบถาดหมุนโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG เพียงอย่างเดียวในกระบวนการแปรรูปปลาสดเกษตรกรจะมีรายได้เพิ่มขึ้นเป็น 6 เท่าเช่นเดียวกัน โดยมีรายได้สุทธิ 175,981.41 บาท/ปี และมีระยะเวลาการคืนทุน

ได้แก่ 0.57 ปี จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการแปรรูปผลิตภัณฑ์ปลาด้วยกระบวนการอบแห้งเป็นอีกหนึ่งแนวทางในการเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์เมื่อเทียบกับการจำหน่ายเป็นเนื้อปลาสด อีกทั้งยังสามารถเพิ่มรายได้ให้กับเกษตรกรได้อีกด้วย ซึ่งผลการวิเคราะห์เปรียบดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 23

ตารางที่ 23 การวิเคราะห์เปรียบเทียบทางด้านเศรษฐศาสตร์ของการอบแห้งปลาดุกด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุน

ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์	ใช้แหล่งพลังงานความ	ใช้แหล่งพลังงานความร้อนจาก
	ร้อนร่วม	แก๊ส LPG
รายได้สุทธิ (บาท/ปี)	189,486.98	175,981.41
ผลตอบแทนสุทธิ (บาท)	1,163,290.00	613,479.74
อัตราผลตอบแทนภายใน (%)	60.80	41.10
ระยะเวลาคืนทุน (ปี)	0.53	0.57

ผู้วิจัยได้ทำการพิจารณาถึงปัจจัยของราคาซื้อปลาดุกสด และราคาขายผลิตภัณฑ์ปลาดุกแห้ง ที่มีผลต่อรายได้ และจุดคุ้มทุนเพื่อเป็นแนวทางการตัดสินใจในการลงทุนของเกษตรกรตามความแปรปรวนของราคากลาง จากผลการวิเคราะห์พบว่า เมื่อต้องการแปรรูปปลาดุกด้วยกระบวนการอบแห้งที่ราคาซื้อปลาดุกสดในราคา 50 60 และ 70 บาท/กิโลกรัมราคาขายผลิตภัณฑ์ปลาแห้งที่มีความเหมาะสมได้แก่ 350 และ 400 บาท/กิโลกรัม ขึ้นไปดังตารางที่ 24 แสดงให้เห็นว่ามูลค่าของรายได้ และจุดคุ้มทุนที่มีค่าติดลบไม่มีความเหมาะสมในการลงทุน โดยการประเมินความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 24

ตารางที่ 24 การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ตามความแปรปรวนของราคาผลิตภัณฑ์

ราคาซื้อปลา สด (บาท/ กิโลกรัม)	ราคาขาย ผลิตภัณฑ์ ปลาแห้ง (บาท/ กิโลกรัม)	การใช้แหล่งพลังงานความ ร้อนร่วม		การใช้พลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG เพียงอย่างเดียว	
		รายได้สุทธิ	ระยะเวลาคืน ทุน (ปี)	รายได้สุทธิ	ระยะเวลาคืน ทุน (ปี)
		(บาท/ปี)		(บาท/ปี)	
50	200.00	-44,513.02	-2.25	-58,018.59	-1.72
	250.00	33,486.98	2.99	19,981.41	5.00
	300.00	111,486.98	0.90	97,981.41	1.02
	350.00	189,486.98	0.53	175,981.41	0.57
	400.00	267,486.98	0.37	253,981.41	0.39
60	200.00	-92,513.02	-1.08	-106,018.59	-0.94
	250.00	-14,513.02	-6.89	-28,018.59	-3.57
	300.00	63,486.98	1.58	49,981.41	2.00
	350.00	141,486.98	0.71	127,981.41	0.78
	400.00	219,486.98	0.46	205,981.41	0.49
70	200.00	-140,513.02	-0.71	-154,018.59	-0.65
	250.00	-62,513.02	-1.60	-76,018.59	-1.32
	300.00	15,486.98	6.46	1,981.41	50.47
	350.00	93,486.98	1.07	79,981.41	1.25
	400.00	171,486.98	0.58	157,981.41	0.63

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

การพัฒนาเครื่องอบพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรดสำหรับการอบแห้งปลาตากจำนวน 20 kg ที่มีความชื้นเริ่มต้น 275.56%db จนเหลือความชื้นสุดท้าย 20%db โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG ซึ่งใช้หัวเผาแก๊สชนิดอินฟราเรดเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเครื่องอบแห้งดังกล่าวมีรูปทรงเป็นครึ่งพาราโบลาภายในห้องอบแห้งปริมาตร 1.18 m³ และมีพื้นที่รับแสง 3.98 m² การทดลองอบแห้งปลาตากโดยแบ่งการอบแห้งออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ ทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 °C ในช่วงแรกจำนวน 5 h และอบแห้งปลาตากที่อุณหภูมิ 60 °C ในช่วงหลังจำนวน 8 h กำหนดความเร็วรอบของพัดลม 6 รอบต่อนาที อัตราการไหลอากาศ 0.049 m³/s และอัตราการนำอากาศกลับมาใช้ใหม่ 80 % จากผลการทดลองพบว่า การอบแห้งปลาตากโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG มีปริมาณการใช้พลังงานสิ้นเปลืองในกระบวนการอบแห้งน้อยที่สุดคือ 16.70 MJ/kg H₂O evap อัตราการอบแห้ง 1.055 kg H₂O evap/h และประสิทธิภาพในการอบแห้ง 13.52% เมื่อเทียบกับการอบแห้งปลาตากที่ใช้พลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG เพียงอย่างเดียวถึงแม้จะมีระยะเวลาการอบแห้งเท่ากันคือ 13 h แต่มีปริมาณการใช้พลังงานสิ้นเปลืองที่มากกว่าได้แก่ 20.19 MJ/kg H₂O evap อัตราการอบแห้ง 1.049 kg H₂O evap/h และประสิทธิภาพในการอบแห้ง 11.18% จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อนำพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์มาใช้ในกระบวนการอบแห้งร่วมกับพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG จะทำให้มีการลดปริมาณการใช้แก๊ส LPG ในกระบวนการอบแห้งได้ 57.14%

พิจารณาการอบแห้งปลาตากโดยใช้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวจะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งนานที่สุดคือ 42 h มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้ง 32.53 MJ/kg H₂O evap มีอัตราการอบแห้งเฉลี่ย 6.08%db/h หรือ 0.326 kg H₂O evap/h และประสิทธิภาพในการอบแห้ง 6.94% เมื่อทำการเปรียบเทียบกับวิธีการทำแห้งปลาตากด้วยวิธีการตากแดดตามธรรมชาติจะใช้ระยะเวลาในการทำแห้งจำนวน 131 h หรือ 13 วัน เพื่อให้มีความชื้นสุดท้ายลดลงเหลือ 20%db โดยมีอัตราการทำแห้งเฉลี่ย 1.95%db/h หรือ 0.053 kg H₂O evap/h จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบพัดลมจะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยกว่าการตากแดดธรรมชาติ และมีอัตราการอบแห้งที่มากกว่าตากแดดธรรมชาติอีกด้วย

เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างการอบแห้งปลาตุ๋นโดยใช้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว วิธีการตากแดดธรรมชาติ และการอบแห้งปลาตุ๋นโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG พบว่า การอบแห้งปลาตุ๋นโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG มีความเหมาะสมต่อการใช้งานเชิงพาณิชย์ เนื่องจากใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้น อัตราการอบแห้งสูง ประสิทธิภาพการอบแห้งที่สูง และมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งน้อย

การวิเคราะห์คุณภาพผลิตภัณฑ์ปลาแห้งภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการอบแห้งจะทำการแบ่งออกเป็น 4 วิธีที่แตกต่างกัน ได้แก่

1) การประเมินคุณภาพผลิตภัณฑ์ปลาแห้งด้วยประสาทสัมผัสจากการสำรวจประชากรจำนวน 20 คน ได้แก่ กลุ่มอาสาสมัครสาธารณสุข (อสม.) ประจำหมู่บ้านโทกหัวช้าง ตำบลพระบาท อำเภอเมือง จังหวัดลำปาง โดยวิธีการทดสอบการยอมรับ (Acceptance testing) ต่อคุณลักษณะด้านรูปร่าง และสีของผลิตภัณฑ์ เนื้อสัมผัส และกลิ่น ผลการวิเคราะห์พบว่า คุณลักษณะความชอบด้านรูปร่าง และสีของผลิตภัณฑ์ปลาตุ๋นแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุนมีคะแนนความชอบแตกต่างกันทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยคะแนนความชอบรวมมากที่สุดคือ 4.20 คะแนน ซึ่งอยู่ในระดับชอบมาก คุณลักษณะความชอบด้านเนื้อสัมผัสมีคะแนนความชอบแตกต่างกันทางสถิติ ($P < 0.05$) คือ 3.75 คะแนน และคุณลักษณะความชอบด้านกลิ่นมีคะแนนความชอบแตกต่างกันทางสถิติ ($P < 0.05$) คือ 4.00 คะแนน ซึ่งผลการยอมรับโดยรวมของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์ปลาตุ๋นแห้งที่ผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุนอยู่ในระดับชอบมาก

2) การประเมินลักษณะสีของผลิตภัณฑ์ปลาแห้งโดยใช้สมุดคู่มือเทียบสี (RHS colour chart) ผลการประเมินลักษณะสีของผลิตภัณฑ์ปลาแห้งดังกล่าวพบว่า ผลิตภัณฑ์ปลาแห้งที่มีจำหน่ายทั่วไปตามท้องตลาด และผลิตภัณฑ์ปลาแห้งที่ได้จากการทดลองมีลักษณะสีที่อยู่ในกลุ่มเฉดสีเดียวกัน ได้แก่ GREYED-ORANGE GROUP 163 เมื่อพิจารณาลักษณะสีของผลิตภัณฑ์ปลาแห้งที่ได้จากการทดลองพบว่า ลักษณะของสีสามารถแบ่งออกเป็น 2 โทน ได้แก่ Deep Orange Yellow A และ Strong Orange Yellow B ซึ่งเป็นโทนสีที่แสดงความเป็นสีเหลืองมากกว่าสีส้ม จากผลการประเมินลักษณะสีข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าผลิตภัณฑ์ปลาแห้งทั้ง 2 รูปแบบมีลักษณะสีที่ใกล้เคียงกัน

3) การประเมินคุณภาพด้านการคืนตัวของผลิตภัณฑ์ปลาแห้ง โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าการคืนตัวของผลิตภัณฑ์ปลาตุ๋นแห้งที่จำหน่ายตามท้องตลาด และผลิตภัณฑ์ปลาตุ๋นแห้งจากการทดลองมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ได้แก่ 40.75 และ 38.16% ตามลำดับ นอกจากนี้ค่าการคืนตัวดังกล่าวสามารถบ่งบอกถึงความสามารถในการให้รสชาติอีกด้วย โดยทั่วไปจะสังเกตได้ว่าผลิตภัณฑ์แห้งหลายๆ ชนิดไม่เหมาะกับการรับประทานโดยตรงเนื่องจากไม่มีรสชาติความกลมกล่อมแต่เมื่อนำไป

ผ่านกระบวนการปรุงอาหาร เช่น การนำไปต้มจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ดังกล่าวมีรสชาติที่ดีขึ้น ดังนั้นค่าการคืนตัวของกล้วยจึงแสดงถึงความสามารถในการให้รสชาติกับอาหาร

4) การวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ปลาแห้ง ผลการวิเคราะห์พบว่า ผลิตภัณฑ์ปลาดุกแห้งที่ได้จากการทดลองมีปริมาณโปรตีน และไขมัน คือ 38.71 g ต่อ 100 g และ 24.38 g ต่อ 100 g ตามลำดับ เมื่อเทียบกับคุณค่าทางโภชนาการของปลาดุกโดยมาตรฐานแล้วต้องมีปริมาณโปรตีน 23 g ต่อ 100 g และมีปริมาณไขมัน 2.4 g ต่อ 100 g ข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นพบว่า ผลิตภัณฑ์ปลาดุกแห้งที่ได้จากการทดลองว่ามีปริมาณโปรตีน และปริมาณของไขมันที่มีความเหมาะสมต่อผู้บริโภค

การศึกษาความชื้นสมดุลไอโซเทอมของปลาดุกที่อุณหภูมิ 40 50 60 และ 70 °C โดยวิธีสถิติในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 0.1 - 0.9 ในการวิเคราะห์ค่าความชื้นสมดุลไอโซเทอมของปลาดุกและนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความชื้นสมดุล 5 รูปแบบ ได้แก่ Modified Halsey, Modified Oswin, Modified Mujica, Modified Chung & Pfof และ Modified Henderson ในการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความชื้นสมดุลด้วยการนำผลการทดลองมาวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้นแบบกำลังสองน้อยที่สุด ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวพบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Mujica สามารถอธิบายผลการทดลองที่อุณหภูมิ 40 50 60 และ 70 °C ได้ดีที่สุดตามความสัมพันธ์คือ $M_{eq} = 1 / [(0.0021T + 0.0555) - (6.7445 \times 10^{-006}T + 9.398610 - 005)RH]$ ซึ่งมีค่า R^2 สูงที่สุด ได้แก่ 0.9910 โดยมีค่า SEE และ RMSE ต่ำที่สุด ได้แก่ 0.1763 และ 0.0124 ตามลำดับ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการทำนายค่าความชื้นสมดุลของวัสดุได้อย่างถูกต้อง

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งปลาดุกในรูปแบบของอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio ,MR) จากผลการศึกษาค่าความชื้นสมดุลของปลาดุกพบว่า ความชื้นสมดุลในปลาดุกมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าความชื้นเริ่มต้น การอบแห้งปลาดุกเป็นการอบแห้งแบบอัตราการอบแห้งลดลง ซึ่งอัตราการลดลงของความชื้นในช่วงเวลาการอบแห้งจะมีความสัมพันธ์ไม่เชิงเส้นกับเวลาการอบแห้ง และสามารถแสดงในรูปความสัมพันธ์แบบเอกซ์โพเนนเชียล โดยสมการอบแห้งชั้นบางสามารถแสดงได้ 2 กรณี โดยมีค่าคงที่ k คือ 0.2101 ได้แก่ การอบแห้งปลาดุกที่อุณหภูมิ 70 °C มีค่าความชื้นสมดุล 5.08%db โดยปลาดุกมีความชื้นเริ่มต้น 275.56%db. สมการอบแห้งชั้นบางกึ่งทฤษฎีมีความสัมพันธ์คือ $M_t = 5.08 + (275.56 - 5.08) \exp(-0.2101t)$ และการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C มีค่าความชื้นสมดุล 5.81%db สมการอบแห้งชั้นบางมีความสัมพันธ์คือ $M_t = 5.81 + (275.56 - 5.81) \exp(-0.2101t)$ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวมีความสัมพันธ์แบบเอกซ์โพเนนเชียลโดยมีค่า $R^2 = 0.995$ และมีค่า RMSE = 8.916×10^{-5} นอกจากนี้พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page สามารถอธิบายจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งปลาดุกด้วย

พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG ได้ดีที่สุดตามความสัมพันธ์ของสมการออบแฮงซ์แบบเอมพิริคัลคือ $MR = \exp(-0.1910t^{1.0350})$ โดยมีค่า $R^2 = 0.9997$ และมีค่า $RMSE = 1.5800 \times 10^{-4}$ โดยความสัมพันธ์ของสมการดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการทำนายค่าความชื้นของของวัสดุทดสอบ ณ เวลาใดๆ ได้อย่างถูกต้อง

การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ ทำการพิจารณารายได้สุทธิเมื่อมีการใช้เครื่องอบแห้งแบบถาดหมุนโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG ในกระบวนการแปรรูปปลาตาก และจำหน่ายเป็นผลิตภัณฑ์ปลาแห้งเกษตรกรจะมีรายได้เพิ่มขึ้นเป็น 6 เท่าจากเดิมที่มีการจำหน่ายเป็นเนื้อปลาสด โดยมีรายได้สุทธิ 189,486.98 บาท/ปี และมีระยะเวลาการคืนทุนสั้น ได้แก่ 0.53 ปี ในขณะที่การใช้เครื่องอบแห้งแบบถาดหมุนโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG เพียงอย่างเดียวในกระบวนการแปรรูปปลาตากเกษตรกรจะมีรายได้เพิ่มขึ้นเป็น 6 เท่าเช่นเดียวกัน โดยมีรายได้สุทธิ 175,981.41 บาท/ปี และมีระยะเวลาการคืนทุน ได้แก่ 0.57 ปี

ข้อเสนอแนะ และแนวทางแก้ไข

1. เนื่องจากเครื่องอบแห้งดังกล่าวถูกออกแบบให้มีการรับรังสีอาทิตย์โดยตรง ดังนั้นผนังของห้องอบแห้งจึงควรเลือกใช้วัสดุที่มีความโปร่งใสเพื่อให้รังสีอาทิตย์สามารถทะลุผ่านไปเกือบทั้งหมด โดยต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของวัสดุที่เหมาะสมต่อการใช้งานด้วย เช่นเดียวกับในงานวิจัยนี้ที่มีการใช้แหล่งพลังงานความร้อนเสริมจากแก๊ส LPG ซึ่งจะส่งผลให้อุณหภูมิภายในห้องอบแห้งมีอุณหภูมิสูง ดังนั้นการเลือกใช้วัสดุที่นำมาทำเป็นผนังห้องควรเป็นวัสดุที่มีความโปร่งใส และมีค่าความต้านทานความร้อนสูง เช่น กระจกความร้อน
2. เพื่อให้มีความเหมาะสมต่อการใช้งานเครื่องอบแห้งในเชิงพาณิชย์ระบบควบคุมอุณหภูมิและระบบควบคุมการจุดติดแก๊ส LPG ควรมีการติดตั้งเป็นระบบอัตโนมัติเพื่อให้งานต่อการใช้งานและเพื่อความปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน

บรรณานุกรม

- กมลทิพย์ กรรไพบเราะ. 2559. การพัฒนาผลิตภัณฑ์ปลาซาร์ดีนแดดเดียวโดยใช้ตู้อบลมร้อน. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**, 1(2), 7-21.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2560. **รายงานพลังงานทดแทนของประเทศไทย 2560**.
- กลุ่มวิจัยและวิเคราะห์สถิติการประมง. 2555. **แผนแม่บทการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำของประเทศไทย (ฉบับร่าง) ปี พ.ศ.2555-2559**.
- กองโภชนาการ กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข. 2541. **โคเลสเตอรอลและกรดไขมันในอาหารไทย**. โรงพิมพ์องค์การสงเคราะห์ทหารผ่านศึก.
- เกรียงไกร ศิวเดชสกุล, กำพล บุญธิ และชยานนท์ บุญทริกบุตร. 2554. **การพัฒนาตู้อบแห้งหญ้าหวานโดยใช้แหล่งความร้อนจากก๊าซหุงต้มหรือพลังงานแสงอาทิตย์**. ปรินิพนธ์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาคพายัพเชียงใหม่.
- จรัสกริ เทียงธรรม. 2543. **การทำแห้งอาหารโดยกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งบางส่วน**. ปรินิพนธ์. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- จุฑารัตน์ ทะสระระ, สุภวรรณ ภูริระวณิชกุล และยุทธนา ภูริระวณิชกุล. 2557. **แนวทางการพัฒนาปลาข้าวสารกรอบด้วยการอบแห้งลมร้อนและรังสีอินฟราเรด**. **วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา**, 19(1), 1-10.
- ชนันท์ ราชภูนิยม และสุนทร สืบคำ. 2555. **การทำไอโซเทอมความชื้นของวัสดุที่แลกเปลี่ยนความชื้นได้ดี**. **วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย**, 18(1), 43-51.
- ณัฐกิตติ์ ณ ลำปาง, ปิยะ ปัญญา และสรายุทธ บุญเลา. 2554. **การพัฒนาตู้อบและกระบวนการอบแห้งข้าวแต๋น โดยการใช้หัวเผาแก๊สชนิดอินฟราเรด**. ปรินิพนธ์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาคพายัพเชียงใหม่.
- ณัฐภูมิ ดุษฎี. 2559. **การอบแห้งผลผลิตเกษตรด้วยพลังงานทดแทน**. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- ธนิต สวัสดิ์เสวี, พลสันต์ วงษ์ศรี, สมเกียรติ ปรัญญาวรรการ และสมชาติ ไสภณรณฤทธิ์. 2549. **อิทธิพลของเกลือต่อการอบแห้งเนื้อหมูโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง**. **วารสารราชบัณฑิตยสถาน**, 31(2), 493-507.
- ธีรเดช ใหญ่บก, สุวิทย์ เพชรห้วยลึก, จอมภพ แววศักดิ์, มารีนา มะหนิ และภรพนา บัวเพชร. 2553. **การพัฒนากระบวนการอบแห้งปลาด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานร่วมแสงอาทิตย์-ไฟฟ้าภายใต้สภาพภูมิอากาศภาคใต้ของประเทศไทย**. **วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ**,

12(3), 109-118.

นพพร พัชรประภิติ, พงศธร จันทร์แก้ว และวัชรพงษ์ มโหรี. 2559. กระบวนการนึ่งและอบแห้งข้าวฮางอกด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับคลื่นอินฟราเรด. **วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา**, 1(1), 43-50.

ประทีป ตุ่มทอง, อำไพศักดิ์ ทีบุญมา, ประพันธ์พงษ์ สมศิลา และธนกร หอมจำปา. 2555. การศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งปลานิล *Tilapia nilotica* (ด้วยลมร้อน). **วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร**, 43(3(พิเศษ)), 115-118.

พงษ์ชัย ไกลถิ่น และอิสระ ยศเลิศ. 2552. **เครื่องอบอินฟราเรดแบบสไลด์**. ปรินูญานิพนธ์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาเชียงใหม่.

เพชรรัตน์ ใจบุญ, อติศักดิ์ นาถกรณกุล และสมชาติ โสภณรณฤทธิ์. 2550. การศึกษาเปรียบเทียบการอบแห้งลำไยด้วยเทคนิคต่างๆ. น. 1-8. ใน **การประชุมวิชาการด้านพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ ครั้งที่ 1**. วันที่ 31 สิงหาคม 2550 ณ โรงแรมเดอะทวินทาวเวอร์ กรุงเทพฯ.

มนตรี การะบัตร, พรรณพร ยืนยิ่ง และอนุธิดา ผายพันธ์. 2552. ผลกระทบปลานิลแผ่นปรุงรสเสริมใยอาหาร. **วารสารการเกษตรราชภัฏ**, 8(1), 33-45.

มารีนา มะหนิ, อรรวี เกียรติไพศาลโสภณ และอุษาวดี ตันติวารานุรักษ์. 2558. ความชื้นสมดุลไอโซเทอมของข่า. **วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ ฉบับพิเศษจากงานประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยทักษิณ ครั้งที่ 25**, 18(3), 215-220.

วสันต์ จินธาดา. 2558. **เครื่องอบแห้งปลาพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.matichon.co.th/news_detail.php?newsid=1422868663 (20 มกราคม 2560).

วัชรินทร์ ดงบัง. 2556. รังสีอินฟราเรดและการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร. **วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา**, 18(2), 299-304.

ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารกรมประมง กลุ่มวิจัยและวิเคราะห์สถิติ กรมประมง. 2561. **สถิติการประมงแห่งประเทศไทย พ.ศ.2559**.

สวัสดี กีไสย์ และเรวัฒ คำวัน. 2557. การจำลองสภาพของการอบกล้วยน้ำว้าด้วยเตาแก๊สอินฟราเรด. ปรินูญานิพนธ์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาภาคพายัพเชียงใหม่.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2560. **สถิติการส่งออกปลาและผลิตภัณฑ์ปลา**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.oae.go.th/oae_report/export_import/export_result.php (23 มกราคม 2560).

- สำราญ ภูบาล และวลัยรัตน์ จันทรวงศ์. 2558. การอบแห้งปลาหมึกกะตอยโดยใช้แสงอาทิตย์เป็นพลังงานความร้อนร่วม. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม*, 11(1), 78-87.
- สุพรพิศ ฌ พิบูลย์. 2558. กระบวนการอบแห้งปลาเกลือด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานไฟฟ้าโดยใช้การควบคุมอุณหภูมิแบบพีไอดี. *วารสารมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์*, 7(2), 1-11.
- สุภวรรณ ฐิระวณิชย์กุล, สากีนา ลาแมปะ และยุธนา ฐิระวณิชย์กุล. 2555. การอบแห้งขนุนด้วยพลังงานความร้อนร่วมของรังสีอินฟราเรด/ไมโครเวฟและลมร้อน: จลนพลศาสตร์คุณภาพและการทดสอบประสาทสัมผัส. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, (17), 117-129.
- สุรัชย์ อุดมอ่าง, นิรมล อุดมอ่าง และรัฐนันท์ พงศ์วิริทธิ์ธร. 2558. การยอมรับและพฤติกรรมการของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์ชาสมุนไพร. *วารสารศรีนครินทร์วิโรฒวิจัยและพัฒนา (สาขามนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์)*, 7(13), 187-199.
- เสกสรรค์ วินยางค์กุล, ศักดิ์เกษม คมขำ, ฤทธิชัย บุญทาศรี และสรรเพชญ บุญชิตูย. 2551. การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งไล่ความชื้นในยอดใบชาโดยรังสีอินฟราเรด. น. 1-6. ใน *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22*. วันที่ 15-17 ตุลาคม 2551 ณ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต.
- เสริม จันท์ฉาย. 2560. *เทคโนโลยีอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์*. หน่วยวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์. มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- อนิรุทธิ์ ต่ายขาว และสมบัติ ทีฆทรัพย์. ม.ป.ป.. เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบธรรมชาติ และชนิดพาความร้อนแบบบังคับ. *วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย*, 22-31.
- อนุสรานาดี, ยุธนา ฐิระวณิชย์กุล และสุภวรรณ ฐิระวณิชย์กุล. 2555. จลนพลศาสตร์การอบแห้งใบเตยด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนและลมร้อน. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, 17(2), 86-94.
- อิลีหัยะ สนิโซ, มาติฮะ ประดู่ และฟาติฮะ ยะยี. 2556. สภาวะที่เหมาะสมของการอบแห้งเห็ดนางฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรด. *วารสารมหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา*, 8(2), 107-117.
- ฮาติมมี บากา, รอกีเยาะ อาแว, ซุลกิพลี กาชอ และสุนิตย์ โจรจนสุวรรณ. 2559. การศึกษาประสิทธิภาพการอบแห้งของปลาช่อนด้วยตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมไฟฟ้า. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มธย.*, 1(1), 13-24

- Ahmat, T., RBruneau, D., Kuitche, A. and Aregba, A.W. 2014. Desorption isotherms for fresh beef; An experimental and modeling approach. **Meat Science**, 96(4), 1417-1424.
- Bala, B.K. 1997. **Drying and storage of cereal grains**. Oxford and IBH Publishing Co, PVT.Ltd, New Belhi302.
- Baysal, T., Icier, F., Ersus, S. and Yildiz, H. 2003. Effects of microwave and infrared drying on the quality of carrot and garlic. **European Food Research and Technology**, 21(8), 68-78.
- Brooker, D.B, Bakker-Arkema, F.W. and Hall, C.W. 1992. **Drying and storage grains and oilseeds**. New York: AVI publishing Co.
- Chen, C.C. and Tao, C.T. 1994. Effective factors on equilibrium relative humidity of agricultural products. **Journal of Agricultural Research China**, 43(1), 93-112.
- Chen, C.S. and Morey, R.V. 1989. Comparison of four EMC/ERH equations. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, 32(2), 983-990.
- Chung, D.S. and Pfost, H.B. 1967. Adsorption and desorption of water vapor by cereal grains and their product. **ASAE**, 10, 549-557.
- Comaposada, J., Gou, P., Pakowski, Z. and Arnau, J. 2000. Desorption isotherms for pork meat at different NaCl contents and temperatures. **Drying Technology**, 13(3), 723-746.
- Halsey, G. 1948. Physical adsorption on non-uniform surface. **Chemical Physics**, 16, 931.
- Henderson, S.M. 1952. A basic concept of equilibrium. **Agricultural Engineering**, 33, 29-31.
- Namsanguan, Y., Tia, W., Devahastin, S. and Soponronnarit, S. 2004. Drying Kinetic and quality of shrimp undergoing different two-stage drying processes. **Drying Technology**, 22, 759-778.
- Nuthong, P., Achariyaviriya, A., Namsanguan, K. and Achariyaviriya, S. 2011. Kinetics and modelling of whole logan with combined infrared and hot air. **Journal of Food Engineering**, 102(3), 233-239.
- Pangborn, R.M. 2003. Sensory techniques of food analysis. **In Food Analysis, Principles**

and Techniques, 1, 61-68.

- Ponwiboon, N. and Rojanakorn, T. 2017. Desorption isotherms and drying characteristics of Nile tilapia fish sheet. **International Food Research Journal**, 24(3), 1292-1300.
- Shen, F., Peng, L., Zhang, Y., Wu, J., Zhang, X., Yang, G., Peng, H., Qi, H. and Deng, S. 2011. Thin-layer drying kinetics and quality changes of sweet sorghum stalk for ethanol production as affected by drying temperature. **Industrial Crops and Products**, 34(3), 1588-1594.
- Stone, Herbert and Side, J.L. 1993. **Sensory Evaluation Practices**. 2nd ed. New York: Academic Press.
- Tirawanichakul, S., Linpo, P. and Tirawanichakul, Y. 2009. Influence of infrared and heat convection on drying kinetics of shrimp and quality. **Thai journal of Physics**, 4, 116-120.
- Tirawanichakul, S., Tasara, J. and Tirawanichakul, Y. 2007. Thermo-physical properties and effect of electrical field on drying process of paddy. **Songklanakarin J. Sci. Technol**, 29, 325-333.
- Tirawanichakul, S., Tirawanichakul, Y. and Sniso, E. 2008. Paddy Dehydration by Adsorption: Thermo-Physical Properties and Diffusion Model of Agriculture Residues. **Biosyst. Eng**, 99(2), 249-255.
- Wang, J. 2002. A single-layer model for far-infrared radiation drying of onion slices. **Drying Technology**, 20(10), 1941-1953.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

รายชื่อสารละลายเกลือที่ใช้ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์

รายชื่อสารละลายเกลือที่ใช้ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์

ในการทดลองเพื่อหาความชื้นสมดุล เราสามารถควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่อยู่แวดล้อมวัสดุที่ต้องการหาความชื้นสมดุล โดยใช้สารละลายเกลืออิ่มตัว ดังที่แสดงไว้ในตารางต่อไปนี้

ตารางภาคผนวกที่ 1 รายชื่อเกลือและค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้จากสารละลายอิ่มตัวของเกลือที่อุณหภูมิค่าต่างๆ

ชื่อเกลือ	สัญลักษณ์ทางเคมี	อุณหภูมิ (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)
Barium chloride	$\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	29.4	88.0
Calcium chloride	CaCl_2	-6.7	44.0
		0.0	41.0
		10.0	40.0
		21.0	35.0
Calcium chloride	$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	5.0	39.8
		20.0	32.3
		24.4	31.0
Calcium sulfate	$\text{CaSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	20.0	98.0
Calcium nitrate	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	-6.7	64.0
		0.0	64.0
		10.0	59.0
		21.0	55.0
Calcium nitrate	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	20.0	53.6
		25.0	50.4
		30.0	46.6
		35.0	42.0
		37.8	38.9
Potassium bromide	Kbr	20.0	84.0
		100.0	69.2
Potassium acetate	$\text{KC}_2\text{H}_3\text{O}_2$	20.0	23.2
		25.0	22.7

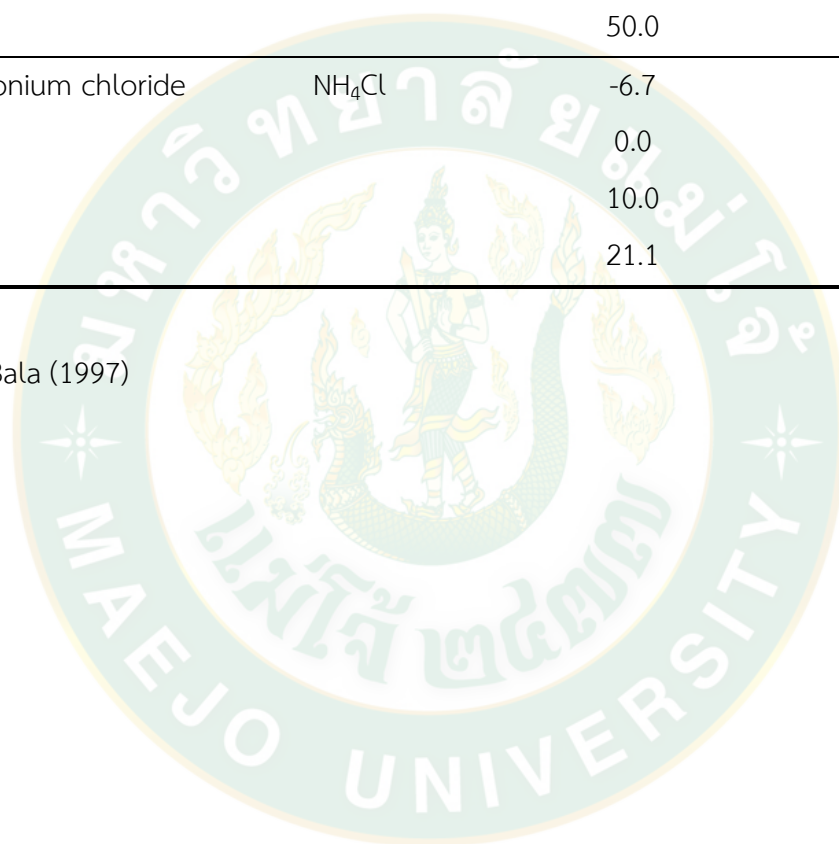
ชื่อเกลือ	สัญลักษณ์ทางเคมี	อุณหภูมิ (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)
		30.0	22.0
		37.8	20.4
Potassium sulphate	K_2SO_4	0.0	99.1
		10.0	97.9
		20.0	97.2
		30.0	96.6
		40.0	96.2
		50.0	95.8
Potassium nitrite	KNO_2	20.0	49.0
		25.0	48.2
		30.0	47.2
		37.8	45.9
Potassium nitrate	KNO_3	0.0	97.6
		10.0	95.5
		20.0	93.2
		30.0	90.7
		40.0	87.9
		50.0	85.0
Potassium carbonate	K_2CO_3	20.0	43.9
		25.0	43.8
		30.0	43.6
		37.8	43.4
Potassium chromate	K_2CrO_4	20.0	86.6
		25.0	86.5
		30.0	86.3
		37.8	85.6
Potassium carbonate	$K_2CO_3 \cdot 2H_2O$	18.9	44.0
		24.4	43.0
Potassium cyanide	KCN	20.0	47.6

ชื่อเกลือ	สัญลักษณ์ทางเคมี	อุณหภูมิ (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)
thiocyanate		25.0	45.7
		30.0	43.8
		37.8	41.1
Sodium acetate	NaC ₂ H ₃ O ₂	22.8	74.8
		30.0	71.4
		37.8	67.7
Lithium chloride	LiCl.H ₂ O	0.0	14.7
		20.0	12.4
		30.0	11.8
		40.0	11.6
		50.0	11.4
Lithium chloride	LiCl	20.0	11.2
		25.0	11.2
		30.0	11.2
		37.8	11.2
Magnesium chloride	MgCl ₂	22.8	32.9
		30.0	32.4
		37.8	31.9
Magnesium chloride	MgCl ₂ .6H ₂ O	0.0	35.0
		20.0	33.6
		30.0	32.8
		40.0	32.1
		50.0	31.4
Magnesium nitrate	Mg(NO ₃) ₂	22.8	53.5
		30.0	51.4
		37.8	49.0
Magnesium nitrate	Mg(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	0.0	60.9
		20.0	54.9
		30.0	52.0

ชื่อเกลือ	สัญลักษณ์ทางเคมี	อุณหภูมิ (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)
		40.0	49.2
		50.0	46.3
Sodium chloride	NaCl	0.0	74.9
		20.0	75.5
		30.0	75.6
		40.0	75.4
		50.0	74.5
Sodium nitrate	NaNO ₂	20.0	65.3
		25.0	64.3
		30.0	63.3
		37.8	61.8
Sodium acetate	NaC ₂ H ₃ O ₂ ·3H ₂ O	20.0	76.0
		25.0	73.7
		30.0	71.3
		37.8	67.6
Sodium dichromate	Na ₂ Cr ₂ O ₇ ·2H ₂ O	0.0	60.6
		20.0	55.2
		30.0	52.5
		40.0	49.8
		50.0	46.3
Sodium dichromate	Na ₂ Cr ₂ O ₇ .	22.7	54.1
		30.0	52.0
		37.8	50.0
Sodium bromide	NaBr	20.0	59.2
		25.0	57.8
		30.0	56.8
		37.8	53.7
Ammonium monophosphate	NH ₄ H ₂ PO ₄	20.0	93.2
		25.0	92.6

ชื่อเกลือ	สัญลักษณ์ทางเคมี	อุณหภูมิ (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)
		30.0	92.0
		37.8	91.1
Ammonium sulphate	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	0.0	83.7
		20.0	80.6
		30.0	80.0
		40.0	79.6
		50.0	79.1
Ammonium chloride	NH_4Cl	-6.7	82.0
		0.0	83.0
		10.0	81.0
		21.1	75.0

ที่มา: Bala (1997)





ภาคผนวก ข

ตัวอย่างแบบประเมินคุณภาพอาหารด้วยประสาทสัมผัส (Sensory evaluation)

แบบประเมินคุณภาพผลิตภัณฑ์ปลาด้วยประสาทสัมผัส (sensory evaluation)

คำชี้แจง : แบบสอบถามนี้เป็นการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์ปลาภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ปลาแบบถาดหมุนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรด จึงขอความร่วมมือในการแสดงความคิดเห็น โดยข้อมูลของท่านจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปพัฒนาและปรับปรุงผลิตภัณฑ์ต่อไป โปรดทำเครื่องหมาย ✓ หน้าข้อที่ตรงกับความเป็นจริงของท่าน

ตอนที่ 1 รายละเอียดของผู้กรอกแบบประเมิน

- | | | |
|-------------|---|--|
| 1. เพศ | () ชาย | (✓) หญิง |
| 2. อายุ | () น้อยกว่า 15 ปี
() 31 – 45 ปี | () 15 – 30 ปี
(✓) มากกว่า 45 ปี |
| 3. การศึกษา | (✓) ต่ำกว่าหรือเทียบเท่าประถมศึกษา
() อนุปริญญา หรือเทียบเท่า | () มัธยมศึกษา หรือเทียบเท่า
() ปริญญาตรี หรือสูงกว่า |
| 4. อาชีพ | () นักเรียน/นักศึกษา
() รัฐวิสาหกิจ
() ผู้บริหารหน่วยธุรกิจ
(✓) เกษตรกร | () รับราชการ
() เจ้าของกิจการ
() พนักงานหน่วยธุรกิจ
() อื่นๆโปรดระบุ..... |

ตอนที่ 2 ข้อมูลเกี่ยวกับการประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์ปลาที่มีจำหน่ายทั่วไปตามท้องตลาด และผลิตภัณฑ์ปลาที่ผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ปลาแบบถาดหมุนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรด

การประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์ปลา กรุณาสั่งเกตคุณลักษณะที่ปรากฏและดมกลิ่นของผลิตภัณฑ์ แล้วให้คะแนนความชอบที่ตรงกับความรู้สึกของท่าน ในการให้คะแนนจะใช้เลขสากลเฮโดนิค 5 ระดับ (5-point Hedonic scale)

ด้านคุณลักษณะ	ระดับความพึงพอใจ				
	มากที่สุด 5	มาก 4	ปานกลาง 3	น้อย 2	น้อยที่สุด 1
ผลิตภัณฑ์ปลาที่มีจำหน่ายทั่วไปตามท้องตลาด					
รูปร่าง และสีของผลิตภัณฑ์			✓		
เนื้อสัมผัส		✓			
กลิ่น		✓			
ผลิตภัณฑ์ปลาที่ผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ปลาแบบถาดหมุน					
รูปร่าง และสีของผลิตภัณฑ์		✓			
เนื้อสัมผัส		✓			
กลิ่น		✓			

ภาพผนวกที่ 1 แบบประเมินคุณภาพผลิตภัณฑ์ปลาด้วยประสาทสัมผัส

เมื่อสังเกตคุณลักษณะที่ปรากฏและत्मกลินของผลิตภัณฑ์เสร็จแล้วกรุณาประเมินการยอมรับของผลิตภัณฑ์ โดยใช้
เครื่องหมาย ✓ ในช่องที่ตรงกับความรู้สึกของท่าน

- ยอมรับผลิตภัณฑ์ปลาที่ผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ปลาแบบถาดหมุนโดยใช้พลังงาน
แสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรด
- ไม่ยอมรับผลิตภัณฑ์ปลาที่ผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ปลาแบบถาดหมุนโดยใช้พลังงาน
แสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรด

ข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์

.....

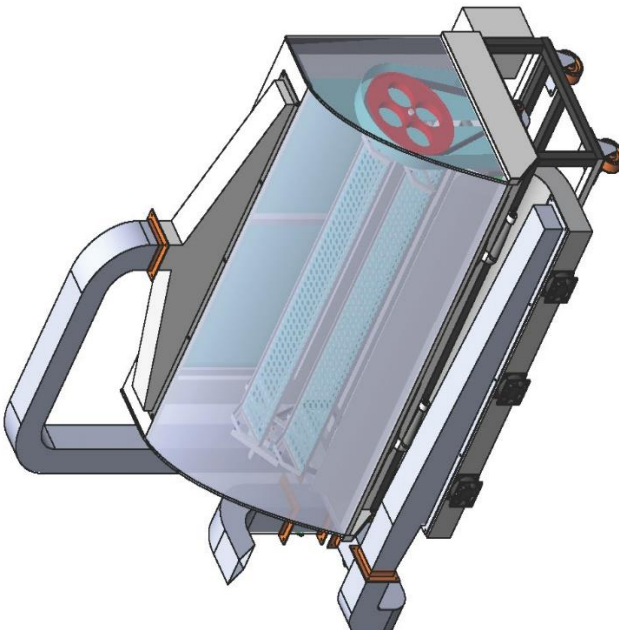
.....

ขอขอบคุณที่สละเวลาในการทำแบบประเมิน

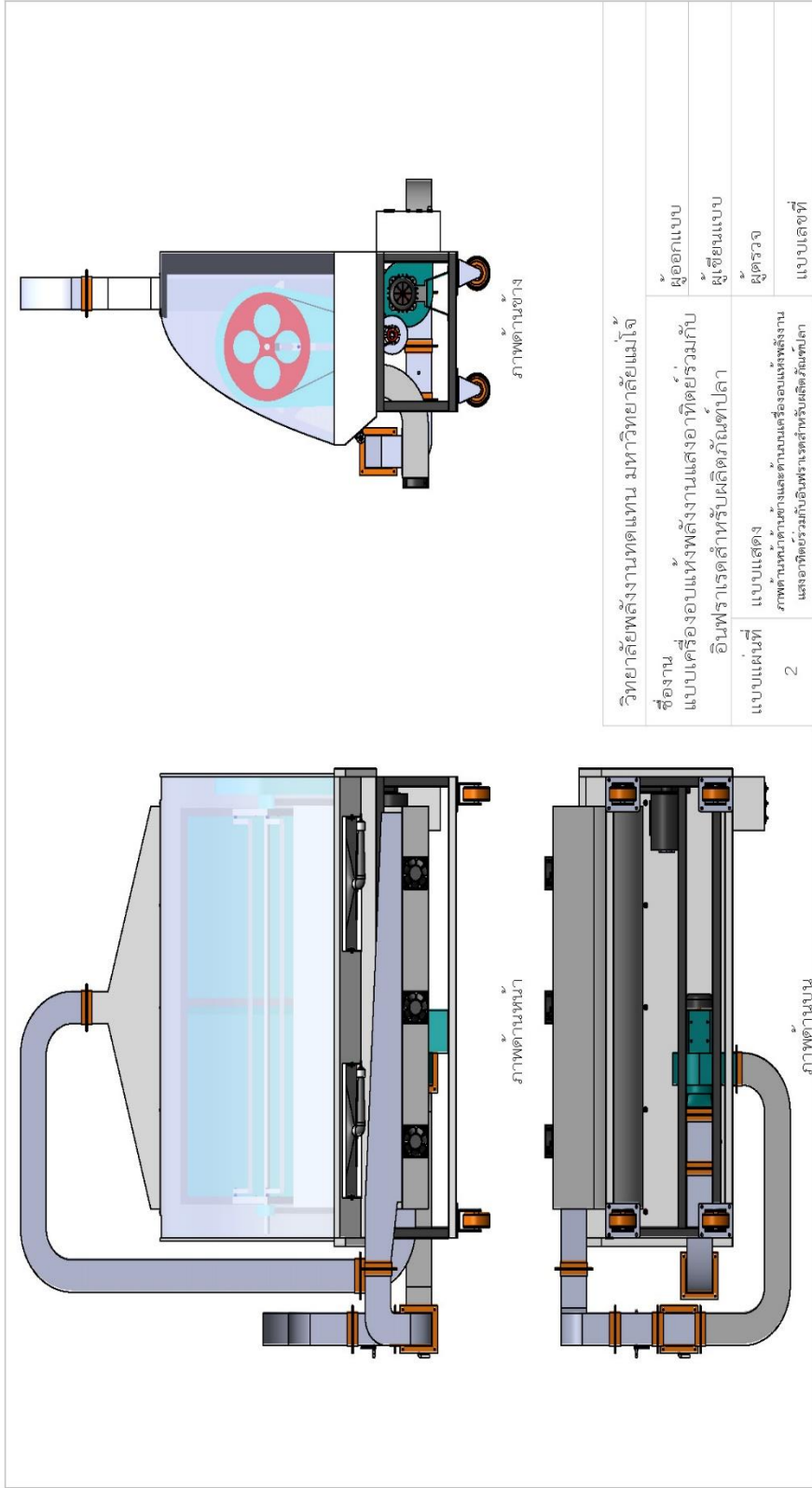


ภาคผนวก ค

แบบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรดสำหรับผลิตภัณฑ์ปลา

		วิทยาลัยพณิชยการทศแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้	
		ชื่องาน แบบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับ อินฟราเรดสำหรับผลิตภัณฑ์ปลา	ผู้ออกแบบ ผู้เขียนแบบ ผู้ตรวจ
แบบแผ่นที่ 1	แบบแสดง	ภาพ Isometric	

ภาพผนวกที่ 2 แบบแสดงภาพ Isometric

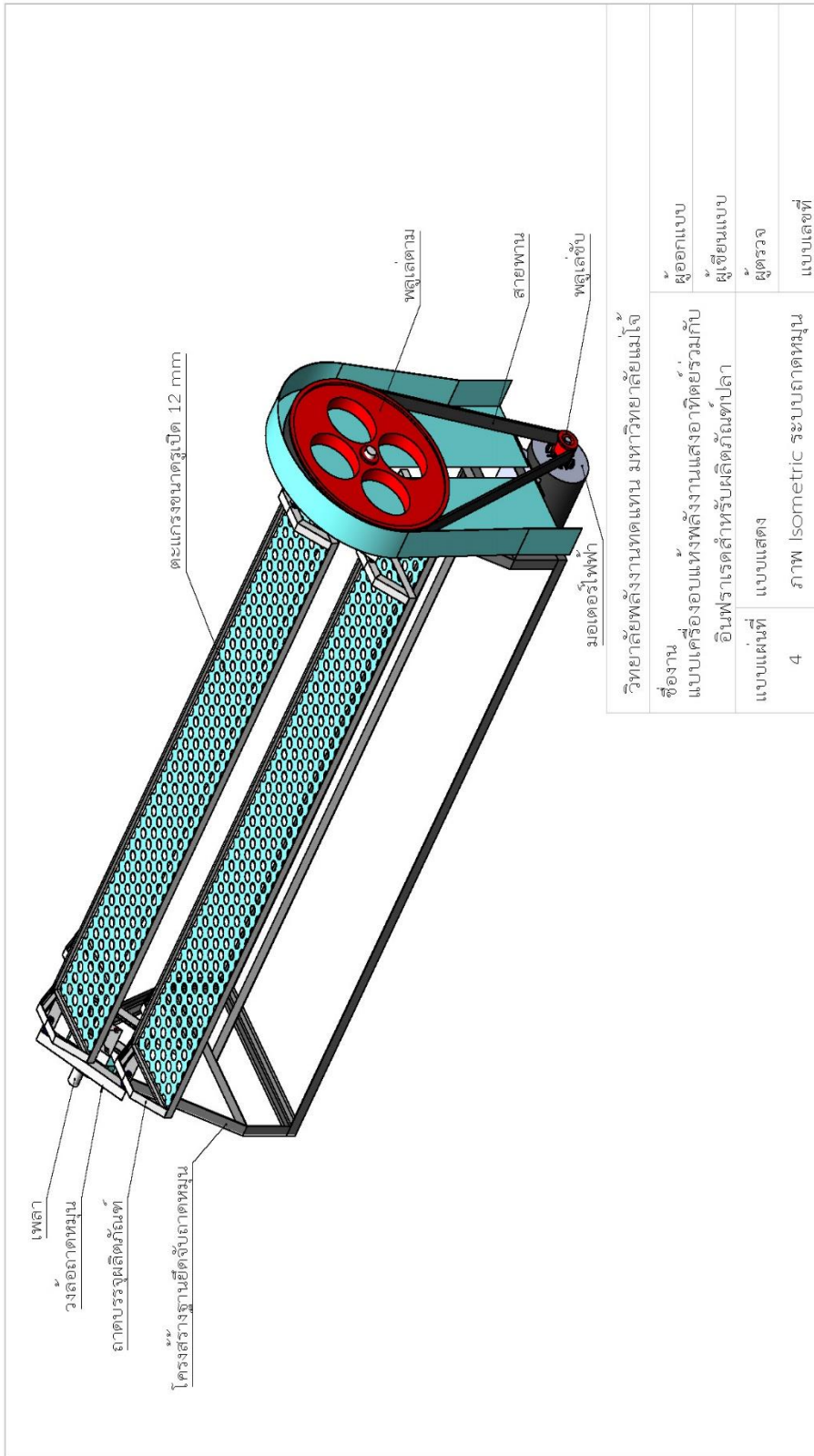


ภาพผนวกที่ 3 แบบแสดงภาพด้านหน้า ด้านข้าง และด้านบนของเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุน



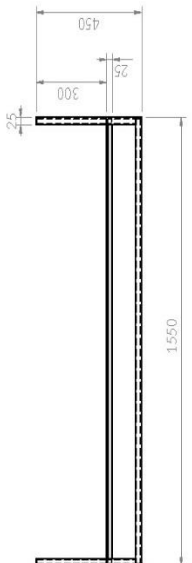
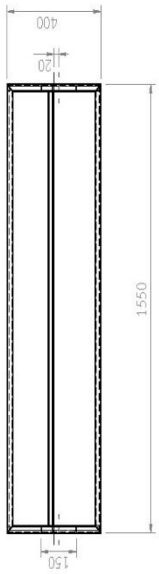
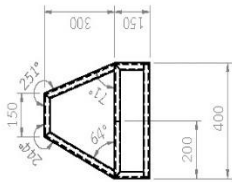
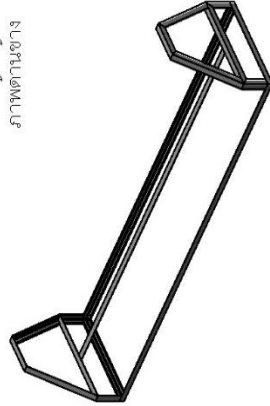
วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้	
ชื่องาน	ผู้ออกแบบ
แบบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับอินฟราเรดสำหรับผลิตภัณฑ์ปลา	ผู้เขียนแบบ
แบบแผ่นที่	ผู้ตรวจ
3	แบบเลขที่
	ภาพ Isometric ห้องอบแห้ง

ภาพผนวกที่ 4 แบบแสดงภาพ Isometric ห้องอบแห้ง

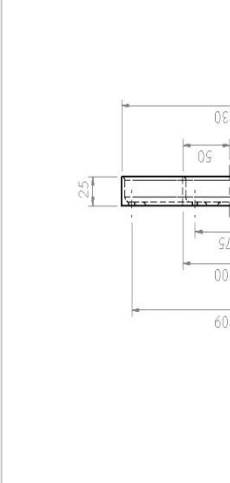
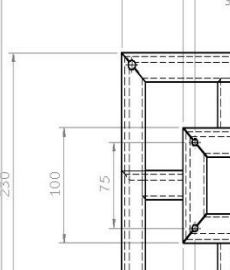
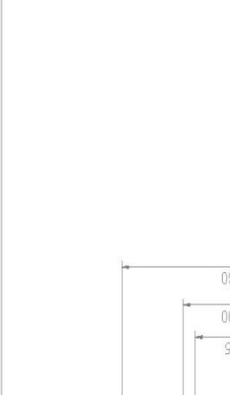


วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้	
ชื่องาน	ผู้ออกแบบ
แบบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ต่อยรวมกับอินฟราเรดสำหรับผลิตภัณฑ์ปลา	ผู้เขียนแบบ
แบบแผ่นที่	ผู้ตรวจ
4	แบบเลขที่
ภาพ Isometric ระบบถาดหมุน	

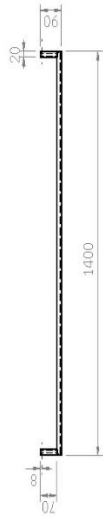
ภาพผนวกที่ 5 แบบแสดงภาพ Isometric ระบบถาดหมุน

 <p>ภาพด้านหน้า</p>	 <p>ภาพด้านบน</p>	 <p>ภาพด้านบน</p>		<p>วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้</p> <p>ชื่องาน แบบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์รวมกับ อินฟราเรดสำหรับผลิตภัณฑ์ปลา</p> <p>แบบแผ่นที่ แบบแสดง 5</p> <p>ภาพโครงสร้างยื่นจับถาดหมุน</p>	<p>ผู้ออกแบบ ผู้เขียนแบบ ผู้ตรวจ แบบเลขที่</p>
--	--	--	---	--	--

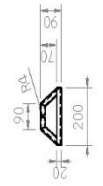
ภาพผนวกที่ 6 แบบแสดงภาพโครงสร้างยื่นจับถาดหมุน

 <p>ภาพด้านหน้า</p>	 <p>ภาพด้านบน</p>	 <p>ภาพด้านขวา</p>	<p>วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้</p>
<p>ชื่องาน</p>	<p>ผู้ออกแบบ</p>	<p>ผู้ตรวจสอบ</p>	<p>ผู้ตรวจ</p>
<p>แบบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับ</p>	<p>อินฟราเรดสำหรับผลิตภัณฑ์ปลา</p>	<p>ผู้เขียนแบบ</p>	<p>ผู้ตรวจ</p>
<p>แบบแผ่นที่</p>	<p>แบบแสดง</p>	<p>ภาพด้านหน้า ด้านขวา และด้านบวงลวดทรมน</p>	<p>แบบเลขที่</p>
<p>6</p>			

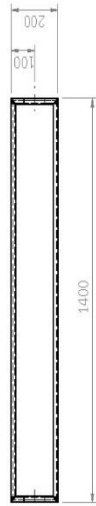
ภาพผนวกที่ 7 แบบแสดงภาพด้านหน้า ด้านข้าง และด้านบวงลวดทรมน



ภาพด้านหน้า



ภาพด้านข้าง



ภาพด้านบน

วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้	
ชื่องาน	ผู้ออกแบบ
แบบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์รวมกับ	ผู้เขียนแบบ
อินฟราเรดสำหรับผลิตภัณฑ์ปลา	ผู้ตรวจ
แบบแผ่นที่	ภาพตามหน้า
7	ด้านข้างและด้านบนมาตรฐานผลิตภัณฑ์
	แบบเลขที่

ภาพผนวที่ 8 แบบแสดงภาพด้านหน้า ด้านข้าง และด้านบนมาตรฐานผลิตภัณฑ์

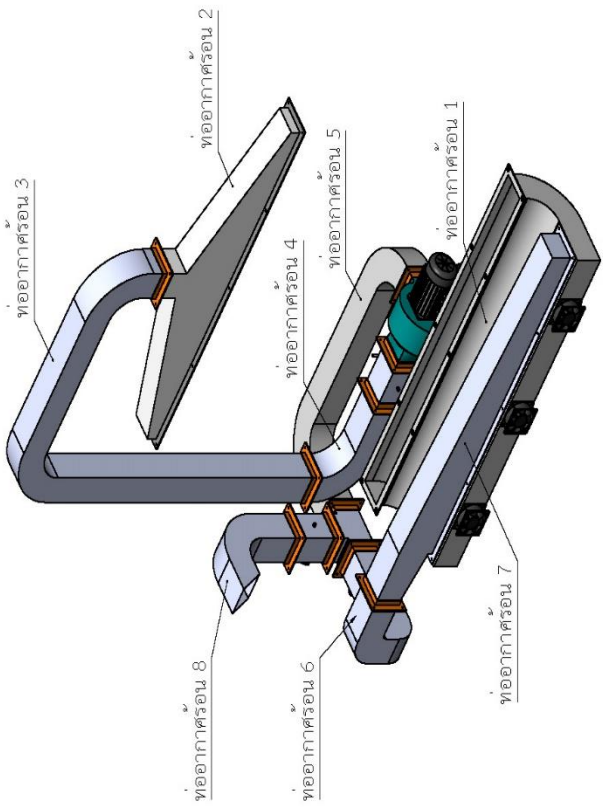
ภาพด้านหน้า

ภาพด้านขวา

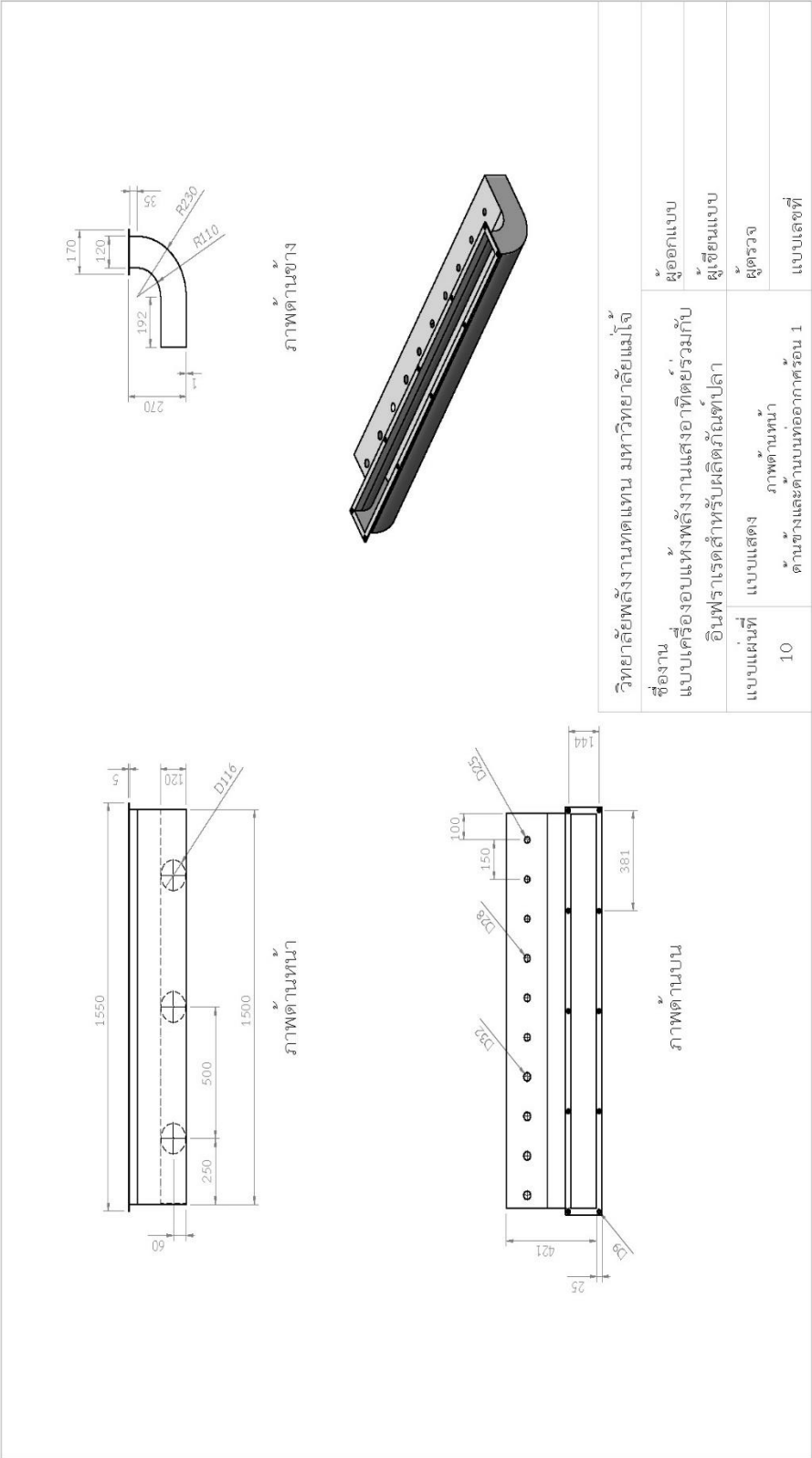
วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้	
ชื่องาน แบบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับ อินฟราเรดสำหรับผลิตภัณฑ์พลาสติก	ผู้ออกแบบ ผู้เขียนแบบ
แบบแผ่นที่ 8	ผู้ตรวจ
ภาพด้านหน้า และด้านหน้าแปลนยึดจับวงล้อถาดหมุน	

ภาพด้านบน

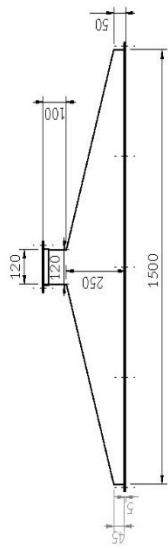
ภาพผนวกที่ 9 แบบแสดงภาพด้านหน้า ด้านข้าง และด้านบนหน้าแปลนยึดจับวงล้อถาดหมุน

	<p>วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้</p> <p>ชื่องาน ผู้ออกแบบ ผู้เขียนแบบ ผู้ตรวจ</p> <p>อินฟราเรดลำสำหรับผลิตมันฝรั่ง</p> <p>แบบแผ่นที่ แบบแสดง</p> <p>9 ภาพ Isometric ระบบอากาศยาน</p>
--	---

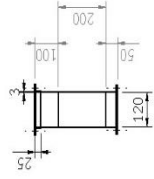
ภาพผนวกที่ 10 แบบแสดงภาพ Isometric ระบบอากาศยาน



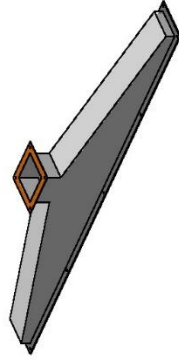
ภาพผนวกที่ 11 แบบแสดงภาพด้านหน้า ด้านข้าง และด้านบนต่อภาคก่อน 1



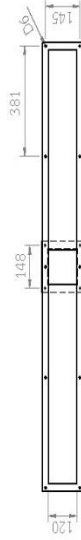
ภาพด้านหน้า



ภาพด้านข้าง

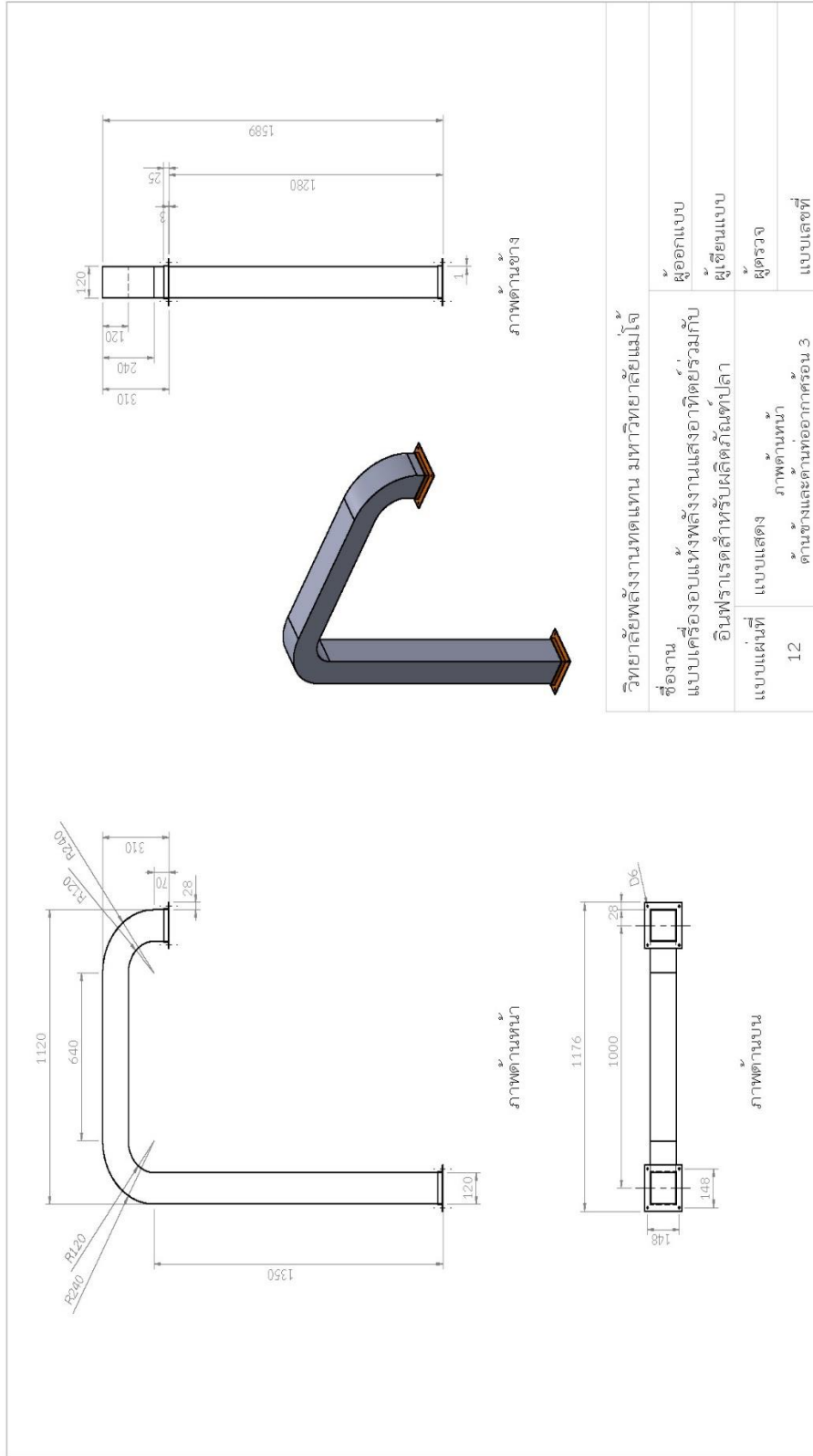


ภาพด้านบน

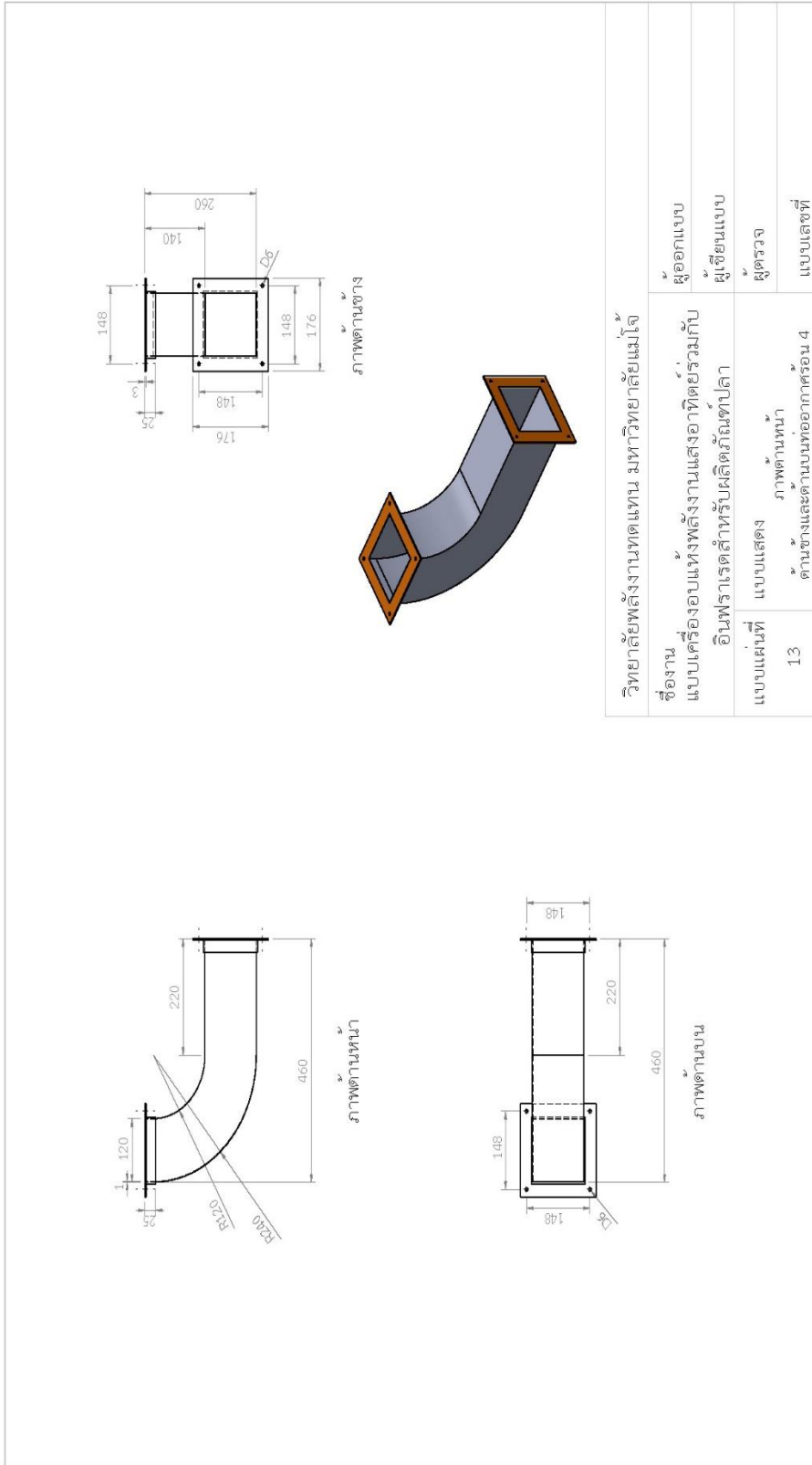


วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้	
ชื่องาน	ผู้ออกแบบ
แบบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับ	ผู้เขียนแบบ
อินฟราเรดสำหรับผลิตมันเส้นปลา	ผู้ตรวจ
แบบแผ่นที่	ภาพด้านหน้า
11	ด้านข้างและด้านบนของอาคารคอน 2
	แบบเลขที่

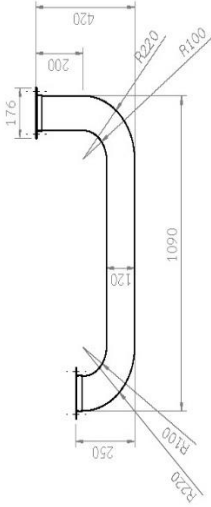
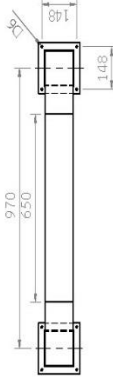
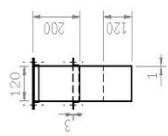
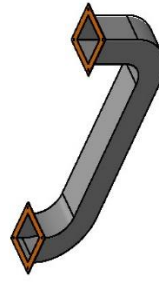
ภาพผนวกที่ 12 แบบแสดงภาพด้านหน้า ด้านข้าง และด้านบนของอาคารคอน 2



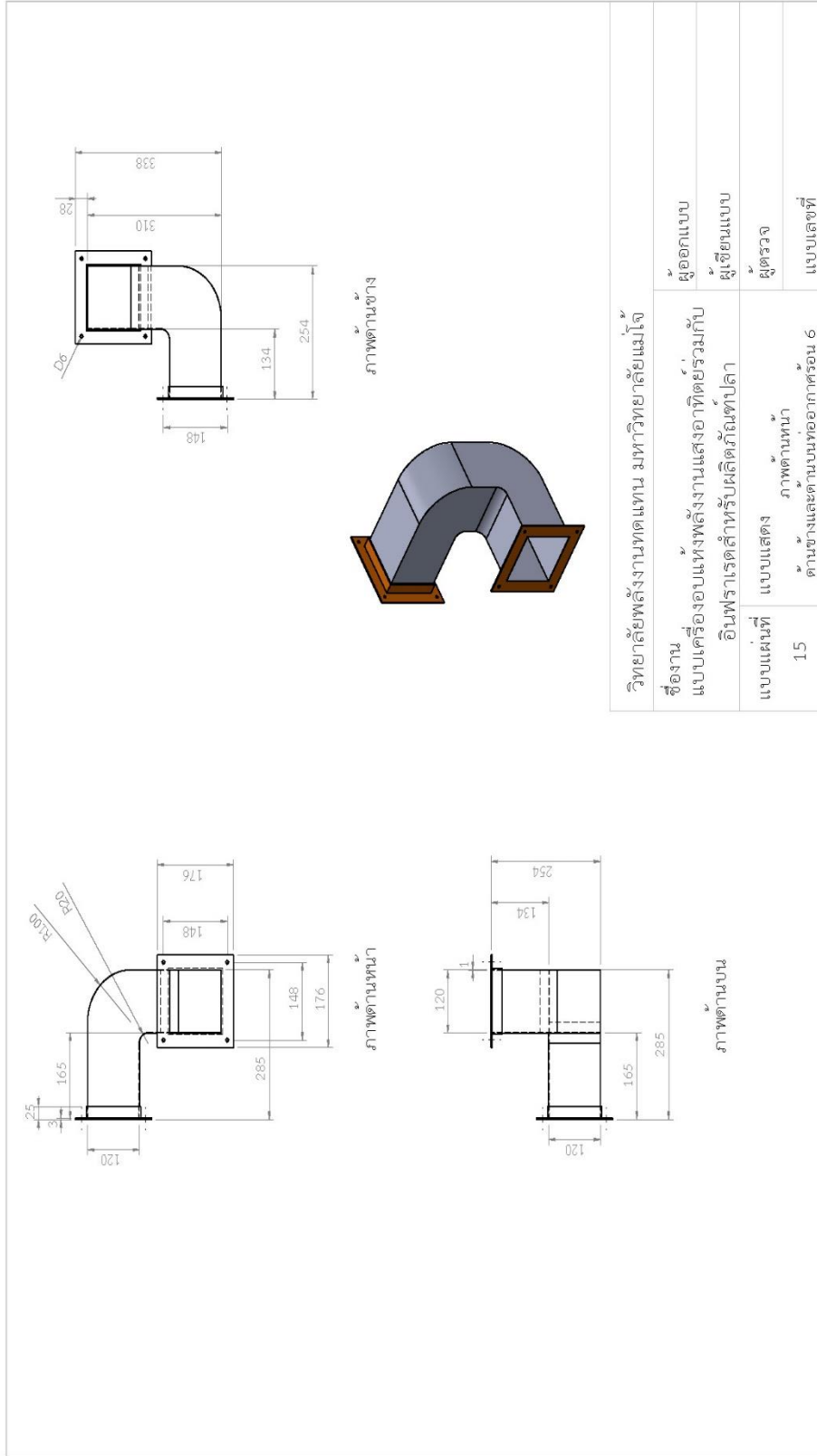
ภาพผนวกที่ 13 แบบแสดงภาพด้านหน้า ด้านข้าง และด้านบนต่อภาคีครอน 3



ภาพผนวกที่ 14 แบบแสดงภาพด้านหน้า ด้านข้าง และด้านบนท่ออากาศร้อน 4

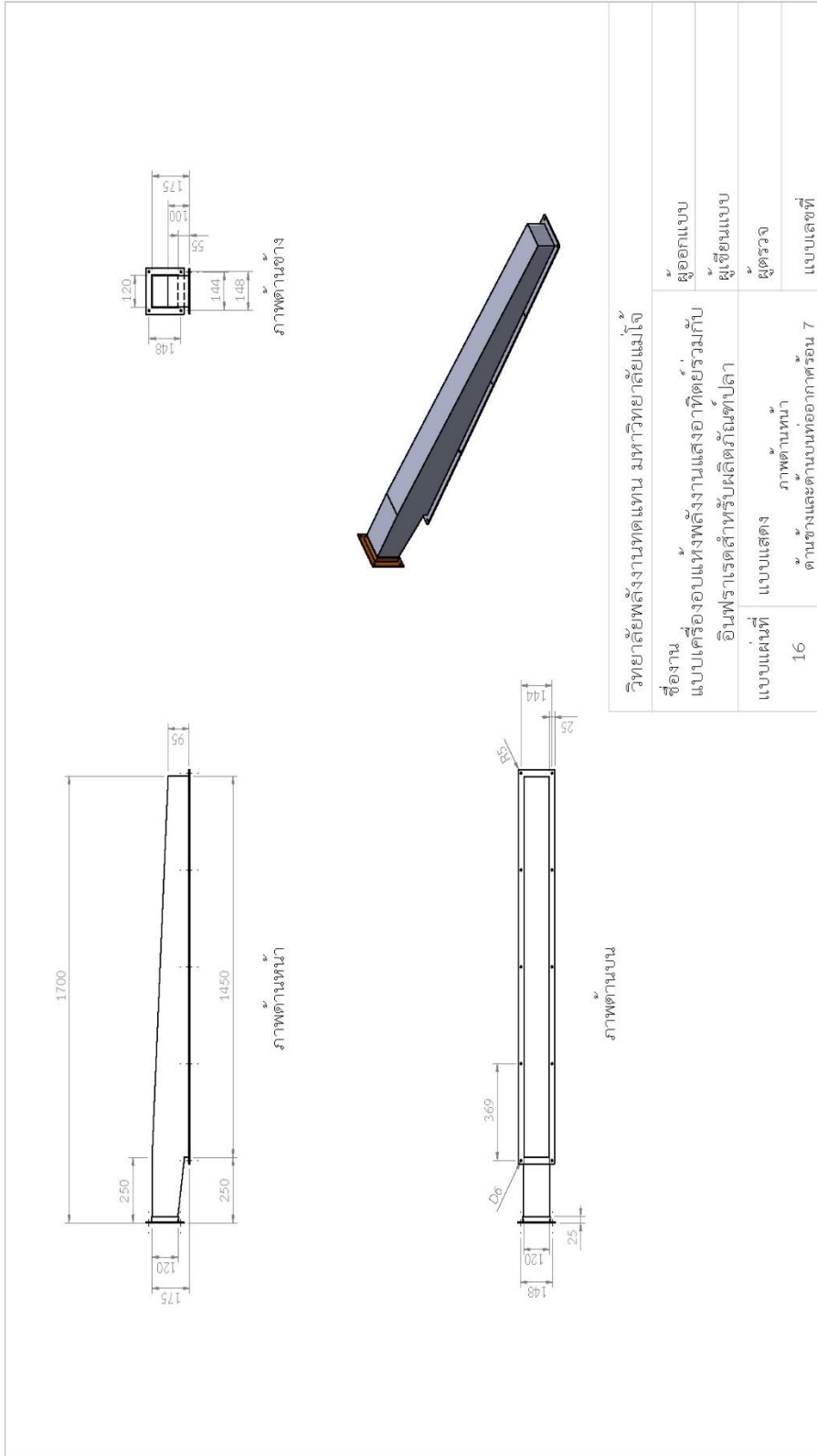
				<p>วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้</p> <p>ชื่องาน แบบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์โดยรวมกับ อินฟราเรดสำหรับผลิตภัณฑ์ปลา</p> <p>แบบแผ่นที่ 14</p> <p>ภาพด้านหน้า ด้านข้างและด้านบนของทออากาศร้อน 5</p>	<p>ผู้ออกแบบ ผู้เขียนแบบ ผู้ตรวจ</p>
---	--	---	---	---	--

ภาพผนวกที่ 15 แบบแสดงภาพด้านหน้า ด้านข้าง และด้านบนทออากาศร้อน 5



วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้	
ชื่องาน	ผู้ออกแบบ
แบบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับอินฟราเรดสำหรับผลิตภัณฑ์ปลา	ผู้เขียนแบบ
แบบแผ่นที่ 15	ผู้ตรวจ
	ภาพด้านหน้า
	ด้านข้างและด้านบนที่ออกอากาศร้อน 6
	แบบเลขที่

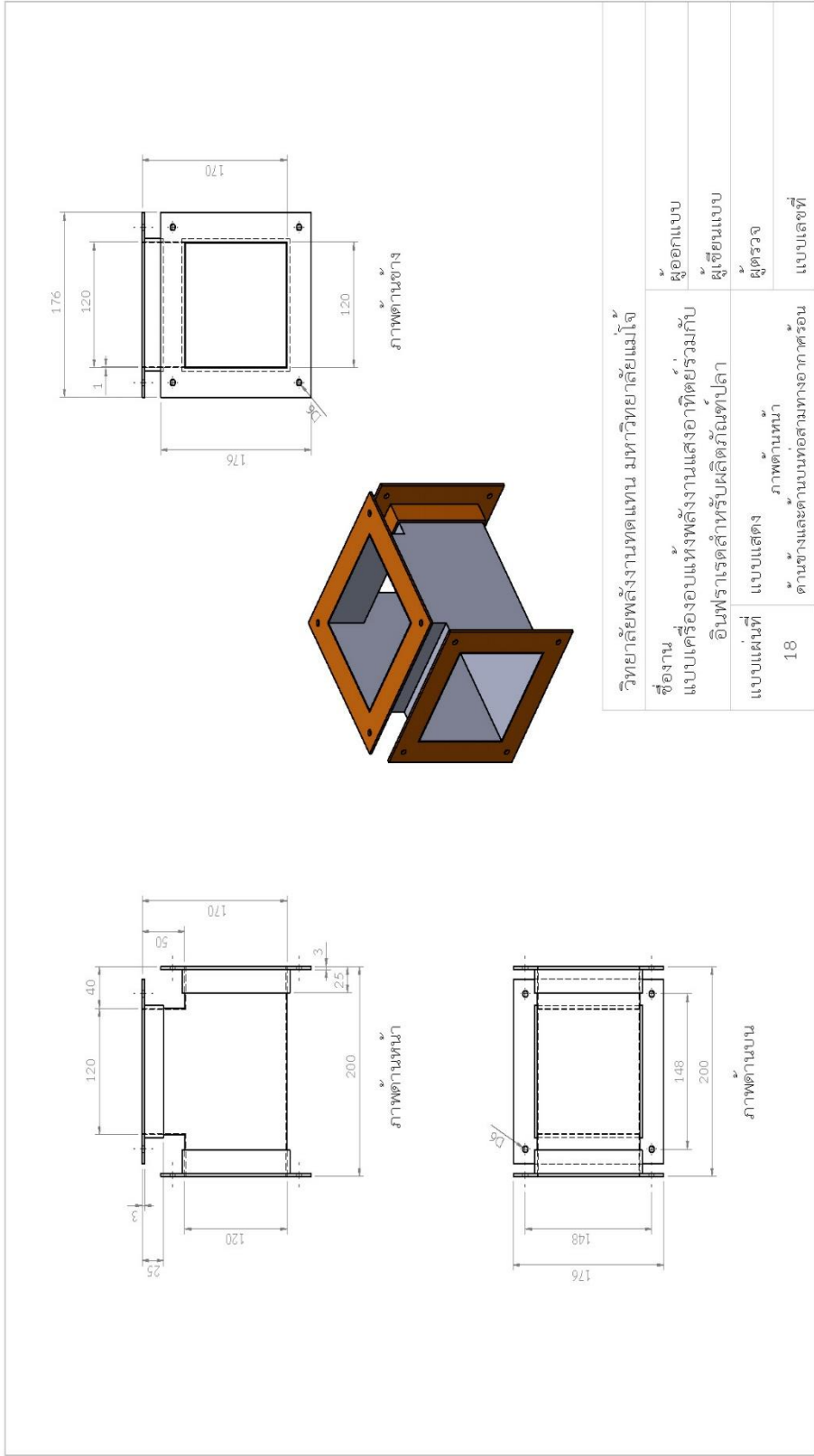
ภาพผนวกที่ 16 แบบแสดงภาพด้านหน้า ด้านข้าง และด้านบนที่ออกอากาศร้อน 6



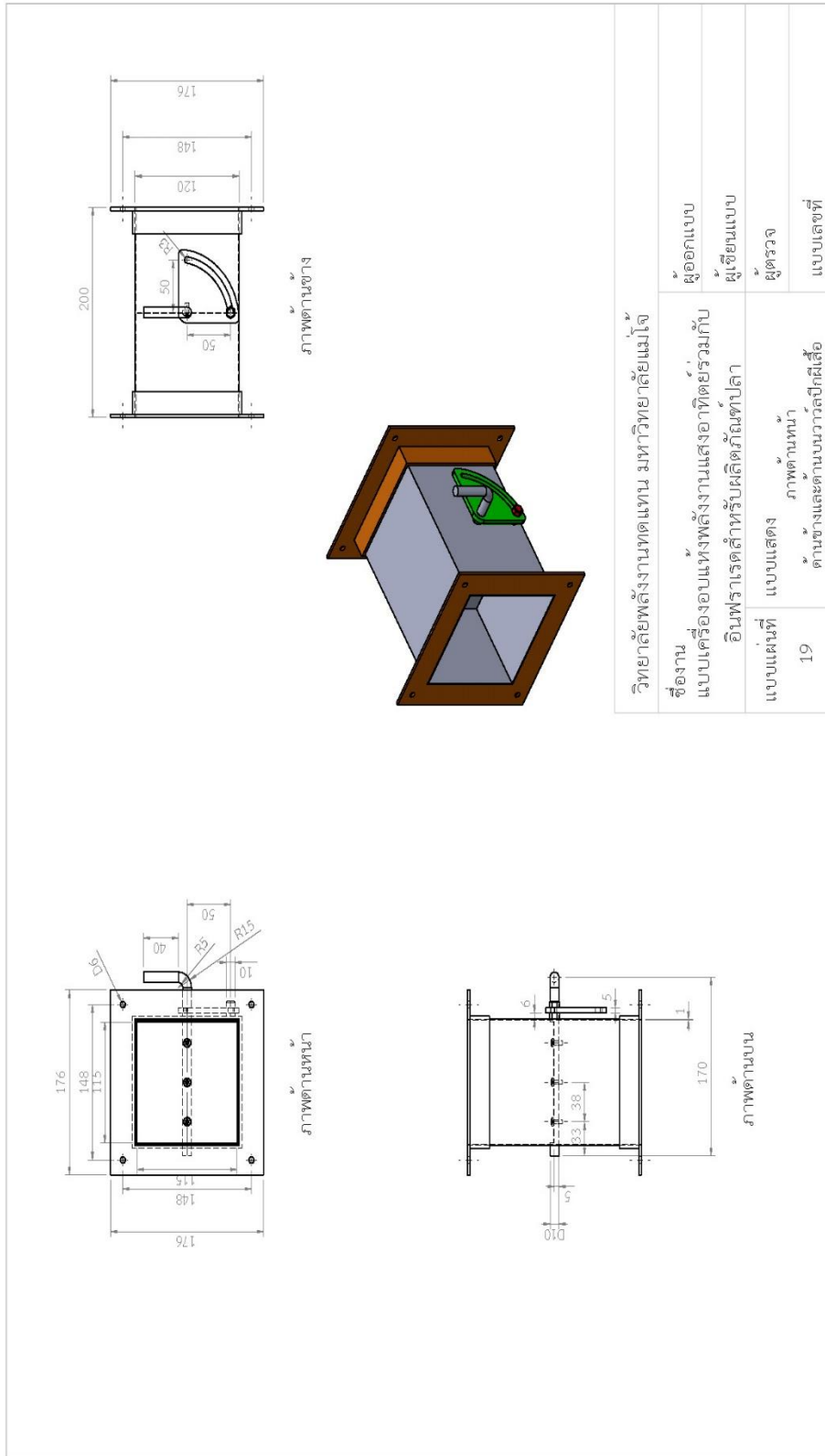
ภาพผนวกที่ 17 แบบแสดงภาพด้านหน้า ด้านข้าง และด้านบนของอาคาร 7

<p>ภาพด้านหน้า</p>		<p>ภาพด้านข้าง</p>	
<p>ภาพด้านบน</p>		<p>วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้</p>	
<p>ชื่องาน แบบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับ อินฟราเรดสำหรับผลิตภัณฑ์ปลา</p>		<p>ผู้ออกแบบ ผู้เขียนแบบ ผู้ตรวจ</p>	
<p>แบบแผนที่ 17</p>		<p>แบบแสดง ภาพด้านหน้า ด้านข้างและด้านบนต่อภาคที่ 8</p>	

ภาพผนวกที่ 18 แบบแสดงภาพด้านหน้า ด้านข้าง และด้านบนต่อภาคที่ 8



ภาพผนวกที่ 19 แบบแสดงภาพด้านหน้า ด้านข้าง และด้านบนของสามทางอากาศร้อน



ภาพผนวกที่ 20 แบบแสดงภาพด้านหน้า ด้านข้าง และด้านบนวารัลปิพีเคโอ



ภาคผนวก ง

ตัวอย่างชุดข้อมูลจากการทดสอบการอบแห้งปลาตากด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุน
และการคำนวณประสิทธิภาพการอบแห้ง

ตารางภาคผนวกที่ 2 การวิเคราะห์ผลการทดลองการอบแห้งปลาตุ๋กโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG

t (h)	I (W/m ²)	T _{amb} (°C)	RH _{amb} (%)	T _{wb} (°C)	T _{db} (°C)	อุณหภูมิบริเวณทางเข้า (°C)					
						T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆
8:00	193.70	26.10	52.00	19.50	23.00	30.10	28.10	27.30	40.90	39.10	38.10
8:30	297.30	25.30	41.00	21.00	25.00	29.70	29.10	29.70	41.10	38.70	38.50
9:00	442.70	27.20	43.00	22.00	28.00	30.10	30.00	30.30	41.00	38.10	38.60
9:30	559.30	29.00	42.00	23.00	29.50	30.00	30.10	31.50	41.70	38.60	33.30
10:00	662.90	30.60	39.00	23.50	31.00	33.50	31.20	37.00	41.80	38.80	38.70
10:30	782.60	31.50	27.00	24.50	32.50	35.80	33.00	39.40	43.80	41.70	39.30
11:00	869.50	32.30	36.00	25.00	33.50	39.10	34.80	43.60	48.90	43.20	41.00
11:30	934.10	32.90	34.00	26.00	33.50	40.30	35.30	44.80	49.60	44.10	42.40
12:00	942.70	33.70	31.00	25.50	35.00	41.80	36.10	46.20	51.40	44.80	42.80
12:30	970.10	34.60	28.00	24.00	35.00	43.20	37.30	47.30	52.40	46.40	43.70
13:00	953.10	35.00	28.00	24.50	35.00	43.90	38.70	47.90	53.30	47.40	44.30
13:30	936.50	35.50	26.00	24.50	35.50	44.50	39.20	48.30	52.60	47.50	45.30
14:00	878.40	37.20	25.00	24.50	35.50	43.20	39.70	44.20	45.50	43.00	46.40
14:30	915.60	37.60	23.00	24.50	36.50	43.90	40.60	44.10	44.90	43.30	47.10
15:00	828.50	37.10	23.00	25.00	37.00	43.70	40.30	44.10	44.40	43.10	47.50
15:30	302.40	36.50	21.00	24.00	37.00	42.00	38.70	44.50	47.40	43.70	37.60
16:00	469.30	35.70	20.00	25.00	37.50	38.80	37.50	40.40	41.60	39.70	37.00
16:30	431.30	36.70	20.00	24.00	37.00	44.60	40.00	47.10	52.40	47.30	36.20
17:00	274.20	36.80	21.00	24.00	36.00	44.70	42.50	45.10	50.80	46.30	42.10
17:30	92.80	37.00	22.00	25.00	36.00	40.60	38.70	40.40	49.50	45.10	37.20
18:00	30.60	36.30	29.00	24.00	32.50	39.80	38.10	39.60	50.10	47.30	35.60
18:30	0.00	34.50	36.00	23.00	30.50	36.50	35.40	35.70	50.00	46.80	36.80
19:00	0.00	32.10	42.00	23.00	30.00	33.10	32.50	33.10	49.70	46.90	36.90
19:30	0.00	31.40	44.00	22.00	29.00	32.10	31.70	31.80	50.90	47.80	37.80
20:00	0.00	30.40	46.00	22.00	29.00	32.50	31.80	31.90	50.10	47.20	37.80
20:30	0.00	29.20	48.00	22.00	30.00	30.40	31.50	30.20	50.10	48.70	36.70
21:00	0.00	29.10	48.00	22.00	30.00	30.20	31.60	21.50	49.50	48.60	37.60
เฉลี่ย	472.874	33.01	31.90	23.59	32.59	37.71	35.31	38.78	47.61	44.19	39.86

ตารางภาคผนวกที่ 2 การวิเคราะห์ผลการทดลองการอบแห้งปลาตุ๋กโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG (ต่อ)

t (h)	อุณหภูมิบริเวณด้านล่าง ของห้องอบแห้ง (°C)			อุณหภูมิบริเวณด้านบน ของห้องอบแห้ง (°C)			อุณหภูมิบริเวณทางออก ห้องอบแห้ง (°C)			ข้อมูลเบื้องต้นภายใน ห้องอบแห้ง		
	T ₇	T ₈	T ₉	T ₁₀	T ₁₁	T ₁₂	T ₁₃	T ₁₄	T ₁₅	RH (%)	T _{wb} (°C)	T _{db} (°C)
8:00	68.70	68.10	69.60	73.50	72.75	71.50	77.60	56.10	53.60	13.90	40.00	74.34
8:30	68.70	68.00	69.10	74.75	73.75	72.50	77.70	56.20	53.30	13.70	40.50	75.43
9:00	69.90	69.10	68.20	74.50	74.50	72.75	78.90	56.10	53.60	12.60	40.00	76.16
9:30	71.80	70.10	69.30	74.25	75.75	74.75	76.10	55.00	52.90	12.10	36.00	70.02
10:00	69.60	68.10	72.60	76.00	75.75	75.50	79.70	55.20	53.70	11.60	40.00	77.70
10:30	69.20	68.00	67.90	77.50	76.25	75.50	73.40	59.30	52.00	10.60	43.00	84.65
11:00	69.00	68.70	68.30	78.25	76.25	76.25	75.50	70.80	56.60	10.30	48.50	94.77
11:30	70.40	69.60	69.30	77.00	75.50	75.25	77.00	72.00	57.50	9.80	39.50	79.95
12:00	72.90	71.10	70.90	77.25	75.00	74.25	78.10	73.50	58.90	9.20	44.50	90.23
12:30	68.70	68.10	67.90	74.75	72.00	71.50	69.10	65.20	61.00	10.90	46.00	89.24
13:00	69.00	68.20	68.60	74.00	73.00	71.75	68.50	65.60	63.20	10.80	47.00	91.14
13:30	62.50	61.30	60.60	66.00	65.25	65.25	71.40	67.10	55.60	10.30	47.50	93.05
14:00	59.30	60.30	57.90	62.25	62.25	60.25	57.40	52.20	48.30	10.80	39.50	78.15
14:30	63.70	63.10	60.10	63.75	64.25	71.50	60.50	51.70	48.30	10.90	38.50	76.22
15:00	63.10	60.30	59.20	62.50	65.75	70.50	61.20	49.20	46.80	11.00	37.50	74.28
15:30	60.30	61.20	57.10	65.00	65.00	68.50	62.20	48.00	47.80	15.80	36.00	65.59
16:00	61.30	60.10	56.20	62.50	63.50	67.25	58.30	48.60	46.70	15.60	36.50	66.61
16:30	62.10	62.00	56.50	63.50	63.50	66.50	53.00	50.60	45.30	14.50	32.50	61.18
17:00	62.80	61.00	60.10	65.50	65.75	66.50	57.30	45.40	42.30	15.10	38.00	69.59
17:30	60.10	60.10	59.50	65.50	66.50	66.25	53.40	44.10	41.40	15.60	37.50	68.22
18:00	57.70	57.80	58.10	66.50	64.50	67.75	52.50	45.10	42.10	14.10	37.00	69.14
18:30	58.40	57.80	56.70	65.25	63.75	67.50	51.10	44.50	41.80	15.00	37.00	68.08
19:00	57.90	56.80	56.10	64.50	63.00	71.75	51.50	43.90	41.50	15.20	36.50	67.04
19:30	58.70	58.60	57.10	65.25	63.25	63.90	51.60	44.70	42.10	16.00	36.00	65.38
20:00	57.90	58.10	57.10	64.75	64.75	62.50	52.00	45.80	43.50	15.80	36.00	65.59
20:30	58.10	58.60	56.10	61.25	62.25	68.10	53.80	46.50	42.30	16.70	38.00	64.50
21:00	58.30	58.10	56.10	60.75	62.75	68.70	52.20	46.30	43.00	18.90	38.00	64.50
เฉลี่ย	64.08	63.42	62.45	68.76	68.39	69.79	64.11	54.03	49.45	13.21	39.52	74.84

ตารางภาคผนวกที่ 2 การวิเคราะห์ผลการทดลองการอบแห้งปลาตุกโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานความร้อนจากแก๊ส LPG (ต่อ)

t (h)	ข้อมูลเบื้องต้นบริเวณ ทางออกห้องอบแห้ง			ตัวอย่างทดสอบ						ไฟฟ้า (kWh)
	RH	T _{wb}	T _{db}	W _{i,1}	M _{i,1}	W _{i,2}	M _{i,2}	W _{i,3}	M _{i,3}	
	(%)	(°C)	(°C)	(kg)	(%db)	(kg)	(%db)	(kg)	(%db)	
8:00	57.80	26.00	33.00	199.33	275.56	200.80	275.56	200.60	275.56	0.00
8:30	55.57	26.00	33.50							0.05
9:00	53.44	26.00	34.00	172.20	224.44	174.00	225.44	174.80	227.26	0.11
9:30	58.28	23.50	30.00							0.18
10:00	53.44	26.00	34.00	151.37	185.20	151.90	184.10	155.70	191.50	0.22
10:30	67.26	30.00	35.50							0.29
11:00	51.32	28.50	37.50	136.07	156.37	133.30	149.31	138.10	158.55	0.34
11:30	56.88	31.00	39.00							0.39
12:00	51.23	31.00	40.50	122.15	130.14	117.50	119.76	123.90	131.96	0.45
12:30	54.30	33.00	42.00							0.52
13:00	58.07	33.00	41.00	110.70	108.56	106.40	99.00	111.70	109.12	0.58
13:30	47.51	33.00	44.00							0.63
14:00	51.89	32.00	41.50	100.60	89.54	96.50	80.49	101.80	90.59	0.68
14:30	50.15	32.00	42.00							0.74
15:00	36.03	26.00	39.00	91.78	72.93	88.40	65.34	92.70	73.55	0.80
15:30	32.89	27.00	41.50							0.86
16:00	32.44	26.50	41.00	85.72	61.50	81.10	51.68	85.40	59.88	0.91
16:30	53.60	29.00	37.50							0.97
17:00	35.56	25.50	38.50	79.95	50.63	75.70	41.58	79.00	47.90	1.02
17:30	58.07	25.00	37.00							1.07
18:00	41.30	25.00	36.00	76.23	43.63	71.80	34.29	74.10	38.73	1.08
18:30	41.30	25.00	36.00							1.13
19:00	43.02	25.00	35.50	73.50	38.48	69.30	29.61	70.60	32.18	1.18
19:30	45.23	25.50	35.50							1.23

t	ข้อมูลเบื้องต้นบริเวณ									ไฟฟ้า
(h)	ทางออกห้องอบแห้ง									(kWh)
	RH	T _{wb}	T _{db}	W _{i,1}	M _{i,1}	W _{i,2}	M _{i,2}	W _{i,3}	M _{i,3}	
	(%)	(°C)	(°C)	(kg)	(%db)	(kg)	(%db)	(kg)	(%db)	
20:00	42.56	24.50	35.00	70.00	31.88	67.00	25.31	67.30	26.00	1.28
20:30	41.44	24.00	34.50							1.33
21:00	41.56	24.00	34.50	64.19	20.94	64.80	21.20	64.10	20.01	1.38
เฉลี่ย	48.60	27.52	37.37							0.05

ตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพการอบแห้งเมื่อทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบภาคหมุนโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ร่วมกับแก๊ส LPG

1) พิจารณาอัตราการอบแห้ง เมื่อทำการอบแห้งปลาแห้งที่มีน้ำหนักเริ่มต้น 20.125 kg และมีน้ำหนักสุดท้าย 6.415 kg ใช้ระยะเวลาในการอบแห้ง 13 h ดังนั้นอัตราการอบแห้งพิจารณาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Drying rate} &= \frac{m_w}{t} \\ \text{Drying rate} &= \frac{20.125 \text{ kg} - 6.415 \text{ kg}}{13 \text{ h}} \\ \text{Drying rate} &= 1.055 \text{ kg H}_2\text{O evap/h} \end{aligned}$$

ดังนั้น อัตราการอบแห้ง ได้แก่ 1.055 kg H₂O evap/h

2) พิจารณาปริมาณการใช้พลังงานสิ้นเปลืองจำเพาะ

● เมื่อการอบแห้งดังกล่าวมีพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ย 472.87 W/m² โดยเครื่องอบแห้งมีพื้นที่รับแสง 3.98 m² ช่วงเวลาที่มีแสงอาทิตย์เป็นระยะเวลา 10 h ดังนั้นพลังงานความร้อนที่ได้จากพลังงานแสงอาทิตย์ได้แก่

$$\begin{aligned} \text{Solar energy} &= 472.87 \text{ W/m}^2 \times 3.98 \text{ m}^2 \times 10 \text{ h} \\ \text{Solar energy} &= 18.82 \text{ kWh} \times 3.6 \text{ MJ/kWh} \\ \text{Solar energy} &= 67.75 \text{ MJ}_{\text{Thermal}} \end{aligned}$$

ดังนั้น พลังงานความร้อนที่ได้จากพลังงานแสงอาทิตย์ ได้แก่ 67.75 MJ_{Thermal}

- การอบแห้งดังกล่าวมีการใช้แก๊ส LPG จำนวน 2.72 kg โดยค่าความร้อนของแก๊ส LPG คือ 50.22 MJ/kg ดังนั้น ปริมาณพลังงานความร้อนที่ได้จากแก๊ส LPG คือ

$$\text{LPG} = 2.72 \text{ kg} \times 50.22 \text{ MJ/kg}$$

$$\text{LPG} = 136.35 \text{ MJ}_{\text{Thermal}}$$

ดังนั้น พลังงานความร้อนที่ได้จากแก๊ส LPG ได้แก่ 136.35 MJ_{Thermal}

- การอบแห้งดังกล่าวมีการใช้พลังงานไฟฟ้าจำนวน 1.38 kWh ดังนั้น ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง คือ

$$\text{Electric} = 1.38 \text{ kWh} \times 3.6 \text{ MJ/kWh}$$

$$\text{Electric} = 4.97 \text{ MJ}_{\text{Electrical}}$$

เมื่อกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าต้องใช้พลังงานความร้อนถึง 5 เท่าในการให้ความร้อนแก่หม้อไอน้ำ (Boiler) และอุปกรณ์อื่นๆ หรืออาจกล่าวได้ว่าในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้ามีการให้พลังงานความร้อนแก่จากอุปกรณ์อื่นๆ ในระบบ 20%

ดังนั้น ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง ได้แก่ $\frac{4.97 \text{ MJ}_{\text{Electrical}}}{20\%}$

ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง = 24.85 MJ_{Thermal}

- จากข้อมูลเบื้องต้นปริมาณพลังงานสิ้นเปลืองจำเพาะที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งทั้งสิ้น ได้แก่ 209.07 MJ ดังนั้นปริมาณความพลังงานสิ้นเปลืองจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งคือ

$$\text{SEC} = \frac{67.76 \text{ MJ} + 136.35 \text{ MJ} + 24.85 \text{ MJ}}{20.125 \text{ kg} - 6.415 \text{ kg}}$$

$$\text{SEC} = 16.70 \text{ MJ/kg H}_2\text{O evap}$$

ดังนั้น ปริมาณความพลังงานสิ้นเปลืองจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง ได้แก่ 16.70 MJ/kg H₂O evap

3) พิจารณาประสิทธิภาพการอบแห้ง

ในการบวกรอบแห้งดังกล่าว มีอัตราการอบแห้ง ได้แก่ 1.055 kg H₂O evap./h และ ปริมาณความพลังงานสิ้นเปลืองจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง ได้แก่ 16.70 MJ/kg H₂O evap. โดยค่า ความร้อนแฝงในการระเหยน้ำคือ 2.257 MJ/kg ดังนั้นประสิทธิภาพการอบแห้งสามารถพิจารณาได้ ดังต่อไปนี้

$$\eta = \frac{(20.150 \text{ kg} - 6.415 \text{ kg}) \times 2.257 \text{ MJ/kg}}{228.96 \text{ MJ}} \times 100$$

$$\eta = 13.51\%$$

ดังนั้น ประสิทธิภาพการอบแห้ง ได้แก่ 13.51%





ภาคผนวก จ

ผลการวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ปลาแห้ง



มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ฝ่ายบริการห้องปฏิบัติการ

รายงานผลการทดสอบหมายเลขที่ 2538/62

หน้า 1/1

หมายเลขปฏิบัติการ	62/C-02256
ชื่อที่อยู่ของผู้ขอรับบริการ	การประเมินสมรรถนะเครื่องอบพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรด สำหรับผลิตภัณฑ์ปลา
รายละเอียดตัวอย่าง	ปลาดุกแห้ง : ผลิตภัณฑ์ปลาแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบกาดหมุน
หมายเลขตัวอย่าง	-
ลักษณะ และสภาพของตัวอย่าง	บรรจุถุงซิปล็อค ปิดสนิท จำนวน 1 ถุง น้ำหนัก 500 กรัม/ถุง ไม่มีฉลาก และสภาพตัวอย่างที่รับปกติ
วันเดือนปีที่รับตัวอย่าง	8 กรกฎาคม 2562
วันเดือนปีที่ทดสอบ	10 - 12 กรกฎาคม 2562
วิธีทดสอบ	วิธีทดสอบมีรายละเอียดดังปรากฏในตาราง
ผลการทดสอบตัวอย่าง	ผลการทดสอบมีรายละเอียดดังปรากฏในตาราง

รายการทดสอบ	วิธีทดสอบ	ผลการทดสอบ
โปรตีน	AOAC (2012), 991.20	38.71 กรัมต่อ 100 กรัม
ไขมัน	AOAC (2012), 945.18	24.38 กรัมต่อ 100 กรัม

ผู้ทดสอบ นางสาวสุปราณี แก้วเทียน

ผู้รับรอง

(นายพินัยพล สินธูยา)

ผู้จัดการวิชาการ

12 / ก.ค. / 2562

รายงานนี้รับรองผลเฉพาะชิ้นตัวอย่างที่ได้ทดสอบเท่านั้น

ห้ามคัดถ่ายรายงานผลการทดสอบแต่เพียงบางส่วนโดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันบริการตรวจสอบคุณภาพและมาตรฐานผลิตภัณฑ์

สถาบันบริการตรวจสอบคุณภาพและมาตรฐานผลิตภัณฑ์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ตำบลหนองหาร อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290 โทร. 0 5387 5646
Institute of Product Quality and Standardization, Maejo University Nongbarn, Sansai, Chiangmai, Thailand 50290 Tel: +66(0) 5387 5646

F-036, 01/10/61/2

ภาพผนวกที่ 21 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ปลาดุกแห้งจากการทดลอง



มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ฝ่ายบริการห้องปฏิบัติการ

รายงานผลการทดสอบหมายเลขที่ 1746/61

หน้า 1/1

หมายเลขปฏิบัติการ	61/C-00783
ชื่อที่อยู่ของผู้ขอรับบริการ	โครงการวิสาหกิจชุมชนนำร่องการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตฝรั่งสดรสสุก โดยใช้โรงเรือน ฯ
รายละเอียดตัวอย่าง	ปลาตุก : EX ปลาตุก
หมายเลขตัวอย่าง	-
ลักษณะ และสภาพของตัวอย่าง	บรรจุในถุงซิปล็อค ปิดสนิท จำนวน 1 ถุง น้ำหนัก 500 กรัม/ถุง ไม่มีฉลาก และสภาพตัวอย่างที่รับปกติ
วันเดือนปีที่รับตัวอย่าง	11 ตุลาคม 2560
วันเดือนปีที่ทดสอบ	12 ตุลาคม - 17 พฤศจิกายน 2560
วิธีทดสอบ	วิธีทดสอบมีรายละเอียดดังปรากฏในตาราง
ผลการทดสอบ	ผลการทดสอบมีรายละเอียดดังปรากฏในตาราง

รายการทดสอบ	วิธีทดสอบ	ผลการทดสอบ
ความชื้น	AOAC (2012), 950.46	2.35 กรัม ต่อ 100 กรัม
ไขมัน	AOAC (2012), 960.39	30.47 กรัม ต่อ 100 กรัม
เถ้า	AOAC (2012), 920.153	7.05 กรัม ต่อ 100 กรัม
โปรตีน	AOAC (2012), 991.20	46.72 กรัม ต่อ 100 กรัม
คาร์โบไฮเดรต	By Calculation	13.39 กรัม ต่อ 100 กรัม
เยื่อใย	AOAC (2012), 962.09	2.89 กรัม ต่อ 100 กรัม
วิตามิน B1	In-house method based on Journal of pharmaceutical and biomedical Analysis 18(1999), 999_1004	0.14 มิลลิกรัม ต่อ 100 กรัม
วิตามิน B2		0.20 มิลลิกรัม ต่อ 100 กรัม

ผู้ทดสอบ

(นางสาวสุปราณี แก้วเทียน)

นักวิทยาศาสตร์

PS

17 / พ.ย. / 2560

ผู้รับรอง

(ดร. กัทธนากรรณ์ ฉันทรัตน์โยธิน)

ผู้จัดการวิชาการ

17 / พ.ย. / 2560

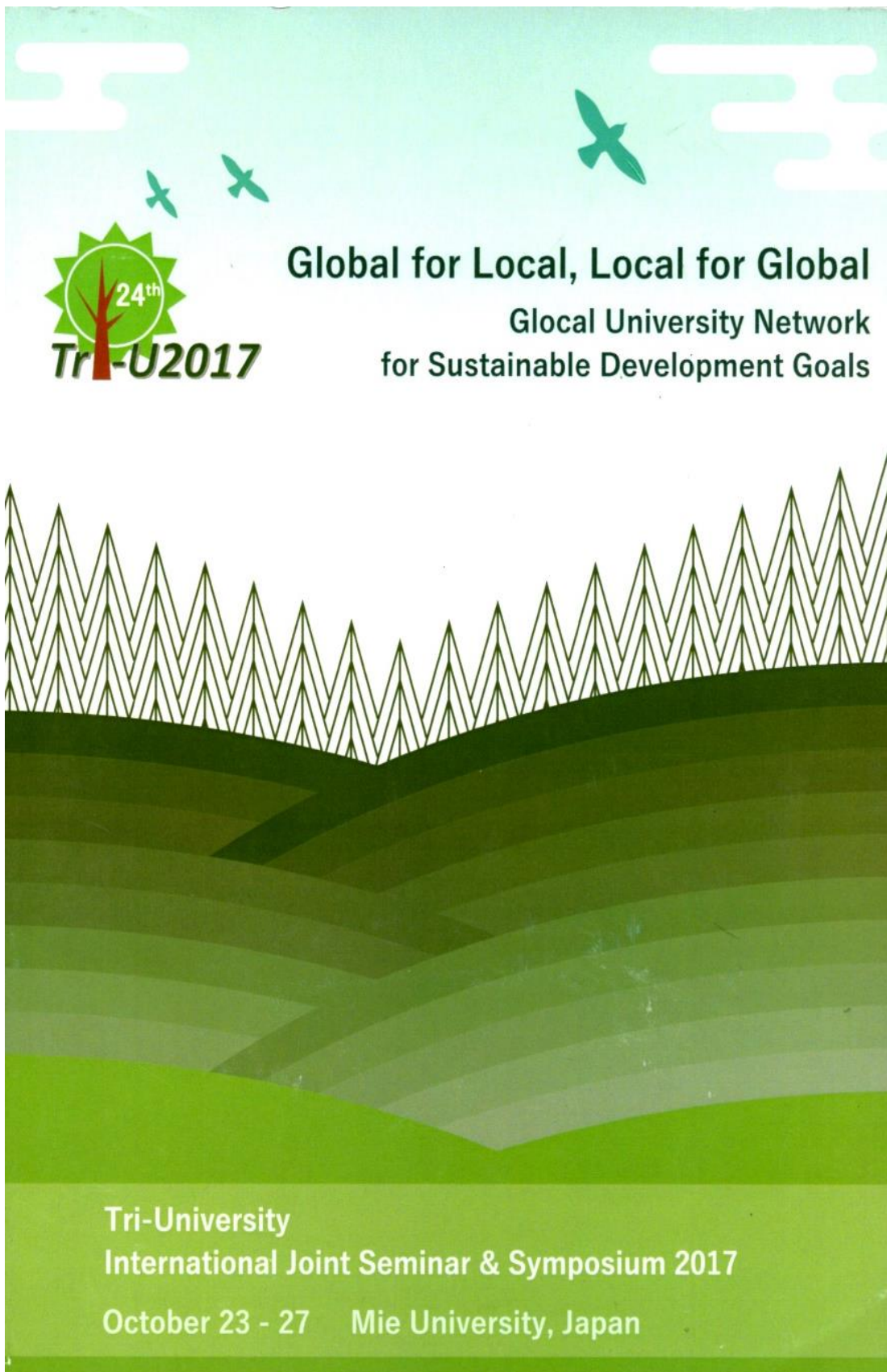
รายงานนี้รับรองผลเฉพาะชิ้นตัวอย่างที่ได้ทดสอบเท่านั้น

ห้ามคัดถ่ายรายงานผลการทดสอบแต่เพียงบางส่วนโดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันบริการตรวจสอบคุณภาพและมาตรฐานผลิตภัณฑ์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ภาพผนวกที่ 22 ผลการวิเคราะห์ผลผลิตปลาตุกแห้งที่มีจำหน่ายทั่วไปตามท้องตลาด



ภาคผนวก ฉ
การเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ



Abstract Theme: Energy

EG8-C4

Performance Evaluation of Solar Dryer for Fish Product



- Jiraporn kaewdiew, Natthawud Dussadee, Churat Thararux, Nigran Homdoug and Rameshprabu Ramaraj

School of renewable energy, Maejo University, Sansai Chiang Mai 50290, Thailand

• **ABSTRACT**

The objectives of this research were to developed fish product dryer by using solar energy combined with electrical energy. The experiment was to study about the drying kinetic of the fish product. The drying chamber can dry fish product about 20 to 30 kg or 8 trays. The main energy consumed will be supplied from the 2.69 m² of collector area, which is located on the top of the drying chamber. The air inside the drying chamber has a forced flow pattern using motor 760 W. control the blower functions to circulate the air through the modular dryer and 70 to 80% of air recycled. Performance evaluation of fish product dryer has three different drying conditions all drying conditions was run under the conditions of drying temperature between 50 to 70 °C. The initial and final moisture content of fish product is about 340.35 %db. and 20 to 30 %db., respectively. The result revealed the performance values of solar dryer is can reduce moisture content of fish product, final moisture content of fish product as your needed. The study showed that the drying process, which used the temperature of 70 °C was 42.60 MJ/kgH₂O_{evap} of specific energy consumption and 14 hours of drying time. However, quality analysis of fish product using the solar energy was similar to the normal process of dried threadfin bought in the market and community acceptance.

KEYWORDS: Fish product, Solar energy, Drying kinetic, Specific energy consumption

Oral Presentation Timetable

Oct.26	EV7	Room B [Environment]			
11:00-11:20	1	Shanghai Ocean	Yating	Song	EV7-B1
11:20-11:40	2	Chiang Mai	Phatthakon	Taotiang	EV7-B2
11:40-12:00	3	Jiangsu	Ying	Song	EV7-B3
12:00-12:20	4	Jiangsu	Qinhong	Zhang	EV7-B4
12:20-12:40	5	Mie	Misa	Horii	EV7-B5
Oct.26	EG8	Room C [Energy]			
11:00-11:20	L	Maejo	Yuwalee	Unpaprom	EG8-CL
11:20-11:40	1	Maejo	Praphatsorn	Rattanaphai boon	EG8-C1
11:40-12:00	2	Naresuan	Natjira	Inmon	EG8-C2
12:00-12:20	3	Jiangsu	Xiaoyin	Zhang	EG8-C3
12:20-12:40	4	Maejo	Jirapom	Kaewdew	EG8-C4
Oct.26	EV8	Room D [Environment]			
11:00-11:20	1	Bogor Agriculture	Eric	Faustine	EV8-D1
11:20-11:40	2	Shanghai Ocean	Caixia	Li	EV8-D2
11:40-12:00	3	Maejo	Kodchakorn	Palaphan	EV8-D3
12:00-12:20	4	Guangxi	Jianlin	Song	EV8-D4
12:20-12:40	5	Mie	Megumi	Murakami	EV8-D5
Oct.26	EV9	Room E [Environment]			
11:00-11:20	1	Jiangsu	Xingtao	Zhong	EV9-E1
11:20-11:40	2	Bogor Agriculture	Ken	Rizkyna	EV9-E2
11:40-12:00	3	Guangxi	Xiafei	Ouyang	EV9-E3
12:00-12:20	4	Mie	Mio	Yoshida	EV9-E4
12:20-12:40					

TRIU17FD01 (paper number)

Performance Evaluation of Solar Dryer for Fish Product

Jiraporn kaewdiew, Natthawud Dussadee*, Churat Thararux, Nigran Homdoung and
Rameshprabu Ramaraj

School of renewable energy, Maejo University, Sansai Chiang Mai 50290, Thailand
*e-mail: forever_nidnoi@hotmail.co.th; natthawud92@gmail.com

Abstract The objectives of this research were to developed fish product dryer by using solar energy combined with electrical energy. The experiment was to study about the drying kinetic of the fish product. The drying chamber can dry fish product about 20 to 30 kg or 8 trays. The main energy consumed will be supplied from the 2.69 m² of collector area, which is located on the top of the drying chamber. The air inside the drying chamber has a forced flow pattern using motor 760 W. control the blower functions to circulate the air through the modular dryer and 70 to 80% of air recycled. Performance evaluation of fish product dryer has three different drying conditions all drying conditions was run under the conditions of drying temperature between 50 to 70 °C. The initial and final moisture content of fish product is about 340.35 %db. and 20 to 30 %db., respectively. The result revealed the performance values of solar dryer is can reduce moisture content of fish product, final moisture content of fish product as your needed. The study showed that the drying process, which used the temperature of 70 °C was 42.60 MJ/kgH₂O_{evap} of specific energy consumption and 14 hours of drying time. However, quality analysis of fish product using the solar energy was similar to the normal process of dried threadfin bought in the market and community acceptance.

Key words: Fish product, Solar energy, Drying kinetic, Specific energy consumption

1. INTRODUCTION

Thailand is an agricultural industry and most of Thai citizens practice crop cultivation and animal husbandry. Aquaculture is a rapidly growing industry in Thailand. Production and export of fisheries products have an important role in the national economy. For each year there is a large amount export of fisheries, which generates huge amounts of revenue for the country. Nile tilapia is a major economic fish of Thailand, 92% of the country consumed the remaining 8% as production for export. Nile Tilapia is an aquatic species that is easily accessible within the area, it is popular to be food processing. Fish products from the process of processing are generally found in the normal market is sun dried fish and dried fish. Dried fish which is already dried from food process processing can be taken 5-7 day to dry by exposing to the sun.



Fig.1 Sun dried fish and dried fish (already dried)

Fresh fish from the river is rapidly deteriorates unless some way can be found to preserve it. Drying is a method of food preservation that works by removing water from the food, which inhibits the growth of microorganisms. Open air drying using sun and wind has been practiced since ancient times to preserve food. Water is usually removed by evaporation (air drying, sun drying, smoking or wind drying). Fish drying fully depends on the weather, in adverse weather it takes long time for drying. Sometimes it becomes not possible to dry the fish hygienically. The fish may infect by worms or insects during drying in open place. The qualities of fish can be damage due to keeping in incorrect and non-scientific way. Sometimes dried fish become black colored which reduces its price and demand in the market.

The development of a drying process with a solar dryer is one of the technology used to help preserve food, preserving agricultural produce and helps to increase the value of the

output as well. The researcher has developed a dryer that can control the temperature of dry air in the drying chamber, which can be used even in bad weather and can prevent the contamination as well. It has been developed by using heat sources from the electric heater as an additional heat source. It can reduce the drying time and the quality of the product is similar to the product sold in the market. For dried fish products, the product must have a dry standard moisture content of 20 to 30 %db. Therefore, in this study aim to develop the proper solar dryer for fish products. It could be beneficial and sustainable usage for fishery farmers.

2. MATERIALS AND METHOD

Solar dryer to study is the drying chamber is width 0.5 m, length 1 m and high 1.5 m. This dryer can dry fish product about 20-30 kg or 8 trays. The main energy consumed will be supplied from the 2.69 m² of solar collector area, which is located on the top of the drying chamber. The air inside the drying chamber has a forced flow pattern using motor 760 W. control the blower functions to circulate the air through the modular dryer and 70 to 80 % of air recycled. The structure of solar dryer for fish product shown in Fig. 2

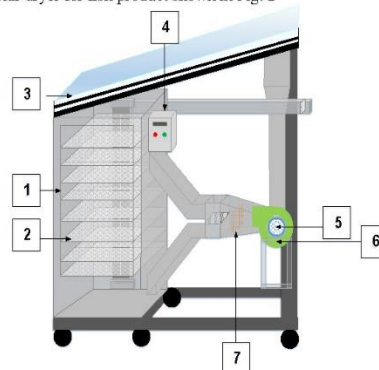


Fig. 2 The structure of solar dryer for fish product (1(drying chamber),2(trays),3(solar collector),4(control

unit,)5(motor,)6(blower,)7(electric heater
 The moisture content of Nile tilapia was measured by the oven method. Blanched and dried samples were taken out and dried in the oven at 103 °C for 72 hours until constant weight was obtained.



Fig. 3 Nile Tilapia

The moisture content dry basis on the definition of the American Society of Agricultural Engineering, [1] can be calculated equations 1 following:

$$M_d = \frac{W_w - W_d}{W_d} \times 100\% \quad (1)$$

- M_d = moisture content of material, %
- W_w = weight of water material, kg
- W_d = weight of dry material, kg

Calculate the moisture ratio reduction in the drying process from the equation 2 following:

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_n - M_{eq}} \quad (2)$$

- MR = moisture ratio
- M_t = moisture content at any time, %db.
- M_n = initial moisture content, %db.
- M_{eq} = equilibrium moisture content, %db.

The values of M_{eq} are very small compared to M_t or M_n for long drying time. [1,4,5] Thus, the equation 2 can be written in a more simplified form the equation 3 following:

$$MR = \frac{M_t}{M_n} \quad (3)$$

The specific energy consumption (SEC) parameter [2] is specified through from the equation 4 following:

$$SEC = \frac{E_T}{m_{wd}} \quad (4)$$

- SEC = specific energy consumption, MJ/kg H₂O
- E_T = energy consumption, kWh
- m_{wd} = moisture mass that is evaporated during the drying process, kg

3. RESULTS AND DISCUSSION

The experiment was to study about drying process of Nile tilapia with the initial weight of 5 kg. Two samples of Nile tilapia for weighing every 1 hour. Nile tilapia samples had initial moisture content was in the range of 216.67- 250 %db. and the final moisture content was in the range of 20-30 %db. this is the moisture of fish products in the market. The experiments showed that drying at 70 °C the drying time was about 11-12 hours. When drying at 60 °C and 50 °C the drying time was about 15-18 hours and 20-23 hours respectively. The results showed that the higher temperature influenced the evaporation of water in the material. The results evolution of moisture

content shown in Fig. 4 and Table 1.

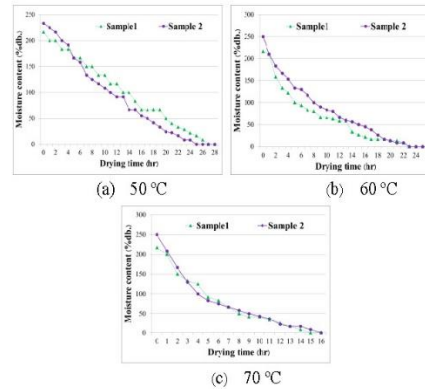


Fig. 4 The evolution of moisture content

The experiment was to study about drying process of Nile tilapia with the initial weight of 5 kg and constant final weight was obtained. It's initial moisture content of 340.35 %db. The results are temperature drying at 70 °C has the shortest drying time, Nile tilapia has final weight is 1.32 kg and the final moisture content is 2.79 %db. When considering the energy consumption for evaporation from Nile tilapia per hour, the results showed that a drying temperature of 60 °C, the highest energy consumption was 53.46 MJ/kgH₂O evap, with a drying temperature of 70 °C and 50 °C had energy consumption rates of 42.60 and 35.46 MJ/kgH₂O evap, respectively. The results energy consumption in term of heat equivalent shown in Fig. 5 and the results of the experiment shown in Table 2.

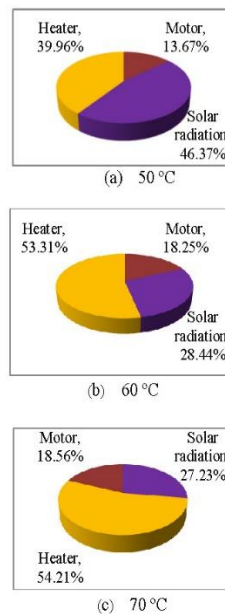


Fig. 5 The energy consumption in term of heat equivalent

Table1. Results from experimental fish sample

T (°C)	Sample	t (hr)	W _w (kg)	W _d (kg)	M _{in} (%db.)	M _t (%db.)	DR (kgH ₂ O/hr)	SEC (MJ/kgH ₂ O _{evap})
50	1	23	0.190	0.080	216.67	28.33	0.005	908.279
	2	20	0.200	0.072	233.33	24.00	0.005	696.64
60	1	15	0.190	0.080	216.67	26.67	0.007	1125.99
	2	18	0.210	0.080	250.00	26.63	0.007	1173.24
70	1	12	0.190	0.075	216.67	25.00	0.009	1182.72
	2	12	0.210	0.070	210.00	21.67	0.010	992.79

(c) 70 °C

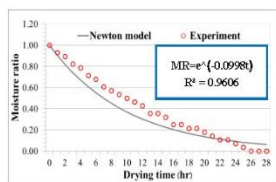
Fig. 6 Evolution of Moisture ratio

Table2. Results from experimental fish products

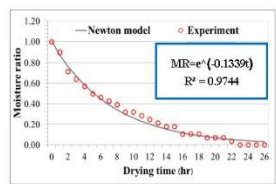
T (°C)	t (hr)	W _w (kg)	W _d (kg)	M _{in} (%db.)	M _t (%db.)	DR (kgH ₂ O/hr)	SEC (MJ/kgH ₂ O _{evap})
50	25	5	1.61	340.35	2.11	0.147	35.46
60	22	5	1.62	340.35	2.09	0.154	53.46
70	14	5	1.32	340.35	2.79	0.263	42.60

One of the important parameters which is studied in dryer systems is the curve of moisture loss or drying kinetics of the wet matter as shown in Fig. 6 Moisture ratio is reduced during drying at various conditions. It was found that drying of Nile tilapia was reduced drying rate because of the moisture content in line tilapia, rapid transpiration at the beginning of the experiment, while high humidity this makes the transfer of water from the tilapia fish to the surface quickly and easily. When the drying time is longer, the moisture content in the skin and the body of the Nile tilapia is lower. The rate of mass transfer from the Nile tilapia to the skin surface is reduced slowly. Consistent with past research. The reduction of moisture in the drying time is not linearly correlated with the drying time, and can be expressed in extrinsic relationships.

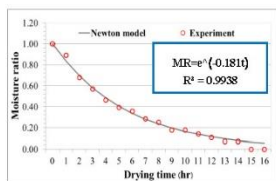
The quality analysis of fish product using the solar energy was similar to the normal process of dried threadfin bought in the market and community acceptance. The quality comparison for dried fish of experiment and dried fish of the market can be shown in Fig. 7.



(a) 50 °C



(b) 60 °C



(a) 50 °C

(b) 60 °C



(c) 70 °C

Fig. 7 Fish products

4. CONCLUSIONS

Development of drying process using solar dryer combined with electric power source. It was found that drying at higher temperatures had higher drying rates than low temperature drying. The study showed that the drying process, which used the temperature of 70 °C, was 42.60 MJ/kgH₂O_{evap} of specific energy consumption while the moisture dry was still about 2.79 % db and 14 hours of drying time. However, quality analysis of fish product using the solar energy was similar to the normal process of dried threadfin bought in the market and community acceptance.

5. ACKNOWLEDGMENT

Authors would like to thanks for provided the research grand from school of Renewable energy Maejo University "Project and development of the renewable energy potential graduates, ASEAN".

6. REFERENCES

- [1] Balbay, A., S. ahin, Ö.,)2012(. Microwave drying kinetics of a thin-layer liquorice root. *Dry. Technol.* 30, 859–864.
- [2] Delgado, J.M.P.Q., Gilson Barbosa de Lima, A.,)2016(. *Drying and Energy Technologies*. Springer International, Switzerland.
- [3] Ferreira, A., Charbel, A., Pires, R., Silva, J., Maiac, C.B.,)2007(. Experimental analysis of a hybrid dryer. *Therm. Eng.* 6, 3–7.
- [4] Khir, R., Pan, Z., Salim, A., Hartsough, B. R., & Mohamed, S. (2011). Moisture diffusivity of rough rice under infrared radiation drying. *LWT - Food Science and Technology*, 44(4), 1126-1132.
- [5] Nuthong, P., Acharyaviriya, A., Namsanguan, K., & Acharyaviriya, S. (2011). Kinetics and modeling of whole longan with combined infrared and hot air. *Journal of Food Engineering*, 102(3), 233-239.
- [6] Ponkham, K., Meeso, N., Soponromanit, S., & Siriamompun, S. (2012). Modeling of combined far-infrared radiation and air drying of a ring shaped-pineapple with/without shrinkage. *Food and Bioproducts Processing*, 90(2), 155-164.
- [7] Shi, J., Pan, Z., McHugh, T. H., Wood, D., Hirschberg, E., & Olson, D. (2008). Drying and quality characteristics of fresh and sugar-infused blueberries dried with infrared radiation heating. *LWT - Food Science and Technology*, 41(10), 1962-1972.
- [8] Soponromanit, S., Nathakaranakule, A., Jirajindalert, A., & Taechapairoj, C. (2006). Parboiling brown rice using superheated steam fluidization technique. *Journal of Food Engineering*, 75, 423-432.
- [9] Tirawanichakul, S., & Tirawanichakul, Y. (1994). Thin layer grain dryer: parameters of thin layer drying for cashew nut. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 16, 92-381.
- [10] Tirawanichakul, S., Na Phatthalung, W., & Tirawanichakul, Y. (2008). Drying strategy of shrimp using hot air convection and hybrid infrared radiation and hot air convection. *Walailak Journal of Science and Technology*, 55, 77-100.



Ms. Jiraporn Kaewdew

Ms. Jiraporn Kaewdew
Date of birth: 03/12/1993
-Candidate in Master of
Engineering (Renewable Energy
Engineering)
-Applied physic
- Biomass technology



Dr. Natthawud Dussadee

Dr. Natthawud Dussadee
Assistant Professor & Director,
School of Renewable Energy,
Maejo University,

Professional:

1. Agricultural Processes (Drying of Foods and Cereal Grains),
2. Energy Conservation (Energy Conservation in building and Industry),
3. Solar energy and Thermal Process (Solar Heating, Heat exchanger),
4. Renewable Energy (Wind, Hydro, Biomass, Biofuel).



Dr. Nigran Homdoug

Dr. Nigran Homdoug
Date of birth: 09/04/1974
Doctor of Engineering
(Mechanical Engineering)

Professional:

1. Gasification and Pyrolysis Process
2. Biomass Conversion Technology (Briquette fuel, Biofuel, Biomass Stove)
3. Internal Combustion Engine (Producer gas and Biogas Engine)
4. Biomass Power Plant Engineering



Dr. Churat Thararux

Dr. Churat Thararux,
Assistant Professor,
School of Renewable Energy,
Maejo University

Professional:

1. Gasification and Pyrolysis Process
2. Biomass Conversion Technology (Briquette fuel, Biofuel, Biomass Stove)
3. Internal Combustion Engine (Producer gas and Biogas Engine, Diesel and spark ignition engine)
4. Biomass Power Plant Engineering

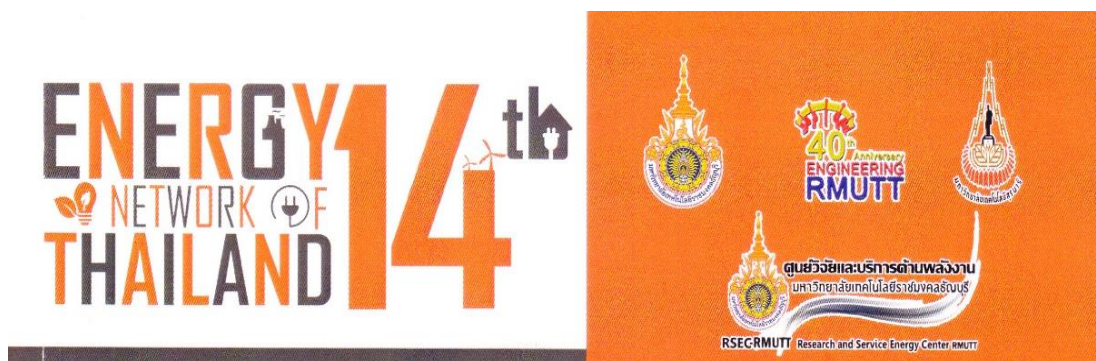


Dr. Rameshprabu Ramaraj

Dr. Rameshprabu Ramaraj,
M.Eng., M.Sc., M.Phil., Ph.D.,
Lecturer, School of Renewable
Energy, Maejo University,

Professional in scientific and engineering field:

biology (animal, plant & microbes), sustainable resource engineering, environment and ecological engineering, bio-statistical analysis and related software applications, biofuels and solid fuels.



14th Conference on Energy Network of Thailand
การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14

13 - 15 มิถุนายน 2561 ณ โนโวเทล ระยอง

Abstract



การศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันหมูโดยใช้เถ้าจากมะพร้าวร่วมกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	808
การศึกษารียบเทียบระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคาขนาด 3 kWp เพื่อรองรับระบบโซลาร์เซลล์สำหรับเมืองไทย	815
การออกแบบและสร้างตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลสำหรับระบบผลิตน้ำร้อน	822
การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันหมูโดยใช้เถ้าไม่ละลายร่วมกับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	826
การใช้ประโยชน์เถ้ากะลาปาล์มเป็นสารเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซล.....	833
คู่มือแห่งรังสีอาทิตย์แบบความร้อนหมุนเวียนตามธรรมชาติ	841
การศึกษานและออกแบบวงจรควบคุมการชาร์จแบตเตอรี่ด้วยเซลล์เชื้อเพลิงชนิดโปรตรอนแลกเปลี่ยนเมมเบรน ขนาด 1.2 kW.....	847
การประเมินสมรรถนะตัวมวลประสิทธิภาพสูงเมื่อใช้ป้อนซึ่งข้าวโพดอัดเม็ดต่อเนื่อง	852
การผลิตถ่านอัดแท่งจากถ่านยูคาลิปตัสและพีตที่เกิดจากการย่อยสลายของอินทรีย์วัตถุในหนองน้ำ	857
ผลกระทบของไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วต่อสมรรถนะและคุณลักษณะการเผาไหม้ ของเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียวที่มีการปรับอัตราส่วน กำลังอัด.....	863
การจำลองการไหลอากาศและการออกแบบเครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์แบบถาดหมุนร่วมกับรังสีอินฟราเรดสำหรับผลิตภัณฑ์ปลา	870
การศึกษามบติทางจุลโครสร้างและทางแสงของฟิล์มบางผลึกนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยบิสมัท สำหรับประยุกต์ในเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดเทอร์ออปโตโวลต์.....	879
ศักยภาพการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคาโรงงานในประเทศไทย	886
การประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพระบบปิดแบบไม่ใช้อากาศดีดและโรงไฟฟ้า	889
สมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดแท่งเมื่อใช้ตัวประสานธรรมชาติ	893
การสังเคราะห์ฟิล์มบางซิลิคอนคอปเปอร์ในเมทริกซ์ของซิงค์ออกไซด์ได้ปีสมัทจากหมึกคอมโพสิทซิลิคอน และคุณสมบัติทางออปโต อิเล็กทรอนิกส์ สำหรับประยุกต์ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดวัสดุชั้นสูง	899
เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากผักตบชวาผสมกับชีวมวล	906
การศึกษาเชื้อเพลิงชีวมวลที่เหลือทิ้งจากการผลิตมะพร้าวแก้วในจังหวัดเลย	910
การสืบสวนผลกระทบของการบังเงาบางส่วนที่มีต่อกำลังไฟฟ้าสูงสุดและประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยว	917
การเพิ่มผลผลิตและความสัมพันธ์ทางด้านพลังงานขาเข้ากับยีสต์เห็ดและการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ ของโรงเรือนทำความเย็นแบบระเหย และพ่นหมอก.....	923
ผลกระทบเทคนิคการอุ่นชีวมวลที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพเชื้อเพลิงอัดแท่ง.....	931
การพัฒนากังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กแบบหลายใบสำหรับอัตราเร็วลมต่ำ	936
วิเคราะห์ผลกระทบจากความเข้มข้นของรังสีแสงอาทิตย์ของเครื่องกลั่นน้ำพลังงานแสงอาทิตย์แบบพกพา	944
อิทธิพลของเผาไหม้เครื่องยนต์เผาไหม้ภายในที่มีต่อสมรรถนะเครื่องยนต์โปรติวอร์นแก๊ส	948
การพัฒนาโรงอบแห้งแสงอาทิตย์แบบโรงเรือนกระจกสำหรับอบแห้งปลาตากและปลาหมองไทย	954
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนและความชื้นของดิน.....	962
การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากคั้นปาล์มหมดยุคผสมกะลาปาล์มและกากกะกอน้ำมันปาล์ม	966
คุณลักษณะมลพิษของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมด้วยการฉีดแก๊สโซลล์ที่พอร์ท.....	974

การจำลองการไหลอากาศและกระบวนการอบแห้งแสงอาทิตย์แบบอัตโนมัติร่วมกับรังสีอินฟราเรดสำหรับผลิตภัณฑ์ปลา
Air Flow Rate Simulation and Design of Combined Infrared - Solar Rotary Tray Dryer for Fish Product

จิราภรณ์ แก้วเดียว¹, พงศ์สถิต ศรีภักดิ์², ชูรัตน์ ชารักษ์³, นิกราน หอมดวง³

เสริมสุข ปัวเจริญ¹, ศิริสุข จินดารักษ์¹ และ ณัฐวุฒิ คุชฎี^{1*}

¹ สาขาวิศวกรรมพลังงานทดแทน วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

² วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

³ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์

*ผู้ติดต่อ: natthawud92@gmail.com โทรศัพท์ 053-875-597

บทคัดย่อ

RE-01-159

บทความวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอัตโนมัติร่วมกับรังสีอินฟราเรดสำหรับผลิตภัณฑ์ปลา และศึกษาอิทธิพลของความเร็วลมที่มีผลต่อกระบวนการอบแห้ง โดยทำการจำลองความเร็วลมเพื่อสังเกตแนวโน้มของการกระจายตัวของลมภายในห้องอบแห้งด้วยฟังก์ชัน Flow Simulation ในโปรแกรม Solid Works โดยเครื่องอบแห้งที่ทำการศึกษาจะมีปริมาตร 1.18 m³ สามารถอบแห้งปลาตากจำนวน 20 kg ที่มีความชื้นเริ่มต้น 280 %d.b. จนมีความชื้นสุดท้าย 20 - 30 %d.b. ตัวแปรที่ได้ทำการศึกษาได้แก่ ความเร็วลม และแผ่นกระจายอากาศร้อน ซึ่งได้กำหนดเงื่อนไขปริมาณการป้อนอากาศเข้าสู่ห้องอบแห้ง 3 เงื่อนไข ได้แก่ การป้อนอากาศในปริมาณ 0.03 m³/s 0.05 m³/s และ 0.10 m³/s จากผลการศึกษาพบว่า การกระจายตัวของลมภายในห้องอบแห้งมีความเร็วลมที่ใกล้เคียงกัน จากผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของลมภายในห้องอบแห้งด้วยฟังก์ชัน Flow Simulation พบว่า การกระจายตัวของลมภายในห้องอบแห้งที่เงื่อนไขการป้อนอากาศในปริมาณ 0.05 m³/s มีความเร็วลมภายในห้องอบแห้งเฉลี่ย 0.5 m/s เมื่อมีการติดตั้งแผ่นบานเกล็ดเพื่อการกระจายอากาศจะส่งผลให้ภายในห้องอบแห้งมีการกระจายตัวของอากาศที่สม่ำเสมอทำให้อากาศสัมผัสกับผิวของปลาตากได้มากที่สุด

คำหลัก: เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอัตโนมัติ รังสีอินฟราเรด การจำลองความเร็วลม แผ่นกระจายอากาศร้อน

Abstract

The objective of this study was to design solar rotary tray dryer combined with infrared radiation for fish product and study effect of air flow velocity to drying process. The simulation is velocity of hot air to observe to the distribution of air flow velocity in the drying chamber by function flow simulation of solid works program. The drying chamber can dry fish product about 20 kg, the initial and final moisture content of fish product is about 280%db, and 20 to 30 %db, respectively. The experiment was to study about air flow velocity and louver for distribution of hot air. The volume flow rate sets at 0.03 m³/s, 0.05 m³/s and 0.10 m³/s. The results showed that the distribution of hot air in the drying chamber had similar. When has simulation volume flow rate sets 0.05 m³/s, the results showed the drying chamber has air flow velocity 0.5 m/s. The distribution of hot air is thoroughly in the drying chamber, when using louver for distribution of hot air.

Keywords: Solar rotary tray dryer, Infrared radiation, Flow Simulation, Louver

1. บทนำ

การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นอุตสาหกรรมที่มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ประเทศไทยติดอันดับต้นๆ ของผู้ส่งออกสินค้าประมงมาตั้งแต่ปี พ.ศ.2541 การส่งออกปลา และผลิตภัณฑ์ปลาของประเทศไทยในปี พ.ศ.2559 ตลอดทั้งปี มีปริมาณการส่งออกรวม 972,776 ตัน คิดเป็นมูลค่า 10,966.31 ล้านบาท [1] ผลิตภัณฑ์ปลาที่ทำการส่งออกนั้นเกิดมาจากกระบวนการแปรรูปปลาซึ่งเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับปลา หลังจากการเพาะเลี้ยง โดยผลิตภัณฑ์จากการแปรรูปปลา มีหลากหลายรูปแบบเช่น ปลาแช่แข็ง ปลาปรุงแต่ง น้ำพริก และปลาแห้ง เป็นต้น โดยกระบวนการอบแห้งเป็นกระบวนการหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในกระบวนการแปรรูปปลา สำหรับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ปลานั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้ต้องมีความชื้นมาตรฐานแห่งอยู่ในช่วง 20-30 %d.b. [2] ซึ่งเป็นค่าความชื้นที่พบในผลิตภัณฑ์ปลาที่มีจำหน่ายทั่วไปตามท้องตลาด โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ปลาส่งอยู่ในช่วง 50 - 70 °C

การถนอมอาหารโดยวิธีการทำแห้งนั้นเป็นที่นิยมมาช้านานทั้งในระดับครัวเรือน และระดับอุตสาหกรรม การตากแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรง (Natural solar drying) เป็นการตากแห้งแบบดั้งเดิม และได้รับการพัฒนามาเป็นเทคโนโลยีการอบแห้งด้วยลมร้อน (Hot air drying) โดยการนำผลิตภัณฑ์ที่ต้องการทำให้แห้งมาใส่ในตู้อบแห้งแทนการวางไว้กับพื้น แล้วให้ลมร้อนไหลผ่านตู้อบแห้ง ความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่อยู่ภายในตู้อบแห้งจะระเหยออกมาพร้อมกับลมร้อน โดยลมร้อนจะถูกระบายออกทางช่องระบายลมทั้งในรูปแบบที่เป็นการอบแห้งที่มีการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural convection drying หรือ Passive drying) และ การอบแห้งที่มีการพาความร้อนแบบบังคับ (Forced convection drying หรือ Active drying) [3,4] ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งประเภทนี้จะมีความคงสภาพ และปลอดภัยตามหลักเกณฑ์การผลิตอาหารแต่เครื่องอบแห้งประเภทนี้เหมาะสำหรับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ในช่วงที่มีแสงอาทิตย์สม่ำเสมอเท่านั้น ดังนั้นเพื่อเป็นการลดปัญหาอบแห้งในช่วงที่แสงอาทิตย์ไม่เพียงพอ

จึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบผสมผสาน (Hybrid drying) เพื่อให้สามารถทำการอบแห้งได้อย่างต่อเนื่องทั้งในสภาวะที่ไม่มีแสงอาทิตย์ ช่วงเวลากลางคืน และในช่วงฤดูฝน การอบแห้งคือกระบวนการที่ความร้อนถูกถ่ายเทด้วยวิธีใดวิธีหนึ่งไปยังวัสดุที่มีความชื้นเพื่อไล่ความชื้นออกจากวัสดุ ซึ่งโดยทั่วไปความร้อนจะช่วยให้ร่างกายในวัสดุเคลื่อนย้ายมาอยู่ที่ผิวและจะถูกทำให้ออกจากผิวโดยการระเหยซึ่งจะถูกพาออกไปโดยอากาศ ปริมาณความชื้นที่ถูกพาออกไปนั้นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอากาศ ความชื้นผลผลิต ความชื้นในอากาศ ชนิด และความสูงแก่ของผลผลิต โดยการพัฒนาเครื่องอบแห้งนั้นต้องพิจารณาถึงปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการอบแห้งผลิตภัณฑ์ เช่น อุณหภูมิ ขนาดของแหล่งความร้อน พื้นที่รับรังสีอาทิตย์ ความเร็วลม เป็นต้น

บทความนี้ได้ทำการออกแบบเครื่องอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นหลัก ภายในห้องอบแห้งสามารถรับพลังงานแสงอาทิตย์ได้โดยตรง (Natural solar drying) และมีการใช้แหล่งพลังงานความร้อนเสริมจากหัวเผาแก๊สชนิดอินฟราเรด เนื่องจากหัวเผาแก๊สชนิดอินฟราเรดจะมีการทำงานแบบซีมแก๊สช่วยทำให้สามารถประหยัดปริมาณแก๊สที่ใช้ประมาณ 30% [5] นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาอิทธิพลของความเร็วมวลของอากาศร้อนที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง และศึกษาอิทธิพลของแผ่นกระจายอากาศร้อน โดยทำการจำลองความเร็วลมภายในห้องอบแห้งเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการไหล และการกระจายตัวของลมภายในห้องอบแห้ง เพื่อนำไปสู่การพัฒนาเครื่องอบแห้งให้มีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานต่อไป

2. การประยุกต์ใช้หัวเผาแก๊สชนิดอินฟราเรดในอุตสาหกรรมอาหาร

หัวเผาแก๊สชนิดอินฟราเรดจะมีลักษณะเป็นรูปทรงแปดเหลี่ยม จากแผ่นเซรามิคทนความร้อนสามารถทนความร้อนได้ในระดับดี แต่ด้วยลักษณะที่เป็นรูปทรงแยุมการใช้งานจะสั้นกว่าหัวเตาแก๊สชนิดธรรมดา โดยปกติอายุการใช้งานอยู่ที่ 5 - 6 ปี ในกรณีที่ใช้เป็นประจําพลังงานความร้อนที่ให้ความร้อนน้อยกว่าหัวเตาแก๊สชนิดธรรมดา เนื่องจากหัวเตาแก๊สชนิดอินฟราเรดจะมีการทำงานแบบซีมแก๊สคือ ในการใช้งานแต่ละครั้งแก๊สจะถูกกักเก็บในหัวเตาก่อนแล้วค่อยๆ ปลดปล่อยแก๊สออกมาตามรูทรงแยุมมาและด้วยลักษณะการซีมแก๊สนั้นจะช่วยให้สามารถประหยัดปริมาณแก๊สที่ใช้ประมาณ 30% [5] หัวเตาแก๊สชนิดอินฟราเรดที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารนั้น กระบวนการทางความร้อนจะใช้หลักการของการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นยาว ความร้อนจะถูกถ่ายเทให้กับอาหาร โดยการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านทางอากาศ และถูกดูดกลืนโดยอาหาร การแผ่รังสีดังกล่าวจะไปช่วยกระตุ้นโมเลกุลของน้ำที่มีอยู่ในอาหารให้เกิดการสั่นสะเทือนทำให้น้ำภายในอาหารเคลื่อนย้ายมาอยู่ที่ผิว และจะถูกพาให้ออกจากผิวโดยการระเหยซึ่งจะถูกพาออกไปโดยอากาศ คุณลักษณะเด่นของความร้อนจากรังสีอินฟราเรด ได้แก่ มีการถ่ายความร้อนสู่อาหารอย่างมีประสิทธิภาพจึงสามารถช่วยลดเวลาของกระบวนการ อีกทั้งยังไม่ส่งผลกระทบต่อคุณค่าทางโภชนาการที่มีอยู่ในอาหารอีกด้วย [6]

3. วิธีดำเนินการศึกษา

3.1 ขั้นตอนการออกแบบเครื่องอบแห้ง

การออกแบบเครื่องอบแห้ง มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1.1 ปริมาณน้ำที่ต้องระเหยออกจากผลผลิต

การออกแบบเครื่องอบแห้งขั้นแรกต้องทราบปริมาณน้ำที่ต้องระเหยออกจากวัสดุขณะอบแห้ง ซึ่งจำเป็นต้องกำหนดความชื้นเริ่มต้น ความชื้นสุดท้าย และปริมาณของผลผลิตที่ต้องการอบแห้ง ก็จะสามารถคำนวณน้ำหนักสุดท้ายหลังอบแห้งแล้วนำไปคำนวณค่าปริมาณน้ำที่ต้องการระเหยออกจากผลผลิตได้ดังสมการที่ 1

$$W_f = \frac{W_i(100 - M_f)}{(100 - M_i)} \quad \text{สมการ 1}$$

$$m_w = W_i - W_f \quad \text{สมการ 2}$$

เมื่อ

- W_f คือ น้ำหนักสุดท้ายหลังการอบแห้ง kg
- W_i คือ น้ำหนักก่อนการอบแห้ง kg
- M_f คือ ความชื้นสุดท้ายหลังการอบแห้ง %w.b.
- M_i คือ ความชื้นก่อนการอบแห้ง %w.b.
- m_w คือ น้ำหนักที่ต้องการระเหย kg

3.1.2 อัตราการระเหยน้ำจากการอบแห้ง

เมื่อทราบปริมาณน้ำที่ต้องการระเหยออกแล้ว เราสามารถคำนวณหาอัตราการระเหยของน้ำออกจากวัสดุอบแห้ง โดยจะต้องมีกำหนดระยะเวลาที่ใช้ในอบแห้ง เพราะจะนำมาใช้ในการคำนวณหาอัตราการระเหยน้ำออกจากวัสดุอบแห้ง คำนวณได้จากสมการที่ 3

$$\dot{m}_w = \frac{m_w}{t} \quad \text{สมการ 3}$$

เมื่อ

- \dot{m}_w คือ อัตราการระเหยน้ำ kg-water/hr.
- m_w คือ น้ำหนักของน้ำที่ต้องระเหย kg
- t คือ เวลาที่ใช้การอบ hr.

3.1.3 ปริมาณลมที่ต้องใช้ในการอบแห้ง

เมื่อทราบอัตราการระเหยน้ำที่ได้จากการคำนวณจากสมการที่ 3 แล้ว สามารถนำมาคำนวณหาปริมาณลมที่ต้องใช้ในการพาความชื้นออกจากวัสดุอบแห้ง สามารถคำนวณได้จากอัตราการระเหยน้ำหารปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นในอากาศ ซึ่งปริมาณลมที่คำนวณได้สามารถนำไปเลือกขนาดของพัดได้

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{m}_w}{W_f - W_i} \quad \text{สมการ 4}$$

เมื่อ

- \dot{m}_a คือ ปริมาณลมที่ต้องใช้ในการอบแห้ง kg-air/hr.

W_i	คือ	อัตราส่วนความชื้นอากาศหลังการอบแห้ง
		kg-water/kg-air
W_i	คือ	อัตราส่วนความชื้นอากาศก่อนการอบแห้ง
		kg-water/kg-air
\dot{m}_w	คือ	อัตราการระเหยน้ำ
		kg-water/hr.

3.1.4 การคำนวณหาขนาดของแหล่งความร้อน

ในกระบวนการการอบแห้งนั้นจำเป็นต้องใช้ความร้อน สำหรับการทำให้ไอน้ำระเหยออกจากวัสดุที่อบแห้ง ซึ่งขนาดของ แหล่งกำเนิดความร้อนสามารถหาได้จากสมการนี้

$$\dot{Q} = \frac{(h_f - h_i)}{3600} \dot{m}_a \quad \text{สมการ 5}$$

เมื่อ			
h_f	คือ	ค่าเอนทัลปีอากาศที่อุณหภูมิอบแห้ง	
		kJ/kg	
h_i	คือ	ค่าเอนทัลปีอากาศแวดล้อมก่อนนำมาเพิ่ม	
		อุณหภูมิ	
\dot{m}_a	คือ	ปริมาณอากาศที่ใช้ออบแห้ง	kg/hr.
\dot{Q}	คือ	ขนาดของแหล่งความร้อน	kW

3.1.5 การหาขนาดหัวเตาแก๊สอินฟราเรด

$$\dot{Q} = \dot{m}_g \times LHV_g \quad \text{สมการ 6}$$

เมื่อ			
		กำหนดเงื่อนไขการหาหัวเตาแก๊สอินฟราเรด	
		ค่า $LHV_g = 46.11 \text{ MJ/kg}$ [8]	
\dot{Q}	คือ	ขนาดของแหล่งความร้อน	kW
\dot{m}_g	คือ	อัตราการไหลเชิงมวล	kg/hr.
LHV_g	คือ	ค่าความร้อนต่ำของแก๊ส	MJ/kg

3.1.6 พื้นที่หน้าตัดของห้องอบแห้ง

พื้นที่หน้าตัดสามารถหาได้ถ้ากำหนดความเร็วลมที่ไหล ผ่านพื้นที่หน้าตัด ดังนั้นพื้นที่หน้าตัดหาจากอัตราการไหลเชิงมวล อากาศที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดต่อความเร็วอากาศที่ผ่าน พื้นที่หน้าตัดนั้น สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$A = \frac{V}{v} \quad \text{สมการ 7}$$

เมื่อ			
\dot{V}	คือ	อัตราการไหลอากาศผ่านชั้นวัสดุ	m^3/s
V	คือ	ความเร็วอากาศไหลผ่านชั้นวัสดุอบ	m/s
A	คือ	พื้นที่หน้าตัดห้องอบ	m^2

3.1.7 ปริมาตรห้องอบแห้ง และความหนาของชั้นวัสดุอบแห้ง

ปริมาตรห้องอบแห้ง และความหนาของชั้นอบแห้ง สามารถหาได้เมื่อทราบความหนาแน่นของวัสดุอบ และน้ำหนัก ของวัสดุอบ ซึ่งปริมาตรของวัสดุสามารถคำนวณได้จากสมการ ดังต่อไปนี้

$$V = \frac{m}{d_p} \quad \text{สมการ 8}$$

เมื่อ			
V	คือ	ปริมาตรวัสดุอบ	m^3
m	คือ	มวลของวัสดุอบ	kg
d_p	คือ	ความหนาแน่นวัสดุอบ	kg/m^3

ความหนาของชั้นวัสดุอบคำนวณได้จากสมการ

$$d = \frac{V}{A} \quad \text{สมการ 9}$$

เมื่อ			
d	คือ	ความหนาวัสดุอบ	m
V	คือ	ปริมาตรวัสดุอบ	m^3
A	คือ	พื้นที่หน้าตัดห้องอบ	m^2

3.2 การ Simulation ด้วยโปรแกรม Solid Works

โปรแกรม Solid Works เป็นโปรแกรมออกแบบ 3มิติ ซึ่งใช้งานกันอย่างแพร่หลายทั้งในระดับการศึกษา และระดับ อุตสาหกรรม โดยโปรแกรม Solid Works สามารถเพิ่มฟังก์ชัน Add-in เพื่อให้มีความสามารถอย่างอื่นนอกเหนือจากการวาด โมเดล 3 มิติ ฟังก์ชัน Simulation เองก็เป็นหนึ่งในฟังก์ชัน Add-in ที่มีอยู่มากมาย ฟังก์ชัน Simulation ในโปรแกรม Solid Works แบ่ง หลักๆได้ 4 ชนิดคือ

1. Simulation คือ การวิเคราะห์ความแข็งแรงของ โมเดล 3 มิติ (Strength Analysis)
2. Motion Analysis คือ การวิเคราะห์งานที่เป็น ระบบกลไกซึ่งมีการเคลื่อนไหวของชิ้นงาน โดยอาจจะเคลื่อนไหว ได้จากการใส่มอเตอร์ กระจับอกสูบ แรงโน้มถ่วง ฯลฯ
3. Flow Simulation คือ การวิเคราะห์พฤติกรรมของ ของไหลที่ไหลผ่านโมเดล 3 มิติ
4. Solid Works Plastic คือ การวิเคราะห์งานฉีด พลาสติก เพื่อตรวจสอบว่าโมเดลที่ออกแบบมาสามารถไปฉีด พลาสติกได้จริงหรือไม่ หากเกิดปัญหา เช่น Air trap, Weld line, Sink mark, Warp ฯลฯ จะเกิดที่ตำแหน่งใด ซึ่งช่วยให้เราทราบ ปัญหาที่จะเกิด และหาทางแก้ไขก่อนที่จะผลิตจริง [7]

โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองความเร็วลมภายใน ห้องอบแห้งด้วยฟังก์ชัน Flow Simulation โดยใช้วิธี Finite Volume ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการไหล และการกระจายตัว ของลมภายในห้องอบแห้ง

3.3 การออกแบบเครื่องอบแห้ง

ในการออกแบบเครื่องอบแห้งนั้นต้องทำการกำหนด เรือนไซเริ่มต้น โดยในบทความวิจัยนี้ต้องการอบแห้งปลาคูกจำนวน 20 kg ให้แห้งภายใน 10 hr. (1 วันที่มีแดด) โดยใช้พลังงาน แสงอาทิตย์เป็นแหล่งความร้อนหลัก และใช้หัวเผาแก๊สชนิด

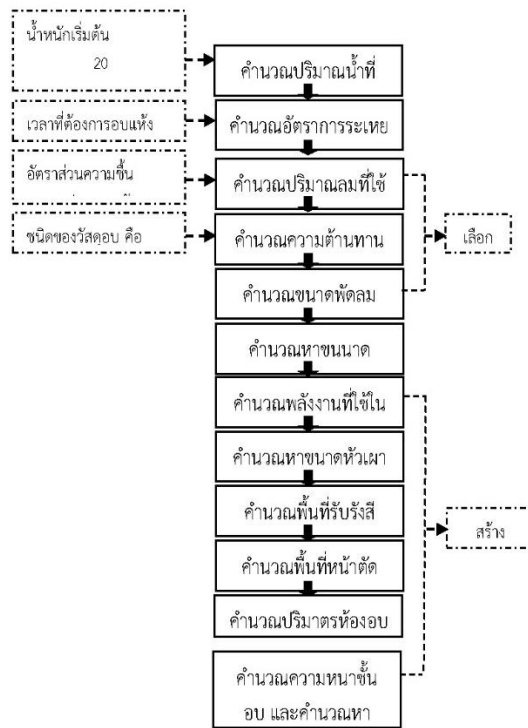
อินฟราเรดเป็นแหล่งความร้อนเสริม โดยกำหนดว่าใน 1 วัน มีค่าพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ย 16.17 MJ/m²-day ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยพลังงานแสงอาทิตย์ของจังหวัดเชียงใหม่ ปี พ.ศ.2555 - 2559 [9] ต้องการอบแห้งปลากุ๊กที่มีความชื้นเริ่มต้น 280 %d.b. จนเหลือความชื้นสุดท้ายในช่วง 20-30 %d.b. ซึ่งเป็นค่าความชื้นที่พบในผลิตภัณฑ์ปลาที่มีจำหน่ายทั่วไปตามท้องตลาด และกำหนดค่าอื่นๆ ดังนี้

อุณหภูมิที่ใช้ออบแห้ง	50-70	°C
อุณหภูมิอากาศหลังอบแห้ง	40	°C
อากาศแวดล้อม	30	°C
ความชื้นอากาศสัมพัทธ์	50	%
เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง	10	hr.
พลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ย	16.17	MJ/m ² -day

ชนิดของปลา ปลากุ๊ก วิธีดำเนินการศึกษาสามารถแสดงได้ดังไดอะแกรมการ ออกแบบเครื่องอบแห้งเบื้องต้นดังรูปที่ 1

ความชื้นเริ่มต้น 280 %d.b.

ความชื้นสุดท้าย 20 %d.b.



รูปที่ 1 ไดอะแกรมการออกแบบเครื่องอบแห้งเบื้องต้น

4. ผลการดำเนินการศึกษา

4.1 ผลการออกแบบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบถาดหมุนร่วมกับรังสีอินฟราเรดสำหรับผลิตภัณฑ์ปลา

จากเงื่อนไขการออกแบบเครื่องอบแห้งเบื้องต้นในการอบแห้งปลาตากจำนวน 20 kg ที่มีความชื้นเริ่มต้น 280 %d.b. จนเหลือความชื้นสุดท้ายอยู่ในช่วง 20-30 %d.b. โดยกำหนดอุณหภูมิในการอบแห้ง 50-70 °C ให้แห้งภายใน 10 hr. (1 วันที่มีแดด) โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งความร้อนหลัก และใช้หัวเผาแก๊สชนิดอินฟราเรดเป็นแหล่งความร้อนเสริม โดยเครื่องอบแห้งที่ทำการออกแบบ และพัฒนาขึ้นจะถูกนำไปใช้ในกลุ่มวิสาหกิจชุมชนในจังหวัดเชียงใหม่ที่มีการใช้ปลาเป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์ เช่น น้ำพริกปลาป่น ปลาแห้ง เป็นต้น ผลการคำนวณการออกแบบเครื่องอบแห้งเบื้องต้นสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการการออกแบบเครื่องอบแห้ง

เงื่อนไขเริ่มต้น	ปลาตาก					
	50°C		60°C		70°C	
ปริมาณน้ำที่ต้องระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ปลา	13.61	kg	13.61	kg	13.61	kg
อัตราการระเหยน้ำระหว่างการอบแห้ง	1.36	kg/hr.	1.36	kg/hr.	1.36	kg/hr.
ปริมาณลมที่ต้องใช้ในการอบแห้ง	339.98	kg-air/hr.	170.01	kg-air/hr.	113.34	kg-air/hr.
	0.09	kg-air/s	0.05	kg-air/s	0.03	kg-air/s
อัตราการไหลของอากาศ	0.10	m ³ /s	0.05	m ³ /s	0.03	m ³ /s
	214.02	CFM	103.91	CFM	67.38	CFM
ขนาดของแหล่งความร้อน	1.95	kW	1.46	kW	1.30	kW
ขนาดของหัวเผาแก๊สอินฟราเรด	0.15	kg/hr.	0.11	kg/hr.	0.10	kg/hr.
ขนาดของพื้นที่รับรังสีอาทิตย์	14.06	m ²	10.55	m ²	9.38	m ²
พื้นที่หน้าตัดห้องอบแห้ง เมื่อกำหนดให้ อากาศไหลผ่านชั้นผลิตภัณฑ์ด้วยความเร็วลม 0.1 m/s	1.01	m ²	0.49	m ²	0.32	m ²
ปริมาตรห้องอบแห้ง	0.03	m ³	0.03	m ³	0.03	m ³
ความหนาของชั้นผลิตภัณฑ์ปลา	0.03	m	0.05	m	0.08	m

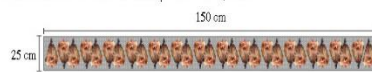
จากผลการคำนวณการออกแบบเครื่องอบแห้งตามเงื่อนไขเบื้องต้นดังตารางที่ 1 เครื่องอบแห้งที่ได้ทำการพัฒนาขึ้นได้ออกแบบให้มีการใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นหลัก โดยผลการการคำนวณการออกแบบเครื่องอบแห้งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ปริมาณลมที่ใช้ในการอบแห้งที่อุณหภูมิอบแห้ง 50-70 °C อยู่ในช่วง 0.03 m³/s – 0.10 m³/s
2. ปริมาณลมที่คำนวณได้มีค่ามากที่สุด คือ 0.10 m³/s หรือ 214.02 CFM ดังนั้นจึงเลือกใช้พัดลมยี่ห้อ VENZ รุ่น SC-164, มอเตอร์ ¼ HP และมีปริมาณลม 423 CFM
3. ขนาดของแหล่งความร้อนต้องไม่น้อยกว่า 1.95 kW

4. ขนาดของหัวเผาอินฟราเรดต้องมีปริมาณการใช้แก๊สไม่น้อยกว่า 0.15 kg/hr. ดังนั้นจึงเลือกใช้หัวเผาอินฟราเรดยี่ห้อ Asia รุ่น A-802 ที่มีปริมาณการใช้แก๊ส 0.22 kg/hr.

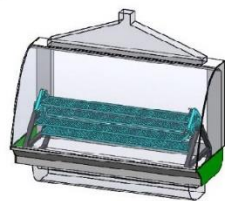
5. ขนาดพื้นที่รับรังสีอาทิตย์ต้องไม่น้อยกว่า 14.06 m²
6. ปริมาตรห้องอบแห้งต้องไม่น้อยกว่า 0.03 m³ โดยในการพัฒนาเครื่องอบแห้ง ได้ทำการสร้างเครื่องอบแห้งที่มีปริมาตร 1.18 m³
7. ความหนาของชั้นผลิตภัณฑ์ปลาต้องไม่น้อยกว่า 0.03 m
8. ปลาตาก 1 ตัว มีน้ำหนักเฉลี่ย 200 g มีขนาดลำตัวกว้าง 7 cm ยาว 15 cm เมื่อกำหนดว่าถาดมีขนาด 25x150 cm

เพราะฉะนั้นเมื่อทำการวางแบบสลับพื้นปลา ในหนึ่งภาตจะสามารถวางปลาตากได้เต็มที่ 41 ตัว แต่ในการอบแห้งปลาตากนั้นจะต้องจัดระยะไม่ให้ปลาตากวางชิดกันเกินไป เพื่อให้อากาศสัมผัสผิวของปลาตากมากที่สุด ดังนั้นจึงได้กำหนดช่องว่างระหว่างปลาตาก 2 cm เพราะฉะนั้นในหนึ่งภาตจะสามารถวางปลาตากได้เต็มที่ 29 ตัว หรือ 5.8 kg เมื่อต้องการอบแห้งปลาตากจำนวน 20 kg ต้องมีทั้งหมด 4 ภาต จึงจะเพียงพอต่อการวางปลาตากสำหรับการอบแห้ง โดยความเร็วรอบของภาตหมุน คือ 6 rpm.

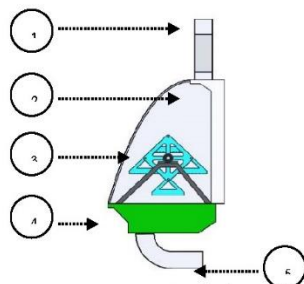


รูปที่ 2 การจัดวางผลิตภัณฑ์บนภาตสำหรับการอบแห้ง

เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบภาตหมุนร่วมกับกังหันอินฟราเรดสำหรับผลิตภัณฑ์ปลาที่ได้ทำการออกแบบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3



(a) บริเวณด้านหน้า



(b) บริเวณด้านข้าง

รูปที่ 3 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบภาตหมุนร่วมกับกังหันอินฟราเรด มีส่วนประกอบหลักๆ ดังนี้

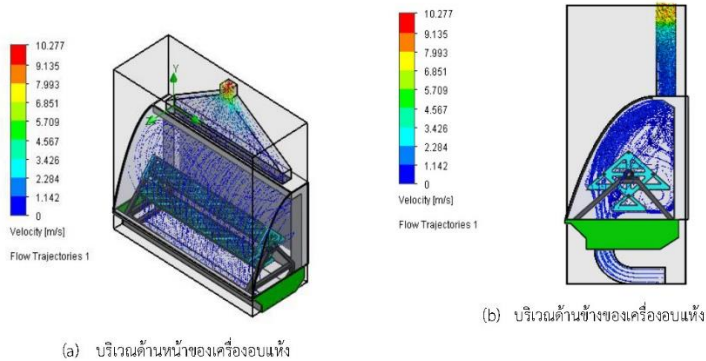
1. ทางออกของอากาศร้อนที่ผ่านกระบวนการอบแห้ง
2. ฉนวนของห้องอบแห้ง ภายในห้องอบแห้งได้ออกแบบให้สามารถรับพลังงานแสงอาทิตย์ได้โดยตรง (Natural solar drying) โดยฉนวนของห้องอบแห้งออกแบบให้เป็นกระจกใสรอบด้านเพื่อให้พลังงานแสงอาทิตย์สามารถทะลุผ่านเข้ามาได้เกือบทั้งหมด บริเวณด้านหน้ากระจกได้ขนาดความหนา 10 mm
3. ภาตวางผลิตภัณฑ์ได้ทำการออกแบบให้เป็นภาตหมุน เพื่อให้ผลิตภัณฑ์สามารถรับพลังงานความร้อนได้อย่างทั่วถึง

4. ตำแหน่งการติดตั้งหัวเผาแก๊สชนิดอินฟราเรด โดยออกแบบให้มีการใช้แหล่งพลังงานความร้อนเสริมจากหัวเผาแก๊สชนิดอินฟราเรดเพื่อให้สามารถทำการอบแห้งได้อย่างต่อเนื่องทั้งในสภาวะที่ไม่มีแสงอาทิตย์ ช่วงเวลากลางคืน และในช่วงฤดูฝน
5. ทางเข้าของอากาศร้อนเข้าสู่ห้องอบแห้ง

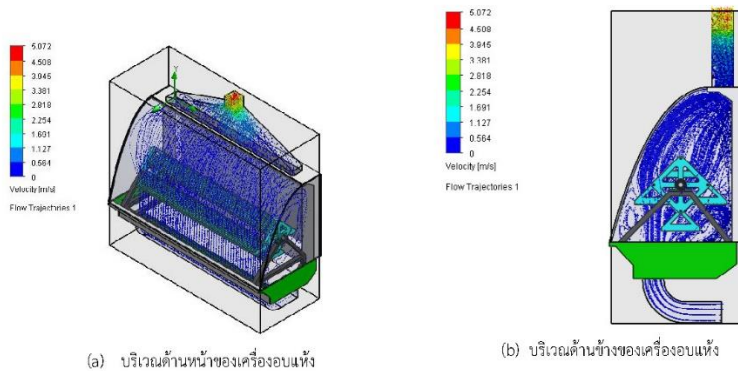
4.2 ผลการจำลองอัตราการไหลของอากาศ

เนื่องจากความเร็วลมเป็นปัจจัยหนึ่งที่ต้องพิจารณาเมื่อทำการออกแบบเครื่องอบแห้ง ดังนั้นในบทความวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาอิทธิพลของความเร็วลมของอากาศร้อนที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง โดยทำการจำลองความเร็วลมภายในห้องอบแห้ง และศึกษาการกระจายลมภายในห้องอบแห้ง จากผลการคำนวณเงื่อนไขเบื้องต้นดังตารางที่ 1 ต้องทำการป้อนอากาศในปริมาณ 0.03 m³/s, 0.05 m³/s และ 0.10 m³/s ตามลำดับ ดังนั้นจึงได้ทำการจำลองความเร็วลมภายในห้องอบแห้งด้วยฟังก์ชัน Flow Simulation โดยใช้วิธี Finite Volume ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการไหล และการกระจายตัวของลมภายในห้องอบแห้ง โดยการกำหนดเงื่อนไขการป้อนอากาศ 3 เงื่อนไข ได้แก่ 0.03 m³/s, 0.05 m³/s และ 0.10 m³/s ตามลำดับ

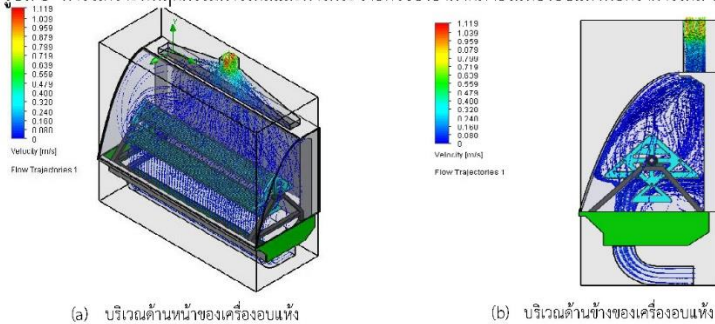
ผลการการจำลองความเร็วลมภายในห้องอบแห้งสามารถแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 4 การวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลและการกระจายตัวของอากาศภายในห้องอบแห้งที่อัตราการไหล 0.03 m³/s



รูปที่ 5 การวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลและการกระจายตัวของอากาศภายในห้องอบแห้งที่อัตราการไหล 0.05 m³/s



รูปที่ 6 การวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลและการกระจายตัวของอากาศภายในห้องอบแห้งที่อัตราการไหล 0.10 m³/s

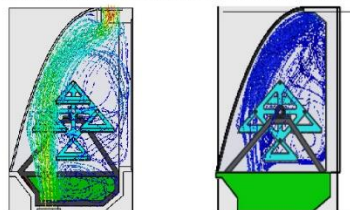
ตารางที่ 2 ผลการจำลองความเร็วลมภายในห้องอบแห้ง

อัตราการไหลของอากาศ (m ³ /s)	ความเร็วลมภายในห้องอบแห้งเฉลี่ย (m/s)
0.03	1
0.05	0.5
0.10	0.05

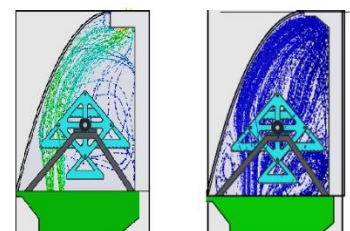
4.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของช่องกระจายอากาศร่อนก่อนเข้าสู่ห้องอบแห้ง

ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของลมภายในห้องอบแห้งด้วยฟังก์ชัน Flow Simulation ได้ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของช่องกระจายอากาศร่อนก่อนเข้าสู่ห้องอบแห้ง โดยช่องกระจายอากาศร่อนก่อนเข้าสู่ห้องอบแห้งมี 2 รูปแบบ ได้แก่ ช่องลมที่มี และช่องลมที่ไม่มีการคิดแผ่นบานเกล็ดเพื่อกระจายอากาศ โดยในการจำลองได้กำหนดเงื่อนไขการป้อนอากาศ 3 เงื่อนไข ได้แก่ 0.03 m³/s, 0.05 m³/s และ 0.10 m³/s ตามลำดับ

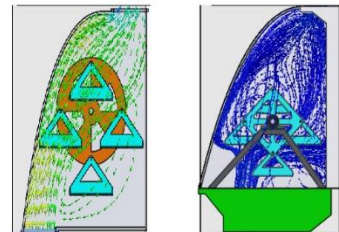
ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของลมภายในห้องอบแห้งด้วยฟังก์ชัน Flow Simulation สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้



(a) ไม่มีแผ่นบานเกล็ด (b) มีแผ่นบานเกล็ด
รูปที่ 7 การกระจายตัวของอากาศภายในห้องอบแห้งที่อัตราการไหล 0.03 m³/s



(a) ไม่มีแผ่นบานเกล็ด (b) มีแผ่นบานเกล็ด
รูปที่ 8 การกระจายตัวของอากาศภายในห้องอบแห้งที่อัตราการไหล 0.05 m³/s

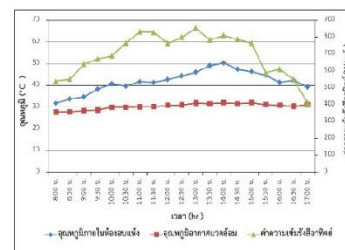


(a) ไม่มีแผ่นบานเกล็ด (b) มีแผ่นบานเกล็ด
รูปที่ 9 การกระจายตัวของอากาศภายในห้องอบแห้งที่อัตราการไหล 0.10 m³/s

ผลการศึกษาถึงอิทธิพลของช่องกระจายอากาศร่อนก่อนเข้าสู่ห้องอบแห้ง ดังรูปที่ 7 ถึง รูปที่ 9 พบว่า การกระจายตัวของลมภายในห้องอบแห้งที่เงื่อนไขการป้อนอากาศในปริมาณ 0.05 m³/s มีความเร็วลมภายในห้องอบแห้งเฉลี่ย 0.5 m/s และมีการคิดแผ่นบานเกล็ดเพื่อกระจายอากาศ มีการกระจายของอากาศภายในห้องอบแห้งที่สม่ำเสมอ ทำให้อากาศสัมผัสกับผิวของพลาสติกได้มากที่สุด

4.4 ผลการศึกษาอุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง

จากผลการวิเคราะห์พฤติกรรมการไหล และการกระจายตัวของลมภายในห้องอบแห้งข้างต้น ได้ทำการพัฒนาเครื่องอบแห้งตามเงื่อนไขการออกแบบเบื้องต้น และได้ทำการศึกษาอุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง โดยทำการนำเครื่องอบแห้งไปทดสอบในพื้นที่โล่งแจ้ง ณ วิทยาลัยพลังงานทดแทนมหาวิทยาลัยแม่โจ้ โดยทำการทดสอบตั้งแต่วันที่ 08.00 น.-17.00 น. ในวันที่มีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ย 696.11 W/m² ผลการทดสอบสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 10 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งเทียบกับค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ในแต่ละช่วงเวลา

ผลการศึกษาอุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง พบว่า ภายในห้องอบแห้งมีอุณหภูมิเฉลี่ย 41.87 °C และมีอุณหภูมิสูงสุด 50.33 °C ในช่วงเวลา 13.30 น. - 14.40 น. เมื่ออุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในการอบแห้ง คือ 70 °C เครื่องอบแห้งดังกล่าวจะสามารถทดแทนการใช้พลังงานความร้อนจากแก๊สอินฟราเรดได้ถึง 50%

5. สรุปผลการดำเนินการศึกษา

การออกแบบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบ ภาตหมุนร่วมกับรังสีอินฟราเรด โดยต้องการอบแห้งปลากุ๊กจำนวน 20 kg มีความชื้นเริ่มต้น 280 %d.b. จนเหลือความชื้นสุดท้ายอยู่ในช่วง 20-30 %d.b. ซึ่งเป็นค่าความชื้นที่พบในผลิตภัณฑ์ปลาที่มีจำหน่ายทั่วไปตามท้องตลาด ให้แห้งภายใน 10 hr. (1 วันที่มีแดด) โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งความร้อนหลัก และใช้หัวเผาแก๊สชนิดอินฟราเรดเป็น แหล่งความร้อนเสริม ผลการคำนวณการออกแบบเบื้องต้น ได้แก่ ปริมาณลมที่ใช้ในการอบแห้งอยู่ในช่วง $0.03 \text{ m}^3/\text{s} - 0.10 \text{ m}^3/\text{s}$ โดยขนาดของแหล่งความร้อนเท่ากับ 1.95 kW ทำการเลือกใช้หัวเตาอินฟราเรดที่มีปริมาณการใช้แก๊ส 0.22 kg/hr. ปริมาตรห้องอบแห้งเท่ากับ 1.18 m^3 ขนาดพื้นที่รับรังสีอาทิตย์เท่ากับ 14.06 m^2 และภาตวางผลิตภัณฑ์มีขนาด 0.38 m^2 มีความเร็วรอบ 6 rpm.

การพัฒนาเครื่องอบแห้งตามเงื่อนไขการออกแบบเบื้องต้น เมื่อนำเครื่องอบแห้งไปทดสอบในพื้นที่โล่งแจ้ง ณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ในวันที่มีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ย 696.11 W/m^2 พบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในการอบแห้ง คือ $70 \text{ }^\circ\text{C}$ เครื่องอบแห้งดังกล่าวจะสามารถทดแทนการใช้พลังงานความร้อนจากแก๊สอินฟราเรดได้ถึง 50%

จากการศึกษาอิทธิพลของความเร็วลมของอากาศร้อนที่ไปในกระบวนการอบแห้ง และศึกษาอิทธิพลของฝนกระจายอากาศร้อน โดยทำการจำลองความเร็วลมภายในห้องอบแห้งด้วย ฟังก์ชัน Flow Simulation ในโปรแกรม Solid Works จากผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของลมภายในห้องอบแห้ง พบว่า การกระจายตัวของลมภายในห้องอบแห้งที่เงื่อนไขการป้อนอากาศในปริมาณ $0.05 \text{ m}^3/\text{s}$ มีความเร็วลมภายในห้องอบแห้งเฉลี่ย 0.5 m/s และมีการคิดผ่านบานเกล็ดเพื่อกระจายอากาศ มีการกระจายของอากาศภายในห้องอบแห้งที่สม่ำเสมอ ทำให้อากาศสัมผัสกับผิวของปลากุ๊กได้มากที่สุด

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ “โปรแกรม Solid Works” ที่ใช้เพื่อการศึกษาพฤติกรรมไหล และการกระจายตัวของลมภายในห้องอบแห้ง ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ “ทุนอุดหนุนการวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปี 2561”

ขอขอบพระคุณ “โครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทน ในกลุ่มประเทศอาเซียนในระดับบัณฑิตศึกษา”

7. เอกสารอ้างอิง

[1] กลุ่มวิจัยและวิเคราะห์สถิติการประมง. (2555). แผนแม่บทการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำของประเทศไทย (ฉบับร่าง) ปี พ.ศ.2555-2559. กรมการประมง, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

[2] วสันต์ จินธาดา. (2558). เครื่องอบแห้งปลาพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์. ออนไลน์:http://www.matichon.co.th/news_detail.php?newsid=1422868663. เข้าถึงเมื่อ 13 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2561

[3] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, นิธิยา รัตนานนท์. (2556). Dehydration/การทำแห้ง. Available viaDIALOG: ออนไลน์:<http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0277/dehydration-การทำแห้ง>. เข้าถึงเมื่อ 13 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2561

[4] จารุวัฒน์ เจริญจิต. (2555). เทคโนโลยีการอบแห้งด้วยรังสีอาทิตย์ และแนวทางการพัฒนา. วารสารวิจัย ม.ช. มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 17(1) : 110-124.

[5] เกียรติไกร ศิวเดชสกุล, กภาพ บุญธิ และ ชยานนท์ บุณตริกบุตร. (2554). การพัฒนาตู้อบแห้งสุญญากาศใช้แหล่งความร้อนจากก๊าซหุงต้มหรือพลังงานแสงอาทิตย์. ปรินญาอุตสาหกรรมศาสตร์บัณฑิต. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาควิชาพืชเชิงใหม่.

[6] วชิรินทร์ ดงบัง. (2556). รังสีอินฟราเรดและการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา, ปีที่ 18 ฉบับที่ 2, หน้า 299-304.

[7] Ponglawat Pripaisankij. (2557). SolidWorks Simulation. ออนไลน์: <https://thai-solidworks-simulation.blogspot.com/2014/10/solidworkssimulation.html>. เข้าถึงเมื่อ 2 เมษายน 2561

[8] สวัสดิ์ กิสิย์, เรวดี คำวัน, นันทน์ โชติศิริ. (2556). การอบแห้งมันฝรั่งแผ่นโดยใช้น้ำมันแก๊สเปลี่ยนความร้อน. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาควิชาพืชเชิงใหม่.

[9] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.). (ม.ป.ป.). ค่าเฉลี่ยความเข้มแสงอาทิตย์รายเดือนของปีของจังหวัดเชียงใหม่ ปี พ.ศ.2555-2559. ออนไลน์: http://www.dede.go.th/ewt_news.php?nid=562&filename=index. เข้าถึงเมื่อ 20 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2561

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล นางสาวจิราภรณ์ แก้วเดียว
เกิดเมื่อ 3 ธันวาคม 2536
ประวัติการศึกษา พ.ศ. 2559 ระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต
สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก
พ.ศ. 2554 ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย
โรงเรียนอัสสัมชัญลำปาง
อำเภอเมือง จังหวัดลำปาง

