

การศึกษาการกระจายอุณหภูมิและความชื้นของวัสดุพูนในเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน
โดยใช้การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทร์วโรดม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

พฤษภาคม 2554

การศึกษาการกระจายอุณหภูมิและความชื้นของวัสดุพูนในเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน
โดยใช้การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

พฤษภาคม 2554

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การศึกษาการกระจายอุณหภูมิและความชื้นของวัสดุพูนในเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน
โดยใช้การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

พฤษภาคม 2554

อิศเรศ วรรณทร. (2554). การศึกษาการกระจายอุณหภูมิและความชื้นของวัสดุพูนในเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนโดยใช้การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลวิธีฐานิพนธ์วศ.ม. (วิศวกรรมเครื่องกล). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จุฑารัตน์ คุรุเจริญ, รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล นาผล.

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือการจำลอง การศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิและความชื้นของวัสดุพูนในเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนด้วยเทคนิคการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล(Computational fluid dynamics,CFD) มาจำลองรูปแบบการศึกษาจะให้แบบจำลอง ทางคณิตศาสตร์แบบสามมิติ เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิอากาศเข้าและความเร็วอากาศเข้าของวัสดุพูนที่นำมาอบแห้งภายในเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน ทำการสร้างแบบจำลองทั้งหมด 9 แบบจำลอง โดยเปลี่ยนความเร็วและอุณหภูมิอากาศเข้าที่ 0.5 0.75 และ 1.0 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิอากาศเข้าที่ 333 343 และ 353 เคลวิน ทำการศึกษาในส่วนของรูปแบบวัสดุพูนที่มีลักษณะสี่เหลี่ยมเท่านั้น จากผลการวิเคราะห์การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล พบว่าผลของอุณหภูมิในการอบที่อุณหภูมิสูง จะมีอัตราการลดความชื้นและการกระจายตัวของอุณหภูมิในการอบได้ดี

คำสำคัญ : การคำนวณพลศาสตร์ของไหล วัสดุพูน การอบแห้ง

A STUDY OF TEMPERATURES AND MOIST CHARACTERISTICS
POROUS MEDIA IN HOT AIR DRYER CHAMBER USING
COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS



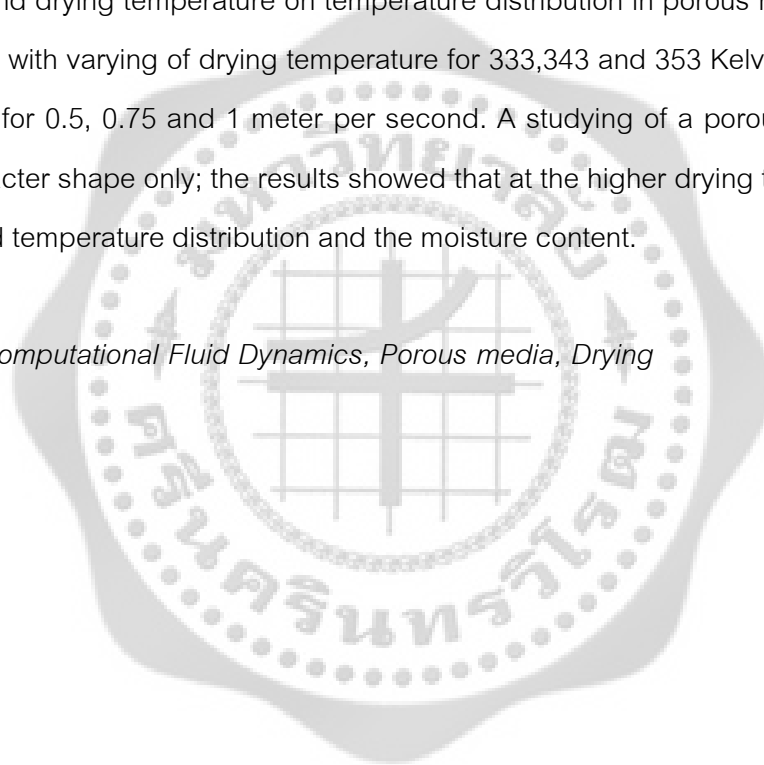
Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Master of Engineering Degree in Mechanical Engineering
at Srinakharinwirot University

May 2011

Isaret Wannathon. (2011). *A Study of temperatures and moist characteristics porous media in hot air dryer chamber using Computational fluid dynamics*. Master thesis, M.Eng. (Mechanical Engineering). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee: Assist. Prof. Dr. Jutarat Kurujareon, Prof. Dr. Paisarn Naphon.

The objective of this research is to simulate of temperatures and moist characteristics porous media in hot air dryer chamber using a computational fluid dynamic. The CFD models are created in three-dimensional (3D). *To study the effecting of the fraction of inlet air velocity and drying temperature on temperature distribution in porous media dryer, there are 9 models with varying of drying temperature for 333, 343 and 353 Kelvin and varying the velocity inlet for 0.5, 0.75 and 1 meter per second. A studying of a porous media is in the square character shape only; the results showed that at the higher drying temperature make a better good temperature distribution and the moisture content.*

Keywords: Computational Fluid Dynamics, Porous media, Drying



ประกาศคุณูปการ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุฑารัตน์ คุรุเจริญ ประธานกรรมการควบคุมการทำปฏิญานิพนธ์ที่ให้โอกาสในการทำวิจัยเรื่องนี้ พร้อมทั้งให้ความรู้และคำแนะนำจนปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี และขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล นามล ที่กรุณาให้คำปรึกษาให้แนวคิดและช่วยแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในการทำปฏิญานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์จาก กองวิชาวิศวกรรมเครื่องกล รร .จปร. และคณาจารย์จาก ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ให้ความรู้และคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยเป็นอย่างดี

ท้ายสุดผู้วิจัยขอขอบพระคุณ แม่ที่ได้อบรมสั่งสอนและให้กำลังใจตลอดจนสนับสนุนในการศึกษาและให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์เป็นอย่างยิ่ง และขอขอบคุณเพื่อนๆ ที่ให้ความช่วยเหลือและความร่วมมือเป็นอย่างดีในการทำวิจัยนี้

อิศเรศ วรรณท



ปริญญาานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาการกระจายอุณหภูมิและความชื้นของวัสดุพูนในเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน

โดยใช้การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

ของ

อิสเรศ วรรณทร

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. สมชาย สันติวัฒน์กุล)

วันที่..... เดือน พ.ศ. 2554

คณะกรรมการควบคุมปริญญาานิพนธ์

คณะกรรมการสอบปากเปล่า

.....ประธาน

.....ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จุฑารัตน์ คุรุเจริญ)

(พันเอก รองศาสตราจารย์ ดร.อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง)

.....กรรมการ

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล นามผล)

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จุฑารัตน์ คุรุเจริญ)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล นามผล)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร. ประชา บุญยวานิชกุล)

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
ขอบเขตของการวิจัย.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	2
การทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2
2 ทฤษฎี.....	10
ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูน.....	10
กระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูน.....	10
รูปแบบโครงสร้างของวัสดุพูน.....	11
ทฤษฎีเกี่ยวกับการอบแห้ง.....	15
ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง.....	19
อุปกรณ์อบแห้ง.....	20
การถ่ายโอนมวล.....	21
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหล.....	25
สมการเชิงอนุพันธ์มวล.....	25
สมการเชิงอนุพันธ์โมเมนต์.....	26
สมการเชิงอนุพันธ์พลังงาน.....	27
ปริมาณไร้มิติที่เกี่ยวข้อง.....	31
ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข.....	34
การดีสครีตไทเซชัน.....	35
เทอมการพา.....	35
เทอมการแพร่.....	35
การประมาณค่าของอินทิกรัลพื้นผิว.....	36
ระเบียบวิธีผลต่างต้นลมอันดับที่หนึ่ง.....	36
ระเบียบวิธีผลต่างต้นลมอันดับที่สอง.....	37

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2 (ต่อ)	
ระเบียบวิธีผลต่างแบบคิก.....	38
กระบวนการหาคำตอบ.....	40
ขั้นตอนและลำดับการแก้สมการ.....	41
ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการจำลอง.....	42
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	44
ลักษณะของแบบจำลองที่ใช้.....	44
ขั้นตอนจำลองการไหลของอากาศ.....	45
เครื่องมือที่ใช้ในการทำแบบจำลอง.....	45
การสร้างแบบจำลองและการสร้างกริด.....	46
การตรวจสอบจำนวนกริดที่มีผลกระทบต่อผลการจำลอง.....	46
เงื่อนไขขอบเขตสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	47
4 ผลและการวิเคราะห์.....	50
ผลการจำลองและการวิเคราะห์.....	50
5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	99
สรุป.....	99
ข้อเสนอแนะ.....	102
บรรณานุกรม.....	103
ภาคผนวก.....	106
ภาคผนวก ก.....	107
อภิธานศัพท์.....	114
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	117

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 แบบจำลองในการคำนวณ.....	49
2 แสดงค่าเงื่อนไขขอบเขตเชิงตัวเลข.....	49



บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศเข้ากับประสิทธิภาพของการลดความชื้นที่ ความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ.....	3
2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศเข้ากับประสิทธิภาพของการลดความชื้นที่ อัตราการไหลของอากาศต่างๆ.....	4
3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของชั้นอากาศ.....	4
4 แสดงความเร็วเฉลี่ย ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในตู้อบ.....	5
5 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศและเมล็ดกาแฟขณะอบแห้ง.....	6
6 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศและเมล็ดกาแฟขณะอบแห้ง (อากาศเข้าที่ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความเร็วลม 0.8 เมตรต่อวินาที).....	6
7 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศและเมล็ดกาแฟขณะอบแห้ง (อากาศเข้าที่ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และความเร็วลม 0.8 เมตรต่อวินาที).....	7
8 การลดของความชื้นเฉลี่ยของเนื้อลำไยด้วยวิธีการอบแห้งแบบต่างๆ.....	8
9 โครงของวัสดุพูนทั่วไป.....	11
10 โครงสร้างวัสดุพูนแบบเซลลูโลส-คาพิวลาไร.....	12
11 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาพิวลาไรภายในวัสดุพูนและสมบัติของของไหล.....	13
12 กระบวนการถ่ายเทมวลสารในวัสดุพูน.....	13
13 ไดอะแกรมของกระบวนการอบแห้งวัสดุพูน.....	14
14 พฤติกรรมของวัสดุขณะอบ.....	17
15 ลักษณะเฉพาะของการอบแห้งที่ได้.....	17
16 การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเมื่ออบแห้งวัสดุภายใต้กระแสลมร้อนปริมาณมากที่มี อุณหภูมิ ความชื้น ความเร็วคงที่ และจุดสมดุลของวัสดุ.....	18
17 แสดงแบบเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน.....	21
18 ชิ้นส่วนของปริมาตรควบคุมที่ใช้กำหนดความหนาแน่น.....	23
19 ความเข้มข้นที่ผิวร่วมของน้ำและอากาศ.....	24
20 รูปการระเหยของฟิล์มน้ำที่ผิวเข้าสู่กระแสอากาศ.....	24
21 ปริมาตรควบคุม 3 มิติ.....	34
22 การประมาณค่าแบบระเบียบวิธีผลต่างต้นลมอันดับที่หนึ่ง.....	36

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
23 การประมาณค่าแบบระเบียบวิธีผลต่างต้นลมอันดับที่สอง.....	37
24 การประมาณค่าแบบระเบียบวิธีผลต่างแบบควิก.....	38
25 ขั้นตอนและลำดับการแก้สมการ.....	42
26 เงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองห้องอบแห้ง.....	44
27 ขนาดแบบจำลอง.....	45
28 แบบจำลองโดยโปรแกรมสำหรับสร้างขอบเขตสภาวะและสร้างกริดการจัดวางกริดแบบไม่สม่ำเสมอ.....	46
29 การเปรียบเทียบความเร็วเฉลี่ยที่ระนาบ ที่ระดับจำนวนกริดต่างๆ.....	47
30 ภาพแสดงตำแหน่งอากาศไหลเข้า อากาศไหลออกที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร.....	50
31 แสดงการกระจาย Static Temperature ภายในห้องอบแห้งโดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบที่อุณหภูมิอากาศเข้า 333 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.5 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร....	51
32 แสดงการกระจาย Static Temperature ภายในห้องอบแห้งโดยมีวัสดุพูนในห้องอบที่อุณหภูมิอากาศเข้า 333 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.5 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร.....	51
33 แสดงการกระจาย Static Temperature ภายในห้องอบแห้งโดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบที่อุณหภูมิอากาศเข้า 333 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.75 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร....	52
34 แสดงการกระจาย Static Temperature ภายในห้องอบแห้งโดยมีวัสดุพูนในห้องอบที่อุณหภูมิอากาศเข้า 333 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.75 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร...	52

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
35 แสดงการกระจาย Static Temperature ภายในห้องอบแห้งโดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 333 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 1.0 เมตรต่อวินาทีที่ เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร.....	53
36 แสดงการกระจาย Static Temperature ภายในห้องอบแห้งโดยมีวัสดุพูนในห้องอบ ที่ อุณหภูมิอากาศเข้า 333 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที ที่ เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร.....	53
37 แสดงการกระจาย Static Temperature ภายในห้องอบแห้งโดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 343 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.5 เมตรต่อวินาทีที่ เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร.....	54
38 แสดงการกระจาย Static Temperature ภายในห้องอบแห้งโดยมีวัสดุพูนในห้องอบ ที่ อุณหภูมิอากาศเข้า 343 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.5 เมตรต่อวินาที ที่ เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร.....	55
39 แสดงการกระจาย Static Temperature ภายในห้องอบแห้งโดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 343 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.75 เมตรต่อวินาที ที่ เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร...	55
40 แสดงการกระจาย Static Temperature ภายในห้องอบแห้งโดยมีวัสดุพูนในห้องอบ ที่ อุณหภูมิอากาศเข้า 343 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.75 เมตรต่อวินาที ที่ เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร.....	56
41 แสดงการกระจาย Static Temperature ภายในห้องอบแห้งโดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 343 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที ที่ เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร.....	56

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
42 แสดงการกระจาย Static Temperature ภายในห้องอบแห้งโดยมีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 343 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ X=18.25, X=32.75, X=47.25 และ X=61.75 เซนติเมตร.....	57
43 แสดงการกระจาย Static Temperature ภายในห้องอบแห้งโดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 353 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.5 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ X=18.25, X=32.75, X=47.25 และ X=61.75 เซนติเมตร....	58
44 แสดงการกระจาย Static Temperature ภายในห้องอบแห้งโดยมีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 353 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.5 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ X=18.25, X=32.75, X=47.25 และ X=61.75 เซนติเมตร.....	58
45 แสดงการกระจาย Static Temperature ภายในห้องอบแห้งโดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 353 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.75 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ X=18.25, X=32.75, X=47.25 และ X=61.75 เซนติเมตร.....	59
46 แสดงการกระจาย Static Temperature ภายในห้องอบแห้งโดยมีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 353 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.75 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ X=18.25, X=32.75, X=47.25 และ X=61.75 เซนติเมตร.....	59
47 แสดงการกระจาย Static Temperature ภายในห้องอบแห้งโดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 353 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ X=18.25, X=32.75, X=47.25 และ X=61.75 เซนติเมตร...	60
48 แสดงการกระจาย Static Temperature ภายในห้องอบแห้งโดยมีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 353 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ X=18.25, X=32.75, X=47.25 และ X=61.75 เซนติเมตร.....	60
49 แสดงตำแหน่งจาก Point 1 ถึง Point 20 จากตำแหน่งอากาศเข้าถึงตำแหน่งอากาศไหลออกที่ใช้ศึกษาภายในห้องอบแห้ง	62

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
50 กราฟแสดง Static Temperature ภายในห้องอบแห้ง ภายในห้องอบแห้งโดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบ ณ ตำแหน่ง Point 1 ถึง Point 20 ที่อุณหภูมิ 333,343 และ 353 เคลวิน ที่ความเร็ว 0.5, 0.75, 1.0 เมตรต่อวินาที ในเวลา 5 นาที ตามลำดับ.....	62
51 กราฟแสดง Static Temperature ภายในห้องอบแห้ง ภายในห้องอบแห้งโดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบ ณ ตำแหน่ง Point 1 ถึง Point 20 ที่อุณหภูมิ 333,343 และ 353 เคลวิน ที่ความเร็ว 0.5, 0.75, 1.0 เมตรต่อวินาที ในเวลา 15 นาที ตามลำดับ ...	63
52 กราฟแสดง Static Temperature ภายในห้องอบแห้งโดยภายในห้องอบแห้งมีวัสดุพูนในห้องอบ ณ ตำแหน่ง Point 1 ถึง Point 20 ที่อุณหภูมิ 333,343 และ 353 เคลวิน ที่ความเร็ว 0.5, 0.75, 1.0 เมตรต่อวินาที ในเวลา 5 นาที ตามลำดับ.....	63
53 กราฟแสดง Static Temperature ภายในห้องอบแห้งโดยภายในห้องอบแห้งมีวัสดุพูนในห้องอบ ณ ตำแหน่ง Point 1 ถึง Point 20 ที่อุณหภูมิ 333,343 และ 353 เคลวิน ที่ความเร็ว 0.5, 0.75, 1.0 เมตรต่อวินาที ในเวลา 15 นาที ตามลำดับ.....	64
54 แสดงการกระจาย Static Pressure ภายในห้องอบแห้งโดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 333 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.5 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ X=18.25, X=32.75, X=47.25 และ X=61.75 เซนติเมตร...	64
55 แสดงการกระจาย Static Pressure ภายในห้องอบแห้งโดยมีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 333 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.5 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ X=18.25, X=32.75, X=47.25 และ X=61.75 เซนติเมตร.....	65
56 แสดงการกระจาย Static Pressure ภายในห้องอบแห้งโดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 333 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.75 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ X=18.25, X=32.75, X=47.25 และ X=61.75 เซนติเมตร.....	65
57 แสดงการกระจาย Static Pressure ภายในห้องอบแห้งโดยมีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 333 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.75 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ X=18.25, X=32.75, X=47.25 และ X=61.75 เซนติเมตร.....	66
58 แสดงการกระจาย Static Pressure ภายในห้องอบแห้งโดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 333 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ X=18.25, X=32.75, X=47.25 และ X=61.75 เซนติเมตร.....	66

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
68 แสดงการกระจาย Static Pressure ภายในห้องอบแห้งโดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 353 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.75 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร...	72
69 แสดงการกระจาย Static Pressure ภายในห้องอบแห้งโดยมีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 353 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.75 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร...	73
70 แสดงการกระจาย Static Pressure ภายในห้องอบแห้งโดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 353 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร.....	73
71 แสดงการกระจาย Static Pressure ภายในห้องอบแห้งโดยมีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 353 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.75 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร...	74
72 กราฟแสดง Static Pressure ภายในห้องอบแห้ง โดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบแห้ง ณ ตำแหน่ง Point 1 ถึง Point 20 ที่อุณหภูมิ 333,343 และ 353 เคลวิน ที่ความเร็ว 0.5, 0.75 และ 1.0 เมตรต่อวินาที ในเวลา 5 นาที ตามลำดับ.....	75
73 กราฟแสดง Static Pressure ภายในห้องอบแห้ง โดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบ ณ ตำแหน่ง Point 1 ถึง Point 20 ที่อุณหภูมิ 333,343 และ 353 เคลวิน ที่ความเร็ว 0.5, 0.75 และ 1.0 เมตรต่อวินาที ในเวลา 15 นาที ตามลำดับ.....	76
74 กราฟแสดง Static Pressure ภายในห้องอบแห้ง โดยมีวัสดุพูนในห้องอบ ณ ตำแหน่ง Point 1 ถึง Point 20 ที่อุณหภูมิ 333,343 และ 353 เคลวิน ที่ความเร็ว 0.5, 0.75, 1.0 เมตรต่อวินาที ในเวลา 5 นาที.....	76
75 กราฟแสดง Static Pressure ภายในห้องอบแห้ง โดยมีวัสดุพูนในห้องอบ ณ ตำแหน่ง Point 1 ถึง Point 20 ที่อุณหภูมิ 333,343 และ 353 เคลวิน ที่ความเร็ว 0.5, 0.75, 1.0 เมตรต่อวินาที ในเวลา 15 นาที.....	77
76 แสดงเวกเตอร์ของความเร็วยภายในห้องอบแห้ง โดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 333 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.5 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร.....	77

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
86 แสดงเวกเตอร์ของความเร็วกายในห้องอบแห้ง โดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิ อากาศเข้า 343 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 1.0 เมตรต่อวินาทีที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร.....	83
87 แสดงเวกเตอร์ของความเร็วกายในห้องอบแห้ง โดยมีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิ อากาศเข้า 343 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร.....	83
88 แสดงเวกเตอร์ของความเร็วกายในห้องอบแห้ง โดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิ อากาศเข้า 353 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.5 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร.....	84
89 แสดงเวกเตอร์ของความเร็วกายในห้องอบแห้ง โดยมีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิ อากาศเข้า 353 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.5 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร.....	85
90 แสดงเวกเตอร์ของความเร็วกายในห้องอบแห้ง โดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิ อากาศเข้า 353 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.75 เมตรต่อวินาทีที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร.....	85
91 แสดงเวกเตอร์ของความเร็วกายในห้องอบแห้ง โดยมีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิ อากาศเข้า 353 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.75 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร.....	86
92 แสดงเวกเตอร์ของความเร็วกายในห้องอบแห้ง โดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิ อากาศเข้า 353 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร.....	86
93 แสดงเวกเตอร์ของความเร็วกายในห้องอบแห้ง โดยมีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิ อากาศเข้า 353 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร.....	87
94 แสดงเวกเตอร์ของความเร็วกายในห้องอบแห้ง โดยในห้องอบแห้งโดยไม่มีวัสดุพูนใน ห้องอบ ณ ตำแหน่ง Point 1 ถึง Point 20 ที่อุณหภูมิ 333,343 และ 353 เคลวิน ที่ความเร็ว 0.5, 0.75, 1.0 เมตรต่อวินาที ในเวลา 5 นาที ตามลำดับ.....	88

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
95 กราฟแสดงความเร็วภายในห้องอบแห้ง โดยห้องอบแห้งโดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบ ณ ตำแหน่ง Point 1 ถึง Point 20 ที่อุณหภูมิ 333,343 และ 353 เคลวิน ที่ความเร็ว 0.5, 0.75, 1.0 เมตรต่อวินาที ในเวลา 15 นาที ตามลำดับ.....	88
96 กราฟแสดงความเร็วภายในห้องอบแห้ง โดยห้องอบแห้งโดยมีวัสดุพูนในห้องอบ ณ ตำแหน่ง Point 1 ถึง Point 20 ที่อุณหภูมิ 333,343 และ 353 เคลวิน ที่ความเร็ว 0.5, 0.75, 1.0 เมตรต่อวินาที ในเวลา 5 นาที ตามลำดับ.....	89
97 กราฟแสดงความเร็วภายในห้องอบแห้ง โดยห้องอบแห้งโดยมีวัสดุพูนในห้องอบ ณ ตำแหน่ง Point 1 ถึง Point 20 ที่อุณหภูมิ 333,343 และ 353 เคลวิน ที่ความเร็ว 0.5, 0.75, 1.0 เมตรต่อวินาที ในเวลา 15 นาที ตามลำดับ.....	89
98 แสดงเวกเตอร์การไหลของอากาศภายในห้องอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศเข้าที่ 353 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที เวลา 15 นาที ที่ระนาบ X=40 เซนติเมตร	90
99 แสดงเวกเตอร์การไหลของอากาศภายในห้องอบแห้งทางด้านอากาศไหลเข้าที่อุณหภูมิอากาศเข้าที่ 353 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ X=40 เซนติเมตร.....	91
100 แสดงเวกเตอร์การไหลของอากาศภายในห้องอบแห้งทางด้านอากาศไหลออกที่อุณหภูมิอากาศเข้าที่ 353 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ X=40 เซนติเมตร.....	92
101 ภาพเส้นทางการไหลของอนุภาคของอากาศร้อนภายในห้องอบแห้ง.....	92
102 ภาพเส้นทางการไหลของอนุภาคของกระแสอากาศร้อนภายในห้องอบแห้ง จากด้านข้างของห้องอบแห้ง.....	93
103 แสดงบริเวณ Zone 1 เปรอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานแห้งของวัสดุพูน.....	94
104 ภาพกราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานแห้งของวัสดุพูนบริเวณ Zone 1 ที่อุณหภูมิ 333,343 และ 353 เคลวิน ที่ความเร็ว 0.5, 0.75 และ 1.0 เมตรต่อวินาที....	95
105 ภาพกราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานแห้งของวัสดุพูนบริเวณ Zone 2 ที่อุณหภูมิ 333,343 และ 353 เคลวิน ที่ความเร็ว 0.5, 0.75 และ 1.0 เมตรต่อวินาที....	96

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
106 ภาพกราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานแห้งของวัสดุพูนบริเวณ Zone 3 ที่ อุณหภูมิ 333,343 และ 353 เคลวิน ที่ความเร็ว 0.5, 0.75 และ 1.0 เมตรต่อวินาที....	97
107 ภาพกราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานแห้งของวัสดุพูนบริเวณ Zone 4 ที่ อุณหภูมิ 333,343 และ 353 เคลวิน ที่ความเร็ว 0.5, 0.75 และ 1.0 เมตรต่อวินาที....	98
108 กราฟแสดง Static Temperature ภายในห้องอบแห้งโดยภายในห้องอบแห้งมีวัสดุพูน ในห้องอบ ณ ตำแหน่ง Point 1 ถึง Point 20 ที่อุณหภูมิ 333,343 และ 353 เคลวิน ที่ความเร็ว 0.5, 0.75, 1.0 เมตรต่อวินาที ในเวลา 5 นาที.....	99
109 กราฟแสดง Static Temperature ภายในห้องอบแห้งโดยภายในห้องอบแห้งมี วัสดุพูนในห้องอบ ณ ตำแหน่ง Point 1 ถึง Point 20 ที่อุณหภูมิ 333,343 และ 353 เคลวินที่ความเร็ว 0.5, 0.75, 1.0 เมตรต่อวินาที ในเวลา 15 นาที.....	100
110 กราฟแสดง Static Pressure ภายในห้องอบแห้งโดยมีวัสดุพูนในห้องอบ ณ ตำแหน่ง Point 1 ถึง Point 20 ที่อุณหภูมิ 333,343 และ 353 เคลวิน ที่ความเร็ว 0.5, 0.75, 1.0 เมตรต่อวินาที ในเวลา 15 นาที	100
111 ภาพกราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานแห้งของวัสดุพูน บริเวณ Zone 1 ที่ อุณหภูมิ 333,343 และ 353 เคลวิน ที่ความเร็ว 0.5, 0.75 และ 1.0 เมตรต่อวินาที....	101

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การวิเคราะห์ปัญหา การไหลเพื่อหาความเร็ว อุณหภูมิ สำหรับใช้ในการออกแบบงานทางวิศวกรรมหรือการศึกษางานทางวิทยาศาสตร์ด้วย วิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics) ได้เข้ามามีบทบาทและก่อให้เกิดประโยชน์อย่างมากในปัจจุบันวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหลความรู้ทางด้านระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (numerical method) โดยการคำนวณด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (partial differential equation) ซึ่งสมการที่แสดงการสมดุลของการไหลนั้น ก่อให้เกิดผลลัพธ์ที่สามารถแสดงได้ด้วยกราฟฟิกส์ ทำให้นักวิเคราะห์สามารถเข้าใจในปรากฏการณ์ของการไหลได้เป็นอย่างดี เป็นผลให้สามารถปรับปรุง ดัดแปลงรูปแบบของการออกแบบจนได้ผลลัพธ์ที่น่าพอใจบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ ก่อนนำไปสร้างจริงหรือทำการทดลองอีกต่อหนึ่งเพื่อความมั่นใจในการออกแบบ

การศึกษา การศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิและความชื้น วัสดุพูนในห้องอบแห้งแบบลมร้อน ด้วยการใช้ การคำนวณทางพลศาสตร์ของ กระบวนการพื้นฐานที่สำคัญซึ่งพบได้ทั่วไปในทุกขั้นตอนการผลิตอาหาร เช่น ในกระบวนการผลิต ต้มและผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง พบว่า การถ่ายเทน้ำมีผลต่อผลิตภัณฑ์เป็นอย่างมาก ความเข้าใจเรื่องการถ่ายเทมวลดีจะช่วยให้คุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพด้วย ทำให้การศึกษารายการถ่ายเทมวลของระบบที่มีความน่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง และในปัจจุบันมีโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์สามารถเข้ามามีบทบาทในการศึกษาการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

สำหรับหัวข้อวิจัยนี้ จะศึกษาผลการเปรียบเทียบการ เปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรทางด้านอุณหภูมิและความเร็วลมที่มีผลต่อ การศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิ และความชื้นวัสดุพูนในห้องอบแห้งแบบลมร้อนโดยใช้ วิธีการคำนวณเชิงพลศาสตร์ของไหล เพื่อที่จะทำความเข้าใจถึงสิ่งที่เกิดขึ้นภายในชิ้นอาหารนั้นๆและนำไปประยุกต์ใช้ออกแบบเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่นำมาอบแห้งต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาการกระจายตัวอุณหภูมิและความชื้นวัสดุพูนในห้องอบแห้งแบบลมร้อน
2. เพื่อให้รู้แนวทางในการศึกษาการกระจายตัวอุณหภูมิ และความชื้นที่เกิดขึ้นของวัสดุพูน

ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของไหล
2. ศึกษาการเปลี่ยนค่าตัวแปรทางด้าน อุณหภูมิ ความเร็วลม
3. ศึกษาการกระจายตัวอุณหภูมิและความชื้นวัสดุพูนรูปทรงสี่เหลี่ยมในห้องอบแห้ง

แบบลมร้อน

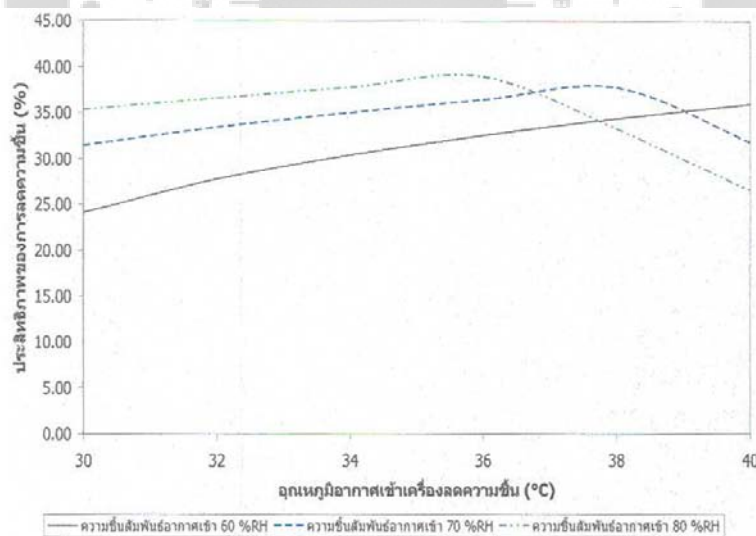
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. ได้เรียนรู้การใช้วิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของไหล
2. ได้ทราบถึงคุณสมบัติและรูปแบบการกระจายตัวอุณหภูมิ ความชื้นวัสดุพูน
3. ทราบถึงความแตกต่างของการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรด้านอุณหภูมิและความเร็วลม

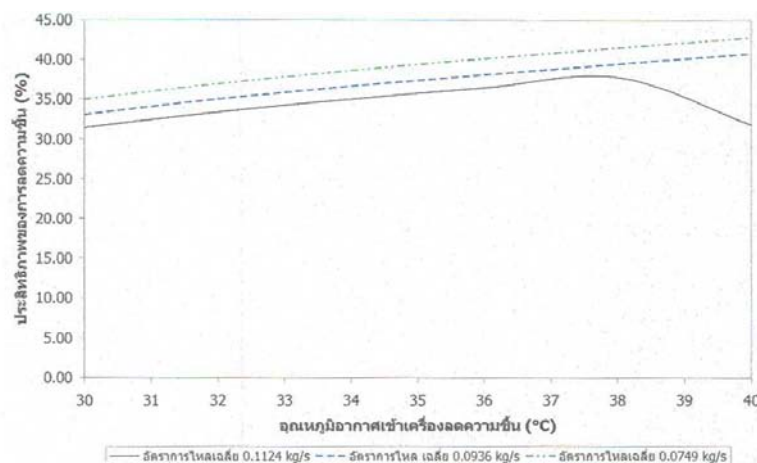
การทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อนุรักษ์ (2531) การใช้ เครื่องอบแห้งเพื่อลดความชื้นของเมล็ดพืช ซึ่งวัตถุประสงค์ของงานวิจัยครั้งนี้ เพื่อที่จะศึกษาความสัมพันธ์ของพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดและคุณภาพของเมล็ดข้าวโพดหลังการอบแห้ง เช่น ปริมาณแอฟลาทอกซิน, เมล็ดร้าวและเมล็ดแตก เป็นต้น โดยการปรับอัตราการไหลและอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งระหว่าง 5.50–45.0 ลูกบาศก์เมตรต่อนาทีต่อลูกบาศก์เมตรข้าวโพดและ 45–90 องศาเซลเซียสตามลำดับ และแบ่งการทดลองออกเป็น 2 วิธีคือ 1) การอบแห้งแบบเป่าอากาศต่อเนื่อง 2) การอบแห้งแบบเป่าอากาศไม่ต่อเนื่องและ ในแต่ละวิธียังแบ่งออกเป็น 1) การอบแห้งโดยใช้อัตราการไหลของอากาศต่ำ อุณหภูมิสูง ,LFHT (อัตราการไหลของอากาศ 5.50–25.95 ลูกบาศก์เมตรต่อนาทีต่อลูกบาศก์เมตรข้าวโพดอุณหภูมิ 60 – 90 องศาเซลเซียส) 2) การอบแห้งแบบใช้อัตราการไหลของอากาศสูง , อุณหภูมิต่ำ , HFLT (อัตราการไหลของอากาศ 30.0–45.0 ลูกบาศก์เมตรต่อนาทีต่อลูกบาศก์เมตรข้าวโพด , อุณหภูมิ 45–55 องศาเซลเซียส) 3) การอบแห้งแบบใช้อัตราการไหลของอากาศต่ำอุณหภูมิต่ำ , LFLT (อัตราการไหลของอากาศ 5.50–25.95 ลูกบาศก์เมตรต่อนาทีต่อลูกบาศก์เมตรข้าวโพด , อุณหภูมิ 45–55 องศาเซลเซียส)ความชื้นก่อนอบแห้งของเมล็ดข้าวโพดอยู่ในช่วง 15–26 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ความชื้นเฉลี่ยสุดท้ายของเมล็ดข้าวโพดทั้งหมดในถังอบที่ใช้เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของพลังงานประมาณเปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก

วัฒนาร (2545) ได้ศึกษาพารามิเตอร์และแบบจำลองแบบของระบบลดความชื้นอากาศเพื่อใช้ในเตาอบ โดยใช้วิธีการทำความเย็นเพื่อลดความชื้นด้วยการกลั่นตัว เครื่อง ลดความชื้นที่วิเคราะห์ประกอบด้วยคอมเพรสเซอร์ขนาด 0.80 วัตต์ พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของอีวาโปเรเตอร์ 1.15 ลูกบาศก์เมตร และพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของคอนเดนเซอร์ 1.74 ลูกบาศก์เมตร การศึกษาใช้หลักการสมดุลพลังงานและสมดุลมวล พารามิเตอร์ประกอบด้วย อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และอัตราการไหลของอากาศ เงื่อนไขในการจำลองมีดังนี้ อุณหภูมิอากาศเข้าอยู่ในช่วง 30-40 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์อากาศเข้าอยู่ในช่วง 60-80 เปอร์เซ็นต์ และอัตราการไหลของอากาศ 0.0749-0.1126 กิโลกรัมต่อวินาที ผลจากการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์พบว่าอุณหภูมิอากาศออกที่อยู่ในช่วง 59.8-66.2 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์อากาศออกอยู่ในช่วง 12.4-21.7 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพการลดความชื้นอยู่ในช่วง 24-42 เปอร์เซ็นต์ การเปรียบเทียบกับผลการทดลองพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของอุณหภูมิ 2.8 เปอร์เซ็นต์ และค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของความชื้นสัมพัทธ์ 11 % ที่อุณหภูมิอากาศเข้าเฉลี่ย 32 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์อากาศเข้าเฉลี่ย และอัตราการไหลของอากาศเฉลี่ย 0.1126 กิโลกรัมต่อวินาที สามารถกลั่นน้ำจาก อากาศชื้นได้เท่ากับ 33 กิโลกรัมต่อ 24 ชั่วโมง

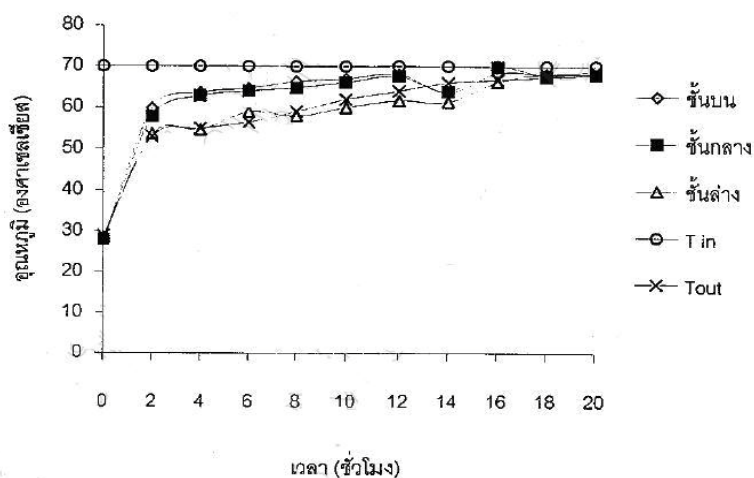


ภาพประกอบ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศเข้ากับประสิทธิภาพของการลดความชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ (วัฒนาร อิงเจริญวัฒนา. 2545)



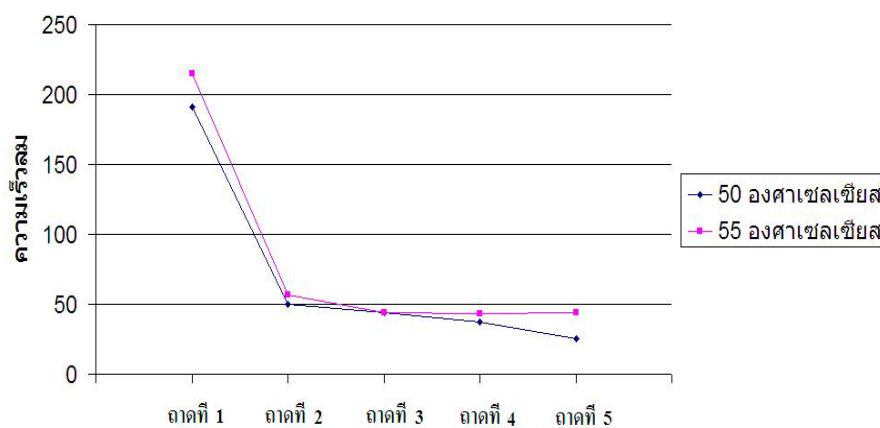
ภาพประกอบ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศเข้ากับประสิทธิภาพของการลดความชื้นที่อัตราการไหลของอากาศต่างๆ (วิวัฒน์ธร อิงเจริญวัฒนา. 2545)

มนัสวี (2546) ศึกษาการปรับปรุงระบบกระจายอากาศร้อนและการสลับทิศทางออกอากาศร้อนของเครื่องอบแห้งลำไยแบบแก๊สเปลือก โดยที่ห้องอบแห้งขนาด $0.46 \times 0.75 \times 0.99$ เมตร บรรจุ 9 ถาด ซึ่งภายในบรรจุลดความร้อนแบบครึ่งขนาด 3600 วัตต์ โดยใช้พัดลมแบบหอยโข่งขนาด 20 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ซับอากาศเย็นผ่านห้องความร้อนเข้าสู่ห้องอบแห้ง ได้ทำการทดลองอบแห้งลำไยด้วยความเร็วลม 0.75 และ 1.15 เมตรต่อวินาที และสลับทิศทางลมร้อนทุกๆ 0,3,5 ชั่วโมง จากการทดลองพบว่า การใช้ความเร็ว 1.15 เมตรต่อวินาที และสลับลมร้อนทุกๆ 6 ชั่วโมง เป็นวิธีที่เหมาะสม เนื่องจากสามารถความชื้นลำไยจาก 703.21 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้งลงเหลือ 20.57 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้งภายในเวลา 16 ชั่วโมง และมีอัตราการลดความชื้น เท่ากับ 42.66 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้งต่อชั่วโมง



ภาพประกอบ 3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของชั้นถาด (มนัสวี สกุลแก้ว. 2546)

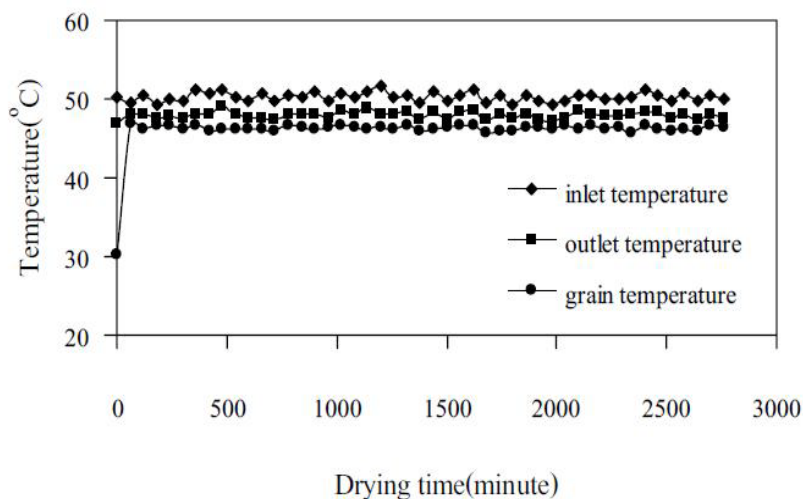
พิทักษ์ กิตติศักดิ์ และ ทรงพล (2546) ศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะต่างๆ (อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม การกระจายตัวลมร้อนภายในตู้อบและระยะเวลาในการอบแห้ง ที่เหมาะสมของการอบแห้งหน่อไม้ไผ่ตง ที่ความหนาประมาณ 1 เซนติเมตร โดยใช้อบแห้งชนิดถาด (Tray dryer) ที่อุณหภูมิ 50 55 60 และ 65 องศาเซลเซียส



ภาพประกอบ 4 แสดงความเร็วเฉลี่ย ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในตู้อบ (พิทักษ์ จันทรเจริญ; กิตติศักดิ์ วสันติวงศ์; และ ทรงพล การะเกด. 2546)

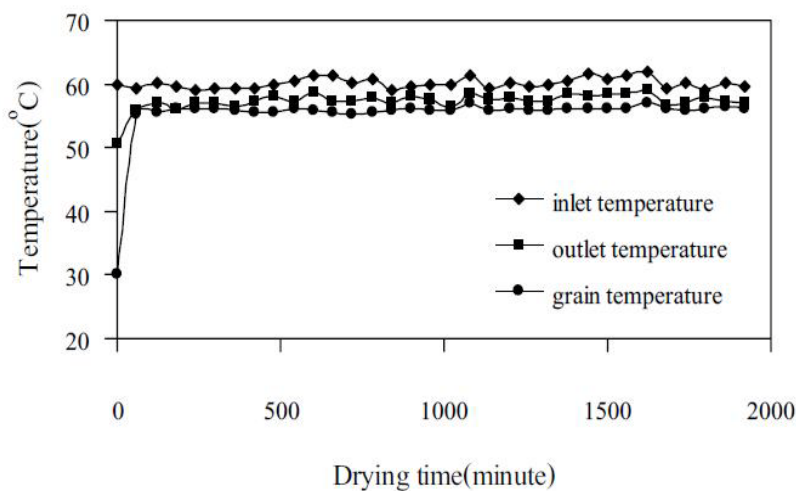
รัฐพร (2547) ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ และความเร็วของอากาศที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งและการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของ เมล็ดกาแฟ โดยมีเงื่อนไขในการศึกษาได้แก่ อุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งแบบลมร้อนเท่ากับ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วอากาศเท่ากับ 0.8 และ 1.3 เมตรต่อวินาที ความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดกาแฟอยู่ในช่วง 178 ถึง 209 ร้อยละมาตรฐานแห้ง อบแห้งจนได้ความชื้นประมาณ 15 ถึง 16 ร้อยละมาตรฐานแห้ง ซึ่งคุณภาพของเมล็ดกาแฟที่ศึกษาได้แก่ การเปลี่ยนแปลงสี ปริมาณ Chlorogenic acid และ ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำในกาแฟ (Total soluble solids) โดยเปรียบเทียบคุณภาพต่างๆดังกล่าวที่ได้จากการอบแห้งแบบลมร้อนที่ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วอากาศเท่ากับ 0.8 เมตรต่อวินาที กับการอบแห้งเมล็ดกาแฟด้วย บั้มความร้อนที่อุณหภูมิและความเร็วอากาศเดียวกัน เพื่อศึกษาผลกระทบของวิธีการอบแห้งที่มีต่อคุณภาพของเมล็ดกาแฟจากการทดลองอบแห้งเมล็ดกาแฟด้วยอากาศร้อน พบว่าการลดลงของความชื้นเมล็ดกาแฟในช่วงอัตรา การอบแห้งลดลง และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศร้อนจะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น โดยความเร็วของอากาศไม่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง ซึ่งสามารถอธิบายการเคลื่อนที่ของน้ำในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงได้ด้วยสมการการแพร่โดยกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์การ

แพร่ประสิทธิผลของน้ำในเมล็ดกาแฟ เปลี่ยนแปลงตามความชื้นและจากการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของน้ำในเมล็ดกาแฟจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงมีค่ามากกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำและมีค่าลดลงตามความชื้นของเมล็ดกาแฟ



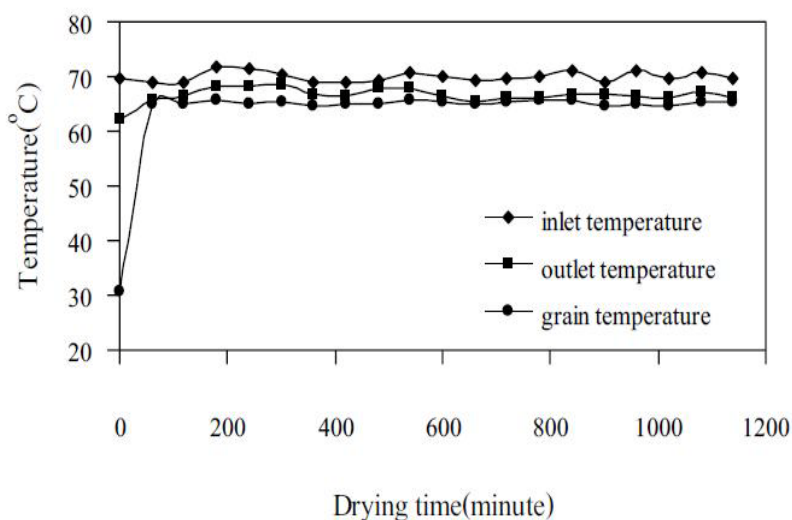
ภาพประกอบ 5 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศและเมล็ดกาแฟขณะอบแห้ง

(อากาศเข้าที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และความเร็วลม 0.8 เมตรต่อวินาที) (รัฐพร บัวชม 2547)



ภาพประกอบ 6 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศและเมล็ดกาแฟขณะอบแห้ง

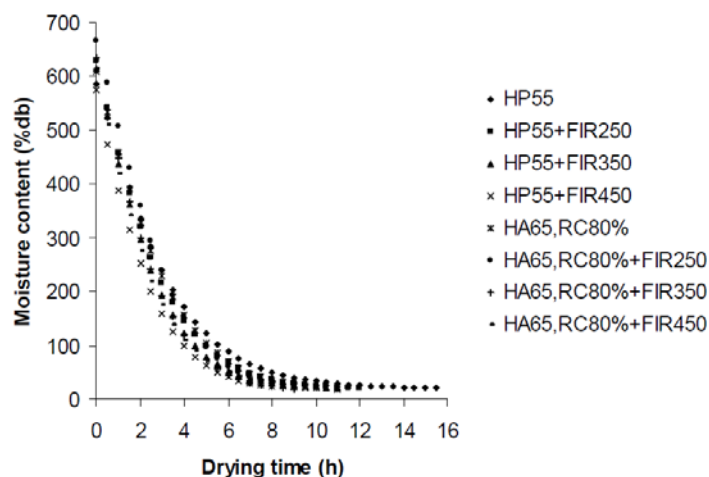
(อากาศเข้าที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความเร็วลม 0.8 เมตรต่อวินาที) (รัฐพร บัวชม. 2547)



ภาพประกอบ 7 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศและเมล็ดกาแฟขณะอบแห้ง

(อากาศเข้าที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และความเร็วลม 0.8 เมตรต่อวินาที)(รัฐพร บัวชม. 2547)

เพชรรัตน์ (2549) เพื่อศึกษาการนำรังสีอินฟราเรดไกลเข้ามาช่วยในการอบแห้งเนื้อลำไยด้วยลมร้อนและบ่มความร้อนเปรียบเทียบกับ การอบแห้งเนื้อลำไยด้วยลมร้อนและบ่มความร้อนเพียงอย่างเดียว ในด้านลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง สี การหดตัว การคั่วตัว ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ วอเตอร์แอกทิวิตี เนื้อสัมผัส โครงสร้างระดับจุลภาค และการทดสอบด้านประสาทสัมผัสโดยทำการอบแห้งเนื้อลำไยจากความชื้นเริ่มต้น 550-670 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง (84-86 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก) จนเหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง (18 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก) ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 65 องศาเซลเซียส สำหรับลมร้อน ในส่วนของบ่มความร้อน อุณหภูมิของอากาศอบแห้ง 55 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 0.3 เมตรต่อวินาที สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนมีสัดส่วนการนำอากาศร้อนหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ 80 เปอร์เซ็นต์ ในส่วนการนำรังสีอินฟราเรดไกลเข้ามาช่วยในการอบแห้งใช้กำลังไฟฟ้าที่ให้กับหลอดรังสีอินฟราเรดไกลที่ 250, 350 และ 450 วัตต์ จากผลการทดลองพบว่าการนำรังสีอินฟราเรดไกลเข้ามาช่วยกับการอบแห้งเนื้อลำไยด้วยลมร้อนหรือบ่มความร้อนช่วยเพิ่มอัตราการอบแห้งและลดเวลาในการอบแห้งลง



ภาพประกอบ 8 เปรียบเทียบการลดของความชื้นเฉลี่ยของเนื้อลำไยด้วยวิธีการอบแห้งแบบต่าง ๆ (เพชรรัตน์ ใจบุญ. 2549)

นริศ ภราดร กอดขวัญ ศิวะ และอารีย์ (2551) เพื่อศึกษาอิทธิพลของกำลังอินฟราเรด อุณหภูมิลมร้อนและความเร็วลมที่มีผลต่อการอบแห้งเนื้อลำไยพร้อมทั้ง ทำการพัฒนาสมการ จลนพลศาสตร์ของการอบแห้งทางทฤษฎี โดยทำการทดลองอบแห้งเนื้อลำไยที่มีความชื้นเริ่มต้น ระหว่าง 450 - 580 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง ด้วยเครื่องอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนในห้องปฏิบัติการที่ความเร็วลม 0.3, 0.5 และ 0.7 เมตรต่อวินาที ใช้กำลังอินฟราเรดขนาด 200,500 และ 800 วัตต์ และ/หรืออุณหภูมิลมร้อน 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส โดยวางตัวอย่างห่างจากแท่งอินฟราเรด 250 มิลลิเมตร อบจนเหลือความชื้น 18 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง จากการศึกษาพบว่า อัตราการอบแห้งและอุณหภูมิของเนื้อลำไยเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของกำลังอินฟราเรด และ/หรืออุณหภูมิลมร้อนทำให้ใช้เวลาอบแห้งลดลง โดยที่ความเร็วลมไม่มีผลต่อเวลาอบแห้งและอุณหภูมิลำไย จากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวมและพัฒนาสมการจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง ได้สมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวมของเนื้อลำไยเป็นฟังก์ชัน กับกำลังอินฟราเรดและอุณหภูมิลมร้อน

ภราดร อธิพงษ์ นราวัฒน์ ศิวะและ อารีย์ (2551) เพื่อสร้างเครื่องอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนสำหรับห้องปฏิบัติการ แล้วทำการหาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งและความชื้นของตัวอย่างหลังอบแห้ง พร้อมทั้งศึกษาอิทธิพลของกำลังอินฟราเรดและ /หรืออุณหภูมิลมร้อนที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง โดยทำแต่ละการทดลองทำ การอบแห้งแห้งมันฝรั่งขนาด 10x10x50 มิลลิเมตร 3 จำนวน 1.0 กิโลกรัม ที่กำลังอินฟราเรดขนาด 100, 500 และ 1000 วัตต์และ/หรืออุณหภูมิ

ลมร้อน 40, 50 และ 80 องศาเซลเซียส ความเร็วลมคงที่ 0.7 เมตรต่อวินาทีและระยะห่างระหว่างมันฝรั่งกับแท่งอินฟราเรด 200 มิลลิเมตร ลดความชื้นมันฝรั่งจนเหลือ 10 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง จากการศึกษาพบว่าอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งและความชื้นของมันฝรั่งหลังการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนค่อนข้างมีความสม่ำเสมออีกทั้งยังพบว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียวหรือการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนที่ใช้ขนาดกำลังอินฟราเรดต่ำๆ อิทธิพลของกำลังอินฟราเรดมีผลน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับผลของอุณหภูมิลมร้อนที่มีผลอย่างมากต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิวัสดุและการเพิ่มขึ้นของอัตราการอบแห้งทำให้ใช้เวลาอบแห้งลดลง ส่วนการอบแห้งมันฝรั่งด้วยอินฟราเรดอย่างเดียว หรือการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนที่กำลังอินฟราเรดสูงๆ พบว่าเมื่ออิทธิพลของกำลังอินฟราเรดมีผลอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับผลของอุณหภูมิลมร้อนที่มีผลน้อยต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิวัสดุและการเพิ่มขึ้นของอัตราการอบแห้ง



บทที่ 2 ทฤษฎี

ทฤษฎีเกี่ยวกับกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูน

ในส่วนนี้อธิบายเกี่ยวกับกลไกของกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารภายในวัสดุพูน ซึ่งความเข้าใจเกี่ยวกับกลไกและปรากฏการณ์พื้นฐานนี้สามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูนโดยใช้กรรมวิธีการให้ความร้อนแบบลมร้อน

กระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูน

เพื่อให้เกิดความเข้าใจในกระบวนการอบแห้ง การวิเคราะห์ในเชิงลึกของกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารที่เกิดขึ้นในวัสดุพูนในระหว่างกระบวนการอบแห้งถือว่าเป็นสิ่งสำคัญก่อนที่จะออกแบบระบบที่ใช้งานในทางปฏิบัติ กระบวนการอบแห้งวัสดุจะคาบเกี่ยวกับกระบวนการเบื้องต้นที่เกิดขึ้นพร้อมกันสองกระบวนการ(ผดุงศักดิ์, 2547) นั่นก็คือ

1. กระบวนการถ่ายเทความร้อน กล่าวคือ ความร้อนที่ถ่ายเทจากสิ่งแวดล้อม (เช่น ลมร้อนและไอน้ำเป็นต้น) ไปยังเนื้อวัสดุเพื่อทำการเคลื่อนย้ายความชื้นและระเหยความชื้นที่มีอยู่
2. กระบวนการถ่ายเทมวลสาร กล่าวคือ มวลสารที่ถ่ายเทอาจอยู่ในรูปของเหลวหรือไอภายในเนื้อวัสดุและที่ผิวของวัสดุ

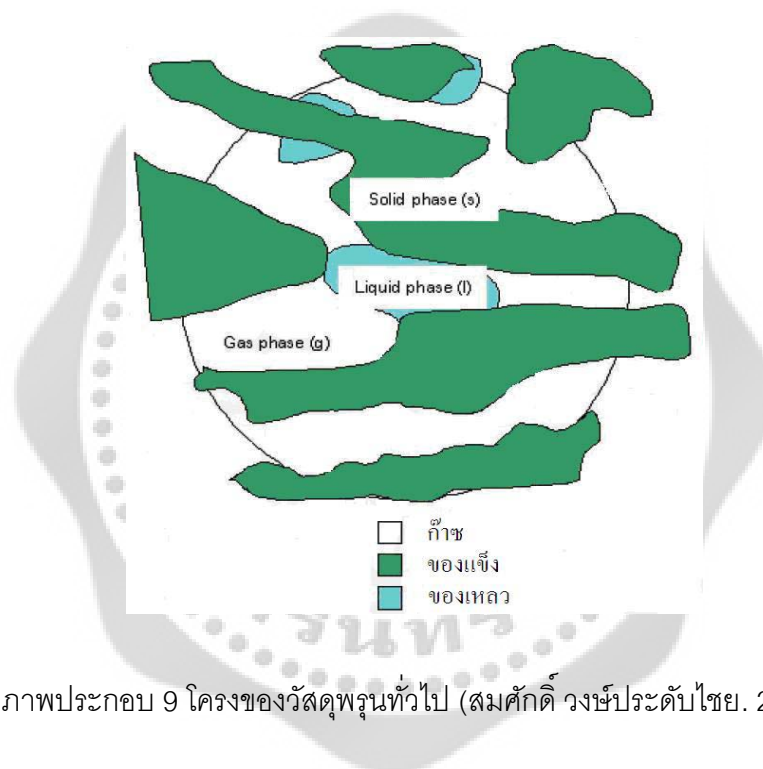
ปัจจัยสำคัญที่ครอบคลุมถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการเพื่อหาปรากฏการณ์ต่างๆ ในกระบวนการ เช่น อัตราการอบแห้ง การกระจายตัวของอุณหภูมิและความชื้นภายในเนื้อวัสดุ เป็นปัจจัยที่ขึ้นกับเวลา

การอบแห้งวัสดุพูนที่ไม่อิมิตัวจะต้องเกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนและการเคลื่อนตัวของความชื้น (ประกอบไปด้วยของเหลว ไอน้ำและอากาศ) ซึ่งเกิดขึ้นพร้อมกันในวัสดุพูนอย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีของกระบวนการอบแห้งจะมีความซับซ้อนเป็นอันมากเนื่องจากคาบเกี่ยวกันของสมการหลายชุดที่เป็นลักษณะไม่เชิงเส้น รวมถึงเงื่อนไขขอบเขตที่ซับซ้อนกว่ากรณีทั่วไป อย่างไรก็ตามปัจจุบันการคำนวณของคอมพิวเตอร์มีสมรรถนะ สูงมากสามารถใช้ในการแก้ปัญหาที่มีเงื่อนไขที่ซับซ้อนได้เป็นอย่างดี ทฤษฎีต่างๆ ทางด้านการถ่ายเทความร้อนและมวลสารก็มีการพัฒนาเป็นอย่างมากเมื่อมีคอมพิวเตอร์ที่มีสมรรถนะสูงมาช่วยในการคำนวณ

รูปแบบโครงสร้างของวัสดุพูน

วัสดุส่วนใหญ่ในทางวิศวกรรมเป็นวัสดุพูนกล่าวคือ ตัววัสดุประกอบด้วยสารที่มี 3 สถานะ คือ สถานะของแข็ง (solid phase หรือ solid matrix) ของเหลว (liquid phase) และก๊าซ (gas phase) ที่อยู่ระหว่างช่องว่างหรือรูพูน (void) ดังภาพประกอบ 9

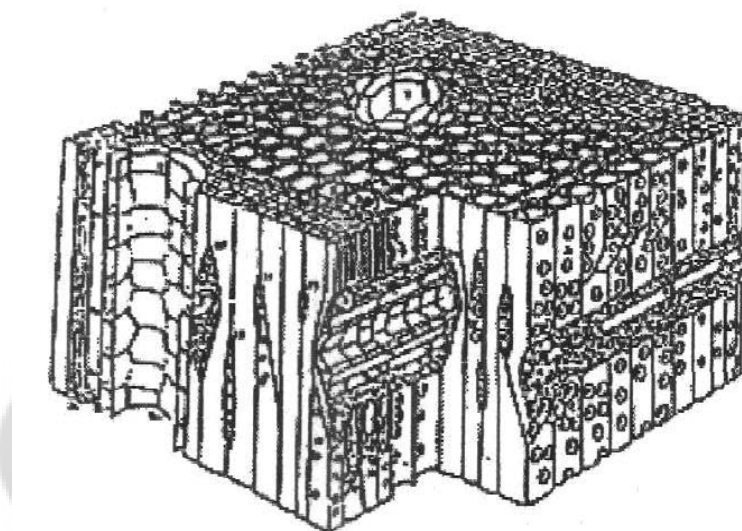
ตัวอย่าง วัสดุพูนที่ใช้ในงานวิศวกรรม เช่น ดินและคอนกรีตในงานวิศวกรรมปฐพี Ceramic ในงานวิศวกรรมโลหะ Catalyst ในงานวิศวกรรมเคมี ฉนวนความร้อนในงานวิศวกรรมเครื่องกล และเคมี เนื้อเยื่อต่างๆ ผิวหรือ Membrane ในงานวิศวกรรมชีวภาพและการแพทย์ รวมถึงอาหาร และผลิตภัณฑ์การเกษตรในงานวิศวกรรมเกษตร



ภาพประกอบ 9 โครงสร้างของวัสดุพูนทั่วไป (สมศักดิ์ วงษ์ประดับไชย. 2549)

เมื่อพิจารณาในระดับโครงสร้างของวัสดุพูน เราสามารถแบ่งออกเป็นสองรูปแบบใหญ่ๆ ชนิดแรกของเหลวหรือความชื้นจะเคลือบตัวอยู่รอบ นอกอนุภาคของแข็ง (solid matrices) ไปตามช่องว่าง (pores) ที่เกิดขึ้นจากส่วนประกอบของอนุภาคของแข็ง โดยที่ความชื้นดังกล่าวนี้ไม่สามารถส่งผ่านหรือดูดกลืนเข้าไปในชั้นผิวของอนุภาคของแข็งได้ เราเรียกวัสดุพูนชนิดนี้ว่า วัสดุพูนแบบไม่ขึ้นน้ำ (nonhygroscopic porous media) หากพิจารณาโครงสร้างของวัสดุพูนชนิดนี้ พบว่าช่องว่างระหว่างอนุภาคของแข็งหรือรูพูนมีขนาดใหญ่พอ ดังนั้นอิทธิพลของความดันไอภายในช่องว่างจะมีความสำคัญน้อย โครงสร้างของวัสดุพูนชนิดที่สองความชื้นจะยึดอยู่กับโครงสร้างของอนุภาคของแข็งภายใต้พันธะทางเคมีและฟิสิกส์ ซึ่งจะเป็นพันธะที่สำคัญในการหน่วงให้ความชื้นคงอยู่

ในโครงสร้างเมื่อพิจารณาโครงสร้างของวัสดุพอร์ซันชนิดนี้ พบว่าช่องว่างระหว่างอนุภาคของแข็งมีขนาดรัศมีเล็กประมาณ 0 ถึง 1 นาโนเมตร เราจะเรียกวัสดุพอร์ซันชนิดนี้ว่าวัสดุพอร์ซันแบบชื้นมาก (hygroscopic porous media) ซึ่งกรณีนี้จะรวมถึงวัสดุพอร์ซันบางชนิด เช่น วัสดุชีวภาพที่ไม่สามารถแบ่งแยกลักษณะโครงสร้างได้ชัดเจน ตัวอย่างเช่น เนื้อไม้ ดังแสดงใน ภาพประกอบ 2.2 ซึ่งจะมีโครงสร้างวัสดุพอร์ซันแบบเซลล์ลูลาร์-คาพิลลารี (cellular capillary) ซึ่งในกรณีนี้การเคลื่อนที่ของความชื้นจะไม่เสถียรและการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีจะทวิความซับซ้อนกว่ากรณีแรก

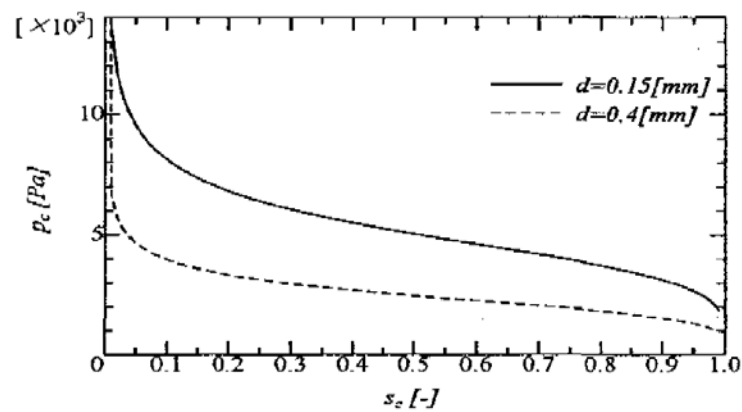


ภาพประกอบ 10 โครงสร้างวัสดุพอร์ซันแบบเซลล์ลูลาร์-คาพิลลารี (cellular capillary)
(สมศักดิ์ วงษ์ประดับไทย, 2549)

สำหรับวัสดุพอร์ซันในกรณีแรก (nonhygroscopic porous media) ส่วนใหญ่จะเรียกว่าวัสดุพอร์ซันแบบคาพิลลารี (capillary porous media) เนื่องจากของเหลวหรือความชื้นภายในวัสดุจะเคลื่อนตัวในช่องว่างที่เป็นรูพอร์ซัน (ภาพประกอบ 12) เนื่องจากอิทธิพลของความดันคาพิลลารี (capillary pressure) โดยที่ความดันคาพิลลารีนี้จะเป็นฟังก์ชันของแรงตึงผิว มุมสัมผัสและลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของวัสดุพอร์ซัน ความดันคาพิลลารีสามารถนิยามได้ดังนี้คือ เมื่อของไหลสองชนิดที่ไม่ผสมกัน (immiscible fluids) เช่น น้ำและอากาศ เกิดการสัมผัสกันในช่องว่างของวัสดุพอร์ซัน การไม่ผสมกันของของไหลสองชนิดทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของความดันตลอดช่วงผิวรอยต่อ เรียกว่า ความดันคาพิลลารี (P_c) ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

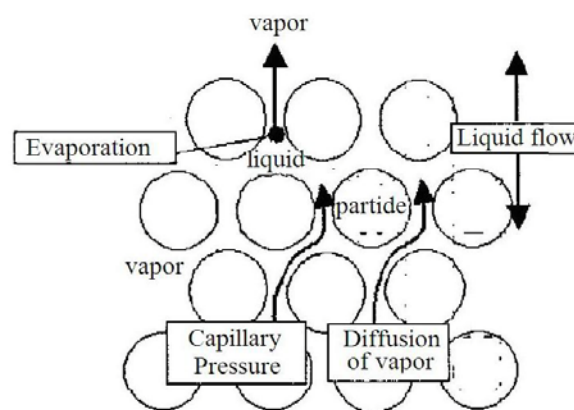
$$P_c = P - P_t \quad (2.1)$$

เมื่อ P คือความดันในของไหลที่มีสถานะแห้ง (non-wetting phase) เช่น อากาศ ส่วน P_l คือ ความดันในของไหลที่มีสถานะเปียก (wetting phase) ความดันคาพิลารีมีคุณสมบัติที่สมดุลและสัมพันธ์โดยตรงกับแรงตึงผิวระหว่างของไหลสองชนิด จากการศึกษพบว่าค่าความดันคาพิลารีเพิ่มขึ้น เมื่อค่าอิมิตัวของของไหลสถานะแห้งเพิ่มขึ้น แต่ก็ขึ้นกับคุณสมบัติ ของความอิมิตัวของวัสดุ นั้นๆ ภาพประกอบ 11 แสดงข้อมูลจากการทดลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาพิลารี ภายในวัสดุพอร์นและคุณสมบัติของของไหลที่สภาวะต่างๆ (Ratanadecho; et al. 2001)



ภาพประกอบ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาพิลารีภายในวัสดุพอร์นและสมบัติของของไหล (สมศักดิ์ วงษ์ประดับไชย. 2549)

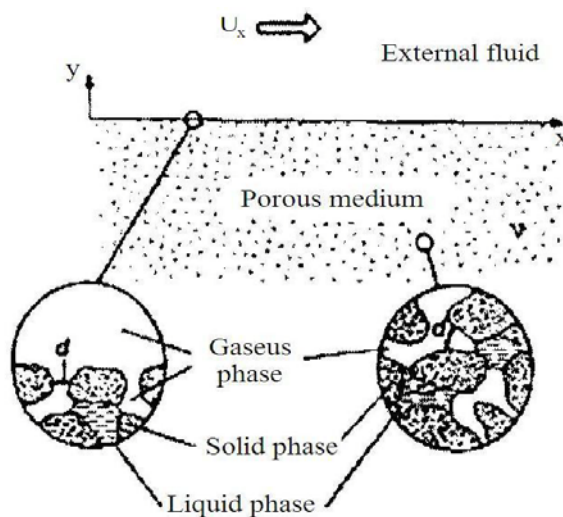
กลไกสำคัญอีกอย่างหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อการเคลื่อนตัวของไอน้ำในช่องว่างที่เป็นรูพรุน คือ ผลของการแพร่กระจายไอน้ำ (Vapor diffusion force) ซึ่งอธิบายได้ด้วยกฎของฟิคส์ (Fick's law) ภาพประกอบ 12 แสดงถึงกลไกที่สำคัญต่อกระบวนการถ่ายเทมวลสารในวัสดุพอร์นแบบคาพิลารี



ภาพประกอบ 12 กระบวนการถ่ายเทมวลสารในวัสดุพอร์น (สมศักดิ์ วงษ์ประดับไชย. 2549)

กลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในกระบวนการอบแห้งในวัสดุพอรุน

กลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในกระบวนการอบแห้งในวัสดุพอรุนแบบคาพิลลารีอยู่บนสมมติฐานที่ว่าอิทธิพลจากความดันคาพิลลารี ถือว่าเป็นกลไกหลักในการเคลื่อนย้ายมวลความชื้นออกจากโครงสร้างวัสดุพอรุน แต่ในวัสดุพอรุนทั่วไปในทางปฏิบัติวัสดุพอรุนมีโครงสร้างซับซ้อนและกลไกหลายอย่างที่มีอิทธิพลต่อการเคลื่อนย้ายมวลความชื้น



ภาพประกอบ 13 ไดอะแกรมของกระบวนการอบแห้งวัสดุพอรุน (สมศักดิ์ วงษ์ประดับไชย. 2549)

จากภาพประกอบ 13 แสดงตัวอย่างวัสดุพอรุนที่เปียกชื้นผ่านกระบวนการอบแห้งภายใต้สภาวะภายนอกคงที่ กล่าวคืออุณหภูมิ ความชื้นและความเร็วอากาศถูกรักษาให้คงที่ตลอดช่วงการทดสอบการเคลื่อนตัวของความชื้นจากภายในสู่ผิวหน้าภายใต้อิทธิพลของกลไกต่างๆ จะปรากฏขึ้น (ภาพประกอบ 12) โดยที่กลไกที่ควบคุมการเคลื่อนตัวของความชื้น (ผดุงศักดิ์. 2547) สามารถสรุปได้ดังนี้

1. แรงดันคาพิลลารี
2. การแพร่กระจายตัว (diffusion) เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของสสาร
3. การเปลี่ยนสถานะของสสาร กล่าวคือ เกิดการระเหยและการกลั่นตัว (evaporation condensation mechanism) ภายในวัสดุพอรุน
4. การแพร่กระจายตัวของความชื้นสู่ผิววัสดุ (surface diffusion)
5. การเคลื่อนตัวของความชื้นเนื่องจากความแตกต่างของความดันรวม
6. การเคลื่อนตัวของความชื้นเนื่องจากอิทธิพลของแรงโน้มถ่วง
7. การเคลื่อนตัวหาความชื้นเนื่องจากการกระจายตัวเชิงอุณหภูมิ (thermo-diffusion)

โดยทั่วไปกลไกที่กล่าวมาข้างต้นมีความสำคัญต่อกระบวนการอบแห้งวัสดุพูนที่คาบเวลาต่างกัน ซึ่งในทางปฏิบัติไม่สามารถแยกกลไกแต่ละชนิดออกจากกันได้ชัดเจนเนื่องจากความซับซ้อนของกระบวนการอบแห้ง ทำได้เพียงพิจารณาเฉพาะกลไกหลักที่สำคัญกว่าเท่านั้น การพิจารณาว่ากลไกใดมีความสำคัญต่อกระบวนการอบแห้งนั้นขึ้นอยู่กับชนิดและโครงสร้างของวัสดุรวมไปถึงวิธีการให้พลังงานความร้อน

ทฤษฎีเกี่ยวกับการอบแห้ง (Drying Fundamental)

การอบแห้งคือ กระบวนการลดความชื้นซึ่งส่วนใหญ่ใช้การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุที่ขึ้นเพื่อไล่ความชื้นออกด้วยการระเหยโดยของเหลวที่อยู่ภายในวัสดุจะเคลื่อนที่ออกมายังผิว ส่วนไอน้ำในวัสดุจะเคลื่อนที่เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น (vapor diffusion) และความดันไอ (partial pressure of vapor) ที่แตกต่างกันระหว่างไอน้ำในวัสดุกับอากาศร้อน ช่วงแรกของการอบแห้งเป็นช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ การถ่ายเทความร้อนและมวลระหว่างวัสดุกับอากาศจะเกิดขึ้นรอบๆ ผิววัสดุเท่านั้น ความร้อนกับอากาศร้อนจะถ่ายเทไปยังผิววัสดุ โดยการนำความร้อนผ่านชั้นฟิล์มของก๊าซไปยังผิวของวัสดุและเมื่อผิวของวัสดุมีปริมาณน้ำลดลงมาก การถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสารจะเกิดขึ้นภายในมวลวัสดุด้วย โดยน้ำภายในวัสดุจะเคลื่อนที่มายังผิววัสดุในรูปของเหลวหรือไอน้ำแล้วระเหยเมื่อได้รับความร้อนจากอากาศ การเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในวัสดุมายังผิวจะช้ากว่าการพาความร้อนจากผิวไปยังอากาศ ทำให้อัตราการอบแห้งลดลง ที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศคงที่ ความชื้นของวัสดุจะลดต่ำลงจนถึงจุดหนึ่งซึ่งไม่เปลี่ยนแปลง ที่จุดนี้ความดันไอน้ำของน้ำในวัสดุมีค่าเท่ากับความดันไอของอากาศที่อยู่รอบๆ และอุณหภูมิของวัสดุก็เท่ากับอุณหภูมิของอากาศรอบๆ ทำให้น้ำไม่สามารถระเหยออกจากวัสดุได้ เรียกความชื้นในขณะนั้นว่า

ความชื้นสมดุลความชื้นเป็นตัวบอกปริมาณของน้ำ ที่มีอยู่ในวัสดุ เมื่อเปรียบเทียบกับมวลวัสดุขึ้นหรือแห้งความชื้นในวัสดุสามารถแสดงได้เป็น 2 แบบ คือ

1. ความชื้นมาตรฐานเปียก (Moisture content wet basis, w.b.)

$$M_{w.b.} = \left(\frac{M_w}{(M_w + M_d)} \right) \times 100 \quad (2.2)$$

โดย $M_{w.b.}$ คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (%w.b.)

M_w คือ มวลของน้ำในอาหาร หรือ น้ำหนักที่หายไปหลังการอบ

M_d คือ มวลของของแข็งในอาหาร หรือ น้ำหนักหลังอบ

2. ความชื้นมาตรฐานแห้ง (Moisture content dry basis, d.b.)

$$M_{d.b.} = \left(\frac{M_w}{M_d} \right) \times 100 \quad (2.3)$$

โดย $M_{d.b.}$ คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (%d.b.)

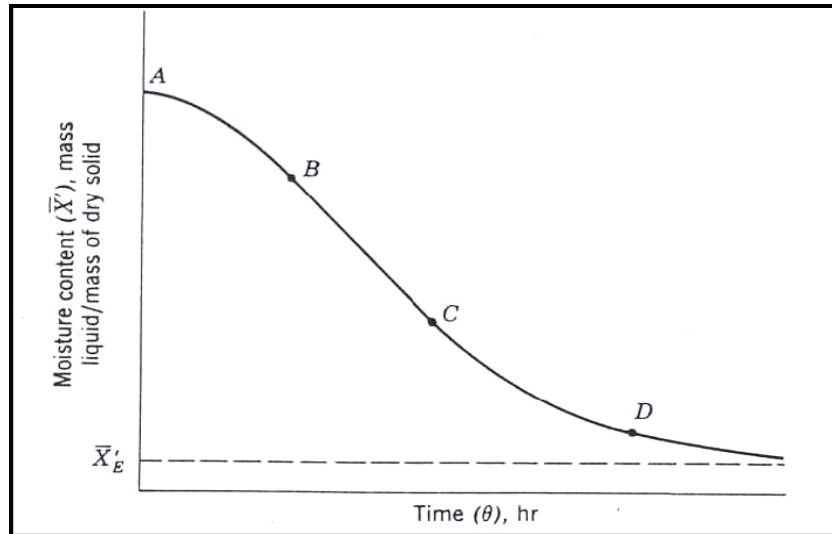
หลักการของการอบแห้ง เนื่องจากวัสดุที่จะใช้อบมีความหลากหลายในด้านคุณสมบัติ จึงไม่มีเครื่องอบแห้งชนิดใด ๆ ที่จะสามารถใช้ให้ครอบคลุมได้ในวัสดุทุกประเภท และเนื่องจากผู้ใช้มักซื้อเครื่องอบจากบริษัทผู้ผลิตมากกว่าจะออกแบบและก่อสร้างเอง อย่างไรก็ตามการเรียนรู้หลักพื้นฐานเกี่ยวกับการคำนวณหาค่าเวลาที่ใช้ อบแห้งก็มีความจำเป็น การอบแห้งหรือตากแห้งก็คือ การลดปริมาณความชื้น (Moisture content) ของผลิตภัณฑ์เพื่อป้องกันการเน่าเสียในช่วงเวลาหนึ่ง กระบวนการอบแห้งประกอบด้วย 2 กระบวนการที่สำคัญคือ การถ่ายเทความร้อนจากแหล่งความร้อนสู่ผลิตภัณฑ์ และถ่ายเทความชื้นออกจากภายในผลิตภัณฑ์มาที่ผิว และออกสู่อากาศภายนอกวัสดุซึ่งมีความชื้นอยู่ภายในเมื่อสัมผัสกับอากาศร้อน จะเกิดการถ่ายเทความร้อนขึ้นที่บริเวณพื้นผิวของวัสดุ นั้นๆ และวัสดุอบแห้งดังกล่าวจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น ความชื้นจะระเหยกลายเป็นไอออกไปจากวัสดุสู่บรรยากาศรอบข้าง กำหนดให้อุณหภูมิและความชื้นของอากาศที่ไหลผ่านวัสดุอบแห้งมีค่าคงที่ และอากาศที่ถ่ายเทความร้อนให้แก่วัสดุเป็นแบบการพาความร้อนขั้นตอนการลดลงของความชื้นสามารถแบ่งได้เป็น 3 ระยะ คือ

-ระยะเริ่มต้นของการอบแห้ง (Initial period) ระยะช่วงนี้อุณหภูมิที่พื้นผิวของวัสดุอบแห้งจะเข้าสู่ภาวะสมดุลทางความร้อน (dynamic equilibrium) และมีการระเหยของความชื้นเกิดขึ้นที่บริเวณพื้นผิวของวัสดุ อัตราการแห้งตัวของวัสดุจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

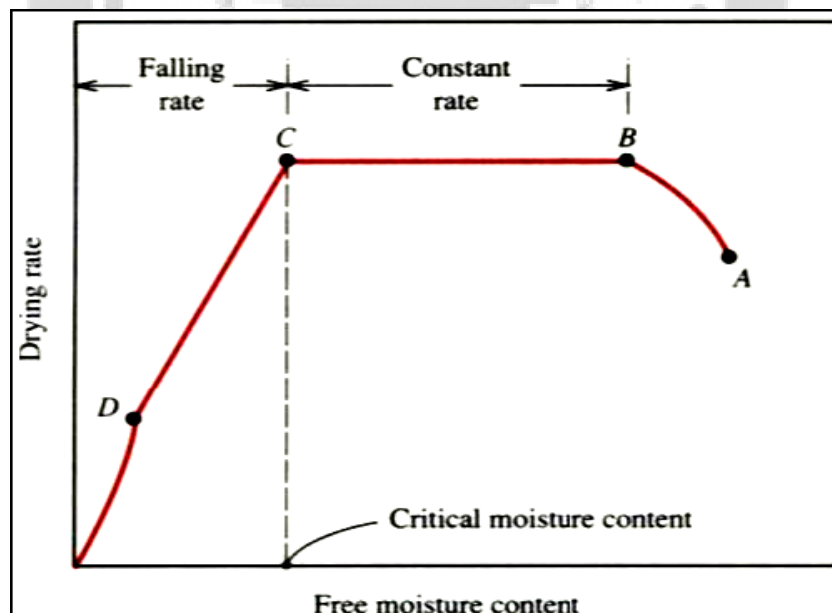
-ระยะอัตราการระเหยของไอน้ำคงที่ (Constant-rate period) ระยะนี้อุณหภูมิพื้นผิวของวัสดุอบแห้งจะมีค่าคงที่ และความชื้นที่บริเวณพื้นผิวของวัสดุจะอยู่ในสภาวะอิ่มตัว การกระจายความชื้นที่พื้นผิวของวัสดุมีค่าสม่ำเสมอ โดยที่อัตราการเคลื่อนที่ของความชื้นจากภายในวัสดุอบแห้งมายังพื้นผิววัสดุ มีค่าเท่ากับอัตราการระเหยของน้ำที่ผิววัสดุ อัตราการอบแห้งในระยะนี้จะมีค่าคงที่ และขึ้นอยู่กับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่พื้นผิวของวัสดุ

-ระยะอัตราการระเหยของไอลดลง (Falling-rate period) ระยะนี้จะเริ่มจากเมื่อความชื้นบนพื้นผิวไม่อิ่มตัว อัตราการเคลื่อนที่ของความชื้นจากภายในของวัสดุอบแห้ง ไปยังบริเวณพื้นผิวมีค่าน้อยกว่าอัตราการระเหยของความชื้นที่พื้นผิวของวัสดุอบแห้งจุดที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการระเหยที่คงที่มาเป็นช่วงที่มีอัตราการระเหยลดลงเรียกว่า จุดความชื้นวิกฤต (Critical moisture content)

การระเหยของไอน้ำจะสิ้นสุดลง เมื่อถึงจุดที่เรียกว่า ความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content) ซึ่งเป็นจุดที่ความชื้นของวัสดุที่ยังคงมีอยู่ภายในเนื้อวัสดุแต่ไม่มีการสูญเสียให้กับอากาศภายนอก

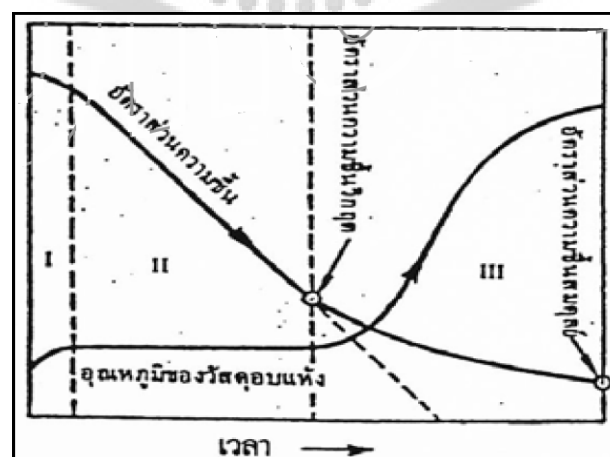


ภาพประกอบ 14 พฤติกรรมของวัสดุขณะอบ (อนุรักษ์ ครองทรัพย์. 2531)



ภาพประกอบ 15 ลักษณะเฉพาะของการอบแห้งที่ได้จากภาพประกอบ 16 (Richard D. Irwin, c. 1995)

จากภาพประกอบ 14 และภาพประกอบ 15 ช่วง AB เป็นช่วงที่วัสดุอยู่ในสภาวะที่ไม่คงที่ (Unsteady State) และกำลังปรับตัวเพื่อเข้าสู่สภาวะคงที่ที่จุด B ช่วง BC เป็นช่วงของการอบแห้งที่ความเร็วคงที่ ในช่วงนี้ผิวหน้าทั้งหมดของ วัสดุจะอิมมิดด้วยน้ำ จะมีน้ำหล่อหุ้มเป็นฟิล์มอยู่โดยรอบและมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของลมร้อน น้ำที่ระเหยออกจากผิวหน้าของ วัสดุจะถูกแทนที่ตลอดเวลาด้วยน้ำที่อยู่ภายใน วัสดุ กลไกของการถ่ายเทน้ำออกจากภายใน ออกมาสู่ผิววนอกนั้น ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของ วัสดุที่มาอบแห้ง ในกรณีการถ่ายเทน้ำจะเป็นไปในลักษณะการแพร่จากภายในเนื้อวัสดุออกมาที่ผิวหน้าถ้าอัตราส่วนช่องว่างเปิดที่ผิว (Open Void Space) กว้าง การถ่ายเทน้ำจะถูกควบคุมโดยแรงตึงผิวและแรงโน้มถ่วงภายใน วัสดุ เนื่องจากการถ่ายเทน้ำด้วยการแพร่มีอัตราการถ่ายเทช้ามากช่วงการอบแห้งก็จะไม่คงที่ ที่จุด C ผิวหน้าของวัสดุเริ่มจะมีน้ำหล่อหุ้มไม่สม่ำเสมอทั่วผิวหน้า ช่วง CD ในภาพประกอบ 15 เรียกว่าช่วงการอบแห้งที่อัตราอบแห้งลดลงช่วงแรก ในช่วงนี้ผิวหน้าของวัสดุเริ่มมีน้ำมาหล่อหุ้มน้อยลงๆ ทุกที เนื่องจากอัตราการถ่ายเทน้ำจากภายในเนื้อ วัสดุช้ากว่าอัตราการระเหยของน้ำออกจากผิวหน้าของ วัสดุ จนกระทั่งถึงจุด D ทั่วทั้งผิวหน้าของ วัสดุจะไม่มีฟิล์มของน้ำเหลืออยู่เลย น้ำที่อยู่ภายในวัสดุจะต้องแพร่ออกมาที่ผิวหน้าซึ่งไม่อิมมิดด้วยน้ำ แล้วจึงแพร่ไปสู่กระแสมร้อน กลไกการแพร่ของน้ำที่ผิวหน้าออกไปสู่ กระแสมร้อนจะมีอัตราการระเหยน้ำช้ากว่ากรณีที่ผิวหน้าของวัสดุอิมมิดด้วยน้ำ ซึ่งในกรณีนี้อุณหภูมิของวัสดุจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ได้จากภาพประกอบ 16 และเมื่อวัสดุมีความชื้นต่ำกว่าจุด D (ในภาพประกอบ 15) การระเหยทั้งหมดจะเกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุในขณะที่ความชื้นของวัสดุมีค่าลดลง ระยะทางสำหรับการนำความร้อนและการแพร่ของมวลก็จะมากขึ้นจนกระทั่ง วัสดุมีความชื้นเท่ากับความชื้นสมดุล และเป็นจุดซึ่งจะไม่เกิดการอบแห้งอีกต่อไป ช่วงการอบแห้งช่วงนี้เรียกว่า ช่วงการอบแห้งที่ความเร็วลดลงช่วงที่สอง



ภาพประกอบ 16 การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเมื่ออบแห้งวัสดุภายใต้กระแสมร้อนปริมาณมาก ที่มีอุณหภูมิ ความชื้น ความเร็วคงที่ และจุดสมดุลของวัสดุ (เรียวโซ. 2526)

จากภาพประกอบ 16 สรุปลักษณะเฉพาะของการอบแห้งได้ 3 ช่วงหลักๆ คือ I. ช่วงการให้ความร้อนเบื้องต้นแก่วัสดุอบแห้ง ช่วงนี้พลังงานความร้อนจากอากาศจะใช้ในการระเหยความชื้นและใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุจนเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศในห้องทดลองจะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่ม II. ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ ปริมาณความร้อนที่วัสดุได้รับจากอากาศร้อนจะใช้ในการระเหยความชื้นเท่านั้น III. ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ช่วงนี้ความชื้นที่ผิววัสดุได้ระเหยไปหมดแล้วเหลือแต่ความชื้นที่อยู่แกนกลางของวัสดุ ซึ่งอัตราการแพร่ของความชื้นจากแกนกลางมาที่ผิวของวัสดุช้ากว่าอัตราการระเหยของความชื้นที่ผิวจึงทำให้อัตราการอบแห้งลดต่ำลง

ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง

สภาวะการอบแห้งสามารถเปลี่ยนแปลงได้ เนื่องจากการดำเนินงานและการควบคุม สภาวะภายนอกที่สำคัญและมีผลต่ออัตราการอบแห้งวัสดุได้แก่ อุณหภูมิของลมร้อน ความชื้นสัมพัทธ์ของลมร้อนและน้ำหนักของวัสดุอบแห้งต่อหน่วยพื้นที่ นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นๆ เช่น การกวน การแบ่งขนาดของชิ้นวัสดุ

1. อุณหภูมิของลมร้อน โดยปกติการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง แบบถาดที่ความดันอบแห้งจะถูกควบคุมโดยเครื่องควบคุมอุณหภูมิ ในกรณีดังกล่าวถือว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยคงที่ ในกรณีที่มีการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิในขณะอบแห้งจะถือว่าอุณหภูมิมีผลต่ออัตราการอบแห้งเป็นอย่างมาก ในกรณีการอบแห้งวัสดุที่ความเร็วลมร้อนคงที่ อัตราการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับผลต่างของอุณหภูมิกระเปาะเปียกกับกระเปาะแห้งของอากาศร้อนเท่านั้น ดังนั้นอัตราการอบแห้งมีค่าสูง เมื่ออุณหภูมิกระเปาะแห้งมีค่าสูงและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีค่าต่ำสุด ในช่วงของอัตราการอบแห้งคงที่ อัตราการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและผลต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศแห้งเท่านั้น ส่วนในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงวัสดุอบแห้งมีแนวโน้มจะแห้งเร็วขึ้นถ้าอุณหภูมิในการอบแห้งเพิ่มขึ้น

2. ความเร็วของลมร้อน ความเร็วของลมร้อนขึ้นอยู่กับ องค์ประกอบของอากาศ อุณหภูมิและการนำอากาศที่ใช้แล้วมาผสมกับอากาศแวดล้อมแม้ว่าการนำที่ใช้แล้วมาผสมกับอากาศแวดล้อมทำให้องค์ประกอบและคุณสมบัติอากาศร้อน เปลี่ยนแปลงไป แต่จะไม่ มีผลต่อความเร็วของลมร้อน โดยปกติในการอบแห้งจะควบคุมให้ความเร็วของลมร้อนคงที่ตลอดช่วงของการอบแห้ง ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วของลมร้อน ความเร็วของลมร้อนมีผลต่ออัตราการอบแห้งเนื่องจากความเร็วของลมร้อนจะมีผลประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ดังนั้นถ้าปัจจัยอื่นๆ คงที่การอบแห้งที่ความเร็วลมร้อนสูงจะทำให้อัตราการอบแห้งดีขึ้น

3. ความชื้น ของลมร้อน ความชื้นจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของอากาศที่ใช้แล้วกับอากาศแวดล้อมและยังขึ้นอยู่กับอัตราการอบแห้งที่เวลาใด ๆ หากลมร้อนมีความชื้นสูงจะทำให้ความสามารถในการดึงน้ำในวัสดุอบแห้ง ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของลมร้อนลดลง นั่นคืออัตราการอบแห้ง จะลดลงด้วยและในทางทฤษฎีสามารถที่จะควบคุมความชื้นของลมร้อนได้ โดยการควบคุมการผสมของอากาศที่ใช้แล้วกับอากาศแวดล้อมซึ่งหากเพิ่มการผสมของอากาศที่ใช้แล้วกับอากาศแวดล้อมมากขึ้นเท่าใด อัตราการอบแห้งจะลดลงมากขึ้นเท่านั้น ในทางปฏิบัติแล้ว ไม่สามารถควบคุมการผสมของอากาศที่ใช้แล้วกับอากาศแวดล้อมได้ แน่นนอน และวิธีที่นิยมทดลองกันคือ การลองผิดลองถูก หรือหาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้น อัตราการอบแห้งขณะใดขณะหนึ่งและสัดส่วนของการผสมของอากาศที่ใช้แล้วกับอากาศแวดล้อมโดยการสมมูลมวลสาร

4. นำหนักของวัสดุต่อหน่วยพื้นที่หรือความหนาของชั้นวัสดุ ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ อัตราการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับลักษณะของพื้นผิววัสดุเท่านั้น ดังนั้นความหนาของวัสดุไม่มีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้งในช่วงนี้เลย แต่เมื่อถึงช่วงอัตราการอบแห้งลดลง การแพร่ ของน้ำจากภายในสู่พื้นผิวของวัสดุซึ่งเกิดการระเหยจะเป็นตัวควบคุมอัตราการอบแห้ง ในช่วงนี้การเพิ่มความหนาของชั้นวัสดุจะทำให้ อัตราการอบแห้งลดลง ดังนั้นต้องกำหนดความหนาของชั้นวัสดุที่เหมาะสมด้วย

5. ปัจจัยอื่น ๆ นอกจากอุณหภูมิของลมร้อน ความเร็วของลมร้อน ความชื้นสัมพัทธ์ และความหนาของชั้นวัสดุอบแห้งแล้วยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อการอบแห้ง เช่น การสลับตำแหน่งของถาดบรรจุวัสดุขณะทำการอบแห้ง ขนาดของชั้นวัสดุอบแห้ง

อุปกรณ์อบแห้ง (Drying Equipment)

เพื่อเป็นตัวอย่างจะกล่าวถึงเครื่องอบแห้งสองกลุ่มได้แก่เครื่องอบสำหรับของแข็งแบบเม็ดหรือกึ่งแข็งเปื่อย ขณะทีกลุ่มที่สองได้แก่เครื่องอบสำหรับ slurry หรือของเหลว

- เครื่องอบแห้งแบบลมร้อน (hot air dryer)

เครื่องอบแห้งชนิดนี้มีส่วนประกอบหลักคือ เครื่องให้ความร้อน (heater) ใ้ปัดสำหรับเป่าลมร้อนกระจายทั่ววัสดุ และทางระบายไอน้ำเพื่อให้ระเหยออกสู่ภายนอก ถ้าเป็นวัสดุที่มีขนาดใหญ่ควรจะใช้ระบบที่ละชุด (batch process) เพราะใช้เวลาอบนาน ส่วนวัสดุที่เป็นชิ้นเล็กๆ เช่น ถั่ว ธัญพืช หรือข้าวโพดสามารถใช้ระบบต่อเนื่องได้

ส่วนประกอบ

1. พัดลม	2. มอเตอร์พัดลม	3. ท่อลมออก	4. ท่อลมเข้า
5-7. ท่อลมส่ง	8. ห้องอบ	9. ชั้นวาง	10. ท่อลม
11. ท่อลมออก	12. ท่อลมเวียนกลับ	13. ประตูปิด	14. ตัวควบคุมลม

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{v} Y_i) = -\nabla \cdot \bar{J}_i + S_i \quad (2.11)$$

กฎของฟิคส์ (Fick,s Law) สำหรับการแพร่จากการพิจารณาของผสมที่มีความแตกต่างของเกรเดียนต์ความเข้มข้นจะทำให้เกิดการแพร่ของสาร สามารถบอกอัตราการแพร่ของสารต่อพื้นที่ได้ การแพร่มวลในการไหลแบบราบเรียบ

$$\bar{J}_i = -\rho D_{i,m} \nabla Y_i \quad (2.12)$$

การแพร่มวลในการไหลแบบปั่นป่วน

$$\bar{J}_i = -\left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t}\right) \nabla Y_i \quad (2.13)$$

เมื่อ \bar{J}_i คือ ฟลักซ์ของการแพร่ของสาร i [$kg/m^2 \cdot s$]

ρ คือ ความหนาแน่นของของผสม [kg/m^3]

Y_i คือ สัดส่วนเชิงมวลของสาร i

$D_{i,m}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ของสาร i ในของผสม [m^2/s]

Sc_t คือ สมิตินัมเบอร์สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน

\bar{v} คือ องค์ประกอบของความเร็ว [m/s]

S_i คือ เป็นอัตราการเกิดที่เพิ่มจากการกระจายของสารที่กำหนดโดยผู้ใช้

สัมประสิทธิ์ของการแพร่ของไอน้ำในอากาศหาได้จากความสัมพันธ์

$$D_{H_2O,Air} = 1.97 \times 10^{-5} \left(\frac{P_0}{P}\right) \left(\frac{T}{T_0}\right)^{1.685} ; 273K < T < 373K \quad (2.14)$$

เมื่อ $P_0 = 1atm, T_0 = 256k$

ในปริมาตรควบคุมสามารถหาจำนวนความหนาแน่นของแต่ละสาร (Species) ได้โดย เท่ากับจำนวนโมเลกุลของสาร i ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร

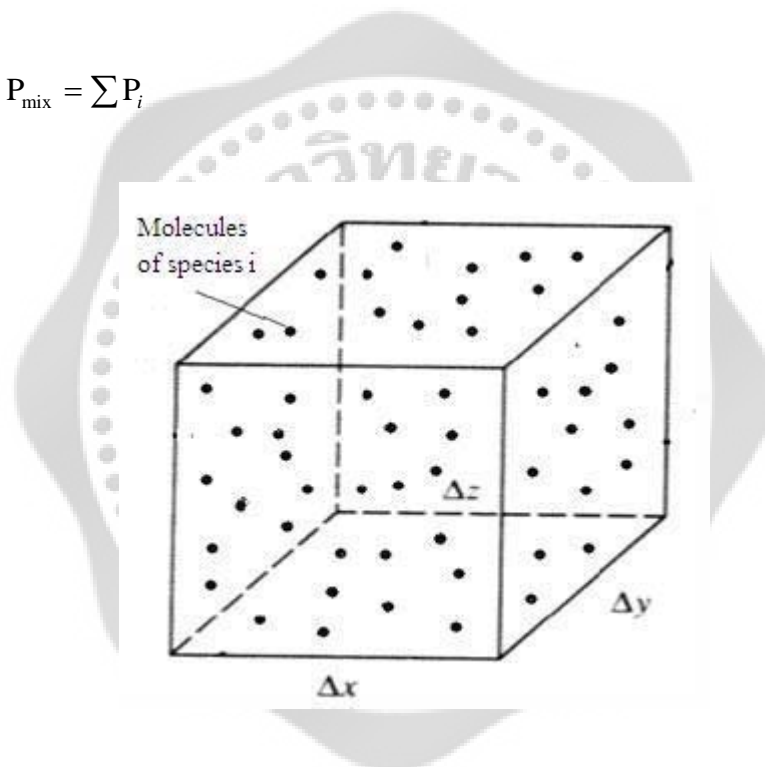
$$\rho_i = N_i / \Delta V \quad (2.15)$$

สัดส่วนเชิงมวล (Mass Fraction) ของแต่ละสารในปริมาตรควบคุมสามารถหาได้จาก ความสัมพันธ์ของความหนาแน่น

$$Y_i = \frac{\rho_i}{\rho}; \quad \rho = \sum \rho_i \quad (2.16)$$

จากกฎของดาลตัน (Dalton Law) ได้ให้ความสัมพันธ์ของความดันในของผสมจะเท่ากับ ผลรวมของความดันย่อย (Partial Pressure) ของของแต่ละสารและความดันย่อยของแต่ละสารหาได้จากกฎของก๊าซอุดมคติ สมการกฎของดาลตันคือ

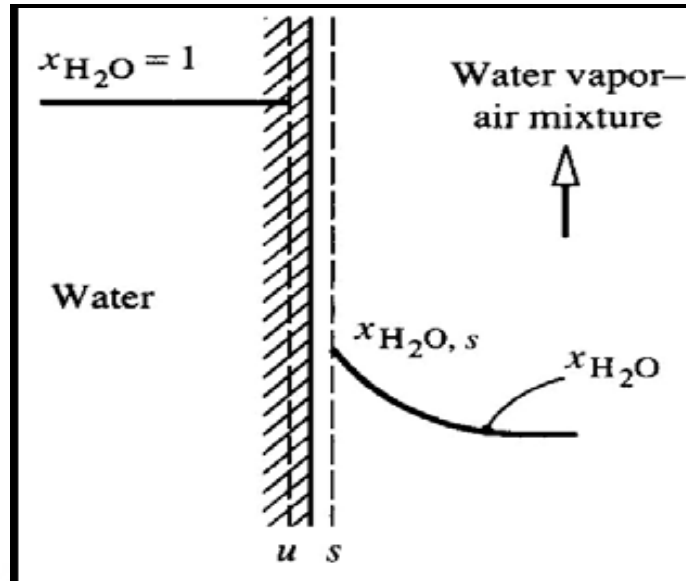
$$P_{\text{mix}} = \sum P_i \quad (2.17)$$



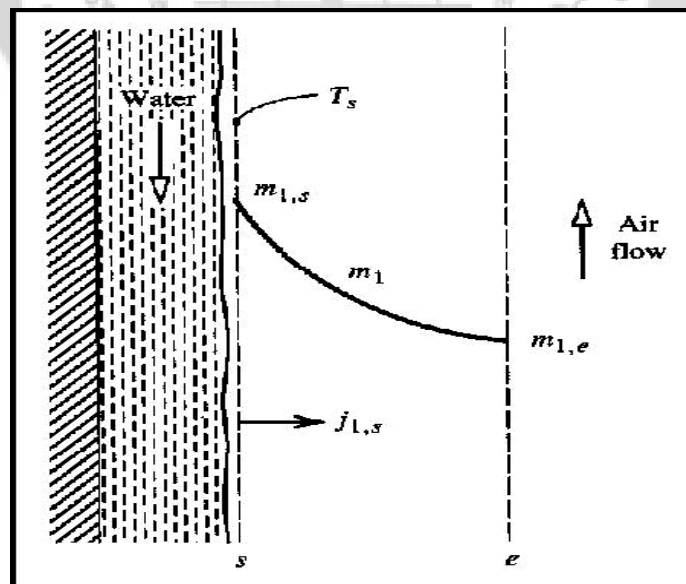
ภาพประกอบ 18 ชิ้นส่วนของปริมาตรควบคุมที่ใช้กำหนดความหนาแน่น (อภัยวงศ์ จันทร์ช่างพูด. 2549)

2. ความเข้มข้นที่ผิวร่วม (Concentration at Interfaces) พิจารณาผิวน้ำที่วัสดุในขณะที น้ำกำลังระเหย พบว่าจะมีความต่อเนื่องของอุณหภูมิที่หน้า ตัดของผิวร่วมระหว่างน้ำและไอน้ำ แต่ใน ส่วนความเข้มข้นจะไม่ต่อเนื่องซึ่งกันและกันตาม ภาพประกอบ 19 กำหนดความเข้มข้นที่ผิวร่วมให้ จินตนาการผิวเป็น u และ s ทั้งสองข้างของผิวจริง สำหรับน้ำที่กำลังระเหยเข้าไปในกระแสอากาศ ดังนั้นค่าสถานะของของเหลวจะห้อย u ส่วนสถานะก๊าซจะห้อย s ถ้าไม่สนใจอากาศในน้ำ $X_{H_2O,u} = 1$ ส่วนการหาค่า $X_{H_2O,s}$ ความจริงแล้วได้ใช้แนวคิดว่าด้วยของผสมเป็นไอน้ำและอากาศในทาง

เทอร์โมไดนามิกส์จะใช้ข้อมูลที่ผิว u เท่ากับผิว s เมื่อพิจารณาน้ำที่ผิวของวัสดุ น้ำที่วัสดุจะระเหยเป็นไอน้ำสู่อากาศรอบๆ ที่มีความเข้มข้นของไอน้ำน้อยกว่าที่ผิวของวัสดุตามภาพประกอบ 20



ภาพประกอบ 19 ความเข้มข้นที่ผิวร่วมของน้ำและอากาศ (อภัยวงศ์ จันทร์ช่างพูด, 2549)



ภาพประกอบ 20 รูปการระเหยของฟิล์มน้ำที่ผิวเข้าสู่กระแสอากาศ (อภัยวงศ์ จันทร์ช่างพูด, 2549)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหล

ในการคำนวณปัญหา ที่เกี่ยวกับการไหลโดยปกติจะมียอด 3 ประการ คือ ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยเชิงเส้นไฮเพอร์โบลิกของปัญหาและรูปร่างลักษณะของปัญหา ซึ่งในการแก้ปัญหาเรื่องการไหลระบบสมการเชิงอนุพันธ์ที่เกี่ยวข้องคือ สมการอนุพันธ์มวล สมการโมเมนตัม และสมการพลังงาน ซึ่งระบบสมการย่อยนี้อธิบายถึงความเป็นจริงของการไหล สมการเหล่านี้จะประกอบไปด้วยพจน์ที่อยู่ในรูปแบบของค่าอนุพันธ์ (Derivative) ต่างๆ กัน ซึ่งต้องใช้ความเข้าใจเป็นอย่างดี จึงจะช่วยให้เกิดผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องแม่นยำน่าเชื่อถือและสามารถอธิบายได้ ซึ่งจะนำไปสู่ความเข้าใจในปัญหาได้ดียิ่งขึ้น

สมการเชิงอนุพันธ์มวล (Conservation of Mass)

เป็นสมการเชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่งที่อธิบายการไหลของมวลซึ่งประกอบไปด้วยตัวแปรทั้งหมด 4 ตัว (ρ, u, v, w) หรือเรียกอีกชื่อว่า สมการความต่อเนื่อง (Continuity) โดยที่ตัวแปรเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงไปได้ตลอดโดเมนของการไหลซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2.19a)$$

สามารถเขียนในรูปเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{V} = 0 \quad (2.19b)$$

อธิบายได้ว่า ปริมาณทางด้านซ้ายเทอมแรกคือ อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลภายในต่อหน่วยปริมาตร ส่วนเทอมที่สองการไหลเข้าออกของมวลต่อหน่วยปริมาตรถ้าเป็นการไหลที่ไม่อัด (Incompressible Flow) ค่าความหนาแน่น (ρ) จะมีค่าคงที่ ดังนั้นสมการ (2.19b) จะเปลี่ยนเป็น

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (2.19c)$$

หรือ

$$\text{div} \cdot \vec{V} = 0 \quad (2.19d)$$

สมการเชิงอนุรักษ์โมเมนตัม(Conservation of Momentum Equation)

ได้ถูกประดิษฐ์ขึ้นมาจากกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน(Newton's Second Law) ด้วยความสัมพันธ์ระหว่างมวลกับความเร่ง

$$F = ma \quad (2.20)$$

เรียกสมการเหล่านี้ว่าสมการนาเวียร์-สโตกส์(Navier-Stoke Equations) เพื่อเป็นการให้เกียรติแก่ M.Navier and G.Stokes

$$\text{แกน X: } \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{V} u) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \nabla \cdot (\mu \nabla u) + \rho f_x \quad (2.21a)$$

$$\text{แกน Y: } \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{V} v) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \nabla \cdot (\mu \nabla v) + \rho f_y \quad (2.21b)$$

$$\text{แกน Z: } \frac{\partial \rho w}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{V} w) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \nabla \cdot (\mu \nabla w) + \rho f_z \quad (2.21c)$$

สมการข้างต้นเขียนในรูปแบบอนุรักษ์ (Conservation Form) สามารถอธิบายได้ว่าผลรวมของแรงทั้งหมดที่กระทำต่อปริมาตรควบคุมจะต้องเท่ากับผลรวมของอัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมภายในปริมาตรควบคุม(อัตราการไหลเข้าออกสุทธิของโมเมนตัม)ในงานวิจัยได้ตั้งสมมุติฐานว่าของไหลเป็นแบบนิวโตเนียน (Newtonian Fluid) จึงนำกฎความเสียดทานของสโตกส์ (Stokes's Law) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ ของอัตราการเปลี่ยนแปลงความเค้น กับความเคียดเป็นเส้นตรงจึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับสมการข้างต้นได้ดังนี้

$$\sigma_x = -\frac{2}{3} \mu \nabla \bar{V} + 2\mu \frac{\sigma u}{\sigma x} \quad (2.22a)$$

$$\sigma_y = -\frac{2}{3} \mu \nabla \bar{V} + 2\mu \frac{\sigma v}{\sigma y} \quad (2.22b)$$

$$\sigma_z = -\frac{2}{3} \mu \nabla \bar{V} + 2\mu \frac{\sigma w}{\sigma z} \quad (2.22c)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left[\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right] \quad (2.22d)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left[\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right] \quad (2.22e)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left[\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right] \quad (2.22f)$$

โดย μ คือ ความหนืดพลศาสตร์ (Dynamic Viscosity) หรือเรียกว่าความหนืดที่หนึ่ง (First Viscosity) และ λ คือ ค่าความหนืดที่สอง (Second Viscosity) ซึ่งสโตกส์ได้ตั้งสมมติฐาน (Stokes's Hypothesis) ดังนี้

$$\lambda = -\frac{2}{3}\mu \quad (2.23)$$

สมมติฐานนี้ใช้กับของไหลที่อัดตัวไม่ได้ (Incompressible Flow) ซึ่งค่าความหนาแน่น ρ จะคงที่ จากสมการอนุรักษ์มวลจะทำให้ $\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$ หรือ $\text{div} \cdot \nabla = 0$ ทำให้เทอมของความหนืดที่สองนั้นไม่ได้ถูกนำมาคำนวณด้วยแทนสมการ (2.8a-f) ในสมการ (2.17) ได้ดังนี้

แกน X:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} &= \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \nabla \cdot \mathbf{V} + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + f_x \end{aligned} \quad (2.24a)$$

แกน Y:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} &= \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \nabla \cdot \mathbf{V} + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + f_y \end{aligned} \quad (2.24b)$$

แกน Z:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho ue)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} &= \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \nabla \cdot \mathbf{V} + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) + f_z \end{aligned} \quad (2.24c)$$

สมการเชิงอนุรักษ์พลังงาน(Conservation of Energy)

สมการนี้ประดิษฐ์ มาจากกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ ที่กล่าวว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานในก้อนมวลจะเท่ากับปริมาณฟลักซ์ความร้อนที่ให้แก่มวลบวกกับอัตราของงานที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงต่างๆ ที่กระทำบนก้อนมวลนั้น

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(e \frac{V^2}{2} \right) \right] + \vec{\nabla} \cdot \left[\rho \left(e \frac{V^2}{2} + \vec{V} \right) \right] = \rho \bar{Q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\partial (u)}{\partial x} - \frac{\partial (vp)}{\partial y} + \frac{\partial (u\sigma_z)}{\partial x} + \frac{\partial (u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial (v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial (v\sigma_z)}{\partial y} + \rho \vec{f} \cdot \vec{V} \quad (2.25)$$

เมื่อ u คือ ความเร็วย่อยในแนวแกน x , (m/s)

v คือ ความเร็วย่อยในแนวแกน y , (m/s)

w คือ ความเร็วย่อยในแนวแกน z , (m/s)

ρ คือ ความหนาแน่น(Density), (kg/m^3)

f คือ ความเร็วเข้าสู่ศูนย์กลางของโลก , (m/s^2)

$$\text{และ } \vec{\nabla} \equiv \frac{\partial}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial}{\partial z} \hat{k} \quad (2.26)$$

$$\vec{V} \equiv \left(u\hat{i} + v\hat{j} + w\hat{k} \right) \quad (2.27)$$

สมการที่กล่าวมาทั้งหมดอาจรวมเรียกทั้ง ระบบว่า สมการนาเวียร์ - สโตกส์ (Navier-Stokes Equations) ซึ่งเป็นสมการที่แก้ได้ยากมากทางคณิตศาสตร์ ไม่ว่าจะเขียนระบบสมการย่อยเหล่านี้ในรูปแบบใดก็ตามด้วยเหตุผล 2 ประการ คือ ประการแรกการเป็นระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Coupled Partial Differential Equations) ซึ่งผลลัพธ์ที่ทำได้ เช่น u , v , p และ T ต้องสอดคล้อง (Satisfy) กับทั้งระบบสมการไปพร้อมๆ กัน ความยากประการที่สองคือ สมการเหล่านี้อยู่ในรูปแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Equations) ซึ่งยากที่จะหาคำเฉลยแน่นอนตรงถึงแม้ว่าเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) และลักษณะรูปร่าง (Geometry) ของปัญหาจะง่ายเพียงไรก็ตาม ทำให้วิธีการแก้ปัญหาของไหลด้วยพลศาสตร์การคำนวณ โดยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ได้เข้ามามีบทบาทเป็นที่นิยมในปัจจุบัน และผลลัพธ์ที่ได้สามารถแสดงถึงลักษณะการไหลได้อย่างแท้จริงนำไปสู่ความเข้าใจในปัญหาได้เป็นอย่างดี

สมการที่กล่าวมาข้างต้น (2.19-2.25) มีตัวแปรที่ไม่รู้ค่า (Unknowns) ทั้งหมด 6 ตัว คือ ρ, u, v, w, P และ e แต่มี 5 สมการ เราจึงต้องหาสมการเพิ่มเติมอีก 1 สมการ สำหรับของไหลที่อัดตัวได้ (Compressible Flow) ในกรณีนี้ให้ก๊าซเป็นก๊าซสมบูรณ์ (Perfect Gas)

$$p = \rho RT \quad (2.28)$$

เมื่อ R คือ ค่าคงตัวสากลของก๊าซ (Universal Gas Constant)

เรียกสมการ (2.28) นี้ว่า สมการของสถานะ (Equation of State) แต่สมการนี้ได้เพิ่มตัวแปรที่ไม่รู้ค่าอีก 1 ตัว คือ T (Temperature) เราจึงต้องหาสมการอีก 1 สมการมาช่วย คือสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ T กับพลังงานภายใน e

$$e = c_v T \quad (2.29)$$

คือ c_v ความร้อนจำเพาะของก๊าซที่ปริมาตรคงตัว (Specific Heat at Constant Volume) ระบบสมการควบคุม (Governing Equations) ทั้งหมดสามารถเขียนให้อยู่ในรูปดังนี้

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial z} = J \quad (2.30)$$

โดยที่

$$U = \begin{Bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \end{Bmatrix}, \quad F = \begin{Bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p - \tau_{xx} \\ \rho vu - \tau_{xy} \\ \rho wu - \tau_{xz} \\ \rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) u + pu - k \frac{\partial T}{\partial x} - u\tau_{xx} - v\tau_{xy} - w\tau_{xz} \end{Bmatrix}$$

$$G = \begin{Bmatrix} \rho v \\ \rho uv - \tau_{yx} \\ \rho v^2 + p - \tau_{yy} \\ \rho wv - \tau_{yz} \\ \rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) v + pv - k \frac{\partial T}{\partial y} - u\tau_{yx} - v\tau_{yy} - w\tau_{yz} \end{Bmatrix}$$

$$H = \left\{ \begin{array}{l} \rho w \\ \rho uw - \tau_{zx} \\ \rho vw - \tau_{zy} \\ \rho w^2 + p - \tau_{zz} \\ \rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) w + pw - k \frac{\partial T}{\partial z} - u\tau_{zx} - v\tau_{zy} - w\tau_{zz} \end{array} \right\}, J = \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ f_x \\ f_y \\ f_z \\ (uf_x + vf_y + wf_z) + \rho \dot{q} \end{array} \right\}$$

F, G, H เรียกว่า Flux Terms หรือ Flux Vectors, J เรียกว่า Source Term, U เรียกว่า Solution Term แก่สมการ (2.30) จะได้ว่า

$$\frac{\partial U}{\partial t} = J - \frac{\partial F}{\partial x} - \frac{\partial G}{\partial y} - \frac{\partial H}{\partial z} \quad (2.31)$$

จะได้ U ซึ่งเป็น Flux Variables เป็นคำตอบซึ่งสามารถนำไปหาค่าของ Primitive Variables

$$\begin{aligned} \rho &= \rho \\ u &= \frac{\rho u}{\rho} \\ v &= \frac{\rho v}{\rho} \\ w &= \frac{\rho w}{\rho} \\ e &= \frac{\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) - \frac{\rho (u^2 + v^2 + w^2)}{2}}{\rho} \end{aligned}$$

ในกรณีที่การไหลเป็นแบบคงตัว (Steady State)

$$\frac{\partial U}{\partial t} = 0 \quad (2.32)$$

และ

$$\frac{\partial F}{\partial x} = J - \frac{\partial G}{\partial y} - \frac{\partial H}{\partial z} \quad (2.32)$$

คำตอบของสมการนี้คือ F ได้แก่

$$\begin{aligned}\rho u &= c_1 \\ \rho u^2 &= c_2 \\ \rho uv &= c_3 \\ \rho uw &= c_4 \\ \rho u \left(e + \frac{u^2 + v^2 + w^2}{2} \right) + pu &= c_5\end{aligned}$$

สมการที่กล่าวมาข้างต้นสามารถแก้ปัญหาคาร์ไหลได้ทุกชนิดๆ แต่คำตอบจะแตกต่างกันไปตามเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) ที่กำหนด ซึ่งแตกต่างกันไปแต่ละปัญหา

ปริมาณไร้มิติที่เกี่ยวข้อง

ตัวเลขนัสเซลท์ (Nusselt Number, Nu) ค่า Nu เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับ Characteristic length โดยค่า Nu เป็นตัวแทนแสดงอัตราส่วนระหว่างการถ่ายเทความร้อนโดยการพาต่อการถ่ายเทความร้อนโดยการนำ โดยค่าความยาวจำเพาะที่ใช้คือค่าความสูงของช่องอากาศ (H) ค่า Nu_H มีนิยามว่า

$$Nu_H = \frac{hH}{k} = \frac{Q'H}{Ak(T_p - T_{air})} \quad (2.33)$$

ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number, Re) ค่า Re เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับความยาวจำเพาะ (Characteristic length) โดยเป็นตัวแทนแสดงถึงอัตราส่วนระหว่างแรงเฉื่อย (Inertia force) ต่อแรงหนืด (Viscous force) ค่าความยาวจำเพาะที่ใช้คือค่าความสูงของช่องอากาศ (H) ค่า Re_H มีนิยามว่า

$$Re_H = \frac{VH}{\nu} \quad (2.34)$$

ตัวเลขพรานด์ลท์ (Prandtl Number, Pr) ค่า Pr เป็นค่าที่ขึ้นกับคุณสมบัติของสารนั้น โดยค่า Pr เป็นตัวแทนแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านพลังงานโดยกระบวนการแพร่ โดยสำหรับแก๊สแล้วค่า Pr นั้นมีค่าประมาณ 1

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad (2.35)$$

แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน $RNG-k-\varepsilon$ (renormalization group) แบบจำลอง $RNG-k-\varepsilon$ Model ได้มาจากการใช้เทคนิคทางสถิติ (เรียกว่า renormalization group) โดยจะมีรูปแบบที่คล้ายคลึงกับแบบจำลอง standard $k-\varepsilon$ แต่ได้รวมสิ่งเหล่านี้เข้าไปด้วย แบบจำลอง RNG ได้มีพจน์ที่เพิ่มเข้ามาในสมการ ε ซึ่งช่วยให้เพิ่มความแม่นยำสำหรับการไหลที่มีความเครียด เปลี่ยนแปลงกะทันหัน ผลกระทบสำหรับการหมุนวนบนการไหลปั่นป่วนได้รวมอยู่ในแบบจำลอง RNG , ช่วยเพิ่มความแม่นยำให้กับการคำนวณการไหลหมุนวน ทฤษฎี RNG ได้มีสูตรสำหรับ turbulent Prandtl numbers, โดยขณะที่ standard $k-\varepsilon$ จะกำหนดให้เป็นค่าคงที่ ขณะที่แบบจำลอง standard $k-\varepsilon$ เป็นแบบจำลอง high Reynolds number, ทฤษฎี ได้มีสมการอนุพันธ์สำหรับความหนืดที่มีผลต่อการไหลซึ่งคำนวณสำหรับผลกระทบที่ low Reynolds number โดยผลกระทบที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับที่บริเวณขอบเขตใกล้เคียง แบบจำลอง $RNG-k-\varepsilon$ นี้ได้มาจากสมการ Navier-Stokes โดยใช้เทคนิคทางสถิติที่เรียกว่า “Renormalization Group” (RNG) แต่ก็มีแตกต่างระหว่างแบบจำลองนี้กับแบบจำลอง Standard $k-\varepsilon$ อยู่บ้าง นั่นคือ วิธีการในการคำนวณหา Turbulent Viscosity ซึ่งจะรวมพจน์ของการหมุนวนในสมการ ε ไปด้วย

ฟังก์ชันต่างๆในสมการ ε ของแบบ $RNG-k-\varepsilon$ ได้ถูกพัฒนาให้มีความแม่นยำ ในการนำไปใช้ในกรณีต่างๆมากขึ้น เช่น กรณี Complex Shear Flow, การไหลที่มีความเครียดสูง, Swirl Flow และ Separation Flow เนื่องจากแบบจำลองนี้ได้ผลของการหมุนวนที่มีผลต่อความปั่นป่วนไว้ ด้วยทำให้ผลที่ได้มีความแม่นยำมากกว่าแบบจำลอง Standard $k-\varepsilon$

สำหรับแบบจำลอง standard $k-\varepsilon$ การหาค่า Reynolds Stresses ($-\overline{u_i u_j}$) ส่วนใหญ่ จะใช้สมการ Boussinesq เข้ามาช่วยดังแสดงในสมการ 2.34 ข้อดีของการทำเช่นนี้ คือ ใช้เวลาในการประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์น้อย แต่จุดด้อยของวิธีการนี้ คือ การที่เรากำหนดให้ μ_t เป็นค่า Isotropic

$$-\overline{\rho u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (2.36)$$

Transport Equations ของ k และ ε ในแบบจำลอง $RNG-k-\varepsilon$ นี้แสดงไว้ในสมการที่ 2.36

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\alpha_k \mu_t \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b + \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (2.37)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\alpha_k \mu_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (2.38)$$

โดยที่ G_k, G_b and Y_M จะมีลักษณะเดียวกับแบบจำลอง standard $k-\varepsilon$ พจน์ที่มีความแตกต่างระหว่างแบบจำลอง $RNG-k-\varepsilon$ กับแบบจำลอง standard $k-\varepsilon$ คือ α_k และ α_ε ซึ่งเรียกว่า Inverse of Prandtl Numbers ค่าเริ่มต้นของ α_k และ α_ε จะใช้ค่าเดียวกัน คือ 1.393 พจน์ที่มีความแตกต่างที่สำคัญที่สุด คือ R_ε ดังที่จะเห็นในสมการ 2.37 ซึ่งเป็นพจน์ของการไหลแบบหมุนวน และนิยามได้ตามสมการที่ 2.38

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0}\right) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{1}{k} \quad (2.39)$$

Turbulent Viscosity ในแบบจำลอง $RNG-k-\varepsilon$ นี้จะรวมผลของการหมุนวนไว้ด้วย Turbulent Viscosity ที่ได้พัฒนาขึ้นนี้แสดงไว้ในสมการที่ 2.39 ซึ่งเป็นสิ่งที่ทำให้แบบจำลองนี้มีความแม่นยำกว่าแบบจำลอง standard $k-\varepsilon$

$$\mu_i = \mu_{i,SKE} \cdot f\left(\alpha_s, S, \frac{k}{\varepsilon}\right) \quad (2.40)$$

ค่า $\mu_{i,SKE}$ ในสมการที่ 2.38 สามารถหาได้จากสมการ 2.40

$$\mu_i = f\left(\rho \frac{k^2}{\varepsilon}\right) = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.41)$$

ในแบบจำลอง standard $k-\varepsilon$ และสำหรับค่าเริ่มต้นของ α_s เท่ากับ 0.05 และ S คือ Swirl Number ซึ่งโปรแกรมกำหนดให้ใช้ค่าเท่ากับ 0.5 สำหรับการไหลที่มีการหมุนวนสูง ค่าคงที่ต่างๆ ในสมการ 2.39-2.41 ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยทฤษฎี RNG จะได้ว่า $C_{1\varepsilon} = 1.42, C_{2\varepsilon} = 1.68, C_\mu = 0.0845$

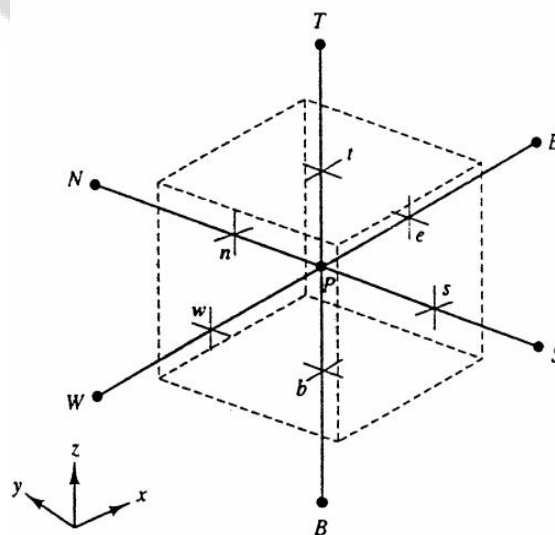
ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method)

ในการหาผลเฉลยของสมการควบคุม (Governing equation) ซึ่งอยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยซึ่งคู่ควบกันอยู่ ได้ใช้หลักวิธีพื้นฐานของปริมาตรควบคุม ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลข โดยแบ่งขอบเขตการคำนวณออกเป็นปริมาตรควบคุม มีย่อย ๆ ทำการอินทิเกรตสมการควบคุมในแต่ละปริมาตรควบคุม พร้อมทั้งจัดให้อยู่ในรูปของสมการพีชคณิต ทำการดิสครีตสมการควบคุม ซึ่งอยู่ในรูปอินทิกรัล และทำการเชื่อมโยงความสัมพันธ์ของปริมาตรต่าง ๆ ในปริมาตรควบคุมย่อยหนึ่ง ๆ กับปริมาตรต่าง ๆ ในปริมาตรควบคุมย่อยข้างเคียงให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้น จากนั้นจึงทำการแก้สมการเพื่อหาผลเฉลยต่อไป ซึ่งระเบียบวิธีดังกล่าวเรียกว่าวิธีการคำนวณแบบปริมาตรสี่บเนื้อง (Finite volume method) และจะได้อธิบายต่อไป

รูปทั่วไปของสมการการส่งถ่ายปริมาณสเกลลาร์ (ϕ) ในปริมาตรควบคุมใด ๆ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอินทิกรัลได้ดังนี้

$$\int_A \rho \phi \vec{u} \cdot \vec{n} dA = \int_A \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot \vec{n} dA + \int_{CV} S_\phi dV \quad (2.42)$$

โดยที่ ρ คือ ความหนาแน่น \vec{u} คือ เวกเตอร์ความเร็ว A คือ พื้นที่ผิวของปริมาตร Γ_ϕ คือสัมประสิทธิ์การแพร่ของ ϕ $\nabla \phi$ คือ ค่าความชันของ ϕ S_ϕ คือ แหล่งกำเนิด (Source) ของ ϕ ต่อหน่วยปริมาตร เทอมต่างๆ ในสมการที่ (2.34) มีความหมายดังนี้ เทอมแรกทางด้านซ้ายของสมการเป็นเทอมที่ขึ้นอยู่กัเวลา เทอมแรกทางด้านขวาของสมการ เป็นเทอมของการพา ส่วนเทอมที่สองด้านขวาของสมการเป็นเทอมการแพร่ การหาค่าอินทิเกรตสมการข้างต้นเป็นขั้นตอนต่อไปของการคำนวณแบบปริมาตรสี่บเนื้อง ในการวิเคราะห์การไหลแบบ 3 มิติ จะกำหนดให้ค่า ϕ มีค่าเป็น u, v และ w ต่อไปเราจะพิจารณาปริมาตรควบคุมใดๆ ในภาพประกอบ 21



ภาพประกอบ 21 ปริมาตรควบคุม 3 มิติ (จำเนียร สุวะไกร. 2550)

ภาพประกอบ 21 จุด P ตัวแทนของ ปริมาตรจะอยู่ตำแหน่งกลางของปริมาตร
พื้นผิวแต่ละด้านของปริมาตรเขียนแทนด้วย e, w, n, s, t, e , และ b ซึ่งหมายถึง พื้นผิวด้านทิศตะวันออก
ทิศตะวันตก ทิศเหนือ ทิศใต้ ด้านบนและด้านล่างของจุด P ตามลำดับ ต่อไปเป็นการดิสครีต
สมการ (2.42)

การดิสครีตไทเซชัน (Discretisation)

สมการอนุพันธ์ย่อยไม่เชิงเส้นที่ใช้อธิบายการไหลของของไหลนั้น เมื่อทำการดิสครีตใน
แต่ละเทอมจะได้ดังนี้

เทอมการพา (Convection term) ทำการดิสครีตเทอมการพาจะได้ดังนี้

$$\int_A (\rho\phi u) \cdot \vec{n} dA = [(\rho\phi Au)_e - (\rho\phi Au)_w] + [(\rho\phi Av)_n - (\rho\phi Av)_s] \\ + [(\rho\phi Aw)_t - (\rho\phi Aw)_b] \quad (2.43)$$

สามารถเขียนสมการของการพาที่ทำการดิสครีตแล้วให้ง่ายขึ้นโดยการแทนด้วย $F = \rho uA$
โดยที่ค่า F คือ ฟลักซ์ของการพา (Convective flux) เขียนสมการ (2.43) ใหม่ได้ดังนี้

$$\int_A (\rho\phi u) \cdot \vec{n} dA = [(F\phi)_e - (F\phi)_w] + [(F\phi)_n - (F\phi)_s] \\ + [(F\phi)_t - (F\phi)_b] \quad (2.44)$$

เทอมการแพร่ (Diffusion term) ทำการดิสครีตเทอมการแพร่ได้ดังนี้

$$\left[\left(A\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x} \right)_e - \left(A\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x} \right)_w \right] + \left[\left(A\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial y} \right)_n - \left(A\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial y} \right)_s \right] \\ + \left[\left(A\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial z} \right)_t - \left(A\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial z} \right)_b \right] + \bar{S}\Delta V = 0 \quad (2.45)$$

เมื่อ Γ คือค่าของสัมประสิทธิ์ของการแพร่ เพื่อความสะดวกเราจะใช้ตัวแปร $D = \frac{\Gamma A}{\delta x}$
แสดงแทน ฟลักซ์ของการแพร่ (Diffusive flux) และสามารถเขียนสมการของการแพร่ที่ทำการดิสครีต
แล้วได้ใหม่เป็น

$$\begin{aligned} & [D_e(\phi_e - \phi_p) - D_w(\phi_p - \phi_w)] + [D_n(\phi_n - \phi_p) - D_s(\phi_p - \phi_s)] \\ & + [D_t(\phi_t - \phi_p) - D_b(\phi_p - \phi_b)] + (S_u + S_{p\phi_p}) = 0 \end{aligned} \quad (2.46)$$

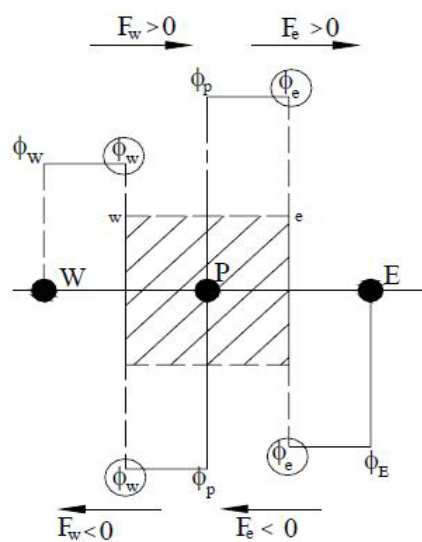
ค่า $\phi_e, \phi_n, \phi_s, \phi_t$ และ ϕ_b เป็นค่าของ ϕ ที่พื้นผิวผนังของปริมาตรซึ่งหาได้ โดยการประมาณค่า ϕ และการประมาณค่า ϕ ที่บริเวณผิวของปริมาตรนั้นมีหลายวิธีด้วยกันแต่ที่จะนำเสนอในงานวิจัยนี้ คือระเบียบวิธีผลต่างต้นลมอันดับที่หนึ่ง (First order upwind scheme) วิธีผลต่างต้นลมอันดับที่สอง (Second order upwind scheme) และระเบียบวิธีผลต่างแบบควิก (Quadratic upstream interpolation for convective kinetics differencing scheme, QUICK)

การประมาณค่าของอินทิกรัลพื้นผิว

ในการประมาณค่าเทอมที่เกิดการพานั้น งานวิจัยในครั้งนี้ได้นำเสนอระเบียบวิธีแบบต่างๆ ดังต่อไปนี้ ระเบียบวิธีผลต่างต้นลมอันดับที่หนึ่ง วิธีผลต่างต้นลมอันดับที่สอง และระเบียบวิธีผลต่างแบบควิก ซึ่งจะแสดงรายละเอียดต่อไป ซึ่งในงานวิจัยในครั้งนี้ได้เลือกใช้ระเบียบวิธีผลต่างต้นลมอันดับที่สอง มาใช้ในการประมาณค่าเทอมที่เกิดการพา

ระเบียบวิธีผลต่างต้นลมอันดับที่หนึ่ง

สำหรับการประมาณค่าแบบระเบียบวิธีผลต่างต้นลมอันดับที่หนึ่งนั้น ค่าที่ต้องการหา คือค่า ϕ ในกรณี F_e เป็นค่าบวก ค่าของ ϕ_e จะถูกกำหนดให้เท่ากับค่า ϕ_p สังเกตว่าจะให้เท่ากับค่าที่อยู่ทางด้านปลายลูกศรกรณีที่ F_e เป็นค่าลบค่า ϕ_e จะถูกกำหนดให้เท่ากับ ϕ_E ดังแสดงใน ภาพประกอบ 22



ภาพประกอบ 22 การประมาณค่าแบบระเบียบวิธีผลต่างต้นลมอันดับที่หนึ่ง (จำเนียร สุวะไกร, 2550)

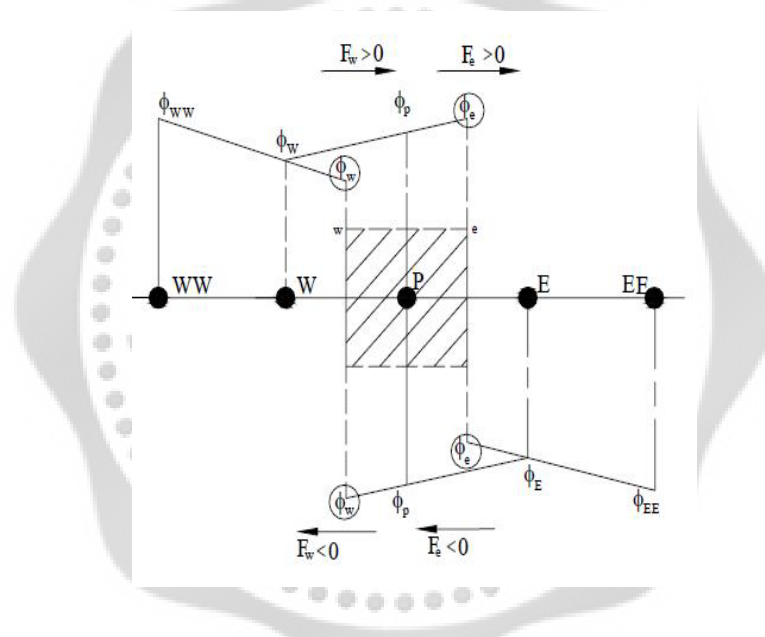
$$\begin{aligned} \phi_e &= \phi_p & : F_e > 0, & & \phi_e &= \phi_E & : F_e < 0 \\ \phi_w &= \phi_w & : F_w > 0, & & \phi_w &= \phi_p & : F_w < 0 \end{aligned}$$

ดังนั้นสมการเขียนได้ดังนี้

$$F_e \phi_e = \phi_p [F_e] + \phi_e [-F_e] \quad (2.47)$$

ระเบียบวิธีผลต่างต้นลมอันดับที่สอง

ค่า ϕ จะประมาณค่าภายในที่พื้นผิวของปริมาตรโดยใช้ตำแหน่งริซข้างเคียงอยู่ที่ท้ายลม ดังแสดงในภาพประกอบ 23



ภาพประกอบ 23 การประมาณค่าแบบระเบียบวิธีผลต่างต้นลมอันดับที่สอง (จำเนียร สุวะไกร. 2550)

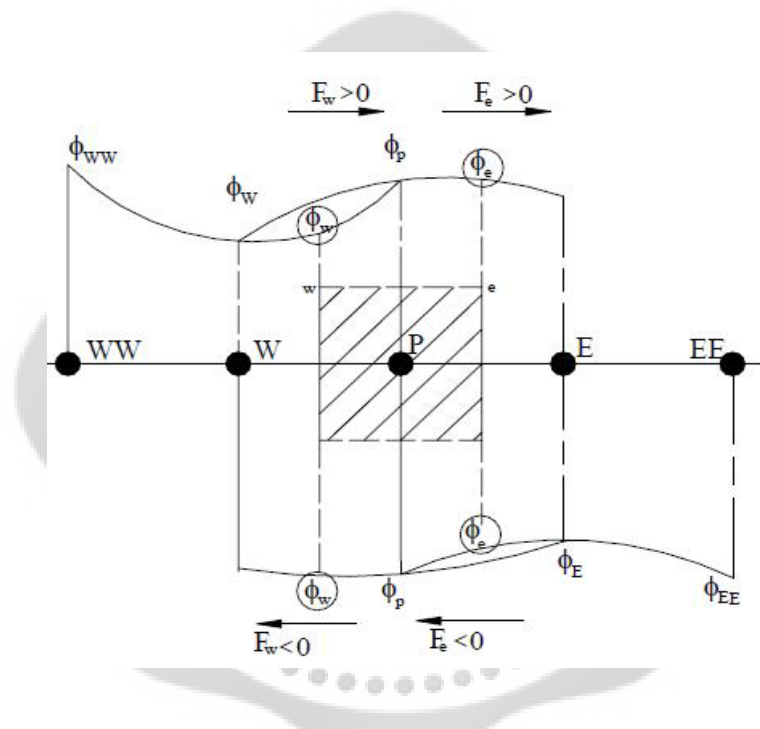
$$\begin{aligned} \phi_e &= \frac{3}{2} \phi_p - \frac{1}{2} \phi_w & : F_e > 0 \\ \phi_w &= \frac{3}{2} \phi_w - \frac{1}{2} \phi_{ww} & : F_w > 0 \\ \phi_e &= \frac{3}{2} \phi_E - \frac{1}{2} \phi_{EE} & : F_e < 0 \\ \phi_w &= \frac{3}{2} \phi_p - \frac{1}{2} \phi_E & : F_w < 0 \end{aligned}$$

ดังนั้นสมการเขียนได้ดังนี้

$$F_e \phi_e = \left(\frac{2}{3} \phi_p - \frac{1}{2} \phi_w \right) [F_e] - \left(\frac{2}{3} \phi_E - \frac{1}{2} \phi_{EE} \right) [-F_e] \quad (2.48)$$

ระเบียบวิธีผลต่างแบบควก

การประมาณค่า ϕ ด้วยระเบียบวิธีนี้ ตั้งสมมติฐานอยู่บนค่าเฉลี่ยของระเบียบวิธีผลต่างต้นลมอันดับที่สอง (Versteeg & Malalasekera.1995) การหาค่าพื้นผิวนั้นหาได้จาก 2 กริดข้างเคียงอยู่ที่ปลายลม (Downstream) และอีก 1 กริดที่อยู่ต้นลม (Upstream)



ภาพประกอบ 24 การประมาณค่าแบบระเบียบวิธีผลต่างแบบควก (จำเนียร สุวะไกร. 2550)

$$\phi_e = \frac{3}{8} \phi_E + \frac{3}{4} \phi_p - \frac{1}{8} \phi_w \quad : F_e > 0$$

$$\phi_w = \frac{3}{8} \phi_p + \frac{3}{4} \phi_w - \frac{1}{8} \phi_{ww} \quad : F_w > 0$$

$$\phi_e = \frac{3}{8} \phi_p + \frac{3}{4} \phi_E - \frac{1}{8} \phi_{EE} \quad : F_e < 0$$

$$\phi_w = \frac{3}{8} \phi_w + \frac{3}{4} \phi_p - \frac{1}{8} \phi_E \quad : F_w < 0$$

ดังนั้นสมการเขียนได้ดังนี้

$$F_e \phi_e = \left(\frac{3}{8} \phi_E - \frac{3}{4} \phi_P - \frac{1}{8} \phi_W \right) [F_e] - \left(\frac{3}{4} \phi_E - \frac{3}{8} \phi_P - \frac{1}{8} \phi_{EE} \right) [-F_e] \quad (2.49)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร ϕ ของปริมาตรหนึ่ง ๆ กับตัวแปร ϕ_{nb} ของปริมาตรข้างเคียงสามารถเขียนให้อยู่ในรูปเชิงเส้นได้ดังนี้

$$a_p \phi_p = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (2.50)$$

โดยที่ตัวห้อย nb หมายถึง ปริมาตรข้างเคียง ส่วน a_p และ a_{nb} เป็นสัมประสิทธิ์ของการให้อยู่ในรูปเชิงเส้นสำหรับตัวแปร ϕ_p และ ϕ_{nb} ตามลำดับ ซึ่งจำนวนของปริมาตรข้างเคียงมีค่าเท่ากับ ด้านที่ล้อมรอบปริมาตรที่พิจารณา ส่วน b เป็นเทอมที่เพิ่มมาจากแหล่งกำเนิดอื่นๆ

การหาผลเฉลยโดยวิธีการแยกพิจารณา (Segregated method) เป็นการแยกส่วนในการคำนวณระหว่างสมการโมเมนต์และสมการความต่อเนื่อง แต่อย่างไรก็ตามค่าต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณต้องสอดคล้องกัน สมการที่ (2.43) เป็นสมการโมเมนต์ที่ดีสคริตแล้วในแนวแกน x โดยได้พิจารณาผลของแรงที่เกิดจากความดัน (pA_f) และกำหนดให้

$$a_p u_p = \sum_{nb} a_{nb} u_{nb} + \sum pA_f + B \quad (2.51)$$

โดยที่ A_f แทนพื้นที่ผิวที่พิจารณา B แทนแหล่งกำเนิดอื่นๆ ที่ปราศจากการกระจายความดันสำหรับสมการโมเมนต์ ในแนวแกน y และแนวแกน z ก็มีลักษณะคล้ายคลึงกันส่วนสมการความต่อเนื่องที่ดีสคริตแล้วแสดงได้ดังนี้

$$N_{face} \sum_f \rho u_n A_f = 0 \quad (2.52)$$

โดยที่ N_{face} เป็นจำนวนผนังล้อมรอบปริมาตร u_n คือ ความเร็วที่ผนังปริมาตรการประมาณค่าของอินทิกรัลพื้นผิว

กระบวนการหาคำตอบ (Solution algorithm)

เพื่อให้ค่าความดันและความเร็วในสมการโมเมนตัมสอดคล้องกับสมการความต่อเนื่อง ดังนั้นกระบวนการหาคำตอบแบบSIMPLE (Semi - Implicit Method for Pressure – Linked Equations), SIMPLEC (Semi - Implicit Method for Pressure - Linked Equations Consistent) และ PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators) จึงถูกนำมาใช้เพื่อตรวจสอบค่าความดันและความเร็ว ให้มีความสอดคล้องกัน (Versteeg & Malalasekera. 1995; FLUENT version 6.0: 2001; Patankar & Spalding. 1972) จากสมการ (2.43) เราจะกำหนด p เพื่อให้ได้ค่าของ u และเพื่อปรับค่าที่ได้จากการคำนวณในรอบแรกเพื่อช่วยให้ผู้เข้าหาคำตอบเราจะเพิ่ม p' ขึ้นมา ดังนั้นสมการสามารถเขียนได้เป็น

$$a_p u_p^* = \sum_{nb} a_{nb} u_{nb}^* + \sum (p_w^* - p_e^*) A_f + B \quad (2.53)$$

โดยที่ p_w^* และ p_e^* เป็นค่าความดันของแต่ละปริมาตรที่ติดกัน ในการแก้สมการจะเริ่มต้นด้วยการสมมติค่าความดัน p^* เพื่อให้ได้ค่า u^*, v^* และ w^* และค่าที่ได้จะต้องที่สอดคล้องกับสมการความต่อเนื่อง ดังนั้นความสัมพันธ์ที่ได้เพิ่มเติม p' เข้ามาเพื่อปรับค่า p^* ในการคำนวณรอบต่อไป ซึ่งมีดังนี้

$$p = p^* + p', u = u^* + u', v = v^* + v' \quad (2.54)$$

โดยที่ p' เรียกว่า การตรวจสอบค่าความดัน (Pressure correction) ดังนั้นสมการ (2.54) สามารถเขียนได้เป็น

$$a_p u_p' = \sum_{nb} a_{nb} u_{nb}' + \sum (p_w' - p_e') A_f + B \quad (2.55)$$

ในกระบวนการหาคำตอบแบบ SIMPLE จะไม่พิจารณาเทอม $\sum_{nb} a_{nb} u_{nb}'$ ดังนั้นจะได้สมการที่ดี สคริปต์ของการตรวจสอบค่าความดันในปริมาตรเป็นดังนี้

$$u_p' = d_f (p_w^* - p_e^*) \quad (2.56)$$

โดยที่เทอม d_f มีค่าเท่ากับ $d_f = \frac{A_f}{a_p}$ ในสมการโมเมนตัมที่ discretized แล้ว การปรับค่าความดันและอัตราการไหลผ่านผนังปริมาตรในแต่ละครั้งนั้น จะเป็นไปตามสมการนี้

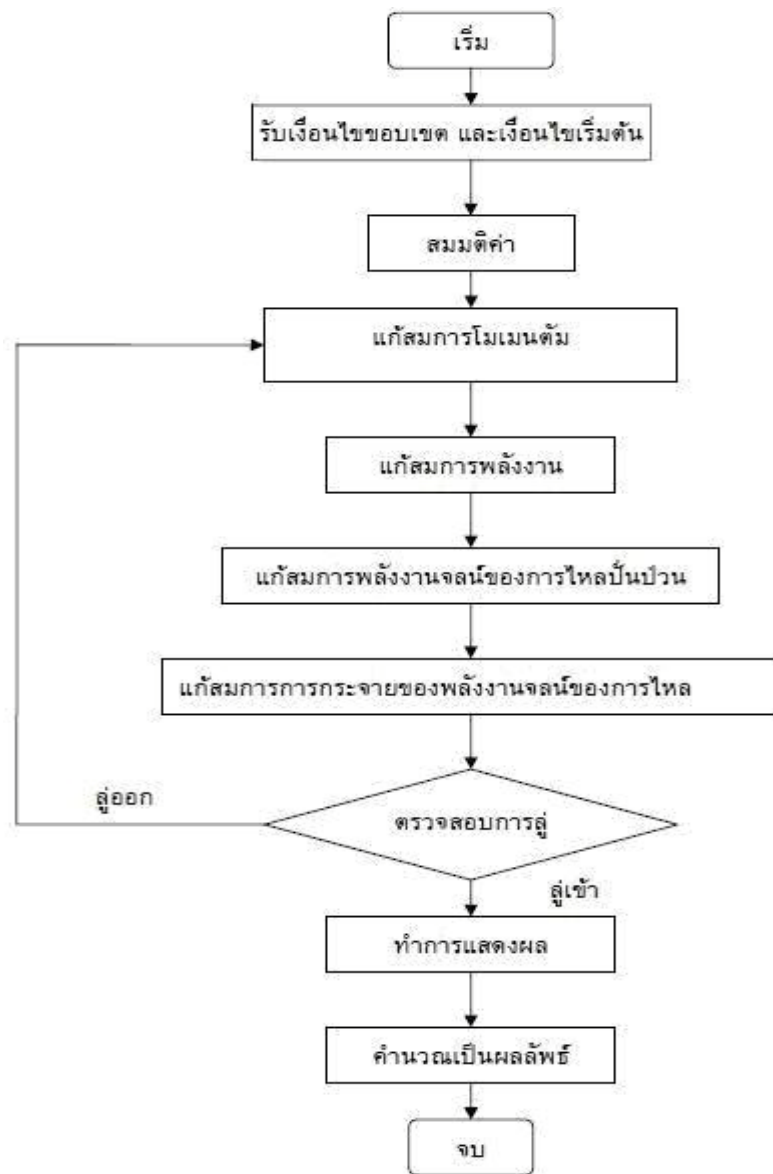
$$p^{new} = p^* + \alpha_p p' \quad (2.57)$$

โดยที่ α_p เป็นค่าแฟคเตอร์ของการปรับค่าสำหรับกระบวนการหาคำตอบแบบ SIMPLEC นั้น เริ่มต้นจะเหมือนกับกระบวนการหาคำตอบแบบ SIMPLE ที่กล่าวมาข้างต้น แต่ต่างกันที่ได้นำเทอม $\sum_{nb} a_{nb} u'_{nb}$ มาพิจารณาด้วย ซึ่งจะมีสัมประสิทธิ์ของ d_f เป็นฟังก์ชันของ $1 - \sum a_{nb} / a_p$ ดังนั้นสมการที่ discretized ของการตรวจสอบค่าความดันในปริมาตรที่พิจารณาจะเป็น $u'_p = \frac{d_f}{1 - \sum a_{nb} / a_p} (p_w^* - p_e^*)$ ส่วนกระบวนการหาคำตอบแบบ PISO นั้น ได้ปรับปรุงประสิทธิภาพของการคำนวณจาก SIMPLE โดยการเพิ่ม Neighbor correction และ Skewness correction ซึ่งได้เพิ่มวงจร (Loop) ในการคำนวณเพื่อให้ค่าความดันและความเร็วของสมการโมเมนตัมสอดคล้องกับ สมการความต่อเนื่องเร็วขึ้น กระบวนการทำซ้ำนี้เรียกว่า การปรับค่าโมเมนตัม (Momentum correction) หรือ Neighbor correction กระบวนการหาคำตอบแบบ PISO นั้น ทำให้การใช้เวลาในการประมวลผลต่อรอบการคำนวณมากขึ้นเพียงเล็กน้อยแต่จะทำให้จำนวนรอบในการทำซ้ำเพื่อเข้าสู่หาคำตอบลดลงสำหรับ Skewness correction นั้นเป็นตัวปรับค่าพลาซิกซ์ของมวลที่ผนังของปริมาตรและค่าความแตกต่างของการตรวจสอบค่าความดัน

ขั้นตอนและลำดับการแก้สมการ

สำหรับการหาผลเฉลยนั้น จะใช้การคำนวณซ้ำ ซึ่งขั้นตอนในแต่ละรอบมีรายละเอียดแสดงดังในภาพประกอบ 25 ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดเงื่อนไขขอบเขตเริ่มต้น และทำการสมมุติค่าเริ่มต้นในการคำนวณ
2. กำหนดเงื่อนไขในการคำนวณ โดยให้มีการไหล รวมทั้งมีการถ่ายเทความร้อน
3. แก้สมการโมเมนตัมเพื่อทำการหาความเร็ว
4. แก้สมการพลังงานเพื่อทำการหาพลังงานรวมจำเพาะ
5. คำนวณค่าพลังงานจลน์ และอัตราการสูญเสียพลังงานจลน์
6. กลับไปทำในขั้นตอนที่ 3-5 ใหม่จนกระทั่งได้ค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่าเดิม



ภาพประกอบ 25 ขั้นตอนและลำดับการแก้สมการ

ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการจำลอง

ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการคำนวณด้วยวิธีการเชิงตัวเลขนั้น หลีกเลี่ยงไม่ได้ เนื่องจากเป็นการประมาณค่า และใช้แบบจำลองความปั่นป่วน ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนั้นสามารถแบ่งออกได้ดังนี้ ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากแบบจำลองเอง ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากดีสครีตและค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากกระบวนการทำซ้ำ (Iteration) รายละเอียดของค่าความผิดพลาดมีดังต่อไปนี้

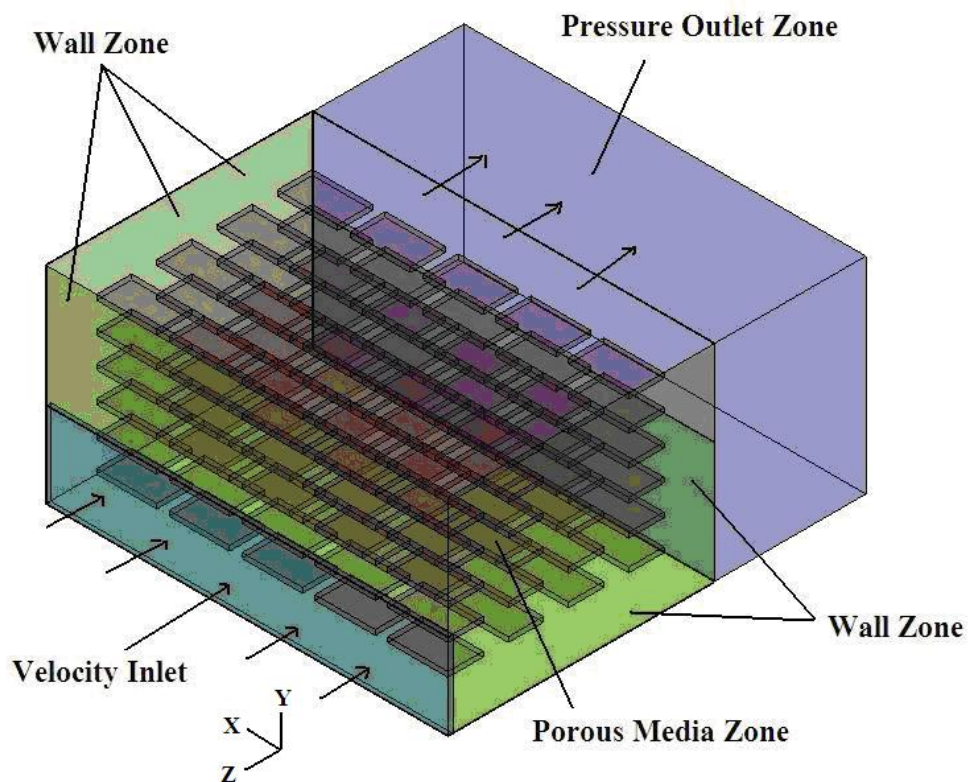
ความผิดพลาดที่เกิดจากแบบจำลอง คือ ค่าความแตกต่าง ระหว่างจากแบบจำลองที่สร้างขึ้นและการไหลจริงกับการไหลในการจำลองที่เราตั้งสมมติฐานขึ้น ซึ่งคุณสมบัติของการไหลไม่สามารถที่จะกำหนดให้ถูกต้องกับของไหลที่เป็นจริงได้ เช่น การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นที่แปรตามอุณหภูมิในของไหลจริงเงื่อนไขขอบเขตที่เรากำหนดไว้เป็นเพียงคาดคะเนซึ่งไม่สามารถจะกำหนดให้ตรงกับความเป็นจริงมากที่สุดได้ความผิดพลาดที่เกิดจากดีสครีตนั้นคือความผิดพลาดที่เกิดจากการประมาณค่าของสมการอนุพันธ์ย่อยซึ่งเราจำเป็นที่จะต้องตัดเทอมปลายของสมการอนุกรมเทเลอร์ (Taylor Series) ออกไป เพื่อที่จะทำให้เรามีการประมาณค่าได้ และเทคนิคการประมาณค่าแต่ละชนิดก็จะมีค่าความผิดพลาดแตกต่างกันออกไป

สุดท้ายเป็นค่าความผิดพลาดที่เกิดจากกระบวนการทำซ้ำซึ่งในกระบวนการหาผลเฉลยของสมการอนุพันธ์ย่อยได้ทำการดีสครีตแล้วนั้น จำเป็นที่จะต้องใช้กระบวนการทำซ้ำ โดยที่กระบวนการทำซ้ำนี้จะมีการสิ้นสุดที่เป็นไปได้ยากมากดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องกำหนดจุดให้กระบวนการทำซ้ำนั้นหยุด จุดนั้น เรียกว่า Criteria ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นสามารถที่จะลดให้น้อยลงได้โดยการกำหนดค่านี้ให้มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเราจะต้องเวลาในการจำลองมากขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังมีค่าความผิดพลาดที่เกิดจากจำนวนกริดไม่ละเอียดพอ ค่าความผิดพลาดที่เกิดจากแบบจำลองของไหลไม่ดีพอ

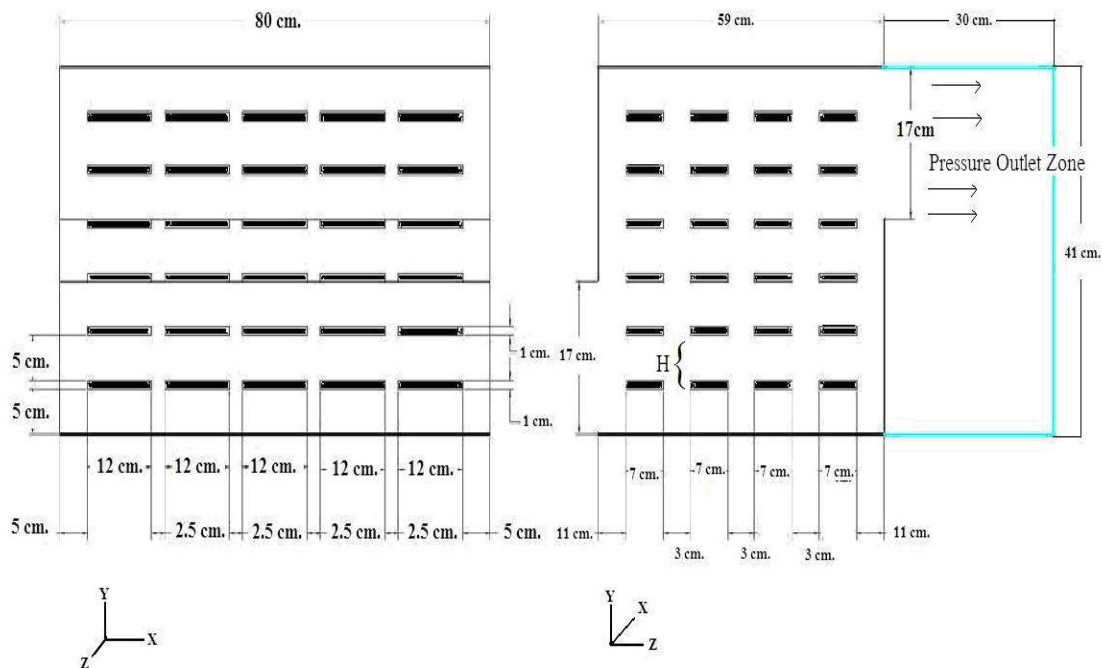
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

ลักษณะของแบบจำลองที่ใช้

ในการจำลองการไหลเพื่อศึกษาการกระจายตัวของอนุภาคและความเข้มข้นวัสดุพูนในห้องอบแห้งแบบลมร้อนจะสร้างลักษณะทางกายภาพของระบบ 3 มิติและกำหนดรูปแบบวิธีในการวิเคราะห์ปัญหาให้สอดคล้องกับสมการควบคุมและสมมติฐานของการศึกษาและทำการสร้างกริดภาพประกอบ 26 และ 27



ภาพประกอบ 26 เงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองห้องอบแห้ง



ภาพประกอบ 27 ขนาดแบบจำลอง

ทุกแบบจำลองจะมีขนาดดังนี้คือ ขนาดเครื่องอบแห้ง กว้าง 0.89 เมตร x ยาว 0.80 เมตร x สูง 0.41 เมตร วัสดุพูนมีจำนวน 6 ชั้น ขนาดวัสดุพูนกว้าง 0.07 เมตร x ยาว 0.12 เมตร xหนา 0.01 เมตร ระยะห่างระหว่างแต่ละชั้น 0.05 เมตร มีช่องทางเข้าของลมร้อนหนึ่งทางและมีทางออกของลมร้อนหนึ่งทางดังจะเห็นได้จากภาพประกอบ 27

ขั้นตอนจำลองการไหลของอากาศ

สำหรับการจำลองการไหลของอากาศภายในห้องอบแห้งจะทำภายหลังจากขั้นตอนการออกแบบขนาดของห้องอบแห้ง ขนาดวัสดุพูน ดังภาพประกอบ 26 และ 27 โดยสมมติฐานสำหรับการศึกษาในขั้นตอนนี้จะแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการไหลของอากาศภายในห้องอบแห้งและนำผลการคำนวณที่ได้ไปวิเคราะห์

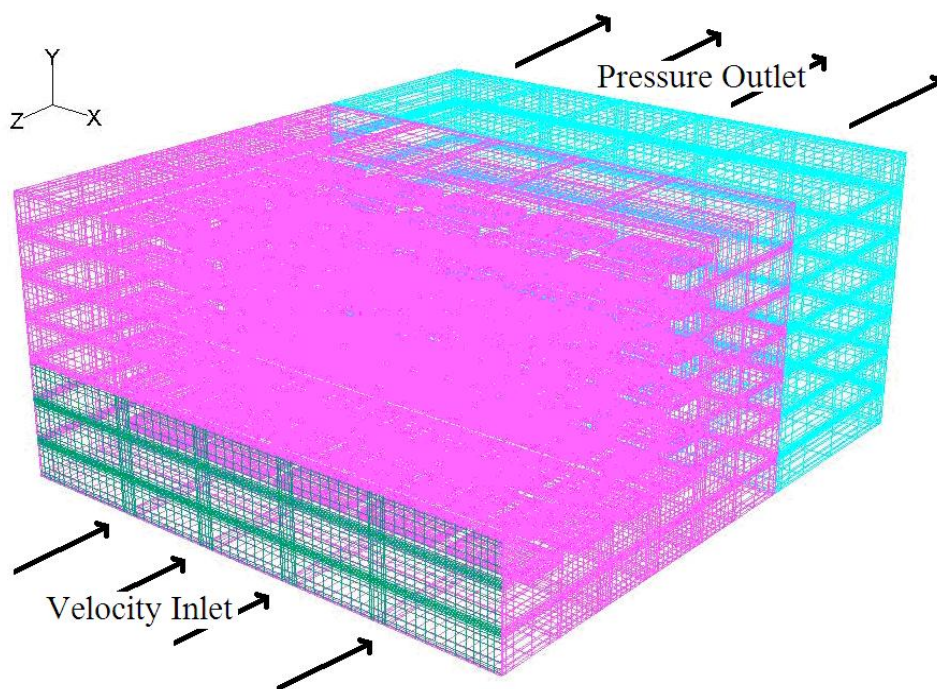
เครื่องมือที่ใช้ในการทำแบบจำลอง

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ 1.66 GHz Intel core 2 CPU, 1 GB RAM
2. โปรแกรมสำหรับสร้างขอบเขตสถานะและสร้างกริด (Grid)
3. โปรแกรมสำหรับช่วยวิเคราะห์การไหลของอากาศโดยระเบียบวิธีปริมาตรจำกัด

(Finite volume method, FVM)

การสร้างแบบจำลองและการสร้างกริด

ในการเขียนแบบเพื่อจำลองการไหลนั้นจะเขียนในลักษณะของปริมาตรห้องที่มีช่องทางเข้าของอากาศและทางออกของอากาศ ส่วนภายในห้องอบจะมีการจัดวางวัสดุพูน ขนาดของห้องอบแห้งที่ทำการออกแบบไว้ ดังภาพประกอบ 27 จึงถูกนำมาสร้างเป็นแบบจำลองในรูปทรง 3 มิติโดยใช้โปรแกรม สำหรับสร้างขอบเขตสภาวะและสร้างกริด ดังภาพประกอบ 28



ภาพประกอบ 28 แบบจำลองโดยโปรแกรมสำหรับสร้างขอบเขตสภาวะและสร้างกริด
การจัดวางกริดแบบไม่สม่ำเสมอ (Non-Uniform Grid)

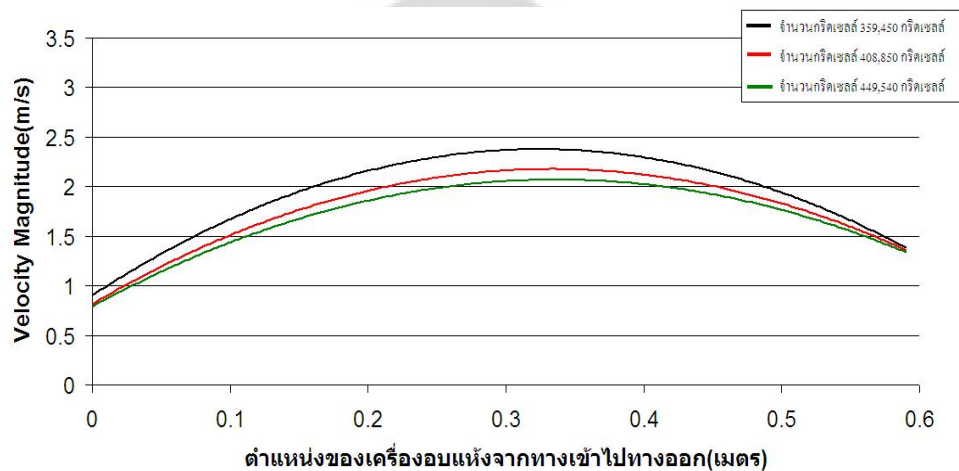
การสร้างกริดได้เลือกใช้กริดแบบสี่เหลี่ยมซึ่งกริดแบบสี่เหลี่ยมนี้สามารถเข้ากันได้ดีกับรูปทรงของห้องอบแห้งที่ทำการจำลองซึ่งมีลักษณะของรูปทรงสี่เหลี่ยมเช่นเดียวกัน การจัดวางกริดได้เลือกใช้การจัดวางแบบไม่สม่ำเสมอ (Non-Uniform Grid) โดยสร้างกริดที่บริเวณการจัดเรียงชั้นของวัสดุพูนมีความหนาแน่นกว่าบริเวณอื่น

การตรวจสอบจำนวนกริดที่มีผลกระทบต่อผลการจำลอง

การตรวจสอบจำนวนกริดที่มีผลกระทบต่อผลของการคำนวณ (Grid Dependent) เพื่อหาระดับของจำนวนกริดที่เหมาะสมต่อผลของการคำนวณที่ได้ โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบด้วยการเลือกใช้จำนวน กริดแบ่งออกเป็น 3 ระดับคือ

1. กริดเซลล์จำนวน 359,450 กริดเซลล์
2. กริดเซลล์จำนวน 408,850 กริดเซลล์
3. กริดเซลล์จำนวน 449,540 กริดเซลล์

เมื่อนำมาแสดงในภาพประกอบ 29 ทำการคำนวณด้วยการเลือกใช้จำนวนกริดที่ระดับ 359,450, 408,850 และ 449,540 กริดเซลล์ พบว่าระดับของจำนวนกริดมีผลต่อการคำนวณมีค่าแตกต่างกันน้อยมาก เพื่อให้การทำงานของซีพียูไม่มีภาระและมีภาระทำงานเต็มที่จึงเลือกใช้กริดเซลล์จำนวน 408,850 กริดเซลล์



ภาพประกอบ 29 การเปรียบเทียบความเร็วเฉลี่ยที่ระนาบ ที่ระดับจำนวนกริดต่างๆ ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร

เงื่อนไขขอบเขตสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เงื่อนไขขอบเขตมีผลโดยตรงต่อการศึกษาพฤติกรรมของของไหล การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตให้สอดคล้องกับสภาวะของปัญหาการไหลจริงย่อมทำให้การใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อศึกษาพฤติกรรมของปัญหาการไหลมีประสิทธิภาพมากขึ้น ประเภทของเงื่อนไขขอบเขตที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ประกอบด้วย เงื่อนไขขอบเขตแบบทางเข้า (Inlet Boundary Condition) เงื่อนไขขอบเขตแบบทางออก (Outlet Boundary Condition) และเงื่อนไขขอบเขตแบบผนัง (Wall Boundary Condition) รายละเอียดของการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตแสดงได้ดังนี้

เงื่อนไขขอบเขตแบบทางเข้า (Inlet Boundary Condition) เงื่อนไขขอบเขตทางเข้าค่าของตัวแปรทั่วไปถูกกำหนดให้มีค่าคงที่ตามลักษณะของปัญหาการไหล

- ความเร็วอากาศเข้า กำหนดตามตาราง 1 แบบจำลองในการคำนวณ
- อุณหภูมิอากาศทางเข้า กำหนดตามตาราง 1 แบบจำลองในการคำนวณ
- วัสดุพูน กำหนดให้วัสดุพูนมีความพูน (Porous media) 1 นาโนเมตร

เงื่อนไขขอบเขตแบบทางออก (Outlet Boundary Condition) โดยปกติแล้วค่าของตัวแปรทั่วไปบริเวณขอบเขตของทางออกจะไม่ทราบค่า ดังนั้นวิธีที่นิยมใช้โดยทั่วไปคือการกำหนดให้ขอบเขตดังกล่าวไม่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรในทิศทางที่ตั้งฉากกับขอบเขตนั้น (Zero Normal Gradient) และเพื่อให้สอดคล้องตามสมการความต่อเนื่องจำเป็นต้องมีการปรับแก้ฟังก์ชันการไหลที่ทางออกให้สอดคล้องกับฟังก์ชันการไหลที่ทางเข้า สำหรับค่าของความดันที่ขอบเขตทางออกสามารถหาได้จากการประมาณค่านอกช่วงหรือหากขอบเขตทางออกนั้นเปิดสู่บรรยากาศอาจจะกำหนดให้ความดันที่ขอบเขตดังกล่าวเป็นความดันบรรยากาศ

เงื่อนไขขอบเขตแบบผนัง (Wall Boundary Condition) เงื่อนไขขอบเขตแบบผนังนั้น ค่าของตัวแปรโดยทั่วไปถูกกำหนดให้มีค่าคงที่ หากเป็นผนังที่ไม่เคลื่อนที่ค่าของความเร็วมีค่าเป็นศูนย์ตามเงื่อนไขการไม่ลื่นไถล (No Slip Condition) สำหรับค่าของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนและการสูญเสียพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนมีค่าเป็นศูนย์ตามเงื่อนไขของแบบจำลองความปั่นป่วนที่เลือกใช้ ผนังไม่มีความร้อนเข้าและออกจากระบบ (Adiabatic surface) ไม่มีการลื่นไถลระหว่างอากาศกับผนัง (No slip condition) ไม่มีการสูญเสียความร้อนในส่วนของการนำความร้อนเข้าระบบ

การวิเคราะห์ตัวเลขเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds Number, Re) ว่าเป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) หรือ การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence Flow) จากสมการที่ 3.1 โดยค่า Re เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับความยาวจำเพาะ (Characteristic length) โดยเป็นตัวแทนแสดงถึงอัตราส่วนระหว่างแรงเฉื่อย (Inertia force) ต่อแรงหนืด (Viscous force) ค่าความยาวจำเพาะที่ใช้คือค่าความสูงของช่องอากาศ (H) แสดงในภาพประกอบ 27 โดยแบ่งสภาวะการไหลออกเป็นดังนี้

$$Re_H = \frac{VH}{\nu} \quad (3.1)$$

- การไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) มีค่าเลขเรย์โนลด์ส์ต่ำกว่า 2,100 โดยประมาณ
- การไหลในช่วงทรานซิชัน (Transition) มีค่าเลขเรย์โนลด์ส์อยู่ในช่วง 2,100 ถึง 4,000 เป็นช่วงการไหลที่จะเปลี่ยนลักษณะ การไหลจากแบบราบเรียบไปเป็น การไหลแบบปั่นป่วน
- การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence Flow) มีค่าเลขเรย์โนลด์ส์ตั้งแต่ 4,000 ขึ้นไป โดยประมาณ

ตาราง 1 แบบจำลองในการคำนวณ

แบบจำลอง (NO.)	อุณหภูมิที่ทางเข้า (เคลวิน)	ความเร็วลมที่ทางเข้า (เมตรต่อวินาที)	ตัวเลขเรย์โนลด์นัมเบอร์
1	333	0.5	1612.903
2	343	1.0	2419.355
3	353	1.5	3225.806
4	333	0.5	1522.843
5	343	1.0	2284.264
6	353	1.5	3045.685
7	333	0.5	1449.275
8	343	1.0	2173.913
9	353	1.5	2898.551

ตาราง 2 แสดงค่าเงื่อนไขขอบเขตเชิงตัวเลข (Numerical boundary condition)

รายละเอียดของเงื่อนไข	กลุ่มของเงื่อนไขหลัก	เงื่อนไขรองที่เลือกใช้
ข้อกำหนดเงื่อนไขที่ป้อน	แบบจำลองเป็นลักษณะ	3D
	สมการพลังงาน	เลือกใช้
	แบบจำลองการไหล	Laminar
	ของไหลที่ใช้	อากาศ
เงื่อนไขวัสดุพูน	วัสดุพูน(ของแข็ง)	ไม้
	ภายในวัสดุพูน(ของเหลว)	น้ำ (H_2O)
เงื่อนไขขอบ	ที่ทางเข้า	u, T (Constant)
	ที่ติดผนัง	Standard Wall Function, Twall(Constant), No Slip Condition
	ที่ทางออก	Pressure Outlet
การควบคุมกระบวนการหาคำตอบ	กระบวนการหาคำตอบ	SIMPLE
	การดีสครีตไทเซชัน	2nd Order Upwind
	จำนวนรอบที่ให้คำนวณ	900 รอบ

บทที่ 4

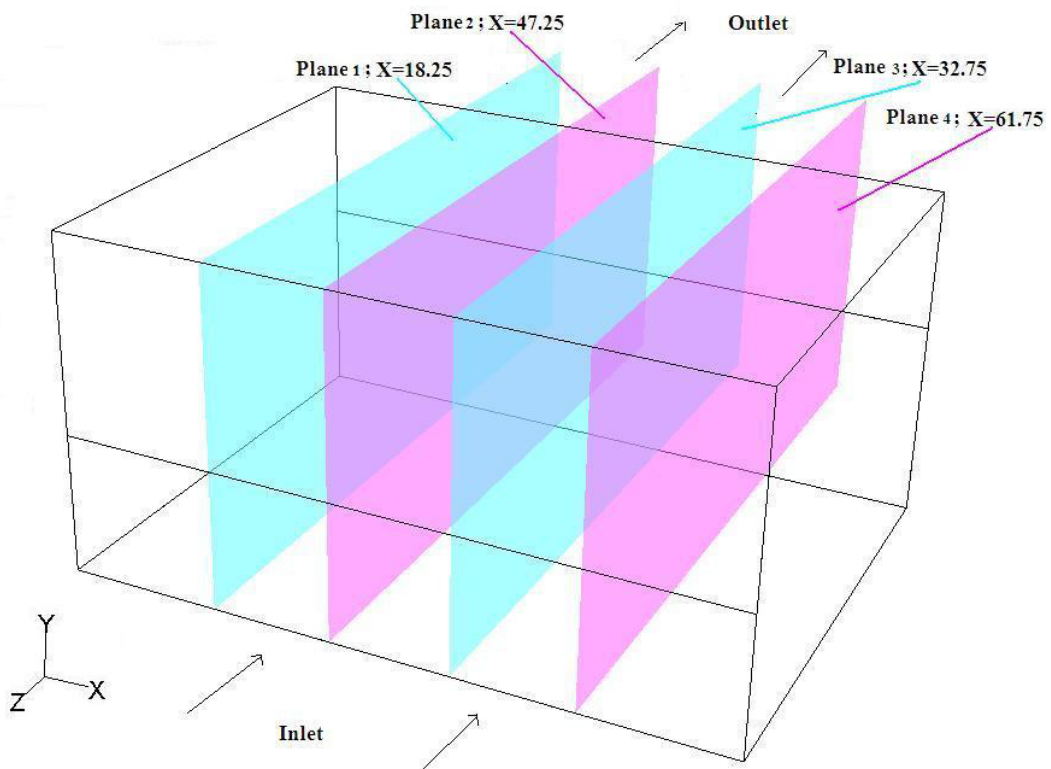
ผลการจำลองและการวิเคราะห์

ผลการจำลองและการวิเคราะห์

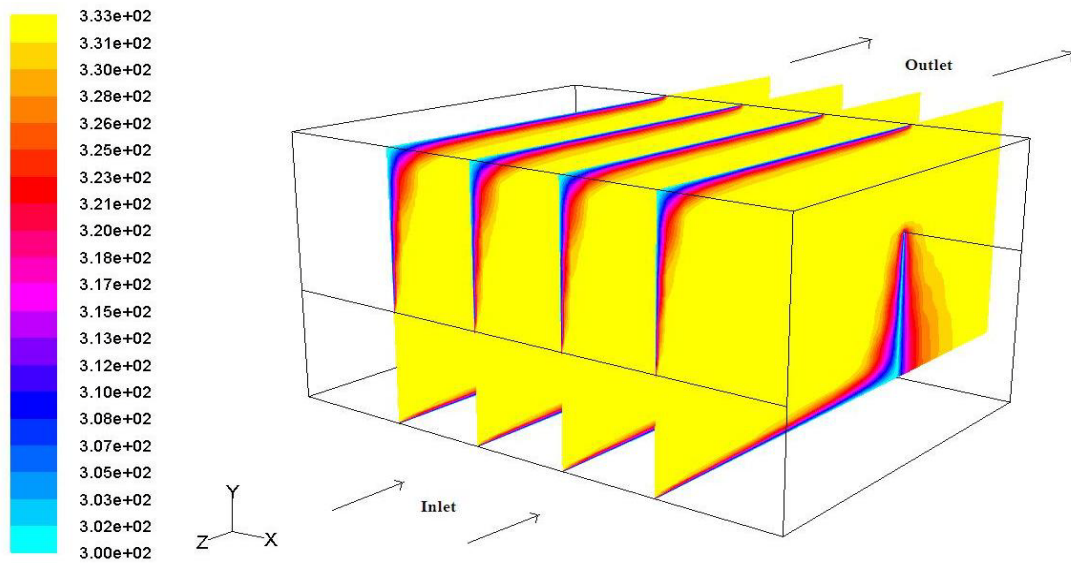
ในบทนี้จะเสนอผลการจำลองที่ได้พร้อมกับการวิเคราะห์ โดยจะกำหนดสภาวะอากาศเข้าเป็นสามช่วงอุณหภูมิ มีช่วงความเร็วอากาศเข้าแตกต่างกันสามระดับ เพื่อดูผลและวิเคราะห์ การกระจายอุณหภูมิและความชื้นของวัสดุพูนในเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนต่อไป

ผลการจำลองแบบห้องอบแห้งวัสดุพูน

จากภาพประกอบ 30 แสดงความสัมพันธ์ของการกระจายอุณหภูมิกับตำแหน่งอุณหภูมิอากาศเข้า อุณหภูมิอากาศออก ที่ระนาบ $X=11$ เซนติเมตร, $X=40$ เซนติเมตร, $X=69$ เซนติเมตร โดยใช้การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

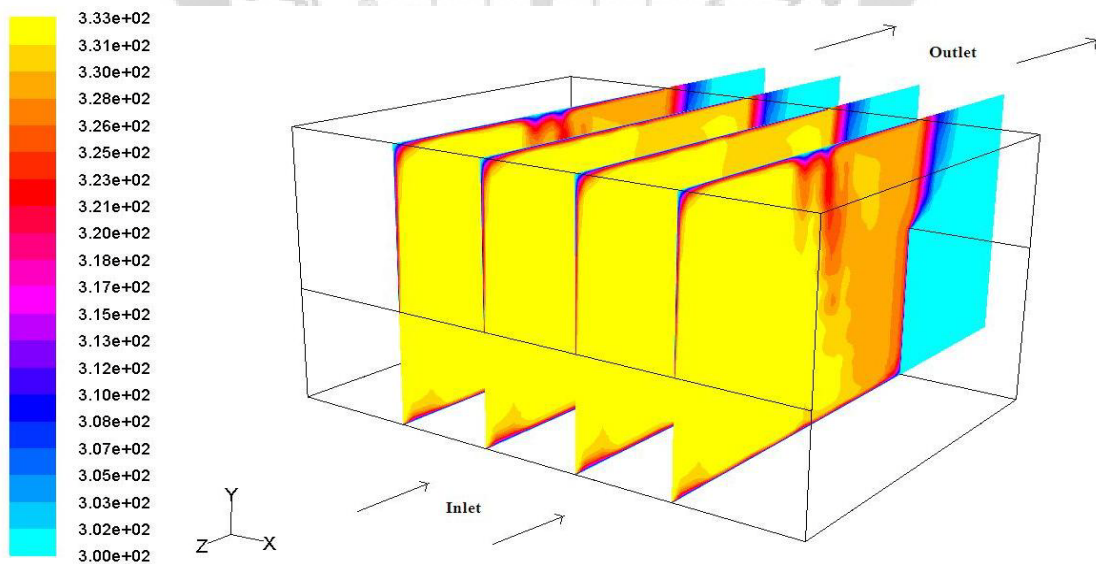


ภาพประกอบ 30 ภาพแสดงตำแหน่งอากาศไหลเข้า อากาศไหลออก ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร



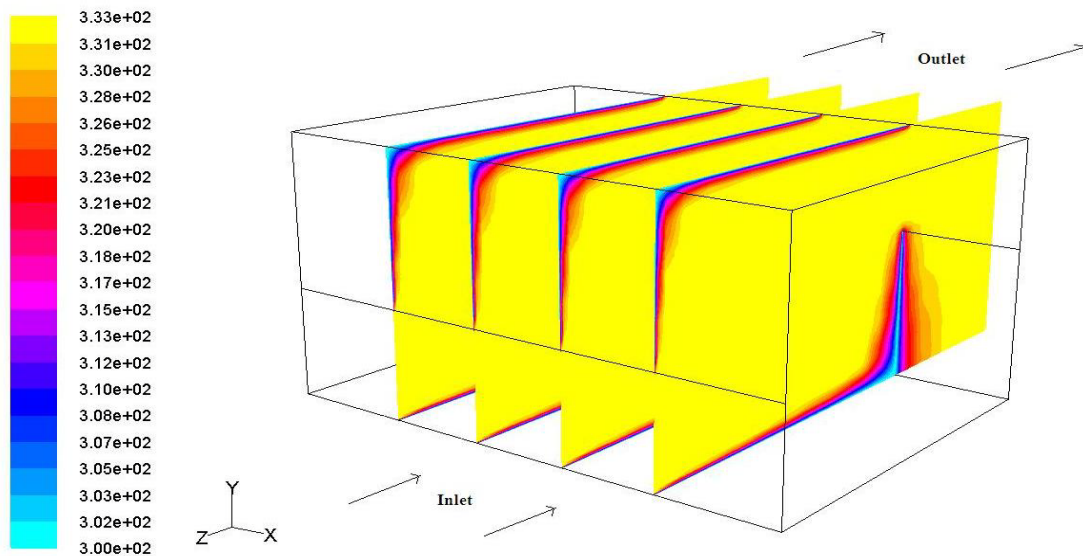
Contours of Static Temperature (k) (Time=9.0000e+02)

ภาพประกอบ 31 แสดงการกระจาย Static Temperature ภายในห้องอบแห้งโดยไม่มีวัสดุพูนใน ห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 333 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.5 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร



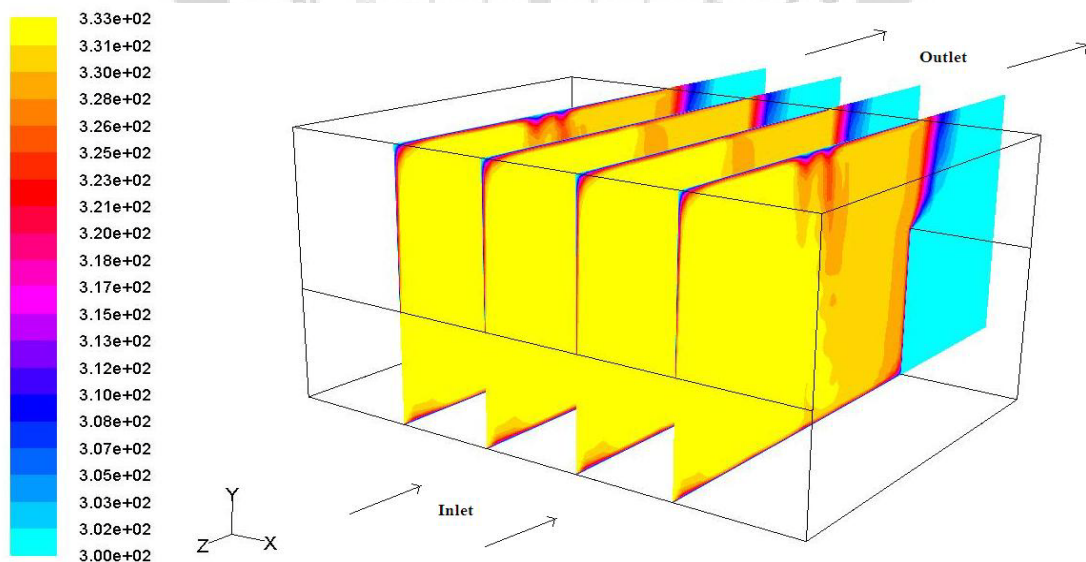
Contours of Static Temperature (k) (Time=9.0000e+02)

ภาพประกอบ 32 แสดงการกระจาย Static Temperature ภายในห้องอบแห้งโดยมีวัสดุพูนใน ห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 333 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.5 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร



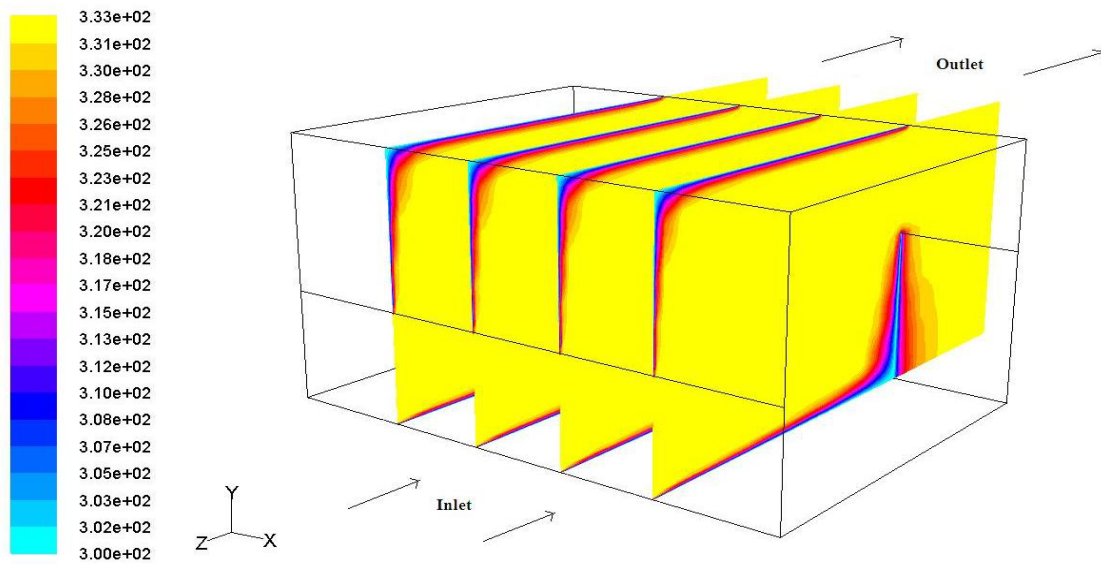
Contours of Static Temperature (k) (Time=9.0000e+02)

ภาพประกอบ 33 แสดงการกระจาย Static Temperature ภายในห้องอบแห้งโดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 333 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.75 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร



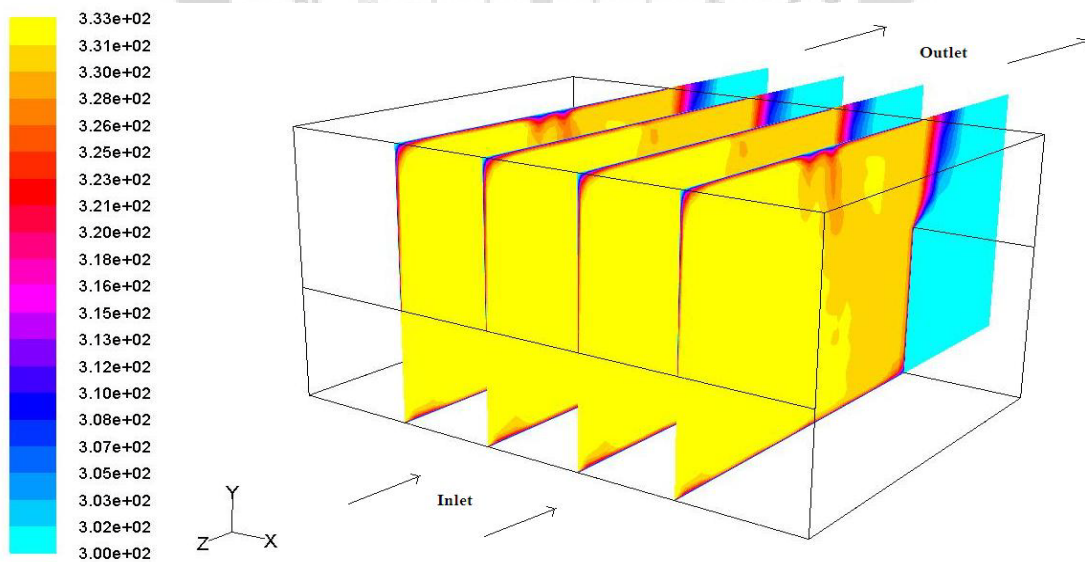
Contours of Static Temperature (k) (Time=9.0000e+02)

ภาพประกอบ 34 แสดงการกระจาย Static Temperature ภายในห้องอบแห้งโดยมีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 333 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.75 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร



Contours of Static Temperature (k) (Time=9.0000e+02)

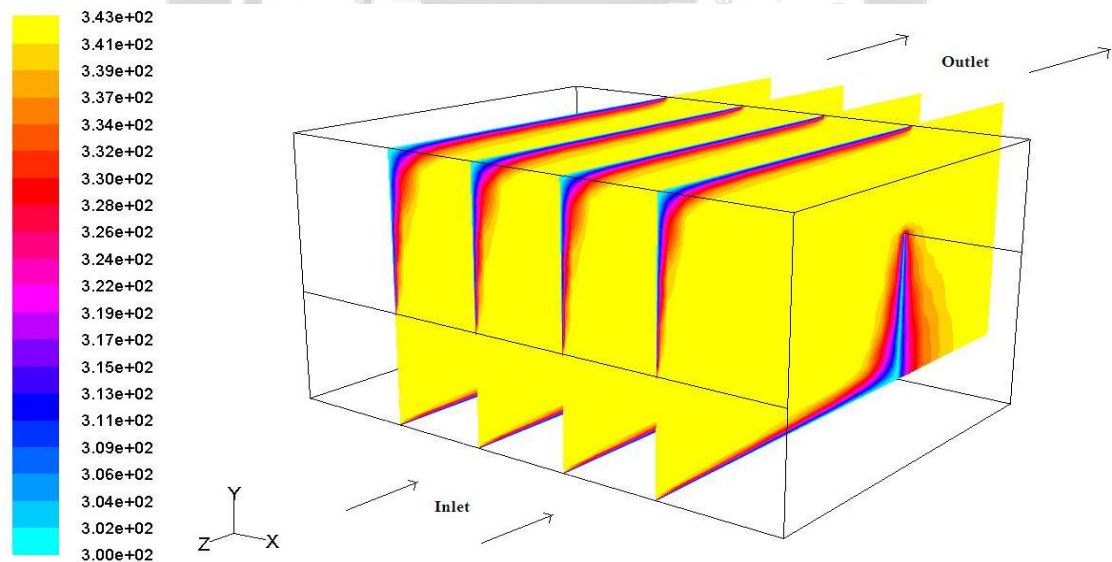
ภาพประกอบ 35 แสดงการกระจาย Static Temperature ภายในห้องอบแห้งโดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 333 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร



Contours of Static Temperature (k) (Time=9.0000e+02)

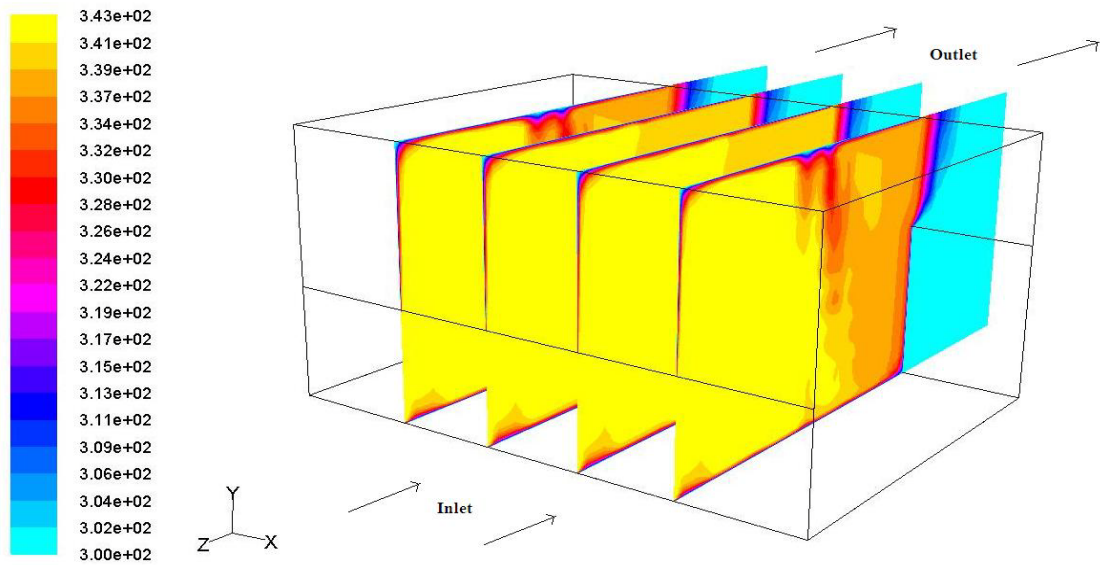
ภาพประกอบ 36 แสดงการกระจาย Static Temperature ภายในห้องอบแห้งโดยมีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 333 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร

จากภาพประกอบ 31 ถึง 36 แสดงการกระจาย Static Temperature ภายในห้องอบแห้ง โดยมีเงื่อนไขของอุณหภูมิทางเข้าที่ 333 เคลวิน ความเร็วอากาศเข้า 0.5, 0.75 และ 1.0 เมตรต่อวินาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตรเมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที โดยมีเงื่อนไขดังนี้ เมื่อภายในห้องอบแห้งที่ไม่มีวัสดุพูนในห้องอบ ลักษณะการกระจายอุณหภูมิ มีทิศทางไปในทางเดียวกันเมื่อเปลี่ยนความเร็วอากาศเข้า ลักษณะการกระจายอุณหภูมิ ภายในห้องอบแห้ง ทั้งห้องจะค่อนข้างคงที่ ที่อุณหภูมิ 333 เคลวิน และในส่วนของห้องอบแห้งที่มีวัสดุพูนภายในห้องอบแห้ง ลักษณะการกระจายอุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง เมื่อเพิ่มความเร็วอากาศเข้าลักษณะการกระจายตัวของอากาศร้อนภายในห้องอบแห้งมีแนวโน้ม ค่อนข้างสม่ำเสมอมากขึ้น เมื่ออากาศพาความร้อนจากทางเข้ามาถ่ายโอนความร้อนภายในห้องอบแห้ง บริเวณ ทางเข้า ภายในห้องอบแห้งก่อน เมื่อได้รับความร้อนแล้วความหนาแน่นของอากาศน้อยลง ขยายตัวลอยตัวสูงขึ้นพร้อมทั้งพาความร้อนไปด้วย ขณะเดียวกันอากาศ บริเวณทางออก ส่วนอื่นที่ยังไม่ได้รับความร้อน ยังมีความหนาแน่นของมากกว่าจะเคลื่อนมาแทนที่เป็นแบบนี้ไปเรื่อยๆ จนอากาศภายในห้องอบแห้งนั้นได้รับความร้อนทั่วกัน ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิ ภายในห้องอบแห้งมีลักษณะคล้ายทุกแบบจำลอง



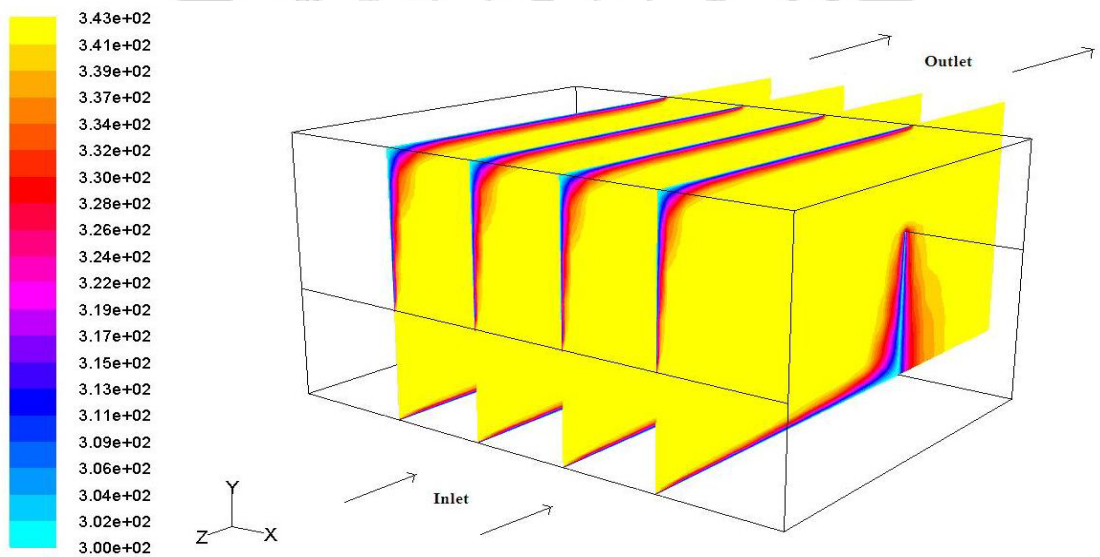
Contours of Static Temperature (k) (Time=9.0000e+02)

ภาพประกอบ 37 แสดงการกระจาย Static Temperature ภายในห้องอบแห้งโดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบแห้ง ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 343 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.5 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร



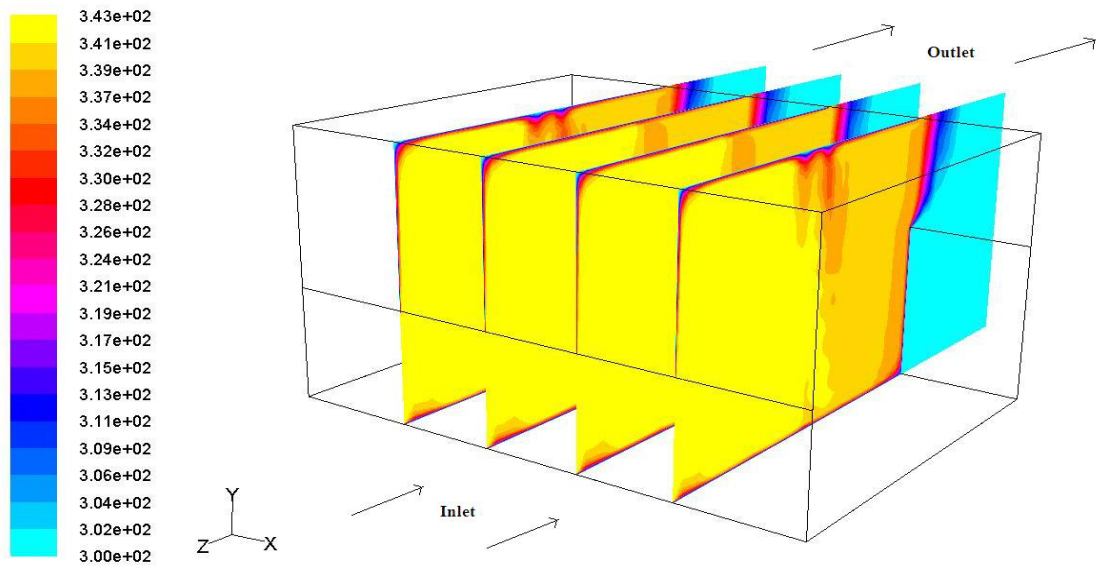
Contours of Static Temperature (k) (Time=9.0000e+02)

ภาพประกอบ 38 แสดงการกระจาย Static Temperature ภายในห้องอบแห้งโดยมีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 343 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.5 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร



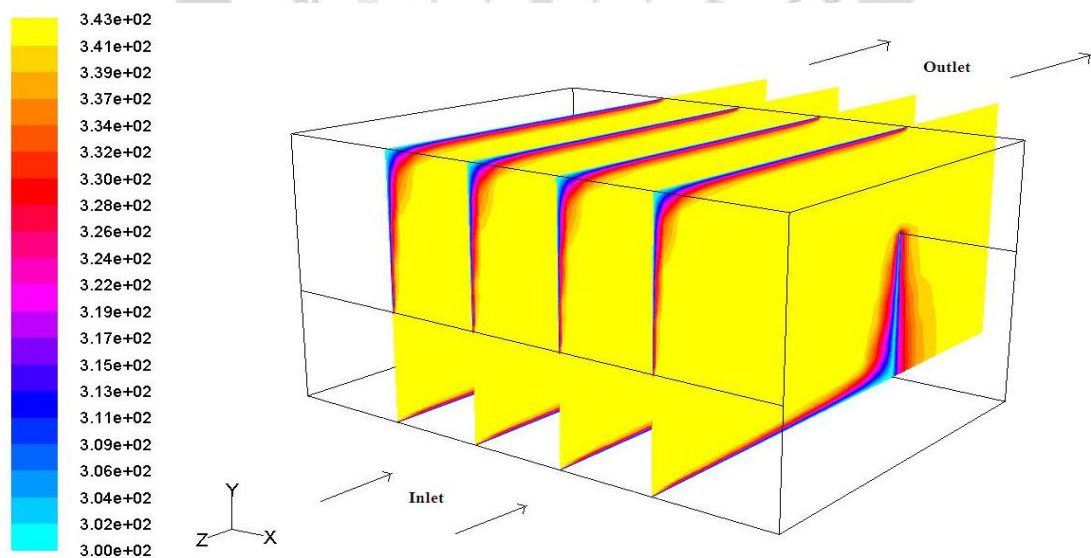
Contours of Static Temperature (k) (Time=9.0000e+02)

ภาพประกอบ 39 แสดงการกระจาย Static Temperature ภายในห้องอบแห้งโดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 343 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.75 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร



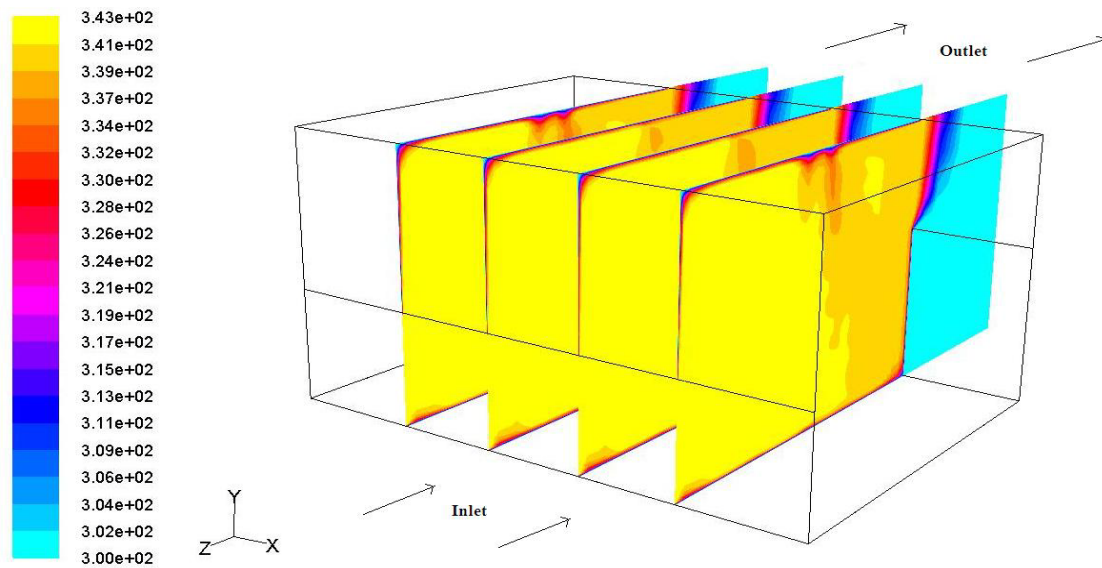
Contours of Static Temperature (k) (Time=9.0000e+02)

ภาพประกอบ 40 แสดงการกระจาย Static Temperature ภายในห้องอบแห้งโดยมีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 343 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.75 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร



Contours of Static Temperature (k) (Time=9.0000e+02)

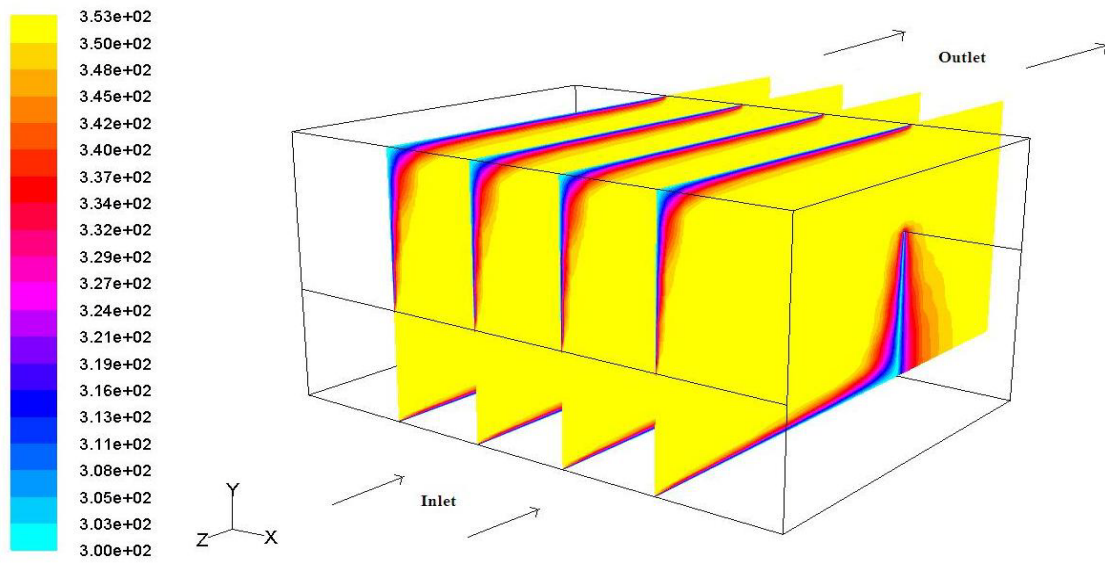
ภาพประกอบ 41 แสดงการกระจาย Static Temperature ภายในห้องอบแห้งโดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 343 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร



Contours of Static Temperature (k) (Time=9.0000e+02)

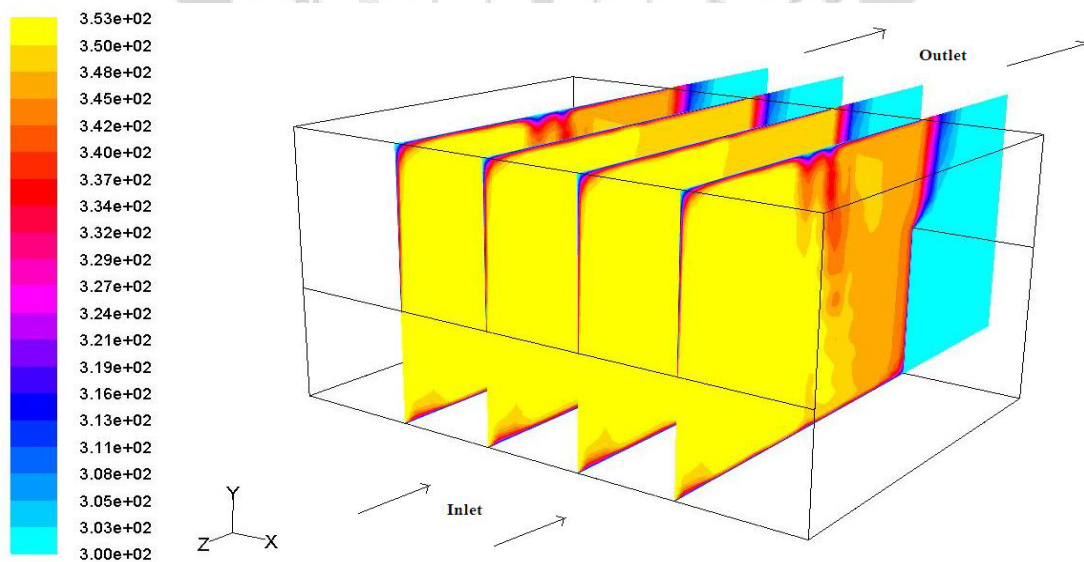
ภาพประกอบ 42 แสดงการกระจาย Static Temperature ภายในห้องอบแห้งโดยมีวัสดุพูนในห้องอบที่อุณหภูมิอากาศเข้า 343 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร

จากภาพประกอบ 37 ถึง 42 แสดงการกระจาย Static Temperature ภายในห้องอบแห้ง โดยมีเงื่อนไขของอุณหภูมิทางเข้าที่ 343 เคลวิน ความเร็วอากาศเข้า 0.5, 0.75 และ 1.0 เมตรต่อวินาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตรเมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที โดยมีเงื่อนไขดังนี้ เมื่อภายในห้องอบแห้งที่ไม่มีวัสดุพูนในห้องอบ ลักษณะการกระจายอุณหภูมิ มีทิศทางไปในทางเดียวกันเมื่อเปลี่ยนความเร็วอากาศเข้า ลักษณะการกระจายอุณหภูมิ ภายในห้องอบแห้ง ทั้งห้องจะค่อนข้างคงที่ ที่อุณหภูมิ 343 เคลวิน และในส่วนของห้องอบแห้งที่มีวัสดุพูนภายในห้องอบแห้ง ลักษณะการกระจาย อุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง เมื่อเพิ่มความเร็วอากาศเข้า ลักษณะการกระจายตัวของอากาศร้อนภายในห้องอบแห้งมีแนวโน้ม ค่อนข้างสม่ำเสมอทั้งห้องอบแห้งมากขึ้น เมื่ออากาศพาความร้อนจากทางเข้ามาถ่ายโอนความร้อนภายในห้องอบแห้งบริเวณทางเข้าภายในห้องอบแห้งก่อน เมื่อได้รับความร้อนแล้วความหนาแน่นของอากาศน้อยลงขยายตัวลอยตัวสูงขึ้นพร้อมทั้งพาความร้อนไปด้วย ขณะเดียวกันอากาศ บริเวณทางออก ส่วนอื่นที่ยังไม่ได้รับความร้อนยังมีความหนาแน่นของมากกว่าจะเคลื่อนมาแทนที่เป็นแบบนี้ไปเรื่อยๆ จนอากาศภายในห้องอบแห้งนั้นได้รับความร้อนทั่วกัน ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิ ภายในห้องอบแห้ง มีลักษณะคล้ายทุบแบบจำลอง



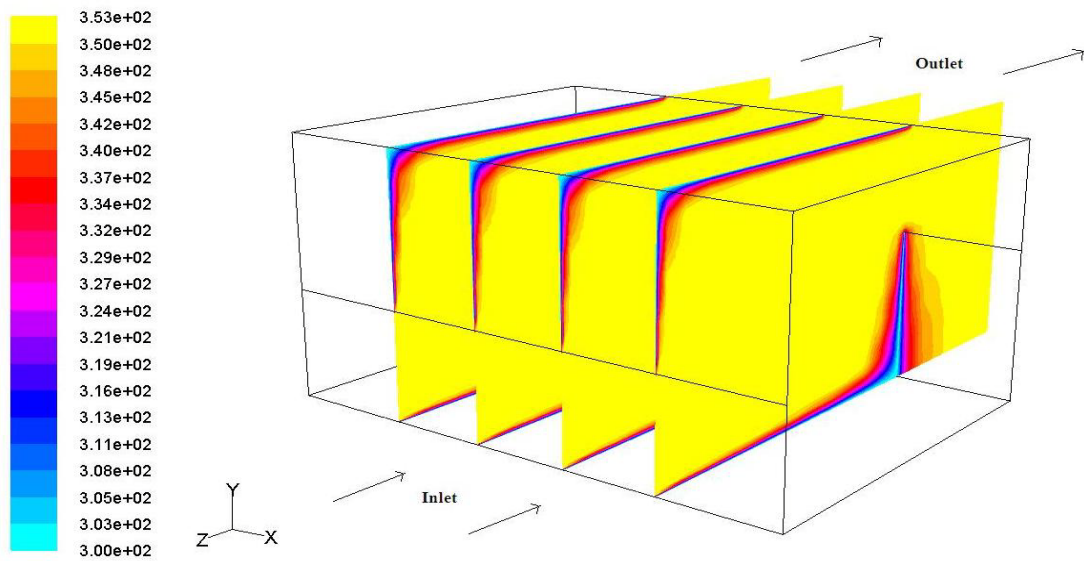
Contours of Static Temperature (k) (Time=9.0000e+02)

ภาพประกอบ 43 แสดงการกระจาย Static Temperature ภายในห้องอบแห้งโดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 353 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.5 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร



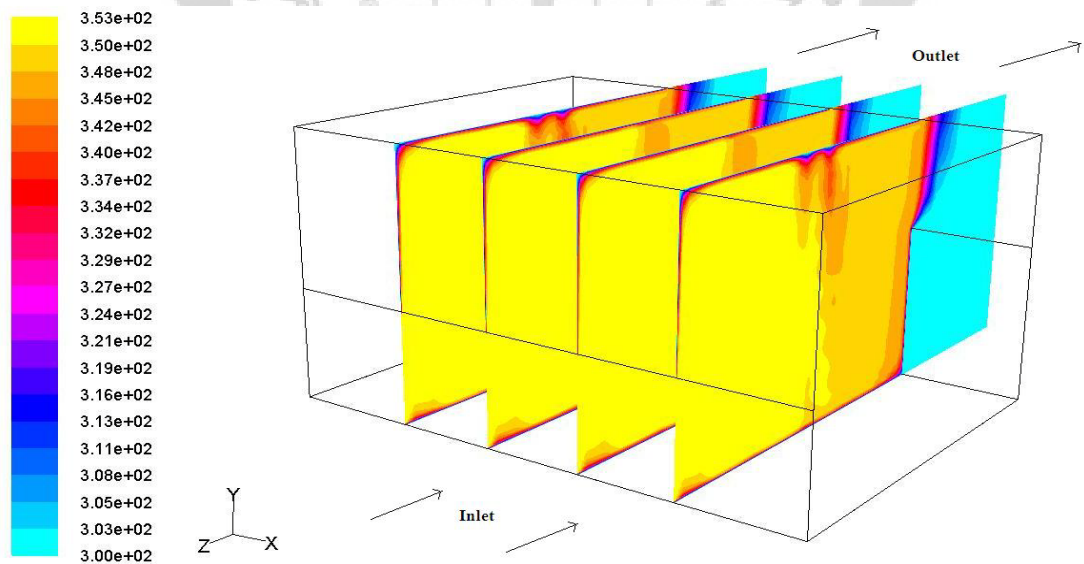
Contours of Static Temperature (k) (Time=9.0000e+02)

ภาพประกอบ 44 แสดงการกระจาย Static Temperature ภายในห้องอบแห้งโดยมีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 353 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.5 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร



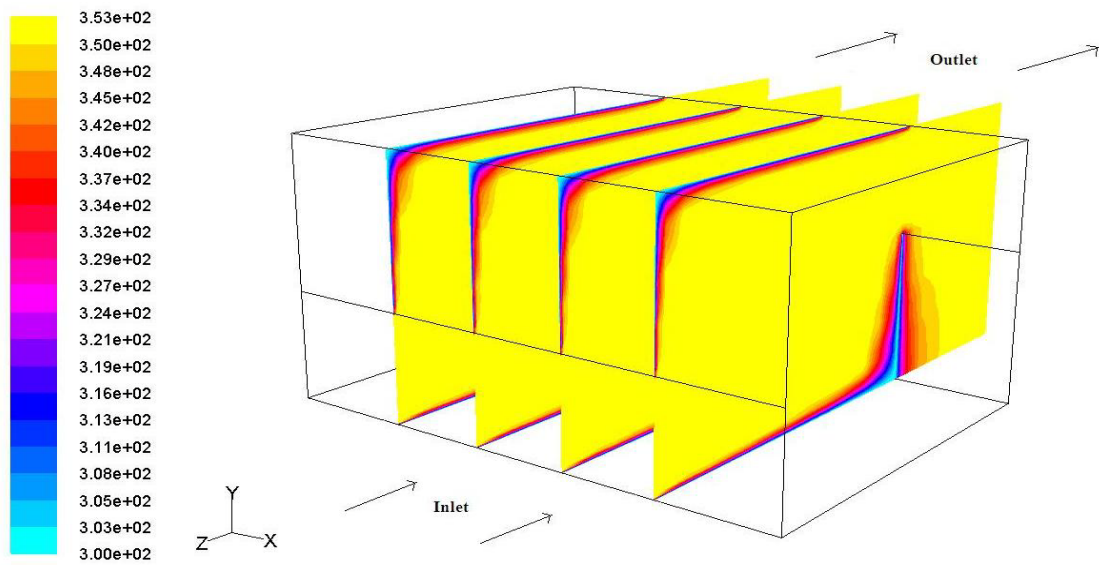
Contours of Static Temperature (k) (Time=9.0000e+02)

ภาพประกอบ 45 แสดงการกระจาย Static Temperature ภายในห้องอบแห้งโดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 353 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.75 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร



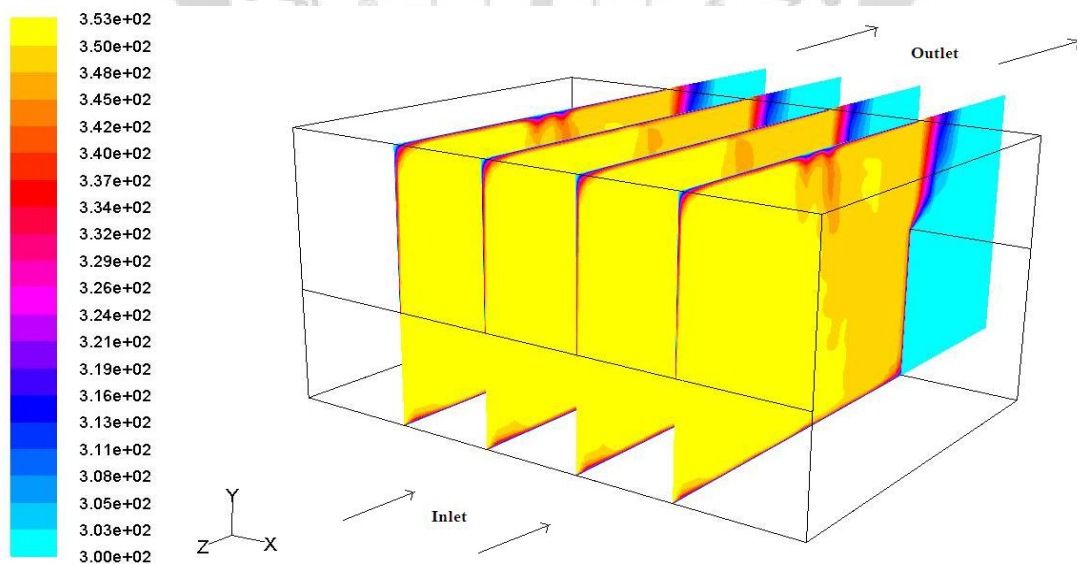
Contours of Static Temperature (k) (Time=9.0000e+02)

ภาพประกอบ 46 แสดงการกระจาย Static Temperature ภายในห้องอบแห้งโดยมีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 353 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.75 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร



Contours of Static Temperature (k) (Time=9.0000e+02)

ภาพประกอบ 47 แสดงการกระจาย Static Temperature ภายในห้องอบแห้งโดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 353 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร



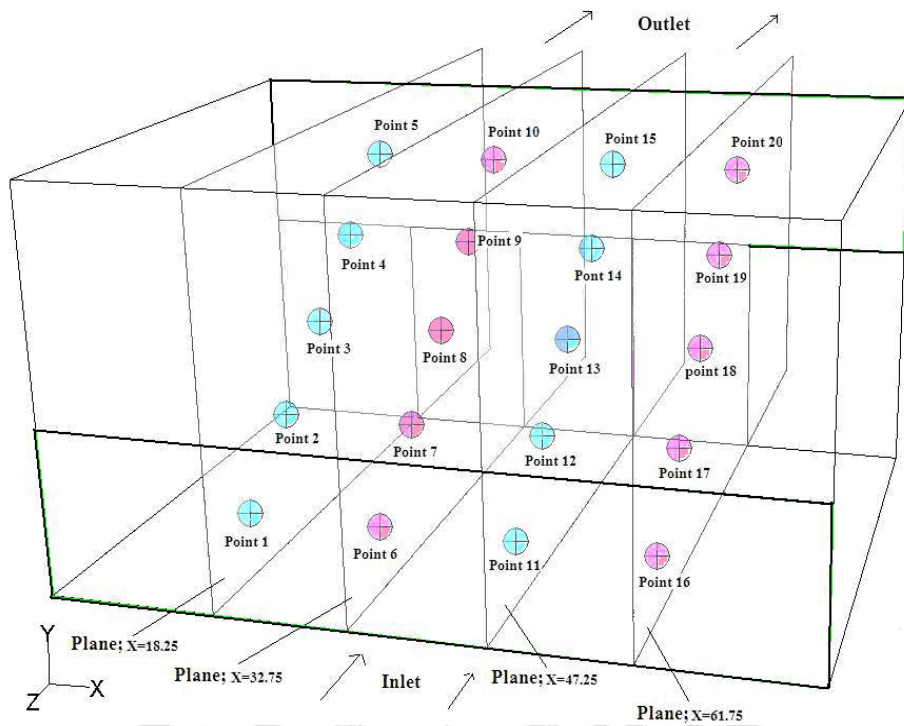
Contours of Static Temperature (k) (Time=9.0000e+02)

ภาพประกอบ 48 แสดงการกระจาย Static Temperature ภายในห้องอบแห้งโดยมีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 353 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร

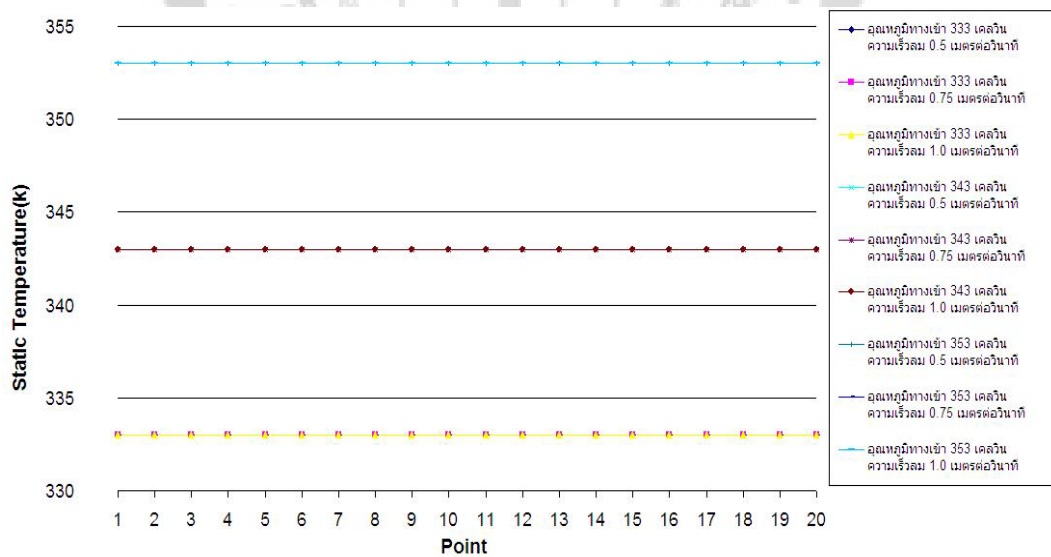
จากภาพประกอบ 43 ถึง 48 แสดงการกระจาย Static Temperature ภายในห้องอบแห้ง โดยมีเงื่อนไขของอุณหภูมิทางเข้าที่ 353 เคลวิน ความเร็วอากาศเข้า 0.5, 0.75 และ 1.0 เมตรต่อวินาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตรเมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที โดยมีเงื่อนไขดังนี้ เมื่อภายในห้องอบแห้งที่ไม่มีวัสดุพูนในห้องอบ ลักษณะการกระจายอุณหภูมิ มีทิศทางไปในทางเดียวกันเมื่อเปลี่ยนความเร็วอากาศเข้า ลักษณะการกระจายอุณหภูมิ ภายในห้องอบแห้ง ทั้งห้องจะค่อนข้างคงที่ ที่อุณหภูมิ 353 เคลวิน และในส่วนของห้องอบแห้งที่มีวัสดุพูนภายในห้องอบแห้ง ลักษณะการกระจาย อุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง เมื่อเพิ่มความเร็วอากาศเข้า ลักษณะการกระจายตัวของอากาศร้อนภายในห้องอบแห้งมีแนวโน้ม ค่อนข้างสม่ำเสมอทั้งห้องอบแห้งมากขึ้น เมื่ออากาศพาความร้อนจากทางเข้ามาถ่ายโอนความร้อนภายในห้องอบแห้งบริเวณทางเข้าภายในห้องอบแห้งก่อน เมื่อได้รับความร้อนแล้วความหนาแน่นของอากาศน้อยลงขยายตัวลอยตัวสูงขึ้นพร้อมทั้งพาความร้อนไปด้วย ขณะเดียวกันอากาศ บริเวณทางออก ส่วนอื่นที่ยังไม่ได้รับความร้อนยังมีความหนาแน่นของมากกว่าจะเคลื่อนมาแทนที่เป็นแบบนี้ไปเรื่อยๆ จนอากาศภายในห้องอบแห้งนั้นได้รับความร้อนทั่วกัน ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิ ภายในห้องอบแห้ง มีลักษณะคล้ายทุกแบบจำลอง

จากภาพประกอบ 50 และ 51 กราฟแสดง Static Temperature ภายในห้องอบแห้ง ภายในห้องอบแห้งโดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบ แห้ง ณ ตำแหน่ง Point 1 ถึง Point 20 ที่อุณหภูมิ 333,343 และ 353 เคลวิน ที่ความเร็ว 0.5, 0.75, 1.0 เมตรต่อวินาที ในเวลา 5 และ 15 นาที จากกราฟภาพประกอบที่ 4.20 และ 4.21 อุณหภูมิภายในห้องอบแห้งที่ไม่มีวัสดุพูนมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิอากาศเข้าของแต่ละช่วงอุณหภูมิ

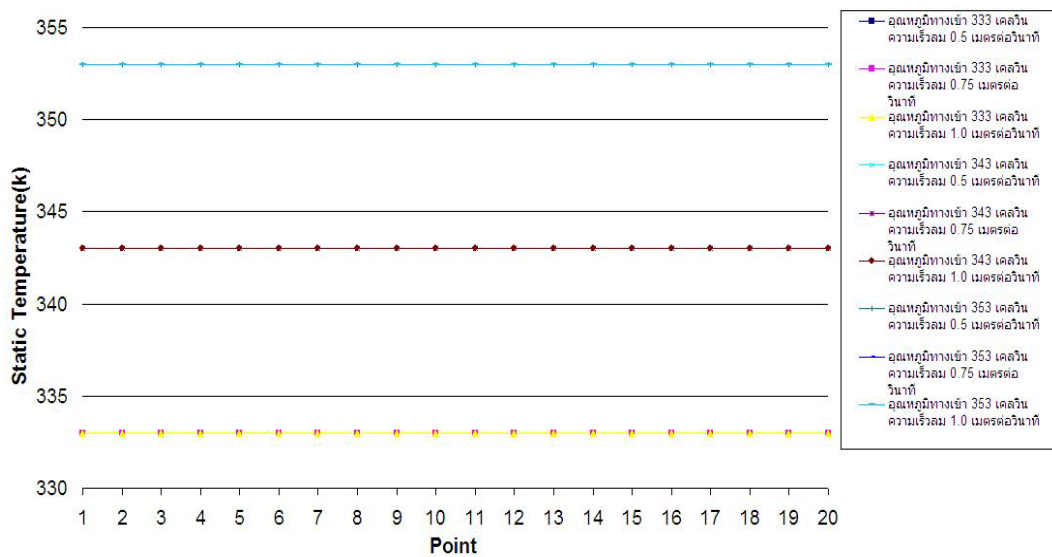
จากภาพประกอบ 52 และ 53 กราฟแสดง Static Temperature ภายในห้องอบแห้ง โดยภายในห้องอบแห้งมีวัสดุพูนในห้องอบ แห้ง ณ ตำแหน่ง Point 1 ถึง Point 20 ที่อุณหภูมิ 333, 343 และ 353 เคลวิน ที่ความเร็ว 0.5, 0.75, 1.0 เมตรต่อวินาที ในเวลา 5 นาที ที่ Point 1, 2, 6, 7, 11, 12, 16 และ Point 17 เป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงในแต่ละช่วงการเปลี่ยนความเร็วและอุณหภูมิอากาศเข้า เนื่องจากอยู่ในบริเวณช่องอากาศเข้า อากาศร้อน จากทางเข้า จะมาถ่ายโอนความร้อนภายในห้องอบแห้งบริเวณนี้ก่อน ในส่วนของที่ Point 4, 5, 9, 10, 14, 15, 19 และ Point 20 มีอุณหภูมิลดลงต่ำกว่าเล็กน้อย เนื่องจากอยู่ใกล้บริเวณบริเวณ ช่องอากาศไหลออก และเมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที ลักษณะการกระจาย อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ยังคงมีแนวโน้มคล้ายช่วงแรกอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากเดิมเล็กน้อย ในส่วนของ การเปลี่ยนความเร็วอากาศเข้าที่ความเร็วอากาศเข้า 1 เมตรต่อวินาที จะส่งผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งดีที่สุดเนื่องจากที่ความเร็วที่เพิ่มขึ้นจะ อากาศพาความร้อนจากทางเข้ามาถ่ายโอนความร้อนภายในห้องอบแห้งได้เร็วเพิ่มขึ้น



ภาพประกอบ 49 แสดงตำแหน่งจาก Point 1 ถึง Point 20 จากตำแหน่งอากาศเข้าถึงตำแหน่งอากาศไหลออกที่ใช้ศึกษาภายในห้องอบแห้ง

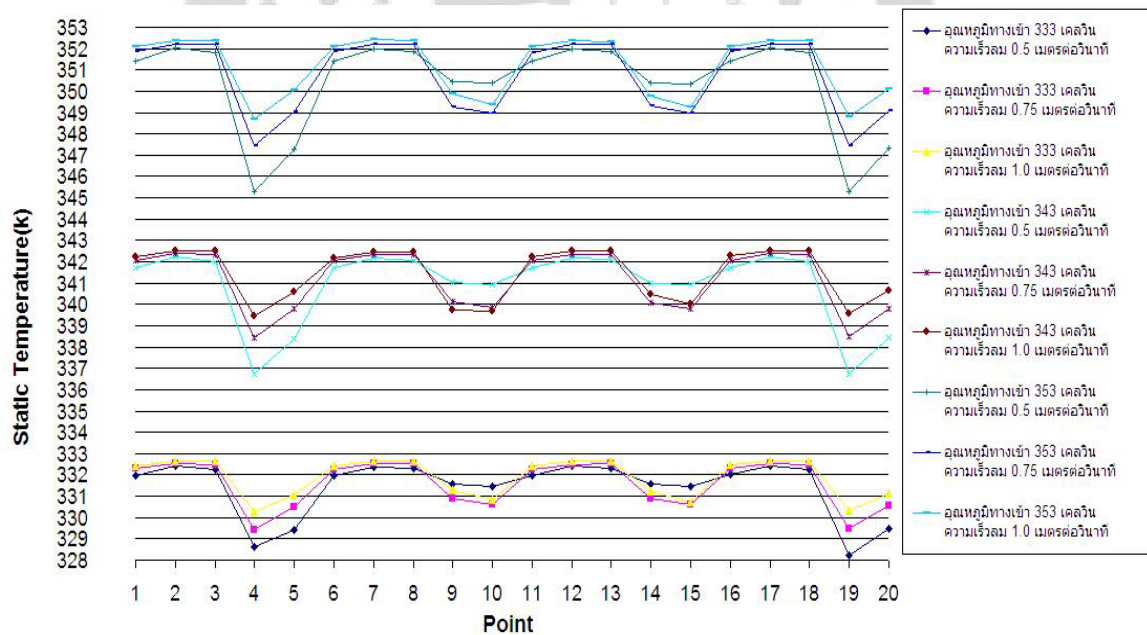


ภาพประกอบ 50 กราฟแสดง Static Temperature ภายในห้องอบแห้ง ภายในห้องอบแห้ง โดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบแห้ง ตำแหน่ง Point 1 ถึง Point 20 ที่อุณหภูมิ 333, 343 และ 353 เคลวิน ที่ความเร็ว 0.5, 0.75, 1.0 เมตรต่อวินาที ในเวลา 5 นาที ตามลำดับ



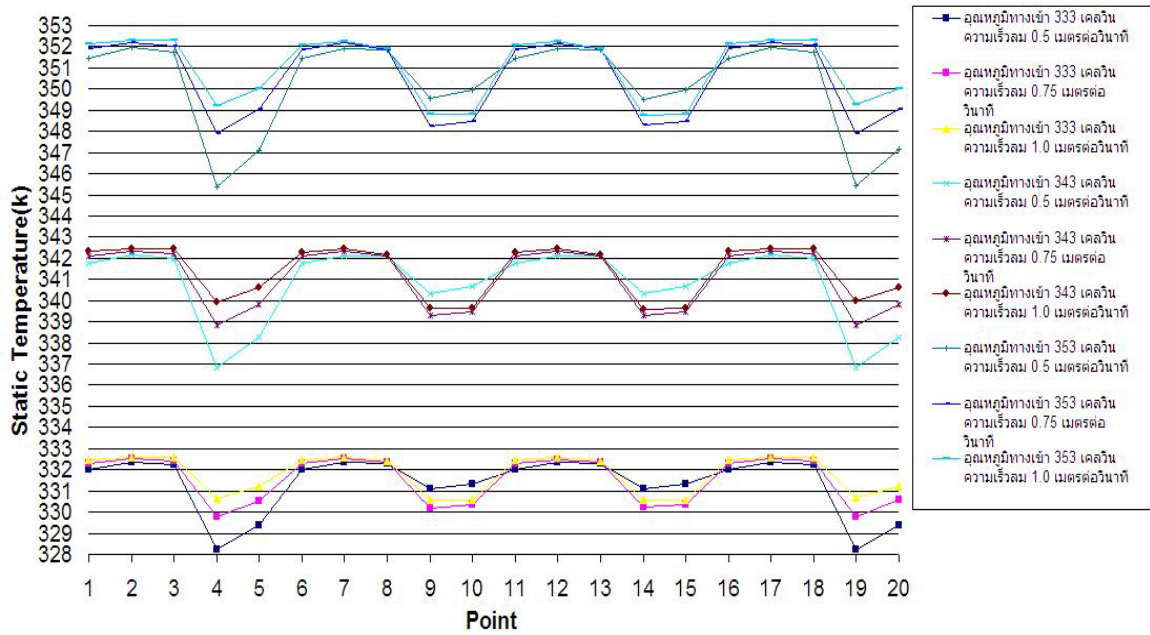
ภาพประกอบ 51 กราฟแสดง Static Temperature ภายในห้องอบแห้ง ภายในห้องอบแห้ง

โดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบ ณ ตำแหน่ง Point 1 ถึง Point 20 ที่อุณหภูมิ 333, 343 และ 353 เคลวิน ที่ความเร็ว 0.5, 0.75, 1.0 เมตรต่อวินาที ในเวลา 15 นาที ตามลำดับ

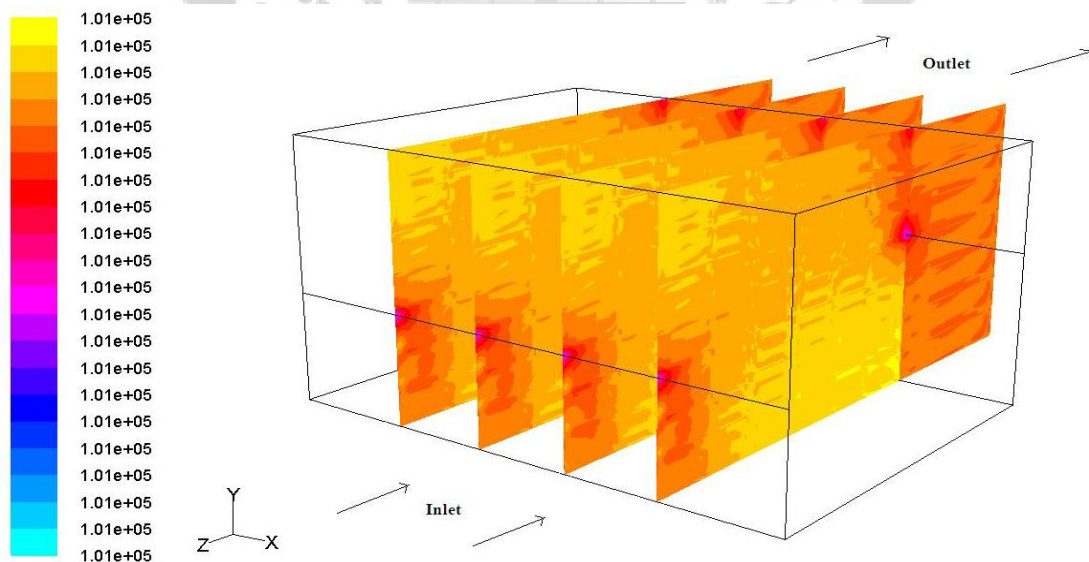


ภาพประกอบ 52 กราฟแสดง Static Temperature ภายในห้องอบแห้งโดยภายในห้องอบแห้ง

มีวัสดุพูนในห้องอบ ณ ตำแหน่ง Point 1 ถึง Point 20 ที่อุณหภูมิ 333, 343 และ 353 เคลวิน ที่ความเร็ว 0.5, 0.75, 1.0 เมตรต่อวินาที ในเวลา 5 นาที ตามลำดับ

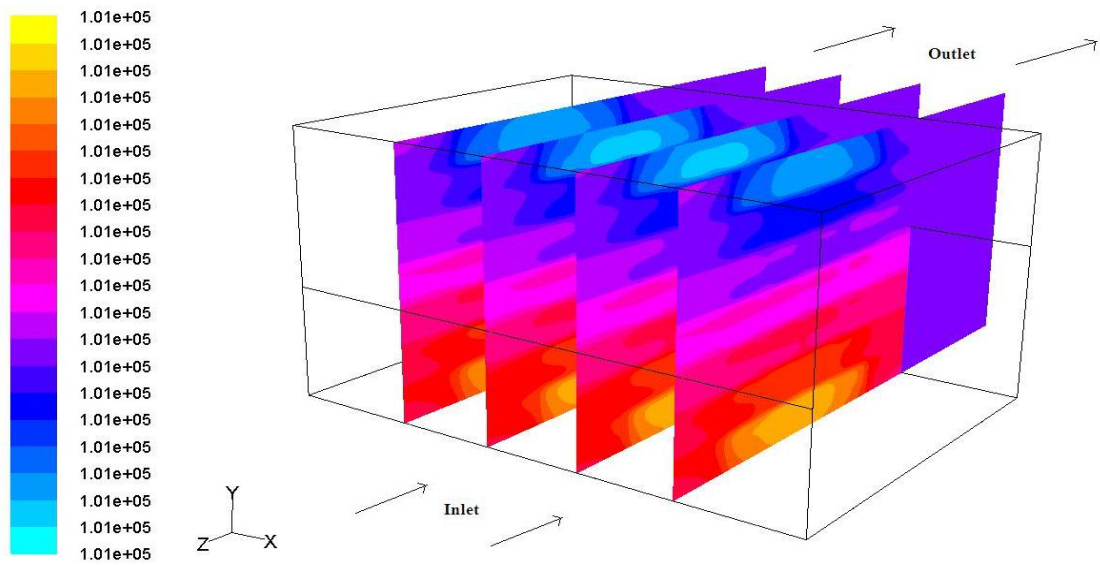


ภาพประกอบ 53 กราฟแสดง Static Temperature ภายในห้องอบแห้งโดยภายในห้องอบแห้ง มีวัสดุพูนในห้องอบ ณ ตำแหน่ง Point 1 ถึง Point 20 ที่อุณหภูมิ 333,343 และ 353 เคลวิน ที่ความเร็ว 0.5, 0.75, 1.0 เมตรต่อวินาที ในเวลา 15 นาที ตามลำดับ



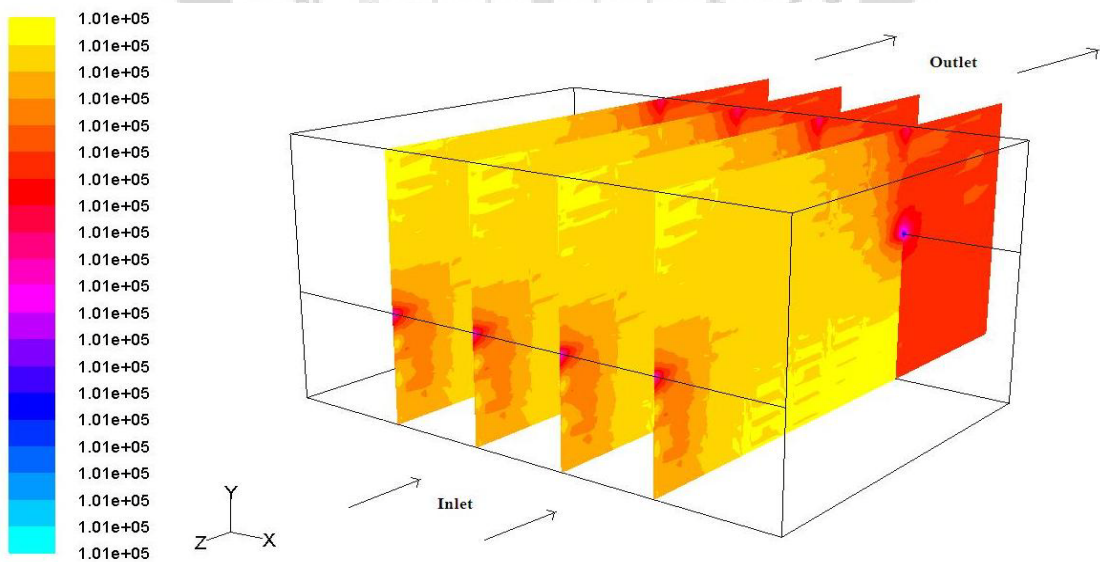
Contours of Static Pressure (pascal) (Time=9.0000e+02)

ภาพประกอบ 54 แสดงการกระจาย Static Pressure ภายในห้องอบแห้งโดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 333 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.5 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ X=18.25, X=32.75, X=47.25 และ X=61.75 เซนติเมตร



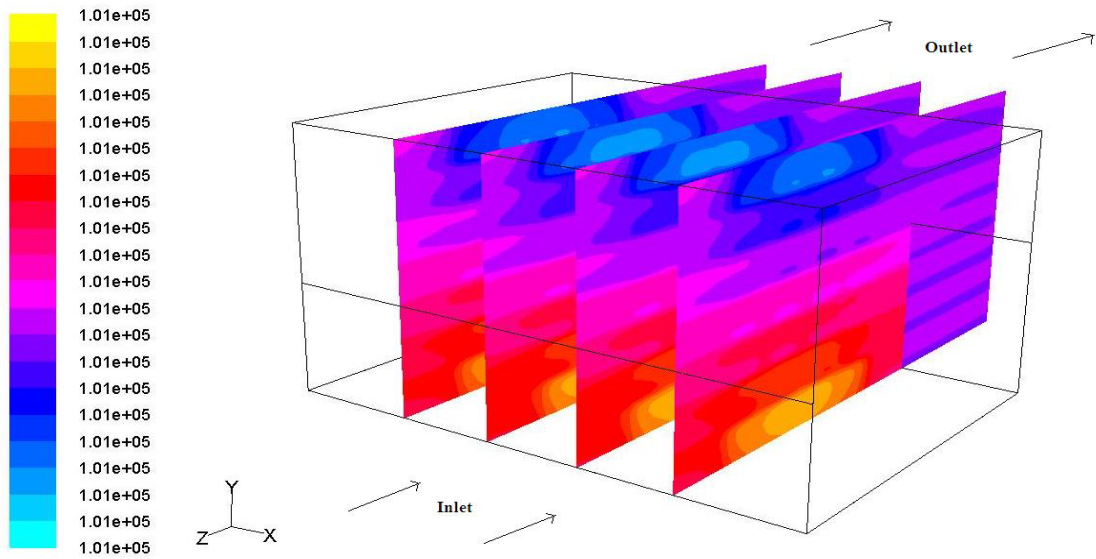
Contours of Static Pressure (pascal) (Time=9.0000e+02)

ภาพประกอบ 55 แสดงการกระจาย Static Pressure ภายในห้องอบแห้งโดยมีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 333 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.5 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร



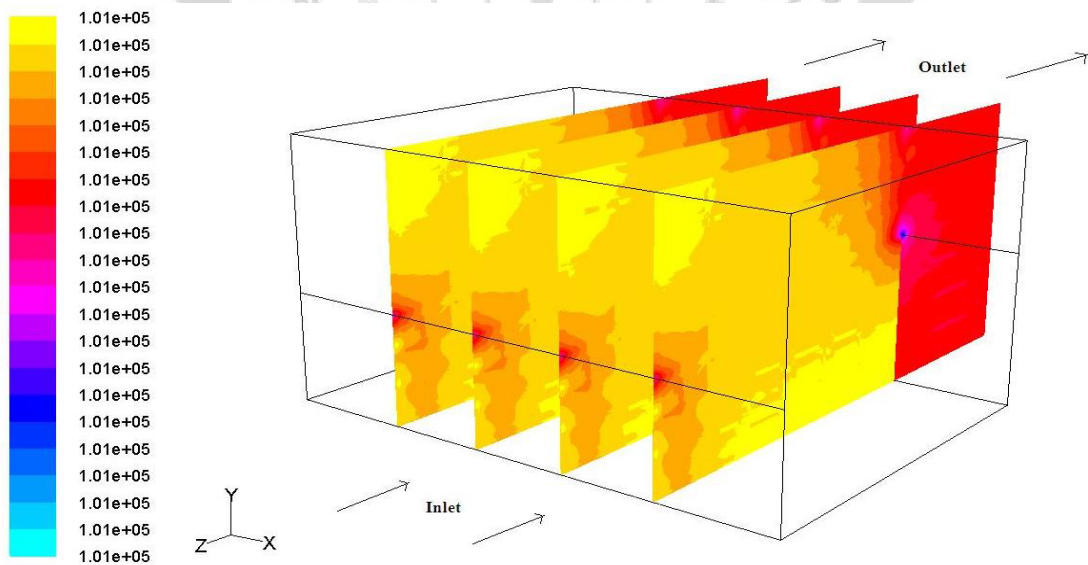
Contours of Static Pressure (pascal) (Time=9.0000e+02)

ภาพประกอบ 56 แสดงการกระจาย Static Pressure ภายในห้องอบแห้งโดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 333 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.75 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร



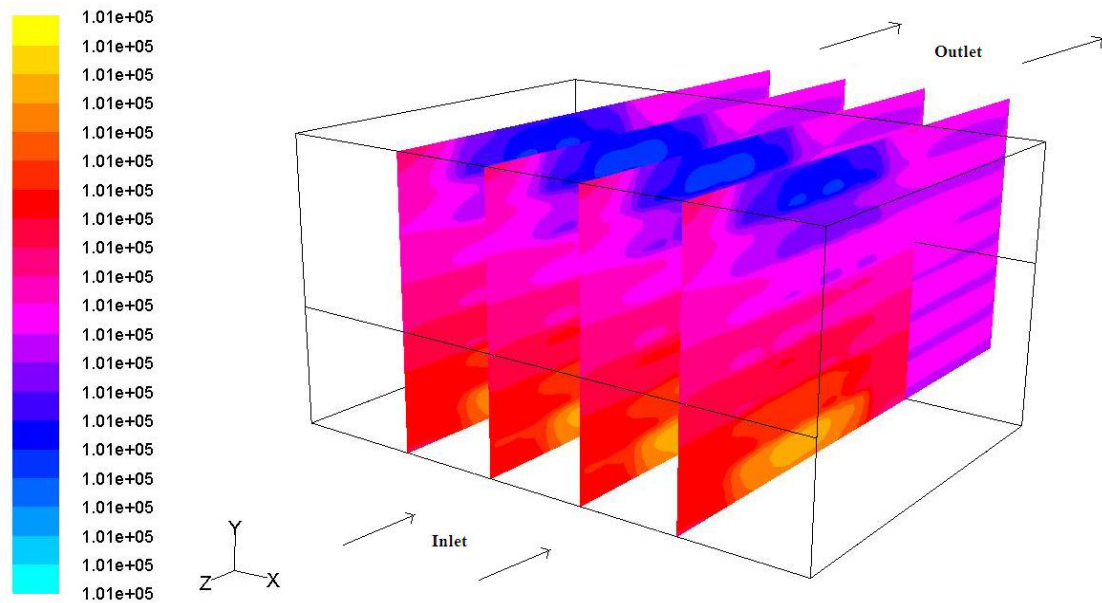
Contours of Static Pressure (pascal) (Time=9.0000e+02)

ภาพประกอบ 57 แสดงการกระจาย Static Pressure ภายในห้องอบแห้งโดยมีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 333 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.75 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร



Contours of Static Pressure (pascal) (Time=9.0000e+02)

ภาพประกอบ 58 แสดงการกระจาย Static Pressure ภายในห้องอบแห้งโดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 333 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร

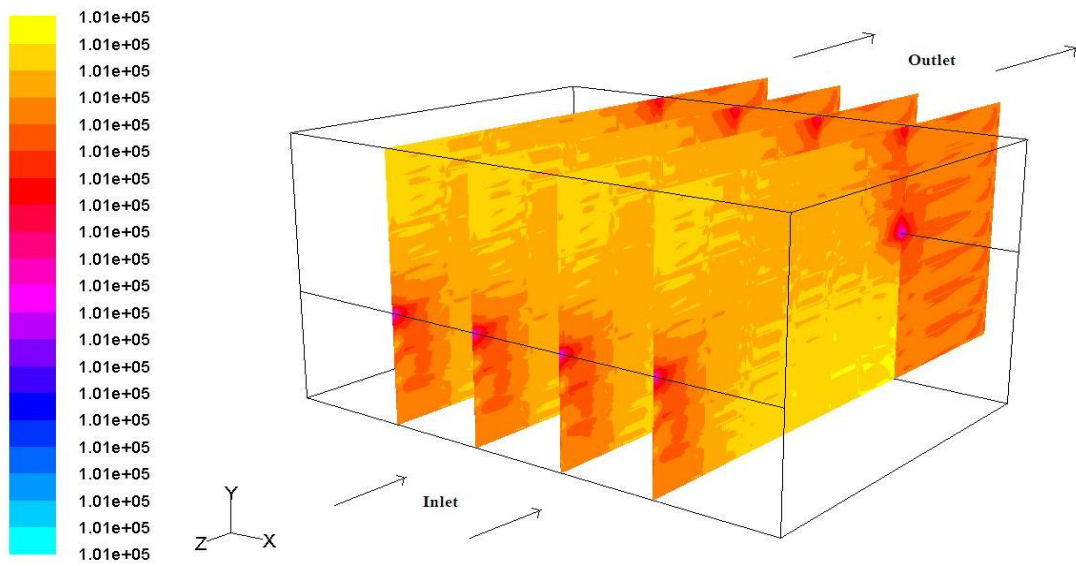


Contours of Static Pressure (pascal) (Time=9.0000e+02)

ภาพประกอบ 59 แสดงการกระจาย Static Pressure ภายในห้องอบแห้งโดยมีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 333 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร

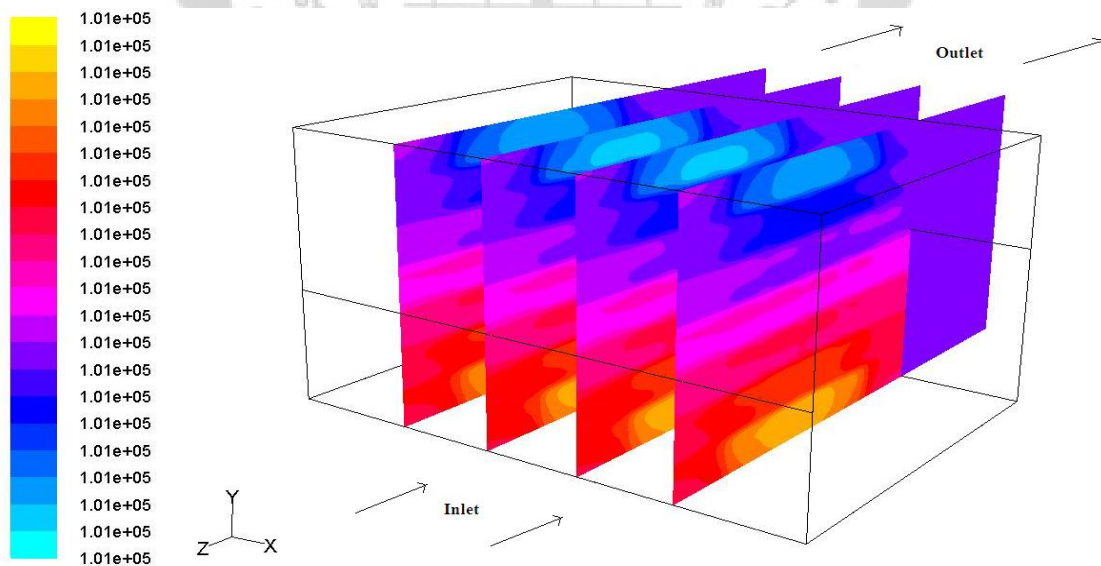
จากภาพประกอบ 54 ถึง 59 แสดงการกระจาย Static Pressure ภายในห้องอบแห้งที่ อุณหภูมิอากาศเข้า 333 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.5, 0.75 และ 1.0 เมตรต่อวินาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร ที่เวลา 15 นาที

ลักษณะการกระจาย Static Pressure ภายในห้องอบแห้งโดยภายในห้องอบแห้งที่ไม่มี วัสดุพูนในห้องอบ แนวโน้มการกระจายตัวของ Static Pressure ภายในห้องอบแห้งที่ไม่มีวัสดุพูน ในห้องอบ ความดันภายในห้องอบแห้งจะมีค่า ค่อนข้างคงที่ในแต่ละระนาบ Static Pressure ภายใน ห้องอบแห้งมีค่าโดยเฉลี่ยอยู่ประมาณ 101325 ปาสคาล ในส่วนของห้องแห้งที่มี วัสดุพูนลักษณะการ กระจายตัวของ Static Pressure ภายในห้องอบแห้งที่มีวัสดุพูนในห้องอบแห้ง มีลักษณะคล้ายกันทุก แบบจำลอง Static Pressure ภายในห้องอบแห้งจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในแต่ละช่วงความเร็วที่เพิ่มขึ้น ลักษณะการกระจาย Static Pressure ภายในห้องอบแห้งจะสูงที่สุดบริเวณทางช่องอากาศเข้าและลด ต่ำลงจนถึงช่องอากาศไหลออก โดยที่บริเวณผนังห้องด้านบนบนจะมีความดันบรรยากาศต่ำที่สุด



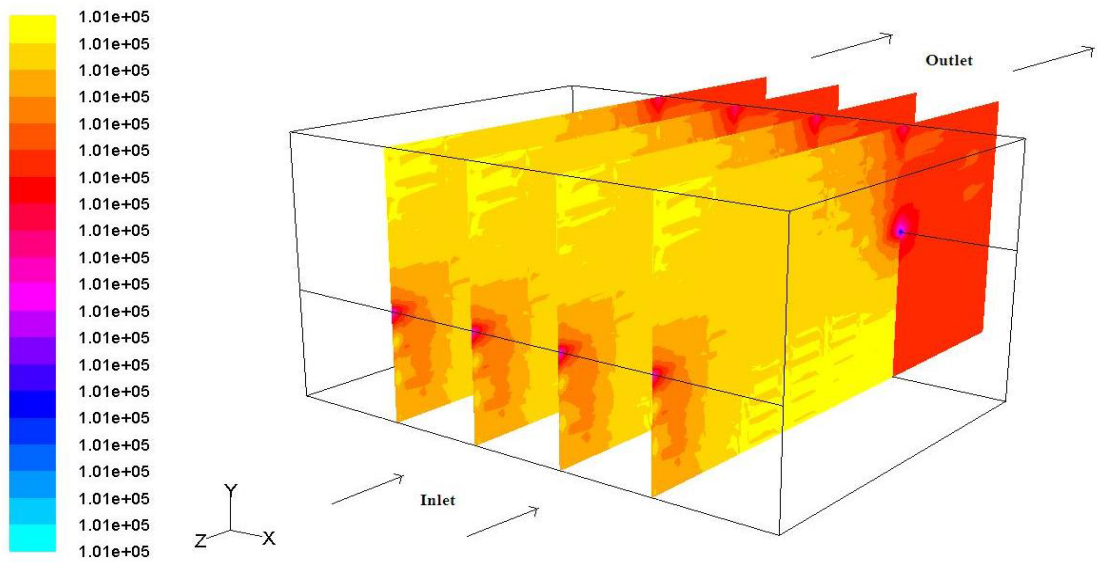
Contours of Static Pressure (pascal) (Time=9.0000e+02)

ภาพประกอบ 60 แสดงการกระจาย Static Pressure ภายในห้องอบแห้งโดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 343 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.5 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร



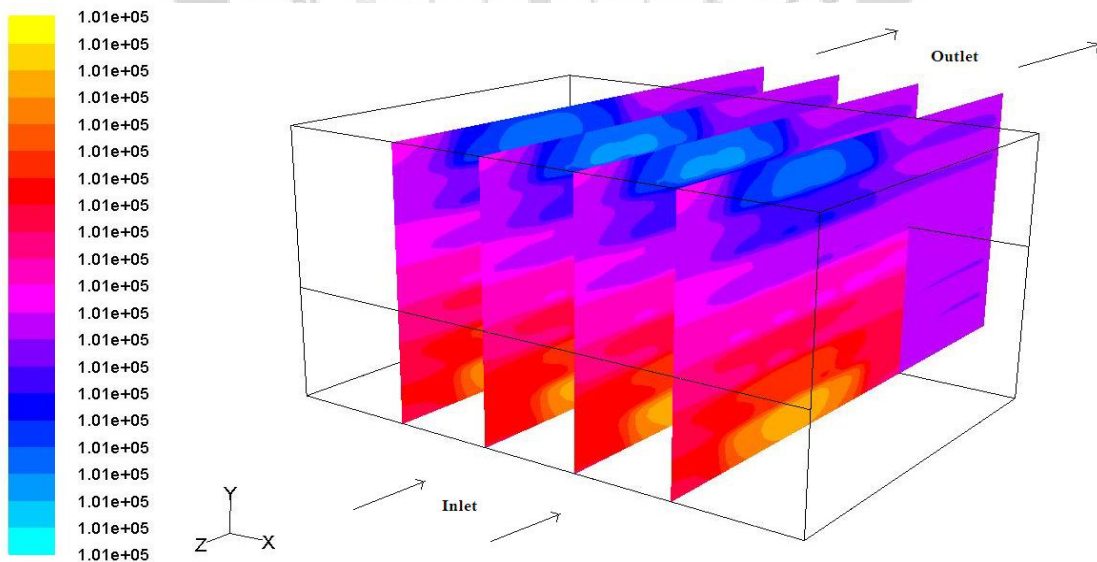
Contours of Static Pressure (pascal) (Time=9.0000e+02)

ภาพประกอบ 61 แสดงการกระจาย Static Pressure ภายในห้องอบแห้งโดยมีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 343 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.5 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร



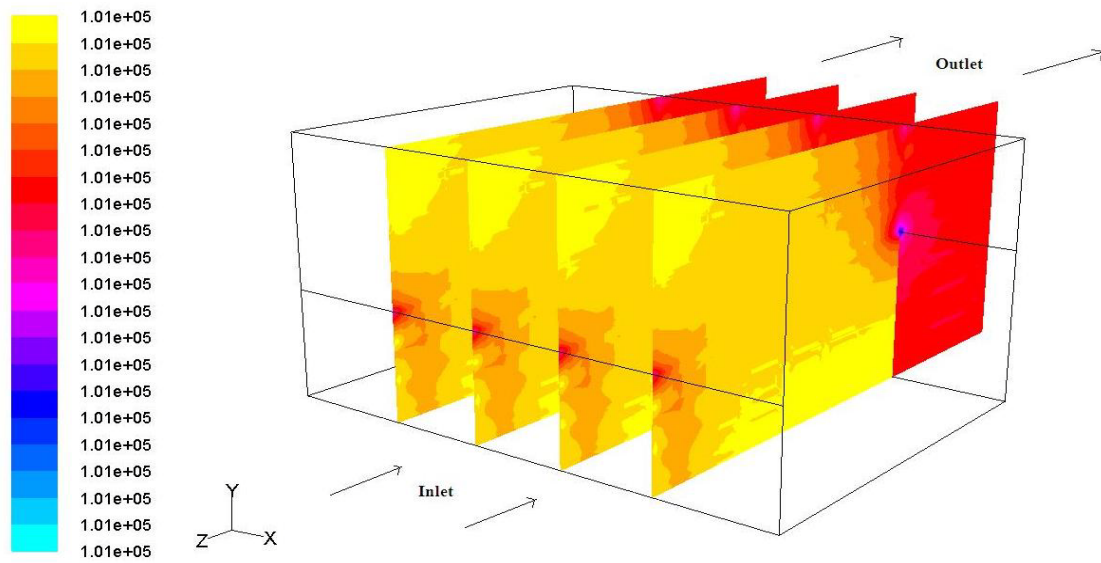
Contours of Static Pressure (pascal) (Time=9.0000e+02)

ภาพประกอบ 62 แสดงการกระจาย Static Pressure ภายในห้องอบแห้งโดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 343 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.75 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร



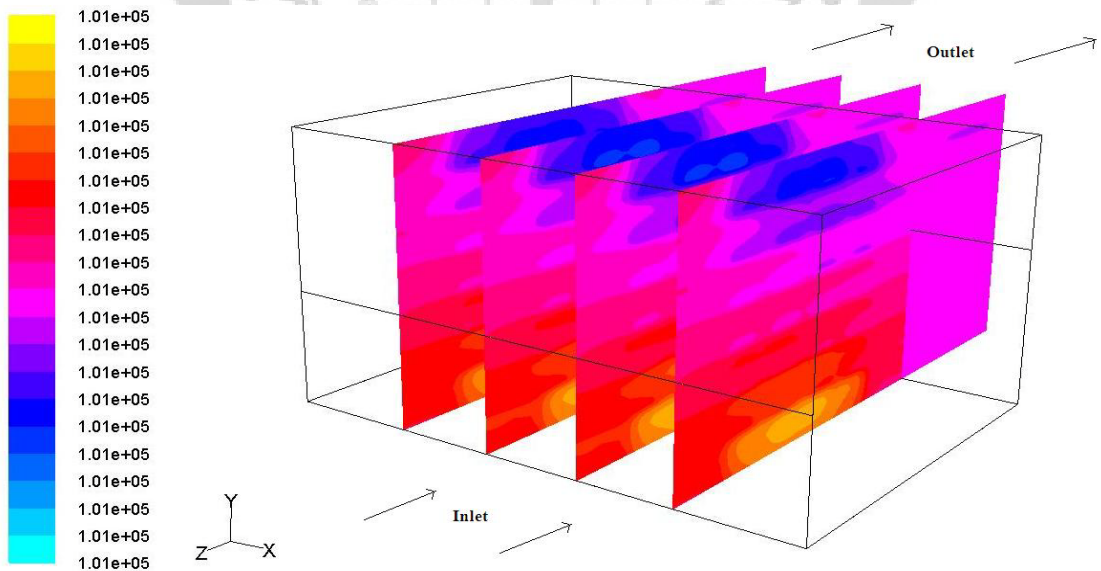
Contours of Static Pressure (pascal) (Time=9.0000e+02)

ภาพประกอบ 63 แสดงการกระจาย Static Pressure ภายในห้องอบแห้งโดยมีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 343 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.75 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร



Contours of Static Pressure (pascal) (Time=9.0000e+02)

ภาพประกอบ 64 แสดงการกระจาย Static Pressure ภายในห้องอบแห้งโดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 343 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร

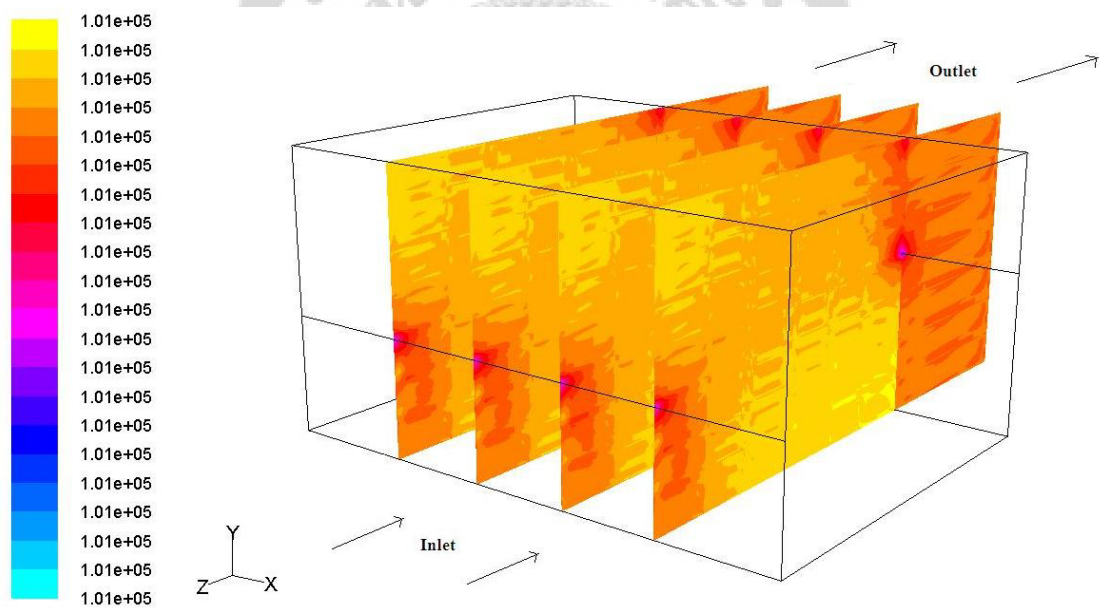


Contours of Static Pressure (pascal) (Time=9.0000e+02)

ภาพประกอบ 65 แสดงการกระจาย Static Pressure ภายในห้องอบแห้งโดยมีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 343 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร

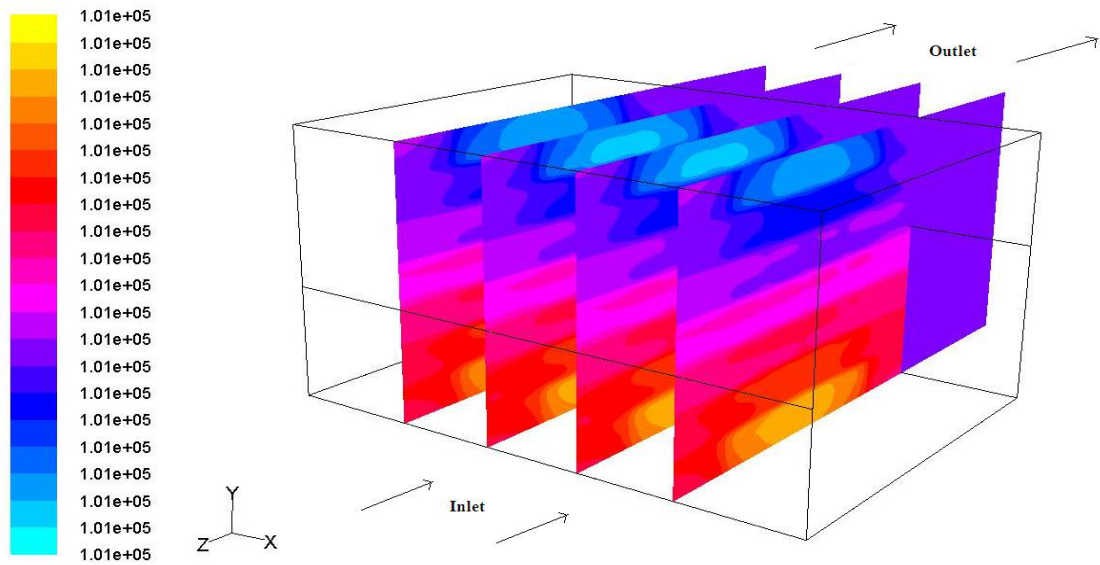
จากภาพประกอบ 59 ถึง 65 แสดงการกระจาย Static Pressure ภายในห้องอบแห้ง ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 343 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.5, 0.75 และ 1.0 เมตรต่อวินาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร ที่เวลา 15 นาที

ลักษณะการกระจาย Static Pressure ภายในห้องอบแห้งโดยภายในห้องอบแห้งที่ไม่มีวัสดุพูนในห้องอบ แนวโน้มการกระจายตัวของ Static Pressure ภายในห้องอบแห้งที่ไม่มีวัสดุพูนในห้องอบ ความดันภายในห้องอบแห้งจะมีค่าค่อนข้างคงที่ในแต่ละระนาบ Static Pressure ภายในห้องอบแห้งมีค่าโดยเฉลี่ยอยู่ประมาณ 101325 ปาสคาล ในส่วนของห้อง แห้งที่มีวัสดุพูนลักษณะการกระจายตัวของ Static Pressure ภายในห้องอบแห้งที่มีวัสดุพูนในห้องอบแห้ง มีลักษณะคล้ายกันทุกแบบจำลอง Static Pressure ภายในห้องอบแห้งจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในแต่ละช่วงความเร็วที่เพิ่มขึ้น ลักษณะการกระจาย Static Pressure ภายในห้องอบแห้งจะสูงที่สุดบริเวณทางช่องอากาศเข้าและ ลดต่ำลงจนถึงช่องอากาศไหลออก โดยที่บริเวณผนังห้องด้านบนจะมีความดันบรรยากาศต่ำที่สุด



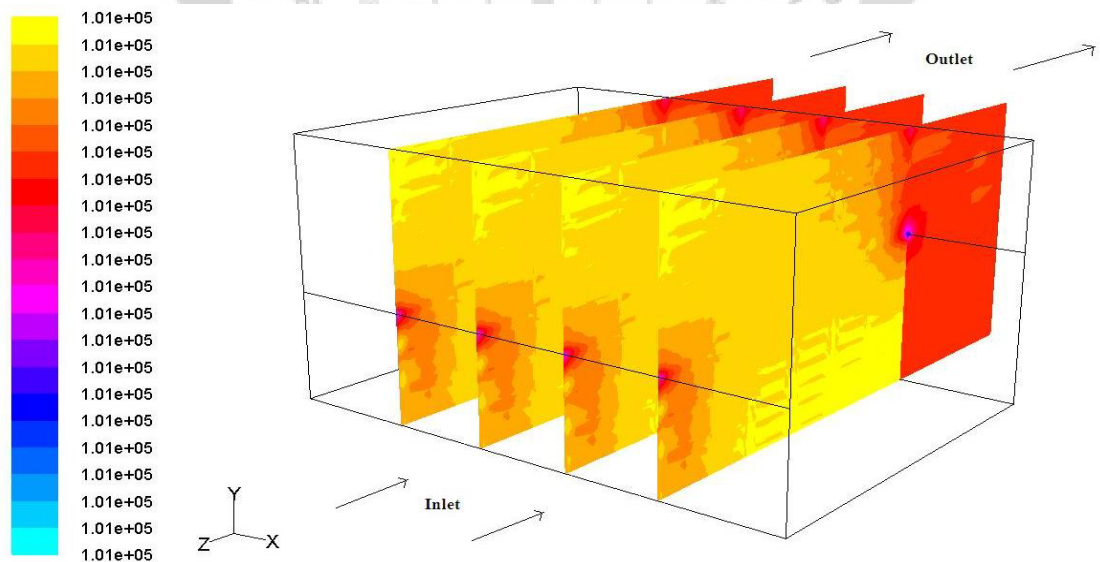
Contours of Static Pressure (pascal) (Time=9.0000e+02)

ภาพประกอบ 66 แสดงการกระจาย Static Pressure ภายในห้องอบแห้งโดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบแห้ง ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 353 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.5 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร



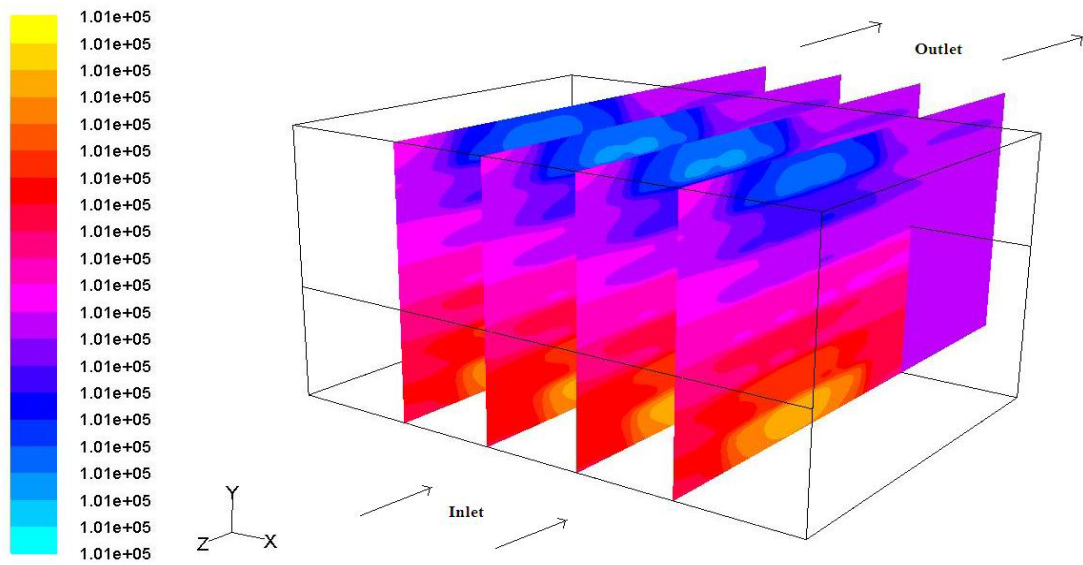
Contours of Static Pressure (pascal) (Time=9.0000e+02)

ภาพประกอบ 67 แสดงการกระจาย Static Pressure ภายในห้องอบแห้งโดยมีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 353 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.5 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร



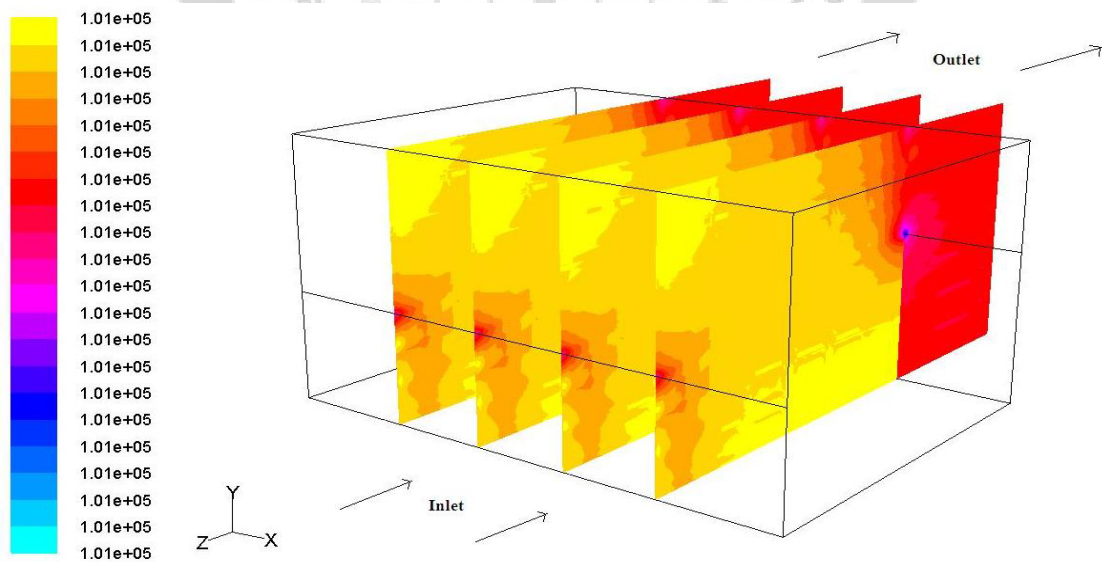
Contours of Static Pressure (pascal) (Time=9.0000e+02)

ภาพประกอบ 68 แสดงการกระจาย Static Pressure ภายในห้องอบแห้งโดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 353 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.75 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร



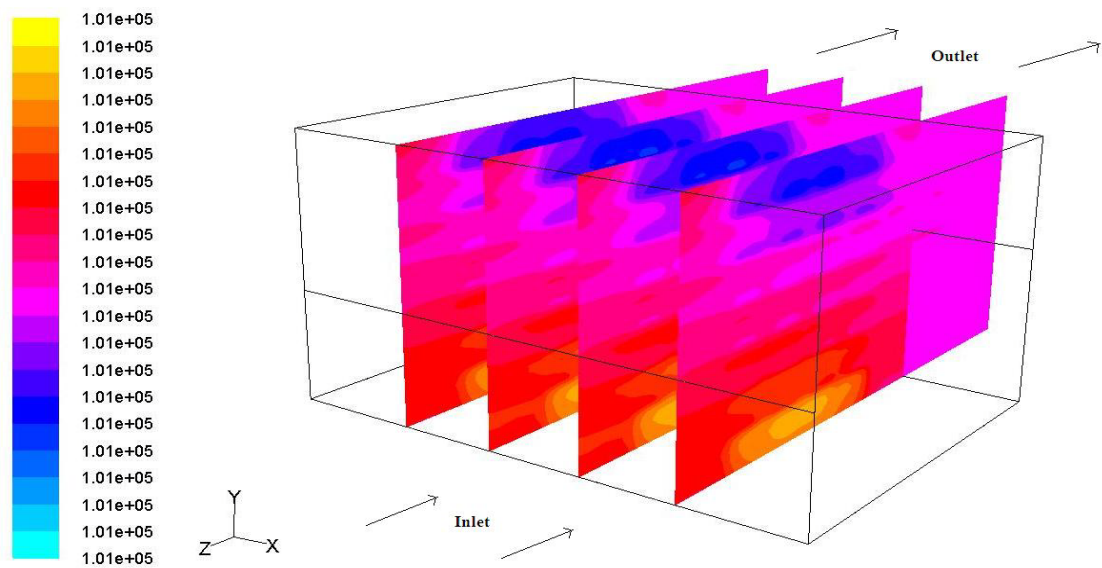
Contours of Static Pressure (pascal) (Time=9.0000e+02)

ภาพประกอบ 69 แสดงการกระจาย Static Pressure ภายในห้องอบแห้งโดยมีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 353 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.75 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร



Contours of Static Pressure (pascal) (Time=9.0000e+02)

ภาพประกอบ 70 แสดงการกระจาย Static Pressure ภายในห้องอบแห้งโดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 353 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร



Contours of Static Pressure (pascal) (Time=9.0000e+02)

ภาพประกอบ 71 แสดงการกระจาย Static Pressure ภายในห้องอบแห้งโดยมีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 353 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร

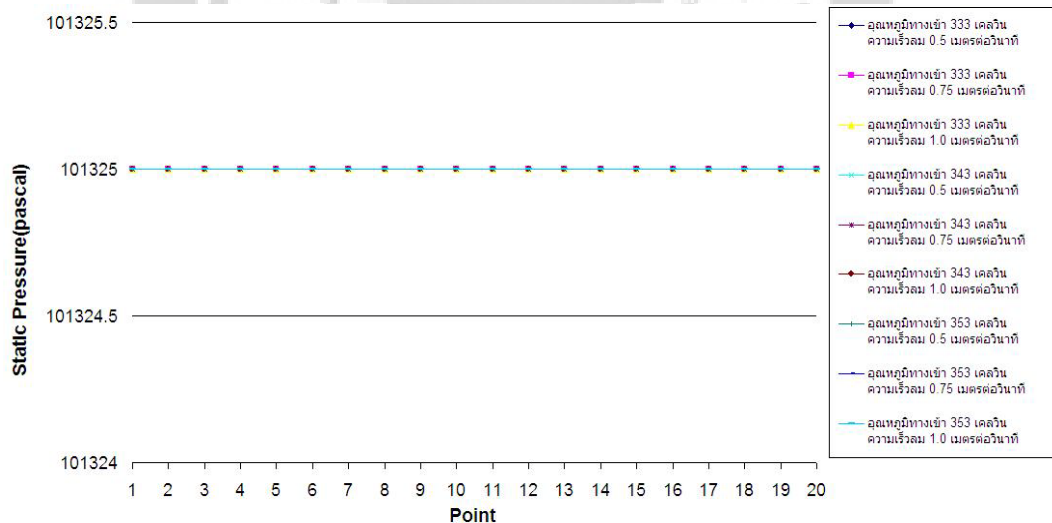
จากภาพประกอบ 66 ถึง 71 แสดงการกระจาย Static Pressure ภายในห้องอบแห้ง ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 353 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.5, 0.75 และ 1.0 เมตรต่อวินาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร ที่เวลา 15 นาที

ลักษณะการกระจาย Static Pressure ภายในห้องอบแห้งโดยภายในห้องอบแห้งที่ไม่มี วัสดุพูนในห้องอบ แนวโน้มการกระจายตัวของ Static Pressure ภายในห้องอบแห้งที่ไม่มีวัสดุพูน ในห้องอบ ความดันภายในห้องอบแห้งจะมีค่าค่อนข้างคงที่ในแต่ละระนาบ Static Pressure ภายใน ห้องอบแห้งมีค่าโดยเฉลี่ยอยู่ประมาณ 101325 ปาสคาล ในส่วนของห้องแห้งที่มีวัสดุพูนลักษณะการ กระจายตัวของ Static Pressure ภายในห้องอบแห้งที่มีวัสดุพูนในห้องอบแห้ง มีลักษณะคล้ายกันทุก แบบจำลอง Static Pressure ภายในห้องอบแห้งจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในแต่ละช่วงความเร็วที่เพิ่มขึ้น ลักษณะการกระจาย Static Pressure ภายในห้องอบแห้งจะสูงที่สุดบริเวณทางช่องอากาศเข้าและลด ต่ำลงจนถึงช่องอากาศไหลออก โดยที่บริเวณผนังห้องด้านบนจะมีความดันบรรยากาศต่ำที่สุด

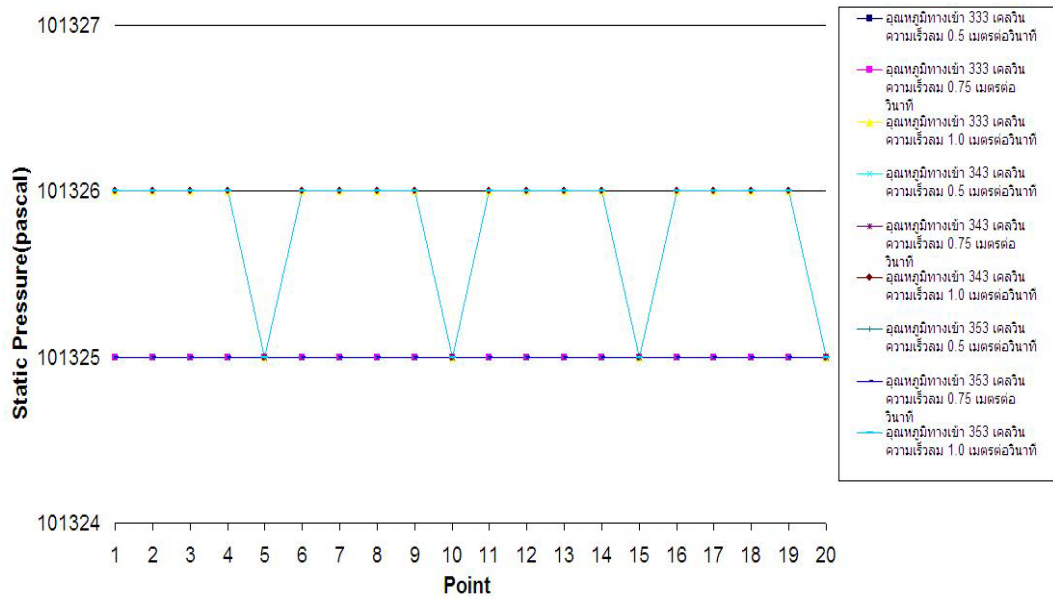
จากภาพประกอบ 72 ถึง 73 แสดงการกระจายความดันภายในห้องอบแห้งโดยภายใน ห้องอบแห้งที่ไม่มีวัสดุพูนในห้องอบ และมีวัสดุพูนในห้อง อบ โดยมีเงื่อนไขของอุณหภูมิทางเข้าที่ 343 เคลวิน ความเร็วอากาศเข้า 0.5, 0.75 และ 1.0 เมตรต่อวินาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$,

$X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร เมื่อเวลาผ่านไป 5 และ 15 นาที แนวโน้มการกระจายตัวของความดันภายในห้องอบแห้งที่ไม่มีวัสดุพูนในห้องอบ ที่เวลา 5 นาทีแรกการกระจายตัวของ ความดันภายในห้องอบแห้งจะมีค่าไม่แตกต่างกัน โดยที่ค่า Static Pressure ในแต่ละจุดมีค่าอยู่ที่ 101325 ปาสคาล และที่เวลา 15 นาที การกระจายตัวของ ความดันภายในห้อง อบแห้งจะมีค่าแตกต่างกัน บางในบางจุด โดยที่ค่า Static Pressure ในแต่ละจุดมีส่วนมากยังคงมีค่าอยู่ที่ 101325 ปาสคาล

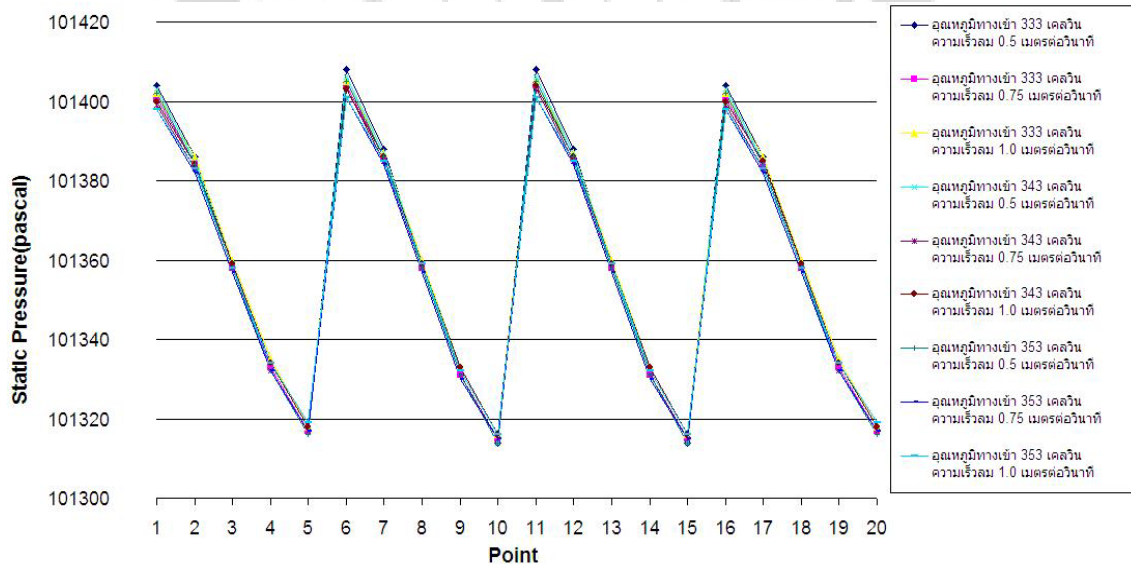
จากภาพประกอบ 74 ถึง 75 ในส่วนของห้องแห้งที่มีวัสดุพูน ลักษณะการกระจายตัวของความดันภายในห้องอบแห้งที่มีวัสดุพูนในห้องอบ ที่เวลา 5 นาที ลักษณะแนวโน้มเหมือนกันทุกแบบจำลอง คือความดันบรรยากาศภายในห้องอบแห้งจะสูงที่สุดบริเวณทางช่องอากาศเข้าที่ Point 1, 6,11 และ 15 ในตำแหน่งอื่นค่า Static Pressure จะมีแนวโน้มลดลงจนถึงช่องอากาศไหลออกที่ตำแหน่ง Point 5, 10,15 และ 20 ความดันจะต่ำเนื่องจากอยู่ใกล้บริเวณ ช่องอากาศไหลออก และที่เวลา 15 นาที ลักษณะแนวโน้มการกระจายความดันภายในห้องอบแห้งยังคงเหมือนกันทุกแบบจำลอง ความดันบรรยากาศภายในห้องอบแห้งจะสูงที่สุดบริเวณทางช่องอากาศเข้า ที่ Point 1, 6,11 และ 15 ในตำแหน่งอื่นค่า Static Pressure จะมีแนวโน้มลดลงจนถึงช่องอากาศไหลออกที่ตำแหน่ง Point 5, 10,15 และ 20 ความดันจะต่ำเนื่องจากอยู่ใกล้บริเวณช่องอากาศไหลออก



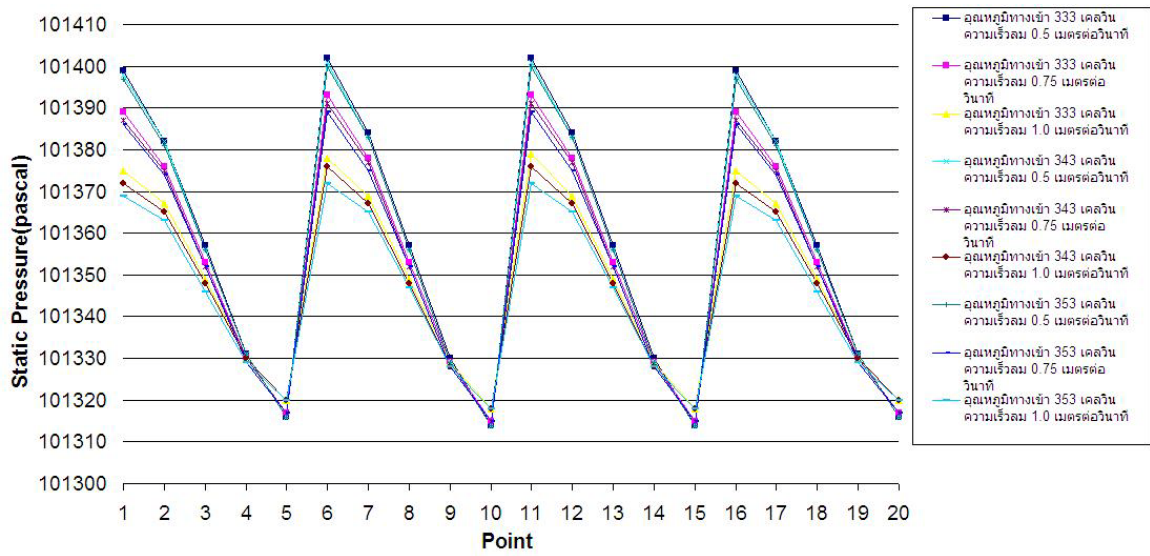
ภาพประกอบ 72 กราฟแสดง Static Pressure ภายในห้องอบแห้งโดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบแห้ง ณ ตำแหน่ง Point 1 ถึง Point 20 ที่อุณหภูมิ 333,343 และ 353 เคลวิน ที่ความเร็ว 0.5, 0.75 และ 1.0 เมตรต่อวินาที ในเวลา 5 นาที ตามลำดับ



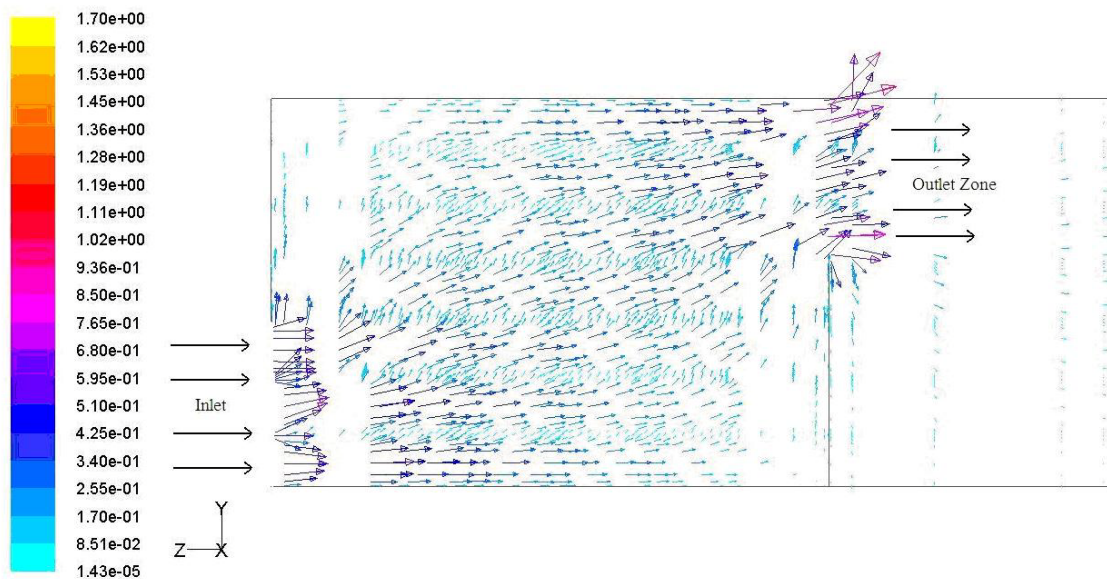
ภาพประกอบ 73 กราฟแสดง Static Pressure ภายในห้องอบแห้งโดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบ
 ณ ตำแหน่ง Point 1 ถึง Point 20 ที่อุณหภูมิ 333,343 และ 353 เคลวิน ที่ความเร็ว 0.5, 0.75
 และ 1.0 เมตรต่อวินาที ในเวลา 15 นาที ตามลำดับ



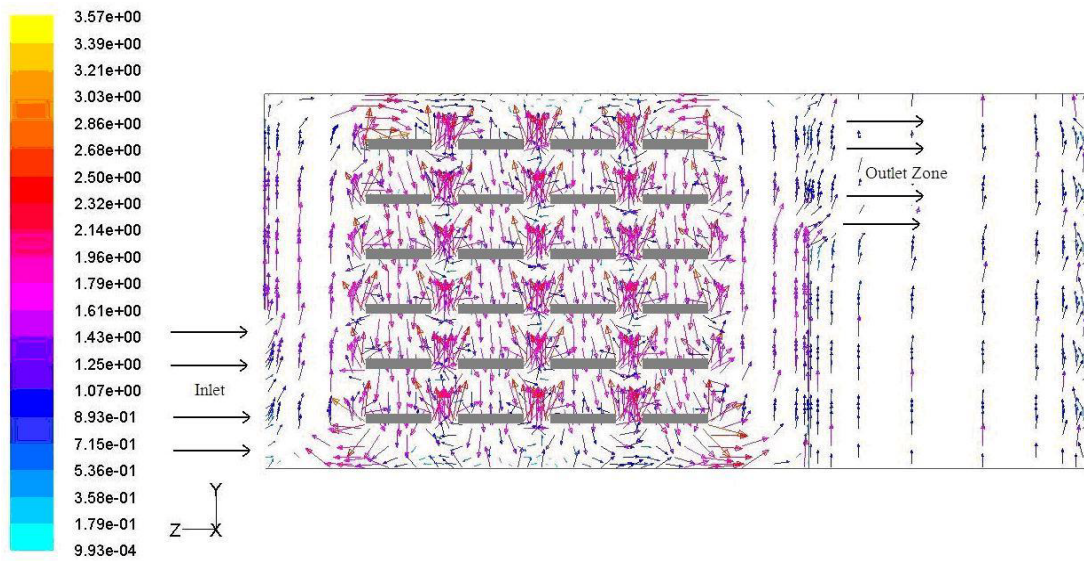
ภาพประกอบ 74 กราฟแสดง Static Pressure ภายในห้องอบแห้งโดยมีวัสดุพูนในห้องอบ
 ณ ตำแหน่ง Point 1 ถึง Point 20 ที่อุณหภูมิ 333,343 และ 353 เคลวิน
 ที่ความเร็ว 0.5, 0.75, 1.0 เมตรต่อวินาที ในเวลา 5 นาที



ภาพประกอบ 76 กราฟแสดง Static Pressure ภายในห้องอบแห้งโดยมีวัสดุพูนในห้องอบ ณ ตำแหน่ง Point 1 ถึง Point 20 ที่อุณหภูมิ 333,343 และ 353 เคลวิน ที่ความเร็ว 0.5, 0.75, 1.0 เมตรต่อวินาที ในเวลา 15 นาที

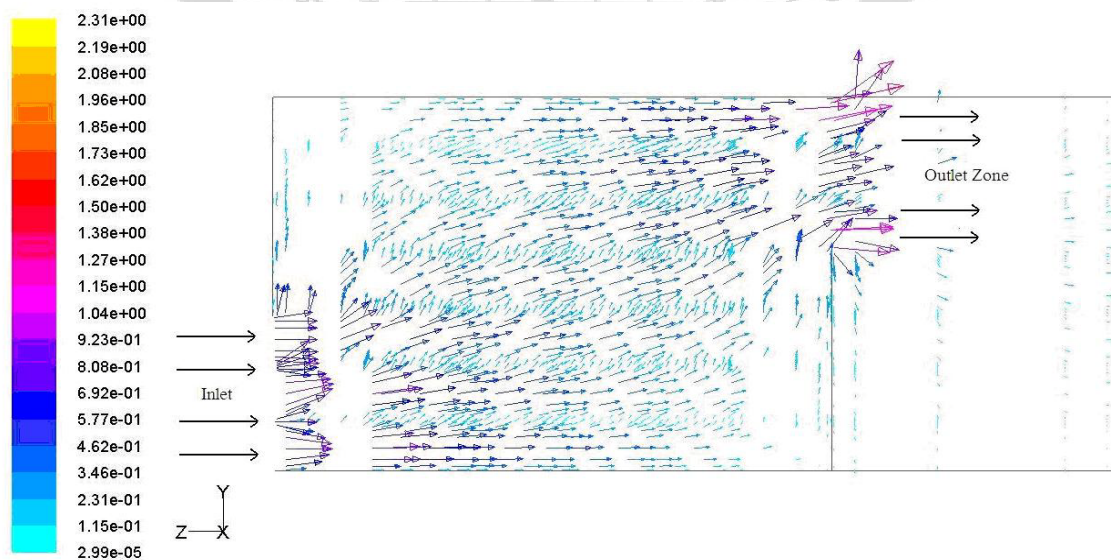


ภาพประกอบ 76 แสดงเวกเตอร์ของความเร็วภายในห้องอบแห้งโดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 333 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.5 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ X=40 เซนติเมตร



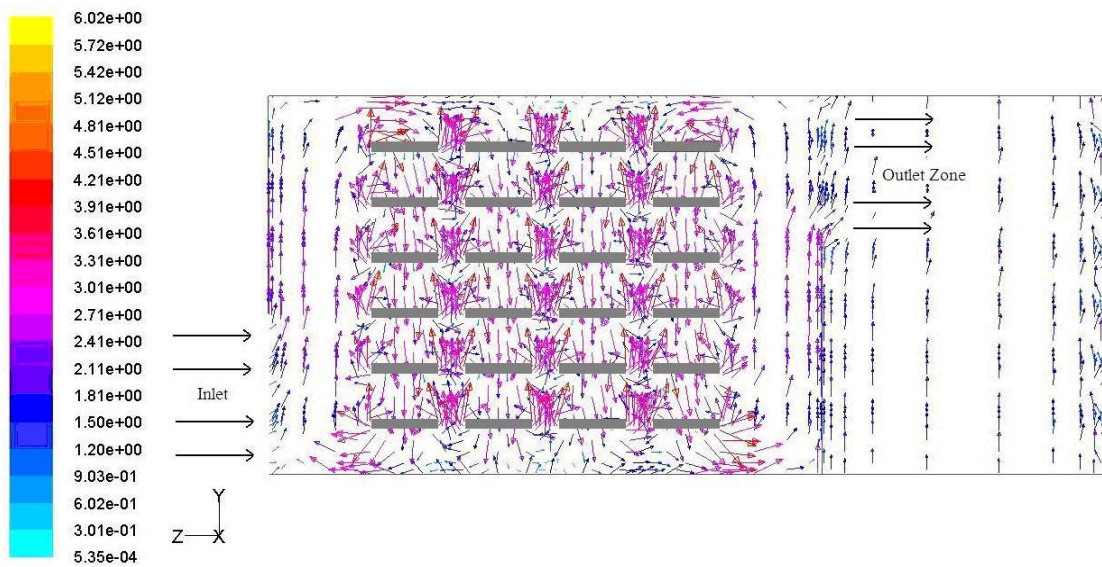
Velocity Vectors Colored By Velocity (m/s) (Time=9.0000e+02)

ภาพประกอบ 77 แสดงเวกเตอร์ของความเร็วภายในห้องอบแห้งโดยมีวัสดุพูนในห้องอบ
 ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 333 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.5 เมตรต่อวินาที
 ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ X=40 เซนติเมตร



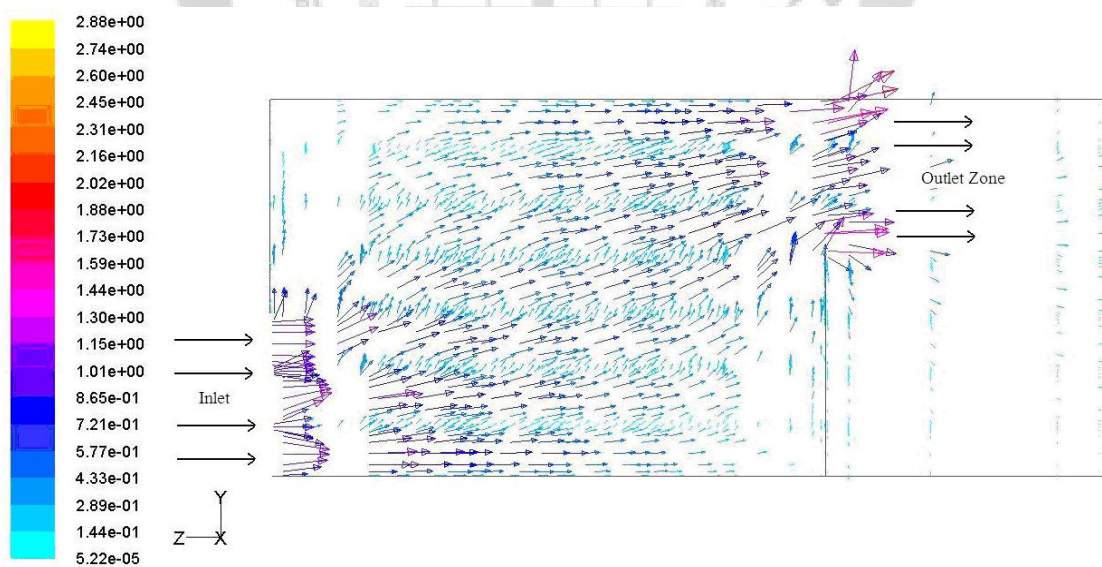
Velocity Vectors Colored By Velocity (m/s) (Time=9.0000e+02)

ภาพประกอบ 78 แสดงเวกเตอร์ของความเร็วภายในห้องอบแห้งโดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบ
 ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 333 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.75 เมตรต่อวินาที
 ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ X=40 เซนติเมตร



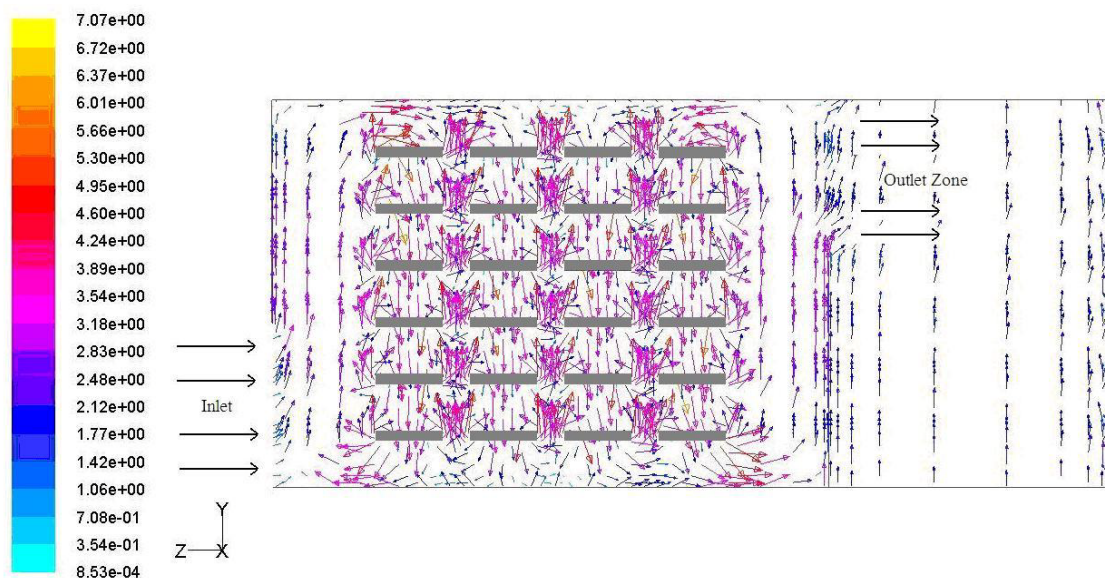
Velocity Vectors Colored By Velocity (m/s) (Time=9.0000e+02)

ภาพประกอบ 79 แสดงเวกเตอร์ของความเร็วภายในห้องอบแห้งโดยมีวัสดุพูนในห้องอบ
 ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 333 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.75 เมตรต่อวินาที
 ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ X=40 เซนติเมตร



Velocity Vectors Colored By Velocity (m/s) (Time=9.0000e+02)

ภาพประกอบ 80 แสดงเวกเตอร์ของความเร็วภายในห้องอบแห้งโดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบ
 ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 333 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที
 ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ X=40 เซนติเมตร

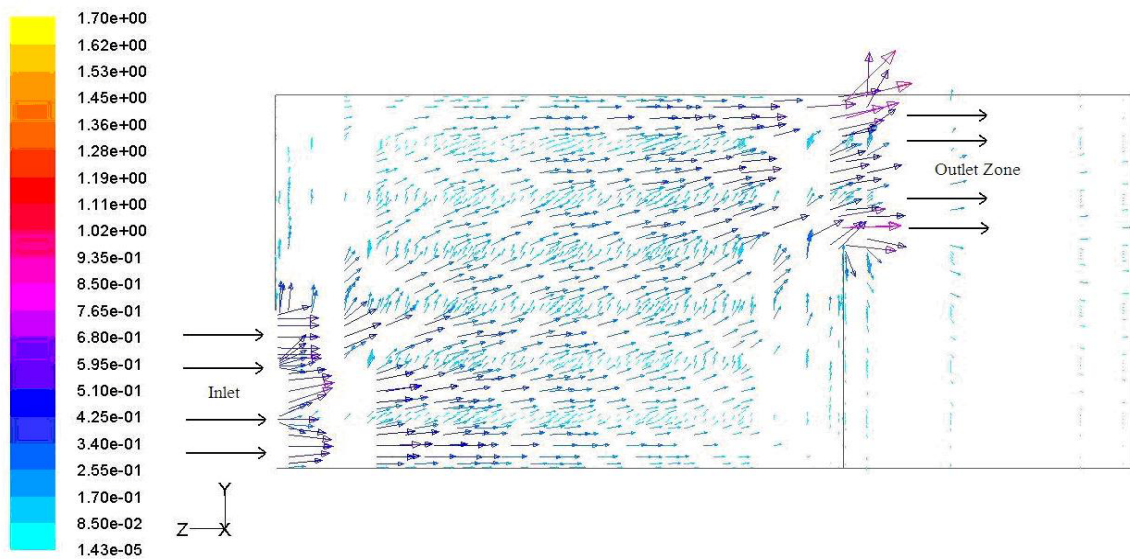


ภาพประกอบ 81 แสดงเวกเตอร์ของความเร็วภายในห้องอบแห้งโดยมีวัสดุพูนในห้องอบ

ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 333 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที

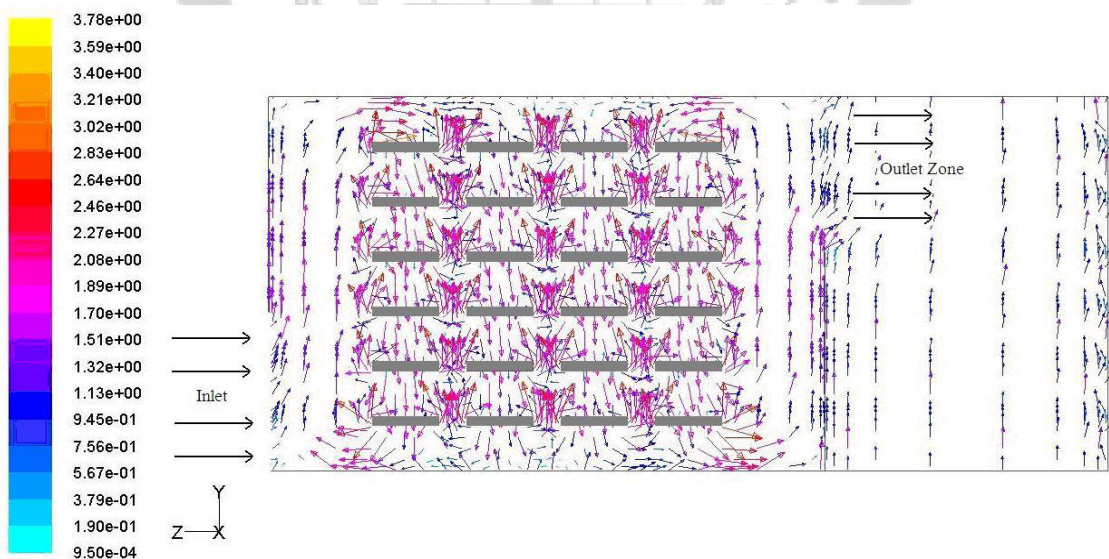
ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=40$ เซนติเมตร

จากภาพประกอบ 76 ถึง 81 ภาพแสดงเวกเตอร์ของความเร็ว ภายในห้องอบแห้ง โดยมีเงื่อนไขของอุณหภูมิทางเข้าที่ 333 เคลวิน และความเร็วอากาศเข้า 0.5, 0.75 และ 1.0 เมตรต่อวินาที ที่เวลาผ่านไป 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร โดยเวกเตอร์ของความเร็ว ภายในห้องอบแห้ง ที่ไม่มีวัสดุพูน มีแนวโน้ม การไหลของ เส้นเวกเตอร์ของความเร็ว ค่อนข้างจะคงที่ จากช่องอากาศเข้า จนถึงช่องอากาศไหลออก ผลจากการเปลี่ยนความเร็วอากาศเข้า ที่ 0.5, 0.75 และ 1.0 เมตรต่อวินาที ลักษณะการกระจายตัวของความเร็วภายในห้องอบแห้งจะเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ในส่วนภาพแสดงเวกเตอร์ของความเร็ว ภายในห้องอบแห้ง ที่มีวัสดุพูน ความเร็วอากาศเข้า ในช่วง 0.5, 0.75 และ 1.0 เมตรต่อวินาที จะมีพฤติกรรมการกระจายตัวของอุณหภูมิลดต่างกัน จากภาพประกอบ 77, 79 และ 81 พฤติกรรมการไหลของเส้นเวกเตอร์ของความเร็วของอากาศจะมีความเร็วเพิ่มขึ้นที่บริเวณช่องว่างระหว่างชั้นวัสดุพูน เนื่องจากอากาศที่ไหลผ่านช่องว่างระหว่างผิวด้านบนและด้านล่างของวัสดุพูน ไหลมาปะทะกันบริเวณช่องว่างระหว่างแถวของวัสดุพูน



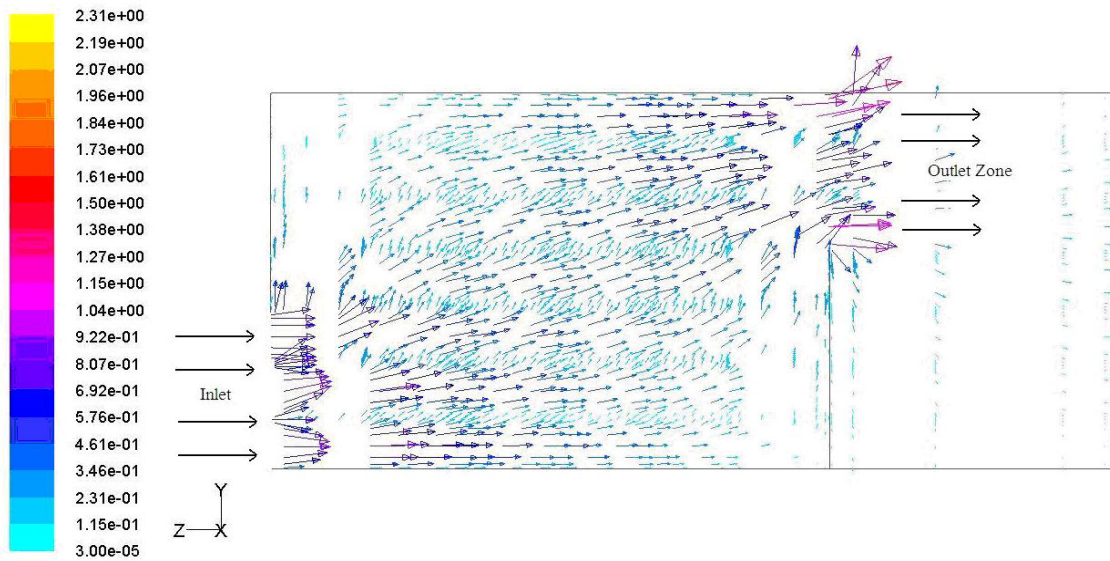
Velocity Vectors Colored By Velocity (m/s) (Time=9.0000e+02)

ภาพประกอบ 82 แสดงเวกเตอร์ของความเร็วภายในห้องอบแห้งโดยไม่มีวัสดุพอร์นในห้องอบ
 ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 343 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.5 เมตรต่อวินาที
 ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ X=40 เซนติเมตร



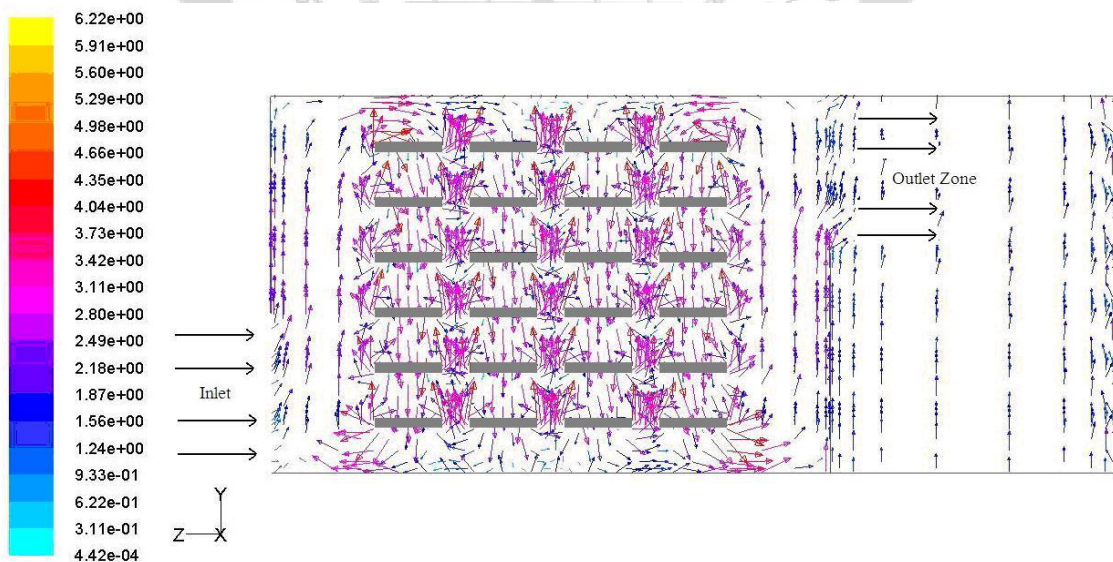
Velocity Vectors Colored By Velocity (m/s) (Time=9.0000e+02)

ภาพประกอบ 83 แสดงเวกเตอร์ของความเร็วภายในห้องอบแห้งโดยมีวัสดุพอร์นในห้องอบ
 ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 343 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.5 เมตรต่อวินาที
 ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ X=40 เซนติเมตร



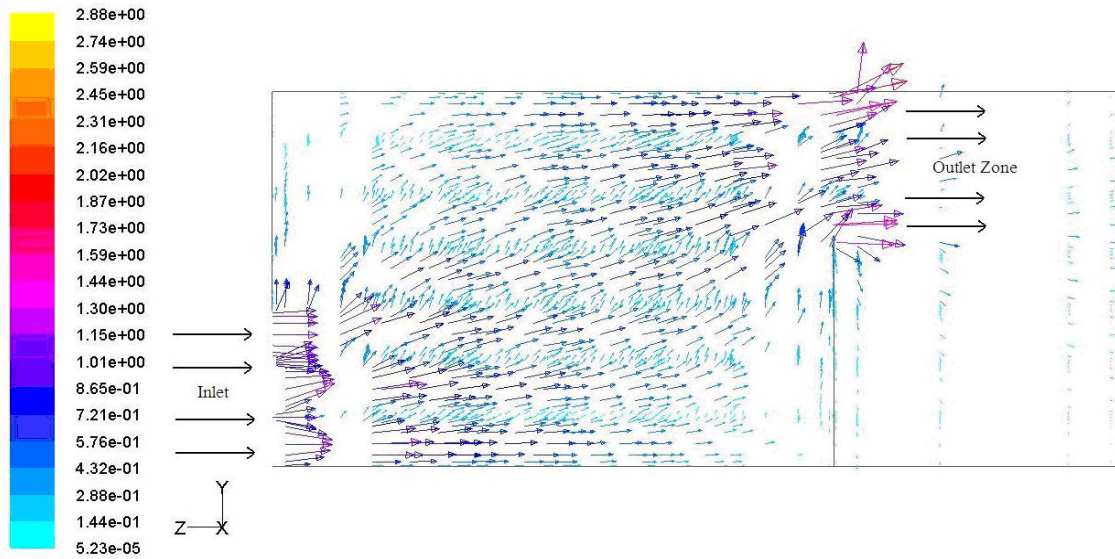
Velocity Vectors Colored By Velocity (m/s) (Time=9.0000e+02)

ภาพประกอบ 84 แสดงเวกเตอร์ของความเร็วภายในห้องอบแห้งโดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบ
 ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 343 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.75 เมตรต่อวินาที
 ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ X=40 เซนติเมตร



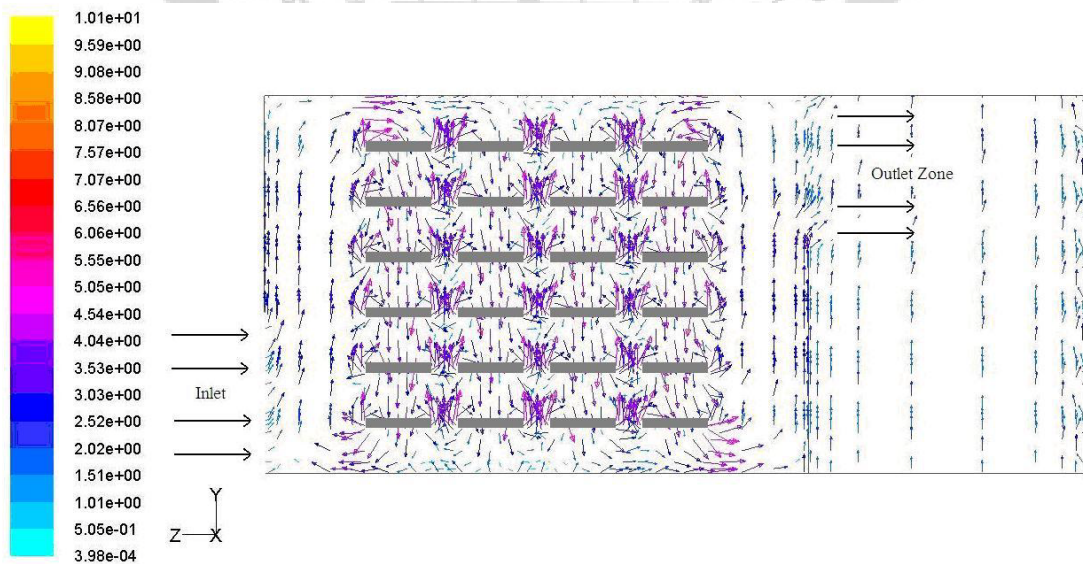
Velocity Vectors Colored By Velocity (m/s) (Time=9.0000e+02)

ภาพประกอบ 85 แสดงเวกเตอร์ของความเร็วภายในห้องอบแห้งโดยมีวัสดุพูนในห้องอบ
 ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 343 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.75 เมตรต่อวินาที
 ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ X=40 เซนติเมตร



Velocity Vectors Colored By Velocity (m/s) (Time=9.0000e+02)

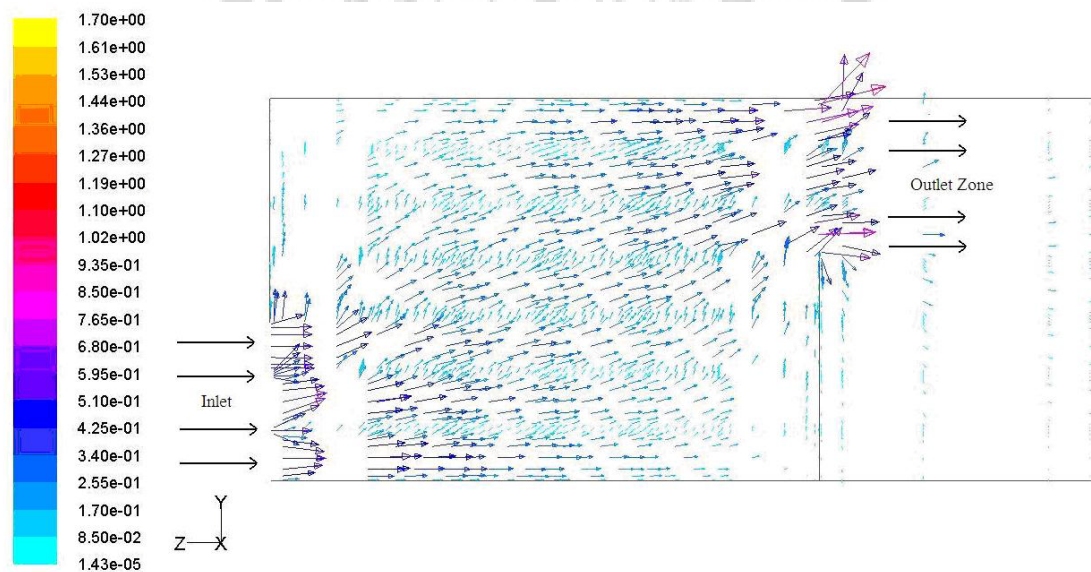
ภาพประกอบ 86 แสดงเวกเตอร์ของความเร็วภายในห้องอบแห้งโดยไม่มีวัสดุพอร์นในห้องอบ
 ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 343 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที
 ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ X=40 เซนติเมตร



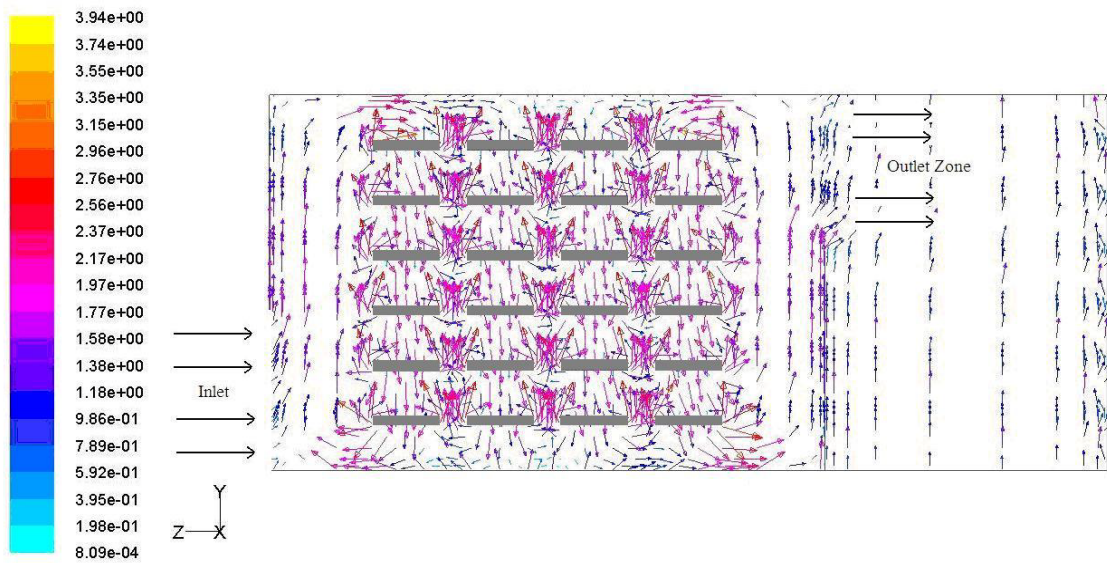
Velocity Vectors Colored By Velocity (m/s) (Time=9.0000e+02)

ภาพประกอบ 87 แสดงเวกเตอร์ของความเร็วภายในห้องอบแห้งโดยมีวัสดุพอร์นในห้องอบ
 ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 343 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที
 ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ X=40 เซนติเมตร

จากภาพประกอบ 82 ถึง 87 ภาพแสดงเวกเตอร์ของความเร็ว ภายในห้องอบแห้ง โดยมีเงื่อนไขของอุณหภูมิทางเข้าที่ 343 เคลวิน และความเร็วอากาศเข้า 0.5, 0.75 และ 1.0 เมตรต่อวินาที ที่เวลาผ่านไป 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร โดยเวกเตอร์ของความเร็ว ภายในห้องอบแห้ง ที่ไม่มีวัสดุพูน มีแนวโน้มการไหลของ เส้นเวกเตอร์ของความเร็ว ค่อนข้างจะคงที่ จากช่องอากาศเข้าจนถึงช่องอากาศไหลออก ผลจากการเปลี่ยนความเร็วอากาศเข้า ที่ 0.5, 0.75 และ 1.0 เมตรต่อวินาที ลักษณะการกระจายตัวของความเร็วภายในห้องอบแห้งจะเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ในส่วนภาพแสดงเวกเตอร์ของความเร็ว ภายในห้องอบแห้ง ที่มีวัสดุพูน ความเร็วอากาศเข้า ในช่วง 0.5, 0.75 และ 1.0 เมตรต่อวินาที จะมีพฤติกรรมการกระจายตัวของอุณหภูมิลำบากกัน จากภาพประกอบ 83, 85 และ 87 พฤติกรรมการไหลของเส้นเวกเตอร์ของความเร็วของอากาศจะมีความเร็วเพิ่มขึ้นที่บริเวณช่องว่างระหว่างชั้นวัสดุพูน เนื่องจากอากาศที่ไหลผ่านช่องว่างระหว่างผิวด้านบนและด้านล่างของวัสดุพูนไหลมาปะทะกันบริเวณช่องว่างระหว่างแถวของวัสดุพูน

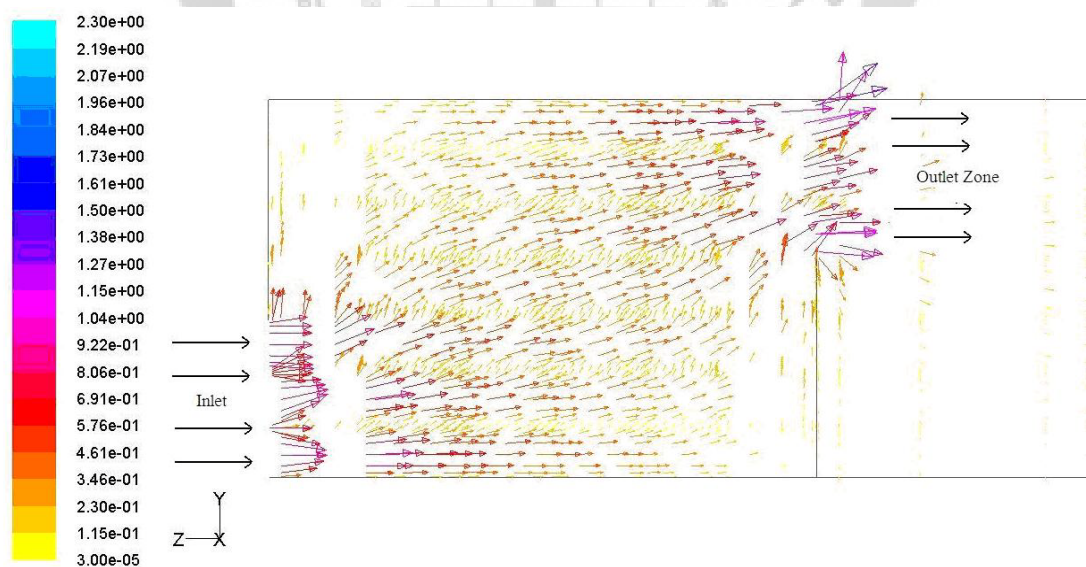


ภาพประกอบ 88 แสดงเวกเตอร์ของความเร็วภายในห้องอบแห้งโดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบที่อุณหภูมิอากาศเข้า 353 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.5 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=40$ เซนติเมตร



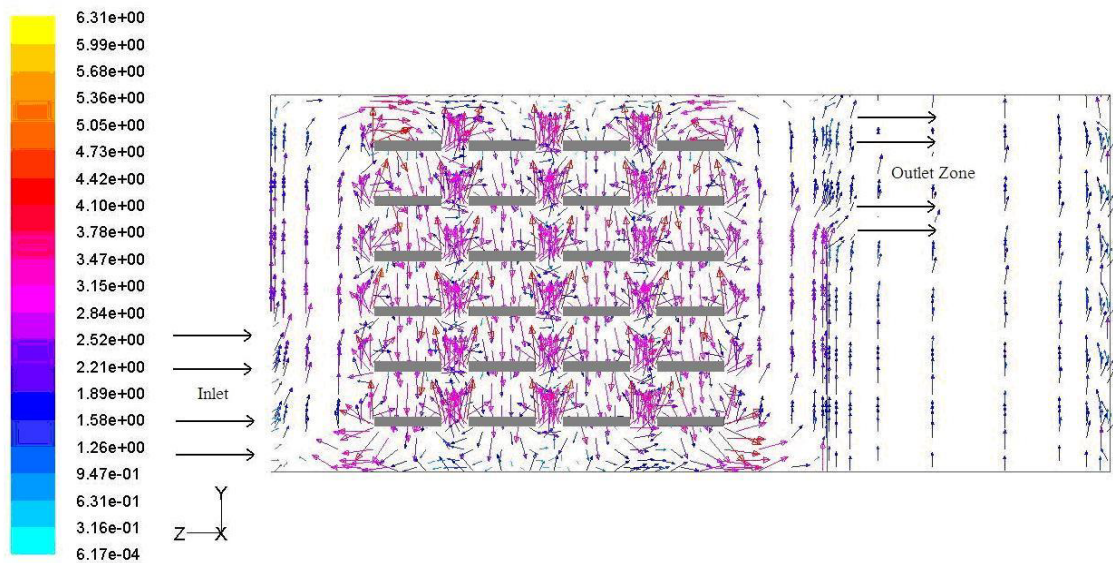
Velocity Vectors Colored By Velocity (m/s) (Time=9.0000e+02)

ภาพประกอบ 89 แสดงเวกเตอร์ของความเร็วภายในห้องอบแห้งโดยมีวัสดุพรมในห้องอบ
 ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 353 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.5 เมตรต่อวินาที
 ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ X=40 เซนติเมตร



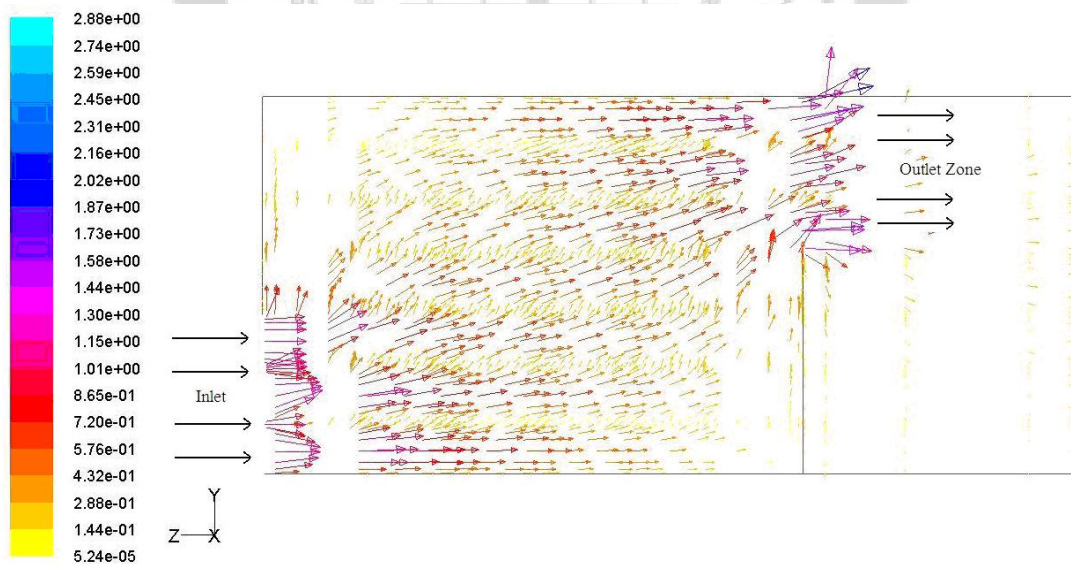
Velocity Vectors Colored By Velocity (m/s) (Time=9.0000e+02)

ภาพประกอบ 90 แสดงเวกเตอร์ของความเร็วภายในห้องอบแห้งโดยไม่มีวัสดุพรมในห้องอบ
 ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 353 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.75 เมตรต่อวินาที
 ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ X=40 เซนติเมตร



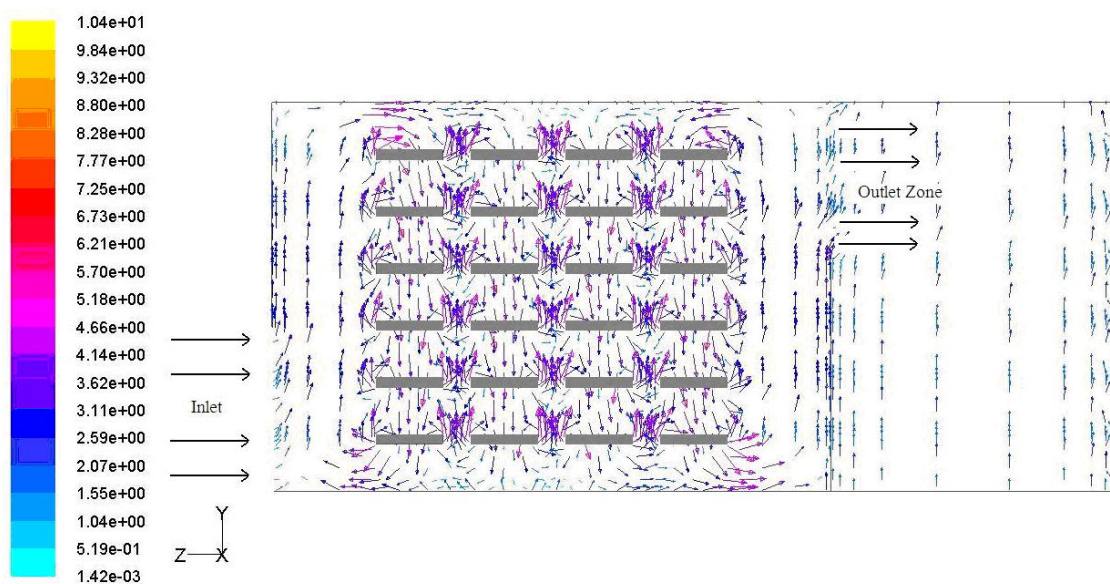
Velocity Vectors Colored By Velocity (m/s) (Time=9.0000e+02)

ภาพประกอบ 91 แสดงเวกเตอร์ของความเร็วภายในห้องอบแห้งโดยมีวัสดุพูนในห้องอบ
 ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 353 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 0.75 เมตรต่อวินาที
 ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ X=40 เซนติเมตร



Velocity Vectors Colored By Velocity (m/s) (Time=9.0000e+02)

ภาพประกอบ 92 แสดงเวกเตอร์ของความเร็วภายในห้องอบแห้งโดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบ
 ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 353 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที
 ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ X=40 เซนติเมตร

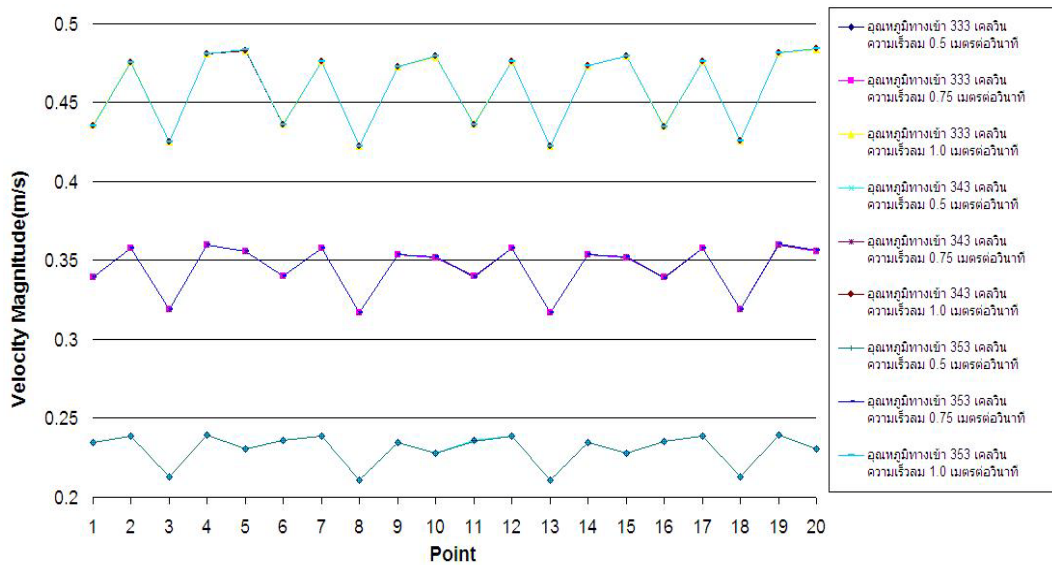


ภาพประกอบ 93 แสดงเวกเตอร์ของความเร็วภายในห้องอบแห้งโดยมีวัสดุพูนในห้องอบ

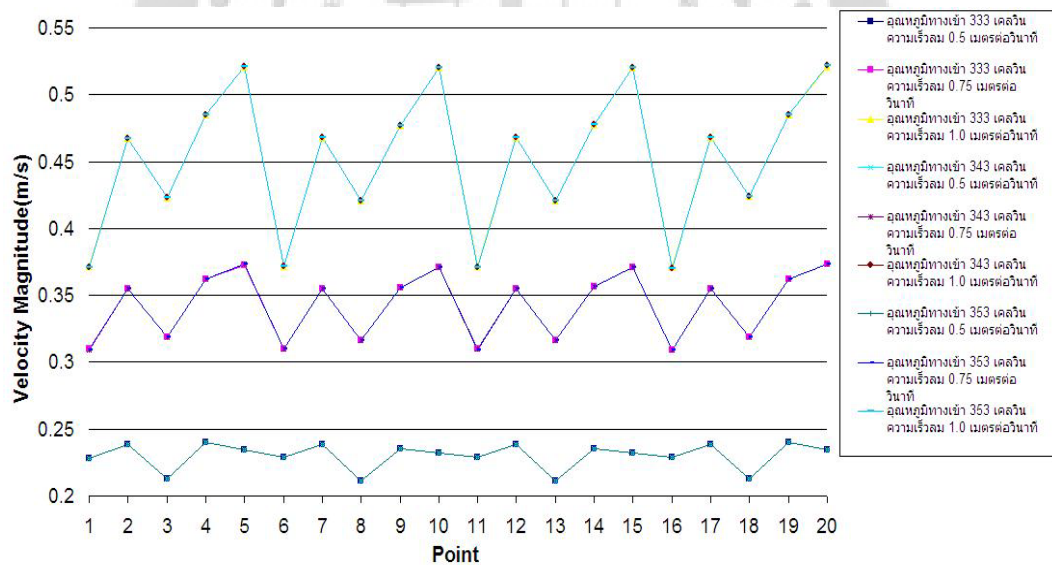
ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 353 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที

ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=40$ เซนติเมตร

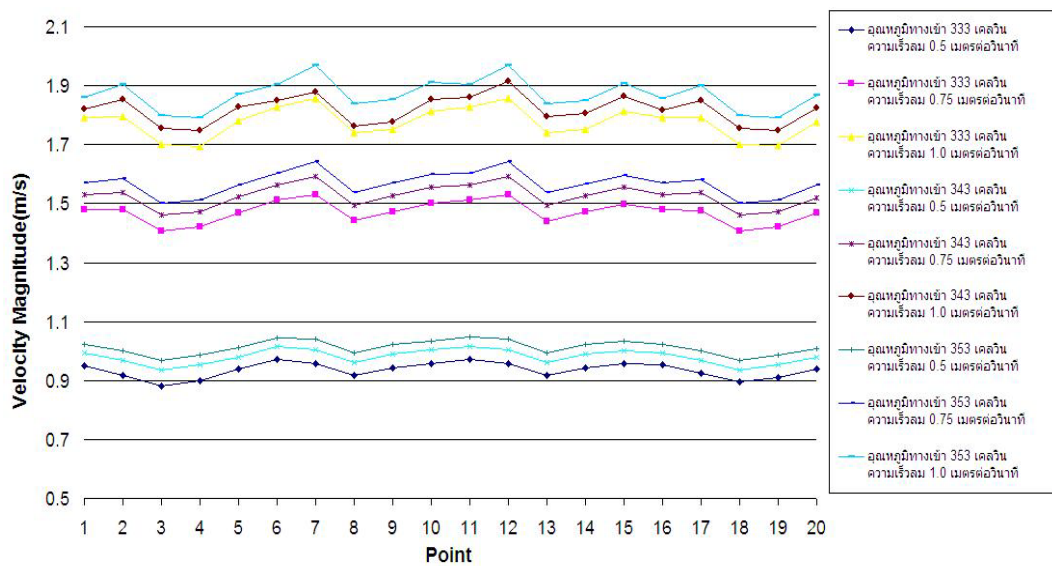
จากภาพประกอบ 88 ถึง 93 ภาพแสดงเวกเตอร์ของความเร็ว ภายในห้องอบแห้ง โดยมีเงื่อนไขของอุณหภูมิทางเข้าที่ 353 เคลวิน และความเร็วอากาศเข้า 0.5, 0.75 และ 1.0 เมตรต่อวินาที ที่เวลาผ่านไป 15 นาที ที่ระนาบ $X=18.25$, $X=32.75$, $X=47.25$ และ $X=61.75$ เซนติเมตร โดยเวกเตอร์ของความเร็ว ภายในห้องอบแห้ง ที่ไม่มีวัสดุพูน มีแนวโน้มการไหลของ เส้นเวกเตอร์ของความเร็ว ค่อนข้างจะคงที่ จากช่องอากาศเข้าจนถึงช่องอากาศไหลออก ผลจากการเปลี่ยนความเร็วอากาศเข้า ที่ 0.5, 0.75 และ 1.0 เมตรต่อวินาที ลักษณะการกระจายตัวของความเร็วภายในห้องอบแห้งจะเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ในส่วนภาพแสดงเวกเตอร์ของความเร็ว ภายในห้องอบแห้งที่มีวัสดุพูน ความเร็วอากาศเข้าในช่วง 0.5, 0.75 และ 1.0 เมตรต่อวินาที จะมีพฤติกรรมการกระจายตัวของอุณหภูมิล้ำยกัน จากภาพประกอบ 89, 91 และ 93 พฤติกรรมการไหลของเส้นเวกเตอร์ของความเร็วของอากาศจะมีความเร็วเพิ่มขึ้นที่บริเวณช่องว่างระหว่างชั้นวัสดุพูน เนื่องจากอากาศที่ไหลผ่านช่องว่างระหว่างผิวด้านบนและด้านล่างของวัสดุพูนไหลมาปะทะกันบริเวณช่องว่างระหว่างแถวของวัสดุพูน



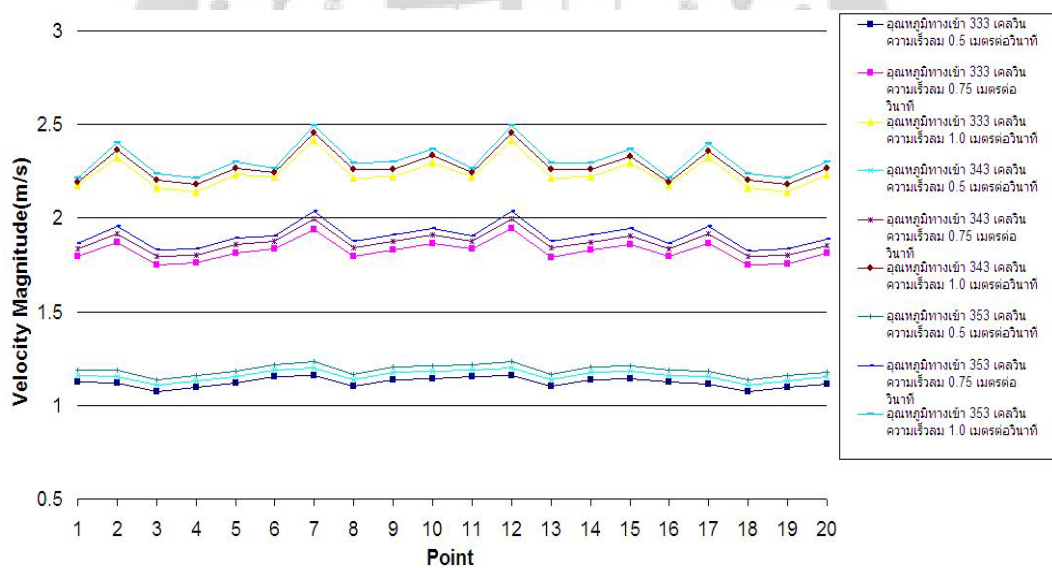
ภาพประกอบ 94 กราฟแสดงความเร็วภายในห้องอบแห้ง โดยในห้องอบแห้งโดยไม่มีวัสดุพูน
ในห้องอบ ณ ตำแหน่ง Point 1 ถึง Point 20 ที่อุณหภูมิ 333,343 และ 353 เคลวิน
ที่ความเร็ว 0.5, 0.75, 1.0 เมตรต่อวินาที ในเวลา 5 นาที ตามลำดับ



ภาพประกอบ 95 กราฟแสดงความเร็วภายในห้องอบแห้ง โดยในห้องอบแห้งโดยไม่มีวัสดุพูน
ในห้องอบ ณ ตำแหน่ง Point 1 ถึง Point 20 ที่อุณหภูมิ 333,343 และ 353 เคลวิน
ที่ความเร็ว 0.5, 0.75, 1.0 เมตรต่อวินาที ในเวลา 15 นาที ตามลำดับ



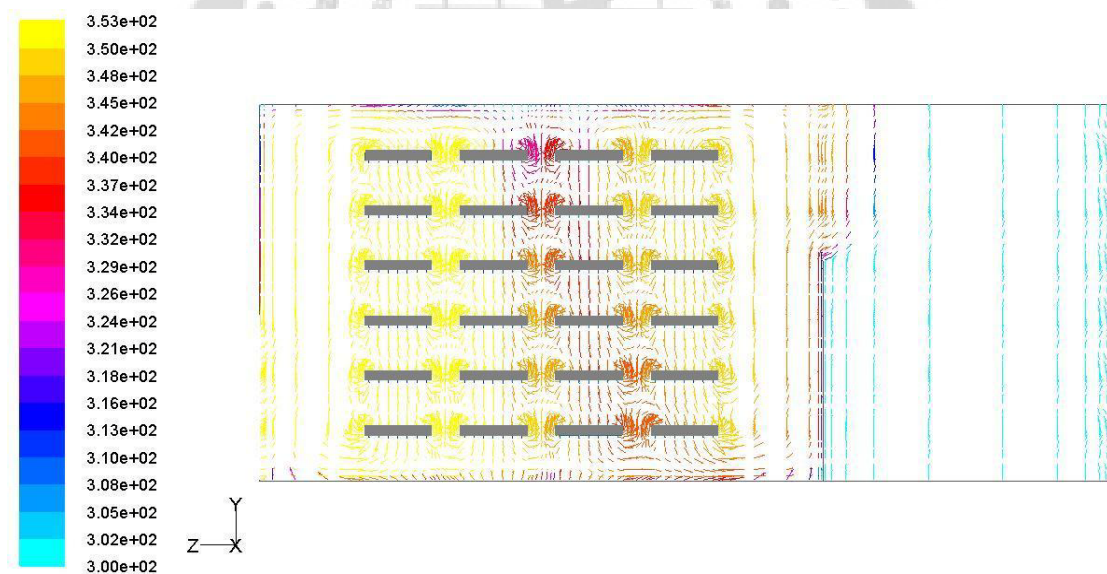
ภาพประกอบ 96 กราฟแสดงความเร็วภายในห้องอบแห้ง โดยห้องอบแห้งโดยมีวัสดุพูน
ในห้องอบ ณ ตำแหน่ง Point 1 ถึง Point 20 ที่อุณหภูมิ 333,343 และ 353 เคลวิน
ที่ความเร็ว 0.5, 0.75, 1.0 เมตรต่อวินาที ในเวลา 5 นาที ตามลำดับ



ภาพประกอบ 97 กราฟแสดงความเร็วภายในห้องอบแห้ง โดยห้องอบแห้งโดยมีวัสดุพูน
ในห้องอบ ณ ตำแหน่ง Point 1 ถึง Point 20 ที่อุณหภูมิ 333,343 และ 353 เคลวิน
ที่ความเร็ว 0.5, 0.75, 1.0 เมตรต่อวินาที ในเวลา 15 นาที ตามลำดับ

จากภาพประกอบ 94 และ 95 กราฟแสดงความเร็วภายในห้องอบแห้ง โดยห้องอบแห้ง โดยไม่มีวัสดุพูนในห้องอบ ณ ตำแหน่ง Point 1 ถึง Point 20 ที่อุณหภูมิ 333,343 และ 353 เคลวิน ที่ความเร็ว 0.5, 0.75, 1.0 เมตรต่อวินาที ในเวลา 5 และ 15 นาที ในการเปลี่ยนความเร็วอากาศเข้า ความเร็วอากาศภายในห้องอบแห้งจะไม่แตกต่างกันมากนัก โดยที่ความเร็วอากาศเข้า 1 เมตรต่อวินาที การกระจายตัวของอากาศภายในห้องอบแห้งจะมีความผันผวนมากกว่าช่วงความเร็วอากาศเข้า 0.5 และ 0.75 เมตรต่อวินาที

จากภาพประกอบ 96 และ 97 กราฟแสดงความเร็วภายในห้องอบแห้ง โดยห้องอบแห้ง โดยมีวัสดุพูนในห้องอบ ณ ตำแหน่ง Point 1 ถึง Point 20 ที่อุณหภูมิ 333,343 และ 353 เคลวิน ที่ความเร็ว 0.5, 0.75, 1.0 เมตรต่อวินาที ในเวลา 5 นาที ที่ตำแหน่ง Point 1 ถึง Point 20 พบว่า ความเร็วของอากาศภายในห้องอบแห้งจะเพิ่มขึ้นเมื่ออากาศร้อนไหลผ่านวัสดุพูน ในตำแหน่ง Point 1,2,6,7,10,11,16 และ 17 จะมีความเร็วมากเนื่องจากเป็นจุดทางด้านที่อากาศไหลเข้า ความเร็วในการไหลของอากาศภายในห้องอบแห้งที่อุณหภูมิต่างๆ มีรูปแบบการกระจายตัวที่คล้ายกัน เมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที ความเร็วของการไหลของอากาศภายในห้องอบแห้งเพิ่มขึ้นจากเดิมเล็กน้อย



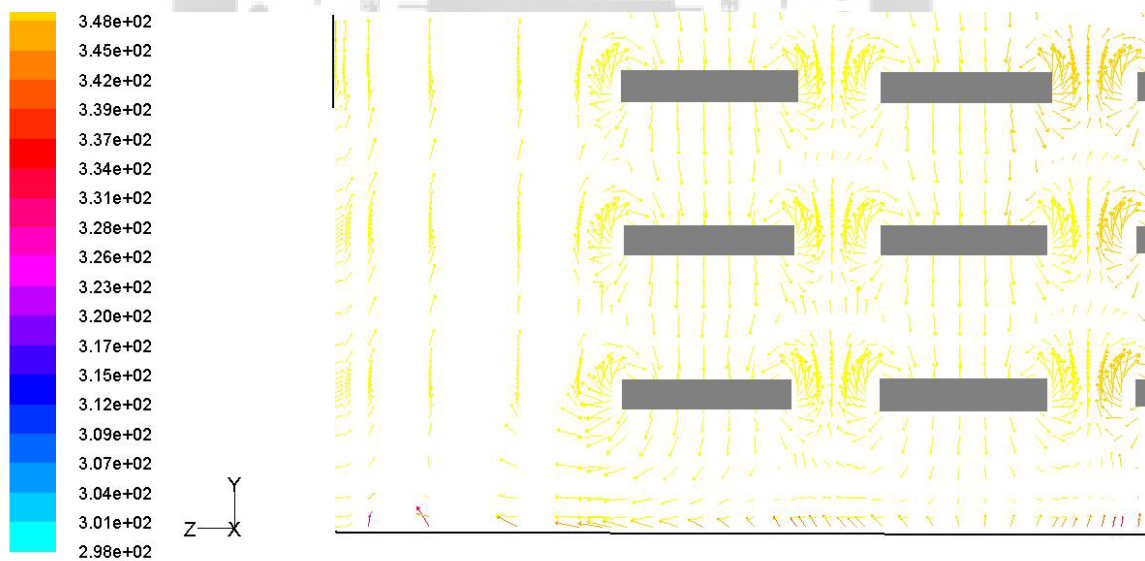
Velocity Vectors Colored By Static Temperature (k) (Time=9.0000e+02)

ภาพประกอบ 98 แสดงเวกเตอร์การไหลของอากาศภายในห้องอบแห้ง ที่อุณหภูมิอากาศเข้าที่ 353 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ X=40 เซนติเมตร

จากภาพประกอบ 98 เป็นเวกเตอร์ของความเร็วที่ระนาบ $X=40$ เซนติเมตร ส่วนใหญ่ อากาศร้อนจะไหลวนด้านติด ช่องว่างระหว่าง วัสดุพูนมากกว่า เนื่องจากอากาศ ร้อนเข้ามาถ่ายโอน ความร้อน ให้แก่ผิวของวัสดุพูนและบริเวณช่องว่างของวัสดุพูนนี้จะเป็นบริเวณที่อากาศมีการไหลวน ส่วนบริเวณช่องอากาศไหลออกอุณหภูมิจะยังคงที่อุณหภูมิห้องที่ 300 เคลวิน

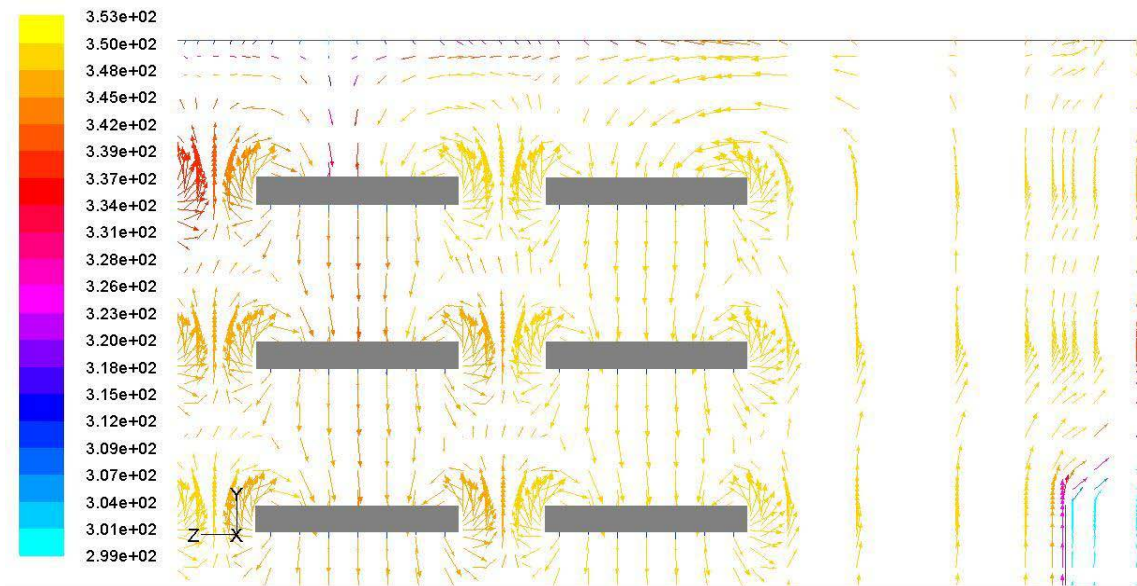
ภาพประกอบ 99 แสดงเวกเตอร์การไหลของอากาศภายในห้องอบแห้งบริเวณทางด้าน อากาศไหลเข้า ที่อุณหภูมิอากาศเข้าที่ 353 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที ที่ เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=40$ เซนติเมตร เมื่ออากาศร้อนไหลเข้า เวกเตอร์ของความเร็ว ส่วนใหญ่ของ อากาศร้อนจะ มีทิศการไหลวนด้านติด ช่องว่างระหว่างวัสดุพูน มากกว่า เนื่องจากอากาศ ร้อนเข้ามา ถ่ายโอนความร้อน ให้แก่ผิวของวัสดุพูนและบริเวณช่องว่างของวัสดุพูนนี้จะเป็นบริเวณที่อากาศมีการ ไหลวนของกระแสอากาศ

ภาพประกอบ 100 แสดงเวกเตอร์การไหลของอากาศภายในห้องอบแห้ง บริเวณทางด้าน อากาศไหลออก ที่อุณหภูมิอากาศเข้าที่ 353 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที ที่ เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=40$ เซนติเมตร บริเวณด้านทางออก เส้นเวกเตอร์การไหลของอากาศยังคง ไหลวนเข้าหาวัสดุพูน



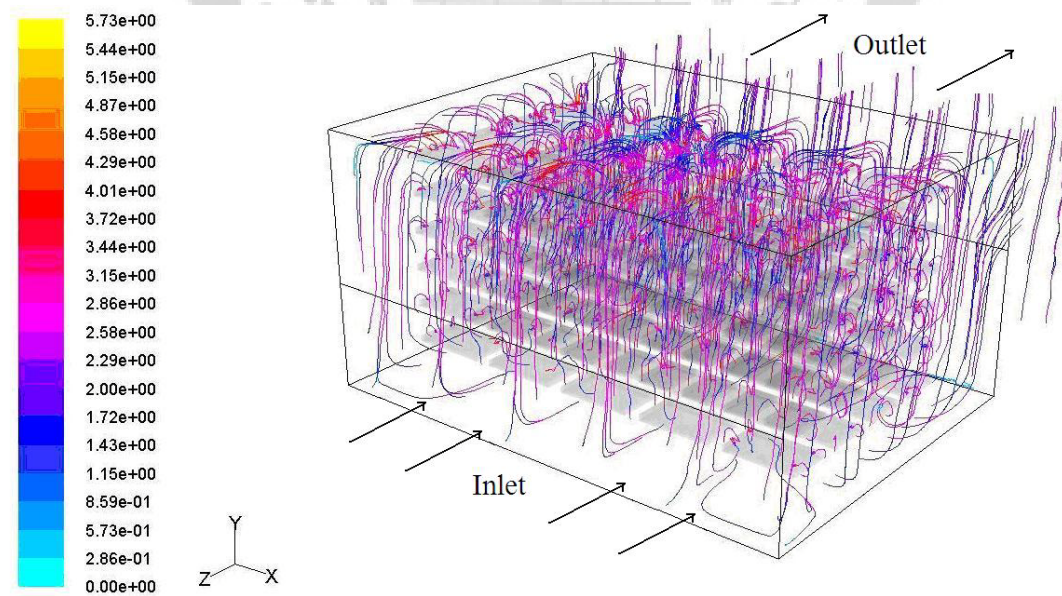
Velocity Vectors Colored By Static Temperature (k) (Time=9.0000e+02)

ภาพประกอบ 99 แสดงเวกเตอร์การไหลของอากาศภายในห้องอบแห้งทางด้านอากาศไหลเข้า ที่อุณหภูมิอากาศเข้าที่ 353 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 15 นาที ที่ระนาบ $X=40$ เซนติเมตร



Velocity Vectors Colored By Static Temperature (k) (Time=9.0000e+02)

ภาพประกอบ 100 แสดงเวกเตอร์การไหลของอากาศภายในห้องอบแห้งทางด้านอากาศไหลออก ที่อุณหภูมิอากาศเข้าที่ 353 เคลวิน ความเร็วอากาศที่ทางเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที เวลา 15 นาที ที่ระนาบ X=40 เซนติเมตร

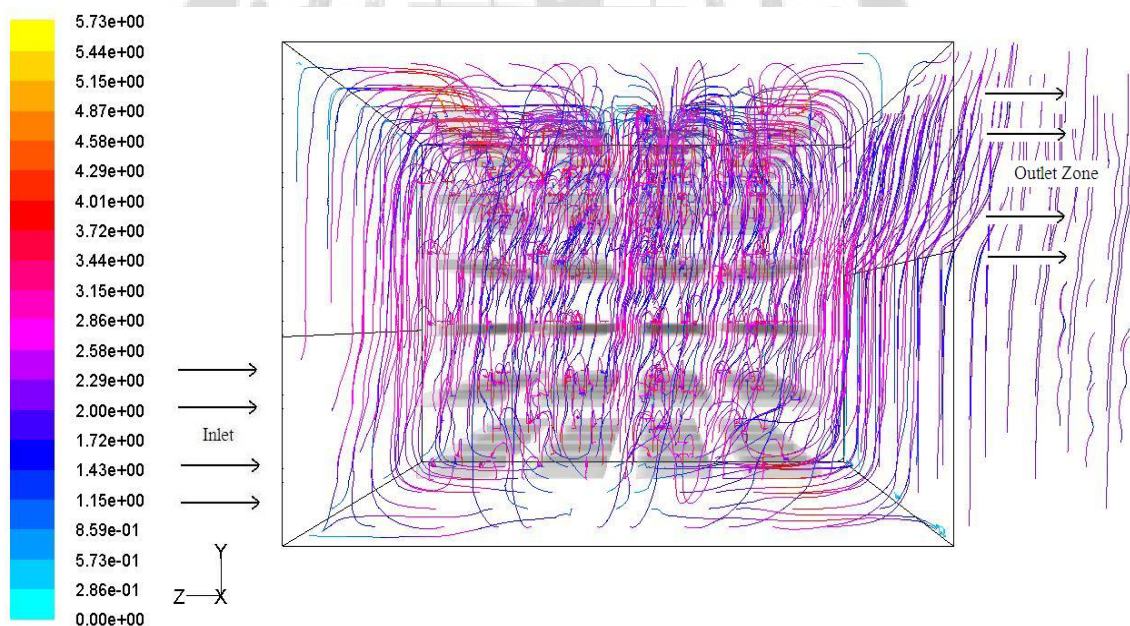


Pathlines Colored by Velocity Magnitude (m/s) (Time=9.0000e+02)

ภาพประกอบ 101 ภาพเส้นทางการไหลของอนุภาคของอากาศภายในห้องอบแห้ง

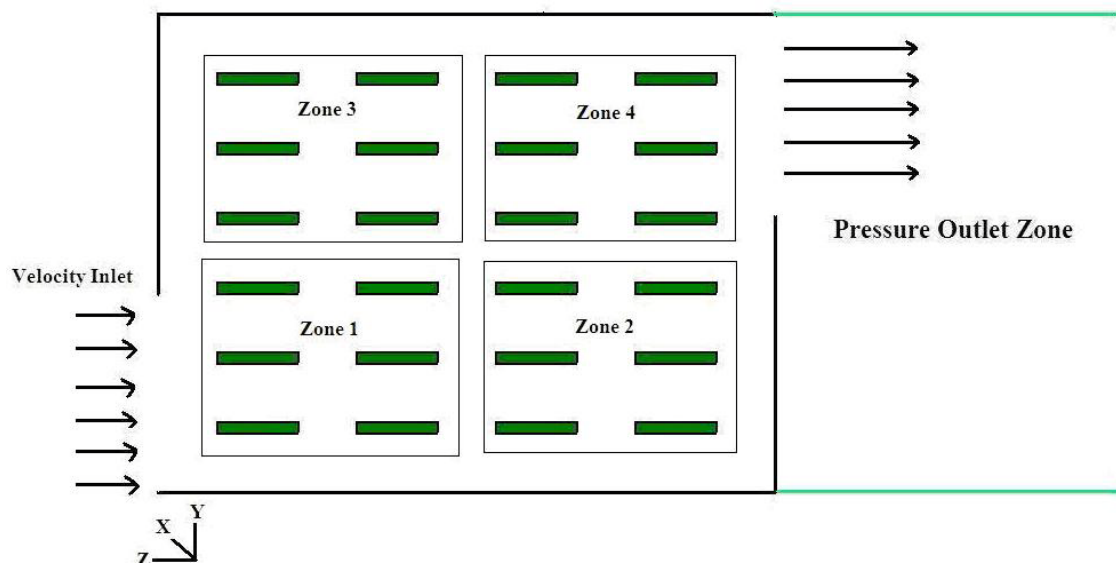
จากภาพประกอบ 101 แสดงภาพเส้นทางการไหลของอนุภาคของอากาศ ร้อนภายในห้องอบแห้งที่ตำแหน่งต่างๆ ของห้องอบแห้ง เมื่อพิจารณาเส้นทางการไหลของอากาศร้อนในภาพประกอบ 101 การไหลของกระแสอากาศร้อนจะไหลวนเข้าหาวัสดุพูน ทำให้มีการส่งถ่ายความร้อนระหว่างวัสดุพูนและอากาศ จะเห็นได้ว่าบริเวณกลางห้องอบแห้งจะมีความปั่นป่วนของการไหลมากกว่าด้านข้างส่งผลให้มีการแลกเปลี่ยนของความร้อนมากตามไปด้วย บริเวณช่องอากาศไหลออก อุณหภูมิของอากาศจะลดลง

จากภาพประกอบ 102 แสดงภาพภาพเส้นทางการไหลของอนุภาคของ กระแสอากาศภายในห้องอบแห้ง จากด้านข้างของห้องอบแห้ง เมื่อพิจารณาเส้นทางการไหลของอากาศในภาพประกอบ 102 การไหลของกระแสอากาศ จากด้านข้างเข้าอากาศ จะไหลวนเข้าหาวัสดุพูน ทำให้มีการส่งถ่ายความร้อน ระหว่างวัสดุพูนและอากาศ จะเห็นได้ว่าบริเวณกลางห้องอบแห้งจะมีความปั่นป่วนของการไหลมากกว่าด้าน ผนังทางเข้าและทางออก เนื่องจาก บริเวณกลางห้องอบแห้งจะมีเส้นทางการไหลของอนุภาคของกระแสอากาศ ปะทะกันของกระแสอากาศ บริเวณช่องว่างของชั้นวัสดุพูนกับวัสดุพูน



Pathlines Colored by Velocity Magnitude (m/s) (Time=9.0000e+02)

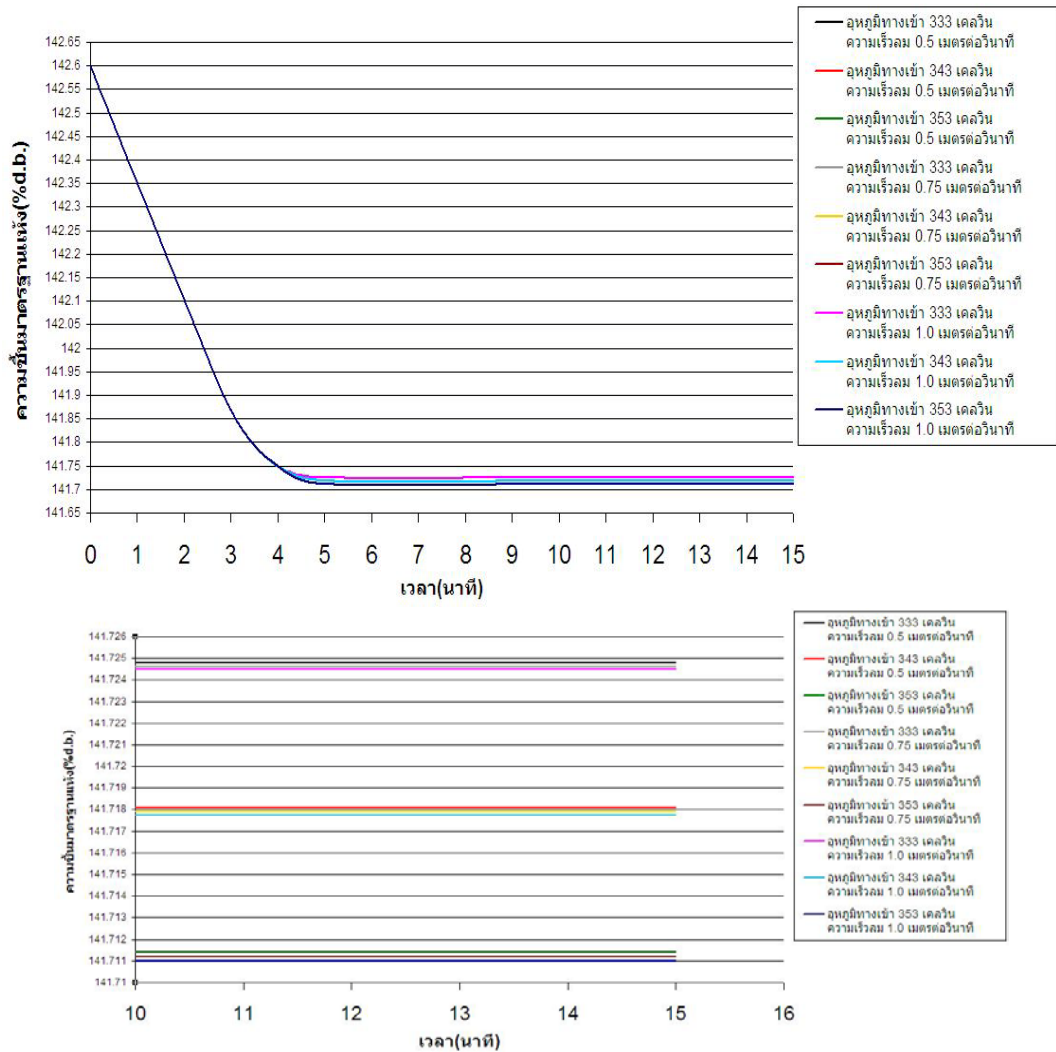
ภาพประกอบ 102 ภาพเส้นทางการไหลของอนุภาคของกระแสอากาศร้อนภายในห้องอบแห้ง จากด้านข้างของห้องอบแห้ง



ภาพประกอบ 103 แสดงบริเวณ Zone 1, 2, 3 และ Zone 4

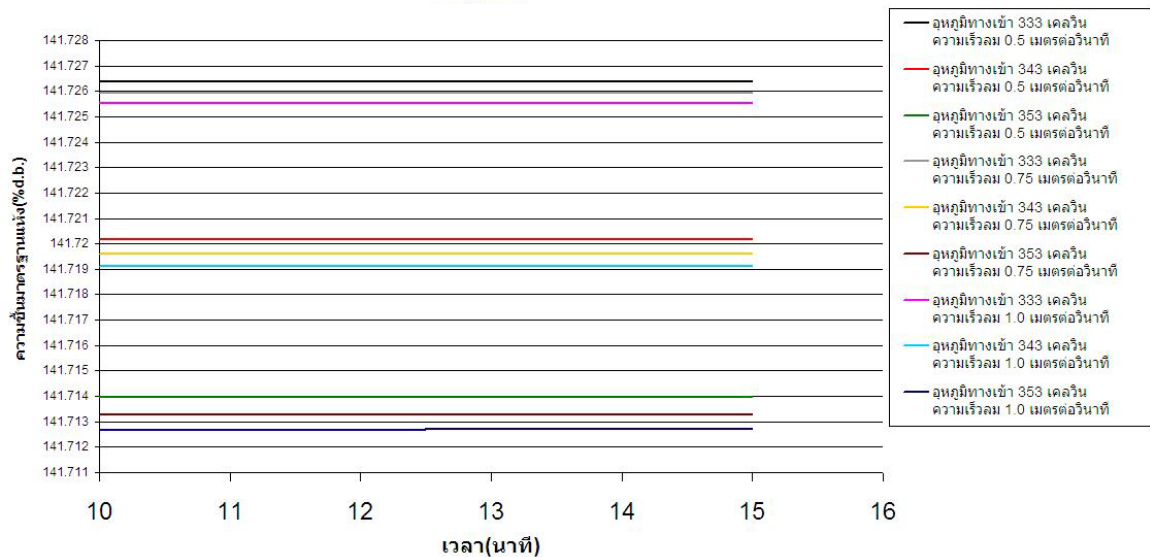
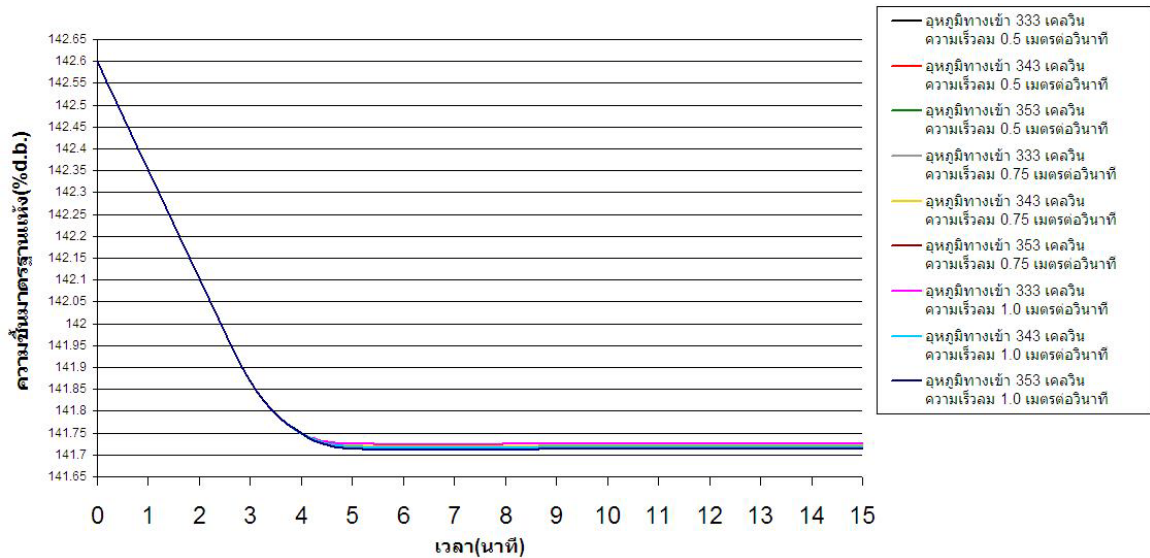
จากภาพประกอบ 103 ถึง 106 แสดงกราฟเปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานแห้งของวัสดุพูนแปรผันตามเวลา ที่อุณหภูมิอบแห้ง 333,343 และ 353 เคลวิน โดยมีความเร็วอากาศไหล เข้า 0.5, 0.75 และ 1.0 เมตรต่อวินาที ในแต่ละ Zone จากกราฟการเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุพูนค่อนข้างใกล้เคียงกันมาก ในช่วงแรกจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วและค่อยๆ ช้าลงเรื่อยๆ เมื่อเวลาผ่านไป ความชื้นของวัสดุพูนในช่วงท้ายจะลดลงใน อัตราที่ค่าค่อนข้างคงที่ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากในช่วงแรก เป็นช่วงที่วัสดุพูนยังมีความชื้นสูงอยู่โดยเฉพาะที่บริเวณผิว ดังนั้นการถ่ายเทมวลและความร้อนส่วนใหญ่จึงเกิดขึ้นที่บริเวณผิว ซึ่งการถ่ายเทมวลและความร้อนที่บริเวณผิวของวัสดุพูนนั้นจะง่ายกว่าการถ่ายเทมวลและความร้อนภายในวัสดุพูน ดังนั้นในช่วงแรกความชื้นของวัสดุพูนจึงลดลงอย่างรวดเร็ว และเมื่อความชื้นที่ผิวลดลงมากแล้ว การถ่ายเทมวลและความร้อนส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นภายในวัสดุพูน ซึ่งการเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในวัสดุพูนมาที่ผิวจะยากและช้ากว่าในช่วงแรกที่วัสดุพูนมีความชื้นสูง ส่งผลให้ความชื้นของวัสดุพูนลดลงอย่างช้าๆ ในช่วงท้าย จากผลการจำลองแบบที่อุณหภูมิอากาศเข้าและความเร็วอากาศเข้าที่ใช้ในการอบแห้งมีผลต่ออัตราการลดความชื้นในช่วง 6 นาทีแรกมากที่สุด เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้นจะทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวหน้าและภายในวัสดุพูนต่างกันมากขึ้น ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนเข้าภายในวัสดุพูนเพิ่มขึ้น ทำให้ความดันแตกต่างระหว่างความดันไอน้ำภายในวัสดุพูนกับอากาศโดยรอบภายนอก ส่งผลให้การแพร่ความชื้นจากภายในวัสดุพูนเคลื่อนที่มายังที่ผิวหน้าได้เร็วขึ้นทำให้ความชื้นลดลงเร็วในช่วงแรก ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 353 เคลวิน ความเร็วอากาศเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที กราฟเปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานแห้งลดลงมากที่สุด ในช่วงสุดท้ายอัตราการลดลงของความชื้นจะมีความใกล้เคียงกันในทุกผลการจำลอง

จากภาพประกอบ 104 ภาพกราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานแห้งของวัสดุพูน บริเวณ Zone 1 ที่อุณหภูมิ 333,343 และ 353 เคลวิน ที่ความเร็ว 0.5, 0.75, 1.0 เมตรต่อวินาที เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น เปอร์เซ็นต์การลดลงของ ความชื้นมาตรฐานแห้ง จะดีขึ้นในแต่ละช่วงเวลา ส่วนในช่วงนาที่ที่ 6 ถึง 15 นาทีสุดท้ายอัตราการลดลงของ ความชื้นจะ ลดลงในอัตราที่คงที่และ มีความใกล้เคียงกันในทุกผลการจำลอง



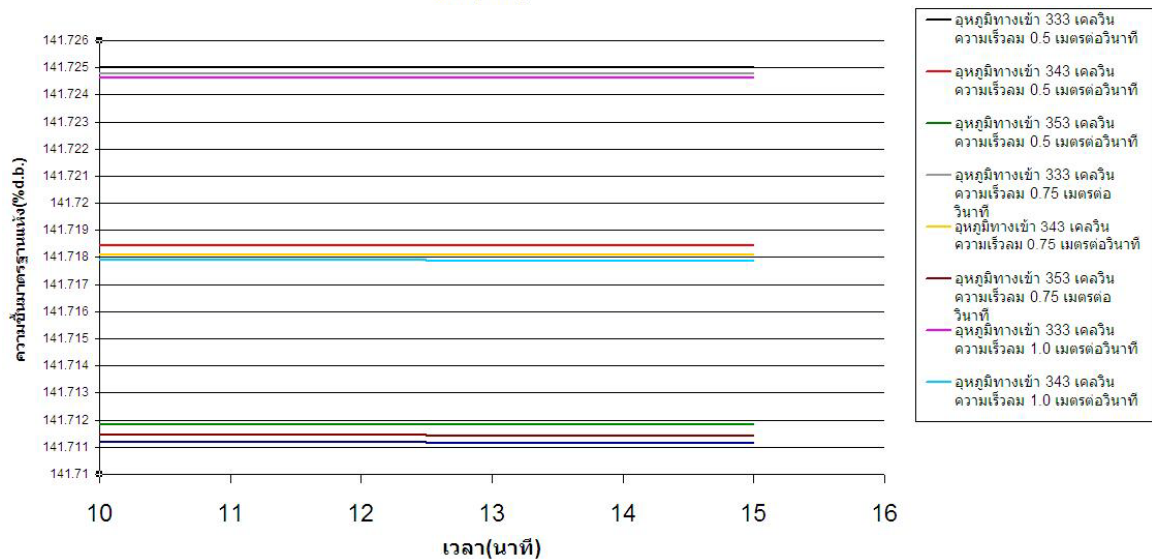
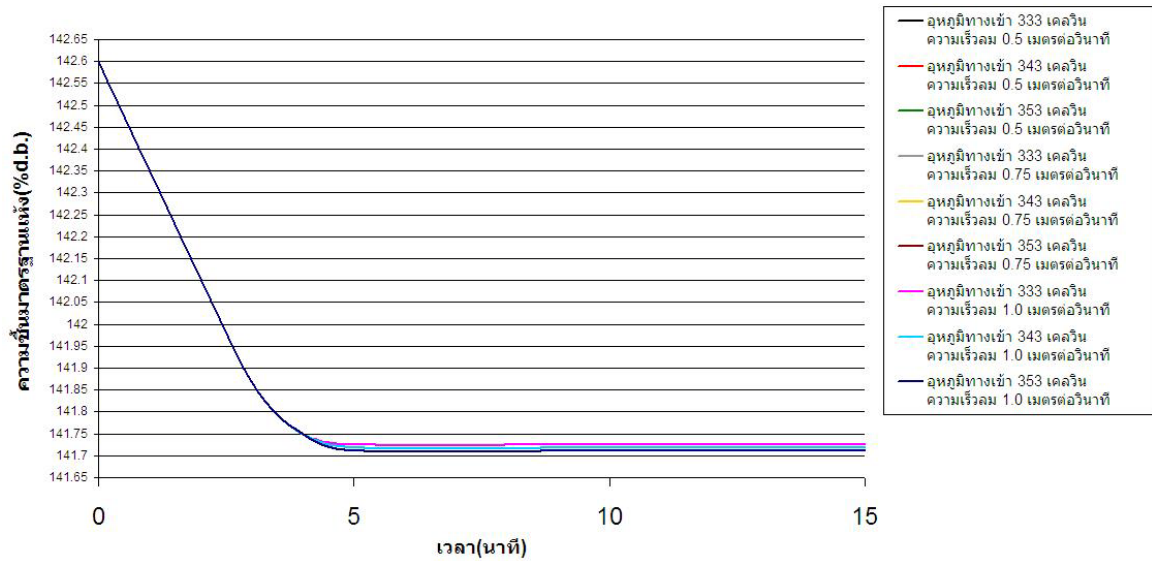
ภาพประกอบ 104 ภาพกราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานแห้งของวัสดุพูน บริเวณ Zone 1 ที่อุณหภูมิ 333,343 และ 353 เคลวิน ที่ความเร็ว 0.5, 0.75 และ 1.0 เมตรต่อวินาที (แสดงการคำนวณภาคผนวก ก)

จากภาพประกอบ 105 ภาพกราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานแห้งของวัสดุพูน บริเวณ Zone 3 ที่อุณหภูมิ 333,343 และ 353 เคลวิน ที่ความเร็ว 0.5, 0.75, 1.0 เมตรต่อวินาที เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น เปอร์เซ็นต์การลดลงของ ความชื้นมาตรฐานแห้ง จะดีขึ้นในแต่ละช่วงเวลา ส่วนในช่วงนาที่ที่ 6 ถึง 15 นาที่สุดท้ายอัตราการลดลงของความชื้นจะ ลดลงในอัตราที่คงที่และ มีความใกล้เคียงกันในทุกผลการจำลอง



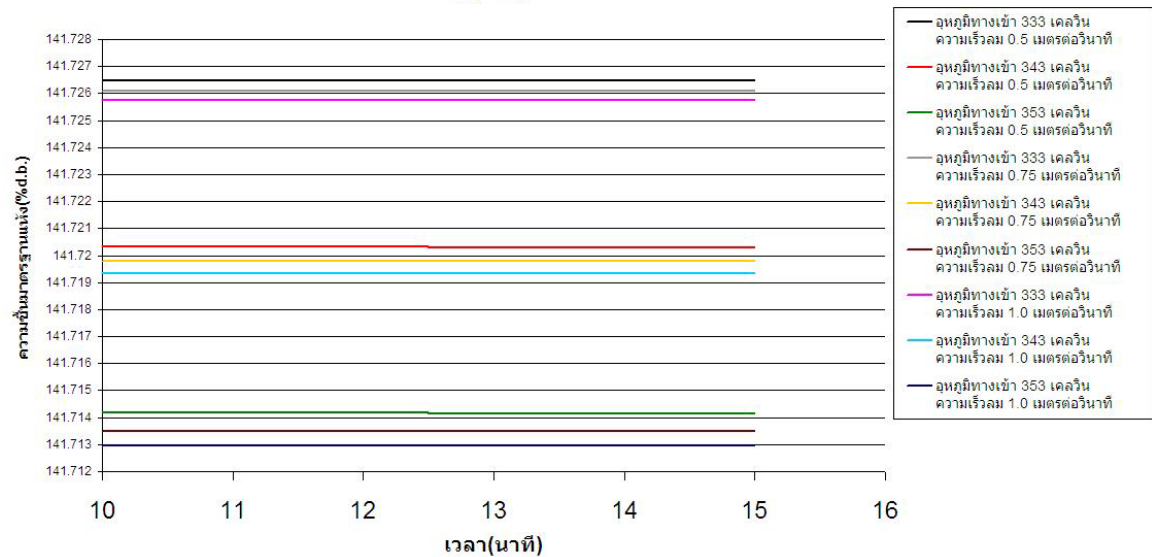
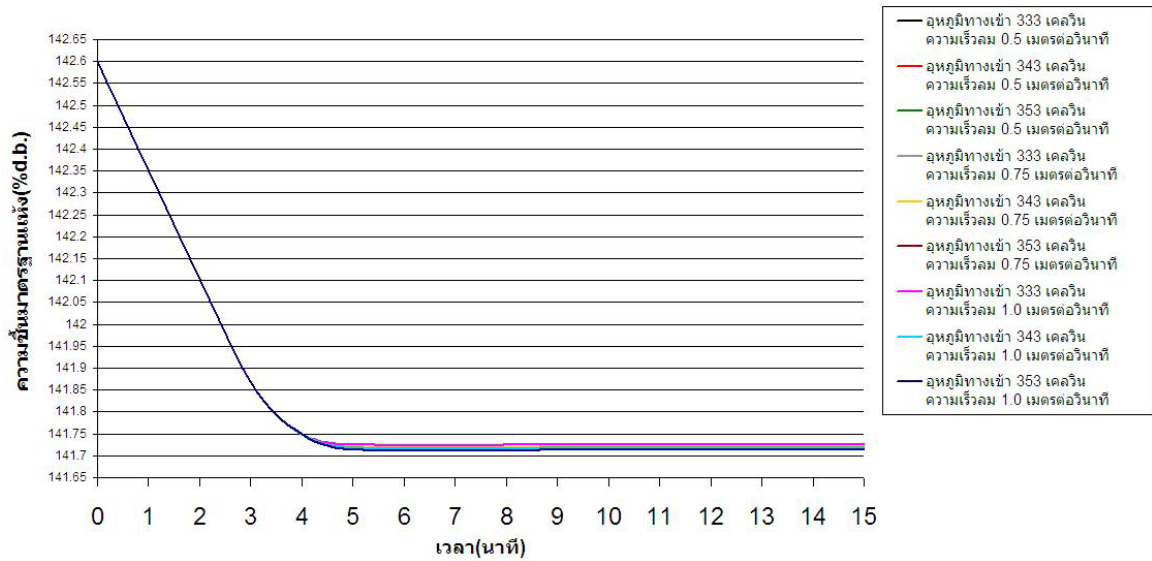
ภาพประกอบ 105 ภาพกราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานแห้งของวัสดุพูน บริเวณ Zone 2 ที่อุณหภูมิ 333,343 และ 353 เคลวิน ที่ความเร็ว 0.5, 0.75 และ 1.0 เมตรต่อวินาที (แสดงการคำนวณภาคผนวก ก)

จากภาพประกอบ 106 ภาพกราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานแห้งของวัสดุพูน บริเวณ Zone 4 ที่อุณหภูมิ 333,343 และ 353 เคลวิน ที่ความเร็ว 0.5, 0.75, 1.0 เมตรต่อวินาที เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น เปอร์เซ็นต์การลดลงของ ความชื้นมาตรฐานแห้ง จะดีขึ้นในแต่ละช่วงเวลา ส่วนในช่วงนาที่ที่ 6 ถึง 15 นาที่สุดท้ายอัตราการลดลงของความชื้นจะ ลดลงในอัตราที่คงที่และ มีความใกล้เคียงกันในทุกผลการจำลอง



ภาพประกอบ 106 ภาพกราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานแห้งของวัสดุพูน บริเวณ Zone 3 ที่อุณหภูมิ 333,343 และ 353 เคลวิน ที่ความเร็ว 0.5, 0.75 และ 1.0 เมตรต่อวินาที (แสดงการคำนวณภาคผนวก ก)

จากภาพประกอบ 107 ภาพกราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานแห้งของวัสดุพูน บริเวณ Zone 2 ที่อุณหภูมิ 333,343 และ 353 เคลวิน ที่ความเร็ว 0.5, 0.75, 1.0 เมตรต่อวินาที เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น เปอร์เซ็นต์การลดลงของ ความชื้นมาตรฐานแห้ง จะดีขึ้นในแต่ละช่วงเวลา ส่วนในช่วงนาที่ที่ 6 ถึง 15 นาที่สุดท้ายอัตราการลดลงของความชื้นจะ ลดลงในอัตราที่คงที่และ มีความใกล้เคียงกันในทุกผลการจำลอง



ภาพประกอบ 107 ภาพกราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานแห้งของวัสดุพูน บริเวณ Zone 4 ที่อุณหภูมิ 333,343 และ 353 เคลวิน ที่ความเร็ว 0.5, 0.75 และ 1.0 เมตรต่อวินาที (แสดงการคำนวณภาคผนวก ก)

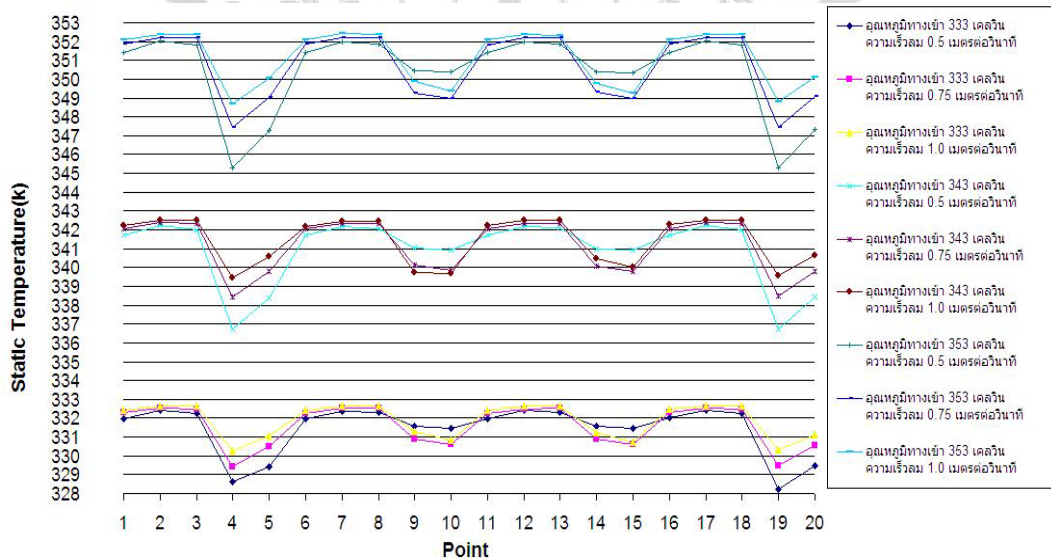
บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

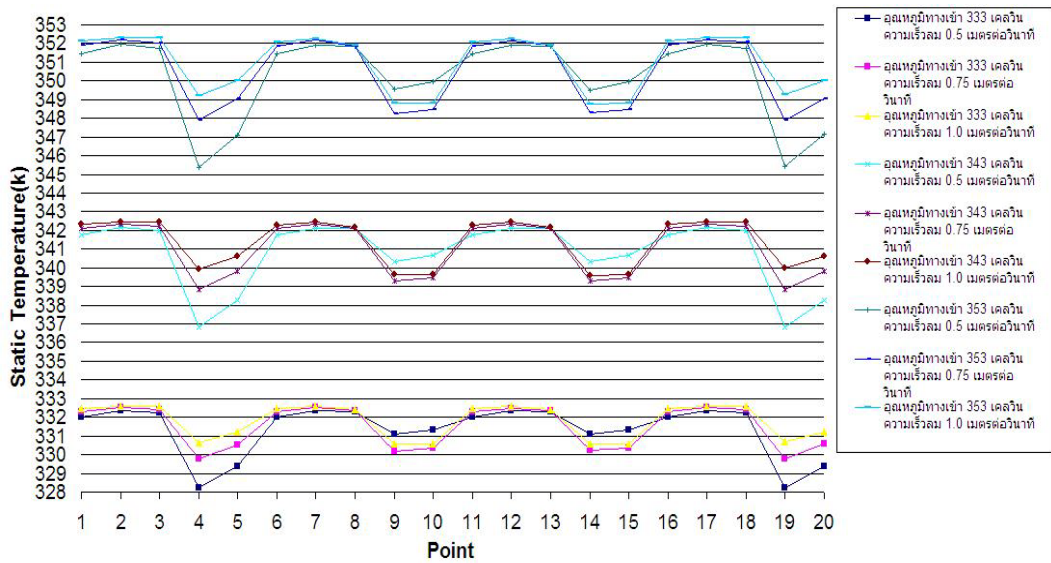
สรุป

จากการจำลองการกระจายอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งแบบลมร้อน เพื่อศึกษาการกระจายอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งแบบลมร้อน ผลที่ได้จากการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล โดยการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิอากาศเข้าและความเร็วอากาศเข้าสามารถสรุปได้ดังนี้

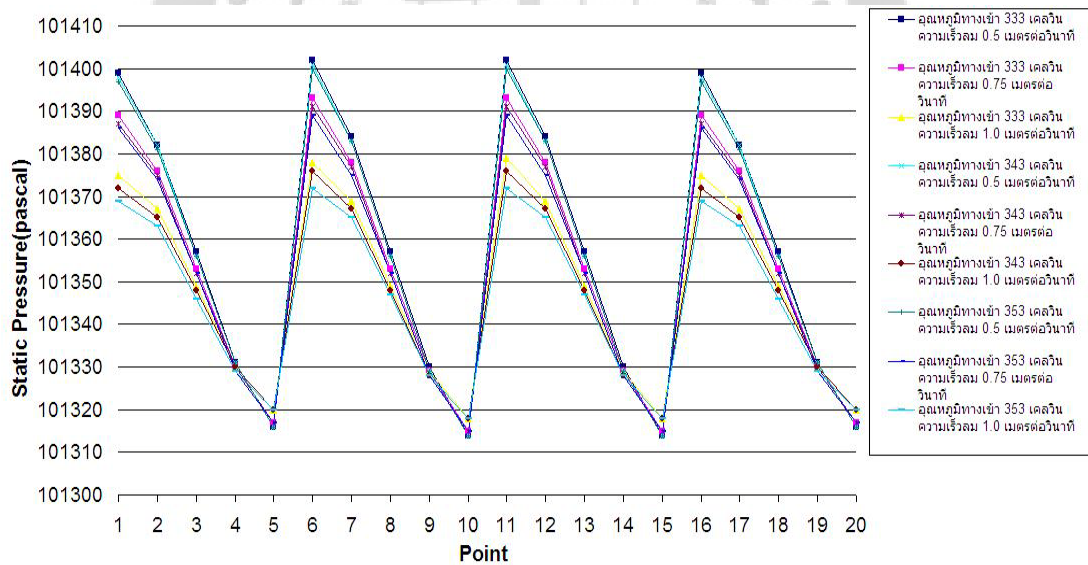
จากรูปภาพประกอบ 108 ผลจากการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิอากาศเข้าและความเร็วอากาศเข้าเมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที พบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง ที่ความเร็วอากาศเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิภายในห้องอบแห้งมีความแตกต่างกันน้อยที่สุดในแต่ละช่วงอุณหภูมิอากาศเข้า แสดงให้เห็นว่าที่ความเร็วอากาศเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที การกระจายตัวของอุณหภูมิต่ำที่สุด และผลจากการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิอากาศเข้า ที่แสดงดัง ภาพประกอบ 108 ที่อุณหภูมิอากาศ 333 เคลวิน ที่ความเร็วอากาศเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที กราฟอุณหภูมิที่จุดต่างๆ มีความแตกต่างกันน้อยที่สุด แสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิ ภายในห้องอบแห้ง มีความสม่ำเสมอมากที่สุด



ภาพประกอบ 108 กราฟแสดง Static Temperature ภายในห้องอบแห้งโดยภายในห้องอบแห้ง มีวัสดุพูนในห้องอบ ณ ตำแหน่ง Point 1 ถึง Point 20 ที่อุณหภูมิ 333, 343 และ 353 เคลวิน ที่ความเร็ว 0.5, 0.75, 1.0 เมตรต่อวินาที ในเวลา 5 นาที

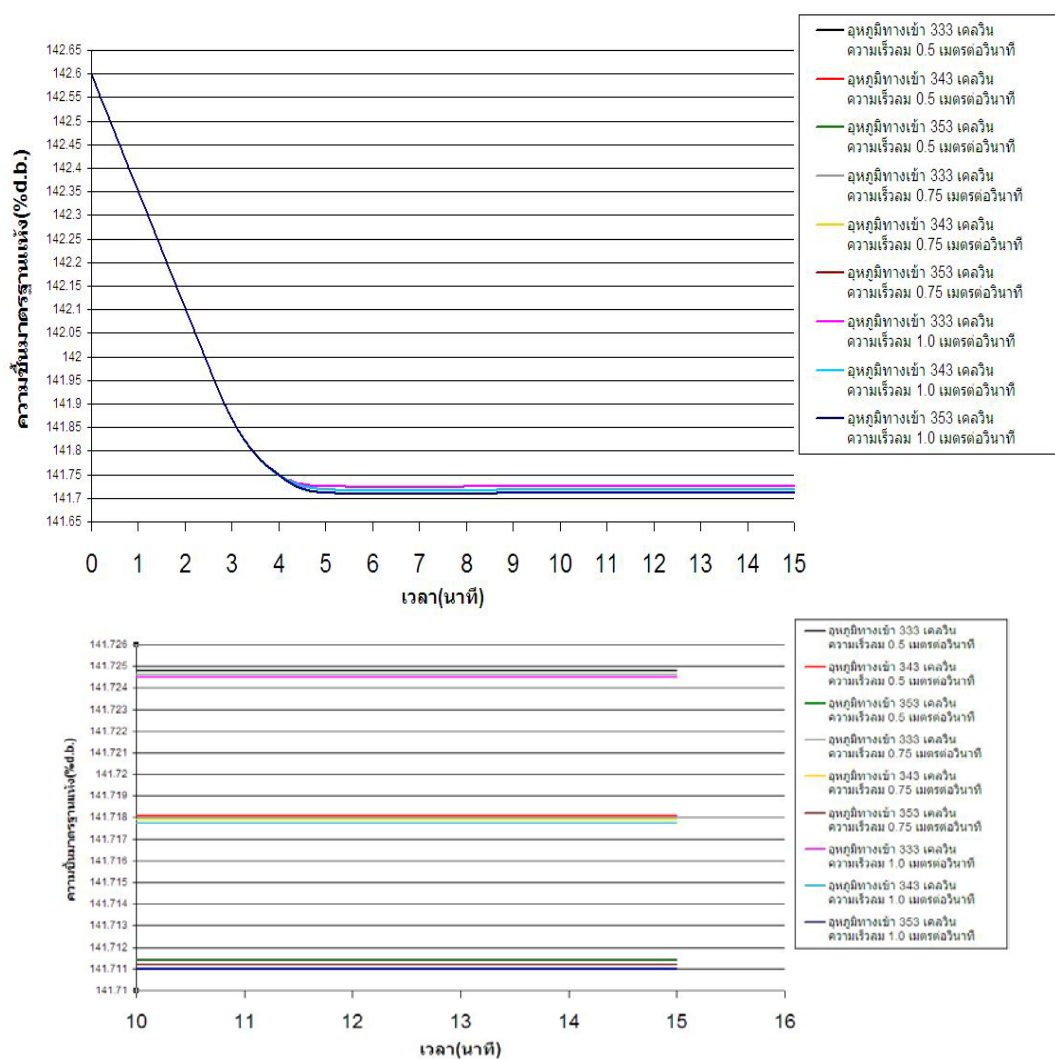


ภาพประกอบ 109 กราฟแสดง Static Temperature ภายในห้องอบแห้งโดยภายในห้องอบแห้ง มีวัสดุพูนในห้องอบ ณ ตำแหน่ง Point 1 ถึง Point 20 ที่อุณหภูมิ 333,343 และ 353 เคลวิน ที่ความเร็ว 0.5, 0.75, 1.0 เมตรต่อวินาที ในเวลา 15 นาที



ภาพประกอบ 110 กราฟแสดง Static Pressure ภายในห้องอบแห้งโดยมีวัสดุพูนในห้องอบ ณ ตำแหน่ง Point 1 ถึง Point 20 ที่อุณหภูมิ 333,343 และ 353 เคลวิน ที่ความเร็ว 0.5, 0.75, 1.0 เมตรต่อวินาที ในเวลา 15 นาที

จากกราฟภาพประกอบ 109 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งแบบลมร้อน เมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที พบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งที่ความเร็วอากาศเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิภายในห้องอบแห้งมีความแตกต่างกันน้อยที่สุดในแต่ละช่วงอุณหภูมิอากาศเข้า แสดงให้เห็นว่าที่ความเร็วอากาศเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที การกระจายตัวของอุณหภูมิมีความสม่ำเสมอมากที่สุด และผลจากการเปลี่ยนที่อุณหภูมิอากาศเข้าที่แสดงด้วยภาพประกอบ 109 ที่อุณหภูมิอากาศ 333 เคลวิน ที่ความเร็วอากาศเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที กราฟอุณหภูมิที่จุดต่างๆ มีความแตกต่างกันน้อยที่สุด แสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งมีความสม่ำเสมอมากที่สุด



ภาพประกอบ 111 ภาพกราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานแห้งของวัสดุพูน บริเวณ Zone 1 ที่อุณหภูมิ 333, 343 และ 353 เคลวิน ที่ความเร็ว 0.5, 0.75 และ 1.0 เมตรต่อวินาที

จากกราฟภาพประกอบ 110 ในส่วนของการกระจาย Static Pressure ภายในห้องอบแห้งแบบลมร้อน ที่ความเร็วอากาศเข้า 1 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิอากาศเข้า 353 เคลวิน ผลจากความดันบรรยากาศภายในห้องอบแห้งมีความดันบรรยากาศต่ำ และยิ่งความดันบรรยากาศต่ำแรงกดดันเนื้อผิวของเหลวน้อยลง สารระเหยดีขึ้น และยิ่งอุณหภูมิสูง สารระเหยดีขึ้น ความดันไอก็สูงขึ้นแรงระหว่างโมเลกุลน้อยสารจะใช้พลังงานน้อยในการสลายพันธะจึงระเหยเร็ว

จากกราฟภาพประกอบ 111 ผลการจำลองแบบที่อุณหภูมิอากาศเข้าและความเร็วอากาศเข้าที่ใช้ในการอบแห้งมีผลต่ออัตราการลดความชื้นในช่วง 6 นาทีแรกมากที่สุด จากกราฟ 111 เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิมอบแห้งสูงขึ้นในช่วงแรกจะทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวนอกและภายในวัสดุพูนต่างกันมากขึ้น ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนเข้าภายในวัสดุพูนเพิ่มขึ้น ทำให้ความดันแตกต่างระหว่างความดันไภายในวัสดุพูนกับอากาศโดยรอบภายนอก ส่งผลให้การแพร่ความชื้นจากภายในวัสดุพูนเคลื่อนที่มายังที่ผิวนอกได้เร็วขึ้นทำให้ความชื้นลดลงเร็วในช่วงแรก ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 353 เคลวิน ความเร็วอากาศเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที กราฟเปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานแห้งลดลงมากที่สุด ในช่วงสุดท้ายอัตราการลดลงของความชื้นจะมี ความใกล้เคียงกันในทุกผลการจำลอง ในส่วนของการแยกไอน้ำวัสดุพูนเพื่อดูแนวโน้มค่า เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานแห้งของวัสดุพูนของแต่ละโซน จากภาพประกอบ 110 แนวโน้มค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานแห้งของวัสดุ พูนของโซนที่ 1 จะเป็นโซนที่การลดลงของ เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานแห้งของวัสดุ พูนที่ดีที่สุด เนื่องจากจะเป็นบริเวณที่อากาศร้อนเข้ามาถ่ายโอนความร้อนให้แก่ผิวของวัสดุพูนก่อนบริเวณอื่น

โดยรวมผลจากการจำลองแบบ พบว่าผลของการเพิ่มอุณหภูมิอากาศเข้าในการอบแห้งให้ อุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลต่ออัตราการลดความชื้นและผลจากการเปลี่ยนความเร็วอากาศเข้าจะส่งผลต่อ การกระจายตัวของอากาศภายในห้องอบแห้งน้อยมาก

ข้อเสนอแนะ

จากการใช้เซลล์ในการคำนวณที่มีขนาดใหญ่ทำให้ค่าที่ได้มีความแม่นยำที่น้อยลงดังนั้นแนวทางการพัฒนาและปรับปรุงแบบจำลองการไหลของการกระจายอุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง เพิ่มเติม เพื่อให้การจำลองดีกว่านี้อีกควรแก้ไข ดังนี้

1. ศึกษาเพิ่มในแบบจำลองของวัสดุพูนที่มีขนาดและรูปร่างอื่นๆ
2. เพิ่มความละเอียดของเซลล์ที่ใช้ คำนวณของแบบจำลอง
3. ในส่วนของคอมพิวเตอร์ช่วยคำนวณ ควรมีพื้นที่หน่วยความจำมากขึ้นเพื่อช่วยประหยัด

เวลาในการคำนวณ



บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- จำเนียร สุวะไกร. (2550). การวิเคราะห์เชิงตัวเลขและการทดลองเกี่ยวกับคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนและการไหลในท่อแบบขดเป็นวง. วิทยานิพนธ์ วศ.ม. (วิศวกรรมเครื่องกล). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. ถ่ายเอกสาร.
- ดวงดี วิเชียรโหด. (2541). การศึกษาการแพร่และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การแพร่ในวัสดุพูน. วิทยานิพนธ์ วศ.ม. กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. ถ่ายเอกสาร.
- มนัสวี สกุลแก้ว. (2546). การปรับปรุงระบบกระจายอากาศร้อน และการสลับทิศทางออกอากาศร้อนของเครื่องอบแห้งลำไยแบบแก๊สเป่า. วิทยานิพนธ์ วศ.ม. (วิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูป). เชียงใหม่: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. ถ่ายเอกสาร.
- พิทักษ์ จันทรเจริญ; กิตติศักดิ์ วสันตวิวงศ์; และ ทรงพล การะเกตุ. (2546). การวิเคราะห์การทำแห้งหน่อไม้ไผ่ตรงโดยเครื่องอบแห้งชนิดถาด. โปรแกรมมิชชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร กรุงเทพฯ: คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันราชภัฏสวนดุสิต.
- นริศ พัวพันวัฒนะ; ภราดร หนูทอง; กอดขวัญ นามสงวน; ศิวะ อัจฉริยวิริยะ; และ อารีย์ อัจฉริยวิริยะ. (ม.ป.ป.). "จลนพลศาสตร์การอบแห้งเนื้อลำไยด้วยเครื่องอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน". การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22, 15-17 ตุลาคม 2551 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต. หน้า 328-343.
- ภราดร หนูทอง; อีรพงษ์ วุฒิมามว นราวัฒน์ ปันพะสงค์; ศิวะ อัจฉริยวิริยะ; และ อารีย์ อัจฉริยวิริยะ. (ม.ป.ป.). "การพัฒนาเครื่องอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนสำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการ". การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 15-17 ตุลาคม 2551 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต.
- วัฒนารฐ อึ้งเจริญวัฒนา. (2545). การศึกษาพารามิเตอร์และแบบจำลองแบบของระบบลดความชื้นเพื่อใช้ในเตาอบ. วิทยานิพนธ์ วศ.ม. กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. ถ่ายเอกสาร.
- เพชรรัตน์ ใจบุญ. (2549). การศึกษาเปรียบเทียบการอบแห้งลำไยด้วยเทคนิคแบบต่าง ๆ. วิทยานิพนธ์ วศ.ม. (เทคโนโลยีพลังงาน). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. ถ่ายเอกสาร.





ภาคผนวก

การคำนวณเปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานแห้งของวัสดุพูน

1. การวิเคราะห์ความชื้น ความชื้นสมมูลความชื้นเป็นตัวเลขปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุ เมื่อเปรียบเทียบกับมวลวัสดุขึ้นหรือแห้งความชื้นในวัสดุสามารถแสดงได้เป็น 2 แบบ คือ

1.1 คำนวณน้ำหนักก่อนอบแห้งของวัสดุพูนจากสมการ

$$\rho = \frac{m}{v}$$

ρ คือความหนาแน่นของวัตถุ (หน่วย กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

m คือมวลรวมของวัตถุ (หน่วย กิโลกรัม)

v คือปริมาตรรวมของวัตถุ (หน่วย ลูกบาศก์เมตร)

ความชื้นมาตรฐานเปียก (Moisture content wet basis, w.b.)

$$M_{w.b.} = \left(\frac{M_w}{(M_w + M_d)} \right) \times 100$$

โดย $M_{w.b.}$ คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (%w.b.)

M_w คือ มวลของน้ำในอาหาร หรือ น้ำหนักที่หายไปหลังการอบ

M_d คือ มวลของของแข็งในอาหาร หรือ น้ำหนักหลังอบ

ความชื้นมาตรฐานแห้ง (Moisture content dry basis, d.b.)

$$M_{d.b.} = \left(\frac{M_w}{M_d} \right) \times 100$$

โดย $M_{d.b.}$ คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (%d.b.)

ปริมาณความชื้น อุณหภูมิอากาศเข้า 333 เคลวิน Zone 1

เวลา (นาท)	ความเร็วอากาศเข้า 0.5 เมตรต่อวินาที		ความเร็วอากาศเข้า 0.75 เมตรต่อวินาที		ความเร็วอากาศเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที	
	มวลของน้ำใน อาหาร(Kg.)	ความชื้น (%db.)	มวลของน้ำใน อาหาร(Kg.)	ความชื้น (%db.)	มวลของน้ำใน อาหาร(Kg.)	ความชื้น (%db.)
0	2.515464000	142.600000	2.515464000	142.600000	2.515464000	142.600000
5	2.500026001	141.724830	2.500023658	141.724697	2.500021364	141.724567
10	2.500025497	141.7248014	2.500023154	141.724668	2.500020886	141.724540
15	2.500024867	141.7247657	2.500022624	141.724638	2.500020558	141.724521

ปริมาณความชื้น อุณหภูมิอากาศเข้า 343 เคลวิน Zone 1

เวลา (นาท)	ความเร็วอากาศเข้า 0.5 เมตรต่อวินาที		ความเร็วอากาศเข้า 0.75 เมตร ต่อวินาที		ความเร็วอากาศเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที	
	มวลของน้ำใน อาหาร(Kg.)	ความชื้น (%db.)	มวลของน้ำใน อาหาร(Kg.)	ความชื้น (%db.)	มวลของน้ำใน อาหาร(Kg.)	ความชื้น (%db.)
0	2.515464000	142.600000	2.515464000	142.600000	2.515464000	142.600000
5	2.499908721	141.718181	2.499905293	141.71798	2.499902471	141.717821
10	2.499907889	141.7179529	2.499904688	141.717952	2.499901841	141.717791
15	2.499907208	141.7179171	2.499904058	141.717917	2.499901387	141.717765

ปริมาณความชื้น อุณหภูมิอากาศเข้า 353 เคลวิน Zone 1

เวลา (นาท)	ความเร็วอากาศเข้า 0.5 เมตรต่อวินาที		ความเร็วอากาศเข้า 0.75 เมตร ต่อวินาที		ความเร็วอากาศเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที	
	มวลของน้ำใน อาหาร(Kg.)	ความชื้น (%db.)	มวลของน้ำใน อาหาร(Kg.)	ความชื้น (%db.)	มวลของน้ำใน อาหาร(Kg.)	ความชื้น (%db.)
0	2.515464000	142.600000	2.515464000	142.600000	2.515464000	142.600000
5	2.499791389	141.71153	2.49978695	141.711278	2.49978350	141.711082
10	2.499790331	141.71147	2.49978617	141.711234	2.49978269	141.711037
15	2.499789474	141.7114214	2.49978544	141.711192	2.49978209	141.711002

ปริมาณความชื้น อุณหภูมิอากาศเข้า 333 เคลวิน Zone 2

เวลา (นาที)	ความเร็วอากาศเข้า 0.5 เมตรต่อวินาที		ความเร็วอากาศเข้า 0.75 เมตรต่อวินาที		ความเร็วอากาศเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที	
	มวลของน้ำใน อาหาร(Kg.)	ความชื้น (%db.)	มวลของน้ำใน อาหาร(Kg.)	ความชื้น (%db.)	มวลของน้ำใน อาหาร(Kg.)	ความชื้น (%db.)
0	2.515464000	142.600000	2.515464000	142.600000	2.515464000	142.600000
5	2.500053494	141.7263886	2.50004601	141.725964	2.500039634	141.725602
10	2.500053016	141.7263614	2.500045304	141.725924	2.500038904	141.725561
15	2.50005299	141.72636	2.500045279	141.725922	2.500038526	141.72554

ปริมาณความชื้น อุณหภูมิอากาศเข้า 343 เคลวิน Zone 2

เวลา (นาที)	ความเร็วอากาศเข้า 0.5 เมตรต่อวินาที		ความเร็วอากาศเข้า 0.75 เมตร ต่อวินาที		ความเร็วอากาศเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที	
	มวลของน้ำใน อาหาร(Kg.)	ความชื้น (%db.)	มวลของน้ำใน อาหาร(Kg.)	ความชื้น (%db.)	มวลของน้ำใน อาหาร(Kg.)	ความชื้น (%db.)
0	2.515464000	142.600000	2.515464000	142.600000	2.515464000	142.600000
5	2.499944404	141.7202043	2.499934525	141.719644	2.499926486	141.719188
10	2.499944	141.7201814	2.499933668	141.719595	2.499925478	141.719131
15	2.499943597	141.7201586	2.499933593	141.719591	2.499924899	141.719098

ปริมาณความชื้น อุณหภูมิอากาศเข้า 353 เคลวิน Zone 2

เวลา (นาที)	ความเร็วอากาศเข้า 0.5 เมตรต่อวินาที		ความเร็วอากาศเข้า 0.75 เมตร ต่อวินาที		ความเร็วอากาศเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที	
	มวลของน้ำใน อาหาร(Kg.)	ความชื้น (%db.)	มวลของน้ำใน อาหาร(Kg.)	ความชื้น (%db.)	มวลของน้ำใน อาหาร(Kg.)	ความชื้น (%db.)
0	2.515464000	142.600000	2.515464000	142.600000	2.515464000	142.600000
5	2.499835363	141.7140229	2.499823166	141.713331	2.499811877	141.712691
10	2.499835262	141.7140171	2.499822083	141.71327	2.499811196	141.712652
15	2.499834481	141.7139729	2.499822007	141.713265	2.499813086	141.71276

ปริมาณความชื้น อุณหภูมิอากาศเข้า 333 เคลวิน Zone 3

เวลา (นาที)	ความเร็วอากาศเข้า 0.5 เมตรต่อวินาที		ความเร็วอากาศเข้า 0.75 เมตรต่อวินาที		ความเร็วอากาศเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที	
	มวลของน้ำใน อาหาร(Kg.)	ความชื้น (%db.)	มวลของน้ำใน อาหาร(Kg.)	ความชื้น (%db.)	มวลของน้ำใน อาหาร(Kg.)	ความชื้น (%db.)
0	2.515464000	142.600000	2.515464000	142.600000	2.515464000	142.600000
5	2.500030688	141.7250957	2.500026354	141.72485	2.500023431	141.724684
10	2.500030084	141.7250614	2.500025774	141.724817	2.500022801	141.724648
15	2.500029353	141.72502	2.500025094	141.724778	2.500022095	141.724608

ปริมาณความชื้น อุณหภูมิอากาศเข้า 343 เคลวิน Zone 3

เวลา (นาที)	ความเร็วอากาศเข้า 0.5 เมตรต่อวินาที		ความเร็วอากาศเข้า 0.75 เมตร ต่อวินาที		ความเร็วอากาศเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที	
	มวลของน้ำใน อาหาร(Kg.)	ความชื้น (%db.)	มวลของน้ำใน อาหาร(Kg.)	ความชื้น (%db.)	มวลของน้ำใน อาหาร(Kg.)	ความชื้น (%db.)
0	2.515464000	142.600000	2.515464000	142.600000	2.515464000	142.600000
5	2.499914491	141.7185086	2.499908846	141.718188	2.499905192	141.717981
10	2.499913861	141.7184729	2.499908116	141.718147	2.499904361	141.717934
15	2.499913105	141.71843	2.499907309	141.718101	2.499903479	141.717884

ปริมาณความชื้น อุณหภูมิอากาศเข้า 353 เคลวิน Zone 3

เวลา (นาที)	ความเร็วอากาศเข้า 0.5 เมตรต่อวินาที		ความเร็วอากาศเข้า 0.75 เมตร ต่อวินาที		ความเร็วอากาศเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที	
	มวลของน้ำใน อาหาร(Kg.)	ความชื้น (%db.)	มวลของน้ำใน อาหาร(Kg.)	ความชื้น (%db.)	มวลของน้ำใน อาหาร(Kg.)	ความชื้น (%db.)
0	2.515464000	142.600000	2.515464000	142.600000	2.515464000	142.600000
5	2.499798395	141.7119271	2.499791188	141.711518	2.499786878	141.711274
10	2.499797588	141.7118814	2.499790482	141.711478	2.499785845	141.711215
15	2.499796757	141.7118343	2.499789499	141.711422	2.499784787	141.711155

ปริมาณความชื้น อุณหภูมิอากาศเข้า 333 เคลวิน Zone 4

เวลา (นาที)	ความเร็วอากาศเข้า 0.5 เมตรต่อวินาที		ความเร็วอากาศเข้า 0.75 เมตรต่อวินาที		ความเร็วอากาศเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที	
	มวลของน้ำใน อาหาร(Kg.)	ความชื้น (%db.)	มวลของน้ำใน อาหาร(Kg.)	ความชื้น (%db.)	มวลของน้ำใน อาหาร(Kg.)	ความชื้น (%db.)
0	2.515464000	142.600000	2.515464000	142.600000	2.515464000	142.600000
5	2.500057199	141.7265986	2.50005047	141.726217	2.500044019	141.725851
10	2.50005541	141.7264971	2.500048253	141.726091	2.500042079	141.725741
15	2.500054729	141.7264586	2.500048127	141.726084	2.500041902	141.725731

ปริมาณความชื้น อุณหภูมิอากาศเข้า 343 เคลวิน Zone 4

เวลา (นาที)	ความเร็วอากาศเข้า 0.5 เมตรต่อวินาที		ความเร็วอากาศเข้า 0.75 เมตร ต่อวินาที		ความเร็วอากาศเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที	
	มวลของน้ำใน อาหาร(Kg.)	ความชื้น (%db.)	มวลของน้ำใน อาหาร(Kg.)	ความชื้น (%db.)	มวลของน้ำใน อาหาร(Kg.)	ความชื้น (%db.)
0	2.515464000	142.600000	2.515464000	142.600000	2.515464000	142.600000
5	2.49994831	141.7204257	2.49993959	141.719931	2.4999313	141.719461
10	2.499946873	141.7203443	2.499937121	141.719791	2.499929788	141.719375
15	2.499946016	141.7202957	2.49993707	141.719788	2.499929309	141.719348

ปริมาณความชื้น อุณหภูมิอากาศเข้า 353 เคลวิน Zone 4

เวลา (นาที)	ความเร็วอากาศเข้า 0.5 เมตรต่อวินาที		ความเร็วอากาศเข้า 0.75 เมตร ต่อวินาที		ความเร็วอากาศเข้า 1.0 เมตรต่อวินาที	
	มวลของน้ำใน อาหาร(Kg.)	ความชื้น (%db.)	มวลของน้ำใน อาหาร(Kg.)	ความชื้น (%db.)	มวลของน้ำใน อาหาร(Kg.)	ความชื้น (%db.)
0	2.515464000	142.600000	2.515464000	142.600000	2.515464000	142.600000
5	2.499839496	141.7142571	2.499828685	141.713644	2.499818378	141.71306
10	2.499838488	141.7142	2.499826241	141.713505	2.499817194	141.712992
15	2.499837228	141.7141286	2.499825964	141.71349	2.499816463	141.712951

2.การวิเคราะห์ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number, Re)

ค่า Re เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับความยาวจำเพาะ (Characteristic length) โดยเป็นตัวแทนแสดงถึงอัตราส่วนระหว่างแรงเฉื่อย (Inertia force) ต่อแรงหนืด (Viscous force) ค่าความยาวจำเพาะที่ใช้คือค่าความสูงของช่องอากาศ (H) แบ่งสภาวะการไหลเป็นดังนี้

โดยที่

$$Re_H = \frac{VH}{\nu}$$

V คือ ความเร็วการไหล (เมตร/วินาที)

H คือ ความสูงช่องว่างระหว่างชั้นวัสดุ (เมตร)

ν คือ ค่าความหนืดจลน์ของอากาศ (เมตร²/วินาที)

- การไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) มีค่าเลขเรย์โนลด์ต่ำกว่า 2,100 โดยประมาณ
- การไหลในช่วงทรานซิชัน (Transition) มีค่าเลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 2,100 ถึง 4,000 เป็นช่วงการไหลที่จะเปลี่ยนลักษณะ การไหลจากแบบราบเรียบไปเป็น การไหลแบบปั่นป่วน
- การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence Flow) มีค่าเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 4,000 ขึ้นไปโดยประมาณ

อุณหภูมิอากาศเข้า (เคลวิน)	ความเร็วการไหล (เมตร/วินาที)	ความสูงช่องว่าง ระหว่างชั้นวัสดุ(เมตร)	ความหนืดจลน์ของ อากาศ(เมตร ² /วินาที)	ค่าเรย์โนลด์
333	0.5	0.06	1.86E-05	1612.903
333	0.75	0.06	1.86E-05	2419.355
333	1.0	0.06	1.86E-05	3225.806
343	0.5	0.06	1.97E-05	1522.843
343	0.75	0.06	1.97E-05	2284.264
343	1.0	0.06	1.97E-05	3045.685
353	0.5	0.06	2.07E-05	1449.275
353	0.75	0.06	2.07E-05	2173.913
353	1.0	0.06	2.07E-05	2898.551



อภิธานศัพท์

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
A	= พื้นที่ผิว	m^2
D	= สัมประสิทธิ์การแพร่	m^2 / s
$D_{i,m}$	= ค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ของสาร i ในของผสม	m^2 / s
e	= พลังงาน	J/kg
F	= แรง	N
f	= ความเร็วเข้าสู่ศูนย์กลางของโลก	m/s^3
\bar{g}	= อัตราเร่งของแรงโน้มถ่วง	m/s^2
h	= สัมประสิทธิ์การพาความร้อน	$W/m^2.K$
\bar{h}	= สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย	$W/m^2.K$
h_{fg}	= ความร้อนแฝงของการระเหย	J/kg.K
\bar{j}	= อัตราการถ่ายโอนมวลต่อหน่วยพื้นที่	$kg/m^2.s$
\bar{J}_i	= ฟลักซ์ของการแพร่ของสาร i	$kg / m^2 - s$
Nu_H	= ตัวเลขนัสเซิลท์	
\dot{m}	= อัตราการไหลเชิงมวล	kg/s
M_d	= มวลของน้ำในอาหาร หรือ น้ำหนักที่หายไปหลังการอบ	
$M_{d.b.}$	= ความชื้นมาตรฐานแห้ง	%d.b.
M_w	= มวลของของแข็งในอาหาร หรือ น้ำหนักหลังอบ	
$M_{w.b.}$	= ความชื้นมาตรฐานเปียก	%w.b.
Pa	= ความดันบรรยากาศ	$1N / m^2$
Pr	= ตัวเลขพรานด์ลท์	
R	= ค \square คงตัวสากลของก \square ซ	
Re_H	= ตัวเลขเรย์โนลด์	
Sc_i	= สมิตทึ้นัมเบอร์สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน	
S_i	= เป็นอัตราการเกิดที่เพิ่มจากการกระจายของสารที่กำหนดโดยผู้ใช้	
t	= เวลา	s
T	= อุณหภูมิ	K
v	= ปริมาตรจำเพาะ	m^3 / kg

รายการสัญลักษณ์(ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
x	= ทิศทางในแนวแกน x ในระบบพิกัดฉาก	
y	= ทิศทางในแนวแกน y ในระบบพิกัดฉาก	
Y_i	= สัดส่วนเชิงมวลของสาร i	
z	= ทิศทางในแนวแกน z ในระบบพิกัดฉาก	
\bar{v}	= องค์ประกอบของความเร็ว	m/s
u	= ความเร็วย่อยในแนวแกน x ,	m/s
v	= ความเร็วย่อยในแนวแกน y	m/s
w	= ความเร็วย่อยในแนวแกน z	m/s
μ	= ความหนืดพลศาสตร์	
λ	= ค่าความหนืดที่สอง	
ρ	= ความหนาแน่นของของผสม	kg/m^3



ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล นายอิศเรศ วรรณทร
 วันเดือนปีเกิด 4 มกราคม 2524
 สถานที่เกิด เพชรบูรณ์
 สถานที่อยู่ปัจจุบัน 17 หมู่ 9 ต.ตะเบาะ อ.เมือง จ.เพชรบูรณ์ 67000

ประวัติการศึกษา

- พ.ศ2539. มัธยมศึกษาตอนต้น
 จากโรงเรียนเพชรพิทยาคม
- พ.ศ2543. มัธยมศึกษาตอนปลาย
 จากโรงเรียนเพชรพิทยาคม
- พ.ศ2548. ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต(วิศวกรรมเครื่องกล)
 จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- พ.ศ2554. ปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต(วิศวกรรมเครื่องกล)
 จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ