



การศึกษาเชิงตัวเลขของการอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือก
Numerical Study of Drying of a Paddy

นายจักรวาล	เสื่อหาญ	รหัสนิสิต 53361870
นายเมธา	ภัทรพงศ์ไพศาล	รหัสนิสิต 53362167
นายยศฐพล	สวัสดิ์ผล	รหัสนิสิต 53362174

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
ปีการศึกษา 2556

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ..... 20/11/56
เลขทะเบียน..... 16914378
เลขเรียกหนังสือ..... 428
มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ 228



ใบรับรองโครงการงาน

หัวข้อโครงการงาน : การศึกษาเชิงตัวเลขของการอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือก

Numerical Study of Drying of a Paddy

ผู้ดำเนินโครงการงาน : นายจักรวาล เสือหาญ รหัสสนิสิต 53361870

นายเมธา ภัทรพงศ์ไพศาล รหัสสนิสิต 53362167

นายยศฐุพล สวัสดิ์ผล รหัสสนิสิต 53362174

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.กฤษยา กนกजारุวิจิตร

ภาควิชา : วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา : 2556

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้โครงการงานวิจัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะกรรมการสอบโครงการงาน

.....ประธานกรรมการ
(ผศ.ดร.กฤษยา กนกजारุวิจิตร)

.....กรรมการ
(ดร.ภาณุ พุทธวงศ์)

.....กรรมการ
(ดร.รัตนา การัญญบุญญานันท์)

หัวข้อโครงการ : การศึกษาเชิงตัวเลขของการอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือก
ผู้ดำเนินโครงการ : นายจักรวาล เสือหาญ รหัสนิสิต 53361870
นายเมธา ภัทรพงศ์ไพศาล รหัสนิสิต 53362167
นายยศฐพล สวัสดิ์ผล รหัสนิสิต 53362174
อาจารย์ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.กฤษยา กนกजारูจิตร
ภาควิชา : วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา : 2556

บทคัดย่อ

การศึกษาเชิงตัวเลขของการอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือกมีวัตถุประสงค์เพื่อพิจารณาผลกระทบของอุณหภูมิของลมร้อนที่ 333.15 ถึง 363.15 K และการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกสัมพันธ์กับทิศทางการไหลของลมร้อน โดยจัดวางในทิศทางตั้งฉาก ขนาน และทำมุม 45 องศา กับทิศทางการไหลของร้อนที่มีต่อการกระจายอุณหภูมิภายในของเมล็ดข้าว ณ เวลาต่างๆ โดยพิจารณาความเร็วของลมร้อนคงที่ที่ 0.5 m/s ซึ่งใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม COMSOL ในการคำนวณและประมวลผลใน 3 มิติ โดยทำการแยกพิจารณาการคำนวณออกเป็นสองส่วน ได้แก่ การไหลของลมร้อนที่สภาวะคงที่ และการถ่ายเทความร้อนภายในเมล็ดข้าวเปลือกที่สภาวะทรานเซียนต์ โดยจะแบ่งพื้นผิวของเมล็ดข้าวเปลือกที่เกิดการถ่ายเทความร้อนออกเป็นสองบริเวณหลัก ได้แก่ บริเวณที่เกิดการปะทะกับลมร้อน และบริเวณหลังการปะทะกับลมร้อน ซึ่งแต่ละบริเวณจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่ต่างกันโดยคำนวณจาก Nusselt number เฉลี่ยที่ได้จากการคำนวณมาจากการรวมรวม จากการศึกษาพบว่าอุณหภูมิของลมร้อนไม่มีผลกระทบต่อลักษณะของเส้นแนวโน้มอุณหภูมิและการกระจายอุณหภูมิ การจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกมีผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอยู่บ้าง เนื่องจากมีพื้นที่บริเวณที่เกิดการปะทะกับลมร้อนต่างกัน ความโค้งของผิวที่ลมร้อนไหลผ่านต่างกัน และลักษณะการไหลของลมร้อนบริเวณด้านหลังการปะทะของเมล็ดข้าวเปลือกต่างกัน โดยบริเวณที่เกิดการปะทะทำให้เกิดการถ่ายเทโมเมนตัมอย่างมาก จึงทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้รวดเร็วกว่าบริเวณหลังการปะทะที่การไหลของลมร้อนมีลักษณะไหลย้อนกลับ หมุนวน และมีความเร็วต่ำกว่า โดยที่บริเวณปลายของเมล็ดข้าวเปลือกจะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้รวดเร็วมากที่สุดเนื่องจากเป็นบริเวณที่มีการนำความร้อนได้เร็วที่สุด และที่บริเวณกึ่งกลางเมล็ดข้าวเปลือกจะเป็นบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิช้าที่สุด

Project Title : Numerical Study of Drying of a Paddy
Name : Mr. Jakrawal Suahal Student ID. 53361870
Mr. Meta Phattarapongpaisan Student ID. 53362167
Mr. Yodtapol Sawatdeephol Student ID. 53362174
Project Advisor : Assist. Prof. Dr. Koonlaya Kanokjaruvijit
Department : Mechanical Engineering
Academic Year : 2013

Abstract

The objectives of this senior project are to numerically study the effects of temperature of the hot air past a three-dimensional rice grain between 333 and 363 K and arrangement of the major axis of the grain related to the flow direction such as perpendicular, parallel and 45° of the axis, to the temperature distribution within the grain. The hot air velocity is fixed at 0.5 m/s. The finite element method in a commercial software called COMSOL is used to calculate and process the data. Two problems of the steady hot air flow and the transient conduction inside the rice grain are separately considered. For the heat transfer problem, the Nusselt numbers are obtained from literature for each region of the grain, which are that impacted directly with the hot air and that behind. The computational results show that the hot air temperature does not affect the temperature distributions. However, the influence of the grain arrangement play an important role in temperature distributions due to the fact that the impact areas are different in each case, and the curvature of the surface for the fluid to move along after stagnating is also different, plus, the behaviors of the fluid at the back region of each case differ. The momentum transfer at the impact area is higher, and thus provides higher heat transfer than the back area, where flow separation, back flow and swirling motions take place. Hence, the fluid at the back region has lower velocity. At the apexes of the grain, where in reality there consists rice germ, the temperature changes swiftly causing higher heat conduction, because the heat transfer area is lower. At the center of the grain, slower temperature change occurs.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิศวกรรมเครื่องกลฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ทางคณะผู้ดำเนินงาน ต้องขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.กฤษยา กนกจาร์วิจิตร ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่กรุณาให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางการแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการดำเนินโครงการ ตลอดจนติดตามประเมินผลการดำเนินโครงการมาโดยตลอด ทางคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ทุกท่าน ที่อบรมสั่งสอน และให้ความรู้แก่ผู้ดำเนินงาน

ขอขอบพระคุณฝ่ายเลขานุการ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการดำเนินโครงการ

ขอขอบพระคุณบิดามารดา ที่ให้การอุปการะเลี้ยงดูและสั่งสอนจนกระทั่งสามารถเติบโตมาจนถึงปัจจุบัน ตลอดจนช่วยอุปการะทางการเงินและคอยให้กำลังใจ จนกระทั่งโครงการนี้เสร็จสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ ผู้ดำเนินงานขอมอบคุณงามความดีที่เกิดขึ้นจากโครงการนี้ แต่ผู้มีส่วนทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และถ้าเกิดข้อผิดพลาดประการใดจากโครงการนี้ ผู้ดำเนินงานต้องกราบขอภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

นายจักรวาล

เสื่อหาญ

นายเมธา

ภัทรพงศ์ไพศาล

นายยศฐพล

สวัสดีผล

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่และความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.4 ขอบเขตของโครงการ	3
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน	4
1.6 แผนการดำเนินงาน	8
1.7 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงการ	9
บทที่ 2 ทฤษฎีและวรรณกรรมปริทัศน์	10
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	10
2.2 วรรณกรรมปริทัศน์	16
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	18
3.1 โดเมนการคำนวณ	20
3.2 ขอบเขตในการคำนวณ และสมการควบคุม	23
3.3 ขั้นตอนการคำนวณจากโปรแกรม COMSOL	26
บทที่ 4 ผลการคำนวณและการวิเคราะห์ผล	39
4.1 การไหลของลมร้อนผ่านเมล็ดข้าวเปลือก	39
4.2 การถ่ายเทความร้อนที่เมล็ดข้าวเปลือก	55
บทที่ 5 สรุปผลการคำนวณและข้อเสนอแนะ	68
สรุปผลการคำนวณ	68
ข้อเสนอแนะ	69
เอกสารอ้างอิง	70

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	8
3.1	22
3.2	33
3.3	34
3.4	35
3.5	35
3.6	35
3.7	37

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แบบจำลองของเมล็ดข้าว 3 มิติ	3
1.2 โดเมนการคำนวณสำหรับการไหลของลมร้อนที่ล้อมรอบแบบจำลองเมล็ดข้าว	4
1.3 แสดง Mesh ของแบบจำลองเมล็ดข้าว	5
1.4 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนการคำนวณในส่วนการไหลของร้อนที่เป็นของไหลไหลผ่านผิวภายนอกเมล็ดข้าวเปลือกที่เป็นของแข็งในสภาวะคงที่	6
1.5 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนการคำนวณในส่วนการถ่ายเทความร้อนในเมล็ดข้าวเปลือกที่เป็นของแข็งในสภาวะทรานเซียนต์	7
2.1 ปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อน	10
3.1 แนวคิดในการประมวลผลด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม COMSOL	19
3.2 การแบ่งส่วนพิจารณาระหว่างการไหลของลมร้อนและการถ่ายเทความร้อนที่เมล็ดข้าวเปลือก	20
3.3 การจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกสัมพันธ์กับทิศทางการไหลของลมร้อนในทิศทางต่างๆ	21
3.4 การจัดวางแกนของเมล็ดข้าวเปลือกตั้งฉากกับทิศทางการไหลของลมร้อนในลักษณะต่างๆ	21
3.5 รูปทรงเมล็ดข้าวเปลือก และการกำหนดขนาด	23
3.6 การเลือกสมการควบคุมจาก Application Mode เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณ	26
3.7 การกำหนดสมบัติทางกายภาพให้กับโดเมนย่อย	27
3.8 การกำหนดสมบัติของพื้นผิวต่างๆ และทิศทางการไหลของลมร้อน	27
3.9 การสร้าง Mesh ของแบบจำลองเมล็ดข้าวเปลือก จำนวน 53,375 Elements ซึ่งคิดเป็นความหนาแน่นเท่ากับ 1.708 meshes / mm ³	28
3.10 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนการคำนวณของแนวคิดปรับปรุงในส่วนการไหลของลมร้อนที่เป็นของไหลไหลผ่านผิวภายนอกเมล็ดข้าวเปลือกที่เป็นของแข็งในสภาวะคงที่	29
3.11 การกำหนดพื้นผิวของเมล็ดข้าวเปลือกออกเป็นบริเวณที่เกิดการปะทะและหลังการปะทะกับลมร้อน	30
3.12 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของการถ่ายเทความร้อนที่ผิวของเมล็ดข้าวเปลือกในแต่ละบริเวณ	33
3.13 ลักษณะการวางตัวของวัตถุทรงรีจากงานวิจัยของ ของ Richter และ Nikrityuk [4]	34
3.14 การสร้าง Mesh ของแบบจำลองเมล็ดข้าวเปลือก จำนวน 6516 elements ซึ่งคิดเป็นความหนาแน่นเท่ากับ 248.8904 meshes / mm ³	38
3.15 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนการคำนวณของแนวคิดปรับปรุงในส่วนการถ่ายเทความร้อนในเมล็ดข้าวเปลือกที่เป็นของแข็งในสภาวะทรานเซียนต์	39

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 สนามความเร็วของลมร้อนที่ตัดผ่านกึ่งกลางของเมล็ดข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 333.15 K ในมุมมองไอโซเมตริก	41
4.2 สนามความเร็วของลมร้อนที่ตัดผ่านกึ่งกลางของเมล็ดข้าวเปลือกที่อุณหภูมิต่างๆ	42
4.3 สนามความเร็วของลมร้อนที่ตัดผ่านปลายเมล็ดข้าวเปลือก	43
4.4 เส้นกระแสการไหลของลมร้อนที่ไหลผ่านเมล็ดข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 333.15 K ในมุมมองไอโซเมตริก	44
4.5 เส้นกระแสการไหลของลมร้อนที่ไหลผ่านเมล็ดข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 333.15 K ในมุมมองด้านบน	45
4.6 เส้นกระแสการไหลของลมร้อนที่ไหลผ่านเมล็ดข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 333.15 K ในมุมมองด้านข้าง	45
4.7 สนามความเร็วของลมร้อนที่ตัดผ่านเมล็ดข้าวเปลือกที่จัดวางขนานกับทิศทางการไหลของลมร้อนที่อุณหภูมิ 333.15 K ในมุมมองไอโซเมตริก	47
4.8 สนามความเร็วของลมร้อนที่ตัดผ่านเมล็ดข้าวเปลือกที่จัดวางทำมุม 45 องศา กับทิศทางการไหลของลมร้อนที่อุณหภูมิ 333.15 K ในมุมมองไอโซเมตริก	48
4.9 สนามความเร็วของลมร้อนที่ตัดผ่านเมล็ดข้าวเปลือกที่จัดวางตั้งฉากกับทิศทาง ของลมร้อนที่อุณหภูมิ 333.15 K	49
4.10 สนามความเร็วของลมร้อนที่ตัดผ่านเมล็ดข้าวเปลือกที่จัดวางขนานกับทิศทาง ของลมร้อนที่อุณหภูมิ 333.15 K	49
4.11 สนามความเร็วของลมร้อนที่ตัดผ่านเมล็ดข้าวเปลือกที่จัดวางทำมุม 45 องศา กับทิศทางการไหลของลมร้อนที่อุณหภูมิ 333.15 K	50
4.12 สนามความเร็วของลมร้อนที่ตัดผ่านกึ่งกลางเมล็ดข้าวเปลือกที่จัดวางตั้งฉาก กับทิศทางการไหลของลมร้อนที่อุณหภูมิ 333.15 K	51
4.13 สนามความเร็วของลมร้อนที่ตัดผ่านปลายเมล็ดข้าวเปลือกที่จัดวางตั้งฉากกับ ทิศทางการไหลของลมร้อนที่อุณหภูมิ 333.15 K	52
4.14 เส้นกระแสการไหลของลมร้อนที่ไหลผ่านเมล็ดข้าวเปลือกที่จัดวางขนานกับ ทิศทางการไหลของลมร้อนที่อุณหภูมิ 333.15 K ในมุมมองไอโซเมตริก	53
4.15 เส้นกระแสการไหลของลมร้อนที่ไหลผ่านเมล็ดข้าวเปลือกที่จัดวางทำมุม 45 องศา กับทิศทางการไหลของลมร้อนที่อุณหภูมิ 333.15 K ในมุมมองไอโซเมตริก	53
4.16 เส้นกระแสการไหลของลมร้อนที่ไหลผ่านเมล็ดข้าวเปลือกที่จัดวางขนานกับ ทิศทางการไหลของลมร้อนที่อุณหภูมิ 333.15 K ในมุมมองด้านบน	54

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 เส้นกระแสการไหลของลมร้อนที่ไหลผ่านเมล็ดข้าวเปลือกที่จัดวางท่ามุม 45 องศา กับทิศทางการไหลของลมร้อนที่อุณหภูมิ 333.15 K ในมุมมองด้านบน	54
4.18 เส้นกระแสการไหลของลมร้อนที่ไหลผ่านเมล็ดข้าวเปลือกที่จัดวางขนาน กับทิศทางการไหลของลมร้อนที่อุณหภูมิ 333.15 K ในมุมมองด้านข้าง	55
4.19 เส้นกระแสการไหลของลมร้อนที่ไหลผ่านเมล็ดข้าวเปลือกที่จัดวางท่ามุม 45 องศา กับทิศทางการไหลของลมร้อนที่อุณหภูมิ 333.15 K ในมุมมองด้านข้าง	55
4.20 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเวลาที่จุดกึ่งกลางของเมล็ดข้าวเปลือกที่อุณหภูมิลมร้อน ต่างๆ สำหรับการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกตั้งฉากกับทิศทางการไหลของลมร้อน	57
4.21 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเวลาที่จุดเกิดการปะทะของเมล็ดข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ ลมร้อนต่างๆ สำหรับการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกตั้งฉากกับทิศทางการไหลของลมร้อน	58
4.22 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเวลาที่จุดหลังการปะทะของเมล็ดข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ ลมร้อนต่างๆ สำหรับการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกตั้งฉากกับทิศทางการไหลของลมร้อน	58
4.23 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเวลาที่จุดปลายเมล็ดข้าวเปลือกที่อุณหภูมิลมร้อนต่างๆ สำหรับการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกตั้งฉากกับทิศทางการไหลของลมร้อน	59
4.24 การกระจายอุณหภูมิภายในเมล็ดข้าวเปลือกในภาพตัดขวางที่อุณหภูมิลมร้อน 333.15 K	60
4.25 การกระจายอุณหภูมิภายในเมล็ดข้าวเปลือกในภาพตัดขวางที่อุณหภูมิลมร้อน 343.15 K	61
4.26 การกระจายอุณหภูมิภายในเมล็ดข้าวเปลือกในภาพตัดขวางที่อุณหภูมิลมร้อน 353.15 K	62
4.27 การกระจายอุณหภูมิภายในเมล็ดข้าวเปลือกในภาพตัดขวางที่อุณหภูมิลมร้อน 363.15 K	63
4.28 การเปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิกับเวลาของเมล็ดข้าวเปลือกที่จัดวาง ในทิศทางต่างๆ ที่บริเวณต่างๆ ที่อุณหภูมิลมร้อน 333.15 K	65
4.29 การเปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิกับเวลาที่จุดต่างๆของเมล็ดข้าวเปลือก สำหรับ การจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกตั้งฉากกับทิศทางการไหลของลมร้อนที่มีความยาวคุณลักษณะ ต่างๆ ที่อุณหภูมิลมร้อน 333.15 K	66
4.30 การเปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิกับเวลาที่จุดต่างๆของเมล็ดข้าวเปลือก สำหรับการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกขนานกับทิศทางการไหลของลมร้อน ที่อุณหภูมิลมร้อน 333.15 K	67
4.31 การเปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิกับเวลาที่จุดต่างๆของเมล็ดข้าวเปลือก สำหรับ การจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกท่ามุม 45 องศา กับทิศทางการไหลของลมร้อน ที่อุณหภูมิ ลมร้อน 333.15 K	68

สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ

q	อัตราถ่ายเทความร้อน
ΔT	ผลต่างของอุณหภูมิ
R	ความต้านทานต่อการถ่ายเทความร้อน
k	ค่าการนำความร้อน
A	พื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของความร้อน
$\frac{dT}{dx}$	อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับระยะทาง
q''	อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่หน้าตัด
h	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน
T_s	อุณหภูมิของผิววัตถุ
T_∞	อุณหภูมิของผิววัตถุ
u	ความเร็วในแกน x
v	ความเร็วในแกน y
w	ความเร็วในแกน z
ρ	ความหนาแน่นของลมร้อน
μ	ความหนืดของลมร้อน
g_x	ความเร่งโน้มถ่วงในแกน x,
g_y	ความเร่งโน้มถ่วงในแกน y
g_z	ความเร่งโน้มถ่วงในแกน z
c_p	ค่าความจุความร้อนจำเพาะ
ρ_s	ความหนาแน่นของเมล็ดข้าวเปลือก
T	อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก
$C_{p,s}$	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของเมล็ดข้าวเปลือก
K_s	ค่าการนำความร้อนของลมร้อน
P	ความดันของลมร้อน
l	ความยาวของเมล็ดข้าวเปลือก
a	ความกว้างของเมล็ดข้าวเปลือก หรือความยาวของแกนหลัก
b	ความหนาของเมล็ดข้าวเปลือก หรือความยาวของแกนรอง

สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ (ต่อ)

\dot{q}	อัตราการถ่ายเทความร้อน
\bar{h}	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย
Nu	ตัวเลขนัสเซิลต์
\overline{Nu}	ตัวเลขนัสเซิลต์เฉลี่ย
Re	ตัวเลขเรย์โนลด์
D	ความยาวคุณลักษณะ
Pr	ตัวเลขเพรนต์เทิล
V	ความหนืดจลน์
mm	มิลลิเมตร
mm ³	ลูกบาศก์มิลลิเมตร
K	เคลวิน
s	วินาที
m/s	เมตรต่อวินาที
W	วัตต์
m ² · K / W	ตารางเมตรเคลวินต่อวัตต์
m	เมตร
m ²	ตารางเมตร
m ² /s	ตารางเมตรต่อวินาที
W / (m · K)	วัตต์ต่อเมตรเคลวิน
K/m	เคลวินต่อเมตร
W / m ²	วัตต์ต่อตารางเมตร
W / (m ² · K)	วัตต์ต่อตารางเมตรเคลวิน
m / s ²	เมตรต่อวินาทีกำลังสอง
kg / m ³	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
Pa	ปาสคาล
Pa · s	ปาสคาลวินาที

สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ (ต่อ)

$J/(kg \cdot K)$	จูลต่อกิโลกรัมเคลวิน
$^{\circ}C$	องศาเซลเซียส



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ในปัจจุบันโรงสีข้าวขนาดใหญ่จำเป็นต้องมีกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือกก่อนกระบวนการขัดสีเนื่องจากข้าวเปลือกที่รับมาจากชาวนานั้นมีความชื้นสูงเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 30% แต่ในกระบวนการสีต้องการความชื้นเพียง 14-16% ดังนั้นการอบแห้งข้าวเปลือกจึงเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญมากกระบวนการหนึ่ง และในกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือกเพื่อกำจัดความชื้นออกนั้นมักเกิดปัญหาเกี่ยวกับการแตกหักภายในเมล็ดข้าวเปลือกอันเนื่องมาจากการอบที่อุณหภูมิหรือปัจจัยร่วมอื่นที่ไม่เหมาะสม โดยปัญหานี้เกิดจากขาดข้อมูลทางการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลที่จำเป็นและเพียงพอในการออกแบบกระบวนการอบแห้งที่เหมาะสม ซึ่งจากที่ผ่านมามีหลายงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาทดลองเกี่ยวกับการลดความชื้นในข้าวและอาหาร ซึ่งมีทั้งการทดลองจริง และการจำลองโดยใช้วิธีเชิงตัวเลข โดยส่วนใหญ่แล้วมักจะเป็นการวิเคราะห์ผลโดยการหาค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง และทดลองโดยใช้ตัวอย่างจำนวนพวก เช่น ทดลองอบแห้งข้าวเปลือกครั้งละหลายกิโลกรัม ซึ่งผลที่ได้นั้นจะไม่สามารถบอกข้อมูลของแต่ละเมล็ดได้ แต่เมื่อเร็วๆ นี้มีหลายงานวิจัยที่ทำการศึกษาลักษณะเฉพาะส่วนในอาหาร โดยมีงานวิจัยของ De Bonis และ Ruocco [1] ที่ได้ศึกษาการอบแห้งแครอทโดยการพาความร้อน และงานวิจัยของ Hacıhafizoglu และคณะ [2] ที่ทำการวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิที่มีต่อความชื้นในเมล็ดข้าวโพดหนึ่งเมล็ด โดยทั้งสองงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม COMSOL ที่ใช้วิธีเชิงตัวเลขในการวิเคราะห์ ซึ่งถือว่าเป็นวิธีการที่สามารถบอกลักษณะแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นได้ใกล้เคียงกับผลที่เกิดขึ้นจริงได้

เพราะฉะนั้นจึงจะนำวิธีการนี้มาวิเคราะห์เมล็ดข้าวเปลือกหนึ่งเมล็ด ซึ่งจะทำให้ทราบถึงลักษณะการกระจายความร้อนในระหว่างกระบวนการอบแห้ง โดยใช้สมบัติต่างๆของเมล็ดข้าวเปลือกอ้างอิงจากงานวิจัยและหนังสืออ้างอิง อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์เชิงตัวเลขนี้เป็นเพียงการวิเคราะห์เบื้องต้นเท่านั้น แต่สามารถทำให้ทราบข้อมูล และเงื่อนไขที่เป็นประโยชน์ต่อการนำไปพัฒนากระบวนการอบแห้งข้าวให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นต่อไปได้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 เพื่อศึกษาเชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนจากลมร้อนสู่เมล็ดข้าวเปลือก
- 1.2.2 เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายอุณหภูมิภายในของเมล็ดข้าวเปลือก
- 1.2.3 เพื่อศึกษาตัวแปรอื่น ๆ ที่มีผลต่อการกระจายอุณหภูมิภายในเมล็ดข้าวเปลือก ได้แก่ อุณหภูมิของลมร้อน และการวางตำแหน่งของเมล็ดข้าวสัมพันธ์กับทิศทางของลมร้อน

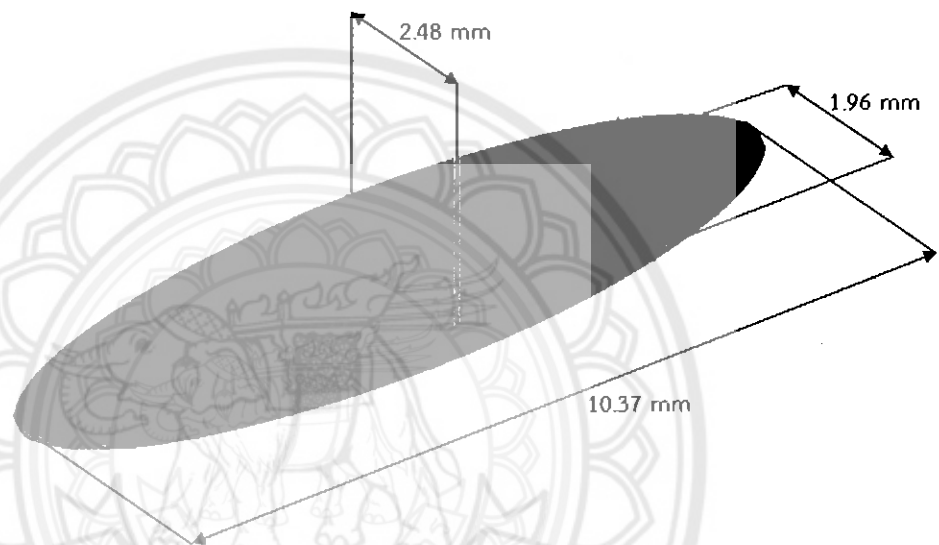
1.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.3.1 การกระจายอุณหภูมิภายในเมล็ดข้าวเปลือก ณ เวลาต่างๆ ในระหว่างการอบแห้ง
- 1.3.2 ผลกระทบของอุณหภูมิ และการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกสัมพันธ์กับทิศทางของลมร้อน



1.4 ขอบเขตของโครงการ

1.4.1 กำหนดให้รูปร่างลักษณะของเมล็ดข้าวเปลือกเป็นทรงรี โดยใช้ขนาดของเมล็ดข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ซึ่งมีความยาวนับจากปลายเมล็ดทั้งสองข้าง 10.37 มม. มีความกว้างซึ่งเป็นความยาวแกนหลัก 2.48 มม. และมีความหนาซึ่งเป็นความยาวแกนรอง 1.96 มม. ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 แบบจำลองของเมล็ดข้าวเปลือกใน 3 มิติ

1.4.2 การไหลของอากาศร้อนเกิดที่สภาวะคงที่ และการถ่ายความร้อนภายในเมล็ดข้าวเปลือกเกิดขึ้นที่สภาวะทรานเซียนต์

1.4.3 เมล็ดข้าวเปลือกไม่มีรูพรุน และเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous)

1.4.4 ไม่มีการเสียรูป กล่าวคือ กำหนดให้เมล็ดข้าวเปลือกมีลักษณะแข็งแรง

1.4.5 อุณหภูมิของลมร้อนคงที่อยู่ในช่วง 333.15 -363.15 K

1.4.6 ความเร็วของลมร้อนคงที่ที่ 0.5 m/s

1.4.5 ไม่มีพลังงานความร้อนจากการหายใจของเมล็ดข้าวเปลือก

1.4.6 ไม่มีผลของการพาความร้อนแบบอिसระ

1.4.7 ไม่มีผลของการแผ่รังสีความร้อน

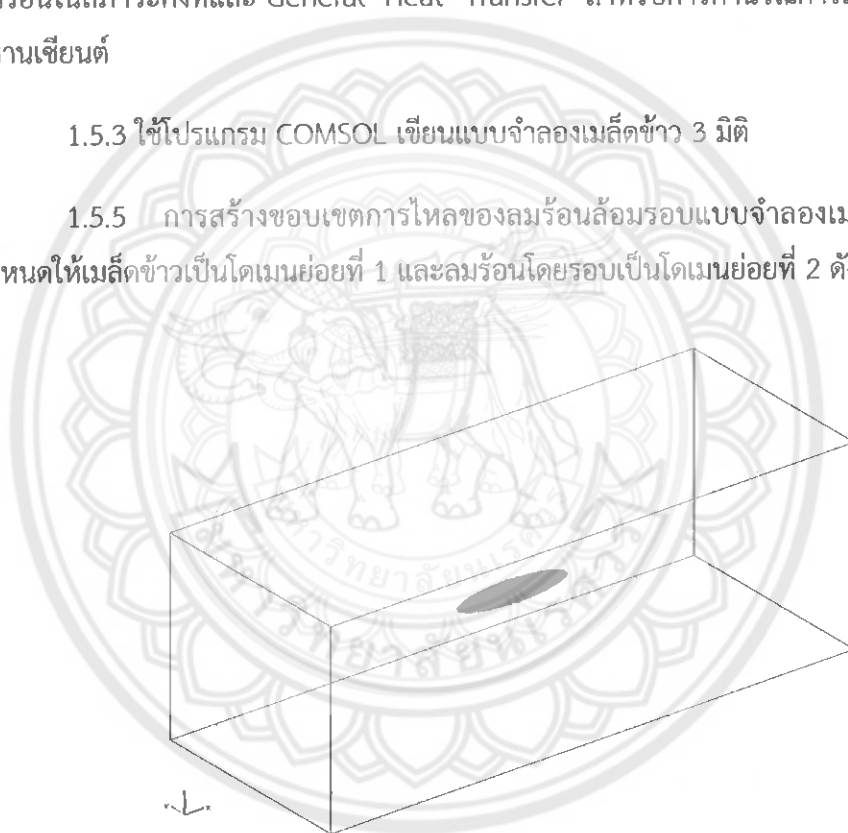
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.5.1 หาข้อมูลของข้าวเปลือกที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ รูปร่างและขนาด ความหนาแน่น ค่าการนำความร้อน ค่าความจุความร้อนจำเพาะ และปริมาณความชื้นของเมล็ดข้าว

1.5.2 โดยทำการเลือกสมการควบคุมจาก Application Mode ในโปรแกรม COMSOL เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณ ซึ่งได้แก่ Incompressible Navier-Stokes สำหรับการคำนวณการไหลของลมร้อนในสถานะคงที่และ General Heat Transfer สำหรับการคำนวณการถ่ายเทร้อนในสถานะทรานเซียนต์

1.5.3 ใช้โปรแกรม COMSOL เขียนแบบจำลองเมล็ดข้าว 3 มิติ

1.5.5 การสร้างขอบเขตการไหลของลมร้อนล้อมรอบแบบจำลองเมล็ดข้าวเปลือก โดยกำหนดให้เมล็ดข้าวเป็นโดเมนย่อยที่ 1 และลมร้อนโดยรอบเป็นโดเมนย่อยที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 1.2

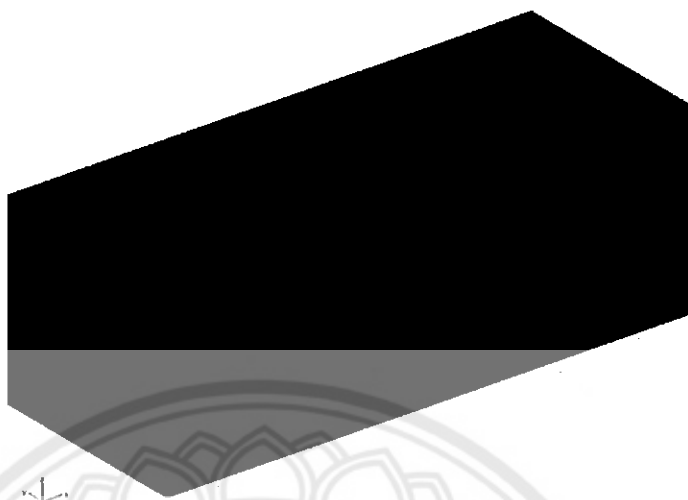


รูปที่ 1.2 โดเมนการคำนวณสำหรับการไหลของลมร้อนที่ล้อมรอบแบบจำลองเมล็ดข้าวเปลือก

1.5.6 กำหนดสถานะขอบเขตให้กับระบบทั้งสองโดเมนย่อย โดยกำหนดทิศทางการไหลของลมร้อนในแนวแกนที่ต้องการศึกษา ซึ่งความเร็วลมร้อนขาเข้าอยู่ที่ 0.5 m/s และอุณหภูมิลมร้อนอยู่ในช่วง 333.15 – 363.15 K

1.5.7 กำหนดค่าสมบัติกายภาพทางความร้อนของทั้ง 2 โดเมนย่อย และกำหนดสมบัติทางของไหลของลมร้อนให้กับโดเมนย่อยที่ 2 และกำหนดสถานะเริ่มต้นให้กับทั้งสองโดเมนย่อย

1.5.8 สร้าง Mesh (ตาข่าย) โดยใช้ปริมาตรฐานสามเหลี่ยมไร้ระเบียบให้กับทั้งสองโดเมนย่อย ดังแสดงในรูปที่ 1.3

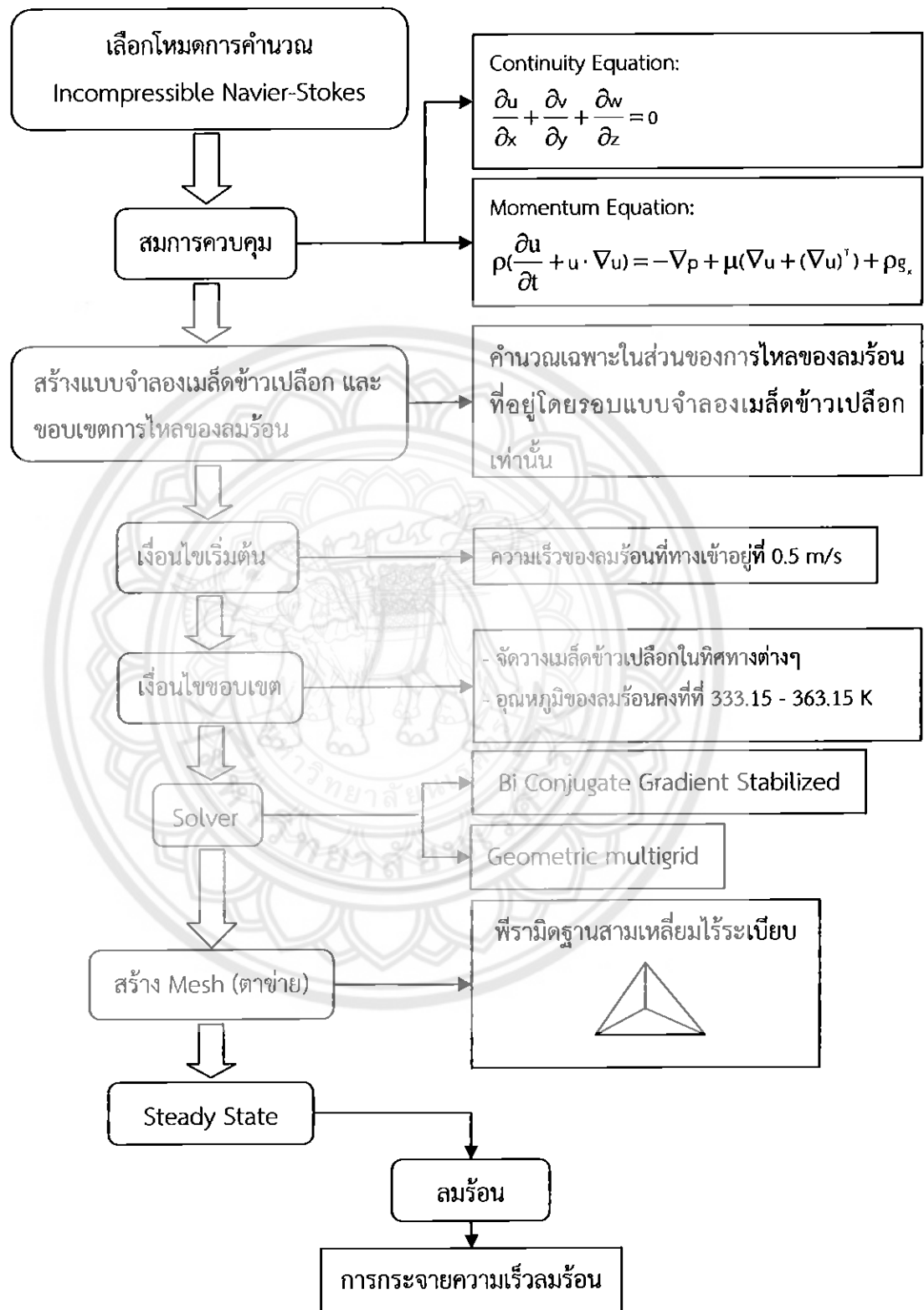


รูปที่ 1.3 แสดง Mesh ของโดเมนการคำนวณ

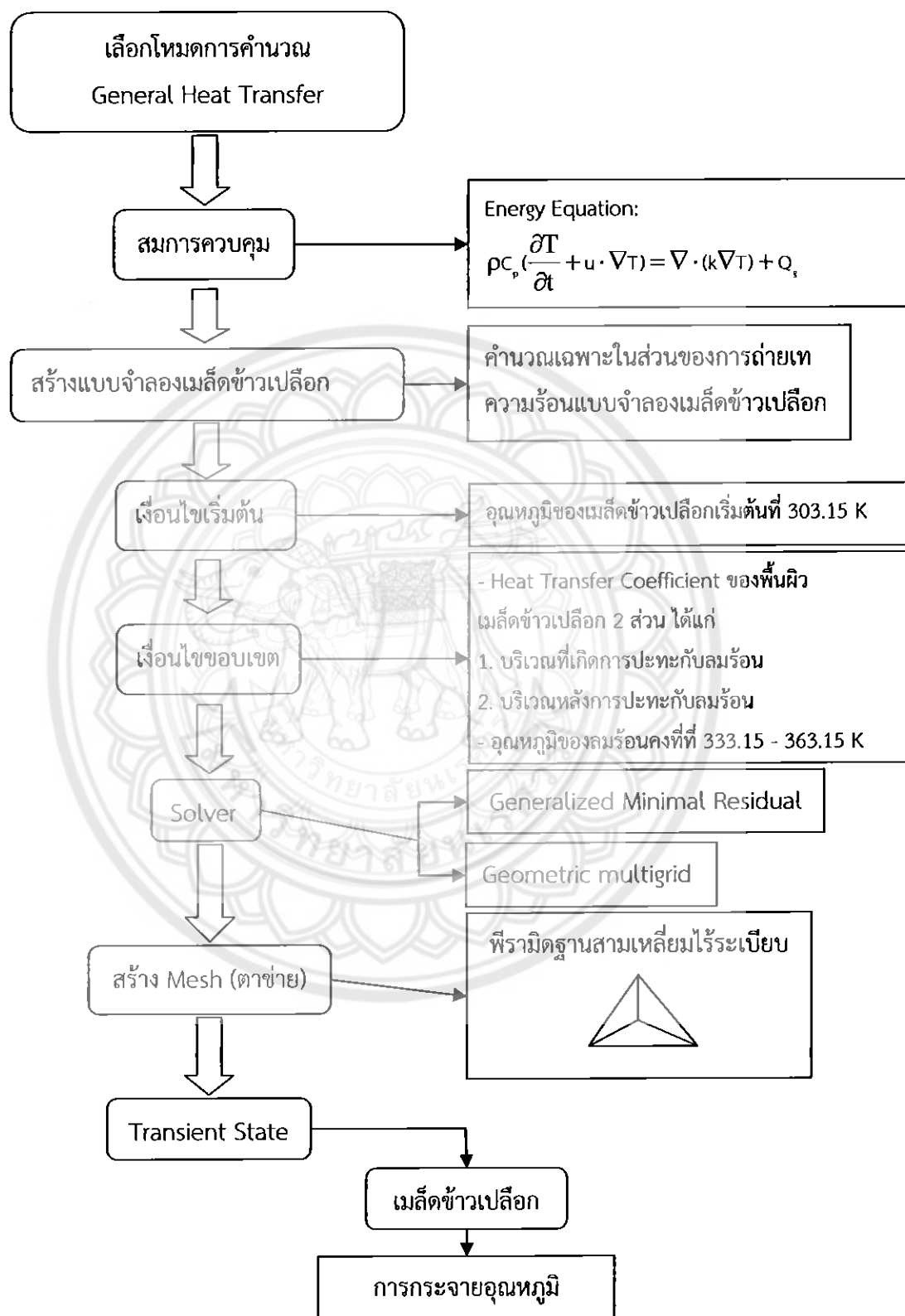
1.5.9 ทำการเลือก Solver ในโปรแกรม COMSOL ที่เหมาะสม จากนั้นจึงทำการคำนวณ

1.5.10 นำเสนอของการคำนวณจากโปรแกรม COMSOL ได้แก่ สนามความเร็ว (Velocity field) เส้นกระแสการไหลของลมร้อน การกระจายอุณหภูมิ (Temperature Distribution) ในภาพตัดขวาง (Cross section) และการเปลี่ยนอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกตามเวลา

ซึ่งจากขั้นตอนการดำเนินงานทั้งหมดสามารถสรุปเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 1.4 และ 1.5



รูปที่ 1.4 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนการคำนวณในส่วนการไหลของร้อนที่เป็นของไหลไหลผ่าน
ผิวภายนอกเมล็ดข้าวเปลือกที่เป็นของแข็งในสภาวะคงที่



รูปที่ 1.5 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนการคำนวณในส่วนการถ่ายเทความร้อนในเมล็ดข้าวเปลือก
ที่เป็นของแข็งในสภาวะทรานเซียนต์

1.6 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานโครงการโครงสร้าง

ช่วงระยะเวลาดำเนินงาน	พ.ศ. 2556									
	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	
ค้นคว้าบทความวิจัยและหนังสืออ้างอิง										
จัดทำโครงร่างโครงการ										
สรุปขอบเขตโครงการ และสอบโครงร่างโครงการ										
ศึกษาเชิงตัวเลข และวิเคราะห์ผลที่ได้										
จัดทำเนื้อหาทั้งหมดในปฏิญานិพนธ์ของโครงการ										
จัดทำรูปเล่มปฏิญานิพนธ์										
สอบโครงการ										

1.7 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงการ

1.7.1. ค่าการทำสำเนาเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้อง	300 บาท
1.7.2. ค่าพิมพ์ตัวอย่างโครงการ	700 บาท
1.7.3. จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์	2,000 บาท
รวมเป็นเงิน	3,000 บาท (สามพันบาทถ้วน)



บทที่ 2

ทฤษฎีและวรรณกรรมปริทัศน์

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

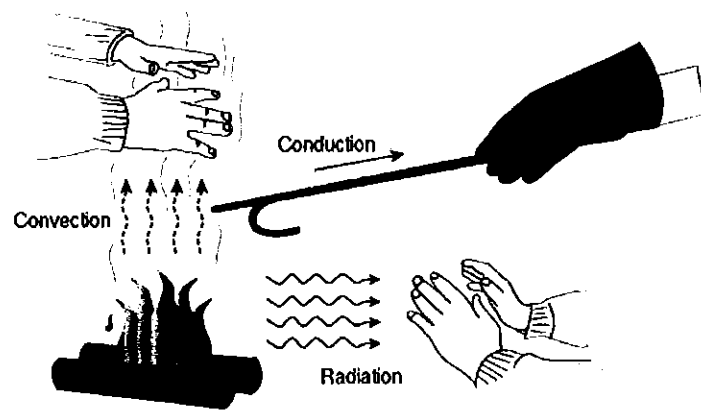
2.1.1 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)

การถ่ายเทความร้อนเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างตำแหน่งสองตำแหน่ง โดยความร้อนจะถ่ายเทจากที่มีอุณหภูมิสูงไปที่มีอุณหภูมิต่ำเสมอ ความแตกต่างของอุณหภูมิเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อน จึงเรียกผลต่างของอุณหภูมินี้ว่า ศักย์หรือแรงขับทางความร้อน โดยปริมาณความร้อน (Heat) หรืออัตราการถ่ายเทความร้อนจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับศักย์ทางความร้อน และเป็นสัดส่วนผกผันกับความต้านทานต่อการถ่ายเทความร้อน เขียนเป็นความสัมพันธ์อย่างง่ายได้ดังนี้

$$q \propto \frac{\Delta T}{R} \quad (2.1)$$

- q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน (Heat rate) มีหน่วยเป็น W
 ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิ (Temperature difference) มีหน่วยเป็น K
 R คือ ความต้านทานต่อการถ่ายเทความร้อน (Thermal resistance)
มีหน่วยเป็น $(m^2 \cdot K) / W$

กลไกการถ่ายเทความร้อนจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งแบ่งได้เป็น 3 วิธีดังแสดงในรูปที่ 2.1 คือ การนำ การพา และการแผ่รังสี โดยกระบวนการถ่ายเทความร้อนทุกกระบวนการอาจเกิดจากการถ่ายเทความร้อนเพียงวิธีเดียวหรือหลายวิธีรวมกันก็ได้



รูปที่ 2.1 ปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อน [4]

2.1.1.1 การนำความร้อน (Conduction Heat Transfer)

การนำความร้อนเป็นวิธีการถ่ายเทความร้อนโดยการส่งผ่านเนื้อของสสารที่เป็นตัวกลางโดยที่เนื้อสสารหยุดนิ่งหรือไม่มีการเคลื่อน เช่น ของแข็ง หรือของไหลที่ไม่อยู่นิ่ง โดยตัวกลางนั้นต้องมีความแตกต่างของอุณหภูมิ ตัวกลางนี้อาจเป็นตัวกลางเดียวกัน หรือตัวกลางต่างชนิดที่อยู่ติดกันได้ การนำความร้อนเกิดขึ้นในระดับโมเลกุล การสั่นของโมเลกุลจะเป็นตัวส่งถ่ายความร้อนโดยเคลื่อนที่ผ่านโมเลกุลของสสารจากโมเลกุลหนึ่งไปยังอีกโมเลกุลหนึ่ง

อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างของอุณหภูมิและพื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของความร้อน เป็นสัดส่วนผกผันกับความหนาหรือระยะทางที่ความร้อนเคลื่อนที่ ซึ่งก็เรียกว่า กฎของฟูเรียร์ (Fourier's law) ซึ่งสามารถแสดงดังสมการต่อไปนี้

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.2)$$

q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน (Heat rate) หน่วย W

k คือ ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) หน่วย $W/(m \cdot K)$

A คือ พื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของความร้อน (Area) หน่วย m^2

$\frac{dT}{dx}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับระยะทาง (Temperature gradient)

มีหน่วยเป็น K/m

จากสมการ 2.2 เป็นการแสดงให้เห็นถึงการนำความร้อนในหนึ่งมิติในแนวแกน x โดยค่าการนำความร้อนเป็นสมบัติเฉพาะตัวของสสาร ค่าการนำความร้อนของสสารแต่ละชนิดจะมีค่าไม่เท่ากัน สสารที่มีความสามารถนำความร้อนได้ดีจะมีค่า k มาก เรียกสสารพวกนี้ว่า ตัวนำ (Conduct) เช่น โลหะชนิดต่างๆ และเรียกสสารที่นำความร้อนได้ต่ำว่า ฉนวน (Insulator) เช่น อโลหะต่างๆ

2.1.1.2 การพาความร้อน (Convection Heat Transfer)

การพาความร้อนเป็นวิธีการถ่ายเทความร้อนจากจุดหนึ่งในสสารที่เคลื่อนที่ไปยังอีกจุดหนึ่งในสสารโดยติดไปกับสสารที่เกิดการเคลื่อนที่ เมื่อของไหลที่มีการไหลสัมผัสกับผิวของวัตถุที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันก็จะมีถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลกับวัตถุนั้น ซึ่งก็คือ การพาความร้อนนั่นเอง กลไกของการถ่ายเทความร้อนนั้นมีความซับซ้อน จึงจะไม่กล่าวถึงวิธีการวิเคราะห์ แต่จะเสนอกลไกและสมการ หลักๆ ที่สามารถใช้คำนวณหาอัตราการพาความร้อนจากส่วนย่อยๆ ของระบบ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญของระบบที่มีการถ่ายเทความร้อนโดยการพา โดยแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

1. การพาความร้อนแบบอิสระ (Free convection or Natural convection)

การพาความร้อนแบบอิสระทำให้เกิดแรงที่ทำให้ของไหลเกิดการเคลื่อนที่ซึ่งเกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิภายในก้อนของไหลเนื่องมาจากการที่ของไหลสัมผัสกับผิวของวัตถุที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันจนเกิดความต่างของความหนาแน่นของของไหลจึงทำให้เกิดแรงลอยตัวขึ้น

2. การพาความร้อนแบบบังคับ (Force convection)

การพาความร้อนแบบบังคับจะเกิดขึ้นเมื่อมีแรงภายนอกมาบังคับให้ของไหลเคลื่อนที่ผ่านผิววัตถุที่ร้อนกว่าหรือเย็นกว่า เนื่องจากการไหลของของไหลในการพาความร้อนแบบบังคับมีความเร็วที่สูงกว่าแบบอิสระ ดังนั้นถ้าหากความแตกต่างของอุณหภูมิมิขนาดเท่าๆ กันแล้ว การพาความร้อนแบบบังคับก็จะมีอัตราการพาความร้อนที่สูงกว่า

แต่ไม่ว่าจะเป็นพาความร้อนแบบไหนก็ตาม ต่างมีสมการสำหรับหาอัตราการพาความร้อนที่อยู่ในรูปของกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) ดังสมการต่อไปนี้

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (2.3)$$

- q'' คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่หน้าตัด (Heat flux) หน่วย W/m^2
 h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convective heat transfer coefficient) หน่วย $W/(m^2 \cdot K)$
 T_s คือ อุณหภูมิของผิววัตถุ (Surface Temperature) หน่วย K
 T_∞ คือ อุณหภูมิของผิววัตถุ (Surface Temperature) หน่วย K

โดยสมการ 2.3 จะเป็นการถ่ายเทความร้อนที่บริเวณผิวหรือขอบเขต (Boundary) ของวัตถุ

2.1.2 สมการควบคุม (Governing Equation)

สำหรับสมการควบคุมที่ใช้ในการคำนวณการไหลของลมร้อนผ่านเมล็ดข้าวนั้นอยู่ภายใต้สมมติฐานดังต่อไปนี้

1. ของไหลนิวตันเนียน (Newtonian Fluid)
2. ของไหลอัดตัวไม่ได้ (Incompressible flow)
3. ไม่มีแหล่งความร้อน (No heat source)
4. ไม่มีผลของการพาความร้อนแบบอิสระ (No free convection)
5. ไม่มีผลของการแผ่รังสีความร้อน (No radiation)

2.1.2.1 สมการควบคุมสำหรับลมร้อน

1. Continuity Equation:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.4)$$

2. Momentum Equation

x-Momentum :

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \quad (2.5)$$

y-Momentum:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g_y \quad (2.6)$$

z-Momentum:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g_z \quad (2.7)$$

เมื่อ u, v, w คือ ความเร็วในแกน x, y, z ตามลำดับ มีหน่วยเป็น m/s^2

ρ คือ ความหนาแน่นของลมร้อน มีหน่วยเป็น kg/m^3

μ คือ ความหนืดของลมร้อน มีหน่วยเป็น $Pa \cdot s$

g_x, g_y, g_z คือ ความเร่งโน้มถ่วงในแกน x, y, z ตามลำดับ มีหน่วยเป็น m/s^2

2.1.2.1 สมการควบคุมสำหรับเมล็ดข้าว

Energy Equation:

$$\rho_s c_p \frac{\partial T}{\partial t} - k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (2.9)$$

เมื่อ ρ_s คือ ความหนาแน่นของเมล็ดข้าวเปลือก มีหน่วยเป็น kg/m^3

T คือ อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก มีหน่วยเป็น K

$c_{p,s}$ คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของเมล็ดข้าวเปลือก มีหน่วยเป็น $J/(kg \cdot K)$

k_s คือ ค่าการนำความร้อนของลมร้อน มีหน่วยเป็น $W/(m \cdot K)$

2.2 วรรณกรรมปริทัศน์

การศึกษาทดลองเกี่ยวกับการอบแห้ง (Drying) นั้นสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งวิธีหนึ่งที่ได้รับ ความนิยมก็คือการวิเคราะห์เชิงตัวเลขโดยใช้โปรแกรมจำลองการทดลองเสมือนจริง โดยผลที่ได้นั้นจะ สามารถนำไปใช้ในการประมาณการผลกระทบที่มีต่อกระบวนการอบแห้งได้ ที่ผ่านมามีหลายงานวิจัยที่ได้ ทำการศึกษาทดลองเกี่ยวกับการลดความชื้นในข้าวและอาหารโดยใช้วิธีเชิงตัวเลขในการจำลอง โดย ส่วนใหญ่แล้วมักจะนิยมใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังเช่นงานวิจัยหนึ่งได้ทำการวิเคราะห์การ ลดความชื้นในแครอทด้วยการพาความร้อนแบบบังคับโดย De Bonis และ Ruocco [1] ได้ ทำการศึกษาด้วยการใช้โปรแกรม COMSOL ซึ่งอาศัยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์ หาความชื้นในชิ้นอาหารด้วยการพาความร้อน ซึ่งตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์นั้นคือชิ้นแครอทตัด ขนาดเล็กหนึ่งชิ้น โดยตั้งสมมติฐานให้ชิ้นแครอทเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าบนระนาบ และมีความยาวเป็น อนันต์ ทำให้สามารถวิเคราะห์ใน 2 มิติ ได้ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษามลกระทบของอุณหภูมิ และ ความเร็วของลมร้อนที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งต่อการกระจายอุณหภูมิ และความชื้นในชิ้นแครอท โดยกำหนดสถานะในการทดลองออกเป็นสี่สถานะต่างๆ ซึ่งมีอุณหภูมิลมร้อนที่ใช้ 3 ค่าด้วยกัน ได้แก่ 333, 343, 353 K และใช้ความเร็วลมร้อนเท่ากับ 0.3 และ 2 m/s จากการทดลองพบว่าระยะเวลาที่ใช้ ในการอบแห้งแปรผกผันกับปริมาณความชื้น และเมื่อนำผลของระยะเวลาการอบแห้งและปริมาณ ความชื้นไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ทำการทดลองก่อนหน้านั้นพบว่ามีความคลาดเคลื่อนประมาณ 5 – 15% และมีการแสดงการกระจายอุณหภูมิ และความชื้นในแครอทที่เวลาในการอบแห้งผ่านไป แล้ว 5 ชั่วโมง ในภาพตัดขวาง โดยใช้เส้นแสดงลักษณะการกระจายและระบุค่าอุณหภูมิ และความชื้น ซึ่งพบว่าหากความเร็วและอุณหภูมิของลมร้อนเพิ่มจะทำให้ค่าอุณหภูมิในแต่ละระดับชั้นสูงขึ้น และมีระดับชั้นมากขึ้น และค่าความชื้นในแต่ละระดับชั้นจะลดลง และมีระดับชั้นมากขึ้น

อีกงานวิจัยหนึ่งที่ทำการศึกษาการจำลองการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดเพียงเมล็ดเดียว โดย Hacıhafızoglu และคณะ [2] ได้ทำการศึกษาโดยใช้โปรแกรม COMSOL ช่วยในการวิเคราะห์หาค่า การกระจายความชื้นในเมล็ดข้าวโพดเพียงหนึ่งเมล็ดที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ โดยใช้ความเร็วของลม ร้อนคงที่ซึ่งใช้แบบจำลองเมล็ดข้าวโพดแบบ 3 มิติ โดยมีสมมติฐานให้เมล็ดข้าวโพดเป็นทรงกลม ทำ การทดลองโดยใช้ความเร็วลมร้อนคงที่ที่ 2 m/s ใช้อุณหภูมิในการอบแห้งที่แตกต่างกันตั้งแต่ 40 – 70 °C และแสดงผลการทดลองเป็นการกระจายความชื้นในเมล็ดข้าวโพดทุกๆ ชั่วโมงไปจนถึง 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิต่างๆกัน ซึ่งทำให้ทราบว่าอุณหภูมินั้นมีผลอย่างมากต่อการลดความชื้นในเมล็ด ข้าวโพดหนึ่งเมล็ด

สำหรับในกระบวนการอบแห้งข้าวที่มีการทดลองมาแล้วนั้นจะพบว่าการอบเมล็ดข้าวเปลือก ที่อุณหภูมิสูงจะสามารถลดปริมาณความชื้นในเมล็ดข้าวได้มากกว่าอุณหภูมิที่ต่ำกว่าโดยใช้เวลา และ ความเร็วลมที่เท่ากัน อย่างไรก็ตามอุณหภูมิลมร้อนที่สูงจนเกินไปก็เป็นสาเหตุให้เมล็ดข้าวแตกหักได้ จากงานวิจัยที่ทำการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบกระแสน โดยสุชาติ ชาญสุขประเสริฐ

และคณะ [3] ซึ่งเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำที่ใช้ในเป็นเครื่องอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งวัสดุที่มีความชื้นที่ผิวสูง จึงเหมาะสมสำหรับศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกพันธุ์พิษณุโลก 2 ที่มีความชื้นที่ผิวสูง โดยงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการอบแห้งในแง่ของอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร ซึ่งใช้อุณหภูมิในการอบแห้ง 130, 150 และ 170°C และความเร็วของอากาศเข้าห้องอบแห้ง 20 m/s โดยในการทดลองได้ทำการลดความชื้นแบบหลายขั้นตอนจนความชื้นในเมล็ดข้าวเปลือกเหลืออยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ซึ่งผลที่ได้ของงานวิจัยสามารถสรุปได้ว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอบแห้งนั้นส่งผลให้อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้นทำให้ความชื้นของข้าวเปลือกนั้นลดลง แต่การใช้อุณหภูมิอบแห้งที่สูงนั้นก็ส่งผลทำให้ปริมาณร้อยละต้นข้าวลดลงตามไปด้วย

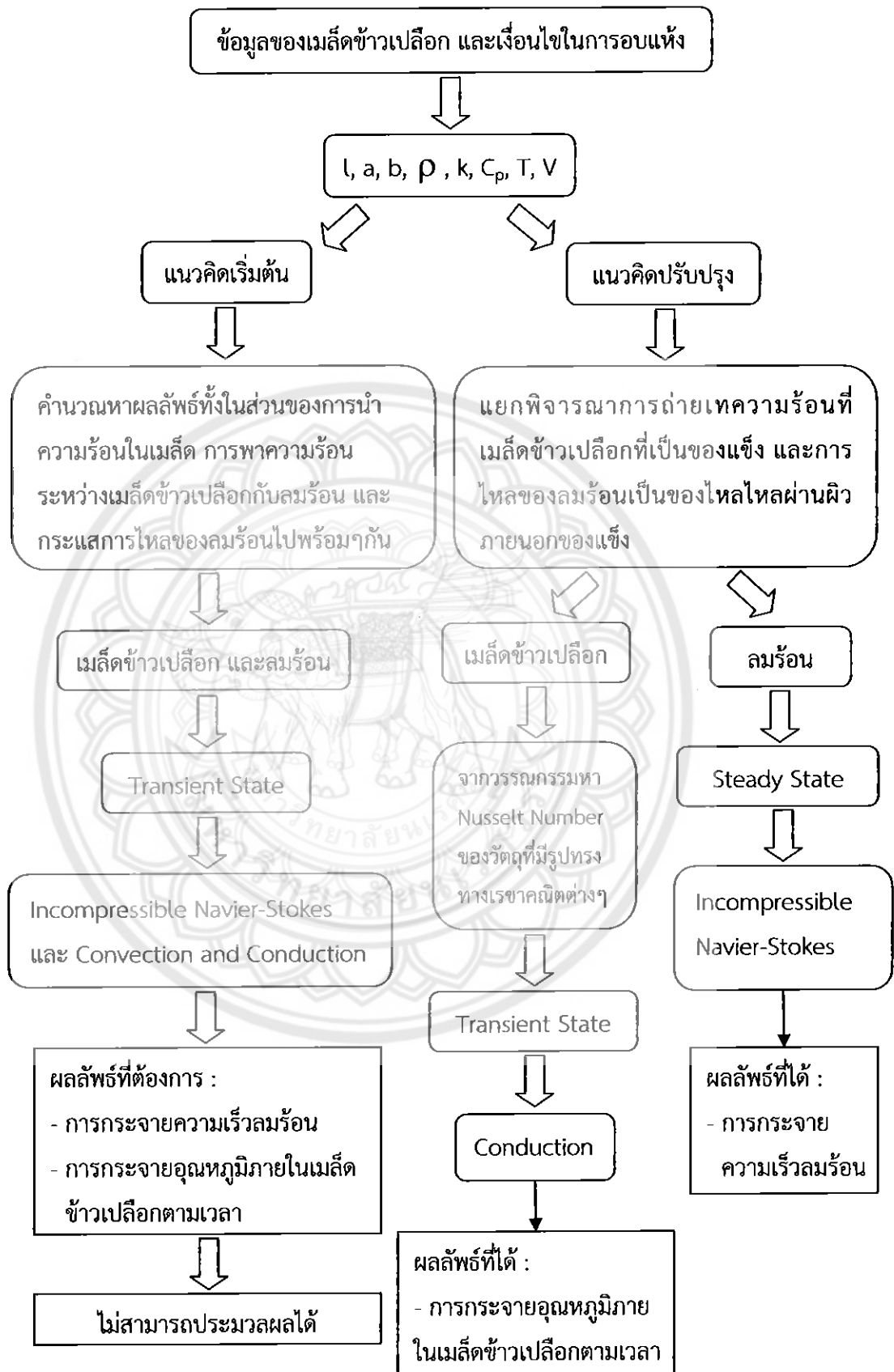


บทที่ 3

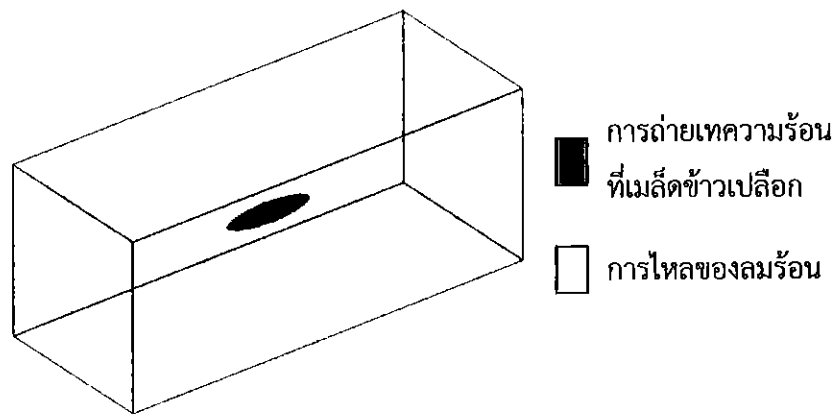
วิธีการดำเนินงาน

เนื้อหาของบทที่ 3 เกี่ยวข้องกับวิธีการดำเนินงานในการคำนวณและประมวลผลเพื่อจำลองการอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือกที่อุณหภูมิความร้อนต่างๆ และการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกสัมพันธ์กับทิศทางของลมร้อน ใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ด้วยโปรแกรมเชิงพาณิชย์ COMSOL ที่มีในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลเพื่อช่วยในการคำนวณและประมวลผล อย่างไรก็ตามโปรแกรม COMSOL เองก็มีขีดจำกัดในการใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการรวมโหมดการคำนวณทางฟิสิกส์ต่างๆซึ่งมีตัวแปรไม่ทราบค่าจำนวนมากเข้าด้วยกัน ซึ่งในที่นี้ได้แก่ การรวมระบบสมการ Navier-Stokes และสมการการถ่ายเทความร้อนเข้าด้วยกัน เพื่อใช้ในการคำนวณหาการกระจายความเร็วในลมร้อน และการกระจายอุณหภูมิในเมล็ดข้าวเปลือกในสามมิติ ซึ่งจะมีตัวแปรไม่ทราบค่า 5 ตัวแปร ได้แก่ u , v , w , P และ T เป็นเหตุให้ในการคำนวณต้องใช้ทรัพยากรคอมพิวเตอร์อย่างมาก เช่น หน่วยความจำหลักของคอมพิวเตอร์ เมื่อหน่วยความจำหลักไม่เพียงพอจึงส่งต่อการคำนวณ และโปรแกรม COMSOL ยังไม่สามารถคำนวณหาการถ่ายเทความร้อนที่พื้นผิวของทรงรีในสามมิติในสภาวะทรานเซียนต์ได้อีกด้วย โดยทางผู้จัดทำโครงการนี้ได้เริ่มทำการคำนวณตามแนวคิดเริ่มต้นดังแสดงในรูปที่ 3.1 ที่เป็นการคำนวณทั้งในส่วนของการนำความร้อนในเมล็ด การพาความร้อนระหว่างเมล็ดข้าวเปลือกกับลมร้อน และกระแสการไหลของลมร้อนไปพร้อมๆกัน ซึ่งไม่สามารถประมวลผลได้ ดังนั้นผู้จัดทำโครงการนี้จึงได้เสนอแนวคิดปรับปรุงขั้นตอนการคำนวณดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยแยกพิจารณาการนำความร้อนในเมล็ดข้าวเปลือกที่เป็นของแข็ง และการไหลของลมร้อนเป็นของไหลไหลผ่านผิวภายนอกของแข็ง ซึ่งสามารถแสดงการแบ่งส่วนพิจารณาได้ดังรูปที่ 3.2 ดังนั้นจะได้ผลการคำนวณในส่วนของการไหลของลมร้อนที่เป็นการคำนวณทางของไหลเพียงอย่างเดียว และในส่วนของการนำความร้อนในเมล็ดข้าวเปลือกที่เป็นการคำนวณทางการถ่ายเทความร้อนเพียงอย่างเดียว ซึ่งทั้งสองส่วนนี้จะสามารถนำวิเคราะห์ผลการจำลองได้ต่อไป

สำหรับวิธีการดำเนินงานจะเริ่มจากหัวข้อที่ 3.1 เพื่ออธิบายถึงโดเมนการคำนวณ ต่อมาในหัวข้อที่ 3.2 เป็นการกล่าวถึงขอบเขตในการคำนวณและสมการควบคุม และรายละเอียดของขั้นตอนการคำนวณแสดงในหัวข้อที่ 3.3 ขั้นตอนการคำนวณจากโปรแกรม COMSOL



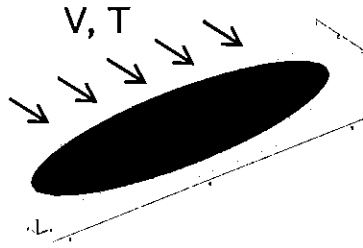
รูปที่ 3.1 แนวคิดในการประมวลผลด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม COMSOL



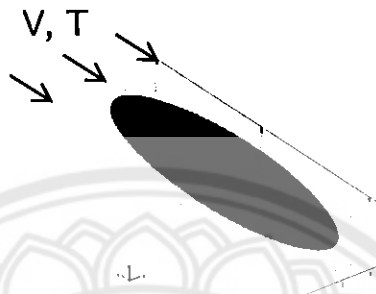
รูปที่ 3.2 การแบ่งส่วนพิจารณาระหว่างการไหลของลมร้อน และการถ่ายเทความร้อนที่เมล็ดข้าวเปลือก

3.1 โดเมนการคำนวณ (Computational Domain)

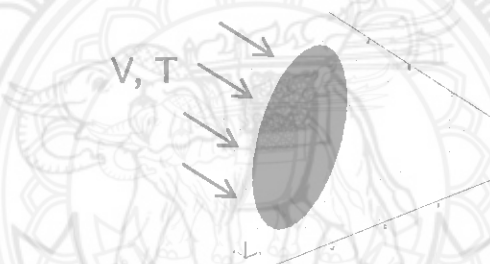
สำหรับโดเมนการคำนวณของโครงงานนี้เราจะแยกพิจารณาการคำนวณออกเป็นสองส่วนดังแนวคิดปรับปรุงขั้นตอนการคำนวณในรูปที่ 3.1 ซึ่งได้แก่ การไหลของลมร้อนที่เป็นของไหลไหลผ่านผิวภายนอกเมล็ดข้าวเปลือกที่เป็นของแข็งในสภาวะคงที่ และการถ่ายเทความร้อนที่เมล็ดข้าวเปลือกที่เป็นของแข็งในสภาวะทรานเซียนต์ดังรูปที่ 3.2 สำหรับลมร้อนที่เป็นเงื่อนไขในการคำนวณนี้จะทำการสร้างขอบเขตการไหลของลมร้อนเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด $0.025 \text{ m} \times 0.05 \text{ m} \times 0.025 \text{ m}$ ครอบเมล็ดข้าวเปลือกไว้ดังรูปที่ 3.2 โดยกำหนดให้พื้นผิวของเมล็ดข้าวเปลือกเป็นผนังที่ไม่เกิดการลื่นไถล (No-Slip) และผนังของขอบเขตการไหลอื่นเป็นผนังที่เกิดการลื่นไถล (Slip) และกำหนดความเร็วของลมร้อนที่ไหลเข้าขอบเขตการไหลของลมร้อนที่ 0.5 m/s โดยลมร้อนมีการไหลในทิศทางต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3.3 และกำหนดอุณหภูมิของลมร้อนคงที่ที่ 333.15 , 343.15 , 353.15 และ 363.15 K โดยการคำนวณในส่วนของการไหลของลมร้อนนั้นจะทำการคำนวณกรณีอุณหภูมิต่างๆ ดังกล่าวมาแล้ว และทำการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกสัมพันธ์กับทิศทางการไหลของลมร้อนในทิศทางต่างๆ ดังรูปที่ 3.3 และทำการจัดวางแกนของเมล็ดข้าวเปลือกตั้งฉากกับทิศทางการไหลของลมร้อนในลักษณะต่างๆ ดังรูปที่ 3.4 เพื่อเป็นการกำหนดความยาวคุณลักษณะ (Characteristic length)



(a) การจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกตั้งฉากกับทิศทางการไหลของลมร้อน

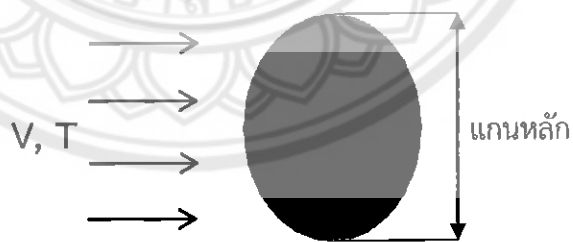


(b) การจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกขนานกับทิศทางการไหลของลมร้อน

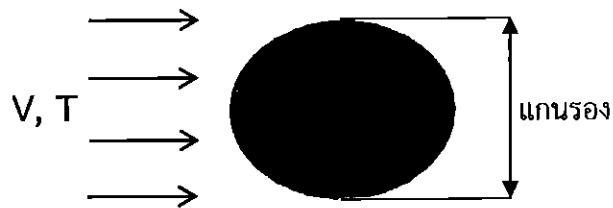


(c) การจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกทำมุม 45 องศา กับทิศทางการไหลของลมร้อน

รูปที่ 3.3 การจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกสัมพันธ์กับทิศทางการไหลของลมร้อนในทิศทางต่างๆ



(a) การจัดวางแกนหลักของเมล็ดข้าวเปลือกตั้งฉากกับทิศทางการไหลของลมร้อนจากมุมมองด้านข้าง



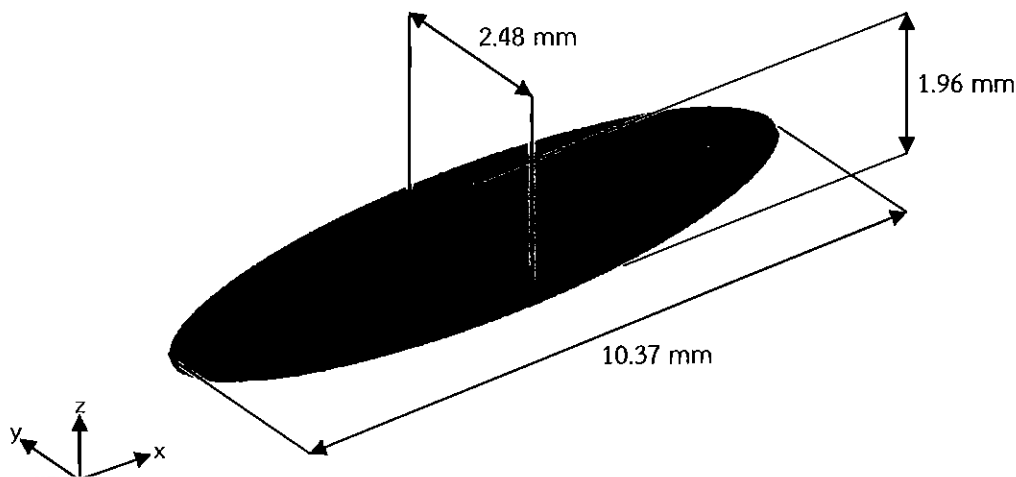
(b) การจัดวางแกนรองของเมล็ดข้าวเปลือกตั้งฉากกับทิศทางการไหลของลมร้อนจากมุมมองด้านข้าง

รูปที่ 3.4 การจัดวางแกนของเมล็ดข้าวเปลือกตั้งฉากกับทิศทางการไหลของลมร้อนในลักษณะต่างๆ

สำหรับข้าวเปลือกที่ใช้ในการศึกษานี้ เลือกใช้ข้อมูลของข้าวขาวดอกมะลิ 105 [5] ซึ่งเป็นพันธุ์ข้าวของไทยที่มีลักษณะเรียวยาวซึ่งเป็นลักษณะโดยทั่วไปของข้าวในประเทศไทย จากนั้นทำการกำหนดขนาดเมล็ดข้าวเปลือกตามขนาดของข้าวขาวดอกมะลิ 105 และกำหนดรูปทรงของเมล็ดข้าวเปลือกให้เป็นทรงรี (Ellipsoid) เนื่องจากเป็นรูปทรงทางเรขาคณิตที่ใกล้เคียงกับเมล็ดข้าวเปลือกมากที่สุด ดังนั้นขนาดและรูปทรงของเมล็ดข้าวเปลือกสามารถแสดงดังรูปที่ 3.5 โดยที่แกนหลัก (Major Axis) ตามแกน y ยาว 2.48 mm แกนรอง (Minor Axis) ตามแกน z ยาว 1.96 mm และความยาวตามแกน x มีความยาว 10.37 mm สำหรับสมบัติทางกายภาพ (Physical Properties) ของข้าวเปลือกจะใช้ค่าของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่มีความใกล้เคียงกับพันธุ์ข้าวของไทยโดยทั่วไป ได้แก่ ความหนาแน่น (Density, ρ) ที่เป็นค่าที่ค่าความชื้นเฉลี่ยระหว่างก่อนการอบแห้งและความชื้นที่ต้องการหลังการอบแห้งที่ประมาณ 23% [6] ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat, C_p) [7] และค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity, k) ที่เป็นค่าจากการทดลองของ Lee และ Chung [3] ซึ่งสมบัติทางกายภาพของเมล็ดข้าวเปลือกทั้งหมดจะแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติทางกายภาพของเมล็ดข้าวเปลือก

สมบัติทางกายภาพ	รายละเอียด / ค่า	หน่วย
พันธุ์ข้าว	ข้าวดอกมะลิ 105	-
ความยาวของเมล็ดข้าวเปลือก, l	10.37	mm
ความกว้างของเมล็ดข้าวเปลือก หรือความยาวของแกนหลัก, a	2.48	mm
ความหนาของเมล็ดข้าวเปลือก หรือความยาวของแกนรอง, b	1.96	mm
ความหนาแน่น, ρ	1,125	kg/m ³
ค่าการนำความร้อน, k	0.102	W/m·K
ค่าความจุความร้อนจำเพาะ, C_p	2,400	J/kg·K



รูปที่ 3.5 รูปทรงเมล็ดข้าวเปลือก และการกำหนดขนาด

3.2 ขอบเขตในการคำนวณ และสมการควบคุม

3.2.1 เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions)

กำหนดให้เมล็ดข้าวเปลือกมีอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 303 K ไม่มีรูพรุน มีผิวเรียบ ไม่มีการเสียรูปในระหว่างการอบแห้ง กล่าวคือ กำหนดให้เมล็ดข้าวเปลือกมีลักษณะเป็นวัตถุแข็งเกร็ง ไม่มีพลังงานความร้อนที่เกิดจากการหายใจของเมล็ดข้าวเปลือก และไม่มีผลของการแผ่รังสีความร้อน และกำหนดให้ลมร้อนมีความเร็วคงที่ที่ 0.5 m/s และอุณหภูมิของลมร้อนคงที่ที่ 333.15, 343.15, 353.15 และ 363.15 K โดยสมบัติทางกายภาพของลมร้อนซึ่งได้แก่ ความหนาแน่น (Density, ρ) ความหนืด (Viscosity, μ) ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat, C_p) คำนำความร้อน (Thermal Conductivity, k) และตัวเลขพรานด์เทิล (Prandtl Number) เป็นสมบัติที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของลมร้อน ซึ่งในการคำนวณเราจะแยกพิจารณาเป็น 2 โดเมนดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น เพื่อนำไปคำนวณระหว่างการนำความร้อนในเมล็ดข้าวเปลือกที่เป็นของแข็ง และการไหลของลมร้อนเป็นของไหลไหลผ่านผิวภายนอกของแข็ง

สำหรับในส่วนของการนำความร้อนภายในเมล็ดข้าวเปลือกกำหนดให้เกิดขึ้นที่สภาวะทรานเซียนต์ (Transient State) แต่การไหลของลมร้อนเกิดขึ้นที่สภาวะคงที่ (Steady State) โดยกำหนดให้ความเร็ว และอุณหภูมิคงที่ การถ่ายเทความร้อนระหว่างลมร้อนกับเมล็ดข้าวเปลือกที่เกิดขึ้นที่ผิวของเมล็ดข้าวเปลือกเป็นการพาความร้อนโดยสมการกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่หาได้จากวรรณกรรม โดยเลือกจากงานวิจัยที่ใช้รูปทรงใกล้เคียงกับด้านที่ปะทะกับลมร้อนและด้านหลังปะทะของรูปทรงที่ใช้ในโครงการนี้ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะรูปทรงและพื้นผิว และการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกสัมพันธ์กับทิศทาง การไหลของลมร้อนในทิศทางต่างๆ และการจัดวางแกนของเมล็ดข้าวเปลือกตั้งฉากกับทิศทาง การไหลของลมร้อนในลักษณะต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4

3.2.2 สมการควบคุม (Governing Equations)

3.2.2.1 สมการควบคุมสำหรับเมล็ดข้าวเปลือก

สำหรับการนำความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเมล็ดข้าวเปลือกจะใช้สมการควบคุมดังสมการที่ (3.1) สมการพลังงาน (Energy Equation):

$$\rho_s c_{p,s} \frac{\partial T}{\partial t} - k_s \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (3.1)$$

เมื่อ ρ_s คือ ความหนาแน่นของเมล็ดข้าวเปลือก มีหน่วยเป็น kg/m^3

T คือ อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก มีหน่วยเป็น K

$c_{p,s}$ คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของเมล็ดข้าวเปลือก มีหน่วยเป็น $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

k_s คือ ค่าการนำความร้อนของเมล็ดข้าวเปลือก มีหน่วยเป็น $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

สำหรับการถ่ายเทความร้อนที่บริเวณผิวหรือขอบเขต (Boundary) ของเมล็ดข้าวเปลือก จะใช้สมการควบคุมดังสมการที่ (3.2)

สมการกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling):

$$\dot{q} = hA(T_s - T_\infty) \quad (3.2)$$

เมื่อ \dot{q} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน (Heat grain) มีหน่วยเป็น W

h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convective heat transfer coefficient) มีหน่วยเป็น $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

A คือ พื้นที่ผิวที่เกิดการถ่ายเทความร้อน มีหน่วยเป็น m^2

T_s คือ อุณหภูมิของผิววัตถุ (Surface Temperature) มีหน่วยเป็น K

T_∞ คือ อุณหภูมิของผิววัตถุ (Surface Temperature) มีหน่วยเป็น K

3.2.2.1 สมการควบคุมสำหรับลมร้อน

สำหรับสมการควบคุมที่ใช้ในการคำนวณการไหลของลมร้อนผ่านเมล็ดข้าวเปลือกนั้นอยู่ภายใต้สมมติฐานดังต่อไปนี้

1. ของไหลนิวตันเนียน (Newtonian Fluid)
2. ของไหลอัดตัวไม่ได้ (Incompressible flow)

3. ไม่มีผลของการถ่ายเทความร้อน (No heat transfer)
4. ไม่มีการลื่นไถลที่ผิวของเม็ลต์ข้าวเปลือก (No slip)
5. สมบัติทางกายภาพของลมนร้อนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

โดยโดเมนการไหลของลมนร้อนผ่านเม็ลต์ข้าวใช้สมการควบคุมทั้งสมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) และสมการโมเมตัม (Momentum Equation)

1. Continuity Equation:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.3)$$

2. Momentum Equation:

x-Momentum :

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \quad (3.4)$$

y-Momentum:

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g_y \quad (3.5)$$

z-Momentum:

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho g_z \quad (3.6)$$

เมื่อ u, v, w คือ ความเร็วในแกน x, y, z ตามลำดับ มีหน่วยเป็น m / s

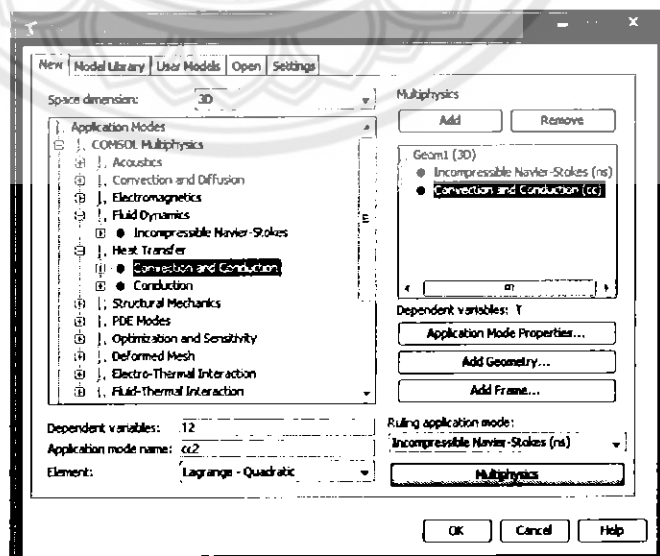
ρ คือ ความหนาแน่นของลมนร้อน มีหน่วยเป็น kg / m^3

μ คือ ความหนืดของลมนร้อน มีหน่วยเป็น $Pa \cdot s$

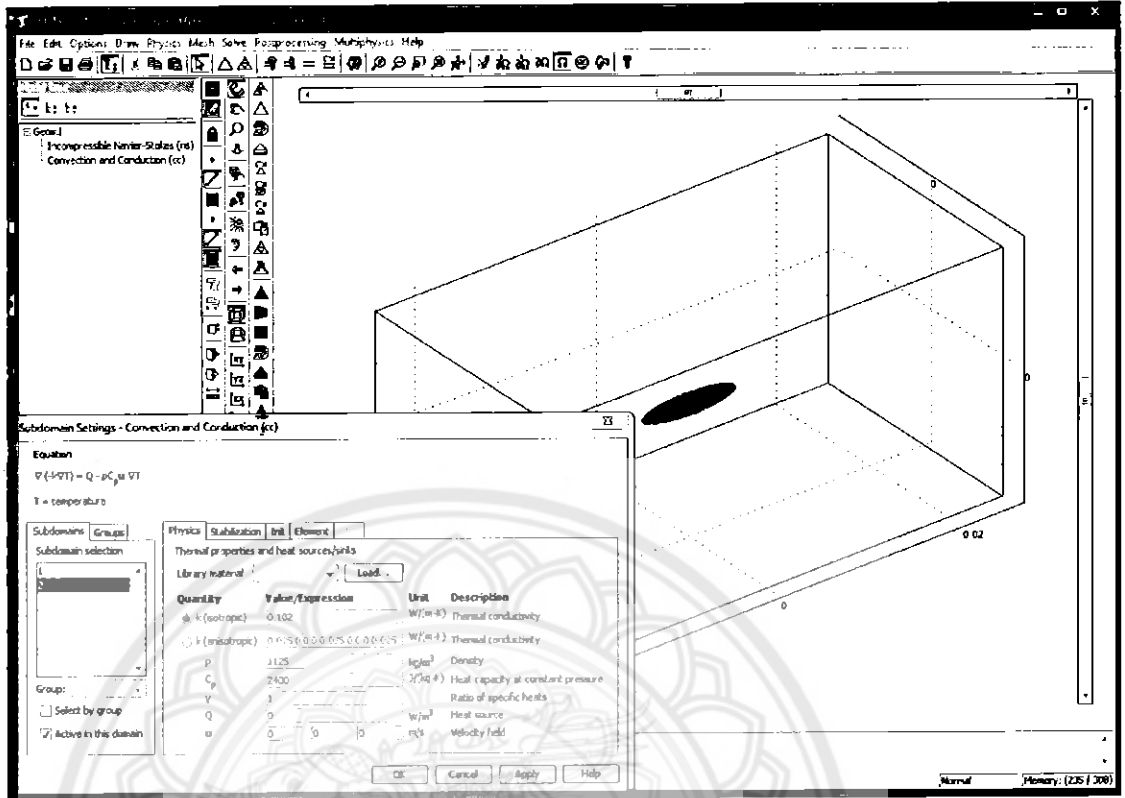
g_x, g_y, g_z คือ ความเร่งโน้มถ่วงในแกน x, y, z ตามลำดับ มีหน่วยเป็น m / s^2

3.3 ขั้นตอนการคำนวณจากโปรแกรม COMSOL

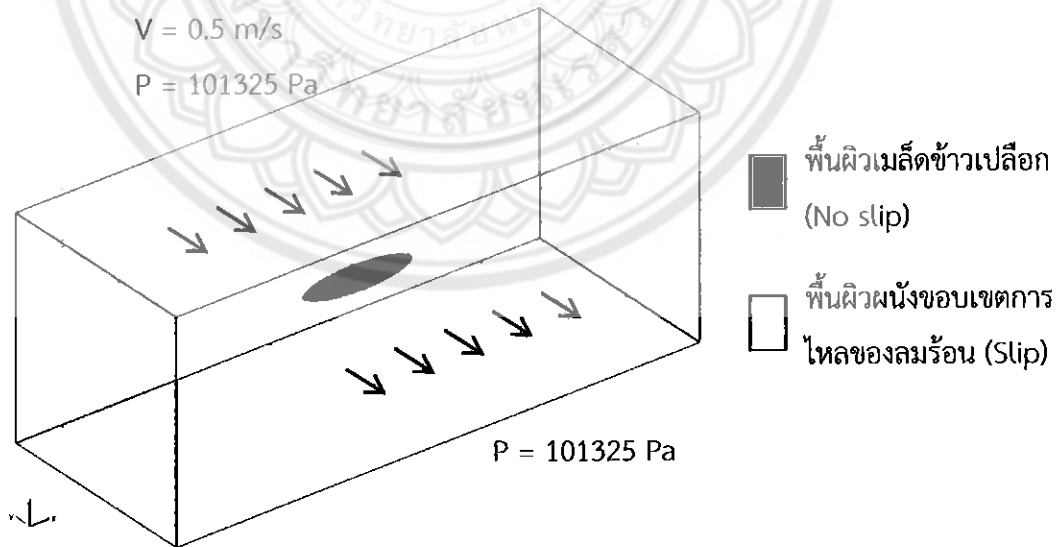
เริ่มต้นการคำนวณโดยใช้โปรแกรม COMSOL ในการคำนวณ โดยทำการเลือกสมการควบคุมจาก Application Mode เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณ ซึ่งได้แก่ Incompressible Navier-Stokes และ Convection and Conduction ใน 3 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 3.6 เริ่มเขียนแบบจำลองเมล็ดข้าวเปลือกให้มีลักษณะเป็นทรงรี 3 มิติ มีขนาดดังรูปที่ 3.2 ด้วยโปรแกรม COMSOL โดยจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกในทิศทางต่างๆ และจัดวางแกนของเมล็ดข้าวเปลือกในลักษณะต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4 และสร้างขอบเขตการไหลของลมร้อนล้อมรอบแบบจำลองเมล็ดข้าว โดยกำหนดให้เมล็ดข้าวเปลือกเป็นโดเมนย่อยที่ 1 ที่เป็นของแข็ง และลมร้อนโดยรอบเป็นโดเมนย่อยที่ 2 เป็นของไหลไหลผ่านผิวภายนอกเมล็ดข้าวเปลือก กำหนดสมบัติทางกายภาพของลมร้อนจากฐานข้อมูลของโปรแกรม COMSOL โดยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และกำหนดสมบัติทางกายภาพของเมล็ดข้าวเปลือกจากตารางที่ 3.1 โดยเลือก Physics >> Subdomain Settings ดังแสดงในรูปที่ 3.7 และกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น จากนั้นกำหนดเงื่อนไขขอบเขต โดยเลือก Physics >> Boundary Settings เพื่อกำหนดสมบัติของพื้นผิวต่างๆ และทิศทางการไหลของลมร้อนให้ลมร้อนที่ทางเข้ามีความเร็วที่ 0.5 m/s และมีความดัน 101325 Pa และที่ทางออกมีความดัน 101325 Pa ดังรูปที่ 3.8 และทำการสร้าง mesh ให้กับโดเมนย่อยทั้งสอง โดยทำการแบ่งโดเมนย่อยทั้งสองให้เป็นเอลิเมนต์ย่อยด้วย Shape functions ในรูปทรงพีระมิดฐานสามเหลี่ยมไว้ระะเบียบ 53,375 เอลิเมนต์ต่อปริมาตรทั้งหมด 31250 mm³ คิดเป็นความหนาแน่นเท่ากับ 1.708 meshes / mm³ ดังรูปที่ 3.9 เพื่อนำไปใช้กับระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ และทำการประมวลผลในสภาวะทรานเซียนต์เพื่อหาผลลัพธ์



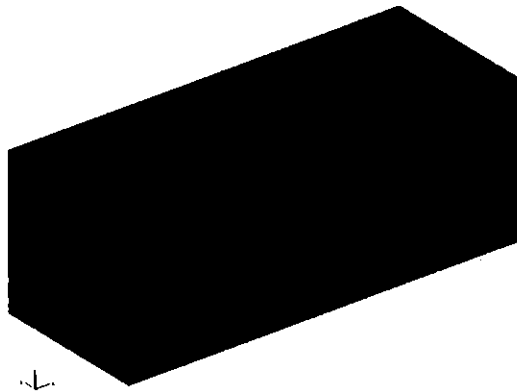
รูปที่ 3.6 การเลือกสมการควบคุมจาก Application Mode เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณ



รูปที่ 3.7 การกำหนดสมบัติทางกายภาพให้กับโดเมนย่อย



รูปที่ 3.8 การกำหนดสมบัติของพื้นผิวต่างๆ และทิศทางการไหลของลมร้อน

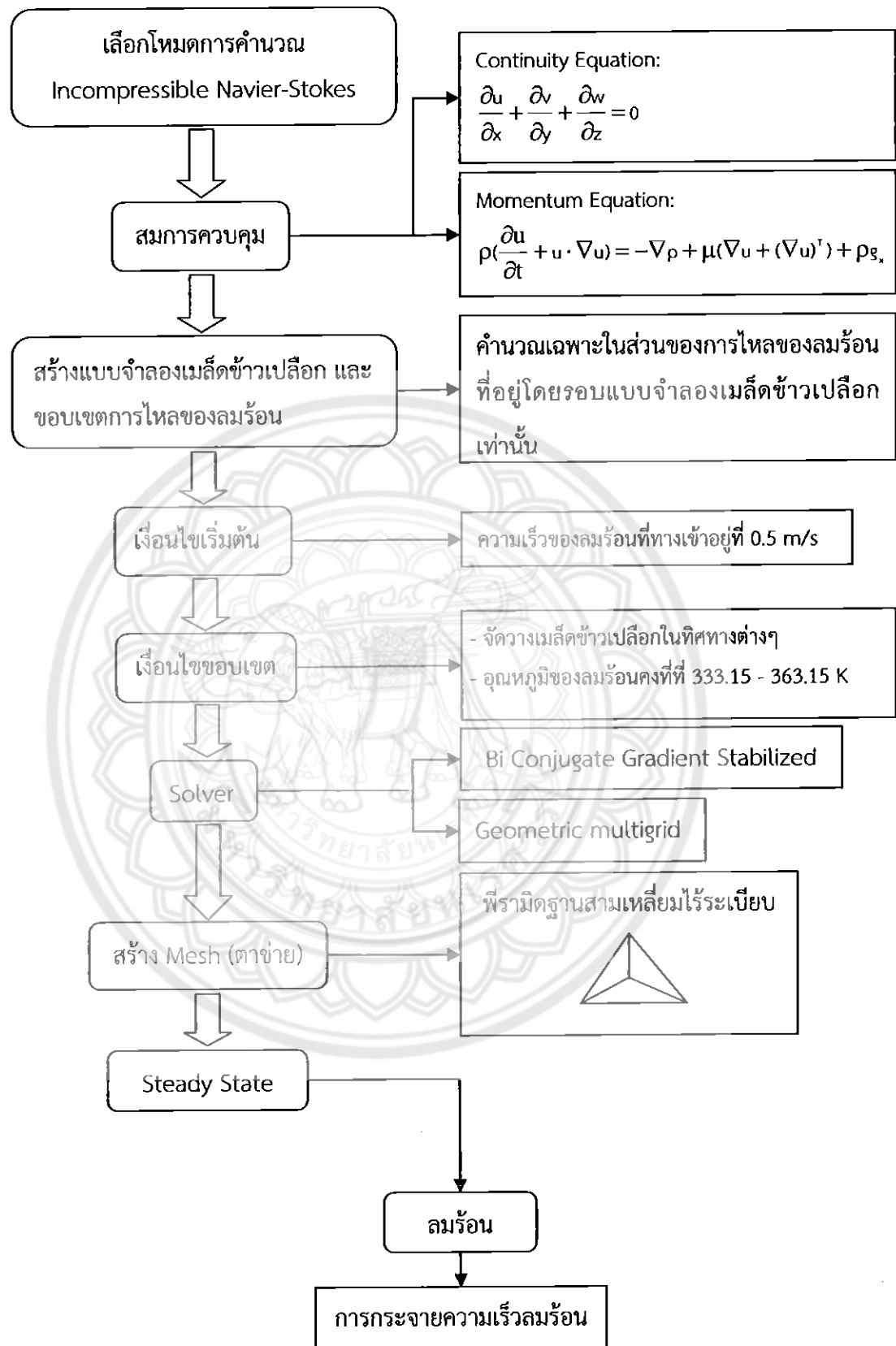


รูปที่ 3.9 การสร้าง Mesh ของแบบจำลองเมล็ดข้าวเปลือก จำนวน 53,375 Elements
ซึ่งคิดเป็นความหนาแน่นเท่ากับ 1.708 meshes / mm³

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่า การประมวลผลพร้อมๆกันของโจทย์ทางกลศาสตร์ของไหล และการถ่ายเทความร้อนในสามมิติที่สภาวะทรานเซียนต์โดยโปรแกรม COMSOL นั้นมีขีดจำกัด จึงเป็นเหตุให้การซ้ำ (iteration) ไม่ให้ค่าที่ลูเข้า ดังนั้นผู้จัดทำโครงการนี้จึงได้เสนอแนวคิดในการแก้ปัญหาเชิงแนวคิดปรับปรุงขั้นตอนการคำนวณต่อไป

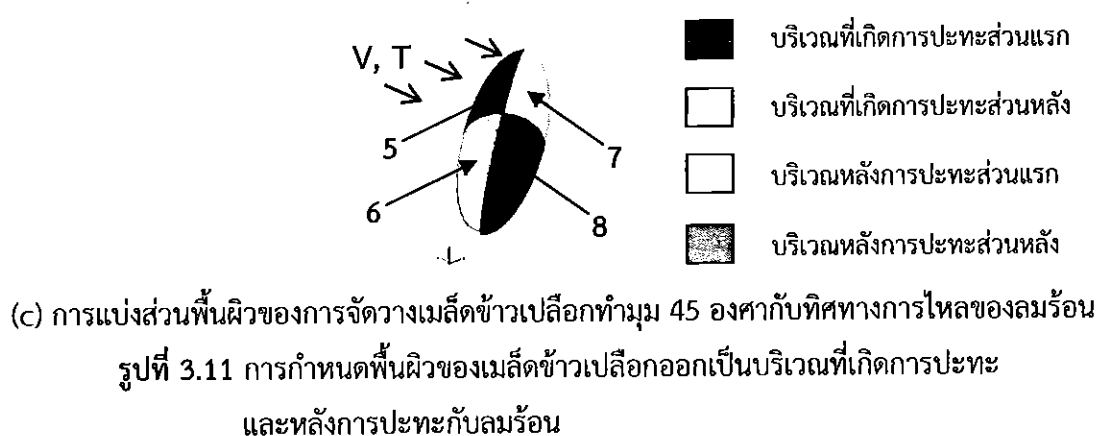
สำหรับแนวคิดปรับปรุงขั้นตอนการคำนวณจะทำการแยกพิจารณาการคำนวณเป็นสองส่วน ได้แก่ ส่วนที่หนึ่งการไหลของลมร้อนที่เป็นของไหลไหลผ่านผิวภายนอกเมล็ดข้าวเปลือกที่เป็นของแข็ง ในสภาวะคงที่ และส่วนที่สองการถ่ายเทความร้อนในเมล็ดข้าวเปลือกที่เป็นของแข็งในสภาวะทรานเซียนต์ ดังเช่นที่แสดงในรูปที่ 3.2 โดยจะทำการคำนวณที่ละส่วนดังต่อไปนี้

1. การคำนวณในส่วนที่หนึ่งการไหลของลมร้อนที่เป็นของไหลไหลผ่านผิวภายนอกเมล็ดข้าวเปลือกที่เป็นของแข็งในสภาวะคงที่ เริ่มต้นด้วยการเลือกสมการควบคุม Incompressible Navier-Stokes จาก Application Mode เพื่อใช้ในการคำนวณผลที่สภาวะคงที่ใน 3 มิติ สร้างแบบจำลองรูปทรงของเมล็ดข้าวเปลือกที่เป็นทรงรี ขนาดตามตารางที่ 3.1 กำหนดการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกในทิศทางต่างๆดังรูปที่ 3.3 กำหนดขอบเขตและทิศทางของการไหลของลมร้อนใน Boundary Settings ดังรูปที่ 3.8 กำหนดสมบัติทางกายภาพให้กับลมร้อนโดย Subdomain Settings จากนั้นกำหนดอุณหภูมิของลมร้อนให้คงที่ที่ 333.15, 343.15, 353.15 และ 363.15 K และความเร็วของลมร้อนที่ทางเข้า 0.5 m/s แล้วจึงกำหนดให้ลมร้อนเป็นของไหลไหลผ่านเมล็ดข้าวเปลือกที่เป็นของแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 3.2 กล่าวคือโดเมนการคำนวณในที่นี้ก็คือปริภูมิภายในขอบเขตการไหลของลมร้อนที่เป็นทรงสี่เหลี่ยมลบออกด้วยปริมาตรของเมล็ดข้าวเปลือก จากนั้นทำการสร้าง Mesh จำนวน 53,375 เอลิเมนต์ต่อปริมาตรทั้งหมด 31250 mm³ คิดเป็นความหนาแน่น 1.708 meshes / mm³ เหมือนดังในรูปที่ 3.9 แล้วจึงทำการกำหนดให้การไหลอยู่ที่สภาวะทรานเซียนต์ แล้วทำการคำนวณ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.10 ทำให้ได้การกระจายความเร็วของลมร้อน และเส้นกระแสการไหลของลมร้อนที่ไหลผ่านเมล็ดข้าวเปลือก



รูปที่ 3.10 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนการคำนวณของแนวคิดปรับปรุงในส่วนการไหลของลมร้อนที่เป็นของไหลไหลผ่านผิวภายนอกเมล็ดข้าวเปลือกที่เป็นของแข็งในสภาวะคงที่

2. การคำนวณการถ่ายเทความร้อนภายในเมล็ดข้าวเปลือกที่เป็นของแข็งในสภาวะทรานเซียนต์ เริ่มต้นด้วยการเลือกสมการควบคุมจาก Application Mode การถ่ายเทความร้อนทั่วไป (General Heat Transfer) ซึ่งแสดงโดยสมการที่ (3.1) และ (3.2) ในการคำนวณผลที่สภาวะทรานเซียนต์ใน 3 มิติ ทำการสร้างแบบจำลองของเมล็ดข้าวเปลือกเป็นทรงรีขนาดตามตารางที่ 3.1 กำหนดสมบัติทางกายภาพให้กับเมล็ดข้าวเปลือก จากนั้นทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตให้ลมร้อนที่ไหลผ่านโดยรอบเมล็ดข้าวเปลือกนั้นมีอุณหภูมิคงที่ที่ 333.15, 343.15, 353.15 และ 363.15 K ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer Coefficient) เป็นเงื่อนไขขอบเขตของการเกิดการถ่ายเทความร้อนที่ผิวของเมล็ดข้าวเปลือก โดยทำการแบ่งพื้นผิวของเมล็ดข้าวเปลือกออกเป็นสองบริเวณ โดยแต่ละบริเวณจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ต่างกันตามทิศทางการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือก ได้แก่ พื้นผิวของเมล็ดข้าวเปลือกบริเวณที่เกิดการปะทะกับลมร้อนและบริเวณหลังการปะทะกับลมร้อน แสดงดังรูปที่ 3.11 แต่ในกรณีการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกทำมุม 45 องศา กับทิศทางการไหลของลมร้อน จำทำการแบ่งแต่ละบริเวณออกเป็นสองส่วน ได้แก่ ส่วนแรกและส่วนหลัง ดังรูปที่ 3.11 (c) เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนบริเวณที่เกิดการปะทะในแต่ละส่วนต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากลักษณะการไหลเข้าปะทะของลมร้อน เพื่อหาลักษณะการกระจายอุณหภูมิที่เป็นผลมาจากความเร็วและลักษณะการไหลของลมร้อนผ่านผิวเมล็ดข้าวเปลือก ทำให้ได้การกระจายอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในเมล็ดที่เวลาต่างๆ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการศึกษาต่อไปได้



ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ใช้ของบริเวณพื้นผิวของแต่ละส่วนเป็นค่าเฉลี่ยที่คำนวณมาจาก Nusselt Number เฉลี่ยทั้งบริเวณที่เกิดการปะทะกับลมร้อน และด้านหลังการปะทะกับลมร้อน ซึ่งคำนวณมาจากการหาค่าเฉลี่ยระหว่างค่า Average Nusselt Number ของวัตถุทรงรีที่จัดวางในลักษณะต่างๆ สัมพันธ์กับทิศทางการไหลของของไหลจากงานวิจัยของ Richter และ Nikrityuk [8] กับค่า Local Nusselt Number ของจุดกึ่งกลางของพื้นผิวบริเวณที่เกิดการปะทะ และหลังการปะทะในการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกในทิศทางต่างๆ

สำหรับในกรณีการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกตั้งฉากกับทิศทางการไหลของลมร้อน ดังรูปที่ 3.11 (a) จะใช้ค่า Local Nusselt Number ของทรงกระบอก ณ จุดที่เกิดการปะทะ (1) และจุดหลังการปะทะ (2) กับของไหลของ Haeri และ Shrimpton [9] สำหรับในกรณีการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกขนานกับทิศทางการไหลของลมร้อน ดังรูปที่ 3.11 (b) จะใช้ค่า Local Nusselt Number ของทรงกลม ณ จุดที่เกิดการปะทะ (3) และจุดหลังการปะทะ (4) กับของไหลของ Daoyun และคณะ [10] และสำหรับในกรณีการจัดวางด้านความยาวของเมล็ดข้าวเปลือกทำมุม 45 องศากับทิศทางการไหลของลมร้อนดังรูปที่ 3.11 (c) จะใช้ค่า Nusselt Number เฉลี่ยจากการหาค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักระหว่างค่า Nusselt Number เฉลี่ยของกรณีการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกตั้งฉากกับทิศทางการไหลของลมร้อน และกรณีการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกขนานกับทิศทางการไหลของลมร้อน ดังสมการต่อไปนี้

$$\overline{Nu}_5 = 0.3\overline{Nu}_1 + 0.7\overline{Nu}_3 \quad (3.7)$$

$$\overline{Nu}_6 = 0.7\overline{Nu}_1 + 0.3\overline{Nu}_3 \quad (3.8)$$

$$\overline{Nu}_7 = 0.3\overline{Nu}_2 + 0.7\overline{Nu}_4 \quad (3.9)$$

$$\overline{Nu}_8 = 0.3\overline{Nu}_3 + 0.7\overline{Nu}_4 \quad (3.10)$$

เมื่อ \overline{Nu}_1 คือ ค่า \overline{Nu} ของบริเวณที่ 1 ดังรูปที่ 3.11 (a)

\overline{Nu}_2 คือ ค่า \overline{Nu} ของบริเวณที่ 2 ดังรูปที่ 3.11 (a)

\overline{Nu}_3 คือ ค่า \overline{Nu} ของบริเวณที่ 3 ดังรูปที่ 3.11 (b)

\overline{Nu}_4 คือ ค่า \overline{Nu} ของบริเวณที่ 4 ดังรูปที่ 3.11 (b)

\overline{Nu}_5 คือ ค่า \overline{Nu} ของบริเวณที่ 5 ดังรูปที่ 3.11 (c)

\overline{Nu}_6 คือ ค่า \overline{Nu} ของบริเวณที่ 6 ดังรูปที่ 3.11 (c)

\overline{Nu}_7 คือ ค่า \overline{Nu} ของบริเวณที่ 7 ดังรูปที่ 3.11 (c)

\overline{Nu}_8 คือ ค่า \overline{Nu} ของบริเวณที่ 8 ดังรูปที่ 3.11 (c)

เนื่องด้วยการคำนวณทางการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากการพาความร้อนนั้นมีความซับซ้อน จึงไม่สามารถคำนวณการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการพาความร้อนด้วยวิธีแมนตรงได้ แต่ทำได้เพียงหาค่าโดยประมาณจากการศึกษาด้วยวิธีเชิงตัวเลข และการทดลองเท่านั้น ซึ่งในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนนั้นต้องใช้ตัวเลขไร้มิติ (Dimensionless number) ในการคำนวณ โดยตัวเลขไร้มิตินั้นคือ ตัวเลขนัสเซลท์ (Nusselt Number, Nu) ซึ่ง Nusselt Number เป็นอัตราส่วนระหว่างการพาความร้อนและการนำความร้อน และยังมีความสัมพันธ์กับตัวเลขไร้มิติอื่นๆอีกดังนี้ $Nu = f(Re_L, Pr)$ โดยตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynold number, Re_L) เป็นอัตราส่วนระหว่างความเฉื่อยกับแรงหนืดของของไหล ซึ่งใช้บ่งบอกลักษณะการไหลของไหล โดย Reynold number ขึ้นอยู่กับความยาวคุณลักษณะ โดยในโครงการนี้ คือ ความยาวแกนของเมล็ดข้าวเปลือกที่ตั้งฉากกับการไหลของลมร้อน ซึ่งได้แก่ ความยาวของแกนหลัก, a ที่เป็นความกว้างของ เมล็ดข้าวเปลือก หรือ ความยาวของแกนรอง, b ที่เป็นความหนาของเมล็ดข้าวเปลือก ดังรูปที่ 3.4 โดยใช้ข้อมูลเมล็ดข้าวเปลือกจากตารางที่ 3.1 และขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพของลมร้อนที่อุณหภูมิ นั้นๆ ดังตารางที่ 3.2 และสามารถแสดงค่าของ Reynold number ที่คำนวณได้ดังตารางที่ 3.3 โดย Reynold number จากตารางที่ 3.3 จะใช้ในการหาค่า Nusselt number จากวรรณกรรม [8, 9, 10] ด้วยการประมาณค่าในช่วงแบบเชิงเส้น (Linear Interpolation) จากตารางและกราฟ ซึ่งค่า Nusselt number ที่หาได้จากวรรณกรรมต่างๆ แสดงดังตารางที่ 3.4, 3.5 และ 3.6 จากนั้นคำนวณ หา Nusselt number เฉลี่ยของแต่ละบริเวณดังที่ได้กล่าวมาแล้วแสดงดังตารางที่ 3.7

เนื่องจากต้องการทราบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยเพื่อนำไปใช้คำนวณใน โปรแกรม COMSOL โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยคำนวณจากนิยามของ Nusselt number ดังนี้

$$h = \frac{Nu \cdot k}{D} \quad (3.11)$$

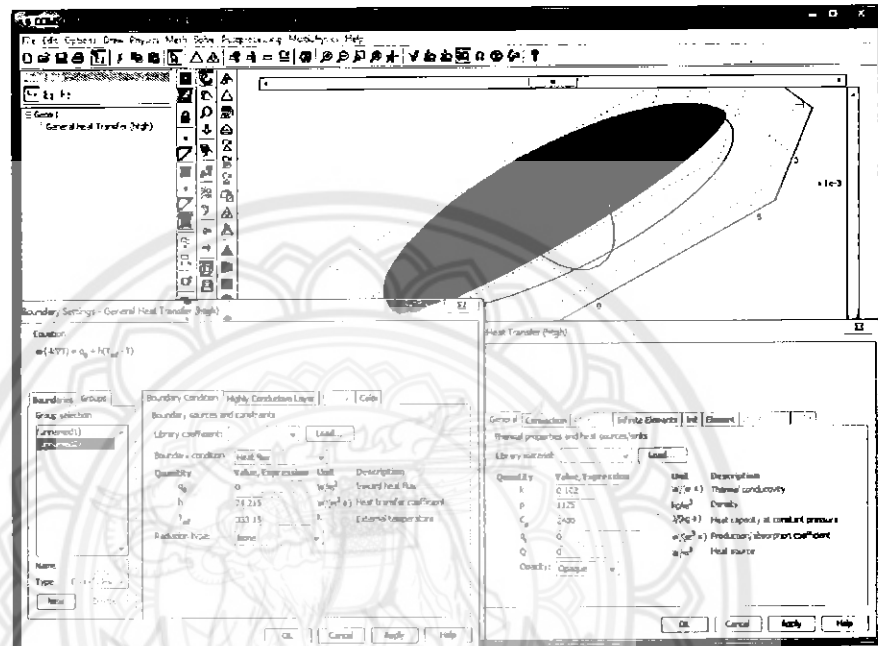
เมื่อ h คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยของแต่ละบริเวณ
มีหน่วยเป็น $W/(m^2 \cdot K)$

Nu คือ Average Nusselt Number เป็นตัวแปรไร้มิติ ซึ่งได้มาจากวรรณกรรม

k คือ ค่าการนำความร้อนของลมร้อน มีหน่วยเป็น $W/(m \cdot K)$

D คือ ความยาวคุณลักษณะ มีหน่วยเป็น m

ดังนั้นจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยของแต่ละบริเวณดังแสดงในตารางที่ 3.7 จากนั้นนำค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยจากตารางที่ 3.7 มากำหนดเป็นเงื่อนไขขอบเขตการถ่ายเทความร้อนจากผิวเมล็ดข้าวเปลือกสู่ภายในเมล็ดข้าวเปลือกในโปรแกรม COMSOL ในส่วนของ Boundary Settings ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของการถ่ายเทความร้อนที่ผิวของเมล็ดข้าวเปลือกในแต่ละบริเวณ

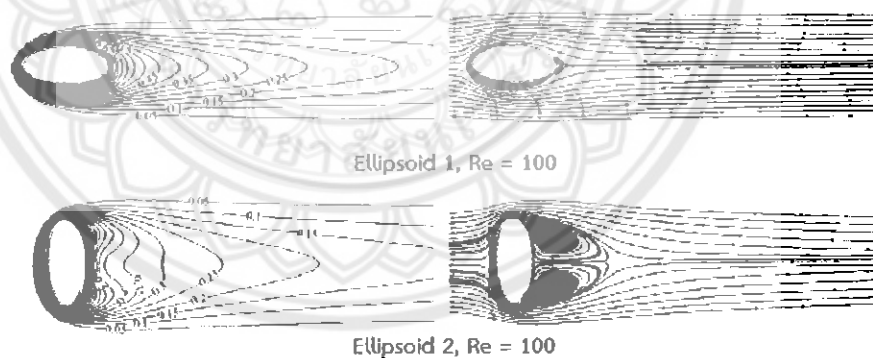
ตารางที่ 3.2 สมบัติทางกายภาพของลมร้อนที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

Temperature T (K)	Density ρ (kg/m^3)	Kinematic viscosity ν $\times 10^{-6}$ (m^2/s)	Thermal conductivity k ($\text{W/m} \cdot \text{K}$)
333.15	1.067	18.9	0.0285
343.15	1.034	19.92	0.0292
353.15	1	20.94	0.0299
363.15	0.973	22	0.0306

ตารางที่ 3.3 ผลการคำนวณค่า Reynold number ที่ขึ้นอยู่กับของเมล็ดข้าว
เปลือกที่ตั้งฉากกับการไหลของลมร้อน

เส้นผ่านศูนย์กลางของ เมล็ดข้าวเปลือกที่ตั้งฉาก กับการไหลของลมร้อน	Reynold number			
	T = 333.15 K	T = 343.15 K	T = 353.15 K	T = 363.15 K
แกนหลัก, a	65.609	62.249	59.217	56.364
แกนรอง, b	51.82	49.197	46.8	44.545

จากผลงานวิจัยของ Richter และ Nikrityuk [8] ที่แสดงในตารางที่ 3.4 เป็นของอากาศที่อุณหภูมิ 25 °C ที่มี $Pr = 0.744$ และลักษณะต่างๆของวัตถุทรงรีที่จัดวางสัมพันธ์กับทิศทางการไหลของของไหลแสดงดังรูปที่ 3.13 โดยกำหนดให้ Ellipsoid 1 เป็นการจัดวางวัตถุทรงรีขนานกับการไหลของของไหล และ Ellipsoid 2 เป็นการจัดวางวัตถุทรงรีตั้งฉากกับการไหลของของไหล และสำหรับงานวิจัยของ Haeri และ Shrimpton [9] และงานวิจัยของ Daoyun และคณะ [10] เป็นการศึกษาของไหลที่มี $Pr = 0.7$ และ $Pr = 1$ ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม Pr ของอากาศที่อุณหภูมิ 300 ถึง 400 K มีผลต่างกันไม่มากนัก โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.69 ถึง 0.707 จาก [11] ดังนั้นจึงสามารถใช้ผลของงานวิจัยเหล่านี้ในการคำนวณในโครงการนี้ได้



รูปที่ 3.13 ลักษณะการวางตัวของวัตถุทรงรีจากงานวิจัยของ ของ Richter และ Nikrityuk [4]

ตารางที่ 3.4 ค่า Nusselt number เฉลี่ยของวัตถุทรงรีจากงานวิจัยของ Richter และ Nikrityuk [8] ที่ Reynold number ต่างๆ

แกนที่ตั้งฉากกับการไหล ของลมร้อน	Reynold number	Average Nusselt number	
		Ellipsoid 1	Ellipsoid 2
แกนหลัก	65.609	5.683	6.087
	62.249	5.579	5.968
	59.217	5.485	5.861
	56.364	5.397	5.76
แกนรอง	51.82	5.256	5.599

ตารางที่ 3.5 ค่า Local Nusselt number ของทรงกระบอกที่ได้จากงานวิจัยของ Haeri และ Shrimpton [9] ที่ Reynold number ต่างๆ

แกนที่ตั้งฉากกับการไหล ของลมร้อน	Reynold number	Local Nusselt number	
		จุดที่ปะทะ	จุดหลังปะทะ
แกนหลัก	65.609	6.828	2.277
	62.249	6.619	2.183
	59.217	6.431	2.098
	56.364	6.254	2.018
แกนรอง	51.82	5.973	1.891

ตารางที่ 3.6 ค่า Local Nusselt number ของทรงกลมที่ได้จากงานวิจัยของ Daoyun และคณะ [10] ที่ Reynold number ต่างๆ

แกนที่ตั้งฉากกับการไหล ของลมร้อน	Reynold number	Local Nusselt number	
		จุดที่ปะทะ	จุดหลังปะทะ
แกนหลัก	65.609	11.246	3.686
	62.249	10.899	3.548
	59.217	10.586	3.423
	56.364	10.291	3.306
แกนรอง	51.82	9.821	3.119

สำหรับ Heat Transfer Coefficient เฉลี่ยของบริเวณพื้นผิวเมล็ดข้าวเปลือกแต่ละส่วนที่แสดงในตารางที่ 3.7 เป็นการคำนวณ Heat Transfer Coefficient เฉลี่ยของบริเวณพื้นผิวเมล็ดข้าวเปลือกแต่ละส่วนเฉพาะในบางกรณีที่จะนำไปวิเคราะห์เปรียบเทียบผลของตัวแปรที่ศึกษาที่มีต่อการถ่ายเทความร้อน ซึ่งได้แก่ กรณีจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกตั้งฉากกับทิศทางการไหลของลมร้อน และแกนหลักของเมล็ดข้าวเปลือกตั้งฉากกับทิศทางการไหลของลมร้อนที่อุณหภูมิของลมร้อน 333, 343, 353 และ 363 K เพื่อหาว่าอุณหภูมิของลมร้อนมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนอย่างไร และกรณีจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกตั้งฉาก ขนาน และทำมุม 45 องศา กับทิศทางการไหลของลมร้อน และแกนหลัก และแกนรองของเมล็ดข้าวเปลือกตั้งฉากกับทิศทางการไหลของลมร้อนที่อุณหภูมิของลมร้อน 333 K เพื่อหาว่าการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนอย่างไร ซึ่งทำให้ได้กรณีที่จะนำไปใช้ในการประมวลผลทั้งหมด 9 กรณี



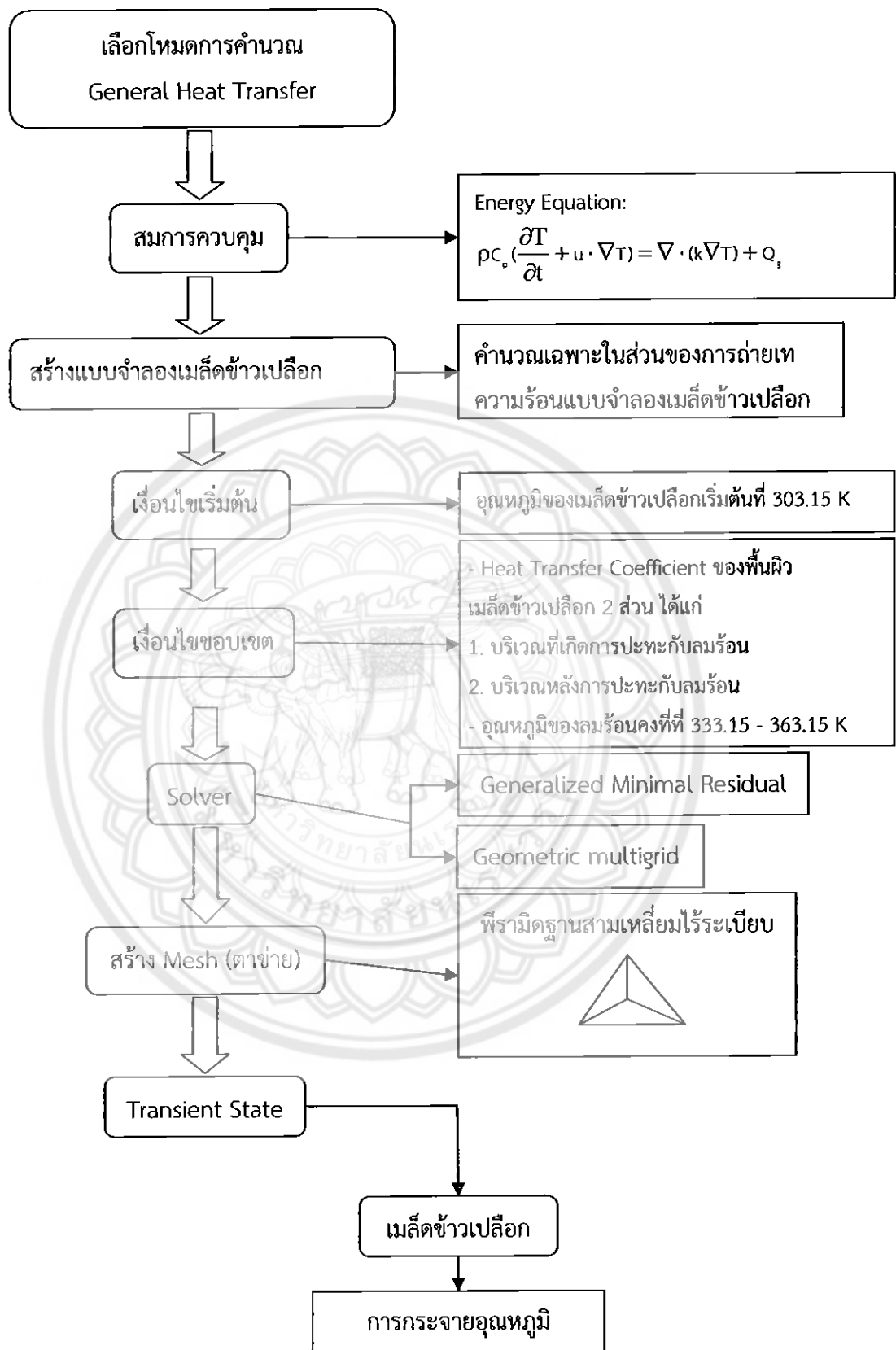
ตารางที่ 3.7 สรุปค่า Nusselt number เฉลี่ย และค่า Heat Transfer Coefficient เฉลี่ยที่บริเวณพื้นผิวเมล็ดข้าวเปลือกแต่ละส่วนที่จะนำมาใช้ในโครงการนี้

การจัดวาง	ความยาว คุณลักษณะ	บริเวณ พื้นผิวเมล็ด ข้าวเปลือก	Average Nusselt number ที่ T ต่างๆ					Average Heat Transfer Coefficient (W/m ² · K) ที่ T ต่างๆ				
			333.15 K	343.15 K	353.15 K	363.15 K	333.15 K	343.15 K	353.15 K	363.15 K		
ตั้งฉาก	แกนหลัก	ปะทะ	6.458	6.294	6.146	6.007	74.2	74.107	74.099	74.119		
		หลังปะทะ	4.182	4.076	3.98	3.889	48.059	47.992	47.985	47.985		
	แกนรอง	ปะทะ	5.786	-	-	-	84.133	-	-	-		
		หลังปะทะ	3.745	-	-	-	54.455	-	-	-		
ขนาน	แกนหลัก	ปะทะ	8.464	-	-	-	97.268	-	-	-		
		หลังปะทะ	4.684	-	-	-	53.828	-	-	-		
	ปะทะส่วนแรก	7.06	-	-	-	90.348	-	-	-			
ทำมุม 45 องศา	แกนหลัก	ปะทะส่วนหลัง	7.862	-	-	-	81.12	-	-	-		
		หลังปะทะส่วนแรก	4.533	-	-	-	52.097	-	-	-		
	หลังปะทะส่วนหลัง	4.333	-	-	-	49.79	-	-	-			

ต่อจากนั้นสร้าง Mesh รูปทรงพีระมิดฐานสามเหลี่ยมไว้ระเบียนให้กับเมล็ดข้าวเปลือก ได้ทั้งหมดจำนวน 6516 เอลิเมนต์ต่อเมล็ดข้าวเปลือกปริมาตร 26.1802 mm^3 คิดเป็นความหนาแน่นเท่ากับ $248.8904 \text{ meshes / mm}^3$ แสดงดังรูปที่ 3.14 และทำการประมวลผลที่สภาวะทรานเซียนต์ โดยขั้นตอนการคำนวณจากแนวทางการปรับปรุงในส่วนที่สองสำหรับการถ่ายเทความร้อนจากผิวข้าวเปลือกสู่ด้านในเมล็ดข้าวเปลือกที่สภาวะทรานเซียนต์นี้สามารถแสดงอยู่ในรูปของแผนภาพดังแสดงในรูปที่ 3.15 ซึ่งจะทำให้ผลลัพธ์ที่จะได้จากการจำลองนี้ คือ การกระจายอุณหภูมิ (Temperature Distribution) ภายในเมล็ดข้าวตามเวลา ซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์ทางการถ่ายเทความร้อนต่อไปในบทที่ 4



รูปที่ 3.14 การสร้าง Mesh ของแบบจำลองเมล็ดข้าวเปลือก จำนวน 6516 elements ซึ่งคิดเป็นความหนาแน่นเท่ากับ $248.8904 \text{ meshes / mm}^3$



รูปที่ 3.15 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนการคำนวณของแนวคิดปรับปรุงในส่วนการถ่ายเทความร้อนในเมล็ดข้าวเปลือกที่เป็นของแข็งในสภาวะทรานเซียนต์

บทที่ 4

ผลการคำนวณและการวิเคราะห์ผล

ในบทที่ 4 ของโครงงานนี้เป็นส่วนของผลการคำนวณ และวิเคราะห์ผล โดยจะทำการวิเคราะห์ผลการคำนวณจากแนวคิดปรับปรุงขั้นตอนการคำนวณดังกล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ซึ่งแยกพิจารณาระหว่างการไหลของลมร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ไหลผ่านเมล็ดข้าวเปลือกที่จัดวางในทิศทางและลักษณะต่างๆ และการถ่ายเทความร้อนที่เมล็ดข้าวเปลือก โดยในบทนี้จะเริ่มแสดงผลการคำนวณ และการวิเคราะห์จากหัวข้อที่ 4.1 การไหลของลมร้อนที่ไหลผ่านเมล็ดข้าวเปลือก และหัวข้อที่ 4.2 การถ่ายเทความร้อนที่เมล็ดข้าวเปลือก ตามลำดับ

4.1 การไหลของลมร้อนผ่านเมล็ดข้าวเปลือก

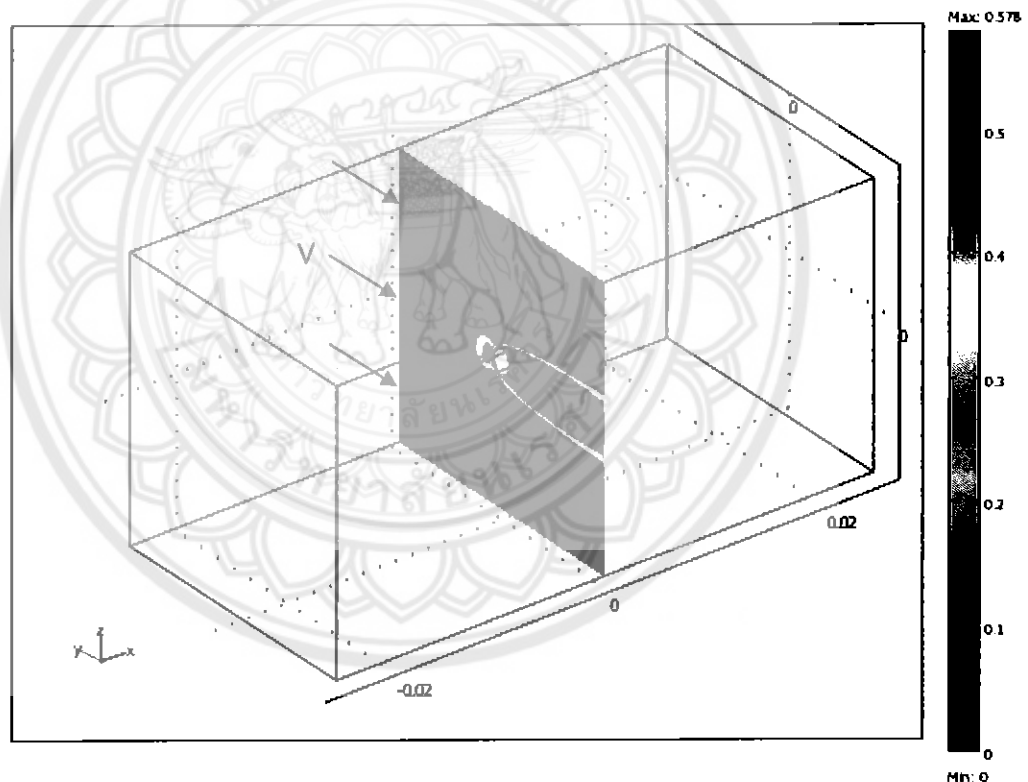
การประมวลผลในส่วนของการไหลของลมร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ไหลผ่านเมล็ดข้าวเปลือกที่จัดวางในทิศทางและลักษณะต่างๆ เป็นการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (Fluid Dynamics) โดยใช้สมการ Navier-Stokes ในการคำนวณทำให้ได้ตัวแปรที่จะช่วยอธิบายการถ่ายเทความร้อนที่พื้นผิวของเมล็ดข้าวเปลือกที่เกิดจากการพาความร้อนที่เป็นผลมาจากการไหลของลมร้อน ซึ่งตัวแปรนั้นคือ ความเร็วของลมร้อนบริเวณที่ไหลผ่านพื้นผิวของเมล็ดข้าวเปลือก โดยแสดงผลเป็นสนามความเร็ว (Velocity field) ของลมร้อน ที่แสดงระดับความเร็วของลมร้อนโดยใช้สีที่แตกต่างกัน (Color Mapping) ตามภาพตัดขวาง (Cross section) ในมุมมองไอโซเมตริก (Isometric view) และมุมมองด้านข้าง (Side view) และเส้นกระแส (Streamline) ของลมร้อนที่แสดงลักษณะการไหลของลมร้อนสำหรับการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกในทิศทางและลักษณะต่างๆ

4.1.1 ผลกระทบของอุณหภูมิของลมร้อน

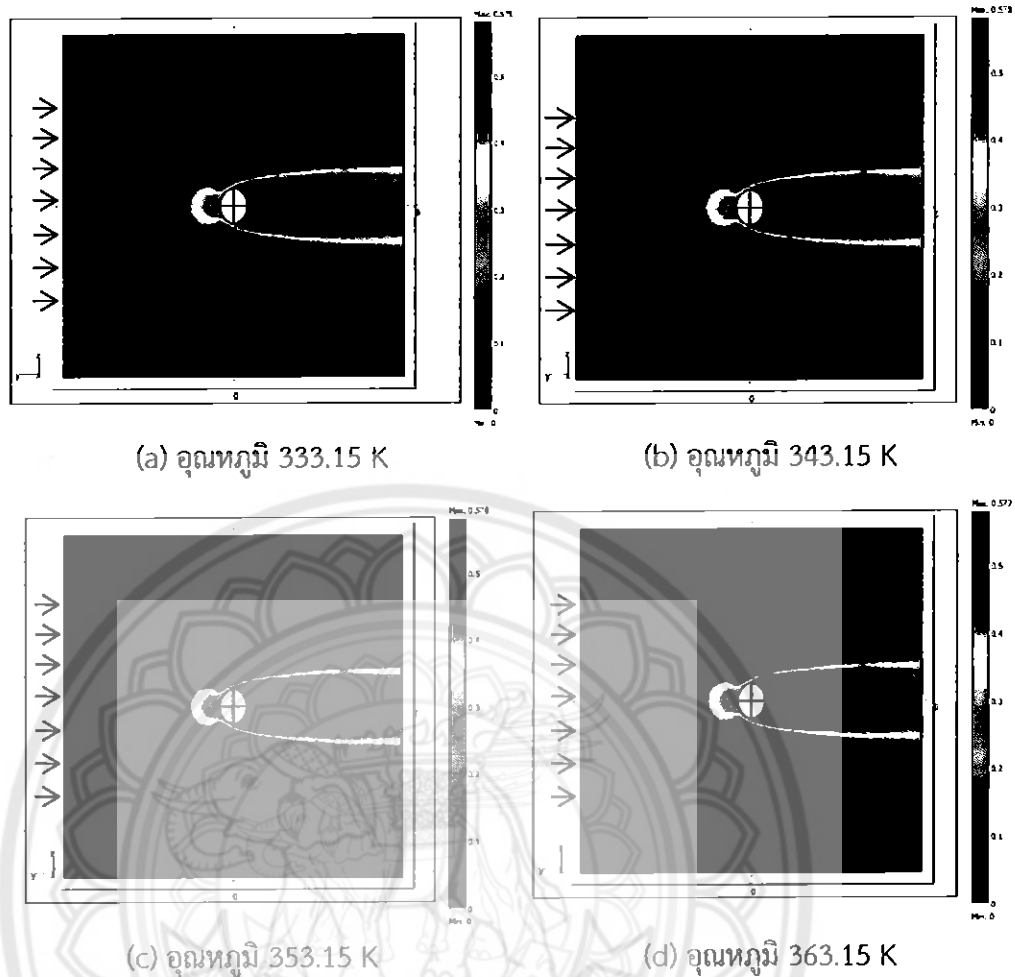
สำหรับการแสดงผลการคำนวณ และวิเคราะห์ผลกระทบของอุณหภูมิของลมร้อนที่มีผลต่อความเร็ว และลักษณะการไหลของลมร้อนนี้จะทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิของลมร้อนทั้งสี่ค่า ได้แก่ 333.15, 343.15, 353.15 และ 363.15 K โดยเป็นการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกสัมพันธ์กับทิศทางการไหลของลมร้อน คือ เมล็ดข้าวเปลือกจัดวางตั้งฉากกับทิศทางการไหลดังรูปที่ 3.3 (a) และการจัดวางแกนของเมล็ดข้าวเปลือกตั้งฉากกับทิศทางการไหลของลมร้อนลักษณะเดียว คือ การจัดวางแกนหลักของเมล็ดข้าวเปลือกตั้งฉากกับทิศทางการไหลของลมร้อนดังรูปที่ 3.4 (a)

4.1.1.1 สนามความเร็ว (Velocity field)

การวิเคราะห์สนามความเร็วในส่วนนี้เป็นการเปรียบเทียบผลกระทบของอุณหภูมิของลมร้อนต่อลักษณะการกระจายความเร็ว (Velocity distribution) และค่าความเร็วของลมร้อนว่าเป็นอย่างไร โดยจะทำการแสดงผลเป็นภาพตัดขวางที่ตัดผ่านกึ่งกลางของเมล็ดข้าวเปลือก และปลายเมล็ดข้าวเปลือกในมุมมองไอโซเมตริกและมุมมองด้านข้าง สำหรับการแสดงผลในมุมมองไอโซเมตริกนั้นจะแสดงเฉพาะในกรณีที่อุณหภูมิ 333.15 K เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.1 เพื่อแสดงตำแหน่งที่ตัดผ่านเมล็ดข้าวเปลือกของสนามความเร็ว เนื่องจากที่อุณหภูมิอื่น ๆ นั้นมีลักษณะการกระจายความเร็ว และค่าความเร็วที่ใกล้เคียงกันกับที่อุณหภูมิ 333.15 K และจะทำการแสดงผลเปรียบเทียบในมุมมองด้านข้างของแต่ละอุณหภูมิ ซึ่งสามารถเปรียบเทียบลักษณะการกระจายความเร็ว และค่าความเร็ว เนื่องจากผลของอุณหภูมิได้อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 สนามความเร็วของลมร้อนที่ตัดผ่านกึ่งกลางของเมล็ดข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 333.15 K ในมุมมองไอโซเมตริก

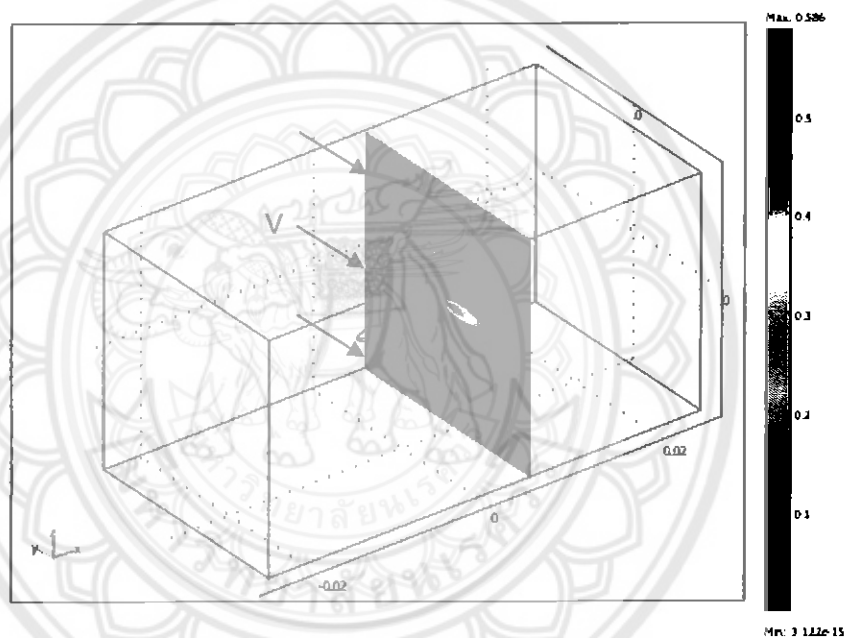


รูปที่ 4.2 สนามความเร็วของลมร้อนที่ตัดผ่านกึ่งกลางของเมล็ดข้าวเปลือกที่อุณหภูมิต่างๆ

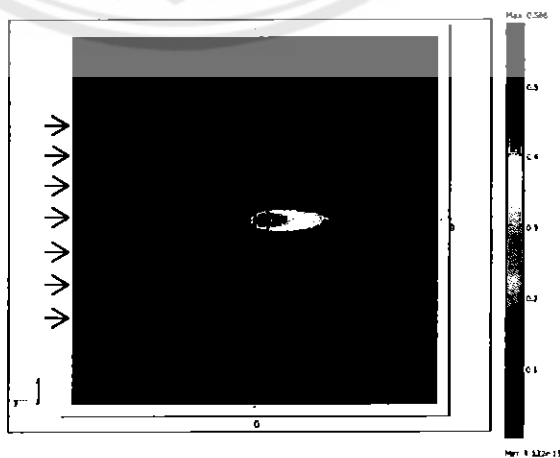
จากรูปที่ 4.2 จะพบว่าสนามความเร็วของลมร้อนที่อุณหภูมิต่างๆมีลักษณะเหมือนกัน ซึ่งสามารถอธิบายผลกระทบของอุณหภูมิต่อการกระจายความเร็วของลมร้อนได้ว่า อุณหภูมิของลมร้อนไม่มีผลต่อการกระจายความเร็วของลมร้อน และค่าของความเร็วที่อุณหภูมิต่างกันที่ตำแหน่งต่างๆนั้นมีค่าต่างกันน้อยมากจนไม่สามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน

จากลักษณะของสนามความเร็วของลมร้อนข้างต้น สามารถนำหลักการการถ่ายเทโมเมนตัม (Momentum Transfer) มาอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้ เนื่องจากลมร้อนเป็นของไหลที่มีมวลและความเร็ว ซึ่งมีทิศทางการไหลดังรูปที่ 4.1 และเมล็ดข้าวเปลือกเป็นของแข็งที่หยุดนิ่งอยู่กับที่ กล่าวคือเมล็ดข้าวเปลือกนั้นไม่มีความเร็ว และลมร้อนที่ไหลผ่านบริเวณผิวของเมล็ดข้าวเปลือกมีความเร็วเท่ากับ 0 เพราะกำหนดให้ที่ผิวของเมล็ดข้าวเปลือกไม่เกิดการลื่นไถล ดังนั้นเมื่อลมร้อนไหลมากระทบกับเมล็ดข้าวเปลือกที่บริเวณที่เกิดการปะทะจะเกิดการชน (Impact) กันของลมร้อนและเมล็ดข้าวเปลือก ทำให้ลมร้อนเกิดการสูญเสียโมเมนตัมให้กับเมล็ดข้าวเปลือกจากการอนุรักษ์โมเมนตัม (Conservation of momentum) ซึ่งจะพบว่าสำหรับการถ่ายเทความร้อนแล้ว บริเวณที่เกิดการปะทะโดยตรงจะเป็นบริเวณที่เกิดการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด

การถ่ายเทโมเมนตัมของลมร้อนให้แก่เมล็ดข้าวเปลือกทำให้ลมร้อนที่เป็นของไหลเกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็วและทิศทางการไหล โดยความเร็วของลมร้อนที่ผิวของเมล็ดข้าวเปลือกจะมีความเร็วลดลงจนเท่ากับ 0 และความเร็วของลมร้อนจะค่อยเพิ่มขึ้นเมื่อห่างออกจากผิวของเมล็ดข้าวเปลือก จึงเกิดเป็นชั้นขอบเขตความเร็ว (Velocity boundary layer) ดังรูปที่ 4.2 และหลังจากลมร้อนปะทะกับเมล็ดข้าวเปลือกแล้ว เมื่อลมร้อนเคลื่อนที่ไปยังด้านหลังการปะทะทำให้เกิดการแยกของการไหล (Flow Separation) ของลมร้อน ความเร็วของลมที่บริเวณด้านข้างของเมล็ดข้าวเปลือกจะมีความเร็วสูงที่สุด ซึ่งมีค่าสูงกว่าความเร็วลมร้อนที่ทางเข้า เนื่องด้วยการเปลี่ยนแปลงหน้าตัดการไหลซึ่งเกิดจากพื้นผิวของเมล็ดข้าวเปลือกนั้นทำให้ความดันเกิดการเปลี่ยนแปลงจึงส่งผลทำให้ค่าของความเร็วเกิดการเปลี่ยนแปลง ทั้งนี้รายละเอียดของการไหลจะแสดงโดยเส้นกระแสในหัวข้อถัดไป



(a) มุมมองไอโซเมตริก



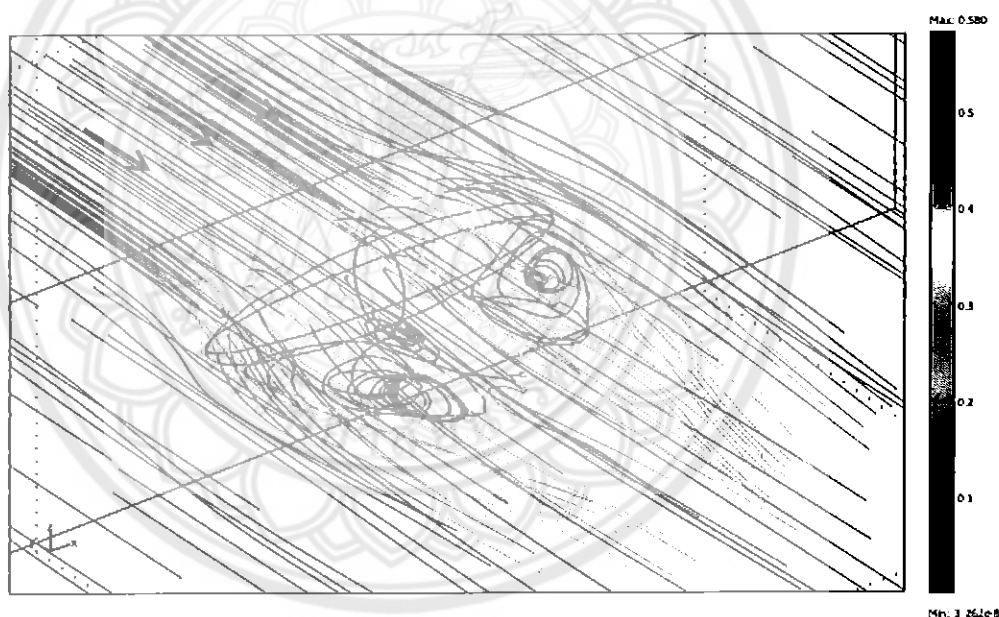
(b) มุมมองด้านข้าง

รูปที่ 4.3 สนามความเร็วของลมร้อนที่ตัดผ่านปลายเมล็ดข้าวเปลือก

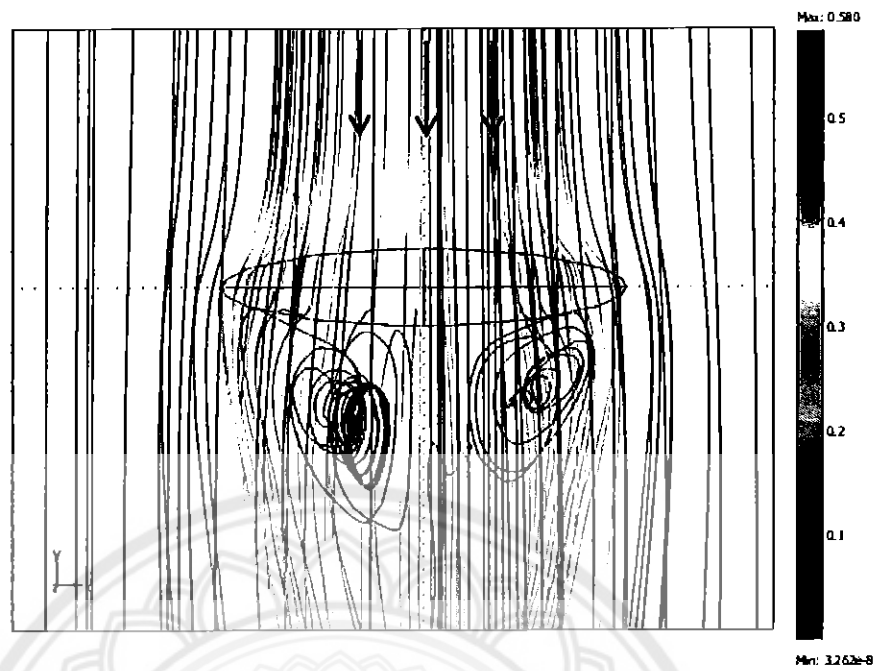
จากรูปที่ 4.3 แสดงการไหลของลมร้อนผ่านเมล็ดข้าวเปลือกโดยแสดงภาพตัดขวางที่ปลาย เมล็ดข้าวเปลือก ซึ่งจะพบว่าความเร็วที่ด้านข้างมีค่าสูงกว่าบริเวณอื่น ซึ่งเป็นผลมาจากการถ่ายเท โมเมนตัม ที่ทำให้ลมร้อนที่บริเวณอื่นเปลี่ยนทิศทางการไหลมารวมที่บริเวณนี้ และพื้นที่ผิวของปลาย เมล็ดข้าวเปลือกมีน้อยมากจึงทำให้การถ่ายเทโมเมนตัมสู่เมล็ดข้าวเปลือกมีน้อยกว่า ดังนั้นโมเมนตัม บริเวณนี้จึงมีค่าสูงกว่าบริเวณอื่น

4.1.1.2 เส้นกระแส (Streamline)

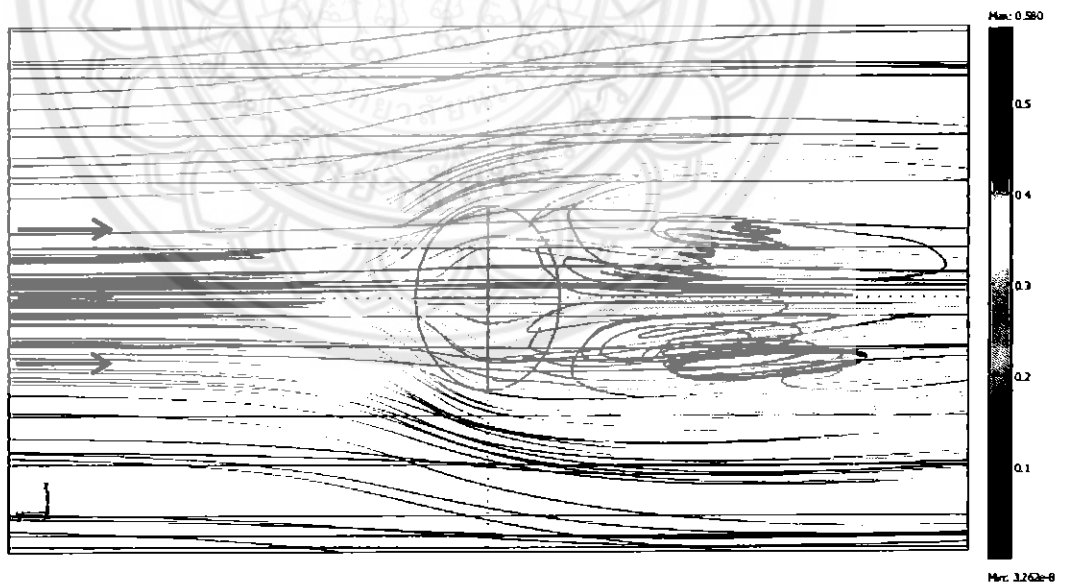
การวิเคราะห์เส้นกระแสจะช่วยให้เราทราบรายละเอียดของการไหลของลมร้อนผ่านเมล็ด ข้าวเปลือกได้ดียิ่งขึ้น จากรูปที่ 4.4 ถึง 4.6 แสดงเส้นกระแสของลมร้อนที่อุณหภูมิ 333.15 K ผ่าน เมล็ดข้าวเปลือก พบกระแสหมุนวนที่มีความเร็วต่ำมากบริเวณหลังการปะทะของเมล็ดข้าวเปลือก ซึ่ง เป็นผลมาจาก Adverse Pressure Gradient ที่ทำให้เกิดการแยกของการไหล (Flow separation) และการไหลย้อนกลับ (Back flow)



รูปที่ 4.4 เส้นกระแสการไหลของลมร้อนที่ไหลผ่านเมล็ดข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 333.15 K ในมุมมองไอโซเมตริก



รูปที่ 4.5 เส้นกระแสการไหลของลมร้อนที่ไหลผ่านเมล็ดข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 333.15 K
ในมุมมองด้านบน



รูปที่ 4.6 เส้นกระแสการไหลของลมร้อนที่ไหลผ่านเมล็ดข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 333.15 K
ในมุมมองด้านข้าง

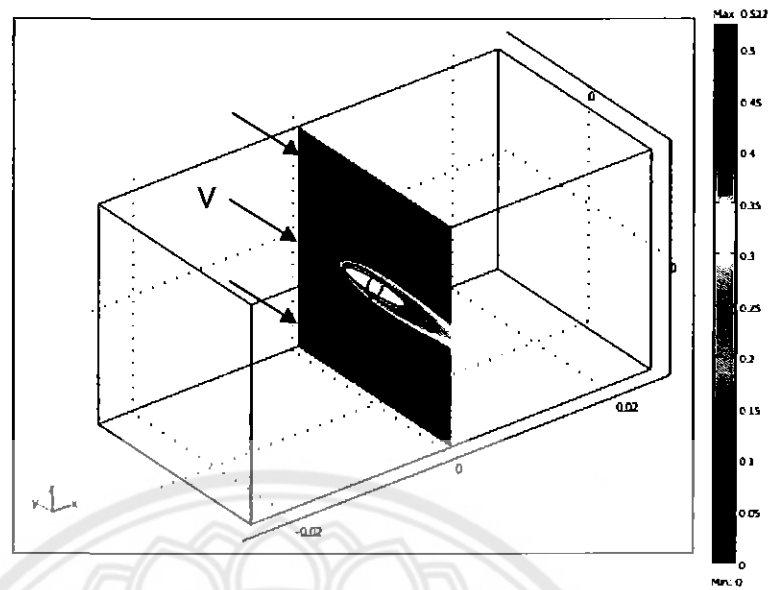
จากรูปที่ 4.4 ถึง 4.6 จะพบว่าลักษณะของเส้นกระแสการไหลที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน มีลักษณะคล้ายคลึงกัน และมีความต่างกันที่ความเร็วเพียงเล็กน้อยเท่านั้น จึงสามารถบอกได้ว่าหากอุณหภูมิมีค่าแตกต่างกันไม่มาก ก็จะไม่ส่งผลต่อความเร็วและลักษณะการไหลของลมร้อน สำหรับบริเวณที่เกิดการปะทะความเร็วของลมร้อนจะค่อยๆ ลดลงเมื่อเข้าใกล้ผิวของเมล็ดข้าวเปลือก และลมร้อนจะเกิดการเปลี่ยนทิศทางการไหลจากบริเวณกึ่งกลางไปยังด้านข้างและไหลไปตามความโค้งของผิวเมล็ดข้าวเปลือกทำให้ลมร้อนที่อยู่บริเวณด้านข้างที่อยู่ห่างจากผิวของเมล็ดข้าวเปลือกมีความเร็วสูงขึ้น และเนื่องจากเป็นการไหลภายนอก (External flow) และเป็นการไหลตัด (Cross flow) กับเมล็ดข้าวเปลือก จึงทำให้ที่บริเวณใกล้พื้นผิวของเมล็ดข้าวเปลือกที่ตำแหน่งผิวด้านที่มีความโค้งเกิดการเปลี่ยนแปลงความดัน จึงส่งผลทำให้ความเร็วเกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและทิศทาง ดังนั้นลมร้อนจึงเกิดการไหลย้อนที่บริเวณหลังปะทะดังรูปที่แสดงมาข้างต้น โดยลักษณะการไหลจะมีลักษณะคล้ายการหมุนวน ซึ่งจากผลลัพธ์ที่ได้สามารถบอกได้ว่าที่บริเวณที่เกิดการปะทะการไหลของลมร้อนจะมีลักษณะเป็นการไหลตัด (Crossflow) และมีความเร็วสูงกว่าบริเวณหลังปะทะ จึงทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากการพาความร้อนได้ดีกว่าบริเวณหลังปะทะซึ่งมีความเร็วที่ต่ำมากและการไหลที่มีลักษณะปั่นป่วน และที่บริเวณด้านข้างลมร้อนจะมีลักษณะไหลการไหลแบบขนานไปกับผิวของเมล็ดข้าวเปลือก

4.1.2 ผลกระทบของทิศทางการจัดวางและลักษณะการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือก

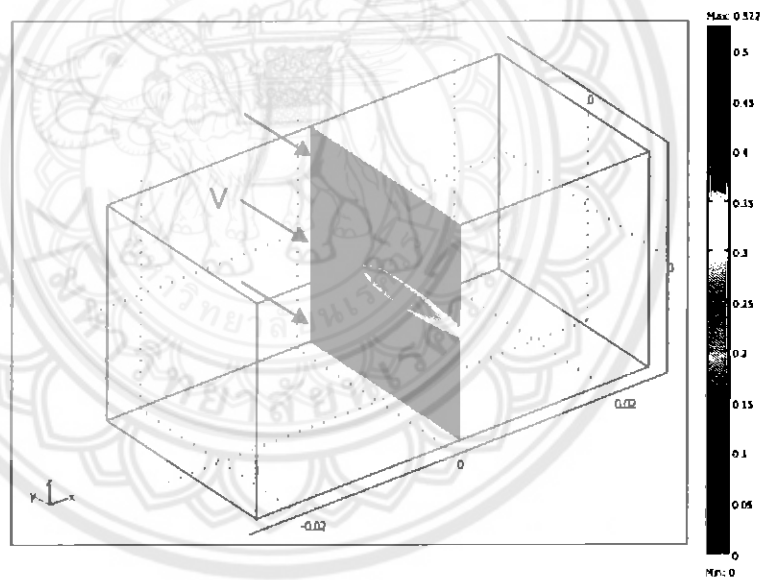
สำหรับการแสดงผลการคำนวณ และวิเคราะห์ผลกระทบของทิศทางการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือก ซึ่งได้แก่ การจัดวางตั้งฉากดังรูปที่ 3.3 (a) การจัดวางขนานดังรูปที่ 3.3 (b) และการจัดวางทำมุม 45 องศาทิศทางการไหลของลมร้อนดังรูปที่ 3.3 (c) และลักษณะการจัดวางแกนเมล็ดข้าวเปลือก ซึ่งได้แก่ แกนหลักตั้งฉากกับทิศทางของลมร้อนดังรูปที่ 3.4 (a) และแกนรองตั้งฉากกับทิศทางของลมร้อนดังรูปที่ 3.4 (b) ว่ามีผลอย่างไรต่อสนามความเร็ว และเส้นกระแสการไหลของลมร้อน โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบที่อุณหภูมิลมคงที่ที่ 333.15 K

4.1.2.1 สนามความเร็ว (Velocity field)

การวิเคราะห์สนามความเร็วในส่วนนี้เป็นการเปรียบเทียบผลกระทบของทิศทางการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือก และลักษณะการจัดวางแกนเมล็ดข้าวเปลือกต่อลักษณะการกระจายความเร็วของลมร้อนว่ามีผลอย่างไร โดยจะทำการแสดงทั้งภาพตัดขวางที่ตัดผ่านกึ่งกลางของเมล็ดข้าวเปลือก และปลายเมล็ดข้าวเปลือกในมุมมองไอโซเมตริก และมุมมองด้านข้าง โดยจะแสดงตำแหน่งสนามความเร็วที่ตัดผ่านเมล็ดข้าวเปลือกดังในรูปที่ 4.1, 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ ทำการเปรียบเทียบผลกระทบของทิศทางการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกดังในรูปที่ 4.9 ถึง 4.11 และเปรียบเทียบผลกระทบของลักษณะการจัดวางแกนเมล็ดข้าวเปลือกดังในรูปที่ 4.12 และ 4.13

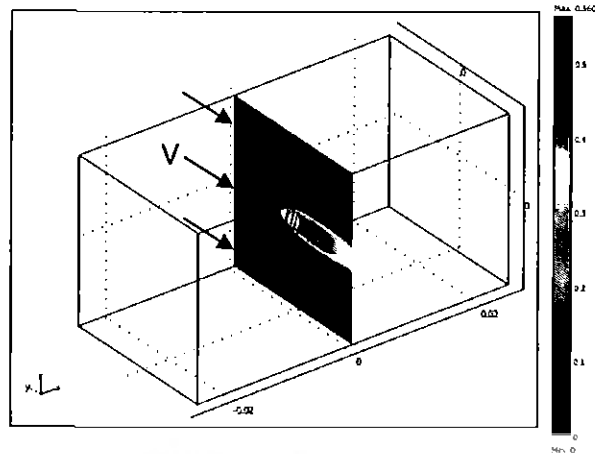


(a) ตัดผ่านกึ่งกลางของเมล็ดข้าวเปลือก

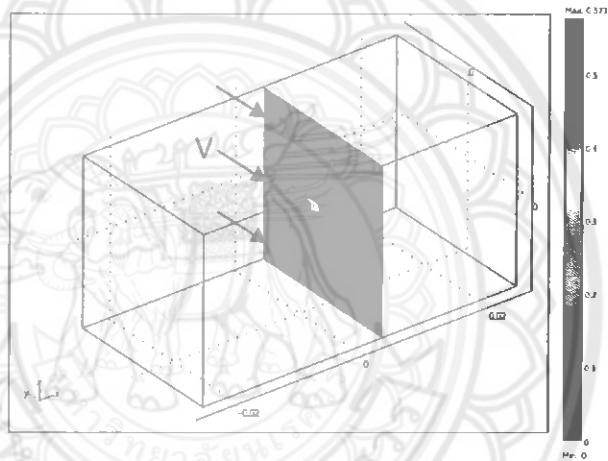


(b) ตัดผ่านผิวข้างเมล็ดข้าวเปลือก

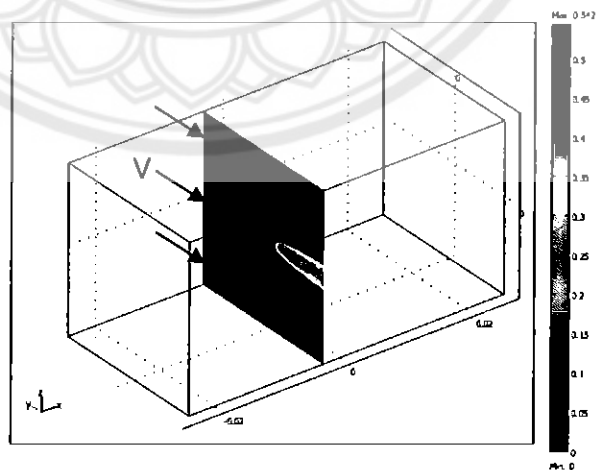
รูปที่ 4.7 สนามความเร็วของลมร้อนที่ตัดผ่านเมล็ดข้าวเปลือกที่จัดวางขนานกับทิศทางการไหล
ของลมร้อนที่อุณหภูมิ 333.15 K ในมุมมองไอโซเมตริก



(a) ตัดผ่านกึ่งกลางของเมล็ดข้าวเปลือก

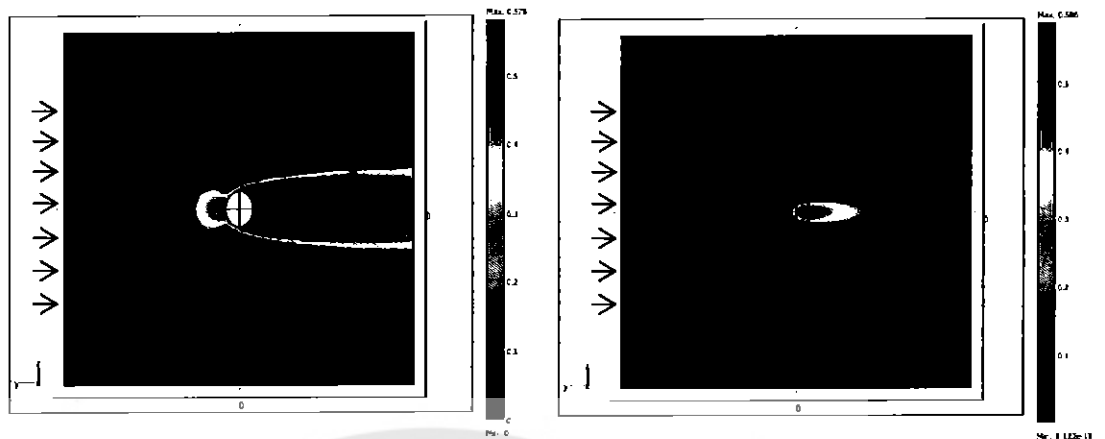


(b) ตัดผ่านปลายเมล็ดข้าวเปลือกที่เกิดการปะทะก่อน



(c) ตัดผ่านปลายเมล็ดข้าวเปลือกที่เกิดการปะทะทีหลัง

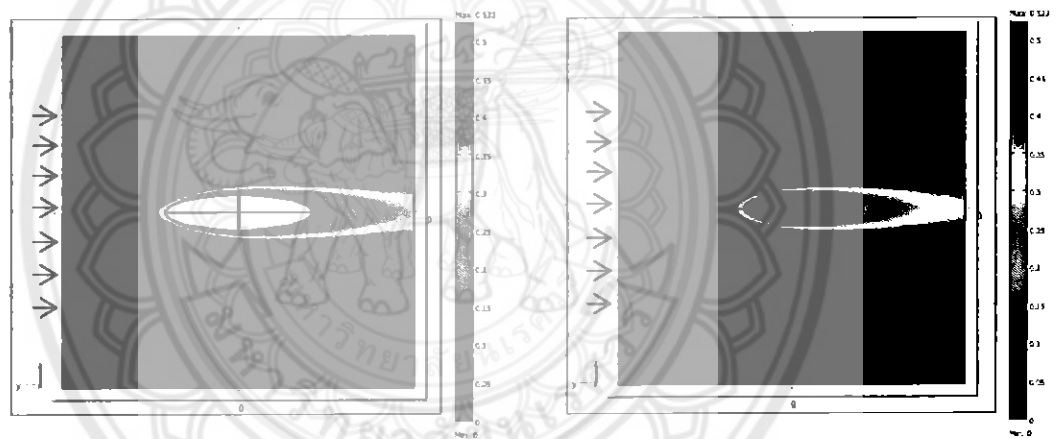
รูปที่ 4.8 สนามความเร็วของลมร้อนที่ตัดผ่านเมล็ดข้าวเปลือกที่จัดวางทำมุม 45 องศา กับทิศทาง
การไหลของลมร้อนที่อุณหภูมิ 333.15 K ในมุมมองไอโซเมตริก



(a) ตัดผ่านกึ่งกลางเมลิคข้าวเปลือก

(b) ตัดผ่านปลายเมลิคข้าวเปลือก

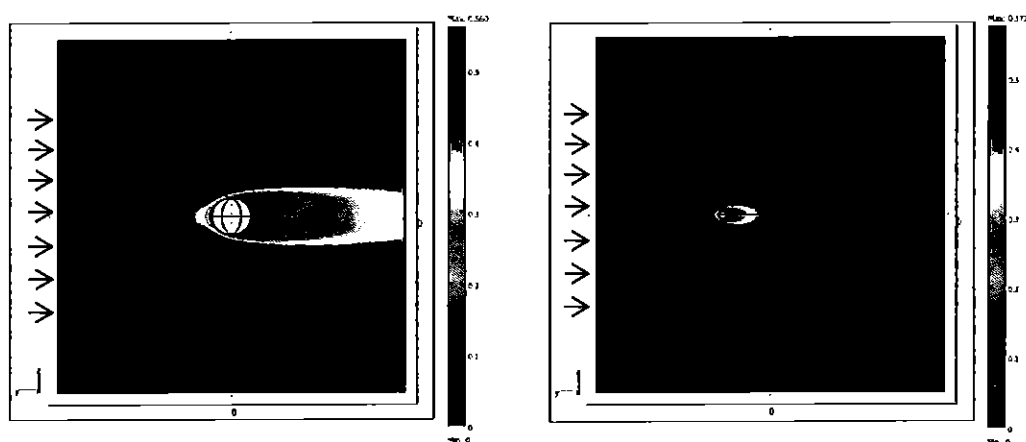
รูปที่ 4.9 สนามความเร็วของลมร้อนที่ตัดผ่านเมลิคข้าวเปลือกที่จัดวางตั้งฉากกับทิศทางของลมร้อน ที่อุณหภูมิ 333.15 K



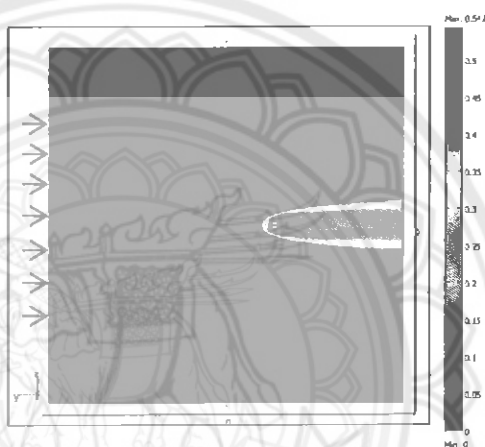
(a) ตัดผ่านกึ่งกลางเมลิคข้าวเปลือก

(b) ตัดผ่านผิวด้านข้างเมลิคข้าวเปลือก

รูปที่ 4.10 สนามความเร็วของลมร้อนที่ตัดผ่านเมลิคข้าวเปลือกที่จัดวางขนานกับทิศทางของลมร้อน ที่อุณหภูมิ 333.15 K



(a) ตัดผ่านกึ่งกลางเมล็ดข้าวเปลือก (b) ตัดผ่านปลายเมล็ดข้าวเปลือกที่เกิดการปะทะก่อน



(c) ตัดผ่านปลายเมล็ดข้าวเปลือกที่เกิดการปะทะทีหลัง

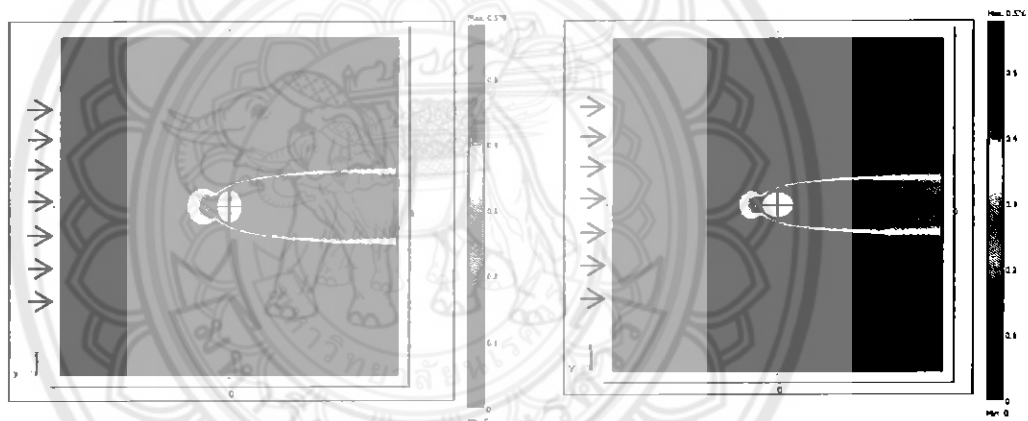
รูปที่ 4.11 สนามความเร็วของลมร้อนที่ตัดผ่านเมล็ดข้าวเปลือกที่จัดวางทำมุม 45 องศา กับทิศทาง การไหลของลมร้อนที่อุณหภูมิ 333.15 K

จากรูปที่ 4.9 ถึง 4.11 พบว่าลักษณะของสนามความเร็วของการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกในแต่ละกรณีนั้นต่างกัน ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกในทิศทางที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อลักษณะของสนามความเร็วของลมร้อน โดยการกระจายความเร็วในกรณีที่มีการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกตั้งฉากกับทิศทางไหลของลมร้อนดังรูปที่ 4.9 มีบริเวณที่มีความเร็วต่ำ (Low-velocity zone) มากที่สุดใน 3 กรณี โดยเฉพาะที่บริเวณหลังการปะทะจะมีช่วงความเร็วต่ำที่มีความกว้างมาก เนื่องจากการปะทะของลมร้อนกับผิวเมล็ดของเมล็ดข้าวเปลือกทำให้โมเมนตัมส่วนใหญ่ของลมร้อน ถูกถ่ายเทให้กับเมล็ดข้าวเปลือก และเกิดการแยกของการไหลของลมร้อนเร็วกว่ากรณีอื่น จึงทำให้ลมร้อนมีความเร็วต่ำมากกว่ากรณีอื่น

สำหรับในกรณีจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกขนานกับทิศทางไหลของลมร้อนที่บริเวณที่เกิดการปะทะและหลังการปะทะจะมีความเร็วสูงกว่าทั้งกรณีจัดวางตั้งฉาก รองลงมาคือการจัดวางทำมุม 45 องศา เพราะลมร้อนที่ไหลผ่านเมล็ดข้าวเปลือกเกิดการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมน้อยกว่ากรณีการไหลตั้งฉาก และความดันต่ำเนื่องจากการไหลของลมร้อนผ่านพื้นผิวที่มีลักษณะโค้งของเมล็ดมีค่าน้อยกว่า

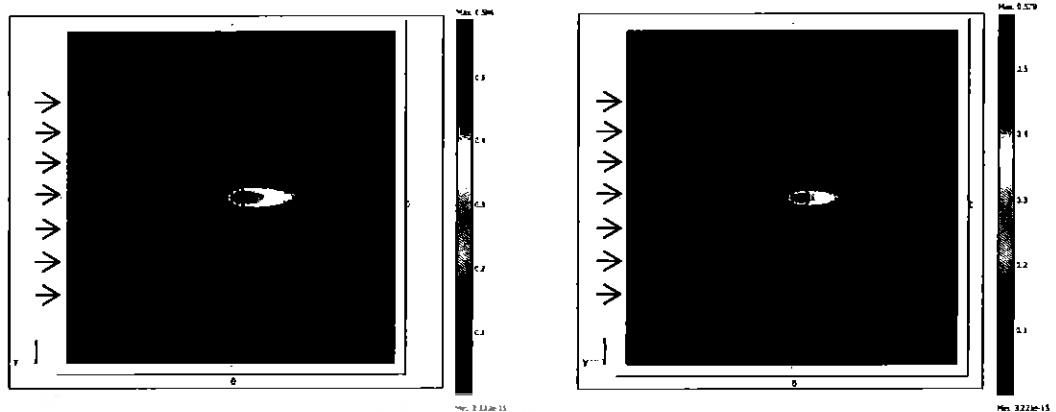
เนื่องจากการจัดวางในกรณีนี้พื้นผิวมีผลต่อการไหลน้อยที่สุด โดยเฉพาะที่บริเวณด้านข้างที่การไหลมีทิศทางขนานไปกับผิวเมล็ดข้าวเปลือกจะมีความเร็วสูงสุด และจากรูปที่ 4.10 (a) ที่จุดปลายเมล็ดข้าวเปลือกที่เป็นบริเวณที่เกิดการปะทะมีความเร็วสูงกว่ากรณีในรูปที่ 4.9 (a) และ 4.11 (a) แต่การไหลของลมร้อนมีทิศทางเข้าปะทะเหมือนกัน ดังนั้นทำให้กรณีจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกขนานกับทิศทางการไหลของลมร้อนเกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่า

สำหรับสนามความเร็วในกรณีของการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกทำมุม 45 องศากับทิศทางการไหลของลมร้อนดังรูปที่ 4.11 จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับในกรณีจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกตั้งฉากกับทิศทางการไหลของลมร้อน เนื่องมีการจัดวางทำให้เกิดการชนของลมร้อนกับผิวของเมล็ดข้าวเปลือกในลักษณะที่ใกล้เคียงกัน แต่เนื่องจากการจัดวางทำมุม 45 องศากับทิศทางการไหลของลมร้อนทำให้มุมการชนและการแยกของการไหลของกระแสลมร้อนต่างกัน จึงส่งผลให้ช่วงค่าการกระจายความเร็วของลมร้อนในกรณีนี้มีค่าสูงกว่า



(a) แกนหลักตั้งฉากกับทิศทางการไหลของลมร้อน (b) แกนรองตั้งฉากกับทิศทางการไหลของลมร้อน

รูปที่ 4.12 สนามความเร็วของลมร้อนที่ตัดผ่านกึ่งกลางเมล็ดข้าวเปลือกที่จัดวางตั้งฉากกับทิศทาง
การไหลของลมร้อนที่อุณหภูมิ 333.15 K



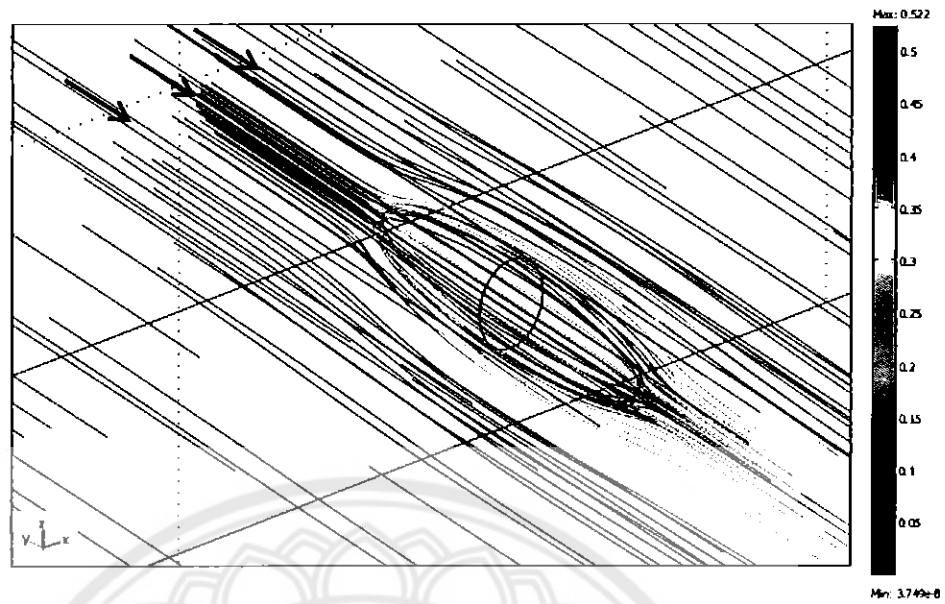
(a) แกนหลักตั้งฉากกับทิศทางการไหลของลมร้อน (b) แกนรองตั้งฉากกับทิศทางการไหลของลมร้อน

รูปที่ 4.13 สนามความเร็วของลมร้อนที่ตัดผ่านปลายเมล็ดข้าวเปลือกที่จัดวางตั้งฉากกับทิศทาง
การไหลของลมร้อนที่อุณหภูมิ 333.15 K

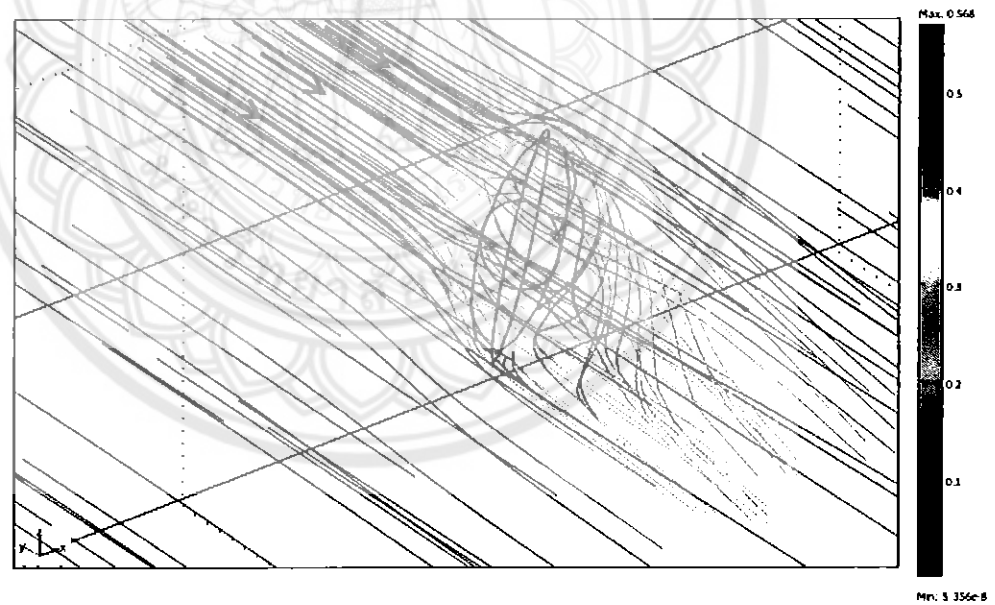
จากรูปที่ 4.12 ถึง 4.13 พบว่าลักษณะของสนามความเร็วของการจัดวางแกนหลักของเมล็ดข้าวเปลือกตั้งฉากกับทิศทางการไหลของลมร้อนเกิดการปะทะกันระหว่างลมร้อนกับผิวของเมล็ดข้าวเปลือกมากที่สุด โดยมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วบริเวณที่เกิดการปะทะเป็นวงกว้างกรณีจัดวางแกนรองของเมล็ดข้าวเปลือกตั้งฉากกับทิศทางการไหลของลมร้อน ซึ่งเป็นผลจากปะทะกันระหว่างลมร้อนที่เป็น Fresh feed กับพื้นผิวที่เกิดการชนมากกว่า ทำให้เกิดการถ่ายเทโมเมนตัมมากกว่าและบริเวณหลังการปะทะมีความเร็วลมร้อนที่มีค่าต่ำกว่าเป็นบริเวณกว้าง

4.1.2.2 เส้นกระแส (Streamline)

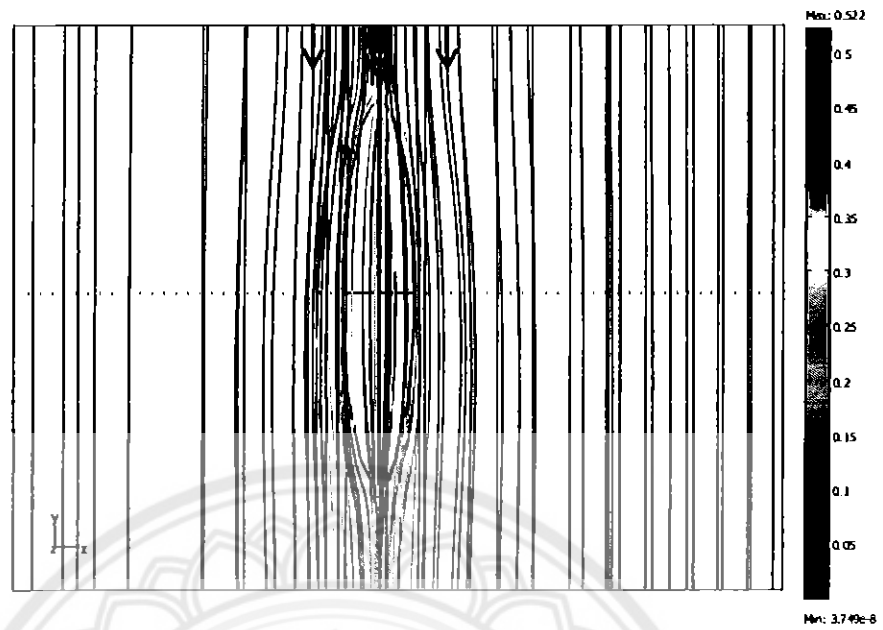
การวิเคราะห์เส้นกระแสที่เราเปรียบเทียบลักษณะและทิศทางการไหลของลมร้อนที่อุณหภูมิ 333.15 K ผ่านเมล็ดข้าวเปลือกที่มีการจัดวางในลักษณะที่ต่างกัน จากรูปที่ 4.4 ถึง 4.6 สำหรับการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกตั้งฉากกับทิศทางการไหลของลม และจากรูปที่ 4.14 ถึง 4.19 การจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกตั้งฉาก และทำมุม 45 องศา กับทิศทางการไหลของลม พบว่าการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกตั้งฉากกับทิศทางการไหลของลมร้อนเกิดกระแสหมุนวนบริเวณด้านหลังการปะทะของเมล็ดข้าวเปลือกมากที่สุด สำหรับการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกขนานกับทิศทางการไหลของลมร้อนไม่เกิดกระแสหมุนวนและเกือบให้ผลคล้ายกันกับ potential flow และไม่เกิดการไหลย้อนกลับเนื่องจากกระแสของลมร้อนเกิดการแยกการไหลผ่านเมล็ดข้าวเปลือกออกเป็นระยะสั้นๆ ได้ไหลมารวมกันที่ปลายเมล็ดข้าวเปลือกที่บริเวณหลังการปะทะในทิศทางเดิม และบริเวณที่เกิดการปะทะเป็นบริเวณปลายของเมล็ดข้าวเปลือก และการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกทำมุม 45 องศา กับทิศทางการไหลของลมร้อนจะเกิดกระแสหมุนวน แต่ไม่รุนแรงเท่ากับกรณีของการไหลตั้งฉากกับแกนหลักและเกิดการไหลบิดเป็นเกลียว



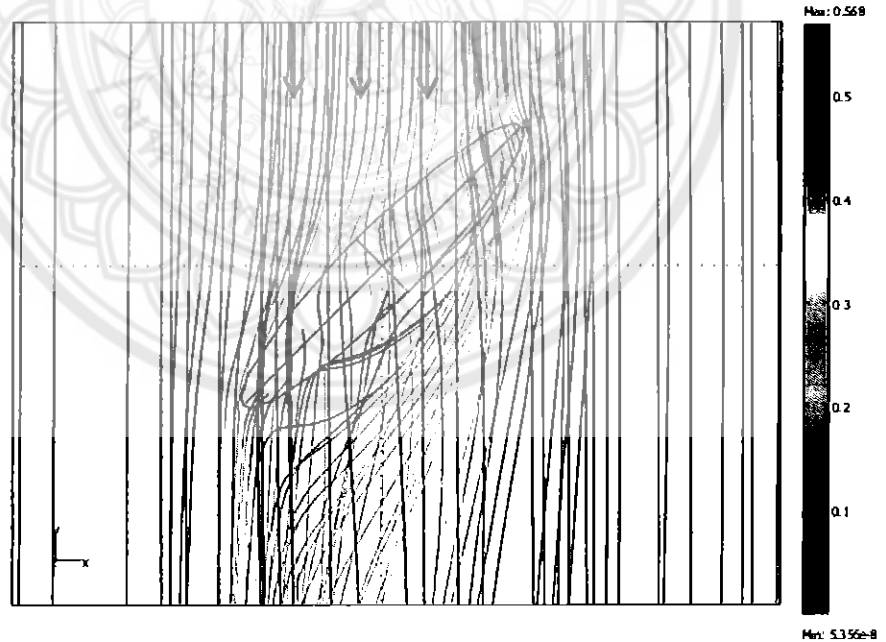
รูปที่ 4.14 เส้นกระแสการไหลของลมร้อนที่ไหลผ่านแมสส์เข้าเปลือกที่จัดวางขนานกับทิศทางการไหลของลมร้อนที่อุณหภูมิ 333.15 K ในมุมมองไอโซเมตริก



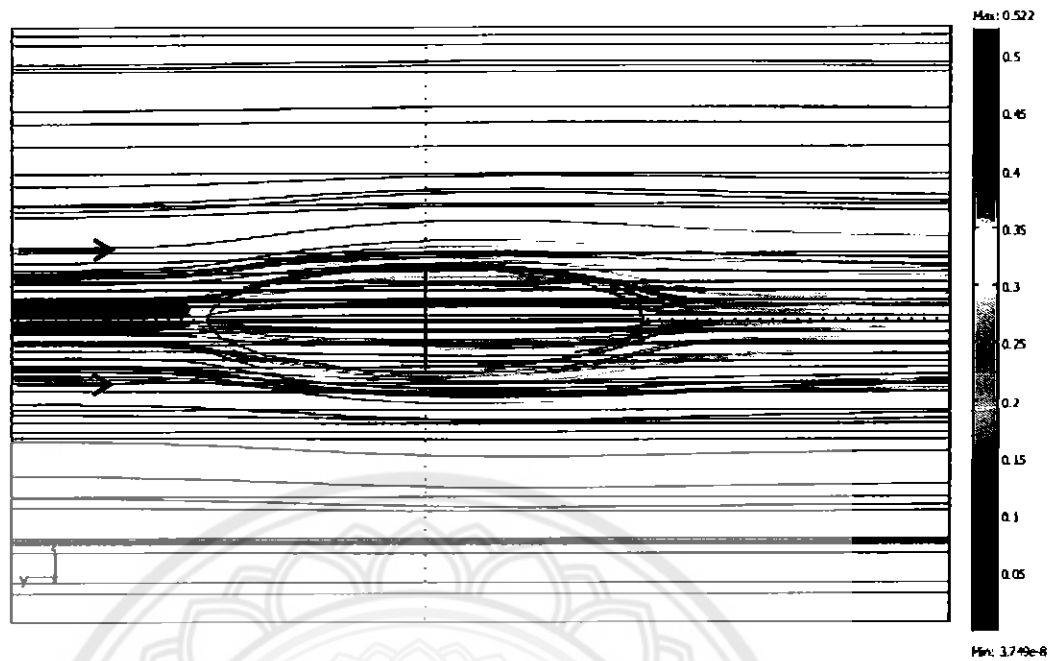
รูปที่ 4.15 เส้นกระแสการไหลของลมร้อนที่ไหลผ่านแมสส์เข้าเปลือกที่จัดวางทำมุม 45 องศา กับทิศทางการไหลของลมร้อนที่อุณหภูมิ 333.15 K ในมุมมองไอโซเมตริก



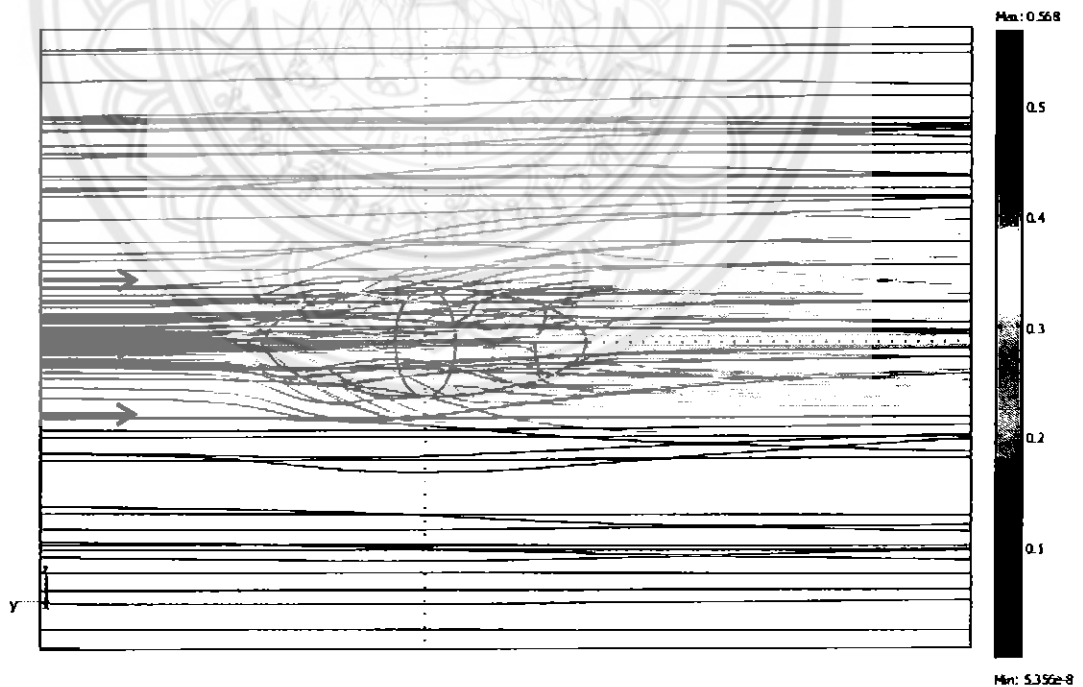
รูปที่ 4.16 เส้นกระแสการไหลของลมร้อนที่ไหลผ่านเมล็ดข้าวเปลือกที่จัดวางขนานกับทิศทางการไหลของลมร้อนที่อุณหภูมิ 333.15 K ในมุมมองด้านบน



รูปที่ 4.17 เส้นกระแสการไหลของลมร้อนที่ไหลผ่านเมล็ดข้าวเปลือกที่จัดวางทำมุม 45 องศา กับทิศทางการไหลของลมร้อนที่อุณหภูมิ 333.15 K ในมุมมองด้านบน



รูปที่ 4.18 เส้นกระแสการไหลของลมร้อนที่ไหลผ่านเมล็ดข้าวเปลือกที่จัดวางขนานกับทิศทางการไหลของลมร้อนที่อุณหภูมิ 333.15 K ในมุมมองด้านข้าง



รูปที่ 4.19 เส้นกระแสการไหลของลมร้อนที่ไหลผ่านเมล็ดข้าวเปลือกที่จัดวางทำมุม 45 องศา กับทิศทางการไหลของลมร้อนที่อุณหภูมิ 333.15 K ในมุมมองด้านข้าง

4.2 การถ่ายเทความร้อนที่เมล็ดข้าวเปลือก

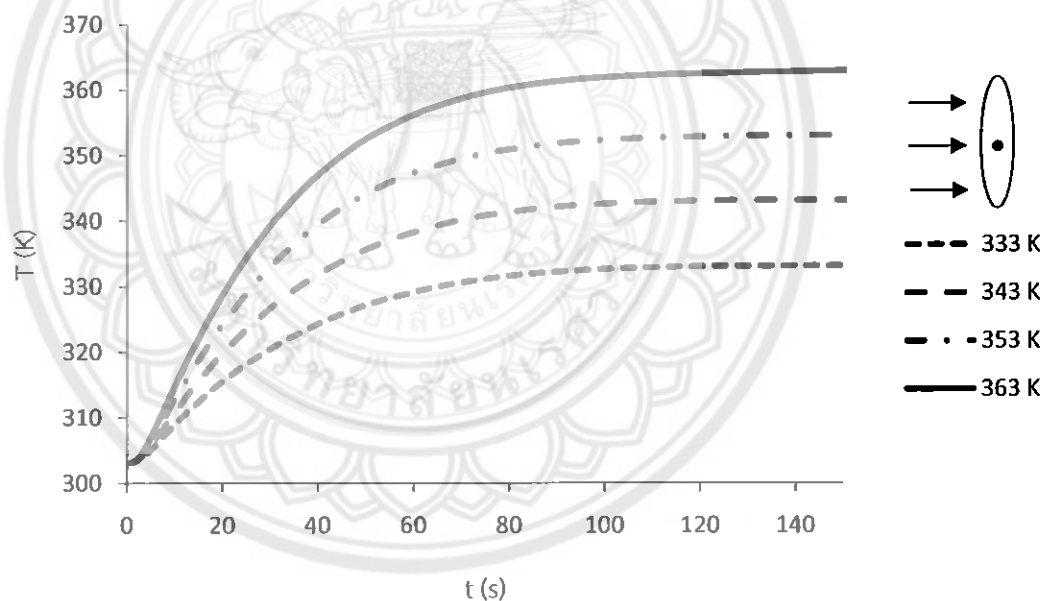
การประมวลผลในส่วนของการถ่ายเทความร้อนที่เมล็ดข้าวเปลือกที่มีอุณหภูมิเริ่มต้น 303 K เป็นการคำนวณทางการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer) โดยใช้สมการพลังงานในการคำนวณทั้งการถ่ายเทความร้อนที่ผิวของเมล็ดข้าวเปลือกที่เกิดจากพาความร้อน (Convection) โดยใช้สมการกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton law of cooling) และการนำความร้อน (Conduction) ภายในเมล็ดข้าวเปลือกในสภาวะทรานเซียนต์ โดยไม่คิดผลของการแผ่รังสีความร้อน ทำให้ทราบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดภายในเมล็ดในระหว่างเกิดการถ่ายเทความร้อน ซึ่งเกิดจากผลต่างระหว่างอุณหภูมิของลมร้อนและเมล็ดข้าวเปลือก และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer coefficient) ที่ต่างกันที่เกิดจากการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกในทิศทางและลักษณะต่างกัน โดยได้คำนวณไว้แล้วในตารางที่ 3.7 ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์การไหลของลมร้อนในหัวข้อ 4.1 อีกด้วย

โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมินี้จะแสดงอยู่ในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา หรือกราฟการเปลี่ยนอุณหภูมิตามเวลาที่ตำแหน่งต่างๆภายในเมล็ดข้าวเปลือก และการกระจายอุณหภูมิ (Temperature Distribution) ที่เวลาต่างๆ แสดงระดับอุณหภูมิของข้าวเปลือกโดยใช้สีที่แตกต่างกันในภาพตัดขวาง แล้วนำมาวิเคราะห์หาผลกระทบของอุณหภูมิลมร้อน และการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกมีผลอย่างไรต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและการกระจายอุณหภูมิในเมล็ดข้าวเปลือก ซึ่งสามารถนำข้อมูลที่ได้นี้ไปประกอบการพิจารณาในการเลือกอุณหภูมิ และระยะเวลาที่เหมาะสมเพื่อปรับปรุงกระบวนการอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือกเพื่อป้องกันการแตกหักที่เกิดขึ้นจากความเครียดเนื่องจากความต่างของอุณหภูมิได้ต่อไป

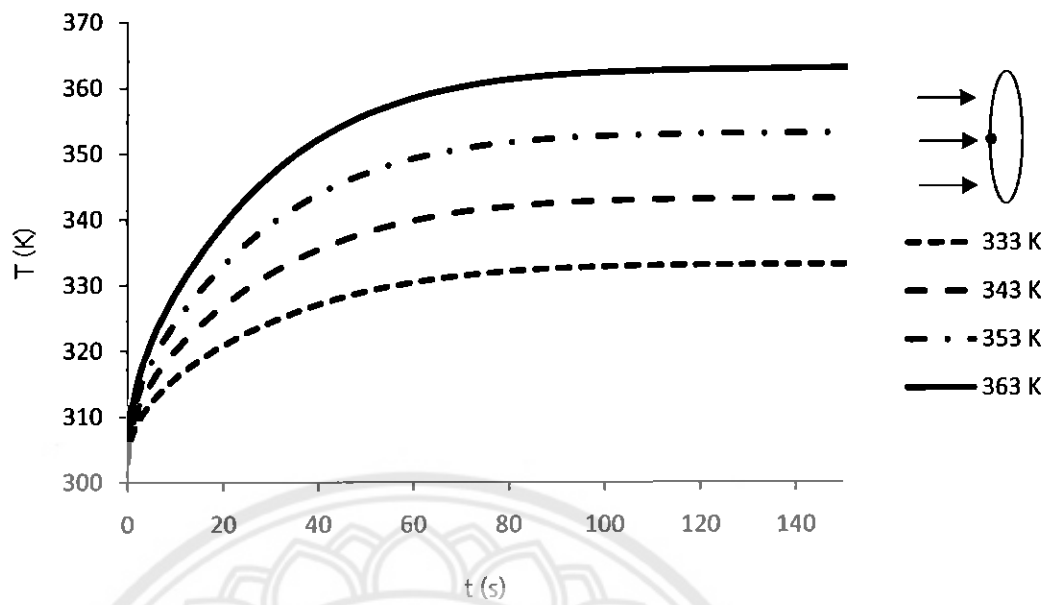
4.2.1 ผลกระทบของอุณหภูมิของลมร้อน

สำหรับการแสดงผลการคำนวณ และวิเคราะห์ผลกระทบของอุณหภูมิของลมร้อนที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และการกระจายอุณหภูมิภายในเมล็ดข้าวเปลือกจะทำการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิของลมร้อน ได้แก่ 333.15, 343.15, 353.15 และ 363.15 K โดยพิจารณาการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกตั้งฉากกับทิศทางการไหลของลมร้อนดังรูปที่ 3.3 (a) และการจัดวางแกนหลักของเมล็ดข้าวเปลือกตั้งฉากกับทิศทางการไหลของลมร้อนดังรูปที่ 3.4 (a) โดยจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของแต่ละอุณหภูมิของลมร้อนจากตารางที่ 3.8 สำหรับการแสดงผลจะเริ่มต้นจากกราฟการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเวลาที่ตำแหน่งๆภายในเมล็ดข้าวเปลือกดังแสดงในรูปที่ 4.20 ถึง 4.23 และการกระจายอุณหภูมิภายในเมล็ดข้าวเปลือกที่เวลาต่างๆดังแสดงในรูปที่ 4.24 ถึง 4.27

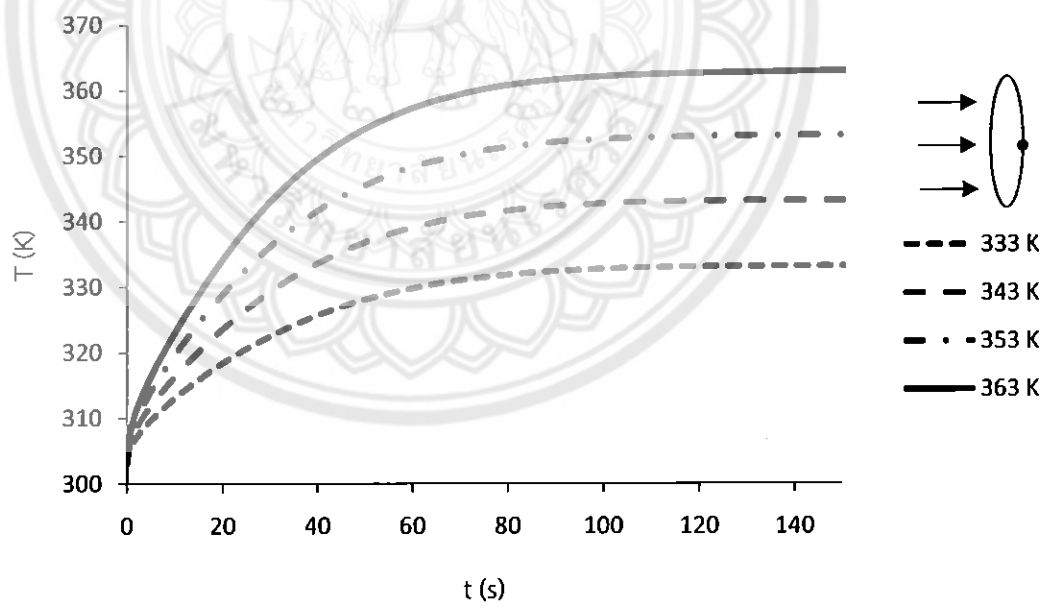
รูปที่ 4.20 ถึง 4.23 แสดงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในเมล็ดข้าวเปลือกที่ตำแหน่งต่างๆกับเวลา สำหรับการจัดวางเมล็ดข้าวแบบตั้งฉากกับทิศทางการไหลของลมร้อน ได้แก่ ที่จุดกึ่งกลาง จุดเกิดการปะทะ จุดหลังการปะทะ และจุดปลายของเมล็ดข้าวเปลือก สำหรับอุณหภูมิลมร้อนต่างๆ พบว่าในทุกกรณี การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมิ่ลักษณะเป็น Exponential และมีลักษณะของเส้นแนวโน้มอุณหภูมิคล้ายคลึงกันโดยที่จุดกึ่งกลางของเมล็ดข้าวเปลือกนั้นมีอุณหภูมิดังรูปที่ 4.20 เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงวินาทีที่ 80 แล้วจึงลู่เข้าสู่ค่าๆหนึ่ง ซึ่งก็คือที่อุณหภูมิของลมร้อนนั่นเอง จากรูปที่ 4.21 สำหรับจุดที่เกิดการปะทะกับลมร้อนมีอุณหภูมิลู่เข้าสู่ค่าๆหนึ่งที่เวลาประมาณ 60 วินาที สำหรับจุดที่หลังการปะทะกับลมร้อนที่วินาทีที่ 60 อุณหภูมิจะลู่เข้าดังแสดงในรูปที่ 4.22 และจุดปลายของเมล็ดข้าวเปลือกที่วินาทีที่ 40 ดังในรูปที่ 4.23 การที่อุณหภูมิลู่เข้าเร็วกว่ากรณีอื่นเป็นเพราะบริเวณจุดปลายของเมล็ดข้าวเปลือกนั้นมีพื้นที่น้อยกว่าบริเวณอื่นจึงเกิดการนำความร้อนได้อย่างรวดเร็ว



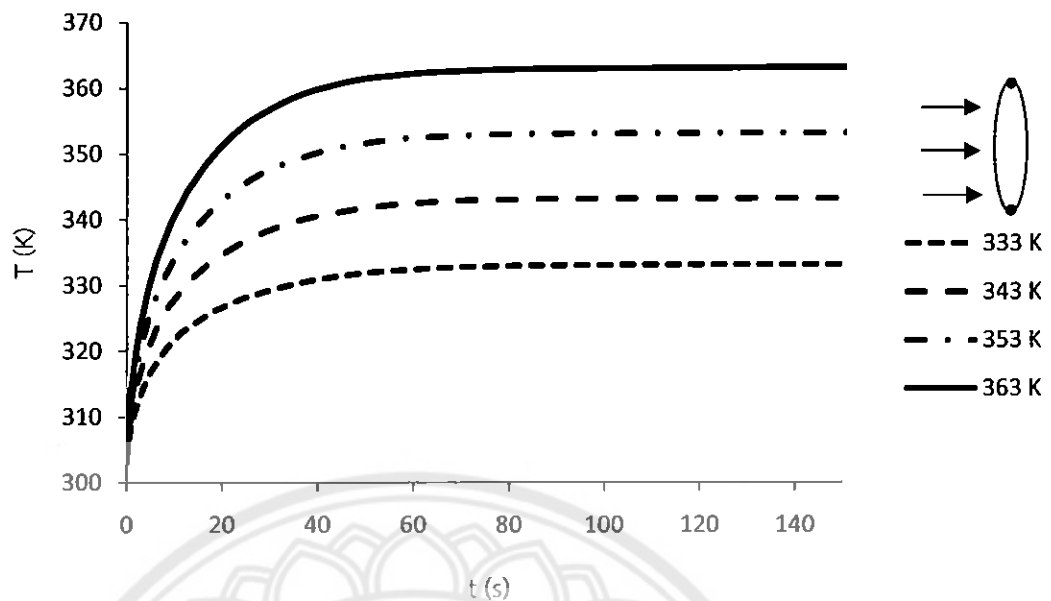
รูปที่ 4.20 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเวลาที่จุดกึ่งกลางของเมล็ดข้าวเปลือกที่อุณหภูมิลมร้อนต่างๆ สำหรับการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกตั้งฉากกับทิศทางการไหลของลมร้อน



รูปที่ 4.21 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเวลาที่จุดเกิดการปะทะของเมล็ดข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ
ลมร้อนต่างๆ สำหรับการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกตั้งฉากกับทิศทางการไหลของลมร้อน



รูปที่ 4.22 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเวลาที่จุดหลังการปะทะของเมล็ดข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ
ลมร้อนต่างๆ สำหรับการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกตั้งฉากกับทิศทางการไหลของลมร้อน

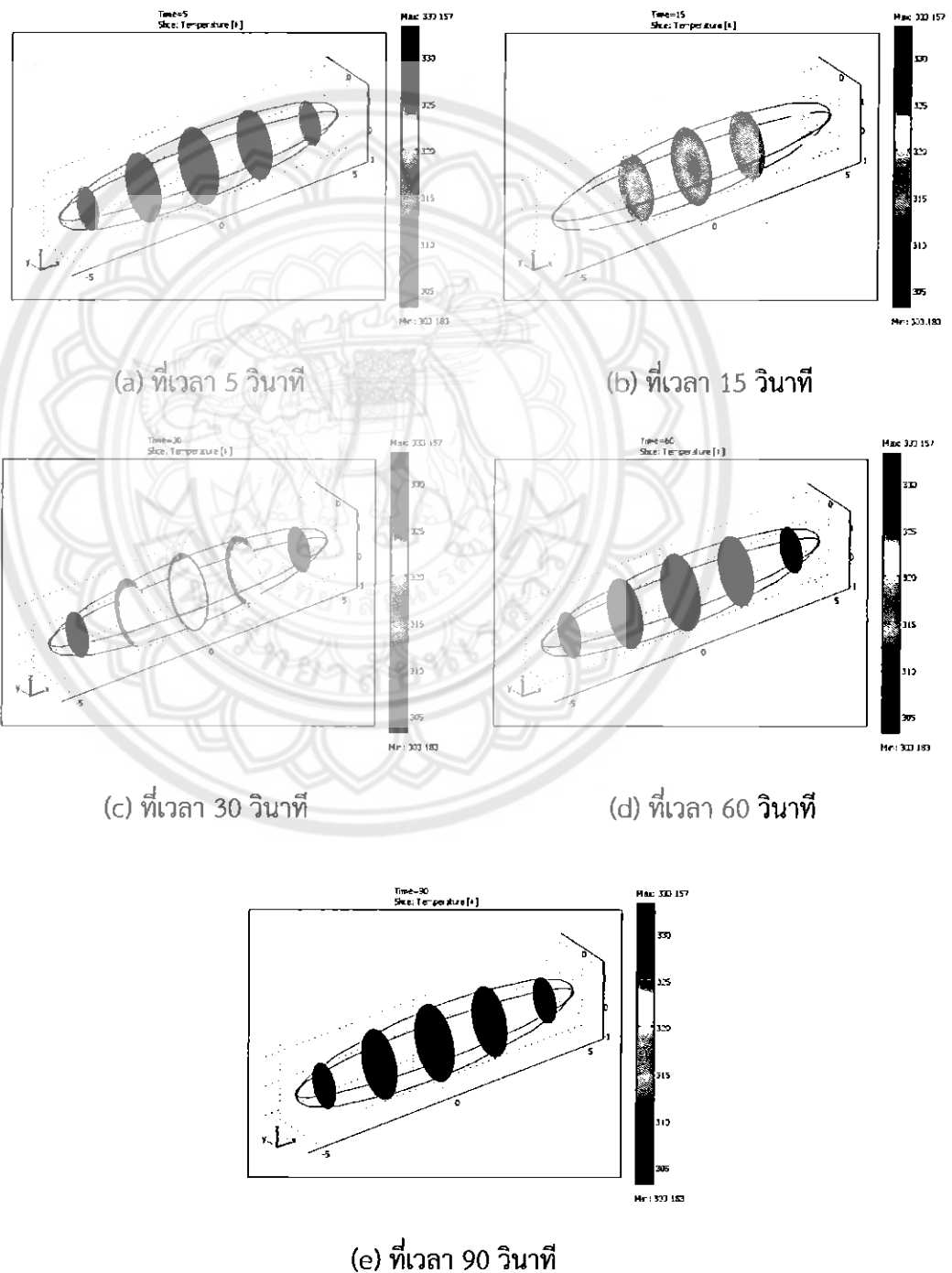


รูปที่ 4.23 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเวลาที่จุดปลายเมล็ดข้าวเปลือกที่อุณหภูมิความร้อนต่างๆ สำหรับการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกตั้งฉากกับทิศทางการไหลของลมร้อน

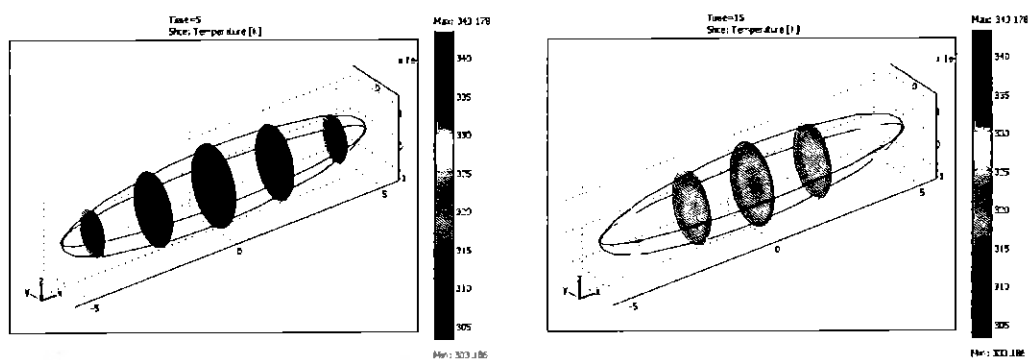
จากรูปที่ 4.24 ถึง 4.27 แสดงการกระจายอุณหภูมิภายในเมล็ดข้าวเปลือกในภาพตัดขวางที่เวลา 5, 15, 30, 60 และ 90 วินาที ที่ลมร้อนอุณหภูมิต่างๆ พบว่าลักษณะการกระจายอุณหภูมิภายในเมล็ดข้าวเปลือกที่อุณหภูมิลมร้อนต่างกันมีลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยมีความแตกต่างกันที่ค่าของอุณหภูมิ ซึ่งหากอุณหภูมิลมร้อนมีค่าสูงจะทำให้อุณหภูมิภายในเมล็ดข้าวเปลือกมีค่าสูงขึ้นไปด้วย ซึ่งจะสอดคล้องกับหลักการการถ่ายเทความร้อนที่ว่า ผลต่างอุณหภูมิ (Temperature difference) เป็นแรงขับ (Driving force) ทางความร้อน ซึ่งส่งผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน (Heat rate) โดยตรง เมื่อมีความต่างของอุณหภูมิระหว่างลมร้อนและเมล็ดข้าวเปลือกมากก็จะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูง ส่งผลให้อุณหภูมิภายในเมล็ดข้าวเปลือกที่ตำแหน่งต่างๆ นั้นมีค่าสูงมากกว่าเมื่อเทียบกับเมื่อมีความต่างของอุณหภูมิระหว่างลมร้อนและเมล็ดข้าวเปลือกที่มีค่าน้อย โดยเมื่ออุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกเพิ่มขึ้น อัตราการถ่ายเทความร้อนก็จะลดลงเพราะผลต่างอุณหภูมิลดลง

สำหรับการกระจายอุณหภูมิภายในเมล็ดข้าวเปลือกที่เวลาต่างๆ ดังรูปที่ 4.24 ถึง 4.27 พบว่าบริเวณปลายเมล็ดข้าวเปลือกมีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณอื่นภายในเมล็ดข้าวเปลือกที่เวลาเดียวกัน เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีพื้นผิวน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับบริเวณอื่น จึงทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้รวดเร็วกว่าบริเวณอื่น สำหรับที่บริเวณกึ่งกลางของเมล็ดข้าวเปลือกจะเป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับบริเวณอื่นภายในเมล็ดข้าวเปลือกที่เวลาเดียวกัน เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีการนำความร้อนจากที่ผิวผ่านเนื้อของเมล็ดข้าวเปลือกเป็นระยะทางมากที่สุด จึงทำให้อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงช้าที่สุด สำหรับบริเวณที่เกิดการปะทะจะมีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณหลังการปะทะ ซึ่งเป็นผลมาจากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่แตกต่างกัน โดยบริเวณที่เกิดการปะทะ

มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยสูงกว่าบริเวณหลังการปะทะ เนื่องจากลักษณะการไหลและความเร็วของลมร้อนที่ไหลเข้าปะทะโดยตรงกับบริเวณที่เกิดการปะทะ ทำให้เกิดการถ่ายเทโมเมนตัมอย่างมาดั่งได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 4.1 จึงเกิดการถ่ายความร้อนได้ดีกว่าบริเวณหลังการปะทะที่การไหลมีลักษณะหมุนวนและมีความเร็วต่ำ และที่เวลา 90 วินาที พบว่าการกระจายอุณหภูมิภายในเมล็ดข้าวเปลือกมีอุณหภูมิเท่ากันทั้งเมล็ดและมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของลมร้อน กล่าวคือการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของลมร้อนได้เข้าสู่ภาวะคงที่แล้ว

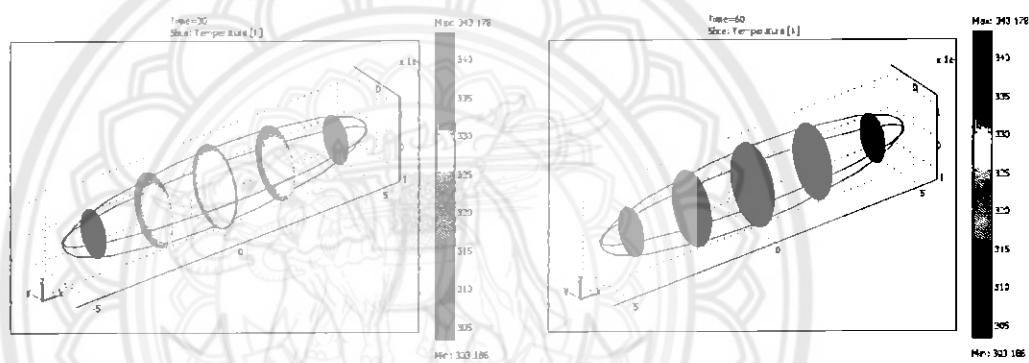


รูปที่ 4.24 การกระจายอุณหภูมิภายในเมล็ดข้าวเปลือกในภาพตัดขวางที่อุณหภูมิลมร้อน 333.15 K



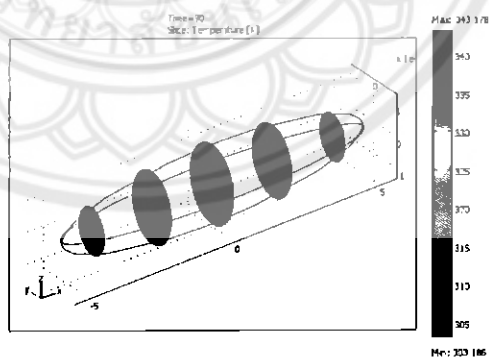
(a) ที่เวลา 5 วินาที

(b) ที่เวลา 15 วินาที



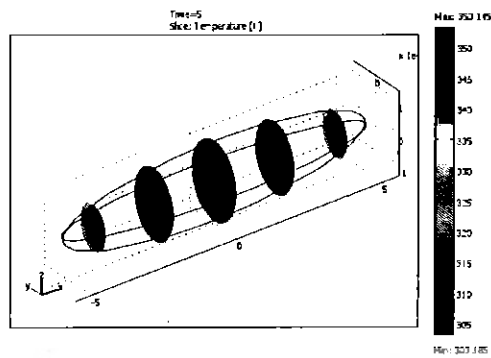
(c) ที่เวลา 30 วินาที

(d) ที่เวลา 60 วินาที

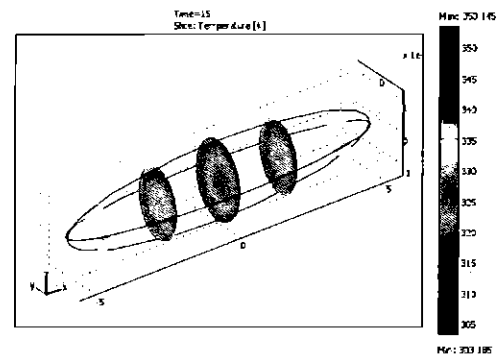


(e) ที่เวลา 90 วินาที

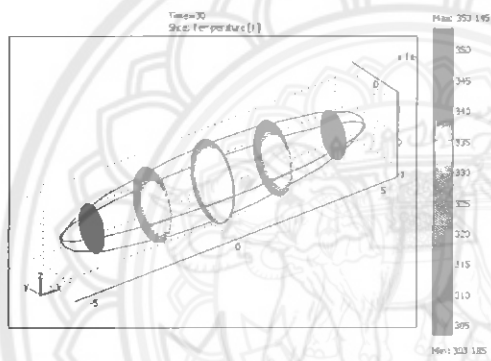
รูปที่ 4.25 การกระจายอุณหภูมิภายในเมล็ดข้าวเปลือกในภาพตัดขวางที่อุณหภูมิความร้อน 343.15 K



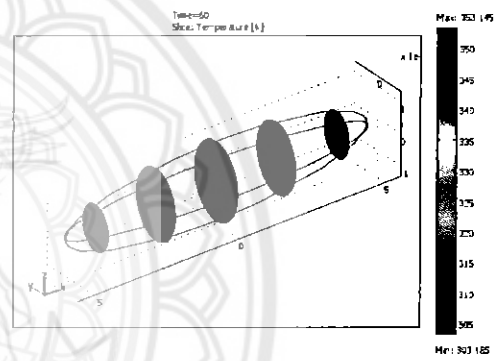
(a) ที่เวลา 5 วินาที



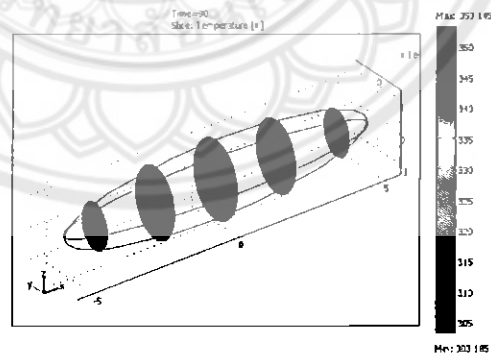
(b) ที่เวลา 15 วินาที



(c) ที่เวลา 30 วินาที

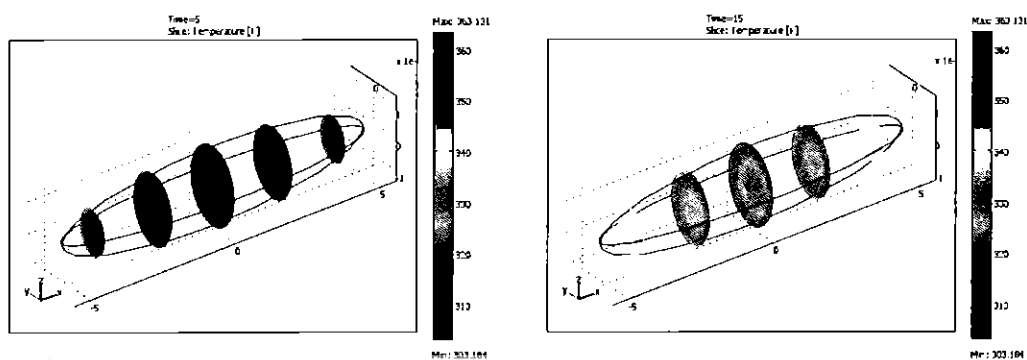


(d) ที่เวลา 60 วินาที



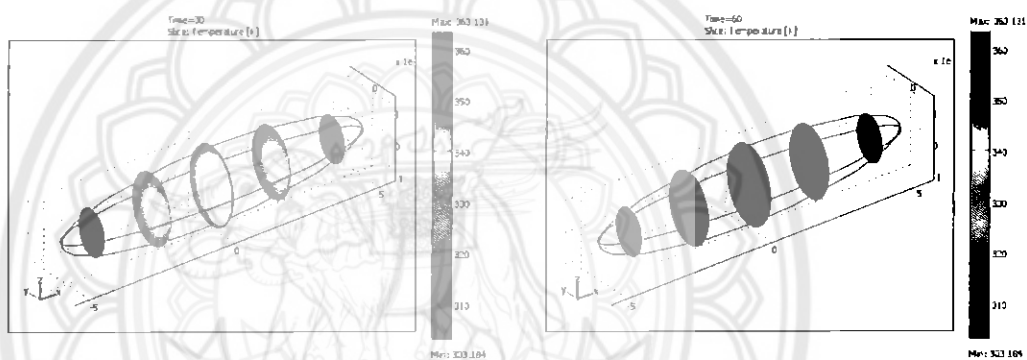
(e) ที่เวลา 90 วินาที

รูปที่ 4.26 การกระจายอุณหภูมิภายในเมล็ดข้าวเปลือกในภาพตัดขวางที่อุณหภูมิความร้อน 353.15 K



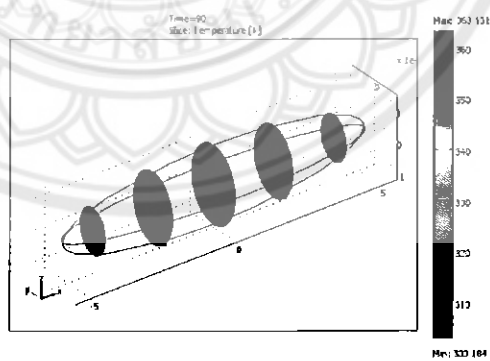
(a) ที่เวลา 5 วินาที

(b) ที่เวลา 15 วินาที



(c) ที่เวลา 30 วินาที

(d) ที่เวลา 60 วินาที



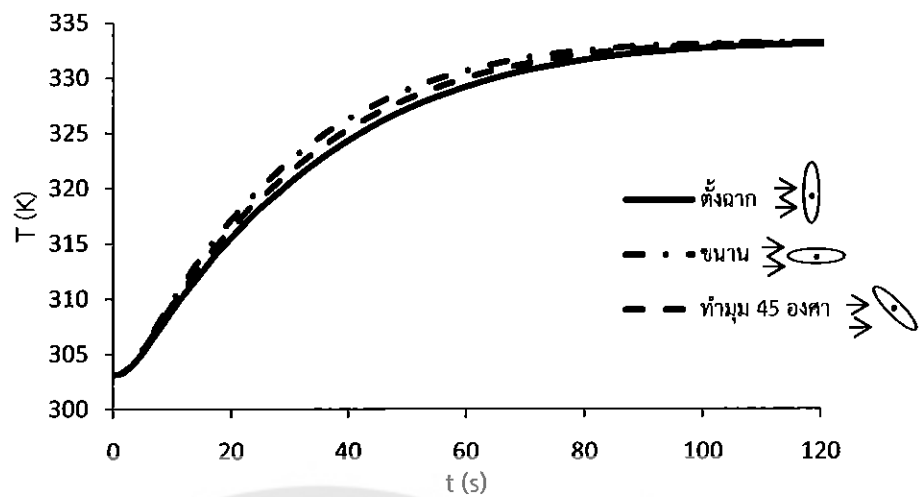
(e) ที่เวลา 90 วินาที

รูปที่ 4.27 การกระจายอุณหภูมิภายในเมล็ดข้าวเปลือกในภาพตัดขวางที่อุณหภูมิลมร้อน 363.15 K

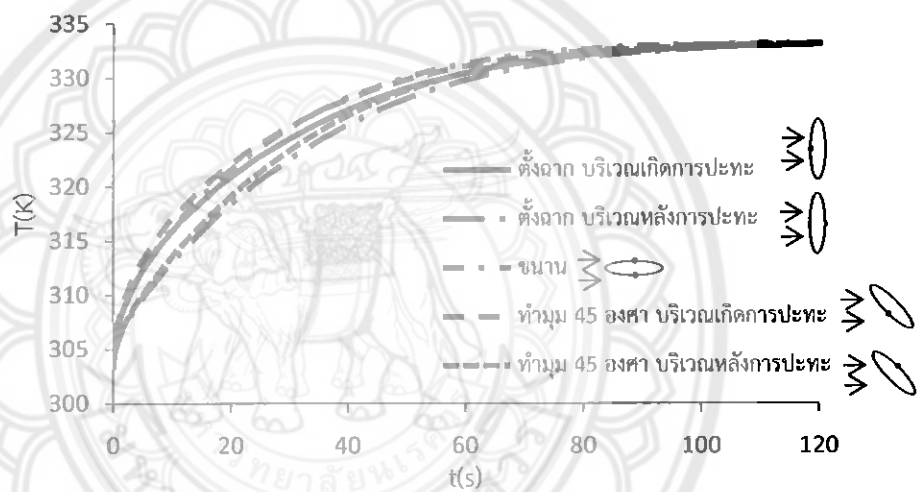
4.2.2 ผลกระทบของการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกในทิศทางและลักษณะต่างๆ

สำหรับผลการคำนวณ และการวิเคราะห์ผลกระทบของการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกสัมพันธ์กับทิศทางการไหลของลมร้อน และลักษณะการจัดวางแกนเมล็ดข้าวเปลือกตั้งฉากกับทิศทางการไหลของลมร้อนที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และการกระจายอุณหภูมิภายในเมล็ดข้าวเปลือก โดยทำการศึกษาในแต่ละกรณีการจัดวาง ได้แก่ การจัดวางตั้งฉาก ขนาน และทำมุม 45 องศา กับทิศทางการไหลของลมร้อน ดังรูปที่ 3.3 และลักษณะการจัดวางแกนเมล็ดข้าวเปลือก ซึ่งได้แก่ แกนหลักตั้งฉากกับทิศทางของลมร้อน และแกนรองตั้งฉากกับทิศทางของลมร้อน ดังรูปที่ 3.4 โดยอุณหภูมิมลคองที่ที่ 333.15 K โดยเปรียบเทียบผลกระทบของการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกในทิศทางต่างๆ ต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่บริเวณต่างๆ ของเมล็ดข้าวเปลือกกับเวลา ที่อุณหภูมิลมร้อน 333.15 K ดังรูปที่ 4.28 จากนั้นเปรียบเทียบผลกระทบของลักษณะการจัดวางแกนเมล็ดข้าวเปลือกสัมพันธ์กับความยาวคุณลักษณะที่มีต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่บริเวณต่างๆ ของเมล็ดข้าวเปลือกกับเวลา ที่อุณหภูมิลมร้อน 333.15 K ดังรูปที่ 4.29 และเปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่บริเวณต่างๆ ของเมล็ดข้าวเปลือกกับเวลา ที่มีการจัดวางขนาน และทำมุม 45 องศา กับทิศทางการไหลของลมร้อน ที่อุณหภูมิลมร้อน 333.15 K ดังรูปที่ 4.30 และ 4.31 ตามลำดับ

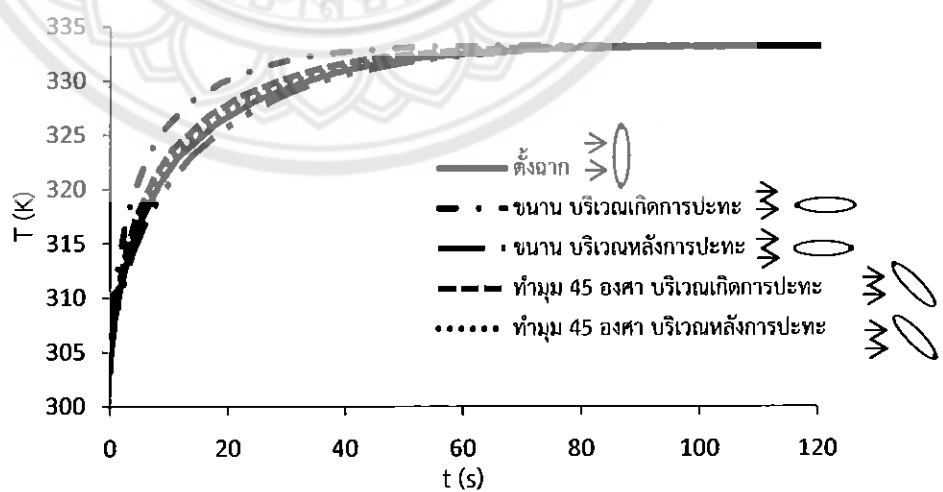
รูปที่ 4.28 แสดงการเปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิกับเวลาของเมล็ดข้าวเปลือกที่จัดวางในทิศทางต่างๆ ที่บริเวณต่างๆ ที่อุณหภูมิลมร้อน 333.15 K พบว่า ลักษณะการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิกับเวลาของการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกในทิศทางต่างๆ นั้นมีลักษณะเป็น Exponential ที่คล้ายคลึงกัน แต่มีค่าของอุณหภูมิต่างกันเล็กน้อย และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเข้าสู่ภาวะคงที่ที่เวลาใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงว่าการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกมีผลน้อยต่อการเพิ่มของอุณหภูมิตามเวลา เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยของการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกในทิศทางต่างๆ มีค่าต่างกันค่อนข้างน้อย ดังแสดงในตารางที่ 3.7 ซึ่งอาจเป็นเพราะสเกลเล็กและความเร็วของลมร้อนต่ำเป็นการไหลแบบราบเรียบ จึงมองไม่เห็นความแตกต่างที่มีนัยสำคัญสูง อย่างไรก็ตามหากศึกษาสิกลงไปให้ละเอียดกว่านี้ เช่น หาเปอร์เซ็นต์ของผลต่างที่แต่ละจุดเวลาก่อนเข้าสู่อุณหภูมิลมร้อน อาจทำให้เรามองเห็นผลต่างอย่างมีนัยสำคัญได้ ทำให้การถ่ายเทความร้อนในกรณีการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกในทิศทางต่างกันมีความแตกต่างกันน้อย โดยกรณีจัดวางขนานกับทิศทางการไหลของลมร้อนเป็นกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้รวดเร็วที่สุด เนื่องจากมีการถ่ายเทความร้อนมาก ซึ่งเป็นผลมาจากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่มีค่าสูงที่สุดจากตารางที่ 3.7 เนื่องจากลมร้อนที่ไหลเข้าปะทะกับบริเวณที่เกิดการปะทะที่ปลายเมล็ดข้าวเปลือกมีการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมน้อยที่สุดจากกรณีการจัดวางทั้งหมด ทำให้โมเมนตัมของลมร้อนที่ไหลผ่านผิวเมล็ดข้าวเปลือกมีค่าสูง จึงทำให้เกิดการพาความร้อนได้ดีกว่ากรณีอื่น



(a) ณ จุดกึ่งกลางของเมล็ดข้าวเปลือก



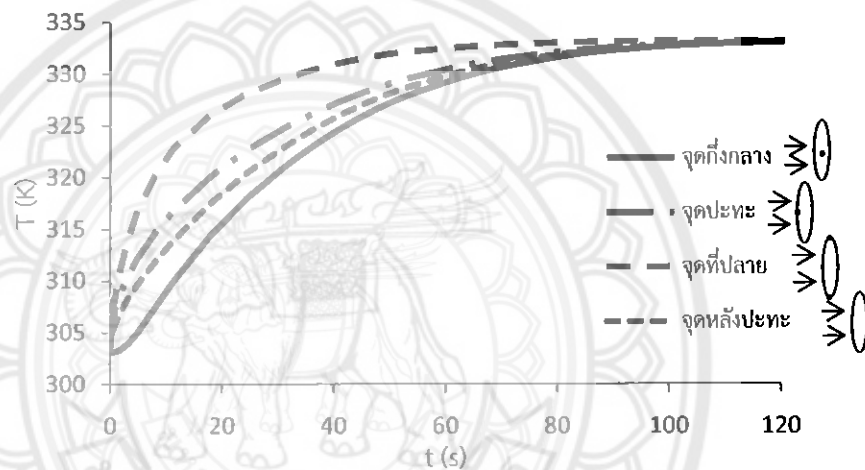
(b) ณ จุดที่บริเวณผิวด้านข้างของเมล็ดข้าวเปลือก



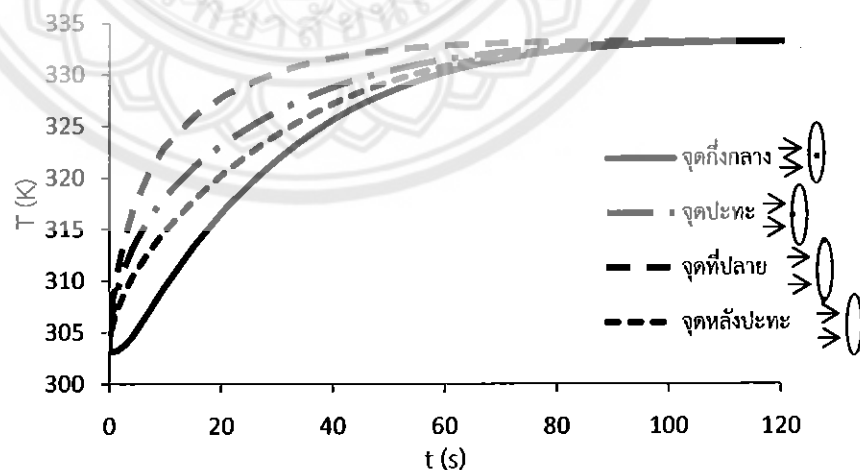
(c) ณ จุดปลายของเมล็ดข้าวเปลือก

รูปที่ 4.28 การเปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิกับเวลาของเมล็ดข้าวเปลือกที่จัดวางในทิศทางต่างๆ ที่บริเวณต่างๆ ที่อุณหภูมิลมร้อน 333.15 K

รูปที่ 4.29 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิกับเวลาที่จุดต่างๆของ เมล็ดข้าวเปลือก สำหรับการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกตั้งฉากกับทิศทางการไหลของลมร้อนที่มีความ ยาวคุณลักษณะต่างๆ ที่อุณหภูมิลมร้อน 333.15 K มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่บริเวณเดียวกันของ ทั้งการจัดวางแกนหลัก และการจัดวางแกนรองตั้งฉากกับทิศทางการไหลของลมร้อนคล้ายคลึงกัน และมีค่าที่ใกล้เคียงกัน เพราะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนใกล้เคียงกันจากตารางที่ 3.7 โดย ที่บริเวณปลายของเมล็ดข้าวเปลือกมีความชันสูงที่สุดในช่วงเริ่มต้น เพราะมีความต่างของอุณหภูมิ มาก และที่จุดกึ่งกลางของเมล็ดข้าวเปลือกมีความชันน้อยที่สุด ทำให้เราทราบว่า ลักษณะการจัดวาง แกนเมล็ดข้าวเปลือกที่เป็นความยาวคุณลักษณะนี้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเมล็ด ข้าวเปลือกน้อย ซึ่งเป็นผลจากการถ่ายเทโมเมนตัมที่เกิดขึ้นมีความแตกต่างกันน้อย



(a) แกนหลัก

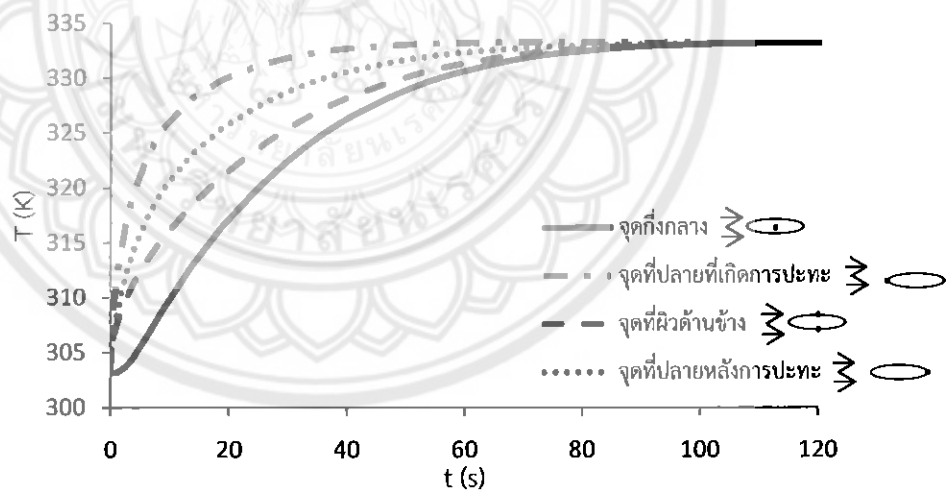


(b) แกนหลักรอง

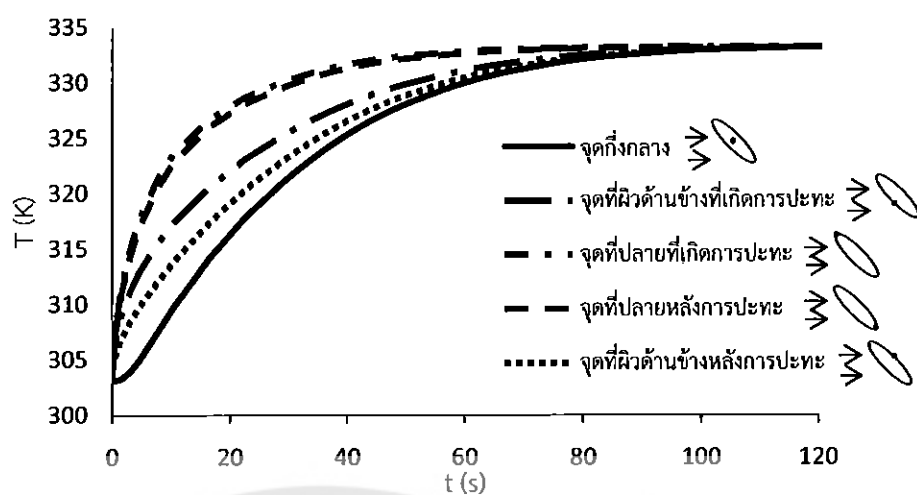
รูปที่ 4.29 การเปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิกับเวลาที่จุดต่างๆของเมล็ดข้าวเปลือก สำหรับการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกตั้งฉากกับทิศทางการไหลของลมร้อนที่มีความยาวคุณลักษณะ ต่างๆ ที่อุณหภูมิลมร้อน 333.15 K

สำหรับผลกระทบของการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่บริเวณต่างๆของเมล็ดข้าวเปลือกของการจัดวางแต่ละกรณี จากรูปที่ 4.29 (a), 4.30 และ 4.31 พบว่าบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่ำที่สุด คือบริเวณปลายของเมล็ดข้าวเปลือก โดยในกรณีการจัดวางขนาน และทำมุม 45 องศา กับทิศทางการไหลของลมร้อนแสดงดังรูปที่ 4.30 และ 4.31 ตามลำดับ ปลายแต่ละข้างของเมล็ดข้าวเปลือกมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ต่างกันซึ่งเป็นผลมาจากลักษณะการเข้าปะทะของลมร้อนที่ต่างกัน และในกรณีการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกขนานกับทิศทางการไหลของลมร้อนที่บริเวณผิวด้านข้างของเมล็ดข้าวเปลือกมีการถ่ายเทความร้อนที่เท่ากันซึ่งเป็นผลมาจากลักษณะการไหลของลมร้อนผ่านพื้นผิว ดังกล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.1.2.2

สำหรับกรณีจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกตั้งฉากกับทิศทางการไหลของลมร้อนหลักพบว่าจากเส้นกระแสในรูปที่ 4.5 ลมร้อนปะทะโดยตรงกับพื้นที่ของเมล็ดข้าวเปลือกที่มากที่สุดทำให้เกิดการนำความร้อนที่สม่ำเสมอกว่าอีกสองกรณี ในขณะที่กรณีจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกขนานกับทิศทางการไหลจากเส้นกระแสในรูปที่ 4.16 แสดงให้เห็นว่าจุดปะทะที่ปลายด้านหนึ่งของเมล็ดข้าวมีพื้นที่เล็กกว่า ดังนั้นกระแสลมร้อนจึงถ่ายเทโมเมนตัมปริมาณน้อยกว่าในกรณีของการไหลตั้งฉากทำให้ลมร้อนซึ่งยังมีโมเมนตัมที่สูงพอเคลื่อนที่ผ่านผิวที่เหลือของเมล็ดข้าวเป็นเหตุให้เกิดการถ่ายเทความร้อนสูงในบริเวณของพื้นที่ส่วนใหญ่ของเมล็ดข้าว



รูปที่ 4.30 การเปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิกับเวลาที่จุดต่างๆของเมล็ดข้าวเปลือก สำหรับการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกขนานกับทิศทางการไหลของลมร้อน ที่อุณหภูมิลมร้อน 333.15 K



รูปที่ 4.31 การเปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิกับเวลาที่จุดต่างๆของเมล็ดข้าวเปลือก สำหรับการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกทำมุม 45 องศาทิศทางการไหลของลมร้อน ที่อุณหภูมิ ลมร้อน 333.15 K



บทที่ 5

สรุปผลการคำนวณและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาเชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนจากลมร้อนสู่เมล็ดข้าวเปลือก โดยพิจารณาผลกระทบของอุณหภูมิของลมร้อนที่ 333 ถึง 363 K และการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกสัมพันธ์กับทิศทางการไหลของลมร้อน โดยจัดวางในทิศทางต่างๆ ได้แก่ จัดวางตั้งฉาก ขนาน และทำมุม 45 องศา กับทิศทางการไหลของร้อนที่มีต่อการกระจายอุณหภูมิภายในของเมล็ดข้าว ณ เวลาต่างๆ โดยกำหนดความเร็วของลมร้อนคงที่ที่ 0.5 m/s โดยทำการแยกพิจารณาการคำนวณออกเป็นสองส่วน ได้แก่ การไหลของลมร้อนที่สภาวะคงที่ และการถ่ายเทความร้อนภายในเมล็ดข้าวเปลือกที่สภาวะทรานเซียนต์ โดยการคำนวณในส่วนของการถ่ายเทความร้อนจะแบ่งพื้นผิวของเมล็ดข้าวเปลือกที่เกิดการถ่ายเทความร้อนออกเป็นสองบริเวณหลัก ได้แก่ บริเวณที่เกิดการปะทะกับลมร้อน และบริเวณหลังการปะทะกับลมร้อน ซึ่งแต่ละบริเวณจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่ต่างกันโดยคำนวณจาก Nusselt number เฉลี่ยที่ได้จากการคำนวณมาจากรวมกัน ซึ่งพบว่าอุณหภูมิของลมร้อนไม่มีผลกระทบต่อลักษณะของเส้นแนวโน้มอุณหภูมิและการกระจายอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกที่บริเวณต่างๆตามเวลา เนื่องจากอุณหภูมิของลมร้อนที่ต่างกันมีผลทำให้อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปโดยลักษณะคล้ายคลึงกันเป็น Exponential ที่สูงเข้าค่าๆหนึ่ง ซึ่งก็คือ อุณหภูมิของลมร้อนนั่นเอง จึงทำให้ที่สภาวะคงที่เมล็ดข้าวเปลือกมีอุณหภูมิต่างกัน

สำหรับผลกระทบของการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกสัมพันธ์กับทิศทางการไหลของลมร้อนพบว่า การจัดวางวางเมล็ดข้าวเปลือกในทิศทางที่ต่างกันมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและการกระจายอุณหภูมิ เนื่องจากการจัดวางในแต่ละกรณีนั้นส่งผลต่อการถ่ายเทโมเมนตัมที่แตกต่างกัน โดยกรณีของการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกตั้งฉากกับทิศทางการไหลของลมร้อนมีการกระจายอุณหภูมิสม่ำเสมอมากที่สุด โดยมีการถ่ายโมเมนตัมมากที่สุดที่บริเวณเกิดการปะทะกับลมร้อนโดยตรงทำให้ที่บริเวณนี้เกิดการถ่ายเทความร้อนสูงสุด ส่งผลให้อุณหภูมิบริเวณนี้มีค่าสูงกว่าบริเวณหลังการปะทะที่ลมร้อน ซึ่งเกิดการไหลย้อนกลับและหมุนวนที่มีความเร็วต่ำมาก และที่บริเวณปลายของเมล็ดข้าวเปลือกมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้รวดเร็วที่สุดเนื่องจากเป็นบริเวณที่เกิดนำความร้อนได้รวดเร็วที่สุดนั่นเอง

สำหรับการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกขนานกับทิศทางการไหลของลมร้อนเป็นกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้รวดเร็วที่สุด เนื่องจากลมร้อนที่ไหลเข้าปะทะมีการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมน้อยที่สุดทำให้ลมร้อนไหลผ่านพื้นที่ผิวส่วนใหญ่ของเมล็ดข้าวเปลือกด้วยโมเมนตัมมาก ส่งผลให้เกิด

การพาความร้อนสูง สำหรับบริเวณที่เกิดการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด คือที่บริเวณปลายของเมล็ดข้าวเปลือกที่เกิดการปะทะซึ่งเป็นบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้รวดเร็วที่สุด ซึ่งเป็นผลจากการนำความร้อนที่รวดเร็ว และลมร้อนที่บริเวณเกิดการปะทะมีโมเมนตัมมากที่สุดและสำหรับผลกระทบของการจัดวางเมล็ดข้าวเปลือกทำมุม 45 องศา กับทิศทางการไหลของลมร้อนจะผลลัพธ์ใกล้เคียงกับทั้งกรณีการจัดวางตั้งฉากและการจัดวางขนานกับทิศทางการไหลของลมร้อน

ข้อเสนอแนะ

1. ในการจัดทำโครงการนี้ผู้จัดทำพบข้อจำกัดการใช้งานของโปรแกรม COMSOL จากการค้าขายทางฟิสิกส์หลายโหมดพร้อมกัน ทำให้เกิดตัวแปรไม่ทราบค่าจำนวนมาก และขาดข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อนที่ผิวตำแหน่งต่างๆ ซึ่งเป็นข้อมูลที่สามารถหาได้จากการทดลอง
2. งานวิจัยนี้สามารถนำไปพัฒนาต่อยอดโดยทำการทดลองแล้วนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับการศึกษาเชิงตัวเลขนี้ ซึ่งจะทำให้ทราบข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการพาความร้อนที่สามารถนำไปใช้การศึกษาทางด้าน การถ่ายเทความร้อนต่อไปได้ และศึกษาในด้านการทางถ่ายเทมวล (Mass Transfer) เพื่อหา Drying Curve ของกระบวนการอบแห้งต่อไปได้ โดยอาจต้องทำการแยกพิจารณาเฉพาะการถ่ายเทมวล และการถ่ายเทความร้อน

เอกสารอ้างอิง

- [1] De Bonis, M.V. and, Ruocco, G. (2008). A Multiphysics Approach to Fundamental Conjugate Drying by Forced Convection. Proceedings of the COMSOL conference, Hannover.
- [2] Hacıhafızoglu, O., Kahveci, K., Chihaan, A. and, Akyol, E. (2011). "Finite Element Simulation of Thin Layer Drying of Corn," Recent Advances in Fluid Mechanics and Heat & Mass Transfer, 288-293.
- [3] สุชาติ อนุสุขประเสริฐ, ธนิต สวัสดิ์เสวี, สักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา และสมชาติ โสภณรณฤทธิ์. (2555), การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบกระแสน, วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 1(2).
- [4] สืบค้นเมื่อ 20 มิถุนายน 2556, จาก <http://www.roasterproject.com/2010/01/heat-transfer-the-basics>.
- [5] สำนักวิจัยและพัฒนาข้าว, ข้าวดอกมะลิ 105 (Khao Dawk Mali 105), <http://www.brrd.in.th/rkb/varieties/index.php-file=content.php&id=19.htm>, สืบค้นเมื่อวันที่ 13 กรกฎาคม พ.ศ. 2556.
- [6] เทวรัตน์ ทิพย์วิมล, ปริศนา แสงรุ่ง และปัตตะนี สุดตะนา. (2555) สมบัติทางกายภาพและความร้อนของข้าวขาวดอกมะลิ 105. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย, ครั้งที่ 13, 4-5 เมษายน 2555. จังหวัดเชียงใหม่. 526-531.
- [7] Chong-Ho, L. and Do Sup, C., Grain Physical and Thermal Properties Related to Drying and Aeration, Principles of Grain Drying and Aeration, 83-98.
- [8] Richter, A. and Nikrityuk, P. A. (2012). Drag forces and heat transfer coefficients for spherical, cuboidal and ellipsoidal particles in cross flow at sub-critical Reynolds numbers, International Journal of Heat and Mass Transfer, 55 (2012), 1343-1354.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [9] Haeri, S. and Shrimpton, J.S. (2013). A correlation for the calculation of the local Nusselt number around circular cylinders in the range $10 \leq Re \leq 250$ and $0.1 \leq Pr \leq 40$, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 59 (2013), 219–229.
- [10] Daoyun, S., Rakesh, K. G. and Rajendra, P. C. (2009). Wall Effects in Convective Heat Transfer from a Sphere to Power Law Fluids in Tubes, Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference, (2009) Boston.
- [11] Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergman, T. L. and Lavine, A. S. (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Rosewood Drive, K Danvers. John Wiley & Son (Asia) Pte Ltd.