การทดลองและวิเคราะห์หาแนวทางอบแห้งข้าวเปลือกให้ได้ประสิทธิภาพสูง ด้วยเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระ

นายเกรียงไกร เพ็ชรน้ำเขียว

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2551

EXPERIMENT AND ANALYSIS OF PADDY DRYING IN THE FREE-FALL PADDY DRYER TO SEARCH FOR A HIGH EFFICIENCY DRYING

Kriangkrai Phetnamkhiao

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the

Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2008

การทดลองและวิเคราะห์หาแนวทางอบแห้งข้าวเปลือกให้ได้ประสิทธิภาพสูง ด้วยเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

____

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)
ประธานกรรมการ

____

(รศ. ดร.ทวิช จิตรสมบูรณ์)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

____

(ผศ. ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล)
กรรมการ

____

(อ. ดร.ธีระชาติ พรพิบูลย์)
กรรมการ

____

(ศ. ดร.ไพโรจน์ สัตยธรรม)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

____

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ ขำพิศ)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

เกรียงไกร เพ็ชรน้ำเขียว : การทดลองและวิเคราะห์หาแนวทางอบแห้งข้าวเปลือกให้ได้ประสิทธิภาพสูงด้วยเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระ (EXPERIMENT AND ANALYSIS OF PADDY DRYING IN THE FREE-FALL PADDY DRYER TO SEARCH FOR A HIGH EFFICIENCY DRYING) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร. ทวิช จิตรสมบูรณ์, 176 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาทดลองและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกที่มีการทำงานอย่างต่อเนื่อง หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งคือ ให้ข้าวเปลือกชื้นหล่นจากถังพักด้านบนอย่างอิสระด้วยแรงโน้มถ่วงโดยไม่มีการขวางการไหลในท่ออบแห้งแนวดิ่ง สวนทางกับอากาศร้อนที่พุ่งขึ้นจากด้านล่างสู่ทางออกด้านบน ทำให้ข้าวเปลือกมีความพรุนสูง ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างข้าวเปลือกกับอากาศมีค่าสูง เกิดการถ่ายเทความร้อนและความชื้นระหว่างข้าวเปลือกกับอากาศร้อนในท่ออบแห้งอย่างรวดเร็วด้วยวิธีการพาแบบบังคับ งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของความเร็วอากาศอบแห้ง อุณหภูมิอากาศอบแห้ง และความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกที่มีต่ออัตราการอบแห้ง อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐมภูมิจำเพาะ และคุณภาพข้าวที่ผ่านการอบแห้ง (ปริมาณข้าวต้นและความขาว) ในการศึกษาใช้เมล็ดข้าวเปลือกพันธุ์ชัยนาท 1 เป็นข้าวเปลือกแห้งที่นำมาเพิ่มความชื้นด้วยวิธีการแช่ข้าวจนได้ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 20-26% w.b. อัตราการป้อนข้าวเปลือก 15.37 kg/min อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 45, 60, 90 และ 120°C และความเร็วอากาศอบแห้ง 1, 2, 3 และ 4 m/s ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่า เมื่อความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือก อุณหภูมิและความเร็วอากาศอบแห้งเพิ่มสูงขึ้นอัตราการอบแห้งและอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐมภูมิจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้น หากเพิ่มระยะเวลาการอบแห้งต่อไปความชื้นจะลู่เข้าสู่ความชื้นสมดุลของข้าวเปลือก ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของข้าวเปลือก อุณหภูมิอากาศอบแห้ง และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ในส่วนคุณภาพข้าวพบว่าปริมาณข้าวต้นมีค่าต่ำและใกล้เคียงกันในทุกกรณีศึกษา ขณะที่ความขาวมีค่าสูงและเกาะกลุ่มกันในทุกกรณี งานวิจัยได้ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกสดจากการเก็บเกี่ยวที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 23% w.b. พบว่า อัตราการอบแห้ง อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ และคุณภาพข้าวมีแนวโน้มและทิศทางที่สอดคล้องกับกรณีข้าวเปลือกแห้งเพิ่มความชื้น อัตราการอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วอากาศอบแห้งแต่มีค่าต่ำกว่าและใช้ระยะเวลาการอบแห้งนานกว่า ทั้งที่ความชื้นเริ่มต้นมีค่าต่ำกว่า อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐมภูมิจำเพาะมีค่าสูงกว่ากรณีข้าวเปลือกแห้งที่เพิ่มความชื้นที่สภาวะอบแห้งเดียวกันกว่าสองเท่า และคุณภาพข้าวที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับกรณีข้าวเปลือกแห้งที่เพิ่มความชื้นทั้งปริมาณข้าวต้นและความขาว โดยปริมาณข้าวต้นมีแนวโน้มสูงกว่าเล็กน้อย

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล	ลายมือชื่อนักศึกษา________________________
ปีการศึกษา 2551	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา__________________

KRIANGKRAI PHETNAMKHIAO : EXPERIMENT AND ANALYSIS OF PADDY DRYING IN THE FREE-FALL PADDY DRYER TO SEARCH FOR A HIGH EFFICIENCY DRYING. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. TAWIT CHITSOMBOON, Ph.D., 176 PP.

PADDY DRYING/COUNTER FLOW DRYER/HIGH TEMPERATURE DRYING

Experiment and analysis of the free-fall paddy rice dryer were studied. This dryer uses the counter flow principle where paddy flows downward with gravity force and hot air flow upward in a drying tube. The paddy has high porosity and high relative velocity with the air, hence high heat and mass transfer coefficients. This research showed the effect of drying air velocity, drying temperature and initial moisture content of paddy on drying rates, specific energy consumptions, head rice yields and whiteness. The conditions used were: Chainat 1 paddy rewetted for initial moisture content 20-26% w.b., feed rate 15.37 kg/min, drying temperature 45, 60, 90 and 120˚C and drying air velocity 1, 2, 3 and 4 m/s. The experimental results indicated that the drying rates and specific energy consumptions increased with the drying temperature, drying air velocity and initial moisture content of the paddy. Dried paddy had low head rice yield but whiteness was very good for all cases. For fresh harvest with initial moisture content about 23% w.b. the drying rates and specific energy consumptions increased with the drying air velocity. The drying rate had the same trend with the rewetted paddy but it used longer time for drying. The specific energy consumptions were more than two times of the rewetted paddy. Head rice yields and whiteness were close to those of the rewetted paddy.

School of Mechanical Engineering Student's Signature___________________

Academic Year 2008 Advisor's Signature___________________

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลือ อย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการ และ ด้านการดำเนินงานวิจัย อาทิเช่น

รองศาสตราจารย์ ดร.ทวิช จิตรสมบูรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รองศาสตราจารย์ นาวาอากาศเอก ดร.วรพจน์ ขำพิศ รองศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์ รองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย จันทสาโร ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล อาจารย์ ดร.ธีระชาติ พรพิบูลย์ อาจารย์ธีทัต ดลวิชัย และอาจารย์โศรฎา แข็งการ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คุณอาภรณ์พรรณ ศรีอัครวิทยา คุณทัศนีย์ ทิพย์สาคร และคุณวันเพ็ญ สืบสาย เจ้าหน้าที่ประจำสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คุณจำนง ผายสระน้อย คุณคมสัน ภาษยเดช คุณศรัทธา โพธิสว่าง คุณณรงค์ เขียวสูงเนิน และคุณสมยง พิมพ์พรม เจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คุณบรรณชา ขันเขียว คุณสุพิชญาย์ มีสุขเจ้าสำราญ คุณปราโมทย์ สิงห์ทอง คุณปิยะ ยินสันเที๊ยะ คุณพรสวรรค์ ทองใบ คุณวิกันดา ศรีเดช และท่านอื่น ๆ ที่เป็นกำลังใจ และให้คำปรึกษาที่มิได้มีรายชื่อข้างต้น ตลอดจนครูอาจารย์ในอดีตทุกท่านที่ได้สั่งสอน อบรม และให้ความรู้

ท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การเลี้ยงดูอบรม และส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิต

เกรียงไกร เพ็ชรน้ำเขียว

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)......ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)......ข
กิตติกรรมประกาศ......ค
สารบัญ......ง
สารบัญตาราง......ฌ
สารบัญรูป......ฏ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ......ด

บทที่

1 บทนำ......1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย......1
1.2 แนวทางการทำวิจัย......5
1.3 วัตถุประสงค์การวิจัย......7
1.4 ขอบเขตของการวิจัย......7
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย......7

2 คำจำกัดความและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง......8
2.1 ความสำคัญของการอบแห้ง......8
2.2 ทฤษฎีการอบแห้ง......8
2.2.1 การถ่ายเทความชื้น......8
2.2.2 การถ่ายเทความร้อน......10
2.2.2.1 การนำความร้อน......10
2.2.2.2 การพาความร้อน......10
2.2.2.3 การแผ่รังสีความร้อน......11
2.3 ความชื้นวัสดุ......11
2.3.1 ความชื้นมาตรฐานเปียก......11
2.3.2 ความชื้นมาตรฐานแห้ง......11

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4 ความชื้นสัมพัทธ์ ... 12
2.5 ความชื้นสมดุลของวัสดุ ... 12
2.6 ประเภทของความชื้น ... 12
2.6.1 ความชื้นที่เกาะที่ผิวเมล็ดพันธุ์ ... 12
2.6.2 ความชื้นภายในเมล็ด ... 12
2.6.3 ความชื้นซึ่งไม่สามารถทำให้ระเหยออกได้ ... 12
2.7 ลักษณะทางกายภาพของข้าว ... 13
2.7.1 น้ำหนักเมล็ด ... 13
2.7.2 ขนาดรูปร่างเมล็ด ... 13
2.7.3 ความขาวของข้าวสาร ... 13
2.7.4 คุณภาพการสี ... 13
2.8 ข้าวเปลือกที่ใช้ในงานวิจัย ... 14
2.9 การลดความชื้นเมล็ด ... 15
2.9.1 วิธีธรรมชาติ ... 15
2.9.1.1 ตากข้าวทิ้งไว้ในนาหลังจากเก็บเกี่ยว ... 15
2.9.1.2 การตากในลานหลังนวดข้าวเสร็จแล้ว ... 16
2.9.2 การใช้เครื่องอบ ... 16
2.10 วิธีการหาค่าความชื้น ... 16
2.10.1 การหาค่าความชื้นแบบวิธีตรง ... 16
2.10.2 การหาค่าความชื้นแบบวิธีอ้อม ... 17
3 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ... 18
3.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ... 18
3.2 ผลสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ... 28
4 เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระที่มีการทำงานอย่างต่อเนื่อง ... 32
4.1 รายละเอียดเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ ... 32
4.2 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ ... 33

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5 วิธีดำเนินการวิจัย 39
5.1 ขั้นตอนการเตรียมข้าวเปลือกชื้น 39
5.1.1 วิธีการคลุกข้าว 39
5.1.2 วิธีการแช่ข้าว 39
5.2 ขั้นตอนการทดลองอบแห้งข้าวเปลือก 39
5.3 ขั้นตอนการหาค่าความชื้นข้าวเปลือก 40
5.3.1 เครื่องวัดความชื้นเมล็ดพันธุ์แบบความต้านทาน 41
5.3.2 การหาค่าความชื้นโดยวิธีการใช้ตู้อบ 41
5.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์คุณภาพข้าว 42
5.4.1 การทำความสะอาด 42
5.4.2 การกะเทาะเปลือก 42
5.4.3 การขัดขาว 42
5.4.4 การคัดแยกปลายข้าว 42
5.4.5 การวิเคราะห์คุณภาพข้าว 43
5.5 ขั้นตอนการหาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐมภูมิจำเพาะ 43
5.6 สถานที่ทำการวิจัย 43
5.7 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย 43
5.8 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย 44
5.9 การเก็บรวบรวมข้อมูล 44
5.10 การวิเคราะห์ข้อมูล 44
6 ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล 45
6.1 อัตราการอบแห้งข้าวเปลือก 45
6.1.1 อัตราการอบแห้งข้าวเปลือกกรณีที่อุณหภูมิอากาศอบแห้งค่าต่าง ๆ 45
6.1.2 อัตราการอบแห้งข้าวเปลือกกรณีที่ความเร็วอากาศอบแห้งค่าต่าง ๆ 51
6.1.3 อัตราการอบแห้งข้าวเปลือกกรณีที่ความชื้นเริ่มต้นค่าต่าง ๆ 56

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.1.4 อัตราการอบแห้งข้าวเปลือกกรณีข้าวเปลือกสดที่ความเร็ว
อากาศอบแห้งค่าต่าง ๆ 60
6.2 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐมภูมิจำเพาะ 66
6.3 คุณภาพข้าวเปลือก 71
6.4 แนวทางอบแห้งที่มีประสิทธิภาพสูง 80
7 สรุปและข้อเสนอแนะ 83
7.1 สรุปผลการวิจัย 83
7.2 สรุปปัญหาจากการทดลอง 84
7.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการทำวิจัยต่อไป 85
รายการอ้างอิง 86
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก การพิสูจน์สมการ 90
ก.1 สมการคำนวณหาค่าปริมาณน้ำที่ใช้ในการเพิ่ม
ความชื้นให้กับข้าวเปลือก 91
ก.2 สมการคำนวณหาค่าอัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน
ความร้อนปฐมภูมิจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งข้าวเปลือก 93
ภาคผนวก ข กาเพิ่มความชื้นข้าวเปลือกด้วยวิธีการคลุกข้าวและแช่ข้าว (soak),
การทดลองการอบแห้งข้าวเปลือก และการหาค่าความชื้น
ด้วยเครื่องวัดความชื้นข้าวเปลือกแบบความต้านทาน Kett
เทียบกับการหาค่าความชื้นวิธีตรงโดยการใช้ตู้อบ 96
ภาคผนวก ค ทดสอบกะพ้อลำเลียง เครื่องทำความร้อน และเครื่องเป่าลม 109
ค.1 กะพ้อลำเลียง (conveyer) 110
ค.2 เครื่องทำความร้อน (heater) 119
ค.3 Orifice plate 125
ค.4 เครื่องเป่าลม (blower) 134

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ง ข้อมูลการทดลองอบแห้งข้าวเปลือก 138
ภาคผนวก จ บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา 174
ประวัติผู้เขียน 176

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

1.1 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฐมภูมิจำเพาะของเครื่องอบแห้งแบบต่าง ๆ 3

ข.1 แสดงข้อมูลระยะเวลาในการแช่ข้าวเปลือก, ค่าความชื้นข้าวเปลือก
ในช่วงเวลา 24 hr โดยการหาค่าความชื้นข้าวเปลือกวิธีตรงโดยการใช้ตู้อบ......................... 98

ข.2 แสดงข้อมูลการทดลองและสภาวะควบคุมในการทดลองการอบแห้งข้าวเปลือก
โดยใช้วิธีการเพิ่มความชื้นข้าวเปลือกทั้งสองวิธี 100

ข.3 แสดงข้อมูลความชื้นที่ระยะเวลาการอบแห้งต่าง ๆ ของข้าวเปลือก
ที่เพิ่มความชื้นทั้งสองวิธี และค่าความแตกต่างของความชื้น
โดยใช้วิธีการเพิ่มความชื้นด้วยการแช่ข้าว (soak) เป็นกรณีเปรียบเทียบ 100

ข.4 แสดงข้อมูลการทดลองการอบแห้งข้าวเปลือก.. 105

ข.5 แสดงการหาค่าความชื้นวิธีตรงโดยการใช้ตู้อบ.. 105

ข.6 แสดงข้อมูลความชื้นที่ระยะเวลาการอบแห้งต่าง ๆ จากการหาค่าความชื้น
ทั้งสองวิธี และค่าความผิดพลาดโดยใช้การหาค่าความชื้นวิธีตรง
โดยการใช้ตู้อบเป็นค่าอ้างอิง 106

ค.1 แสดงข้อมูลของความถี่กระแสไฟฟ้ากับความเร็วรอบมอเตอร์ขับ 111

ค.2 แสดงข้อมูลของความเร็วรอบมอเตอร์ขับกับความเร็วรอบสายพานลำเลียง 112

ค.3 แสดงข้อมูลของความเร็วรอบมอเตอร์ขับ, แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องเป่าลม
และอัตราการป้อนข้าวเปลือก.. 114

ค.4 แสดงข้อมูลอุณหภูมิ, ความชื้นสัมพัทธ์ และความชื้นสัมบูรณ์ของ
อากาศแวดล้อมในการทดลอง 119

ค.5 แสดงข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องทำความร้อน, อุณหภูมิ
อากาศอบแห้ง และความเร็วอากาศอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศแวดล้อม 23°C 121

ค.6 แสดงข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องทำความร้อน, อุณหภูมิ
อากาศอบแห้ง และความเร็วอากาศอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศแวดล้อม 27°C 122

ค.7 แสดงข้อมูลของความเร็วอากาศอบแห้ง, อุณหภูมิอากาศอบแห้ง
และความชื้นสัมพัทธ์.. 123

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

ค.8 ความสัมพันธ์การหาปริมาตรการไหล, ค่าความดันที่ตำแหน่งตกคร่อม orifice plate, ค่า Reynold's Number และค่า C_d กรณีใช้น้ำเป็นของไหลทำงาน 132
ค.9 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องเป่าลม, ผลต่างความสูงของน้ำตกคร่อม U-tube manometer, ความเร็วอากาศที่ตำแหน่งคอคอดแผ่น orifice และความเร็วอากาศภายในท่ออบแห้ง 136
ง.1 แสดงข้อมูลวันที่ทำการทดลอง สภาวะอากาศแวดล้อม และสภาวะอากาศอบแห้ง กรณีการอบแห้งทั้งหมด 139
ง.2 แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 45°C ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 26% w.b. กรณีความเร็วอากาศอบแห้ง 1, 2, 3 และ 4 m/s.................................. 141
ง.3 แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60°C ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 26% w.b. กรณีความเร็วอากาศอบแห้ง 1, 2, 3 และ 4 m/s.................................. 145
ง.4 แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 90°C ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 26% w.b. กรณีความเร็วอากาศอบแห้ง 1, 2, 3 และ 4 m/s.................................. 149
ง.5 แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 26% w.b. กรณีความเร็วอากาศอบแห้ง 1, 2, 3 และ 4 m/s.................................... 152
ง.6 แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C ใช้ข้าวเปลือกสดที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 23% w.b. กรณีความเร็วอากาศอบแห้ง 1, 2, 3 และ 4 m/s......... 155
ง.7 แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60°C ความเร็วอากาศอบแห้ง 2 m/s ความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือก 22.92% w.b. 159
ง.8 แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60°C ความเร็วอากาศอบแห้ง 2 m/s ความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือก 25.04 และ 26.05% w.b. 162
ง.9 แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C ความเร็วอากาศอบแห้ง 2 m/s กรณีความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือกค่าต่าง ๆ.............................. 164
ง.10 แสดงข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C ความเร็วอากาศอบแห้ง 4 m/s กรณีความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือกค่าต่าง ๆ.............................. 165

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

ง.11 แสดงข้อมูลอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐมภูมิจำเพาะ กรณีความเร็วอากาศอบแห้ง และอุณหภูมิอากาศอบแห้งค่าต่าง ๆ ที่ความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือกประมาณ 26% w.b. และข้าวเปลือกสด 167

ง.12 แสดงการเปรียบเทียบอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ ของเครื่องอบแห้งแบบต่าง ๆ 169

ง.13 แสดงข้อมูลปริมาณข้าวต้น และความขาว เมื่อพิจารณาผลกระทบ ของอุณหภูมิอากาศอบแห้ง ความชื้นเริ่มต้น และความชื้นสุดท้าย ที่สภาวะอบแห้งต่าง ๆ โดยใช้มวลตัวอย่างข้าวเปลือก 100 g.. 171

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

1.1 เครื่องอบแห้งแบบหล่นไหลสวนทางอิสระ 3

1.2 เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระที่มีการทำงานอย่างต่อเนื่อง 6

4.1 แผนภาพเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ 34

4.2 เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระที่ใช้ในการทดลอง 35

4.3 เครื่องเป่าลม (blower) ของ FengLi ขนาด 0.6 kW
ความเร็วรอบมอเตอร์ 16000 rpm 36

4.4 Variac ของ yamabishi รุ่น s-260-10M 36

4.5 Orifice plate ที่ใช้ในงานวิจัย 37

4.6 U-tube manometer 37

4.7 Inverter ของ Toshiba รุ่น VF-s7, ตัวปรับและแสดงค่าอุณหภูมิของ Shinko
รุ่น GCS-300 38

6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับค่าความชื้นข้าวเปลือก
ที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 1 m/s กรณีอุณหภูมิอากาศอบแห้งค่าต่าง ๆ 47

6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับค่าความชื้นข้าวเปลือก
ที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 2 m/s กรณีอุณหภูมิอากาศอบแห้งค่าต่าง ๆ 48

6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับค่าความชื้นข้าวเปลือก
ที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 3 m/s กรณีอุณหภูมิอากาศอบแห้งค่าต่าง ๆ 49

6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับค่าความชื้นข้าวเปลือก
ที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 4 m/s กรณีอุณหภูมิอากาศอบแห้งค่าต่าง ๆ 50

6.5 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับค่าความชื้นข้าวเปลือก
ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 45°C กรณีความเร็วอากาศอบแห้งค่าต่าง ๆ 52

6.6 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับค่าความชื้นข้าวเปลือก
ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60°C กรณีความเร็วอากาศอบแห้งค่าต่าง ๆ 53

6.7 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับค่าความชื้นข้าวเปลือก
ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 90°C กรณีความเร็วอากาศอบแห้งค่าต่าง ๆ 54

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

6.8 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับค่าความชื้นข้าวเปลือก
ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C กรณีความเร็วอากาศอบแห้งค่าต่าง ๆ 55
6.9 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับค่าความชื้นข้าวเปลือก
ที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 2 m/s อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60°C กรณีค่าความชื้น
เริ่มต้นค่าต่าง ๆ 57
6.10 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับค่าความชื้นข้าวเปลือก
ที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 2 m/s อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C กรณีค่าความชื้น
เริ่มต้นค่าต่าง ๆ 58
6.11 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับค่าความชื้นข้าวเปลือก
ที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 4 m/s อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C กรณีค่าความชื้น
เริ่มต้นค่าต่าง ๆ 59
6.12 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับค่าความชื้นข้าวเปลือกสด
ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C กรณีความเร็วอากาศอบแห้งค่าต่าง ๆ 61
6.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศอบแห้งกับระยะเวลาการอบแห้ง
เปรียบเทียบกรณีของข้าวเปลือกสดกับข้าวเปลือกแห้งที่นำมาเพิ่มความชื้น
ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C และความเร็วอากาศอบแห้ง 1 m/s 62
6.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศอบแห้งกับระยะเวลาการอบแห้ง
เปรียบเทียบกรณีของข้าวเปลือกสดกับข้าวเปลือกแห้งที่นำมาเพิ่มความชื้น
ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C และความเร็วอากาศอบแห้ง 2 m/s 63
6.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศอบแห้งกับระยะเวลาการอบแห้ง
เปรียบเทียบกรณีของข้าวเปลือกสดกับข้าวเปลือกแห้งที่นำมาเพิ่มความชื้น
ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C และความเร็วอากาศอบแห้ง 3 m/s 64
6.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศอบแห้งกับระยะเวลาการอบแห้ง
เปรียบเทียบกรณีของข้าวเปลือกสดกับข้าวเปลือกแห้งที่นำมาเพิ่มความชื้น
ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C และความเร็วอากาศอบแห้ง 4 m/s 65

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

6.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศอบแห้งกับค่าอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐมภูมิจำเพาะที่อุณหภูมิอากาศอบแห้งต่าง ๆ และความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือกประมาณ 26% w.b. 68

6.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศอบแห้งกับอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐมภูมิจำเพาะที่อุณหภูมิ 120°C ของข้าวเปลือกสดกับข้าวเปลือกแห้งที่เพิ่มความชื้น 69

6.19 แสดงการเปรียบเทียบอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฐมภูมิจำเพาะของเครื่องอบแห้งแบบต่าง ๆ 70

6.20 ลักษณะของข้าวเปลือก ข้าวกล้อง ข้าวเต็มเมล็ด และข้าวหัก ที่ผ่านการอบแห้งกรณีข้าวเปลือกสดและข้าวเปลือกแห้งที่เพิ่มความชื้น 73

6.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการอบแห้งข้าวเปลือกกับปริมาณข้าวต้น 74

6.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกกับปริมาณข้าวต้น 75

6.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งกับปริมาณข้าวต้น 76

6.24 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการอบแห้งข้าวเปลือกกับค่าความขาว 77

6.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกกับค่าความขาว 78

6.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเริ่มสุดท้ายของข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งกับค่าความขาว 79

6.27 ผลของอุณหภูมิและ ความเร็วอากาศอบแห้งที่มีต่ออัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐมภูมิจำเพาะ 81

6.28 ผลของอุณหภูมิและ ความเร็วอากาศอบแห้งที่มีต่อระยะเวลาการอบแห้งข้าวเปลือก 82

ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการแช่ข้าวเปลือกกับค่าความชื้นข้าวเปลือก 99

ข.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับค่าความชื้นข้าวเปลือกเปรียบเทียบกันระหว่างการเพิ่มความชื้นขาวเปลือกด้วยวิธีการคลุกข้าวกับการเพิ่มความชื้นขาวเปลือกด้วยวิธีการแช่ข้าว (soak) ด้วยความเร็วอากาศอบแห้ง 4 m/s และอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 90°C 103

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
ข.3	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับค่าความแตกต่างของความชื้น โดยใช้วิธีการเพิ่มความชื้นด้วยการแช่ข้าว (soak) เป็นกรณีเปรียบเทียบ	103
ข.4	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับค่าความชื้นข้าวเปลือก เปรียบเทียบกันระหว่างเครื่องวัดความชื้นข้าวเปลือกแบบความต้านทาน Kett m401 กับการหาค่าความชื้นข้าวเปลือกวิธีตรงโดยการใช้ตู้อบ ด้วยความเร็วอากาศอบแห้ง 2 m/s และอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 108.1°C	107
ข.5	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับค่าความผิดพลาด ของค่าความชื้นข้าวเปลือก เมื่อให้การหาค่าความชื้นข้าวเปลือกวิธีตรง โดยการใช้ตู้อบเป็นค่าอ้างอิง	108
ค.1	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่กระแสไฟฟ้ากับความเร็วรอบของมอเตอร์ขับ	111
ค.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของมอเตอร์ขับกับความเร็วรอบ ของสายพานลำเลียง	113
ค.3	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องเป่าลม (ความเร็วอากาศอบแห้ง) กับอัตราการป้อนข้าวเปลือก ที่ความเร็วรอบมอเตอร์ขับค่าต่าง ๆ	118
ค.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของมอเตอร์ขับ กับอัตราการป้อนข้าวเปลือกเฉลี่ย	118
ค.5	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมที่วัดได้	120
ค.6	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องทำความร้อนกับอุณหภูมิ อากาศอบแห้งที่ออกจากเครื่องทำความร้อน กรณีความเร็วอากาศอบแห้ง ค่าต่าง ๆ ที่อุณหภูมิอากาศแวดล้อม 23°C	121
ค.7	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องทำความร้อนกับอุณหภูมิ อากาศอบแห้งที่ออกจากเครื่องทำความร้อน กรณีความเร็วอากาศอบแห้ง ค่าต่าง ๆ ที่อุณหภูมิอากาศแวดล้อม 27°C	122
ค.8	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศอบแห้งกับความชื้นสัมพัทธ์ที่วัดได้ ที่ตำแหน่งทางเข้าท่ออบแห้ง กรณีความเร็วอากาศอบแห้งค่าต่าง ๆ	124

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

ค.9 แผนภาพแสดงลักษณะของท่อ orifice plate และจุดต่อสำหรับวัดค่าความแตกต่างของความดันแบบระยะ D และ 0.5D (vena contracta taps) 131
ค.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า C_d กับค่า Reynold’s Number จากการทดสอบ 134
ค.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องเป่าลมกับผลต่างความสูงของระดับน้ำใน U-tube manometer 137
ค.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างความสูงของระดับน้ำใน U-tube manometer กับความเร็วอากาศภายในท่ออบแห้ง 137

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

β	=	อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง (diameter ratio = d/D)
ε	=	สภาพเปล่งรังสี, สัมประสิทธิ์การขยายตัว (expansion coefficient)
σ	=	Stefan-Boltzmann constant, $W/(m^2 \cdot K^4)$
ρ_a	=	ความหนาแน่นของอากาศ, kg/m^3
ϕ	=	ความชื้นสัมพัทธ์, %
μ	=	ความหนืด (dynamic viscosity), $Pa \cdot s$
ω	=	ความเร็วเชิงมุม, rad/s
A	=	พื้นที่สัมผัสระหว่างเม็ดของแข็งและของไหล, พื้นที่ผิวของวัตถุที่ปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า, พื้นที่หน้าตัดท่ออบแห้ง, m^2
C_A	=	ความเข้มข้นของมวลสาร
C_{AS}	=	ความเข้มข้นของมวลสารที่อิ่มตัว
C_a	=	ความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง, $kJ/(kg \cdot K)$
C_d	=	สัมประสิทธิ์อัตราไหล (discharge coefficient)
C_v	=	ความร้อนจำเพาะของไอน้ำในอากาศ, $kJ/(kg \cdot K)$
d	=	มวลของวัสดุแห้ง, kg, เส้นผ่านศูนย์กลางของ orifice plate, mm
D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ, mm
D_{AB}	=	สัมประสิทธิ์การแพร่, $kg/(m \cdot hr)$
e	=	ความหนาของแผ่น orifice plate, mm
$\hat{E}_T$	=	อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐมภูมิจำเพาะ, MJ/kg น้ำที่ระเหย
g	=	แรงโน้มถ่วง, m/s^2
h'	=	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (heat transfer coefficient), $W/(m^2 \cdot °C)$
h'_D	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร, $kg/(m^2 \cdot hr)$
Δh	=	ผลต่างความสูงของระดับน้ำใน U-tube manometer, mm
k	=	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัตถุ (thermal conductivity), $W/(m \cdot °C)$ specific heat ratio
L_e	=	ความยาวท่อสมมูล, m
$\dot{m}_a$	=	อัตราไหลมวลของอากาศ, kg/s

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

M_d	=	ความชื้นมาตรฐานแห้ง, % dry basis or % d.b.
M_w	=	ความชื้นมาตรฐานเปียก, % wet basis or % w.b.
N_A	=	ปริมาณของมวลสารที่ถ่ายเท, kg/hr
Nu	=	Nusselt number
Pr	=	Prandtl number
Δp	=	ผลต่างความดันตกคร่อมที่แผ่น orifice plate, Pa
q	=	อัตราการถ่ายเทความร้อน, W
Q	=	พลังงานความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้อากาศอบแห้ง, MJ, อัตราไหลปริมาตร, m^3/s
Re	=	Reynolds number
Re_D	=	Reynolds number ภายในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง D
Sc	=	Schmidt number
Sh	=	Sherwood number
T_∞	=	อุณหภูมิของกระแสของไหล, อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม, °C, K
T_{in}	=	อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเครื่องทำความร้อน, °C
T_{out}	=	อุณหภูมิอากาศที่ออกจากเครื่องทำความร้อน, °C
T_S	=	อุณหภูมิที่ผิวของเม็ดของแข็ง, อุณหภูมิของวัตถุที่ปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า, °C, K
Δt	=	ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง, min
V	=	ปริมาตรของน้ำ, m^3
$\bar{V}$	=	ความเร็วเฉลี่ยกระแสอากาศในท่ออบแห้ง, m/s
w	=	มวลของวัสดุชื้น, kg
W_a	=	อัตราส่วนความชื้นของอากาศอบแห้ง (ความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศ), kg/kg-dry air
x	=	พิกัดมวลสาร, m
x_w	=	เศษส่วนเชิงโมล หรือความดันไอของไอน้ำในอากาศ
x_{ws}	=	เศษส่วนเชิงโมล หรือความดันไอของไอน้ำในอากาศอิ่มตัว
Z	=	ระดับจากจุดอ้างอิง, m
$\frac{dT}{dx}$	=	ความชันของอุณหภูมิในเนื้อวัตถุ, °C/m