ผลของการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันร่วมกับเทมเปอริง และอุณหภูมิในการเก็บต่อปริมาณ 2AP และคุณภาพการสีของข้าวขาวดอกมะลิ 105 *Oryza sativa* L.

นางสาววริศรา อิ่มภาประเสริฐ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2549

ISBN 974-14-2600-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF DRYING USING FLUIDIZATION TECHNIQUE WITH TEMPERING AND STORAGE TEMPERATURES ON 2AP CONTENT AND MILLING QUALITY OF KHAO DAWK MALI 105 *Oryza sativa* L.

Ms. Rarisara Impaprasert

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
For the Degree of Master of Science in Food Technology
Department of Food Technology
Faculty of Science
Chulalongkorn University
Academic Year 2006

ISBN 974-14-2600-3

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันร่วมกับเทมเปอริง และอุณหภูมิในการเก็บต่อปริมาณ 2AP และคุณภาพการสีของข้าวขาวดอกมะลิ 105 *Oryza sativa* L.
โดย	นางสาววริศรา อิ่มภาประเสริฐ
สาขาวิชา	เทคโนโลยีทางอาหาร
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร. ชาลีดา บรมพิชัยชาติกุล
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุเมธ ตันตระเธียร

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุวรรณา สุภิมารส)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ ดร. ชาลีดา บรมพิชัยชาติกุล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุเมธ ตันตระเธียร)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. สายวรุฬ ชัยวานิชศิริ)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร. ละมุล วิเศษ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รวิศรา อิ่มภาประเสริฐ : ผลของการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันร่วมกับเทมเปอริง และอุณหภูมิในการเก็บต่อปริมาณ 2AP และคุณภาพการสีของข้าวขาวดอกมะลิ 105 *Oryza sativa* L. (EFFECTS OF DRYING USING FLUIDIZATION TECHNIQUE WITH TEMPERING AND STORAGE TEMPERATURES ON 2AP CONTENT AND MILLING QUALITY OF KHAO DAWK MALI 105 *Oryza sativa* L.) อ.ที่ปรึกษา : อ.ดร. ชาลีดา บรมพิชัยชาติกุล, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ.ดร. สุเมธ ตันตระเธียร 114 หน้า. ISBN 974-14-2600-3

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการอบแห้งข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 ด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันร่วมกับการ tempering และอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อคุณภาพของข้าว โดยแบ่งงานวิจัยออกเป็น 3 ส่วน ส่วนที่ 1 เป็นการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งข้าวเปลือก เพื่อให้ทราบเวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งข้าวเปลือกให้มีความชื้นอยู่ในระดับที่ต้องการ ในส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านการสี ได้แก่ เปอร์เซ็นต์ข้าวต้น ดัชนีความขาวของข้าวสาร และคุณภาพด้านปริมาณสารหอม 2-Acetyl-1-pyrroline (2AP) ภายหลังการอบแห้ง และส่วนที่ 3 เป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านการสี และปริมาณสารหอม 2AP ของข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งแล้ว ในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง (28–30°C) และที่ 15°C เป็นเวลา 6 เดือน ผลจากการศึกษาในส่วนที่ 1 พบว่าระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งข้าวเปลือกเพื่อลดความชื้นจากความชื้นเริ่มต้น 35-37 %dry basis (db) ให้เหลือ 23–24 %db สำหรับการอบแห้งที่อุณหภูมิ 115 , 125 , 135 และ 150°C ใช้เวลา 3 , 3 , 2.5 และ 2 นาที ตามลำดับ และระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งข้าวเปลือกในรอบที่ 2 เพื่อลดความชื้นจาก 23–24 %db ให้เหลือ 15–17 %db ต้องใช้เวลา 3 , 2 , 1.5 และ 1 นาที ตามลำดับ การศึกษาในส่วนที่ 2 พบว่าอุณหภูมิการอบแห้งที่ต่างกันมีผลทำให้ข้าวเปลือกมีเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น ดัชนีความขาวของข้าวสาร และปริมาณสารหอม 2AP แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยทำให้มีเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นต่ำมาก และการแตกร้าวของเมล็ดจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้น แต่ที่อุณหภูมิ 150°C พบว่าเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในด้านความขาวของข้าวพบว่าการอบแห้งในทุกอุณหภูมิมีความขาวสัมพัทธ์สูงกว่า 80% ซึ่งเป็นความขาวที่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ในทางการค้า และปริมาณสารหอม 2AP มีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งเพิ่มมากขึ้น เมื่อทดลองเปลี่ยนวิธีการลดความชื้นในรอบที่ 2 เป็นการตากในที่ร่มแทนการอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูงพบว่าได้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นเพิ่มขึ้น โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิ 135 และ 150°C ทำให้ได้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นสูงกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) การศึกษาในส่วนที่ 3 พบว่าในระหว่างการเก็บรักษาข้าวเปลือกเป็นเวลา 6 เดือน ปริมาณความชื้นของข้าวเปลือกจะแปรผันไปตามสภาพบรรยากาศในระหว่างการเก็บรักษา เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นและดัชนีความขาวของข้าวมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากอุณหภูมิในการอบแห้ง แต่อุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาไม่มีผลทำให้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นและดัชนีความขาวของข้าวสารเกิดการเปลี่ยนแปลง ในส่วนของปริมาณสารหอม 2AP พบว่าปัจจัยของอุณหภูมิในการเก็บรักษาร่วมกับระยะเวลาในการเก็บรักษามีผลต่อปริมาณสารหอม 2AP

ภาควิชา.....เทคโนโลยีทางอาหาร..... ลายมือชื่อนิสิต.....รวิศรา อิ่มภาประเสริฐ.....

สาขาวิชา.....เทคโนโลยีทางอาหาร..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....ชาลีดา บรมพิชัยชาติกุล.....

ปีการศึกษา.....2549..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4672541723 : MAJOR FOOD TECHNOLOGY

KEY WORD : FLUIDIZATION / TEMPERING / 2-ACETYL-1-PYRROLINE / STORAGE / KHAO DAWK MALI 105

RARISARA IMPAPRASERT : EFFECTS OF DRYING USING FLUIDIZATION TECHNIQUE WITH TEMPERING AND STORAGE TEMPERATURES ON 2AP CONTENT AND MILLING QUALITY OF KHAO DAWK MALI 105 *Oryza sativa* L. THESIS ADVISOR : CHALEEDA BOROMPICHAICHARTKUL, Ph.D., THESIS COADVISOR : ASST.PROF. SUMATE TANTRATIEN, Ph.D. 114 pp. ISBN 974-14-2600-3

The objective of this research is to study the effects of high temperature drying by using fluidization technique with tempering as well as and storage temperatures on aroma and milling quality of Khao Dawk Mali 105 (*Oryza sativa* L.). The experiment was divided into 3 parts; in the first part the suitable time to reduce moisture content of paddy to required level for first and second fluidized bed drying was determined. The second part, the changes of milling quality: head rice yield (HRY), white index (WI) and aroma quality: 2-Acetyl-1-pyrroline (2AP) content after subjected to drying was studied. In the final experiment, dried paddy was stored under different conditions and the changes of milling and aroma quality were observed during storage for 6 months. The results showed that the first stage of drying by high temperature fluidization required 3, 3, 2.5 and 2 minutes to reduce moisture content of the paddy from 35-37 %db to 23-24 %db, while the second fluidization after tempering required 3, 2, 1.5 and 1 minutes to reduce moisture content from 23-24 %db to 15-17 %db for drying temperature of 115, 125, 135 and 150°C respectively. After drying, it was found that drying temperatures had effects on HRY, white index and 2AP content. The relative white index was found to be higher than 80% but it was still in the commercial limit. Furthermore, most of the drying temperature gave the low level of HRY except for 150°C which had significant increasing of head rice yield ($p \leq 0.05$). However, when replaced the second fluidization with shade drying after the first fluidization and tempering, HRY increased significantly especially at 135 and 150°C ($p \leq 0.05$). During storage, the moisture content was subjected to the change of ambient relative humidity. 2AP content decreased significantly ($p \leq 0.05$) while HRY and white index were not changed. When compare between ambient temperature (28-30°C) and 15°C storage condition, it was found that the suitable condition to maintain 2AP content was 15°C. However, the storage condition dose not significantly affect the HRY and white index of rice ($p > 0.05$).

Department.....Food Technology..... Student's Signature..Rarisara Impaprapert

Field of Study.....Food Technology..... Advisor's Signature..Chaleeda Borompichaichartkul

Academic Year.....2006..... Co-advisor's Signature.....

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงได้ ต้องขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.ชาลีดา บรมพิชัยชาติกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุเมธ ตันตระเธียร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม เป็นอย่างสูงที่ได้สละเวลาอันมีค่าเพื่อให้คำแนะนำเกี่ยวกับแนวทางการวิจัย ตลอดจนความเอาใจใส่ ดูแล และความช่วยเหลืออย่างใกล้ชิดมาโดยตลอด และขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สุวรรณา สุภิมารส รองศาสตราจารย์ ดร.สายวรุฬ ชัยวานิชศิริ และอาจารย์ ดร.ละมุล วิเศษ เป็นอย่างสูงที่กรุณาสละเวลามาตรวจสอบ กลั่นกรอง และแก้ไขให้งานวิจัยนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ในภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหารทุกท่านที่กรุณาประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้อันเป็นพื้นฐานในการศึกษาค้นคว้าของงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร. สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ สายวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ได้ให้การสนับสนุนในด้านห้องปฏิบัติการและเครื่องมืออบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดรวมทั้งความช่วยเหลือของเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องทุกท่านของสายวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ และภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุกัญญา วงศ์พรชัย และคุณทินกร สีเสียดค้า ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และโครงการ PERCH มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ได้ให้การสนับสนุนในด้านห้องปฏิบัติการและเครื่องมือวิเคราะห์ปริมาณสาร 2-Acetyl-1-pyrroline รวมทั้งความช่วยเหลือของเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องทุกท่านของภาควิชาเคมี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการและเจ้าหน้าที่ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหารทุกท่านที่ได้อำนวยความสะดวกในด้านต่างๆ

ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ทั้งที่เป็นนิสิตปริญญาโท ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และเพื่อนๆปริญญาตรี ภาควิชาจุลชีววิทยา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ความช่วยเหลือและกำลังใจในการทำงานวิจัย

เงินทุนที่ใช้ในการศึกษาวิจัย และค่าใช้จ่ายบางส่วนได้รับการสนับสนุนจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสมาคมนิสิตเก่าจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ และคุณยาย ที่ให้กำลังใจ ความห่วงใย และให้การสนับสนุนด้านทุนทรัพย์ให้แก่ข้าพเจ้าจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....จ
กิตติกรรมประกาศ.....ฉ
สารบัญ.....ช
สารบัญตาราง.....ซ
สารบัญภาพ.....ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....1
บทที่ 2 วารสารปริทัศน์.....2
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....30
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....35
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....73
รายการอ้างอิง.....75
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์.....83
ภาคผนวก ข ข้อมูลผลการทดลอง.....95
ภาคผนวก ค ผลงานวิจัยที่ได้นำเสนอในการประชุม.....113
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....114

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 ปริมาณ 2-Acetyl-1-pyrroline ที่พบในข้าวสารและข้าวหุงสุกพันธุ์ต่างๆ.....10
2.2 คุณภาพการสีของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่เก็บเกี่ยวแล้วตากเพื่อลดความชื้นในนาเป็นเวลา 0, 2, 4 และ 6 วัน.....13
2.3 สภาวะการอบแห้งที่ทำให้ได้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นที่มากที่สุดในแต่ละระบบอบแห้ง.....21
4.1 เวลาที่ต้องใช้ในการลดความชื้นข้าวเปลือกจาก 35 - 37 %db ให้เหลือ 23-24 %db.....39
4.2 เวลาที่ต้องใช้ในการลดความชื้นข้าวเปลือกจาก 23 - 24 %db ให้เหลือ 15-17 %db.....40
4.3 สภาวะที่ต้องใช้ในการอบแห้งข้าวเปลือกจาก 35 - 37 %db ให้เหลือ 15-17 %db.....41
4.4 ผลของอุณหภูมิการอบแห้งแบบฟลูอิไดเซชัน การ tempering และการตากในที่ร่ม ต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นของข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105.....48
4.5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น ดัชนีความขาวของข้าว และปริมาณสารหอม 2AP ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 115, 125, 135 และ 150°C ในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง (28-30°C) และที่อุณหภูมิ 15°C เป็นเวลา 6 เดือน.....56
ก.1 ปริมาตรของสารมาตรฐาน 2AP ที่มีวามเข้มข้น 1000 ppm ในตัวทำละลายไดคลอโรมีเทนที่เติมลงในตัวอย่างข้าวพันธุ์เหลืองพิจิตร (พันธุ์ไม่หอม) เพื่อใช้ในการสร้างกราฟมาตรฐาน....93
ข.1 ความชื้นของข้าวเปลือกที่ผึ่งในที่ร่มที่อุณหภูมิห้อง (28-30°C) ของตัวอย่างควบคุม.....95
ข.2 ความชื้นและเวลาในการอบแห้งข้าวเปลือก (Drying curve) ด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันที่อุณหภูมิต่างกัน.....96
ข.3 อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกเมื่อออบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันที่อุณหภูมิต่างกัน.....97
ข.4 ความชื้นและเวลาในการอบแห้งข้าวเปลือก (drying curve) โดยเทคนิคฟลูอิไดเซชันรอบที่ 2 ที่อุณหภูมิต่างกันภายหลังการ tempering.....98
ข.5 ปริมาณความชื้นของข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันร่วมกับการ tempering.....99
ข.6 เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นของข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันร่วมกับการ tempering....99
ข.7 ค่าดัชนีความขาวของข้าวสารที่อบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันร่วมกับการ tempering.....100
ข.8 ปริมาณสาร 2AP ในข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันร่วมกับการtempering....100
ข.9 ความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการเก็บรักษาข้าวเปลือก.....101
ข.10 ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ในกรุงเทพฯ ตั้งแต่เดือน พฤษภาคม – พฤศจิกายน 2548.....101

ตารางที่ **หน้า**

ข.11 ผลของอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อปริมาณความชื้นของข้าวเปลือก.....101
ข.12 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น.....102
ข.13 ผลของระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น.....102
ข.14 ผลของอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น.....102
ข.15 ผลของอุณหภูมิการอบแห้งและระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น.....103
ข.16 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งและอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น.....103
ข.17 ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น.....103
ข.18 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งต่อดัชนีความขาวของข้าวสาร.....104
ข.19 ผลของระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อดัชนีความขาวของข้าวสาร.....104
ข.20 ผลของอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อค่าดัชนีความขาวของข้าวสาร.....104
ข.21 ผลของอุณหภูมิการอบแห้งและระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อดัชนีความขาวของข้าวสาร...105
ข.22 ผลของอุณหภูมิการอบแห้งและระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อดัชนีความขาวสัมพัทธ์ของข้าวสาร.....105
ข.23 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งและอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อดัชนีความขาวของข้าวสาร.105
ข.24 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งและอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อดัชนีความขาวสัมพัทธ์ของข้าวสาร.....106
ข.25 ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อค่าดัชนีความขาวของข้าวสาร.....106
ข.26 ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อค่าดัชนีความขาวสัมพัทธ์ของข้าวสาร...106
ข.27 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งต่อปริมาณสาร 2AP.....107
ข.28 ผลของระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อปริมาณสาร 2AP.....107
ข.29 ผลของอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อปริมาณสาร 2AP.....107
ข.30 ผลของอุณหภูมิการอบแห้งและระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อปริมาณสารหอม2AP(ppm).108
ข.31 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งและอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อปริมาณสาร 2AP (ppm)....108
ข.32 ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อปริมาณสาร 2AP (ppm).....108
ข.33 ผลของอุณหภูมิการอบแห้ง ระยะเวลา และอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อความชื้นของข้าวเปลือก.....109
ข.34 ผลของอุณหภูมิการอบแห้ง ระยะเวลา และอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นของข้าวเปลือก.....110

ตารางที่ **หน้า**

ข.35 ผลของอุณหภูมิการอบแห้ง ระยะเวลา และอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อดัชนีความขาวของข้าวสาร.....111
ข.36 ผลของอุณหภูมิการอบแห้ง ระยะเวลา และอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อปริมาณสารหอม 2AP 112

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่ **หน้า**

2.1 โครงสร้างของเมล็ดข้าว....3
2.2 ส่วนของข้าวหักและขนาดข้าวหัก....8
2.3 สูตรโครงสร้างของสาร 2–Acetyl–1–pyrroline (2AP) 9
2.4 ปฏิกิริยาการเกิดสาร 2AP จาก proline....11
2.5 ส่วนประกอบของเครื่อง Headspace Gas Chromatography ของบริษัท Agilent Technologies....12
2.6 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดที่ใช้ในระดับอุตสาหกรรม....15
2.7 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด....16
2.8 แผนผังขั้นตอนการอบแห้งข้าวเปลือกในอุตสาหกรรม....18
2.9 การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบทางเคมีที่เกิดขึ้นในเมล็ดข้าวระหว่างการเก็บรักษา....26
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาในการลดความชื้นข้าวเปลือก และอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกระหว่างการตากในที่ร่มที่อุณหภูมิห้อง (28-30°C) ของตัวอย่างควบคุม (control) เป็นเวลา 10 วัน....35
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาในการอบแห้งข้าวเปลือก และอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกภายหลังการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันที่อุณหภูมิ 115°C เป็นเวลา 10 นาที....36
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาในการอบแห้งข้าวเปลือก และอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกภายหลังการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันที่อุณหภูมิ 125°C เป็นเวลา 10 นาที....36
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาในการอบแห้งข้าวเปลือก และอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกภายหลังการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันที่อุณหภูมิ 135°C เป็นเวลา 10 นาที....37
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาในการอบแห้งข้าวเปลือก และอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกภายหลังการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 10 นาที....37

รูปที่ **หน้า**

4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาในการอบแห้งข้าวเปลือกรอบที่ 2 ด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันที่อุณหภูมิ 115, 125, 135 และ 150°C เป็นเวลา 4 นาทีภายหลังการอบแห้งรอบที่ 1 และการtempering.....40

4.7 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันร่วมกับการ tempering ต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นของข้าวเปลือก.....42

4.8 ลักษณะการร้าวของเมล็ดข้าวที่ผ่านการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันที่อุณหภูมิ 115°C (ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอน).....43

4.9 ลักษณะการร้าวของเมล็ดข้าวที่ผ่านการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันที่อุณหภูมิ 115°C (ภาพถ่ายจากเครื่อง Scanning Electron Microscopy กำลังขยาย 200 เท่า).....43

4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นของข้าวกล้องจากข้าวพันธุ์ Bengal แสดงให้เห็นส่วน glassy และ rubbery region.....44

4.11 ภาพถ่ายตัดขวางด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy ของข้าวที่ผ่านการลดความชื้นโดย (A) ตากในที่ร่ม (B) , (C) , (D) , และ (E) การอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันที่อุณหภูมิ 115 , 125 , 135 และ 150°C ตามลำดับร่วมกับการ tempering.....46

4.12 ภาพจำลองกลไกการหลอมเหลวของเม็ดแป้ง.....47

4.13 ผลของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันที่อุณหภูมิต่างกัน ร่วมกับการ tempering และการตากในที่ร่ม.....49

4.14 ภาพถ่ายตัดขวางด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy ของข้าวที่ผ่านการลดความชื้นโดย (A) ตากในที่ร่ม (B) , (C) , (D) , และ (E) การอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันที่อุณหภูมิ 115 , 125 , 135 และ 150°C ตามลำดับ ที่เวลาต่างกัน ร่วมกับการ tempering 50

4.15 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันร่วมกับการ tempering ต่อค่าดัชนีความขาวของข้าวสาร.....51

4.16 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันร่วมกับการ tempering ต่อค่าดัชนีความขาวสัมพัทธ์ของข้าวสาร.....52

4.17 โครมาโตแกรมของสารหอม 2AP และสารมาตรฐานภายใน 2,4-DMP ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค Headspace Gas Chromatography.....53

4.18 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันร่วมกับการ tempering ต่อปริมาณสารหอม 2AP ในข้าวเปลือก.....54

รูปที่ **หน้า**

4.19 การเปลี่ยนแปลงปริมาณสารหอม 2AP ในข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันที่อุณหภูมิต่างๆ ร่วมกับการ tempering….....55
4.20 ความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการเก็บรักษาข้าวเปลือก.....57
4.21 ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ในกรุงเทพฯ ตั้งแต่เดือน พฤษภาคม – พฤศจิกายน 2548.....58
4.22 ผลของอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อความชื้นของข้าวเปลือก.....59
4.23 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น.....60
4.24 ผลของระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น.....61
4.25 ผลของอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น.....61
4.26 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งและระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น.....62
4.27 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งและอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น.....62
4.28 ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น.....62
4.29 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งต่อ (A) ดัชนีความขาวของข้าวสาร และ (B) ดัชนีความขาวสัมพัทธ์ของข้าวสาร.....63
4.30 ผลของระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อ (A) ดัชนีความขาวของข้าวสาร และ (B) ดัชนีความขาวสัมพัทธ์ของข้าวสาร.....64
4.31 ผลของอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อ (A) ดัชนีความขาวของข้าวสาร และ (B) ดัชนีความขาวสัมพัทธ์ของข้าวสาร.....65
4.32 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งและอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อ (A) ดัชนีความขาวของข้าวสาร และ (B) ดัชนีความขาวสัมพัทธ์ของข้าวสาร.....66
4.33 ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อ (A) ดัชนีความขาวของข้าวสาร และ (B) ดัชนีความขาวสัมพัทธ์ของข้าวสาร.....67
4.34 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งและระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อ (A) ดัชนีความขาวของข้าวสาร และ (B) ดัชนีความขาวสัมพัทธ์ของข้าวสาร.....68
4.35 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งต่อปริมาณสาร 2AP.....69
4.36 ผลของระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อปริมาณสาร 2AP.....70
4.37 ผลของอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อปริมาณสาร 2AP.....70
4.38 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งและระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อปริมาณสาร 2AP.....71
4.39 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งและอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อปริมาณสาร 2AP.....71
4.40 ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อปริมาณสารหอม 2AP….....72

รูปที่ **หน้า**

ก.1 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด.....85
ก.2 อุปกรณ์สำหรับการ tempering.....86
ก.3 อุปกรณ์สำหรับวัดอุณหภูมิของเมล็ด.....87
ก.4 เครื่องกะเทาะเปลือกชนิดลูกกลิ้งยาง.....89
ก.5 เครื่องขัดขาวชนิดหินขัด.....89
ก.6 เครื่องคัดขนาดเมล็ดข้าว.....89
ก.7 กราฟมาตรฐาน 2AP ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณในเมล็ดข้าวด้วยเทคนิค Headspace Gas Chromatography 94

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1
บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย นอกจากเป็นอาหารหลักของคนไทยแล้วยังเป็นสินค้าส่งออกที่นำรายได้เข้าสู่ประเทศเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะข้าวหอมมะลิของไทย ซึ่งมีเนื้อสัมผัสและความหอมเฉพาะตัว ทำให้เป็นที่นิยมของผู้บริโภคอย่างมาก เป็นผลให้อุตสาหกรรมข้าวของไทยต้องเพิ่มปริมาณการผลิตให้เพียงพอต่อความต้องการทั้งในและต่างประเทศ การใช้เครื่องเกี่ยวนวดข้าวได้รับความนิยมมาตั้งแต่ปี พ.ศ.2522 (กรมวิชาการเกษตร, 2545) เนื่องจากขาดแคลนแรงงานในภาคเกษตร สามารถทำงานได้สะดวกรวดเร็ว และประหยัดกว่าการใช้แรงงานคน แต่การใช้เครื่องเกี่ยวนวดที่มีประสิทธิภาพในการทำงานสูงจะต้องเก็บเกี่ยวในขณะที่ข้าวเปลือกมีความชื้นค่อนข้างสูง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วข้าวเปลือกหลังการเก็บเกี่ยวมักมีความชื้นประมาณ 25 – 33 % น้ำหนักแห้ง (% db) หากไม่มีวิธีการจัดการกับข้าวเปลือกชื้นที่เหมาะสมและทันเวลา จะทำให้ข้าวเปลือกเกิดการเสียหายก่อนที่จะนำไปสีเป็นข้าวสาร โดย Philips, Twiddy และ Reilly (1988) พบว่าข้าวเปลือกที่เก็บเกี่ยวที่ความชื้นสูง (มากกว่า 25 % db) เพียงพอที่เชื้อราเจริญได้ และ Juliano (1994) พบว่าการเกิดความร้อนของข้าวเปลือกชื้นมาจากการหายใจของเมล็ด และ จุลินทรีย์ เป็นผลให้เกิดสีเหลืองในข้าว ดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำข้าวเปลือกไปลดความชื้นให้อยู่ระหว่าง 14 – 15 % db โดยผ่านกระบวนการอบแห้ง แต่ในขณะเดียวกันความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งอาจทำให้เกิดการสูญเสียสารหอมที่สำคัญและเป็นลักษณะเฉพาะของข้าวหอมมะลิ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง 2-Acetyl-1-pyrroline (2AP) ซึ่งพบว่าเป็นสารที่ให้กลิ่นหอมที่เป็นเอกลักษณ์ของข้าวหอมมะลิ งานวิจัยที่ผ่านมาจึงเน้นการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำเพื่อรักษาปริมาณ 2AP แต่มีข้อจำกัดคือ ต้องใช้เวลาในการอบนานจึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในระดับอุตสาหกรรม ส่วนงานวิจัยที่ศึกษาการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงแบบมีการ tempering มีการศึกษาเพียงด้านคุณภาพการสี แต่ยังไม่มีการศึกษาในด้านผลกระทบที่มีต่อคุณภาพสารหอมระเหยในข้าวหอมมะลิ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาผลของการอบแห้งข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันที่อุณหภูมิต่าง ๆ ร่วมกับการ tempering ต่อคุณภาพการสีและปริมาณสาร 2AP และศึกษาผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพการสีและปริมาณสาร 2AP ระหว่างการเก็บรักษา เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาการอบแห้งข้าวหอมมะลิในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

บทที่ 2
วารสารปริทัศน์

2.1 ข้าว

ข้าวเป็นพืชตระกูลหญ้า (วงศ์ Graminae) ซึ่งเป็นพืชล้มลุก (annual) มีลำต้นเป็นไม้เนื้ออ่อน มีใบชนิดใบเลี้ยงเดี่ยว (monocotyledon) และมีระบบรากฝอย (fibrous root system) สามารถเจริญเติบโตได้ดีทั้งในเขตร้อนและเขตอบอุ่น และสามารถปลูกได้ทั้งในที่ราบไปจนถึงพื้นที่ที่มีความสูง 2,500 เมตรจากระดับน้ำทะเล สามารถปลูกในที่ที่มีน้ำขัง (ซึ่งอาจลึกถึง 4 เมตร) หรือปลูกในที่ซึ่งไม่มีน้ำขังเลยก็ได้ นอกจากนี้ยังเจริญเติบโตได้ในดินหลายประเภทที่มีความเป็นกรดด่างและความเค็มต่าง ๆ กัน ในประเทศไทยมีพันธุ์ข้าวที่ใช้ปลูกอยู่ประมาณ 3,500 พันธุ์ ปัจจุบันข้าวที่เพาะปลูกเพื่อใช้ในการบริโภคแบ่งออกเป็น 2 ชนิด (species) คือ *Oryza sativa* ซึ่งปลูกในทวีปเอเชีย และ *Oryza glaberrima* ที่ปลูกในทวีปแอฟริกา *Oryza sativa* มีจำนวนพันธุ์และความแตกต่างในลักษณะของพันธุ์มากกว่า *Oryza glaberrima* มาก และข้าวที่ปลูกในแถบเอเชียและมีการซื้อขายกันในตลาดโลกในปัจจุบันนี้เป็น *Oryza sativa* เกือบทั้งหมด ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ชนิดย่อย (Subspecies) ตามแหล่งที่ปลูก (อัมมาร์ สยามวาลา และ วิโรจน์ ณ ระนอง, 2533) ได้แก่

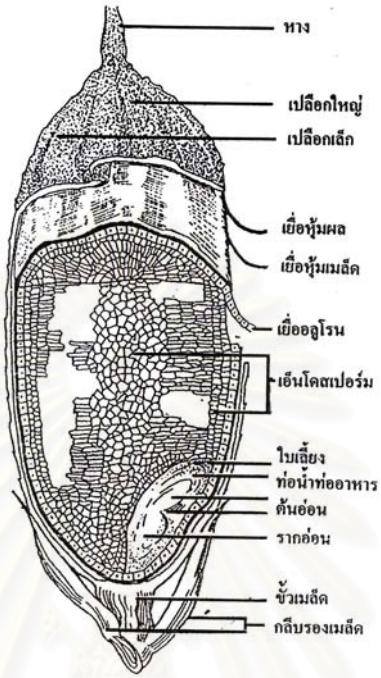
Indica type เป็นข้าวที่มีลักษณะเมล็ดยาวเรียว มีขนาดกว้างประมาณ 2.8 มิลลิเมตร ยาว 9 – 11 มิลลิเมตร และหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร ต้นสูง ไวต่อช่วงแสง ใบมากและโค้งงอ มีการตอบสนองต่อปุ๋ยน้อย ให้ผลผลิตที่ค่อนข้างต่ำ แต่สามารถปรับตัวให้เข้ากับสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ ได้ง่ายปลูกมากในประเทศเขตร้อนและเขตมรสุม เช่น ประเทศไทย ฟิลิปปินส์ อินโดนีเซีย มาเลเซีย เวียดนาม ลาว กัมพูชา พม่า จีน อินเดีย และศรีลังกา

Japonica type หรือ Sinica type เป็นข้าวที่มีลักษณะเมล็ดป้อมสั้น มีขนาดกว้างประมาณ 3.5 มิลลิเมตร ยาวประมาณ 7 มิลลิเมตร และหนาประมาณ 2.5 มิลลิเมตร ต้นเตี้ย ใบตั้งและสั้น ไม่ค่อยไวต่อช่วงแสง มีการตอบสนองต่อปุ๋ยดีมาก ให้ผลผลิตสูง ปลูกมากในประเทศเขตอบอุ่น เช่น ประเทศจีน เกาหลี ญี่ปุ่น และสหรัฐอเมริกา

Javanica type เป็นข้าวที่มีลักษณะอยู่ระหว่าง Indica type และ Japonica type กล่าวคือ เมล็ดป้อมใหญ่เหมือน Japonica type แต่ให้ผลผลิตต่ำกว่า Indica type และไม่ค่อยตอบสนองต่อปุ๋ย มีปลูกเฉพาะในประเทศอินโดนีเซีย เป็นข้าวที่ไม่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ

2.1.1 **โครงสร้างของเมล็ดข้าว** (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547 ; กัญญา เชื้อพันธุ์, 2547)

เมล็ดข้าวประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนที่ห่อหุ้มเมล็ดข้าว เรียกว่า แกลบ และส่วนเนื้อผล (caryopsis grain) หรือข้าวกล้อง โดยมีส่วนประกอบต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเมล็ดข้าว
ที่มา : กัญญา เชื้อพันธุ์ (2547)

2.1.1.1 **แกลบ (hull หรือ husk)** เป็นส่วนที่ห่อหุ้มเมล็ดข้าว (ประมาณ 20% ของน้ำหนักเมล็ดทั้งหมด) ประกอบด้วยเปลือกใหญ่ (lemma) เปลือกเล็ก (palea) ขน (pubescence) หาง (awn) ขั้วเมล็ด (rachilla) และกลีบของเมล็ด (sterile lemmas) ซึ่งเชื่อมต่อกับก้าน (pedicel) เปลือกใหญ่ เป็นเปลือกหุ้มเนื้อผลด้านท้อง (dorsal side) มีขนาดใหญ่ ลักษณะของเปลือกใหญ่จะเป็นรอยเส้น (nerves) ตามความยาวของเปลือกประมาณ 5 เส้น เปลือกใหญ่จะห่อหุ้มเปลือกเล็กไว้ทั้ง 2 ด้าน ในลักษณะขบอยู่ข้างบนอย่างแน่นสนิท ประมาณ 2/3 ของเปลือกทั้งหมดตามแนวยาวของเมล็ด เปลือกเล็ก เป็นเปลือกหุ้มเนื้อผลด้านหลัง (ventral side) ที่มีขนาดเล็กกว่าเปลือกใหญ่ประมาณ 1/3 ของเปลือกทั้งหมด จะยึดแน่นอยู่ใต้เปลือกใหญ่ตามแนวยาวด้วยโครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายตะขอ (hooklike structure) ทำให้เปลือกข้าวปิดสนิท จึงช่วยป้องกันเมล็ดข้าวจากเชื้อราและแมลงได้ในระดับหนึ่งแกลบจะมีน้ำหนักเฉลี่ยประมาณ 20% ของน้ำหนักเมล็ดข้าวเปลือก และที่ชั้นนอกของเปลือกมี trichomes ซึ่งมีองค์ประกอบภายในส่วนใหญ่เป็น ลิกนิน (30%) เซลลูโลส (25%) เพนโตเซน (15%) และเถ้า (21%) ดังนั้นส่วนนี้จึงมีคุณค่าทางโภชนาการต่ำ

2.1.1.2 **ข้าวกล้อง (brown rice หรือ dehulled rice)** เป็นส่วนที่ใช้บริโภค ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

ก) เยื่อหุ้มผล (pericarp หรือ caryopsis coat) มีน้ำหนักประมาณ 1.2% ของน้ำหนักเมล็ดทั้งหมด มีความหนาประมาณ 10 ไมครอน มีรงควัตถุอยู่ทำให้ข้าวกล้องมีสีต่าง ๆ เช่น น้ำตาลอ่อน เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีโปรตีน เฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลส เป็นองค์ประกอบสำคัญ เยื่อหุ้มผลนี้สามารถแบ่งย่อยได้เป็น 3 ชั้น ได้แก่ เยื่อชั้นนอก (epicarp หรือ exocarp) เยื่อชั้นกลาง mesocarp หรือ hypoderm) และเยื่อชั้นใน (endocarp)

ข) เยื่อหุ้มเมล็ด (tegmen หรือ seed coat) อยู่ถัดจากเยื่อหุ้มผลเข้ามา ประกอบด้วยเซลล์ 2 ชั้น รูปยาว เรียงตามขวาง และมีผนังบางกั้น มีน้ำหนักประมาณ 4% ของน้ำหนักเมล็ดทั้งหมด มีความหนาประมาณ 0.5 ไมครอน ภายในเซลล์มีไขมันและรงควัตถุเช่นเดียวกับเยื่อหุ้มผล ทำให้ข้าวกล้องมีสี

ค) เยื่อโปร่งแสง (nucellus) เป็นเซลล์ชั้นที่ติดกับเยื่อหุ้มเมล็ด แต่พันธะระหว่างเยื่อโปร่งแสงกับเยื่อหุ้มเมล็ดไม่ติดแน่น จึงแยกออกจากกันได้ง่าย มีความหนาประมาณ 0.8-2.5 ไมครอน

ง) เยื่อชั้นแอลิวโรน (aleurone layer) เป็นเนื้อเยื่อชั้นถัดจากเยื่อหุ้มเมล็ด ประกอบด้วยเซลล์ 1-7 ชั้น โดยเยื่อหุ้มด้านหลังของเมล็ดจะหนากว่าเยื่อหุ้มด้านท้อง เซลล์แอลิวโรนจะไม่เชื่อมติดกับคัพภะในส่วนของใบเลี้ยงด้านท้องของเมล็ดลงมาถึงจุดเชื่อมระหว่างใบเลี้ยงกับเยื่อหุ้มรากอ่อน ซึ่งอยู่ภายในเมล็ด จึงแบ่งเซลล์แอลิวโรนเป็น 2 ลักษณะ คือเซลล์ส่วนที่ห่อหุ้มรอบเนื้อของเมล็ดจะมีรูปร่างสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ส่วนเซลล์แอลิวโรนที่ห่อหุ้มคัพภะจะบาง มีรูปร่างยาว ที่ผนังเซลล์มีโปรตีน เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส ไขมัน และวิตามินต่าง ๆ

จ) คัพภะ หรือ จมูกข้าว (embryo หรือ germ) เป็นส่วนที่อยู่ติดกับส่วนที่เป็นแป้งทางด้านท้องของเมล็ด (ventral side) เป็นแหล่งสะสมอาหารสำหรับการเจริญเติบโตของต้นอ่อน จึงมีโปรตีน เอนไซม์ ไขมัน แร่ธาตุ และวิตามินในปริมาณสูง แต่ไม่มีแป้ง ประกอบด้วย ต้นอ่อน (plumule) รากอ่อน (radicle) เยื่อหุ้มต้นอ่อน (coleoptile) เยื่อหุ้มรากอ่อน (coleorhiza) ท่อน้ำท่ออาหาร (epiblast) และใบเลี้ยง (scutellum) มีน้ำหนักประมาณ 2.4% ของน้ำหนักเมล็ดทั้งหมด

ฉ) เนื้อเมล็ด (endosperm) มีมากที่สุดในเมล็ดข้าว คือประมาณ 80% ของน้ำหนักเมล็ดทั้งหมด อยู่ชั้นในสุดของเมล็ด มีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก แป้งข้าวจะอยู่รวมกันเป็นกลุ่ม (starch compound) กลุ่มแป้งหลายๆ กลุ่มจะอยู่รวมกันเป็น micelles โดยมีกลุ่มโปรตีน (protein bodies) แทรกอยู่ภายใน เมล็ดข้าวสารนี้มีแป้งอยู่ประมาณ 84 – 93% โดยน้ำหนัก

2.1.2 ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105

ข้าวหอมมะลิ (Jasmin Rice, Fragrant Rice) เป็นข้าวหอมที่มีคุณภาพดีเป็นที่นิยมของตลาดทั้งภายในและต่างประเทศ เพราะมีเนื้อสัมผัสที่อ่อนนุ่ม มีกลิ่นหอมเฉพาะตัว และมีรสชาติเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคเป็นอย่างมาก ประเทศไทยเป็นผู้ผลิตข้าวชนิดนี้แต่เพียงผู้เดียว ข้าวหอมมะลิมีชื่อพันธุ์ว่า ข้าวขาวดอกมะลิ 105 มีถิ่นกำเนิดในอำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา

ลักษณะทั่วไปของข้าวหอมมะลิ 105 เป็นข้าวเจ้าที่ไวต่อแสง (ข้าวที่มีกำหนดออกดอกที่แน่นอนหรือคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อย แม้จะปลูกในเวลาต่างกัน) (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547) ปลูกได้เฉพาะฤดูนาปีเท่านั้น ลักษณะลำต้นสีเขียวจาง ใบสีเขียว ความสูงประมาณ 138 – 150 เซนติเมตร มีความทนทานต่อความแห้งแล้ง ทนดินเปรี้ยวและดินเค็มได้ดี เมล็ดมีลักษณะเรียวยาว น้ำหนักเบา คุณภาพการขัดสีดี เมล็ดข้าวมีลักษณะจำเพาะแตกต่างจากข้าวพันธุ์อื่นอย่างเด่นชัด กล่าวคือ เมื่อแปรสภาพข้าวเปลือกเป็นข้าวกล้องหรือข้าวขาวแล้ว เมล็ดข้าวมีลักษณะยาวรี ก้นงอน เมล็ดข้าวขาวใส แข็งแกร่ง เมล็ดข้าวมีความยาวเฉลี่ยไม่น้อยกว่า 7.0 มิลลิเมตร ความกว้างเฉลี่ยไม่เกิน 2.2 มิลลิลิตร และมีแอมิโลสร้อยละ 12 – 19 โดยน้ำหนักข้าวขาว ที่ระดับความชื้น 16 %db ถ้าเป็นข้าวใหม่มีกลิ่นหอม เมื่อหุงข้าวขาวให้สุกแล้ว เมล็ดข้าวสุกจะอ่อนนิ่ม ตลอดทั้งเมล็ดและมีกลิ่นหอม รสชาติดี จึงจำหน่ายได้ราคาดี (เอกสารเศรษฐกิจการเกษตร, 2538)

2.2 คุณภาพของข้าว

คุณภาพข้าวที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการซื้อขายจะพิจารณาจากคุณภาพด้านต่าง ๆ ได้แก่ (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547)

- คุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ น้ำหนักเมล็ด สีของข้าวเปลือก สีของข้าวกล้อง ขนาดและรูปร่าง ปริมาณสิ่งเจือปนที่ติดมากับเมล็ดข้าวเปลือก ลักษณะท้องไข่ ความเลื่อมมันของเมล็ด ความขาวของข้าวสาร และความใสของเมล็ดข้าวสาร เป็นต้น
- คุณสมบัติทางเคมี ได้แก่ ความชื้นของข้าวเปลือก และ กลิ่นสารระเหยในข้าว เป็นต้น ข้าวเปลือกที่มีความชื้น 16%db จะขายได้ราคาดีกว่าข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูง ความชื้นยิ่งมากราคาก็จะยิ่งต่ำ เพราะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการอบแห้งเพื่อลดความชื้นเพิ่มขึ้น
- คุณภาพการสีข้าวเปลือกเป็นข้าวสาร โดยสิ่งสำคัญที่ใช้ประเมินราคาข้าวเปลือก คือ ปริมาณข้าวเต็มเมล็ด และเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น ถ้ามีปริมาณมาก ราคาข้าวเปลือกจะสูง
- คุณภาพเมล็ดในการหุงต้มและการรับประทาน

2.2.1 **คุณภาพการสีข้าว**

การสีข้าว มีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดเปลือก รำ และ คัพภะ ออกจากเมล็ดข้าวให้ได้ข้าวสาร การขัดสีที่ดีควรมีปริมาณข้าวเต็มเมล็ดมากที่สุด หรือมีข้าวหักน้อยที่สุด โดยผ่านกระบวนการ 4 ขั้นตอนพื้นฐาน คือ การทำความสะอาด การกะเทาะ การขัดขาว และการคัดแยก โดยปกติข้าวจะมีส่วนที่เป็นเปลือกประมาณ 20% รำข้าว 10% และเอนโดสเปิรม 70% เมื่อขัดสีแล้วจะได้ผลิตภัณฑ์คือ ข้าวต้น (head rice) ข้าวหัก (broken rice) และผลพลอยได้คือ แกลบ (hull) จมูกข้าว (germ) รำข้าว (bran) และปลายข้าว (fine broken) (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547)

ประสิทธิภาพการสี หมายถึง ปริมาณผลผลิตจากข้าวเปลือกที่ได้เป็นข้าวสารเต็มเมล็ด และข้าวต้น ถ้าได้ข้าวสารเต็มเมล็ด และข้าวต้นมาก แสดงว่ามีประสิทธิภาพการสีดี ขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าว การปฏิบัติก่อนและหลังการเก็บเกี่ยว และกระบวนการสีข้าว (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547)

ระดับการสี (degree of milling) หมายถึงความหนักเบา หรือมากน้อยในการขัดข้าวกล้องให้เป็นข้าวสาร สิ่งที่ได้จากการขัด คือ รำ คัพภะ และส่วนเนื้อเมล็ด โดยแบ่งระดับการสีเป็น 4 ระดับ (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547) ได้แก่

1) **สีดีพิเศษ** (extra well milled) คือ การสีขัดเอารำออกทั้งหมด จนเมล็ดข้าวมีลักษณะสวยงามพิเศษ

2) **สีดี** (well milled) คือ การสีขัดเอารำออกทั้งหมดจนเมล็ดมีลักษณะสวยงามดี

3) **สีดีปานกลาง** (reasonable well milled) คือ การสีขัดเอารำออกเป็นส่วนมากจนเมล็ดข้าวมีลักษณะสวยงามพอสมควร

4) **สีธรรมดา** (ordinarily milled) คือ การสีขัดเอารำออกแต่เพียงบางส่วน

ระดับการสีนี้ยังสามารถคิดเป็นเปอร์เซ็นต์รำที่ขัดออก หรือข้าวสารหลังขัดสี ซึ่งตรวจสอบได้หลายวิธี ได้แก่

ก) ตามมาตรฐานของ ISO ประเทศอินเดีย และมาเลเซีย จากสูตร

$$\% \text{ น้ำหนักรำที่หายไป} = \frac{(\text{น้ำหนักข้าวกล้อง} - \text{น้ำหนักข้าวสาร}) \times 100}{\text{น้ำหนักข้าวกล้อง}}$$

และนำค่าที่คำนวณได้มาเป็นเกณฑ์ของระดับการสี ดังนี้

สีดีพิเศษ หมายถึง น้ำหนักรำหายไป 8% หรือมากกว่า

สีดี หมายถึง น้ำหนักรำหายไป 7 – 7.9% หรือมากกว่า

สีดีปานกลาง หมายถึง น้ำหนักรำหายไป 6 – 6.9% หรือมากกว่า

สีธรรมดา หมายถึง หมายถึง น้ำหนักรำหายไป 5 – 5.9% หรือมากกว่า

ข) ตามมาตรฐานของประเทศไต้หวัน คิดจากเปอร์เซ็นต์ข้าวสารหลังการขัดสี

$$\text{ระดับการขัดสี} = \frac{\text{น้ำหนักข้าวสาร} \times 100}{\text{น้ำหนักข้าวเปลือก}}$$

ระดับที่อยู่ในเกณฑ์ปกติ คือ 88%

ค) ตามปริมาณไทอะมีน หรือวิตามิน บี ที่วิเคราะห์ได้จากรำที่ขัดออกจากข้าวกล้อง ถ้ามีปริมาณมาก แสดงว่าขัดรำออกได้มากอยู่ในระดับสีดีพิเศษ เป็นต้น

ง) ตามสีย้อมเมล็ดข้าว โดยการใช้สารเคมีบางชนิด เช่น ซูแดน 4 (Sudan IV) ทำปฏิกิริยากับไขมันที่ติดกับเมล็ดข้าวสาร จะกลายเป็นสีแดง ดังนั้นถ้าเมล็ดข้าวสารมีสีแดงติดอยู่มาก แสดงว่ายังมีไขมัน ซึ่งเป็นองค์ประกอบของรำอยู่มาก ระดับการสีจึงยังไม่ดี

2.2.2 คำจำกัดความ

มาตรฐานสินค้าข้าว (มาตรฐานข้าวไทย , 2540) ได้กำหนดความหมายของคำที่ใช้ในมาตรฐานไว้ดังนี้

ข้าวเปลือก (Paddy rice, Rough rice) หมายถึง ข้าวที่ยังไม่ผ่านการกะเทาะเอาเปลือกออก

ข้าวกล้อง (Cargo rice, Loonzain rice, Brown rice, Husked rice) หมายถึง ข้าวที่ผ่านการกะเทาะเอาเปลือกออกเท่านั้น

ข้าวขาว (White rice) หมายถึง ข้าวที่ได้จากการนำข้าวกล้องไปขัดเอารำออก

ส่วนของเมล็ดข้าว (Parts of rice kernels) หมายถึง ส่วนของข้าวเต็มเมล็ดแต่ละส่วนที่แบ่งตามความยาวของเมล็ดออกเป็น 10 ส่วน เท่า ๆ กัน (รูปที่ 2.2)

ข้าวเต็มเมล็ด (Whole kernels) หมายถึง เมล็ดข้าวที่อยู่ในสภาพเต็มเมล็ด ไม่มีส่วนใดหักและให้รวมถึงเมล็ดข้าวที่มีความยาวตั้งแต่ 9 ส่วนขึ้นไป

ข้าวต้น หรือ ต้นข้าว (Head rice) หมายถึง เมล็ดข้าวหักที่มีความยาวมากกว่าข้าวหัก แต่ไม่ถึงความยาวของข้าวเต็มเมล็ด และให้รวมถึงเมล็ดข้าวแตกเป็นซีกที่มีเนื้อที่เหลืออยู่ตั้งแต่ร้อยละ 80 ของเมล็ด

ข้าวหัก (Brokens) หมายถึง เมล็ดข้าวหักที่มีความยาวตั้งแต่ 2.5 ส่วนขึ้นไป แต่ไม่ถึงความยาวของต้นข้าว และให้รวมถึงเมล็ดข้าวแตกเป็นซีกที่มีเนื้อที่เหลืออยู่ไม่ถึงร้อยละ 80 ของเมล็ด

โดยเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นที่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ทางการค้า ต้องมีเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นสัมพัทธ์ไม่ต่ำกว่า 80% (Soponronnarit et al.,1999)

$$\% \text{ ข้าวต้นสัมพัทธ์} = \frac{\text{น้ำหนักข้าวต้นของข้าวที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิไดซ์เบด}}{\text{น้ำหนักข้าวต้นของข้าวชุดเดียวกันที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศแวดล้อม}} \times 100$$

รูปที่ 2.2 ส่วนของข้าวหักและขนาดข้าวหัก

ที่มา : มาตรฐานข้าวไทย (2540)

2.2.3 **ความขาวของข้าวสาร**

เมื่อนำข้าวกล้องไปขัดขาวจนได้ข้าวสาร ความขาวของข้าวอาจแตกต่างกันขึ้นอยู่กับระดับการสี ซึ่งความขาวของข้าวสารเป็นปัจจัยหนึ่งในการกำหนดเกณฑ์มาตรฐานในการซื้อขายข้าว โดยความขาวของข้าวสารที่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ทางการค้า ค่าความขาวไม่ควรต่ำกว่า 37 (เมื่อวัดด้วยเครื่องวัดความขาว Kett Whiteness Meter (Kett C-300) ที่ calibrate เครื่องด้วย Standard pure white Barium Oxide ที่มีความขาว 86%) หรือมีความขาวสัมพัทธ์ไม่ต่ำกว่า 80% (Soponronnarit et al., 1999)

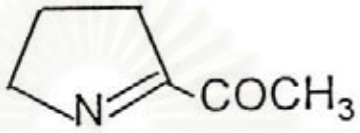
$$\% \text{ ความขาวสัมพัทธ์} = \frac{\text{ความขาวของข้าวสารที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิไดซ์เบด}}{\text{ความขาวของข้าวสารชุดเดียวกันที่ลดความชื้นโดยการตากในที่ร่ม}} \times 100$$

ในงานวิจัยนี้วัดค่าความขาวของข้าวสารด้วยเครื่อง Minolta Chroma Meter, CR 300 (ตามวิธีในภาคผนวก ก.5) ซึ่งจะแสดงผลออกมาเป็นค่า L (ความสว่าง), a (+สีแดง –สีเขียว), b (+ สีเหลือง - สีน้ำเงิน) จากนั้นนำค่า L, a, b มาคำนวณค่าความขาวของข้าวสาร (WI) ตามสูตร (Chen, Lu and Lii, 1999)

$$\text{White Index (WI)} = 100 - [\,(100-L)^2 + a^2 + b^2\,]^{1/2}$$

2.2.4 คุณภาพด้านปริมาณสารหอม 2-Acetyl-1-pyrroline (2AP) ในข้าว

ในปี 1982 Buttery, Juliano และ Ling ได้ศึกษาจนค้นพบสารระเหยหลักที่ให้กลิ่นหอมในข้าวหุงสุกเป็นครั้งแรก พร้อมกับสามารถพิสูจน์และระบุได้ว่าเป็นสาร 2-Acetyl-1-pyrroline (2AP) โดยมีสูตรโครงสร้างทางเคมีดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งพบได้ทั้งในพันธุ์ข้าวหอม เช่น Basmati 370 , Milagrosa , Azucena, Malagkit Sungsong, IR 841-76-1, Seratus Malam, Hieri และ Khao Dawk Mali 105 (ข้าวขาวดอกมะลิ 105 หรือ ข้าวหอมมะลิ) และพันธุ์ข้าวไม่หอมบางพันธุ์ได้แก่ Texas Long Grain และ Calrose



รูปที่ 2.3 สูตรโครงสร้างของสาร 2–Acetyl–1–pyrroline (2AP)

สาร 2AP เป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ซึ่งมีส่วนทำให้สามารถระเหยได้ง่ายที่สภาวะอุณหภูมิปกติ เพราะมีจุดเดือดต่ำ และให้กลิ่นหอมเฉพาะตัว ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับระดับความแรงของกลิ่นของสารนี้พบว่าค่าความเข้มข้นต่ำที่สุดที่สามารถได้รับกลิ่นเมื่อละลายสารนี้ในน้ำเท่ากับ 0.1 ppm (Buttery et al., 1982) สารนี้จึงถูกจัดอยู่ในกลุ่มสารที่มีบทบาทสำคัญมาก (aroma impact compound) และการที่เป็นสารประกอบเฮเทอโรไซคลิก ซึ่งมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ ทำให้สาร 2AP เป็นสารที่มีสมบัติมีขั้ว และค่อนไปทางเบส ซึ่งคุณสมบัตินี้เองที่ทำให้สารนี้สามารถยึดเกาะอยู่ในเนื้ออาหารหรือตัวอย่างพืชได้ โดยพันธะอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ เช่น แป้ง หรือกรดไขมัน และระเหยออกมาเล็กน้อยในสภาวะอุณหภูมิต่ำ(สุกัญญา วงศ์พรชัย , 2547)

Buttery, Juliano และ Ling (1983) ทดลองวิเคราะห์ปริมาณสาร 2AP ของข้าวพันธุ์ต่าง ๆ ด้วยเทคนิคการแยกสารแบบการสกัดด้วยไอน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์แบบต่อเนื่อง (continuous steam distillation and solvent extraction device) โดยใช้ชุดสกัดสารแบบ Likens – Nickerson ใช้ปริมาณตัวอย่างข้าว ครั้งละ 500 กรัม แล้วนำสารสกัดที่ได้มาวิเคราะห์หาปริมาณสาร 2AP ด้วยเทคนิค gas chromatography / mass spectrometry พบว่า สารหลักที่ทำให้มีกลิ่นหอมในข้าวคือ 2-Acetyl-1-pyrroline (2AP) ซึ่งในข้าวหอมมีปริมาณมากกว่าในข้าวธรรมดา โดยในข้าวหอมที่หุงสุกมีปริมาณสารนี้ตั้งแต่ 0.04–0.09 μg/g (ppm) ส่วนข้าวธรรมดามีปริมาณน้อยกว่า 0.008 ppm พบในปริมาณที่แตกต่างกันไปในข้าวหอมแต่ละพันธุ์ และพบในข้าวกล้องมากกว่าข้าวสาร ดังตารางที่ 2.1 ข้าวสารที่ใช้ในการทดลองนี้ได้จากการนำข้าวกล้องมาขัดสีเอารำออกไปร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก จะเห็นได้ว่าสาร 2AP อยู่ในชั้นเยื่อหุ้มเมล็ดที่ถูกขัดสีออกไปใน

ปริมาณมากกว่าในส่วนที่เหลือเป็นเนื้อเมล็ดข้าวสาร ซึ่งข้าวหอมจะมีลักษณะแตกต่างจากข้าวธรรมดา กล่าวคือ เมื่อนำข้าวสารที่มาจากพันธุ์ข้าวหอมมาหุงต้มจนข้าวสุก จะมีกลิ่นหอมระเหยออกมามากกว่าข้าวปกติ ซึ่งกลิ่นหอมของข้าว นอกจากจะเป็นไปตามพันธุกรรมของข้าวแล้ว ปริมาณ และองค์ประกอบของสารระเหยยังขึ้นอยู่กับสภาพดินฟ้าอากาศในระหว่างการปลูกอีกด้วย (อนันต์ พลธานี, 2533)

ตารางที่ 2.1 ปริมาณ 2-Acetyl-1-pyrroline ที่พบในข้าวสารและข้าวหุงสุกพันธุ์ต่าง ๆ

Variety	2-Acetyl-1-pyrroline concentration (ppm*)	
	milled rice	brown rice
Malagkit Sungsong	0.09	0.2
IR 841-76-1	0.07	0.2
Khao Dawk Mali 105	0.07	0.2
Milagrosa	0.07	-
Basmati 370	0.06	0.17
Seratus Malam	0.06	-
Azucena	0.04	0.16
Hieri	0.04	0.1
Texas Long Grain	<0.008	-
Calrose	<0.006	-

*ppm = parts (weight) of compound per million (10^6) parts of rice (dry weight)

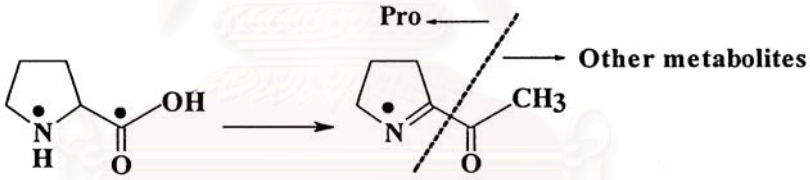
ที่มา : Buttery และ คณะ (1983)

Mahatheeranont, Promdang และ Chiampiriyakul (1995) ได้ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับสารอินทรีย์ที่เป็นสารให้ความหอมของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 พบสารระเหยมากกว่า 140 ชนิดเป็นองค์ประกอบของสารสกัดที่มีกลิ่นหอมที่ได้จากการสกัดข้าวกล้องพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ด้วยวิธีสกัดด้วยไอน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์ และเมื่อทดลองควบคู่ไปกับการทดสอบกลิ่นโดยวิธีการดมพบว่ามีเพียงสาร 2AP เท่านั้นที่เป็นสารหอมที่มีบทบาทมากที่สุดในความหอมของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105

สาร 2AP นอกจากจะพบในข้าวแล้วยังพบได้ในใบเตย (Buttery และคณะ, 1982) ดอกชมนาด (สุกัญญา มหาธีรานนท์, 2540) น้ำและเนื้อมะพร้าว (กรรณานุช เลาห์เรณู, นุสรา เมธาพิพัฒน์ และ ศรีสุรางค์ ปิ่นแสงมณี, 2541) ข้าวโพดหวาน (Buttery, Ling and Donald, 1994) กลิ่นขนมปังข้าวสาลี กลิ่นขนมปังข้าวไรย์ (Schieberle and Grosch, 1985, 1987) และ

เนื้อที่ผ่านกระบวนการหุงต้ม (Gasser and Grosch, 1988) และพบว่าเป็นองค์ประกอบในส่วนระเหยแต่ไม่ได้มีบทบาทสำคัญต่อกลิ่นของอาหาร เช่น ข้าวโพดหวานบรรจุกระป๋อง, ขนมปังข้าวสาลีอบ, งาอบ, ขนมปังกรอบ, เนื้อหางกุ้งต้มสุก, มันฝรั่งต้มสุก, เมล็ดมะม่วงอบ, น้ำมันหอยนางรม, ซาลามี่ และปรามาแฮมอิตาลี, เนื้อหางกุ้งทะเลใหญ่ต้มสุก และนมผงพร่องมันเนย เป็นต้น ส่วนอาหารที่พบสาร 2AP เป็นองค์ประกอบหลักที่มีบทบาทสำคัญต่อกลิ่นโดยรวมของอาหาร ได้แก่ เนื้อก้ามปูสุก, แป้งข้าวโพดสุก, เผือกต้มสุก และไอบีเรียนแฮม (สุกัญญา วงศ์พรชัย, 2547)

Yoshihashi, Huong และ Inatomi (2002) ได้รายงานว่าการเติมกรดอะมิโนบางชนิดลงไปในแหล่งอาหารสำหรับต้นกล้าข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ ซึ่งได้แก่ proline, ornithine และ glutamate (เป็นกรดอะมิโน 3 ใน 7 ชนิดที่ใช้ในการทดลอง) แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 27°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จะทำให้ต้นกล้าสามารถสร้างสาร 2AP เพิ่มขึ้นได้ โดยเฉพาะการเติมกรดอะมิโนชนิด proline ทำให้ต้นกล้าของข้าวสร้างสาร 2AP เพิ่มขึ้นได้มากที่สุด คือประมาณ 3 เท่าของความเข้มข้นที่มีอยู่เดิมในต้นกล้าควบคุม คณะผู้วิจัยนี้จึงสรุปว่า proline เป็นสารตั้งต้นที่สำคัญของกระบวนการสังเคราะห์สาร 2AP ในต้นข้าว นอกจากนี้คณะผู้วิจัยยังศึกษาถึงสารต้นตอและปฏิกิริยาการสังเคราะห์สาร 2AP ในต้นข้าว พบว่าธาตุไนโตรเจน (N) ในวง pyrroline ของสาร 2AP นั้นมาจาก N ของกรดอะมิโน proline แต่ คาร์บอน (C) ในส่วนของ acetyl group นั้นไม่ใช่ C ใน carbonyl group ของ proline ดังแสดงในรูปที่ 2.4



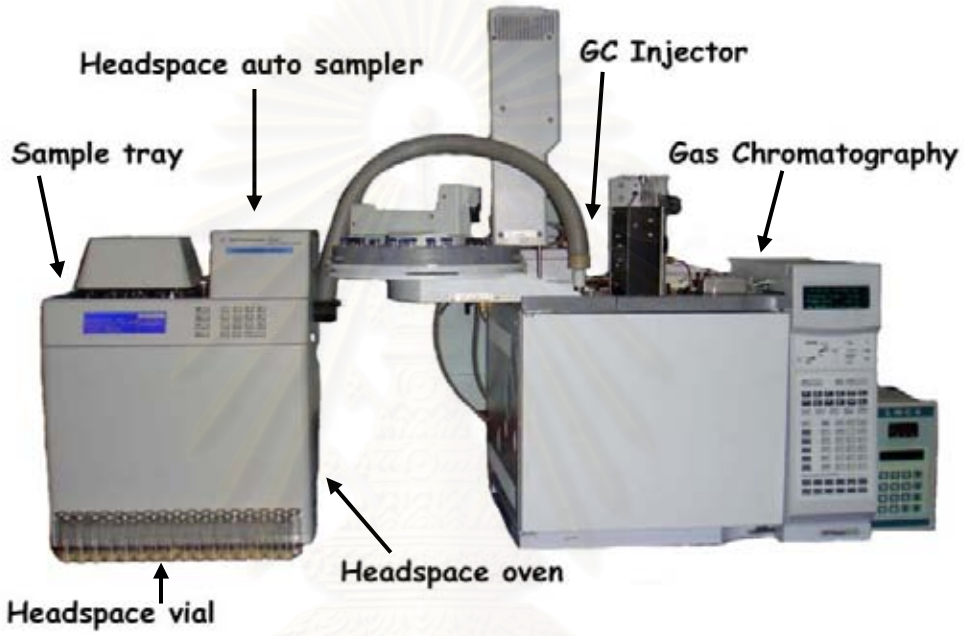
รูปที่ 2.4 ปฏิกิริยาการเกิดสาร 2AP จาก proline

ที่มา : Yoshihashi และคณะ (2002)

สุกัญญา วงศ์พรชัย (2544) ศึกษาเทคนิคในการวิเคราะห์ปริมาณสารหอม 2AP ในข้าวดิบด้วยวิธีทางเคมีโดยการสกัดด้วยสารละลายกรด ในข้าว 3 พันธุ์ ได้แก่ ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 , ข้าวพันธุ์หอมพม่า และข้าวพันธุ์หอมคลองหลวง พบว่า ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 มีปริมาณสารหอม 2AP มากที่สุดคือ 0.352 ppm รองลงมาเป็นข้าวพันธุ์หอมพม่า คือ 0.288 ppm และข้าวพันธุ์หอมคลองหลวง มีปริมาณสารหอม 2AP น้อยที่สุดคือ 0.022 ppm

วิธีการหาปริมาณสารหอม 2AP โดยเทคนิค Headspace Gas chromatography

เทคนิค Headspace Gas chromatography (HS-GC) เป็นเทคนิคที่เหมาะสมกับการวิเคราะห์สารระเหยในตัวอย่างต่างๆ ไม่ว่าตัวอย่างนั้นจะเป็นของเหลว เช่น สารสกัดในตัวทำละลาย หรือของแข็งในสภาพเดิมของตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการที่ว่าสารระเหยที่อยู่ในตัวอย่างและบรรจุในขวดปิดสนิทถูกทำให้ระเหยออกมาอยู่ในที่ว่างเหนือตัวอย่าง (headspace) จนเกิดสมดุลกับตัวอย่าง จากนั้นนำไอของตัวอย่างไปวิเคราะห์อย่างต่อเนื่องและอัตโนมัติด้วยเครื่อง GC ต่อไป (สุกัญญา วงศ์พรชัย, 2547) ส่วนประกอบของเครื่องแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ส่วนประกอบของเครื่อง Headspace Gas Chromatography ของบริษัท Agilent Technologies

เทคนิค HS-GC เกิดจากการรวมเอาเทคนิคการวิเคราะห์แบบ headspace กับเทคนิคที่เหมาะสมในการวิเคราะห์สารระเหย คือ Gas Chromatography (GC) เข้าด้วยกัน สำหรับการพัฒนาเทคนิค HS-GC ในการวิเคราะห์สารหอมในข้าวมีข้อได้เปรียบคือ สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างเมล็ดข้าวได้โดยตรง โดยไม่ต้องสกัดสารหอมให้มาอยู่ในตัวทำละลาย จึงช่วยลดขั้นตอนในการสกัดสาร 2AP จากตัวอย่างข้าว และประหยัดทั้งเวลาและสารเคมี เพียงแต่ต้องมีการต่ออุปกรณ์เพิ่มเติมเข้ากับเครื่อง GC คือเครื่องดูดไอระเหยของตัวอย่างแบบอัตโนมัติ headspace auto sampler (สุกัญญา วงศ์พรชัย, 2547) ซึ่งวิธีการวิเคราะห์ปริมาณสาร 2AP ในเมล็ดข้าวด้วยวิธี HS-GC นี้ เป็นวิธีการวิเคราะห์ที่สามารถทำได้ง่ายในห้องปฏิบัติการ ในส่วนของความแม่นยำของเทคนิค พบว่า ถ้าควบคุมปริมาณความชื้นของตัวอย่างข้าว ไม่ให้มีความแตกต่างของความชื้นระหว่างตัวอย่างมากนัก จะได้ผลการวิเคราะห์ที่มีสภาพไวที่สูงและมีความแม่นยำดี

2.3 การลดความชื้นข้าวเปลือก

หลังจากเก็บเกี่ยวและนวดข้าวจะได้ข้าวเปลือกซึ่งยังคงมีความชื้นในเมล็ดสูง การลดความชื้นเมล็ดจึงมีความสำคัญต่ออายุการเก็บรักษา อัตราการเสื่อมคุณภาพ การเข้าทำลายของแมลงศัตรูในโรงเก็บ และเชื้อรา ดังนั้นหลังจากเก็บเกี่ยวและนวดจะต้องรีบตากหรือลดความชื้นเมล็ดให้แห้งโดยเร็วที่สุด เพื่อลดอัตราการหายใจของเมล็ด และลดการเกิดเชื้อราซึ่งเป็นสาเหตุให้เมล็ดเสื่อมคุณภาพเร็วยิ่งขึ้น (กิติยา กิจควรดี, 2547) วิธีการลดความชื้นข้าวเปลือกที่ใช้มี 2 วิธี ได้แก่

2.3.1 วิธีธรรมชาติ (Natural drying or sun drying)

เป็นการใช้แสงอาทิตย์เป็นแหล่งความร้อน โดยมีการเคลื่อนที่ของอากาศเป็นตัวช่วยพาความชื้นออกจากเมล็ด ทำให้ความชื้นของเมล็ดลดลง เป็นวิธีการที่นิยมใช้เนื่องจากประหยัด ไม่ยุ่งยาก และได้ผลดี แต่ในบางสถานการณ์ เช่น ฤดูฝน ไม่สามารถใช้วิธีนี้ได้ ต้องใช้แรงงาน และพื้นที่ในการตากมาก รวมทั้งไม่สามารถควบคุมคุณภาพของข้าวที่ต้องการลดความชื้นได้ โดยเฉพาะเมื่อตากข้าวไว้ในนา และยังมีการสูญเสียเกิดขึ้นในขณะตากสูง จากการทำลายของนก หนู และแมลง การตากโดยวิธีธรรมชาติ มีวิธีปฏิบัติ 2 แบบ คือ

2.3.1.1 ตากข้าวทิ้งไว้ในนาหลังการเก็บเกี่ยว

เป็นการตากข้าวเปลือกทั้งรวงก่อนนำไปนวด การตากทิ้งไว้ในนาอาจถูกนก หนู และแมลงศัตรูทำลายขณะตาก ในเวลากลางวันข้าวได้รับอุณหภูมิสูงจากแสงแดด ทำให้ความชื้นของข้าวเปลือกลดต่ำลง ข้าวจะแห้ง แต่ในเวลากลางคืนอุณหภูมิของอากาศต่ำลงและมีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศสูง เนื่องจากมีน้ำค้างหรือฝนตก ข้าวจะดูดความชื้นกลับเข้าไปใหม่ การเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในเมล็ดข้าวแห้งและชื้นสลับกันไป ทำให้เมล็ดเกิดการแตกร้าวขึ้น เมื่อนำข้าวไปนวดและขัดสีจะเกิดการแตกหัก ทำให้ได้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นต่ำ แสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 คุณภาพการสีของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่เก็บเกี่ยวแล้วตากเพื่อลดความชื้นในนาเป็นเวลา 0, 2, 4 และ 6 วัน

ตากข้าวในนา (วัน)	ความชื้นเมล็ดก่อนนวด (%db)	เปอร์เซ็นต์ข้าวต้น
0 (ไม่ตาก)	26.6	49.2
2	17.6	47.2
4	14.9	40.1
6	19.0	35.7

ที่มา : กิติยา กิจควรดี (2547)

2.3.1.2 ตากในลานหลังนวดข้าวเสร็จแล้ว

การตากเฉพาะเมล็ดข้าวเปลือกเป็นวิธีที่เหมาะสมกว่า เพราะจะช่วยลดความเสียหายของข้าวได้ดีกว่าการตากข้าวทั้งรวงไว้ในนา โดยจะเก็บเกี่ยวข้าวแล้วนวดทันที เพราะใช้รถเกี่ยวนวด หลังจากนั้นจะขายข้าวที่มีความชื้นสูงให้พ่อค้าหรือโรงสี เพื่อให้โรงสีนำข้าวเปลือกไปลดความชื้นโดยการตากบนลานหรือใช้เครื่องอบแห้งต่อไป การตากควรมีวัสดุที่สะอาดและแห้งรองรับ เช่น ผ้าใบหรือเสื่อที่สานด้วยไม้ไผ่ ไม่ควรตากกับพื้นซีเมนต์หรือถนนโดยตรง เพราะเมล็ดอาจได้รับความร้อนจากพื้นสูงเกินไป ทำให้เมล็ดแตกร้าว ความหนาของชั้นข้าวไม่ควรเกิน 5 เซนติเมตร ถ้าหากหนาเกินไปการระบายอากาศในกองไม่ดีทำให้ข้าวแห้งช้า ถ้าบางเกินไปจะทำให้เมล็ดข้าวมีอุณหภูมิสูง ข้าวจะเกิดการแตกร้าวเมื่อนำไปสี และควรมีการกลับกองข้าวทุกๆ 2 ชั่วโมง หรือวันละ 4 ครั้ง จะช่วยให้ลดความชื้นได้รวดเร็วขึ้น และในเวลากลางคืนควรมีวัสดุปกคลุมเพื่อป้องกันน้ำค้างหรือน้ำฝน

2.3.2 **การใช้เครื่องอบแห้ง** (Artificial drying)

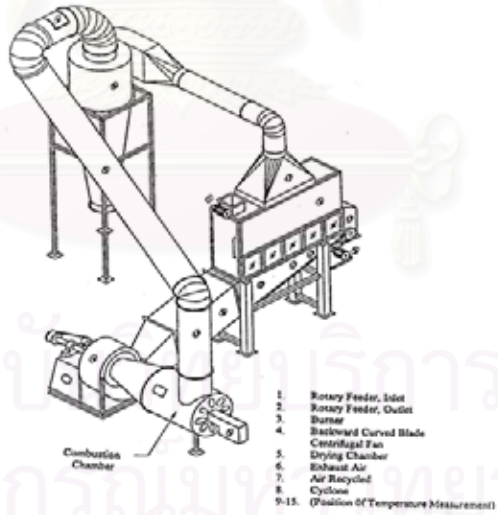
วิธีนี้มีข้อดีคือ สามารถปฏิบัติได้ทุกสภาวะอากาศไม่ว่าฝนจะตกหรือมีแสงแดดน้อย ไม่ต้องเปลืองลานตาก สามารถควบคุมการลดความชื้นให้อยู่ในระดับที่ต้องการได้อย่างถูกต้อง ใช้ระยะเวลาลดความชื้นไม่มากและยังสามารถควบคุมป้องกันความเสียหายต่อคุณภาพข้าวได้ดีกว่าวิธีธรรมชาติ แต่มีข้อเสียคือ ค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง และมีข้อปฏิบัติยุ่งยากกว่า โดยชนิดของเครื่องอบแห้งที่ใช้ในการลดความชื้นของเมล็ดพืช แบ่งได้เป็น 2 ชนิด (พิพัฒน์ อมตฉายา, 2538; ณัฐพล ภูมิสะอาด, 2540; นเรศ มีโส, 2541; คงศักดิ์ ชินนาบุญ, 2543; ขุนพล สังข์อารียกุล, 2544) ได้แก่

1. เครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชอยู่กับที่ (Fixed-bed dryer)
   (1) การอบแห้งในถังเก็บ
   (2) การอบแห้งแบบเป็นชั้น
   (3) การอบแห้งแบบเป็นงวด
2. เครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชไหล (Moving-bed dryer)
   (1) เครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชไหลขวางกับทิศทางการไหลของอากาศ
   (2) เครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชไหลตามทิศทางการไหลของอากาศ
   (3) เครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชไหลสวนทางกับทิศทางการไหลของอากาศ
   (4) เครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชไหลคลุกเคล้า (LSU) (Continuous – flow dryer)
   (5) เครื่องอบแห้งแบบถังหมุนเวียน (Recirculating batch dryer)
   (6) เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด (Fluidized bed dryer)

ขุนพล สังข์อารียกุล (2544) ได้ประเมินสถานภาพการใช้เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบต่าง ๆ ในประเทศไทย พบว่า เครื่องอบแห้งที่มีการใช้งานมากที่สุดและมีกำลังการผลิตรวมมากที่สุด คือ เครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชไหลคลุกเคล้า (LSU) รองลงมาคือ เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด และเครื่องอบแห้งที่ผู้ประกอบการโรงสีพอใจในสมรรถนะโดยรวมมากที่สุด คือ เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการทำงานสูง และใช้เวลาในการอบแห้งสั้น (Soponronnarit, 1996) ในส่วนของงานวิจัยต่าง ๆ พบว่า มีการศึกษาการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันร่วมกับการ tempering ในด้านคุณภาพการสี แต่ยังไม่มีงานวิจัยที่ศึกษาในด้านปริมาณสารหอมระเหยในข้าว ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เครื่องอบแห้งชนิดนี้ และกล่าวเฉพาะรายละเอียดของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดเท่านั้น

2.4 **เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด** (Fluidized bed dryer)

มีการนำมาใช้งานในทางอุตสาหกรรมตั้งแต่ปี 1995 ลักษณะของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดที่ใช้ในทางอุตสาหกรรม แสดงในรูปที่ 2.6 เครื่องอบแห้งแบบนี้สามารถอบลดความชื้นในช่วงความชื้นสูงได้ดี (มากกว่า 30 %db) ความชื้นของเมล็ดพืชขณะไหลออกจากเครื่องไม่ควรต่ำกว่า 23 %db และในช่วงความชื้นต่ำไม่สามารถใช้อบได้ เนื่องจากจะทำให้คุณภาพการสีของข้าวเปลือกลดลง จึงจำเป็นต้องใช้ระบบอบแห้งอื่น ๆ มาอบในช่วงความชื้นต่ำ (Soponronnarit, 1996)



รูปที่ 2.6 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดที่ใช้ในระดับอุตสาหกรรม

ที่มา : Soponronnarit (1996)

2.4.1 **หลักการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชัน** (Fluidization drying)

เป็นกระบวนการที่ของแข็งซึ่งมีลักษณะเป็นเม็ดหรือชิ้น สัมผัสกับของไหลแล้วทำให้ของแข็งนั้นมีพฤติกรรมคล้ายของไหล ของแข็งนั้นอยู่บนตะแกรงในหอทดลอง แล้วจะปล่อยของไหลที่เป็นก๊าซหรือของเหลวให้ผ่านมาทางด้านล่างของตะแกรงที่รองรับของแข็งอยู่ ของไหลก็จะ

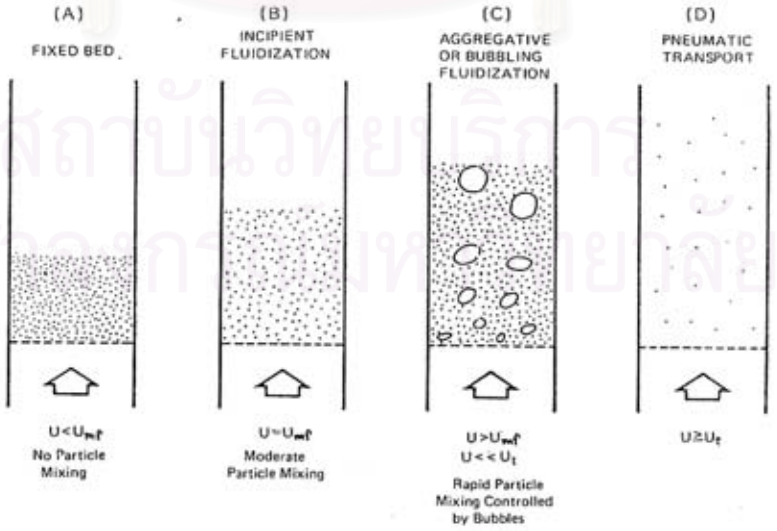
ไหลผ่านชั้นของแข็ง แล้วไหลออกทางส่วนบนของหอทดลอง เมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลให้มากขึ้นเรื่อยๆ จนในที่สุดจะเห็นของแข็งขยับตัวและลอยตัวขึ้นอย่างเป็นอิสระไม่เกาะติดกัน โดยความเร็วของของไหลจะต้องมีค่ามากพอที่จะเอาชนะแรงโน้มถ่วงของของแข็ง ทำให้เม็ดของแข็งลอยอยู่ในอากาศได้จนมีคุณสมบัติคล้ายของไหล คือมีการไหลหมุนเวียนของเม็ดของแข็งภายในหอทดลอง เรียกว่าการเกิดฟลูอิไดซ์เบด (สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ, 2528) ซึ่งความเร็วของอากาศที่ใช้ขึ้นอยู่กับความหนาแน่น ขนาด และรูปร่างของเม็ดของแข็ง ลักษณะของการเกิดฟลูอิไดซ์เบด ดังแสดงในรูปที่ 2.7 จะเห็นได้ว่าอาณาเขตในห้องอบแห้งที่มีปริมาณเม็ดของแข็งบรรจุอยู่ ไม่ว่าของแข็งนั้นจะอยู่นิ่งหรือเคลื่อนไหวด้วยของไหล ซึ่งจะเริ่มนับตั้งแต่แผ่นตะแกรงรองรับเม็ดของแข็งจนถึงระดับสูงสุดที่ผิวของเม็ดของแข็งลอยอยู่ จะเรียกว่า เบด (bed)

เบดนิ่ง (Fixed bed) เกิดขึ้นเมื่อเม็ดของแข็งถูกบรรจุเข้าไปในห้องอบแห้ง และเริ่มปล่อยของไหลผ่านขึ้นไปทางด้านบนของตะแกรงในห้องอบแห้ง ขณะที่ของไหลยังมีความเร็วน้อย เม็ดของแข็งจะไม่ขยับตัว

ฟลูอิไดซ์เบดหนาแน่น (Densed phase fluidized bed) เกิดขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลให้มากขึ้นจนทำให้เม็ดของแข็งขยับลอยตัวอย่างอิสระ ทำให้เบดขยายตัวเพิ่มขึ้น แต่เม็ดของแข็งยังชิดกันมาก ดูเหมือนว่ายังจับกันเป็นกลุ่มก้อน

ฟลูอิไดซ์เบดเจือจาง (Diluted phase fluidized bed) เกิดขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วให้กับของไหลอีกจนทำให้เม็ดของแข็งลอยตัวมากขึ้น ระยะห่างระหว่างเม็ดของแข็งมีมากขึ้น

การถูกพัดพาของเบด (Lean phase fluidized bed) เกิดขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลขึ้นอีก เม็ดของแข็งจะถูกพัดพาออกจากเบด ติดไปกับของไหล และหลุดออกไปจากห้องอบแห้ง หรืออาจเรียกว่าการขนถ่ายด้วยอากาศ (pneumatic transport)



รูปที่ 2.7 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด

ที่มา : Hovmand (1987)

จากรูปที่ 2.7

U = ความเร็วของของไหล

U_{mf} = Minimum fluidizing velocity

= ความเร็วต่ำสุดของการเกิดสภาวะเสมือนของไหลเป็นความเร็วของของไหลที่ทำให้อนุภาคของแข็งเริ่มเกิดการลอยตัว

U_t = Terminal velocity of particles

= ความเร็วสุดท้ายของอนุภาค เป็นความเร็วที่ทำให้อนุภาคไหลออกไปจากหอทดลองพร้อมกับของไหล

ข้อดีของการอบแห้งโดยใช้เทคนิคฟลูอิไดเซชัน (Soponronnarit ,1996)

(1) วัสดุถูกทำให้ลอยตัวทำให้มีโอกาสสัมผัสกับอากาศร้อนมากกว่าเครื่องอบแห้งชนิดอื่น จึงเกิดการถ่ายเทความร้อนมากกว่า

(2) เนื่องจากมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าเครื่องอบแห้งชนิดอื่น ทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่า และสามารถเพิ่มอุณหภูมิของอากาศที่ใช้อบได้สูงกว่าโดยไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่อวัสดุ

(3) วัสดุมีการเคลื่อนที่คล้ายกับของไหล จึงทำให้สามารถนำมาใช้ทำงานแบบระบบต่อเนื่องได้

(4) วัสดุมีการคลุกเคล้าผสมผสานกันระหว่างการอบ ทำให้คุณภาพของวัสดุหลังการอบแห้งมีคุณภาพใกล้เคียงกัน

(5) สามารถกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่ติดมากับเม็ดของแข็งได้ง่าย โดยสิ่งปนเปื้อนที่มีน้ำหนักเบาจะลอยตามไปกับของไหล ส่วนสิ่งปนเปื้อนที่มีน้ำหนักมากก็จะค้างอยู่บนตะแกรง

(6) ตัวเครื่องอบแห้งมีขนาดเล็ก เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งชนิดอื่น ๆ ที่ใช้ในการอบแห้งข้าวเปลือก ทำให้ต้นทุนในการสร้างเครื่องต่ำลง และใช้พื้นที่ติดตั้งน้อย

(7) ลดปัญหาการซ่อมบำรุงรักษา เพราะของแข็งเคลื่อนที่ด้วยแรงลมเป่าแทนการเครื่องที่ด้วยสายพานหรือเครื่องจักร

ข้อเสียของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดเซชัน (Soponronnarit ,1996)

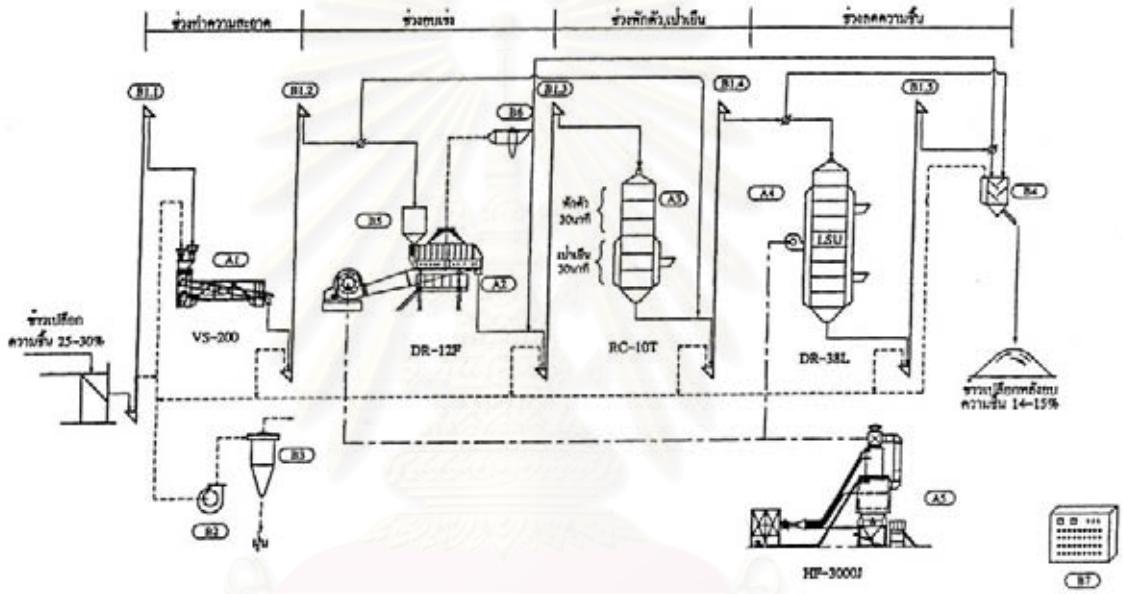
(1) ขนาดของวัสดุมีผลต่อความเร็วของอากาศที่ทำให้เกิดฟลูอิไดซ์เบด

(2) เมื่อคำนวณความเร็วที่เหมาะสมสำหรับวัสดุที่ใช้ทดลองได้แล้ว ไม่สามารถปรับความเร็วเพิ่มหรือลดได้ เนื่องจากถ้าใช้ความเร็วมากเกิน ไปวัสดุจะหลุดลอยออกจากหอทดลองไป แต่ถ้าความเร็วน้อยเกินไปจะไม่เกิดลักษณะของฟลูอิไดซ์เบด

(3) ไม่สามารถใช้กับวัสดุที่เปียกหรือเป็นยางได้ เพราะจะเกิดการเกาะกันเป็นก้อนใหญ่และไหลตกลงมายังส่วนล่างของเบด

2.5 **การเทมเปอริง** (Tempering)

เป็นการนำข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งแล้วมาเก็บในภาชนะที่ปิดสนิท ซึ่งมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกภายหลังการอบแห้งทันที เพื่อให้ความชื้นแพร่จากภายในเมล็ดมาที่ผิวของเมล็ด แต่ต้องไม่เกิดการแพร่ออกสู่บรรยากาศภายนอก (ณัฐพล ภูมิสะอาด, 2540) ในอุตสาหกรรมการอบแห้งข้าวเปลือกมีขั้นตอนการพักข้าว (tempering) โดยจะเก็บในลักษณะของถังพักขนาดใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 จะเห็นได้ว่ามีขั้นตอนในการพักข้าวเปลือกในถังพักคั่นกลางระหว่างขั้นตอนการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด กับการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชไหลคลุกเคล้า (LSU)



รูปที่ 2.8 แผนผังขั้นตอนการอบแห้งข้าวเปลือกในอุตสาหกรรม
ที่มา : เอกรินทร์ โบษกรนัฏ (2545)

เนื่องจากการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันทำให้ความชื้นของข้าวเปลือกลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้ข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งแล้ว มีความชื้นที่บริเวณผิวเมล็ดแตกต่างกับภายในแกนกลางเมล็ดมาก โดยที่ภายในเมล็ดจะมีความชื้นมากกว่า ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีกระบวนการ tempering โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

1. เพื่อให้ความชื้นภายในเมล็ดแพร่ออกมาที่ผิวของเมล็ด ทำให้มีความชื้นที่บริเวณผิวนอกของเมล็ดมากขึ้น ความแตกต่างของความชื้น (moisture gradient) จึงลดลง เมื่อนำมาผ่านกระบวนการลดความชื้นในขั้นตอนต่อไปจะสามารถพาความชื้นออกไปได้ง่ายกว่า จึงช่วยลดความชื้นได้รวดเร็วกว่าข้าวเปลือกที่ไม่ผ่านการ tempering (ณัฐพล ภูมิสะอาด, 2540)

2. ทำให้อุณหภูมิและความชื้นที่ผิวและแกนกลางเมล็ดแตกต่างกันน้อยลง จึงช่วยลดการร้าวของเมล็ดข้าว ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการมีการขยายตัวของเม็ดแป้งที่ผิวนอก และการหดตัวของเม็ดแป้งภายในเกิดขึ้นพร้อม ๆ กัน เมล็ดข้าวที่มีรอยร้าว เมื่อนำไปขัดสีจะเกิดการแตกหัก ทำให้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นลดลง (Cnossen and Siebenmorgen, 2000) ดังนั้นการ tempering จึงช่วยให้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นเพิ่มขึ้นได้

3. การ tempering โดยใช้อุณหภูมิสูงกว่า 60°C จะทำให้เม็ดแป้งบางส่วนเกิดการหลอมเหลว (เกิด partial gelatinization) เมื่อเม็ดแป้งเย็นตัวลง เม็ดแป้งส่วนที่หลอมเหลวจะเชื่อมติดกันแน่นทำให้โครงสร้างภายในเมล็ดข้าวแข็งแรงขึ้น ทำให้สามารถเพิ่มเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นได้ (Cnossen, Jimenez and Siebenmorgen, 2003)

Steffe และ Singh (1980) Soponronnarit และคณะ (1999) Poomsa-ad และคณะ (2002) และ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, สมบูรณ์ เวชกามา และ ณัฐพล ภูมิสะอาด (2542) ได้เสนอว่าเมื่ออบแห้งข้าวเปลือกด้วยอุณหภูมิสูงกว่า100°Cระยะเวลาที่เหมาะสมในการ tempering ข้าวเปลือก ควรมีอย่างน้อย 30 นาที แต่ไม่ควรเกิน 1 ชั่วโมง และใช้อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกภายหลังการอบแห้ง เป็นอุณหภูมิสำหรับการ tempering เนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่ทำให้ได้ปริมาณข้าวต้นสูงที่สุด และระยะเวลาการ tempering ที่นานกว่านี้ไม่มีผลในการเพิ่มเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น แต่มีผลต่อความขาวของข้าว นอกจากนี้ยังพบว่าข้าวเปลือกที่ผ่านการ tempering จะมีปริมาณข้าวต้นมากกว่าข้าวที่ไม่ผ่านการ tempering

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันและการ tempering ต่อคุณภาพการสีและปริมาณสารหอมของข้าวเปลือก

ณัฐพล ภูมิสะอาด (2540) และสมชาติ โสภณรณฤทธิ์ และคณะ (2542) ศึกษาแนวทางในการลดความชื้นข้าวเปลือกที่ได้จากโรงสีข้าวคุ้งหลีจัน จังหวัดพระนครศรีอยุธยา แต่ไม่ทราบพันธุ์ข้าว ให้เหลือ 16.5% db โดยใช้กระบวนการ อบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชัน การเก็บในที่อับอากาศ และการเป่าด้วยอากาศแวดล้อม โดยพิจารณาจากระยะเวลาที่ใช้ทั้งหมด และคุณภาพการสีของข้าวเปลือกภายหลังผ่านทั้งสามกระบวนการ แล้วพบว่า เมื่อผ่านทั้งสามกระบวนการสามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้น 33 %db ลงได้จนถึงประมาณ 16.5 %db โดยใช้เวลาทั้งหมด 53 นาที เริ่มต้นจากการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด 3 นาที จนได้ความชื้นเหลือประมาณ 19.5 %db นำไปเก็บในที่อับอากาศ 30 นาที และเป่าด้วยอากาศแวดล้อมด้วยความเร็วของอากาศประมาณ 0.15 m/s ที่ความสูงเบด 3.0 cm เป็นเวลา 20 นาที โดยคุณภาพการสีในด้านเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น และความขาวของข้าวสารอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ใน

ส่วนของระยะเวลาในการเก็บในที่อับอากาศจะขึ้นอยู่กับความชื้นที่ลดลงในช่วงการอบแห้ง ระยะเวลาดังกล่าวควรมีอย่างน้อยประมาณ 30 นาที แต่ไม่ควรเกิน 1 ชั่วโมง โดยพบว่าความขาวของเมล็ดข้าวสารแปรผกผันกับระยะเวลาในการเก็บในที่อับอากาศ ความขาวที่อยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้อยู่ในช่วงระยะเวลาไม่เกิน 1 ชั่วโมง และความขาวของเมล็ดข้าวสารไม่ขึ้นอยู่กับความเร็วของอากาศในช่วงการเป่าด้วยอากาศแวดล้อม แต่การเก็บข้าวเปลือกในที่อับอากาศมีส่วนช่วยให้ปริมาณข้าวต้นเพิ่มขึ้นและลดความชื้นในช่วงการเป่าด้วยอากาศแวดล้อมได้มากขึ้น

อดิเทพ ทวีรัตนพาณิชย์ (2540) สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ และคณะ (2541) และ อดิเทพ ทวีรัตนพาณิชย์ และคณะ (2542) ได้ศึกษาผลของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันที่อุณหภูมิอากาศอบแห้งสูง 140 และ 150°C พบว่า ช่วงความชื้นเริ่มต้นที่สามารถเพิ่มปริมาณข้าวต้นให้สูงขึ้นได้อยู่ระหว่าง 30 – 45 %db โดยเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นเริ่มต้นสูงขึ้น และช่วงที่สามารถเพิ่มปริมาณข้าวต้นได้สูงสุด คือ เมื่ออบแห้งจนเหลือความชื้นสุดท้าย 23.5 – 28 %db และเมื่ออบแห้งจนมีความชื้นสุดท้ายต่ำกว่า 23.5 %db ปริมาณข้าวต้นลดลง โดยข้าวที่ผ่านการ tempering ที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง มีปริมาณข้าวต้นสูงกว่าข้าวที่ไม่ผ่านการ tempering นอกจากนี้ ความขาวของข้าวสารส่วนใหญ่ผ่านเกณฑ์ (ไม่ควรมีค่าต่ำกว่า 37 เมื่อวัดด้วยเครื่องวัดความขาว Kett C-300) แต่ความขาวของข้าวสารจะลดลงจนอาจเป็นปัญหาในการซื้อขาย ถ้าอุณหภูมิที่ใช้ในการ tempering มากกว่า 60°C เนื่องจากการ tempering เป็นการยืดเวลาให้ข้าวเปลือกอยู่ในสภาพที่มีอุณหภูมิสูง ความร้อนจะไปเร่งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่มีเอนไซม์เข้ามาเกี่ยวข้องให้มากขึ้น ดังนั้นข้าวที่ผ่านการ tempering จึงเปลี่ยนสีจากสีขาวเป็นสีเหลืองมากขึ้น ความยอมรับในการบริโภคข้าวที่ไม่ผ่านการ tempering มีลักษณะไม่แตกต่างจากข้าวอ้างอิง ขณะที่ข้าวที่ผ่านการ tempering จะมีปัญหาเรื่องกลิ่นเหม็นของข้าวที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการรักษาระดับอุณหภูมิของเมล็ดข้าวให้อยู่ในสภาพที่มีอุณหภูมิสูงสามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันทำให้เกิดกลิ่นเหม็นภายในเมล็ดข้าว

ณัฐพล ภูมิสะอาด (2544) ศึกษาการออกแบบระบบอบแห้งข้าวเปลือกในโรงสีข้าวที่เหมาะสมที่สุดโดยศึกษาหาระบบอบแห้งและเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสมสำหรับการลดความชื้นข้าวเปลือกให้เหลือประมาณ 16.5 %db โดยใช้การศึกษาทั้งทางการทดลองและทางทฤษฎีการอบแห้ง ในแต่ละระบบอบแห้งประกอบด้วยกระบวนการหลัก 3 กระบวนการ ได้แก่ การอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชัน การ tempering และการเป่าด้วยอากาศแวดล้อม เกณฑ์ในการพิจารณาระบบอบแห้งและเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสม คือ มีสมรรถนะในการอบแห้งสูง การใช้พลังงานต่ำ และคุณภาพข้าวเปลือกในด้านปริมาณข้าวต้นและความขาวอยู่ในเกณฑ์ดี ด้วย

ระยะเวลาในการทำงานรวมสั้นกว่า จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งไม่ควรสูงกว่า 150°C , ความชื้นหลังการอบแห้งในช่วงแรกไม่ควรต่ำกว่า 22.5 %db และระยะเวลาในการ tempering ควรมีอย่างน้อย 25 นาที และจากการเปรียบเทียบระบบอบแห้งทั้ง 3 แบบ (ตารางที่ 2.3) พบว่า ระบบอบแห้งที่เหมาะสมคือ ระบบอบแห้งที่ 2 เนื่องจากทำให้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นสูงกว่าและมีความขาวมากกว่าตัวอย่างควบคุม ส่วนระบบอบแห้งที่ 1 ให้ผลด้านเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นสูงที่สุด แต่ให้ผลด้านความขาวต่ำกว่าตัวอย่างควบคุม แต่ทั้งนี้ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ในทางการค้า ส่วนระบบอบแห้งที่ 3 ให้ผลในด้านความขาวค่อนข้างต่ำกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้ทางการค้า (ความขาวมีค่าต่ำกว่า 37 เมื่อวัดด้วยเครื่องวัดความขาว Kett C-300) และให้ผลด้านเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นต่ำกว่าตัวอย่างควบคุม

ตารางที่ 2.3 สภาวะการอบแห้งที่ทำให้ได้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นที่มากที่สุดในแต่ละระบบอบแห้ง

ระบบที่	ขั้นตอนที่ 1	tempering	ขั้นตอนที่ 2	เปอร์เซ็นต์ข้าวต้น	ความขาวของข้าว
1	FBD150°C 3 min	30 min	Ventilation 20 min	52.46	40.1
2	FBD150°C 1.5 min Tempering 15 min Ventilation 30 min	15 min	FBD150°C 1 min Tempering 15 min Ventilation 30 min	52.17	48.7
3	FBD150°C 2 min	15 min	FBD130°C 1.5 min Tempering 15 min Ventilation 30 min	40.1	37.0

ที่มา : ณัฐพล ภูมิสะอาด (2544)

โดย

FBD (Fluidized Bed Drying) = การอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดซ์เบด

Ventilation = การเป่าด้วยอากาศแวดล้อม

ความชื้นเริ่มต้น 35 %db ความสูงเบด 10 cm. ความเร็วลมของอากาศอบแห้ง 2.3 m/s

อุณหภูมิในการ tempering = อุณหภูมิของเมล็ด ความชื้นสุดท้าย 16.5 %db

ความเร็วลมของการเป่าอากาศแวดล้อม 0.125 m/s

เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นของตัวอย่างควบคุม 47.6% ความขาวของตัวอย่างควบคุม 45.5

บุญมี ศิริ และคณะ (2546) ศึกษาผลของวิธีการลดความชื้นข้าวหอมมะลิ 105 ที่มีต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น และดัชนีความขาวของข้าว โดยใช้วิธีการลดความชื้น 6 วิธี คือ การใช้เครื่องลดความชื้นชนิดลมแห้งที่อุณหภูมิ 30 และ 40°C เครื่องลดความชื้นชนิดลมร้อนที่อุณหภูมิ 40, 50 และ 70°C และการตากแดด หลังจากลดความชื้นแล้วตรวจวัดเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น และค่าดัชนี

ความขาวของข้าว ผลการทดลองพบว่าการใช้เครื่องลดความชื้นชนิดลมแห้ง และการใช้เครื่องลดความชื้นชนิดลมร้อนที่อุณหภูมิ 40 และ 50°C ทำให้มีเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น และดัชนีความขาวของข้าว มากกว่าการใช้เครื่องลดความชื้นชนิดลมร้อนที่อุณหภูมิ 70°C และการตากแดด จากนั้นบรรจุข้าวเปลือกลงในถุงปุ๋ย เก็บรักษาไว้ในห้องที่ไม่มีการควบคุมสภาพแวดล้อมนาน 11 เดือน พบว่า เมื่อเก็บรักษาข้าวเปลือกไว้นานมากขึ้น ทำให้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้น และดัชนีความขาวของข้าวลดลงทุกวิธีการลดความชื้น แต่การลดความชื้นด้วยลมแห้ง และการลดความชื้นด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 40 และ 50°C ยังคงค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น และดัชนีความขาวของข้าวมากกว่าการลดความชื้นด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 70°C และการตากแดด

สุภาวรรณ ฏิระวณิชย์กุล และคณะ (2546) ได้ศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดที่มีผลต่อ เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นและความขาวของข้าวสุพรรณบุรี1 (มีปริมาณแอมิโลสสูง คือประมาณ 27 %) และข้าวปทุมธานี 1 (มีปริมาณแอมิโลสต่ำ อยู่ในช่วง 14–17.8 %) โดยอบแห้งข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้น 25.6–33 %db ด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันที่อุณหภูมิตั้งแต่ 40–150°C จนมีความชื้นสุดท้าย 22 %db จากนั้นนำข้าวเปลือกไป tempering เป็นเวลา 30 นาที แล้วจึงนำข้าวเปลือกไปลดความชื้นในรอบที่ 2 ด้วยการเป่าด้วยอากาศแวดล้อม จนมีความชื้นสุดท้าย 16 %db พบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิ 40 – 90°C ไม่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นและความขาวของข้าว ในขณะที่ข้าวที่อบแห้งด้วยอุณหภูมิสูงกว่า 90°C ขึ้นไปมีค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นเพิ่มขึ้นและค่าความขาวลดลงเล็กน้อย และสามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งไม่ทำให้สมบัติทางกายภาพส่วนใหญ่เปลี่ยนแปลงยกเว้นค่าความขาวของข้าวเมื่ออบแห้งด้วยอุณหภูมิสูง

พรรณนิภา สืบราช และคณะ (2549) ศึกษาอิทธิพลของการลดความชื้นต่อปริมาณสาร 2AP ในข้าวหอมพันธุ์ปทุมธานี 1 โดยใช้วิธีการลดความชื้นข้าวเปลือกที่ต่างกัน 3 วิธี ได้แก่ การตากแดด 10 ชั่วโมง, การใช้เครื่องสเปาเต็ดเบด อุณหภูมิ 115°C นาน 2 นาที ร่วมกับการทำ tempering เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นลดความชื้นด้วยตู้อบลมร้อนอุณหภูมิ 50°C นาน 7 ชั่วโมง และวิธีสุดท้ายเป็นการใช้เครื่องสเปาเต็ดเบด อุณหภูมิ 115°C นาน 2 นาที ร่วมกับการทำ tempering เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นลดความชื้นด้วยเครื่องสเปาเต็ดเบด อุณหภูมิ 110°C นาน 1 นาที พบว่า ข้าวเปลือกที่ผ่านการลดความชื้นด้วยวิธีการตากแดดมีปริมาณสารหอม 2AP 0.6025 ppm ข้าวเปลือกที่ลดความชื้นด้วยการใช้เครื่องสเปาเต็ดเบด อุณหภูมิ 115°C นาน 2 นาที ร่วมกับการทำ tempering เป็นเวลา 30 นาที และการลดความชื้นด้วยตู้อบลมร้อนอุณหภูมิ 50°C นาน 7 ชั่วโมงมีปริมาณสารหอม 2AP 0.1436 ppm ส่วนการใช้เครื่องสเปาเต็ดเบด

อุณหภูมิ 115°C นาน 2 นาที ร่วมกับการทำ tempering เป็นเวลา 30 นาที และการลดความชื้นด้วยเครื่องสเปาเต็ดเบด อุณหภูมิ 110°C นาน 1 นาที ทำให้ข้าวเปลือกมีปริมาณสารหอม 2AP 0.2995 ppm ซึ่งจะเห็นได้ว่าการลดความชื้นด้วยการตากแดดสามารถลดการสูญเสียปริมาณสาร 2AP ได้ดีกว่าการลดความชื้นโดยการใช้เครื่องอบแห้ง

Soponronnarit และ Prachayawarakorn (1994) ได้ศึกษาผลของการอบแห้งข้าวเปลือกความชื้นสูงด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชัน ทดลองอบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 100 , 130 และ 150°C จากความชื้นเริ่มต้น 42.5 %db ให้ลดลงเหลือความชื้นในระดับต่าง ๆ แล้วนำไปเป่าด้วยอากาศแวดล้อมต่อจนกระทั่งความชื้นลดลงเหลือ 15 – 16 %db พบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิ 150°C ทำให้ข้าวมีความขาวต่ำสุด ความเร็วของอากาศต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิไดซ์เบด คือ ประมาณ 1.65 m/s ความชื้นสุดท้ายของการอบแห้งไม่ควรต่ำกว่า 24 – 25 %db เพราะจะทำให้ข้าวแตกหักมากและมีสีคล้ำ

Soponronnarit และคณะ (1999) ได้ศึกษาผลของระยะเวลาในการ tempering ข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันต่อคุณภาพการสีของข้าวได้แก่ ปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ และความขาวสัมพัทธ์ของข้าว โดยอบแห้งข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้น 33 %db ด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันจนมีความชื้น 20–25 %db จากนั้นนำข้าวเปลือกไปผ่านการ tempering ที่เวลาต่าง ๆ ในช่วง 0–24 ชั่วโมงแล้วจึงนำข้าวเปลือกไปลดความชื้นในรอบที่ 2 ด้วยการเป่าด้วยอากาศแวดล้อม จนมีความชื้นสุดท้าย 16.5 %db พบว่า การอบแห้งที่มีการ tempering ทำให้การลดความชื้นในช่วงการเป่าด้วยอากาศแวดล้อมลดลงได้มากกว่าการอบแห้งที่ไม่มีการ tempering โดยสามารถลดลงได้มากกว่า 0.5–1 %db เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น พบว่าการอบแห้งที่มีการ tempering ทำให้ปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ (อัตราส่วนของข้าวต้นที่ได้จากการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดต่อข้าวต้นที่ได้จากการอบแห้งด้วยอากาศแวดล้อม โดยปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ที่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ทางการค้าต้องไม่ต่ำกว่า 80 %) เพิ่มขึ้นได้ ตามระยะเวลาในการ tempering ที่เพิ่มขึ้นในช่วง 1 ชั่วโมงแรก แต่หลังจากนั้นระยะเวลาในการ tempering ที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์ ช่วงเวลาที่เหมาะสมในการ tempering อยู่ระหว่าง 15–30 นาที เนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่ทำให้ได้ปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์สูงที่สุด คือมีปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์มากกว่าร้อยละ 120 และการ tempering นานกว่า 30 นาที ไม่มีผลทำให้ปริมาณข้าวต้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น ในส่วนของความขาวสัมพัทธ์ (อัตราส่วนของความขาวที่ได้จากการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดต่อความขาวที่ได้จากการอบแห้งด้วยอากาศแวดล้อม โดยความขาวของข้าวที่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ทางการค้าต้องไม่ต่ำกว่า 37 (หน่วยวัดของเครื่องวัดความขาว Kett C-300 ที่ calibrate เครื่องด้วย

Standard Pure White Barium oxide ที่มีความขาว 86 %) หรือมีความขาวสัมพัทธ์ไม่ต่ำกว่า80% พบว่าความขาวสัมพัทธ์มีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาในการ tempering เพิ่มขึ้น โดยความขาวสัมพัทธ์จะอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ถ้าใช้ระยะเวลาในการ tempering น้อยกว่า 1 ชั่วโมง การ tempering นานเกินกว่า 1 ชั่วโมงจะทำให้ข้าวมีความขาวลดลงมากจนต่ำกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้ และระยะเวลาการ tempering ที่เพิ่มขึ้นในช่วง 1 ชั่วโมงแรก ไม่มีผลต่อความขาวของข้าว

Sunthonvit, Srzednicki และ Craske (2003) ได้รายงานถึงผลของการอบแห้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 โดยใช้เทคนิคฟลูอิไดเซชันที่อุณหภูมิสูง 100, 125 และ 150°C จนความชื้นลดลงจาก 35 %db เหลือ 22 %db จากนั้นนำข้าวเปลือกมาลดความชื้นต่อโดยการอบแห้งด้วยอากาศแวดล้อม จนความชื้นลดลงเหลือ 15 – 16 %db แล้ววิเคราะห์ปริมาณสารหอมระเหยโดยเทคนิคการสกัดด้วยไอน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์แบบต่อเนื่องตามแบบของ Likens and Nikerson และวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเทคนิค gas chromatography-mass spectrometry พบว่า มีสารระเหยชนิดต่าง ๆ ถึง 44 ชนิด แต่สารประกอบหลักที่พบในข้าวหอมคือ 2AP และพบว่าจะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอบแห้ง โดยในตัวอย่างควบคุมพบสาร 2AP ในปริมาณ 0.0447 ppm ในขณะที่หลังการอบที่ 100, 125 และ 150°C พบสาร 2AP ในปริมาณ 0.0488, 0.0798 และ 0.1248 ppm ตามลำดับ ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าปริมาณสาร 2AP จะมีปริมาณมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้น โดยเฉพาะการอบแห้งที่ 150°C พบว่ามีปริมาณสูงสุด และมากกว่าตัวอย่างควบคุมเกือบ 3 เท่า สันนิษฐานว่าสาร 2AP เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา Maillard reaction

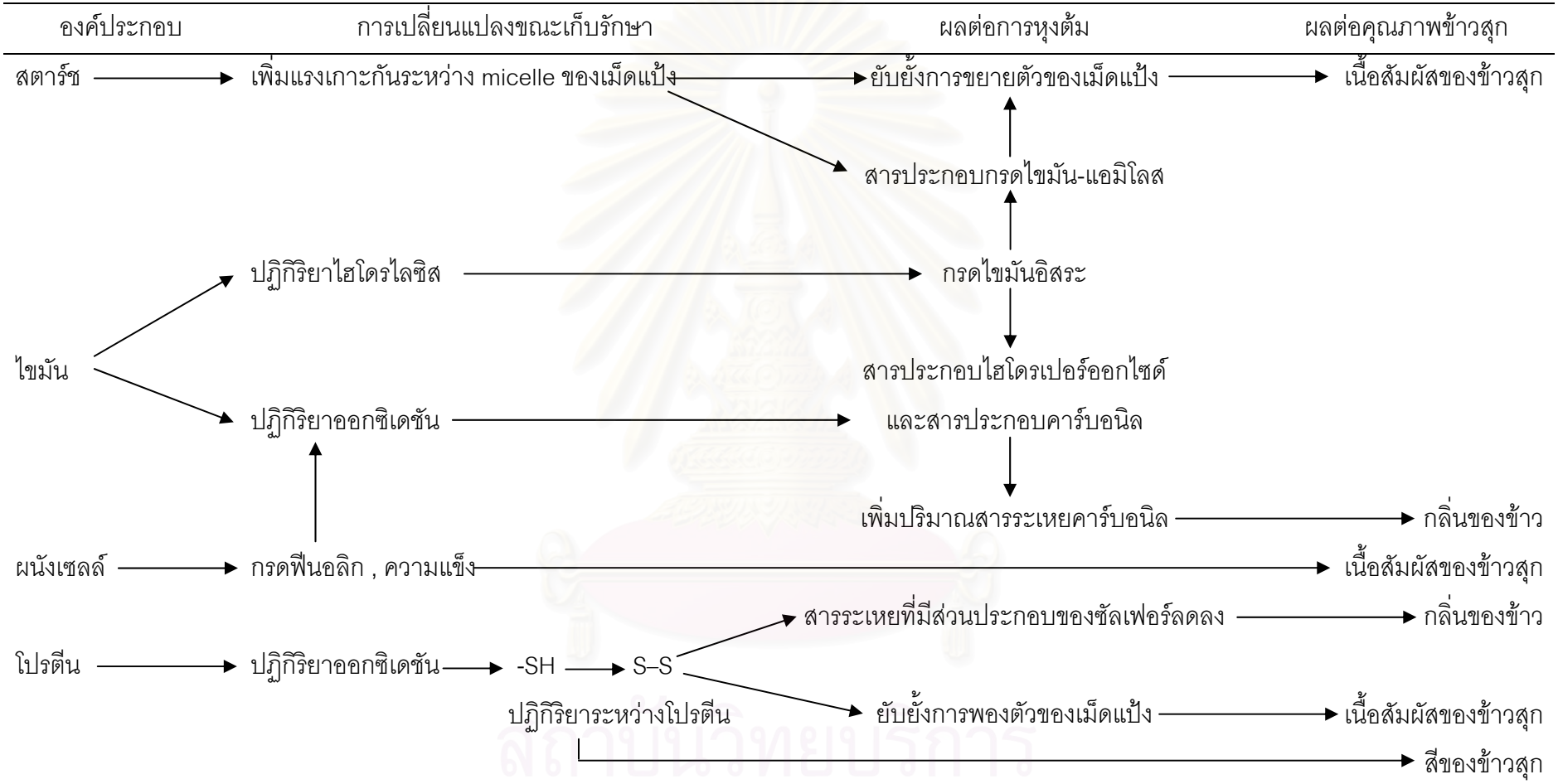
Wongpornchai, Dumri และ Jongkaewwattana (2004) ศึกษาผลของการอบแห้งด้วยวิธีต่าง ๆ และระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อปริมาณสารหอม 2AP และคุณภาพการสีของข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 โดยใช้วิธีการอบแห้ง 6 วิธี ได้แก่ การอบแห้งด้วย modified air ที่ 30 และ 40°C การอบแห้งด้วย hot air ที่ 40 , 50 และ 70°C และการตากแดด จนกระทั่งข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้น 39 %db ลดลงเหลือ 15 – 18 %db พบว่าการอบแห้งด้วย hot air ที่อุณหภูมิสูง 70°C จะให้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นเฉลี่ยต่ำสุดเท่ากับ 25.84% ส่วนการอบแห้งด้วย modified air ที่ 30 และ 40°C การอบแห้งด้วย hot air ที่ 40 และ 50°C มีเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นเฉลี่ยเท่ากับ 56.48% พบว่ามีค่าสูงกว่าเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นเฉลี่ยที่ได้จากการตากแดด ที่มีค่าเท่ากับ 53.64% ในส่วนของค่าความขาวของข้าวพบว่าการอบแห้งด้วย hot air ที่อุณหภูมิสูง 70°C และการอบแห้งด้วย modified air ที่ 30°C จะทำให้ความขาวของข้าวมีค่าต่ำ (44.30 และ 44.79%)

ตามลำดับ ส่วนวิธีที่เหลือให้ความขาวของข้าวอยู่ในช่วง 48 – 52% และการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงทำให้ปริมาณสารหอม 2AP ในข้าวเปลือกลดลงมากกว่าการอบแห้งด้วยอุณหภูมิต่ำ แสดงให้เห็นว่าความร้อนสูงเป็นปัจจัยที่ทำให้สารหอม 2AP ในข้าวระเหยมากขึ้น หลังจากนั้นเก็บรักษาข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งแล้วในถุงกระสอบที่อุณหภูมิ 20 – 35°C และความชื้นสัมพัทธ์ 70 – 85 % เป็นเวลา 10 เดือน พบว่าปริมาณสารหอม 2AP ในตัวอย่างข้าวจะลดลงตามระยะเวลาในการเก็บรักษา โดยในเดือนที่ 1 ปริมาณสาร 2AP มีค่าเท่ากับ 4.02 ppm ในเดือนที่ 4 มีค่าเท่ากับ 1.88 ppm และลดลงเหลือ 0.89 ppm ในเดือนที่ 10

2.7 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของข้าวเปลือกในระหว่างการเก็บรักษา

ในระหว่างการเก็บรักษาข้าวเปลือกจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีและกายภาพทั้งที่ต้องการและไม่ต้องการ ขึ้นอยู่กับพันธุ์ของข้าวและภาวะในการเก็บรักษา โดยปริมาณความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการเก็บรักษาเป็นปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ เคมี และคุณภาพข้าว การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจะเกี่ยวข้องกับองค์ประกอบในข้าว ได้แก่ แป้ง โปรตีน และไขมัน แสดงในรูปที่ 2.9 ข้าวที่อยู่ระหว่างการเก็บรักษาเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีโดยเม็ดแป้งจับกันแข็งแรงมากขึ้น กรดไขมันอิสระที่เกิดจากกระบวนการไฮโดรไลซิสของไขมัน จับกับอมัยโลส ส่งผลให้เนื้อสัมผัสของข้าวสุกเปลี่ยนไป นอกจากนี้ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ที่เกิดจากกระบวนการออกซิเดชันของไขมัน ทำให้สารระเหยจำพวกสารประกอบคาร์บอนิลเพิ่มขึ้น และเร่งการเกิดออกซิเดชันของไขมันทำให้เกิดกลิ่นหืน ซึ่งนอกจากนี้แล้วมีผลทำให้โครงสร้างภายในเกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้การพองตัวของเม็ดแป้งลดลง เนื้อสัมผัสของข้าวสุกเปลี่ยนแปลงไป (Juliano, 1985) นอกจากนี้ Zhou และคณะ (2002) พบว่า การปลดปล่อยกรดฟีนอลิกทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผนังเซลล์ทั้งหมดทำให้ผนังเซลล์แข็งแรงขึ้น ขณะเดียวกันยังไปมีผลกระทบกับกิจกรรมของสารต้านการเกิดออกซิเดชันในการสร้างกรดไขมันอิสระ ที่สามารถสร้างสารเชิงซ้อนกับแอมิโลสในระหว่างการเก็บรักษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.9 การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบทางเคมีที่เกิดขึ้นในเมล็ดข้าวระหว่างการเก็บรักษา

ที่มา : Zhou และคณะ (2002)

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของข้าวเปลือกในระหว่างการเก็บรักษา

งามชื่น คงเสรี และคณะ (2533) ศึกษาการเก็บข้าวหอมพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ไว้ในรูปข้าวกล้องและข้าวสารที่อุณหภูมิ 5°C และที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 เดือน พบว่าการเก็บข้าวกล้องและข้าวสารไว้ที่อุณหภูมิห้อง กลิ่นหอมของข้าวหุงสุกจะลดลง พร้อมกับมีกลิ่นหืนเพิ่มขึ้นเมื่อเก็บข้าวไว้นานกว่า 4 เดือน แต่การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5°C กลิ่นหอมของข้าวหุงสุกยังคงไม่เปลี่ยนแปลง

งามชื่น คงเสรี (2538) พบว่า การเก็บรักษาทำให้ข้าวมีความแข็งแรงและทนต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น เมื่อนำข้าวไปขัดสีจะทำให้ได้ปริมาณข้าวเต็มเมล็ดสูงกว่าข้าวใหม่ การเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องมีผลให้ข้าวมีความแข็งแรงและทนต่อแรงกระทบได้สูงกว่าข้าวที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5°C เนื่องจากการเก็บรักษาทำให้ผนังเซลล์ของเอนโดสเปิร์มมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น (Shibuya, et al., 1982)

ละมุล วิเศษ (2541) ศึกษาผลของอุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณไขมัน คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของข้าวกล้องพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 พบว่า เมื่อนำข้าวเปลือกที่ผ่านการลดความชื้นมาแล้วจนมีความชื้น 15.12% มาบรรจุในถุงพลาสติก polypropylene หนา 70 ไมโครเมตร แล้วนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C และ 37°C เป็นระยะเวลา 7 เดือน พบว่าความชื้นของข้าวเปลือกที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 37°C ลดลงเหลือ 12.12% ในขณะที่ข้าวเปลือกที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C มีความชื้นค่อนข้างคงที่ ในส่วนของปริมาณข้าวกล้องเต็มเมล็ดของข้าวที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 37°C เพิ่มขึ้นสูงกว่าข้าวที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C ส่วนค่าสีของข้าวเปลือกและข้าวกล้องที่แสดงในรูปของค่า b ของข้าวที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 37°C มีค่า b เพิ่มขึ้น (เป็นสีเหลืองมากขึ้น) ในขณะที่การเก็บรักษาข้าวที่อุณหภูมิ 25°C มีค่า b ค่อนข้างคงที่ (ไม่ค่อยเกิดการเปลี่ยนสีเป็นสีเหลือง)

พัสกร เจียตระกูล, เมธินี เห่วซึ่งเจริญ และ ศุภศักดิ์ ลิปปิติ (2546 ก.) ศึกษาผลของอุณหภูมิและความชื้นต่อคุณภาพการสีข้าวขาวดอกมะลิ 105 พบว่า เมื่อทำการเก็บรักษาข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 10°C , 15°C และ อุณหภูมิห้อง (28°C) เป็นระยะเวลา 6 เดือน โดยไม่มีการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องเก็บ ทำให้ข้าวเปลือกมีความชื้นลดลงจาก 13.21% เหลือเพียง 12.92% , 11.19% และ 8.73 % ตามลำดับในเดือนสุดท้าย ไม่พบเชื้อราเนื่องจากข้าว

เก็บที่อุณหภูมิต่ำ มีค่า Water activity (Aw) ต่ำกว่า 0.7 ส่วนที่เก็บที่อุณหภูมิห้องมีค่าต่ำกว่า 0.54 แต่มีสีเหลืองเพิ่มขึ้น ปริมาณต้นข้าวลดลงจาก 45% เหลือเพียง 31% และ 42% สำหรับการเก็บที่อุณหภูมิ 10°C และ 15°C ตามลำดับ ส่วนที่อุณหภูมิห้องจะเพิ่มขึ้นเป็น 49.76%

พัสกร เจียตระกูล, เมธินี เห่วซึ่งเจริญ และ ศุภศักดิ์ ลิปปิติ (2546 ข.) ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวขาวดอกมะลิ 105 โดยเก็บรักษาข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 10°C , 15°C และอุณหภูมิห้อง (28°C) เป็นระยะเวลา 6 เดือน โดยไม่มีการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาเข้า พบว่าในด้านของความหอมหรือปริมาณสาร 2AP โดยเฉลี่ยที่พบในข้าวกล้องจะมากกว่าข้าวสาร อาจเนื่องมาจากขั้นตอนการสีจากข้าวกล้องให้เป็นข้าวสารนั้นมีความร้อนเกิดขึ้น สาร 2AP ซึ่งเป็นสารระเหยจึงอาจจะระเหยออกมาบางส่วน ทำให้พบในข้าวสารในปริมาณที่น้อยกว่า และมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการเก็บรักษา นอกจากนั้นยังพบว่าการเก็บที่ 15°C สามารถชะลอการลดลงของสาร 2AP ได้ดีกว่าการเก็บที่อุณหภูมิห้อง (28°C)

เมธินี เห่วซึ่งเจริญ และคณะ (2546) ได้ศึกษาการเก็บรักษาข้าวขาวดอกมะลิให้คงความหอมด้วยวิธี Grain Chilling โดยทำการเก็บรักษาข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่อุณหภูมิ 10°C , 15°C และอุณหภูมิห้อง (ประมาณ 30°C) เป็นเวลา 6 เดือน โดยบรรจุข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 16%db ในถังสังกะสีปิดสนิทรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.6 เมตร ความสูง 1.15 เมตร หุ้มด้วยฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว ปริมาณถังละ 100 กิโลกรัม ทำการทดลองอุณหภูมิละ 3 ถัง แต่ละอุณหภูมิใช้พัดลม 1 ตัว อัตราการไหล 1.70 ลบ.เมตร/นาที พบว่าข้าวเปลือกที่เก็บที่ 10°C และที่อุณหภูมิห้องมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2AP เป็นอย่างมากในช่วง 2 เดือนแรกของการเก็บ โดยเพิ่มขึ้นจากเดิมประมาณ 50% ในเดือนที่ 2 จากนั้นจะลดลงเท่าเดิมในเดือนที่ 3 – 4 และลดลงอย่างรวดเร็วเหลือเพียง 60% ในเดือนที่ 5 – 6 ส่วนข้าวเปลือกที่เก็บที่ 15°C สามารถรักษาความหอมให้คงที่ได้ใน 4 เดือนแรก แต่ลดลงเหลือประมาณ 60% เช่นกันในเดือนที่ 5 – 6

Barber (1972) ศึกษาผลของอุณหภูมิและปริมาณความชื้นที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสีของข้าวขาวระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 10 เดือน พบว่าข้าวขาวที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 35°C จะมีสีเข้มมากกว่าข้าวขาวที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C และ 5°C และข้าวขาวที่มีความชื้นสูง (16 – 17%db) จะมีสีเข้มมากกว่าข้าวขาวที่มีปริมาณความชื้นต่ำ (15 %db) และในระหว่างการเก็บ

รักษาข้าวขาวจะมีสีเข้มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยา non-enzymatic browning ของกรดอะมิโนและคาร์โบไฮเดรตที่มีในข้าว

Gras และคณะ (1989) เสนอว่า ปัจจัยหลักที่มีผลกระทบต่ออัตราการเกิดสีเหลืองของข้าว คือ อุณหภูมิ และ ค่า water activity (a_w) และจากการศึกษาพบว่าข้าวเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอย่างเห็นได้ชัดหลังจากเก็บรักษาเป็นเวลา 6 ถึง 12 เดือน

Laksanalamai และ Ilangantileke (1993) ศึกษาสารที่เป็นองค์ประกอบของน้ำมันหอมระเหยจากใบเตย พบว่า สารประกอบที่สำคัญที่ให้กลิ่นหอมทั้งในข้าวสุก และข้าวสารจากข้าวหอมพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 คือสาร 2–Acetyl–1–pyrroline (2AP) ซึ่งเป็นสารที่พบในใบเตยหอมเช่นกัน สารตัวนี้ไวต่อแสง และอุณหภูมิ และเกิดการสลายตัวในระหว่างการเก็บรักษา ทำให้ข้าวสารที่เก็บไว้เป็นเวลานานมีความหอมลดลงจนใกล้เคียงกับข้าวพันธุ์ไม่หอม โดยพบว่ากลิ่นจะลดลง 50% เมื่อเก็บที่อุณหภูมิห้องปกติ

Juliano (1994) รายงานว่า การเก็บรักษาข้าวเปลือกทำให้คุณสมบัติบางอย่างเปลี่ยนไประหว่าง 4-6 เดือนแรกของการเก็บรักษา โดยเฉพาะการเก็บที่อุณหภูมิมากกว่า 15°C ไม่ว่าเก็บในรูปข้าวเปลือก ข้าวซ้อมมือ หรือข้าวสาร การเปลี่ยนแปลงหลังการเก็บรักษาพบว่า ข้าวซ้อมมือมีความทนทานต่อการสีเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ และทำให้ได้ปริมาณข้าวเต็มเมล็ดเพิ่มขึ้น เพิ่มการขยายปริมาตร และการดูดซึมน้ำของข้าวสารระหว่างหุง แป้ง และโปรตีนละลายออกมาน้อยลงในน้ำที่ใช้หุง กลิ่นหอมสูญเสียไป และความสามารถในการงอกของเมล็ดลดลงระหว่างการเก็บรักษา และการเกิดลักษณะของข้าวเก่าถูกเร่งด้วยการให้ความร้อนระหว่างการอบแห้งแบบความร้อนแห้งหรือความร้อนชื้น

Widjaja, Craske และ Wootton (1996) ศึกษาการเก็บข้าวหอมพันธุ์ Australian YRF9 ในรูปข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวสาร ไว้ที่อุณหภูมิ 30°C ความชื้นสัมพัทธ์ 84% ที่ความดันบรรยากาศปกติ และภายใต้สุญญากาศประมาณ 150 Pa เป็นเวลา 3 เดือน พบว่าสภาวะการเก็บทุกรูปแบบไม่มีศักยภาพพอที่จะป้องกันการสลายตัวของสารที่ให้กลิ่นหอมของข้าวไว้ได้ แต่การเก็บรูปข้าวเปลือกจะสามารถยับยั้งการเกิด off-flavor ของข้าวได้ เพราะการขัดสีเอารำและเปลือกออกทำให้ข้าวสัมผัสกับออกซิเจนและเซลล์เกิดการฉีกขาดจากการขัดสี ทำให้เอนไซม์เข้าทำลายได้ง่าย

บทที่ 3
การดำเนินงานวิจัย

3.1 วัตถุดิบ

ข้าวเปลือกที่ใช้เป็นข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 *(Oryza sativa* L.) จากจังหวัดสุรินทร์ จำนวน 400 กิโลกรัม ที่เก็บเกี่ยวในเดือนพฤศจิกายน พ.ศ.2547 มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 14–15 %db ข้าวเปลือกทั้งหมดที่ได้ผ่านกระบวนการทำความสะอาดโดยผ่านเครื่องทำความสะอาดที่ใช้ลมเป่า (air–screen cleaner) คัดเอาสิ่งปนเปื้อน เช่น ฟางหญ้า ฝุ่น รวมทั้งเมล็ดลีบออกไป ข้าวเปลือกที่ได้นำมาเก็บในห้องเย็นที่มีอุณหภูมิประมาณ 4°C เพื่อรอเวลาที่จะนำมาใช้ทดลอง ก่อนการทดลองประมาณ 10 วัน นำข้าวเปลือกที่จะใช้ทดลองมาหาความชื้น (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.1) แล้วนำมาปรับความชื้นให้ได้ 35-37 %db โดยการเติมน้ำและเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°C คลุกเคล้าทุกวันเป็นเวลา 7 วัน (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก. 3) ก่อนการทดลองนำข้าวเปลือกมาวางไว้ที่อุณหภูมิห้องจนอุณหภูมิของเมล็ดเท่ากับอุณหภูมิห้อง

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.3)
(คณะพลังงานและวัสดุ,มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี)

ตู้อบลมร้อน (Memmert รุ่น model 600, Germany)
(คณะพลังงานและวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี)

เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง (Sartorius รุ่น CP320S, Germany)
(คณะพลังงานและวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี)

เครื่องวัดความเร็วลม (Air-max รุ่น SK-26A, Japan)
(คณะพลังงานและวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี)

เครื่องกะเทาะเปลือกชนิดลูกกลิ้งยาง (Jircas, Japan)
(คณะพลังงานและวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี)

เครื่องขัดขาวชนิดหินขัด (Jircas, Japan)
(คณะพลังงานและวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี)

เครื่องคัดขนาดเมล็ดข้าว (Jircas, Japan)
(คณะพลังงานและวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี)

เครื่องวัดสี (Minolta Chroma Meter รุ่น CR300)
(ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เครื่อง Headspace (Agilent Technologies รุ่น HSG1888, China)
(ภาควิชาเคมี, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่)

เครื่อง Gas chromatography (Agilent Technologies รุ่น CG6890N, China)
(ภาควิชาเคมี, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่)

เครื่อง Scanning Electron Micrpspopy (JEOL รุ่น JSM-5800LV, Oxford)
(ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

เครื่องปั่นไฟฟ้า (National รุ่น MX-T110PN, Taiwan)

ขวดแก้วทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร มีฝาปิด

ถ้วยอลูมิเนียม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 6 เซนติเมตร

เทอร์โมมิเตอร์ ชนิดแอลกอฮอล์

โถดูดความชื้น

นาฬิกาจับเวลา

3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.3.1 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาในการอบแห้งข้าวเปลือก (drying curve) ด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ทดลองอบแห้งข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้น 35-37%dbด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชัน โดยแปรอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งเป็น 4 ระดับ คือ 115, 125, 135 และ 150°C ใช้ความหนาของชั้นของขณะเบดนิ่ง 9.5 เซนติเมตร ความเร็วของอากาศในห้องอบแห้ง 2.5 เมตร/วินาที (Soponronnarit and Prachayawarakorn, 1994) และแปรระยะเวลาในการอบแห้งเป็น 12 ระดับ ได้แก่ 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 4, 5, 6, 8 และ 10 นาที นำข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งไปวิเคราะห์ดังนี้

(1) ปริมาณความชื้น โดยวิธีอบแห้งในตู้ลมร้อน ตามวิธีของ AOAC (1990) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.1)

(2) อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.2)

วิเคราะห์ 2 ซ้ำ และทดลอง 2 ซ้ำ เลือกเวลาการอบแห้งที่เหมาะสม ได้แก่ เวลาที่ลดความชื้นข้าวเปลือกจาก 35-37 %db จนเหลือ 23-24 %db

3.3.2 การหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ภายหลังการ tempering

นำข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันที่อุณหภูมิ 4 ระดับ ตามเวลาที่ได้จากข้อ 3.3.1 จนมีความชื้นเหลือ 23-24 % db มาบรรจุลงในภาชนะแก้วที่ปิดสนิทและเก็บในตู้อบที่ตั้งอุณหภูมิให้เท่ากับอุณหภูมิของข้าวเปลือก เพื่อการ tempering เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นนำข้าวเปลือกมาอบแห้งรอบที่ 2 ด้วยอุณหภูมิ 4 ระดับเช่นเดียวกับข้อ 3.3.1 แปรระยะเวลาในการอบแห้งรอบที่ 2 เป็น 5 ระดับ ได้แก่ 0, 1, 2 ,3 และ 4 นาที นำข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งไปวิเคราะห์ดังนี้

(1) ปริมาณความชื้น โดยวิธีอบแห้งในตู้ลมร้อน ตามวิธีของ AOAC (1990) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.1)

(2) อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.2)

วิเคราะห์ 2 ซ้ำ และทดลอง 2 ซ้ำ เลือกเวลาการอบแห้งที่เหมาะสม ได้แก่ เวลาที่ลดความชื้นข้าวเปลือกจาก 23-24 %db จนเหลือ 15-17 %db

3.3.3 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารหอม 2AP และคุณภาพการสีของข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิไดเซชันร่วมกับการ tempering

อบแห้งข้าวเปลือกตามระยะเวลาที่ได้จากข้อ 3.3.1 และ 3.3.2 จากนั้นนำข้าวเปลือกมาผึ่งในกระจาดให้มีความหนาของชั้นข้าว 1 เซนติเมตร จนกระทั่งอุณหภูมิของเมล็ดลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้อง (28-30°C) นำข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งไปวิเคราะห์ดังนี้

(1) ปริมาณความชื้น โดยวิธีอบแห้งในตู้ลมร้อน ตามวิธีของ AOAC (1990) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.1)

(2) อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกด้วยเทอร์โมมิเตอร์ชนิดแอลกอฮอล์ (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.2)

(3) เปอร์เซ็นต์ข้าวต้น คำนวณจากสมการ (Bal and Ojha, 1975) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.5)

$$\text{เปอร์เซ็นต์ข้าวต้น} = \frac{\text{น้ำหนักข้าวต้นที่ได้หลังการขัดสี}}{\text{น้ำหนักข้าวเปลือกเริ่มต้น}} \times 100$$

(4) ตรวจสอบพื้นผิวของเมล็ดข้าวสารด้วย Scanning Electron Microscopy (SEM) (ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

(5) ค่าสีในระบบ CIE L a* b* ด้วยเครื่องวัดสี Minolta CR-300 แหล่งกำเนิดแสง D_{65} แต่ละซ้ำวัดสีของข้าวสาร 31 จุด (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.6) คำนวณดัชนีความขาว (white index) ตามวิธีของ Chen และคณะ (1999) ดัชนีความขาวของข้าว = $100 - [(100\text{-}L)^2 + a^2 + b^2]^{1/2}$

(6) ปริมาณสารหอม 2AP ด้วยเครื่อง Headspace Gas Chromatography ตามวิธีของ ทินกร สีเสียดค้า (2548) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.7)

วางแผนการทดลองแบบ Complete Randomized Design (CRD) ตัวแปรในการทดลอง คือ อุณหภูมิในการอบแห้ง วิเคราะห์ 1 ซ้ำ ทดลอง 4 ซ้ำ เปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมที่ใช้ข้าวเปลือกชุดเดียวกันมาตากในร่มโดยการผึ่งในกระจาด ให้มีความหนาของชั้นข้าวประมาณ 1 เซนติเมตร จนความชื้นลดลงจาก 35-37 %db เหลือ 15-17 %db วิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (Analysis of Variance) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วย Duncan's New Multiple Range Test (Cochran and Cox, 1992)

3.3.4 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารหอม 2AP และคุณภาพการสีของข้าวเปลือกระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิห้อง (28–30 °C) เป็นเวลา 6 เดือน

นำข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชัน ตามวิธีในข้อ 3.3.3 มาบรรจุในถุงกระสอบพลาสติก โดยบรรจุถุงละ 600 กรัม มัดปากถุงด้วยเชือกฟางพลาสติก และเก็บในกล่องพลาสติก แปรอุณหภูมิในการเก็บรักษาเป็น 2 ระดับ คือ 15°C และอุณหภูมิห้อง (28–30 °C) เป็นเวลา 6 เดือน โดยไม่มีการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องเก็บ และแปรระยะเวลาในการเก็บรักษาเป็น 4 ระดับ ได้แก่ 0 , 2 , 4 และ 6 เดือน ข้าวเปลือกมาวิเคราะห์ดังนี้

(1) ปริมาณความชื้น โดยวิธีอบแห้งในตู้ลมร้อน ตามวิธีของ AOAC (1990) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.1)

(2) เปอร์เซ็นต์ข้าวต้น คำนวณจากสมการ (Bal and Ojha, 1975) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.5)

$$\text{เปอร์เซ็นต์ข้าวต้น} = \frac{\text{น้ำหนักข้าวต้นที่ได้หลังการขัดสี}}{\text{น้ำหนักข้าวเปลือกเริ่มต้น}} \times 100$$

(3) ค่าสีในระบบ CIE L a* b* ด้วยเครื่องวัดสี Minolta CR-300 แหล่งกำเนิดแสง D_{65} แต่ละซ้ำวัดสีของข้าวสาร 31 จุด (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.6) คำนวณดัชนีความขาว (white index) ตามวิธีของ Chen และคณะ (1999) ดัชนีความขาวของข้าว = $100 - [(100\text{-}L)^2 + a^2 + b^2]^{1/2}$

(4) ปริมาณสารหอม 2AP ด้วยเครื่อง Headspace Gas Chromatography ตามวิธีของ ทินกร สีเสียดค้า (2548) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.7)

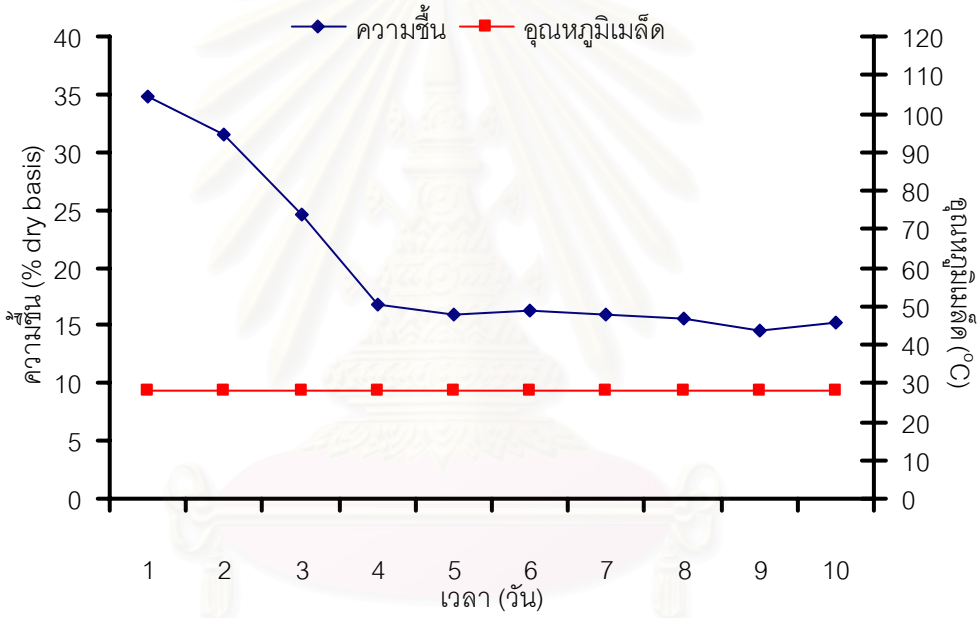
วางแผนการทดลองแบบ 5 x 2 x 4 Factorial ปัจจัยในการทดลอง คือ อุณหภูมิในการอบแห้ง 5 ระดับ อุณหภูมิในการเก็บรักษา 2 ระดับ และระยะเวลาในการเก็บรักษา 4 ระดับ วิเคราะห์ 1 ซ้ำ ยกเว้นความชื้นวิเคราะห์ 2 ซ้ำ ทดลอง 4 ซ้ำ เปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมที่ใช้ข้าวเปลือกชุดเดียวกันมาตากในร่มโดยการผึ่งในกระจาด ให้มีความหนาของชั้นข้าวประมาณ 1 เซนติเมตร จนความชื้นลดลงจาก 35-37 %db เหลือ 15-17 %db วิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (Analysis of Variance) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วย Duncan's New Multiple Range Test (Cochran and Cox, 1992)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

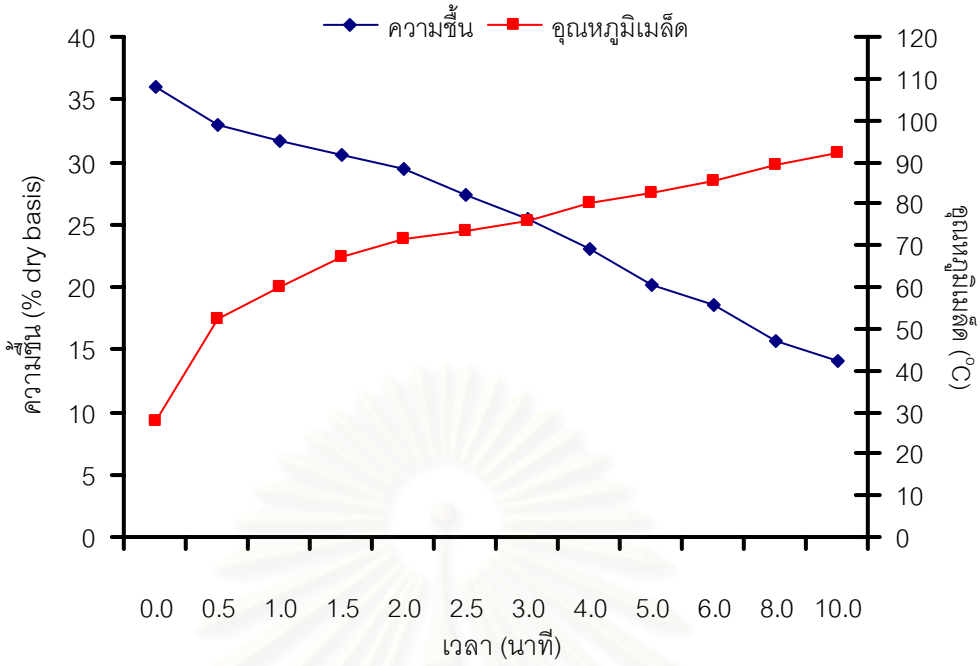
บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาในการอบแห้งข้าวเปลือก (Drying curve) ด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันที่อุณหภูมิต่าง ๆ

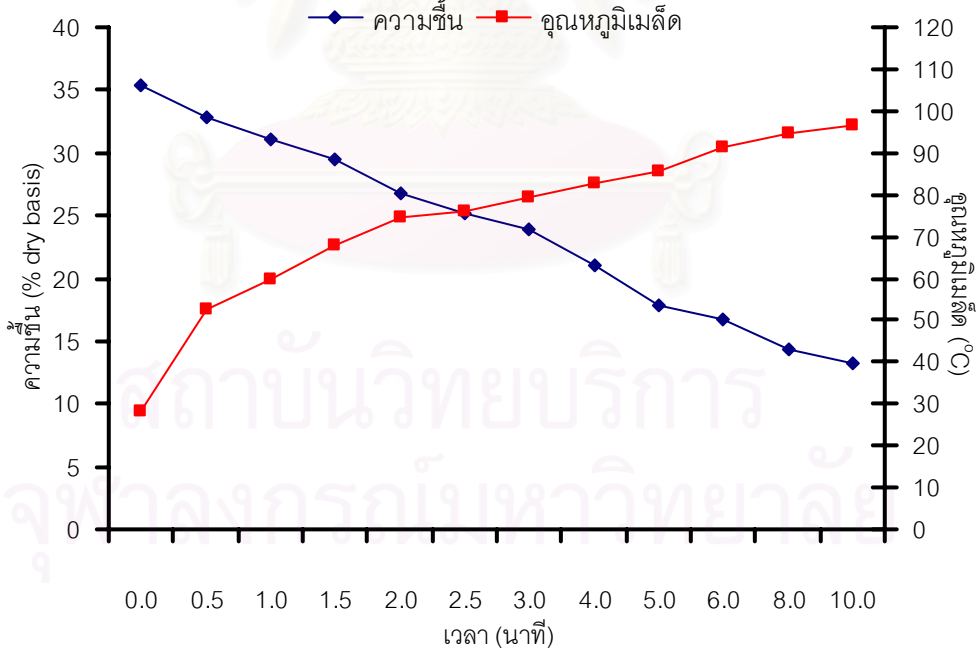
การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาในการอบแห้งข้าวเปลือก ทำให้ทราบข้อมูลความชื้นของข้าวเปลือกที่เวลาในการอบแห้งต่าง ๆ กัน เพื่อใช้เป็นแนวทางในการพิจารณาเลือกเวลาที่เหมาะสมในการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยอุณหภูมิต่าง ๆ เพื่อลดความชื้นจาก 35-37 %db จนเหลือ 23-24 %db นอกจากนี้การอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิและระยะเวลาที่ต่างกัน มีผลทำให้อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกต่างกันด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.1 – 4.5



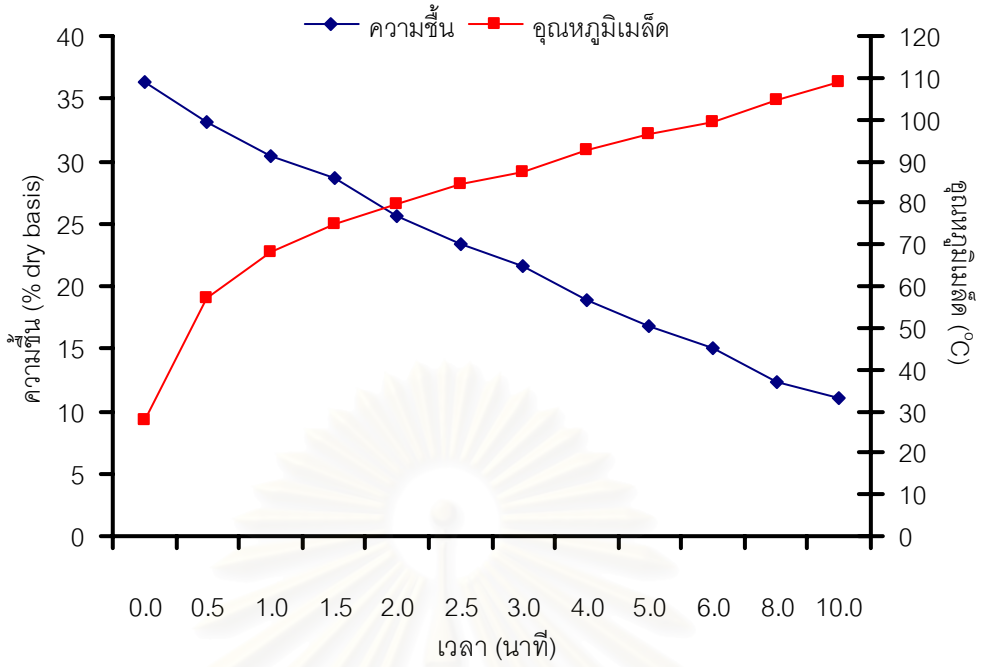
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาในการลดความชื้นข้าวเปลือก และอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกระหว่างการตากในที่ร่มที่อุณหภูมิห้อง (28-30°C) ของตัวอย่างควบคุม (control) เป็นเวลา 10 วัน



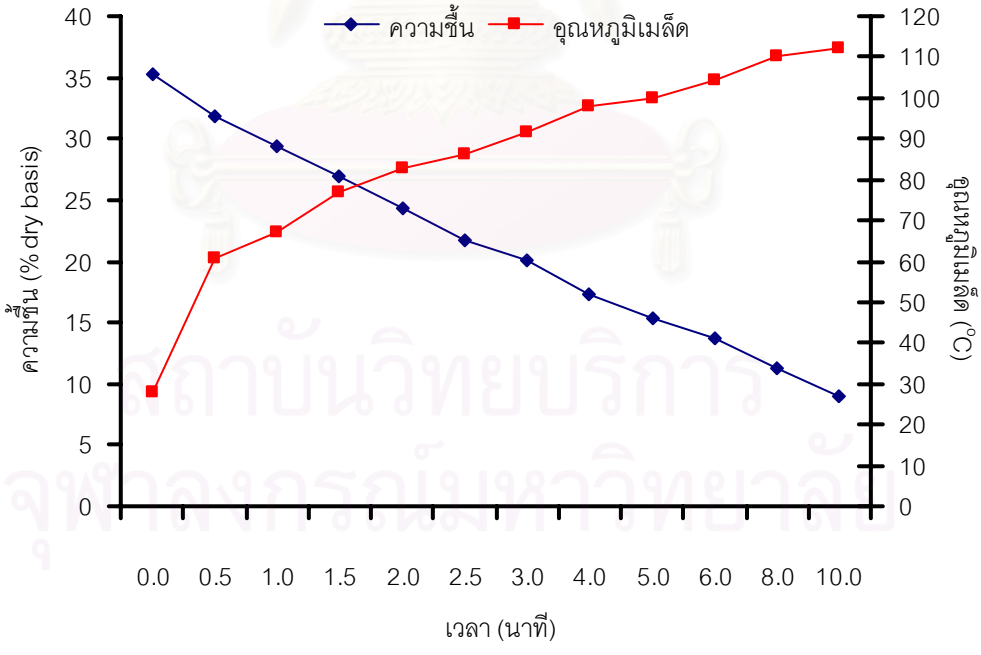
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาในการอบแห้งข้าวเปลือก และอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกภายหลังการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันที่อุณหภูมิ 115°C เป็นเวลา 10 นาที



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาในการอบแห้งข้าวเปลือก และอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกภายหลังการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันที่อุณหภูมิ 125°C เป็นเวลา 10 นาที



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาในการอบแห้งข้าวเปลือก และอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกภายหลังการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันที่อุณหภูมิ 135°C เป็นเวลา 10 นาที



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาในการอบแห้งข้าวเปลือก และอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกภายหลังการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 10 นาที

จากรูปที่ 4.1 - 4.5 พบว่า ถ้าต้องการลดความชื้นของข้าวเปลือกจาก 35 – 37 %db ให้มีความชื้นเหลือ 15 – 17 %db ซึ่งเป็นระดับความชื้นที่ปลอดภัยสำหรับการเก็บรักษา โดยการตากในที่ร่ม (control) ต้องใช้เวลา 5 วัน หลังจากนั้นปริมาณความชื้นมีแนวโน้มที่ค่อนข้างคงที่ระหว่าง 15–17 %db ในขณะที่การลดความชื้นของข้าวเปลือกโดยวิธีการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันที่อุณหภูมิต่าง ๆ ให้เหลือ 15–17 %db จะใช้เวลาประมาณ 4 – 8 นาที ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง เนื่องจากการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันเป็นการอบแห้งที่ใช้อุณหภูมิสูง ทำให้ความชื้นที่ผิวของเมล็ดข้าวเปลือกลดลงอย่างรวดเร็ว และการที่เมล็ดข้าวเปลือกมีความแตกต่างของความชื้นภายในและภายนอกเมล็ดนี้เอง ส่งผลให้เกิดแรงอัดและแรงกดพร้อมกันซึ่งเป็นแรงดึงออกจากแนวศูนย์กลางของเมล็ด ที่จะนำไปสู่การแตกร้าวภายในเมล็ดข้าวได้ (กริช เจียมจิโรจน์, 2543)

มีผู้วิจัยหลายคณะ (อดิเทพ ทวีรัตนพาณิชย์, 2540 ; สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ และคณะ, 2541 ; ณัฐพล ภูมิสะอาด, 2544) ได้แนะนำว่า การอบแห้งข้าวเปลือกที่มีปริมาณแอมิโลสสูง เช่น ข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1 โดยใช้เทคนิคฟลูอิไดเซชันสามารถเพิ่มปริมาณข้าวต้นได้สูงสุด เมื่อลดความชื้นสุดท้ายให้อยู่ในช่วง 22 – 23 % db แต่ถ้าอบแห้งจนความชื้นสุดท้ายต่ำกว่า 22 % db ปริมาณข้าวต้นจะลดลง

นอกจากนี้ผู้วิจัย (ณัฐพล ภูมิสะอาด, 2540 ; อดิเทพ ทวีรัตนพาณิชย์, 2540 ; สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ และคณะ, 2541) ยังแนะนำว่าควรมีกระบวนการพักข้าวเปลือก (tempering) คั่นระหว่างการอบแห้ง เนื่องจากข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งแล้วจะมีความชื้นที่บริเวณผิวเมล็ดแตกต่างกับภายในแกนกลางเมล็ดมาก โดยที่ภายในเมล็ดจะมีความชื้นมากกว่า การ tempering จะช่วยให้ความชื้นภายในเมล็ดแพร่ออกมาที่ผิวของเมล็ดทำให้อุณหภูมิและความชื้นของเมล็ดแตกต่างกันน้อยลง ส่งผลให้เกิดการแตกหักน้อยลง และพบว่าข้าวที่ผ่านการ tempering มีปริมาณข้าวต้นสูงกว่าข้าวที่ไม่ผ่านการ tempering

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงแบ่งการอบแห้งออกเป็น 2 รอบ โดยรอบที่ 1 เป็นการอบแห้งข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้น 35–37 %db ให้มีความชื้นลดลงเหลือ 23–24 %db สาเหตุที่ต้องลดความชื้นให้อยู่ในช่วงนี้ เนื่องจากในช่วงที่ข้าวเปลือกมีความชื้นมากกว่า 23–24 %db น้ำที่ถูกทำให้ระเหยออกไปโดยการอบแห้งเป็นน้ำอิสระ (free water) ซึ่งเป็นน้ำที่แทรกอยู่ตามช่องว่างของเม็ดแป้ง ซึ่งเกาะเกี่ยวอยู่กับองค์ประกอบอื่น ๆ ในข้าวได้บ้างด้วยแรงที่ไม่แข็งแรงนัก จึงเกิดการระเหยออกไปได้ง่าย แต่เมื่อข้าวเปลือกมีความชื้นต่ำกว่า 23–24 %db น้ำที่ถูกทำให้ระเหยออกไปโดยการอบแห้งจะเริ่มเป็นน้ำที่อยู่ในรูปที่เกาะเกี่ยวอยู่กับองค์ประกอบต่าง ๆ ในข้าวอย่างแน่นหนา (bound water) เช่น เกาะอยู่ด้วยพันธะโควาเลนต์ ทำให้ระเหยน้ำส่วนนี้ออกไปได้ยาก จึงต้องใช้เวลาในการอบแห้งที่นานขึ้น โดยเฉพาะการอบแห้งที่ใช้อุณหภูมิสูง ถ้าหากอบแห้งอย่างต่อเนื่อง

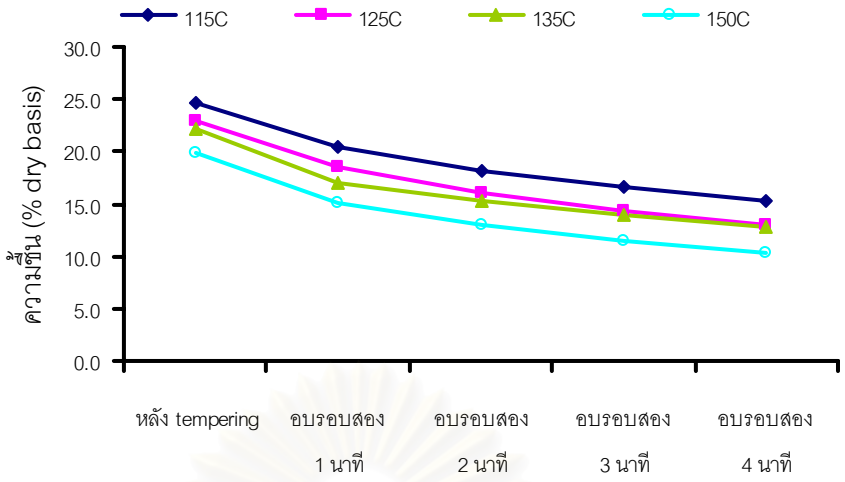
จนความชื้นลดลงเหลือ 15-17 %db จะทำให้เมล็ดเกิดการแตกร้าว เนื่องจากน้ำที่เกาะเกี่ยวอยู่กับองค์ประกอบต่าง ๆ ในข้าวระเหยออกไป ทำให้โครงสร้างภายในเกิดการยุบตัว (วิไล รังสาดทอง, 2543) ดังนั้นจึงควรมีขั้นตอนการ tempering โดยระยะเวลาที่เหมาะสมในการ tempering คือ 30 นาที เนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่ทำให้ได้ปริมาณข้าวต้นสูงที่สุด (Steffe and Singh, 1980 ; Soponronnarit et al., 1999 ; Poomsa-ad et al., 2002) แล้วจึงนำข้าวเปลือกไปอบแห้งในรอบที่ 2 เพื่อลดความชื้นให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยสำหรับการเก็บรักษา คือ 15–17 %db จากผลการทดลองในขั้นตอนที่ 4.1 นี้ ทำให้ทราบว่าถ้าต้องการลดความชื้นข้าวเปลือกให้อยู่ในช่วง 23 – 24 %db) จะต้องใช้เวลาในการอบแห้งรอบที่ 1 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 เวลาที่ต้องใช้ในการลดความชื้นข้าวเปลือกจาก 35 - 37 %db ให้เหลือ 23-24 %db

สภาวะการอบแห้ง	เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง	ความชื้น (%db)	อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกหลังอบแห้ง
ตัวอย่างควบคุม	3 วัน	24.60	28°C
115°C	3 นาที	25.42	80°C
125°C	3 นาที	23.92	80°C
135°C	2.5 นาที	23.35	82°C
150°C	2 นาที	23.79	83°C

4.2 การหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันรอบที่ 2 ที่อุณหภูมิต่างๆ ภายหลังการ tempering

ในขั้นตอนที่ 2 นี้เป็นการหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันในรอบที่ 2 ภายหลังการ tempering เป็นเวลา 30 นาที เพื่อลดความชื้นของข้าวเปลือกจาก 23–24 %db ให้เหลือ 15–17 %db ซึ่งเป็นช่วงความชื้นที่ปลอดภัยต่อการเก็บรักษาข้าวเปลือก โดยความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาในการอบแห้งข้าวเปลือกดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาในการอบแห้งข้าวเปลือกรอบที่ 2 ด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันที่อุณหภูมิ 115, 125, 135 และ 150°C เป็นเวลา 4 นาที ภายหลังการอบแห้งรอบที่ 1 และการ tempering

จากผลการทดลองในขั้นตอนที่ 4.2 นี้ ทำให้ทราบว่าภายหลังการอบแห้งรอบที่ 1 และการ tempering ถ้าต้องการลดจาก 23–24 %db ให้เหลือ 15–17 %db จะต้องใช้เวลาในการอบแห้งในรอบที่ 2 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 เวลาที่ต้องใช้ในการลดความชื้นข้าวเปลือกจาก 23-24 %db ให้เหลือ 15-17 %db

สภาวะการอบแห้ง (°C)	เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (นาที)	ความชื้น (%db)
115	3	16.59
125	2	16.09
135	1.5	15.65
150	1	16.67

ผลจากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาที่ใช้ในการอบแห้งข้าวเปลือกทั้งสองช่วงของการอบ สามารถสรุปสภาวะที่ต้องใช้ในการทดลองได้ดังตารางที่ 4.3 ในส่วนของอุณหภูมิที่ใช้ในการ tempering จะเป็นอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก ที่บันทึกภายหลังการอบแห้งในรอบที่ 1 เพื่อใช้ในการตั้งอุณหภูมิของตู้อบที่ใช้ในการ tempering

ตารางที่ 4.3 สภาวะที่ต้องใช้ในการอบแห้งข้าวเปลือกจาก 35 - 37 %db ให้เหลือ 15-17 %db

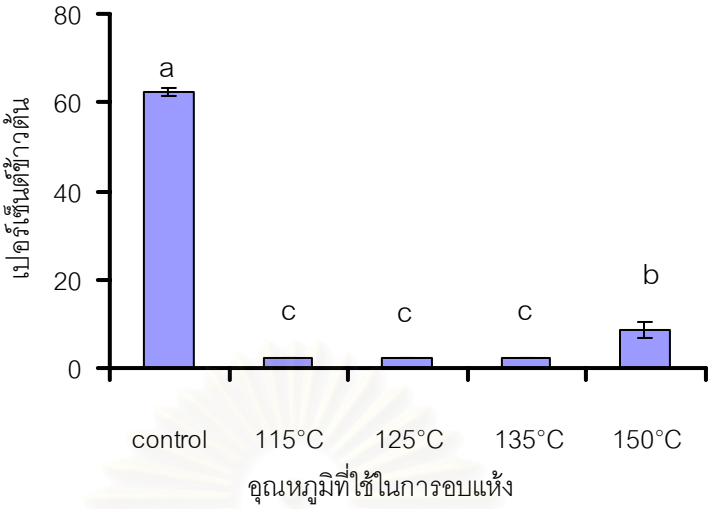
การอบแห้งรอบที่ 1 ลดความชื้นจาก 35 - 37 %db เหลือ 23-24 %db		การ tempering		การอบแห้งรอบที่ 2 ลดความชื้นจาก 23-24 %db เหลือ 15-17 %db	
อุณหภูมิ (^{o}C)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (^{o}C)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (^{o}C)	เวลา (นาที)
115	3	80	30	115	3
125	3	80	30	125	2
135	2.5	82	30	135	1.5
150	2	83	30	150	1
ตัวอย่างควบคุม ลดความชื้นโดยการตากในที่ร่ม ใช้เวลาในการลดความชื้นจาก 35-37 %db เหลือ 15-17 %db					5 วัน

4.3 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพการสีและปริมาณสารหอม 2AP ของข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันที่อุณหภูมิต่างกัน ร่วมกับการ tempering

หลังจากอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันทั้ง 2 รอบตามสภาวะที่ได้จากข้อ 4.1 และ 4.2 พบว่า ข้าวเปลือกมีปริมาณความชื้นลดลงจนอยู่ในระดับที่ต้องการ คืออยู่ในช่วง 15-17 %db และเมื่อนำมาผึ่งจนอุณหภูมิของเมล็ดลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้อง (28-30^{o}C) จะมีความชื้นลดลงเหลือประมาณ 13-15 %db (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข.5) จากนั้นนำข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ ไปวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น ความขาวของข้าวสาร และปริมาณสารหอม 2AP ได้ผลการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

4.3.1 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น

ข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันร่วมกับการ tempering เมื่อนำมาขัดสีจนเป็นข้าวสาร มีเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นดังแสดงในรูปที่ 4.7



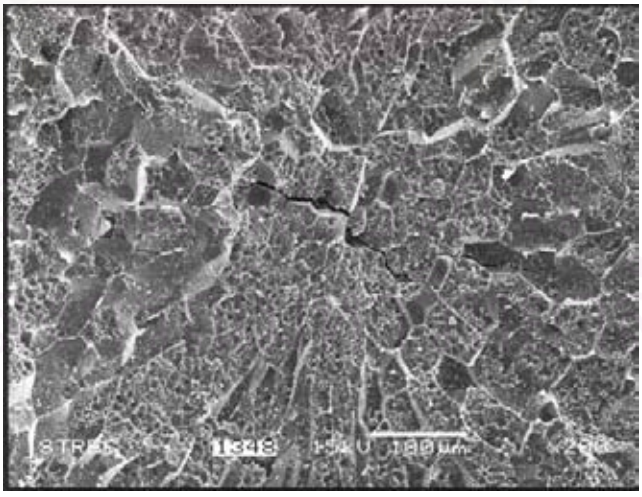
รูปที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันร่วมกับการ tempering ต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นของข้าวเปลือก

กราฟแท่งที่มีตัวอักษรกำกับที่ต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

จากรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งที่ทุกอุณหภูมิที่ทดลอง มีเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นต่ำกว่าตัวอย่างควบคุม (62.44%) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยมีเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นเท่ากับ 0.19, 0.14 และ 0.09% (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข.6) สำหรับการอบแห้งที่อุณหภูมิ 115, 125 และ 135°C ตามลำดับ โดยพบว่าเมล็ดข้าวเกิดการแตกหักเสียหายอย่างมาก และความเสียหายที่เกิดขึ้นจะเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งสูงขึ้น ยกเว้นการอบแห้งที่อุณหภูมิ 150°C พบว่ามีเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น (8.58%) สูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิอื่น ๆ อย่างเห็นได้ชัด ณัฐพล ภูมิสะอาด (2540) และ Taweerattanapanish และคณะ (1999) พบว่าการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันร่วมกับการ tempering ทำให้ข้าวเปลือกมีเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นสูงกว่า หรือใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุม ทั้งนี้เนื่องจากการ tempering เป็นกระบวนการพักข้าวที่ทำให้ความชื้นภายในเมล็ดแพร่ออกมาที่ผิวของเมล็ด ทำให้อุณหภูมิและความชื้นของเมล็ดที่บริเวณผิวและแกนกลางแตกต่างกันน้อยลง ความเครียดที่เกิดขึ้นในช่วงการอบแห้งน้อยลง เมื่อนำมาขัดสีเมล็ดข้าวเปลือกจะเกิดการแตกหักน้อยลงด้วย แต่ผลการทดลองที่ได้กลับพบว่าไม่เป็นไปตามที่ควรจะเป็น ทั้งนี้น่าจะมีสาเหตุมาจากความชื้นสุดท้ายในการอบแห้งในรอบที่สองมีค่าต่ำ โดยในการทดลองจะอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันในรอบที่สองจนมีความชื้น 15-17 %db ซึ่งขัดแย้งกับงานของอดิเทพ ทวีรัตนพาณิชย์ (2540) สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ และคณะ (2541) และอดิเทพ ทวีรัตนพาณิชย์ และคณะ (2542) ที่พบว่า เมื่ออบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันที่อุณหภูมิ 140 และ 150°C ช่วงที่สามารถเพิ่มปริมาณข้าวต้น

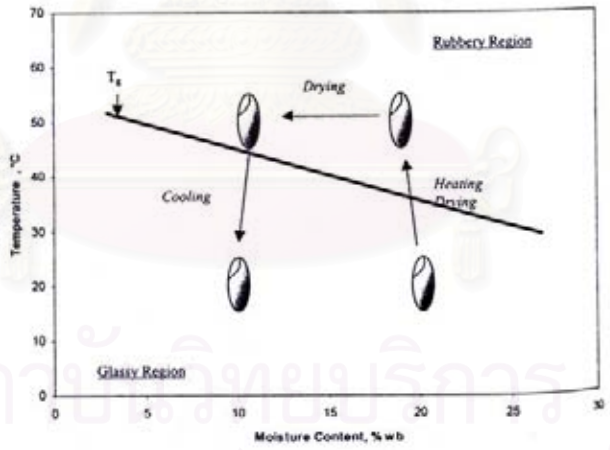
ได้สูงสุด คือ ช่วงความชื้นเริ่มต้น 30-45 %db และเมื่ออบแห้งข้าวเปลือกจนเหลือความชื้นสุดท้าย 23.5–28 %db แต่ถ้าอบแห้งข้าวเปลือกจนมีความชื้นสุดท้ายต่ำกว่า 23.5 %db ปริมาณข้าวต้นลดลง นอกจากนั้น Soponronnarit และคณะ (1995) ได้ให้ข้อเสนอแนะว่า การลดความชื้นในช่วงที่สองให้เหลือ 15-17 %db ควรลดความชื้นลงอย่างช้า ๆ โดยการเป่าด้วยอากาศแวดล้อมเพื่อให้ความชื้นค่อย ๆ ลดลงแม้จะต้องใช้เวลาที่นานกว่าแต่จะทำให้ได้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นสูง หรืออาจใช้เครื่องอบแห้งแบบลมร้อนก็ได้ แต่ควรปรับอุณหภูมิให้ต่ำลงก่อนเพื่อป้องกันการแตกร้าว เมื่อนำข้าวที่มีรอยร้าวไปขัดสีทำให้เมล็ดข้าวแตกหักได้ง่ายกว่าเมล็ดข้าวปกติที่ไม่มีรอยร้าว รอยร้าวในเมล็ดข้าวแสดงในรูปที่ 4.8 และ 4.9

รูปที่ 4.8 ลักษณะการร้าวของเมล็ดข้าวที่ผ่านการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันที่อุณหภูมิ 115°C (ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอน)



รูปที่ 4.9 ลักษณะการร้าวของเมล็ดข้าวที่ผ่านการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันที่อุณหภูมิ 115°C (ภาพถ่ายจากเครื่อง Scanning Electron Microscopy กำลังขยาย 200 เท่า)

การร้าวของเมล็ดข้าวไม่ได้เกิดขึ้นในระหว่างการอบแห้ง แต่จะเกิดขึ้นภายหลังการอบแห้งสิ้นสุดลง ซึ่งเป็นผลมาจากความแตกต่างของความชื้นและอุณหภูมิภายในและที่ผิวนอกของเมล็ด (Cnossen and Siebenmorgen, 2000) ซึ่งสาเหตุของการเกิดรอยร้าวภายในเมล็ดเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของเม็ดแป้ง โดยก่อนการอบแห้งเม็ดแป้งในข้าวจะอยู่ในสภาพ glassy region ซึ่งจะมีคุณสมบัติขยายตัวได้ต่ำ มีปริมาตรต่ำ และมีการกระจายตัวต่ำ ต่อมาเมื่อเม็ดแป้งในข้าวได้รับความร้อนจากการอบแห้งจะเปลี่ยนแปลงสมบัติจาก glassy region ไปเป็น rubbery region ซึ่งจะมีคุณสมบัติขยายตัวได้มากขึ้น มีปริมาตรมากขึ้น และมีการกระจายตัวได้มากขึ้น เมื่อการอบแห้งสิ้นสุดลงเม็ดแป้งในข้าวเย็นตัวลง แป้งจะเปลี่ยนแปลงสมบัติจาก rubbery region กลับมาเป็น glassy region อีกครั้ง (ดังแสดงในรูปที่ 4.10) จึงมีความเปราะและยืดหยุ่นน้อยลง ในขณะเดียวกันเม็ดแป้งที่อยู่บริเวณผิวภายนอกของเมล็ดข้าวจะสูญเสียความชื้นไปมาก ส่วนเม็ดแป้งที่อยู่ภายในเมล็ดจะยังมีความชื้นสูงอยู่ ทำให้เกิดความแตกต่างของความชื้น (moisture gradient) ขึ้น ความชื้นที่อยู่ภายในเมล็ดข้าวจะแพร่ออกมาที่ผิวนอกของเมล็ด เมื่อเม็ดแป้งที่ผิวนอกของเมล็ดได้รับความชื้นจะเกิดการขยายตัว เกิดแรงอัด ส่วนแป้งที่อยู่ภายในเมล็ดเมื่อสูญเสียความชื้นไปจะเกิดการหดตัว เกิดแรงดึงเข้าสู่ศูนย์กลางของเมล็ด เมื่อเกิดแรงสองอย่างนี้พร้อม ๆ กัน ทำให้เกิดรอยร้าวในเมล็ดขึ้น (Cnossen และ Siebenmorgen, 2000)



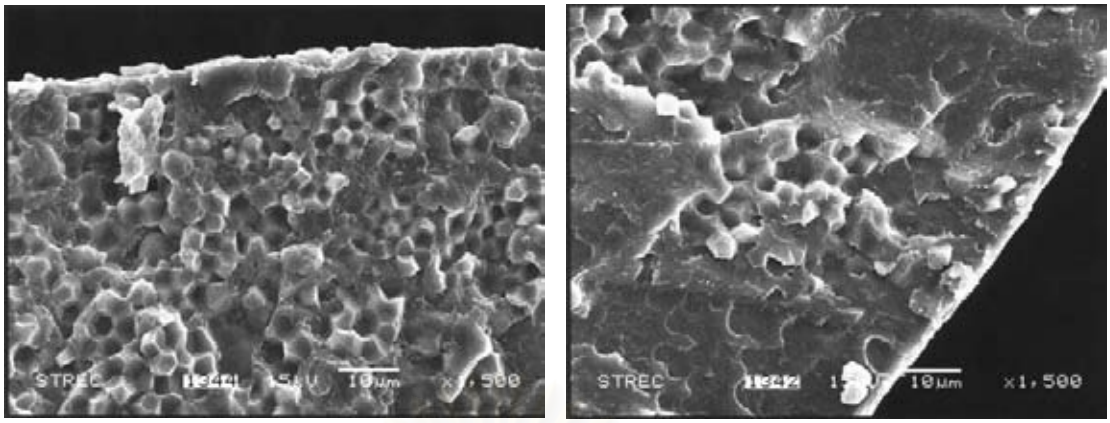
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นของข้าวกล้องจากข้าวพันธุ์ Bengal แสดงให้เห็นส่วน glassy และ rubbery region
ที่มา : Perdon และคณะ (2000)

ทั้งนี้การเกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติของแป้งขึ้นอยู่กับการได้รับอุณหภูมิและความชื้นที่เหมาะสม (Cnossen และ Siebenmorgen, 2000) โดยแป้งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติได้เมื่อมีอุณหภูมิสูงกว่าจุด Tg (glass transition temperature) ซึ่งจะเห็นได้จากรูปที่ 4.10

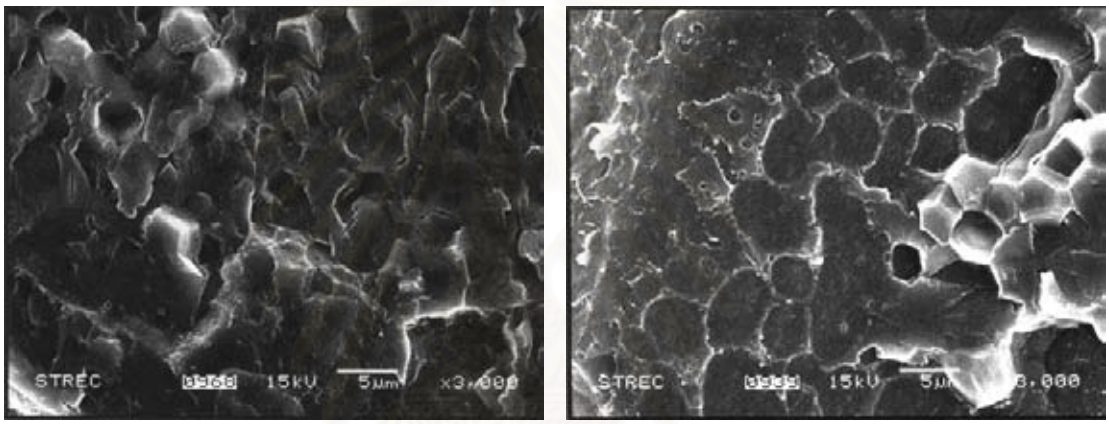
ยกตัวอย่างเช่น ถ้าเมล็ดข้าวมีความชื้น 20 %wb จะมีอุณหภูมิที่จุด Tg ประมาณ 40°C แสดงว่าแป้งในเมล็ดข้าวนี้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติได้ก็ต่อเมื่อมีอุณหภูมิสูงกว่า 40°C แต่ในกรณีของข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 150°C พบว่ามีเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิอื่นๆอย่างมาก เนื่องจากการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิสูงจะทำให้เม็ดแป้งเกิด gelatinization โดยเฉพาะที่ 150°C จะทำให้เกิดการหลอมเหลวมากที่สุด และพบว่าการหลอมเหลวโดยส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่บริเวณขอบของเมล็ด เพราะเป็นส่วนที่สัมผัสกับความร้อนมากกว่า เมื่อเมล็ดข้าวเย็นตัวลง เม็ดแป้งส่วนที่หลอมเหลวจะแทรกซึมไปตามช่องว่างที่เกิดรอยร้าว ทำให้เกิดการเชื่อมติดกันแน่นขึ้น จึงส่งผลให้โครงสร้างภายในเมล็ดข้าวแข็งแรงขึ้น (แสดงในรูปที่ 4.11) ดังนั้นข้าวที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 150°C จึงมีเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งจากรูปที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าเมล็ดข้าวที่ไม่ผ่านการอบแห้ง (รูปที่ 4.11A) เม็ดแป้งจะยังคงมีความสมบูรณ์ สามารถเห็นเป็นลักษณะเหลี่ยมของเม็ดแป้ง เนื่องจากเม็ดแป้งไม่ได้สัมผัสกับความร้อนสูง แต่เมื่อผ่านการอบแห้งแล้ว (รูปที่ 4.11 B-E) จะเห็นได้ว่าเม็ดแป้งเกิดการหลอมเหลวเนื่องจากได้รับความร้อน แอมิโลสและโปรตีนบางส่วนแพร่ออกมาจากเม็ดแป้ง แทรกซึมไปตามช่องว่างระหว่างเม็ดแป้ง ทำหน้าที่เหมือนซีเมนต์ช่วยเชื่อมเม็ดแป้งให้ยึดติดกันแน่นขึ้น โดยมีภาพจำลองการหลอมเหลวดังแสดงในรูปที่ 4.12 (Hebeda และ Zobel, 1996)

.

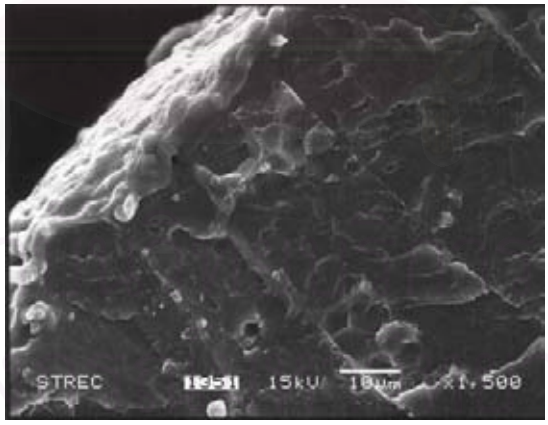
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(A) (B)

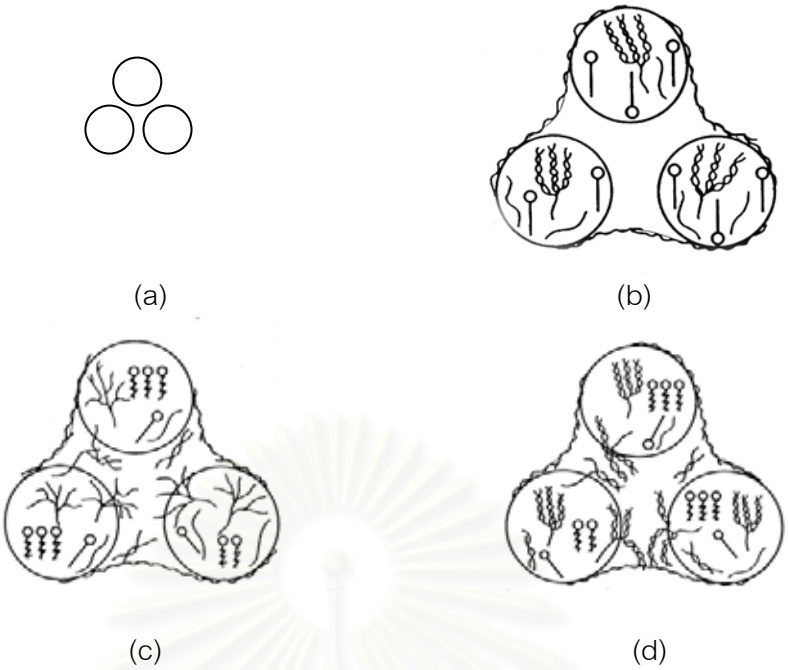


(C) (D)



(E)

รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายตัดขวางด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy ของข้าวที่ผ่านการลดความชื้นโดย (A) ตากในที่ร่ม (B), (C), (D), และ (E) การอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันทั้งสองขั้นตอน ที่อุณหภูมิ 115 , 125 , 135 และ 150°C ตามลำดับ ร่วมกับการ tempering



(a) (b)

(c) (d)

รูปที่ 4.12 ภาพจำลองกลไกการหลอมเหลวของเม็ดแป้ง

ที่มา : Hebeda และ Zobel (1996)

จากรูป

(a) เม็ดแป้งก่อนได้รับความร้อนจากการอบแห้ง ยังไม่เกิดการพองตัว

(b) เม็ดแป้งที่ชื้น เมื่อได้รับความร้อนจากการอบแห้งและการ tempering จะเกิดการพองตัวจนเบียดเข้ามาชิดกันทำให้โครงสร้างภายในแน่นขึ้นแต่เนื่องจากข้าวเปลือกมีความชื้นค่อนข้างต่ำ ดังนั้นเม็ดแป้งจึงเกิดการพองตัวแต่ยังไม่แตกออก เนื่องจากความชื้นมีไม่มากพอที่จะทำให้เกิด gelatinization อย่างสมบูรณ์

(c) Amylose และ protein บางส่วนแพร่ออกมาจากเม็ดแป้ง แทรกซึมไปตามช่องว่างระหว่างเม็ดแป้ง ทำหน้าที่เหมือนซีเมนต์ช่วยเชื่อมเม็ดแป้งให้ยึดติดกันแน่นขึ้น

(d) เมื่อสิ้นสุดกระบวนการ tempering และข้าวเปลือกเริ่มมีอุณหภูมิลดลง จนกระทั่งเมล็ดข้าวเปลือกมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง amylose และ protein ที่อยู่ภายนอกเม็ดแป้งจะเริ่มรวมตัวกัน โดยการสร้างพันธะไฮโดรเจนเกิดเป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบมากขึ้น และมีการ pack ตัวกันแน่นขึ้น ทำให้โครงสร้างภายในเมล็ดข้าวมีความแข็งแรงมากขึ้น เมื่อนำไปขัดสีการแตกหักจะลดลง

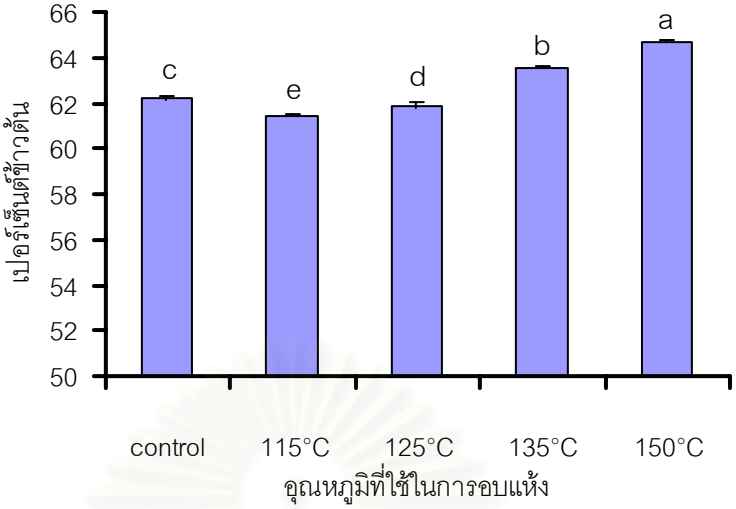
แต่เนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้ข้าวเปลือกที่มีความชื้นค่อนข้างต่ำ (35-37%db) ดังนั้นการอบแห้งจึงทำให้เกิด gelatinization ขึ้นเพียงบางส่วน สอดคล้องกับงานวิจัยของสุภาวรรณ ฏิระวณิชย์กุล และคณะ (2546) ที่ได้ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้น 25-33 %db ด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันโดยใช้อุณหภูมิของอากาศระหว่าง 40–150°C แล้วพบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิของอากาศ 40–90°C จะทำให้ข้าวเปลือกมีอุณหภูมิ 35–75°C และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของ

อากาศเป็น 100–150°C ข้าวเปลือกจะมีอุณหภูมิ 83–89°C ซึ่งการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิของอากาศสูงกว่า 90°C ทำให้อุณหภูมิของข้าวเปลือกสูงถึงระดับที่ทำให้เกิด gelatinization ขึ้นบางส่วนได้ โดยมีช่วงอุณหภูมิของการเกิด gelatinization ของแป้งข้าวเจ้าที่ 68°C และเกิดได้สมบูรณ์ที่ 78°C (วิเคราะห์ด้วยวิธี Kofler hot-stage microscope) (กล้าณรงค์ ศรีรอต และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2546) ทั้งนี้การเกิด gelatinization จะเกิดได้อย่างสมบูรณ์หรือไม่ ขึ้นอยู่กับความชื้นของแป้งและอุณหภูมิที่แป้งได้รับ แป้งที่มีปริมาณน้ำน้อย จะมีการเปลี่ยนแปลงรูป หรือหลอมละลายที่อุณหภูมิสูง 166–180°C แต่เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำให้มากขึ้น อุณหภูมิของการหลอมละลายจะลดลง เช่น ถ้าแป้งมีความชื้น 22–37 %db จะต้องให้ความร้อนมากกว่า 100°C แสดงให้เห็นว่าการมีน้ำอยู่อย่างจำกัด (22–37%db) และได้รับอุณหภูมิที่สูงเพียงพอทำให้แป้งมีโอกาสเกิด gelatinization ได้ (Rudi และคณะ, 2006) และเมื่อปริมาณน้ำมีประมาณ 70 % (น้ำ 70 ส่วน ต่อแป้ง 30 ส่วน) หรือมากกว่า การหลอมละลายก็คือการเกิด gelatinization (กล้าณรงค์ ศรีรอต และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2546) จากผลการทดลองที่พบว่าข้าวมีการแตกหักมากเมื่อนำไปขัดสี ซึ่งสันนิษฐานว่าน่าจะมีสาเหตุมาจากการอบแห้งในรอบที่ 2 ที่นำข้าวเปลือกกลับไปอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันโดยใช้อุณหภูมิสูงอีกครั้ง ดังนั้นจึงได้ทดลองเปลี่ยนวิธีการลดความชื้นในรอบที่สอง จากเดิมที่ลดความชื้นด้วยการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชัน มาเป็นการตากในที่ร่ม เพื่อให้ความชื้นที่อยู่ภายในเมล็ดข้าวค่อย ๆ แพร่ออกมาอย่างช้า ๆ พบว่าเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นที่ได้เพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.13

ตารางที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิการอบแห้งแบบฟลูอิไดเซชัน การ tempering และการตากในที่ร่มต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นของข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105

การอบแห้ง รอบที่ 1ลดความชื้น จาก 35-37 %db เหลือ 23-24 %db	อุณหภูมิในการ tempering (30 นาที) (°C)	การอบแห้ง รอบที่ 2 ลดความชื้น จาก 23-24 %db เหลือ 15-17 %db	ความชื้นหลังอบแห้ง (%db)	เปอร์เซ็นต์ข้าวต้น
control	-	-	15.35 ± 0.04 [b]	62.21 ± 0.06 [c]
115°C 3 นาที	80	ตากในที่ร่ม 3 วัน	16.11 ± 0.05 [a]	61.46 ± 0.02 [e]
125°C 3 นาที	80	ตากในที่ร่ม 3 วัน	16.04 ± 0.11 [a]	61.91 ± 0.10 [d]
135°C 2.5 นาที	82	ตากในที่ร่ม 3 วัน	16.22 ± 0.01 [a]	63.56 ± 0.04 [b]
150°C 2 นาที	83	ตากในที่ร่ม 3 วัน	16.15 ± 0.19 [a]	64.71 ± 0.03 [a]

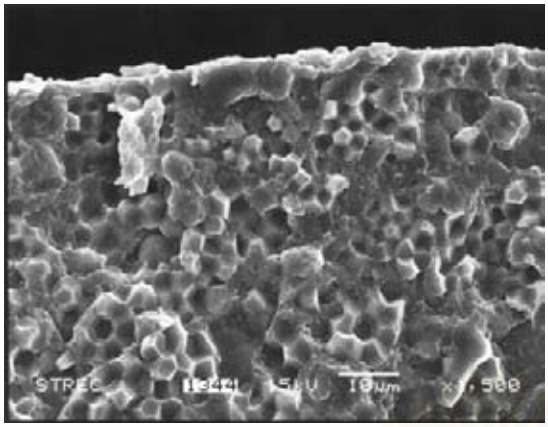
ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)



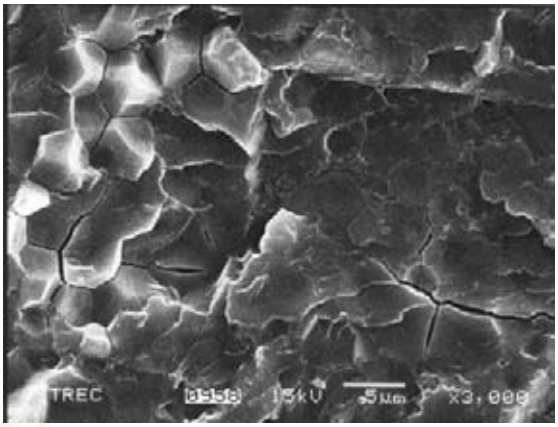
รูปที่ 4.13 ผลของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันที่อุณหภูมิต่างกัน ร่วมกับการ tempering และการตากในที่ร่ม

กราฟแท่งที่มีตัวอักษรกำกับที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ($p \leq 0.05$)

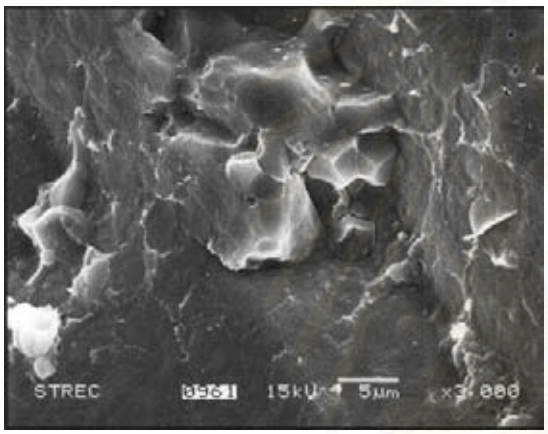
จากตารางที่ 4.4 พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอบแห้งให้สูงขึ้น เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง 135 และ 150°C ทำให้ได้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นสูงกว่าตัวอย่างควบคุม และได้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นสูงสุดเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิ 150°C ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิสูงเพียงรอบแรกรอบเดียว ทำให้ความชื้นที่อยู่ภายในเมล็ดกับความชื้นที่อยู่ที่ผิวมีความแตกต่างกันไม่มาก และภายหลังการอบแห้งความชื้นมีการแพร่ออกอย่างช้า ๆ เมื่อเมล็ดข้าวเย็นตัวลง เม็ดแป้งภายในและภายนอกของเมล็ดข้าวเกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติในด้านการขยายตัวและหดตัวไปพร้อม ๆ กัน จึงลดความรุนแรงของการเกิดแรงกดและแรงอัด ส่งผลให้เมล็ดข้าวเกิดรอยร้าวน้อยลง นอกจากนั้นการ tempering โดยใช้อุณหภูมิสูง (80-83°C) ดังแสดงในตารางที่ 4.4 ยังส่งผลให้เกิดการหลอมเหลวของเม็ดแป้ง (ดังแสดงในรูปที่ 4.14 จึงน่าจะทำให้เมล็ดข้าวมีความแข็งแรงมากขึ้น เมื่อนำไปขัดสีจึงทนต่อแรงกระแทกได้ดี จึงมีเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นสูง



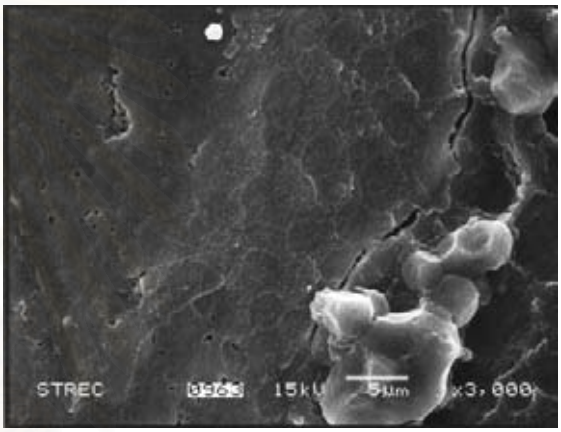
(A)



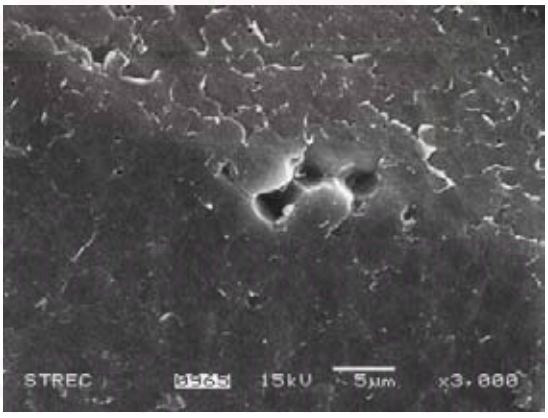
(B)



(C)



(D)

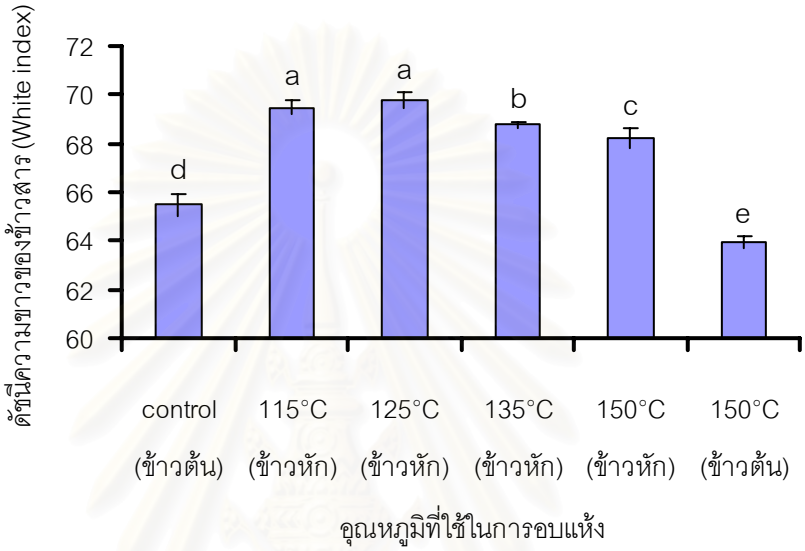


(E)

รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายตัดขวางด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy ของข้าวที่ผ่านการลดความชื้นโดย (A) ตากในที่ร่ม (B), (C), (D), และ (E) การอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันที่อุณหภูมิ 115 , 125 , 135 และ 150°C ตามลำดับ ที่เวลาต่างกัน ร่วมกับการ tempering

4.3.2 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งต่อดัชนีความขาวของข้าวสาร

เมล็ดข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันร่วมกับการ tempering นำมาขัดสีจนเป็นข้าวสาร แล้ววัดค่าสีในระบบ CIE L a* b* ด้วยเครื่องวัดสี Minolta รุ่น CR-300 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.5) และคำนวณค่าดัชนีความขาวของข้าวสาร (white index) ตามวิธีของ Chen และคณะ (1999) ดังสมการ White Index = $100 - [(100-L)^2 + a^2 + b^2]^{1/2}$ ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.15 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข.7)



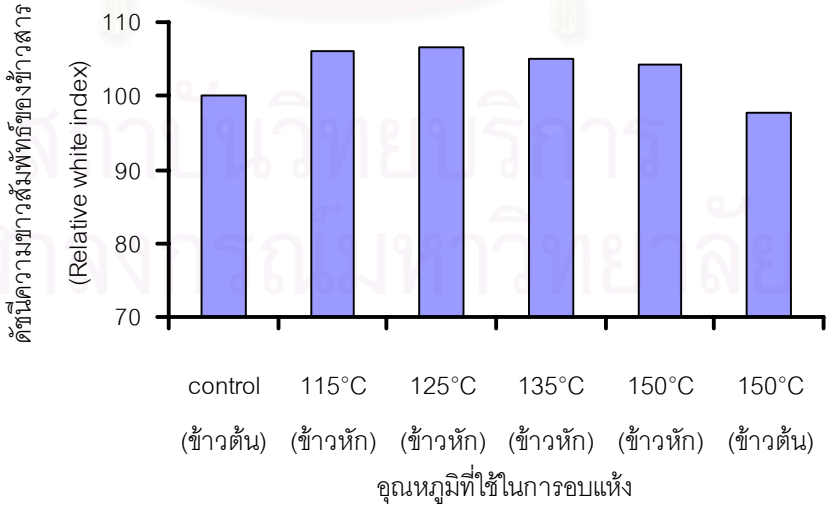
รูปที่ 4.15 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันร่วมกับการ tempering ต่อค่าดัชนีความขาวของข้าวสาร

กราฟแท่งที่มีตัวอักษรกำกับที่ต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ($p \leq 0.05$)

จากรูปที่ 4.15 พบว่าเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มขึ้น ดัชนีความขาวของข้าวสารมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนับสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้มีความร้อนที่เพิ่มมากขึ้นเข้าไปเร่งการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (non-enzymatic browning) โดยเมื่อหมู่คาร์บอนิลของน้ำตาลรีดิวซิงในข้าว ได้รับความร้อนในภาวะที่มีน้ำ (a_w>0.2) และทำปฏิกิริยากับหมู่เอมีนของกรดอะมิโนและโปรตีนในข้าวได้เป็นไกลโคซิลเอมีน และเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องจนได้สารสีน้ำตาล (นิธิยา รัตนาปนนท์, 2545) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Soponronnarit และ Prachayawarakorn (1994) และ สุภวรรณ ฏิระวณิชย์กุล และคณะ (2546) ที่พบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 150°C ทำให้ข้าวมีสีคล้ำมากที่สุด แต่เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม (control) แล้วพบว่าข้าวที่ผ่านการอบแห้งจะมีความขาวมากกว่าตัวอย่างควบคุม เนื่องจากข้าวมีการแตกหักอย่างมาก ทำให้เมล็ดมีพื้นที่ผิวที่มีความขาวมากขึ้น อนุภาคของแป้งภายในเมล็ดข้าวมีความขาวมากกว่าภายนอกเมล็ด เนื่องจากเม็ดแป้งที่อยู่รอบนอกสัมผัสกับความร้อนจากการ

อบแห้งมากกว่าเม็ดแป้งที่อยู่ภายใน ทำให้วัดค่าดัชนีความขาวของเมล็ดข้าวได้มากกว่าปกติ นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อเปรียบเทียบค่าดัชนีความขาวของข้าวในส่วนของข้าวต้นของตัวอย่างควบคุม (control) กับดัชนีความขาวของข้าวที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 150°C พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน สาเหตุที่มีผลการทดลองค่าดัชนีความขาวของข้าวสารในส่วนของข้าวต้นของการอบแห้งที่อุณหภูมิ 150°C เพียงสภาวะเดียว เนื่องจากข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิอื่น ๆ มีการแตกหักอย่างมาก จึงมีเพียงข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 150°C เท่านั้นที่มีปริมาณข้าวต้นมากพอที่จะนำมาวัดค่าดัชนีความขาวได้

ในทางการค้าความขาวที่ยอมรับได้ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 37 ตามหน่วยวัดของเครื่อง Kett C-300 หรือมีความขาวสัมพัทธ์ไม่ต่ำกว่า 80% (Soponronnarit และคณะ, 1999) เมื่อนำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณเป็นค่าความขาวสัมพัทธ์ของข้าวสาร (ค่าดัชนีความขาวของข้าวสารที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิไดซ์เบดหารด้วยค่าดัชนีความขาวของข้าวสารชุดเดียวกันที่ลดความชื้นด้วยการตากในที่ร่ม คูณด้วย 100) พบว่าได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.16 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข.7) จะเห็นได้ว่าข้าวเปลือกที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 150°C ซึ่งมีแนวโน้มที่จะมีความขาวน้อยที่สุด ยังคงมีค่าความขาวสัมพัทธ์อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ในทางการค้า คือสูงกว่า 80% สอดคล้องกับงานวิจัยของ สุภวรรณ ฏิระวณิชย์กุล และคณะ (2546) ที่ได้ทดลองอบแห้งข้าวด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันที่อุณหภูมิ 40 – 150°C ในข้าวสุพรรณบุรี 1 และข้าวปทุมธานี 1 แล้ววัดค่าความขาวของข้าวด้วยเครื่อง Kett C-300 พบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงกว่า 100°C จะทำให้ข้าวสุพรรณบุรี 1 มีความขาวอยู่ในช่วง 45-50 ส่วนข้าวปทุมธานี 1 มีความขาวอยู่ในช่วง 41-45 ซึ่งอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ในทางการค้า คือสูงกว่า 37

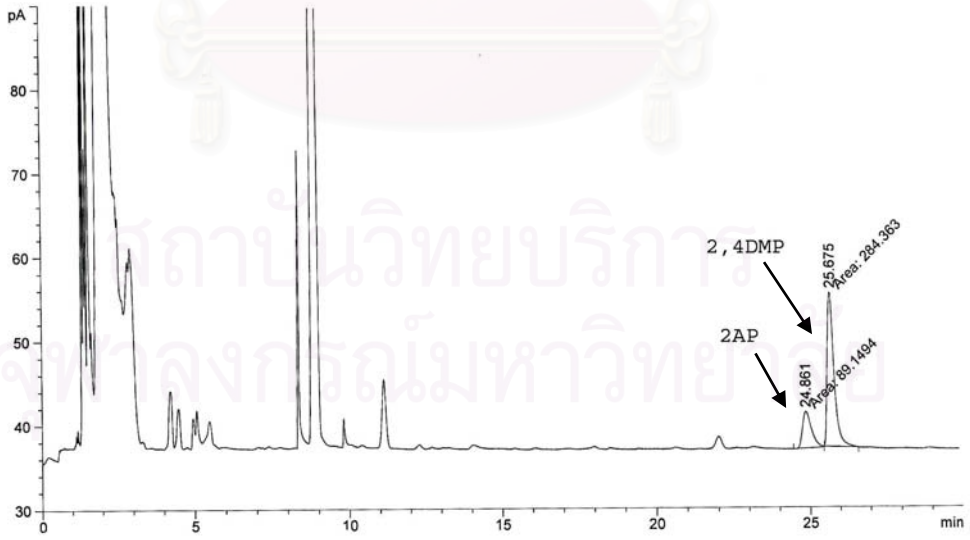


รูปที่ 4.16 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันร่วมกับการ tempering ต่อค่าดัชนีความขาวสัมพัทธ์ของข้าวสาร

นอกจากนี้การ tempering ยังมีผลต่อค่าดัชนีความขาวของข้าวสารด้วย เนื่องจากในระหว่างการ tempering เป็นการยืดเวลาให้ข้าวเปลือกอยู่ในสภาพที่มีอุณหภูมิสูง ข้าวเปลือกถูกพักไว้ในขวดอับอากาศทำให้ความร้อนยังคงอยู่ในเมล็ดข้าวเปลือกมากกว่า ความร้อนดังกล่าวจึงทำให้ข้าวเปลือกเปลี่ยนสีจากสีขาวเป็นสีเหลืองมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของสมชาติ โสภณรณฤทธิ์ และคณะ (2541) และอดิเทพ ทวีรัตนพาณิชย์ (2540) ที่พบว่าข้าวที่ผ่านการ tempering มีเปอร์เซ็นต์ความขาวสัมพัทธ์ต่ำกว่าข้าวที่ไม่ผ่านการ tempering นอกจากนั้นยังพบว่าการใช้อุณหภูมิของการ tempering สูงกว่า 80°C จะทำให้ความขาวของข้าวลดต่ำลงมาก จึงมีแนวโน้มทำให้ข้าวมีลักษณะเป็นข้าวเก่ามากขึ้น

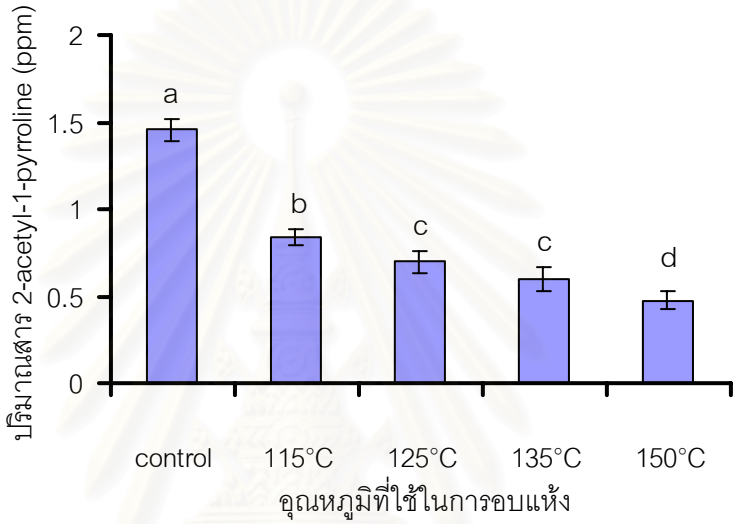
4.3.3 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งต่อปริมาณสารหอม 2AP

เมล็ดข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันร่วมกับการ tempering เมื่อนำมาวิเคราะห์ปริมาณสารหอม 2AP ซึ่งเป็นสารหลักที่ทำให้มีกลิ่นหอมในข้าว (Buttery et al., 1983) จากศึกษาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสาร 2-Acetyl-1-pyrroline (2AP) ด้วยเทคนิค Headspace Gas Chromatography พบว่าได้โครมาโตแกรมที่ประกอบด้วย peak ของสาร 2AP และ peak ของสารมาตรฐานภายใน (internal standard) 2,4-Dimethylpyrridine (DMP) โดย peak ของสารหอม 2AP และ peak ของสารมาตรฐานภายใน DMP จะมีระยะเวลาในการเกิด peak (retention time) อยู่ที่ 24.8 และ 25.7 นาที ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 โครมาโตแกรมของสารหอม 2AP และสารมาตรฐานภายใน 2,4-DMP ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค Headspace Gas Chromatography

การคำนวณปริมาณสาร 2AP ที่มีอยู่ใน headspace ของตัวอย่างข้าว สามารถทำได้โดยนำผลจากการวิเคราะห์ตัวอย่างข้าวที่สนใจมาหาอัตราส่วนพื้นที่ใต้พีคของ 2AP ต่อ DMP และเทียบหาอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ 2AP ต่อ DMP จากกราฟมาตรฐาน (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.6) โดยแทนค่า Y (อัตราส่วนพื้นที่ใต้พีคของ 2AP ต่อ DMP) ลงในสมการเส้นแนวโน้มที่ได้จากกราฟมาตรฐาน จะได้ค่า X (อัตราส่วนน้ำหนักของ 2AP ต่อ DMP) และเมื่อทราบน้ำหนักของสารมาตรฐานภายใน DMP จะทำให้ทราบปริมาณของสาร 2AP ใน headspace ของตัวอย่างข้าวได้ ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 4.18 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข.8)

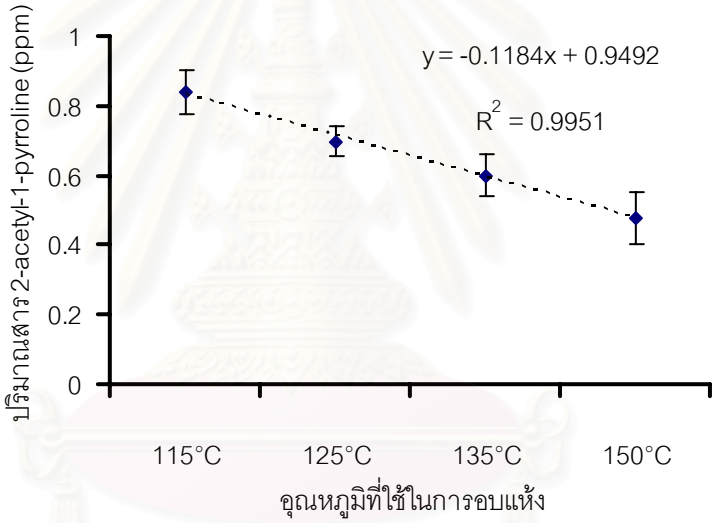


รูปที่ 4.18 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันร่วมกับการ tempering ต่อปริมาณสารหอม 2AP ในข้าวเปลือก

กราฟแท่งที่มีตัวอักษรกำกับที่ต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ($p \leq 0.05$)

จากรูปจะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการอบแห้งให้สูงขึ้น ปริมาณสารหอม 2AP มีแนวโน้มลดลง โดยพบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 115°C จะทำให้ปริมาณสารหอมลดลงน้อยที่สุด และการอบแห้งที่อุณหภูมิ 150°C ทำให้ปริมาณสารหอมลดลงมากที่สุด สอดคล้องกับงานวิจัยของ Wongpornchai และคณะ (2004) ที่พบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ปริมาณสารหอม 2AP ของข้าวเปลือกลดลงมากกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากความร้อนสูงเป็นปัจจัยที่ส่งเสริมให้สารหอม 2AP ระเหยออกไปได้มากขึ้น นอกจากนั้นยังพบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 125 และ 135°C ทำให้มีปริมาณสารหอมไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) มีการสันนิษฐานว่าสาร 2AP นี้เกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติ Yoshihashi และคณะ (2002) รายงานว่า สาร 2AP เกิดขึ้นภายในต้นข้าวระหว่างการปลูก สามารถพบได้ในทุกส่วนของต้นข้าวโดยเฉพาะส่วนที่มีคลอโรฟิลล์ แล้วส่งถ่ายไปยังเมล็ดข้าว หรือสร้างขึ้นเองที่เมล็ดข้าว (นันทวรรณ รักพงษ์, 2547)

และน่าจะอยู่ในส่วนของเยื่อหุ้มเมล็ดเป็นส่วนใหญ่ (บริบูรณ์ สมฤทธิ์, 2543) และเมื่อนำข้าวเปลือกไปอบแห้ง ความร้อนจากการอบแห้งจะไปกระตุ้นให้สารหอมที่อยู่ภายในเมล็ดระเหยออกมาสู่ผิวนอกของเมล็ด และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของอากาศอบแห้งให้มากขึ้น จะทำให้สารหอมระเหยออกไปได้มากขึ้น นอกจากนี้การอบแห้งแบบที่มีการ tempering จะทำให้สารหอม 2AP ในข้าวเปลือกเกิดการระเหยออกมาได้มากขึ้น เนื่องจากการ tempering เป็นการยืดเวลาให้ข้าวเปลือกอยู่ในสภาพที่มีอุณหภูมิสูง จึงทำให้เกิดการสูญเสียสารหอมได้มากขึ้น นอกจากนั้นยังสังเกตเห็นได้ว่าปริมาณสารหอม 2AP ที่ลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการอบแห้งให้สูงขึ้น มีลักษณะการลดลงที่ค่อนข้างเป็นเส้นตรง (รูปที่ 4.19) จึงน่าจะสามารถนำสมการเส้นตรงมาทำนายผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันร่วมกับการtempering เมื่อใช้อุณหภูมิในการอบแห้งข้าวเปลือกที่อยู่นอกเหนือจากช่วง 115–150°C ต่อปริมาณสารหอม 2AP แต่ทั้งนี้ควรเพิ่มจำนวนซ้ำของการทดลอง เพื่อเพิ่มความถูกต้องแม่นยำให้มากขึ้น



รูปที่ 4.19 การเปลี่ยนแปลงปริมาณสารหอม 2AP ในข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันที่อุณหภูมิต่างๆ ร่วมกับการ tempering

4.4 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพการสี และปริมาณสารหอม 2AP ของข้าวเปลือกในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง (28-30°C) และที่ 15°C เป็นเวลา 6 เดือน

ในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาผลของสภาวะในการเก็บรักษาข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันที่อุณหภูมิที่ต่างกัน ร่วมกับการ tempering จนมีความชื้นลดลงเหลือ 13-15 %db ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพ ได้แก่ เปอร์เซ็นต์ข้าวต้น ดัชนีความขาวของข้าวสาร และปริมาณสารหอม 2AP ในระหว่างการเก็บรักษาโดยการบรรจุลงในถุงกระสอบพลาสติก (ถุงปุ๋ย) ปริมาณ 600 กรัมต่อ 1 ถุง มัดปากถุงด้วยเชือกฟางพลาสติก และเก็บไว้ในกล่องพลาสติกที่

อุณหภูมิห้อง (28-30°C) และในตู้แช่เย็นที่ควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 15±1°C เป็นเวลา 6 เดือน เมื่อนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น ค่าดัชนีความขาวของข้าวสาร และปริมาณสารหอม 2AP ในระหว่างการเก็บรักษา (ตารางที่ 4.5)

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น ดัชนีความขาวของข้าว และปริมาณสารหอม 2AP ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 115, 125, 135 และ 150°C ในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง (28-30°C) และที่อุณหภูมิ 15°C เป็นเวลา 6 เดือน

แหล่งความแปรปรวน	เปอร์เซ็นต์ข้าวต้น	ดัชนีความขาว	สาร 2AP
อุณหภูมิการอบแห้ง (A)	*	*	*
อุณหภูมิการเก็บรักษา (B)	*	*	*
ระยะเวลาการเก็บรักษา (C)	ns	*	*
อุณหภูมิการอบแห้ง และ อุณหภูมิการเก็บรักษา (AB)	*	*	*
อุณหภูมิการอบแห้ง และ ระยะเวลาการเก็บรักษา (AC)	ns	ns	*
อุณหภูมิการเก็บรักษา และ ระยะเวลาการเก็บรักษา (BC)	ns	*	*
อุณหภูมิการเก็บรักษา , อุณหภูมิการอบแห้ง และ ระยะเวลาการเก็บรักษา (ABC)	ns	ns	*

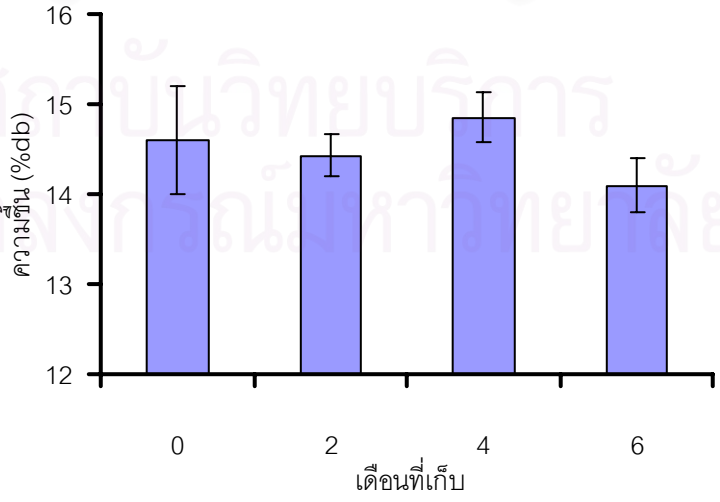
* มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ns ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

จากตารางที่ 4.5 เมื่อพิจารณาปัจจัยหลัก ได้แก่ อุณหภูมิในการอบแห้ง, อุณหภูมิในการเป็นรักษา และระยะเวลาในการเก็บรักษา พบว่า อุณหภูมิในการอบแห้งมีผลต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น ค่าดัชนีความขาว และปริมาณสารหอม 2AP ของข้าวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยเมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งเพิ่มสูงขึ้นทำให้ข้าวเปลือกมีแนวโน้มที่จะมีเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น ค่าดัชนีความขาว และปริมาณสารหอม 2AP ลดลง ส่วนอุณหภูมิในการเก็บรักษาพบว่าอุณหภูมิในการเก็บรักษาข้าวเปลือกที่ต่างกันมีแนวโน้มที่จะทำให้ข้าวมีเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น ค่าดัชนีความขาวของข้าวสาร และปริมาณสารหอม 2AP แตกต่างกับการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในส่วนของระยะเวลาในการเก็บรักษาพบว่ามีผลต่อค่าดัชนีความขาวของข้าวสารและปริมาณสารหอม 2AP อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แต่ไม่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) นอกจากนี้เมื่อพิจารณาการมีผลร่วมกันของปัจจัยหลัก พบว่า

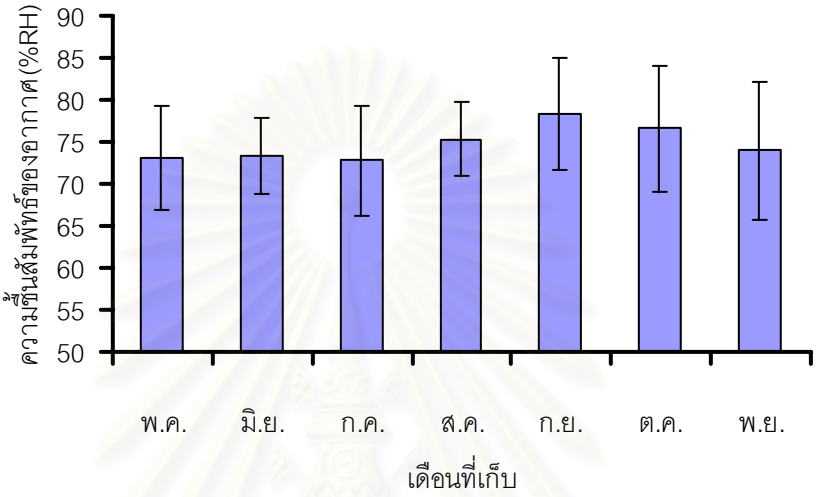
อุณหภูมิในการอบแห้ง และ อุณหภูมิในการเก็บรักษามีผลร่วมกันต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น ค่าดัชนีความขาวของข้าว และปริมาณสารหอม 2AP ของข้าวเปลือกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ส่วนอุณหภูมิในการอบแห้งและระยะเวลาในการเก็บรักษาไม่มีผลโดยตรงต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นและค่าดัชนีความขาวของข้าว แต่มีผลต่อปริมาณสารหอม 2AP อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) และในส่วนของอุณหภูมิการเก็บและระยะเวลาในการเก็บรักษา พบว่า ปัจจัยทั้งสองมีอิทธิพลร่วมกันต่อการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีความขาวของข้าว และปริมาณสารหอม 2AP ของข้าวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แต่ไม่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อพิจารณาปัจจัยร่วมของทั้งสามปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิในการอบแห้ง, อุณหภูมิในการเป็นรักษา และระยะเวลาในการเก็บรักษา พบว่า ปัจจัยทั้งสามไม่มีผลทำให้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นและค่าดัชนีความขาวของข้าวเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แต่มีอิทธิพลร่วมกันทำให้ปริมาณสารหอม 2AP ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ในระหว่างการเก็บรักษาข้าวเปลือกเป็นระยะเวลา 6 เดือน คือ ตั้งแต่เดือนพฤษภาคม ถึงเดือนพฤศจิกายน พ.ศ.2548 พบว่าปริมาณความชื้นของข้าวเปลือกมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะแวดล้อมของการเก็บรักษา แต่การเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นมีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) คืออยู่ในช่วง 14.10–14.85 %db (รูปที่ 4.20) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข.9) เนื่องจากในการทดลองนี้ไม่ได้มีการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องเก็บ ดังนั้นความชื้นของข้าวเปลือกจึงเปลี่ยนไปตามความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในระหว่างการเก็บรักษา (รูปที่ 4.21) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข.10) ซึ่งพบว่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในระหว่างเดือนพฤษภาคม–พฤศจิกายน 2548 มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)



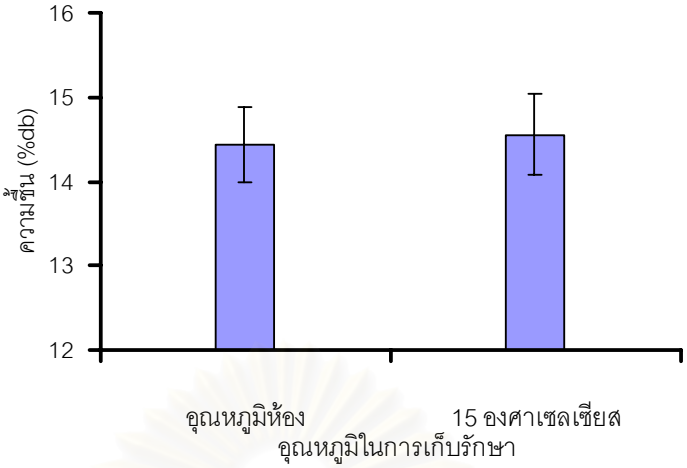
รูปที่ 4.20 ความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการเก็บรักษาข้าวเปลือก

จากรูปที่ 4.20 แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาการเก็บรักษาที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อปริมาณความชื้น โดยจะเห็นได้ว่าความชื้นของข้าวเปลือกมีการเปลี่ยนแปลงตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาเป็นเวลา 6 เดือน ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ เมธินี เห่วซึ่งเจริญ และคณะ (2546) ที่พบว่าเมื่อไม่ได้มีการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องเก็บแล้ว ความชื้นของข้าวเปลือกจะมีการเปลี่ยนแปลงแบบเพิ่มขึ้นและลดลงเช่นกัน



รูปที่ 4.21 ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ในกรุงเทพฯ ตั้งแต่เดือน พฤษภาคม – พฤศจิกายน 2548
ที่มา : กรมอุตุนิยมวิทยา (2548)

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อปริมาณความชื้น (รูปที่ 4.22) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข.11) จะเห็นได้ว่าข้าวเปลือกที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง จะมีปริมาณความชื้นลดลงมากกว่าข้าวเปลือกที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 15°C ทั้งนี้เนื่องจากที่อุณหภูมิห้อง (28 – 30°C) ซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่า ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศจะมีค่าต่ำ ดังนั้นเมล็ดข้าวจึงต้องมีการปรับความชื้นภายในเมล็ดให้เท่ากับความชื้นของสิ่งแวดล้อม เมื่อความชื้นของสิ่งแวดล้อมลดต่ำลง เมล็ดข้าวจึงมีการปรับตัวให้ความชื้นลดลงด้วย ในทางกลับกันที่อุณหภูมิต่ำ (15°C) จะมีความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศสูง ดังนั้นข้าวเปลือกที่มีความชื้นต่ำกว่า จะดูดความชื้นจากสิ่งแวดล้อม (นิธิยา รัตนาปนนท์, 2545) จึงทำให้ข้าวเปลือกที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำมีความชื้นสูงกว่าข้าวเปลือกที่เก็บที่อุณหภูมิสูงซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ เพลงพิณ ศิวาพรรักษ์ (2541) ซึ่งให้ผลการทดลองเช่นเดียวกัน แต่ทั้งนี้การเก็บรักษาทั้งสองสภาวะไม่ทำให้ปริมาณความชื้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

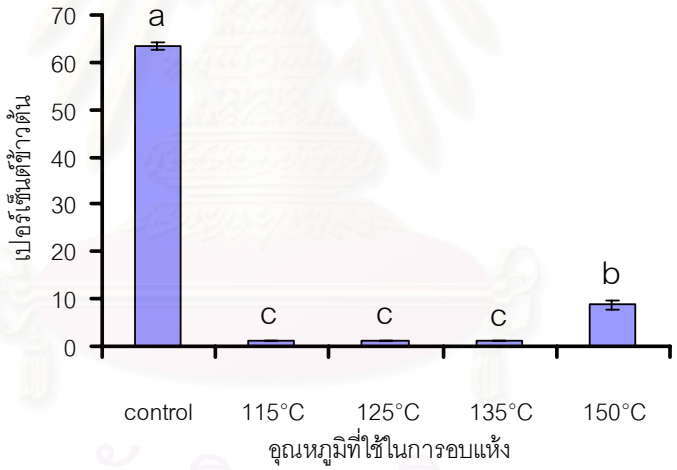


รูปที่ 4.22 ผลของอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อความชื้นของข้าวเปลือก

4.4.1 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นในระหว่างการเก็บรักษา

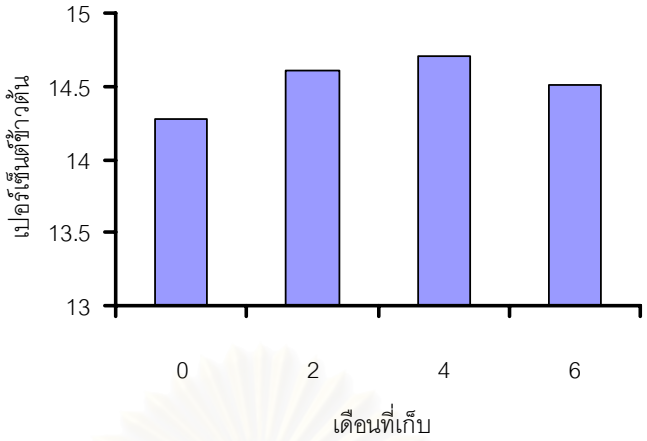
เมล็ดข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันทั้ง 2 รอบ และนำมาผึ่งจนอุณหภูมิของเมล็ดลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้อง (28-30°C) แล้วเมื่อพิจารณาผลของปัจจัยหลัก ได้แก่ อุณหภูมิในการอบแห้ง ระยะเวลาในการเก็บรักษา และ อุณหภูมิในการเก็บรักษา พบว่าได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 4.23–4.25 โดยข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งที่ทุกอุณหภูมิที่ทดลอง มีเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยพบว่าเมล็ดข้าวเกิดการแตกหักเสียหายอย่างมาก และความเสียหายที่เกิดขึ้นจะเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งสูงขึ้น ยกเว้นการอบแห้งที่อุณหภูมิ 150°C พบว่ามีเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิอื่น ๆ อย่างเห็นได้ชัด (รูปที่ 4.23) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข.12) และเมื่อนำข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งแล้วมาเก็บรักษาเป็นเวลา 6 เดือน พบว่าเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่เป็นการเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) (รูปที่ 4.24) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข.13) เนื่องจากการเก็บข้าวไว้เป็นเวลานานขึ้นจะส่งผลให้เม็ดแป้งที่อยู่ภายในเมล็ดข้าวมีการจับตัวกันแข็งแรงมากขึ้น ในขณะเดียวกันโปรตีนในเมล็ดข้าวก็เกิดการสร้างพันธะไดซัลไฟด์ระหว่างสายของโปรตีน ทำให้โครงสร้างของเม็ดแป้งมีความแข็งแรงและคงตัวมากขึ้น (Zhou et al., 2002) แต่เนื่องจากข้าวเปลือกมีรอยร้าวอย่างมากอยู่ก่อนแล้ว ดังนั้นการสร้างพันธะไดซัลไฟด์ระหว่างสายของโปรตีน และการจับตัวกันของเม็ดแป้งในระหว่างการเก็บรักษา จึงไม่มีผลทำให้เมล็ดข้าวมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นได้อีก หรือมีผลเพียงเล็กน้อยเท่านั้นในการเพิ่มเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น แต่หลังจากเดือนที่ 4 ไปแล้ว พบว่าระยะเวลาในการเก็บรักษาไม่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ เมธินี เห่วซึ่งเจริญ และคณะ (2546) ที่พบว่าคุณภาพของข้าวจะค่อนข้างคงที่ เมื่อข้าวมีอายุการเก็บรักษาในช่วง 3 – 6 เดือน

และเมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น พบว่าข้าวเปลือกที่เก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้อง มีแนวโน้มที่จะมีเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นสูงกว่าข้าวเปลือกที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 15°C (รูปที่ 4.25) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข.14) เนื่องจากการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้ข้าวเกิดความเครียดจากความเย็น (Chilling stress) ทำให้เมล็ดข้าวเกิดการร้าว เมื่อนำไปขัดสีจึงเกิดการแตกหักมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ พัสกร เจียตระกูล และคณะ (2546ข.) แม้ว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องจะทำให้มีเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นสูงกว่าการเก็บที่อุณหภูมิ15°C และ Juliano (1994) ก็พบว่า เมื่อเก็บรักษาข้าวไม่ว่าจะอยู่ในรูปข้าวเปลือก ข้าวกล้อง หรือข้าวสารจะทำให้ข้าวมีความทนทานต่อการขัดสีเพิ่มมากขึ้น และทำให้ได้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นเพิ่มขึ้น นอกจากนั้น งามชื่น คงเสรี (2538) ยังพบว่าการเก็บรักษาข้าวเปลือก จะทำให้ข้าวมีความแข็งแรงมากขึ้น และการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องมีผลทำให้ข้าวมีความแข็งแรงมากกว่าข้าวที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5°C เนื่องจากการเก็บรักษาทำให้ผนังเซลล์ของเอนโดสเปิร์มมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น (Shibuya, et al.,1982) แต่จากผลการทดลองนี้พบว่ามีเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ($p>0.05$) เนื่องจากเมล็ดข้าวมีรอยร้าวอยู่ก่อนแล้ว

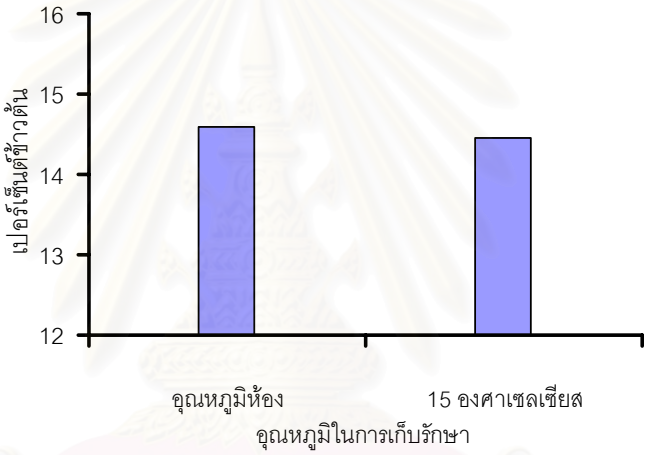


รูปที่ 4.23 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น

กราฟแท่งที่มีตัวอักษรกำกับที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq0.05$)

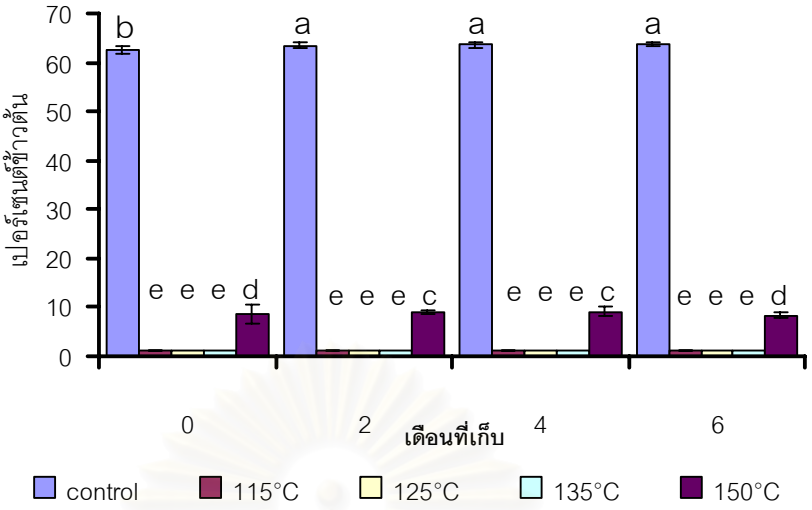


รูปที่ 4.24 ผลของระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น

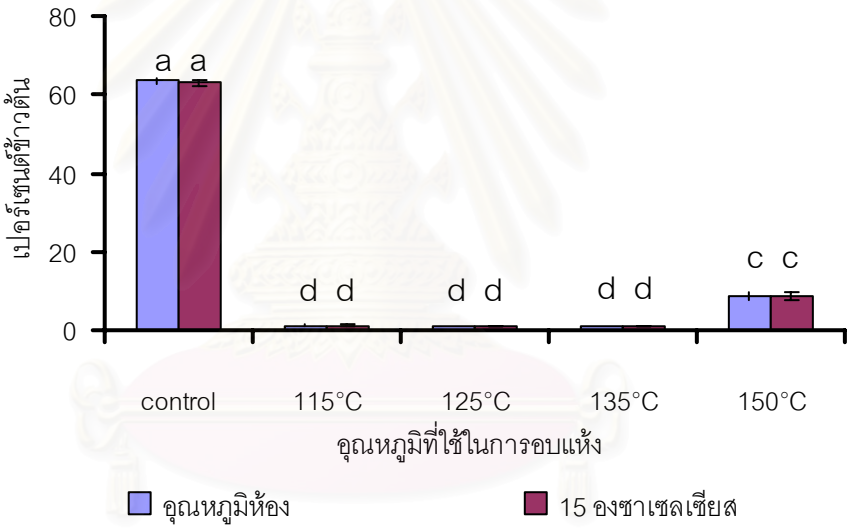


รูปที่ 4.25 ผลของอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น

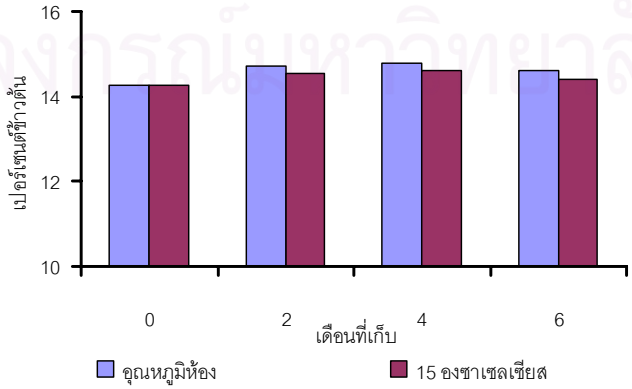
เมื่อพิจารณาผลร่วมกันของปัจจัยหลัก โดยศึกษาผลของอุณหภูมิในการอบแห้งและระยะเวลาในการเก็บรักษา (รูปที่ 4.26) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข.15) ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งและอุณหภูมิในการเก็บรักษา (รูปที่ 4.27) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข.16) รวมทั้งผลของอุณหภูมิการเก็บและระยะเวลาในการเก็บรักษา (รูปที่ 4.28) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข.17) พบว่าอุณหภูมิการเก็บและระยะเวลาในการเก็บรักษา ไม่มีอิทธิพลต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) โดยพบว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง หรือที่อุณหภูมิ 15°C และระยะเวลาการเก็บที่นานถึง 6 เดือน ไม่มีผลทำให้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นเกิดการเปลี่ยนแปลง แต่การเปลี่ยนแปลงที่แสดงให้เห็นในผลการทดลองนั้นเป็นผลสืบเนื่องมาจากผลของอุณหภูมิในการอบแห้งซึ่งทำให้ข้าวมีการแตกร้าวอยู่ก่อนแล้ว ดังนั้นการเก็บรักษาจึงไม่มีผลในการเพิ่มเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นได้อีก



รูปที่ 4.26 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งและระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น
กราฟแท่งที่มีตัวอักษรกำกับที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ($p \leq 0.05$)



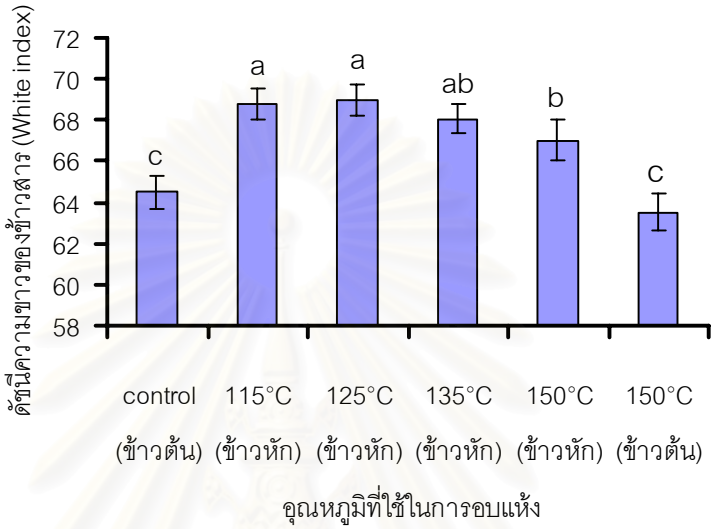
รูปที่ 4.27 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งและอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น
กราฟแท่งที่มีตัวอักษรกำกับที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ($p \leq 0.05$)



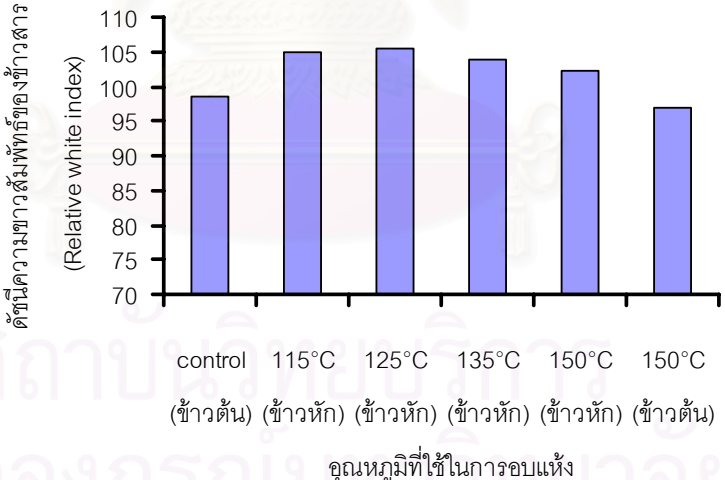
รูปที่ 4.28 ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น

4.4.2 การเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีความขาวของข้าวสารในระหว่างการเก็บรักษา

เมล็ดข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันทั้ง 2 รอบ และนำมาผึ่งจนอุณหภูมิของเมล็ดลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้อง (28-30°C) แล้วเมื่อนำมาเก็บรักษาเป็นเวลา 6 เดือน เมื่อนำมาวัดค่าสีและคำนวณออกมาเป็นค่าดัชนีความขาวของข้าวสาร พิจารณาผลของอุณหภูมิในการอบแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 4.29 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข.18)



(A)



(B)

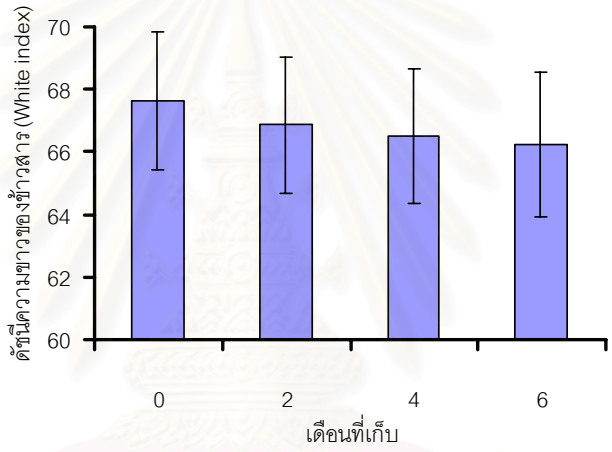
รูปที่ 4.29 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งต่อ (A) ดัชนีความขาวของข้าวสาร และ (B) ดัชนีความขาวสัมพัทธ์ของข้าวสาร

กราฟแท่งที่มีตัวอักษรกำกับที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

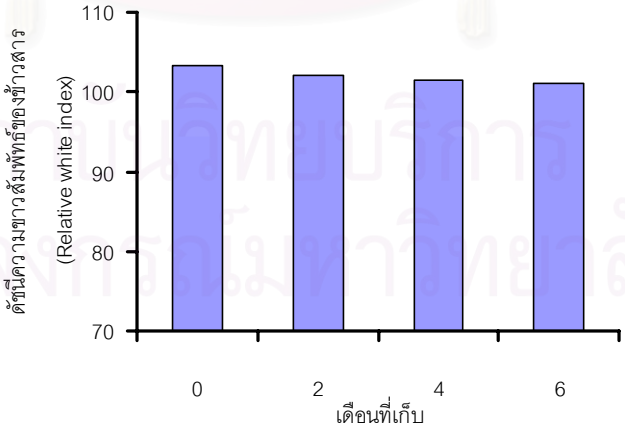
จากรูปที่ 4.29 พบว่าการอบแห้งในทุกอุณหภูมิ ทำให้ข้าวมีค่าดัชนีความขาวไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ยกเว้นการอบแห้งที่อุณหภูมิ 150°C พบว่ามีค่า

ดัชนีความขาวแตกต่างจากการอบแห้งที่อุณหภูมิอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แต่มีค่าไม่แตกต่างกับตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ทั้งนี้ความขาวของข้าวยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ในทางการค้าเพราะมีค่าดัชนีความขาวสัมพัทธ์มากกว่า80% (Soponronnarit และคณะ, 1999)

เมื่อพิจารณาผลของระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อดัชนีความขาวของข้าวสาร ดังแสดงในรูปที่ 4.30 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข.19) พบว่าดัชนีความขาวของข้าวสารมีแนวโน้มที่ลดลงตามระยะเวลาการเก็บที่นานขึ้น ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการเก็บที่นานขึ้นมีผลทำให้ผนังเซลล์ของเมล็ดข้าวมีความแข็งแรงมากขึ้น (Zhou et al., 2002) ดังนั้นเมื่อใช้เวลาในการขัดสีที่เท่ากัน ข้าวที่มีความแข็งแรงมาก (ข้าวที่ผ่านการเก็บรักษา) จะถูกขัดสีเพื่อกำจัดรำออกได้น้อยกว่าข้าวที่มีความแข็งแรงน้อย (ข้าวก่อนการเก็บรักษา)



(A)

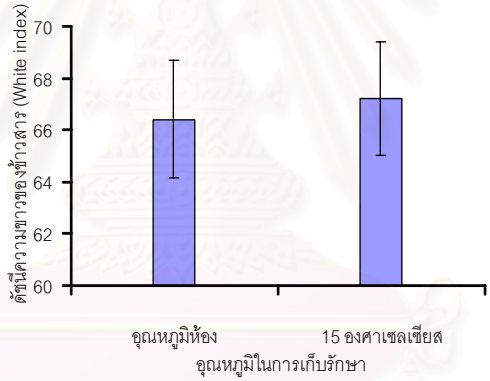


(B)

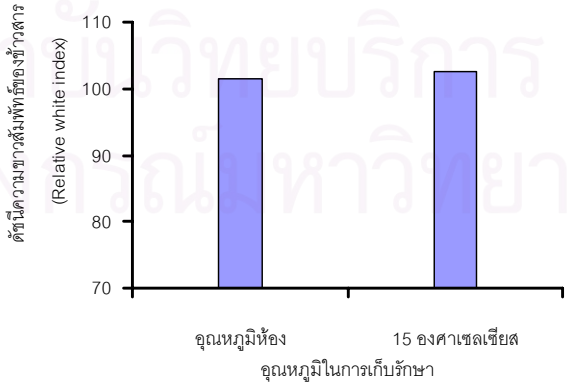
รูปที่ 4.30 ผลของระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อ (A) ดัชนีความขาวของข้าวสาร และ (B) ดัชนีความขาวสัมพัทธ์ของข้าวสาร

นอกจากนั้นยังเกิดจากปฏิกิริยา non-enzymatic browning ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาได้สูงสุดในอาหารที่มีค่า a_w ในช่วง 0.6-0.8 (นิธิยา รัตนาปนนท์, 2545) จึงเป็นสาเหตุให้ข้าวที่ผ่านการเก็บรักษามีดัชนีความขาวลดลงตามระยะเวลาการเก็บที่เพิ่มขึ้น (Barber, 1972) แต่ทั้งนี้การลดลงของค่าดัชนีความขาวของข้าวเป็นการลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิในการเก็บรักษา ต่อค่าดัชนีความขาวของข้าวสารและดัชนีความขาวสัมพัทธ์ของข้าวสาร (รูปที่ 4.31) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข.20) พบว่าข้าวเปลือกที่เก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 15°C มีแนวโน้มที่จะสามารถชะลอการเปลี่ยนแปลงสีของข้าวสารได้มากกว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง แต่ถ้าพิจารณาในทางสถิติแล้วพบว่าอุณหภูมิในการเก็บรักษาไม่มีผลทำให้ข้าวมีค่าดัชนีความขาวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ($p>0.05$) เนื่องจากการเก็บที่อุณหภูมิต่ำจะช่วยยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ ที่จะทำให้ข้าวเกิดการเปลี่ยนเป็นสีเหลือง ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ เมธินี เห่วซึ่งเจริญ และคณะ (2546) และเนื่องจากข้าวเปลือกที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องมีความแข็งแรงมากกว่า (มีเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นมากกว่า) เมื่อนำไปขัดสีจึงกำจัดรำออกได้น้อย จึงมีค่าดัชนีความขาวน้อยกว่า



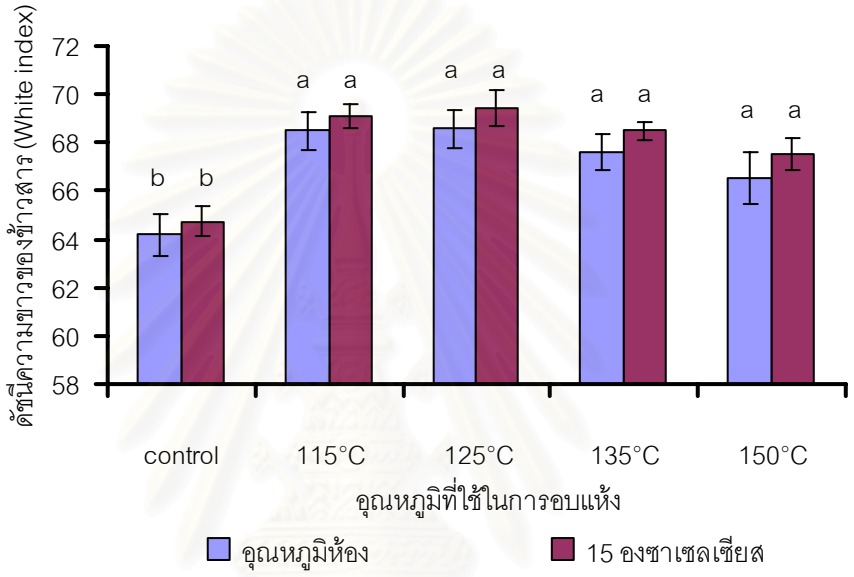
(A)



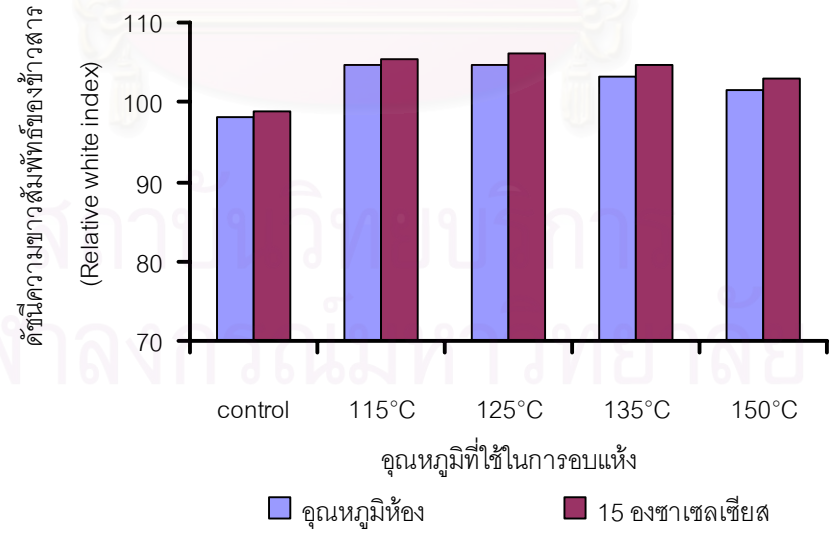
(B)

รูปที่ 4.31 ผลของอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อ (A) ดัชนีความขาวของข้าวสาร และ (B) ดัชนีความขาวสัมพัทธ์ของข้าวสาร

เมื่อพิจารณาปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิในการอบแห้ง และอุณหภูมิในการเก็บรักษาที่มีผลต่อค่าดัชนีความขาวของข้าวสาร และดัชนีความขาวสัมพัทธ์ของข้าวสาร (รูปที่ 4.32) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข.23-24) พบว่าการอบแห้งด้วยอุณหภูมิที่สูงขึ้นมีแนวโน้มที่จะทำให้ข้าวสารมีค่าดัชนีความขาวลดลง แต่เป็นการลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) และสภาวะการเก็บรักษาที่อุณหภูมิที่ต่างกันไม่ทำให้ข้าวมีค่าดัชนีความขาวต่างกัน แต่ถ้าเปรียบเทียบค่าดัชนีความขาวระหว่างข้าวที่ผ่านการอบแห้งกับตัวอย่างควบคุม พบว่าตัวอย่างควบคุมมีค่าดัชนีความขาวต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq0.05$)



(A)

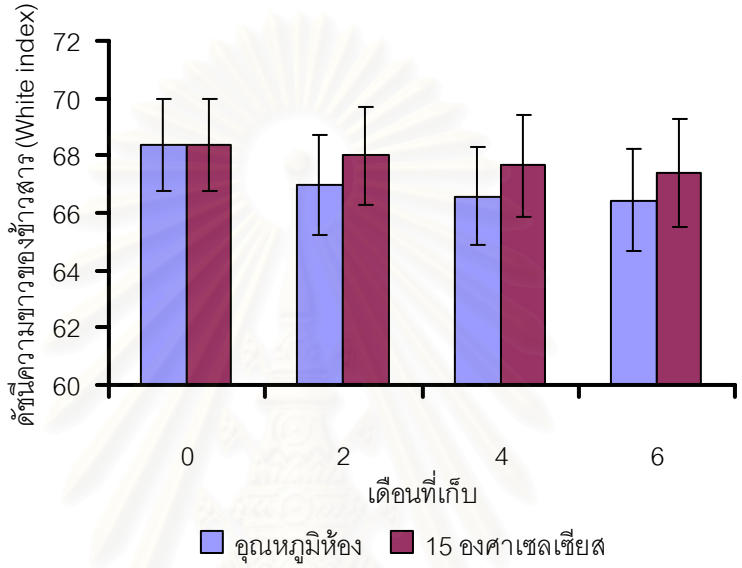


(B)

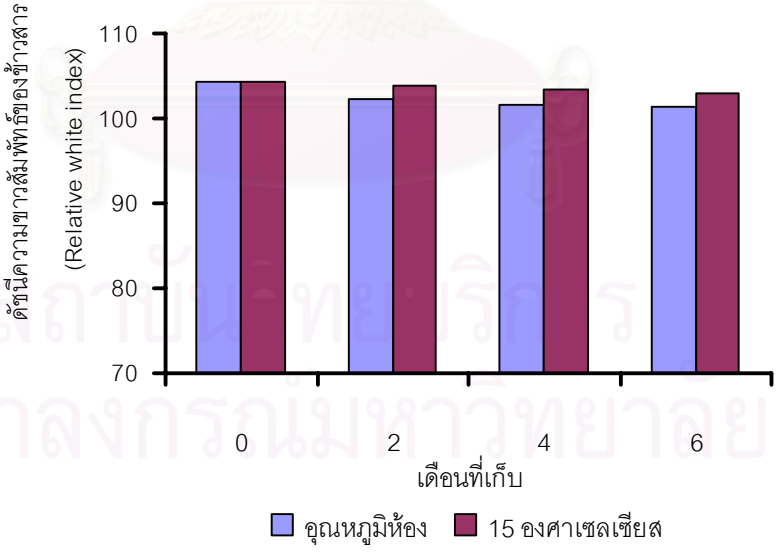
รูปที่ 4.32 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งและอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อ (A) ดัชนีความขาวของข้าวสาร และ (B) ดัชนีความขาวสัมพัทธ์ของข้าวสาร

กราฟแท่งที่มีตัวอักษรกำกับที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq0.05$)

ในส่วนผลของอุณหภูมิในการเก็บรักษาและระยะเวลาในการเก็บรักษา ต่อค่าดัชนีความขาวของข้าวสาร และดัชนีความขาวสัมพัทธ์ของข้าวสาร (รูปที่ 4.33) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข.25-26) พบว่าทั้งสองปัจจัยไม่มีอิทธิพลร่วมกันต่อการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีความขาวของข้าวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) สอดคล้องกับงานวิจัยของ เมธินี เห่วซึ่งเจริญ และคณะ (2546) ที่พบว่าคุณภาพของข้าวจะค่อนข้างคงที่ เมื่อข้าวมีอายุการเก็บรักษาในช่วง 3 – 6 เดือน



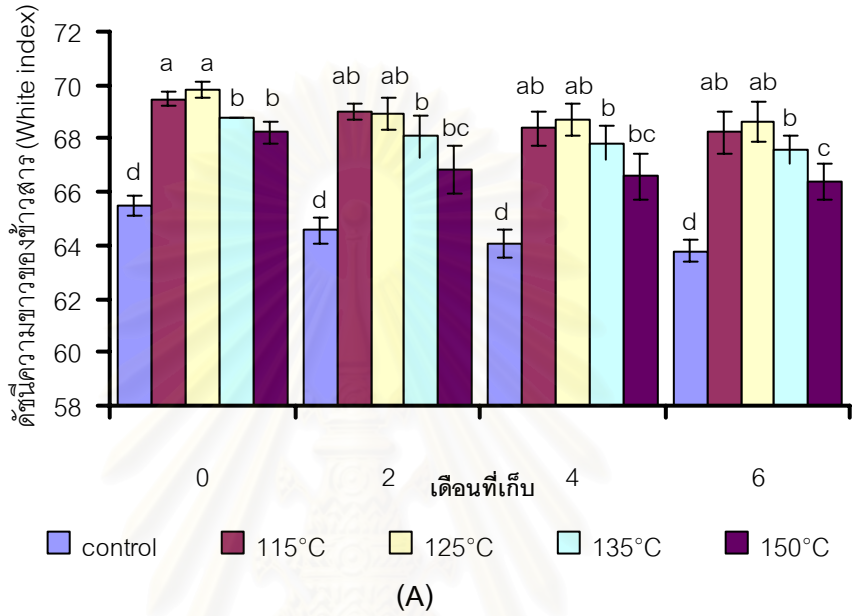
(A)



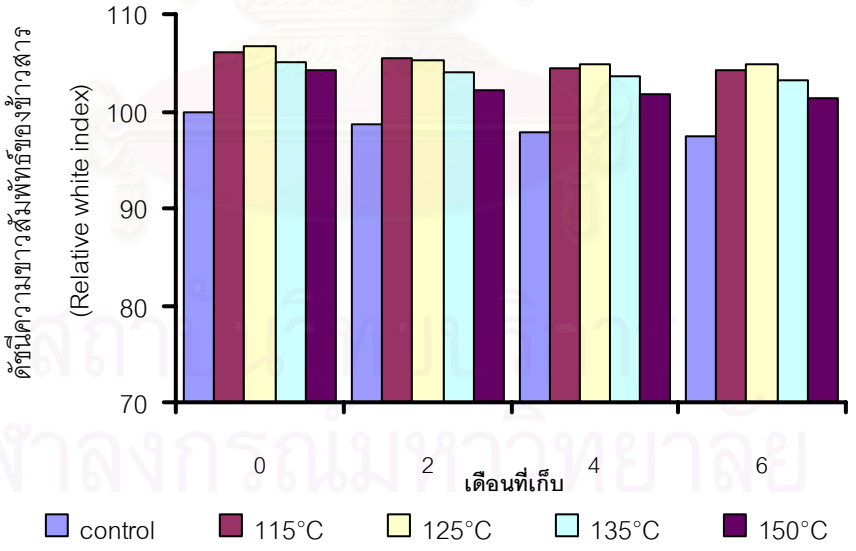
(B)

รูปที่ 4.33 ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อ (A) ดัชนีความขาวของข้าวสาร และ (B) ดัชนีความขาวสัมพัทธ์ของข้าวสาร

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิในการอบแห้งและระยะเวลาในการเก็บรักษา พบว่าทั้งสองปัจจัยไม่ส่งผลโดยตรงต่อค่าดัชนีความขาวของข้าวสาร และดัชนีความขาวสัมพัทธ์ของข้าวสาร (รูปที่ 4.34) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข.21-22) โดยจะเห็นได้ว่าระยะเวลาในการเก็บรักษาไม่มีผลทำให้ค่าดัชนีความขาวของข้าวสารลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) และความขาวที่ลดลงเป็นผลมาจากอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง



(A)



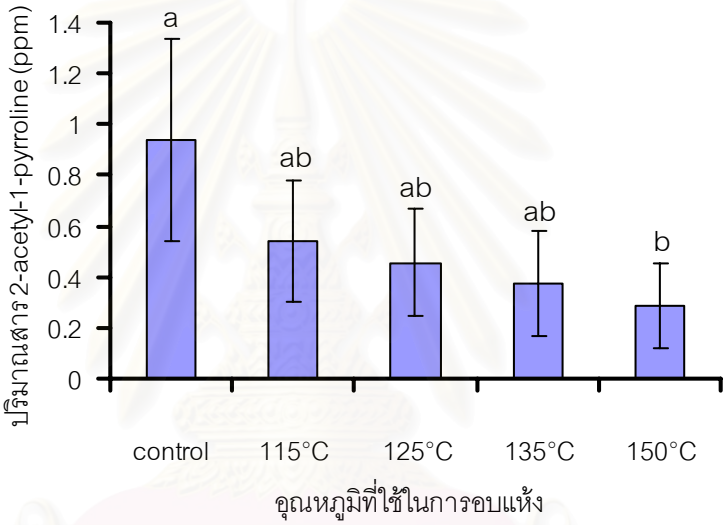
(B)

รูปที่ 4.34 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งและระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อ (A) ดัชนีความขาวของข้าวสาร และ (B) ดัชนีความขาวสัมพัทธ์ของข้าวสาร

กราฟแท่งที่มีตัวอักษรกำกับที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq0.05$)

4.4.3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2AP ของข้าวเปลือกในระหว่างการเก็บรักษา

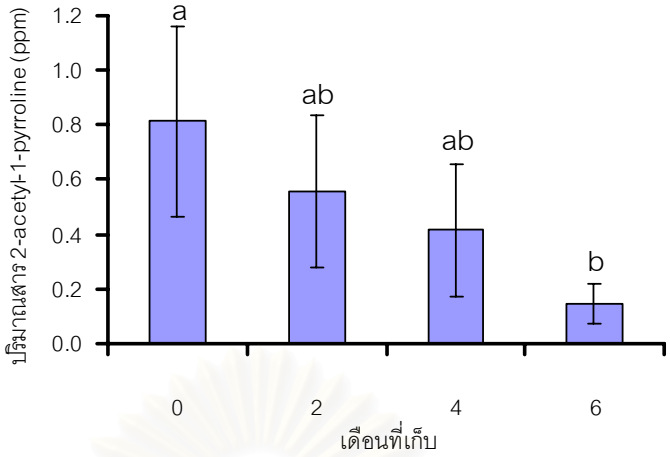
เมล็ดข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันทั้ง 2 รอบ และนำมาผึ่งจนอุณหภูมิของเมล็ดลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้อง (28-30°C) แล้วนำมาเก็บรักษาเป็นเวลา 6 เดือน เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิในการอบแห้งต่อปริมาณสารหอม 2AP (รูปที่ 4.35) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข.27) พบว่าข้าวเปลือกมีแนวโน้มที่จะมีปริมาณสารหอมลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่ออุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นเป็นปัจจัยที่ทำให้สารหอมในข้าวระเหยออกไปได้มากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Wongpornchai และคณะ (2004) ที่พบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ปริมาณสารหอมในข้าวเปลือกลดลงมากกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งจะเห็นได้จากรูปที่ 4.35



รูปที่ 4.35 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งต่อปริมาณสาร 2AP

กราฟแท่งที่มีตัวอักษรกำกับที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

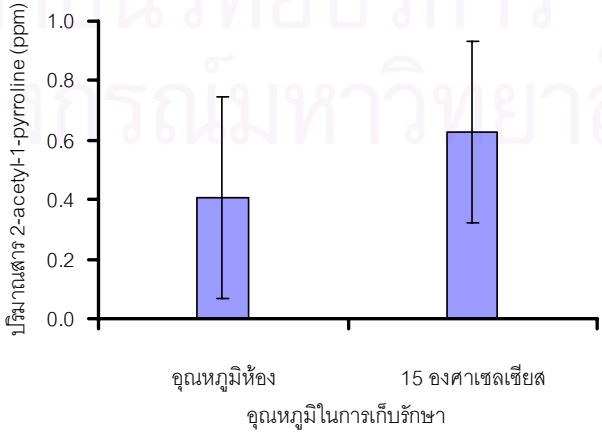
เมื่อพิจารณาผลของระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อปริมาณสาร 2AP (รูปที่ 4.36) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข.28) พบว่าสาร 2AP มีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาในการเก็บรักษาที่เพิ่มขึ้น โดยพบว่าในระหว่างการเก็บรักษา 4 เดือนแรก ปริมาณสารหอม 2AP มีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) และเมื่อเก็บรักษาข้าวเปลือกจนถึงเดือนที่ 6 พบว่าสารหอม 2AP มีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากสาร 2AP เป็นสารระเหย ดังนั้นการเก็บข้าวไว้นานขึ้นจะทำให้สารหอมค่อย ๆ ระเหยออกไป และจะลดลงจนมีปริมาณใกล้เคียงกับข้าวพันธุ์ไม่หอม (Laksanalamai and Ilangantileke, 1993) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Wongpornchai และคณะ (2004) ที่พบว่าเมื่อเก็บรักษาข้าวเปลือกเป็นเวลา 10 เดือน ปริมาณสารหอม 2AP ในข้าวจะลดลงตามระยะเวลาในการเก็บรักษา



รูปที่ 4.36 ผลของระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อปริมาณสาร 2AP

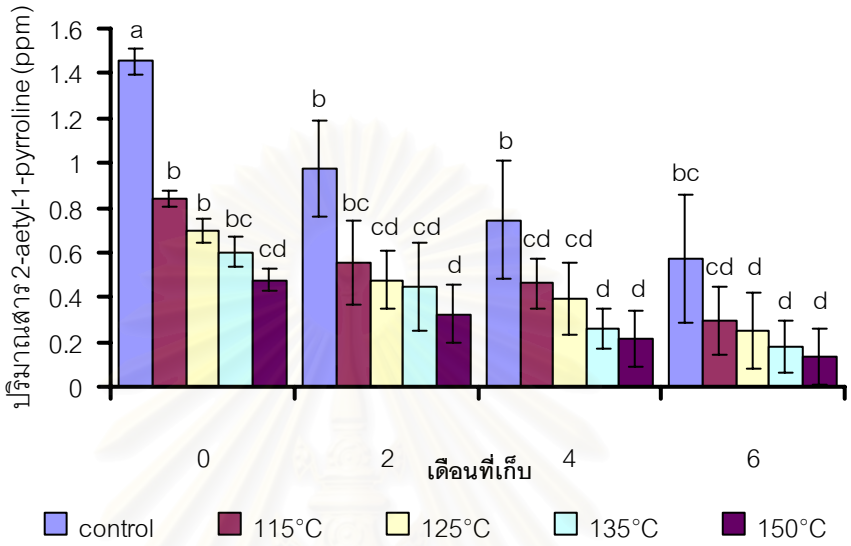
กราฟแท่งที่มีตัวอักษรกำกับที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อปริมาณสาร 2AP (รูปที่ 4.37) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข.29) พบว่าข้าวเปลือกที่เก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 15°C มีแนวโน้มที่จะสามารถชะลอการลดลงของสาร 2AP ได้ดีกว่าการเก็บที่อุณหภูมิห้อง (28-30°C) แต่ปริมาณสารหอม 2AP ของข้าวที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิที่ต่างกันนี้มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) สอดคล้องกับงานวิจัยของ พัสกร เจียตระกูล และคณะ (2546ข.) ที่เก็บรักษาข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 10°C , 15°C และอุณหภูมิห้อง (28-30°C) เป็นระยะเวลา 6 เดือน แล้วพบว่าปริมาณสารหอมในข้าวมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการเก็บรักษา และการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 15°C สามารถชะลอการลดลงของสาร 2AP ได้ดีกว่าการเก็บที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากสารหอม 2AP เป็นสารที่ระเหยได้ง่าย ดังนั้นการเก็บรักษาที่อุณหภูมิสูงจึงเป็นการกระตุ้นให้สาร 2AP ระเหยออกไปได้มากกว่าการเก็บที่อุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 4.37 ผลของอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อปริมาณสาร 2AP

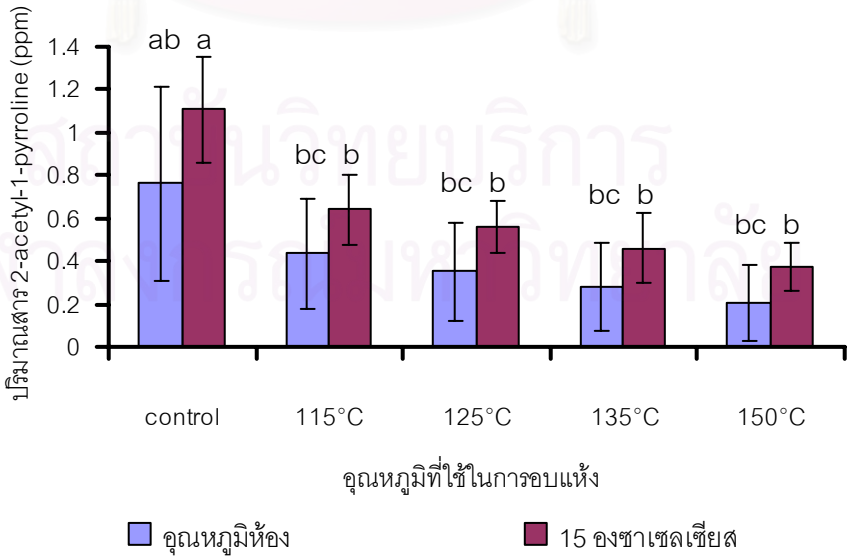
เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิในการอบแห้งและระยะเวลาในการเก็บรักษา (รูปที่ 4.38) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข.30) พบว่าระยะเวลาการเก็บรักษาที่นานขึ้นมีผลต่อการลดลงของสารหอม 2AP เพียงเล็กน้อย โดยทำให้สารหอม 2AP ลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) และการลดลงของปริมาณสารหอม 2AP เป็นผลมาจากอุณหภูมิในการอบแห้ง



รูปที่ 4.38 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งและระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อปริมาณสาร 2AP

กราฟแท่งที่มีตัวอักษรกำกับที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq0.05$)

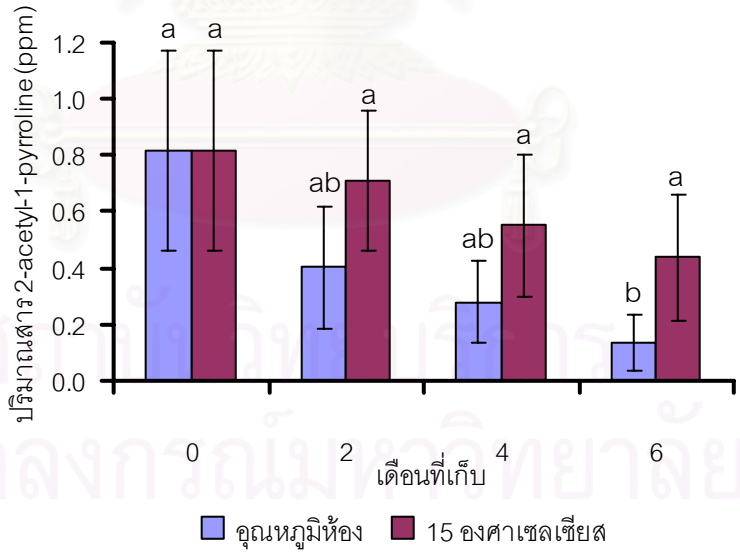
เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิในการอบแห้งกับอุณหภูมิในการเก็บรักษา (รูปที่ 4.39) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข.31) พบว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 15°C มีแนวโน้มที่จะทำให้ปริมาณสารหอม 2AP ลดลงน้อยกว่าการเก็บที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิในการอบแห้งที่ต่างกันไม่มีผลต่อปริมาณสารหอม 2AP อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)



รูปที่ 4.39 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งและอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อปริมาณสาร 2AP

กราฟแท่งที่มีตัวอักษรกำกับที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq0.05$)

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิในการเก็บรักษากับระยะเวลาในการเก็บรักษา (รูปที่ 4.40) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข.32) พบว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 15°C สามารถรักษาปริมาณสารหอม 2AP ไว้ได้ โดยในระหว่างการเก็บรักษา ปริมาณสารหอม 2AP มีแนวโน้มที่ลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ส่วนการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องพบว่า สารหอม 2AP มีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq0.05$) ตั้งแต่เดือนที่ 2 และลดลงอย่างเห็นได้ชัดในเดือนที่ 6 ของการเก็บรักษา ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ เมธินี เห่วซึ่งเจริญ และคณะ (2546) ; พัสกร เจียตระกูล และคณะ (2546ข.) ; Laksanalamai และ Ilangantileke (1993) ที่พบว่าการเก็บข้าวในโรงเก็บที่มีอากาศแห้งและมีอุณหภูมิต่ำประมาณ 15°C สามารถรักษาสารหอมไว้ได้ดีกว่าการเก็บที่อุณหภูมิห้องใน 4 เดือนแรก และข้าวเปลือกที่เก็บรักษาไว้เป็นเวลานานจะมีความหอมลดลงจนใกล้เคียงกับข้าวพันธุ์ไม่หอม และมีรายงานว่ากลิ่นหอมจะลดลง 50% เมื่อเก็บที่อุณหภูมิห้อง แสดงให้เห็นว่าเมื่อต้องการเก็บรักษาข้าวเปลือกเป็นระยะเวลานานให้คงความหอมไว้ให้ได้มากที่สุดจะต้องเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำนั้นนอกจากจะช่วยรักษาคุณภาพของข้าวในด้านความขาวของข้าวและปริมาณสารหอม 2AP แล้วยังช่วยยับยั้งการเจริญของเมล็ดศัตรูพืชที่ทำลายข้าวได้ บุษรา จันทร์แก้วมณี (2547) ได้เสนอแนะว่าการเก็บเมล็ดพืชที่อุณหภูมิต่ำกว่า 12°C จะทำให้แมลงหยุดการเจริญเติบโตและขยายพันธุ์ได้ และแมลงจะตายหมดที่อุณหภูมิ -2 ถึง -5°C



รูปที่ 4.40 ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อปริมาณสารหอม 2AP

กราฟแท่งที่มีตัวอักษรกำกับที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq0.05$)

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

เมื่ออบแห้งข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้น 35-37%db ด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันที่อุณหภูมิ 115, 125, 135 และ 150°C จนกระทั่งความชื้นลดลงเหลือ 23-24 %db (ใช้เวลา 3, 3, 2.5 และ 2 นาที ตามลำดับ) ร่วมกับการ tempering 30 นาที จากนั้นนำไปอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันโดยใช้อุณหภูมิระดับเดิมจนกระทั่งความชื้นลดลงเหลือ 15-17%db (ใช้เวลา 3, 2, 1.5 และ 1 นาที ตามลำดับ) พบว่าส่งผลให้มีเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นต่ำกว่าตัวอย่างควบคุม เนื่องจากข้าวเปลือกเกิดการร้าวเมื่อนำมาขัดสีจึงเกิดการแตกหัก โดยการแตกหักจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งเพิ่มขึ้น ยกเว้นการอบแห้งที่อุณหภูมิ 150°C ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิอื่นๆ และเมื่อทดลองเปลี่ยนวิธีการลดความชื้นในรอบที่ 2 จากเดิมที่ลดความชื้นด้วยการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันมาเป็นการตากในที่ร่ม พบว่าได้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นเพิ่มขึ้น โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง 135°C และ 150°C ทำให้ได้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นสูงกว่าตัวอย่างควบคุม และได้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นสูงสุดเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิ 150°C ในด้านของค่าดัชนีความขาวและปริมาณสารหอม 2AP พบว่ามีแนวโน้มที่ลดลง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการอบแห้งให้มากขึ้น แต่ความขาวของข้าวสารในทุกอุณหภูมิที่อบแห้งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ในทางการค้า คือ มีค่าดัชนีความขาวสัมพัทธ์สูงกว่า 80%

ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของข้าวเปลือกในระหว่างการเก็บรักษาพบว่า อุณหภูมิในการเก็บรักษาและระยะเวลาการเก็บรักษาไม่มีผลทำให้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นและดัชนีความขาวของข้าวสารเกิดการเปลี่ยนแปลง แต่การเปลี่ยนแปลงที่แสดงให้เห็นในผลการทดลองนั้นเป็นผลสืบเนื่องมาจากผลของอุณหภูมิในการอบแห้งซึ่งทำให้ข้าวมีการแตกร้าวอยู่ก่อนแล้ว ดังนั้นการเก็บรักษาจึงไม่มีผลในการเพิ่มเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นได้อีก และไม่มีผลต่อค่าดัชนีความขาวของข้าวสาร แต่มีผลทำให้ปริมาณสารหอม 2AP ลดลง และการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 15°C มีแนวโน้มที่จะช่วยชะลอการลดลงของสารหอม 2AP ได้มากกว่าการเก็บที่อุณหภูมิห้อง แสดงให้เห็นว่าถ้าต้องการเก็บรักษาข้าวเปลือกเป็นระยะเวลานานให้คงความหอมไว้ให้ได้มากที่สุดจะต้องเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 15°C

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในทางการค้าถ้าพิจารณาในด้านของการผลิตเพื่อให้ได้ปริมาณผลผลิตที่เป็นข้าวเต็มเมล็ดมากๆ ควรเลือกการอบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 150°C ร่วมกับการ tempering เนื่องจากมีแนวโน้มที่ทำให้ได้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นสูงสุด แต่การลดความชื้นในช่วงความชื้นต่ำกว่า 23-24 %db ไม่ควรใช้วิธีการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันที่อุณหภูมิสูงกว่า 100°C แต่ควรใช้วิธีการตากในที่ร่มหรืออบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งอื่นๆที่มีอุณหภูมิต่ำกว่านี้ และการเก็บข้าวเปลือกไว้ที่อุณหภูมิห้องมีแนวโน้มที่จะทำให้ได้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นมากกว่า แต่ถ้าพิจารณาในแง่ของการเก็บรักษาความหอมและความขาวของข้าวควรเลือกเก็บข้าวไว้ที่อุณหภูมิ 15°C

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

กรมวิชาการเกษตร. 2545. วิวัฒนาการการผลิตข้าวไทย. สถาบันวิจัยข้าว กระทรวงเกษตรสหกรณ์. โรงพิมพ์นิวธรรมดาการพิมพ์ จำกัด.

กรมอุตุนิยมวิทยา. 2548. รายงานผลความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในกรุงเทพฯ ของเดือนพฤษภาคม ถึง พฤศจิกายน พ.ศ.2548.

กรรณานุช เลาห์เรณู, นุสรา เมธาพิพัฒน์ และศรีสุรางค์ ปิ่นแสงมณี. 2541. การตรวจพิสูจน์สาร2-อะซิทิล-1-ไพโรลีนซึ่งเป็นสารสำคัญที่ให้กลิ่นข้าวหอมในมะพร้าว. ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 56 หน้า.

กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ. 2546. เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตร. 303 หน้า.

กัญญา เชื้อพันธุ์. 2547. คุณภาพข้าวทางกายภาพ. ใน คุณภาพและการตรวจสอบข้าวหอมมะลิไทย. หน้า 31-40. กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

กิติยา กิจควรดี. 2547. การเก็บเกี่ยวและปฏิบัติหลังการเก็บเกี่ยวเพื่อให้ได้ข้าวคุณภาพดี. ใน คุณภาพและการตรวจสอบข้าวหอมมะลิไทย. หน้า 1-16. กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

กริช เจียมวิโรจน์. 2543. การอบแห้งข้าวกล้อง. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. สายวิชาเทคโนโลยีอุณหภาพ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ขุนพล สังข์อารียกุล. 2544. การประเมินสถานภาพเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกในประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. สายวิชาเทคโนโลยีอุณหภาพ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

คงศักดิ์ ชินนาบุญ. 2543. อิทธิพลของการทำเทมเปอริงที่มีต่อคุณภาพของเมล็ดข้าวโพดหลังการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. สายวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอม เกล้าธนบุรี.

งามชื่น คงเสรี, พูลศรี สว่างจิต, สุนันทา วงศ์ปิยชน, ประนอม มงคลบรรจง, กัมปนาท มุขดี และจันทนา สรสิริ. 2533. การเปลี่ยนแปลงคุณภาพการหุงต้มและรับประทานของข้าวเมื่อเก็บเมล็ดในสภาพต่าง ๆ ในระหว่างการเก็บรักษา. รายงานผลงานวิจัยของสถาบันวิจัยข้าวประจำปี พ.ศ. 2533. ศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี สถาบันวิจัยข้าว. หน้า 109-129.

งามชื่น คงเสรี. 2538. การปรับปรุงคุณภาพข้าวสารเพื่อการบริโภคและส่งออก. ใน เอกสารการฝึกอบรมหลักสูตรการวิเคราะห์คุณภาพข้าวทางเคมี 1-2 และ 15-16 มิถุนายน 2538. หน้า 1-23. ศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี.

ณัฐพล ภูมิสะอาด. 2540. การจัดการข้าวเปลือกชื้นโดยการอบแห้งแบบฟลูอิไดเซชัน การเก็บในที่อับอากาศ และการเป่าด้วยอากาศแวดล้อม. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. สายวิชาเทคโนโลยีอุณหภาพ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ณัฐพล ภูมิสะอาด. 2544. การออกแบบระบบอบแห้งข้าวเปลือกในโรงสีข้าวที่เหมาะสมที่สุด. ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สายวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ทินกร สีเสียดค้า. 2548. การวิเคราะห์ 2-อะเซทิล-1-พิโรลีน โดยตรงในเมล็ดข้าวด้วยเฮดสเปซ-แก๊สโครมาโทกราฟี. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

นเรศ มีโส. 2541. การประเมินสมรรถนะของระบบอบแห้งในโรงสีข้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. สายวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

นันทวรรณ รักพงษ์. 2547. อิทธิพลของการควบคุมแหล่งสังเคราะห์แสงที่มีผลต่อการสังเคราะห์และการสะสมปริมาณสารหอม 2-acetyl-1-pyrroline ของพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. สาขาวิชาพืชไร่ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

นิธิยา รัตนาปนนท์. 2546. เคมีอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.

บริบูรณ์ สมฤทธิ์. 2543. โครงการวิจัยสภาพพื้นที่เหมาะสมสำหรับปลูกข้าวขาวดอกมะลิ 105 และกข 15 ในประเทศไทย. กรุงเทพฯ.

บุญมี ศิริ, สุกัญญา วงศ์พรชัย, ศักดิ์ดา จงแก้ววัฒนา และศิริพร ศรีล้อม. 2546. ผลการลดความชื้น และระยะเวลาการเก็บรักษาต่อคุณภาพการขัดสีของข้าวหอมมะลิ 105. Postharvest Technology Information Network. (30 October 2003). 4 หน้า.

บุษรา จันทร์แก้วมณี. 2547. การจัดการแมลงศัตรูข้าวหลังการเก็บเกี่ยว. ใน คุณภาพและการตรวจสอบข้าวหอมมะลิไทย.หน้า17-30. กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

พรรณนิภา สืบราช, ทรงศิลป์ พจน์ชนะชัย, ณัฏฐา เลาหกุลจิต และอรพิน เกิดชูชื่น. 2549. อิทธิพลของการลดความชื้นต่อปริมาณสาร 2-acetyl-1-pyrroline ในข้าวหอมพันธุ์ปทุมธานี 1. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. 37(2) มีนาคม - เมษายน : 174-177.

พัสกร เจียตระกูล, เมธินี เห่วซึ่งเจริญ และ ศุภศักดิ์ ลิปปิติ. 2546ก. ผลของอุณหภูมิและความชื้นต่อคุณภาพการสีข้าวขาวดอกมะลิ 105. เครือข่ายข้อมูลวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว. 8 หน้า.

พัสกร เจียตระกูล, เมธินี เห่วซึ่งเจริญ และ ศุภศักดิ์ ลิมปิติ. 2546ข. ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวขาวดอกมะลิ105. สัมมนาวิชาการวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว/หลังการผลิตแห่งชาติ 2. (21-22 สิงหาคม) : 10 หน้า.

พิพัฒน์ อมตฉายา. 2538. การอบแห้งข้าวเปลือกและข้าวโพดในที่เก็บและการเก็บรักษาในสภาพที่ใช้งานจริง. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. สายวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

เพลงพิณ ศิวาพรรักษ์. 2541. ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณอะไมโลส คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. สาขาวิชาเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

มาตรฐานข้าวไทย. 2540. กรมการค้าภายใน. กระทรวงพาณิชย์.

เมธินี เห่วซึ่งเจริญ, ศุภศักดิ์ ลิมปิติ, ทวีชัย นิมาแสง และ พัสกร เจียตระกูล. 2546. การรักษาข้าวขาวดอกมะลิให้คงความหอมด้วยวิธี Grain Chilling. เครือข่ายข้อมูลวิทยาหลังการเก็บเกี่ยว. 12 หน้า.

ละมุล วิเศษ. 2541. ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณไขมันคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของข้าวกล้องพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

วิไล รังสาดทอง. 2543. เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร. ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 401 หน้า.

สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, อดิเทพ ทวีรัตนพาณิชย์, สมบูรณ์ เวชกามา, งามชื่น คงเสรี และสุนันทา วงศ์ปิยชน. 2541. ผลพลอยได้จากการอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้เทคนิคฟลูอิดไดเซชัน. วารสารราชบัณฑิตยสถาน. 24 (2) : 49 – 64.

สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, สมบูรณ์ เวชกามา และณัฐพล ภูมิสะอาด. 2542. การจัดการข้าวเปลือกชื้นโดยการอบแห้งแบบฟลูอิดไดเซชัน การเก็บในที่อับอากาศ และการเป่าด้วยอากาศแวดล้อม. บทความวิจัยและบทความวิชาการประจำปีงบประมาณ 2542. คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. หน้า 167 – 172.

สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ. 2528. ฟลูอิดไดเซชัน. โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 255 หน้า.

สุกัญญา มหาธีรานนท์. 2540. การศึกษาสารให้ความหอมในเมล็ดข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105. เอกสารวิชาการ Biotech 1/2540. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. หน้า 1 – 33.

สุกัญญา วงศ์พรชัย. 2544. การวิเคราะห์ปริมาณสารหอม 2-อะเซติล-1-ไพรโรลีน ในข้าวด้วยวิธีทางเคมี. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. 65 หน้า.

สุกัญญา วงศ์พรชัย .2547. รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการ การพัฒนาวิธีการตรวจวัดปริมาณสารหอมในข้าว. 112 หน้า.

สุทธินี วานิชสำราญ. 2545. การเพิ่มปริมาณต้นข้าวของข้าวคุณภาพต่ำโดยการแช่ร่วมกับการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สุภวรรณ ฏิระวณิชย์กุล, สมเกียรติ ปรัชญาวรากร, พัชรี ตั้งตระกูล, วารุณี วารัญญานนท์ และ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. 2546. ปัจจัยของอุณหภูมิอบแห้งของเครื่องฟลูอิไดซ์เบดที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพข้าวและการชิมของข้าวสุก. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยครั้งที่ 4 เค ยู โฮม.มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. หน้า 306 – 323.

อดิเทพ ทวีรัตนพาณิชย์. 2540. เงื่อนไขการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดเพื่อการเพิ่มคุณภาพข้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. ภาควิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

อดิเทพ ทวีรัตนพาณิชย์, สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, สมบูรณ์ เวชกามา, งามชื่น คงเสรี และ สุนันทา วงศ์ปิยชน. 2542. การอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคฟลูอิไดเซชันเพื่อการเพิ่มปริมาณข้าวเต็มเมล็ด. วารสารเกษตรศาสตร์ (วิทยาศาสตร์) 33 : 134-145.

อนันต์ พลธานี. 2533. ข้าวหอม : พืชเศรษฐกิจที่ควรพัฒนา. แก่นเกษตร. 18 : 55 – 59.

อัมมาร์ สยามวาลา และวิโรจน์ ณ ระนอง. 2533. ประมวลความรู้เรื่องข้าว. สถาบันวิจัยเพื่อการพัฒนาประเทศไทย. หน้า 158-159, 235-239.

อรอนงค์ นัยวิกุล. 2547. ข้าว : วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทางอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 366 หน้า.

เอกรินทร์ โบษกรนัฏ. 2545. การอบแห้งข้าวนึ่งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. ภาควิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

เอกสารเศรษฐกิจการเกษตร เลขที่ 50. 2538. การวิเคราะห์ต้นทุนและผลตอบแทนการผลิตข้าวหอมมะลิ 105 ปี 2536 /37. กองวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร. สำนักงานเศรษฐกิจารเกษตร. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

AOAC. 1990. Official Method of Analysis. Association of Official Analytical Chemists.15th ed. Washington D.C. : Association of Official Analytical Chemists.

Bal, S. and Ojha, T.P. 1975. Determination of biological maturity and effect of harvesting and drying conditions on milling of paddy. Journal of Agricultural Engineering Research. 20 : 353-361.

Barber, S. 1972. Milled rice and changes during ageing in rice : chemistry and technology. 1st ed. American Association of Cereal Chemists. St. Paul, Minnesota, U.S.A.

Buttery, R.G., Juliano, B.O. and Ling, L.C. 1982. 2-Acetyl-1-pyrroline : an important aroma component of cooked rice. Chemistry and Industry.(London). pp.958-959.

Buttery, R.G., Juliano, B.O. and Ling, L.C. 1983. Identification of rice aroma compound 2-acetyl-1-pyrroline in pandan leaves. Chemistry and Industry.(London).23 : 478.

Buttery, R.G., Ling, L.C. and Donald, D.J. 1994. Studies on flavor volatiles of some sweet corn products. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 42(3):791-795.

Chen, J.J., Lu, S. and Lii, C.Y. 1999. Effect of milling methods on the physicochemical characteristics of waxy rice in Taiwan. Cereal Chemistry. 76(5) : 796-798.

Cnossen, A.G. and Siebenmorgen, T.J. 2000. The glass transition temperature concept in rice drying and tempering : Effect on milling quality. Transactions of the ASAE. 43(6) : 1661 – 1667.

Cnossen, A.G., Jimenez, M.J., and Siebenmorgen, T.J. 2003. Rice fissuring response to high drying and tempering temperatures. Journal of Food Engineering. 59 : 61 – 69.

Cochran, W.C. and Cox, G.M. 1992. Experimenal Design. 2nd ed. New York : John Wiley & Sons.

Gasser, U. and Grosch, W. 1988. Identification of volatile flavor components with high aroma values of cooked beef. Z.Lebenm.Unter.Forsch. 188 : 489-494.

Gras, P.W., Banks, H.J., Bason, M.L. and Arriola, L.P. 1989. A quantitative study of the influences of temperature, water activity and storage atmosphere on the yellowing of milled rice. Journal of Cereal Science. 9 : 77-89.

Hebeda, R.E. and Zobel, H.F. 1996. Baked goods freshness technology, evaluation and inhibition of staling. pp. 1 – 60.

Hovmand, S. 1987. Handbook of Industrial drying. Mujumdar, A.S. (ed.). Marcel Dekker, Inc. New York.

Juliano, B.O. 1985. Criteria and tests for rice grain qualities in rice : Chemistry and Technology. 2nd ed. American Association of Cereal Chemists, St. Paul, Minnesota, U.S.A.

Juliano, B.O. 1994. Concerns for quality maintenance during storage of cereals and cereal products. Proceedings of the 6th International Working Conference on Stored-Product Production-Volume 2, Canberra, Australia, 17-23 April 1994, pp. 663-665.

Laksanalamai, V. and Ilangantileke, S. 1993. Comparison of aroma compound (2-Acetyl-1-pyrroline) in leaves from pandan *(Pandanus amaryllifolius)* and Thai fragrant rice (Khao Dawk Mali-105). Cereal Chemistry. 70 (4) : 381-384.

Mahatheeranont, S., Promdang, S. and Chiampiriyakul, A. 1995. Volatile aroma compounds of Khao Dawk Mali 105 rice. Kasetsart Journal. (Nat. Sci.). 29 : 508– 514.

Perdon, A.A., Siebenmorgen, T.J. and Mauromoustakos, A. 2000. Glassy state transition and rice drying : Development of a brown rice state diagram. Cereal Chemistry. 77 : 708-713.

Philips, S.I., Twiddy, D.R. and Reilly, P.J.A. 1988. Post harvest discoloration of rice. Poster presented at the society for applied microbiology conference. July, 1988.

Poomsa-ad, N., Soponronnarit, S., Prachayawarakorn, S., and Terdyothin, A. 2002. Effect of tempering on subsequent drying of paddy using fluidisation technique. Drying Technology. 20 (1) : 195-210.

Poomsa-ad, N., Terdyothin, A., Prachayawarakorn, S., and Soponronnarit, S. 2005. Investigations on head-rice yield and operating time in the fluidized-bed drying process : experiment and simulation. Journal of Stored Products Research. 41 : 387-400.

Rudi, V., Veerle, D., Jan, D.A., Bart, G., Harry, R. and Michel, K.H.J. 2006. Structural transformations during gelatinization of starches in limited water : combined wide-and small-angle X-ray scattering study. Biomacromolecules. 7 (4) : 1231-1238.

Schieberle, P. and Grosch, W. 1985. Identification of volatile flavor compounds of wheat bread crust-comparison with rye bread crust. Z.Lebenm.Unter.Forsch. 180 : 474-478.

Schieberle, P. and Grosch, W. 1987. Quantitative analysis of aroma compounds in wheat and rye crust using a stable isotope dilution assay. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 35 : 252-257.

Soponronnarit, S., and Prachayawarakorn, S. 1994. Optimum strategy for fluidized bed paddy drying. Drying Technology. 12(7) : 1667-1686.

Soponronnarit, S., Yapha M. and Prachayawarakorn, S. 1995. Cross-flow fluidized bed paddy dryer : prototype and commercialization. Drying Technology. 13 : 2207-2216.

Soponronnarit, S. 1996. Grain drying in Asia : Fluidised-bed paddy drying. Proceedings of an international conference held at the FAO regional office for Asia and the Pacific. pp. 201 – 209.

Soponronnarit, S., Prachayawarakorn, S., and Wangji, M. 1996. Commercial fluidized bed paddy dryer. Proceeding of the 10th International Drying Symposium. Krakow, Poland, 30 July – 2 August, A : 638-644.

Soponronnarit, S., Wetchacama, S., Swasdisevi, T. and Poomsa-ad, N. 1999. Managing moist paddy by drying, tempering and ambient air ventilation. Drying Technology – An International Journal. 17(1&2) : 335 – 344.

Steffe, J.F. and Singh, R.P. 1980. Theoretical and practical aspects of rough rice tempering. Transaction of the American Society of Agricultural Engineers. 23 (3) : 775 – 782.

Sunthonvit, N., Srzednicki, G. and Craske, J. 2003. Effect of high temperature drying on the flavour component in Thai fragrant rice varieties. Proceedings of the 3rd Asia-Pacific drying conference. pp.249-259.

Taweerattanapanish, A., Soponronnarit, S., Wetchakama, S., Kongseri, N., and Wongpiyaachon, S. 1999. Effects of drying on head rice yield using fluidization technique. Drying Technology. 17 : 345-353.

Widjaja, R., Craske, J.D. and Wootton, M. 1996. Changes in volatile components of paddy, brown and white fragrant rice during storage. Journal of Science Food Agricultural. 71 : 218-224.

Wongpornchai, S., Dumri, K., and Jongkaewwattana, S. 2004. Effect of dryings and storage time on the aroma and milling quality of rice (*Oryza sativa* L.) cv. Khao Dawk Mali 105. Food Chemistry. 87: 407-414.

Yoshihashi, T., Huong, N. T. T., and Inatomi, H. 2002. Precursors of 2-acetyl-1-pyrroline, a potent flavor compound of an aromatic rice variety. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 50 : 2001-2004.

Zhou, Z., Robards, K., Helliwell, S., and Blanchard, C. 2002. Ageing of stored rice : Changes in chemical and physical attributes. Journal of Cereal Science. 35 : 65-68.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.
วิธีการวิเคราะห์

ก.1. การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นของข้าวเปลือก

ดัดแปลงจากวิธีของ AOAC (1990) โดยเปลี่ยนอุณหภูมิที่ใช้อบจาก 130±3°C เป็น 103±2°C เปลี่ยนจากเมล็ดข้าวบด เป็นข้าวเปลือกทั้งเมล็ด และเปลี่ยนจากการอบแห้งนาน 1 ชั่วโมงเป็นอบแห้งนาน 72 ชั่วโมง

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. ตู้อบลมร้อนของ Memmert รุ่น model 600, Germany
2. เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่งของ Sartorius รุ่น CP3202s, Germany ชั่งน้ำหนักสูงสุด 3200 กรัม
3. ถ้วยอลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 6 เซนติเมตร
4. โถดูดความชื้น

วิธีการทดลอง

1. นำถ้วยอลูมิเนียมไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103±2°C นาน 1 ชั่วโมง ทิ้งเย็นในโถดูดความชื้น จากนั้นชั่งน้ำหนักถ้วยอลูมิเนียมเปล่าที่แน่นอนเก็บไว้
2. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างเมล็ดข้าวเปลือก ประมาณ 30 กรัม ลงในถ้วยอลูมิเนียม
3. บันทึกค่าน้ำหนักที่แน่นอนเก็บไว้
4. นำถ้วยอลูมิเนียมที่มีข้าวเปลือกเข้าตู้อบ และตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 103±2°C โดยเปิดฝาของถ้วยอลูมิเนียม
5. เมื่อครบ 72 ชั่วโมง นำตัวอย่างออกจากตู้อบพร้อมปิดฝาถ้วยอลูมิเนียม ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น จนมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิอากาศแวดล้อม
6. นำมาชั่งน้ำหนัก บันทึกค่า และคำนวณหาปริมาณความชื้นตามสมการดังนี้

$$\text{ความชื้น (\%wb)} = \frac{(\text{น้ำหนักตัวอย่างข้าวก่อนอบ} - \text{น้ำหนักตัวอย่างข้าวหลังอบ})}{\text{น้ำหนักตัวอย่างข้าวก่อนอบ}} \times 100$$

$$\text{ความชื้น (\%db)} = \frac{(\text{น้ำหนักตัวอย่างข้าวก่อนอบ} - \text{น้ำหนักตัวอย่างข้าวหลังอบ})}{\text{น้ำหนักตัวอย่างข้าวหลังอบ}} \times 100$$

ก.2. การวัดอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เทอร์โมมิเตอร์ชนิดแอลกอฮอล์ ที่มีสเกลตั้งแต่ 0 - 100 °C
2. ภาชนะพร้อมฝาปิดที่มีฉนวนหุ้มป้องกันการถ่ายเทความร้อนออกสู่ภายนอก

วิธีการทดลอง

1. นำข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันบรรจุลงในภาชนะที่มีฉนวนหุ้มทันที
2. เสียบเทอร์โมมิเตอร์ ลงในช่องขนาดเล็กที่เจาะไว้ที่ฝาภาชนะ
3. ใช้ผ้าหุ้มภาชนะไว้อีกชั้นหนึ่ง พร้อมกับอ่านค่าอุณหภูมิที่วัดได้ ทุก ๆ 5 วินาที
4. จดบันทึกอุณหภูมิที่วัดได้ อุณหภูมิของเมล็ดจะเลือกจากค่าอุณหภูมิสูงสุดที่วัดได้

ก.3 วิธีการปรับความชื้นของข้าวเปลือก (reweting)

1. หาความชื้นของข้าวเปลือกเริ่มต้น
2. คำนวณปริมาณน้ำที่ต้องเติมลงไปในข้าวตามสูตร

$$W_w = W_f - W_i$$

$$W_f = W_i \left\{ \frac{1 - MC_i}{1 - MC_f} \right\}$$

เมื่อ W_w = ปริมาณน้ำที่ต้องเติมลงไป (กรัม)

W_f = น้ำหนักเมล็ดข้าว + น้ำหนักน้ำ (กรัม)

W_i = น้ำหนักเมล็ดข้าวเริ่มต้น (กรัม)

MC_i = ความชื้นของข้าวเปลือกเริ่มต้น (% wb / 100)

MC_f = ความชื้นของข้าวเปลือกที่ต้องการ (% wb / 100)

3. เติมน้ำลงในข้าวเปลือกตามปริมาณที่คำนวณได้จากข้อ 2
4. คลุกเคล้าให้น้ำกระจายไปอย่างทั่วถึง
5. นำไปเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4°C และนำออกมาคลุกเคล้าทุกวันเป็นเวลา 7 วัน

ก.4 วิธีการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องฟลูอิดไดซ์เบด

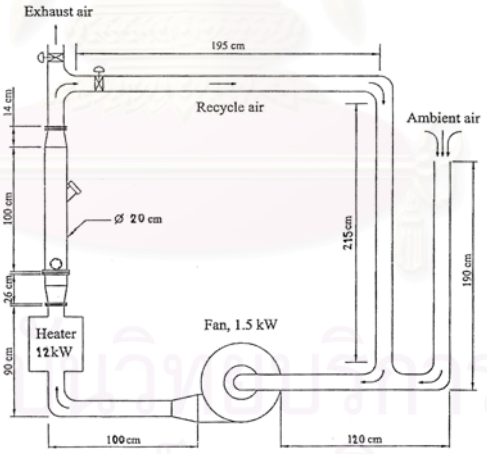
ตามวิธีของสุทธินี วานิชสำราญ (2545)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. **เครื่องวัดความเร็วลม** (Air-max รุ่น SK-26A, Japan)
2. **เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด** (คณะพลังงานและวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี)

เครื่องอบแห้งที่ใช้เป็นเครื่องอบแห้งแบบเป็นงวด ลักษณะอุปกรณ์เป็นดังรูปที่ ก.1 ห้องอบแห้งเป็นรูปทรงกระบอกทำด้วยสเตนเลส มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 ซ.ม. สูง 100 ซ.ม. พื้นที่ผิวของห้องอบแห้งและท่อลมทั้งหมดหุ้มด้วยฉนวนใยแก้วหนา 2.5 cm ให้ความร้อนโดยใช้ขดลวดความร้อนขนาด 12 kW พัดลมที่ใช้เป็นพัดลมแรงเหวี่ยง ใบพัดโค้งหลัง มีมอเตอร์ขนาด 1.5 kW เป็นตัวขับเคลื่อนพัดลม และมีอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบของพัดลมทางกล เพื่อปรับอัตราการไหลของอากาศให้ได้ตามที่ต้องการ มีลิ้นปีกผีเสื้อที่ทางออกของเครื่องอบแห้ง และที่ท่ออากาศเวียนกลับสำหรับใช้ปรับปริมาณอากาศเวียนกลับ วัดอุณหภูมิที่ทางเข้าห้องอบแห้ง โดยใช้ Thermocouple type K ต่อเข้ากับเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller) เพื่อควบคุมอุณหภูมิให้ได้ตามที่ต้องการ และแสดงอุณหภูมิที่วัดได้ มีท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร ต่อเข้าทางด้านบนของห้องอบแห้ง เพื่อใช้กรอกข้าวเปลือกที่จะทำการทดลอง ด้านล่างของห้องอบแห้งมีท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร ท่อทั้งสองปิดด้วยฝาเกลียวทำจากเหล็กสำหรับใช้ปล่อยข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งแล้วลงในขวดแก้วเพื่อนำไปเก็บในที่อับอากาศต่อไป



รูปที่ ก.1 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด
ที่มา : Soponronnarit (1996)

Soponronnarit และ Prachayawarakorn (1994) พบว่า ในกรณีที่ของแข็งเป็นเมล็ดข้าวเปลือกและของไหลเป็นอากาศ ความเร็วของอากาศต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิไดซ์เบดในข้าวเปลือกได้มีค่าประมาณ 1.65 เมตร/วินาที แต่ในทางปฏิบัติพบว่าที่จุดความเร็วของอากาศต่ำสุด อนุภาคยังไม่เกิดการหมุนเวียนดีพอที่จะทำให้เกิดการถ่ายเทมวลสารและความร้อนได้อย่าง

มีประสิทธิภาพดังนั้นถ้าจะให้เกิดผลดีจะต้องใช้ความเร็วไม่ต่ำกว่า 1.5 เท่าของความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิไดซ์เบด แต่จะต้องไม่เกินค่าความเร็วสุดท้ายของอนุภาค เพราะถ้าใช้ความเร็วสูงเกินไปจะทำให้อนุภาคไหลออกไปจากห้องอบแห้งพร้อมกับของไหล ดังนั้นความเร็วของอากาศที่ใช้มีค่าประมาณ 2.5 เมตร/วินาที นอกจากนั้นการใช้ความเร็วที่สูงเกินไปเป็นสาเหตุให้เครื่องสึกหรอ ทำให้สูญเสียอนุภาคที่มีขนาดเล็ก และทำให้อนุภาคแตก

ในการทดลองจะใช้ความสูงเบด 9.5 เซนติเมตร ความเร็วของอากาศในห้องอบแห้งประมาณ 2.5 เมตร/วินาที ปริมาณอากาศเวียนกลับประมาณ 80% ก่อนการทดลองทุกครั้งจะต้องเดินเครื่องที่อุณหภูมิที่จะทดลองทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที เพื่อให้เครื่องมีอุณหภูมิสม่ำเสมอ และภายหลังการอบแห้งแต่ละงวดต้องเปิดฝาท่อทางเข้าและทางออกไว้เพื่อให้ข้าวเปลือกที่เหลือค้างอยู่ภายในเครื่องให้ออกไปให้หมดแล้วจึงปิดเพื่อทดลองต่อไป

3. อุปกรณ์สำหรับการเก็บในที่อับอากาศ

ใช้ขวดแก้วทรงสูงขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซ.ม. สูง 30 ซ.ม. มีแผ่นยางคั่นระหว่างฝาและปากขวด มีลวดสำหรับเกี่ยวเพื่อปิดฝา ทำให้เกิดแรงกดเพื่อป้องกันการรั่ว การป้องกันการถ่ายเทความร้อนออกสู่ภายนอกจะใช้วิธีการเก็บไว้ในตู้อบ (รูปที่ ก.2) ที่ควบคุมอุณหภูมิให้เท่ากับอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกที่ออกจากเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด ซึ่งอุณหภูมินี้จะต้องวัดทุกครั้งที่เปลี่ยนเงื่อนไขการอบแห้ง และขวดแก้วนี้ต้องนำเข้าตู้อบที่มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิของเมล็ด เพื่อป้องกันการถ่ายเทความร้อนให้กับขวดแก้ว ก่อนจะนำข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งแล้วมาใส่ (สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ และคณะ, 2541) เวลาที่ใช้ในการเก็บในตู้อับอากาศ คือ 30 นาที

รูปที่ ก.2 อุปกรณ์สำหรับการ tempering

วิธีการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องฟลูอิดไดซ์เบด

1. เปิดเครื่องฟลูอิดไดซ์เบด ตั้งอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งไปที่ 115°C และความเร็วของอากาศเท่ากับ 2.5 เมตร/วินาที เปิดทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที เพื่อให้สภาวะการทำงานคงที่

2. เริ่มดำเนินการอบแห้ง โดยป้อนข้าวเปลือกให้ได้ความสูงเบด 9.5 ซ.ม. (ประมาณ 1,900 กรัม สำหรับข้าวเปลือกที่มีความชื้น 35 %db) ลงไปในห้องอบแห้ง

3. ทิ้งไว้ตามระยะเวลาที่ต้องการ (เพื่อให้ได้ความชื้นที่ต้องการ ประมาณ 23 – 24 %db)

4. เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด ปล่อยข้าวเปลือกลงในภาชนะที่มีฉนวนหุ้มเพื่อเก็บความร้อน เสียบเทอร์โมมิเตอร์ลงไปวัดอุณหภูมิภายในกองเมล็ดข้าวเปลือก บันทึกอุณหภูมิสูงสุดที่วัดได้

5. ปล่อยข้าวเปลือกที่เหลือในห้องอบแห้งออก ทิ้งเครื่องไว้ประมาณ 15 นาที เพื่อให้สภาวะการทำงานคงที่

6. ทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 2 – 4 อีก 1 ครั้ง หาค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่วัดได้ตามข้อ 4 นำค่าที่ได้ไปตั้งอุณหภูมิของตู้อบที่ใช้สำหรับการเก็บในที่อับอากาศ

7. ปล่อยข้าวเปลือกที่เหลือในห้องอบแห้งออก ทิ้งเครื่องไว้ประมาณ 15 นาที เพื่อให้สภาวะการทำงานคงที่

8. ป้อนข้าวเปลือกที่จะทำการอบแห้งลงไปในห้องอบแห้ง

9. ทิ้งไว้ตามระยะเวลาที่ต้องการ (เพื่อให้ได้ความชื้นที่ต้องการ ประมาณ 23 – 24 %db)

10. เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด ปล่อยข้าวเปลือกลงในขวดแก้วที่ใช้สำหรับการเก็บในที่อับอากาศ ปิดฝาให้สนิท

11. นำขวดแก้วที่บรรจุข้าวเปลือกมาเก็บไว้ในตู้อบที่ตั้งอุณหภูมิตามข้อ 6 ไว้แล้ว เป็นเวลา 30 นาที

12. นำข้าวเปลือกออกจากขวดแก้ว แล้วป้อนลงไปในห้องอบแห้งต่อทันที

13. ทิ้งไว้ตามระยะเวลาที่ต้องการ (เพื่อให้ได้ความชื้นที่ต้องการประมาณ 15 – 17 %db)

14. หาปริมาณความชื้นของข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งตามขั้นตอนข้างต้น จำนวน 2 ซ้ำ

15. ทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 2 – 14 แต่เปลี่ยนอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งเป็น 125, 135 และ 150°C

รูปที่ ก.3 อุปกรณ์สำหรับวัดอุณหภูมิของเมล็ด

ปริมาณข้าวเปลือกที่ใช้ในการทดลองอบแห้ง 1 ครั้ง

Soponronnarit และคณะ (1996) ได้เสนอความสูงเบดที่เหมาะสมในการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องฟลูอิไดซ์เบด คือ 9.5 เซนติเมตร สำหรับเครื่องฟลูอิไดซ์เบดที่ใช้ในการทดลอง มีห้องอบแห้งรูปทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร ดังนั้นปริมาตรข้าวเปลือกที่ต้องใช้ต่อ 1 ครั้งสามารถคำนวณได้ดังนี้

ปริมาตรข้าวเปลือกที่ใช้อบแห้งต่อ 1 ครั้ง = π x รัศมีห้องอบแห้ง^2 x ความสูงเบด

= π x 10^2 x 9.5

= 2984.5 ลูกบาศก์เซนติเมตร

ในการทดลองหาความหนาแน่นปรากฏของข้าวเปลือกที่มีความชื้น 35 %db ใช้วิธีเทข้าวลงในกระบอกตวงให้มีปริมาตร 1000 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วนำมาชั่งน้ำหนักและทดลองวัดตัวอย่างข้าวเปลือก 3 ซ้ำ แล้วหาค่าเฉลี่ย พบว่ามีน้ำหนักเฉลี่ย 636.65 กรัม ดังนั้นน้ำหนักข้าวเปลือกที่ใช้ในการทดลองอบแห้งต่อ 1 ครั้ง คำนวณได้โดย

น้ำหนักข้าวเปลือกที่ใช้ในการอบแห้งต่อ 1 ครั้ง = ความหนาแน่นปรากฏ x ปริมาตรข้าวเปลือก

= 2.9845 x 636.65

= 1900 กรัม

ก.5 การวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ข้าวต้น (Bal and Ojha, 1975)

ได้จากการชั่งน้ำหนักข้าวขาวที่ได้จากการขัดสีแล้ว เป็นเมล็ดข้าวที่มีความยาว 80% ของข้าวเต็มเมล็ด

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องคัดแยก (Aspirator)
2. เครื่องกะเทาะเปลือกชนิดลูกกลิ้งยาง (Jircas, Japan)
3. เครื่องขัดขาวชนิดหินขัด (Jircas, Japan)
4. เครื่องคัดขนาดเมล็ดข้าว (Jircas, Japan)
5. เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง (Sartorius รุ่น CP320S, Germany) ชั่งน้ำหนักสูงสุด 3200 กรัม

รูปที่ ก.4 เครื่องกะเทาะเปลือกชนิดลูกกลิ้งยาง

รูปที่ ก.5 เครื่องขัดขาวชนิดหินขัด

รูปที่ ก.6 เครื่องคัดขนาดเมล็ดข้าว

วิธีการทดลอง

1. ทำความสะอาดข้าวเปลือก โดยผ่านเครื่องคัดแยก (Aspirator) เพื่อดูดเอาเมล็ดลีบ ระแง้ (แขนง หรือ กิ่งที่เชื่อมเมล็ดข้าวกับรวงข้าว) และสิ่งเจือปนต่าง ๆ ออกจากเมล็ดข้าวเปลือก ส่วนหิน กรวด ทราย หรือเหล็ก คัดแยกออกด้วยมือ
2. ชั่งน้ำหนักข้าวเปลือกที่ทำความสะอาดแล้วตัวอย่างละ 250 กรัม บันทึกค่าไว้
3. นำมากะเทาะเปลือกด้วยเครื่องกะเทาะเปลือกจนเปลือกหลุดออกหมด
4. ชั่งน้ำหนักข้าวกล้องที่ได้จากการกะเทาะเปลือกออกแล้วบันทึกค่าไว้
5. นำมาขัดขาวด้วยเครื่องขัดขาวชนิดหินขัด เป็นเวลา 45 วินาที ทิ้งข้าวสารไว้ให้เย็น
6. ชั่งน้ำหนักข้าวสารที่ได้จากการขัดขาวแล้วบันทึกค่าไว้
7. นำข้าวสารที่ได้ทั้งหมดไปแยกส่วนที่เป็นต้นข้าว และข้าวหักออกจากกันด้วยเครื่องคัดขนาดเมล็ดข้าว

8. ชั่งน้ำหนักข้าวต้นที่ได้แล้วบันทึกค่าไว้

9. นำค่าน้ำหนักที่ได้ไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ต้นข้าว เปอร์เซ็นต์ข้าวหัก เปอร์เซ็นต์รำ และเปอร์เซ็นต์แกลบ จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\% \text{ ข้าวต้น} = \frac{\text{น้ำหนักข้าวต้น}}{\text{น้ำหนักข้าวเปลือก}} \times 100$$

$$\% \text{ ข้าวหัก} = \frac{(\text{น้ำหนักข้าวสาร} - \text{น้ำหนักข้าวต้น})}{\text{น้ำหนักข้าวเปลือก}} \times 100$$

$$\% \text{ รำ} = \frac{(\text{น้ำหนักข้าวกล้อง} - \text{น้ำหนักข้าวสาร})}{\text{น้ำหนักข้าวเปลือก}} \times 100$$

$$\% \text{ แกลบ} = \frac{(\text{น้ำหนักข้าวเปลือก} - \text{น้ำหนักข้าวกล้อง})}{\text{น้ำหนักข้าวเปลือก}} \times 100$$

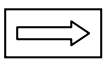
$$\% \text{ ข้าวต้นสัมพัทธ์} = \frac{\text{น้ำหนักข้าวต้นของข้าวที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิไดซ์เบด}}{\text{น้ำหนักข้าวต้นของข้าวชุดเดียวกันที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศแวดล้อม}} \times 100$$

ก.6 การวัดค่าดัชนีความขาวของข้าว

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่อง Chroma meter (Minolta Chroma Meter, CR 300)

วิธีการทดลอง

1. กดปุ่ม ON พร้อมกับกดปุ่ม ALL DATA โดยกดค้างไว้จนหน้าจอเครื่องมีข้อความขึ้นมา
2. กดปุ่ม ENTER
3. กดปุ่ม INDEX SET แล้วเลือกแหล่งแสงโดยกดปุ่ม ไปเรื่อย ๆ จนเจอข้อความ D65 บนหน้าจอ
4. กดเลือก D65 โดยใช้ปุ่ม  แล้วกดปุ่ม ENTER
5. กดปุ่ม CALIBRATE แล้วใส่ค่า Y , x , y (Y = 93.2, x = 0.3157, y = 0.3321)
6. วางหัววัดลงบนแผ่นสีมาตรฐาน (สีขาว) แล้วกดปุ่มที่หัววัด 1 ครั้ง เครื่องจะวัด 3 ซ้ำ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

7. กดปุ่ม COLOR SPACE

8. นำเมล็ดข้าวสารประมาณ 3 – 4 กรัม เกลี่ยลงบนกระดาษขาว

9. วางหัววัดลงบนเมล็ดข้าวสาร ให้แนบสนิทไปกับเมล็ดข้าวสาร แล้วกดปุ่มที่หัววัด 1 ครั้ง

10. เครื่องจะแสดงค่า L* a* และ b* ที่วัดได้ เมื่อ

ค่า L คือ ค่าแสดงความเข้มสว่างของสี ซึ่งค่า L มีค่ามากแสดงว่าสีสว่างมาก โดยที่ระดับค่า L ที่เท่ากับ 0 จะเป็นสีดำ และระดับค่า L ที่เท่ากับ 100 จะเป็นสีขาว

ค่า a คือ ค่าแสดงระดับสีแดง เขียว เมื่อ a มีค่าเป็นบวกแสดงลักษณะสีแดง ถ้ามีค่าเป็นลบแสดงลักษณะสีเขียว เมื่อห่างจากจุด 0 มากแสดงถึงค่าสีแดงหรือสีเขียวที่มากขึ้น

ค่า b คือ ค่าแสดงระดับสีเหลือง น้ำเงิน เมื่อ b มีค่าเป็นบวกแสดงลักษณะสีเหลือง ถ้ามีค่าเป็นลบแสดงลักษณะสีน้ำเงิน เมื่อห่างจากจุด 0 มากแสดงถึงค่าสีเหลืองหรือสีน้ำเงินที่มากขึ้น

11. เมื่อวัดตัวอย่างเสร็จในแต่ละตัวอย่าง สามารถหาค่าเฉลี่ย ค่ามากสุด น้อยสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานได้ โดยกดปุ่ม STATISTIC แล้วกดปุ่ม ENTER เครื่องจะพิมพ์ผลทางสถิติออกมาให้

12. ก่อนวัดตัวอย่างต่อไป กดปุ่ม ALL DATA CLEAR และปุ่ม ENTER เพื่อลบข้อมูลเก่า

ก.7 การวิเคราะห์ปริมาณสาร 2AP (ตามวิธีของ ทินกร สีเสียดค้า, 2548)

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่อง Gas Chromatography (GC) รุ่น GC 6890N series US 10533020 (China)
2. เครื่อง Headspace รุ่น HS G1888 Agilent Technologies Network Headspace Sampler
3. เครื่องปั่นไฟฟ้า (National รุ่น MX-T110PN, Taiwan)
4. ตะแกรงขนาด 45 mesh
5. เครื่องชั่งที่มีความละเอียด ± 0.001 กรัม
6. ขวด vial ใช้บรรจุตัวอย่างข้าว
7. septum และ ฝาอลูมิเนียม
8. เข็มฉีดสารมาตรฐานภายใน ขนาดบรรจุในหน่วยไมโครลิตร (µl)

สารเคมี

1. สารละลายมาตรฐานภายใน (internal standard) 2,4-dimethylpyrridine (DMP) ความเข้มข้น 1000 ppm ในตัวทำละลาย isopropanol

วิธีการทดลอง

1. กะเทาะเปลือกตัวอย่างเมล็ดข้าวที่มีความชื้นไม่เกิน 16 %db แล้วบดให้ละเอียดด้วยเครื่องปั่นไฟฟ้า ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 45 mesh

2. ชั่งน้ำหนักผงข้าว 1.000 ± 0.001 กรัม ลงในขวดบรรจุตัวอย่าง (headspace vial) ซึ่งอบไล่ความชื้นไว้แล้ว

3. เติมสารละลายมาตรฐานภายใน 2,4-dimethylpyridine (DMP) ความเข้มข้น 1000 ppm ในตัวทำละลาย isopropanol ปริมาตร 1 µl

4. ปิดขวดด้วย septum ชนิด PTEE/silicone และฝาอลูมิเนียม ที่มีขนาดเดียวกับขวดตัวอย่างโดยใช้ crimper อัดฝาให้ปิดสนิท

5. วางใน sample tray ของเครื่อง HS-GC

6. ตั้งสภาวะของเครื่องที่ใช้ในการวิเคราะห์ ดังนี้

Gas Chromatography

- Capillary column รุ่น HP-5 (5% phenyl 95% methylpolysiloxane) ความยาว 30.0 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 530.0 µm ความหนาของ liquid phase 1.5 µm
- แก๊สตัวพา HS N_2 อัตราการไหล 3.0 ml/min
- อุณหภูมิของตัวนำสารเข้า 230°C
- โปรแกรมอุณหภูมิของคอลัมน์
  - อุณหภูมิเริ่มต้น 45°C
  - อุณหภูมิที่สอง 65°C
  - อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 0.5°C / min
  - อุณหภูมิสุดท้าย 225°C
- ปริมาตรของสารที่ฉีด 1.0 µl
- Split ratio 1:1
- อุณหภูมิของ FID 250°C

(ใช้ detector ชนิด Flame Ionization Detector)

Headspace

- อุณหภูมิของตู้อบ 140°C
- อุณหภูมิของลูพตัวอย่าง 150°C
- อุณหภูมิของท่อนำตัวอย่าง 160°C
- เวลาเข้าสู่สมดุลของขวดตัวอย่าง 5.00 นาที
- เวลาในการเพิ่มความดัน 0.60 นาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- เวลาในการเติมลูพตัวอย่าง 0.10 นาที
- เวลาสมดุลของลูพตัวอย่าง 0.60 นาที
- เวลาในการฉีดสาร 0.40 นาที

7. จะได้โครมาโตแกรมของสาร 2AP และสารมาตรฐานภายใน 2,4-dimethylpyridine

การสร้างกราฟมาตรฐาน

การสร้างกราฟมาตรฐานทำเพื่อใช้เทียบวิเคราะห์ปริมาณสาร 2AP ในตัวอย่างเมล็ดข้าว โดยใช้วิธีเทียบกับสารมาตรฐานภายใน DMP ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. เตรียมสารมาตรฐาน 2AP ที่มีความเข้มข้น 1000 ppm ในตัวทำละลายไดคลอโรมีเทน ตามวิธีการสังเคราะห์และทำให้บริสุทธิ์มากขึ้นตามวิธีของ ทินกร สีเสียดค้า (2548)

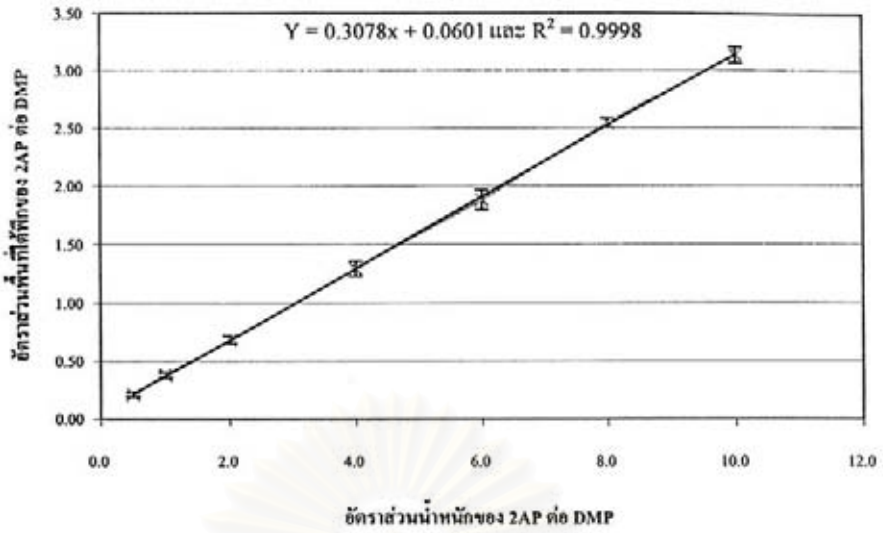
2. ใช้ข้าวไม่หอมพันธุ์เหลืองพิจิตรแทนตัวอย่างข้าวที่ไม่มีสาร 2AP นำมาเตรียมตัวอย่างตามวิธีการทดลองข้างต้น จำนวน 7 ตัวอย่าง ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ ในแต่ละตัวอย่างเติมสารมาตรฐาน 2AP ที่มีความเข้มข้น 1000 ppm ปริมาตร 0.5 , 1.0 , 2.0 , 4.0 , 6.0 , 8.0 และ 10.0 µL ตามลำดับ และทุกตัวอย่างเติมสารมาตรฐานภายใน DMP เข้มข้น 1000 ppm ปริมาตร 1.0 µL

3. วิเคราะห์ตัวอย่างข้าวด้วยเครื่อง Headspace Gas Chromatography จากนั้นสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสาร 2AP / DMP และอัตราส่วนพื้นที่ใต้พีคของสาร 2AP / DMP (รูปที่ ก.7) ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 ปริมาตรของสารมาตรฐาน 2AP ที่มีความเข้มข้น 1000 ppm ในตัวทำละลายไดคลอโรมีเทนที่เติมลงในตัวอย่างข้าวพันธุ์เหลืองพิจิตร (พันธุ์ไม่หอม) เพื่อใช้ในการสร้างกราฟมาตรฐาน

ขวดที่	1	2	3	4	5	6	7
ปริมาตรที่เติมของสารละลายมาตรฐาน 2AP ที่มีความเข้มข้น 1000 ppm ในตัวทำละลายไดคลอโรมีเทน (µL)	0.5	1.0	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0
น้ำหนักของสาร 2AP ในขวดตัวอย่างที่มีข้าวพันธุ์เหลืองพิจิตร (µg)	0.5	1.0	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0
อัตราส่วนน้ำหนัก 2AP ในขวดตัวอย่างต่อกรัมของน้ำหนักข้าวพันธุ์เหลืองพิจิตร	0.1	0.2	0.4	0.8	1.2	1.6	2.0
อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ 2AP ต่อ DMP	0.5	1	2	4	6	8	10
ค่าเฉลี่ยพื้นที่ใต้พีค 2AP	1754	3860	6409	6280	14167	18712	7367
ค่าเฉลี่ยพื้นที่ใต้พีค 2,4-DMP	8455	10327	9415	4958	7670	7442	2351
ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนพื้นที่ใต้พีค 2AP ต่อ DMP	0.207	0.377	0.681	1.292	1.878	2.542	3.138

ที่มา : ทินกร สีเสียดค้า (2548)



รูปที่ ก.7 กราฟมาตรฐาน 2AP ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณในเมล็ดข้าวด้วยเทคนิค Headspace Gas Chromatography

จากรูปจะเห็นได้ว่ากราฟมาตรฐานที่ได้เป็นเส้นตรงที่มีสมการของเส้นแนวโน้มเท่ากับ Y = 0.3078 x + 0.0601 เมื่อ ค่า Y คือค่าอัตราส่วนพื้นที่ใต้พีคของ 2AP ต่อ DMP และ ค่า X คือ อัตราส่วนน้ำหนักของ 2AP ต่อ DMP และมีค่าสัมประสิทธิ์เชิงเส้น (R^2) เท่ากับ 0.9998 ในช่วงปริมาณสาร 2AP ระหว่าง 0.5 – 10 µg หรือ ในช่วงอัตราส่วนของปริมาณ 2AP / DMP ระหว่าง 0.5 – 10.0 เมื่อแทนค่าอัตราส่วนพื้นที่ใต้พีคของ 2AP ต่อ DMP (ค่า Y) ลงในสมการแล้วจะทำให้ทราบอัตราส่วนน้ำหนักของ 2AP ต่อ DMP (ค่า X) และเมื่อทราบน้ำหนักของสารมาตรฐานภายใน DMP ก็จะทำให้ทราบปริมาณของสาร 2AP ใน headspace ของตัวอย่างข้าวได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข.
ข้อมูลผลการทดลองเพิ่มเติม

ตารางที่ ข.1 ความชื้นของข้าวเปลือกที่ผึ่งในที่ร่มที่อุณหภูมิห้อง (28-30°C) ของตัวอย่างควบคุม (control)

เวลา (วัน)	% wet basis	% dry basis
1	25.78 ± 0.07	34.74 ± 0.12
2	23.94 ± 0.18	31.47 ± 0.31
3	19.74 ± 0.43	24.60 ± 0.66
4	14.33 ± 0.17	16.73 ± 0.24
5	13.72 ± 0.23	15.91 ± 0.31
6	14.04 ± 0.08	16.33 ± 0.11
7	13.73 ± 0.08	15.92 ± 0.10
8	13.47 ± 0.07	15.57 ± 0.10
9	12.76 ± 0.08	14.63 ± 0.10
10	13.20 ± 0.14	15.20 ± 0.18

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.2 ความชื้นและเวลาในการอบแห้งข้าวเปลือก (Drying curve) ด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันที่อุณหภูมิต่างกัน

เวลา (นาที)	อุณหภูมิในการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชัน							
	115°C		125°C		135°C		150°C	
	% wet basis	% dry basis	% wet basis	% dry basis	% wet basis	% dry basis	% wet basis	% dry basis
0.0	26.51 ± 0.34	36.07 ± 0.63	26.15 ± 0.31	35.42 ± 0.56	26.67 ± 0.29	36.37 ± 0.54	26.11 ± 0.05	35.34 ± 0.08
0.5	24.75 ± 0.08	32.88 ± 0.14	24.75 ± 0.11	32.89 ± 0.20	24.90 ± 0.26	33.15 ± 0.46	24.11 ± 0.18	31.77 ± 0.31
1.0	24.07 ± 0.08	31.69 ± 0.13	23.74 ± 0.29	31.12 ± 0.49	23.34 ± 0.74	30.45 ± 1.26	22.71 ± 0.20	29.38 ± 0.34
1.5	23.45 ± 0.25	30.63 ± 0.41	22.75 ± 0.18	29.45 ± 0.30	22.29 ± 0.36	28.68 ± 0.59	21.24 ± 0.18	26.96 ± 0.29
2.0	22.73 ± 0.55	29.41 ± 0.92	21.08 ± 0.14	26.71 ± 0.23	20.42 ± 0.46	25.66 ± 0.73	19.54 ± 0.23	24.28 ± 0.34
2.5	21.50 ± 0.48	27.39 ± 0.78	20.07 ± 0.24	25.10 ± 0.37	18.92 ± 0.66	23.35 ± 1.00	17.82 ± 0.44	21.69 ± 0.66
3.0	20.27 ± 0.23	25.42 ± 0.35	19.30 ± 0.20	23.91 ± 0.31	17.77 ± 0.69	21.62 ± 1.02	16.67 ± 0.29	20.01 ± 0.42
4.0	18.68 ± 0.23	22.97 ± 0.34	17.42 ± 0.24	21.09 ± 0.36	15.88 ± 0.67	18.89 ± 0.94	14.71 ± 0.48	17.25 ± 0.67
5.0	16.81 ± 0.21	20.20 ± 0.30	15.10 ± 0.68	17.79 ± 0.95	14.36 ± 0.91	16.77 ± 1.24	13.35 ± 0.17	15.41 ± 0.24
6.0	15.62 ± 0.50	18.51 ± 0.71	14.38 ± 0.37	16.79 ± 0.51	13.02 ± 0.79	14.98 ± 1.05	12.02 ± 0.30	13.66 ± 0.39
8.0	13.61 ± 0.32	15.75 ± 0.43	12.54 ± 0.28	14.34 ± 0.36	11.03 ± 0.55	12.40 ± 0.70	10.10 ± 0.19	11.24 ± 0.24
10.0	12.31 ± 0.31	14.04 ± 0.41	11.73 ± 0.14	13.28 ± 0.18	9.92 ± 0.41	11.02 ± 0.50	8.24 ± 0.21	8.98 ± 0.25

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.3 อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกเมื่ออบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันที่อุณหภูมิต่างกัน

เวลา (นาที)	อุณหภูมิในการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชัน			
	115 °C	125°C	135°C	150°C
0.0	28.0 ± 0.00	28.0 ± 0.00	28.0 ± 0.00	28.0 ± 0.00
0.5	52.5 ± 0.71	52.5 ± 0.71	57.0 ± 0.00	60.5 ± 2.12
1.0	60.0 ± 0.00	60.0 ± 0.00	68.0 ± 0.00	67.0 ± 1.41
1.5	67.0 ± 0.00	68.0 ± 0.00	75.0 ± 0.00	77.0 ± 0.00
2.0	71.5 ± 0.71	74.5 ± 0.71	79.5 ± 0.71	83.0 ± 1.41
2.5	73.5 ± 0.71	76.0 ± 0.00	84.5 ± 0.71	86.0 ± 0.00
3.0	76.0 ± 0.00	79.5 ± 0.71	87.5 ± 0.71	91.5 ± 0.71
4.0	80.0 ± 0.00	82.5 ± 0.71	92.5 ± 0.71	98.0 ± 1.41
5.0	82.5 ± 0.71	85.5 ± 0.71	96.5 ± 0.71	100.0 ± 0.00
6.0	85.5 ± 0.71	91.5 ± 0.71	99.5 ± 0.71	104.5 ± 3.54
8.0	89.5 ± 0.71	94.5 ± 0.71	104.5 ± 0.71	110.0 ± 1.41
10.0	92.0 ± 0.00	96.5 ± 0.71	109.0 ± 0.00	112.0 ± 1.41

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.4 ความชื้นและเวลาในการอบแห้งข้าวเปลือก (drying curve) โดยเทคนิคฟลูอิไดเซชันรอบที่ 2 ที่อุณหภูมิต่างกันภายหลังการ tempering

	อุณหภูมิในการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชัน							
	115°C		125°C		135°C		150°C	
	% wet basis	% dry basis	% wet basis	% dry basis	% wet basis	% dry basis	% wet basis	% dry basis
ก่อนอบ	26.41 ± 0.25	35.89 ± 0.46	26.83 ± 0.15	36.67 ± 0.27	26.15 ± 0.13	35.41 ± 0.24	26.60 ± 0.62	36.25 ± 1.15
อบรอบที่ 1	19.79 ± 0.20	24.67 ± 0.31	19.48 ± 0.10	24.19 ± 0.16	19.05 ± 0.05	23.54 ± 0.07	19.08 ± 0.05	23.57 ± 0.07
อบรอบที่ 1 + tempering 30 นาที	19.76 ± 0.42	24.63 ± 0.65	19.47 ± 0.09	24.17 ± 0.14	19.04 ± 0.04	23.52 ± 0.06	19.04 ± 0.05	23.51 ± 0.08
อบรอบที่ 1 + tempering 30 นาที +อบ 1 นาที	16.92 ± 0.16	20.36 ± 0.24	16.30 ± 0.12	19.48 ± 0.16	14.78 ± 0.12	17.34 ± 0.17	14.45 ± 0.07	16.89 ± 0.09
อบรอบที่ 1 + tempering 30 นาที +อบ 2 นาที	15.43 ± 0.47	18.24 ± 0.65	14.55 ± 0.02	17.03 ± 0.03	13.20 ± 0.45	15.21 ± 0.60	12.54 ± 0.27	14.34 ± 0.35
อบรอบที่ 1 + tempering 30 นาที +อบ 3 นาที	14.26 ± 0.22	16.64 ± 0.30	12.58 ± 0.18	14.39 ± 0.23	12.21 ± 0.27	13.91 ± 0.35	11.30 ± 0.29	12.74 ± 0.37
อบรอบที่ 1 + tempering 30 นาที +อบ 4 นาที	13.26 ± 0.11	15.29 ± 0.15	11.52 ± 0.32	13.01 ± 0.41	11.37 ± 0.13	12.83 ± 0.17	10.26 ± 0.41	11.43 ± 0.50

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.5 ปริมาณความชื้นของข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันร่วมกับการ tempering

อุณหภูมิในการอบแห้ง (°C)	ความชื้น (%db)
control	14.86 ± 0.16 [ab]
115	13.86 ± 0.03 [c]
125	15.25 ± 0.09 [a]
135	14.69 ± 0.84 [ab]
150	14.27 ± 0.26 [bc]

ตัวอักษรที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ข.6 เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นของข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันร่วมกับการ tempering

อุณหภูมิในการอบแห้ง (°C)	เปอร์เซ็นต์ข้าวต้น
control	62.44 ± 0.85 [a]
115	0.19 ± 0.11 [c]
125	0.14 ± 0.04 [c]
135	0.09 ± 0.03 [c]
150	8.58 ± 1.99 [b]

ตัวอักษรที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.7 ค่าดัชนีความขาวของข้าวสารที่อบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันร่วมกับการ tempering

อุณหภูมิในการอบแห้ง (°C)	ดัชนีความขาวของข้าวสาร (White index*)	ดัชนีความขาวสัมพัทธ์ของข้าวสาร (Relative white index)
control	65.48 ± 0.43 [d]	100.00
115 (ข้าวหัก)	69.48 ± 0.29 [a]	106.11
125 (ข้าวหัก)	69.82 ± 0.33 [a]	106.63
135 (ข้าวหัก)	68.76 ± 0.11 [b]	105.01
150 (ข้าวหัก)	68.23 ± 0.42 [c]	104.20
150 (ข้าวต้น)	63.97 ± 0.24 [e]	97.69

ตัวอักษรที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

*White Index (WI) = $100 - [(100-L)^2 + a^2 + b^2]^{1/2}$ (Chen และคณะ, 1999)

% ความขาวสัมพัทธ์ = $\frac{\text{ความขาวของข้าวสารที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิไดซ์เบด}}{\text{ความขาวของข้าวสารชุดเดียวกันที่ลดความชื้นโดยการตากในที่ร่ม}} \times 100$

โดย ความขาวของข้าวสารชุดเดียวกันที่ลดความชื้นโดยการตากในที่ร่ม (control) = 65.48

ตารางที่ ข.8 ปริมาณสารหอม 2AP ในข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันร่วมกับการ tempering

อุณหภูมิในการอบแห้ง (°C)	ปริมาณสาร 2AP (ppm)
control	1.4548 ± 0.0610 [a]
115	0.8391 ± 0.0419 [b]
125	0.6969 ± 0.0609 [c]
135	0.5999 ± 0.0725 [c]
150	0.4768 ± 0.0508 [d]

ตัวอักษรที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.9 ความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการเก็บรักษาข้าวเปลือก

เดือนที่เก็บ	ความชื้นของข้าวเปลือก (moisture content, %db)
0 (พ.ค.)	14.59 ± 0.60 [a]
2 (ก.ค.)	14.43 ± 0.24 [a]
4 (ก.ย.)	14.85 ± 0.28 [a]
6 (พ.ย.)	14.10 ± 0.30 [a]

ตัวอักษรที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ข.10 ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ในกรุงเทพฯ ตั้งแต่เดือน พฤษภาคม – พฤศจิกายน 2548

เดือน	ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (%RH)
0 (พ.ค.)	73.10 ± 6.11
1 (มิ.ย.)	73.33 ± 4.47
2 (ก.ค.)	72.81 ± 6.56
3 (ส.ค.)	75.29 ± 4.42
4 (ก.ย.)	78.33 ± 6.63
5 (ต.ค.)	76.61 ± 7.55
6 (พ.ย.)	73.94 ± 8.30

ที่มา : กรมอุตุนิยมวิทยา (2548)

ตารางที่ ข.11 ผลของอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อปริมาณความชื้นของข้าวเปลือก

อุณหภูมิในการเก็บรักษา	ความชื้นของข้าวเปลือก (moisture content, %db)
อุณหภูมิห้อง (28-30°C)	14.43 ± 0.45 [a]
15°C	14.55 ± 0.48 [a]

ตัวอักษรที่เหมือนกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตารางที่ ข.12 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น

อุณหภูมิในการอบแห้ง (°C)	เปอร์เซ็นต์ข้าวต้น
control	63.36 ± 0.81 [a]
115	0.24 ± 0.07 [c]
125	0.16 ± 0.03 [c]
135	0.16 ± 0.06 [c]
150	8.74 ± 1.11 [b]

ตัวอักษรที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ข.13 ผลของระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น

เดือนที่เก็บ	เปอร์เซ็นต์ข้าวต้น
0 (พ.ค.)	14.28 ± 24.62 [a]
2 (ก.ค.)	14.61 ± 24.98 [a]
4 (ก.ย.)	14.71 ± 25.07 [a]
6 (พ.ย.)	14.51 ± 25.75 [a]

ตัวอักษรที่เหมือนกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตารางที่ ข.14 ผลของอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น

อุณหภูมิในการเก็บรักษา	เปอร์เซ็นต์ข้าวต้น
อุณหภูมิห้อง (28-30°C)	14.60 ± 24.89 [a]
15°C	14.46 ± 24.71 [a]

ตัวอักษรที่เหมือนกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตารางที่ ข.15 ผลของอุณหภูมิการอบแห้ง และระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น

เดือนที่	อุณหภูมิในการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชัน				
	control	115°C	125°C	135°C	150°C
0	62.44 ± 0.79[b]	0.19 ± 0.10[e]	0.14 ± 0.04[e]	0.09 ± 0.03[e]	8.58 ± 1.84[d]
2	63.47 ± 0.61[a]	0.29 ± 0.03[e]	0.16 ± 0.03[e]	0.19 ± 0.02[e]	8.97 ± 0.49[c]
4	63.73 ± 0.59[a]	0.29 ± 0.01[e]	0.18 ± 0.02[e]	0.21 ± 0.02[e]	9.14 ± 0.97[c]
6	63.79 ± 0.44[a]	0.21 ± 0.03[e]	0.14 ± 0.02[e]	0.16 ± 0.03[e]	8.27 ± 0.58[d]

ตัวอักษรที่ต่างกันทั้งในแนวตั้งและแนวนอนแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ข.16 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งและอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น

อุณหภูมิในการเก็บรักษา	อุณหภูมิในการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชัน				
	control	115°C	125°C	135°C	150°C
อุณหภูมิห้อง	63.59 ± 0.85[a]	0.25 ± 0.07[d]	0.17 ± 0.03[d]	0.17 ± 0.06[d]	8.81 ± 1.00[c]
15°C	63.12 ± 0.72[a]	0.23 ± 0.07[d]	0.15 ± 0.03[d]	0.15 ± 0.05[d]	8.67 ± 1.23[c]

ตัวอักษรที่ต่างกันทั้งในแนวตั้งและแนวนอนแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ข.17 ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น

อุณหภูมิในการเก็บรักษา	ระยะเวลาในการเก็บรักษา			
	เดือนที่ 0 (พ.ค.)	เดือนที่ 2 (ก.ค.)	เดือนที่ 4 (ก.ย.)	เดือนที่ 6 (พ.ย.)
อุณหภูมิห้อง	14.28 ± 24.95[a]	14.70 ± 25.44[a]	14.80 ± 25.50[a]	14.61 ± 25.59[a]
15°C	14.28 ± 24.95[a]	14.53 ± 25.16[a]	14.62 ± 25.30[a]	14.42 ± 25.37[a]

ตัวอักษรที่เหมือนกันทั้งในแนวตั้งและแนวนอนแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตารางที่ ข.18 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งต่อดัชนีความขาวของข้าวสาร

อุณหภูมิในการอบแห้ง (°C)	ดัชนีความขาวของข้าวสาร (White index*)	ดัชนีความขาวสัมพัทธ์ของข้าวสาร (Relative white index)
control	64.48 ± 0.79 [c]	98.47
115	68.78 ± 0.73 [a]	105.04
125	69.01 ± 0.75 [a]	105.39
135	68.06 ± 0.71 [ab]	103.94
150 (ข้าวหัก)	67.01 ± 1.01 [b]	102.34
150 (ข้าวต้น)	63.51 ± 0.90 [c]	96.99

ตัวอักษรที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

*White Index (WI) = $100 - [(100-L)^2 + a^2 + b^2]^{1/2}$ (Chen และคณะ, 1999)

% ความขาวสัมพัทธ์ = $\frac{\text{ความขาวของข้าวสารที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิไดซ์เบด}}{\text{ความขาวของข้าวสารชุดเดียวกันที่ลดความชื้นโดยการตากในที่ร่ม}} \times 100$

โดย ความขาวของข้าวสารชุดเดียวกันที่ลดความชื้นโดยการตากในที่ร่ม (control) = 65.48

ตารางที่ ข.19 ผลของระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อดัชนีความขาวของข้าวสาร

เดือนที่เก็บ	ดัชนีความขาวของข้าวสาร (White index*)	ดัชนีความขาวสัมพัทธ์ของข้าวสาร (Relative white index)
0 (พ.ค.)	67.62 ± 2.20 [a]	103.27
2 (ก.ค.)	66.87 ± 2.17 [a]	102.12
4 (ก.ย.)	66.51 ± 2.16 [a]	101.57
6 (พ.ย.)	66.23 ± 2.33 [a]	101.15

ตัวอักษรที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ข.20 ผลของอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อค่าดัชนีความขาวของข้าวสาร

อุณหภูมิในการเก็บรักษา	ดัชนีความขาวของข้าวสาร (White index*)	ดัชนีความขาวสัมพัทธ์ของข้าวสาร (Relative white index)
อุณหภูมิห้อง	66.42 ± 2.28 [a]	101.44
15°C	67.20 ± 2.18 [a]	102.63

ตัวอักษรที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ข.21 ผลของอุณหภูมิการอบแห้ง และระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อดัชนีความขาวของข้าวสาร

เดือนที่	อุณหภูมิในการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชัน				
	control	115°C	125°C	135°C	150°C
0	65.48 ± 0.40^{d}	69.48 ± 0.27^{a}	69.82 ± 0.31^{a}	68.76 ± 0.01^{b}	68.23 ± 0.39^{b}
2	64.58 ± 0.49^{d}	69.03 ± 0.29^{ab}	68.92 ± 0.62^{ab}	68.07 ± 0.82^{b}	66.84 ± 0.87^{bc}
4	64.09 ± 0.53^{d}	68.39 ± 0.64^{ab}	68.67 ± 0.60^{ab}	67.83 ± 0.64^{b}	66.58 ± 0.87^{bc}
6	63.79 ± 0.43^{d}	68.22 ± 0.78^{ab}	68.62 ± 0.75^{ab}	67.57 ± 0.53^{b}	66.38 ± 0.70^{c}

ตัวอักษรที่ต่างกันทั้งในแนวตั้งและแนวนอนแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ข.22 ผลของอุณหภูมิการอบแห้ง และระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อดัชนีความขาวสัมพัทธ์ของข้าวสาร

เดือนที่	อุณหภูมิในการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชัน				
	control	115°C	125°C	135°C	150°C
0	100.00	106.11	106.63	105.01	104.20
2	98.63	105.42	105.25	103.96	102.08
4	97.88	104.44	104.87	103.59	101.68
6	97.42	104.18	104.80	103.19	101.37

ตารางที่ ข.23 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งและอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อดัชนีความขาวของข้าวสาร

อุณหภูมิในการเก็บรักษา	อุณหภูมิในการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชัน				
	control	115°C	125°C	135°C	150°C
อุณหภูมิห้อง	64.21 ± 0.87^{b}	68.48 ± 0.82^{a}	68.60 ± 0.79^{a}	67.64 ± 0.74^{a}	66.52 ± 1.09^{a}
15°C	64.75 ± 0.61^{b}	69.08 ± 0.48^{a}	69.41 ± 0.73^{a}	68.48 ± 0.36^{a}	67.49 ± 0.66^{a}

ตัวอักษรที่ต่างกันทั้งในแนวตั้งและแนวนอนแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ข.24 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งและอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อดัชนีความขาวสัมพัทธ์ของข้าวสาร

อุณหภูมิในการเก็บรักษา	อุณหภูมิในการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชัน				
	control	115°C	125°C	135°C	150°C
อุณหภูมิห้อง	98.06	104.58	104.76	103.30	101.59
15°C	98.89	105.50	106.00	104.58	103.07

ตารางที่ ข.25 ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อค่าดัชนีความขาวของข้าวสาร

อุณหภูมิในการเก็บรักษา	ระยะเวลาในการเก็บรักษา			
	เดือนที่ 0 (พ.ค.)	เดือนที่ 2 (ก.ค.)	เดือนที่ 4 (ก.ย.)	เดือนที่ 6 (พ.ย.)
อุณหภูมิห้อง	68.36 ± 1.61[a]	66.98 ± 1.72[a]	66.59 ± 1.69[a]	66.44 ± 1.79[a]
15°C	68.36 ± 1.61[a]	67.99 ± 1.74[a]	67.64 ± 1.80[a]	67.39 ± 1.86[a]

ตัวอักษรที่ต่างกันทั้งในแนวตั้งและแนวนอนแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ข.26 ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อค่าดัชนีความขาวสัมพัทธ์ของข้าวสาร

อุณหภูมิในการเก็บรักษา	ระยะเวลาในการเก็บรักษา			
	เดือนที่ 0 (พ.ค.)	เดือนที่ 2 (ก.ค.)	เดือนที่ 4 (ก.ย.)	เดือนที่ 6 (พ.ย.)
อุณหภูมิห้อง	104.40	102.29	101.70	101.47
15°C	104.40	103.83	103.30	102.92

ตารางที่ ข.27 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งต่อปริมาณสาร 2AP

อุณหภูมิในการอบแห้ง (°C)	ปริมาณสาร 2-acetyl–1–pyrroline (ppm)
control	0.9355 ± 0.3980 [a]
115	0.5381 ± 0.2380 [ab]
125	0.4539 ± 0.2104 [ab]
135	0.3726 ± 0.2055 [ab]
150	0.2888 ± 0.1676 [b]

ตัวอักษรที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ข.28 ผลของระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อปริมาณสาร 2AP

เดือนที่เก็บ	ปริมาณสาร 2-acetyl–1–pyrroline (ppm)
0 (พ.ค.)	0.8135 ± 0.3500 [a]
2 (ก.ค.)	0.5557 ± 0.2789 [ab]
4 (ก.ย.)	0.4152 ± 0.2437 [ab]
6 (พ.ย.)	0.1472 ± 0.0717 [b]

ตัวอักษรที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ข.29 ผลของอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อปริมาณสาร 2AP

อุณหภูมิในการเก็บรักษา	ปริมาณสาร 2-acetyl–1–pyrroline (ppm)
อุณหภูมิห้อง	0.4076 ± 0.3375 [a]
15°C	0.6279 ± 0.3052 [a]

ตัวอักษรที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ข.30 ผลของอุณหภูมิการอบแห้งและระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อปริมาณสาร 2AP (ppm)

เดือนที่	อุณหภูมิในการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชัน				
	control	115°C	125°C	135°C	150°C
0	1.4548 ± 0.0565^{a}	0.8391 ± 0.0388^{b}	0.6969 ± 0.0564^{b}	0.5999 ± 0.0671^{bcf}	0.4768 ± 0.0471^{cd}
2	0.9725 ± 0.2141^{b}	0.5531 ± 0.1906^{bc}	0.4780 ± 0.1311^{cd}	0.4493 ± 0.1982^{cd}	0.3258 ± 0.1262^{d}
4	0.7432 ± 0.2634^{b}	0.4643 ± 0.1115^{cd}	0.3916 ± 0.1634^{cd}	0.2596 ± 0.0881^{d}	0.2171 ± 0.1253^{d}
6	0.5716 ± 0.2825^{bc}	0.2960 ± 0.1533^{cd}	0.2491 ± 0.1690^{d}	0.1814 ± 0.1155^{d}	0.1356 ± 0.1259^{d}

ตัวอักษรที่ต่างกันทั้งในแนวตั้งและแนวนอนแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ข.31 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งและอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อปริมาณสาร 2AP (ppm)

อุณหภูมิในการเก็บรักษา	อุณหภูมิในการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชัน				
	control	115°C	125°C	135°C	150°C
อุณหภูมิห้อง	0.7647 ± 0.4531^{ab}	0.4342 ± 0.2591^{bc}	0.3502 ± 0.2323^{bc}	0.2832 ± 0.2055^{bc}	0.2057 ± 0.1758^{bc}
15°C	1.1063 ± 0.2448^{a}	0.6420 ± 0.1639^{b}	0.5575 ± 0.1210^{b}	0.4619 ± 0.1673^{b}	0.3719 ± 0.1113^{b}

ตัวอักษรที่ต่างกันทั้งในแนวตั้งและแนวนอนแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ข.32 ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อปริมาณสาร 2AP (ppm)

อุณหภูมิในการเก็บรักษา	ระยะเวลาในการเก็บรักษา			
	เดือนที่ 0 (พ.ค.)	เดือนที่ 2 (ก.ค.)	เดือนที่ 4 (ก.ย.)	เดือนที่ 6 (พ.ย.)
อุณหภูมิห้อง	0.8135 ± 0.3546^{a}	0.4018 ± 0.2188^{ab}	0.2797 ± 0.1452^{ab}	0.1356 ± 0.1016^{b}
15°C	0.8135 ± 0.3546^{a}	0.7097 ± 0.2489^{a}	0.5507 ± 0.2493^{a}	0.4379 ± 0.2236^{a}

ตัวอักษรที่ต่างกันทั้งในแนวตั้งและแนวนอนแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ข.33 ผลของอุณหภูมิการอบแห้ง ระยะเวลา และอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อความชื้นของข้าวเปลือก

สภาวะการเก็บรักษา		อุณหภูมิในการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชัน				
อุณหภูมิ	เดือนที่	control	115°C	125°C	135°C	150°C
อุณหภูมิห้อง	0 (พ.ค.)	14.86 ± 0.16^{abcd}	13.86 ± 0.03^{mn}	15.25 ± 0.09^{a}	14.69 ± 0.84^{bcdefgh}	14.27 ± 0.26^{hijklm}
	2 (ก.ค.)	14.62 ± 0.04^{cdefghi}	14.31 ± 0.05^{fghijklm}	14.33 ± 0.11^{fghijkl}	14.26 ± 0.02^{hijklm}	14.14 ± 0.05^{jklmn}
	4 (ก.ย.)	14.74 ± 0.09^{bcdefg}	14.66 ± 0.01^{bcdefgh}	15.00 ± 0.29^{abc}	14.71 ± 0.10^{bcdefgh}	14.83 ± 0.28^{abcd}
	6 (พ.ย.)	14.37 ± 0.05^{efghijk}	13.78 ± 0.04^{n}	14.05 ± 0.13^{jklmn}	13.93 ± 0.08^{klmn}	13.89 ± 0.11^{lmn}
15°C	0 (พ.ค.)	14.86 ± 0.16^{abcd}	13.86 ± 0.03^{mn}	15.25 ± 0.09^{a}	14.69 ± 0.84^{bcdefgh}	14.27 ± 0.26^{hijklm}
	2 (ก.ค.)	14.67 ± 0.05^{bcdefgh}	14.32 ± 0.31^{fghijklm}	14.80 ± 0.12^{bcde}	14.35 ± 0.24^{efghijk}	14.50 ± 0.22^{defghij}
	4 (ก.ย.)	14.80 ± 0.12^{bcde}	14.88 ± 0.34^{abce}	15.08 ± 0.08^{ab}	14.76 ± 0.43^{bcdef}	15.05 ± 0.53^{abc}
	6 (พ.ย.)	14.63 ± 0.13^{bcdefghi}	13.80 ± 0.05^{n}	14.19 ± 0.16^{ijklmn}	14.29 ± 0.40^{ghijklm}	14.05 ± 0.05^{jklmn}

ตัวอักษรที่ต่างกันทั้งในแนวตั้งและแนวนอนแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.34 ผลของอุณหภูมิการอบแห้ง ระยะเวลา และอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นของข้าวเปลือก

สภาวะการเก็บรักษา		อุณหภูมิในการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชัน				
อุณหภูมิ	เดือนที่	control	115°C	125°C	135°C	150°C
อุณหภูมิห้อง	0 (พ.ค.)	62.44 ± 0.85 ^{c}	0.19 ± 0.11 ^{f}	0.14 ± 0.04 ^{f}	0.09 ± 0.03 ^{f}	8.58 ± 1.99 ^{de}
	2 (ก.ค.)	63.82 ± 0.49 ^{ab}	0.29 ± 0.02 ^{f}	0.19 ± 0.01 ^{f}	0.20 ± 0.01 ^{f}	9.00 ± 0.30 ^{de}
	4 (ก.ย.)	64.01 ± 0.44 ^{ab}	0.30 ± 0.01 ^{f}	0.19 ± 0.01 ^{f}	0.22 ± 0.02 ^{f}	9.29 ± 0.18 ^{d}
	6 (พ.ย.)	64.09 ± 0.10 ^{a}	0.23 ± 0.02 ^{f}	0.16 ± 0.02 ^{f}	0.18 ± 0.01 ^{f}	8.37 ± 0.54 ^{de}
15°C	0 (พ.ค.)	62.44 ± 0.85 ^{c}	0.19 ± 0.11 ^{f}	0.14 ± 0.04 ^{f}	0.09 ± 0.03 ^{f}	8.58 ± 1.99 ^{de}
	2 (ก.ค.)	63.11 ± 0.54 ^{bc}	0.29 ± 0.03 ^{f}	0.14 ± 0.03 ^{f}	0.17 ± 0.02 ^{f}	8.94 ± 0.69 ^{de}
	4 (ก.ย.)	63.46 ± 0.66 ^{ab}	0.28 ± 0.01 ^{f}	0.18 ± 0.04 ^{f}	0.21 ± 0.03 ^{f}	8.99 ± 1.45 ^{de}
	6 (พ.ย.)	63.48 ± 0.45 ^{ab}	0.19 ± 0.03 ^{f}	0.13 ± 0.01 ^{f}	0.14 ± 0.03 ^{f}	8.18 ± 0.68 ^{e}

ตัวอักษรที่ต่างกันทั้งในแนวตั้งและแนวนอนแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.35 ผลของอุณหภูมิการอบแห้ง ระยะเวลา และอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อดัชนีความขาวของข้าวสาร

สภาวะการเก็บรักษา		อุณหภูมิในการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชัน				
อุณหภูมิ	เดือนที่	control	115°C	125°C	135°C	150°C
อุณหภูมิห้อง	0 (พ.ค.)	65.48 ± 0.43 ^{mn}	69.48 ± 0.29 ^{ab}	69.82 ± 0.33 ^{a}	68.76 ± 0.11 ^{cdef}	68.23 ± 0.42 ^{defgh}
	2 (ก.ค.)	64.27 ± 0.39 ^{opq}	68.81 ± 0.18 ^{bcde}	68.35 ± 0.21 ^{defg}	67.38 ± 0.51 ^{ijkl}	66.08 ± 0.42 ^{m}
	4 (ก.ย.)	63.70 ± 0.22 ^{qr}	67.87 ± 0.26 ^{ghij}	68.17 ± 0.41 ^{efgh}	67.26 ± 0.19 ^{jkl}	65.95 ± 0.29 ^{m}
	6 (พ.ย.)	63.41 ± 0.13 ^{rs}	67.75 ± 0.66 ^{ghijk}	68.07 ± 0.31 ^{fgh}	67.16 ± 0.41 ^{kl}	65.83 ± 0.52 ^{m}
15°C	0 (พ.ค.)	65.48 ± 0.43 ^{mn}	69.48 ± 0.29 ^{ab}	69.82 ± 0.33 ^{a}	68.76 ± 0.11 ^{cdef}	68.23 ± 0.42 ^{defgh}
	2 (ก.ค.)	64.88 ± 0.40 ^{no}	69.24 ± 0.21 ^{abc}	69.48 ± 0.08 ^{ab}	68.76 ± 0.13 ^{cdef}	67.60 ± 0.20 ^{hijk}
	4 (ก.ย.)	64.48 ± 0.43 ^{op}	68.92 ± 0.40 ^{bcd}	69.17 ± 0.10 ^{abc}	68.41 ± 0.17 ^{defg}	67.21 ± 0.78 ^{jkl}
	6 (พ.ย.)	64.17 ± 0.19 ^{pq}	68.70 ± 0.63 ^{cdef}	69.16 ± 0.65 ^{abc}	67.98 ± 0.19 ^{ghi}	66.93 ± 0.27 ^{l}

ตัวอักษรที่ต่างกันทั้งในแนวตั้งและแนวนอนแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.36 ผลของอุณหภูมิการอบแห้ง ระยะเวลา และอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อปริมาณสารหอม 2AP

สภาวะการเก็บรักษา		อุณหภูมิในการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชัน				
อุณหภูมิ	เดือนที่	control	115°C	125°C	135°C	150°C
อุณหภูมิห้อง	0 (พ.ค.)	1.4548 ± 0.0610 ^{a}	0.8391 ± 0.0419 ^{d}	0.6969 ± 0.0609 ^{fg}	0.5999 ± 0.0725 ^{hi}	0.4768 ± 0.0508 ^{klm}
	2 (ก.ค.)	0.7936 ± 0.1253 ^{de}	0.3801 ± 0.0071 ^{nop}	0.3627 ± 0.0676 ^{nopq}	0.2642 ± 0.0077 ^{rstu}	0.2084 ± 0.0154 ^{tuv}
	4 (ก.ย.)	0.5010 ± 0.0318 ^{jkl}	0.3610 ± 0.0113 ^{nopq}	0.2441 ± 0.0116 ^{stu}	0.1888 ± 0.0602 ^{uv}	0.1034 ± 0.0191 ^{wx}
	6 (พ.ย.)	0.3095 ± 0.0327 ^{pqrs}	0.1568 ± 0.0387 ^{vw}	0.0973 ± 0.0258 ^{wx}	0.0801 ± 0.0343 ^{wx}	0.0342 ± 0.0140 ^{x}
15°C	0 (พ.ค.)	1.4548 ± 0.0610 ^{a}	0.8391 ± 0.0419 ^{d}	0.6969 ± 0.0609 ^{fg}	0.5999 ± 0.0725 ^{hi}	0.4768 ± 0.0508 ^{klm}
	2 (ก.ค.)	1.1514 ± 0.0771 ^{b}	0.7261 ± 0.0701 ^{ef}	0.5932 ± 0.0114 ^{hi}	0.5975 ± 0.0137 ^{hi}	0.4431 ± 0.0146 ^{lmn}
	4 (ก.ย.)	0.9853 ± 0.0670 ^{c}	0.5676 ± 0.0211 ^{hij}	0.5391 ± 0.0644 ^{ijk}	0.3305 ± 0.0328 ^{opqr}	0.3308 ± 0.0424 ^{opqr}
	6 (พ.ย.)	0.8336 ± 0.0453 ^{d}	0.4352 ± 0.0406 ^{lmn}	0.4009 ± 0.0668 ^{mno}	0.2828 ± 0.0506 ^{qrst}	0.2370 ± 0.0969 ^{stu}

*ตัวอักษรที่ต่างกันทั้งในแนวตั้งและแนวนอนแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค.
ผลงานวิจัยที่ได้นำเสนอในการประชุม

Borompichaichartkul, C., Wiset, L., Impaprasert, R. and Waedalor, I. 2005. Effects of combination of high temperature and intermittent drying on volatile compounds and other quality attributes of Thai fragrant rice. Proceedings of the 4th Asia-Pacific Drying Conference. 13-15 December, Science City, Kolgatta, India. 2 : 1166-1176.

Borompichaichartkul, C., Wiset, L., Tulayatun, W., Tuntratean, S., Thetsup-amorn, T., Impaprasert, R. and Waedalor, I. 2006. Comparative study of effects of drying methods and storage conditions on aroma and quality attributes of Thai Jasmine rice. Proceedings of the 15th International Drying Symposium. 20-23 August, Budapest, Hungary. C : 1394-1401.

ชาลีดา บรมพิชัยชาติกุล, วรรณา ตุลยธัญ, สุเมธ ตันตระเธียร, ธัญญารัตน์ เตชทรัพย์อมร และ รริศรา อิ่มภาประเสริฐ. 2549. ผลของการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชัน และอุณหภูมิในการเก็บต่อปริมาณ 2AP และคุณภาพการสีของข้าวขาวดอกมะลิ 105. การประชุมสัมมนาวิชาการอุตสาหกรรมเกษตร นวัตกรรมทางอาหาร ครั้งที่ 8, 15-16 มิถุนายน, ศูนย์ประชุมไบเทคบางนา. CD-ROM.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว รวิศรา อิ่มภาประเสริฐ เกิดเมื่อวันที่ 29 ธันวาคม พ.ศ. 2523 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิตจาก สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เมื่อปีการศึกษา 2545

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย