



การสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์การกระจายลมร้อนในตู้อบเบเกอรี่โดยใช้
พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณภายใต้การพาความร้อนแบบบังคับ
Modeling and Analysis of Hot Air Distribution in Bakery Oven Using
Computational Fluid Dynamics under Forced Convection

ชัยวัฒน์ อุทัยแสน
Chaiwat Uthaisan

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร



การสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์การกระจายลมร้อนในตู้อบเบเกอรี่โดยใช้
พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณภายใต้การพาความร้อนแบบบังคับ
Modeling and Analysis of Hot Air Distribution in Bakery Oven Using
Computational Fluid Dynamics under Forced Convection

ชัยวัฒน์ อุทัยแสน
Chaiwat Uthaisan

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ชื่อวิทยานิพนธ์	การสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์การกระจายลมร้อนในตู้อบเบเกอร์โดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณภายใต้การพาความร้อนแบบบังคับ
ชื่อ นามสกุล	ชัยวัฒน์ อุทัยแสน
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
สาขาวิชา และคณะ	วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วาที่เรือดรี ดร.ทรงวุฒิ มงคลเลิศมณี
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.ยศกร ประทุมวัลย์
ปีการศึกษา	2567

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์การกระจายลมร้อนในตู้อบเบเกอร์โดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณภายใต้การพาความร้อนแบบบังคับ ซึ่งตู้อบขนมเบเกอร์ขนาด 100x88.5x200 cm มีจำนวนชั้นของการวางถาดจำนวนมากและซับซ้อนหลายชั้นจึงเกิดปัญหาการกระจายลมร้อนไม่ทั่วถึงในช่วงสภาวะไม่คงตัว และส่งผลต่อผลิตภัณฑ์ที่นำเข้ามาอบ กระบวนการทดลองและการวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ แบบจำลอง CFD ได้รับการพิสูจน์ด้วยการเปรียบเทียบผลของการกระจายอุณหภูมิกับการทดลองที่อุณหภูมิ 80°C ภายใต้สมมติฐานไม่พิจารณาความชื้นและไม่มีผลิตภัณฑ์ในการทดลองอบเพราะต้องการศึกษาเรื่องพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการกระจายลมร้อนภายในตู้อบเท่านั้น การวิเคราะห์เป็นแบบไหลภายใน มีปริมาตรของของไหลที่วิเคราะห์เท่ากับ 1.52354 m³ ของไหลเกิดการถ่ายเทและพาความร้อน ภายใต้การกำหนดค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก เลือกใช้รูปแบบการไหลทั้งแบบราบเรียบและปั่นป่วน สภาพผิวของผนังถูกกำหนดเป็น Adiabatic wall ผิวราบเรียบ ด้วยความดันอากาศที่ 101,325 Pa อุณหภูมิเริ่มต้นของอากาศและตู้อบคือ 28°C ผลการศึกษาพบว่า การวิเคราะห์ด้วย CFD และการทดลองให้ผลไปทิศทางเดียวกันมีค่าความแตกต่างอยู่ในช่วงร้อยละ 2-10 มีการกระจายของลมร้อนเป็นแบบปั่นป่วน ลมร้อนในแต่ละตำแหน่งแตกต่างกัน ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการอบ จากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า การศึกษานี้สามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงการออกแบบตู้อบให้มีการกระจายความร้อนที่สมดุลและมีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการทำงาน โดยต้องพิจารณาตัวแปรสำคัญประกอบด้วย ทิศทางและตำแหน่งการเข้าของลมร้อน ความเร็วของลมร้อน อัตราการไหลของลมร้อน กำลังของฮีตเตอร์ การควบคุมการสูญเสียของลมร้อนด้วยการติดตั้งฉนวนกันความร้อน และการเพิ่มจำนวนช่องทางเข้าของลมร้อน

คำสำคัญ : การกระจายลมร้อน, การพาความร้อนแบบบังคับ, พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

Thesis Title	Modeling and Analysis of Hot Air Distribution in Bakery Oven Using Computational Fluid Dynamics under Forced Convection
Author	Chaiwat Uthaisan
Degree	Master of Engineering (Mechanical Engineering)
Major Program	Mechanical Engineering Faculty of Engineering
Main Advisor	Asst.Prof. Acting Sub Lt. Dr.Songwut Mongkonlerdmanee
Co-Advisor	Dr.Yotsakorn Pratumwal
Academic Year	2024

ABSTRACT

The objective of this study was to apply computational fluid dynamics (CFD) under forced convection to develop a model and analyze the distribution of hot air within a bakery oven. The oven, measuring 100x88.5x200 cm, featured intricate tray configurations that led to uneven hot air dispersion under transient situations, affecting baked product quality. To better understand this phenomenon, both experimental studies and CFD simulations were conducted. The CFD model was validated by comparing its temperature distribution results with experimental data at 80°C. To ensure accuracy, the study focused solely on factors influencing hot air circulation, disregarding humidity effects and baked goods. It examined an interior fluid volume of 1.52354 m³, where convection and heat transfer occurred due to Earth's gravitational force. The oven walls were assumed to be smooth, adiabatic surfaces, and both laminar and turbulent airflow patterns were considered. The oven and air were initially set at 28°C, with air pressure maintained at 101,325 Pa. The results demonstrated strong agreement between CFD simulations and experimental data, with variations ranging from 2% to 10%. Temperature fluctuations caused by turbulent hot air distribution directly impacted baking efficiency. These findings provide valuable insights for optimizing oven designs to achieve more uniform heat distribution. Key improvement strategies include adjusting the location and orientation of hot air inlets, managing airflow velocity and mass flow rate, optimizing heater power, minimizing heat loss through insulation, and increasing the number of hot air inlet channels.

Keywords : Hot Air Distribution, Forced Convection, Computational Fluid Dynamics (CFD)

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความสามารถ ความเมตตากรุณา ช่วยเหลือและอนุเคราะห์จาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ว่าที่เรือตรี ดร.ทรงวุฒิ มงคลเลิศมณี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และกรรมการคุมสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งกรุณามอบความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ ความช่วยเหลือในทุกด้านทั้งการแก้ปัญหาต่างๆ ตลอดจนตรวจสอบวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงยิ่งไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำนรรค ที่กรุณาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ชี้แนะแนวทาง ให้ความรู้ ตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ ดร.ยศกร ประทุมวัลย์ จากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่กรุณาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ให้ความรู้ ชี้แนะแนวทางการวิเคราะห์ด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.กฤษณ์ อภิญาวิศิษฐ์ ที่กรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ให้ความรู้ ชี้แนะแนวทาง ตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ ดร.ประกอบ ขาติภักดิ์ ที่กรุณาอนุญาตให้ใช้ข้อมูลแบบเกอร์เพื่อการทดลองและร่วมดำเนินการทดลองเก็บข้อมูลร่วมกัน ให้คำแนะนำ ให้ความรู้ ช่วยออกแบบโมเดล และสร้างแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา สมาชิกในครอบครัว และครูอาจารย์ทุกท่าน ผู้ที่ให้ความรู้ อนุเคราะห์ ส่งเสริม สนับสนุนด้านทุนทรัพย์และกำลังใจ ค่อยอบรมสั่งสอนจนประสบความสำเร็จในทางการศึกษา

ขอขอบคุณ อาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมเครื่องกล ผู้บริหารสาขาวิศวกรรมเครื่องกล ผู้บริหารคณะวิศวกรรมศาสตร์ ผู้บริหารระดับสูงของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร รวมถึงเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ อุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัยครั้งนี้ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ดี ท้ายที่สุดนี้ ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะมีประโยชน์สำหรับผู้อ่านไม่มากนักน้อยต่อไป

ชัยวัฒน์ อุทัยแสน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	5
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	5
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	5
1.5 สถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและการทบทวนวรรณกรรม	
2.1 วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ	7
2.2 ความดันและอัตราการไหล	14
2.3 Reynolds Number	15
2.4 ตู้อบลมร้อน	19
2.5 การทบทวนวรรณกรรม	22
บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย	
3.1 ระเบียบวิธีวิจัย	41
3.2 การสร้างโมเดลตู้อบลมร้อน 3 มิติ	44
3.3 สร้างแบบจำลองทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ	46
3.4 การเตรียมเครื่องมือและการดำเนินงานสำหรับการเก็บผลทดลอง	49
3.5 การเปรียบเทียบผลการจำลองและการทดลอง	53
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	
4.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ	54
4.2 ผลการทดสอบการกระจายลมร้อนสำหรับตู้อบลมร้อนในกรณีศึกษาที่ 1	65

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 การวิเคราะห์ผลการเปรียบเทียบ	67
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผล	68
5.2 ข้อเสนอแนะ	69
เอกสารอ้างอิง	70
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	74



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าเรย์โนลด์สวิกฤตสำหรับการไหลในท่อ	17
2.2 สมบัติของวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์	30
2.3 สรุปการทบทวนวรรณกรรมและช่องว่างของประเด็นการทำวิจัย	32
4.1 ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิด้วยการทดลองและ CFD	67



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 โมเดลเครื่องอบลมร้อนแบบอากาศหมุนเวียน 3 มิติ แบบเดิม	2
1.2 เครื่องอบลมร้อนที่จะนำมาออกแบบและพัฒนาใหม่	3
1.3 ส่วนประกอบภายนอกด้านบนที่สำคัญสำหรับการควบคุมและจ่ายลมร้อน	3
1.4 ถาดและขนมอาลัวที่ใช้ออบกับเครื่องอบลมร้อนนี้	4
2.1 ในแนวทางลากรองจั่ววัตถุจะนิ่งเฉยกับชีปนาวรุ ซึ่งไม่เช่นนั้นก็จะเป็แนวทาง ออยเลอร์	8
2.2 การแบ่งส่วนตัวเลขที่แม่นยำช่วยให้สร้าง PDE เชิงเส้นและจับความชันของตัว แปรที่ละเอียดอ่อนได้	11
2.3 ความหนาแน่นของตาข่ายที่แปรผัน (ระดับการปรับแต่ง) บนรศ F1 ช่วยในการ จับภาพการเปลี่ยนแปลงสูงสุดที่เกี่ยวข้องกับลักษณะการไหล	12
2.4 ตัวอย่างการวิเคราะห์การบรรจบกันของตาข่ายนี้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของ การเลือกขนาดตาข่ายที่เหมาะสมที่สุดเพื่อประหยัดค่าใช้จ่ายในการคำนวณ	13
2.5 รูปแบบการไหลของของไหลในท่อ	17
2.6 แผนภูมิ Moody สำหรับแรงเสียดทานของท่อที่มีผนังเรียบและขรุขระ	18
2.7 การเปลี่ยนผ่านของชั้นขอบเขตสำหรับรูปแบบการไหลต่างๆ	19
3.1 กรอบการวิจัย	42
3.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	44
3.3 โครงสร้างและส่วนประกอบของตู้อบลมร้อน	45
3.4 แบบจำลองตู้อบลมร้อนสำหรับการวิเคราะห์ CFD	47
3.5 ค่าการนำความร้อนและค่าความร้อนจำเพาะของ a) Stainless Steel 321 b) Aluminum 6061 และ c) อากาศ	48
3.6 ตู้อบลมร้อนและตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ	51
3.7 การวางตำแหน่งอุปกรณ์เครื่องบันทึกผลและการเชื่อมต่อผ่าน RS485	51
3.8 Sommy GTF2-IM28 Temp Controller และ PT100	51
3.9 ตู้บันทึกผลและอุปกรณ์	52
3.10 อุปกรณ์ประกอบเครื่องมือวัดค่าอุณหภูมิ	52
3.11 การตัดกำลังไฟของแท่งฮีตเตอร์	52

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.12 การลดกำลังลมด้วยการตัดการทำงานของมอเตอร์พัดลม	52
3.13 ภาพรวมของกระบวนการดำเนินงานเพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองและวิเคราะห์	53
4.1 โมเดล 3 มิติของตู้อบลมร้อนแบบเดิมที่บรรจุถาดสำหรับกรณีศึกษาที่ 1	56
4.2 การกระจายลมร้อนในตู้อบลมร้อนสำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ซึ่งไม่บรรจุถาด	56
4.3 เส้นทางการเคลื่อนที่ของลมร้อนสำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ซึ่งไม่บรรจุถาด	57
4.4 การกระจายลมร้อนในตู้อบลมร้อนสำหรับกรณีศึกษาที่ 1 บรรจุถาด	57
4.5 เส้นทางการเคลื่อนที่ของลมร้อนสำหรับกรณีศึกษาที่ 1 บรรจุถาด	58
4.6 โมเดล 3 มิติของตู้อบลมร้อนสำหรับกรณีศึกษาที่ 2 บรรจุถาด	58
4.7 การกระจายลมร้อนในตู้อบลมร้อนสำหรับกรณีศึกษาที่ 2 บรรจุถาด	59
4.8 เส้นทางการเคลื่อนที่ของลมร้อนสำหรับกรณีศึกษาที่ 2 บรรจุถาด	59
4.9 โมเดล 3 มิติของตู้อบลมร้อนสำหรับกรณีศึกษาที่ 3 ปรับปรุงเพิ่มห้องสะสมความร้อนด้านหลังตู้อบ	60
4.10 การกระจายลมร้อนในตู้อบลมร้อนสำหรับกรณีศึกษาที่ 3	61
4.11 เส้นทางการเคลื่อนที่ของลมร้อนสำหรับกรณีศึกษาที่ 3	61
4.12 โมเดล 3 มิติของตู้อบลมร้อนสำหรับกรณีศึกษาที่ 4 ปรับปรุงเพิ่มห้องสะสมความร้อนและต่อทางเข้าลมร้อนมายังด้านล่างของตู้อบ	63
4.13 การกระจายลมร้อนในตู้อบลมร้อนสำหรับกรณีศึกษาที่ 4	64
4.14 เส้นทางการเคลื่อนที่ของลมร้อนสำหรับกรณีศึกษาที่ 4	65
4.15 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งในช่วงสภาวะไม่คงตัว จำนวน 12 จุด	66
4.16 ลักษณะการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเมื่อทำการลดกำลังไฟของฮีตเตอร์ 1/3 เท่า	66
4.17 การเปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ	67

บทที่ 1

บทนำ

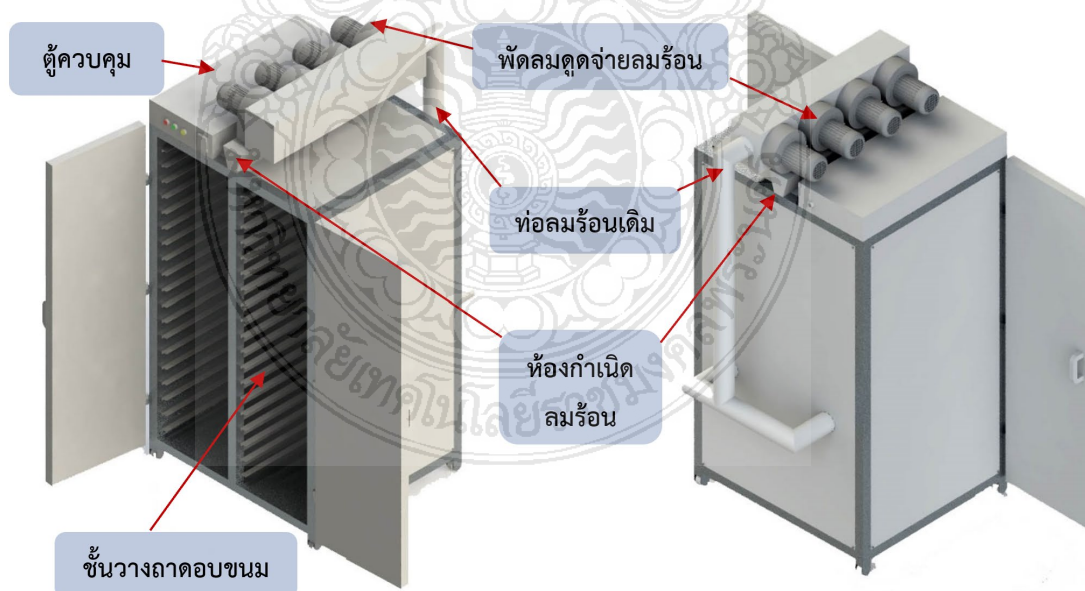
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากนโยบายการขับเคลื่อนปฏิรูปประเทศด้านต่างๆ และพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศเข้าสู่ไทยแลนด์ 4.0 เพื่อให้ประเทศมีการพัฒนาและสามารถดำเนินไปได้อย่างมั่นคงพร้อมที่จะแข่งขันทางการค้ากับคู่แข่งในตลาดโลก ด้วยการนำเทคโนโลยีและนวัตกรรมใหม่ๆ มาพัฒนาต่อยอดธุรกิจและสินค้าต่างๆ ภายในประเทศ รวมถึงสินค้าแปรรูปทางการเกษตรภายใต้โครงการหนึ่งตำบลหนึ่งผลิตภัณฑ์หรือโอท็อป (One Village One Product : OTOP) ซึ่งเป็นโครงการกระตุ้นให้ชาวบ้านและเกษตรกรท้องถิ่นนำผลผลิตที่ได้มาแปรรูปและจำหน่าย เพื่อกระตุ้นให้เกษตรกรท้องถิ่นสร้างรายได้ในช่วงเวลาที่เว้นว่างจากการทำการเกษตร ทำให้เกษตรกรและชาวบ้านท้องถิ่นมีชีวิตความเป็นอยู่ที่ดียิ่งขึ้น ลดการกู้หนี้ยืมสิน และสอดคล้องกับนโยบายการพัฒนาประเทศ นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับพระราชดำริสเกี่ยวกับเศรษฐกิจพอเพียงของพระบาทสมเด็จพระปรมินทรมหาภูมิพลอดุลยเดช รัชกาลที่ 9 ในวันที่ 18 กรกฎาคม พ.ศ. 2517 “...การพัฒนาประเทศจำเป็นต้องทำตามลำดับขั้น ต้องสร้างพื้นฐานคือ ความพอมี พอกิน พอใช้ของประชาชนส่วนใหญ่เบื้องต้นก่อน โดยใช้วิธีการและอุปกรณ์ที่ประหยัดแต่ถูกต้องตามหลักวิชาการ เมื่อได้พื้นฐานความมั่นคงพร้อมพอสมควร และปฏิบัติได้แล้ว จึงค่อยสร้างค่อยเสริมความเจริญ และฐานะทางเศรษฐกิจขั้นที่สูงขึ้นโดยลำดับต่อไป...” [1] ซึ่งการพัฒนาประเทศให้ก้าวหน้าด้วยนโยบายของทางภาครัฐสู่ไทยแลนด์ 4.0 นั้นเป็นการเปลี่ยนการขับเคลื่อนประเทศด้วยภาคอุตสาหกรรมไปเป็นการขับเคลื่อนด้วยเทคโนโลยี นวัตกรรม และความคิดสร้างสรรค์ ซึ่งต้องมีการปฏิรูปการพัฒนาประเทศในทุกภาคส่วนงาน เพื่อให้ประเทศมีความเจริญสามารถรับมือการเปลี่ยนแปลงจากภัยคุกคามแบบใหม่และโอกาสต่าง ๆ ที่จะเกิดขึ้น ให้พร้อมที่จะก้าวสู่การตลาดโลกอย่างมั่นคง มั่งคั่ง และยั่งยืน อาทิเช่น ในส่วนงานทางด้านการเกษตรนั้นจะเปลี่ยนจากการเกษตรแบบดั้งเดิมเป็นการบริหารจัดการการเกษตรด้วยเทคโนโลยีและนวัตกรรม (Smart Farm) เป็นต้น ดังนั้นในส่วนสินค้า OTOP ควรต้องมีการพัฒนาเปลี่ยนการบริหารจัดการแบบดั้งเดิมด้วยแรงงานคนหรือเครื่องจักรดั้งเดิมเป็นการดำเนินการผลิตด้วยเครื่องจักรและอุปกรณ์ที่มีนวัตกรรมเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์นั้นๆ [2]

จากโครงการที่อาจารย์ ดร.ประกอบ ชาติภักต์ และคณะ ซึ่งเป็นนักวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และได้รับจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) เพื่อพัฒนาและส่งเสริมผู้ประกอบการโอท็อปของจังหวัดเพชรบุรีในด้านขนมหวานพื้นเมืองที่ผ่านมานั้น ทางอาจารย์และคณะผู้วิจัยได้ดำเนินการออกแบบและสร้างเครื่องจักรเพื่อช่วยเหลือผู้ประกอบการโอท็อปเรื่อยมา อาทิเช่น เครื่องหยอดขนมหม้อแกง เครื่องยี่เนื่อตาล เครื่องหยอดขนมทองหยิบ เครื่องหยอด

ขนมทองหยอด เครื่องปั้นขนมฝอยทอง เครื่องทำลูกชุบ เป็นต้น ด้วยการพัฒนาและสร้างเครื่องจักรสำหรับการผลิตขนมหวานเพชรบุรีด้วยเทคโนโลยีที่เหมาะสม ให้ผู้ประกอบการนำนวัตกรรมใหม่ ๆ มาช่วยดำเนินการผลิต

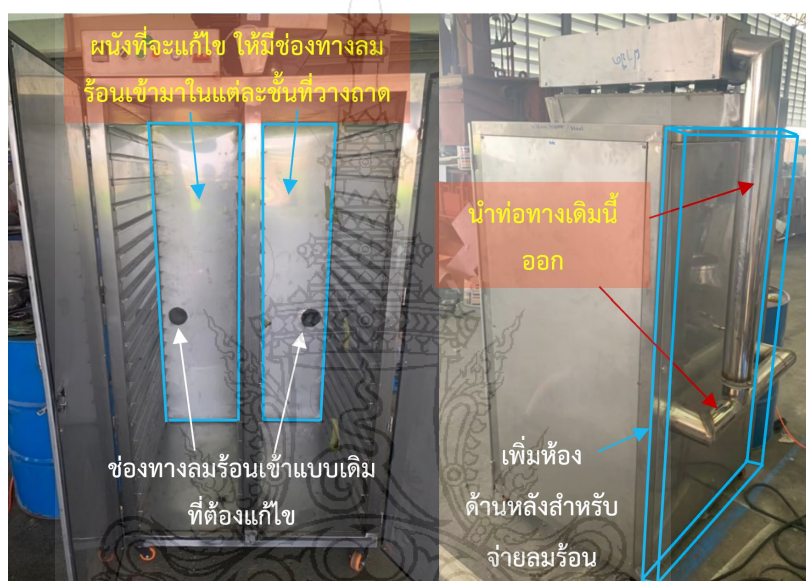
จากการสำรวจสภาพการทำงานของกระบวนการผลิตขนมหวานพื้นเมืองของร้านขนมไทย ลูกเจี๊ยบ และโรงงานอบขนมหลายแห่ง พบว่า มีเครื่องมือหรือเครื่องจักรที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตจำนวนมาก และการผลิตขนมหวานพื้นเมืองเพชรบุรีนั้น มีเครื่องจักรที่เกี่ยวข้องกับการอบให้ความร้อน เช่น อบขนมอาลัว อบวุ้นกรอบ อบฝอยทองกรอบ อบหม้อแกง อบขนมโสมนัส อบขนมผิง และอื่นๆ และจะพบปัญหาในการอบ คือ การกระจายของความร้อนไม่ทั่วถึง ในบางตำแหน่งหรือบางพื้นที่มีอุณหภูมิที่แตกต่างกันมาก ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ออกมาจากการอบนั้นมีคุณภาพไม่เท่ากัน โดยเฉพาะในบางพื้นที่ที่ใกล้กับช่องทางลมร้อนที่เข้ามาในตู้จะมีอุณหภูมิสูงอย่างชัดเจนและพื้นที่ที่ไกลออกไปจะมีอุณหภูมิน้อยกว่า ลักษณะของตู้อบขนมลมร้อนที่มีการพาความร้อนจากแท่งฮีตเตอร์ไหลไปสู่ห้องอบด้านในแสดงดังรูปที่ 1.1 ด้านบนตรงกลางของตู้อบจะเป็นห้องสร้างลมร้อนด้วยแท่งฮีตเตอร์ และมีพัดลมทำหน้าที่ดูดจ่ายลมร้อนไปยังท่อทางที่อยู่ด้านหลังของตู้ ลมร้อนไหลตามท่อและแยกออกเป็นสองทาง คือ ทางด้านขวาและทางด้านซ้าย และทั้งสองทางต่อเข้าไปยังห้องอบด้านใน จากรูปที่ 1.2 จะเห็นว่า มีช่องทางลมร้อนเข้ามาสองท่อ ซึ่งเมื่อนำถาดอบขนมมาใส่แล้วจะทำให้อากาศไหลเวียนได้ไม่ดี โดยเฉพาะถาดขนมที่อยู่ใกล้ท่อลมร้อนจะได้รับความร้อนมากกว่าแล้วเกิดการเสียหายของผลิตภัณฑ์ที่นำมาอบได้



รูปที่ 1.1 โมเดลเครื่องอบลมร้อนแบบอากาศหมุนเวียน 3 มิติ แบบเดิม

มีประเด็นสำคัญในกระบวนการผลิตขนมที่ต้องมีการอบด้วยลมร้อน คือ การกระจายความร้อนภายในตู้อบขนมที่ไม่สม่ำเสมอในแต่ละตำแหน่ง และเนื่องด้วยตู้อบขนมดังรูปที่ 1.1-1.2 ถูก

ออกแบบมาเป็นพิเศษให้สามารถใส่ถาดอบขนมได้จำนวนมาก วางเรียงซ้อนกันในแนวตั้งสองฝั่ง ฝั่งละ 19 ถาด (19 ชั้น) และแต่ละชั้นจะมีระยะห่างไม่มากนัก ย่อมส่งผลให้ความร้อนแพร่กระจายได้ไม่ดี และเป็นตู้อบที่มีความแตกต่างจากตู้อบทั่วไป จากที่กล่าวมาข้างต้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีการออกแบบ ปรับปรุงและพัฒนาสร้างเครื่องจักรใหม่ด้วยเทคโนโลยีที่เหมาะสมกับการทำงานในปัจจุบัน โดยแนวทางในการปรับปรุงจะทำการนำท่อทางลมร้อนเดิมออก และเปลี่ยนเป็นห้องความร้อนด้านหลังตู้แทนและให้มีช่องทางลมร้อนไหลเข้าไปในแต่ละชั้น (19 ชั้น) ช่องทางที่จะให้ลมร้อนไหลเข้าไปจะมีขนาดไม่เท่ากัน ซึ่งจะต้องทำการทดลองและจำลองการไหลด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ



รูปที่ 1.2 เครื่องอบลมร้อนที่จะนำมาออกแบบและพัฒนาใหม่



รูปที่ 1.3 ส่วนประกอบภายนอกด้านบนที่สำคัญสำหรับการควบคุมและจ่ายลมร้อน



รูปที่ 1.4 ถาดและขนมอาลัวที่ใช้กับเครื่องอบลมร้อนนี้

ผู้ประกอบการหรือชุมชนร่วมดำเนินการมีเจตจำนงค์ความต้องการในด้านเครื่องจักรในการเพิ่มศักยภาพการผลิตอย่างมีคุณภาพ และเพียงพอต่อการต้องการของลูกค้า ทั้งนี้มีความจำเป็นอย่างยิ่งในการใช้ศาสตร์ทางวิศวกรรมเพื่อเข้าแก้ไขปัญหา จากที่กล่าวมาจึงมีความจำเป็นต้องออกแบบและสร้างใหม่ด้วยเทคโนโลยีที่เหมาะสม ให้สอดคล้องกับการประกอบสัมมาอาชีพของผู้ประกอบการโอท็อป

ดังนั้น เพื่อแก้ไขปัญหาการกระจายความร้อนที่ไม่ทั่วถึงของตู้อบ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างแบบจำลองตู้อบเบเกอร์และวิเคราะห์การกระจายลมร้อนโดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณภายใต้การพาความร้อนแบบบังคับ และทำการศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและส่งผลต่อการกระจายอุณหภูมิของตู้อบเบเกอร์ โดยเปรียบเทียบผลของการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในตู้อบและความเร็วลมที่ตำแหน่งต่างๆ ด้วยโปรแกรมทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณและการทดลอง ดำเนินการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์และทดลอง และเมื่อได้โมเดลจำลองทางพลศาสตร์ของไหลที่สอดคล้องกับการทดลองจึงนำไปสู่การออกแบบโมเดลตู้อบและจำลองใหม่ เพื่อหารูปแบบตู้อบที่มีช่องทางการไหลของลมร้อนที่เหมาะสม ทั้งนี้ผลสำเร็จของโครงการวิจัยนี้ จะสามารถผลิตนวัตกรรมตู้อบที่มีประโยชน์ นำไปใช้งานได้จริง จากกระบวนการมีส่วนร่วมของโรงงานขนมไทยลูกเจี๊ยบที่จะเป็นกำลังในการสานต่อองค์ความรู้ หลักวิธีการ แนวปฏิบัติในเชิงวิเคราะห์อย่างเป็นระบบให้กับกลุ่มผู้ประกอบการอื่น เพื่อรากฐานความเป็นอยู่ที่ดีขึ้นจากการสร้างมูลค่าทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณของขนมหวานเมืองเพชรบุรีสืบต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อออกแบบและสร้างแบบจำลองตู้อบเบเกอร์และวิเคราะห์การกระจายลมร้อนโดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณภายใต้การพาความร้อนแบบบังคับ

1.2.2 เพื่อศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและส่งผลต่อการกระจายลมร้อนของตู้อบเบเกอร์

1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบผลของการกระจายตัวของลมร้อนภายในตู้อบและความเร็วลมที่ตำแหน่งต่างๆ ด้วยโปรแกรมทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณและการทดลอง

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 วิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SolidWorks Flow Simulation

1.3.2 การวิจัยเลือกใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มและวิธีการทดลอง เปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างสองวิธีดังกล่าวด้วยลมร้อนที่กระจายตามตำแหน่งๆ ภายในตู้อบ และความเร็วลมในแต่ละตำแหน่งที่เข้าสู่ห้องอบ

1.3.3 พัฒนาและสร้างตู้อบขนมเบเกอร์โดยออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ SolidWorks และวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณด้วยโปรแกรม SolidWorks Flow Simulation

1.3.4 ตัวแปรที่ศึกษาเพื่อใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์ ประกอบด้วย ขนาดรูหรือพื้นที่รู้ทางเข้าตู้อบ จำนวนรูเข้าของลมร้อน ความเร็วลมร้อนที่เข้ามาในตู้อบ และอุณหภูมิของลมร้อน

1.3.5 ไม่พิจารณาประเด็นการเปลี่ยนแปลงความชื้น และไม่พิจารณาผลิตภัณฑ์สำหรับการอบ แต่จะพิจารณาในด้านของการกระจายลมร้อน เส้นทางไหลของลมร้อน และความเร็วลมร้อนเท่านั้น

1.3.6 การไหลของของไหลเป็นแบบระบบเปิด ดังนั้นจึงตั้งสมมติฐานของลมร้อนเป็นการไหลแบบอัดตัวไม่ได้

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.4.1 ได้องค์ความรู้และโมเดลจำลองจากการจำลองด้วยโปรแกรมทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) นำไปประยุกต์ต่อในการออกแบบระบบอบลมร้อนแบบอื่นได้

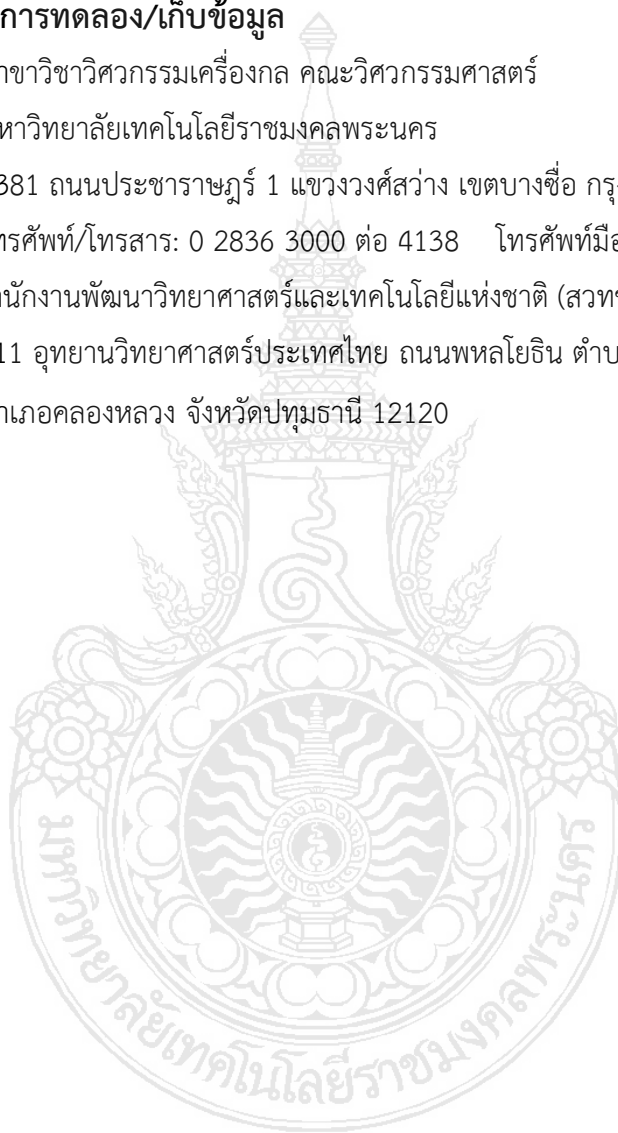
1.4.2 ได้ทราบถึงการใช้วัสดุอุปกรณ์และรูปแบบต่างๆที่ใช้ในการผลิตตู้อบลมร้อน

1.4.3 ผู้ประกอบการด้านการอบขนมสามารถนำหลักการไปใช้ในการผลิตได้

- 1.4.4 ได้ผลงานตีพิมพ์ในวารสาร หรือนำเสนอผลงานในงานสัมมนาการประชุมทางวิชาการ
- 1.4.5 เกิดการแลกเปลี่ยนเรียนรู้ด้านการใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของผู้ที่เกี่ยวข้อง
ต่างๆ ในการดำเนินงานวิจัยนี้ นำไปสู่การเกิดแนวคิดประยุกต์ใช้กับงานกรณีศึกษา
อื่นๆ

1.5 สถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล

- 1.5.1 สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
โทรศัพท์/โทรสาร: 0 2836 3000 ต่อ 4138 โทรศัพท์มือถือ: -
- 1.5.2 สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)
111 อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย ถนนพหลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง
อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120



บทที่ 2

ทฤษฎีและการทบทวนวรรณกรรม

2.1 วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ [3]

ศาสตร์แห่งการใช้คอมพิวเตอร์เพื่อทำนายการไหลของของเหลวและก๊าซโดยอาศัยสมการการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม และพลังงาน ของไหลอยู่รอบตัววัตถุและในรูปแบบต่างๆ มากมาย เช่น การสันสะท้อนเพื่อสร้างคลื่นความดันในอากาศที่ทำให้สามารถพูดได้ รวมถึงการได้ยินคำพูด การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ผ่านอากาศของลูกเทนนิส การออกแบบเครื่องบิน ยานยนต์ สามารถวิเคราะห์ทำความเข้าใจ และทำนายพฤติกรรมของไหลได้ CFD ถูกนำมาใช้เมื่อใดก็ตามที่จำเป็นต้องคาดการณ์การไหลของของไหลและการถ่ายเทความร้อน หรือเพื่อทำความเข้าใจผลกระทบของการไหลของของไหลที่มีต่อผลิตภัณฑ์หรือระบบ CFD วิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ของการไหลของของไหล เช่น อุณหภูมิ แรงดัน ความเร็ว และความหนาแน่น และสามารถนำไปใช้กับปัญหาทางวิศวกรรมที่หลากหลายในอุตสาหกรรมต่างๆ

ในด้านการบินและอวกาศและการป้องกันประเทศ พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ทำให้สามารถสร้างแบบจำลองการไหลของอากาศรอบๆ เครื่องบินเพื่อคาดการณ์แรงยกและแรงต้าน ซึ่งเรียกว่าอากาศพลศาสตร์ภายนอก ซึ่งมีความสำคัญเนื่องจากบริษัทต่างๆ มองหาวิธีเพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบเครื่องบินเพื่อประสิทธิภาพที่ดีขึ้นและลดการใช้เชื้อเพลิง CFD ยังสามารถจำลองระบบที่ซับซ้อนภายในเครื่องบิน เช่น การไหลเวียนของอากาศในห้องโดยสาร เพื่อคาดการณ์คุณภาพอากาศ การใช้งานหลักๆ ได้แก่ ระบบระบายความร้อนของอากาศยาน ระบบออปติกาอากาศ อากาศพลศาสตร์ภายนอก ระบบปรับอากาศในห้องโดยสาร และระบบขับเคลื่อน

2.1.1 สมการควบคุมของ CFD (Governing Equations of CFD) [3]

โครงสร้างหลักของการตรวจสอบเทอร์โมฟลูอิดนั้นกำกับโดยสมการควบคุมที่อิงตามกฎการอนุรักษ์ของคุณสมบัติทางกายภาพของของไหล สมการพื้นฐาน คือกฎการอนุรักษ์ 3 ข้อ

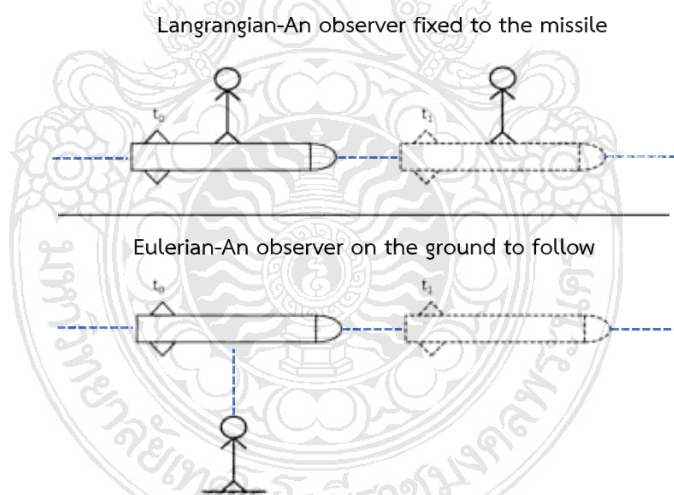
1. การอนุรักษ์มวล: สมการความต่อเนื่อง
2. การอนุรักษ์โมเมนตัม: กฎข้อที่สองของนิวตัน
3. การอนุรักษ์พลังงาน: กฎข้อแรกของเทอร์โมไดนามิกส์หรือสมการพลังงาน

หลักการเหล่านี้ระบุว่ามวล โมเมนตัม และพลังงานเป็นค่าคงที่ที่เสถียรภายในระบบปิด กล่าวโดยย่อ ทุกอย่างจะต้องได้รับการอนุรักษ์ การตรวจสอบการไหลของของไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนนั้นต้องอาศัยคุณสมบัติทางกายภาพบางประการ ตัวแปรที่ไม่ทราบค่า 3 ค่า ซึ่งต้องได้รับพร้อมกันจากสมการการอนุรักษ์พื้นฐาน 3 สมการนี้คือ ความเร็ว (v) ความดัน (P) และอุณหภูมิ (T)

แต่อย่างไรก็ตามความดัน (P) และอุณหภูมิ (T) และถือเป็นตัวแปรเทอร์โมไดนามิกอิสระสองตัวที่จำเป็น

รูปแบบสุดท้ายของสมการการอนุรักษ์ยังประกอบด้วยตัวแปรทางอุณหพลศาสตร์อีกสี่ตัว ได้แก่ ความหนาแน่น (ρ) เอนทัลปี (h) ความหนืด (μ) และการนำความร้อน (k) ซึ่งสองตัวหลังยังเป็นคุณสมบัติในการขนส่งอีกด้วย คุณสมบัติทั้ง 4 นี้จะถูกกำหนดโดยค่าความดัน (P) และอุณหภูมิ (T) การไหลของของไหลควรได้รับการวิเคราะห์เพื่อทราบความเร็ว (v) ความดัน (P) และอุณหภูมิ (T) ตลอดทุกจุดของระบบการไหล นอกจากนี้ วิธีการสังเกตการไหลของของไหลโดยอาศัยคุณสมบัติ จลนศาสตร์ถือเป็นประเด็นพื้นฐาน การเคลื่อนที่ของของไหลสามารถตรวจสอบได้โดยใช้ทั้งวิธีลาก ร่องจหรือออยเลอร์

1. คำอธิบายลากรองจ์ของการเคลื่อนที่ของของไหลนั้นอิงตามทฤษฎีในการติดตามอนุภาค ของของไหลที่มีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะตรวจจับคุณสมบัติได้ จำเป็นต้องตรวจสอบพิกัด เริ่มต้นในเวลาและพิกัดของอนุภาคเดียวกันในเวลา
2. การติดตามอนุภาคที่แยกจากกันนับล้านตัวตลอดเส้นทางนั้นแทบจะเป็นไปไม่ได้เลย ในวิธีออยเลอร์ แทนที่จะติดตามอนุภาคเฉพาะใดๆ ตลอดเส้นทาง จะตรวจสอบสนาม ความเร็วเป็นฟังก์ชันของปริภูมิและเวลา



รูปที่ 2.1 ในแนวทางลากรองจ์วัตถุจะนิ่งอยู่กับที่ปนาวรุ ซึ่งไม่เช่นนั้นก็จะเป็แนวทางออยเลอร์ [3]

จากรูปที่ 2.1 ลากรองจ์จะใช้ทุกจุดที่จุดเริ่มต้นของโดเมนและติดตามเส้นทางของมันจนกระทั่งไปถึงจุดสิ้นสุด และออยเลอร์จะพิจารณาหน้าต่าง (ปริมาตรควบคุม) ภายในของเหลวและวิเคราะห์การไหลของอนุภาคภายในปริมาตรนี้

2.1.2 สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) [3]

สมการการอนุรักษ์มวลระบุดังนี้

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho(\nabla \cdot \vec{v}) = 0 \quad (2.1)$$

โดยที่ ρ คือความหนาแน่น, $\vec{v}$ คือ ความเร็ว และ ∇ ตัวดำเนินการความชัน (Gradient operator)

$$\vec{\nabla} = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z} \quad (2.2)$$

หากความหนาแน่นคงที่ การไหลจะถือว่าไม่สามารถบีบอัดได้ และสมการความต่อเนื่องจะลดลงเหลือ

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \rightarrow \nabla \cdot \vec{v} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.3)$$

สมการ Navier-Stokes (Navier-Stokes Equation)

สมการอนุรักษ์โมเมนตัม ซึ่งเรียกอีกอย่างว่าสมการ Navier-Stokes ได้จากสมการต่อไปนี้

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v})}_I + \underbrace{\nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v})}_{II} = - \underbrace{\nabla p}_{III} + \underbrace{\nabla \cdot (\vec{\tau})}_{IV} + \underbrace{\rho \vec{g}}_V \quad (2.4)$$

โดยที่ p คือ ความดันสถิต, $\vec{\tau}$ คือ เทนเซอร์ความเค้นหนืด, และ $\rho \vec{g}$ คือ แรงโน้มถ่วงต่อหน่วยปริมาตร
ในที่นี้ ตัวเลขโรมันหมายถึง

I: การเปลี่ยนแปลงในท้องถิ่นตามเวลา

II: การพาความร้อนของโมเมนตัม

III: แรงดันผิว

IV: เทอมการแพร่กระจาย

V: แรงมวล

เทนเซอร์ความเค้นหนืด $\vec{\tau}$ สามารถระบุได้ดังต่อไปนี้ตามสมมติฐานของสโตค (Stoke's Hypothesis)

$$\tau_{ij} = \mu \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{v}) \delta_{ij} \quad (2.5)$$

หากถือว่าของเหลวไม่สามารถบีบอัดได้โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดคงที่ สมการ Navier-Stokes จะลดรูปลงเหลือ

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} + \rho \vec{g} \quad (2.6)$$

กฎข้อแรกทางเทอร์โมไดนามิกส์ของนิวตัน (Newton's First Law of Thermodynamics) การอนุรักษ์พลังงานเป็นกฎข้อแรกของเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งระบุว่าผลรวมของงานและความร้อนที่เพิ่มเข้าไปในระบบจะส่งผลให้พลังงานในระบบเพิ่มขึ้น

$$dE_t = dQ + dW \quad (2.7)$$

เมื่อ dQ คือความร้อนที่ถูกเพิ่มเข้าไปในระบบ dW คืองานที่ทำบนระบบ และ dE_t คือการเพิ่มขึ้นของพลังงานทั้งหมดของระบบ สมการพลังงานประเภททั่วไปประเภทหนึ่ง คือ

$$\rho \left[\overbrace{\frac{\partial h}{\partial t}}^I + \overbrace{\nabla \cdot (h\vec{v})}^{II} \right] = -\overbrace{\frac{\partial p}{\partial t}}^{III} + \overbrace{\nabla \cdot (k\nabla T)}^{IV} + \overbrace{\phi}^V \quad (2.8)$$

I: การเปลี่ยนแปลงในท้องถิ่นตามเวลา

II: เอนโทรปีของการพาความร้อน

III: งานแรงดัน

IV: ฟลักซ์ความร้อน

V: เอนโทรปีแหล่งกำเนิด

2.1.3 สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equations: PDE) [3]

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์การขนส่ง ซึ่งเกี่ยวข้องในกระบวนการทั้งหมด ไม่ว่าจะเป็นทางตรงหรือทางอ้อม แม้ว่าเงื่อนไขแต่ละเงื่อนไขในสมการเหล่านั้นจะมีผลสัมพันธ์กันกับปรากฏการณ์ทางกายภาพ แต่ควรพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์พร้อมกันโดยใช้วิธีแก้เชิงตัวเลข ซึ่งประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ สัญกรณ์เวกเตอร์ และเทนเซอร์ สมการ PDE ประกอบด้วยตัวแปรมากกว่าหนึ่งตัวและแสดงด้วย “ ∂ ” หากการหาค่าของสมการทำได้ด้วย “ d ” สมการเหล่านี้เรียกว่าสมการเชิงอนุพันธ์สามัญ (ODE) ซึ่งประกอบด้วยตัวแปรตัวเดียวและการหาอนุพันธ์ของตัวแปรนั้น PDE มีส่วนเกี่ยวข้องในการแปลงตัวดำเนินการเชิงอนุพันธ์ (∂) เป็นตัวดำเนินการพีชคณิตเพื่อหาคำตอบ การถ่ายเทความร้อน พลศาสตร์ของไหล เสียง อิเล็กทรอนิกส์ และกลศาสตร์ควอนตัม ล้วนเป็นสาขาที่ PDE ถูกใช้เพื่อสร้างคำตอบอย่างมากร ตัวอย่างของ ODE:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = x \rightarrow x(t) \quad \text{เมื่อ } t \text{ เป็นตัวแปรต้นเพียงตัวเดียว}$$

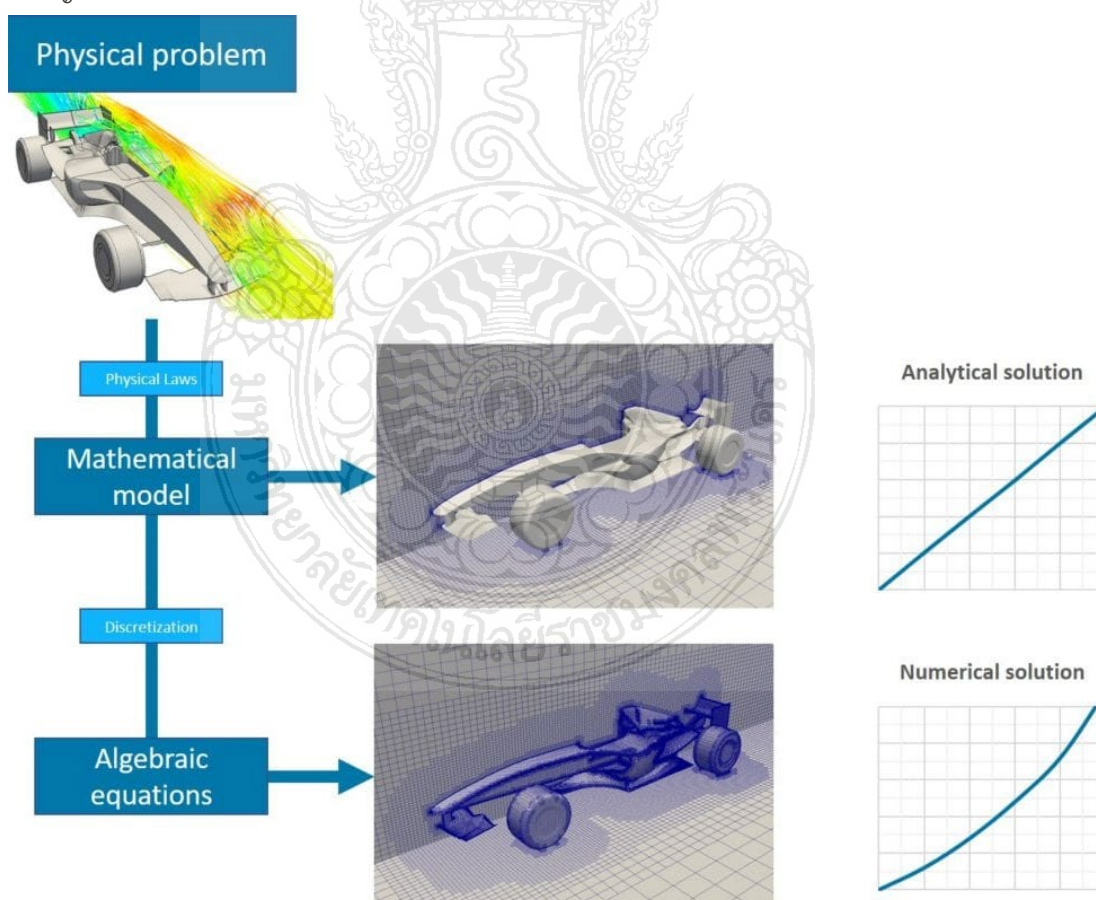
ตัวอย่างของ PDE:

$$\frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial y} = 5 \rightarrow f(x, y) \quad \text{เมื่อ } x \text{ และ } y \text{ เป็นตัวแปรต้นสองตัว}$$

PDE มีความสำคัญอย่างไรในการหาคำตอบสำหรับสมการการควบคุม เพื่อตอบคำถามนี้ จะเริ่มต้นด้วยการตรวจสอบโครงสร้างพื้นฐานของ PDE บางส่วนเพื่อสร้างความหมาย ตัวอย่างเช่น

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} = 0 \rightarrow f(x, y) \quad (2.9)$$

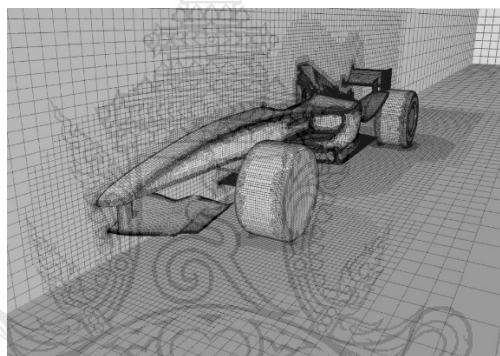
การเปรียบเทียบอย่างรวดเร็วระหว่างสมการที่ (2.2) และสมการที่ (2.8) ระบุส่วนลากลากของสมการความต่อเนื่อง ขั้นตอนต่อไปคืออะไร การเปรียบเทียบลากลากนี้หมายถึงอะไร ในการเริ่มแก้สมการขนาดใหญ่เหล่านี้ ขั้นตอนต่อไปคือการแบ่งส่วนเพื่อจุดประกายกระบวนการแก้ปัญหาเชิงตัวเลข



รูปที่ 2.2 การแบ่งส่วนตัวเลขที่แม่นยำช่วยให้สร้าง PDE เชิงเส้นและจับความชันของตัวแปรที่ละเอียดอ่อนได้ [3]

2.1.4 การบรรจบกันของตาข่าย (Mesh Convergence) [3]

การทำงานหลายอย่างพร้อมกันเป็นปัญหาใหญ่ของศตวรรษที่แล้ว ซึ่งมักจะจบลงด้วยการผัดวันประกันพรุ่งหรือความล้มเหลว ดังนั้น การวางแผน แบ่งส่วน และจัดลำดับงานจึงเหมาะสมกว่ามากสำหรับการบรรลุเป้าหมาย ซึ่งวิธีนี้ได้ผลสำหรับ CFD เช่นกัน เพื่อดำเนินการวิเคราะห์ โดเมนโซลูชันจะถูกแบ่งออกเป็นโดเมนย่อยหลายโดเมน ซึ่งเรียกว่าเซลล์ การรวมเซลล์เหล่านี้ในโครงสร้างการคำนวณเรียกว่าเมช การสร้างตาข่าย คือกระบวนการแบ่งโดเมนออกเป็นเซลล์หรือองค์ประกอบขนาดเล็กเพื่อใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ภายใต้สมมติฐานของความเป็นเส้นตรงที่เกี่ยวข้องกับแต่ละเซลล์ ซึ่งหมายความว่าต้องแน่ใจพฤติกรรมของตัวแปรที่ต้องแก้ไขนั้น สามารถสันนิษฐานได้ว่าเป็นเส้นตรงภายในแต่ละเซลล์ ข้อกำหนดนี้ยังหมายถึงจำเป็นต้องใช้ตาข่ายที่ละเอียดกว่าสำหรับพื้นที่ที่คาดว่าจะคุณสมบัติทางกายภาพที่จะทำนายนั้นมีความละเอียดอ่อนสูง



รูปที่ 2.3 ความหนาแน่นของตาข่ายที่แปรผัน (ระดับการปรับแต่ง) บนรถ F1 ช่วยในการจับภาพการเปลี่ยนแปลงสูงสุดที่เกี่ยวข้องกับลักษณะการไหล [3]

2.1.5 ข้อผิดพลาดของตาข่ายและการศึกษาความเป็นอิสระของตาข่าย (Mesh Errors and Mesh Independence Studies) [3]

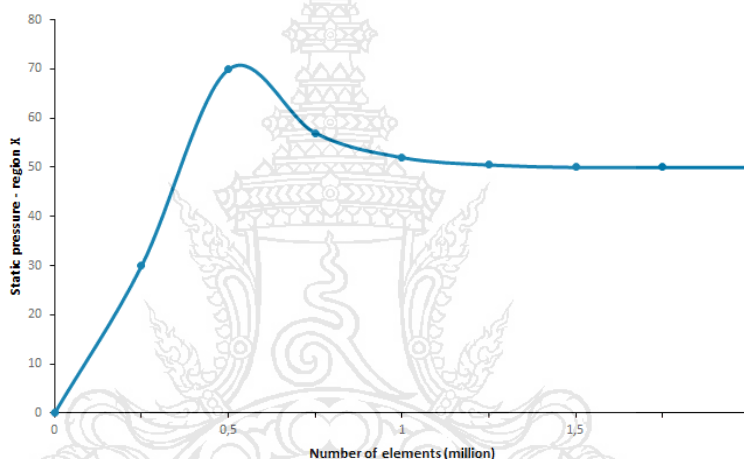
ข้อผิดพลาดที่เกิดจากตาข่ายเป็นปัญหาทั่วไปที่ส่งผลให้มีการแก้ปัญหาที่ไม่แม่นยำหรือการจำลองล้มเหลวโดยสิ้นเชิง ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้เนื่องจากตาข่ายหยาบเกินไปและไม่สามารถจับภาพฟิสิกส์ของการไหลภายในพื้นที่ของเซลล์หยาบขนาดใหญ่ได้ ด้วยเหตุนี้ จึงจำเป็นต้องดำเนินการศึกษาความเป็นอิสระของตาข่ายเพื่อให้แน่ใจว่าตาข่ายไม่มีผลกระทบที่เป็นรูปธรรมต่อการแก้ปัญหา ตัวอย่างของการศึกษาความเป็นอิสระของตาข่ายสามารถกำหนดได้ดังต่อไปนี้

1. สร้างตาข่ายเริ่มต้นที่จับภาพรูปทรงเรขาคณิตได้อย่างแม่นยำ และดูเหมือนว่าจะมีเซลล์และความหนาแน่นของตาข่ายเพียงพอเมื่อตรวจสอบด้วยสายตา
2. สร้างตาข่ายใหม่ด้วยจำนวนเซลล์ที่มากขึ้นและความหนาแน่นของตาข่ายที่มากขึ้นในพื้นที่ที่สนใจ ดำเนินการวิเคราะห์ CFD อีกครั้งและเปรียบเทียบผลลัพธ์ตามนั้น

ตัวอย่างเช่น การตรวจสอบการไหลภายในผ่านช่องทาง การเปรียบเทียบการลดลงของความดันที่บริเวณที่สำคัญจะเป็นการวัดความไวของตาข่ายที่ดี

3. ดำเนินการปรับปรุงตาข่ายต่อไปจนกว่าผลลัพธ์และคุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญ (ความดันลดลง ความเร็วสูงสุด เป็นต้น) จะบรรจบกันอย่างน่าพอใจกับการวิเคราะห์ตาข่ายและ CFD ก่อนหน้านี้

การดำเนินการดังกล่าวจะช่วยขจัดข้อผิดพลาดที่เกิดจากโครงสร้างตาข่ายได้ และจะได้จำนวนองค์ประกอบที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้การคำนวณเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพ รูปที่ 2.4 พิจารณาการเปลี่ยนแปลงความดันสถิตที่บริเวณจินตภาพ X ผ่านการเพิ่มจำนวนองค์ประกอบตาข่าย ด้วยองค์ประกอบประมาณ 1,000,000 องค์ประกอบก็เพียงพอที่จะดำเนินการศึกษาวิจัยที่เชื่อถือได้



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างการวิเคราะห์การบรรจบกันของตาข่ายนี้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการเลือกขนาดตาข่ายที่เหมาะสมที่สุดเพื่อประหยัดค่าใช้จ่ายในการคำนวณ [3]

2.1.6 การบรรจบกันในพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Convergence in CFD) [3]

CFD ยังมีกระบวนการที่คล้ายกันซึ่งอาศัยการเปลี่ยนแปลงผลลัพธ์ที่ละน้อยซึ่งทำซ้ำที่สุดแล้วจะไปเสร็จสิ้นที่ผลเฉลยสุดท้าย ในระหว่างการวิเคราะห์ CFD จะใช้การคาดเดาเบื้องต้นเป็นจุดเริ่มต้น ด้วยการผ่านการวนซ้ำเชิงตัวเลข ฟิสิกส์จะเปลี่ยนจากการคาดเดาเบื้องต้นเป็นฟิสิกส์การไหลที่คงอยู่ขั้นสุดท้าย แม้ว่าการวนซ้ำเชิงตัวเลขจะรับผิดชอบในการมาถึงโซลูชันสุดท้าย แต่ความแม่นยำของผลลัพธ์ยังคงขึ้นอยู่กับเมชอย่างสมบูรณ์เพื่อให้ได้โซลูชันที่แม่นยำ

การบรรจบกันเป็นปัญหาสำคัญสำหรับการวิเคราะห์เชิงคำนวณ การเคลื่อนที่ของของไหลมีรูปแบบทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นโดยมีรูปแบบที่ซับซ้อนต่างๆ เช่น ความปั่นป่วน การเปลี่ยนเฟส และการถ่ายเทมวล โดยการบรรจบกันนั้นได้รับอิทธิพลอย่างมากจากรูปแบบเหล่านี้ นอกเหนือจากวิธีแก้ไขเชิงวิเคราะห์แล้ว วิธีแก้ไขเชิงตัวเลขยังผ่านรูปแบบการวนซ้ำซึ่งผลลัพธ์จะได้มาจากการลดข้อผิดพลาดระหว่างขั้นตอนก่อนหน้า ความแตกต่างระหว่างสองวิธีแก้ไขสุดท้ายจะระบุ

ข้อผิดพลาด เมื่อข้อผิดพลาดสัมบูรณ์ลดลง ความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์จะเพิ่มขึ้น และผลลัพธ์จะบรรจบกันไปสู่วิธีแก้ไขที่เสถียร

2.1.7 บทสรุปสรุปคำตอบการวิเคราะห์ (When is the solution converged?)

การแก้ปัญหาควรดำเนินต่อไปโดยทำซ้ำไปเรื่อยๆ จนกว่าฟิลด์ของการแก้ปัญหาจะหยุดเปลี่ยนแปลง สิ่งนี้เป็นจริงกับทั้งการจำลองแบบคงที่และชั่วคราว สำหรับการจำลองแบบชั่วคราว จะต้องได้การบรรจบกันในแต่ละขั้นตอนเวลา เหมือนกับว่าเป็นการจำลองแบบคงที่ (Steady-state simulation)

2.1.8 เกณฑ์การบรรจบกัน (Criteria for convergence) [3]

เศษตกค้างที่เหลือจากสมการ (Residuals of equations) จะเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละรอบการทำซ้ำ เมื่อการทำซ้ำลดลงเหลือค่าเกณฑ์มาตรฐาน ก็จะมีการบรรจบ มีข้อเท็จจริงสำคัญที่เกี่ยวกับการบรรจบกัน ได้แก่

1. สามารถเร่งความเร็วได้ด้วยพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น initial conditions, under-relaxation และ Courant number
2. วิธีแก้ปัญหามิจำเป็นต้องถูกต้องเสมอไป แต่คำตอบสามารถบรรจบกันได้ โมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ดีและโครงสร้างตาข่ายอาจส่งผลให้ได้ผลลัพธ์ที่ไม่ถูกต้องแต่บรรจบกันได้
3. สามารถทำให้เสถียรได้หลายวิธี เช่น คุณภาพตาข่ายที่เหมาะสม การปรับแต่งตาข่าย
4. ตรวจสอบให้แน่ใจว่าวิธีแก้ปัญหานั้นสามารถทำซ้ำได้หากจำเป็น เพื่อหลีกเลี่ยงความคลุมเครือ

2.2 ความดันและอัตราการไหล [4]

การวัดอัตราการไหลของของเหลวมีความจำเป็นอย่างยิ่งในแอปพลิเคชันมาตรวัดน้ำ ในบางการดำเนินงาน ความสามารถในการวัดอัตราการไหลที่แม่นยำมีความสำคัญมาก จนสามารถสร้างความแตกต่างระหว่างการทำกำไรหรือการขาดทุนได้ ในกรณีอื่นๆ การวัดอัตราการไหลที่ไม่แม่นยำหรือการไม่วัดผลอาจทำให้เกิดผลลัพธ์ที่ร้ายแรง ในเครื่องมือวัดอัตราการไหลของของเหลวส่วนใหญ่ อัตราการไหลจะถูกกำหนดโดยการอนุมานด้วยการวัดความเร็วของของเหลวหรือการเปลี่ยนแปลงของพลังงานจลน์ ความเร็วขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความดันที่บังคับให้ของเหลวไหลผ่านท่อ เนื่องจากทราบพื้นที่หน้าตัดของท่อและการไหลคงที่ ความเร็วเฉลี่ยจึงเป็นตัวบ่งชี้อัตราการไหล ความสัมพันธ์พื้นฐานในการกำหนดอัตราการไหลของของเหลว [4] สมการการไหลแสดงดังสมการที่ (2.10)

$$Q = V \cdot A \quad (2.10)$$

โดยที่ Q คือ การไหลของของเหลวผ่านท่อ (m^3/s)

V คือ ความเร็วเฉลี่ยของการไหล (m/s)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อ (m^2)

ปัจจัยอื่นๆ ที่ส่งผลต่ออัตราการไหลของของเหลว ได้แก่ ความหนืด และความหนาแน่นของของเหลว ตลอดจนแรงเสียดทานของของเหลวที่สัมผัสกับท่อ

การวัดความดันคือการวัดแรงที่กระทำโดยของเหลว (ของเหลวหรือก๊าซ) บนพื้นผิว ความดัน (สัญลักษณ์: P) คือแรงที่กระทำในแนวตั้งฉากกับพื้นผิวหารด้วยพื้นที่ของพื้นผิว ความดันจัดเป็นปริมาณ สเกลาร์และต้องการเพียงขนาดเท่านั้น โดยทั่วไปความดันจะวัดเป็นหน่วยแรงต่อหน่วยพื้นที่ผิว มีการพัฒนาเทคนิคมากมายสำหรับการวัดความดันและสุญญากาศ เครื่องมือที่ใช้ในการวัดและแสดงความดันทางกลเรียกว่า เกจวัดความดัน เกจวัดสุญญากาศ หรือ compound gauges (สุญญากาศและความดัน) เกจบูร์ดองที่ใช้กันอย่างแพร่หลายเป็นอุปกรณ์เชิงกลที่ใช้วัดความดันและอาจเป็นเกจประเภทหนึ่งที่อยู่กันมากที่สุด เกจวัดสุญญากาศใช้ในการวัดความดันที่ต่ำกว่าความดันบรรยากาศโดยรอบ ซึ่งกำหนดเป็นจุดศูนย์ในค่าลบ (เช่น -1 บาร์หรือ -760 mmHg เท่ากับสุญญากาศทั้งหมด) เกจวัดส่วนใหญ่วัดความดันเทียบกับความดันบรรยากาศเป็นจุดศูนย์ ดังนั้นรูปแบบการอ่านนี้จึงเรียกว่า “ความดันเกจ” หน่วย SI สำหรับความดันคือปาสกาล (Pa) ซึ่งเท่ากับหนึ่งนิวตันต่อตารางเมตร (N/m^2) หรือ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) ในหน่วยอังกฤษ และยังคงใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น ความดันลมยาง มักจะมีตัวอักษรต่อท้ายหน่วย psi เพื่อระบุการอ้างอิงศูนย์ของการวัด psia สำหรับค่าสัมบูรณ์ psig สำหรับมาตรวัด psid สำหรับค่าดิฟเฟอเรนเชียล ดังที่กล่าวไว้ ความดันคือแรงหารด้วยพื้นที่หน้าตัด โดยพิจารณาว่าแรงนั้นกระทำในแนวตั้งฉากกับพื้นผิว ความสัมพันธ์นี้จะกำหนดโดยสมการความดันตามกฎของปาสกาล ดังสมการที่ (2.2)

$$P = F / A \quad (2.11)$$

โดยที่ P คือ ความดันเป็นปาสกาล (Pa) หรือ N/m^2

F คือ แรงเป็นนิวตัน (N)

A คือ พื้นที่เป็นตารางเมตร (m^2)

2.3 Reynolds Number

เลขเรย์โนลด์เป็นค่าที่ไม่มีมิติ มีบทบาทสำคัญในการคาดการณ์รูปแบบพฤติกรรมของของไหล หมายเลขเรย์โนลด์ซึ่งเรียกอีกอย่างว่า Re ใช้เพื่อกำหนดว่าการไหลของของไหลจะเป็นแบบลามินาร์หรือปั่นป่วน หมายเลขเรย์โนลด์เป็นหนึ่งในพารามิเตอร์ควบคุมหลักในการไหลที่มีความหนืด โดยจะเลือกแบบจำลองเชิงตัวเลขตามหมายเลขเรย์โนลด์ที่คำนวณไว้ล่วงหน้า หมายเลขเรย์โนลด์จะ

ประกอบด้วยคุณสมบัติทั้งแบบสถิตและจลนศาสตร์ของของไหล แต่หมายเลขเรย์โนลด์ก็ถูกกำหนดให้เป็นคุณสมบัติการไหลเนื่องจากการตรวจสอบสถานะไดนามิก ในทางเทคนิคแล้วหมายเลขเรย์โนลด์คืออัตราส่วนของแรงเฉื่อยต่อแรงหนืด อัตราส่วนนี้ช่วยในการจำแนกการไหลแบบลามินาร์จากการไหลแบบปั่นป่วน แรงเฉื่อยต้านการเปลี่ยนแปลงความเร็วของวัตถุและเป็นสาเหตุของการเคลื่อนที่ของของไหล แรงเหล่านี้มีอิทธิพลเหนือการไหลแบบปั่นป่วน มิฉะนั้น หากแรงหนืด ซึ่งกำหนดเป็นความต้านทานต่อการไหล มีค่ามากกว่า การไหลจะเป็นแบบลามินาร์ สามารถระบุหมายเลขเรย์โนลด์ได้ดังต่อไปนี้ [5]

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{VL}{\nu} \quad (2.12)$$

$$Re = \frac{F_{inertia}}{F_{viscous}} = \frac{\frac{kg}{m^3} \times \frac{m}{s} \times m}{Pa \times s} = \frac{F}{F} \quad (2.13)$$

โดยที่ $\rho (kg/m^3)$ คือความหนาแน่นของของเหลว, $V (m/s)$ คือความเร็วลักษณะเฉพาะของการไหล และ $L (m)$ คือมาตราส่วนความยาวลักษณะเฉพาะของการไหล สมการที่ (2.13) คือการหาค่าของหน่วยที่ Re ถูกกำหนดให้ไม่มีมิติ การเปลี่ยนแปลงของหมายเลขเรย์โนลด์แสดงอยู่ในสมการที่ (2.12) โดยที่ $\mu (Pa.s)$ คือความหนืดไดนามิกของของเหลว และ $\nu (m^2/s)$ คือความหนืดจลนศาสตร์ การเปลี่ยนแปลงระหว่างความหนืดไดนามิกและจลนศาสตร์มีดังนี้ [5]

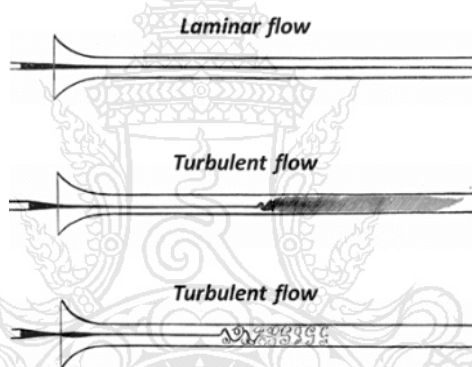
$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.14)$$

ความสามารถในการใช้เลขเรย์โนลด์แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับข้อมูลจำเพาะของการไหลของของไหล เช่น การเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่น (การบีบอัด) การเปลี่ยนแปลงของความหนืด (แบบไม่นิวโทเนียน) การไหลภายในหรือภายนอก เป็นต้น เลขเรย์โนลด์วิกฤต คือการแสดงออกของค่าเพื่อระบุการเปลี่ยนแปลงระหว่างระบบต่างๆ ซึ่งแตกต่างกันไปตามประเภทของการไหลและรูปทรงด้วย ในขณะที่เลขเรย์โนลด์วิกฤตสำหรับการไหลปั่นป่วนในท่อคือ 2,000 เลขเรย์โนลด์วิกฤตสำหรับการไหลปั่นป่วนเหนือแผ่นแบน เมื่อความเร็วการไหลคือความเร็วของกระแสน้ำอิสระ จะอยู่ในช่วงตั้งแต่ 10^5 ถึง 10^6 เลขเรย์โนลด์ยังทำนายพฤติกรรมความหนืดของการไหลในกรณีที่ของไหลเป็นแบบนิวโทเนียนอีกด้วย ดังนั้น การรับรู้กรณีทางกายภาพจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งเพื่อหลีกเลี่ยงการทำนายที่ไม่ถูกต้อง ระบบการเปลี่ยนผ่านและการไหลภายในและภายนอกเป็นพื้นฐานในการศึกษาหมายเลขเรย์โนลด์อย่างครอบคลุม ของไหลนิวโทเนียน คือของไหลที่มีความหนืดคงที่ หากอุณหภูมิยังคงเท่าเดิม

ไม่สำคัญว่าจะมีแรงกดดันของไหลนิวโทเนียนมากเพียงใด เพราะของไหลดังกล่าวจะมีความหนืดเท่าเดิมเสมอ ตัวอย่างเช่น น้ำ แอลกอฮอล์ และน้ำมันแร่

การเปลี่ยนผ่านจากลามินาร์เป็นปั่นป่วนการไหลของของไหลสามารถระบุได้ภายใต้ระบอบที่แตกต่างกันสองแบบ คือลามินาร์และปั่นป่วน การเปลี่ยนผ่านระหว่างระบอบต่างๆ เป็นปัญหาสำคัญที่ขับเคลื่อนโดยคุณสมบัติของของไหลและการไหล ดังที่ได้กล่าวไปก่อนหน้านี้ หมายเลขเรย์โนลด์สวิกฤตสามารถจำแนกได้เป็นภายในและภายนอก แม้ว่าหมายเลขเรย์โนลด์สที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนผ่านจากลามินาร์เป็นปั่นป่วน สามารถกำหนดได้อย่างสมเหตุสมผลสำหรับการไหลภายใน แต่การกำหนดค่าจำกัดความสำหรับการไหลภายนอกนั้นทำได้ยาก

การไหลของของไหลในท่อเป็นการไหลภายใน ซึ่งแสดงโดยเรย์โนลด์สตามรูปที่ 2.5 หมายเลขเรย์โนลด์สวิกฤตสำหรับการไหลภายในแสดงดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.5 รูปแบบการไหลของของไหลในท่อ [5]

ตารางที่ 2.1 ค่าเรย์โนลด์สวิกฤตสำหรับการไหลในท่อ [5]

รูปแบบการไหลในท่อ	Reynolds Number Range
Laminar regime	up to $Re=2300$
Transition regime	$2300 < Re < 4000$
Turbulent regime	$Re > 4000$

การไหลในช่องเปิด การไหลของของไหลในวัตถุและการไหลที่มีแรงเสียดทานของท่อเป็นการไหลภายในซึ่งคาดการณ์หมายเลขเรย์โนลด์ส โดยอิงจากเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกแทนความยาวลักษณะเฉพาะ ในกรณีที่ท่อเป็นทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกจะถือเป็นเส้นผ่านศูนย์กลางจริงของกระบอกสูบ ซึ่งหมายความว่าหมายเลขเรย์โนลด์สจะเป็นดังนี้

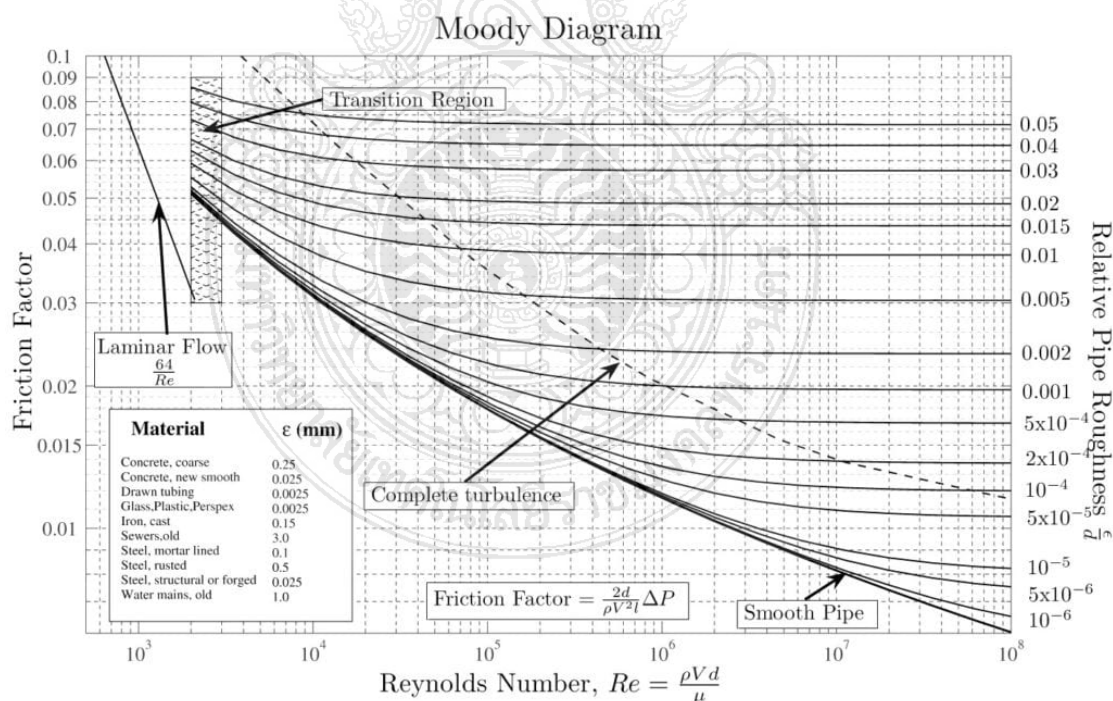
$$Re = \frac{F_{inertia}}{F_{viscous}} = \frac{\rho V D_H}{\mu} \quad (2.15)$$

รูปร่างของท่อหรือท่อส่งลมสามารถเปลี่ยนแปลงได้ (เช่น สี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้า เป็นต้น) ในกรณีดังกล่าว เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกจะถูกกำหนดดังต่อไปนี้

$$D_H = \frac{4A}{P} \quad (2.16)$$

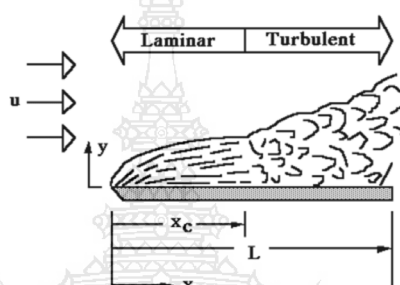
โดยที่ A คือพื้นที่หน้าตัด และ P คือเส้นรอบวง

แรงเสียดทานบนพื้นผิวเนื่องจากความหยาบเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญที่ต้องพิจารณา เนื่องจากทำให้เกิดการเปลี่ยนจากการไหลแบบลามินาร์เป็นการไหลแบบปั่นป่วนและเกิดการสูญเสียพลังงาน แผนภาพ Moody Chart แสดงในรูปที่ 2.6 สร้างขึ้นโดย Lewis Ferry Moody (1944) เพื่อทำนายการไหลของของไหลในท่อที่ความหยาบมีประสิทธิผล เป็นวิธีปฏิบัติในการกำหนดการสูญเสียพลังงานในแง่ของปัจจัยแรงเสียดทานเนื่องจากความหยาบตลอดพื้นผิวด้านในของท่อ ในแผนภูมิมีสเกลลอการิทึมที่แน่นอนด้านล่าง โดยมีสเกลสำหรับปัจจัยแรงเสียดทานที่แกนตั้งด้านซ้าย และความหยาบสัมพัทธ์ของท่อที่แกนตั้งด้านขวา



รูปที่ 2.6 แผนภูมิ Moody สำหรับแรงเสียดทานของท่อที่มีผนังเรียบและขรุขระ [5]

การไหลภายนอก การไหลภายนอกที่กระแสน้ำหลักไม่มีขอบเขตที่ชัดเจนนั้นเหมือนกับการไหลภายในซึ่งมีระบบการเปลี่ยนผ่านเช่นกัน การไหลผ่านวัตถุ เช่น แผ่นแบน ทรงกระบอก และทรงกลม เป็นกรณีมาตรฐานที่ใช้ตรวจสอบผลกระทบของความเร็วตลอดกระแสน้ำ ในปี 1914 ลุดวิก พรันดท์ล นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมันค้นพบชั้นขอบเขต ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของฟังก์ชันของเลขเรย์โนลด์ โดยปกคลุมพื้นผิวผ่านการไหลแบบลามินาร์ แบบปั่นป่วน และแบบเปลี่ยนผ่านด้วยการไหลบนพื้นผิวเรียบ แสดงในรูปที่ 2.7 โดยมีระบบที่ x_c คือความยาววิกฤตสำหรับการเปลี่ยนผ่าน L คือความยาวทั้งหมดของแผ่น และ u คือความเร็วของการไหลของกระแสน้ำอิสระ



รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนผ่านของชั้นขอบเขตสำหรับรูปแบบการไหลต่างๆ [5]

โดยทั่วไป ชั้นขอบเขตจะขยายตัวเมื่อมีการเคลื่อนไหวยาวผ่านทิศทางบนแผ่น ซึ่งในที่สุดจะส่งผลให้เกิดสภาวะไม่เสถียร โดยที่เลขเรย์โนลด์จะเพิ่มขึ้นพร้อมกัน หมายเลขเรย์โนลด์วิกฤตสำหรับการไหลบนพื้นผิวแผ่นแบนคือ

$$Re_{critical} = \frac{\rho V x}{\mu} \geq 3 \times 10^5 \text{ to } 3 \times 10^6 \quad (2.17)$$

ซึ่งขึ้นอยู่กับความสม่ำเสมอของการไหลบนพื้นผิว ถึงแม้ว่าเลขเรย์โนลด์วิกฤตสำหรับระบบต่างๆ จะถูกกำหนดไว้สำหรับการไหลภายในแล้วก็ตาม แต่การตรวจจับเลขเรย์โนลด์วิกฤตสำหรับการไหลภายนอกนั้นทำได้ยาก ซึ่งทำให้เลขเรย์โนลด์วิกฤตเกี่ยวกับรูปทรงเรขาคณิตมีความหลากหลาย นอกจากนี้ นอกเหนือจากการไหลภายในแล้ว การแยกชั้นขอบเขตยังเป็นปัญหาที่ผิดปกติสำหรับการไหลภายนอก โดยพบความคลุมเครือหลายประการเพื่อสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขที่เชื่อถือได้เกี่ยวกับโดเมนทางกายภาพ [6]

2.4 ตู้อบลมร้อน [7]

หลักการทำงาน คือการดูดอากาศภายนอกผ่านเครื่องทำความร้อนและเข้าสู่พื้นที่ผลิตภัณฑ์ กระบวนการอบแห้งอย่างมีประสิทธิภาพและสม่ำเสมอ โดยใช้กระแสลมวนวนรอบด้านบนและด้านใต้ ถาด อากาศร้อนจะถูกหมุนเวียนรอบพื้นที่ผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีการต่างๆ วิธีนี้ช่วยให้กระจายอุณหภูมิได้

สม่ำเสมอและอากาศเคลื่อนที่รอบภาคแต่ละภาคอย่างสม่ำเสมอ จึงทำให้ผลิตภัณฑ์แห้งอย่างสม่ำเสมอ แคมเปอร์ที่ควบคุมด้วยเครื่องควบคุมหรือควบคุมด้วยมือ อาจต้องมีติดตั้งไว้ที่ด้านบนของเตาอบช่วยควบคุมการระบายอากาศและการปล่อยความชื้นออกสู่สภาพแวดล้อมภายนอก รวมถึงอากาศบริสุทธิ์ที่เข้ามาสู่ระบบ

เพื่อความสะอาดในการทำความสะดวก ภายในเตาอบจึงผลิตด้วยสแตนเลส 304 ติดตั้งแผ่นพื้นเชื่อมต่อเนื่อง และสร้างขึ้นตามการออกแบบ นอกจากนี้ ภาคและชั้นวางแบบเคลื่อนที่ซึ่งทำจากสแตนเลส 304 หรืออลูมิเนียม โครงสร้างเตาอบทำด้วยเหล็กอ่อนหรือสแตนเลส ตรงกลางระหว่างผนังตู้อบด้านในและด้านนอกหุ้มฉนวนกันความร้อน และภายนอกปิดด้วยแผ่นสแตนเลส

ชุดควบคุมไฟฟ้าพร้อมระบบควบคุมอุณหภูมิ ตัวตั้งเวลา ตัวควบคุมพัลสพร้อมเครื่องมือความปลอดภัยทั้งหมดจะจัดมาให้เป็นมาตรฐาน ลดความเสี่ยงต่อการเกิดไฟไหม้จากวัสดุที่ถูกทำให้แห้งจากแหล่งอื่น ซึ่งต้องใช้อุปกรณ์ทนไฟที่ได้รับการรับรอง

2.4.1 ส่วนประกอบหลักของตู้อบลมร้อนไฟฟ้าสำหรับการอบขนม [7]

- โครงสร้างภายนอกของเตาอบลมร้อน มักสร้างขึ้นด้วยวัสดุที่ทนทานและทนความร้อน มักเคลือบด้วยผง ซึ่งไม่เพียงแต่เพิ่มความสวยงาม แต่ยังป้องกันการกัดกร่อนและการสึกหรออีกด้วย โครงสร้างภายนอกได้รับการออกแบบมาเพื่อให้มีเสถียรภาพและปลอดภัยระหว่างการใช้งาน โดยมีที่จับและตัวล็อกที่แข็งแรงเพื่อให้หยิบจับได้ง่ายและปิดเตาอบได้อย่างปลอดภัย

- วัสดุฉนวน เพื่อให้มั่นใจถึงประสิทธิภาพความร้อนที่เหมาะสมที่สุดและลดการสูญเสียความร้อน เตาอบลมร้อนจึงติดตั้งวัสดุฉนวนคุณภาพสูง วัสดุเหล่านี้ช่วยรักษาอุณหภูมิที่สม่ำเสมอภายในห้องในขณะที่ลดการใช้พลังงาน วัสดุฉนวนที่ใช้กันทั่วไป ได้แก่ ขนแร่ โยเซรามิก หรือใยแก้วที่มีความหนาแน่นสูง วัสดุเหล่านี้มีความทนทานต่อความร้อนได้ดีเยี่ยมและป้องกันการถ่ายเทความร้อนสู่สภาพแวดล้อมภายนอกได้อย่างมีประสิทธิภาพ

- องค์ประกอบความร้อน มีบทบาทสำคัญในการสร้างความร้อนภายในเตาอบ โดยทั่วไปจะอยู่ที่ด้านล่างหรือด้านหลังของเตาอบและทำหน้าที่ทำความร้อนอากาศภายในห้อง ในเตาอบลมร้อน ประเภททั่วไปขององค์ประกอบความร้อน ได้แก่ ขดลวดทำความร้อนแบบลวดนิโครมหรือองค์ประกอบความร้อนแบบท่อ องค์ประกอบเหล่านี้ให้การถ่ายเทความร้อนที่มีประสิทธิภาพและเพิ่มอุณหภูมิอย่างรวดเร็วเพื่อให้ได้จุดตั้งค่าที่ต้องการ

- เซ็นเซอร์อุณหภูมิ การควบคุมอุณหภูมิที่แม่นยำเป็นสิ่งสำคัญสำหรับเตาอบลมร้อน และเซ็นเซอร์อุณหภูมิใช้เพื่อตรวจสอบและควบคุมอุณหภูมิภายในห้อง เซ็นเซอร์เหล่านี้ซึ่งมักอยู่ในรูปแบบเทอร์โมคัปเปิลหรือเครื่องตรวจจับอุณหภูมิแบบความต้านทานพลตตินัม (RTD) จะถูกวางไว้ในตำแหน่งที่เหมาะสมภายในเตาอบเพื่อให้การอ่านอุณหภูมิที่แม่นยำ ข้อมูลจากเซ็นเซอร์จะถูกส่งไปยังตัวควบคุมอุณหภูมิ PID แบบดิจิทัลที่ใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ ทำให้สามารถปรับเอาต์พุตความร้อนและรักษาอุณหภูมิที่ต้องการได้อย่างแม่นยำ

- ระบบระบายอากาศ เตาอบลมร้อนติดตั้งระบบระบายอากาศเพื่อให้แน่ใจว่ามีการหมุนเวียนอากาศที่เหมาะสมและกระจายความร้อนสม่ำเสมอ โดยทั่วไประบบนี้จะมีพัดลมหรือกลไกหมุนเวียนอากาศแบบบังคับที่ช่วยกระจายอากาศร้อนอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งห้อง ระบบระบายอากาศป้องกันไม่ให้เกิดจุดร้อนและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ทำให้มั่นใจได้ว่าจะทำงานได้สม่ำเสมอและเชื่อถือได้ นอกจากนี้ยังช่วยให้กระบวนการอบแห้งหรือให้ความร้อนรวดเร็วยิ่งขึ้นด้วยการส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพไปยังตัวอย่างหรือวัสดุที่วางอยู่ภายในเตาอบ

- ระบบทำความร้อน (Heating Element) ตู้อบสำหรับการอบขนมมักจะใช้ขดลวดไฟฟ้า หรือฮีตเตอร์ไฟฟ้า สำหรับทำความร้อนให้กับอากาศภายในตู้อบ ฮีตเตอร์สามารถตั้งอยู่ที่ด้านบนและด้านล่างของตู้อบ เพื่อให้การกระจายความร้อนได้อย่างทั่วถึง ทั้งนี้ในบางรุ่นอาจมีการใช้ฮีตเตอร์หลายตัวเพื่อการควบคุมอุณหภูมิที่แม่นยำขึ้น

- ระบบการหมุนเวียนอากาศ (Air Circulation) การอบขนมต้องการการกระจายความร้อนที่สม่ำเสมอ การติดตั้งพัดลมหมุนเวียนอากาศ (Fan) จะช่วยให้อากาศร้อนสามารถหมุนเวียนได้ทั่วถึงทุกชั้นภายในตู้อบ ทำให้ขนมอบสม่ำเสมอจากด้านในจนถึงด้านนอก พัดลมนี้ยังช่วยให้ความชื้นจากการอบระเหยออกจากตู้อบไป ซึ่งจะช่วยให้ขนมอบได้เร็วขึ้นและมีความกรอบ

- ระบบควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Control System) ตู้อบสำหรับการอบขนมต้องมีเทอร์โมสตัทที่สามารถตั้งอุณหภูมิได้อย่างแม่นยำ ซึ่งอาจอยู่ในช่วงประมาณ 50°C - 220°C ขึ้นอยู่กับประเภทของขนม

- การควบคุมอุณหภูมิ จะต้องละเอียดเพื่อให้สามารถปรับอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับขนมแต่ละประเภทได้ เช่น เค้ก คุกกี้ หรือขนมปัง

- ระบบตั้งเวลา (Timer) ตัวตั้งเวลา หรือระบบจับเวลา จะช่วยให้สามารถควบคุมระยะเวลาในการอบได้ ซึ่งจะทำให้การอบขนมเสร็จสมบูรณ์ตามที่กำหนด

ในบางรุ่นอาจมีการตั้งเวลาหลายช่วง เพื่อรองรับขนมหลายประเภทที่ต้องการเวลาอบที่แตกต่างกัน

- ประตู (Door) ประตูของตู้อบควรทำจาก กระจกทนความร้อน เพื่อให้สามารถมองเห็นขนมที่อบได้โดยไม่ต้องเปิดประตู ประตูควรมี ซิลยาง หรือ วัสดุกันความร้อน เพื่อป้องกันไม่ให้ความร้อนรั่วออกจากตู้อบ และป้องกันการเสียความร้อน

- ระบบระบายอากาศ (Ventilation) ตู้อบสำหรับการอบขนมมักจะมีช่องระบายอากาศ เพื่อให้ความชื้นที่เกิดจากการอบระเหยออกจากตู้อบไป การระบายอากาศที่ดีจะช่วยให้ขนมอบได้กรอบและไม่เหนียว

- ชั้นวางและตะแกรง (Shelves and Trays) ชั้นวางในตู้อบจะต้องมีหลายชั้น เพื่อให้สามารถอบขนมในจำนวนมากได้ในครั้งเดียว วัสดุของชั้นวางควรทำจากสแตนเลส หรือวัสดุที่ทนทานต่อความร้อนสูงและทำความสะอาดง่าย การออกแบบ ช่องระหว่างชั้น ควรมีความสูงที่เหมาะสม เพื่อให้ลมร้อนสามารถไหลเวียนได้ทั่วถึง

2.4.2 ขั้นตอนการออกแบบตู้อบลมร้อนไฟฟ้าสำหรับการอบขนม

- การคำนวณขนาดของตู้อบ โดยพิจารณาจำนวนและขนาดของขนมที่จะอบ โดยการคำนวณขนาดของช่องอบและชั้นวาง เพื่อให้สามารถอบขนมได้ในปริมาณที่ต้องการโดยไม่เกินขีดจำกัด ขนาดภายในต้องรองรับการหมุนเวียนของอากาศได้ดีเพื่อให้ขนมอบได้อย่างทั่วถึง
- เลือกวัสดุที่เหมาะสม ตัวโครงควรใช้วัสดุที่ทนทานต่อการใช้งานและการอบที่อุณหภูมิสูง เช่น สแตนเลส ซึ่งมีคุณสมบัติด้านการกัดกร่อนและทำความสะอาดง่าย ชั้นวางควรใช้วัสดุที่แข็งแรงและสามารถทนความร้อนสูงได้ดี เช่น สแตนเลส หรืออลูมิเนียม
- การออกแบบระบบการหมุนเวียนอากาศ การติดตั้งพัดลมควรคำนึงถึงการกระจายความร้อนที่สม่ำเสมอทั่วทั้งตู้อบ และจะต้องมีการเลือกขนาดของพัดลมที่เหมาะสมกับขนาดของตู้อบ
- การควบคุมอุณหภูมิและเวลา ระบบควบคุมอุณหภูมิจะต้องมีการปรับแต่งให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการอบขนมต่างๆ รวมถึงการตั้งเวลาที่แม่นยำเพื่อการอบที่สมบูรณ์แบบ
- ประตุและการตรวจสอบภายใน ประตุที่ทำจากกระจกทนความร้อนช่วยให้สามารถดูขนมได้โดยไม่ต้องเปิดประตูป่อยครั้ง ซึ่งช่วยรักษาอุณหภูมิภายในตู้อบ
- ควรออกแบบให้การเปิดปิดประตูปะดุสะดวกและปลอดภัย
- การใช้งานและการดูแลรักษา ควรทำความสะอาดฮีตเตอร์และพัดลมเป็นประจำ เพื่อลดการสะสมของคราบและฝุ่นที่อาจทำให้การทำงานของตู้อบไม่เต็มประสิทธิภาพ
- การควบคุมความชื้น หากอบขนมที่มีความชื้นสูง เช่น ขนมปังหรือเค้ก ควรตรวจสอบให้มีการระบายอากาศที่เหมาะสมเพื่อให้ขนมอบได้กรอบและไม่เหนียว

2.4.3 การบำรุงรักษาและการดูแล หากต้องการรักษาอุณหภูมิ ให้ทำตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

- ตรวจสอบให้แน่ใจว่าวางตัวอย่างห่างจากผนังห้องทดสอบอย่างน้อย 1 นิ้วหรือ 25 มม.
- ให้ความร้อนสูงสุดตามขีดจำกัดและตัวจับเวลาการทำงาน
- ตรวจสอบให้แน่ใจว่าปิดประตูล้างห้องทดสอบแล้วในขณะที่เครื่องทำงาน
- ตรวจสอบให้แน่ใจว่าเปิดพัดลมเป่าขณะทำงาน
- เว้นระยะห่างจากผนังอย่างน้อย 1 ฟุตขณะวางเครื่องมือ
- ห้ามวางของเหลวภายในห้องทดสอบ
- วางเครื่องบนแท่นโลหะที่มั่นคง หลีกเลี่ยงการใช้แท่นไม้ในการวางเครื่องมือ
- ทำความสะอาดเครื่องก่อนและหลังขั้นตอนการทดสอบ
- ตรวจสอบให้แน่ใจว่าปิดประตูล้างห้องทดสอบอย่างถูกต้องขณะเริ่มการทดสอบ

2.5 การทบทวนวรรณกรรม

จากการศึกษาและทบทวนวรรณกรรม พบว่าพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมีขีดความสามารถในการวิเคราะห์และจำลองปัญหาของการกระจายความร้อนในตู้อบได้ ทั้งนี้จำเป็นต้องมีกระบวนการ

ทดลองร่วมด้วยเพื่อเปรียบเทียบผลและยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง ทั้งนี้จากการทบทวนวรรณกรรมได้ข้อมูลที่สามารถนำมาเป็นแนวทางในการพิจารณาและแนวทางการวิเคราะห์สำคัญของงานวิจัยนี้ได้ดังต่อไปนี้

P.S. Mirade et al. [8] ได้ศึกษาลักษณะเฉพาะและการสร้างแบบจำลอง CFD ของโปรไฟล์อุณหภูมิอากาศและความเร็วในเตาอบอุโมงค์อบบิสกิตอุตสาหกรรม และกล่าวถึงการประยุกต์ใช้แนวทางของ CFD เพื่อทำนายโปรไฟล์อุณหภูมิของอากาศและความเร็วลมภายในห้องอบของเตาอบอุโมงค์เผาด้วยก๊าซอุตสาหกรรมที่ใช้ออบบิสกิต เลือกใช้แบบจำลอง CFD สามมิติสองแบบ (แบบหนึ่งไม่ครอบคลุมแถบลำเลียงของบิสกิตและอีกแบบหนึ่งรวมแถบลำเลียงนี้ไว้ด้วย) เพื่ออธิบายการไหลเวียนของอากาศที่ซับซ้อน ซึ่งเกิดจากกลไกของอากาศเข้าและออกที่ปลายเตาอบและการสกัดอากาศที่ผ่านจุดสกัดต่างๆ ซึ่งตั้งอยู่ตลอดความยาวของเตาอบ การเปรียบเทียบผลลัพธ์เชิงตัวเลขกับการวัดในเชิงทดลอง แสดงให้เห็นว่ามีความสอดคล้องกันค่อนข้างใกล้เคียงกันในการคาดการณ์เชิงคุณภาพ และมีความไม่แม่นยำเล็กน้อยในการคาดการณ์เชิงปริมาณของโปรไฟล์อุณหภูมิอากาศภายในห้องอบ เพื่อให้สามารถวัดความเร็วลมในเตาอบได้อย่างน่าเชื่อถือและเปรียบเทียบผลกับตัวเลขได้ง่ายขึ้น จำเป็นต้องมีเซ็นเซอร์ที่เหมาะสม สำหรับการวัดความเร็วต่ำในบรรยากาศที่ร้อนจัด

Nantawan Therdthai et al. [9] ศึกษาการสร้างแบบจำลอง CFD และการจำลองเตาอบขนมปังต่อเนื่องในอุตสาหกรรมโดยใช้แบบจำลองสองมิติ ซึ่งขนมปังจะเคลื่อนที่ภายในห้องเตาอบและการกระจายอุณหภูมิของเตาอบในช่วงเวลาการเดินทางทั้งหมดนี้เป็นสิ่งที่มีอิทธิพลเหนือความแปรผันของคุณภาพผลิตภัณฑ์ เพื่อสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขที่ครอบคลุมการกระจายอุณหภูมิของห้องเตาอบทั้งหมด จึงใช้การคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) แบบจำลอง CFD สองมิติได้รับการจัดทำขึ้นเพื่อจำลองรูปแบบการกระจายอุณหภูมิและรูปแบบการไหลของอากาศ อันเนื่องมาจากการพาความร้อนและการแผ่รังสีของการถ่ายเทความร้อน ด้วยพารามิเตอร์การทำงานของเตาอบหลายตัว เช่น ปริมาณความร้อนและปริมาณพัดลม ทำให้สามารถจำลองแนวโน้มการกระจายความร้อนในเตาอบได้อย่างน่าพอใจ ซึ่งทำให้ได้ข้อมูลเชิงสร้างสรรค์ในการบรรลุโปรไฟล์อุณหภูมิการอบที่เหมาะสมที่สุด โดยควบคุมปริมาณพลังงานและรูปแบบการไหลของอากาศจากผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลอง ได้มีการตรวจสอบตัวอย่างและตำแหน่งของเซ็นเซอร์ควบคุมผ่านการศึกษาความไว นอกจากนี้ยังพบว่าผลลัพธ์จากการจำลองยังสามารถใช้เพื่อปรับเปลี่ยนการกำหนดค่าตัวแปรเตาอบเพื่อให้กระจายความร้อนได้ดีขึ้นอีกด้วย

Rodger Talbert [10] ทำความเข้าใจอุปกรณ์การอบความร้อนด้วยก๊าซสำหรับการเคลือบผงช่วงอุณหภูมิการอบที่แท้จริงประกอบด้วยสามช่วงที่สำคัญ: (1) อุณหภูมิขั้นต่ำที่จำเป็นในการเริ่มการอบ (2) อุณหภูมิเป้าหมาย และ (3) อุณหภูมิสูงสุด หากต่ำกว่าอุณหภูมิขั้นต่ำจะไม่มีการเกิดการอบ หากสูงกว่าอุณหภูมิสูงสุดอาจส่งผลเสียได้ เป้าหมายคือการให้ถึงอุณหภูมิเป้าหมายโดยเร็วที่สุดและคงไว้ตามระยะเวลาที่ระบุโดยดัชนีการอบโดยไม่เกินอุณหภูมิสูงสุด Pumphruk Satithave [11] ได้

ทำการศึกษาวิจัยเรื่อง “Computational Fluid Dynamic (CFD) Modeling and Validation of Temperature Distribution in the Infrared Oven” ในการศึกษาครั้งนี้พบว่ากระบวนการให้ความร้อนด้วยอินฟราเรด (IR) ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพความร้อนในแอปพลิเคชันอุตสาหกรรมต่างๆ ได้สำเร็จ แม้ว่าการแผ่รังสีจะเป็นกลไกที่โดดเด่นที่สุดในเตาอินฟราเรด แต่ประสิทธิภาพก็ยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการแผ่รังสีของวัสดุด้วย พบว่าผลการสร้างแบบจำลองที่แสดงเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลที่เผยแพร่สามารถจำลองประสิทธิภาพของเตาทั้งสองได้อย่างชัดเจน ผลลัพธ์เหล่านี้ยืนยันว่าเตาอินฟราเรดมีประสิทธิภาพดีกว่าเตาแบบพาความร้อนแบบเดิม โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับวัตถุนขนาดใหญ่ที่มีการแผ่รังสีสูง ในแง่ของอัตราการให้ความร้อน เตาอินฟราเรดยังแสดงประสิทธิภาพที่ดีขึ้นด้วยการเพิ่มอุณหภูมิเร็วกว่าการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนประมาณ 40 เท่า ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นที่ต่างกันส่งผลต่อการดูดซับและการกระเจิงของรังสีอินฟราเรด สีดำแสดงอุณหภูมิสูงสุดและอัตราการให้ความร้อน รองลงมาคือสีน้ำเงิน สีแดง และสีขาว ตามลำดับ ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุด (สีดำ) และต่ำสุด (สีขาว) อยู่ที่ 0.85% และ 0.35% สำหรับเหล็กและ MDF อย่างไรก็ตาม ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและการแผ่รังสีดูเหมือนจะเกี่ยวข้องกับทฤษฎีที่ว่า การแผ่รังสีสูงทำให้ประสิทธิภาพการทำความร้อนดีขึ้น เมื่อพิจารณาจากผลการคำนวณ จะเห็นได้ว่าสามารถแยกแยะระหว่างเตาอบแบบพาความร้อนแบบดั้งเดิมและเตาอบอินฟราเรดได้อย่างชัดเจน ซึ่งเตาอบอินฟราเรดดูเหมือนจะประหยัดพลังงานมากกว่า

Andrew Lee [12] ศึกษาวิจัยเรื่อง “การตรวจสอบเชิงตัวเลขของการกระจายอุณหภูมิในเตาอบอุตสาหกรรม” การตรวจสอบเชิงตัวเลขดำเนินการกับเตาอบอุตสาหกรรมโดยใช้เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ผลที่ได้จากการตรวจสอบเชิงตัวเลขของเตาอบที่ Orford Refrigeration พิสูจน์ได้ว่าเตาอบมีการกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอเป็นส่วนใหญ่ในช่วงระหว่าง 314 ถึง 348 องศาเซลเซียส การกระจายอุณหภูมิภายในเตาอบนั้นสัมพันธ์กับความเร็ว การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะเป็นไปตามเส้นโค้งของความเร็ว จากผลที่ได้ พบว่าบริเวณที่มีปัญหภายในเตาอบอุตสาหกรรมนั้นสามารถระบุได้ เช่น การไหลของอากาศผ่านรูพรุน และโซนพื้นที่การหมุนเวียนที่ไม่ดี

D.A. Kontogeorgos et al. [13] ได้ประเมินความสำคัญของการแผ่รังสีความร้อนในเปลวไฟก๊าซธรรมชาติที่แบบปั่นป่วน ซึ่งถูกจำกัดอยู่ในเตาเผาแบบแกนสมมาตร สร้างแบบจำลองการคำนวณที่พัฒนาขึ้นเป็นการจำลองลักษณะของการไหลแบบปั่นป่วน การควบคุมการผสมและกลไกทางเคมีตลอดจนการแผ่รังสี แบบจำลอง P-1 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนที่แปรผันจะถูกนำมาพิจารณา ข้อมูลการทดลองบ่งชี้ว่าแบบจำลองเหล่านี้สามารถนำไปใช้ในกรณีทางวิศวกรรมได้ โดยแบบจำลอง P-1 ให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำกว่าในกรณีที่พิจารณา

Pragati Kaushal และ Sharma HK [14] ได้ศึกษาและใช้ CFD และการประยุกต์ใช้ในการออกแบบอุปกรณ์แปรรูปอาหาร ระเบียบวิธี CFD สามารถใช้เป็นเครื่องมือในการออกแบบอุปกรณ์แปรรูปอาหารได้ การประยุกต์ใช้รวมถึงกระบวนการต่างๆ เช่น การทำความสะอาดถังเก็บ การตก

ผลึก ไซโคลนแบบธรรมดา การอบแห้ง การฆ่าเชื้อ การตกผลึก การผสม และการแช่เย็น การหมัก การอบ ฯลฯ

Zinedine Khatiret. คณะ [15] ได้ศึกษาการประยุกต์ใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) และการเพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบเตาอบในอุตสาหกรรมการอบขนมปังของอังกฤษ และลดเวลาการอบขนมปังที่มีประสิทธิภาพสูง และด้วยเหตุนี้จึงปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการ พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ผสมผสานกับกรอบการเพิ่มประสิทธิภาพเพื่อพัฒนาเครื่องมือที่มีแนวโน้มดี สำหรับการสร้างการออกแบบเตาอบแบบพาความร้อนแบบบังคับอย่างรวดเร็ว การกำหนดพารามิเตอร์การออกแบบของแบบจำลองเตาอบทั่วไป แบบสามมิติถูกดำเนินการเพื่อให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับขนาดเตาอบและเงื่อนไขการไหลที่หลากหลาย โดยดำเนินการภายใต้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เหมาะสม ที่วัดคุณสมบัติที่ต้องการ เช่น ความสม่ำเสมอของอุณหภูมิและความดันตลอดบริเวณเตาอบ การออกแบบที่เหมาะสมที่สุดจะได้มาจากระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับพื้นผิวแบบไร้มิติ $H/D = 6.82$ เส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด $D = 20$ มิลลิเมตร และความเร็วของเจ็ตทำงานเท่ากับ 38.12 เมตรต่อวินาที ภายใต้อุณหภูมิการอบ 240°C ภายใต้เงื่อนไขเหล่านี้ สามารถลดเวลาในการอบลงได้ 5-10% ส่งผลให้ประหยัดพลังงานได้ในระดับที่ใกล้เคียงกัน การใช้ CFD ภายในกรอบการทำงานที่เหมาะสม โดยเลือกฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เหมาะสมเพื่อแสดงผลลัพธ์ที่ต้องการช่วยให้ใช้ทรัพยากรการคำนวณได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Verboven et al. [16] นำเสนอการตรวจสอบความถูกต้องของการไหลของอากาศภายในเตาอบไฟฟ้าแบบพาความร้อนบังคับ บทความนี้กล่าวถึงแบบจำลอง 3 มิติ โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Rokni [17] อภิปรายเกี่ยวกับการไหลปั่นป่วนที่พัฒนาเต็มที่ในท่อในช่วงของเรย์โนลด์ที่กว้าง กระบวนการนี้ผสมผสานแบบจำลองความหนืด เพื่อให้ได้แบบจำลองฟลักซ์เชิงพีชคณิตที่มีค่าการแพร่ที่แปรผัน

Jones [18] นำเสนอหัวข้อที่เกี่ยวข้องกับการไหลของการพาความร้อนในผนังขนานแนวตั้ง คำตอบเชิงตัวเลขสำหรับสถานการณ์ดังกล่าว และให้ผลลัพธ์สำหรับโปรไฟล์ความเร็วภายในผนังจำนวนน้อยเซลล์ในท้องถิ่น อุณหภูมิเฉลี่ย ปัจจัยแรงเสียดทาน และพื้นที่การไหลเวียนที่เกิดขึ้น Sparrow [19] นำเสนอการตรวจสอบเชิงทดลองเกี่ยวกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่อยู่เหนือแผ่นที่มีรูพรุน เอกสารนี้สามารถแสดงการไหลของของไหลที่อยู่ติดกับพื้นผิวของแผ่นได้

แนวทาง RANS ถือเป็นเทคนิคการจัดการความปั่นป่วนที่ใช้งานได้จริงที่สุดสำหรับปัญหาพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณทางอุตสาหกรรม ด้วยทรัพยากรการคำนวณที่มีอยู่ในปัจจุบัน [20], [21] แบบจำลองความปั่นป่วนของความหนืดของกระแสน้ำของไหลวนสองสมการได้ทำหน้าที่เป็นรากฐานสำหรับการวิจัยความปั่นป่วนมากมาย แบบจำลองเหล่านี้ช่วยให้เกิดความแม่นยำ [22] แม้จะมีตัวเลือกการสร้างแบบจำลองความปั่นป่วนมากมาย แต่แบบจำลอง $k-\varepsilon$ ก็เป็นแบบจำลองสองสมการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและได้รับการตรวจสอบแล้วสำหรับพลศาสตร์ของไหลเชิงปั่นป่วนจนถึงปัจจุบัน

[23, 24] สำหรับการไหลของอุตสาหกรรม เช่น การไหลในเตาอบ การกระจายของ k และ ε มักไม่ค่อยเป็นที่รู้จักล่วงหน้า และมักประมาณจากสูตรที่เชื่อมโยงความเร็วของทางเข้าและมาตราส่วนความยาวกับการเกิดความปั่นป่วน การใช้แบบจำลอง $k-\varepsilon$ อย่างแพร่หลายได้เน้นย้ำถึงทั้งความสามารถและข้อบกพร่องของแบบจำลอง [25] แม้จะได้รับความนิยม แต่ข้อจำกัดที่ทราบบางประการของแบบจำลอง $k-\varepsilon$ ได้แก่ [26], [21]

1. พลังงานจลน์ของการปั่นป่วนถูกคาดการณ์ไว้เกินจริงในบริเวณที่การไหลกระทบและต่อกลับ ส่งผลให้คาดการณ์การพัฒนาของการไหลรอบขอบนำและวัตถุที่มีลักษณะเป็นหน้าผาลาดชันได้ไม่ดี
2. บริเวณที่การไหลเวียนซ้ำในกระแสน้ำวนถูกประเมินต่ำเกินไป
3. กระแสน้ำวนสูงมักคาดการณ์ได้ไม่ดีเนื่องจากสนามความเครียดที่ซับซ้อน
4. การผสมกันนั้นคาดการณ์ได้ไม่ดีในกระแสน้ำที่มีผลกระทบการลอยตัวสูงหรือความโค้งของเส้นกระแสน้ำสูง
5. การแยกตัวของการไหลจากพื้นผิวภายใต้การกระทำของการไล่ระดับความดันที่ไม่พึงประสงค์นั้นคาดการณ์ได้ไม่ดี การไหลจริงนั้นน่าจะอยู่ใกล้กับการแยกตัว (หรือแยกตัวมากขึ้น) มากกว่าที่การคำนวณแนะนำ
6. การฟื้นตัวของการไหลหลังจากการต่อกลับนั้นคาดการณ์ได้ไม่ดี
7. อัตราการแพร่กระจายของกระแสน้ำวนและเจ็ตทรงกลมนั้นคาดการณ์ได้ไม่ถูกต้อง
8. ไม่สามารถคาดการณ์การไหลทุติยภูมิที่ขับเคลื่อนด้วยความปั่นป่วนในท่อตรงที่มีหน้าตัดไม่กลมได้เลย แบบจำลองความหนืดของกระแสน้ำวนเชิงเส้นไม่สามารถจับภาพลักษณะนี้ได้
9. ไม่สามารถสร้างแบบจำลองการไหลแบบลามินาร์และแบบเปลี่ยนผ่านด้วยแบบจำลอง $k-\varepsilon$ มาตรฐานได้ จึงเป็นพื้นที่การวิจัยที่ดำเนินการอย่างต่อเนื่องในการสร้างแบบจำลองความปั่นป่วน
10. ไม่สามารถคาดการณ์การไหลแบบปั่นป่วนในบริเวณใกล้ผนังได้ดีหากไม่ได้รับการบำบัดพิเศษ [27]

ซึ่งจากการวิเคราะห์ Mark Fahey et al. [21] ได้เก็บข้อมูลผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับทดลองด้วยการมองเห็นเส้นทางการไหลของความร้อน การเปรียบเทียบความเร็ว และการเปรียบเทียบอุณหภูมิ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. การมองเห็นการไหลของอากาศที่ทางเข้าระหว่างด้านบนของประตูและด้านล่างของแผงควบคุม สามารถมองเห็นพัดลมของแสงเลเซอร์ได้ และแสงสะท้อน (เส้นสีเข้ม) สามารถมองเห็นความเข้มข้นของควันในอากาศที่ทอดยาวเข้าไปในทางเข้า โดยสามารถมองเห็นไอพ่นขาออกจากช่องระบายอากาศด้านล่างได้ ซึ่งการไหลนั้นไม่สม่ำเสมอและมีกระแสน้ำวนขนาดใหญ่จำนวนมาก อากาศถูกดึงเข้าไปในทางเข้าอย่างรวดเร็วจากด้านหน้า ด้านบน และด้านล่าง สามารถมองเห็นการไหลที่ไหลลงมาตามพื้นผิวด้านล่างของประตูและถูกดึงเข้าไปที่ด้านล่างประตูเหนือไอพ่น [21]

2. การเปรียบเทียบความเร็ว เนื่องจากแบบจำลอง CFD เป็นแบบสองมิติ จึงมีตำแหน่งการวัดในการทดลองเพียงตำแหน่งเดียวที่ทางออก แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่านี้กับค่าจากกรณี CFD ทั้งสามกรณี ค่าที่ CFD ทำนายไว้จะใกล้เคียง 3% ของค่าการทดลองและเป็นไปตามการออกแบบของเงื่อนไขขอบเขตมวล [21]

3. การเปรียบเทียบอุณหภูมิ วัดด้วยเทอร์โมคัปเปิล 59 ครั้ง มี 31 ครั้งที่มีค่าตำแหน่งตรงกับในแบบจำลอง CFD สองมิติ ความแตกต่างของอุณหภูมิ (คำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ในหน่วยเคลวิน) กับเทอร์โมคัปเปิลโดยรวมแล้ว ความสอดคล้องระหว่างอุณหภูมิที่ทำนายโดย CFD และค่าที่วัดได้นั้นค่อนข้างดี อยู่ภายใน $\pm 10K$ ของค่าที่วัดได้ [21]

J. C. Z. Piaia et al. [28] ได้นำเสนอการสร้างแบบจำลอง CFD ของอัตราการไหลของอากาศในเตาอบแบบพาความร้อนในอุตสาหกรรมเตาอบที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นอุปกรณ์เตาอบแบบพาความร้อนไฟฟ้าอุตสาหกรรม สำหรับให้ความร้อนอาหาร เตาอบมีชั้นวางแบบตะแกรงแปดชั้นพร้อมรองรับถาดแบบถอดได้ ชั้นวางแบบตะแกรงแต่ละชั้นกว้าง 59 ซม. และลึก 65 ซม. ขนาดรวมของช่องเตาอบที่มีประโยชน์คือกว้าง 70 ซม. ลึก 84 ซม. และสูง 90 ซม. ขนาดภายนอกของเตาอบเมื่อคำนึงถึงฉนวนผนังคือกว้าง 98 ซม. ลึก 100 ซม. และสูง 130 ซม. มีพัดลมติดอยู่ที่ผนังด้านหลังของเตาอบโดยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 ซม. พัดลมดูดอากาศร้อนออกจากพื้นที่การประมวลผลตามแนวแกนและพัดไปที่ผนังในลักษณะวงกลม อากาศจะผ่านท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 ซม. และยาว 76 ซม. วางในแนวตั้งภายในผนังของช่อง ความร้อนเกิดขึ้นโดยใช้ขดลวดภายในท่อและกระจายไปทั่วเตาอบ พัดลมเรเดียลเชื่อมต่อกับอินเวอร์เตอร์ความถี่สำหรับระบบควบคุมความเร็วและหมุนทวนเข็มนาฬิกาด้วยความเร็วสูงสุด 3,465 รอบต่อนาที ในการศึกษานี้ใช้ความเร็วรอบหมุน 1,730 รอบต่อนาทีกับเตาอบสุญญากาศเพื่อให้การตรวจสอบแบบจำลองง่ายขึ้น สมการที่อธิบายการอนุรักษ์มวลและโมเมนตัมของของไหลนิวตันที่เคลื่อนที่และอัดตัวไม่ได้ เช่น อากาศ เขียนด้วยสัญลักษณ์ดัชนีสำหรับพิกัดคาร์ทีเซียน สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนสามมิติ กระบวนการคงที่ในสถานะคงที่สามารถอธิบายทางคณิตศาสตร์ได้ด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ [28] ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้รูปแบบการวิเคราะห์ CFD 3 มิติ ด้วยสมการควบคุม (Governing Equations) ของ Bird et al. [29] เช่นกัน

สมการอนุรักษ์มวลหรือสมการความต่อเนื่องใน 3 มิติ

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.12)$$

และสมการโมเมนตัม

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + f_x \quad (2.13)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + f_y \quad (2.14)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + f_z \quad (2.15)$$

โดยที่ p คือความดันสถิต (N/m^2), v คือองค์ประกอบของความเร็ว (m/s), q คือความหนาแน่น (kg/m^3), f คืออัตราการสร้างมวลเชิงปริมาตรภายใน (kg/sm^3) และ μ คือความหนืดไดนามิก (Pa s) [28]

ซอฟต์แวร์ CFD เชิงพาณิชย์ Ansys CFX 11.0 ถูกใช้สำหรับการแบ่งส่วนและการแก้สมการแพ็คเกจเชิงพาณิชย์นี้ประกอบด้วยสามโมดูล ได้แก่ พร็อบเรสเซเซอร์ โปรเซสเซอร์ และโพสต์โปรเซสเซอร์ พร็อบเรสเซเซอร์ประกอบด้วยสองส่วน ส่วนแรกใช้เพื่อสร้างเรขาคณิตแบบหลายบล็อกซึ่งประกอบด้วยเฮกซาอีดรอนแข็ง ซึ่งรองรับการสร้างหมายเลขตาข่ายแบบเตตระฮีดรัลบนพื้นผิวแข็ง (การแสดงเรขาคณิตเชิงคำนวณในแผนผัง) ส่วนที่สองใช้เพื่อสร้างไฟล์ที่เลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลข โปรเซสเซอร์เป็นโมดูลของโซลูชันเชิงตัวเลข ซึ่งใช้วิธีเชิงตัวเลขแบบปริมาตรจำกัดเพื่อแก้แบบจำลองที่สร้างขึ้นในพร็อบเรสเซเซอร์ โพสต์โปรเซสเซอร์ใช้สำหรับการแสดงผลทางวิทยาศาสตร์ของผลลัพธ์ที่ได้ในโมดูลโปรเซสเซอร์ในรูปแบบของแผนที่สี กราฟิกแบบเวกเตอร์ และแอนิเมชันเรขาคณิต 3 มิติเต็มรูปแบบของเตาอบได้รับการจำลองอย่างแม่นยำ ผงภายใน ประตู ท่อ พัฒนแบบเรเดียล และชั้นวางแสดงด้วยตาข่ายหกเหลี่ยมในกริดการคำนวณ [28]

วิธีการตรวจสอบ ใช้เซ็นเซอร์วัดความเร็วลมแบบฟิล์มร้อนสามตัว (EE65/EE Elektronik) ที่มีช่วงการทำงาน (0–20 m/s) เพื่อตรวจสอบความเร็วเฉลี่ย ในทางปฏิบัติ จะใช้ผ้าครอบเซ็นเซอร์เพื่อวัดการไหลสองมิติที่ตั้งฉากกับสาย (ความแม่นยำ $\pm 2\%$ ของค่าที่อ่านได้) เทคนิคที่ใช้บ่อยที่สุดวิธีหนึ่งในการวัดความเร็วในของเหลวคือการวัดความเร็วลมแบบฟิล์มร้อน [30] เทคนิคนี้ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ความร้อนจากองค์ประกอบการตรวจจับความร้อนด้วยไฟฟ้าซึ่งวางอยู่ในกระแส และความเร็วของของเหลวในพื้นที่ อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อน ระหว่างเส้นใยและสภาพแวดล้อมเป็นฟังก์ชันความเร็ว-การไหล ดังนั้นจึงสามารถหาค่าความเร็วได้ วิธีการทดลองสำหรับการตรวจสอบความเร็วเฉลี่ยในโพรงเตาอบ ตัวแปลงความเร็วเชื่อมต่อกับพีซีแบบพกพาด้วยเครื่องรวบรวมข้อมูล FIELDLOGGER ซอฟต์แวร์ FIELDCHART ถูกใช้เพื่อเชื่อมต่อการรวบรวมข้อมูล สแกน 48 จุดในช่องเตาอบ (12 จุดใน 4 จาก 8 ชั้น) ในแต่ละจุด จะวัดทิศทางตั้งฉากตลอดทั้งพัฒลมแยกกัน ในช่วงเวลาที่ยาวนานพอสมควร (120 วินาที) [28]

ผลที่ได้คือ โปรไฟล์ความเร็วระหว่างชั้นวางได้รับการตรวจสอบโดยใช้เทคนิค CFD การคำนวณโปรไฟล์ความเร็ว CFD ถูกนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่วัดได้ที่จุดต่างๆ ของช่องเตาอบซึ่งมีคาบเวลา 120 วินาที ได้ทำการตรวจสอบความเร็วแล้ว ประเด็นหลักของการไหลที่คำนวณได้ซึ่งเวกเตอร์ความเร็วในภาคตัดขวางแนวนอนของแบบจำลองเตาอบ เนื่องจากรูปทรงเรขาคณิตที่ซับซ้อนและการหมุนวนของพัฒลม อากาศจึงไม่เคลื่อนที่โดยตรงผ่านช่องเตาอบไปยังพัฒลม พัฒลมแนวรัศมีจะ

กำหนดทิศทางการไหลของอากาศไปยังผนังที่อยู่ใกล้กับท่อที่มีความต้านทานไฟฟ้า อากาศจะไหลกลับไปที่พัดลมผ่านจุดศูนย์กลางของเตาอบ และที่ช่องนี้เองที่อาหารที่จะแปรรูปตั้งอยู่ การเปรียบเทียบเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณของการวัดและการคำนวณ สำหรับส่วนประกอบความเร็วในทิศทางตั้งฉาก y โดยเปรียบเทียบค่าความเร็วที่วัดได้และคาดการณ์ไว้บนเส้นแนวนอนต่างๆ ในโพรงเตาอบ พิกัด y จากด้านซ้าย ตรงกลาง และด้านขวาของโพรงเตาอบ ผลลัพธ์สำหรับขนาดกริดทั้งสามขนาดจะถูกพล็อตความเร็วสูงสุดที่สังเกตได้ในเตาอบจะพบใกล้กับพัดลม ข้อผิดพลาดในการสร้างแบบจำลองนั้นสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วใกล้กับประตู ผลลัพธ์ที่ได้คือ ข้อผิดพลาดบางส่วนเกิดจากการทำให้รูปทรงเรขาคณิตของอากาศในเตาอบแบบพาความร้อนแบบบังคับง่ายขึ้น เมื่อเปรียบเทียบความเร็วเฉลี่ยของแบบจำลอง CFD ข้อผิดพลาดที่น้อยที่สุดที่ได้คือ 18.14% โดยใช้องค์ประกอบปริมาตรจำนวนมากที่สุดคือ 2,682,371 ข้อผิดพลาดจะลดลงโดยการเพิ่มความละเอียดของกริดโดยแลกกับการเพิ่มเวลาในการจำลอง เนื่องจากทรัพยากรคอมพิวเตอร์ที่มีอยู่มีจำกัด จึงไม่สามารถปรับปรุงกริดเพิ่มเติมได้ [28]

Zlatko Rek et al. [31] ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้การจำลอง CFD ในการพัฒนาเตาอบความร้อนรุ่นใหม่ วิเคราะห์ที่สถานะคงที่ (Steady state) เท่านั้น สมการการควบคุมจึงถูกทำให้เรียบง่ายขึ้นเนื่องจากอนุพันธ์ของเวลาทั้งหมดเป็นศูนย์ หมายเลขเรย์โนลด์จะแตกต่างกันระหว่าง 230 (ทางเข้า) และ 880 (ทางออก) ในกรณีของการพาความร้อนแบบบังคับ ในขณะที่หมายเลขเรย์ลีห์ (Rayleigh number) คือ 6×10^8 สำหรับการพาความร้อนตามธรรมชาติ ตัวเลขเหล่านี้บ่งชี้ [32] โชน การเปลี่ยนผ่านระหว่างการไหลแบบลามินาร์และแบบปั่นป่วน ได้ตัดสินใจที่จะปฏิบัติต่อการไหลแบบลามินาร์ เนื่องจากแบบจำลองความปั่นป่วนเฉลี่ยของเรย์โนลด์ (RANS) ที่มีอยู่ใน Fluent ไม่เป็นไปตามเงื่อนไขของผนัง $y+$ ในกรณีดังกล่าว ความแปรผันของความดันมีขนาดเล็กเพียงพอ จึงใช้กฎของแก๊สอุดมคติที่อัดตัวไม่ได้เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอากาศและอุณหภูมิ ดังสมการที่ (2.16) การแบ่งส่วนของแบบจำลองทางเรขาคณิตได้ดำเนินการในโปรแกรม Tgrid [32] โดยใช้ปริมาตรควบคุมแบบเตตระฮีดรอล ความเบ้ของพารามิเตอร์คุณภาพกริด (ความแตกต่างระหว่างรูปร่างของเซลล์และรูปร่างของเซลล์ด้านเท่าที่มีพื้นที่เท่ากัน) ของตาข่ายพื้นผิวที่สร้างโดยอัตโนมัติเกินค่า 0.85 ในเซลล์บางเซลล์จำเป็นต้องซ่อมแซมด้วยมือโดยการรวมเซลล์ที่มีปัญหาเข้าด้วยกันความเบ้สูงสุดคือ 0.76 สำหรับกริดทั้งหมดหลังจากการซ่อมแซมตาข่าย ซึ่งหมายความว่าคุณภาพของตาข่ายพื้นผิวนั้นดีมาก กริดปริมาตรเริ่มต้นถูกสร้างขึ้นบนพื้นฐานของตาข่ายพื้นผิว กริดเหล่านี้ต้องการการปรับแต่งและการทำให้เรียบเพิ่มเติมเพื่อให้ได้คุณภาพกริดภายใน [31]

$$\rho = \frac{P_{op}}{\frac{R}{M_w} T} \quad 2.16$$

โดยที่ p_{op} คือ ความดันใช้งาน (101.325 Pa), R คือ ค่าคงที่ของก๊าซสากล และ M_w คือ น้ำหนักโมเลกุลของอากาศ ซึ่งหมายความว่ามีการใช้แบบจำลองการลอยตัวเต็มที่ คุณสมบัติของวัสดุนำเสนอในตารางที่ 2.2 ถูกใช้ในแบบจำลองเชิงตัวเลข

ตารางที่ 2.2 สมบัติของวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์ [31]

Material	ρ [kg/m ³]	c_p [J/kgK]	λ [W/mK]	ε
steel	7850	465	44	0.8
aluminum	2700	896	229	-
enamel	7870	481	12	0.9
glass wool	50	670	0.036	-
glass	2700	840	0.76	0.94
air	0.7	1034	0.037	-
biscuit/HIPOR	1075	3365	0.452	0.6

ความถูกต้องของผลการคำนวณเชิงตัวเลขนั้นขึ้นอยู่กับเงื่อนไขขอบเขตเป็นส่วนใหญ่ หากเงื่อนไขเหล่านี้ไม่ตรงกับสถานการณ์จริง การแก้สมการก็จะไม่ให้ค่าที่คาดหวัง เงื่อนไขขอบเขตอุณหภูมิสำหรับผนังด้านนอกของเตาอบ เครื่องทำความร้อนอินฟราเรด และฝาครอบพัดลมนั้นได้มาจากการวัดบนต้นแบบเตาอบในแผนกห้องปฏิบัติการไฟฟ้าความร้อนของอุปกรณ์ประกอบอาหารในโกเรเนเย (Electrothermics Laboratory of Cooking Appliances department in Gorenje) เพื่อให้ใกล้เคียงกับสถานการณ์จริง โดยตั้งเทอร์โมสตัทไว้ที่ 200 °C อุณหภูมิเฉลี่ยที่วัดได้ที่ผนังด้านนอกของเตาอบ สามารถสังเกตอิทธิพลของการสลับเครื่องทำความร้อนที่ระยะเวลา 10 นาที บนผนังด้านบนและด้านล่างได้ หลังจากผ่านไป 30 นาที การสั่นของอุณหภูมิบนผนังที่อยู่ห่างจากเครื่องทำความร้อนจะน้อยที่สุด สังเกตสถานการณ์ที่คล้ายกันในเตาอบที่ใช้ระบบทำความร้อนแบบพาความร้อน สภาวะคงที่จะเกิดขึ้นหลังจากให้ความร้อนเป็นเวลา 60 นาที และจะถูกใช้สำหรับสภาวะขอบเขตอุณหภูมิที่ผนังเตาอบ อุณหภูมิสูงสุดของสามช่วงเวลาสุดท้ายจะถูกใช้สำหรับสภาวะขอบเขตผนังด้านบนและด้านล่าง [31]

Zinedine Khatir et al. [33] ได้นำเสนอบทความการตรวจสอบการไหลของอากาศและการกระจายอุณหภูมิในเตาอบขนมปังขนาดเล็กโดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) เนื่องจากการไหลของอากาศภายในเตาอบแบบพัดลมดูดอากาศมีความปั่นป่วนสูงในบริเวณหัวฉีด จึงมีความสำคัญมากที่จะต้องตรวจสอบการคาดการณ์ CFD กับข้อมูลการทดลองก่อนใช้ CFD เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการอบ ดังนั้น วัตถุประสงค์ของ Zinedine Khatir et al. จึงมีดังนี้ (i) เพื่ออธิบายการพัฒนาและการตรวจสอบการทดลองของแบบจำลอง CFD ของการไหลของอากาศความร้อนในเตาอบแบบพัดลมดูดอากาศความเร็วสูงแบบอุตสาหกรรม (ii) เพื่อใช้แบบจำลอง CFD เพื่อศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์การทำงานต่อการกระจายของการไหลที่เกี่ยวข้องภายในเตาอบ ซึ่งถือเป็นขั้นตอนแรกๆ

จำเป็นในการใช้ CFD สำหรับกระบวนการออกแบบละเอียดและการปรับปรุงการออกแบบเตาอบ การไหลของอากาศในห้องอบนั้นเป็นการปั่นป่วน ซึ่งได้รับการยืนยันจากการประมาณค่าเรย์โนลด์ (Re) โดยอิงจากความเร็วของอากาศเข้าแบบทั่วไป และเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด ใช้แบบจำลองเรย์โนลด์สเฉลี่ยนาเวียร์-สโตกส์ (RANS) เพื่อทำนายการไหลของอากาศในเตาอบ [33]

การศึกษาเน้นที่ห้องอบด้านในของโซนแรกของเตาอบอุตสาหกรรมขนาดเล็ก ในการผลิตจริงนั้นเตาอบจะเต็มไปด้วยผลิตภัณฑ์ แต่เพื่อความเรียบง่าย การทดลองและการวิเคราะห์ CFD จะดำเนินการในขณะที่เตาอบว่างเปล่า เราคาดคิดของตาท้ายได้รับการออกแบบและสร้างโดยใช้ Gambit เวอร์ชัน 2.4.6 ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์สร้างตาท้ายที่มีใน ANSYS FLUENT

เนื่องจากความสม่ำเสมอของการกระจายอุณหภูมิเป็นเป้าหมายการออกแบบที่สำคัญในเตาอบ การจำลองเพิ่มเติมจะดำเนินการโดยการเปลี่ยนความเร็วของเจ็ตเพื่อพิจารณาผลกระทบต่อการกระจายของการไหลของอากาศ ผลลัพธ์เมื่อความเร็วของเจ็ตเปลี่ยนแปลงจาก 0.5 vref เป็น 3 vref m/s เส้นกระแสของการไหลของอากาศนั้นอย่างชัดเจนว่าความเร็วของเจ็ตที่เพิ่มขึ้นทำให้ความแข็งแรงของโครงสร้างการหมุนวนเพิ่มขึ้น (รวมถึงอัตราการไหลด้วย) Verboven et al. [34] และ Therdthai et al. [35, 36] ได้อธิบายลักษณะของสนามการไหลด้วยความเร็วที่เปรียบเทียบได้ ความเร็วเหล่านี้ได้รับการปรับให้เป็นฟังก์ชันของความเร็วของเจ็ตทางเข้า ซึ่งแสดงให้เห็นว่ายิ่งความเร็วสูงขึ้นก็จะมีผลวนมากขึ้นภายในเตาอบ นอกจากนี้ ยังมีรายงานเกี่ยวกับประโยชน์และความแม่นยำของ CFD ในการใช้งานการอบขนมอย่างแพร่หลายในเอกสารต่างๆ เช่น Therdthai et al. [35,36], Mirade et al. [37] และ Wong et al. [38]

จากการทบทวนวรรณกรรมและสรุปดังตารางที่ 2.3 พบว่า ยังไม่มีการศึกษาเชิงเทคนิคที่เกี่ยวกับการปรับมิติของโครงสร้างตู้อบลมร้อนแบบถาดเรียงจำนวนมากที่มีความซับซ้อนของชิ้นส่วนภายในห้องอบ ซึ่งการปรับโครงสร้างบางส่วนของงานวิจัยนี้จะทำให้การกระจายลมร้อนของตู้อบเปลี่ยนไปอย่างมีนัยสำคัญ โดยใช้ระเบียบวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณและการทดลองร่วมกัน

ตารางที่ 2.3 สรุปการทบทวนวรรณกรรมและช่องว่างของประเด็นการวิจัย

ลำดับ	ผู้แต่ง	ชื่อวรรณกรรม	วิธีวิจัย	การดำเนินงาน/ผลการวิจัย
1	P.S. Mirade et al. [8]	Characterization and CFD Modeling of Air Temperature and Velocity Profiles in an Industrial Biscuit Baking Tunnel Oven	CFD และการทดลอง	○ สร้างแบบจำลอง CFD ของโปรไฟล์อุณหภูมิอากาศและความเร็วในเตาอบอุโมงค์อบบิสกิต ○ อธิบายการไหลเวียนของอากาศที่ซับซ้อน ซึ่งเกิดจากกลไกของอากาศเข้าและออกที่ปลายเตาอบและการสัปดาห์อากาศที่ผ่านจุดสกัดต่างๆ ○ การเปรียบเทียบผลลัพธ์เชิงตัวเลขกับการวัดในเชิงทดลอง แสดงให้เห็นว่ามีความสอดคล้องกันค่อนข้างใกล้เคียงกันในการคาดการณ์เชิงคุณภาพ และมีความไม่แม่นยำเล็กน้อยในการคาดการณ์เชิงปริมาณของโปรไฟล์อุณหภูมิอากาศภายในห้องอบ
2	Nantawan Therdthai et al. [9]	Two-dimensional CFD Modeling and Simulation of an Industrial Continuous Bread Baking Oven	CFD และการทดลอง	○ แบบจำลอง CFD สองมิติได้รับการจัดทำขึ้นเพื่อจำลองรูปแบบการกระจายอุณหภูมิและรูปแบบการไหลของอากาศ อันเนื่องมาจากการพาความร้อนและการแผ่รังสี ○ พารามิเตอร์การทำงานของเตาอบหลายตัว เช่น ปริมาณความร้อนจำนวนพัลลัม ○ ผลลัพธ์จากการจำลองยังสามารถใช้เพื่อปรับเปลี่ยนการกำหนดค่าตัวแปรเตาอบเพื่อให้กระจายความร้อนได้ดีขึ้นอีกด้วย
3	Pumphruk Satit [11]	Computational Fluid Dynamic (CFD) Modeling and Validation of Temperature Distribution in the Infrared Oven	CFD และการทดลอง	○ กระบวนการให้ความร้อนด้วยอินฟราเรด (IR) ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพความร้อนในแอปพลิเคชันอุตสาหกรรมต่างๆ ○ ผลการสร้างแบบจำลองที่แสดงเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลที่เผยแพร่สามารถจำลองประสิทธิภาพของเตาทั้งสองได้อย่างชัดเจน ○ ประสิทธิภาพก็ยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการแผ่รังสีของวัสดุด้วย ○ ผลการคำนวณ จะเห็นได้ว่าสามารถแยกแยะระหว่างเตาอบแบบพาความร้อนแบบดั้งเดิมและเตาอบแบบอินฟราเรดได้อย่างชัดเจน ซึ่งเตาอบแบบอินฟราเรดดูเหมือนจะประหยัดพลังงานมากกว่า

ตารางที่ 2.3 สรุปการทบทวนวรรณกรรมและช่องว่างของประเด็นการทำวิจัย (ต่อ)

ลำดับ	ผู้แต่ง	ชื่อวรรณกรรม	วิธีวิจัย	การดำเนินงาน/ผลการวิจัย
5	Pragati Kaushal and H.K. Sharma [14]	Concept of Computational Fluid Dynamics (CFD) and its Applications in Food Processing Equipment Design	CFD และการทดลอง	○ ใช้ CFD และการประยุกต์ใช้ในการออกแบบอุปกรณ์แปรรูปอาหารเป็นเครื่องมือในการออกแบบอุปกรณ์แปรรูปอาหาร ○ การประยุกต์ใช้รวมถึงกระบวนการต่างๆ เช่น การทำความสะอาดถังเก็บ การตกผลึก ไซโคลนแบบธรรมดา การอบแห้ง การฆ่าเชื้อ การตกผลึก การผสม และการแช่เย็น การหมัก การอบ ฯลฯ
6	Z. Khatir et al. [15]	The Application of Computational Fluid Dynamics (CFD) and Oven Design Optimization in the British Bread-baking Industry	CFD	○ การเพิ่มประสิทธิภาพเพื่อพัฒนาเครื่องมือสำหรับการสร้างการออกแบบเตาอบแบบพาความร้อนแบบบังคับอย่างรวดเร็ว ○ พารามิเตอร์การออกแบบของแบบจำลองเตาอบทั่วไปแบบสามมิติถูกดำเนินการเพื่อให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับขนาดเตาอบ เพื่อความสม่ำเสมอของอุณหภูมิทั่วทั้งเตาอบ ○ จึงได้ชุดการออกแบบที่เหมาะสมที่สุด คือระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับพื้นผิวแบบไม่มีมิติ $H/D = 6.82$ เส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด $D = 20$ mm และความเร็วของเจ็ตทำงาน $u_{noz} = 38.12$ m/s ภายใต้อุณหภูมิการอบ 240 °C ภายใต้เงื่อนไขเหล่านี้ เวลาในการอบสามารถลดลงได้ 5-10% ส่งผลให้ประหยัดพลังงานได้ในระดับที่ใกล้เคียงกัน
7	P. Verboven et al. [16]	Computational Fluid Dynamics Modelling and Validation of the Temperature Distribution in a Forced Convection Oven	CFD และการทดลอง (วิเคราะห์แบบปั่นป่วนด้วย $k-\epsilon$)	○ ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง CFD ของการถ่ายเทความร้อนในเตาอบแบบพาความร้อนแบบบังคับเชิงพาณิชย์ ○ Turbulent flow of a Newtonian ○ Convection exchanges are assumed to obey Newton's law of cooling ○ ความแตกต่างของอุณหภูมิเตาอบโดยเฉลี่ยระหว่างการวัดและการทำนายคือ 4.6 °C

ตารางที่ 2.3 สรุปการทบทวนวรรณกรรมและช่องว่างของประเด็นการทำวิจัย (ต่อ)

ลำดับ	ผู้แต่ง	ชื่อวรรณกรรม	วิธีวิจัย	การดำเนินงาน/ผลการวิจัย
9	M. Rokni and B. Sunden [17]	Investigation of a Two-equation Turbulent Heat Transfer Model Applied to Ducts	CFD และการทดลอง	○ ตรวจสอบการคำนวณเชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนแบบปั่นป่วนและการไหลของของไหลในท่อในช่วงของเลขเรย์โนลด์ที่กว้าง ○ แบบจำลองความหนืดของกระแสน้ำวนแบบไม่เชิงเส้นที่มีเลขเรย์โนลด์ต่ำจะรวมเข้ากับแบบจำลองฟลักซ์ความร้อนสองสมการที่มีแนวคิดการแพร่กระจายของกระแสน้ำวน ○ แบบจำลองนี้สามารถใช้ในทางทฤษฎีสำหรับช่วงของเลข Prandtl หรือช่วงของของไหลที่แตกต่างกัน ○ ผลลัพธ์ที่คำนวณได้นั้นน่าพอใจเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง จากข้อมูล DNS ที่มีอยู่และการคำนวณในงานนี้ พบว่าอัตราส่วนระหว่างมาตราเวลา (อุณหภูมิต่อความเร็ว) อยู่ที่ประมาณ 0.7 จากสมมติฐานนี้ แบบจำลองฟลักซ์สเกลาร์เชิงพีชคณิตที่มีการแพร่กระจายแบบแปรผันจะถูกนำเสนอ
10	A. Jones and D. Ingham [18]	Combined Convection Flow in a Vertical Duct with Wall Temperatures that Vary Linearly with Depth	Analytical method	○ มีการนำเสนอวิธีแก้ไขเชิงตัวเลขสำหรับปัญหาการไหลแบบพาความร้อนรวมแบบลามินาร์คงที่ในท่อขนานแนวตั้งที่มีอุณหภูมิผนังเปลี่ยนแปลงเชิงเส้น ○ พารามิเตอร์ควบคุม ได้แก่ ค่า Grashof หรือ Gr จะถูกพิจารณา รวมถึงวิธีแก้ไขการพาความร้อนแบบบังคับ คือ $Gr = 0$ ในขณะที่ค่า Prandtl หรือ Pr จะถูกตั้งค่าเป็น 1 เพื่อนำเสนอวิธีเชิงตัวเลข เมื่อค่า $IGrl$ เพิ่มขึ้น บริเวณการไหลย้อนกลับจะปรากฏขึ้น ผลลัพธ์ที่ได้จะมาจากโปรไฟล์ความเร็ว ค่า Nusselt ในพื้นที่ อุณหภูมิเฉลี่ยของการไหล และปัจจัยแรงเสียดทาน
11	E.M. Sparrow and M.C. Ortiz [19]	Heat Transfer Coefficients for the Upstream Face of a	Analytical method และการทดลอง	○ การทดลองได้ดำเนินการเพื่อกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่หันไปทางต้นน้ำ ซึ่งถูกเจาะด้วยรูจำนวนหนึ่งที่เรียงกันอย่างสม่ำเสมอ

ตารางที่ 2.3 สรุปการทบทวนวรรณกรรมและช่องว่างของประเด็นการทำวิจัย (ต่อ)

ลำดับ	ผู้แต่ง	ชื่อวรรณกรรม	วิธีวิจัย	การดำเนินงาน/ผลการวิจัย
		Perforated Plate Positioned Normal to an Oncoming Flow		○ รุฎกจัดเรียงบนจุดศูนย์กลางสามเหลี่ยมด้านเท่า และเรขาคณิตที่สมมาตรทำให้เกิดรูปแบบสมมาตร โดยที่รูแต่ละรูถูกล้อมรอบด้วยพื้นที่รูปหกเหลี่ยม ซึ่งมีขอบเขตเป็นเส้นสมมาตรภายในโมดูลรูปหกเหลี่ยมแต่ละโมดูลนั้น ○ ลักษณะการถ่ายเทความร้อนและการไหลของของไหลจะเหมือนกันกับโมดูลอื่นๆ ทั้งหมดที่ปกคลุมพื้นผิว ○ ดังนั้นเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์สองประการในระหว่างการทดลอง คือ อัตราส่วนระยะห่างระหว่างรูต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง P/D และค่าเรย์โนลด์ต้อู Re ผลลัพธ์มีความสัมพันธ์กัน โดยความสัมพันธ์ $Nu_L^* = 0.881Re^{0.476} Pr^{1/3}$ เลข Nusselt คือ อัตราส่วนของพื้นที่ผิวโมดูลต่อระยะห่างระหว่างแผ่น ในขณะที่เลข Reynolds คือ อัตราส่วนของการไหลผ่านท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับรูบนแผ่น
12	R. Subrata, K. Sagar and J. Heidmann [20]	Film Cooling Analysis Using DES Turbulence Model	CFD และการทดลอง	○ การระบายความร้อนของใบพัดกังหันทำให้จำเป็นต้องสร้างแบบจำลองสนามการไหลอย่างแม่นยำทั้งทางเวลาและเชิงพื้นที่โดยใช้เทคนิคจำลองโดยละเอียด เช่น การจำลองเชิงตัวเลขโดยตรงหรือการจำลองกระแสน้ำวนขนาดใหญ่ของการปั่นป่วน แม้ว่าวิธีการหลังจะต้องใช้ความพยายามในการคำนวณน้อยกว่า จึงสามารถจำลองการไหลที่หมายเลขเรย์โนลด์สูงกว่าการจำลองโดยตรงได้ แต่ทั้งสองวิธีนี้ยังคงมีราคาสูง ○ งานวิจัยนี้จึงเสนอการจำลองกระแสน้ำวนแบบแยกส่วน (DES) ตาม Spalart-Allmaras ซึ่งนำไปใช้กับแผ่นแบนที่ระบายความร้อนด้วยฟิล์มเป็นครั้งแรก แบบจำลองเชิงตัวเลขใช้ระบบกริดที่ไม่มีโครงสร้างเพื่อระบุโครงสร้างการไหลแบบ

ตารางที่ 2.3 สรุปการทบทวนวรรณกรรมและช่องว่างของประเด็นการทำวิจัย (ต่อ)

ลำดับ	ผู้แต่ง	ชื่อวรรณกรรม	วิธีวิจัย	การดำเนินงาน/ผลการวิจัย
				ไดนามิกทั้งสองด้านของแผ่น รวมถึงภายในรูด้วย การคำนวณโดยละเอียดของรูกกลม 35 องศา แกวเดียวนบนแผ่นแบนได้รับสำหรับอัตราการเป่า 1.0 และอัตราส่วนความหนาแน่น 2.0 นอกจากนี้ โซลูชัน DES ยังได้รับการเปรียบเทียบกับสูตร Navier-Stokes ที่ใช้ค่าเฉลี่ยของ Reynolds การเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าการจำลอง DES ช่วยเพิ่มคำอธิบายที่สมจริงของกระบวนการผสมแบบไดนามิกได้อย่างมาก
13	Mark Fahey et al. [21]	Use of computational fluid dynamics in domestic oven design	CFD ร่วมกับการทดลอง	○ การทดสอบต้นแบบ ศึกษาการไหลที่ซับซ้อนภายในวงจรทำความเย็นของประตูเตาเผาไฟโรลติก โดยใช้เทคนิคการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) ร่วมกับการทดลอง ○ พบว่า CFD สามารถช่วยให้บรรลุโซลูชันที่เหมาะสมที่สุดได้ โดยอาศัยความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมของไหล และมีการทำงานร่วมกันระหว่างเทคนิคเชิงตัวเลขและเชิงทดลอง การใช้เทคนิคเพียงเทคนิคเดียวจะทำให้เข้าใจพฤติกรรมของไหลได้จำกัด และอาจทำให้ได้โซลูชันที่ไม่เหมาะสมที่สุดสำหรับปัญหาด้านการออกแบบ ○ งานนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อสำรวจสถานการณ์การไหลของของไหลทางอุตสาหกรรมที่ซับซ้อนโดยเฉพาะนี้ เพื่อทำความเข้าใจการไหลรอบวงจรทำความเย็นของประตูเตาอบ สาธิตการทำงานร่วมกันของ CFD และงานทดลองภายในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ซับซ้อน สำรวจบทบาทของ CFD ในกระบวนการพัฒนาผลิตภัณฑ์
14	F. R. Menter [24]	Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications	CFD	○ แบบจำลองความปั่นป่วนของความหนืดของกระแสน้ำวนสองสมการใหม่สองแบบถูกนำเสนอ

ตารางที่ 2.3 สรุปการทบทวนวรรณกรรมและช่องว่างของประเด็นการทำวิจัย (ต่อ)

ลำดับ	ผู้แต่ง	ชื่อวรรณกรรม	วิธีวิจัย	การดำเนินงาน/ผลการวิจัย
				○ แบบจำลองแรกซึ่งเรียกว่าแบบจำลองพื้นฐาน (BSL) ใช้แบบจำลอง k-ω ดั้งเดิมของ Wilcox ในบริเวณด้านในของชั้นขอบเขต และเปลี่ยนไปใช้แบบจำลอง k-ϵ พบว่าแบบจำลองนี้มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับแบบจำลอง Wilcox ○ แบบจำลองที่สองเป็นผลมาจากการปรับเปลี่ยนคำจำกัดความของความหนืดของกระแสน้ำวนในแบบจำลอง BSL ซึ่งคำนึงถึงผลกระทบของการเคลื่อนย้ายของความเค้นเฉือนหลักจากการปั่นป่วน แบบจำลองใหม่นี้เรียกว่าแบบจำลองการเคลื่อนย้ายความเค้นเฉือนและนำไปสู่การปรับปรุงที่สำคัญในการคาดการณ์การไหลแบบไล่ระดับความดันที่ไม่พึงประสงค์
15	K. K. Dhinsa, C. J. Bailey and K. A. Pericleous [25]	Turbulence Modelling and its Impact on CFD Predictions for Cooling of Electronic Components	CFD ร่วมกับการทดลอง	○ ผลลัพธ์ของพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจากการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองความปั่นป่วนหลายแบบเพื่อทำนายการระบายความร้อนด้วยอากาศ ○ เสนอแบบจำลองความปั่นป่วนแบบเปลี่ยนผ่านใหม่ โดยเน้นที่เทคนิคไฮบริดที่ใช้แบบจำลอง k-ϵ ในระยะห่างที่เหมาะสมจากผนัง และแบบจำลองที่เหมาะสมพร้อมฟังก์ชันผนังใกล้กับบริเวณผนัง ○ ความร้อนส่วนใหญ่ที่ปล่อยออกมาจากชุดอิเล็กทรอนิกส์สามารถนำออกมาได้โดยการระบายความร้อนด้วยอากาศ การไหลของอากาศตลอดระบบอิเล็กทรอนิกส์และความร้อนที่นำออกมานั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของความปั่นป่วนที่มีอยู่ในกระแสมาก ○ ความน่าเชื่อถือของการวิเคราะห์ CFD ขึ้นอยู่กับแบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้ร่วมกับฟังก์ชันผนังที่นำไปใช้เป็นอย่างมาก

ตารางที่ 2.3 สรุปการทบทวนวรรณกรรมและช่องว่างของประเด็นการทำวิจัย (ต่อ)

ลำดับ	ผู้แต่ง	ชื่อวรรณกรรม	วิธีวิจัย	การดำเนินงาน/ผลการวิจัย
				○ เพื่อแก้ไขความผันผวนอย่างกะทันหันที่เกิดขึ้นจากพลังงานปั่นป่วนและพารามิเตอร์อื่นๆ ที่อยู่ใกล้บริเวณผนังและชั้นเฉือน จำเป็นต้องใช้เมชการคำนวณที่ละเอียดเป็นพิเศษ ○ โค้ดปริมาตรจำกัดของ PHYSICA ถูกใช้สำหรับการตรวจสอบนี้ ○ ยกเว้นโมเดล k-ε และ k-ω ซึ่งมีให้เป็นมาตรฐานใน PHYSICA โมเดลความปั่นป่วนอื่นๆ ทั้งหมดที่กล่าวถึงนั้นถูกนำไปใช้ผ่านโค้ดต้นฉบับโดยผู้เขียน ○ โมเดล LVEL, LVEL CAP, Wolfshtein, k-ε และ k-ω, SST และ kε/kl ได้รับการอธิบายและเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลอง
16	J. C. S. Lai and C. Y. Yang [27]	Numerical Simulation of Turbulence Suppression: Comparisons of the Performance of Four k-ε Turbulence Models	CFD ร่วมกับการทดลอง	○ นำเสนอวิธีแก้ไขเชิงตัวเลขสำหรับปัญหาการไหลแบบพาความร้อนแบบรวมที่เป็นลามินาร์คงที่ในท่อขนานแนวตั้งที่มีอุณหภูมิผนังเปลี่ยนแปลงเชิงเส้น ○ ค่าต่างๆ ของพารามิเตอร์ควบคุมก็คือค่า Grashof หรือ Gr จะถูกนำมาพิจารณา รวมถึงวิธีแก้ไขการพาความร้อนแบบบังคับ คือ $Gr = 0$ ในขณะที่ค่า Prandtl หรือ Pr จะถูกตั้งค่าเป็น 1 เพื่อนำเสนอวิธีเชิงตัวเลข เมื่อค่าของ Gr เพิ่มขึ้น บริเวณการไหลย้อนกลับจะปรากฏ ○ ผลลัพธ์ที่ได้จะมาจากโปรไฟล์ความเร็ว ตัวเลข Nusselt ในพื้นที่ อุณหภูมิเฉลี่ยของการไหล และปัจจัยแรงเสียดทาน และจะประเมินความแข็งแรงเชิงเปรียบเทียบของบริเวณการหมุนเวียน ความสัมพันธ์แบบง่าย ๆ แสดงในรูปของ Gr สำหรับ $Pr = 1$
17	J. C. Z. Piaia, C. A. Claumann, M. B.	Air Flow CFD Modeling in an Industrial Convection Oven	CFD ร่วมกับการทดลอง	○ การวิเคราะห์ CFD สามมิติที่ผ่านการตรวจสอบโดยการทดลองของกระบวนการไหลและความร้อนในเตาอบแห้งในห้องปฏิบัติการที่มีการหมุนเวียนอากาศแบบบังคับ

ตารางที่ 2.3 สรุปการทบทวนวรรณกรรมและช่องว่างของประเด็นการทำวิจัย (ต่อ)

ลำดับ	ผู้แต่ง	ชื่อวรรณกรรม	วิธีวิจัย	การดำเนินงาน/ผลการวิจัย
	Quadri, and A. Bolzan [28]			○ สนาความร้อนภายในเตาอบมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อคุณภาพของอาหารที่ปรุงสุกและการคาดการณ์ที่เชื่อถือได้มีความสำคัญต่อการออกแบบและการประเมินประสิทธิภาพของเตาอบ ○ มีการจำลองเชิงตัวเลขเพื่อคาดการณ์การไหลของอากาศแบบไอโซเทอร์มอลสามมิติในเตาอบแบบพาความร้อนแบบบังคับไฟฟ้าในอุตสาหกรรมโดยใช้รหัสพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ○ แบบจำลอง CFD มีพื้นฐานมาจากสมการพื้นฐานสำหรับการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม และแบบจำลองความปั่นป่วน k-ε ○ ประสิทธิภาพของแบบจำลอง CFD ได้รับการประเมินโดยใช้การวัดจุดของความเร็วโดยใช้เซ็นเซอร์ความเร็วฟิล์มร้อนแบบมีทิศทาง ○ ผลการจำลองสอดคล้องกับการวัดความเร็วจริงจากเตาอบอุตสาหกรรม ข้อผิดพลาดในการคำนวณโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 18.14% ของความเร็วจริง ซึ่งเกิดจากข้อจำกัดในการสร้างแบบจำลองความปั่นป่วนและความหนาแน่นของกริดเชิงตัวเลข
18	N. Sanyal, B. Bhattacharyya, and S. Munshi [30]	An Analog Non-linear Signal Conditioning Circuit for Constant Temperature Anemometer	CFD ร่วมกับการทดลอง	○ เสนอวงจรปรับสภาพสัญญาณแอนะล็อกแบบไม่เชิงเส้นแบบใหม่สำหรับแก้ไขเส้นโค้ง ○ การถ่ายโอนของเครื่องวัดความเร็วลมแบบอุณหภูมิคงที่ เน้นที่วงจรลอการิทึมที่ใช้เครื่องขยายสัญญาณแบบทำงานที่มีอินพุตคู่ ○ การศึกษาจำลอง Pspice simulation ได้ดำเนินการโดยใช้ข้อมูลการวัดความเร็วการไหลของอากาศในชีวิตจริง ซึ่งได้ผลลัพธ์ที่ค่อนข้างดี ○ โครงร่างที่เสนอนี้สามารถใช้กับทรานสดิวเซอร์อื่นที่มีลักษณะการถ่ายโอนแบบนูนขึ้นด้านบนได้ด้วย

ตารางที่ 2.3 สรุปการทบทวนวรรณกรรมและช่องว่างของประเด็นการทำวิจัย (ต่อ)

ลำดับ	ผู้แต่ง	ชื่อวรรณกรรม	วิธีวิจัย	การดำเนินงาน/ผลการวิจัย
19	Zlatko Rek, Mitja Rudolf, and Iztok Zun [31]	Application of CFD Simulation in the Development of a New Generation Heating Oven	CFD และการทดลอง	○ ได้แบบจำลองที่เหมาะสม ทราบการแผ่รังสีพื้นผิวปฏิกิริยาซึ่งไม่แสดงผลกระทบที่สำคัญต่ออุณหภูมิพื้นผิว ○ มีการใช้รูปทรงเตาอบที่แตกต่างกันสี่แบบ และตั้งเงื่อนไขขอบเขตความเร็ว 11 แบบ ○ การควบคุมความเร็วของอากาศร้อนที่หมุนเวียนในช่องเตาอบได้กลายมาเป็นปัจจัยที่มีผลชี้ขาดต่อคุณภาพการอบ การทำนายจากการจำลองเชิงตัวเลขได้รับการยืนยันจากผลลัพธ์ในด้านดีจากการตรวจสอบความถูกต้องด้วย CFD และการทดลอง
20	Zinedine Khatir et al. [33]	Computational Fluid Dynamics (CFD) Investigation of Air Flow and Temperature Distribution in a Small-Scale Bread-baking Oven	CFD และการทดลอง	○ ใช้ CFD และการประยุกต์ใช้ในการออกแบบอุปกรณ์แปรรูปอาหาร ○ CFD สามารถใช้เป็นเครื่องมือในการออกแบบอุปกรณ์แปรรูปอาหารได้ ○ การประยุกต์ใช้รวมถึงกระบวนการต่างๆ เช่น การทำความสะอาดถังเก็บ การตกผลึก ไซโคลนแบบธรรมดา การอบแห้ง การตกผลึก การผสม และการอบ ฯลฯ ○ การออกแบบที่เหมาะสมที่สุดจะได้มาจากระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับพื้นผิวแบบไร้มิติ $H/D = 6.82$ เส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด $D = 20$ มิลลิเมตร และความเร็วของเจ็ตทำงานเท่ากับ 38.12 เมตรต่อวินาที ภายใต้อุณหภูมิการอบ 240°C
21	P. Verboven, N. Scheerlinck, J. De. Baerdemaeker, and B.M. Nicolai [34]	Computational Fluid Dynamics Modelling and Validation of the Isothermal Airflow in a Forced Convection Oven		○ พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) เพื่อคำนวณการไหลของอากาศแบบไอโซเทอร์มอลสามมิติ ○ ในเตาอบแบบพาความร้อน แบบบังคับไฟฟ้าในอุตสาหกรรม สมการการไหลของของไหลที่ควบคุมได้รับ ○ จากการตรวจสอบ พบว่าลักษณะสำคัญของแบบจำลองคือความสัมพันธ์ระหว่างความจุของหัวพัดลม การหมุนวนของพัดลม และเรขาคณิตของเตาอบ ข้อผิดพลาดในการคำนวณโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 22% ของความเร็วจริง

บทที่ 3

การดำเนินการวิจัย

จากการดำเนินงานทบทวนวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2 ในบทนี้จะกล่าวถึง การดำเนินการวิจัยที่ประกอบด้วยวิธีระเบียบวิธีวิจัย การดำเนินงานวิจัย ขั้นตอนการเตรียมเครื่องมือ อุปกรณ์ การกำหนดวิธีการทดลอง การออกแบบโมเดลตู้อบลมร้อน วิธีการวิเคราะห์ด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ซึ่งกระบวนการทั้งหมดจะทำให้ได้มาซึ่งผลการวิเคราะห์และผลการทดลอง จากนั้นนำไปใช้ในการเปรียบเทียบเพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์ด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ และมุ่งสู่การออกแบบ แก้ไขปัญหาการกระจายลมร้อนของตู้ต่อไป

3.1 ระเบียบวิธีวิจัย

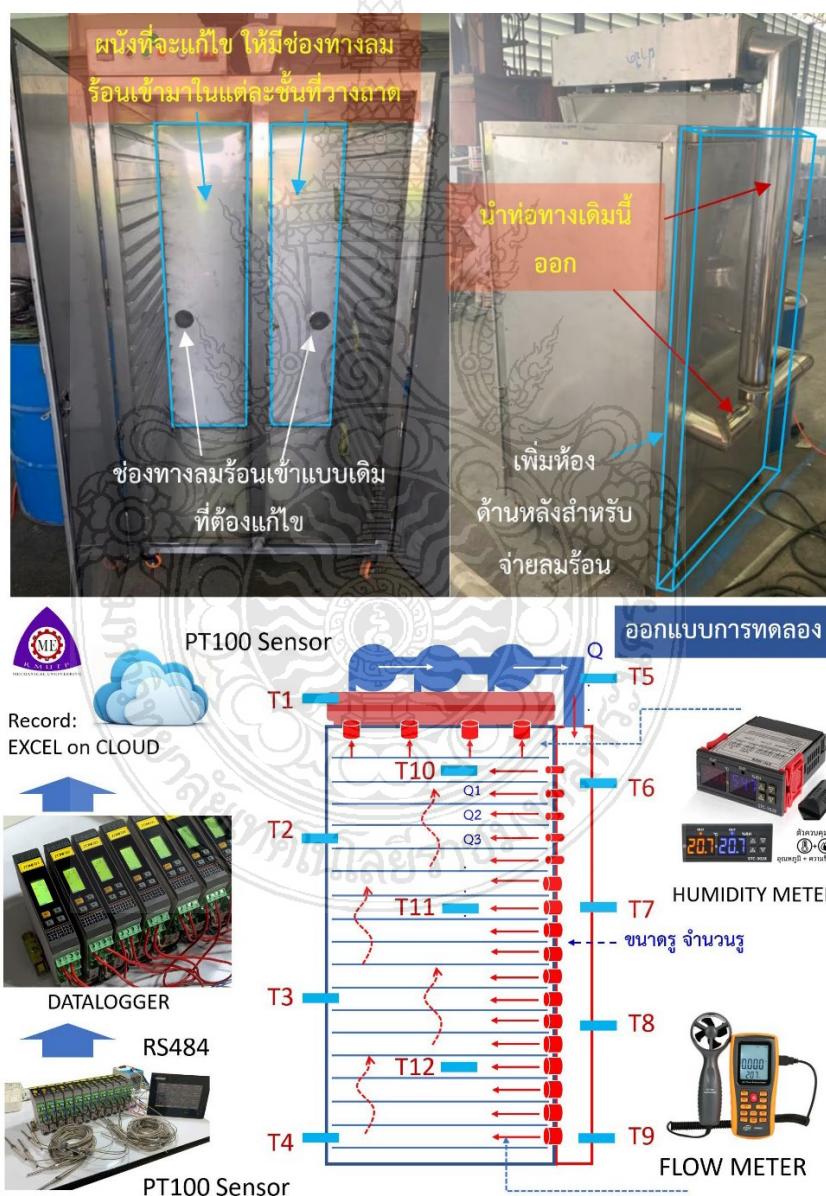
3.1.1 เครื่องมือ วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองศึกษาวิจัย มีดังนี้

- 3.1.1.1 แผ่นสแตนเลสสำหรับผนังตู้ที่มีความหนา 1.2 มิลลิเมตร
- 3.1.1.2 โปรแกรม SolidWorks Flow Simulation สำหรับวิเคราะห์การไหลของลมร้อน
- 3.1.1.3 โปรแกรม SolidWorks สำหรับการออกแบบโมเดลตู้อบลมร้อน
- 3.1.1.4 เครื่อง CNC เครื่องตัดแผ่นโลหะ เครื่องเจาะ และเครื่องเชื่อมอาร์กอน
- 3.1.1.5 เครื่องวัดความเร็วลมแบบใบพัด (Vane Anemometer)
- 3.1.1.6 เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ RTD PT100 (Resistance Temperature Detector) จำนวน 12 ตัวหมายเลข PT100 (Platinum Temperature) โดยตัวเลข 100 หมายถึง ที่อุณหภูมิ 0 °c ค่าความต้านทานภายในของ RTD Sensor จะมีค่าเท่ากับ 100 โอห์ม
- 3.1.1.7 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ Sommy (Din-Rail GTF2 TEMPERATURE CONTROLLER & TRANSMITTER) RS485 Modbus (RTU) communication
- 3.1.1.8 เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data Logger) ในที่นี้เลือกใช้ EMKO PROOP-7L.E และสามารถแสดงผลผ่านหน้าจอ (HMI) และเรียกข้อมูลบันทึก Excel ได้ด้วย
- 3.1.1.9 เครื่องคอมพิวเตอร์ ในการคำนวณเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม SolidWorks Simulation มีปัจจัยในการคำนวณที่สำคัญเนื่องจากการคำนวณของโปรแกรมทางไฟไนต์เอลูเมนต์จำเป็นต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีสมรรถนะสูงเนื่องจากการในสร้างขนาดของกริด (Grid) ที่แบบจำลองมีขนาดเล็กซึ่งเป็นปัจจัยหลักและการคำนวณที่มีเวลาเป็นตัวแปรมาเกี่ยวข้องนั้น การเลือกใช้คอมพิวเตอร์ที่มีสมรรถนะสูงเพื่อให้ได้ผลการคำนวณที่รวดเร็ว และผลการจากการคำนวณที่เที่ยงตรงเพื่อให้ได้มาซึ่งผลการวิเคราะห์ที่สามารถใช้เพื่อในการคาดการณ์หรือเปรียบเทียบกับผลการจำลองการอบความร้อน ซึ่งจะต้องมีความใกล้เคียงจากความเป็นจริงเพื่อเป็นการยืนยันผลจากการคำนวณ

รายละเอียดข้อกำหนดเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ มีดังนี้ 1) หน่วยประมวลผล CPU: AMD Ryzen Threadripper 2990WX 32 Core Processor 2) Mainboard: MSI MEG X399 CREATION (MS-7B92) RAM Corsair 128 GB DDR4/3200 MHz 3) VGA: NVIDIA Quadro RTX 4000 4) Power supply: Thermaltake 850W 80 Plus Gold

3.1.2 กรอบการวิจัย

งานวิจัยนี้เลือกใช้เครื่องมือในการทำวิจัย ประกอบด้วย การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์วอลุ่ม โดยใช้โปรแกรม SolidWorks Simulation ร่วมกับการทดลอง ทำการจำลองและทดลองในบางกรณีเพื่อยืนยันขีดความสามารถในการวิเคราะห์ของโปรแกรมไฟไนต์วอลุ่ม SolidWorks Flow Simulation เมื่อได้รูปแบบการดำเนินงานด้วยวิธีไฟไนต์วอลุ่มที่ถูกต้อง จึงสร้างโมเดลไฟไนต์วอลุ่ม



รูปที่ 3.1 กรอบการวิจัย

เพื่อวิเคราะห์กรณีศึกษาที่เป็นการกระจายลมร้อนในตู้อบขนมที่มีการวางเรียงถาดขนมจำนวนมากภายใน กรอบการวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ส่วนด้วยกัน ประกอบด้วย 1) การนำเข้า (Input) เป็นเรื่องของกรอกแบบรูปแบบตู้อบขนม ขนาดหรือพื้นที่รูทางเข้าตู้อบ จำนวนรูเข้าของลมร้อน ความเร็วลมร้อนที่เข้ามาในตู้อบ อุณหภูมิของลมร้อน 2) ส่วนที่สองเป็นส่วนกระบวนการ (Process) ซึ่งประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์วอลุ่มด้วยโปรแกรม SolidWorks Flow Simulation และการทดลอง และ 3) ผลลัพธ์ (Output) ประกอบด้วย ผลการเปรียบเทียบ การกระจายของอุณหภูมิที่ทั่วถึงทั้งตู้ เส้นทางลมร้อน ความเร็วลมในแต่ละตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.1

3.1.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานสามารถแสดงเป็น Flowchart ได้ดังรูปที่ 3.2 และมีขั้นตอนดังนี้

3.1.3.1 ศึกษาข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และการสืบค้นข้อมูลในวารสารวิชาการต่าง ๆ ประกอบด้วย บทความจากงานวิจัย บทความจากงานสัมมนาทางวิชาการ วิทยานิพนธ์ หนังสือ ตำรา หรือหนังสือชุด (Book series) และศึกษาการทดสอบความแข็งแรงของกันชนรถยนต์ เป็นต้น

3.1.3.2 ศึกษากระบวนการเตรียมการก่อนการวิเคราะห์ (Pre-processing) และขั้นตอนการวิเคราะห์ (Solve-processing) จากการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมา เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบหรือเป็นข้อมูลในกระบวนการทั้งสอง ซึ่งโครงการวิจัยนี้เลือกใช้โปรแกรม SolidWorks Flow Simulation

3.1.3.3 สร้างโมเดลสามมิติด้วยโปรแกรม SolidWorks โดยใช้ขนาดตามที่วัดจริงจากตู้อบเบเกอรี่ที่มีอยู่ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของหลายเชิงคำนวณ

3.1.3.4 สร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิในตู้อบเบเกอรี่โดยใช้โปรแกรม SolidWorks Flow Simulation

3.1.3.5 นำโมเดลเข้าสู่โปรแกรม SolidWorks Flow Simulation ตั้งค่ารูปแบบการจำลอง และการสร้างรูปแบบ Mesh วิเคราะห์ผลการจำลอง

3.1.3.6 ติดตั้งเครื่องมือวัดบันทึกผล และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิเข้ากับตู้อบเบเกอรี่ เชื่อมต่อระบบเข้ากับอินเตอร์เน็ตเพื่อบันทึกข้อมูลลงคลาวด์

3.1.3.7 ดำเนินการทดสอบการจ่ายลมร้อนและบันทึกผลอุณหภูมิเทียบเวลาผ่านระบบคลาวด์จนกระทั่งถึงสภาวะคงตัว (Steady State) และทดลองในกรณีอื่นตามรูปแบบการเปลี่ยนตัวแปร บันทึกผลการทดลองทั้งหมด

3.1.3.8 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CFD และการทดลอง

3.1.3.9 วิเคราะห์ตัวแปรที่ส่งผลต่อการกระจายลมร้อน และกำหนดวิธีการแก้ไขการกระจายลมร้อนที่ไม่เหมาะสมในช่วงสภาวะไม่คงตัว ซึ่งก็คือการออกแบบปรับแต่งโครงสร้างตู้อบเบเกอรี่ใหม่ในบางส่วนหรือบางจุด

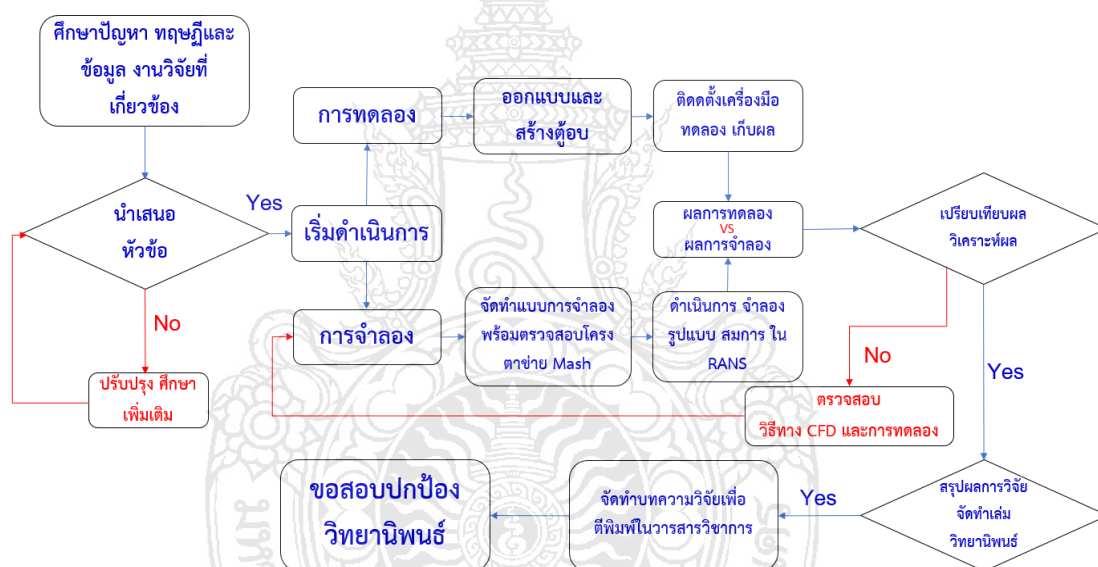
3.1.3.10 ปรับแต่งโมเดลสามมิติในข้อ 3.1.3.3 ภายใต้การพาความร้อนแบบบังคับ โดยใช้โปรแกรม SolidWorks ปรับตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ประกอบด้วย ความยาว การสร้างห้องสะสมความร้อน การปรับโครงสร้างให้สมมาตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อที่จ่ายลมร้อนเข้าตู้อบ ความเร็วลมในการจ่ายที่ออกมาจากพัดลมร้อน ค่าความร้อนที่สร้างขึ้นด้วยฮีตเตอร์

3.1.3.11 วิเคราะห์ผลการทดสอบและผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม SolidWorks Flow Simulation เพิ่มเติม

3.1.3.12 ตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานวิจัย ในรูปแบบบทความวิจัย ซึ่งอาจนำเสนอในวารสารทางวิชาการที่อยู่ในฐานข้อมูลภายในประเทศ

3.1.3.13 สรุปผลการดำเนินงาน เขียนเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

3.1.3.14 ดำเนินการสอบวิทยานิพนธ์



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.2 การสร้างโมเดลตู้อบลมร้อน 3 มิติ

ตู้อบลมร้อนมีลักษณะเป็นตู้สี่เหลี่ยมมีขนาดกว้างxยาวxสูง เท่ากับ 100x88.5x200 เซนติเมตร สร้างขึ้นในรูปแบบ Part ที่เป็นวัตถุหลายชิ้นประกอบกัน (Multibody) รูปแบบโมเดลตู้อบลมร้อนมี 3 รูปแบบ คือ

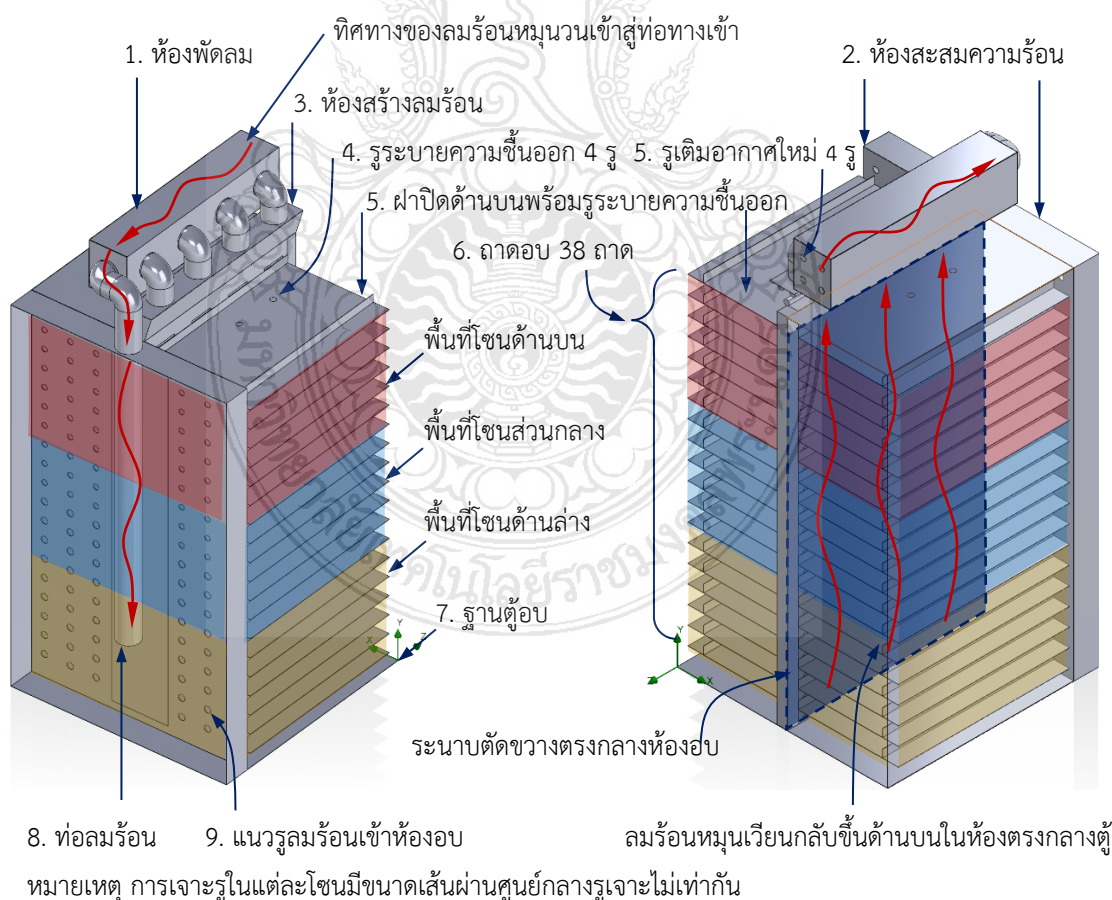
รูปแบบที่ 1 โมเดล 3 มิติ สำหรับตู้อบลมร้อนแบบเดิมที่มีขนาดและมิติเป็นไปตามตู้อบลมร้อนของจริงที่มีอยู่ดังรูปที่ 3.4 และรูปที่ 3.5 เป็นโมเดลที่มีท่อนำพาความร้อนต่อระหว่างห้องสร้างความร้อนไปยังห้องอบด้านในที่มีการวางตำแหน่งท่อลมไม่สมมาตร โมเดลรูปแบบที่ 1 นี้มีทั้งตู้ที่เป็นของจริง (รูปที่) และตู้ที่เป็นแบบจำลอง (รูปที่ 3.4 a และ b) ใช้เพื่อการเปรียบเทียบผลระหว่างการ

วิเคราะห์ด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณและการทดลอง และศึกษาเส้นทางการไหลของความร้อน การแพร่กระจายลมร้อนเพื่อการวิเคราะห์ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง นำไปสู่การออกแบบโมเดลตู้อบใหม่

รูปแบบที่ 2 โมเดล 3 มิติ สำหรับตู้อบลมร้อนที่มีการปรับปรุงท่อนำพาความร้อนไปยังห้องอบ ด้านใน ซึ่งแต่เดิมนั้นจะมีการวางเรียงท่อนำความร้อนที่ไม่สมมาตรทำให้ลมร้อนกระจายเข้าตู้อบไม่เท่าเทียมกัน ดังนั้นจึงปรับการวางท่อลมร้อนให้มีลักษณะสมมาตรดังรูปที่ 3.4 c และ d

รูปแบบที่ 3 โมเดล 3 มิติ สำหรับตู้อบลมร้อนที่มีการปรับปรุงเพิ่มห้องสะสมลมร้อนไว้ด้านหลังตู้อบเพื่อใช้ในการกระจายลมร้อนเข้าไปยังภายในของตู้อบผ่านรูลมร้อนที่มีขนาดแตกต่างกัน โดยแบ่งขนาดของรูลมร้อนออกเป็น 3 โซน คือ พื้นที่โซนด้านล่าง พื้นที่โซนตรงกลาง และพื้นที่โซนด้านบน โดยให้รูลมร้อนที่อยู่โซนด้านล่างมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าโซนตรงกลาง และรูลมร้อนโซนตรงกลางใหญ่กว่ารูลมร้อนโซนด้านบน จากนั้นทำการนำท่อนำความร้อนต่อตรงไปยังด้านล่างของห้องสะสมลมร้อน เพื่อให้ความร้อนที่สร้างขึ้นจากฮีตเตอร์วิ่งลงมาอยู่ที่ด้านล่างของตู้อบเพื่อกระจายขึ้นสู่ด้านบน ดังรูปที่ 3.4 e และ f

โมเดลทั้ง 3 รูปแบบมีโครงสร้างและส่วนประกอบดังรูปที่ 3.3



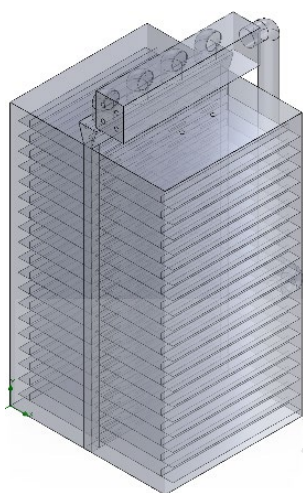
รูปที่ 3.3 โครงสร้างและส่วนประกอบของตู้อบลมร้อน

3.3 สร้างแบบจำลองทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

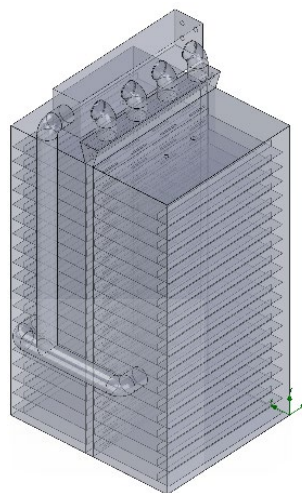
การวิจัยนี้วิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลภายใต้สภาวะคงตัว (Steady state) สมการควบคุม (Governing equation) ที่เลือกใช้เป็นโมเดลการไหลแบบปั่นป่วน ตามแบบจำลองของ $k-\epsilon$ เปรียบเทียบผลของค่าอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองจริง โดยกำหนดเงื่อนไข พลังงานไฟฟ้าที่ป้อนเข้าฮีตเตอร์ต้องรักษาอุณหภูมิของระบบให้อยู่ที่ 80°C ความเร็วลม 10, 15 และ 20 m/s เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทำนายผลของอุณหภูมิจากโปรแกรม CFD และการทดลองเพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง

แบบจำลอง 3D ถูกสร้างขึ้นด้วยโปรแกรม SolidWorks ดังรูปที่ 3.4 กำหนดการไหลเป็นแบบไหลภายใน (Internal Flow) มีปริมาตรของช่องไหลที่วิเคราะห์ (Fluid volume) เท่ากับ 1.52354 m^3 ของไหลเกิดการถ่ายเทความร้อนและพาความร้อน กำหนดค่า Gravity ในทิศทางแกน y เท่ากับ -9.81 m/s^2 กำหนดของไหลเป็นอากาศ (Air) มีความหนาแน่นอากาศ 1.168 kg/m^3 ค่าความหนืดจลน์ เท่ากับ 0.00001855 kg/m s สำหรับสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการสร้างตู้อบเป็น Stainless Steel 321 มีความหนาแน่น $8,100\text{ kg/m}^3$ มีค่าการนำความร้อนและค่าความร้อนจำเพาะเป็นไปตามรูปที่ 3.5 เลือกรูปแบบการไหลเป็น Laminar และ Turbulent กำหนด Wall thermal condition เป็น Adiabatic wall ผิวราบเรียบ กำหนดความดันอากาศเป็น $101,325\text{ Pa}$ อุณหภูมิของอากาศเริ่มต้น 28°C และอุณหภูมิของวัสดุตู้อบเริ่มต้นเป็น 28°C เช่นกัน การกำหนดเงื่อนไขขอบ (Boundary Conditions) กำหนดดังต่อไปนี้

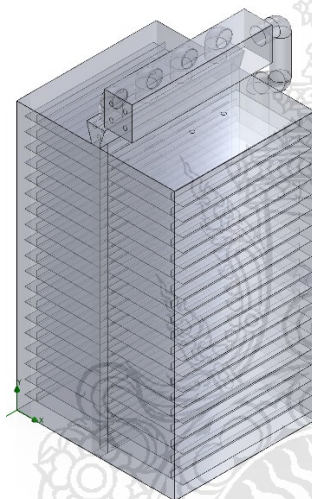
1. ที่ช่องทางอากาศภายนอกเข้ามาเติม (Inlet) ด้วยอัตราการไหลเข้าของอากาศ (Q_{in}) เท่ากับ $0.000393\text{ m}^3/\text{s}$ (เป็นค่าความเร็วลมที่วัดได้จากการทดลอง)
2. ช่องทางอากาศออกสู่ภายนอกกำหนดเป็นความดันบรรยากาศ (Environment pressure, P_{atm}) เท่ากับ $101,325\text{ Pa}$
3. กำหนดความเร็วของพัดลมเป็นแบบภายใน (Internal fan) 4 ตัว ด้วยความเร็วเชิงมุม 282 rad/s ที่ส่งผ่านลมร้อนออกไปด้วยความเร็ว 10 m/s (วัดได้จากการทดลอง) และสามารถปรับอัตราการไหลลงได้ด้วยการลดการทำงานของพัดลมที่ละตัวเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลง ท่อมีความราบเรียบไม่ขรุขระ
4. ผนังตู้อบลมร้อนเป็นแบบ Adiabatic จากการติดตั้งฉนวนทั้งหมด ไม่มีการสูญเสียความร้อนออกที่ผนังทุกด้าน ทั้งนี้อาจแตกต่างจากการทดลอง ซึ่งในการทดลองไม่สามารถทำได้
5. แท่งฮีตเตอร์จำนวน 3 แท่ง ที่สามารถจ่ายความร้อนได้สูงถึง $4,500\text{ วัตต์}$ และสามารถปรับลดกำลังไฟลงได้ตามกรณีศึกษานั้นๆ
6. กำหนดอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมและอุณหภูมิตู้อบอยู่ที่ 28°C เป็นอุณหภูมิเริ่มต้นการทำงาน
7. ค่าการนำความร้อนและค่าความร้อนจำเพาะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิตามรูปที่ 3.5



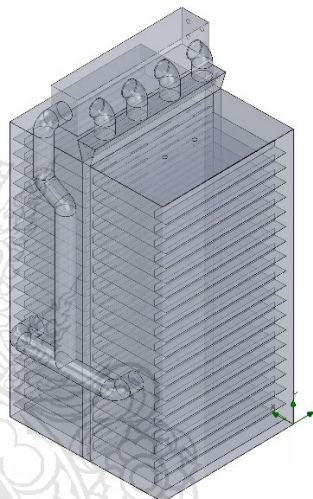
a) ตู้อบลมร้อนแบบเดิมในมุมมองด้านหน้าใส่ถาด



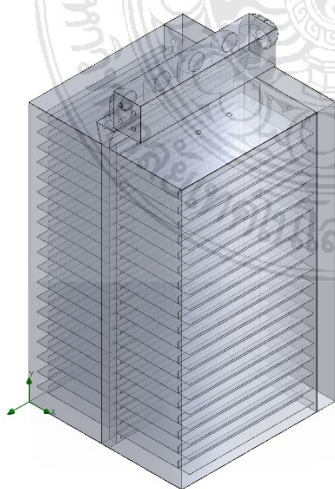
b) ตู้อบลมร้อนแบบเดิมในมุมมองด้านหลังใส่ถาด



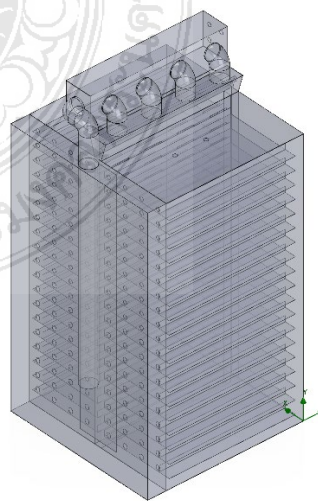
c) ตู้อบลมร้อนแบบที่ 1 ในมุมมองด้านหน้า



d) ตู้อบลมร้อนแบบที่ 1 ในมุมมองด้านหลัง

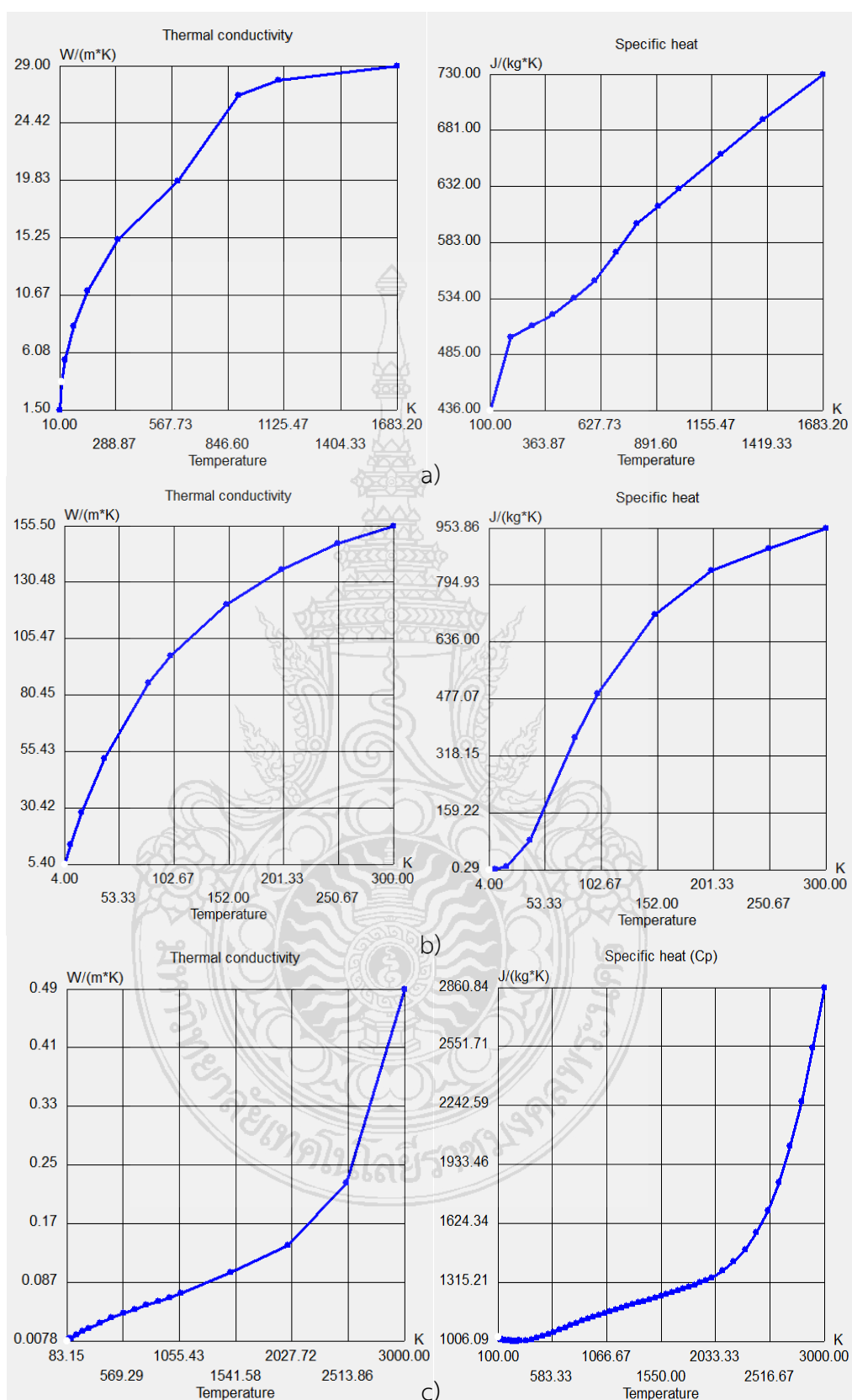


e) ตู้อบลมร้อนแบบที่ 2 ในมุมมองด้านหน้า



f) ตู้อบลมร้อนแบบที่ 2 ในมุมมองด้านหลัง

รูปที่ 3.4 แบบจำลองตู้อบลมร้อนสำหรับการวิเคราะห์ CFD



รูปที่ 3.5 ค่าการนำความร้อนและค่าความร้อนจำเพาะของ a) Stainless Steel 321

b) Aluminum 6061 และ c) อากาศ

3.4 การเตรียมเครื่องมือและการดำเนินงานสำหรับการเก็บผลทดลอง

3.4.1 ตู้อบความร้อนขนาด กว้าง×ยาว×สูง เท่ากับ 100×88.5×200 เซนติเมตร ที่มีกำลังของฮีตเตอร์ไฟฟ้า 3 แท่งเท่ากับ 4,500 วัตต์ มีพัฒนาผลความร้อนจำนวน 4 ตัว หมุนด้วยความเร็วรอบคงที่ 2,700 รอบต่อนาที ที่จ่ายอัตราการไหลแต่ละตัวได้เท่ากับ $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ภายในสามารถบรรจุถาดอบที่มีขนาดกว้าง×ยาวเท่ากับ 40×80 เซนติเมตร ได้สองด้านคือด้านซ้ายและด้านขวา และแต่ละด้านจะมีฐานรองยื่นออกมาไว้สำหรับวางถาดฝั่งละ 19 ฐานรอง รวมเป็น 38 ฐานรอง รองรับถาดจำนวน 38 ถาด ดังรูปที่ 3.6

3.4.2 สร้างชุดเครื่องมือสำหรับการเก็บข้อมูล (Datalogger) โดยเตรียมอุปกรณ์ตามรายการดังต่อไปนี้

3.4.2.1 เครื่องบันทึกข้อมูลอุณหภูมิ เลือกใช้ EMKO Proop.black-7L เชื่อมต่อ Ethernet, Ethernet + Wi-Fi, Wi-Fi และเชื่อมต่อกับเครื่องควบคุมและอ่านค่าอุณหภูมิผ่าน Modbus-RTU ที่สามารถแสดงผลผ่านหน้าจอ (HMI) และเรียกข้อมูลบันทึก Excel ได้ด้วย

3.4.2.2 เซนเซอร์วัดอุณหภูมิประเภท PT100 (Resistance Temperature Detector, RTD) จำนวน 12 ตัว หมายเลข PT100 (Platinum Temperature) โดยตัวเลข 100 หมายถึง ที่อุณหภูมิ 0°C ค่าความต้านทานภายในของ RTD Sensor จะมีค่าเท่ากับ 100 โอห์ม

3.4.2.3 เครื่องควบคุมอุณหภูมิและส่งสัญญาณ ยี่ห้อ Sommy เลือกใช้ GTF2-IM28 Temp Controller แสดงผลการวัด ควบคุมสัญญาณขาออก สัญญาณเตือน ออกแบบอะนาล็อกสื่อสารผ่าน RS485, Modbus-RTU มีค่า Sample rate เท่ากับ 2 times/second ดังรูปที่ 3.7 และรูปที่ 3.8

3.4.2.4 ตู้คอลโทรล ขนาด 350×520×170 มิลลิเมตร ดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ เข้าด้วยกัน ประกอบตู้บันทึกผลและอุปกรณ์และทำการสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิ และใช้ Node-RED เป็นเครื่องมือในการเขียนโปรแกรมแบบโพล์เพื่อพัฒนาแอปพลิเคชัน Internet of Things (IoT) ในการเก็บข้อมูลลงคลาวด์และสังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของการอบแบบเรียลไทม์ และใช้ใน IoT Gateway

3.4.3 เครื่องมือวัดความเร็วลม (Lutron AM 4201 Digital Anemometer) ความละเอียด 0.1 m/s และความแม่นยำ $\pm 2\% + 1 \text{ d}$ ตามมาตรฐาน ISO-9001, CE, IEC1010

3.4.4 ติดตั้งฉนวนกันความร้อนที่ผนังของตู้อบลมร้อนด้านซ้าย ด้านขวา และด้านหลัง

3.4.5 ติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ PT100 จำนวน 12 จุด ไว้ที่ด้านข้างของตู้อบ ให้หัววัดอุณหภูมิยื่นเข้าไปในตู้อบ ดังรูปที่ 3.6

3.4.6 ติดตั้งตู้บันทึกผลไว้ด้านหลังของตู้อบลมร้อน ไม่ให้ได้รับความร้อนจากตู้อบ ดังรูปที่ 3.9

3.4.7 ติดตั้งสายอินเทอร์เน็ตเพื่อเก็บข้อมูลการบันทึกลงระบบ Cloud

3.4.8 ทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ ประกอบด้วย การทำงานของเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (ตั้งอุณหภูมิสำหรับการอบที่ 80°C) การทำงานของ Datalogger การทำงานของพัดลมและฮีตเตอร์ และการทำงานของอุปกรณ์ในตู้ควบคุมการทำงาน ซึ่งเก็บข้อมูลแบบเรียลไทม์ ดังรูปที่ 3.10

3.4.9 ทดลองและเก็บข้อมูลอุณหภูมิโดยแยกเป็นรายกรณีศึกษาต่างๆ ดังนี้

- กรณีที่ 1 ไม่มีฉนวนในตู้อบ เพื่อตรวจสอบการกระจายความร้อนเบื้องต้น โดยใช้กำลังฮีตเตอร์สูงสุด ที่ความเร็วลมของพัดลม 10 m/s

- กรณีที่ 2 ใส่ฉนวนในตู้อบจำนวน 38 ฉาก เพื่อตรวจสอบการกระจายความร้อน โดยใช้กำลังฮีตเตอร์สูงสุด ที่ความเร็วลมของพัดลม 10 m/s

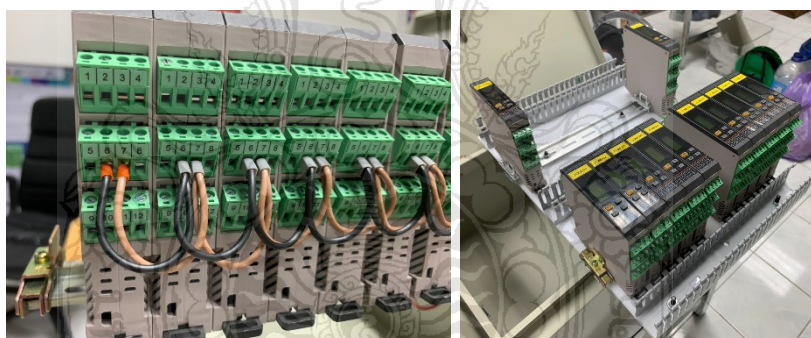
ทั้งนี้ช่องทางเติมอากาศจะอยู่ด้านบนตู้ ในส่วนด้านหน้าพัดลมเพื่อให้พัดลมช่วยในการเติมอากาศใหม่เข้ามา และช่องทางระบายอากาศออก ในกรณีมีผลิตภัณฑ์จะเป็นช่องทางปล่อยความชื้นออกไปจากตู้

ในการทำงานของตู้อบลมร้อนนี้จะดำเนินการภายใต้การพิจารณาการกระจายของลมร้อน โดยไม่มีการใส่ผลิตภัณฑ์สำหรับการอบใดๆ จึงไม่ต้องคำนึงถึงการควบคุมความชื้น อุณหภูมิสำหรับการทดสอบและจำลองอยู่ที่ 80°C แ่งฮีตเตอร์แต่ละแ่งมีกำลัง $1,500$ วัตต์จำนวน 3 แ่ง พัดลมดูดจ่ายลมร้อนจำนวน 4 ตัวๆ ละ 250 วัตต์ หมุนด้วยความเร็ว $2,700$ รอบต่อนาที สามารถให้อัตราการไหลรวมได้เท่ากับ $0.046\text{ m}^3/\text{s}$ และจ่ายออกไปยังทางออกเข้าตู้อบจำนวน 2 ช่องทางด้วยท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน คือ 100 มิลลิเมตร โดยจ่ายไปทางด้านขวาและด้านซ้ายด้วยอัตราการไหล 0.026 และ $0.021\text{ m}^3/\text{s}$ ตามลำดับ มีช่องปล่อยลมร้อนออกจำนวน 4 รูที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร แต่ละรูให้อัตราการปล่อยความร้อนออกที่ $0.001\text{ m}^3/\text{s}$ รวมทั้ง 4 รูเท่ากับ $0.004\text{ m}^3/\text{s}$ มีช่องเติมอากาศใหม่เข้าไปที่ช่องทางดูดของพัดลมด้วยอัตราการไหลเข้า $0.000393\text{ m}^3/\text{s}$ การทดลองจะดำเนินการจนกระทั่งถึงสภาวะคงตัว (Steady state) ซึ่งตั้งอุณหภูมิห้องอบไว้ที่ 80°C

ในกรณีที่จะดำเนินการทดลองโดยมีการปรับลดกำลังไฟของแ่งฮีตเตอร์ สามารถทำได้โดยตรงด้วยการปลดสายไฟที่ต่อเข้าฮีตเตอร์ออกดังรูปที่ 3.11 และกรณีที่ต้องการปรับลดอัตราการไหลหรือความเร็วลมของมอเตอร์พัดลม สามารถทำได้โดยการตัดการจ่ายไฟฟ้าไปยังมอเตอร์พัดลม ดังรูปที่ 3.12 ในการดำเนินการปลดสายไฟของมอเตอร์และสายไฟของแ่งฮีตเตอร์จะต้องทำการปิดสวิตช์เบรกเกอร์ลงทั้งหมดและหยุดการทำงานเพื่อความปลอดภัย สำหรับการบันทึกข้อมูลลงในเครื่องบันทึกข้อมูลอุณหภูมิจะสามารถบันทึกได้อย่างต่อเนื่องตามวันและเวลาสำหรับการเรียกข้อมูลออกมานั้นสามารถกำหนดวันและเวลาในการจัดเก็บได้และสามารถนำออกผ่านทางระบบข่าวด้วยการดาวน์โหลดและบันทึกเป็นไฟล์ Excel ตลอดระยะเวลาที่ทำการทดลองจะต้องตรวจสอบอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงและแสดงอยู่บนหน้าจอเพื่อสังเกตแนวโน้มของการกระจายลมร้อนไปยังตำแหน่งต่างๆ ของตู้อบเพื่อประกอบการพิจารณาในการปรับปรุงตู้อบให้มีการกระจายความร้อนที่ดีขึ้น



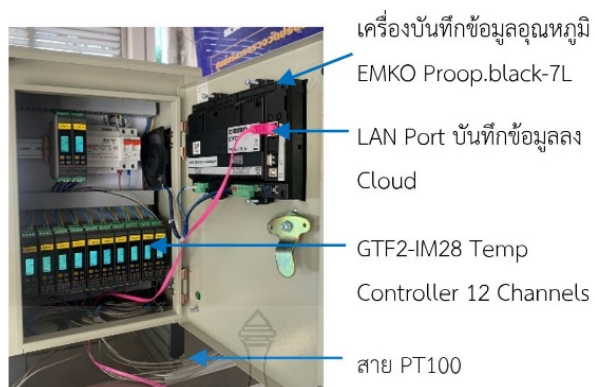
รูปที่ 3.6 ตู้อบลมร้อนและตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ



รูปที่ 3.7 การวางตำแหน่งอุปกรณ์เครื่องบันทึกผลและการเชื่อมต่อผ่าน RS485



รูปที่ 3.8 Sommy GTF2-IM28 Temp Controller และ PT100



รูปที่ 3.9 ตู้บันทึกผลและอุปกรณ์

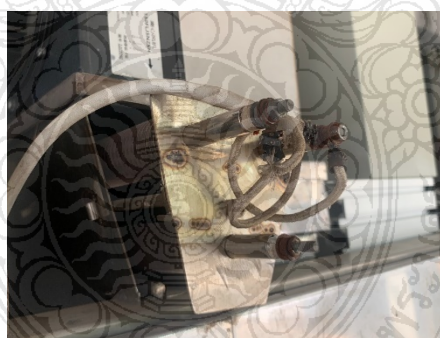


a) GTF2-IM28 Temp Controller



b) EMKO Proop.black-7L Datalogger

รูปที่ 3.10 อุปกรณ์ประกอบเครื่องมือวัดค่าอุณหภูมิ



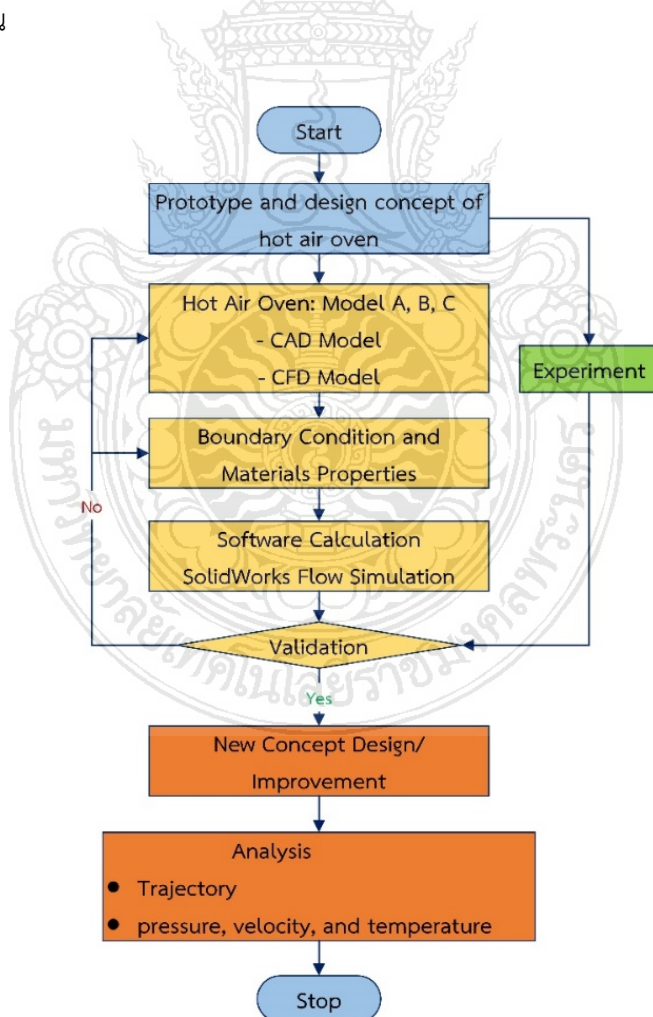
รูปที่ 3.11 การตัดกำลังไฟของแท่งฮีตเตอร์



รูปที่ 3.12 การลดกำลังลมด้วยการตัดการทำงานของมอเตอร์พัดลม

3.5 การเปรียบเทียบผลการจำลองและการทดลอง

การเปรียบเทียบผลการทดลองจะกระทำในช่วงของสภาวะคงตัว จะพบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการกระจายความร้อนในแต่ละตำแหน่งของตู้อบลมร้อน ซึ่งได้ติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิไว้ทั้งหมด 12 ตำแหน่งด้วยกัน ประกอบไปด้วยด้านขวาของตู้อบ 6 ตำแหน่ง และด้านซ้ายของตู้อบอีก 6 ตำแหน่ง ซึ่งแต่ละฝั่งของตู้อบจะมีตำแหน่งเซ็นเซอร์ที่อยู่ตรงข้ามกัน เมื่อทำการบันทึกผลการทดลองของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจึงนำไปเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่วิเคราะห์ได้จากพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณด้วยโปรแกรม SolidWorks Flow Simulation ซึ่งในการทดลองนี้จะกำหนดที่สภาวะใดสภาวะหนึ่งเท่านั้นเพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองและการทดลองและยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ จากรูปที่ 3.13 หากการเปรียบเทียบผลทั้งสองวิธีต่างกันมากกว่า 10% จะต้องย้อนกลับไปตรวจสอบกระบวนการทดลองและการวิเคราะห์ด้วย CFD สำหรับการวิเคราะห์ด้วย CFD จำเป็นต้องย้อนไปพิจารณาเงื่อนไขขอบที่กำหนดว่าเหมาะสมและถูกต้องหรือไม่ การเลือกเครื่องมือหรือโมเดลการวิเคราะห์เหมาะสมหรือไม่ จนกระทั่งทั้งสองวิธีให้ผลลัพธ์ไปในทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 3.13 ภาพรวมของกระบวนการดำเนินงานเพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองและวิเคราะห์

บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

จากการดำเนินงานในบทที่ 2 ได้มีการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องในเรื่องของการอบลมร้อนโดยการใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณและนำไปสู่การศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง เช่น ทฤษฎีทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ทฤษฎีการออกแบบตู้อบลมร้อน จึงสามารถสรุปเป็นช่องว่างของการทำวิจัยและกำหนดเป็นโจทย์การวิจัยดังที่กล่าวมา รวมทั้งแผนการดำเนินงาน ระเบียบวิธีวิจัย ดังบทที่ 3 ได้ทำการนำเสนอเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงาน การสร้างชุดเครื่องมือสำหรับการบันทึกผล การสร้างโมเดลสามมิติ การสร้างแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ การออกแบบการทดลองและการเปรียบเทียบผลการทดลอง ดังนั้นจึงเข้าสู่ในบทที่ 4 ว่าด้วยเรื่องของผลการดำเนินงาน ประกอบด้วยผลการทดลองและผลการจำลองทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ รวมทั้ง โดยมีรายละเอียดดังหัวข้อต่างๆ ต่อไปนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

การวิเคราะห์ผลในช่วงสภาวะคงตัว (Steady State) ถูกนำมาใช้ในการพิจารณาการกระจายลมร้อนในตู้อบลมร้อน ด้วยวัตถุประสงค์ของการวิจัยกำหนดไว้ในด้านการศึกษาการกระจายลมร้อน ดังนั้นการวิเคราะห์ด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณด้วยโปรแกรม SolidWorks Flow Simulation จะต้องกำหนดสเกลบาร์ที่เป็นแถบแสดงผลอุณหภูมิให้เท่ากันและใช้ชุดสีอุณหภูมิเดียวกันทุกกรณีจึงจะสามารถนำผลการศึกษามาเปรียบเทียบกันได้ และเงื่อนไขขอบในการศึกษาต้องกำหนดให้เท่ากันในแต่ละค่าของทุกกรณีศึกษาเช่นกัน สิ่งที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นการปรับเปลี่ยนมิติทางโครงสร้าง เช่น การปรับเปลี่ยนตำแหน่งท่อทางเข้า การปรับขนาดท่อทางเข้า การสร้างห้องสะสมลมร้อน เป็นต้น ซึ่งมีการศึกษาเชิงเทคนิคโดยแบ่งเป็นกรณีศึกษาต่างๆ ดังต่อไปนี้

4.1.1 กรณีศึกษาที่ 1 ตู้อบลมร้อนแบบเดิมไม่บรรจุถาด และบรรจุถาด

การดำเนินงานวิจัยจำเป็นต้องศึกษาสภาวะเดิมจากโครงสร้างตู้อบแบบเดิม เพื่อตรวจสอบการกระจายลมร้อนทั้งวิธีการทดลองและวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ใช้เป็นข้อมูลในการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองที่เป็นการใช้ตู้แบบเดิมและผลจากการจำลองทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ นอกจากนั้นยังใช้เป็นข้อมูลในการเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์เมื่อได้ทำการเปลี่ยนแปลงรูปแบบชิ้นส่วนโครงสร้างในบางตำแหน่งหรือบางอย่างต่อไป

รูปแบบโครงสร้างของตู้แบบเดิมนั้นจากรูปที่ 3.4 a) และ b) และรูปที่ 4.1 พบว่าท่อทางลมร้อนที่ติดตั้งอยู่ด้านหลังเป็นท่อนำส่งความร้อนหรือเป็นท่อทางเข้าของลมร้อนไปยังตู้ด้านในมีการวางตำแหน่งของท่อลมร้อนไม่สมมาตรทำให้ความร้อนวิ่งเข้าสู่ห้องทางด้านซ้ายและห้องทางด้านขวาของ

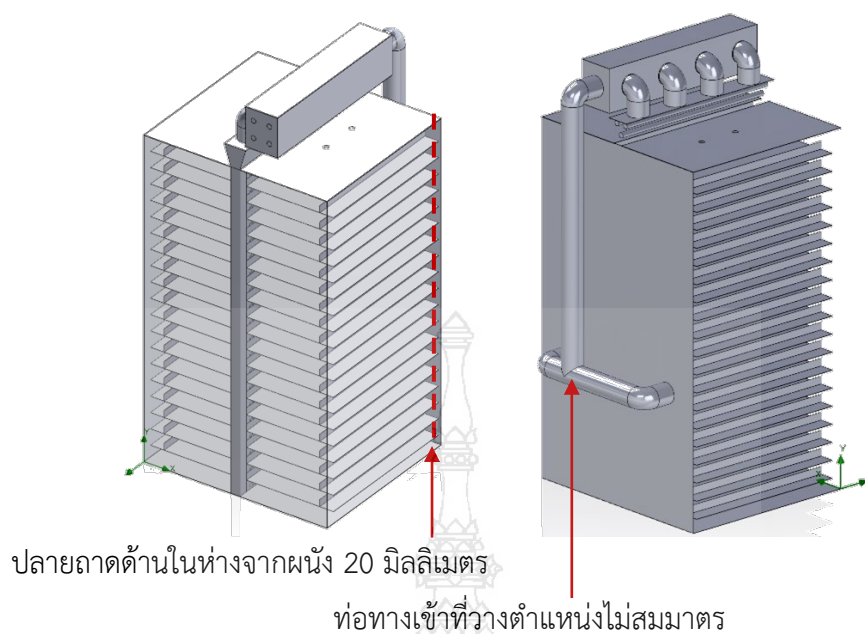
ต้อบไม่เท่ากัน นั้นหมายถึงอัตราการไหลที่เข้าไปในห้องอบแตกต่างกันทั้งสองฝั่งเป็นผลให้การกระจายลมร้อนไม่เหมาะสม

จากรูปที่ 4.2 ไม่มีการบรรจุถาด เป็นการศึกษาการกระจายของลมร้อนในสภาวะไม่บรรจุถาด เนื่องด้วยท่อนำส่งลมร้อนซึ่งอยู่ด้านหลังต้อบมีการจัดวางตำแหน่งไม่อยู่ตรงกลาง (ไม่สมมาตร) ส่งผลให้ท่อทางขวาของต้อมีระยะทางที่สั้นกว่า ลมร้อนจึงไหลไปตามท่อที่สะดวกกว่า ลมร้อนจึงกระจายไม่ทั่วกันทั้งต้อบ ตำแหน่งของรูท่อนำส่งลมร้อนที่เป็นท่อทางเข้ามี 2 รู ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm หนา 1.4 mm ที่ถูกเจาะเข้าไปยังต้อบนั้นอยู่สูงจากฐานของต้อบเป็นระยะ 0.6 m จึงทำให้พื้นที่ด้านล่างนั้นมีการกระจายของลมร้อนที่ต่ำกว่าด้านบนและด้วยเหตุที่ลมร้อนจะลอยตัวขึ้นสู่ที่สูงจึงส่งผลให้ความร้อนในด้านบนจะสูงกว่าด้านล่าง หากปล่อยเวลาให้นานขึ้นมากกว่า 2 ชั่วโมงขึ้นไป พบว่าการกระจายของลมร้อนทั่วทั้งต้อมันจะเข้าสู่สภาวะคงตัว นั่นคืออุณหภูมิอากาศทั้งไว้ที่ 80 °C ก็จะมีอุณหภูมิทั่วทั้งต้อมันทั้งด้านซ้ายและด้านขวา ด้านบนและด้านล่างใกล้เคียงกันอยู่ที่ 80 °C แม้ว่าเมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัวอุณหภูมิทั่วทั้งต้อบอาจแตกต่างกันไม่มาก แต่ในช่วงสภาวะไม่คงตัวจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่อบได้รับความร้อนสูงและต่ำแตกต่างกันมาก รูปที่ 4.3 คือเส้นทางการไหลของลมร้อนพบว่ามีเส้นทางการเคลื่อนที่ในฝั่งที่ลมร้อนเข้าได้สะดวกมากกว่า

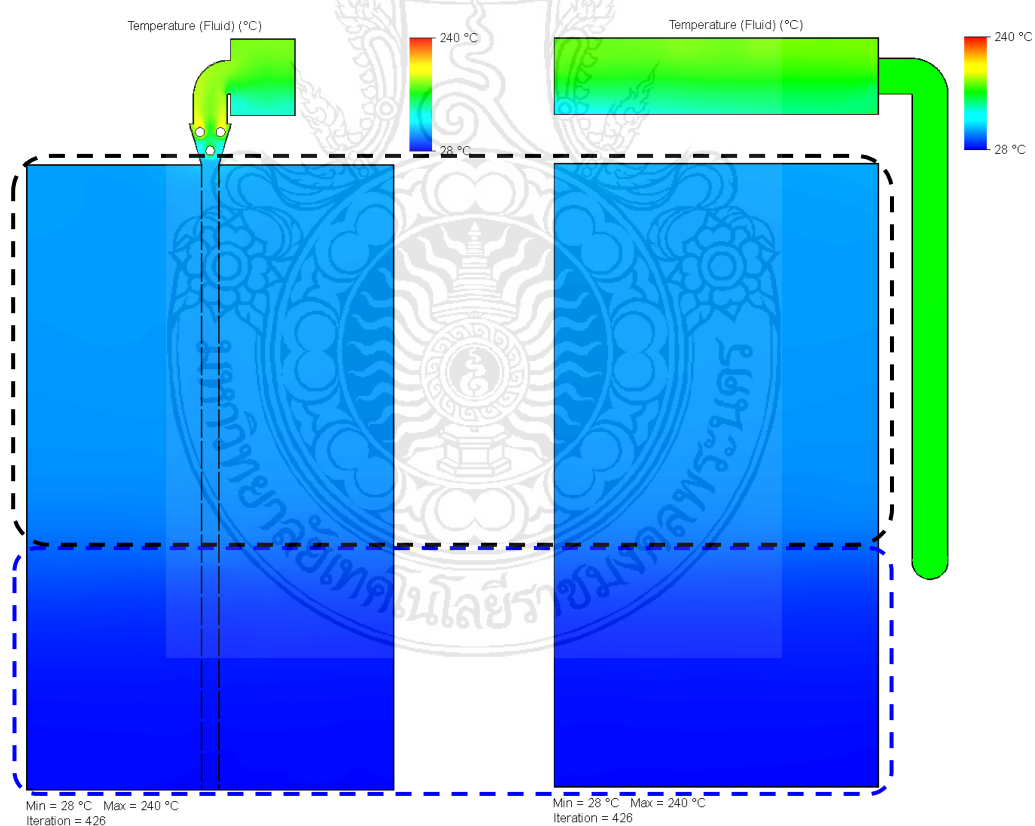
จากรูปที่ 4.4 เป็นการศึกษาในกรณีที่มีการบรรจุถาดจำนวน 38 ถาด แบ่งเป็นห้องอบด้านขวา 19 ถาดและห้องอบด้านซ้าย 19 ถาด ลมร้อนจะถูกบังคับให้ไหลไปตามท่อทางเช่นเดียวกับผลการวิเคราะห์ในรูปที่ 4.2 เพียงแต่มลร้อนที่กระจายเข้าสู่ห้องอบนั้นจะมีถาดเป็นตัวบังคับไม่ให้ลมร้อนกระจายขึ้นสู่ด้านบนได้อย่างรวดเร็ว ความร้อนจะต้องแพร่กระจายไปยังโซนด้านขวาและโซนด้านซ้าย จะสังเกตเห็นได้ว่า ถาดได้เข้ามาขวางเส้นทางการไหลของลมร้อนขึ้นไปสู่ข้างบนหรือลงข้างล่าง ทำให้ความร้อนกระจุกตัวอยู่ในบริเวณแนวระดับตรงหน้าตำแหน่งท่อทางลมร้อนเข้า ดังนั้นผลิตภัณฑ์ในพื้นที่บริเวณโซนนี้อาจจะได้รับความเสียหายก่อน หลังจากนั้นลมร้อนจะแพร่กระจายขึ้นไปทางด้านบนของต้อบเร็วกว่าการกระจายลมร้อนลงสู่ด้านล่าง มีเส้นทางการเคลื่อนที่ของลมร้อนดังรูปที่ 4.5

4.1.2 กรณีศึกษาที่ 2 ปรับปรุงตำแหน่งท่อทางเข้าของลมร้อนให้สมมาตร

จากต้อบลมร้อนในรูปที่ 4.1 และผลลัพธ์ดังรูปที่ 4.2-4.3 ซึ่งมีความไม่สมมาตรของท่อทางเข้า ลมร้อนได้ถูกปรับปรุงใหม่ให้ท่อทางเข้ามีความสมมาตรวิ่งตรงและกระจายออกไปยังห้องอบด้านขวาและห้องอบด้านซ้ายอย่างเท่าเทียมดังรูปที่ 4.6 ซึ่งท่อลมร้อนทางเข้าทั้ง 2 รู มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm จะยังคงอยู่สูงจากฐานของต้อบที่ระยะ 0.6 m ดำเนินการวิเคราะห์ใหม่โดยใช้เงื่อนไขขอบและรูปแบบเดิมได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.7-4.8 พบว่าความร้อนเกิดการกระจายตัวไปยังห้องอบทางด้านซ้ายและด้านขวาอย่างเท่าเทียมมีการกระจายของลมร้อนในลักษณะของปั่นป่วนทำให้เกิดข้อดีในด้านการกระจายลมร้อน จากรูปในรูปที่ พบว่าการวิเคราะห์ในช่วงสภาวะไม่คงตัวนี้ถือว่าเป็นแนวโน้มและแนวทางที่น่าพึงพอใจหากแต่สามารถปรับท่อทางเข้าของลมร้อนให้เคลื่อนตัวมาอยู่ที่ด้านล่างของต้อบจะทำให้การกระจายของลมร้อนนั้นดีมากยิ่งขึ้นและกระจายทั่วทั้งต้อบ



รูปที่ 4.1 โมเดล 3 มิติของตู้อบลมร้อนแบบเดิมที่บรรจุถาดสำหรับกรณีศึกษาที่ 1

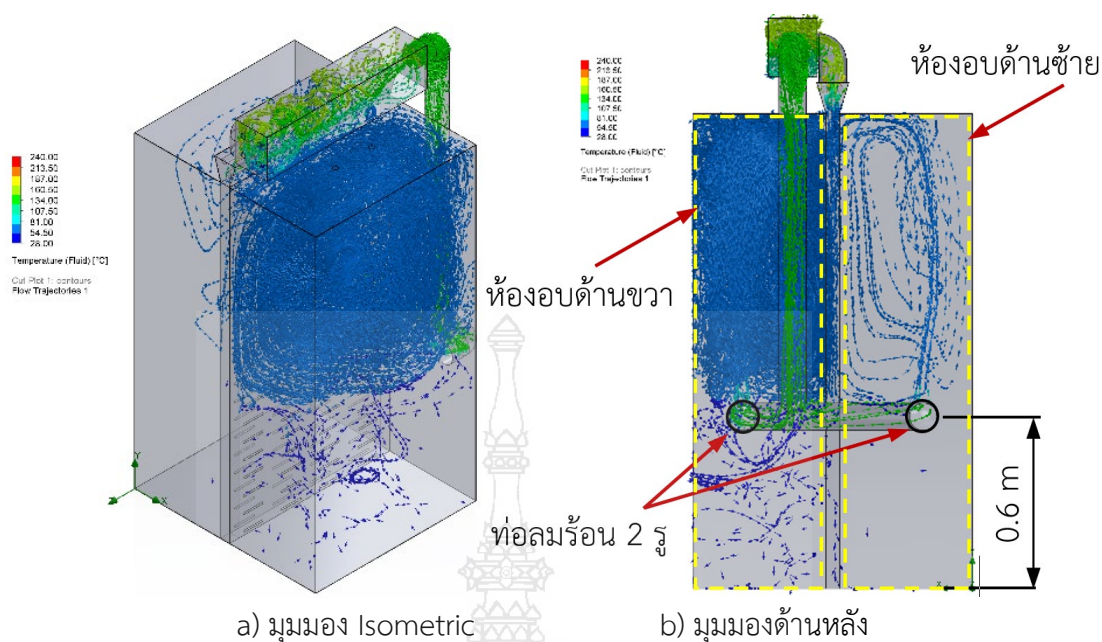


แบ่งแยกโซนพื้นที่ด้านบนและด้านล่าง พบว่า ลมร้อนกระจายตัวไม่เหมาะสมโดยเฉพาะด้านล่างของตู้อบ

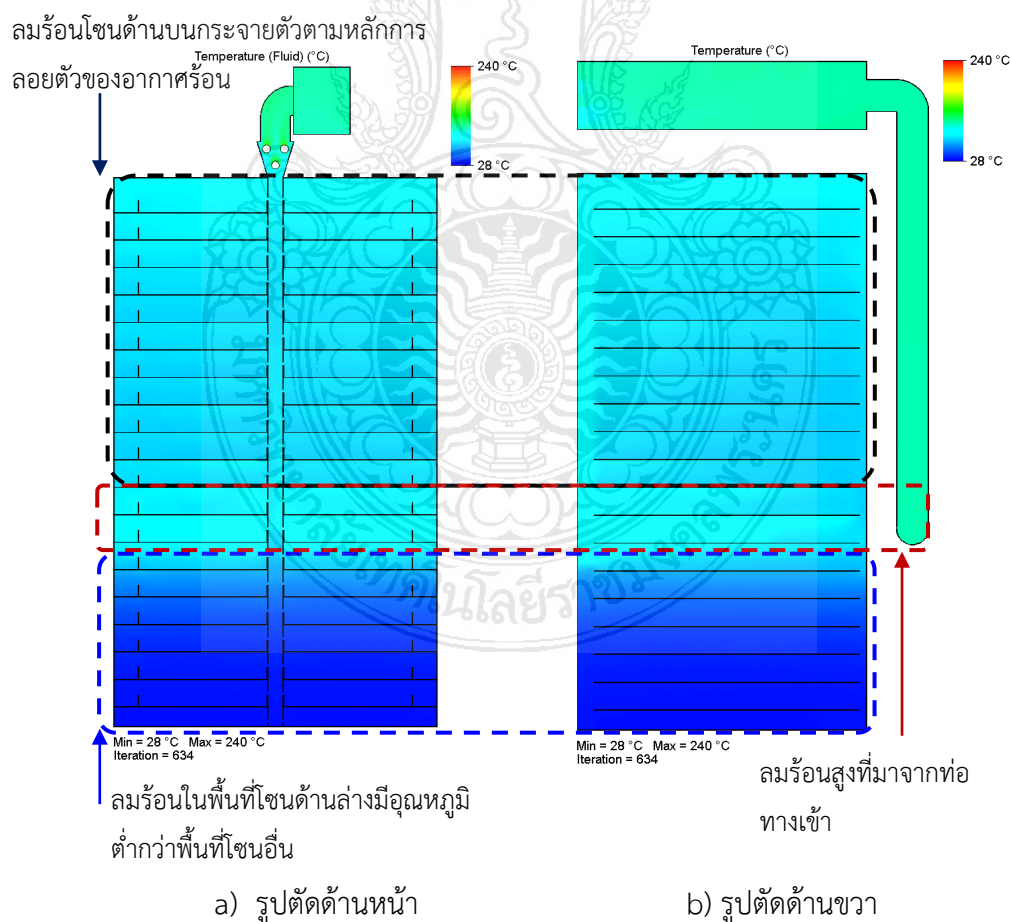
a) มุมมองด้านหน้า

b) มุมมองด้านขวา

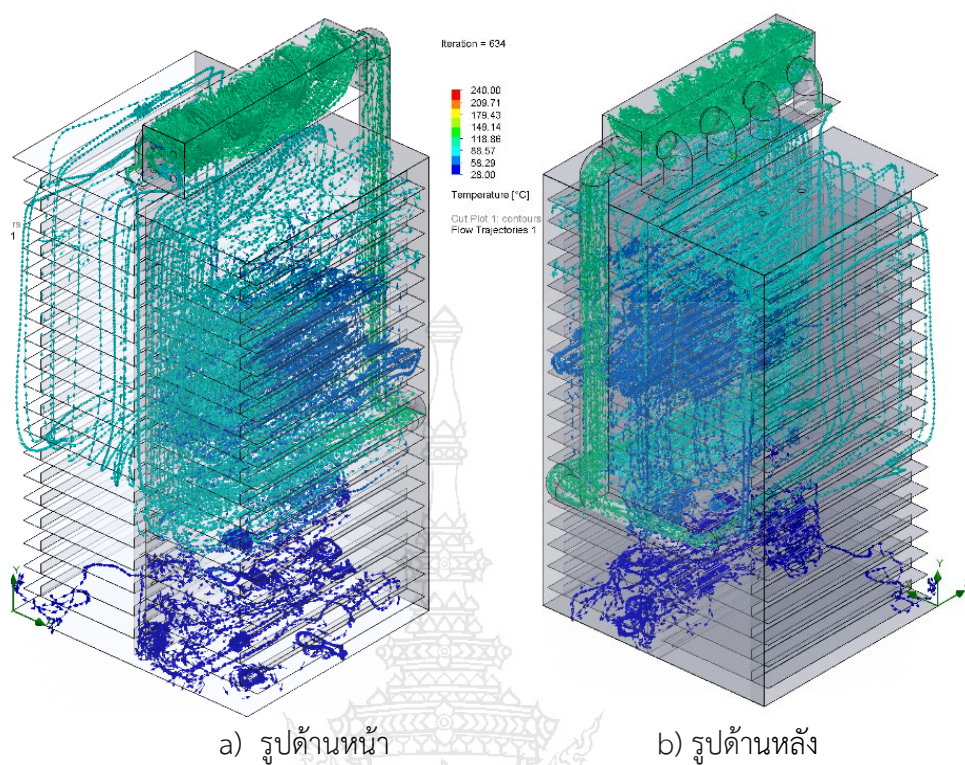
รูปที่ 4.2 การกระจายลมร้อนในตู้อบลมร้อนสำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ซึ่งไม่บรรจุถาด



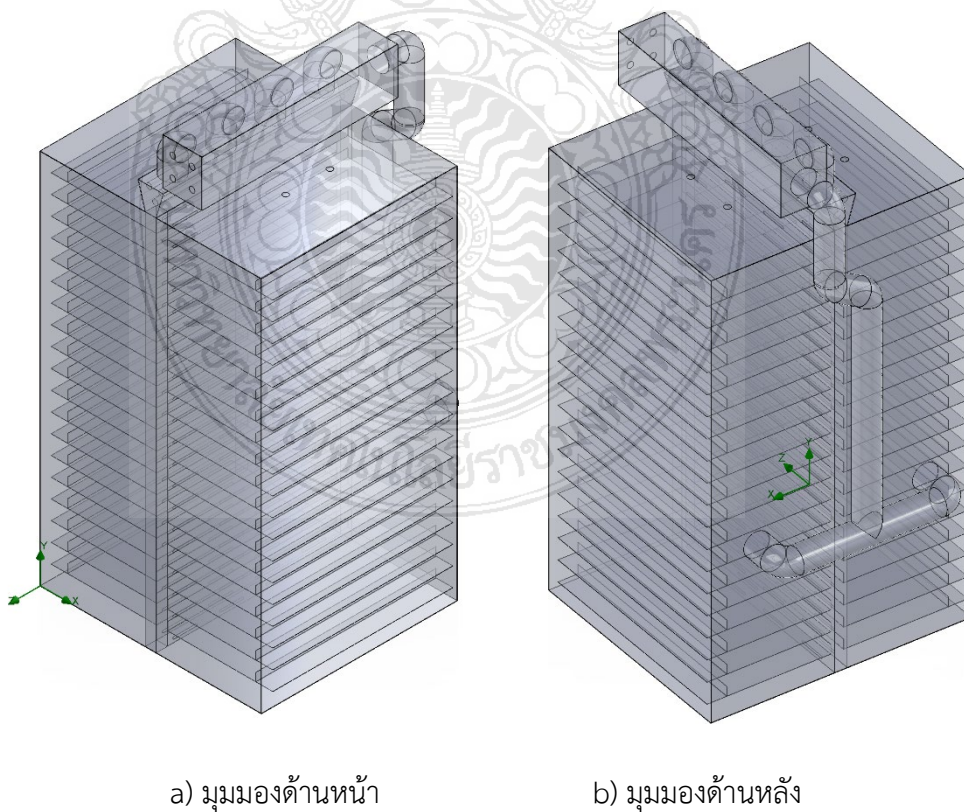
รูปที่ 4.3 เส้นทางการเคลื่อนที่ของลมร้อนสำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ซึ่งไม่บรรจุถาด



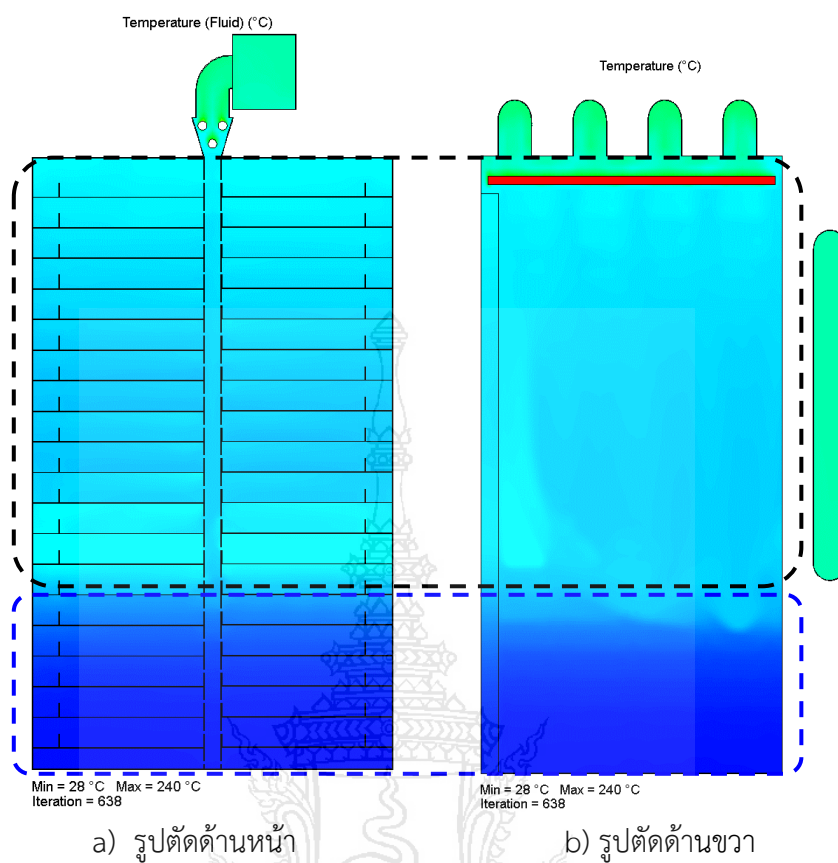
รูปที่ 4.4 การกระจายลมร้อนในตู้อบลมร้อนสำหรับกรณีศึกษาที่ 1 บรรจุถาด



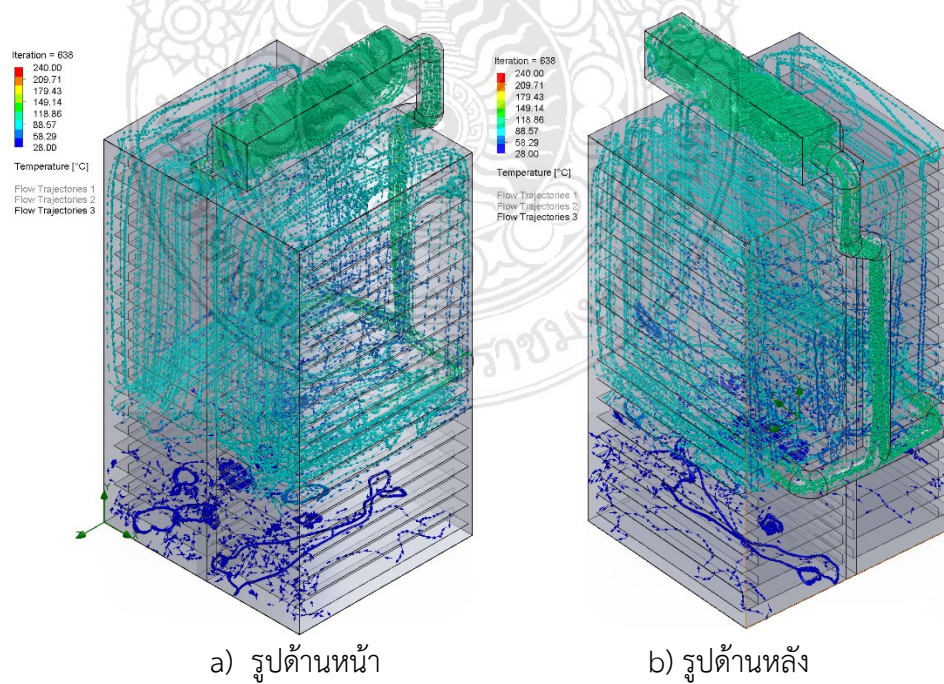
รูปที่ 4.5 เส้นทางการเคลื่อนที่ของลมร้อนสำหรับกรณีศึกษาที่ 1 บรรจุถาด



รูปที่ 4.6 โมเดล 3 มิติของตู้อบลมร้อนสำหรับกรณีศึกษาที่ 2 บรรจุถาด



รูปที่ 4.7 การกระจายอุณหภูมิในตัวแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับกรณีศึกษาที่ 2 บรรจุถาด

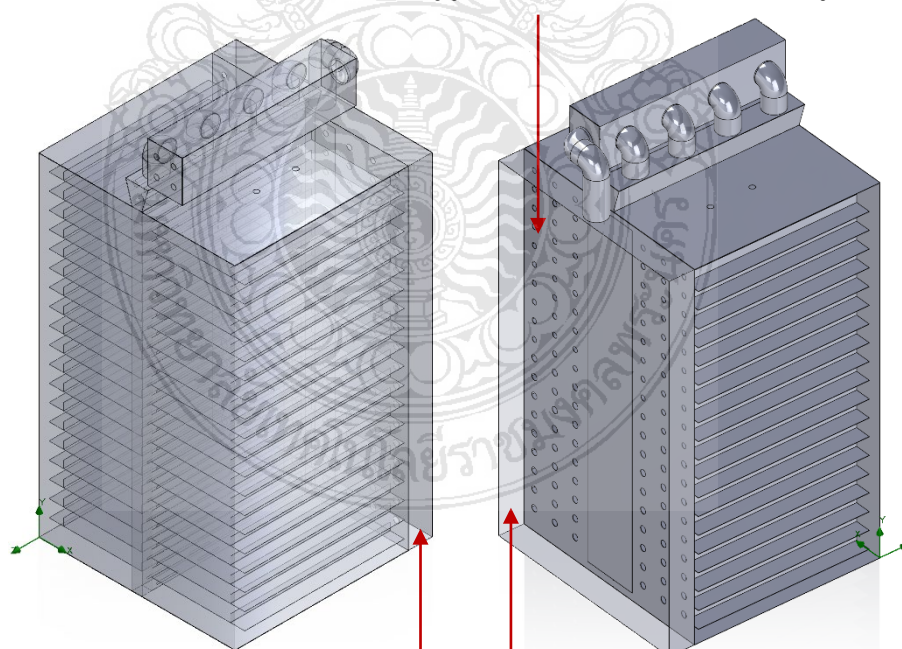


รูปที่ 4.8 เส้นทางการเคลื่อนที่ของอุณหภูมิในตัวแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับกรณีศึกษาที่ 2 บรรจุถาด

4.1.3 กรณีศึกษาที่ 3 ปรับปรุงเพิ่มห้องสะสมความร้อนด้านหลังตู้บและเพิ่มช่องทางเข้าด้วยการเจาะรู

สำหรับกรณีศึกษาที่ 3 เป็นการปรับปรุงเพิ่มเติมห้องสะสมความร้อนไว้ที่ด้านหลังของตู้บลมร้อน โดยห้องสะสมนี้มีความลึกของห้อง 120 มิลลิเมตร และต่อท่อลมร้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร หนา 1.4 มิลลิเมตร ต่อจนเข้ามายังห้องสะสมความร้อนโดยตรง และทำการเพิ่มช่องทางเข้าด้วยการเจาะรูในพื้นที่ด้านหลัง และรูเจาะนี้จะเจาะเข้าหาช่องว่างระหว่างถาดทุกชั้นเป็นการบังคับให้ลมร้อนวิ่งเข้ามายังถาดโดยตรง ช่องทางเข้าด้วยการเจาะรูนี้จะแบ่งโซนพื้นที่ออกเป็นสามโซนด้วยกัน คือโซนพื้นที่ด้านล่าง โซนพื้นที่ส่วนกลาง และโซนพื้นที่ส่วนบน โดยพิจารณาได้จากรูปที่ 3.3 ในการเจาะรูเพื่อเป็นช่องทางเข้าไปยังตู้บนั้น ซึ่งแบ่งออกเป็นสามโซนจะมีการเจาะรูที่มีขนาดแตกต่างกัน ในโซนพื้นที่ด้านล่างจะเจาะรูให้มีขนาดใหญ่อยู่ที่ 1.5 นิ้ว โซนพื้นที่ส่วนกลางเจาะรูขนาด 1 นิ้ว โซนพื้นที่ส่วนบนเจาะรูขนาด 0.5 นิ้ว เนื่องจากลมร้อนจะกระจายเข้าไปยังภายในห้องอบและลมร้อนนั้นจะต้องวิ่งลงมาอยู่ที่ส่วนล่างได้ยากกว่า จำเป็นต้องอาศัยการบังคับจึงจะทำให้ลมร้อนลงสู่ที่ต่ำ เนื่องด้วยตามธรรมชาติลมร้อนจะลอยตัวขึ้นสูง ดังนั้นจึงต้องเจาะรูพื้นที่ด้านล่างให้มีขนาดใหญ่เอื้ออำนวยให้ลมร้อนสามารถเข้าได้ง่าย จากการกระทำเช่นนี้ส่งผลให้ลมร้อนกระจายเข้าไปยังตู้บอย่างสม่ำเสมอในแต่ละชั้น รูปแบบแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 4.9

เพิ่มช่องทางเข้าของลมร้อนเข้าสู่ตู้บลมร้อนด้านหลังด้วยการเจาะรู

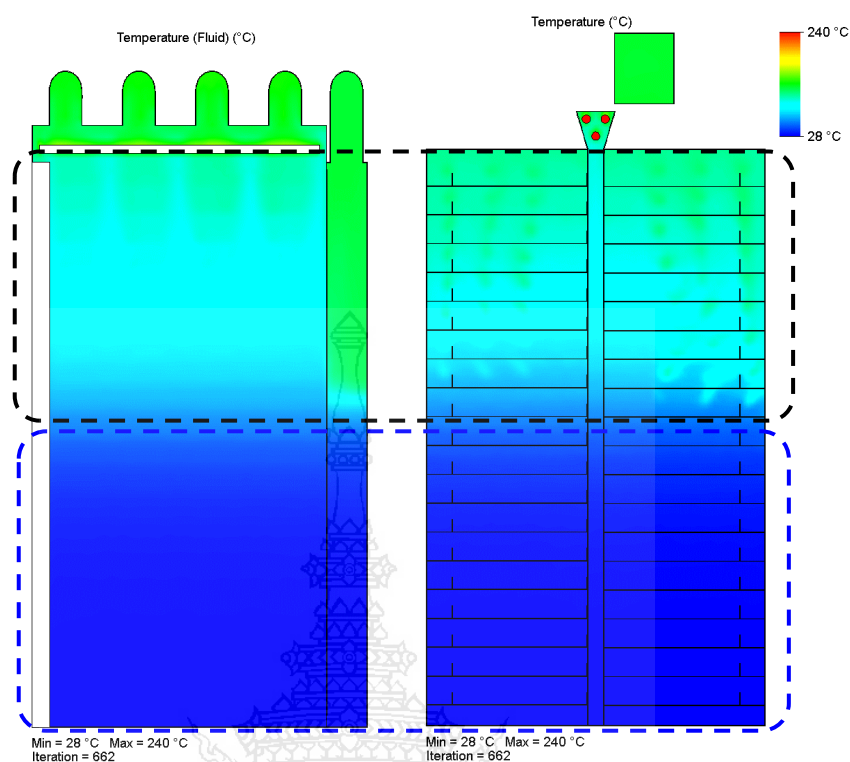


ห้องสะสมความร้อนด้านหลังที่เพิ่มเติมขึ้นมาใหม่

a) มุมมองด้านหน้า

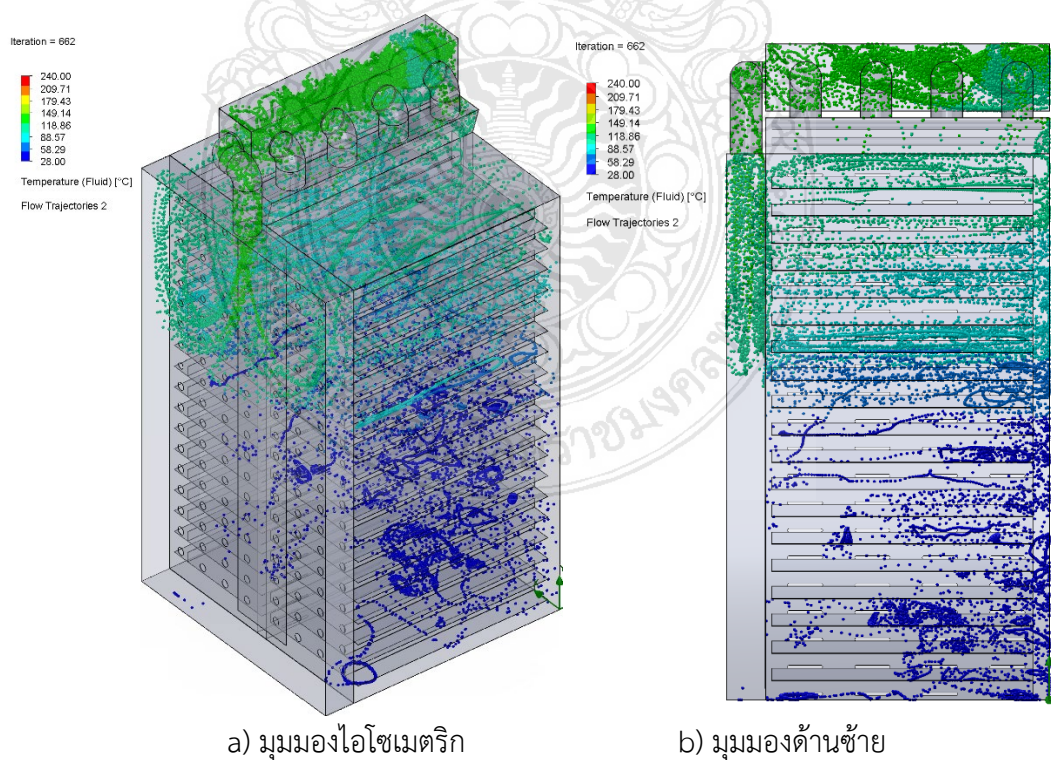
b) มุมมองด้านหลัง

รูปที่ 4.9 โมเดล 3 มิติของตู้บลมร้อนสำหรับกรณีศึกษาที่ 3 ปรับปรุงเพิ่มห้องสะสมความร้อนด้านหลังตู้บลมร้อน



การกระจายความร้อนในส่วนบนของตู้อบลมร้อนเท่าเทียม แต่โซนด้านล่างมีอุณหภูมิต่างมาก

รูปที่ 4.10 การกระจายลมร้อนในตู้อบลมร้อนสำหรับกรณีศึกษาที่ 3



a) มุมมองไอโซเมตริก

b) มุมมองด้านซ้าย

รูปที่ 4.11 เส้นทางเคลื่อนที่ของลมร้อนสำหรับกรณีศึกษาที่ 3

จากรูปที่ 4.10 พบว่าการกระจายลมร้อนในตู้อบลมร้อนสำหรับกรณีศึกษาที่ 3 นี้ ลมร้อนจะกระจายเข้าไปยังห้องอบผ่านรูซึ่งเจาะไว้ในโซนด้านบนอย่างเท่าเทียมสม่ำเสมอและมีการสูญเสียของลมร้อนน้อยกว่า แต่ในขณะเดียวกันพื้นที่โซนด้านล่างนั้นกลับมีความร้อนที่ต่ำกว่าด้านบน ทั้งที่ลมร้อนสามารถเข้ามาสะสมในห้องสะสมลมร้อนได้ แต่เนื่องด้วยธรรมชาติของลมร้อนจะลอยตัวขึ้นสูง ดังนั้นการต่อท่อทางเข้าลมร้อนจากพัดลมเป่าอากาศมายังห้องสะสมความร้อนโดยตรงนั้นก็ทำให้ลมร้อนกระจายเพียงแค่ส่วนบนหรือครึ่งหนึ่งของตู้อบด้านบนเท่านั้น ดังนั้นการกระจายในส่วนของด้านล่างลมร้อนจะกระจายได้อย่างดีและการไหลของลมร้อนจะเป็นไปตามรูปที่ 4.11 จะเห็นชัดเจนว่าลมร้อนมีเส้นทางการวิ่งเป็นไปตามธรรมชาติของการลอยตัวขึ้นสู่ที่สูง ในแบบจำลองนี้แสดงให้เห็นว่าแนวคิดในการสร้างห้องสะสมลมร้อนไว้ที่ด้านหลังกับการต่อท่อลมร้อนเข้ามาโดยตรงอาจส่งผลให้เกิดการกระจายของลมร้อนที่ดีแต่ก็ยังไม่ดีพอสำหรับโซนพื้นที่ด้านล่างซึ่งควรจะปรับปรุงใหม่เป็นกรณีศึกษาข้อต่อไป

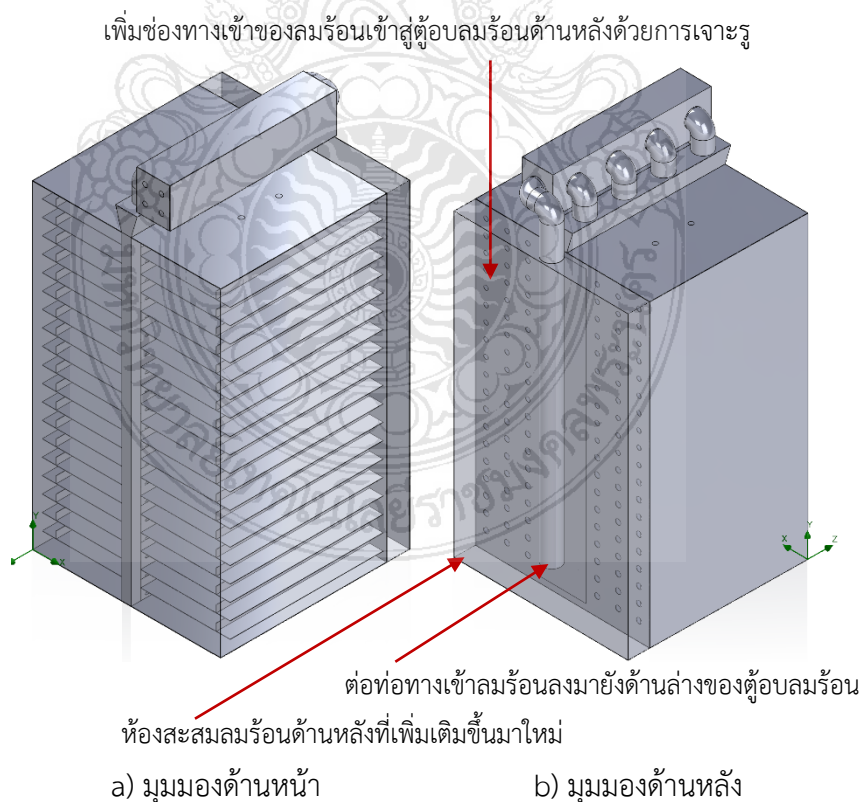
4.1.4 กรณีศึกษาที่ 4 ปรับปรุงเพิ่มห้องสะสมความร้อน ต่อท่อทางเข้าลมร้อนมายังด้านล่างของตู้อบและเพิ่มช่องทางเข้าด้วยการเจาะรู

สำหรับกรณีศึกษาที่ 4 เป็นการปรับปรุงเพิ่มเติมห้องสะสมลมร้อนไว้ที่ด้านหลังของตู้อบลมร้อน โดยห้องสะสมนี้มีความลึกของห้อง 120 มิลลิเมตร และต่อท่อลมร้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร หนา 1.4 มิลลิเมตร ที่เป็นท่อทางเข้าลงมายังพื้นที่ส่วนล่าง โดยห่างจากฐานของตู้อบลมร้อน 200 มิลลิเมตร การต่อท่อทางเข้าลงมาเช่นนี้คือการบังคับให้ลมร้อนกระจายทั่วทั้งห้องสะสมลมร้อน และสามารถเข้าไปยังห้องอบลมร้อนได้ในทุกชั้นที่เจาะรูไว้ และทำการเพิ่มช่องทางเข้าด้วยการเจาะรูในพื้นที่ด้านหลัง ช่องทางเข้าด้วยการเจาะรูนี้จะแบ่งโซนพื้นที่ออกเป็นสามโซนด้วยกันคือ โซนพื้นที่ด้านล่าง โซนพื้นที่ส่วนกลาง และโซนพื้นที่ส่วนบน โดยพิจารณาได้จากรูปที่ 3.3 ในการเจาะรูเพื่อเป็นช่องทางเข้าไปยังตู้อบนั้น ซึ่งแบ่งออกเป็นสามโซนจะมีการเจาะรูซึ่งมีขนาดแตกต่างกัน ในโซนพื้นที่ด้านล่างจะเจาะรูให้มีขนาดใหญ่อยู่ที่ 1.5 นิ้ว โซนพื้นที่ส่วนกลางเจาะรูขนาด 1 นิ้ว โซนพื้นที่ส่วนบนเจาะรูขนาด 0.5 นิ้ว เนื่องจากว่าลมร้อนจะกระจายเข้าไปยังภายในห้องอบและลมร้อนนั้นจะต้องวิ่งลงมาอยู่ที่ส่วนล่างได้ยากกว่า เนื่องด้วยตามธรรมชาติลมร้อนจะลอยตัวขึ้นสูง ดังนั้นจึงต้องเจาะรูพื้นที่ด้านล่างให้มีขนาดใหญ่เอื้ออำนวยให้ลมร้อนสามารถเข้าได้ง่าย จากการกระทำเช่นนี้ส่งผลให้ลมร้อนกระจายเข้าไปยังตู้อบอย่างสม่ำเสมอในแต่ละชั้น รูปแบบแบบจำลองดูได้จากรูปที่ 4.12

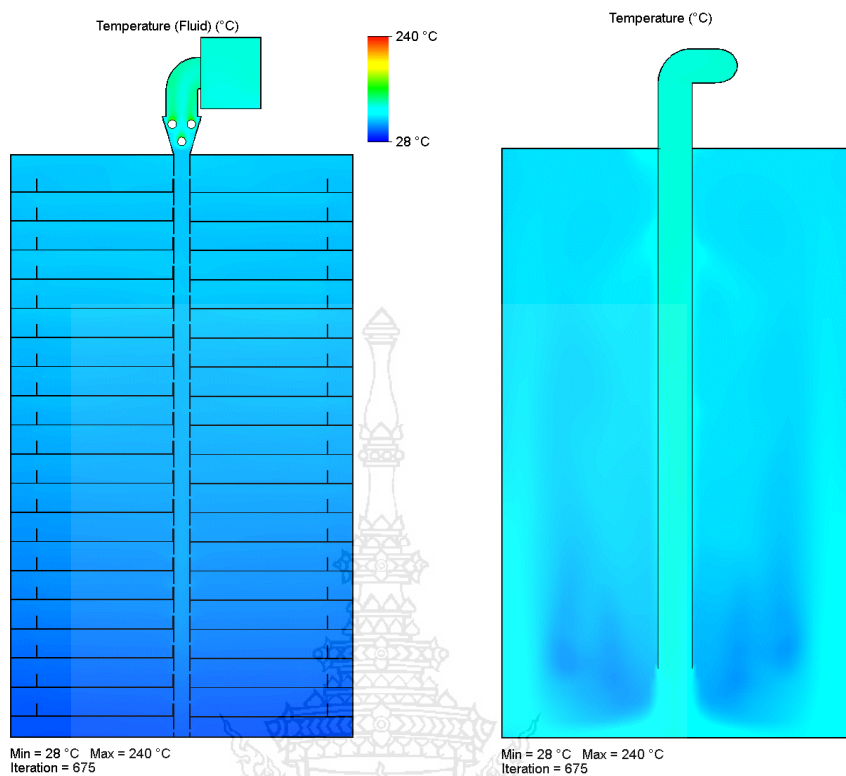
กระบวนการกำหนดเงื่อนไขขอบและข้อมูลตั้งต้นในการวิเคราะห์ทุกอย่างยังคงเดิมเหมือนกัน ในทุกกรณีศึกษา สิ่งที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นเพียงมิติของโครงสร้างที่มีการเพิ่มเติมขึ้นส่วนบางอย่างเข้าไป ผลลัพธ์จากการจำลองแสดงดังรูปที่ 4.12 เป็นการกระจายลมร้อนในตู้ลมร้อนสำหรับกรณีศึกษาที่ 4.12 a) เป็นรูปด้านหน้าแสดงให้เห็นถึงการกระจายลมร้อนจากชั้นล่างถึงชั้นบนซึ่งค่อนข้างมีความเท่าเทียมกัน และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.12 b) ซึ่งเป็นรูปด้านหลังจะเห็นว่าลมร้อนนั้นถูกส่งผ่านมายังท่อโดยไม่มีการสูญเสียความร้อนในท่อ ลมร้อนได้ถูกปล่อยลงยังด้านล่างของตู้อบและหมุนวนขึ้นไปสู่

ด้านบน พบว่าพฤติกรรมของลมร้อนนั้นเป็นไปตามแนวคิดในการออกแบบชิ้นส่วนตู้อบลมร้อนขึ้นมาใหม่ หากพิจารณาจากรูปด้านข้างคือรูปที่ 4.12 c) จะเห็นได้ว่าคอนข้างมีความเท่าเทียมกันระหว่างชั้นล่างชั้นกลางและชั้นบนเช่นกันและหากพิจารณาจากรูปตัดขวางในแนวนอนดังรูปที่ 4.12 d) พบว่าความร้อนก็กระจายตัวในแนวนอนคอนข้างสม่ำเสมอเช่นกัน

จากรูปที่ 4.14 เป็นการแสดงมุมมองภาพด้านหน้าและภาพด้านหลังของเส้นทางการเคลื่อนที่ของลมร้อนในกรณีที่ 4 จะเห็นได้ว่าลมร้อนมีการวิ่งสู่ด้านล่างและหมุนวนจากด้านข้างขึ้นสู่ด้านบนแล้ววนกลับเข้ามา จากนั้นได้วิ่งเข้าไปยังตู้อบในแต่ละชั้นตามรูเจาะที่ได้เจาะไว้ แสดงให้เห็นว่าแนวคิดตั้งแต่กรณีศึกษาที่ 1 จนกระทั่งถึงกรณีศึกษาที่ 4 นี้ได้ถูกพิจารณาและต่อยอดจนกระทั่งสามารถใช้เทคนิคในการปรับปรุงตู้อบเพื่อควบคุมการกระจายของลมร้อนและเส้นทางการเคลื่อนที่ของลมร้อนได้อย่างดี และพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณด้วยโปรแกรม SolidWorks Flow Simulation สามารถแสดงภาพการกระจายของลมร้อนและเส้นทางการเคลื่อนที่ของลมร้อนได้อย่างชัดเจน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสรุปได้ว่ากรณีศึกษาที่ 4 นี้เป็นกรณีการกระจายลมร้อนที่ดีที่สุด โดยไม่มีการติดตั้งพัดลมหมุนวนอากาศภายในห้องสะสมความร้อนหรือภายในห้องอบ ซึ่งจะเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า ดังนั้นด้วยเทคนิคการออกแบบตู้ให้เหมาะสมจึงเป็นเทคนิคที่ดีที่สุดในการที่จะทำให้ตู้อบสามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพภายใต้การใช้พลังงานไฟฟ้าที่เหมาะสม

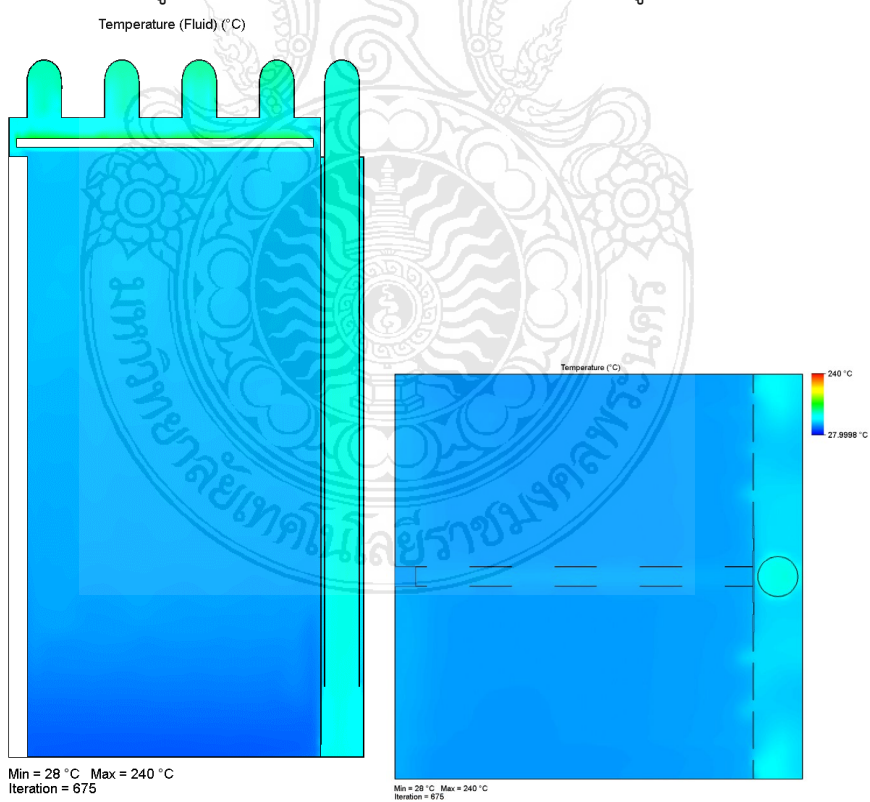


รูปที่ 4.12 โมเดล 3 มิติของตู้อบลมร้อนสำหรับกรณีศึกษาที่ 4 ปรับปรุงเพิ่มห้องสะสมลมร้อนและต่อท่อทางเข้าลมร้อนมายังด้านล่างของตู้อบลมร้อน



a) รูปด้านหน้า

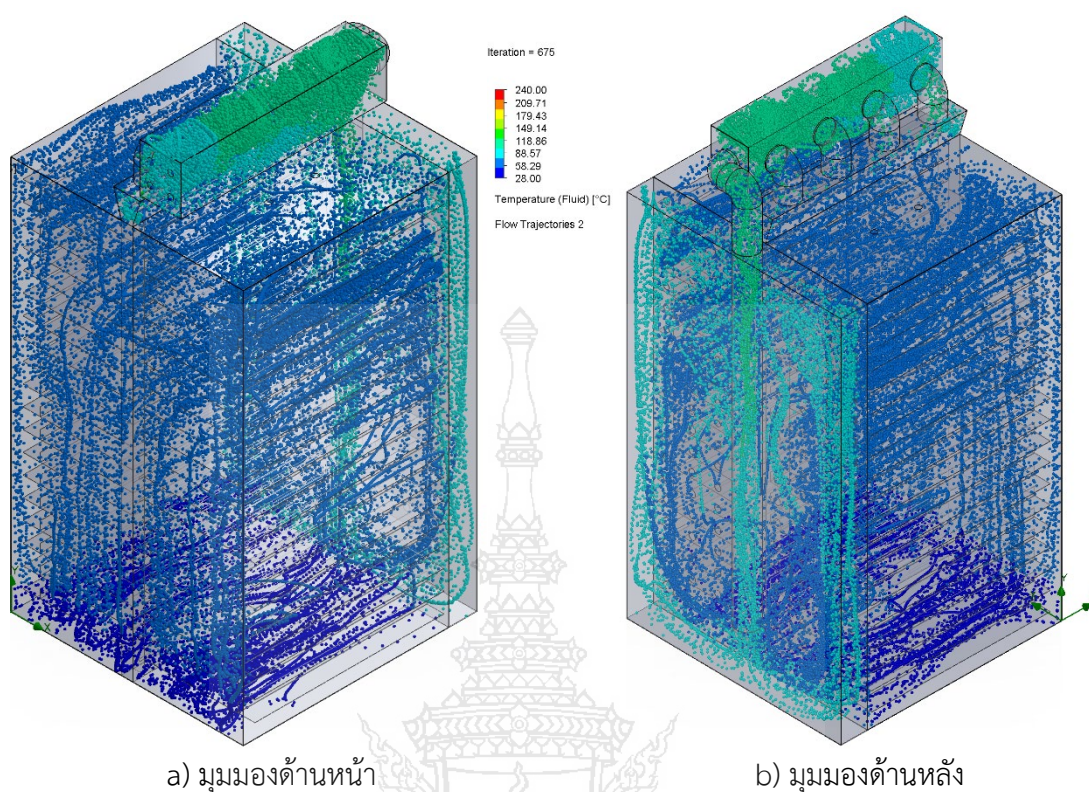
b) รูปด้านหลัง



c) รูปด้านข้าง

d) รูปตัดขวางแนวนอน

รูปที่ 4.13 การกระจายความร้อนในตู้อบลมร้อนสำหรับกรณีศึกษาที่ 4



รูปที่ 4.14 เส้นทางเคลื่อนที่ของลมร้อนสำหรับกรณีศึกษาที่ 4

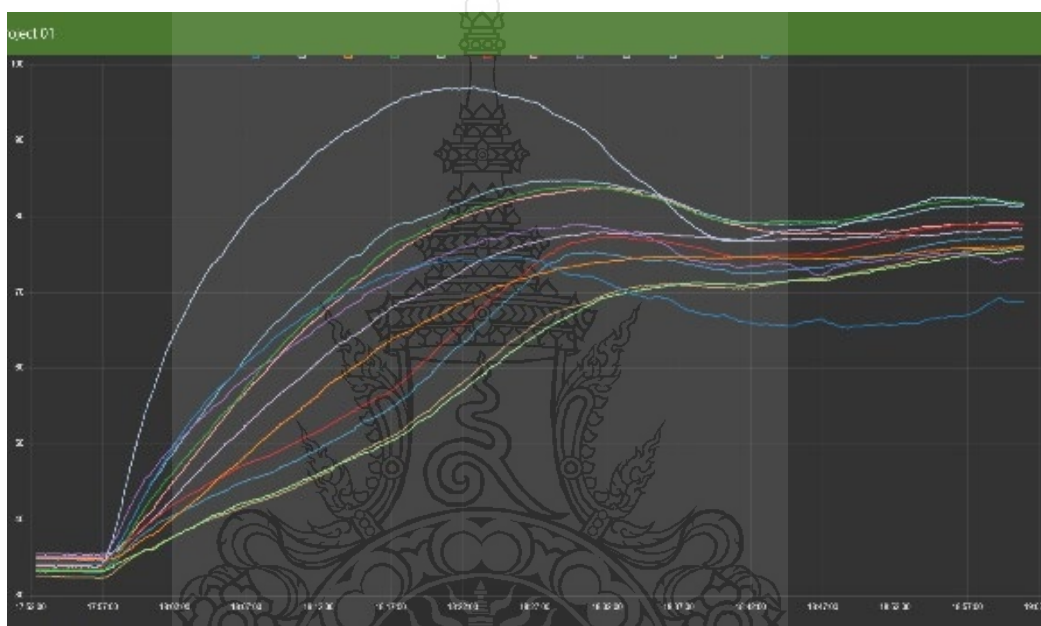
4.2 ผลการทดสอบการกระจายลมร้อนสำหรับตู้บลมร้อนในกรณีศึกษาที่ 1

จากการทดลองให้ความร้อนกับตู้บที่ใส่ถาดจำนวน 38 ถาด ได้ผลดังรูปที่ 4.15 แกนแนวนอนเป็นระยะเวลา (t) และแกนแนวตั้งเป็นอุณหภูมิ (T) แสดงให้เห็นถึงการกระจายลมร้อนซึ่งวัดด้วยเซนเซอร์ PT100 จำนวน 12 ช่องสัญญาณในช่วงเริ่มต้นที่อุณหภูมิของตู้บจะเท่ากับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมที่ 28 °C เมื่อทำการป้อนกำลังไฟไปยังฮีตเตอร์ทำให้เกิดการกระจายของลมร้อนโดยใช้พัดลมเป่าอากาศเพื่อนำพาความร้อนกระจายไปยังส่วนต่างๆ ของตู้บด้วยความเร็วลมที่ 10 m/s จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าตู้บลมร้อนแบบเดิม ซึ่งยังไม่มีมีการปรับปรุงนั้นจะมีช่วงของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งแตกต่างกันอย่างมาก พิจารณาได้จากเส้นกราฟเกิดการกระจายตัวแต่เมื่อเวลาผ่านไปเป็นระยะเวลามากกว่า 2 ชั่วโมง พบว่าแนวโน้มของเส้นกราฟจะใกล้เคียงกัน มีความแตกต่างกันไม่มากนัก เหตุผลนี้เองจึงส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่จะนำมาอบนั้นอาจเกิดความเสียหายได้ในช่วงที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของลมร้อนที่ไม่เท่ากันก็คือช่วงสภาวะไม่คงตัว ในการปรับปรุงตู้บนั้นจะต้องทำให้ช่วงสภาวะไม่คงตัวนี้มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งให้ใกล้เคียงกัน

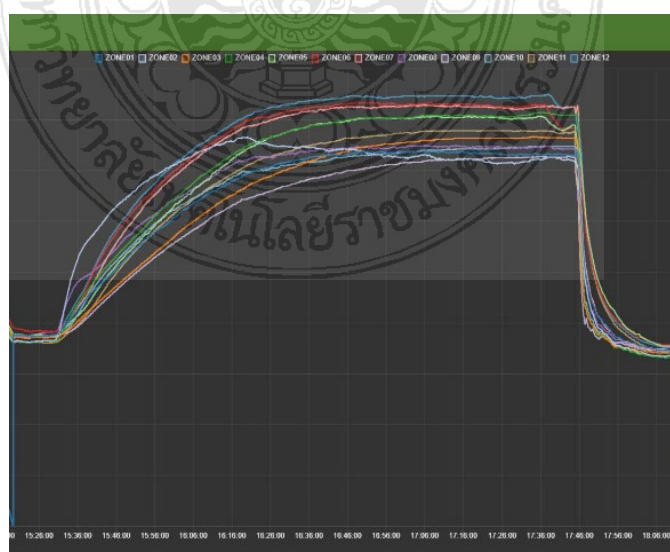
จากการทดลองด้วยการใช้กำลังไฟสูงสุดและรักษาอุณหภูมิห้องอบให้อยู่ที่ 80 °C ด้วยความเร็วลม 10 m/s ได้ผลดังรูปที่ 4.15 นั้น จึงทำการปรับเปลี่ยนค่ากำลังไฟให้ลดลง 34% และลดกำลังของลมเป่าลง 25% จึงได้ผลดังรูปที่ 4.16 พบว่าการกระจายของลมร้อนในตู้บของแต่ละตำแหน่งที่วัด

อุณหภูมิมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นไปในทิศทางเดียวกัน อัตราการกระจายความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างมีสัดส่วนและเข้าสู่ช่วงสภาวะคงตัว แต่จะเห็นได้ว่าทั้งกรณีของผลในรูปที่ 4.15 และผลในรูปที่ 4.16 นั้น อุณหภูมิที่สภาวะคงตัวในแต่ละตำแหน่งของตู้อบก็ยังคงมีความแตกต่างกัน 1-5 °C

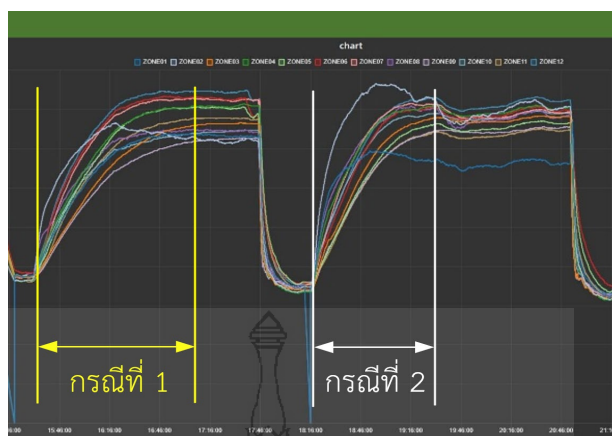
ซึ่งจากรูปที่ 4.17 คือการเปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของกรณีศึกษาที่ 1 แบบบรรจุถาด ในรูปด้านซ้ายเป็นกรณีที่ใช้ค่ากำลังไฟให้ลดลง 33% และใช้กำลังของลมเป่าที่ 66% จะต้องใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวเท่ากับ 100 นาที แต่สำหรับกรณีที่ 2 รูปด้านขวาคือการทดลองที่ใช้ค่ากำลังไฟให้ลดลง 33% และกำลังของลมเป่า 100% จะใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวเพียง 74 นาที



รูปที่ 4.15 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งในช่วงสภาวะไม่คงตัว จำนวน 12 จุด



รูปที่ 4.16 ลักษณะการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเมื่อทำการลดกำลังไฟของฮีตเตอร์ 1/3 เท่า



รูปที่ 4.17 การเปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ

4.3 การวิเคราะห์ผลการเปรียบเทียบ

ผลการเปรียบเทียบการจำลองด้วย CFD และการทดลองได้ผลในช่วงสภาวะคงตัว ดังตารางที่ 4.1 เป็นตัวอย่างผลการทดลองและวิเคราะห์ที่เงื่อนไขเดียวกันโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนกันระหว่าง 2-10% ซึ่งยอมรับได้ในการวิเคราะห์นี้ เนื่องด้วยกรณีศึกษาทั้งการทดลองและการจำลองการไหลด้วย CFD นั้นมีผลการทดลองและการวิเคราะห์เป็นจำนวนมาก ดังนั้นในตารางที่ 4.1 จึงเป็นการเลือกข้อมูลเพียงบางส่วนเพื่อนำมาใช้ในการพิสูจน์แบบจำลอง ซึ่งในทุกโมเดลของการจำลองนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองก็ให้ผลมีความสอดคล้องกันในทุกกรณีศึกษา ดังนั้นจึงยกผลการเปรียบเทียบมาเพียงเงื่อนไขใดเงื่อนไขหนึ่งเท่านั้น

ตารางที่ 4.1 ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิด้วยการทดลองและ CFD

Point	Exp. Results	CFD Results	% Difference
1	68.7	65.2	5.09
2	81.6	79.8	2.20
3	76.0	72.5	4.60
4	81.8	77.8	4.88
5	75.6	68.8	8.99
6	79.0	72.6	8.10
7	79.0	75.4	4.55
8	74.3	71.2	4.17
9	78.3	75.2	3.95
10	81.3	77.8	4.30
11	75.9	68.5	9.74
12	77.3	69.7	9.83

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

การสรุปผลคือการนำผลการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณและการทดลองทั้งหมดที่ได้ทำมาสรุปผลต่อวัตถุประสงค์และประโยชน์ที่ได้รับ ผลเป็นส่วนประกอบสำคัญของการทำรายงานการวิจัยเพื่อให้เหตุผลยืนยันว่าผลการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณและการทดลองมีความสอดคล้องและมีความน่าเชื่อถือ มีความถูกต้อง สอดคล้องหรือไม่สอดคล้องกับผลการทดลองจริง การวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณอาศัยแนวคิด ทฤษฎีและผลการวิจัยที่ผ่านมาโดยการนำเสนอข้อมูลในภาพรวมหรือสรุปทั้งในส่วน ของผลการศึกษาและสมมติฐานการวิจัย โดยมีเนื้อหาใจความสรุปและอภิปรายผลได้ผลลัพธ์จากการวิจัยสามารถตอบวัตถุประสงค์ของงานวิจัยได้ดังนี้

1. ได้ออกแบบและสร้างแบบจำลองตู้อบเบเกอร์และวิเคราะห์การกระจายลมร้อนโดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณภายใต้การพาความร้อนแบบบังคับ โดยกรณีศึกษาที่ 4 เป็นการออกแบบเชิงเทคนิคที่ทำให้ลมร้อนสามารถกระจายทั่วทั้งตู้อบได้อย่างสม่ำเสมอ ด้วยวิธีการสร้างห้องสะสมลมร้อนขึ้นมาด้านหลังของตู้อบที่มีความหนาเพิ่มขึ้น 120 มิลลิเมตร และต่อท่อลมร้อนเข้ามายังห้องสะสมความร้อน จากนั้นต่อลงไปยังด้านล่างของตู้อบเพื่อให้ลมร้อนกระจาย อีกทั้งยังมีการเจาะท่อทางเข้าจากห้องสะสมลมร้อนเข้าไปยังห้องอบด้านใน โดยเจาะผ่านทุกชั้นที่มีถาดบรรจุอยู่ทั้งหมด 19 ชั้นทั้งด้านซ้ายและด้านขวา ส่งผลให้เกิดการกระจายของลมร้อนผ่านรูเจาะเข้าไปยังถาดทุกชั้นอย่างเท่าเทียมและสม่ำเสมอ

2. ได้ศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและส่งผลต่อการกระจายลมร้อนของตู้อบเบเกอร์ จากการสร้างกรณีศึกษาทั้งหมด 4 กรณีศึกษานี้ ทำให้เกิดการปรับเปลี่ยนตัวแปร ซึ่งเป็นตัวแปรเชิงเทคนิคของมิติโครงสร้าง จะเห็นได้ว่าตัวแปรเชิงเทคนิคที่เป็นตัวแปรควบคุมรูปแบบของโครงสร้างนั้นได้ส่งผลต่อการกระจายลมร้อนอย่างเห็นได้ชัด โดยที่ไม่จำเป็นต้องเพิ่มอุปกรณ์ฮีตเตอร์หรือพัดลมหมุนวนอากาศเข้าไปยังตู้อบด้านใน และไม่จำเป็นต้องสูญเสียพลังงานไฟฟ้าเพิ่มเติม ดังนั้นการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรนี้จะทำให้เกิดความคุ้มค่าและตู้อบมีประสิทธิภาพมากขึ้น

3. ได้เปรียบเทียบผลของการกระจายตัวของลมร้อนภายในตู้อบและความเร็วลมที่ตำแหน่งต่างๆ ด้วยโปรแกรมทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณและการทดลอง โดยแบบจำลอง CFD ได้รับการพิสูจน์ด้วยการเปรียบเทียบผลของการกระจายอุณหภูมิกับการทดลองที่อุณหภูมิ 80 °C ภายใต้สมมติฐานไม่พิจารณาความชื้นและไม่ผลิติก๊าซในการทดลองอบเพราะต้องการศึกษาเรื่องพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการกระจายลมร้อนภายในตู้อบเท่านั้น

จากการทดลองและวิเคราะห์ด้วยหลักพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณด้วยโปรแกรม SolidWorks Flow Simulation ให้ผลที่สอดคล้องกัน ซึ่งมีความแตกต่างอยู่ในช่วง 2-10% นั้นพบว่า การกระจายของลมร้อนในช่วงของสภาวะไม่คงตัวจะมีความแตกต่างกันไปและแต่ละตำแหน่งจะมี อุณหภูมิที่แตกต่างกันมาก ซึ่งเป็นปัญหาหลักของการกระจายลมร้อน เนื่องด้วยอากาศร้อนจะต้อง เคลื่อนตัวขึ้นสู่ที่สูง ดังนั้นการจ่ายลมร้อนจากห้องสร้างลมร้อนจะต้องใช้พัดลมอากาศบังคับให้อากาศ ไหลผ่านลงมายังด้านล่างของตู้อบและลมร้อนจะกระจายขึ้นไปด้านบนของตู้อบโดยธรรมชาติ ดังนั้น การออกแบบจะต้องพิจารณาทางเข้าของลมร้อน ตัวแปรหนึ่งที่มีความสำคัญคือการทำให้เกิดความ สมมาตรของลักษณะทางกายภาพของตู้อบลมร้อน การเข้าของลมร้อนไหลไปตามท่อทางเดิมนั้นไม่ สมมาตร แม้ว่าจะปรับให้ท่อทางสมมาตรอาจยังไม่เพียงพอ จำเป็นต้องให้ปลายท่อทางเข้านั้นนำพา ลมร้อนไปสู่ด้านล่างของตู้อบด้วย หรืออีกแนวทางหนึ่งคือการสร้างห้องสะสมความร้อนให้อยู่ด้านหลัง ตู้อบ และใช้ห้องสะสมลมร้อนนี้เป็นห้องกระจายลมร้อนเข้าไปยังภาคตามชั้นต่างๆ ซึ่งด้วยหลักการที่ อากาศร้อนจะต้องเคลื่อนที่ขึ้นสูง ดังนั้นห้องลมร้อนที่สร้างขึ้นนี้ควรจะต้องเจาะรูให้มีความแตกต่างกัน บริเวณโซนพื้นที่ชั้นล่างของตู้ให้มีรูขนาดใหญ่ โซนพื้นที่ส่วนกลางเจาะรูเล็กกว่าด้านล่าง และบริเวณ โซนพื้นที่ด้านบนควรเจาะรูให้เล็กกว่าด้านล่างและตรงกลาง เพื่อให้อากาศถูกบังคับให้พาลงสู่ ด้านล่างได้ง่ายและกระจายไปยังภาคตามชั้นต่างๆ ซึ่งจะเป็นวิธีการช่วยกระจายลมร้อนได้ดีอีกวิธีหนึ่ง สำหรับตู้อบประเภทนี้

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ผลลัพธ์สุดท้ายเป็นการออกแบบและสร้างห้องสะสมลมร้อน และเพิ่มท่อลมร้อน ยังไม่มีการสร้างจริงและทดลอง ยังเป็นเพียงผลการวิเคราะห์ด้วยหลักพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเท่านั้น

5.2.2 ในการทดลองและจำลองทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณยังไม่มีผลลิตภัณฑ์ทดสอบ ดังนั้นหากมีผลลิตภัณฑ์จะต้องพิจารณาประเด็นความชื้นที่เกิดขึ้นด้วย และทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมของผลลิตภัณฑ์นั้นๆ ต่อไป

5.2.3 การวิเคราะห์และการทดลองอาจมีความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากการสูญเสียความร้อนแม้ว่าจะมีการติดตั้งฉนวนก็ตามที่

5.2.4 สิ่งแวดล้อมภายนอกที่ไม่สามารถควบคุมได้เช่น ลมที่พัดผ่านตู้อบลมร้อนขณะทำการทดลองจะทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนง่ายขึ้น

5.2.5 เนื่องจาก ย่อมต้องมีการสูญเสียความร้อน ดังนั้นการกำหนดค่าความร้อน อุณหภูมิใช้งานอาจต้องได้รับการพิจารณาทำการทดลองเพิ่มเติมเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานพัฒนาชุมชนจังหวัดเพชรบุรี - กรมการพัฒนาชุมชน กระทรวงมหาดไทย
- [2] การท่องเที่ยวแห่งประเทศไทย. (2562, 15 ธันวาคม). แผนที่เพชรบุรี แผนที่เมืองเพชรบุรี. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.emagtravel.com/archive/phetchaburi-map.html>
- [3] SIMSCALE. (2024, Dec. 22). Documentation. [Online]. Available: <https://www.simscale.com/docs/simwiki/cfd-computational-fluid-dynamics/what-is-cfd-computational-fluid-dynamics/>
- [4] Omega. (2023). Lessons about Positive Displacement Flow Meters. [Online]: Available: <https://www.omega.com/en-us/resources/flow-meters>
- [5] SIMSCALE. (2024, Dec. 22). Documentation. [Online]. Available: <https://www.simscale.com/docs/simwiki/numerics-background/what-is-the-reynolds-number/>
- [6] Bird, R.B., Stewart, W.E. and Lightfoot, E.N. “Transport Phenomena”. 2th edition. John Wiley Sons, 2001, ISBN 0-471-41077-2.
- [7] Anurag Mishra. (2024, Dec. 22). Hot Air Oven: Working Principle, Uses and Advantages in 2025. [Online]. Available: <https://www.testronixinstruments.com/blog/hot-air-oven-a-comprehensive-guide-to-its-features-and-diverse-applications/>
- [8] P.S. Mirade, J.D. Daudin, F. Ducept, and G. Trystram, “Characterization and CFD modeling of air temperature and velocity profiles in an industrial biscuit baking tunnel oven,” *J. Clement, /Food Research International*, vol. 37, pp. 1031– 1039, 2004.
- [9] Nantawan Therdthai, Weibiao Zhou, and Thomas Adamczak, “Two-dimensional CFD modeling and simulation of an industrial continuous bread baking oven,” *Journal of Food Engineering*, vol. 60, pp. 211–217, 2003.
- [10] Rodger Talbert, “Understanding gas fired convection curing equipment for powder coating,” *Powder Coating*, pp. 35-41, Nov. 1994.
- [11] Pumpruk Satit, “Computational Fluid Dynamic (CFD) Modeling and alidation of Temperature Distribution in the Infrared Oven,” School of Engineering and Physical Sciences, Heriot-Watt University, Edinburgh, UK.
- [12] Andrew Lee, “ Numerical Investigation of the Temperature Distribution in an Industrial Oven,” University of Southern Queensland.

- [13] D.A. Kontogeorgos, E.P. Keramida, M.A. Founti, "Assessment of simplified thermal radiation models for engineering calculations in natural gas- fired furnace," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 50, pp. 5260–5268, 2007.
- [14] Pragati Kaushal and Sharma HK, "Concept of Computational Fluid Dynamics (CFD) and its Applications in Food Processing Equipment Design," *Journal of Food Process Technology*, vol. 3, no. 1, 2012.
- [15] Z. KHATIR et. al, "The Application of Computational Fluid Dynamics (CFD) And Oven Design Optimization in the British Bread-baking Industry," *in Proceeding of 8th International Conference on CFD in Oil & Gas, Metallurgical and Process Industries SINTEF/NTNU*, Trondheim Norway, pp. 21-23, Jun. 2011.
- [16] P. Verboven, et. al., "Computational fluid dynamics modelling and validation of the temperature distribution in a forced convection oven," *Journal of Food Engineering*, vol. 43, no. 2, pp. 61-73.
- [17] M. Rokni and B. Sunden, "Investigation of a Two-Equation Turbulent Heat Transfer Model Applied to Ducts," *Journal of Heat Transfer*, vol. 125, no. 1, pp. 194-200, 2003.
- [18] A. Jones and D. Ingham, "Combined convection flow in a vertical duct with wall temperatures that vary linearly with depth," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 14, no. 1, pp. 37-47, 1993.
- [19] E. Sparrow and M. Ortiz, "Heat transfer coefficients for the upstream face of a perforated plate positioned normal to an oncoming flow," *International Journal of Heat Mass Transfer*, vol. 25, no. 1, pp. 127-135, 1981.
- [20] R. Subrata, K. Sagar and J. Heidmann, "Film Cooling Analysis Using DES Turbulence Model," in *ASME TurboExpo*, 2003.
- [21] Mark Fahey et. al., "Use of computational fluid dynamics in domestic oven design," *Int. Jnl. of Multiphysics*, vol. 2, no. 1, 2008.
- [22] ANSYS Inc, *CFX-5.7.1 Theory Manual*, ANSYS, 2005.
- [23] D. C. Wilcox, Basic Fluid Mechanics, *D C W Industries*, La Canada, 1998.
- [24] F. R. Menter, "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications," *AIAA Journal*, pp. 1598–1605, 1994.

- [25] K. K. Dhinsa, C. J. Bailey and K. A. Pericleous, "Turbulence Modelling and its Impact on CFD Predictions for Cooling of Electronic Components," in *Inter Society Conference on Thermal Phenomena*, 2004.
- [26] W.S. Atkins, "Consultants, Best Practice Guidelines for Marine Applications of Computational Fluid Dynamics," 2002.
- [27] J. C. S. Lai and C. Y. Yang, Numerical Simulation of Turbulence Suppression: Comparisons of the Performance of Four k-e Turbulence Models, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, vol. 18, pp. 575–584, 1997.
- [28] J. C. Z. Piaia, C. A. Claumann, M. B. Quadri, and A. Bolzan, "Air Flow CFD Modeling in an Industrial Convection Oven," in *CFD Techniques and Thermo-Mechanics Applications*, Z. Driss, B. Necib, and H.-C. Zhang, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 1–12. doi: 10.1007/978-3-319-70945-1_1.
- [29] R.B. Bird, W.E. Stewart, E.N. Lightfoot, Transport phenomena, 2nd edn. Wiley, New York, 2002.
- [30] N. Sanyal, B. Bhattacharyya, and S. Munshi, "An analog non-linear signal conditioning circuit for constant temperature anemometer," *Measurement*, vol. 39, no. 4, pp. 308–311, 2006.
- [31] Zlatko Rek, Mitja Rudolf, and Iztok Zun, "Application of CFD Simulation in the Development of a New Generation Heating Oven," *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 58, no. 2, pp. 134–144, 2012.
- [32] *TGrid Version 4.0: User's Guide (2006)*. Fluent, Inc.
- [33] Zinedine Khatir et al., "Computational fluid dynamics (CFD) investigation of air flow and temperature distribution in a small scale bread-baking oven," *Applied Energy*, vol. 89, pp. 89–96, 2012.
- [34] P. Verboven, N. Scheerlinck, J. De. Baerdemaeker, and B.M. Nicolai, "Computational fluid dynamics modelling and validation of the isothermal airflow in a forced convection oven," *J. Food Eng.*, vol. 43, no. 1, pp. 41–53, 2000.
- [35] N. Therdthai, W.B. Zhou, and T. Adamczak, "Two-dimensional CFD modelling and simulation of an industrial continuous bread baking oven," *J. Food Eng.*, vol. 60, no. 2, pp. 211–217, 2003.

- [36] N. Therdthai, W.B. Zhou, and T. Adamczak, "Three-dimensional CFD modelling and simulation of the temperature profiles and airflow patterns during a continuous industrial baking process," *J. Food Eng.*, vol. 65, no. 4, pp. 599–608, 2004.
- [37] P.S. Mirade, J.D. Daudin, F. Ducept, G. Trystram, and G. Clement, "Characterization and CFD modelling of air temperature and velocity profiles in an industrial biscuit baking tunnel oven," *Food Res Int.*, vol. 37, no. 10, pp. 1031–1039, 2004.
- [38] S.Y. Wong, W.B. Zhou, and J.S. Hua, "CFD modeling of an industrial continuous breadbaking process involving U-movement," *J. Food Eng.*, vol. 78, no. 3, pp. 888–896, 2007.



ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล ชัยวัฒน์ อุทัยแสน
 วัน เดือน ปีเกิด 30 กันยายน 2515
 ภูมิลำเนา 86/267 ซอยตรีมิตร ถนนพระราม 4 แขวงพระโขนง เขตคลองเตย
 กรุงเทพมหานคร 10110

ประวัติการศึกษา

วุฒิการศึกษา	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วศ.บ.วิศวกรรมเครื่องกล	มหาวิทยาลัยธนบุรี	2558
ปวส.ช่างยนต์	โรงเรียนกนกเทคโนโลยี	2535
ปวช.ช่างยนต์	โรงเรียนกนกเทคโนโลยี	2533

ตำแหน่งและสถานที่ทำงานปัจจุบัน

กรรมการบริหาร บริษัทก๊อนทองเอกวิศวกรรมจำกัด

168 ถนนบรมราชชนนี พุทธมณฑลสาย 6 ตำบลทรงคนอง อำเภอสองแพรวน จังหวัดนครปฐม

