



ปัจจัยของเทคนิคการอบแห้งและเทคโนโลยีการบรรจุภัณฑ์ต่อคุณภาพของ
กุ้งแห้งสายพันธุ์ *Penaeus spp.*

**Effect of Drying Technique and Packaging Technology on Qualities of
Dried *Penaeus spp.* Shrimp**

เกียรติฉัตร แก้วนกสิกรรม

Keattichat Kwaenksaikam

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of

Master of Engineering in Chemical Engineering

Prince of Songkla University

2553

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

| | |
|-----------------|--|
| ชื่อวิทยานิพนธ์ | ปัจจัยของเทคนิคการอบแห้งและเทคโนโลยีการบรรจุภัณฑ์ต่อคุณภาพของกึ่งแห้งสายพันธุ์ <i>Penaeus spp.</i> |
| ผู้เขียน | นายเกียรติจักร์ แก่วนกสิกรรม |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมเคมี |
| ปีการศึกษา | 2553 |

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์นี้เพื่อศึกษาการอบแห้งโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนร่วมของกึ่งขนาดกลางและเล็ก (150-200 และ 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม) และศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางกายภาพ คุณภาพทางเคมี และคุณภาพทางจุลชีววิทยาของกึ่งแห้งระหว่างการเก็บรักษาในช่วงระยะเวลา 0-6 เดือน โดยบรรจุกึ่งแห้งในถุง 3 ชนิดภายใต้บรรยากาศปกติและสุญญากาศ

จากการศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งของกึ่ง กึ่งสดมีความชื้นเริ่มต้น 270-350 % dry-basis โดยทำการอบแห้งกึ่งโดยใช้รังสีอินฟราเรด รังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน และลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ อุณหภูมิอบแห้งในช่วงอุณหภูมิ 69-92°C ความเร็วลมเฉลี่ย 1.1±0.1 เมตร/วินาที กำลังของรังสีอินฟราเรดที่ใช้คือ 500 และ 1,000 W ผลการทดลองพบว่า กึ่งแห้งที่ผ่านการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนมีอัตราการอบแห้งเร็วกว่าการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดเพียงอย่างเดียว และลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ อัตราการอบแห้งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการอบแห้งเปรียบเทียบกับปริมาณความชื้นเริ่มต้นของตัวอย่าง สำหรับรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง โดยนำข้อมูลจากการทดลองมาวิเคราะห์โดยใช้สมการเอมพิริคัลสรุปได้ว่าแบบจำลองของ Oswin อธิบายข้อมูลจากการทดลองได้ดีที่สุด ($R^2 = 0.965$, $RMSE = 0.022$) อย่างไรก็ตาม ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดเพียงอย่างเดียวมีค่าน้อยกว่าการอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมระหว่างรังสีอินฟราเรดกับลมร้อน และลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์

หลังจากการอบแห้งทำการบรรจุตัวอย่างกึ่งแห้งในถุงลามิเนต 3 ชนิด การบรรจุมีลักษณะดังต่อไปนี้ ถุง Polypropylene ถุง Nylon/LLDPE และถุง Nylon/Al/LLDPE ในบรรยากาศปกติ ถุง Nylon/LLDPE และถุง Nylon/Al/LLDPE ในสุญญากาศ โดยวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ คุณภาพทางเคมี คุณภาพทางจุลชีววิทยา และคุณภาพทางประสาทสัมผัสของกึ่งแห้งระหว่างการเก็บรักษาที่สภาวะแวดล้อม ผลการทดลองพบว่า ปริมาณความชื้น วอเตอร์แอกติวิตี้ จำนวนจุลินทรีย์

รียทั้งหมด ยีสต์และรา มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับช่วงของการเก็บรักษา ($p \leq 0.05$) โดยเฉพาะกึ่งแห้งที่บรรจุในถุง Polypropylene นอกจากนี้ค่าสีแดงของกึ่งแห้งมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการเก็บรักษาของกึ่งแห้งที่ผ่านการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดเพียงอย่างเดียว และรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนที่บรรจุในถุง Polypropylene และถุง Nylon/LLDPE ที่สภาวะปกติ คือ 1 และ 2 เดือนตามลำดับ สำหรับระยะเวลาการเก็บรักษาที่อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ที่บรรจุในถุง Polypropylene คือ 3 เดือน ถุง Nylon/LLDPE และ Nylon/Al/LLDPE ที่บรรจุในบรรยากาศปกติ คือ 4 เดือน และถุง Nylon/LLDPE และ Nylon/Al/LLDPE ที่บรรจุสุญญากาศ คือ 5 เดือน

สำหรับการวิเคราะห์คุณภาพ ผลการทดลองพบว่า การวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส และการยอมรับมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับอายุการเก็บรักษา ชนิดของถุงลามิเนตและเทคนิคการบรรจุ โดยที่สี ลักษณะเนื้อสัมผัสและการยอมรับมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น

| | |
|----------------------|--|
| Thesis Title | Effect of Drying Technique and Packaging Technology on Qualities of Dried <i>Penaeus spp.</i> Shrimp |
| Author | Mr. Keattichat Kwaenkasikam |
| Major Program | Chemical Engineering |
| Academic Year | 2010 |

ABSTRACT

The objectives of this thesis were to investigate combined heat sources for drying of medium and small size shrimp (150-200 and 300-400 shrimps/kg) and to study change of physical quality, chemical quality and biological quality of dried shrimp during storage period 0-6 months. In addition, three types of package bag with atmospheric and vacuum packaging were used for storage of dried shrimps.

To determine drying kinetic of shrimps, the fresh samples with initial moisture content ranging 270-350 % dry-basis were dried using infrared (IR) heat source, combined infrared and hot air (HA) and combined hot air and solar energy. The drying temperature was varied between 69 and 92°C with air flow rate of 1.1±0.1 m/s. the power of IR was fixed at 500 and 1000 W. The results showed that the dried shrimp using combined IR and HA heat sources was faster than drying with IR source only and combined HA and solar energy. Drying rate relatively depended on drying temperature compared to initial moisture content of samples. For mathematical drying model analysis, the experimental data was evaluated using the empirical method. The simulation concluded that the simulated data using the Oswin model was the best fitting to the experimental data ($R^2 = 0.965$, RMSE = 0.022). However, the specific energy consumption of drying using IR source only was slightly lower than drying with combined IR and HA heating and combined HA and solar energy heating.

After drying, the dried shrimp samples were packed using three different laminate bag. The packaging was done as follows: Polypropylene bag package, Nylon/LLDPE bag package, Nylon/Al/LLDPE bag package, vacuum Nylon/LLDPE bag package and vacuum Nylon/Al/LLDPE bag package. The physical quality, chemical quality, biological quality and sensory evaluation was tested during ambient storage period. The results showed that the

increasing of moisture content, water activity, yeast and fungi significantly related to duration period of storage ($P \leq 0.05$) especially for dried shrimp packaging with polypropylene bag. Moreover, the redness value of samples decreased with increasing of storage time. The suitable storage time of dried shrimp at drying with IR source only and combined IR and HA using Polypropylene bag and Nylon/LLDPE bag with atmospheric packaging was 1 and 2 months, respectively. In addition, the suitable storage time of dried shrimp at drying with combined HA and solar energy using Polypropylene bag with atmospheric packaging was 3 month, Nylon/LLDPE bag and Nylon/Al/LLDPE bag with atmospheric packaging was 4 month and Nylon/LLDPE bag and Nylon/Al/LLDPE bag with vacuum packaging was 5 month.

For quality analysis, the results showed that texture analysis and acceptability has significant relation to shelf-life, type of laminated bag and packaging techniques. The colorless value, texture and acceptability tended to decrease when the storage time increased.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุภวรรณ ฐิระวณิชย์กุล รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงพร คันธโชติ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุษนา ฐิระวณิชย์กุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำแนะนำ คำปรึกษา และช่วยแก้ปัญหาในการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนคอยติดตามความก้าวหน้าของงานอย่างสม่ำเสมอ ตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชญานุช แสงวิเชียร ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นฤมล มาแทน และ ดร.เถียน บัวต้อม ที่ได้ให้เกียรติเป็นกรรมการสอบและประเมินผลพร้อมทั้งให้คำแนะนำและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วนิดา เจียรกุลประเสริฐ ที่คอยให้ความช่วยเหลือในการรับทุนการศึกษาในครั้งนี้

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาฟิสิกส์ ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้สนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยตลอดจนเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณคณะกรรมการพิจารณาอนุมัติทุน ทุนการศึกษาต่อตามมาตรการการดูแลบุคลากร วิทยาเขตปัตตานี เพื่อศึกษาระดับปริญญาโท ภายในประเทศ ที่ให้ทุนในการศึกษาประจำปีการศึกษา 2551

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้อง ๆ ที่คอยให้คำปรึกษา ความช่วยเหลือ กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ด้วยดี

ท้ายที่สุดขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ผู้ให้ชีวิต ด้วยความเคารพอย่างยั้งที่ได้กรุณาสนับสนุนกำลังทรัพย์ในการศึกษา และคอยเป็นกำลังใจและเป็นທີ່ปรึกษาอย่างดีในระหว่างการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวมา ณ ที่นี้ ที่มีส่วนช่วยเป็นกำลังใจในการทำวิจัยและให้คำแนะนำให้วิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์ด้วยดี

เกียรติฉัตร แก้วนกลีกรรม

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อ | (3) |
| Abstract | (5) |
| กิตติกรรมประกาศ | (7) |
| สารบัญ | (8) |
| รายการตาราง | (10) |
| รายการตารางภาคผนวก | (12) |
| รายการภาพประกอบ | (21) |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย | 2 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 3 |
| บทที่ 2 การตรวจเอกสาร และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง | 4 |
| 2.1 การตรวจเอกสาร | 4 |
| 2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง | 16 |
| 2.3 พารามิเตอร์พื้นฐานสำหรับการอบแห้งกุ้ง | 23 |
| 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 31 |
| บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ | 35 |
| 3.1 วัสดุดิบ | 35 |
| 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ | 35 |
| 3.3 สารเคมี | 38 |
| 3.4 อาหารเลี้ยงเชื้อ | 38 |
| 3.5 วิธีการวิจัย | 38 |
| 3.6 การทดสอบคุณภาพของกุ้งแห้ง | 40 |
| บทที่ 4 ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง | 45 |
| 4.1 ผลการทดลองหาค่าสมบัติทางกายภาพและทางความร้อนของกุ้งแห้ง | 45 |
| | (8) |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 4.2 จลนพลศาสตร์และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งกึ่งแบบ ชั้นบางด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรดกำลัง 500 W | 50 |
| 4.3 ผลการทดลองหาจลนพลศาสตร์การอบแห้งของกึ่ง | 58 |
| 4.4 ความสิ้นเปลืองของพลังงานจำเพาะในการอบแห้งกึ่ง | 62 |
| 4.5 คุณภาพของกึ่งแห้งภายหลังอบแห้ง | 65 |
| 4.6 ผลการศึกษาคุณภาพ อายุการเก็บรักษาของกึ่งแห้งในถุงลามิเนตที่ สภาวะต่าง ๆ | 73 |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ | 106 |
| เอกสารอ้างอิง | 111 |
| ภาคผนวก | 114 |
| ประวัติผู้เขียน | 153 |

รายการตาราง

| ตาราง | | หน้า |
|-------|---|------|
| 2.1 | คุณค่าทางโภชนาการในส่วนที่กินได้ 100 กรัม ของกุ้ง | 6 |
| 2.2 | ค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในฟิล์มพลาสติกชนิดต่าง ๆ | 9 |
| 2.3 | อัตราการซึมผ่านของไอน้ำในฟิล์มพลาสติกชนิดต่าง ๆ | 9 |
| 2.4 | ความชื้นสัมพัทธ์ (%) เนื้อสารละลายอิมิตัวของเกลือบางอย่างที่อุณหภูมิต่าง ๆ | 25 |
| 3.1 | สัญลักษณ์อักษรย่อแทนด้วยแหล่งพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งรูปแบบต่าง ๆ | 44 |
| 4.1 | ค่าคงตัวของรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ของความชื้นสมดุลของกุ้งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม | 46 |
| 4.2 | รูปแบบสมการเอมพิริคัลและค่าคงตัวของกุ้งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม อบแห้งด้วยลมร้อน อุณหภูมิอบแห้ง 60-93°C ความเร็วลม 5.0±0.2 เมตร/วินาที ความชื้นเริ่มต้น 300-320% dry-basis | 52 |
| 4.3 | รูปแบบสมการเอมพิริคัลและค่าคงตัวของกุ้งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดกำลัง 500 W อุณหภูมิอบแห้ง 61-92°C ความชื้นเริ่มต้น 325-330% dry-basis | 52 |
| 4.4 | ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นกุ้งขนาด 150-200 ต่อต่อกิโลกรัม อบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรดกำลัง 500 W โดยพิจารณาให้กุ้งมีรูปทรงเป็นทรงกลม เปรียบเทียบกับรูปทรงกระบอกสั้น | 55 |
| 4.5 | ค่าความชื้นและค่าวอเตอร์แอกติวิตีของกุ้งแห้งที่ผ่านการอบแห้งด้วยสภาวะต่าง ๆ | 66 |
| 4.6 | ค่าสีของการอบแห้งกุ้งด้วยสภาวะต่าง ๆ | 68 |
| 4.7 | ร้อยละการหดตัว และการคืนตัวของกุ้งที่อบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ | 69 |
| 4.8 | ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดและยีสต์และราของกุ้งแห้งที่อบแห้งด้วยสภาวะต่าง ๆ | 71 |
| 4.9 | คะแนนการยอมรับเฉลี่ยของการอบแห้งกุ้งที่สภาวะการอบแห้งแบบต่าง ๆ | 72 |
| 4.10 | คุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของกุ้งแห้งที่อบแห้งด้วยสภาวะต่าง ๆ เก็บรักษาในบรรยากาศปกติ ที่อุณหภูมิห้อง ใช้กุ้งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม | 86 |
| 4.10 | คุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของกุ้งแห้งที่อบแห้งด้วยสภาวะต่าง ๆ เก็บรักษาใน | 87 |
| (ต่อ) | บรรยากาศปกติ ที่อุณหภูมิห้อง ใช้กุ้งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม | |

รายการตาราง (ต่อ)

| ตาราง | | หน้า |
|-------|--|------|
| 4.10 | คุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของกึ่งแข็งที่อบแห้งด้วยสภาวะต่าง ๆ เก็บรักษาใน (ต่อ) บรรยากาศปกติ ที่อุณหภูมิห้อง ใช้กึ่งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม | 88 |
| 4.11 | คุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของกึ่งแข็งที่อบแห้งด้วยสภาวะต่าง ๆ เก็บรักษาที่ | 89 |
| 4.12 | คุณลักษณะทางประสาทสัมผัสที่อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ใช้กึ่งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม | 102 |
| 4.12 | คุณลักษณะทางประสาทสัมผัสที่อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ (ต่อ) เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ใช้กึ่งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม | 103 |

รายการตารางภาคผนวก

| ตาราง | | หน้า |
|----------|---|------|
| 1 | ความชื้นสมดุลของกึ่งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโกรัม ที่อุณหภูมิ 40°C | 129 |
| 2 | ความชื้นสมดุลของกึ่งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโกรัม ที่อุณหภูมิ 45°C | 129 |
| 3 | ความชื้นสมดุลของกึ่งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโกรัม ที่อุณหภูมิ 50°C | 130 |
| 4 | ความชื้นสมดุลของกึ่งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโกรัม ที่อุณหภูมิ 55°C | 130 |
| 5 | ความหนาแน่นปรากฏของกึ่งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโกรัม | 131 |
| 6 | ร้อยละช่องว่างของอากาศของกึ่งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโกรัม | 132 |
| 7 | ความร้อนจำเพาะของกึ่งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโกรัม | 133 |
| 8 | ค่าความชื้นของกึ่งแห้งที่อบแห้งด้วยสภาวะต่าง ๆ เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง | 134 |
| 9 | ค่าแอมเตอร์แอกติวิตี (a_w) ของกึ่งแห้งที่อบแห้งด้วยสภาวะต่าง ๆ เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง | 135 |
| 10 | ค่าสีของกึ่งแห้งที่อบแห้งด้วยสภาวะต่าง ๆ เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ใช้กึ่งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโกรัม | 136 |
| 10 (ต่อ) | ค่าสีของกึ่งแห้งที่อบแห้งด้วยสภาวะต่าง ๆ เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ใช้กึ่งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโกรัม | 137 |
| 11 | ค่าสีของกึ่งแห้งที่อบแห้งด้วยสภาวะต่าง ๆ เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ใช้กึ่งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโกรัม | 137 |
| 12 | จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดของกึ่งแห้งที่อบแห้งด้วยสภาวะต่าง ๆ เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง | 138 |
| 13 | จำนวนยีสต์และราของกึ่งแห้งที่อบแห้งด้วยสภาวะต่าง ๆ เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง | 139 |
| 14 | ค่าความชื้นของกึ่งแห้งที่อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ เก็บรักษาอุณหภูมิห้อง ใช้กึ่งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโกรัม | 140 |
| 15 | ค่าแอมเตอร์แอกติวิตี (a_w) ของกึ่งแห้งที่อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ เก็บรักษาที่เก็บรักษาอุณหภูมิห้อง ใช้กึ่งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโกรัม | 140 |
| 16 | ค่าสีของกึ่งแห้งที่อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ใช้กึ่งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโกรัม | 141 |

รายการตารางภาคผนวก (ต่อ)

| ตาราง | หน้า | |
|-------|--|-----|
| 16 | ค่าสีของกึ่งแห้งที่อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ เก็บรักษาที่ | 142 |
| (ต่อ) | อุณหภูมิห้อง ใช้กึ่งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม | |
| 17 | ค่าร้อยละการคืนตัวของกึ่งแห้งที่อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ | 142 |
| | เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ใช้กึ่งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม | |
| 18 | ค่าแรงเหวี่ยงสูงสุดของกึ่งแห้งที่อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ | 143 |
| | เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ใช้กึ่งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม | |
| 19 | ค่า TBARS ของกึ่งแห้งที่อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ เก็บรักษา | 143 |
| | ที่อุณหภูมิห้อง ใช้กึ่งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม | |
| 20 | ปริมาณโปรตีนของกึ่งแห้งที่อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ เก็บ | 144 |
| | รักษาที่อุณหภูมิห้อง ใช้กึ่งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม | |
| 21 | จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดของกึ่งแห้งที่อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงาน | 144 |
| | แสงอาทิตย์เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ใช้กึ่งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม | |
| 22 | จำนวนยีสต์และราของกึ่งแห้งที่อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ | 145 |
| | เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ใช้กึ่งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม | |

รายการภาพประกอบ

| ภาพประกอบ | หน้า |
|--|------|
| 2.1 รูปร่างและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกึ่งเทียบเท่าทรงกลม | 30 |
| 3.1 กุ้งขาว (กุ้งเลี้ยง) สายพันธุ์ <i>Penaeus</i> spp. | 35 |
| 3.2 รายละเอียดของเครื่องอบแห้งกุ้งแบบพลังงานความร้อนร่วม (ลมร้อน แสงอาทิตย์ และรังสีอินฟราเรด) | 36 |
| 3.3 แผนผังกระบวนการอบแห้งกุ้งและการวิเคราะห์คุณภาพ | 43 |
| 4.1 เปรียบเทียบความชื้นสัมพัทธ์กับค่าวอเตอร์แอคทีวิตีของผลการทดลองและผลจาก แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกุ้งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม | 47 |
| 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นปรากฏกับความชื้นเริ่มต้นของกุ้งขนาด 150- 200 ตัวต่อกิโลกรัม | 48 |
| 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละช่องว่างอากาศกับความชื้นของกุ้งขนาด 150-200 ตัว ต่อกิโลกรัม | 48 |
| 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนจำเพาะกับความชื้นของกุ้งขนาด 150-200 ตัวต่อ กิโลกรัม | 49 |
| 4.5 ผลการทดลองอบแห้งชั้นบางของกุ้งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม ด้วยลมร้อน ช่วงอุณหภูมิลมร้อน 60-93°C ที่ความเร็วลม 0.5±0.2 เมตร/วินาที ความชื้นเริ่มต้น 300-320% dry-basis | 50 |
| 4.6 ผลการทดลองอบแห้งชั้นบางของกุ้งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม ด้วยรังสี อินฟราเรดกำลัง 500 W อุณหภูมิอบแห้ง 61-92°C ความชื้นเริ่มต้น 325-330% dry- basis | 51 |
| 4.7 อัตราส่วนความชื้นจากผลการทดลอง เปรียบเทียบผลการทดลองอบแห้งกับ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัลของกุ้งอบแห้งด้วยลมร้อน อุณหภูมิ 60- 93°C ความเร็วลม 0.5±0.2 เมตร/วินาที ความชื้นเริ่มต้น 300-320% dry-basis | 53 |
| 4.8 อัตราส่วนความชื้นจากผลการทดลอง เปรียบเทียบผลการทดลองอบแห้งกับ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัลของกุ้ง อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดกำลัง 500 W อุณหภูมิอบแห้ง 61-92°C ความชื้นเริ่มต้น 325-330% dry-basis | 54 |

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

| ภาพประกอบที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.9 อัตราส่วนความชื้นผลจากการทดลองเปรียบเทียบกับแบบจำลองอบแห้ง ใช้รูปแบบ สมการเอมพิริคัลและสมการกึ่งทฤษฎี อบแห้งด้วยลมร้อน อุณหภูมิ 60-93°C ความเร็วลม 0.5±0.2 เมตร/วินาที ความชื้นเริ่มต้น 300-320% dry-basis | 56 |
| 4.10 อัตราส่วนความชื้นผลจากการทดลองเปรียบเทียบกับแบบจำลองอบแห้ง ใช้รูปแบบ สมการเอมพิริคัลและสมการกึ่งทฤษฎี อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดกำลัง 500 W อุณหภูมิตั้งที่ 61-92°C ความชื้นเริ่มต้น 325-330% dry-basis | 57 |
| 4.11 อัตราส่วนความชื้นการอบแห้งกึ่งด้วยรังสีอินฟราเรดกำลัง 500 และ 1,000 W แบบ อุณหภูมิตั้งที่ อุณหภูมิตั้งที่ 69-92°C ความชื้นเริ่มต้น 300-333% dry-basis | 59 |
| 4.12 อัตราส่วนความชื้นการอบแห้งกึ่งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด 1,000 W โดย ใช้อุณหภูมิแบบเป็นขั้น ความชื้นเริ่มต้น 312-330% dry-basis ความเร็วลมเฉลี่ย 1.12-1.20 เมตร/วินาที การวนกลับของอากาศ 95% | 60 |
| 4.13 อัตราส่วนความชื้นการอบแห้งกึ่งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม ด้วยลมร้อน ร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้อุณหภูมิแบบเป็นขั้น ความชื้นเริ่มต้น 311.3- 325.1% dry-basis ความเร็วลมเฉลี่ย 1.13-1.16 เมตร/วินาที การวนกลับของอากาศ 95% | 61 |
| 4.14 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งกึ่งด้วยรังสีอินฟราเรดกำลัง 500 และ 1,000 W แบบอุณหภูมิตั้งที่ อุณหภูมิตั้งที่ 69-92°C ความชื้นเริ่มต้น 300- 333% dry-basis | 63 |
| 4.15 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งกึ่งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสี อินฟราเรด 1,000 W โดยใช้อุณหภูมิเป็นขั้นแบบ 2 ขั้นตอน ความชื้นเริ่มต้น 312- 330% dry-basis ความเร็วลมเฉลี่ย 1.12-1.20 m/s การวนกลับของอากาศ 95% | 64 |
| 4.16 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งกึ่งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม ด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้อุณหภูมิเป็นขั้นแบบ 2 ขั้นตอน ความชื้นเริ่มต้น 311.3-325.1% dry-basis ความเร็วลมเฉลี่ย 1.13-1.16 เมตร/วินาที การวนกลับของอากาศ 95% | 65 |

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

| ภาพประกอบที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.17 ปริมาณความชื้นของกึ่งแห้งที่อบแห้งด้วยสภาวะต่าง ๆ บรรจุในถุงชนิดต่าง ๆ ภายใต้สภาวะบรรยากาศปกติเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง | 74 |
| 4.18 ค่าวอเตอร์แอกตีวิตี (a_w) ของกึ่งแห้งที่อบแห้งด้วยสภาวะต่าง ๆ บรรจุในถุงชนิดต่าง ๆ ภายใต้สภาวะบรรยากาศปกติเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง | 76 |
| 4.19 ค่าสี L^* ของกึ่งแห้งที่อบแห้งด้วยสภาวะต่าง ๆ บรรจุในถุงชนิดต่าง ๆ ภายใต้สภาวะบรรยากาศปกติเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง | 77 |
| 4.20 ค่าสี a^* ของกึ่งแห้งที่อบแห้งด้วยสภาวะต่าง ๆ บรรจุในถุงชนิดต่าง ๆ ภายใต้สภาวะบรรยากาศปกติเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง | 78 |
| 4.21 ค่าสี b^* ของกึ่งแห้งที่อบแห้งด้วยสภาวะต่าง ๆ บรรจุในถุงชนิดต่าง ๆ ภายใต้สภาวะบรรยากาศปกติเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง | 79 |
| 4.22 ค่า ΔE^* ของกึ่งแห้งที่อบแห้งด้วยสภาวะต่าง ๆ บรรจุในถุงชนิดต่าง ๆ ภายใต้สภาวะบรรยากาศปกติเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง | 80 |
| 4.23 ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดของกึ่งแห้งที่อบแห้งด้วยสภาวะต่าง ๆ บรรจุในถุงชนิดต่าง ๆ ภายใต้สภาวะบรรยากาศปกติเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง | 82 |
| 4.24 ปริมาณยีสต์และราของกึ่งแห้งที่อบแห้งด้วยสภาวะต่าง ๆ บรรจุในถุงชนิดต่าง ๆ ภายใต้สภาวะบรรยากาศปกติเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง | 83 |
| 4.25 ปริมาณความชื้นของกึ่งแห้งที่บรรจุในถุงชนิดต่าง ๆ ภายใต้สภาวะบรรยากาศปกติและสุญญากาศเก็บรักษาอุณหภูมิห้อง ที่อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ ใช้ถุงขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม | 91 |
| 4.26 ค่าวอเตอร์แอกตีวิตี (a_w) ของกึ่งแห้งที่บรรจุในถุงชนิดต่าง ๆ ภายใต้สภาวะบรรยากาศปกติและสุญญากาศเก็บรักษาอุณหภูมิห้อง ที่อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ ใช้ถุงขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม | 92 |
| 4.27 ค่าสี L^* a^* b^* และค่า ΔE^* ของกึ่งแห้งที่บรรจุในถุงชนิดต่าง ๆ ภายใต้สภาวะบรรยากาศปกติและสุญญากาศเก็บรักษาอุณหภูมิห้อง ที่อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ ใช้ถุงขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม | 93 |

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

| ภาพประกอบที่ | หน้า | |
|--------------|--|-----|
| 4.28 | ค่าร้อยละการคืนตัวของกึ่งแข็งที่บรรจุในถุงชนิดต่าง ๆ ภายใต้สภาวะบรรยากาศปกติและสุญญากาศเก็บรักษาอุณหภูมิห้อง ที่อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ ใช้กึ่งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม | 95 |
| 4.29 | ค่าแรงเหวี่ยงสูงสุดของกึ่งแข็งที่บรรจุในถุงชนิดต่าง ๆ ภายใต้สภาวะบรรยากาศปกติและสุญญากาศเก็บรักษาอุณหภูมิห้อง ที่อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ ใช้กึ่งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม | 97 |
| 4.30 | ค่า TBARS ของกึ่งแข็งที่บรรจุในถุงชนิดต่าง ๆ ภายใต้สภาวะบรรยากาศปกติและสุญญากาศเก็บรักษาอุณหภูมิห้อง ที่อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ ใช้กึ่งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม | 98 |
| 4.31 | ปริมาณโปรตีนของกึ่งแข็งที่บรรจุในถุงชนิดต่าง ๆ ภายใต้สภาวะบรรยากาศปกติและสุญญากาศเก็บรักษาอุณหภูมิห้อง ที่อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ ใช้กึ่งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม | 99 |
| 4.32 | ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดของกึ่งแข็งที่บรรจุในถุงชนิดต่าง ๆ ภายใต้สภาวะบรรยากาศปกติและสุญญากาศเก็บรักษาอุณหภูมิห้อง ที่อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ ใช้กึ่งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม | 100 |
| 4.33 | ปริมาณยีสต์และราของกึ่งแข็งที่บรรจุในถุงชนิดต่าง ๆ ภายใต้สภาวะบรรยากาศปกติและสุญญากาศเก็บรักษาอุณหภูมิห้อง ที่อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ ใช้กึ่งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม | 100 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

กึ่งแห้งจัดเป็นผลิตภัณฑ์ประมงที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง โดยเฉพาะโปรตีน พบว่า กึ่งแห้งที่ทำจากกุ้งทะเลมีปริมาณโปรตีนสูงถึงร้อยละ 62.4 ส่วนกึ่งแห้งที่ทำจากกุ้งน้ำจืดมีปริมาณโปรตีนสูงถึงร้อยละ 59.8 (รลิตา, 2533) ราคา กึ่งแห้งที่ขายหรือที่กำหนดราคาซื้อขายในตลาด จะพิจารณาจากคุณภาพทางกายภาพที่สังเกตได้ด้วยตา เช่น ความสะอาด สี ขนาด ความชื้น กลิ่น เป็นต้น ซึ่งโดยทั่วไปแล้วไม่ต้องการกึ่งแห้งที่มีสิ่งเจือปน เช่น เศษหินและทราย หรือมีสีแดงซีด ๆ รวมทั้งมีกลิ่นเหม็นหืน และมีความชื้นสูง

กระบวนการผลิตกึ่งแห้งในอุตสาหกรรมขนาดเล็ก ทำได้โดยต้มกุ้งสดในน้ำเกลือให้สุก สะเด็ดน้ำ และตากลานเพื่อลดความชื้น ในการลดความชื้นมักอาศัยพลังงานแสงอาทิตย์ ใช้ระยะเวลาในการลดความชื้นประมาณ 2-3 วัน แต่ถ้าในฤดูฝนหรือช่วงฝนตกที่ยาวนานหลายเดือนติดต่อกัน พบว่า ระยะเวลาที่มีปริมาณแสงอาทิตย์ในแต่ละวันมีเป็นช่วงสั้น ๆ อุณหภูมิอากาศ แดด ลมต่ำ ความชื้นสัมพัทธ์อากาศสูง ทำให้กระบวนการลดความชื้นในกุ้งช้าลง เนื่องจากน้ำจากตัวกุ้งระเหยออกสู่อากาศแวดล้อมได้ช้า ซึ่งจากกระบวนการผลิตกึ่งแห้งที่ใช้ในอุตสาหกรรมขนาดเล็ก สามารถสรุปปัญหาหลักที่เกิดขึ้นได้ 2 ประการ คือ 1) การปนเปื้อนจากฝุ่นละออง ทำให้ความสะอาดของผลิตภัณฑ์มีไม่เพียงพอ 2) ระยะเวลาในการตากแห้ง ต้องใช้ระยะเวลานานมากขึ้น เนื่องจากปริมาณแสงแดดในแต่ละวันมีความไม่สม่ำเสมอหรือไม่มีเลย ทำให้ผลิตภัณฑ์กึ่งแห้งที่ต้องการตากแห้งมีความชื้นอยู่สูง เกิดการเน่าเสียและเสื่อมสภาพเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมี เอ็นไซม์และเชื้อจุลินทรีย์ เกิดกลิ่นเหม็นหืนหรือกลิ่นฉุนและมีสีออกน้ำตาลดำ ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้มาตรฐานและไม่มีความสม่ำเสมอ ดังนั้นการเลือกเทคโนโลยีที่ใช้ในการอบแห้งจึงเป็นกระบวนการหนึ่งที่สำคัญในการลดความชื้น เพราะช่วยลดปัญหาความสูญเสีย รักษาคุณภาพและยืดระยะเวลาการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ไว้ได้นาน โดยกระบวนการอบแห้งทั้งแบบการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural convection) และการอบแห้งแบบการพาความร้อนแบบบังคับ (Force convection) สามารถลดปัญหาดังกล่าวได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามนอกจากการเลือกใช้กระบวนการอบแห้งแล้วยังคงต้องพิจารณาถึงการเลือกใช้บรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุผลิตภัณฑ์เพื่อ

วางขายในท้องตลาดทั่วไป พบว่าส่วนใหญ่กึ่งแห้งที่ขายโดยทั่วไปจะบรรจุใส่กระสอบหรือถุงพลาสติกขนาดใหญ่และเก็บรักษาไว้ในบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิห้องเพื่อรอการจัดจำหน่าย ซึ่งทำให้กึ่งแห้งเสื่อมสภาพและมีระยะเวลาการเก็บรักษาที่สั้น ส่วนการวางจำหน่ายในท้องตลาดมักจะบรรจุในสภาวะปกติ โดยใช้ถุงพอลิเอทิลีน (ถุงร้อน) และถุงพอลิโพรพิลีน (ถุงเย็น) ซึ่งถุงทั้งสองแบบนี้สามารถหาซื้อได้ง่ายและมีราคาถูก แต่การบรรจุผลิตภัณฑ์กึ่งแห้งในสภาวะเหล่านี้ จะทำให้กึ่งแห้งมีสีซีดจางลง เนื่องจากสีของกึ่งแห้งสามารถถูกออกซิไดซ์ด้วยแสงและออกซิเจนในบรรยากาศแวดล้อม ส่งผลให้กึ่งแห้งที่เก็บรักษาในถุงพลาสติกทั้งสองประเภทนี้มีอายุการเก็บรักษาสั้นลง นอกจากนี้เทคนิคในการบรรจุกึ่งแห้งก็มีความสำคัญ

ดังนั้นงานวิจัยนี้ทดลองอบแห้งกึ่งด้วยการพาความร้อนแบบบังคับ (Force convection) อุณหภูมิอบแห้งช่วง 70-90 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.1 ± 0.1 เมตรต่อวินาที พร้อมทั้งศึกษาคุณภาพกึ่งแห้งภายหลังการอบแห้ง ได้แก่ คุณภาพทางกายภาพ ทางเคมีและจุลชีววิทยา และศึกษาเทคนิคของการบรรจุภัณฑ์มีผลต่อการเก็บรักษา กึ่งแห้งโดยใช้แผ่นฟิล์ม Nylon/Linear Low Density Polyethylene (LLDPE) และ Nylon/Al /Linear Low Density Polyethylene (LLDPE) ภายใต้สภาวะสุญญากาศและในสภาวะปกติ เพื่อควบคุมการเสื่อมของคุณภาพและเน่าเสีย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาปัจจัยของแหล่งพลังงานความร้อนต่อการอบแห้งกึ่ง และการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางกายภาพ คุณภาพทางเคมี และคุณภาพทางจุลชีววิทยาของกึ่งแห้งระหว่างการเก็บรักษา
2. เพื่อศึกษาชนิดของวัสดุบรรจุภัณฑ์และเทคนิคการบรรจุต่อคุณภาพของกึ่งแห้งระหว่างการเก็บรักษา

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาหาพารามิเตอร์พื้นฐานของการอบแห้ง ได้แก่ ความชื้นสมดุล ความหนาแน่นปรากฏ ร้อยละช่องว่างของอากาศ ค่าความร้อนจำเพาะของกึ่ง และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นที่ผ่านการอบแห้ง และพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของพารามิเตอร์พื้นฐาน และสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของกึ่ง
2. ทดลองอบแห้งกึ่งข้าวด้วยสภาวะต่าง ๆ
 - 2.1 อบแห้งกึ่งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 500 และ 1,000 วัตต์ ด้วยอุณหภูมิคงที่แบบ 1 ขั้นตอน อุณหภูมิอบแห้งช่วง $70-90^{\circ}\text{C}$

- 2.2 อบแห้งกึ่งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,000 วัตต์ ร่วมกับลมร้อน แบบอุณหภูมิเป็นขั้น โดยทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 20 และ 25 นาทีในช่วงแรก จากนั้นทำการลดอุณหภูมิลงเป็น 70°C
- 2.3 อบแห้งกึ่งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ แบบอุณหภูมิเป็นขั้น โดยทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 30 นาทีในช่วงแรก จากนั้นทำการลดอุณหภูมิลงเป็น 70°C
3. ทำการบรรจุกึ่งแห้งในถุงลามิเนต Nylon/Linear Low Density Polyethylene (LLDPE), Nylon/Al/Linear Low Density Polyethylene (LLDPE) ภายใต้สภาวะสุญญากาศและในสภาวะปกติ และถุง Polypropylene ในสภาวะปกติ
4. วิเคราะห์คุณภาพของกึ่งแห้งทั้งก่อนและภายหลังการอบแห้ง ทางกายภาพ เคมี และทางจุลชีววิทยาที่นำไปใช้ในการประเมินเปรียบเทียบการอบแห้งในแต่ละกรณี คือ สีของผลิตภัณฑ์ เปอร์เซ็นต์การหดตัวและการคืนตัว ลักษณะเนื้อสัมผัส ค่าวอเตอร์แอกติวิตี ความชื้น ปริมาณโปรตีน และจุลชีววิทยา ได้แก่ การหาปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด (Total Bacterial) ยีสต์และรา (Mold and yeast) ซาลโมเนลลา (Salmonella) สตาฟีโลค็อกคัส ออเรียส (Staphylococcus aureus) คลอสทริเดียม เพอร์ฟริงเจนส์ (Clostridium perfringens) เอสเชอริเชีย โคลิ (Escherichia coli) และวibriโอ พาราฮีโมไลติคัส (Vibrio parahaemolyticus)
5. สรุปแนวทางในการอบแห้งกึ่งโดยพิจารณาด้านคุณภาพ ความสิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้ และการบรรจุภัณฑ์ในการอบแห้ง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ข้อมูลพื้นฐานที่สามารถนำไปใช้ในการอบแห้งกึ่งด้วยแหล่งพลังงานแบบต่าง ๆ
2. ได้แนวทางการอบแห้งกึ่งทั้งในด้านคุณภาพทางกายภาพ ทางเคมีและทางจุลชีววิทยา รวมถึงชนิดของแผ่นฟิล์มและเทคนิคที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษา

บทที่ 2

การตรวจเอกสาร และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การตรวจเอกสาร

2.1.1 ความหมายและความสำคัญของกุ้งแห้ง

กุ้งแห้ง (Dried shrimp) หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำกุ้งสดมาต้มให้สุก (ต้มในน้ำเกลือที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3-4 ควรให้สุกพอดีที่จะไม่ทำให้เนื้อกุ้งติดเปลือกหรือแข็งเกินไป) แล้วนำมาทำให้แห้งโดยแสงแดดหรือเครื่องให้ความร้อน โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะปอกเปลือกหรือไม่ก็ได้ และการปอกเปลือกสามารถทำได้ทั้งก่อนหรือหลังการทำให้แห้ง (สำนักมาตรฐานอุตสาหกรรมกุ้งแห้ง, 2533) กุ้งแห้งแบ่งออกเป็น 3 ชนิด

1. กุ้งแห้งชนิดมีเปลือก ได้แก่ กุ้งแห้งทั้งตัวที่ไม่เอาเปลือกออก ต้องมีเปลือกติดกับลำตัว มีส่วนหางติดอยู่ ส่วนหัวจะติดอยู่หรือไม่ก็ได้
2. กุ้งแห้งชนิดไม่มีเปลือก ได้แก่ กุ้งแห้งทั้งตัวที่กะเทาะเปลือกออกก่อนทำให้แห้ง ต้องไม่มีเปลือกติดกับลำตัว
3. กุ้งแห้งชนิดกะเทาะเปลือก ได้แก่ กุ้งแห้งทั้งตัวที่กะเทาะเปลือกออกหลังทำให้แห้งแล้ว อาจมีเปลือกติดกับลำตัวได้บางส่วน

กุ้งแห้งชนิดมีเปลือก ส่วนใหญ่ผลิตจากกุ้งฝอยหรือกุ้งน้ำจืดบางชนิดนิยมใส่ลงในอาหารประเภทส้มตำ กุ้งแห้งชนิดไม่มีเปลือกมักจะผลิตจากกุ้งต้มปอกเปลือกที่มีคุณภาพไม่ได้มาตรฐานที่จะนำไปบรรจุกระป๋องได้จึงถูกนำมาแปรรูปเป็นกุ้งแห้ง ส่วนกุ้งแห้งชนิดกะเทาะเปลือกมีทั้งที่ผลิตจากกุ้งน้ำจืดและกุ้งทะเลเป็นที่นิยมบริโภคกันทั่วไป (เขวาลักษณ์, 2539)

2.1.2 พันธุ์กุ้งที่ใช้ทำกุ้งแห้ง

กุ้งที่ใช้ในการผลิตกุ้งแห้งมีหลายพันธุ์ เป็นกุ้งที่อยู่ในตระกูลพีนีอิดี (Penaeidae) และพาลีโมนีดี (Palaemonidae) เป็นส่วนใหญ่ (วนิช, 2503) แบ่งกุ้งที่ใช้ผลิต กุ้งแห้ง เป็น 9 ชนิด ดังนี้ คือ

2.1.2.1 กุ้งตะกาด มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Metapenaeus monoceroe* พบในนาเป็นจำนวนมากพอ ๆ กับกุ้งแชบ๊วย แต่ขนาดเล็กกว่าและราคาถูกกว่ากุ้งแชบ๊วยมาก มักใช้ทำกุ้งแห้ง เพราะแปรรูปเป็นกุ้งแห้งแล้วมีสีสวย เนื้อแข็ง ขายได้ราคาดี ขนาดที่จับได้โดยทั่ว ๆ ไปในนากุ้งยาว 3-4 นิ้ว ประมาณ 230 ตัวต่อ 1 กิโลกรัม

2.1.2.2 กุ้งกะต้อม มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Palaemon* sp. มีปริมาณน้อย ขนาดปกติ ที่พบในนา 2-3 นิ้ว ใช้ประกอบอาหารและทำกุ้งแห้ง

2.1.2.3 กุ้งแป๊ะแห มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Leander* sp. มีปริมาณน้อย ทั้งขนาดก็เล็กยาวประมาณ 2-3 นิ้ว ใช้ประกอบอาหารและทำกุ้งแห้ง

2.1.2.4 กุ้งแชบ๊วย ที่พบในนากุ้งมี 2 ชนิด มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Penaeus indicus* และ *Penaeus merguensis* กุ้งทั้งสองชนิดนี้คล้ายคลึงกันมาก ทั้งลักษณะ ขนาดและสีสัน

(1) กุ้งแชบ๊วย : *Penaeus indicus* กุ้งชนิดนี้เป็นกุ้งที่มีรสดี เป็นที่นิยม และมีราคาดีที่สุดในบรรดากุ้งทั้งหลายที่เลี้ยงในนากุ้งและที่จับได้มากจากบริเวณก้นอ่าว ทั้งขนาดก็โตและมีจำนวนมากที่สุดชนิดหนึ่งด้วย ขนาดที่ซื้อขายกันยาวประมาณ 4-6 นิ้ว และมีจำนวน 50-60 ตัวต่อ 1 กิโลกรัม

(2) กุ้งแชบ๊วย : *Penaeus merguensis* เป็นกุ้งที่มีรสชาติดี ราคาสูง เช่นเดียวกับกุ้งแชบ๊วยชนิด *Penaeus indicus* แต่พบในนากุ้งเป็นจำนวนน้อย

2.1.2.5 กุ้งกุลาดำ มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Penaeus monodon Fabeicius* มีขนาดใหญ่กว่ากุ้งชนิดอื่น ขนาดใหญ่ที่สุดที่จับได้ในนากุ้งยาว 96 นิ้ว ขนาดธรรมชาติยาวประมาณ 10 ตัวต่อ 1 กิโลกรัม เป็นกุ้งที่มีรสชาติดี ราคาสูง มักใช้ประกอบอาหาร

2.1.2.6 กุ้งกุลาลาย มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Penaeus semisulatus De Haan* เป็นกุ้งทะเลที่มีขนาดใหญ่ ลำตัวยาวประมาณ 22 เซนติเมตร หรือความยาวรวมประมาณ 25 เซนติเมตร มีลักษณะคล้ายกุ้งกุลาดำ มีรสชาติดี

2.1.2.7 กุ้งเหลือง มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Penaeus logistylus Kubo* หรือ *Penaeus esculentus Haswell* หรือ *Penaeus orientalis Kishinouge* ลำตัวยาว 17 เซนติเมตรหนัก 60 กรัม กุ้งชนิดนี้เป็นที่นิยมในท้องตลาดมาก

2.1.2.8 กุ้งโอดัค มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *P. hungerfordi*

2.1.2.9 กุ้งทราย มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Trachypenaeus fulvus Dall* เป็นกุ้งทะเลที่นิยมนำมาผลิตเป็นกุ้งแห้ง เนื่องจากมีราคาถูกและจับได้ง่าย

กุ้งแต่ละพันธุ์จะมีขนาดและสีที่แตกต่างกัน ทั้งนี้เพราะรงควัตถุที่อยู่ในเปลือกและที่ผิวของกุ้งมีปริมาณแตกต่างกัน สำหรับรงควัตถุที่พบในกุ้ง ได้แก่ แอสตาแซนทีน (astaxanthin)

ซึ่งเป็นรงควัตถุในกลุ่มแคโรทีนอยด์ (carotenoid) เมื่อแอสตาแซนทีนที่จับกับโปรตีนถูกความร้อน เช่น โดยการต้ม โปรตีนจะเปลี่ยนสภาพ (denature) และทำให้รงควัตถุชนิดนี้เปลี่ยนจากสีเขียวเข้ม เป็นมีแดง รงควัตถุชนิดนี้สามารถสลายตัวได้เนื่องจากความร้อน เช่น โดยการทำให้แห้ง และเมื่อถูกแสง ออกซิเจน และความเป็นกรด ดังนั้นในการทำกุ้งแห้งจึงพบว่า ปริมาณแอสตาแซนทีนที่วิเคราะห์ได้มีปริมาณลดลงเมื่อเทียบกับกุ้งก่อนทำให้แห้ง ดังนั้นเมื่อกุ้งผ่านกระบวนการทำให้แห้งจะทำให้กุ้งมีสีส้มอ่อนเข้มแตกต่างกันไปตามชนิดของกุ้ง (วารภา, 2531)

กุ้งแห้งเป็นอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง โดยเฉพาะโปรตีน กล่าวคือ กุ้งแห้งที่ทำจากกุ้งทะเลมีปริมาณโปรตีนสูงถึงร้อยละ 62.40 ในขณะที่กุ้งทะเลสด มีโปรตีนร้อยละ 17.60 ส่วนกุ้งแห้งที่ทำมาจากกุ้งน้ำจืดมีปริมาณโปรตีนสูงถึงร้อยละ 46.40 กุ้งน้ำจืดสดมีปริมาณโปรตีนเพียงร้อยละ 16.20 กุ้งแห้งจัดเป็นอาหารที่มีโปรตีน แคลเซียม และฟอสฟอรัสสูง องค์ประกอบทางเคมีของกุ้งสดและกุ้งแห้ง แสดงดังตาราง 2.1

ตาราง 2.1 คุณค่าทางโภชนาการในส่วนที่กินได้ 100 กรัม ของกุ้ง

| ส่วนประกอบ | ปริมาณแยกตามชนิดของกุ้ง | | | |
|------------------------|-------------------------|--------------|------------|----------------|
| | กุ้งทะเลสด | กุ้งทะเลแห้ง | กุ้งน้ำจืด | กุ้งน้ำจืดแห้ง |
| โปรตีน (กรัม) | 17.60 | 62.40 | 16.20 | 46.40 |
| ไขมัน (กรัม) | 0.90 | 3.50 | 1.30 | 2.90 |
| คาร์โบไฮเดรต (กรัม) | 0.90 | 15.60 | 0.40 | 10.90 |
| แคลเซียม (มิลลิกรัม) | 79.00 | 236.00 | 161.00 | 2350.00 |
| ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม) | 184.00 | 995.00 | 292.00 | 625.00 |
| เหล็ก (มิลลิกรัม) | 1.60 | 4.60 | 2.20 | 20.00 |
| ไทอะมีน (มิลลิกรัม) | 0.40 | 0.16 | 0.04 | 0.05 |
| ไรโบฟลาวิน (มิลลิกรัม) | 0.08 | 0.34 | 0.13 | 0.20 |
| ไนอะซิน (มิลลิกรัม) | 2.30 | 9.50 | 0.20 | 5.70 |

ที่มา : Institute of Nutrition Mahidol University, (1998)

2.1.3 มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนของกุ้งแห้ง (มผช. 309/2547)

คุณลักษณะที่ต้องการ

(1) ลักษณะทั่วไป ในภาชนะบรรจุเดียวกันต้องเป็นกุ้งแห้งหรือเคยแห้งที่มีขนาดใกล้เคียงกัน มีเปลือกหรือไม่ก็ได้

(2) สี ต้องมีสีที่ดีตามธรรมชาติของกุ้งแห้ง

(3) กลิ่นรส ต้องมีกลิ่นรสที่ดีตามธรรมชาติของกุ้งแห้ง ปราศจากกลิ่นรสอื่นที่ไม่พึงประสงค์ เช่น กลิ่นอับ กลิ่นหืน รสเค็มจัด ต้องไม่พบสิ่งแปลกปลอมที่ไม่ใช่ส่วนประกอบที่ใช้ เช่น เส้นผม ขนสัตว์ ดิน ทราข กรวด ชิ้นส่วนหรือสิ่งปฏิกูลจากสัตว์

(4) ความชื้น ต้องไม่เกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

(5) วัตถุเจือปนอาหาร

- ห้ามใช้สีสังเคราะห์ทุกชนิด

- หากมีการใช้กรดเบนโซอิกหรือเกลือของกรดเบนโซอิก (คำนวณเป็นกรดเบนโซอิก) และกรดซอร์บิกหรือเกลือของซอร์บิก (คำนวณเป็นกรดซอร์บิก) อย่างใดอย่างหนึ่งหรือรวมกันต้องไม่เกิน 1000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

(6) วอเตอร์แอกทีวิตี้ เป็นปัจจัยสำคัญในการคาดคะเนอายุการเก็บอาหาร และเป็นตัวบ่งชี้ถึงความปลอดภัยของอาหาร โดยทำหน้าที่ควบคุมการอยู่รอด การเจริญและการสร้างสปอร์พิษของจุลินทรีย์ ต้องมีค่าไม่เกิน 0.70

(7) จุลินทรีย์

- จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด ต้องไม่เกิน 1×10^5 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม

- ซาลโมเนลลา ต้องไม่พบต่อตัวอย่าง 25 กรัม

- สตาฟีโลค็อกคัส ออเรียส ต้องไม่เกิน 100 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม

- คลอสทริเดียม เพอร์ฟริงเจนส์ ต้องไม่พบในตัวอย่าง 0.01 กรัม

- เอสเชอริเชีย โคลิ โดยวิธีเอ็มพีเอ็น ต้องไม่เกิน 10 ต่อตัวอย่าง 1 กรัม

- ยีสต์ รา ต้องไม่เกิน 500 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม

2.1.4 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพและอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหารแห้ง

ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพและอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหารแห้งสามารถแบ่งออกได้เป็น 11 ปัจจัยดังนี้ คือ (Raksakulthai, 1997)

(1) ส่วนประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์ที่นำมาจากวัตถุดิบที่มีไขมันมีอายุการเก็บรักษาสั้นกว่า

(2) คุณภาพทางวัตถุบิบ ต้องการคุณภาพของวัตถุบิบที่ดีในการผลิตเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่มีคุณภาพดี

(3) ปริมาณความชื้นและวอเตอร์แอกทิวิตี (a_w) ความชื้นและ a_w เป็นดัชนีชี้บ่งอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณความชื้นและ a_w ต่ำ จะมีอายุการเก็บรักษายาวนานขึ้น

(4) ปริมาณเกลือ ผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณเกลือสูงสามารถเก็บรักษาได้ยาวนานกว่า

(5) การปนเปื้อนของจุลินทรีย์ ผลิตภัณฑ์ที่มีการปนเปื้อนของจุลินทรีย์สูง จะมีอายุการเก็บรักษาที่สั้นกว่า

(6) เทคนิคที่ใช้ในกระบวนการ pretreatment วัตถุบิบ เช่น การลวก การต้ม หรือหนึ่งจะทำให้การปนเปื้อนของจุลินทรีย์ต่ำลง กระบวนการอบแห้งที่ใช้เครื่องอบแห้งแทนการตากแดดสามารถลดจำนวนจุลินทรีย์ได้

(7) เวลาและอุณหภูมิในการอบแห้ง เวลาและอุณหภูมิในการอบแห้งที่เหมาะสมเป็นสิ่งที่ต้องการ

(8) การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันในผลิตภัณฑ์ การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันสามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วที่ปริมาณความชื้นต่ำ

(9) การรบกวนของแมลง ผลิตภัณฑ์แห้งสามารถถูกรบกวนโดยแมลง เช่น มด แมลงชนิดปีกแข็ง เป็นต้น ถ้าผลิตภัณฑ์เหล่านี้ถูกเก็บรักษาในที่ที่ไม่เหมาะสม

(10) วัสดุที่ใช้บรรจุ การบรรจุที่เหมาะสมสามารถยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ได้

(11) อุณหภูมิที่เก็บรักษา การเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำทำให้สามารถเก็บรักษาได้ยาวนานขึ้น

2.1.5 การบรรจุภัณฑ์ (งามทิพย์, 2550)

บรรจุภัณฑ์ หมายถึง ภาชนะห่อหุ้มผลิตภัณฑ์โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อนำผลิตภัณฑ์นั้นไปถึงผู้บริโภคในสภาพที่สมบูรณ์ได้โดยสะดวก การออกแบบบรรจุภัณฑ์เป็นทั้งศาสตร์และศิลป์ที่ใช้ในการบรรจุสินค้าในการจัดจำหน่ายเพื่อสนองความต้องการของผู้ซื้อและหรือผู้บริโภคด้วยต้นทุนที่เหมาะสม

(1) สมบัติของวัสดุบรรจุหรือภาชนะบรรจุที่ต้องพิจารณา มีดังนี้

- การซึมผ่านของก๊าซ การกำหนดค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซ (Gas permeability) เพื่อเลือกชนิดของวัสดุที่จะนำมาใช้นั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการคือ ชนิดของผลิตภัณฑ์ อายุการเก็บรักษาและสภาวะการเก็บรักษา โดยทั่วไปเมื่อต้องการใช้วัสดุที่ป้องกันก๊าซได้ดีมาก ควรเลือกวัสดุที่มีค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนไม่เกิน $2 \text{ cc/m}^2 \cdot \text{atm} \cdot 24\text{hr}$ ส่วนวัสดุที่ป้องกันการ

ซึมผ่านของก๊าซดีพอกวอร์จะมีค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนประมาณ 20-30 cc/m².atm.24hr ซึ่งค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในฟิล์มพลาสติกชนิดต่าง ๆ แสดงดังตาราง 2.2

ตาราง 2.2 ค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในฟิล์มพลาสติกชนิดต่าง ๆ (งามทิพย์, 2550)

| ชนิดของพลาสติก | ค่าอัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจน (cc/m ² .atm.24hr) |
|----------------------------------|--|
| Nylon/LLDPE | 30-120 |
| Nylon/AL/LLDPE | < 0.5 |
| พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) | 1,300-6,400 |

- อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ การที่จะเลือกวัสดุที่จะนำมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์จากค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำต้องระมัดระวังปัญหาที่เกิดจากหยดน้ำภายในภาชนะบรรจุภัณฑ์ และปัญหาการสูญเสียความชื้นของผลิตภัณฑ์ วัสดุบรรจุภัณฑ์ที่ป้องกันไอน้ำได้ดีจะช่วยลดปัญหาการสูญเสียความชื้นของผลิตภัณฑ์ แต่มักเกิดปัญหาหยดน้ำภายในภาชนะและในทางกลับกันวัสดุบรรจุภัณฑ์ที่ยอมให้ไอน้ำผ่านได้มักจะเกิดปัญหาผลิตภัณฑ์แห้งและสูญเสียความชื้น การแก้ไขปัญหาอาจทำได้โดยการเติมสารป้องกันการเกิดหยดน้ำในฟิล์มพลาสติกหรือการเจาะรูเล็ก ๆ เพื่อช่วยระบายไอน้ำบางส่วนออกจากภาชนะ

ตาราง 2.3 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำในฟิล์มพลาสติกชนิดต่าง ๆ (งามทิพย์, 2550)

| ชนิดของพลาสติก | ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (g/m ² .24hr) |
|----------------------------------|---|
| Nylon/LLDPE | 15 |
| Nylon/AL/LLDPE | < 0.5 |
| พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) | 24-31 |

(2) ฟิล์มที่ใช้สำหรับเป็นบรรจุภัณฑ์ (ปุ่น, 2541)

- พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) เป็นฟิล์มที่ยอมให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซออกซิเจนผ่านได้ง่าย ป้องกันการเกิดฝ้าไอน้ำ เนื่องจากแผ่นฟิล์มชนิดนี้ยอมให้ความชื้นที่เกิดขึ้นแพร่กระจายเข้าไปในเนื้อฟิล์มแทนที่จะเป็นหยดน้ำเกาะอยู่บนแผ่นฟิล์ม โดยทั่วไปความหนาของแผ่นฟิล์มจะอยู่ระหว่าง 25-65 ไมครอน การลดความหนาของแผ่นฟิล์มมักเลือกใช้ฟิล์มที่

เป็นพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) แทน ซึ่งทำให้ขยายตัวตามความหนาและความยาวได้ สมบัติของ LDPE เป็นแผ่นฟิล์มที่สามารถยืดตัวได้

- พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) เป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติกที่เบาที่สุด มีสมบัติเชิงกลดีมาก เหนียว ทนต่อแรงดึง แรงกระแทกและทรงตัวดี มีจุดหลอมตัวที่ 165°C ก๊าซออกซิเจนและไอน้ำซึมผ่านได้ต่ำ เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีมาก มีการนำเอาพอลิโพรพิลีนไปใช้งานในลักษณะเดียวกับ PE เมื่อต้องการให้มีสมบัติที่ดีขึ้น พอลิโพรพิลีนได้ถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง ตัวอย่างเช่น ใช้ทำถุงร้อน ฟิล์มใส ฟิล์มห่อหุ้ม หรือบรรจุอาหารที่ไม่ต้องการให้ก๊าซออกซิเจนซึมผ่าน พลาสติกหุ้มซองบุหรี่ เชือก แห อวน ถังน้ำมัน ชิ้นส่วนรถยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้า เฟอร์นิเจอร์ ภาชนะเครื่องใช้ในครัวเรือน เป็นต้น

- พอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE) เป็นพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่น $0.910\text{-}0.925\text{ g/cm}^3$ ใช้ทำถุงเย็น ถุงซิป เป็นฉนวนหุ้มสายไฟและสายเคเบิล ของเด็กเล่น สายน้ำเกลือ ขวดน้ำเกลือ ดอกไม้พลาสติก ฟิล์มห่อรัดรูป (shrink film) และทำวัสดุเคลือบผิว เป็นต้น

- พอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear low density polyethylene, LLDPE) เป็นพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นตรง สมบัติจะอยู่ระหว่าง LDPE และ HDPE แต่เหนียวและเหนียวมากกว่า LDPE และ HDPE ได้รับการแปรรูปเป็นฟิล์มถึง 65 % เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมการหีบห่อ เช่น ใช้ทำเป็นฟิล์มหด (shrink film) ฟิล์มยืดรัดรูป (stretch film) ถุงบรรจุสิ่งของที่มีน้ำหนักสูง ถุงบรรจุอาหารแช่แข็ง นอกจากนี้รูปของฟิล์มแล้วก็ยังมีการนำ LLDPE มาทำท่อน้ำ สายเคเบิล และของเด็กเล่น เป็นต้น

- พอลิเอไมด์ (Polyamide, PA) (Nylon) เป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) จัดอยู่ในกลุ่มพลาสติกวิศวกรรม คุณสมบัติที่สำคัญของพอลิเอไมด์ คือ เหนียว, แกร่ง, ขยายตัวได้มาก, ทนต่อสารเคมี, ทนต่อการขีดข่วน, การขัดสี, ทนต่อความร้อน, ดูดซึมน้ำได้มาก แต่ถ้ามีเปอร์เซ็นต์ของกลุ่ม Amide ในโครงสร้างลดลงจะสามารถลดการดูดน้ำ และความชื้นได้ซึ่งทำให้เสถียรภาพทางโครงสร้าง และทางไฟฟ้าดีขึ้น การใช้งานของพอลิเอไมด์กว้างขวางมาก เช่น ใช้ทำเบรค, เกียร์, ล้อจักรยานยนต์, ถุงน่องสตรี, วาล์ว, สายไฟ, หมวก, เส้นใยสิ่งทอ นอกจากนี้ยังใช้ในงานด้านบรรจุภัณฑ์อาหาร โดยผลิตในรูปฟิล์ม

- พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเรต (Polyethylene terephthalate, PET/PETP) เป็นพอลิเอสเตอร์เชิงเส้นตรงที่อึดตัวที่สำคัญที่สุด ถูกใช้งานในรูปของเส้นใยสังเคราะห์เป็นส่วนใหญ่ แต่มีข้อเสียคือ ฝุ่น และสิ่งสกปรกเกาะติดได้ง่าย ดูดซับเหงื่อได้ไม่ดี จึงนิยมผสมกับผ้าฝ้าย ในรูปของแผ่นฟิล์มที่ผลิตจาก PET มีความเหนียวและใส มักจะใช้งานเกี่ยวกับอาหารและยา ในรูปของ

งาน ชาม สามารถแช่ตู้เย็น, อุณหภูมิในหม้อน้ำเดือด จนถึงเสิร์ฟบนโต๊ะอาหารได้เลย ในรูปของขวดเพ็ท (โดยวิธีเป่ายืด Stretch-Blow Moulding) ขวดเพ็ทนี้จะใสเหนียว ไม่แตกง่าย ๆ ทนต่อความดันก๊าซ ได้สูง ทั้งยังผ่านคณะกรรมการอาหารและยาเรียบร้อยแล้วใช้บรรจุน้ำอัดลม, บรรจุอาหาร, สุรา, ยา, เครื่องสำอาง

2.1.6 เทคโนโลยีการบรรจุภัณฑ์ (งามทิพย์, 2550)

(1) การยืดอายุการเก็บรักษาโดยการบรรจุในสภาวะสุญญากาศ

การบรรจุในสภาวะสุญญากาศเป็นการบรรจุผลิตภัณฑ์ภายใต้บรรยากาศที่ต่ำกว่าบรรยากาศปกติ โดยการไล่อากาศทั้งหมดภายในภาชนะบรรจุออกก่อนปิดผนึก โดยมีจุดประสงค์ เพื่อไล่ก๊าซออกซิเจนออกจากผลิตภัณฑ์ให้หมด เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและยับยั้งการเปลี่ยนแปลงทางเคมี กายภาพ และการเน่าเสียของอาหารเนื่องจากจุลินทรีย์เช่นเดียวกัน ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบการบรรจุในสภาพปรับบรรยากาศและสุญญากาศ พบว่า การบรรจุในสภาวะปรับบรรยากาศค่อนข้างยุ่งยากกว่า เพราะต้องคำนวณอัตราส่วนของก๊าซเริ่มต้นให้มีความเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์และระยะเวลาในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์นั้น อีกทั้งต้นทุนในการบรรจุจะสูงกว่าแบบสุญญากาศ

กึ่งแห้งที่เก็บในสภาวะสุญญากาศมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของแอสตาแซนทีนได้น้อย ทำให้สีของกึ่งแห้งซีดจาง เป็นผลให้อายุการเก็บรักษายาวนานกว่ากึ่งแห้งที่เก็บภายใต้สภาพบรรยากาศปกติ

(2) การยืดอายุการเก็บรักษาโดยใช้สารดูดซับออกซิเจน

สารดูดซับออกซิเจน (oxygen absorber) ชื่อในทางการค้า “Ageless” ใช้เพื่อช่วยดูดกลืนออกซิเจนที่มีอยู่ในช่องว่างเหนือผลิตภัณฑ์โดยปฏิกิริยาเคมี ซึ่งปริมาณก๊าซออกซิเจนที่มีอยู่ในช่องว่างเหนือผลิตภัณฑ์ภายหลังการบรรจุนั้นขึ้นอยู่กับอัตราการซึมผ่านของก๊าซสำหรับวัสดุบรรจุที่เลือกใช้ ประสิทธิภาพของเครื่องบรรจุ ลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ และความสามารถในการดูดกลืนก๊าซของผลิตภัณฑ์ ซึ่งในสภาพปราศจากออกซิเจนนี้จะช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ต้องการใช้ก๊าซออกซิเจนในการเจริญเติบโตและป้องกันการเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันในอาหารตลอดการเก็บรักษา เพราะระหว่างการเก็บรักษาจะมีก๊าซออกซิเจนเข้าออกภาชนะอยู่ตลอดเวลา เนื่องจากวัสดุบรรจุที่นิยมนำมาใช้มักป้องกันก๊าซออกซิเจนผ่านเข้ามาภายในภาชนะบรรจุได้ไม่สมบูรณ์ การควบคุมปริมาณก๊าซนี้ให้ต่ำกว่าร้อยละ 0.4 ตลอดอายุการเก็บ นั้นจึงจำเป็นต้องใช้สารดูดซับออกซิเจนเข้ามาช่วย การใช้สารดูดซับออกซิเจนจะช่วยให้ปริมาณออกซิเจนเหลืออยู่ภายในภาชนะบรรจุเพียงร้อยละ 0.01 แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเลือกใช้

ชนิดของสารดูดซับออกซิเจนที่มีปริมาณเหมาะสมด้วย ในขณะที่การบรรจุแบบสุญญากาศจะมีปริมาณก๊าซออกซิเจนเหลืออยู่ภายในภาชนะบรรจุไม่เกินร้อยละ 0.5

2.1.7. ไอโซเทอมการดูดซับ (Sorption isotherm)

การวัดค่าแอกทีวิตี (water activity, a_w) ในอาหารสามารถกระทำได้หลายวิธี อาจทำการวัดคุณสมบัติของอากาศ (ความชื้น) ในช่องว่างของระบบปิดหลังจากที่ระบบถึงสมดุล เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์สามารถหาได้จากแผนภาพไซโครเมตริก หรือความดันไอสามารถวัดได้โดยตรง เทคนิคในการหาค่านี้เพื่อต้องการสมดุลของตัวอย่างอาหารสำหรับสารอ้างอิงในภาชนะบรรจุปิด เมื่อหาปริมาณความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content, EMC) ของสารอ้างอิงได้แล้ว ค่า a_w ซึ่งจะเป็น a_w ของตัวอย่างด้วย สามารถได้จากกราฟมาตรฐานของ EMC กับ a_w กราฟมาตรฐานดังกล่าว คือ sorption isotherm สำหรับสารอ้างอิงที่อุณหภูมิเดียวกัน ค่า sorption isotherm ของน้ำบอกให้ทราบถึงปริมาณน้ำที่องค์ประกอบหนึ่ง ๆ ถูกดูดซับไว้เมื่ออยู่ในสมดุล โดยทราบว่า a_w มีความสำคัญมากเนื่องจากปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับไว้ให้ข้อมูลสำคัญเกี่ยวกับลักษณะการดูดความชื้น (hygroscopic nature) ขององค์ประกอบ จะเห็นได้ว่า สารประกอบพวก hydrophobic เช่น ไขมันและน้ำมัน จะดูดซับปริมาณน้ำได้น้อยมากเมื่อเทียบกับน้ำตาลหรือโปรตีนซึ่งดูดซับได้มากกว่า a_w หนึ่ง ๆ

เมื่อวางผลิตภัณฑ์อาหารหนึ่ง ๆ ไว้ในภาชนะปิดและความชื้นของอากาศภายในภาชนะบรรจุนั้น ๆ ถูกควบคุมให้อยู่ในระดับคงที่ตลอดเวลา ตัวอย่างอาหารอาจได้รับความชื้นจากสิ่งแวดล้อมหรือสูญเสียความชื้นไปยังสิ่งแวดล้อม ถ้าค่า a_w เริ่มต้นไม่เท่ากับ a_w ของสิ่งแวดล้อม ดังนั้น จะเห็นว่าน้ำหนักทั้งหมดมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากมีการรับและสูญเสียน้ำหนักจากการเคลื่อนย้ายของความชื้นซึ่งขึ้นกับแรงขับเคลื่อนของการถ่ายเทความชื้น (chemical potential ของน้ำในตัวอย่างเมื่อเทียบกับ chemical potential ในบรรยากาศสิ่งแวดล้อม) หลังจากช่วงเวลาหนึ่งที่สมดุลเกิดขึ้นผ่านไป ค่า EMC นี้จะขึ้นอยู่กับระดับของค่า a_w ในภาชนะปิด ดังนั้น สามารถอธิบายเหตุผลที่อาหารจะแห้งขึ้นในสภาวะที่มีความชื้นต่ำ และมีความชื้นมากขึ้นในอากาศที่ชื้น ถ้าตัวอย่างต่าง ๆ ของอาหารชนิดหนึ่ง (ในสภาวะที่แห้ง) วางในภาชนะปิดที่มีความชื้นหรือ a_w ต่าง ๆ กัน (ณ อุณหภูมิหรือความดันเดียวกัน) อนุกรมของข้อมูลที่เป็นปริมาณความชื้นสมดุล (EMC) ของตัวอย่างอาหารจากแต่ละภาชนะปิดที่ a_w ต่าง ๆ กัน จะใช้ในการสร้างกราฟ ไอโซเทอมการดูดซับน้ำสำหรับอาหารนั้น ๆ

2.1.8 การเหม็นหืนในอาหาร (รุ่งนภา, 2540)

การเหม็นหืนในอาหารเป็นการเสื่อมเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีที่เกิดในอาหารพวกไขมันและน้ำมัน รวมทั้งอาหารที่มีไขมันและน้ำมันเป็นองค์ประกอบ ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส อัตราการออกซิเดชันของไขมันมีผลมาจากปัจจัยหลายอย่าง โดยเฉพาะอุณหภูมิภายนอกเป็นตัวแปรสำคัญ การมีออกซิเจนในบริเวณใกล้อาหารทำให้อัตราการออกซิเดชันเพิ่มขึ้น ในทำนองเดียวกันน้ำมีบทบาทสำคัญเนื่องจากการออกซิเดชันของไขมันในอาหารมักเกิดด้วยอัตราสูงที่วอเตอร์แอกทีวิตีต่ำมาก ในการกำหนดอายุการเก็บของอาหารที่มีไขมันสูง อาจต้องพิจารณาปฏิกิริยาเคมีอื่น ๆ ที่สามารถกระตุ้นจากแสงได้ เช่น การสูญเสียวิตามินและการเกิดสีน้ำตาลของเนื้ออาหาร การเหม็นหืนของผลิตภัณฑ์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท

(1) การเหม็นหืนเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation rancidity) การเหม็นหืนที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวเกิดเป็นสารเปอร์ออกไซด์ ซึ่งสลายตัวไปเป็นสารที่ระเหยง่าย มีกลิ่นเหม็นหืนและมักทำให้วิตามินที่ละลายในไขมันถูกทำลายด้วย ในขณะที่มีการเกิดกลิ่นรสผิดปกติในอาหารเหม็นหืน การเกิดอนุมูลอิสระในระหว่างกระบวนการ autocatalytic ก็ทำให้เกิดปฏิกิริยาอื่น ๆ ที่ไม่ต้องการด้วย เช่น การสูญเสียวิตามิน การเปลี่ยนสี การเหม็นหืนแบบนี้อาจป้องกันได้โดยไม่ให้อาหารสัมผัสกับอากาศ ซึ่งทำได้โดยเก็บที่อุณหภูมิต่ำ หรือเก็บในภาชนะที่ปิดสนิทหรือมีการเติมสารกันหืนลงไป

(2) การเหม็นหืนเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis rancidity) การเหม็นหืนที่เกิดปฏิกิริยาของเอนไซม์ไลเปส (lipase) หรือเอนไซม์ไลพอกซิเดส (lipoxidase) ที่มีอยู่ในอาหาร เอนไซม์ไลพอกซิเดสจะทำให้กรดไขมันไม่อิ่มตัวแตกตัวได้เป็นสารที่ให้กลิ่นเหม็นหืน ส่วนเอนไซม์ไลเปสจะทำให้ไขมันแตกตัวเป็นกรดไขมันอิสระและกลีเซอรอล ซึ่งกรดไขมันอิสระเหล่านี้ทำให้เกิดกลิ่นผิดปกติ การเหม็นหืนแบบนี้อาจป้องกันได้โดยการทำลายเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการเหม็นหืนด้วยความร้อน

2.1.9 ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ (ชัยวิทย์, 2525)

(1) แสงแดดในประเทศไทย

ประเทศไทยตั้งอยู่ระหว่างเส้นรุ้งขนาน 5° - 22° เหนือ และเส้นแวง 96° - 106° ตะวันออก เป็นบริเวณที่ได้รับแสงแดดพอสมควร การวัดปริมาณแสงแดดโดยตรงในประเทศไทย เริ่มมานานแล้ว โดยการพลังงานแห่งชาติได้จัดตั้งเครื่องบันทึกแสงแดดตามส่วนต่าง ๆ ของประเทศและเครื่องที่ติดตั้งอยู่ที่อาคารฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ก็เป็นจุดหนึ่งในข่ายการวัด และเพิ่งเริ่มเก็บข้อมูลเมื่อมิถุนายน 2522 R.H.B. Exell สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชียได้

ศึกษาข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยา ที่ได้รับจากสถานีตรวจวัดอากาศตามส่วนต่าง ๆ ของประเทศ แล้ว
คำนวณหาค่าปริมาณรังสีโดยใช้คอมพิวเตอร์พบว่า

- 1) ปริมาณแสงแดดทั้งหมดเฉลี่ยทั่วประเทศ $16.7 \times 10^6 \text{ Jm}^{-2}\text{d}^{-1}$ หรือคิดเป็น
กำลัง $\approx 700 \text{ Wm}^{-2}$
- 2) แม้ยังไม่มี การวัดปริมาณรังสีโดยตรงและรังสีกระจายโดยตรง แต่จากการ
คำนวณพบว่า รังสีกระจายเฉลี่ยต่อวันมีค่าสูงสุดในฤดูร้อนและค่าต่ำในฤดู
หนาวทั่วประเทศ ยกเว้นในเขตภาคใต้ ซึ่งมีค่าคงที่ตลอดปี เหตุผลสำคัญ
ในการผันแปรของรังสีกระจายต่อวันคือ การเปลี่ยนระดับของดวงอาทิตย์
การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศไม่มีผลมากนักต่อค่าเฉลี่ยนี้ ที่น่าสังเกต คือ โดย
เฉลี่ยรังสีกระจายจะมีค่าครึ่งหนึ่งของรังสีแสงแดดทั้งหมด

(2) การวัดความเข้มและพลังงานแสงแดด

มักจะวัดรังสีแสงแดดทั้งหมดที่ตกกระทบผิวพื้นราบ โดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า
ไพราโนมิเตอร์ (pyranometer) หน่วยพลังงานต่อพื้นที่ต่อเวลา ส่วนการวัดรังสีตรงใช้อุปกรณ์ที่
เรียกว่า ไพเฮลิโอมิเตอร์ (pyrheliometer) ไพราโนมิเตอร์อาศัยหลักการที่แสงทำให้อุณหภูมิระหว่าง
ผิวดำกับผิวขาวต่างกัน และเทอร์โมไพล์ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าปริมาณราวมิลลิโวลต์ซึ่งสามารถ
ปรับมาตรฐานเป็นวัตต์ต่อตารางเมตรได้

2.1.10 การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

อินฟราเรดเป็นรังสีหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีความยาวคลื่น 0.7
ไมโครเมตร ถึง 80 ไมโครเมตร โดยในธรรมชาติเราจะสัมผัสกับอินฟราเรดอยู่เสมอ ๆ เช่น ในแสง
แดดหรือแสงอาทิตย์จะมีอินฟราเรดรวมอยู่ด้วย ทำให้เรารู้สึกร้อน อินฟราเรดที่ส่งออกมาจากดวง
อาทิตย์ไม่จำเป็นที่ต้องใช้ตัวกลาง

ฮีตเตอร์อินฟราเรดผลิตขึ้นมาจากเซรามิกซึ่งประกอบด้วยผลึกออกไซด์ของโลหะ
ที่มีคุณสมบัติในการกระจายรังสีพลังงาน การแผ่รังสีพลังงานออกจากเซรามิกเกิดจากออกไซด์ของ
การเผาโลหะโดยเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านแท่งความร้อน ออกไซด์จะดูดซึมพลังงานความร้อนจาก
แท่งความร้อนไว้และทำหน้าที่เป็นตัวเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นรังสีอินฟราเรดในช่วงความยาว
คลื่นต่าง ๆ กัน ซึ่งรังสีอินฟราเรดนี้สามารถทะลุผ่านวัตถุเข้าไปทำให้โมเลกุลของวัตถุเกิดการ
สั่นสะเทือนมีผลให้วัตถุนั้นร้อนขึ้นได้พลังงานที่แผ่ออกจากแท่งความร้อนอยู่ในรูปของคลื่นแม่
เหล็กไฟฟ้าจึงไม่ทำให้คุณสมบัติทางกายภาพของวัตถุนั้น ๆ ต้องเสียไปอีกทั้งประสิทธิภาพการให้

ความร้อนยังรวดเร็วกว่าเครื่องให้ความร้อนแบบแท่งโลหะ (pipeheater) ระยะเวลาและพลังงานที่ใช้ก็น้อยกว่าด้วย

คุณลักษณะของฮีตเตอร์อินฟราเรด

1. การกระจายความร้อนเท่ากันตลอดพื้นผิว
2. ประกอบขึ้นจากวัสดุที่แข็งแรงทนทานการบำรุงรักษาง่าย
3. แผ่ความร้อนสม่ำเสมอและรวดเร็วจัดปัญหาวัตถุแห้งไม่เท่ากัน
4. ทนทานต่ออุณหภูมิที่สูงเหมาะในการใช้งานติดต่อกันเป็นระยะเวลานาน
5. เมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ให้ความร้อนชนิดอื่นจะใช้เวลาทำงานน้อยกว่า และไม่ทำให้วัตถุนั้นได้รับความเสียหาย
6. ถ่ายโอนความร้อนได้ดี
7. ระดับความร้อนไม่เปลี่ยนแปลงตามสีของวัตถุ
8. ไม่มีเปลวไฟระหว่างกระบวนการทำงาน

2.1.11 พลังงาน

พลังงาน (Energy) หมายถึง ความสามารถในการทำงานหรืออำนาจที่แฝงอยู่ในวัตถุซึ่งสามารถเปลี่ยนรูปได้ หรือสามารถกล่าวได้ว่าวัตถุใดที่มีพลังงาน วัตถุนั้นจะสามารถทำงานได้ พลังงานของวัตถุต่าง ๆ อาจสะสมอยู่ในหลายรูปแบบ เช่น พลังงานกล พลังงานศักย์ พลังงานจลน์ ความร้อน แสง ไฟฟ้า เสียง เป็นต้น

พลังงานไฟฟ้า จะเกิดขึ้นเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำใด ๆ หมายความว่า ขณะนั้นมีประจุไฟฟ้าจำนวนหนึ่งเคลื่อนที่ผ่านตัวนำนั้น ๆ ไปเป็นกระแสต่อเนื่อง การที่ประจุไฟฟ้าจะเคลื่อนที่เป็นกระแสต่อเนื่องไปได้นั้นจะต้องมีพลังงานจากแหล่งอื่น เช่น จากแบตเตอรี่ จากไดนาโม เป็นต้น มาทำให้ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ไป พลังงานที่เกิดขึ้นจากแหล่งอื่นนั้นอาจจะเป็นพลังงานเคมี พลังงานกล พลังงานความร้อน หรือพลังงานแสงก็ตาม ซึ่งแล้วแต่ว่าแหล่งกำเนิดพลังงานนั้นเป็นอะไร พลังงานเหล่านี้จะแปรเปลี่ยนสภาพไปเป็นพลังงานไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้าที่สิ้นเปลืองในการเคลื่อนประจุหนึ่งหน่วยประจุจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งคือความต่างศักย์ทางไฟฟ้าระหว่างจุดทั้งสองนั่นเอง ดังนั้นความต่างศักย์ทางไฟฟ้าจึงหมายถึงค่าของพลังงานไฟฟ้าที่สิ้นเปลืองในการเคลื่อนหนึ่งหน่วยประจุ ระหว่างจุดคู่ใด ๆ เช่น ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุดคู่หนึ่งเท่ากับ V โวลต์ (จูล/คูลอมบ์) หมายความว่า ในการเคลื่อนประจุ 1 คูลอมบ์ ระหว่างจุดคู่นั้นต้องใช้พลังงานไฟฟ้า V จูล ถ้ามีประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ระหว่างจุดนั้นทั้งหมด Q คูลอมบ์ ดังนั้นพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ต้องสิ้นเปลือง คือ QV จูล เราทราบว่า กระแสไฟฟ้าเกิดเพราะอิเล็กตรอน

เป็นตัวพาประจุเคลื่อนที่ไปซึ่งในการเคลื่อนที่นี้ต้องมีการเสียพลังงานไป พลังงานที่เสียไปนั้น อาจะเสียไปในรูปของพลังงานความร้อนพลังงานแสงหรือพลังงานกล

วิธีคำนวณพลังงานคำนวณให้อยู่ในหน่วยของเมกะจูลต่อกิโลกรัมของน้ำที่ระเหย

$$\text{Specific Energy Consumption, SEC} = \frac{3.6 E_p}{(M_{in} - M_f) \times W_w} \quad (2.1)$$

| | | |
|-------|----------|---------------------------------------|
| เมื่อ | E_p | คือ ปริมาณพลังงานที่ใช้, kW-h |
| | M_{in} | คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ, decimal |
| | M_f | คือ ความชื้นสุดท้ายของวัสดุ, decimal |
| | W_w | คือ น้ำหนักแห้ง, kg |

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การอบแห้งเป็นกระบวนการที่ความร้อนถูกถ่ายเทด้วยวิธีการใดวิธีการหนึ่งไปยังวัสดุที่มีความชื้นเพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหยของน้ำ โดยอาศัยความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการระเหย โดยทั่วไปจะใช้อากาศเป็นตัวกลางในการอบแห้งวัสดุ ซึ่งการถ่ายเทความร้อนจากอากาศไปยังวัสดุจะเกิดขึ้นพร้อม ๆ กันกับการถ่ายเทมวลจากวัสดุไปยังอากาศ โดยความร้อนสัมผัสที่ได้รับจากอากาศส่วนใหญ่จะถูกใช้ในการทำให้น้ำระเหยออกจากวัสดุ ซึ่งอัตราการระเหยของน้ำหรืออัตราการอบแห้งของวัสดุ จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วอากาศอบแห้ง โดยทั่วไปแล้ว อัตราการอบแห้งจะคงที่ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง หลังจากนั้นอัตราการอบแห้งจะลดลงและมีค่าเป็นศูนย์เมื่อความชื้นถึงสถานะสมดุล อัตราการเปลี่ยนแปลงของความชื้นหรืออัตราการอบแห้ง ซึ่งใช้อธิบายกลไกการอบแห้งและสร้างเป็นสมการอบแห้งนั้น จะต้องมีการทดสอบความถูกต้องจากการทดลองหาอัตราการอบแห้งโดยทั่วไป คือ การติดตามการเปลี่ยนแปลงของความชื้นเทียบกับเวลา พบว่าอัตราการอบแห้งของวัสดุแบ่งได้เป็น 2 ช่วงคือ ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ ในช่วงนี้มักจะพบในกรณีที่วัสดุมีความชื้นเริ่มต้นสูง ๆ ซึ่งการถ่ายเทความร้อนและมวลระหว่างวัสดุและอากาศ เหมือนกับการถ่ายเทความร้อนและมวลที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิกระเปาะเปียกของเทอร์โมมิเตอร์ คือ จะเกิดขึ้นเฉพาะที่รอบ ๆ ผิววัสดุเท่านั้น ซึ่งอัตราการอบแห้งในช่วงนี้จะถูกควบคุมโดยสถานะอากาศอบแห้ง ซึ่งเป็นตัวแปรภายนอกวัสดุ ช่วงที่สอง คือ ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง พบว่าช่วงนี้ความชื้นภายในวัสดุมีค่าต่ำกว่าความชื้นวิกฤต การถ่ายเทความร้อนและ

มวลไม่ได้เกิดเฉพาะที่ผิวของวัสดุเท่านั้น แต่ยังเกิดภายในเนื้อวัสดุด้วย การเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในวัสดุมายังผิวช้ากว่าการพาความชื้นจากผิววัสดุไปยังอากาศทำให้อัตราการอบแห้งลดลง ซึ่งอัตราการระเหยของน้ำจะถูกควบคุมด้วยความต้านทานต่อการเคลื่อนที่โมเลกุลของน้ำในวัสดุ ในขณะที่อุณหภูมิของวัสดุมีค่าสูงขึ้นและสูงกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียก ซึ่งช่วงอัตราการอบแห้งลดลงจะถูกควบคุมด้วยตัวแปรภายใน ได้แก่ การเคลื่อนที่ของความชื้นที่ค่าความชื้นสมดุล อย่างไรก็ตามการอบแห้งวัสดุส่วนใหญ่มักพบเพียงแค่ช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเท่านั้น

2.2.1. พื้นฐานการอบแห้ง (สมชาติ, 2540)

ในการอบแห้งทั่วไปมักจะใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้ง ความร้อนจะถูกถ่ายเทจากกระแสวนอากาศไปยังวัสดุ ความร้อนส่วนใหญ่จะถูกนำไปใช้ในการระเหยน้ำ ในขณะที่เดียวกันไอน้ำจะเกิดการเคลื่อนที่จากผิวของวัสดุมายังกระแสวนอากาศ ถ้าผิวของวัสดุนั้นมีน้ำอยู่เป็นจำนวนมากอุณหภูมิและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวก็จะคงที่ ซึ่งส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและอัตราการอบแห้งคงที่ด้วยอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วของกระแสวนอากาศมีค่าคงที่ และเมื่อผิวของวัสดุมีปริมาณลดลงมาก อุณหภูมิและความเข้มข้นของไอน้ำที่บริเวณผิวของวัสดุค่อยเปลี่ยนแปลงไป โดยที่อุณหภูมิสูงขึ้นและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวของวัสดุจะลดลง ซึ่งส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและอัตราการอบแห้งลดลง ความชื้นที่อยู่ระหว่างการอบแห้งด้วยอัตราคงที่และอัตราการอบแห้งลดลงเรียกว่า ความชื้นวิกฤต (Critical moisture content)

(1) การอบแห้งขั้นต้นและสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น

ปกติแล้วจะใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้งวัสดุโดยเมื่อมีการผ่านอากาศร้อนไปที่ตัววัสดุ การถ่ายเทความร้อนจากกระแสวนอากาศไปยังผิววัสดุ และการถ่ายเทมวลจากวัสดุไปยังกระแสวนอากาศจะเกิดขึ้นพร้อม ๆ กัน ความร้อนจากอากาศที่วัสดุได้รับส่วนใหญ่จะถูกใช้ในการทำให้น้ำระเหย วัสดุจากสิ่งมีชีวิตส่วนใหญ่ที่มีโครงสร้างภายในเป็นรูพรุน เมื่อถูกทำให้แห้งในลักษณะของขั้นต้นที่สภาวะอากาศคงที่ อัตราการอบแห้งจะคงที่ในช่วงระยะเวลาหนึ่งหลังจากนั้นจะลดลง เรียกว่า ความชื้นวิกฤต ค่าความชื้นวิกฤตจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุและสภาวะในการอบแห้ง

(2) ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant drying rate period)

ในช่วงที่อัตราการอบแห้งคงที่ ลักษณะหรือกลไกการถ่ายเทความร้อน การถ่ายเทมวลระหว่างวัสดุกับอากาศ จะเหมือนกับการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลที่เกิดขึ้นที่กระเปาะเปียกของเทอร์โมมิเตอร์ คือ เกิดขึ้นเฉพาะที่รอบ ๆ ผิวของวัสดุเท่านั้น ตัวแปรที่มีผลเกี่ยวข้องกับอัตราการอบแห้ง คือ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วของกระแสวนอากาศ อัตรา

การระเหยของน้ำจะเท่ากับอัตราการถ่ายเทความร้อนจากอากาศมายังวัสดุต่อความร้อนแฝงของการระเหยของน้ำหรือเท่ากับอัตราการถ่ายเทมวล ดังสมการที่ (2.2)

$$\dot{m}_w = \frac{h'A(T_\infty - T_{wb})}{h_{fg}} \quad (2.2)$$

- เมื่อ \dot{m}_w คือ อัตราการระเหยของน้ำ, kg/h
 h' คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศ, kJ/h.m².°C หรือ W/m².°C
 A คือ พื้นที่สัมผัสของวัสดุกับอากาศ, m²
 T_∞ คือ อุณหภูมิของกระแสอากาศ, °C
 T_{wb} คือ อุณหภูมิกระเปาะเปียก, °C
 h_{fg} คือ ค่าความร้อนแฝงของการระเหยกลายเป็นไอ, kJ/kg

จากสมการที่ (2.2) จะเห็นว่า อัตราการระเหยของน้ำจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเพิ่มมากขึ้น ซึ่งในทางปฏิบัติสามารถทำได้โดยการเพิ่มความเร็วของลมโดยวิธีนี้จะทำให้ความหนาของชั้นอากาศนิ่งที่อยู่รอบ ๆ ผิววัสดุมีค่าลดลง นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มอัตราการระเหยน้ำได้อีกโดยการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศร้อนที่ใช้ในการอบ หรือลดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ซึ่งเป็นการทำให้ผลต่างของอัตราส่วนความชื้นของอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น

(3) ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling drying rate period)

ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ความชื้นของวัสดุมีค่าต่ำกว่าความชื้นวิกฤต การถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะพื้นที่ผิวของวัสดุเท่านั้น แต่เกิดการถ่ายเทในเนื้อวัสดุด้วยการเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในวัสดุมายังผิวช้ากว่าการพาความร้อนจากผิววัสดุไปยังอากาศ ทำให้อัตราการอบแห้งลดลง อัตราการระเหยของน้ำจะถูกควบคุมโดยความต่อต้านการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำในวัสดุ ในขณะที่อุณหภูมิของวัสดุมีค่าสูงขึ้นและมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียก

2.2.2 สมการอบแห้ง

สมการอบแห้ง คือ สมการที่อาจเขียนขึ้นโดยใช้ทฤษฎีหรือผลการทดลองหรือทั้งสองประกอบกันเพื่อนำมาใช้ทำนายอัตราการอบแห้งตลอดจนถึงผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อ

การอบแห้งผลิตภัณฑ์นั้น ๆ สมการอบแห้งชั้นบางสามารถแบ่งได้เป็น สมการอบแห้งทางทฤษฎี สมการอบแห้งกึ่งทฤษฎีและสมการอบแห้งเอมพิริคัล

(1) สมการการอบแห้งทางทฤษฎี

ได้มีการนำหลักการทางทฤษฎีหลายทฤษฎีมาใช้เพื่ออธิบายการเคลื่อนที่ของน้ำใน วัสดุที่มีโครงสร้างภายในเป็นรูพรุนในช่วงการอบแห้งลดลง จากกลไกการเคลื่อนที่ของน้ำภายใน วัสดุ Luikov ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุ อุณหภูมิของวัสดุ และความดันรวม แต่เนื่องจากแบบจำลองมีความยุ่งยากมากเพราะมีตัวแปรและ พารามิเตอร์หลายตัวดังนั้นจึงไม่มีการนำไปใช้ แต่เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่าการเคลื่อนที่ของน้ำ ใน วัสดุโดยส่วนใหญ่อยู่ในรูปของการแพร่อันเนื่องมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของ ความชื้น เมื่อน้ำเคลื่อนที่มายังผิวของ วัสดุแล้วจึงจะระเหยกลายเป็นไอ อัตราการระเหยของน้ำนี้จะ ถูกจำกัดโดยการแพร่ของความชื้นซึ่ง อัตราการถ่ายเทมวลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของการถ่ายเทมวล แปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับเกรเดียนต์ ความเข้มข้นของความชื้น ซึ่งสามารถเขียนได้ว่า

$$\dot{M}_w = -AD \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2.3)$$

| | | |
|-------|-------------|---|
| เมื่อ | \dot{M}_w | คือ อัตราส่วนการถ่ายเทมวล, kg/s |
| | A | คือ พื้นที่การถ่ายเทมวล, m ² |
| | C | คือ ความเข้มข้นของความชื้น, kg/m ³ |
| | x | คือ ระยะ, m |
| | D | คือ สัมประสิทธิ์การแพร่, m ² /s |

กำหนดให้

$$MR = \frac{(M_t - M_{eq})}{(M_{in} - M_{eq})} \quad (2.4)$$

| | | |
|-------|----------|----------------------------------|
| เมื่อ | MR | คือ อัตราส่วนความชื้น, decimal |
| | M_t | คือ ความชื้นที่เวลาใด ๆ, decimal |
| | M_{in} | คือ ความชื้นเริ่มต้น, decimal |
| | M_{eq} | คือ ความชื้นสมดุล, decimal |

จากวิธีเชิงวิเคราะห์ จะได้ผลเฉลยสำหรับการเคลื่อนที่ของความชื้นภายในวัสดุรูปทรงต่าง ๆ ดังนี้

1) สำหรับวัสดุทรงลูกบาศก์ (cubic shape)

$$MR = \left(\frac{8}{\pi^2}\right)^3 \sum_{p=0}^{\infty} \left(\frac{1}{(2p+1)^2}\right)^3 \exp\left(-\frac{(2p+1)^2 3\pi^2 Dt}{l^2}\right) \quad (2.5)$$

1.1) เมื่อพิจารณาเพียงสามเทอมแรก

$$MR = \left(\frac{8}{\pi^2}\right)^3 \left[\exp\left(-\frac{3\pi^2 Dt}{l^2}\right) + \frac{3}{9} \exp\left(-\frac{11\pi^2 Dt}{l^2}\right) + \frac{3}{25} \exp\left(-\frac{27\pi^2 Dt}{l^2}\right) \right]$$

2) สำหรับวัสดุทรงกลม (sphere)

$$MR = \left(\frac{6}{\pi^2}\right) \sum_{p=1}^{\infty} \left(\frac{1}{p^2}\right) \exp\left(-\frac{p^2 \pi^2 X^2}{9}\right) \quad (2.6)$$

2.1) เมื่อพิจารณาเพียงสามเทอมแรก

$$MR = \left(\frac{6}{\pi^2}\right) \left[\exp\left(-\frac{\pi^2 Dt}{r_0^2}\right) + \frac{1}{4} \exp\left(-\frac{4\pi^2 Dt}{r_0^2}\right) + \frac{1}{9} \exp\left(-\frac{9\pi^2 Dt}{r_0^2}\right) \right]$$

3) สำหรับวัสดุทรงกระบอกยาวมาก (infinite cylinder)

$$MR = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{4}{\lambda_n^2}\right) \exp\left(-\frac{\lambda_n^2 X^2}{4}\right) \quad (2.7)$$

4) สำหรับวัสดุทรงกระบอกตัน (finite cylinder)

$$MR = \left\{ \left(\frac{8}{\pi^2}\right) \sum_{p=0}^{\infty} \left(\frac{1}{(2p+1)^2}\right) \exp\left(-\frac{(2p+1)^2 \pi^2 Dt}{l^2}\right) \right\} \times \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{4}{\lambda_n^2}\right) \exp\left(-\frac{\lambda_n^2 X^2}{4}\right) \right\} \quad (2.8)$$

4.1) เมื่อพิจารณาเพียงสามเทอมแรก

$$MR = \left\{ \left(\frac{8}{\pi^2}\right) \left[\exp\left(-\frac{\pi^2 Dt}{l^2}\right) + \frac{1}{9} \exp\left(-\frac{9\pi^2 Dt}{l^2}\right) + \frac{1}{25} \exp\left(-\frac{25\pi^2 Dt}{l^2}\right) \right] \right\} \times \left\{ (4) \left[\frac{1}{\lambda_1^2} \exp\left(-\frac{\lambda_1^2}{r^2} Dt\right) + \frac{1}{\lambda_2^2} \exp\left(-\frac{\lambda_2^2}{r^2} Dt\right) + \frac{1}{\lambda_3^2} \exp\left(-\frac{\lambda_3^2}{r^2} Dt\right) \right] \right\}$$

เมื่อ $X = \frac{A}{V} (Dt)^{\frac{1}{2}}$ คือ ระยะทางเฉพาะ (Characteristic length)

A คือ พื้นที่ผิว, m^2

V คือ ปริมาตร, m^3

p คือ จำนวนเต็มที่มีค่าเป็น 1, 2, 3, ...

l คือ ความหนาของแผ่นแบนกว้างและยาวมาก, m

| | |
|-------------|--|
| λ_n | คือ รากของเบสเซลฟังก์ชันอันดับที่ศูนย์ $\lambda_1=2.4048, \lambda_2=5.5201, \lambda_3=8.6537$ |
| r_0 | คือ รัศมีที่มีปริมาตรเทียบเท่าก้อน, m |
| r | คือ รัศมีของทรงกระบอก, m |

และสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นและอุณหภูมิของลมร้อนมาใช้ในการอบแห้งได้จากสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) ดังนี้

$$D = D_0 \exp\left[-\frac{E_a}{R(T+273.15)}\right] \quad (2.9)$$

| | | |
|-------|-------|--|
| เมื่อ | D | คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น, m^2/s |
| | D_0 | คือ ค่าคงตัว |
| | E_a | คือ Activation Energy, kcal/kg mol |
| | R | คือ ค่าคงตัวของก๊าซ = 8.314 kJ/kg mol K |
| | T | คือ อุณหภูมิลมร้อน, $^{\circ}C$ |

(2) สมการอบแห้งกึ่งทฤษฎี

เนื่องจากการนำสมการทางทฤษฎีที่ประกอบด้วยจำนวนพจน์ที่ไม่สิ้นสุดมาใช้งานไม่เป็นที่นิยม จึงพยายามทำให้ง่ายขึ้นโดยการตัดพจน์หลัง ๆ ซึ่งมีค่าน้อย ๆ ทิ้งไปเพื่อให้สะดวกต่อการคำนวณนั่นเอง ซึ่งจากสมการ (2.6) ถ้าคงไว้เพียงพจน์แรกจะทำให้ได้สมการ ดังนี้

$$\overline{MR} = \left(\frac{6}{\pi^2}\right) \exp\left(-\frac{D^2 \pi^2 t}{r_0^2}\right) \quad (2.10)$$

$$\text{หรือ} \quad \overline{MR} = \left(\frac{6}{\pi^2}\right) \exp(-kt) \quad (2.11)$$

| | | |
|-------|-------|--|
| เมื่อ | r_0 | คือ รัศมีทรงกลม, m |
| | k | คือ ค่าคงที่ของการอบแห้ง, h^{-1}, s^{-1} |

สมการ (2.10) และ (2.11) จะให้ค่าใกล้เคียงกันมากเมื่อเวลาการอบแห้งมีค่ามาก และความแตกต่างจะน้อยกว่า 5 % ถ้าอัตราส่วน $D\pi^2/r_0$ มีค่ามากกว่า 1.2 (สมชาติ, 2540)

สามารถสร้างแบบจำลองการอบแห้งแบบง่าย ๆ โดยการสมมติว่าอัตราการอบแห้ง ภายใต้สภาวะคงที่แปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างของความชื้นของวัสดุและความชื้นสมดุล ซึ่งข้อสมมติฐานดังกล่าวคล้ายกับกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) สมการดังกล่าวสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{dM}{dt} = -k (M - M_{eq}) \quad (2.12)$$

ด้วยสภาวะเริ่มต้น $M(0) = M_{in}$

สภาวะขอบเขต $M(t) = M_{eq}$

และอินทิเกรต สมการ (2.12) จะได้คำตอบของสมการคือ

$$MR = \exp(-kt) \quad (2.13)$$

| | | |
|-------|----------|---|
| เมื่อ | k | คือ ค่าคงตัวของ การอบแห้ง, s^{-1} , hr^{-1} |
| | MR | คือ อัตราส่วนความชื้น |
| | M | คือ ความชื้น, % dry-basis |
| | M_{in} | คือ ความชื้นเริ่มต้น, % dry-basis |
| | M_{eq} | คือ ความชื้นสมดุล, % dry-basis |
| | t | คือ เวลา, s |

(3) สมการการอบแห้งเอมพิริคัล

สมการอบแห้งเอมพิริคัล หมายถึง สมการที่สร้างจากข้อมูลการทดลองสำหรับ วัสดุในช่วงอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลมของอากาศอบแห้งค่าหนึ่ง ๆ ซึ่งสามารถใช้ทำนายอัตราการอบแห้งได้ดี แต่มีข้อจำกัดในเรื่องเงื่อนไขการอบแห้งที่ต้องการ ต้องตรงกับสภาวะการทดลอง ซึ่งได้มีผู้นำเสนอสมการการอบแห้งแบบเอมพิริคัลไว้หลายท่านด้วยกัน เช่น

$$\text{Newton} \quad \text{MR} = \exp(-kt) \quad (2.14)$$

$$\text{Page (1949)} \quad \text{MR} = \exp(-kt^n) \quad (2.15)$$

$$\text{Henderson and Pabis;} \quad \text{MR} = a \exp(-kt) \quad (2.16)$$

$$\text{Logarithmic (1947)} \quad \text{MR} = a \exp(-kt) + c \quad (2.17)$$

$$\text{Wang and Singh (1978)} \quad \text{MR} = 1 + at + bt^2 \quad (2.18)$$

จากค่าคงตัว k ที่ได้จากสมการการอบแห้งชั้นบางสามารถนำมาหาความสัมพันธ์ของอัตราการอบแห้งกับอุณหภูมิของการอบแห้งได้จากสมการของอาเรเนียส (Arrhenius equation) ดังนี้

$$k = a \exp\left(-\frac{b}{T+273.15}\right) \quad (2.19)$$

เมื่อ k คือ ค่าคงตัวของการอบแห้ง, s^{-1} , hr^{-1}

a, b คือ คงตัวแปรตามอุณหภูมิ

T คือ อุณหภูมิ, $^{\circ}C$

2.3 พารามิเตอร์พื้นฐานสำหรับการอบแห้งกึ่ง

2.3.1 ความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content)

ความชื้นสมดุลของวัสดุมีความสำคัญต่อการศึกษากระบวนการอบแห้ง เพราะเมื่อทำการอบแห้งวัสดุโดยใช้อากาศที่สภาวะคงที่ เช่น อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์คงที่แล้วความชื้นของวัสดุก็จะลดต่ำลงจนถึงจุด ๆ หนึ่งซึ่งจะไม่เปลี่ยนแปลงอีกต่อไปในขณะนั้น ความชื้นในวัสดุจะมีความดันไอน้ำเท่ากับความดันไอน้ำของอากาศที่อยู่รอบ ๆ และอุณหภูมิของวัสดุก็เท่ากับอุณหภูมิของอากาศของอากาศรอบ ๆ ด้วย เรียกความชื้นในขณะนั้นว่า ความชื้นสมดุล ค่าความชื้นสมดุลนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความชื้น

สมดุลที่กำหนดให้ทั้งกระบวนการคายความชื้น (desorption) และกระบวนการดูดซับความชื้น (adsorption) กับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง เรียกว่า เส้นความชื้นสมดุลไอโซเทอม (equilibrium moisture isotherm) เมล็ดพืชและวัสดุอาหารโดยส่วนใหญ่มีเส้นความชื้นสมดุลไอโซเทอมเป็นรูปตัวซิกมอยด์ (sigmoid shape) แต่เส้นโค้งของกระบวนการคายความชื้นกับกระบวนการดูดซับความชื้นที่ได้จากวัสดุชนิดเดียวกันอาจจะมีค่าแตกต่างกัน ความแตกต่างของกระบวนการคายความชื้นและดูดซับความชื้นนี้ เรียกว่า ปรากฏการณ์ฮีสเทอรีซิส (hysteresis effect)

วิธีการหาความชื้นสมดุล

วิธีการหาความชื้นสมดุล มีอยู่ 2 วิธีใหญ่ ๆ คือ วิธีสถิตและวิธีจลน์

(1) วิธีสถิต

เป็นที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายมาก่อน โดยมีหลักการคือ จะต้องทำให้ความชื้นของเมล็ดพืชเข้าสู่สมดุลกับอากาศรอบ ๆ ซึ่งอยู่หนึ่ง สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

(ก) การหาความชื้นของวัสดุในภาชนะปิดโดยการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิให้คงที่โดยใช้สารละลายอิ่มตัวหรือสารละลายกรด ซึ่งค่าความชื้นสัมพัทธ์ของสารละลายเกลืออิ่มตัวนี้จะแตกต่างกันตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (นิยมใช้สารละลายเกลืออิ่มตัวมากกว่า เพราะมีเสถียรภาพและการกัดกร่อนโลหะน้อยกว่ารวมทั้งราคาจะถูกด้วย) และจะชั่งน้ำหนักของวัสดุจนกระทั่งน้ำหนักของวัสดุไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อน้ำหนักไม่เปลี่ยนแปลงก็แสดงว่า วัสดุเข้าสู่สมดุลแล้วและความชื้นของวัสดุขณะนั้นก็คือความชื้นสมดุลนั่นเอง วิธีนี้มีข้อยอมรับได้ แต่มีข้อเสียคือ ใช้เวลานานหลายวันกว่าจะทำให้วัสดุเข้าสู่สมดุลและที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่า 80 % อาจเกิดเชื้อราขึ้นที่ผิววัสดุก่อนที่จะถึงจุดสมดุลทำให้ความชื้นสมดุลมีค่าคลาดเคลื่อนได้

(ข) การวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่อยู่ในสมดุลกับวัสดุที่ทราบค่าความชื้นภายในภาชนะปิดที่ควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ ซึ่งค่าความชื้นสัมพัทธ์นี้สามารถวัดได้ด้วยเครื่อง ไฮโกรมิเตอร์ เมื่อค่าความชื้นสัมพัทธ์คงที่ก็แสดงว่าวัสดุเข้าสู่สมดุลแล้ว วิธีนี้ถ้าจำกัดปริมาณอากาศรอบ ๆ วัสดุให้น้อยที่สุดได้ จะช่วยให้ถึงจุดสมดุลในระยะเวลาที่รวดเร็วขึ้นกว่าแบบแรก

(2) วิธีจลน์

เป็นวิธีที่ปรับปรุงมาจากวิธีสถิต มีลักษณะเหมือนกับวิธีสถิตต่างกันตรงที่ วิธีจลน์อากาศรอบ ๆ วัสดุจะมีการเคลื่อนที่ในขณะที่วิธีสถิตอากาศจะอยู่หนึ่ง จึงทำให้วัสดุเข้าสู่สมดุลได้เร็วกว่าวิธีสถิตมาก คือประมาณ 1-2 วันหรือน้อยกว่า แต่มีข้อเสียคือ การควบคุมสภาวะของอากาศซึ่งเคลื่อนที่ให้มีอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์คงที่มีความยุ่งยากและซับซ้อน

ในการหาความชื้นสมดุลด้วยวิธีสถิตนั้นสารละลายเกลืออิมตัวที่ใช้จะต้องมีคุณสมบัติดังนี้ คือ ความชื้นสัมพัทธ์จะต้องไม่เปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะขึ้นอยู่กับสารเคมีที่ใช้ ความเข้มข้นและอุณหภูมิ สารละลายเกลืออิมตัวและสารละลายกรดต่าง ๆ ที่นิยมใช้ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์

ตาราง 2.4 ความชื้นสัมพัทธ์ (%) เหนือสารละลายอิมตัวของเกลือบางอย่างที่อุณหภูมิต่าง ๆ

| Temperature (°C) | LiCl | MgCl ₂ ·6H ₂ O | Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O | NaCl | (NH ₄) ₂ SO ₄ | KNO ₃ | K ₂ SO ₄ |
|------------------|------|--------------------------------------|--|------|---|------------------|--------------------------------|
| 10.0 | 13.3 | 34.2 | 57.8 | 75.4 | 81.8 | 95.5 | 97.9 |
| 32.2 | 11.9 | 32.6 | 51.9 | 75.6 | 80.0 | 90.0 | 96.5 |
| 48.9 | 11.5 | 31.6 | 47.3 | 74.8 | 79.1 | 85.3 | 95.8 |
| 68.3 | 11.1 | 30.3 | 42.2 | 73.2 | 78.0 | 78.0 | 95.0 |

ที่มา: Gustafson (1972)

สมการความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content equation)

ได้มีการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ของความชื้นสมดุลทั้งสมการทางทฤษฎี กึ่งทฤษฎี และสมการที่ได้จากการทดลอง (Empirical) หลายสมการ เพื่อใช้หาค่าความชื้นสมดุลของวัสดุชนิดต่าง ๆ สมการทางทฤษฎีที่มีอยู่ในปัจจุบันยังไม่มีสมการใดที่สามารถอธิบายความชื้นสมดุลได้อย่างถูกต้องตลอดช่วงของความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่พิจารณา สมการที่จัดว่าสามารถอธิบายความชื้นสมดุลได้ดีพอสมควรคือ สมการของ BET (1938) ซึ่งมีรูปแบบสมการดังนี้

$$\frac{RH}{(1-RH) M_{cq}} = \frac{1}{M_m C} + \frac{RH (C-1)}{M_m C} \quad (2.20)$$

- เมื่อ
- C คือ เป็นค่าคงที่ของวัสดุแต่ละชนิด
 - M_{cq} คือ ความชื้นสมดุล, % dry-basis
 - RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์, decimal
 - M_m คือ ความชื้นสูงสุดในหนึ่งชั้น โมเลกุล, % dry-basis

และสมการของ Chung & Pfof (1967) ซึ่งมีรูปแบบสมการดังนี้

$$\ln(RH) = \left(\frac{-A}{RT} \right) \exp(-BM_{eq}) \quad (2.21)$$

| | | |
|-------|----------|---|
| เมื่อ | A, B | คือ เป็นค่าคงที่ของวัสดุแต่ละชนิด |
| | M_{eq} | คือ ความชื้นสมดุล, % dry-basis |
| | RH | คือ ความชื้นสัมพัทธ์, decimal |
| | T | คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์, K |
| | R | คือ ค่าคงที่สากลของก๊าซ เท่ากับ 8.314 kJ/kg mol K |

จากข้อจำกัดของสมการทางทฤษฎีทำให้มีการสร้างสมการกึ่งทฤษฎี (Semi Empirical) และสมการที่ได้จากการทดลอง (Empirical) ขึ้น โดยมีสมการกึ่งทฤษฎีที่เป็นที่รู้จักกันมากที่สุดสมการหนึ่งคือ สมการของ Henderson (1952) โดยมีรูปแบบสมการดังนี้

$$1-RH = \exp(-kTM_{eq}^n) \quad (2.22)$$

| | | |
|-------|----------|---|
| เมื่อ | k, n | คือ เป็นค่าคงที่ของวัสดุแต่ละชนิด ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ |
| | M_{eq} | คือ ความชื้นสมดุล, % dry-basis |
| | RH | คือ ความชื้นสัมพัทธ์, decimal |
| | T | คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์, K |

นอกจากนี้ยังมีผู้เสนอสมการความชื้นสมดุล ซึ่งสมการที่ได้จากทฤษฎี กึ่งทฤษฎี และจากการทดลองอีกหลายสมการ เช่น

$$\text{Hasey (1948); } RH = \exp\left[\left(\frac{-A}{RT}\right) M_{eq}^B\right] \quad (2.23)$$

$$\text{Oswin (1946); } M_{eq} = A \left(\frac{RH}{1-RH} \right)^B \quad (2.24)$$

| | | |
|-------|----------|---|
| เมื่อ | RH | คือ ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ, decimal |
| | T | คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์, K |
| | M_{eq} | คือ ความชื้นสมมูล, % dry-basis |
| | A, B | คือ ค่าคงตัวของสมการ |
| | R | คือ ค่าคงที่สากลของก๊าซ เท่ากับ 8.314 kJ/kg mol K |

2.3.2 ความร้อนจำเพาะ (Specific heat capacity)

ในการศึกษาและออกแบบอุปกรณ์การอบแห้งนั้นจำเป็นต้องศึกษาถึงอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ความร้อนจำเพาะของวัสดุจึงเป็นพารามิเตอร์ที่จำเป็นอีกพารามิเตอร์หนึ่งในการที่จะช่วยให้การออกแบบและใช้งานอุปกรณ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ความร้อนจำเพาะ หมายถึง ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำให้วัสดุหนึ่งหน่วยมวลมีอุณหภูมิสูงขึ้นหนึ่งองศา ที่ความดันหรือปริมาตรคงที่ โดยส่วนใหญ่แล้วมักจะเกี่ยวข้องกับกระบวนการความดันคงที่มากกว่าปริมาตรคงที่ ค่าความร้อนจำเพาะนิยมใช้กันทั่วไปในหน่วยของ kJ/kg°C ค่าความร้อนจำเพาะนี้ในผลิตภัณฑ์อาหารมักขึ้นอยู่กับค่าความชื้น ในลักษณะเชิงเส้น (สมชาติ, 2540) หรือสัดส่วนของส่วนประกอบในตัวอย่าง เช่น น้ำ ไขมัน แป้ง เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วไม่นิยมกำหนดให้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิสำหรับช่วงอุณหภูมิการใช้งานที่ไม่กว้างมากนัก

วิธีการหาค่าความร้อนจำเพาะนั้นมีอยู่หลายแบบ วิธีที่นิยมใช้กันมาก คือ วิธีของผสม และวิธีการใช้แผ่นความร้อนไฟฟ้า สำหรับในงานวิจัยนี้ใช้วิธีของผสม ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะวิธีของผสมเท่านั้น

จากกฎข้อที่ 1 ของอุณหพลศาสตร์

$$\Delta U = Q + W \quad (2.25)$$

| | | |
|-------|------------|---|
| เมื่อ | ΔU | คือ การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายใน, kJ |
| | Q | คือ ความร้อนที่ถ่ายโอนระหว่างระบบและสิ่งแวดล้อม, kJ |
| | W | คือ งานที่ถ่ายโอนระหว่างระบบและสิ่งแวดล้อม, kJ |

ถ้าไม่มีงานและความร้อนที่แลกเปลี่ยนระบบและสิ่งแวดล้อม จะเขียนสมการ (2.26) ได้ว่า $\Delta U = 0$ และในระบบที่มีความดันและปริมาตรคงที่ การเปลี่ยนแปลงของพลังงาน

ภายในเท่ากับการเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปี (ΔH) นั่นคือ $\Delta H = 0$ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วในการทดลองหาค่าความร้อนจำเพาะ โดยวิธีของผสมนี้ มักใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่าแคลอรีมิเตอร์ที่ทำด้วยกระป๋องทองแดงที่หุ้มด้วยฉนวนอย่างดี และมีแท่งแก้วกวนของผสมให้เข้ากัน โดยมากจะใช้น้ำเป็นตัวผสมกับผลิตภัณฑ์หรือวัสดุที่ต้องการหาค่าความร้อนจำเพาะ เมื่อพิจารณาตัวแคลอรีมิเตอร์และของผสมเป็นระบบทางเทอร์โมไดนามิกส์ จะสามารถเขียนสมการสมดุลพลังงานได้ดังนี้

$$\text{จาก } \Delta H_w + \Delta H_p + \Delta H_c = 0 \quad (2.26)$$

เมื่อ ΔH_w , ΔH_p และ ΔH_c คือ การเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปีของน้ำ วัสดุ และ แคลอรีมิเตอร์ ตามลำดับ, kJ

$$\text{จะได้ } m_c c_c (T_{eq} - T_{c,i}) + m_p c_p (T_{eq} - T_{p,i}) + m_w c_w (T_{eq} - T_{w,i}) = 0 \quad (2.27)$$

$$\text{หรือ } c_p = \frac{[-m_c c_c (T_{eq} - T_{c,i}) - m_w c_w (T_{eq} - T_{w,i})]}{m_p (T_{eq} - T_{p,i})}$$

$$\text{หรือ } c_p = -\frac{[m_c c_c (T_{eq} - T_{c,i}) + m_w c_w (T_{eq} - T_{w,i})]}{m_p (T_{eq} - T_{p,i})} \quad (2.28)$$

| | | |
|-------|-----------|---|
| เมื่อ | c_c | คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของแคลอรีมิเตอร์, kJ/kg ^o C |
| | c_w | คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ, kJ/kg ^o C |
| | c_p | คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุ, kJ/kg ^o C |
| | m_c | คือ มวลของแคลอรีมิเตอร์, kg |
| | m_w | คือ มวลของน้ำ, kg |
| | m_p | คือ มวลของวัสดุ, kg |
| | T_{eq} | คือ อุณหภูมิที่สภาวะสมดุล, ^o C |
| | $T_{c,i}$ | คือ อุณหภูมิของแคลอรีมิเตอร์ที่สภาวะสมดุล, ^o C |
| | $T_{w,i}$ | คือ อุณหภูมิของน้ำที่สภาวะเริ่มต้น, ^o C |
| | $T_{p,i}$ | คือ อุณหภูมิของวัสดุที่สภาวะเริ่มต้น, ^o C |

ดังนั้นจากสมการ (2.28) ข้างต้นจะสามารถคำนวณหาค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุได้ถ้าทราบค่าของเทอมต่าง ๆ

2.3.3 ความหนาแน่น (density)

ความหนาแน่นเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างหนึ่งในการวิเคราะห์การอบแห้ง ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็นสองชนิดด้วยกัน คือ ความหนาแน่นจริง (True density) และความหนาแน่นปรากฏ (Bulk density) โดยความหนาแน่นจริง หมายถึง อัตราส่วนของมวลวัสดุต่อปริมาตรวัสดุ ส่วนความหนาแน่นปรากฏ จะใช้กับวัสดุที่มีลักษณะเป็นเม็ด ๆ กองรวมกันอยู่เป็นปริมาณหนึ่ง ซึ่งหมายถึง อัตราส่วนของมวลต่อปริมาตรทั้งหมด โดยรวมปริมาตรของเม็ดวัสดุและปริมาตรของอากาศที่แทรกตัวอยู่ตามช่องของเม็ดวัสดุนั้น ๆ สำหรับวัสดุที่มีความชื้นแตกต่างกัน อาจมีค่าความหนาแน่นแตกต่างกันตามไปด้วย โดยขณะที่ทำการอบแห้งวัสดุอยู่นั้นความชื้นที่มีอยู่ในวัสดุจะมีการเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ฉะนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทราบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับความชื้นของวัสดุที่จะนำมาใช้ในการอบแห้งในรูปแบบต่าง ๆ ด้วย

โดยทั่วไปแล้วความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นจริงกับค่าความชื้นของวัสดุ หรือค่าความหนาแน่นปรากฏกับค่าความชื้นของวัสดุมักจะอยู่ในรูปเชิงเส้น (Altuntas, *et al.*, 2005; Kshaninejad, *et al.*, 2006) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ (Karababa, 2006)

$$\rho = aM + b \quad (2.29)$$

| | | |
|-------|--------|---------------------------------------|
| เมื่อ | ρ | คือ ความหนาแน่นปรากฏ, kg/m^3 |
| | M | คือ ความชื้นของวัสดุ, % dry-basis |
| | a, b | คือ ค่าคงตัว |

2.3.4 ร้อยละช่องว่างของอากาศ (percentage of void fraction)

ร้อยละช่องว่างของอากาศ คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาตรของอากาศต่อปริมาตรทั้งหมดโดยร้อยละช่องว่างของอากาศเป็นส่วนหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อความดันลดของอากาศในท่อของกระบวนการอบแห้งวัสดุทางการเกษตรหรือเมล็ดธัญพืชชนิดต่าง ๆ ดังนั้น การศึกษาถึงร้อยละช่องว่างของอากาศจะทำให้สามารถกำหนดขนาดของอุปกรณ์ที่จะนำมาใช้ในการอบแห้งได้ ฉะนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทราบความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละช่องว่างของอากาศกับค่าความชื้นของวัสดุที่จะนำมาใช้ในการอบแห้งในรูปแบบต่าง ๆ ด้วย

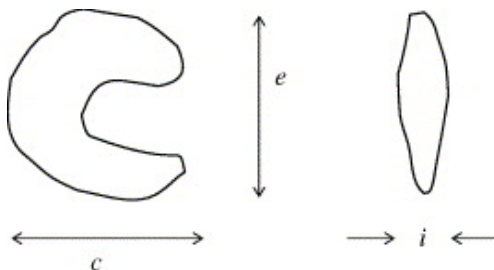
ร้อยละช่องว่างของอากาศ โดยทั่วไปแล้วจะขึ้นอยู่กับค่าความชื้นของวัสดุซึ่งมักจะอยู่ในรูปเชิงเส้น (สมชาติ, 2540) โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\mathcal{E} = aM + b \quad (2.30)$$

| | | |
|-------|---------------|-----------------------------------|
| เมื่อ | \mathcal{E} | คือ ร้อยละช่องว่างของอากาศ, % |
| | M | คือ ความชื้นของวัสดุ, % dry-basis |
| | a, b | คือ ค่าคงตัว |

2.3.5 การหาขนาดและรูปร่างของก้อน (Mohsenin, 1970)

สมมติให้ก้อนมีรูปร่างเป็นทรงกลม สามารถหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าได้จากสมการ



ภาพประกอบ 2.1 รูปร่างและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของก้อนเทียบเท่าทรงกลม

(Tirawanichakul, *et al.*, 2008)

$$\text{Sphericity} = \left(\frac{\text{Volume of solid}}{\text{Volume of circumscribed sphere}} \right)^{1/3} \quad (2.31)$$

$$= \left(\frac{(\pi/6)ic}{(\pi/6)e^3} \right)^{1/3} = \left(\frac{ic}{e^2} \right)^{1/3} \quad (2.32)$$

$$= \frac{\text{geometric mean diameter}}{\text{major diameter}} = \frac{(ic)^{1/3}}{e} \quad (2.33)$$

เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวก้อน หาได้จากสมการ (2.34) ดังนี้

$$\text{geometric mean diameter (GMD)} = (ic)^{1/3} \quad (2.34)$$

- เมื่อ e คือ เส้นผ่านศูนย์กลางตัดขวางที่ยาวที่สุด (longest intercept), m
 i คือ เส้นผ่านศูนย์กลางตัดขวางที่ยาวที่สุดที่ตั้งฉากกับด้าน e, m
 c คือ เส้นผ่านศูนย์กลางตัดขวางที่ยาวที่สุดที่ตั้งฉากกับด้าน e และ i, m

คุณภาพของกึ่งแห้งที่ดีควรจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นองค์ประกอบประมาณ 20% (d.b.) และกึ่งแห้งที่ทำแห้งจะนำมาทดสอบคุณภาพด้านสี การหดตัว การคืนตัว และวัดค่าแรงเฉือนสูงสุด โดยนำกึ่ง 3 ตัวอย่างมาทดสอบแต่ละคุณภาพที่สนใจ

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เขาวลัษณ์ รัตนพรวารัฐกุล (2535) ได้ทำการศึกษาผลของชนิดของชนิดที่มึต่อคุณภาพและอายุการเก็บรักษาของกึ่งแห้ง ผลการทดลองปรากฏว่า กึ่งแห้งที่ใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้นร้อยละ 0.1 0.3 และ 0.5 มีปริมาณแอสตาแซนทีนที่ต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ แต่มีคุณภาพที่ดีกว่ากึ่งแห้งที่ไม่ใช้กรดซัลฟูริก โดยเลือกความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกร้อยละ 0.1 มาผลิตกึ่งแห้ง เพื่อทดสอบคุณภาพระหว่างการเก็บรักษาในสภาวะสุญญากาศและบรรยากาศปกติ โดยเทียบกับกึ่งแห้งที่ไม่ใช้กรดซัลฟูริก พบว่า กึ่งแห้งที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ $10\pm 2^{\circ}\text{C}$ จะมีอายุการเก็บรักษา 14 สัปดาห์ และมีคุณภาพดีกว่ากึ่งแห้งที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ $30\pm 2^{\circ}\text{C}$ ทุกสภาวะการบรรจุ โดยกึ่งแห้งที่เก็บรักษาในสภาวะบรรยากาศปกติและสุญญากาศที่อุณหภูมิ $30\pm 2^{\circ}\text{C}$ จะมีอายุการเก็บรักษาเพียง 6 และ 8 สัปดาห์ตามลำดับ กึ่งแห้งที่ใช้กรดซัลฟูริกจะมีคุณภาพทางด้านสี ปริมาณแอสตาแซนทีนสูงกว่าและมีปริมาณแอมโมเนียต่ำกว่ากึ่งแห้งที่ไม่ใช้กรดซัลฟูริก ($P < 0.01$) ทั้งที่เก็บรักษาในสภาวะสุญญากาศและบรรยากาศปกติ ที่อุณหภูมิ $30\pm 2^{\circ}\text{C}$ และ $10\pm 2^{\circ}\text{C}$

วรรณิษา โสภักดี (2544) ได้ทำการศึกษาอายุการเก็บรักษาของกึ่งแห้งในถุงลามิเนตชนิด Nylon/LLDPE ภายใต้สภาวะสุญญากาศและสภาวะปกติร่วมกับสารดูดซับออกซิเจนที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่า ที่อุณหภูมิห้อง ($30\pm 2^{\circ}\text{C}$) กึ่งแห้งที่บรรจุภายใต้สภาวะสุญญากาศสามารถเก็บได้ 70 วัน และกึ่งแห้งที่เก็บในสภาวะปกติร่วมกับสารดูดซับออกซิเจน มีอายุการเก็บรักษา 105 วัน กึ่งแห้งที่บรรจุในสภาวะปกติร่วมกับสารดูดซับออกซิเจนมีคุณภาพและอายุการเก็บรักษาที่ดีกว่ากึ่งแห้งที่บรรจุภายใต้สภาวะสุญญากาศในทุกอุณหภูมิ

รุ่งทิพย์ ตปนียศิลป์ (2547) ศึกษาวิธีการอบแห้งและคุณภาพของกึ่งแห้ง เมื่อทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบ Jet-spouted bed โดยพิจารณาปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ขนาดของกึ่งแห้ง อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งกึ่งแห้งและคุณภาพของกึ่งแห้ง ทำการทดลอง

ในช่วงอุณหภูมิ 70-100°C โดยใช้อุณหภูมิแบบคงที่ขึ้นตอนเดียวและแบบสองขึ้นตอน (ใช้อุณหภูมิอบแห้งขึ้นตอนแรก ช่วง 100-120°C ขึ้นตอนที่สองใช้ 70°C) พบว่าการใช้อุณหภูมิตอบแห้งแบบคงที่ขึ้นตอนเดียวที่ 100°C จะได้กุ้งแห้งที่คุณภาพดีที่สุด โดยมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวต่ำที่สุด ความสามารถในการคืนตัวสูงที่สุด แรงเกลือสูงสุดที่ใช้ในการตัดต่ำ และมีความเป็นสีแดงสูงเมื่อเปรียบเทียบกับกรอบแห้งที่สภาวะอื่น ๆ สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการทำนายการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบ Jet-spouted bed เป็นรูปแบบสมการเอมพิริคัล

Ramaswamy *et al.*, (1982) ได้ศึกษาการทำแห้งกุ้งโดยใช้เครื่องอบแห้ง พบว่า กุ้งแห้งที่มีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 23.5 มีค่า a_w ต่ำกว่า 0.80 ซึ่ง a_w ระดับนี้จะจำกัดการเจริญของจุลินทรีย์บางชนิดที่ทำให้อาหารเสื่อมคุณภาพและเน่าเสียได้

Posomboon (1998) ได้ศึกษาการอบแห้งกุ้งโดยใช้ลมร้อน โดยสนใจศึกษาเกี่ยวกับความสดของกุ้งที่นำมาทำกุ้งแห้ง เวลาในการต้มกุ้ง และอุณหภูมิในการอบแห้งซึ่งมีผลต่อคุณภาพของกุ้งแห้ง จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า กุ้งแห้งที่ผลิตจากกุ้งสดที่เก็บมากกว่า 2 วัน จะเกิดลายสีขาวบนตัวกุ้ง ทำให้กุ้งมีสีน้ำตาลเข้มขึ้น มีกลิ่นเหม็นและคุณภาพไม่อยู่ในเกณฑ์ที่รับได้ และเมื่อนำกุ้งมาทำการต้มพบว่า ยิ่งต้มนานขึ้นสารละลายเกลือจะยิ่งแทรกซึมผ่านเซลล์ของตัวกุ้งเข้าไปมากขึ้น อย่างไรก็ตามปริมาณของเกลือในตัวกุ้งก็ขึ้นอยู่กับขนาดของกุ้งด้วย โดยกุ้งขนาดเล็กจะมีเปอร์เซ็นต์เกลือมากกว่ากุ้งขนาดใหญ่ และใช้เวลาในการต้มกุ้ง 2 นาทีก็เพียงพอสามารถกำจัดจุลินทรีย์ให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

Dilip and Pankai (2006) ได้ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งกุ้งและปลาแซลวาคด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ระบบเปิด ผลการทดลองพบว่า อัตราการอบแห้งไม่มีช่วงที่เป็นอัตราอบแห้งคงที่ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์แนวโน้มนุ่มและค่าเฉลี่ยความผิดพลาดเป็น 0.9996 และ 0.33×10^{-14} สำหรับกุ้ง และ 0.9993 กับ 0.58×10^{-4} สำหรับปลาแซลวา ตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น โดยสามารถสร้างสมการหาค่าสัมประสิทธิ์จากแนวคิดกฎของ Fick พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมีความสัมพันธ์แบบเอกซ์โพเนนเชียลกับค่าความจุความชื้นเฉลี่ยของปลาแซลวา ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นเฉลี่ยมีค่า 11.11×10^{-11} และ $8.708 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ สำหรับกุ้งและปลาแซลวา ตามลำดับ

Niamny *et al.*, (2008 a) ได้ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงของ astaxanthin และการเปลี่ยนสีของกุ้งแห้งระหว่างการเก็บรักษาในระยะเวลาการเก็บรักษา 16 สัปดาห์ ใช้กุ้งขนาด 350-360 ตัว/กิโลกรัม เป็นการอบแห้งแบบ jet spouted bed dryer อุณหภูมิอบแห้งอยู่ที่ 80 100 และ 120°C ความชื้นสุดท้ายอยู่ที่ 15-16 % wet-basis พบว่า ปริมาณ astaxanthin ความเป็นสีขาว สีแดงและสีเหลืองของกุ้งที่อบแห้งด้วยอุณหภูมิ 100 และ 120°C มีค่า

สูงกว่าอบแห้งที่อุณหภูมิ 80°C สำหรับรูปแบบสมการจลนพลศาสตร์อันดับที่หนึ่ง เป็นรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเสื่อมของ astaxanthin และการเปลี่ยนของสีทั้งหมด กุ้งแห้งที่อบด้วยอุณหภูมิ 120°C สามารถป้องกัน astaxanthin ได้สูงกว่าระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 100 และ 80°C อย่างไรก็ตามการเก็บรักษากุ้งแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศที่อุณหภูมิต่ำทำให้เพิ่มค่า retention astaxanthin การเพิ่มขึ้นของความขาวและการลดลงของสีแดงและสีเหลืองของกุ้งแห้งมีความสัมพันธ์กับการลดลงของ astaxanthin ระหว่างการเก็บรักษา

Niamnuy *et al.*, (2008 b) ศึกษาปัจจัยของร้อยละของน้ำเกลือต่อการเปลี่ยนแปลงของสัดส่วนของโปรตีนและ hardness ใช้กุ้งขนาด 150-160 ตัว/กิโลกรัม ความเข้มข้นของน้ำเกลือ 0, 2, 3 และ 4% ระยะเวลาในการต้ม 1, 3, 5 และ 7 นาที พบว่า ระยะเวลาการต้มกุ้งและความเข้มข้นของสารละลายเกลือมีผลต่อสัดส่วนของโปรตีนในกุ้ง การเพิ่มระยะเวลาในการต้มและการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเกลือทำให้ปริมาณ myofibrillar, sarcoplasm และ stroma ในโปรตีนลดลง แต่จะทำให้ alkali-soluble protein และ protein loss เพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงของ cooking loss hardness และ $\Delta FD/FD_0$ มีความสัมพันธ์อย่างมากกับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ myofibrillar sarcoplasm และ alkali-soluble protein ทำให้ muscle protein เกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากธรรมชาติ ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญเพราะมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของ microstructure และสมบัติทางกายภาพของกุ้งระหว่างการต้มในสารละลายเกลือ

Tirawanichakul *et al.*, (2008) ได้ศึกษาการอบแห้งกุ้งโดยศึกษาการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด และการพาความร้อนจากลมร้อน เพื่อศึกษาผลกระทบของสภาวะการอบแห้งและผลของอุณหภูมิต่อคุณภาพของกุ้งโดยใช้กุ้งสองขนาด คือ 100 และ 200 ตัวต่อกิโลกรัม ความชื้นเริ่มต้น 270-350% dry-basis อบแห้งจนได้ความชื้นสุดท้าย 20-25% dry-basis ความเร็วลม 1.0-1.2 เมตร/วินาที อุณหภูมิอบแห้งอยู่ในช่วง 40-90°C ความเข้มของรังสีอินฟราเรด 1,785.7-3,571.4 W/m² จากผลการทดลองสรุปได้ว่า อัตราส่วนความชื้นของกุ้งทั้งสองขนาดมีค่าลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลเมื่อระยะเวลาในการอบแห้งเพิ่มสูงขึ้น โดยอุณหภูมิในการอบแห้งเพิ่มสูงขึ้นมีผลต่อจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งและคุณภาพของกุ้งอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05) ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของกุ้งทั้งสองขนาดพิจารณาโดยเปรียบเทียบรูปร่างของกุ้งเป็นแบบทรงกระบอกสั้น มีค่า 10⁻⁷ m²/s โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง จากการวิเคราะห์คุณภาพของกุ้งแห้ง พบว่า ค่าสีแดงของกุ้งที่อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนมีค่าสีแดงสูงกว่าการอบแห้งด้วยแหล่งพลังงานอื่น ๆ โดยที่สมบัติการหดตัวและคืนตัวมีค่าแตกต่างกัน (p<0.05) ทุกสภาวะการอบแห้ง ขณะที่การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดมีอัตราการอบแห้งที่สูงกว่าและใช้ระยะเวลาในการอบแห้งที่น้อยกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การอบแห้งโดยใช้ลมร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้ง วัสดุและผลิตภัณฑ์อาหารบางชนิดเป็นวิธีหนึ่งที่น่าจะใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน เพราะสามารถทำการลดความชื้นให้อยู่ในช่วงที่ต้องการได้อย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามการพัฒนาด้านเทคโนโลยีอบแห้ง จะขึ้นกับแหล่งพลังงานที่เลือกใช้ด้วย รวมถึงการประยุกต์ใช้แหล่งพลังงานตามธรรมชาติร่วมกับแหล่งพลังงานแบบอื่น ๆ ได้หลายแบบ เช่น การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับลมร้อน หรือการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรด เป็นต้น ซึ่งกระบวนการอบแห้งจะทำให้ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นอย่างไรนั้น ขึ้นกับการออกแบบการอบแห้งที่เหมาะสมกับวัสดุ นั้น ๆ โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์อาหาร เพราะจะส่งผลต่อคุณภาพทางกายภาพ ทางเคมี และชีวภาพของวัสดุ และอาหารนั้น ๆ ซึ่งจะต่อเนื่องถึงการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ให้ได้ระยะเวลาที่ยาวนานขึ้น โดยที่ยังคงคุณภาพทั้งทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์ไว้ได้

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

3.1 วัตถุดิบ

กุ้งขาว (กุ้งเลี้ยง) สายพันธุ์ *Penaeus* spp. โดยคัดที่เป็นกุ้งสด 2 ขนาดคือ ขนาด 150-200 และ 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม ล้างทำความสะอาด แล้วนำไปต้มในน้ำเกลือที่มีความเข้มข้น 3% โดยน้ำหนัก ระยะเวลา 3-5 นาที อุณหภูมิ 100°C หาคำขึ้นตามมาตรฐาน AOAC (1995) และนำไปอบแห้งตามสภาวะต่าง ๆ



(ก) ขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม



(ข) ขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม

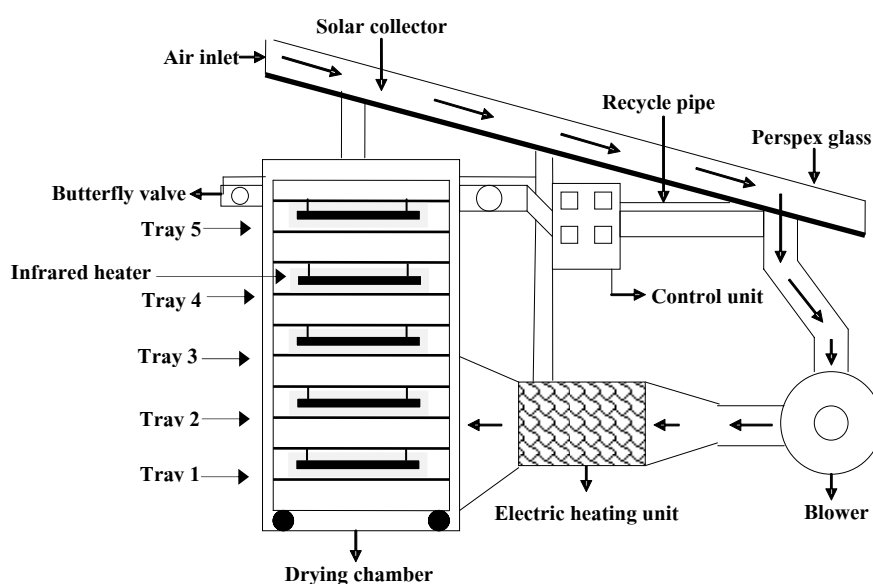
ภาพประกอบ 3.1 กุ้งขาว (กุ้งเลี้ยง) สายพันธุ์ *Penaeus* spp.

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

3.2.1 เครื่องอบแห้งกุ้งเป็นแบบใช้พลังงานความร้อนร่วม ได้แก่ การใช้ลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดและพลังงานจากแสงอาทิตย์ รายละเอียดของเครื่องอบแห้งแสดงดังภาพประกอบที่ 3.2

(1) ห้องอบแห้งมีปริมาตร 60×80×158.5 cm³ ภายในบุฉนวนใยแก้วหนา 5 cm

- (2) แผงรับความร้อนทำด้วยแผ่นสังกะสีทาสีดำ เพื่อช่วยในการดูดซับรังสีมีขนาด $32.5 \times 133 \times 240 \text{ cm}^3$ ด้านบนปิดด้วยพลาสติกใส ผนังด้านนอกทำด้วยสังกะสี ภายในบุด้วยฉนวนที่ทำด้วยโพลีเอทิลีนหนา 1 cm ประกอบเข้ากับตัวเครื่องอบแห้ง วางทำมุมเอียง 14 องศาับแนวระดับ
- (3) ถาดอบแห้งสแตนเลส มีขนาด $44 \times 70 \times 5 \text{ cm}^3$ จำนวน 3 ถาด มีพื้นที่การอบแห้งรวม 0.308 m^2 สามารถอบแห้งกุ้งได้ประมาณ 1 kg ต่อถาด ดังภาพประกอบที่ 3.1
- (4) ฮีตเตอร์ครีบน้ำมัน 1,000 W จำนวน 10 ตัว
- (5) แผงรังสีอินฟราเรดขนาด 500 W จำนวน 10 แผง ในแนวตั้งฉากกับทิศทางการไหลของอากาศและห่างจากวัสดุอบแห้ง 0.13 m
- (6) พัดลม มีใบพัดแบบโค้งหน้า ขนาด 1 hp จำนวน 1 ตัว
- (7) ท่ออากาศไหลกลับ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm จำนวน 2 ท่อ



ภาพประกอบ 3.2 รายละเอียดของเครื่องอบแห้งกุ้งแบบพลังงานความร้อนร่วม (ลมร้อน แสงอาทิตย์และอินฟราเรด) (Tirawanichakul, *et al.*, 2008)

3.2.2 เครื่องวัดและบันทึกอุณหภูมิยี่ห้อ YOKOKAWA, Japan ต่อกับเทอร์โมคัปเปิลชนิด K เพื่อวัดอุณหภูมิภายในตู้อบแห้ง อุณหภูมิแวดล้อม และอุณหภูมิกระเปาะเปียก

3.2.3 หลอดอินฟราเรด ขนาดกำลัง 500 วัตต์ 10 หลอด

3.2.4 เครื่องชั่งน้ำหนัก ยี่ห้อ A&D รุ่น GF 3000, Japan ค่าความละเอียด ± 0.01

กรัม

3.2.5 เครื่องวัดความเร็วลม ยี่ห้อ DIGICON รุ่น DA-45, Japan ความละเอียด ± 0.01 เมตรต่อวินาที

3.2.6 เครื่อง Texture analyzer รุ่น TA-XT2i

3.2.7 เวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์ ความละเอียด ± 0.05 มิลลิเมตร

3.2.8 แคลอริมิเตอร์ ทำด้วยทองแดงหุ้มฉนวนหนา 3 เซนติเมตร และหุ้มโดยรอบด้วยแผ่นสแตนเลสบาง 1 ชั้น

3.2.9 ขวดโพลีเอทิลีน ปิดสนิทขนาด 2 ลิตร มีแผ่นยางรองได้ฝาเพื่อป้องกันการระเหิดของสารละลายเกลืออิ่มตัว และสามารถใช้กับตู้อบอุณหภูมิ 40-100 องศาเซลเซียสได้ เพื่อทำการทดลองหาค่าความชื้นสมดุล

3.2.10 อุปกรณ์เครื่องแก้ว ได้แก่ ขวดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ขวดเคตาลขนาด 250 มิลลิลิตร กระจกตวงขนาด 100 มิลลิลิตร และ 250 มิลลิลิตร

3.2.11 เครื่องวัดค่าอุณหภูมิยี่ห้อ Novasina รุ่น Thermoconstanter, Switzerland

3.2.12 เครื่องวัดสี ยี่ห้อ Hunter Lab รุ่น JP7100, Tokyo, Japan โดยระบบ CIELAB

3.2.13 แผ่นฟิล์มชนิด Nylon/Al/LLDPE, Nylon/LLDPE และ Polypropylene

3.2.14 เครื่องตีปั่นไฟฟ้า ยี่ห้อ Stomacher Lab Blender Model 400 Type BA 7021, UK

3.2.15 เครื่องบรรจุสุญญากาศ

3.2.16 เครื่องรีดปากถุง

3.2.17 เครื่องนึ่งฆ่าเชื้อ

3.2.18 ตู้บเพาะเชื้อจุลินทรีย์

3.2.19 เครื่องแก้วที่ฆ่าเชื้อแล้ว

3.2.20 ถุงพลาสติกฆ่าเชื้อ

3.2.21 กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42

3.2.22 ไมโครปีเปต

3.2.23 เครื่องแยกเหวียง

3.2.24 สเปคโตรโฟโตมิเตอร์

3.3 สารเคมี

- 3.3.1 Sodium hydroxide (A.R. grade, LABSCAN, Israel)
- 3.3.2 Sodium chloride (A.R. grade, Ajax Finechem, New Zealand)
- 3.3.3 Potassium sulfate (A.R. grade, J.T. baker, USA)
- 3.3.4 Concentration Sulfuric acid (A.R. grade, J.T. baker, USA)
- 3.3.5 Boric (A.R. grade, Ranken, India)
- 3.3.6 Phenolphthalein (VWR International Ltd., England)
- 3.3.7 Concentration Hydrochloric acid (A.R. grade, LABSCAN, Israel)
- 3.3.8 Thiobarbituric acid (Fluka Analytical, Germany)
- 3.3.9 Trichloroacetic acid (Riedel-dehaen, Germany)
- 3.3.10 Alcohol (A.R. grade, VWR International Ltd., England)

3.4 อาหารเลี้ยงเชื้อ

- 3.4.1 Plate count agar (PCA) (Merck, Germany)
- 3.4.2 Potato Dextrose Agar (PDA) (Merck, Germany)

3.5 วิธีการวิจัย

3.5.1 ศึกษาผลของความชื้นและอุณหภูมิที่มีต่อพารามิเตอร์ทางกายภาพของกุ้ง

(1) ความชื้นสมดุลของกุ้งต้ม

นำตัวอย่างกุ้งต้มประมาณ 15-20 กรัม ใส่ไว้ในตะแกรงรูปทรงกระบอก แล้วนำไปแขวนในขวดปากกว้างที่บรรจุสารละลายเกลืออิ่มตัวของ LiCl , NaCl , KNO_3 , $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ซึ่งเป็นตัวควบคุมความชื้นสัมพัทธ์และควบคุมอุณหภูมิด้วยตู้อบในช่วงอุณหภูมิ $40\text{-}55^\circ\text{C}$ ปิดฝาขวดให้แน่นเพื่อป้องกันอากาศภายนอกเข้าไปในขวด ทิ้งไว้ให้เข้าสู่สมดุลและหาความชื้นสมดุลตามมาตรฐาน AOAC (1995)

(2) ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent density, ρ)

นำตัวอย่างกุ้งต้มที่ความชื้นต่าง ๆ กัน เทใส่ภาชนะทรงกระบอกที่ทราบปริมาตร โดยใส่กุ้งทีละตัวจนเต็มภาชนะนำไปชั่งน้ำหนัก และบันทึกค่าที่อ่านได้ ทำการทดลองเช่นเดียวกัน

โดยเปลี่ยนตัวอย่างที่มีความชื้นแตกต่างกัน ทำการทดลองตัวอย่างละ 5 ครั้ง แล้วคำนวณค่าความหนาแน่นปรากฏ

(3) ค่าร้อยละช่องว่างของอากาศ (Percentage of void fraction, ϵ)

นำตัวอย่างกึ่งดัมที่ทราบความชื้นที่แน่นอน ใส่ในภาชนะทรงกระบอกที่ทราบปริมาตร โดยใส่ที่ละตัวจนเต็มภาชนะ เติมน้ำมันพืชลงไปจนจมน้ำผิวดิน วัดปริมาตรน้ำมันพืชที่ใช้ แล้ว คำนวณค่าสัดส่วนช่องว่างของอากาศ ทำการทดลองเช่นเดียวกันโดยเปลี่ยนตัวอย่างที่มีความชื้นแตกต่างกัน ทำการทดลองตัวอย่างละ 2 ครั้ง แล้วคำนวณค่าสัดส่วนช่องว่างของอากาศหาค่าเฉลี่ยของแต่ละความชื้น

(4) ค่าความร้อนจำเพาะ (Specific heat capacity, c_p)

นำตัวอย่างกึ่งดัมที่ความชื้นต่าง ๆ กัน มาทดสอบในแคลอรีมิเตอร์ที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอน ใช้น้ำกลั่นที่อุณหภูมิเริ่มต้น 65°C น้ำหนัก 40 g ใส่ลงไป ในแคลอรีมิเตอร์ ปิดฝา กวนให้เข้ากันให้ดี สังเกตค่าอุณหภูมิที่จุดสมดุล แล้วคำนวณค่าความร้อนจำเพาะ

3.5.2 วิธีการอบแห้งกึ่ง

(1) นำกึ่งดัมสุก (ที่เตรียมจากข้อ 3.1) มาอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ โดยมีเงื่อนไขในการอบแห้งดังนี้คือ

สภาวะที่ 1 อบแห้งกึ่งด้วยอุณหภูมิคงที่ด้วยรังสีอินฟราเรด โดยใช้กำลังของรังสีอินฟราเรด 500 และ 1,000 W ที่อุณหภูมิ $70-90^{\circ}\text{C}$ จนได้ความชื้นสุดท้ายประมาณ 20-25% dry-basis

สภาวะที่ 2 อบแห้งกึ่งด้วยอุณหภูมิเป็นขั้นแบบสองขั้นตอน คือ อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด 1,000 W โดยขั้นตอนแรกอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูง 90°C นาน 20 และ 25 นาที และลดอุณหภูมิลงเป็น 70°C ในขั้นตอนที่สอง จนได้ความชื้นสุดท้ายประมาณ 20-25% dry-basis

สภาวะที่ 3 อบแห้งกึ่งด้วยอุณหภูมิเป็นขั้นแบบสองขั้นตอน คือ อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ โดยขั้นตอนแรกอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูง 90°C นาน 30 นาที และลดอุณหภูมิลงเป็น 70°C ในขั้นตอนที่สอง จนได้ความชื้นสุดท้ายประมาณ 20-25% dry-basis

(2) บันทึกผลการทดลอง ได้แก่ น้ำหนักกึ่ง อุณหภูมิกระเปาะเปียก กระเปาะแห้ง และอุณหภูมิอบแห้งภายในห้องอบแห้ง

(3) บันทึกปริมาณพลังงานที่ใช้ด้วย Watt-hour meter

(4) หาค่าความชื้นตามมาตรฐาน AOAC (1995)

(5) บรรจุถุงแห้งตามสภาวะที่ 1 และ 2 ในถุง Nylon / LLDPE และ Polypropylene ในสภาวะปกติ และทำการบรรจุถุงแห้งตามสภาวะที่ 3 ในถุง Nylon / LLDPE, Nylon / Al / LLDPE ในสภาวะปกติ และสุญญากาศ และถุง Polypropylene ในสภาวะปกติ

(6) ทดสอบคุณภาพของถุงแห้งทั้งก่อนและหลังอบแห้ง ได้แก่ ทางกายภาพ เคมี และทางจุลชีววิทยาของถุงแห้งทุก ๆ เดือน

3.6 การทดสอบคุณภาพของถุงแห้ง

3.6.1 คุณภาพทางกายภาพ

(1) ความชื้น (AOAC, 1995) ดังแสดงในภาคผนวก ค 1.1

(2) คุณภาพสี ดังแสดงในภาคผนวก ค 1.2

นำถุงมาปอกเปลือก วัดสีของถุงโดยใช้เครื่องวัดสีอาหาร (Juki, รุ่น JP7100p, Tokyo, Japan) โดยระบบ CIELAB จะวัดสีในเทอมของตัวแปร L^* , a^* , b^* และคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงของสีรวมตามสมการที่ (3.1)

$$\Delta E^* = \left[(L_0^* - L_f^*)^2 + (a_0^* - a_f^*)^2 + (b_0^* - b_f^*)^2 \right]^{1/2} \quad (3.1)$$

เมื่อ L_0^* , a_0^* และ b_0^* คือ ค่าความสว่าง, สีแดง และสีเหลือง ที่สภาวะเริ่มต้นตามลำดับ

L_f^* , a_f^* และ b_f^* คือ ค่าความสว่าง, สีแดง และสีเหลือง ที่สภาวะสุดท้ายตามลำดับ

ΔE^* คือ การเปลี่ยนแปลงสีรวม

(3) การหดตัว (Shrinkage)

ร้อยละการหดตัวของถุงจะมาจากการวัดขนาดถุงทั้งก่อนและหลังการทำให้แห้งด้วยเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ ความละเอียด ± 0.05 mm แล้วนำมาคำนวณตามสมการที่ (3.2)

$$\% \text{Shrinkage} = \frac{D_{\text{initial}} - D_{\text{final}}}{D_{\text{initial}}} \times 100 \quad (3.2)$$

เมื่อ $D_{initial}$ และ D_{final} คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเรขาคณิตเฉลี่ยของกึ่งที่วัดได้ก่อนและหลังการทำแห้ง ตามลำดับ

(4) การคืนตัว (Rehydration)

ร้อยละการคืนตัวของกึ่งแห้ง ทำได้โดยนำกึ่งแห้งไปแช่น้ำเดือดที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลานาน 10 นาที สะเด็ดน้ำออกจากตัวกึ่ง วัดขนาดกึ่งก่อนและหลังแช่น้ำเดือด ด้วยเวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์ ความละเอียด $\pm 0.05\text{ mm}$ แล้วนำมาคำนวณตามสมการที่ (3.3)

$$\% \text{Rehydration} = \frac{D_{\text{after}} - D_{\text{before}}}{D_{\text{before}}} \times 100 \quad (3.3)$$

เมื่อ D_{before} และ D_{after} คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเรขาคณิตเฉลี่ยของกึ่งที่วัดได้ก่อนและหลังนำกึ่งไปแช่น้ำเดือด ตามลำดับ

(5) การหาค่าวอเตอร์แอกติวิตี (water activity, a_w) ดังแสดงในภาคผนวก ค 1.3

(6) ลักษณะเนื้อสัมผัส ดังแสดงในภาคผนวก ค 1.4

ใช้เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (TA-XT2i plus, Stable Micro System, UK) เพื่อประเมินลักษณะเนื้อสัมผัสของกึ่งแห้งที่มีความชื้นประมาณ 20-25% (d.b.) และใช้หัวทดสอบชนิด Warner Bratzler Meat Shear Compression ที่ crosshead speed เท่ากับ 13.5 mm/s และบันทึกค่าแรงเฉือนสูงสุด (maximum shear force) ในการทดลองจะทำการวัดกึ่งแต่ละตัวที่ 3 ตำแหน่ง (ใกล้หัวกลางลำตัว และหาง) ทดลองอย่างน้อย 5 ซ้ำ

3.6.2 คุณภาพทางเคมี

(1) ปริมาณโปรตีน (AOAC, 1990) ดังแสดงในภาคผนวก ค 2.1

(2) ค่า Thiobarbituric acid-reactive substance (TBARS) (Buege and Aust, 1978) ดังแสดงในภาคผนวก ค 2.2

3.6.3 คุณภาพทางจุลินทรีย์

(1) จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด โดยวิธี Total viable count แบบ pour plate (BAM 2001) ดังแสดงในภาคผนวก ค 3.1

(2) จำนวนยีสต์และรา (BAM 2001) ดังแสดงในภาคผนวก ค 3.2

3.6.4 การทดสอบลักษณะทางประสาทสัมผัส (Sensory evaluation)

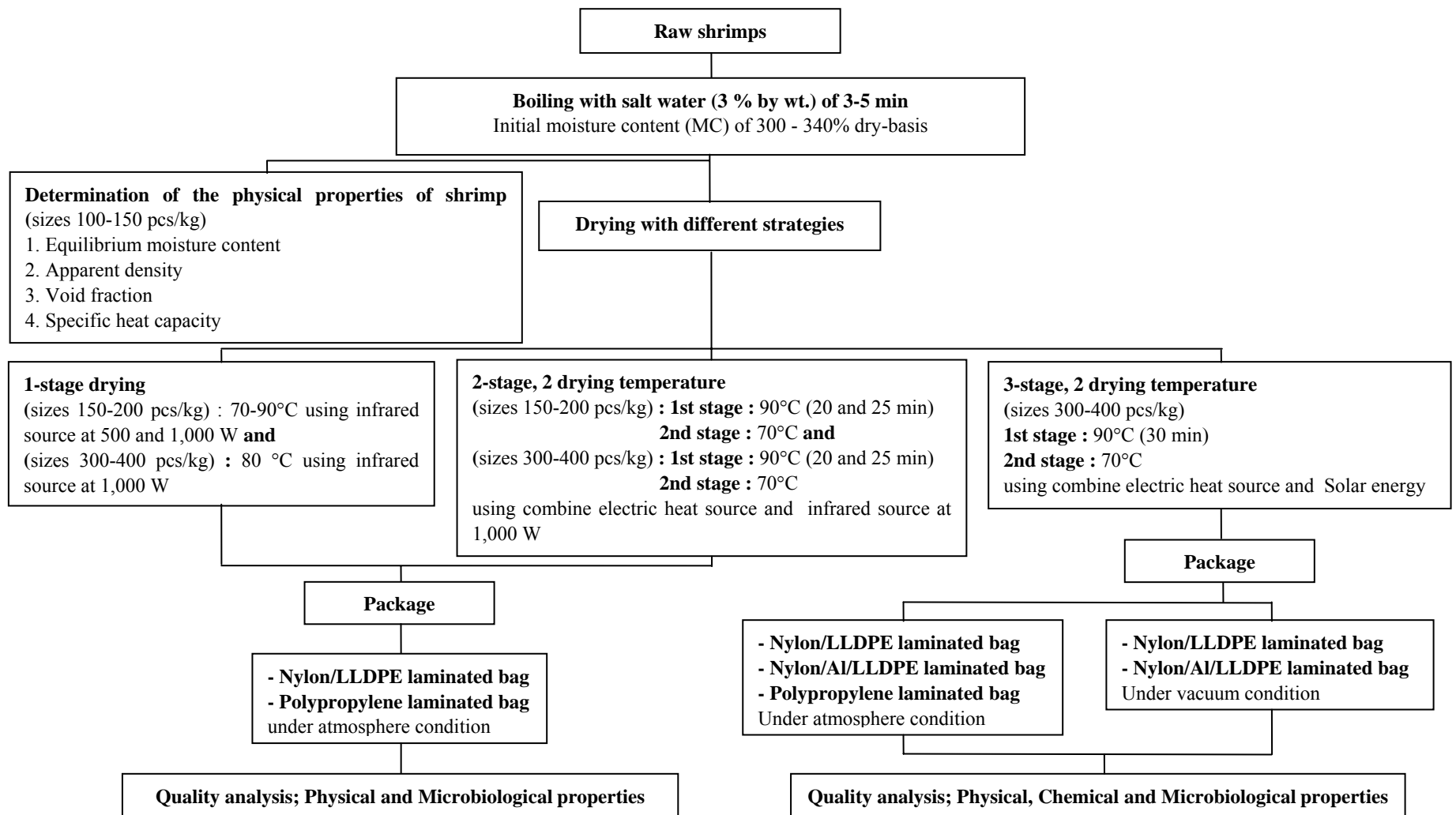
ทำการทดสอบทางด้านประสาทสัมผัสโดยใช้วิธี มผช. โดยการนำกุ้งที่ได้มาทดสอบทางด้านประสาทสัมผัสซึ่งพิจารณาลักษณะของกุ้งแห้ง ลักษณะเนื้อเยื่อของกุ้งแห้ง กลิ่นของกุ้งแห้ง รสเค็มของกุ้ง และความชอบรวม โดยใช้ผู้ชิม 20-30 คน ทำแบบสอบถามและกรอกคะแนน ดังแสดงในภาคผนวก ค 4

ในการประเมินคำตอบ กำหนดคะแนนในการตอบคำถาม 5 ระดับ คือ

| | |
|------------|---------|
| ชอบมาก | 5 คะแนน |
| มาก | 4 คะแนน |
| ปานกลาง | 3 คะแนน |
| น้อย | 2 คะแนน |
| น้อยที่สุด | 1 คะแนน |

สำหรับคำถามที่มีเนื้อหาในเชิงนิเสธหรือในเชิงลบ (Negative) การคิดคะแนนในแต่ละข้อจะกลับกันกับวิธีการคิดคะแนนข้างต้น

ผลการทดลองที่ได้จะนำมาวิเคราะห์โดยอาศัยหลักวิชาการทางสถิติของคุณภาพทางกายภาพ เคมี จุลชีววิทยา และทางด้านประสาทสัมผัส โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ด้วยโปรแกรม คอมพิวเตอร์สำเร็จรูป SPSS 11.5 และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างชุดการทดลองโดยวิธี DMRT (Duncan's New Multiple Range Test) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 หลังจากนั้นจะทำการสรุปผลทดลองและผลการวิเคราะห์ทางสถิติ



ภาพประกอบ 3.3 แผนผังกระบวนการอบแห้งกุ้งและการวิเคราะห์คุณภาพ

ตาราง 3.1 สัญลักษณ์อักษรย่อแทนด้วยแหล่งพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งรูปแบบต่าง ๆ

| สัญลักษณ์/อักษรย่อ | ความหมาย |
|-----------------------------------|--|
| IR 500 W | การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 500 W |
| IR 1,000 W | การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 1,000 W |
| HA+IR 1,000 W 90°C (20 min), 70°C | การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด 1,000 W อุณหภูมิสูง 90°C นาน 20 นาที แล้วลดอุณหภูมิเป็น 70°C จนได้ความชื้นสุดท้ายประมาณ 20-25 % dry-basis |
| HA+IR 1,000 W 90°C (25 min), 70°C | การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด 1,000 W อุณหภูมิสูง 90°C นาน 25 นาที แล้วลดอุณหภูมิเป็น 70°C จนได้ความชื้นสุดท้ายประมาณ 20-25 % dry-basis |
| HA+IR 1,000 W 90°C (30 min), 70°C | การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด 1,000 W อุณหภูมิสูง 90°C นาน 30 นาที แล้วลดอุณหภูมิเป็น 70°C จนได้ความชื้นสุดท้ายประมาณ 20-25 % dry-basis |
| HA+Solar 90°C (30 min), 70°C | การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับแสงอาทิตย์ อุณหภูมิสูง 90°C นาน 30 นาที แล้วลดอุณหภูมิเป็น 70°C จนได้ความชื้นสุดท้ายประมาณ 20-25 % dry-basis |

บทที่ 4

ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้สามารถแยกวิเคราะห์และวิจารณ์ผลการทดลองออกเป็น

1. ศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางความร้อนของกึ่งแข็ง ได้แก่ ความชื้นสมดุล ความหนาแน่นปรากฏ ความร้อนจำเพาะ สัดส่วนช่องว่างของอากาศ และการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
2. ศึกษาการอบแห้งกึ่งด้วยรังสีอินฟราเรดและการอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมด้วยรูปแบบต่าง ๆ
3. ศึกษาคุณภาพของกึ่งแห้งที่ผ่านกระบวนการในข้อ 2 ทางด้านกายภาพ ทางเคมี ทางจุลชีววิทยา และทางด้านประสาทสัมผัส
4. ศึกษาชนิดของวัสดุบรรจุภัณฑ์และเทคนิคการบรรจุต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพ การเก็บรักษา กึ่งแห้ง

4.1 ผลการทดลองหาค่าสมบัติทางกายภาพและทางความร้อนของกึ่งแห้ง

ค่าสมบัติทางความร้อนและพารามิเตอร์พื้นฐานต่าง ๆ ที่สำคัญของกึ่งต้มขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม ได้แก่ ความชื้นสมดุล ความหนาแน่นปรากฏ ความร้อนจำเพาะ และร้อยละช่องว่างของอากาศ ผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังนี้

4.1.1 ความชื้นสมดุลของกึ่งแห้ง

ผลการทดลองหาความชื้นสมดุลของกึ่งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม แบบคายความชื้น (desorption) ที่อุณหภูมิ 40-55°C โดยใช้สารละลายเกลืออิ่มตัวควบคุมค่าความชื้นสัมพัทธ์ในช่วง 0.10-0.90 และใช้ตู้อบเป็นอุปกรณ์ในการควบคุมอุณหภูมิ โดยทำการคัดเลือกรูปแบบสมการความชื้นสมดุลของ Chung & Pfof (1967) Henderson (1952) Halsey (1948) และ Oswin (1946) จากผลการทดลองหาค่าความชื้นสมดุลของกึ่ง และพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (สมชาติ, 2540) โดยทำการวิเคราะห์สมการถดถอยด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด สามารถหาค่าคงตัวของสมการความชื้นสมดุลแบบต่าง ๆ ดังตาราง 4.1 และเมื่อนำค่าคงตัวแทนกลับเข้าไป

ในสมการ แล้วนำไปเขียนกราฟเปรียบเทียบกับผลการทดลองซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ และความชื้นสมมูล แสดงดังภาพประกอบ 4.1

ตาราง 4.1 ค่าคงตัวของรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ของความชื้นสมมูลของกุ้งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม

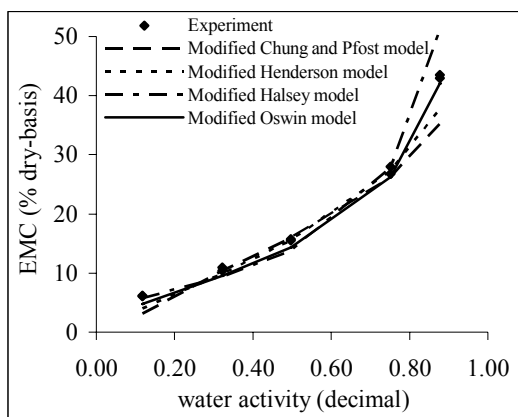
| Model name | A | B | R ² | RMSE |
|--|------------------------|--------|----------------|-------|
| Modified Chung & Pfof (1967) $M_{eq} = \ln \left[\frac{\ln a_w}{-A_1/RT_{abs}} \right] \frac{1}{-B_1}$ | 7,345.911 | 0.088 | 0.971 | 2.963 |
| Modified Henderson (1952) $M_{eq} = \left[\frac{\ln(1-a_w)}{-A_2 T} \right]^{1/B_2}$ | 6.847x10 ⁻⁵ | 1.264 | 0.980 | 2.059 |
| Modified Halsey (1948) $M_{eq} = \left[\frac{\ln a_w}{-A_3/RT_{abs}} \right]^{1/B_3}$ | 52,712.939 | -1.283 | 0.982 | 2.936 |
| Modified Oswin (1946) $M_{eq} = A_4 \left[\frac{a_w}{1-a_w} \right]^{B_4}$ | 14.342 | 0.545 | 0.993 | 1.047 |

A₁₋₄ และ B₁₋₄ คือ ค่าคงตัว; Meq คือ ค่าความชื้นสมมูล (เศษส่วนdry-basis); R คือ ค่าคงที่ของก๊าซเท่ากับ 8.314 kJ/kmol-K; RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (เศษส่วน); T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

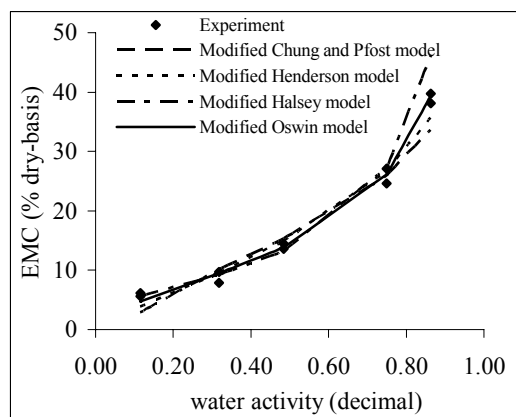
$$RMSE = \text{Root Mean Square Error} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\text{Data}_{\text{predicted}, i} - \text{Data}_{\text{experiment}, i})^2}{N}}$$

จากตาราง 4.1 ค่าความชื้นสมมูลของกุ้ง จากการศึกษาเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R²) พบว่า รูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Modified Oswin (1946) สามารถอธิบายผลการทดลองได้ดีที่สุด โดยมีค่า R² เท่ากับ 0.993 และมีค่า RMSE เท่ากับ 1.047 ซึ่งมีค่าน้อยที่สุด และเมื่อนำค่าคงตัวแทนกลับเข้าไปในสมการ แล้วนำไปเขียนกราฟเปรียบเทียบกับผลการทดลองซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างวอเตอร์แอกติวิตี้กับความชื้นสมมูลที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังภาพประกอบ 4.1 การจะเข้าสู่สมการความชื้นกับอากาศแวดล้อมรอบ ๆ ตัว ที่ความชื้นสัมพัทธ์หนึ่ง ๆ ย่อมมีความแตกต่างกันเช่นเดียวกันกับในกรณีของการอบแห้งมักจะเกี่ยวข้องกับการคายความชื้นเป็นส่วนใหญ่ เมื่อทำการอบแห้งวัสดุโดยใช้อากาศที่สภาวะอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์คงตัว ความชื้นของวัสดุจะลดต่ำลงจนถึงจุด ๆ หนึ่งซึ่งไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะที่ความชื้นในวัสดุมีความดันไอน้ำเท่ากับความดันไอน้ำของอากาศรอบ

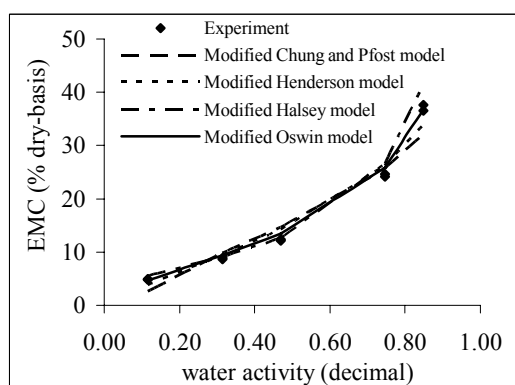
ๆ และอุณหภูมิของวัสดุก็เท่ากับอุณหภูมิของอากาศรอบ ๆ ด้วย ความชื้นที่ลดลงเกิดจากการระเหยของน้ำที่ได้รับความร้อนจากตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้ง



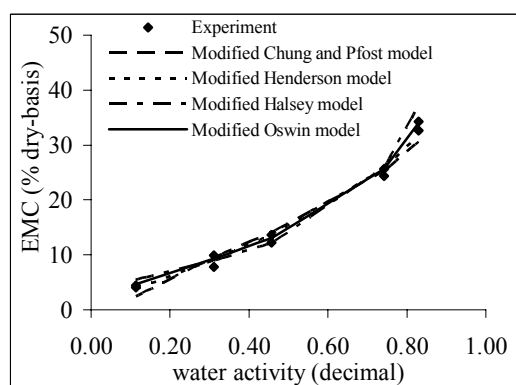
(ก) 40°C



(ข) 45°C



(ค) 50°C



(ง) 55°C

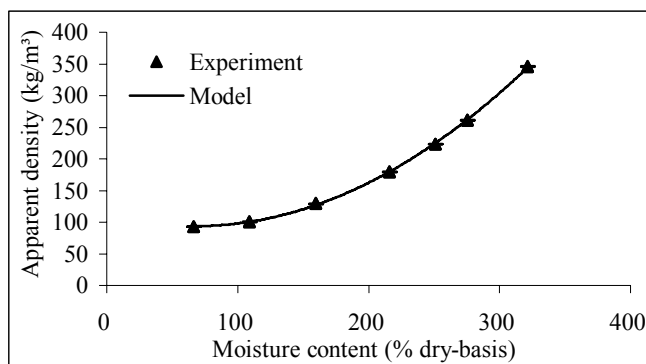
ภาพประกอบ 4.1 เปรียบเทียบความชื้นสมดุลกับค่าแอมเตอร์แอกติวิตี้ของผลการทดลองและผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกุ้งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม

4.1.2 ความหนาแน่นปรากฏ

ผลการทดลองหาค่าความหนาแน่นปรากฏและวิเคราะห์สมการถดถอยโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดของกุ้งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม พบว่าความหนาแน่นปรากฏมีความสัมพันธ์กับความชื้นของกุ้งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัมในรูปแบบสมการโพลิโนเมียล ดังสมการ (4.1) และภาพประกอบ 4.2 ความชื้นเริ่มต้นอยู่ในช่วง 62.1-321.3% dry-basis

$$\rho = 0.0039M^2 + 0.5212M + 111.31 \quad R^2 = 0.999 \quad RMSE = 1.814 \quad (4.1)$$

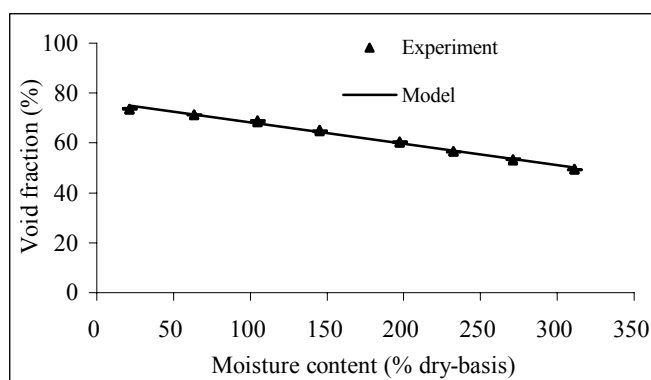
เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นปรากฏของกึ่ง, kg/m^3
 M คือ ความชื้นของกึ่ง, % dry-basis



ภาพประกอบ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นปรากฏกับความชื้นเริ่มต้นของกึ่งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม

4.1.3 ร้อยละช่องว่างของอากาศ

ผลการทดลองหาค่าร้อยละช่องว่างของอากาศของกึ่งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม พบว่า ค่าร้อยละช่องว่างของอากาศมีความสัมพันธ์กับความชื้นของกึ่งในรูปแบบสมการเชิงเส้น โดยมีค่าร้อยละช่องว่างอากาศลดลงเมื่อความชื้นของกึ่งเพิ่มขึ้น และจากการวิเคราะห์สมการถดถอยโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดเมื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละช่องว่างของอากาศกับความชื้น จะได้เป็นรูปแบบสมการเชิงเส้น ดังสมการ (4.2) และภาพประกอบ 4.3 ความชื้นเริ่มต้นอยู่ในช่วง 21.1-316.7% dry-basis



ภาพประกอบ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละช่องว่างอากาศกับความชื้นเริ่มต้นของกึ่งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม

$$E = 78.591 - 0.0936M \quad R^2 = 0.998 \quad \text{RMSE} = 0.261 \quad (4.2)$$

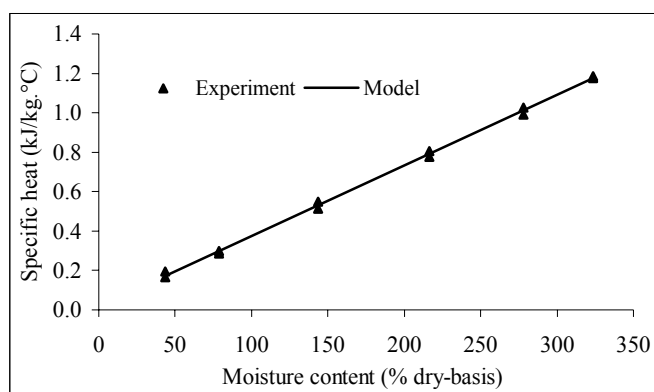
เมื่อ E คือ ร้อยละช่องว่างของอากาศของกึ่ง
 M คือ ความชื้นของกึ่ง, % dry-basis

4.1.4 ค่าความร้อนจำเพาะ

นำตัวอย่างกึ่งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม มาทดสอบโดยใช้แคลอริมิเตอร์ คำนวณค่าความร้อนจำเพาะ พบว่า เมื่อความชื้นของกึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นค่าความร้อนจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้น ในลักษณะเชิงเส้น และจากการวิเคราะห์สมการถดถอยโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดเมื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนจำเพาะกับความชื้น จะได้เป็นรูปแบบสมการเชิงเส้นดังสมการ (4.3) และภาพประกอบ 4.4 ความชื้นเริ่มต้นอยู่ในช่วง 29.8-331.2% dry-basis

$$c_p = 0.0036M + 0.0176 \quad R^2 = 0.998 \quad \text{RMSE} = 0.015 \quad (4.3)$$

เมื่อ c_p คือ ความร้อนจำเพาะของกึ่ง, kJ/kg^oC
 M คือ ความชื้นของกึ่ง, % dry-basis



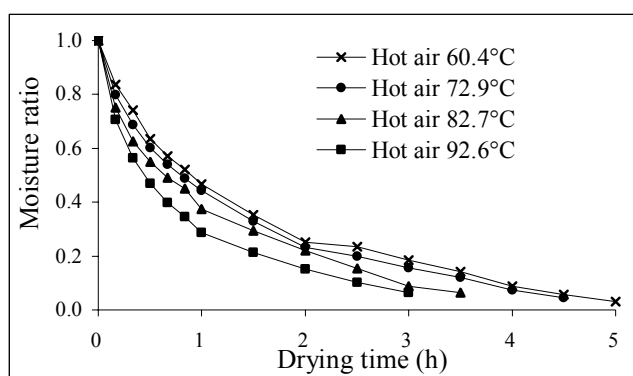
ภาพประกอบ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนจำเพาะกับความชื้นของกึ่งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม

ซึ่งสมการค่าความร้อนจำเพาะนี้ สามารถช่วยให้ทราบถึงความสามารถในการจุความร้อนของกึ่งที่ค่าความชื้นต่าง ๆ และมีประโยชน์ต่อการวิเคราะห์ถึงกระบวนการถ่ายโอนความร้อนให้กึ่ง

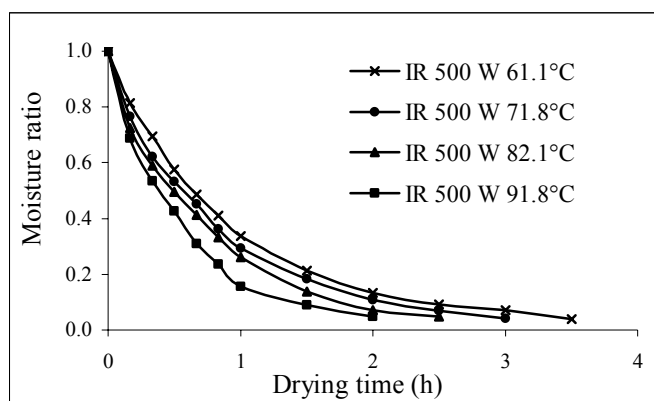
4.2 จลนพลศาสตร์และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งกึ่งแบบชั้นบางด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรดกำลัง 500 W

4.2.1 จลนพลศาสตร์ของการอบแห้งชั้นบาง

จลนพลศาสตร์ของการอบแห้งชั้นบางเมื่อใช้กึ่งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม ความชื้นเริ่มต้นของกึ่งอยู่ในช่วง 300-330% dry-basis โดยใช้ลมร้อน อุณหภูมิอบแห้ง 60-93°C ความเร็วลม 0.5±0.2 เมตร/วินาที และการอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรดที่กำลังของอินฟราเรด 500 W อุณหภูมิอบแห้ง 61-92°C แสดงดังภาพประกอบ 4.5 และ 4.6 พบว่า เมื่ออุณหภูมิอบแห้งเพิ่มขึ้นระยะเวลาในการอบแห้งลดลงโดยการอบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรด 500 W พบว่าการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนจะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งมากกว่าการอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรด โดยรังสีอินฟราเรดสามารถอบแห้งได้เร็วกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเท่ากับ 40%



ภาพประกอบ 4.5 ผลการทดลองอบแห้งชั้นบางของกึ่งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม ด้วยลมร้อน ช่วงอุณหภูมิลมร้อน 60-93°C ที่ความเร็วลม 0.5±0.2 เมตร/นาที่ ความชื้นเริ่มต้น 300-320% dry-basis



ภาพประกอบ 4.6 ผลการทดลองอบแห้งชั้นบางของกุ้งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม ด้วยรังสีอินฟราเรดกำลัง 500 W อุณหภูมิอบแห้ง 61-92°C ความชื้นเริ่มต้น 325-330% dry-basis

4.2.2 สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งชั้นบาง

4.2.2.1 สมการเอมพิริคัล

จากการทดลองอบแห้งกุ้งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม ความชื้นเริ่มต้นของกุ้งอยู่ในช่วง 300-330% dry-basis โดยใช้ลมร้อน อุณหภูมิอบแห้ง 60-93°C ความเร็วลม 0.5±0.2 เมตร/วินาที และการอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรดที่กำลังของอินฟราเรด 500 W อุณหภูมิอบแห้ง 61-92°C เมื่อนำข้อมูลการอบแห้งมาคำนวณหาอัตราส่วนความชื้นสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา โดยได้เปรียบเทียบผลการทดลองกับสมการทางคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัล 4 สมการ คือ สมการ Handerson and Pabis (1961) สมการ Newton (1985) สมการ Page (1949) และสมการ Logarithmic โดยมีรูปแบบสมการดังตาราง 4.2 และ 4.3

จากตาราง 4.2 และ 4.3 สมการของการอบแห้งสามารถเขียนได้ในรูปแบบฟังก์ชันการลดลงแบบเอกซ์โปเนนเชียลกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง เมื่อนำค่าคงตัวของสมการแทนกลับในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แสดงดังตาราง 4.2 และ 4.3 แล้วนำมาเขียนกราฟเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและผลจากแบบจำลองได้ผลดังภาพประกอบ 4.7 และ 4.8 สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 500 W ตามลำดับ

ตาราง 4.2 รูปแบบสมการเอมพิริคัลและค่าคงตัวของกุ้งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม อบแห้งด้วยลมร้อน อุณหภูมิอบแห้ง 60-93°C ความเร็วลม 0.5±0.2 เมตร/วินาที ความชื้นเริ่มต้น 300-320% dry-basis

| Model | Constant | R ² | RMSE |
|---|--|----------------|-------|
| Handerson and Pabis (1961) MR = a exp(-k ₁ t) | k ₁ = 1.88x10 ⁻⁵ exp(0.019T) a = 0.915 | 0.977 | 0.044 |
| Newton (1985) MR = exp(-k ₂ t) | k ₂ = 6.28x10 ⁻⁴ T ² -0.420T+70.918 | 0.963 | 0.053 |
| Page (1949) MR = exp(-k ₃ t ⁿ) | k ₃ = 3.82x10 ⁻⁴ T ² -0.253T+42.682 n = -2.46x10 ⁻³ T+1.594 | 0.998 | 0.010 |
| Logarithmic MR = b exp(-k ₄ t)+c | k ₄ = 2.41x10 ⁻⁵ exp(0.019T) b = 0.871, c = 0.077 | 0.985 | 0.031 |

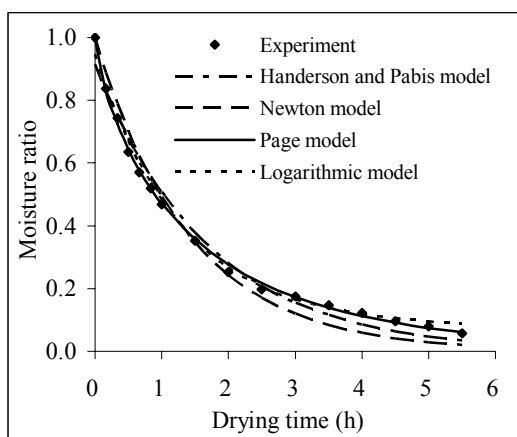
MR คือ อัตราส่วนความชื้น (decimal), t คือ เวลาในการอบแห้ง (min), T คือ อุณหภูมิ (K); a, b และ c คือ ค่าคงตัว

ตาราง 4.3 รูปแบบสมการเอมพิริคัลและค่าคงตัวของกุ้งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดกำลัง 500 W อุณหภูมิอบแห้ง 61-92°C ความชื้นเริ่มต้น 325-330% dry-basis

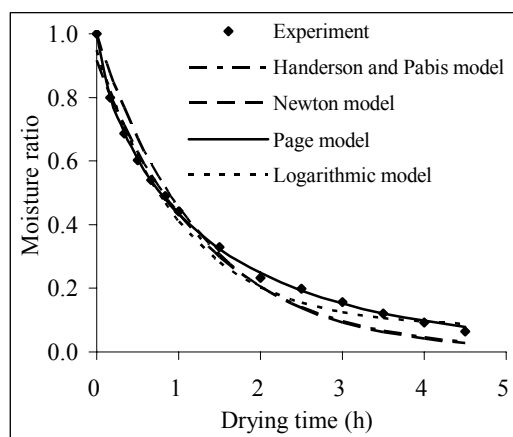
| Model | Constant | R ² | RMSE |
|---|---|----------------|-------|
| Handerson and Pabis (1956) MR = a exp(-k ₁ t) | k ₁ = 2.82x10 ⁻³ exp(0.017T) a = 0.946 | 0.988 | 0.031 |
| Newton (1985) MR = exp(-k ₂ t) | k ₂ = 2.41x10 ⁻⁴ T ² -0.146T+22.780 | 0.983 | 0.035 |
| Page (1949) MR = exp(-k ₃ t ⁿ) | k ₃ = 1.77x10 ⁻⁴ T ² -0.105T+16.518 n = 0.799 | 0.998 | 0.014 |
| Logarithmic MR = b exp(-k ₄ t)+c | k ₄ = 3.56x10 ⁻³ exp(0.017T) b = 0.903, c = 0.065 | 0.994 | 0.022 |

MR คือ อัตราส่วนความชื้น (decimal), t คือ เวลาในการอบแห้ง (min), T คือ อุณหภูมิ (K); a, b และ c คือ ค่าคงตัว

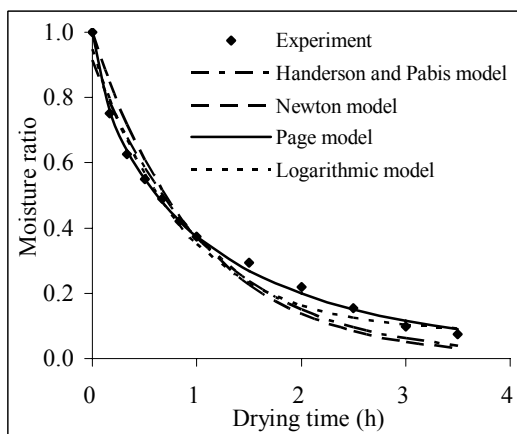
เมื่อพิจารณาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งชั้นบางของกุ้งด้วยลมร้อน สมการในรูปแบบจำลองของ Page อธิบายผลการทดลองได้ดีที่สุด มีค่า R^2 และ ค่า RMSE เท่ากับ 0.998 และ 0.010 ตามลำดับ และการอบแห้งชั้นบางของกุ้งคัมด้วยรังสีอินฟราเรดกำลัง 500 W สมการในรูปแบบจำลองของ Page อธิบายผลการทดลองได้ดีที่สุด มีค่า R^2 และ ค่า RMSE เท่ากับ 0.998 และ 0.014 ตามลำดับเช่นเดียวกัน โดยที่ค่าคงที่ของสมการอบแห้งเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ



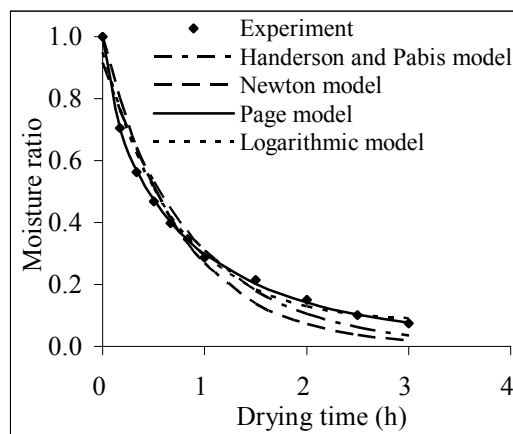
(ก) Hot air 60.4°C



(ข) Hot air 72.9°C

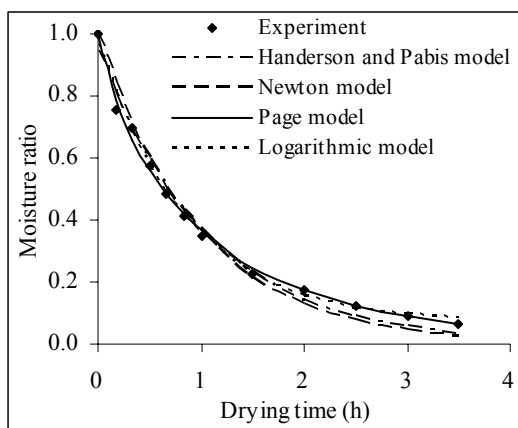


(ค) Hot air 82.7°C

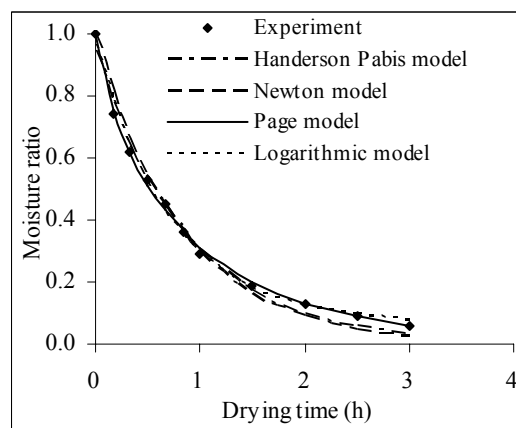


(ง) Hot air 92.6°C

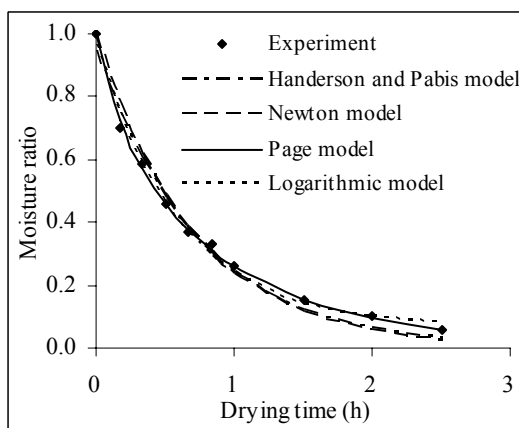
ภาพประกอบ 4.7 อัตราส่วนความชื้นจากผลการทดลอง เปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัลของกุ้งอบแห้งด้วยลมร้อน อุณหภูมิ 60-93°C ความเร็วลม 0.5±0.2 เมตร/วินาที ความชื้นเริ่มต้น 300-320% dry-basis



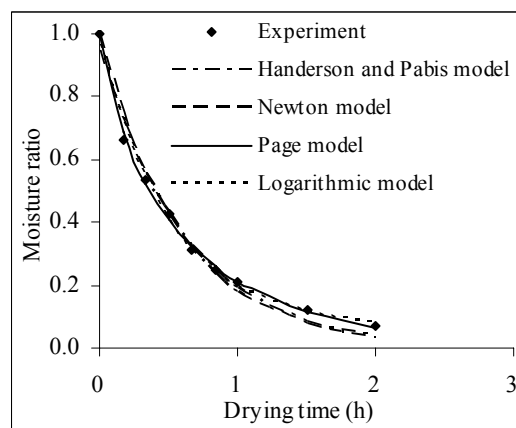
(ก) IR 500 W 61.8°C



(ข) IR 500 W 71.8°C



(ค) IR 500 W 82.1°C



(ง) IR 500 W 91.8°C

ภาพประกอบ 4.8 อัตราส่วนความชื้นจากผลการทดลอง เปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัลของกึ่งอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดกำลัง 500 W อุณหภูมิอบแห้ง 61-92°C ความชื้นเริ่มต้น 325-330% dry-basis

4.2.1.2 สมการอบแห้งกึ่งทฤษฎี

จากการทดลองอบแห้งกึ่งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม ความชื้นเริ่มต้นของกึ่งอยู่ในช่วง 300-330% dry-basis โดยใช้ลมร้อน อุณหภูมิอบแห้ง 60-93°C ความเร็วลม 0.5±0.2 เมตร/วินาที และการอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรดที่กึ่งของอินฟราเรด 500 W อุณหภูมิอบแห้ง 61-92°C จากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของกึ่งภายหลังการอบแห้ง โดยได้เปรียบเทียบผลการทดลองกับสมการอบแห้งกึ่งทฤษฎี 2 สมการ โดยพิจารณาให้กึ่งมีรูปทรงเป็นทรงกลมและทรงกระบอกสั้น โดยมีรูปแบบดังสมการ (2.7) และ (2.9) ในการคำนวณใช้รัศมีที่มี

ปริมาตรเทียบเท่ากึ่งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม เท่ากับ 0.00815 m รัศมีของทรงกระบอกของกึ่ง เท่ากับ 0.00455 m ความยาวของกึ่งเท่ากับ 0.0520 m เมื่อวิเคราะห์สมการถดถอยเพื่อหา ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นกับอุณหภูมิของลมร้อนและรังสีอินฟราเรด ที่กำลัง 500 W ในการอบแห้ง โดยแทนค่าข้อมูลการทดลองลงไปในสมการของกึ่งจะได้ผลแสดง ดังสมการที่ 4.4-4.7 และดังตาราง 4.4 พบว่า สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของการอบแห้งชั้นบาง ด้วยรังสีอินฟราเรดมีค่าสูงกว่าการอบแห้งชั้นบางด้วยลมร้อน สมการอัตราการอบแห้งชั้นบางกึ่ง ทฤษฎีนี้ เมื่อนำไปใช้ในการทำนายผลการทดลองสามารถทำนายผลการทดลองได้ดีพอสมควร

Hot Air (sphere)

$$D = 6.63 \times 10^{-3} \exp\left(\frac{-22,143.59}{RT}\right) \quad R^2 = 0.931 \quad \text{RMSE} = 0.032 \quad (4.4)$$

Hot Air (finite cylinder)

$$D = 3.54 \times 10^{-3} \exp\left(\frac{-22,148.50}{RT}\right) \quad R^2 = 0.930 \quad \text{RMSE} = 0.036 \quad (4.5)$$

Infrared 500 W (sphere)

$$D = 5.23 \times 10^{-3} \exp\left(\frac{-20,183.33}{RT}\right) \quad R^2 = 0.978 \quad \text{RMSE} = 0.037 \quad (4.6)$$

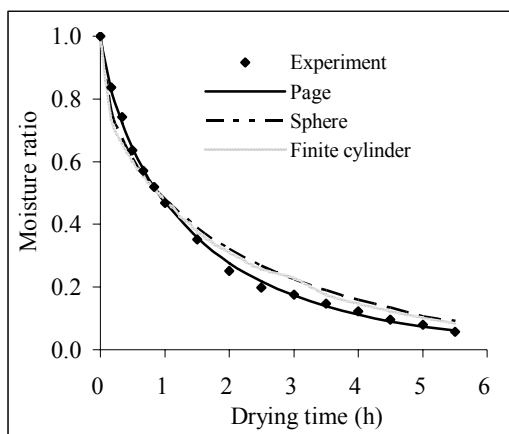
Infrared 500 W (finite cylinder)

$$D = 4.21 \times 10^{-3} \exp\left(\frac{-19,746.97}{RT}\right) \quad R^2 = 0.968 \quad \text{RMSE} = 0.043 \quad (4.7)$$

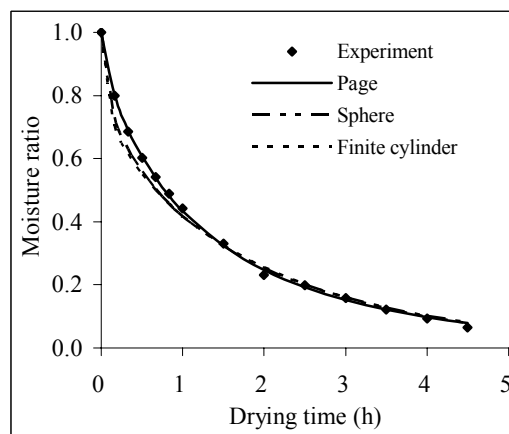
ตาราง 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นกึ่งขนาด 150-200 ต่อต่อกิโลกรัม อบแห้งด้วยด้วยลม ร้อนและรังสีอินฟราเรดกำลัง 500 W โดยพิจารณาให้กึ่งมีรูปทรงเป็นทรงกลม เปรียบเทียบกับรูปทรงกระบอกสั้น

| Hot Air | | | | | Infrared 500 W | | | | |
|-----------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|
| Temp. (K) | Sphere | | Finite cylinder | | Temp. (K) | Sphere | | Finite cylinder | |
| | Exp. (m ² /h) | Model (m ² /h) | Exp. (m ² /h) | Model (m ² /h) | | Exp. (m ² /h) | Model (m ² /h) | Exp. (m ² /h) | Model (m ² /h) |
| 333.54 | 2.51x10 ⁻⁶ | 2.26x10 ⁻⁶ | 1.34x10 ⁻⁶ | 1.20x10 ⁻⁶ | 334.58 | 3.65x10 ⁻⁶ | 3.69x10 ⁻⁶ | 3.40x10 ⁻⁶ | 3.48x10 ⁻⁶ |
| 346.05 | 2.85x10 ⁻⁶ | 3.01x10 ⁻⁶ | 1.52x10 ⁻⁶ | 1.61x10 ⁻⁶ | 344.94 | 4.44x10 ⁻⁶ | 4.59x10 ⁻⁶ | 4.14x10 ⁻⁶ | 4.30x10 ⁻⁶ |
| 355.85 | 3.45x10 ⁻⁶ | 3.72x10 ⁻⁶ | 1.84x10 ⁻⁶ | 1.98x10 ⁻⁶ | 355.23 | 5.33x10 ⁻⁶ | 5.63x10 ⁻⁶ | 4.97x10 ⁻⁶ | 5.25x10 ⁻⁶ |
| 365.75 | 4.76x10 ⁻⁶ | 4.56x10 ⁻⁶ | 2.54x10 ⁻⁶ | 2.43x10 ⁻⁶ | 364.97 | 6.54x10 ⁻⁶ | 6.76x10 ⁻⁶ | 6.11x10 ⁻⁶ | 6.28x10 ⁻⁶ |

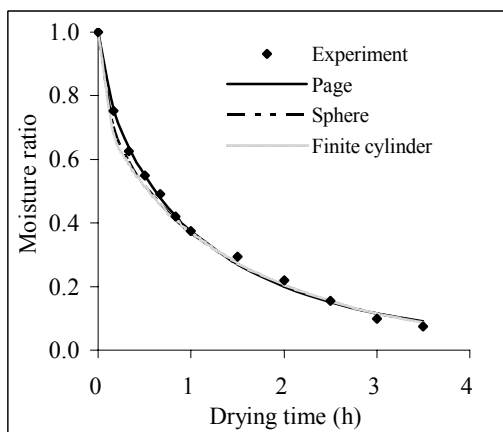
จากผลการทดลองสรุปได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นขึ้นกับอุณหภูมิอบแห้ง พบว่า เมื่ออุณหภูมิลมร้อนและรังสีอินฟราเรดของการอบแห้งเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมีค่าสูงขึ้นซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่ผ่านมา (สมชาติ, 2540; Tirawanichakul *et al.*, 2004; Tirawanichakul and Tirawanichakul, 2008) อธิบายได้ว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลทำให้ความดันไอกายในและภายนอกชั้นวัสดุแตกต่างกันหรือเกิดการเคลื่อนที่ของอุณหภูมิมากขึ้นทำให้น้ำเคลื่อนที่จากภายในมาสู่ผิวภายนอกได้เร็วขึ้น



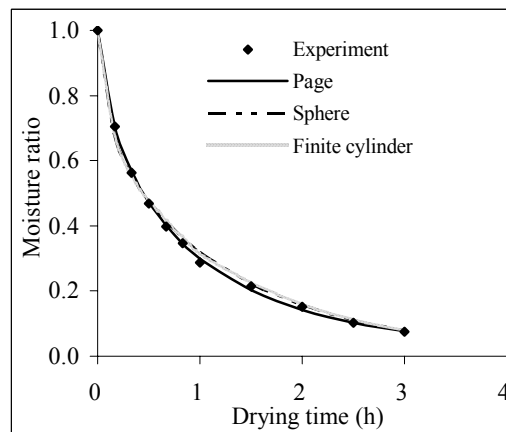
(ก) Hot air 60.4°C



(ข) Hot air 72.9°C

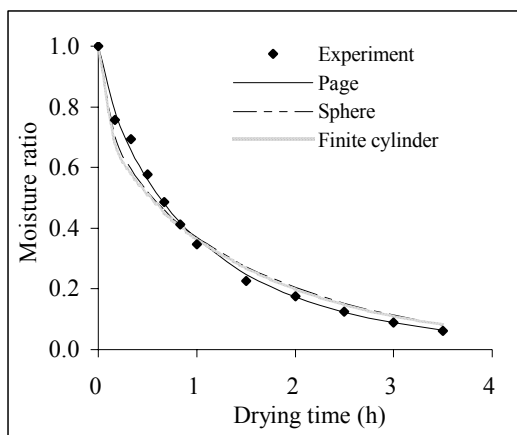


(ค) Hot air 82.7°C

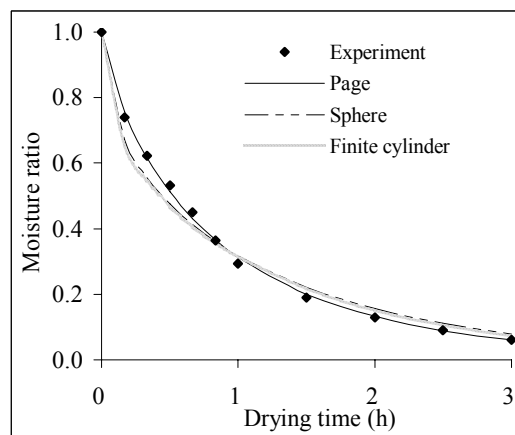


(ง) Hot air 92.6°C

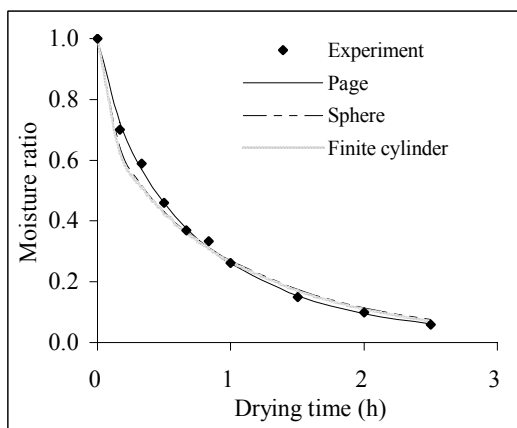
ภาพประกอบ 4.9 อัตราส่วนความชื้นผลจากการทดลองเปรียบเทียบกับแบบจำลองอบแห้ง ใช้รูปแบบสมการเอมพิริคัลและสมการกึ่งทฤษฎี อบแห้งด้วยลมร้อน อุณหภูมิ 60-93°C ความเร็วลม 0.5±0.2 เมตร/วินาที ความชื้นเริ่มต้น 300-320% dry-basis



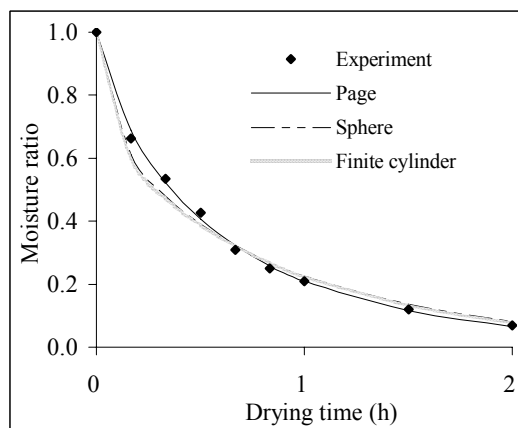
(ก) IR 500 W 61.8°C



(ข) IR 500 W 71.8°C



(ค) IR 500 W 82.1°C



(ง) IR 500 W 91.8°C

ภาพประกอบ 4.10 อัตราส่วนความชื้นผลจากการทดลองเปรียบเทียบกับแบบจำลองออบแห้ง ใช้รูปแบบสมการเอมพิริคัลและสมการกึ่งทฤษฎี ออบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดกำลัง 500 W อุณหภูมิอบแห้ง 61-92°C ความชื้นเริ่มต้น 325-330% dry-basis

หากพิจารณารูปทรงของกึ่งให้มีลักษณะเป็นทรงกลมเปรียบเทียบกับทรงกระบอกสั้น พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของกึ่งรูปทรงเป็นทรงกลมสามารถอธิบายผลการทดลองได้ดีกว่ารูปทรงกระบอกสั้น โดยพิจารณาจากค่า R^2 และค่า RMSE

เมื่อนำค่าคงตัวของรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัล (Page) และรูปแบบสมการออบแห้งกึ่งทฤษฎีจากการทดลองแทนข้อมูลลงไปในสมการของกึ่งจะได้ผลแสดงดังภาพประกอบ 4.9 และ 4.10 แสดงผลการคำนวณอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งชั้นบางของกึ่ง

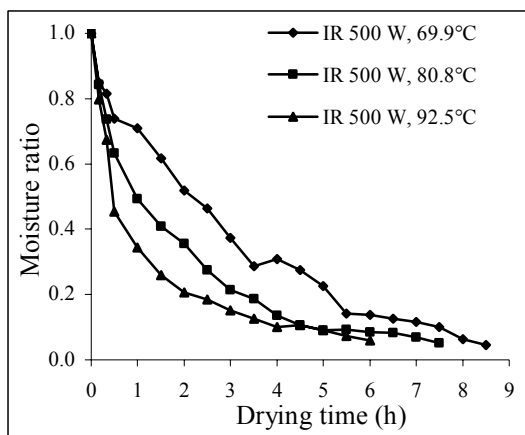
เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากสมการเอมพิริคัลและสมการกึ่งทฤษฎี พบว่า ทั้งกรณีการอบแห้งด้วยลมร้อนและอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดกำลัง 500 W ผลการทำนายเมื่อใช้รูปแบบสมการเอมพิริคัล (Page) สามารถทำนายผลการทดลองได้ใกล้เคียงมากกว่าเมื่อเทียบกับผลที่ได้จากรูปแบบสมการกึ่งทฤษฎี (รูปทรงเป็นทรงกลมและรูปทรงกระบอกสั้น)

4.3 ผลการทดลองหาจลนพลศาสตร์การอบแห้งของกุ้ง

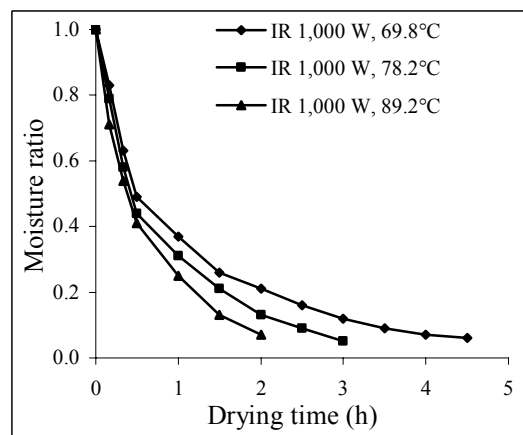
ในงานวิจัยนี้ได้ทดลองและวิเคราะห์การอบแห้งกุ้งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม และ 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม โดยค่าความชื้นเริ่มต้นของกุ้งต้มอยู่ในช่วง 300-350% dry-basis เลือกใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากรังสีอินฟราเรด พลังงานความร้อนจากกระแสไฟฟ้า และพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ โดยทำการอบแห้งในช่วงอุณหภูมิ 70-90°C แบบอุณหภูมิคงที่ และอุณหภูมิเป็นขั้น โดยค่าความชื้นของกุ้งภายหลังการอบแห้งประมาณ 20-25% dry-basis กุ้งแห้งที่ได้ภายหลังการอบแห้งนำไปทดสอบคุณภาพทางด้านกายภาพ ทางเคมี ทางจุลชีววิทยา และทางด้านประสาทสัมผัส โดยผลการทดลองการอบแห้งกุ้งเป็นตามลำดับดังนี้

4.3.1 การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดแบบอุณหภูมิคงที่

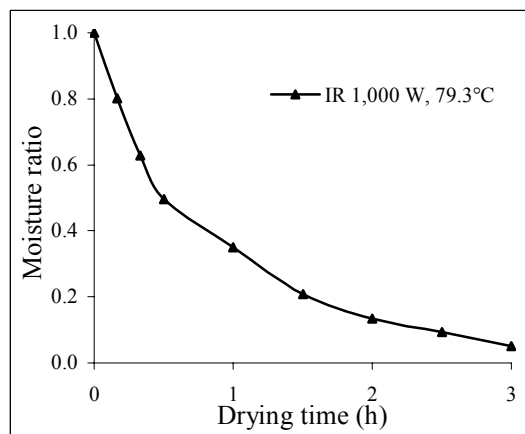
จากภาพประกอบ 4.11 (ก) แสดงอัตราส่วนความชื้นของกุ้งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัมกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งกุ้งแบบอุณหภูมิคงที่ด้วยรังสีอินฟราเรดกำลัง 500 W ที่อุณหภูมิ 69.9 80.8 และ 92.5°C ตามลำดับ ใช้ระยะเวลาประมาณ 8.5 7.5 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ ที่กำลังของรังสีอินฟราเรด 1,000 W ที่อุณหภูมิ 69.8 78.2 และ 89.2°C ตามลำดับ ใช้ระยะเวลาประมาณ 5 3.5 และ 2.5 ชั่วโมง ตามลำดับ ดังภาพประกอบ 4.11 (ข) สำหรับการทดลองอบแห้งกุ้งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัมด้วยรังสีอินฟราเรดกำลัง 1,000 W ที่อุณหภูมิ 79.3°C ใช้ระยะเวลาประมาณ 3 ชั่วโมง ภาพประกอบ 4.9 (ค) พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้น จะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มสูงขึ้น แต่ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งกุ้งสั้นลง เมื่อพิจารณาการอบแห้งที่อุณหภูมิใกล้เคียงกัน แต่กำลังของอินฟราเรดแตกต่างกัน พบว่า จะเห็นว่า การอบแห้งกุ้งด้วยกำลังของอินฟราเรด 1,000 W จะใช้ระยะเวลาสั้นกว่าการอบแห้งด้วยกำลังของอินฟราเรด 500 W เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิอบแห้งใกล้เคียงกัน โดยสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อกำลังของอินฟราเรดของเพิ่มขึ้นจะเป็นการเพิ่มพลังงานต่อหน่วยพื้นที่มากขึ้น ส่งผลต่ออัตราการถ่ายโอนพลังงานความร้อนและการถ่ายโอนมวลของน้ำเพิ่มมากขึ้น ทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งก็ลดน้อยลงไปด้วย



(ก) กุ้งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม



(ข) กุ้งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม



(ค) กุ้งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม

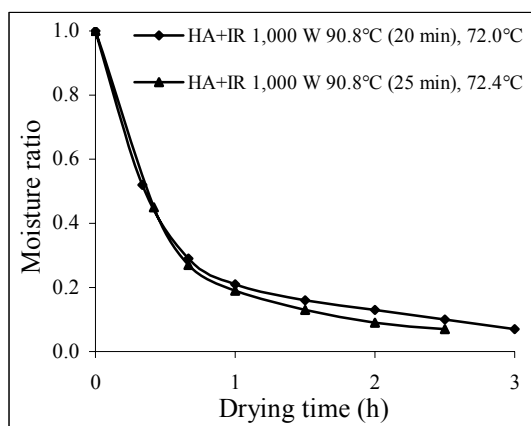
ภาพประกอบ 4.11 อัตราส่วนความชื้นการอบแห้งกุ้งด้วยรังสีอินฟราเรดกำลัง 500 และ 1,000 W แบบอุณหภูมิคงที่ อุณหภูมิอบแห้ง 69-92°C ความชื้นเริ่มต้น 300-333% dry-basis

เมื่อเปรียบเทียบการอบแห้งกุ้งที่กำลังของรังสีอินฟราเรด 1,000 W ที่อุณหภูมิอบแห้งใกล้เคียงกันของกุ้งที่มีขนาดต่างกัน ดังภาพประกอบ 4.11 (ข) และ (ค) พบว่า การอบแห้งกุ้งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม ที่มีความชื้นเริ่มต้น 313.8% dry-basis จนได้ความชื้นสุดท้าย 20.7% dry-basis และกุ้งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม มีความชื้นเริ่มต้น 333.1% dry-basis และความชื้นสุดท้าย 16.7% dry-basis มีระยะเวลาการอบแห้งที่เท่ากัน เมื่อพิจารณาส่วนของปริมาณความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายหลังการทดลอง พบว่า การอบแห้งด้วยกุ้งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม

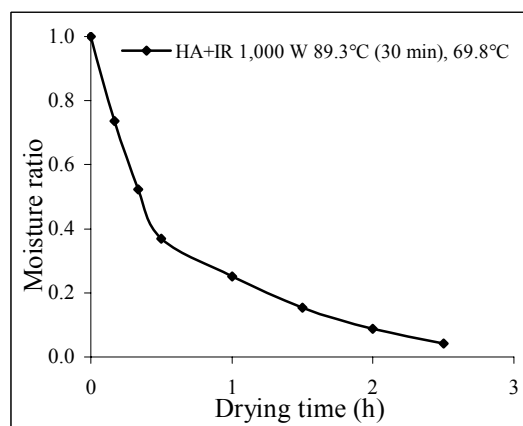
จะใช้ระยะเวลาการลดความชื้นได้เร็วกว่ากึ่งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม เมื่อใช้ระยะเวลาในการอบแห้งเท่ากัน เนื่องจากอัตราส่วนระหว่างพื้นที่สัมผัสอากาศต่อน้ำหนักตัวมีค่าต่างกัน กึ่งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม จะมีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักตัว ($2.2 \text{ cm}^2/\text{g}$) มากกว่ากึ่งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม ($1.3 \text{ cm}^2/\text{g}$) ทำให้ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ของกึ่งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม จะมีอัตราการระเหยน้ำสูงกว่ากึ่งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม นั่นคือกึ่งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม จะลดความชื้นได้เร็วกว่ากึ่งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม

4.3.2 การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด 1,000 W โดยใช้อุณหภูมิเป็นขั้น

จากภาพประกอบ 4.12 (ก) เป็นผลการทดลองอบแห้งกึ่งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม โดยใช้อุณหภูมิสองขั้นโดยขั้นแรกทำการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดกำลัง 1,000 W ที่อุณหภูมิ 90.8°C (นาน 20 และ 25 นาที) แล้วจึงเปลี่ยนมาใช้อุณหภูมิ 72.0°C และ 72.4°C ตามลำดับ จนได้ความชื้นสุดท้ายประมาณ 20-25% dry-basis (เป็นการลดอุณหภูมิหลังจาก 20 และ 25 นาที) ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งนาน 3.0 และ 2.5 ชั่วโมง ตามลำดับ และการทดลองอบแห้งกึ่งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม ที่อุณหภูมิ 89.3°C (นาน 30 นาที) แล้วจึงเปลี่ยนมาใช้ อุณหภูมิ 69.8°C ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งนาน 2.5 ชั่วโมง ภาพประกอบ 4.12 (ข)



(ก) กึ่งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม



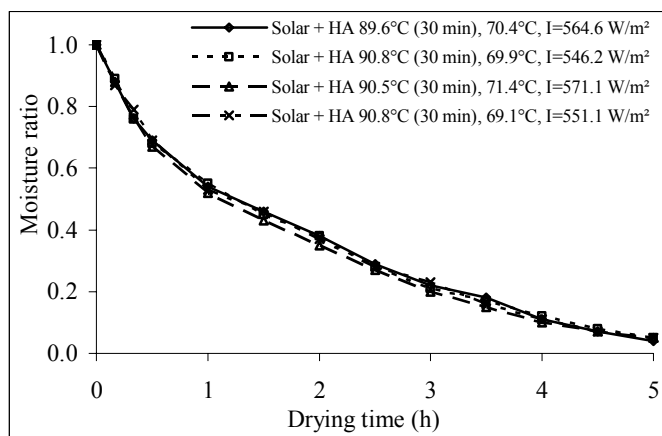
(ข) กึ่งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม

ภาพประกอบ 4.12 อัตราส่วนความชื้นการอบแห้งกึ่งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด 1,000 W โดยใช้อุณหภูมิแบบเป็นขั้น ความชื้นเริ่มต้น 312-330% dry-basis ความเร็วลม 1.1 ± 0.1 เมตร/วินาที การวนกลับของอากาศ 95%

จากภาพประกอบ 4.11 และ 4.12 พบว่า สาเหตุที่การอบแห้งกึ่งด้วยพลังงานความร้อนร่วมของลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดใช้ระยะเวลาสั้นกว่าการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดเพียงอย่างเดียว เพราะขณะทำการอบแห้งเกิดการถ่ายเทความร้อนทั้งการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน ไปยังวัสดุพร้อม ๆ กัน ส่งผลให้น้ำภายในวัสดุได้รับพลังงานจากลมร้อนที่ผิวสัมผัส และการแผ่รังสีความร้อนไปยังวัสดุได้โดยตรง ทำให้น้ำที่อยู่ภายในเนื้อวัสดุจึงถูกถ่ายเทไปให้กับอากาศแวดล้อมเร็วกว่าการอบแห้งด้วยอินฟราเรดเพียงอย่างเดียว ซึ่งจะมีแต่การแผ่รังสีความร้อนไปยังวัสดุเพียงอย่างเดียว

4.3.3 การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้อุณหภูมิแบบเป็นขั้น

ผลการทดลองอบแห้งกึ่งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม เมื่ออบแห้งกึ่งเต็มพิกัดของเครื่องอบแห้ง แสดงดังภาพประกอบ 4.13 เป็นการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิแบบเป็นขั้น โดยขั้นแรกทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ อุณหภูมิ 89.6 90.8 90.5 และ 90.8°C (นาน 30 นาที) แล้วจึงเปลี่ยนมาใช้ อุณหภูมิ 70.4 69.9 71.4 และ 69.1°C ตามลำดับ จนได้ความชื้นสุดท้ายประมาณ 20% dry-basis (เป็นการลดอุณหภูมิหลังจาก 30 นาที) ใช้ระยะเวลาในการอบแห้ง 5 ชั่วโมง



ภาพประกอบ 4.13 อัตราส่วนความชื้นการอบแห้งกึ่งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม ด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้อุณหภูมิแบบเป็นขั้น ความชื้นเริ่มต้น 311.3-325.1% dry-basis ความเร็วลม 1.1±0.1 เมตร/วินาที การวนกลับของอากาศ 95%

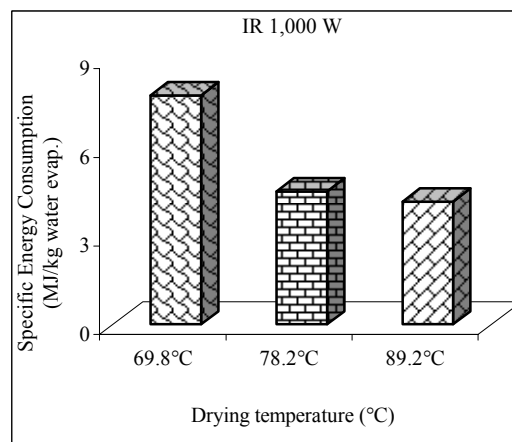
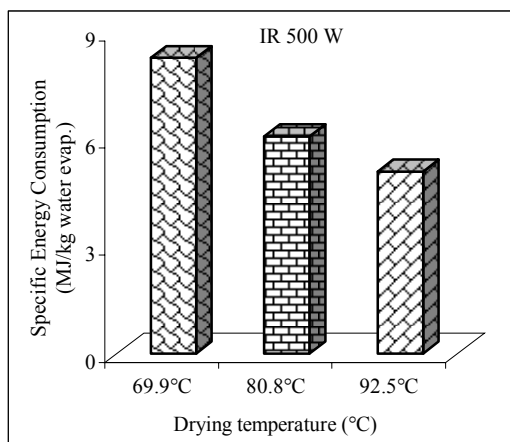
4.4 ความสิ้นเปลืองของพลังงานจำเพาะในการอบแห้งกึ่ง

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งคิดจากพลังงานไฟฟ้า สำหรับการเปรียบเทียบความสิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งจะพิจารณาถึงค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งกึ่งด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ ดังนี้

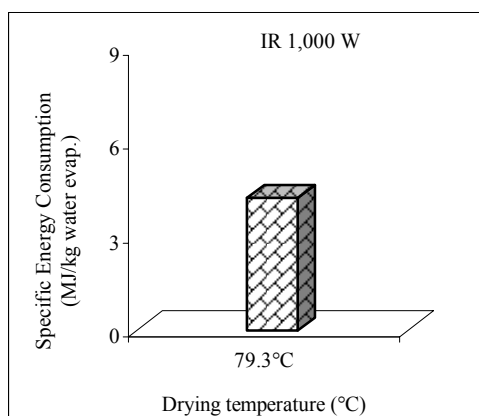
4.5.1 การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดแบบอุณหภูมิคงที่

จากภาพประกอบ 4.14 (ก) แสดงค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งกึ่งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม ด้วยกำลังของอินฟราเรด 500 W ในช่วงอุณหภูมิ 69.9-92.5°C มีค่าอยู่ในช่วง 5.10-8.28 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมของน้ำที่ระเหย สำหรับที่กำลังของอินฟราเรด 1,000 W ที่ช่วงอุณหภูมิ 69.8-89.2°C มีค่าอยู่ในช่วง 4.15-7.77 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมของน้ำที่ระเหย ดังภาพประกอบ 4.14 (ข) และการทดลองอบแห้งกึ่งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม ด้วยรังสีอินฟราเรดกำลัง 1,000 W ที่อุณหภูมิ 79.3°C มีค่า 4.24 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมของน้ำที่ระเหย ดังภาพประกอบ 4.14 (ค) พบว่า เมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้นทำให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลงตามลำดับ หากเปรียบเทียบค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งกึ่งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม ทั้งสองกำลังของอินฟราเรดที่อุณหภูมิอบแห้งใกล้เคียงกันประมาณ 69 ± 1 , 79 ± 2 และ 90 ± 2 °C พบว่า ที่กำลังอินฟราเรด 500 W มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสูงกว่าที่กำลังของรังสีอินฟราเรด 1,000 W คิดเป็น 6.3, 25.9 และ 18.6% ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดกำลัง 1,000 W ที่อุณหภูมิ 78.2°C และ 79.3°C ของกึ่งทั้งสองขนาดดังภาพประกอบ 4.14 (ข) และ (ค) พบว่า ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกึ่งทั้งสองขนาดมีค่าไม่แตกต่างกัน คือ มีค่า 4.51 และ 4.24 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมของน้ำที่ระเหย ตามลำดับ



(ก) 500 W (กึ่งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม) (ข) 1,000 W (กึ่งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม)



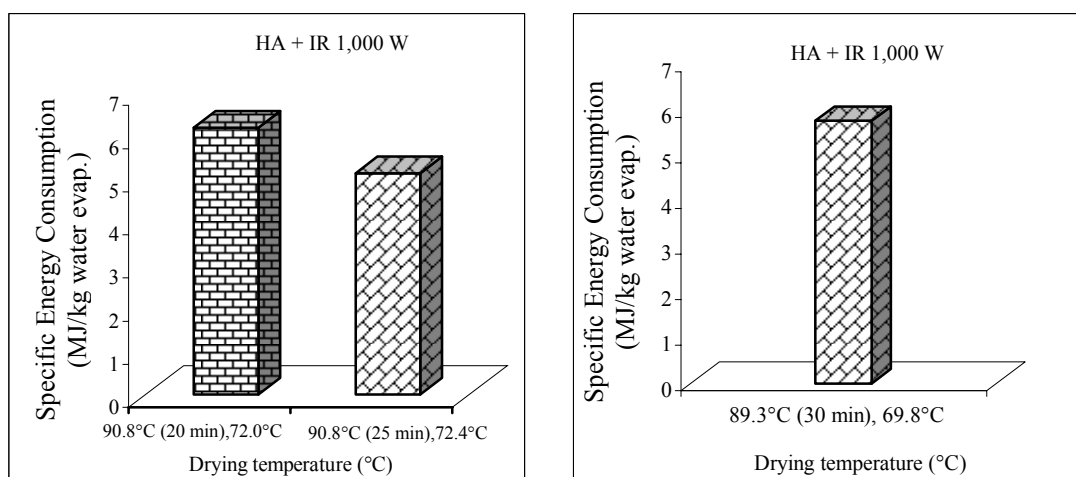
(ค) 1,000 W (กึ่งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม)

ภาพประกอบ 4.14 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งกึ่งด้วยรังสีอินฟราเรดกำลัง 500 และ 1,000 W แบบอุณหภูมิกึ่งที่ อุณหภูมิอบแห้ง 69-92°C ความชื้นเริ่มต้น 300-333% dry-basis

4.4.2 การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดโดยใช้อุณหภูมิเป็นขั้น

จากภาพประกอบ 4.15 (ก) แสดงค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด 1,000 W ของกึ่งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม โดยใช้ อุณหภูมิเป็นขั้นแบบสองขั้นตอนจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้ระยะเวลาในการอบแห้งในช่วงแรกที่ อุณหภูมิอบแห้งสูงมากขึ้น โดยการอบแห้งด้วยอุณหภูมิเริ่มต้น 90.8°C (นาน 20 และ 25 นาที) ลด อุณหภูมิลงเป็น 72.0°C และ 72.4°C ตามลำดับ มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลงเป็น 6.20 และ 5.14 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมของน้ำที่ระเหย ตามลำดับ มีค่าลดลงคิดเป็น 17.1% และเมื่อใช้กึ่ง

ขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม โดยการอบแห้งด้วยอุณหภูมิเริ่มต้น 89.3°C (นาน 30 นาที) ลดอุณหภูมิลงเป็น 69.8°C มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเป็น 5.77 เมกะจูลต่อกิโลกรัมของน้ำที่ระเหย



(ก) กุ้งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม

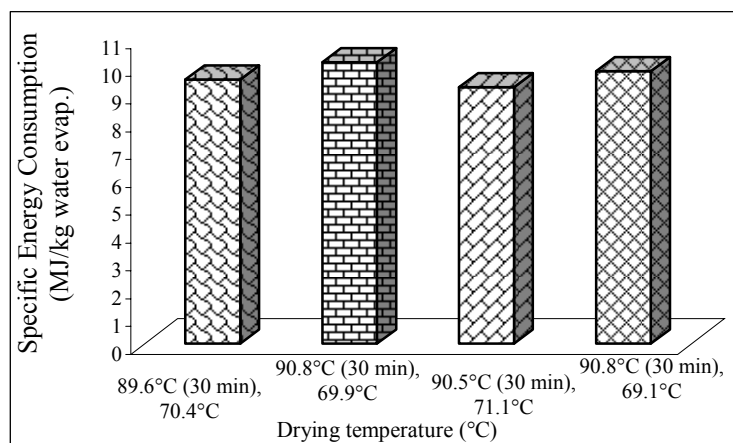
(ข) กุ้งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม

ภาพประกอบ 4.15 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งกุ้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด 1,000 W โดยใช้อุณหภูมิเป็นขั้นแบบ 2 ขั้นตอน ความชื้นเริ่มต้น 312-330% dry-basis ความเร็วลม 1.1±0.1 เมตร/วินาที การวนกลับของอากาศ 95%

4.4.3 การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้อุณหภูมิเป็นขั้น

ภาพประกอบ 4.16 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งกุ้งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม ด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้อุณหภูมิตั้งแบบเป็นขั้นที่เริ่มต้นการอบแห้งที่อุณหภูมิ 89.6 90.8 90.5 และ 90.8°C (นาน 30 นาที) แล้วจึงเปลี่ยนมาใช้อุณหภูมิ 70.4 69.9 71.1 และ 69.1°C ตามลำดับ พบว่า ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ใช้อุณหภูมิเป็นขั้นแบบสองขั้นตอนจะมีแนวโน้มใกล้เคียงกันมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเป็น 9.50 10.12 9.22 และ 9.79 เมกะจูลต่อกิโลกรัมของน้ำที่ระเหย ตามลำดับ ซึ่งค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่มีค่าแตกต่างกันไม่มากเนื่องจากปริมาณแสงแดดที่ทำการอบแห้งแต่ละวัน ไม่มีความสม่ำเสมอ รวมทั้งปริมาณความชื้น

เริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายของแต่ละสภาวะการทดลองมีค่าไม่เท่ากัน จึงทำให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ได้มีค่าแตกต่างกัน



ภาพประกอบ 4.16 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งกุ้งขนาด 300-400 ตัวต่อ กิโลกรัม ด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้อุณหภูมิตั้งเป็นชั้นแบบ 2 ชั้นตอน ความชื้นเริ่มต้น 311.3-325.1% dry-basis ความเร็วลมเฉลี่ย 1.13-1.16 เมตร/วินาที การวนกลับของอากาศ 95%

4.5 คุณภาพของกุ้งแห้งภายหลังอบแห้ง

ในการทดลองนี้ได้ทดสอบคุณภาพของกุ้งแห้งหลังการอบแห้งโดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพทางกายภาพ ทางเคมี ทางจุลชีววิทยา และทางด้านประสาทสัมผัส

4.5.1 คุณภาพทางกายภาพ

(1) วอเตอร์แอกทิวิตี (a_w)

ค่า a_w เป็นค่าแสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำที่จุลินทรีย์สามารถใช้ประโยชน์จากการวัดค่า a_w ของกุ้ง จากการทดลองวัดค่า a_w ของกุ้งแห้งหลังการอบแห้งด้วยวิธีต่าง ๆ แสดงดังตาราง 4.5

ตาราง 4.5 ค่าความชื้นและค่าแอกติวิตี้ของกุ้งแห้งที่ผ่านการอบแห้งด้วยสภาวะต่าง ๆ

| Drying condition | Moisture content (% dry-basis) | Water activity |
|---------------------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| กุ้งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม | | |
| IR 500 W 69.9°C | 19.32±0.99 ^{cA} | 0.601±0.01 ^{dC} |
| IR 500 W 80.8°C | 19.22±0.40 ^{cA} | 0.586±0.01 ^{bcB} |
| IR 500 W 92.5°C | 19.54±0.19 ^{cA} | 0.542±0.01 ^{bA} |
| IR 1,000 W 69.8°C | 20.34±0.04 ^{dA} | 0.634±0.01 ^{dC} |
| IR 1,000 W 78.2°C | 19.98±0.21 ^{cdA} | 0.575±0.01 ^{bcB} |
| IR 1,000 W 89.2°C | 20.11±0.05 ^{dA} | 0.533±0.01 ^{bA} |
| HA+IR 1,000 W 90.8°C (20 min), 72.0°C | 20.65±0.14 ^{dA} | 0.586±0.01 ^{bcB} |
| HA+IR 1,000 W 90.8°C (25 min), 72.4°C | 21.11±0.22 ^{eA} | 0.556±0.01 ^{bA} |
| กุ้งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม | | |
| IR 1,000 W 79.3°C | 16.70±1.45 ^{aA} | 0.340±0.01 ^{aB} |
| HA+IR 1,000 W 89.3°C (30 min), 69.8°C | 16.91±0.80 ^{aA} | 0.333±0.01 ^{aAB} |
| HA+Solar 90.4°C, (30 min), 70.2°C | 18.53±0.04 ^{bA} | 0.324±0.01 ^{aA} |

หมายเหตุ : a-d และ A-C คือ ในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยพิจารณาทุกสภาวะการทดลอง และพิจารณาเฉพาะปัจจัยของอุณหภูมิอบแห้งจากแหล่งพลังงานเดียวกันเท่านั้น ตามลำดับ

จากการทดลอง พบว่า กุ้งแห้งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัมที่ผ่านการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดกำลัง 500 W และ 1,000 W มีค่า a_w อยู่ในช่วง 0.542-0.601 และ 0.533-0.634 ตามลำดับ ส่วนการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดกำลัง 1,000 W มีค่า a_w อยู่ในช่วง 0.533-0.586 ส่วนกุ้งแห้งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม ที่อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดกำลัง 1,000 W ลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดกำลัง 1,000 W และลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์มีค่า a_w เท่ากับ 0.340 0.330 และ 0.324 ตามลำดับ ค่า a_w ของกุ้งแห้งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม ที่วิเคราะห์ได้มีค่าต่ำกว่าของกุ้งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม เพราะว่า ปริมาณความชื้นที่วิเคราะห์ได้ก่อนทำการวิเคราะห์ค่า a_w มีค่าความชื้นที่ต่ำกว่า ส่งผลให้ค่า a_w มีค่าต่ำกว่า ซึ่งค่า a_w ที่วัดได้ในแต่ละกรณีของการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นที่วิเคราะห์ได้หลังจากการอบแห้ง

(2) สี

การทดสอบคุณภาพสีของกึ่งหลังการอบแห้งด้วยเครื่องวัดสีอาหาร JUKI รุ่น JP7100 โดยวัดค่าสีของกึ่งแห้งในเทอมของตัวแปร L^* , a^* และ b^* จากเงื่อนไขและสภาวะการอบแห้งในแต่ละกรณี พบว่า กระบวนการอบแห้งแบบต่าง ๆ และเวลาที่ใช้ในการอบแห้งมีผลต่อคุณภาพสีของกึ่งแห้ง จะเห็นว่ากึ่งที่อบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งแต่ละกรณี มีการเปลี่ยนแปลงค่าสีแดง (a^* -Redness) ส่วนค่าสีเหลือง (b^* -Yellowness) ไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลง อย่างไรก็ตามตัวแปรอีกตัวแปรที่สามารถบ่งบอกการเปลี่ยนแปลงสีของเนื้อกึ่ง คือ L^* โดยที่ค่า L^* ต่ำหมายถึงค่าความสว่างน้อย

จากตาราง 4.6 เป็นการแสดงค่าสีของกึ่งแห้งขนาด 150-200 และ 300-400 ตัวต่อ กิโลกรัม ที่อบแห้งด้วยสภาวะต่าง ๆ เมื่ออบแห้งกึ่งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม ด้วยรังสีอินฟราเรดกำลัง 500 W อุณหภูมิอบแห้งในช่วง $69.9-92.5^{\circ}\text{C}$ มีค่าความสว่าง (L^*) อยู่ในช่วง 50.56-54.48 ค่าสีแดง (a^*) อยู่ในช่วง 32.53-35.59 ค่าสีเหลือง (b^*) อยู่ในช่วง 34.30-36.67 และค่าการเปลี่ยนแปลงสีรวม (ΔE^*) อยู่ในช่วง 15.89-18.75 สำหรับกรณีอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดกำลัง 1,000 W อุณหภูมิอบแห้งในช่วง $69.8-89.2^{\circ}\text{C}$ มีค่าสี L^* อยู่ในช่วง 42.41-49.23 ค่าสี a^* อยู่ในช่วง 38.47-41.24 ค่าสี b^* อยู่ในช่วง 46.24-47.60 และค่า ΔE^* อยู่ในช่วง 23.31-24.42 เมื่อพิจารณาปัจจัยของต่อสีของกึ่งอุณหภูมิที่กำลังของรังสีอินฟราเรดเดียวกัน พบว่า อุณหภูมิมีอิทธิพลต่อค่าสีอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % โดยค่าสี L^* และ a^* มีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งเพิ่มขึ้น ส่วนค่าสี b^* มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดกำลัง 1,000 W มีค่าสี $L^* = 46.29-48.68$ ค่าสี $a^* = 43.65-44.79$ ค่าสี $b^* = 47.44-48.33$ และค่า $\Delta E^* = 27.27-28.05$ กรณีอบแห้งกึ่งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม ด้วยรังสีอินฟราเรดกำลัง 1,000 W มีค่าสี $L^* = 50.28$ ค่าสี $a^* = 37.55$ ค่าสี $b^* = 44.21$ และค่า $\Delta E^* = 20.59$ การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดกำลัง 1,000 W มีค่าสี $L^* = 51.34$ ค่าสี $a^* = 36.21$ ค่าสี $b^* = 42.26$ และค่า $\Delta E^* = 18.03$ พบว่า การอบแห้งกึ่งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดกำลัง 1,000 W ของกึ่งแห้งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม ให้ค่าความเป็นสีแดงสูงที่สุด ส่วนกรณีที่อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดกำลัง 1,000 W มีค่าสีแดงสูงกว่าที่กำลัง 500 W สำหรับการอบแห้งของกึ่งทั้งสองขนาดที่สภาวะการอบแห้งเดียวกัน คือ รังสีอินฟราเรดกำลัง 1,000 W อุณหภูมิ $79 \pm 2^{\circ}\text{C}$ และ ลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดกำลัง 1,000 W อุณหภูมิ $89 \pm 2^{\circ}\text{C}$ (20-30 min), $70 \pm 2^{\circ}\text{C}$ พบว่า กึ่งแห้งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัมจะให้ค่าสีแดงสูงกว่ากึ่งแห้งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม ในทุกสภาวะการทดลอง

ตาราง 4.6 ค่าสีของการอบแห้งกุ้งด้วยสภาวะต่าง ๆ

| color | | | | |
|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Drying condition | L* | a* | b* | ΔE^* |
| กุ้งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม ค่าสีเริ่มต้นก่อนการอบแห้ง $L_0^* = 51.60$, $a_0^* = 16.30$, $b_0^* = 15.10$ | | | | |
| IR 500 W 69.9°C | 54.48±0.37 ^{iC} | 32.53±0.32 ^{aA} | 34.30±0.21 ^{bA} | 15.89±0.29 ^{aA} |
| IR 500 W 80.8°C | 52.44±0.31 ^{hB} | 34.33±0.25 ^{bB} | 35.67±0.18 ^{cB} | 17.48±0.25 ^{bB} |
| IR 500 W 92.5°C | 50.56±0.32 ^{fA} | 35.59±0.41 ^{cC} | 36.67±0.31 ^{dC} | 18.75±0.41 ^{cC} |
| IR 1,000 W 69.8°C | 49.23±0.19 ^{eC} | 41.24±0.20 ^{gB} | 46.24±0.21 ^{gA} | 24.42±0.20 ^{cC} |
| IR 1,000 W 78.2°C | 48.36±0.26 ^{cB} | 38.08±0.72 ^{fA} | 47.30±0.32 ^{hB} | 21.28±0.73 ^{eA} |
| IR 1,000 W 89.2°C | 42.41±0.30 ^{aA} | 38.47±0.25 ^{fA} | 47.60±0.20 ^{hB} | 23.31±0.24 ^{fB} |
| HA+IR 1,000 W 90.8°C (20 min), 72.0°C | 46.29±0.11 ^{bA} | 43.65±0.12 ^{hA} | 47.44±0.52 ^{hA} | 27.27±0.11 ^{hA} |
| HA+IR 1,000 W 90.8°C (25 min), 72.4°C | 48.68±0.18 ^{dB} | 44.79±0.14 ^{iB} | 48.33±0.25 ^{iB} | 28.05±0.13 ^{iB} |
| กุ้งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม ค่าสีเริ่มต้นก่อนการอบแห้ง $L_0^* = 53.26$, $a_0^* = 14.34$, $b_0^* = 14.40$ | | | | |
| IR 1000 W 79.3°C | 50.28±0.09 ^{fA} | 37.55±0.16 ^{eC} | 44.21±0.10 ^{fC} | 20.59±0.18 ^{dB} |
| HA+IR 1000 W 89.3°C (30 min), 69.8°C | 51.34±0.12 ^{gB} | 36.21±0.07 ^{dB} | 42.26±0.08 ^{EB} | 18.03±0.08 ^{cA} |
| HA+Solar 90.4°C, (30 min), 70.2°C | 52.42±0.19 ^{hC} | 32.49±0.27 ^{aA} | 33.49±0.27 ^{aA} | 26.35±0.37 ^{gC} |

หมายเหตุ : a-i และ A-C คือ ในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยพิจารณาทุกสภาวะการทดลอง และพิจารณาเฉพาะปัจจัยของอุณหภูมิอบแห้งจากแหล่งพลังงานเดียวกันเท่านั้น ตามลำดับ

ค่าสีของการอบแห้งกุ้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ค่าสี $L^* = 52.42$ ค่าสี $a^* = 30.47$ ค่าสี $b^* = 42.26$ และค่า $\Delta E^* = 20.59$ ซึ่งค่าความเป็นสีแดงของการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์มีค่าน้อยกว่าการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด และลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด เนื่องจากรังสีอินฟราเรดนี้สามารถทะลุผ่านวัตถุเข้าไปทำให้โมเลกุลของวัตถุเกิดการสั่นสะเทือนมีผลให้วัตถุนั้นร้อนขึ้นทำให้รังควัตถุ (เม็ดสี) ที่อยู่ในตัวกุ้งถูกกระตุ้นได้เร็วขึ้นจึงทำให้สีของกุ้งปรากฏความเป็นสีแดงได้เร็วขึ้นส่งผลให้ค่าสีของกุ้งที่อบแห้งด้วยแหล่งพลังงานที่มีรังสีอินฟราเรดมีค่าสีแดงที่สูงกว่า โดยขนาดของกุ้งและสภาวะที่ใช้ในการทดลองที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อค่าความสว่าง สีแดง และสีเหลือง ของกุ้งแห้งอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

(3) คุณภาพด้านการหดตัว และการคืนตัว

จากการทดสอบคุณภาพด้านการหดตัว และการคืนตัว ของกุ้งขนาด 150-200 และ 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม ที่ผ่านการอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ แสดงดังตาราง 4.7

ตาราง 4.7 ร้อยละการหดตัว และการคืนตัวของกุ้งที่อบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ

| Drying condition | Shrinkage (%) | Rehydration (%) |
|---------------------------------------|----------------------------|--------------------------|
| กุ้งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม | | |
| IR 500 W 69.9°C | 12.67±1.59 ^{bA} | 5.95±0.78 ^{bA} |
| IR 500 W 80.8°C | 13.13±1.18 ^{bcAB} | 5.73±0.89 ^{bA} |
| IR 500 W 92.5°C | 13.61±1.38 ^{cB} | 5.43±1.39 ^{bA} |
| IR 1,000 W 69.8°C | 13.27±1.44 ^{cA} | 5.42±0.66 ^{bb} |
| IR 1,000 W 78.2°C | 13.49±1.48 ^{cA} | 4.51±0.82 ^{aA} |
| IR 1,000 W 89.2°C | 14.20±1.36 ^{dB} | 4.88±0.91 ^{abA} |
| HA+IR 1,000 W 90.8°C (20 min), 72.0°C | 12.26±1.17 ^{bB} | 4.61±0.73 ^{aA} |
| HA+IR 1,000 W 90.8°C (25 min), 72.4°C | 9.71±0.73 ^{aA} | 5.12±1.07 ^{bb} |
| Solar | 12.46±1.27 ^b | 5.80±0.66 ^b |
| กุ้งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม | | |
| IR 1,000 W 79.3°C | 13.07±0.75 ^{bcA} | 5.79±0.54 ^{bA} |
| HA+IR 1,000 W 89.3°C (30 min), 69.8°C | 12.14±0.67 ^{bA} | 5.81±0.55 ^{bA} |
| HA+Solar 90.4°C, (30 min), 70.2°C | 23.31±0.60 ^{IC} | 12.57±0.15 ^{dC} |
| Solar | 17.94±1.17 ^{cb} | 8.03±0.87 ^{cb} |

หมายเหตุ : a-f และ A-C คือ ในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยพิจารณาทุกสภาวะการทดลองและพิจารณาเฉพาะปัจจัยของอุณหภูมิอบแห้งจากแหล่งพลังงานเดียวกันเท่านั้น ตามลำดับ

จากตาราง 4.7 เมื่อพิจารณาปัจจัยของอุณหภูมิอบแห้งเมื่ออบแห้งด้วยสภาวะเดียวกัน พบว่า การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดกำลัง 500 และ 1,000 W อุณหภูมิอบแห้งในช่วง 70-

90°C พบว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งสูงขึ้นไม่ส่งผลต่อร้อยละการหดตัวของกึ่งอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยมีค่าอยู่ในช่วง 12.67-14.20% ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกึ่งที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดกำลัง 1,000 W แบบอุณหภูมิเป็นขั้นมีค่าอยู่ในช่วง 9.71-12.26% สำหรับค่าร้อยละการคืนตัวของกึ่งแห้งที่อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดกำลัง 500 และ 1,000 W มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่ออุณหภูมิมอบแห้งสูงขึ้น โดยมีค่าอยู่ในช่วง 4.51-5.95% สำหรับกึ่งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม พบว่า ค่าร้อยละการหดตัวของการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดมีค่า 13.07% ส่วนค่าร้อยละการคืนตัวมีค่า 7.67% สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดกำลัง 1,000 W มีค่าร้อยละการหดตัวมีค่า 12.14% ส่วนค่าร้อยละการคืนตัวมีค่า 9.47% ซึ่งค่าร้อยละการหดตัวและการคืนตัวของกึ่งทั้งสองขนาดไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ พบว่า ร้อยละการหดตัวของกึ่งมีค่า 23.31% สำหรับร้อยละการคืนตัวกึ่งมีค่า 12.57%

4.5.2 คุณภาพทางจุลชีววิทยา

ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดและยีสต์และรา

ตาราง 4.8 แสดงผลจากการวิเคราะห์จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดและยีสต์และราในตัวอย่างกึ่งแห้งที่ผ่านกระบวนการอบแห้งต่าง ๆ พบว่า มีจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดของกึ่งแห้งอยู่ในช่วง 8.90×10^3 - 7.34×10^4 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัมและจำนวนของยีสต์และราอยู่ในช่วง 30-52 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม

จากการวิเคราะห์ปริมาณจุลินทรีย์และยีสต์และราของกึ่งแห้งที่ผ่านการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 500 และ 1,000 W ลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด 1,000 W และลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ พบว่า ปริมาณเชื้อทั้งหมดมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนของกึ่งแห้ง แสดงว่ากึ่งแห้งที่ผ่านการอบแห้งทุกสภาวะการทดลองผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนของกึ่งแห้งดังตาราง 4.8

สำหรับผลการวิเคราะห์คุณภาพทางจุลชีววิทยาของการอบแห้งกึ่งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ของกึ่งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม พบว่า มีจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดของกึ่งแห้ง 2.95×10^3 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัมและมีจำนวนของยีสต์และรา 40 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม มีเอสเชอริเชีย โคลิ น้อยกว่า 3 MPN ต่อตัวอย่าง 1 กรัม โดยตรวจไม่พบเชื้อ ซาลโมเนลลา สตาฟีโลค็อกคัส ออเรียส คลอสทริเดียม เพอร์ฟริงเจนส์ และไวรัสโอพาราฮิวโมไลติคัส ซึ่งค่าที่ตรวจวิเคราะห์ได้พบว่ามีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ที่มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนของกึ่งแห้งที่กำหนด ซึ่งปกติ

ในการผลิตกึ่งแห้งได้ผ่านกรรมวิธีที่สามารถลดปริมาณจุลินทรีย์ได้ระดับหนึ่ง เช่น การล้างทำความสะอาด การต้มฆ่าเชื้อโรค และกระบวนการอบแห้ง เป็นต้น สรุปได้ว่าทุกสภาวะอบแห้งมีคุณภาพทางด้านจุลชีววิทยาได้มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนของกึ่งแห้ง

ตาราง 4.8 ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดและยีสต์และราของกึ่งแห้งที่อบแห้งด้วยสภาวะต่าง ๆ

| Drying condition | Moisture content (% dry-basis) | Viable count (CFU/g) | |
|---------------------------------------|-----------------------------------|----------------------|------------------|
| | | Total viable count | Yeasts and Molds |
| มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนของกึ่งแห้ง | - | 1×10^5 | < 500 |
| กึ่งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม | | | |
| IR 500 W 69.9°C | 19.32 | 7.34×10^4 | 45 |
| IR 500 W 80.8°C | 19.22 | 5.92×10^4 | 40 |
| IR 500 W 92.5°C | 19.54 | 2.31×10^4 | 36 |
| IR 1,000 W 69.8°C | 20.34 | 5.27×10^4 | 45 |
| IR 1,000 W 78.2°C | 19.98 | 1.42×10^4 | 52 |
| IR 1,000 W 89.2°C | 20.11 | 8.90×10^3 | 48 |
| HA+IR 1,000 W 90.8°C (20 min), 72.0°C | 20.65 | 4.72×10^4 | 32 |
| HA+IR 1,000 W 90.8°C (25 min), 72.4°C | 21.11 | 3.56×10^4 | 30 |
| กึ่งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม | | | |
| IR 1,000 W 79.3°C | 16.70 | 3.13×10^3 | 52 |
| HA+IR 1,000 W 89.3°C (30 min), 69.8°C | 16.91 | 3.57×10^3 | 30 |
| HA+Solar 90.4°C, (30 min), 70.2°C | 18.53 | 2.95×10^3 | 40 |

4.5.3 การทดสอบทางด้านประสาทสัมผัสกึ่งแห้ง (Sensory evaluation)

ผลการทดสอบคุณภาพด้านประสาทสัมผัสของกึ่งแห้งหลังการอบแห้งด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ แสดงได้ดังตาราง 4.9 โดยให้ผู้ทดสอบจำนวน 20 คน แสดงคะแนนความชอบต่อผลิตภัณฑ์กึ่งแห้งทางด้านต่าง ๆ ได้แก่ สี ลักษณะปรากฏ เนื้อสัมผัส กลิ่น หิน รสเค็ม และความชอบรวม

ตาราง 4.9 คะแนนการยอมรับเฉลี่ยของการอบแห้งกุ้งที่สภาวะการอบแห้งแบบต่าง ๆ

| Drying condition | color | Appearance | Texture | Odor | Taste | Overall liking |
|---------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| กุ้งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม | | | | | | |
| IR 500 W 69.9°C | 3.00±0.65 ^{aA} | 2.70±0.66 ^{bcA} | 3.20±0.70 ^{ba} | 2.50±0.61 ^{ba} | 2.75±0.55 ^{bb} | 3.35±0.49 ^{aA} |
| IR 500 W 80.8°C | 3.20±0.52 ^{abB} | 2.85±0.59 ^{ca} | 3.30±0.57 ^{bcA} | 2.45±0.51 ^{abA} | 2.85±0.49 ^{bb} | 3.45±0.51 ^{aA} |
| IR 500 W 92.5°C | 3.20±0.62 ^{abB} | 2.85±0.67 ^{ca} | 3.30±0.66 ^{bcA} | 2.40±0.50 ^{abA} | 2.60±0.50 ^{aA} | 3.50±0.51 ^{abA} |
| IR 1,000 W 69.8°C | 3.35±0.49 ^{ba} | 2.65±0.49 ^{abA} | 3.15±0.67 ^{ba} | 2.30±0.66 ^{aA} | 2.65±0.59 ^{abA} | 3.35±0.59 ^{aA} |
| IR 1,000 W 78.2°C | 3.35±0.49 ^{ba} | 2.60±0.50 ^{abA} | 3.20±0.77 ^{ba} | 2.40±0.50 ^{abA} | 2.50±0.51 ^{aA} | 3.35±0.49 ^{aA} |
| IR 1,000 W 89.2°C | 3.40±0.50 ^{ba} | 2.50±0.51 ^{aA} | 3.15±0.59 ^{ba} | 2.35±0.49 ^{aA} | 2.55±0.51 ^{aA} | 3.40±0.50 ^{aA} |
| HA+IR 1,000 W 90.8°C (20 min), 72.0°C | 3.55±0.51 ^{ca} | 2.55±0.51 ^{aA} | 3.25±0.55 ^{ba} | 2.25±0.44 ^{aA} | 2.50±0.51 ^{aA} | 3.55±0.60 ^{ba} |
| HA+IR 1,000 W 90.8°C (25 min), 72.4°C | 3.60±0.50 ^{ca} | 2.65±0.49 ^{abA} | 3.30±0.47 ^{bcA} | 2.30±0.47 ^{aA} | 2.60±0.50 ^{aA} | 3.60±0.50 ^{ba} |
| กุ้งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม | | | | | | |
| IR 1,000 W 79.3°C | 3.45±0.51 ^{bbc} | 2.65±0.49 ^{abA} | 2.85±0.59 ^{aA} | 2.55±0.51 ^{ba} | 2.60±0.50 ^{aA} | 3.40±0.50 ^{aA} |
| HA+IR 1,000 W 89.3°C (30 min), 69.8°C | 3.35±0.59 ^{bb} | 2.70±0.47 ^{bcA} | 2.90±0.45 ^{aA} | 2.50±0.51 ^{ba} | 2.55±0.51 ^{aA} | 3.35±0.49 ^{aA} |
| HA+Solar 90.4°C, (30 min), 70.2°C | 3.27±0.74 ^{abA} | 2.93±0.74 ^{db} | 3.40±0.67 ^{cb} | 3.03±0.61 ^{cb} | 2.97±0.49 ^{cb} | 3.70±0.47 ^{cb} |

หมายเหตุ : a-c และ A-C คือ ในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยพิจารณาทุกสภาวะการทดลอง และพิจารณาเฉพาะปัจจัยของอุณหภูมิอบแห้งจากแหล่งพลังงานเดียวกันเท่านั้น ตามลำดับ

จากตาราง 4.9 แสดงคะแนนการยอมรับเฉลี่ยของการอบแห้งกุ้งที่สภาวะการอบแห้งแบบต่าง ๆ พบว่า ทุกสภาวะการทดลองปรากฏว่าผู้บริโภคให้ทัศนคติเห็นว่ากุ้งแห้งทุกสภาวะการทดลองมีสีส้ม โดยกุ้งแห้งที่อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดกำลัง 1,000 W เป็นสภาวะที่ปรากฏสีของกุ้งแห้งดีที่สุด คือ มีสีส้มมากกว่าสภาวะการอบแห้งอื่น ๆ ซึ่งผลของผู้บริโภคที่ได้สอดคล้องกับค่าสี a* ที่วิเคราะห์ได้ภายหลังการอบแห้ง สำหรับลักษณะปรากฏของกุ้งแห้งทุกสภาวะการทดลองที่สังเกตได้ พบว่า ลักษณะของตัวกุ้งค่อนข้างชุ่มชื้นเล็กน้อยและแห้งบางส่วน ส่วนคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของกุ้งแห้งซึ่งทดสอบด้วยการชิม พบว่า กุ้งแห้งจากการอบแห้งทุกสภาวะมีลักษณะผิวหนังนอกเหนียวแต่เนื้อเยื่อด้านในนุ่ม และยังพบว่าอุณหภูมิในการอบแห้งไม่ส่งผลต่อคะแนนการยอมรับด้านกลิ่นหืนและความเค็มของกุ้งแห้ง โดยกุ้งแห้งที่ได้จะมีกลิ่นคาวของกุ้งเพียงเล็กน้อยและมีรสเค็มเล็กน้อยถึงปานกลาง เมื่อพิจารณาคะแนนความชอบ

โดยรวม พบว่า ผู้ทดสอบทางประสาทสัมผัสให้คะแนนความชอบกึ่งแห้งอยู่ในระดับปานกลาง โดยเฉพาะกึ่งแห้งจากการให้ความร้อนด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดจะมีคะแนนความชอบมากกว่ากรณีอื่น ๆ ของกึ่งขนาดเดียวกัน สำหรับกรณีการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ พบว่า กึ่งที่ได้หลังจากอบแห้งมีสีส้ม ลักษณะใสเล็กน้อยและแห้งบางส่วนเนื้อกึ่งพบว่า ผิวด้านนอกเหนียวแต่เนื้อด้านในนุ่ม มีกลิ่นควและความเค็มของกึ่งแห้งเล็กน้อย

4.6 ผลการศึกษาคุณภาพ อายุการเก็บรักษาของกึ่งแห้งในถุงลามิเนตที่สภาวะต่าง ๆ

การทดลองในขั้นนี้จะเป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางเคมี กายภาพ จุลชีววิทยา และคุณภาพทางประสาทสัมผัสของกึ่งแห้งที่อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดกำลัง 500 และ 1,000 W และลมร้อนร่วมกับด้วยรังสีอินฟราเรดกำลัง 1,000 W บรรจุภายใต้สภาวะปกติ ในถุงพลาสติกชนิด Nylon/LLDPE และ Polypropylene และการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ บรรจุภายใต้สภาวะปกติ และสภาวะสุญญากาศ ในถุงพลาสติกชนิด Nylon/LLDPE Nylon/Al/LLDPE และ Polypropylene โดยเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งมีสัญลักษณ์ดังต่อไปนี้

- | | |
|----|---|
| N | แทน กึ่งแห้งที่บรรจุในถุง Nylon/LLDPE สภาวะบรรยากาศปกติ |
| PP | แทน กึ่งแห้งที่บรรจุในถุง Polypropylene สภาวะบรรยากาศปกติ |

4.6.1 อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 500 และ 1,000 W และลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด 1,000 W

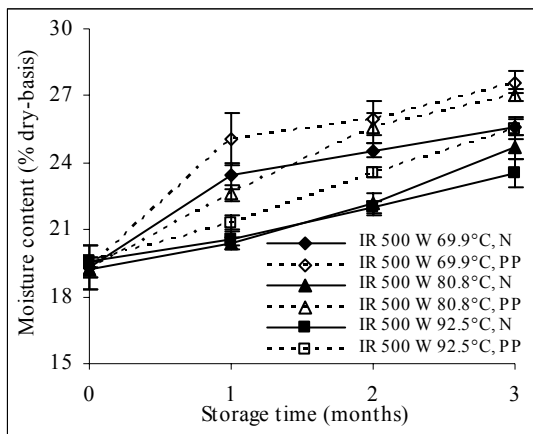
สำหรับกึ่งแห้งที่นำมาวิเคราะห์นี้เป็นตัวอย่างของกึ่งแห้งที่ผ่านการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 500 และ 1,000 W และลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด 1,000 W โดยทำการเก็บรักษาในถุงพลาสติกลามิเนตถุง N และถุง PP ที่บรรจุภายใต้สภาวะปกติ เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง โดยทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยคุณภาพในระหว่างการเก็บรักษาทางด้านกายภาพ (ความชื้น สีและค่าวอเตอร์แอกติวิตี) ด้านจุลชีววิทยา (ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด และจำนวนยีสต์และรา) และด้านประสาทสัมผัส โดยให้ผู้ทดสอบให้ระดับคะแนนของคุณลักษณะทางด้านสี ลักษณะปรากฏ ลักษณะเนื้อสัมผัส กลิ่น หิน รสเค็ม และความชอบรวมของผลิตภัณฑ์

4.6.1.1 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางด้านกายภาพ

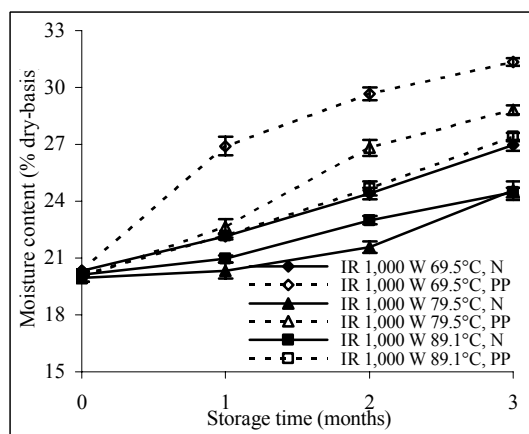
(1) ความชื้น

ปริมาณความชื้นเป็นปัจจัยสำคัญในการพิจารณา จากการวัดค่าปริมาณความชื้นของกึ่งแห้งที่ผ่านการอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ โดยทำการบรรจุในถุง N และถุง PP ในสภาวะปกติ

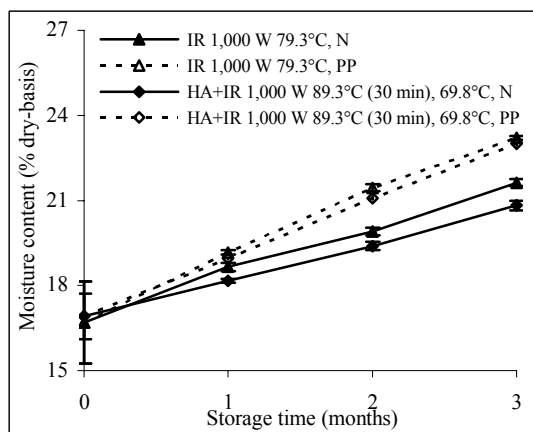
โดยเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง พบว่า ค่าปริมาณความชื้นเริ่มต้นของกุ้งแห้งทุกสภาวะการทดลอง ก่อนการบรรจุที่วิเคราะห์ได้ในช่วง 16.70-21.11% dry-basis



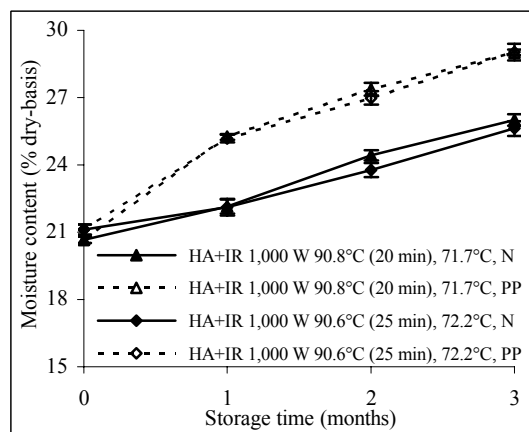
(ก) IR 500 W (150-200 ตัว/กิโลกรัม)



(ข) IR 1,000 W (150-200 ตัว/กิโลกรัม)



(ค) HA+IR 1,000 W (150-200 ตัว/กิโลกรัม)



(ง) IR 1,000 W และ HA+IR 1,000 W (300-400 ตัว/กิโลกรัม)

ภาพประกอบ 4.17 ปริมาณความชื้นของกุ้งแห้งที่อบแห้งด้วยสภาวะต่าง ๆ บรรจุในถุงชนิดต่าง ๆ ภายใต้สภาวะบรรยากาศปกติเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง

จากการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นของกุ้งแห้ง เมื่อพิจารณาปัจจัยของระยะเวลาการเก็บรักษา พบว่า เมื่อระยะเวลาเก็บรักษาเพิ่มสูงขึ้นปริมาณความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษาในถุงทุกชนิดที่ทำการบรรจุอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และเมื่อพิจารณาปัจจัยชนิดของถุง พบว่า การบรรจุกุ้งแห้งในถุง N มีอัตราการเพิ่มสูงขึ้นของปริมาณความชื้นที่ช้า

กว่าการบรรจุกึ่งแห้งในถุง PP ในทุก ๆ เดือน ในทุกกรณีของการอบแห้ง อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เนื่องจากคุณสมบัติของถุง PP ที่ใช้มีการซึมผ่านของไอน้ำที่สูงกว่าถุง N (งามทิพย์, 2550) มีผลทำให้ปริมาณความชื้นของกึ่งแห้งมีค่าเพิ่มขึ้นสูงกว่า แสดงดังภาพประกอบ 4.17 และตารางภาคผนวก 8 โดยชนิดของถุงมีอิทธิพลต่อความชื้นของกึ่งแห้งเมื่อระยะเวลาที่ใช้ในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะความไม่สม่ำเสมอของตัวอย่างและคุณสมบัติของถุงพลาสติกที่ใช้ มีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำที่แตกต่างกัน โดยที่อัตราการซึมผ่านของไอน้ำของถุง PP มีค่าสูงกว่าถุง N (งามทิพย์, 2550) มีผลทำให้ปริมาณความชื้นของกึ่งแห้งที่บรรจุในถุง PP มีค่าการเปลี่ยนแปลงที่สูงกว่าการบรรจุในถุง N

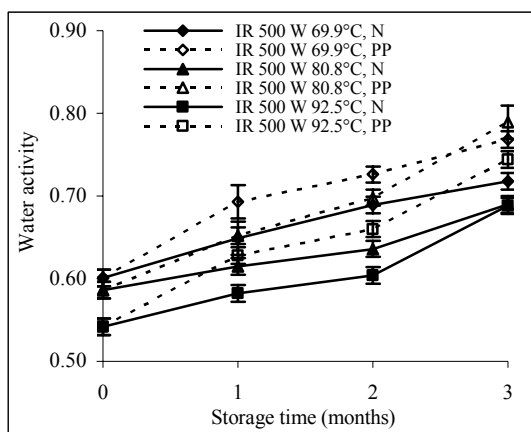
การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นที่เกิดขึ้นในอาหารกึ่งแห้ง มีผลเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของสภาวะแวดล้อมที่ใช้ในการเก็บรักษา โดยปกติอาหารกึ่งแห้งมักมีความดันไอสุง ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยก็จะเป็นสาเหตุของการเกาะตัวของไอน้ำภายในภาชนะบรรจุ (Quast และ Teixeira Neto, 1976) ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและค่า a_w พบว่า ทั้งปริมาณความชื้นและค่า a_w มีการเปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาการเก็บรักษาเช่นเดียวกัน การเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นจึงสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของค่า a_w โดยที่ปริมาณความชื้นและค่า a_w มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงของการเก็บรักษา

(2) ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี (a_w)

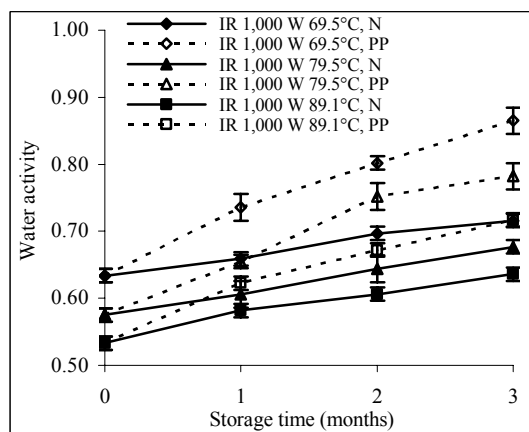
ค่า a_w เป็นค่าแสดงการเปลี่ยนแปลงแปลงปริมาณน้ำที่จุลินทรีย์สามารถใช้ประโยชน์ จากการวัดค่า a_w ของกึ่งแห้งที่ผ่านการอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ โดยทำการบรรจุในถุง N และถุง PP ในสภาวะบรรยากาศปกติโดยเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง แสดงดังภาพประกอบ 4.18

จากการวิเคราะห์ค่า a_w ของกึ่งแห้งทุกสภาวะการทดลองก่อนการบรรจุที่วิเคราะห์ได้อยู่ในช่วง 0.333-0.634 จากการวิเคราะห์ค่า a_w ของกึ่งแห้ง เมื่อพิจารณาปัจจัยของระยะเวลาการเก็บรักษา พบว่า เมื่อระยะเวลาเก็บรักษาเพิ่มสูงขึ้นค่า a_w มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษาในถุงทุกชนิดที่ทำการบรรจุอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และเมื่อพิจารณาปัจจัยชนิดของถุง พบว่า การบรรจุกึ่งแห้งในถุง N มีอัตราการเพิ่มสูงขึ้นของค่า a_w ที่ช้ากว่าการบรรจุกึ่งแห้งในถุง PP ในทุก ๆ เดือน ในทุกกรณีของการอบแห้ง อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เนื่องจากคุณสมบัติของถุง PP ที่ใช้มีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำที่สูงกว่าถุง N (งามทิพย์, 2550) มีผลทำให้ค่า a_w ของกึ่งแห้งมีค่าเพิ่มขึ้นสูงกว่า แสดงดังภาพประกอบ 4.18 และตารางภาคผนวก 9 โดยชนิดของถุงมีอิทธิพลต่อค่า a_w ของกึ่งแห้งเมื่อระยะเวลาที่ใช้ในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ซึ่งค่า a_w ที่

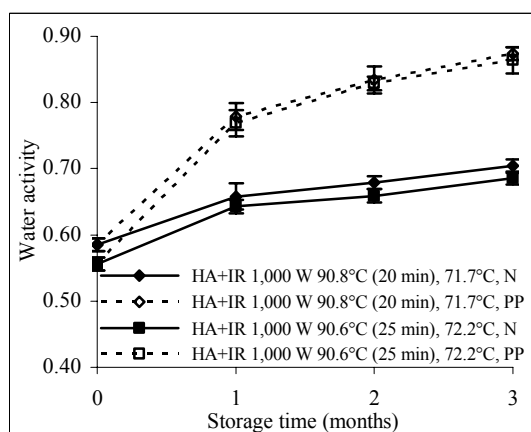
วิเคราะห์ได้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณความชื้น อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นและค่า a_w เป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้น



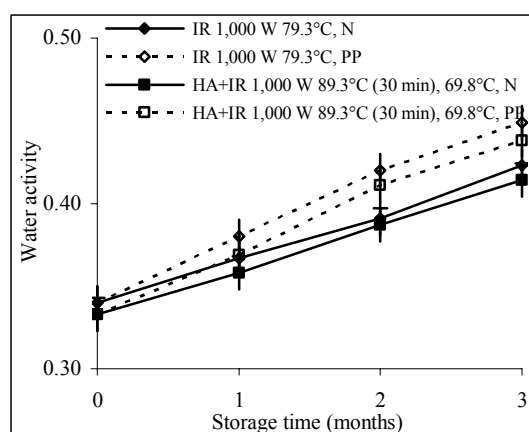
(ก) IR 500 W (150-200 ตัว/กิโลกรัม)



(ข) IR 1,000 W (150-200 ตัว/กิโลกรัม)



(ค) HA+IR 1,000 W (150-200 ตัว/กิโลกรัม)



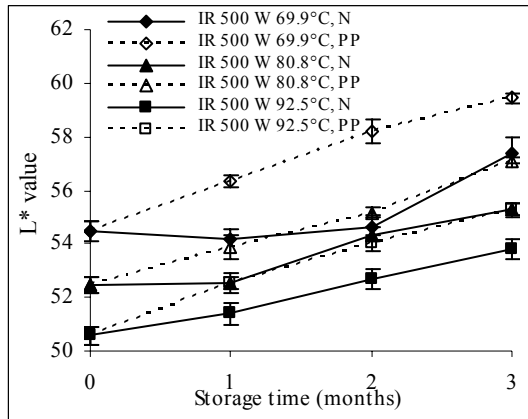
(ง) IR 1,000 W และ HA+IR 1,000 W
(300-400 ตัว/กิโลกรัม)

ภาพประกอบ 4.18 ค่าแอกติวิตี (a_w) ของกุ้งแห้งที่อบแห้งด้วยสภาวะต่าง ๆ บรรจุในถุงชนิดต่าง ๆ ภายใต้สภาวะบรรยากาศปกติเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง

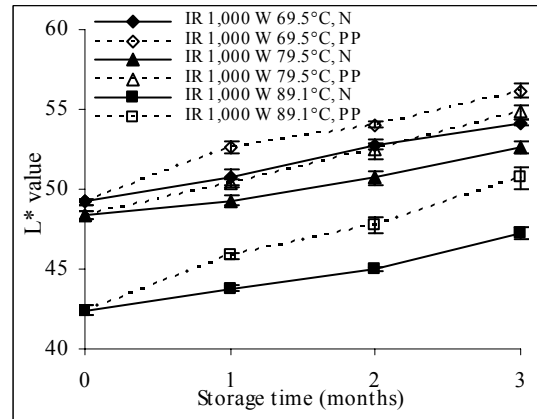
(3) ลี

จากการวัดค่าสีของกุ้งที่บรรจุในถุง N และถุง PP บรรจุในสภาวะบรรยากาศปกติ โดยเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง โดยที่ค่า L^* เป็นค่าความสว่าง a^* เป็นค่าสีแดง b^* เป็นค่าสีเหลือง และ

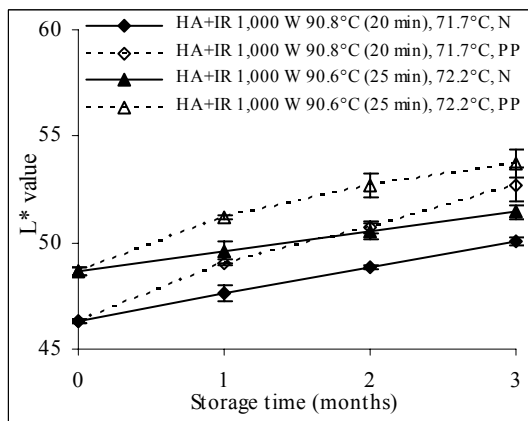
ค่า ΔE^* เป็นค่าที่บอกความแตกต่างของค่าสีระหว่างตัวอย่างกับตัวอย่างมาตรฐาน โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้ตัวอย่างกึ่งแห้งก่อนทำการบรรจุเป็นตัวอย่างมาตรฐาน ผลแสดงดังภาพประกอบ 4.19-4.22



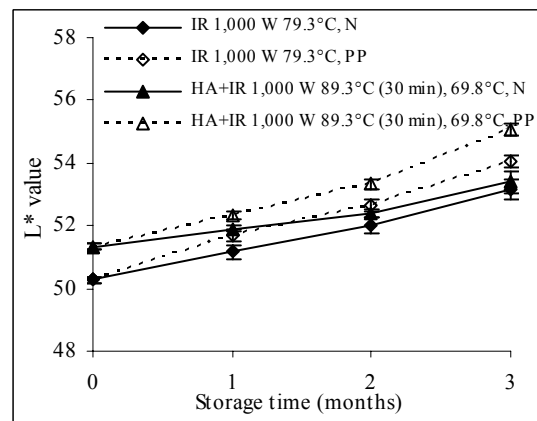
(ก) IR 500 W (150-200 ตัว/กิโลกรัม)



(ข) IR 1,000 W (150-200 ตัว/กิโลกรัม)



(ค) HA+IR 1,000 W (150-200 ตัว/กิโลกรัม)

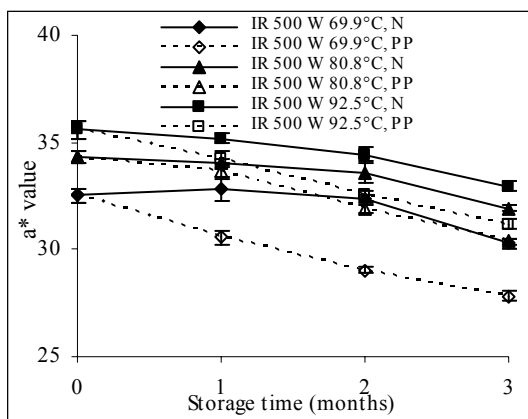


(ง) IR 1,000 W และ HA+IR 1,000 W
(300-400 ตัว/กิโลกรัม)

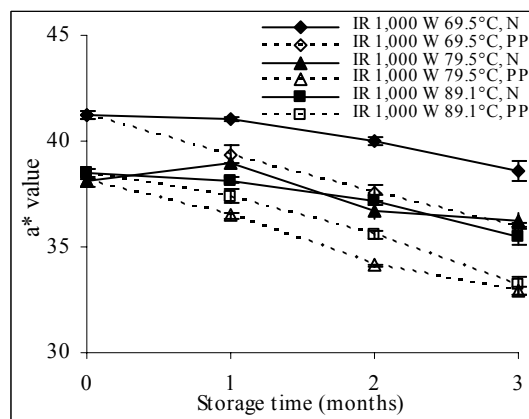
ภาพประกอบ 4.19 ค่าสี L^* ของกึ่งแห้งที่อบแห้งด้วยสถานะต่าง ๆ บรรจุในถุงชนิดต่าง ๆ ภายใต้สถานะบรรยากาศปกติเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง

จากการวัดค่าสี L^* ของกึ่งแห้งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม ที่บรรจุในสถานะปกติที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง แสดงดังภาพประกอบ 4.19 (ก-ค) พบว่า ค่าสี L^* ของกึ่งแห้งระหว่างการเก็บรักษาที่ผ่านการอบแห้งด้วย IR 500 และ 1,000 W และ HA+IR 1,000 W มีค่าอยู่ในช่วง 50.56-59.44 42.41-56.32 และ 46.29-54.10 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาปัจจัยของระยะเวลาการเก็บรักษา พบว่า เมื่อระยะเวลาเก็บรักษาเพิ่มสูงขึ้นค่าสี L^* มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาการ

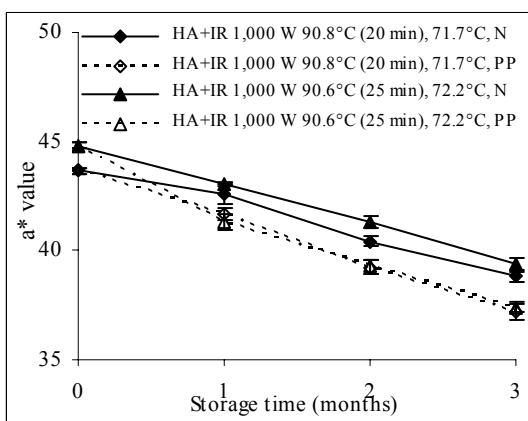
เก็บรักษาของทุกสภาวะการทดลองและถุงทั้งสองชนิดที่ทำการบรรจุอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และเมื่อพิจารณาชนิดของถุง พบว่า การบรรจุถุงแห้งในถุง N มีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่สูงขึ้นของค่าสี L^* ที่ชี้กว่าการบรรจุถุงแห้งในถุง PP อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในทุกสภาวะการทดลอง แสดงดังตารางภาคผนวก 10



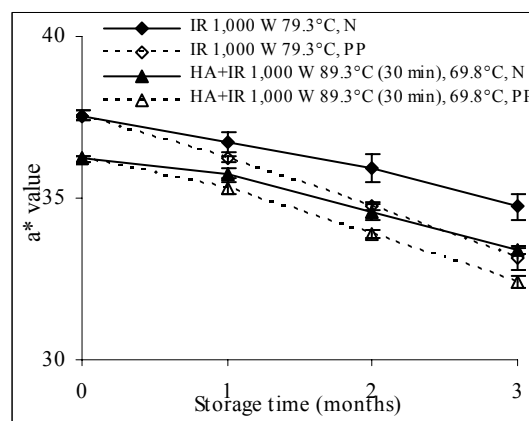
(ก) IR 500 W (150-200 ตัว/กิโลกรัม)



(ข) IR 1,000 W (150-200 ตัว/กิโลกรัม)



(ค) HA+IR 1,000 W (150-200 ตัว/กิโลกรัม)

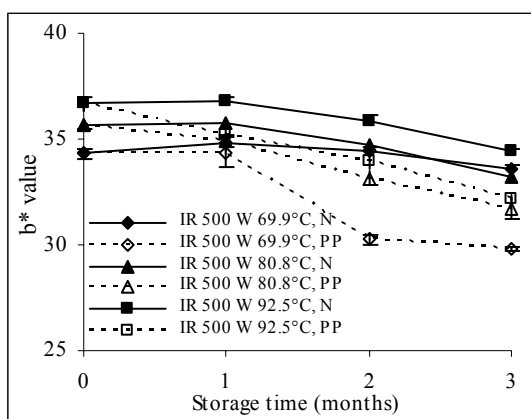


(ง) IR 1,000 W และ HA+IR 1,000 W (300-400 ตัว/กิโลกรัม)

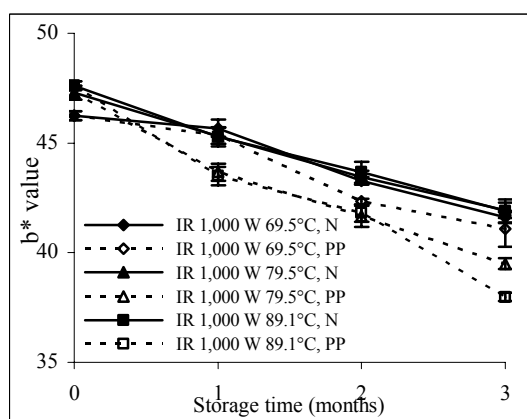
ภาพประกอบ 4.20 ค่าสี a^* ของถุงแห้งที่อบแห้งด้วยสภาวะต่าง ๆ บรรจุในถุงชนิดต่าง ๆ ภายใต้สภาวะบรรยากาศปกติเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง

จากการวัดค่าสี a^* ของถุงแห้งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม ที่บรรจุในสภาวะปกติที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง แสดงดังภาพประกอบ 4.20 (ก-ค) พบว่า ค่าสี a^* ของถุงแห้งระหว่างการเก็บรักษาที่ผ่านการอบแห้งด้วย IR 500 และ 1,000 W และ HA+IR 1,000 W มีค่าอยู่

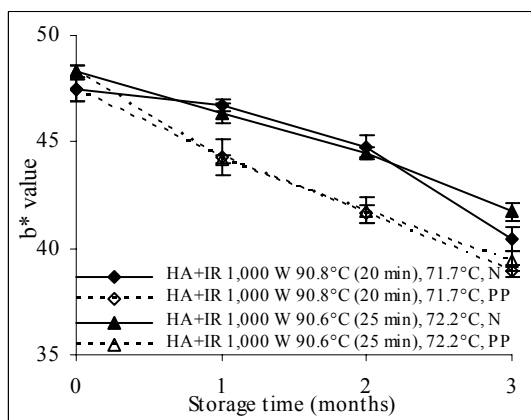
ในช่วง 27.64-35.59 32.76-41.24 และ 36.89-44.79 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาปัจจัยของระยะเวลาการเก็บรักษา พบว่า เมื่อระยะเวลาเก็บรักษาเพิ่มสูงขึ้นค่า b^* มีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นของทุกสภาวะการทดลองและดูทั้งสองชนิดที่ทำการบรรจุอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และเมื่อพิจารณาชนิดของถุง พบว่า การบรรจุถุงแห้งในถุง N มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า b^* ที่ช้ากว่าการบรรจุถุงแห้งในถุง PP อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในทุกสภาวะการทดลอง แสดงดังตารางภาคผนวก 10



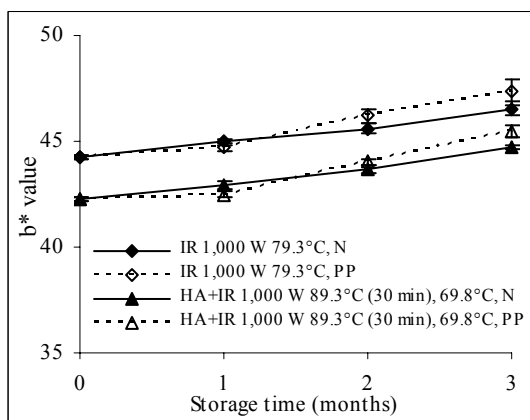
(ก) IR 500 W (150-200 ตัว/กิโลกรัม)



(ข) IR 1,000 W (150-200 ตัว/กิโลกรัม)

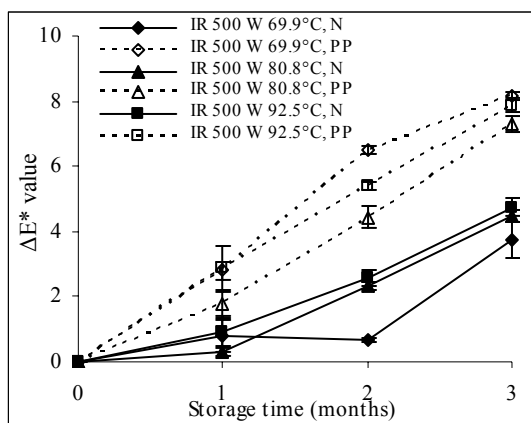


(ค) HA+IR 1,000 W (150-200 ตัว/กิโลกรัม)

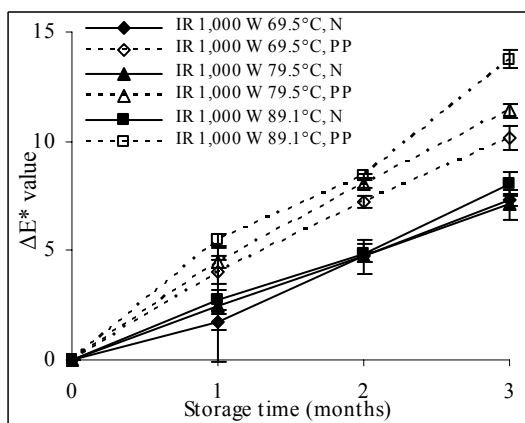


(ง) IR 1,000 W และ HA+IR 1,000 W
(300-400 ตัว/กิโลกรัม)

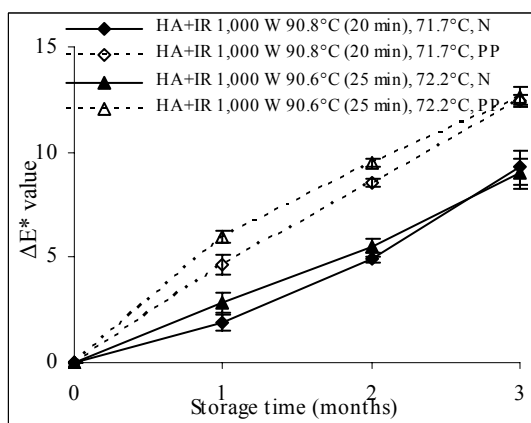
ภาพประกอบ 4.21 ค่า b^* ของกุ้งแห้งที่อบแห้งด้วยสภาวะต่าง ๆ บรรจุในถุงชนิดต่าง ๆ ภายใต้สภาวะบรรยากาศปกติเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง



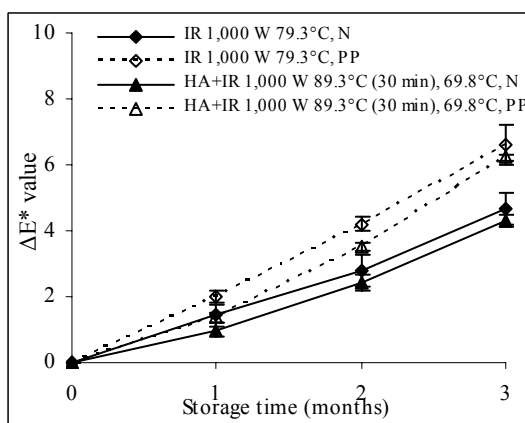
(ก) IR 500 W (150-200 ตัว/กิโลกรัม)



(ข) IR 1,000 W (150-200 ตัว/กิโลกรัม)



(ค) HA+IR 1,000 W (150-200 ตัว/กิโลกรัม)

(ง) IR 1,000 W และ HA+IR 1,000 W
(300-400 ตัว/กิโลกรัม)

ภาพประกอบ 4.22 ค่า ΔE^* ของกุ้งแห้งที่อบแห้งด้วยสภาวะต่างๆ บรรจุในถุงชนิดต่างๆ ภายใต้สภาวะบรรยากาศปกติเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง

จากการวัดค่าสี b^* ของกุ้งแห้งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม ที่บรรจุในสภาวะปกติที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง แสดงดังภาพประกอบ 4.21 (ก-ค) พบว่า ค่าสี b^* ของกุ้งแห้งระหว่างการเก็บรักษาที่ผ่านการอบแห้งด้วย IR 500 และ 1,000 W และ HA+IR 1,000 W มีค่าอยู่ในช่วง 29.78-36.67 37.86-47.60 และ 36.89-48.33 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาปัจจัยของระยะเวลาการเก็บรักษา พบว่า เมื่อระยะเวลาเก็บรักษาเพิ่มสูงขึ้นค่าสี b^* มีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นของทุกสภาวะการทดลองและถุงทั้งสองชนิดที่ทำการบรรจุอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และเมื่อพิจารณาชนิดของถุง พบว่า การบรรจุกุ้งแห้งในถุง N มีอัตราการ

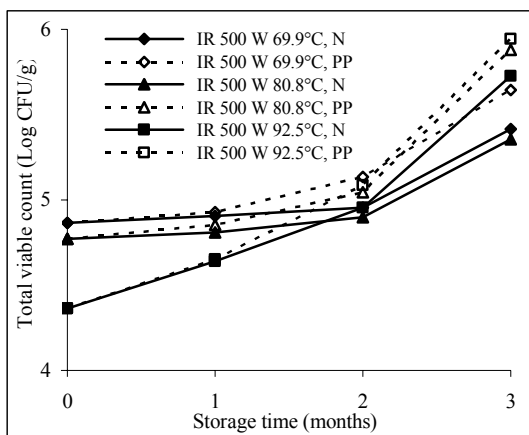
เปลี่ยนแปลงของค่าสี b^* ที่ต่ำกว่าการบรรจุกึ่งแห้งในถุง PP อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในทุกสภาวะการทดลอง แสดงดังตารางภาคผนวก 10

ค่า ΔE^* เป็นค่าที่บอกความแตกต่างของค่าสีระหว่างตัวอย่างกับตัวอย่างมาตรฐาน โดยในการทดลองนี้จะใช้ตัวอย่างค่าสีของกึ่งแห้งเดือนที่ 0 เป็นตัวอย่างมาตรฐาน จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของค่า ΔE^* ของกึ่งแห้งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม ที่บรรจุในสภาวะปกติที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง แสดงดังภาพประกอบ 4.22 (ก-ค) เมื่อพิจารณาปัจจัยของระยะเวลาการเก็บรักษา พบว่า เมื่อระยะเวลาเก็บรักษาเพิ่มสูงขึ้นค่า ΔE^* มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นของทุกสภาวะการทดลองและถุงทั้งสองชนิดที่ทำการบรรจุอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จากค่าเริ่มต้น และเมื่อพิจารณาชนิดของถุง พบว่า การบรรจุกึ่งแห้งในถุง N มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า ΔE^* ที่ต่ำกว่าการบรรจุกึ่งแห้งในถุง PP อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในทุกสภาวะการทดลอง แสดงดังตารางภาคผนวก 10 ซึ่งค่า ΔE^* ที่เปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้จะขึ้นอยู่กับค่า L^* , a^* และ b^* ในระหว่างการเก็บรักษาของกึ่งแห้งที่บรรจุในถุงชนิดต่าง ๆ

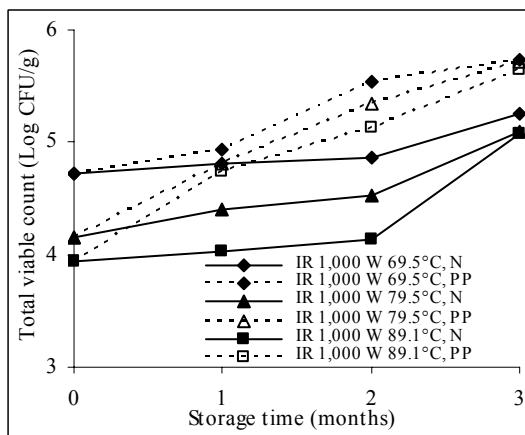
ภาพประกอบ 4.18-4.21 (ง) ผลการวิเคราะห์ค่าสีของกึ่งแห้งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม ของกึ่งแห้งระหว่างการเก็บรักษาที่ผ่านการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดกำลัง 1,000 W และลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดกำลัง 1,000 W พบว่า ค่าสี L^* มีค่า 50.28 และ 51.34 ตามลำดับ ค่าสี a^* มีค่า 37.55 และ 36.21 ตามลำดับ ค่าสี b^* มีค่า 44.21 และ 42.26 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาปัจจัยของระยะเวลาการเก็บรักษา พบว่า เมื่อระยะเวลาเก็บรักษาเพิ่มสูงขึ้นค่าสี L^* , b^* และ ΔE^* มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนค่าสี a^* มีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นของถุงทั้งสองชนิดที่ทำการบรรจุอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และเมื่อพิจารณาชนิดของถุง พบว่า การบรรจุกึ่งแห้งในถุง N มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าสี L^* , a^* , b^* และ ΔE^* ที่ต่ำกว่าการบรรจุกึ่งแห้งในถุง PP อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในทุกสภาวะการทดลอง แสดงดังตารางภาคผนวก 11

4.6.1.2 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางด้านจุลชีววิทยา

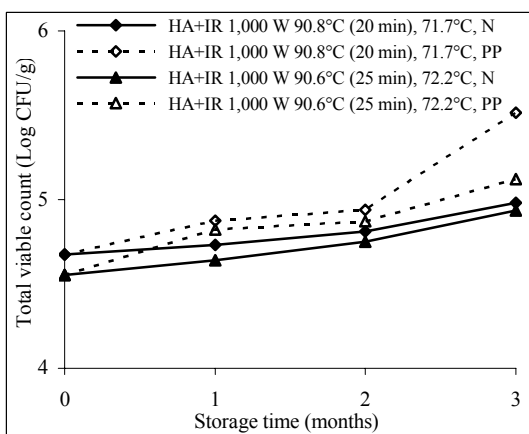
เมื่อวิเคราะห์คุณภาพทางด้านจุลชีววิทยาของกึ่งแห้งก่อนการบรรจุ พบว่าจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดก่อนทำการบรรจุมีค่าอยู่ในช่วง 3.13×10^3 - 7.34×10^4 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม และจำนวนของยีสต์และราอยู่ในช่วง 30-52 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม โดยกึ่งแห้งที่นำมาศึกษานี้อยู่ในเกณฑ์ของมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนของกึ่งแห้ง (มผช. 309/2547)



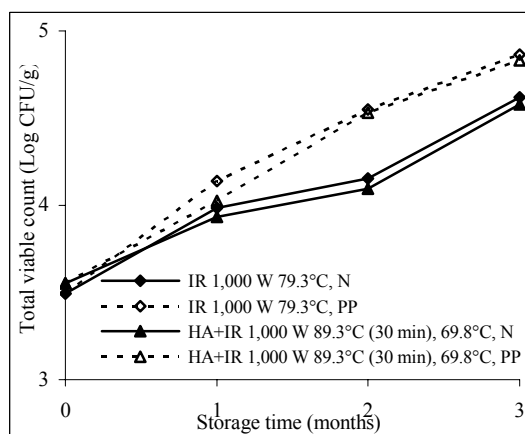
(ก) IR 500 W (150-200 ตัว/กิโลกรัม)



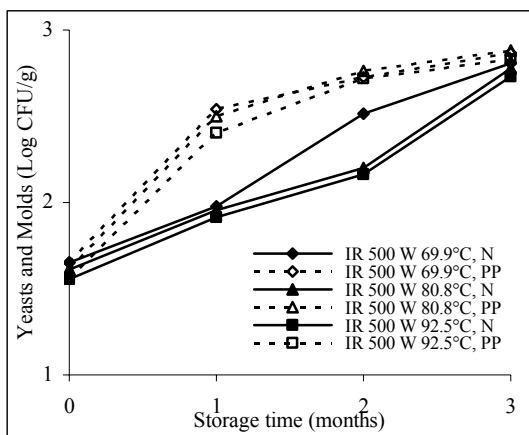
(ข) IR 1,000 W (150-200 ตัว/กิโลกรัม)



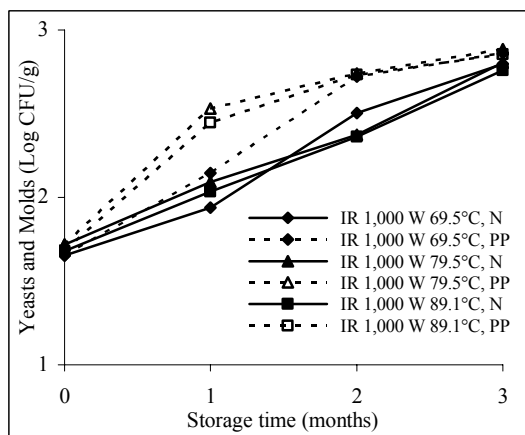
(ค) HA+IR 1,000 W (150-200 ตัว/กิโลกรัม)

(ง) IR 1,000 W และ HA+IR 1,000 W
(300-400 ตัว/กิโลกรัม)

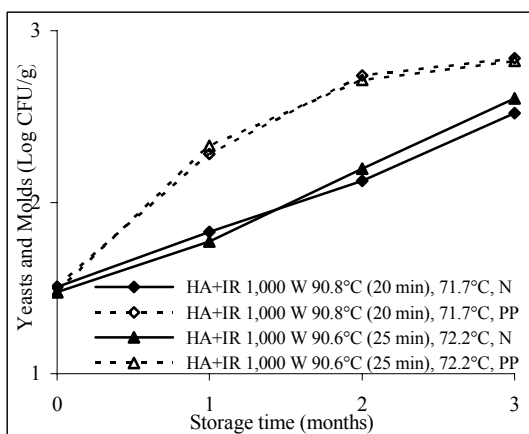
ภาพประกอบ 4.23 ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดของกุ้งแห้งที่อบแห้งด้วยสภาวะต่าง ๆ บรรจุในถุงชนิดต่าง ๆ ภายใต้สภาวะบรรยากาศปกติเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง



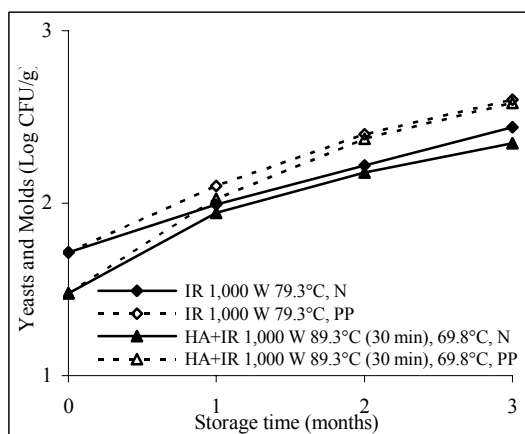
(ก) IR 500 W (150-200 ตัว/กิโลกรัม)



(ข) IR 1,000 W (150-200 ตัว/กิโลกรัม)



(ค) HA+IR 1,000 W (150-200 ตัว/กิโลกรัม)

(ง) IR 1,000 W และ HA+IR 1,000 W
(300-400 ตัว/กิโลกรัม)

ภาพประกอบ 4.24 ปริมาณยีสต์และราของกุ้งแห้งที่อบแห้งด้วยสภาวะต่าง ๆ บรรจุในถุงชนิดต่าง ๆ ภายใต้สภาวะบรรยากาศปกติเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง

จากการวิเคราะห์จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดและจำนวนยีสต์และราของกุ้งแห้งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม ที่บรรจุในถุง N และถุง PP ในสภาวะปกติ เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องแสดงดังภาพประกอบ 4.23 (ก-ค) และ 4.24 (ก-ค) เมื่อพิจารณาปัจจัยของระยะเวลาการเก็บรักษา พบว่าเมื่อระยะเวลาเก็บรักษาเพิ่มสูงขึ้นจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดและจำนวนยีสต์และรา มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษาทุกสภาวะการทดลองของถุงทุกชนิดที่ทำการบรรจุ โดยที่อัตราการเพิ่มสูงขึ้นของจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดและจำนวนของยีสต์และราขึ้นกับปริมาณความชื้นเริ่มต้นก่อนทำการบรรจุ สภาพแวดล้อมและปัจจัยต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ ปริมาณความชื้น ค่า a_w เป็น

ต้น เอื้ออำนวยต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ และเมื่อพิจารณาปัจจัยชนิดของถุง พบว่า การบรรจุ ถุงแห้งในถุง N มีอัตราการเพิ่มสูงขึ้นของจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดและจำนวนของยีสต์และราที่ช้ากว่าการบรรจุถุงแห้งในถุง PP ในทุก ๆ เดือน ในทุกกรณีของการอบแห้ง ถุงแห้งที่บรรจุในถุง N สามารถเก็บรักษาได้นาน 2 เดือน ส่วนถุงแห้งที่บรรจุในถุง PP สามารถเก็บรักษาได้นาน 1 เดือน สำหรับถุงแห้งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม แสดงผลดังภาพประกอบ 4.23 (ง) และ 4.24 (ง) พบว่า จากการวิเคราะห์คุณภาพทางจุลชีววิทยามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับถุงแห้งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม ถุงแห้งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม ที่บรรจุในถุง N และถุง PP สามารถเก็บรักษาได้นาน 3 เดือน โดยที่ถุงแห้งที่บรรจุในถุง PP จะมีอัตราการเพิ่มของจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์และราสูงกว่าในถุง N เมื่อเปรียบเทียบในเดือนเดียวกัน ทั้งนี้เป็นเพราะการบรรจุในถุง PP สภาพบรรยากาศปกติเอื้ออำนวยต่อการเจริญเติบโตมากกว่าการบรรจุในถุง N เนื่องจากคุณสมบัติการซึมผ่านไอน้ำ และออกซิเจนมีค่าที่สูงกว่า ส่งผลต่อค่า a_w สูงขึ้นเหมาะแก่การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ นอกจากนี้ถุง PP เป็นถุงที่มีลักษณะบางเมื่อถูกตัวถุงไปสัมผัสกับตัวถุงทำให้ถุงเกิดการขาดทำให้อากาศจากภายนอกเกิดการแพร่เข้าไปยังภายในถุงทำให้ปริมาณความชื้นเพิ่มอย่างรวดเร็วซึ่งส่งผลต่อปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดและจำนวนของยีสต์และราที่มีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

4.6.1.3 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัส

การทดสอบคุณภาพของประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ถุงแห้งที่ผ่านการอบแห้งด้วยสภาวะต่าง ๆ โดยทำการบรรจุในถุง N และถุง PP โดยบรรจุในสภาวะปกติ โดยเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ทำการทดสอบโดยให้ผู้ทดสอบจำนวน 20 คน แสดงคะแนนความชอบต่อผลิตภัณฑ์ถุงแห้งทางด้านต่าง ๆ โดยศึกษาแต่ละคุณลักษณะ คือ สี ลักษณะปรากฏ ลักษณะเนื้อสัมผัส กลิ่น หิน รสเค็ม และความชอบรวม

จากตาราง 4.10 แสดงผลการทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ถุงแห้งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม ที่ผ่านการอบแห้งด้วยสภาวะต่าง ๆ โดยทำการบรรจุในถุง N และถุง PP โดยบรรจุในสภาวะปกติ โดยเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง คุณภาพของถุงแห้งก่อนการบรรจุ ผู้ทดสอบทางประสาทสัมผัสให้ความเห็นว่า ถุงแห้งมีสีส้ม ลักษณะปรากฏของตัวถุงมีลักษณะตัวใสเล็กน้อยถึงขุ่นและแห้งบางส่วน คุณภาพทางด้านเนื้อสัมผัสด้วยการชิม พบว่า ผิวด้านนอกของตัวถุงเหนียวเล็กน้อยแต่เนื้อด้านในนุ่ม ถุงแห้งมีกลิ่นคาวเพียงเล็กน้อยและมีรสเค็มเล็กน้อยถึงปานกลาง หากพิจารณาคะแนนความชอบรวม พบว่า ผู้ทดสอบทางประสาทสัมผัสให้คะแนนความชอบถุงแห้งอยู่ในระดับเล็กน้อยถึงปานกลางของทุกสภาวะการทดลอง เมื่อพิจารณาปัจจัยของระยะเวลา

การเก็บรักษา พบว่า เมื่อระยะเวลาเก็บรักษาเพิ่มสูงขึ้น สีของผลิตภัณฑ์กุ้งแห้งเปลี่ยนแปลงจากสีส้มไปเป็นสีส้มอ่อนอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งสอดคล้องกับค่า a^* คือ ค่า a^* ซึ่งเป็นค่าของสีแดงมีค่าลดลง ลักษณะเนื้อสัมผัส เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้น ส่งผลให้ความแข็งของผลิตภัณฑ์มีค่าลดลง แต่ผลิตภัณฑ์มีความเหนียวเพิ่มมากขึ้น อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และความพึงพอใจโดยรวมของผู้บริโภค ได้รับคะแนนการยอมรับคุณภาพทางประสาทสัมผัสโดยรวมลดลงตามระยะเวลาการเก็บรักษาอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยที่ผู้บริโภคยังให้การยอมรับในตัวผลิตภัณฑ์ของกุ้งแห้งอยู่ แต่เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นส่งผลให้ผลิตภัณฑ์กุ้งแห้งมีการเพิ่มขึ้นของกลิ่นหืนอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ส่วนลักษณะปรากฏ และรสชาติของกุ้งแห้ง เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของลักษณะปรากฏ และรสชาติของกุ้งแห้งอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ตามระยะเวลาการเก็บรักษาที่เพิ่มขึ้น ในทุกสภาวะการทดลองและถุงทั้งสองชนิดที่ทำการบรรจุ และเมื่อพิจารณาในส่วนของชนิดของถุง พบว่า การบรรจุกุ้งแห้งในถุง N มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัสที่ช้ากว่าการบรรจุกุ้งแห้งในถุง PP ซึ่งกุ้งแห้งที่บรรจุในถุง N มีคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสที่ดีว่ากุ้งแห้งที่บรรจุในถุง PP ทุกสภาวะการทดลอง โดยผู้บริโภคให้การยอมรับกุ้งแห้งที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดกำลัง 1,000 W ที่บรรจุในถุง N มากที่สุด เพราะว่ามีคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสที่ดีที่สุด และมีคุณลักษณะของสีดีที่สุด ตัวกุ้งมีลักษณะด้านนอกเหนียวโดยเนื้อด้านในนุ่ม

ตาราง 4.10 คุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของกุ้งแห้งที่อบแห้งด้วยสภาวะต่าง ๆ เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ใช้กุ้งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม

| สภาวะการอบแห้ง | ชนิดกุ้ง | เดือน | คุณลักษณะทางประสาทสัมผัส | | | | | |
|--------------------|----------|-------|---------------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|
| | | | สี | ลักษณะปรากฏ | ลักษณะเนื้อสัมผัส | กลิ่นหืน | รสเค็ม | ความชอบรวม |
| IR 500 W 69.9°C | N | 0 | 3.00±0.65 ^{aA} | 2.70±0.66 ^{aA} | 3.20±0.70 ^{aA} | 2.50±0.61 ^{aA} | 2.75±0.55 ^{aA} | 3.35±0.49 ^{aB} |
| | | 1 | 2.90±0.72 ^{aA} | 2.65±0.59 ^{aA} | 3.10±0.72 ^{aA} | 2.70±0.57 ^{aAB} | 2.70±0.73 ^{aA} | 3.15±0.59 ^{aAB} |
| | | 2 | 2.80±0.62 ^{abA} | 2.65±0.59 ^{aA} | 3.00±0.73 ^{aA} | 2.90±0.64 ^{aAB} | 2.70±0.73 ^{aA} | 3.00±0.56 ^{abAB} |
| | | 3 | 2.65±0.57 ^{abA} | 2.55±0.60 ^{aA} | 2.90±0.72 ^{abA} | 3.00±0.73 ^{aB} | 2.65±0.67 ^{aA} | 2.80±0.52 ^{aA} |
| | PP | 0 | 3.00±0.65 ^{aB} | 2.70±0.66 ^{aA} | 3.20±0.70 ^{aB} | 2.50±0.61 ^{aA} | 2.75±0.55 ^{aA} | 3.35±0.49 ^{aB} |
| | | 1 | 2.70±0.57 ^{aAB} | 2.60±0.50 ^{aA} | 2.95±0.69 ^{aAB} | 2.85±0.49 ^{aAB} | 2.65±0.59 ^{aA} | 3.05±0.69 ^{aAB} |
| | | 2 | 2.55±0.51 ^{aAB} | 2.50±0.51 ^{aA} | 2.85±0.67 ^{aAB} | 3.05±0.60 ^{abC} | 2.55±0.51 ^{aA} | 2.85±0.75 ^{aA} |
| | | 3 | 2.40±0.50 ^{aA} | 2.45±0.51 ^{aA} | 2.70±0.57 ^{aA} | 3.25±0.55 ^{aC} | 2.45±0.51 ^{aA} | 2.70±0.57 ^{aA} |
| IR 500 W 80.8°C | N | 0 | 3.20±0.52 ^{aB} | 2.85±0.59 ^{aA} | 3.30±0.57 ^{aA} | 2.45±0.51 ^{aA} | 2.85±0.49 ^{aA} | 3.45±0.51 ^{aB} |
| | | 1 | 3.05±0.60 ^{aAB} | 2.75±0.64 ^{aA} | 3.20±0.52 ^{aA} | 2.55±0.51 ^{aAB} | 2.80±0.41 ^{aA} | 3.30±0.47 ^{aAB} |
| | | 2 | 2.90±0.72 ^{abAB} | 2.65±0.59 ^{aA} | 3.05±0.60 ^{aA} | 2.60±0.50 ^{aAB} | 2.70±0.47 ^{aA} | 3.15±0.49 ^{abAB} |
| | | 3 | 2.75±0.44 ^{aA} | 2.55±0.60 ^{aA} | 3.00±0.46 ^{abA} | 2.90±0.64 ^{aB} | 2.60±0.50 ^{aA} | 3.00±0.65 ^{aA} |
| | PP | 0 | 3.20±0.52 ^{aB} | 2.85±0.59 ^{aA} | 3.30±0.57 ^{aB} | 2.45±0.51 ^{aA} | 2.85±0.49 ^{aA} | 3.45±0.51 ^{aB} |
| | | 1 | 2.90±0.55 ^{aAB} | 2.65±0.59 ^{aA} | 3.05±0.51 ^{aAB} | 2.70±0.47 ^{aAB} | 2.70±0.47 ^{aA} | 3.15±0.49 ^{aAB} |
| | | 2 | 2.70±0.57 ^{aAB} | 2.60±0.60 ^{aA} | 2.95±0.69 ^{aAB} | 2.95±0.39 ^{abC} | 2.65±0.50 ^{aA} | 3.00±0.56 ^{aA} |
| | | 3 | 2.60±0.60 ^{aA} | 2.55±0.51 ^{aA} | 2.85±0.59 ^{aA} | 3.15±0.75 ^{aC} | 2.60±0.50 ^{aA} | 2.80±0.52 ^{aA} |
| IR 500 W 92.5°C | N | 0 | 3.20±0.62 ^{aA} | 2.85±0.67 ^{aA} | 3.30±0.66 ^{aA} | 2.40±0.50 ^{aA} | 2.60±0.50 ^{aA} | 3.50±0.51 ^{aB} |
| | | 1 | 3.10±0.55 ^{aA} | 2.85±0.58 ^{aA} | 3.15±0.67 ^{aA} | 2.55±0.51 ^{aAB} | 2.60±0.50 ^{aA} | 3.35±0.49 ^{abAB} |
| | | 2 | 3.00±0.65 ^{abA} | 2.80±0.62 ^{aA} | 3.10±0.72 ^{aA} | 2.65±0.59 ^{abAB} | 2.50±0.51 ^{aA} | 3.20±0.52 ^{bAB} |
| | | 3 | 2.85±0.59 ^{abA} | 2.75±0.64 ^{aA} | 3.05±0.60 ^{abA} | 2.80±0.62 ^{aB} | 2.45±0.51 ^{aA} | 3.10±0.64 ^{bA} |
| | PP | 0 | 3.20±0.62 ^{aB} | 2.85±0.67 ^{aA} | 3.30±0.66 ^{aB} | 2.40±0.50 ^{aA} | 2.60±0.50 ^{aA} | 3.50±0.51 ^{aC} |
| | | 1 | 2.95±0.60 ^{aAB} | 2.75±0.55 ^{aA} | 3.05±0.60 ^{aAB} | 2.65±0.49 ^{aAB} | 2.55±0.51 ^{aA} | 3.15±0.49 ^{aB} |
| | | 2 | 2.75±0.64 ^{aA} | 2.70±0.57 ^{aA} | 2.90±0.55 ^{aA} | 2.80±0.62 ^{abC} | 2.45±0.51 ^{aA} | 2.85±0.59 ^{aAB} |
| | | 3 | 2.60±0.50 ^{aA} | 2.70±0.47 ^{aA} | 2.80±0.52 ^{aA} | 3.05±0.76 ^{aC} | 2.45±0.51 ^{aA} | 2.65±0.49 ^{aA} |

หมายเหตุ : a-b และ A-C คือ ในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ของแต่ละสภาวะการทดลอง

ตาราง 4.10 (ต่อ) คุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของกุ้งแห้งที่อบแห้งด้วยสภาวะต่าง ๆ เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ใช้กุ้งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม

| สภาวะการอบแห้ง | ชนิดกุ้ง | เดือน | คุณลักษณะทางประสาทสัมผัส | | | | | |
|----------------------|----------|-------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|
| | | | สี | ลักษณะปรากฏ | ลักษณะเนื้อสัมผัส | กลิ่นหืน | รสเค็ม | ความชอบรวม |
| IR 1,000 W 69.5°C | N | 0 | 3.35±0.49 ^{aA} | 2.65±0.49 ^{aA} | 3.15±0.67 ^{aA} | 2.30±0.66 ^{aA} | 2.65±0.59 ^{aA} | 3.35±0.59 ^{aB} |
| | | 1 | 3.25±0.44 ^{aA} | 2.50±0.51 ^{aA} | 3.00±0.56 ^{aA} | 2.50±0.51 ^{aA} | 2.50±0.51 ^{aA} | 3.20±0.62 ^{aAB} |
| | | 2 | 3.20±0.41 ^{abA} | 2.50±0.51 ^{aA} | 2.85±0.75 ^{abA} | 2.70±0.47 ^{aAB} | 2.45±0.51 ^{aA} | 3.00±0.46 ^{abAB} |
| | | 3 | 3.10±0.45 ^{bA} | 2.40±0.50 ^{aA} | 2.75±0.64 ^{aA} | 2.95±0.76 ^{ab} | 2.45±0.51 ^{aA} | 2.85±0.49 ^{aA} |
| | PP | 0 | 3.35±0.49 ^{aC} | 2.65±0.49 ^{aA} | 3.15±0.67 ^{aC} | 2.30±0.66 ^{aA} | 2.65±0.59 ^{aA} | 3.35±0.59 ^{aC} |
| | | 1 | 3.15±0.59 ^{aBC} | 2.40±0.50 ^{aA} | 2.85±0.59 ^{aBC} | 2.70±0.66 ^{aB} | 2.45±0.51 ^{aA} | 3.05±0.60 ^{aBC} |
| | | 2 | 2.95±0.60 ^{aAB} | 2.35±0.49 ^{aA} | 2.60±0.50 ^{aAB} | 3.00±0.65 ^{aBC} | 2.45±0.51 ^{aA} | 2.80±0.62 ^{aAB} |
| | | 3 | 2.75±0.44 ^{aA} | 2.35±0.49 ^{aA} | 2.45±0.51 ^{aA} | 3.20±0.52 ^{aC} | 2.40±0.50 ^{aA} | 2.60±0.50 ^{aA} |
| IR 1,000 W 79.5°C | N | 0 | 3.35±0.49 ^{aB} | 2.60±0.50 ^{aA} | 3.20±0.77 ^{aA} | 2.40±0.50 ^{aA} | 2.50±0.51 ^{aA} | 3.35±0.49 ^{aB} |
| | | 1 | 3.25±0.55 ^{aAB} | 2.50±0.51 ^{aA} | 3.15±0.75 ^{aA} | 2.55±0.51 ^{aAB} | 2.45±0.51 ^{aA} | 3.25±0.55 ^{aB} |
| | | 2 | 3.15±0.37 ^{abAB} | 2.45±0.51 ^{abA} | 2.90±0.45 ^{abA} | 2.70±0.47 ^{abAB} | 2.40±0.50 ^{aA} | 3.05±0.60 ^{abAB} |
| | | 3 | 2.95±0.51 ^{aA} | 2.35±0.59 ^{abA} | 2.80±0.52 ^{aA} | 2.90±0.72 ^{aB} | 2.35±0.49 ^{aA} | 2.85±0.49 ^{aA} |
| | PP | 0 | 3.35±0.49 ^{aC} | 2.60±0.50 ^{aB} | 3.20±0.77 ^{aC} | 2.40±0.50 ^{aA} | 2.50±0.51 ^{aA} | 3.35±0.49 ^{aC} |
| | | 1 | 3.15±0.37 ^{aBC} | 2.35±0.59 ^{aAB} | 2.90±0.45 ^{aBC} | 2.65±0.49 ^{aAB} | 2.40±0.50 ^{aA} | 3.15±0.59 ^{aBC} |
| | | 2 | 2.90±0.31 ^{aAB} | 2.20±0.52 ^{aA} | 2.65±0.49 ^{aAB} | 2.85±0.59 ^{aBC} | 2.40±0.50 ^{aA} | 2.95±0.60 ^{aAB} |
| | | 3 | 2.70±0.47 ^{aA} | 2.10±0.45 ^{aA} | 2.45±0.51 ^{aA} | 3.10±0.45 ^{aC} | 2.30±0.47 ^{aA} | 2.75±0.44 ^{aA} |
| IR 1,000 W 89.1°C | N | 0 | 3.40±0.50 ^{aB} | 2.50±0.51 ^{aA} | 3.15±0.59 ^{aC} | 2.35±0.49 ^{aA} | 2.55±0.51 ^{aA} | 3.40±0.50 ^{aB} |
| | | 1 | 3.25±0.44 ^{aAB} | 2.45±0.51 ^{aA} | 3.00±0.46 ^{aBC} | 2.45±0.51 ^{aA} | 2.50±0.51 ^{aA} | 3.20±0.52 ^{abAB} |
| | | 2 | 3.15±0.59 ^{abAB} | 2.45±0.51 ^{aA} | 2.80±0.52 ^{abAB} | 2.65±0.49 ^{abAB} | 2.45±0.51 ^{aA} | 3.10±0.45 ^{abAB} |
| | | 3 | 3.00±0.46 ^{aA} | 2.40±0.50 ^{abA} | 2.65±0.49 ^{aA} | 2.80±0.52 ^{aB} | 2.40±0.50 ^{aA} | 3.00±0.46 ^{bA} |
| | PP | 0 | 3.40±0.50 ^{aC} | 2.50±0.51 ^{aB} | 3.15±0.59 ^C | 2.35±0.49 ^{aA} | 2.55±0.51 ^{aA} | 3.40±0.50 ^{aC} |
| | | 1 | 3.15±0.59 ^{aBC} | 2.40±0.50 ^{aAB} | 2.85±0.59 ^{BC} | 2.70±0.66 ^{aAB} | 2.45±0.51 ^{aA} | 3.05±0.60 ^{aB} |
| | | 2 | 2.95±0.60 ^{aAB} | 2.35±0.49 ^{aAB} | 2.60±0.50 ^{aAB} | 3.00±0.65 ^{aBC} | 2.45±0.51 ^{aA} | 2.80±0.62 ^{aAB} |
| | | 3 | 2.75±0.44 ^{aA} | 2.35±0.49 ^{aAB} | 2.45±0.51 ^{aA} | 3.20±0.52 ^{bC} | 2.40±0.50 ^{aA} | 2.60±0.50 ^{aA} |

หมายเหตุ : a-b และ A-C คือ ในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ของแต่ละสภาวะการทดลอง

ตาราง 4.10 (ต่อ) คุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของกึ่งแข็งที่อบแห้งด้วยสภาวะต่าง ๆ เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ใช้กึ่งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม

| สภาวะการอบแห้ง | ชนิดกึ่ง | เดือน | คุณลักษณะทางประสาทสัมผัส | | | | | ความชอบรวม |
|---|----------|-------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|
| | | | สี | ลักษณะปรากฏ | ลักษณะเนื้อสัมผัส | กลิ่นหืน | รสเค็ม | |
| HA+IR 1,000 W 90.8°C (20 min), 71.7°C | N | 0 | 3.55±0.51 ^{aB} | 2.55±0.51 ^{aA} | 3.25±0.55 ^{aB} | 2.25±0.44 ^{aA} | 2.50±0.51 ^{aA} | 3.55±0.60 ^{aA} |
| | | 1 | 3.45±0.51 ^{aAB} | 2.50±0.51 ^{aA} | 3.15±0.37 ^{aB} | 2.45±0.51 ^{abAB} | 2.45±0.51 ^{aA} | 3.45±0.51 ^{aA} |
| | | 2 | 3.30±0.47 ^{abAB} | 2.40±0.50 ^{aA} | 3.00±0.46 ^{abAB} | 2.65±0.49 ^{abBC} | 2.40±0.50 ^{aA} | 3.35±0.49 ^{abA} |
| | | 3 | 3.20±0.41 ^{aA} | 2.40±0.50 ^{aA} | 2.80±0.41 ^{aA} | 2.80±0.41 ^{aC} | 2.40±0.50 ^{aA} | 3.25±0.44 ^{aA} |
| | PP | 0 | 3.55±0.51 ^{aC} | 2.55±0.51 ^{aA} | 3.25±0.55 ^{aC} | 2.25±0.44 ^{aA} | 2.50±0.51 ^{aA} | 3.55±0.60 ^{bcC} |
| | | 1 | 3.30±0.57 ^{aBC} | 2.35±0.49 ^{aA} | 3.00±0.46 ^{aBC} | 2.60±0.50 ^{aB} | 2.40±0.50 ^{aA} | 3.30±0.47 ^{abBC} |
| | | 2 | 3.15±0.37 ^{aAB} | 2.30±0.47 ^{aA} | 2.80±0.41 ^{aAB} | 2.75±0.44 ^{abC} | 2.35±0.49 ^{aA} | 3.15±0.49 ^{aAB} |
| | | 3 | 2.95±0.51 ^{aA} | 2.30±0.47 ^{aA} | 2.60±0.50 ^{aA} | 2.90±0.31 ^{aC} | 2.35±0.49 ^{aA} | 2.85±0.49 ^{aA} |
| HA+IR 1,000 W 90.6°C (25 min), 72.2°C | N | 0 | 3.60±0.50 ^{aB} | 2.65±0.49 ^{aA} | 3.30±0.47 ^{aB} | 2.30±0.47 ^{aA} | 2.60±0.50 ^{aA} | 3.60±0.50 ^{aB} |
| | | 1 | 3.50±0.51 ^{aAB} | 2.55±0.51 ^{aA} | 3.20±0.41 ^{aB} | 2.50±0.51 ^{abAB} | 2.50±0.51 ^{aA} | 3.45±0.51 ^{abB} |
| | | 2 | 3.35±0.49 ^{abAB} | 2.45±0.51 ^{aA} | 3.05±0.39 ^{abAB} | 2.70±0.47 ^{abC} | 2.40±0.50 ^{aA} | 3.30±0.47 ^{abAB} |
| | | 3 | 3.25±0.44 ^{aA} | 2.40±0.40 ^{aA} | 2.90±0.31 ^{aA} | 2.85±0.37 ^{aC} | 2.35±0.49 ^{aA} | 3.05±0.51 ^{aA} |
| | PP | 0 | 3.60±0.50 ^{aB} | 2.65±0.49 ^{aA} | 3.30±0.47 ^{aC} | 2.30±0.47 ^{aA} | 2.60±0.50 ^{aA} | 3.60±0.50 ^{aC} |
| | | 1 | 3.35±0.49 ^{aAB} | 2.45±0.51 ^{aA} | 3.10±0.45 ^{abC} | 2.65±0.49 ^{aB} | 2.45±0.51 ^{aA} | 3.25±0.44 ^{abB} |
| | | 2 | 3.20±0.52 ^{aA} | 2.35±0.49 ^{aA} | 2.85±0.49 ^{aAB} | 2.80±0.41 ^{abC} | 2.40±0.50 ^{aA} | 3.15±0.37 ^{abAB} |
| | | 3 | 3.10±0.55 ^{aA} | 2.35±0.49 ^{aA} | 2.70±0.47 ^{aA} | 2.95±0.22 ^{aC} | 2.35±0.49 ^{aA} | 2.95±0.39 ^{aA} |

หมายเหตุ : a-b และ A-C คือ ในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ของแต่ละสภาวะการทดลอง

จากตาราง 4.11 ผลการทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์กึ่งแข็งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม ที่ผ่านการอบแห้งด้วยสภาวะต่าง ๆ พบว่า ผลการทดลองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับกึ่งแข็งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม

ตาราง 4.11 คุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของกึ่งแข็งที่อบแห้งด้วยสภาวะต่าง ๆ เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ใช้กึ่งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม

| สภาวะการอบแห้ง | ชนิดถุ่ | เดือน | คุณลักษณะทางประสาทสัมผัส | | | | | ความชอบรวม |
|---|---------|-------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|
| | | | สี | ลักษณะปรากฏ | ลักษณะเนื้อสัมผัส | กลิ่นหืน | รสเค็ม | |
| IR 1,000 W 79.3°C | N | 0 | 3.45±0.51 ^{aB} | 2.65±0.49 ^{aA} | 2.85±0.59 ^{aB} | 2.55±0.51 ^{aA} | 2.60±0.50 ^{aA} | 3.40±0.50 ^{aB} |
| | | 1 | 3.30±0.57 ^{aAB} | 2.60±0.50 ^{aA} | 2.65±0.49 ^{aAB} | 2.65±0.49 ^{aAB} | 2.55±0.51 ^{aA} | 3.30±0.57 ^{aAB} |
| | | 2 | 3.20±0.62 ^{abAB} | 2.55±0.51 ^{aA} | 2.55±0.51 ^{abAB} | 2.80±0.62 ^{abAB} | 2.50±0.51 ^{aA} | 3.15±0.59 ^{aAB} |
| | | 3 | 3.05±0.60 ^{abA} | 2.45±0.51 ^{aA} | 2.45±0.51 ^{aA} | 3.00±0.56 ^{aB} | 2.40±0.50 ^{aA} | 3.00±0.46 ^{aA} |
| | PP | 0 | 3.45±0.51 ^{aA} | 2.65±0.49 ^{aA} | 2.85±0.59 ^{aB} | 2.55±0.51 ^{aA} | 2.60±0.50 ^{aA} | 3.40±0.50 ^{aB} |
| | | 1 | 3.20±0.70 ^{aA} | 2.50±0.51 ^{aA} | 2.55±0.60 ^{aAB} | 2.75±0.44 ^{aAB} | 2.50±0.51 ^{aA} | 3.20±0.77 ^{aAB} |
| | | 2 | 3.05±0.60 ^{aA} | 2.45±0.51 ^{aA} | 2.40±0.60 ^{aA} | 3.00±0.46 ^{aBC} | 2.45±0.51 ^{aA} | 3.05±0.51 ^{aAB} |
| | | 3 | 2.90±0.55 ^{aA} | 2.40±0.50 ^{aA} | 2.25±0.44 ^{aA} | 3.20±0.41 ^{aC} | 2.40±0.50 ^{aA} | 2.80±0.62 ^{aA} |
| HA+IR 1,000 W 89.3°C (30 min), 69.8°C | N | 0 | 3.35±0.59 ^{aA} | 2.70±0.47 ^{aA} | 2.90±0.45 ^{aA} | 2.50±0.51 ^{aA} | 2.55±0.51 ^{aA} | 3.35±0.49 ^{aB} |
| | | 1 | 3.20±0.62 ^{aA} | 2.65±0.49 ^{aA} | 2.75±0.55 ^{abA} | 2.60±0.50 ^{aAB} | 2.50±0.51 ^{aA} | 3.25±0.55 ^{aB} |
| | | 2 | 3.10±0.55 ^{abA} | 2.55±0.51 ^{aA} | 2.65±0.59 ^{abA} | 2.75±0.44 ^{abAB} | 2.45±0.51 ^{aA} | 3.15±0.37 ^{aAB} |
| | | 3 | 3.00±0.45 ^{abA} | 2.50±0.51 ^{aA} | 2.55±0.51 ^{aA} | 2.90±0.64 ^{aB} | 2.45±0.51 ^{aA} | 2.90±0.55 ^{aA} |
| | PP | 0 | 3.35±0.59 ^{aC} | 2.70±0.47 ^{aA} | 2.90±0.45 ^{abB} | 2.50±0.51 ^{aA} | 2.55±0.51 ^{aA} | 3.35±0.49 ^{aC} |
| | | 1 | 3.10±0.45 ^{abB} | 2.55±0.51 ^{aA} | 2.55±0.51 ^{aA} | 2.75±0.55 ^{aAB} | 2.45±0.51 ^{aA} | 3.20±0.52 ^{abC} |
| | | 2 | 3.00±0.32 ^{abAB} | 2.45±0.51 ^{aA} | 2.45±0.51 ^{aA} | 2.95±0.51 ^{aB} | 2.40±0.50 ^{aA} | 3.00±0.56 ^{abAB} |
| | | 3 | 2.80±0.41 ^{aA} | 2.40±0.50 ^{aA} | 2.30±0.47 ^{aA} | 3.05±0.22 ^{aB} | 2.350.49 ^{aA} | 2.75±0.44 ^{aA} |

หมายเหตุ : a-b และ A-C คือ ในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ของแต่ละสภาวะการทดลอง

4.6.2 อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์

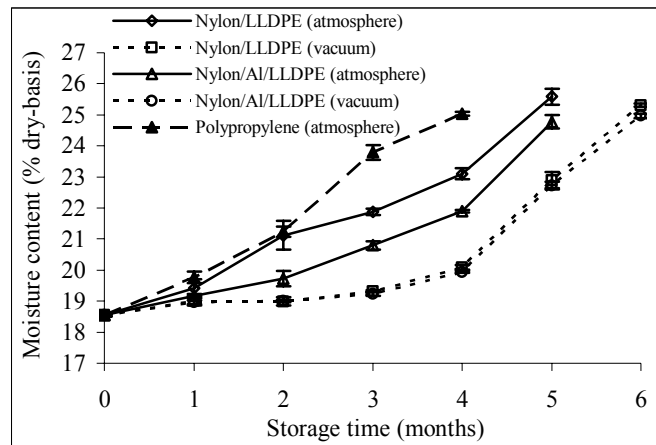
โดยการทดลองในส่วนนี้ได้ทำการเก็บรักษา กึ่งแข็ง ในถุงพลาสติกลามิเนตชนิด Nylon/LLDPE Nylon/Al/LLDPE และ Polypropylene ที่สภาวะปกติ Nylon/LLDPE และ Nylon/Al/LLDPE ที่สภาวะสุญญากาศ ซึ่งเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยคุณภาพในระหว่างการเก็บรักษาทางด้านกายภาพ (ความชื้น สี การคืนตัว ค่าแอดอร์แอกติวิตี และค่าแรงเนียนสูงสุด) ด้านเคมี (ความหืน (TBARS) และปริมาณโปรตีน) ด้านจุลชีววิทยา

(ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด และจำนวนยีสต์และรา) และด้านประสาทสัมผัส โดยให้ผู้ทดสอบให้ระดับคะแนนของคุณลักษณะทางด้านสี ลักษณะปรากฏ ลักษณะเนื้อสัมผัส กลิ่น หิน รสเค็ม และความชอบรวมของผลิตภัณฑ์

4.6.2.1 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางด้านกายภาพ

(1) ปริมาณความชื้น

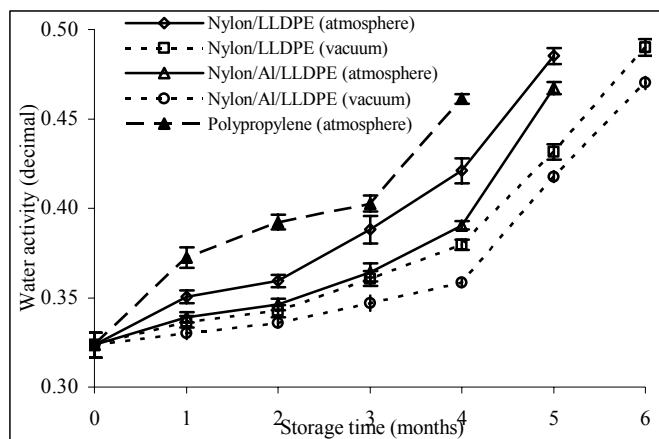
ปริมาณความชื้นเป็นปัจจัยสำคัญในการพิจารณา จากการวัดค่าปริมาณความชื้นของกึ่งแห้งที่ทำการบรรจุกึ่งแห้งในถุง Nylon/LLDPE ถุง Nylon/Al/LLDPE และถุง Polypropylene ที่สภาวะปกติ ถุง Nylon/LLDPE และถุง Nylon/Al/LLDPE ที่สภาวะสุญญากาศ โดยเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องแสดงดังภาพประกอบ 4.25 พบว่า ค่าปริมาณความชื้นเริ่มต้นของกึ่งแห้ง 18.53% dry-basis จากการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นของกึ่งแห้ง เมื่อพิจารณาปัจจัยของระยะเวลาการเก็บรักษาพบว่า เมื่อระยะเวลาเก็บรักษาเพิ่มสูงขึ้นปริมาณความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษาในถุงทุกชนิดที่ทำการบรรจุ สำหรับชนิดของถุง พบว่า การบรรจุกึ่งแห้งในถุง Nylon/Al/LLDPE มีอัตราการเพิ่มสูงขึ้นของปริมาณความชื้นที่ช้ากว่าการบรรจุกึ่งแห้งในถุง Nylon/LLDPE และถุง Polypropylene ตามลำดับ ส่วนวิธีการบรรจุ พบว่า การบรรจุกึ่งแห้งด้วยสภาวะสุญญากาศมีอัตราการเพิ่มสูงขึ้นของปริมาณความชื้นที่ช้ากว่าการบรรจุกึ่งแห้งด้วยสภาวะปกติ โดยที่กึ่งแห้งที่บรรจุในถุง Polypropylene มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของความชื้นสูงกว่าถุง Nylon/LLDPE และถุง Nylon/Al/LLDPE ที่สภาวะปกติและสภาวะสุญญากาศ อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แสดงดังตารางภาคผนวก 14 โดยที่ระหว่างการเก็บรักษามีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงร้อยละ 18.51-25.14 18.51-25.85 18.51-23.09 18.51-24.94 และ 18.51-22.92 ตามลำดับ โดยชนิดของถุงและสภาวะการบรรจุมีอิทธิพลต่อความชื้นของกึ่งแห้งเมื่อระยะเวลาที่ใช้ในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะความไม่สม่ำเสมอของตัวอย่างและคุณสมบัติของถุงพลาสติกที่ใช้มีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำที่แตกต่างกัน โดยที่อัตราการซึมผ่านของไอน้ำของถุง Polypropylene มีค่าสูงกว่า ถุง Nylon/LLDPE และถุง Nylon/Al/LLDPE (งามทิพย์, 2550) มีผลทำให้ปริมาณความชื้นของกึ่งแห้งที่บรรจุในถุง Polypropylene มีค่าสูงกว่าสภาวะอื่น ๆ



ภาพประกอบ 4.25 ปริมาณความชื้นของกึ่งแห้งที่บรรจุในถุงชนิดต่าง ๆ ภายใต้สภาวะปกติและสุญญากาศเก็บรักษาอุณหภูมิห้อง ที่อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ ใช้ถุงขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม

(2) ค่าแอกทีวิตี (a_w)

ค่า a_w ของกึ่งแห้งหลังการอบแห้งซึ่งทำการบรรจุในถุง Nylon/LLDPE ถุง Nylon/Al/LLDPE และถุง Polypropylene ที่สภาวะปกติ Nylon/LLDPE และถุง Nylon/Al/LLDPE ที่สภาวะสุญญากาศ โดยเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องแสดงดังภาพประกอบ 4.26 โดยค่า a_w เริ่มต้นของกึ่งแห้งมีค่า 0.324 จากการวิเคราะห์ค่า a_w ของกึ่งแห้ง เมื่อพิจารณาปัจจัยของระยะเวลาการเก็บรักษาพบว่า เมื่อระยะเวลาเก็บรักษาเพิ่มสูงขึ้นค่า a_w มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษาในถุงทุกชนิดที่ทำการบรรจุ สำหรับชนิดของถุง พบว่า การบรรจุกึ่งแห้งในถุง Nylon/Al/LLDPE มีอัตราการเพิ่มสูงขึ้นของค่า a_w ที่ช้ากว่าการบรรจุกึ่งแห้งในถุง Nylon/LLDPE และถุง Polypropylene ตามลำดับ ส่วนวิธีการบรรจุ พบว่า การบรรจุกึ่งแห้งด้วยสภาวะสุญญากาศมีอัตราการเพิ่มสูงขึ้นของค่า a_w ที่ช้ากว่าการบรรจุกึ่งแห้งด้วยสภาวะปกติ โดยที่กึ่งแห้งที่บรรจุในถุง Polypropylene มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่า a_w สูงกว่าถุง Nylon/LLDPE และถุง Nylon/Al/LLDPE ที่สภาวะปกติและสภาวะสุญญากาศ อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แสดงดังตารางภาคผนวก 15 เนื่องจากอากาศที่บรรจุอยู่ภายในถุงทั้งสองสภาวะการบรรจุมีปริมาณที่แตกต่างกัน และคุณสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำของถุงแต่ละชนิดมีค่าที่แตกต่างกันด้วย โดยที่ค่าการเปลี่ยนแปลงของ a_w มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้น

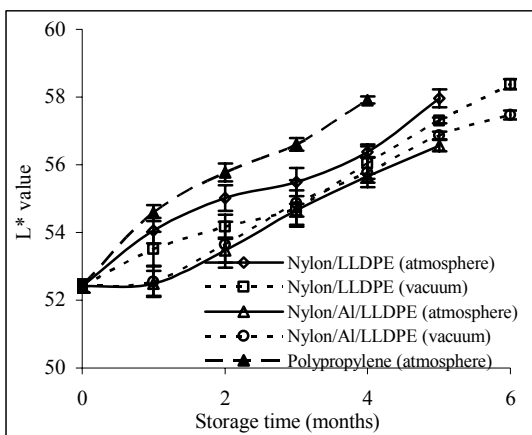


ภาพประกอบ 4.26 ค่าวอเตอร์แอกติวิตี (a_w) ของกึ่งแห้งที่บรรจุในถุงชนิดต่าง ๆ ภายใต้สภาวะปกติ และสุญญากาศเก็บรักษาอุณหภูมิห้อง ที่อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ ใช้ถุงขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม

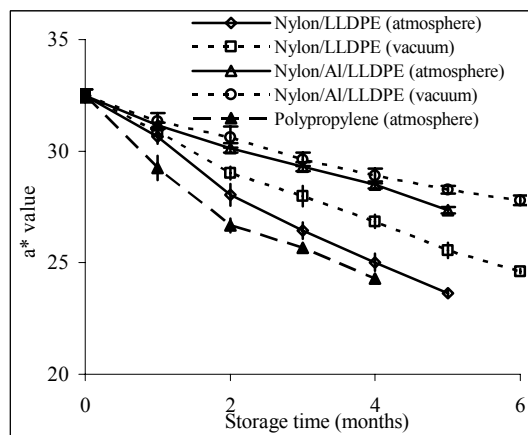
(3) ส

ส เป็นปัจจัยหนึ่งที่ผู้บริโภคใช้ประกอบการตัดสินใจในการเลือกซื้อกึ่งแห้ง จากการวัดค่าสีของกึ่งแห้งที่บรรจุในถุง Nylon/LLDPE ถุง Nylon/Al/LLDPE และถุง Polypropylene ที่สภาวะปกติ ถุง Nylon/LLDPE และถุง Nylon/Al/LLDPE ที่สภาวะสุญญากาศ เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง แสดงดังภาพประกอบ 4.27 และตารางภาคผนวก 16

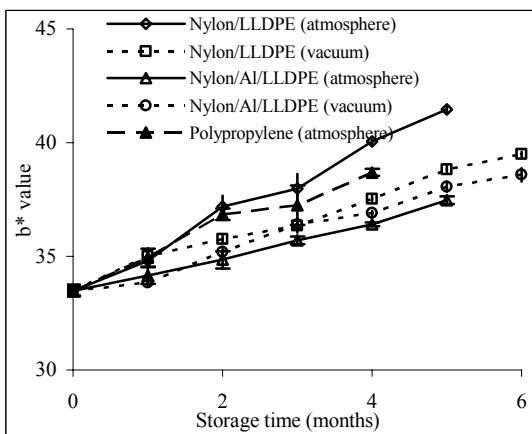
จากการวัดค่าสี L^* ของกึ่งแห้งดังภาพประกอบ 4.27 (ก) เมื่อพิจารณาปัจจัยของระยะเวลาการเก็บรักษา พบว่า เมื่อระยะเวลาเก็บรักษาเพิ่มสูงขึ้นค่าสี L^* มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษาในถุงทุกชนิดที่ทำการบรรจุอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% สำหรับชนิดของถุง พบว่า การบรรจุกึ่งแห้งในถุง Nylon/Al/LLDPE มีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่สูงขึ้นของค่าสี L^* ที่ช้ากว่าการบรรจุกึ่งแห้งในถุง Nylon/LLDPE และถุง Polypropylene ตามลำดับ ส่วนวิธีการบรรจุ พบว่า การบรรจุกึ่งแห้งด้วยสภาวะสุญญากาศมีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นของค่าสี L^* ที่ช้ากว่าการบรรจุกึ่งแห้งด้วยสภาวะปกติ โดยที่กึ่งแห้งที่บรรจุในถุง Polypropylene มีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่สูงขึ้นของค่าสี L^* สูงกว่าถุง Nylon/LLDPE และถุง Nylon/Al/LLDPE ที่สภาวะปกติและสภาวะสุญญากาศ อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แสดงดังตารางภาคผนวก 16



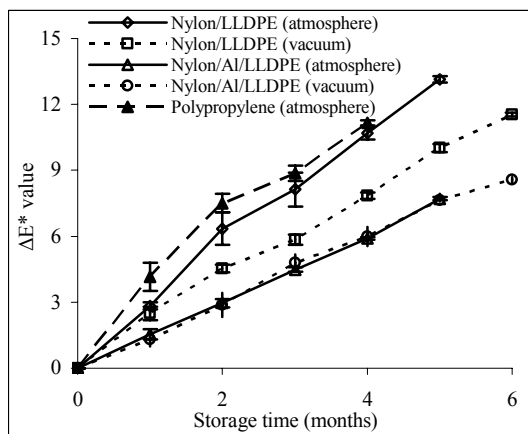
(ก) ค่าสี L*



(ข) ค่าสี a*



(ค) ค่าสี b*



(ง) ค่า ΔE*

ภาพประกอบ 4.27 ค่าสี L* a* b* และค่า ΔE* ของกุ้งแห้งที่บรรจุในถุงชนิดต่าง ๆ ภายใต้สภาวะปกติและสุญญากาศเก็บรักษาอุณหภูมิห้อง ที่อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ ใช้กุ้งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม

จากการวัดค่าสี a* ของกุ้งแห้งดังกล่าวประกอบ 4.27 (ข) เมื่อพิจารณาปัจจัยของระยะเวลาการเก็บรักษา พบว่า เมื่อระยะเวลาเก็บรักษาเพิ่มสูงขึ้นค่าสี a* มีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นในทุกชนิดที่ทำการบรรจุอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% สำหรับชนิดของถุง พบว่า การบรรจุกุ้งแห้งในถุง Nylon/Al/LLDPE มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าสี a* ที่ช้ากว่าการบรรจุกุ้งแห้งในถุง Nylon/LLDPE และถุง Polypropylene ตามลำดับ เพราะว่าถุง Nylon/Al/LLDPE มีลักษณะเป็นถุงที่ทึบแสง จึงทำให้สามารถป้องกันแสงแดดใน

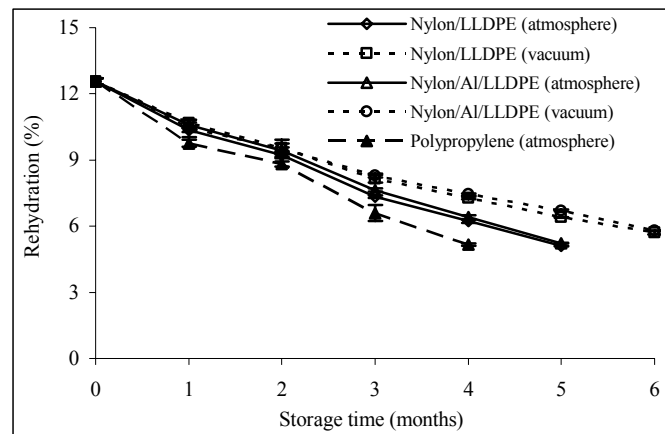
สภาพแวดล้อมได้ดีกว่าถุงที่มีลักษณะโปร่งแสง และมีอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนที่น้อยกว่าถุง Nylon/LLDPE และถุง Polypropylene จึงทำให้กึ่งแห้งที่บรรจุในถุง Nylon/Al/LLDPE มีค่า a^* ที่ดีที่สุด ส่วนวิธีการบรรจุ พบว่า การบรรจุกึ่งแห้งด้วยสภาวะสุญญากาศมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า a^* ที่ช้ากว่าการบรรจุกึ่งแห้งด้วยสภาวะปกติ โดยที่กึ่งแห้งที่บรรจุในถุง Polypropylene มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า a^* สูงกว่าถุง Nylon/LLDPE และถุง Nylon/Al/LLDPE ที่สภาวะปกติและสภาวะสุญญากาศ อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แสดงดังตารางภาคผนวก 16

จากการวัดค่า b^* ของกึ่งแห้งดังภาพประกอบ 4.27 (ค) เมื่อพิจารณาปัจจัยของระยะเวลาการเก็บรักษา พบว่า เมื่อระยะเวลาเก็บรักษาเพิ่มสูงขึ้น ค่า b^* มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นในถุงทุกชนิดที่ทำการบรรจุอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% สำหรับชนิดของถุง พบว่า การบรรจุกึ่งแห้งในถุง Nylon/Al/LLDPE มีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มสูงขึ้นของค่า b^* ที่ช้ากว่าการบรรจุกึ่งแห้งในถุง Nylon/LLDPE และถุง Polypropylene ตามลำดับ ส่วนวิธีการบรรจุ พบว่า การบรรจุกึ่งแห้งด้วยสภาวะสุญญากาศมีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มสูงขึ้นของค่า b^* ที่ช้ากว่าการบรรจุกึ่งแห้งด้วยสภาวะปกติ โดยที่กึ่งแห้งที่บรรจุในถุง Polypropylene มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า b^* สูงกว่าถุง Nylon/LLDPE และถุง Nylon/Al/LLDPE ที่สภาวะปกติและสภาวะสุญญากาศ อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แสดงดังตารางภาคผนวก 16

จากการวิเคราะห์ค่า ΔE^* ของกึ่งแห้งดังภาพประกอบ 4.27 (ง) เมื่อพิจารณาปัจจัยของระยะเวลาการเก็บรักษา พบว่า เมื่อระยะเวลาเก็บรักษาเพิ่มสูงขึ้นค่า ΔE^* มีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นในถุงทุกชนิดที่ทำการบรรจุอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% สำหรับชนิดของถุง พบว่า การบรรจุกึ่งแห้งในถุง Nylon/Al/LLDPE มีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มสูงขึ้นของค่า ΔE^* ที่น้อยกว่าการบรรจุกึ่งแห้งในถุง Nylon/LLDPE และถุง Polypropylene ตามลำดับ ส่วนวิธีการบรรจุ พบว่า การบรรจุกึ่งแห้งด้วยสภาวะสุญญากาศมีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มสูงขึ้นของค่า ΔE^* ที่ช้ากว่าการบรรจุกึ่งแห้งด้วยสภาวะปกติ โดยที่กึ่งแห้งที่บรรจุในถุง Polypropylene มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า ΔE^* สูงกว่าถุง Nylon/LLDPE และถุง Nylon/Al/LLDPE ที่สภาวะปกติและสภาวะสุญญากาศ อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แสดงดังตารางภาคผนวก 16 ซึ่งค่า ΔE ที่เปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้จะขึ้นอยู่กับค่า L^* , a^* และ b^* ในระหว่างการเก็บรักษาของกึ่งแห้งที่บรรจุในถุงชนิดต่าง ๆ

(4) ร้อยละการคืนตัว

จากการวิเคราะห์หาความสามารถในการดูดน้ำกลับคืนของกึ่งแห้งที่บรรจุในถุง Nylon/LLDPE ถุง Nylon/Al/LLDPE และถุง Polypropylene ที่สภาวะปกติ ถุง Nylon/LLDPE และถุง Nylon/Al/LLDPE ที่สภาวะสุญญากาศ โดยเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งมีค่าร้อยละการคืนตัวเริ่มต้นเท่ากับ 12.27 แสดงดังภาพประกอบ 4.27



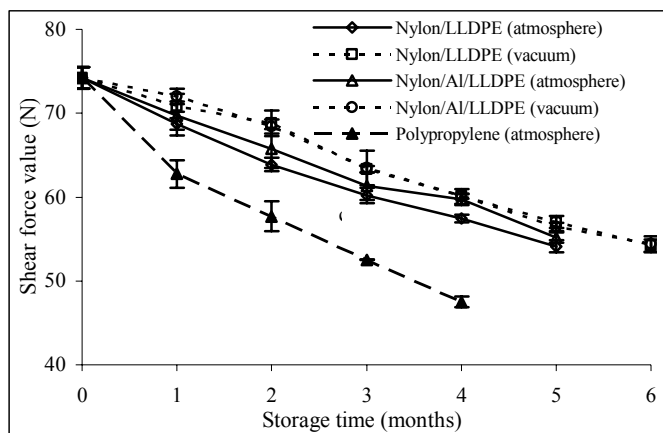
ภาพประกอบ 4.28 ค่าร้อยละการคืนตัวของกึ่งแห้งบรรจุในถุงชนิดต่าง ๆ ภายใต้สภาวะปกติและสุญญากาศเก็บรักษาอุณหภูมิห้อง ที่อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ ใช้กึ่งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม

จากภาพประกอบ 4.28 จากการวิเคราะห์ค่าร้อยละการคืนตัวของกึ่งแห้ง เมื่อพิจารณาปัจจัยของระยะเวลาการเก็บรักษา พบว่า เมื่อระยะเวลาเก็บรักษาเพิ่มสูงขึ้นค่าร้อยละการคืนตัวมีค่าลดลงในทุกชนิดที่ทำการบรรจุ สำหรับชนิดของถุง พบว่า การบรรจุกึ่งแห้งในถุง Nylon/Al/LLDPE มีค่าร้อยละการคืนตัวที่สูงกว่าการบรรจุกึ่งแห้งในถุง Nylon/LLDPE และถุง Polypropylene ตามลำดับ ส่วนวิธีการบรรจุ พบว่า การบรรจุกึ่งแห้งด้วยสภาวะสุญญากาศมีค่าร้อยละการคืนตัวที่สูงกว่าการบรรจุกึ่งแห้งด้วยสภาวะปกติ โดยที่กึ่งแห้งที่บรรจุในถุง Polypropylene ค่าร้อยละการคืนตัวต่ำกว่าถุง Nylon/LLDPE และถุง Nylon/Al/LLDPE ที่สภาวะปกติและสภาวะสุญญากาศ อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แสดงดังตารางภาคผนวก 17 เนื่องจากระหว่างการเก็บรักษาอากาศจากภายนอกเกิดการแพร่เข้าภายในถุงทำให้ตัวของกึ่งแห้งเกิดการขยายตัวขึ้น โดยที่ค่าร้อยละการคืนตัวของกึ่งแห้งที่บรรจุในถุง Polypropylene จะมีค่าร้อยละการคืนตัวน้อยกว่าการบรรจุในสภาวะอื่น เนื่องมาจากถุง Polypropylene มีสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำสูง

จึงทำให้ความชื้นซึมผ่านเข้าไปภายในตัวกึ่ง เมื่อนำกึ่งมาแช่น้ำเพื่อหาค่าร้อยละการคืนตัวจึงทำให้ค่าที่ได้มีค่าน้อยกว่าที่บรรจุในสถานะอื่น ส่วนกึ่งแห้งที่บรรจุในถุง Nylon/LLDPE และถุง Nylon/Al/LLDPE ที่สถานะปกติและสถานะสุญญากาศก็มีค่าร้อยละการคืนตัวลดลงเช่นกัน

(5) ค่าแรงเฉือนสูงสุด

จากการทดสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของกึ่งหลังการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ พบว่า จากการวิเคราะห์ค่าแรงเฉือนสูงสุดของกึ่งแห้งที่บรรจุในถุง Nylon/LLDPE ถุง Nylon/Al/LLDPE และถุง Polypropylene ที่สถานะปกติ ถุง Nylon/LLDPE และถุง Nylon/Al/LLDPE ที่สถานะสุญญากาศ โดยเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง โดยค่าแรงเฉือนสูงสุดเริ่มต้นก่อนการบรรจุ เท่ากับ 74.23 N จากการวิเคราะห์ค่าแรงเฉือนสูงสุดของกึ่งแห้งภายหลังการบรรจุลงในถุงชนิดต่าง ๆ เมื่อพิจารณาปัจจัยของระยะเวลาการเก็บรักษา พบว่า เมื่อระยะเวลาเก็บรักษาเพิ่มสูงขึ้นค่าแรงเฉือนสูงสุดมีค่าลดลงตามระยะเวลาการเก็บรักษาในถุงทุกชนิดที่ทำการบรรจุ สำหรับชนิดของถุง พบว่า การบรรจุกึ่งแห้งในถุง Nylon/Al/LLDPE มีค่าแรงเฉือนสูงสุดที่สูงกว่าการบรรจุกึ่งแห้งในถุง Nylon/LLDPE และถุง Polypropylene ตามลำดับ ส่วนวิธีการบรรจุ พบว่า การบรรจุกึ่งแห้งด้วยสถานะสุญญากาศมีค่าแรงเฉือนสูงสุดที่สูงกว่าการบรรจุกึ่งแห้งด้วยสถานะปกติ โดยที่กึ่งแห้งที่บรรจุในถุง Polypropylene ค่าแรงเฉือนสูงสุดต่ำกว่าถุง Nylon/LLDPE และถุง Nylon/Al/LLDPE ที่สถานะปกติและสถานะสุญญากาศ อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แสดงดังภาพประกอบ 4.29 และตารางภาคผนวก 18 เนื่องจากเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้นทำให้ความชื้นภายในตัวกึ่งแห้งที่บรรจุที่สถานะต่าง ๆ มีค่าสูงขึ้นจึงทำให้แรงที่ทำการเฉือนลงไปบนเนื้อกึ่งจึงใช้แรงน้อยลง กึ่งแห้งที่บรรจุในถุง Polypropylene จะมีค่าแรงเฉือนน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบแต่ละเดือนของการบรรจุเนื่องมาจากถุง Polypropylene มีสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำสูงกว่าถุงชนิดอื่น ๆ จึงทำให้ความชื้นซึมผ่านเข้าไปภายในตัวกึ่ง จึงทำให้ค่าที่ได้มีค่าน้อยกว่าที่บรรจุในสถานะอื่น ๆ



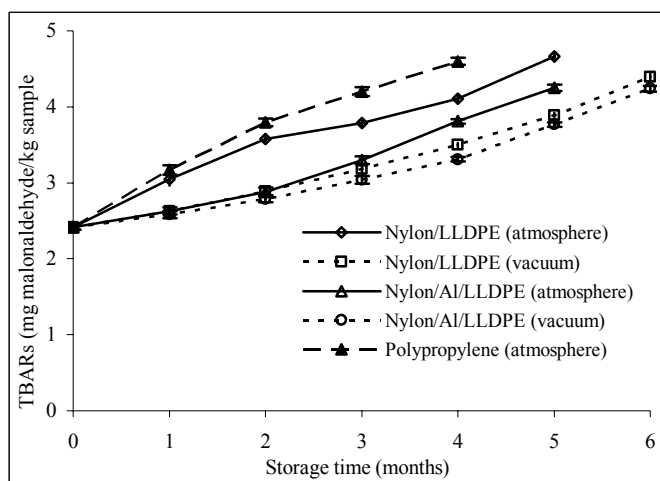
ภาพประกอบ 4.29 ค่าแรงเฉือนสูงสุดของกุ้งแห้งที่บรรจุในถุงชนิดต่าง ๆ ภายใต้สภาวะปกติและสุญญากาศ เก็บรักษาอุณหภูมิห้อง ที่อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ ใช้กุ้งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม

4.6.2.2 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางด้านเคมี

(1) ค่าความหืน (TBARS)

การวิเคราะห์ความหืนของไขมันในผลิตภัณฑ์อาหารสามารถทำได้โดยการตรวจวัดค่า TBARS โดยวัดปริมาณกรดไฮโดรเปอร์ออกไซด์ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความหืนที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ โดยบรรจุกุ้งแห้งในถุง Nylon/LLDPE ถุง Nylon/Al/LLDPE และถุง Polypropylene ที่สภาวะปกติ ถุง Nylon/LLDPE และถุง Nylon/Al/LLDPE ที่สภาวะสุญญากาศ โดยเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง พบว่า ค่า TBARS ในตัวอย่างของกุ้งแห้งเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 2.42 มิลลิกรัมมาลอนดีไฮด์ต่อตัวอย่าง 1 กิโลกรัม จากการวิเคราะห์ค่า TBARS ของกุ้งแห้งภายหลังการบรรจุลงในถุงชนิดต่าง ๆ เมื่อพิจารณาปัจจัยของระยะเวลาการเก็บรักษา พบว่า เมื่อระยะเวลาเก็บรักษาเพิ่มสูงขึ้นค่า TBARS มีอัตราเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษาในถุงทุกชนิดที่ทำการบรรจุอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้รับความร้อนสูงในขณะอบแห้งจะมีผลทำให้ไขมันซึ่งเป็นองค์ประกอบในอาหารนั้นสลายตัวเป็นกรดไขมันอิสระได้ง่าย เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น สำหรับชนิดของถุง พบว่า การบรรจุกุ้งแห้งในถุง Nylon/Al/LLDPE มีอัตราการเพิ่มของค่า TBARS ที่ช้ากว่าการบรรจุกุ้งแห้งในถุง Nylon/LLDPE และถุง Polypropylene ตามลำดับ ส่วนวิธีการบรรจุ พบว่า การบรรจุกุ้งแห้งด้วยสภาวะสุญญากาศมีอัตราการเพิ่มของค่า TBARS ที่ช้ากว่าการบรรจุกุ้งแห้งด้วยสภาวะปกติ โดยที่กุ้งแห้งที่บรรจุในถุง Polypropylene มีอัตราการเพิ่มของค่า TBARS สูงกว่าของถุง Nylon/LLDPE ถุง Nylon/Al/LLDPE ที่สภาวะปกติและสภาวะสุญญากาศ

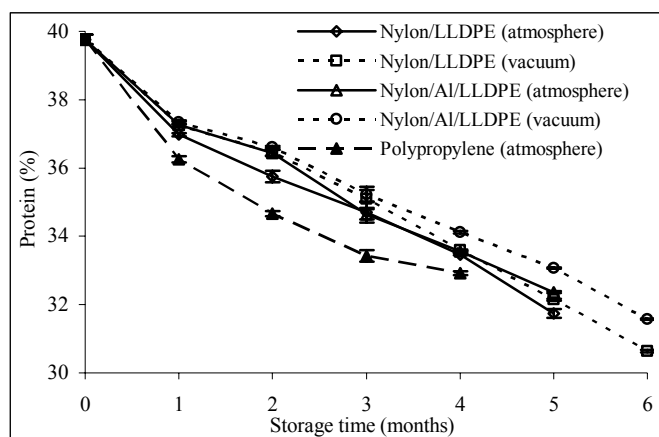
อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แสดงดังภาพประกอบ 4.30 และตารางภาคผนวก 19 เนื่องจากการบรรจุภัณฑ์ในสภาวะสุญญากาศมีปริมาณก๊าซออกซิเจนเหลืออยู่ภายในภาชนะบรรจุ น้อยกว่าการบรรจุในสภาวะปกติ เพราะก๊าซออกซิเจนจะเข้าไปทำปฏิกิริยา โดยเข้าไปรวมกับ สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ตำแหน่งพันธะคู่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้น ซึ่งก่อให้เกิดการหืน ของอาหาร เมื่อปริมาณก๊าซออกซิเจนมีอยู่น้อยจึงทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นได้ช้า การหืนของอาหารเกิดขึ้นได้น้อยกว่า เมื่อบรรจุภัณฑ์ในสภาวะสุญญากาศ



ภาพประกอบ 4.30 ค่า TBARS ของกึ่งแห้งที่บรรจุในถุงชนิดต่าง ๆ ภายใต้สภาวะปกติและสุญญากาศเก็บรักษาอุณหภูมิห้อง ที่อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ ใช้กึ่งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม

(2) ปริมาณโปรตีน

จากการวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนภายหลังการอบแห้งของกึ่งแห้งที่บรรจุในถุง Nylon/LLDPE ถุง Nylon/Al/LLDPE และถุง Polypropylene ที่สภาวะปกติ ถุง Nylon/LLDPE และถุง Nylon/Al/LLDPE ที่สภาวะสุญญากาศ โดยเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง แสดงดังภาพประกอบ 4.31



ภาพประกอบ 4.31 ปริมาณโปรตีนของกุ้งแห้งที่บรรจุในถุงชนิดต่าง ๆ ภายใต้สภาวะปกติและสุญญากาศเก็บรักษาอุณหภูมิห้อง ที่อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ ใช้กุ้งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม

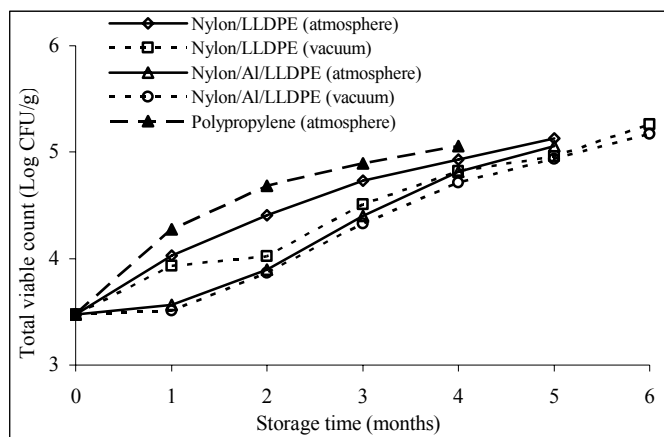
จากภาพประกอบ 4.31 จากการวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนเริ่มต้นของกุ้งแห้งก่อนทำการบรรจุมีค่าเท่ากับ 39.76% เมื่อพิจารณาปัจจัยของระยะเวลาการเก็บรักษา พบว่า เมื่อระยะเวลาเก็บรักษาเพิ่มสูงขึ้นปริมาณโปรตีนมีค่าลดลงในทุกชนิดที่ทำการบรรจุ สำหรับชนิดของถุง พบว่า การบรรจุกุ้งแห้งในถุง Nylon/Al/LLDPE มีอัตราการลดลงของปริมาณโปรตีนช้ากว่าการบรรจุกุ้งแห้งในถุง Nylon/LLDPE และถุง Polypropylene ตามลำดับ ส่วนวิธีการบรรจุ พบว่า การบรรจุกุ้งแห้งด้วยสภาวะสุญญากาศมีอัตราการลดลงของปริมาณโปรตีนช้ากว่าการบรรจุกุ้งแห้งด้วยสภาวะปกติ โดยที่กุ้งแห้งที่บรรจุในถุง Polypropylene อัตราการลดลงของปริมาณโปรตีนเร็วกว่าถุง Nylon/LLDPE และถุง Nylon/Al/LLDPE ที่สภาวะปกติและสภาวะสุญญากาศ อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แสดงดังตารางภาพผนวก 20 เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้นจะส่งผลให้โปรตีนเกิดการย่อยสลายได้จากการเพิ่มจำนวนจุลินทรีย์ (ภาพประกอบ 4.31) จึงทำให้ปริมาณโปรตีนมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น

4.7.2.3 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางด้านจุลชีววิทยา

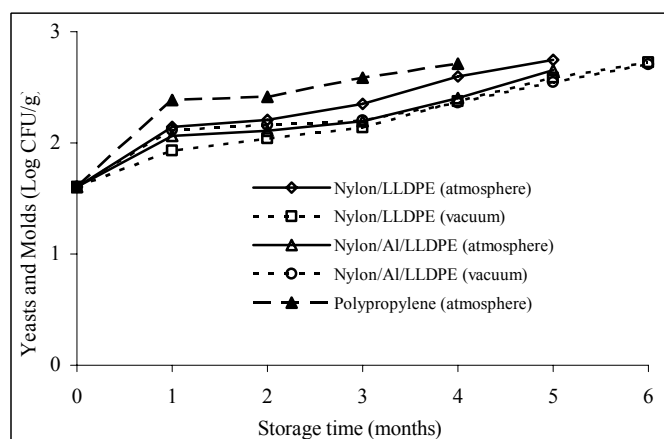
จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด และยีสต์และรา

เมื่อวิเคราะห์คุณภาพทางด้านจุลชีววิทยาของกุ้งแห้งก่อนการบรรจุ พบว่า มีค่าเท่ากับ 2.97×10^3 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม จำนวนของยีสต์และรามีค่าเท่ากับ 40 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม และมีซาลโมเนลลา (Salmonella) น้อยกว่า 3 MPN ต่อตัวอย่าง 1 กรัม โดยตรวจไม่พบเชื้อ

สตาฟีโลค็อกคัส ออเรียส (*Staphylococcus aureus*) คลอสทริเดียม เพอร์ฟริงเจนส์ (*Clostridium perfringens*) เอสเชอริเชีย โคลิ (*Escherichia coli*) และไวรัสโ พาราฮีโมไลติกัส (*Vibrio parahaemolyticus*) โดยกึ่งแห้งที่นำมาศึกษานี้อยู่ในเกณฑ์ของมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนของกึ่งแห้ง (มพช. 309/2547)



ภาพประกอบ 4.32 ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดของกึ่งแห้งที่บรรจุในถุงชนิดต่าง ๆ ภายใต้สภาวะปกติและสุญญากาศเก็บรักษาอุณหภูมิห้อง ที่อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ ใช้กึ่งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม



ภาพประกอบ 4.33 ปริมาณยีสต์และราของกึ่งแห้งที่บรรจุในถุงชนิดต่าง ๆ ภายใต้สภาวะปกติและสุญญากาศเก็บรักษาอุณหภูมิห้อง ที่อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ ใช้กึ่งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม

กึ่งแข็งที่บรรจุในที่บรรจุในถุง Nylon/LLDPE ถุง Nylon/Al/LLDPE และถุง Polypropylene ที่สภาวะปกติ ถุง Nylon/LLDPE และถุง Nylon/Al/LLDPE ที่สภาวะสุญญากาศ โดยเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง มีจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดและจำนวนยีสต์และรา แสดงดังภาพประกอบ 4.32 และ 4.33 และตารางภาคผนวก 21 และ 22 ตามลำดับ จากการวิเคราะห์คุณภาพทางด้านจุลชีววิทยาของกึ่งแข็งภายหลังการบรรจุลงในถุงชนิดต่าง ๆ เมื่อพิจารณาปัจจัยของระยะเวลาการเก็บรักษา พบว่า เมื่อระยะเวลาเก็บรักษาเพิ่มสูงขึ้นปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด และยีสต์และรา มีปริมาณเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษาในถุงทุกชนิดที่ทำการบรรจุ สำหรับชนิดของถุง พบว่า การบรรจุกึ่งแข็งในถุง Nylon/Al/LLDPE มีอัตราการเพิ่มของปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด และยีสต์และรา ที่ช้ากว่าการบรรจุกึ่งแข็งในถุง Nylon/LLDPE และถุง Polypropylene ตามลำดับ ส่วนวิธีการบรรจุ พบว่า การบรรจุกึ่งแข็งด้วยสภาวะสุญญากาศมีอัตราการเพิ่มของปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด และยีสต์และรา ที่ช้ากว่าการบรรจุกึ่งแข็งด้วยสภาวะปกติ โดยที่กึ่งแข็งที่บรรจุในถุง Polypropylene มีอัตราการเพิ่มของปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด และยีสต์และรา เร็วกว่าการบรรจุในถุง Nylon/LLDPE และถุง Nylon/Al/LLDPE ทั้งที่สภาวะปกติและสุญญากาศ การเก็บรักษาในสภาวะสุญญากาศส่งผลให้คุณภาพทางจุลชีววิทยาดีกว่าการเก็บรักษาในสภาวะปกติ เนื่องจากการบรรจุในสภาวะสุญญากาศทำให้ปริมาณออกซิเจนที่เหลืออยู่ในถุงมีน้อยกว่าการบรรจุในสภาวะปกติ จึงทำให้จุลินทรีย์และแบคทีเรียที่มีอยู่ในบรรจุภัณฑ์ใช้ออกซิเจนในการดำรงชีวิตและการเจริญเติบโตได้น้อยกว่า ทั้งนี้ปริมาณจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมและปัจจัยต่าง ๆ เช่น ปริมาณความชื้น ค่า a_w เอื้ออำนวยต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่วิเคราะห์ได้ในแต่ละเดือน

โดยที่กึ่งแข็งที่บรรจุในถุง Polypropylene สามารถเก็บรักษาได้นาน 3 เดือน สำหรับถุง Nylon/LLDPE และถุง Nylon/Al/LLDPE ที่บรรจุในสภาวะปกติสามารถเก็บรักษาได้นาน 4 เดือน และถุง Nylon/LLDPE และถุง Nylon/Al/LLDPE ที่บรรจุในสภาวะสุญญากาศสามารถเก็บรักษาได้นาน 5 เดือน

4.7.2.4 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัส

การทดสอบคุณภาพประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์กึ่งแข็งที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ โดยทำการบรรจุในถุง Nylon/LLDPE ถุง Nylon/Al/LLDPE และถุง Polypropylene ในสภาวะปกติ ถุง Nylon/LLDPE และ ถุง Nylon/Al/LLDPE ในสภาวะสุญญากาศ โดยเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ทำการทดสอบโดยให้ผู้ทดสอบจำนวน 20 คน แสดงคะแนนความชอบต่อผลิตภัณฑ์กึ่งแข็งทางด้านต่าง ๆ โดยศึกษาแต่ละคุณลักษณะ คือ สี ลักษณะปรากฏ ลักษณะเนื้อสัมผัส กลิ่นหืน รสเค็ม และความชอบรวม

ตาราง 4.12 คุณลักษณะทางประสาทสัมผัสที่อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ใช้กุ้งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม

| คุณลักษณะ | เดือน | Nylon/LLDPE (ปกติ) | Nylon/LLDPE (สุญญากาศ) | Nylon/Al/LLDPE (ปกติ) | Nylon/Al/LLDPE (สุญญากาศ) | Polypropylene (ปกติ) |
|-----------------------|-------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|------------------------------|---------------------------|
| สี | 0 | 3.27±0.74 ^{aC} | 3.27±0.74 ^{aB} | 3.27±0.74 ^{aA} | 3.27±0.74 ^{aA} | 3.27±0.74 ^{aC} |
| | 1 | 3.10±0.55 ^{abBC} | 3.25±0.72 ^{aB} | 3.25±0.63 ^{aA} | 3.30±0.80 ^{aA} | 2.95±0.83 ^{abBC} |
| | 2 | 2.95±0.60 ^{abABC} | 3.15±0.67 ^{abAB} | 3.20±0.52 ^{bA} | 3.25±0.55 ^{bA} | 2.80±0.52 ^{aAB} |
| | 3 | 2.75±0.55 ^{abAB} | 3.05±0.69 ^{bcAB} | 3.15±0.59 ^{cA} | 3.20±0.52 ^{cA} | 2.65±0.49 ^{aAB} |
| | 4 | 2.70±0.66 ^{abAB} | 2.90±0.72 ^{abAB} | 3.00±0.65 ^{bA} | 3.10±0.64 ^{bA} | 2.50±0.51 ^{aA} |
| | 5 | 2.60±0.68 ^{aA} | 2.75±0.55 ^{aA} | 2.90±0.72 ^{aA} | 3.00±0.56 ^{aA} | - |
| | 6 | - | 2.70±0.66 ^{aA} | - | 2.85±0.75 ^{aA} | - |
| ลักษณะ ปรากฏ | 0 | 2.93±0.74 ^{aA} | 2.93±0.74 ^{aA} | 2.93±0.74 ^{aA} | 2.93±0.74 ^{aA} | 2.93±0.74 ^{aA} |
| | 1 | 2.80±0.83 ^{aA} | 2.90±0.72 ^{aA} | 2.95±0.83 ^{aA} | 3.00±0.73 ^{aA} | 2.75±0.64 ^{aA} |
| | 2 | 2.70±0.66 ^{aA} | 2.80±0.52 ^{aA} | 2.90±0.79 ^{aA} | 2.90±0.85 ^{aA} | 2.70±0.57 ^{aA} |
| | 3 | 2.70±0.66 ^{aA} | 2.75±0.64 ^{aA} | 2.80±0.62 ^{aA} | 2.80±0.70 ^{aA} | 2.60±0.60 ^{aA} |
| | 4 | 2.60±0.60 ^{aA} | 2.65±0.59 ^{aA} | 2.70±0.66 ^{aA} | 2.75±0.72 ^{aA} | 2.50±0.61 ^{aA} |
| | 5 | 2.50±0.61 ^{aA} | 2.65±0.59 ^{aA} | 2.65±0.67 ^{aA} | 2.70±0.73 ^{aA} | - |
| | 6 | - | 2.55±0.69 ^{aA} | - | 2.60±0.50 ^{aA} | - |
| ลักษณะ เนื้อสัมผัส | 0 | 3.40±0.67 ^{aC} | 3.40±0.67 ^{aD} | 3.40±0.67 ^{aB} | 3.40±0.67 ^{aC} | 3.40±0.67 ^{aB} |
| | 1 | 3.15±0.81 ^{abBC} | 3.25±0.72 ^{aCD} | 3.25±0.85 ^{aAB} | 3.30±0.73 ^{aC} | 3.05±0.76 ^{aAB} |
| | 2 | 2.90±0.64 ^{aAB} | 3.15±0.67 ^{aBCD} | 3.20±0.70 ^{aAB} | 3.20±0.77 ^{aBC} | 2.90±0.55 ^{aA} |
| | 3 | 2.80±0.70 ^{aAB} | 2.95±0.76 ^{aABCD} | 3.10±0.64 ^{aAB} | 3.10±0.64 ^{aABC} | 2.80±0.70 ^{aA} |
| | 4 | 2.65±0.49 ^{aA} | 2.80±0.70 ^{aABC} | 2.95±0.69 ^{aAB} | 2.95±0.69 ^{aABC} | 2.70±0.73 ^{aA} |
| | 5 | 2.50±0.51 ^{aA} | 2.70±0.66 ^{aAB} | 2.80±0.62 ^{aA} | 2.80±0.62 ^{aAB} | - |
| | 6 | - | 2.60±0.60 ^{aA} | - | 2.65±0.67 ^{aA} | - |

หมายเหตุ : a-c คือ ในแถวเดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

A-D คือ ในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

- คือ ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

ตาราง 4.12 (ต่อ) คุณลักษณะทางประสาทสัมผัสที่อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์
เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ใช้กึ่งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม

| คุณลักษณะ | เดือน | Nylon/LLDPE (ปกติ) | Nylon/LLDPE (สุญญากาศ) | Nylon/Al/LLDPE (ปกติ) | Nylon/Al/LLDPE (สุญญากาศ) | Polypropylene (ปกติ) |
|----------------|-------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------|--------------------------|
| กลิ่นหืน | 0 | 3.03±0.61 ^{aA} | 3.03±0.61 ^{aA} | 3.03±0.61 ^{aA} | 3.03±0.61 ^{aA} | 3.03±0.61 ^{aA} |
| | 1 | 3.10±0.72 ^{aAB} | 3.05±0.69 ^{aA} | 3.00±0.79 ^{aA} | 3.05±0.83 ^{aA} | 3.20±0.77 ^{aAB} |
| | 2 | 3.25±0.72 ^{aABC} | 3.15±0.67 ^{aAB} | 3.20±0.77 ^{aA} | 3.10±0.55 ^{aA} | 3.35±0.88 ^{aAB} |
| | 3 | 3.35±0.67 ^{aABC} | 3.25±0.64 ^{aAB} | 3.30±0.57 ^{aA} | 3.20±0.62 ^{aA} | 3.50±0.83 ^{aAB} |
| | 4 | 3.50±0.61 ^{aBC} | 3.35±0.75 ^{aAB} | 3.40±0.75 ^{aA} | 3.25±0.91 ^{aA} | 3.65±0.75 ^{bB} |
| | 5 | 3.60±0.60 ^{aC} | 3.45±0.69 ^{aAB} | 3.45±0.60 ^{aA} | 3.35±0.88 ^{aA} | - |
| | 6 | - | 3.55±0.83 ^{aB} | - | 3.45±0.76 ^{aA} | - |
| รสเค็ม | 0 | 2.97±0.49 ^{aA} | 2.97±0.49 ^{aA} | 2.97±0.49 ^{aA} | 2.97±0.49 ^{aA} | 2.97±0.49 ^{aA} |
| | 1 | 2.90±0.85 ^{aA} | 2.90±0.55 ^{aA} | 2.90±0.72 ^{aA} | 2.90±0.45 ^{aA} | 2.80±0.62 ^{aA} |
| | 2 | 2.85±0.67 ^{aA} | 2.90±0.64 ^{aA} | 2.85±0.75 ^{aA} | 2.90±0.79 ^{aA} | 2.85±0.67 ^{aA} |
| | 3 | 2.80±0.70 ^{aA} | 2.85±0.59 ^{aA} | 2.85±0.67 ^{aA} | 2.85±0.81 ^{aA} | 2.80±0.62 ^{aA} |
| | 4 | 2.75±0.72 ^{aA} | 2.80±0.52 ^{aA} | 2.85±0.59 ^{aA} | 2.80±0.62 ^{aA} | 2.75±0.64 ^{aA} |
| | 5 | 2.75±0.64 ^{aA} | 2.75±0.64 ^{aA} | 2.80±0.62 ^{aA} | 2.80±0.62 ^{aA} | - |
| | 6 | - | 2.75±0.71 ^{aA} | - | 2.80±0.70 ^{aA} | - |
| ความชอบ รวม | 0 | 3.70±0.47 ^{aC} | 3.70±0.47 ^{aD} | 3.70±0.47 ^{aC} | 3.70±0.47 ^{aC} | 3.70±0.47 ^{aC} |
| | 1 | 3.40±0.60 ^{aBC} | 3.50±0.51 ^{aCD} | 3.60±0.75 ^{aBC} | 3.55±0.51 ^{aBC} | 3.30±0.86 ^{aBC} |
| | 2 | 3.30±0.57 ^{aAB} | 3.35±0.59 ^{aBCD} | 3.40±0.60 ^{aABC} | 3.45±0.51 ^{aABC} | 3.15±0.75 ^{aB} |
| | 3 | 3.20±0.52 ^{aAB} | 3.30±0.47 ^{aBC} | 3.30±0.57 ^{aAB} | 3.35±0.75 ^{aABC} | 2.95±0.69 ^{aAB} |
| | 4 | 3.05±0.69 ^{abAB} | 3.15±0.67 ^{bABC} | 3.20±0.52 ^{bA} | 3.25±0.72 ^{bAB} | 2.70±0.57 ^{aA} |
| | 5 | 2.95±0.60 ^{aA} | 3.00±0.73 ^{aAB} | 3.10±0.72 ^{aA} | 3.15±0.67 ^{aAB} | - |
| | 6 | - | 2.9±0.64 ^{aA} | - | 3.05±0.60 ^{aA} | - |

หมายเหตุ : a-c คือ ในแถวเดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

A-C คือ ในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

- คือ ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

จากตาราง 4.12 แสดงผลการทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์กึ่งแห้งที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ คุณภาพของกึ่งแห้งก่อนการบรรจุผู้ทดสอบทางประสาทสัมผัสให้ความเห็นว่า กึ่งแห้งมีสีส้ม ลักษณะปรากฏของตัวกึ่งมีลักษณะตัวใสเล็กน้อยและแห้งบางส่วน คุณภาพทางด้านเนื้อสัมผัสด้วยการชิม พบว่า ผิวด้านนอกของตัวกึ่งเหนียวเล็กน้อยแต่เนื้อด้านในนุ่ม กึ่งแห้งมีกลิ่นคาวเพียงเล็กน้อยและมีรสเค็มปานกลาง หากพิจารณาคะแนนความชอบรวม พบว่า ผู้ทดสอบทางประสาทสัมผัสให้คะแนนความชอบกึ่งแห้งอยู่ในระดับปานกลาง เมื่อพิจารณาปัจจัยของระยะเวลาการเก็บรักษา พบว่า เมื่อระยะเวลาเก็บรักษาเพิ่มสูงขึ้น สีของผลิตภัณฑ์กึ่งแห้งเปลี่ยนแปลงจากสีส้มไปเป็นสีส้มอ่อนอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งสอดคล้องกับค่า a^* และ b^* คือ ค่า a^* ซึ่งเป็นค่าของสีแดงมีค่าลดลง ขณะที่ค่า b^* ซึ่งเป็นค่าของสีเหลืองมีค่าเพิ่มขึ้น ลักษณะเนื้อสัมผัส เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้น ส่งผลให้ความแข็งของผลิตภัณฑ์มีค่าลดลง แต่ผลิตภัณฑ์มีความเหนียวเพิ่มมากขึ้น อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และความพึงพอใจโดยรวมของผู้บริโภค ได้รับคะแนนการยอมรับคุณภาพทางประสาทสัมผัสโดยรวมลดลงตามระยะเวลาการเก็บรักษาอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยที่ผู้บริโภคยังให้การยอมรับในตัวผลิตภัณฑ์ของกึ่งแห้งอยู่ แต่เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นส่งผลให้ผลิตภัณฑ์กึ่งแห้งมีการเพิ่มขึ้นของกลิ่นหืนอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ส่วนลักษณะปรากฏ และรสเค็มของกึ่งแห้งเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของลักษณะปรากฏ และรสเค็มของกึ่งแห้งอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ตามระยะเวลาการเก็บรักษาที่เพิ่มขึ้น ในทุกชนิดที่ทำกรบรรจุ สำหรับชนิดของถุง พบว่า การบรรจุกึ่งแห้งในถุง Nylon/Al/LLDPE มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัสที่ช้ากว่าการบรรจุกึ่งแห้งในถุง Nylon/LLDPE และถุง Polypropylene ตามลำดับ ส่วนวิธีการบรรจุ พบว่า การบรรจุกึ่งแห้งด้วยสถานะสุญญากาศมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัสที่ช้ากว่าการบรรจุกึ่งแห้งด้วยสถานะปกติ โดยที่กึ่งแห้งที่บรรจุในถุง Polypropylene มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัสที่เร็วกว่าการบรรจุกึ่งแห้งในถุง Nylon/LLDPE และถุง Nylon/Al/LLDPE ทั้งที่สถานะปกติและสุญญากาศ การเก็บรักษาในสถานะสุญญากาศส่งผลให้คุณภาพทางด้านประสาทสัมผัสดีกว่าการเก็บรักษาในสถานะปกติ ผู้ทดสอบให้การยอมรับกึ่งแห้งที่บรรจุในถุง Nylon/Al/LLDPE ในสถานะสุญญากาศมากที่สุด เพราะว่า สีของกึ่งแห้งดีที่สุดในช่วงการเก็บรักษา คือ มีสีส้ม เมื่อเปรียบเทียบกับกรบรรจุในถุงชนิดอื่น ๆ ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์คุณภาพทางด้านกายภาพและทางด้านเคมี คือ ชนิดของถุงและวิธีการบรรจุมีผลต่อ สี ลักษณะเนื้อสัมผัส และกลิ่นหืน อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ

ความเชื่อมั่น 95% โดยที่กึ่งหนึ่งที่บรรจุในถุง Polypropylene มีคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสที่
ดีกว่ากึ่งหนึ่งที่บรรจุในสถานะอื่น ๆ แสดงดังตาราง 4.12

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาแนวทางการอบแห้งกุ้ง โดยนำเทคนิคการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด มาใช้ร่วมกับการอบแห้งด้วยลมร้อน โดยใช้กุ้งสดขนาด 150-200 และ 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม และ เทคนิคการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ร่วมกับการอบแห้งด้วยลมร้อน โดยใช้กุ้งสดขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม ทำการทดลองหาจลนพลศาสตร์การอบแห้ง วิเคราะห์คุณภาพกุ้งหลังการอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง และศึกษาอายุการเก็บรักษากุ้งแห้งที่ผ่านการอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ ที่เก็บรักษาในถุงลามิเนตที่บรรจุในสภาวะปกติและสภาวะสุญญากาศ ซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และจุลชีววิทยา รวมทั้งทำการทดลองหาพารามิเตอร์พื้นฐานในการอบแห้งกุ้งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม สรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1 พารามิเตอร์พื้นฐานในการอบแห้งกุ้ง

จากการศึกษาหาพารามิเตอร์พื้นฐานที่จำเป็นในการอบแห้งกุ้งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม กรณีศึกษาสมบัติเชิงความร้อน ได้แก่ ค่าความหนาแน่นปรากฏ ความร้อนจำเพาะ ร้อยละช่องว่างของอากาศ และค่าความชื้นสมดุล จากผลการทดลอง พบว่า ความหนาแน่นปรากฏมีความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการโพลีโนเมียลกับค่าความชื้นเริ่มต้น สำหรับความร้อนจำเพาะและร้อยละช่องว่างของอากาศมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับค่าความชื้นเริ่มต้น ส่วนความชื้นสมดุล พบว่ารูปแบบสมการของ Oswin (1946) อธิบายผลการทดลองได้ดีที่สุด ดังแสดงแบบจำลองความชื้นสมดุลของ Oswin (1946)

$$M_{e,q} = A \left(\frac{a_w}{1 - a_w} \right)^B$$

ค่าคงตัวสำหรับ กุ้งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม $A = 14.342$, $B = 0.545$

อุณหภูมิอบแห้งในช่วงอบแห้ง $40-55^{\circ}\text{C}$ ค่าแอมพลิจูดแอกติวิตี้เท่ากับ $0.10-0.90$

5.2 การอบแห้งกึ่ง

การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและกำลังของรังสีอินฟราเรดที่มีต่อ จลนพลศาสตร์การอบแห้งกึ่ง พบว่า

1. ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง

1.1 ปัจจัยของอุณหภูมิอบแห้ง เมื่ออุณหภูมิอบแห้งเพิ่มขึ้น อัตราการอบแห้งก็จะเพิ่มขึ้น

1.2 ปัจจัยของความชื้นเริ่มต้น เมื่อความชื้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้น อัตราการอบแห้งมีแนวโน้มลดลง

1.3 ปัจจัยของกำลังอินฟราเรด เมื่อกำลังของอินฟราเรดสูงขึ้น อัตราการอบแห้งก็จะเพิ่มขึ้น

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัล

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัลของ Page สามารถใช้ทำนาย จลนพลศาสตร์ของการอบแห้งได้ดีที่สุดในช่วงอุณหภูมิ 60-95°C

3. ผลการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น

จากการทดลองอบแห้งกึ่งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม และนำข้อมูลไปหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น โดยพิจารณาให้กึ่งมีรูปทรงเป็นทรงกลมเปรียบเทียบกับรูปทรงกระบอกสั้น พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นขึ้นกับอุณหภูมิของการอบแห้งในรูปแบบเอกซ์โพเนนเชียลกับอุณหภูมิต่ำ

5.3 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้ง

จากการวิเคราะห์ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง พบว่า ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิต่ำและกำลังของอินฟราเรด โดยเมื่ออุณหภูมิต่ำและกำลังของอินฟราเรดเพิ่มขึ้น ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากเวลาที่ใช้ในการอบแห้งสั้นลง เมื่อเปรียบเทียบกับอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด พบว่า การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด และลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์

5.4 คุณภาพของกึ่งระหว่างการเก็บรักษาและอายุการเก็บรักษากึ่งแห้งในถุงมาลินเนต

5.4.1 อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 500 และ 1,000 W และลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด 1,000 W

จากการวิเคราะห์คุณภาพของกึ่งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโกรัม ภายหลังการอบแห้งทั้งในด้านกายภาพ จุลชีววิทยา และประสาทสัมผัสโดยการทดสอบการซึมกึ่งแห้ง พบว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดช่วยให้อุณหภูมิสูงมีร้อยละการหดตัวมากกว่าอุณหภูมิต่ำ แต่ไม่ส่งผลต่อร้อยละการคืนตัวของกึ่ง ค่าวอเตอร์แอกติวิตีของกึ่งแห้งที่วัดได้ มีค่าอยู่ในช่วง 0.533-0.601 สำหรับคุณภาพด้านจุลชีววิทยา พบว่า กึ่งที่ผ่านการอบแห้งทุกสภาวะมีปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด และยีสต์และรา ผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.309/2547) และเมื่อนำไปบรรจุในถุง Polypropylene และถุง Nylon/LLDPE ในสภาวะปกติ เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น พบว่า ปริมาณความชื้น ค่าวอเตอร์แอกติวิตี ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด และยีสต์และรา มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยที่กึ่งแห้งที่บรรจุในถุง Polypropylene มีอัตราการเพิ่มที่สูงกว่าถุง Nylon/LLDPE ส่วนค่าสีแดงของกึ่งแห้งมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น สำหรับผลการทดสอบทางด้านประสาทสัมผัส พบว่า ระยะเวลาเก็บรักษาไม่ส่งผลต่อลักษณะปรากฏ และรสเค็ม อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แต่ส่งผลต่อสี ลักษณะเนื้อสัมผัส กลิ่นหืน และความพึงพอใจอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% สี ลักษณะเนื้อสัมผัส และความพึงพอใจมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการเก็บรักษา แต่กลิ่นหืนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษาโดยกึ่งแห้งที่บรรจุในถุง Nylon/LLDPE มีคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสที่ดีว่ากึ่งแห้งที่บรรจุในถุง Polypropylene ทุกสภาวะการทดลอง โดยที่กึ่งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโกรัม ที่ผ่านการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,000 W อุณหภูมิ 79.3°C และลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,000 W อุณหภูมิ 89.3°C (30 min) ลดอุณหภูมิลงเหลือ 69.8°C พบว่า คุณภาพที่วิเคราะห์ได้มีแนวโน้มในทิศทางเดียวกับกึ่งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโกรัม

กึ่งแห้งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโกรัม ที่ผ่านการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 500 และ 1,000 W และลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,000 W ทุกช่วงอุณหภูมิ ที่บรรจุภายในถุง Polypropylene และถุง Nylon/LLDPE ในสภาวะปกติ โดยเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง มีอายุการเก็บรักษานาน 1 และ 2 เดือน ตามลำดับ ส่วนกึ่งแห้งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโกรัม ที่บรรจุในถุงทั้งสองชนิดมีอายุการเก็บรักษานาน 3 เดือน

5.4.2 การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์

จากการวิเคราะห์คุณภาพของกึ่งแห้งในด้านกายภาพ ด้านเคมี และด้านจุลชีววิทยา ระหว่างการเก็บรักษา พบว่า ชนิดของถุงและวิธีการบรรจุมีผลต่อคุณภาพของกึ่งแห้งที่บรรจุในถุง แต่ละชนิด อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น โดยที่กึ่งแห้งที่บรรจุในถุง Polypropylene มีอัตราการเปลี่ยนแปลงทางด้านคุณภาพมากที่สุด เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ด้อยกว่าถุง Nylon/LLDPE และถุง Nylon/Al/LLDPE และวิธีการบรรจุ พบว่า การบรรจุในสภาวะสุญญากาศมีคุณภาพที่ดีกว่าการบรรจุด้วยสภาวะปกติ

การทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์กึ่งแห้ง เมื่อพิจารณาปัจจัยของระยะเวลาการเก็บรักษา ชนิดของถุงและวิธีการบรรจุ พบว่า สี ลักษณะเนื้อสัมผัส กลิ่นหืน และความพึงพอใจมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยที่ สี ลักษณะเนื้อสัมผัส และความพึงพอใจมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการเก็บรักษา แต่กลิ่นหืนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษา ส่วนลักษณะปรากฏ และรสเค็ม ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยกึ่งแห้งที่บรรจุในถุง Nylon/Al/LLDPE ในสภาวะสุญญากาศมีสีที่เข้มที่สุด โดยที่กึ่งแห้งที่บรรจุในถุง Polypropylene จะมีคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสที่ต่ำกว่ากึ่งแห้งที่บรรจุในสภาวะอื่น ๆ

กึ่งแห้งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม ที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ที่บรรจุภายในถุง Polypropylene ในสภาวะปกติ มีอายุการเก็บรักษานาน 3 เดือน สำหรับถุง Nylon/LLDPE และ Nylon/Al/LLDPE ที่บรรจุในสภาวะปกติสามารถเก็บรักษาได้นาน 4 เดือน และถุง Nylon/LLDPE และ Nylon/Al/LLDPE ที่บรรจุในสภาวะสุญญากาศสามารถเก็บรักษาได้นาน 5 เดือน

การเลือกแนวทางการอบแห้งกึ่ง ขึ้นอยู่กับว่าต้องการอัตราการอบแห้งสูงสุดหรือค่าใช้จ่ายพลังงานต่ำสุด หรือต้องการคุณภาพของกึ่งแห้งภายหลังการอบแห้ง ถ้าต้องการอัตราการอบแห้งสูงสุดควรเลือกการอบแห้งแบบพลังงานความร้อนร่วมจากลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด และถ้าต้องการประหยัดพลังงานควรเลือกการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ถ้าต้องการให้กึ่งแห้งมีคุณภาพสีแดงภายหลังการอบแห้ง ควรเลือกการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดหรือการอบแห้งด้วยอินฟราเรดเพียงอย่างเดียว

5.5 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการพัฒนาเครื่องอบแห้งด้วยเทคนิคการอบแห้งแบบพลังงานความร้อนร่วมให้มีปริมาณการอบแห้งกึ่งได้มากขึ้น นอกจากนี้ควรศึกษาปัจจัยอื่น ๆ ที่น่าจะมีผลต่อการอบแห้งด้วย เช่น ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (สามารถควบคุมได้) และความเร็วลมในการอบแห้ง เป็นต้น

2. ในการทดลองเพื่อให้การเปรียบเทียบผลการทดลองให้ดีขึ้นควรควบคุมความชื้นเริ่มต้น และความชื้นสุดท้ายของกึ่งแห้งให้เท่ากัน

3. ควรมีการเตรียมภาชนะบรรจุให้เรียบร้อยก่อนที่จะทำการอบแห้งกึ่ง

4. กึ่งแห้งเป็นวัตถุดิบที่เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางด้านจุลชีววิทยาได้ง่าย ดังนั้นขณะทำการบรรจุลงในภาชนะ ควรรักษาความสะอาดของภาชนะบรรจุและสถานที่ทำการบรรจุ

5. ควรทำการบรรจุผลิตภัณฑ์กึ่งหลังจากทำการทดลองทันที ถ้าไม่ทำการบรรจุทันทีจะทำให้ปริมาณความชื้นมีค่าสูงก่อนทำการบรรจุ และส่งผลถึงคุณภาพทางจุลชีววิทยาได้

6. ควรมีการตรวจสอบคุณภาพของภาชนะบรรจุภัณฑ์ระหว่างเก็บรักษาว่าอยู่ในสภาพปกติหรือไม่

เอกสารอ้างอิง

- งามทิพย์ กุ้วโรดม. 2550. ก๊าซกับการบรรจุผลิตภัณฑ์อาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 2. โรงพิมพ์ลินคอร์น โปรโมชั่น, กรุงเทพฯ. 173-285.
- ชัยวิทย์ ศิวาวิชาไนย. 2525. ฟิสิกส์ของพลังงานแสงแดด. เอกสารประกอบการสอนนักศึกษาปริญญาตรี. ภาควิชาฟิสิกส์, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 52.
- ปุ่น คงเกียรติเจริญ และ สมพร คงเกียรติเจริญ. 2541. บรรจุภัณฑ์อาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 1. โรงพิมพ์หิ่เฮงจำกัด. กรุงเทพฯ. 60-66.
- มานิต สุขจินดาเสถียร, สมชาติ โสภณธนฤทธิ์ และสมเกียรติ ปรัชญาวารการ. 2537. แนวทางการอบแห้งคั้นหอมสับ. วารสารเกษตรศาสตร์, 28: 602-607.
- มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนของกุ้งแห้ง (มพช. 309/2547).
- เขวลักษณ์ รัตนพรวาริสกุล. 2539. ผลของกรดซิตริกที่มีต่อคุณภาพและอายุการเก็บรักษากุ้งแห้ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ผลิตภัณฑ์ประมง) สาขาผลิตภัณฑ์ประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ ฯ.
- รุ่งทิพย์ ตปนิยศิลป์. 2546. การศึกษาลักษณะการไหลและการทำแห้งกุ้งในเจตสเปาท์เดดเบด. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. กรุงเทพฯ. 26.
- รติดา จิตต์ธรรม. 2533. การเก็บรักษากุ้งแห้งโดยการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์และการใช้วัสดุดูดซึมน้ำออกซิเจน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ ฯ.
- วนิช วาริสกุล. 2503. กุ้งของประเทศไทย. วารสารการประมง, 13 (1): 49-55.
- วรรณิยา โสภักดี. 2544. การศึกษาอายุการเก็บรักษากุ้งแห้งในถุงลามิเนตเพื่อการค้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ ฯ.
- สมชาติ โสภณธนฤทธิ์. 2540. การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ ฯ. 335.
- สุภวรรณ ภูริระวณิชย์กุล และ ยุทธนา ภูริระวณิชย์กุล. 2537. เครื่องอบแห้งเมล็ดพืชชั้นบาง: พารามิเตอร์ของการอบแห้งชั้นบางของเนื้อในเมล็ดมะม่วงหิมพานต์. วารสารสงขลานครินทร์, 16 (4): 381-392.

- AOAC. 1995. Official Methods of Analysis 16th ed. The Association of Official Analytical Chemists, Arlington, Virginia, USA.
- BAM. 2001. Bacteriology Analytical Manual online. Chapter 18. Yeasts and Molds. <http://www.cfsan.fda.gov/~ebam/bam-18.html>.
- Buege, J.A. and Aust, S.D. 1978. Microsomal Lipid Peroxidation. In *Methods in Enzymology* (Fleischer and Packer, L., eds.). Academic Press. New York. 302-310.
- Dilip, J. and Pankaj B.P. 2007. Study the Drying Kinetics of Open Sun Drying of Fish. Central Institute of Post Harvest Engineering and Technology. *Journal of Food Engineering*, 78: 1315-1319.
- Eliasson, B. and Kogelschatz, U. 1986. Electron Impact Dissociation in Oxygen. *Phys. B: At. Mol. Phys.*, 19: 1241-1247.
- Meeso, N., Nathakaranakule, A. and Soponronnarit, S. 2004. Influence of FIR Irradiation on Paddy Moisture Reduction and Milling Quality after Fluidized Bed Drying. *Journal of Food Engineering*, 65: 293-301.
- Mohsenin, N. 1970. Criteria for Describing Shape and Side. *Physical Properties of Plant and Animal*. New York. Gordon and Breach Science Publishers Ltd., 58-61.
- Namsanguan, Y., Tia, W., Devahastin, S. and Soponronnarit, S. 2004. Drying Kinetics and Quality of Shrimp Undergoing Different Two-Stage Drying Processes. *Journal of Drying Technology*, 22: 759-778.
- Niamnuy, C., Devahastin, S. and Soponronnarit, S. 2008 a. Changes in Protein Compositions and their Effects on Physical Changes of Shrimp during Boiling in Salt Solution. *Food Chemistry*, 108: 165-175.
- Niamnuy, C., Devahastin, S., Soponronnarit, S. and Raghavan, G.S.V. 2008 b. Kinetics of Astaxanthin Degradation and Color Changes of Dried Shrimp during Storage. *Journal of Food Engineering*, 87: 591-600.
- Philip Handel, A., and Guerrieri, S.A. 1990. Evaluation of Heated Frying Oils Containing Added Fatty Acids. *Journal of Food Science*, 55 (5): 1417-1420.
- Posomboon, W. 1998. Processing Effect on Quality of Dried Shrimp. Master Engineering. Thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.

- Raksakulthai, N. 1997. Dried Fishery Production. Department of Fish Products. Faculty of Fisheries. Kaseisart University, Bangkok. 79.
- Shamberger, R.J., Shamberger, B.A., and Willis, C.E. 1977. Malonaldehyde Content of Food. *Journal of Nutrition*, 107: 1404-1409.
- Prachayawarakorn, S., Jaisut, D., Prachayawarakorn, S. and Soponronnarit, S. 2000. Desorption Isotherms and Drying Characteristics of Shrimp in Superheated Steam and Hot Air. *Journal of Drying Technology*, 20: 669-684.
- Tirawanichakul, S., Na Phatthalung, W. and Tirawanichakul, S. 2008. Drying Strategy of Shrimp using Hot Air Convection and Hybrid Infrared Radiation/Hot Air Convection. *Walailak Journal Science and Technology*, 5(1): 77-100.
- Troller, J.A. 1978. *Water Activity and Food*. Academic Press. New York. 235.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนกึ่งแห้ง (มผช. 309/2547)

1. ขอบข่าย

มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนนี้ครอบคลุมเฉพาะกึ่งแห้งที่บรรจุในภาชนะบรรจุ

2. บทนิยาม

ความหมายของคำที่ใช้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนนี้ มีดังต่อไปนี้

กึ่งแห้ง หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำกึ่งสดหรือเคสดมาทำให้แห้งโดยใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์หรือแหล่งพลังงานอื่น หรืออาจนึ่งให้สุกหรือต้มให้สุกในน้ำเกลือเจือจางก่อนทำให้แห้ง อาจแกะเปลือกหรือไม่ก็ได้

3. คุณลักษณะที่ต้องการ

3.1 ลักษณะทั่วไป ในภาชนะบรรจุเดียวกันต้องเป็นกึ่งแห้งหรือเคสแห้งที่มีขนาดใกล้เคียงกัน อาจมีเปลือกหรือไม่ก็ได้

3.2 สี ต้องมีสีที่ดีตามธรรมชาติของกึ่งแห้ง

3.3 กลิ่นรส ต้องมีกลิ่นรสที่ดีตามธรรมชาติของกึ่งแห้ง ปราศจากกลิ่นรสอื่นที่ไม่พึงประสงค์ เช่น กลิ่นอับ กลิ่นหืน รสเค็มจัด เมื่อตรวจสอบโดยวิธีให้คะแนนตามข้อ 8.1 แล้ว ต้องได้คะแนนเฉลี่ยของแต่ละลักษณะจากผู้ตรวจสอบทุกคน ไม่น้อยกว่า 3 คะแนน และไม่มีลักษณะใดได้ 1 คะแนนจากผู้ตรวจสอบคนใดคนหนึ่ง

3.4 สิ่งแปลกปลอม ต้องไม่พบสิ่งแปลกปลอมที่ไม่ใช่ส่วนประกอบที่ใช้ เช่น เส้นผม ขนสัตว์ ดิน ทราย กรวด ชิ้นส่วนหรือสิ่งปฏิกูลจากสัตว์

3.5 ความชื้น ต้องไม่เกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

3.6 สารปนเปื้อน

3.6.1 ตะกั่ว ต้องไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

3.6.2 ปรอท ต้องไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

3.6.3 สารหนู ต้องไม่เกิน 2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

3.7 วัตถุเจือปนอาหาร

3.7.1 ห้ามใช้สีสังเคราะห์ทุกชนิด

3.7.2 หากมีการใช้กรดเบนโซอิกหรือเกลือของกรดเบนโซอิก (คำนวณเป็นกรดเบนโซอิก) และกรดซอร์บิกหรือเกลือของซอร์บิก (คำนวณเป็นกรด

ซอร์บิก) อย่างใดอย่างหนึ่งหรือรวมกันต้องไม่เกิน 1000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

3.8 วอเตอร์แอกทิวิตี ต้องไม่เกิน 0.70

หมายเหตุ วอเตอร์แอกทิวิตี เป็นปัจจัยสำคัญในการคาดคะเนอายุการเก็บอาหาร และเป็นตัวบ่งชี้ถึงความปลอดภัยของอาหาร โดยทำหน้าที่ควบคุมการอยู่รอด การเจริญ และการสร้างสปอร์พิษของจุลินทรีย์

3.9 จุลินทรีย์

3.9.1 จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด ต้องไม่เกิน 1×10^5 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม

3.9.2 ซาลโมเนลลา ต้องไม่พบต่อตัวอย่าง 25 กรัม

3.9.3 สตาฟีโลค็อกคัส ออเรียส ต้องไม่เกิน 100 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม

3.9.4 คลอสตริเดียม เพอร์ฟริงเจนส์ ต้องไม่พบในตัวอย่าง 0.01 กรัม

3.9.5 เอสเชอริเชีย โคลิ โดยวิธีเอ็มพีเอ็น ต้องไม่เกิน 10 ต่อตัวอย่าง 1 กรัม

3.9.6 รา ต้องไม่เกิน 500 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม

4. สุขลักษณะ

สุขลักษณะในการทำกึ่งแห้ง ให้เป็นไปตามคำแนะนำตามภาคผนวก ข

5. การบรรจุ

5.1 ให้บรรจุกึ่งแห้งในภาชนะบรรจุที่สะอาดแห้ง ผนึกได้เรียบร้อย และสามารถป้องกันการปนเปื้อนจากสิ่งแวดล้อมภายนอกได้

5.2 น้ำหนักสุทธิของกึ่งแห้งในแต่ละภาชนะบรรจุ ต้องไม่น้อยกว่าที่ระบุไว้ใน

ฉลาก

6. เครื่องหมายและฉลาก

6.1 ที่ภาชนะบรรจุกึ่งแห้งทุกหน่วย อย่างน้อยต้องมีเลข อักษร หรือเครื่องหมายแจ้งรายละเอียดต่อไปนี้ให้เห็นได้ง่าย ชัดเจน

- (1) ชื่อผลิตภัณฑ์
- (2) น้ำหนักสุทธิ
- (3) วัน เดือน ปีที่ทำ และวัน เดือน ปีที่หมดอายุ หรือข้อความว่า “ควรบริโภคก่อน (วัน เดือน ปี)”
- (4) ชื่อแนะนำในการเก็บรักษา

- (5) ชื่อผู้ทำ หรือสถานที่ทำ พร้อมสถานที่ตั้ง หรือเครื่องหมายการค้าที่จดทะเบียน ในกรณีที่ใช้ภาษาต่างประเทศ ต้องมีความหมายตรงกับภาษาไทยที่กำหนดไว้ข้างต้น

7. การชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสิน

- 7.1 รุ่น ในที่นี้ หมายถึง กุ้งแห้งที่ทำโดยกรรมวิธีเดียวกัน ในระยะเวลาเดียวกัน
- 7.2 การชักตัวอย่างและการยอมรับ ให้เป็นไปตามแผนการชักตัวอย่างที่กำหนด

ต่อไปนี้

7.2.1 การชักตัวอย่างและการยอมรับ สำหรับการทดสอบสิ่งแปลกปลอม การบรรจุ และเครื่องหมายและฉลากให้ชักตัวอย่างโดยวิธีสุ่มจากรุ่นเดียวกัน จำนวน 3 หน่วยภาชนะบรรจุ เมื่อตรวจสอบแล้วทุกตัวอย่างต้องเป็นไปตามข้อ 3.4 ข้อ 5. และข้อ 6. จึงจะถือว่ากุ้งแห้งรุ่นนั้นเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

7.2.2 การชักตัวอย่างและการยอมรับ สำหรับการทดสอบลักษณะทั่วไป สี และกลิ่นรส ให้ใช้ตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบตามข้อ 7.2.1 แล้ว จำนวน 3 หน่วยภาชนะบรรจุ เมื่อตรวจสอบแล้วตัวอย่างต้องเป็นไปตามข้อ 3.1 ถึงข้อ 3.3 จึงจะถือว่ากุ้งแห้งรุ่นนั้นเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

7.2.3 การชักตัวอย่างและการยอมรับ สำหรับการทดสอบความชื้น สารปนเปื้อน วัตถุเจือปนอาหาร และวอเตอร์แอกทิวิตี ให้ชักตัวอย่างโดยวิธีสุ่มจากรุ่นเดียวกัน จำนวน 3 หน่วยภาชนะบรรจุ นำมาทำเป็นตัวอย่างรวม เมื่อตรวจสอบแล้วตัวอย่างต้องเป็นไปตามข้อ 3.5 ถึงข้อ 3.8 จึงจะถือว่ากุ้งแห้งรุ่นนั้นเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

7.2.4 การชักตัวอย่างและการยอมรับ สำหรับการทดสอบจุลินทรีย์ ให้ชักตัวอย่างโดยวิธีการสุ่มจากรุ่นเดียวกันจำนวน 3 หน่วยภาชนะบรรจุ โดยมีน้ำหนักรวมไม่น้อยกว่า 500 กรัม กรณีตัวอย่างไม่พอให้ชักตัวอย่างเพิ่มโดยวิธีสุ่มจากรุ่นเดียวกัน ให้ได้ตัวอย่างที่มีน้ำหนักรวมตามที่กำหนด เมื่อตรวจสอบแล้วตัวอย่างต้องเป็นไปตามข้อ 3.9 จึงจะถือว่ากุ้งแห้งรุ่นนั้นเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

7.3 เกณฑ์ตัดสิน

ตัวอย่างกุ้งแห้งต้องเป็นไปตามข้อ 7.2.1 ข้อ 7.2.2 ข้อ 7.2.3 และข้อ 7.2.4 ทุกข้อ จึงจะถือว่ากุ้งแห้งรุ่นนั้นเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนนี้

8. การทดสอบ

8.1 การทดสอบลักษณะทั่วไป สี และกลิ่นรส

8.1.1 ให้แต่งตั้งคณะผู้ตรวจสอบ ประกอบด้วยผู้ที่มีความชำนาญในการตรวจสอบกึ่งแห้งอย่างน้อย 5 คน แต่ละคนจะแยกกันตรวจและให้คะแนนโดยอิสระ

8.1.2 เทตัวอย่างกึ่งแห้งลงในจานกระเบื้องสีขาว ตรวจสอบโดยการตรวจพินิจ

8.1.3 หลักเกณฑ์การให้คะแนน ให้เป็นไปตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 หลักเกณฑ์การให้คะแนน

| ลักษณะที่ตรวจสอบ | เกณฑ์ที่กำหนด | ระดับการตัดสิน (คะแนน) | | | |
|------------------|--|------------------------|----|-------|--------------|
| | | ดีมาก | ดี | พอใช้ | ต้องปรับปรุง |
| ลักษณะทั่วไป | ในภาชนะบรรจุเดียวกันต้องเป็นกึ่งที่มีขนาดใกล้เคียงกัน อาจมีเปลือกหรือไม่ก็ได้ | 4 | 3 | 2 | 1 |
| สี | ต้องมีสีที่ดีตามธรรมชาติของกึ่งแห้ง | 4 | 3 | 2 | 1 |
| กลิ่นรส | ต้องมีกลิ่นรสที่ดีตามธรรมชาติของกึ่งแห้ง ปราศจากกลิ่นรสอื่นที่ไม่พึงประสงค์ เช่น กลิ่นอับ กลิ่นหืน รสเค็มจัด | 4 | 3 | 2 | 1 |

8.2 การทดสอบสิ่งแปลกปลอม ภาชนะบรรจุ และเครื่องหมายและฉลากให้ตรวจพินิจ

8.3 การทดสอบความชื้น สารปนเปื้อน และวัตถุเจือปนอาหารให้ใช้วิธีทดสอบตาม AOAC หรือวิธีทดสอบอื่นที่เป็นที่ยอมรับ

8.4 การทดสอบวอเตอร์แอกทิวิตี้ ให้ใช้เครื่องวัดวอเตอร์แอกทิวิตี้ที่ควบคุมอุณหภูมิได้ที่ (25 ± 2) องศาเซลเซียส

8.5 การทดสอบจุลินทรีย์ ให้ใช้วิธีทดสอบตาม AOAC หรือ BAM หรือวิธีทดสอบอื่นที่เป็นที่ยอมรับ

8.6 การทดสอบน้ำหนักสุทธิ ให้ใช้เครื่องชั่งที่เหมาะสม

ภาคผนวก ข

สัญลักษณ์ (ข้อ 4.1)

1 สถานที่ตั้งและอาคารที่ทำ

1.1 สถานที่ตั้งตัวอาคารและที่ใกล้เคียง อยู่ในที่ที่จะไม่ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดการปนเปื้อนได้ง่าย โดย

1.1.1 สถานที่ตั้งตัวอาคารและบริเวณโดยรอบ สะอาด ไม่มีน้ำขังและและสกปรก

1.1.2 อยู่ห่างจากบริเวณหรือสถานที่ที่มีฝุ่น เหม่า ควัน มากผิดปกติ

1.1.3 ไม่อยู่ใกล้เคียงกับสถานที่น่ารังเกียจ เช่น บริเวณเพาะเลี้ยงสัตว์ แหล่งเก็บหรือกำจัดขยะ

1.2 อาคารที่ทำมีขนาดเหมาะสม มีการออกแบบและก่อสร้างในลักษณะที่ง่ายแก่การบำรุงรักษา การทำความสะอาด และสะดวกในการปฏิบัติงาน โดย

1.2.1 พื้น ฝาผนัง และเพดานของอาคารที่ทำ ก่อสร้างด้วยวัสดุที่คงทน เรียบ ทำความสะอาด และซ่อมแซมให้อยู่ในสภาพที่ดีตลอดเวลา

1.2.2 แยกบริเวณที่ทำออกเป็นสัดส่วน ไม่อยู่ใกล้ห้องสุขา ไม่มีสิ่งของที่ไม่ใช้แล้วหรือไม่เกี่ยวข้องกับการทำอยู่ในบริเวณที่ทำ

1.2.3 พื้นที่ปฏิบัติงานไม่แออัด มีแสงสว่างเพียงพอ และมีการระบายอากาศที่เหมาะสม

2 เครื่องมือ เครื่องจักร และอุปกรณ์ในการทำ

2.1 ภาชนะหรืออุปกรณ์ในการทำที่สัมผัสกับผลิตภัณฑ์ ทำจากวัสดุมีผิวเรียบ ไม่เป็นสนิม ล้างทำความสะอาดได้ง่าย

2.2 เครื่องมือ เครื่องจักร และอุปกรณ์ที่ใช้ สะอาด เหมาะสมกับการใช้งาน ไม่ก่อให้เกิดการปนเปื้อน ติดตั้งได้ง่าย มีปริมาณเพียงพอ รวมทั้งสามารถทำความสะอาดได้ง่ายและทั่วถึง

3 การควบคุมกระบวนการทำ

3.1 วัตถุดิบและส่วนผสมในการทำ สะอาด มีคุณภาพดี มีการล้างหรือทำความสะอาดก่อนนำไปใช้

3.2 การทำ การเก็บรักษา การขนย้าย และการขนส่ง ให้มีการป้องกันการปนเปื้อน และการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์

4 การสุขาภิบาล การบำรุงรักษา และการทำความสะอาด

4.1 น้ำที่ใช้ล้างทำความสะอาดเครื่องมือ เครื่องจักร อุปกรณ์ และมือของผู้ทำ เป็น น้ำสะอาดและมีปริมาณเพียงพอ

4.2 มีวิธีการป้องกันและกำจัดสัตว์นำเชื้อ แมลงและฝุ่นผง ไม่ให้เข้าในบริเวณที่ทำ ตามความเหมาะสม

4.3 มีการกำจัดขยะ สิ่งสกปรก และน้ำทิ้ง อย่างเหมาะสม เพื่อไม่ก่อให้เกิดการ ปนเปื้อนกลับลงสู่ผลิตภัณฑ์

4.4 สารเคมีที่ใช้ล้างทำความสะอาด และใช้กำจัดสัตว์นำเชื้อและแมลง ใช้ใน ปริมาณที่เหมาะสม และเก็บแยกจากบริเวณที่ทำ เพื่อไม่ให้ปนเปื้อนลงสู่ผลิตภัณฑ์ได้

5 บุคลากรและสุขลักษณะของผู้ทำ

ผู้ทำทุกคน ต้องรักษาความสะอาดส่วนบุคคลให้ดี เช่น สวมเสื้อผ้าที่สะอาด มีผ้าคลุมผมเพื่อป้องกันไม่ให้เส้นผมหล่นลงในผลิตภัณฑ์ ไม่ไว้เล็บยาว ล้างมือให้สะอาดทุกครั้งก่อน ปฏิบัติงาน หลังการใช้ห้องสุขาและเมื่อมือสกปรก

ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์คุณภาพกุ้งแห้ง

1. การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ

1.1 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น (AOAC, 1995)

อุปกรณ์

1. ตู้อบไฟฟ้า (Oven)
2. ถ้วยหาความชื้น (Moisture can)
3. โถดูดความชื้น (Dessicator)

วิธีการ

ชั่งตัวอย่างกุ้งประมาณ 2 กรัม ให้ได้น้ำหนักแน่นอนในภาชนะอลูมิเนียมมีฝาปิดที่ผ่านการ อบจนน้ำหนักคงที่ นำไปอบในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ $130 \pm 3^{\circ}\text{C}$ ประมาณ 8-10 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วชั่งน้ำหนัก ทำการวิเคราะห์ 2 ซ้ำต่อตัวอย่าง คำนวณปริมาณความชื้น โดยน้ำหนักแห้ง (dry basis) จาก

$$\text{ร้อยละความชื้น} = \frac{(\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ}) \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ}}$$

คำนวณปริมาณความชื้น โดยน้ำหนักเปียก (wet basis) จาก

$$\text{ร้อยละความชื้น} = \frac{(\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ}) \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ}}$$

1.2 การวัดค่าสี

อุปกรณ์

1. เครื่องวัดสี ยี่ห้อ Hunter Lab รุ่น JP7100p, Tokyo, Japan โดยระบบ CIELAB
2. เครื่องคอมพิวเตอร์พร้อมโปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับวิเคราะห์

วิธีการ

1. เปิดสวิตช์เครื่องสำรองไฟ (UPS) มาที่ตำแหน่ง On
2. เปิดคอมพิวเตอร์ และเลือกโปรแกรมสำเร็จรูป
3. ทำการคาลิเบตด้วยแผ่นสีมาตรฐาน
 - 3.1 เลือก Standardize แล้วเลือกขนาดของช่อง 2.5 นิ้ว ตอบตกลง
 - 3.2 วางแผ่นสีดำ โดยวางด้านสีดำนั่นลงบน Port ตอบตกลง
 - 3.3 วางแผ่นสีขาวให้จุดสีขาวบนแผ่นสีอยู่กึ่งกลาง Port ตอบตกลง
4. กำหนดค่าในการวัดสี โดยเลือก Active view
 - 4.1 Scale เลือก L* a* b* เพื่อให้เครื่องแสดงค่าวัดสีในระบบ CIELAB
 - 4.2 Illuminant เลือกเพื่อกำหนดแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้เลือก D65
5. ทำการวัดตัวอย่างโดยใส่ตัวอย่างลงในถ้วยขนาด 2.5 นิ้ว วางบน Port แล้วใช้ฝาปิด
6. เลือก Read sample เมื่อต้องการอ่านค่า

1.3 การวิเคราะห์ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี (a_w)

อุปกรณ์

1. เครื่องวัดค่าวอเตอร์แอกทิวิตี ยี่ห้อ Novasina รุ่น Thermoconstanter

วิธีการ

1. ตั้งค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดค่าวอเตอร์แอกทิวิตีให้ได้ 25°C แล้วคาลิเบตเครื่องวัดค่าวอเตอร์แอกทิวิตีด้วยเกลือมาตรฐาน
2. บดตัวอย่างให้ละเอียดและบรรจุลงในตลับพลาสติกให้ได้ปริมาณ โดยประมาณร้อยละ 80-90 แล้วนำตลับตัวอย่างใส่ลงใน Measuring chamber
3. ค่าที่เครื่องวัดได้เป็นค่าวอเตอร์แอกทิวิตีตามที่ต้องการ

1.4 การวัดค่าแรงเนียนสูงสุดของกึ่งแข็ง

อุปกรณ์

1. เครื่อง Texture Analyzer ยี่ห้อ STABLE MICRO SYSTEM รุ่น TA-XT2i
2. เครื่องคอมพิวเตอร์พร้อมโปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับวิเคราะห์

วิธีการ

1. เปิดเครื่องวัดเนื้อสัมผัสและคอมพิวเตอร์ที่กระบวนการทำงานด้วยระบบปฏิบัติการ

2. ทำการคาลิเบตแรงของเครื่องวัดเนื้อสัมผัสโดยใช้ลูกตุ้มหนัก 5,000 กรัม
3. นำตัวอย่างกึ่งแข็งมาวัดค่าแรงเฉือนโดยใช้ Warner-Blatzler Blade และฐานวางตัวอย่างบนเครื่องวัดเนื้อสัมผัส ทำการคาลิเบตหัววัด ความเร็ว 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ทำการตัดตัวอย่างจนขาดออกจากกัน วัดค่าแรงเฉือนสูงสุดที่ใช้ รายงานผลเป็นหน่วยนิวตัน (N)

2. การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี

2.1 การหาปริมาณโปรตีน (AOAC, 1990)

ชั่งตัวอย่างกึ่งที่ทราบน้ำหนักแน่นอนประมาณ 1.5 กรัม (น้ำหนักแห้ง) บนกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 พับกระดาษให้ตัวอย่างอยู่ข้างใน ใส่ลงไปในช่วงเขตรวดขนาด 250 มิลลิเมตร เติมโปแตสเซียมซัลเฟต 10 กรัม และคอปเปอร์ซัลเฟต 0.5 กรัม เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 25 มิลลิเมตร ใส่เม็ดแก้วกันกระแทก (glass bead) 2-3 เม็ด แล้วนำไปย่อยโดยใช้เครื่องย่อยโปรตีนในตู้ควัน ช่วงแรกใช้อุณหภูมิ 250°C นาน 30 นาที แล้วจึงปรับอุณหภูมิสูงขึ้นเมื่อหมุดฟองแล้วเป็น 380°C ย่อยจนสารละลายใสมีสีเหลืองอ่อนหรือไม่มีสี ตั้งทิ้งไว้จนเย็นจึงเติมน้ำกลั่น 200 มิลลิเมตร เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 50 ปริมาตร 70 มิลลิเมตร นำไปประกอบเข้ากับเครื่องกลั่น ให้ปลายของเครื่องควมแน่นอยู่ในสารละลายกรดบอริกเข้มข้นร้อยละ 4 ปริมาตร 25 มิลลิเมตร และอินดิเคเตอร์ 3 หยด กลั่นแอมโมเนียลงในขวดจนได้สารละลายในช่วงประมาณ 200 มิลลิเมตร นำสิ่งที่กลั่นได้ไปไทเทรตกับกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 นอร์มอล (ที่ผ่านการเทียบมาตรฐานด้วยสารละลายไดโซเดียมเตตระบอเรตเคะไฮเดรต) จนได้สารละลายสีชมพู และทำแบลนค์เช่นเดียวกับตัวอย่าง คำนวณหาปริมาณโปรตีน

การคำนวณ:

$$\text{ร้อยละโปรตีน} = \frac{(A - B) \times M \times 1.4007 \times 5.95}{W}$$

A = ปริมาตร (มิลลิเมตร) ของสารละลายมาตรฐานกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ไทเทรตกับตัวอย่าง

B = ปริมาตร (มิลลิเมตร) ของสารละลายมาตรฐานกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ไทเทรตกับแบลนค์

M = ความเข้มข้น (โมลาร์) ของสารละลายมาตรฐานกรดไฮโดรคลอริก

W = น้ำหนักตัวอย่างเป็นกรัม (น้ำหนักแห้ง)

2.2 การหาค่า Thiobarbituric acid-reactive substance (TBARS) (Buege and Aust, 1978)

สารเคมี

1. สารละลาย TBA ซึ่งประกอบด้วย กรดไซโอบาร์บิฟูริก 1.875 กรัม และกรดไตรคลอโรอะซิติก 75 กรัม ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.25 โมลาร์ 10.45 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 500 มิลลิลิตร

2. สารละลาย Blank: ละลายกรดไตรคลอโรอะซิติก 75 กรัมในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.25 โมลาร์ 10.45 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำ กลั่นเป็น 500 มิลลิลิตร

อุปกรณ์

1. หลอดฝาเกลียว
2. อ่างควบคุมอุณหภูมิ
3. เครื่องแยกเหวี่ยง
4. สเปคโตรโฟโตมิเตอร์
5. ออโตปิเปต

วิธีการ

1. ชั่งตัวอย่าง 0.5 กรัม เติมสารละลาย TBA ปริมาตร 2.5 มิลลิลิตร
2. นำมาโฮโมจีไนซ์เป็นเวลา 1 นาที ด้วยความเร็วต่ำสุด
3. ต้มสารละลายผสมในน้ำเดือด (95-100°C) เป็นเวลา 10 นาที
4. ทำให้สารละลายผสมมีอุณหภูมิลดลงโดยให้น้ำไหลผ่าน
5. เหวี่ยงแยกสารด้วยความเร็วรอบ 5,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที
6. นำส่วนใสที่ได้มาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไปเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน malonaldehyde
7. ทำ Blank โดยการใส่ตัวอย่างผสมกับ สารละลาย Blank แล้วทำการทดลองเช่นเดียวกับตัวอย่าง

การเตรียมกราฟมาตรฐาน

1. ดูดสารละลาย malonaldehyde เข้มข้น 10 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร จำนวน 0 10 50 100 150 และ 200 ไมโครลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 1000 ไมโครลิตร
2. นำสารละลาย malonaldehyde จากข้อ 1 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ มาหาค่า TBARS เช่นเดียวกับตัวอย่าง

3. เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลาย malonaldehyde กับ ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร ค่า TBARS คำนวณโดยนำค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร แทนค่าในสมการของกราฟมาตรฐาน malonaldehyde

การคำนวณ

1. สมการเส้นตรงของกราฟมาตรฐาน malonaldehyde, $y = 0.0921a + 0.013$
2.
$$\text{TBARS (mg malonaldehyde/kg sample)} = \frac{\text{ค่าจากกราฟ (mg/kg)} \times 0.5 \text{ (g)} \times 5 \text{ (ml)}}{\text{ปริมาตรรวม (ml)} \times \text{น้ำหนักตัวอย่าง (g)}}$$

3. การวิเคราะห์คุณสมบัติทางจุลชีววิทยา

3.1 จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด (BAM, 2001)

โดยวิธี Total viable count แบบ pour plate

1. ชั่งตัวอย่างอาหาร 25 กรัม ใส่ในจานเลี้ยงเชื้อที่ฆ่าเชื้อแล้ว ด้วยวิธีปราศจากเชื้อ
2. นำตัวอย่างอาหารและสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 0.85 จำนวน 225 มิลลิลิตร เทในถุงพลาสติกเพื่อตีปนด้วยเครื่องตีปนไฟฟ้า โดยใช้ความเร็วระดับต่ำ เป็นระยะเวลา 1 นาที ตัวอย่างอาหารจะมีระดับความเจือจาง 1:10
3. เจือจางอาหารด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 0.85 ปริมาณ 9 มิลลิลิตร ให้มีระดับความเจือจางที่ต้องการ (1:100, 1:1000, 1:10000)
4. ปิเปิดตัวอย่างอาหารเจือจางที่ระดับ 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} มา 1 มิลลิลิตร ระดับละ 3 ซ้ำ ลงในจานเพาะเชื้อที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว
5. เททับด้วยอาหาร PCA ประมาณ 20 มิลลิลิตร
6. หมุนจานเพาะเชื้อเบาๆ แล้วตั้งทิ้งไว้ให้อาหารแข็งตัวประมาณ 15 นาที
7. บ่มจานเพาะเชื้อที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ในลักษณะคว่ำจานเพาะเชื้อเป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง
8. ตรวจสอบจำนวนโคโลนีในจานเพาะเชื้อที่มีจำนวนประมาณ 30-300 โคโลนี และรายงานผลเป็นจำนวน Colony Forming Unit (CFU/กรัมตัวอย่าง)

การคำนวณ

$$\text{จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด (โคโลนี/กรัมตัวอย่าง)} = \frac{\text{ค่าเฉลี่ยของจำนวนโคโลนี}}{\text{ระดับความเข้มข้น}}$$

3.2 จำนวนยีสต์และรา (BAM, 2001)

1. ชั่งตัวอย่างอาหาร 25 กรัม ใส่ในจานเลี้ยงเชื้อที่ฆ่าเชื้อแล้ว ด้วยวิธีปราศจากเชื้อ
2. นำตัวอย่างอาหารและสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 0.85 จำนวน 225 มิลลิลิตร เทในถุงพลาสติกเพื่อตีปนด้วยเครื่องตีปั่นไฟฟ้า โดยใช้ความเร็วระดับต่ำ เป็นระยะเวลา 1 นาที ตัวอย่างอาหารจะมีระดับความเจือจาง 1:10
3. เจือจางอาหารด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 0.85 ปริมาณ 9 มิลลิลิตร ให้มีระดับความเจือจางที่ต้องการ (1:100, 1:1000, 1:10000)
4. ปิ่เปิดอาหารเจือจางที่ระดับ 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} มา 0.1 มิลลิลิตร แล้ว Spread plate บนอาหารเลี้ยงเชื้อ Potato Dextrose Agar (PDA) ทำ 3 ซ้ำต่อ 1 ระดับความเจือจาง
5. บ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง
6. ตรวจสอบจำนวนโคโลนีในจานเพาะเชื้อที่มีจำนวนประมาณ 30-300 โคโลนี และรายงานผลเป็นจำนวน Colony Forming Unit (CFU/กรัมตัวอย่าง)

การคำนวณ

$$\text{จำนวนยีสต์และรา (โคโลนี/กรัมตัวอย่าง)} = \frac{\text{ค่าเฉลี่ยของจำนวนโคโลนี}}{\text{ระดับความเข้มข้น}}$$

4. การทดสอบการยอมรับในการบริโภค คัดแปลงจากวิธีของคลฤดี (2543)

แบบทดสอบการชิม

ผลิตภัณฑ์

กึ่งแห้ง

ชื่อผู้ชิม..... เพศ.....วันที่.....เวลา.....

ท่านจะได้รับตัวอย่างผลิตภัณฑ์ทั้งหมดและหมายเลขของกึ่งแห้ง ขอให้ท่านกรุณาชิม และแสดงความคิดเห็นถึงความชอบของท่านที่มีต่อผลิตภัณฑ์ชนิดนี้ โดยให้คะแนนดังนี้

หลังจากทำการทดสอบแต่ละตัวอย่าง กรุณาดื่มน้ำเพื่อทำความสะอาดปากและเว้นช่วง อย่างน้อย 1 นาที ก่อนทำการทดสอบตัวอย่างถัดไป

คำแนะนำ กรุณาใส่เครื่องหมาย / ในวงเล็บ () ที่ท่านเห็นควรตามความคิดเห็นของท่าน

| ตัวอย่าง | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| สีของกึ่งแข็งที่ท่านเห็น | | | | | |
| 5 สีแดง | | | | | |
| 4 สีแดงส้ม | | | | | |
| 3 สีส้ม | | | | | |
| 2 สีส้มอ่อน | | | | | |
| 1 สีส้มเหลือง | | | | | |
| ลักษณะของกึ่งแข็งที่ท่านเห็น | | | | | |
| 5 ตัวใส เงาม ผิวเรียบ | | | | | |
| 4 ตัวใส และผิวเรียบ | | | | | |
| 3 ตัวใสเล็กน้อยและแห้งบางส่วน | | | | | |
| 2 ตัวขุ่นและแห้งบางส่วน | | | | | |
| 1 ตัวขุ่นและแห้งมาก | | | | | |
| ลักษณะของเนื้อสัมผัสกึ่งแข็ง | | | | | |
| 5 ผิวด้านนอกและเนื้อเยื่อด้านในเหนียวเล็กน้อย | | | | | |
| 4 ผิวด้านนอกเหนียวเล็กน้อยแต่เนื้อเยื่อด้านในนุ่ม | | | | | |
| 3 ผิวด้านนอกเหนียวแต่เนื้อเยื่อด้านในนุ่ม | | | | | |
| 2 ผิวด้านนอกเหนียวมากแต่เนื้อเยื่อด้านในนุ่ม | | | | | |
| 1 ผิวด้านนอกและเนื้อเยื่อด้านในเหนียวมาก | | | | | |
| กลิ่นของกึ่งแข็ง | | | | | |
| 5 มีกลิ่นคาวของกึ่งรุนแรง | | | | | |
| 4 มีกลิ่นคาวของกึ่ง | | | | | |
| 3 มีกลิ่นคาวของกึ่งเล็กน้อย | | | | | |
| 2 มีกลิ่นคาวของกึ่งน้อยมาก | | | | | |
| 1 ไม่มีกลิ่นคาวของกึ่งเลย | | | | | |

| ตัวอย่าง | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---------------------|---|---|---|---|---|
| รสเค็มของกุ้ง | | | | | |
| 5 มีรสเค็มมากเกินไป | | | | | |
| 4 มีรสเค็มมาก | | | | | |
| 3 มีรสเค็มปานกลาง | | | | | |
| 2 มีรสเค็มเล็กน้อย | | | | | |
| 1 ไม่มีรสเค็ม | | | | | |
| ความพึงพอใจ | | | | | |
| 5 ชอบมาก | | | | | |
| 4 ชอบปานกลาง | | | | | |
| 3 ชอบเล็กน้อย | | | | | |
| 2 ไม่ชอบ | | | | | |
| 1 ไม่ชอบมาก | | | | | |

ข้อเสนอแนะ

.....

.....

.....

.....

ขอขอบคุณ

ภาคผนวก ง

ข้อมูลการหาค่าคุณสมบัติทางความร้อนและทางกายภาพ

1. ความชื้นสมดุล

ตารางภาคผนวก 1 ความชื้นสมดุลของกึ่งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม ที่อุณหภูมิ 40°C

| สารละลายเกลืออิ่มตัว | วอเตอร์แอกติวิตี (a_w) | น้ำหนักเริ่มต้นกึ่ง (g) | น้ำหนักสมดุลกึ่ง (g) | ความชื้นกึ่ง (% d.b.) |
|--|-------------------------------|----------------------------|-------------------------|--------------------------|
| LiCl | 0.12 | 1.76 | 1.66 | 6.12 |
| LiCl | 0.12 | 1.71 | 1.61 | 6.21 |
| MgCl ₂ .6H ₂ O | 0.32 | 1.69 | 1.53 | 10.46 |
| MgCl ₂ .6H ₂ O | 0.32 | 1.72 | 1.55 | 10.97 |
| Mg(NO ₃) ₂ .6H ₂ O | 0.50 | 1.69 | 1.46 | 15.75 |
| Mg(NO ₃) ₂ .6H ₂ O | 0.50 | 1.71 | 1.48 | 15.54 |
| NaCl | 0.75 | 1.66 | 1.30 | 27.95 |
| NaCl | 0.75 | 1.70 | 1.34 | 26.78 |
| KNO ₃ | 0.88 | 1.75 | 1.22 | 43.44 |
| KNO ₃ | 0.88 | 1.73 | 1.21 | 42.98 |

ตารางภาคผนวก 2 ความชื้นสมดุลของกึ่งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม ที่อุณหภูมิ 45°C

| สารละลายเกลืออิ่มตัว | วอเตอร์แอกติวิตี (a_w) | น้ำหนักเริ่มต้นกึ่ง (g) | น้ำหนักสมดุลกึ่ง (g) | ความชื้นกึ่ง (% d.b.) |
|--------------------------------------|-------------------------------|----------------------------|-------------------------|--------------------------|
| LiCl | 0.12 | 2.06 | 1.95 | 5.64 |
| LiCl | 0.12 | 2.03 | 1.91 | 6.18 |
| MgCl ₂ .6H ₂ O | 0.32 | 2.04 | 1.86 | 9.68 |
| MgCl ₂ .6H ₂ O | 0.32 | 2.12 | 1.97 | 7.84 |

| | | | | |
|--|------|------|------|-------|
| Mg(NO ₃) ₂ .6H ₂ O | 0.48 | 2.01 | 1.77 | 13.56 |
| Mg(NO ₃) ₂ .6H ₂ O | 0.48 | 2.10 | 1.83 | 14.51 |
| NaCl | 0.75 | 2.22 | 1.78 | 27.59 |
| NaCl | 0.75 | 2.25 | 1.77 | 27.12 |
| KNO ₃ | 0.86 | 2.15 | 1.54 | 39.71 |
| KNO ₃ | 0.86 | 2.39 | 1.73 | 38.15 |

ตารางภาคผนวก 3 ความชื้นสมดุลของกุ้งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม ที่อุณหภูมิ 50°C

| สารละลายเกลืออิมิตัว | วอเตอร์แอกทิวิตี (a _w) | น้ำหนักเริ่มต้นกุ้ง (g) | น้ำหนักสมดุลกุ้ง (g) | ความชื้นกุ้ง (% d.b.) |
|--|------------------------------------|-------------------------|----------------------|-----------------------|
| LiCl | 0.12 | 1.72 | 1.64 | 4.88 |
| LiCl | 0.12 | 1.73 | 1.65 | 4.85 |
| MgCl ₂ .6H ₂ O | 0.32 | 1.75 | 1.61 | 8.70 |
| MgCl ₂ .6H ₂ O | 0.32 | 1.71 | 1.57 | 8.92 |
| Mg(NO ₃) ₂ .6H ₂ O | 0.47 | 1.76 | 1.57 | 12.10 |
| Mg(NO ₃) ₂ .6H ₂ O | 0.47 | 1.73 | 1.54 | 12.34 |
| NaCl | 0.75 | 1.72 | 1.38 | 24.64 |
| NaCl | 0.75 | 1.75 | 1.41 | 24.11 |
| KNO ₃ | 0.85 | 1.75 | 1.27 | 32.58 |
| KNO ₃ | 0.85 | 1.71 | 1.25 | 33.59 |

ตารางภาคผนวก 4 ความชื้นสมดุลของกุ้งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม ที่อุณหภูมิ 55°C

| สารละลายเกลืออิมิตัว | วอเตอร์แอกทิวิตี (a _w) | น้ำหนักเริ่มต้นกุ้ง (g) | น้ำหนักสมดุลกุ้ง (g) | ความชื้นกุ้ง (% d.b.) |
|--------------------------------------|------------------------------------|-------------------------|----------------------|-----------------------|
| LiCl | 0.11 | 2.11 | 2.02 | 4.46 |
| LiCl | 0.11 | 2.04 | 1.96 | 4.08 |
| MgCl ₂ .6H ₂ O | 0.31 | 2.17 | 1.98 | 9.90 |

| | | | | |
|--|------|------|------|-------|
| MgCl ₂ .6H ₂ O | 0.31 | 2.19 | 2.03 | 7.83 |
| Mg(NO ₃) ₂ .6H ₂ O | 0.46 | 2.04 | 1.82 | 12.27 |
| Mg(NO ₃) ₂ .6H ₂ O | 0.46 | 2.04 | 1.80 | 13.68 |
| NaCl | 0.74 | 2.08 | 1.67 | 24.35 |
| NaCl | 0.74 | 2.06 | 1.64 | 25.62 |
| KNO ₃ | 0.83 | 2.02 | 1.52 | 32.66 |
| KNO ₃ | 0.83 | 2.12 | 1.58 | 34.27 |

2. ความหนาแน่นปรากฏ

ตารางภาคผนวก 5 ความหนาแน่นปรากฏของกึ่งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม

| ความชื้น (% d.b.) | น้ำหนักกึ่ง (g) | ปริมาตรภาชนะ (cm ³) | ความหนาแน่นปรากฏ (kg/m ³) |
|-------------------|-----------------|---------------------------------|---------------------------------------|
| 66.54 | 23.30 | 250 | 93.20 |
| 66.54 | 23.25 | 250 | 93.00 |
| 66.54 | 23.21 | 250 | 92.84 |
| 108.67 | 25.13 | 250 | 100.52 |
| 108.67 | 25.19 | 250 | 100.76 |
| 108.67 | 25.08 | 250 | 100.32 |
| 159.65 | 32.22 | 250 | 128.88 |
| 159.65 | 32.31 | 250 | 129.24 |
| 159.65 | 32.45 | 250 | 129.80 |
| 215.65 | 44.83 | 250 | 179.32 |
| 215.65 | 44.86 | 250 | 179.44 |
| 215.65 | 44.78 | 250 | 179.12 |
| 251.11 | 55.87 | 250 | 223.48 |
| 251.11 | 55.78 | 250 | 223.12 |
| 251.11 | 55.82 | 250 | 223.28 |
| 275.63 | 65.29 | 250 | 261.16 |

| | | | |
|--------|-------|-----|--------|
| 275.63 | 65.25 | 250 | 261.00 |
| 275.63 | 65.31 | 250 | 261.24 |
| 321.33 | 86.47 | 250 | 345.88 |
| 321.33 | 86.38 | 250 | 345.52 |
| 321.33 | 86.56 | 250 | 346.24 |

3. ร้อยละช่องว่างของอากาศ

ตารางภาคผนวก 6 ร้อยละช่องว่างของอากาศของกึ่งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม

| ความชื้น (% d.b.) | ปริมาตรภาชนะ (cm ³) | ปริมาตรน้ำมัน (cm ³) | ร้อยละช่องว่าง (%) |
|-------------------|---------------------------------|----------------------------------|--------------------|
| 21.11 | 50 | 36.85 | 73.70 |
| 21.11 | 50 | 36.68 | 73.36 |
| 21.11 | 50 | 36.75 | 73.50 |
| 63.43 | 50 | 35.65 | 71.30 |
| 63.43 | 50 | 35.55 | 71.10 |
| 63.43 | 50 | 35.70 | 71.40 |
| 104.76 | 50 | 34.30 | 68.67 |
| 104.76 | 50 | 34.15 | 68.34 |
| 104.76 | 50 | 34.25 | 69.03 |
| 145.33 | 50 | 32.35 | 64.67 |
| 145.33 | 50 | 32.55 | 65.12 |
| 145.33 | 50 | 32.65 | 65.31 |
| 197.23 | 50 | 30.20 | 60.45 |
| 197.23 | 50 | 30.05 | 60.13 |
| 197.23 | 50 | 30.30 | 60.58 |
| 232.43 | 50 | 28.20 | 56.43 |
| 232.43 | 50 | 28.40 | 56.78 |
| 232.43 | 50 | 28.30 | 56.57 |

| | | | |
|--------|----|-------|-------|
| 271.32 | 50 | 26.70 | 53.44 |
| 271.32 | 50 | 26.50 | 53.01 |
| 271.32 | 50 | 26.60 | 53.26 |
| 311.33 | 50 | 24.60 | 49.27 |
| 311.33 | 50 | 24.65 | 49.33 |
| 311.33 | 50 | 24.80 | 49.67 |

4. ความร้อนจำเพาะ

ตารางภาคผนวก 7 ความร้อนจำเพาะของกุ้งขนาด 150-200 ตัวต่อ กิโลกรัม

| MC (% d.b.) | $W_{\text{น้ำ}}$ (g) | $W_{\text{วัสดุ}}$ (g) | $T_{\text{น้ำ}}$ ($^{\circ}\text{C}$) | $T_{\text{วัสดุ}}$ ($^{\circ}\text{C}$) | $T_{\text{แคลอรีมิเตอร์}}$ ($^{\circ}\text{C}$) | $T_{\text{สมดุล}}$ ($^{\circ}\text{C}$) | C_p (kJ/kg $^{\circ}\text{C}$) |
|-------------|----------------------|------------------------|---|---|---|---|-----------------------------------|
| 35.67 | 40.01 | 70.02 | 65.2 | 27.5 | 28.4 | 42.2 | 0.327 |
| 35.67 | 39.99 | 70.01 | 65.0 | 27.2 | 28.3 | 42.1 | 0.305 |
| 94.00 | 39.98 | 70.02 | 65.3 | 28.1 | 28.8 | 41.9 | 0.599 |
| 93.42 | 39.99 | 69.99 | 65.1 | 27.8 | 28.6 | 41.8 | 0.548 |
| 165.34 | 40.01 | 70.00 | 65.2 | 27.8 | 28.3 | 41.3 | 0.731 |
| 165.34 | 40.00 | 69.98 | 64.9 | 27.6 | 28.6 | 41.2 | 0.796 |
| 256.78 | 40.02 | 69.99 | 65.2 | 28.0 | 28.4 | 40.7 | 1.091 |
| 256.78 | 39.98 | 70.01 | 64.8 | 27.7 | 28.3 | 40.4 | 1.125 |
| 331.23 | 40.02 | 69.97 | 65.0 | 28.2 | 28.5 | 40.2 | 1.397 |
| 331.23 | 40.01 | 70.00 | 64.8 | 28.0 | 28.3 | 40.1 | 1.332 |

น้ำหนักแคลอรีมิเตอร์ = 276.27 g, $C_{p_{\text{น้ำ}}}$ ($T=54.44-65.55^{\circ}\text{C}$) = 4.18 kJ/kg $^{\circ}\text{C}$, $C_{p_{\text{ที่กวน}}}$ (ทองแดง $T=20^{\circ}\text{C}$) = 0.3831 kJ/kg $^{\circ}\text{C}$, $C_{p_{\text{แคลอรีมิเตอร์รวมทั้งกวน}}}$ = 0.9207 kJ/kg

ภาคผนวก จ

ตารางผลการวิเคราะห์คุณภาพระหว่างการเก็บรักษา

ตารางภาคผนวก 8 ค่าความชื้นของกุ้งแห้งที่อบแห้งด้วยสภาวะต่าง ๆ เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง

| สภาวะการอบแห้ง | ความชื้น (% dry-basis) เดือนที่ | | | |
|---|---------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 |
| กุ้งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม | | | | |
| IR 500 W 69.9°C, N | 19.32±0.99 ^{aA} | 23.41±0.57 ^{aB} | 24.53±0.32 ^{aC} | 25.60±0.38 ^{aD} |
| IR 500 W 69.9°C, PP | 19.32±0.99 ^{aA} | 25.05±1.14 ^{aB} | 26.00±0.79 ^{bB} | 27.59±0.48 ^{bC} |
| IR 500 W 80.8°C, N | 19.22±0.40 ^{aA} | 20.39±0.30 ^{aB} | 22.19±0.42 ^{aC} | 24.71±0.51 ^{aD} |
| IR 500 W 80.8°C, PP | 19.22±0.40 ^{aA} | 22.60±0.36 ^{bB} | 25.56±0.69 ^{bC} | 27.02±0.25 ^{bD} |
| IR 500 W 92.5°C, N | 19.54±0.19 ^{aA} | 20.61±0.29 ^{aB} | 21.99±0.31 ^{aC} | 23.53±0.64 ^{aD} |
| IR 500 W 92.5°C, PP | 19.54±0.19 ^{aA} | 21.32±0.32 ^{bB} | 23.56±0.23 ^{bC} | 25.54±0.47 ^{bD} |
| IR 1,000 W 69.5°C, N | 20.34±0.04 ^{aA} | 22.16±0.17 ^{aB} | 24.40±0.31 ^{aC} | 26.95±0.28 ^{aD} |
| IR 1,000 W 69.5°C, PP | 20.34±0.04 ^{aA} | 26.91±0.48 ^{bB} | 29.66±0.33 ^{bC} | 31.34±0.21 ^{bD} |
| IR 1,000 W 79.5°C, N | 19.97±0.21 ^{aA} | 20.33±0.42 ^{aA} | 21.57±0.30 ^{aB} | 24.56±0.48 ^{aC} |
| IR 1,000 W 79.5°C, PP | 19.97±0.21 ^{aA} | 22.66±0.39 ^{bB} | 26.82±0.42 ^{bC} | 28.81±0.23 ^{bD} |
| IR 1,000 W 89.1°C, N | 20.11±0.05 ^{aA} | 20.95±0.18 ^{aB} | 23.00±0.23 ^{aC} | 24.46±0.26 ^{aD} |
| IR 1,000 W 89.1°C, PP | 20.11±0.05 ^{aA} | 22.17±0.09 ^{bB} | 24.68±0.38 ^{bC} | 27.39±0.22 ^{bD} |
| HA+IR 1,000 W 90.8°C (20 min), 71.7°C, N | 20.65±0.14 ^{aA} | 22.15±0.32 ^{aB} | 24.42±0.23 ^{aC} | 26.01±0.26 ^{aD} |
| HA+IR 1,000 W 90.8°C (20 min), 71.7°C, PP | 20.65±0.14 ^{aA} | 25.25±0.13 ^{bB} | 27.38±0.29 ^{bC} | 29.01±0.12 ^{bD} |
| HA+IR 1,000 W 90.6°C (25 min), 72.2°C, N | 21.11±0.22 ^{aA} | 22.11±0.38 ^{aB} | 23.77±0.32 ^{aC} | 25.62±0.32 ^{aD} |
| HA+IR 1,000 W 90.6°C (25 min), 72.2°C, PP | 21.11±0.22 ^{aA} | 25.17±0.17 ^{bB} | 26.98±0.30 ^{bC} | 29.03±0.36 ^{bD} |
| กุ้งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม | | | | |
| IR 1,000 W 79.3°C, N | 16.70±1.45 ^{aA} | 18.65±0.14 ^{aB} | 19.91±0.14 ^{aC} | 21.63±0.12 ^{aD} |
| IR 1,000 W 79.3°C, PP | 16.70±1.45 ^{aA} | 19.16±0.08 ^{aB} | 21.45±0.12 ^{bC} | 23.21±0.07 ^{bD} |
| HA+IR 1,000 W 89.3°C (30 min), 69.8°C, N | 16.91±0.80 ^{aA} | 18.17±0.07 ^{aB} | 19.39±0.15 ^{aC} | 20.82±0.17 ^{aD} |
| HA+IR 1,000 W 89.3°C (30 min), 69.8°C, PP | 16.91±0.80 ^{aA} | 18.96±0.02 ^{bB} | 21.09±0.06 ^{bC} | 23.00±0.06 ^{bD} |

หมายเหตุ : a-b คือ ในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% , A-D คือ ในแถวเดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ของแต่ละสภาวะการทดลอง

ตารางภาคผนวก 9 ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ (a_w) ของกุ้งแห้งที่อบแห้งด้วยสภาวะต่าง ๆ เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง

| สภาวะการอบแห้ง | ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ เดือนที่ | | | |
|---|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 |
| กุ้งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม | | | | |
| IR 500 W 69.9°C, N | 0.601±0.01 ^{aA} | 0.649±0.02 ^{aB} | 0.689±0.01 ^{aC} | 0.718±0.01 ^{aD} |
| IR 500 W 69.9°C, PP | 0.601±0.01 ^{aA} | 0.693±0.02 ^{bB} | 0.726±0.01 ^{bC} | 0.768±0.01 ^{bD} |
| IR 500 W 80.8°C, N | 0.586±0.01 ^{aA} | 0.615±0.01 ^{aB} | 0.636±0.01 ^{aC} | 0.690±0.01 ^{aD} |
| IR 500 W 80.8°C, PP | 0.586±0.01 ^{aA} | 0.652±0.01 ^{bB} | 0.698±0.01 ^{bC} | 0.789±0.02 ^{bD} |
| IR 500 W 92.5°C, N | 0.542±0.01 ^{aA} | 0.582±0.01 ^{aB} | 0.604±0.01 ^{aC} | 0.688±0.01 ^{aD} |
| IR 500 W 92.5°C, PP | 0.542±0.01 ^{aA} | 0.628±0.01 ^{bB} | 0.660±0.01 ^{bC} | 0.744±0.01 ^{bD} |
| IR 1,000 W 69.5°C, N | 0.634±0.01 ^{aA} | 0.659±0.01 ^{aB} | 0.697±0.01 ^{aC} | 0.716±0.01 ^{aD} |
| IR 1,000 W 69.5°C, PP | 0.634±0.01 ^{aA} | 0.736±0.02 ^{bB} | 0.802±0.01 ^{bC} | 0.865±0.02 ^{bD} |
| IR 1,000 W 79.5°C, N | 0.575±0.01 ^{aA} | 0.606±0.02 ^{aB} | 0.644±0.02 ^{aC} | 0.677±0.01 ^{aD} |
| IR 1,000 W 79.5°C, PP | 0.575±0.01 ^{aA} | 0.655±0.01 ^{bB} | 0.752±0.02 ^{bC} | 0.782±0.02 ^{bC} |
| IR 1,000 W 89.1°C, N | 0.533±0.01 ^{aA} | 0.582±0.01 ^{aB} | 0.606±0.01 ^{aC} | 0.636±0.01 ^{aD} |
| IR 1,000 W 89.1°C, PP | 0.533±0.01 ^{aA} | 0.623±0.01 ^{bB} | 0.672±0.01 ^{bC} | 0.717±0.01 ^{bD} |
| HA+IR 1,000 W 90.8°C (20 min), 71.7°C, N | 0.585±0.01 ^{aA} | 0.658±0.02 ^{aB} | 0.679±0.01 ^{aC} | 0.704±0.01 ^{aD} |
| HA+IR 1,000 W 90.8°C (20 min), 71.7°C, PP | 0.533±0.01 ^{aA} | 0.779±0.02 ^{bB} | 0.834±0.02 ^{bC} | 0.874±0.01 ^{bD} |
| HA+IR 1,000 W 90.6°C (25 min), 72.2°C, N | 0.556±0.01 ^{aA} | 0.643±0.01 ^{aB} | 0.659±0.01 ^{aC} | 0.686±0.01 ^{aD} |
| HA+IR 1,000 W 90.6°C (25 min), 72.2°C, PP | 0.556±0.01 ^{aA} | 0.769±0.02 ^{bB} | 0.829±0.01 ^{bC} | 0.864±0.02 ^{bD} |
| กุ้งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม | | | | |
| IR 1,000 W 79.3°C, N | 0.340±0.01 ^{aA} | 0.367±0.01 ^{aB} | 0.391±0.01 ^{aC} | 0.423±0.01 ^{aD} |
| IR 1,000 W 79.3°C, PP | 0.340±0.01 ^{aA} | 0.380±0.01 ^{bB} | 0.420±0.01 ^{bC} | 0.449±0.01 ^{bD} |
| HA+IR 1,000 W 89.3°C (30 min), 69.8°C, N | 0.333±0.01 ^{aA} | 0.358±0.01 ^{aB} | 0.387±0.01 ^{aC} | 0.414±0.01 ^{aD} |
| HA+IR 1,000 W 89.3°C (30 min), 69.8°C, PP | 0.333±0.01 ^{aA} | 0.369±0.01 ^{bB} | 0.411±0.01 ^{bC} | 0.438±0.01 ^{bD} |

หมายเหตุ : a-b คือ ในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%, A-D คือ ในแถวเดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ของแต่ละสภาวะการทดลอง

ตารางภาคผนวก 10 ค่าสีของกึ่งแข็งที่อบแห้งด้วยสภาวะต่าง ๆ เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ใช้กึ่งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม

| สภาวะการอบแห้ง | ชนิดถุง | Nylon/LLDPE (N) | | | | Polypropylene (PP) | | | |
|----------------------|---------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | | เดือน | L* | a* | b* | ΔE^* | L* | a* | b* |
| IR 500 W 69.9°C | 0 | 54.48±0.37 ^{aA} | 32.53±0.32 ^{aBC} | 34.30±0.21 ^{aB} | 0 | 54.48±0.37 ^{aA} | 32.53±0.32 ^{aD} | 34.30±0.21 ^{aC} | 0 |
| | 1 | 54.16±0.40 ^{aA} | 32.78±0.50 ^{bC} | 34.83±0.37 ^{aC} | 0.84±0.50 ^{aA} | 56.33±0.24 ^{bB} | 30.55±0.37 ^{aC} | 34.38±0.67 ^{aC} | 2.80±0.26 ^{bA} |
| | 2 | 54.61±0.42 ^{aA} | 32.33±0.24 ^{bB} | 34.46±0.44 ^{bB} | 0.68±0.08 ^{aA} | 58.22±0.15 ^{bC} | 29.04±0.13 ^{aB} | 30.25±0.23 ^{aB} | 6.53±0.12 ^{bB} |
| | 3 | 57.39±0.55 ^{aB} | 30.27±0.22 ^{bA} | 33.60±0.17 ^{bA} | 3.76±0.55 ^{aB} | 59.44±0.13 ^{bD} | 27.82±0.23 ^{aA} | 29.83±0.10 ^{aA} | 8.17±0.13 ^{bC} |
| IR 500 W 80.8°C | 0 | 52.44±0.31 ^{aA} | 34.33±0.25 ^{aC} | 35.67±0.18 ^{aC} | 0 | 52.44±0.31 ^{aA} | 34.33±0.25 ^{aD} | 35.67±0.18 ^{aD} | 0 |
| | 1 | 52.54±0.25 ^{aA} | 34.07±0.14 ^{bC} | 35.71±0.22 ^{bC} | 0.52±0.22 ^{aA} | 53.88±0.48 ^{bB} | 33.70±0.32 ^{aC} | 34.94±0.33 ^{aC} | 1.84±0.44 ^{bA} |
| | 2 | 54.36±0.28 ^{aB} | 33.55±0.46 ^{bB} | 34.72±0.19 ^{bB} | 2.38±0.12 ^{aB} | 55.18±0.12 ^{bC} | 31.94±0.21 ^{aB} | 33.13±0.33 ^{aB} | 4.34±0.31 ^{bB} |
| | 3 | 55.28±0.21 ^{aC} | 31.93±0.12 ^{bA} | 33.17±0.13 ^{bA} | 4.39±0.17 ^{aC} | 57.10±0.17 ^{bD} | 30.39±0.13 ^{aB} | 31.73±0.54 ^{aA} | 7.20±0.24 ^{bC} |
| IR 500 W 92.5°C | 0 | 50.56±0.32 ^{aA} | 35.59±0.41 ^{aD} | 36.67±0.31 ^{aC} | 0 | 50.56±0.32 ^{aA} | 35.59±0.41 ^{aD} | 36.67±0.31 ^{aD} | 0 |
| | 1 | 51.39±0.42 ^{aB} | 35.17±0.23 ^{bC} | 36.83±0.16 ^{bC} | 0.96±0.44 ^{aA} | 52.56±0.36 ^{bB} | 34.21±0.38 ^{aC} | 35.17±0.56 ^{aC} | 2.87±0.70 ^{bA} |
| | 2 | 52.66±0.37 ^{aC} | 34.44±0.35 ^{bB} | 35.89±0.27 ^{bB} | 2.57±0.23 ^{aB} | 54.02±0.23 ^{bC} | 32.51±0.21 ^{aB} | 33.94±0.34 ^{aB} | 5.39±0.12 ^{bB} |
| | 3 | 53.78±0.37 ^{aD} | 32.95±0.21 ^{bA} | 34.43±0.26 ^{bA} | 4.75±0.29 ^{aC} | 55.27±0.15 ^{bD} | 31.16±0.24 ^{aA} | 32.17±0.21 ^{aA} | 7.88±0.22 ^{bC} |
| IR 1,000 W 69.5°C | 0 | 49.23±0.19 ^{aA} | 41.24±0.20 ^{aC} | 46.24±0.21 ^{aD} | 0 | 49.23±0.19 ^{aA} | 41.24±0.20 ^{aD} | 46.24±0.21 ^{aD} | 0 |
| | 1 | 50.77±0.48 ^{aB} | 41.00±0.10 ^{bC} | 45.67±0.40 ^{aC} | 1.73±0.34 ^{aA} | 52.66±0.39 ^{bB} | 39.36±0.43 ^{aC} | 45.33±0.38 ^{aC} | 4.02±0.59 ^{bA} |
| | 2 | 52.71±0.19 ^{aC} | 40.04±0.19 ^{bB} | 43.27±0.16 ^{bB} | 4.73±0.24 ^{aB} | 54.03±0.18 ^{bC} | 37.54±0.39 ^{aB} | 42.33±0.13 ^{aB} | 7.22±0.31 ^{bB} |
| | 3 | 54.16±0.20 ^{aD} | 38.55±0.46 ^{bA} | 41.61±0.43 ^{aA} | 7.30±0.23 ^{aC} | 56.16±0.24 ^{bD} | 35.96±0.14 ^{aA} | 41.09±0.82 ^{aA} | 10.14±0.52 ^{bC} |
| IR 1,000 W 79.5°C | 0 | 48.36±0.26 ^{aA} | 38.08±0.22 ^{aAB} | 47.30±0.32 ^{aD} | 0 | 48.36±0.26 ^{aA} | 38.08±0.22 ^{aD} | 47.30±0.32 ^{aD} | 0 |
| | 1 | 49.31±0.28 ^{aB} | 39.00±0.14 ^{bB} | 45.32±0.36 ^{bC} | 2.97±0.57 ^{aA} | 50.38±0.21 ^{bB} | 36.48±0.17 ^{aC} | 43.67±0.39 ^{aC} | 4.46±0.29 ^{aA} |
| | 2 | 50.72±0.43 ^{aC} | 36.73±0.43 ^{bA} | 43.44±0.59 ^{bB} | 4.73±0.81 ^{aB} | 52.49±0.30 ^{bC} | 34.11±0.08 ^{aB} | 41.67±0.48 ^{aB} | 8.05±0.21 ^{bB} |
| | 3 | 52.62±0.42 ^{aD} | 36.26±0.32 ^{bA} | 41.93±0.44 ^{bA} | 7.09±0.65 ^{aC} | 54.83±0.34 ^{bD} | 32.89±0.19 ^{aA} | 39.50±0.24 ^{aA} | 11.39±0.29 ^{bC} |
| IR 1,000 W 89.1°C | 0 | 42.41±0.30 ^{aA} | 38.47±0.25 ^{aD} | 47.60±0.20 ^{aD} | 0 | 42.41±0.30 ^{aA} | 38.47±0.25 ^{aD} | 47.60±0.20 ^{aD} | 0 |
| | 1 | 43.81±0.18 ^{aB} | 38.16±0.12 ^{bC} | 45.28±0.44 ^{bC} | 2.73±0.45 ^{aA} | 45.84±0.20 ^{bB} | 37.40±0.30 ^{aC} | 43.49±0.42 ^{aC} | 5.47±0.25 ^{bA} |
| | 2 | 45.00±0.14 ^{aC} | 37.20±0.25 ^{bB} | 43.67±0.48 ^{bB} | 4.89±0.40 ^{aB} | 47.77±0.49 ^{bC} | 35.54±0.19 ^{aB} | 41.81±0.40 ^{aB} | 8.44±0.08 ^{bB} |
| | 3 | 47.27±0.34 ^{aD} | 35.50±0.41 ^{bA} | 41.89±0.71 ^{bA} | 8.10±0.48 ^{aC} | 50.70±0.54 ^{bD} | 33.18±0.41 ^{aA} | 37.98±0.20 ^{aA} | 13.77±0.39 ^{bC} |

หมายเหตุ : a-b คือ ในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%, A-D คือ ในแถวเดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ของแต่ละสภาวะการทดลอง

ตารางภาคผนวก 10 (ต่อ) ค่าสีของกึ่งแข็งที่อบแห้งด้วยสภาวะต่าง ๆ เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ใช้
กึ่งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม

| สภาวะการ อบแห้ง | ชนิดถุง | Nylon/LLDPE (N) | | | | Polypropylene (PP) | | | |
|--|---------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | | L* | a* | b* | ΔE | L* | a* | b* | ΔE^* |
| HA+IR 1,000 W 90.8°C (20 min), 71.7°C | 0 | 46.29±0.11 ^{aA} | 43.65±0.12 ^{aD} | 47.44±0.52 ^{aD} | 0 | 46.29±0.11 ^{aA} | 43.65±0.12 ^{aD} | 47.44±0.52 ^{aD} | 0 |
| | 1 | 47.62±0.42 ^{aB} | 42.58±0.43 ^{bC} | 46.73±0.31 ^{bC} | 1.92±0.41 ^{aA} | 49.00±0.07 ^{bB} | 41.68±0.25 ^{aC} | 44.28±0.88 ^{aC} | 4.67±0.49 ^{bA} |
| | 2 | 48.84±0.13 ^{aC} | 40.43±0.26 ^{bB} | 44.79±0.31 ^{bB} | 4.91±0.13 ^{aB} | 50.72±0.53 ^{bC} | 39.25±0.35 ^{aB} | 41.62±0.43 ^{aB} | 8.57±0.17 ^{bB} |
| | 3 | 50.06±0.23 ^{aD} | 38.84±0.25 ^{bA} | 40.45±0.81 ^{bA} | 9.29±0.08 ^{aC} | 52.73±0.55 ^{bD} | 37.21±0.35 ^{aA} | 38.95±0.30 ^{aA} | 12.47±0.28 ^{bC} |
| HA+IR 1,000 W 90.6°C (25 min), 72.2°C | 0 | 48.68±0.18 ^{aA} | 44.79±0.14 ^{aD} | 48.33±0.25 ^{aD} | 0 | 48.68±0.18 ^{aA} | 44.79±0.14 ^{aD} | 48.33±0.25 ^{aD} | 0 |
| | 1 | 49.62±0.43 ^{aB} | 43.05±0.09 ^{bC} | 46.32±0.47 ^{bC} | 2.85±0.51 ^{aA} | 51.17±0.09 ^{bB} | 41.33±0.34 ^{aC} | 44.16±0.20 ^{aB} | 5.96±0.30 ^{bA} |
| | 2 | 50.54±0.35 ^{aC} | 41.29±0.29 ^{bB} | 44.48±0.54 ^{bB} | 5.56±0.31 ^{aB} | 52.71±0.31 ^{bC} | 39.26±0.31 ^{aB} | 41.77±0.60 ^{aC} | 9.50±0.18 ^{bB} |
| | 3 | 51.45±0.35 ^{aD} | 39.36±0.30 ^{bA} | 41.74±0.66 ^{bA} | 8.98±0.75 ^{aC} | 53.71±0.42 ^{bD} | 37.38±0.23 ^{aA} | 39.41±0.39 ^{aA} | 12.65±0.41 ^{bC} |

หมายเหตุ : a-b คือ ในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%, A-D คือ ในแถวเดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ของแต่ละสภาวะการทดลอง

ตารางภาคผนวก 11 ค่าสีของกึ่งแข็งที่อบแห้งด้วยสภาวะต่าง ๆ เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ใช้กึ่ง
ขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม

| สภาวะการ อบแห้ง | ชนิดถุง | Nylon/LLDPE (N) | | | | Polypropylene (PP) | | | |
|---|---------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|
| | | L* | a* | b* | ΔE^* | L* | a* | b* | ΔE^* |
| IR 1,000 W 79.3°C | 0 | 50.28±0.09 ^{aA} | 37.55±0.16 ^{aD} | 44.21±0.10 ^{aA} | 0 | 50.28±0.09 ^{aA} | 37.55±0.16 ^{aD} | 44.21±0.10 ^{aA} | 0 |
| | 1 | 51.17±0.21 ^{aB} | 36.74±0.31 ^{bC} | 44.97±0.11 ^{aB} | 1.43±0.34 ^{aA} | 51.67±0.19 ^{bB} | 36.22±0.10 ^{aC} | 44.68±0.17 ^{aB} | 1.99±0.18 ^{bA} |
| | 2 | 52.02±0.25 ^{aC} | 35.93±0.43 ^{bB} | 45.60±0.26 ^{aC} | 2.77±0.49 ^{aB} | 52.66±0.18 ^{bC} | 34.74±0.11 ^{aB} | 46.19±0.36 ^{bC} | 4.19±0.22 ^{bB} |
| | 3 | 53.16±0.34 ^{aD} | 34.73±0.40 ^{bA} | 46.55±0.29 ^{aD} | 4.67±0.46 ^{aC} | 54.07±0.20 ^{bD} | 33.13±0.35 ^{aA} | 47.33±0.60 ^{bD} | 6.62±0.61 ^{bC} |
| HA+IR 1,000 W 89.3°C (30 min), 69.8°C | 0 | 51.34±0.12 ^{aA} | 36.21±0.07 ^{aD} | 42.26±0.08 ^{aA} | 0 | 51.34±0.12 ^{aA} | 36.21±0.07 ^{aD} | 42.26±0.08 ^{aA} | 0 |
| | 1 | 51.91±0.12 ^{aB} | 35.77±0.16 ^{bC} | 42.95±0.17 ^{aB} | 1.00±0.22 ^{aA} | 52.35±0.13 ^{bB} | 35.31±0.17 ^{aC} | 42.50±0.11 ^{aB} | 1.38±0.16 ^{bA} |
| | 2 | 52.39±0.13 ^{aC} | 34.56±0.25 ^{bB} | 43.69±0.19 ^{aC} | 2.43±0.22 ^{aB} | 53.32±0.17 ^{bC} | 33.90±0.14 ^{aB} | 44.02±0.15 ^{bC} | 3.52±0.10 ^{bB} |
| | 3 | 53.39±0.37 ^{aD} | 33.39±0.14 ^{bA} | 44.73±0.12 ^{aD} | 4.28±0.18 ^{aC} | 55.04±0.19 ^{bD} | 32.41±0.20 ^{aA} | 45.47±0.31 ^{bD} | 6.22±0.11 ^{bC} |

หมายเหตุ : a-b คือ ในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%, A-D คือ ในแถวเดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ของแต่ละสภาวะการทดลอง

ตารางภาคผนวก 12 จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดของกุ้งแห้งที่อบแห้งด้วยสภาวะต่าง ๆ เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง

| สภาวะการอบแห้ง | จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด (โคโลนี/กรัม) เดือนที่ | | | |
|---|---|----------------------|----------------------|----------------------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 |
| กุ้งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม | | | | |
| IR 500 W 69.9°C, N | 7.33x10 ⁴ | 8.05x10 ⁴ | 9.03x10 ⁴ | 2.60x10 ⁵ |
| IR 500 W 69.9°C, PP | 7.33x10 ⁴ | 8.48x10 ⁴ | 1.37x10 ⁵ | 4.40x10 ⁵ |
| IR 500 W 80.8°C, N | 5.93x10 ⁴ | 6.43x10 ⁴ | 7.90x10 ⁴ | 2.27x10 ⁵ |
| IR 500 W 80.8°C, PP | 5.93x10 ⁴ | 7.12x10 ⁴ | 1.11x10 ⁵ | 7.62x10 ⁵ |
| IR 500 W 92.5°C, N | 2.31x10 ⁴ | 4.34x10 ⁴ | 9.03x10 ⁴ | 5.32x10 ⁵ |
| IR 500 W 92.5°C, PP | 2.31x10 ⁴ | 4.48x10 ⁴ | 1.22x10 ⁵ | 8.82x10 ⁵ |
| IR 1,000 W 69.5°C, N | 5.27x10 ⁴ | 6.52x10 ⁴ | 7.45x10 ⁴ | 1.80x10 ⁵ |
| IR 1,000 W 69.5°C, PP | 5.27x10 ⁴ | 8.78x10 ⁴ | 3.43x10 ⁵ | 5.40x10 ⁵ |
| IR 1,000 W 79.5°C, N | 1.42x10 ⁴ | 2.49x10 ⁴ | 3.32x10 ⁴ | 1.27x10 ⁵ |
| IR 1,000 W 79.5°C, PP | 1.42x10 ⁴ | 6.50x10 ⁴ | 2.24x10 ⁵ | 5.23x10 ⁵ |
| IR 1,000 W 89.1°C, N | 8.90x10 ³ | 1.07x10 ⁴ | 1.37x10 ⁴ | 1.18x10 ⁵ |
| IR 1,000 W 89.1°C, PP | 8.90x10 ³ | 5.53x10 ⁴ | 1.33x10 ⁵ | 4.48x10 ⁵ |
| HA+IR 1,000 W 90.8°C (20 min), 71.7°C, N | 4.73x10 ⁴ | 5.37x10 ⁴ | 6.45x10 ⁴ | 9.53x10 ⁴ |
| HA+IR 1,000 W 90.8°C (20 min), 71.7°C, PP | 4.73x10 ⁴ | 7.50x10 ⁴ | 8.72x10 ⁴ | 3.28x10 ⁵ |
| HA+IR 1,000 W 90.6°C (25 min), 72.2°C, N | 3.57x10 ⁴ | 4.37x10 ⁴ | 5.60x10 ⁴ | 8.60x10 ⁴ |
| HA+IR 1,000 W 90.6°C (25 min), 72.2°C, PP | 3.57x10 ⁴ | 6.63x10 ⁴ | 7.45x10 ⁴ | 1.32x10 ⁵ |
| กุ้งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม | | | | |
| IR 1,000 W 79.3°C, N | 3.13x10 ³ | 9.68x10 ³ | 1.43x10 ⁴ | 4.15x10 ⁴ |
| IR 1,000 W 79.3°C, PP | 3.13x10 ³ | 1.38x10 ⁴ | 3.55x10 ⁴ | 7.32x10 ⁴ |
| HA+IR 1,000 W 89.3°C (30 min), 69.8°C, N | 3.57x10 ³ | 8.62x10 ³ | 1.25x10 ⁴ | 3.78x10 ⁴ |
| HA+IR 1,000 W 89.3°C (30 min), 69.8°C, PP | 3.57x10 ³ | 1.06x10 ⁴ | 3.40x10 ⁴ | 6.77x10 ⁴ |

ตารางภาคผนวก 13 จำนวนยีสต์และราของกึ่งแห้งที่อบแห้งด้วยสภาวะต่าง ๆ เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง

| สภาวะการอบแห้ง | จำนวนยีสต์และรา (โคโลนี/กรัม) เดือนที่ | | | |
|---|--|-----|-----|-----|
| | 0 | 1 | 2 | 3 |
| กึ่งขนาด 150-200 ตัวต่อกิโลกรัม | | | | |
| IR 500 W 69.9°C, N | 45 | 95 | 326 | 641 |
| IR 500 W 69.9°C, PP | 45 | 346 | 531 | 735 |
| IR 500 W 80.8°C, N | 41 | 90 | 159 | 600 |
| IR 500 W 80.8°C, PP | 41 | 316 | 578 | 758 |
| IR 500 W 92.5°C, N | 36 | 82 | 145 | 535 |
| IR 500 W 92.5°C, PP | 36 | 254 | 525 | 676 |
| IR 1,000 W 69.5°C, N | 45 | 87 | 318 | 626 |
| IR 1,000 W 69.5°C, PP | 45 | 140 | 528 | 728 |
| IR 1,000 W 79.5°C, N | 52 | 124 | 236 | 638 |
| IR 1,000 W 79.5°C, PP | 52 | 338 | 551 | 771 |
| IR 1,000 W 89.1°C, N | 48 | 108 | 230 | 575 |
| IR 1,000 W 89.1°C, PP | 48 | 279 | 541 | 713 |
| HA+IR 1,000 W 90.8°C (20 min), 71.7°C, N | 32 | 67 | 133 | 331 |
| HA+IR 1,000 W 90.8°C (20 min), 71.7°C, PP | 32 | 191 | 550 | 690 |
| HA+IR 1,000 W 90.6°C (25 min), 72.2°C, N | 30 | 59 | 157 | 403 |
| HA+IR 1,000 W 90.6°C (25 min), 72.2°C, PP | 30 | 214 | 516 | 668 |
| กึ่งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม | | | | |
| IR 1,000 W 79.3°C, N | 52 | 98 | 165 | 275 |
| IR 1,000 W 79.3°C, PP | 52 | 126 | 252 | 397 |
| HA+IR 1,000 W 89.3°C (30 min), 69.8°C, N | 30 | 88 | 150 | 222 |
| HA+IR 1,000 W 89.3°C (30 min), 69.8°C, PP | 30 | 106 | 237 | 380 |

ตารางภาคผนวก 14 ค่าความชื้นของกึ่งแห้งที่อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ เก็บรักษา อุณหภูมิห้อง ใช้กึ่งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม

| ความชื้น (% dry-basis) | | | | | |
|------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|
| ชนิดกึ่ง | Nylon/LLDPE | Nylon/LLDPE | Nylon/Al/LLDPE | Nylon/Al/LLDPE | Polypropylene |
| เดือน | (ปกติ) | (สุญญากาศ) | (ปกติ) | (สุญญากาศ) | (ปกติ) |
| 0 | 18.53±0.04 ^{aA} | 18.53±0.04 ^{aA} | 18.53±0.04 ^{aA} | 18.53±0.04 ^{aA} | 18.53±0.04 ^{aA} |
| 1 | 19.42±0.29 ^{bB} | 19.00±0.16 ^{aB} | 19.16±0.07 ^{abB} | 18.97±0.06 ^{aB} | 19.78±0.19 ^{cB} |
| 2 | 21.12±0.46 ^{cC} | 18.99±0.13 ^{aB} | 19.72±0.25 ^{bC} | 19.00±0.21 ^{aB} | 21.24±0.16 ^{cC} |
| 3 | 21.88±0.10 ^{cD} | 19.32±0.03 ^{aC} | 20.80±0.13 ^{bD} | 19.22±0.06 ^{aC} | 23.79±0.24 ^{dD} |
| 4 | 23.10±0.17 ^{cE} | 20.08±0.07 ^{aD} | 21.90±0.05 ^{bE} | 19.94±0.02 ^{aD} | 25.03±0.07 ^{dE} |
| 5 | 25.59±0.26 ^{cF} | 22.90±0.27 ^{aE} | 24.77±0.21 ^{bF} | 22.72±0.13 ^{aE} | - |
| 6 | - | 25.31±0.06 ^{bF} | - | 24.97±0.07 ^{aF} | - |

หมายเหตุ : a-d คือ ในแถวเดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%, A-F คือ ในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%, - คือ ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

ตารางภาคผนวก 15 ค่าแวลูเตอร์แอกติวิตี (a_w) ของกึ่งแห้งที่อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ เก็บรักษาที่เก็บรักษาอุณหภูมิห้อง ใช้กึ่งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม

| ค่าแวลูเตอร์แอกติวิตี | | | | | |
|-----------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| ชนิดกึ่ง | Nylon/LLDPE | Nylon/LLDPE | Nylon/Al/LLDPE | Nylon/Al/LLDPE | Polypropylene |
| เดือน | (ปกติ) | (สุญญากาศ) | (ปกติ) | (สุญญากาศ) | (ปกติ) |
| 0 | 0.324±0.01 ^{aA} | 0.324±0.01 ^{aA} | 0.324±0.01 ^{aA} | 0.324±0.01 ^{aA} | 0.324±0.01 ^{aA} |
| 1 | 0.351±0.01 ^{cB} | 0.337±0.01 ^{bB} | 0.339±0.01 ^{bB} | 0.330±0.01 ^{aB} | 0.373±0.01 ^{dB} |
| 2 | 0.359±0.01 ^{cC} | 0.343±0.01 ^{bC} | 0.346±0.01 ^{bC} | 0.336±0.01 ^{aC} | 0.392±0.01 ^{dC} |
| 3 | 0.388±0.01 ^{cD} | 0.361±0.01 ^{bD} | 0.364±0.01 ^{bD} | 0.347±0.01 ^{aD} | 0.403±0.01 ^{dD} |
| 4 | 0.421±0.01 ^{dE} | 0.380±0.01 ^{bE} | 0.391±0.01 ^{cE} | 0.359±0.01 ^{aE} | 0.461±0.01 ^{eE} |
| 5 | 0.485±0.01 ^{dF} | 0.432±0.01 ^{bF} | 0.467±0.01 ^{cF} | 0.418±0.01 ^{aF} | - |
| 6 | - | 0.490±0.01 ^{bG} | - | 0.470±0.01 ^{aG} | - |

หมายเหตุ : a-c คือ ในแถวเดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%, A-G คือ ในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%, - คือ ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

ตารางภาคผนวก 16 ค่าสีของกึ่งแข็งที่อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ใช้กึ่งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม

| ค่าสี | ชนิด | Nylon/LLDPE | Nylon/LLDPE | Nylon/Al/LLDPE | Nylon/Al/LLDPE | Polypropylene |
|-------|-------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|
| | เดือน | (ปกติ) | (สุญญากาศ) | (ปกติ) | (สุญญากาศ) | (ปกติ) |
| L* | 0 | 52.42±0.19 ^{aA} | 52.42±0.19 ^{aA} | 52.42±0.19 ^{aA} | 52.42±0.19 ^{aA} | 52.42±0.19 ^{aA} |
| | 1 | 54.06±0.38 ^{bB} | 53.51±0.50 ^{bB} | 52.50±0.36 ^{aA} | 52.55±0.45 ^{aA} | 54.58±0.24 ^{dB} |
| | 2 | 55.02±0.37 ^{cC} | 54.17±0.35 ^{bC} | 53.48±0.37 ^{aB} | 53.65±0.68 ^{aB} | 55.77±0.26 ^{dC} |
| | 3 | 55.49±0.42 ^{bD} | 54.74±0.51 ^{aD} | 54.66±0.18 ^{aC} | 54.86±0.69 ^{daC} | 56.60±0.19 ^{cd} |
| | 4 | 56.37±0.17 ^{cE} | 56.04±0.57 ^{bE} | 55.66±0.08 ^{aD} | 55.78±0.44 ^{abD} | 57.91±0.10 ^{dE} |
| | 5 | 57.96±0.27 ^{dF} | 57.31±0.09 ^{cF} | 56.57±0.17 ^{bE} | 56.87±0.12 ^{aE} | - |
| | 6 | - | 58.37±0.15 ^{bG} | - | 57.47±0.13 ^{aF} | - |
| a* | 0 | 32.49±0.29 ^{aF} | 32.49±0.29 ^{aG} | 32.49±0.29 ^{aF} | 32.49±0.29 ^{aG} | 32.49±0.29 ^{aE} |
| | 1 | 30.66±0.33 ^{bE} | 30.88±0.15 ^{bcF} | 31.16±0.12 ^{cdE} | 31.35±0.35 ^{dF} | 29.24±0.54 ^{aD} |
| | 2 | 28.05±0.49 ^{bD} | 29.01±0.28 ^{cE} | 30.14±0.21 ^{dd} | 30.63±0.48 ^{eE} | 26.67±0.31 ^{aC} |
| | 3 | 26.44±0.36 ^{bC} | 27.99±0.46 ^{cd} | 29.30±0.20 ^{dc} | 29.62±0.30 ^{ed} | 25.68±0.09 ^{aB} |
| | 4 | 25.02±0.38 ^{bb} | 26.85±0.30 ^{cC} | 28.49±0.15 ^{db} | 28.89±0.34 ^{cC} | 24.28±0.10 ^{aA} |
| | 5 | 23.64±0.16 ^{aA} | 25.55±0.34 ^{bb} | 27.35±0.14 ^{ca} | 28.27±0.18 ^{db} | - |
| | 6 | - | 24.62±0.11 ^{aA} | - | 27.80±0.21 ^{ba} | - |
| b* | 0 | 33.49±0.27 ^{aA} | 33.49±0.27 ^{aA} | 33.49±0.27 ^{aA} | 33.49±0.27 ^{aA} | 33.49±0.27 ^{aA} |
| | 1 | 34.81±0.24 ^{bB} | 34.99±0.25 ^{bB} | 34.15±0.34 ^{bB} | 33.85±0.18 ^{aB} | 34.94±0.40 ^{bB} |
| | 2 | 37.20±0.47 ^{cC} | 35.77±0.14 ^{cC} | 34.85±0.47 ^{aC} | 35.20±0.13 ^{bC} | 36.86±0.26 ^{dC} |
| | 3 | 37.98±0.64 ^{dD} | 36.35±0.32 ^{bD} | 35.70±0.23 ^{aD} | 36.40±0.26 ^{bD} | 37.26±0.87 ^{cC} |
| | 4 | 40.05±0.10 ^{eE} | 37.54±0.15 ^{cE} | 36.40±0.15 ^{aE} | 36.90±0.10 ^{bE} | 38.69±0.15 ^{dd} |
| | 5 | 41.46±0.20 ^{dF} | 38.81±0.20 ^{cF} | 37.47±0.08 ^{aF} | 38.06±0.22 ^{bF} | - |
| | 6 | - | 39.49±0.11 ^{bG} | - | 38.59±0.29 ^{aG} | - |

หมายเหตุ : a-e คือ ในแถวเดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%, A-G คือ ในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%, - คือ ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

ตารางภาคผนวก 16 (ต่อ) ค่าสีของกึ่งแข็งที่อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ใช้กึ่งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม

| ค่าสี | ชนิด | Nylon/LLDPE | Nylon/LLDPE | Nylon/Al/LLDPE | Nylon/Al/LLDPE | Polypropylene |
|--------------|-------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
| | เดือน | (ปกติ) | (สุญญากาศ) | (ปกติ) | (สุญญากาศ) | (ปกติ) |
| ΔE^* | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 1 | 2.83±0.17 ^{ca} | 2.49±0.30 ^{ba} | 1.54±0.23 ^{aA} | 1.30±0.30 ^{aA} | 4.16±0.65 ^{dA} |
| | 2 | 6.34±0.74 ^{cb} | 4.53±0.18 ^{bb} | 2.96±0.19 ^{aB} | 2.87±0.55 ^{aB} | 7.51±0.43 ^{dB} |
| | 3 | 8.13±0.77 ^{cc} | 5.85±0.24 ^{bc} | 4.49±0.09 ^{aC} | 4.80±0.37 ^{aC} | 8.87±0.34 ^{dC} |
| | 4 | 10.70±0.28 ^{cd} | 7.85±0.15 ^{bd} | 5.90±0.07 ^{ad} | 5.99±0.43 ^{ad} | 11.16±0.12 ^{dd} |
| | 5 | 13.14±0.14 ^{ce} | 10.02±0.18 ^{be} | 7.71±0.07 ^{ae} | 7.64±0.06 ^{ae} | - |
| | 6 | - | 11.54±0.08 ^{bf} | - | 8.58±0.12 ^{af} | - |

หมายเหตุ : a-d คือ ในแถวเดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%, A-F คือ ในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%, - คือ ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

ตารางภาคผนวก 17 ค่าร้อยละการคืนตัวของกึ่งแข็งที่อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ใช้กึ่งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม

| ค่าการคืนตัว (%) | | | | | |
|------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| ชนิดกึ่ง | Nylon/LLDPE | Nylon/LLDPE | Nylon/Al/LLDPE | Nylon/Al/LLDPE | Polypropylene |
| เดือน | (ปกติ) | (สุญญากาศ) | (ปกติ) | (สุญญากาศ) | (ปกติ) |
| 0 | 12.57±0.15 ^{aF} | 12.57±0.15 ^{aG} | 12.57±0.15 ^{aF} | 12.57±0.15 ^{aG} | 12.57±0.15 ^{aE} |
| 1 | 10.36±0.08 ^{abE} | 10.67±0.15 ^{bf} | 10.58±0.13 ^{bE} | 10.44±0.39 ^{bf} | 9.76±0.17 ^{ad} |
| 2 | 9.23±0.16 ^{abD} | 9.55±0.21 ^{bE} | 9.42±0.16 ^{bd} | 9.52±0.39 ^{bE} | 8.81±0.12 ^{aC} |
| 3 | 7.34±0.06 ^{bc} | 8.16±0.18 ^{cd} | 7.64±0.08 ^{bc} | 8.30±0.08 ^{cd} | 6.60±0.36 ^{ab} |
| 4 | 6.24±0.08 ^{bb} | 7.28±0.07 ^{cc} | 6.40±0.11 ^{bb} | 7.45±0.04 ^{cc} | 5.17±0.06 ^{aA} |
| 5 | 5.10±0.02 ^{aA} | 6.40±0.01 ^{cb} | 5.23±0.02 ^{ba} | 6.71±0.04 ^{db} | - |
| 6 | - | 5.72±0.08 ^{aA} | - | 5.79±0.02 ^{aA} | - |

หมายเหตุ : a-c คือ ในแถวเดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%, A-G คือ ในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%, - คือ ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

ตารางภาคผนวก 18 ค่าแรงเหวี่ยงสูงสุดของกึ่งแข็งที่อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ใช้กึ่งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม

| ค่าแรงเหวี่ยงสูงสุด (N) | | | | | |
|-------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|
| ชนิดถุง | Nylon/LLDPE | Nylon/LLDPE | Nylon/Al/LLDPE | Nylon/Al/LLDPE | Polypropylene |
| เดือน | (ปกติ) | (สุญญากาศ) | (ปกติ) | (สุญญากาศ) | (ปกติ) |
| 0 | 74.23±1.30 ^{aF} | 74.23±1.30 ^{aG} | 74.23±1.30 ^{aF} | 74.23±1.30 ^{aG} | 74.23±1.30 ^{aE} |
| 1 | 68.76±1.44 ^{bE} | 70.84±1.46 ^{cdF} | 69.74±1.68 ^{bcE} | 72.00±0.95 ^{dF} | 62.76±1.64 ^{ad} |
| 2 | 63.88±0.83 ^{bd} | 68.78±1.51 ^{dE} | 65.78±2.31 ^{cd} | 68.45±0.94 ^{dE} | 57.69±1.78 ^{ac} |
| 3 | 60.20±0.91 ^{bc} | 63.31±0.35 ^{cd} | 61.33±1.64 ^{bc} | 63.46±2.04 ^{cd} | 52.53±0.97 ^{ab} |
| 4 | 57.46±0.44 ^{bb} | 60.08±0.30 ^{dc} | 58.73±0.72 ^{cb} | 60.09±0.90 ^{dc} | 47.50±0.63 ^{aa} |
| 5 | 54.13±0.69 ^{aa} | 57.02±0.72 ^{db} | 55.16±0.63 ^{ba} | 56.43±0.50 ^{ab} | - |
| 6 | - | 54.23±0.74 ^{aa} | - | 54.37±0.96 ^{aa} | - |

หมายเหตุ : a-d คือ ในแถวเดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%, A-G คือ ในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%, - คือ ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

ตารางภาคผนวก 19 ค่า TBARS ของกึ่งแข็งที่อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ใช้กึ่งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม

| TBARS (mg malonaldehyde/kg sample) | | | | | |
|------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| ชนิดถุง | Nylon/LLDPE | Nylon/LLDPE | Nylon/Al/LLDPE | Nylon/Al/LLDPE | Polypropylene |
| เดือน | (ปกติ) | (สุญญากาศ) | (ปกติ) | (สุญญากาศ) | (ปกติ) |
| 0 | 2.42±0.04 ^{aa} | 2.42±0.04 ^{aa} | 2.42±0.04 ^{aa} | 2.42±0.04 ^{aa} | 2.42±0.04 ^{aa} |
| 1 | 3.05±0.09 ^{cb} | 2.63±0.04 ^{ab} | 2.63±0.05 ^{ab} | 2.58±0.05 ^{ab} | 3.17±0.06 ^{cb} |
| 2 | 3.58±0.06 ^{cc} | 2.89±0.05 ^{bc} | 2.88±0.06 ^{bc} | 2.79±0.05 ^{ac} | 3.80±0.05 ^{dc} |
| 3 | 3.79±0.06 ^{dd} | 3.18±0.05 ^{bd} | 3.30±0.05 ^{cd} | 3.04±0.05 ^{ad} | 4.20±0.06 ^{ed} |
| 4 | 4.11±0.04 ^{de} | 3.50±0.03 ^{be} | 3.81±0.03 ^{ce} | 3.31±0.03 ^{ae} | 4.60±0.05 ^{ee} |
| 5 | 4.66±0.06 ^{df} | 3.89±0.03 ^{bf} | 4.25±0.04 ^{cf} | 3.77±0.03 ^{af} | - |
| 6 | - | 4.39±0.05 ^{bg} | - | 4.24±0.04 ^{ag} | - |

หมายเหตุ : a-d คือ ในแถวเดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%, A-G คือ ในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%, - คือ ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

ตารางภาคผนวก 20 ปริมาณโปรตีนของกุ้งแห้งที่อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ใช้กุ้งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม

| ปริมาณโปรตีน (%) | | | | | |
|------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|
| ชนิดกุ้ง | Nylon/LLDPE | Nylon/LLDPE | Nylon/Al/LLDPE | Nylon/Al/LLDPE | Polypropylene |
| เดือน | (ปกติ) | (สุญญากาศ) | (ปกติ) | (สุญญากาศ) | (ปกติ) |
| 0 | 39.76±0.14 ^{aF} | 39.76±0.14 ^{aG} | 39.76±0.14 ^{aF} | 39.76±0.14 ^{aG} | 39.76±0.14 ^{aE} |
| 1 | 36.98±0.05 ^{bE} | 37.25±0.04 ^{cF} | 37.27±0.09 ^{cdE} | 37.35±0.06 ^{dF} | 36.26±0.09 ^{aD} |
| 2 | 35.75±0.17 ^{bD} | 36.45±0.09 ^{cE} | 36.44±0.10 ^{cd} | 36.62±0.03 ^{dE} | 34.66±0.08 ^{aC} |
| 3 | 34.70±0.30 ^{bC} | 35.10±0.27 ^{cd} | 34.64±0.15 ^{bC} | 35.23±0.21 ^{cd} | 33.42±0.17 ^{aB} |
| 4 | 33.47±0.03 ^{bb} | 33.60±0.02 ^{dC} | 33.56±0.02 ^{cb} | 34.11±0.04 ^{cC} | 32.92±0.05 ^{aA} |
| 5 | 31.75±0.13 ^{aa} | 32.15±0.03 ^{bb} | 32.37±0.02 ^{ca} | 33.07±0.02 ^{db} | - |
| 6 | - | 30.64±0.04 ^{aa} | - | 31.57±0.02 ^{ba} | - |

หมายเหตุ : a-c คือ ในแถวเดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%, A-G คือ ในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%, - คือ ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

ตารางภาคผนวก 21 จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดของกุ้งแห้งที่อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ใช้กุ้งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม

| จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด (โคโลนี/กรัม) | | | | | |
|--------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| ชนิดกุ้ง | Nylon/LLDPE | Nylon/LLDPE | Nylon/Al/LLDPE | Nylon/Al/LLDPE | Polypropylene |
| เดือน | (ปกติ) | (สุญญากาศ) | (ปกติ) | (สุญญากาศ) | (ปกติ) |
| 0 | 2.97x10 ³ | 2.97x10 ³ | 2.97x10 ³ | 2.97x10 ³ | 2.97x10 ³ |
| 1 | 1.06x10 ⁴ | 8.60x10 ³ | 3.65x10 ³ | 3.25x10 ³ | 1.87x10 ⁴ |
| 2 | 2.55x10 ⁴ | 1.06x10 ⁴ | 7.83x10 ³ | 7.32x10 ³ | 4.80x10 ⁴ |
| 3 | 5.28x10 ⁴ | 3.22x10 ⁴ | 2.52x10 ⁴ | 2.12x10 ⁴ | 7.88x10 ⁴ |
| 4 | 8.53x10 ⁴ | 6.63x10 ⁴ | 6.57x10 ⁴ | 5.18x10 ⁴ | 1.15x10 ⁵ |
| 5 | 1.35x10 ⁵ | 9.15x10 ⁴ | 1.15x10 ⁵ | 8.62x10 ⁴ | - |
| 6 | - | 1.82x10 ⁵ | - | 1.48x10 ⁵ | - |

หมายเหตุ : - คือ ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

ตารางภาคผนวก 22 จำนวนยีสต์และราของกึ่งแห้งที่อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ใช้กึ่งขนาด 300-400 ตัวต่อกิโลกรัม

| จำนวนยีสต์และรา (โคโลนี/กรัม) | | | | | |
|-------------------------------|-------------|-------------|----------------|----------------|---------------|
| ชนิดถุง | Nylon/LLDPE | Nylon/LLDPE | Nylon/Al/LLDPE | Nylon/Al/LLDPE | Polypropylene |
| เดือน | (ปกติ) | (สุญญากาศ) | (ปกติ) | (สุญญากาศ) | (ปกติ) |
| 0 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 |
| 1 | 140 | 85 | 115 | 131 | 243 |
| 2 | 160 | 110 | 128 | 145 | 258 |
| 3 | 225 | 138 | 156 | 158 | 385 |
| 4 | 398 | 235 | 251 | 230 | 515 |
| 5 | 555 | 385 | 455 | 351 | - |
| 6 | - | 528 | - | 511 | - |

หมายเหตุ :- คือ ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

ภาคผนวก ฉ

Analysis of Parameters for Shrimp Drying

Analysis of Parameters for Shrimp Drying

Kwaenkasikam, K.,¹ Tirawanichakul, S.² and Tirawanichakul, Y.³

^{1,2} Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering,

³ Department of Physics, Faculty of Science,

Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla, Thailand 90112

e-mail : Supawan.t@psu.ac.th*

Abstract

The objective of this research was to investigate effect of thermo-physical parameters on shrimp during drying (an equilibrium moisture content, apparent density, percentage of void fraction, specific heat capacity and effective diffusion coefficient). For determining the equilibrium moisture content (EMC) equation, the experimental data were determined and formulated in five different EMC models by non-linear regression analysis. The best fitting equation was comparative determined by determination of two error values as follows the coefficient of determination (R^2) and the root mean square error (RMSE). The results showed that simulated results using the Henderson equation (1952) had a good relationship to the experimental result. For evaluation the thermo-physical parameters, the results found that apparent density and specific heat capacity were function of moisture content. Consequently, the percentage of void fraction of shrimp has inverse relation to moisture content. However an empirical model is the best model to describe the drying phenomenon.

Keywords: Equilibrium Moisture Content, Drying kinetic, Shrimp, Thin-layer drying

1. Introduction

Drying is one of the oldest and most important food processing operations. The purposes of drying are mainly to extend the shelf life and maintain the high quality of product. The moisture reduction mechanism involves heat and mass transfer incidence between the product and air surrounding.

Dried shrimp is an important fishery product both for domestic consumption and export of Thailand. Its price depends on quality of dried shrimp for examples: dryness, color and size [11, 17]. Normally, process for dry shrimp production can be divided to 3 stages. The first stage is a boiling of shrimp in salt solution 2-3% (w/v) a few minute for micro-organisms control. The second stage is natural drying for 3-6 h by solar radiation, depending on solar intensity and the final stage is packaging, respectively. The main

process of three stages is the drying process that reduces moisture content for safe storage and maintains quality of dried shrimp. There are many types of dryer that used in shrimp drying for example jet spout bed dryer [11], fluidized dryer [17], etc. The suitable management of boiled shrimp is necessary. This is because it has high moisture content and it is easy to deterioration. Thus understanding the drying process and mathematical model for prediction moisture transfer of shrimp should be considered, especially on thermo-physical parameters.

Thus the main objectives of this study were to determine the equilibrium moisture content, drying rate and the physical parameter affecting to shrimp.

2. Experimental set-up

2.1 Materials

The material tested in the present study was white shrimp of the genus *Penaeus* spp. Raw shrimp was washed and boiled in 3% (w/v) of salt water for 3 min in order to deactivate microorganisms before drying. The initial moisture content of samples was in range of 300-400 % dry-basis and final moisture content was about 30% dry-basis.

2.2 Methods

The physical properties of the boiled shrimps were determined in terms of equilibrium moisture content, bulk density, percentages of void fraction and specific heat capacity as listed below:

(a) Equilibrium moisture content (EMC)

For determining equilibrium moisture content, the five saturated salt solutions for achieving an equilibrium moisture content stage used in this experiments as follows:- KNO_3 , NaCl , $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ and LiCl . These saturated salt solutions provide water activity of 0.10-0.90 [1, 5] and then they were put in the airtight vials. To avoid disruption the results from direct contact of the solutions, the boiled shrimp samples were

2 การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 5
29 เมษายน - 1 พฤษภาคม 2552 มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ พิษณุโลก

put in small stainless steel mesh basket which hold samples above the salt solution. The vials was placed into incubator at controlled temperatures of 40-65°C to obtain final dry weight. The surrounding temperature and ambient air temperature were measured by K-typed thermocouple connected to a data logger. After a few weeks, the sample was in the equilibrium state with ambient air surrounding, then the sample was taken off the vials and take to determine moisture content following the standardized AOAC method [2]. Equilibrium state was acknowledged when three consecutive weight measurements showing a difference lower than 0.001 g. The sample was taken by means of triplicate measurements. Finally, the four isotherm models for predicting EMC equation were chosen to fit the experimental data, surrounding temperature (T) and water activity (a_w) such as the modified Chung-Pfost [4], modified Henderson [13], modified Halsey [7] and Oswin [3] equations which were listed as below

Modified Chung and Pfost (1967) model

$$M_{eq} = \ln \left[\frac{\ln a_w}{-A/RT} \right]^{1/B} \quad (1)$$

Modified Henderson (1952) model

$$M_{eq} = \ln \left[\frac{\ln(1-a_w)}{-AT} \right]^{1/B} \quad (2)$$

Modified Halsey (1948) model

$$M_{eq} = \ln \left[\frac{\ln a_w}{-A/RT} \right]^{1/B} \quad (3)$$

Modified Oswin (1946) model

$$M_{eq} = A \left[\frac{a_w}{1-a_w} \right]^B \quad (4)$$

Where T_{abs} is absolute temperature in Kelvin; M_{eq} is a mean equilibrium moisture content, decimal (d.b.); M_n is moisture content of molecular layer; a_w is water activity in decimal; A, B and C are arbitrary coefficients; T is drying temperature (°C)

The constant values in these models were determined by the non-linear regression analysis from the experimental data. The coefficient of determination (R^2) and root mean square error (RMSE) values were used as the primary criterion for selecting the best equation to describe the experimental data. The latter parameter was formulated as follows:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_{i,exp} - M_{i,est})^2} \quad (5)$$

Where $M_{i,exp}$ and $M_{i,est}$ are the equilibrium moisture content for the i^{th} sample with subscripts exp and est denote an experimental and predicted value in decimal (dry-basis), respectively.

(b) Apparent density (ρ)

The apparent density is the ratio of the mass sample of the shrimp to its total volume. For determining an apparent density, the mass of samples were weighted by an electronic balance with an accuracy of ± 0.01 g and volume was measured using a volumetric flask. Then the apparent density was calculated by dividing mass by volume of samples. The moisture content of shrimp was varied between 30 and 310% dry-basis.

(c) Percentage of void fraction (ϵ)

The true density is the ratio of mass of the sample to its volume. The porosity of shrimp is the fraction of the space in the bulk shrimp. The porosity was calculated by using the following relationship [15]:

$$\epsilon = \frac{V_{oil}}{V_b} \times 100 \quad (6)$$

Where ϵ = percentage of void fraction, %
 V_{oil} , V_b = oil and container of volume, m^3

(d) Specific heat capacity (c_p)

The specific heat capacity of the sample was determined using a calorimeter at moisture contents of 40-350% dry-basis. The equilibrium temperature was recorded by data logger and the specific heat of sample was calculated as follows [16]:

$$c_p = \frac{[m_c c_c (T_{eq} - T_{ci}) + m_w c_w (T_{eq} - T_{wi})]}{m_p (T_{eq} - T_{pi})} \quad (7)$$

Where c_p = the specific heat (kJ/kg°C)
 m = the mass (kg)
 T = temperature (°C)

And subscripts c, w, p, i, eq mean calorimeter, water, sample, initial, equilibrium, respectively.

(e) Drying equation and diffusion coefficient

To study the drying kinetic of boiled shrimp, the sample with initial moisture content of 300-350% dry-basis was thin-layer dried

by drying air temperatures ranging from 60 to 90°C at intervals of 10°C and inlet air flow rate of 0.5 m/s. Fig. 1 shows the schematic diagram of a thin-layer dryer which comprises of a drying chamber with dimension of 0.2 m in diameter and 0.80 m in height, a 1.2x2 kW electrical heater and a backward curved-blade centrifugal fan driven by a 1.5 kW motor. The inlet drying air temperature was controlled by a PID controller with an accuracy of ±1°C.

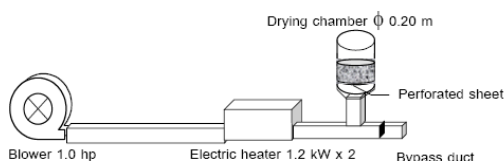


Fig. 1 Illustrative of thin-layer drying system

The sample was weighted during drying time. Drying curves were fitted to the experimental data using empirical and semi-theoretical model.

Empirical model

Empirical models were developed using non-linear regression. The four models [6, 9, 12, 14] which were listed as follows:

Newton (1985)

$$MR = \exp(-kt) \tag{8}$$

Page (1949)

$$MR = \exp(-kt^n) \tag{9}$$

Logarithmic

$$MR = A \exp(-kt)+B \tag{10}$$

Handerson

$$MR = A \exp(-kt) \tag{11}$$

Where: MR is predicted value of moisture ratio at the *i*th drying time, dimensionless and is defined as $(M_i - M_{eq}) / (M_i - M_{eq})$ where M_i , M_i and M_{eq} are an predicted, initial and equilibrium moisture content, respectively, decimal (dry-basis); A, B, k and n are arbitrary coefficients; t is drying time in s

Semi-theoretical model.

It is assumed that moisture is transferred by liquid diffusion and the shrinkage of material is negligible during drying. The general solution of diffusion model for sphere shape and finite cylinder are written as follow:

Sphere shape

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \sum_{p=1}^{\infty} \frac{1}{p^2} \exp\left(-\frac{p^2 \pi^2 Dt}{RT}\right) \tag{12}$$

Where t is drying time in sec

r_o is the radius of dried shrimp (0.0735 m)

The effective diffusion coefficient is described by the Arrhenius type equation as follows:

$$D_{eff} = D_o \exp\left(\frac{-E_a}{RT_{abs}}\right) \tag{13}$$

Where D_o is the Arrhenius factor

R is universal gas constant 8.314 kJ/kmol-K

T_{abs} is absolute temperature in Kelvin

E_a is the activated energy in kJ/kmol.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Equilibrium moisture content

Fig. 2 illustrates the relationship between the equilibrium moisture content and water activity of boiled shrimp samples at surrounding temperature of 50°C. The result showed that an equilibrium moisture content increased when the water activity increase. The EMC equations were used for determining EMC of shrimp and it showed that EMC equation was a function of water activity and absolute temperature. Consequently, the Oswin's equation has good relation to the experimental values ($R^2 = 0.965$), corresponding to its low sum of square error and the lowest RMSE value compared to the others.

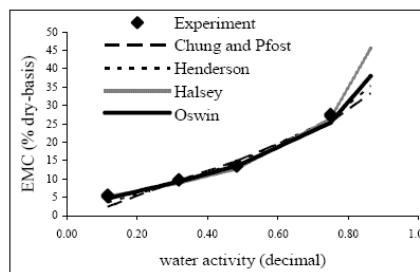


Fig. 2 Comparison of the equilibrium moisture content of shrimp among water activity.

Chung and Pfost (1967) model

$$M_{eq} = \ln \left[\frac{\ln a_w}{-A/RT} \right] \frac{1}{-B} \quad (14)$$

A = 7031.974 B = 8.724738
R² = 0.956 RMSE = 0.0321

Henderson (1952) model

$$M_{eq} = \left[\frac{\ln(1-a_w)}{-AT} \right]^{1/B} \quad (15)$$

A = 0.022487 B = 1.22631
R² = 0.967 RMSE = 0.0239
kg/m³

Halsey (1948) model

$$M_{eq} = \left[\frac{\ln a_w}{-A/RT} \right]^{1/B} \quad (16)$$

A = 144.1636 B = -1.2533
R² = 0.971 RMSE = 0.0354

Modified Oswin (1946) model

$$M_{eq} = A \left[\frac{a_w}{1-a_w} \right]^B \quad (17)$$

A = 0.140154 B = 0.540319
R² = 0.965 RMSE = 0.0217

where T is absolute temperature in Kelvin

3.2 Apparent density (ρ)

The results showed that the apparent density of the dried boiled shrimp linearly related to the moisture content increased from 23 to 311.3% dry-basis. The equation can be expressed by the following equation:

Moisture contents of 23-311% dry-basis

$$\rho = 0.2269 + 0.0002M - 3 \times 10^{-7}M^2 \quad (18)$$

where M is moisture content, %dry-basis

with values for R² and RMSE of 0.977 and 0.006, respectively.

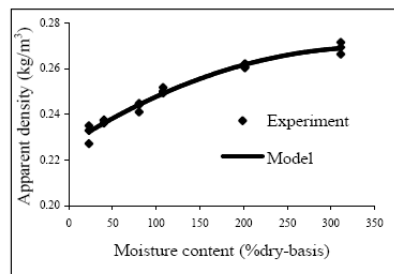


Fig. 3 Relationship between apparent density and moisture content of shrimp.

3.3 Percentage of void fraction (ε)

The porosity of the dried shrimp was observed to decrease linearly from 84 to 50% as the moisture content increased from 23 to 311.3% dry-basis.

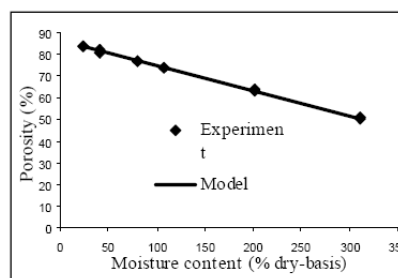


Fig. 4 Relationship between porosity and moisture content of shrimp.

The relationship can be expressed by the following equation:
Moisture content of 23-311% dry-basis

$$\epsilon = 86.411 - 0.1149M \quad (19)$$

where M is moisture content, %dry-basis

with values for R² and RMSE of 0.998 and 0.422, respectively.

3.4 Specific heat capacity (c_p)

The results showed that the specific heat in kJ/kg K of dried shrimp increased with increasing of moisture content. The equation show the relationship between specific heat and the moisture content are as follow:

Moisture content of 23-311% dry-basis

$$c_p = 1.0879 + 0.0086M - 0.000006M^2 \quad (20)$$

where M is moisture content, %dry-basis

with values for R^2 and RMSE of 0.992 and 0.077, respectively.

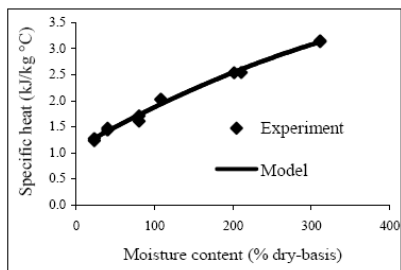


Fig. 5 Relationship between specific heat and moisture content of shrimp.

3.5 Thin-layer drying and mathematical model

The moisture ratio and drying time of thin-layer drying for three temperatures 60.4, 72.9, 82.7 and 93.0°C were shown in Fig. 6.

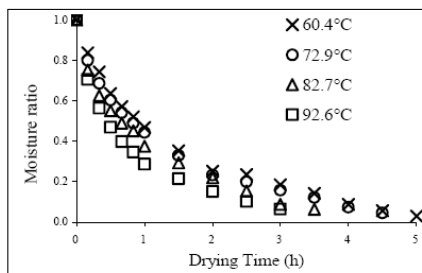


Fig. 6 Influence of air drying temperature on the moisture ratio of shrimp drying.

The result showed that a moisture ratio decreased with time and increased with drying temperature. The experimental data of the moisture ratio were fitted to models there are shown in Fig. 7.

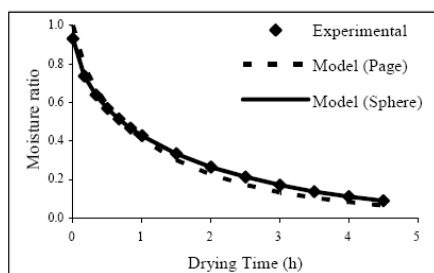


Fig. 7 Comparison of the moisture ratio of shrimp at temperature 72.9°C fitted by semi-theoretical and empirical models.

5 การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 5
29 เมษายน - 1 พฤษภาคม 2552 มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ พิษณุโลก

The fitting of the moisture ratio was found to be exponential form and has function of the temperatures there are shown as follow

Page (1949)

$$MR = \exp(-kt^n) \tag{21}$$

$$\begin{aligned} \text{Where } k &= 0.00003T^2 - 0.0035T + 0.1237 & R^2 &= 0.999 \\ n &= 0.00003T^2 - 0.0077T + 1.1742 & R^2 &= 0.999 \end{aligned}$$

Newton (1985)

$$MR = \exp(-k_1t) \tag{22}$$

$$\text{Where } k_1 = 0.00001T^2 - 0.0015T + 0.0597 \quad R^2 = 0.998$$

Logarithmic

$$MR = A \exp(-k_2t) + B \tag{23}$$

$$\begin{aligned} \text{Where } A &= 0.00007T^2 - 0.0121T + 1.3758 & R^2 &= 0.984 \\ k_2 &= -0.000005T^2 + 0.002T - 0.0494 & R^2 &= 0.994 \\ B &= 0.00002T^2 - 0.0022T + 0.0834 & R^2 &= 0.993 \end{aligned}$$

Handerson

$$MR = A \exp(-kt) \tag{24}$$

$$\begin{aligned} \text{Where } A &= 0.00006T^2 - 0.0105T + 1.3283 & R^2 &= 0.965 \\ k &= 0.00001T^2 - 0.0016T + 0.0622 & R^2 &= 0.996 \end{aligned}$$

where T is absolute temperature in Kelvin

It was found that empirical Page models were good fit model to describe the moisture ratio with drying time of shrimp that gives the lowest RMSE and the highest R^2 .

The effective moisture diffusivity, D_{eff} of dried shrimp increased from 2.082×10^{-6} , 2.322×10^{-6} , 2.808×10^{-6} and $3.876 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ as drying air temperature increased from 60.4, 72.9, 82.7 and 92.6°C. The result of Arrhenius equation there the diffusivity constant (D_0) and the activation energy (E) were calculated as $4.618 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ and 21676.99 kJ/kmol, respectively, having a correlation coefficient of $R^2 = 0.956$ and RMSE = 0.0603.

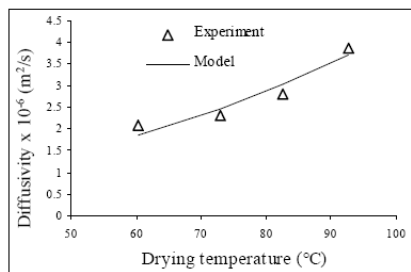


Fig. 8 Relationship between the effective diffusion coefficient and drying temperature of shrimp

4. CONCLUSION

The result showed that an equilibrium moisture content decreased with temperature and increased with relative humidity. The best fitted model representing equilibrium moisture content of shrimp was the Oswin model. The apparent density and specific heat of the dried shrimp increased linearly as the moisture content increased. The porosity of the dried shrimp decreased linearly as the moisture content increased. The moisture ratio decreased with time and increased with drying temperature. The Page model was the best fit model to describe the moisture ratio of shrimp.

5. ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank the Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Department of Physics, Faculty of Science and Graduate School Prince of Songkla University, Thailand for financial support and testing quality of dries shrimp.

6. REFERENCES

- [1] A. Jamali, M. Kouhila, L. Ait Mohamed, A. Idlimam and A. Lamharrar, "Moisture adsorption-desorption isotherms of Citrus reticulata leaves at three temperatures", *Journal of Food Engineering*, 2006, Vol. 77, pp. 71-78.
- [2] AOAC. *Official Method of Analysis*. 16th ed., Arlington, Virginia. USA: The Association of Official Analytical Chemists, Inc., 1995
- [3] C. R. Oswin, "The kinetics of package life.III. Isotherm", 1946, *Journal of the Society of Chemical Industry*, Vol. 65, pp. 419-421.
- [4] D.S. Chung and H.B. Pfost, "Adsorption and Desorption of Water Vapor by Cereal Grain and Their Products", *Transaction of ASAE*, 1967, Vol. 10, pp. 549-557.

- [5] D.S. Cordeiro, G.S.V. Raghavan and W.P. Oliveira, "Equilibrium moisture content Models for *Maytenus ilicifolia* leaves", *Biosystems Engineering*, 2006, Vol. 94, No 2, pp. 221-228.
- [6] G. E. Page, "Factors Influencing the Maximum Rate of Drying Shell Corn in Layers" *M.Sc.Thesis*, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA, 1949.
- [7] G. Halsey, "Physical Adsorption on Non-uniform Surface" *Journal of Chemical Physics*, 1948, Vol. 16, pp. 83-92.
- [8] J. Crank, *Mathematics of Diffusion*, 2nd ed., London, Oxford University Press.
- [9] J. Waewsak, S Chindaruksa and C Punlek, "A Mathematical Modeling Study of Hot Air Drying for Some Agricultural Products", *Thammasat Int. J. Sc. Tech.*, 2006, Vol. 11, No. 1, pp. 14-20.
- [10] S. Brunauer, P.H. Emmett and E. Teller, "Adsorption of Gases in Multi-molecular Layers", *Journal of American Chemistry Society*, 1938, Vol. 60, pp. 309-319.
- [11] S. Devahastin, R. Tapaneyasin and A. Tansakul, "Hydrodynamic behavior of a jet spouted bed of shrimp", *Journal of Food Engineering*, 2006, Vol. 74, pp. 345-351.
- [12] S. J. Babalis and V.G. Belessiotis, "Influence of the drying conditions on the drying constants", *Journal of Food Engineering*, 2004, Vol. 65, pp. 449-458.
- [13] S.M. Henderson, "A Basic Concept of Equilibrium Moisture", *Agricultural Engineering Journal*, 1952, Vol. 3, pp. 29-32.
- [14] S.M. Henderson and S. Pabis, "Grain drying theory I. Temperature effect on drying coefficients", *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1956, Vol. 6, pp. 169-174.
- [15] S. Soponronnarit, "*Drying Grains and Some Types of Foods*", 7th edition, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, 338 pages, (1997). (in Thai)
- [16] Y. Namsanguan, W. Tia, S. Devahastin and S. Soponronnarit, "Drying kinetics and quality of shrimp undergoing different two-stage drying processes", *Drying Technology*. 2004, Vol. 22, pp. 759-778.

ประวัติผู้เขียน

| | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------|---------------------|--|
| ชื่อ | นายเกียรติฉัตร แก้วนกสิกรรม | | |
| รหัสประจำตัวนักศึกษา | 5110120102 | | |
| วุฒิการศึกษา | | | |
| วุฒิ | ชื่อสถาบัน | ปีที่สำเร็จการศึกษา | |
| วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) | มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ | 2551 | |

ทุกการศึกษา

ทุนศึกษาต่อตามาตรการการดูแลบุคลากร วิทยาเขตปัตตานี เพื่อศึกษาระดับปริญญาโท
ภายในประเทศ ปีการศึกษา 2551

ข้อมูลเผยแพร่วิทยานิพนธ์

Kwaenkasikam K., Tirawanichakul S. and Tirawanichakul Y. 2551. Analysis of Parameters for
Shrimp Drying. 5th E-NETT Conference on Energy Network of Thailand, Phitsanulok,
Thailand, April 29 – May 1, 2009, 48.