# การพัฒนาและวิจัยเพื่อปรับปรุงเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบหล่นอิสระ

นางสาวโศรฎา แข็งการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2557

# DEVELOPMENT AND RESEARCH FOR IMPROVEMENT OF THE FREE-FALL PADDY DRYER

**Sorada Khaengkarn**

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

**Degree of Doctor of Engineering in Mechanical Engineering**

**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2014**

**การพัฒนาและวิจัยเพื่อการปรับปรุงเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบหล่นอิสระ**

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาดุษฎีบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

_____

(อ. ดร.ธีทัต ดลวิชัย)
ประธานกรรมการ

_____

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

_____

(ศ. ดร.สมชาติ โสภณรณฤทธิ์)
กรรมการ

_____

(ศ. ดร.ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์)
กรรมการ

_____

(รศ. ดร.ประภาศรี อัศวกุล)
กรรมการ

_____

(ผศ. ดร.วีระศักดิ์ เลิศสิริโยธิน)
กรรมการ

_____

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

_____

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

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โศรฎา แข็งการ : การพัฒนาและวิจัยเพื่อการปรับปรุงเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบหล่นอิสระ (DEVELOPMENT AND RESEARCH FOR IMPROVEMENT OF THE FREE-FALL PADDY DRYER) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.ทวิช จิตรสมบูรณ์, 198 หน้า.

งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 5 ส่วน คือ การปรับปรุงเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ การทดลอง การค้นหาแบบจำลองอบแห้งด้วยรหัสวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm : GA) การจำลองผลการอบแห้งด้วยวิธีการเชิงตัวเลขและการวิเคราะห์ตัวแปรไร้มิติ เครื่องอบแห้งต้นแบบได้ถูกปรับปรุงเพื่อให้สามารถอบแห้งได้อย่างต่อเนื่อง โดยการติดตั้งระบบลำเลียงและเครื่องมือวัด การทดลองอบแห้งข้าวเปลือกใช้เงื่อนไขการอบแห้งที่ความเร็วอากาศอบแห้งคงที่เท่ากับ 2 m/s อุณหภูมิอากาศอบแห้งเท่ากับ 100 130 150°C และอัตราการไหลของข้าวเปลือกเท่ากับ 52.4 kg/min และมีช่วงพักตัวระหว่างรอบการอบแห้ง 1 นาที ซึ่งผลการทดลองได้ถูกนำไปใช้ค้นหาแบบจำลองเอมไพริเคิล (Empirical Model) ที่เหมาะสมโดยใช้ GA Toolbox ของโปรแกรม MATLAB การจำลองผลด้วยวิธีการเชิงตัวเลขใช้แบบจำลองแบบไม่สมดุลของการอบแห้งแบบไหลสวนทางเพื่อจำลองผลการถ่ายเทความร้อนและมวลระหว่างอากาศอบแห้งและเมล็ดข้าวเปลือก และพัฒนาเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB ซึ่งผลการจำลองของโปรแกรมได้ผลใกล้เคียงกับการทดลอง การวิเคราะห์ตัวแปรไร้มิติเพื่อการขยายขนาดไปสู่เครื่องอบแห้งเชิงพาณิชย์ด้วยวิธีการสร้างและการวัดด้วยวิธีตัวแปรบริสุทธิ์ พบตัวแปรไร้มิติทั้งหมด 6 ตัว โดยที่กลุ่มตัวแปรไร้มิติดังกล่าวมีความเสมือนทางรูปทรงและทางพลศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ปีการศึกษา 2557 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

SORADA KHAENGKARN : DEVELOPMENT AND RESEARCH FOR IMPROVEMENT OF THE FREE-FALL PADDY DRYER. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. TAWIT CHITSOMBOON, Ph.D., 198 PP.

FREE-FALL DRYER/THIN-LAYER MODEL/GENETIC ALGORITHM/ DIMENSIONLESS ANALYSIS/CHARACTERISTIC CURVE/DRYING RATE

This work comprises of 5 parts namely: improvement of the dryer, experiment, drying models by genetic algorithm, dimensionless analysis and numerical simulation. The existing free-fall dryer was improved for a continuous drying process by installing a bucket conveyor and measurement instruments. The experiment was done at air velocity 2 m/s, temperature 100, 130, 150°C, paddy feed rate 52.4 kg/min and rest period between drying round of 1 min. Experimental data obtained from the experiment were then fitted to the 9 empirical models in the literature by a genetic algorithm of MATLAB to find the best models. As for the numerical simulation work, the non-equilibrium model of the counter-current flow drying process was used to simulate the heat and mass transfer between drying air and paddy grains. A computer code was developed by using MATLAB. The experimental data were compared to the simulated values and the results were in good agreements. A dimensionless variables analysis is desirable for scaling of the dryer into a commercial scale. By using the method of pure dimension scaling, 6 dimensionless variables were found. Geometric and dynamic similarities of the dimensionless groups were demonstrated.

School of Mechanical Engineering Student's Signature _____

Academic Year 2014 Advisor's Signature _____

# กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลือ อย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการ และ ด้านการดำเนินงานวิจัยอาทิเช่น

รองศาสตราจารย์ ดร.ทวิช จิตรสมบูรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เมตตาอบรมสั่งสอน รวมทั้งอดทนและให้โอกาสต่อผู้วิจัยเสมอมา จนสามารถสำเร็จการศึกษานี้ได้ ดิฉันขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ ด้วยความเคารพรักเป็นอย่างยิ่งค่ะ

รองศาสตราจารย์ นาวาอากาศเอก ดร.วรพจน์ ขำพิศ รองศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กีรติ สุลักษณ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ คูณศรี สุข อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คุณอาภรณ์พรรณ ศรีอัครวิทยา คุณทัศนีย์ ทิพย์สาคร และคุณสายฝน สิบพลกรัง เจ้าหน้าที่ประจำสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คุณจำนงค์ ผายสระน้อย คุณคมสัน ภายยเดช คุณวิชาญ วีรชัยสุนทร คุณคมสันต์ ต่ายทรัพย์ และคุณสมยง พิมพ์พรม เจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คุณสุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ คุณเกรียงไกร เพ็ชรน้ำเขียว คุณพรสวรรค์ ทองใบ คุณจารุวรรณ ตั้งต้นสกุลวงศ์ คุณวิกันดา ศรีเดช และท่านอื่นๆ ที่เป็นกำลังใจ และให้คำปรึกษาที่มิได้มีรายชื่อข้างต้น ตลอดจนครูอาจารย์ในอดีตทุกท่านที่ได้สั่งสอน อบรม และให้ความรู้

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยและทุนเดินทางนำเสนอผลงานวิจัย

ท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การเลี้ยงดูอบรม เข้าใจ เป็นกำลังใจและส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีมาโดยตลอด แม้จะด้วยความยากลำบากสักเพียงใด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตได้ ขอบพระคุณค่ะ

โศรฎา แข็งการ

# สารบัญ

**หน้า**


บทคัดย่อ (ภาษาไทย) ..... ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) ..... ค
กิตติกรรมประกาศ ..... จ
สารบัญ ..... ฉ
สารบัญตาราง ..... ญ
สารบัญรูป ..... ฏ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ ..... ด

**บทที่**

**1 บทนำ** ..... 1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย ..... 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย ..... 4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย ..... 4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ ..... 5
**2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง** ..... 6
2.1 บทนำ ..... 6
2.2 งานวิจัยของเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ ..... 6
2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งด้วยลมร้อน ..... 8
2.4 ตัวแปรไร้มิติในการอบแห้ง ..... 10
**3 เครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ** ..... 12
3.1 บทคัดย่อ ..... 12
3.2 บทนำ ..... 12
3.3 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ ..... 14
3.4 การทดลองเบื้องต้น ..... 22
3.5 สรุปผลการวิจัย ..... 29
**4 การทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ** ..... 31

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า


4.1 บทคัดย่อ ..... 31
4.2 บทนำ ..... 31
4.3 การทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ ..... 32
4.3.1 การเตรียมข้าวเปลือกชื้น ..... 32
4.3.2 เงื่อนไขการอบแห้งข้าวเปลือก ..... 33
4.3.3 ขั้นตอนการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ ..... 33
4.3.4 ขั้นตอนการหาความชื้นข้าวเปลือก ..... 35
4.4 ขั้นตอนการอบแห้งข้าวเปลือกมาตรฐานด้วยเครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ลม ..... 37
4.5 ขั้นตอนการทดสอบคุณภาพข้าวหลังการอบแห้ง ..... 37
4.6 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองอบแห้งข้าวเปลือก ..... 39
4.6.1 เส้นโค้งการอบแห้ง ..... 39
4.6.2 เส้นโค้งอัตราการอบแห้ง ..... 47
4.6.3 เส้นโค้งลักษณะเฉพาะ ..... 49
4.6.4 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ..... 52
4.7 ผลการทดสอบคุณภาพข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง ..... 63
4.7.1 ปริมาณข้าวต้นหลังการอบแห้ง ..... 64
4.7.2 ดัชนีความขาวของข้าวสารหลังการอบแห้ง ..... 66
4.8 สรุปผลการทดลอง ..... 69
**5 รหัสวิธีทางพันธุกรรมเพื่อคัดเลือกแบบจำลองการอบแห้งชั้นบาง ..... 70**
5.1 บทคัดย่อ ..... 70
5.2 บทนำ ..... 70
5.3 สมการอบแห้งชั้นบาง ..... 71
5.4 การค้นหาคำตอบด้วยรหัสวิธีเชิงพันธุกรรม ..... 76
5.4.1 ขั้นตอนการทำงานของ GA ..... 77
5.5 สมการที่เกี่ยวข้อง ..... 78
5.5.1 การหาอัตราส่วนความชื้น ..... 78

# สารบัญ (ต่อ)

**หน้า**


5.5.2 การคำนวณระยะเวลาในท่ออบแห้ง ..... 79
5.6 วิธีการดำเนินการวิจัย ..... 80
5.6.1 ฟังก์ชั่นค่าความเหมาะสมและเงื่อนไขรหัสวิธีพันธุกรรม ..... 80
5.6.2 ผลการคำนวณและการวิจารณ์ผล ..... 81
5.7 สรุปผลการวิจัย ..... 94
**6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบหล่นอิสระ** ..... 95
6.1 บทคัดย่อ ..... 95
6.2 บทนำ ..... 95
6.3 การจำลองปัญหาเชิงตัวเลขของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ ..... 101
6.4 วิธีการจำลองผล ..... 105
6.5 ผลการจำลองผล ..... 108
6.6 วิเคราะห์การทำนายผลของแบบจำลองที่นำเสนอ ..... 116
6.7 สรุปผลการวิจัย ..... 117
**7 การวิเคราะห์หาตัวแปรไร้มิติสำหรับเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ** ..... 118
7.1 บทคัดย่อ ..... 118
7.2 บทนำ ..... 119
7.2.1 ทฤษฎีของบัคกิงแฮม ..... 119
7.2.2 การสร้างและการวัดด้วยหน่วยคุณลักษณ์ ..... 119
7.2.3 ตัวแปรเสมือน ..... 119
7.3 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย ..... 120
7.4 วิเคราะห์อิทธิพลของค่า $\Pi$ที่มีต่อ $\Pi_1$ โดยใช้ ANOVA ..... 127
7.4.1 หลักการของ ANOVA ..... 128
7.4.2 อิทธิพลของค่า $\Pi_3$ที่มีต่อ $\Pi_1$ ..... 130
7.5 การหาความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้มิติ ..... 132
7.6 ทดสอบความเหมือนของตัวแปรไร้มิติ ..... 135

# สารบัญ (ต่อ)

**หน้า**

7.1 การสร้างแบบจำลองตัวแปรอิสระของเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ ..... 137
7.8 สรุปผลการวิจัย..... 141
**8 สรุปและข้อเสนอแนะ**..... 142
รายการอ้างอิง ..... 144
ภาคผนวก ..... 149
ภาคผนวก ก.การพิสูจน์สมการ ..... 149
ภาคผนวก ข.ตารางข้อมูลการทดลอง ..... 157
ภาคผนวก ค.บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่..... 183
ประวัติผู้เขียน ..... 198

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# สารบัญตาราง

**ตารางที่** **หน้า**


3.1 อัตราการขนถ่ายของกระพ้อลำเลียงที่ความเร็วรอบต่างๆ ..... 28
4.1 อัตราการอบแห้งที่อุณหภูมิ 100, 130 และ 150 องศาเซลเซียส ..... 47
4.2 ข้อมูลปริมาณร้อยละต้นข้าวของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ ..... 64
4.3 ข้อมูลปริมาณร้อยละต้นข้าวที่การอบแห้งข้าวมาตรฐาน ..... 65
4.4 ข้อมูลดัชนีความขาวของข้าวสารที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง
แบบหล่นอิสระและข้าวมาตรฐาน ..... 67
5.1 แบบจำลองการอบแห้งชั้นบาง ..... 75
5.2 แสดงกลยุทธ์วิวัฒนาการที่เลือกใช้ ..... 83
5.3 การวิเคราะห์แบบจำลองอบแห้ง กรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมสูง
ใช้อุณหภูมิอบแห้ง100°C ..... 82
5.4 การวิเคราะห์แบบจำลองอบแห้ง กรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมสูง
ใช้อุณหภูมิอบแห้ง 130°C ..... 83
5.5 การวิเคราะห์แบบจำลองอบแห้ง กรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมสูง
ใช้อุณหภูมิอบแห้ง 150°C ..... 84
5.6 การวิเคราะห์แบบจำลองอบแห้ง กรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมต่ำ
ใช้อุณหภูมิอบแห้ง 100°C ..... 85
5.7 การวิเคราะห์แบบจำลองอบแห้ง กรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมต่ำ
ใช้อุณหภูมิอบแห้ง 130°C ..... 86
5.8 การวิเคราะห์แบบจำลองอบแห้ง กรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมต่ำ
ใช้อุณหภูมิอบแห้ง 150°C ..... 87
7.1 ตัวแปรพื้นฐานการอบแห้งแบบหล่นอิสระ ..... 123
7.2 ตาราง ANOVA ..... 130
7.3 ผลการทดสอบการอบแห้งที่อุณหภูมิต่างๆ ..... 131

# สารบัญตาราง(ต่อ)

**ตารางที่** **หน้า**

7.4 เปรียบเทียบความเสมือนของตัวแปรไร้มิติระหว่างเครื่องอบแห้งต้นแบบ
และเครื่องอบแห้งขนาดกลาง เมื่อ $\Pi_3$, $\Pi_4$และ $\Pi_5$ คงที่ ..... 135
7.5 เปรียบเทียบความเสมือนของตัวแปรไร้มิติระหว่างเครื่องอบแห้งต้นแบบ
และเครื่องอบแห้งขนาดกลาง เมื่อ $\Pi_2$, $\Pi_4$และ $\Pi_5$ คงที่ ..... 136
7.6 เปรียบเทียบความเสมือนของตัวแปรไร้มิติระหว่างเครื่องอบแห้งต้นแบบ
และเครื่องอบแห้งขนาดกลาง เมื่อ $\Pi_2$, $\Pi_3$ และ $\Pi_4$ คงที่ ..... 136

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# สารบัญรูป

**รูปที่** **หน้า**


1.1 แบบจำลองของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบหล่นอิสระที่ใช้ในการทดลอง ..... 2
3.1 รูปโครงร่างของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบหล่นอิสระ ..... 15
3 2 เครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระขนาดที่ 1 ..... 16
3.3 รูปถ่ายเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระที่ใช้ในการทดลอง..... 18
3.4 รูปถ่ายเครื่องเป่าลม ..... 19
3.5 รูปถ่ายเครื่องทำความร้อน ..... 19
3.6 รูปถ่ายVariac 3 Phase ..... 20
3.7 รูปถ่ายท่อแก้วอบแห้งทนความร้อน..... 20
3.8 รูปถ่ายถังพักข้าวเปลือกด้านบน ..... 21
3.9 รูปถ่ายถังพักข้าวเปลือกด้านล่าง..... 21
3.10 กล่องลิ้นกันลม..... 23
3.11 รูปโครงร่างเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบหล่นอิสระที่ใช้ในการทดลอง ..... 24
3.12 แสดงตำแหน่งการวัดความเร็วลมในแนวหน้าตัดขวางท่ออบแห้ง..... 25
3.13 กราฟเปรียบเทียบความเร็วที่วัดได้จาก Airflow meter ที่ทางเข้า
กับความเร็วของอากาศที่ทางออก..... 26
3.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของ Inverter และความเร็วอากาศที่ทางออก..... 26
3.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของ Inverter
และความเร็วอากาศที่ทางออกแบบมีกล่องลิ้นกันลม..... 27
3.16 อัตราการขนถ่ายของกระพ้อลำเลียงที่ความถี่ของ Inverter ต่างๆ ..... 28
4.1 รูปโครงร่างเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบหล่นอิสระที่ใช้ในการทดลอง ..... 34
4.2 เครื่องมือวัดความชื้นเมล็ดพันธ์แบบความต้านทานไฟฟ้า..... 36
4.3 การลดลงของความชื้นเทียบต่อเวลา ที่เงื่อนไขอากาศอบแห้ง 100 องศาเซลเซียส..... 40
4.4 การลดลงของความชื้นเทียบต่อเวลา ที่เงื่อนไขอากาศอบแห้ง 130 องศาเซลเซียส..... 41
4.5 การลดลงของความชื้นเทียบต่อเวลา ที่เงื่อนไขอากาศอบแห้ง 150 องศาเซลเซียส..... 42

# สารบัญรูป (ต่อ)

**รูปที่** **หน้า**

4.6 การลดลงของความชื้นเทียบต่อเวลา ที่เงื่อนไขอากาศอบแห้ง 100, 130 และ150 องศาเซลเซียส, RH = 65 - 80% ..... 44
4.7 การลดลงของความชื้นเทียบต่อเวลา ที่เงื่อนไขอากาศอบแห้ง 100, 130 และ150 องศาเซลเซียส, RH = 50 - 60% ..... 45
4. 7 การลดลงของความชื้นเทียบต่อเวลา ที่เงื่อนไขอากาศอบแห้ง 100, 130 และ150 องศาเซลเซียส, RH = 50 - 60% ..... 46
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง ..... 48
4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งเทียบต่อเวลา..... 49
4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งเทียบต่อความชื้นของเมล็ดพืช..... 50
4.10 เส้นโค้งลักษณะเฉพาะของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระที่ 150°C ..... 50
4.11 เส้นโค้งลักษณะสมบัติของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระที่ 130°C ..... 51
4.12 เส้นโค้งลักษณะสมบัติของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระที่ 100°C ..... 51
4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้ง ที่ทางออกกับเวลาในการอบแห้งครั้งที่ 1, 2 และ 3 @ T = 100 C..... 53
4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม กับเวลาในการอบแห้งครั้งที่ 1, 2 และ 3 @ T = 100 C..... 54
4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้ง ที่ทางออกกับเวลาในการอบแห้งครั้งที่1, 2 และ 3 @ T = 130 C..... 55
4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม กับเวลาในการอบแห้งครั้งที่ 1, 2 และ 3 @ T = 130 C..... 56
4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้ง ที่ทางออกกับเวลาในการอบแห้งครั้งที่ 1, 2 และ 3 @ T = 150 C..... 57
4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม กับเวลาในการอบแห้งครั้งที่1, 2 และ 3 @ T = 150 C..... 58
4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่ทางออกและ กองข้าวเปลือกกับเวลาในการอบแห้งครั้งที่ 1 ..... 59

# สารบัญรูป (ต่อ)

**รูปที่** **หน้า**


4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่ทางออกและ
กองเมล็ดข้าวเปลือกกับเวลาในการอบแห้งครั้งที่ 2 ..... 60
4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่ทางออกและ
กองเมล็ดข้าวเปลือกกับเวลาในการอบแห้งครั้งที่ 3 ..... 61
4.22 ลักษณะเฉพาะของการอบแห้งภายใต้เงื่อนไขการอบแห้งคงที่ ..... 63
4.23 ปริมาณต้นข้าวที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 100,
130 และ 150 องศาเซลเซียส เทียบกับข้าวมาตรฐาน ..... 66
4.24 ดัชนีความขาวข้าวสารที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ
100, 130 และ 150 องศาเซลเซียส เทียบกับข้าวมาตรฐาน ..... 68
5.1 วัฏจักรของรหัสวิธีเชิงพันธุกรรม ..... 77
5.2 ขั้นตอนของรหัสวิธีเชิงพันธุกรรม ..... 78
5.3 เปรียบเทียบแบบจำลองของ Midilliและ Two-term exponential
กับผลการทดลอง กรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมสูง ..... 88
5.4 เปรียบเทียบแบบจำลองของ Midilliและ Two-term exponential
กับผลการทดลอง กรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมต่ำ ..... 89
5.5 ผลการทำนายของแบบจำลอง Two-term exponential กับผลการทดลอง
กรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมสูง ..... 91
5.6 ผลการทำนายของแบบจำลอง Two-term exponential กับผลการทดลอง
กรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมต่ำ ..... 92
5.7 ผลการทำนายของแบบจำลอง Midilli กับผลการทดลอง
กรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมสูง ..... 93
5.8 ผลการทำนายของแบบจำลอง Midilli กับผลการทดลอง
กรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมต่ำ ..... 94
6.1 เครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชมีการไหล ..... 96
6.2 Elementary Thin-layer ในท่ออบแห้ง ..... 102
6.3 ผลการจำลองความชื้นเทียบกับการทดลองที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 100°C ..... 109

# สารบัญรูป (ต่อ)

**รูปที่** **หน้า**


6.4 ผลการจำลองอุณหภูมิทางออกของอากาศอบแห้งเทียบกับการทดลอง ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 100°C ..... 110

6.5 ผลการจำลองอุณหภูมิทางเข้าของข้าวเปลือกเทียบกับ การทดลองที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 100°C ..... 110

6.6 ผลการจำลองอุณหภูมิเทียบกับการทดลองที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 100°C ..... 111

6.7 ผลการจำลองความชื้นเทียบกับการทดลองที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 130°C ..... 112

6.8 ผลการจำลองอุณหภูมิทางออกของอากาศอบแห้งเทียบกับ การทดลองที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 130°C ..... 112

6.9 ผลการจำลองอุณหภูมิทางเข้าของข้าวเปลือกเทียบกับ การทดลองที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 130°C ..... 113

6.10 ผลการจำลองอุณหภูมิเทียบกับการทดลองที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 130°C ..... 113

6.11 ผลการจำลองความชื้นเทียบกับการทดลองที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 150°C ..... 114

6.12 ผลการจำลองอุณหภูมิทางออกของอากาศอบแห้งเทียบกับการทดลอง ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 150°C ..... 115

6.13 ผลการจำลองอุณหภูมิทางเข้าของข้าวเปลือกเทียบกับการทดลอง ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 150°C ..... 115

6.14 ผลการจำลองอุณหภูมิเทียบกับการทดลองที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 150°C ..... 116

7.1 ANOVA table จากการวิเคราะห์ด้วย MATLAB Toolbox ..... 131

7.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\Pi_1 = MR$ และ $\Pi_2 = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_p}$ ..... 132

7.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\Pi_1 = MR$ และ $\Pi_3 = \frac{T_a - T_{amb}}{RH \cdot T_{amb}}$ ..... 133

7.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\Pi_1 = MR$ และ $\Pi_5 = \frac{D_{eff}}{d_e^2} \cdot t$ ..... 134

7.5 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ของ Coefficient of Π3 และ Π2 ..... 139

7.6 ผลการทำนายของแบบจำลองตัวแปรไร้มิติกับผลการทดลอง ..... 140

7. 7 แสดงความสัมพันธ์ของ Fourier Number และ Moisture Ratio ..... 141

# คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$\rho_a$ = ความหนาแน่นของอากาศ, $kg/m^3$

$\phi$ = ความชื้นสัมพัทธ์, %

$\mu$ = ความหนืด (dynamic viscosity), $Pa \cdot s$

$\%BRY$ = ปริมาณข้าวกล้อง, %

$\%HRY_1$ = ปริมาณข้าวต้นทั่วไป (รวมน้ำหนักแกลบ), %

$\%HRY_2$ = ปริมาณข้าวต้นแบบใหม่ (ไม่รวมน้ำหนักแกลบ), %

$\%Husk$ = ปริมาณแกลบ, %

$A$ = พื้นที่สัมผัสระหว่างเม็ดของแข็งและของไหล, พื้นที่ผิวของวัตถุที่ปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า, พื้นที่หน้าตัดท่ออบแห้ง, $m^2$

$a^*$ = ความเป็นสีแดง-เขียว, %

$b^*$ = ความเป็นสีเหลือง-น้ำเงิน, %

$C_A$ = ความเข้มข้นของมวลสาร

$C_{AS}$ = ความเข้มข้นของมวลสารที่อิ่มตัว

$C_a$ = ความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง,$kJ/(kg \cdot K)$

$C_d$ = สัมประสิทธิ์อัตราไหล (discharge coefficient)

$C_v$ = ความร้อนจำเพาะของไอน้ำในอากาศ,$kJ/(kg \cdot K)$

$D$ = เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ, mm

$D_{AB}$ = สัมประสิทธิ์การแพร่, $kg/(m \cdot hr)$

$D_P$ = เส้นผ่านศูนย์กลางเมล็ดของแข็ง, mm

$d$ = มวลของวัสดุแห้ง, kg, เส้นผ่านศูนย์กลางของ orifice plate, mm

g = แรงโน้มถ่วง, $m/s^2$

$h_{dryer\,tube}$ = ความยาวท่ออบแห้ง, m

$h_{fg}$ = ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำที่อุณหภูมิกระเปาะเปียก, J/kg

$h'$ = ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (heat transfer coefficient), $W/(m^2 \cdot °C)$

$h'_D$ = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร, $kg/(m^2 \cdot hr)$

$\Delta h$ = ผลต่างความสูงของระดับน้ำในU-tube manometer, mm

# คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ(ต่อ)

| | | |
|---|---|---|
| $k$ | = | ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัตถุ (thermal conductivity),W/(m · °C) |
| | | specific heat ratio |
| $\overline{\dot{M}}$ | = | อัตราอบแห้งเฉลี่ย, % w.b./sec. |
| $MC$ | = | ความชื้นภายในข้าวเปลือก, % wet basis or % w.b. |
| $M_d$ | = | ความชื้นมาตรฐานแห้ง, % dry basis or % d.b. |
| $M_{eq}$ | = | ความชื้นสมดุล, % dry basis or % d.b. |
| $M_f$ | = | เปอร์เซ็นต์ความชื้นข้าวเปลือกสุดท้าย, % w.b. |
| $M_i$ | = | เปอร์เซ็นต์ความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้น, % w.b. |
| $M_w$ | = | ความชื้นมาตรฐานเปียก, % wet basis or % w.b. |
| $\dot{m}_a$ | = | อัตราไหลมวลของอากาศ, kg/s |
| $\overline{\dot{m}_p}$ | = | อัตราการไหลข้าวเปลือกเฉลี่ย kg/min. |
| $N$ | = | จำนวนครั้งที่เก็บตัวอย่างข้าวเปลือก |
| $N_A$ | = | ปริมาณของมวลสารที่ถ่ายเท, kg/hr |
| Nu | = | Nusselt number |
| Pr | = | Prandtl number |
| $\Delta p$ | = | ผลต่างความดันตกคร่อมที่แผ่น orificeplate, Pa |
| $Q$ | = | พลังงานความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้อากาศอบแห้ง, MJ, |
| | | อัตราไหลปริมาตร, $m^3/s$ |
| Re | = | Reynolds number |
| RH | = | ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ, % |
| $\Delta t$ | = | ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง, min. |
| $T_{amb}$ | = | อุณหภูมิของกระแสของไหล, อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม,°C, K |
| $T_a$ | = | อุณหภูมิอากาศอบแห้ง,°C |
| $T_p$ | = | อุณหภูมิข้าวเปลือก,°C |
| $T_{wb}$ | = | อุณหภูมิกระเปาะเปียก,°C |
| $V$ | = | ปริมาตรของ, $m^3$ |
| $\bar{V}$ | = | ความเร็วเฉลี่ยกระแสอากาศในท่ออบแห้ง, m/s |
| $\bar{V}_{avg1}$ | = | ความเร็วอากาศเฉลี่ย ณ ตำแหน่งแผ่น orifice, m/s |

# คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ(ต่อ)

| | | |
|---|---|---|
| $\bar{V}_{avg2}$ | = | ความเร็วอากาศเฉลี่ยในท่ออบแห้ง, m/s |
| $\bar{V}_{Paddy}$ | = | ความเร็วข้าวเปลือกเฉลี่ย, m/s |
| $W_a$ | = | อัตราส่วนความชื้นของอากาศอบแห้ง (ความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศ),kg/kg-dry air |
| $WI$ | = | Whiteness index |
| $\bar{m}_i$ | = | มวลข้าวเปลือกเฉลี่ย, kg |
| $m$ | = | มวลของวัสดุชื้น, kg |
| $m_i$ , $m_f$ | | มวลข้าวเปียกเริ่มต้นและสุดท้าย ตามลำดับ, kg |
| $\frac{dT}{dx}$ | = | ความชันของอุณหภูมิในเนื้อวัตถุ, °C/m |

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

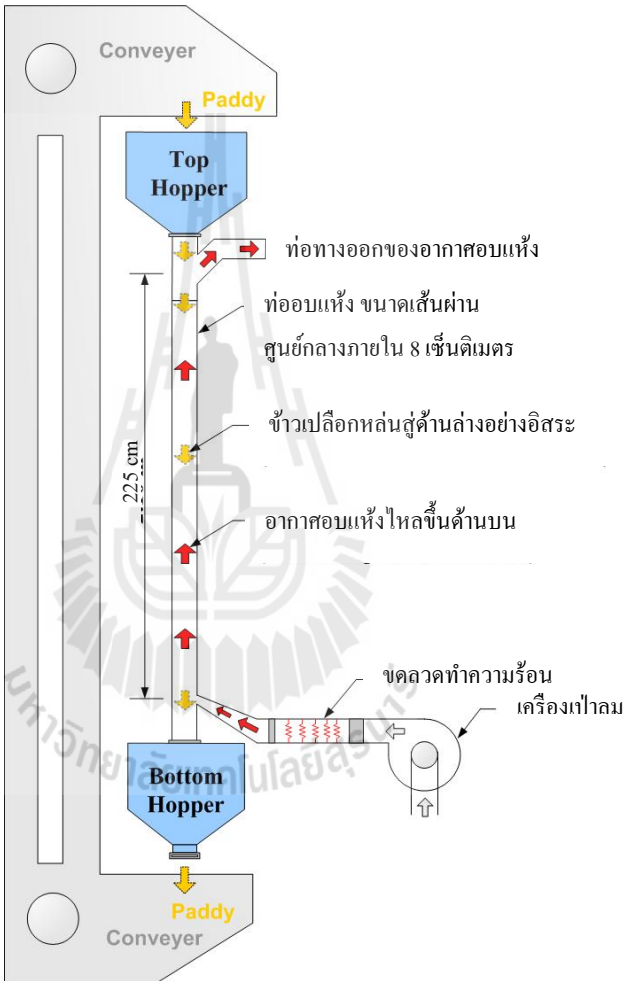
# บทที่ 1
# บทนำ

## 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาของปัญหาการวิจัย

กระบวนการอบแห้งข้าวเปลือกหรือกระบวนการลดความชื้นข้าวเปลือก เป็นกระบวนการสำคัญในอุตสาหกรรมข้าว ที่จะต้องทำทันทีหลังการเก็บเกี่ยว เพื่อรักษาคุณภาพของข้าวให้ได้มากที่สุดและยืดอายุการเก็บรักษาให้ได้นานที่สุด โดยที่การอบแห้ง หมายถึง การเคลื่อนย้ายน้ำหรือความชื้นออกจากวัสดุที่ทำการอบแห้งโดยการระเหย ซึ่งกระบวนการระเหยความชื้นออกจากวัสดุนั้น ส่วนใหญ่จะใช้ลมร้อนหรืออากาศร้อนเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุ โดยวัสดุจะนำความร้อนนั้นไประเหยความชื้นออกไป ซึ่งการอบแห้งข้าวเปลือกสำหรับใช้เป็นเมล็ดพันธุ์และใช้เป็นอาหารที่ถูกวิธี จะทำให้เปอร์เซ็นต์การงอกของเมล็ดสูง ได้ข้าวสารคุณภาพดีและเก็บไว้ได้นาน นอกจากนี้การอบแห้งยังเป็นการลดปริมาตรและน้ำหนัก ช่วยให้ลดต้นทุนในการเก็บรักษาและการขนส่งอีกด้วย แต่กระบวนการอบแห้งเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานและเวลามาก จึงมีการวิจัยและพัฒนาเครื่องอบแห้งอย่างต่อเนื่องจากอดีตจนถึงปัจจุบันเพื่อลดการใช้พลังงานโดยที่สามารถรักษาคุณภาพข้าวเปลือกที่ดีไว้ได้ ทำให้เกิดเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกเทคนิคต่าง ๆ อย่างหลากหลาย เช่น เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด, แบบสเปาเต็ดเบด, แบบไหลคลุกเคล้า (LouisianaStateUniversity, LSU), แบบไหลวนซ้ำ และแบบหล่นอิสระ เป็นต้น

สำหรับเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบหล่นอิสระ เป็นเครื่องที่ประดิษฐ์คิดค้นโดย ทวิช จิตรสมบูรณ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (กรมทรัพย์สินทางปัญญา, 2550) มีวัตถุประสงค์ในการสร้างเพื่อให้เป็นเครื่องอบแห้งที่ดีและประหยัดพลังงาน ด้วยการใช้เทคนิคการอบแห้งแบบลมไหลสวนทางและปล่อยข้าวหล่นอิสระ จากรูปที่ 1.1 แสดงโครงร่างของเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระและหลักการทำงานของเครื่องอบแห้งนี้คือ พัดลมเป่าอากาศผ่านขดลวดความร้อน เพื่อสร้างลมร้อนเข้าสู่ท่ออบแห้งที่ตั้งอยู่ในแนวดิ่งทางด้านล่าง ส่วนข้าวเปลือกชื้นตกลงมาโดยอิสระจากถังพักที่ด้านบนของท่ออบแห้งสวนทางกับการไหลขึ้นของลมร้อน ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนและความชื้นกับอากาศร้อนอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้ข้าวเปลือกแห้งลงอย่างรวดเร็ว โดยข้าวเปลือกจะอยู่ในท่ออบแห้งเป็นระยะเวลาสั้น ๆ เพียงประมาณ 1 วินาทีในแต่ละรอบ (กรณีเครื่องอบแห้งขนาดห้องทดลอง ที่ท่ออบแห้งยาวประมาณ 2 เมตร แต่ถ้าท่ออบแห้งยาวกว่านี้ก็จะมีเวลามากกว่านี้) จากนั้นข้าวเปลือกจะออกจากท่ออบแห้งเข้าสู่ถังพักทางด้านล่าง เพื่อให้ได้ข้าวเปลือกที่มีความชื้นอยู่ในระดับที่ต้องการ จึงต้องลำเลียงข้าวเปลือกเข้าสู่ท่ออบแห้งหลายรอบ ดังนั้นจึงเกิดช่วงเวลา

ที่ข้าวเปลือกรอที่จะเข้าสู่ท่ออบแห้งอีกครั้ง โดยเรียกช่วงเวลานี้ว่า ‘การพัก’(resting period) ถ้าหากเป็นการอบแห้งแบบต่อเนื่อง “การพัก” นี้ จะหมายถึงระยะเวลานับตั้งแต่ข้าวเปลือกออกจากท่ออบเข้าสู่ถังพักด้านล่าง และถูกลำเลียงขึ้นไปที่ถังพักด้านบนด้วยระบบลำเลียงจนกระทั่งเข้าสู่ท่ออบแห้งอีกครั้ง ช่วงระยะเวลาดังกล่าวจะมากหรือน้อยขึ้นกับปริมาณข้าวเปลือกที่หมุนเวียนอยู่ในระบบและอัตราการลำเลียงของระบบลำเลียง




รูปที่ 1. 1 แบบจำลองของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบหล่นอิสระที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระนี้แตกต่างจากเครื่องอบแห้งที่ใช้เทคนิคไหลสวนทางชนิดอื่น ๆ ที่เครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระไม่มีตัวควบคุมการไหลของเมล็ดพืช ในขณะที่เครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทางอื่น ๆ นั้น มีตัวควบคุมการไหลเมล็ดพืช และการไหลของอากาศจะเป็นการไหลแบบค่อย ๆ ซึมผ่านชั้นกองข้าวเปลือกที่ไหลลงมา เช่นเครื่องอบแห้งแบบไหลคลุกเคล้า (LSU)

(สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2540) และเครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบด[1](Madhiyanon T., 2001) เป็นต้น แต่สำหรับเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระนี้เมล็ดพืชตกลงมาสวนทางกับอากาศในแนวดิ่งด้วยความเร็วสูงและมีความพรุนสูง ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสในการถ่ายเทความร้อนและความชื้นมาก ที่สำคัญคือความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างอากาศกับเมล็ดพืชในเครื่องอบแห้งนี้จะมีค่าสูง ซึ่งทำให้มีอัตราการถ่ายเทมวลความชื้นสูงเป็นสัดส่วนกันโดยไม่ต้องใช้ความเร็วของอากาศสูงมากนัก

งานวิจัยที่ผ่านมาของเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ เป็นการทดลองเพื่อทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง โดยใช้เครื่องอบแห้ง 2 ขนาด คือ ขนาดที่ 1 มีขนาดท่อวงใน 8 เซนติเมตร ความยาวท่อรวม 225 เซนติเมตร และขนาดที่ 2 มีขนาดวงใน 4.5 เซนติเมตร ความยาวท่อรวม 122เซนติเมตร ซึ่งเครื่องอบแห้งขนาดที่ 2ได้ทำการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกทั้งแบบไม่ต่อเนื่องและแบบต่อเนื่อง โดยที่การอบแห้งแบบไม่ต่อเนื่องของเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ คือ ปล่อยข้าวเปลือกจากถังพักด้านบนผ่านส่วนอบแห้ง แล้วนำมาพักในถังมีปิดฝา จากนั้นนำข้าวเปลือกจำนวนนั้นกลับขึ้นไปในถังพักด้านบน ด้วยแรงงานคนแล้วจึงทำการปล่อยข้าวเปลือกเข้าสู่ท่ออบแห้งอีกครั้ง ทำเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะได้ความชื้นตามต้องการ วิธีการนี้ข้าวจะไม่ไหลอย่างต่อเนื่องในท่ออบแห้งตลอดเวลา ทำให้ช่วงระหว่าง “การพัก” ลมร้อนยังคงไหลอย่างต่อเนื่อง แต่ไม่มีข้าวเปลือกอยู่ในท่ออบแห้งสำหรับการอบแห้งแบบต่อเนื่อง จะใช้กระพ้อลำเลียงข้าวเปลือกแทนแรงงานคน จากถังพักด้านล่างขึ้นสู่ถังพักด้านบน ทำให้ข้าวเปลือกจะหล่นเข้าสู่ท่ออบแห้งตลอดเวลา โดยช่วงการพักคือช่วงที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบลำเลียง

จากงานวิจัยของเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระที่ผ่านมาพบว่า เครื่องอบแห้งขนาดที่ 1 ยังไม่ได้ทำการทดลองแบบต่อเนื่อง และงานวิจัยทั้งหมดเป็นการวิจัยเชิงการทดลองเท่านั้น ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงเป็นงานวิจัยเพื่อพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ โดยจะทำการศึกษาทั้งทางทฤษฎีและการทดลอง ซึ่งสามารถแบ่งงานได้เป็น 3 ส่วน คือ

- ส่วนที่ 1 ทำการปรับปรุงเครื่องอบแห้งเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระขนาดที่ 1 และทดลองอบแห้งข้าวเปลือกแบบต่อเนื่อง,
- ส่วนที่ 2 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอบแห้ง (Drying system) ของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบหล่นอิสระที่เหมาะสม เพื่อทำนายผลการอบแห้งที่เงื่อนไขการอบแห้งต่าง ๆ โดยจะทำการสอบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยผลการทดลองของงานวิจัยในอดีต

---

[1] เครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบด ใช้วิธีปล่อยอากาศร้อนที่ความเร็วสูงให้ไหลผ่านกึ่งกลางของกองเมล็ดพืชทำให้เมล็ดพืชลอยตัวสูงขึ้นไปเป็นลำเหนือชั้นเมล็ดพืชอย่างรวดเร็วเรียกว่า สเปาต์ (Spout)และเมื่อเมล็ดพืชลอยตัวสูงขึ้นอยู่เหนือชั้นของเมล็ดพืชในระดับหนึ่งนั้น ความเร็วของเมล็ดพืชจะลดลงและเริ่มแยกตัวออกจากกระแสอากาศร้อนและตกลงบนชั้น-ของเมล็ดพืชที่อยู่รอบ ๆ ข้างลำสเปาต์ในลักษณะคล้ายน้ำพุ (Fountain) ส่วนรอบข้างเรียกว่าดาวน์คัมเมอร์ (Down comer) เป็นส่วนที่เมล็ดพืชค่อย ๆ ไหลลงมาและมีอากาศไหลแทรกชั้นเมล็ดพืชสวนทางขึ้นไป

และปัจจุบันซึ่งการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความสำคัญช่วยให้ไม่ต้องทำการทดลองเพื่อประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดลอง และทราบแนวโน้มของตัวแปรที่มีผลต่อการอบแห้ง

- ส่วนที่ 3 ทำการวิเคราะห์หาตัวแปรไร้มิติที่มีความสำคัญในการอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ เพื่อลดความยุ่งยากในการคำนวณและการนำเสนอข้อมูล ซึ่งผลที่ได้จากงานวิจัยนี้จะสามารถนำไปออกแบบเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระขนาดที่เหมาะสมกับความต้องการในเชิงพาณิชย์ต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 ทำการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกแบบต่อเนื่องเพื่อศึกษาอัตราการอบแห้ง

1.2.2 เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอบแห้งสำหรับการอบแห้งแบบหล่นอิสระ

1.2.3 เพื่อหาตัวแปรไร้มิติสำหรับการอบแห้งแบบหล่นอิสระ เพื่อการออกแบบและขยายขนาดเครื่องอบแห้งไปสู่เครื่องขนาดใหญ่

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 ใช้ผลการทดลองการอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระขนาดท่อวงใน 4.5 เซนติเมตร ความยาวท่อรวม 122 เซนติเมตรเป็นต้นแบบและตัวเปรียบเทียบ

1.3.2 ทำการทดลองการอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระแบบต่อเนื่องขนาดท่อวงใน 8 เซนติเมตร ความยาวท่อรวม 225 เซนติเมตร

1.3.3 ใช้ข้าวเปลือกสดที่หาได้ในท้องถิ่น

1.3.4 ทำการทดลองเพื่อทดสอบความเสมือนของตัวแปรกำหนดอุณหภูมิอากาศอยู่ในช่วง 100, 130 และ150 องศาเซลเซียส

1.3.5 กำหนดความเร็วอากาศ เท่ากับ 2เมตรต่อวินาที (โดยในส่วนความเร็วอื่น ๆ จะใช้ผลการจำลองจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์)

1.3.6 กำหนดระยะการพัก ประมาณ 1 นาที ด้วยวิธีการควบคุมอัตราการป้อนข้าวเปลือก

1.3.7 การวิเคราะห์ จะพิจารณาเฉพาะอัตราการอบแห้ง และคุณภาพข้าวเปลือก ได้แก่ ปริมาณต้นข้าว (Head Rice Yield, HRY) และความขาว (Whiteness)

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

จากงานวิจัยทั้งการทดลองและทางทฤษฎี คาดว่าจะได้

1.4.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอบแห้งแบบหล่นอิสระ สำหรับใช้ทำนายผลการอบแห้ง ที่เงื่อนไขการอบแห้งต่าง ๆ

1.4.2 สมการปฏิสัมพันธ์ของตัวแปรไร้มิติ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและพัฒนาการอบแห้งข้าวเปลือกแบบหล่นอิสระนี้ต่อไป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# บทที่ 2
# ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

## 2.1 บทนำ

วรรณกรรมและงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งข้าวเปลือกมีอยู่มากมาย ตั้งแต่การออกแบบเครื่องอบแห้ง การทดลอง การจำลองผลการอบแห้งด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ รวมถึงการสร้างตัวแปรไร้มิติในการอบแห้ง ซึ่งงานวิจัยเหล่านี้ได้ถูกใช้เป็นแนวทางในการทำวิจัยของผู้วิจัยเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมและการสร้างตัวแปรไร้มิติของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ ซึ่งเป็นเครื่องอบแห้งแบบใหม่ ที่ออกแบบขึ้นโดยคาดหวังว่าจะสามารถอบแห้งได้อย่างรวดเร็วและประหยัดพลังงาน โดยในบทนี้ได้รวบรวมงานวิจัยในอดีตต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องมานำเสนอพร้อมทั้งวิเคราะห์วิจารณ์วรรณกรรมเหล่านั้น เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในงานวิจัยของผู้วิจัยต่อไป

## 2.2 งานวิจัยของเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระของจุฑาทิพย์ (2545) เป็นการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกเบื้องต้นเพื่อทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง โดยทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง เครื่องอบแห้งที่ใช้เป็นขนาดที่ 1 มีท่ออบแห้งขนาดวงใน 8 เซนติเมตร ความยาวท่อรวม 225 เซนติเมตร โดยมีวิธีการทดลอง คือ ปล่อยข้าวเปลือกจำนวน 600 – 1500 กรัม จากถังพักด้านบนผ่านส่วนอบแห้ง ที่มีอากาศไหลสวนทางขึ้นไป แล้วนำมาพักในถังปิดฝาด้านนอก จากนั้นนำข้าวเปลือกจำนวนนั้นกลับขึ้นไปที่ถังพักด้านบน ด้วยแรงงานคน แล้วปล่อยลงมาอีกครั้ง ทำซ้ำไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะได้ความชื้นตามต้องการ ในช่วงที่ข้าวเปลือกอยู่ในถัง และลำเลียงขึ้นไปไว้ที่ถังพักด้านบน ท่ออบแห้งจะไม่มีข้าวเปลือก แต่ยังคงเป่าอากาศร้อนเข้าสู่ส่วนอบแห้ง ในการทดลองได้ทำการเพิ่มระยะทางสัมผัสกับอากาศร้อนในท่ออบแห้งของข้าวเปลือก ด้วยการติดปีกหมุนวนลมที่ทางเข้าของอากาศ ทำให้อากาศร้อนหมุนวนเป็นเกลียวขึ้นด้านบน เป็นการเพิ่มระยะเวลาสัมผัสอากาศร้อนของข้าวเปลือก ซึ่งการทดลองพบว่าความสามารถในการอบแห้งเพิ่มขึ้น เมื่อติดปีกหมุนวนลม ด้วยผลการทดลองอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อบแห้งให้ได้ความชื้นสุดท้ายประมาณ 13.5%w.b. ในกรณีติดปีกหมุนวนลมใช้เวลา 24.185 วินาที และในกรณีไม่ติดปีกหมุนวนลมใช้เวลา 29.1 วินาที สำหรับการอบแห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ในกรณีติดปีกหมุนวนลมใช้เวลา 18.325 วินาที ส่วนในกรณีไม่ติดปีกหมุนวนลมใช้เวลา 20.57 วินาที โดยที่ไม่มีความ

แตกต่างในปริมาณร้อยละต้นข้าวและดัชนีความขาวของข้าวสารทั้งสองกรณี จะเห็นได้ว่าการติดปีกหมุนวนลมทำให้เวลาในการอบแห้งลดลงและประหยัดพลังงาน โดยอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฐมภูมิ ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ลดความชื้นจาก 23 ถึง 15.5%d.b. ใช้พลังงานเพียง 3.03 MJ/kg water evaporation (ทวิช และคณะ, 2549) นอกจากนี้ยังเป็นการอบแห้งในคราวเดียวที่สามารถลดความชื้นจนถึงระดับความชื้นเก็บรักษา โดยไม่ต้องเปลี่ยนไปอบแห้งต่อในเครื่องอบแห้งชนิดอื่น

งานวิจัยต่อมาเป็นการทดลองเพื่อหาผลกระทบของระยะการพักข้าวเปลือก ความเร็ว และอุณหภูมิของอากาศอบแห้ง ต่ออัตราการอบแห้ง ซึ่งเป็นงานวิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโทของสุพิชฌาย์ (2551) โดยเครื่องอบแห้งที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นเครื่องอบแห้งขนาดที่ 2 มีท่ออบแห้งขนาดท่อวงใน 4.5 เซนติเมตร ความยาวท่อรวม 122 เซนติเมตร ทำการทดลองระยะการพักที่ 1, 2 และ 4 นาที, ความเร็วอากาศอบแห้งที่ 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที และอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่ 40, 60, 100, 130 และ 150 องศาเซลเซียส ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ระยะการพัก ความเร็วและอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น ทำให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้นด้วย โดยถ้าความเร็วอากาศและอุณหภูมิสูงจะส่งผลให้กระบวนการแพร่ของน้ำจากภายในเมล็ดดีขึ้น เนื่องจากสัมประสิทธิ์การแพร่จะมีค่าสูงเมื่ออุณหภูมิของเมล็ดสูงขึ้นนั่นเอง สำหรับระยะการพัก เมื่อพักนานขึ้นในกรณีที่ใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงและอุณหภูมิของเมล็ดสูงเกินกว่าค่าวิกฤตที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสภาพโครงสร้างภายในเมล็ด จากสภาพแก้ว (glassy state) ไปเป็นสภาพยาง (rubbery state) พบว่าการพักที่นานขึ้นจะช่วยเพิ่มเวลาในการแพร่ความชื้นจากภายในสู่ภายนอกทำให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้นด้วย ซึ่งอัตราการอบแห้งโดยเฉลี่ยของงานวิจัยนี้ อยู่ในช่วง 0.0514-0.0971 (%w.b.ต่อวินาที) (สุพิชฌาย์ และ ทวิช, 2552a) และใช้พลังงานปฐมภูมิจำเพาะที่ต่ำอยู่ใน ช่วง 3.00-3.55 MJ/kg water evap. (สุพิชฌาย์ และ ทวิช, 2552b) โดยสามารถคงรักษาปริมาณข้าวต้นได้สูงถึงประมาณ 55% (สุพิชฌาย์ และ ทวิช, 2552c) ซึ่งงานวิจัยเหล่านี้ชี้ให้เห็นว่าเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระมีสมรรถนะดีสามารถอบแห้งได้อย่างรวดเร็วและประหยัดพลังงาน เมื่อเทียบกับเครื่องอบแห้งที่มีอยู่ในปัจจุบัน

สำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระแบบต่อเนื่องนั้น งานวิจัยของเกรียงไกร และคณะ (2551) ได้ทำการศึกษาผลของความเร็วอากาศที่มีต่ออัตราการอบแห้งเมื่อทำการอบแห้งแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระขนาดที่ 2 มีขนาดความโตท่อวงใน 4.5 เซนติเมตร ความยาวท่อรวม 122 เซนติเมตรโดยใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 90 และ 120 องศาเซลเซียส ความเร็วเฉลี่ย 1, 2, 3 และ 4 เมตรต่อวินาที ใช้ข้าวเปลือกปริมาณ 2.5 กิโลกรัมหมุนเวียนอยู่ในเครื่องอบแห้ง และใช้กระพ้อลำเลียงข้าวเปลือกจากถังพักด้านล่างขึ้นสู่ถังพักด้านบน พบว่าความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้น ทำให้เวลาที่ใช้ในการอบแห้งน้อยลง โดยที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ใช้เวลาอยู่ในช่วง 14.35 – 6.15 นาที (ไม่รวมเวลาพัก) ตามลำดับ ค่าพลังงานความ

ร้อนปฐมภูมิจำเพาะมีค่าอยู่ในช่วง 3.52 – 6.00 MJ/kg water evap. ซึ่งเมื่อใช้อุณหภูมิสูงและความเร็วสูงทำให้พลังงานที่ใช้เพิ่มขึ้น ขณะเดียวกันเวลาที่ใช้ก็ลดลงด้วย แต่แนวโน้มของการเพิ่มขึ้นของพลังงานที่ความเร็วอากาศอบแห้งเท่ากับ 4 เมตรต่อวินาที มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับที่ความเร็ว 3 เมตรต่อวินาที และมีค่าลู่เข้าค่าคงที่ ดังนั้นจะเห็นว่าการอบแห้งแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระมีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานค่อนข้างต่ำ ความเร็วของอากาศมีส่วนช่วยให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นแต่เพิ่มการใช้พลังงานเพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ดีความเร็วของอากาศที่สูงมากก็จะมีผลทำให้ข้าวลอยอยู่ในท่ออบแห้งทำให้ท่ออบแห้งเกิดการอุดตัน ข้าวไม่สามารถไหลลงมาที่ถังพักได้และหากความเร็วสัมพัทธ์สูงเกินกว่าความเร็วลอยตัวของข้าวก็จะทำให้ข้าวปลิวออกไปพร้อมอากาศอบแห้งที่ทางออก ซึ่งจะได้มีการวิจัยเพื่อหาจุดออกแบบที่เหมาะสมสำหรับเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระขนาดเล็กนี้ต่อไป

การทดลองในงานวิจัยของเครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทาง เพื่อทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งที่ผ่านมานั้น ใช้ข้าวเปลือกในปริมาณน้อย และเป็นข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งมาแล้ว และนำมาทำเป็นข้าวเปลือกชื้นด้วยการแช่ (Soaking) ซึ่งอัตราการอบแห้งที่ได้จะไม่เหมือนกับการอบแห้งด้วยข้าวเปลือกสด เนื่องจากสภาพทางกายภาพในเมล็ดของข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งแล้วจะเปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้ ยังมีผลกระทบต่อคุณภาพข้าวเปลือกหลังการอบแห้งด้วย ดังนั้น งานวิจัยนี้ จะใช้ข้าวเปลือกสดในการอบแห้ง เพื่อให้ได้อัตราการอบแห้งและคุณภาพข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง ที่แสดงถึงสมรรถนะตามความเป็นจริงและตามสภาพการใช้งานจริงของเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ เพื่อการพัฒนาต่อไปในอนาคต

## 2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งด้วยลมร้อน

เครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ ถือเป็นเครื่องอบแห้งแบบลมไหลสวนทางแบบหนึ่ง เนื่องจากอากาศอบแห้งและเมล็ดพืชมีการไหลแบบสวนทางกันในท่ออบแห้ง ดังนั้น ในการจำลองผลการอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ จะสามารถใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทางเพื่อการจำลองผลการอบแห้งได้ โดยงานวิจัยของ Lacerda et al. (2005) ใช้เครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทางซึ่งมีความคล้ายคลึงกับเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ เนื่องจากในชุดการทดลอง เมล็ดพืชจะถูกปล่อยลงมาจากถังพักด้านบนที่ยกสูงขึ้น 3 เมตรด้วยแรงโน้มถ่วง ก่อนเข้าสู่ส่วนอบแห้ง แต่อัตราการไหลของเมล็ดจะถูกควบคุมด้วยสายพานที่ทางออกด้านล่าง ซึ่งจะเป็นตัวควบคุมความเร็วและความพรุนของเมล็ดในท่ออบแห้งไปในตัว และขนาดของท่ออบแห้งที่ใช้มีขนาด 8 เซนติเมตร ความยาวท่ออบแห้ง 64 เซนติเมตร Lacerda et al. (2005) ใช้ 2-phase model (ของไหล+ของแข็ง) ทำนายการถ่ายเทความร้อนและความชื้นระหว่างอากาศและเมล็ดถั่วเหลืองในเครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทางนี้ ซึ่งแบบจำลองที่ใช้จะคล้ายกับแบบจำลองแบบ

ไม่สมดุลของ Brooker et al. (1974) โดยใช้สมการสมดุลมวลและพลังงานของของไหล (อากาศ) และของแข็ง (เมล็ดพืช) ซึ่งผลการสอบเทียบแบบจำลองกับการทดลองให้ผลค่อนข้างดี ข้อจำกัดของแบบจำลองนี้คือ อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางท่อและเมล็ดพืชต้องมากกว่า 10 ขึ้นไป เนื่องจากแบบจำลองโดยส่วนใหญ่จะพิจารณาเป็นการไหลใน 1 มิติ (ในแนวการไหลของอากาศและเมล็ดพืช) เพื่อความง่ายของแบบจำลอง เนื่องจากผลกระทบในแนวรัศมีจะน้อยมากถ้าท่อนอบแห้งมีขนาดใหญ่มากพอ และในแบบจำลองของงานวิจัยนี้ไม่รวมผลกระทบที่เกิดจากการสูญเสียความร้อนและมวลที่บริเวณผนังท่อ เพราะมีการหุ้มฉนวนในส่วนอบแห้งด้วย ซึ่งตรงกับสมมุติฐานของแบบจำลอง ทำให้แบบจำลองมีความถูกต้องใกล้เคียงกับการทดลองมากขึ้น

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับเครื่องอบแห้งแบบไหลขนานแบบต่อเนื่องนั้น Bruce (1984) ทำการศึกษาแบบจำลองที่สภาวะคงตัว (Steady state) โดยใช้หลักการการถ่ายเทความร้อนและความชื้นในชั้นของเมล็ดพืช เพื่อทำนายอุณหภูมิและความชื้นของอากาศและเมล็ดพืชภายในชั้นเบด โดยการสอบเทียบแบบจำลองกับผลการทดลองได้ร้อยละของค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ระหว่าง -8.2 ถึง -23.4 เหตุที่ค่าความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูงเนื่องจากแบบจำลองชั้นบางที่ใช้ทำนายความชื้นของเมล็ดพืชไม่เหมาะสม เป็นการนำแบบจำลองจากการทดลองอื่นมาใช้ ทำให้ได้ค่าที่สูงกว่าการทดลอง ซึ่งมีผลให้ค่าอุณหภูมิของอากาศคลาดเคลื่อนไปด้วย งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการใช้แบบจำลองชั้นบางที่เหมาะสมต่อเครื่องอบแห้ง เป็นปัจจัยสำคัญอันหนึ่งของความถูกต้องในการจำลองผลการอบแห้งของเครื่องอบแห้งนั้น ๆ

นอกจากงานวิจัยดังกล่าวข้างต้น ยังมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับเครื่องอบแห้งแบบต่าง ๆ อีกมาก เช่น งานวิจัยของ Madhiyanon et al. (2002) ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบไม่สมดุล ทำนายการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบด โดยพิจารณาให้ส่วน spout เป็นการไหลตามกัน และพิจารณาส่วน downcomer เป็นการไหลสวนทาง ซึ่งในส่วน downcomer นี้ถือว่าเป็นส่วนของการพัก (tempering) โดยไม่มีการระเหยความชื้นของเมล็ดข้าว ส่วนงานวิจัยของ Bruce and Giner (1993) ทำการศึกษาหาแบบจำลองที่สามารถทำนายปรากฏการณ์การลดลงของอุณหภูมิอากาศและเมล็ดพืช ในส่วนที่พิจารณาเป็น counter-flow beds ในเครื่องอบแห้งแบบคลุกเคล้า สำหรับงานวิจัยของ Soponronnarit (1999) อธิบายถึงการพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบ Fluidised-bed เชิงพาณิชย์ในประเทศไทยและการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้สมการอนุรักษ์พลังงานและมวลของเมล็ดข้าวและอากาศ และใช้แบบจำลองเอมไพริเคิลของ Page ทำนายผลอัตราการอบแห้ง และ Soponronnarit and Prachayawarakorn (2005) จำลองปัญหาทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคผสมผสาน ซึ่งใช้การอบแห้งแบบ Fluidised-bed ผสมกับการทำ tempering ในระหว่างการอบแห้ง และการ cooling หรือการระบายอากาศให้เมล็ดข้าวเย็นตัวลงอย่างช้า ๆ หลังการอบแห้ง เพื่อหยุดการเหลืองของเมล็ดข้าว

เนื่องจากอุณหภูมิและลดความเค้นภายในเมล็ดข้าวด้วย โดยใช้สมการอบแห้งทางทฤษฎี จำลองผลการอบแห้งแบบผสมผสาน (Multi stage) เนื่องจากสมการเอมไพริเคิลไม่สามารถใช้ได้ทำนายความชื้นที่ทางออกแต่ละช่วงการอบแห้งได้

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมกับการอบแห้งแบบเมล็ดพืชมีการไหลคือแบบจำลองของ Brooker et al. (1974) ซึ่งเป็นแบบจำลองน่าจะที่เหมาะสมกับการทำนายผลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ โดยจะต้องมีการปรับสมมุติฐานของแบบจำลองให้สอดคล้องกับการทดลองจริง เนื่องจากท่ออบแห้งของเครื่องอบแห้งไม่ได้หุ้มฉนวน ดังนั้น จะมีการสูญเสียความร้อนของท่ออบแห้งให้กับสิ่งแวดล้อมด้วย สำหรับแบบจำลองการอบแห้งชั้นบางจะใช้แบบจำลองทางทฤษฎี เนื่องจากการอบแห้งคล้ายกับการอบแห้งแบบผสมผสานของ Soponronnarit and Prachayawarakorn (2005) ที่มีการพักสลับกับการอบแห้งในกระบวนการอบแห้ง และสามารถนำไปใช้ทำนายผลการอบแห้งที่เงื่อนไขการอบแห้งอื่น ๆ ได้โดยไม่ต้องทำการทดลอง

## 2.4 ตัวแปรไร้มิติในการอบแห้ง

สำหรับการใช้เทคนิคของตัวแปรไร้มิติในการวิเคราะห์การอบแห้งนั้น บทความวิจัยของทวิช และรุ่ง (2541) ได้นำเสนอตัวแปรไร้มิติในการอบแห้งอาหารสัตว์ เนื่องจากมีตัวแปรไร้มิติเป็นจำนวนมาก จึงได้ทำการยุบรวมตัวแปรลงด้วยเทคนิคทางวิศวกรรม (ทวิช, 2544) ทำให้ได้จำนวนตัวแปรไร้มิติที่พอเหมาะ และมีความหมายเชิงวิศวกรรมอย่างเด่นชัด แล้วทำการทดลองโดยการวัดค่าตัวแปรต่าง ๆ ของเครื่องอบแห้งอาหารสัตว์ ซึ่งผลการทดลองยืนยันว่า ตัวแปรไร้มิติที่นำเสนอในบทความนี้มีความถูกต้องตามหลักการทางวิศวกรรมศาสตร์ และงานวิจัยนี้จะนำวิธีการในบทความดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ในการหาค่าตัวแปรไร้มิติ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบเครื่องอบแห้งขนาดใหญ่ต่อไป สำหรับ Kachru and Matthes (1976) นำเสนอการใช้การวิเคราะห์ตัวแปรไร้มิติในการอบแห้งข้าวเปลือกแบบเมล็ดพืชอยู่กับที่ ด้วยวิธี Buckingham Pi Theorem ซึ่งได้ 6 Pi terms แล้วพิจารณาผลของ Pi term แต่ละตัวเทียบกับอัตราการอบแห้งและเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง โดยการหาความสัมพันธ์ของ Pi term จากผลการทดลอง ได้เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง Pi term กับอัตราการอบแห้งและเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง แล้วนำไปหาสมการทำนาย (prediction equation) อัตราการอบแห้งและความชื้นของเมล็ดพืช ซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์เงื่อนไขการอบแห้งที่เหมาะสมได้ นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Costa and Taranto (2003) เป็นการวิเคราะห์ความเสมือนของตัวแปรไร้มิติ สำหรับเครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบดแบบ 2 มิติ เพื่อการปรับขนาดของเครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบดทั่วไป โดยการใช้ความสัมพันธ์ของการปรับขนาดสำหรับเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดมาประยุกต์ใช้กับสเปาเต็ดเบดแบบ 2 มิติ งานวิจัยนี้ได้พัฒนาความสัมพันธ์ของตัวแปร

ทำนาย จากกลุ่มตัวแปรไร้มิติ 6 ตัว เพื่อวิเคราะห์ความเสมือนทางรูปทรงและความเสมือนทางพลศาสตร์ ซึ่งใช้ตัวแปรทำนาย 3 ตัว คือ ค่าสูงสุดของความดันตก (maximum pressure drop), ค่าต่ำสุดของความเร็วสเปาต์ (minimum spout velocity) และค่ามากที่สุดของความสูงของสเปาต์ (maximum height of spouting) แล้วทำการสอบเทียบกับผลการทดลอง

งานวิจัยเหล่านี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานวิทยานิพนธ์นี้ได้ โดยเฉพาะวิธีการวิเคราะห์หาตัวแปรไร้มิติที่เหมาะสม ซึ่งจะใช้ผลการทดลองอบแห้งทั้งในอดีตและปัจจุบัน รวมทั้งการจำลองผลการอบแห้งด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้มิติ และหาสมการทำนายหรือสมการปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้มิติ ของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ เพื่อใช้ในการออกแบบและขยายขนาดเครื่องอบแห้งไปสู่ระดับอุตสาหกรรมต่อไป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# บทที่ 3
# เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบหล่นอิสระและการทดลองเบื้องต้น

## 3.1 บทคัดย่อ

เครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระนี้ แตกต่างจากเครื่องอบแห้งแบบอื่น ๆ ที่ไม่มีการควบคุมการไหลข้าวเปลือกในท่ออบแห้ง แต่เป็นการปล่อยให้ตกอย่างอิสระของข้าวเปลือก โดยการหล่นลงมาของข้าวเปลือกเมื่อปะทะกับอากาศร้อน ข้าวเปลือกจะเกิดการฟุ้งกระจาย ทำให้ความพรุนสูง ข้าวเปลือกจึงสัมผัสกับอากาศร้อนได้มากขึ้น อีกทั้งการไหลสวนทางเป็นการเพิ่มความเร็วสัมพัทธ์และเพิ่มอัตราการถ่ายเททั้งความร้อนและความชื้น สำหรับเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระในระดับห้องทดลองมี 2 ขนาด คือ ขนาดที่ 1 (ขนาดท่อวงใน 8 เซนติเมตร และความยาวท่อ 225 เซนติเมตร) และขนาดที่ 2 (ขนาดท่อวงใน 4.5 เซนติเมตร และความยาวท่อ 122 เซนติเมตร) โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องอบแห้งขนาดที่ 1 จึงได้ทำการปรับปรุงเครื่องอบแห้งนี้ ให้มีระบบขนถ่ายอัตโนมัติ รวมทั้งเพิ่มความจุของเครื่อง เพื่อให้สามารถทำการอบแห้งได้ปริมาณมากขึ้น และติดตั้งเครื่องมือวัดสำหรับทำการทดลอง จากนั้นทำการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์และเครื่องมือวัดต่าง ๆ ซึ่งผลการทดสอบที่ได้ พบว่าในช่วงความถี่ของชุดควบคุมเครื่องเป่าลมที่ 8 – 60 Hz สามารถสร้างอัตราเร็วของลมได้เท่ากับ 0.7 – 6.4 เมตรต่อวินาทีที่ทางเข้าท่ออบแห้ง โดยที่สามารถวัดความเร็วลมที่ทางออกท่ออบแห้งได้เท่ากับ 0.95 – 4.21 เมตรต่อวินาที ซึ่งในช่วงความเร็วต่ำไม่เกิน 2 เมตรต่อวินาที ความเร็วที่ทางเข้าและทางออกมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อความเร็วอากาศทางเข้าสูงขึ้น ความเร็วที่ทางออกจะมีค่าต่ำกว่าทางเข้าอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่ามีอากาศบางส่วนไหลลงด้านล่าง ผู้ทำวิจัยได้ทำการแก้ไขด้วยวิธีการติดตั้งกล่องลิ้นกันลมที่ด้านล่างท่ออบแห้ง โดยที่กล่องลิ้นกันลมทำงานได้ดีเฉพาะในช่วงความเร็วอากาศต่ำ 1 – 2 เมตรต่อวินาที แต่ยังสามารถทำให้ความแตกต่างของความเร็วที่ทางเข้าและทางออกน้อยลงกว่าการไม่ติดตั้งกล่อง สำหรับอัตราการขนถ่ายของกระพ้อลำเลียงที่ความถี่ของชุดควบคุมมอเตอร์ในช่วง 7 – 20 Hz สามารถขนถ่ายได้ตั้งแต่ 27.6 – 81 กิโลกรัมต่อนาที

## 3.2 บทนำ

ข้าวเปลือกที่เพิ่งทำการเก็บเกี่ยวจะมีความชื้นในเมล็ดสูง โดยเฉพาะข้าวเปลือกที่ใช้เครื่องเกี่ยวนวดจะมีความชื้นสูงกว่าการใช้คนเกี่ยวและนวดข้าว เนื่องจากถ้าเมล็ดขาวเปลือกมีความชื้นต่ำข้าวจะหลุดออกจากรวงได้ง่าย เมื่อใช้เครื่องเกี่ยวนวดจะทำให้สูญเสียเมล็ดข้าวเปลือก เกษตรกร

จึงต้องรีบเก็บเกี่ยวข้าวในช่วงความชื้นสูง เพื่อให้อัตราการสูญเสียน้อยที่สุด ซึ่งเมล็ดข้าวเปลือกที่มีความชื้น จะทำให้ อายุการเก็บรักษาต่ำ เสื่อมคุณภาพได้ง่าย โดยเฉพาะที่เกิดจากการเข้าทำลายของแมลง และเชื้อรา เป็นต้น ดังนั้น หลังจากเกี่ยวนวดแล้ว จะต้องลดความชื้นข้าวเปลือกให้เร็วที่สุด ซึ่งการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งเป็นทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสมกับสภาพในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถลดความชื้นได้อย่างรวดเร็ว ในปริมาณที่มาก โดยไม่ขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศ แต่อย่างไรก็ดี กระบวนการอบแห้งเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานค่อนข้างสูง และความร้อนที่ใช้ยังมีผลต่อคุณภาพข้าวเปลือก ทั้งปริมาณต้นข้าว (Head Rice Yield, HRY) และความขาวของข้าวสาร (Whiteness) ทำให้ในปัจจุบันมีงานวิจัยและพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบใช้ลมร้อนด้วยเทคนิคต่าง ๆ มากมาย เช่น เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด, แบบสเปาเต็ดเบด และแบบไหลคลุกเคล้า (LSU) เป็นต้น สำหรับเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบหล่นอิสระของงานวิจัยนี้ ก็เป็นหนึ่งในเครื่องอบแห้งแบบใช้ลมร้อน โดยใช้เทคนิคการปล่อยข้าวหล่นอิสระและลมไหลสวนทาง กล่าวคือ อากาศอบแห้งจะไหลเข้าท่ออบแห้งที่วางตัวในแนวดิ่ง ส่วนข้าวเปลือกถูกเก็บไว้ที่ถังพักด้านบนและถูกปล่อยให้ตกอย่างอิสระเข้าสู่ท่ออบแห้งด้วยแรงโน้มถ่วง ซึ่งเครื่องอบแห้งนี้แตกต่างจากเครื่องอบแห้งแบบ LSU และแบบสเปาเต็ดเบด ที่ถึงแม้จะมีการไหลของเมล็ดพืชในแนวดิ่งสวนทางกับอากาศ แต่เครื่องอบแห้งแบบอื่น ๆ จะมีตัวควบคุมการไหลให้เมล็ดพืชตกลงด้านล่างอย่างช้า ๆ โดยอากาศจะค่อย ๆ ซึมผ่านขึ้นไปด้านบน แต่เครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระนี้เมล็ดข้าวจะหล่นลงมาอย่างอิสระสวนทางกับอากาศในแนวดิ่งและมีความพรุนสูง ทำให้พื้นที่สัมผัสในการถ่ายเทความร้อนและความชื้นเพิ่มมากขึ้น ที่สำคัญคือความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างอากาศกับเมล็ดพืชในเครื่องอบแห้งนี้จะมีค่าสูง โดยความเร็วของอากาศไม่จำเป็นต้องมีค่าสูงมากนัก (ต่ำกว่าความเร็วลอยตัว, Minimum fluidized bed velocity) ซึ่งทำให้มีอัตราการถ่ายเทมวลความชื้นที่สูงเป็นสัดส่วนกัน 3 เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบหล่นอิสระที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นเครื่องอบแห้งขนาดที่ 1 ที่มีท่ออบแห้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 8 เซนติเมตร และความยาวเท่ากับ 225 เซนติเมตร จะทำให้ข้าวเปลือกอยู่ในท่ออบแห้งเป็นระยะเวลาสั้น ๆ เพียงประมาณ 1 วินาทีในแต่ละรอบ ซึ่งหากท่ออบแห้งยาวกว่านี้ก็จะใช้เวลามากกว่านี้ จากนั้นข้าวเปลือกจะออกจากท่ออบแห้งเข้าสู่ถังพักทางด้านล่าง

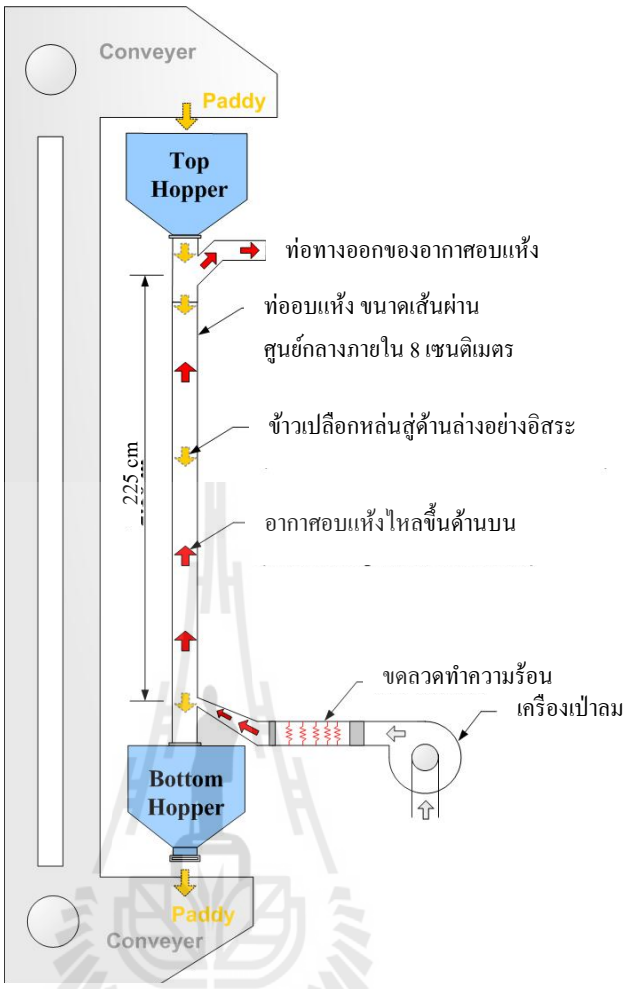
ในการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระที่ผ่านมานั้น การทดลองของ จุฑาทิพย์ (2545) ได้ใช้เครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระขนาดที่ 1 ทำการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกแบบไม่ต่อเนื่อง กล่าวคือ ไม่มีระบบลำเลียงอัตโนมัติ เนื่องจากเป็นเครื่องต้นแบบในระยะเริ่มต้นของการออกแบบเครื่อง การทดลองอบแห้งจะใช้แรงงานคน ลำเลียงถังบรรจุข้าวเปลือกที่ออกจากท่ออบแห้งในแต่ละรอบ ขึ้นไปที่ถังพักด้านบน ดังนั้น เพื่อให้สามารถทำการวิจัยและ

พัฒนาเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ ไปสู่ระดับอุตสาหกรรมได้ จะต้องทำการปรับปรุงเครื่องต้นแบบนี้ให้ทำงานอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นวัตถุประสงค์หนึ่งของงานวิจัยนี้

## 3.3 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ

เครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระดังแสดงในรูปที่ 3.1 ได้ถูกคิดค้นขึ้น โดย ทวิช จิตรสมบูรณ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (กรมทรัพย์สินทางปัญญา, 2550) ซึ่งคาดหวังว่าจะสามารถอบแห้งได้อย่างรวดเร็ว ประหยัดพลังงาน และไม่เกิดผลเสียหายต่อเมล็ดข้าว ได้ข้าวเต็มเมล็ด (ข้าวต้น) ในปริมาณสูง อีกทั้งได้คุณภาพดีในด้านสีของข้าวสาร โดยได้ทำการจดสิทธิบัตรแล้วในปี 2550

หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระนั้น ใช้เครื่องเป่าลมที่ควบคุมความเร็วด้วยการปรับแรงดันไฟฟ้าของ variac ดูดอากาศจากสิ่งแวดล้อม แล้วเข้าสู่เครื่องทำความร้อนที่ควบคุมอุณหภูมิด้วยการปรับแรงดันไฟฟ้าของ variac เช่นเดียวกัน จากนั้นอากาศอบแห้งจะไหลเข้าสู่ท่ออบแห้งที่วางตัวในแนวดิ่ง ข้าวเปลือกชื้นที่ถูกลำเลียงจากถังพักข้าวเปลือกด้านล่างขึ้นสู่ถังพักข้าวเปลือกด้านบนด้วยกระพ้อลำเลียง ข้าวเปลือกจะหล่นอย่างอิสระด้วยแรงโน้มถ่วงโดยไม่มีการกีดขวางใด ๆ ข้าวเปลือกชื้นและอากาศอบแห้งจะเคลื่อนที่สวนทางกัน (counter flow) ซึ่งจะเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อน และความชื้นด้วยวิธีการพาแบบบังคับ (forced convection) อากาศอบแห้งที่ผ่าน nozzle จะมีความเร็วสูง และเกิดความปั่นป่วน ประกอบกับข้าวเปลือกที่เคลื่อนตัวลงมาอย่างอิสระจะมีความพรุนสูง ทำให้พื้นที่สัมผัสอากาศอบแห้งมีมาก จึงคาดว่าจะช่วยลดระยะเวลาการอบแห้งหรือทำให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้น นอกจากนี้ ข้อดีของการสัมผัสอากาศร้อนเป็นระยะเวลาสั้น ๆ และมีช่วงการพักตัว เป็นผลให้เกรเดียนท์อุณหภูมิและเกรเดียนท์ความชื้นภายในเมล็ดต่ำ ส่งผลให้คุณภาพข้าวเปลือกทั้งความขาว และปริมาณข้าวต้นมีค่าสูง




รูปที่ 3. 1 รูปโครงร่างของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบหล่นอิสระ

การปรับปรุงเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระขนาดที่ 1 จากเครื่องอบแห้งแบบไม่ต่อเนื่อง (รูปที่ 3.2 (ก)) ให้สามารถอบแห้งได้อย่างต่อเนื่อง (รูปที่ 3.2 (ข)) ด้วยการติดตั้งระบบลำเลียงข้าวเปลือกซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้กระพ้อลำเลียง สำหรับถังพักข้าวเปลือกทั้งด้านบนและด้านล่างติดตั้งเพื่อใช้ประกอบกับชุดกระพ้อลำเลียงและยังช่วยให้สามารถเพิ่มจำนวนข้าวเปลือกที่หมุนเวียนในระบบได้มากขึ้นตามต้องการ

(ก) แบบไม่มีระบบขนถ่าย (ข) แบบมีระบบขนถ่ายอัตโนมัติ

รูปที่ 3. 2 เครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระขนาดที่ 1

### 3.3.1 องค์ประกอบของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ

เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระที่ได้รับการปรับปรุง ให้สามารถอบแห้งได้อย่างต่อเนื่อง (รูปที่ 3.3) และส่วนประกอบต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 3.4 – รูปที่ 3.9 ซึ่งประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

- เครื่องเป่าลม (blower) ของ Crelec รุ่น HB-429 ขนาด 1.75 กิโลวัตต์ (รูปที่ 3.4) ความเร็วรอบมอเตอร์สูงสุด 2840 รอบต่อนาที ติดตั้งกับอินเวอร์เตอร์ของ Toshiba รุ่น VF-S7 ขนาด 1.5 กิโลวัตต์ เพื่อปรับแรงดันไฟฟ้าและความถี่กระแสไฟฟ้า
- เครื่องทำความร้อน (heater) (รูปที่ 3.5) ใช้ขดลวดความร้อนขนาด 12 กิโลวัตต์ ติดตั้งควบคู่กับ variac 3 phase (รูปที่ 3.6) เพื่อปรับแรงดันไฟฟ้า และวัดค่าอุณหภูมิอากาศอบแห้งด้วย Thermocouple type K ซึ่งต่อกับตัวปรับและแสดงอุณหภูมิของ Shinko โดยวัดอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่ตำแหน่งหลังจากอากาศผ่านเครื่องทำความร้อน และใช้ thermostat ในการควบคุมให้มีอุณหภูมิตามที่ต้องการ

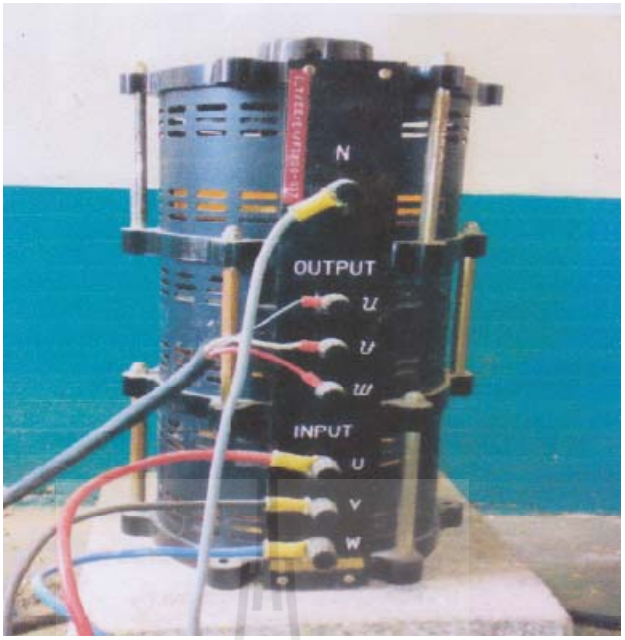
- ท่อออบแห้ง แบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นท่อหลอดแก้วทนความร้อน (รูปที่ 3.7) หน้าตัดกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 8 เซ็นติเมตร ยาว 75 เซ็นติเมตร และส่วนที่สองเป็นท่อโลหะกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 87.5 เซ็นติเมตร ยาว 75 เซ็นติเมตร มี 2 ท่อ ท่อทั้งสองส่วนวางตัวต่อกันในแนวดิ่ง รวมความยาวทั้งสองส่วนเท่ากับ 225 เซ็นติเมตร ปลายด้านล่างต่อกับท่อส่งอากาศอบแห้งที่ผ่านเครื่องทำความร้อน ตำแหน่งที่ท่อส่งอากาศอบแห้งต่อเชื่อมกับท่ออบแห้งด้วยมุมเอียง 45 องศา ปลายด้านบนท่ออบแห้งต่อกับท่อสามทางที่มีท่อแขนงทำมุมเอียงประมาณ 45 องศา (รูปที่ 3.7) กับแนวดิ่งเพื่อใช้เป็นทางออกอากาศอบแห้ง และปลายด้านบนของท่อสามทางต่อเข้ากับถังพักข้าวเปลือกด้านบน
- ถังพักข้าวเปลือกด้านบน เป็นถังสังกะสีรูปกรวย ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กขนาด 5 เซ็นติเมตร และเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่ขนาด 37 เซ็นติเมตร โดยผนังกรวยทำมุมเอียงกับแนวดิ่ง 30 องศา มีความสูงรวม 28 เซ็นติเมตร โดยฝาด้านบนเปิดโล่ง แสดงดังรูปที่ 3.8
- ถังพักข้าวเปลือกด้านล่าง (รูปที่ 3.9) มีขนาดใหญ่กว่าถังพักข้าวเปลือกด้านบน มีการติดตั้งลิ้นปิดเปิดที่ทางออกด้านล่าง และกล่องลิ้นติดที่ปลายท่ออบแห้งด้านล่าง เพื่อสร้างแรงต้านให้อากาศอบแห้งที่จะถูกกระแสข้าวเปลือกชะตามลงมาให้ไหลขึ้นสู่ด้านบนท่ออบแห้ง
- กระพ้อลำเลียงข้าวเปลือก ใช้ชุดควบคุมของ Omron Sysdrive 3G 3JV inverter
- เครื่องเก็บบันทึกข้อมูล (data logger) ของ Hioki รุ่น 8420-01 ใช้สำหรับเก็บข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อม อุณหภูมิอากาศอบแห้งที่ปลายทางออกท่อสามทาง และอุณหภูมิกองข้าวเปลือกขณะพัก ตลอดกระบวนการอบแห้งทุก ๆ 5 วินาที

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 3. 3 รูปถ่ายเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระที่ใช้ในการทดลอง

รูปที่ 3. 4 รูปถ่ายเครื่องเป่าลม

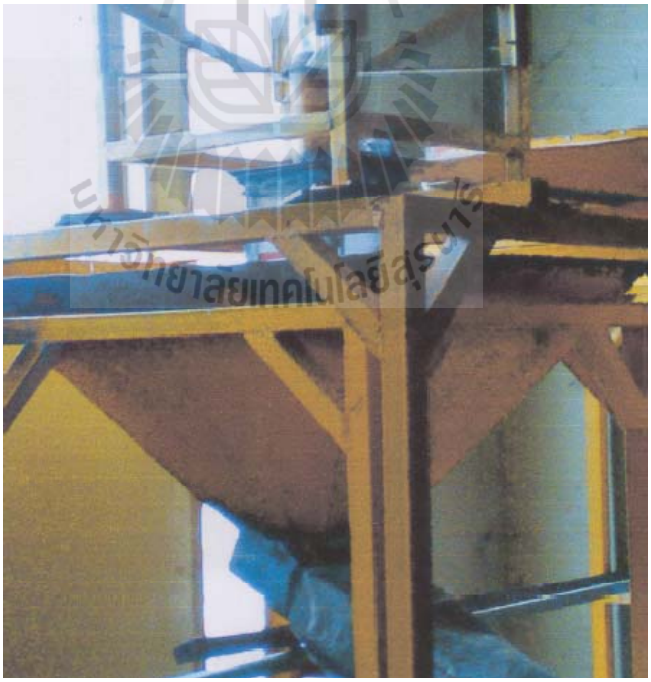
รูปที่ 3. 5 รูปถ่ายเครื่องทำความร้อน




รูปที่ 3. 6 รูปถ่าย Variac 3 Phase

รูปที่ 3. 7 รูปถ่ายท่อแก้วอบแห้งทนความร้อน

รูปที่ 3. 8 รูปถ่ายถังพักข้าวเปลือกด้านบน



รูปที่ 3. 9 รูปถ่ายถังพักข้าวเปลือกด้านล่าง

## 3.4 การทดลองเบื้องต้น

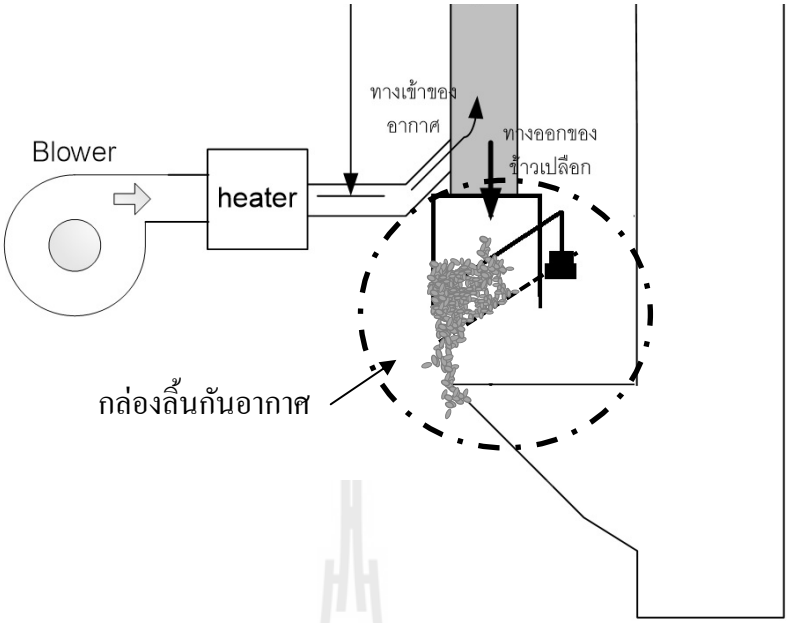
การทดลองเบื้องต้นสำหรับเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ หลังจากทำการปรับปรุงเครื่องเพื่อให้สามารถอบแห้งได้อย่างต่อเนื่อง แบ่งเป็น 2 การทดลองคือ การทดลองเพื่อทดสอบความเร็วของอากาศในท่ออบแห้ง และการทดลองเพื่อทดสอบอัตราการขนถ่ายของกระพ้อลำเลียง

### 3.4.1 การวัดความเร็วอากาศอบแห้งในท่ออบแห้ง

การวัดความเร็วลมอากาศอบแห้ง มีวัตถุประสงค์ เพื่อหาช่วงความเร็วลมที่เครื่องเป่าลมสามารถทำได้ เพื่อตรวจสอบความเร็วลมที่ตำแหน่งทางออกส่วนอบแห้ง และเพื่อทำการเปรียบวัดอุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับความเร็วลมของเครื่องเป่าลม โดยที่ตำแหน่งลมทางเข้าเครื่องเป่าลมจะมี Air flow meter สำหรับวัดการไหลของลม

ปัญหาที่พบในระหว่างทำการทดสอบช่วงแรก คือ มีอากาศบางส่วนไหลลงทางด้านล่างของท่ออบแห้ง เนื่องจากเป็นท่อเปิดโล่ง ดังนั้น เพื่อป้องกันให้อากาศไหลลงด้านล่างน้อยที่สุด จึงได้คิดทำกล่องปิดกันลมที่มีลิ้นสำหรับกันไม่ให้ลมไหลออกทางด้านล่างโดยที่ข้าวเปลือกยังสามารถไหลลงถังพักด้านล่างได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ซึ่งมีหลักการทำงานคือ ใช้กองข้าวเปลือกเป็นตัวกั้นไม่ให้อากาศไหลลงด้านล่าง โดยใช้กล่องใสสี่เหลี่ยมเปิดด้านล่าง มีแผ่นลิ้นถ่วงด้วยน้ำหนัก ลิ้นจะปิดกั้นไว้ให้ข้าวเปลือกกองอยู่ในกล่องจนกว่าจะมีน้ำหนักมากกว่าน้ำหนักที่ใช้ถ่วง เมื่อลิ้นเปิดข้าวเปลือกจะสามารถไหลออกได้ โดยในการทดลองจะใช้วิธีปรับน้ำหนักถ่วงให้มีข้าวกองอยู่ในกล่องตลอดเวลาในขณะที่ข้าวเปลือกสามารถไหลออกจากกล่องได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี




รูปที่ 3. 10 กล่องลิ้นกันลม

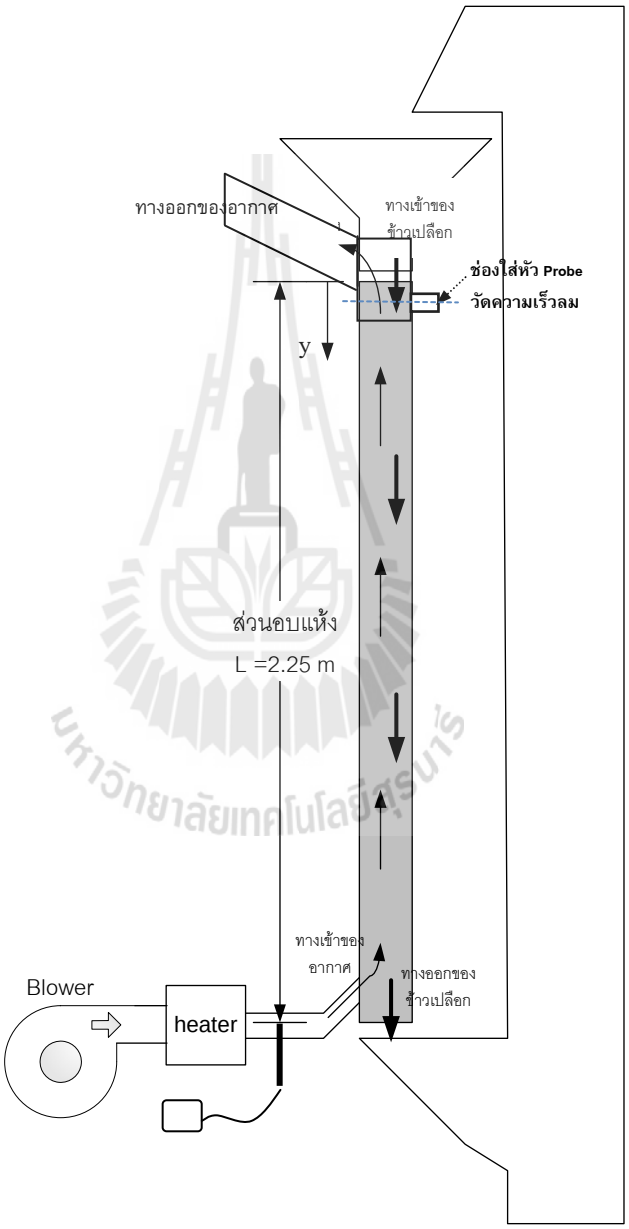
ในการทดสอบเพื่อทำการวัดความเร็วลมที่ตำแหน่งทางออกของท่อออบแห้ง (ตำแหน่งแสดงดังรูปที่ 3.11) โดยวัดความเร็วลมในแนวหน้าตัดขวางของท่อออบแห้ง ด้วย Hot bulb probe (ขนาด Ø3 มิลลิเมตร และ Testo Anemometer รุ่นโมเดล 445) ที่จุดต่าง ๆ ตามแนวรัศมี ทั้งหมด 4 จุด (ห่างกัน10 มิลลิเมตร โดยประมาณ) ดังรูปที่ 3.12 แล้วนำมาหาค่าความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัด ในการทดลองครั้งที่ 1 ทำการวัดในขณะที่ไม่มีข้าวเปลือกไหลในท่อออบแห้ง ทั้งแบบมีลิ้นกั้นลมและแบบทางออกข้าวเปลือกเปิดโล่ง

วิธีทำการทดลอง

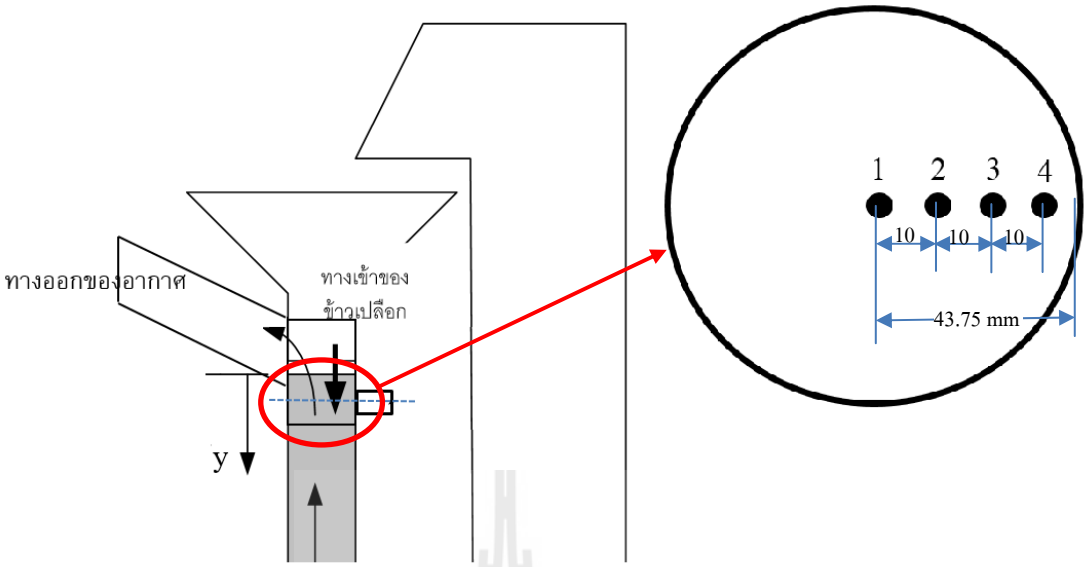
- เปิดเครื่องเป่าลม โดยเริ่มปรับอุปกรณ์ปรับความเร็วลม จนกระทั่งเครื่องเป่าลมทำงาน
- ทิ้งไว้สักครู่ให้พัดลมทำงานคงที่ แล้วใช้อุปกรณ์วัดความเร็วลม (hot bulk probe ของ Testo) วัดความเร็วลมที่ตำแหน่งทางออกส่วนอบแห้ง แล้วปรับอุปกรณ์ปรับความเร็วลม (Inverter) โดยให้ค่าที่อ่านได้จาก manometer น้ำของ Air flow meter เพิ่มขึ้นที่ละ 1 มิลลิเมตรน้ำ โดยประมาณ จากนั้นบันทึกค่า ความถี่ของชุดวงจรควบคุมเครื่องเป่าลม (Inverter circuit)
- เมื่อเครื่องเป่าลมทำงานคงที่แล้วให้วัดความเร็วลมที่ทางออกส่วนอบแห้ง โดยบันทึกค่าจากเครื่องมือวัดความเร็วลมในแต่ละตำแหน่ง โดยวัดแต่ละตำแหน่ง 3 ครั้ง เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย

- ทำการทดลองซ้ำในข้อ 3.3.1.2 และ 3.3.1.3 จนกระทั่งความถี่ของ Inverter เท่ากับ 60 Hz โดยประมาณ

ทำการทดลองวัดความเร็วลมอีก 2 ครั้ง โดยในครั้งที่ 2 ให้ปิดทางออกข้าวเปลือกท่อด้านล่างให้สนิท และในครั้งที่ 3 ทำการทดลองโดยประกอบกล่องลิ้นกันลมไหลลงด้านล่าง




รูปที่ 3. 11 รูปโครงร่างเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบหล่นอิสระที่ใช้ในการทดลอง

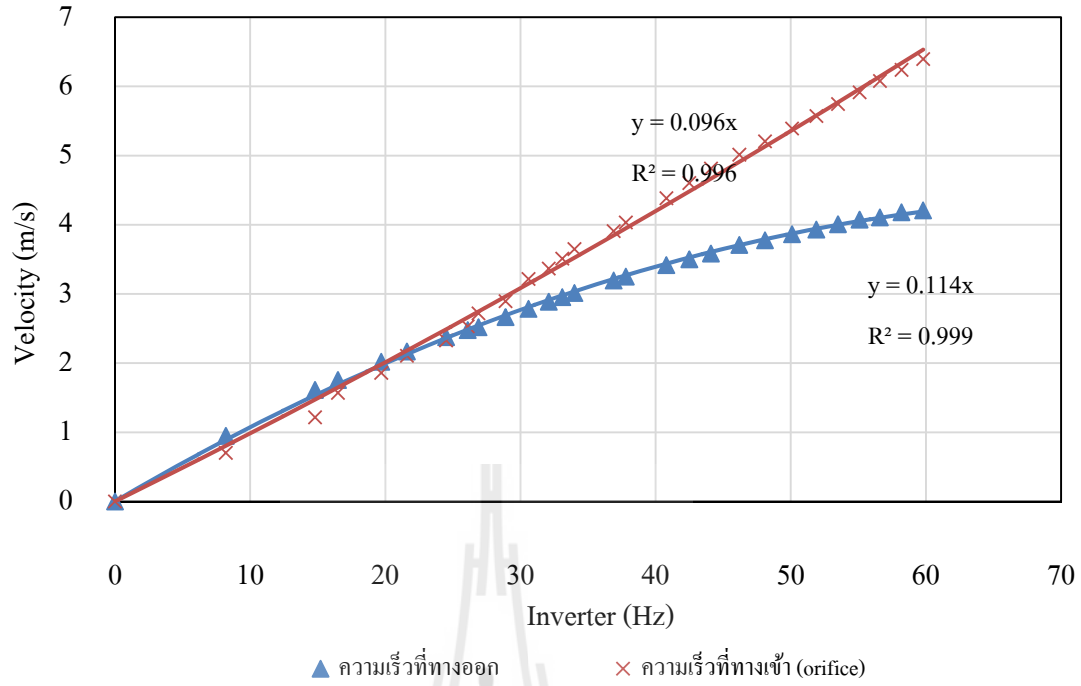



รูปที่ 3. 12 แสดงตำแหน่งการวัดความเร็วลมในแนวหน้าตัดขวางท่อออบแห้ง

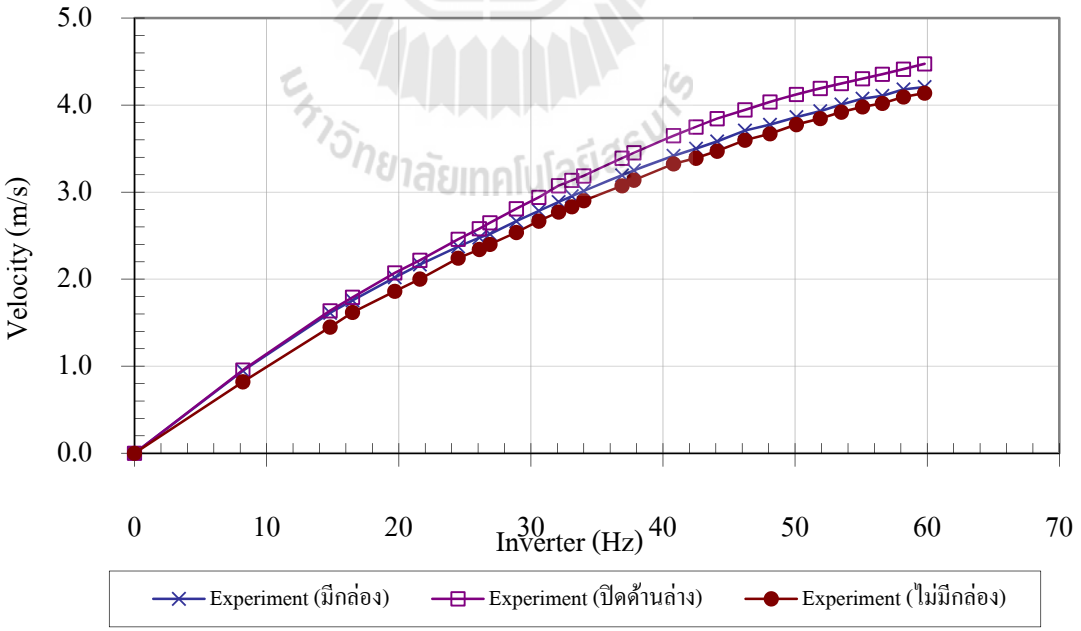
จากการทดสอบเครื่องเป่าลมที่ใช้ในการอบแห้งพบว่า ในช่วงความถี่ของชุดควบคุมเครื่องเป่าลมจาก 8 – 60 Hz สามารถสร้างแรงลมได้เท่ากับ 0.7 – 6.4 เมตรต่อวินาที โดยที่สามารถวัดความเร็วลมที่ทางออกท่ออบแห้งได้เท่ากับ 0.95 – 4.21 เมตรต่อวินาที

เมื่อเปรียบเทียบความเร็วที่วัดได้จาก Airflow meter ที่ทางเข้า กับความเร็วของอากาศที่ทางออก ดังรูปที่ 3.13 จะพบว่าในช่วงความเร็วต่ำไม่เกิน 2 เมตรต่อวินาที ความเร็วที่ทางเข้าและทางออกมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อความเร็วอากาศทางเข้าสูงขึ้น ความเร็วที่ทางออกต่ำกว่าทางเข้าอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่ามีอากาศบางส่วนไหลลงด้านล่าง ซึ่งสอดคล้องกับกราฟในรูปที่ 3.14

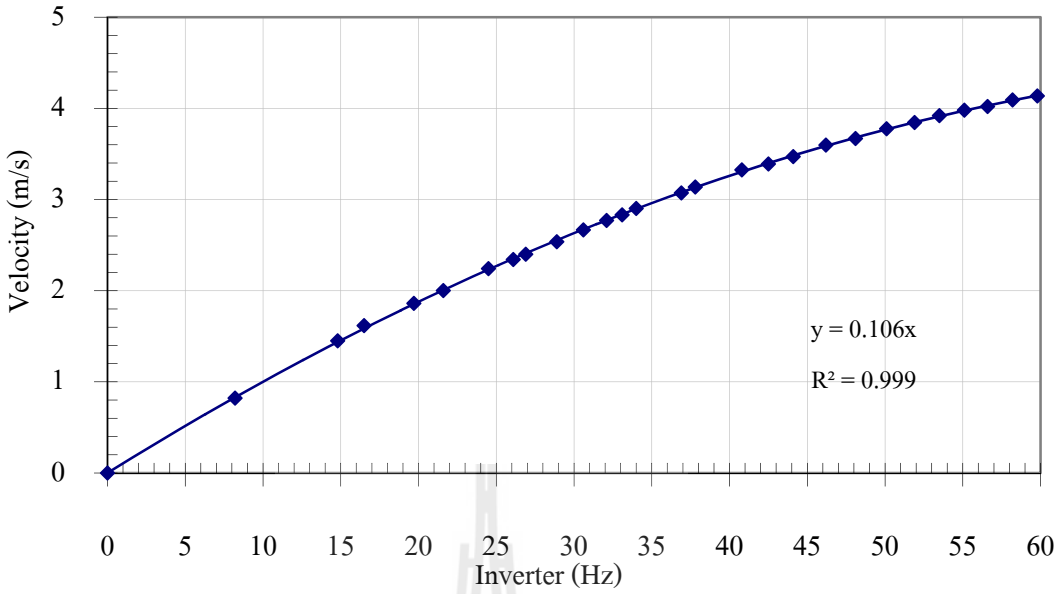
ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.14 แสดงถึงความสัมพันธ์ของความถี่ของ Inverter และความเร็วที่ทางออกของท่ออบแห้ง (การคำนวณและตารางผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ก1 และ ข1 ตามลำดับ) จากการทดสอบทั้ง 3 ครั้ง ซึ่งจะพบว่า กล่องลิ้นปิดด้านล่างเพื่อกันลมไหลลงด้านล่างนั้น มีประสิทธิภาพในการกันลมไหลลงด้านล่างที่ความเร็วอากาศต่ำ (0 – 2 เมตรต่อวินาที) สำหรับที่ความเร็วสูง จะมีอากาศบางส่วนไหลลงด้านล่างผ่านกองข้าวและตามรอยต่อของลิ้นเนื่องจากลิ้นเปิดกว้างมากขึ้นและแรงดันอากาศมากขึ้น




รูปที่ 3. 13 กราฟเปรียบเทียบความเร็วที่วัดได้จาก Airflow meter ที่ทางเข้า กับความเร็วของอากาศที่ทางออก



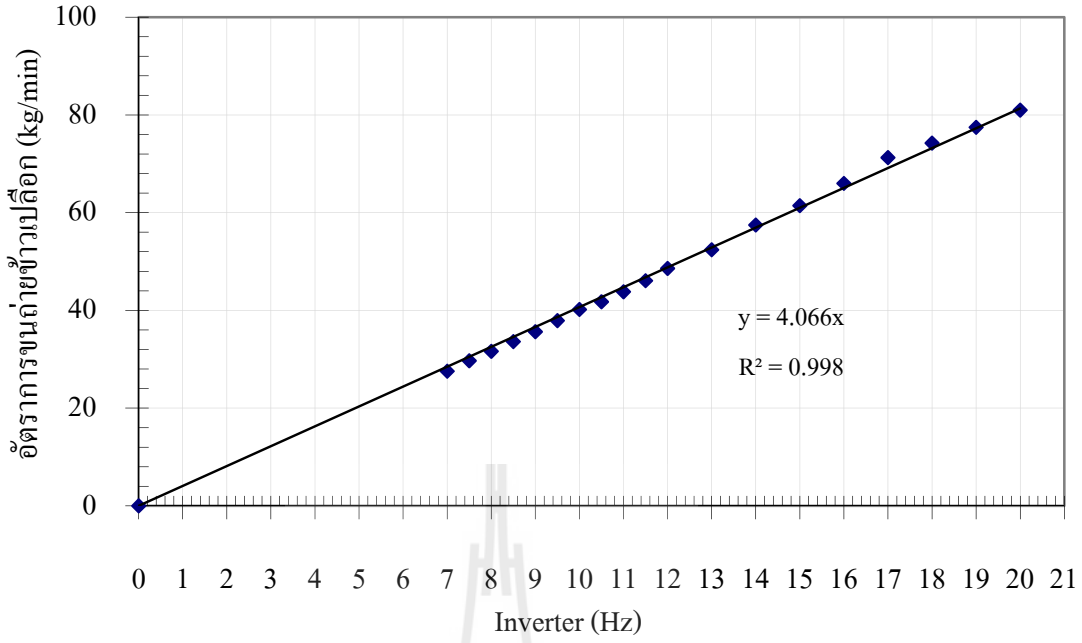

รูปที่ 3. 14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของ Inverter และความเร็วอากาศที่ทางออก




รูปที่ 3. 15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของ Inverter และความเร็วอากาศที่ทางออกแบบมีกล่องลิ้นกันลม

### 3.4.2 การหาอัตราการลำเลียงข้าวเปลือกด้วยกระพ้อลำเลียง

การทดสอบอัตราการขนถ่ายข้าวเปลือกของกระพ้อลำเลียง มีวัตถุประสงค์เพื่อหาอัตราการขนถ่ายที่สอดคล้องกับเงื่อนไขการทดลอง โดยการทดสอบให้กระพ้อทำการลำเลียงข้าวเปลือก โดยทำการปรับค่าความถี่ของชุดวงจรควบคุมมอเตอร์ (Inverter Circuit) ของกระพ้อลำเลียง จากค่าต่ำสุด คือ 7 Hz ไปจนถึง 20 Hz แล้วจับเวลาที่กระพ้อลำเลียงหมุนครบ 1 รอบ ในแต่ละความถี่ โดยที่ปริมาณข้าวเปลือกในกระพ้อ 1 ลูก เท่ากับ 1.1 กิโลกรัม จำนวนกระพ้อทั้งหมด 53 ลูก และในแต่ละรอบจะมีลูกกระพ้อที่มีข้าวเปลือกอยู่เพียง 27 ลูก ทำให้ได้ว่าปริมาณข้าวเปลือกที่ขนถ่ายได้ใน 1 รอบเท่ากับ 29.7 กิโลกรัม ดังนั้นจะสามารถคำนวณปริมาณการขนถ่ายข้าวเปลือกในแต่ละรอบได้ จากการนำปริมาณข้าวเปลือกที่ขนถ่ายได้ใน 1 รอบ มาหารด้วยเวลาที่ได้ในแต่ละความถี่ ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.16 และตารางที่ 3.1




รูปที่ 3. 16 อัตราการขนถ่ายของกระพ้อลำเลียงที่ความถี่ของ Inverter ต่าง ๆ

ตารางที่ 3. 1 อัตราการขนถ่ายของกระพ้อลำเลียงที่ความเร็วรอบต่าง ๆ

| Inverter (Hz) | เวลาที่กระพ้อหมุนครบ 1 รอบ (s) | | | | ความเร็วรอบ | อัตราการขนถ่ายข้าวเปลือก |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | เฉลี่ย | rpm | (kg/min) |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 64 | 65 | 65 | 65 | 0.928 | 27.6 |
| 7.5 | 60 | 60 | 60 | 60 | 1.000 | 29.7 |
| 8 | 56 | 56 | 57 | 56 | 1.065 | 31.6 |
| 8.5 | 53 | 53 | 53 | 53 | 1.132 | 33.6 |
| 9 | 50 | 50 | 50 | 50 | 1.200 | 35.6 |
| 9.5 | 47 | 47 | 47 | 47 | 1.277 | 37.9 |
| 10 | 44 | 45 | 44 | 44 | 1.353 | 40.2 |
| 10.5 | 43 | 42 | 43 | 43 | 1.406 | 41.8 |
| 11 | 40 | 41 | 41 | 41 | 1.475 | 43.8 |
| 11.5 | 39 | 38 | 39 | 39 | 1.552 | 46.1 |

ตารางที่ 3. 2 อัตราการขนถ่ายของกระพ้อลำเลียงที่ความเร็วรอบต่าง ๆ (ต่อ)

| Inverter (Hz) | เวลาที่กระพ้อหมุนครบ 1 รอบ (s) | | | | ความเร็วรอบ | อัตราการขนถ่ายข้าวเปลือก |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | เฉลี่ย | rpm | (kg/min) |
| 12 | 37 | 37 | 36 | 37 | 1.636 | 48.6 |
| 13 | 34 | 34 | 34 | 34 | 1.765 | 52.4 |
| 14 | 31 | 31 | 31 | 31 | 1.935 | 57.5 |
| 15 | 29 | 29 | 29 | 29 | 2.069 | 61.4 |
| 16 | 27 | 27 | 27 | 27 | 2.222 | 66.0 |
| 17 | 25 | 25 | 25 | 25 | 2.400 | 71.3 |
| 18 | 24 | 24 | 24 | 24 | 2.500 | 74.3 |
| 19 | 23 | 23 | 23 | 23 | 2.609 | 77.5 |
| 20 | 22 | 22 | 22 | 22 | 2.727 | 81.0 |

จากการทดลองพบว่าอัตราการขนถ่ายของกระพ้อลำเลียงที่ใช้ในการทดลอง โดยการปรับค่าความถี่ของชุดควบคุมมอเตอร์ของกระพ้อลำเลียงในช่วง 7 – 20 Hz สามารถขนถ่ายได้ตั้งแต่ 27.6 – 81 กิโลกรัมต่อนาที

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## 3.5 สรุปผลการวิจัย

จากการทดสอบเครื่องเป่าลมที่ใช้ในการอบแห้งพบว่า ในช่วงความถี่ของชุดควบคุมเครื่องเป่าลมจาก 8 – 60 Hz สามารถสร้างแรงลมเข้าสู่ท่ออบแห้งได้เท่ากับ 0.7 – 6.4 เมตรต่อวินาที โดยที่สามารถวัดความเร็วลมที่ทางออกท่ออบแห้งได้เท่ากับ 0.95 – 4.21 เมตรต่อวินาที โดยในช่วงความเร็วต่ำไม่เกิน 2 เมตรต่อวินาที ความเร็วที่ทางเข้าและทางออกมีค่าใกล้เคียงกัน และกล่องลิ้นกันลมทำงานได้ดีในช่วงความเร็วอากาศต่ำ 1 – 2 เมตรต่อวินาที สำหรับอัตราการขนถ่ายของกระพ้อลำเลียงที่ความถี่ของชุดควบคุมมอเตอร์ในช่วง 7 – 20 Hz สามารถขนถ่ายได้ตั้งแต่ 27.6 – 81 กิโลกรัมต่อนาที

จากการทดสอบข้างต้น ผลการทดสอบสามารถนำไปใช้ในการปรับตั้งอุปกรณ์ของเครื่องอบแห้งให้สอดคล้องกับการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกได้ โดยที่การปรับตั้งกระพ้อลำเลียง เพื่อให้อัตราการไหลของข้าวเปลือกผ่านท่ออบแห้งขนาดความยาว 225 เซนติเมตร มีเวลาพักตัวประมาณ

1 นาทีในระบบลำเลียง หากใช้ข้าวเปลือก 52.4 กิโลกรัม จะต้องปรับอัตราการขนถ่ายของกระพ้อลำเลียงที่ 52.4 กิโลกรัมต่อนาที โดยปรับความถี่ชุดวงจรควบคุมมอเตอร์ของกระพ้อลำเลียงเท่ากับ 13 Hz สำหรับความเร็วที่สามารถใช้ในการทดลองสำหรับความยาวท่อออบแห้งเท่ากับ 225 เซนติเมตร ควรใช้ที่ความเร็วเฉลี่ย 2 เมตรต่อวินาที เป็นความเร็วที่เหมาะสม เนื่องจากข้อจำกัดของกล่องลิ้นกันลม สามารถใช้งานได้ดีในช่วงความเร็วไม่เกิน 2 เมตรต่อวินาที โดยจะต้องปรับความถี่ของชุดวงจรควบคุมเครื่องเป่าลมที่ 21 Hz สำหรับที่ความเร็วลมต่ำกว่า 2 เมตรต่อวินาที เมื่อมีข้าวเปลือกไหลสวนทางลงมา พบว่าเป็นความเร็วที่ต่ำเกินไป จนกระทั่งเครื่องมือวัดไม่สามารถวัดความเร็วลมที่ทางออกได้ เนื่องจากลมไหลลงทางด้านล่างตามกระแสการไหลของข้าวเปลือก

# บทที่ 4
# การทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ

## 4.1 บทคัดย่อ

การทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระขนาดที่ 1 แบบต่อเนื่อง โดยมีเงื่อนไขการทดลองคือ ความเร็วอากาศอบแห้งคงที่เท่ากับ 2 เมตรต่อวินาที และอุณหภูมิอากาศแห้งเท่ากับ 100, 130 และ 150 องศาเซลเซียส ข้าวเปลือกมีความชื้นเริ่มต้นที่ 27 - 29 %d.b. โดยอัตราการไหลของข้าวเปลือกเท่ากับ 52.4 kg/min จะมีช่วงเวลาพักตัวข้าวเปลือก 1 นาที จากการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 100 องศาเซลเซียส มีอัตราการอบแห้งเท่ากับ 2.53%d.b. ต่อชั่วโมง ที่ 130 องศาเซลเซียส เท่ากับ 3.19 %d.b. ต่อชั่วโมง และที่ 150 องศาเซลเซียส เท่ากับ 3.78%d.b. ต่อชั่วโมง สำหรับคุณภาพข้าวเปรียบเทียบกับข้าวมาตรฐาน พบว่าในทุกกรณีได้ปริมาณต้นข้าวต่ำกว่าข้าวมาตรฐานประมาณ 34 – 45% สำหรับค่าดัชนีความขาว มีค่าต่ำกว่าข้าวมาตรฐาน 1.2 – 2.8%

## 4.2 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระแบบต่อเนื่องด้วยลมร้อน โดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อทดสอบอัตราการอบแห้ง, การลดลงของความชื้นเทียบต่อเวลา และคุณภาพของข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง โดยจะทำการวิเคราะห์เงื่อนไขอากาศอบแห้งและสภาพแวดล้อมในระหว่างการอบแห้งที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งและคุณภาพของข้าวเปลือกเทียบกับการอบแห้งข้าวมาตรฐาน

การออกแบบการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระนี้ ได้คำนึงถึงสมรรถนะของอุปกรณ์และองค์ประกอบต่าง ๆ ของเครื่อง จากผลการทดสอบในบทที่ 3 เครื่องเป่าลมสามารถทำความเร็วได้ 0.7 – 6.4 เมตรต่อวินาที (ทดสอบแบบไม่มีการไหลของข้าวเปลือกในท่ออบแห้ง) และเครื่องทำความร้อนสามารถทำความร้อนสูงสุดได้ประมาณ 200 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 10 เมตรต่อวินาที โดยที่ความเร็วอากาศที่เหมาะสมกับการทดลองอยู่ในช่วง 1 – 3 เมตรต่อวินาที แต่เมื่อทำการทดสอบพบว่าที่ความเร็วอากาศ 1 เมตรต่อวินาที อากาศมีแรงดันไม่มากพอที่จะไหลผ่านชั้นเมล็ดข้าวเปลือกที่ไหลสวนทางลงมาได้ ทำให้ไม่สามารถวัดความเร็วของอากาศที่ทางออกได้ เพราะอากาศไหลลงด้านล่างของท่ออบแห้งตามกระแสการไหล

ของข้าวเปลือก สำหรับที่ความเร็ว 3 เมตรต่อวินาที เมื่อปล่อยข้าวเปลือกไหลสวนทาง จะมีเมล็ดข้าวเปลือกบางส่วนลอยออกไปพร้อมอากาศที่ทางออก ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ จึงได้ใช้ความเร็วอากาศอบแห้งที่ความเร็วเดียวคือ 2 เมตรต่อวินาที ในส่วนของอุณหภูมิอากาศอบแห้งจะใช้ที่อุณหภูมิ 100, 130 และ 150 องศาเซลเซียส และเวลาในการพักตัวที่ 1 นาที โดยอ้างอิงจากผลการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกแบบหล่นอิสระ ด้วยเครื่องอบแห้งขนาดที่ 2 ของสุพิชฌาย์ (2551) ซึ่งศึกษาผลกระทบของเวลาพักตัวที่ความเร็วอบแห้ง 2 เมตรต่อวินาที ที่ 1, 2 และ 4 นาที ได้อัตราการอบแห้งที่ใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะในช่วงอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากการเพิ่มระยะเวลาพักตัวมีผลต่ออัตราการอบแห้งไม่มากเท่ากับการเปลี่ยนแปลงความเร็วและอุณหภูมิ สำหรับการทดลองปัจจุบันใช้ข้าวเปลือกเป็นจำนวนมาก ประมาณ 51 กิโลกรัม เพื่อป้องกันไม่ให้ปริมาณข้าวเปลือกที่หายไปจากระบบมากเกินไปเนื่องจากการเก็บตัวอย่าง (การเก็บตัวอย่างต้องเก็บตัวอย่างครั้งละ 5 กรัม ทุก 10 นาทีโดยประมาณ ทำให้ข้าวเปลือกจะหายไปจากกระบวนการอบแห้ง 150 กรัมต่อชั่วโมง) ซึ่งจะมีผลกระทบต่ออัตราการอบแห้งในระหว่างทำการทดลอง ดังนั้น ผู้วิจัย จึงได้เลือกใช้การพักตัวที่ 1 นาทีเท่านั้น เนื่องจากการพักตัวที่ 2 และ 4 นาที จะต้องใช้ข้าวเปลือกในจำนวนที่เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า และ 4 เท่า ตามลำดับ ถ้าใช้อัตราป้อนเดียวกัน (51.4 กิโลกรัมต่อนาที) ซึ่งจะทำให้การทดลองใช้เวลานานและสิ้นเปลืองมากขึ้น โดยหากใช้อัตราป้อนที่น้อยกว่านี้ จะไม่เกิดการกองตัวของข้าวเปลือกที่ถังพักด้านบน ทำให้ไม่เกิดปรากฏการณ์ตกอิสระของข้าวเปลือก และการไหลอย่างไม่ต่อเนื่องของข้าวเปลือกเนื่องจากลักษณะการทำงานของกระพ้อลำเลียง

## 4.3 การทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ

### 4.3.1 การเตรียมข้าวเปลือกชื้น

การทดลองนี้ใช้ข้าวเปลือกพันธุ์ชัยนาท 1 ที่ปลูกในจังหวัดนครราชสีมา เก็บเกี่ยวด้วยรถเกี่ยวนวด ในเดือนมีนาคม 2552 โดยบรรจุข้าวเปลือกชื้นในถุงพลาสติกปิดสนิทถุงละ 20 กิโลกรัม จัดเก็บไว้ในห้องแช่ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส

ขั้นตอนการเตรียมข้าวเปลือกสำหรับการทดลอง มีดังนี้

- **นำถุงข้าวเปลือกชื้นออกจากห้องแช่มาพักไว้ในอากาศแวดล้อมประมาณ 12 ชั่วโมง เพื่อให้อุณหภูมิข้าวเปลือกมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิสภาพแวดล้อม**
- ทำความสะอาดข้าวเปลือกชื้นด้วยเครื่องคัดแยกเมล็ดพันธุ์ เพื่อแยกเศษฟางและเมล็ดลีบ
- บรรจุข้าวเต็มเมล็ดที่ได้ลงในถุงพลาสติกปิดสนิท แล้ว**นำไปทำการทดลอง**

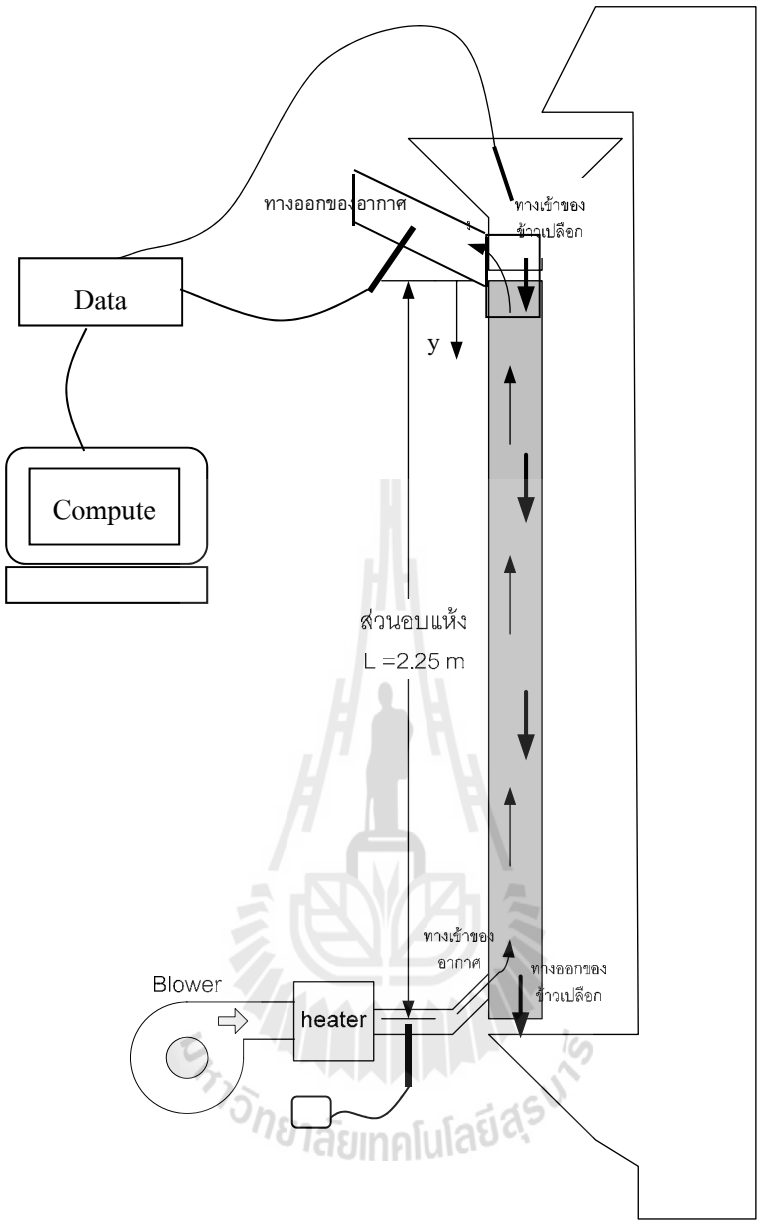
**4.3.2 เงื่อนไขการทดลองอบแห้งข้าวเปลือก**

การทดลองอบแห้งข้าวเปลือก กำหนดให้มีระยะพักตัวเท่ากับ 1 นาที ที่ถังพักด้านบน โดยเงื่อนไขการอบแห้ง มีดังนี้

- **ความเร็วอากาศอบแห้งเฉลี่ย 2 เมตรต่อวินาที**
- **อุณหภูมิอบแห้งที่ 100, 130 และ 150 องศาเซลเซียส (ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งที่แต่ละอุณหภูมิอากาศอบแห้ง)**
- **ข้าวเปลือกเริ่มต้น 60 กิโลกรัม โดยที่ข้าวเปลือกจำนวน 9 กิโลกรัม จะตกค้างอยู่ที่ด้านล่างฐานของกระพ้อ ทำให้มีข้าวเปลือกจำนวนทั้งสิ้น 51 กิโลกรัม หมุนเวียนอยู่ในกระบวนการอบแห้ง**
- **อัตราป้อนข้าวเปลือก 52.4 กิโลกรัมต่อนาที ทำให้เกิดการพักตัวของข้าว 1 นาทีต่อรอบการอบแห้ง**
- **ความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือก 22%w.b.**

**4.3.3 ขั้นตอนการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ**

- **เปิดเครื่องแล้วปรับความเร็วลมของอากาศ โดยตั้งค่าความถี่วงจรควบคุมเครื่องเป่าลมที่ 21 Hz เพื่อสร้างความเร็วอากาศเฉลี่ยในท่ออบแห้งที่ 2 เมตรต่อวินาที**
- **เปิดเครื่องทำความร้อน (Heater) ปรับอุณหภูมิอากาศอบแห้ง โดยเครื่องทำความร้อน (heater) ใช้ขดลวดความร้อนขนาด 12 กิโลวัตต์ จำนวน 6 ตัว ติดตั้งควบคู่กับ variac 3 phase เพื่อปรับแรงดันไฟฟ้า และวัดค่าอุณหภูมิอากาศอบแห้งด้วย Thermocouple type K ซึ่งต่อกับตัวปรับและแสดงอุณหภูมิของ Shinko โดยวัดอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่ตำแหน่งทางเข้าท่ออบแห้ง (รูปที่ 4.1)**




รูปที่ 4. 1 รูปโครงร่างเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบหล่นอิสระที่ใช้ในการทดลอง

- **เปิดเครื่องคอมพิวเตอร์และติดตั้งเครื่องเก็บบันทึกข้อมูล (data logger)**
- **เมื่ออุณหภูมิอากาศอบแห้งคงที่ ที่ค่าที่กำหนด ให้เก็บตัวอย่างเริ่มต้นประมาณ 15 กรัม ใส่ถุงพลาสติกปิดสนิท**
- **เทข้าวเปลือกชื้นทั้งหมดใส่ในถังพักด้านล่าง ลำเลียงข้าวเปลือกด้วยกระพ้อลำเลียง ไปที่ถังพักด้านบน**

- **ติดตั้ง Thermocouple Type K ในกองข้าวเปลือกเพื่อวัดอุณหภูมิกองข้าวเปลือกตรวจสอบเครื่องมือวัดทุกตำแหน่งให้อยู่ในสภาพพร้อมใช้**
- **จากนั้นปล่อยข้าวเปลือกจากถังพักด้านบนเข้าสู่ท่ออบแห้งเพื่อเริ่มการทดลองพร้อมทั้งจับเวลา**
- **เก็บตัวอย่างข้าวเปลือกที่ทางออกจากส่วนอบแห้งทุก 5 นาทีในชั่วโมงที่ 1 และทุก 10 นาทีในชั่วโมงถัดไป**
- **ใช้เครื่องวัดความชื้นแบบความต้านทานไฟฟ้า (Grain Moisture Tester Riceter m401) วัดความชื้นของข้าวเปลือกทุก ๆ 1 ชั่วโมง**
- **ทำการอบแห้งไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งวัดความชื้นของข้าวเปลือกได้ประมาณ 14%w.b. จึงหยุดทำการทดลอง**
- **หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการอบแห้ง ให้เก็บตัวอย่างข้าวเปลือกประมาณ 1 กิโลกรัม เก็บไว้ในถุงพลาสติกปิดสนิท เพื่อนำไปทดสอบหาคุณภาพข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง**
- **นำตัวอย่างข้าวเปลือกที่เก็บระหว่างการทดลอง ไปพักตัว ก่อนนำไปวัดความชื้นสุดท้ายด้วยวิธีการใช้ตู้อบ**

**4.3.4 ขั้นตอนการหาความชื้นข้าวเปลือก**

ความชื้นข้าวเปลือก เป็นตัวบอกปริมาณน้ำที่มีอยู่ในข้าวเปลือก สามารถแสดงได้ 2 แบบ คือ

ความชื้นมาตรฐานเปียก: นิยมใช้ในวงการการค้า

$$M_w = \left( \frac{w-d}{w} \right) \times 100 \qquad (4.1)$$

เมื่อ $M_w$ คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก, % w.b.

w คือ มวลของวัสดุเปียก, kg

d คือ มวลของวัสดุแห้ง (ไม่มีความชื้น), kg

ความชื้นมาตรฐานแห้ง: นิยมใช้ในการวิเคราะห์ทางทฤษฎี

$$M_d = \left(\frac{w-d}{d}\right)\times 100 \qquad (4.2)$$

เมื่อ $M_d$ คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง, % d.b.

วิธีการหาความชื้นในเมล็ดพืชและอาหารอาจแบ่งได้เป็น 2 วิธีคือ (1) วิธีตรง เช่น การใช้ตู้อบ การกลั่น การใช้สารดูดความชื้นในห้องสุญญากาศ เป็นต้น ข้อดีคือ มีความถูกต้องและใช้อ้างอิงได้ แต่จะใช้เวลานาน ตั้งแต่ **1** – 72 ชั่วโมง ขึ้นอยู่กับมาตรฐานที่ใช้อ้างอิง และ (2) วิธีอ้อม โดยการวัดคุณสมบัติบางอย่างซึ่งขึ้นกับความชื้น เช่น ความต้านทานไฟฟ้า เป็นต้น ข้อดีคือ มีความรวดเร็ว แต่อาจไม่ถูกต้องนัก เพราะคุณสมบัติเหล่านั้นแปรผันตามชนิดของเมล็ดพืช อุณหภูมิและความหนาแน่นของการบรรจุ

รูปที่ 4. 2 เครื่องมือวัดความชื้นเมล็ดพันธ์แบบความต้านทานไฟฟ้า

สำหรับการทดลองนี้ใช้วิธีการใช้ตู้อบ โดยงานวิจัยนี้ใช้มาตรฐานของ American Association of Cereal Chemists, AACC คือการอบหาความชื้นแบบเมล็ดเต็ม ไม่บดละเอียดเพื่อป้องกันความผิดพลาดที่เกิดจากการสูญเสียความชื้นเมล็ดในขั้นตอนบดละเอียด แล้วอบแห้งด้วยอุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลา 72 ชั่วโมง (AACC,1995) โดยมีขั้นตอนการดำเนินการดังนี้

- **เตรียมภาชนะสำหรับบรรจุตัวอย่างเข้าตู้อบ เพื่ออบไล่ความชื้นออกจากภาชนะที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้ววางให้เย็นตัวในตู้ดูดความชื้น**
- **นำตัวอย่างข้าวเปลือกออกจากถุงพลาสติก เทใส่ในภาชนะ เพื่อชั่งน้ำหนักโดยไม่คิดน้ำหนักภาชนะ จะได้มวลของวัสดุชื้น, *w***
- **นำภาชนะบรรจุตัวอย่างเข้าตู้อบ (งานวิจัยนี้ใช้ตู้อบ MCP HEK GmbH) ทำการอบด้วยอุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลา 72 ชั่วโมง เพื่อให้น้ำในเมล็ดระเหยออกไปจนหมด**
- **นำตัวอย่างที่อบเสร็จแล้ว วางทิ้งไว้ให้เย็นตัวในตู้ดูดความชื้น**
- **นำตัวอย่างไปชั่งเพื่อหาน้ำหนักของเมล็ดแห้งจะได้มวลของวัสดุแห้ง, *d***
- **คำนวณความชื้นตามสมการหาความชื้นวัสดุ สมการ (4. 2)**

## 4.4 ขั้นตอนการอบแห้งข้าวเปลือกตัวเทียบด้วยเครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ลม

ข้าวเปลือกตัวเทียบ หรือข้าวเปลือกมาตรฐาน เป็นข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 30 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับข้าวที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ การอบแห้งข้าวมาตรฐานด้วยเครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ลม จนกระทั่งข้าวเปลือกมีความชื้น 14% w.b. ใช้เวลา 77 ชั่วโมง 15 นาที โดยมีขั้นตอนการอบแห้งดังนี้

4.4.1 ตั้งค่าอุณหภูมิอากาศอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ลม เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส และใช้ความเร็วลมในการอบแห้งเท่ากับ 2 เมตรต่อวินาที

4.4.2 ตั้งค่าเครื่องชั่งน้ำหนัก ซึ่งเป็นภาชนะสำหรับวางข้าวเปลือกในส่วนอบแห้งของเครื่องอบแห้งอุโมงค์ลม ให้มีค่าเท่ากับศูนย์ แล้วจึงนำข้าวเปลือกที่เตรียมไว้ 1 กิโลกรัม ใส่ลงในภาชนะของเครื่องชั่งเพื่อทำการอบแห้ง

4.4.3 ทำการอบแห้งจนกระทั่งข้าวมีความชื้นเท่ากับ 14%w.b. โดยใช้วิธีการคำนวณน้ำหนัก ข้าวจากสมการหาความชื้นมาตรฐานเปียก สมการ (4. 1)

4.4.4 ทำการกวนข้าวในภาชนะทุก ๆ 3 ชั่วโมง เพื่อให้ข้าวสัมผัสกับลมร้อนได้ทั่วถึง

4.4.5 เมื่อข้าวเปลือกมีความชื้นเท่ากับ 14%w.b. แล้ว ถือว่าสิ้นสุดการอบแห้ง ให้นำข้าวเปลือกเก็บใส่ถุงพลาสติกปิดสนิท เพื่อนำไปทดสอบคุณภาพหลังการอบแห้งต่อไป

## 4.5 ขั้นตอนการทดสอบคุณภาพข้าวหลังการอบแห้ง

การทดสอบคุณภาพของข้าวหลังการอบแห้ง จะทำการทดสอบเพื่อหาปริมาณต้นข้าว (Head rice yield, HRY) และความขาวของข้าวด้วยเครื่องวัดสี ซึ่งได้ตัวชี้วัดเป็นดัชนีความขาว

(White index, WI) แล้วนำไปเปรียบเทียบกับคุณภาพของข้าวมาตรฐาน โดยขั้นตอนการทดสอบมีดังนี้

4.5.1 การทำความสะอาดโดยใช้ตะแกรง และเครื่องเป่าลมเพื่อแยกสิ่งสกปรกออกจากเมล็ดข้าว ตะแกรงจะถูกวางซ้อนกัน 3 ชั้น ซึ่งแต่ละชั้นจะมีขนาดรูตะแกรง 6.5, 3.0 และ 1.75 มิลลิเมตร เรียงลำดับจากด้านบนลงด้านล่าง โดยชั้นล่างสุดจะมีลมเป่าเพื่อแยกฝุ่นที่เบากว่าเมล็ดข้าวเปลือกออกจากข้าวเปลือก

4.5.2 การกะเทาะเปลือก ใช้เครื่องกะเทาะเปลือก (Rice Huller) หจก. เง็กเซ่งฮวด ซึ่งมีความจุประมาณ 100 กรัม โดยประกอบด้วยลูกกลิ้งโลหะหุ้มด้วยยาง 2 ลูก หมุนเข้าหากันด้วยอัตราเร็วที่ต่างกัน เพื่อให้เกิดแนวดึงแยกส่วนเปลือกออกจากเมล็ด การทดสอบนี้ตั้งระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งไว้ที่ประมาณ 1 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นระยะที่เหมาะสมสำหรับข้าวแบบเมล็ดยาว ข้าวเปลือกผ่านกระบวนการกะเทาะเปลือกจะได้เป็นข้าวกล้องและส่วนเปลือกที่หลุดออกมาคือแกลบ

4.5.3 การขัดขาว ใช้เครื่องขัดขาว (Rice miller) หจก. เง็กเซ่งฮวด ความจุประมาณ 100 กรัม หลักการทำงานของเครื่องขัดขาวประกอบด้วยแกนเหล็กขัดขาวที่มีใบมีดติดอยู่ และวางตัวอยู่ในแนวระดับ ด้านล่างของแกน มีตะแกรงขัดขาวที่มีรูรูปวงรี เพื่อให้เมล็ดข้าวอยู่ภายในรู และใบมีดที่ติดกับแกนเหล็กจะทำการขัดเอารำออก เมื่อนำข้าวกล้องมาขัดสีจะได้เป็นข้าวขาว และส่วนที่ขัดออกมาคือรำ

4.5.4 การคัดแยกปลายข้าว ใช้เครื่องคัดแยกปลายข้าว (Cylinder Separator) ของ หจก. เง็กเซ่งฮวด ความจุประมาณ 100 กรัม เครื่องคัดแยกปลายข้าวเป็นรูปทรงกระบอก หลักการทำงานอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์ เมื่อใส่ข้าวเปลือกที่ผ่านการขัดขาวลงไป แล้วทำการหมุนเครื่อง ข้าวเต็มเมล็ดที่มีน้ำหนักมากกว่า จะเคลื่อนตัวไปอยู่ภายในหลุมด้านข้างของทรงกระบอก ส่วนปลายข้าวที่มีน้ำหนักเบากว่าจะเคลื่อนตัวออกทางช่องทางออก จะทำให้สามารถแยกต้นข้าวและปลายข้าวออกจากกันได้

4.5.5 การวัดปริมาณต้นข้าว ทำได้โดยการชั่งน้ำหนักต้นข้าวและปลายข้าวที่ได้จากการขัดสีและหาเป็นค่าร้อยละ

4.5.6 การวัดความขาว นำต้นข้าวมาทำการวัดสีด้วยเครื่องวัดสีของ Minolta รุ่น CR-300 w/DP-301 โดยงานวิจัยนี้ใช้มาตรฐานสี L, a, b ซึ่งความขาวแทนด้วยค่า +L และความดำแทนด้วยค่า –L ค่าสูงสุดจะมีค่า 100 ทั้งด้านบวกและด้านลบ ค่า +a แทนสีแดง ค่า –a แทนสีเขียว และค่า +b แทนสีเหลือง ส่วน –b แทนสีน้ำเงิน ซึ่งค่า a และ b มีค่าสูงสุด 60 ทั้งทางบวกและทางลบ ในการวิเคราะห์ความขาวของข้าวสารที่ได้จะให้ค่าเป็นค่าดัชนีความขาว (White Index, WI)

## 4.6 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองอบแห้งข้าวเปลือก

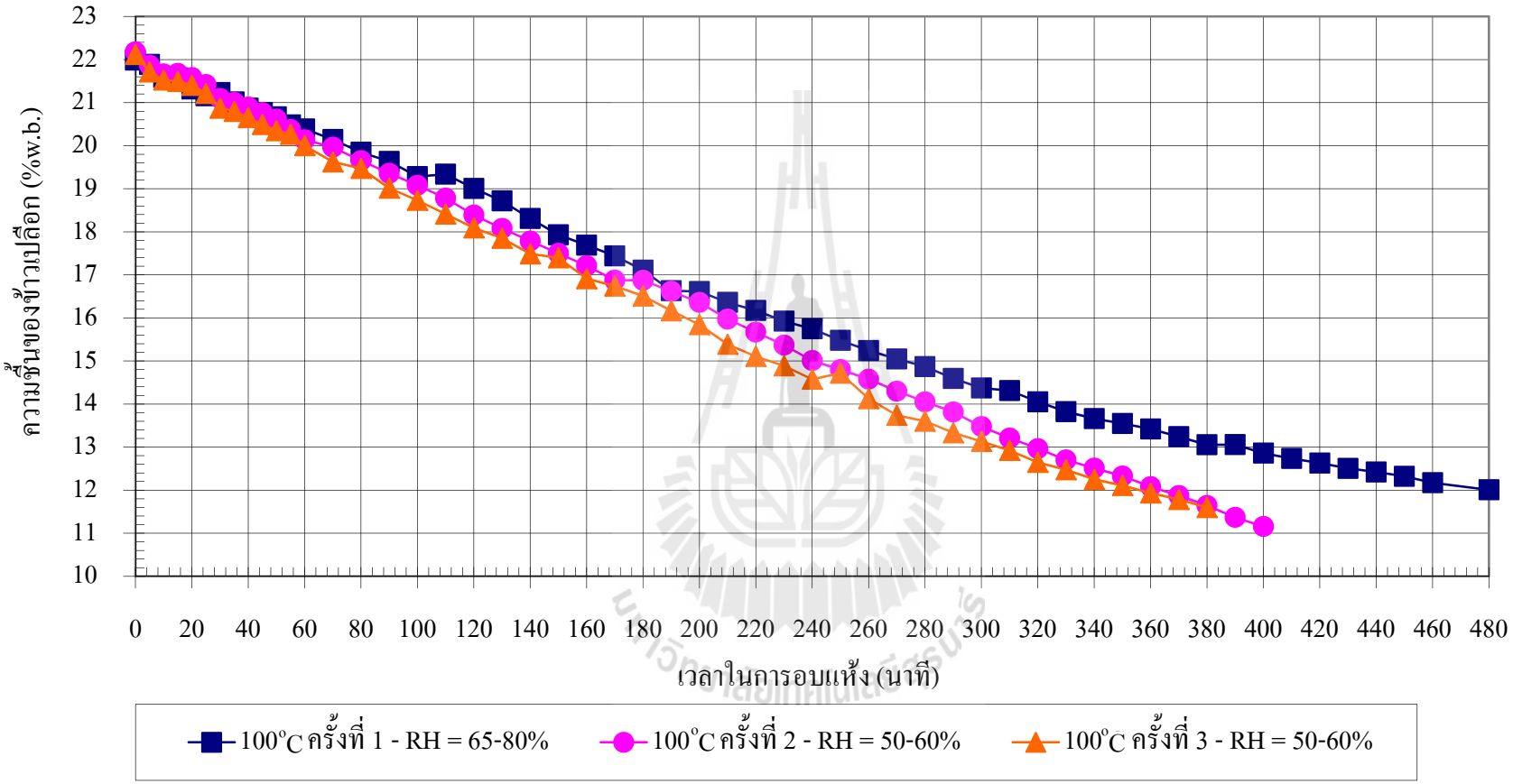
ในการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกที่เงื่อนไขการอบแห้งที่กำหนด คือ อุณหภูมิอบแห้งข้าวเปลือก 100, 130 และ 150 องศาเซลเซียส ความเร็วอากาศอบแห้งเท่ากับ 2 เมตรต่อวินาที และอัตราการป้อนข้าวเปลือก 52.4 กิโลกรัมต่อนาที ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งที่แต่ละเงื่อนไขอุณหภูมิอากาศอบแห้ง ผลการทดลองจะนำเสนอในรูปของเส้นโค้ง 4 ชนิด คือ

- เส้นโค้งการอบแห้ง (Drying curve): ความชื้นเทียบต่อเวลา โดยหาได้จากน้ำหนักที่หายไปของเมล็ดพืชเทียบต่อเวลา
- เส้นโค้งอัตราการอบแห้ง (Drying rate curve): อัตราการอบแห้งเทียบต่อเวลา โดยหาได้จากความแตกต่างของความชื้นเทียบต่อเวลา
- เส้นโค้งลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง (Characteristic curve): อัตราการอบแห้งเทียบต่ออัตราส่วนความชื้น โดยที่เส้นโค้งนี้เป็นอิสระต่อเวลา (Kemp, Ian C. et al., 2001)
- เส้นโค้งอุณหภูมิเทียบต่อเวลา (Temperature-time plot): ได้แก่ อุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือก อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศอบแห้งที่ทางออกท่ออบแห้ง และอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม

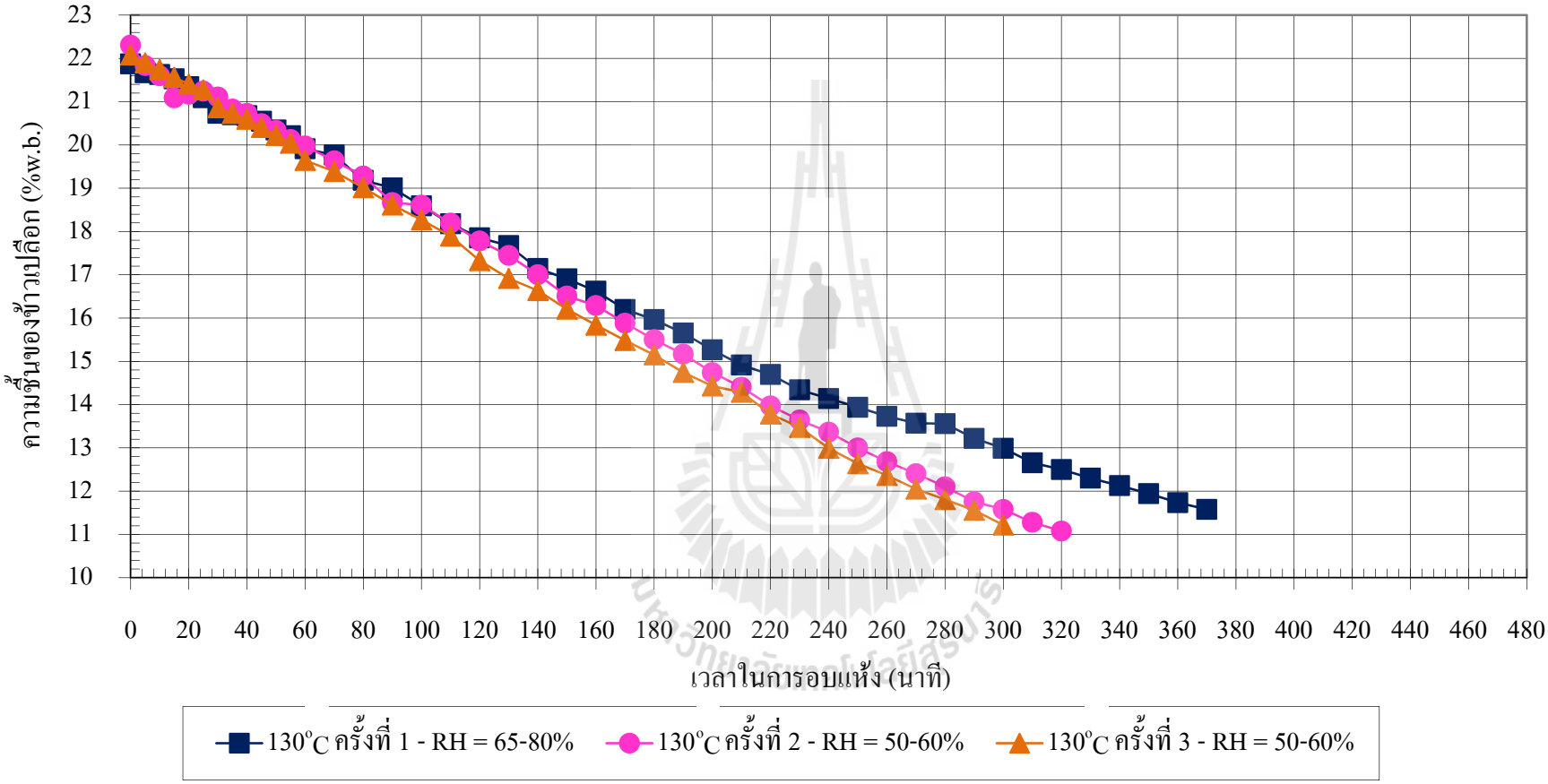
สำหรับผลการทดสอบคุณภาพข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง จะแสดงในรูปของตารางและกราฟแท่ง

### 4.6.1 เส้นโค้งการอบแห้ง (Drying curve)

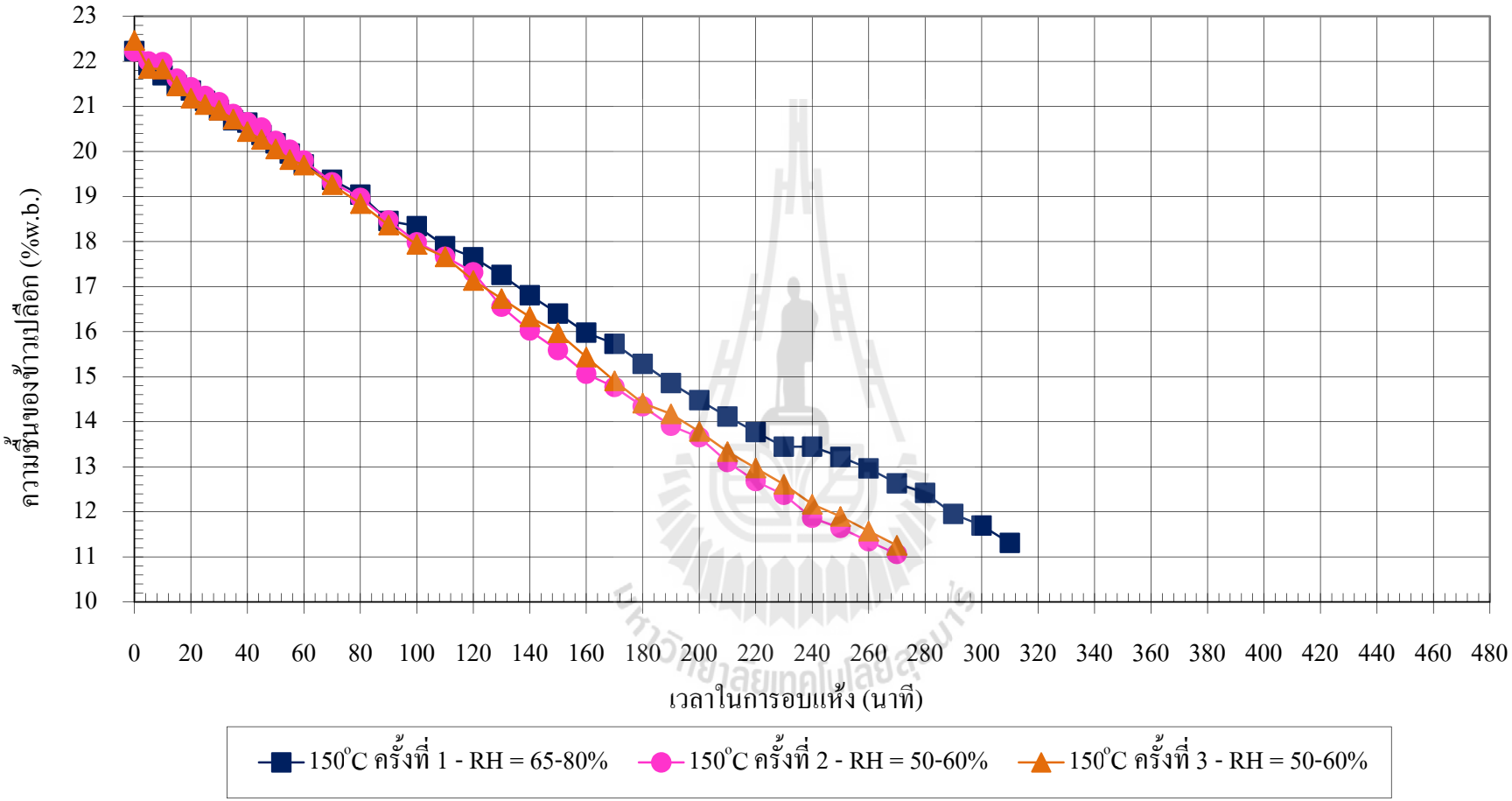
จากการทดลองที่อุณหภูมิอบแห้ง 100, 130 และ 150 องศาเซลเซียส (ทำการทดลองที่อุณหภูมิอากาศอบแห้งอย่างละ 3 ครั้ง) กราฟผลการทดลองการลดลงของความชื้นข้าวเปลือกเทียบต่อเวลา แสดงในรูปที่ 4.3 ถึง รูปที่ 4.5 พบว่า ชุดข้อมูลการทดลองครั้งที่ 1 ของการทดลองทุกอุณหภูมิ ใช้เวลาในการอบแห้งนานกว่าและมีอัตราการอบแห้งต่ำกว่าการทดลองครั้งที่ 2 และ 3 อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากครั้งที่ 1 ทำการทดลองในช่วงที่ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศค่อนข้างสูง (ฝนตกในระหว่างทำการทดลอง) ซึ่งการทดลองครั้งที่ 2 และ 3 ได้ผลการทดลองที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากสภาพอากาศแวดล้อมในการทดลองใกล้เคียงกัน แต่เส้นแนวโน้มการลดลงของความชื้นเทียบต่อเวลาของการทดลองทั้งสามครั้งมีแนวโน้มในลักษณะเดียวกัน $^{o}C$




รูปที่ 4. 3 การลดลงของความชื้นเทียบต่อเวลา ที่เงื่อนไขอากาศอบแห้ง 100 องศาเซลเซียส




รูปที่ 4. 4 การลดลงของความชื้นเทียบต่อเวลา ที่เงื่อนไขอากาศอบแห้ง 130 องศาเซลเซียส

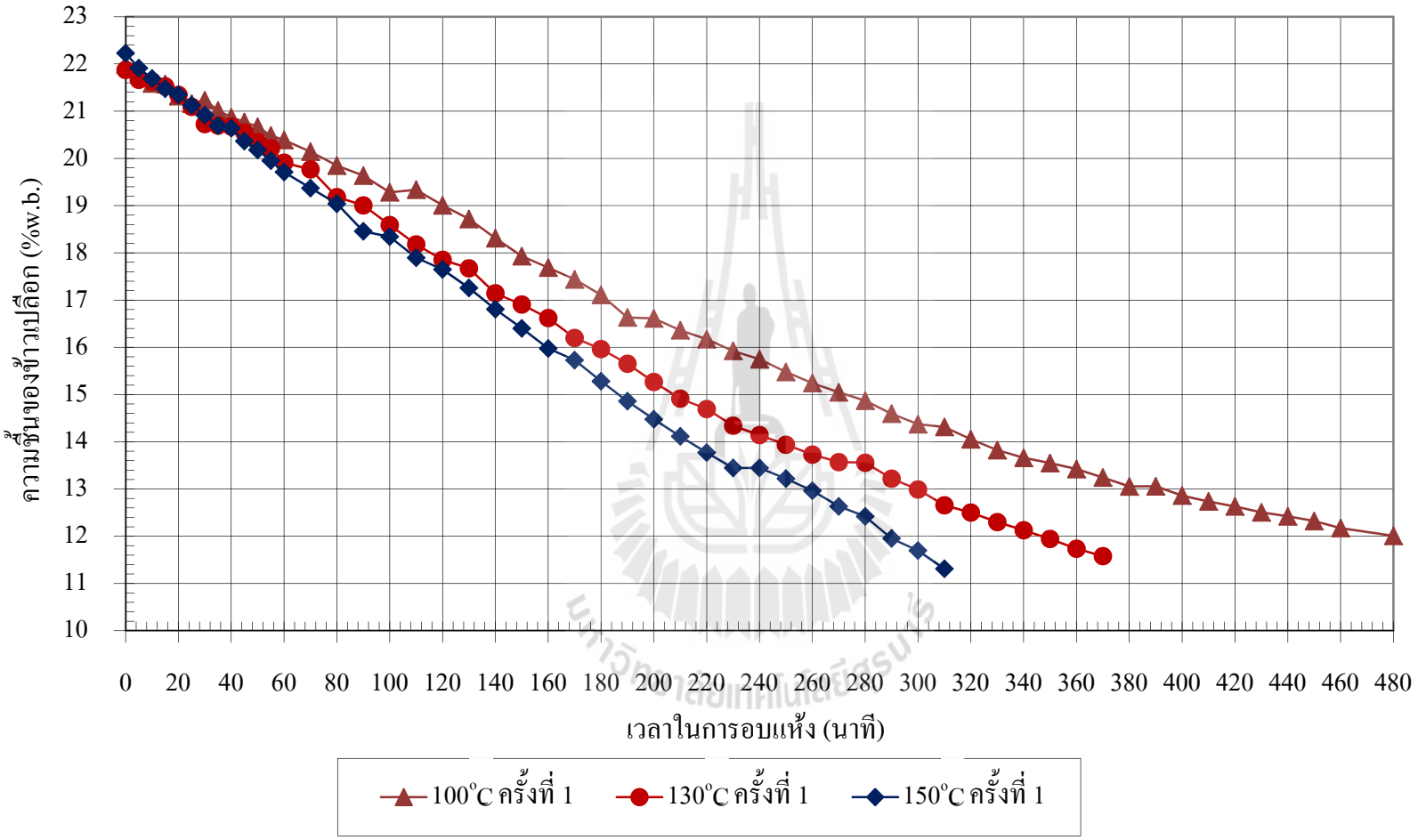



รูปที่ 4. 5 การลดลงของความชื้นเทียบต่อเวลา ที่เงื่อนไขอากาศอบแห้ง 150 องศาเซลเซียส

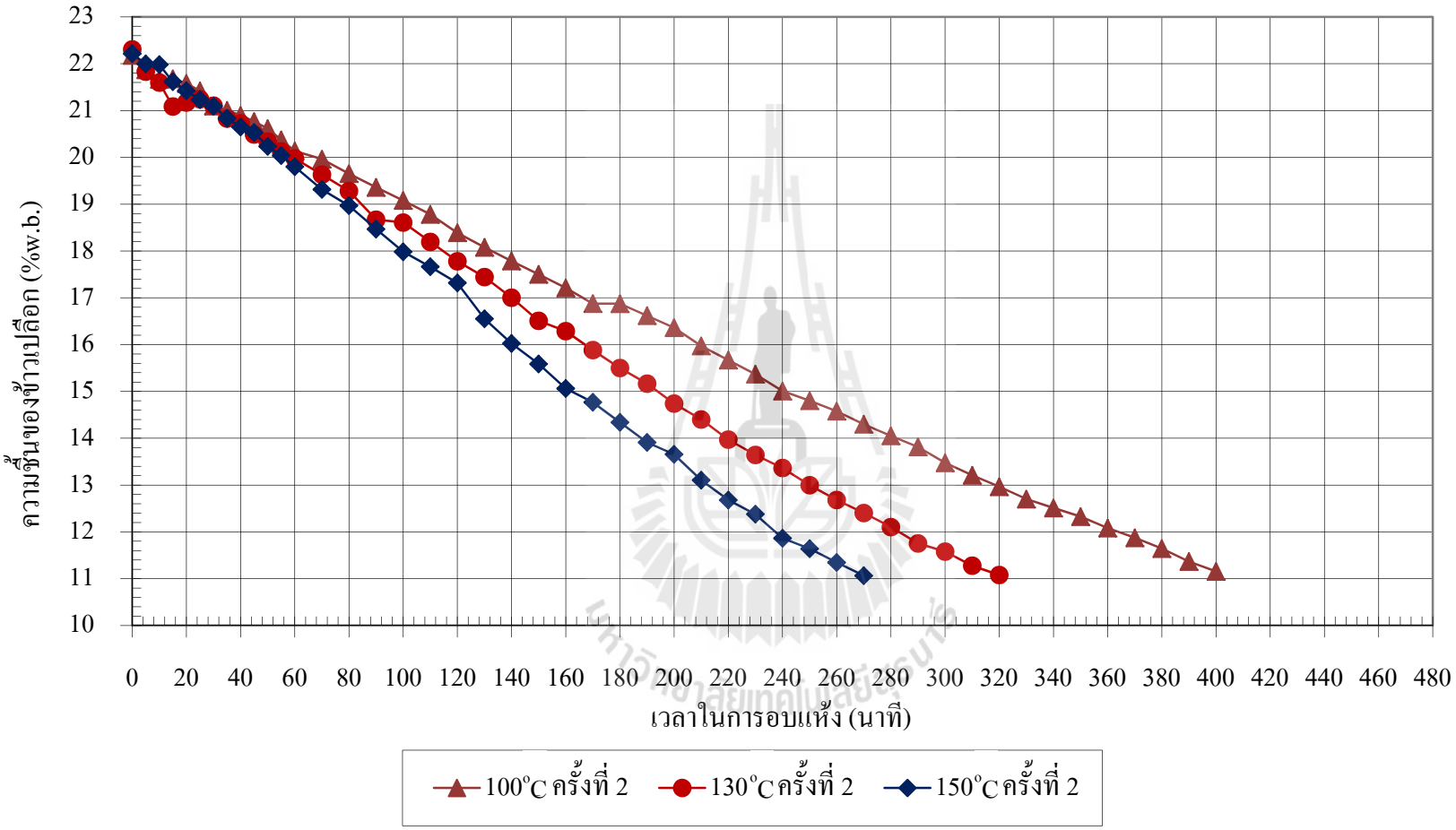
จากรูปที่ 4.3 ถึง รูปที่ 4.5 จะเห็นว่าเงื่อนไขของอากาศแวดล้อมในขณะอบแห้ง โดยเฉพาะความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม มีผลต่อการลดลงของความชื้นของข้าวเปลือกอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่การคายความชื้นของข้าวเปลือกจะใช้เวลานานมากขึ้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีค่าสูงขึ้น (ครั้งที่ 1) โดยที่ในช่วงฝนตกจะมีค่าความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 65 – 80% และในช่วงไม่มีฝนตก (ครั้งที่ 2 และ 3) ความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 50 – 60% ซึ่งเวลาที่ใช้เพิ่มขึ้นเท่ากับร้อยละ 7 –11 ของเวลาการอบแห้งเฉลี่ยที่อุณหภูมิอากาศอบแห้งต่าง ๆ

เมื่อเทียบการลดลงของความชื้นที่เงื่อนไขอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 100, 130 และ 150 องศาเซลเซียส ในแต่ละครั้งของการทดลอง แสดงในรูปที่ 4.6 รูปที่ 4.8 แนวโน้มของการลดลงของความชื้นเทียบต่อเวลา จากความชื้นเริ่มต้น 21 – 22 %w.b. ลดลงเหลือ 14 %w.b. โดยประมาณ ผลการทดลองอบแห้งที่ 150 องศาเซลเซียส ใช้เวลาน้อยที่สุด เวลาเฉลี่ย 197 นาที โดยที่อุณหภูมิที่ 130 องศาเซลเซียส ใช้เวลาเฉลี่ย 227 นาที น้อยกว่าที่ 100 องศาเซลเซียส เวลาเฉลี่ย 287 นาที และเป็นแนวโน้มเดียวกันในแต่ละครั้งของการทดลอง

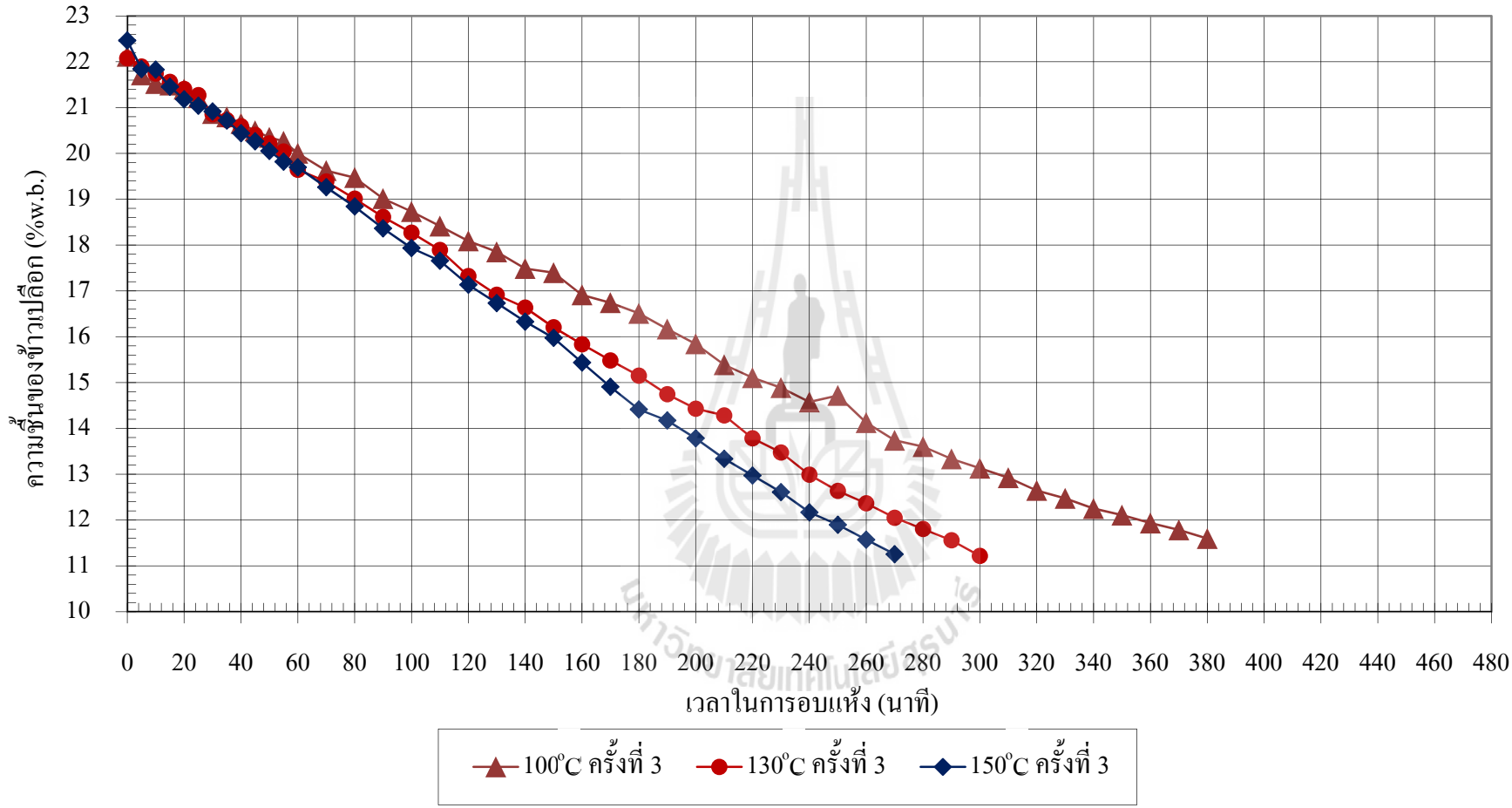
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี




รูปที่ 4. 6 การลดลงของความชื้นเทียบต่อเวลา ที่เงื่อนไขอากาศอบแห้ง 100, 130 และ150 องศาเซลเซียส, RH = 65 - 80%




รูปที่ 4. 7 การลดลงของความชื้นเทียบต่อเวลา ที่เงื่อนไขอากาศอบแห้ง 100, 130 และ150 องศาเซลเซียส, RH = 50 - 60%




รูปที่ 4. 8 การลดลงของความชื้นเทียบต่อเวลา ที่เงื่อนไขอากาศอบแห้ง 100, 130 และ150 องศาเซลเซียส, RH = 50 - 60%

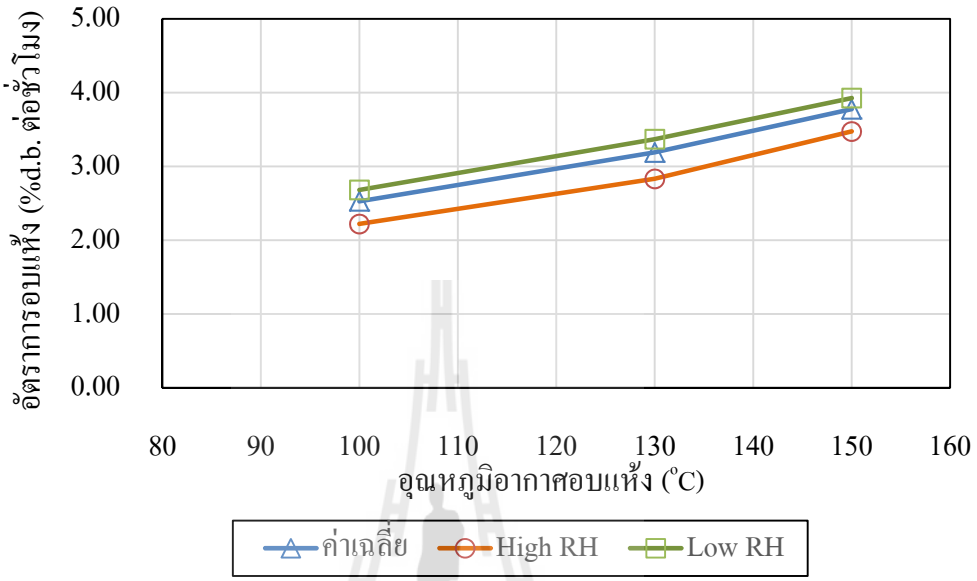
### 4.6.2 เส้นโค้งอัตราการอบแห้ง (Drying rate curve)

การอบแห้งข้าวเปลือกที่เงื่อนไขอุณหภูมิอากาศอบแห้งต่าง ๆ เพื่อลดความชื้นของข้าวเปลือกสด (ข้าวเปลือกที่ไม่ผ่านการอบแห้งก่อนทำการทดลอง) จากความชื้นเริ่มต้น 21 –22% w.b. จนกระทั่งความชื้นข้าวเปลือกมีค่าเท่ากับ 14%w.b. โดยประมาณ จากผลการทดลอง พบว่าเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการอบแห้งจากทั้ง 3 การทดลอง เท่ากับ 287 นาที, 227 นาที และ 197 นาที จากการอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง เท่ากับ 100, 130 และ 150 องศาเซลเซียส ตามลำดับ สำหรับอัตราการอบแห้งเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 2.53, 3.19 และ 3.78%d.b. ต่อชั่วโมง ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้งเท่ากับ 100, 130 และ 150 องศาเซลเซียส (ตารางที่ 4.1) ซึ่งการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง จะใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่า ทำให้อัตราการอบแห้งมีค่าสูงกว่า

ตารางที่ 4. 1 อัตราการอบแห้งที่อุณหภูมิ 100, 130 และ 150 องศาเซลเซียส

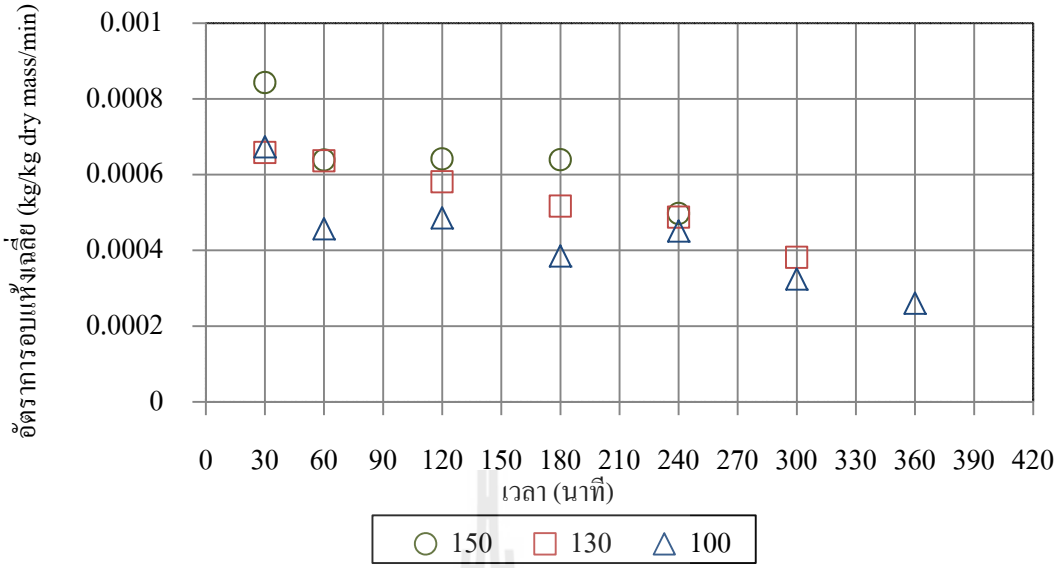
| อุณหภูมิ | ความชื้นเริ่มต้น | ความชื้นสุดท้าย | เวลารวมที่ข้าวเปลือกอยู่ในท่ออบแห้ง | | อัตราการอบแห้ง | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | %d.b. | %d.b. | (นาที) | ชั่วโมง | %d.b.ต่อนาที | %d.b.ต่อชั่วโมง |
| 100 | 28.19 | 16.35 | 320 | 5.33 | 0.037 | 2.22 |
| | 28.5 | 16.35 | 280 | 4.67 | 0.0434 | 2.604 |
| | 28.4 | 16.45 | 260 | 4.33 | 0.046 | 2.76 |
| ค่าเฉลี่ย | 28.36 | 16.38 | 287 | 4.78 | 0.0421 | 2.526 |
| 130 | 27.99 | 16.19 | 250 | 4.17 | 0.0472 | 2.832 |
| | 28.71 | 16.24 | 220 | 3.67 | 0.0567 | 3.402 |
| | 28.33 | 16.66 | 210 | 3.50 | 0.0556 | 3.336 |
| ค่าเฉลี่ย | 28.34 | 16.36 | 227 | 3.78 | 0.0356 | 2.136 |
| 150 | 28.58 | 16.43 | 210 | 3.50 | 0.0579 | 3.474 |
| | 28.56 | 16.16 | 190 | 3.17 | 0.0653 | 3.918 |
| | 28.97 | 16.51 | 190 | 3.17 | 0.0656 | 3.936 |
| ค่าเฉลี่ย | 28.7 | 16.36 | 197 | 3.28 | 0.042 | 2.52 |

เมื่อพิจารณาที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม การทดลองในช่วงที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูง (65 – 80%) จะทำให้อัตราการอบแห้งต่ำลงประมาณ 11 – 18% ดูรูปที่ 4.9




รูปที่ 4. 9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง

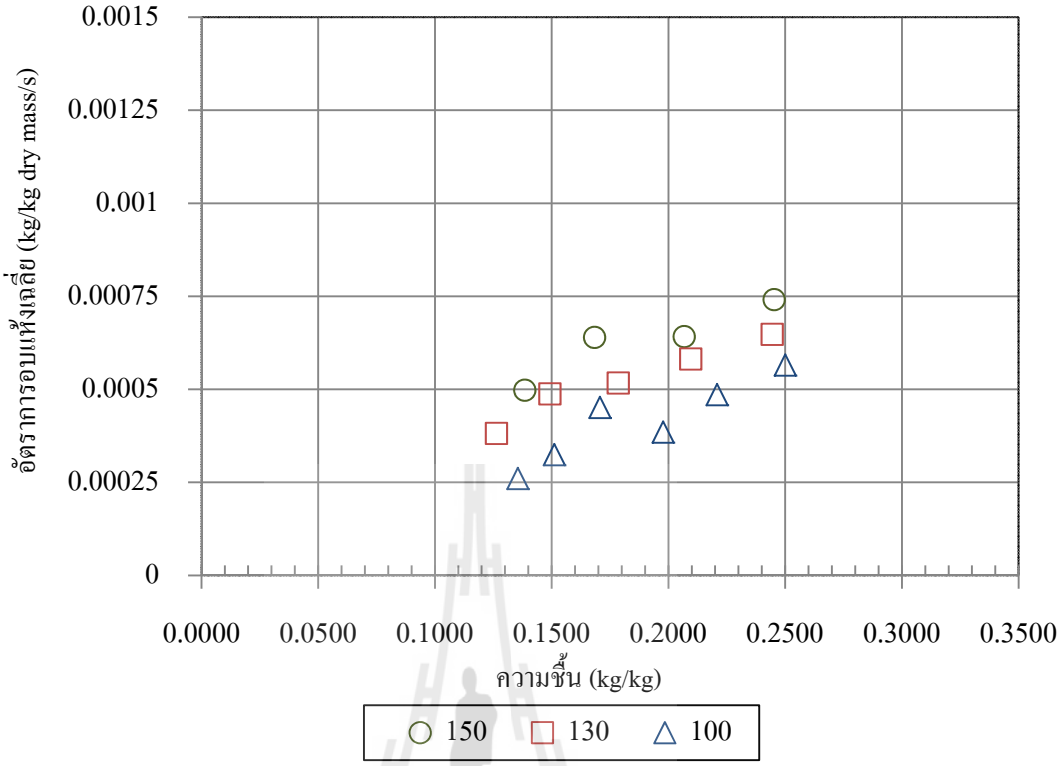
เมื่อพล็อตกราฟอัตราการอบแห้งเทียบต่อเวลา จะได้ดังรูปที่ 4.10 ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้งต่าง ๆ จะพบว่าในช่วง 30 นาทีแรก อัตราการอบแห้งจะมีค่าสูง และมีแนวโน้มคงที่ในชั่วโมงที่ 2 – 4 และมีค่าลดลงหลังจาก 4 ชั่วโมงผ่านไปแล้ว



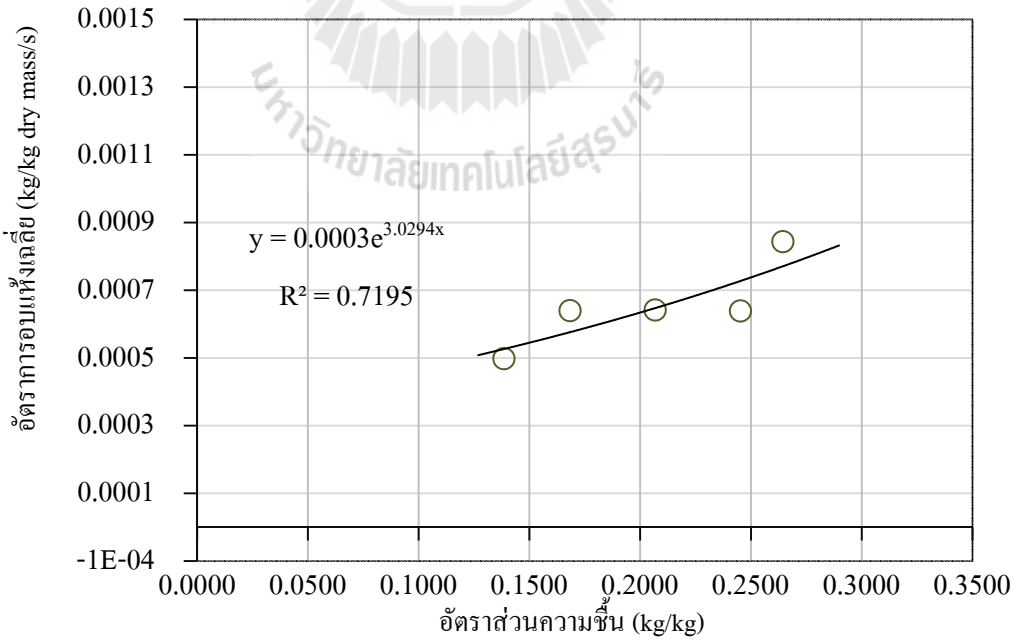

รูปที่ 4. 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งเทียบต่อเวลา

### 4.6.3 เส้นโค้งลักษณะเฉพาะ (Characteristics curve or Krischer curve)

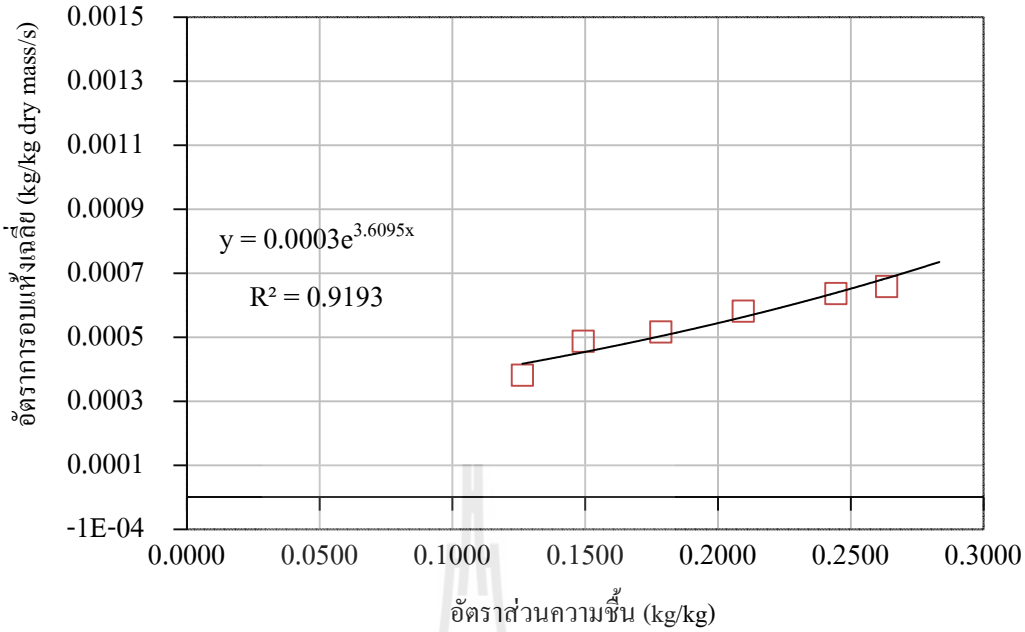
เส้นโค้งลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง เป็นเส้นกราฟที่ได้จากการรวมเส้นโค้งการอบแห้งและเส้นโค้งอัตราการอบแห้งไว้ด้วยกัน ซึ่งจะได้เส้นกราฟที่เป็นอิสระจากเวลา เมื่อฟิตข้อมูลของกราฟนี้จะได้เป็นเส้นโค้งลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง ซึ่งคือความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งที่ขึ้นต่อความชื้น โดยสามารถใช้ประโยชน์จากสมการเส้นโค้งลักษณะเฉพาะของการอบแห้งนี้เพื่อการออกแบบ และการขยายขนาดเครื่องอบแห้ง โดยการดูย้อนกลับเส้นโค้งอัตราการอบแห้ง-เวลา ที่เงื่อนไขการอบแห้งที่ต้องการ และเวลาที่ใช้สำหรับการอบแห้งที่ความชื้นเริ่มต้นที่กำหนดจนถึงความชื้นสุดท้ายที่ต้องการ (Kemp et al., 2001) โดยเส้นโค้งลักษณะเฉพาะของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ แสดงในรูปที่ 4.11 ถึง รูปที่ 4.14



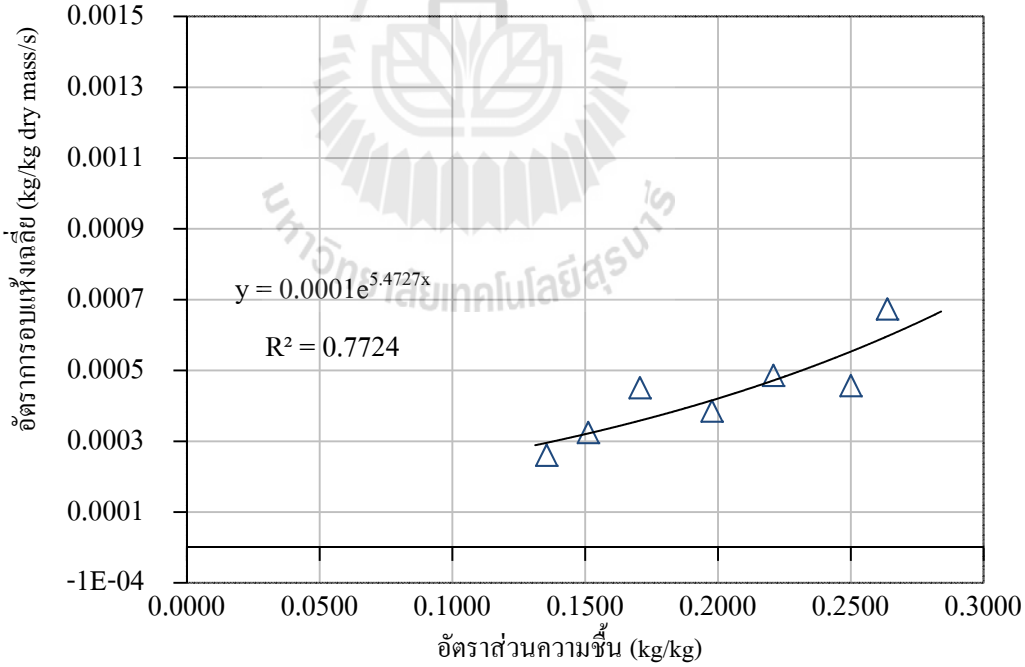

รูปที่ 4. 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งเทียบต่อความชื้นของเมล็ดพืช




รูปที่ 4. 12 เส้นโค้งลักษณะเฉพาะของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระที่ 150°C




รูปที่ 4. 13 เส้นโค้งลักษณะสมบัติของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระที่ 130°C

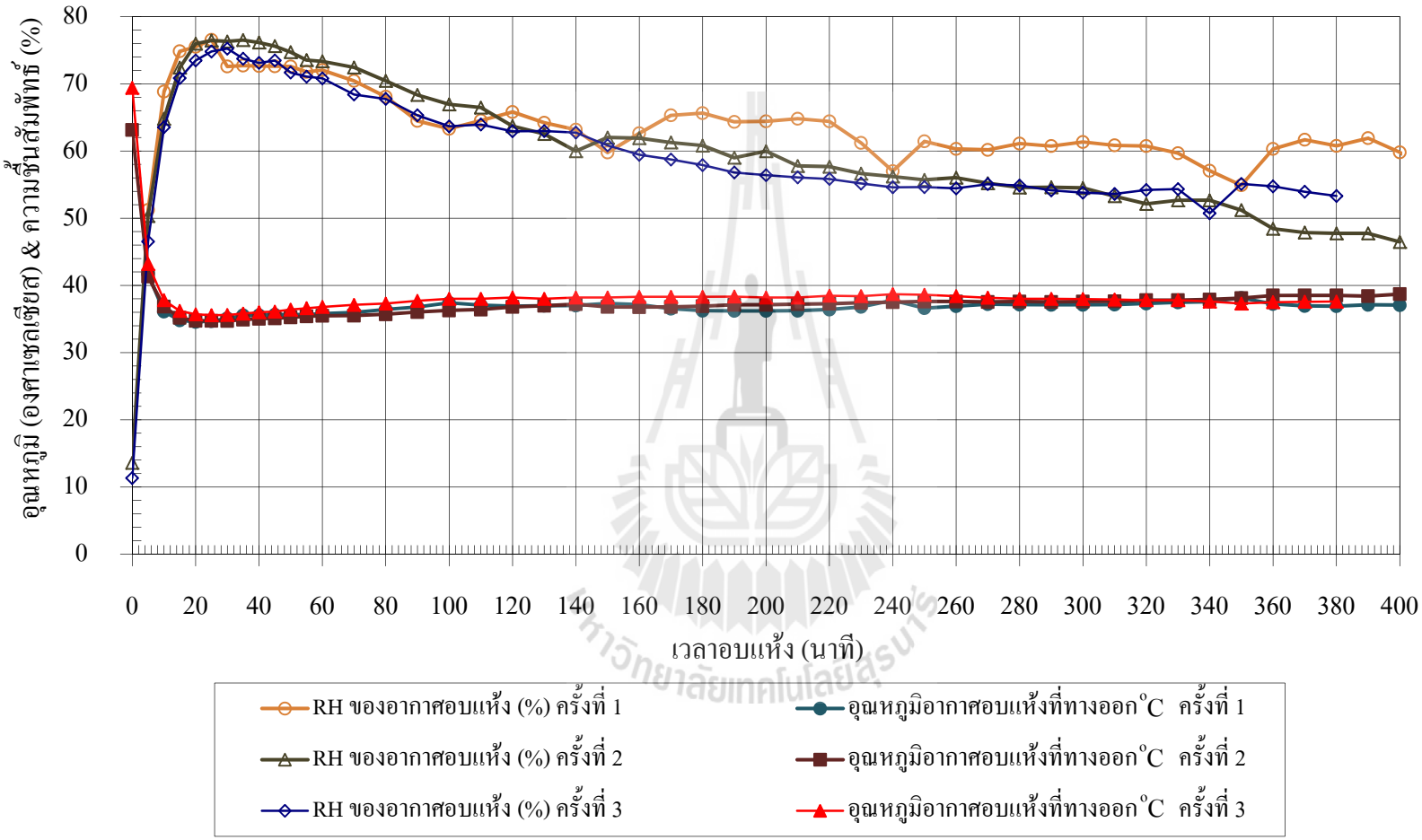



รูปที่ 4. 14 เส้นโค้งลักษณะสมบัติของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระที่ 100°C

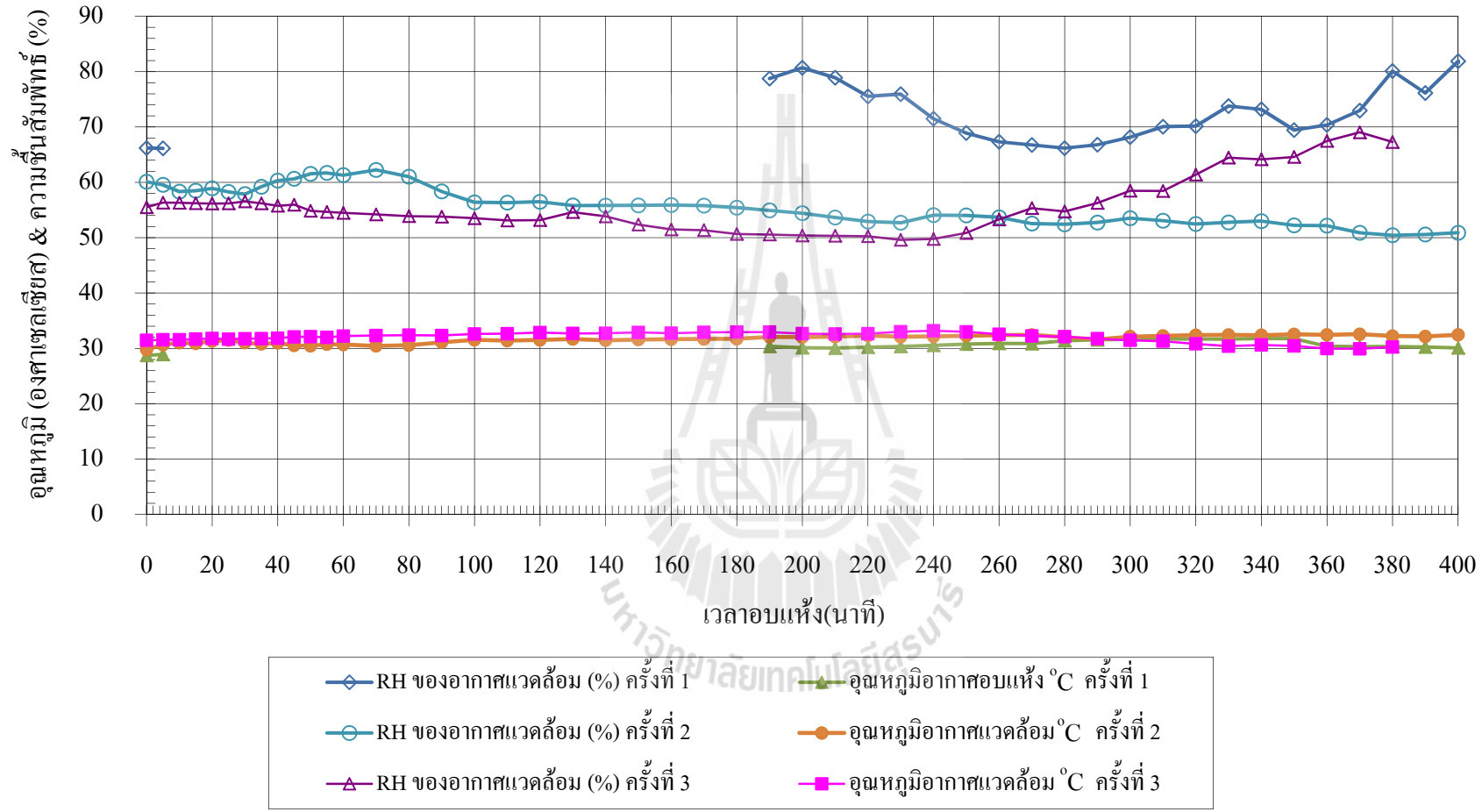
### 4.6.4 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์

ในการทดลองได้มีการบันทึกความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศแวดล้อม ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่ทางออกท่ออบแห้ง และอุณหภูมิกองเมล็ดข้าวเปลือกที่ทางเข้าท่ออบแห้ง แสดงในรูปที่ 4.15 รูปที่ 4.16 จะพบว่า ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม มีการเปลี่ยนแปลงในระหว่างทำการทดลอง โดยมีค่าเริ่มต้นที่ประมาณ 45 – 65% และมีค่าเพิ่มสูงขึ้นและไม่คงที่ในระหว่างทำการทดลอง เนื่องจากในวันที่ทำการทดลองครั้งที่ 1 ของการทดลองทั้ง 3 เงื่อนไขอุณหภูมิอากาศอบแห้งนั้นเกิดมีฝนตก ทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศแวดล้อมสูงขึ้น ในขณะที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมค่อนข้างคงที่ประมาณ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งมีผลทำให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้งที่ทางออก ที่มีค่าสูงมากกว่าการทดลองครั้งที่ 2 และ 3 เนื่องจากความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเพิ่มขึ้น ในขณะที่อุณหภูมิของอากาศที่ทางออกมีค่าใกล้เคียงกัน

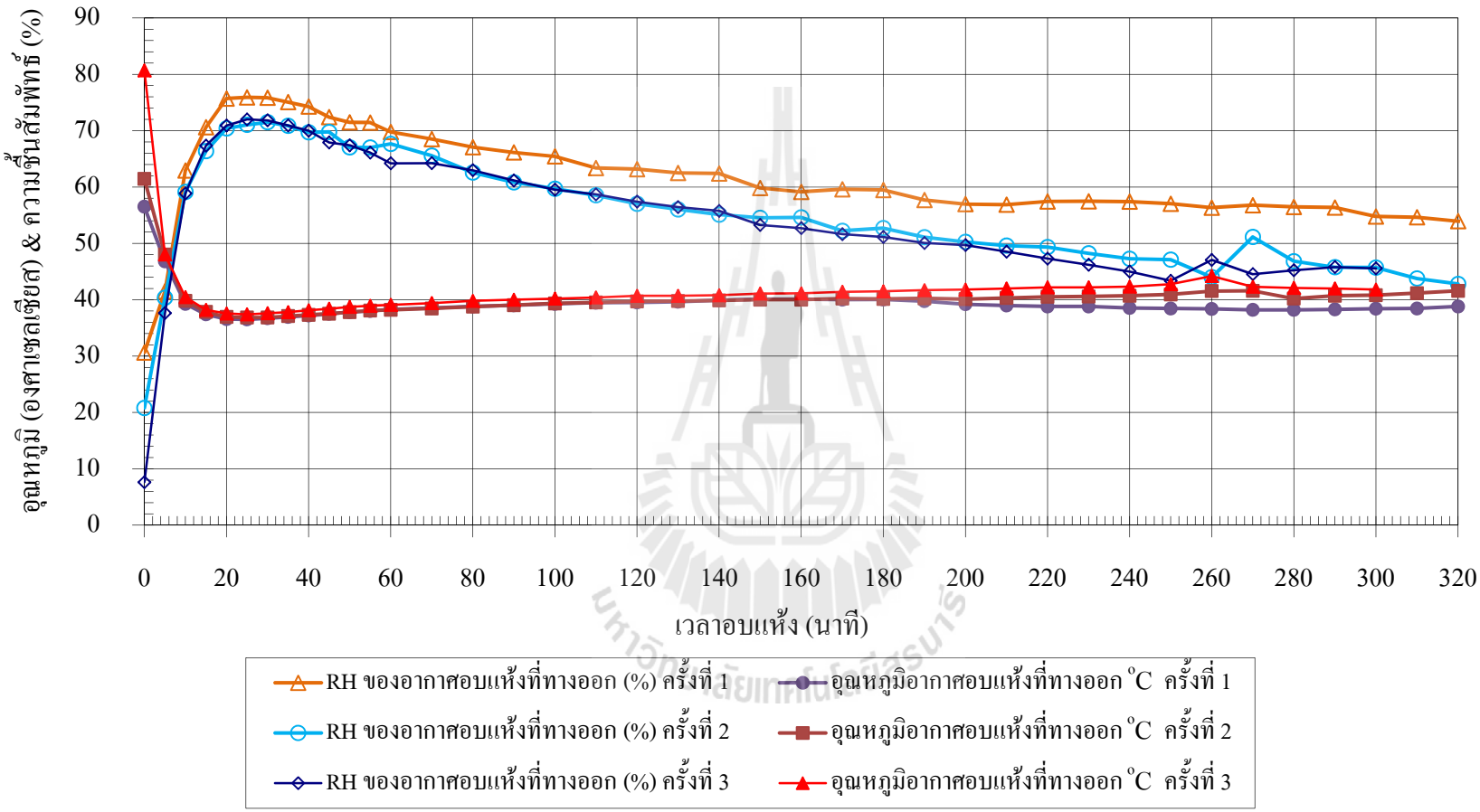
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



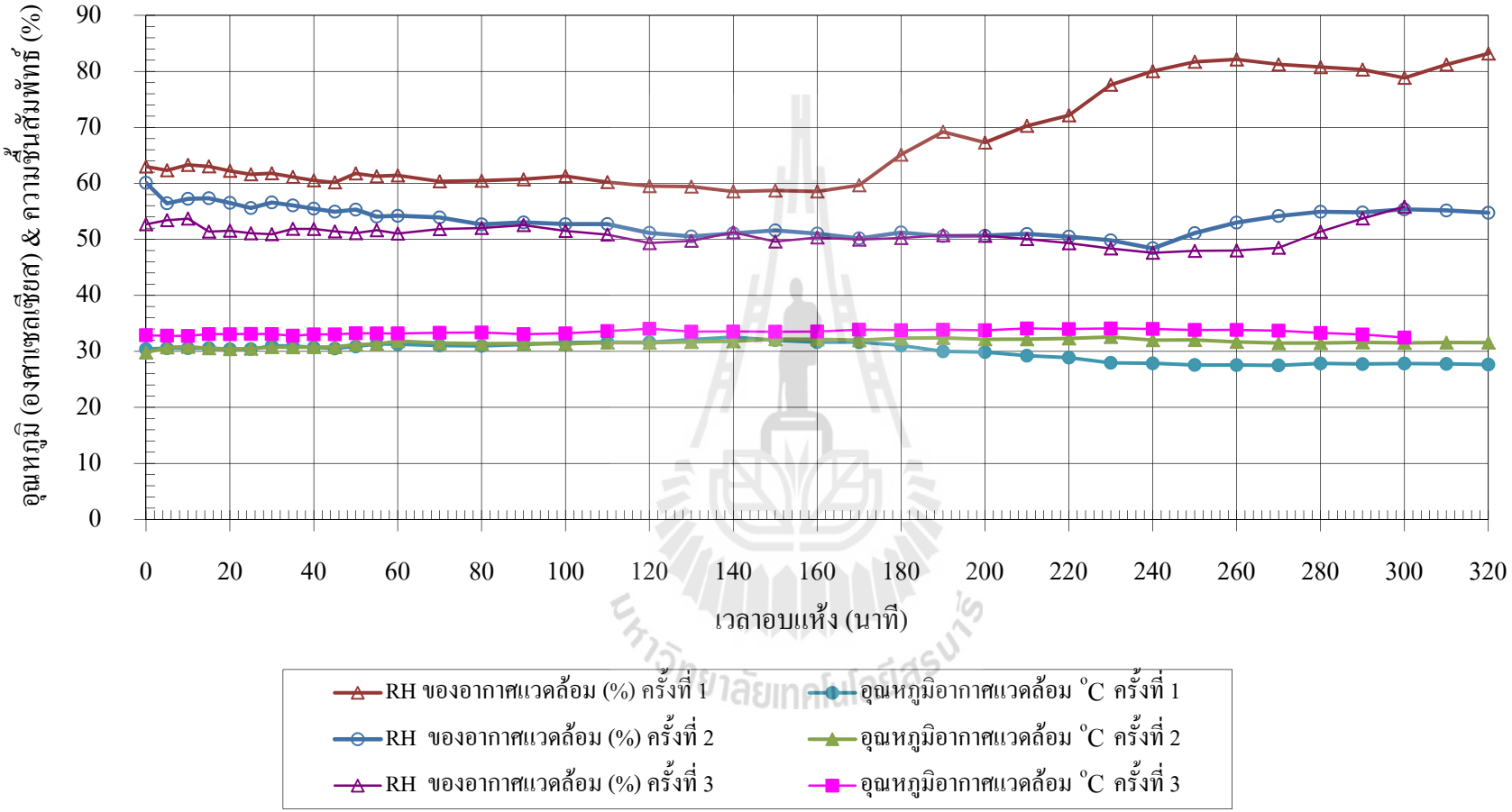

รูปที่ 4. 15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้งที่ทางออกกับเวลาในการอบแห้งครั้งที่ 1, 2 และ 3 @ T = 100 °C



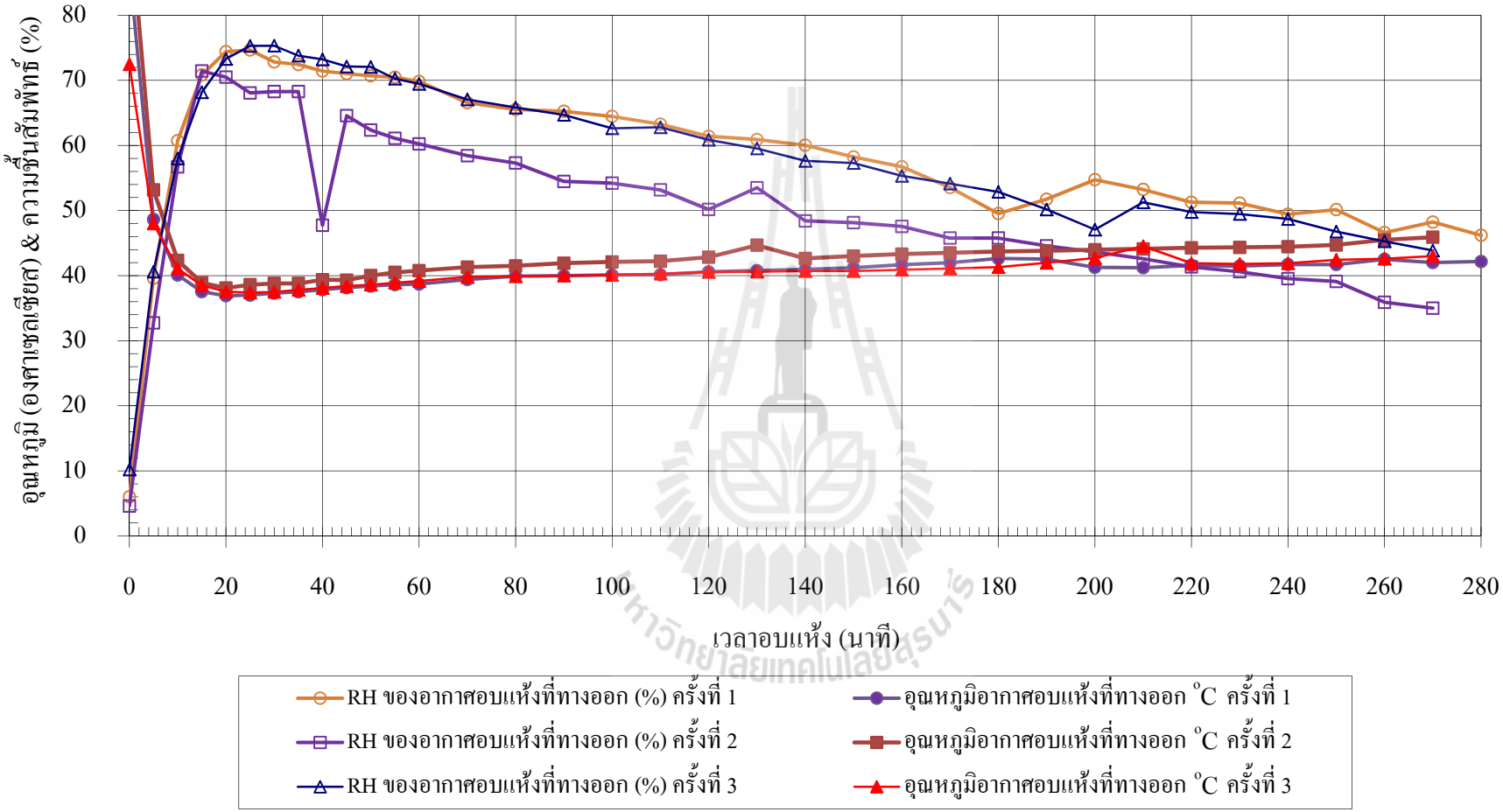

รูปที่ 4. 16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมกับเวลาในการอบแห้ง ครั้งที่ 1, 2 และ 3 @ T = 100 °C



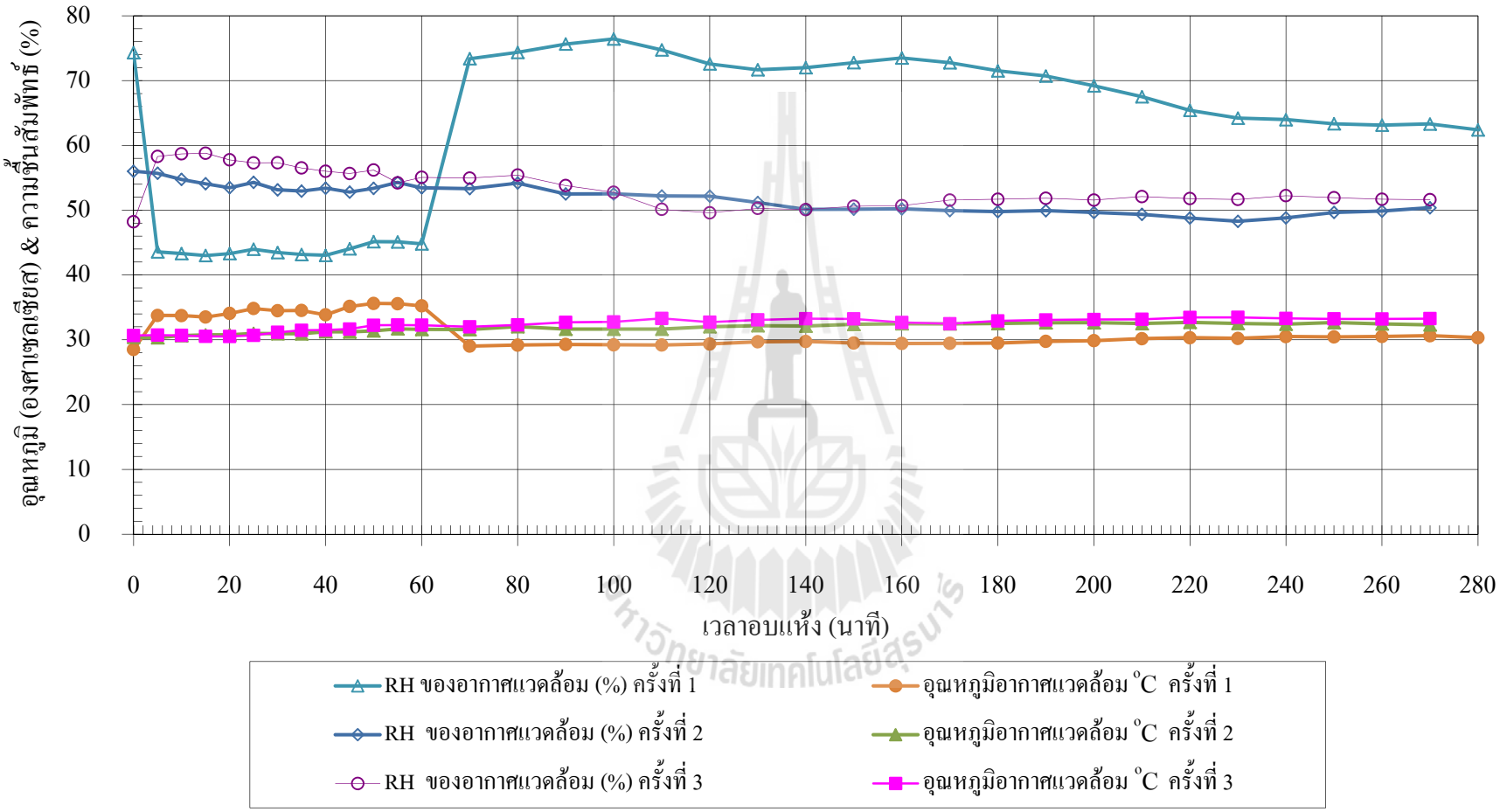

รูปที่ 4. 17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้งที่ทางออกกับเวลาในการอบแห้งครั้งที่ 1, 2 และ 3 @ T = 130 °C



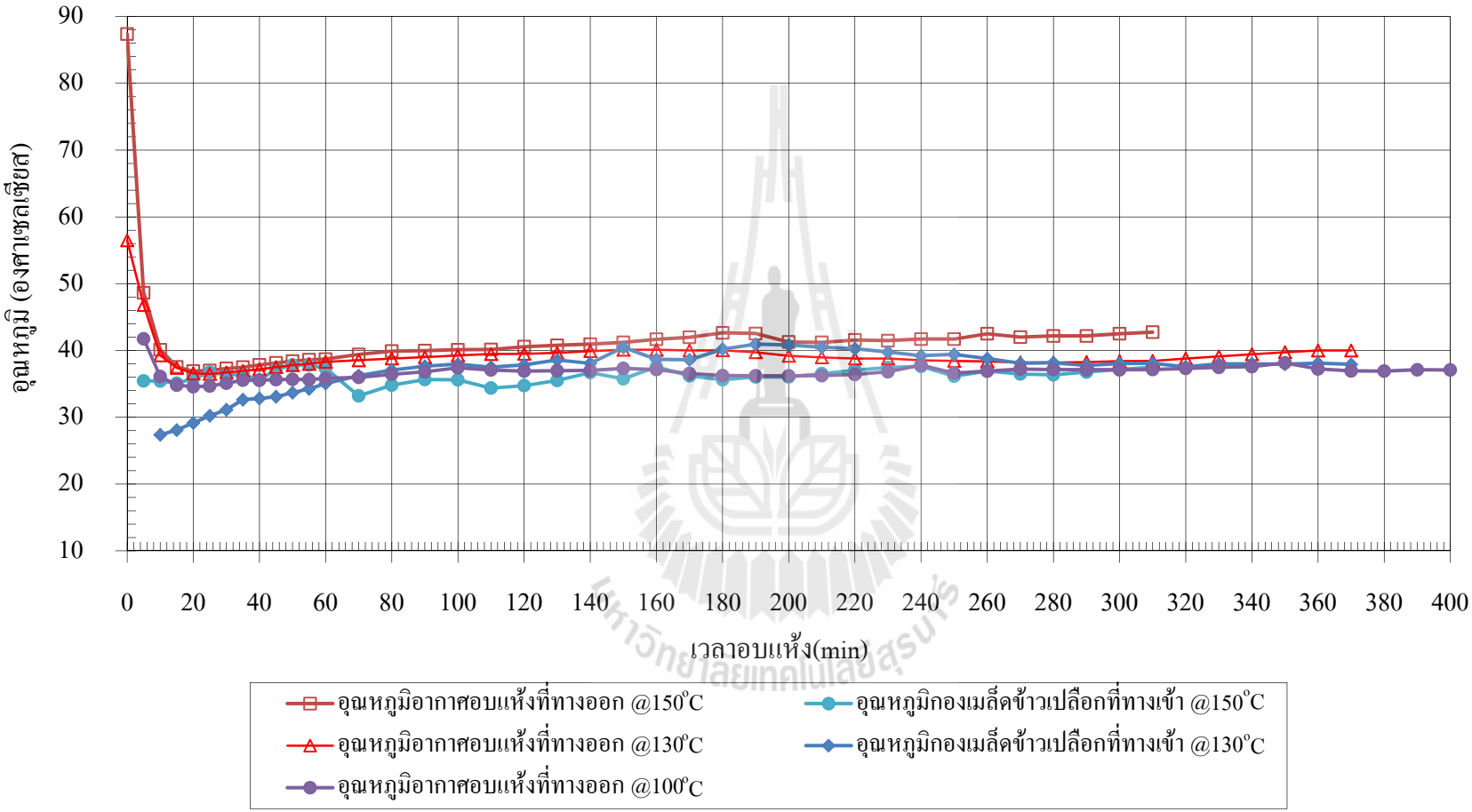

รูปที่ 4. 18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมกับเวลาในการอบแห้งครั้งที่ 1, 2 และ 3 @ T = 130 °C



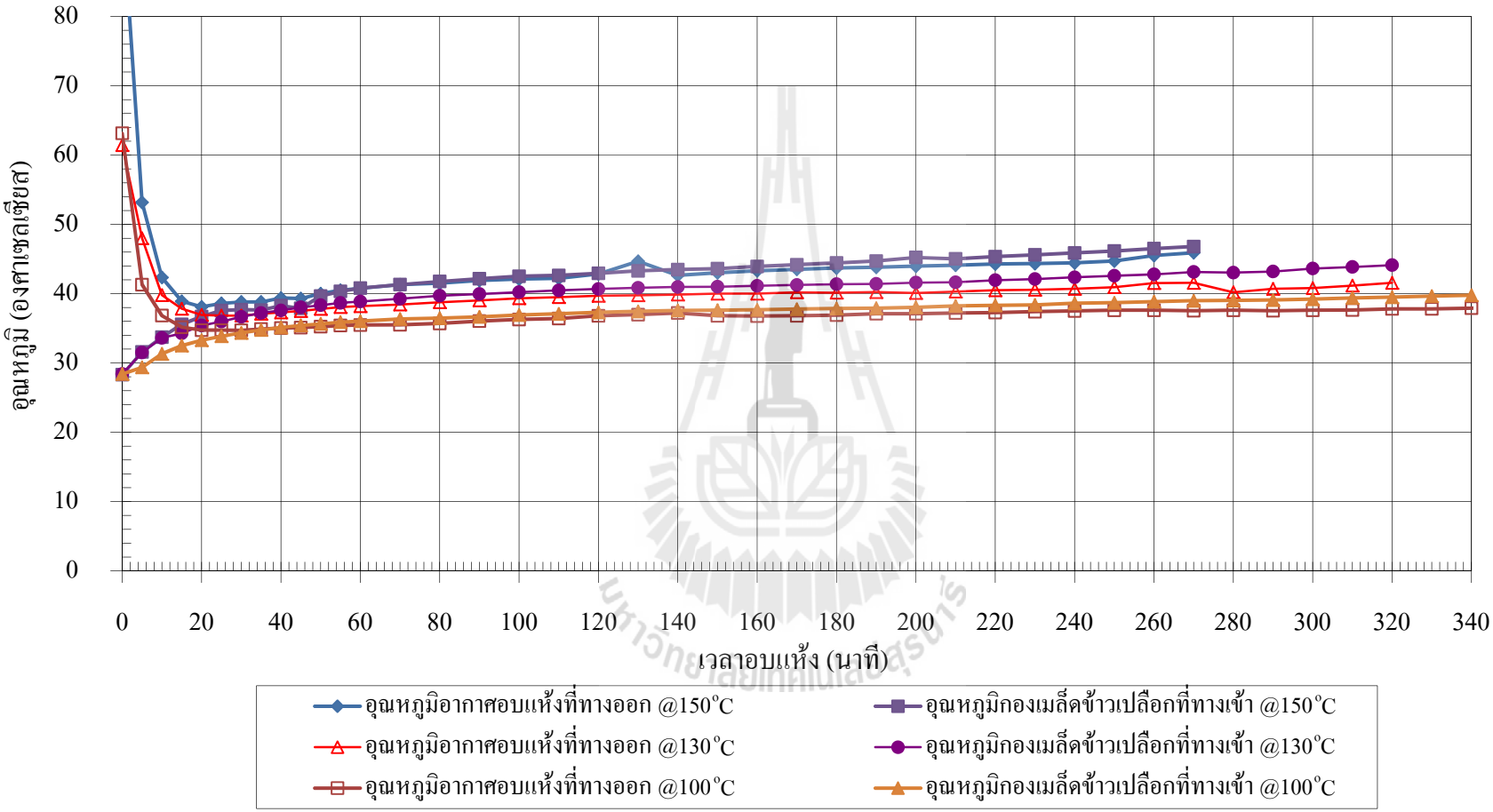

รูปที่ 4. 19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้งที่ทางออกกับเวลาในการอบแห้งครั้งที่ 1, 2 และ 3 @ T = 150 °C



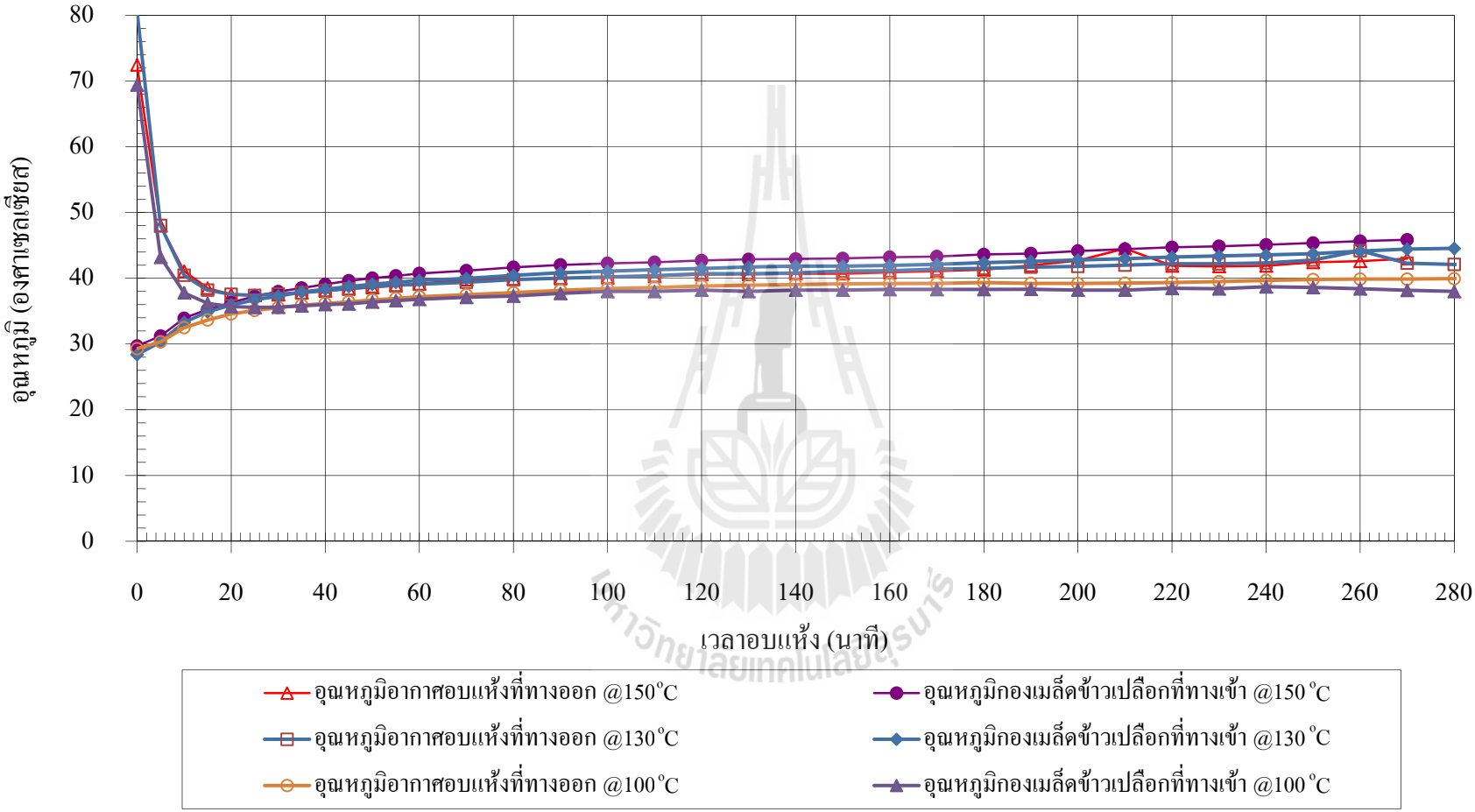

รูปที่ 4. 20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมกับเวลาในการอบแห้งครั้งที่ 1, 2 และ 3 @ T = 150 °C




รูปที่ 4. 21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่ทางออกและกองข้าวเปลือกกับเวลาในการอบแห้ง ครั้งที่ 1



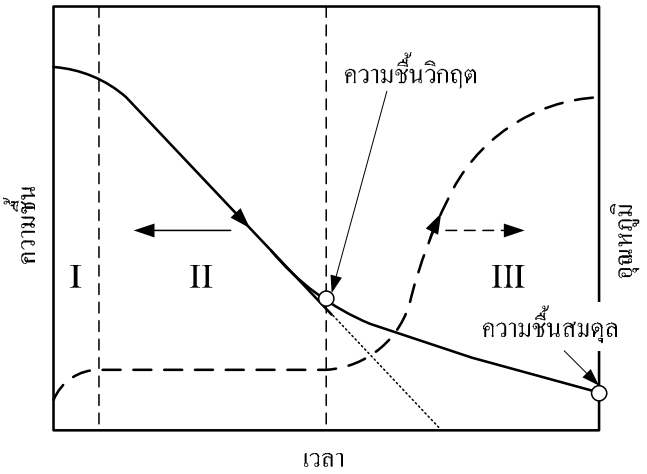

รูปที่ 4. 22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่ทางออกและกองเมล็ดข้าวเปลือกกับเวลาในการอบแห้ง ครั้งที่ 2



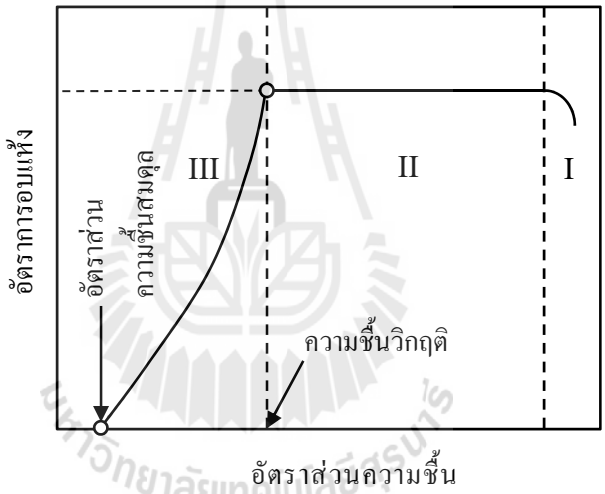

รูปที่ 4. 23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่ทางออกและกองเมล็ดข้าวเปลือกกับเวลาในการอบแห้ง ครั้งที่ 3

เส้นโค้งทั้ง 4 แบบที่ได้นำเสนอ เป็นเส้นโค้งที่มักนำมาใช้ในการแสดงผลการทดลองอบแห้ง เมื่อพิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของวัสดุอบแห้งกับเวลาโดยทั่วไป ดังแสดงในรูปที่ 4.24 (ก) ในช่วงที่ I เป็นช่วงเวลาที่วัสดุค่อย ๆ เพิ่มอุณหภูมิขึ้น จนมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง (Wet-bulb temperature, $t_w$) ซึ่งเรียกช่วงนี้ว่า ช่วงการให้ความร้อนเบื้องต้นแก่วัสดุ ส่วนในช่วงที่ II อุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าคงที่ประมาณ $t_w$ ตราบใดที่ยังมีความชื้นอยู่ในรูปของน้ำที่ผิวของวัสดุ ความร้อนที่วัสดุได้รับทั้งหมดจะถูกใช้ในการระเหยความชื้นเท่านั้น จากกราฟจะเห็นว่าความชื้นเฉลี่ย (M) ของวัสดุจะลดลงเป็นสัดส่วนกับเวลา ดังนั้นความเร็วของการระเหยจะมีค่าคงที่ โดยเรียกช่วงนี้ว่า ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant rate period of drying) ในช่วงที่ III ความชื้นในรูปของน้ำที่ผิวของวัสดุจะระเหยหมดไป โดยที่ความชื้น เฉลี่ยของวัสดุจะมีค่าต่ำกว่าความชื้นวิกฤต $M_c$ (critical moisture content) ทำให้การถ่ายเทความชื้นจากภายในของวัสดุเกิดขึ้นไม่ทันกับการระเหยของความชื้นที่ผิวของวัสดุ ผิวของวัสดุจะอยู่ในสภาพที่แห้งกว่าและอุณหภูมิของวัสดุจะเริ่มสูงขึ้น ในขณะที่เกรเดียนท์ความชื้นในเมล็ดข้าวลดลงนั้น ความเร็วในการอบแห้งจะค่อย ๆ ลดลงด้วย และการอบแห้งจะสิ้นสุดลงเมื่อความชื้นลดลงถึงค่าความชื้นสมดุล $M_e$ (Equilibrium moisture content) ซึ่งจะเรียกช่วงนี้ว่า ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate period of drying)

เมื่อเปรียบเทียบเส้นโค้ง ความชื้น-เวลา และอุณหภูมิ-เวลา ที่ได้จากการทดลอง พบว่า ช่วงการให้ความร้อนเบื้องต้นแก่วัสดุ อยู่ในช่วง 20 นาทีแรกของการทดลอง หรือ 20 รอบ (วินาที)แรกที่เมล็ดข้าวเปลือกอยู่ในส่วนอบแห้ง (สัมผัสอากาศร้อน) และหลังจาก 20 นาทีผ่านไปจะเข้าสู่ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ โดยที่เส้นโค้งอุณหภูมิมีค่าค่อนข้างคงที่ และเส้นโค้งการอบแห้งลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่เส้นโค้งของการทดลองไม่ปรากฏช่วงที่ 3 หรือช่วงการอัตราการอบแห้งลดลง ที่ชัดเจน เมื่อพิจารณาเส้นโค้งลักษณะเฉพาะของการการอบแห้ง (รูปที่ 4.11) จะเกิดจุดเปลี่ยนความโค้งที่ 17%d.b. และเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นโค้งลักษณะเฉพาะของการอบแห้งทั่วไปในรูปที่ 4.24 (ข) แล้วจะพบว่าที่อัตราส่วนความชื้นที่จุดเปลี่ยนความโค้งนี้น่าจะเป็นความชื้นวิกฤต โดยวิวัฒน์ และคณะ (2548) ได้ยกตัวอย่างความชื้นวิกฤติของวัสดุเม็ดและผงในสภาพกองสุมอยู่จะมีความชื้นวิกฤติในช่วง 15 – 20%d.b. แต่ถ้าหากถูกอบแห้งในสภาพกระจายในลมร้อน หรือถูกกวนผสม ค่าความชื้นวิกฤติจะลดลง 1.0 – 0.5% ดังนั้น การทดลองอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบอิสระนี้ เมื่อพิจารณาตามเส้นโค้งลักษณะเฉพาะแล้วจะได้ความชื้นวิกฤติที่ 17%d.b. หรือ ประมาณ 15%w.b.




(ก) ช่วงเวลา 3 ระยะของการอบแห้ง




(ข) เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง

รูปที่ 4. 24 ลักษณะเฉพาะของการอบแห้งภายใต้เงื่อนไขการอบแห้งคงที่ (วิวัฒน์ และคณะ, 2548)

### 4.7 ผลการทดสอบคุณภาพข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง

ข้าวเปลือกหลังการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ สามารถวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพที่มีคุณภาพของข้าวสาร ด้วยการหาปริมาณต้นข้าวในรูปของร้อยละต้นข้าว(% Head Rice Yield, HRY) และความขาวของเมล็ดข้าวสารในรูปดัชนีความขาว (White index)แล้วนำไปเทียบกับข้าวมาตรฐาน ซึ่งได้ผลดังนี้

### 4.7.1 ปริมาณต้นข้าวหลังการอบแห้ง

การคำนวณหาร้อยละต้นข้าว สามารถคำนวณหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\%HRY = (\text{น้ำหนักต้นข้าว}/\text{น้ำหนักข้าวเปลือก})*100\% \quad (4.3)$$

นอกจากนี้ยังได้คำนวณร้อยละแกลบและข้าวกล้องตามสมการดังนี้

$$\%Husk = (\text{น้ำหนักข้าวเปลือก} - \text{น้ำหนักข้าวกล้อง})/(\text{น้ำหนักข้าวเปลือก})*100\% \quad (4.4)$$

$$\%BRY = (\text{น้ำหนักข้าวกล้อง}/\text{น้ำหนักข้าวเปลือก})*100\% \quad (4.5)$$

ตารางที่ 4. 2 ข้อมูลปริมาณร้อยละต้นข้าวของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ

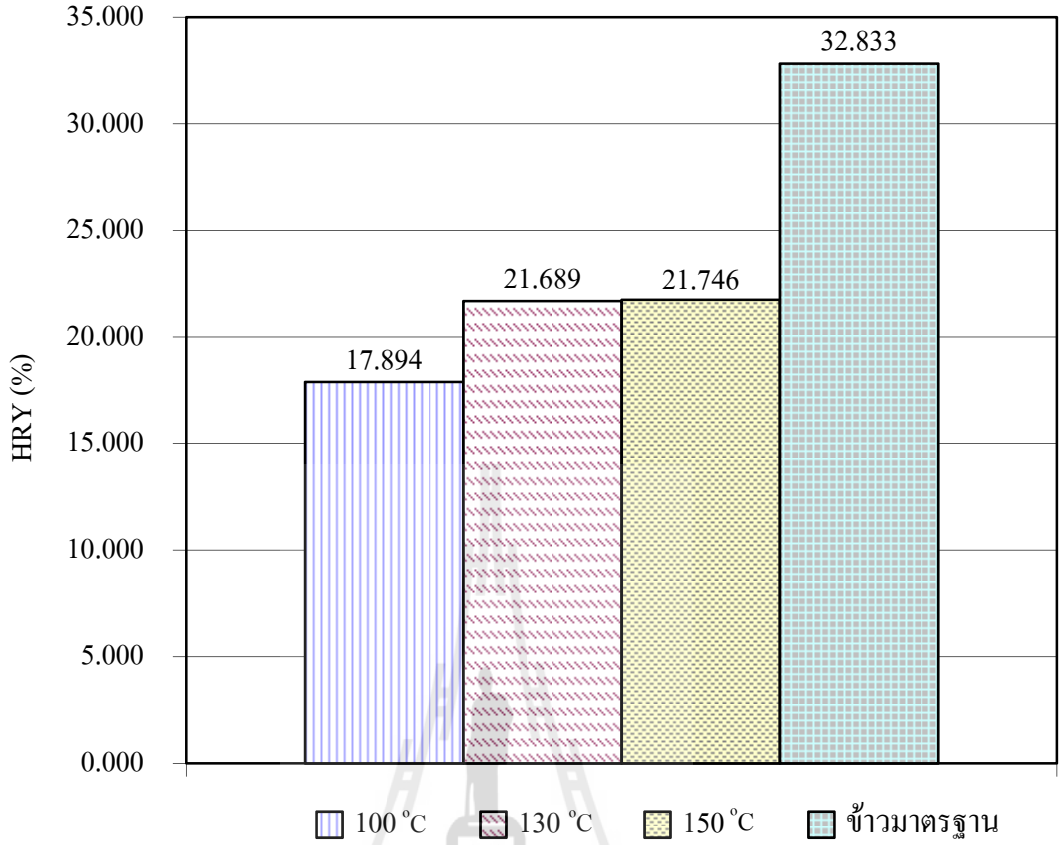
| การทดสอบ | มวลข้าวทดลอง (กรัม) | ข้าวกล้อง (กรัม) | ปลายข้าวกล้อง (กรัม) | ต้นข้าว (กรัม) | ปลายข้าวขาว (กรัม) | % HRY | ค่าเฉลี่ย % HRY |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **การทดลองอบแห้งที่ความเร็ว 2m/s อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 100 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1** | | | | | | | |
| ครั้งที่ 1 | 91.21 | 28.24 | 42.40 | 16.37 | 9.55 | 17.948 | 17.383 |
| ครั้งที่ 2 | 91.92 | 26.60 | 44.70 | 15.46 | 8.72 | 16.819 | |
| **การทดลองอบแห้งที่ความเร็ว 2m/s อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 100 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 2** | | | | | | | |
| ครั้งที่ 1 | 92.79 | 31.27 | 40.98 | 16.32 | 11.97 | 17.588 | 17.544 |
| ครั้งที่ 2 | 92.91 | 31.18 | 40.38 | 16.26 | 11.97 | 17.501 | |
| **การทดลองอบแห้งที่ความเร็ว 2m/s อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 100 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 3** | | | | | | | |
| ครั้งที่ 1 | 93.91 | 32.77 | 41.44 | 17.81 | 12.04 | 18.965 | 18.756 |
| ครั้งที่ 2 | 94.09 | 32.58 | 40.60 | 17.45 | 12.09 | 18.546 | |
| **การทดลองอบแห้งที่ความเร็ว 2m/s อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 130 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1** | | | | | | | |
| ครั้งที่ 1 | 92.72 | 33.65 | 38.58 | 19.28 | 11.21 | 20.794 | 20.412 |
| ครั้งที่ 2 | 92.61 | 33.62 | 38.41 | 18.55 | 11.87 | 20.030 | |
| **การทดลองอบแห้งที่ความเร็ว 2m/s อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 130 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 2** | | | | | | | |
| ครั้งที่ 1 | 96.65 | 38.02 | 37.29 | 21.57 | 13.03 | 22.318 | 22.139 |
| ครั้งที่ 2 | 94.90 | 37.04 | 37.24 | 20.84 | 12.85 | 21.960 | |

ตารางที่ 4. 3 ข้อมูลปริมาณร้อยละต้นข้าวของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ (ต่อ)

| การทดสอบ | มวลข้าวทดลอง (กรัม) | ข้าวกล้อง (กรัม) | ปลายข้าวกล้อง (กรัม) | ต้นข้าว (กรัม) | ปลายข้าวขาว (กรัม) | % HRY | ค่าเฉลี่ย % HRY |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| การทดลองอบแห้งที่ความเร็ว 2m/s อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 130 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 3 | | | | | | | |
| ครั้งที่ 1 | 95.63 | 37.18 | 37.02 | 22.07 | 11.82 | 23.079 | 22.515 |
| ครั้งที่ 2 | 95.12 | 37.21 | 37.33 | 20.88 | 13.12 | 21.951 | |
| การทดลองอบแห้งที่ความเร็ว 2m/s อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 150 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1 | | | | | | | |
| ครั้งที่ 1 | 93.30 | 34.86 | 37.38 | 19.18 | 12.47 | 20.557 | 21.447 |
| ครั้งที่ 2 | 92.54 | 38.02 | 34.44 | 20.67 | 13.83 | 22.336 | |
| การทดลองอบแห้งที่ความเร็ว 2m/s อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 150 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 2 | | | | | | | |
| ครั้งที่ 1 | 92.97 | 37.23 | 35.13 | 20.47 | 13.38 | 22.018 | 21.881 |
| ครั้งที่ 2 | 92.21 | 36.01 | 35.86 | 20.05 | 12.71 | 21.744 | |
| การทดลองอบแห้งที่ความเร็ว 2m/s อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 150 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 3 | | | | | | | |
| ครั้งที่ 1 | 94.33 | 38.83 | 35.17 | 20.6 | 14.49 | 21.838 | 21.910 |
| ครั้งที่ 2 | 94.58 | 38.35 | 35.89 | 20.79 | 14.00 | 21.981 | |

ตารางที่ 4. 4 ข้อมูลปริมาณร้อยละต้นข้าวที่การอบแห้งข้าวมาตรฐาน

| การทดสอบ | มวลข้าวทดลอง (กรัม) | ข้าวกล้อง (กรัม) | ปลายข้าวกล้อง (กรัม) | ต้นข้าว (กรัม) | ปลายข้าวขาว (กรัม) | % HRY | ค่าเฉลี่ย % HRY |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| การทดลองอบแห้งข้าวมาตรฐานในอุโมงค์ลม | | | | | | | |
| ครั้งที่ 1 | 95.01 | 67.00 | 6.67 | 31.04 | 29.84 | 32.670 | 32.833 |
| ครั้งที่ 2 | 94.04 | 66.24 | 6.85 | 31.03 | 28.85 | 32.997 | |




รูปที่ 4. 25 ปริมาณต้นข้าวที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 100, 130 และ 150 องศาเซลเซียส เทียบกับข้าวมาตรฐาน

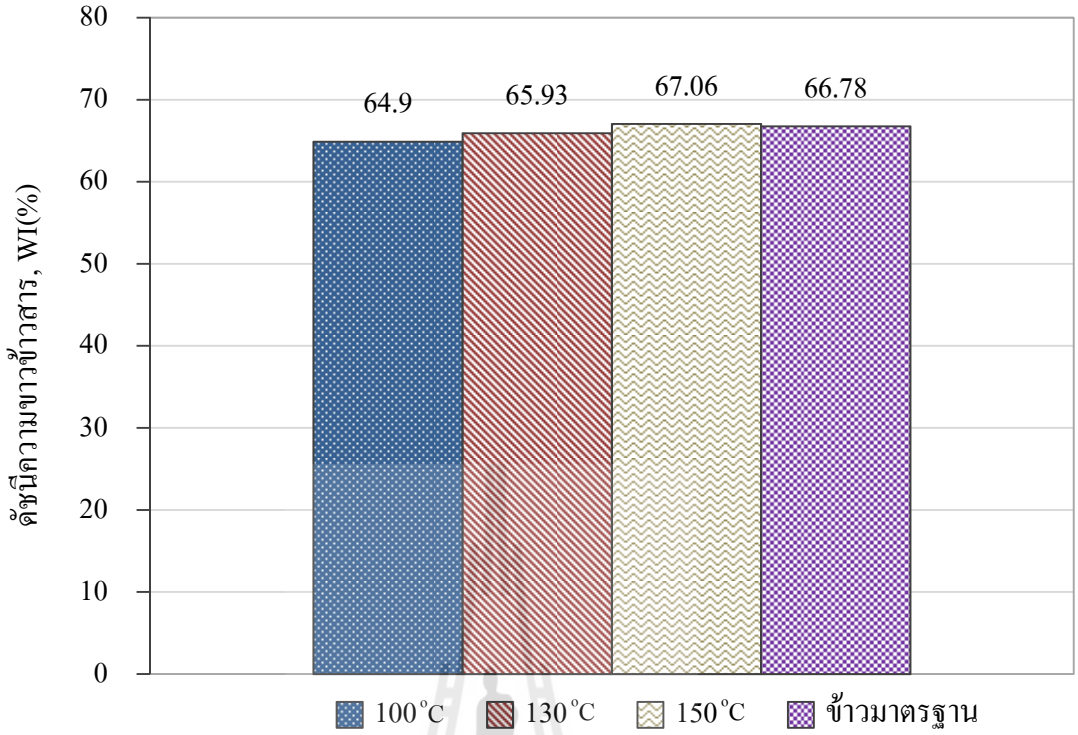
### 4.7.2 ดัชนีความขาวของข้าวสารหลังการอบแห้ง

ในการวิเคราะห์ค่าความขาวของข้าวสารที่ขัดสี จากเครื่องมือทดสอบสีให้ค่าตามมาตรฐานสี L*a*b* โดยค่า L* แทนสว่าง-มืด, a* แทนแดง-เขียว, b* แทนเหลือง-น้ำเงิน ดังนั้นจึงต้องมีสมการเพื่อวิเคราะห์ผลของความสว่างและสีต่าง ๆ ที่มีผลต่อความขาวของวัสดุซึ่งอยู่ในรูปดัชนีความขาว (whiteness index, *WI*), (Bolin & Huxsoll, 1991) ตามสมการดังนี้

$$WI = 100 - \sqrt{\left(100 - L^*\right)^2 + a^{*2} + b^{*2}} \qquad (4.\ 6)$$

ตารางที่ 4. 5 ข้อมูลดัชนีความขาวของข้าวสารที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระและข้าวมาตรฐาน

| อุณหภูมิอากาศอบแห้ง | L | a | b | %WI | เฉลี่ย |
|---|---|---|---|---|---|
| 100 °C | 68.7 | -4.48 | 13.36 | 65.67 | 64.9 |
| | 66.5 | -4.09 | 14.2 | 63.39 | |
| | 67.64 | -3.99 | 12.8 | 64.97 | |
| | 67.03 | -3.91 | 12.75 | 64.44 | |
| | 65.13 | -3.77 | 12.03 | 62.92 | |
| | 70.9 | -4.28 | 12.62 | 67.99 | |
| 130 °C | 70.21 | -4.52 | 12.7 | 67.30 | 65.93 |
| | 68.96 | -4.36 | 12.93 | 66.09 | |
| | 67.29 | -4.05 | 12.53 | 64.74 | |
| | 67.5 | -3.95 | 13.33 | 64.65 | |
| | 67.62 | -4.04 | 11.99 | 65.24 | |
| | 70.1 | -4.23 | 11.78 | 67.59 | |
| 150 °C | 66.93 | -4.31 | 12.99 | 64.21 | 67.06 |
| | 72.31 | -4.72 | 12.6 | 69.21 | |
| | 68.28 | -4.31 | 11.54 | 65.97 | |
| | 69.33 | -4.19 | 12.84 | 66.49 | |
| | 71.14 | -4.06 | 13.16 | 68.02 | |
| | 71.19 | -4.29 | 12.19 | 68.42 | |
| ข้าวมาตรฐาน | 69.07 | -3.94 | 13.03 | 66.21 | 66.78 |
| | 70.37 | -4.08 | 13.1 | 67.35 | |




รูปที่ 4. 26 ดัชนีความขาวข้าวสารที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 100, 130 และ 150 องศาเซลเซียส เทียบกับข้าวมาตรฐาน

คุณภาพข้าวเปลือกหลังการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ จะได้ปริมาณร้อยละต้นข้าวต่ำกว่าในทุกกรณีเมื่อเทียบกับข้าวมาตรฐานที่อบแห้งด้วยอุณหภูมิใกล้เคียง สิ่งแวดล้อมแต่ได้ค่าดัชนีความขาวข้าวสารที่ใกล้เคียงกับข้าวมาตรฐาน เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 100 องศาเซลเซียส ได้ปริมาณร้อยละต้นข้าวเท่ากับ 17.89 และดัชนีความขาวข้าวสารเท่ากับร้อยละ 64.9 ในขณะที่อุณหภูมิอากาศอบแห้งที่ 130 องศาเซลเซียส ได้ปริมาณร้อยละต้นข้าวเท่ากับ 21.86 ซึ่งใกล้เคียงกับอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ส่วนดัชนีความขาวข้าวสาร เท่ากับร้อยละ 65.93 และ 67.06 ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้งเท่ากับ 130 และ 150 องศาเซลเซียส ตามลำดับ สาเหตุที่ปริมาณร้อยละต้นข้าวของข้าวเปลือกหลังการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระต่ำมาก เมื่อเทียบกับข้าวมาตรฐานนั้น เนื่องจากความชื้นสุดท้ายเมื่อสิ้นสุดการอบแห้งในแต่ละการทดลองมีค่าต่ำมาก (11 – 12%w.b.) ในขณะที่ ข้าวมาตรฐานสามารถควบคุมความชื้นสุดท้ายได้ใกล้เคียง 14%w.b. อีกทั้ง ความชื้นที่ลดลงมากและรวดเร็ว ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างความชื้นที่ผิวกับภายในเมล็ดสูง ซึ่งทำให้เกิดการรอยร้าวหรือการแตกหักภายในเมล็ดข้าวเปลือก สำหรับปริมาณร้อยละต้นข้าวของข้าวมาตรฐานมีค่าต่ำมาก (32.8%) ถึงแม้จะใช้อุณหภูมิต่ำในการอบแห้งก็

ตาม แต่เนื่องจากใช้ความเร็วอากาศในการอบแห้งสูง ทำให้ความชื้นลดลงรวดเร็ว และเป็นการอบแห้งรวดเดียว ไม่มีการพักหรือทำ tempering ซึ่งทำเมล็ดข้าวแตกหักเนื่องจากเกรเดียนท์ความชื้นเช่นเดียวกัน นอกจากนี้ สาเหตุประกอบอื่น ๆ ที่ทำให้ปริมาณร้อยละต้นข้าวสำหรับการทดลองที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 100 องศาเซลเซียส ต่ำกว่าอุณหภูมิ 130 และ 150 องศาเซลเซียส ซึ่งปกติการใช้อุณหภูมิสูงน่าจะทำให้คุณภาพของข้าวลดลง เนื่องจากอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกขณะอบแห้งสูงมากกว่า แต่ในการทดลองนี้ที่อุณหภูมิต่ำกลับทำให้คุณภาพข้าวเปลือกทั้งปริมาณร้อยละต้นข้าวและดัชนีความขาว มีค่าต่ำกว่าการทดลองที่ใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งสูง อาจเนื่องมาจากการไหลแบบตกกระทบของข้าวเปลือกในถังพักและกระพ้อลำเลียงในแต่ละรอบของการอบแห้ง และจำนวนรอบที่ใช้มากกว่า ทำให้สัมผัสกับลมร้อนเป็นจำนวนรอบและเวลาที่มากกว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิ 130 และ 150 องศาเซลเซียส

## 4.8 สรุปผลการทดลอง

การทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระขนาดที่ 1 แบบต่อเนื่อง การใช้อุณหภูมิในช่วง 100 – 150 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการอบแห้งน้อย และได้อัตราการอบแห้งอยู่ในช่วง 2.53 – 3.78%d.b. ต่อชั่วโมง สำหรับปัจจัยแวดล้อมโดยเฉพาะความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมส่งผลต่อการคายน้ำของเมล็ดข้าวเปลือก โดยที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมสูงทำให้อัตราการอบแห้งลดลง แต่คุณภาพหลังการอบแห้งโดยเฉพาะปริมาณร้อยละต้นข้าวต่ำกว่าข้าวมาตรฐาน เนื่องจากความชื้นสุดท้ายมีค่าต่ำมาก และความชื้นลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการแตกร้าวเนื่องจากเกรเดียนท์ความชื้นภายในเมล็ดข้าวเปลือก สำหรับดัชนีความขาวข้าวสารอยู่ในเกณฑ์ใกล้เคียงกับข้าวมาตรฐาน เนื่องจากอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกระหว่างทำการทดลองไม่สูงมากนัก

# บทที่ 5
# รหัสวิธีทางพันธุกรรมเพื่อคัดเลือกแบบจำลองการอบแห้งชั้นบาง

## 5.1 บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการค้นหาแบบจำลองการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมกับการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระ โดยทำการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 100, 130 และ 150°C ใช้ความเร็วของอากาศอบแห้ง 2 m/s และระยะเวลาพักข้าวเปลือก 1 นาทีต่อรอบการอบแห้ง จากนั้นใช้รหัสวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) เพื่อค้นหาค่าปัจจัยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางในรูปแบบต่างๆ 9 รูปแบบ ที่สอดคล้องกับผลการทดลองอบแห้งมากที่สุด ทั้งนี้โดยใช้ GA Toolbox ของโปรแกรม MATLAB จากการวิเคราะห์เชิงสถิติแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองอบแห้งชั้นบางของ Midilli เหมาะสมที่สุดในกรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมที่มีค่าสูง และแบบจำลองอบแห้งชั้นบางแบบ Two-term exponential เหมาะสมที่สุดในกรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมที่มีค่าต่ำ

## 5.2 บทนำ

การจำลองกระบวนการอบแห้งเป็นสิ่งที่สำคัญต่อการวิจัยและพัฒนาเครื่องอบแห้ง โดยสมการทำนายความชื้นภายในวัสดุเป็นหัวใจสำคัญของระบบสมการอบแห้ง และเนื่องจากข้าวเปลือกเป็นวัสดุทางชีวภาพ ที่มีความซับซ้อนในกระบวนการแพร่และการระเหยน้ำภายในเมล็ด เช่นมีทั้งการแพร่ของน้ำในสภาพของเหลวและไอ การดูดซึมด้วยระบบคาปิลารี และการไหลแบบโมเลกุลอิสระ (Knudsen flow) ดังนั้นการสร้างสมการทำนายความชื้นภายในข้าวเปลือก จึงมักใช้ผลการทดลองอบแห้งเป็นข้อมูลในการสร้างสมการ โดยเปรียบเทียบผลการทดลองอบแห้งเข้ากับแบบจำลองอบแห้งชั้นบาง (Thin Layer Drying Model) ซึ่งมีหลายรูปแบบ ดังแสดงในตารางที่ 5. 1

การเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองอบแห้งชั้นบาง ก็คือการหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองอบแห้งชั้นบาง ซึ่งทำให้แบบจำลองสามารถทำนายลักษณะการลดลงของความชื้นข้าวเปลือกได้สอดคล้องกับผลการทดลองมากที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่ากระบวนการดังกล่าว คือปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization Problem) นั่นเอง ซึ่งในปัจจุบันเทคนิคการค้นหาคำตอบด้วยรหัสวิธีเชิงพันธุกรรม (genetic algorithm) กำลังได้รับการประยุกต์ใช้อย่างมากมายในหลากหลายงาน เนื่องจากเป็นที่ยอมรับว่าสามารถหลีกเลี่ยงคำตอบแบบวงแคบเฉพาะถิ่น (local

optimum) และสามารถค้นหาคำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้าง (near global optimum) ได้

เพื่อการวิจัยและพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระในขั้นสูงต่อไป งานวิจัยนี้จึงทำการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระซึ่งเป็นการอบแห้งแบบมีการพักในระหว่างกระบวนการ จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับแบบจำลองอบแห้งชั้นบาง โดยประยุกต์ใช้รหัสวิธีเชิงพันธุกรรมในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละแบบจำลอง แล้วใช้การวิเคราะห์เชิงสถิติเพื่อเลือกแบบจำลองอบแห้งชั้นผิวบางที่เหมาะสมซึ่งแบบจำลองที่ได้ซ้อนทับกับผลการทดลองแบบมีการพักได้ดี แสดงถึงความเหมาะสมของแบบจำลองในการทำนายผลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระ

## 5.3 สมการอบแห้งชั้นบาง (Thin layer equation)

การจำลองการอบแห้งด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้น เป็นสิ่งที่สำคัญต่อการวิจัยและพัฒนาเครื่องอบแห้ง การอบแห้งชั้นบางเป็นรูปแบบการทดลองที่นิยมใช้ในการทดสอบแบบจำลอง ซึ่งสมการอบแห้งชั้นบางในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงมี 3 แบบ คือ สมการอบแห้งทางทฤษฎี (Theoretical Model) สมการอบแห้งกึ่งทฤษฎี (Semi-empirical Model) และสมการอบแห้งเอมไพริคเคิล (Empirical Model)

ในเชิงทฤษฎี จากกลไกการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงดังกล่าวเมื่อคิดแบบรวบยอด อัตราการถ่ายเทมวลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่แปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับเกรเดียนร์ ความเข้มข้นของความชื้น จึงสามารถเขียนได้ว่า

$$\dot{m}_w = -AD\frac{\partial C}{\partial x} \qquad (5.1)$$

เมื่อ $\dot{m}_w$ คือ อัตราการถ่ายเทมวลน้ำ, kg/h

$A$ คือพื้นที่การถ่ายเทมวล, $m^2$

$C$ คือความเข้มข้นของความชื้น, $kg/m^3$

$x$ คือระยะ, m

$D$ คือสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น, $m^2/h$

จากกฎทรงมวล อัตราการเคลื่อนที่ของมวลเข้าปริมาตรบังคับจะเท่ากับผลรวมของอัตราการเปลี่ยนแปลงของมวลภายในปริมาตรบังคับและอัตราการเคลื่อนที่ของมวลออกจากปริมาตรบังคับ ดังนั้น

$$-AD\frac{\partial C}{\partial x} = A\left(\frac{\partial C}{\partial t}\right)dx - AD\frac{\partial C}{dx} - \left[\frac{\partial\left(AD\dfrac{\partial C}{\partial x}\right)}{dx}\right]dx$$

หรือ

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial\left(D\dfrac{\partial C}{\partial x}\right)}{\partial x} \qquad (5.2)$$

เมื่อหารสมการที่ (5.2) ด้วยความหนาแน่นของวัสดุ จะได้

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial\left(D\dfrac{\partial M}{\partial x}\right)}{dx} \qquad (5.3)$$

เมื่อ $M$ คือความชื้น, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง (d.b.)

สำหรับเมล็ดข้าวเปลือก สามารถพิจารณาเป็นวัสดุทรงกระบอกหรือทรงกลมก็ได้ โดยพิจารณาว่ามีการถ่ายเทมวลในแนวรัศมี และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะขึ้นอยู่กับความชื้นของวัสดุ โดยจะมีค่าคงที่ในช่วงความชื้นของวัสดุที่ไม่กว้างมากนัก เพื่อให้เกิดความง่ายต่อการแก้สมการ จะสามารถเขียนสมการที่ (5.3) ในระบบพิกัดเชิงขั้วสำหรับ 1 มิติ ได้ว่า

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D\left(\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \left(\frac{c}{r}\right)\frac{\partial M}{\partial r}\right) \qquad (5.4)$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เมื่อ $c = 1$ สำหรับการแพร่ความชื้นในแนวรัศมีของวัสดุทรงกระบอกยาวมาก

$c = 2$ สำหรับการแพร่ความชื้นในแนวรัศมีของวัสดุทรงกลม

$r$ คือระยะในแนวรัศมี, m

โดยที่สภาวะเริ่มต้นและสภาวะขอบเขตกำหนดว่า

$$M(r,0) = M_{in} \tag{5. 5}$$

$$M(r_0,t) = M_e \tag{5. 6}$$

เมื่อ $M_{in}$ คือความชื้นเริ่มต้น, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง (d.b.)

และกำหนดให้ $MR = \dfrac{M - M_e}{M_{in} - M_e}$

คำตอบของสมการที่ (5.4) ที่สอดคล้องกับสภาวะเริ่มต้นและสภาวะขอบเขตที่กำหนด สำหรับวัสดุทรงกลมคือ

$$\overline{MR} = \left(\frac{6}{\pi^2}\right)\sum_{p=1}^{\infty}\left(1/\,p^2\right)\exp\left(\frac{-p^2\pi^2X^2}{9}\right) \tag{5. 7}$$

เมื่อ $X = \left(\dfrac{A}{V}\right)(Dt)^{1/2}$

$A$ คือพื้นที่ผิว, $m^2$

$V$ คือปริมาตร, $m^3$

สำหรับวัสดุทรงกระบอกยาวมาก คือ

$$\overline{MR} = \sum_{n=1}^{\infty} \left(4 / \lambda_n^2\right) \exp\left(\frac{-\lambda_n^2 X^2}{4}\right) \quad (5.8)$$

เมื่อ $\lambda_n$ คือรากของเบสเซลฟังก์ชันอันดับที่ศูนย์

สำหรับสมการอบแห้งกึ่งทฤษฎี เป็นการประยุกต์ใช้สมการทางทฤษฎีหรือสมการที่ (5.7) โดยถ้าคงไว้เพียงพจน์แรก จะได้

$$\overline{MR} = \left(\frac{6}{\pi^2}\right) \exp\left(-\frac{D\pi^2 t}{r_0^2}\right) \quad (5.9)$$

หรือ $$\overline{MR} = \left(\frac{6}{\pi^2}\right) \exp(-kt) \quad (5.10)$$

เมื่อ $r_0$ คือรัศมีของทรงกลม, m

$k$ คือค่าคงที่ของการอบแห้ง, $h^{-1}$

วิธีกึ่งทฤษฎีอีกประการหนึ่ง คือ การสร้างแบบจำลองการอบแห้งชั้นบางแบบง่ายๆ โดยใช้หลักการที่คล้ายกับกฎการเย็นตัวของ Newton โดยมีสมมุติฐานว่า เป็นการอบแห้งภายใต้สภาวะคงที่ ที่แปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างความชื้นของข้าวเปลือกและความชื้นสมดุล ซึ่งในวิธีนี้จะหาค่าคงที่การอบแห้งแทนค่าสัมประสิทธิการแพร่ความชื้น โดยใช้วิธีหาความสัมพันธ์จากข้อมูลการทดลอง และหาความสัมพันธ์ของค่าคงที่การอบแห้งกับเงื่อนไขการอบแห้ง

$$\frac{d\overline{M}}{dt} = -k\left(\overline{M} - M_e\right) \quad (5.11)$$

โดยสภาวะเริ่มต้นคือ

$$M(0) = M_{in} \quad (5.12)$$

จะได้คำตอบของสมการที่ (5.11) คือ

$$\overline{MR} = \exp(-kt) \tag{5. 13}$$

สมการการอบแห้งแบบเอมไพริคเคิล เป็นแบบจำลองการอบแห้งที่สร้างขึ้นให้สอดคล้องกับลักษณะการอบแห้งที่เปลี่ยนไป ซึ่งใช้ทำนายอัตราการอบแห้งได้ดี ตัวอย่างของแบบจำลองอบแห้งแบบเอมไพริคเคิล แสดงในตารางที่ 5.1

หากเปรียบเทียบสมการอบแห้งชั้นบางทั้ง 3 แบบแล้ว สมการอบแห้งทางทฤษฎีมีความยุ่งยากในการหาคำตอบของสมการ และค่าพารามิเตอร์มากกว่าแบบอื่นๆ จึงไม่เป็นที่นิยมใช้ ส่วนในแบบกึ่งทฤษฎีและแบบเอมไพริคเคิลก็สามารถทำนายการอบแห้งได้ดี แต่มีข้อเสียคือ การอบแห้งต้องตรงกับสภาวะการทดลองที่ใช้ในการสร้างสมการเท่านั้น

ตารางที่ 5. 1 แบบจำลองการอบแห้งชั้นบาง (Vivian, N. P., 2007)

| Name | Model equation |
|---|---|
| Newton | $MR = e^{-kt}$ |
| Page | $MR = e^{-kt^n}$ |
| Henderson and Pabis | $MR = ae^{-kt^n}$ |
| Logarithmic | $MR = a_0 + ae^{-kt}$ |
| Two-term exponential | $MR = a_1 e^{-k_1 t} + a_2 e^{-k_2 t}$ |
| Geometric | $MR = at^{-n}$ |
| Wang and Singh | $MR = 1 + a_1 t + a_2 t^2$ |
| Midilli | $MR = ae^{-kt^n} + bt$ |
| Diffusion approach | $MR = ae^{-kt} + (1-a)e^{-kbt}$ |

การเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองอบแห้งชั้นบางจากตารางที่ 5.1 โดยการหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองอบแห้งชั้นบาง ซึ่งแบบจำลองสามารถทำนายลักษณะการลดลงของความชื้นข้าวเปลือกที่สอดคล้องกับผลการทดลองมากที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่ากระบวนการดังกล่าว คือปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization Problem) นั่นเอง ซึ่งในปัจจุบันเทคนิคการค้นหาคำตอบด้วยรหัสวิธีเชิงพันธุกรรม (genetic algorithm) กำลังได้รับการประยุกต์ใช้อย่างมากมายในหลากหลายงาน เนื่องจากเป็นที่ยอมรับว่าสามารถหลีกเลี่ยงคำตอบ

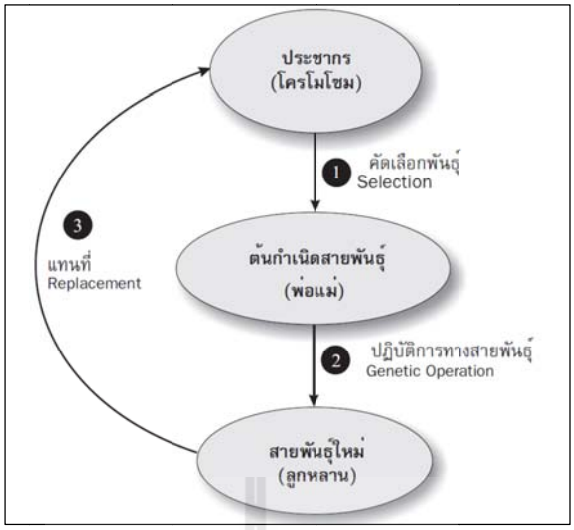
แบบวงแคบเฉพาะถิ่น (local optimum) และสามารถค้นหาคำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้าง (near global optimum) ได้

เพื่อการวิจัยและพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระในขั้นสูงต่อไป งานวิจัยนี้จึงทำการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระซึ่งเป็นการอบแห้งแบบมีการพักในระหว่างกระบวนการ จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับแบบจำลองอบแห้งชั้นบาง โดยประยุกต์ใช้รหัสวิธีพันธุกรรมในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละแบบจำลอง แล้วใช้การวิเคราะห์เชิงสถิติเพื่อเลือกแบบจำลองอบแห้งชั้นผิวบางที่เหมาะสม ซึ่งแบบจำลองที่ได้ซ้อนทับกับผลการทดลองแบบมีการพักได้ดี แสดงถึงความเหมาะสมของแบบจำลองในการทำนายผลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระ

## 5.4 การค้นหาคำตอบด้วยรหัสวิธีเชิงพันธุกรรม

รหัสวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) ใช้การเลียนแบบการคัดเลือกโดยธรรมชาติและปฏิบัติการทางสายพันธุ์ กับการค้นหาคำตอบให้โจทย์ปัญหา โดยพิจารณารูปแบบของปัญหาเลียนแบบประชากรในสังคม ซึ่งโดยปกติประชากรในสังคมจะถูกคัดเลือกและปรับเปลี่ยนพันธุกรรมเพื่อให้ได้ลูกหลานที่มีลักษณะเหมาะสมกับสภาวะแวดล้อมที่บีบบังคับ ดังนั้น โจทย์ปัญหาจะเปรียบได้กับแบบจำลองการอบแห้งชั้นบาง ผลการทดลองอบแห้งและฟังก์ชันวัตถุประสงค์เปรียบได้กับสิ่งแวดล้อมที่บีบบังคับ สำหรับประชากรเปรียบได้กับชุดค่าคงที่ของแบบจำลองนั้นๆ ซึ่งจะถูกคัดเลือกและปรับแปลงพันธุกรรมจนได้คำตอบของปัญหาที่ดีขึ้นเรื่อยๆ จากรุ่นหนึ่งไปสู่รุ่นหนึ่ง ทำให้แบบจำลองและผลการทดลองซ้อนทับกันมากขึ้นเรื่อยๆ

วัฏจักรของ GA ประกอบด้วย 3 กระบวนการที่สำคัญ คือการคัดเลือกสายพันธุ์, ปฏิบัติการทางสายพันธุ์ และการแทนที่ ดังรูปที่ 5.1




รูปที่ 5. 1 วัฏจักรของรหัสวิธีเชิงพันธุกรรม (อาทิตย์ ศรีแก้ว, 2552)

### 5.4.1 ขั้นตอนการทำงานของ GA

1. สร้างประชากรโดยการสุ่ม (Random) ตามจำนวนที่ต้องการ

2. ประเมินค่าประชากรของกลุ่มประชากรทั้งหมดที่สุ่มได้ จากหัวข้อที่ 1 ข้างต้นด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ในที่นี้ คือ ค่าน้อยที่สุด ของค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานระหว่างแบบจำลองและผลการทดลอง โดยที่ประชากร 1 คน ประกอบด้วย 1 โครโมโซมซึ่งแต่ละโครโมโซมแทนชุดค่าคงที่ของแบบจำลอง และยีนแต่ละตัวใน 1 โครโมโซม จะเป็นตัวแทนของค่าคงที่แต่ละพจน์ของแบบจำลอง

3. คำนวณหาค่าความเหมาะสมแล้วส่งกลับไปยัง GA

4. ใช้ค่าความเหมาะสมทำการคัดเลือกโครโมโซมบางกลุ่ม เพื่อนำมาเป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์ ซึ่งจะถูกใช้เป็นตัวแทนในการถ่ายทอดสายพันธุ์ให้กับรุ่นถัดไป

5. นำต้นกำเนิดสายพันธุ์มาทำการสร้างลูกหลาน ด้วยปฏิบัติการทางสายพันธุ์ โครโมโซมที่ได้ในขั้นตอนนี้ก็คือโครโมโซมลูกหลาน

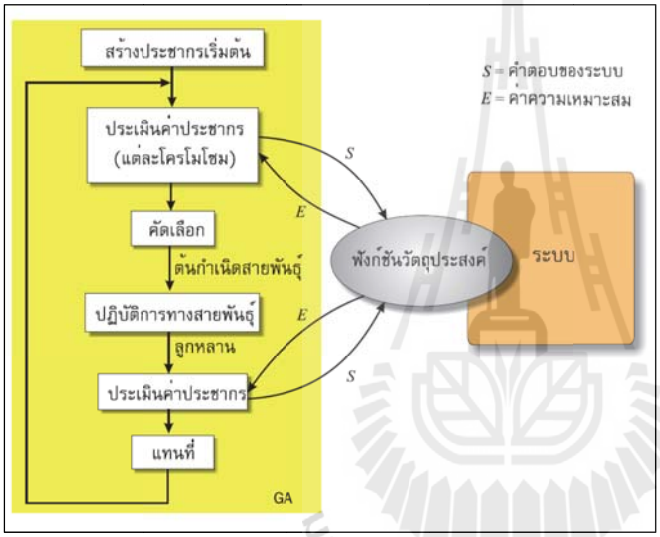
6. คำนวณค่าความเหมาะสมของโครโมโซมลูกหลาน โดยใช้ขั้นตอนเดียวกับข้อ 3

โครโมโซมในประชากรเดิมจะถูกแทนที่ด้วยลูกหลานที่ได้จากข้อ 5 ประชากรเพียงบางส่วนเท่านั้นที่จะถูกแทนที่ด้วยกลวิธีเฉพาะสำหรับขั้นตอนของการแทนที่โดยใช้ค่าความเหมาะสมในการตัดสิน

เริ่มต้นทำซ้ำจากขั้นตอนในข้อ 2 ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งได้ คำตอบที่ต้องการ คำตอบที่ได้

จะมาจากโครโมโซมที่ดีที่สุดในกลุ่มประชากรนั่นเอง โดยที่สามารถใช้ค่าจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อเป็นการประเมินว่าคำตอบที่ได้เป็นที่ต้องการ ซึ่งสามารถแสดงขั้นตอนดังรูปที่ 5.3

รหัสวิธีเชิงพันธุกรรมจะดำเนินการไปเรื่อย ทำให้พบคำตอบที่ดีขึ้น จากคำตอบวงแคบเฉพาะถิ่น (Local solution) ไปยังคำตอบวงกว้าง (Global solution) รหัสวิธีเชิงพันธุกรรมจะยุติเมื่อเงื่อนไขการค้นหาสอดคล้องกับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ โดยทั่วไปจะอาศัยเงื่อนไขเกี่ยวกับจำนวนรุ่นที่ต้องการ หรือค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ คำตอบที่ดีที่สุดที่พบคือโครโมโซมที่ดีที่สุดในกลุ่มของประชากร




รูปที่ 5. 2 ขั้นตอนของรหัสวิธีเชิงพันธุกรรม (อาทิตย์ ศรีแก้ว, 2552)

## 5.5 สมการการคำนวณที่เกี่ยวข้อง

### 5.5.1 การหาอัตราส่วนความชื้น

อัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio, MR) นิยามโดย

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \tag{5. 14}$$

โดยที่ $M$ คือ ความชื้นข้าวเปลือกที่เวลาใด

$M_0$ คือ ความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้น

$M_e$ คือ ความชื้นสมดุลของข้าวเปลือก

ความชื้นสมดุลหาได้จากสมการกึ่งทฤษฎี พัฒนาโดย Henderson (1952)

$$M_e = \frac{1}{100}\left[\frac{\ln(1-RH)}{(C_1 T_{abs})}\right]^{\frac{1}{C_2}} \quad (5.15)$$

โดยที่ $RH$ คือ ค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศอบแห้ง (ทศนิยม)

$T_{abs}$ คือ ค่าอุณหภูมิอากาศอบแห้งสัมบูรณ์

$C_1, C_2$ คือ ค่าคงที่การคายความชื้น สำหรับข้าวเปลือกมีค่าเท่ากับ -3.146x10-6 และ 2.464 ตามลำดับ (สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2540)

### 5.5.2 การคำนวณระยะเวลาในท่ออบแห้ง

เครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระ มีลักษณะการสัมผัสกันระหว่างข้าวเปลือกและอากาศอบแห้งแบบไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นการพิจารณาระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งจะพิจารณาจากระยะเวลาที่เมล็ดข้าว 1 เมล็ดสัมผัสอากาศร้อนจริง, $t_{resident}$ ตามสมการที่ (5.16)

$$t_{resident} = \left(N_{drying_pass} \times t_{resident_1pass}\right) \quad (5.16)$$

โดยที่ $N_{drying_pass}$ คือจำนวนรอบที่ข้าวเปลือกผ่านเข้าสู่ท่ออบแห้ง (รอบ) และ $t_{resident_1pass}$ คือ เวลาที่เมล็ดข้าว 1 เมล็ดอยู่ในท่ออบแห้ง ใน 1 รอบการอบแห้ง (วินาที)

เงื่อนไขที่ใช้ประเมินความเหมาะสม ของแบบจำลองอบแห้งชั้นบาง ประกอบด้วย 3 เงื่อนไข คือค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน $(e_s)$, ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ $(r)$ และ ค่าความแปรปรวน $(\chi^2)$ แต่ละเงื่อนไขมีนิยามดังต่อไปนี้ (Chapra, S. C. and Canel, R. P., 1989)

$$e_s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(MR_{pre,i} - MR_{\exp,i}\right)^2}{N - N_c}} \qquad (5.17)$$

$$r = \frac{N\sum_{i=1}^{N} MR_{pre,i}MR_{\exp,i} - \sum_{i=1}^{N} MR_{pre,i}\sum_{i=1}^{N} MR_{\exp,i}}{\sqrt{N\sum_{i=1}^{N}\left(MR_{pre,i}\right)^2 - \left(\sum_{i=1}^{N} MR_{pre,i}\right)^2}\sqrt{N\sum_{i=1}^{N}\left(MR_{\exp,i}\right)^2 - \left(\sum_{i=1}^{N} MR_{\exp,i}\right)^2}} \qquad (5.18)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(MR_{pre,i} - MR_{\exp,i}\right)^2}{N - N_c} \qquad (5.19)$$

โดยที่ $MR_{pre,i}$ คือ ค่าสัดส่วนความชื้นที่คำนวณได้จากสมการอบแห้งชั้นบาง, $MR_{\exp,i}$ คือ ค่าสัดส่วนความชื้นที่ได้จากผลการทดลอง, $N$ คือ จำนวนจุดข้อมูลการทดลอง และ $N_c$ คือ จำนวนค่าคงที่ในแบบจำลองอบแห้งชั้นบาง

## 5.6 วิธีการดำเนินงานวิจัย

### 5.6.1 ฟังก์ชั่นค่าความเหมาะสมและเงื่อนไขรหัสวิธีพันธุกรรม

ผู้วิจัยเลือกใช้ Genetic Algorithm Tool ของโปรแกรม MATLAB ซึ่งอยู่ในรูปแบบ Graphic User Interface, GUI การใช้งานเริ่มต้นจากการสร้างฟังค์ชั่นค่าความเหมาะสม (ฟังค์ชั่นวัตถุประสงค์) ในรูปของ m-file โดยงานวิจัยนี้ใช้ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน $(e_s)$ เป็นค่าความเหมาะสมที่ต้องการให้มีค่าน้อยที่สุด ซึ่ง $e_s$ ได้จากความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าสัดส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองกับที่ได้จากแบบจำลองอบแห้งชั้นบาง ตามสมการที่ 5.17

อันดับต่อมาทำการกำหนดกลยุทธ์วิวัฒนาการ (Evolution Strategies) ซึ่งผู้วิจัยได้เลือกใช้ตามที่แสดงในตารางที่ 5.2 จากนั้นทำการ run โปรแกรมผ่าน Genetic Algorithm Tool ท้ายที่สุดได้คำตอบเป็นค่าของตัวแปรในแบบจำลองอบแห้งชั้นบางที่พิจารณา ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานต่ำที่สุด

ตารางที่ 5. 2 แสดงกลยุทธ์วิวัฒนาการที่เลือกใช้

| | |
|---|---|
| Population size | - 3000 |
| Fitness scaling | - Rank |
| Selection | - Stochastic uniform |
| Reproduction | Elite count: 2<br>- Crossover fraction: 0.8 |
| Mutation | - Gaussian function |
| Crossover | - Heuristic |
| Migration | - Forward |
| Hybrid function | - fminsearch |
| Stopping criteria | - 300,000 Generation |

### 5.6.2 ผลการคำนวณและการวิจารณ์ผล

ค่าตัวแปรของแบบจำลองอบแห้งชั้นบางทั้ง 9 สมการ ที่ค้นหาด้วย GA และผลการวิเคราะห์เชิงสถิติ ในกรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมสูงแสดงในตารางที่ 5.3 – 5.5 และในกรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมต่ำแสดงในตารางที่ 5.6 – 5.8

แบบจำลองอบแห้งที่ดีจะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ $(r)$ เข้าใกล้ 1 และมีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน $(e_s)$ และค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนมาตรฐาน $(\chi^2)$ ที่ต่ำ

จากตารางที่ 5.3 – 5.5 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดในการอธิบายการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระ เมื่อความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมสูงคือ แบบจำลองของ Midilli โดยในการทดลองทั้ง 3 กรณี มีค่า r ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.999480 และมีค่า $e_s$ สูงสุดเท่ากับ 0.005975 และค่า $\chi^2$ สูงที่สุดเท่ากับ 0.00004 ถึงแม้ว่าในกรณีที่ 150 องศาเซลเซียส ค่า $e_s$ ที่ได้จากแบบจำลองของ Midilli จะมีค่า0.005975 ซึ่งมากกว่าแบบจำลองแบบ Two-term exponential ($e_s$ = 0.005842) และเส้นกราฟของแบบจำลองทั้งสองเกาะกับผลการทดลองได้ดี ดังแสดงในรูปที่ 5.4 ดังนั้นจึงถือว่าที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส สามารถใช้แบบจำลองทั้งสองได้ และเลือกใช้แบบจำลองของ Midilli เพื่อให้เป็นแนวทางเดียวกันกับการอบแห้งที่อุณหภูมิอบแห้ง 100 และ 130 องศาเซลเซียส และสามารถหาความสัมพันธ์ของค่าคงที่ของสมการกับอุณหภูมิอบแห้ง สำหรับกรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมสูงได้

ตารางที่ 5. 3 การวิเคราะห์แบบจำลองอบแห้ง กรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมสูง ใช้อุณหภูมิอบแห้ง 100°C

| Model | Parameter | Value | Standard Error ($e_s$) | Correlation coeff. (r) | MSD ($\chi^2$) |
|---|---|---|---|---|---|
| Newton | Drying Coefficient, k | 0.002025 | 0.010379 | 0.998621 | 0.000110 |
| Page | Drying Coefficient, k | 0.001937 | 0.010336 | 0.998609 | 0.000111 |
| | Exponent, n | 1.007810 | | | |
| Henderson and Pabis | Drying Coefficient, k | 0.002041 | 0.010199 | 0.998639 | 0.000108 |
| | Coefficient, a | 1.004016 | | | |
| Logarithmic | Drying Coefficient, k | 0.002358 | 0.009514 | 0.998813 | 0.000096 |
| | Coefficient, a | 0.921174 | | | |
| | Coefficient, $a_0$ | 0.088505 | | | |
| Two-term exponent | Coefficient, $a_1$ | 1.008498 | 0.010027 | 0.998687 | 0.000109 |
| | Drying Coefficient, $k_1$ | 0.002057 | | | |
| | Coefficient, $a_2$ | -0.012349 | | | |
| | Drying Coefficient, $k_2$ | 0.042789 | | | |
| Geometric | Coefficient, a | 1.721333 | 0.089304 | 0.906856 | 0.008282 |
| | Exponent, n | 0.192390 | | | |
| Wang and Singh | Coefficient, $a_1$ | -0.001979 | 0.008041 | 0.999221 | 0.000067 |
| | Coefficient, $a_2$ | 1.491E-06 | | | |
| Midilli | Coefficient, a | 0.986112 | 0.005809 | 0.999558 | 0.000036 |
| | Coefficient, b | 0.000386 | | | |
| | Drying Coefficient, k | 0.000823 | | | |
| | Exponent, n | 1.218109 | | | |
| Diffusion Approach | Coefficient, a | -0.007795 | 0.010059 | 0.998683 | 0.000107 |
| | Coefficient, b | 0.053501 | | | |
| | Drying Coefficient, k | 0.038408 | | | |

ตารางที่ 5. 4 การวิเคราะห์แบบจำลองอบแห้ง กรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมสูง ใช้อุณหภูมิอบแห้ง 130°C

| Model | Parameter | Value | Standard Error ($e_s$) | Correlation coeff. (r) | MSD ($\chi^2$) |
|---|---|---|---|---|---|
| Newton | Drying Coefficient, k | 0.002025 | 0.010379 | 0.998621 | 0.000110 |
| Page | Drying Coefficient, k | 0.001852 | 0.008386 | 0.999065 | 0.000074 |
| | Exponent, n | 1.047085 | | | |
| Henderson and Pabis | Drying Coefficient, k | 0.002454 | 0.007948 | 0.999135 | 0.000066 |
| | Coefficient, a | 1.012401 | | | |
| Logarithmic | Drying Coefficient, k | 0.002574 | 0.007879 | 0.999150 | 0.000067 |
| | Coefficient, a | 0.982580 | | | |
| | Coefficient, $a_0$ | 0.031457 | | | |
| Two-term exponent | Coefficient, $a_1$ | 1.019035 | 0.007246 | 0.999283 | 0.000058 |
| | Drying Coefficient, $k_1$ | 0.002486 | | | |
| | Coefficient, $a_2$ | -0.020826 | | | |
| | Drying Coefficient, $k_2$ | 0.062342 | | | |
| Geometric | Coefficient, a | 1.683932 | 0.086039 | 0.915322 | 0.007755 |
| | Exponent, n | 0.190412 | | | |
| Wang and Singh | Coefficient, $a_1$ | -0.002271 | 0.008351 | 0.999250 | 0.000073 |
| | Coefficient, $a_2$ | 1.845E-06 | | | |
| Midilli | Coefficient, a | 0.995787 | 0.005266 | 0.999620 | 0.000031 |
| | Coefficient, b | 0.000392 | | | |
| | Drying Coefficient, k | 0.001186 | | | |
| | Exponent, n | 1.181532 | | | |
| Diffusion Approach | Coefficient, a | -0.019029 | 0.007254 | 0.999282 | 0.000056 |
| | Coefficient, b | 0.042598 | | | |
| | Drying Coefficient, k | 0.058348 | | | |

ตารางที่ 5. 5 การวิเคราะห์แบบจำลองอบแห้ง กรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมสูง ใช้อุณหภูมิอบแห้ง 150°C

| Model | Parameter | Value | Standard Error ($e_s$) | Correlation coeff. (r) | MSD ($\chi^2$) |
|---|---|---|---|---|---|
| Newton | Drying Coefficient, k | 0.002788 | 0.007933 | 0.999178 | 0.000065 |
| Page | Drying Coefficient, k | 0.002258 | 0.006497 | 0.999411 | 0.000045 |
| | Exponent, n | 1.040081 | | | |
| Henderson and Pabis | Drying Coefficient, k | 0.002814 | 0.007630 | 0.999155 | 0.000061 |
| | Coefficient, a | 1.004362 | | | |
| Logarithmic | Drying Coefficient, k | 0.002199 | 0.006259 | 0.999429 | 0.000043 |
| | Coefficient, a | 1.188866 | | | |
| | Coefficient, $a_0$ | -0.191337 | | | |
| Two-term exponent | Coefficient, $a_1$ | 1.055264 | 0.005842 | 0.999503 | 0.000038 |
| | Drying Coefficient, $k_1$ | 0.003023 | | | |
| | Coefficient, $a_2$ | -0.062611 | | | |
| | Drying Coefficient, $k_2$ | 0.013871 | | | |
| Geometric | Coefficient, a | 1.628474 | 0.083954 | 0.918454 | 0.007440 |
| | Exponent, n | 0.188328 | | | |
| Wang and Singh | Coefficient, $a_1$ | -0.002591 | 0.006150 | 0.999472 | 0.000040 |
| | Coefficient, $a_2$ | 2.263E-06 | | | |
| Midilli | Coefficient, a | 0.990905 | 0.005975 | 0.999480 | 0.000040 |
| | Coefficient, b | 0.000032 | | | |
| | Drying Coefficient, k | 0.001815 | | | |
| | Exponent, n | 1.081782 | | | |
| Diffusion Approach | Coefficient, a | -0.189910 | 0.006220 | 0.999457 | 0.000042 |
| | Coefficient, b | 0.490094 | | | |
| | Drying Coefficient, k | 0.006591 | | | |

จากตารางที่ 5.6 – 5.8 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดในการอธิบายการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระ เมื่อความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมต่ำคือ แบบจำลองแบบ Two-term exponential ซึ่งมีค่า r ต่ำสุดเท่ากับ 0.999417 และมีค่า $e_s$ สูงสุดเท่ากับ 0.006614 และค่า $\chi^2$ สูงสุดเท่ากับ 0.000049

ตารางที่ 5. 6 การวิเคราะห์แบบจำลองอบแห้ง กรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมต่ำ ใช้อุณหภูมิอบแห้ง 100°C

| Model | Parameter | Value | Standard Error ($e_s$) | Correlation coeff. (r) | MSD ($\chi^2$) |
|---|---|---|---|---|---|
| Newton | Drying Coefficient, k | 0.002499 | 0.007898 | 0.999201 | 0.000064 |
| Page | Drying Coefficient, k | 0.002110 | 0.006984 | 0.999416 | 0.000051 |
| | Exponent, n | 1.031077 | | | |
| Henderson and Pabis | Drying Coefficient, k | 0.002506 | 0.007872 | 0.999193 | 0.000065 |
| | Coefficient, a | 1.001308 | | | |
| Logarithmic | Drying Coefficient, k | 0.001955 | 0.006032 | 0.999523 | 0.000039 |
| | Coefficient, a | 1.180027 | | | |
| | Coefficient, a0 | -0.186477 | | | |
| Two-term exponent | Coefficient, a1 | 1.092848 | 0.005630 | 0.999585 | 0.000035 |
| | Drying Coefficient, k1 | 0.002773 | | | |
| | Coefficient, a2 | -0.103703 | | | |
| | Drying Coefficient, k2 | 0.009044 | | | |
| Geometric | Coefficient, a | 1.684437 | 0.090860 | 0.906380 | 0.008640 |
| | Exponent, n | 0.195613 | | | |
| Wang and Singh | Coefficient, a1 | -0.002319 | 0.006551 | 0.999533 | 0.000045 |
| | Coefficient, a2 | 1.818E-06 | | | |
| Midilli | Coefficient, a | 0.987202 | 0.005790 | 0.999561 | 0.000037 |
| | Coefficient, b | -0.000006 | | | |
| | Drying Coefficient, k | 0.001616 | | | |
| | Exponent, n | 1.074260 | | | |
| Diffusion Approach | Coefficient, a | -6.892263 | 0.006530 | 0.999490 | 0.000046 |
| | Coefficient, b | 1.077549 | | | |
| | Drying Coefficient, k | 0.001483 | | | |

ตารางที่ 5. 7 การวิเคราะห์แบบจำลองอบแห้ง กรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมต่ำ ใช้อุณหภูมิอบแห้ง 130°C

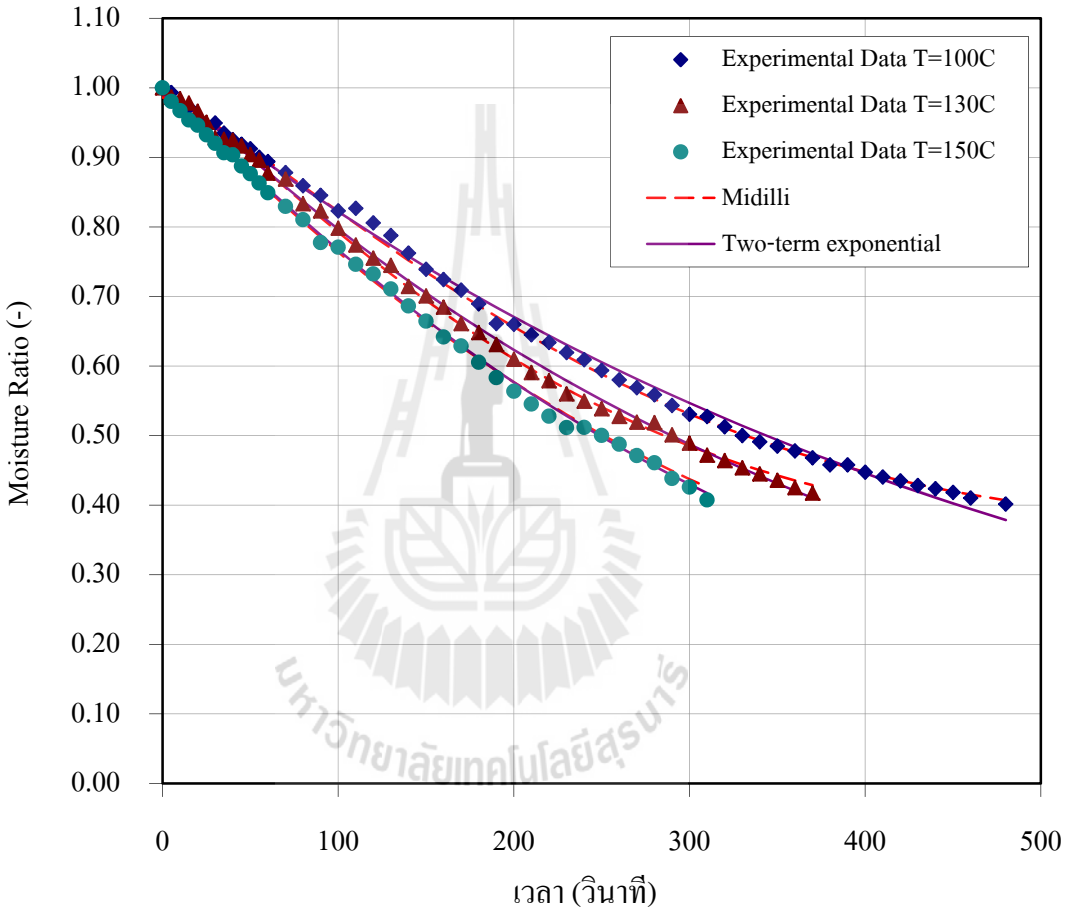
| Model | Parameter | Value | Standard Error ($e_s$) | Correlation coeff. (r) | MSD ($\chi^2$) |
|---|---|---|---|---|---|
| Newton | Drying Coefficient, k | 0.002839 | 0.015112 | 0.997238 | 0.000234 |
| Page | Drying Coefficient, k | 0.001738 | 0.010929 | 0.998665 | 0.000126 |
| | Exponent, n | 1.092773 | | | |
| Henderson and Pabis | Drying Coefficient, k | 0.002880 | 0.014721 | 0.997138 | 0.000228 |
| | Coefficient, a | 1.006908 | | | |
| Logarithmic | Drying Coefficient, k | 0.001283 | 0.007934 | 0.999161 | 0.000068 |
| | Coefficient, a | 1.830550 | | | |
| | Coefficient, a0 | -0.842124 | | | |
| Two-term exponent | Coefficient, a1 | 1.472332 | 0.006614 | 0.999417 | 0.000049 |
| | Drying Coefficient, k1 | 0.003951 | | | |
| | Coefficient, a2 | -0.493440 | | | |
| | Drying Coefficient, k2 | 0.008079 | | | |
| Geometric | Coefficient, a | 1.645632 | 0.094285 | 0.901445 | 0.009370 |
| | Exponent, n | 0.193092 | | | |
| Wang and Singh | Coefficient, a1 | -0.002488 | 0.009157 | 0.999071 | 0.000088 |
| | Coefficient, a2 | 1.700E-06 | | | |
| Midilli | Coefficient, a | 0.976039 | 0.007116 | 0.999325 | 0.000056 |
| | Coefficient, b | -0.000064 | | | |
| | Drying Coefficient, k | 0.001010 | | | |
| | Exponent, n | 1.176772 | | | |
| Diffusion Approach | Coefficient, a | -16.891285 | 0.009205 | 0.999032 | 0.000092 |
| | Coefficient, b | 1.087098 | | | |
| | Drying Coefficient, k | 0.000985 | | | |

ตารางที่ 5. 8 การวิเคราะห์แบบจำลองอบแห้ง กรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมต่ำ ใช้อุณหภูมิอบแห้ง 150°C

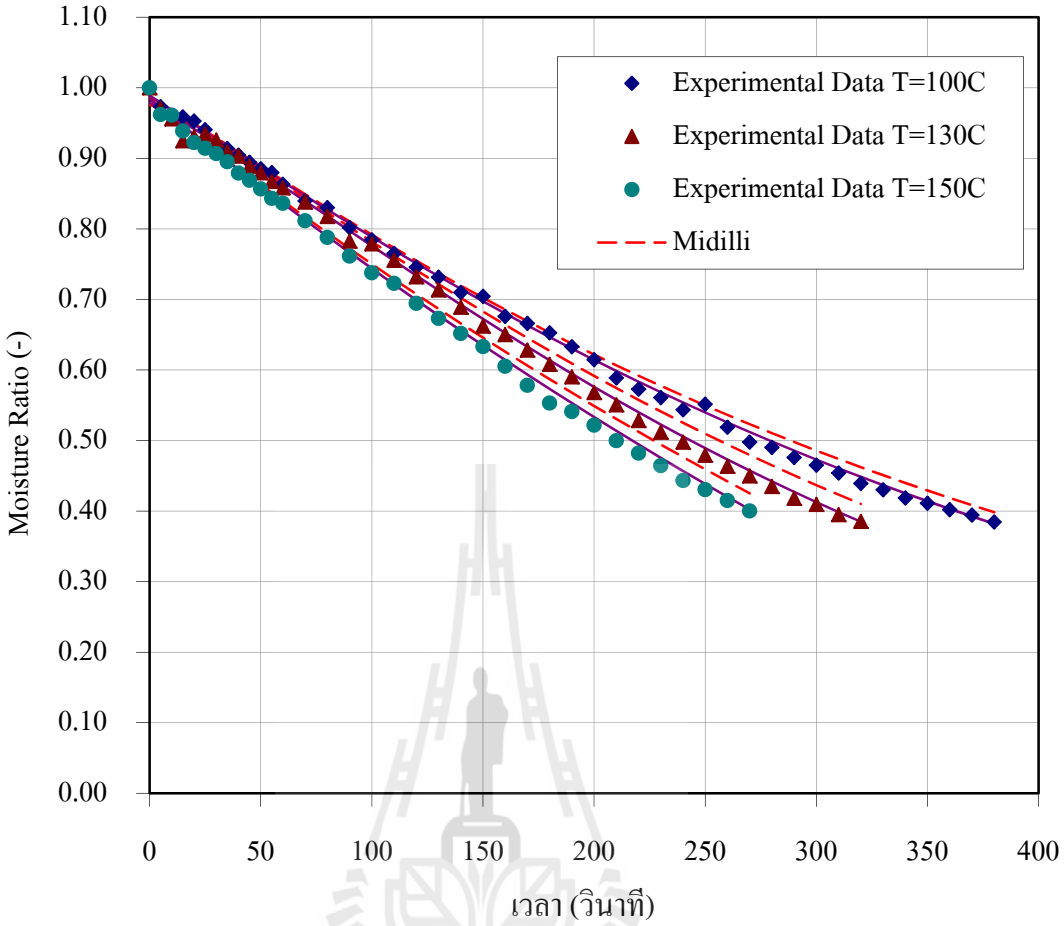
| Model | Parameter | Value | Standard Error ($e_s$) | Correlation coeff. (r) | MSD ($\chi^2$) |
|---|---|---|---|---|---|
| Newton | Drying Coefficient, k | 0.003224 | 0.012280 | 0.997859 | 0.000155 |
| Page | Drying Coefficient, k | 0.002378 | 0.010304 | 0.998689 | 0.000113 |
| | Exponent, n | 1.059478 | | | |
| Henderson and Pabis | Drying Coefficient, k | 0.003236 | 0.012253 | 0.997837 | 0.000160 |
| | Coefficient, a | 1.001644 | | | |
| Logarithmic | Drying Coefficient, k | 0.001467 | 0.005410 | 0.999574 | 0.000032 |
| | Coefficient, a | 1.810819 | | | |
| | Coefficient, a0 | -0.826184 | | | |
| Two-term exponent | Coefficient, a1 | 1.912572 | 0.005408 | 0.999574 | 0.000033 |
| | Drying Coefficient, k1 | 0.001419 | | | |
| | Coefficient, a2 | -0.928188 | | | |
| | Drying Coefficient, k2 | 0.000068 | | | |
| Geometric | Coefficient, a | 1.601385 | 0.087277 | 0.913909 | 0.008093 |
| | Exponent, n | 0.190451 | | | |
| Wang and Singh | Coefficient, a1 | -0.002883 | 0.008493 | 0.999318 | 0.000077 |
| | Coefficient, a2 | 2.439E-06 | | | |
| Midilli | Coefficient, a | 0.984691 | 0.005452 | 0.999567 | 0.000034 |
| | Coefficient, b | -0.000627 | | | |
| | Drying Coefficient, k | 0.002047 | | | |
| | Exponent, n | 1.002924 | | | |
| Diffusion Approach | Coefficient, a | -0.528344 | 0.008214 | 0.999308 | 0.000074 |
| | Coefficient, b | 0.000317 | | | |
| | Drying Coefficient, k | 6.408306 | | | |

เหตุผลทางกายภาพที่แบบจำลองของ Midilli มีความเหมาะสมกับการอบแห้งที่ความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมสูง อาจเนื่องมาจากค่าความดันไอของอากาศที่ปกคลุมกองข้าวเปลือกในช่วงระยะพักมีค่าสูง ส่งผลให้ความแตกต่างระหว่างความดันไอภายในกับภายนอกต่ำกว่ากรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมต่ำ จึงทำให้การกระจายความชื้นภายในเมล็ดและการ

ระเหยสู่บรรยากาศเป็นไปได้ช้ากว่า ลักษณะการลดลงของความชื้นจึงค่อนข้างราบเรียบ สอดคล้องกับรูปแบบของแบบจำลองของ Midilli ที่มีพจน์การลดลงแบบเชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 5. 3 ในทางกลับกันกรณีการอบแห้งที่ความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมต่ำ การลดลงของความชื้นจึงรวดเร็วและมีลักษณะโค้งงอมากกว่า ดังนั้นแบบจำลองแบบ Two-term exponential จึงให้ความสอดคล้องกับผลการทดลองที่ดีกว่าดังแสดงในรูปที่ 5. 4




รูปที่ 5. 3 เปรียบเทียบแบบจำลองของ Midilli และ Two-term exponential กับผลการทดลอง กรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมสูง




รูปที่ 5. 4 เปรียบเทียบแบบจำลองของ Midilli และ Two-term exponential กับผลการทดลอง กรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมต่ำ

ดังนั้น กรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมสูง เลือกแบบจำลองของ Midilli

$$MR = ae^{-kt^n} + bt \qquad (5.\ 20)$$

โดยที่สัมประสิทธิ์ $a$, $k$, $n$ และ $b$ เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิอากาศอบแห้ง ($T$) ดังนี้

$$a = -0.00001133T^2 + 0.00292897T + 0.80653797 \qquad (5.\ 21)$$

$$k = 0.00000039T^2 - 0.00007671T + 0.00463167 \qquad (5.\ 22)$$

$$n = -0.00007536T^2 + 0.01611246T + 0.36044789 \quad (5.\ 23)$$

$$b = -0.00000036T^2 + 0.00008397T - 0.00436890 \quad (5.\ 24)$$

กรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมต่ำ เลือก แบบจำลองแบบ Two-term exponential

$$MR = a_1 e^{-k_1 t} + a_2 e^{-k_2 t} \quad (5.\ 25)$$

โดยที่ สัมประสิทธิ์ $a_1$, $k_1$, $a_2$และ $k_2$ เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิอากาศอบแห้ง ($T$) ดังนี้

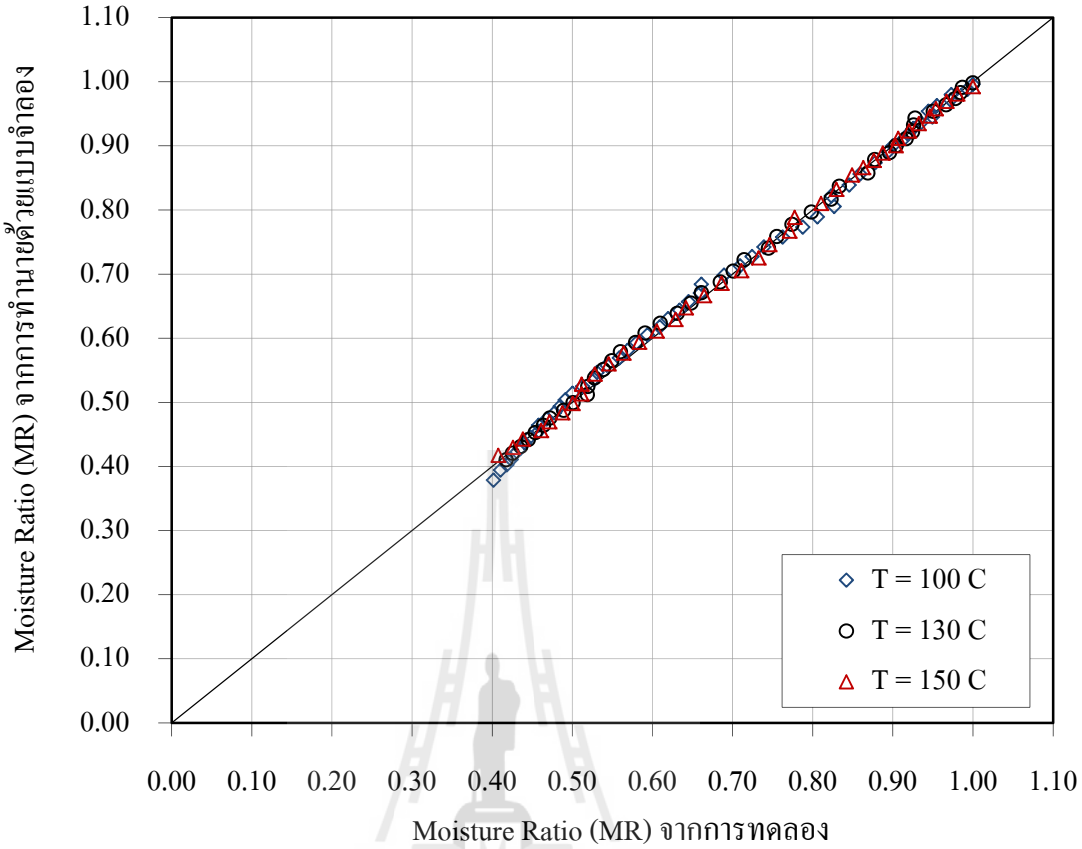
$$a_1 = 0.00018725T^2 - 0.03041804T + 2.26215079 \quad (5.\ 26)$$

$$k_1 = -0.00000332T^2 + 0.00080216T - 0.04427326 \quad (5.\ 27)$$

$$a_2 = -0.00017492T^2 + 0.02724108T - 1.07857873 \quad (5.\ 28)$$

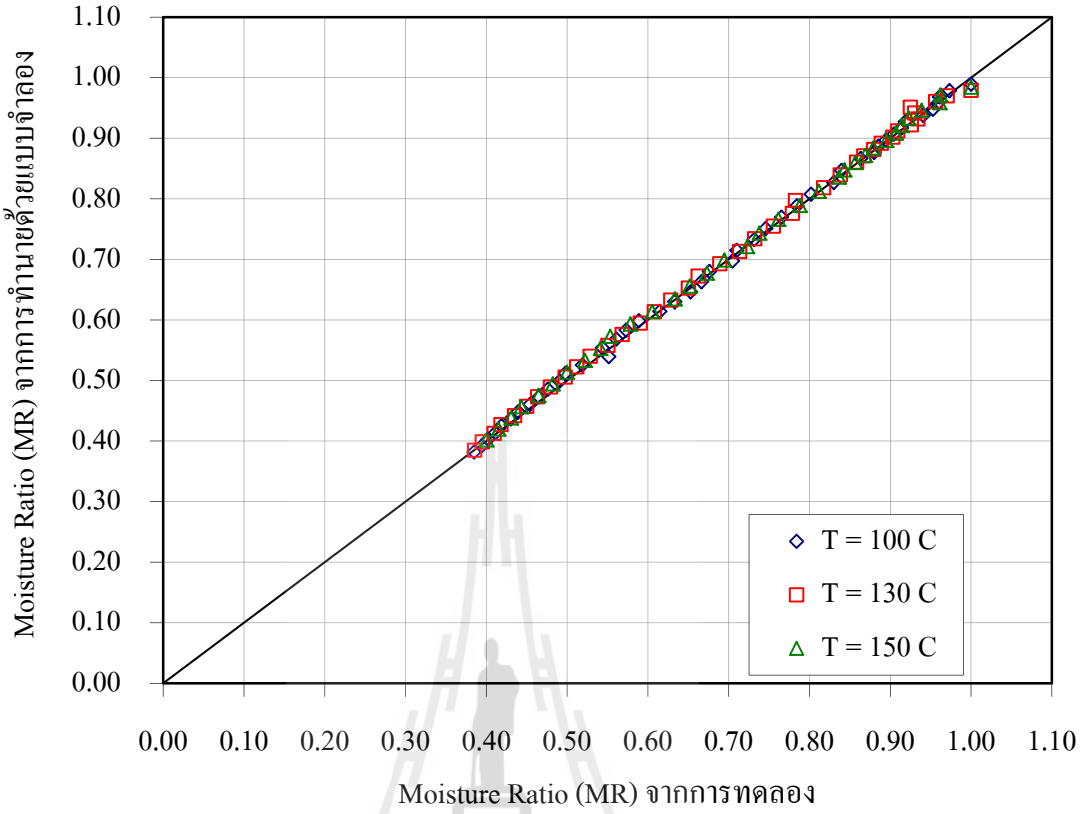
$$k_2 = -0.00000737T^2 + 0.00166233T - 0.08351565 \quad (5.\ 29)$$

ความถูกต้องของแบบจำลองอบแห้งและสมการความสัมพันธ์ที่สร้างขึ้น ด้วยการเปรียบเทียบกับค่าสัดส่วนความชื้นที่ทำนายได้กับผลการทดลอง แสดงในรูปที่ 5.6 - 5.9 จากรูปพบว่าค่าที่ทำนายค่อนข้างซ้อนทับกับเส้นตรง ซึ่งแสดงถึงความเหมาะสมของแบบจำลองอบแห้งทั้งสอง ในการทำนายการอบแห้งข้าวเปลือกเมื่อใช้เครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระ



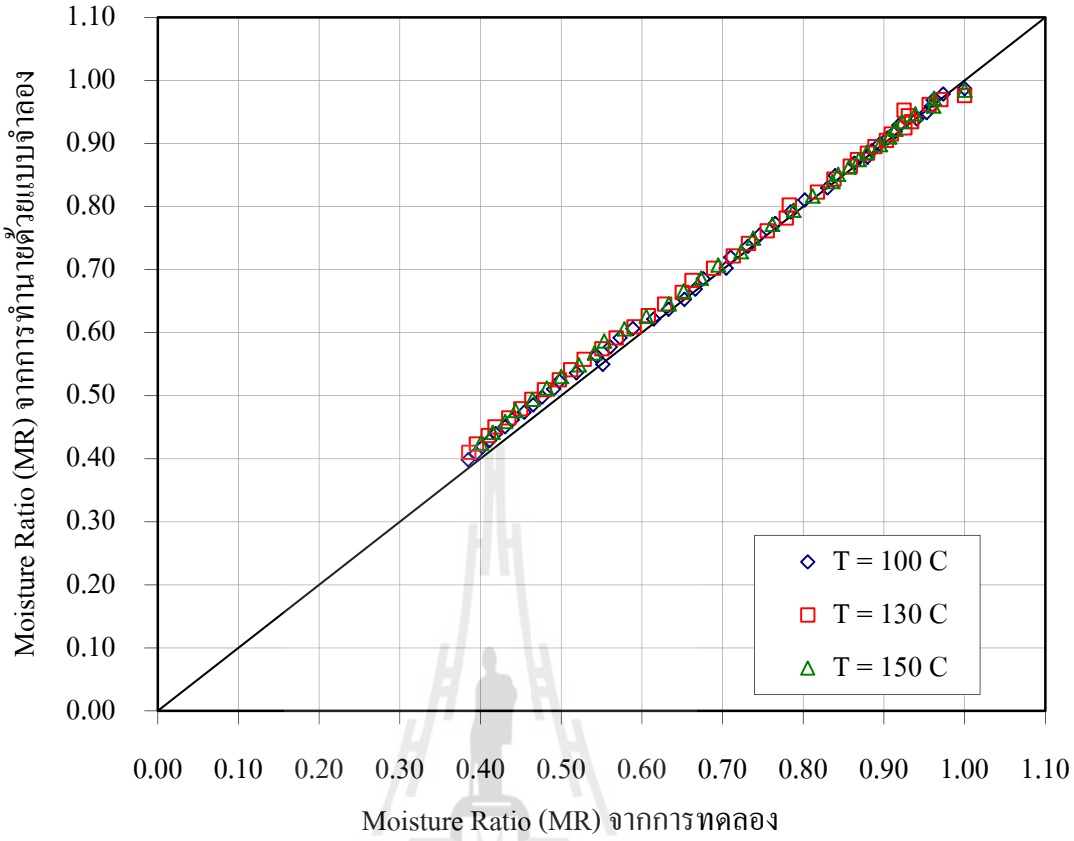

รูปที่ 5. 5 ผลการทำนายของแบบจำลอง Two-term exponential กับผลการทดลอง กรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมสูง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



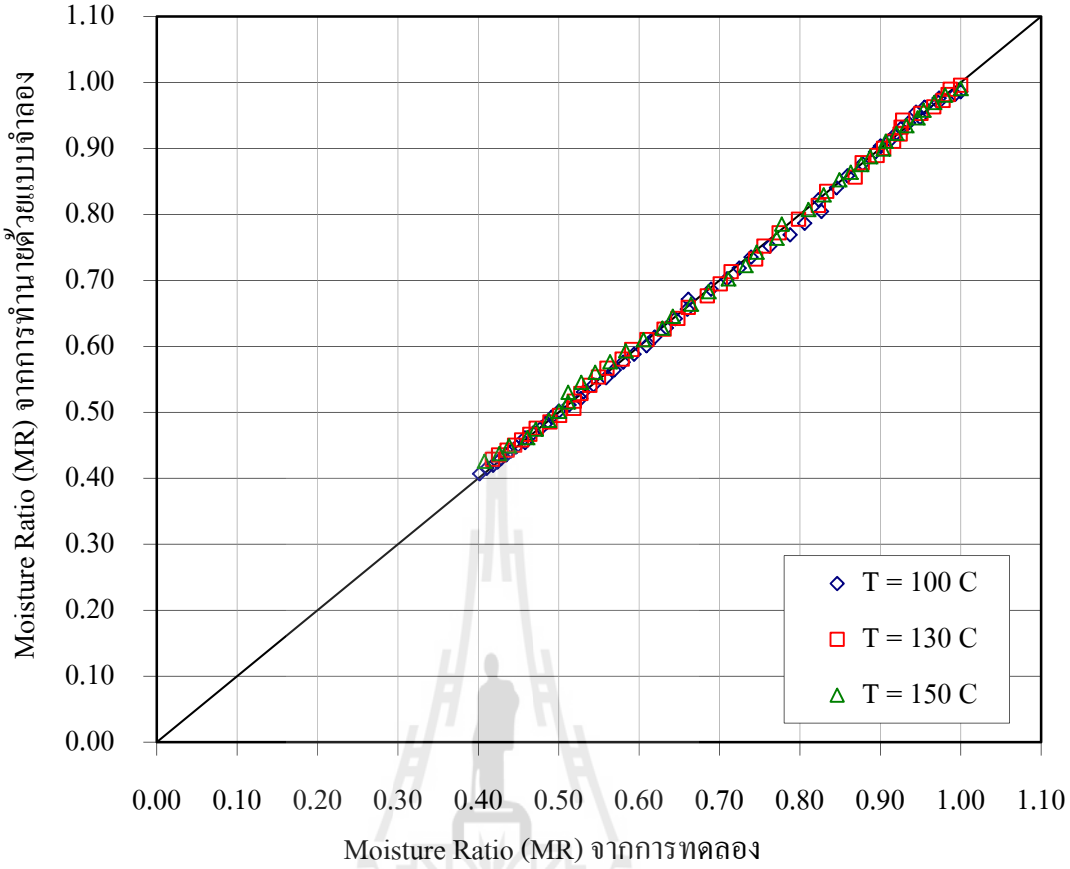

รูปที่ 5. 6 ผลการทำนายของแบบจำลอง Two-term exponential กับผลการทดลอง กรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมต่ำ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี




รูปที่ 5. 7 ผลการทำนายของแบบจำลอง Midilli กับผลการทดลอง กรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมสูง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี




รูปที่ 5. 8 ผลการทำนายของแบบจำลอง Midilli กับผลการทดลอง กรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมต่ำ

## 5.7 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้รหัสวิธีเชิงพันธุกรรมในการกำหนดค่าปัจจัยของแบบจำลองอบแห้งชั้นบาง 9 แบบ เพื่อใช้กับเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ ผลงานวิจัยแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองอบแห้งชั้น Midilli เหมาะสมที่สุดในกรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมที่มีค่าสูง และแบบจำลองอบแห้งชั้นบางแบบ Two-term exponential เหมาะสมที่สุดในกรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมที่มีค่าต่ำ ซึ่งแบบจำลองทั้งสองให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ใกล้เคียง 1 มาก อีกทั้งค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน และค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนมาตรฐานยังต่ำอีกด้วย งานวิจัยนี้ยังได้นำเสนอสมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยของแบบจำลองกับอุณหภูมิอากาศอบแห้งในรูปของสมการโพลิโนเมียลเพื่อให้ได้ผลการทำนายที่ดีที่สุดอีกด้วย

# บทที่ 6
# แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบหล่นอิสระ

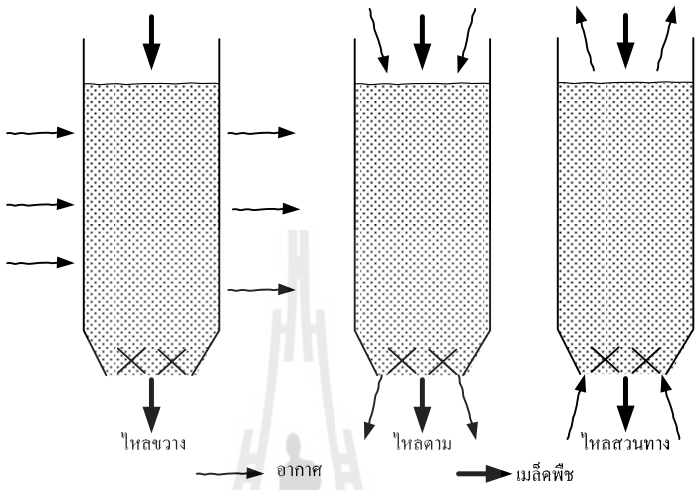
## 6.1 บทคัดย่อ

การจำลองกระบวนการอบแห้งเป็นสิ่งที่สำคัญต่อการวิจัยและพัฒนาเครื่องอบแห้ง โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ จะใช้แบบจำลองแบบไม่สมดุลของ Brooker et al. (1974) ทำนายการสูญเสียพลังงานและมวลในกระบวนการอบแห้ง และใช้วิธีการจำลองผลด้วยกรรมวิธีเชิงตัวเลข โดยที่งานวิจัยนี้ การถ่ายเทความชื้นจะใช้แบบจำลองการอบแห้งชั้นบางทาทฤษฎี เพื่อทำนายการลดลงของความชื้นในเมล็ดข้าวเปลือก ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ นำมาจากงานวิจัยในอดีต แล้วพัฒนาเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อหาผลคำตอบ โดยผลการจำลองสำหรับเงื่อนไขอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 100 องศาเซลเซียส สามารถทำนายผลอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกได้ใกล้เคียงกับการทดลอง ในขณะที่การทำนายผลการของความชื้นสามารถทำนายผลได้ใกล้เคียงการทดลองในช่วงต้นและทำนายได้สูงกว่าการทดลอง สำหรับที่เงื่อนไขอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 130 และ 150 องศาเซลเซียส สามารถทำนายผลความชื้นได้ใกล้เคียงกับการทดลอง และทำนายผลอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกได้ต่ำกว่าการทดลองเล็กน้อย ดังนั้นแบบจำลองที่นำเสนอนี้สามารถทำนายผลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระได้ใกล้เคียงกับการทดลองเป็นที่ยอมรับได้

## 6.2 บทนำ

ในการทดลองอบแห้งข้าวเปลือก เป็นขั้นตอนการวิจัยที่ใช้เวลามากและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ เนื่องจากมีหลายขั้นตอน ตั้งแต่ขั้นตอนการเตรียมข้าวเปลือก การตั้งค่าเครื่องมือ การอบแห้ง ตลอดจนการหาความชื้นและวัดคุณภาพหลังการอบแห้ง เพื่อเป็นการประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายดังกล่าว การวิจัยโดยส่วนมากจะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายผลการอบแห้งแทนการทำการทดลอง โดยจะทำการทดลองเพียงบางเงื่อนไข เพื่อใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อจำลองผลการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบหล่นอิสระ โดยใช้ผลการทดลองอบแห้งที่เงื่อนไขต่าง ๆ ที่ปรากฏในบทที่ 4 ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับกระบวนการอบแห้งนั้น จะขึ้นอยู่กับชนิดและเทคนิคของเครื่องอบแห้งที่ใช้ ซึ่งมีทั้งแบบเมล็ดพืชอยู่กับที่ และแบบเมล็ดพืชมี

การไหล เช่น ไหลขวาง (cross-flow) ไหลสวนทาง (counter-current flow) ไหลตาม (concurrent flow) และคลุกเคล้า (mixed flow) ดังแสดงในรูปที่ 6.1 โดยที่เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบหล่นอิสระถือว่าเป็นเครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทาง




รูปที่ 6. 1 เครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชมีการไหล (สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2540)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายอุณหภูมิของเมล็ดพืช ความชื้นและอุณหภูมิของอากาศในวรรณกรรม แบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดใหญ่ ๆ (Pabis el al,1998) คือ แบบจำลองแบบไม่สมดุล (Theoretical nonequilibrium model), แบบจำลองแบบสมดุล (Equilibrium model) และแบบจำลองแบบลอการิทึมมิค (Logarithmic model)

สำหรับแบบจำลองแบบไม่สมดุล คือไม่มีความสมดุลทางความร้อนและมวลระหว่างอากาศอบแห้งและเมล็ดพืช จากสมมุติฐานนี้จะได้ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equation) ซึ่งได้จากกฎการถ่ายเทความร้อนและมวล แบบจำลองแบบไม่สมดุลของ Bakker-Arkema (Bakker-Arkema et al., 1976) สำหรับการอบแห้งแบบเมล็ดพืชอยู่กับที่ (stationary bed) ประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ 3 สมการ และสมการอัตราการอบแห้งชั้นบางของเมล็ดพืช คือ

$$\frac{\partial T_a}{\partial x} = \frac{-ha}{G_a c_a + \rho_a c_v H}\left(T_a - T_p\right) \tag{6. 1}$$

$$\frac{\partial T_p}{\partial t} = \frac{ha\left(T_a - T_p\right)}{\rho_p c_p + \rho_p c_w M} + \frac{h_v + c_v\left(T_a - T_p\right)}{\rho_p c_p + \rho_p c_w M} G_a \frac{\partial H}{\partial x} \tag{6. 2}$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} = -\frac{\rho}{G_a}\frac{\partial H}{\partial \theta} \tag{6. 3}$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \text{Thin - Layer drying equation} \tag{6. 4}$$

โดยที่ $T_a$ และ $T_p$ คืออุณหภูมิของอากาศอบแห้งและเมล็ดพืชตามลำดับ, K

$\rho_a$ และ $\rho_p$ คือความหนาแน่นของอากาศอบแห้งและเมล็ดพืชตามลำดับ, kg/m$^3$

$c_a, c_v, c_p$ และ $c_w$ คือความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง, ไอน้ำ, เมล็ดพืชแห้ง และน้ำ ตามลำดับ, J/kg.K

$H$ คือ Humidity ratio ของอากาศ, decimal

$M$ คือ ความชื้นของเมล็ดพืช, d.b.

$v_a$ คือความเร็วของอากาศ, m/s

$x$ คือความหนาของชั้นเบด, m

$t$ คือเวลา, s

$h$ คือ convective heat transfer coefficient, W/m$^2$.s

$a$ คือพื้นที่ผิวในการแลกเปลี่ยนความร้อนของเมล็ดพืชต่อปริมาตร, m$^2$/m$^3$

$G_a = \rho_a v_a$

นอกจากนี้ แบบจำลองของ Spencer (Spencer, 1969) สำหรับการอบแห้งแบบเมล็ดพืชอยู่กับที่ชั้นเบดหนา (stationary deep bed) และแบบจำลองของ Sharp (Sharp, 1982) เป็นแบบจำลองแบบไม่สมดุล สำหรับการอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศอบแห้งต่ำ แบบจำลองจะคล้ายกับ ของ Bakker-Arkema ซึ่งจะไม่กล่าวถึงในที่นี้

สำหรับแบบจำลองของ Law and Parry (Law and Parry, 1983) เป็นแบบจำลองแบบไม่สมดุลทั่วไป สำหรับการอบแห้งในระบบอบแห้งพื้นฐาน 4 แบบ คือ แบบเมล็ดพืชหยุดนิ่ง แบบไหลขวาง แบบไหลตาม และแบบไหลสวนทาง โดยแบบจำลองจะอยู่ในรูปของเมทริกซ์ ซึ่งพิจารณาให้ความชื้นของอากาศและเมล็ดพืชเป็นของผสม (binary mixture) โดยสมมุติให้อัตราการไหลของมวลเป็น 1 มิติ และความหนาแน่นของอากาศและเมล็ดพืชคงที่ และไม่คิดผลของการนำและการแผ่รังสีของความร้อน

$$\left\{\frac{\partial u}{\partial t}\right\}+[A]\left\{\frac{\partial u}{\partial x}\right\}+[B]\left\{\frac{\partial u}{\partial y}\right\}=\{b\} \tag{6. 5}$$

โดยที่ $x$ คือทิศทางการไหลของอากาศ และ $y$ คือทิศทางการไหลของเมล็ดพืช

$\{u\}=\left[H,M,T_a,T_p\right]^T$ และ $[A],[B]$ และ $\{b\}$ คือ

$$[A]=\begin{bmatrix} v_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & v_a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{6. 6}$$

$$[B]=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & v_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & v_p \end{bmatrix} \tag{6. 7}$$

$$\{b\}=\begin{Bmatrix} \dfrac{m}{\varepsilon\rho_a} \\ \dfrac{-m}{\rho_p} \\ \dfrac{\left[-h\left(T_a-T_p\right)+m\left(E_v\left(T_v\right)-E_v\left(T_a\right)\right)\right]}{\left[\varepsilon\rho_a\left(c_a+c_vH\right)\right]} \\ \dfrac{\left[h\left(T_a-T_p\right)-m\left(E_v\left(T_v\right)-E_w\left(T_p\right)\right)\right]}{\left[\rho_p\left(c_p+c_wM\right)\right]} \end{Bmatrix} \tag{6. 8}$$

โดยที่ $\varepsilon$ คือ ความพรุนของชั้นเบด

$E_v(T)$ คือพลังงานภายในของไอน้ำ

$m=\rho_pK\left(M-M_e\right)$ คืออัตราการอบแห้งสุทธิ (Net rate of drying)

สำหรับเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ ถือว่าเป็นเครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทางแบบหนึ่ง ดังนั้น จะสามารถใช้แบบจำลองของ Laws and Parry ได้ โดยกำหนดให้ทิศทาง $+x$ เป็นทิศทาง

การไหลของเมล็ดพืช และทิศทาง $-x$ เป็นทิศทางการไหลของอากาศ ถ้าพิจารณาที่สภาวะคงตัว (Steady state) จะได้

$$[B-A]\left\{\frac{\partial u}{\partial x}\right\}=\{b\} \tag{6. 9}$$

เงื่อนไขขอบเขต คือ

$$M(0)=M_0 \tag{6. 10}$$

$$T_p(0)=T_{p,0} \tag{6. 11}$$

$$H(L)=H_0 \tag{6. 12}$$

$$T_a(L)=T_{a,0} \tag{6. 13}$$

นอกจากนี้ แบบจำลองของ Brooker et al. (1974) สำหรับเครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทางในรูปสมการอนุพันธ์ จะได้ว่า

$$\frac{dT_a}{dx}=\frac{ha}{G_a c_a+G_a c_v H}\left(T_a-T_p\right) \tag{6. 14}$$

$$\frac{dT_p}{dx}=\frac{ha\left(T_a-T_p\right)}{G_p c_p+G_p c_w M}+\frac{h_v+c_v\left(T_a-T_p\right)}{G_p c_p+G_p c_w M}G_a\frac{dH}{dx} \tag{6. 15}$$

$$\frac{dH}{dx}=\frac{G_p}{G_a}\frac{dM}{dx} \tag{6. 16}$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \text{Thin - Layer drying equation} \qquad (6.17)$$

โดยที่ $h_v$ คือความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ, J/kg water

แบบจำลองสำหรับเครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทางของ Laws and Parry นั้น อัตราการอบแห้งสุทธิ (m) เทียบได้กับแบบจำลองอบแห้งชั้นบางในแบบจำลองของ Brooker et al. ส่วนค่าพลังงานภายในของน้ำ ก็คือค่าความร้อนแฝง ดังนั้น รูปของสมการของแบบจำลองทั้งสองจะคล้ายกัน และการหาคำตอบของแบบจำลองทั้งสองต้องใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข เนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของสมการ

ในการเลือกใช้แบบจำลองใดนั้น ผู้วิจัยเห็นว่าขึ้นอยู่กับความนิยมและความชำนาญของนักวิจัย ซึ่งจากวรรณกรรมในอดีตมีหลากหลายวิธีในการสร้างแบบจำลอง เช่น การสร้างแบบจำลองโดยใช้กฎพื้นฐานของกลศาสตร์ของไหล คือ สมการอนุรักษ์มวล, สมการอนุรักษ์โมเมนตัม และสมการอนุรักษ์พลังงาน ซึ่งสามารถจำลองผลได้เช่นกัน โดยความถูกต้องของการจำลองผลจะขึ้นกับสมการอบแห้งชั้นบางที่ใช้และการใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

สำหรับแบบจำลองแบบสมดุล เป็นแบบจำลองสำหรับเงื่อนไขการอบแห้งที่เหมาะกับกรณีอุณหภูมิและอัตราการไหลของอากาศต่ำ ๆ ทำให้เกิดสมดุลทางความร้อนและมวลภายในชั้นเบดที่หยุดนิ่ง ซึ่งทำให้อุณหภูมิของอากาศและเมล็ดพืชเท่ากัน ความชื้นของเมล็ดพืชจะเท่ากับความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content) (Parry, 1985) ซึ่งแบบจำลองนี้ไม่เหมาะกับงานวิจัยนี้ แบบจำลองชนิดที่ 3 คือ ลอการิทึมมิค โดย Hukill (1954) ได้นำเสนอแบบจำลองนี้ครั้งแรก ส่วนใหญ่จะนำไปใช้กับการอบแห้งแบบเมล็ดพืชอยู่กับที่ที่อุณหภูมิต่ำ โดยพิจารณา ความสัมพันธ์โดยตรงระหว่างอัตราการอบแห้งของชั้นเมล็ดพืชในเบดและเกรเดียนต์ของอุณหภูมิที่ชั้นเบดนั้น

ในงานวิจัยนี้เครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ ถือว่าเป็นเครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทาง และการอบแห้งที่ใช้ในการทดลองอยู่ในช่วงอุณหภูมิสูง ซึ่งแบบจำลองของ Brooker et al. เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการทำนายผลช่วงอุณหภูมิสูง ส่วนแบบจำลองการอบแห้งชั้นบางได้เลือกใช้แบบจำลองทางทฤษฎี เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่สามารถทำนายผลการอบแห้งที่เงื่อนไขการอบแห้งต่าง ๆ ได้ โดยตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกับการทดลอง และเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจากงานวิจัยในอดีต

## 6.3 การจำลองปัญหาเชิงตัวเลขของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ

การจำลองปัญหาเชิงตัวเลขของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ ซึ่งเป็นเครื่องอบแห้งแบบใช้ลมร้อนชนิดไหลสวนทาง ในงานวิจัยนี้ ใช้แบบจำลองแบบไม่สมดุลของ Brooker et al. (1974) เพื่อทำนายการสูญเสียพลังงานและมวลระหว่างอากาศอบแห้งและเมล็ดข้าวเปลือก และใช้แบบจำลองการแพร่ (Diffusion model) เพื่อทำนายการลดลงของความชื้นในเมล็ดข้าวเปลือก โดยเลือกใช้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากงานวิจัยในอดีตที่เหมาะสม แล้วนำมาพัฒนาเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อหาผลคำตอบด้วยกรรมวิธีเชิงตัวเลข สำหรับข้อมูลที่ได้จากการทำการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระของเครื่องอบแห้งขนาดที่ 1 ขนาดท่อวงใน 8 เซ็นติเมตร และความยาว 225 เซ็นติเมตร ที่ความเร็วอากาศ 2 เมตรต่อวินาที และอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 100, 130 และ 150 องศาเซลเซียส โดยใช้อุณหภูมิอากาศที่ทางออกจากส่วนอบแห้ง และความชื้นของกองเมล็ดข้าวเปลือกและอุณหภูมิกองเมล็ดข้าวเปลือกที่ทางเข้าสู่ส่วนอบแห้ง มาเปรียบเทียบกับผลคำตอบเชิงตัวเลขที่ได้จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น

### 6.3.1 สมดุลพลังงานและสมดุลมวลของเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ

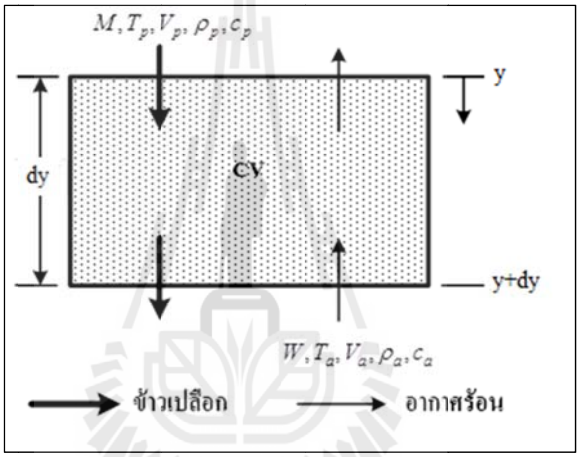
การอบแห้งในเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระนั้น ข้าวเปลือกจะตกอย่างอิสระจากถังพักด้านบนเข้าสู่ท่ออบแห้งในแนวดิ่งที่มีความยาว 2.25 เมตร ข้าวเปลือกมีระยะเวลาอยู่ในเครื่องอบแห้งโดยประมาณ 1 วินาที จากนั้นข้าวเปลือกจะถูกลำเลียงโดยใช้กระพ้อลำเลียงกลับเข้าสู่ถังพักด้านบนเพื่อไหลกลับเข้าสู่ท่ออบแห้งต่อไป ระยะเวลาที่ข้าวเปลือกอยู่ในกระพ้อลำเลียงและถังพักด้านบนของเครื่องอบแห้ง จะจำลองให้เป็นการพักของข้าวเปลือกคล้ายกับการทำ Tempering ในถังพัก และทำให้เกิดการแพร่ความชื้นของเมล็ดข้าวจากด้านในสู่ผิวด้านนอก แต่เนื่องจากในการทดลองถังพักไม่ได้ควบคุมอุณหภูมิและการลำเลียงโดยใช้กระพ้อลำเลียง อาจทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนของเมล็ดข้าวไปเล็กน้อย ซึ่งในส่วนนี้จะใช้เวลาประมาณ 59 วินาทีต่อรอบ รวมระยะเวลาที่ใช้ในการหมุนเวียนของข้าวเปลือกเพื่อทำการอบแห้งรวมการพักตัวของข้าวใช้เวลาประมาณ 1 นาทีต่อ 1 รอบการอบแห้ง

สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนอบแห้ง ซึ่งเป็นท่อแนวดิ่ง จำลองให้เป็นการอบแห้งแบบไหลสวนทาง และส่วนพักตัวในถังพัก เป็นการพักตัวแบบไม่ควบคุมอุณหภูมิ

สมมุติฐานสำหรับส่วนอบแห้ง

- การไหลของอากาศและเมล็ดพืชเป็นแบบลูกสูบหรือจุกอุด (Plug type)
- เครื่องอบแห้งไม่มีความจุความร้อน
- ความร้อนจำเพาะของอากาศอบแห้งและเมล็ดพืชมีค่าคงที่ในช่วงเวลาสั้น ๆ
- ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำมีค่าคงที่

<u>กำหนดให้</u> ทิศทางการไหลของเมล็ดข้าวเปลือกเป็นทิศทางบวก และทิศทางการไหลของอากาศเป็นทิศทางลบ




รูปที่ 6. 2 Elementary Thin-layer ในท่ออบแห้ง

แบบจำลองที่ใช้สำหรับส่วนอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ ได้ดัดแปลงแบบจำลองของ Brooker et al. (1974) สำหรับเครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทาง โดยเพิ่มส่วนของการสูญเสียความร้อนตลอดความยาวของท่ออบแห้งในแนวดิ่ง เนื่องจากส่วนท่ออบแห้งในการทดลองไม่ได้ทำการหุ้มฉนวน จึงทำให้มีการสูญเสียความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อมที่ผนังท่ออบแห้ง ซึ่งจะได้สมการสมดุลพลังงานของอากาศในท่ออบแห้ง เป็นดังสมการที่ (6.18) ส่วนสมการสมดุลพลังงานของเมล็ดข้าวและสมการสมดุลมวลแสดงในสมการที่ (6.19) – (6.20)

$$\frac{dT_a}{dy} = \frac{ha}{G_a c_a + G_a c_v W}\left(T_a - T_p\right) + \frac{h_L A_L}{\left(G_a c_a + G_a c_v W\right)}\left(T_a - T_{amb}\right) \qquad (6.18)$$

$$\frac{dT_p}{dy} = \frac{ha\left(T_a - T_p\right)}{G_p c_p + G_p c_w M} + \frac{h_v + c_v\left(T_a - T_p\right)}{c_p + c_w M}\frac{dM}{dy} \tag{6. 19}$$

$$\frac{dW}{dy} = \frac{G_p}{G_a}\frac{dM}{dy} \tag{6. 20}$$

เงื่อนไขค่าขอบเขตและเงื่อนไขค่าเริ่มต้นของแบบจำลอง คือ

$$T_a(L) = T_a(inlet)$$
$$T_p(0) = T_p(inlet)$$
$$W(L) = W(inlet)$$
$$M(0) = M(inlet)$$

สำหรับการสูญเสียความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือก ใช้สมการการแพร่ความชื้นในแนวรัศมีของวัสดุทรงกลม

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff}\left(\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \left(\frac{2}{r}\right)\frac{\partial M}{\partial r}\right) \tag{6. 21}$$

สำหรับ particle ที่มีรูปทรงเป็นทรงกลมของเมล็ดข้าว ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะหาได้จาก (Poomsa-ad et al, 2002)

$$D_{eff} = 5.68088\times10^{-6}\exp\left(\frac{-3445.6}{T_p}\right)$$

เมื่อ $r$ คือระยะในแนวรัศมี, m

โดย เงื่อนไขค่าขอบเขตและเงื่อนไขค่าเริ่มต้นคือ

$$\frac{\partial M}{\partial t} = 0, \qquad r = 0 \text{ และ } t \geq 0$$
$$M = M_{eq}, \qquad r = R \text{ และ } t \geq 0$$
$$M = M_0, \qquad 0 \leq r \leq R \text{ และ } t = 0$$

ในส่วนพักตัวของข้าวเปลือก เมล็ดข้าวไม่ได้รับความร้อน เนื่องจากไม่มีอากาศร้อนไหลผ่านและเมล็ดข้าวไม่มีการไหล ในช่วงที่อุณหภูมิของเมล็ดข้าวสูงกว่าสิ่งแวดล้อมจะทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนออกจากเมล็ดข้าว ซึ่งจะใช้แบบจำลองสมดุลพลังงานของเมล็ดข้าวดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{dT_p}{dy} = -\frac{h_L a_L \left(T_a - T_{amb}\right)}{G_p c_p + G_p c_w M} \tag{6. 22}$$

เงื่อนไขค่าเริ่มต้นของแบบจำลอง คือ

$$T_{p,Tempering}\left(inlet\right) = T_{p,Drying}\left(outlet\right)$$

และค่าอุณภูมิสุดท้ายที่ออกจากถังพักจะเป็นค่าอุณหภูมิเริ่มต้นของเมล็ดข้าวในรอบถัดไป

เนื่องจากในส่วนการพักตัวของข้าวเปลือกในถังพัก จะถือว่าไม่มีการสูญเสียความชื้นให้กับอากาศแวดล้อม แต่จะเกิดการแพร่ความชื้นจากภายในเมล็ดสู่ผิว โดยจะใช้สมการการแพร่ความชื้นในแนวรัศมีของวัสดุทรงกลม เช่นเดียวกันกับในส่วนอบแห้ง

$$\frac{\partial M}{\partial t} = 0 = D_{eff}\left(\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \left(\frac{2}{r}\right)\frac{\partial M}{\partial r}\right) \tag{6. 23}$$

โดย เงื่อนไขค่าขอบเขตและเงื่อนไขค่าเริ่มต้นคือ

$$\frac{\partial M}{\partial t} = 0, \qquad r = 0 \text{ และ } t \geq 0$$
$$M = M_{eq}, \qquad r = R \text{ และ } t \geq 0$$

$M = M_{outlet,Drying}$ , $0 \le r \le R$ และ $t = 0$

## 6.4 วิธีการจำลองผล

ในส่วนอบแห้ง จะเริ่มจากการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขของ Clank-Nicolson คำนวณหาการสูญเสียความชื้นในเมล็ดข้าวจากสมการที่ (6.21) แล้วหาความชื้นเฉลี่ยของเมล็ดข้าวซึ่งจะใช้เป็นตัวแทนของความชื้นของเมล็ดข้าวทั้งชั้นอบแห้งดังสมการต่อไปนี้

$$\overline{M}(t) = \frac{4\pi}{V}\int_0^R r^2 M(r,t)dr \qquad (6.24)$$

จากนั้นคำนวณหาความชื้นสัมบูรณ์ในอากาศด้วยสมการที่ (6.20) ในส่วนของสมการพลังงาน สำหรับเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ ถือว่าเป็นเครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทางแบบหนึ่ง ดังนั้น จะกำหนดให้ทิศทาง $+y$ เป็นทิศทางการไหลของเมล็ดพืช (จากบนลงล่าง) และทิศทาง $-y$ เป็นทิศทางการไหลของอากาศ (จากล่างขึ้นบน) ถ้าพิจารณาที่สภาวะคงตัว (Steady state) จากระบบสมการอนุพันธ์ (ODE) (6.18) และ (6.19) จัดรูปใหม่จะได้

$$\frac{dT_a}{dy} = -\frac{(ha)}{G_a c_a + G_a c_v W}T_p + \frac{(ha + h_L A_L)}{G_a c_a + G_a c_v W}T_a - \frac{h_L A_L}{(G_a c_a + G_a c_v W)}T_{amb}$$

หรือ

$$\frac{dT_a}{dy} = \beta_1 T_p + \alpha_1 T_a + \gamma_1 \qquad (6.25)$$

$$\frac{dT_p}{dy} = -\frac{ha + c_v G_p \dfrac{dM}{dy}}{G_p c_p + G_p c_w M}T_p + \frac{ha + c_v G_p \dfrac{dM}{dy}}{G_p c_p + G_p c_w M}T_a + \frac{h_v}{c_p + c_w M}\frac{dM}{dy}$$

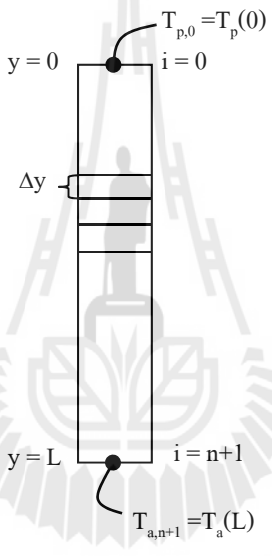
หรือ

$$\frac{dT_p}{dy} = \beta_2 T_p + \alpha_2 T_a + \gamma_2 \qquad (6.26)$$

กำหนดให้ $\Delta y$ เป็นความหนาของแต่ละชั้นเบด ซึ่งถูกแบ่งตามความสูงท่ออบแห้ง L เมตร และหารด้วยจำนวน n ชั้นเบด

$$\Delta y = \frac{L}{n+1} \tag{6. 27}$$

และเนื่องจากค่าขอบเขตของค่า $T_p$ กำหนดเป็นค่าเริ่มต้นที่ทางเข้าของเมล็ดข้าวเปลือก และค่า $T_a$ กำหนดที่ทางออกของเมล็ดข้าวเปลือก จะได้ว่า




$$\frac{dT_p}{dy} \approx \frac{dT_p(y-h) - dT_p(y)}{-\Delta y} \tag{6. 28}$$

$$\frac{dT_a}{dy} \approx \frac{dT_a(y+h) - dT_a(y)}{\Delta y} \tag{6. 29}$$

สมการ (6.25) และ (6.26) เปลี่ยนเป็นระบบสมการพีชคณิต (Differential Algebraic equation system, DAE) จะได้

$$\frac{T_{p,i-1} - T_{p,i}}{-\Delta y} = \beta_{1,i} T_{p,i} + \alpha_{1,i} T_{a,i} + \gamma_{1,i} \tag{6. 30}$$

$$\frac{T_{a,i+1}-T_{p,i}}{\Delta y}=\beta_{2,i}T_{p,i}+\alpha_{2,i}T_{a,i}+\gamma_{2,i} \tag{6. 31}$$

สำหรับ $i=1,2,3,\ldots,n$
และเงื่อนไขขอบเขตคือ

$$T_{p,0}=T_p(0)$$

$$T_{a,n+1}=T_a(L)$$

จัดรูปสมการที่ (6.30) และ (6.31) จะได้

$$T_{p,i-1}+(\beta_{1,i}\Delta y-1)T_{p,i}+\alpha_{1,i}\Delta yT_{a,i}=-\gamma_{1,i}\Delta y \tag{6. 32}$$

$$-\beta_{2,i}\Delta yT_{p,i}-(\alpha_{2,i}\Delta y+1)T_{a,i}+T_{a,i+1}=\gamma_{2,i}\Delta y \tag{6. 33}$$

จากสมการ (6.32) และ (6.33) สามารถเขียนเป็นเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$[A]\begin{Bmatrix}T_{p,1}\\T_{a,1}\\\vdots\\T_{p,n}\\T_{a,n}\end{Bmatrix}=\{B\}$$

และจะได้ว่า

$$\{T\}=[A]^{-1}\{B\}$$

โดยที่

$$[A]=\begin{bmatrix} (\beta_{1,1}\Delta y-1) & \alpha_{1,1}\Delta y & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ -\beta_{2,1}\Delta y & -(\alpha_{2,1}\Delta y+1) & 0 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 0 & (\beta_{1,2}\Delta y-1) & \alpha_{1,2}\Delta y & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & -\beta_{2,2}\Delta y & -(\alpha_{2,2}\Delta y+1) & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & 1 & 0 & (\beta_{1,n}\Delta y-1) & \alpha_{1,n}h \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & -\beta_{2,n}\Delta y & -(\alpha_{2,n}\Delta y+1) \end{bmatrix}$$

$$\{B\}=\begin{Bmatrix} -\gamma_{1,1}\Delta y-T_{p,0} \\ \gamma_{2,1}\Delta y \\ \vdots \\ -\gamma_{1,n}\Delta y \\ \gamma_{2,n}\Delta y-T_{a,n+1} \end{Bmatrix}$$

การคำนวณหา $\{T\}$ ใน Iteration ที่ 1 จะสมมุติอุณหภูมิของอากาศและเมล็ดข้าวตลอดความยาวท่อ เพื่อคำนวณหาเมทริกซ์ A และเวกเตอร์ B แล้วใช้ผลคำตอบที่ได้เป็นค่าเริ่มต้นของ Iteration ถัดไป และกระทำซ้ำจนกระทั่งผลของคำตอบลู่เข้า

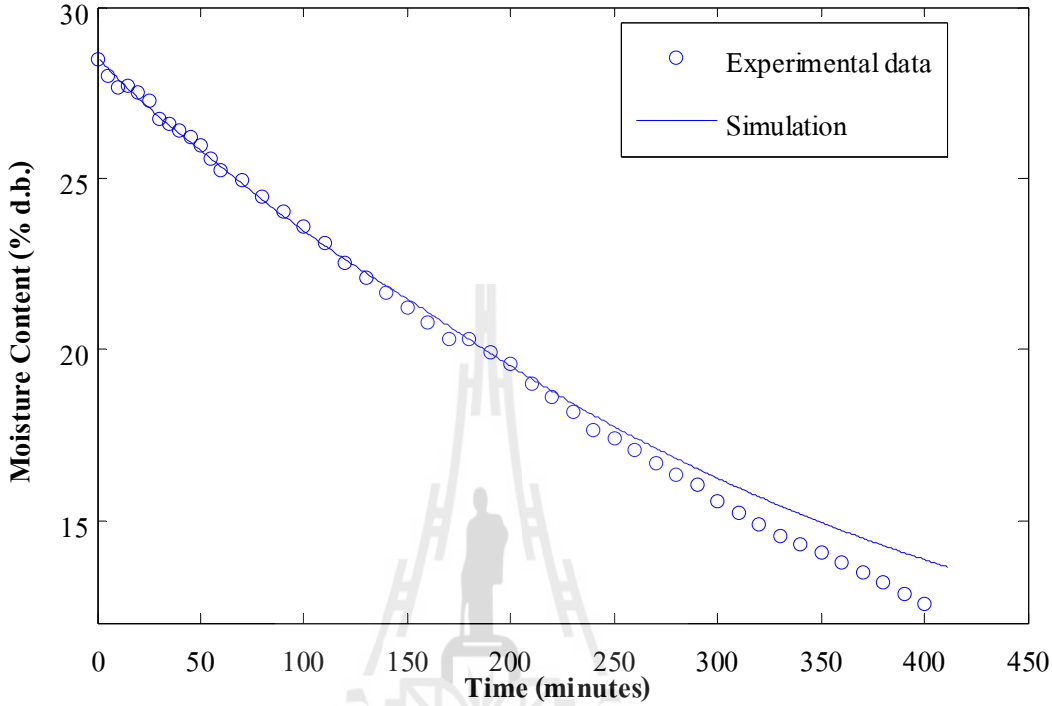
ในส่วนการพักตัว การคำนวณหาความชื้นของเมล็ดข้าวจะใช้ Clank-Nicolson เหมือนกับในส่วนอบแห้งและใช้ RK-4 สำหรับการ Integrate สมการที่ (6.22) เพื่อหาอุณหภูมิของเมล็ดข้าวหลังจากออกจากถังพักเพื่อเข้าสู่ส่วนอบแห้ง

## 6.5 ผลการจำลองผล

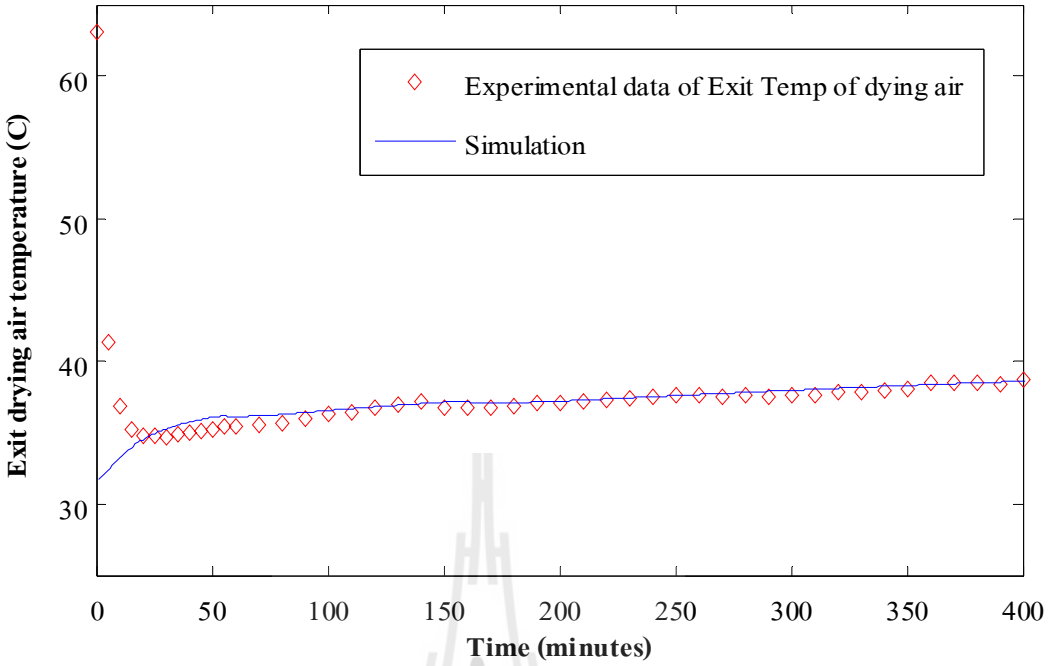
การตรวจสอบความถูกต้องของวิธีการจำลองผลที่ได้นำเสนอ ซึ่งนำไปพัฒนาเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB และใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระที่อุณหภูมิอากาศอบแห้งเท่ากับ 100, 130 และ 150 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วอากาศ 2 เมตรต่อวินาที โดยที่พารามิเตอร์และตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องแสดงในภาคผนวก ก

ผลการจำลองการทดลองอบแห้งที่อุณหภูมิอบแห้ง 100 องศาเซลเซียส แสดงในรูปที่ 6.3 โปรแกรมสามารถทำนายความชื้นได้ใกล้เคียงกับการทดลอง แต่เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นผลการจำลองจะสูงกว่าการทดลอง การทำนายอุณหภูมิทางออกของอากาศอบแห้งนั้นโปรแกรมทำนายผลได้ต่างจากการทดลองในช่วงเวลา 25 นาทีแรกของการอบแห้ง แต่สามารถทำนายผลได้ใกล้เคียงกับการทดลอง

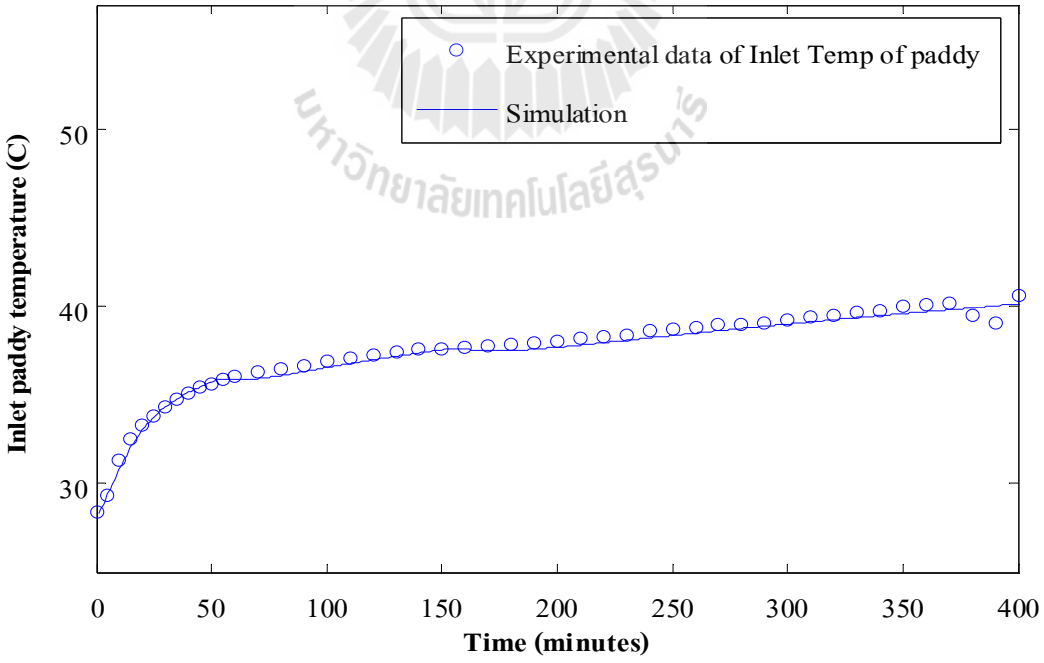
เมื่อผ่าน 25 นาทีแรกไปแล้ว (รูปที่ 6.4) และสำหรับอุณหภูมิทางออกของอากาศอบแห้งแสดงใน รูปที่ 6. 5โปรแกรมสามารถทำนายได้ใกล้เคียงกับการทดลอง



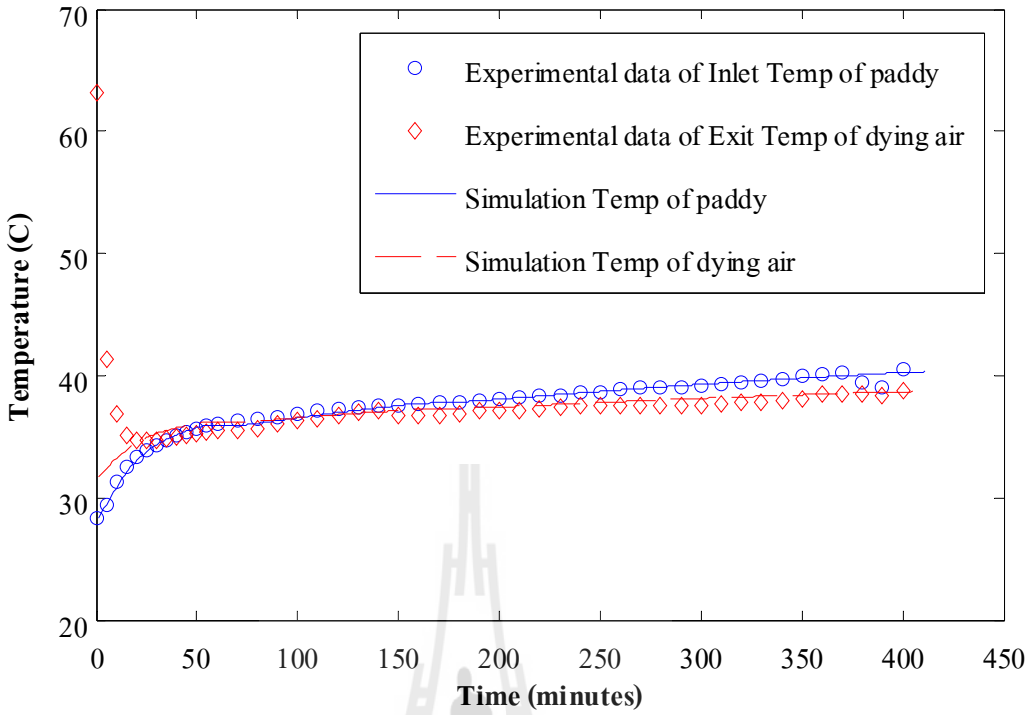

รูปที่ 6. 3 ผลการจำลองความชื้นเทียบกับการทดลองที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 100°C




รูปที่ 6. 4 ผลการจำลองอุณหภูมิทางออกของอากาศอบแห้งเทียบกับการทดลองที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 100°C

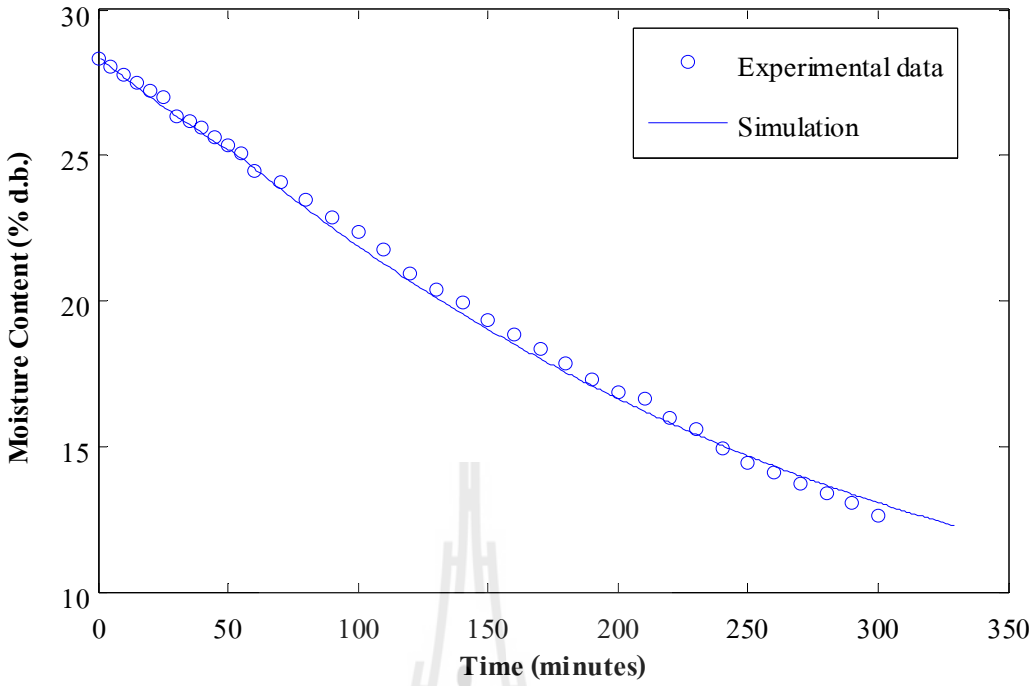



รูปที่ 6. 5 ผลการจำลองอุณหภูมิทางเข้าของข้าวเปลือกเทียบกับการทดลองที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 100°C

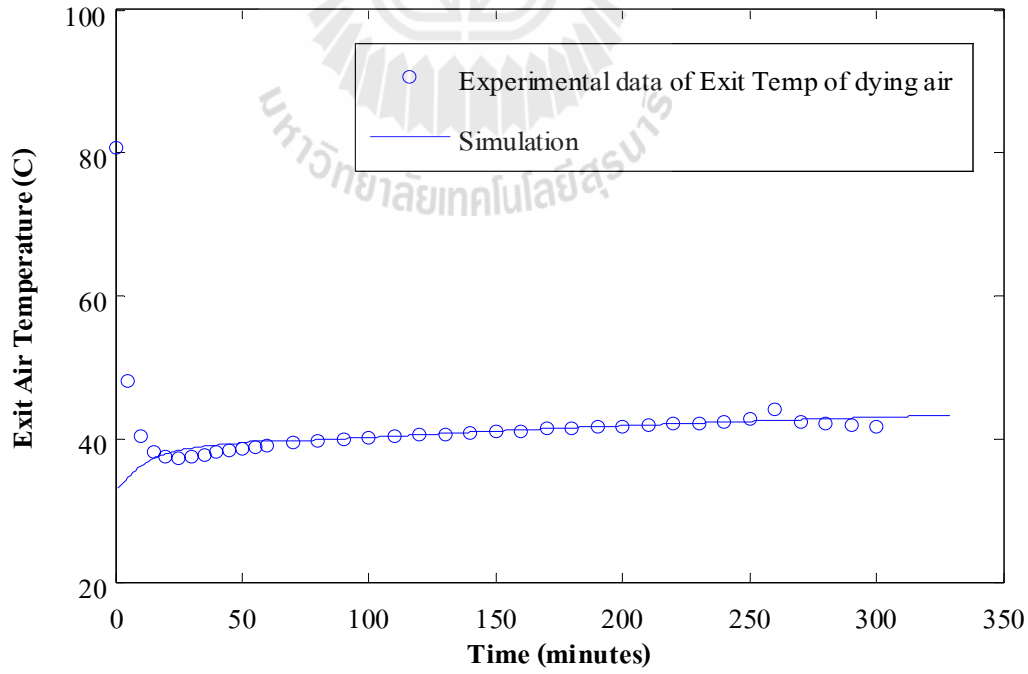



รูปที่ 6. 6 ผลการจำลองอุณหภูมิเทียบกับการทดลองที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 100°C

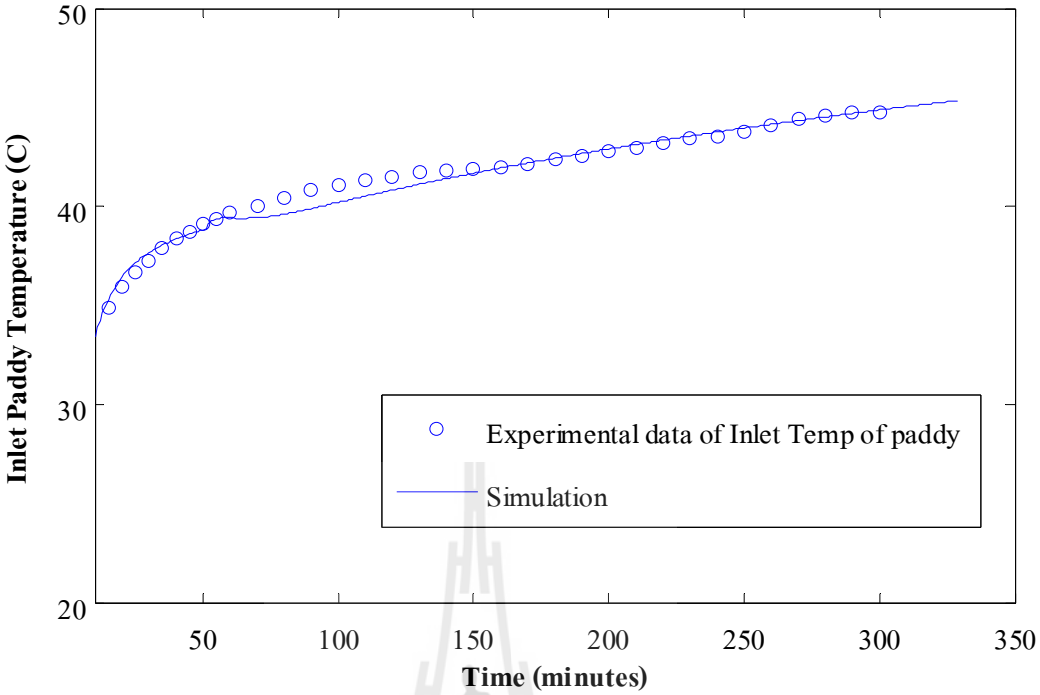
การจำลองผลการอบแห้งที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส โปรแกรมสามารถจำลองผลการลดลงของความชื้นได้ใกล้เคียงกับการทดลอง และผลการจำลองอุณหภูมิอากาศที่ทางออกในช่วง 25 นาทีแรกต่างไปจากการทดลอง เช่นเดียวกันกับที่อุณหภูมิ 100 และ 150 องศาเซลเซียส และเมื่อผ่านช่วง 25 นาทีแรกไปแล้วสามารถจำลองผลได้ใกล้เคียงการทดลอง สำหรับผลการจำลองอุณหภูมิทางเข้าของข้าวเปลือกได้ผลค่อนข้างใกล้เคียงกับการทดลอง แต่ช่วง 50 – 150 นาที ผลการจำลองจะต่ำกว่าการทดลองเล็กน้อย



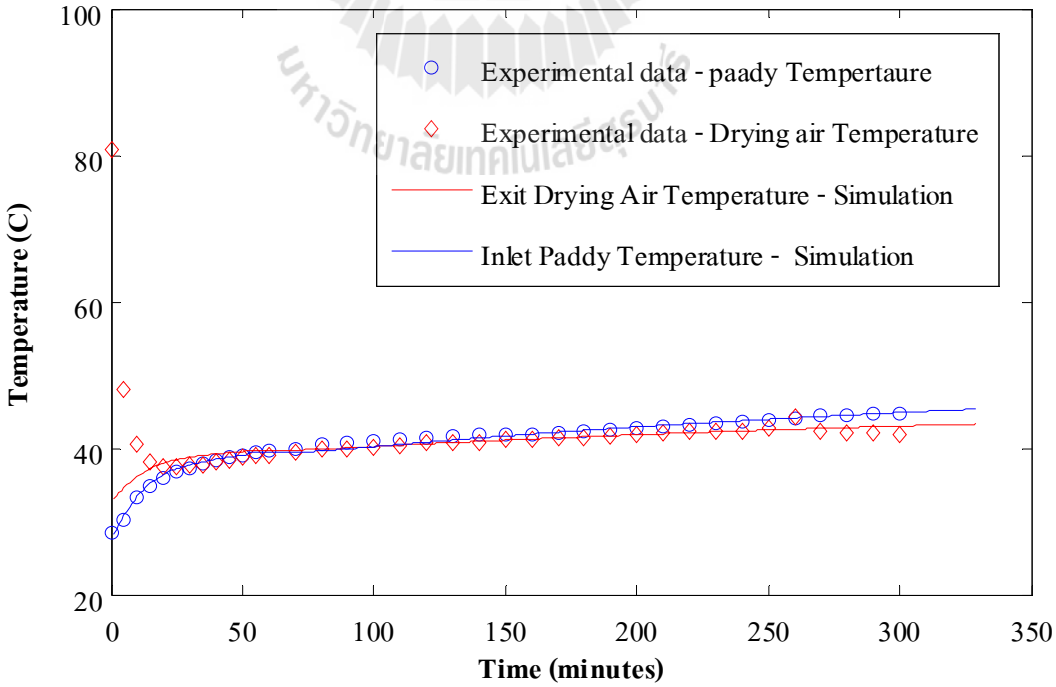

รูปที่ 6. 7 ผลการจำลองความชื้นเทียบกับการทดลองที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 130°C




รูปที่ 6. 8 ผลการจำลองอุณหภูมิทางออกของอากาศอบแห้งเทียบกับการทดลองที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 130°C

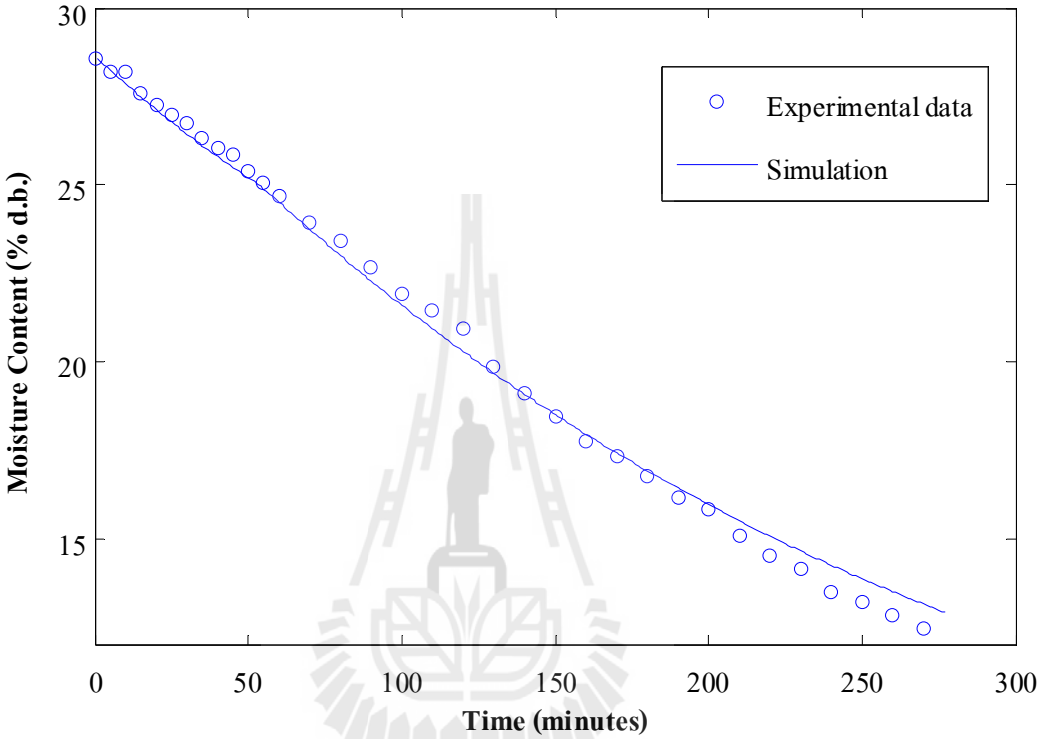



รูปที่ 6. 9 ผลการจำลองอุณหภูมิทางเข้าของข้าวเปลือกเทียบกับการทดลองที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 130°C

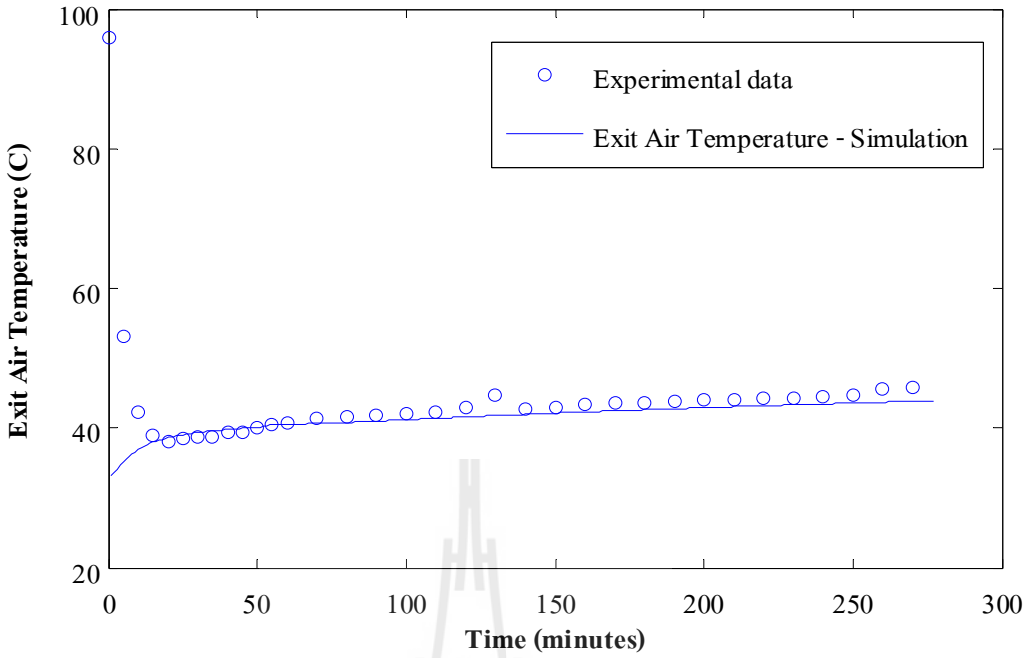



รูปที่ 6. 10 ผลการจำลองอุณหภูมิเทียบกับการทดลองที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 130°C

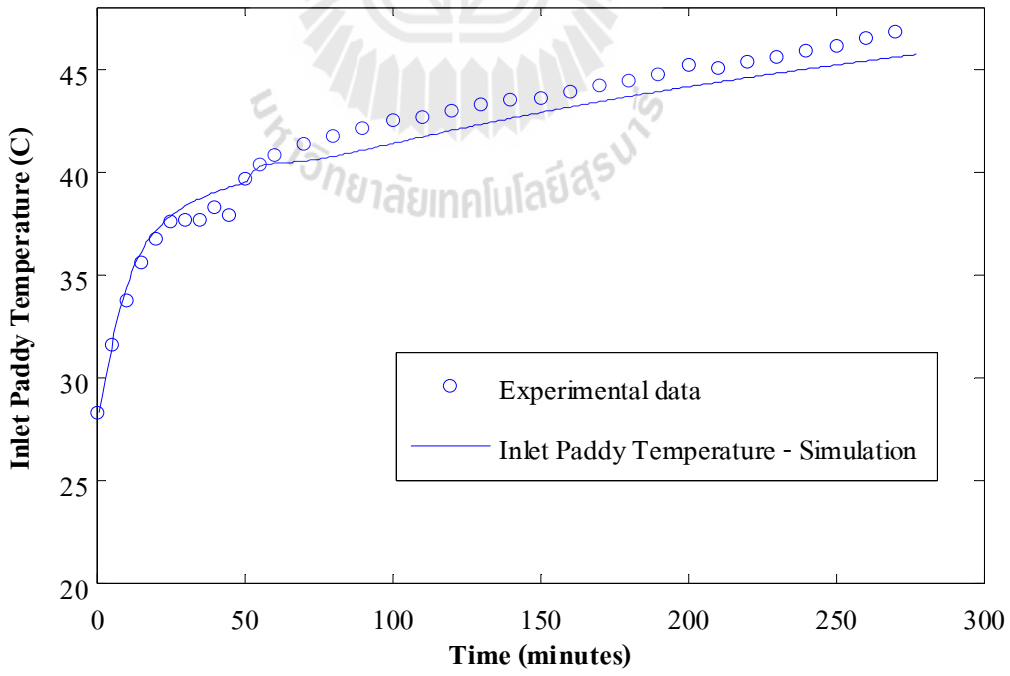
การจำลองผลที่ 150 องศาเซลเซียส โปรแกรมสามารจำลองผลความชื้นได้ใกล้เคียงการทดลอง สำหรับการจำลองอุณหภูมิทางออกของอากาศอบแห้งและอุณหภูมิทางเข้าของเมล็ดข้าวเปลือก เมื่อผ่าน 50 นาทีแรกไปแล้ว โปรแกรมจำลองผลได้ต่ำกว่าการทดลองเล็กน้อย



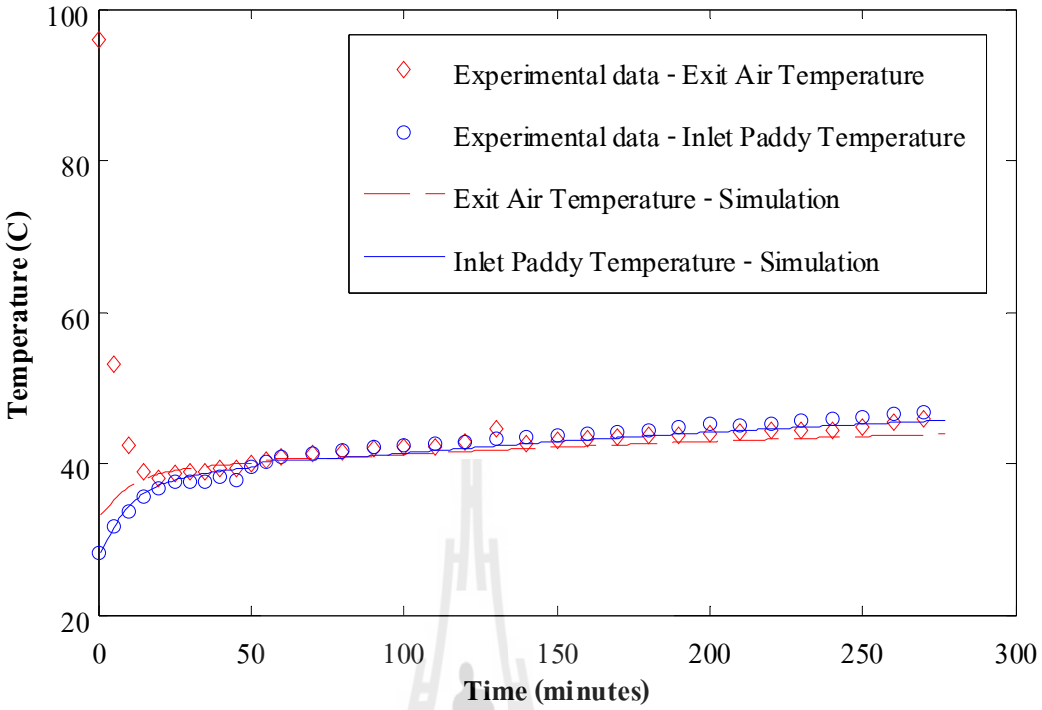

รูปที่ 6. 11 ผลการจำลองความชื้นเทียบกับการทดลองที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 150°C




รูปที่ 6. 12 ผลการจำลองอุณหภูมิทางออกของอากาศอบแห้งเทียบกับการทดลองที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 150°C




รูปที่ 6. 13 ผลการจำลองอุณหภูมิทางเข้าของข้าวเปลือกเทียบกับการทดลองที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 150°C




รูปที่ 6. 14 ผลการจำลองอุณหภูมิเทียบกับการทดลองที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 150°C

## 6.6 วิเคราะห์การทำนายผลของแบบจำลองที่นำเสนอ

การทำนายผลของความชื้นของแบบจำลองที่นำเสนอที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าการทดลอง ในช่วงเวลามากกว่า 200 นาที เนื่องจากเป็นพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจากแบบจำลองการแพร่ ที่เมื่อมีการอบแห้งเป็นเวลานาน ความชื้นที่ผิวถูกแพร่ออกไปมาก ความชื้นก็จะแพร่ออกมาจากเมล็ดได้ยากขึ้น และถึงแม้จะมีการพักตัวในถังพัก แต่เป็นการพักตัวในระยะเวลาสั้น ๆ 59 วินาที จึงทำให้เกิดการแพร่ได้น้อยลง และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่นำมาใช้ในระหว่างพักตัว เป็นค่าที่นำมาจากงานวิจัยในอดีตของ Poomsaad et. al. (2000) จึงทำให้ผลการทำนายคลาดเคลื่อนไปบ้างจากการทดลองเมื่อความชื้นลดลงและอุณหภูมิของเมล็ดสูงขึ้น นอกจากนี้ งานวิจัยของ Law Chung Lim et. al. (2004) ได้แสดงให้เห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ไม่เป็นคงที่ มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามช่วงของการอบแห้ง โดยเฉพาะในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate period) ซึ่งจะต้องทำการทดลองเพิ่มเติมเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่เหมาะสมกับกระบวนการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ

สำหรับการทำนายผลอุณหภูมิอากาศที่ทางออกในช่วง 25 นาทีแรกของการทดลองนั้น เมื่อย้อนกลับไปดูวิธีทำการทดลองจะพบว่า ก่อนเริ่มต้นการทำการทดลอง ผู้ทำการทดลองจะเปิดเครื่องทำความร้อนให้อากาศไหลเข้าสู่ท่ออบแห้งในขณะที่ยังไม่มีเมล็ดข้าว เพื่อทำการปรับแรงดันของ

Heater จนกว่าจะได้อุณหภูมิคงที่ แล้วก็ได้ทิ้งไว้ระยะหนึ่งเพื่อให้อุณหภูมิของอากาศไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งอาจเป็นผลให้เกิดการสะสมความร้อนที่ผนังท่อทางออกของเครื่องอบแห้งจึงทำให้ช่วงต้นอุณหภูมิที่วัดได้เป็นค่าที่มากกว่าความเป็นจริง อีกทั้ง เงื่อนไขเริ่มต้นของการจำลองผลและการทดลองในช่วงต้นไม่เหมือนกัน เพราะที่วินาทีที่ 0 ของการทำลองยังไม่มีข้าวเปลือกอยู่ในท่ออบแห้ง แต่ในการจำลองผลของแบบจำลอง จะเปรียบเสมือนมีข้าวเปลือกอยู่เต็มท่ออบแห้งแล้ว นั่นเอง

## 6.7 สรุปผลการวิจัย

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการอบแห้ง สำหรับเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระและวิธีการจำลองผลด้วยวิธีการเชิงตัวเลข ที่ได้นำเสนอในการศึกษานี้ สามารถจำลองผลการทั้งอุณหภูมิและความชื้นที่เงื่อนไขอุณหภูมิอากาศอบแห้ง ที่ 100, 130 และ 150 องศาเซลเซียส ได้ใกล้เคียงกับการทดลอง โดยยังมีข้อผิดพลาดในการจำลองผลอุณหภูมิอากาศในช่วง 0 - 25 นาที แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อผ่าน 25 นาทีแรกไปแล้วแบบจำลองสามารถจำลองผลได้ดี และสามารถนำไปใช้ทำนายผลการทดลองที่เงื่อนไขการอบแห้งอื่น ๆ ได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# บทที่ 7
# การวิเคราะห์หาตัวแปรไร้มิติสำหรับเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ

## 7.1 บทคัดย่อ

การสร้างตัวแปรไร้มิติของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบหล่นอิสระ ด้วยวิธีการสร้างและการวัดด้วยหน่วยวัดคุณลักษณ์ของทวิช จิตรสมบูรณ์ (2547) ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio, MR) กับตัวแปรที่มีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้ง คือ เงื่อนไขการทดลองและลักษณะทางกายภาพของเครื่องอบแห้ง ทำให้ได้ตัวแปรไร้มิติทั้งหมด 6 ตัว คือ

$$MR = f^n\left(\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_p}, \frac{T_a - T_{amb}}{T_{amb}}, \frac{D_c}{L_c}, \frac{D_{eff}}{d_e^2}t, RH\right)$$

เพื่อทดสอบคุณสมบัติความเสมือนทางรูปทรง (geometric similarity) ของกลุ่มตัวแปรไร้มิติของเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระที่ได้สร้างขึ้น จึงทำการคำนวณค่า $\Pi_1$ ที่เปลี่ยนแปลงไปตามการเปลี่ยนแปลงค่า $\Pi_5$ ในกรณีของแบบจำลอง (model) ใช้เครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระขนาดที่ 2 โดยกำหนดให้ค่า $\Pi_2 = 0.01$ และ $\Pi_4 = 0.0368$ และในกรณีของตัวต้นแบบ (prototype) ใช้เครื่องอบแห้งหล่นอิสระขนาดที่ 1 โดยกำหนดให้ค่า $\Pi_2 = 0.01$ และ $\Pi_4 = 0.0376$

จากการวิเคราะห์ ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\Pi_1$ และ $\Pi_5$ มีแนวโน้มสอดคล้องกันทั้งแบบจำลองและตัวต้นแบบ

สมการแบบจำลองตัวแปรไร้มิติสำหรับเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ ที่ใช้สำหรับทำนายอัตราส่วนความชื้นที่ลดลงของข้าวเปลือก ดังนี้

$$\frac{M - M_e}{M_{in} - M_e} = \exp\left(\left(-18.78 \cdot \ln\left(\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_p}\right) - 133.16\right) \cdot \left(\frac{D_{eff}\, t}{d_e^2}\right)\right)$$

โดยที่ผลการทำนาย สามารถทำนายได้ใกล้เคียงกับการทดลอง

## 7.2 บทนำ

ตัวแปรไร้มิติสำหรับของระบบความร้อน (Thermal system) การสร้างตัวแปรไร้มิติมีหลายวิธีด้วยกัน

### 7.2.1 ทฤษฎีของบัคกิงแฮม (Buckingham Pi Theorem)

การหาตัวแปรไร้มิติด้วยกรรมวิธีไพนั้น เริ่มต้นด้วยการเลือกตัวแปรพื้นฐาน (Fundamental variables) ที่เกี่ยวข้องอย่างมีนัยสำคัญ จากนั้นเขียนหน่วยของปริมาณทุกปริมาณในรูปของหน่วยวัดบริสุทธิ์ เช่น M (มวล), L (ความยาว) และ T (เวลา) จากนั้นนำตัวแปรพื้นฐานมายกกำลังและคูณกันทั้งหมด ซึ่งเป็นการทำกลุ่มของไพ แล้วนำไปหารตัวแปรที่ต้องการจะวัด ซึ่งจะได้พจน์ที่ไม่มีหน่วย (unit) ก็ต่อเมื่อกำลังของหน่วยบริสุทธิ์ของจำนวนเศษและจำนวนส่วนเท่ากัน จากนั้นแก้สมการหาค่าของเลขยกกำลังก็จะได้ตัวแปรไร้มิติที่ต้องการ

### 7.2.2 การสร้างและการวัดด้วยหน่วยวัดคุณลักษณ์ (ทวิช จิตรสมบูรณ์, 2547)

เป็นวิธีการสร้างตัวแปรไร้มิติอีกวิธีหนึ่ง โดยการสร้างหน่วยวัดพื้นฐานจากตัวแปรพื้นฐานเสียก่อนโดยใช้วิธีการคำนวณอย่างง่าย จากนั้นนำหน่วยวัดพื้นฐานไปประกอบกันเป็นหน่วยวัดปริมาณต่าง ๆ โดยตรงหรือที่เรียกว่า หน่วยวัดคุณลักษณ์ แล้ววัดตัวแปรที่ต้องการด้วยหน่วยวัดคุณลักษณ์ที่สร้างขึ้นสำหรับตัวแปรนั้น ๆ ซึ่งวิธีการจะแตกต่างจากวิธีของบัคกิงแฮม แต่จะได้ผลลัพธ์สุดท้ายเหมือนกัน และเป็นการลดขั้นตอนที่ไม่ต้องมีการคำนวณหรือแก้สมการเพื่อหาค่าเลขยกกำลัง อีกทั้งการวัดค่าตัวแปรต่าง ๆ ด้วยหน่วยวัดคุณลักษณ์นั้น มีประโยชน์ในการทำความเข้าใจความหมายเชิงกายภาพของตัวแปรได้ดีกว่า

### 7.2.3 ตัวแปรเสมือน (Similarity Variables)

ความเสมือนมี 3 แบบ คือ ความเสมือนทางรูปทรง (Geometric similarity), ความเสมือนทางการเคลื่อนตัว (Kinematics similarity) หมายถึง แนวเส้นการไหล (streamline) มีความเสมือนกัน และความเสมือนทางพลศาสตร์ (Dynamics similarity) คือ แรงที่กระทำต่อรูปทรงมีความเสมือนกัน สำหรับระบบสองระบบจะเหมือนกันทุกประการจะต้องมีความเสมือนกันทั้ง 3 แบบ

ในการทดลองด้วยหุ่นจำลองขนาดเล็ก (Model testing) และการทำงานในต้นแบบขนาดใหญ่ (prototype) จะมีความเสมือนกันเมื่อ ค่าตัวแปรไร้มิติทุกตัวเท่ากัน ดังนั้นตัวแปรไร้มิติของการอบแห้งที่เหมาะสม จะทำให้ไม่ต้องสิ้นเปลืองการสร้างเครื่องขนาดใหญ่และทำการทดลองเพื่อหาจุดออกแบบที่ดี

## 7.3 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

การวิเคราะห์หาตัวแปรไร้มิติสำหรับเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระ ซึ่งเป็นเครื่องอบแห้งแบบลมไหลสวนทาง จะใช้วิธีการสร้างและการวัดด้วยหน่วยวัดคุณลักษณ์ ของทวิช จิตรสมบูรณ์ (2547) เพื่อหาตัวแปรไร้มิติที่เหมาะสมต่อการนำเสนอข้อมูลการทดลอง และประโยชน์สำหรับการออกแบบการทดลองและเครื่องอบแห้งต่อไป โดยมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังนี้

- ส่วนอบแห้ง

$$\frac{dT_a}{dy} = \frac{ha}{G_a c_a + G_a c_v W}\left(T_a - T_p\right) + \frac{h_L A_L}{\left(G_a c_a + G_a c_v W\right)}\left(T_a - T_{amb}\right) \tag{7. 1}$$

$$\frac{dT_p}{dy} = \frac{ha\left(T_a - T_p\right)}{G_p c_p + G_p c_w M} + \frac{h_v + c_v\left(T_a - T_p\right)}{c_p + c_w M}\frac{dM}{dy} \tag{7. 2}$$

$$\frac{dW}{dy} = \frac{G_p}{G_a}\frac{dM}{dy} \tag{7. 3}$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff}\left(\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \left(\frac{2}{r}\right)\frac{\partial M}{\partial r}\right) \tag{7. 4}$$

สำหรับ particle ที่มีรูปทรงเป็นทรงกลมของเมล็ดข้าว จะหาได้จาก

$$D_{eff} = 5.68088 \times 10^{-6} \exp\left(\frac{-3445.6}{T_p}\right) \tag{7. 5}$$

- ส่วนพักตัว

$$\frac{dT_p}{dy} = -\frac{h_L A_L\left(T_a - T_{amb}\right)}{G_p c_p + G_p c_w M} \tag{7. 6}$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = 0 = D_{eff}\left(\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \left(\frac{2}{r}\right)\frac{\partial M}{\partial r}\right) \quad (7.7)$$

โดยที่ $T_a$ คือ อุณหภูมิอากาศอบแห้ง, K

$T_p$ คือ อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก, K

$V_a$ คือ ความเร็วของอากาศ, m/s

$V_p$ คือ ความเร็วเฉลี่ยของเมล็ดข้าว, m/s

$M$ คือ ความชื้นของเมล็ดพืช, kg น้ำ/ kg dry mass

$h_{fg}$ คือ ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ, J/kg

$c_a$ คือ ความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง, J/kg.K

$c_p$ คือ ความร้อนจำเพาะของข้าวเปลือกแห้ง, J/kg.K

$c_w$ คือ ความร้อนจำเพาะของน้ำ, J/kg.K

$h$ คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศกับเมล็ดข้าวเปลือก, J/kg.K

$h_L$ คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างท่ออบแห้งกับอากาศแวดล้อม, J/kg.K

$a$ คือ พื้นที่ผิวในการแลกเปลี่ยนความร้อนของเมล็ดพืชต่อปริมาตร, $m^2/m^3$

$A_L$ คือ พื้นที่ผิวในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างท่ออบแห้งกับอากาศแวดล้อม, $m^2/m^3$

$D_{eff}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่, $m^2/s$

y คือ ความสูงในแนวดิ่งของท่ออบแห้ง, m

t คือ เวลา, s

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับเครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทาง ในสมการที่ (7.1) – (7.4) นี้ จะเห็นว่ามีตัวแปรมากมายที่มีอิทธิพลต่อการลดความชื้นในเมล็ดข้าว สำหรับตัวแปรที่ไม่ปรากฏในสมการ คือ

$L_c$ คือ ความสูง/ยาวของท่ออบแห้งในแนวดิ่ง (เฉพาะส่วนอบแห้ง), m

$D_c$ คือ เส้นผ่านศูนย์กลางท่ออบแห้ง, m

$d_e$ คือ เส้นผ่านศูนย์กลางสมมูลของเมล็ดข้าว, m

$\varepsilon$ คือ ความพรุนของชั้นข้าวเปลือกในท่ออบแห้ง, (-)

$RH$ คือ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ, relative humidity, %

ซึ่งตัวแปรเหล่านี้เป็นตัวแปรแฝงที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรต่าง ๆ ที่ปรากฏอยู่ในสมการควบคุม และเป็นตัวแปรแฝงเหล่านี้มีความสำคัญในต่อการลดความชื้นในข้าวเปลือกด้วย เนื่องจากตัวแปรดังกล่าวข้างต้นเป็นตัวควบคุมกลไกในการถ่ายเทความชื้น เช่น ค่า $D_{eff}$ และ $\phi$ เป็นต้น สำหรับ

$L_c$, $D_c$, $d_e$ เป็นตัวแปรกำหนดลักษณะทางกายภาพของเครื่องอบแห้งและเมล็ดข้าว ซึ่งเป็นตัวกำหนดพื้นที่ผิวในการถ่ายเทความชื้นและอัตราการไหลของอากาศและเมล็ดข้าวนั่นเอง

ในแบบจำลองคณิตศาสตร์ เราจะทราบค่าอุณหภูมิของอากาศและเมล็ดข้าว ความชื้นสัมพัทธ์และความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกในตอนเริ่มต้น รวมทั้งอัตราการไหลเชิงมวลของทั้งอากาศและเมล็ดข้าว ที่เป็นค่าเงื่อนไขการทดลอง ซึ่งจะทำให้สามารถทำนายผลของความชื้นหลังจากออกจากเครื่องอบแห้งได้ หากทราบว่าอัตราการอบแห้งของเครื่องอบแห้งเป็นเท่าใด ซึ่งค่าอัตราการอบแห้งจะหาได้จากการทำการทดลอง ดังนั้นผลการทดลองที่ได้จะทำให้ทราบค่าของอัตราการอบแห้งของเครื่องอบแห้งที่เงื่อนไขการอบแห้งที่กำหนด

ดังนั้นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้ง คือ เงื่อนไขการทดลองและลักษณะทางกายภาพของเครื่องอบแห้งนั่นเอง

อัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR) คือ อัตราส่วนของความชื้นที่ระเหยได้ต่อเวลาที่ใช้ มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิและอัตราเร็วของอากาศที่ใช้ จะได้ว่า

$$DR = \frac{M_{t+dt} - M_t}{\Delta t} \qquad \text{kg น้ำ / (kg dry mass. min)}$$

โดยที่ $M_i$ คือ ความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดพืช, kg น้ำ/ kg dry mass

ในการวิเคราะห์ครั้งนี้ จะหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับตัวแปรที่เกี่ยวข้องในรูปของตัวแปรไร้มิติ โดยที่อัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio, MR) คือ อัตราส่วนของผลต่างความชื้นในเมล็ดพืชกับความชื้นสมดุลของอากาศ ($M_e$) ต่อปริมาณความชื้นมากที่สุดที่เมล็ดพืชสามารถระเหยออกมาได้ที่เงื่อนไขการอบแห้งที่กำหนด นั่นคือ

$$MR = \frac{M - M_e}{M_i - M_e} \qquad \text{kg / kg}$$

สำหรับเงื่อนไขของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง ประกอบด้วย $V_a$, $T_a$, $T_{amb}$, $M_i$ และ $M_e$ โดยที่ $L_c$, $D_c$, $d_e$ เป็นตัวแปรกำหนดลักษณะทางกายภาพของเครื่องอบแห้งและเมล็ดข้าว ซึ่งเวลา $t$ ที่ใช้พิจารณาจะเป็นเวลาที่ข้าวเปลือกอยู่ในท่ออบแห้ง (Resident time) ซึ่งขึ้นอยู่กับความยาวท่ออบแห้งและความเร็วของอากาศอบแห้ง

ตารางที่ 7. 1 ตัวแปรพื้นฐานการอบแห้งแบบหล่นอิสระ

| ตัวแปร | นิยาม | หน่วย | มิติ[a] |
|---|---|---|---|
| MR | อัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio) | - | [1] |
| $V_a$ | ความเร็วของอากาศ | m/s | $LT^{-1}$ |
| $RH$ | ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ, relative humidity | % | [1] |
| $T_a$ | อุณหภูมิอากาศอบแห้ง | K | $\Theta$ |
| $T_{amb}$ | อุณหภูมิอากาศแวดล้อม | K | $\Theta$ |
| $L_c$ | ความสูง/ยาวของท่ออบแห้งในแนวดิ่ง (เฉพาะส่วนอบแห้ง) | m | L |
| $D_c$ | เส้นผ่านศูนย์กลางท่ออบแห้ง | m | L |
| $d_e$ | เส้นผ่านศูนย์กลางสมมูลของเมล็ดข้าว | m | L |
| $t$ | เวลาที่ข้าวเปลือกอยู่ในท่ออบแห้ง | s | T |

หมายเหตุ : [a] L = Length, T = Time และ $\Theta$ = Temperature

จากตารางที่ 7.1 ทำการวิเคราะห์หาตัวแปรไร้มิติดังนี้

**<u>ขั้นที่ 1</u>** เลือกตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการอบแห้ง

ในการอบแห้งจริงเราไม่สามารถควบคุมความชื้นเริ่มต้นของข้าวได้ เนื่องจากการเก็บเกี่ยวข้าวในแต่ละครั้งขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศในขณะนั้นด้วย ดังนั้นการใช้อัตราส่วนของความชื้น ณ เวลาใด ๆ ต่อด้วยความชื้นเริ่มต้นจะทำให้ข้อมูลมีความเสมือนมากกว่า ไม่ว่าจะเริ่มต้นที่ความชื้นเท่าไหร่ก็ตาม ซึ่งจำทำให้ได้ว่า

$$MR = f^n(V_a, RH, T_a, T_{amb}, L_c, D_c, d_e, t)$$

**<u>ขั้นที่ 2</u>** เลือกมิติบริสุทธิ์ จำนวน 3 ตัว คือ มิติของความยาว เวลา และอุณหภูมิ นั่นคือ L, T และ $\Theta$ เนื่องจากตัวแปรในหน่วยมวลในที่นี้เป็นตัวแปรไร้มิติอยู่แล้วจึงไม่นำมาพิจารณา

**ขั้นที่ 3** แจกแจงตัวแปรที่เกี่ยวข้องในรูปมิติบริสุทธิ์ ดังนี้

| | $MR$ | $V_a$ | $RH$ | $T_a$ | $T_{amb}$ | $L_c$ | $D_c$ | $d_e$ | $t$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| L | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| T | 0 | -1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| $\Theta$ | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

**ขั้นที่ 4** เลือกตัวแปรทอน 4 ตัว (เท่าจำนวนมิติบริสุทธิ์)
เลือก $L_c$, $t$ และ $T_a$ เป็นตัวแปรทอน

**ขั้นที่ 5** หามิติบริสุทธิ์จากตัวแปรทอนเหล่านี้ จะได้

$$L = L_c$$

$$T = t$$

$$\Theta = T_{amb}$$

**ขั้นที่ 6** นำตัวแปรในขั้นที่ 5 ไปทอนตัวแปรที่เหลือ เพื่อให้ได้ตัวแปรไร้มิติ สุดท้ายจะได้ เนื่องจากค่าความชื้นเป็นตัวแปรไร้มิติอยู่แล้วจึงทำให้ได้ว่า

$$\prod_1 = \frac{M - M_e}{M_i - M_e}$$

เมื่อพิจารณาตัวแปรที่เป็นความเร็วการไหลของอากาศ จะทำให้ได้ตัวแปรไร้มิติตัวที่ 2 เป็น

$$\prod_2 = \frac{V_a}{L_c} \cdot t$$

ซึ่งเวลา t ที่ใช้เป็นเวลาที่ข้าวเปลือกอยู่ในท่ออบแห้ง (Resident time) และ L คือความยาวของท่ออบแห้ง ตีความหมายได้ว่าเป็นระยะทางที่ทำข้าวเปลือกเคลื่อนที่อยู่ในท่ออบแห้ง ซึ่งอัตราส่วนระหว่างระยะทางและเวลาในท่ออบแห้งนี้ก็คือความเร็วของข้าวเปลือกในท่ออบแห้งนั่นเอง และจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามจำนวนรอบที่ทำการอบแห้ง ทำให้ตัวแปรไร้มิตินี้เป็นอัตราส่วนระหว่างความเร็วของอากาศอบแห้งต่อด้วยความเร็วของข้าวเปลือกในท่ออบแห้ง ซึ่งถ้าใช้ความเร็วอากาศมากขึ้น โดยที่ข้าวจะเคลื่อนที่ด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก และหากกำหนดให้ขนาดของท่อทาง

เท่าเดิม ความเร็วข้าวเปลือกที่ตกลงมาจะคงที่ในแต่ละรอบ ก็จะทำให้ $\Pi_1$ เพิ่มขึ้น ถ้าใช้เวลาเท่ากัน

สำหรับอุณหภูมิของอากาศอบแห้ง เป็นค่าคงที่ที่สามารถกำหนดได้ในการทดลอง แต่เนื่องจากอุณหภูมิของอากาศแวดล้อมมีผลกระทบต่อการอบแห้ง เช่นเดียวกัน ดังนั้น จะได้ตัวแปรไร้มิติเป็น

$$\Pi_4 = \frac{T_a - T_{amb}}{T_{amb}}$$

ตัวแปรไร้มิตินี้อาจตีความหมายได้เป็น ค่าของพลังงานปฐมภูมิที่ให้กับอากาศ เพื่อใช้ในขบวนการอบแห้ง คือ

$$\dot{Q} = \dot{m}_a c_p \left(T_a - T_{amb}\right)$$

หรือ

$$q = c_p \left(T_a - T_{amb}\right)$$

หากแทนค่าลงใน $\Pi_4$ จะได้ว่า

$$\Pi_3 = \frac{q}{c_p T_{amb}} = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_a c_p T_{amb}}$$

ตัวแปรที่เหลือคือ $D_c$ และ $d_e$ จะได้

$$\Pi_4 = \frac{D_c}{L_c}$$

และ $$\Pi_5 = \frac{D_c}{d_e}$$

สำหรับตัวแปรไร้มิติตัวที่ 5 นั้น หากใช้เป็น $\frac{d_e}{L}$ อาจจะสื่อความหมายไม่ชัดเจนมากเท่ากับ $\frac{D_c}{d_e}$ เพราะจะเป็นตัวแทนของการกำหนดลักษณะทางกายภาพของกองเมล็ดข้าวหรือความพรุนนั่นเอง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

หากรวม $\Pi_2$ และ $\Pi_5$ เข้าด้วยกัน จะได้ตัวแปรไร้มิติใหม่คือ

$$\Pi_{2_new} = \frac{V_a t}{L_c} \cdot \frac{D_c}{d_e} = \frac{V_a \cdot D_c}{\frac{L_c}{t} \cdot d_e} = \frac{V_a \cdot D_c}{V_p \cdot d_e}$$

จาก $\Pi_{2,new}$ นี้ ดูเหมือนว่าหากใช้ $\left(\frac{D_c}{d_e}\right)^2$ แทน $\frac{D_c}{d_e}$ จะทำให้การแปลความหมายของ $\Pi_{2,new}$ ชัดเจนยิ่งขึ้น ซึ่งจะทำให้ได้ $\Pi_{2,new}$ เป็นอัตราส่วนระหว่าปริมาตรการไหลของอากาศต่อปริมาตรการไหลของข้าวเปลือก แต่ในการอบแห้ง ความหนาแน่นของอากาศจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ส่วนความหนาแน่นของกองเมล็ดข้าวจะมีการเปลี่ยนแปลงตามความชื้น ทำให้การหาค่า $\Pi_2$ ในระหว่างการทดลองค่อนข้างลำบาก และในการทดลองได้กำหนดการไหลของเมล็ดข้าวเปลือกเป็นอัตราการไหลเชิงมวลดังนั้น สำหรับ $\Pi_2$ จะเปลี่ยนจากปริมาตรการไหลเป็นอัตราการไหลเชิงมวลแทนจะได้

$$\Pi_{2_new} = \frac{\rho_a V_a \cdot D_c^2}{\rho_p V_p \cdot d_e^2} = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_p}$$

จากขั้นตอนที่ 6 สามารถสรุปตัวแปรไร้มิติที่ได้ทั้งหมด 3 ตัวดังนี้

$$\Pi_1 = \frac{M - M_e}{M_i - M_e}$$

$$\Pi_{2_new} = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_p}$$

$$\Pi_3 = \frac{T_a - T_{amb}}{RH \cdot T_{amb}}$$

$$\Pi_4 = \frac{D_c}{L_c}$$

ดังนั้น จะได้

$$\Pi_1 = f^n\left(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4\right) = f^n\left(\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_p}, \frac{T_a - T_{amb}}{RH \cdot T_{amb}}, \frac{D_c}{L_c}\right)$$

จากการทดลอง MR จะลดลงตามเวลา ค่า $\Pi_2$, $\Pi_3$ และ $\Pi_4$ ยังไม่มีค่าใดที่ขึ้นกับเวลาในการอบแห้ง ดังนั้น เมื่อ พิจารณาจากตัวแปรและพารามิเตอร์ในสมการควบคุม ตัวแปรที่มีหน่วยของเวลานอกจากความเร็ว ก็คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ $D_{eff}$ มีหน่วยเป็น $m^2/s$ เมื่อใช้ตัวแปรทอน $t$ และใช้ $D_c$ แทน $L_c$ เนื่องจากการแพร่เกิดขึ้นในเมล็ดข้าวเปลือก ตัวแปรทอนที่เป็นขนาดของเมล็ดข้าวน่าจะเหมาะสมกว่าขนาดของเครื่องอบแห้ง ซึ่งจะได้เป็นตัวแปรไร้มิติตัวใหม่ดังนี้

$$\Pi_5 = \frac{D_{eff}}{d_e^2} \times t$$

โดยที่ $\Pi_5$ นี้เป็นที่รู้จักในชื่อ Fourier Number ของการถ่ายเทมวล

สำหรับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม ในขณะทำการทดลองจะเปลี่ยนแปลงน้อยมาก แต่ในการทดลอง อัตราการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมด้วย ซึ่งค่านี้เป็นตัวแปรไร้มิติอยู่แล้ว ดังนั้น จะได้ว่า

$$\Pi_6 = RH$$

ดังนั้น จะได้สมการตัวแปรไร้มิติดังนี้

$$\Pi_1 = f^n\left(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5\right) = f^n\left(\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_p}, \frac{T_a - T_{amb}}{T_{amb}}, \frac{D_c}{L_c}, \frac{D_{eff}}{d_e^2}t, RH\right)$$

## 7.4 วิเคราะห์อิทธิพลของค่า Π ที่มีต่อ $\Pi_1$ โดยใช้ ANOVA

Analysis of Variance หรือเรียกว่า ANOVA คือ การวิเคราะห์หาความแตกต่างของค่ากลางระหว่างประชากร โดยการวิเคราะห์ผ่านค่าความแปรปรวน (Variance) ซึ่งงานวิจัยนี้ได้นำมาใช้ในการวิเคราะห์อิทธิพลของค่า Π ต่าง ๆ ที่มีต่อ $\Pi_1$

### 7.4.1 หลักการของ ANOVA

หลักการของ ANOVA คือเปรียบเทียบ Variation ที่เกิดจากการเอาค่ากลางทุกประชากร มาเป็นกลุ่มเดียวกัน (Between samples variation) กับ Variation ที่เกิดขึ้นในแต่ละกลุ่มตัวอย่าง (Within samples variation) ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{Test statistic} = \frac{\text{Between samples variation}}{\text{Within samples Variation}} \tag{7. 8}$$

ถ้านำข้อมูลของแต่ละประชากรมาหาค่าเฉลี่ย $(\bar{x}_1, \bar{x}_2, ..., \bar{x}_k)$ และในแต่ละกลุ่มหา Standard deviation เราจะเรียกว่า Within-sample variation

และเมื่อนำค่าเฉลี่ยของแต่ละประชากรมาบวกกันและหารด้วยจำนวนค่าเฉลี่ยทั้งหมด จะได้ค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมดจากทุกประชากร และเมื่อหาค่า Standard deviation ก็จะเรียกว่า Between-sample variation

$$\bar{\bar{x}} = \frac{(\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + ... + \bar{x}_k)}{k} \tag{7. 9}$$

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการวิเคราะห์อิทธิพลของค่าปัจจัยทีละค่า โดยใช้ Single-Factor ANOVA คือการวิเคราะห์ ข้อมูลเมื่อการทดลองนั้นมีเพียงปัจจัย (Factor) เดียวเท่านั้นที่ถูกควบคุม (Treat) คือ อุณหภูมิอากาศอบแห้ง ($\prod_3$) จะเรียกว่า Treatmented factor ในขณะที่แต่ละค่าอุณหภูมิอากาศอบแห้ง ในการทดลองนั้น เราจะเรียกว่า Level หรือ Treatment levels ส่วนปัจจัยอื่นจะปล่อยให้คงเดิม ไม่ได้มีการควบคุม และเนื่องจากปัจจัยหรือค่าด้วย ANOVA

สำหรับ คำจำกัดความต่าง ๆ ใน ANOVA มีดังนี้คือ

Sample size คือ $n_1, n_2, ..., n_k$

Sample mean คือ $\bar{x}_1, \bar{x}_2, ..., \bar{x}_k$

Sample variation คือ $s_1^2, s_2^2, ..., s_k^2$

Total sample size คือ $n = n_1 + n_2 + ... + n_k$

Grand average คือ $\bar{\bar{x}}$ คือค่าเฉลี่ยของค่าเฉลี่ย หรือการให้ค่าน้ำหนักหรืออัตราส่วนของ Sample size เทียบกับ Total sample size และค่าเฉลี่ยแต่ละค่า ตามสมการนี้

$$\bar{\bar{x}} = \left(\frac{n_1}{n}\right)\bar{x}_1 + \left(\frac{n_2}{n}\right)\bar{x}_2 + ... + \left(\frac{n_k}{n}\right)\bar{x}_k \tag{7. 10}$$

ค่า Between-samples variation สามารถหาได้จากสมการ

$$SSTr = n_1(\bar{x}_1 - \bar{\bar{x}})^2 + n_2(\bar{x}_2 - \bar{\bar{x}})^2 + ... + n_k(\bar{x}_k - \bar{\bar{x}})^2 \quad (7.11)$$

สำหรับค่า Within-sample variation หาได้จากสมการที่ (7.12) และเนื่องจากสมการเป็นการบวกกันของพจน์กำลังสอง จึงเรียกอีกอย่างว่า “ Treatment sum of squares” หรือเรียกว่า " Sum square of error "

$$SSE = \sum_{j=1}^{n_1}(x_{1j} - \bar{x}_1)^2 + \sum_{j=1}^{n_2}(x_{2j} - \bar{x}_2)^2 + ... + \sum_{j=1}^{n_k}(x_{kj} - \bar{x}_k)^2 \quad (7.12)$$

หรือ

$$SSE = (n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2 + ... + (n_k - 1)s_k^2 \quad (7.13)$$

และเมื่อนำ SSTr มารวมกันกับ SSE เราจึงเรียกว่า Sum square total

$$SST = SSTr + SSE \quad (7.14)$$

เมื่อ SST คือ ผลรวมทั้งหมด จะมี Degree of freedom = n-1 โดยที่ n คือผลรวมของจำนวนตัวอย่าง(ข้อมูล) ทั้งหมดจาก ทุก ๆ Level ส่วน SSTr คือผลรวม ระหว่าง Level จะได้ Degree of freedom = k-1 โดยที่ k คือจำนวน Level และ SSE คือผลรวมที่เกิดจากทุก ๆ ข้อมูลของทุก Level ดังนั้น Degree of freedom = n-k

จุดประสงค์ที่ต้องหาค่า Degree of freedom เนื่องจากต้องการหาค่าเฉลี่ยของแต่ละพจน์ดังนี้

$$MSTr = \frac{SSTr}{k-1} \quad (7.15)$$

$$MSE = \frac{SSE}{n-k} \quad (7.16)$$

MSTr คือ Mean square for treatments (Between-sample)

MSE คือ Mean square error (Within-sample)

อัตราส่วนระหว่าง MSTr กับ MSE คือค่า สถิติที่ใช้ทดสอบ ANOVA (Test statistic) ซึ่งเราเรียกย่อ ๆ ว่า F

$$F = \frac{MSTr}{MSE} \tag{7. 17}$$

ค่าทางสถิติของ ANOVA มีมากมายหลายค่าจึงได้มีการสรุปในรูปตาราง ซึ่งเรียกว่า ANOVA Table ดังแสดงในตารางที่ 7.2

ตารางที่ 7. 2 ตาราง ANOVA

| Source of Variation | DOF | SS | MS | F |
|---|---|---|---|---|
| Between samples (Treatments) | k-1 | SSTr | MSTr | MSTr/MSE |
| Within samples (Error) | n-k | SSE | MSE | |
| Total variation | n-1 | SST | | |

### 7.4.2 อิทธิพลของค่า $\Pi_3$ ที่มีต่อ $\Pi_1$

ค่า $\Pi$ ต่าง ๆ เป็นปัจจัย (Factor) ที่ต้องการทราบผลกระทบต่อการลดลงของความชื้นของข้าวเปลือกหรือ $\Pi_1$ ในการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ สำหรับตัวชี้วัด (response) นั้นใช้เวลารวมในการอบแห้งข้าวเปลือก จากความชื้นเริ่มต้นจนถึง 14% d.b.

โดยสมมุติฐานคือ

Ho: ค่าระยะเวลารวมของแต่ละอุณหภูมิที่ใช้ไม่มีความแตกต่างกัน

Ha: ค่าระยะเวลารวมของแต่ละอุณหภูมิที่ใช้มีความแตกต่างกัน

กำหนดให้ค่าระดับนัยสำคัญ (Significant level ) $\alpha = 0.05$ หรือค่าระดับความเชื่อมั่น (Confidence level) เท่ากับ 95%

การทดสอบอบแห้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ ($\Pi_3$) ได้ทำการทำซ้ำการทดลองที่ค่าปัจจัยนี้จำนวน 3 ครั้ง โดยกำหนดให้ความเร็วเท่ากันที่ 2 m/s (ปัจจัย คืออุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์เริ่มต้นของอากาศอบแห้ง)

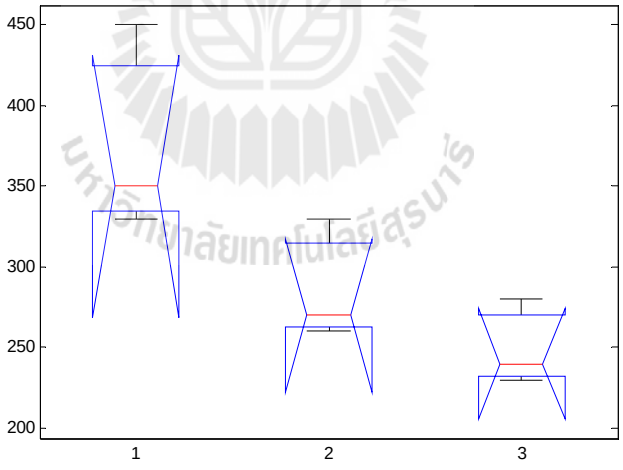
ตารางที่ 7. 3 ผลการทดสอบการอบแห้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ

| Ta = 100 | Ta = 130 | Ta = 150 |
|---|---|---|
| เวลา (t) | เวลา (t) | เวลา (t) |
| 450 | 330 | 280 |
| 350 | 270 | 230 |
| 330 | 260 | 240 |

ผลการวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ Statistics Toolbox ของ MATLAB ได้ผลดังนี้

**ANOVA Table**

| Source | SS | df | MS | F | Prob>F |
|---|---|---|---|---|---|
| Columns | 25488.9 | 2 | 12744.4 | 6.1 | 0.0358 |
| Error | 12533.3 | 6 | 2088.9 | | |
| Total | 38022.2 | 8 | | | |

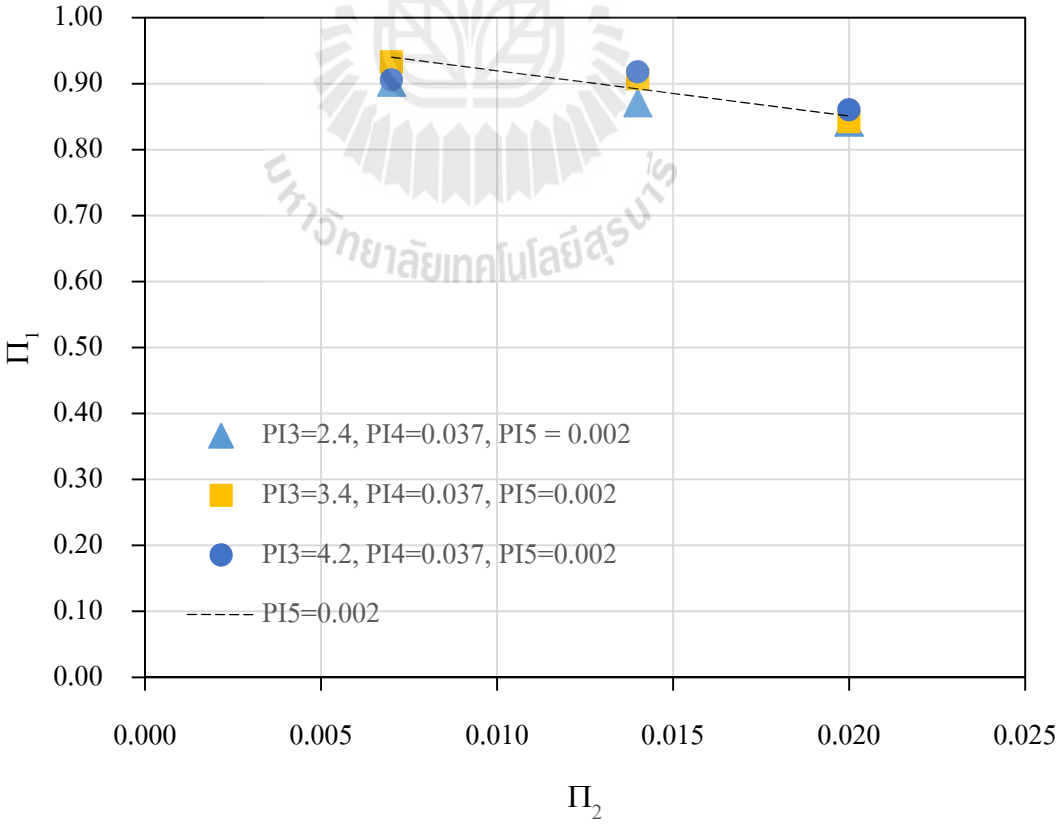



รูปที่ 7. 1 ANOVA table จากการวิเคราะห์ด้วย MATLAB Toolbox

จากผลการวิเคราะห์ ANOVA ได้ค่า P-value = 0.0358 ซึ่งน้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญที่กำหนด จึงทำให้สุมมติฐาน Ho คือ ค่าระยะเวลารวมของแต่ละอุณหภูมิที่ใช้ไม่มีความแตกต่างกัน และสามารถสรุปได้ว่า ปัจจัยที่เป็นอุณหภูมิอากาศอบแห้งและความชื้นสัมพัทธ์เริ่มต้นมีผลต่อการลดลงของความชื้นในระหว่างอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ อย่างมีนัยสำคัญ

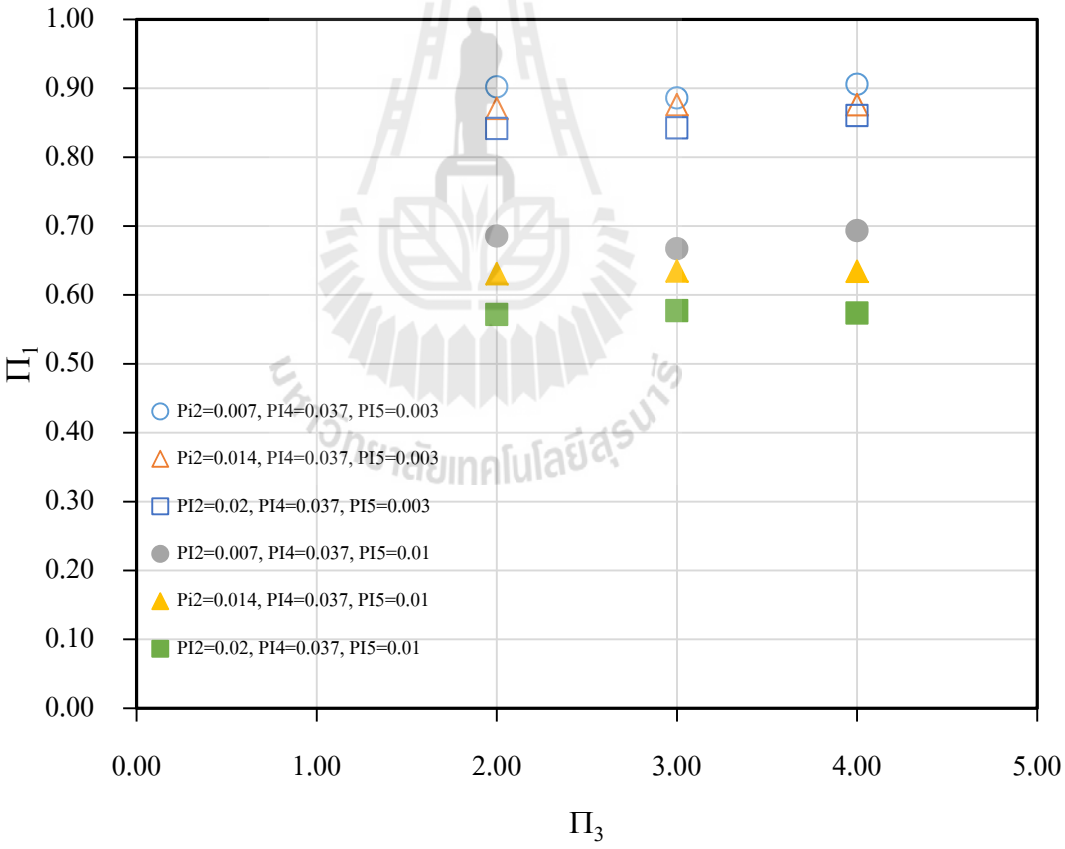
## 7.5 การหาความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้มิติ

ความสัมพันธ์ระหว่าง $\Pi_1 = MR$ และ $\Pi_2 = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_p}$ ดังแสดงในรูปที่ 7.2 จะเห็นว่าตัวแปรไร้ค่า $\Pi_1$ มีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย โดยมีแนวโน้มลดลงเมื่อ $\Pi_2$ มีค่าเพิ่มขึ้น นั่นหมายความว่า เมื่อใช้ความเร็วอากาศเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ข้าวเปลือกมีความพรุนตัวสูงขึ้น เป็นการเพิ่มพื้นที่ในการสัมผัสอากาศร้อน ทำให้ความชื้นของข้าวเปลือกลดลงเร็วขึ้น หรือค่า MR น้อยลงนั่นเอง ซึ่งมีความสอดคล้องตามหลักการทางวิศวกรรมเป็นอย่างดี



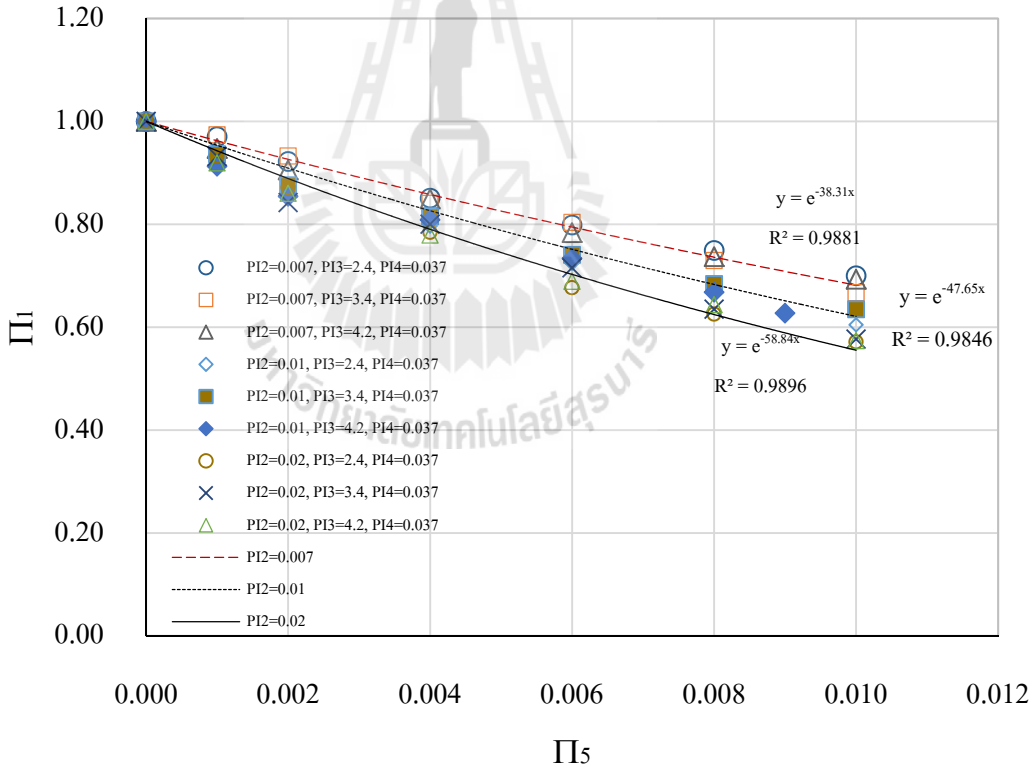
รูปที่ 7. 2 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\Pi_1 = MR$ และ $\Pi_2 = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_p}$

ในรูปที่ 7.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\Pi_1 = MR$ และ $\Pi_3 = \frac{T_a - T_{amb}}{T_{amb}}$ ซึ่งเมื่ออุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงขึ้นจะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น โดยที่ ค่า $\Pi_1$ มีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยเกือบจะคงที่ เมื่อ $\Pi_3$ เพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาปัจจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องอย่างมีนัยสำคัญคือ ความเร็วของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง ($\Pi_2$) ซึ่งจะเห็นว่าค่า $\Pi_2$ มีอิทธิพลต่อการลดลงของความชื้นมากกว่า $\Pi_3$ อย่างเห็นได้ชัด ซึ่งขัดกับการวิเคราะห์อิทธิพลของ $\Pi_3$ ด้วย ANOVA ในหัวข้อที่ 7.4.2 ที่แสดงถึงอิทธิพลของอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่มีผลต่อเวลาที่ใช้ในการอบแห้งเป็นอย่างมาก โดยความขัดแย้งนี้ จะหมดไปเมื่อทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง $\Pi_5$ และ $\Pi_5$ ดังจะได้อภิปรายในลำดับต่อไป




รูปที่ 7. 3 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\Pi_1 = MR$ และ $\Pi_3 = \frac{T_a - T_{amb}}{RH \cdot T_{amb}}$

การวิเคราะห์ ความสัมพันธ์ระหว่าง $\Pi_1 = MR$ และ $\Pi_5 = \frac{D_{eff}}{d_e^2} \cdot t$ ค่า $D_{eff}$ เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการเคลื่อนตัวของความชื้นจากภายในสู่ผิวของเมล็ด ซึ่งเกิดจากการถ่ายเทความร้อนจากอากาศอบแห้งสู่เมล็ด ทำให้เมล็ดมีอุณหภูมิสูงขึ้น เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างรูพรุนภายในเนื้อเมล็ด และส่งผลให้ความดันของความชื้นภายเมล็ดสูงขึ้น ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างความดันไอภายในกับสิ่งแวดล้อม กระบวนการแพร่จึงเกิดขึ้น ยิ่งเมื่อมีความแตกต่างความดันมาก การแพร่จะยิ่งเกิดขึ้นเร็วตามไปด้วย จากผลของการถ่ายเทความร้อนทำให้เกิดการถ่ายเทมวล และเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนตัวของความชื้นภายในเมล็ด อาจกล่าวได้ว่า $\Pi_5$ ได้รวมผลหรืออิทธิพลของอุณหภูมิอากาศอบแห้งไว้แล้ว ซึ่งทำให้อุณหภูมิยังคงมีอิทธิพลต่อการอบแห้ง แต่อยู่ในรูปของเวลาที่ใช้ในการอบแห้งและการถ่ายเทมวล




รูปที่ 7. 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\Pi_1 = MR$ และ $\Pi_5 = \frac{D_{eff}}{d_e^2} \cdot t$

## 7.6 ทดสอบความเสมือนของตัวแปรไร้มิติ

การทดลองใช้เครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ 2 ขนาด คือ เครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระขนาดที่ 1 ขนาดผ่านศูนย์กลางภายใน 8 เซนติเมตร ความยาว 225 เซนติเมตร จะเรียกว่า เครื่องต้นแบบ (prototype) และเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระขนาดที่ 2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4.49 เซนติเมตร ความยาว 115 เซนติเมตร จะเรียกว่า แบบจำลอง (model) สำหรับเครื่องอบแห้งต้นแบบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวประมาณ 2 เท่าของเครื่องอบแห้งแบบจำลอง

การเปรียบเทียบความเสมือนของเครื่องอบแห้งทั้งสองขนาด เมื่อพิจารณาระหว่าง $\Pi_1$ และ $\Pi_2$ ของเครื่องต้นแบบและเครื่องแบบจำลอง ควรจะมีค่าคงที่และเท่ากัน เมื่อกำหนดให้ $\Pi_3$, $\Pi_4$ และ $\Pi_5$ คงที่ ซึ่งพบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนของ $\Pi_2$ ของเครื่องทั้งสองแบบ มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 0.69 – 5.5 โดยถือเป็นค่าที่ยอมรับได้ (ดูตารางที่ 7.4)

ตารางที่ 7. 4 เปรียบเทียบความเสมือนของตัวแปรไร้มิติระหว่างเครื่องอบแห้งต้นแบบและเครื่องอบแห้งขนาดกลาง เมื่อ $\Pi_3$, $\Pi_4$ และ $\Pi_5$ คงที่

| Prototype | | Model | | % error |
|---|---|---|---|---|
| $\Pi_1$ | $\Pi_2$ | $\Pi_1$ | $\Pi_2$ | |
| $\Pi_3$=3.472, $\Pi_4$=0.037 และ $\Pi_5$=0.003 | | | | |
| 0.871 | 0.014 | 0.860 | 0.011 | 1.28% |
| $\Pi_3$=3.472, $\Pi_4$=0.037 และ $\Pi_5$=0.011 | | | | |
| 0.631 | 0.014 | 0.605 | 0.011 | 4.14% |
| $\Pi_3$=4.99, $\Pi_4$=0.037 และ $\Pi_5$=0.002 | | | | |
| 0.908 | 0.013 | 0.901 | 0.010 | 0.69% |
| $\Pi_3$=4.99, $\Pi_4$=0.037 และ $\Pi_5$=0.01 | | | | |
| 0.635 | 0.013 | 0.600 | 0.010 | 5.50% |
| $\Pi_3$=6.308, $\Pi_4$=0.037 และ $\Pi_5$=0.002 | | | | |
| 0.918 | 0.013 | 0.879 | 0.010 | 4.26% |
| $\Pi_3$=6.308, $\Pi_4$=0.037 และ $\Pi_5$=0.01 | | | | |
| 0.634 | 0.013 | 0.617 | 0.010 | 2.78% |

ตารางที่ 7.5 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนระหว่าง $\Pi_1$ และ $\Pi_3$ ของเครื่องทั้งสองแบบ มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 0.46 – 5.54 โดยถือเป็นค่าที่ยอมรับได้

ตารางที่ 7. 5 เปรียบเทียบความเสมือนของตัวแปรไร้มิติระหว่างเครื่องอบแห้งต้นแบบและเครื่องอบแห้งขนาดกลาง เมื่อ $\Pi_2$, $\Pi_4$ และ $\Pi_5$ คงที่

| Prototype | | Model | | % error |
|---|---|---|---|---|
| $\Pi_1$ | $\Pi_3$ | $\Pi_1$ | $\Pi_3$ | |
| $\Pi_2 = 0.014$, $\Pi_4 = 0.037$ และ $\Pi_5 = 0.003$ | | | | |
| 0.871 | 3.487 | 0.860 | 3.817 | 1.28% |
| 0.876 | 5.391 | 0.872 | 5.679 | 0.46% |
| 0.876 | 6.312 | 0.855 | 6.809 | 2.49% |
| $\Pi_2 = 0.014$, $\Pi_4 = 0.037$ และ $\Pi_5 = 0.010$ | | | | |
| 0.631 | 3.487 | 0.605 | 3.817 | 4.14% |
| 0.635 | 5.391 | 0.608 | 5.679 | 4.26% |
| 0.634 | 6.312 | 0.599 | 6.809 | 5.54% |

ตารางที่ 7.6 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนระหว่าง $\Pi_1$ และ $\Pi_5$ ของเครื่องทั้งสองแบบ มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 0.12 – 5.54 โดยถือเป็นค่าที่ยอมรับได้ ดังนั้น จะถือว่า ตัวแปรไร้มิติทั้ง 5 มีคุณสมบัติความเสมือน

ตารางที่ 7. 6 เปรียบเทียบความเสมือนของตัวแปรไร้มิติระหว่างเครื่องอบแห้งต้นแบบและเครื่องอบแห้งขนาดกลาง เมื่อ $\Pi_2$, $\Pi_3$ และ $\Pi_4$ คงที่

| Prototype | | Model | | % error |
|---|---|---|---|---|
| $\Pi_1$ | $\Pi_5$ | $\Pi_1$ | $\Pi_5$ | |
| $\Pi_2 = 0.014$, $\Pi_3 = 3.487$ และ $\Pi_4 = 0.037$ | | | | |
| 1.000 | 0.000 | 1.000 | 0.000 | 0.00% |
| 0.944 | 0.001 | 0.916 | 0.001 | 2.94% |
| 0.871 | 0.003 | 0.860 | 0.003 | 1.28% |
| 0.741 | 0.007 | 0.725 | 0.006 | 2.16% |
| 0.631 | 0.010 | 0.605 | 0.010 | 4.14% |
| 0.802 | 0.005 | 0.797 | 0.004 | 0.71% |
| 0.682 | 0.008 | 0.668 | 0.008 | 2.11% |
| $\Pi_2 = 0.013$, $\Pi_3 = 5.391$ และ $\Pi_4 = 0.037$ | | | | |
| 1.000 | 0.000 | 1.000 | 0.000 | 0.00% |
| 0.936 | 0.001 | 0.933 | 0.001 | 0.37% |
| 0.876 | 0.003 | 0.877 | 0.002 | 0.12% |

ตารางที่ 7. 7 เปรียบเทียบความเสมือนของตัวแปรไร้มิติระหว่างเครื่องอบแห้งต้นแบบและเครื่องอบแห้งขนาดกลาง เมื่อ $\Pi_2$, $\Pi_3$ และ $\Pi_4$ คงที่ (ต่อ)

| Prototype | | Model | | % error |
|---|---|---|---|---|
| $\Pi_1$ | $\Pi_5$ | $\Pi_1$ | $\Pi_5$ | |
| 0.741 | 0.006 | 0.727 | 0.007 | 1.90% |
| 0.635 | 0.010 | 0.600 | 0.010 | 5.50% |
| 0.815 | 0.004 | 0.814 | 0.004 | 0.19% |
| 0.684 | 0.009 | 0.683 | 0.008 | 0.19% |
| $\Pi_2 = 0.010$, $\Pi_3 = 7.172$ และ $\Pi_4 = 0.038$ | | | | |
| 1.000 | 0.000 | 1.000 | 0.000 | 0.00% |
| 0.953 | 0.001 | 0.939 | 0.001 | 1.50% |
| 0.876 | 0.003 | 0.879 | 0.003 | 0.29% |
| 0.759 | 0.006 | 0.748 | 0.006 | 1.42% |
| 0.634 | 0.010 | 0.617 | 0.010 | 2.78% |
| 0.837 | 0.004 | 0.825 | 0.004 | 1.46% |
| 0.687 | 0.009 | 0.669 | 0.009 | 2.70% |

## 7.7 การสร้างแบบจำลองตัวแปรอิสระของเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ

จากความสัมพันธ์ระหว่าง $\Pi$ กลุ่มต่าง ๆ กับ Moisture ratio (MR หรือ $\Pi_1$) ที่ได้จากการทดลองอบแห้งด้วยเครื่องต้นแบบและโมเดล แต่เนื่องจากการทดลองใช้เวลาและค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงทำให้ไม่มีผลการทดลองที่ค่าตัวแปรอิสระบางตัวเช่น $\Pi_4 = \frac{D_c}{L_c}$, $RH$ และผลการทดลองของตัวแปรอิสระตัวอื่นมีจำนวนจำกัด ดังนั้นจะพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้มิติที่เหลือดังสมการข้างล่างนี้

$$\Pi_1 = MR = f^n(\Pi_2, \Pi_5) = f^n\left(\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_p}, \frac{D_{eff}}{d_e^2}t\right) \tag{7. 18}$$

เนื่องจาก $M(y, t=0) = M_{in}$ ทำให้ได้ $MR = 1$ ที่ t = 0 ดังนั้นสมการที่ (7.18) สามารถเขียนได้ในรูปของสมการเอ็กซ์โปเนเชียล ดังนี้

$$\Pi_1 = MR = \exp\left( F_1\left(\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_p}\right) \cdot F_2\left(\frac{D_{eff}}{d_e^2} t\right)\right) \quad (7.19)$$

เขียนให้อยู่ในรูปของลอการิทึม จะได้

$$\ln(MR) = F_1\left(\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_p}\right) \cdot F_2\left(\frac{D_{eff}}{d_e^2} t\right) \quad (7.20)$$

จากรูปที่ 7.4 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง $\Pi_1$ และ $\Pi_5$ เมื่อค่า $\Pi_2$ คงที่ ซึ่งจะอยู่ในรูปสมการเอ็กซ์โปเนเชียล ดังนี้

$\Pi_1 = e^{-38.31\Pi_5}$ $\quad R^2 = 0.9881$ เมื่อค่า $\Pi_2 = 0.007$

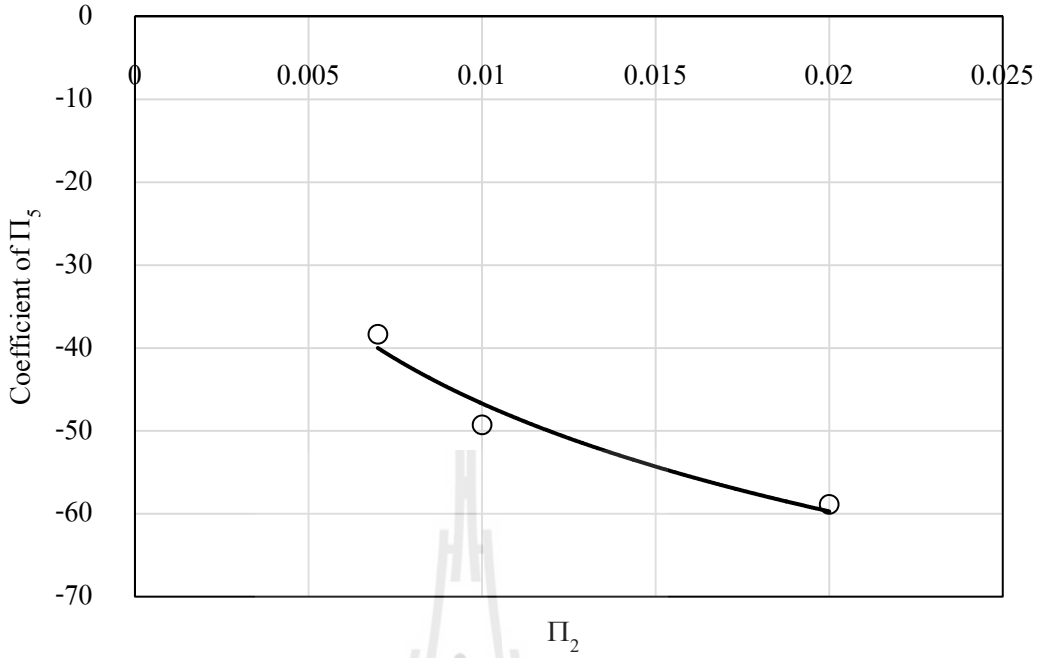
$\Pi_1 = e^{-49.25\Pi_5}$ $\quad R^2 = 0.993$ เมื่อค่า $\Pi_2 = 0.01$

$\Pi_1 = e^{-58.84\Pi_5}$ $\quad R^2 = 0.9896$ เมื่อค่า $\Pi_2 = 0.02$

เมื่อหาสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ของ $\Pi_3$ ที่มีความสัมพันธ์กับ $\Pi_2$ โดยการฟิตกราฟดังรูปที่ 7.5 จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\text{Coefficien t of } \Pi_5 = -18.78 \cdot \ln(\Pi_2) - 133.16 \text{ และ } R^2 = 0.952 \quad (7.21)$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี




รูปที่ 7. 5 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ของ Coefficient of Π3 และ Π2

แทนสมการ (7.21) ลงในสมการ (7.20) จะได้ผลเฉลยดังสมการต่อไปนี้

$$\Pi_1 = e^{\left(-18.78\cdot\ln\left(\Pi_2\right)-133.16\right)\cdot\Pi_5}$$

หรือ

$$\ln\left(\Pi_1\right) = \left(-18.78\cdot\ln\left(\Pi_2\right)-133.16\right)\cdot\Pi_5$$

จะได้

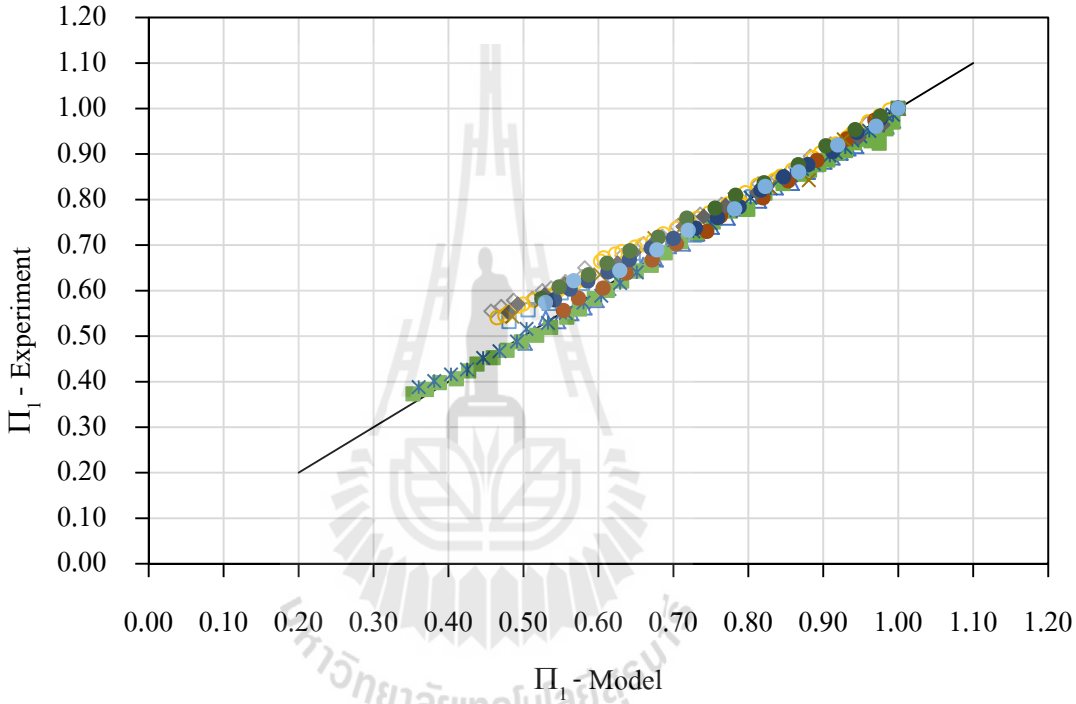
$$\ln\left(\frac{M-M_e}{M_{in}-M_e}\right) = \left(-18.78\cdot\ln\left(\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_p}\right)-133.16\right)\cdot\left(\frac{D_{eff}\,t}{d_e^2}\right) \qquad (7.\ 22)$$

หรือ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

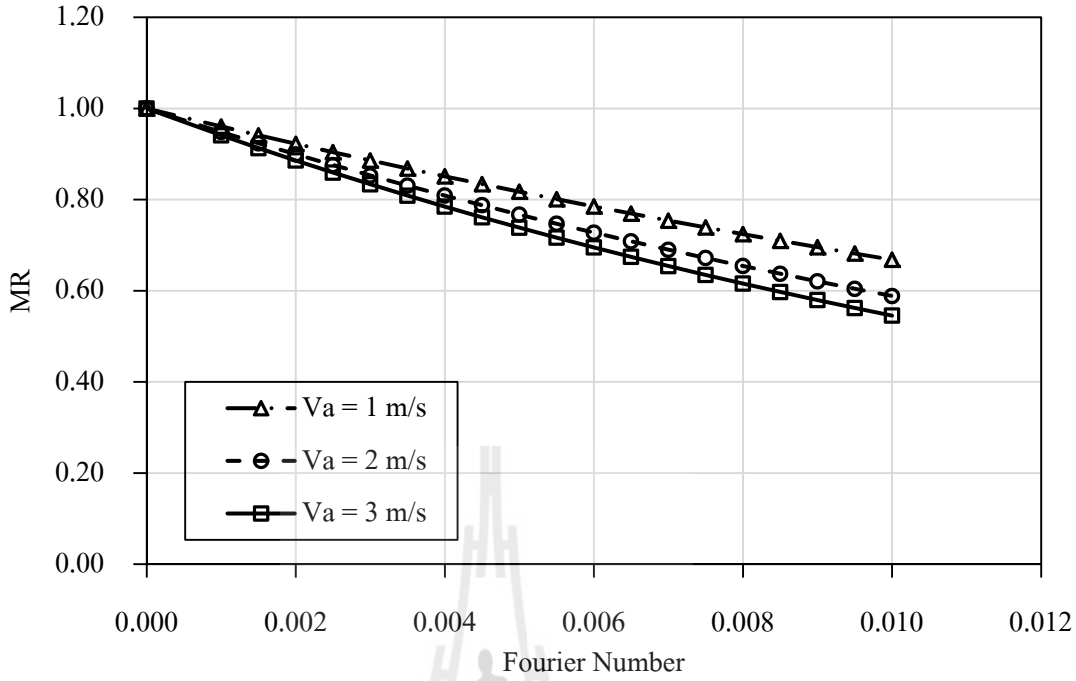
$$\frac{M-M_e}{M_{in}-M_e}=\exp\left(\left(-18.78\cdot\ln\left(\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_p}\right)-133.16\right)\cdot\left(\frac{D_{eff}t}{d_e^2}\right)\right) \quad (7.23)$$

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองตัวแปรอิสระที่สร้างขึ้นและการทดลอง ด้วยการเปรียบเทียบกับค่า $\Pi_1$ ที่ทำนายได้กับผลการทดลอง แสดงในรูปที่ 7.6 จากรูปพบว่าค่าที่ทำนายค่อนข้างซ้อนทับกับเส้นตรง ซึ่งแสดงถึงความเหมาะสมของแบบจำลองของตัวแปรอิสระที่นำเสนอ




รูปที่ 7. 6 ผลการทำนายของแบบจำลองตัวแปรไร้มิติกับผลการทดลอง

สมการปฏิสัมพันธ์ (สมการ 7.23) สำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกแบบหล่นอิสระนี้มีข้อจำกัดคือ เครื่องอบแห้งที่ใช้จะต้องมีค่าสัดส่วนระหว่าง ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวท่อ ($\Pi_4=\frac{D_c}{L_c}$) เท่ากับ 0.037 และมีค่าความชื้นสัมพัทธ์อยู่ระหว่าง 50 – 60% เท่านั้น โดยที่รูปที่ 7.7 จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fourier number และค่าอัตราส่วนความชื้นของเมล็ดจากสมการปฏิสัมพันธ์ ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามความเร็วอากาศอบแห้ง




รูปที่ 7. 7 แสดงความสัมพันธ์ของ Fourier Number และ Moisture Ratio

## 7.8 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ ได้วิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้มิติสำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ ซึ่งผลการจำลองจากแบบจำลองตัวแปรอิสระที่ได้ สอดคล้องกับการทดลอง โดยที่ตัวแปรไร้มิติทั้ง 5 ตัวที่นำเสนอ เป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการลดลงของความชื้นของข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ โดยที่ ในแบบจำลองเหลือตัวแปรไร้มิติเพียง 3 ตัว เนื่องจากผลการทดลองที่มีไม่เพียงพอ ซึ่งหากต้องการแบบจำลองรวมผลกระทบของ $\Pi_4 = \frac{D_c}{L_c}$ โดยอาจจะต้องทำการทดลองเพิ่มเติม โดยออกแบบเครื่องอบแห้งในขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวต่าง ๆ หรืออาจใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อจำลองผลการอบแห้งแทนการทดลอง

# บทที่ 8
# สรุปและข้อเสนอแนะ

เครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ ที่ใช้ในการทดลองนั้น ยังมีข้อบกพร่องเรื่องของลมร้อนที่ไหลลงด้านล่าง แม้จะแก้ไขด้วยการติดตั้งลิ้นกั้นลมแล้วก็ตาม แต่กล่องลิ้นฯ สามารถกั้นลมไหลลงได้เพียงบางส่วนและทำงานได้ดีเฉพาะช่วงอัตราเร็วอากาศ 1 – 2 เมตรต่อวินาที การแก้ไขในส่วนนี้ ผู้วิจัยได้ออกแบบถังพักรูปทรงกรวยที่มีขนาดใหญ่กว่าถังพักด้านบนท่อออบแห้งเล็กน้อย นำไปติดตั้งแทนลิ้นกั้นลม โดยที่ถังพักนี้จะปิดสนิท และจะใช้กองข้าวเปลือกที่กองอยู่ในถังพักเป็นตัวกั้นลมเหมือนเดิม ซึ่งคาดว่า จะสามารถทำงานได้ดีกว่าลิ้นกั้นลม เนื่องจากถังพักมีขนาดใหญ่กว่าสามารถบรรจุกองข้าวเปลือกได้มากขึ้น โดยที่ชั้นกองข้าวเปลือกเปรียบเสมือนกำแพงหนาทำให้ลมไหลลงด้านล่างได้น้อยลง แต่ข้อเสียคือขนาดความจุของเครื่องอบแห้งจะลดลงเนื่องจากถังพักด้านล่างมีขนาดเล็กกว่าเดิม สำหรับถังพักทรงกรวยนี้ ได้ติดตั้งเรียบร้อยแล้ว ส่วนการทดสอบอุปกรณ์จะเป็นงานวิจัยที่จะทำต่อไปในอนาคต

ในการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระนั้น ขั้นตอนการทดลองค่อนข้างยุ่งยาก และต้องใช้ผู้ทำการทดลองอย่างน้อย 3 คนขึ้นไป โดยเฉพาะในตอนเริ่มต้นทำการทดลอง ซึ่งประกอบไปด้วย ผู้ควบคุมการปล่อยตกข้าวเปลือกในตอนเริ่มต้น ผู้ควบคุมคอมพิวเตอร์สำหรับบันทึกการทดลอง และผู้เก็บตัวอย่างในการทดลอง โดยงานวิจัยในอนาคต จะออกแบบให้ระบบต่าง ๆ เป็นอัตโนมัติ เพื่อลดจำนวนผู้ทำการทดลอง และเพิ่มความสะดวกสบายทำให้สามารถทำการทดลองในเงื่อนไขต่าง ๆ ได้มากขึ้น

การทดลองอบแห้งข้าวเปลือกในงานวิจัยนี้ ใช้ข้าวเปลือกสดและเป็นข้าวเปลือกที่เก็บเกี่ยวพร้อมกันในทุกการทดลอง ทำให้ความชื้นเริ่มต้นมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ในการทดลองไม่สามารถควบคุมความชื้นสุดท้าย (14%w.b.) ของแต่ละการทดลองให้เท่ากันได้ อีกทั้งความชื้นที่ได้เมื่อสิ้นสุดการทดลอง มีค่าต่ำมากประมาณ 11 - 12%w.b. และเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวอ้างอิงหรือข้าวมาตรฐาน ปริมาณร้อยละต้นข้าวจึงต่ำกว่ามาก นอกจากนี้ การใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งค่อนข้างสูง ความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้เกรเดียนท์ความชื้นภายในเมล็ดสูง ซึ่งเป็นเหตุให้เกิดการแตกร้าวของเมล็ดข้าวเปลือก แต่อย่างไรก็ดี ผลการทดลองที่ได้ทำให้ทราบถึงสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ ที่สามารถลดความชื้นข้าวเปลือกได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งจะต้องทำการปรับปรุงวิธีการอบแห้งเพื่อให้ได้ปริมาณร้อยละต้นข้าวที่สูงขึ้น เช่น การทอลองเพิ่มเวลาพัก หรือการอบแห้งแบบผสมผสานด้วยการทำ Tempering เพื่อลดเกรเดียนท์ความชื้นในเมล็ดข้าว เป็นต้น

การหาแบบจำลองการอบแห้งชั้นบาง โดยใช้ Genetic Algorithm (GA) นั้น ได้แบบจำลองที่สามารถทำนายการลดลงของความชื้นที่เงื่อนไขการทดลองที่กำหนด แต่ไม่สามารถนำมาใช้ในการทำนายผลที่เงื่อนไขที่อื่น ๆ ได้ เนื่องจากเป็นแบบจำลองเอมไพริเคิล ดังนั้น การจำลองการลดลงของความชื้นในบทที่ 6 จึงใช้แบบจำลองการอบแห้งชั้นบางทางทฤษฎี ในการทำนายผลการลดลงของความชื้นในกระบวนการอบแห้ง เพื่อให้แบบจำลองสามารถใช้ทำนายผลการอบแห้งที่เงื่อนไขอื่น ๆ ได้

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการจำลองผลของกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือก ด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ ได้ผลการจำลองสอดคล้องกับการทดลองทั้งความชื้นและอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก แต่การจำลองผลอุณหภูมิของอากาศอบแห้ง ช่วงเริ่มต้น (เวลา 0 – 25 นาที) การทดลองและการจำลองผลให้ผลตรงกันข้าม เนื่องจากวิธีการจำลองผลในช่วงเริ่มต้นกับการทดลองมีเงื่อนไขที่แตกต่างกัน แต่แบบจำลองสามารถทำนายผลได้สอดคล้องกับการทดลองเมื่อผ่าน 25 นาทีแรกของการทดลองไปแล้ว ซึ่งจะต้องปรับปรุงและพัฒนาแบบจำลองและการจำลองผล ให้มีเงื่อนไขที่สอดคล้องกับผลการทดลองให้มากขึ้น โดยอาจจะทำการทดลองเพิ่มเติมเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับกระบวนการอบแห้ง โดยเฉพาะค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่เหมาะสมกับคุณลักษณ์ของเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ เป็นต้น

สำหรับ ตัวแปรไร้มิติของเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระนั้น สมการปฏิสัมพันธ์ที่ได้สามารถใช้ในการออกแบบเครื่องอบแห้งและการทดลองในเบื้องต้นได้ แต่สำหรับงานวิจัยในขั้นต่อไปควรจะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการจำลองผลการอบแห้ง หรือทำการทดลองที่ค่าเงื่อนไขการอบแห้งและพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพิ่มเติม เพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระต่าง ๆ ที่มีต่ออัตราส่วนความชื้น (MR) โดยอาจใช้เงื่อนไขการทดลองและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น

- ความยาวของท่ออบแห้ง: 1, and 3 m.
- เส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออบแห้ง: 0.16, และ 0.24 m.
- ชนิดของข้าวเปลือก: เมล็ดสั้น, เมล็ดยาวปานกลาง และเมล็ดยาว โดยมี equivalent diameter เท่ากับ 2 และ 3.12

ซึ่งจะทำให้ได้สมการปฏิสัมพันธ์ที่มีความซับซ้อนขึ้น และเป็นประโยชน์ต่อการขยายขนาดเครื่องอบแห้งไปสู่ระดับอุตสาหกรรมต่อไป

# รายการอ้างอิง


กรมทรัพย์สินทางปัญญา.สิทธิบัตรการประดิษฐ์ชื่อ **เครื่องอบแห้งแบบการไหลสวนทางในแนวดิ่ง**. เลขที่สิทธิบัตร 22985. ออกเมื่อ 27 ธันวาคม 2550.

เกรียงไกร เพ็ชรน้ำเขียว. สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ และ ทวิช จิตรสมบูรณ์. (2551). ผลของความเร็วอากาศต่ออัตราการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีข้าวหล่นอิสระอย่างต่อเนื่อง. **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22.** 15 – 17 ตุลาคม 2551. หน้า 166 -170. เล่มที่ 3. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต.

กรมทรัพย์สินทางปัญญา, สิทธิบัตรการประดิษฐ์ชื่อ **"เครื่องอบแห้งแบบการไหลสวนทางในแนวดิ่ง"**, เลขที่สิทธิบัตร 22985, ออกเมื่อ ๒๗ ธันวาคม **๒๕๕๐**

กรมทรัพย์สินทางปัญญา. สิทธิบัตรการประดิษฐ์ชื่อ **เครื่องอบแห้งแบบการไหลสวนทางในแนวดิ่ง**. เลขที่สิทธิบัตร 22985. ออกเมื่อ 27 ธันวาคม 2550.

จุฑาทิพย์ ทองเดชาสามารถ. (2545). **การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันแบบใหม่**. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

ทวิช จิตรสมบูรณ์ และ รุ่ง แก้วกล้า. (2541). ตัวแปรไร้มิติในการอบแห้ง. **สัมมนาวิชาการวิศวกรรมเครื่องกล แห่งประเทศไทยครั้งที่ 12**. 11-13 พฤศจิกายน 2541. หน้า 172-178. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ทวิช จิตรสมบูรณ์. (2544). วิธีการสร้างและการตีความตัวแปรไร้มิติแบบใหม่. **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 15**. 28-30 พฤศจิกายน 2544. หน้า TF 39-45. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

ทวิช จิตรสมบูรณ์. (2547). **กลศาสตร์ของไหล.** พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์ท๊อป.

ทวิช จิตรสมบูรณ์. โศรฎา แข็งการ และ เกรียงไกร เพ็ชรน้ำเขียว. (2549). เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบหล่นอิสระ : รวดเร็วและประหยัดพลังงาน. **การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 2**. 27-29 กรกฎาคม 2549. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.



ทวิช จิตรสมบูรณ์ และ รุ่ง แก้วกล้า. (2541). ตัวแปรไร้มิติในการอบแห้ง. **สัมมนาวิชาการวิศวกรรมเครื่องกล แห่งประเทศไทยครั้งที่ 12**. 11-13 พฤศจิกายน 2541. หน้า 172-178. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ทวิช จิตรสมบูรณ์. (2544). วิธีการสร้างและการตีความตัวแปรไร้มิติแบบใหม่. **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 15**. 28-30 พฤศจิกายน 2544. หน้า TF 39-45. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

ทวิช จิตรสมบูรณ์. โศรฎา แข็งการ และ เกรียงไกร เพ็ชรน้ำเขียว. (2549). เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบหล่นอิสระ : รวดเร็วและประหยัดพลังงาน. **การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 2**. 27-29 กรกฎาคม 2549. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. (2540). **การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท**. พิมพ์ครั้งที่ 7. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ และ ทวิช จิตรสมบูรณ์. (2552a). ผลของระยะพัก ความเร็ว และอุณหภูมิต่ออัตราอบแห้งในเครื่องอบแห้งแบบข้าวเปลือกหล่นอิสระ. **การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่10**. 1 – 3 เมษายน 2552. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ และ ทวิช จิตรสมบูรณ์. (2552b). ผลของระยะพัก อุณหภูมิ และความเร็วอากาศต่อการสิ้นเปลืองพลังงานในการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ. **การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 5**. 29 เมษายน-1 พฤษภาคม 2552. มหาวิทยาลัยนเรศวร.

สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ และ ทวิช จิตรสมบูรณ์. (2552c). เครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ: เงื่อนไขการอบแห้งที่ให้คุณภาพข้าวสารที่ดี. **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 23**. 4 – 7 พฤศจิกายน 2552. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ. (2551). **ผลกระทบการพักข้าวเปลือกต่ออัตราการอบแห้งของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่อนอิสระ**. มหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ. (2551). **ผลกระทบการพักข้าวเปลือกต่ออัตราการอบแห้งของเครื่องอบ**

สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ และ ทวิช จิตรสมบูรณ์. (2552**). ผลของระยะพัก ความเร็ว และอุณหภูมิต่ออัตราอบแห้งในเครื่องอบแห้งแบบข้าวเปลือกหล่นอิสระ,** การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่10, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ และ ทวิช จิตรสมบูรณ์. (2552). **ผลของระยะพัก อุณหภูมิ และความเร็วอากาศต่อการสิ้นเปลืองพลังงานในการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ**, การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 5, มหาวิทยาลัยนเรศวร

สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ และ ทวิช จิตรสมบูรณ์. (2552). **เครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ: เงื่อนไขการอบแห้งที่ให้คุณภาพข้าวสารที่ดี,** การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 23, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

วิวัฒน์ ตัณฑะพาณิชกุล และ Tamon, H. (2548). **เทคโนโลยีอบแห้งในอุตสาหกรรมอาหาร.** สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). กรุงเทพมหานคร.

**แห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่อนอิสระ**. มหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

อาทิตย์ ศรีแก้ว. (2552). **ปัญญาเชิงคำนวณ**, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

AACC (1995). Approved method of the American association of cereal chemists (9th ed.). MN: **American Association of Cereal Chemists St. Paul**.

Bolin, H. R. and Huxsoll, C. C. (1991). **Control of minimally processed carrot (Daucus carota L.) surface discoloration caused by abrasion peeling.** Journal of food science. 56: 416.

Brooker, D. S., Bakker-Arkema, F. W. and Hall, C. W. (1974). **Drying Cereal Grains**. AVI. Westport. CT.

Bruce, D. M. (1984). Simulation of Multiple-bed Concureent-, Counter-, and Mixed-Flow Grain Driers. **Journal of Agricultural Engineering** 30. pp. 361-372.

Bruce, D. M. and Giner, S. A. (1993). Mathematical Modeling of Grain Drying in Counter-flow Beds: Investigation of Crossover of Air and Grain Temperature. **Journal of Agricultural Engineering Research 55.** pp. 143-161.

Bakker-Arkema, F. W., Bickert .W. G. and Petterson, R. J. (1976). Simultaneous heat and mass transfer during the cooling of deep bed of biological products under varying inlet air condition. **Journal of Agricultural Engineering** 12. pp. 297-307.

Brooker, D. S., Bakker-Arkema, F. W. and Hall, C. W. (1974). **Drying Cereal Grains**. AVI. Westport. CT.

Bruce, D. M. (1984). Simulation of Multiple-bed Concureent-, Counter-, and Mixed-Flow Grain Driers. **Journal of Agricultural Engineering** 30. pp. 361-372.

Bruce, D. M. and Giner, S. A. (1993). Mathematical Modeling of Grain Drying in Counter-flow Beds: Investigation of Crossover of Air and Grain Temperature. **Journal of Agricultural Engineering Research 55.** pp. 143-161.

Costa, M. de A. and Taranto, O. P. (2003). Scale-up and Spouting of Two-Dimensional Beds. **The Canadian Journal of Chemical Engineering 18.** April 2003. pp. 264-267.

Chapra, S. C. and Canel, R. P. (1989). **Numerical method for engineer**, McGraw-Hill Book Company, New York.

Costa, M. de A. and Taranto, O. P. (2003). Scale-up and Spouting of Two-Dimensional Beds. **The Canadian Journal of Chemical Engineering 18.** April 2003. pp. 264-267.

Hukill, W. V. (1954). Drying of grain. In Storage of cereal grains and their products (Anderson, J. A. and Alcock, A. W., Eds.) **American association of cereal chemists.** St. Paul.

Kemp, I. C., et al., (2001). **Methods of processing experimental drying kinetics data.** Drying Technology. 19(1): 15 – 34.

Kachru, R. P. and Matthes, R. K. (1976). Kenetics of batch dryer of deep-bed rough rice using dimensional analysis. **American association of cereal chemists.** 53(1). pp. 61-71.

Kachru, R. P. and Matthes, R. K. (1976). Kenetics of batch dryer of deep-bed rough rice using dimensional analysis. **American association of cereal chemists.** 53(1). pp. 61-71.

Lacerda, A. F., Lisboa, M. H. and Barrozo, M. A. S. (2005). Heat and mass transfer in a countercurrent moving bed dryer. **Applied Thermal Engineering.** 25. pp. 2641-2652.

Lacerda, A. F., Lisboa, M. H. and Barrozo, M. A. S. (2005). Heat and mass transfer in a countercurrent moving bed dryer. **Applied Thermal Engineering.** 25. pp. 2641-2652.

Law Chung Lim, Siti Masrinda Tasirin and Wan Ramli Wan Daud. (2004). **Derivation of new drying model from theoretical diffusion controlled drying period.** 14th International Drying Symposium. Brazil.

Laws, N. and Parry, J. L. (1983). Mathematical modeling of heat and mass transfer in agricultural grain drying. **Proc. Roy. Soc.** A 385. pp. 169-187.

Luikov, A. V. (1966). **Heat and mass transfer in Cappillary porous bodies.** Pergamon Press. London.

Madhiyanon T. (2001). **Drying of grains by Spouted Bed Technique.** PhD. Thesis. King Mongkut's University of Technology Thonburi.

Madhiyanon, T., Soponronnarit, S. and Tia, W. (2002). A Mathematical Model for Continuous Drying of Grains in A Spouted Bed Dryer. **Drying Technology** 20(3). pp. 587-614.

Madhiyanon, T., Soponronnarit, S. and Tia, W. (2002). A Mathematical Model for Continuous Drying of Grains in A Spouted Bed Dryer. **Drying Technology** 20(3). pp. 587-614.

Pabis, S. et al. (1998). **Grain drying : Theory and practice.** John Wiley & Son Inc. USA.

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

Soponronnarit, S. (1999). Fluidised-bed paddy drying. **ScienceAsia** 25. pp. 51-56.

Soponronnarit, S. and Prachayawarakorn, S. (2005). Mathematical modeling and simulation of fluidised-bed drying, tempering and ventilation of grains. **KKU Engineering Journal** 23(1). pp. 1-14.

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

Sharp, J. R. (1982). A review of low temperature drying simulation models. **Journal of Agricultural Engineering Res.** 27. pp. 169-190.

Spencer, H. B. (1969). A mathematical simulation of grain drying. **Journal of Agricultural Engineering Res.** 14. pp. 226-235.

Soponronnarit, S. (1999). Fluidised-bed paddy drying. **ScienceAsia** 25. pp. 51-56.

Soponronnarit, S. and Prachayawarakorn, S. (2005). Mathematical modeling and simulation of fluidised-bed drying, tempering and ventilation of grains. **KKU Engineering Journal** 23(1). pp. 1-14.

Vivian, N. P. (2007). **Focus on Food Engineering Research and Developments**, Nova Science Publishers, New York.

Vivian, N. P. (2007)**. Focus on Food Engineering Research and Developments.** Nova Science Publishers. New York.

# ภาคผนวก ก

# การพิสูจน์สมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## การคำนวณในการทดลอง

### ก.1 การคำนวณความเร็วจาก Airflow meter ที่ใช้ในการทดลอง

Airflow meter มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถังเท่ากับ 27 นิ้ว และยาว 42 นิ้ว $\rho g = 0.784$ @ 20 องศาเซลเซียส

เส้นผ่านศูนย์กลางของ orifice เท่ากับ 64.95 มิลลิเมตร ค่า Discharge coefficient, $C_d = 0.6$ มานอมิเตอร์น้ำโมเดล 504

จาก Bernoulli obstruction theory

Continuity: $$Q = \frac{\pi}{4} D_1^2 V_1 = \frac{\pi}{4} D_2^2 V_2$$

Bernoulli: $$p_0 = p_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2$$

กำหนดให้ $V_1 \approx 0$

$$V_2 = \sqrt{\frac{2}{\rho_a}(p_1 - p_2)}$$

$$1.5 m/s = \sqrt{\frac{2}{\rho_a}\Delta p}$$

$$\Delta p = \rho g \Delta H = \frac{1.5^2 \cdot 1.2}{2}$$

$$\Delta H = \frac{1.35}{996 \cdot 9.81}$$

ถ้าความเร็ว

$$63.642^2 \, m/s \, \frac{\rho}{2} = \Delta p$$

$$\Delta p = \frac{6.642^2 \cdot 1.2}{2}$$

$$\Delta H = \frac{26.45}{996 \cdot 9.81} = 2.209 \qquad \text{mmH}_2\text{O}$$

## ก.2 การหาความเร็วเฉลี่ยในท่ออบแห้ง

พื้นที่วงแหวน $A_1 = \pi \times 0.012^2 = 0.0005 \qquad \text{m}^2$

$$A_2 = \pi \times \left(0.022^2 - 0.012^2\right) = 0.0011 \quad \text{m}^2$$

$$A_3 = \pi \times \left(0.032^2 - 0.022^2\right) = 0.0017 \quad \text{m}^2$$

$$A_4 = \pi \times \left(0.042^2 - 0.032^2\right) = 0.0023 \quad \text{m}^2$$

$$V_{avg} = \frac{A_1V_1 + A_2V_2 + A_3V_3 + A_4V_4}{A_1 + A_2 + A_3 + A_4}$$

$$V_{actual} = C_d \cdot V_{avg}$$

$$V_{avg} = \frac{0.0005 \times 1.28 + 0.0011 \times 1.13 + 0.0017 \times 1.02 + 0.0023 \times 0.75}{0.01} = 0.95 \text{ m/s}$$

$$V_{actual} = 0.6 \times 0.95 = 0.70 \qquad \text{m/s}$$

## ก.3 การหาเส้นผ่านศูนย์กลางสมมูลของเมล็ดข้าวเปลือกที่ใช้ในการทดลอง

ข้าวเปลือกพันธ์ชัยนาท 1 ที่ใช้ในการทดลองเป็นข้าวเปลือกชนิดเมล็ดยาว โดยมีขนาดของเมล็ดข้าวเปลือก คือ

- กว้าง (a) = 2.411 มม.
- หนา (b) = 1.931 มม.
- ยาว (c) = 10.309 มม.

ข้าวเปลือกมีรูปทรงยาวและรี การวางตัวในกองข้าวเปลือกมีลักษณะไม่เป็นแบบแผนแน่นอน ดังนั้นเพื่อให้เกิดความสะดวกในการคำนวณรูปทรง จะสมมุติให้ ข้าวเปลือกมีลักษณะเป็น

ทรงกลม โดยจะคำนวณหาเส้นผ่านศูนย์กลางสมมูล (Equivalent diameter, $D_e$) ของข้าวเปลือกจากขนาดจริง ซึ่งจะได้ว่า

$$shearicity = \frac{(abc)^{1/3}}{c} = \frac{D_e}{D_c}$$

โดยที่ $c$ คือ longest dimension จะได้ว่า

$$D_e = (2.411 \times 1.931 \times 10.309)^{1/3} = 3.605 \text{ มม.}$$

## ก.4 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผล

ค่า parameter ต่าง ๆ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิและความชื้นของอากาศและเมล็ดพืชมีดังนี้

ความหนาแน่นของเมล็ดข้าวเปลือกเมล็ดเดียว (kernel density)

$$\rho_k = 1460.695 - 1.738 \cdot M \qquad \text{kg/m}^3$$

ความหนาแน่นกองข้าวเปลือก (bulk density)

$$\rho_b = (1-\varepsilon)\rho_k \qquad \text{kg/m}^3$$

คุณสมบัติทาง Thermodynamics ของอากาศ น้ำ และไอน้ำ หาได้ดังนี้

Vapor Pressure (kPa)

$$P_v = 0.0231 \cdot \left(\frac{1}{18.015}\right) \cdot 8.314 \cdot T_{a,abs}$$

Vapor pressure at Saturate Temperature (kPa)

$$P_{sv} = \exp\left(\begin{array}{l} \frac{-7511.52}{T_{a,abs}} + 89.63121 + 0.02399897 \cdot T_{a,abs} - 1.1624551 \cdot 10^{-5} \cdot T_{a,abs}^2 \\ -1.2810336 \cdot 10^{-8} \cdot T_{a,abs}^3 + 2.0998405 \cdot 10^{-11} \cdot T_{a,abs}^4 - 12.150799 \cdot \ln(T_{a,abs}) \end{array}\right)$$

Relative humidity (decimal)

$$RH = \frac{P_v}{P_{sv}}$$

Humidity Ratio (kg/kg dry air)

$$W = \left(\frac{18.016}{28.964}\right) \cdot \frac{RH \cdot P_s}{\left(P_t - RH \cdot P_s\right)}$$

ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (Latent heat of evaporation)

$$h_{fg} = \left(2505 - 2.386 \cdot T_p\right) \times \left(1 + 2.496 \cdot \exp\left(-21.733 \cdot M\right)\right) \times 10^3 \quad \text{J/kg}$$

ค่าความร้อนจำเพาะ (J/kg.K)

$$c_a = 1.00926 \times 10^3 - 4.043 \times 10^{-2}\left(T_a\right) + 6.1759 \times 10^{-4}\left(T_a\right)^2 - 4.097 \times 10^{-7}\left(T_a\right)^3$$

$$c_v = 1.883 \times 10^3 - 1.6737 \times 10^{-1}\left(T_a\right) + 8.4346 \times 10^{-4}\left(T_a\right)^2 - 2.6966 \times 10^{-7}\left(T_a\right)^3$$

$$c_w = 2.8223 \times 10^3 + 11.828\left(T_p\right) - 3.5043 \times 10^2\left(T_p\right)^2 - 3.601 \times 10^{-5}\left(T_p\right)^3$$

$$c_p = 1.11 \times 10^3 + 44.8 \cdot \frac{M}{\left(1 + M\right)}$$

Thermal conductivity of air (W/m.K)

$$k_a = 2.425 \cdot 10^{-2} + 7.889 \cdot 10^{-5} \cdot \left(T_a\right) - 1.79 \cdot 10^{-8} \cdot \left(T_a\right)^2 - 8.75 \cdot 10^{-12} \cdot \left(T_a\right)^3$$

หรือสามารถหาได้จากอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศหรือข้าวเปลือก

$$\dot{m}_p = (1-\varepsilon)\cdot \rho_k \cdot v_p$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{\dot{m}_p}{\rho_k v_p}$$

สำหรับค่า $a_p$ คือ พื้นที่ผิวของข้าวเปลือกที่สัมผัสกับอากาศต่อปริมาตร ($m^2/m^3$) หาได้จาก

$$a_p = N_p \cdot \pi \cdot d_e^2 \text{ หรือ } a_p = \frac{6(1-\varepsilon)}{D_p}$$

และค่าความชื้นสมดุลหาได้จาก

$$M_{eq} = \frac{1}{100}\left[\frac{\ln(1-RH)}{-3.146\times10^{-6}T_p}\right]^{1/2.464}$$

## ก.5 Heat transfer coefficient

สำหรับ convective air-grain heat transfer coefficient แบบ counter flow moving bed ใช้ความสัมพันธ์ของ Whitaker correlation สำหรับ single sphere

$$Nu = 2 + \left(0.4\,\mathrm{Re}^{0.5} + 0.06\,\mathrm{Re}^{(2/3)}\right)\cdot \mathrm{Pr}^{0.4}\cdot\left(\frac{U_g}{U_{gs}}\right)^{0.25}$$

โดยที่

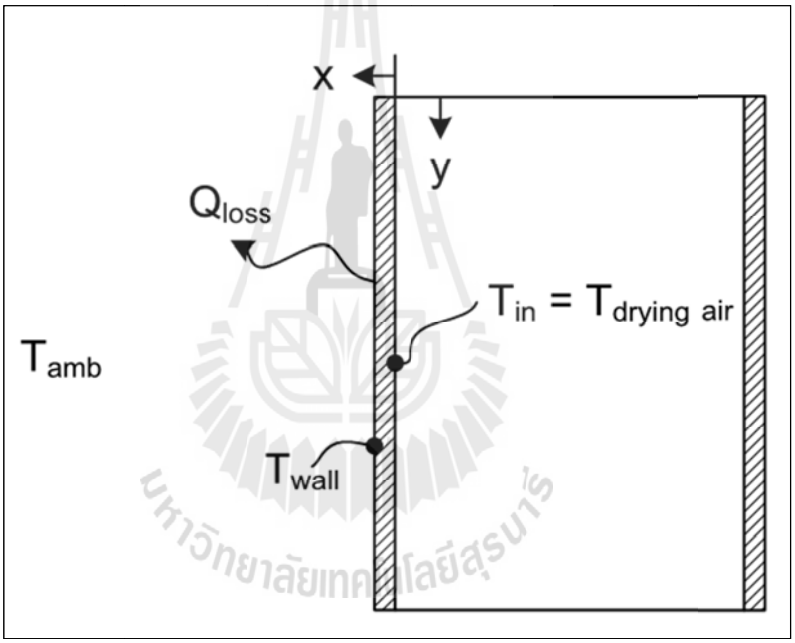
$$Nu = \frac{h_{drying} D_p}{k_a}$$

โดยที่

Prandtl Number = $\Pr = \frac{c_a \mu}{k_a}$

Reynolds Number= $\mathrm{Re} = \frac{v_a \rho_a d_p}{\mu}$

## ก.6 Heat transfer coefficient of Loss




สมมุติฐาน

1. ความหนาของท่อ เท่ากับ 1 มม. ดังนั้นจะประมาณให้ $T_{in} \approx T_{wall}$
2. ความร้อนจากผนังท่อสูญเสียให้อากาศแวดล้อมด้วยการพาความร้อนเท่านั้น
3. $T_{in}$ คงที่ในทิศทางของ y (กำหนดให้เป็น 1-D Heat transfer) ที่สภาวะคงตัว

ดังนั้นจะได้ว่า

$$Q_{loss} = -kA\left.\frac{dT}{dx}\right|_{wall} = h_L A\left(T_{wall} - T_{amb}\right)$$

สำหรับ free-convective heat transfer coefficient ของ vertical Cylinder สามารถหาได้จาก

$$Nu_L = 0.508 \cdot \left(\Pr^{0.5}\right) \cdot \left(0.952 + \Pr\right)^{(-1/4)} \cdot Gr^{(1/4)}$$

$$Gr = \frac{g\beta\left(T_{wall} - T_{amb}\right) \cdot L^3}{\nu^2}$$

$$h_L = \frac{Nu_L \cdot k_a}{L}$$

โดยที่ $Gr$ คือ Grashof Number

$\nu$ คือ kinematic viscosity of Air

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# ภาคผนวก ข

# ตารางข้อมูลการทดลอง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# ตารางข้อมูลการทดลอง

## ข. 1 ตารางการทดสอบวัดความเร็วในท่ออบแห้ง

ตารางที่ ข1. 1 ความเร็วอากาศที่ทางเข้าเครื่องเป่าลม (orifice)

| Orifice ($mm(H_2O)$) | Orifice (mm(Air)) | Invertor (Hz) | $V_{orifice}$ (m/s) | $V_{ท่ออบแห้ง}$ (m/s) | $V_{actual}$ (CD = 0.6) |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 0.5 | 415.83 | 8.20 | 2.86 | 1.17 | 0.70 |
| 1.5 | 1247.50 | 14.80 | 4.95 | 2.03 | 1.22 |
| 2.5 | 2079.17 | 16.50 | 6.39 | 2.62 | 1.57 |
| 3.5 | 2910.83 | 19.70 | 7.56 | 3.10 | 1.86 |
| 4.5 | 3742.50 | 21.60 | 8.57 | 3.51 | 2.11 |
| 5.5 | 4574.17 | 24.50 | 9.47 | 3.88 | 2.33 |
| 6.5 | 5405.83 | 26.10 | 10.30 | 4.22 | 2.53 |
| 7.5 | 6237.50 | 26.90 | 11.06 | 4.53 | 2.72 |
| 8.5 | 7069.17 | 28.90 | 11.78 | 4.82 | 2.89 |
| 10.5 | 8732.50 | 30.60 | 13.09 | 5.36 | 3.22 |
| 11.5 | 9564.17 | 32.10 | 13.70 | 5.61 | 3.37 |
| 12.5 | 10395.83 | 33.10 | 14.28 | 5.85 | 3.51 |
| 13.5 | 11227.50 | 34.00 | 14.84 | 6.08 | 3.65 |
| 15.5 | 12890.83 | 36.90 | 15.90 | 6.51 | 3.91 |
| 16.5 | 13722.50 | 37.80 | 16.41 | 6.72 | 4.03 |
| 19.5 | 16217.50 | 40.80 | 17.84 | 7.31 | 4.38 |
| 21.5 | 17880.83 | 42.50 | 18.73 | 7.67 | 4.60 |
| 23.5 | 19544.17 | 44.10 | 19.58 | 8.02 | 4.81 |
| 25.5 | 21207.50 | 46.20 | 20.40 | 8.36 | 5.01 |
| 27.5 | 22870.83 | 48.10 | 21.18 | 8.68 | 5.21 |
| 29.5 | 24534.17 | 50.10 | 21.94 | 8.99 | 5.39 |
| 31.5 | 26197.50 | 51.90 | 22.67 | 9.29 | 5.57 |
| 33.5 | 27860.83 | 53.50 | 23.38 | 9.58 | 5.75 |
| 35.5 | 29524.17 | 55.10 | 24.07 | 9.86 | 5.91 |
| 37.5 | 31187.50 | 56.60 | 24.74 | 10.13 | 6.08 |
| 39.5 | 32850.83 | 58.20 | 25.39 | 10.40 | 6.24 |
| 41.5 | 34514.17 | 59.80 | 26.02 | 10.66 | 6.40 |

ตารางที่ ข1. 2 ความเร็วอากาศที่ทางออกเครื่องอบแห้ง ทดลองแบบปิดทางออกด้านล่าง

| orifice | orifice | inverter | ตำแหน่งที่ 1 | | | | ตำแหน่งที่ 2 | | | | ตำแหน่งที่ 3 | | | | ตำแหน่งที่ 4 | | | | $V_{avg}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| mm(H2O) | mm(air) | (Hz) | 1 | 2 | 3 | เฉลี่ย | 1 | 2 | 3 | เฉลี่ย | 1 | 2 | 3 | เฉลี่ย | 1 | 2 | 3 | เฉลี่ย | m/s |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.5 | 415.83 | 8.20 | 1.41 | 1.41 | 1.42 | 1.41 | 1.23 | 1.24 | 1.24 | 1.24 | 1.04 | 1.05 | 1.06 | 1.05 | 0.68 | 0.67 | 0.66 | 0.67 | 0.96 |
| 1.5 | 1247.50 | 14.80 | 2.22 | 2.23 | 2.22 | 2.22 | 1.98 | 1.95 | 1.95 | 1.96 | 1.78 | 1.79 | 1.81 | 1.79 | 1.27 | 1.26 | 1.25 | 1.26 | 1.64 |
| 2.5 | 2079.17 | 16.50 | 2.43 | 2.43 | 2.43 | 2.43 | 2.11 | 2.15 | 2.15 | 2.14 | 1.93 | 1.95 | 1.93 | 1.94 | 1.39 | 1.40 | 1.42 | 1.40 | 1.79 |
| 3.5 | 2910.83 | 19.70 | 2.79 | 2.79 | 2.78 | 2.79 | 2.47 | 2.46 | 2.47 | 2.47 | 2.22 | 2.23 | 2.21 | 2.22 | 1.63 | 1.65 | 1.65 | 1.64 | 2.07 |
| 4.5 | 3742.50 | 21.60 | 2.98 | 2.99 | 2.99 | 2.99 | 2.66 | 2.66 | 2.60 | 2.64 | 2.38 | 2.36 | 2.36 | 2.37 | 1.77 | 1.75 | 1.77 | 1.76 | 2.22 |
| 5.5 | 4574.17 | 24.50 | 3.31 | 3.32 | 3.31 | 3.31 | 2.95 | 2.95 | 2.96 | 2.95 | 2.61 | 2.60 | 2.62 | 2.61 | 1.95 | 1.94 | 1.97 | 1.95 | 2.46 |
| 6.5 | 5405.83 | 26.10 | 3.46 | 3.46 | 3.45 | 3.46 | 3.08 | 3.08 | 3.08 | 3.08 | 2.73 | 2.72 | 2.73 | 2.73 | 2.07 | 2.07 | 2.08 | 2.07 | 2.58 |
| 7.5 | 6237.50 | 26.90 | 3.53 | 3.54 | 3.55 | 3.54 | 3.17 | 3.18 | 3.17 | 3.17 | 2.77 | 2.79 | 2.82 | 2.79 | 2.14 | 2.11 | 2.13 | 2.13 | 2.65 |
| 8.5 | 7069.17 | 28.90 | 3.73 | 3.74 | 3.72 | 3.73 | 3.36 | 3.35 | 3.35 | 3.35 | 2.97 | 2.94 | 2.98 | 2.96 | 2.25 | 2.27 | 2.28 | 2.27 | 2.81 |
| 10.5 | 8732.50 | 30.60 | 3.87 | 3.89 | 3.9 | 3.89 | 3.49 | 3.49 | 3.49 | 3.49 | 3.08 | 3.10 | 3.11 | 3.10 | 2.37 | 2.40 | 2.40 | 2.39 | 2.94 |
| 11.5 | 9564.17 | 32.10 | 4.04 | 4.05 | 4.05 | 4.05 | 3.64 | 3.63 | 3.63 | 3.63 | 3.24 | 3.23 | 3.22 | 3.23 | 2.52 | 2.49 | 2.53 | 2.51 | 3.07 |
| 12.5 | 10395.83 | 33.10 | 4.13 | 4.13 | 4.1 | 4.12 | 3.70 | 3.71 | 3.71 | 3.71 | 3.30 | 3.29 | 3.30 | 3.30 | 2.56 | 2.56 | 2.57 | 2.56 | 3.14 |
| 13.5 | 11227.50 | 34.00 | 4.22 | 4.22 | 4.21 | 4.22 | 3.77 | 3.78 | 3.76 | 3.77 | 3.36 | 3.36 | 3.33 | 3.35 | 2.58 | 2.58 | 2.63 | 2.60 | 3.19 |
| 15.5 | 12890.83 | 36.90 | 4.49 | 4.49 | 4.49 | 4.49 | 4.01 | 4.03 | 4.03 | 4.02 | 3.51 | 3.53 | 3.52 | 3.52 | 2.79 | 2.81 | 2.77 | 2.79 | 3.39 |
| 16.5 | 13722.50 | 37.80 | 4.58 | 4.54 | 4.58 | 4.57 | 4.08 | 4.06 | 4.08 | 4.07 | 3.58 | 3.59 | 3.57 | 3.58 | 2.86 | 2.85 | 2.86 | 2.86 | 3.45 |
| 19.5 | 16217.50 | 40.80 | 4.82 | 4.82 | 4.82 | 4.82 | 4.34 | 4.33 | 4.30 | 4.32 | 3.80 | 3.79 | 3.80 | 3.80 | 2.99 | 3.01 | 3.01 | 3.00 | 3.65 |

ตารางที่ ข1. 2 ความเร็วอากาศที่ทางออกเครื่องอบแห้ง ทดลองแบบปิดทางออกด้านล่าง (ต่อ)

| orifice | orifice | inverter | ตำแหน่งที่ 1 | | | | ตำแหน่งที่ 2 | | | | ตำแหน่งที่ 3 | | | | ตำแหน่งที่ 4 | | | | $V_{avg}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| mm(H2O) | mm(air) | (Hz) | 1 | 2 | 3 | เฉลี่ย | 1 | 2 | 3 | เฉลี่ย | 1 | 2 | 3 | เฉลี่ย | 1 | 2 | 3 | เฉลี่ย | m/s |
| 21.5 | 17880.83 | 42.50 | 4.98 | 4.97 | 4.97 | 4.97 | 4.41 | 4.42 | 4.41 | 4.41 | 3.88 | 3.89 | 3.89 | 3.89 | 3.08 | 3.12 | 3.11 | 3.10 | 3.75 |
| 23.5 | 19544.17 | 44.10 | 5.13 | 5.14 | 5.13 | 5.13 | 4.52 | 4.53 | 4.52 | 4.52 | 3.97 | 3.99 | 3.99 | 3.98 | 3.17 | 3.20 | 3.17 | 3.18 | 3.84 |
| 25.5 | 21207.50 | 46.20 | 5.33 | 5.31 | 5.31 | 5.32 | 4.69 | 4.70 | 4.68 | 4.69 | 4.06 | 4.05 | 4.05 | 4.05 | 3.26 | 3.27 | 3.24 | 3.26 | 3.94 |
| 27.5 | 22870.83 | 48.10 | 5.47 | 5.47 | 5.48 | 5.47 | 4.82 | 4.80 | 4.80 | 4.81 | 4.13 | 4.14 | 4.15 | 4.14 | 3.34 | 3.33 | 3.31 | 3.33 | 4.04 |
| 29.5 | 24534.17 | 50.10 | 5.65 | 5.65 | 5.65 | 5.65 | 4.92 | 4.93 | 4.92 | 4.92 | 4.18 | 4.19 | 4.18 | 4.18 | 3.40 | 3.44 | 3.40 | 3.41 | 4.12 |
| 31.5 | 26197.50 | 51.90 | 5.78 | 5.77 | 5.78 | 5.78 | 5.03 | 5.02 | 5.04 | 5.03 | 4.24 | 4.25 | 4.24 | 4.24 | 3.47 | 3.44 | 3.47 | 3.46 | 4.19 |
| 33.5 | 27860.83 | 53.50 | 5.92 | 5.92 | 5.92 | 5.92 | 5.13 | 5.10 | 5.11 | 5.11 | 4.30 | 4.29 | 4.30 | 4.30 | 3.51 | 3.47 | 3.49 | 3.49 | 4.25 |
| 35.5 | 29524.17 | 55.10 | 6.06 | 6.05 | 6.07 | 6.06 | 5.21 | 5.19 | 5.21 | 5.20 | 4.36 | 4.36 | 4.33 | 4.35 | 3.52 | 3.51 | 3.51 | 3.51 | 4.30 |
| 37.5 | 31187.50 | 56.60 | 6.19 | 6.2 | 6.2 | 6.20 | 5.29 | 5.30 | 5.29 | 5.29 | 4.40 | 4.39 | 4.40 | 4.40 | 3.55 | 3.53 | 3.52 | 3.53 | 4.35 |
| 39.5 | 32850.83 | 58.20 | 6.33 | 6.31 | 6.34 | 6.33 | 5.39 | 5.37 | 5.41 | 5.39 | 4.44 | 4.44 | 4.44 | 4.44 | 3.60 | 3.54 | 3.57 | 3.57 | 4.41 |
| 41.5 | 34514.17 | 59.80 | 6.48 | 6.49 | 6.49 | 6.49 | 5.48 | 5.48 | 5.48 | 5.48 | 4.50 | 4.49 | 4.47 | 4.49 | 3.64 | 3.59 | 3.60 | 3.61 | 4.47 |

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข1. 3 ความเร็วอากาศที่ทางออกเครื่องอบแห้ง ทดลองแบบเปิดทางออกด้านล่าง

| orifice | orifice | inverter | ตำแหน่งที่ 1 | | | | ตำแหน่งที่ 2 | | | | ตำแหน่งที่ 3 | | | | ตำแหน่งที่ 4 | | | | $V_{avg}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| mm(H2O) | mm(air) | (Hz) | 1 | 2 | 3 | เฉลี่ย | 1 | 2 | 3 | เฉลี่ย | 1 | 2 | 3 | เฉลี่ย | 1 | 2 | 3 | เฉลี่ย | m/s |
| 0 | 0 | 0.00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.5 | 415.83 | 8.20 | 1.1 | 1.13 | 1.13 | 1.1 | 0.99 | 1.01 | 1 | 1 | 0.97 | 0.96 | 0.96 | 1 | 0.55 | 0.58 | 0.59 | 0.57 | 0.82 |
| 1.5 | 1247.50 | 14.80 | 1.8 | 1.84 | 1.83 | 1.8 | 1.66 | 1.69 | 1.67 | 1.7 | 1.65 | 1.66 | 1.65 | 1.7 | 1.15 | 1.11 | 1.11 | 1.12 | 1.45 |
| 2.5 | 2079.17 | 16.50 | 2 | 2.01 | 2 | 2 | 1.85 | 1.83 | 1.85 | 1.8 | 1.79 | 1.76 | 1.79 | 1.8 | 1.32 | 1.31 | 1.33 | 1.32 | 1.62 |
| 3.5 | 2910.83 | 19.70 | 2.3 | 2.31 | 2.3 | 2.3 | 2.1 | 2.09 | 2.09 | 2.1 | 2.05 | 2.02 | 1.99 | 2 | 1.53 | 1.55 | 1.57 | 1.55 | 1.86 |
| 4.5 | 3742.50 | 21.60 | 2.5 | 2.48 | 2.48 | 2.5 | 2.25 | 2.25 | 2.29 | 2.3 | 2.15 | 2.16 | 2.14 | 2.2 | 1.69 | 1.66 | 1.69 | 1.68 | 2.00 |
| 5.5 | 4574.17 | 24.50 | 2.8 | 2.76 | 2.78 | 2.8 | 2.52 | 2.51 | 2.52 | 2.5 | 2.41 | 2.38 | 2.4 | 2.4 | 1.89 | 1.93 | 1.88 | 1.9 | 2.24 |
| 6.5 | 5405.83 | 26.10 | 2.9 | 2.9 | 2.91 | 2.9 | 2.63 | 2.63 | 2.65 | 2.6 | 2.49 | 2.49 | 2.51 | 2.5 | 1.94 | 2 | 2.01 | 1.98 | 2.34 |
| 7.5 | 6237.50 | 26.90 | 3 | 2.96 | 2.98 | 3 | 2.73 | 2.71 | 2.69 | 2.7 | 2.55 | 2.55 | 2.58 | 2.6 | 2.01 | 2.04 | 2.04 | 2.03 | 2.40 |
| 8.5 | 7069.17 | 28.90 | 3.2 | 3.15 | 3.16 | 3.2 | 2.86 | 2.87 | 2.89 | 2.9 | 2.65 | 2.71 | 2.71 | 2.7 | 2.14 | 2.16 | 2.15 | 2.15 | 2.54 |
| 10.5 | 8732.50 | 30.60 | 3.4 | 3.32 | 3.34 | 3.3 | 3.05 | 2.99 | 3.01 | 3 | 2.82 | 2.82 | 2.84 | 2.8 | 2.26 | 2.25 | 2.27 | 2.26 | 2.67 |
| 11.5 | 9564.17 | 32.10 | 3.5 | 3.5 | 3.51 | 3.5 | 3.14 | 3.1 | 3.12 | 3.1 | 2.95 | 2.9 | 2.9 | 2.9 | 2.34 | 2.38 | 2.37 | 2.36 | 2.77 |
| 12.5 | 10395.83 | 33.10 | 3.6 | 3.57 | 3.55 | 3.6 | 3.22 | 3.18 | 3.19 | 3.2 | 3.02 | 2.95 | 2.95 | 3 | 2.43 | 2.42 | 2.41 | 2.42 | 2.83 |
| 13.5 | 11227.50 | 34.00 | 3.7 | 3.66 | 3.65 | 3.7 | 3.29 | 3.29 | 3.29 | 3.3 | 3.06 | 3.02 | 3.02 | 3 | 2.45 | 2.5 | 2.49 | 2.48 | 2.90 |
| 15.5 | 12890.83 | 36.90 | 3.9 | 3.89 | 3.9 | 3.9 | 3.51 | 3.48 | 3.5 | 3.5 | 3.18 | 3.22 | 3.17 | 3.2 | 2.62 | 2.64 | 2.64 | 2.63 | 3.07 |
| 16.5 | 13722.50 | 37.80 | 4 | 3.95 | 3.96 | 4 | 3.58 | 3.57 | 3.54 | 3.6 | 3.25 | 3.26 | 3.2 | 3.2 | 2.7 | 2.75 | 2.68 | 2.71 | 3.14 |
| 19.5 | 16217.50 | 40.80 | 4.2 | 4.2 | 4.22 | 4.2 | 3.79 | 3.75 | 3.79 | 3.8 | 3.45 | 3.43 | 3.44 | 3.4 | 2.84 | 2.89 | 2.85 | 2.86 | 3.32 |

ตารางที่ ข1. 3 ความเร็วอากาศที่ทางออกเครื่องอบแห้ง ทดลองแบบเปิดทางออกด้านล่าง (ต่อ)

| orifice | orifice | inverter | ตำแหน่งที่ 1 | | | | ตำแหน่งที่ 2 | | | | ตำแหน่งที่ 3 | | | | ตำแหน่งที่ 4 | | | | $V_{avg}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| mm(H2O) | mm(air) | (Hz) | 1 | 2 | 3 | เฉลี่ย | 1 | 2 | 3 | เฉลี่ย | 1 | 2 | 3 | เฉลี่ย | 1 | 2 | 3 | เฉลี่ย | m/s |
| 21.5 | 17880.83 | 42.50 | 4.4 | 4.38 | 4.35 | 4.4 | 3.95 | 3.94 | 3.91 | 3.9 | 3.51 | 3.48 | 3.5 | 3.5 | 2.89 | 2.87 | 2.86 | 2.87 | 3.39 |
| 23.5 | 19544.17 | 44.10 | 4.5 | 4.47 | 4.49 | 4.5 | 4.01 | 3.97 | 3.99 | 4 | 3.56 | 3.6 | 3.59 | 3.6 | 2.95 | 2.96 | 2.95 | 2.95 | 3.47 |
| 25.5 | 21207.50 | 46.20 | 4.7 | 4.64 | 4.65 | 4.7 | 4.16 | 4.18 | 4.2 | 4.2 | 3.71 | 3.71 | 3.69 | 3.7 | 3.04 | 3.03 | 3.07 | 3.05 | 3.60 |
| 27.5 | 22870.83 | 48.10 | 4.8 | 4.77 | 4.8 | 4.8 | 4.25 | 4.29 | 4.3 | 4.3 | 3.76 | 3.81 | 3.74 | 3.8 | 3.11 | 3.11 | 3.08 | 3.1 | 3.67 |
| 29.5 | 24534.17 | 50.10 | 4.9 | 4.95 | 4.97 | 4.9 | 4.39 | 4.43 | 4.41 | 4.4 | 3.85 | 3.85 | 3.89 | 3.9 | 3.2 | 3.18 | 3.2 | 3.19 | 3.78 |
| 31.5 | 26197.50 | 51.90 | 5.1 | 5.1 | 5.08 | 5.1 | 4.52 | 4.53 | 4.49 | 4.5 | 3.94 | 3.91 | 3.92 | 3.9 | 3.25 | 3.25 | 3.22 | 3.24 | 3.85 |
| 33.5 | 27860.83 | 53.50 | 5.2 | 5.19 | 5.24 | 5.2 | 4.61 | 4.63 | 4.63 | 4.6 | 3.98 | 3.96 | 3.98 | 4 | 3.3 | 3.32 | 3.3 | 3.31 | 3.92 |
| 35.5 | 29524.17 | 55.10 | 5.3 | 5.32 | 5.28 | 5.3 | 4.72 | 4.7 | 4.69 | 4.7 | 4.02 | 4.04 | 4 | 4 | 3.35 | 3.38 | 3.35 | 3.36 | 3.98 |
| 37.5 | 31187.50 | 56.60 | 5.4 | 5.44 | 5.41 | 5.4 | 4.77 | 4.78 | 4.78 | 4.8 | 4.02 | 4.06 | 4.02 | 4 | 3.42 | 3.37 | 3.38 | 3.39 | 4.02 |
| 39.5 | 32850.83 | 58.20 | 5.5 | 5.58 | 5.57 | 5.6 | 4.88 | 4.86 | 4.86 | 4.9 | 4.07 | 4.06 | 4.08 | 4.1 | 3.49 | 3.48 | 3.44 | 3.47 | 4.09 |
| 41.5 | 34514.17 | 59.80 | 5.7 | 5.68 | 5.69 | 5.7 | 4.93 | 4.92 | 4.92 | 4.9 | 4.09 | 4.15 | 4.13 | 4.1 | 3.48 | 3.49 | 3.49 | 3.49 | 4.14 |

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข1. 4 ความเร็วอากาศที่ทางออกเครื่องอบแห้ง ทดลองแบบมีกล่องลิ้นกันลม

| orifice | orifice | inverter | ตำแหน่งที่ 1 | | | | ตำแหน่งที่ 2 | | | | ตำแหน่งที่ 3 | | | | ตำแหน่งที่ 4 | | | | $V_{avg}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| mm(H2O) | mm(air) | (Hz) | 1 | 2 | 3 | เฉลี่ย | 1 | 2 | 3 | เฉลี่ย | 1 | 2 | 3 | เฉลี่ย | 1 | 2 | 3 | เฉลี่ย | m/s |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.5 | 415.83 | 8.20 | 1.28 | 1.28 | 1.28 | 1.28 | 1.14 | 1.12 | 1.13 | 1.13 | 1.01 | 1.03 | 1.01 | 1.02 | 0.76 | 0.74 | 0.75 | 0.75 | 0.95 |
| 1.5 | 1247.50 | 14.80 | 2.01 | 2.03 | 2.04 | 2.03 | 1.86 | 1.86 | 1.86 | 1.86 | 1.70 | 1.69 | 1.69 | 1.69 | 1.36 | 1.36 | 1.36 | 1.36 | 1.61 |
| 2.5 | 2079.17 | 16.50 | 2.2 | 2.2 | 2.21 | 2.20 | 2.02 | 2.03 | 2.02 | 2.02 | 1.83 | 1.84 | 1.82 | 1.83 | 1.51 | 1.49 | 1.48 | 1.49 | 1.76 |
| 3.5 | 2910.83 | 19.70 | 2.52 | 2.5 | 2.51 | 2.51 | 2.32 | 2.30 | 2.32 | 2.31 | 2.09 | 2.08 | 2.07 | 2.08 | 1.76 | 1.75 | 1.73 | 1.75 | 2.02 |
| 4.5 | 3742.50 | 21.60 | 2.72 | 2.71 | 2.71 | 2.71 | 2.49 | 2.49 | 2.47 | 2.48 | 2.24 | 2.26 | 2.24 | 2.25 | 1.88 | 1.85 | 1.85 | 1.86 | 2.17 |
| 5.5 | 4574.17 | 24.50 | 2.98 | 3 | 2.99 | 2.99 | 2.60 | 2.58 | 2.59 | 2.59 | 2.47 | 2.46 | 2.47 | 2.47 | 2.11 | 2.08 | 2.08 | 2.09 | 2.38 |
| 6.5 | 5405.83 | 26.10 | 3.07 | 3.06 | 3.07 | 3.07 | 2.72 | 2.72 | 2.72 | 2.72 | 2.58 | 2.59 | 2.59 | 2.59 | 2.17 | 2.18 | 2.16 | 2.17 | 2.48 |
| 7.5 | 6237.50 | 26.90 | 3.16 | 3.11 | 3.14 | 3.14 | 2.79 | 2.79 | 2.77 | 2.78 | 2.63 | 2.62 | 2.66 | 2.64 | 2.21 | 2.17 | 2.19 | 2.19 | 2.52 |
| 8.5 | 7069.17 | 28.90 | 3.33 | 3.32 | 3.34 | 3.33 | 2.95 | 2.98 | 2.95 | 2.96 | 2.80 | 2.80 | 2.79 | 2.80 | 2.30 | 2.30 | 2.32 | 2.31 | 2.67 |
| 10.5 | 8732.50 | 30.60 | 3.43 | 3.41 | 3.43 | 3.42 | 3.09 | 3.08 | 3.09 | 3.09 | 2.93 | 2.91 | 2.92 | 2.92 | 2.42 | 2.42 | 2.43 | 2.42 | 2.78 |
| 11.5 | 9564.17 | 32.10 | 3.62 | 3.62 | 3.62 | 3.62 | 3.21 | 3.21 | 3.22 | 3.21 | 3.02 | 2.99 | 3.04 | 3.02 | 2.48 | 2.51 | 2.52 | 2.50 | 2.89 |
| 12.5 | 10395.83 | 33.10 | 3.7 | 3.71 | 3.7 | 3.70 | 3.27 | 3.29 | 3.30 | 3.29 | 3.08 | 3.10 | 3.03 | 3.07 | 2.56 | 2.56 | 2.59 | 2.57 | 2.95 |
| 13.5 | 11227.50 | 34.00 | 3.77 | 3.77 | 3.79 | 3.78 | 3.39 | 3.36 | 3.36 | 3.37 | 3.15 | 3.13 | 3.14 | 3.14 | 2.60 | 2.61 | 2.62 | 2.61 | 3.01 |
| 15.5 | 12890.83 | 36.90 | 4.02 | 4.02 | 4.04 | 4.03 | 3.56 | 3.56 | 3.59 | 3.57 | 3.33 | 3.31 | 3.35 | 3.33 | 2.75 | 2.76 | 2.77 | 2.76 | 3.19 |
| 16.5 | 13722.50 | 37.80 | 4.11 | 4.11 | 4.1 | 4.11 | 3.66 | 3.64 | 3.65 | 3.65 | 3.39 | 3.37 | 3.38 | 3.38 | 2.83 | 2.81 | 2.78 | 2.81 | 3.25 |
| 19.5 | 16217.50 | 40.80 | 4.34 | 4.34 | 4.34 | 4.34 | 3.83 | 3.82 | 3.84 | 3.83 | 3.54 | 3.53 | 3.54 | 3.54 | 2.98 | 2.95 | 2.96 | 2.96 | 3.42 |

ตารางที่ ข1. 4 ความเร็วอากาศที่ทางออกเครื่องอบแห้ง ทดลองแบบมีกล่องลิ้นกันลม (ต่อ)

| orifice | orifice | inverter | ตำแหน่งที่ 1 | | | | ตำแหน่งที่ 2 | | | | ตำแหน่งที่ 3 | | | | ตำแหน่งที่ 4 | | | | $V_{avg}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| mm(H2O) | mm(air) | (Hz) | 1 | 2 | 3 | เฉลี่ย | 1 | 2 | 3 | เฉลี่ย | 1 | 2 | 3 | เฉลี่ย | 1 | 2 | 3 | เฉลี่ย | m/s |
| 23.5 | 19544.17 | 44.10 | 4.61 | 4.63 | 4.61 | 4.62 | 4.06 | 4.09 | 4.08 | 4.08 | 3.70 | 3.72 | 3.67 | 3.70 | 3.09 | 3.06 | 3.07 | 3.07 | 3.58 |
| 25.5 | 21207.50 | 46.20 | 4.77 | 4.78 | 4.79 | 4.78 | 4.22 | 4.21 | 4.23 | 4.22 | 3.84 | 3.80 | 3.81 | 3.82 | 3.19 | 3.18 | 3.19 | 3.19 | 3.71 |
| 27.5 | 22870.83 | 48.10 | 4.92 | 4.94 | 4.94 | 4.93 | 4.32 | 4.32 | 4.32 | 4.32 | 3.87 | 3.88 | 3.89 | 3.88 | 3.24 | 3.22 | 3.21 | 3.22 | 3.78 |
| 29.5 | 24534.17 | 50.10 | 5.1 | 5.12 | 5.11 | 5.11 | 4.45 | 4.45 | 4.45 | 4.45 | 3.95 | 3.99 | 3.95 | 3.96 | 3.30 | 3.24 | 3.29 | 3.28 | 3.86 |
| 31.5 | 26197.50 | 51.90 | 5.23 | 5.24 | 5.23 | 5.23 | 4.54 | 4.54 | 4.54 | 4.54 | 4.04 | 4.04 | 3.98 | 4.02 | 3.32 | 3.34 | 3.34 | 3.33 | 3.93 |
| 33.5 | 27860.83 | 53.50 | 5.35 | 5.37 | 5.36 | 5.36 | 4.63 | 4.64 | 4.68 | 4.65 | 4.09 | 4.08 | 4.08 | 4.08 | 3.38 | 3.37 | 3.43 | 3.39 | 4.01 |
| 35.5 | 29524.17 | 55.10 | 5.49 | 5.48 | 5.48 | 5.48 | 4.72 | 4.75 | 4.73 | 4.73 | 4.12 | 4.11 | 4.11 | 4.11 | 3.49 | 3.46 | 3.46 | 3.47 | 4.07 |
| 37.5 | 31187.50 | 56.60 | 5.6 | 5.6 | 5.6 | 5.60 | 4.81 | 4.83 | 4.83 | 4.82 | 4.16 | 4.11 | 4.12 | 4.13 | 3.48 | 3.47 | 3.46 | 3.47 | 4.11 |
| 39.5 | 32850.83 | 58.20 | 5.73 | 5.7 | 5.72 | 5.72 | 4.91 | 4.90 | 4.91 | 4.91 | 4.22 | 4.20 | 4.20 | 4.21 | 3.53 | 3.52 | 3.54 | 3.53 | 4.18 |
| 41.5 | 34514.17 | 59.80 | 5.86 | 5.82 | 5.84 | 5.84 | 5.03 | 4.98 | 4.98 | 5.00 | 4.22 | 4.22 | 4.18 | 4.21 | 3.54 | 3.50 | 3.55 | 3.53 | 4.21 |

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## ข.2 ตารางข้อมูลการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกของเครื่องอบแห้งขนาดที่ 1

ตารางที่ ข2. 1 ข้อมูลการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความเร็ว 2 เมตรต่อวินาที ครั้งที่ 1

| ตารางค่าเฉลี่ย | | | | อากาศอบแห้ง | | อากาศแวดล้อม | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| เวลาการอบแห้ง (min) | ความชื้นมาตรฐานเปียก (%w.b.) | ความชื้นมาตรฐานแห้ง (%d.b.) | อุณหภูมิเมล็ดข้าวที่ถังพักด้านบน (°C) | อุณหภูมิทางออก (°C) | RH (%) | RH (%) | อุณหภูมิ (°C) |
| 0 | 21.99 | 28.19 | | | | | |
| 5 | 21.89 | 28.02 | | 41.73 | 51.23 | | |
| 10 | 21.59 | 27.53 | | 36.10 | 68.83 | | |
| 15 | 21.57 | 27.51 | | 34.80 | 74.83 | | |
| 20 | 21.32 | 27.09 | | 34.57 | 75.50 | | |
| 25 | 21.16 | 26.84 | | 34.67 | 76.53 | | |
| 30 | 21.23 | 26.96 | | 35.10 | 72.57 | | |
| 35 | 21.02 | 26.61 | | 35.53 | 72.70 | | |
| 40 | 20.87 | 26.38 | | 35.53 | 72.63 | | |
| 45 | 20.77 | 26.21 | | 35.63 | 72.60 | | |
| 50 | 20.67 | 26.06 | | 35.67 | 72.57 | | |
| 55 | 20.48 | 25.76 | | 35.63 | 71.77 | | |
| 60 | 20.39 | 25.61 | | 35.80 | 72.03 | | |
| 70 | 20.14 | 25.22 | | 35.97 | 70.43 | | |
| 80 | 19.85 | 24.76 | | 36.43 | 68.07 | | |
| 90 | 19.63 | 24.43 | | 36.80 | 64.47 | | |
| 100 | 19.28 | 23.89 | | 37.40 | 63.30 | | |
| 110 | 19.34 | 23.98 | | 37.07 | 64.53 | | |
| 120 | 19.01 | 23.47 | | 36.90 | 65.80 | | |
| 130 | 18.72 | 23.03 | | 36.97 | 64.20 | | |
| 140 | 18.31 | 22.41 | | 37.00 | 63.17 | | |
| 150 | 17.93 | 21.85 | | 37.30 | 59.77 | | |
| 160 | 17.69 | 21.49 | | 37.13 | 62.63 | | |
| 170 | 17.44 | 21.12 | | 36.53 | 65.30 | | |
| 180 | 17.11 | 20.64 | | 36.23 | 65.63 | | |
| 190 | 16.63 | 19.95 | | 36.20 | 64.33 | 78.74 | 30.34 |
| 200 | 16.61 | 19.92 | | 36.20 | 64.40 | 80.69 | 30.10 |
| 210 | 16.36 | 19.56 | | 36.23 | 64.80 | 78.89 | 30.04 |

ตารางที่ ข2. 2 ข้อมูลการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความเร็ว 2 เมตรต่อวินาที ครั้งที่ 1 (ต่อ)

| ตารางค่าเฉลี่ย | | | | อากาศอบแห้ง | | อากาศแวดล้อม | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| เวลาการอบแห้ง (min) | ความชื้นมาตรฐานเปียก (%w.b.) | ความชื้นมาตรฐานแห้ง (%d.b.) | อุณหภูมิเมล็ดข้าวที่ถังพักด้านบน (°C) | อุณหภูมิทางออก (°C) | RH (%) | RH (%) | อุณหภูมิ (°C) |
| 220 | 16.17 | 19.29 | | 36.40 | 64.40 | 75.53 | 30.20 |
| 230 | 15.92 | 18.94 | | 36.80 | 61.20 | 75.91 | 30.33 |
| 240 | 15.75 | 18.69 | | 37.80 | 57.00 | 71.49 | 30.53 |
| 250 | 15.48 | 18.31 | | 36.60 | 61.43 | 68.89 | 30.77 |
| 260 | 15.24 | 17.98 | | 36.90 | 60.30 | 67.33 | 30.88 |
| 270 | 15.05 | 17.71 | | 37.20 | 60.17 | 66.76 | 30.85 |
| 280 | 14.87 | 17.47 | | 37.13 | 61.10 | 66.17 | 31.37 |
| 290 | 14.59 | 17.09 | | 37.10 | 60.73 | 66.80 | 31.53 |
| 300 | 14.37 | 16.78 | | 37.10 | 61.33 | 68.16 | 31.64 |
| 310 | 14.31 | 16.70 | | 37.13 | 60.83 | 70.05 | 31.69 |
| 320 | 14.05 | 16.35 | | 37.30 | 60.73 | 70.15 | 31.66 |
| 330 | 13.82 | 16.04 | | 37.47 | 59.67 | 73.77 | 31.67 |
| 340 | 13.66 | 15.82 | | 37.57 | 57.07 | 73.18 | 31.76 |
| 350 | 13.55 | 15.67 | | 38.13 | 54.90 | 69.44 | 31.74 |
| 360 | 13.42 | 15.50 | | 37.23 | 60.30 | 70.36 | 30.38 |
| 370 | 13.24 | 15.26 | | 36.93 | 61.67 | 72.97 | 30.29 |
| 380 | 13.05 | 15.01 | | 36.90 | 60.77 | 80.11 | 30.31 |
| 390 | 13.06 | 15.02 | | 37.10 | 61.90 | 76.13 | 30.23 |
| 400 | 12.86 | 14.76 | | 37.07 | 59.80 | 81.88 | 30.08 |
| 410 | 12.74 | 14.59 | | 37.93 | 56.50 | 79.48 | 30.12 |
| 420 | 12.63 | 14.46 | | 38.70 | 55.07 | 79.60 | 29.76 |
| 430 | 12.51 | 14.29 | | 38.87 | 54.80 | 82.73 | 29.26 |
| 440 | 12.42 | 14.18 | | 38.90 | 53.70 | 84.57 | 29.39 |
| 450 | 12.32 | 14.05 | | 38.63 | 53.57 | 80.70 | 29.80 |
| 460 | 12.17 | 13.86 | | 38.20 | 54.03 | 79.59 | 29.63 |
| 480 | 12.01 | 13.65 | | 37.80 | 53.30 | 79.59 | 29.63 |

ตารางที่ ข2. 3 ข้อมูลการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความเร็ว 2 เมตรต่อวินาที ครั้งที่ 2

| ตารางค่าเฉลี่ย | | | | อากาศอบแห้ง | | อากาศแวดล้อม | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| เวลาการอบแห้ง (min) | ความชื้นมาตรฐานเปียก(%wb) | ความชื้นมาตรฐานแห้ง(%db) | อุณหภูมิเมล็ดข้าวที่ถังพักด้านบน(°C) | อุณหภูมิทางออก (°C) | RH (%) | RH (%) | อุณหภูมิ (°C) |
| 0 | 22.18 | 28.50 | 28.40 | 63.13 | 13.60 | 60.10 | 29.77 |
| 5 | 21.87 | 27.99 | 29.37 | 41.30 | 50.33 | 59.53 | 30.65 |
| 10 | 21.66 | 27.66 | 31.33 | 36.83 | 64.80 | 58.30 | 31.00 |
| 15 | 21.68 | 27.68 | 32.50 | 35.17 | 72.40 | 58.47 | 30.87 |
| 20 | 21.58 | 27.52 | 33.29 | 34.73 | 75.97 | 58.91 | 31.31 |
| 25 | 21.42 | 27.26 | 33.85 | 34.73 | 76.43 | 58.26 | 31.47 |
| 30 | 21.10 | 26.74 | 34.34 | 34.70 | 76.30 | 57.86 | 31.01 |
| 35 | 21.00 | 26.59 | 34.76 | 34.90 | 76.50 | 59.20 | 30.78 |
| 40 | 20.90 | 26.42 | 35.12 | 35.03 | 76.13 | 60.31 | 30.98 |
| 45 | 20.77 | 26.21 | 35.42 | 35.10 | 75.60 | 60.62 | 30.51 |
| 50 | 20.62 | 25.97 | 35.64 | 35.23 | 74.70 | 61.53 | 30.45 |
| 55 | 20.37 | 25.59 | 35.89 | 35.40 | 73.53 | 61.69 | 30.73 |
| 60 | 20.14 | 25.21 | 36.02 | 35.47 | 73.33 | 61.28 | 30.67 |
| 70 | 19.96 | 24.94 | 36.34 | 35.50 | 72.43 | 62.24 | 30.43 |
| 80 | 19.65 | 24.46 | 36.46 | 35.70 | 70.43 | 61.02 | 30.55 |
| 90 | 19.36 | 24.01 | 36.65 | 36.03 | 68.33 | 58.34 | 31.09 |
| 100 | 19.08 | 23.58 | 36.91 | 36.27 | 66.93 | 56.38 | 31.53 |
| 110 | 18.78 | 23.13 | 37.09 | 36.40 | 66.47 | 56.32 | 31.38 |
| 120 | 18.39 | 22.53 | 37.29 | 36.80 | 63.70 | 56.48 | 31.50 |
| 130 | 18.08 | 22.07 | 37.44 | 36.97 | 62.53 | 55.81 | 31.67 |
| 140 | 17.79 | 21.63 | 37.58 | 37.20 | 59.97 | 55.79 | 31.44 |
| 150 | 17.50 | 21.21 | 37.61 | 36.80 | 62.00 | 55.82 | 31.57 |
| 160 | 17.21 | 20.79 | 37.66 | 36.77 | 61.90 | 55.89 | 31.64 |
| 170 | 16.88 | 20.30 | 37.77 | 36.80 | 61.27 | 55.78 | 31.69 |
| 180 | 16.87 | 20.30 | 37.86 | 36.90 | 60.80 | 55.41 | 31.71 |
| 190 | 16.62 | 19.93 | 37.90 | 37.10 | 59.00 | 54.92 | 32.05 |
| 200 | 16.36 | 19.56 | 38.02 | 37.10 | 59.97 | 54.42 | 32.01 |
| 210 | 15.97 | 19.01 | 38.23 | 37.20 | 57.77 | 53.64 | 32.09 |
| 220 | 15.67 | 18.58 | 38.31 | 37.27 | 57.67 | 52.91 | 32.30 |

ตารางที่ ข2. 4 ข้อมูลการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความเร็ว 2 เมตรต่อวินาที ครั้งที่ 2 (ต่อ)

| ตารางค่าเฉลี่ย | | | | อากาศอบแห้ง | | อากาศแวดล้อม | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| เวลาการอบแห้ง (min) | ความชื้นมาตรฐานเปียก(%wb) | ความชื้นมาตรฐานแห้ง(%db) | อุณหภูมิเมล็ดข้าวที่ถังพักด้านบน(°C) | อุณหภูมิทางออก (°C) | RH (%) | RH (%) | อุณหภูมิ(°C) |
| 240 | 15.01 | 17.66 | 38.61 | 37.50 | 56.20 | 54.06 | 32.14 |
| 250 | 14.80 | 17.37 | 38.69 | 37.60 | 55.70 | 54.01 | 32.26 |
| 260 | 14.58 | 17.07 | 38.84 | 37.60 | 56.03 | 53.67 | 32.37 |
| 270 | 14.30 | 16.69 | 38.98 | 37.53 | 55.20 | 52.55 | 32.41 |
| 280 | 14.05 | 16.35 | 39.02 | 37.60 | 54.57 | 52.40 | 32.03 |
| 290 | 13.81 | 16.03 | 39.08 | 37.53 | 54.60 | 52.73 | 31.62 |
| 300 | 13.48 | 15.58 | 39.20 | 37.60 | 54.50 | 53.52 | 32.13 |
| 310 | 13.21 | 15.22 | 39.38 | 37.63 | 53.27 | 53.06 | 32.24 |
| 320 | 12.97 | 14.90 | 39.49 | 37.80 | 52.13 | 52.46 | 32.38 |
| 330 | 12.70 | 14.55 | 39.64 | 37.80 | 52.67 | 52.75 | 32.41 |
| 340 | 12.51 | 14.30 | 39.77 | 37.90 | 52.67 | 52.99 | 32.36 |
| 350 | 12.33 | 14.06 | 39.99 | 38.10 | 51.20 | 52.22 | 32.53 |
| 360 | 12.08 | 13.74 | 40.08 | 38.50 | 48.43 | 52.16 | 32.43 |
| 370 | 11.87 | 13.47 | 40.19 | 38.50 | 47.87 | 50.88 | 32.55 |
| 380 | 11.64 | 13.18 | 39.50 | 38.50 | 47.73 | 50.44 | 32.22 |
| 390 | 11.37 | 12.82 | 39.04 | 38.40 | 47.73 | 50.56 | 32.14 |
| 400 | 11.16 | 12.56 | 40.59 | 38.70 | 46.47 | 50.88 | 32.44 |

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข2. 5 ข้อมูลการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความเร็ว 2 เมตรต่อวินาที ครั้งที่ 3

| ตารางค่าเฉลี่ย | | | | อากาศอบแห้ง | | อากาศแวดล้อม | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| เวลาการอบแห้ง (min) | ความชื้นมาตรฐานเปียก(%wb) | ความชื้นมาตรฐานแห้ง (%db) | อุณหภูมิเมล็ดข้าวที่ถังพักด้านบน(°C) | อุณหภูมิทางออก (°C) | RH (%) | RH (%) | อุณหภูมิ(°C) |
| 0 | 22.12 | 28.40 | 29.30 | 69.40 | 11.33 | 55.50 | 31.44 |
| 5 | 21.71 | 27.74 | 30.33 | 43.20 | 46.53 | 56.34 | 31.55 |
| 10 | 21.52 | 27.43 | 32.49 | 37.80 | 63.53 | 56.31 | 31.55 |
| 15 | 21.49 | 27.38 | 33.66 | 36.20 | 70.83 | 56.21 | 31.67 |
| 20 | 21.40 | 27.23 | 34.59 | 35.70 | 73.47 | 56.16 | 31.79 |
| 25 | 21.21 | 26.93 | 35.11 | 35.57 | 74.80 | 56.19 | 31.66 |
| 30 | 20.87 | 26.38 | 35.54 | 35.60 | 75.23 | 56.55 | 31.73 |
| 35 | 20.80 | 26.26 | 35.92 | 35.80 | 73.73 | 56.21 | 31.76 |
| 40 | 20.65 | 26.03 | 36.17 | 36.00 | 73.10 | 55.76 | 31.84 |
| 45 | 20.49 | 25.77 | 36.43 | 36.10 | 73.47 | 55.95 | 32.07 |
| 50 | 20.35 | 25.55 | 36.70 | 36.40 | 71.67 | 54.84 | 32.10 |
| 55 | 20.26 | 25.42 | 36.95 | 36.60 | 71.07 | 54.65 | 31.99 |
| 60 | 20.00 | 25.00 | 37.21 | 36.80 | 70.80 | 54.48 | 32.21 |
| 70 | 19.62 | 24.42 | 37.50 | 37.10 | 68.40 | 54.20 | 32.32 |
| 80 | 19.47 | 24.18 | 37.81 | 37.30 | 67.73 | 53.88 | 32.38 |
| 90 | 19.01 | 23.48 | 38.16 | 37.70 | 65.30 | 53.80 | 32.32 |
| 100 | 18.73 | 23.05 | 38.43 | 38.00 | 63.67 | 53.52 | 32.60 |
| 110 | 18.41 | 22.57 | 38.59 | 38.00 | 63.93 | 53.11 | 32.65 |
| 120 | 18.09 | 22.09 | 38.82 | 38.20 | 62.93 | 53.17 | 32.85 |
| 130 | 17.85 | 21.73 | 38.94 | 38.00 | 62.97 | 54.62 | 32.68 |
| 140 | 17.49 | 21.19 | 39.05 | 38.20 | 62.73 | 53.85 | 32.72 |
| 150 | 17.40 | 21.06 | 39.15 | 38.20 | 60.83 | 52.37 | 32.88 |
| 160 | 16.91 | 20.35 | 39.19 | 38.30 | 59.43 | 51.49 | 32.73 |
| 170 | 16.74 | 20.11 | 39.22 | 38.30 | 58.73 | 51.35 | 32.88 |
| 180 | 16.51 | 19.77 | 39.34 | 38.30 | 57.90 | 50.66 | 32.94 |
| 190 | 16.17 | 19.29 | 39.23 | 38.33 | 56.80 | 50.56 | 32.95 |
| 200 | 15.84 | 18.83 | 39.22 | 38.20 | 56.40 | 50.40 | 32.66 |

ตารางที่ ข2. 6 ข้อมูลการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความเร็ว 2 เมตรต่อวินาที ครั้งที่ 3 (ต่อ)

| ตารางค่าเฉลี่ย | | | | อากาศอบแห้ง | | อากาศแวดล้อม | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| เวลาการอบแห้ง (min) | ความชื้นมาตรฐานเปียก (%wb) | ความชื้นมาตรฐานแห้ง (%db) | อุณหภูมิเมล็ดข้าวที่ถังพักด้านบน(°C) | อุณหภูมิทางออก (°C) | RH (%) | RH (%) | อุณหภูมิ (°C) |
| 220 | 15.11 | 17.79 | 39.34 | 38.47 | 55.83 | 50.26 | 32.65 |
| 230 | 14.89 | 17.49 | 39.50 | 38.40 | 55.17 | 49.60 | 33.00 |
| 240 | 14.58 | 17.06 | 39.67 | 38.70 | 54.60 | 49.76 | 33.19 |
| 250 | 14.72 | 17.26 | 39.81 | 38.60 | 54.63 | 50.85 | 32.98 |
| 260 | 14.13 | 16.45 | 39.88 | 38.40 | 54.43 | 53.29 | 32.54 |
| 270 | 13.74 | 15.93 | 39.88 | 38.17 | 55.07 | 55.33 | 32.24 |
| 280 | 13.60 | 15.74 | 39.94 | 38.00 | 54.87 | 54.74 | 32.10 |
| 290 | 13.33 | 15.39 | 39.89 | 38.00 | 54.13 | 56.27 | 31.75 |
| 300 | 13.13 | 15.12 | 39.93 | 37.97 | 53.80 | 58.47 | 31.45 |
| 310 | 12.92 | 14.84 | 39.99 | 37.90 | 53.60 | 58.43 | 31.29 |
| 320 | 12.64 | 14.48 | 39.88 | 37.80 | 54.20 | 61.39 | 30.81 |
| 330 | 12.47 | 14.25 | 39.92 | 37.80 | 54.33 | 64.46 | 30.39 |
| 340 | 12.25 | 13.96 | 40.03 | 37.60 | 50.73 | 64.15 | 30.61 |
| 350 | 12.11 | 13.78 | 40.00 | 37.30 | 55.10 | 64.59 | 30.44 |
| 360 | 11.93 | 13.55 | 39.98 | 37.50 | 54.73 | 67.47 | 29.95 |
| 370 | 11.79 | 13.36 | 40.06 | 37.57 | 53.93 | 69.03 | 29.91 |
| 380 | 11.60 | 13.12 | 40.19 | 37.60 | 53.30 | 67.28 | 30.24 |

ตารางที่ ข2. 7 ข้อมูลการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ความเร็ว 2 เมตรต่อวินาที ครั้งที่ 1

| ตารางค่าเฉลี่ย | | | | อากาศอบแห้ง | | อากาศแวดล้อม | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| เวลาการอบแห้ง (min) | ความชื้นมาตรฐานเปียก (%wb) | ความชื้นมาตรฐานแห้ง (%db) | อุณหภูมิเมล็ดข้าวที่ถังพักด้านบน(°C) | อุณหภูมิทางออก(°C) | RH (%) | RH (%) | อุณหภูมิ (°C) |
| 0 | 21.87 | 27.99 | | | | 63.00 | 30.39 |
| 5 | 21.67 | 27.66 | | 46.80 | 41.50 | 62.33 | 30.56 |
| 10 | 21.63 | 27.60 | 27.36 | 39.27 | 62.93 | 63.30 | 30.55 |
| 15 | 21.53 | 27.43 | 28.08 | 37.40 | 70.60 | 63.02 | 30.57 |
| 20 | 21.35 | 27.14 | 29.14 | 36.57 | 75.70 | 62.22 | 30.38 |
| 25 | 21.09 | 26.73 | 30.22 | 36.50 | 75.90 | 61.60 | 30.39 |
| 30 | 20.73 | 26.15 | 31.12 | 36.70 | 75.83 | 61.78 | 30.97 |
| 35 | 20.70 | 26.10 | 32.63 | 36.93 | 75.07 | 61.14 | 30.93 |
| 40 | 20.68 | 26.07 | 32.81 | 37.20 | 74.27 | 60.53 | 30.69 |
| 45 | 20.55 | 25.86 | 33.06 | 37.50 | 72.40 | 60.17 | 30.50 |
| 50 | 20.35 | 25.54 | 33.67 | 37.80 | 71.47 | 61.76 | 30.85 |
| 55 | 20.21 | 25.33 | 34.25 | 38.00 | 71.43 | 61.26 | 31.32 |
| 60 | 19.91 | 24.86 | 35.05 | 38.30 | 69.77 | 61.42 | 31.26 |
| 70 | 19.77 | 24.64 | 36.23 | 38.53 | 68.50 | 60.34 | 31.04 |
| 80 | 19.18 | 23.73 | 37.06 | 38.80 | 67.07 | 60.47 | 30.96 |
| 90 | 19.01 | 23.47 | 37.63 | 39.00 | 66.13 | 60.71 | 31.22 |
| 100 | 18.59 | 22.84 | 37.96 | 39.27 | 65.43 | 61.30 | 31.55 |
| 110 | 18.18 | 22.22 | 37.49 | 39.47 | 63.37 | 60.21 | 31.61 |
| 120 | 17.85 | 21.73 | 37.84 | 39.50 | 63.17 | 59.51 | 31.61 |
| 130 | 17.67 | 21.47 | 38.57 | 39.63 | 62.50 | 59.42 | 32.09 |
| 140 | 17.14 | 20.69 | 38.07 | 39.90 | 62.40 | 58.55 | 32.52 |
| 150 | 16.91 | 20.35 | 40.46 | 40.10 | 59.83 | 58.71 | 31.99 |
| 160 | 16.62 | 19.93 | 38.66 | 40.10 | 59.13 | 58.54 | 31.63 |
| 170 | 16.20 | 19.33 | 38.59 | 40.00 | 59.60 | 59.66 | 31.64 |
| 180 | 15.96 | 19.00 | 40.20 | 40.03 | 59.47 | 65.13 | 31.04 |
| 190 | 15.65 | 18.56 | 40.94 | 39.73 | 57.70 | 69.20 | 29.99 |
| 200 | 15.27 | 18.02 | 40.82 | 39.20 | 56.97 | 67.29 | 29.85 |
| 210 | 14.91 | 17.53 | 40.46 | 38.97 | 56.87 | 70.26 | 29.22 |
| 220 | 14.70 | 17.23 | 40.25 | 38.80 | 57.43 | 72.15 | 28.87 |

ตารางที่ ข2. 8 ข้อมูลการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ความเร็ว 2 เมตรต่อวินาที ครั้งที่ 1 (ต่อ)

| ตารางค่าเฉลี่ย | | | | อากาศอบแห้ง | | อากาศแวดล้อม | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| เวลาการอบแห้ง (min) | ความชื้นมาตรฐานเปียก (%wb) | ความชื้นมาตรฐานแห้ง (%db) | อุณหภูมิเมล็ดข้าวที่ถังพักด้านบน(°C) | อุณหภูมิทางออก(°C) | RH (%) | RH (%) | อุณหภูมิ (°C) |
| 230 | 14.34 | 16.74 | 39.77 | 38.80 | 57.47 | 77.61 | 27.95 |
| 240 | 14.14 | 16.47 | 39.21 | 38.53 | 57.40 | 80.03 | 27.86 |
| 250 | 13.94 | 16.19 | 39.41 | 38.43 | 57.03 | 81.70 | 27.57 |
| 260 | 13.73 | 15.91 | 38.79 | 38.37 | 56.33 | 82.12 | 27.55 |
| 270 | 13.57 | 15.70 | 38.08 | 38.20 | 56.77 | 81.25 | 27.48 |
| 280 | 13.56 | 15.69 | 38.16 | 38.20 | 56.47 | 80.76 | 27.82 |
| 290 | 13.22 | 15.23 | 37.75 | 38.27 | 56.37 | 80.31 | 27.73 |
| 300 | 12.99 | 14.93 | 38.05 | 38.40 | 54.77 | 78.84 | 27.82 |
| 310 | 12.66 | 14.49 | 38.06 | 38.43 | 54.63 | 81.21 | 27.76 |
| 320 | 12.50 | 14.29 | 37.56 | 38.80 | 53.93 | 83.17 | 27.64 |
| 330 | 12.30 | 14.03 | 37.99 | 39.10 | 53.70 | 87.02 | 27.61 |
| 340 | 12.13 | 13.80 | 37.99 | 39.43 | 52.23 | 85.39 | 27.69 |
| 350 | 11.94 | 13.56 | 37.94 | 39.73 | 51.67 | 86.01 | 27.42 |
| 360 | 11.73 | 13.29 | 38.10 | 40.00 | 50.40 | 85.81 | 27.67 |
| 370 | 11.58 | 13.09 | 37.91 | 40.00 | 49.90 | 83.86 | 27.69 |

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข2. 9 ข้อมูลการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ความเร็ว 2 เมตรต่อวินาที ครั้งที่ 2

| ตารางค่าเฉลี่ย | | | | อากาศอบแห้ง | | อากาศแวดล้อม | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| เวลาการอบแห้ง (min) | ความชื้นมาตรฐานเปียก(%wb) | ความชื้นมาตรฐานแห้ง (%db) | อุณหภูมิเมล็ดข้าวที่ถังพักด้านบน(°C) | อุณหภูมิทางออก (°C) | RH (%) | RH (%) | อุณหภูมิ (°C) |
| 0 | 22.31 | 28.71 | 28.40 | 61.43 | 20.80 | 60.10 | 29.77 |
| 5 | 21.83 | 27.93 | 31.50 | 48.00 | 40.37 | 56.43 | 30.70 |
| 10 | 21.60 | 27.55 | 33.62 | 39.80 | 59.13 | 57.23 | 30.81 |
| 15 | 21.09 | 26.73 | 34.27 | 37.83 | 66.37 | 57.33 | 30.54 |
| 20 | 21.17 | 26.87 | 35.40 | 36.93 | 70.40 | 56.50 | 30.39 |
| 25 | 21.24 | 26.97 | 35.98 | 36.83 | 71.03 | 55.59 | 30.47 |
| 30 | 21.11 | 26.75 | 36.65 | 36.83 | 71.50 | 56.59 | 30.75 |
| 35 | 20.83 | 26.31 | 37.21 | 37.10 | 70.87 | 56.05 | 30.73 |
| 40 | 20.73 | 26.15 | 37.59 | 37.30 | 69.70 | 55.47 | 30.75 |
| 45 | 20.49 | 25.77 | 38.02 | 37.50 | 69.77 | 54.94 | 30.76 |
| 50 | 20.34 | 25.53 | 38.33 | 37.80 | 67.03 | 55.31 | 31.21 |
| 55 | 20.13 | 25.20 | 38.67 | 38.07 | 67.00 | 54.06 | 31.29 |
| 60 | 19.98 | 24.96 | 38.86 | 38.20 | 67.66 | 54.20 | 31.84 |
| 70 | 19.63 | 24.43 | 39.27 | 38.43 | 65.57 | 53.90 | 31.47 |
| 80 | 19.28 | 23.89 | 39.70 | 38.77 | 62.57 | 52.67 | 31.37 |
| 90 | 18.67 | 22.96 | 39.95 | 39.03 | 60.83 | 53.02 | 31.39 |
| 100 | 18.61 | 22.86 | 40.22 | 39.33 | 59.70 | 52.71 | 31.34 |
| 110 | 18.19 | 22.24 | 40.48 | 39.50 | 58.53 | 52.72 | 31.55 |
| 120 | 17.78 | 21.62 | 40.68 | 39.70 | 57.03 | 51.15 | 31.53 |
| 130 | 17.45 | 21.13 | 40.85 | 39.77 | 56.03 | 50.52 | 31.67 |
| 140 | 17.00 | 20.49 | 40.97 | 39.87 | 55.10 | 51.08 | 31.80 |
| 150 | 16.51 | 19.78 | 41.00 | 40.00 | 54.53 | 51.61 | 32.15 |
| 160 | 16.29 | 19.46 | 41.14 | 40.00 | 54.60 | 51.03 | 32.14 |
| 170 | 15.88 | 18.88 | 41.25 | 40.20 | 52.23 | 50.18 | 31.98 |
| 180 | 15.50 | 18.34 | 41.37 | 40.13 | 52.70 | 51.22 | 32.34 |
| 190 | 15.17 | 17.88 | 41.41 | 40.23 | 51.10 | 50.58 | 32.39 |
| 200 | 14.74 | 17.29 | 41.60 | 40.10 | 50.27 | 50.65 | 32.15 |
| 210 | 14.40 | 16.82 | 41.65 | 40.30 | 49.60 | 50.95 | 32.15 |
| 220 | 13.97 | 16.24 | 41.94 | 40.50 | 49.33 | 50.49 | 32.30 |

ตารางที่ ข2. 10 ข้อมูลการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ความเร็ว 2 เมตรต่อวินาที ครั้งที่ 2 (ต่อ)

| ตารางค่าเฉลี่ย | | | | อากาศอบแห้ง | | อากาศแวดล้อม | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| เวลาการอบแห้ง (min) | ความชื้นมาตรฐานเปียก(%wb) | ความชื้นมาตรฐานแห้ง (%db) | อุณหภูมิเมล็ดข้าวที่ถังพักด้านบน(°C) | อุณหภูมิทางออก (°C) | RH (%) | RH (%) | อุณหภูมิ (°C) |
| 230 | 13.64 | 15.80 | 42.11 | 40.57 | 48.23 | 49.83 | 32.56 |
| 240 | 13.36 | 15.43 | 42.36 | 40.70 | 47.27 | 48.39 | 32.00 |
| 250 | 13.00 | 14.94 | 42.58 | 40.93 | 47.10 | 51.11 | 32.03 |
| 260 | 12.68 | 14.52 | 42.78 | 41.53 | 44.00 | 53.00 | 31.68 |
| 270 | 12.40 | 14.16 | 43.13 | 41.57 | 51.13 | 54.17 | 31.47 |
| 280 | 12.10 | 13.77 | 43.04 | 40.20 | 46.83 | 54.93 | 31.47 |
| 290 | 11.76 | 13.32 | 43.19 | 40.70 | 45.77 | 54.80 | 31.59 |
| 300 | 11.58 | 13.10 | 43.63 | 40.80 | 45.70 | 55.36 | 31.50 |
| 310 | 11.28 | 12.71 | 43.85 | 41.17 | 43.77 | 55.16 | 31.56 |
| 320 | 11.08 | 12.46 | 44.12 | 41.57 | 42.80 | 54.74 | 31.55 |

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข2. 11 ข้อมูลการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ความเร็ว 2 เมตรต่อวินาที ครั้งที่ 3

| ตารางค่าเฉลี่ย | | | | อากาศอบแห้ง | | อากาศแวดล้อม | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| เวลาการอบแห้ง (min) | ความชื้นมาตรฐานเปียก (%wb) | ความชื้นมาตรฐานแห้ง (%db) | อุณหภูมิเมล็ดข้าวที่ถังพักด้านบน(°C) | อุณหภูมิทางออก (°C) | RH (%) | RH (%) | อุณหภูมิ (°C) |
| 0 | 22.08 | 28.33 | 28.40 | 80.70 | 7.63 | 52.70 | 32.86 |
| 5 | 21.89 | 28.03 | 30.32 | 48.03 | 37.63 | 53.42 | 32.78 |
| 10 | 21.74 | 27.78 | 33.28 | 40.47 | 58.87 | 53.70 | 32.75 |
| 15 | 21.56 | 27.49 | 34.91 | 38.20 | 67.33 | 51.38 | 33.09 |
| 20 | 21.41 | 27.24 | 35.94 | 37.57 | 70.90 | 51.54 | 33.06 |
| 25 | 21.27 | 27.02 | 36.71 | 37.40 | 72.00 | 51.09 | 33.11 |
| 30 | 20.86 | 26.35 | 37.28 | 37.60 | 71.83 | 50.91 | 33.08 |
| 35 | 20.73 | 26.15 | 37.92 | 37.80 | 70.93 | 51.88 | 32.78 |
| 40 | 20.59 | 25.93 | 38.35 | 38.13 | 70.00 | 51.86 | 33.04 |
| 45 | 20.40 | 25.64 | 38.75 | 38.40 | 67.90 | 51.42 | 33.03 |
| 50 | 20.22 | 25.34 | 39.11 | 38.73 | 67.40 | 51.11 | 33.23 |
| 55 | 20.04 | 25.07 | 39.40 | 38.93 | 66.10 | 51.63 | 33.21 |
| 60 | 19.64 | 24.44 | 39.69 | 39.10 | 64.20 | 51.04 | 33.20 |
| 70 | 19.39 | 24.05 | 39.98 | 39.40 | 64.23 | 51.84 | 33.31 |
| 80 | 19.01 | 23.48 | 40.44 | 39.80 | 62.97 | 52.03 | 33.37 |
| 90 | 18.61 | 22.87 | 40.83 | 40.00 | 61.17 | 52.54 | 33.08 |
| 100 | 18.27 | 22.35 | 41.07 | 40.20 | 59.53 | 51.49 | 33.22 |
| 110 | 17.89 | 21.79 | 41.31 | 40.40 | 58.70 | 50.85 | 33.61 |
| 120 | 17.33 | 20.96 | 41.48 | 40.70 | 57.40 | 49.33 | 34.04 |
| 130 | 16.92 | 20.36 | 41.71 | 40.70 | 56.43 | 49.73 | 33.52 |
| 140 | 16.64 | 19.96 | 41.84 | 40.80 | 55.77 | 51.26 | 33.54 |
| 150 | 16.21 | 19.34 | 41.85 | 41.10 | 53.27 | 49.61 | 33.51 |
| 160 | 15.84 | 18.82 | 41.95 | 41.13 | 52.70 | 50.33 | 33.53 |
| 170 | 15.48 | 18.32 | 42.11 | 41.40 | 51.63 | 49.95 | 33.88 |
| 180 | 15.15 | 17.85 | 42.38 | 41.50 | 51.13 | 50.23 | 33.78 |
| 190 | 14.75 | 17.30 | 42.57 | 41.70 | 50.07 | 50.73 | 33.85 |
| 200 | 14.43 | 16.86 | 42.78 | 41.80 | 49.70 | 50.63 | 33.77 |
| 210 | 14.28 | 16.66 | 42.98 | 42.00 | 48.53 | 50.06 | 34.08 |
| 220 | 13.78 | 15.99 | 43.22 | 42.20 | 47.30 | 49.31 | 33.98 |

ตารางที่ ข2. 12 ข้อมูลการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ความเร็ว 2 เมตรต่อวินาที ครั้งที่ 3 (ต่อ)

| ตารางค่าเฉลี่ย | | | | อากาศอบแห้ง | | อากาศแวดล้อม | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| เวลาการอบแห้ง (min) | ความชื้นมาตรฐานเปียก (%wb) | ความชื้นมาตรฐานแห้ง (%db) | อุณหภูมิเมล็ดข้าวที่ถังพักด้านบน(°C) | อุณหภูมิทางออก (°C) | RH (%) | RH (%) | อุณหภูมิ (°C) |
| 230 | 13.47 | 15.57 | 43.40 | 42.20 | 46.20 | 48.37 | 34.08 |
| 240 | 12.99 | 14.93 | 43.54 | 42.33 | 45.00 | 47.60 | 34.00 |
| 250 | 12.64 | 14.46 | 43.74 | 42.77 | 43.37 | 47.95 | 33.82 |
| 260 | 12.36 | 14.11 | 44.11 | 44.20 | 47.07 | 48.01 | 33.83 |
| 270 | 12.05 | 13.70 | 44.44 | 42.30 | 44.53 | 48.50 | 33.69 |
| 280 | 11.81 | 13.39 | 44.55 | 42.10 | 45.23 | 51.37 | 33.29 |
| 290 | 11.56 | 13.07 | 44.76 | 42.00 | 45.80 | 53.72 | 33.01 |
| 300 | 11.22 | 12.64 | 44.78 | 41.80 | 45.57 | 55.83 | 32.46 |

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข2. 13 ข้อมูลการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ความเร็ว 2 เมตรต่อวินาที ครั้งที่ 1

| ตารางค่าเฉลี่ย | | | | อากาศอบแห้ง | | อากาศแวดล้อม | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| เวลาการอบแห้ง (min) | ความชื้นมาตรฐานเปียก (%wb) | ความชื้นมาตรฐานแห้ง(%db) | อุณหภูมิเมล็ดข้าวที่ถังพักด้านบน(°C) | อุณหภูมิทางออก (°C) | RH (%) | RH (%) | อุณหภูมิ (°C) |
| 0 | 22.23 | 28.58 | | 87.37 | 6.00 | 74.30 | 28.50 |
| 5 | 21.91 | 28.06 | 35.44 | 48.63 | 39.60 | 43.57 | 33.76 |
| 10 | 21.69 | 27.70 | 35.41 | 40.10 | 60.73 | 43.30 | 33.73 |
| 15 | 21.47 | 27.35 | 35.10 | 37.53 | 70.83 | 43.00 | 33.50 |
| 20 | 21.35 | 27.15 | 35.79 | 36.90 | 74.40 | 43.30 | 34.07 |
| 25 | 21.12 | 26.78 | 36.76 | 37.00 | 74.67 | 43.97 | 34.82 |
| 30 | 20.92 | 26.45 | 36.32 | 37.30 | 72.83 | 43.47 | 34.49 |
| 35 | 20.69 | 26.09 | 36.40 | 37.50 | 72.43 | 43.17 | 34.52 |
| 40 | 20.64 | 26.01 | 35.56 | 37.83 | 71.43 | 43.03 | 33.84 |
| 45 | 20.37 | 25.57 | 37.19 | 38.13 | 71.03 | 44.03 | 35.14 |
| 50 | 20.18 | 25.28 | 37.81 | 38.40 | 70.70 | 45.13 | 35.61 |
| 55 | 19.95 | 24.92 | 37.82 | 38.60 | 70.47 | 45.10 | 35.57 |
| 60 | 19.71 | 24.55 | 37.31 | 38.70 | 69.83 | 44.80 | 35.23 |
| 70 | 19.37 | 24.02 | 33.20 | 39.40 | 66.57 | 73.38 | 29.02 |
| 80 | 19.04 | 23.52 | 34.81 | 39.90 | 65.53 | 74.36 | 29.18 |
| 90 | 18.46 | 22.64 | 35.64 | 39.97 | 65.23 | 75.64 | 29.28 |
| 100 | 18.34 | 22.46 | 35.60 | 40.10 | 64.47 | 76.42 | 29.22 |
| 110 | 17.90 | 21.80 | 34.37 | 40.13 | 63.27 | 74.73 | 29.18 |
| 120 | 17.65 | 21.43 | 34.73 | 40.57 | 61.40 | 72.57 | 29.35 |
| 130 | 17.26 | 20.86 | 35.51 | 40.77 | 60.90 | 71.67 | 29.68 |
| 140 | 16.81 | 20.20 | 36.69 | 40.93 | 60.03 | 71.99 | 29.74 |
| 150 | 16.40 | 19.62 | 35.75 | 41.20 | 58.23 | 72.77 | 29.49 |
| 160 | 15.98 | 19.01 | 37.56 | 41.67 | 56.73 | 73.49 | 29.42 |
| 170 | 15.73 | 18.66 | 36.20 | 41.97 | 53.53 | 72.75 | 29.44 |
| 180 | 15.28 | 18.04 | 35.61 | 42.63 | 49.53 | 71.51 | 29.49 |
| 190 | 14.86 | 17.45 | 36.02 | 42.53 | 51.73 | 70.70 | 29.75 |
| 200 | 14.48 | 16.93 | 36.03 | 41.27 | 54.73 | 69.20 | 29.86 |
| 210 | 14.11 | 16.43 | 36.54 | 41.20 | 53.23 | 67.51 | 30.17 |
| 220 | 13.77 | 15.97 | 37.05 | 41.57 | 51.27 | 65.41 | 30.32 |

ตารางที่ ข2. 14 ข้อมูลการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ความเร็ว 2 เมตรต่อวินาที ครั้งที่ 1 (ต่อ)

| ตารางค่าเฉลี่ย | | | | อากาศอบแห้ง | | อากาศแวดล้อม | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| เวลาการอบแห้ง (min) | ความชื้นมาตรฐานเปียก (%wb) | ความชื้นมาตรฐานแห้ง(%db) | อุณหภูมิเมล็ดข้าวที่ถังพักด้านบน(°C) | อุณหภูมิทางออก (°C) | RH (%) | RH (%) | อุณหภูมิ (°C) |
| 230 | 13.45 | 15.53 | 37.44 | 41.47 | 51.13 | 64.20 | 30.21 |
| 240 | 13.45 | 15.54 | 37.61 | 41.70 | 49.43 | 63.97 | 30.49 |
| 250 | 13.22 | 15.23 | 36.14 | 41.70 | 50.13 | 63.34 | 30.43 |
| 260 | 12.96 | 14.89 | 36.92 | 42.50 | 46.60 | 63.12 | 30.50 |
| 270 | 12.63 | 14.46 | 36.47 | 42.00 | 48.23 | 63.30 | 30.62 |
| 280 | 12.42 | 14.18 | 36.35 | 42.17 | 46.20 | 62.39 | 30.32 |
| 290 | 11.95 | 13.57 | 36.76 | 42.17 | 46.30 | 62.93 | 30.27 |
| 300 | 11.70 | 13.25 | 37.15 | 42.50 | 44.30 | 63.89 | 30.41 |
| 310 | 11.31 | 12.75 | 37.51 | 42.73 | 43.30 | 62.78 | 30.26 |

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข2. 15 ข้อมูลการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ความเร็ว 2 เมตรต่อวินาที ครั้งที่ 2

| ตารางค่าเฉลี่ย | | | | อากาศอบแห้ง | | อากาศแวดล้อม | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| เวลาการอบแห้ง (min) | ความชื้นมาตรฐานเปียก (%wb) | ความชื้นมาตรฐานแห้ง(%db) | อุณหภูมิเมล็ดข้าวที่ถังพักด้านบน(°C) | อุณหภูมิทางออก (°C) | RH (%) | RH (%) | อุณหภูมิ (°C) |
| 0 | 22.21 | 28.56 | 28.30 | 95.87 | 4.60 | 56.00 | 30.40 |
| 5 | 22.00 | 28.20 | 31.60 | 53.17 | 32.73 | 55.69 | 30.31 |
| 10 | 21.98 | 28.17 | 33.72 | 42.33 | 56.70 | 54.75 | 30.65 |
| 15 | 21.62 | 27.58 | 35.57 | 38.90 | 71.43 | 54.08 | 30.75 |
| 20 | 21.42 | 27.27 | 36.70 | 38.10 | 70.50 | 53.47 | 30.77 |
| 25 | 21.23 | 26.95 | 37.56 | 38.60 | 68.07 | 54.29 | 30.97 |
| 30 | 21.09 | 26.73 | 37.69 | 38.80 | 68.27 | 53.14 | 30.93 |
| 35 | 20.83 | 26.31 | 37.63 | 38.80 | 68.27 | 52.94 | 30.92 |
| 40 | 20.65 | 26.02 | 38.27 | 39.37 | 47.73 | 53.39 | 31.24 |
| 45 | 20.53 | 25.83 | 37.88 | 39.30 | 64.57 | 52.79 | 31.21 |
| 50 | 20.24 | 25.37 | 39.65 | 40.00 | 62.37 | 53.37 | 31.36 |
| 55 | 20.04 | 25.06 | 40.32 | 40.50 | 61.10 | 54.28 | 31.69 |
| 60 | 19.80 | 24.69 | 40.80 | 40.77 | 60.23 | 53.45 | 31.59 |
| 70 | 19.32 | 23.94 | 41.31 | 41.30 | 58.43 | 53.32 | 31.57 |
| 80 | 18.97 | 23.41 | 41.76 | 41.50 | 57.30 | 54.18 | 32.03 |
| 90 | 18.47 | 22.65 | 42.15 | 41.90 | 54.47 | 52.50 | 31.63 |
| 100 | 17.98 | 21.93 | 42.51 | 42.10 | 54.20 | 52.51 | 31.64 |
| 110 | 17.66 | 21.45 | 42.64 | 42.20 | 53.17 | 52.19 | 31.64 |
| 120 | 17.32 | 20.95 | 42.93 | 42.83 | 50.17 | 52.15 | 32.02 |
| 130 | 16.55 | 19.84 | 43.29 | 44.67 | 53.50 | 51.18 | 32.16 |
| 140 | 16.02 | 19.08 | 43.47 | 42.63 | 48.40 | 50.12 | 32.12 |
| 150 | 15.59 | 18.47 | 43.61 | 43.00 | 48.13 | 50.15 | 32.37 |
| 160 | 15.06 | 17.73 | 43.92 | 43.30 | 47.57 | 50.20 | 32.47 |
| 170 | 14.77 | 17.33 | 44.16 | 43.50 | 45.77 | 49.93 | 32.45 |
| 180 | 14.34 | 16.74 | 44.42 | 43.70 | 45.77 | 49.77 | 32.50 |
| 190 | 13.91 | 16.16 | 44.70 | 43.80 | 44.57 | 49.92 | 32.62 |
| 200 | 13.65 | 15.81 | 45.22 | 43.97 | 43.63 | 49.63 | 32.63 |
| 210 | 13.11 | 15.08 | 45.03 | 44.10 | 42.60 | 49.35 | 32.50 |
| 220 | 12.68 | 14.52 | 45.34 | 44.27 | 41.33 | 48.79 | 32.68 |

ตารางที่ ข2. 16 ข้อมูลการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ความเร็ว 2 เมตรต่อวินาที ครั้งที่ 2 (ต่อ)

| ตารางค่าเฉลี่ย | | | | อากาศอบแห้ง | | อากาศแวดล้อม | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| เวลาการอบแห้ง (min) | ความชื้นมาตรฐานเปียก (%wb) | ความชื้นมาตรฐานแห้ง(%db) | อุณหภูมิเมล็ดข้าวที่ถังพักด้านบน(°C) | อุณหภูมิทางออก (°C) | RH (%) | RH (%) | อุณหภูมิ (°C) |
| 230 | 12.38 | 14.13 | 45.60 | 44.33 | 40.60 | 48.28 | 32.51 |
| 240 | 11.87 | 13.46 | 45.87 | 44.43 | 39.53 | 48.81 | 32.40 |
| 250 | 11.64 | 13.17 | 46.15 | 44.70 | 39.10 | 49.65 | 32.65 |
| 260 | 11.35 | 12.80 | 46.49 | 45.50 | 35.90 | 49.85 | 32.44 |
| 270 | 11.06 | 12.44 | 46.79 | 45.90 | 35.00 | 50.38 | 32.29 |

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข2. 17 ข้อมูลการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ความเร็ว 2 เมตรต่อวินาที ครั้งที่ 3

| ตารางค่าเฉลี่ย | | | | อากาศอบแห้ง | | อากาศแวดล้อม | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| เวลาการอบแห้ง (min) | ความชื้นมาตรฐานเปียก (%wb) | ความชื้นมาตรฐานแห้ง(%db) | อุณหภูมิเมล็ดข้าวที่ถังพักด้านบน(°C) | อุณหภูมิทางออก (°C) | RH (%) | RH (%) | อุณหภูมิ (°C) |
| 0 | 22.46 | 28.97 | 29.70 | 72.47 | 10.20 | 48.20 | 30.67 |
| 5 | 21.84 | 27.95 | 31.22 | 48.00 | 40.60 | 58.28 | 30.72 |
| 10 | 21.83 | 27.92 | 33.92 | 41.07 | 58.00 | 58.69 | 30.67 |
| 15 | 21.45 | 27.31 | 35.27 | 38.50 | 68.17 | 58.79 | 30.53 |
| 20 | 21.18 | 26.87 | 36.31 | 37.53 | 73.30 | 57.77 | 30.51 |
| 25 | 21.04 | 26.65 | 37.26 | 37.40 | 75.30 | 57.30 | 30.68 |
| 30 | 20.91 | 26.44 | 37.98 | 37.50 | 75.33 | 57.33 | 31.15 |
| 35 | 20.72 | 26.13 | 38.52 | 37.80 | 73.80 | 56.51 | 31.47 |
| 40 | 20.44 | 25.69 | 39.09 | 38.10 | 73.23 | 56.01 | 31.51 |
| 45 | 20.26 | 25.42 | 39.63 | 38.40 | 72.13 | 55.66 | 31.66 |
| 50 | 20.05 | 25.08 | 40.02 | 38.60 | 72.07 | 56.19 | 32.24 |
| 55 | 19.82 | 24.72 | 40.38 | 38.90 | 70.27 | 54.21 | 32.27 |
| 60 | 19.70 | 24.53 | 40.74 | 39.17 | 69.47 | 55.06 | 32.25 |
| 70 | 19.26 | 23.86 | 41.17 | 39.80 | 67.07 | 54.95 | 32.01 |
| 80 | 18.84 | 23.22 | 41.67 | 39.90 | 65.83 | 55.42 | 32.29 |
| 90 | 18.36 | 22.50 | 42.04 | 40.00 | 64.70 | 53.80 | 32.70 |
| 100 | 17.94 | 21.86 | 42.27 | 40.10 | 62.63 | 52.76 | 32.75 |
| 110 | 17.66 | 21.45 | 42.45 | 40.30 | 62.80 | 50.13 | 33.29 |
| 120 | 17.13 | 20.68 | 42.71 | 40.57 | 60.87 | 49.59 | 32.71 |
| 130 | 16.73 | 20.10 | 42.88 | 40.60 | 59.53 | 50.27 | 33.08 |
| 140 | 16.33 | 19.52 | 42.95 | 40.70 | 57.63 | 50.10 | 33.26 |
| 150 | 15.98 | 19.01 | 43.03 | 40.70 | 57.30 | 50.61 | 33.22 |
| 160 | 15.44 | 18.26 | 43.22 | 40.90 | 55.33 | 50.70 | 32.68 |
| 170 | 14.91 | 17.52 | 43.32 | 41.10 | 54.13 | 51.56 | 32.48 |
| 180 | 14.41 | 16.84 | 43.63 | 41.30 | 52.87 | 51.69 | 32.91 |
| 190 | 14.17 | 16.51 | 43.77 | 41.97 | 50.17 | 51.84 | 33.06 |
| 200 | 13.78 | 15.99 | 44.15 | 42.70 | 47.07 | 51.56 | 33.12 |
| 210 | 13.34 | 15.39 | 44.45 | 44.53 | 51.27 | 52.09 | 33.16 |
| 220 | 12.97 | 14.91 | 44.71 | 41.90 | 49.77 | 51.79 | 33.45 |

ตารางที่ ข2. 18 ข้อมูลการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ความเร็ว 2 เมตรต่อวินาที ครั้งที่ 3 (ต่อ)

| ตารางค่าเฉลี่ย | | | | อากาศอบแห้ง | | อากาศแวดล้อม | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| เวลาการอบแห้ง (min) | ความชื้นมาตรฐานเปียก (%wb) | ความชื้นมาตรฐานแห้ง(%db) | อุณหภูมิเมล็ดข้าวที่ถังพักด้านบน(°C) | อุณหภูมิทางออก (°C) | RH (%) | RH (%) | อุณหภูมิ (°C) |
| 230 | 12.61 | 14.43 | 44.87 | 41.80 | 49.47 | 51.66 | 33.46 |
| 240 | 12.17 | 13.85 | 45.10 | 41.90 | 48.70 | 52.24 | 33.30 |
| 250 | 11.90 | 13.50 | 45.38 | 42.43 | 46.77 | 51.93 | 33.22 |
| 260 | 11.57 | 13.09 | 45.65 | 42.60 | 45.27 | 51.68 | 33.21 |
| 270 | 11.26 | 12.68 | 45.87 | 43.00 | 43.87 | 51.61 | 33.26 |

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# ภาคผนวก ค

# บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Sorada Khaengkarn. Supitchar Meesukchaosumran and Tawit Chitsomboon. (2010). **Genetic algorithm for the selection of rough rice drying model for the free-fall paddy dryer.** International Journal of Research and Applications in Mechanical Engineering. Vol 1. No. 1.

ทวิช จิตรสมบูรณ์. โศรฎา แข็งการ และเกรียงไกร เพ็ชรน้ำเขียว. (2549). **เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบหล่นอิสระ : รวดเร็วและประหยัดพลังงาน.** การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 2. 27 – 29 กรกฎาคม 2549. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ. โศรฎา แข็งการ และทวิช จิตรสมบูรณ์. (2556) **ผลกระทบของท่อลมเป่าและความสูงของชั้นเบดต่อจลนศาสตร์การอบแห้งและการสิ้นเปลืองพลังงานในเครื่องอบแห้งเป่าพ่น-หล่นอิสระ.** การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 9. 8 – 10 พฤษภาคม 2556. นครนายก.

โศรฎา แข็งการ. สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ และทวิช จิตรสมบูรณ์. (2553). **รหัสวิธีเชิงพันธุกรรมเพื่อคัดเลือกแบบจำลองการอบแห้งข้าวเปลือก.** การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24. 20 – 22 ตุลาคม 2553. อุบลราชธานี. บทความที่ได้รับรางวัลดีเด่น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# รหัสวิธีเชิงพันธุกรรมเพื่อคัดเลือกแบบจำลองการอบแห้งข้าวเปลือก สำหรับเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระ

# Genetic algorithm for the selection of rough rice drying model for the free-fall paddy dryer

โศรฎา แซ่งการ[1], สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ[1] และ ทวิช จิตรสมบูรณ์[1]*

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา 30000

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้ทำการค้นหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งที่เหมาะสมกับการอบแห้งข้าวเปลือก ด้วยเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระ โดยทำการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 100, 130 และ 150 °C ใช้ความเร็วของอากาศอบแห้ง 2 m/s และระยะเวลาพักข้าวเปลือก 1 นาทีต่อรอบการอบแห้ง จากนั้นใช้รหัสวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) เพื่อค้นหาค่าปัจจัยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางในรูปแบบต่างๆ 9 รูปแบบ ที่สอดคล้องกับผลการทดลองอบแห้งมากที่สุด ทั้งนี้โดยใช้ GA Toolbox ของโปรแกรม MATLAB จากการวิเคราะห์เชิงสถิติแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองอบแห้งชั้นบางของ Midilli เหมาะสมที่สุดในกรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมที่มีค่าสูง และแบบจำลองอบแห้งชั้นบางแบบ Two-term exponential เหมาะสมที่สุดในกรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมที่มีค่าต่ำ

**คำหลัก**: รหัสวิธีเชิงพันธุกรรม, แบบจำลองการอบแห้งชั้นบาง, เครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระ

**Abstract**

The purpose of this study was to seek the proper thin-layer rough rice model for the free-fall dryer. Experimental data for drying temperatures 100, 130 and 150°C, drying velocity 2 m/s and rest period between drying round of 1 minute were fitted into the 9 theoretical models by a genetic algorithm (GA). The GA Toolbox in MATLAB was used to generate the correlation coefficients of the models. The best fitting of the experimental data by these models was specified by comparing the correlation coefficients, standard errors and mean square deviations. The Midilli model was found to be the most suitable model for drying condition at high relative humidity of ambient air while the Two-term exponential model was most appropriate for ambient air of low relative humidity.

**Keywords**: emissions/ fluidized-bed/ rice husk/ vortex

## 1. บทนำ

ข้าวเปลือกที่ได้จากการเก็บเกี่ยวมักมีความชื้นในเมล็ดสูง ซึ่งส่งผลต่ออายุการเก็บรักษา อัตราการเสื่อมคุณภาพ การเข้าทำลายของแมลง และเชื้อรา ดังนั้นจึงต้องลดความชื้นเมล็ดให้เร็วที่สุด การลดความชื้นด้วยเครื่องอบแห้งเป็นทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสมกับสภาพในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถลดความชื้นได้อย่างรวดเร็ว ในปริมาณที่มาก และในระยะเวลาที่กำหนดได้แน่นอน โดยไม่ขึ้นกับสภาพภูมิอากาศ แต่เนื่องจากการอบแห้งเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานสูง และความร้อนที่ใช้ยังมีผลต่อคุณภาพข้าวเปลือก จึงเกิดงานวิจัยและพัฒนาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกเพื่อลดการใช้พลังงานและคงรักษาคุณภาพข้าวเปลือกที่ดี ผลของงานวิจัยก่อให้เกิดเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคต่าง ๆ อย่างหลากหลาย เช่น เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด, แบบสเปาต์เตดเบด, แบบไหลคลุกเคล้า(LSU), แบบการไหลขวาง และแบบข้าวหล่นอิสระเป็นต้น

การจำลองกระบวนการอบแห้งเป็นสิ่งที่สำคัญต่อการวิจัยและพัฒนาเครื่องอบแห้ง โดยสมการทำนายความชื้นภายในวัสดุเป็นหัวใจสำคัญของระบบสมการอบแห้ง และเนื่องจากข้าวเปลือกเป็นวัสดุทางชีวภาพ ที่มีความซับซ้อนในกระบวนการแพร่และการระเหยน้ำภายในเมล็ด เช่นมีทั้งการแพร่ของน้ำในสภาพของเหลวและไอ การดูดซึมด้วยระบบคาปิลารี และการไหลแบบโมเลกุลอิสระ (Knudsen flow) ดังนั้นการสร้างสมการทำนายความชื้นภายในข้าวเปลือก จึงมักใช้ผลการทดลองอบแห้งเป็นข้อมูลในการสร้างสมการ โดยเปรียบเทียบผลการทดลองอบแห้งเข้ากับแบบจำลองอบแห้งชั้นบาง (Thin Layer Drying Model) ซึ่งมีหลายรูปแบบ ดังแสดงในตารางที่ 1.

การเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองอบแห้งชั้นบาง ก็คือการหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองอบแห้งชั้นบาง ซึ่งทำให้แบบจำลองสามารถทำนายลักษณะการลดลงของความชื้นข้าวเปลือกได้สอดคล้องกับผลการทดลองมากที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า

*ผู้ติดต่อ: E-Mail: tabon@sut.ac.th, โทรศัพท์: 044 22 4410, โทรสาร: 044 22 4613

กระบวนการดังกล่าว คือปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization Problem) นั่นเอง ซึ่งในปัจจุบันเทคนิคการค้นหาคำตอบด้วยรหัสวิธีเชิงพันธุกรรม (genetic algorithm) กำลังได้รับการประยุกต์ใช้อย่างมากมายในหลากหลายงาน เนื่องจากเป็นที่ยอมรับว่าสามารถหลีกเลี่ยงคำตอบแบบวงแคบเฉพาะถิ่น (local optimum) และสามารถค้นหาคำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้าง (near global optimum) ได้

เพื่อการวิจัยและพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระในขั้นสูงต่อไป งานวิจัยนี้จึงทำการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระซึ่งเป็นการอบแห้งแบบมีการพักในระหว่างกระบวนการ จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับแบบจำลองอบแห้งชั้นบาง โดยประยุกต์ใช้รหัสวิธีพันธุกรรมในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละแบบจำลอง แล้วใช้การวิเคราะห์เชิงสถิติเพื่อเลือกแบบจำลองอบแห้งชั้นผิวบางที่เหมาะสม ซึ่งแบบจำลองที่ได้ซ้อนทับกับผลการทดลองแบบมีการพักได้ดี แสดงถึงความเหมาะสมของแบบจำลองในการทำนายผลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระ

**2. หลักการทำงานเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ**

เครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระนี้ ได้ถูกคิดค้นขึ้น โดยคาดหวังว่าจะสามารถอบแห้งได้อย่างรวดเร็ว ประหยัดพลังงาน และไม่เกิดผลเสียหายต่อเมล็ดข้าว ซึ่งจะทำให้ได้ข้าวเต็มเมล็ด (ข้าวต้น) เป็นปริมาณสูง อีกทั้งได้คุณภาพดีทั้งในด้านของกลิ่นและสีของข้าวสาร ซึ่งเครื่องอบนี้ได้รับการจดสิทธิบัตรแล้ว [3]

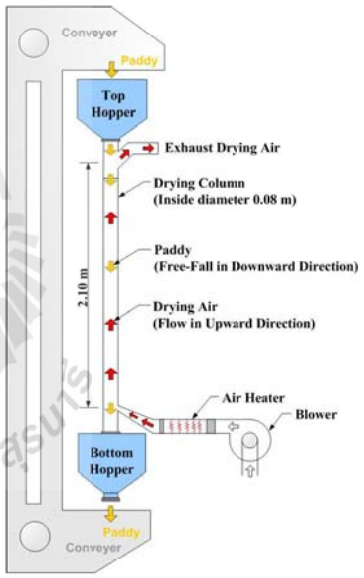
รูปที่ 1 แสดงให้เห็นถึงหลักการทำงานของเครื่องอบแห้งนี้คือ พัดลมเป่าอากาศผ่านอุปกรณ์สร้างความร้อน เพื่อสร้างลมร้อนเข้าสู่ด้านล่างของท่ออบแห้งที่ตั้งอยู่ในแนวดิ่ง ส่วนข้าวเปลือกชื้นตกลงมาโดยอิสระจากด้านบนของท่ออบแห้งสวนทางกับการไหลขึ้นของลมร้อน ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนและความชื้นกับอากาศร้อนอย่างรวดเร็ว ทำให้ข้าวเปลือกแห้งลงอย่างรวดเร็ว แต่ข้าวเปลือกจะอยู่ในท่ออบแห้งเป็นระยะเวลาสั้นๆ เพียงประมาณ 1 วินาทีในแต่ละรอบ (กรณีเครื่องอบแห้งขนาดห้องทดลอง ที่ท่ออบแห้งยาวประมาณ 2 เมตร แต่ถ้าท่ออบแห้งยาวกว่านี้ก็จะมีเวลามากกว่านี้) จากนั้นข้าวเปลือกจะออกจากท่ออบแห้งเข้าสู่ถังพักทางด้านล่าง

เครื่องอบแห้งนี้แตกต่างจากเครื่องอบแห้ง แบบ LSU ที่ถึงแม้จะมีการไหลของเมล็ดพืชในแนวดิ่งสวนทางกับอากาศแต่จะมีตัวควบคุมการไหลให้เมล็ดพืชตกลงด้านล่างอย่างช้าๆ โดยอากาศจะค่อยๆ ซึมผ่านขึ้นไปด้านบน แต่เครื่องอบแห้งแบบใหม่นี้เมล็ดพืชตกลงสวนทางกับอากาศในแนวดิ่งด้วยความเร็วสูงและมีความพรุนเมล็ดข้าวสูง ทำให้พื้นที่สัมผัสในการถ่ายเทความร้อนและความชื้นเพิ่มมากขึ้น ที่สำคัญคือความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างอากาศกับเมล็ดพืชในเครื่องอบแห้งนี้จะมีค่าสูง โดยความเร็วของอากาศไม่จำเป็นต้องมีค่าสูงมากนัก (ต่ำกว่าความเร็วลอยตัว) ซึ่งทำให้มีอัตราการถ่ายเทมวลความชื้นที่สูงเป็นสัดส่วนกัน

เพื่อให้ได้ข้าวเปลือกที่มีความชื้นอยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการจัดเก็บจึงต้องลำเลียงข้าวเปลือกเข้าสู่ท่ออบแห้งหลายรอบ ดังนั้นจึงเกิดช่วงเวลาที่ข้าวเปลือกรอที่จะเข้าสู่ท่ออบแห้งอีกครั้ง เรียกช่วงเวลานี้ว่า 'การพัก' (resting period) นั่นคือระยะเวลาตั้งแต่ข้าวเปลือกออกจากท่ออบ เข้าสู่ถังพักด้านล่าง และถูกลำเลียงขึ้นจนกระทั่งเข้าสู่ท่ออบแห้งอีกครั้ง ช่วงระยะเวลาดังกล่าวจะมากหรือน้อยขึ้นกับปริมาณข้าวเปลือกในถังพักด้านล่าง

ผลการวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระมีอัตราการอบแห้งที่ค่อนข้างสูง อยู่ในช่วง 0.0514-0.0971 (%w.b./sec.) [5] และใช้พลังงานปฐมภูมิจำเพาะที่ต่ำ อยู่ในช่วง 3.00-3.55 MJ/kg water evap. [6] โดยสามารถคงรักษาปริมาณข้าวต้นได้สูงถึงประมาณ 55% [7]

เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นเครื่องระดับห้องทดลองขนาดเล็ก โดยมีท่ออบแห้งขนาดวงใน 8 เซนติเมตร ความยาวท่อรวม 210 เซนติเมตร ขดลวดความร้อนขนาด 6 กิโลวัตต์ มอเตอร์พัดลมขนาด 1.75 กิโลวัตต์ ซึ่งสามารถปรับแต่งความร้อนและจำนวนรอบพัดลมได้อย่างต่อเนื่อง




รูปที่ 1 โครงร่างเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระ

**3.แบบจำลองอบแห้งชั้นผิวบาง**

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ส่วนมากที่ใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับการอบแห้งชั้นบาง แสดงในตารางที่ 1 โดยแต่ละสมการถูกสร้างขึ้น

Journal of Research and Applications in Mechanical Engineering (JRAME) | Vol.1 No. 1

เพื่อให้สอดคล้องกับลักษณะการอบแห้งที่เปลี่ยนไปทั้งด้านเทคนิคอบแห้ง เงื่อนไขการอบแห้ง และสภาวะแวดล้อมเป็นต้น

ตารางที่ 1 แบบจำลองการอบแห้งชั้นบาง [2]

| Name | Model equation |
|---|---|
| Newton | $MR = e^{-kt}$ |
| Page | $MR = e^{-kt^n}$ |
| Henderson and Pabis | $MR = ae^{-kt}$ |
| Logarithmic | $MR = a_0 + ae^{-kt}$ |
| Two-term exponential | $MR = a_1e^{-k_1t} + a_2e^{-k_2t}$ |
| Geometric | $MR = at^{-n}$ |
| Wang and Singh | $MR = 1 + a_1t + a_2t^2$ |
| Midilli | $MR = ae^{-kt^n} + bt$ |
| Diffusion approach | $MR = ae^{-kt} + (1-a)e^{-kbt}$ |

งานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองในตารางที่ 1 เพื่อทดสอบหาแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดกับเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระ

**4.การค้นหาคำตอบด้วยรหัสวิธีเชิงพันธุกรรม**

รหัสวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) ใช้การเลียนแบบการคัดเลือกโดยธรรมชาติและปฏิบัติการทางสายพันธุ์ กับการค้นหาคำตอบให้โจทย์ปัญหา โดยพิจารณารูปแบบของปัญหาเลียนแบบประชากรในสังคม ซึ่งโดยปกติประชากรในสังคมจะถูกคัดเลือกและปรับเปลี่ยนพันธุกรรม เพื่อให้ได้ลูกหลานที่มีลักษณะเหมาะสมกับสภาวะแวดล้อมที่บีบบังคับ ดังนั้น โจทย์ปัญหาจะเปรียบได้กับแบบจำลองการอบแห้งชั้นบาง ผลการทดลองอบแห้งและฟังก์ชันวัตถุประสงค์เปรียบได้กับสิ่งแวดล้อมที่บีบบังคับ สำหรับประชากรเปรียบได้กับชุดค่าคงที่ของแบบจำลองนั้นๆ ซึ่งจะถูกคัดเลือกและปรับแปลงพันธุกรรมจนได้คำตอบของปัญหาที่ดีขึ้นเรื่อยๆ จากรุ่นหนึ่งไปสู่รุ่นหนึ่ง ทำให้แบบจำลองและผลการทดลองซ้อนทับกันมากขึ้นเรื่อยๆ

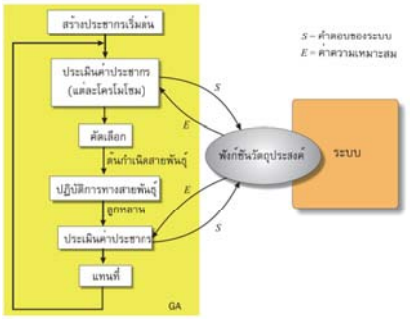
วัฏจักรของ GA ประกอบด้วย 3 กระบวนการที่สำคัญ คือการคัดเลือกสายพันธุ์, ปฏิบัติการทางสายพันธุ์ และการแทนที่ ดังรูปที่ 2

รูปที่ 2 วัฏจักรของรหัสวิธีเชิงพันธุกรรม [8]

ขั้นตอนการทำงานของ GA

1. สร้างประชากรโดยการสุ่ม (Random) ตามจำนวนที่ต้องการ
2. ประเมินค่าประชากร (ประชากร 1 คน ประกอบด้วย 1 โครโมโซมซึ่งแต่ละโครโมโซมแทนชุดค่าคงที่ของแบบจำลอง และยีนแต่ละตัวใน 1 โครโมโซม เป็นตัวแทนของค่าคงที่แต่ละพจน์ของแบบจำลอง) ของกลุ่มประชากรทั้งหมดที่สุ่มได้ จากข้อ 1. ด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ในที่นี้คือ ค่าน้อยที่สุด ของค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน ระหว่าง แบบจำลองและผลการทดลอง
3. คำนวณหาค่าความเหมาะสมแล้วส่งกลับไปยัง GA
4. ใช้ค่าความเหมาะสมทำการคัดเลือกโครโมโซมบางกลุ่มเพื่อนำมาเป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์ ซึ่งจะถูกใช้เป็นตัวแทนในการถ่ายทอดสายพันธุ์ให้กับรุ่นถัดไป
5. นำต้นกำเนิดสายพันธุ์มาทำการสร้างลูกหลาน ด้วยปฏิบัติการทางสายพันธุ์ โครโมโซมที่ได้ในขั้นตอนนี้ก็คือโครโมโซมลูกหลาน
6. คำนวณค่าความเหมาะสมของโครโมโซมลูกหลาน โดยใช้ขั้นตอนเดียวกับข้อ 3
7. โครโมโซมในประชากรเดิมจะถูกแทนที่ด้วยลูกหลานที่ได้จากข้อ 5 ประชากรเพียงบางส่วนเท่านั้นที่จะถูกแทนที่ด้วยกลวิธีเฉพาะสำหรับขั้นตอนของการแทนที่โดยใช้ค่าความเหมาะสมในการตัดสิน
8. เริ่มต้นทำซ้ำจากขั้นตอนในข้อ 2 ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งได้คำตอบที่ต้องการ คำตอบที่ได้จะมาจากโครโมโซมที่ดีที่สุดในกลุ่มประชากรนั่นเอง โดยที่สามารถใช้ค่าจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อเป็นการประเมินว่าคำตอบที่ได้เป็นที่ต้องการ ซึ่งสามารถแสดงขั้นตอนดังรูปที่ 3

รหัสวิธีเชิงพันธุกรรมจะดำเนินการไปเรื่อย ทำให้พบคำตอบที่ดีขึ้น จากคำตอบวงแคบเฉพาะถิ่น (Local solution) ไปยังคำตอบวงกว้าง (Global solution) รหัสวิธีเชิงพันธุกรรมจะยุติเมื่อเงื่อนไขการค้นหาสอดคล้องกับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ โดยทั่วไปจะอาศัยเงื่อนไขเกี่ยวกับจำนวนรุ่นที่ต้องการ หรือค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ คำตอบที่ดีที่สุดที่พบคือโครโมโซมที่ดีที่สุดในกลุ่มของประชากร




รูปที่ 3 ขั้นตอนของรหัสวิธีเชิงพันธุกรรม [8]

**5.สมการการคำนวณที่เกี่ยวข้อง**

**5.1 การหาอัตราส่วนความชื้น**

อัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio, MR) นิยามโดย

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

โดยที่ $M$ คือ ความชื้นข้าวเปลือกที่เวลาใด

$M_0$ คือ ความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้น

$M_e$ คือ ความชื้นสมดุลของข้าวเปลือก

ความชื้นสมดุลหาได้จากสมการกึ่งทฤษฎี พัฒนาโดย Henderson (1952)

$$M_e = \frac{1}{100}\left[\frac{\ln(1-RH)}{(C_1 T_{abs})}\right]^{\frac{1}{C_2}} \quad (2)$$

โดยที่ $RH$ คือ ค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศอบแห้ง (ทศนิยม)

$T_{abs}$ คือ ค่าอุณหภูมิอากาศอบแห้งสัมบูรณ์

$C_1, C_2$ คือ ค่าคงที่การคายความชื้น สำหรับข้าวเปลือกมีค่าเท่ากับ -3.146X10-6 และ 2.464 ตามลำดับ [4]

**5.2 การคำนวณระยะเวลาในท่ออบแห้ง**

เครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระ มีลักษณะการสัมผัสกันระหว่างข้าวเปลือกและอากาศอบแห้งแบบไม่ต่อเนื่องดังนั้นการพิจารณาระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งจะพิจารณาจากระยะเวลาที่เมล็ดข้าว 1 เมล็ดสัมผัสอากาศร้อนจริง, $t_{resident}$ ตามสมการที่ (3)

$$t_{resident} = \left(N_{drying_pass} \times t_{resident_1pass}\right) \quad (3)$$

โดยที่ $N_{drying_pass}$ คือจำนวนรอบที่ข้าวเปลือกผ่านเข้าสู่ท่ออบแห้ง (รอบ) และ $t_{resident_1pass}$ คือเวลาที่เมล็ดข้าว 1 เมล็ดอยู่ในท่ออบแห้ง ใน 1 รอบการอบแห้ง (วินาที)

**5.3 เงื่อนไขที่ใช้ประเมินความเหมาะสม ของแบบจำลองอบแห้งชั้นบาง**

ประกอบด้วย 3 เงื่อนไข คือค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน $(e_s)$, ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ $(r)$ และ ค่าความแปรปรวน $(\chi^2)$ แต่ละเงื่อนไขมีนิยามดังต่อไปนี้ [1]

$$e_s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(MR_{pre,i} - MR_{exp,i}\right)^2}{N - N_c}} \quad (4)$$

$$r = \frac{N\sum_{i=1}^{N} MR_{pre,i} MR_{exp,i} - \sum_{i=1}^{N} MR_{pre,i} \sum_{i=1}^{N} MR_{exp,i}}{\sqrt{N\sum_{i=1}^{N}\left(MR_{pre,i}\right)^2 - \left(\sum_{i=1}^{N} MR_{pre,i}\right)^2}\sqrt{N\sum_{i=1}^{N}\left(MR_{exp,i}\right)^2 - \left(\sum_{i=1}^{N} MR_{exp,i}\right)^2}} \quad (5)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(MR_{pre,i} - MR_{exp,i}\right)^2}{N - N_c} \quad (6)$$

โดยที่ $MR_{pre,i}$ คือ ค่าสัดส่วนความชื้นที่คำนวณได้จากสมการอบแห้งชั้นบาง, $MR_{exp,i}$ คือ ค่าสัดส่วนความชื้นที่ได้จากผลการทดลอง, $N$ คือ จำนวนชุดข้อมูลการทดลอง และ $N_c$ คือ จำนวนค่าคงที่ในแบบจำลองอบแห้งชั้นบาง

**6.วิธีการดำเนินงานวิจัย**

**6.1 วัสดุและวิธีการทดลอง**

งานวิจัยนี้ใช้ข้าวเปลือกพันธุ์ ชัยนาท1 ที่ได้จากการเก็บเกี่ยวด้วยรถเกี่ยวนวด ในเดือน พฤษภาคม 2551 บรรจุในถุงพลาสติกปิดสนิทถุงละ 60 กิโลกรัม และจัดเก็บในห้องแช่เย็นที่มีอุณหภูมิประมาณ 5°Cก่อนการทดลองนำถุงข้าวเปลือกออกจากห้องแช่เย็นและพักในสภาพอากาศแวดล้อมประมาณ 12 ชั่วโมง จากนั้นนำข้าวเปลือกไปคัดแยกเมล็ดเต็มออกจากเศษฟางและเมล็ดลีบด้วยเครื่องคัดแยก บรรจุข้าวเปลือกเมล็ดเต็มที่ได้ในถุงพลาสติกปิดสนิทตั้งไว้ในสภาพอากาศแวดล้อมอีกประมาณ 1 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการกระจายตัวของความชื้นในเมล็ด แล้วจึงเริ่มการทดลอง ข้าวเปลือกที่เตรียมได้มีน้ำหนัก 31.5 กิโลกรัม และมีความชื้นประมาณ 21 (%w.b.) โดยเงื่อนไขการทดลองอบแห้งแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงเงื่อนไขการทดลองอบแห้ง

- ความเร็วอากาศอบแห้ง 2 m/s
- ระยะเวลาพัก 1 นาที ต่อรอบการอบแห้ง

| อุณหภูมิอากาศอบแห้ง (°C) | ค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อม, RH (%) | |
|---|---|---|
| | กรณี %RH สูง | กรณี %RH ต่ำ |
| 100 | 74.82 | 55.73 |
| 130 | 69.09 | 53.48 |
| 150 | 61.16 | 53.47 |

Journal of Research and Applications in Mechanical Engineering (JRAME) | Vol.1 No. 1

เริ่มการทดลอง ด้วยการเปิดพัดลม กะพ้อลำเลียงและเครื่องทำความร้อน ตั้งความเร็วและอุณหภูมิอากาศอบแห้งตามเงื่อนไขข้างต้น เก็บตัวอย่างเริ่มต้น 15 กรัม ในถุงพลาสติกปิดสนิท นำข้าวเปลือกที่เตรียมไว้เทใส่ถังพักด้านบน ข้าวเปลือกจะ ไหลผ่านท่อออบแห้ง เข้าสู่ถังพักด้านล่าง และเข้าสู่กะพ้อลำเลียง เพื่อลำเลียงกลับ ไปถังพักด้านบน เกิดการอบแห้งซ้ำเป็นวงรอบตามวิธีการข้างต้นจนกระทั่งข้าวเปลือกได้ความชื้นประมาณ 13% (w.b.) ในขณะอบแห้งเก็บตัวอย่างข้าวเปลือกตัวอย่างละ 15 กรัมในถุงพลาสติกปิดสนิท โดยเก็บทุกๆ 5 นาที ในชั่วโมงแรกและทุกๆ 10 นาทีในชั่วโมงต่อมา เพื่อนำไปหาค่าความชื้น หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการอบแห้งนำตัวอย่างที่เก็บได้พักในอุณหภูมิบรรยากาศประมาณ 6 ชั่วโมง เพื่อให้อุณหภูมิข้าวเปลือกลดลง คลายความเครียดที่ผิวและเกิดการกระจายความชื้นอย่างสม่ำเสมอตลอดเมล็ดข้าว จากนั้นนำไปหาค่าความชื้นโดยวิธีการอบด้วยตู้อบ (Oven Method) โดยนำข้าวเปลือกตัวอย่างทั้งเมล็ด นำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

### 6.2 ฟังก์ชั่นค่าความเหมาะสมและเงื่อนไขพันธุกรรม

ผู้วิจัยเลือกใช้ Genetic Algorithm Tool ของโปรแกรม MATLAB ซึ่งอยู่ในรูปแบบ Graphic User Interface, GUI การใช้งานเริ่มต้นจากการสร้างฟังก์ชั่นค่าความเหมาะสม (ฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์) ในรูปของ m-file โดยงานวิจัยนี้ใช้ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน ($e_s$) เป็นค่าความเหมาะสมที่ต้องการให้มีค่าน้อยที่สุด ซึ่ง $e_s$ ได้จากความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าสัดส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองกับที่ได้จากแบบจำลองอบแห้งชั้นบาง ตามสมการที่ 4

อันดับต่อมาทำการกำหนดกลยุทธ์วิวัฒนาการ (Evolution Strategies) ซึ่งผู้วิจัยได้เลือกใช้ตามที่แสดงในตารางที่ 3 จากนั้นทำการ run โปรแกรมผ่าน Genetic Algorithm Tool ท้ายที่สุดได้ค่าตอบเป็นค่าของตัวแปรในแบบจำลองอบแห้งชั้นบางที่พิจารณา ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานต่ำที่สุด

ตารางที่ 3 แสดงกลยุทธ์วิวัฒนาการที่เลือกใช้

| | |
|---|---|
| Population size | - 3000 |
| Fitness scaling | - Rank |
| Selection | - Stochastic uniform |
| Reproduction | - Elite count: 2 |
| | - Crossover fraction: 0.8 |
| Mutation | - Gaussian function |
| Crossover | - Heuristic |
| Migration | - Forward |
| Hybrid function | - fminsearch |
| Stopping criteria | - 300,000 Generation |

### 7.ผลการคำนวณและการวิจารณ์ผล

ค่าตัวแปรของแบบจำลองอบแห้งชั้นบางทั้ง 9 สมการ ที่คันหาด้วย GA และผลการวิเคราะห์เชิงสถิติ ในกรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมสูงแสดงในตารางที่ 4-7 และในกรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมต่ำแสดงในตารางที่ 8-10

แบบจำลองอบแห้งที่ดีจะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ($r$) เข้าใกล้ 1 และมีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน ($e_s$) และค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($\chi^2$) ที่ต่ำ

จากตารางที่ 4-6 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดในการอธิบายการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระ เมื่อความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมสูงคือ แบบจำลองของ Midilli โดยในการทดลองทั้ง 3 กรณี มีค่า r ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.999480 และมีค่า $e_s$ สูงสุดเท่ากับ 0.005975 และค่า $\chi^2$ สูงที่สุดเท่ากับ 0.00004 ถึงแม้ว่าในกรณีที่ 150°C ค่า $e_s$ ที่ได้จากแบบจำลองของ Midilli จะมีค่า0.005975 ซึ่งมากกว่าแบบจำลองแบบ Two-term exponential ($e_s$ = 0.005842) และเส้นกราฟของแบบจำลองทั้งสองเกาะกับผลการทดลองได้ดี ดังแสดงในรูปที่ 4 ดังนั้นจึงถือว่าที่อุณหภูมิ 150°C สามารถใช้แบบจำลองทั้งสองได้ และเลือกใช้แบบจำลองของ Midilli เพื่อให้เป็นแนวทางเดียวกันกับการอบแห้งที่อุณหภูมิอบแห้ง 100°C และ 130°C และสามารถหาความสัมพันธ์ของค่าคงที่ของสมการกับอุณหภูมิอบแห้ง สำหรับกรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมสูงได้

จากตารางที่ 7-9 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดในการอธิบายการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระ เมื่อความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมต่ำคือ แบบจำลองแบบ Two-term exponential ซึ่งมีค่า r ต่ำสุดเท่ากับ 0.999417 และมีค่า $e_s$ สูงสุดเท่ากับ 0.006614 และค่า $\chi^2$ สูงสุดเท่ากับ 0.000049

เหตุผลทางกายภาพที่แบบจำลองของ Midilli มีความเหมาะสมกับการอบแห้งที่ความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมสูง อาจเนื่องมาจากค่าความดันไอของอากาศที่ปกคลุมกองข้าวเปลือกในช่วงระยะพักมีค่าสูง ส่งผลให้ความแตกต่างระหว่างความดันไอภายในกับภายนอกต่ำกว่ากรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อม ต่ำ จึงทำให้การกระจายความชื้นภายในเมล็ดและการ ระเหยสู่บรรยากาศเป็นไปได้ช้ากว่า ลักษณะการลดลงของความชื้นจึงค่อนข้างราบเรียบ สอดคล้องกับรูปแบบของแบบจำลองของ Midilli ที่มีพจน์การลดลงแบบเชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 4 ในทางกลับกันกรณีการอบแห้งที่ความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมต่ำ การ ลดลงของความชื้นจึงรวดเร็วและมีลักษณะโค้งมากกว่า ดังนั้นแบบจำลองแบบ Two-term exponential จึงให้ความสอดคล้องกับผลการทดลองที่ดีกว่าดังแสดงในรูปที่ 5

ดังนั้น กรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมสูง เลือกแบบจำลองของ Midilli

$$MR = ae^{-kt^n} + bt \quad (7)$$

โดยที่สัมประสิทธิ์ $a$, $k$, $n$ และ $b$ เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิอากาศอบแห้ง ($T$) ดังนี้

$$a = -0.00001133T^2 + 0.00292897T + 0.80653797 \quad (8)$$

$$k = 0.00000039T^2 - 0.00007671T + 0.00463167 \quad (9)$$

$$n = -0.00007536T^2 + 0.01611246T + 0.36044789 \quad (10)$$

$$b = -0.00000036T^2 + 0.00008397T - 0.00436890 \quad (11)$$

กรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมต่ำ เลือก แบบจำลองแบบ Two-term exponential

$$MR = a_1 e^{-k_1 t} + a_2 e^{-k_2 t} \quad (12)$$

โดยที่ สัมประสิทธิ์ $a_1$, $k_1$, $a_2$และ $k_2$ เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิอากาศอบแห้ง ($T$) ดังนี้

$$a_1 = 0.00018725T^2 - 0.03041804T + 2.26215079 \quad (13)$$

$$k_1 = -0.00000332T^2 + 0.00080216T - 0.04427326 \quad (14)$$

$$a_2 = -0.00017492T^2 + 0.02724108T - 1.07857873 \quad (15)$$

$$k_2 = -0.00000737T^2 + 0.00166233T - 0.08351565 \quad (16)$$

ความถูกต้องของแบบจำลองอบแห้งและสมการความสัมพันธ์ที่สร้างขึ้น ด้วยการเปรียบเทียบกับค่าสัดส่วนความชื้นที่ทำนายได้กับผลการทดลอง แสดงในรูปที่ 6 และ 7 จากรูปพบว่าค่าที่ทำนายค่อนข้างซ้อนทับกับเส้นตรง ซึ่งแสดงถึงความเหมาะสมของแบบจำลองอบแห้งทั้งสอง ในการทำนายการอบแห้งข้าวเปลือกเมื่อใช้เครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระ

## 8. สรุป

งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้วิธีเชิงพันธุกรรมในการกำหนดค่าปัจจัยของแบบจำลองอบแห้งชั้นบาง 9 แบบ เพื่อใช้กับเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ ผลงานวิจัยแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองอบแห้งชั้นบางของ Midilli เหมาะสมที่สุดในกรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมที่มีค่าสูง และแบบจำลองอบแห้งชั้นบางแบบ Two-term exponential เหมาะสมที่สุดในกรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมที่มีค่าต่ำ ซึ่ง แบบจำลองทั้งสองให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ใกล้เคียง 1 มาก ดูทั้งค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน และค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนมาตรฐานยังต่ำอีกด้วย งานวิจัยนี้ยังได้นำเสนอสมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยของแบบจำลองกับอุณหภูมิอากาศอบแห้งในรูปของสมการโพลิโนเมียลเพื่อให้ได้ผลการทำนายที่ดีที่สุดอีกด้วย

## 9. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยบางส่วนจาก สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## 10. เอกสารอ้างอิง

[1] Chapra, S.C., Canel, R.P., 1989. Numerical method for engineer. McGraw-Hill Book Company, New York.

[2] Vivian, N.P., 2007. Focus on Food Engineering Research and Developments. Nova Science Publishers, New York.

[3] กรมทรัพย์สินทางปัญญา, สิทธิบัตรการประดิษฐ์ชื่อ "เครื่องอบแห้งแบบการไหลสวนทางในแนวดิ่ง". เลขที่สิทธิบัตร 22985, ออกเมื่อ ๒๗ ธันวาคม ๒๕๕๐

[4] สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. 2540. การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. กรุงเทพฯ, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

[5] สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ และ ทวิช จิตรสมบูรณ์. 2552. ผลของระยะพัก ความเร็ว และอุณหภูมิต่ออัตราอบแห้งในเครื่องอบแห้งแบบข้าวเปลือกหล่นอิสระ, การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่10, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

[6] สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ และ ทวิช จิตรสมบูรณ์. 2552. ผลของระยะพัก อุณหภูมิ และความเร็วอากาศต่อการสิ้นเปลืองพลังงานในการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ, การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 5, มหาวิทยาลัยนเรศวร

[7] สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ และ ทวิช จิตรสมบูรณ์. 2552. เครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ : เงื่อนไขการอบแห้งที่ให้คุณภาพข้าวสารที่ดี, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 23, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

[8] อาทิตย์ ศรีแก้ว. 2552. ปัญญาเชิงคำนวณ, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Journal of Research and Applications in Mechanical Engineering (JRAME) | Vol.1 No. 1

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์แบบจำลองอบแห้ง กรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมสูง ใช้อุณหภูมิอบแห้ง 100°C

| Model | Parameter | Value | Standard Error ($e_y$) | Correlation coeff. (r) | MSD ($\chi^2$) |
|---|---|---|---|---|---|
| Newton | Drying Coefficient, k | 0.002025 | 0.010379 | 0.998621 | 0.000110 |
| Page | Drying Coefficient, k | 0.001937 | 0.010336 | 0.998609 | 0.000111 |
| | Exponent, n | 1.007810 | | | |
| Henderson and Pabis | Drying Coefficient, k | 0.002041 | 0.010199 | 0.998639 | 0.000108 |
| | Coefficient, a | 1.004016 | | | |
| Logarithmic | Drying Coefficient, k | 0.002358 | 0.009514 | 0.998813 | 0.000096 |
| | Coefficient, a | 0.921174 | | | |
| | Coefficient, $a_0$ | 0.088505 | | | |
| Two-term exponent | Coefficient, $a_1$ | 1.008498 | 0.010027 | 0.998687 | 0.000109 |
| | Drying Coefficient, $k_1$ | 0.002057 | | | |
| | Coefficient, $a_2$ | -0.012349 | | | |
| | Drying Coefficient, $k_2$ | 0.042789 | | | |
| Geometric | Coefficient, a | 1.721333 | 0.089304 | 0.906856 | 0.008282 |
| | Exponent, n | 0.192390 | | | |
| Wang and Singh | Coefficient, $a_1$ | -0.001979 | 0.008041 | 0.999221 | 0.000067 |
| | Coefficient, $a_2$ | 1.491E-06 | | | |
| Midilli | Coefficient, a | 0.986112 | 0.005809 | 0.999558 | 0.000036 |
| | Coefficient, b | 0.000386 | | | |
| | Drying Coefficient, k | 0.000823 | | | |
| | Exponent, n | 1.218109 | | | |
| Diffusion Approach | Coefficient, a | -0.007795 | 0.010059 | 0.998683 | 0.000107 |
| | Coefficient, b | 0.053501 | | | |
| | Drying Coefficient, k | 0.038408 | | | |

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 5 การวิเคราะห์แบบจำลองอบแห้ง กรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมสูง ใช้อุณหภูมิอบแห้ง 130°C

| Model | Parameter | Value | Standard Error ($e_y$) | Correlation coeff. (r) | MSD ($\chi^2$) |
|---|---|---|---|---|---|
| Newton | Drying Coefficient, k | 0.002025 | 0.010379 | 0.998621 | 0.000110 |
| Page | Drying Coefficient, k | 0.001852 | 0.008386 | 0.999065 | 0.000074 |
| | Exponent, n | 1.047085 | | | |
| Henderson and Pabis | Drying Coefficient, k | 0.002454 | 0.007948 | 0.999135 | 0.000066 |
| | Coefficient, a | 1.012401 | | | |
| Logarithmic | Drying Coefficient, k | 0.002574 | 0.007879 | 0.999150 | 0.000067 |
| | Coefficient, a | 0.982580 | | | |
| | Coefficient, $a_0$ | 0.031457 | | | |
| Two-term exponent | Coefficient, $a_1$ | 1.019035 | 0.007246 | 0.999283 | 0.000058 |
| | Drying Coefficient, $k_1$ | 0.002486 | | | |
| | Coefficient, $a_2$ | -0.020826 | | | |
| | Drying Coefficient, $k_2$ | 0.062342 | | | |
| Geometric | Coefficient, a | 1.683932 | 0.086039 | 0.915322 | 0.007755 |
| | Exponent, n | 0.190412 | | | |
| Wang and Singh | Coefficient, $a_1$ | -0.002271 | 0.008351 | 0.999250 | 0.000073 |
| | Coefficient, $a_2$ | 1.845E-06 | | | |
| Midilli | Coefficient, a | 0.995787 | 0.005266 | 0.999620 | 0.000031 |
| | Coefficient, b | 0.000392 | | | |
| | Drying Coefficient, k | 0.001186 | | | |
| | Exponent, n | 1.181532 | | | |
| Diffusion Approach | Coefficient, a | -0.019029 | 0.007254 | 0.999282 | 0.000056 |
| | Coefficient, b | 0.042598 | | | |
| | Drying Coefficient, k | 0.058348 | | | |

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 6 การวิเคราะห์แบบจำลองอบแห้ง กรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมสูง ใช้อุณหภูมิอบแห้ง 150°C

| Model | Parameter | Value | Standard Error ($e_s$) | Correlation coeff. (r) | MSD ($\chi^2$) |
|---|---|---|---|---|---|
| Newton | Drying Coefficient, k | 0.002788 | 0.007933 | 0.999178 | 0.000065 |
| Page | Drying Coefficient, k | 0.002258 | 0.006497 | 0.999411 | 0.000045 |
| | Exponent, n | 1.040081 | | | |
| Henderson and Pabis | Drying Coefficient, k | 0.002814 | 0.007630 | 0.999155 | 0.000061 |
| | Coefficient, a | 1.004362 | | | |
| Logarithmic | Drying Coefficient, k | 0.002199 | 0.006259 | 0.999429 | 0.000043 |
| | Coefficient, a | 1.188866 | | | |
| | Coefficient, $a_0$ | -0.191337 | | | |
| Two-term exponent | Coefficient, $a_1$ | 1.055264 | 0.005842 | 0.999503 | 0.000038 |
| | Drying Coefficient, $k_1$ | 0.003023 | | | |
| | Coefficient, $a_2$ | -0.062611 | | | |
| | Drying Coefficient, $k_2$ | 0.013871 | | | |
| Geometric | Coefficient, a | 1.628474 | 0.083954 | 0.918454 | 0.007440 |
| | Exponent, n | 0.188328 | | | |
| Wang and Singh | Coefficient, $a_1$ | -0.002591 | 0.006150 | 0.999472 | 0.000040 |
| | Coefficient, $a_2$ | 2.263E-06 | | | |
| Midilli | Coefficient, a | 0.990905 | 0.005975 | 0.999480 | 0.000040 |
| | Coefficient, b | 0.000032 | | | |
| | Drying Coefficient, k | 0.001815 | | | |
| | Exponent, n | 1.081782 | | | |
| Diffusion Approach | Coefficient, a | -0.189910 | 0.006220 | 0.999457 | 0.000042 |
| | Coefficient, b | 0.490094 | | | |
| | Drying Coefficient, k | 0.006591 | | | |

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 7 การวิเคราะห์แบบจำลองอบแห้ง กรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมต่ำ ใช้อุณหภูมิอบแห้ง 100°C

| Model | Parameter | Value | Standard Error ($e_s$) | Correlation coeff. (r) | MSD ($\chi^2$) |
|---|---|---|---|---|---|
| Newton | Drying Coefficient, k | 0.002499 | 0.007898 | 0.999201 | 0.000064 |
| Page | Drying Coefficient, k | 0.002110 | 0.006984 | 0.999416 | 0.000051 |
| | Exponent, n | 1.031077 | | | |
| Henderson and Pabis | Drying Coefficient, k | 0.002506 | 0.007872 | 0.999193 | 0.000065 |
| | Coefficient, a | 1.001308 | | | |
| Logarithmic | Drying Coefficient, k | 0.001955 | 0.006032 | 0.999523 | 0.000039 |
| | Coefficient, a | 1.180027 | | | |
| | Coefficient, $a_0$ | -0.186477 | | | |
| Two-term exponent | Coefficient, $a_1$ | 1.092848 | 0.005630 | 0.999585 | 0.000035 |
| | Drying Coefficient, $k_1$ | 0.002773 | | | |
| | Coefficient, $a_2$ | -0.103703 | | | |
| | Drying Coefficient, $k_2$ | 0.009044 | | | |
| Geometric | Coefficient, a | 1.684437 | 0.090860 | 0.906380 | 0.008640 |
| | Exponent, n | 0.195613 | | | |
| Wang and Singh | Coefficient, $a_1$ | -0.002319 | 0.006551 | 0.999533 | 0.000045 |
| | Coefficient, $a_2$ | 1.818E-06 | | | |
| Midilli | Coefficient, a | 0.987202 | 0.005790 | 0.999561 | 0.000037 |
| | Coefficient, b | -0.000006 | | | |
| | Drying Coefficient, k | 0.001616 | | | |
| | Exponent, n | 1.074260 | | | |
| Diffusion Approach | Coefficient, a | -6.892263 | 0.006530 | 0.999490 | 0.000046 |
| | Coefficient, b | 1.077549 | | | |
| | Drying Coefficient, k | 0.001483 | | | |

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Journal of Research and Applications in Mechanical Engineering (JRAME) | Vol.1 No. 1

ตารางที่ 8 การวิเคราะห์แบบจำลองอบแห้ง กรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมต่ำ ใช้อุณหภูมิอบแห้ง 130°C

| Model | Parameter | Value | Standard Error ($e_r$) | Correlation coeff. (r) | MSD ($\chi^2$) |
|---|---|---|---|---|---|
| Newton | Drying Coefficient, k | 0.002839 | 0.015112 | 0.997238 | 0.000234 |
| Page | Drying Coefficient, k | 0.001738 | 0.010929 | 0.998665 | 0.000126 |
| | Exponent, n | 1.092773 | | | |
| Henderson and Pabis | Drying Coefficient, k | 0.002880 | 0.014721 | 0.997138 | 0.000228 |
| | Coefficient, a | 1.006908 | | | |
| Logarithmic | Drying Coefficient, k | 0.001283 | 0.007934 | 0.999161 | 0.000068 |
| | Coefficient, a | 1.830550 | | | |
| | Coefficient, $a_0$ | -0.842124 | | | |
| Two-term exponent | Coefficient, $a_1$ | 1.472332 | 0.006614 | 0.999417 | 0.000049 |
| | Drying Coefficient, $k_1$ | 0.003951 | | | |
| | Coefficient, $a_2$ | -0.493440 | | | |
| | Drying Coefficient, $k_2$ | 0.008079 | | | |
| Geometric | Coefficient, a | 1.645632 | 0.094285 | 0.901445 | 0.009370 |
| | Exponent, n | 0.193092 | | | |
| Wang and Singh | Coefficient, $a_1$ | -0.002488 | 0.009157 | 0.999071 | 0.000088 |
| | Coefficient, $a_2$ | 1.700E-06 | | | |
| Midilli | Coefficient, a | 0.976039 | 0.007116 | 0.999325 | 0.000056 |
| | Coefficient, b | -0.000064 | | | |
| | Drying Coefficient, k | 0.001010 | | | |
| | Exponent, n | 1.176772 | | | |
| Diffusion Approach | Coefficient, a | -16.891285 | 0.009205 | 0.999032 | 0.000092 |
| | Coefficient, b | 1.087098 | | | |
| | Drying Coefficient, k | 0.000985 | | | |

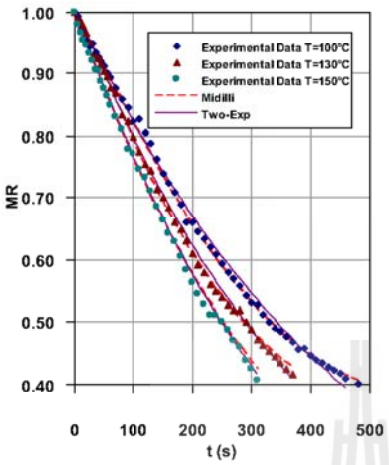
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 9 การวิเคราะห์แบบจำลองอบแห้ง กรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมต่ำ ใช้อุณหภูมิอบแห้ง 150°C

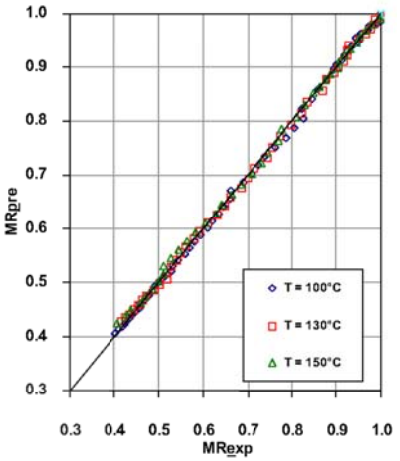
| Model | Parameter | Value | Standard Error ($e_r$) | Correlation coeff. (r) | MSD ($\chi^2$) |
|---|---|---|---|---|---|
| Newton | Drying Coefficient, k | 0.003224 | 0.012280 | 0.997859 | 0.000155 |
| Page | Drying Coefficient, k | 0.002378 | 0.010304 | 0.998689 | 0.000113 |
| | Exponent, n | 1.059478 | | | |
| Henderson and Pabis | Drying Coefficient, k | 0.003236 | 0.012253 | 0.997837 | 0.000160 |
| | Coefficient, a | 1.001644 | | | |
| Logarithmic | Drying Coefficient, k | 0.001467 | 0.005410 | 0.999574 | 0.000032 |
| | Coefficient, a | 1.810819 | | | |
| | Coefficient, $a_0$ | -0.826184 | | | |
| Two-term exponent | Coefficient, $a_1$ | 1.912572 | 0.005408 | 0.999574 | 0.000033 |
| | Drying Coefficient, $k_1$ | 0.001419 | | | |
| | Coefficient, $a_2$ | -0.928188 | | | |
| | Drying Coefficient, $k_2$ | 0.000068 | | | |
| Geometric | Coefficient, a | 1.601385 | 0.087277 | 0.913909 | 0.008093 |
| | Exponent, n | 0.190451 | | | |
| Wang and Singh | Coefficient, $a_1$ | -0.002883 | 0.008493 | 0.999318 | 0.000077 |
| | Coefficient, $a_2$ | 2.439E-06 | | | |
| Midilli | Coefficient, a | 0.984691 | 0.005452 | 0.999567 | 0.000034 |
| | Coefficient, b | -0.000627 | | | |
| | Drying Coefficient, k | 0.002047 | | | |
| | Exponent, n | 1.002924 | | | |
| Diffusion Approach | Coefficient, a | -0.528344 | 0.008214 | 0.999308 | 0.000074 |
| | Coefficient, b | 0.000317 | | | |
| | Drying Coefficient, k | 6.408306 | | | |

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

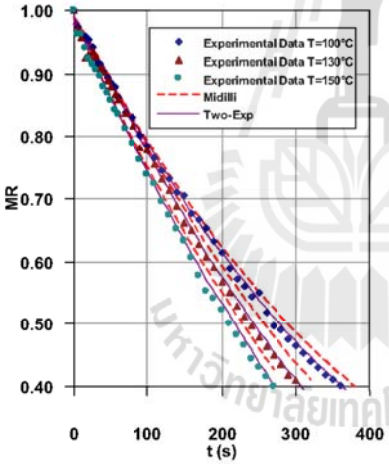
Journal of Research and Applications in Mechanical Engineering (JRAME) | Vol.1 No. 1



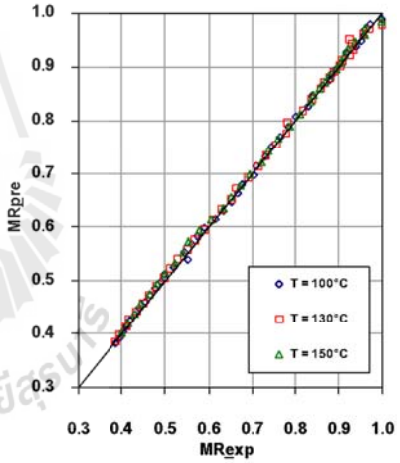

รูปที่ 4 เปรียบเทียบแบบจำลองของ Midilli และ Two-term exponential กับผลการทดลอง กรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศเวลล้อมสูง




รูปที่ 6 ผลการทำนายของแบบจำลอง Midilli กับผลการทดลอง กรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศเวลล้อมสูง




รูปที่ 5 เปรียบเทียบแบบจำลองของ Midilli และ Two-term exponential กับผลการทดลอง กรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศเวลล้อมต่ำ




รูปที่ 7 ผลการทำนายของแบบจำลอง Two-term exponential กับผลการทดลอง กรณีความชื้นสัมพัทธ์อากาศเวลล้อมต่ำ

# ประวัติผู้เขียน

นางสาวโศรฎา แข็งการ เกิดเมื่อวันที่ 29 ธันวาคม พ.ศ. 2520 ที่จังหวัดนครราชสีมา ได้เข้าศึกษาในระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนบ้านหนองไผ่ล้อม และระดับมัธยมศึกษา ที่โรงเรียนสุรนารีวิทยา จังหวัดนครราชสีมา หลังจากนั้น ในปี พ.ศ. 2537 ได้เข้าศึกษาต่อในระดับอุดมศึกษาที่มหาวิทยาลัยเทคโนลียีสุรนารี จังหวันครราชสีมา สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) จากสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2541 และสำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัญฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) จากสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2545

ปี พ.ศ. 2551 เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยขณะศึกษาได้ทำงานเป็นอาจารย์ผู้สอนบรรยาย จำนวน 2 รายวิชา (1) กลศาสตร์เครื่องจักรกล (2) เทอร์โมไดนามิกส์ และวิชาปฏิบัติการ จำนวน 5 รายวิชา (1) วิชาปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล 1, (2) วิชาปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล 2, (3) วิชาปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล 3, (4) วิชาเขียนแบบทางวิศวกรรม 1 และ (5) วิชาเขียนแบบทางวิศวกรรม 2 จนถึงปัจจุบัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี