



EFFECTIVE MOISTURE DIFFUSIVITY OF PADDY DRYING SIMULATION BY  
FLUIDIZATION TECHNIQUE COMBINED WITH THERMAL IMAGING CAMERA

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของการจำลองการอบแห้งเมล็ด  
ข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันร่วมกับกล้องถ่ายภาพความร้อน

ภีร์ณุกาญจน์ แดงสว่าง

PEECHUKAN DANGSAWANG

วสุธร คงเพชร

WASUTORN KONGPET

ปริญญาานิพนธ์เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกลและพลังงาน

ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

ปีการศึกษา 2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของการจำลองการอบแห้งเมล็ด  
ข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันร่วมกับกล้องถ่ายภาพความร้อน  
EFFECTIVE MOISTURE DIFFUSIVITY OF PADDY DRYING SIMULATION BY  
FLUIDIZATION TECHNIQUE COMBINED WITH THERMAL IMAGING CAMERA



ปริญญาานิพนธ์เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล  
ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร  
ปีการศึกษา 2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFECTIVE MOISTURE DIFFUSIVITY OF PADDY DRYING SIMULATION BY  
FLUIDIZATION TECHNIQUE COMBINED WITH THERMAL IMAGING CAMERA



A PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE  
DEGREE OF BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING  
DEPARTMENT OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
PRINCE OF CHUMPHON

2021

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร  
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์      สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของการจำลองการอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันร่วมกับกล้องถ่ายภาพความร้อน

Thesis      Effective moisture diffusivity of paddy drying simulation by fluidization technique combined with thermal imaging camera.


ชื่อนักศึกษา      นางสาวกวีร์กาญจน์ แดงสว่าง      รหัสประจำตัว 61512063  
   นายวสุธร คงเพชร      รหัสประจำตัว 61514015

ปริญญา      วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา      วิศวกรรมเครื่องกล และ วิศวกรรมพลังงาน

อาจารย์ที่ปรึกษา      รศ.ดร.ชัยวัฒน์ รัตน์มีชัยสกุล

ปริญญาานิพนธ์

คณะกรรมการสอบปริญญาานิพนธ์			ลายมือชื่อ
รศ.ดร.ธัชพล	จิ้งเจอร์ญ	กรรมการสอบ	
ผศ.ดร.ศิริวรรณ	ศรีสังข์	กรรมการสอบ	
รศ.ดร.นฤบดี	ศรีสังข์	กรรมการสอบ	
ผศ.ดร.วารุณี	ลิ้มมัน	กรรมการสอบ	
ผศ.ดร.ณัฐพงศ์	รัตน์เดช	กรรมการสอบ	
ผศ.ว่าที่ ร.ต.ดร.กิตติศักดิ์	เพชรพันธ์	กรรมการสอบ	
รศ.ดร.ชัยวัฒน์	รัตน์มีชัยสกุล	อาจารย์ที่ปรึกษา	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 19 พฤษภาคม 2565 เวลา 15.30 – 18.00 น.

สถานที่สอบ ผ่านโปรแกรม Microsoft Team

ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ กุศล)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 19 กรกฎาคม พ.ศ. 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของการจำลองการอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันร่วมกับกล้องถ่ายภาพความร้อน		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวภีร์ณุกาญจน์ แดงสว่าง	รหัสประจำตัว	61512063
	นายวสุธร คงเพชร	รหัสประจำตัว	61514015
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต		
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล และ วิศวกรรมพลังงาน		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.ชัยวัฒน์ รัตนมิชัยสกุล		
ปริญญานิพนธ์			

### บทคัดย่อ

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลสำหรับการจำลองการอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้เทคโนโลยีฟลูอิดไดเซชันร่วมกับกล้องถ่ายภาพความร้อน ข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้น 33.33% (d.b.) ถูกทำให้แห้งด้วยอากาศร้อนในช่วงอุณหภูมิ 90 – 150°C โดยความชื้นสุดท้ายที่ได้เท่ากับ 20% (d.b.) ซึ่งดำเนินการโดยทำการเก็บผลอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกทุกหนึ่งนาที่ขณะอบแห้งโดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนทุกจุดของอุณหภูมิ และเก็บผลความชื้นจากการนำเมล็ดข้าวเปลือกหลังการอบแห้งเข้าสู่อบแล้วจึงนำค่าที่มากำหนดเพื่อให้ได้ความชื้นสุดท้ายจึงเป็นค่าจากการทดลอง ในส่วนของแบบจำลองอุณหภูมิและความชื้นหาได้จากการกำหนดค่าสมมติฐานและค่าคงตัวต่างๆตามขอบเขตที่กำหนด ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่ากล้องถ่ายภาพความร้อนสามารถใช้สำหรับการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เซชันได้ ภาพที่ได้มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก จากจลนศาสตร์การอบแห้งพบว่าเวลาในการอบแห้งที่ลดลงมีความสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการอบแห้ง เนื่องจากอุณหภูมิในการอบแห้งสูงทำให้อุณหภูมิของข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นในระหว่างการอบแห้ง ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลสำหรับการเคลื่อนที่ของความชื้นจากบริเวณภายในสู่บริเวณผิวมีค่าสูงตามไปด้วย ในขอบเขตของการศึกษางานวิจัยครั้งนี้ ค่าคงที่ Arrhenius ( $D_0$ ) และพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) ที่เหมาะสม คือ  $5.15141 \text{ m}^2 / \text{s}$  และ  $25936.4 \text{ J/mol}$  ตามลำดับ จากค่าดังกล่าวสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าเท่ากับ  $4.56 \times 10^{-15} - 4.79 \times 10^{-9}$  ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) ของความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกเฉลี่ย สำหรับการอบแห้งอยู่ระหว่าง 0.8561 – 0.9522 และ 0.8738 – 0.9517 ตามลำดับ

<b>Thesis</b>	Effective moisture diffusivity of paddy drying simulation by fluidization technique combined with thermal imaging camera.		
<b>Student</b>	Miss.Peechukan Dangawang	<b>Student ID</b>	61512063
	Mr.Wasutorn Kongpet	<b>Student ID</b>	61514015
<b>Degree</b>	Bachelor of Engineering		
<b>Program</b>	Mechanical Engineering and Energy Engineering		
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr.Chaiwat Rattanamechaiskul		

## ABSTRACT

The aim of this project was to find effective moisture diffusivity of paddy drying simulation by fluidization technique combined with thermal Imaging camera. The paddy with initial moisture content of 33.33% (d.b.) was dried by hot air in the range of temperature of 90-150°C to final moisture content of 20% (d.b.). The result revealed that using thermal imaging camera could be applied with fluidization drying. The image correlated well with the grain temperature. The drying kinetic showed a decrease in the drying time was related to an increase in the drying temperature. This was due to high drying temperature yielded an increased grain temperature during drying, subsequently high effective moisture diffusivity for moisture movement from inner part to surface of paddy. In the scope of this research study, the appropriate Arrhenius factor ( $D_0$ ) and Activation energy ( $E_a$ ) were  $5.15141 \text{ m}^2 / \text{s}$  and  $25,936.4 \text{ J} / \text{mol}$ . From the mention values, the effective moisture diffusivity had the value  $4.56 \times 10^{-15}$  -  $4.79 \times 10^{-9}$ . The determination coefficient ( $R^2$ ) of average moisture content and grain temperature for all drying temperatures was between 0.8561 – 0.9522 and 0.8738 – 0.9517.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจาก รศ.ดร.ชัยวัฒน์ รัตนมีชัยสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ แนวคิด ความรู้ต่างๆ ตลอดจน ขั้นตอนและวิธีการในการทำปริญญาานิพนธ์

บุคคลที่ขาดมิได้คือ บิดา มารดา ผู้มีพระคุณและเป็นที่ยศพรัก ที่คอยให้การสนับสนุนและ กำลังใจแก่คณะผู้จัดทำเสมอคณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่ง และขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ นักศึกษาที่คอยช่วยเหลือแนะนำและสนับสนุนในทุกๆ ด้าน รวมถึงกำลังใจซึ่งทำให้การจัดทำ ปริญญาานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วง คณะผู้จัดทำหวังว่าปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จะมีประโยชน์ไม่มีกัน้อยต่อผู้ที่ สนใจศึกษาเกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์ เซชั่นร่วมกับกล้องถ่ายภาพความร้อนความร้อน

ภริณีภาณุจันต์ แดงสว่าง

วสุธร คงเพชร

พฤษภาคม 2565

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.5 ระยะเวลาดำเนินงาน	3
1.6 สถานที่ที่ใช้ดำเนินงาน	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ข้าวสังข์หยด	5
2.2 กระบวนการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดซ์เบด	6
2.3 กล้องถ่ายภาพความร้อน	8
2.4 เทอร์โมสแกนหรือการถ่ายภาพความร้อน	10
2.5 สมการทางคณิตศาสตร์	11
2.6 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	14
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	16
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	21
3.1 วัสดุและวิธีการทดลอง	21
3.2 ขั้นตอนการอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดซ์เบด	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 การหาค่าความชื้นของข้าวเปลือก	23
3.4 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	24
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผล	41
4.1 จลนพลศาสตร์การอบแห้ง	41
4.2 ผลการเปรียบเทียบจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งกับผลการจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือก	42
4.3 ผลการเปรียบเทียบภาพถ่ายความร้อนจากกล้องถ่ายภาพความร้อนของการอบแห้งกับผลการจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือก	46
บทที่ 5 สรุปผลและเสนอแนะ	48
5.1 สรุปผล	48
5.2 ข้อเสนอแนะ	49
เอกสารอ้างอิง	50
ภาคผนวก	54
ภาคผนวก ก ผลการทดลอง	55
ภาคผนวก ข ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข	60
ภาคผนวก ค การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	67
ภาคผนวก ง การเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก	89
ประวัติผู้เขียน	93

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ระยะเวลาดำเนินงาน	3
ก.1 เมล็ดข้าวเปลือกที่กระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 90 °C	56
ก.2 เมล็ดข้าวเปลือกที่กระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 °C	56
ก.3 เมล็ดข้าวเปลือกที่กระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 130 °C	57
ก.4 เมล็ดข้าวเปลือกที่กระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 150 °C	57
ก.5 ค่าความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกที่กระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 90 °C	58
ก.6 ค่าความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกที่กระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 °C	58
ก.7 ค่าความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกที่กระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 130 °C	59
ก.8 ค่าความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกที่กระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 150 °C	59

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 Type Fluidized Bed Dryer	6
2.2 ภาพถ่ายจากกล้องส่องความร้อน	9
2.3 การตรวจสอบระบบไฟฟ้าด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน	10
2.4 แสดงการถ่ายเทพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ของวัตถุในรูปแบบรังสีอินฟราเรด	11
2.5 รูปทรงกระบอกของเมล็ดข้าวที่ใช้ในแบบจำลอง	15
3.1 รูปเครื่องฟลูอิดไคซ์เบด	21
3.2 เมล็ดข้าวเปลือกพันธุ์สังข์หยด	21
3.3 Inverter รุ่น DLB1 , ยี่ห้อ JADEN	22
3.4 Thermal imaging camera รุ่น FLIR 60	22
3.5 ตู้อบ รุ่น UF75 , ยี่ห้อ Memmert	22
3.6 เครื่องชั่งรุ่น Pioneer series , ยี่ห้อ OHAUS	23
4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการอบแห้งกับความชื้นในเมล็ดข้าวเปลือก	41
4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการอบแห้งกับอุณหภูมิในเมล็ดข้าวเปลือก	42
4.3 ความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกที่อุณหภูมิและการอบแห้งที่เวลาต่างๆ	44
4.4 อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกที่อุณหภูมิและการอบแห้งที่เวลาต่างๆ	45
4.5 ผลการเปรียบเทียบความชื้นภายในเมล็ดของจลนพลศาสตร์การอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือก กับผลการจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือก	46
4.6 ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิเมล็ดของจลนพลศาสตร์การอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือกกับ ผลการจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือก	46
4.7 อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกที่การอบแห้งที่เวลาต่างๆ จากกล้องถ่ายภาพความร้อน	47
ง.1 ผลการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกที่อุณหภูมิการอบแห้ง 90°C	90
ง.2 ผลการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกที่อุณหภูมิการอบแห้ง 110°C	90
ง.3 ผลการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกที่อุณหภูมิการอบแห้ง 130°C	90
ง.4 ผลการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกที่อุณหภูมิการอบแห้ง 150°C	91
ง.5 ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกที่อุณหภูมิการอบแห้ง 90°C	91
ง.6 ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกที่อุณหภูมิการอบแห้ง 110°C	91
ง.7 ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกที่อุณหภูมิการอบแห้ง 130°C	92
ง.8 ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกที่อุณหภูมิการอบแห้ง 150°C	92

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ข้าวมีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์และสัตว์มาก ถือเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญที่สุดของวิถีชีวิตคนไทยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน [1] งานวิจัยนี้ได้นำข้าวเปลือกที่ได้ภายหลังจากการเก็บเกี่ยวซึ่งยังคงมีความชื้นสูงจึงต้องผ่านกระบวนการอบแห้งเพื่อลดการก่อตัวของเชื้อรากระบวนการอบแห้งด้วยวิธีตากแดดธรรมชาติจะมีข้อดีเรื่องการประหยัดพลังงานและค่าใช้จ่าย แต่จำเป็นต้องใช้พื้นที่ และแรงงานคนจำนวนมากในการตาก อีกทั้งยังเสี่ยงต่อการปนเปื้อนสิ่งสกปรกจากสภาพแวดล้อมและจากสัตว์หรือแมลงต่างๆ การอบแห้งข้าวในระดับอุตสาหกรรมจึงนิยมใช้วิธีการอบแห้งแบบพาความร้อน [2] โดยวิธีที่กำลังเป็นที่นิยมได้แก่กระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เซชัน

กระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เซชัน (Fluidization) เป็นกระบวนการอบแห้งระดับอุตสาหกรรมกระบวนการหนึ่ง [3] ที่ใช้ลมร้อนเป่าผ่านชั้นวัสดุเพื่อให้ไปสัมผัสกับเมล็ดข้าวเปลือกให้ลอยตัวอย่างอิสระคล้ายของไหล เมื่อลมร้อนที่ผ่านชั้นขึ้นมาจากชั้นวัสดุไปสัมผัสผิวของเมล็ดข้าวเปลือกอย่างสม่ำเสมอ จะเกิดการถ่ายเทความร้อนและมวลสูง จึงทำให้ความชื้นในเมล็ดข้าวเปลือกลดลงอย่างรวดเร็ว กระบวนการนี้ให้อัตราการอบแห้งสูง และมีความสิ้นเปลืองทางพลังงานต่ำเมื่อเปรียบกับวิธีการอบแห้งแบบอื่นๆ [4] กระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เซชัน จึงเป็นกระบวนการที่นิยมใช้ในการอบแห้งข้าวเปลือกในปัจจุบัน อย่างไรก็ตามกระบวนการดังกล่าวเป็นกระบวนการอบแห้งที่มีการถ่ายเทความร้อน และถ่ายเทมวลที่ซับซ้อน จากปัญหาดังกล่าวจึงมีการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model) [5] เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยกระบวนการฟลูอิดไดซ์เซชัน การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งให้มีระยะเวลาสั้นที่สุด [6] ประหยัดพลังงานมากที่สุด ในขณะที่คุณภาพด้านต่างๆ ของเมล็ดข้าวเปลือกยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน แม้ว่าการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีข้อดีของการประยุกต์ใช้ดังที่ได้กล่าวมาแต่การประยุกต์ใช้แบบจำลองที่ดีในปัจจุบันมักมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นจากการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดสมมติฐานภายในกระบวนการอบแห้งเพื่อจำลองความชื้น และอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือก [7]

กล้องถ่ายภาพความร้อน Thermal imaging camera ช่วยให้สามารถวิเคราะห์ และปรับแต่งภาพได้อย่างรวดเร็ว ทั้งยังสามารถเชื่อมต่อเพื่อโอนถ่ายข้อมูลของกล้องถ่ายภาพความไปย เพื่อเกิดเป็นภาพถ่ายที่บอกลักษณะของศาของตัวอุณหภูมิอย่างชัดเจนและนำค่าที่ได้ไปใส่รายงาน เพื่อนำไปวิเคราะห์ข้อมูลต่อไปได้ Thermal camera [8] กล้องจับความร้อนได้รับความนิยมมากยิ่งขึ้นในการใช้ตรวจวัดความร้อนในพื้นที่ที่ไม่สามารถเข้าถึงได้ หรือในพื้นที่ที่มีอันตรายในการเข้าถึงเพื่อตรวจวัด รังสีอินฟราเรดสามารถปรับเปลี่ยนค่า Emissivity ได้ [9] จึงนำมาใช้ร่วมกับการทดลองเพื่อลดระยะเวลาจากการเก็บค่าอุณหภูมิที่จุดต่างๆของเมล็ดข้าวเปลือกขณะอบแห้งเมื่อเทียบกับการเก็บค่าอุณหภูมิด้วยวิธีเดิม [10] และเพื่อให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น ทั้งยังเหมาะสมกับการตรวจสอบและวัดอุณหภูมิ

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนในกระบวนการอบแห้ง
- 1.2.2 เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนประสิทธิภาพของการจำลองการอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชันร่วมกับกล้องถ่ายภาพความร้อน

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1.3.1 กำหนดสายพันธุ์ข้าวเปลือก คือ ข้าวสังข์หยด จังหวัดพัทลุง
- 1.3.2 กำหนดความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดข้าวเปลือก เท่ากับ 33.33 %
- 1.3.3 กำหนดความสูงเบตของเครื่องอบแห้ง เท่ากับ 10 cm
- 1.3.4 กำหนดความเร็วลมของเครื่องอบแห้ง เท่ากับ 46 Hz ความเร็วลม 15 m/s
- 1.3.5 อบแห้งเมล็ดข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชันที่อุณหภูมิในช่วง 90 110 130 และ 150 °C
- 1.3.6 กำหนดให้กล้องที่ใช้ถ่ายภาพความร้อน เป็นกล้องรุ่น FRIR E 60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.7 โปรแกรมที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ คือ โปรแกรม MATLAB

1.3.8 ทำการเปรียบเทียบความขึ้นและอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกที่ได้จากแบบจำลองโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายค่าความขึ้น และอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก

1.4.2 ได้ศึกษาความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้กล้องส่องความร้อนในกระบวนการอบแห้ง

#### 1.5 ระยะเวลาดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาดำเนินงาน

		ระยะเวลาดำเนินงาน 2564 – 2565									
การดำเนินงาน	ม.ค.- เม.ย.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย. -พ.ค.	
	2564	2564	2564	2564	2564	2564	2565	2565	2565	2565	
1.	←→										
2.		←→									
3.				←→							
4.					←→						
5.							←→				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ค้นคว้าข้อมูล
2. ออกแบบงานวิจัย
3. ทดลองและรวบรวมผลการทดลอง
4. พัฒนา/ปรับปรุงแบบจำลอง
5. วิเคราะห์และสรุปผล

## 1.6 สถานที่ดำเนินงาน

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ข้าวสังข์หยด (Sang Yod)

สืบเนื่องจากในปี 2557 สหกรณ์เครดิตยูเนียนเคหะรัฐภาณุเก็ด จำกัด เล็งเห็นว่าจังหวัดพัทลุง เป็นจังหวัดที่มีความอุดมสมบูรณ์ เป็นแหล่งอยู่อาศัยน้ำที่สำคัญของภาคใต้ สมาชิกส่วนใหญ่มีอาชีพทำสวน ทำนา เป็นหลัก จึงเห็นสมควรสนับสนุนสมาชิกที่มีอาชีพทำนา ให้ผลิตข้าวสังข์หยด ซึ่งเป็นข้าวที่ปลูกได้เฉพาะในพื้นที่จังหวัดพัทลุง และข้าวสังข์หยดเป็นพันธุ์ข้าวพื้นเมือง เป็นพันธุ์ข้าวเฉพาะถิ่นมีแหล่งปลูกดั้งเดิมอยู่ในจังหวัดพัทลุง เป็นข้าวพื้นเมืองพันธุ์ดีของภาคใต้ เมื่อครั้งที่สมเด็จพระนางเจ้าฯ พระบรมราชินีนาถ ในรัชกาลที่ 9 เสด็จไปยังฟาร์มตัวอย่างตามพระราชดำริ จังหวัดพัทลุง เมื่อวันที่ 24 กันยายน 2546 ศูนย์วิจัยข้าวพัทลุงได้ถวายข้าวสังข์หยด ลักษณะประจำพันธุ์เป็นข้าวเจ้าไวต่อช่วงแสงอ่อน [11] สำหรับข้าวสังข์หยดเมืองพัทลุง เป็นข้าวสายพันธุ์แรกที่ได้คำประกาศรับรองให้เป็น “สินค้าบ่งชี้ทางภูมิศาสตร์” หรือข้าวจีไอ (GI) ตามพระราชบัญญัติคุ้มครองสิ่งบ่งชี้ทางภูมิศาสตร์ 2546 โดยได้รับการรับรองเมื่อวันที่ 23 มิถุนายน 2549 ทำให้ข้าวสังข์หยดเมืองพัทลุงมีความต้องการในท้องตลาดเพิ่มมากขึ้น การที่ข้าวสังข์หยดเมืองพัทลุงได้รับความนิยมนั้นเนื่องจากเป็นข้าวที่มีสีเยื่อหุ้มเมล็ดสีแดง อุดมไปด้วยสารอาหาร มีรสชาติมัน กลิ่นหอม และนุ่ม [12]

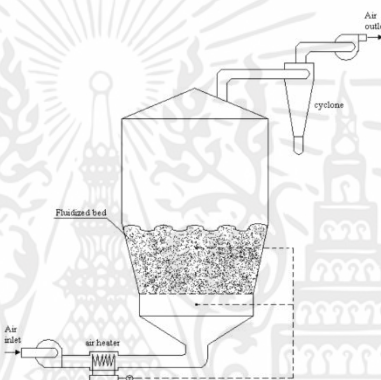
**2.1.1 ลักษณะโดยทั่วไปของข้าวสังข์หยด** มีลักษณะแตกต่างจากพันธุ์ข้าวทั่วไป โดยปลูกได้เพียงปีละ 1 ครั้ง มีเยื่อหุ้มเมล็ดสีขาวปนแดงอ่อนๆถึงแดงเข้มเมล็ดเล็กเรียวยาวงอน ระยะพักตัวของเมล็ดพันธุ์ ประมาณ 8 สัปดาห์เมล็ดข้าวเปลือก ยาว x กว้าง x หนา =  $9.3 \times 2.1 \times 1.7$  mm เมล็ดข้าวกล้องมีสีแดง ยาว x กว้าง x หนา =  $6.7 \times 1.8 \times 1.6$  mm ปริมาณอมิโลสต่ำ ( $15 \pm 2$  %) สามารถต้านทานต่อโรค แมลง และศัตรูพืช รวมทั้งปรับตัวกับสิ่งแวดล้อมได้ดี

**2.2.1 ลักษณะเด่นของข้าวสังข์หยด** มีเมล็ดสีขาวปนสีแดงจาง ๆ จนถึงสีแดงเข้ม เมื่อข้าวหุงสุกมีความนุ่ม ข้าวสังข์หยดนอกจากมีความนุ่มอร่อยแล้วยังให้คุณค่าทางอาหารสูงกว่าข้าวชนิดอื่นๆ เหมาะสำหรับผู้รักสุขภาพ และในปัจจุบันมีกลุ่มคนรักสุขภาพเพิ่มมากขึ้น เริ่มมองหาอาหารที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพมาบริโภคในชีวิตประจำวัน ข้าวสังข์หยดจึงเป็นข้าวอันดับต้นๆ ของข้าวเพื่อสุขภาพที่คนให้ความสนใจ [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 กระบวนการอบแห้งและเทคนิคฟลูอิดไธซ์เบด

เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไธซ์เบด (Fluidized bed dryer) เป็นเครื่องอบแห้งที่ใช้กับวัสดุของแข็งที่มีลักษณะเป็นเม็ดหรือเป็นชิ้นสัมผัสกับของไหล เม็ดหรืออนุภาคของแข็งจะมี คุณสมบัติคล้ายของไหล ดังรูปที่ 2.1 เริ่มจากวางอนุภาคของแข็งไว้บนตะแกรงหรือตัวกระจายใน ห้องทดลอง และให้ของไหลหรือก๊าซไหลผ่านขึ้นไปทางด้านล่างของตัวกระจายที่รองรับ [13] และไหล ผ่านชั้นอนุภาคของแข็งที่เป็นเม็ดและขยับตัวลอยไปพร้อมกับของไหล หรือเรียกว่า ชั้นเบด และแยกตัวเป็นอิสระในที่สุด พฤติกรรมจึงคล้ายของไหล จึงเรียกอนุภาคของแข็งในสภาวะนี้ว่า ฟลูอิดไธซ์เซชัน (Fluidization)



รูปที่ 2.1 Type Fluidized Bed Dryer [14]

### 2.2.1 ทฤษฎีการอบแห้ง

การอบแห้ง คือ กระบวนการลดความชื้น ส่วนใหญ่ใช้การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุที่ชื้น เพื่อไล่ความชื้นออกด้วยการระเหย ซึ่งอาศัยความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการระเหย โดยปกติจะใช้ความชื้นเป็นตัวบ่งบอกปริมาณของน้ำที่อยู่ในวัสดุ โดยทั่วไปการอบแห้งวัสดุสามารถแบ่งออกเป็นช่วง คือ ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ ซึ่งปริมาณความชื้นภายในวัสดุมีค่าสูงกว่าความชื้นวิกฤติที่ผิวของวัสดุมีน้ำอยู่จำนวนมาก เมื่อความร้อนจากอากาศถ่ายเทไปยังวัสดุ การถ่ายเทความร้อนและมวลจะเกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวของวัสดุ ช่วงนี้อุณหภูมิผิวของวัสดุอบแห้งและอัตราการอบแห้งจะมีค่าคงที่ และช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ซึ่งปริมาณความชื้นภายในวัสดุมีค่าต่ำกว่าความชื้นวิกฤติ เมื่อความร้อนจากอากาศถ่ายเทไปยังวัสดุน้ำจะเคลื่อนที่จากภายในเนื้อวัสดุมาที่ผิวของวัสดุในลักษณะของเหลวหรือไอน้ำและน้ำที่ผิวจึงจะระเหยไปกับอากาศ [15]

## 2.2.2 ฟลูอิดไชน์เบด

ฟลูอิดไชน์เซชัน คือ เป็นกระบวนการหรือวิธีการที่ทำให้ของแข็งซึ่งมีรูปร่างลักษณะเป็นเม็ด มีลักษณะเหมือนเป็นของไหล จากการสัมผัสกับของไหลที่มีความเร็วที่เหมาะสมค่าหนึ่ง โดยที่ของไหลที่ใช้จะถูกปล่อยให้ผ่านมาทางด้านล่างของตะแกรง ที่รองรับอนุภาคของแข็ง แล้วจะไหลผ่านออกทางส่วนบนของหอตลอดซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกระบอกหรือเป็นท่อเหลี่ยมแนวตั้งเมื่อเพิ่มความเร็วของไหลให้มากขึ้นเรื่อย ๆ จนในที่สุดอนุภาคของแข็งเริ่มจะเคลื่อนที่ และลอยตัวขึ้นอิสระไม่เกาะติดกัน ซึ่งเรียกกระบวนการนี้อีกอย่างหนึ่งว่า ฟลูอิดไชน์เบด (Fluidized bed)

ระบบฟลูอิดไชน์เบด (Fluidized bed) เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีสะอาดที่ใช้กันทั่วโลก อย่างเช่น ประยุกต์ใช้สำหรับการเผาไหม้ มีหลักการทำงาน คือ การเผาไหม้ของถ่านหินเกิดขึ้นในขณะที่อนุภาคถ่านหินถูกยกตัวให้ลอยขึ้นไปกับอากาศที่เป่าจากด้านล่างของเตาเผา โดยมวลสารในเตาเผาจะมีพฤติกรรมเหมือนของไหล เมื่อมวลสารทั้งหมดลอยไปถึงทางออกด้านบน ก็จะเข้าสู่ส่วนที่สองซึ่งมีไซโคลน ทำหน้าที่แยกอนุภาคถ่านหินขนาดใหญ่ ที่ยังไม่เผาไหม้ให้ไหลวนกลับเข้าสู่เตาเผาอีกครั้ง ทำให้ถ่านหินเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์มากขึ้น ส่วนก๊าซร้อนจะถูกส่งไปใช้ในวัฏจักรไอน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้าต่อไป [16]

เบด หมายถึง อาณาเขตในหอตลอดที่มีปริมาณเม็ดของแข็งบรรจุอยู่ ไม่ว่าจะเม็ดของแข็งนั้นจะอยู่นิ่งหรือ เคลื่อนไหวด้วย ของไหลในหอตลอดจะมีระดับตั้งแต่แผ่นโลหะทำเป็นตะแกรงรองรับหรือเป็นตัวกระจายของไหล (Distributor) จนถึงระดับสูงสุดคือผิวหน้าของเม็ดของแข็งที่อยู่ในหอตลอด เมื่อบรรจุเม็ดของแข็งในหอตลอดเรียบร้อยแล้ว เริ่มปล่อยของไหลเข้าทางด้านล่างของหอตลอดอย่างช้า ๆ ขณะที่ของไหลความเร็วยังน้อยอยู่เม็ดของแข็งจะไม่ขยับตัวเลย ลักษณะของเบดเช่นนี้เรียกว่า เบดนิ่ง (Fixed bed) เมื่อค่อย ๆ เพิ่มความเร็วของของไหลให้มากขึ้นทีละน้อยจนถึงความเร็วระดับหนึ่ง เม็ดของแข็งจะเริ่มขยับตัว และจัดตัวอย่างเป็นระเบียบ เมื่อความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย เม็ดของแข็งจะหลุดออกจากกันลอยตัวเป็นอิสระ ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า จุดเริ่มการก่อกองสภาพของไหล

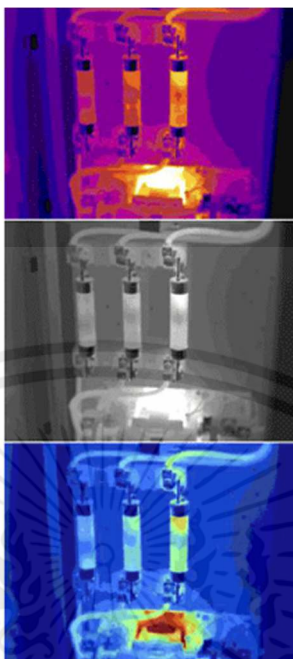
การก่อกองสภาพของไหล เป็นนิยามที่ใช้อธิบายกระบวนการหรือวิธีการที่มีของแข็งลักษณะเป็นเม็ดสัมผัสกับของไหล เม็ดเหล่านี้จะถูกวางไว้บนตะแกรงในหอตลอดที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก แต่ในปัจจุบันมีการดัดแปลงให้อยู่ในรูปร่างต่างๆ อยู่ในแนวนอนก็มี ของไหลที่ใช้ก็มีแก๊ส หรือของเหลว ปล่อยให้ผ่านมาทางด้านล่างของตะแกรงที่รองรับเม็ดของแข็ง ของไหลก็จะไหลผ่านชั้นเม็ดของแข็ง

แล้วไหลออกทางส่วนบนของหอตลอด เมื่อเพิ่มความเร็วของไหลให้มากขึ้นเรื่อย ๆ จนในที่สุดจะเห็น เม็ดของแข็งขยับตัว และลอยตัวขึ้นเป็นอิสระไม่เกาะติดกัน ของแข็งที่อยู่ในลักษณะนี้จะมีสมบัติคล้าย ของไหล กล่าวคือมีการไหลหมุนเวียนของเม็ดของแข็งภายในเบด (Bed) หรือภายในหอตลอดหรือ ระหว่างเบดต่อบેดก็ได้ เราจึงเรียกของแข็งในสถานะนี้ว่า การก่อกองสภาพของไหล [17]

### 2.3 กล้องถ่ายภาพความร้อน

กล้องถ่ายภาพความร้อน (Thermal image camera, TI - camera หรือ Thermography) เป็น เครื่องมือวัดอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุ ซึ่งเป็นการวัดแบบไม่สัมผัสและไม่ทำลายวัตถุและเป็นการวัด อุณหภูมิแบบพื้นที่ส่วนประกอบสำคัญของกล้องถ่ายภาพความร้อน ประกอบด้วย เลนส์ (Lens) ตัว ตรวจจับรังสีอินฟราเรด (Infrared detector) หรือเซนเซอร์ชนิดอินฟราเรด (Infrared sensor) วงจร อิเล็กทรอนิกส์ (Electronic circuit) และส่วนแสดงผล (Display) โดยมีหลักการ ดังนี้

ตัวตรวจจับรังสีอินฟราเรดทำหน้าที่ ตรวจจับรังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกจากวัตถุเป้าหมาย (Target) ผ่านเลนส์ของเครื่องมือวัด แล้วแปลงรังสีอินฟราเรดเหล่านี้ให้อยู่ในรูปของสัญญาณทางไฟฟ้าโดยรังสี อินฟราเรดที่ตัวตรวจจับรับไปนั้นประกอบด้วยรังสีที่วัตถุเป้าหมายแผ่ออกมารวมกับรังสีที่แผ่จากวัตถุ อื่นหรือจากสิ่งแวดล้อมสะท้อนออกจากผิวของวัตถุเป้าหมาย (ตามทฤษฎีการแผ่รังสีความร้อน: Theory of thermal radiation) จากนั้นวงจรอิเล็กทรอนิกส์จะทำหน้าที่แปลงข้อมูลที่รับมาจากตัว ตรวจจับและนำไปแสดงที่ตัวแสดงผล ซึ่งอาจแสดงผลออกมาในรูปแบบของตัวเลข สี หรือกราฟ หรือ ทั้ง 3 รูปแบบ จะประกอบขึ้นเป็นภาพ เรียกว่า "ภาพถ่ายความร้อน (Thermal image)" ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งการแปลงรังสีอินฟราเรดที่เซนเซอร์ตรวจจับได้ให้อยู่ในหน่วยของอุณหภูมิ อาศัยกฎของพลังค์ (Planck's Law) และ กฎของสเตฟาน-บ็อลทซ์มัน (Stefan-Boltzman's Law)



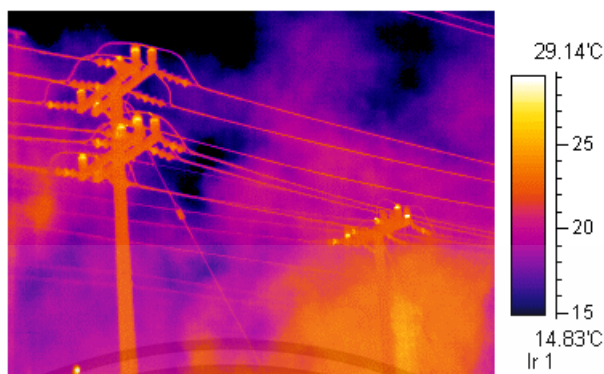
รูปที่ 2.2 ภาพถ่ายจากกล้องส่องความร้อน [18]

ในทางทฤษฎีกล้องถ่ายภาพความร้อนมีย่านการวัดอุณหภูมิตั้งแต่อุณหภูมิสูงกว่า  $0^{\circ}\text{C}$  และในทางปฏิบัติช่วงการใช้งานของเครื่องมือวัดขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีที่ใช้ รวมถึงช่วงความยาวคลื่นที่เลือกใช้ ปัจจุบันกล้องถ่ายภาพความร้อนบางรุ่นสามารถวัดอุณหภูมิได้ต่ำถึง  $-20^{\circ}\text{C}$  ค่าความถูกต้องของอุณหภูมิที่วัดได้จากกล้องถ่ายภาพความร้อนขึ้นอยู่กับชนิด และลักษณะพื้นผิวของวัตถุเป้าหมาย หรือวัตถุที่ต้องการวัดอุณหภูมิ ระยะห่างระหว่างเครื่องมือวัด วัตถุ เป้าหมาย และคุณลักษณะเฉพาะของเครื่องมือวัดนั้นๆ รายละเอียดของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความถูกต้องที่ได้จากรูปภาพ [19]

กล้องถ่ายภาพความร้อนมีความสามารถในการเก็บภาพความร้อนทั้งในหน่วยความจำภายในหรือในการ์ดความจำขึ้นอยู่กับความสามารถของกล้องถ่ายภาพ เมื่อผู้ใช้ถ่ายภาพเสร็จสามารถมองเห็นภาพ แก๊ซ หรือดาวนโหลตลงในเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งสามารถนำภาพมาใช้ในรายงานและมีซอฟต์แวร์ในการใช้งานรวมอยู่ด้วย สามารถซื้อกล้องถ่ายภาพความร้อนโดยที่เลือกความสามารถน้อยลงได้ซึ่งสามารถอ่านค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งจุดตัดของเส้นกลางจอแสดงภาพ ขณะที่กล้องถ่ายภาพแบบอื่นๆ สามารถให้ผู้ใช้เลือกตำแหน่งของจุดตัดในจอภาพให้เคลื่อนที่ได้และเปรียบเทียบอุณหภูมิระหว่างบริเวณสองพื้นที่ได้ กล้องถ่ายภาพความร้อนมีสีหลายสีเช่น ขาว/ดำ , สีเหล็ก หรือสีรุ้งซึ่งผู้ใช้สามารถเลือกได้ สีแบบเหล็กมักจะใช้ในการตรวจสอบบ้าน, สีขาว/ดำจะช่วยในการตรวจหารายละเอียดในรูปภาพ และสีรุ้งจะเป็นสีที่ดีที่สุดที่สามารถบอกความแตกต่างของอุณหภูมิได้ ดังรูปที่

2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



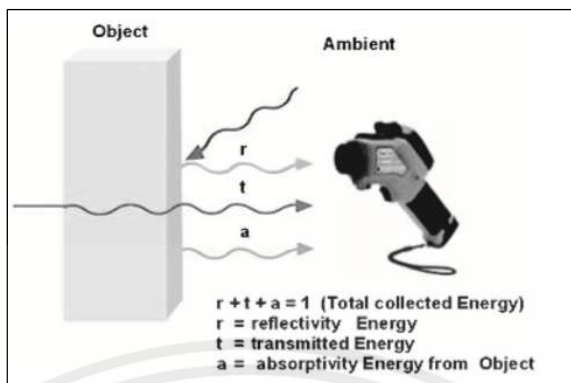
รูปที่ 2.3 การตรวจสอบระบบไฟฟ้าด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน [20]

## 2.4 เทอร์โมสแกนหรือการถ่ายภาพความร้อน

การถ่ายภาพความร้อน (Thermal imaging) เป็นวิธีการปรับปรุงการมองเห็นของวัตถุในสภาพแวดล้อมที่มีดโดยการตรวจจับรังสีอินฟราเรดของวัตถุ และสร้างภาพจากข้อมูลนั้น การถ่ายภาพในที่แสงน้อยโดยทั่วไปจะใช้เทคโนโลยีที่ช่วยในการมองเห็นตอนกลางคืน แต่การถ่ายภาพความร้อนในสภาพแวดล้อมที่ไม่มีแสงโดยรอบหรือพื้นที่ที่มีแสงน้อยจะไม่ส่งผลกระทบต่อภาพที่ถ่าย เนื่องจากความร้อนที่ยังคงอยู่ในวัตถุยังสามารถแสดงให้เห็นในกล้องถ่ายภาพความร้อนได้ [21]

เทอร์โมสแกนสามารถตรวจจับได้และจะปรากฏเป็นภาพความร้อนที่แตกต่างกัน โดยปกติภาพความร้อนจะเป็นโทนสีเทาโดยธรรมชาติวัตถุสีดำนจะเย็นวัตถุสีขาวจะร้อน และความลึกของสีเทาบ่งบอกถึงความแตกต่างระหว่างวัตถุทั้งสองเพื่อช่วยให้ระบุวัตถุที่อุณหภูมิต่างกัน

รังสีอินฟราเรด (IR) หรือแสง infrared เป็นพลังงานรังสีชนิดหนึ่งที่ตามนุษย์มองไม่เห็น แต่เรารู้สึกได้ว่าเป็นความร้อน วัตถุทั้งหมดในจักรวาลปล่อยรังสี IR ออกมาในระดับหนึ่ง แต่แหล่งที่มาที่ชัดเจนที่สุดสองแหล่งคือดวงอาทิตย์และไฟ ดังรูปที่ 2.4



#### รูปที่ 2.4 แสดงการถ่ายเทพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ของวัตถุในรูปแบบรังสีอินฟราเรด [22]

เมื่อวัตถุอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่สมดุล การแผ่พลังงานของรังสีอินฟราเรดของวัตถุจะมีค่าเท่ากับ ปริมาณที่ดูดกลืน เป็นผลให้วัตถุที่สามารถดูดกลืนรังสีได้ดีก็จะแผ่รังสีได้ดีด้วย

IR เป็นรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งซึ่งเป็นความถี่ต่อเนื่องที่เกิดขึ้นเมื่ออะตอมดูดซับแล้ว ปล่อยพลังงาน จากความถี่สูงสุดไปต่ำสุดรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า ได้แก่ รังสีแกมมา รังสีเอ็กซ์ รังสี อัลตราไวโอเล็ต แสงที่มองเห็นได้รังสี infrared ไมโครเวฟ และคลื่นวิทยุ รังสีประเภทนี้ประกอบกัน เป็นสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า [19 21]

#### 2.5 สมการทางคณิตศาสตร์

สมการการถ่ายเทความร้อน และมวลที่สามารถอธิบายการทำให้ข้าวเปลือกในตูบแห้งมี ความชื้นลดลง ได้แก่

##### 1. สำหรับข้าวเปลือก

การอนุรักษ์มวล (น้ำ) :

$$\frac{\partial M_p}{\partial t} = \nabla \cdot \{ D'_p (T_p, M_p, r) \nabla M_p \} \quad (2.1)$$

การอนุรักษ์พลังงาน :

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\rho_p C_p (M_p, r) \cdot \left( \frac{\partial T_p}{\partial t} \right) = \nabla \cdot \{ k'_p (M_p, r) \cdot \nabla T_p \} \quad (2.2)$$

## 2. การผึ่งลม

การอนุรักษ์มวล (ไอน้ำ) :

$$\frac{\partial M_p}{\partial t} + u \cdot \nabla M_a = \nabla \cdot \{ D_v (T_a) \nabla M_a \} \quad (2.3)$$

สมการอนุรักษ์พลังงาน :

$$\rho_a C_a (M_a) \cdot \frac{\partial T_a}{\partial t} + \rho_a C_a (M_a) u \cdot \nabla T_a = \nabla \cdot \{ k_a (M_a) \cdot \nabla T_a \} \quad (2.4)$$

$M$	คือ ปริมาณความชื้น (%)
$T$	คือ อุณหภูมิ (K)
$D$	คือ การแพร่กระจายของความชื้น ( $m^2 / s$ )
$P$	คือ ความหนาแน่น ( $kg / m^3$ )
$C$	คือ ความร้อนจำเพาะ ( $J / Kg \cdot K$ )
$k$	คือ การนำความร้อน ( $W / m \cdot K$ )
$t$	คือ เวลา (s)
$u$	คือ ค่าความเร็วอากาศ ( $m / s$ )

เงื่อนไขที่สอดคล้องสำหรับสมการ ที่ (2.1) – (2.4)

$$-k'_p \frac{\partial T_p}{\partial n} = h_c (T_a - T_p) \cdot a_c - \dot{m} \cdot \lambda \quad (2.5)$$

$$-k_a \frac{\partial T_a}{\partial n} = h_c (T_p - T_a) \cdot a_c \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$-D'_p \left( \frac{\partial M_p}{\partial n} \right) = h_m (M_p - M_a) \cdot a_c \quad (2.7)$$

$$-D'_v \left( \frac{\partial M_a}{\partial n} \right) = h_m (M_a - M_p) \cdot a_c \quad (2.8)$$

$$\text{Inlet: } T_a(t) = T_\infty \quad (2.9)$$

$$\text{Inflow: } M_\infty = M_e \quad (2.10)$$

$$\text{At } t=0: M = M_0 \text{ And } T = T_0 \quad (2.11)$$

$h_c$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ( $W/m^2 \cdot K$ )

$h_m$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล ( $m/s$ )

$n$  คือ เวกเตอร์ปกติ

$m$  คือ ฟลักซ์มวล ( $Kg/m^2 \cdot s$ )

$\lambda$  คือ ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ ( $J/Kg$ )

$a_c$  คือ ตัวประกอบการปรับแก้พื้นที่ผิวต่อตารางเมตร ( $m^2$ )

$T_\infty$  คือ อุณหภูมิอากาศเข้า ( $K$ )

$M_\infty$  คือ ปริมาณความชื้น (%)

$M_e$  คือ ปริมาณความชื้นที่สมดุล (%)

$M_0$  คือ ความชื้นเริ่มต้น (%)

$T_0$  คือ อุณหภูมิเริ่มต้น ( $^{\circ}C$ )

ตั้งข้อสังเกตว่าเนื่องจากด้านหนึ่งของถังอบแห้งไม่ได้สัมผัสกับลมร้อน จึงมีการกระจายความร้อนในระหว่างการอบแห้ง เมื่อพิจารณาในแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นการแผ่รังสีจึงถูกนำไปใช้ดังนี้

$$-k'_p \left( \frac{\partial T_p}{\partial n} \right) = \epsilon \sigma (T_a^4 - T_{sur}^4) \quad (2.12)$$

$\epsilon$  คือ ค่าการแผ่รังสีของวัสดุแผ่นความร้อน (0.97)

$\sigma$  คือ ค่าคงที่สเตฟาน-โบลทซ์มันน์ ( $5.6 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K$ )

$T_{sur}$  คือ อุณหภูมิห้อง ( $^{\circ}C$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

### 2.5.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีขั้นตอนการศึกษา รวบรวมข้อมูลดังนี้

2.5.1.1 กำหนดรูปทรงของตัวอย่างที่ต้องการศึกษา เพื่อใช้สำหรับการแก้ปัญหา

2.5.1.2 แบ่งรูปทรงด้วยเส้นแบ่ง (Grid line) ซึ่งเป็นขั้นตอนที่สำคัญมาก เพราะเกี่ยวเนื่องกับความแม่นยำของคำตอบที่ได้จะขึ้นอยู่กับจำนวนของเส้นแบ่ง ยิ่งเส้นแบ่งมีมากจะส่งผลให้คำตอบมีความแม่นยำมากขึ้นด้วย

2.5.1.3 การเลือกสภาวะของระบบ เช่น สภาวะอุณหภูมิคงที่ หรือสภาวะอุณหภูมิไม่คงที่

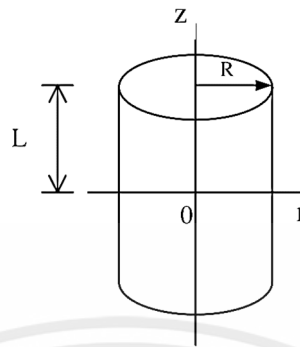
2.5.1.4 กำหนดสมมติฐานของตัวอย่างที่ต้องการศึกษา

2.5.1.5 กำหนดเงื่อนไข และสภาวะขอบเขต ซึ่งเป็นส่วนสำคัญอีกส่วนหนึ่งของแบบจำลองซึ่งต้องใช้ในการหาผลเฉลยของสมการควบคุม

### 2.5.2 ขั้นตอนการหาคำตอบ

ขั้นตอนการหาคำตอบ เริ่มโดยการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical methods) ทำให้สมการอนุพันธ์ของสมการสมดุลมวล สมดุลโมเมนตัม และสมดุลพลังงาน อยู่ในรูปสมการเชิงตัวเลขที่ง่ายในการหาคำตอบ และเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ให้ขั้นตอนและวิธีการต่างๆ ออกมาเป็นตัวเลข ซึ่งระยะเวลาในการได้มาซึ่งคำตอบขึ้นอยู่กับความสามารถของคอมพิวเตอร์ และลักษณะการทำงานของโปรแกรม ภาษาคอมพิวเตอร์ที่นิยมใช้ในการศึกษาระเบียบวิธีเชิงตัวเลขประกอบด้วย ภาษาแมทแล็บ (MATLAB) ฟอรัทแรน (FORTRAN) ปาสคาล (PASCAL) ซี (C) และเบสิก (BASIC) ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) คือ วิธีการต่างๆ ที่เป็นขั้นตอน โดยแต่ละวิธีนั้นเหมาะสมกับการนำไปใช้ในการแก้ปัญหาต่างๆ ที่มีลักษณะเฉพาะของตัวเอง

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการจำลองความชื้น และอุณหภูมิของเมล็ดข้าว สามารถหาได้จากกฎของฟิค (Fick's law) สำหรับการแพร่กระจายมวล และกฎของฟูเรียร์ (Fourier law) สำหรับการนำความร้อน โดยทำการสมมติให้รูปทรงของเมล็ดข้าวเปลือกมีลักษณะเป็นทรงกระบอก [23] แสดงได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 รูปทรงกระบอกของเมล็ดข้าวที่ใช้ในแบบจำลอง

สมการสำหรับการกระจายมวล

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{\text{eff}} \left[ \frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \left( \frac{\partial M}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 M}{\partial z^2} \right] \quad (2.13)$$

สภาวะเริ่มต้นของแบบจำลอง

$$\begin{aligned} t = 0 \quad 0 \leq r \leq R \quad M &= M_{\text{initial}} \\ 0 \leq z \leq L \quad M &= M_{\text{initial}} \end{aligned} \quad (2.14)$$

สภาวะขอบเขตของแบบจำลอง

$$\begin{aligned} t > 0 \quad r = 0, 0 \leq z \leq L ; \quad \frac{\partial M}{\partial r} &= 0 \\ z = 0, 0 \leq r \leq R ; \quad \frac{\partial M}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \quad (2.15)$$

$$\begin{aligned} r = R, 0 \leq z \leq L ; \quad -D_{\text{eff}} \left( \frac{\partial M}{\partial r} \right) \Big|_{r=R} &= h_m (M_{\infty} - M_s) \\ z = L, 0 \leq r \leq R ; \quad -D_{\text{eff}} \left( \frac{\partial M}{\partial z} \right) \Big|_{z=L} &= h_m (M_{\infty} - M_s) \end{aligned} \quad (2.16)$$

$D_{\text{eff}}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล ( $m^2 / s$ )

$h_m$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล ( $m / s$ )

$M_s$  คือ ค่าความชื้นที่พื้นผิว (% d.b.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$M_\infty$  คือ ค่าความชื้นของอากาศ (%d.b.)

สมการสำหรับการนำความร้อน

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \left( \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (2.17)$$

สภาวะเริ่มต้นของแบบจำลอง

$$t = 0 \quad 0 \leq r \leq R \quad T = T_{initial} \quad 0 \leq z \leq L \quad T = T_{initial} \quad (2.18)$$

สภาวะขอบเขตของแบบจำลอง

$$t > 0 \quad r = 0, 0 \leq z \leq L \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad z = 0, 0 \leq r \leq R \quad \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (2.19)$$

$$z = L, 0 \leq r \leq R \quad K \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=L} + \frac{m_{wp}}{A_s} \Delta H = h_T (T_{air,out} - T_{out}) \quad (2.20)$$

$k$  คือ ค่าการนำความร้อนของเมล็ดข้าว ( $W / m \cdot k$ )

$h_T$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ( $W / m^2 \cdot K$ )

$\Delta H$  คือ ความร้อนจากการระเหย

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

KevinHowell MariaSoroko [24] มีความพยายามในการวิจัยอย่างมากเพื่อให้แน่ใจว่าการวัดความร้อนในเวชภัณฑ์ของมนุษย์นั้นดำเนินการตามมาตรฐานที่สอดคล้องกัน เพื่อให้การตรวจวัดสามารถตรวจสอบย้อนกลับ เชื่อถือได้ และถูกต้อง แต่ความสนใจในการทำความเข้าใจแหล่งที่มาของความไม่แน่นอนของการวัดได้พัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็วลงในการถ่ายภาพความร้อนทางสัตวแพทย์ วัตถุประสงค์ของการศึกษาคือเพื่อทำความเข้าใจอิทธิพลของความแปรปรวนในประสิทธิภาพของกล้องถ่ายภาพความร้อน และการมีส่วนร่วมในการวัดความแปรปรวนของปัจจัยที่ขึ้นกับตัวดำเนินการ ในการตั้งค่าการถ่ายภาพความร้อนในสภาพม้าที่ใช้งานได้จริง ซึ่งการถ่ายภาพความร้อนด้วยอินฟราเรดเป็นเทคนิคการถ่ายภาพแบบไม่รุกรานและไม่ทำให้เกิดไอออนสำหรับบันทึกอุณหภูมิพื้นผิวของร่างกาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Leidy V.Estrada-Pérez [25] เป็นการศึกษากล้องถ่ายภาพความร้อนและอัลกอริธึมอัจฉริยะที่ได้ถูกนำมาใช้เพื่อจำแนกข้าวห้าประเภท (*Oryza sativa* L.) ในรูปแบบเมล็ดพืชหรือแป้ง และเพื่อตรวจสอบส่วนผสมของข้าวประเภทต่างๆ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวอย่างที่ปลอมปน ด้วยเหตุนี้จึงใช้ภาพความร้อนของข้าวบริสุทธิ์ (Japonica และ Indica) มากกว่า 63,000 ภาพและของผสม ภาพเหล่านี้ถูกใช้ในการฝึกอบรมและตรวจสอบระบบโดยอิงจากการเรียนรู้เชิงลึก (โครงข่ายประสาทเทียม) เพื่อดำเนินการจำแนกและตรวจจับการปลอมปน การผสมผสานระหว่างการสร้างแบบจำลองทางปัญญาและการวิเคราะห์ทางความร้อนสามารถจำแนกประเภทของข้าวและตรวจจับการปลอมปนที่อาจเกิดขึ้นได้อย่างแม่นยำกว่า 98% ผลลัพธ์ที่น่าพึงพอใจเหล่านี้ทำให้เครื่องมือนี้สามารถตรวจจับการฉ้อโกง การควบคุมคุณภาพอาหาร และความปลอดภัยสาธารณะ

NittayaJunka [26] เป็นการศึกษาเกี่ยวกับข้าวกล้องหอมมะลิ (JBR) ที่มีกลิ่นเหม็นหืน โดยการศึกษาเน้นไปที่การรักษาเสถียรภาพของ JBR ผ่านการทำให้แห้งในฟลูอิดเบดที่ 100–150 °C โดยใช้สักรอบแห้งที่แตกต่างกัน: ลมร้อน (HA) ลมร้อนที่มีความชื้น (HHA) และไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (SHS) วิเคราะห์ JBR และกลิ่นหืนที่เกิดจากกรดไฮโอบาร์บิทริก (TBA) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้รับการพัฒนาสำหรับกระบวนการทำให้แห้ง และได้กำหนดสมการที่เกี่ยวข้องเพื่อทำนายกลไกที่อยู่ภายใต้การเปลี่ยนแปลงของ TBA ในช่วง 180 วันของการจัดเก็บ ตัวอย่างที่แห้งยากขึ้นเนื่องจากการเจลาติไนเซชันของแป้งและการลดลงของ 2-acetyl-1-pyrroline volatility การเปลี่ยนแปลงคุณภาพ JBR มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิในการทำให้แห้งและตัวกลางในการทำให้แห้งที่ใช้ การอบแห้ง SHS ที่ 150 °C ชะลอการเกิด TBA ได้มากที่สุด แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เสนอและสมการที่เกี่ยวข้องสามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงของ TBA ระหว่างการจัดเก็บได้อย่างแม่นยำ และนำไปใช้กับ JBR ภายใต้สภาวะการทำให้แห้งส่วนใหญ่

OktayHacihafizoglu [27] เป็นการศึกษาความเหมาะสมของแบบจำลองการอบแห้งหลายแบบที่มีอยู่ ในการกำหนดพฤติกรรมการอบแห้งแบบชั้นบางของข้าวเมล็ดยาวหยาบได้รับการตรวจสอบโดยใช้การวิเคราะห์ทางสถิติ เพื่อจุดประสงค์นี้ แบบจำลองการอบแห้งได้รับการติดตั้งเข้ากับข้อมูลการทดลองโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ในแบบจำลองสำหรับอุณหภูมิของอากาศที่ทำให้แห้ง 40 °C, 45 °C, 50 °C, 55 °C และ 60 °C และที่อัตราการไหลของอากาศ ที่ 1.5 m/s และ 3.0 m/s ผลปรากฏว่า Midilli et al. เป็นแบบอย่างที่เหมาะสมที่สุดสำหรับพฤติกรรมการอบแห้งข้าวหยาบชั้นบาง นอกจากนี้ในบรรดาโมเดลพารามิเตอร์สองแบบ โมเดลเพจ และโมเดลพารามิเตอร์สามแบบ ได้แก่ Verma et al และรูปแบบวิธีการแพร่ให้เหมาะสมยิ่งขึ้น สัมประสิทธิ์ a และ b สัมประสิทธิ์การทำให้แห้ง k และเลขชี้กำลัง n ใน Midilli et al แบบจำลองสามารถแสดงเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและความเร็วของอากาศที่ทำให้แห้ง

ChunWang [28] เป็นการศึกษามุ่งเป้าไปที่ปัญหาที่ว่าแบบจำลองการทำนายผลผลิตดั้งเดิมของต้นข้าวและข้าวสาลีมีความแม่นยำในการทำนายต่ำในการใช้งาน รูปแบบการทำนายผลผลิตของข้าวและพืชข้าวสาลีตามอัลกอริทึมระยะห่างทางนิเวศวิทยา ตามขั้นตอนการออกแบบ พารามิเตอร์สภาพอากาศ พารามิเตอร์ของดิน และพารามิเตอร์พฤติกรรมได้รับเป็นพารามิเตอร์ผลกระทบต่อผลผลิตพืชผล การใช้พารามิเตอร์นี้ร่วมกับสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สันและดัชนีความไวรวมเทคนิคการดูซึมข้อมูลถูกใช้เพื่อกำหนดตัวทำนายผลผลิตพืชผล อัลกอริทึมระยะห่างทางนิเวศวิทยาถูกรวมเข้ากับตัวทำนายผลผลิตพืชผลเพื่อสร้างแบบจำลองการทำนายผลผลิตของข้าวและข้าวสาลีเมื่อเทียบกับแบบจำลองการคาดการณ์ผลตอบแทนเดิม ผลการพยากรณ์ผลผลิตของแบบจำลองนี้ใกล้เคียงกับผลตัวอย่างมากขึ้น โดยสรุป แบบจำลองการทำนายผลผลิตของข้าวและข้าวสาลีโดยใช้อัลกอริทึมระยะห่างทางนิเวศวิทยามีความแม่นยำในการทำนายที่สูงกว่า

YongYan [29] เป็นการศึกษาตรวจสอบจลนศาสตร์ในการทำให้แห้งของชีวมวลในเครื่องทำลมแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบตมีความสำคัญต่อการควบคุมกระบวนการทำให้แห้ง เพิ่มผลผลิต และลดการใช้พลังงาน และได้มีการเสนอวิธีการใหม่โดยการรวมการตรวจจับไฟฟ้าสถิตและเทคนิคการถ่ายภาพดิจิทัลเพื่อให้ได้ปริมาณความชื้น แบบจำลองการทำให้แห้ง การแพร่กระจายของความชื้น พลังงานกระตุ้น และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารชีวมวล ณ ตำแหน่งฟองอากาศต่างๆ การทดสอบทดลองดำเนินการกับเครื่องทำลมแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบตระดับห้องปฏิบัติการสำหรับความเร็วลมที่แตกต่างกันในช่วงอุณหภูมิของอากาศ มีการประเมินแบบจำลองการอบแห้งทางคณิตศาสตร์ห้าแบบในกระดาษ พบว่าแบบจำลองการทำแห้งแบบหน้าเหมาะที่สุดสำหรับการอธิบายกระบวนการทำให้แห้งของสารชีวมวลในฟลูอิดไคซ์เบต ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารชีวมวลที่ด้านในและขอบของฟองสปู้นั้นสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารชีวมวลที่ด้านในและขอบของฟองสปู่นอกจากนี้ แม้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอากาศและความเร็วลม แต่อุณหภูมิอากาศสูงสุดและความเร็วลมสูงสุดไม่ใช่สภาวะที่เหมาะสม ตัวอย่างเช่น การไหลของฟองจะเปลี่ยนเป็นการไหลของทากหรือการไหลของปลีที่ความเร็วลม  $0.56 \text{ m/s}$  และอุณหภูมิอากาศ  $75 \text{ }^{\circ}\text{C}$

MohammadMohseni [30] เป็นการศึกษาการวิเคราะห์การทำให้แห้งของชีวมวลในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบตแบบสันโดยใช้เครื่องมือจำลอง DEM-CFD เป็นแพลตฟอร์มแบบหลายฟิสิกส์และหลายขนาด ในแนวทางนี้ อนุภาคจะได้รับการแก้ไขเป็นองค์ประกอบที่ไม่ต่อเนื่องควบคู่กันผ่านการถ่ายเทความร้อน มวล และโมเมนตัมไปยังเฟสของก๊าซโดยรอบซึ่งนำไปสู่แนวทางการมีเพศสัมพันธ์แบบลากรองจ์เจียน-ออยเลอร์ เครื่องมือนี้ทำนายการเคลื่อนที่ของอนุภาคเป็นองค์ประกอบที่ไม่ต่อเนื่องตามสมการการเคลื่อนที่ของนิวตัน และสถานะทางอุณหพลศาสตร์ของแต่ละอนุภาคจะขยายออกไปตามอัลกอริทึมที่เกี่ยวข้อง สถานะทางอุณหพลศาสตร์หมายถึงการประมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าอุณหภูมิและการกระจายพันธุ์ผ่านอนุภาคเนื่องจากแหล่งความร้อนภายนอกและปฏิกิริยาเคมี การทดลองที่จำเป็นจะดำเนินการในเครื่องอบแห้งตะแกรงแบบสั่นระดับอุตสาหกรรม ความตั้งใจของงานทดลองคือการประมาณปริมาณความชื้น ความหนาแน่นและการกระจายขนาดของวัสดุตลอดจนเวลาที่อยู่อาศัยเพื่อประเมินผลการจำลอง จุดมุ่งหมายคือการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานและประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์แบบสั่นโดยการตรวจสอบอิทธิพลของพารามิเตอร์ที่มีประสิทธิภาพ เช่น อุณหภูมิและความเร็วของก๊าซที่ไหลเข้า อุณหภูมิของเครื่องอบแห้งเริ่มต้น ปริมาณความชื้นเริ่มต้นของอนุภาค และความเข้มข้นของตะแกรงในกระบวนการทำให้แห้ง ในตอนท้าย ผลกระทบของการกระจายขนาดจะแสดงโดยการกระจายอุณหภูมิของอนุภาคในระหว่างการมีปฏิสัมพันธ์กับไอน้ำร้อนยวดยิ่งในระบบ

ChongdianSi [31] เป็นศึกษาการจำลองลักษณะของการทำแห้งลิกไนต์ในไมโครเวฟฟลูอิดไรซ์เบดโดยใช้ซอฟต์แวร์ Fluent ตามแบบจำลองการไหลของออยเลอร์-ออยเลอร์ โดยผลการจำลองสอดคล้องกับข้อมูลการทดลองอย่างเหมาะสม ผลการวิจัยพบว่าคุณภาพการฟลูอิดไรซ์เซชันและอัตราการทำให้แห้งของลิกไนต์เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของกำลังไมโครเวฟและอุณหภูมิของอากาศ นอกจากนี้กระบวนการทำให้แห้งแล้ว ค่าที่คาดการณ์ของปริมาณความชื้นลิกไนต์ยังน้อยกว่าค่าทดลองเล็กน้อย อุทกพลศาสตร์และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของการอบแห้งด้วยไมโครเวฟลิกไนต์ในฟลูอิดไรซ์เบดได้รับการศึกษาบนพื้นฐานของผลการจำลอง ความแตกต่างของเศษส่วนปริมาตรของแข็งถูกระบุแม้ว่าจะได้รับข้อตกลงที่ดีในการทดลอง ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามกำลังไมโครเวฟ อุณหภูมิอากาศ และความเร็วลมที่เพิ่มขึ้น ขณะที่ลดลงตามระยะเวลาในการทำให้แห้งที่เพิ่มขึ้น

FrancescoSapino [32] เป็นการพัฒนารอบงานแบบกลุ่มที่มีหลายแบบจำลองซึ่งครอบคลุมโมเดลการเขียนโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ 5 โมเดล (2 แบบจำลองการเขียนโปรแกรมทางคณิตศาสตร์เชิงบวก 2 แบบจำลองการเขียนโปรแกรมยูทิลิตี้หลายแอตทริบิวต์เชิงบวก และ 1 แบบจำลองการเขียนโปรแกรมเป้าหมายแบบถ่วงน้ำหนัก) ที่แสดงถึงพฤติกรรมที่สังเกตพบของตัวแทนทางเศรษฐกิจและสังคม 1) เพื่อจำลองผลกระทบของการปฏิรูปการกำหนดราคาน้ำของ Piedmontese ต่อการจัดสรรและการจัดการการใช้ที่ดิน การอนุรักษ์น้ำ กำไรและรายได้จากภาษีน้ำ 2) ความไม่แน่นอนของการสร้างแบบจำลองตัวอย่างผ่านการแพร่กระจายทั้งหมด และ 3) สำรองจุดเปลี่ยนที่อาจเกิดขึ้นโดยใช้เทคนิคการค้นหาสถานการณ์ จากการวิจัยชี้ให้เห็นว่าความท้าทายที่สำคัญในการปฏิรูปอยู่ที่การจัดการน้ำในพื้นที่การเกษตรที่กว้างขวาง (17% ของพื้นที่เกษตรกรรม) พืชที่ต้องการน้ำและพืชที่มีมูลค่าเพิ่มค่อนข้างต่ำซึ่งยังคงให้บริการระบบนิเวศที่สำคัญ (เช่น การกักเก็บน้ำ) ความเกี่ยวข้องทางประวัติศาสตร์และวัฒนธรรมกับภูมิภาค การทดลองทั้งหมดแสดงให้เห็นว่าการทำนาลดน้อยลงอย่างรวดเร็วในช่วงราคา 0.012–0.074 EUR/m<sup>3</sup> ขึ้นอยู่กับรุ่น ก่อนถึงจุดเปลี่ยน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกำหนดราคาน้ำเพื่อการเกษตรสามารถลดการถอนได้สูงถึง 1.7% – 9.5% ในขณะที่ลดกำไรระหว่าง 4.9% ถึง 5.6% และทำให้รายได้ภาษีน้ำเพิ่มขึ้น 57 ถึง 65 เท่า

Steven A. Niederer [33] เนื่องจากความซับซ้อนและความสำคัญของหัวใจ กลศาสตร์ของหัวใจจึงได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวางทั้งในเชิงทดลองและผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการจำลองแบบจำลองของกลศาสตร์หัวใจพัฒนาจากการศึกษาน้ำเชื้อในกล้ามเนื้อโครงร่าง และพัฒนาเป็นการคำนวณเฉพาะสำหรับผู้ป่วยโดยเฉพาะในหัวใจ เฉพาะชนิด เฉพาะมนุษย์ และสุดท้าย โมเดลเหล่านี้จัดเตรียมกรอบการทำงานที่เป็นทางการเพื่อเชื่อมโยงการทดสอบทดลองหลายชุดที่บันทึกไว้เป็นเวลาเกือบ 100 ปี ให้กลายเป็นการแสดงการทำงานของหัวใจแบบรวมเป็นหนึ่งเดียว การทบทวนนี้เป็นการสรุปเกี่ยวกับโปรตีน สรีรวิทยา และกายวิภาคศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการสร้างการทำงานของปัมหัวใจ จากนั้นเราจะอธิบายวิวัฒนาการของแบบจำลองกลศาสตร์ของหัวใจโดยเริ่มจากกรอบทฤษฎีเบื้องต้นที่อธิบายความเชื่อมโยงระหว่างซาร์โคเมียร์กับการหดตัวของกล้ามเนื้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

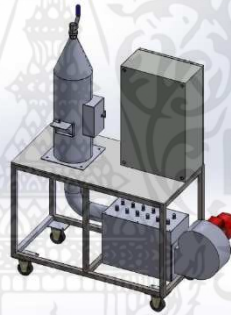
## บทที่ 3

### อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

สำหรับงานวิจัยนี้ศึกษาการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับกล้องส่องความร้อนโดยมีความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดข้าว คือ 33.33% และทำการทดลองอบแห้งที่อุณหภูมิ 90 110 130 และ 150°C

#### 3.1 วัสดุและวิธีการทดลอง

##### 3.1.1 เครื่องอบแห้งฟลูอิดไอเซชัน



รูปที่ 3.1 รูปเครื่องฟลูอิดไอเซชัน

##### 3.1.2 เมล็ดข้าวเปลือกพันธุ์สังข์หยดที่ใช้ในการทดลอง ได้รับมาจากจังหวัดพัทลุง



รูป 3.2 เมล็ดข้าวเปลือกพันธุ์สังข์หยด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.3 อินเวอร์เตอร์ใช้สำหรับกำหนดความเร็วลมในการอบแห้ง



รูปที่ 3.3 Inverter รุ่น DLB1 , ยี่ห้อ JADEN

### 3.1.4 กล้องถ่ายภาพความร้อน



รูปที่ 3.4 Thermal imaging camera รุ่น FLIR 60

### 3.1.5 ตู้อบ ใช้สำหรับอบเพื่อหาความชื้นสุดท้ายของเมล็ดข้าวเปลือกโดยอบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 72 hr



รูปที่ 3.5 ตู้อบ รุ่น UF75 , ยี่ห้อ Memmert

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.6 เครื่องชั่งทศนิยมสองตำแหน่ง ใช้สำหรับชั่งน้ำหนักของเมล็ดข้าวเปลือก



รูปที่ 3.6 เครื่องชั่งรุ่น Pioneer series , ยี่ห้อ OHAUS

## 3.2 ขั้นตอนการอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดไคซ์เบด

3.2.1 เตรียมข้าวสังข์หยด (ข้าวเปลือก) 1.8 kg และฉีดพ่นน้ำ 0.2 g ทำการคลุกเคล้าเข้าด้วยกันจะได้ข้าวที่มีน้ำหนัก 2 kg สำหรับทดลอง ณ อุณหภูมิ 90 110 130 และ 150°C

3.2.2 นำข้าวที่ผสมเสร็จแล้วไปใส่ตู้เย็น ที่อุณหภูมิ 4 °C นาน 7 วัน โดยนำออกมาคลุกเคล้าทุก 12 hr

3.2.3 เตรียมเซตเครื่องฟลูอิดไคซ์เบด และกล้องถ่ายภาพความร้อน เพื่อทำการทดลอง ที่อุณหภูมิ 90°C 110°C 130°C และ 150°C

## 3.3 การหาค่าความชื้นของข้าวเปลือก

### 3.3.1 วิธีคำนวณการเพิ่มความชื้นให้กับเมล็ดข้าวเปลือก

เนื่องจากเมล็ดข้าวเปลือกมีความชื้นน้อยกว่าความชื้นเริ่มต้นที่กำหนดให้ใช้ในการทดลอง ซึ่งก็คือ 33.33 % (d.b.) หรือ 25% (w.b.) จึงจำเป็นต้องเพิ่มความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกก่อนนำไปทำการทดลอง ก่อนอื่นต้องหาความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกก่อน เพื่อทำการคำนวณหาปริมาณน้ำที่จะต้องเพิ่มให้ได้ความชื้นเริ่มต้นตามที่ต้องการ ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (3.1) หลังจากคำนวณได้ปริมาณน้ำที่ต้องการจึงจะทำการฉีดลงบนเมล็ดข้าวเปลือกแล้วคลุกเคล้าให้ทั่วทั้งเมล็ด จากนั้นนำไปแช่ในตู้เย็นเพื่อให้ความชื้นกระจายทั่วทั้งเมล็ด แล้วจึงจะทำการทดลองต่อไป

$$Q = \frac{w_i(M_f - M_i)}{100 - M_f} \quad (3.1)$$

โดยที่

$Q$  คือ ปริมาณน้ำที่ต้องเพิ่มให้กับเมล็ดข้าวเปลือก ( $kg$ )

$w_i$  คือ น้ำหนักเริ่มต้นของเมล็ดข้าวเปลือกที่ต้องการเพิ่มความชื้น ( $kg$ )

$M_f$  คือ ความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกที่ต้องการ ( $\%w.b.$ )

$M_i$  คือ ความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดข้าวเปลือก ( $\%w.b.$ )

### 3.3.2 การคำนวณหาค่าความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือก

การหาความชื้นในเมล็ดข้าวเปลือกนั้นจำเป็นต้องชั่งน้ำหนักของเมล็ดก่อนแล้วจึงนำเมล็ดข้าวเปลือกใส่ลงใน Moisture can แล้วนำเข้าตู้อบ หลังจากอบแล้วนำเมล็ดข้าวมาชั่งอีกรอบเพื่อทำการคำนวณหาความชื้นต่อไป [22] ตามสมการที่ (3.2)

$$\text{เปอร์เซ็นต์ค่าความชื้น (\%d.b.)} = \frac{\text{น้ำหนักก่อนอบ} - \text{น้ำหนักหลังอบ}}{\text{น้ำหนักหลังอบ}} \times 100 \quad (3.2)$$

### 3.4 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดิมที่มีการคำนวณโดยกำหนดให้แบบจำลองการอบแห้งเป็นฟังก์ชันกระบอกที่มีความซับซ้อน และสามารถประยุกต์ใช้แก้ปัญหาได้ แต่เนื่องจากการกำหนดสมมติฐานของรูปทรงทางกายภาพ มิติและทิศทาง ให้วัสดุเป็นเนื้อเดียวกัน แหล่งความร้อนในวัสดุ การหดหรือขยายตัว กระบวนการอบแห้งแบบอุณหภูมิต่ำคงที่ พื้นที่ในการจำลอง และการคลุกเคล้ากันอย่างดี เพื่อใช้ในแบบจำลองทำให้ผลการคำนวณมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น จึงได้ทำการเปรียบเทียบค่าความชื้นและอุณหภูมิจากแบบจำลองการอบแห้งกับจากการทดลองจริง โดยใช้ค่าความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกจากการนำเมล็ดข้าวเปลือกเข้าตู้อบและค่าอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกจากกล้องถ่ายภาพความร้อน การเปรียบเทียบค่าความชื้นและอุณหภูมิได้ใช้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นด้วยสมการดังต่อไปนี้

### 3.5.1 สมการอนุรักษ์พลังงาน

กฎการอนุรักษ์พลังงานใช้อธิบายความร้อนและการถ่ายเทมวลอากาศกับเมล็ดข้าวเปลือกที่ถูกรอบแห้ง การอบแห้งจะเริ่มจากวัสดุถูกป้อนเข้าห้องอบแห้งจากนั้นอากาศแวดล้อมจะไหลเข้าสู่ระบบ ทำให้ร้อนจนถึงช่วงอุณหภูมิที่ต้องการทดสอบ เมื่ออากาศร้อนไหลเข้าห้องอบแห้งจะเกิดการถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายเทมวลกับเมล็ดข้าวเปลือก หลังจากนั้นอากาศส่วนหนึ่งจะไหลออกห้องอบแห้งเพื่อระบายความชื้น ส่วนอากาศที่เหลือจะถูกเวียนอากาศร้อนกลับมาเพื่อผสมกับอากาศแวดล้อมที่พื้นที่ผสมก่อนไหลเข้าสู่ระบบอีกครั้งเพื่อประหยัดพลังงาน

$$\begin{aligned} \dot{m}_a c_{p,a} (T_{a,i} - T_{a,o}) + \dot{m}_a c_{p,v} (w_{a,i} T_{a,i} - w_{a,o} T_{a,o}) \\ = m_m (c_{p,w} M(t)) \left( \frac{dT}{dt} \right) + \dot{m}_{w,m} h_{fg} \end{aligned} \quad (3.3)$$

เมื่อ  $c_{p,a}$ ,  $c_{p,m}$ ,  $c_{p,v}$  และ  $c_{p,w}$  คือ ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศร้อน เมล็ดข้าวเปลือก ไอน้ำและน้ำตามลำดับ ( $J/kgK$ )

$h_{fg}$  คือ ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ ( $J/kg$ )

$M$  คือ ความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือก ( $kg/kg$  dry basis)

$m_m$  คือ มวลแห้งของเมล็ดข้าวเปลือก ( $kg$ )

$\dot{m}_a$  และ  $\dot{m}_{w,m}$  คือ อัตราการไหลของอากาศร้อน และอัตราการระเหยความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือก ( $kg/s$ )

$T$  คือ อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก ( $K$ )

$T_{a,i}$  และ  $T_{a,o}$  คือ อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าและขาออกจากห้องอบแห้ง ( $K$ )

$t$  คือ ระยะเวลาอบแห้ง ( $s$ )

$w_{a,i}$  และ  $w_{a,o}$  คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศร้อนขาเข้าและขาออก ( $kg$  water /  $kg$  dry air)

ในสมการที่ (3.3) เป็นสมดุลสมการถ่ายโอนพลังงานระหว่างอากาศร้อนกับเมล็ดข้าวเปลือก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการระเหยความชื้นของวัสดุสามารถคำนวณได้จากผลคูณของมวลแห้งกับอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือก ดังสมการ

$$\dot{m}_{w,m} = m_m \frac{dM}{dt} \quad (3.4)$$

อัตราส่วนความชื้นอากาศร้อนขาออกคำนวณได้จาก ผลรวมของอัตราส่วนความชื้นของอากาศร้อนขาเข้ากับผลหารของอัตราการระเหยความชื้นต่ออัตราการไหลของอากาศร้อน ดังสมการ

$$w_{a,o} = w_{a,i} + \left( \frac{m_m \frac{dM}{dt}}{\dot{m}_a} \right) \quad (3.5)$$

เมื่อพิจารณาสมดุลมวลของพื้นที่ผสมอัตราส่วนความชื้นของอากาศร้อนขาเข้าคำนวณได้จาก ผลรวมสัดส่วนของอัตราส่วนความชื้นอากาศร้อนขาออกกับสัดส่วนที่เหลือของอัตราส่วนความชื้นของอากาศแวดล้อม ดังสมการ

$$w_{a,i} = RC(w_{a,o}) + (1-RC)w_{a,amb} \quad (3.6)$$

$RC$  คือ สัดส่วนของอากาศเวียนกลับ (*decimal*)

$w_{amb}$  คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศแวดล้อม (*kg water / kg dry air*)

นำค่าอัตราส่วนความชื้นของอากาศร้อนขาเข้าจากสมการ (3.6) แทนในสมการ (3.5) จะได้

$$w_{a,o} = w_{a,amb} + \left( \frac{m_m \frac{dM}{dt}}{\dot{m}_a} \right) \left( \frac{1}{1-RC} \right) \quad (3.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.2 สมการควบคุม

สมการควบคุมเพื่อให้แบบจำลองการอบแห้งอยู่ในขอบเขตและสามารถพิจารณาความชื้น อุณหภูมิตามกฎของฟิกซ์และกฎของฟูเรียร์ได้

#### 1. การถ่ายเทมวล

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \left[ \frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial M}{\partial r} + \frac{\partial^2 M}{\partial z^2} \right] \quad (3.8)$$

เมื่อ  $D_{eff}$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล ( $m^2 / s$ )

$M$  คือ ความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือก (%)

$r$  คือ ระยะตามแนวแกน ( $m$ )

$t$  คือ ระยะเวลาอบแห้ง ( $s$ )

$z$  คือ ระยะตามแนวแกน ( $m$ )

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล มีรูปแบบของสมการดังนี้

$$D_{eff} = D_0 * \exp\left(\frac{-E_a}{R_g T}\right) \quad (3.9)$$

เมื่อ  $D_0$  คือ ค่าคงที่ของอาร์เรเนียส ( $m^2 / s$ )

$E_a$  คือ พลังงานกระตุ้น ( $J / mol$ )

$R_g$  คือ ค่าคงที่ของก๊าซ ( $J / mol K$ )

$T$  คือ อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก ( $K$ )

#### 2. การถ่ายโอนความร้อน

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (3.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $\alpha$  คือ ค่าการแพร่ความร้อน ( $m^2 / s$ )

ค่าการแพร่ความร้อนมีรูปแบบของสมการ

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (3.11)$$

เมื่อ  $c_p$  คือ ค่าความร้อนจำเพาะของเมล็ดข้าวเปลือก ( $J / kg K$ )

$k$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเมล็ดข้าวเปลือก ( $W / m K$ )

$\rho$  คือ ความหนาแน่นของเมล็ดข้าวเปลือก ( $kg / m^3$ )

### 3.5.3 สภาวะเริ่มต้นและสภาวะขอบเขต

สภาวะเริ่มต้นและสภาวะขอบเขตของการแพร่ความร้อนขึ้นตามกฎของฟิกซ์ และการนำความร้อนตามกฎของฟูเรียร์ของการจำลองการอบแห้งวัสดุพิกัดทรงกระบอก โดยพิจารณาเพียงหนึ่งในสี่ส่วน โดยเขียนสมการได้ดังนี้

#### 1. การถ่ายเทมวล

สภาวะเริ่มต้น  $t = 0$

$$0 \leq r \leq R \quad M(r) = M_m \quad (3.12)$$

$$0 \leq z \leq L \quad M(z) = M_m \quad (3.13)$$

สภาวะขอบเขต  $t > 0$

$$r = 0, 0 \leq z \leq L ; \quad \frac{\partial M}{\partial r} = 0 \quad (3.14)$$

$$z = 0, 0 \leq r \leq R ; \quad \frac{\partial M}{\partial z} = 0 \quad (3.15)$$

$$r = R, 0 \leq z \leq L ; \quad -D_{eff} \left( \frac{\partial M}{\partial r} \right) \Big|_{r=R} = h_m (M_s - M_e) \quad (3.16)$$

$$z = L, 0 \leq r \leq R ; \quad -D_{eff} \left( \frac{\partial M}{\partial z} \right) \Big|_{z=L} = h_m (M_s - M_e) \quad (3.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่	$h_m$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล ( $m / s$ )
	$L$	คือ ความสูงของเมล็ดข้าวเปลือก ( $m$ )
	$M_e$	คือ ความชื้นสมดุล ( $kg / kg \text{ dry basis}$ )
	$M_{in}$	คือ ความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดข้าวเปลือก ( $kg / kg \text{ dry basis}$ )
	$M_s$	คือ ค่าความชื้นที่พื้นผิว ( $\% d.b.$ )
	$R$	คือ รัศมีสมมูลของเมล็ดข้าวเปลือก ( $m$ )

## 2. การถ่ายโอนความร้อน

สภาวะเริ่มต้น  $t = 0$

$$0 \leq r \leq R \quad T(r) = T_{in} \quad (3.18)$$

$$0 \leq z \leq L \quad T(z) = T_{in} \quad (3.19)$$

สภาวะขอบเขต  $t > 0$

$$r = 0, 0 \leq z \leq L \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (3.20)$$

$$z = 0, 0 \leq r \leq R \quad \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (3.21)$$

$$r = R, 0 \leq z \leq L \quad k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} + \frac{m_{w,m}}{A_t} h_{fg} = h_T (T_{a,o} - T_s) \quad (3.22)$$

$$z = L, 0 \leq r \leq R \quad k \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=L} + \frac{m_{w,m}}{A_t} h_{fg} = h_T (T_{a,o} - T_s) \quad (3.23)$$

โดยที่	$A_t$	คือ พื้นที่ผิวของเมล็ดข้าวเปลือก ( $m^2$ )
	$h_T$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $W / m^2 \cdot K$ )
	$T_{in}$	คือ อุณหภูมิเริ่มต้นของเมล็ดข้าวเปลือก ( $K$ )
	$T_s$	คือ อุณหภูมิที่ผิวของเมล็ดข้าวเปลือก ( $K$ )

เมื่อกระบวนการอบแห้งเริ่มต้นสมการสภาวะขอบเขตคือ การกำหนดให้การเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในวัสดุจากการแพร่มีค่าเท่ากับการพาความร้อนที่บริเวณผิวของวัสดุสู่ชั้นขอบเขตโดย

ความชื้นของชั้นขอบเขตมีค่าเท่ากับความชื้นสมดุลของวัสดุ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากการนำความร้อนตามแนวรัศมีและตามแนวความยาวรวมกับพลังงานที่ใช้ในการระเหยความชื้นต่อพื้นที่ผิว มีค่าเท่ากับการพาความร้อนจากชั้นขอบเขตสู่ผิวของเมล็ดข้าวเปลือก โดยอุณหภูมิของชั้นขอบเขตมีค่าเท่ากับอุณหภูมิกาศร่อน [34]

### 3.5.4 ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

การหาผลเฉลยการเปลี่ยนแปลงความชื้นโดยการถ่ายเทมวลและผลเฉลยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยการถ่ายโอนความร้อนใช้วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ด้วยระเบียบวิธีแบบชัดเจน การประมาณค่าอนุพันธ์จากการแบ่งย่อยแบบไปข้างหน้าถูกใช้ในการประมาณสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยแปรผันกับเวลา ส่วนการแบ่งย่อยแบบตรงกลางถูกใช้ในการประมาณสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยแปรผันกับระยะทาง

#### 1. การถ่ายเทมวล

ผลเฉลยสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของสมการควบคุม สำหรับคำนวณการเปลี่ยนแปลงความชื้น ดังสมการ

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{M_{i,j}^{n+1} - M_{i,j}^n}{\Delta t} \quad (3.24)$$

$$\frac{\partial M}{\partial r} = \frac{M_{i+1,j}^n - M_{i-1,j}^n}{2\Delta r} \quad (3.25)$$

$$\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} = \frac{M_{i-1,j}^n - 2M_{i,j}^n + M_{i+1,j}^n}{(\Delta r)^2} \quad (3.26)$$

$$\frac{\partial^2 M}{\partial z^2} = \frac{M_{i,j-1}^n - 2M_{i,j}^n + M_{i,j+1}^n}{(\Delta z)^2} \quad (3.27)$$

เมื่อ  $i$  และ  $j$  คือ ตัวอักษรแทนตำแหน่ง

$n$  คือ ตัวอักษรแทนช่วงเวลา

นำสมการที่ (3.24) ถึง (3.27) แทนค่าในสมการที่ (3.8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้

$$\frac{M_{i,j}^{n+1} - M_{i,j}^n}{\Delta t} = D_{eff} \left[ \frac{M_{i-1,j}^n - 2M_{i,j}^n + M_{i+1,j}^n}{(\Delta r)^2} + \frac{1}{r} \frac{M_{i+1,j}^n - M_{i-1,j}^n}{2\Delta r} + \frac{M_{i,j-1}^n - 2M_{i,j}^n + M_{i,j+1}^n}{(\Delta z)^2} \right] \quad (3.28)$$

$$\frac{M_{i,j}^{n+1} - M_{i,j}^n}{\Delta t} = D_{eff} \left[ \frac{M_{i-1,j}^n - 2M_{i,j}^n + M_{i+1,j}^n}{(\Delta r)^2} + \frac{1}{r} \frac{\Delta r}{\Delta r} \frac{M_{i+1,j}^n - M_{i-1,j}^n}{2\Delta r} + \frac{M_{i,j-1}^n - 2M_{i,j}^n + M_{i,j+1}^n}{(\Delta z)^2} \right] \quad (3.29)$$

$$M_{i,j}^{n+1} = \left[ \frac{D_{eff} \Delta t}{(\Delta r)^2} (M_{i-1,j}^n - 2M_{i,j}^n + M_{i+1,j}^n) + \frac{D_{eff} \Delta t}{(\Delta r)^2} \frac{\Delta r}{2r} (M_{i+1,j}^n - M_{i-1,j}^n) + \frac{D_{eff} \Delta t}{(\Delta z)^2} (M_{i,j-1}^n - 2M_{i,j}^n + M_{i,j+1}^n) \right] + M_{i,j}^n \quad (3.30)$$

กำหนดให้  $F_r = \frac{D_{eff} \Delta t}{(\Delta r)^2} \quad (3.31)$

$$F_z = \frac{D_{eff} \Delta t}{(\Delta z)^2} \quad (3.32)$$

เมื่อ  $F_r$  และ  $F_z$  คือ เลขฟูเรียร์

กำหนดผลเฉลยสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของสภาวะขอบเขต ดังสมการ

$$M_{i+1,j}^n = -\frac{2\Delta r h_m}{D_{eff}} (M_s - M_e) + M_{i-1,j}^n \quad (3.33)$$

$$M_{i,j+1}^n = -\frac{2\Delta z h_m}{D_{eff}} (M_s - M_e) + M_{i,j-1}^n \quad (3.34)$$

สมการคำนวณการเปลี่ยนแปลงความชื้น สามารถเขียนได้ดังนี้

กรณีที่ 1 :  $i = 1, 2, 3, \dots, i_{\max-1}$   $j = 1, 2, 3, \dots, j_{\max-1}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$M_{i,j}^{n+1} = \left[ F_r (M_{i-1,j}^n - 2M_{i,j}^n + M_{i+1,j}^n) + F_r \frac{\Delta r}{2r} (M_{i+1,j}^n - M_{i-1,j}^n) + F_z (M_{i,j-1}^n - 2M_{i,j}^n + M_{i,j+1}^n) \right] + M_{i,j}^n \quad (3.35)$$

กรณีที่ 2 :  $i=0 \quad j=0$

$$M_{0,0}^{n+1} = \left[ F_r (-2M_{0,0}^n - 2M_{1,0}^n) + F_z (-2M_{0,0}^n - 2M_{0,1}^n) \right] + M_{0,0}^n \quad (3.36)$$

กรณีที่ 3 :  $i=0 \quad j=1,2,3,\dots,j_{\max-1}$

$$M_{0,j}^{n+1} = \left[ F_r (-2M_{0,j}^n + 2M_{1,j}^n) + F_z (M_{0,j-1}^n - 2M_{0,j}^n + M_{0,j+1}^n) \right] + M_{0,j}^n \quad (3.37)$$

กรณีที่ 4 :  $i=0 \quad j=j_{\max}$

$$M_{0,j_{\max}}^{n+1} = \left[ F_r (-2M_{0,j_{\max}}^n + 2M_{1,j_{\max}}^n) + F_z (M_{0,j_{\max}-1}^n - 2M_{0,j_{\max}}^n + M_{0,j_{\max}+1}^n) \right] + M_{0,j_{\max}}^n \quad (3.38)$$

จากสมการที่ (3.34)  $M_{0,j_{\max}+1}^n$  มีค่าเท่ากับ

$$M_{0,j_{\max}+1}^n = -\frac{2\Delta z h_m}{D_{eff}} (M_s - M_e) + M_{0,j_{\max}-1}^n \quad (3.39)$$

กรณีที่ 5 :  $i=1,2,3,\dots,i_{\max-1} \quad j=j_{\max}$

$$M_{i,j_{\max}}^{n+1} = \left[ F_r (M_{i-1,j_{\max}}^n - 2M_{i,j_{\max}}^n + M_{i+1,j_{\max}}^n) + F_r \frac{\Delta r}{2r} (M_{i+1,j_{\max}}^n - M_{i-1,j_{\max}}^n) + F_z (M_{i,j_{\max}-1}^n - 2M_{i,j_{\max}}^n + M_{i,j_{\max}+1}^n) \right] + M_{i,j_{\max}}^n \quad (3.40)$$

จากสมการที่ (3.34)  $M_{i,j_{\max}+1}^n$  มีค่าเท่ากับ

$$M_{i,j_{\max}+1}^n = -\frac{2\Delta z h_m}{D_{eff}} (M_s - M_e) + M_{i,j_{\max}-1}^n \quad (3.41)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ 6 :  $i = i_{\max}$   $j = j_{\max}$

$$\begin{aligned} M_{i_{\max}, j_{\max}}^{n+1} = & \left[ F_r \left( M_{i_{\max}-1, j_{\max}}^n - 2M_{i_{\max}, j_{\max}}^n + M_{i_{\max}+1, j_{\max}}^n \right) \right. \\ & + F_r \frac{\Delta r}{2r} \left( M_{i_{\max}+1, j_{\max}}^n - M_{i_{\max}-1, j_{\max}}^n \right) + F_z \left( M_{i_{\max}, j_{\max}-1}^n \right. \\ & \left. \left. - 2M_{i_{\max}, j_{\max}}^n + M_{i_{\max}, j_{\max}+1}^n \right) \right] + M_{i_{\max}, j_{\max}}^n \end{aligned} \quad (3.42)$$

จากสมการที่ (3.33) และ (3.34)  $M_{i_{\max}+1, j_{\max}}^n$  และ  $M_{i_{\max}, j_{\max}+1}^n$  มีค่าเท่ากับ

$$M_{i_{\max}+1, j_{\max}}^n = -\frac{2\Delta r h_m}{D_{eff}} (M_s - M_e) + M_{i_{\max}-1, j_{\max}}^n \quad (3.43)$$

$$M_{i_{\max}, j_{\max}+1}^n = -\frac{2\Delta z h_m}{D_{eff}} (M_s - M_e) + M_{i_{\max}, j_{\max}-1}^n \quad (3.44)$$

กรณีที่ 7 :  $i = i_{\max}$   $j = 1, 2, 3, \dots, j_{\max}-1$

$$\begin{aligned} M_{i_{\max}, j}^{n+1} = & \left[ F_r \left( M_{i_{\max}-1, j}^n - 2M_{i_{\max}, j}^n + M_{i_{\max}+1, j}^n \right) + F_r \frac{\Delta r}{2r} \left( M_{i_{\max}+1, j}^n \right. \right. \\ & \left. \left. - M_{i_{\max}-1, j}^n \right) + F_z \left( M_{i_{\max}, j-1}^n - 2M_{i_{\max}, j}^n + M_{i_{\max}, j+1}^n \right) \right] + M_{i_{\max}, j}^n \end{aligned} \quad (3.45)$$

จากสมการที่ (3.33)  $M_{i_{\max}+1, j}^n$  มีค่าเท่ากับ

$$M_{i_{\max}+1, j}^n = -\frac{2\Delta r h_m}{D_{eff}} (M_s - M_e) + M_{i_{\max}-1, j}^n \quad (3.46)$$

กรณีที่ 8 :  $i = i_{\max}$   $j = 0$

$$\begin{aligned} M_{i_{\max}, 0}^{n+1} = & \left[ F_r \left( M_{i_{\max}-1, 0}^n - 2M_{i_{\max}, 0}^n + M_{i_{\max}+1, 0}^n \right) + F_r \frac{\Delta r}{2r} \left( M_{i_{\max}+1, 0}^n \right. \right. \\ & \left. \left. - M_{i_{\max}-1, 0}^n \right) + F_z \left( -2M_{i_{\max}, 0}^n + 2M_{i_{\max}, 1}^n \right) \right] + M_{i_{\max}, 0}^n \end{aligned} \quad (3.47)$$

จากสมการที่ (3.33)  $M_{i_{\max}+1, 0}^n$  มีค่าเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$M_{i_{\max+1,0}}^n = -\frac{2\Delta r h_m}{D_{eff}} (M_s - M_e) + M_{i_{\max-1,0}}^n \quad (3.48)$$

กรณีที่ 9 :  $i = 1, 2, 3, \dots, i_{\max-1} \quad j = 0$

$$M_{i,0}^{n+1} = \left[ F_r (M_{i-1,0}^n - 2M_{i,0}^n + M_{i+1,0}^n) + F_r \frac{\Delta r}{2r} (M_{i+1,0}^n - M_{i-1,0}^n) + F_z (-2M_{i,0}^n + 2M_{i,1}^n) \right] + M_{i,0}^n \quad (3.49)$$

เพื่อให้ค่าประมาณที่ได้ลู่อเข้าสู่คำตอบ ผลรวมของ  $F_r$  และ  $F_z$  ต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ

0.5

2. การถ่ายโอนความร้อน

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n}{\Delta t} \quad (3.50)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{T_{i+1,j}^n - T_{i-1,j}^n}{2\Delta r} \quad (3.51)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = \frac{T_{i-1,j}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i+1,j}^n}{(\Delta r)^2} \quad (3.52)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{T_{i,j-1}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i,j+1}^n}{(\Delta z)^2} \quad (3.53)$$

นำสมการที่ (3.50) ถึง (3.53) แทนค่าในสมการที่ (3.10)

$$\frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n}{\Delta t} = \alpha \left[ \frac{T_{i-1,j}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i+1,j}^n}{(\Delta r)^2} + \frac{1}{r} \frac{T_{i+1,j}^n - T_{i-1,j}^n}{2\Delta r} + \frac{T_{i,j-1}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i,j+1}^n}{(\Delta z)^2} \right] \quad (3.54)$$

$$\frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n}{\Delta t} = \alpha \left[ \frac{T_{i-1,j}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i+1,j}^n}{(\Delta r)^2} + \frac{1}{r} \frac{\Delta r}{\Delta r} \frac{T_{i+1,j}^n - T_{i-1,j}^n}{2\Delta r} \right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left. + \frac{T_{i,j-1}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i,j+1}^n}{(\Delta z)^2} \right] \quad (3.55)$$

$$T_{i,j}^{n+1} = \left[ \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta r)^2} (T_{i-1,j}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i+1,j}^n) + \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta r)^2} \frac{\Delta r}{2r} (T_{i+1,j}^n - T_{i-1,j}^n) \right. \\ \left. + \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta z)^2} (T_{i,j-1}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i,j+1}^n) \right] + T_{i,j}^n \quad (3.56)$$

กำหนดให้

$$F_{rh} = \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta r)^2} \quad (3.57)$$

$$F_{zh} = \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta z)^2} \quad (3.58)$$

เมื่อ  $F_{rh}$  และ  $F_{zh}$  คือ เลขฟูเรียร์

สมการที่ (3.56) สามารถเขียนได้เป็น

$$T_{i,j}^{n+1} = \left[ F_{rh} (T_{i-1,j}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i+1,j}^n) + F_{rh} \frac{\Delta r}{2r} (T_{i+1,j}^n - T_{i-1,j}^n) \right. \\ \left. + F_{zh} (T_{i,j-1}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i,j+1}^n) \right] + T_{i,j}^n \quad (3.59)$$

เพื่อหาค่าประมาณที่ได้ลู่อเข้าสู่คำตอบ ผลรวมของ  $F_{rh}$  และ  $F_{zh}$  ต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ

0.5

จากสมการที่ (3.22) และ (3.33) ใช้การประมาณค่าอนุพันธ์จากการแบ่งย่อยแบบตรงกลาง ประมาณสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยแปรผันกับระยะทางในสภาวะขอบเขต โดยเขียนสมการได้ดังนี้

$$k \left( \frac{T_{i+1,j}^n - T_{i-1,j}^n}{2\Delta r} \right) + \frac{\dot{m}_w}{A_t} h_{fg} = h_T (T_{a,o} - T_s) \quad (3.60)$$

$$T_{i+1,j}^n = \left[ \frac{2\Delta r}{k} \left( h_T (T_{a,o} - T_s) - \frac{\dot{m}_w}{A_t} h_{fg} \right) \right] + T_{i-1,j}^n \quad (3.61)$$

$$k \left( \frac{T_{i,j+1}^n - T_{i,j-1}^n}{2\Delta z} \right) + \frac{\dot{m}_w}{A_t} h_{fg} = h_T (T_{a,o} - T_s) \quad (3.62)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_{i,j+1}^n = \left[ \frac{2\Delta r}{k} \left( h_r (T_{a,o} - T_s) - \frac{\dot{m}_w}{A_t} h_{fg} \right) \right] + T_{i,j-1}^n \quad (3.63)$$

สมการที่ (3.59), (3.61) และ (3.63) คือ สมการหลักที่ใช้ในการหาผลเฉลยการเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิ ดังนี้

กรณีที่ 1 :  $i = 1, 2, 3, \dots, i_{\max-1}$   $j = 1, 2, 3, \dots, j_{\max-1}$

$$T_{i,j}^{n+1} = \left[ F_{rh} (T_{i-1,j}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i+1,j}^n) + F_{rh} \frac{\Delta r}{2r} (T_{i+1,j}^n - T_{i-1,j}^n) + F_{zh} (T_{i,j-1}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i,j+1}^n) \right] + T_{i,j}^n \quad (3.64)$$

กรณีที่ 2 :  $i=0$   $j=0$

$$T_{0,0}^{n+1} = \left[ F_{rh} (T_{-1,0}^n - 2T_{0,0}^n + T_{1,0}^n) + F_{rh} \frac{\Delta r}{2r} (T_{1,0}^n - T_{-1,0}^n) + F_{zh} (T_{0,-1}^n - 2T_{0,0}^n + T_{0,1}^n) \right] + T_{0,0}^n \quad (3.65)$$

กำหนดให้  $T_{-1,0}^n = T_{1,0}^n$  และ  $T_{0,-1}^n = T_{0,1}^n$

$$T_{0,0}^{n+1} = \left[ F_{rh} (-2T_{0,0}^n + 2T_{1,0}^n) + F_{zh} (-2T_{0,0}^n + 2T_{0,1}^n) \right] + T_{0,0}^n \quad (3.66)$$

กรณีที่ 3 :  $i=0$   $j = 1, 2, 3, \dots, j_{\max-1}$

$$T_{0,j}^{n+1} = \left[ F_{rh} (T_{-1,0}^n - 2T_{0,j}^n + T_{1,j}^n) + F_{rh} \frac{\Delta r}{2r} (T_{1,j}^n - T_{-1,j}^n) + F_{zh} (T_{0,j-1}^n - 2T_{0,j}^n + T_{0,j+1}^n) \right] + T_{0,j}^n \quad (3.67)$$

กำหนดให้  $T_{-1,j}^n = T_{1,j}^n$

$$T_{0,j}^{n+1} = \left[ F_{rh} (-2T_{0,j}^n + 2T_{1,j}^n) + F_{zh} (T_{0,j-1}^n - 2T_{0,j}^n + T_{0,j+1}^n) \right] + T_{0,j}^n \quad (3.68)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ 4 :  $i=0 \quad j = j_{\max}$

$$T_{0,j_{\max}}^{n+1} = \left[ F_{rh} (T_{-1,j_{\max}}^n - 2T_{0,j_{\max}}^n + T_{1,j_{\max}}^n) + F_{rh} \frac{\Delta r}{2r} (T_{1,j_{\max}}^n - T_{-1,j_{\max}}^n) + F_{zh} (T_{0,j_{\max}-1}^n - 2T_{0,j_{\max}}^n + T_{0,j_{\max}+1}^n) \right] + T_{0,j_{\max}}^n \quad (3.69)$$

กำหนดให้  $T_{-1,j_{\max}}^n = T_{1,j_{\max}}^n$

$$T_{0,j_{\max}}^{n+1} = \left[ F_{rh} (-2T_{0,j_{\max}}^n + 2T_{1,j_{\max}}^n) + F_{zh} (T_{0,j_{\max}-1}^n - 2T_{0,j_{\max}}^n + T_{0,j_{\max}+1}^n) \right] + T_{0,j_{\max}}^n \quad (3.70)$$

จากสมการที่ (3.63)  $T_{0,j_{\max}+1}^n$  มีค่าเท่ากับ

$$T_{0,j_{\max}+1}^n = \left[ \frac{2\Delta z}{k} \left( h_T (T_{a,o} - T_s) - \frac{\dot{m}_w}{A_t} h_{fg} \right) \right] + T_{0,j_{\max}-1}^n \quad (3.71)$$

กรณีที่ 5 :  $i = 1, 2, 3, \dots, i_{\max-1} \quad j = j_{\max}$

$$T_{i,j_{\max}}^{n+1} = \left[ F_{rh} (T_{i-1,j_{\max}}^n - 2T_{i,j_{\max}}^n + T_{i+1,j_{\max}}^n) + F_{rh} \frac{\Delta r}{2r} (T_{i+1,j_{\max}}^n - T_{i-1,j_{\max}}^n) + F_{zh} (T_{i,j_{\max}-1}^n - 2T_{i,j_{\max}}^n + T_{i,j_{\max}+1}^n) \right] + T_{i,j_{\max}}^n \quad (3.72)$$

จากสมการที่ (3.63)  $T_{i,j_{\max}+1}^n$  มีค่าเท่ากับ

$$T_{i,j_{\max}+1}^n = \left[ \frac{2\Delta z}{k} \left( h_T (T_{a,o} - T_s) - \frac{\dot{m}_w}{A_t} h_{fg} \right) \right] + T_{i,j_{\max}-1}^n \quad (3.73)$$

กรณีที่ 6 :  $i = i_{\max} \quad j = j_{\max}$

$$T_{i_{\max},j_{\max}}^{n+1} = \left[ F_{rh} (T_{i_{\max}-1,j_{\max}}^n - 2T_{i_{\max},j_{\max}}^n + T_{i_{\max}+1,j_{\max}}^n) + F_{rh} \frac{\Delta r}{2r} (T_{i_{\max}+1,j_{\max}}^n - T_{i_{\max}-1,j_{\max}}^n) + F_{zh} (T_{i_{\max},j_{\max}-1}^n - 2T_{i_{\max},j_{\max}}^n + T_{i_{\max},j_{\max}+1}^n) \right] + T_{i_{\max},j_{\max}}^n$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_{i_{\max}+1, j_{\max}}^n - T_{i_{\max}-1, j_{\max}}^n) + F_{zh} (T_{i_{\max}, j_{\max}-1}^n - 2T_{i_{\max}, j_{\max}}^n + T_{i, j_{\max}+1}^n) \Big] \\ + T_{i_{\max}, j_{\max}}^n \quad (3.74)$$

จากสมการที่ (3.61) และ (3.63)  $T_{i_{\max}+1, j_{\max}}^n$  และ  $T_{i_{\max}, j_{\max}+1}^n$  มีค่าเท่ากับ

$$T_{i_{\max}+1, j_{\max}}^n = \left[ \frac{2\Delta r}{k} \left( h_T (T_{a,o} - T_s) - \frac{\dot{m}_w}{A_t} h_{fg} \right) \right] + T_{i_{\max}-1, j_{\max}}^n \quad (3.75)$$

$$T_{i_{\max}, j_{\max}+1}^n = \left[ \frac{2\Delta r}{k} \left( h_T (T_{a,o} - T_s) - \frac{\dot{m}_w}{A_t} h_{fg} \right) \right] + T_{i_{\max}, j_{\max}-1}^n \quad (3.76)$$

กรณีที่ 7 :  $i = i_{\max}$   $j = 1, 2, 3, \dots, j_{\max}-1$

$$T_{i_{\max}, j}^{n+1} = \left[ F_{rh} (T_{i_{\max}-1, j}^n - 2T_{i_{\max}, j}^n + T_{i_{\max}+1, j}^n) + F_{rh} \frac{\Delta r}{2r} (T_{i_{\max}+1, j}^n - T_{i_{\max}-1, j}^n) \right. \\ \left. + F_{zh} (T_{i_{\max}, j-1}^n - 2T_{i_{\max}, j}^n + T_{i_{\max}, j+1}^n) \right] + T_{i_{\max}, j}^n \quad (3.77)$$

จากสมการที่ (3.61)  $T_{i_{\max}+1, j}^n$  มีค่าเท่ากับ

$$T_{i_{\max}+1, j}^n = \left[ \frac{2\Delta r}{k} \left( h_T (T_{a,o} - T_s) - \frac{\dot{m}_w}{A_t} h_{fg} \right) \right] + T_{i_{\max}-1, j}^n \quad (3.78)$$

กรณีที่ 8 :  $i = i_{\max}$   $j = 0$

$$T_{i_{\max}, 0}^{n+1} = \left[ F_{rh} (T_{i_{\max}-1, 0}^n - 2T_{i_{\max}, 0}^n + T_{i_{\max}+1, 0}^n) + F_{rh} \frac{\Delta r}{2r} (T_{i_{\max}+1, 0}^n - T_{i_{\max}-1, 0}^n) \right. \\ \left. + F_{zh} (T_{i_{\max}, -1}^n - 2T_{i_{\max}, 0}^n + T_{i_{\max}, 1}^n) \right] + T_{i_{\max}, 0}^n \quad (3.79)$$

กำหนดให้  $T_{i_{\max}, -1}^n = T_{i_{\max}, 1}^n$

$$T_{i_{\max}, 0}^{n+1} = \left[ F_{rh} (T_{i_{\max}-1, 0}^n - 2T_{i_{\max}, 0}^n + T_{i_{\max}+1, 0}^n) + F_{zh} \frac{\Delta r}{2r} (T_{i_{\max}+1}^n - T_{i_{\max}-1, 0}^n) \right. \\ \left. + F_{zh} (-2T_{i_{\max}, 0}^n + 2T_{i_{\max}, 1}^n) \right] + T_{i_{\max}, 0}^n \quad (3.80)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (3.61)  $T_{i_{\max}+1,0}^n$  มีค่าเท่ากับ

$$T_{i_{\max}+1,0}^n = \left[ \frac{2\Delta r}{k} \left( h_T (T_{a,o} - T_s) - \frac{\dot{m}_w}{A_t} h_{fg} \right) \right] + T_{i_{\max}-1,0}^n \quad (3.81)$$

กรณีที่ 9 :  $i = 1, 2, 3, \dots, i_{\max-1}$   $j = 0$

$$T_{i,0}^{n+1} = \left[ F_{rh} (T_{i-1,0}^n - 2T_{i,0}^n + T_{i+1,0}^n) + F_{rh} \frac{\Delta r}{2r} (T_{i+1,0}^n - T_{i-1,0}^n) + F_{zh} (T_{i,-1}^n - 2T_{i,0}^n + T_{i,1}^n) \right] + T_{i,0}^n \quad (3.82)$$

กำหนดให้  $T_{i,-1}^n = T_{i,1}^n$

$$T_{i,0}^{n+1} = \left[ F_{rh} (T_{i-1,0}^n - 2T_{i,0}^n + T_{i+1,0}^n) + F_{zh} \frac{\Delta r}{2r} (T_{i+1,0}^n - T_{i-1,0}^n) + F_{zh} (-2T_{i,0}^n + 2T_{i,1}^n) \right] + T_{i,0}^n \quad (3.83)$$

จากสมการที่ (3.61)  $T_{i_{\max}+1,0}^n$  มีค่าเท่ากับ

$$T_{i_{\max}+1,0}^n = \left[ \frac{2\Delta r}{k} \left( h_T (T_{a,o} - T_s) - \frac{\dot{m}_w}{A_t} h_{fg} \right) \right] + T_{i_{\max}-1,0}^n \quad (3.84)$$

### 3.5.5 ค่าความชื้นและอุณหภูมิเฉลี่ย

ค่าความชื้นและอุณหภูมิเฉลี่ยของเมล็ดข้าวเปลือกคำนวณโดยใช้สมการอินทิกรัล ดังนี้

$$\bar{M}(t) = \frac{\pi r}{V} \int_0^L \int_0^R f(r, z) dr dz \quad (3.85)$$

$$\bar{T}(t) = \frac{\pi r}{V} \int_0^L \int_0^R f(r, z) dr dz \quad (3.86)$$

เมื่อ  $V$  คือ ปริมาตรของเมล็ดข้าวเปลือก ( $m^3$ )

กฎเศษหนึ่งส่วนสามของซิมป์สันแบบหลายช่วงถูกใช้ในการประมาณค่าอินทิกรัลทั้งการหาค่าความชื้นและอุณหภูมิเฉลี่ยของเมล็ดข้าวเปลือก ต้องพิจารณาโดยประมาณค่าความชื้นหรืออุณหภูมิที่จุดต่อต่างๆ ในแนวแกนในแกนหนึ่งเป็นขั้นตอนแรก ต่อมาจึงประมาณค่าความชื้นหรืออุณหภูมิในแนวแกน



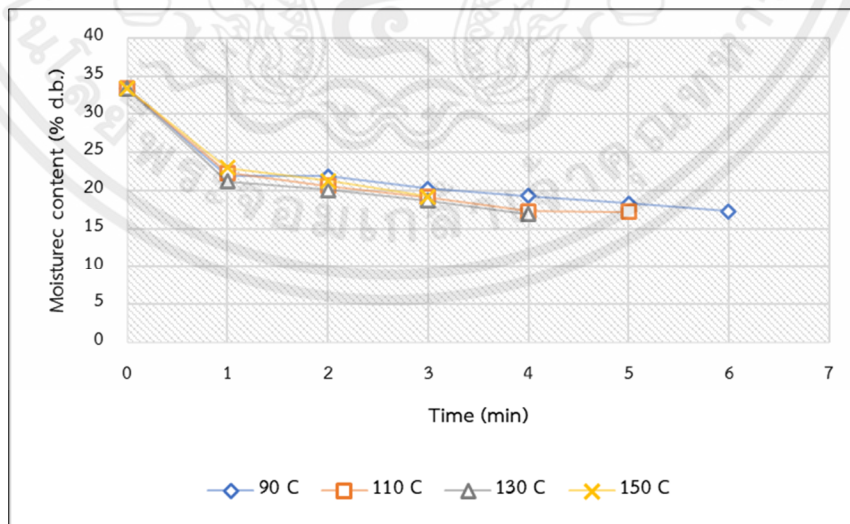
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลและวิจารณ์ผล

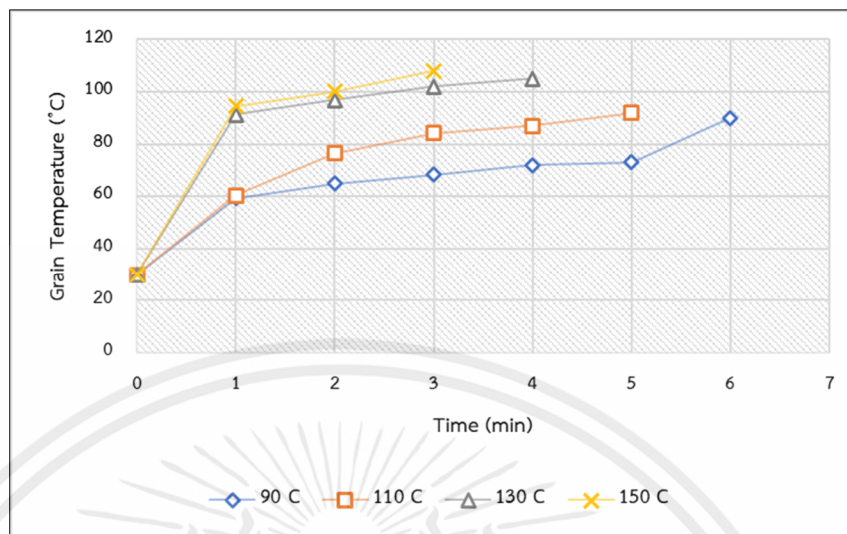
#### 4.1 จลนพลศาสตร์การอบแห้ง

จลนพลศาสตร์การอบแห้ง (Drying kinetics) คือการศึกษาอัตราการอบแห้งจากข้อมูลการอบแห้ง โดยการพลอตกราฟการอบแห้ง (Drying curve) หรือ กราฟอัตราการอบแห้ง (Drying rate curve) จลนพลศาสตร์ของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดซ์เบดที่อุณหภูมิต่างๆ พัฒนาขึ้นเพื่อทำนายการเปลี่ยนแปลงของความชื้นในระหว่างการอบแห้งและระยะเวลาในการอบแห้ง เมื่อใช้สภาวะในการอบแห้งต่างๆ โดยได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วนความชื้นของข้าวเปลือกในระหว่างการอบแห้งที่ระดับอุณหภูมิ 4 ระดับ คือ 90 110 130 และ 150°C จากความชื้นเริ่มต้น ที่ 33.33% (d.b.) เพื่อให้ข้าวเปลือกมีความชื้นสุดท้ายที่ 20% (d.b.) จากกราฟที่แสดงพบว่า อุณหภูมิการอบแห้งสูงจะทำให้ความชื้นในเมล็ดข้าวลดลงได้อย่างรวดเร็วกว่าการอบที่อุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้น้ำที่อยู่ในเมล็ดข้าวระเหยออกได้ดีกว่าการอบที่อุณหภูมิต่ำ จากการทดลองพบว่า อัตราส่วนของความชื้นข้าวเปลือกมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการอบแห้งที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ โดยมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงแบบสมการเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบลดลงตามเวลาที่ระยะการทดลองและอุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการอบแห้งกับความชื้นในเมล็ดข้าวเปลือกจากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



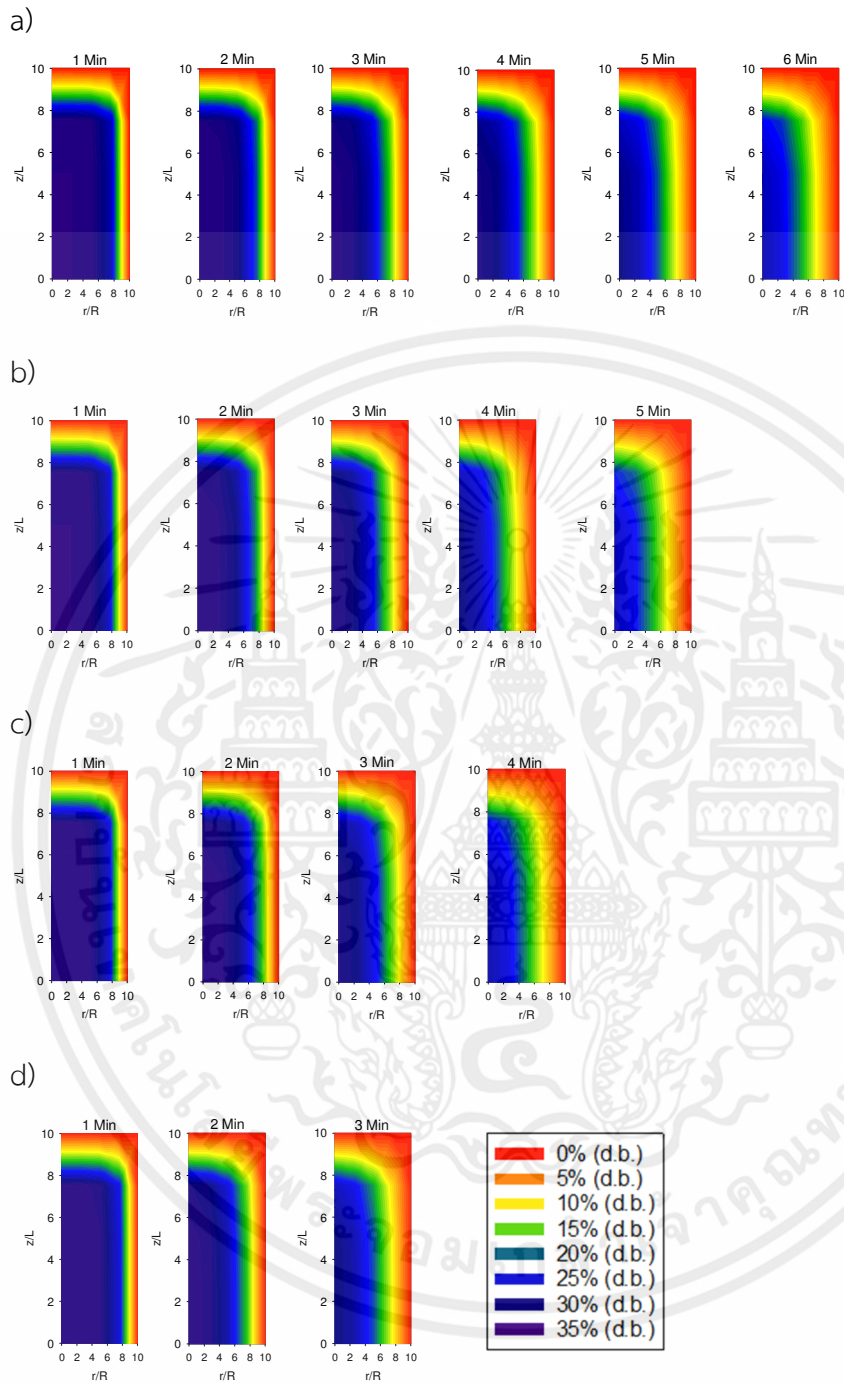
รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการอบแห้งกับอุณหภูมิในเมล็ดข้าวเปลือกจากการทดลองโดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน

#### 4.2 ผลการเปรียบเทียบจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งกับผลการจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือก

ข้าวเปลือกสำหรับอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไชเบตมีความชื้นเริ่มต้นอยู่ที่ 33.33% (d.b.) โดยอุณหภูมิที่ใช้ในห้องอบแห้งคือ 90 110 130 และ 150°C ความเร็วลม 15 m/s และความสูงของเบดเท่ากับ 10 cm ทำการอบแห้งให้ได้ค่าความชื้นสุดท้ายอยู่ที่ 20% (d.b.) และเพื่อหาค่าความชื้นและอุณหภูมิเฉลี่ยจึงใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งเป็นแบบเบดหนา เพื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แล้วจึงหาค่าความชื้นและอุณหภูมิเฉลี่ยของเมล็ดข้าวเปลือกได้จาก Simpson's Rule เนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ แล้วกฎเศษหนึ่งส่วนสามของซิมป์สันมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ซึ่งเป็นการประมาณค่าเชิงตัวเลข วิธีนี้เป็นวิธีการหาค่าเฉลี่ยที่มีความแม่นยำสูง [35] จากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกที่มีการลดลงอย่างต่อเนื่องจากการอบแห้งเพราะมีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นระหว่างลมร้อนกับเมล็ดข้าวเปลือก หากได้รับความร้อนมากเกินไปให้ค่าความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกต่ำลงเรื่อยๆ จนทำให้เกิดการแตกหักของเมล็ดข้าว เมื่ออุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มขึ้น

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล ( $D_{eff}$ ) ก็ที่สูงขึ้นไปด้วย และทำให้ความชื้นภายในเมล็ดมีการแพร่กระจายอย่างรวดเร็ว [31] ดังนั้นจะทราบได้ว่าเมื่อใช้อุณหภูมิสูงในการอบแห้งก็จะลดระยะเวลาในการอบแห้งให้สั้นลงไปด้วย แล้วจึงนำความชื้นที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาเปรียบเทียบกับความชื้นจากการทดลอง จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) ของการอบแห้งที่อุณหภูมิ 90 110 130 และ 150°C ดังนี้ 0.9522 0.8622 0.8561 และ 0.9108 ตามลำดับดังรูปที่ 4.5 ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ได้จะอยู่ค่าที่ยอมรับได้หรือไม่ขึ้นอยู่กับผลที่ได้จากแบบจำลองและการทดลองมีความใกล้เคียงกันมากน้อยแค่ไหน ยิ่งใกล้เคียงกันมากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจก็ยิ่งเข้าใกล้หนึ่งมาก โดยความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 4.78% 13.78% 14.39% และ 8.92% ตามลำดับ ซึ่งอาจเกิดจากสภาพแวดล้อมภายนอกหรืออุณหภูมิขณะเข้าตู้อบไม่คงที่ขณะอบอาจจะเป็นด้วยมีไฟฟ้าตกหรือดับจึงส่งผลกระทบต่อความคลาดเคลื่อนของความชื้นโดยหลักการแล้วสามารถอธิบายได้ว่ายิ่งค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเข้าใกล้หนึ่งมากเท่าไรย่อมบ่งบอกถึงความความสัมพันธ์ที่สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าทั้งสองที่ต้องการเปรียบเทียบซึ่งในกรณีนี้ก็คือความสัมพันธ์ของความชื้นจากการทดลองกับความชื้นจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [36] ซึ่งโดยเฉลี่ยแล้วอยู่ที่ประมาณ 0.9 เป็นค่าที่สามารถยอมรับได้

ค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแสดงดังรูปที่ 4.4 พบว่าอุณหภูมิที่ผิวมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับเวลาในการอบแห้ง เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนระหว่างลมร้อนกับเมล็ดข้าว เมื่ออุณหภูมิการอบแห้งสูงขึ้นอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกก็จะสูงตามขึ้นด้วย เมื่อนำค่าอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาเปรียบเทียบกับกับค่าอุณหภูมิที่ได้จากการทดลอง จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) ของการอบแห้งที่อุณหภูมิ 90 110 130 และ 150°C คือ 0.9517 0.9349 0.8738 และ 0.9034 ตามลำดับดังรูปที่ 4.6 ซึ่งความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอยู่ที่ 4.83% 6.51% 12.62% และ 9.66% ตามลำดับ อาจเกิดขึ้นจากสภาพแวดล้อมขณะอบแห้งมีอุณหภูมิภายนอกไม่คงที่ แต่โดยเฉลี่ยภาพรวมแล้วอยู่ที่ประมาณ 0.9 ซึ่งเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้



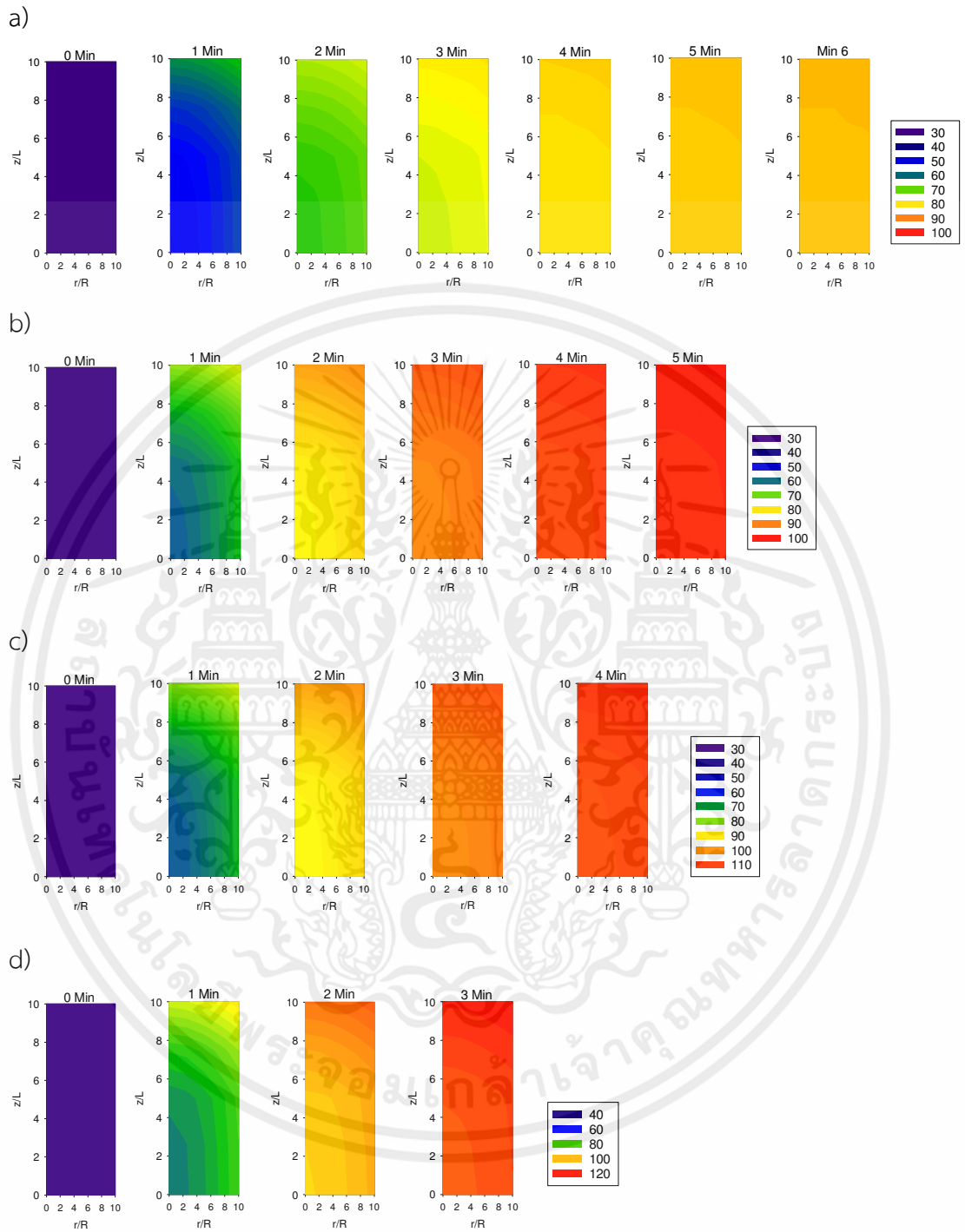
รูปที่ 4.3 ความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกที่อุณหภูมิและการอบแห้งที่เวลาต่างๆ

(a) อบที่อุณหภูมิ 90°C (b) อบที่อุณหภูมิ 110°C (c) อบที่อุณหภูมิ 130°C (d) อบที่อุณหภูมิ 150°C

โดยที่  $z/L$  คือ การถ่ายเทความชื้นภายในเมล็ดที่เกิดขึ้นตามแนวแกนยาว

$r/R$  คือ การถ่ายเทความชื้นภายในเมล็ดที่เกิดขึ้นตามแนวรัศมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

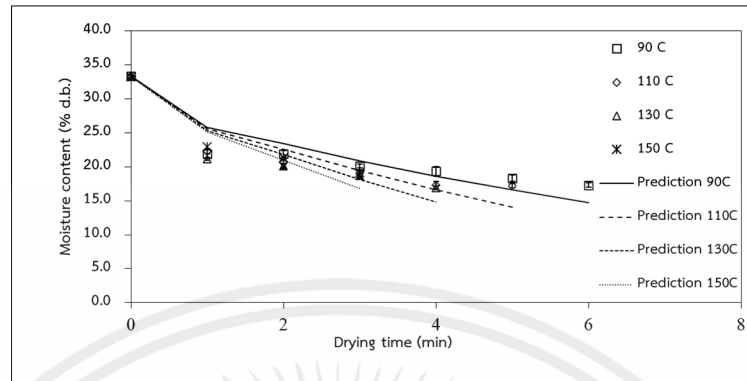


รูปที่ 4.4 อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกที่อุณหภูมิและการอบแห้งที่เวลาต่างๆ

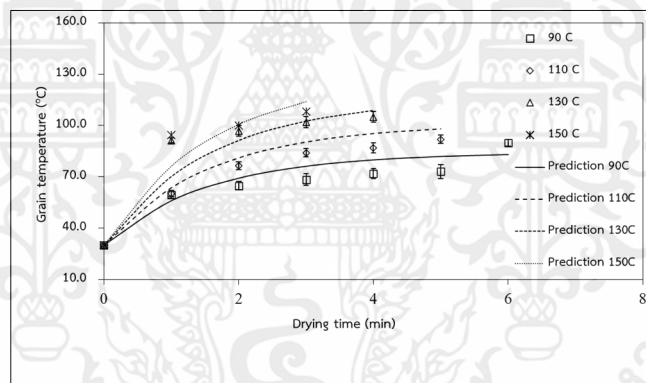
(a) อบที่อุณหภูมิ 90°C (b) อบที่อุณหภูมิ 110°C (c) อบที่อุณหภูมิ 130°C (d) อบที่อุณหภูมิ 150°C

โดยที่  $z/L$  คือ การถ่ายเทความร้อนภายในเมล็ดที่เกิดขึ้นตามแนวแกนยาว

$r/R$  คือ การถ่ายเทความร้อนภายในเมล็ดที่เกิดขึ้นตามแนวรัศมี



รูปที่ 4.5 ผลการเปรียบเทียบความชื้นภายในเมล็ดของจลนพลศาสตร์การอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือก กับผลการจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือก



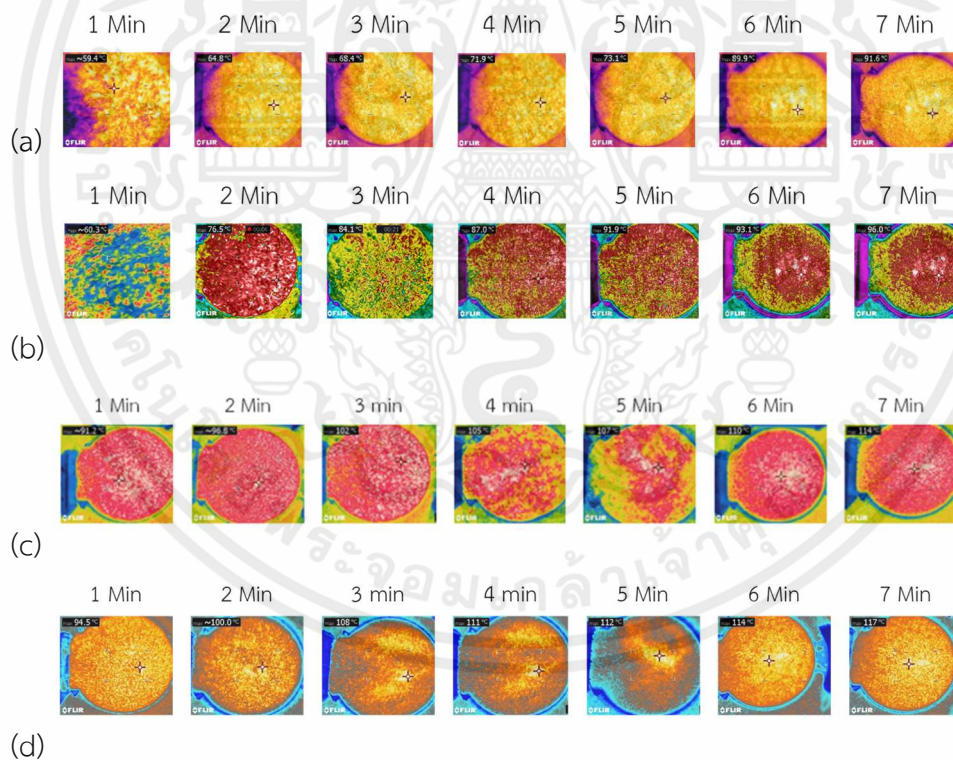
รูปที่ 4.6 ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิเมล็ดของจลนพลศาสตร์การอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือกกับ ผลการจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือก

#### 4.3 ผลการเปรียบเทียบภาพถ่ายความร้อนจากกล้องถ่ายภาพความร้อนของการอบแห้งกับ ผลการจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือก

เนื่องจากการพัฒนาแบบจำลองเพื่อทำนายค่าของการอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือก จึงต้องทำการตรวจสอบค่าที่ได้จากแบบจำลองเพื่อความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น โดยปกติทั่วไปแล้วจะวัดอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกโดยใช้กระดิกที่ติดเทอร์โมคัปเปิลไว้ซึ่งจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.816 0.812 0.769 และ 0.662 [37] แต่ค่อนข้างมีความยุ่งยากและใช้เวลาในการวัด จึงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำกล้องถ่ายภาพความร้อนมาใช้เพื่อยืนยันว่าอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกที่ได้จากแบบจำลองเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกที่ได้จากการทดลองมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่เหมาะสมและโดยสามารถยอมรับได้ จากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่เข้าใกล้หนึ่งมากกว่าการวัดแบบเดิมที่ใช้กระตักจึงยืนยันได้ว่าการใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนในการวัดอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกให้ผลการทดลองที่ดีกว่าแบบเดิม จากที่กล่าวไว้ข้างต้นในหัวข้อ 4.3 ซึ่งค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ได้จากกล้องถ่ายภาพความร้อนแสดงดังรูปที่ 4.7 โดยพบว่าอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับเวลาในการอบแห้ง เช่นเดียวกับรูปที่ 4.4 ที่แสดงถึงค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ แต่จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกจะสูงขึ้นตามเวลาและอุณหภูมิในการอบแห้งที่สูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกที่ได้จากกล้องถ่ายภาพความร้อนได้มีการนำไปใช้เทียบกับอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกที่ได้จากแบบจำลอง จะได้อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกหลังอบแห้งเพื่อใช้ในสมการสมดุลพลังงานในแบบจำลอง โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนขึ้นประสิทธิผลมีค่า  $4.56 \times 10^{-15}$  -  $4.79 \times 10^{-9}$



**รูปที่ 4.7** อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกที่การอบแห้งที่เวลาต่างๆ จากกล้องถ่ายภาพความร้อน  
 (a) อบที่อุณหภูมิ 90°C (b) อบที่อุณหภูมิ 110°C (c) อบที่อุณหภูมิ 130°C (d) อบที่อุณหภูมิ 150°C

## บทที่ 5

### สรุปผลและเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

จากการศึกษาการทดลองและการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือกเพื่อหาค่าความชื้น ณ อุณหภูมิ ที่ 90 110 130 และ 150°C ร่วมกับกล้องถ่ายภาพความร้อนเพื่อนำค่าที่ได้จากแต่ละอุณหภูมิมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบหนา โดยการใช้ค่าอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกที่ได้จากกล้องถ่ายภาพความร้อนมาใช้กับสมการสมดุลพลังงานในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้ข้าวเปลือกพันธุ์สังข์หยดจำนวน 1.7 kg ที่ความสูง 10 cm ในการทดลองแต่ละครั้ง เมล็ดข้าวเปลือกมีความชื้นเริ่มต้น ที่ 33.33% (d.b.) และอบแห้งที่อุณหภูมิ 90 110 130 และ 150°C ได้นำกล้อง (Thermal imaging camera รุ่น FLIR 60) มาประยุกต์ใช้ในงานเพื่อหาค่าความร้อน ณ จุดต่างๆในการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด เพื่อพัฒนาและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม MATLAB สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

**5.1.1** ค่าผลการเปรียบเทียบความชื้นภายในเมล็ดของจลนพลศาสตร์การอบแห้งที่ได้จากผลแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) อยู่ในช่วง 0.8561 – 0.9522

**5.1.2** ค่าผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในเมล็ดของจลนพลศาสตร์การอบแห้งที่ได้จากผลแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) อยู่ในช่วง 0.8738 – 0.9517

**5.1.3** ค่าคงที่อาร์เรเนียสและค่าพลังงานกระตุ้นที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองและผลจากอุณหภูมิของ 90 110 130 และ 150°C ได้นำกล้อง (Thermal imaging camera รุ่น FLIR 60) มาประยุกต์ใช้ในงานเพื่อหาค่าความร้อน พบว่าค่าคงที่

อาร์เรเนียสและค่าพลังงานกระตุ้นมีค่าเท่ากับ  $5.15141 \text{ m}^2 / \text{s}$  และ  $25936.4 \text{ J/mol}$  ตามลำดับ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในกระบวนการการถ่ายภาพความร้อน ควรปรับการตั้งค่าแถบสีและอุณหภูมิพื้นฐาน เช่น กำหนดค่าพื้นฐาน ที่  $40^\circ\text{C}$  เพื่อถ่ายภาพความร้อนออกมาได้ชัดเจนกว่าการให้กล้องจับอุณหภูมิเอง เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิ

5.2.2 การเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การตัดสิน สามารถเพิ่มได้จากการตรวจสอบเปรียบเทียบค่าที่ได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการทดลองเพื่อให้มีความสัมพันธ์กัน และแก้ไขเพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ถูกต้อง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] สารบัญสุดยอดข้าวไทย. 2560  
แหล่งที่มา : <https://www.toyota.co.th/rrc.pdf>
- [2] มาตรฐานสินค้าเกษตร 4004 – 2560. ข้าวไทย.  
แหล่งที่มา : [https://www.acfs.go.th/standard/download/Thai-Rice\\_60.pdf](https://www.acfs.go.th/standard/download/Thai-Rice_60.pdf)
- [3] สมเกียรติ ประชญาวารกร. การอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคฟลูอิดไอเซชัน. วิทยานิพนธ์  
วิทยาศาสตรบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [4] ประทีป ตุ่มทองและมงคล સાແກ້ວ. เครื่องอบแห้งด้วยลมร้อน 2559. วิจัยเพื่อประเทศไทย  
4.0 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์
- [5] พิศาล สีนวล. 2560. การใช้โปรแกรมทางคณิตศาสตร์ สำหรับแก้ปัญหาจัดสรรทรัพยากร  
เพื่อลดเวลาในการวาง แผนการผลิต. การประชุมวิชาการด้านการพัฒนาการ ดำเนินงานทาง  
อุตสาหกรรม แห่งชาติครั้งที่ 8 (9พฤษภาคม 2560).
- [6] M. Younis, D. Abdelkarim and A.Z. El-Abdein, “Kinetics and mathematical  
modeling of infrared thin-layer drying of garlic slices,” Saudi Journal of  
Biological Sciences, vol. 25, no. 2, pp. 332-338, Feb. 2018.
- [7] การออกแบบระบบพลังงานทดแทน / เทคโนโลยีการอบแห้ง (DRYING TECHNOLOGY).  
แหล่งที่มา : <http://www.tdetlab.com/teaching/13/lesson/32/show>
- [8] คู่มือการใช้งาน : กล้องถ่ายภาพความร้อน. Instruction Manual : Thermal Camera.  
แหล่งที่มา : [https://www.legatool.com/pub/media/wysiwyg/Manual-thai/FLIR/TG267\\_ legatool.pdf](https://www.legatool.com/pub/media/wysiwyg/Manual-thai/FLIR/TG267_ legatool.pdf)
- [9] กล้องส่องความร้อน (Thermal Viewer)  
แหล่งที่มา : <https://www.chonburi.spu.ac.th/it/admin/knowledge/.pdf>
- [10] THERMOGRAPHY กับงานซ่อมบำรุง  
แหล่งที่มา : <https://www.chonburi.spu.ac.th/it/admin/knowledge/.pdf>

- [11] กรมการข้าว. 2550. ข้าว : โภชนาการสุขภาพ. พิมพ์ครั้งที่ 1. โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย. กรุงเทพฯ.
- [12] กัญญา เชื้อพันธ์. 2545. คุณภาพข้าวทางกายภาพ, คุณภาพข้าวและการตรวจสอบข้าวปนในข้าวหอมมะลิไทย. กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพฯ
- [13] Sungkasem G. “ Efficiency Increasing for Corn Drying from Heater Preheat for Fluidized bed using Heat” pump. In: The 20th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand; 2006 Oct 18-20; Suranaree University of Technology. Nakhon Ratchasima. p.1315-61. (In Thai)
- [14] google,/ “Type Fluidized Bed Dryer,” [Online]. Available: <http://th.trustarpack.com>. [Accessed: 15 Apr 2565].
- [15] จิรเมธา สังข์เกษม. วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต ที่ 9 ฉบับที่ 3 กันยายน-ธันวาคม 2562. การศึกษาการ กระจายตัวของอนุภาคน้ำในฟลูอิดไคซ์เบดที่ใช้อบแห้ง เมล็ดข้าวโพดโดยใช้พลังงานจากฮีตปั๊ม สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
- [16] อีลีหัยะ สนิโซ และ ลุตฟี สือนิ. วิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร/เทคโนโลยีพลังงานทดแทน. การพัฒนาระบบผลิตข้าวหนึ่งด้วยเทคนิคฟลูอิดไคซ์เบด ร่วมกับรังสีอินฟราเรด. ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณบำรุงการศึกษาประจำปี 2563 มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา
- [17] MagdalenaJdzierowska , RobertKoprowski “The use of infrared thermal imaging in tonometry with a Scheimpflug camera” Journal of Thermal Biology, February 2021, 102823
- [18] ดร.ยุทธพงศ์ ทัพผดุง, บทความด้านวิศวกรรมไฟฟ้า, กรุงเทพฯ: 2555
- [19] A.Szajewska. “ Development of the Thermal Imaging Camera (TIC)”. TechnologyProcedia \_Engineering . 2017, Pages 1067-1072
- [20] ดร.ยุทธพงศ์ ทัพผดุง,/ “บทความด้านวิศวกรรมไฟฟ้า,” [Online]. Available: <https://www.pea.co.th/esd/electrical-engineering-articles>. [ Accessed: 26 มิถุนายน 2555].

- [21] PrasonKumar , Rajesh KumarRajnish. “ **Applications of thermal imaging with infrared thermography in Orthopaedics**”. Journal of Clinical Orthopaedics and Trauma. January 2022, 101722
- [22] ดร.ยุทธพงศ์ ทัพผดุง,/ “**บทความด้านวิศวกรรมไฟฟ้า,**” [Online]. Available: <https://www.pea.co.th/esd/electrical-engineering-articles>. [Accessed: 26 มิถุนายน 2555].
- [23] AdityaPutranto.” **Mathematical modeling of intermittent and convective drying of rice and coffee using the reaction engineering approach (REA).**” Journal of \_\_\_Food \_\_\_Engineering vol\_ 105, Issue 4, Auges 2011, Pages 638-646
- [24] KevinHowell. MariaSoroko “**Thermal camera performance and image analysis repeatability in equine thermography.**” Infrared Physics & Technology vol \_\_\_\_\_110, November 2020, 103447
- [25] Leidy V.Estrada-Pérez. “ **Thermal imaging of rice grains and flours to design convolucional systems to ensure quality and safety.**” Food Control vol 121, March 2021, 107572
- [26] NittayaJunka. “**Drying and mathematical modelling for the decelerated rancidity of treated jasmine brown rice using different drying media.**” Journal of Food Engineering vol 289, January 2021, 110165
- [27] OktayHacihafizoğlu. “ **Mathematical modelling of drying of thin layer rough rice Food \_\_\_and Bioproducts Processing**” vol\_\_\_86, Issue 4, December 2008, Pages 268-275
- [28] ChunWang Yield. “**prediction model of rice and wheat crops based on ecological distance algorithm Environmental**” Technology & Innovation vol 20, November 2020, 101132
- [29] YongYan. “**Investigations into the drying kinetics of biomass in a fluidized bed dryer using electrostatic sensing and digital imaging techniques**” Fuel vol 30, November 201

- [30] Mohammad,MohseniBiomass. “drying in a vibrating fluidized bed dryer with a Lagrangian- Eulerian approach International.”\_Journal of Thermal SciencesVolume \_\_\_\_138, April 2019, Pages 219-234
- [31] ChongdianSi. “Experimental and numerical simulation of drying of lignite in a microwave- assisted fluidized bed.” Fuel vol 242, 15 April 2019, Pages 149-159
- [32] FrancescoSapinoAn. “ensemble experiment of mathematical programming models to assess socio-economic effects of agricultural water pricing reform in the Piedmont Region, Italy.” Journal of Environmental Management vol 267, 1 August 2020, 110645
- [33] Steven A.Niederer . “A short history of the development of mathematical models of cardiac mechanics.” Journal of Molecular and Cellular Cardiology vol 127, February 2019, Pages 11-19
- [34] RobertoConfalonieri. “A taxonomy-based approach to shed light on the babel of mathematical models for rice simulation” Environmental Modelling & Software vol, November 2016, Pages 332-341
- [35] รศ.ดร.ชัยวัฒน์ รัตน์มีชัยสกุล,/ “การจำลองการอบแห้งสำหรับเมล็ดพืชและวัสดุทางชีวภาพ ,”/กรุงเทพฯ : (ชื่อสำนักพิมพ์),2564.
- [36] Google, “ปัญหาและอุปสรรคที่ทำให้เกิดความผิดพลาดในการจัดทำประมาณการและราคากลาง,” [Online]. Available: <http://dspace.spu.ac.th/bitstream/>. [Accessed: May. 23, 2022]
- [37] มงคล ทองขาว และคณะ,/“แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดซ์เบดสำหรับทำนaylorยับยั้งเชื้อราของข้าวเปลือก,”/วิทยานิพนธ์ วศ.บ. (เครื่องกล),สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์, ชุมพร, 2561.



**ภาคผนวก**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.  
ผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 เมล็ดข้าวเปลือกที่กระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 90 °C

ระยะเวลาในการอบแห้ง (min)	ความชื้น % ( d.b. )
0	33.33
1	59.40
2	64.80
3	68.40
4	71.90
5	73.10
6	89.90
7	91.60

ตารางที่ ก.2 เมล็ดข้าวเปลือกที่กระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 °C

ระยะเวลาในการอบแห้ง (min)	ความชื้น % ( d.b. )
0	33.33
1	60.33
2	76.50
3	84.10
4	87.00
5	91.90
6	93.10
7	96.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.3 เมล็ดข้าวเปลือกที่กระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 130 °C

ระยะเวลาในการอบแห้ง (min)	ความชื้น % ( d.b. )
0	33.33
1	65.30
2	74.20
3	83.10
4	87.30
5	89.70
6	91.90
7	101.00

ตารางที่ ก.4 เมล็ดข้าวเปลือกที่กระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 150 °C

ระยะเวลาในการอบแห้ง (min)	ความชื้น % ( d.b. )
0	33.33
1	67.20
2	76.90
3	89.30
4	91.90
5	97.60
6	105.00
7	109.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.5 ค่าความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกที่กระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 90 °C

ระยะเวลาในการอบแห้ง (min)	ความชื้น % ( d.b. )
0	30.00
1	21.93
2	21.93
3	20.15
4	19.33
5	18.33
6	17.33
7	16.33

ตารางที่ ก.6 ค่าความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกที่กระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 °C

ระยะเวลาในการอบแห้ง (min)	ความชื้น % ( d.b. )
0	30.00
1	22.32
2	20.56
3	19.05
4	17.27
5	17.22
6	16.51
7	16.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.7 ค่าความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกที่กระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 130 °C

ระยะเวลาในการอบแห้ง (min)	ความชื้น % ( d.b. )
0	30.00
1	21.19
2	20.11
3	18.69
4	16.69
5	16.88
6	14.60
7	14.20

ตารางที่ ก.8 ค่าความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกที่กระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 150 °C

ระยะเวลาในการอบแห้ง (min)	ความชื้น % ( d.b. )
0	30.00
1	22.96
2	21.32
3	19.21
4	18.5
5	17.00
6	14.25
7	12.36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาเมล็ดข้าวเปลือกเป็นทรงกระบอก

สมการหลักในการควบคุมแบบจำลองการอบแห้ง ตามกฎของฟิคซ์ เขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \left[ \frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial M}{\partial r} + \frac{\partial^2 M}{\partial z^2} \right]$$

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล เขียนได้ดังนี้

$$D_{eff} = D_0 * \exp\left(\frac{-E_a}{R_g T}\right)$$

สภาวะเริ่มต้นของแบบจำลอง

$$\begin{aligned} 0 \leq r \leq R, & \quad M(r) = M_{in} \\ 0 \leq z \leq L, & \quad M(z) = M_{in} \end{aligned}$$

สภาวะขอบเขตของแบบจำลอง

$$r=0 \quad 0 \leq z \leq L, \quad \frac{\partial M}{\partial r} = 0$$

$$z=0 \quad 0 \leq r \leq R, \quad \frac{\partial M}{\partial z} = 0$$

$$r=R \quad 0 \leq z \leq L, \quad -D_{eff} \frac{\partial M}{\partial r} \Big|_{r=R} = h_m (M_s - M_e)$$

$$z=L \quad 0 \leq r \leq R, \quad -D_{eff} \frac{\partial M}{\partial z} \Big|_{z=L} = h_m (M_s - M_e)$$

หาค่าการเปลี่ยนแปลงความชื้นด้วยระเบียบวิธีแบบชัดแจ้ง ดังสมการ

$$\text{เมื่อ} \quad \frac{\partial M}{\partial t} = \frac{M_{i,j}^{n+1} - M_{i,j}^n}{\Delta t}$$

$$\frac{\partial M}{\partial r} = \frac{M_{i+1,j}^n - M_{i-1,j}^n}{2\Delta r}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} = \frac{M_{i-1,j}^n - 2M_{i,j}^n + M_{i+1,j}^n}{(\Delta r)^2}$$

$$\frac{\partial^2 M}{\partial z^2} = \frac{M_{i,j-1}^n - 2M_{i,j}^n + M_{i,j+1}^n}{(\Delta z)^2}$$

จะได้

$$\frac{M_{i,j}^{n+1} - M_{i,j}^n}{\Delta t} = D_{eff} \left[ \frac{M_{i-1,j}^n - 2M_{i,j}^n + M_{i+1,j}^n}{(\Delta r)^2} + \frac{1}{r} \frac{M_{i+1,j}^n - M_{i-1,j}^n}{2\Delta r} + \frac{M_{i,j-1}^n - 2M_{i,j}^n + M_{i,j+1}^n}{(\Delta z)^2} \right]$$

$$\frac{M_{i,j}^{n+1} - M_{i,j}^n}{\Delta t} = D_{eff} \left[ \frac{M_{i-1,j}^n - 2M_{i,j}^n + M_{i+1,j}^n}{(\Delta r)^2} + \frac{1}{r} \frac{\Delta r}{\Delta r} \frac{M_{i+1,j}^n - M_{i-1,j}^n}{2\Delta r} + \frac{M_{i,j-1}^n - 2M_{i,j}^n + M_{i,j+1}^n}{(\Delta z)^2} \right]$$

$$M_{i,j}^{n+1} = \left[ \frac{D_{eff} \Delta t}{(\Delta r)^2} (M_{i-1,j}^n - 2M_{i,j}^n + M_{i+1,j}^n) + \frac{D_{eff} \Delta t}{(\Delta r)^2} \frac{\Delta r}{2r} (M_{i+1,j}^n - M_{i-1,j}^n) + \frac{D_{eff} \Delta t}{(\Delta z)^2} (M_{i,j-1}^n - 2M_{i,j}^n + M_{i,j+1}^n) \right] + M_{i,j}^n$$

กำหนดให้

$$F_r = \frac{D_{eff} \Delta t}{(\Delta r)^2}$$

$$F_z = \frac{D_{eff} \Delta t}{(\Delta z)^2}$$

เมื่อ  $F_r$  และ  $F_z$  คือเลขฟูเรียร์

$$M_{i,j}^{n+1} = \left[ F_r (M_{i-1,j}^n - 2M_{i,j}^n + M_{i+1,j}^n) + F_r \frac{\Delta r}{2r} (M_{i+1,j}^n - M_{i-1,j}^n) + F_z (M_{i,j-1}^n - 2M_{i,j}^n + M_{i,j+1}^n) \right] + M_{i,j}^n$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประมาณสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยแปรผันในสภาวะขอบเขต เขียนได้ดังนี้

$$-D_{eff} \left( \frac{M_{i+1,j}^n - M_{i-1,j}^n}{2\Delta r} \right) = h_m (M_s - M_e)$$

$$M_{i+1,j}^n = -\frac{2\Delta r h_m}{D_{eff}} (M_s - M_e) + M_{i-1,j}^n$$

$$-D_{eff} \left( \frac{M_{i,j+1}^n - M_{i,j-1}^n}{2\Delta z} \right) = h_m (M_s - M_e)$$

$$M_{i,j+1}^n = -\frac{2\Delta z h_m}{D_{eff}} (M_s - M_e) + M_{i,j-1}^n$$

กรณีที่ 1 :  $i = 1, 2, 3, \dots, i_{\max-1}$   $j = 1, 2, 3, \dots, j_{\max-1}$

$$M_{i,j}^{n+1} = \left[ F_r (M_{i-1,j}^n - 2M_{i,j}^n + M_{i+1,j}^n) + F_r \frac{\Delta r}{2r} (M_{i+1,j}^n - M_{i-1,j}^n) \right. \\ \left. + F_z (M_{i,j-1}^n - 2M_{i,j}^n + M_{i,j+1}^n) \right] + M_{i,j}^n$$

กรณีที่ 2 :  $i = 0$   $j = 0$

$$M_{0,0}^{n+1} = \left[ F_r (M_{-1,0}^n - 2M_{0,0}^n + M_{1,0}^n) + F_r \frac{\Delta r}{2r} (M_{1,0}^n - M_{-1,0}^n) \right. \\ \left. + F_z (M_{0,-1}^n - 2M_{0,0}^n + M_{0,1}^n) \right] + M_{0,0}^n$$

กำหนดให้  $M_{-1,0}^n = M_{1,0}^n$  และ  $M_{0,-1}^n = M_{0,1}^n$

$$M_{0,0}^{n+1} = \left[ F_r (-2M_{0,0}^n - 2M_{1,0}^n) + F_z (-2M_{0,0}^n - 2M_{0,1}^n) \right] + M_{0,0}^n$$

กรณีที่ 3 :  $i = 0$   $j = 1, 2, 3, \dots, j_{\max-1}$

$$M_{0,j}^{n+1} = \left[ F_r (M_{-1,j}^n - 2M_{0,j}^n + M_{1,j}^n) + F_r \frac{\Delta r}{2r} (M_{1,j}^n - M_{-1,j}^n) \right. \\ \left. + F_z (M_{0,j-1}^n - 2M_{0,j}^n + M_{0,j+1}^n) \right] + M_{0,j}^n$$

กำหนดให้  $M_{-1,j}^n = M_{1,j}^n$

$$M_{0,j}^{n+1} = \left[ F_r (-2M_{0,j}^n - 2M_{1,j}^n) + F_z (M_{0,j-1}^n - 2M_{0,j}^n - 2M_{0,j+1}^n) \right] + M_{0,j}^n$$

กรณีที่ 4 :  $i = 0$   $j = j_{\max}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$M_{0,j_{\max}}^{n+1} = \left[ F_r (M_{-1,j_{\max}}^n - 2M_{0,j_{\max}}^n + M_{1,j_{\max}}^n) + F_r \frac{\Delta r}{2r} (M_{1,j_{\max}}^n - M_{-1,j_{\max}}^n) \right. \\ \left. + F_z (M_{0,j_{\max}-1}^n - 2M_{0,j_{\max}}^n + M_{0,j_{\max}+1}^n) \right] + M_{0,j_{\max}}^n$$

กำหนดให้  $M_{-1,j_{\max}}^n = M_{1,j_{\max}}^n$

$$M_{0,j_{\max}}^{n+1} = \left[ F_r (-2M_{0,j_{\max}}^n + 2M_{1,j_{\max}}^n) + F_z (M_{0,j_{\max}-1}^n - 2M_{0,j_{\max}}^n + M_{0,j_{\max}+1}^n) \right] \\ + M_{0,j_{\max}}^n$$

จากสมการ  $M_{0,j_{\max}+1}^n$  มีค่าเท่ากับ

$$M_{0,j_{\max}+1}^n = -\frac{2\Delta z h_m}{D_{eff}} (M_s - M_e) + M_{0,j_{\max}-1}^n$$

กรณีที่ 5 :  $i = 1, 2, 3, \dots, i_{\max-1}$   $j = j_{\max}$

$$M_{i,j_{\max}}^{n+1} = \left[ F_r (M_{i-1,j_{\max}}^n - 2M_{i,j_{\max}}^n + M_{i+1,j_{\max}}^n) + F_r \frac{\Delta r}{2r} (M_{i+1,j_{\max}}^n - M_{i-1,j_{\max}}^n) \right. \\ \left. + F_z (M_{i,j_{\max}-1}^n - 2M_{i,j_{\max}}^n + M_{i,j_{\max}+1}^n) \right] + M_{i,j_{\max}}^n$$

จากสมการ  $M_{i,j_{\max}+1}^n$  มีค่าเท่ากับ

$$M_{i,j_{\max}+1}^n = -\frac{2\Delta z h_m}{D_{eff}} (M_s - M_e) + M_{i,j_{\max}-1}^n$$

กรณีที่ 6 :  $i = i_{\max}$   $j = j_{\max}$

$$M_{i_{\max},j_{\max}}^{n+1} = \left[ F_r (M_{i_{\max}-1,j_{\max}}^n - 2M_{i_{\max},j_{\max}}^n + M_{i_{\max}+1,j_{\max}}^n) + F_r \frac{\Delta r}{2r} (M_{i_{\max}+1,j_{\max}}^n \right. \\ \left. - M_{i_{\max}-1,j_{\max}}^n) + F_z (M_{i_{\max},j_{\max}-1}^n - 2M_{i_{\max},j_{\max}}^n + M_{i_{\max},j_{\max}+1}^n) \right] + M_{i_{\max},j_{\max}}^n$$

จากสมการ  $M_{i_{\max}+1,j_{\max}}^n$  และ  $M_{i_{\max},j_{\max}+1}^n$  มีค่าเท่ากับ

$$M_{i_{\max}+1,j_{\max}}^n = -\frac{2\Delta r h_m}{D_{eff}} (M_s - M_e) + M_{i_{\max}-1,j_{\max}}^n$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$M_{i_{\max}, j_{\max}+1}^n = -\frac{2\Delta zh_m}{D_{eff}}(M_s - M_e) + M_{i_{\max}, j_{\max}-1}^n$$

กรณีที่ 7 :  $i = i_{\max}$   $j = 1, 2, 3, \dots, j_{\max}-1$

$$M_{i_{\max}, j}^{n+1} = \left[ F_r (M_{i_{\max}-1, j}^n - 2M_{i_{\max}, j}^n + M_{i_{\max}+1, j}^n) + F_r \frac{\Delta r}{2r} (M_{i_{\max}+1, j}^n - M_{i_{\max}-1, j}^n) + F_z (M_{i_{\max}, j-1}^n - 2M_{i_{\max}, j}^n + M_{i_{\max}, j+1}^n) \right] + M_{i_{\max}, j}^n$$

จากสมการ  $M_{i_{\max}+1, j}^n$  มีค่าเท่ากับ

$$M_{i_{\max}+1, j}^n = -\frac{2\Delta rh_m}{D_{eff}}(M_s - M_e) + M_{i_{\max}-1, j}^n$$

กรณีที่ 8 :  $i = i_{\max}$   $j = 0$

$$M_{i_{\max}, 0}^{n+1} = \left[ F_r (M_{i_{\max}-1, 0}^n - 2M_{i_{\max}, 0}^n + M_{i_{\max}+1, 0}^n) + F_r \frac{\Delta r}{2r} (M_{i_{\max}+1, 0}^n - M_{i_{\max}-1, 0}^n) + F_z (M_{i_{\max}, -1}^n - 2M_{i_{\max}, 0}^n + M_{i_{\max}, 1}^n) \right] + M_{i_{\max}, 0}^n$$

กำหนดให้  $M_{i_{\max}, -1}^n = M_{i_{\max}, 1}^n$

$$M_{i_{\max}, 0}^{n+1} = \left[ F_r (M_{i_{\max}-1, 0}^n - 2M_{i_{\max}, 0}^n + M_{i_{\max}+1, 0}^n) + F_r \frac{\Delta r}{2r} (M_{i_{\max}+1, 0}^n - M_{i_{\max}-1, 0}^n) + F_z (-2M_{i_{\max}, 0}^n + 2M_{i_{\max}, 1}^n) \right] + M_{i_{\max}, 0}^n$$

จากสมการ  $M_{i_{\max}+1, 0}^n$  มีค่าเท่ากับ

$$M_{i_{\max}+1, 0}^n = -\frac{2\Delta rh_m}{D_{eff}}(M_s - M_e) + M_{i_{\max}-1, 0}^n$$

กรณีที่ 9 :  $i = 1, 2, 3, \dots, i_{\max}-1$   $j = 0$

$$M_{i, 0}^{n+1} = \left[ F_r (M_{i-1, 0}^n - 2M_{i, 0}^n + M_{i+1, 0}^n) + F_r \frac{\Delta r}{2r} (M_{i+1, 0}^n - M_{i-1, 0}^n) \right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$+F_z \left( -2M_{i,0}^n + 2M_{i,1}^n \right) \Big] + M_{i,0}^n$$

ค่าความชื้นใช้ในการคำนวณค่าเฉลี่ยดังสมการอินทิกรัล

$$\bar{M}(t) = \frac{\pi r}{V} \int_0^L \int_0^R f(r, z) dr dz$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

%Drying modeling-non isothermal for cylindrical materials%
tic;
clc;
clear;

%Input parameter%
counter=0;
R=0.00250;           %equivalent radius of materials, m%
L=0.01060;          %half-height of materials, m%
r=R/2;              %radial distance from center, m%
z=L/2;              %axial distance from center, m%
N=4;                %node number%
dr=r/N;             %radial distance, m%
dz=z/N;             %axial distance, m%
tsim=360;           %drying time, s%
delta_t=0.0005;     %delta of time, s%
t_step=tsim/delta_t;
per_s=1/delta_t;
M_in=0.33;          %initial moisture content, kg/kg dry basis%
m_p=2;              %dry mass of materials, kg%
T_in=30+273;        %initial temperature of materials, K%
RC=0.8;             %recycled air ratio, decimal%
R_gas=8.314;        %universal gas constant, J/mol K%
W_ratio=0.031;      %humidity ratio, kg water/kg dry air%
Tinf_HA=90+273;     %drying temperature, K%

%%%%%%%%%%%%%%      Drying Period      %%%%%%%%%%%%%%%

for k=1:1:50;
    Ta_o_as_d(k)=(74+273)+k;

%Input parameter for drying period%
M00_d=M_in;
M10_d=M_in;
M20_d=M_in;
M30_d=M_in;
M40_d=M_in;
M01_d=M_in;
M11_d=M_in;
M21_d=M_in;
M31_d=M_in;
M41_d=M_in;
M02_d=M_in;
M12_d=M_in;
M22_d=M_in;
M32_d=M_in;
M42_d=M_in;
M03_d=M_in;
M13_d=M_in;
M23_d=M_in;
M33_d=M_in;
M43_d=M_in;
M04_d=M_in;
M14_d=M_in;
M24_d=M_in;
M34_d=M_in;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

M44_d=M_in;
T00_d=T_in;
T10_d=T_in;
T20_d=T_in;
T30_d=T_in;
T40_d=T_in;
T01_d=T_in;
T11_d=T_in;
T21_d=T_in;
T31_d=T_in;
T41_d=T_in;
T02_d=T_in;
T12_d=T_in;
T22_d=T_in;
T32_d=T_in;
T42_d=T_in;
T03_d=T_in;
T13_d=T_in;
T23_d=T_in;
T33_d=T_in;
T43_d=T_in;
T04_d=T_in;
T14_d=T_in;
T24_d=T_in;
T34_d=T_in;
T44_d=T_in;

D0_dm=5.15141*(10^(-6));%Arrhenius factor, m2/s%
Ea_d=25936.4;          %activation energy, J/mol%

Ps=0.61078*(exp(17.2693882*(((Tinf_HA+Ta_o_as_d(k))/2)/(((Tinf_HA+Ta_o_as_d
(k))/2)+237.3)))));%saturation vapor pressure of air, pa%
Pa=101300;          %atmospheric pressure, pa%
RH=1.350/100;      %relative humidity, decimal%
Me=0.0;            %equilibrium moisture content, kg/kg dry basis%

cw=(2.8223*10^3)+(11.828*(((Tinf_HA+Ta_o_as_d(k))/2)))-(3.5043*(10^-2)...
*(((Tinf_HA+Ta_o_as_d(k))/2)^2))+3.601*(10^-
5)*(((Tinf_HA+Ta_o_as_d(k))/2)^3));
%specific heat of water, J/kg K%

c_a=(1.00926*10^3)-(4.0403*(10^-
2)*(((Tinf_HA+Ta_o_as_d(k))/2)))+(6.1759*(10^-4)...
*(((Tinf_HA+Ta_o_as_d(k))/2)^2))-(4.097*(10^-
7)*(((Tinf_HA+Ta_o_as_d(k))/2)^3));
%specific heat of air, J/kg K%

c_v=(1.883*10^3)-(1.6737*(10^-1)*(((Tinf_HA+Ta_o_as_d(k))/2)))+(8.4386*(10^-
4)...
*(((Tinf_HA+Ta_o_as_d(k))/2)^2))-(2.6966*(10^-
7)*(((Tinf_HA+Ta_o_as_d(k))/2)^3));
%specific heat of vapor, J/kg K%

den_air_d=101.325/(0.287*(((Tinf_HA+Ta_o_as_d(k))/2))); %air density,
kg/m3%

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

u_air_d=(1.691*10^-5)+(4.984*(10^-8)*((Tinf_HA+Ta_o_as_d(k))/2))-
(3.187*(10^-11)...
*((((Tinf_HA+Ta_o_as_d(k))/2)^2)))+(1.319*(10^-
14)*(((Tinf_HA+Ta_o_as_d(k))/2)^3));
%air viscosity, kg/m s%

v_HA=2.5; %air velocity, m/s%
Dp=0.2; %drying chamber diameter, m%
m_a=den_air_d*v_HA*(3.14*Dp^2); %mass flow rate of air, kg/s%
Re_HA=(den_air_d*v_HA*Dp)/u_air_d; %Reynolds number%
Dw_air_HA=(-2.775*(10^-6))+((4.479*(10^-
8))*((Tinf_HA+Ta_o_as_d(k))/2))+((1.656*(10^-
10))*(((Tinf_HA+Ta_o_as_d(k))/2)^2));%water vapor diffusivity of air, m2/s%
Sc_HA=u_air_d/(den_air_d*Dw_air_HA);%Schmidt number%
Sh_HA=2+(0.6*(Re_HA^0.5)*(Sc_HA^(1/3)));%Sherwood number%
hm_HA=Sh_HA*Dw_air_HA/Dp; %convective mass transfer coefficient,
m/s%
den_p=(1456+(705*M_in))*1.257; %density of materials, kg/m3%
mp=den_p*3.14*(r^2)*z; %mass of materials, kg%
k_a=(2.425*10^-2)+(7.889*(10^-5)*((Tinf_HA+Ta_o_as_d(k))/2))-((1.790*(10^-
8))*(((Tinf_HA+Ta_o_as_d(k))/2)^2))-((8.570*(10^-
12))*(((Tinf_HA+Ta_o_as_d(k))/2)^3));%thermal conductivity of air, W/ m K%
hT_dh=((0.46*(Re_HA^0.5))+((0.00128*Re_HA))*k_a/Dp; %heat transfer
coefficient, W/ m2 K%
At=3.14*r*z; %surface area, m2%
Lv_d=2257; %heat of vaporization, J/kg %

counter=0;
for n=1:1:t_step;
counter=counter+1;
if n==1;
%Initial mass transfer property for drying period%

Deff_dm=D0_dm*(exp(-Ea_d/(R_gas*T_in)));
Fr_dm=(Deff_dm*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dm=(Deff_dm*(delta_t))/(dz^2);
Bn_dr=(-2*dr*hm_HA)/Deff_dm;
Bn_dz=(-2*dz*hm_HA)/Deff_dm;

Deff_dm_00=D0_dm*(exp(-Ea_d/(R_gas*T00_d)));
Fr_dm_00=(Deff_dm_00*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dm_00=(Deff_dm_00*(delta_t))/(dz^2);

Deff_dm_10=D0_dm*(exp(-Ea_d/(R_gas*T10_d)));
Fr_dm_10=(Deff_dm_10*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dm_10=(Deff_dm_10*(delta_t))/(dz^2);

Deff_dm_20=D0_dm*(exp(-Ea_d/(R_gas*T20_d)));
Fr_dm_20=(Deff_dm_20*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dm_20=(Deff_dm_20*(delta_t))/(dz^2);

Deff_dm_30=D0_dm*(exp(-Ea_d/(R_gas*T30_d)));
Fr_dm_30=(Deff_dm_30*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dm_30=(Deff_dm_30*(delta_t))/(dz^2);

Deff_dm_40=D0_dm*(exp(-Ea_d/(R_gas*T40_d)));

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Fr_dm_40=(Deff_dm_40*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dm_40=(Deff_dm_40*(delta_t))/(dz^2);
Bn_dr_40=(-2*dr*hm_HA)/Deff_dm_40;

Deff_dm_01=D0_dm*(exp(-Ea_d/(R_gas*T01_d)));
Fr_dm_01=(Deff_dm_01*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dm_01=(Deff_dm_01*(delta_t))/(dz^2);

Deff_dm_11=D0_dm*(exp(-Ea_d/(R_gas*T11_d)));
Fr_dm_11=(Deff_dm_11*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dm_11=(Deff_dm_11*(delta_t))/(dz^2);

Deff_dm_21=D0_dm*(exp(-Ea_d/(R_gas*T21_d)));
Fr_dm_21=(Deff_dm_21*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dm_21=(Deff_dm_21*(delta_t))/(dz^2);

Deff_dm_31=D0_dm*(exp(-Ea_d/(R_gas*T31_d)));
Fr_dm_31=(Deff_dm_31*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dm_31=(Deff_dm_31*(delta_t))/(dz^2);

Deff_dm_41=D0_dm*(exp(-Ea_d/(R_gas*T41_d)));
Fr_dm_41=(Deff_dm_41*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dm_41=(Deff_dm_41*(delta_t))/(dz^2);
Bn_dr_41=(-2*dr*hm_HA)/Deff_dm_41;

Deff_dm_02=D0_dm*(exp(-Ea_d/(R_gas*T02_d)));
Fr_dm_02=(Deff_dm_02*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dm_02=(Deff_dm_02*(delta_t))/(dz^2);

Deff_dm_12=D0_dm*(exp(-Ea_d/(R_gas*T12_d)));
Fr_dm_12=(Deff_dm_12*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dm_12=(Deff_dm_12*(delta_t))/(dz^2);

Deff_dm_22=D0_dm*(exp(-Ea_d/(R_gas*T22_d)));
Fr_dm_22=(Deff_dm_22*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dm_22=(Deff_dm_22*(delta_t))/(dz^2);

Deff_dm_32=D0_dm*(exp(-Ea_d/(R_gas*T32_d)));
Fr_dm_32=(Deff_dm_32*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dm_32=(Deff_dm_32*(delta_t))/(dz^2);

Deff_dm_42=D0_dm*(exp(-Ea_d/(R_gas*T42_d)));
Fr_dm_42=(Deff_dm_42*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dm_42=(Deff_dm_42*(delta_t))/(dz^2);
Bn_dr_42=(-2*dr*hm_HA)/Deff_dm_42;

Deff_dm_03=D0_dm*(exp(-Ea_d/(R_gas*T03_d)));
Fr_dm_03=(Deff_dm_03*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dm_03=(Deff_dm_03*(delta_t))/(dz^2);

Deff_dm_13=D0_dm*(exp(-Ea_d/(R_gas*T13_d)));
Fr_dm_13=(Deff_dm_13*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dm_13=(Deff_dm_13*(delta_t))/(dz^2);

Deff_dm_23=D0_dm*(exp(-Ea_d/(R_gas*T23_d)));
Fr_dm_23=(Deff_dm_23*(delta_t))/(dr^2);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Fz_dm_23=(Deff_dm_23*(delta_t))/(dz^2);

Deff_dm_33=D0_dm*(exp(-Ea_d/(R_gas*T33_d)));
Fr_dm_33=(Deff_dm_33*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dm_33=(Deff_dm_33*(delta_t))/(dz^2);

Deff_dm_43=D0_dm*(exp(-Ea_d/(R_gas*T43_d)));
Fr_dm_43=(Deff_dm_43*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dm_43=(Deff_dm_43*(delta_t))/(dz^2);
Bn_dr_43=(-2*dr*hm_HA)/Deff_dm_43;

Deff_dm_04=D0_dm*(exp(-Ea_d/(R_gas*T04_d)));
Fr_dm_04=(Deff_dm_04*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dm_04=(Deff_dm_04*(delta_t))/(dz^2);
Bn_dz_04=(-2*dz*hm_HA)/Deff_dm_04;

Deff_dm_14=D0_dm*(exp(-Ea_d/(R_gas*T14_d)));
Fr_dm_14=(Deff_dm_14*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dm_14=(Deff_dm_14*(delta_t))/(dz^2);
Bn_dz_14=(-2*dz*hm_HA)/Deff_dm_14;

Deff_dm_24=D0_dm*(exp(-Ea_d/(R_gas*T24_d)));
Fr_dm_24=(Deff_dm_24*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dm_24=(Deff_dm_24*(delta_t))/(dz^2);
Bn_dz_24=(-2*dz*hm_HA)/Deff_dm_24;

Deff_dm_34=D0_dm*(exp(-Ea_d/(R_gas*T34_d)));
Fr_dm_34=(Deff_dm_34*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dm_34=(Deff_dm_34*(delta_t))/(dz^2);
Bn_dz_34=(-2*dz*hm_HA)/Deff_dm_34;

Deff_dm_44=D0_dm*(exp(-Ea_d/(R_gas*T44_d)));
Fr_dm_44=(Deff_dm_44*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dm_44=(Deff_dm_44*(delta_t))/(dz^2);
Bn_dr_44=(-2*dr*hm_HA)/Deff_dm_44;
Bn_dz_44=(-2*dz*hm_HA)/Deff_dm_44;

%Initial heat transfer property for drying period %

k_p_d=(0.0863+(0.00134*(M_in/(1+M_in))));
den_p_d=(1456+(705*M_in))*1.257;
cp_p_d=(1.11*(10^3))+44.8*(M_in/(1+M_in));
lfa_dh(n)=(k_p_d(n))/(den_p_d(n)*cp_p_d(n));
Fr_dh=(lfa_dh*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dh=(lfa_dh*(delta_t))/(dz^2);

k_p_d_00=(0.0863+(0.00134*(M00_d/(1+M00_d))));
den_p_d_00=(1456+(705*M00_d))*1.257;
cp_p_d_00=(1.11*(10^3))+44.8*(M00_d/(1+M00_d));
lfa_dh_00(n)=(k_p_d_00(n))/(den_p_d_00(n)*cp_p_d_00(n));
Fr_dh_00=(lfa_dh_00*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dh_00=(lfa_dh_00*(delta_t))/(dz^2);

k_p_d_01=(0.0863+(0.00134*(M01_d/(1+M01_d))));
den_p_d_01=(1456+(705*M01_d))*1.257;
cp_p_d_01=(1.11*(10^3))+44.8*(M01_d/(1+M01_d));

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
lfa_dh_01(n)=(k_p_d_01(n))/(den_p_d_01(n)*cp_p_d_01(n));
Fr_dh_01=(lfa_dh_01*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dh_01=(lfa_dh_01*(delta_t))/(dz^2);
```

```
k_p_d_11=(0.0863+(0.00134*(M11_d/(1+M11_d))));
den_p_d_11=(1456+(705*M11_d))*1.257;
cp_p_d_11=(1.11*(10^3))+(44.8*(M11_d/(1+M11_d)));
lfa_dh_11(n)=(k_p_d_11(n))/(den_p_d_11(n)*cp_p_d_11(n));
Fr_dh_11=(lfa_dh_11*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dh_11=(lfa_dh_11*(delta_t))/(dz^2);
```

```
k_p_d_10=(0.0863+(0.00134*(M10_d/(1+M10_d))));
den_p_d_10=(1456+(705*M10_d))*1.257;
cp_p_d_10=(1.11*(10^3))+(44.8*(M10_d/(1+M10_d)));
lfa_dh_10(n)=(k_p_d_10(n))/(den_p_d_10(n)*cp_p_d_10(n));
Fr_dh_10=(lfa_dh_10*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dh_10=(lfa_dh_10*(delta_t))/(dz^2);
```

```
k_p_d_02=(0.0863+(0.00134*(M02_d/(1+M02_d))));
den_p_d_02=(1456+(705*M02_d))*1.257;
cp_p_d_02=(1.11*(10^3))+(44.8*(M02_d/(1+M02_d)));
lfa_dh_02(n)=(k_p_d_02(n))/(den_p_d_02(n)*cp_p_d_02(n));
Fr_dh_02=(lfa_dh_02*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dh_02=(lfa_dh_02*(delta_t))/(dz^2);
```

```
k_p_d_12=(0.0863+(0.00134*(M12_d/(1+M12_d))));
den_p_d_12=(1456+(705*M12_d))*1.257;
cp_p_d_12=(1.11*(10^3))+(44.8*(M12_d/(1+M12_d)));
lfa_dh_12(n)=(k_p_d_12(n))/(den_p_d_12(n)*cp_p_d_12(n));
Fr_dh_12=(lfa_dh_12*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dh_12=(lfa_dh_12*(delta_t))/(dz^2);
```

```
k_p_d_22=(0.0863+(0.00134*(M22_d/(1+M22_d))));
den_p_d_22=(1456+(705*M22_d))*1.257;
cp_p_d_22=(1.11*(10^3))+(44.8*(M22_d/(1+M22_d)));
lfa_dh_22(n)=(k_p_d_22(n))/(den_p_d_22(n)*cp_p_d_22(n));
Fr_dh_22=(lfa_dh_22*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dh_22=(lfa_dh_22*(delta_t))/(dz^2);
```

```
k_p_d_21=(0.0863+(0.00134*(M21_d/(1+M21_d))));
den_p_d_21=(1456+(705*M21_d))*1.257;
cp_p_d_21=(1.11*(10^3))+(44.8*(M21_d/(1+M21_d)));
lfa_dh_21(n)=(k_p_d_21(n))/(den_p_d_21(n)*cp_p_d_21(n));
Fr_dh_21=(lfa_dh_21*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dh_21=(lfa_dh_21*(delta_t))/(dz^2);
```

```
k_p_d_20=(0.0863+(0.00134*(M20_d/(1+M20_d))));
den_p_d_20=(1456+(705*M20_d))*1.257;
cp_p_d_20=(1.11*(10^3))+(44.8*(M20_d/(1+M20_d)));
lfa_dh_20(n)=(k_p_d_20(n))/(den_p_d_20(n)*cp_p_d_20(n));
Fr_dh_20=(lfa_dh_20*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dh_20=(lfa_dh_20*(delta_t))/(dz^2);
```

```
k_p_d_03=(0.0863+(0.00134*(M03_d/(1+M03_d))));
den_p_d_03=(1456+(705*M03_d))*1.257;
cp_p_d_03=(1.11*(10^3))+(44.8*(M03_d/(1+M03_d)));
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
lfa_dh_03(n)=(k_p_d_03(n))/(den_p_d_03(n)*cp_p_d_03(n));
Fr_dh_03=(lfa_dh_03*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dh_03=(lfa_dh_03*(delta_t))/(dz^2);
```

```
k_p_d_13=(0.0863+(0.00134*(M13_d/(1+M13_d))));
den_p_d_13=(1456+(705*M13_d))*1.257;
cp_p_d_13=(1.11*(10^3))+(44.8*(M13_d/(1+M13_d)));
lfa_dh_13(n)=(k_p_d_13(n))/(den_p_d_13(n)*cp_p_d_13(n));
Fr_dh_13=(lfa_dh_13*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dh_13=(lfa_dh_13*(delta_t))/(dz^2);
```

```
k_p_d_23=(0.0863+(0.00134*(M23_d/(1+M23_d))));
den_p_d_23=(1456+(705*M23_d))*1.257;
cp_p_d_23=(1.11*(10^3))+(44.8*(M23_d/(1+M23_d)));
lfa_dh_23(n)=(k_p_d_23(n))/(den_p_d_23(n)*cp_p_d_23(n));
Fr_dh_23=(lfa_dh_23*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dh_23=(lfa_dh_23*(delta_t))/(dz^2);
```

```
k_p_d_33=(0.0863+(0.00134*(M33_d/(1+M33_d))));
den_p_d_33=(1456+(705*M33_d))*1.257;
cp_p_d_33=(1.11*(10^3))+(44.8*(M33_d/(1+M33_d)));
lfa_dh_33(n)=(k_p_d_33(n))/(den_p_d_33(n)*cp_p_d_33(n));
Fr_dh_33=(lfa_dh_33*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dh_33=(lfa_dh_33*(delta_t))/(dz^2);
```

```
k_p_d_32=(0.0863+(0.00134*(M32_d/(1+M32_d))));
den_p_d_32=(1456+(705*M32_d))*1.257;
cp_p_d_32=(1.11*(10^3))+(44.8*(M32_d/(1+M32_d)));
lfa_dh_32(n)=(k_p_d_32(n))/(den_p_d_32(n)*cp_p_d_32(n));
Fr_dh_32=(lfa_dh_32*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dh_32=(lfa_dh_32*(delta_t))/(dz^2);
```

```
k_p_d_31=(0.0863+(0.00134*(M31_d/(1+M31_d))));
den_p_d_31=(1456+(705*M31_d))*1.257;
cp_p_d_31=(1.11*(10^3))+(44.8*(M31_d/(1+M31_d)));
lfa_dh_31(n)=(k_p_d_31(n))/(den_p_d_31(n)*cp_p_d_31(n));
Fr_dh_31=(lfa_dh_31*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dh_31=(lfa_dh_31*(delta_t))/(dz^2);
```

```
k_p_d_30=(0.0863+(0.00134*(M30_d/(1+M30_d))));
den_p_d_30=(1456+(705*M30_d))*1.257;
cp_p_d_30=(1.11*(10^3))+(44.8*(M30_d/(1+M30_d)));
lfa_dh_30(n)=(k_p_d_30(n))/(den_p_d_30(n)*cp_p_d_30(n));
Fr_dh_30=(lfa_dh_30*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dh_30=(lfa_dh_30*(delta_t))/(dz^2);
```

```
k_p_d_04=(0.0863+(0.00134*(M04_d/(1+M04_d))));
den_p_d_04=(1456+(705*M04_d))*1.257;
cp_p_d_04=(1.11*(10^3))+(44.8*(M04_d/(1+M04_d)));
lfa_dh_04(n)=(k_p_d_04(n))/(den_p_d_04(n)*cp_p_d_04(n));
Fr_dh_04=(lfa_dh_04*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dh_04=(lfa_dh_04*(delta_t))/(dz^2);
```

```
k_p_d_14=(0.0863+(0.00134*(M14_d/(1+M14_d))));
den_p_d_14=(1456+(705*M14_d))*1.257;
cp_p_d_14=(1.11*(10^3))+(44.8*(M14_d/(1+M14_d)));
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
lfa_dh_14(n)=(k_p_d_14(n))/(den_p_d_14(n)*cp_p_d_14(n));
Fr_dh_14=(lfa_dh_14*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dh_14=(lfa_dh_14*(delta_t))/(dz^2);
```

```
k_p_d_24=(0.0863+(0.00134*(M24_d/(1+M24_d))));
den_p_d_24=(1456+(705*M24_d))*1.257;
cp_p_d_24=(1.11*(10^3))+44.8*(M24_d/(1+M24_d));
lfa_dh_24(n)=(k_p_d_24(n))/(den_p_d_24(n)*cp_p_d_24(n));
Fr_dh_24=(lfa_dh_24*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dh_24=(lfa_dh_24*(delta_t))/(dz^2);
```

```
k_p_d_34=(0.0863+(0.00134*(M34_d/(1+M34_d))));
den_p_d_34=(1456+(705*M34_d))*1.257;
cp_p_d_34=(1.11*(10^3))+44.8*(M34_d/(1+M34_d));
lfa_dh_34(n)=(k_p_d_34(n))/(den_p_d_34(n)*cp_p_d_34(n));
Fr_dh_34=(lfa_dh_34*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dh_34=(lfa_dh_34*(delta_t))/(dz^2);
```

```
k_p_d_44=(0.0863+(0.00134*(M44_d/(1+M44_d))));
den_p_d_44=(1456+(705*M44_d))*1.257;
cp_p_d_44=(1.11*(10^3))+44.8*(M44_d/(1+M44_d));
lfa_dh_44(n)=(k_p_d_44(n))/(den_p_d_44(n)*cp_p_d_44(n));
Fr_dh_44=(lfa_dh_44*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dh_44=(lfa_dh_44*(delta_t))/(dz^2);
```

```
k_p_d_43=(0.0863+(0.00134*(M43_d/(1+M43_d))));
den_p_d_43=(1456+(705*M43_d))*1.257;
cp_p_d_43=(1.11*(10^3))+44.8*(M43_d/(1+M43_d));
lfa_dh_43(n)=(k_p_d_43(n))/(den_p_d_43(n)*cp_p_d_43(n));
Fr_dh_43=(lfa_dh_43*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dh_43=(lfa_dh_43*(delta_t))/(dz^2);
```

```
k_p_d_42=(0.0863+(0.00134*(M42_d/(1+M42_d))));
den_p_d_42=(1456+(705*M42_d))*1.257;
cp_p_d_42=(1.11*(10^3))+44.8*(M42_d/(1+M42_d));
lfa_dh_42(n)=(k_p_d_42(n))/(den_p_d_42(n)*cp_p_d_42(n));
Fr_dh_42=(lfa_dh_42*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dh_42=(lfa_dh_42*(delta_t))/(dz^2);
```

```
k_p_d_41=(0.0863+(0.00134*(M41_d/(1+M41_d))));
den_p_d_41=(1456+(705*M41_d))*1.257;
cp_p_d_41=(1.11*(10^3))+44.8*(M41_d/(1+M41_d));
lfa_dh_41(n)=(k_p_d_41(n))/(den_p_d_41(n)*cp_p_d_41(n));
Fr_dh_41=(lfa_dh_41*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dh_41=(lfa_dh_41*(delta_t))/(dz^2);
```

```
k_p_d_40=(0.0863+(0.00134*(M40_d/(1+M40_d))));
den_p_d_40=(1456+(705*M40_d))*1.257;
cp_p_d_40=(1.11*(10^3))+44.8*(M40_d/(1+M40_d));
lfa_dh_40(n)=(k_p_d_40(n))/(den_p_d_40(n)*cp_p_d_40(n));
Fr_dh_40=(lfa_dh_40*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dh_40=(lfa_dh_40*(delta_t))/(dz^2);
```

```
end
```

```
%case 1: if i=1,2,3,...,i_max-1, j=1,2,3,...,j_max-1%
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

M11_d(n+1)=((Fr_dm_11(n)*(M01_d(n)-
(2*M11_d(n))+M21_d(n)))+(Fr_dm_11(n)*(dr/(2*r))*(M21_d(n)-
M01_d(n)))+(Fz_dm_11(n)*(M10_d(n)-(2*M11_d(n))+M12_d(n))))+M11_d(n);
M12_d(n+1)=((Fr_dm_12(n)*(M02_d(n)-
(2*M12_d(n))+M22_d(n)))+(Fr_dm_12(n)*(dr/(2*r))*(M22_d(n)-
M02_d(n)))+(Fz_dm_12(n)*(M11_d(n)-(2*M12_d(n))+M13_d(n))))+M12_d(n);
M13_d(n+1)=((Fr_dm_13(n)*(M03_d(n)-
(2*M13_d(n))+M23_d(n)))+(Fr_dm_13(n)*(dr/(2*r))*(M23_d(n)-
M03_d(n)))+(Fz_dm_13(n)*(M12_d(n)-(2*M13_d(n))+M14_d(n))))+M13_d(n);
M21_d(n+1)=((Fr_dm_21(n)*(M11_d(n)-
(2*M21_d(n))+M31_d(n)))+(Fr_dm_21(n)*(dr/(2*r))*(M31_d(n)-
M11_d(n)))+(Fz_dm_21(n)*(M20_d(n)-(2*M21_d(n))+M22_d(n))))+M21_d(n);
M22_d(n+1)=((Fr_dm_22(n)*(M12_d(n)-
(2*M22_d(n))+M32_d(n)))+(Fr_dm_22(n)*(dr/(2*r))*(M32_d(n)-
M12_d(n)))+(Fz_dm_22(n)*(M21_d(n)-(2*M22_d(n))+M23_d(n))))+M22_d(n);
M23_d(n+1)=((Fr_dm_23(n)*(M13_d(n)-
(2*M23_d(n))+M33_d(n)))+(Fr_dm_23(n)*(dr/(2*r))*(M33_d(n)-
M13_d(n)))+(Fz_dm_23(n)*(M22_d(n)-(2*M23_d(n))+M24_d(n))))+M23_d(n);
M31_d(n+1)=((Fr_dm_31(n)*(M21_d(n)-
(2*M31_d(n))+M41_d(n)))+(Fr_dm_31(n)*(dr/(2*r))*(M41_d(n)-
M21_d(n)))+(Fz_dm_31(n)*(M30_d(n)-(2*M31_d(n))+M32_d(n))))+M31_d(n);
M32_d(n+1)=((Fr_dm_32(n)*(M22_d(n)-
(2*M32_d(n))+M41_d(n)))+(Fr_dm_32(n)*(dr/(2*r))*(M42_d(n)-
M22_d(n)))+(Fz_dm_32(n)*(M31_d(n)-(2*M32_d(n))+M33_d(n))))+M32_d(n);
M33_d(n+1)=((Fr_dm_33(n)*(M23_d(n)-
(2*M33_d(n))+M43_d(n)))+(Fr_dm_33(n)*(dr/(2*r))*(M43_d(n)-
M23_d(n)))+(Fz_dm_33(n)*(M32_d(n)-(2*M33_d(n))+M34_d(n))))+M33_d(n);

%case 2: if i=0, j=0 %
M00_d(n+1)=((Fr_dm_00(n)*((-2*M00_d(n))+2*M10_d(n)))+(Fz_dm_00(n)*((-
2*M00_d(n))+2*M01_d(n))))+M00_d(n);

%case 3: if i=0, j=1,2,3,...,jmax-1%
M01_d(n+1)=((Fr_dm_00(n)*((-
2*M01_d(n))+2*M11_d(n)))+(Fz_dm_00(n)*(M00_d(n)-
(2*M01_d(n))+M02_d(n))))+M01_d(n);
M02_d(n+1)=((Fr_dm_00(n)*((-
2*M02_d(n))+2*M12_d(n)))+(Fz_dm_00(n)*(M01_d(n)-
(2*M02_d(n))+M03_d(n))))+M02_d(n);
M03_d(n+1)=((Fr_dm_00(n)*((-
2*M03_d(n))+2*M13_d(n)))+(Fz_dm_00(n)*(M02_d(n)-
(2*M03_d(n))+M04_d(n))))+M03_d(n);

%case 4: if i=0, j=j_max%
M05_d(n)=(Bn_dz_04(n)*(M04_d(n)-Me))+M03_d(n);
M04_d(n+1)=((Fr_dm_04(n)*((-
2*M04_d(n))+2*M14_d(n)))+(Fz_dm_04(n)*(M03_d(n)-
(2*M04_d(n))+M05_d(n))))+M04_d(n);

%case 5: if i=1,2,3,...,i_max-1, j=jmax%
M15_d(n)=(Bn_dz_14(n)*(M14_d(n)-Me))+M13_d(n);
M25_d(n)=(Bn_dz_24(n)*(M24_d(n)-Me))+M23_d(n);
M35_d(n)=(Bn_dz_34(n)*(M34_d(n)-Me))+M33_d(n);
M14_d(n+1)=((Fr_dm_14(n)*(M04_d(n)-
(2*M14_d(n))+M24_d(n)))+(Fr_dm_14(n)*(dr/(2*r))*(M24_d(n)-
M04_d(n)))+(Fz_dm_14(n)*(M13_d(n)-(2*M14_d(n))+M15_d(n))))+M14_d(n);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

M24_d(n+1)=((Fr_dm_24(n)*(M14_d(n)-
(2*M24_d(n))+M34_d(n)))+(Fr_dm_24(n)*(dr/(2*r))*(M34_d(n)-
M14_d(n)))+(Fz_dm_24(n)*(M23_d(n)-(2*M24_d(n))+M25_d(n))))+M24_d(n);
M34_d(n+1)=((Fr_dm_34(n)*(M24_d(n)-
(2*M34_d(n))+M44_d(n)))+(Fr_dm_34(n)*(dr/(2*r))*(M44_d(n)-
M24_d(n)))+(Fz_dm_34(n)*(M33_d(n)-(2*M34_d(n))+M35_d(n))))+M34_d(n);

%case 6: if i=i_max, j=j_max%
M54_d(n)=(Bn_dr_44(n)*(M44_d(n)-Me))+M34_d(n);
M45_d(n)=(Bn_dz_44(n)*(M44_d(n)-Me))+M43_d(n);
M44_d(n+1)=((Fr_dm_44(n)*(M34_d(n)-
(2*M44_d(n))+M54_d(n)))+(Fr_dm_44(n)*(dr/(2*r))*(M54_d(n)-
M34_d(n)))+(Fz_dm_44(n)*(M43_d(n)-(2*M44_d(n))+M45_d(n))))+M44_d(n);

%case 7: if i=i_max, j=1,2,3,...,jmax-1%
M51_d(n)=(Bn_dr_41(n)*(M41_d(n)-Me))+M31_d(n);
M52_d(n)=(Bn_dr_42(n)*(M42_d(n)-Me))+M32_d(n);
M53_d(n)=(Bn_dr_43(n)*(M43_d(n)-Me))+M33_d(n);
M41_d(n+1)=((Fr_dm_41(n)*(M31_d(n)-
(2*M41_d(n))+M51_d(n)))+(Fr_dm_41(n)*(dr/(2*r))*(M51_d(n)-
M31_d(n)))+(Fz_dm_41(n)*(M40_d(n)-(2*M41_d(n))+M42_d(n))))+M41_d(n);
M42_d(n+1)=((Fr_dm_42(n)*(M32_d(n)-
(2*M42_d(n))+M52_d(n)))+(Fr_dm_42(n)*(dr/(2*r))*(M52_d(n)-
M32_d(n)))+(Fz_dm_42(n)*(M41_d(n)-(2*M42_d(n))+M43_d(n))))+M42_d(n);
M43_d(n+1)=((Fr_dm_43(n)*(M33_d(n)-
(2*M43_d(n))+M53_d(n)))+(Fr_dm_43(n)*(dr/(2*r))*(M53_d(n)-
M33_d(n)))+(Fz_dm_43(n)*(M42_d(n)-(2*M43_d(n))+M44_d(n))))+M43_d(n);

%case 8: if i=i_max, j=0%
M50_d(n)=(Bn_dr_40(n)*(M40_d(n)-Me))+M30_d(n);
M40_d(n+1)=((Fr_dm_40(n)*(M30_d(n)-
(2*M40_d(n))+M50_d(n)))+(Fr_dm_40(n)*(dr/(2*r))*(M50_d(n)-
M30_d(n)))+(Fz_dm_40(n)*((-2*M40_d(n))+2*M41_d(n))))+M40_d(n);

%case9: if i=1,2,3,...,imax-1, j=0%
M10_d(n+1)=((Fr_dm_10(n)*(M00_d(n)-
(2*M10_d(n))+M20_d(n)))+(Fr_dm_10(n)*(dr/(2*r))*(M20_d(n)-
M00_d(n)))+(Fz_dm_10(n)*((-2*M10_d(n))+2*M11_d(n))))+M10_d(n);
M20_d(n+1)=((Fr_dm_20(n)*(M10_d(n)-
(2*M20_d(n))+M30_d(n)))+(Fr_dm_20(n)*(dr/(2*r))*(M30_d(n)-
M10_d(n)))+(Fz_dm_20(n)*((-2*M20_d(n))+2*M21_d(n))))+M20_d(n);
M30_d(n+1)=((Fr_dm_30(n)*(M20_d(n)-
(2*M30_d(n))+M40_d(n)))+(Fr_dm_30(n)*(dr/(2*r))*(M40_d(n)-
M20_d(n)))+(Fz_dm_30(n)*((-2*M30_d(n))+2*M31_d(n))))+M30_d(n);

%Calculated moisture average by Simpson's rules%
Row_0_dm(n)=((r-
0)*(M00_d(n))+4*(M10_d(n)+M30_d(n)))+(2*M20_d(n))+M40_d(n)))/(3*N);
Row_1_dm(n)=((r-
0)*(M01_d(n))+4*(M11_d(n)+M31_d(n)))+(2*M21_d(n))+M41_d(n)))/(3*N);
Row_2_dm(n)=((r-
0)*(M02_d(n))+4*(M12_d(n)+M32_d(n)))+(2*M22_d(n))+M42_d(n)))/(3*N);
Row_3_dm(n)=((r-
0)*(M03_d(n))+4*(M13_d(n)+M33_d(n)))+(2*M23_d(n))+M43_d(n)))/(3*N);
Row_4_dm(n)=((r-
0)*(M04_d(n))+4*(M14_d(n)+M34_d(n)))+(2*M24_d(n))+M44_d(n)))/(3*N);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Col_dm(n)=(z-
0)*((Row_0_dm(n))+4*(Row_1_dm(n)+Row_3_dm(n)))+(2*Row_2_dm(n)+(Row_4_dm(n)
))/ (3*N);
Mavg_dm(n)=((3.14*r)/(3.14*(r^2)*z))*Col_dm(n);

```

**%Calculated mass evaporated rate during drying period%**

```

dM00_d(n+1)=M00_d(n+1)-M00_d(n);
dM10_d(n+1)=M10_d(n+1)-M10_d(n);
dM20_d(n+1)=M20_d(n+1)-M20_d(n);
dM30_d(n+1)=M30_d(n+1)-M30_d(n);
dM40_d(n+1)=M40_d(n+1)-M40_d(n);
dM01_d(n+1)=M01_d(n+1)-M01_d(n);
dM11_d(n+1)=M11_d(n+1)-M11_d(n);
dM21_d(n+1)=M21_d(n+1)-M21_d(n);
dM31_d(n+1)=M31_d(n+1)-M31_d(n);
dM41_d(n+1)=M41_d(n+1)-M41_d(n);
dM02_d(n+1)=M02_d(n+1)-M02_d(n);
dM12_d(n+1)=M12_d(n+1)-M12_d(n);
dM22_d(n+1)=M22_d(n+1)-M22_d(n);
dM32_d(n+1)=M32_d(n+1)-M32_d(n);
dM42_d(n+1)=M42_d(n+1)-M42_d(n);
dM03_d(n+1)=M03_d(n+1)-M03_d(n);
dM13_d(n+1)=M13_d(n+1)-M13_d(n);
dM23_d(n+1)=M23_d(n+1)-M23_d(n);
dM33_d(n+1)=M33_d(n+1)-M33_d(n);
dM43_d(n+1)=M43_d(n+1)-M43_d(n);
dM04_d(n+1)=M04_d(n+1)-M04_d(n);
dM14_d(n+1)=M14_d(n+1)-M14_d(n);
dM24_d(n+1)=M24_d(n+1)-M24_d(n);
dM34_d(n+1)=M34_d(n+1)-M34_d(n);
dM44_d(n+1)=M44_d(n+1)-M44_d(n);

```

**%Calculated mass flow rate of evaporation%**

```

Row_0_dM_dm(n)=((r-
0)*((dM00_d(n))+4*(dM10_d(n)+dM30_d(n)))+(2*dM20_d(n)+(dM40_d(n))))/(3*N)
;
Row_1_dM_dm(n)=((r-
0)*((dM01_d(n))+4*(dM11_d(n)+dM31_d(n)))+(2*dM21_d(n)+(dM41_d(n))))/(3*N)
;
Row_2_dM_dm(n)=((r-
0)*((dM02_d(n))+4*(dM12_d(n)+dM32_d(n)))+(2*dM22_d(n)+(dM42_d(n))))/(3*N)
;
Row_3_dM_dm(n)=((r-
0)*((dM03_d(n))+4*(dM13_d(n)+dM33_d(n)))+(2*dM23_d(n)+(dM43_d(n))))/(3*N)
;
Row_4_dM_dm(n)=((r-
0)*((dM04_d(n))+4*(dM14_d(n)+dM34_d(n)))+(2*dM24_d(n)+(dM44_d(n))))/(3*N)
;
Col_dM_dm(n)=(z-
0)*((Row_0_dM_dm(n))+4*(Row_1_dM_dm(n)+Row_3_dM_dm(n)))+(2*Row_2_dM_dm(n)
+(Row_4_dM_dm(n)))/(3*N);
dMavg_dM_dm(n)=((3.14*r)/(3.14*(r^2)*z))*Col_dM_dm(n);
m_w_d(n)=(dMavg_dM_dm(n)/delta_t)*mp;
dMavg_dM_abs (n)=(abs((((3.14*r)/(3.14*(r^2)*z))*(Col_dM_dm(n)))/delta_t));

```

**%Calculate temperature profile for drying period%**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

%case 1: if i=1,2,3,...,i_max-1, j=1,2,3,...,j_max-1%
T11_d(n+1)=((Fr_dh_11(n)*(T01_d(n)-
(2*T11_d(n))+T21_d(n)))+(Fr_dh_11(n)*(dr/(2*r))*(T21_d(n)-
T01_d(n)))+(Fz_dh_11(n)*(T10_d(n)-(2*T11_d(n))+T12_d(n))))+T11_d(n);
T12_d(n+1)=((Fr_dh_12(n)*(T02_d(n)-
(2*T12_d(n))+T22_d(n)))+(Fr_dh_12(n)*(dr/(2*r))*(T22_d(n)-
T02_d(n)))+(Fz_dh_12(n)*(T11_d(n)-(2*T12_d(n))+T13_d(n))))+T12_d(n);
T13_d(n+1)=((Fr_dh_13(n)*(T03_d(n)-
(2*T13_d(n))+T23_d(n)))+(Fr_dh_13(n)*(dr/(2*r))*(T23_d(n)-
T03_d(n)))+(Fz_dh_13(n)*(T12_d(n)-(2*T13_d(n))+T14_d(n))))+T13_d(n);
T21_d(n+1)=((Fr_dh_21(n)*(T11_d(n)-
(2*T21_d(n))+T31_d(n)))+(Fr_dh_21(n)*(dr/(2*r))*(T31_d(n)-
T11_d(n)))+(Fz_dh_21(n)*(T20_d(n)-(2*T21_d(n))+T22_d(n))))+T21_d(n);
T22_d(n+1)=((Fr_dh_22(n)*(T12_d(n)-
(2*T22_d(n))+T32_d(n)))+(Fr_dh_22(n)*(dr/(2*r))*(T32_d(n)-
T12_d(n)))+(Fz_dh_22(n)*(T21_d(n)-(2*T22_d(n))+T23_d(n))))+T22_d(n);
T23_d(n+1)=((Fr_dh_23(n)*(T13_d(n)-
(2*T23_d(n))+T33_d(n)))+(Fr_dh_23(n)*(dr/(2*r))*(T33_d(n)-
T13_d(n)))+(Fz_dh_23(n)*(T22_d(n)-(2*T23_d(n))+T24_d(n))))+T23_d(n);
T31_d(n+1)=((Fr_dh_31(n)*(T21_d(n)-
(2*T31_d(n))+T41_d(n)))+(Fr_dh_31(n)*(dr/(2*r))*(T41_d(n)-
T21_d(n)))+(Fz_dh_31(n)*(T30_d(n)-(2*T31_d(n))+T32_d(n))))+T31_d(n);
T32_d(n+1)=((Fr_dh_32(n)*(T22_d(n)-
(2*T32_d(n))+T42_d(n)))+(Fr_dh_32(n)*(dr/(2*r))*(T42_d(n)-
T22_d(n)))+(Fz_dh_32(n)*(T31_d(n)-(2*T32_d(n))+T33_d(n))))+T32_d(n);
T33_d(n+1)=((Fr_dh_33(n)*(T23_d(n)-
(2*T33_d(n))+T43_d(n)))+(Fr_dh_33(n)*(dr/(2*r))*(T43_d(n)-
T23_d(n)))+(Fz_dh_33(n)*(T32_d(n)-(2*T33_d(n))+T34_d(n))))+T33_d(n);

%case 2: if i=0, j=0%
T00_d(n+1)=((Fr_dh_00(n)*((-2*T00_d(n))+2*T10_d(n)))+(Fz_dh_00(n)*((-
2*T00_d(n))+2*T01_d(n))))+T00_d(n);

%case 3: if i=0, j=1,2,3,...,jmax-1%
T01_d(n+1)=((Fr_dh_00(n)*((-
2*T01_d(n))+2*T11_d(n)))+(Fz_dh_00(n)*(T00_d(n)-
(2*T01_d(n))+T02_d(n))))+T01_d(n);
T02_d(n+1)=((Fr_dh_00(n)*((-
2*T02_d(n))+2*T12_d(n)))+(Fz_dh_00(n)*(T01_d(n)-
(2*T02_d(n))+T03_d(n))))+T02_d(n);
T03_d(n+1)=((Fr_dh_00(n)*((-
2*T03_d(n))+2*T13_d(n)))+(Fz_dh_00(n)*(T02_d(n)-
(2*T03_d(n))+T04_d(n))))+T03_d(n);

%case 4: if i=0, j=j_max%
T05_d(n)=((2*dz/k_p_d_04(n))*((hT_dh*(Ta_o_as_d(k)-T04_d(n)))-
((m_w_d(n)*Lv_d/At))))+T03_d(n);
T04_d(n+1)=((Fr_dh_04(n)*((-
2*T04_d(n))+2*T14_d(n)))+(Fz_dh_04(n)*(T03_d(n)-
(2*T04_d(n))+T05_d(n))))+T04_d(n);

%case 5: if i=1,2,3,...,i_max-1, j=jmax%
T15_d(n)=((2*dz/k_p_d_14(n))*((hT_dh*(Ta_o_as_d(k)-T14_d(n)))-
((m_w_d(n)*Lv_d/At))))+T13_d(n);
T25_d(n)=((2*dz/k_p_d_24(n))*((hT_dh*(Ta_o_as_d(k)-T24_d(n)))-
((m_w_d(n)*Lv_d/At))))+T23_d(n);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

T35_d(n)=((2*dz/k_p_d_34(n))*((hT_dh*(Ta_o_as_d(k)-T34_d(n)))-
((m_w_d(n)*Lv_d/At))))+T33_d(n);
T14_d(n+1)=((Fr_dh_14(n)*(T04_d(n)-
(2*T14_d(n))+T24_d(n)))+(Fr_dh_14(n)*(dr/(2*r))*(T24_d(n)-
T04_d(n)))+(Fz_dh_14(n)*(T13_d(n)-(2*T14_d(n))+T15_d(n))))+T14_d(n);
T24_d(n+1)=((Fr_dh_24(n)*(T14_d(n)-
(2*T24_d(n))+T34_d(n)))+(Fr_dh_24(n)*(dr/(2*r))*(T34_d(n)-
T14_d(n)))+(Fz_dh_24(n)*(T23_d(n)-(2*T24_d(n))+T25_d(n))))+T24_d(n);
T34_d(n+1)=((Fr_dh_34(n)*(T24_d(n)-
(2*T34_d(n))+T44_d(n)))+(Fr_dh_34(n)*(dr/(2*r))*(T44_d(n)-
T24_d(n)))+(Fz_dh_34(n)*(T33_d(n)-(2*T34_d(n))+T35_d(n))))+T34_d(n);

```

```
%case 6: if i=i_max, j=j_max%
```

```

T54_d(n)=((2*dr/k_p_d_44(n))*((hT_dh*(Ta_o_as_d(k)-T44_d(n)))-
((m_w_d(n)*Lv_d/At))))+T34_d(n);
T45_d(n)=((2*dz/k_p_d_44(n))*((hT_dh*(Ta_o_as_d(k)-T44_d(n)))-
((m_w_d(n)*Lv_d/At))))+T43_d(n);
T44_d(n+1)=((Fr_dh_44(n)*(T34_d(n)-
(2*T44_d(n))+T54_d(n)))+(Fr_dh_44(n)*(dr/(2*r))*(T54_d(n)-
T34_d(n)))+(Fz_dh_44(n)*(T43_d(n)-(2*T44_d(n))+T45_d(n))))+T44_d(n);

```

```
%case 7: if i=i_max, j=1,2,3,...,jmax-1%
```

```

T51_d(n)=((2*dr/k_p_d_41(n))*((hT_dh*(Ta_o_as_d(k)-T41_d(n)))-
((m_w_d(n)*Lv_d/At))))+T31_d(n);
T52_d(n)=((2*dr/k_p_d_42(n))*((hT_dh*(Ta_o_as_d(k)-T42_d(n)))-
((m_w_d(n)*Lv_d/At))))+T32_d(n);
T53_d(n)=((2*dr/k_p_d_43(n))*((hT_dh*(Ta_o_as_d(k)-T43_d(n)))-
((m_w_d(n)*Lv_d/At))))+T33_d(n);
T41_d(n+1)=((Fr_dh_41(n)*(T31_d(n)-
(2*T41_d(n))+T51_d(n)))+(Fr_dh_41(n)*(dr/(2*r))*(T51_d(n)-
T31_d(n)))+(Fz_dh_41(n)*(T40_d(n)-(2*T41_d(n))+T42_d(n))))+T41_d(n);
T42_d(n+1)=((Fr_dh_42(n)*(T32_d(n)-
(2*T42_d(n))+T52_d(n)))+(Fr_dh_42(n)*(dr/(2*r))*(T52_d(n)-
T32_d(n)))+(Fz_dh_42(n)*(T41_d(n)-(2*T42_d(n))+T43_d(n))))+T42_d(n);
T43_d(n+1)=((Fr_dh_43(n)*(T33_d(n)-
(2*T43_d(n))+T53_d(n)))+(Fr_dh_43(n)*(dr/(2*r))*(T53_d(n)-
T33_d(n)))+(Fz_dh_43(n)*(T42_d(n)-(2*T43_d(n))+T44_d(n))))+T43_d(n);

```

```
%case 8: if i=i_max, j=0%
```

```

T50_d(n)=((2*dr/k_p_d_40(n))*((hT_dh*(Ta_o_as_d(k)-T40_d(n)))-
((m_w_d(n)*Lv_d/At))))+T30_d(n);
T40_d(n+1)=((Fr_dh_40(n)*(T30_d(n)-
(2*T40_d(n))+T50_d(n)))+(Fr_dh_40(n)*(dr/(2*r))*(T50_d(n)-
T30_d(n)))+(Fz_dh_40(n)*((-2*T40_d(n))+2*T41_d(n))))+T40_d(n);

```

```
%case9: if i=1,2,3,...,imax-1, j=0%
```

```

T10_d(n+1)=((Fr_dh_10(n)*(T00_d(n)-
(2*T10_d(n))+T20_d(n)))+(Fr_dh_10(n)*(dr/(2*r))*(T20_d(n)-
T00_d(n)))+(Fz_dh_10(n)*((-2*T10_d(n))+2*T11_d(n))))+T10_d(n);
T20_d(n+1)=((Fr_dh_20(n)*(T10_d(n)-
(2*T20_d(n))+T30_d(n)))+(Fr_dh_20(n)*(dr/(2*r))*(T30_d(n)-
T10_d(n)))+(Fz_dh_20(n)*((-2*T20_d(n))+2*T21_d(n))))+T20_d(n);
T30_d(n+1)=((Fr_dh_30(n)*(T20_d(n)-
(2*T30_d(n))+T40_d(n)))+(Fr_dh_30(n)*(dr/(2*r))*(T40_d(n)-
T20_d(n)))+(Fz_dh_30(n)*((-2*T30_d(n))+2*T31_d(n))))+T30_d(n);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

%Calculated average grain temperature by Simpson's rules%
Row_0_dh(n)=(r-
0)*((T00_d(n))+4*(T10_d(n)+T30_d(n)))+(2*T20_d(n)+(T40_d(n)))/(3*N);
Row_1_dh(n)=(r-
0)*((T01_d(n))+4*(T11_d(n)+T31_d(n)))+(2*T21_d(n)+(T41_d(n)))/(3*N);
Row_2_dh(n)=(r-
0)*((T02_d(n))+4*(T12_d(n)+T32_d(n)))+(2*T22_d(n)+(T42_d(n)))/(3*N);
Row_3_dh(n)=(r-
0)*((T03_d(n))+4*(T13_d(n)+T33_d(n)))+(2*T23_d(n)+(T43_d(n)))/(3*N);
Row_4_dh(n)=(r-
0)*((T04_d(n))+4*(T14_d(n)+T34_d(n)))+(2*T24_d(n)+(T44_d(n)))/(3*N);
Col_dh(n)=(z-
0)*((Row_0_dh(n))+4*(Row_1_dh(n)+Row_3_dh(n)))+(2*Row_2_dh(n)+(Row_4_dh(n)
)))/(3*N);
Tavg_dh(n)=((3.14*r)/(3.14*(r^2)*z))*Col_dh(n);

%Update mass transfer property for drying period%
Deff_dm(n+1)=D0_dm*(exp(-Ea_d/(R_gas*Tavg_dh(n))));
Fr_dm(n+1)=(Deff_dm(n)*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dm(n+1)=(Deff_dm(n)*(delta_t))/(dz^2);
Bn_dr(n+1)=(-2*dr*hm_HA)/Deff_dm(n);
Bn_dz(n+1)=(-2*dz*hm_HA)/Deff_dm(n);

Deff_dm_00(n+1)=D0_dm*(exp(-Ea_d/(R_gas*T00_d(n))));
Fr_dm_00(n+1)=(Deff_dm_00(n)*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dm_00(n+1)=(Deff_dm_00(n)*(delta_t))/(dz^2);

Deff_dm_10(n+1)=D0_dm*(exp(-Ea_d/(R_gas*T10_d(n))));
Fr_dm_10(n+1)=(Deff_dm_10(n)*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dm_10(n+1)=(Deff_dm_10(n)*(delta_t))/(dz^2);

Deff_dm_20(n+1)=D0_dm*(exp(-Ea_d/(R_gas*T20_d(n))));
Fr_dm_20(n+1)=(Deff_dm_20(n)*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dm_20(n+1)=(Deff_dm_20(n)*(delta_t))/(dz^2);

Deff_dm_30(n+1)=D0_dm*(exp(-Ea_d/(R_gas*T30_d(n))));
Fr_dm_30(n+1)=(Deff_dm_30(n)*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dm_30(n+1)=(Deff_dm_30(n)*(delta_t))/(dz^2);

Deff_dm_40(n+1)=D0_dm*(exp(-Ea_d/(R_gas*T40_d(n))));
Fr_dm_40(n+1)=(Deff_dm_40(n)*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dm_40(n+1)=(Deff_dm_40(n)*(delta_t))/(dz^2);
Bn_dr_40(n+1)=(-2*dr*hm_HA)/Deff_dm_40(n);

Deff_dm_01(n+1)=D0_dm*(exp(-Ea_d/(R_gas*T01_d(n))));
Fr_dm_01(n+1)=(Deff_dm_01(n)*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dm_01(n+1)=(Deff_dm_01(n)*(delta_t))/(dz^2);

Deff_dm_11(n+1)=D0_dm*(exp(-Ea_d/(R_gas*T11_d(n))));
Fr_dm_11(n+1)=(Deff_dm_11(n)*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dm_11(n+1)=(Deff_dm_11(n)*(delta_t))/(dz^2);

Deff_dm_21(n+1)=D0_dm*(exp(-Ea_d/(R_gas*T21_d(n))));
Fr_dm_21(n+1)=(Deff_dm_21(n)*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dm_21(n+1)=(Deff_dm_21(n)*(delta_t))/(dz^2);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{Deff\_dm\_31}(n+1) &= D0\_dm * (\exp(-Ea\_d / (R\_gas * T31\_d(n))))); \\ \text{Fr\_dm\_31}(n+1) &= (\text{Deff\_dm\_31}(n) * (\text{delta\_t})) / (\text{dr}^2); \\ \text{Fz\_dm\_31}(n+1) &= (\text{Deff\_dm\_31}(n) * (\text{delta\_t})) / (\text{dz}^2); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Deff\_dm\_41}(n+1) &= D0\_dm * (\exp(-Ea\_d / (R\_gas * T41\_d(n))))); \\ \text{Fr\_dm\_41}(n+1) &= (\text{Deff\_dm\_41}(n) * (\text{delta\_t})) / (\text{dr}^2); \\ \text{Fz\_dm\_41}(n+1) &= (\text{Deff\_dm\_41}(n) * (\text{delta\_t})) / (\text{dz}^2); \\ \text{Bn\_dr\_41}(n+1) &= (-2 * \text{dr} * \text{hm\_HA}) / \text{Deff\_dm\_41}(n); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Deff\_dm\_02}(n+1) &= D0\_dm * (\exp(-Ea\_d / (R\_gas * T02\_d(n))))); \\ \text{Fr\_dm\_02}(n+1) &= (\text{Deff\_dm\_02}(n) * (\text{delta\_t})) / (\text{dr}^2); \\ \text{Fz\_dm\_02}(n+1) &= (\text{Deff\_dm\_02}(n) * (\text{delta\_t})) / (\text{dz}^2); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Deff\_dm\_12}(n+1) &= D0\_dm * (\exp(-Ea\_d / (R\_gas * T12\_d(n))))); \\ \text{Fr\_dm\_12}(n+1) &= (\text{Deff\_dm\_12}(n) * (\text{delta\_t})) / (\text{dr}^2); \\ \text{Fz\_dm\_12}(n+1) &= (\text{Deff\_dm\_12}(n) * (\text{delta\_t})) / (\text{dz}^2); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Deff\_dm\_22}(n+1) &= D0\_dm * (\exp(-Ea\_d / (R\_gas * T22\_d(n))))); \\ \text{Fr\_dm\_22}(n+1) &= (\text{Deff\_dm\_22}(n) * (\text{delta\_t})) / (\text{dr}^2); \\ \text{Fz\_dm\_22}(n+1) &= (\text{Deff\_dm\_22}(n) * (\text{delta\_t})) / (\text{dz}^2); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Deff\_dm\_32}(n+1) &= D0\_dm * (\exp(-Ea\_d / (R\_gas * T32\_d(n))))); \\ \text{Fr\_dm\_32}(n+1) &= (\text{Deff\_dm\_32}(n) * (\text{delta\_t})) / (\text{dr}^2); \\ \text{Fz\_dm\_32}(n+1) &= (\text{Deff\_dm\_32}(n) * (\text{delta\_t})) / (\text{dz}^2); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Deff\_dm\_42}(n+1) &= D0\_dm * (\exp(-Ea\_d / (R\_gas * T42\_d(n))))); \\ \text{Fr\_dm\_42}(n+1) &= (\text{Deff\_dm\_42}(n) * (\text{delta\_t})) / (\text{dr}^2); \\ \text{Fz\_dm\_42}(n+1) &= (\text{Deff\_dm\_42}(n) * (\text{delta\_t})) / (\text{dz}^2); \\ \text{Bn\_dr\_42}(n+1) &= (-2 * \text{dr} * \text{hm\_HA}) / \text{Deff\_dm\_42}(n); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Deff\_dm\_03}(n+1) &= D0\_dm * (\exp(-Ea\_d / (R\_gas * T03\_d(n))))); \\ \text{Fr\_dm\_03}(n+1) &= (\text{Deff\_dm\_03}(n) * (\text{delta\_t})) / (\text{dr}^2); \\ \text{Fz\_dm\_03}(n+1) &= (\text{Deff\_dm\_03}(n) * (\text{delta\_t})) / (\text{dz}^2); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Deff\_dm\_13}(n+1) &= D0\_dm * (\exp(-Ea\_d / (R\_gas * T13\_d(n))))); \\ \text{Fr\_dm\_13}(n+1) &= (\text{Deff\_dm\_13}(n) * (\text{delta\_t})) / (\text{dr}^2); \\ \text{Fz\_dm\_13}(n+1) &= (\text{Deff\_dm\_13}(n) * (\text{delta\_t})) / (\text{dz}^2); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Deff\_dm\_23}(n+1) &= D0\_dm * (\exp(-Ea\_d / (R\_gas * T23\_d(n))))); \\ \text{Fr\_dm\_23}(n+1) &= (\text{Deff\_dm\_23}(n) * (\text{delta\_t})) / (\text{dr}^2); \\ \text{Fz\_dm\_23}(n+1) &= (\text{Deff\_dm\_23}(n) * (\text{delta\_t})) / (\text{dz}^2); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Deff\_dm\_33}(n+1) &= D0\_dm * (\exp(-Ea\_d / (R\_gas * T33\_d(n))))); \\ \text{Fr\_dm\_33}(n+1) &= (\text{Deff\_dm\_33}(n) * (\text{delta\_t})) / (\text{dr}^2); \\ \text{Fz\_dm\_33}(n+1) &= (\text{Deff\_dm\_33}(n) * (\text{delta\_t})) / (\text{dz}^2); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Deff\_dm\_43}(n+1) &= D0\_dm * (\exp(-Ea\_d / (R\_gas * T43\_d(n))))); \\ \text{Fr\_dm\_43}(n+1) &= (\text{Deff\_dm\_43}(n) * (\text{delta\_t})) / (\text{dr}^2); \\ \text{Fz\_dm\_43}(n+1) &= (\text{Deff\_dm\_43}(n) * (\text{delta\_t})) / (\text{dz}^2); \\ \text{Bn\_dr\_43}(n+1) &= (-2 * \text{dr} * \text{hm\_HA}) / \text{Deff\_dm\_43}(n); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Deff\_dm\_04}(n+1) &= D0\_dm * (\exp(-Ea\_d / (R\_gas * T04\_d(n))))); \\ \text{Fr\_dm\_04}(n+1) &= (\text{Deff\_dm\_04}(n) * (\text{delta\_t})) / (\text{dr}^2); \\ \text{Fz\_dm\_04}(n+1) &= (\text{Deff\_dm\_04}(n) * (\text{delta\_t})) / (\text{dz}^2); \\ \text{Bn\_dz\_04}(n+1) &= (-2 * \text{dz} * \text{hm\_HA}) / \text{Deff\_dm\_04}(n); \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Deff_dm_14(n+1)=D0_dm*(exp(-Ea_d/(R_gas*T14_d(n))));
Fr_dm_14(n+1)=(Deff_dm_14(n)*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dm_14(n+1)=(Deff_dm_14(n)*(delta_t))/(dz^2);
Bn_dz_14(n+1)=(-2*dz*hm_HA)/Deff_dm_14(n);

Deff_dm_24(n+1)=D0_dm*(exp(-Ea_d/(R_gas*T24_d(n))));
Fr_dm_24(n+1)=(Deff_dm_24(n)*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dm_24(n+1)=(Deff_dm_24(n)*(delta_t))/(dz^2);
Bn_dz_24(n+1)=(-2*dz*hm_HA)/Deff_dm_24(n);

Deff_dm_34(n+1)=D0_dm*(exp(-Ea_d/(R_gas*T34_d(n))));
Fr_dm_34(n+1)=(Deff_dm_34(n)*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dm_34(n+1)=(Deff_dm_34(n)*(delta_t))/(dz^2);
Bn_dz_34(n+1)=(-2*dz*hm_HA)/Deff_dm_34(n);

Deff_dm_44(n+1)=D0_dm*(exp(-Ea_d/(R_gas*T44_d(n))));
Fr_dm_44(n+1)=(Deff_dm_44(n)*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dm_44(n+1)=(Deff_dm_44(n)*(delta_t))/(dz^2);
Bn_dr_44(n+1)=(-2*dr*hm_HA)/Deff_dm_44(n);
Bn_dz_44(n+1)=(-2*dz*hm_HA)/Deff_dm_44(n);

%Update heat transfer property for drying period%
k_p_d(n+1)=(0.0863+(0.00134*(Mavg_dm(n)/(1+Mavg_dm(n))));
den_p_d(n+1)=(1456+(705*Mavg_dm(n)))*1.257;
cp_p_d(n+1)=(1.11*(10^3))+44.8*(Mavg_dm(n)/(1+Mavg_dm(n)));
lfa_dh(n+1)=(k_p_d(n))/(den_p_d(n)*cp_p_d(n));
Fr_dh(n+1)=(lfa_dh(n)*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dh(n+1)=(lfa_dh(n)*(delta_t))/(dz^2);

k_p_d_00(n+1)=(0.0863+(0.00134*(M00_d(n)/(1+M00_d(n))));
den_p_d_00(n+1)=(1456+(705*M00_d(n)))*1.257;
cp_p_d_00(n+1)=(1.11*(10^3))+44.8*(M00_d(n)/(1+M00_d(n)));
lfa_dh_00(n+1)=(k_p_d_00(n))/(den_p_d_00(n)*cp_p_d_00(n));
Fr_dh_00(n+1)=(lfa_dh_00(n)*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dh_00(n+1)=(lfa_dh_00(n)*(delta_t))/(dz^2);

k_p_d_01(n+1)=(0.0863+(0.00134*(M01_d(n)/(1+M01_d(n))));
den_p_d_01(n+1)=(1456+(705*M01_d(n)))*1.257;
cp_p_d_01(n+1)=(1.11*(10^3))+44.8*(M01_d(n)/(1+M01_d(n)));
lfa_dh_01(n+1)=(k_p_d_01(n))/(den_p_d_01(n)*cp_p_d_01(n));
Fr_dh_01(n+1)=(lfa_dh_01(n)*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dh_01(n+1)=(lfa_dh_01(n)*(delta_t))/(dz^2);

k_p_d_11(n+1)=(0.0863+(0.00134*(M11_d(n)/(1+M11_d(n))));
den_p_d_11(n+1)=(1456+(705*M11_d(n)))*1.257;
cp_p_d_11(n+1)=(1.11*(10^3))+44.8*(M11_d(n)/(1+M11_d(n)));
lfa_dh_11(n+1)=(k_p_d_11(n))/(den_p_d_11(n)*cp_p_d_11(n));
Fr_dh_11(n+1)=(lfa_dh_11(n)*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dh_11(n+1)=(lfa_dh_11(n)*(delta_t))/(dz^2);

k_p_d_10(n+1)=(0.0863+(0.00134*(M10_d(n)/(1+M10_d(n))));
den_p_d_10(n+1)=(1456+(705*M10_d(n)))*1.257;
cp_p_d_10(n+1)=(1.11*(10^3))+44.8*(M10_d(n)/(1+M10_d(n)));
lfa_dh_10(n+1)=(k_p_d_10(n))/(den_p_d_10(n)*cp_p_d_10(n));
Fr_dh_10(n+1)=(lfa_dh_10(n)*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dh_10(n+1)=(lfa_dh_10(n)*(delta_t))/(dz^2);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} k_{p\_d\_02}(n+1) &= (0.0863 + (0.00134 * (M02\_d(n) / (1 + M02\_d(n))))); \\ den\_p\_d\_02(n+1) &= (1456 + (705 * M02\_d(n))) * 1.257; \\ cp\_p\_d\_02(n+1) &= (1.11 * (10^3)) + (44.8 * (M02\_d(n) / (1 + M02\_d(n)))); \\ lfa\_dh\_02(n+1) &= (k_{p\_d\_02}(n)) / (den\_p\_d\_02(n) * cp\_p\_d\_02(n)); \\ Fr\_dh\_02(n+1) &= (lfa\_dh\_02(n) * (\delta_t)) / (dr^2); \\ Fz\_dh\_02(n+1) &= (lfa\_dh\_02(n) * (\delta_t)) / (dz^2); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} k_{p\_d\_12}(n+1) &= (0.0863 + (0.00134 * (M12\_d(n) / (1 + M12\_d(n))))); \\ den\_p\_d\_12(n+1) &= (1456 + (705 * M12\_d(n))) * 1.257; \\ cp\_p\_d\_12(n+1) &= (1.11 * (10^3)) + (44.8 * (M12\_d(n) / (1 + M12\_d(n)))); \\ lfa\_dh\_12(n+1) &= (k_{p\_d\_12}(n)) / (den\_p\_d\_12(n) * cp\_p\_d\_12(n)); \\ Fr\_dh\_12(n+1) &= (lfa\_dh\_12(n) * (\delta_t)) / (dr^2); \\ Fz\_dh\_12(n+1) &= (lfa\_dh\_12(n) * (\delta_t)) / (dz^2); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} k_{p\_d\_22}(n+1) &= (0.0863 + (0.00134 * (M22\_d(n) / (1 + M22\_d(n))))); \\ den\_p\_d\_22(n+1) &= (1456 + (705 * M22\_d(n))) * 1.257; \\ cp\_p\_d\_22(n+1) &= (1.11 * (10^3)) + (44.8 * (M22\_d(n) / (1 + M22\_d(n)))); \\ lfa\_dh\_22(n+1) &= (k_{p\_d\_22}(n)) / (den\_p\_d\_22(n) * cp\_p\_d\_22(n)); \\ Fr\_dh\_22(n+1) &= (lfa\_dh\_22(n) * (\delta_t)) / (dr^2); \\ Fz\_dh\_22(n+1) &= (lfa\_dh\_22(n) * (\delta_t)) / (dz^2); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} k_{p\_d\_21}(n+1) &= (0.0863 + (0.00134 * (M21\_d(n) / (1 + M21\_d(n))))); \\ den\_p\_d\_21(n+1) &= (1456 + (705 * M21\_d(n))) * 1.257; \\ cp\_p\_d\_21(n+1) &= (1.11 * (10^3)) + (44.8 * (M21\_d(n) / (1 + M21\_d(n)))); \\ lfa\_dh\_21(n+1) &= (k_{p\_d\_21}(n)) / (den\_p\_d\_21(n) * cp\_p\_d\_21(n)); \\ Fr\_dh\_21(n+1) &= (lfa\_dh\_21(n) * (\delta_t)) / (dr^2); \\ Fz\_dh\_21(n+1) &= (lfa\_dh\_21(n) * (\delta_t)) / (dz^2); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} k_{p\_d\_20}(n+1) &= (0.0863 + (0.00134 * (M20\_d(n) / (1 + M20\_d(n))))); \\ den\_p\_d\_20(n+1) &= (1456 + (705 * M20\_d(n))) * 1.257; \\ cp\_p\_d\_20(n+1) &= (1.11 * (10^3)) + (44.8 * (M20\_d(n) / (1 + M20\_d(n)))); \\ lfa\_dh\_20(n+1) &= (k_{p\_d\_20}(n)) / (den\_p\_d\_20(n) * cp\_p\_d\_20(n)); \\ Fr\_dh\_20(n+1) &= (lfa\_dh\_20(n) * (\delta_t)) / (dr^2); \\ Fz\_dh\_20(n+1) &= (lfa\_dh\_20(n) * (\delta_t)) / (dz^2); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} k_{p\_d\_03}(n+1) &= (0.0863 + (0.00134 * (M03\_d(n) / (1 + M03\_d(n))))); \\ den\_p\_d\_03(n+1) &= (1456 + (705 * M03\_d(n))) * 1.257; \\ cp\_p\_d\_03(n+1) &= (1.11 * (10^3)) + (44.8 * (M03\_d(n) / (1 + M03\_d(n)))); \\ lfa\_dh\_03(n+1) &= (k_{p\_d\_03}(n)) / (den\_p\_d\_03(n) * cp\_p\_d\_03(n)); \\ Fr\_dh\_03(n+1) &= (lfa\_dh\_03(n) * (\delta_t)) / (dr^2); \\ Fz\_dh\_03(n+1) &= (lfa\_dh\_03(n) * (\delta_t)) / (dz^2); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} k_{p\_d\_13}(n+1) &= (0.0863 + (0.00134 * (M13\_d(n) / (1 + M13\_d(n))))); \\ den\_p\_d\_13(n+1) &= (1456 + (705 * M13\_d(n))) * 1.257; \\ cp\_p\_d\_13(n+1) &= (1.11 * (10^3)) + (44.8 * (M13\_d(n) / (1 + M13\_d(n)))); \\ lfa\_dh\_13(n+1) &= (k_{p\_d\_13}(n)) / (den\_p\_d\_13(n) * cp\_p\_d\_13(n)); \\ Fr\_dh\_13(n+1) &= (lfa\_dh\_13(n) * (\delta_t)) / (dr^2); \\ Fz\_dh\_13(n+1) &= (lfa\_dh\_13(n) * (\delta_t)) / (dz^2); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} k_{p\_d\_23}(n+1) &= (0.0863 + (0.00134 * (M23\_d(n) / (1 + M23\_d(n))))); \\ den\_p\_d\_23(n+1) &= (1456 + (705 * M23\_d(n))) * 1.257; \\ cp\_p\_d\_23(n+1) &= (1.11 * (10^3)) + (44.8 * (M23\_d(n) / (1 + M23\_d(n)))); \\ lfa\_dh\_23(n+1) &= (k_{p\_d\_23}(n)) / (den\_p\_d\_23(n) * cp\_p\_d\_23(n)); \\ Fr\_dh\_23(n+1) &= (lfa\_dh\_23(n) * (\delta_t)) / (dr^2); \\ Fz\_dh\_23(n+1) &= (lfa\_dh\_23(n) * (\delta_t)) / (dz^2); \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} k_{p\_d\_33}(n+1) &= (0.0863 + (0.00134 * (M33\_d(n) / (1 + M33\_d(n))))); \\ den\_p\_d\_33(n+1) &= (1456 + (705 * M33\_d(n))) * 1.257; \\ cp\_p\_d\_33(n+1) &= (1.11 * (10^3)) + (44.8 * (M33\_d(n) / (1 + M33\_d(n)))); \\ lfa\_dh\_33(n+1) &= (k_{p\_d\_33}(n)) / (den\_p\_d\_33(n) * cp\_p\_d\_33(n)); \\ Fr\_dh\_33(n+1) &= (lfa\_dh\_33(n) * (\delta_t)) / (dr^2); \\ Fz\_dh\_33(n+1) &= (lfa\_dh\_33(n) * (\delta_t)) / (dz^2); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} k_{p\_d\_32}(n+1) &= (0.0863 + (0.00134 * (M32\_d(n) / (1 + M32\_d(n))))); \\ den\_p\_d\_32(n+1) &= (1456 + (705 * M32\_d(n))) * 1.257; \\ cp\_p\_d\_32(n+1) &= (1.11 * (10^3)) + (44.8 * (M32\_d(n) / (1 + M32\_d(n)))); \\ lfa\_dh\_32(n+1) &= (k_{p\_d\_32}(n)) / (den\_p\_d\_32(n) * cp\_p\_d\_32(n)); \\ Fr\_dh\_32(n+1) &= (lfa\_dh\_32(n) * (\delta_t)) / (dr^2); \\ Fz\_dh\_32(n+1) &= (lfa\_dh\_32(n) * (\delta_t)) / (dz^2); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} k_{p\_d\_31}(n+1) &= (0.0863 + (0.00134 * (M31\_d(n) / (1 + M31\_d(n))))); \\ den\_p\_d\_31(n+1) &= (1456 + (705 * M31\_d(n))) * 1.257; \\ cp\_p\_d\_31(n+1) &= (1.11 * (10^3)) + (44.8 * (M31\_d(n) / (1 + M31\_d(n)))); \\ lfa\_dh\_31(n+1) &= (k_{p\_d\_31}(n)) / (den\_p\_d\_31(n) * cp\_p\_d\_31(n)); \\ Fr\_dh\_31(n+1) &= (lfa\_dh\_31(n) * (\delta_t)) / (dr^2); \\ Fz\_dh\_31(n+1) &= (lfa\_dh\_31(n) * (\delta_t)) / (dz^2); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} k_{p\_d\_30}(n+1) &= (0.0863 + (0.00134 * (M30\_d(n) / (1 + M30\_d(n))))); \\ den\_p\_d\_30(n+1) &= (1456 + (705 * M30\_d(n))) * 1.257; \\ cp\_p\_d\_30(n+1) &= (1.11 * (10^3)) + (44.8 * (M30\_d(n) / (1 + M30\_d(n)))); \\ lfa\_dh\_30(n+1) &= (k_{p\_d\_30}(n)) / (den\_p\_d\_30(n) * cp\_p\_d\_30(n)); \\ Fr\_dh\_30(n+1) &= (lfa\_dh\_30(n) * (\delta_t)) / (dr^2); \\ Fz\_dh\_30(n+1) &= (lfa\_dh\_30(n) * (\delta_t)) / (dz^2); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} k_{p\_d\_04}(n+1) &= (0.0863 + (0.00134 * (M04\_d(n) / (1 + M04\_d(n))))); \\ den\_p\_d\_04(n+1) &= (1456 + (705 * M04\_d(n))) * 1.257; \\ cp\_p\_d\_04(n+1) &= (1.11 * (10^3)) + (44.8 * (M04\_d(n) / (1 + M04\_d(n)))); \\ lfa\_dh\_04(n+1) &= (k_{p\_d\_04}(n)) / (den\_p\_d\_04(n) * cp\_p\_d\_04(n)); \\ Fr\_dh\_04(n+1) &= (lfa\_dh\_04(n) * (\delta_t)) / (dr^2); \\ Fz\_dh\_04(n+1) &= (lfa\_dh\_04(n) * (\delta_t)) / (dz^2); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} k_{p\_d\_14}(n+1) &= (0.0863 + (0.00134 * (M14\_d(n) / (1 + M14\_d(n))))); \\ den\_p\_d\_14(n+1) &= (1456 + (705 * M14\_d(n))) * 1.257; \\ cp\_p\_d\_14(n+1) &= (1.11 * (10^3)) + (44.8 * (M14\_d(n) / (1 + M14\_d(n)))); \\ lfa\_dh\_14(n+1) &= (k_{p\_d\_14}(n)) / (den\_p\_d\_14(n) * cp\_p\_d\_14(n)); \\ Fr\_dh\_14(n+1) &= (lfa\_dh\_14(n) * (\delta_t)) / (dr^2); \\ Fz\_dh\_14(n+1) &= (lfa\_dh\_14(n) * (\delta_t)) / (dz^2); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} k_{p\_d\_24}(n+1) &= (0.0863 + (0.00134 * (M24\_d(n) / (1 + M24\_d(n))))); \\ den\_p\_d\_24(n+1) &= (1456 + (705 * M24\_d(n))) * 1.257; \\ cp\_p\_d\_24(n+1) &= (1.11 * (10^3)) + (44.8 * (M24\_d(n) / (1 + M24\_d(n)))); \\ lfa\_dh\_24(n+1) &= (k_{p\_d\_24}(n)) / (den\_p\_d\_24(n) * cp\_p\_d\_24(n)); \\ Fr\_dh\_24(n+1) &= (lfa\_dh\_24(n) * (\delta_t)) / (dr^2); \\ Fz\_dh\_24(n+1) &= (lfa\_dh\_24(n) * (\delta_t)) / (dz^2); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} k_{p\_d\_34}(n+1) &= (0.0863 + (0.00134 * (M34\_d(n) / (1 + M34\_d(n))))); \\ den\_p\_d\_34(n+1) &= (1456 + (705 * M34\_d(n))) * 1.257; \\ cp\_p\_d\_34(n+1) &= (1.11 * (10^3)) + (44.8 * (M34\_d(n) / (1 + M34\_d(n)))); \\ lfa\_dh\_34(n+1) &= (k_{p\_d\_34}(n)) / (den\_p\_d\_34(n) * cp\_p\_d\_34(n)); \\ Fr\_dh\_34(n+1) &= (lfa\_dh\_34(n) * (\delta_t)) / (dr^2); \\ Fz\_dh\_34(n+1) &= (lfa\_dh\_34(n) * (\delta_t)) / (dz^2); \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

k_p_d_44(n+1)=(0.0863+(0.00134*(M44_d(n)/(1+M44_d(n)))));
den_p_d_44(n+1)=(1456+(705*M44_d(n)))*1.257;
cp_p_d_44(n+1)=(1.11*(10^3))+(44.8*(M44_d(n)/(1+M44_d(n)));
lfa_dh_44(n+1)=(k_p_d_44(n))/(den_p_d_44(n)*cp_p_d_44(n));
Fr_dh_44(n+1)=(lfa_dh_44(n)*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dh_44(n+1)=(lfa_dh_44(n)*(delta_t))/(dz^2);

```

```

k_p_d_43(n+1)=(0.0863+(0.00134*(M43_d(n)/(1+M43_d(n)))));
den_p_d_43(n+1)=(1456+(705*M43_d(n)))*1.257;
cp_p_d_43(n+1)=(1.11*(10^3))+(44.8*(M43_d(n)/(1+M43_d(n)));
lfa_dh_43(n+1)=(k_p_d_43(n))/(den_p_d_43(n)*cp_p_d_43(n));
Fr_dh_43(n+1)=(lfa_dh_43(n)*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dh_43(n+1)=(lfa_dh_43(n)*(delta_t))/(dz^2);

```

```

k_p_d_42(n+1)=(0.0863+(0.00134*(M42_d(n)/(1+M42_d(n)))));
den_p_d_42(n+1)=(1456+(705*M42_d(n)))*1.257;
cp_p_d_42(n+1)=(1.11*(10^3))+(44.8*(M42_d(n)/(1+M42_d(n)));
lfa_dh_42(n+1)=(k_p_d_42(n))/(den_p_d_42(n)*cp_p_d_42(n));
Fr_dh_42(n+1)=(lfa_dh_42(n)*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dh_42(n+1)=(lfa_dh_42(n)*(delta_t))/(dz^2);

```

```

k_p_d_41(n+1)=(0.0863+(0.00134*(M41_d(n)/(1+M41_d(n)))));
den_p_d_41(n+1)=(1456+(705*M41_d(n)))*1.257;
cp_p_d_41(n+1)=(1.11*(10^3))+(44.8*(M41_d(n)/(1+M41_d(n)));
lfa_dh_41(n+1)=(k_p_d_41(n))/(den_p_d_41(n)*cp_p_d_41(n));
Fr_dh_41(n+1)=(lfa_dh_41(n)*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dh_41(n+1)=(lfa_dh_41(n)*(delta_t))/(dz^2);

```

```

k_p_d_40(n+1)=(0.0863+(0.00134*(M40_d(n)/(1+M40_d(n)))));
den_p_d_40(n+1)=(1456+(705*M40_d(n)))*1.257;
cp_p_d_40(n+1)=(1.11*(10^3))+(44.8*(M40_d(n)/(1+M40_d(n)));
lfa_dh_40(n+1)=(k_p_d_40(n))/(den_p_d_40(n)*cp_p_d_40(n));
Fr_dh_40(n+1)=(lfa_dh_40(n)*(delta_t))/(dr^2);
Fz_dh_40(n+1)=(lfa_dh_40(n)*(delta_t))/(dz^2);

```

```

%Calculate dT_avg during drying period%

```

```

dT00_d(n+1)=T00_d(n+1)-T00_d(n);
dT10_d(n+1)=T10_d(n+1)-T10_d(n);
dT20_d(n+1)=T20_d(n+1)-T20_d(n);
dT30_d(n+1)=T30_d(n+1)-T30_d(n);
dT40_d(n+1)=T40_d(n+1)-T40_d(n);
dT01_d(n+1)=T01_d(n+1)-T01_d(n);
dT11_d(n+1)=T11_d(n+1)-T11_d(n);
dT21_d(n+1)=T21_d(n+1)-T21_d(n);
dT31_d(n+1)=T31_d(n+1)-T31_d(n);
dT41_d(n+1)=T41_d(n+1)-T41_d(n);
dT02_d(n+1)=T02_d(n+1)-T02_d(n);
dT12_d(n+1)=T12_d(n+1)-T12_d(n);
dT22_d(n+1)=T22_d(n+1)-T22_d(n);
dT32_d(n+1)=T32_d(n+1)-T32_d(n);
dT42_d(n+1)=T42_d(n+1)-T42_d(n);
dT03_d(n+1)=T03_d(n+1)-T03_d(n);
dT13_d(n+1)=T13_d(n+1)-T13_d(n);
dT23_d(n+1)=T23_d(n+1)-T23_d(n);
dT33_d(n+1)=T33_d(n+1)-T33_d(n);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

dT43_d(n+1)=T43_d(n+1)-T43_d(n);
dT04_d(n+1)=T04_d(n+1)-T04_d(n);
dT14_d(n+1)=T14_d(n+1)-T14_d(n);
dT24_d(n+1)=T24_d(n+1)-T24_d(n);
dT34_d(n+1)=T34_d(n+1)-T34_d(n);
dT44_d(n+1)=T44_d(n+1)-T44_d(n);

%Calculated change of grain temperature%
Row_0_dT_dh(n)=((r-
0)*((dT00_d(n))+4*(dT10_d(n)+dT30_d(n)))+(2*dT20_d(n)+(dT40_d(n))))/(3*N)
;
Row_1_dT_dh(n)=((r-
0)*((dT01_d(n))+4*(dT11_d(n)+dT31_d(n)))+(2*dT21_d(n)+(dT41_d(n))))/(3*N)
;
Row_2_dT_dh(n)=((r-
0)*((dT02_d(n))+4*(dT12_d(n)+dT32_d(n)))+(2*dT22_d(n)+(dT42_d(n))))/(3*N)
;
Row_3_dT_dh(n)=((r-
0)*((dT03_d(n))+4*(dT13_d(n)+dT33_d(n)))+(2*dT23_d(n)+(dT43_d(n))))/(3*N)
;
Row_4_dT_dh(n)=((r-
0)*((dT04_d(n))+4*(dT14_d(n)+dT34_d(n)))+(2*dT24_d(n)+(dT44_d(n))))/(3*N)
;
Col_dT_dh(n)=(z-
0)*((Row_0_dT_dh(n))+4*(Row_1_dT_dh(n)+Row_3_dT_dh(n)))+(2*Row_2_dT_dh(n)
+(Row_4_dT_dh(n)))/(3*N);
dTavg_dT_dh(n)=((3.14*r)/(3.14*(r^2)*z))*Col_dT_dh(n);
dTavg_dT_abs(n)=(abs(((3.14*r)/(3.14*(r^2)*z))*(Col_dT_dh(n)))/delta_t));

%Calculated new air out temperature%
Tao_n(n)=((m_p*(cp_p_d(n)+(cw*Mavg_dm(n)))*(dTavg_dT_abs
(n)))+(m_p*(dMavg_dM_abs (n))*(Lv_d))-(m_a*c_a*Tinf_HA)-
(m_a*c_v*W_ratio*Tinf_HA))/((-m_a*c_a)-
((m_a*c_v*(W_ratio+((m_p*dMavg_dM_abs (n))/m_a)*(1/(1-RC))))));

if counter==20000;
fprintf('%10.0f %10.1f %10.1f %10.1f %10.1f %10.1f %10.1f %10.1f %10.1f
%10.1f %10.1f\n',...
n/per_s,T04_d(n)-273,T14_d(n)-273,T24_d(n)-273,T34_d(n)-273,T44_d(n)-
273,...
M04_d(n)*100,M14_d(n)*100,M24_d(n)*100,M34_d(n)*100,M44_d(n)*100);
fprintf('%10.0f %10.1f %10.1f %10.1f %10.1f %10.1f %10.1f %10.1f %10.1f
%10.1f %10.1f\n',...
n/per_s,T03_d(n)-273,T13_d(n)-273,T23_d(n)-273,T33_d(n)-273,T43_d(n)-
273,...
M03_d(n)*100,M13_d(n)*100,M23_d(n)*100,M33_d(n)*100,M43_d(n)*100);
fprintf('%10.0f %10.1f %10.1f %10.1f %10.1f %10.1f %10.1f %10.1f %10.1f
%10.1f %10.1f\n',...
n/per_s,T02_d(n)-273,T12_d(n)-273,T22_d(n)-273,T32_d(n)-273,T42_d(n)-
273,...
M02_d(n)*100,M12_d(n)*100,M22_d(n)*100,M32_d(n)*100,M42_d(n)*100);
fprintf('%10.0f %10.1f %10.1f %10.1f %10.1f %10.1f %10.1f %10.1f %10.1f
%10.1f %10.1f\n',...
n/per_s,T01_d(n)-273,T11_d(n)-273,T21_d(n)-273,T31_d(n)-273,T41_d(n)-
273,...
M01_d(n)*100,M11_d(n)*100,M21_d(n)*100,M31_d(n)*100,M41_d(n)*100);

```

```

fprintf('%10.0f %10.1f %10.1f %10.1f %10.1f %10.1f %10.1f %10.1f %10.1f
%10.1f %10.1f\n',...
n/per_s,T00_d(n)-273,T10_d(n)-273,T20_d(n)-273,T30_d(n)-273,T40_d(n)-
273,...
M00_d(n)*100,M10_d(n)*100,M20_d(n)*100,M30_d(n)*100,M40_d(n)*100);
fprintf('          Tg_avg      MC_avg\n');
fprintf('%10.0f %10.1f %10.1f\n',n/per_s,Tavg_dh(n)-273,Mavg_dm(n)*100);
fprintf('_____
\n');
counter=0;
    %Check stability%
    stability_dm=Fr_dm+Fz_dm;
    stability_dh=Fr_dh+Fz_dh;
    if stability_dm > 0.5
        if stability_dh > 0.5;
break;
        end
    end
end
end

Tao_new = Tao_n(n);
Ta_o_assume = Ta_o_as_d(k);
dTao_o=abs(Ta_o_assume-Tao_new)
if (dTao_o)<1.0;
break;
end
end
toc;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



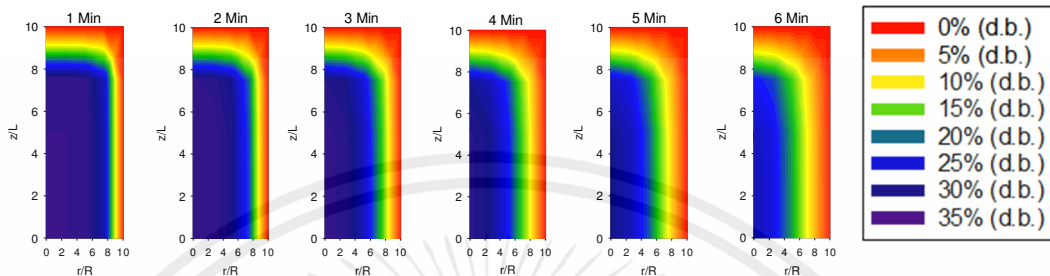
ภาคผนวก ง

## การเปลี่ยนแปลงความขึ้นและอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

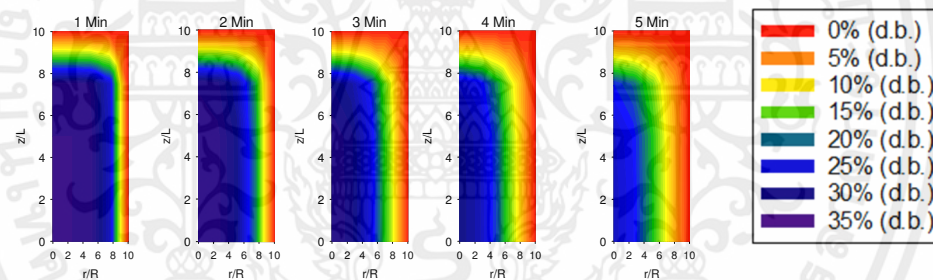
## 1. การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือก

### 1.1 ผลการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 90°C



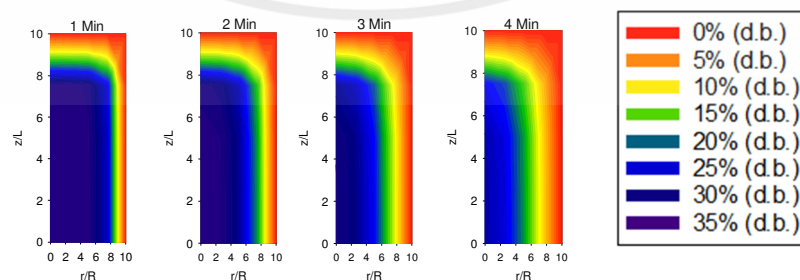
รูปที่ ง.1 ผลการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกที่อุณหภูมิการอบแห้ง 90°C

### 1.2 ผลการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 110°C



รูปที่ ง.2 ผลการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกที่อุณหภูมิการอบแห้ง 110°C

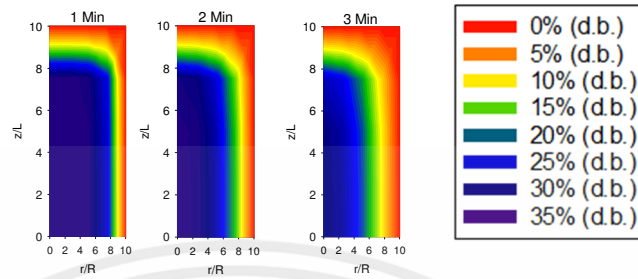
### 1.3 ผลการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 130°C



รูปที่ ง.3 ผลการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกที่อุณหภูมิการอบแห้ง 130°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

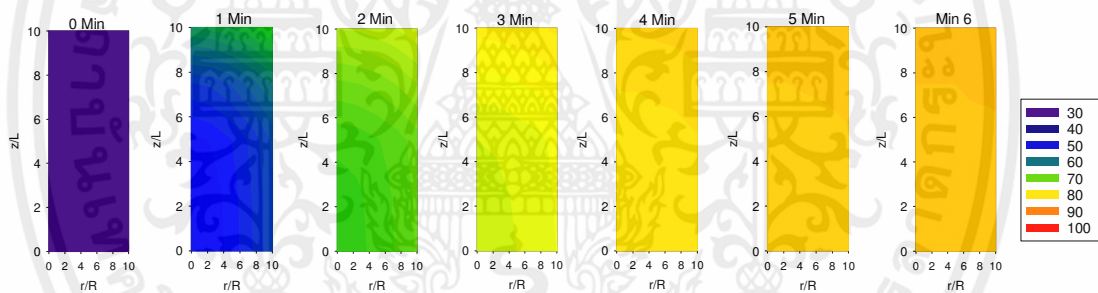
1.4 ผลการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 150°C



รูปที่ ง.4 ผลการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกที่อุณหภูมิการอบแห้ง 150°C

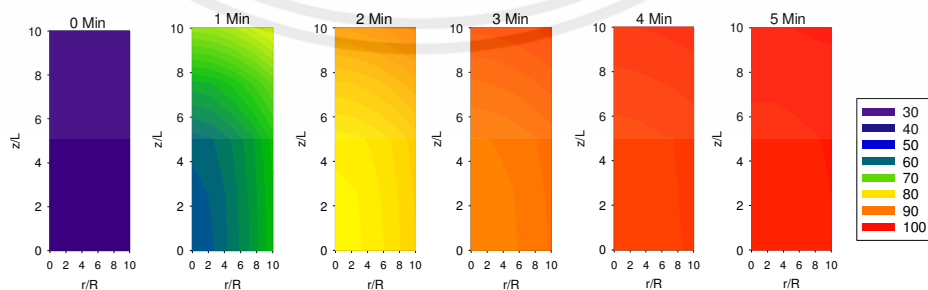
2. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของข้าวเปลือก

2.1 ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกที่อุณหภูมิการอบแห้ง 90°C



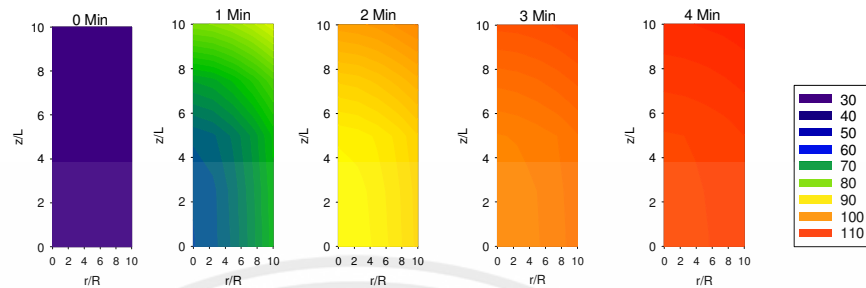
รูปที่ ง.5 ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกที่อุณหภูมิการอบแห้ง 90°C

2.2 ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกที่อุณหภูมิการอบแห้ง 110°C



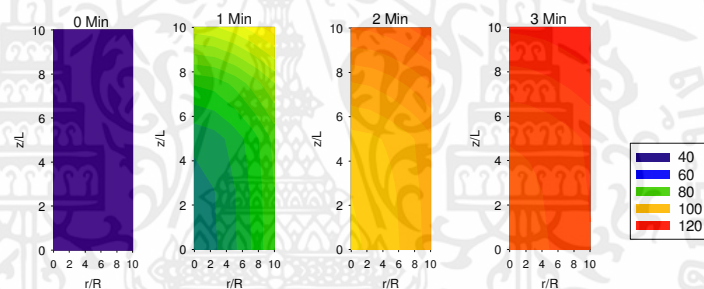
รูปที่ ง.6 ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกที่อุณหภูมิการอบแห้ง 110°C

### 2.3 ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกที่อุณหภูมิการอบแห้ง 130°C



รูปที่ ๗.7 ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกที่อุณหภูมิการอบแห้ง 130°C

### 2.4 ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกที่อุณหภูมิการอบแห้ง 150°C



รูปที่ ๗.8 ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกที่อุณหภูมิการอบแห้ง 150°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล นางสาวสิริณกาญจน์ แดงสว่าง  
 วัน เดือน ปีเกิด วันที่ 16 เมษายน พ.ศ. 2543  
 ภูมิลำเนา จังหวัดประจวบคีรีขันธ์  
 ที่อยู่ 835 หมู่ 12 ตำบล อ่าวน้อย อำเภอ เมือง  
 จังหวัด ประจวบคีรีขันธ์  
 E-mail 61512063@kmitl.ac.th

### ประวัติการศึกษา

- สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษา (วิทย์-คณิต)  
 ปีการศึกษา 2560 จากโรงเรียนประจวบวิทยาลัย

### ผลงานและกิจกรรม

- ผ่านการฝึกงานในส่วนวิศวกรรมศาสตร์ จากสถาบัน  
 เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขต  
 ชุมพรเขตรอุดมศักดิ์



ชื่อ-นามสกุล นายวสุธร คงเพชร  
 วัน เดือน ปีเกิด วันที่ 28 กันยายน พ.ศ. 2542  
 ภูมิลำเนา จังหวัดตรัง  
 ที่อยู่ 68 หมู่ 5 ตำบล ปากแจ่ม อำเภอ ห้วยยอด  
 จังหวัด ตรัง  
 E-mail 61514015@kmitl.ac.th

### ประวัติการศึกษา

- สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษา (วิทย์-คณิต)  
 ปีการศึกษา 2560 จากโรงเรียนตรังคริสเตียนศึกษา

### ผลงานและกิจกรรม

- ผ่านการฝึกงานในส่วนวิศวกรรมศาสตร์ จากการไฟฟ้าฝ่าย  
 ผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) สำนักงานลำภูรา จังหวัด ตรัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้