

การศึกษาดังกล่าวเป็นการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบในช่องปิดสองช่องที่ติดกันด้วยการจำลอง
เชิงเลข



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Parameter Study of Periodic Temperature Control in Two Adjacent Cavities Using
Numerical Simulation



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering
Department of Mechanical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2019
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบในช่องปิดสองช่องที่ติดกันด้วยการจำลองเชิงเลข
โดย	นายเทิดพงศ์ ช่วยแก้ว
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สร้อย ศาลากิจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.จิตติน แดงเที่ยง)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สร้อย ศาลากิจ)	
.....	กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิพนธ์ วรรณโสภาคย์)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร.เด่นชัย วรรณจำเริญ)	

เทิดพงศ์ ช่วยแก้ว : การศึกษาอิงพารามิเตอร์ของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบในช่องปิด
สองช่องที่ติดกันด้วยการจำลองเชิงเลข. (A Parameter Study of Periodic
Temperature Control in Two Adjacent Cavities Using Numerical Simulation)
อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.สร้อย ศาลากิจ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบในช่องปิดสี่เหลี่ยมจัตุรัสสองช่องที่ติดกันแยกจากกันด้วยผนังร่วม โดยที่แต่ละช่องปิดมีการควบคุมอุณหภูมิด้วยเครื่องทำความร้อนแบบเปิดปิดแยกกันอย่างอิสระ การศึกษาใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 2019 จำลองการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อนตามธรรมชาติของอากาศที่มีการไหลแบบราบเรียบในช่องปิดและการนำความร้อนของผนังร่วมเมื่อเรย์เลห์นัมเบอร์มีค่าประมาณ 10^5 โดยกำหนดให้เครื่องทำความร้อนเปิดเมื่ออุณหภูมิเฉลี่ยในช่องปิดต่ำกว่า 299 K และปิดเมื่ออุณหภูมิเฉลี่ยในช่องปิดสูงกว่า 301 K ผลการจำลองแสดงว่าไม่ว่าจะเริ่มการควบคุมอุณหภูมิเมื่อใดก็ตาม เมื่อเวลาผ่านไป คาบของการควบคุมจะเข้าสู่สภาวะคงตัวโดยที่การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเชิงคาบของทั้งสองช่องจะปรับจนมีค่าสอดคล้องใกล้เคียงกัน นอกจากนี้จากการศึกษาผลของสมบัติของผนังร่วมต่อการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบ 3 ชนิด ได้แก่ ทองแดง อลูมิเนียม และนิกเกิล พบว่าผนังร่วมที่ทำด้วยอลูมิเนียม ซึ่งมีค่า Thermal storage ต่ำที่สุด จะทำให้ช่องของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบเข้าสู่สภาวะคงตัวและการสอดคล้องของอุณหภูมิของสองช่องได้เร็วที่สุด และในการศึกษาผลของอุณหภูมิภายนอกพบว่าอุณหภูมิภายนอกมีผลต่อคาบของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบอย่างมาก โดยเมื่ออุณหภูมิภายนอกสูงขึ้นจะทำให้ระยะเวลาเปิดเครื่องทำความร้อนสั้นลงในขณะที่ระยะเวลาปิดยาวขึ้น และใช้เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวของการควบคุมเชิงคาบและการสอดคล้องกันของอุณหภูมิของสองช่องนานขึ้นด้วย ซึ่งส่งผลโดยรวมให้คาบการควบคุมยาวขึ้น เมื่ออุณหภูมิภายนอกสูงเกินกว่า 298.15 K พบว่าอุณหภูมิของช่องปิดทั้งสองช่องไม่มีการปรับตัวเข้าหากัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6170371021 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORD: Conjugate Heat Transfer; Natural Convection; Adjacent Cavities

Terdphong Chauykaew : A Parameter Study of Periodic Temperature Control in Two Adjacent Cavities Using Numerical Simulation. Advisor: Asst. Prof. Saran Salakij, Ph.D.

This research investigates various factors that affects the periodic temperature control of two adjacent cavities separated by a common wall. The temperature control of each cavity is performed by using on-off heater which operates independently. ANSYS FLUENT 2019 was used for simulation of the natural convection in cavities and conduction in common wall where Rayleigh number is roughly 105. The heaters are on when the average temperature of the cavity falling below 299 K and off when the average temperature of the cavity rising above 301 K.. The simulation results show that no matter what starting conditions, the periods of temperature control of both cavities eventually reach steady condition. Also, the periodic change of temperatures of both cavities are adapt such that they are almost synchronized. Moreover, in order to study of effects of the common wall properties to the periodic temperature control, the common wall made of copper, aluminum and nickel were investigated. It found that using aluminum wall, which has the smallest thermal storage, the periodic temperature control would reach steady condition the fastest. It also takes smallest time for temperatures of both cavities to synchronize. In addition, the ambient temperature greatly affects the periodic temperature control. When the ambient temperature increases, the on-time of the heaters are shorter while the off-time of the heaters are longer. Overall, it is leading to longer period of temperature control and take longer time for the temperatures of both cavities to synchronize. When the ambient temperature is above 298.15 K, synchronization of temperatures of both cavities is no longer found.

Field of Study: Mechanical Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2019

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยคำแนะนำและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สร้อย ศาลากิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางในการศึกษาวิจัยตลอดจนตรวจเล่มวิทยานิพนธ์ จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ และขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.จิตติน แดงเที่ยง ประธานคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิพนธ์ วรรณโสภากย์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ อาจารย์ ดร.เด่นชัย วรเดชจำเริญ กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่ได้สละเวลาเพื่อเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้งคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่าน ในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่ได้ให้คำแนะนำและความรู้ต่องานวิจัยฉบับนี้

ขอขอบคุณพี่กันตินันท์ เผือกพันธ์ ที่ได้ถ่ายทอดความรู้ประสบการณ์และคำปรึกษาในทุกๆ ด้านรวมถึงเพื่อนๆปริญญาโททุกท่าน สำหรับคำแนะนำ ความช่วยเหลือ กำลังใจ และข้อคิดเห็นต่างๆ ตลอดระยะเวลาในการทำงานวิจัยฉบับนี้

สุดท้ายผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา อันเป็นที่รักยิ่งที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุน การศึกษาของผู้วิจัยเสมอมา และคุณค่าอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขอมอบเป็นกตัญญูบูชาต่่ บิดา มารดา ครูอาจารย์ ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน

เทิดพงศ์ ช่วยแก้ว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ฒ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 หลักการของการแลกเปลี่ยนความร้อน.....	3
2.1.1 การนำความร้อน.....	3
2.1.2 การพาความร้อนแบบธรรมชาติ.....	3
2.2 การคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics).....	4
2.3 ขั้นตอนการคำนวณ CFD.....	7
2.3.1 Pre-Process.....	7
2.3.2 Solver.....	8
2.3.3 Post Process.....	8

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	9
2.4.1 กลุ่มที่มีการคำนึงเฉพาะการพาความร้อนตามธรรมชาติเท่านั้น.....	9
2.4.2 กลุ่มที่คำนึงถึงการถ่ายเทความร้อนร่วมแบบคอนจูเกต.....	16
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	20
3.1 ข้อกำหนดแบบจำลอง (Specify Model)	20
3.2 รูปทรงของแบบจำลอง (Geometry)	20
3.2.1 ช่องปิด (Cavity).....	21
3.2.2 เครื่องทำความร้อน (Heater wall)	21
3.2.3 ผนังร่วม (Common wall).....	21
3.3 เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition).....	22
3.3.1 Cooling wall	22
3.3.2 Adiabatic wall	22
3.4 การสร้างแบบจำลองของพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics Modelling) ในโปรแกรม ANSYS FLUENT.....	23
3.4.1 กำหนดโดเมนของปัญหา (Computational Domain)	23
3.4.2 กำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition)	23
3.4.3 สร้างเอลิเมนต์และขนาดของเวลา (Meshing and Time Step).....	24
3.4.3.2 การศึกษาผลของขนาดเอลิเมนต์และผลของขนาดของเวลา (Mesh & Time Independency).....	24
3.4.3.2.1 การศึกษาผลของขนาดเอลิเมนต์ (Mesh Independency)	25
3.4.3.2.2 การศึกษาผลของขนาดเวลา (Time independency).....	28
3.4.3.2 จำนวนเอลิเมนต์.....	30
3.4.4 ประเมินความถูกต้องของแบบจำลอง (Validation).....	31
3.4.5 กำหนดเงื่อนไขในการควบคุมอุณหภูมิของแบบจำลอง (Temperature Control Condition).....	39

3.4.6 กำหนดขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง (Procedure)	40
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล	41
4.1 ผลของการเริ่มควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดที่สองต่อการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดทั้งสองช่อง	42
4.1.1 การเตรียมการก่อนการศึกษาผลของการเริ่มควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดที่สองต่อการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดทั้งสองช่อง	42
4.1.2 การเปรียบเทียบผลของการเริ่มควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบในช่องปิดที่สองต่อการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดทั้งสองช่อง	44
4.2 ผลของสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นผนังร่วมที่มีต่อการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดทั้งสองช่อง	51
4.2.1 การเตรียมการของการศึกษาผลของสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นผนังร่วมต่อการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบในช่องปิดทั้งสองช่อง	51
4.2.2 การเปรียบเทียบผลของสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นผนังร่วมต่อการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดทั้งสองช่อง	52
4.3 ผลของอุณหภูมิภายนอกที่มีต่อการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดทั้งสองช่อง	59
4.3.1 การเตรียมการของการศึกษาผลของอุณหภูมิภายนอกต่อการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดทั้งสองช่อง	60
4.3.2 การเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิภายนอกต่อการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดทั้งสองช่อง	61
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	69
5.1 สรุปผลการวิจัย	69
5.1.1 ผลของการเริ่มควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดที่สองต่อการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดทั้งสองช่อง	69
5.1.2 ผลของสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นผนังร่วมที่มีต่อการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดทั้งสองช่อง	69

5.1.3 ผลของอุณหภูมิภายนอกที่มีต่อการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดทั้งสองช่อง	70
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต	71
บรรณานุกรม	72
ภาคผนวก ก ลักษณะเอลิเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัย	74
ก.1 ลักษณะเอลิเมนต์ของเครื่องทำความร้อน	75
ก.2 ลักษณะเอลิเมนต์ของผนังร่วม	76
ภาคผนวก ข ผลการจำลองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของช่องปิดทั้งสองเมื่อเริ่มควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดที่สองที่เงื่อนไขต่างกัน	77
ข.1 เมื่อเริ่มควบคุมอุณหภูมิของช่องปิดที่สองเมื่ออุณหภูมิของช่องปิดที่หนึ่งอยู่ในช่วงขาขึ้นที่ 299 K	78
ข.2 เมื่อเริ่มควบคุมอุณหภูมิของช่องปิดที่สองเมื่ออุณหภูมิของช่องปิดที่หนึ่งอยู่ในช่วงขาขึ้นที่ 300 K	79
ข.3 เมื่อเริ่มควบคุมอุณหภูมิของช่องปิดที่สองเมื่ออุณหภูมิของช่องปิดที่หนึ่งอยู่ในช่วงขาลงที่ 301 K	80
ข.4 เมื่อเริ่มควบคุมอุณหภูมิของช่องปิดที่สองเมื่ออุณหภูมิของช่องปิดที่หนึ่งอยู่ในช่วงขาลงที่ 300 K	81
ภาคผนวก ค ผลการจำลองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของช่องปิดทั้งสองเมื่อมีผนังร่วมที่ต่างชนิดกัน	82
ค.1 ผนังร่วมชนิดอลูมิเนียม	83
ค.2 ผนังร่วมชนิดทองแดง	84
ค.2 ผนังร่วมชนิดนิกเกิล	85
ภาคผนวก ง ผลการจำลองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของช่องปิดทั้งสองเมื่ออุณหภูมิภายนอกต่างกัน	86
ง.1 อุณหภูมิภายนอกมีค่าเท่ากับ 296.15 K	87
ง.2 อุณหภูมิภายนอกมีค่าเท่ากับ 296.65 K	88
ง.3 อุณหภูมิภายนอกมีค่าเท่ากับ 297.15 K	89

ง.4 อุณหภูมิภายนอกมีค่าเท่ากับ 297.65 K.....	90
ง.5 อุณหภูมิภายนอกมีค่าเท่ากับ 298.15 K.....	91
ภาคผนวก จ User Define Function (UDF).....	92
จ.1 การทำงานของ UDF.....	93
จ.2 Code สำหรับการควบคุมอุณหภูมิของช่องปิด.....	94
ประวัติผู้เขียน.....	104



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	สรุปงานวิจัยเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนในช่องปิดรูปสี่เหลี่ยมที่คำนึงถึงเฉพาะการพาความร้อนตามธรรมชาติเท่านั้น.....	9
ตารางที่ 2.2	สรุปงานวิจัยเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนในช่องปิดรูปสี่เหลี่ยมตามจำนวนของช่องปิดเฉพาะการถ่ายเทความร้อนแบบคอนจูเกต.....	16
ตารางที่ 3.1	จำนวนเอลิเมนต์ที่ใช้ในการคำนวณ CFD.....	26
ตารางที่ 3.2	ผลต่างของอุณหภูมิที่เรย์เลห์นัมเบอร์ต่าง ๆ.....	37
ตารางที่ 3.3	ผลการประเมินความถูกต้องของแบบจำลอง.....	37
ตารางที่ 4.1	การศึกษาพารามิเตอร์และเงื่อนไขในการสร้างแบบจำลอง.....	41
ตารางที่ 4.2	จำนวนรอบการควบคุมที่คาบการควบคุมเข้าสู่สภาวะคงตัวและร้อยละของเวลาเคลื่อนระหว่างการเริ่มเปิดเครื่องทำความร้อนของสองช่องปิดในแต่ละกรณีเริ่มควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบในช่องปิดที่สอง.....	50
ตารางที่ 4.3	สมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นผนังร่วม.....	51
ตารางที่ 4.4	ค่าของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบเฉพาะช่องปิดที่หนึ่งในกรณีของผนังร่วมแต่ละชนิด.....	52
ตารางที่ 4.5	จำนวนรอบการควบคุมที่คาบการควบคุมเข้าสู่สภาวะคงตัวและร้อยละของเวลาเคลื่อนระหว่างการเริ่มเปิดเครื่องทำความร้อนของสองช่องปิดในแต่ละกรณีของผนังร่วมแต่ละชนิด.....	58
ตารางที่ 4.6	ค่าของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบเฉพาะช่องปิดที่หนึ่งในกรณีอุณหภูมิภายนอกแต่ละค่า.....	60
ตารางที่ 4.7	จำนวนรอบการควบคุมที่คาบการควบคุมเข้าสู่สภาวะคงตัวและร้อยละของเวลาเคลื่อนระหว่างการเริ่มเปิดเครื่องทำความร้อนของสองช่องปิดในแต่ละกรณีของอุณหภูมิภายนอก.....	66

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	7
รูปที่ 2.2 ลักษณะช่องปิดในงานวิจัยของ Reddy & Satake (1980).....	10
รูปที่ 2.3 ลักษณะช่องปิดในงานวิจัยของ Markatos and Pericleous (1984).....	11
รูปที่ 2.4 ลักษณะช่องปิดในงานวิจัยของ John D. Hall et al. (1988).....	12
รูปที่ 2.5 ลักษณะช่องปิดในงานวิจัยของ Hortmann et al.(1990).....	12
รูปที่ 2.6 ลักษณะช่องปิดในงานวิจัยของ O. Aydin et al. (1999).....	13
รูปที่ 2.7 ลักษณะช่องปิดในงานวิจัยของ Ben Nasr et al. (2006).....	14
รูปที่ 2.8 ลักษณะช่องปิดในงานวิจัยของ Marcelo et al. (1995)	15
รูปที่ 2.9 ลักษณะช่องปิดในงานวิจัยของ O. Aydin and Yang (2000).....	15
รูปที่ 2.10 ลักษณะช่องปิดในงานวิจัยของ Kaminski and Prakash (1986).....	16
รูปที่ 2.11 ลักษณะช่องปิดในงานวิจัยของ Misra and Sarkar (1997).....	17
รูปที่ 2.12 ลักษณะช่องปิดในงานวิจัยของ Mobedi (2008).....	18
รูปที่ 2.13 ลักษณะช่องปิดในงานวิจัยของ Turkoglu and Yucel (1996).....	18
รูปที่ 2.14 ลักษณะช่องปิดในงานวิจัยของ Khatamifar et al. (2017).....	19
รูปที่ 3.1 ลักษณะของแบบจำลองของสองช่องปิดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ติดกัน.....	21
รูปที่ 3.2 การกำจัด Ceiling wall และการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนใหม่.....	22
รูปที่ 3.3 ตำแหน่งของ Adiabatic wall และ Cooling wall.....	23
รูปที่ 3.4 จุดที่ใช้ในการคำนวณค่า MAE ของอุณหภูมิของอากาศและ MRAE ของอัตราเร็วของอากาศ ในช่องปิดที่หนึ่ง.....	25
รูปที่ 3.5 ลักษณะของกริดของช่องปิดที่ใช้ในการศึกษาขนาดของเมลิเมนต์.....	26
รูปที่ 3.6 ค่า MAE ของอุณหภูมิอากาศทั้ง 9 จุดในแต่ละขนาดเอลิเมนต์.....	27
รูปที่ 3.7 ค่า MRAE ของอัตราเร็วอากาศอากาศทั้ง 9 จุดในแต่ละขนาดเอลิเมนต์.....	27
รูปที่ 3.8 ค่า MRAE ของอัตราเร็วอากาศทั้ง 8 จุดนอกเหนือจากจุดที่ 5 ในช่องปิดที่หนึ่งในกรณีที่ให้ ความร้อนแบบคงที่สำหรับแต่ละขนาดเอลิเมนต์.....	28
รูปที่ 3.9 ค่า MAE ของอุณหภูมิทั้ง 9 จุดในแต่ละขนาดเวลา.....	29

รูปที่ 3.10 ค่า MRAE ของอัตราเร็วอากาศ 9 จุดในแต่ละขนาดเวลา.....	29
รูปที่ 3.11 การแบ่งเอลิเมนต์ของปริมาตรควบคุม.....	30
รูปที่ 3.12 การพาความร้อนแบบธรรมชาติในช่องปิดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ไม่มีการแผ่รังสี ที่ $Ra = 10^3$	32
รูปที่ 3.13 การพาความร้อนแบบธรรมชาติในช่องปิดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ไม่มีการแผ่รังสี ที่ $Ra = 10^4$	33
รูปที่ 3.14 การพาความร้อนแบบธรรมชาติในช่องปิดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ไม่มีการแผ่รังสี ที่ $Ra = 10^5$	34
รูปที่ 3.15 การพาความร้อนแบบธรรมชาติในช่องปิดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ไม่มีการแผ่รังสี ที่ $Ra = 10^6$	35
รูปที่ 3.16 ช่องปิดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใช้ในการประเมินความถูกต้องของแบบจำลอง.....	36
รูปที่ 3.17 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของการไหลที่ระยะกึ่งกลางความสูงของช่องปิดที่ไม่คำนึงถึงการแผ่รังสีความร้อน.....	38
รูปที่ 3.18 ตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิและอัตราเร็วจำนวน 9 จุดในแต่ละช่องปิดของแบบจำลอง	39
รูปที่ 4.1 การควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบเฉพาะช่องปิดที่หนึ่ง.....	43
รูปที่ 4.2 คาบของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดที่หนึ่ง.....	43
รูปที่ 4.3 เริ่มควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดที่สองเมื่ออุณหภูมิของช่องปิดที่หนึ่งมีอุณหภูมิต่าง ๆ.....	45
รูปที่ 4.4 การควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดทั้งสองในกรณีที่เริ่มควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดที่สองเมื่ออุณหภูมิของช่องปิดที่หนึ่งมีอุณหภูมิต่าง ๆ.....	45
รูปที่ 4.5 คาบของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดทั้งสองช่องในกรณีเริ่มควบคุมพร้อมกันเมื่อช่องปิดที่หนึ่งมีอุณหภูมิต่าง ๆ.....	46
รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบ phase ของช่องปิดทั้งสองช่องกับการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดทั้งสองช่อง.....	47
รูปที่ 4.7 การหาค่าต่าง ๆ ในการคำนวณ $\% \Delta t_n$ ในกรณีอุณหภูมิของช่องปิดที่หนึ่งอยู่ในช่วงขาขึ้น.....	48
รูปที่ 4.8 การหาค่าต่าง ๆ ในการคำนวณ $\% \Delta t_n$ ในกรณีอุณหภูมิของช่องปิดที่หนึ่งอยู่ในช่วงขาลง.....	49
รูปที่ 4.9 ร้อยละของเวลาเคลื่อนระหว่างเริ่มเปิดเครื่องทำความร้อนของสองช่องปิดเทียบกับการควบคุมในแต่ละกรณีเริ่มควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบในช่องปิดที่สอง.....	49
รูปที่ 4.10 ตัวแปร $T_{c1,steady}$ และ T_{c2} สำหรับแสดงอัตราส่วน.....	52

รูปที่ 4.11 อัตราส่วนของคาบในการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดที่หนึ่งกับคาบของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบเฉพาะช่องปิดที่หนึ่งในกรณีของการศึกษาผลของสมบัติของวัสดุ.....	53
รูปที่ 4.12 ตัวแปร $\text{ton},c1,\text{steady}$ และ $\text{ton},2c$ สำหรับแสดงอัตราส่วน.....	53
รูปที่ 4.13 ตัวแปร $\text{toff},c1,\text{steady}$ และ $\text{toff},2c$ สำหรับแสดงอัตราส่วน.....	54
รูปที่ 4.14 อัตราส่วนเวลาในการเปิดเครื่องทำความร้อนของช่องปิดที่หนึ่งกับเวลาในการเปิดของเครื่องทำความร้อนเมื่อควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบเฉพาะช่องปิดที่หนึ่งในการศึกษาผลของสมบัติของวัสดุ.....	54
รูปที่ 4.15 อัตราส่วนเวลาในการปิดเครื่องทำความร้อนของช่องปิดที่หนึ่งกับเวลาในการปิดของเครื่องทำความร้อนเมื่อควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบเฉพาะช่องปิดที่หนึ่งในการศึกษาผลของสมบัติของวัสดุ.....	55
รูปที่ 4.16 อุณหภูมิเฉลี่ยของผนังร่วมในกรณีของการศึกษาผลของสมบัติของวัสดุ.....	57
รูปที่ 4.17 อุณหภูมิเฉลี่ยของผนังร่วมในกรณีของการศึกษาผลของสมบัติของวัสดุเมื่อคาบของการควบคุมอุณหภูมิไม่มีการเปลี่ยนแปลง.....	57
รูปที่ 4.18 ร้อยละของเวลาเคลื่อนระหว่างการเริ่มเปิดเครื่องทำความร้อนของสองช่องปิดเทียบกับรอบการควบคุมในแต่ละกรณีของวัสดุที่เป็นผนังร่วม.....	58
รูปที่ 4.19 การเตรียมการของการศึกษาผลของอุณหภูมิภายนอก.....	60
รูปที่ 4.20 การเริ่มควบคุมอุณหภูมิพร้อมกันทั้งสองช่องปิดเมื่อมีอุณหภูมิภายนอกที่แตกต่างกัน...62	62
รูปที่ 4.21 การควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดทั้งสองเมื่อมีอุณหภูมิภายนอกที่แตกต่างกัน....63	63
รูปที่ 4.22 อัตราส่วนคาบในการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดที่หนึ่งกับคาบของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบเฉพาะช่องปิดที่หนึ่งในการศึกษาผลของอุณหภูมิภายนอก.....	64
รูปที่ 4.23 อัตราส่วนเวลาในการเปิดเครื่องทำความร้อนของช่องปิดที่หนึ่งกับเวลาในการเปิดของเครื่องทำความร้อนเมื่อควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบเฉพาะช่องปิดที่หนึ่งในการศึกษาผลของอุณหภูมิภายนอก.....	65
รูปที่ 4.24 อัตราส่วนเวลาในการปิดเครื่องทำความร้อนของช่องปิดที่หนึ่งกับเวลาในการปิดของเครื่องทำความร้อนเมื่อควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบเฉพาะช่องปิดที่หนึ่งในการศึกษาผลของอุณหภูมิภายนอก.....	65
รูปที่ 4.25 ร้อยละของเวลาเคลื่อนระหว่างการเริ่มเปิดเครื่องทำความร้อนของสองช่องปิดเทียบกับรอบการควบคุมในแต่ละกรณีของอุณหภูมิภายนอก.....	66

คำอธิบายสัญลักษณ์

c_p	ค่าความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่, J/Kg-K
d	ความหนาไรมิติ
g	แรงโน้มถ่วงโลก, m/s ²
H, h	ความสูง, m
k	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน, W/m-K
L, l	ความยาว, m
MAE_T	Mean Absolute Error ของอุณหภูมิ
$MRAE_v$	Mean Relative Absolute Error ของอัตราเร็วของอากาศ
N_{steady}	จำนวนคาบของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบที่มีค่าคงที่
Nu	นัสเซิลท์นัมเบอร์ (Nusselt number)
Pr	พรันด์เทิลนัมเบอร์ (Prandtl number)
q''	ฟลักซ์ความร้อน, W/m ²
Ra	เรย์เลห์นัมเบอร์ (Rayleigh number)
T	อุณหภูมิ, K
T_{lower}	อุณหภูมิของช่องปิดเมื่อมีค่าเท่ากับ 299 K
T_{upper}	อุณหภูมิของช่องปิดเมื่อมีค่าเท่ากับ 301 K
$T_{avg,cavity2}$	อุณหภูมิเฉลี่ยของช่องปิดที่สอง
ΔT	ผลต่างอุณหภูมิ, K
T_0	อุณหภูมิจุดอ้างอิง, K
T_{out}	อุณหภูมิภายนอก
t	เวลา, s

$t_{on,c1,steady}$	เวลาในการเปิดเครื่องทำความร้อนของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบเฉพาะช่องปิดที่หนึ่ง
$t_{on,2c}$	เวลาในการเปิดเครื่องทำความร้อนของช่องปิดที่หนึ่งเมื่อมีการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของทั้งสองช่องปิด
$t_{off,c1,steady}$	เวลาในการปิดเครื่องทำความร้อนของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบเฉพาะช่องปิดที่หนึ่ง
$t_{off,2c}$	เวลาในการปิดเครื่องทำความร้อนของช่องปิดที่หนึ่งเมื่อมีการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของทั้งสองช่องปิด
$\% \Delta t_{steady}$	ร้อยละของเวลาเคลื่อนระหว่างการเริ่มเปิดเครื่องทำความร้อนของสองช่องปิดเทียบกับรอบการควบคุม
u	อัตราเร็วในแนวแกน x , m/s
v	อัตราเร็วในแนวแกน y , m/s
x	ระยะในแนวราบ, m
y	ระยะในแนวตั้ง, m
β	สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Coefficient of thermal expansion), 1/K
α	สัมประสิทธิ์การแพร่ (Thermal Diffusivity), m^2/s
θ	อุณหภูมิไร้มิติ
μ	ความหนืดจลศาสตร์ (Dynamics viscosity), kg/m-s
ν	ความหนืดพลศาสตร์ (Kinematic viscosity), m^2/s
ρ	ความหนาแน่น, kg/m^3
σ	ค่าคงที่ Stefan-Boltzmann, W/m^2-K
$\tau_{c1,steady}$	คาบของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบเฉพาะช่องปิดที่หนึ่ง

T_{2c} คาบของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบเมื่อมีการควบคุมอุณหภูมิพร้อมกันทั้งสองช่อง

Subscripts

h ผนังร้อน

c ผนังเย็น

s ช่องแข็ง



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์

ในปัจจุบันการควบคุมสภาวะอากาศในอาคาร เป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการอยู่อาศัยในปัจจุบัน ซึ่งการควบคุมอุณหภูมิพื้นฐานทำได้โดยการดึงเอาความร้อนออกจากพื้นที่ด้วยเครื่องปรับอากาศสำหรับสภาวะอากาศที่ร้อน หรือการให้ความร้อนด้วยเครื่องทำความร้อนแบบเปิดหรือปิดสำหรับสภาวะอากาศหนาวเย็น ผลจากการเปิดและปิดเครื่องทำความร้อนจะทำให้อุณหภูมิของอากาศภายในห้องเพิ่มขึ้นและลดลงเป็นลักษณะการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบ ในปัจจุบันมีที่อยู่อาศัยที่มีลักษณะติดกันเพิ่มมากขึ้น เช่น คอนโดมิเนียม, โรงแรม และ โรงพยาบาล เป็นต้น ซึ่งในทางทฤษฎี แล้วการควบคุมอุณหภูมิของห้องข้างเคียงจะมีผลต่อการควบคุมอุณหภูมิของห้องที่อยู่ติดกันด้วย จึงเป็นที่น่าสนใจว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในห้องข้างเคียงอันเนื่องมาจากการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบมีผลต่อการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของอีกห้องอย่างไร

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องเปิดสองช่องที่ติดกันและแต่ละช่องมีลักษณะที่เหมือนกันโดยมีผนังร่วมทำหน้าที่กั้นระหว่างช่องเปิดสองช่อง โดยที่แต่ละช่องเปิดควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบด้วยเครื่องทำความร้อนชนิดเปิดและปิดที่แยกการทำงานกันอย่างอิสระ โดยจะทำการศึกษาอิงพารามิเตอร์ถึงปัจจัยที่มีผลต่อการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบในช่องเปิดทั้งสอง โดยการศึกษาจะเป็นการสร้างแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อช่วยจำลองการถ่ายเทความร้อนที่มีทั้งการนำความร้อนและการพาความร้อนตามธรรมชาติเพื่อศึกษาคาบในการควบคุมอุณหภูมิของช่องเปิด, ระยะเวลาในการเปิดและปิดเครื่องทำความร้อนและผลต่างของระยะเวลาในการเปิดเครื่องทำความร้อนภายในช่องเปิดสองช่องที่ติดกันโดยใช้วิธีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งอาศัยการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) ซึ่งเป็นวิธีที่แพร่หลายเป็นอย่างมากในปัจจุบันและเป็นที่ยอมรับของนักวิจัยทั่วไป การสร้างแบบจำลองด้วยวิธีนี้สามารถทำนายปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการเริ่มควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดที่สองที่มีผลต่อการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดทั้งสองช่อง

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของสมบัติของผนังกั้นที่มีผลต่อการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดทั้งสองช่อง

1.2.3 เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิภายนอกที่มีผลต่อการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดทั้งสองช่อง

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 ช่องปิดแต่ละช่องมีการควบคุมอุณหภูมิด้วยเครื่องทำความร้อนชนิดเปิดและปิด

1.3.2 เริ่มควบคุมอุณหภูมิในช่องปิดที่สองเมื่อช่องปิดที่หนึ่งมีอุณหภูมิในช่วงขาขึ้นและขาลงที่พิจารณา คือ 299 K, 300 K, 301 K และ 300 K

1.3.3 ผนังร่วมที่พิจารณา คือ อลูมิเนียม, ทองแดง และ นิกเกิล

1.3.4 อุณหภูมิภายนอกที่พิจารณาคือ 296.15 K, 296.65 K, 297.15 K, 297.65 K และ 298.15 K เมื่อมีการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบในช่วง 299 – 301 K

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้แบบจำลองเชิงเลขของการศึกษาอิงพารามิเตอร์ที่สามารถอธิบายผลกระทบของการควบคุมอุณหภูมิเมื่อมีการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบในเงื่อนไขที่ต่างกัน

1.4.2 สามารถนำการศึกษาอิงพารามิเตอร์มาประยุกต์ใช้กับการควบคุมอุณหภูมิของห้องที่มีระบบซับซ้อนมากขึ้น

1.4.3 สามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่ทำให้เกิดการประสานของอุณหภูมิของช่องปิดสองช่องที่ติดกัน

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล หรือ Computational Fluid Dynamics (CFD) เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาของการเปิดและปิดเครื่องทำความร้อนของสองช่องปิดที่มีผนังติดกันโดยในแต่ละช่องปิดจะมีการควบคุมอุณหภูมิขึ้น-ลง แยกอย่างอิสระ ซึ่งปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นจากการถ่ายเทความร้อนและการไหลของอากาศภายในช่องปิด ซึ่งโดยทั่วไปแล้วมักจะเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนตามธรรมชาติและการถ่ายเทความร้อนแบบคอนจูเกต

2.1 หลักการของการแลกเปลี่ยนความร้อน

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงกลไกของการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในช่องปิดสองช่องที่ติดกันโดยสังเขป

การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) จะทั้งหมด 3 รูปแบบคือ การนำความร้อน (Conduction) การพาความร้อน (Convection) และการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) แต่กลไกการถ่ายเทความร้อนภายในช่องปิดที่ติดกันโดยมีตัวกลางเป็นของไหลจะมีรูปแบบการถ่ายเทความร้อนหลัก อยู่สองรูปแบบคือ การนำความร้อน และการพาความร้อนตามธรรมชาติ สำหรับการนำความร้อนจะเกิดขึ้นที่ผนังร่วมและเครื่องทำความร้อนของทั้งสองช่องปิดที่ติดกัน ส่วนการพาความร้อนตามธรรมชาติจะเกิดระหว่างอากาศภายในช่องปิดและผนังร่วมโดยอากาศที่ไหลอยู่จะเป็นตัวพาความร้อนตามธรรมชาติระหว่างสองช่องปิดที่มีผนังติดกัน โดยการถ่ายเทความร้อนในช่องปิดจะเป็นแบบสภาวะไม่คงที่ (Unsteady-state Heat Transfer) คืออัตราการถ่ายเทความร้อนจะแปรผันตามเวลาโดยที่กลไกการถ่ายเทความร้อนทั้งสองรูปแบบหลักมีดังนี้

2.1.1 การนำความร้อน

เป็นปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในตัวกลางที่เป็นของแข็งหรือของไหลที่ไม่มีการเคลื่อนที่ จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อวัตถุสองชิ้นที่มีอุณหภูมิต่างกันมาสัมผัสกัน ปัจจัยที่มีความสำคัญในการนำความร้อนคือ ผลต่างของอุณหภูมิและสมบัติของวัสดุ การนำความร้อนในช่องปิด

2.1.2 การพาความร้อนแบบธรรมชาติ

เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้เฉพาะของไหล จะเกิดขึ้นได้ในของเหลวและก๊าซซึ่งเป็นตัวกลางที่สามารถเคลื่อนที่ได้ แต่การพาความร้อนในช่องปิดจะเป็นแบบการพาความร้อนตามธรรมชาติ เมื่อของไหลได้รับความร้อนจะเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความ

หนาแน่นของของไหลโดยของไหลที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจะมีความหนาแน่นลดลงทำให้ลอยตัวสูงขึ้นซึ่งการลอยตัวนี้จะไม่มีความแรงภายนอกกระทำเรียกว่า แรงลอยตัว (Buoyant force) และของไหลที่มีความหนาแน่นต่ำกว่าจะไหลมาแทนที่ให้เกิดการถ่ายเทความร้อนแบบการพาตามธรรมชาติ

2.2 การคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics)

การคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics) เป็นวิธีการที่ช่วยแก้ปัญหาที่เกี่ยวกับการไหลของของไหล (Fluid flow) และการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer) แบบต่าง ๆ โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) เช่น Finite Volume และ Finite Difference เป็นต้น

การคำนวณพลศาสตร์ของไหลเป็นการใช้สมการอธิบายปรากฏการณ์ต่าง ๆ ของการไหลและการถ่ายเทความร้อนที่ขึ้นอยู่กับเวลาซึ่งมีสมการพื้นฐานอยู่ทั้งหมด 3 สมการ

สมการอนุรักษ์มวล (Continuity Equation)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} + \rho \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots(2.1)$$

เป็นสมการที่อธิบายว่ามวลในระบบไม่สามารถสร้างหรือทำลายหายไปได้ นั่นหมายความว่าปริมาณมวลที่ไหลเข้าและไหลออกจากปริมาตรควบคุมจะต้องมีค่าเท่ากันตลอดหรืออัตราการเปลี่ยนแปลงมวลในระบบจะต้องเท่ากับศูนย์

สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum Equation)

จากกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน (Newton Second Law) ได้บอกไว้ว่า แรงเท่ากับมวลคูณด้วยความเร่ง ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมในปริมาตรควบคุมใด ๆ มีค่าเท่ากับแรงลัพธ์ที่กระทำต่อปริมาตรและผิวของปริมาตรควบคุมนั้น ๆ

X – Component

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \dots\dots\dots(2.2)$$

Y – Component

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} = \rho g_y - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \dots\dots\dots(2.3)$$

เนื่องจากการพาความร้อนตามธรรมชาติ (Natural convection) โดยที่แรงลอยตัว (Buoyant force) ของของไหลอันเนื่องมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิสามารถประมาณค่าจากการใช้สมมติฐานของบูซซิเนสก์ (Boussinesq approximation) ที่สมมติว่ามีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นเฉพาะพจน์ของแรงลอยตัวในขณะที่พจน์อื่น ๆ ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งในความเป็นจริงแล้วเทอมของแรงโน้มถ่วงมีเฉพาะในทิศแนวดิ่ง ดังนั้น สมการอนุรักษ์โมเมนตัมในแนวแกน y จึงเปลี่ยนรูปเป็น

X - Component

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \dots \dots \dots (2.4)$$

Y - Component

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} = \rho g_y \beta \Delta T - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \dots \dots \dots (2.5)$$

สมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy Equation)

เป็นสมการที่บ่งบอกว่าพลังงานไม่มีการสูญหายไปไหน โดยจากกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์กล่าวไว้ว่า “อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานในปริมาตรควบคุมจะมีค่าเท่ากับอัตราความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่ปริมาตรควบคุมรวมกับอัตราของงานที่กระทำบนปริมาตรควบคุม” ซึ่งสามารถเขียนสมการในรูปของอัตราการเปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลาได้ดังนี้

- Energy equation inside the air cavity มหาวิทยาลัย

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p u \frac{\partial T}{\partial x} + \rho c_p v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \dots \dots \dots (2.6)$$

- Heat conduction equation inside the solid walls

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_s \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \dots \dots \dots (2.7)$$

สรุปสมการพื้นฐาน

จากที่กล่าวมาทั้งหมดนั้นจะเห็นได้ว่าสมการพื้นฐานที่เป็นตัวกำหนดลักษณะทางกายภาพของการไหลและการถ่ายเทความร้อนประกอบด้วยสาม สมการ ได้แก่ สมการอนุรักษ์มวล สมการอนุรักษ์โมเมนตัม และสมการอนุรักษ์พลังงาน ซึ่งสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

Continuity equation

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (2.8)$$

Momentum equation

X - Component

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \dots\dots\dots (2.9)$$

Y - Component

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} = \rho g_y \beta \Delta T - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \dots\dots\dots (2.10)$$

Energy equation

- Energy equation inside the air cavity

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p u \frac{\partial T}{\partial x} + \rho c_p v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \dots\dots\dots (2.11)$$

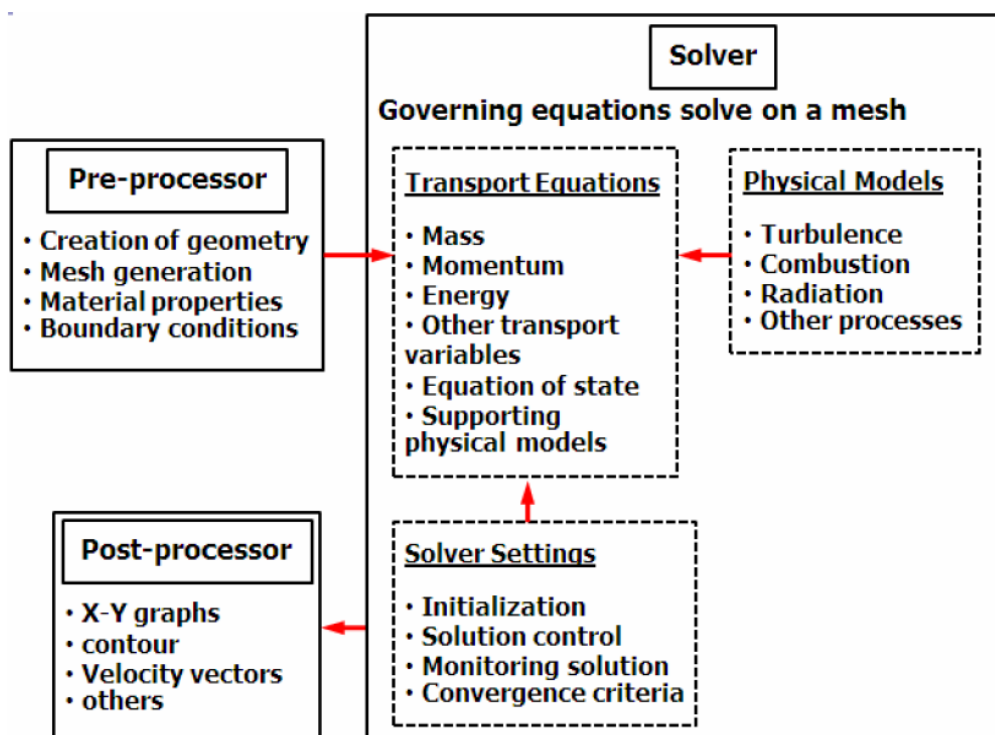
- Heat conduction equation inside the solid walls

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_s \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \dots\dots\dots (2.12)$$

โดยในการคำนวณทางคณิตศาสตร์ของสมการพื้นฐานทั้งสามสมการนี้เพื่อหาคำตอบของการไหลและการถ่ายเทความร้อนมีความยุ่งยากในการหาคำตอบจึงต้องทำการคำนวณโดยใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการคำนวณหรือเรียกว่าสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

2.3 ขั้นตอนการคำนวณ CFD

ในปัจจุบันการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลหรือการถ่ายเทความร้อนสามารถทำได้โดยการใช้โปรแกรมสำเร็จรูปซึ่งมีขายอย่างแพร่หลายในท้องตลาด เช่น CFX, FLUENT และ STAR-CD เป็นต้น โปรแกรมแต่ละตัวถูกสร้างมาให้ใช้งานได้ง่ายเป็นมิตรกับผู้ใช้และมีลำดับขั้นตอนในการสร้างแบบจำลองที่สามารถสรุปเป็นแผนภาพดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (อ้างอิงคัดลอกจาก [1])

จากรูปที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

2.3.1 Pre-Process

ขั้นตอน Pre-Process เป็นขั้นตอนในการเตรียมความพร้อมและกำหนดเงื่อนไขของปัญหาประกอบไปด้วยขั้นตอนย่อย ดังนี้

2.3.1.1 Creation of Geometry เป็นการสร้างรูปร่างของปัญหาซึ่งเป็นขั้นตอนแรกในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

2.3.1.2 Mesh Generation เป็นการแบ่งปริมาตรควบคุมซึ่งจะถูกแบ่งเป็นปริมาตรเล็ก ๆ โดยอาจจะถูกแบ่งเป็นรูปสี่เหลี่ยมเล็ก ๆ หรือรูปสามเหลี่ยมเล็ก ๆ ขึ้นอยู่กับลักษณะของ Computational Domain

2.3.1.3 Solid and Fluid properties เป็นการกำหนดว่าของไหลและของแข็งในระบบเป็นแบบใดและมีสมบัติเป็นอย่างไร เช่นการกำหนด ความหนาแน่นของของเหลว หรือ การกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของแข็ง

2.3.1.4 Boundary Condition เป็นการกำหนดขอบเขตของปริมาตรควบคุมแต่ละด้านว่ามีสมบัติเป็นอย่างไร เช่น เป็นผนังที่เป็นฉนวน หรือ เป็นผนังที่มีการสร้างความร้อนค่าหนึ่ง เป็นต้น

2.3.2 Solver

ขั้นตอน Solver เป็นขั้นตอนกำหนดค่าเริ่มต้นในการเริ่มการคำนวณและสิ้นสุดการคำนวณทางคณิตศาสตร์ ประกอบไปด้วยขั้นตอนย่อย ดังนี้

2.3.2.1 Transport Equations เป็นการกำหนดรูปแบบเฉพาะของ Fluid domain

2.3.2.2 Physical models เป็นการเลือกใช้งานโมเดลต่าง ๆ ที่เหมาะสมกับแบบจำลองที่ จะต้องการสร้างขึ้นมา เช่น หากแบบจำลองมีการไหลแบบปั่นป่วน ก็สามารถเลือกใช้โมเดลความปั่นป่วน แบบต่าง ๆ เป็นต้น

2.3.2.3 Solver Setting เป็นการกำหนดค่าเริ่มต้น (Initialization) และการควบคุมการแก้ปัญหา (Solution control) รวมไปถึงการสังเกตการลู่เข้าของคำตอบ (Monitoring Convergence)

2.3.3 Post Process

เป็นขั้นตอนสุดท้ายในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นขั้นตอนการแสดงผลที่ได้จากการคำนวณและสามารถดึงค่า Parameter ต่าง ๆ เพื่อนำมาวิเคราะห์ผลจากแบบจำลองต่อไป โดยสามารถนำมาพลอตกราฟในรูปแบบของ X – Y Plot การแสดง Vector Plot และ Contour plot เป็นต้น ขึ้นอยู่กับสิ่งที่ต้องการนำเสนอ

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เป็นการศึกษางานวิจัยในอดีตเป็นแบบจำลองเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนภายในช่องปิดรูปสี่เหลี่ยมแบบการพาความร้อนตามธรรมชาติและการถ่ายเทความร้อนแบบคอนจูเกตซึ่งประกอบไปด้วยการนำความร้อนที่อาศัยตัวกลางที่เป็นของแข็ง เช่น ผนังนำความร้อนทั้งแบบแนวนอนแนวตั้ง และการพาความร้อนโดยอาศัยตัวกลางที่สามารถเคลื่อนที่ได้ เช่น อากาศ ของไหลต่าง ๆ ในที่นี้จะกล่าวถึงแค่การพาความร้อนตามธรรมชาติซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในการถ่ายเทความร้อนด้วยการพา อันเกิดจาก การเคลื่อนที่ของของไหลเกิดจากแรงลอยตัว (Buoyancy force) ในการไหลจะไม่มีแรงภายนอกมากระทำ เมื่อของไหลได้รับความร้อนและมีอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นของโมเลกุลของของไหลลดลงทำให้ของไหลที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าซึ่งมีความหนาแน่นของโมเลกุลของของไหลมากกว่าเคลื่อนที่มาแทนที่ทำให้ของไหลเกิดการเคลื่อนที่ ซึ่งในงานวิจัยที่ศึกษามาสามารถแบ่งรูปแบบของการศึกษาการถ่ายเทความร้อนในช่องปิดตามรูปแบบของการถ่ายเทความร้อนได้ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่มีการคำนึงเฉพาะการพาความร้อนตามธรรมชาติเท่านั้น และกลุ่มที่คำนึงถึงการถ่ายเทความร้อนร่วมแบบคอนจูเกต (Conjugate Heat Transfer) ที่คำนึงถึงทั้งการพาความร้อนตามธรรมชาติและการนำความร้อนในผนัง อนึ่ง ทั้งสองกลุ่มการศึกษาใช้สมมติฐานว่าผลจากการถ่ายเทความร้อนแบบแผ่รังสีสามารถละทิ้งได้

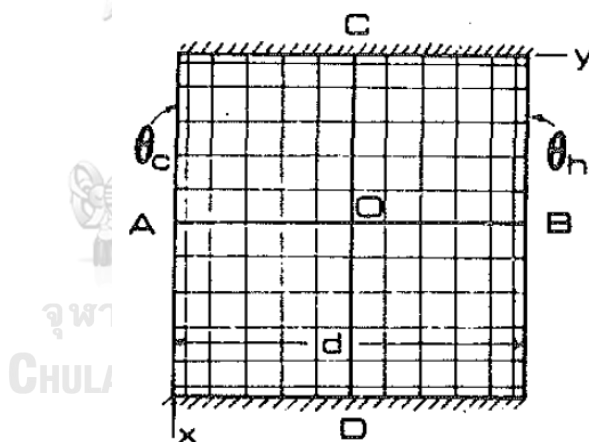
2.4.1 กลุ่มที่มีการคำนึงเฉพาะการพาความร้อนตามธรรมชาติเท่านั้น

ในกลุ่มนี้สามารถแบ่งย่อยได้อีกสองกลุ่มย่อยตามตำแหน่งของแหล่งความร้อน ดังนี้ ตารางที่ 2.1 สรุปงานวิจัยเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนในช่องปิดรูปสี่เหลี่ยมที่คำนึงถึงเฉพาะการพาความร้อนตามธรรมชาติเท่านั้น

Heat from	No	Author	Ra	Flow	Simulation
side wall	1	Reddy & Satake	$< 10^4$	Laminar	Steady
	2	de Vahl Davis	$10^3 - 10^6$	Laminar and Turbulent	Steady
	3	Markatos and Pericleous	$10^3 - 10^{16}$	Laminar and Turbulent	Steady
	4	John D. Hall et al.	$10^3 - 10^6$	Laminar	Transient
	5	Hortmann et al.	$10^4 - 10^6$	Laminar	Steady
	6	O. Aydin et al.	$10^3 - 10^7$	Laminar	Steady
	7	Ben Nasr et al.	$10^2 - 10^6$	Laminar	Steady
bottom wall	1	Marcelo et al.	$10^3 - 10^7$	Laminar	Steady
	2	O. Aydin and Yang	$10^3 - 10^6$	Laminar	Steady

2.4.1.1 การศึกษาช่องปิดที่มีการพาความร้อนตามธรรมชาติจากแหล่งความร้อนที่อยู่ด้านข้างของช่องปิด

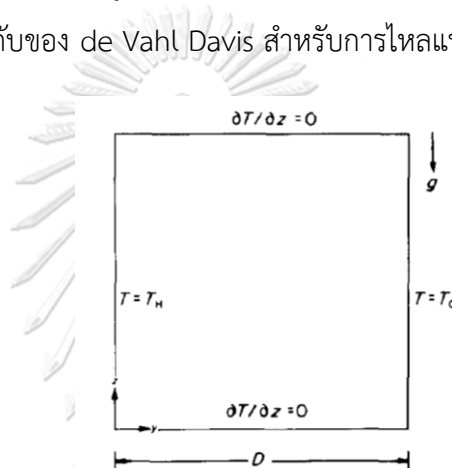
Reddy & Satake [2] ทำการศึกษาเชิงเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนตามธรรมชาติภายในช่องปิดสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบ 2 มิติ ที่มีผนังในแนวตั้งเป็นผนังที่มีอุณหภูมิคงที่ที่ต่างกันด้วยวิธี stream function – vorticity formulation และวิธี penalty function ในเบื้องต้นพบว่า ผลลัพธ์ที่ได้รับจาก stream function – vorticity ประสบข้อเสียเปรียบตรงเงื่อนไขขอบเขตทำให้มีผลลัพธ์ที่มีความคลาดเคลื่อนถึง 30 % ส่วนผลลัพธ์ที่ได้รับจาก penalty method มีความคลาดเคลื่อนที่น้อยกว่า ในการศึกษาที่มีเรย์เลห์นัมเบอร์มากกว่า 10^4 พบว่า stream function – vorticity ให้คำตอบที่มีความคลาดเคลื่อนสูง ในขณะที่ penalty model จะต้องมีการกำหนดค่า penalty parameter ที่ดีด้วยสำหรับค่าเรย์เลห์นัมเบอร์สูง ค่า penalty parameter จึงต้องมีค่ามากแต่ในทางกลับกันจะทำให้เป็นเงื่อนไขที่ไม่เหมาะสม



รูปที่ 2.2 ลักษณะช่องปิดในงานวิจัยของ Reddy & Satake (อ้างอิงคัดลอกจาก [2])

de Vahl Davis [3] ทำการสร้างแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนตามธรรมชาติภายในช่องปิดสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบ 2 มิติ ที่มีผนังด้านข้างเป็นแบบอุณหภูมิคงที่โดยที่ข้างหนึ่งเป็นผนังที่มีอุณหภูมิสูงและอีกฝั่งหนึ่งเป็นผนังที่มีอุณหภูมิต่ำ ซึ่งทำเพื่อใช้เปรียบเทียบผลลัพธ์ของการคำนวณพลศาสตร์ของไหล โดยมีค่า เรย์เลห์นัมเบอร์ ตั้งแต่ 10^3 ถึง 10^6 ซึ่งเป็นการไหลแบบราบเรียบผลจากแบบจำลองพบว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนขึ้นอยู่กับค่าเรย์เลห์นัมเบอร์ และมีความผิดพลาดน้อยกว่า 1 % ที่เรย์เลห์นัมเบอร์สูง และ 10^{-10} ที่เรย์เลห์นัมเบอร์ต่ำ

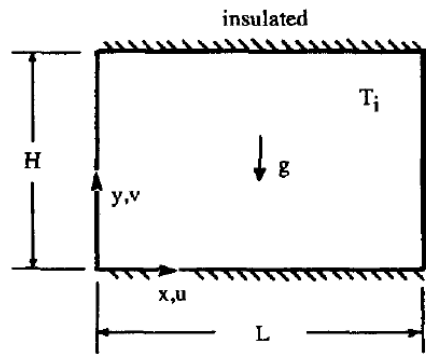
Markatos and Pericleous [4] ทำการจำลองการไหลแบบลอยตัวและการถ่ายเทความร้อนของอากาศทั้งการไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วนด้วยผลต่างของอุณหภูมิที่ผนังในช่องปิดสี่เหลี่ยมจัตุรัสด้วยวิธีการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ที่มีค่าเรย์เลห์นัมเบอร์ตั้งแต่ 10^3 ถึง 10^{16} และพิจารณาความเหมาะสมของเซลล์และกริดแบบยูนิฟอร์มในทุก ๆ เรย์เลห์นัมเบอร์ สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน สำหรับเรย์เลห์นัมเบอร์ที่มีค่ามากกว่า 10^6 จะใช้แบบจำลองความปั่นป่วน ($k \sim \epsilon$) แบบจำลองนี้ประกอบด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกและการไล่ระดับของความหนาแน่นอากาศ โดยเปรียบเทียบกับแบบจำลองของ de Vahl Davis ผลจากแบบจำลองพบว่าในขณะที่เรย์เลห์นัมเบอร์สูงขึ้นอัตราเร็วของอากาศจะมีอัตราเร็วสูงขึ้นและมีการไหลเข้าใกล้กับผนังมากขึ้นและเปรียบเทียบค่าความถูกต้องซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับของ de Vahl Davis สำหรับการไหลแบบราบเรียบ



รูปที่ 2.3 ลักษณะช่องปิดในงานวิจัยของ Markatos and Pericleous (อ้างอิงคัดลอกจาก [4])

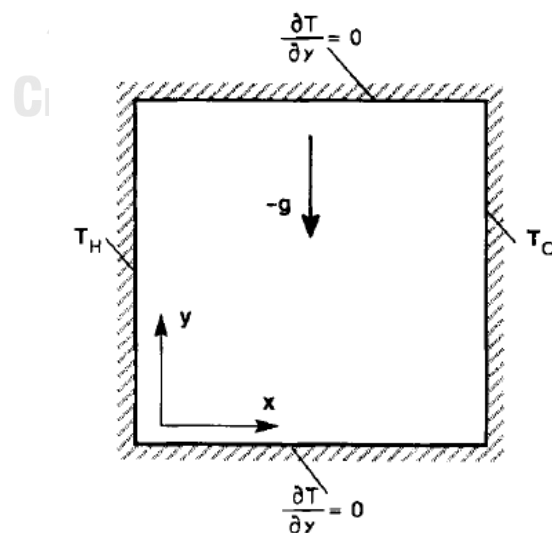
John D. Hall et al. [5] ทำการจำลองการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาตามธรรมชาติภายในแบบไม่คงที่ในช่องปิดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่เต็มไปด้วยของไหล มีแหล่งความร้อนตลอดแนวตั้งของช่องปิด ส่วนด้านที่เหลือเป็นฉนวนและมีอุณหภูมิเริ่มต้นค่าหนึ่งที่มีค่าเรย์เลห์นัมเบอร์อยู่ในช่วง 10^3 ถึง 10^6 ค่าพรีนัมเบอร์ 7 ซึ่งเป็นของไหลที่มีความหนืดสูงมากเมื่อเทียบกับอากาศ ผลจากแบบจำลองพบว่า ณ เรย์เลห์นัมเบอร์ต่ำ ($Ra = 10^3$) ในช่วงเริ่มต้นมีการหมุนวนของของไหลใกล้กับบริเวณตรงกลางของช่องสี่เหลี่ยมและพบลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิคล้ายกับการนำความร้อนเพียงอย่างเดียวและเมื่อเวลาผ่านไปพบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิจะเข้าใกล้แหล่งจ่ายความร้อนและการหมุนวนของของไหลจะหยุดลงจึงกลายเป็นการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว ณ เรย์เลห์นัมเบอร์สูง ($Ra = 10^6$) การไหลและการกระจายตัวของอุณหภูมิต่างกันเป็นอย่างมากในช่วงเริ่มต้นพบว่าการกระจุกของอุณหภูมิจากบริเวณแหล่งจ่ายความร้อนและค่อยๆ กระจายตัวออกไปทางผนังด้านบนและพบการไหลวนของของไหลซึ่งมีจุดศูนย์กลางเข้าใกล้กับแหล่งจ่ายความร้อน จึงสามารถ

สรุปได้ว่า ในตอนเริ่มต้นในทุก ๆ เรย์เลห์นัมเบอร์อัตราการนำความร้อนจะมีค่าสูงและเมื่อเวลาผ่านไปจะลดลง เนื่องจากมีแต่การใส่ความร้อนสู่ระบบเพียงอย่างเดียว



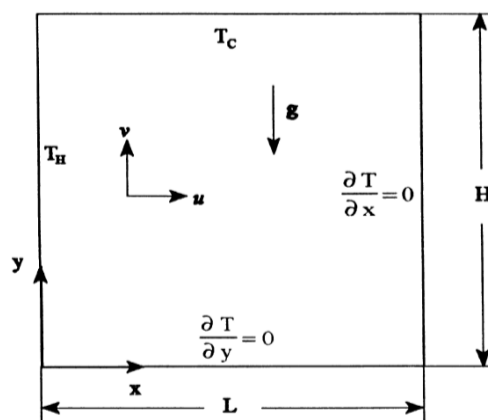
รูปที่ 2.4 ลักษณะช่องปิดในงานวิจัยของ John D. Hall et al. (อ้างอิงคัดลอกจาก [5])

Hortmann et al. [6] ทำการสร้างแบบจำลองเพื่อเป็นตัวเปรียบเทียบค่าความถูกต้องของการทำนายผลของการถ่ายเทความร้อนตามธรรมชาติโดยมีการไหลแบบราบเรียบ แบบจำลองเป็นช่องปิดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสซึ่งมีผนังสองข้างเป็นผนังที่มีอุณหภูมิที่แตกต่างกันและมีอุณหภูมิที่คงที่ และผนังที่เหลือจะเป็นฉนวน กริดเป็นแบบละเอียดมาก โดยการแบ่งช่วงใช้เป็น second order central differencing สำหรับการพาความร้อนและการนำความร้อน ทำการจำลองโดยใช้เรย์เลห์นัมเบอร์ตั้งแต่ 10^4 ถึง 10^6 โดยกริดที่ละเอียดที่สุดจะมีขนาด 640×640 โดยมีความผิดพลาดที่ต่ำกว่า 0.01 % สำหรับทุก เรย์เลห์นัมเบอร์



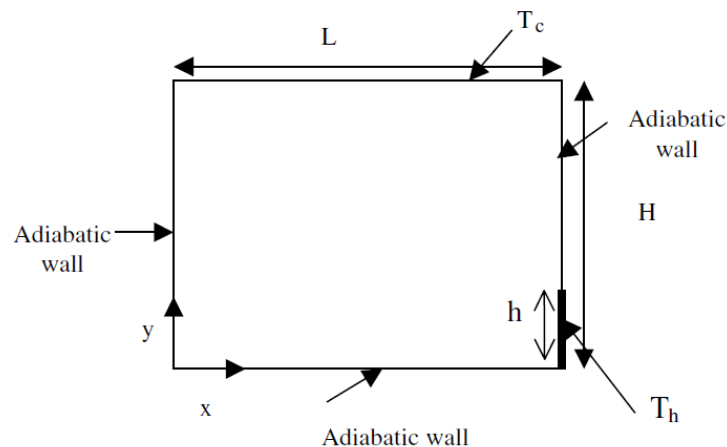
รูปที่ 2.5 ลักษณะช่องปิดในงานวิจัยของ Hortmann et al. (อ้างอิงคัดลอกจาก [6])

O. Aydin et al. [7] ทำการจำลองการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาตามธรรมชาติของอากาศภายในช่องปิดที่มีการให้ความร้อนด้านข้างและมีการระบายความร้อนจากทางด้านบนซึ่งผนังทั้งสองชนิดเป็นอุณหภูมิคงที่ วิเคราะห์โดยใช้ Stream function-vorticity ใช้ค่าเรย์เลห์นัมเบอร์ในช่วง 10^3 ถึง 10^7 และมีการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนความยาวต่อความสูงตั้งแต่ 0.25 ไปจนถึง 4.0 ผลของเรย์เลห์นัมเบอร์ที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนอย่างมีนัยสำคัญคือเมื่ออัตราส่วนความยาวต่อความสูงมากกว่า 1 และอิทธิพลของอัตราส่วนเมื่อช่องปิดมีความสูงและค่าเรย์เลห์นัมเบอร์สูงทำให้มีการถ่ายเทความร้อนที่ดียิ่งขึ้น



รูปที่ 2.6 ลักษณะช่องปิดในงานวิจัยของ O. Aydin et al. (อ้างอิงคัดลอกจาก [7])

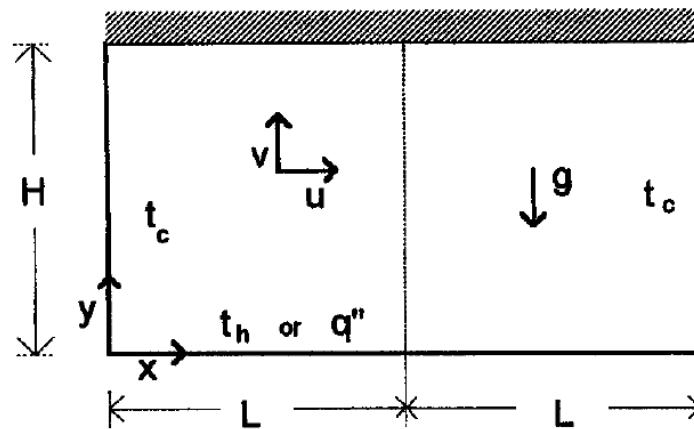
Ben Nasr et al. [8] ทำการจำลองการพาตามธรรมชาติในช่องปิดที่มีแหล่งความร้อนมาจากผนังที่มุมของช่องและเพดานที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าและคงที่ เป็นการจำลองแบบคงที่และมีการพาความร้อนตามธรรมชาติแบบราบเรียบ โดยผนังทั้งหมดเป็นฉนวนที่ความร้อนไม่สามารถไหลผ่านไปได้ โดยใช้อากาศที่ ค่าพรันด์เทิลนัมเบอร์เท่ากับ 0.71 และช่วงของเรย์เลห์นัมเบอร์ตั้งแต่ $10^2 - 10^6$ จากแบบจำลองพบว่าอากาศที่มีอุณหภูมิสูงจะไหลวนไปยังเพดานเพื่อระบายความร้อนออกด้วยอัตราเร็วและการเพิ่มขึ้นของเรย์เลห์นัมเบอร์ทำให้ค่าของนัสเซลนัมเบอร์สูงขึ้นด้วยส่งผลให้มีการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้นในรูปแบบการพาความร้อนตามธรรมชาติ



รูปที่ 2.7 ลักษณะช่องปิดในงานวิจัยของ Ben Nasr et al. (อ้างอิงคัดลอกจาก [8])

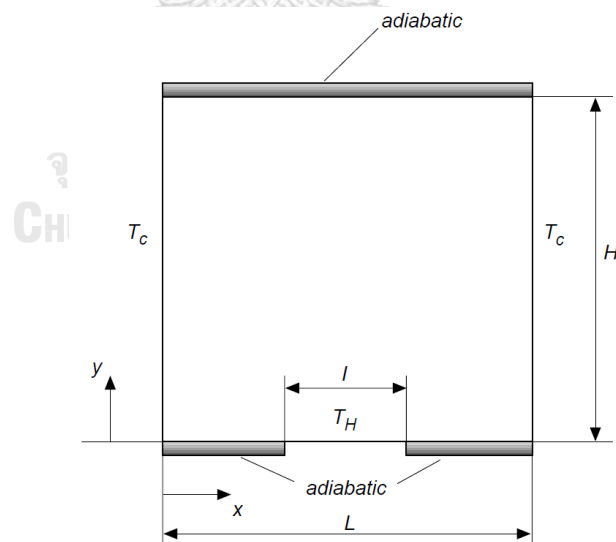
2.4.1.2 การศึกษาช่องปิดที่มีการพาความร้อนตามธรรมชาติจากแหล่งความร้อนที่อยู่ด้านล่างของช่องปิด

Marcelo et al. [9] ทำการจำลองการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาตามธรรมชาติภายในช่องปิด ในระบบ 2 มิติที่มีแหล่งความร้อนที่เป็นอุณหภูมิคงที่หรือเป็นฟลักซ์ความร้อนคงที่อยู่ที่ผนังด้านล่างของช่องปิดและมีการระบายความร้อนออกทางผนังด้านข้างทั้งสองด้านที่มีอุณหภูมิคงที่ค่าเรย์เลห์นัมเบอร์ตั้งแต่ 10^3 ถึง 10^7 ค่าพรีนัมเบอร์เท่ากับ 0.7 และ 7.0 และทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนความยาวต่อความสูง ตั้งแต่ 1 ไปจนถึง 9 จากแบบจำลองพบว่า สำหรับช่องปิดสี่เหลี่ยมจัตุรัส $L/H = 1$ ไม่ว่าจะแหล่งความร้อนจะเป็นแบบอุณหภูมิคงที่หรือเป็นฟลักซ์ความร้อนคงที่ไม่ได้ส่งผลมากมายต่อการไหลของอากาศหรือเส้นแสดงรูปร่างของการกระจายอุณหภูมิ แต่สำหรับช่องปิดแบบยาว $L/H > 1$ จะเห็นความแตกต่างได้อย่างชัดเจน ในกรณีแหล่งความร้อนเป็นอุณหภูมิคงที่ทำให้เกิดกระกระจายตัวของความร้อนไม่ทั่วถึงจะเกิดกระกระจุกของเส้นความร้อนที่ผนังด้านซ้ายของช่องปิดและการไหลของอากาศจะไหลแค่บางส่วนสำหรับเรย์เลห์นัมเบอร์ต่ำกว่า 10^6 ในทางกลับกันกรณีที่แหล่งความร้อนเป็นฟลักซ์ความร้อนคงที่พบว่าการกระจายตัวของความร้อนและเส้นแสดงการไหลของอากาศสามารถกระจายและครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดของช่องปิดได้ดีแม้กระทั่งใช้ค่าเรย์เลห์นัมเบอร์ต่ำ



รูปที่ 2.8 ลักษณะช่องปิดในงานวิจัยของ Marcelo et al. (อ้างอิงคัดลอกจาก [9])

O. Aydin and Yang [10] ทำการจำลองการถ่ายเทความร้อนของอากาศในช่องปิดสี่เหลี่ยมในระบบ 2 มิติ ที่มีแหล่งความร้อนเป็นผนังอยู่ด้านล่างและมีผนังที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอยู่ที่ด้านข้างทั้งสองฝั่ง ทำการปรับเปลี่ยนสัดส่วนความยาวของแหล่งความร้อนต่อความยาวของผนังด้านล่างทั้งหมดตั้งแต่ $1/5$ ถึง $4/5$ โดยใช้ค่าเรย์เลห์นัมเบอร์ตั้งแต่ $10^3 - 10^6$ จากแบบจำลองพบว่า ในทุก ๆ ความยาวของผนังแหล่งความร้อนค่าสเกลนัมเบอร์ซึ่งเป็นค่าที่ส่งผลโดยตรงกับอัตราการถ่ายเทความร้อนนั้นได้มีค่าที่สูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของค่าเรย์เลห์นัมเบอร์



รูปที่ 2.9 ลักษณะช่องปิดในงานวิจัยของ O. Aydin and Yang (อ้างอิงคัดลอกจาก [10])

2.4.2 กลุ่มที่คำนึงถึงการถ่ายเทความร้อนร่วมแบบคอนจูเกต

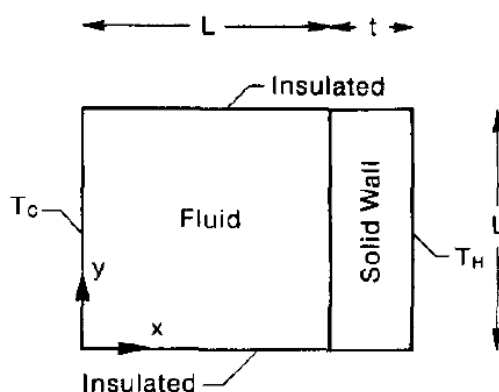
ในกลุ่มนี้สามารถแบ่งย่อยได้อีกสองกลุ่มย่อยตามจำนวนของช่องปิด ดังนี้

ตารางที่ 2.2 สรุปงานวิจัยเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนในช่องปิดรูปสี่เหลี่ยมตามจำนวนของช่องปิด
เฉพาะการถ่ายเทความร้อนแบบคอนจูเกต

Heat from	No	Author	Ra	Flow	Simulation
Single Cavity	1	Kaminski and Prakash	$10^3 - 10^7$	Laminar	Steady
	2	Misra and Sarkar	$10^3 - 10^6$	Laminar	Steady
	3	Mobedi	$10^3 - 10^6$	Laminar	Steady
Multiple Cavities	1	Turkoglu and Yucel	–	Laminar	Steady
	2	Khatamifar et al.	$10^5 - 10^9$	Laminar	Steady

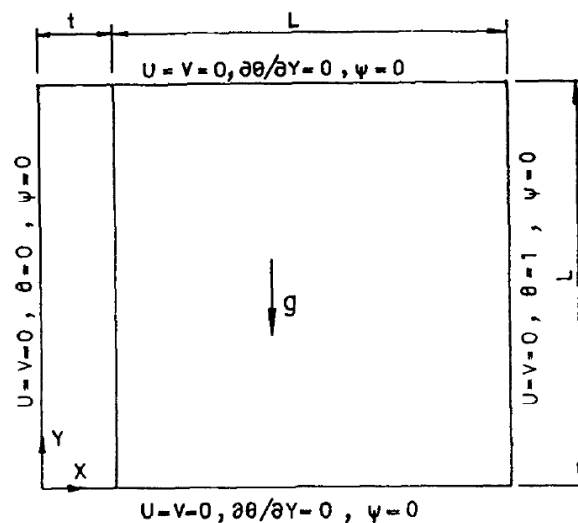
2.4.2.1 การศึกษาการสร้างแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนแบบคอนจูเกตที่มีลักษณะของช่องปิดเพียงช่องเดียวเท่านั้น

Kaminski and Prakash [11] ทำการจำลองการถ่ายเทความร้อนสม่ำเสมอแบบคอนจูเกตภายในช่องปิดสี่เหลี่ยมจตุรัสที่มีผนังนำความร้อนในแนวตั้งที่มีการปรับความหนาของผนังได้และผนังด้านบนและด้านล่างจะเป็นฉนวน โดยจะใช้ค่าความหนาแน่นของอากาศแบบ Boussinesq ที่ ค่าพรันด์เทิลนัมเบอร์ 0.7 และช่วงของกราสฮอฟนัมเบอร์ 10^3 ถึง 10^7 จากแบบจำลองพบว่าไม่ว่าผนังนำความร้อนจะมีความหนาเท่าไรก็ไม่ส่งผลต่อลักษณะการถ่ายเทความร้อนหรือรูปแบบของการกระจายตัวของอุณหภูมิ



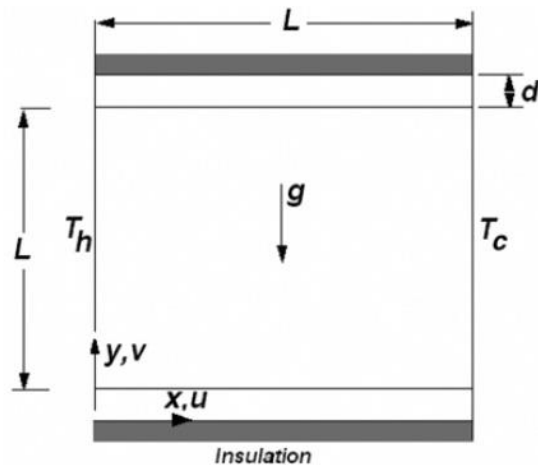
รูปที่ 2.10 ลักษณะช่องปิดในงานวิจัยของ Kaminski and Prakash (อ้างอิงคัดลอกจาก [11])

Misra and Sarkar [12] ทำการจำลองการถ่ายเทความร้อนแบบคอนจูเกตในช่องปิดสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยใช้ Finite Element Method มาสร้างแบบจำลองด้วย Galerkin formulation สำหรับแบบจำลองนั้นจะมีผนังในแนวตั้งที่มีการปรับความหนาของผนังหนาความร้อนเป็นตัวแปรไร้มิติตั้งแต่ 0.1, 0.2 และ 0.4 ซึ่งติดตั้งอยู่ที่ฝั่งเย็นของช่องปิด โดยใช้ช่วงเรย์เลห์นัมเบอร์ตั้งแต่ 10^3 ถึง 10^6 จากแบบจำลองพบว่าผลของความหนาของกำแพงส่งผลให้ชั้นความหนาของของไหลมีค่ามากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในทางกลับกันรูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิในช่องปิดขึ้นอยู่กับอัตราเร็วของของไหลที่ไหลอยู่ในช่องปิดไม่ขึ้นอยู่กับความหนาแต่อย่างใด



รูปที่ 2.11 ลักษณะช่องปิดในงานวิจัยของ Misra and Sarkar (อ้างอิงคัดลอกจาก [12])

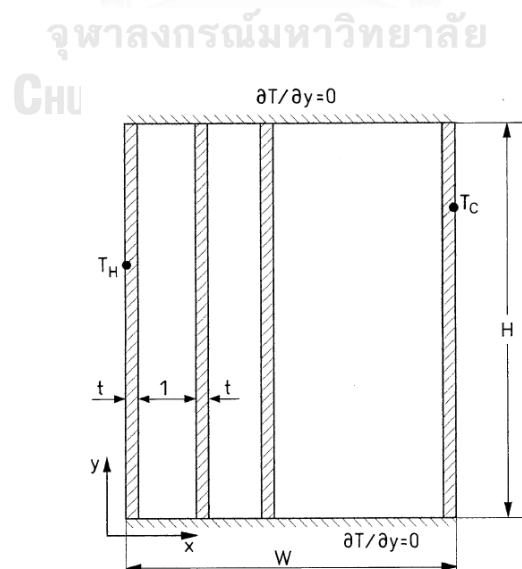
Mobedi [13] ทำการจำลองผลของการนำความร้อนของผนังในแนวนอนและการพาความร้อนตามธรรมชาติในช่องปิดสี่เหลี่ยมโดยที่ผนังในแนวตั้งทั้งสองด้านจะมีอุณหภูมิคงที่และผิวด้านนอกของผนังในแนวนอนจะถูกกั้นด้วยฉนวนกันความร้อน โดยมีความหนาของผนังในแนวนอนเป็นตัวแปรไร้มิติ 0.1 ที่มีค่าเรย์เลห์นัมเบอร์ตั้งแต่ 10^3 ถึง 10^6 และอัตราส่วนการนำความร้อนตั้งแต่ 0 ถึง 50 จากแบบจำลองพบว่า แม้ว่าผนังในแนวนอนจะไม่สามารถลดอุณหภูมิของผนังในแนวตั้งได้แต่มันสามารถช่วยให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและการกระจายตัวของอุณหภูมิสูงขึ้น



รูปที่ 2.12 ลักษณะช่องปิดในงานวิจัยของ Mobedi (อ้างอิงคัดลอกจาก [13])

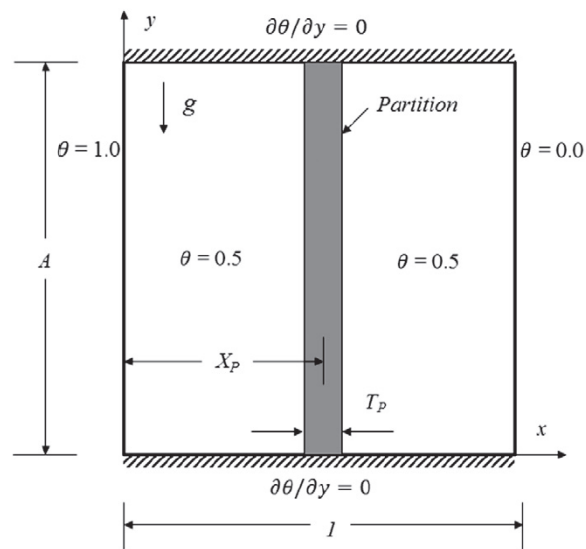
2.4.2.2 การศึกษาการสร้างแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนแบบคอนจูเกตที่มีลักษณะของช่องปิดมากกว่าหนึ่งช่อง

Turkoglu and Yucel [14] ทำการจำลองการถ่ายเทความร้อนแบบคอนจูเกตที่ในช่องปิดหลายช่องโดยมีผนังนำความร้อนเป็นตัวกั้นในแต่ละช่อง และมีผนังที่มีอุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำซึ่งมีค่าคงที่ไว้ทั้งสองฝั่งของช่องปิด ซึ่งการคำนวณใช้วิธี SIMPLE ในการสร้างแบบจำลองครั้งนี้ และจะทำการแบ่งช่องปิดย่อยจาก 1 ช่องไปจนถึง 5 ช่อง พบว่าการเพิ่มขึ้นของช่องปิดด้วยการกั้นของผนังนำความร้อนไม่ส่งผลต่อค่าตัวเลขนัมเบอร์เฉลี่ย ค่าตัวเลขนัมเบอร์เฉลี่ยยังคงแปรผันตรงกับค่าเรย์เลห์นัมเบอร์เสมอ ในทางกลับกันนั้นอัตราส่วนของความสูงและความยาวของช่องปิดไม่มีผลต่อค่าตัวเลขนัมเบอร์เฉลี่ย



รูปที่ 2.13 ลักษณะช่องปิดในงานวิจัยของ Turkoglu and Yucel (อ้างอิงคัดลอกจาก [14])

Khatamifar et al. [15] ทำการจำลองการถ่ายเทความร้อนแบบคอนจูเกตที่มีลักษณะช่องปิดสองช่องติดกันโดยมีกำแพงกั้นไว้ซึ่งกำแพงนี้สามารถปรับเปลี่ยนขนาดและตำแหน่งได้ผนังด้านหนึ่งเป็นอุณหภูมิสูงและผนังอีกด้านหนึ่งเป็นอุณหภูมิต่ำกว่า ทั้งสองผนังเป็นอุณหภูมิคงที่ โดยใช้ค่าเรย์เลห์นัมเบอร์ 10^5 ถึง 10^9 ในการสร้างแบบจำลองจากแบบจำลองในทุก ๆ ค่าเรย์เลห์นัมเบอร์พบว่าค่าสเซลนัมเบอร์เฉลี่ยแปรผันตรงกับค่าเรย์เลห์นัมเบอร์แต่ในทางกลับกันค่าสเซลนัมเบอร์เฉลี่ยกลับลดลงเมื่อผนังมีความหนามากขึ้นและยังพบอีกว่าตำแหน่งของกำแพงกั้นไม่มีผลต่อค่าสเซลนัมเบอร์เฉลี่ยเลย



รูปที่ 2.14 ลักษณะช่องปิดในงานวิจัยของ Khatamifar et al. (อ้างอิงคัดลอกจาก [15])

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

บทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดขั้นตอนในการศึกษาทางวิจัย โดยเป็นการประยุกต์ใช้การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล หรือ Computational Fluid Dynamics (CFD) ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาของการเปิดและปิดเครื่องทำความร้อนในสองช่องปิดที่ติดกัน โดยจะเป็นการสร้างแบบจำลองการถ่ายเทความร้อน การกระจายอุณหภูมิและอัตราเร็วของอากาศในช่องปิด

3.1 ข้อกำหนดแบบจำลอง (Specify Model)

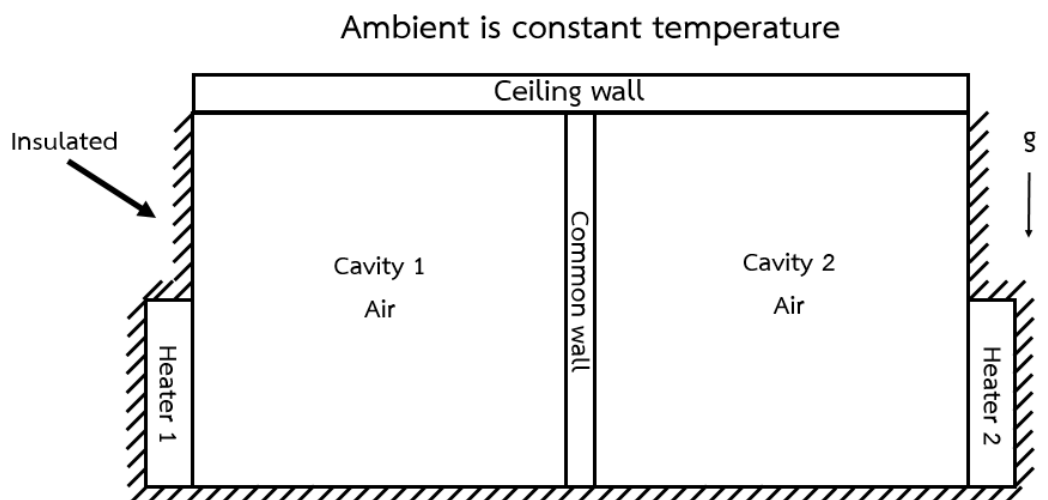
การสร้างแบบจำลองใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS FLUENT 2019 R1 Academic version ที่มีความสามารถในการแก้ปัญหากลศาสตร์ไหลและการถ่ายเทความร้อนพร้อมกันได้

สมมติฐานเบื้องต้นของปัญหาได้แก่

1. สร้างแบบจำลองในระบบ 2 มิติ
2. กำหนดการไหลของอากาศเป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) ที่เรย์เลห์นัมเบอร์เท่ากับ 10^5
3. กำหนดความหนาแน่นของอากาศเป็นสมมติฐานของบูซซิเนสค์ (Boussinesq approximation)
4. สมบัติของของแข็งมีค่าคงที่

3.2 รูปทรงของแบบจำลอง (Geometry)

สำหรับลักษณะและรูปร่างของช่องปิดสองช่องที่ติดกันเป็นช่องปิดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสและมีเครื่องทำความร้อนเป็นลักษณะแนวตั้งซึ่งตั้งอยู่บริเวณมุมของช่องปิดโดยช่องปิดสองช่องนี้จะถูกกั้นด้วยผนัง ซึ่งจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ดังที่แสดงอยู่ในรูป 3.1



รูปที่ 3.1 ลักษณะของแบบจำลองของสองช่องปิดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ติดกัน

3.2.1 ช่องปิด (Cavity)

ช่องปิดมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาดความกว้าง 50 มิลลิเมตร และ ความความสูง 50 มิลลิเมตรที่เต็มไปด้วยอากาศที่ค่าพรีนซ์เทิลนัมเบอร์เท่ากับ 0.71, Thermal expansion เท่ากับ $1/300$ K ซึ่งช่องด้านซ้ายจะถูกกำหนดเป็นช่องปิดที่ 1 และช่องด้านขวาจะถูกกำหนดเป็นช่องปิดที่ 2 ตามลำดับ โดยผนังแต่ละด้านของช่องปิดแต่ละช่องจะประกอบไปด้วยผนังที่เป็นฉนวนและผนังที่มีการระบายความร้อนด้วยการพาความร้อนภายนอก

3.2.2 เครื่องทำความร้อน (Heater wall)

เครื่องทำความร้อนในแบบจำลองมีลักษณะเป็นผนังความร้อนซึ่งมีขนาดความกว้าง 3 มิลลิเมตร และขนาดความสูง 25 มิลลิเมตร ซึ่งเครื่องทำความร้อนด้านซ้ายจะถูกกำหนดเป็นเครื่องทำความร้อนตัวที่ 1 และเครื่องทำความร้อนด้านขวาจะถูกกำหนดเป็นเครื่องทำความร้อนตัวที่ 2 ตามลำดับ โดยเครื่องทำความร้อนทำมาจากไม้ก้าซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ในการทำเครื่องทำความร้อนซึ่งมีสมบัติทางกลและทางความร้อนดังนี้ ความหนาแน่นเท่ากับ 3000 kg/m^3 , ค่าความร้อนจำเพาะเท่ากับ 0.21 J/kg-K และค่าการนำความร้อนเท่ากับ 0.22 W/m-K

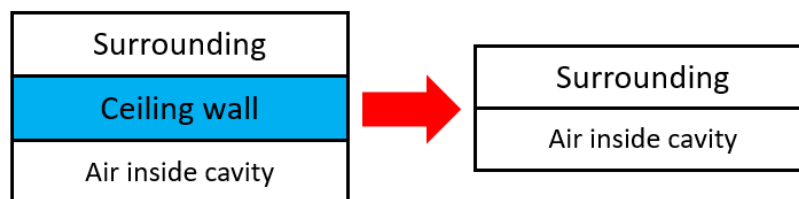
3.2.3 ผนังร่วม (Common wall)

ผนังร่วมเป็นส่วนที่ตั้งอยู่กึ่งกลางของช่องปิดทั้งสองช่องซึ่งทำหน้าที่กั้นช่องปิดสองช่องให้มีขนาดที่เท่ากัน มีขนาดความหนา 0.24 มิลลิเมตร และขนาดความสูง 50 มิลลิเมตร ซึ่งสำหรับแบบจำลองพื้นฐานผนังร่วมนี้ที่ทำมาจากวัสดุทองแดง

3.3 เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition)

3.3.1 Cooling wall

สำหรับผนังระบายความร้อนเป็นผนังที่ยอมให้ความร้อนที่มาจากเครื่องทำความร้อนทั้งสองตัวสามารถถ่ายเทออกไปสู่สิ่งแวดล้อมได้โดยที่อุณหภูมิภายนอกมีค่าที่คงที่ และมีตำแหน่งอยู่ที่ด้านบนของช่องปิดทั้งสองช่องรวมไปถึงผนังร่วมด้วย และมีความหนา 6 mm ซึ่งในการสร้างแบบจำลองนี้จะทำการศึกษาผลของอุณหภูมิภายนอกต่อการประสานกันของอุณหภูมิภายในช่องปิดสองช่องที่ติดกัน โดยจะทำการศึกษา อุณหภูมิภายนอกมีค่า 297.15 K และอุณหภูมิภายนอกแต่ละค่าจะมีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเท่ากับ 3.8479 W/m²-K และเพื่อเป็นการลดจำนวน mesh ที่ใช้ในการคำนวณลง ทางผู้ศึกษาจึงนำวิธี Thermal resistance มาเพื่อกำจัด Ceiling wall ออกไป หลังจากกำจัด Ceiling wall แล้วทางผู้ศึกษาจึงขอตั้งชื่อใหม่เป็น Cooling wall ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเท่ากับ 3.4309 W/m²-K ตำแหน่งของ Cooling wall แสดงดังรูปที่ 3.3 โดยการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนใหม่ ซึ่งจากการกำจัด Ceiling wall พบว่าสามารถลดจำนวนกริดลงไปได้ถึง 13.10% แสดงดังรูปที่ 3.2



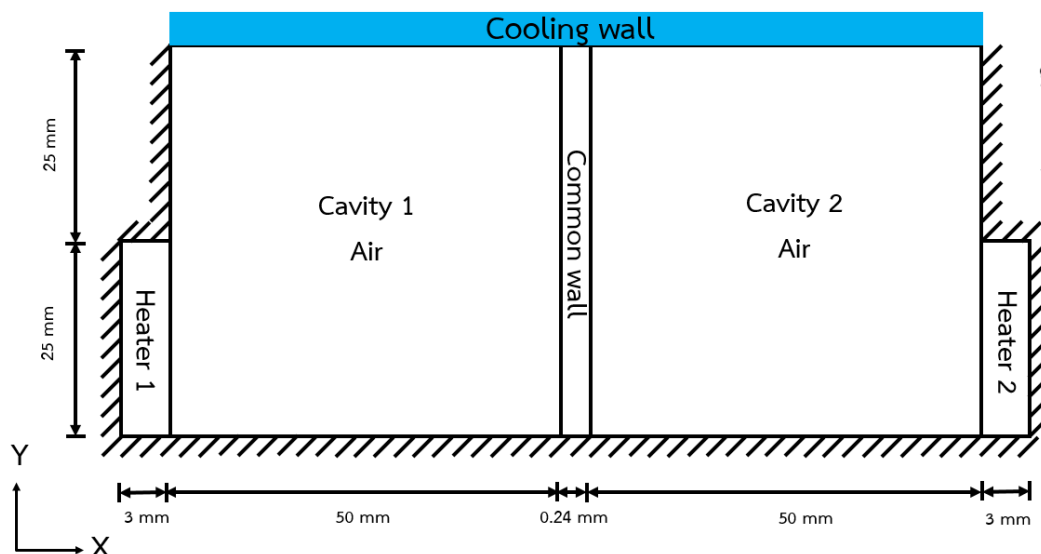
$$R_{total} = R_{ceiling\ wall} + R_{convection}$$

$$\frac{1}{Ah_{new}} = \frac{L}{AK_{ceiling\ wall}} + \frac{1}{Ah_{convection}}$$

รูปที่ 3.2 การกำจัด Ceiling wall และการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนใหม่

3.3.2 Adiabatic wall

สำหรับผนังที่เป็นฉนวนจะเป็นผนังที่อยู่รอบแบบจำลองนอกเหนือจากผนังด้านบนซึ่งเป็นผนังระบายความร้อน การที่มีผนังด้านข้างและด้านล่างเป็นฉนวนนั้นก็เพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าพลักซ์ความร้อนที่มาจากเครื่องทำความร้อนจะถูกถ่ายเทเข้าสู่อากาศอย่างเต็มที่และไม่ให้ความร้อนถ่ายเทออกสู่สิ่งแวดล้อมโดยเด็ดขาด แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ตำแหน่งของ Adiabatic wall และ Cooling wall

3.4 การสร้างแบบจำลองของพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics Modelling) ในโปรแกรม ANSYS FLUENT

แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสำหรับงานวิจัยนี้จะสร้างขึ้นในโปรแกรม ANSYS FLUENT 2019 โดยมีขั้นตอนทั้งหมด 6 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

3.4.1 กำหนดโดเมนของปัญหา (Computational Domain)

ขั้นตอนแรกของการสร้างแบบจำลองคือการกำหนดโดเมนของปัญหาหรือปริมาตรควบคุมซึ่งเป็นการกำหนดขอบเขตของปัญหาในการคำนวณ สำหรับงานวิจัยนี้ซึ่งเป็นการสร้างแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนภายในช่องปิดสองช่องที่ติดกันซึ่งจะมีทั้งวัตถุที่เป็นของไหลและของแข็ง โดยแบบจำลองจะอยู่ในรูปแบบ 2 มิติ

ขั้นตอนการสร้างโดเมนของปัญหานี้ใช้โปรแกรม DesignModeler ในโปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS FLUENT 2019 โดยเริ่มจากการวาดแบบที่สนใจขึ้นมาและกำหนดขนาดและชื่อของพื้นผิวต่าง ๆ ให้ได้ตามที่ออกแบบไว้

3.4.2 กำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition)

ในการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตในงานวิจัยนี้จะมีเงื่อนไขขอบเขตอยู่ 2 ประเภท คือ Cooling wall และ Adiabatic wall ซึ่งรายละเอียดของการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตทั้งหมดได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 3.3

3.4.3 สร้างเอลิเมนต์และขนาดของเวลา (Meshing and Time Step)

หลังจากสร้างโดเมนของปัญหานี้แล้วขั้นตอนต่อไปคือการแบ่งเอลิเมนต์หรือ Meshing ซึ่งใช้โปรแกรม Meshing รวมไปถึงการหาขนาดของเวลาในโปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS FLUENT 2019 R1 ACADEMIC ก่อนเริ่มการสร้างแบบจำลองจะต้องทำการศึกษาผลของขนาดเอลิเมนต์และขนาดของเวลาที่เหมาะสมต่อการสร้างแบบจำลอง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.4.3.2 การศึกษาผลของขนาดเอลิเมนต์และผลของขนาดของเวลา (Mesh & Time Independency)

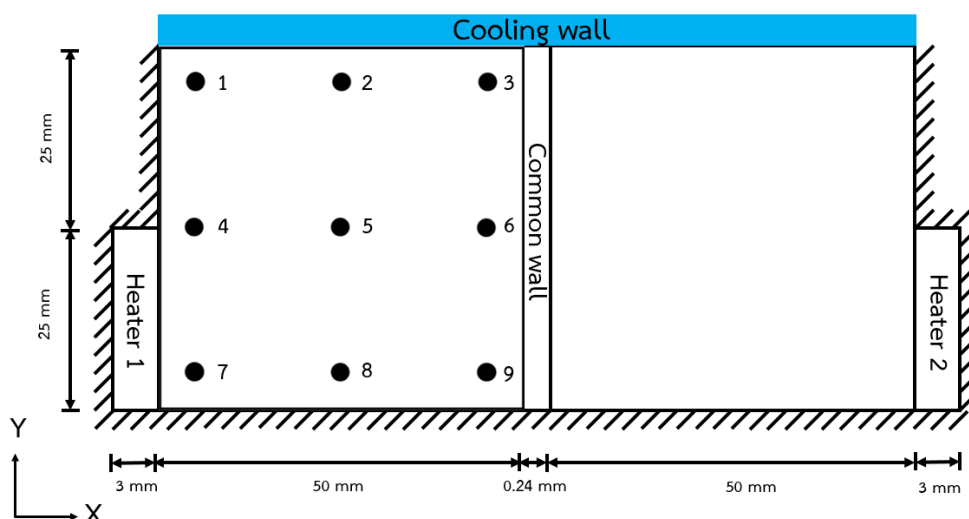
ในขั้นตอนนี้จะเป็นขั้นตอนในการศึกษาผลของขนาดเอลิเมนต์ของปริมาตรควบคุมและผลของขนาดเวลาที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณ CFD ให้มีความแม่นยำของคำตอบและใช้เวลาในการคำนวณที่เหมาะสมต่อการคำนวณแต่ละครั้ง โดยทั้งการหาขนาดของเอลิเมนต์และขนาดของเวลาที่เหมาะสมจะพิจารณาจากค่า Mean Absolute Error (MAE) และใช้ค่า Mean Relative Absolute Error (MRAE) ของอุณหภูมิของอากาศและอัตราเร็วของอากาศตามลำดับ เพื่อใช้ยืนยันความเหมาะสมของขนาดเอลิเมนต์และขนาดของเวลาที่จะใช้ในการสร้างแบบจำลอง ซึ่งในการคำนวณค่า MAE_T และ $MRAE_V$ ได้มาจากผลการเปรียบเทียบการคำนวณอุณหภูมิของอากาศและอัตราเร็วของอากาศที่ขนาดเอลิเมนต์และขนาดเวลาใด ๆ เทียบกับผลของการคำนวณอุณหภูมิของอากาศและอัตราเร็วของอากาศที่ขนาดเอลิเมนต์และขนาดของเวลาละเอียดที่สุดที่ตำแหน่งเดียวกัน ตั้งแต่เริ่มจำลองทุกชั้นเวลาจนถึงวินาทีที่ 60 โดยจะทำการเปรียบเทียบทั้งหมด 9 ตำแหน่งในช่องปิดที่หนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.4 (หมายเหตุ ช่องปิดที่หนึ่งและช่องปิดที่สองมีขนาดและสมบัติของอากาศเหมือนกัน) ค่า MAE_T และ $MRAE_V$ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$MAE_T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |T_i - T_{i,ref}|$$

เมื่อ	n	คือ จำนวนของข้อมูล
	$T_{i,ref}$	คือ ข้อมูลอุณหภูมิของอากาศที่ได้จากการคำนวณของขนาดเอลิเมนต์และขนาดของเวลาที่ละเอียดที่สุดที่ชั้นเวลาที่ i
	T_i	คือ ข้อมูลอุณหภูมิที่ของอากาศได้จากการคำนวณของขนาดเอลิเมนต์และขนาดของเวลาใด ๆ ที่ชั้นเวลาที่ i

$$MRAE_V = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{V_i - V_{i,ref}}{V_{i,ref}} \right|$$

- เมื่อ n คือ จำนวนของข้อมูล
- $V_{i,ref}$ คือ ข้อมูลอัตราเร็วของอากาศที่ได้จากการคำนวณของขนาด
เอลิเมนต์และขนาดของเวลาที่ละเอียดที่สุดที่ชั้นเวลาที่ i
- v_i คือ ข้อมูลอัตราเร็วของอากาศที่ได้จากการคำนวณของขนาด
เอลิเมนต์และขนาดของเวลาใด ๆ ที่ชั้นเวลาที่ i



รูปที่ 3.4 จุดที่ใช้ในการคำนวณค่า MAE ของอุณหภูมิของอากาศและ MRAE ของอัตราเร็วของอากาศ
ในช่องปิดที่หนึ่ง

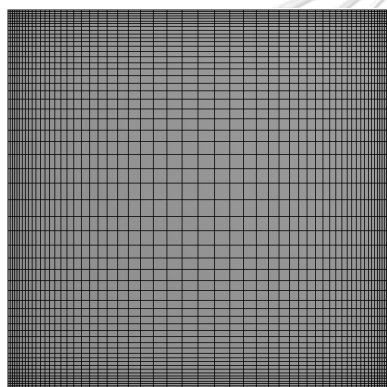
3.4.3.2.1 การศึกษาผลของขนาดเอลิเมนต์ (Mesh Independency)

ในที่นี้จะเป็นเพียงส่วนหนึ่งของช่องปิดที่เต็มไปด้วยอากาศซึ่งเป็นของไหลที่มีสมบัติ μ ค่าพรีรันด์
เทิลนัมเบอร์เท่ากับ 0.71 โดยมีลักษณะการให้ความร้อนแบบคงที่เท่ากับ 11321.4 W/m^2 ซึ่งทำให้
 Ra เท่ากับ 10^5 และใช้ขนาดเวลาคงที่เท่ากับ 0.05 วินาทีในการทดสอบขนาดเอลิเมนต์ จากผลของ
ศึกษาขนาดเอลิเมนต์จากเอลิเมนต์ใหญ่ (กริดหยาบ) และ เอลิเมนต์เล็ก (กริดละเอียด) ตามลำดับโดย
ทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิและอัตราเร็วแต่ละจุดในการแบ่งเอลิเมนต์แต่ละแบบเทียบกับการแบ่งเอ
ลิเมนต์ที่เล็กที่สุด คือ กริดขนาด 148×148 จำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมดที่ศึกษาสำหรับช่องปิดแสดงดัง

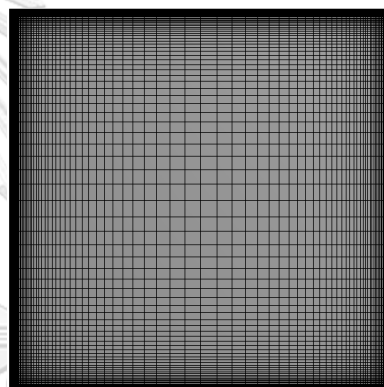
ตารางที่ 3.1 และรูปที่ 3.5 โดยผลการคำนวณ CFD ของแบบจำลองทั้ง 4 กรณี ซึ่งแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.6 - 3.8 จะถูกนำมาเปรียบเทียบเพื่อหาขนาดของเอลิเมนต์ที่เหมาะสม

ตารางที่ 3.1 จำนวนเอลิเมนต์ที่ใช้ในการคำนวณ CFD

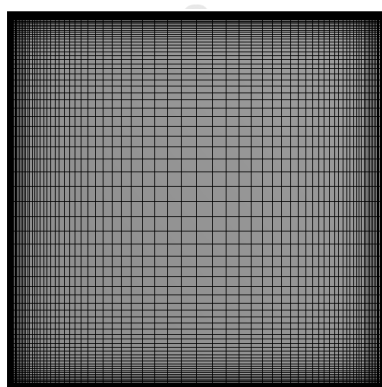
Cavity				
No.	Grid	Bias Factor	Growth rate	Element
1	56x56	8	1.0828	3136
2	68x68	16	1.0907	4624
3	92x92	40	1.0856	8464
4	148x148	400	1.0853	21904



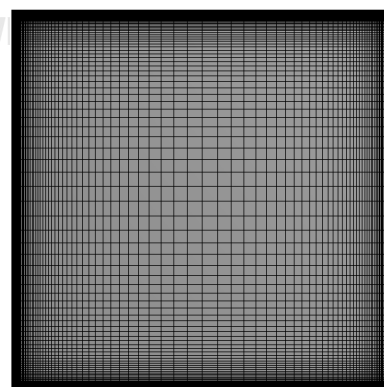
(ก) 56x56



(ข) 68x68

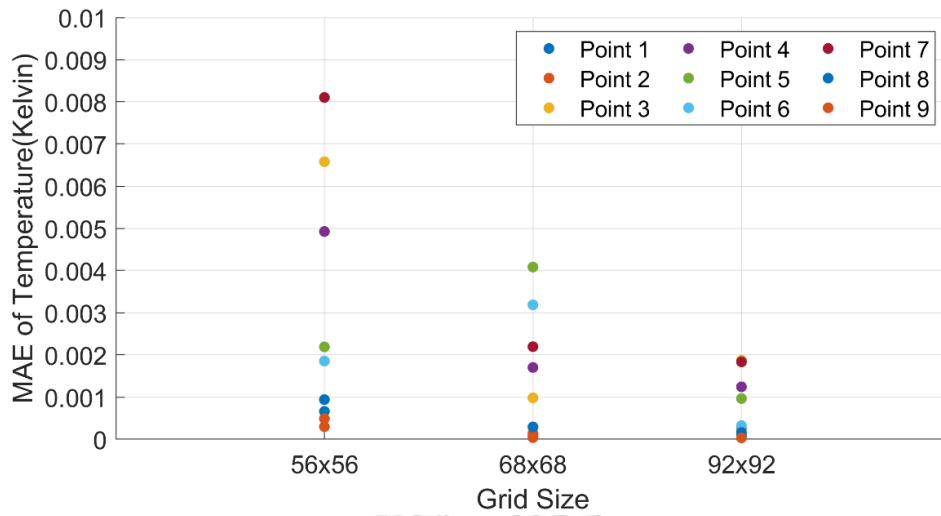


(ค) 92x92

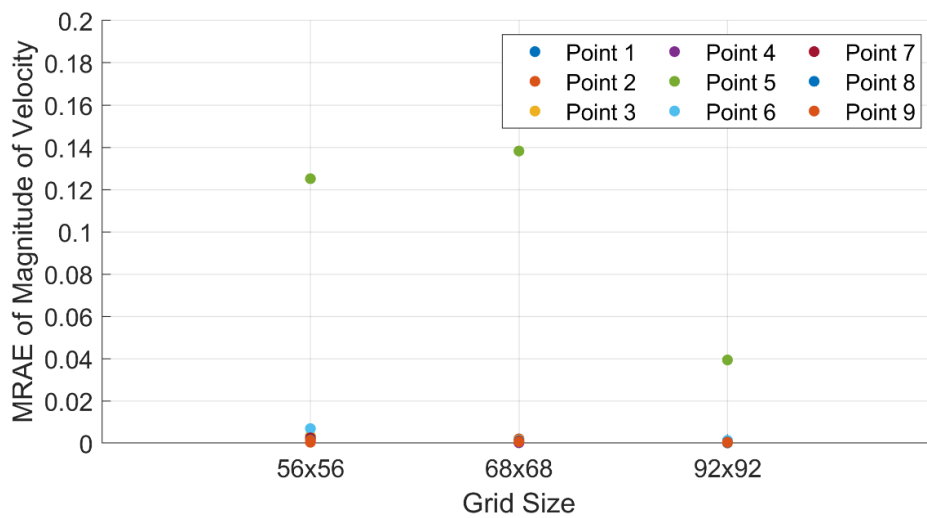


(ง) 148x148

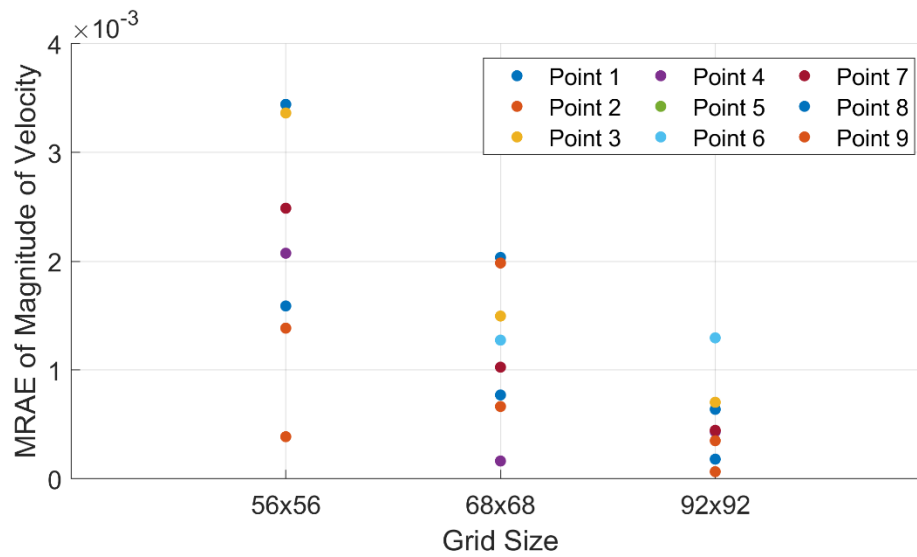
รูปที่ 3.5 ลักษณะของกริดของช่องปิดที่ใช้ในการศึกษาขนาดของเอลิเมนต์



รูปที่ 3.6 ค่า MAE ของอุณหภูมิอากาศทั้ง 9 จุดในช่องปิดที่หนึ่งในกรณีให้ความร้อนแบบคงที่ สำหรับแต่ละขนาดเอลิเมนต์



รูปที่ 3.7 ค่า MRAE ของอัตราเร็วอากาศอากาศทั้ง 9 จุดในช่องปิดที่หนึ่งในกรณีให้ความร้อนแบบคงที่สำหรับแต่ละขนาดเอลิเมนต์



รูปที่ 3.8 ค่า MRAE ของอัตราเร็วอากาศทั้ง 8 จุดนอกเหนือจากจุดที่ 5 ในช่องปิดที่หนึ่งในกรณีที่ทำให้ ความร้อนแบบคงที่สำหรับแต่ละขนาดเอลิเมนต์

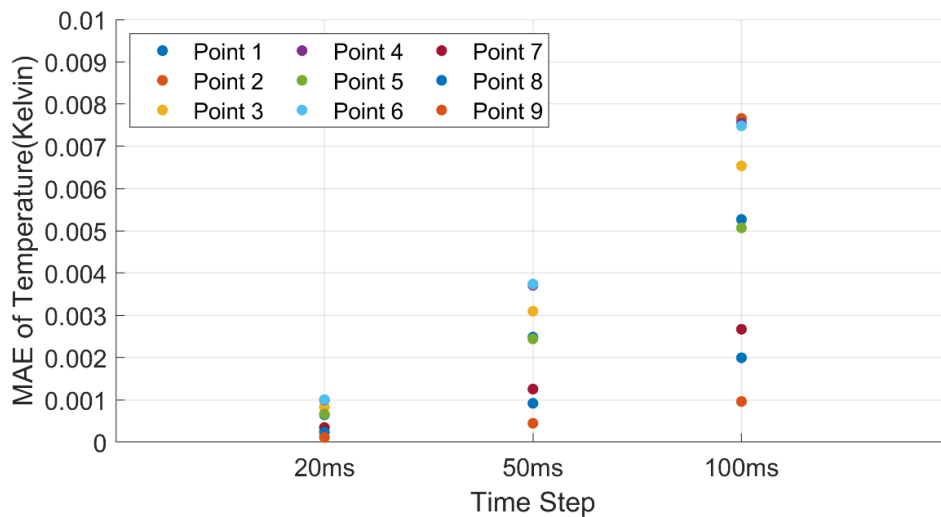
จากรูปที่ 3.7 ซึ่งแสดงถึงค่า $MRAE_V$ ของทุกตำแหน่ง พบว่า $MRAE_V$ ของตำแหน่งที่ 5 ที่เป็น ตำแหน่งกึ่งกลางของช่องปิดมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับตำแหน่งอื่นในทุกกรณี ซึ่งเมื่อพิจารณาเพิ่มเติม จะพบว่าตำแหน่งนี้เป็นตำแหน่งที่ปกติแล้วอากาศจะมีอัตราเร็วเข้าใกล้ศูนย์ ทำให้การคิดค่า $MRAE_V$ ซึ่งเป็นการพิจารณาแบบสัดส่วนอาจไม่ค่อยเหมาะสมในการพิจารณาหาขนาดของเอลิเมนต์ที่เหมาะสม จึงในการพิจารณาหาขนาดเอลิเมนต์ที่เหมาะสมในส่วนของ $MRAE_V$ จึงจะพิจารณาจาก ตำแหน่งที่เหลือทุกตำแหน่ง ดังแสดงผลในรูปที่ 3.8 แทน

จากรูปที่ 3.6 และ 3.8 แสดงให้เห็นได้ว่า เมื่อใช้กริด 92x92 ค่า MAE_T ในทุกตำแหน่งจะมี ค่าต่ำกว่า 0.002 K ในขณะที่ค่า $MRAE_V$ ในทุกตำแหน่งยกเว้นตำแหน่งที่ 5 ที่เป็นตำแหน่งกึ่งกลาง ของช่องปิดมีค่าน้อยกว่า 0.0015 ดังนั้นจึงเลือกใช้จำนวนกริด ขนาด 92x92 ในการจำลอง

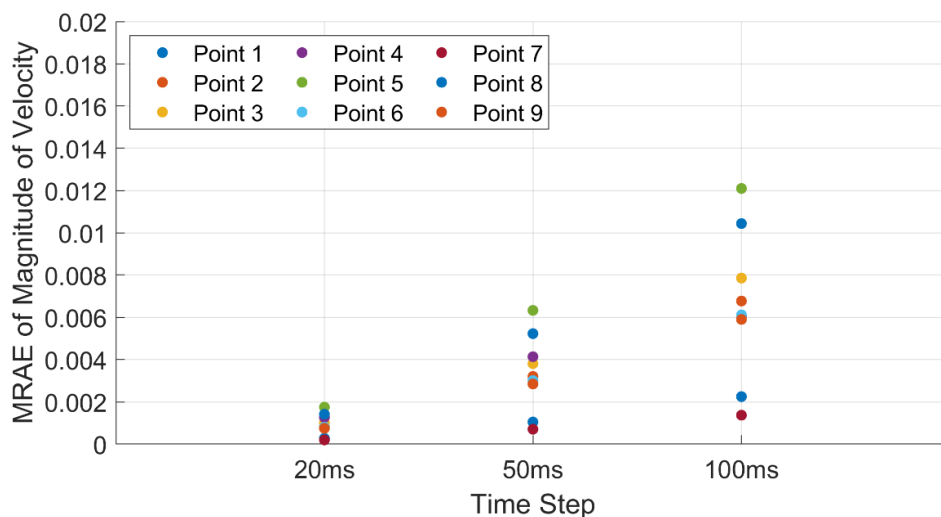
3.4.3.2.2 การศึกษาผลของขนาดเวลา (Time independency)

ในที่นี้จะเป็นส่วนหนึ่งของช่องปิดที่เต็มไปด้วยอากาศซึ่งเป็นของไหลที่มีสมบัติ μ ค่าพริ้นด์ เทิลนัมเบอร์เท่ากับ 0.71 โดยมีลักษณะการให้ความร้อนแบบคงที่เท่ากับ 11321.4 W/m^2 ซึ่งทำให้ Ra เท่ากับ 10^5 และใช้ขนาดของเอลิเมนต์เท่ากับ 92x92 ในการทดสอบขนาดของเวลา ในการศึกษา ผลของขนาดเวลาที่ใช้ในการคำนวณเริ่มจากขนาดเวลา 100 มิลลิวินาที, 50 มิลลิวินาที, 20 มิลลิวินาที และ 10 มิลลิวินาที ซึ่งเป็นขนาดเวลาน้อยที่สุด ตามลำดับ โดยทำการเปรียบเทียบขนาด เวลาต่าง ๆ กับขนาดเวลาน้อยที่สุด คือ ขนาดเวลา 10 มิลลิวินาที การศึกษาผลของขนาดจะใช้ค่า

อุณหภูมิและอัตราเร็วของอากาศ ณ จุดต่าง ๆ ทั้งหมด 9 จุด โดยใช้ค่า Mean Absolute Error (MAE) เพื่อพิจารณาอุณหภูมิ แสดงดังรูปที่ 3.9 และค่า Mean Relative Absolute Error (MRAE) เพื่อพิจารณาอัตราเร็วของอากาศ แสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.9 ค่า MAE ของอุณหภูมิทั้ง 9 จุดในช่องปิดที่หนึ่งในกรณีให้ความร้อนแบบคงที่สำหรับแต่ละขนาดเวลา



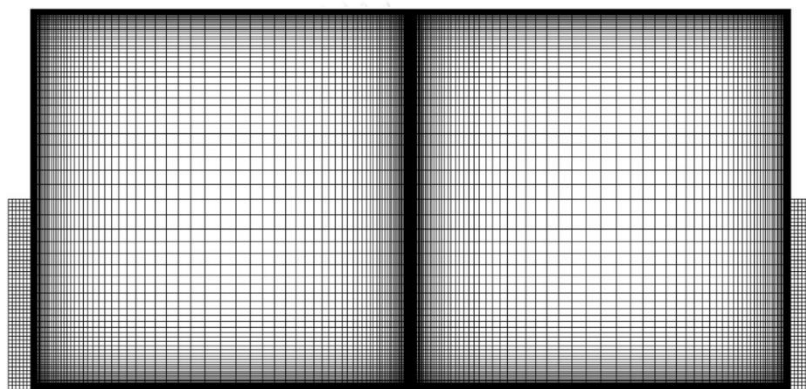
รูปที่ 3.10 ค่า MRAE ของอัตราเร็วอากาศ 9 จุดในช่องปิดที่หนึ่งในกรณีให้ความร้อนแบบคงที่สำหรับแต่ละขนาดเวลา

จากรูปที่ 3.9 และ 3.10 ซึ่งแสดงค่า MAE ของอุณหภูมิและค่า MRAE ของอัตราเร็วอากาศตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการคำนวณโดยใช้ขนาดเวลา 100 มิลลิวินาที มีลักษณะกวัดแกว่งเป็นอย่างมาก ในขณะที่เมื่อลดขนาดของเวลาลงไปที่ 50 มิลลิวินาที จะเห็นได้ว่ามีความกวัดแกว่งน้อยลง

อย่างเห็นได้ชัด ซึ่ง ขนาดเวลาที่ 20 มิลลิวินาทีให้ผลของการคำนวณมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด แต่อย่างไรก็ตามขนาดของเวลาที่ 50 มิลลิวินาทีก็มีค่า MAE และ MRAE ไม่เกิน 0.004 K และ 0.008 ตามลำดับ ซึ่งสามารถยอมรับได้ และยังสามารถลดระยะเวลาในการคำนวณลงไปได้ 2-3 เท่า ดังนั้นจึงนำเอาขนาดเวลา 50 มิลลิวินาทีมาใช้ในแบบจำลอง

3.4.3.2 จำนวนเอลิเมนต์

หลังจากได้ทำการศึกษาผลของขนาดเอลิเมนต์และผลของขนาดเวลา จึงสามารถสรุปจำนวนเอลิเมนต์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองได้ดังรูปที่ 3.11 โดยที่แต่ละส่วนประกอบมีรายละเอียดการแบ่งเอลิเมนต์ดังนี้



รูปที่ 3.11 การแบ่งเอลิเมนต์ของปริมาตรควบคุม
เครื่องทำความร้อน (Heater)

ในการแบ่งเอลิเมนต์ของเครื่องทำความร้อนเนื่องจากเครื่องทำความร้อนมีขนาดความกว้าง 3 มิลลิเมตร และขนาดความสูง 25 มิลลิเมตร จากลักษณะของเครื่องทำความร้อนที่เป็นของแข็งจึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องการเอลิเมนต์ที่มีขนาดละเอียด ทางผู้ศึกษาจึงทำการแบ่งเอลิเมนต์ของเครื่องทำความร้อนแต่ละตัวมีขนาด 6x50 หรือจำนวน 300 เอลิเมนต์

ช่องปิด (Cavity)

ในการแบ่งเอลิเมนต์ของช่องปิดซึ่งเป็นส่วนที่เต็มไปด้วยของไหล โดยทั่วไปแล้วในการคำนวณ CFD ที่เป็นลักษณะของการถ่ายเทความร้อนแบบการพาตามธรรมชาติ อากาศภายในช่องปิดจะเกิดการไหลวน ซึ่งอากาศจะมีอัตราเร็วในการไหลสูงบริเวณขอบของช่องปิดซึ่งแตกต่างกับบริเวณศูนย์กลางของช่องปิดที่อัตราเร็วของอากาศเข้าใกล้ศูนย์ ดังนั้นบริเวณขอบของช่องปิดจะถูกแบ่งเอลิเมนต์ที่มีขนาดเล็กและมีความละเอียดมากกว่าบริเวณศูนย์กลางของช่องปิดและเพื่อเป็นการไม่ให้อายุการใช้งานสูงเกินไปจนเกิดความล่าช้าในการคำนวณ ทางผู้ศึกษาจึงกำหนดขนาดของเอลิเมนต์

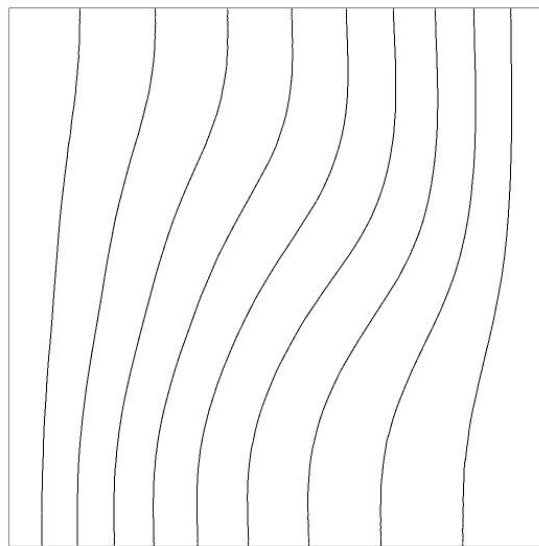
ที่มีขนาดเล็กที่สุดตั้งแต่ 0.0025 ตารางมิลลิเมตรซึ่งจะอยู่บริเวณขอบของโดเมน และขนาดของเอลิเมนต์โตด้วยอัตรา 1.0856 จนมีขนาดใหญ่สุด 4 ตารางมิลลิเมตร โดยเอลิเมนต์ของช่องปิดมีขนาด 92x92 หรือจำนวน 8,464 เอลิเมนต์

ผนังร่วม (Common wall)

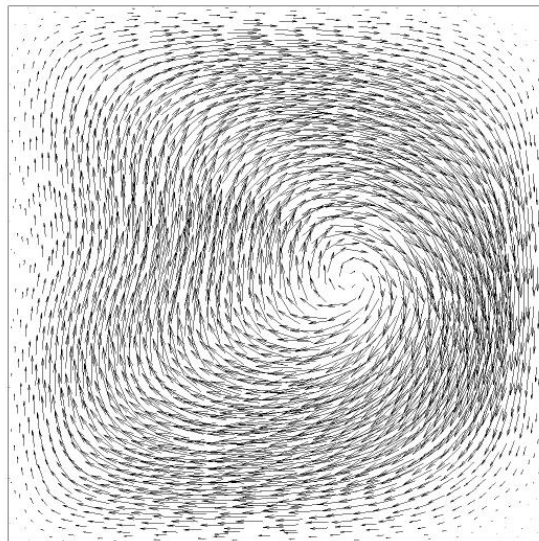
ในการแบ่งเอลิเมนต์ของผนังร่วมเนื่องจากผนังร่วมมีขนาดความกว้างเพียง 0.24 มิลลิเมตร และขนาดความสูง 50 มิลลิเมตร จากลักษณะของผนังร่วมที่เป็นของแข็งจึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องการเอลิเมนต์ที่มีขนาดละเอียด ทางผู้ศึกษาจึงทำการแบ่งเอลิเมนต์ของผนังร่วมมีขนาด 8x100 หรือจำนวน 800 เอลิเมนต์ ดังแสดงในรูป ก.2 ในภาคผนวก ก

3.4.4 ประเมินความถูกต้องของแบบจำลอง (Validation)

การประเมินความถูกต้องของแบบจำลองคือการเปรียบเทียบค่าตัวเลขที่คำนวณได้จากการคำนวณกับค่าที่ได้จากแบบจำลองของ de Vahl Davis [3] และ Hortmann et al. [6] และการเปรียบเทียบอัตราเร็วไร้มิติและอุณหภูมิไร้มิติที่ระยะกึ่งกลางความสูงของช่องปิดที่ได้จากแบบจำลองของ Reddy & Satake [2] กับค่าที่ได้จากแบบจำลองของผู้จัดทำ โดยการถ่ายเทความร้อนในช่องปิดที่ติดกันจะมีการถ่ายเทความร้อนแบบคอนจูเกต คือ มีการนำความร้อน การพาความร้อนตามธรรมชาติและไม่มีการแผ่รังสีความร้อนใด ๆ ดังนั้นในการประเมินความถูกต้องของแบบจำลองจะทำโดยใช้รูปแบบการถ่ายเทความร้อนที่มีการพาความร้อนตามธรรมชาติในช่องปิดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการหุ้มฉนวนที่เพดานและพื้น ส่วนผนังด้านซ้ายและด้านขวาจะเป็นผนังที่มีอุณหภูมิสูง (T_h) และผนังที่มีอุณหภูมิต่ำ (T_c) โดยเป็นผนังที่มีอุณหภูมิคงที่ แสดงดังรูปที่ 3.16 สำหรับกรณีนี้ตัวเลขไร้มิติโดยเฉลี่ยได้นิยามดังสมการ $Nu = \frac{q''L}{k\Delta T}$ โดยทำการประเมินความถูกต้องของแบบจำลองที่เรย์เลห์นัมเบอร์ 4 ค่า ได้แก่ Ra เท่ากับ 10^3 , 10^4 , 10^5 และ 10^6 ตามลำดับ เมื่อ $Ra = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu\alpha}$ ซึ่งใช้ของไหลเป็นอากาศที่มีค่าพรันด์เทิลนัมเบอร์เท่ากับ 0.71 โดยที่ผลจากการจำลองลักษณะการกระจายของอุณหภูมิและเวกเตอร์อัตราเร็วแสดงให้เห็นในรูป 3.12 – 3.15



(ก)

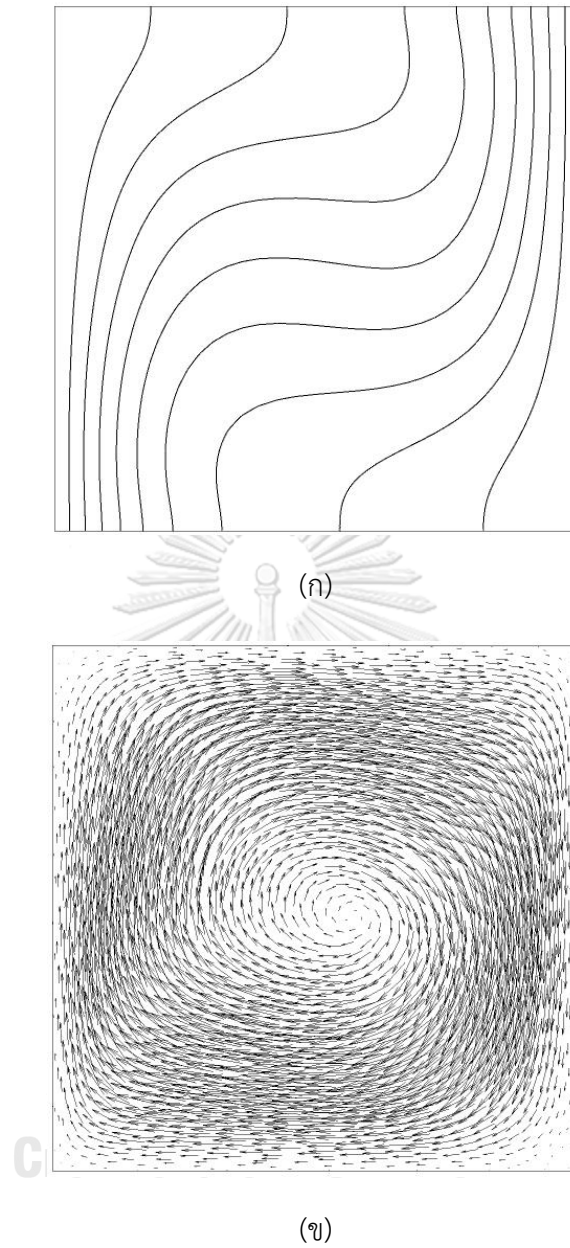


(ข)

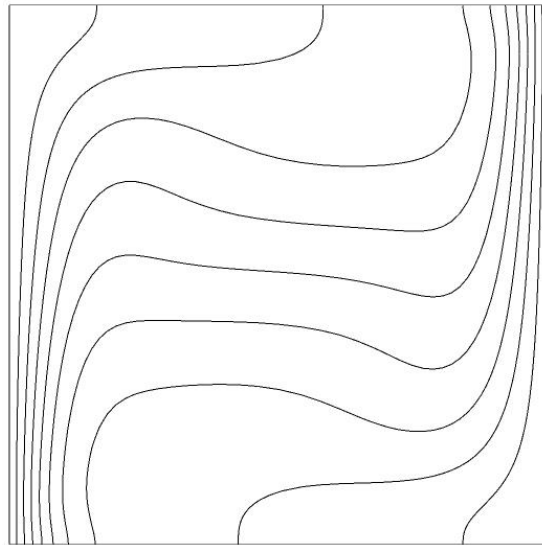
รูปที่ 3.12 การพาความร้อนแบบธรรมชาติในช่องปิดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ไม่มีการแผ่รังสี ที่ $Ra = 10^3$

(ก) ลักษณะการกระจายของอุณหภูมิ

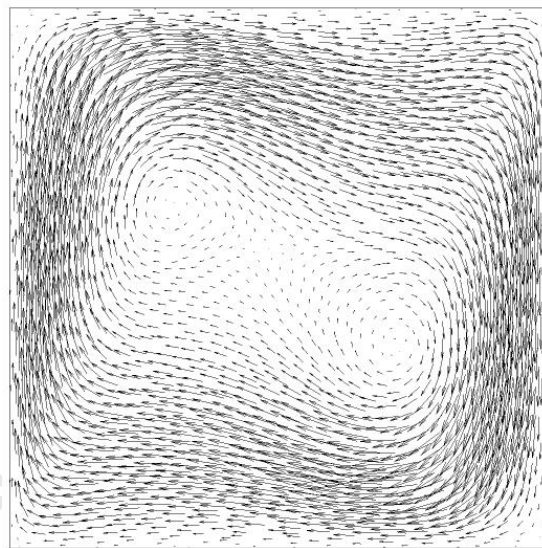
(ข) เวกเตอร์อัตราเร็ว



รูปที่ 3.13 การพาความร้อนแบบธรรมชาติในช่องปิดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ไม่มีการแผ่รังสี ที่ $Ra = 10^4$
 (ก) ลักษณะการกระจายของอุณหภูมิ (ข) เวกเตอร์อัตราเร็ว



(ก)

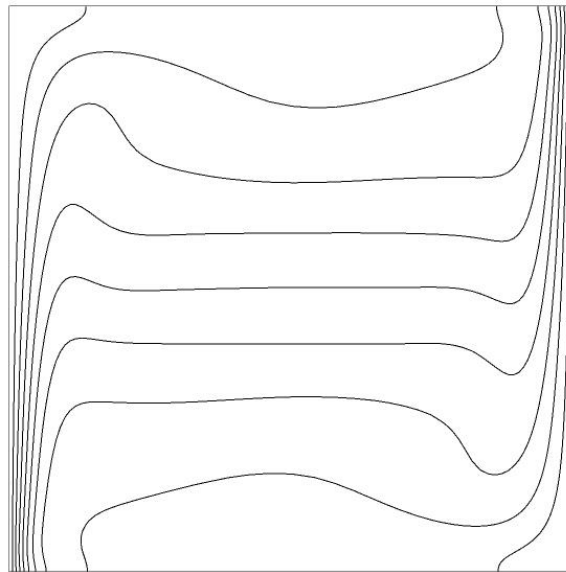


(ข)

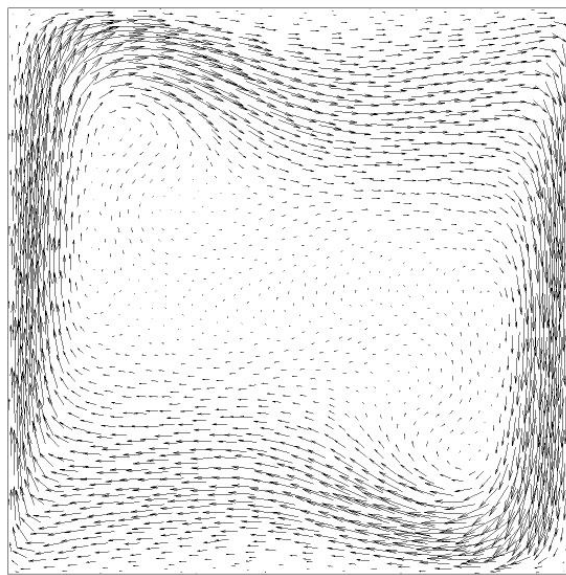
รูปที่ 3.14 การพาความร้อนแบบธรรมชาติในช่องปิดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ไม่มีการแผ่รังสี ที่ $Ra = 10^5$

(ก) ลักษณะการกระจายของอุณหภูมิ

(ข) เวกเตอร์อัตราเร็ว



(ก)



(ข)

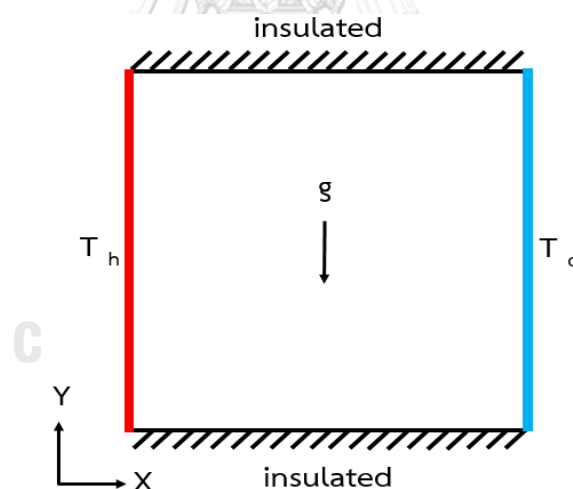
รูปที่ 3.15 การพาความร้อนแบบธรรมชาติในช่องปิดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ไม่มีการแผ่รังสี ที่ $Ra = 10^6$

(ก) ลักษณะการกระจายของอุณหภูมิ

(ข) เวกเตอร์อัตราเร็ว

จากรูปที่ 3.12 และ 3.13 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิและเวกเตอร์อัตราเร็วที่ Ra แตกต่างกัน จะเห็นได้ว่าลักษณะการไหลเป็นลักษณะที่ราบเรียบไหลตามเข็มนาฬิกาผ่านผนังอุณหภูมิสูงไปยังผนังอุณหภูมิต่ำ เมื่อ Ra เท่ากับ 10^3 และ 10^4 พบว่าลักษณะการไหลและลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิไม่มีความซับซ้อนสังเกตได้จากเส้นแสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิ ส่วนเมื่อ Ra เท่ากับ 10^5 และ 10^6 พบว่าลักษณะการไหลและลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิต่างกันมากขึ้นตามค่า Ra สังเกตได้จากเส้นแสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิและเวกเตอร์อัตราเร็วที่แสดงให้เห็นถึงการหมุนวนถึงสองบริเวณ ในกรณีนี้ค่า Ra เท่ากับ 10^5 และ 10^6 ถ้าหากว่าใช้ขนาดกริดไม่เพียงพอ ก็จะไม่สามารรถคำนวณผลลัพธ์ออกมาได้จนเห็นการหมุนวนที่แสดงดังรูปที่ 3.14 และ 3.15 ซึ่งเป็นกริดแบบนอน - ยูนิฟอร์ม ขนาด 92×92 และมีอัตราการเติบโต 1.0856 ซึ่งมีความละเอียดเพียงพอ และใช้ค่า Ra ที่ 10^5 เพื่อให้เห็นการหมุนวนของอากาศและการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ชัดเจนในแบบจำลองที่จะสร้างต่อไป

ผลต่างของอุณหภูมิที่เรย์เลห์นัมเบอร์ต่าง ๆ และผลการเปรียบเทียบค่านัสเซลนัมเบอร์ของแบบจำลองแสดงดังตารางที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ



รูปที่ 3.16 ช่องปิดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใช้ในการประเมินความถูกต้องของแบบจำลองการพาความร้อนตามธรรมชาติโดยอ้างอิงจากรูปร่างแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยของ *de Vahl Davis* [3]

ตารางที่ 3.2 ผลต่างของอุณหภูมิที่เรย์เลห์นัมเบอร์ต่าง ๆ

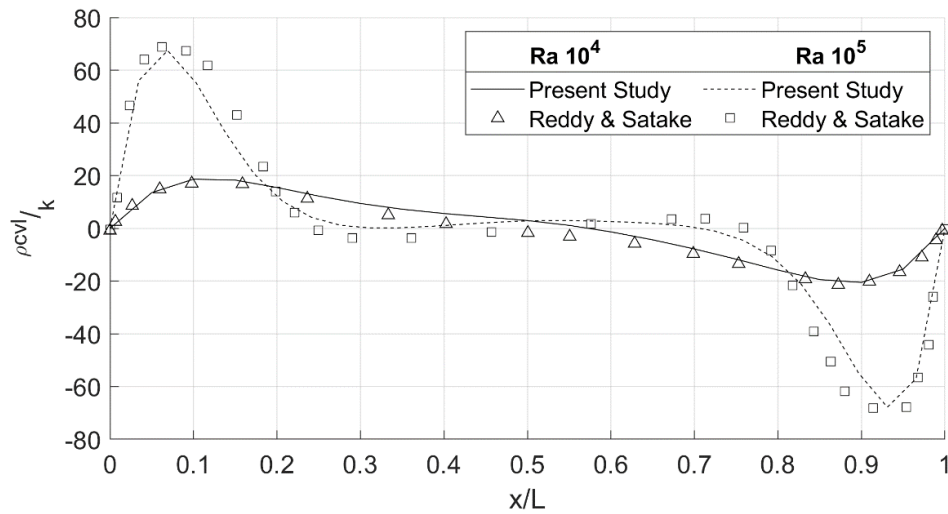
Ra	T_h (K)	T_c (K)
10^3	300.072	300
10^4	300.716	300
10^5	307.158	300
10^6	371.584	300

ตารางที่ 3.3 ผลการประเมินความถูกต้องของแบบจำลอง

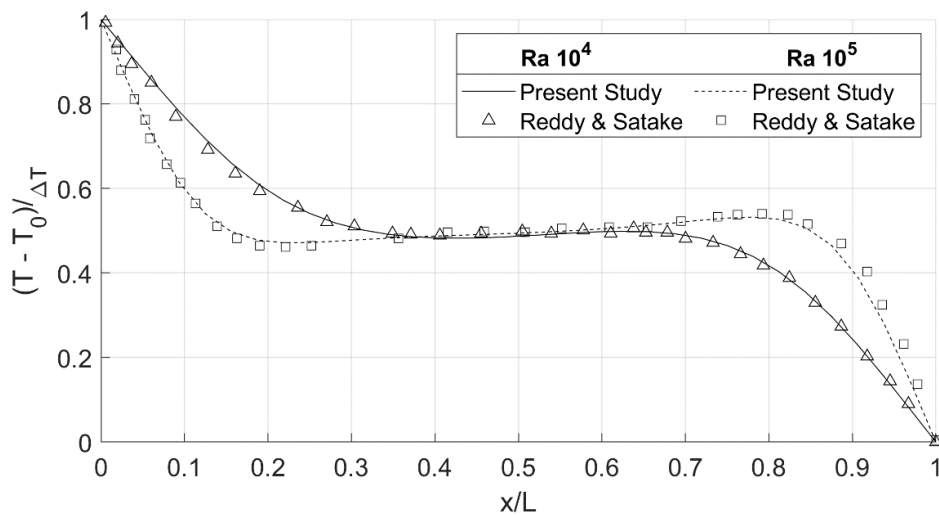
Ra	de Vahl Davis	Hortman et al.	Present Study
	Average Nusselt Number	Average Nusselt Number	Average Nusselt Number
10^3	1.118	-	1.129
10^4	2.243	2.245	2.265
10^5	4.519	4.522	4.510
10^6	8.800	8.826	8.786

จากตารางที่ 3.3 ผลการประเมินความถูกต้องของแบบจำลองจะเห็นว่าผลจากการคำนวณของแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับผลจากการคำนวณในงานวิจัยของ de Vahl Davis [3] และ Hortmann et al. [4] ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 1%

ผลลัพธ์ที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการคำนวณของ Reddy & Satake [2] โดยนำผลลัพธ์ที่ได้มาคำนวณอัตราเร็วไร้มิติและอุณหภูมิไร้มิติที่ระยะกึ่งกลางความสูงของช่องปิด แล้วนำมาเขียนกราฟที่ค่าเรย์เลห์นัมเบอร์ 10^4 และ 10^5 แสดงดังรูปที่ 3.17 ตามลำดับ



(ก)



CHULALONGKORN UNIVERSITY

(ข)

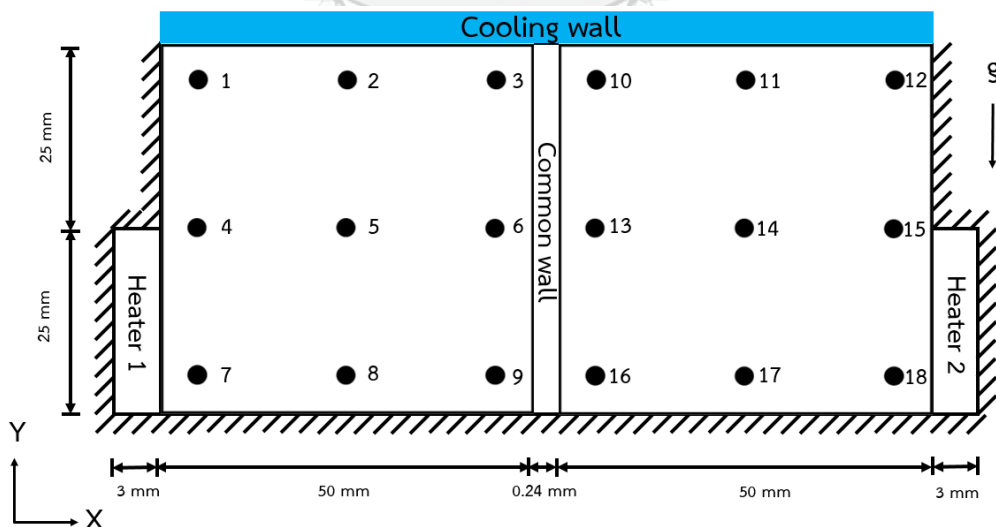
รูปที่ 3.17 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของการไหลที่ระยะกึ่งกลางความสูงของช่องปิดที่ไม่คำนึงถึงการแผ่รังสีความร้อน

(ก) อัตราเร็วไร้มิติในแนวดิ่ง (ข) อุณหภูมิไร้มิติ

จากรูปที่ 3.17 จะเห็นได้ว่าผลลัพธ์จากการคำนวณของการศึกษานี้และผลลัพธ์จากการคำนวณของ Reddy & Satake [2] มีความสอดคล้องและมีแนวโน้มเป็นไปในทางเดียวกันซึ่งมีความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อย

3.4.5 กำหนดเงื่อนไขในการควบคุมอุณหภูมิของแบบจำลอง (Temperature Control Condition)

ในส่วนของการควบคุมอุณหภูมินั้น ช่องปิดแต่ละช่องจะมีการควบคุมที่แยกกันอย่างอิสระ เนื่องจากการควบคุมอุณหภูมิจะนำค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของแต่ละช่องปิดมาควบคุมการเปิดและปิดของเครื่องทำความร้อนแต่ละตัว โดยอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละช่องปิดจะใช้อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ทั้งหมด 9 จุดมาเพื่อหาอุณหภูมิเฉลี่ย แสดงในรูปที่ 3.18 ซึ่งในการควบคุมอุณหภูมิของช่องปิดนั้น กล่าวคืออุณหภูมิเฉลี่ยของจุดที่ 1 – 9 ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิของช่องปิดที่ 1 และอุณหภูมิเฉลี่ยของจุดที่ 10 - 18 ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิในช่องปิดที่ 2 จะมีการควบคุมอุณหภูมิให้ได้ที่ 300 K และให้มีการแกว่งของอุณหภูมิขึ้นและลง อย่างละ 1 K นั้นหมายความว่า จะมีการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบตั้งแต่ 299 K - 301 K ดังนั้นการควบคุมอุณหภูมิภายในช่องปิดแต่ละช่องเครื่องทำความร้อนจะเริ่มทำงานเมื่ออุณหภูมิเฉลี่ยต่ำกว่าหรือเท่ากับ 299 K และเครื่องทำความร้อนจะทำงานไปจนกระทั่งอุณหภูมิเฉลี่ยมากกว่าหรือเท่ากับ 301 K หลังจากปล่อยให้อุณหภูมิเฉลี่ยตกลงมาต่ำกว่าหรือเท่ากับ 299 K เครื่องทำความร้อนจึงเปิดอีกอีกครั้ง และจะมีรูปแบบการเปิดและปิดเครื่องทำความร้อนแบบไปจนกว่าจะสิ้นสุดการทดลอง โดยทางผู้ศึกษาได้เขียน User Define Function (UDF) ขึ้นมาเพื่อเป็นตัวช่วยในการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบโดยการเปิดและปิดเครื่องทำความร้อน ตามที่แสดงไว้ในภาคผนวก จ



รูปที่ 3.18 ตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิและอัตราเร็วจำนวน 9 จุดในแต่ละช่องปิดของแบบจำลอง

3.4.6 กำหนดขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง (Procedure)

หลังจากที่ได้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ให้ผลการคำนวณที่ถูกต้องแม่นยำเพียงพอแล้วจึงนำโปรแกรมดังกล่าวมาศึกษาผลของการเริ่มควบคุมอุณหภูมิของช่องปิดสองช่อง, สมบัติของผนังร่วม และอุณหภูมิภายนอกที่มีผลต่อการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดสองช่องที่ติดกันโดยการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ดังกล่าวจะกล่าวถึงโดยละเอียดในบทถัดไป



บทที่ 4

ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะเป็นส่วนของการแสดงผลของแบบจำลองของการศึกษาการอิงพารามิเตอร์ของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบในช่องปิดสองช่องที่ติดกันในงานวิจัยนี้จะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงคาบของช่องปิดที่หนึ่ง, ช่วงเวลาที่เปิดและปิดเครื่องทำความร้อนของช่องปิดที่หนึ่ง และ ร้อยละของเวลาเคลื่อนระหว่างการเริ่มเปิดเครื่องทำความร้อนของสองช่องปิดเทียบกับรอบการควบคุม โดยอิงกรณีพื้นฐานตามรายละเอียดที่อธิบายไว้ในบทที่ 3 เมื่อมีการศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่อการควบคุมจึงเปลี่ยนเฉพาะพารามิเตอร์นั้นจากกรณีพื้นฐาน โดยพารามิเตอร์ที่จะทำการศึกษาแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้ รายละเอียดการปรับพารามิเตอร์เพื่อการศึกษาแสดงในตารางที่ 4.1

1. การศึกษาผลของการเริ่มควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบในช่องปิดที่สองต่อการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดทั้งสองช่อง
2. การศึกษาผลของสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นผนังร่วมที่มีต่อการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดทั้งสองช่อง
3. การศึกษาผลของอุณหภูมิภายนอกที่มีต่อการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดทั้งสองช่อง

ตารางที่ 4.1 การศึกษาพารามิเตอร์และเงื่อนไขในการสร้างแบบจำลอง

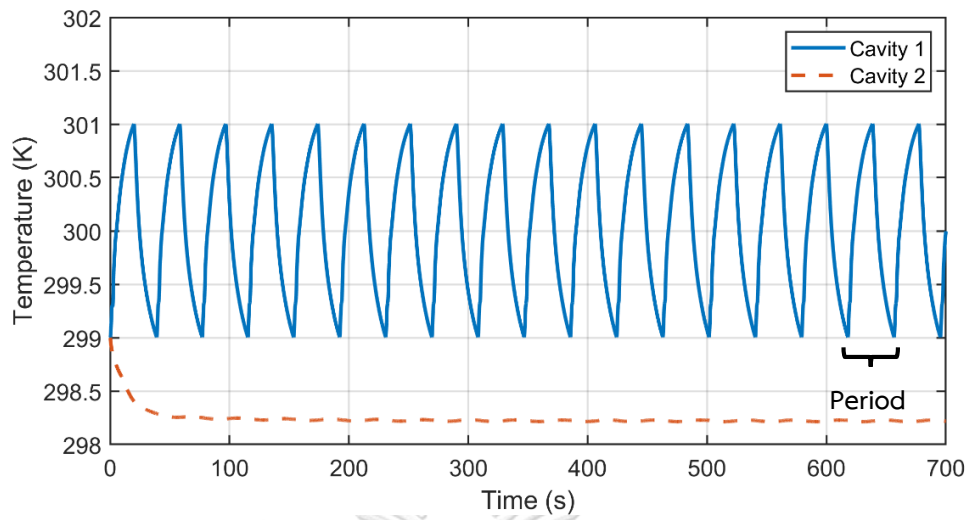
พารามิเตอร์	เงื่อนไขที่เปลี่ยนแปลง	เงื่อนไขที่ไม่เปลี่ยนแปลง
การเริ่มควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดที่สอง	$T_{1 \text{ rising}} @ 299 \text{ K}, 300 \text{ K}$ $T_{1 \text{ falling}} @ 301 \text{ K}, 300 \text{ K}$	ผนังร่วมชนิดทองแดง อุณหภูมิภายนอกเท่ากับ 297.15 K
สมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นผนังร่วม	อลูมิเนียม, ทองแดง และนิกเกิล	$T_{1 \text{ falling}} @ 301 \text{ K}$ อุณหภูมิภายนอกเท่ากับ 297.15 K
อุณหภูมิภายนอก	$T_{\text{out}} @ 296.15 \text{ K}, 296.65 \text{ K},$ 297.15K, 297.65K และ 298.15 K	ผนังร่วมชนิดทองแดง $T_{1 \text{ falling}} @ 301 \text{ K}$

4.1 ผลของการเริ่มควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดที่สองต่อการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดทั้งสองช่อง

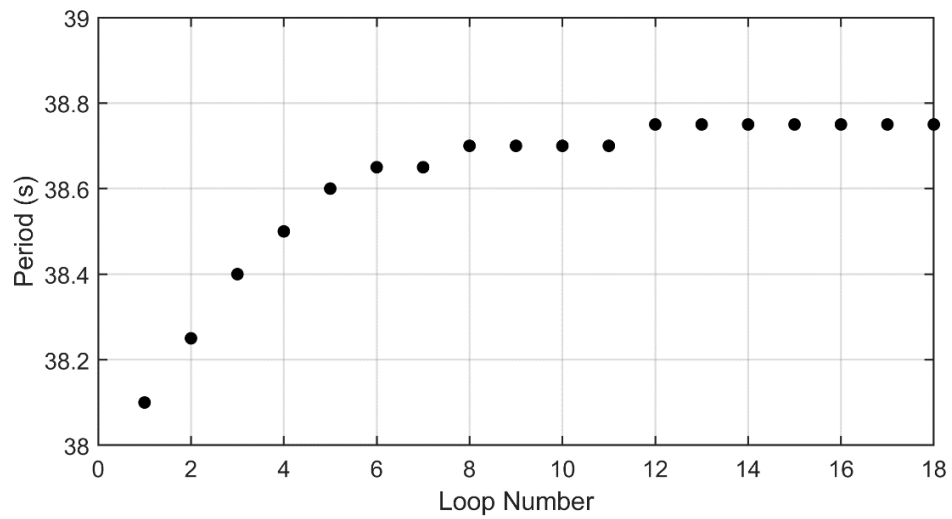
ในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาในกรณีที่ช่องปิดที่หนึ่งมีการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบอยู่ก่อนแล้วจึงเริ่มการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดที่สองตามมาว่าการเริ่มควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบในช่องปิดที่สองในขณะที่อุณหภูมิของช่องปิดที่หนึ่งมีค่าต่างกันว่ามีผลต่อการควบคุมอุณหภูมิทั้งสองช่องอย่างไร โดยจะทำการควบคุมอุณหภูมิของช่องปิดที่สองเริ่มเมื่อช่องปิดที่หนึ่งมีอุณหภูมิอยู่ในช่วงขาขึ้นและอุณหภูมิช่วงขาลงที่แตกต่างกัน 4 กรณี คือ (1) เมื่อช่วงขาขึ้นที่ 299 K (2) เมื่อช่วงขาขึ้นที่ 300 K (3) เมื่อช่วงขาลงที่ 301 K และ (4) เมื่อช่วงขาลงที่ 300 K และกำหนดให้เงื่อนไขอื่น ๆ มีค่าคงที่ดังนี้ ผนังร่วมเป็นวัสดุทองแดง, อุณหภูมิภายนอกเป็น 297.15 K และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนคงที่เท่ากับ $3.4309 \text{ W/m}^2\text{-K}$

4.1.1 การเตรียมการก่อนการศึกษาผลของการเริ่มควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดที่สองต่อการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดทั้งสองช่อง

ในส่วนของการเตรียมการก่อนสร้างแบบจำลอง ทางผู้ศึกษาได้เตรียมการโดยทำการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบในช่องปิดที่หนึ่งโดยการเปิดและปิดเครื่องทำความร้อนของช่องปิดที่หนึ่ง ให้อยู่ในช่วง 299 K ถึง 301 K ในขณะที่ช่องปิดที่สองไม่มีการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบใด ๆ ทั้งสิ้น โดยในช่วงเริ่มต้นกำหนดให้อุณหภูมิเฉลี่ยของทั้งสองช่องปิดมีค่าเป็น 299 K ผลของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องที่หนึ่งส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเทียบกับเวลาของช่องที่หนึ่งและสอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในขณะที่อุณหภูมิมีค่าเท่ากับ 299 K จะเป็นเวลาที่เครื่องทำความร้อนเปิดและในขณะที่อุณหภูมิมีค่าเท่ากับ 301 K จะเป็นเวลาที่เครื่องทำความร้อนปิด แสดงดังรูปที่ 4.1 และทำการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบในช่องปิดที่หนึ่งไปจนกว่าคาบในการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบในช่องปิดที่หนึ่งดังแสดงในรูปที่ 4.2 ไม่มีการเปลี่ยนแปลง โดยนิยามคาบในการควบคุมคือ ช่วงเวลาที่ใช้ในการควบคุมตั้งแต่ขณะที่อุณหภูมิของช่องปิดที่หนึ่งอยู่ที่ 299 K และเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งกลับมาอยู่ที่ 299 K อีกครั้ง จากรูปจะเห็นว่าคาบของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงตั้งแต่รอบที่ 12 เป็นต้นไป ซึ่งมีค่าเท่ากับ 38.75 วินาที



รูปที่ 4.1 การควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบเฉพาะช่องปิดที่หนึ่ง

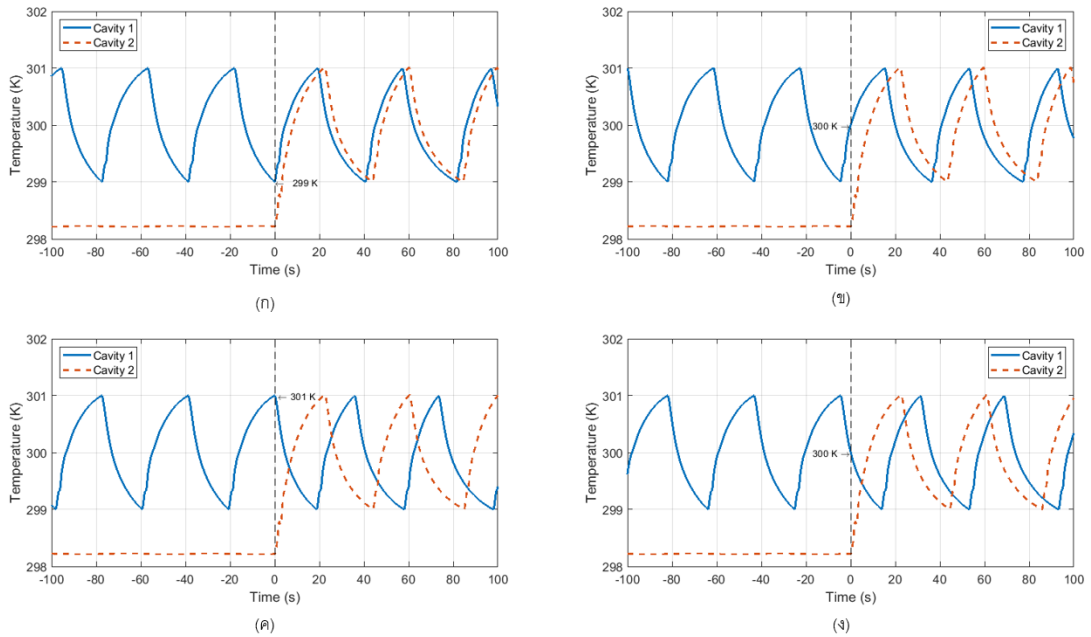


รูปที่ 4.2 คาบของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดที่หนึ่ง

4.1.2 การเปรียบเทียบผลของการเริ่มควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบในช่องปิดที่สองต่อการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดทั้งสองช่อง

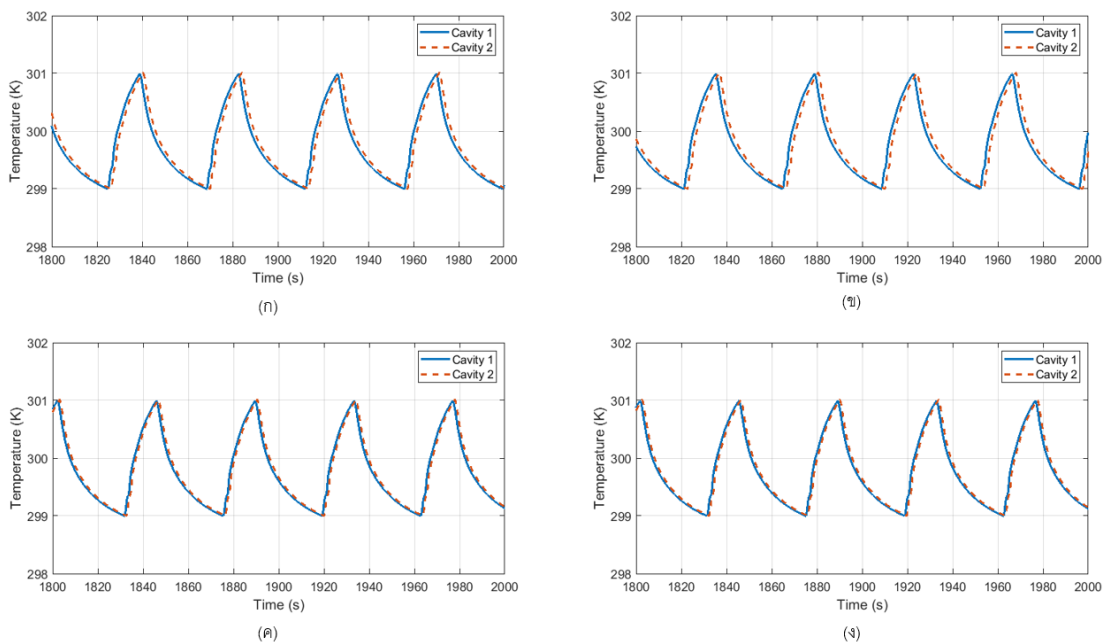
การแสดงผลการศึกษาผลของการเริ่มควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดที่สองต่อการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบพร้อมกันของช่องปิดทั้งสองช่องเมื่อช่องปิดที่หนึ่งมีอุณหภูมิอยู่ในช่วงขาขึ้นและช่วงขาลงที่แตกต่างกันทั้ง 4 กรณีดังกล่าว จะเริ่มนับเวลาใหม่เป็นวินาทีที่ 0 เมื่อเริ่มควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องที่สอง โดยผลการควบคุมในช่วงแรกแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าในช่วงเริ่มต้นการควบคุมอุณหภูมิของทั้งสองช่องมีลักษณะที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนในแต่ละกรณีแต่เมื่อเวลาผ่านไปความแตกต่างของอุณหภูมิของสองช่องจะน้อยลงอย่างชัดเจนดังแสดงให้เห็นในรูป 4.4 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อช่องสองช่องที่อยู่ติดกันมีการควบคุมอุณหภูมิแม้ว่าจะมีการเริ่มควบคุมที่ต่างเงื่อนไขกัน เมื่อเวลาผ่านไปการควบคุมของทั้งสองช่องจะมีการปรับเข้าหากันจนมีลักษณะใกล้เคียงกันแม้ว่าจะเงื่อนไขเริ่มต้นจะต่างกัน

การเปลี่ยนแปลงของคาบการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของทั้งสองช่องแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.5 โดยที่คาบของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของทั้งสองช่องนิยามเช่นเดียวกับที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.1.1 ถึงแม้ว่าในช่วงต้นของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบจะมีความแตกต่างกันตามผลต่างของอุณหภูมิในช่วงเริ่มต้นแต่เมื่อเวลาผ่านไปช่องปิดทั้งสองช่องจะมีการปรับตัวเข้าหากันซึ่งทำให้คาบของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบคู่เข้าหากันซึ่งสุดท้ายเมื่ออุณหภูมิของทั้งสองช่องแตกต่างกันไม่มากก็จะทำให้คาบของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบไม่แตกต่างกัน



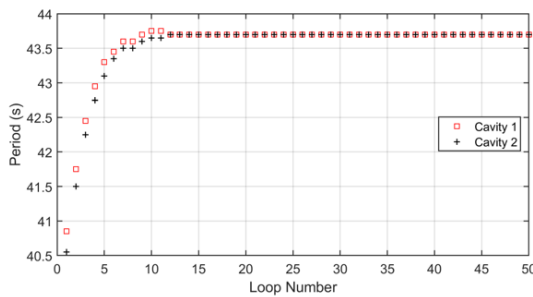
รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่องปิดทั้งสองในช่วงที่เริ่มควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดที่สองเมื่ออุณหภูมิของช่องปิดที่หนึ่งมีอุณหภูมิ

(ก) ช่วงขาขึ้นที่ 299 K (ข) ช่วงขาขึ้นที่ 300 K (ค) ช่วงขาลงที่ 301 K (ง) ช่วงขาลงที่ 300 K

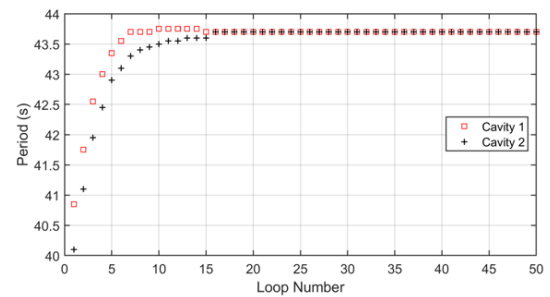


รูปที่ 4.4 การควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดทั้งสองหลังจากเริ่มควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดที่สองเมื่อไปแล้ว 1800 วินาทีสำหรับกรณีเริ่มควบคุมเชิงคาบของที่สองอุณหภูมิของช่องปิดที่หนึ่งมีอุณหภูมิต่าง ๆ

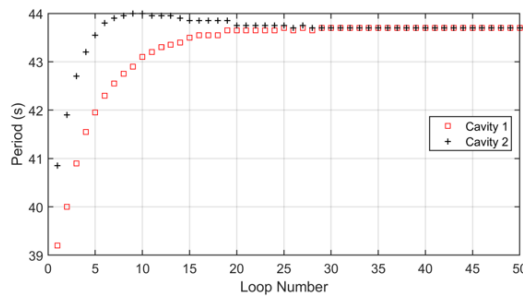
(ก) ช่วงขาขึ้นที่ 299 K (ข) ช่วงขาขึ้นที่ 300 K (ค) ช่วงขาลงที่ 301 K (ง) ช่วงขาลงที่ 300 K



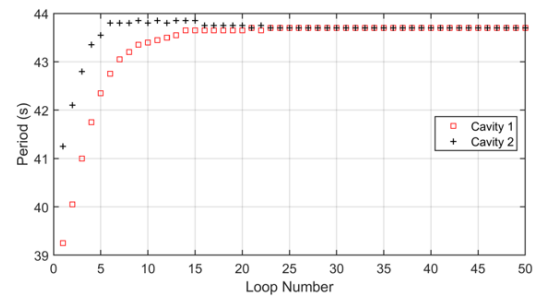
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.5 คาบของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดทั้งสองช่องในกรณีเริ่มควบคุมพร้อมกันเมื่อช่องปิดที่หนึ่งมีอุณหภูมิ

(ก) ช่วงขาขึ้นที่ 299 K (ข) ช่วงขาขึ้นที่ 300 K (ค) ช่วงขาลงที่ 301 K (ง) ช่วงขาลงที่ 300 K

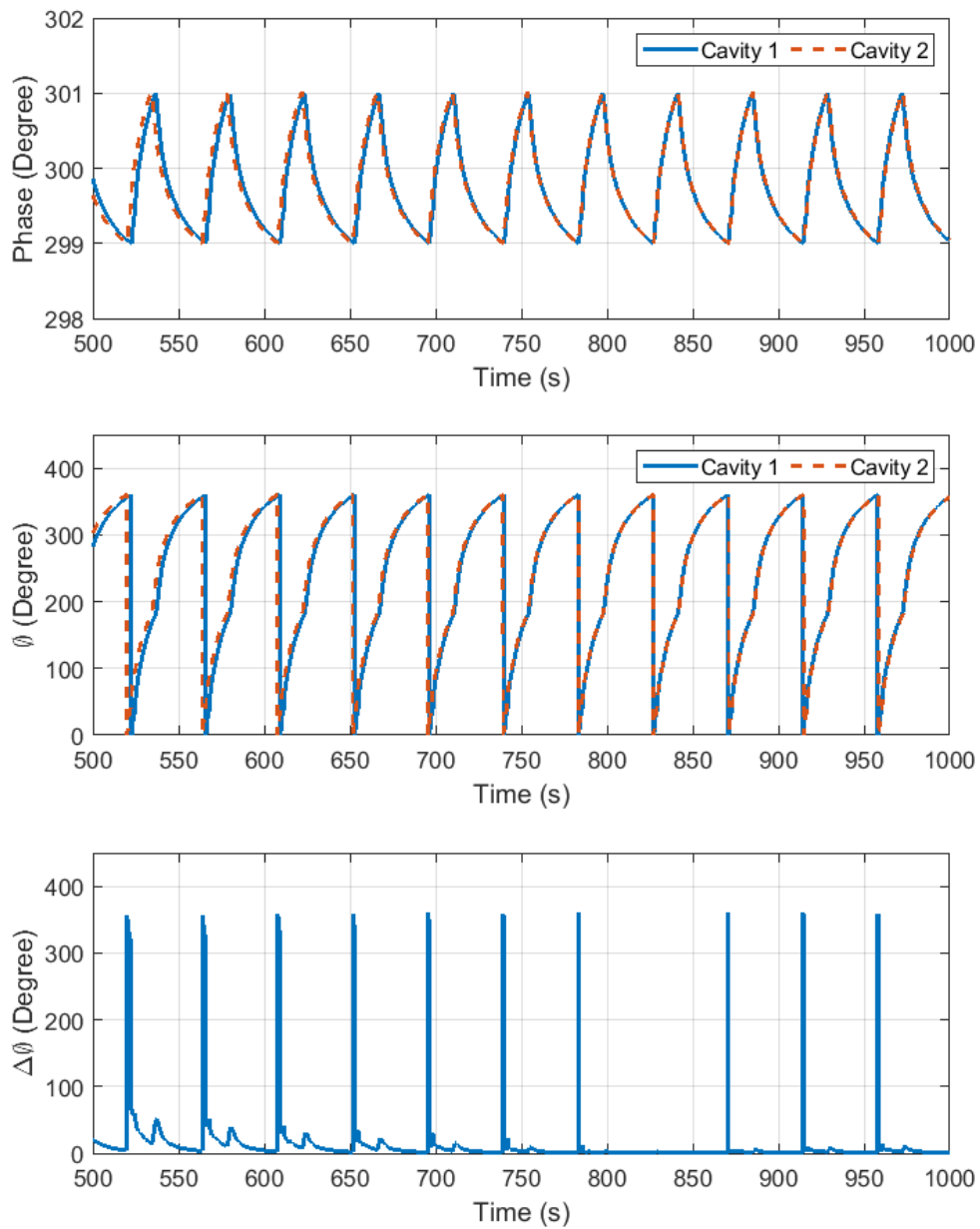
เพื่อศึกษาความแตกต่างของเวลาในการเปิดเครื่องทำความร้อนของทั้งสองช่องปิดอย่างละเอียดจึงทำการแสดงเป็น Phase การคำนวณเฟสแบ่งตามการเพิ่ม – ลดอุณหภูมิได้ 2 ช่วงโดยมีนิยามดังนี้ กำหนดให้เฟสมีค่าเท่ากับ 0° ถึง 180° ในช่วงที่เครื่องทำความร้อนเปิดโดยที่มีค่าเฟสเท่ากับ 0° และ 180° เมื่ออุณหภูมิของอากาศในช่องปิดมีค่าเท่ากับ 299 K และ 301 K ตามลำดับ สำหรับอุณหภูมิระหว่างขึ้น สำหรับอุณหภูมิระหว่างขึ้นอุณหภูมิได้ว่าเฟสมีการเปลี่ยนแปลงแบบเป็นเส้นตรง เฟสในช่วงระหว่าง 0° ถึง 180° จึงนิยามได้ดังนี้

สำหรับ phase เมื่ออุณหภูมิอยู่ในช่วงขาขึ้น

$$\phi = \left| \frac{T - T_{lower}}{T_{upper} - T_{lower}} \right| \times 180 \quad \text{สำหรับ } 0^\circ \leq \phi \leq 180^\circ$$

ในทางเดียวกัน phase เมื่ออุณหภูมิอยู่ในช่วงขาลง กำหนดให้มิตีค่าระหว่าง 180° ถึง 360° โดยกำหนดนิยามในช่วงนี้ดังนี้

$$\phi = \left| \frac{T - T_{upper}}{T_{upper} - T_{lower}} \right| \times 180 + 180 \quad \text{สำหรับ } 180^\circ \leq \phi \leq 360^\circ$$



รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบเฟสของอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดทั้งสองช่องสำหรับกรณีเริ่มควบคุม อุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดที่สองเมื่อช่องปิดที่หนึ่งมีอุณหภูมิเท่ากับ 301 K

หมายเหตุ วินาทีที่ 500 ที่แสดงในรูป คือประมาณรอบการควบคุมที่ 12 ที่แสดงในรูป 4.5 (ค)

รูปที่ 4.6 แสดงเฟสของอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดทั้งสองช่องและแสดงผลต่างของเฟสดังกล่าว จะเห็นได้ว่าผลต่างของเฟสมีลักษณะไม่ราบเรียบและในบางช่วงมีลักษณะกระโดดอย่างชัดเจนแม้ว่าอุณหภูมิของช่องปิดทั้งสองช่องจะเปลี่ยนแปลงจนแทบไม่มีความแตกต่างกันแล้วก็ตาม ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการที่การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงที่ราบเรียบ การ

วิเคราะห์จึงอาจจะไม่เหมาะสมสำหรับกรณีนี้ งานวิจัยจึงทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของเวลาในการเปิดเครื่องทำความร้อนของช่องปิดทั้งสองอย่างละเอียดด้วยการนิยามตัวแปรใหม่ที่มีชื่อว่า “ร้อยละของเวลาเคลื่อนระหว่างการเริ่มเปิดเครื่องทำความร้อนของสองช่องปิดเทียบกับการควบคุมในแต่ละกรณีเริ่มควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบในช่องปิดที่สอง” หรือ $\% \Delta t_n$ ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้ โดยที่ $\% \Delta t_n$ มีค่าอยู่ในช่วง -50 % ถึง 50 %

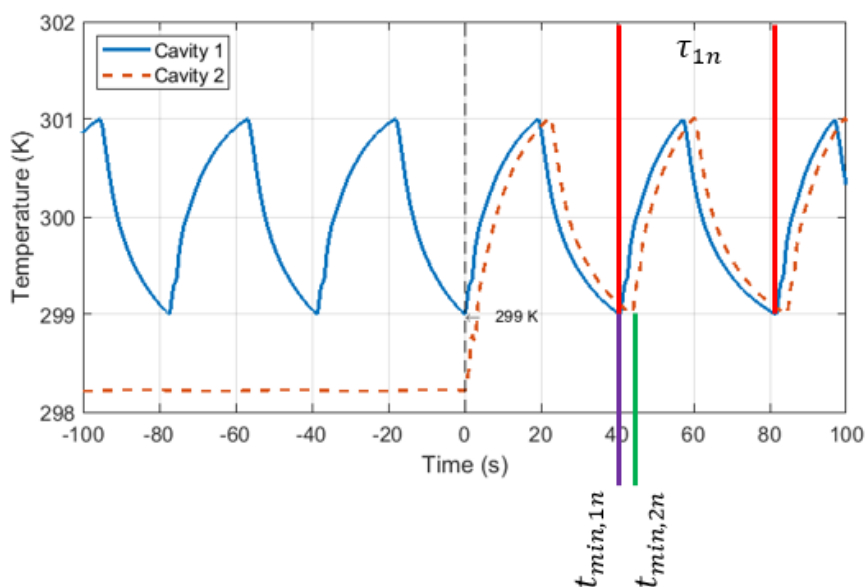
$$\% \Delta t_n = \frac{t_{min,1n} - t_{min,2n}}{\tau_{1n}} \times 100$$

เมื่อ $t_{min,1n}$ คือ เวลาที่อุณหภูมิของช่องปิดที่หนึ่งมีค่า 299 K ในรอบที่ n

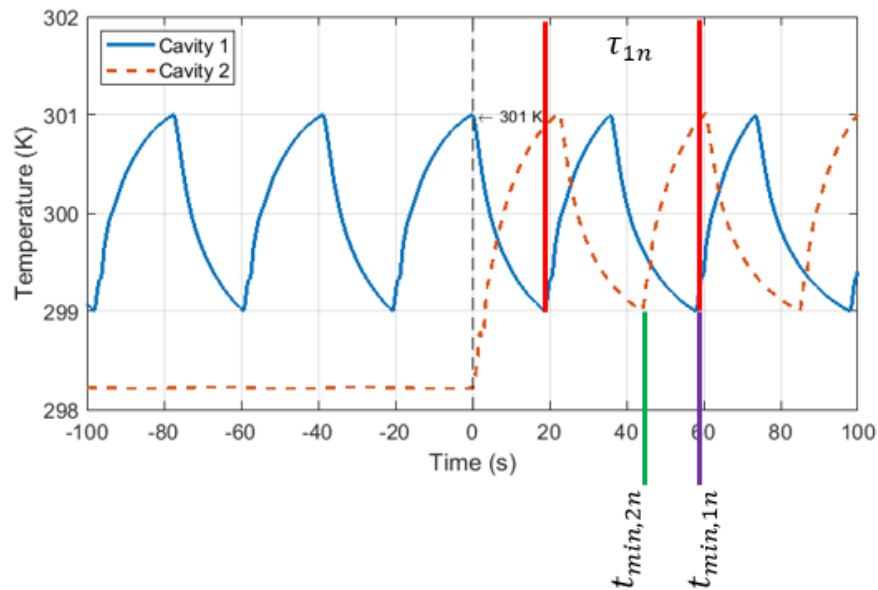
$t_{min,2n}$ คือ เวลาที่อุณหภูมิของช่องปิดที่สองมีค่า 299 K ในรอบที่ n

τ_{1n} คือ คาบของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดที่หนึ่งในรอบที่ n

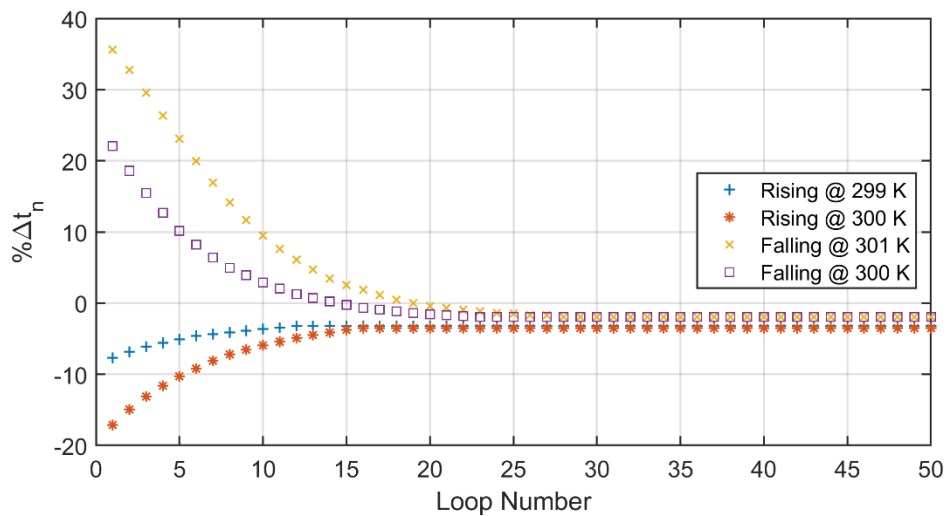
$\% \Delta t_n$ คือ % ผลต่างของระยะเวลาในการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดทั้งสองช่อง



รูปที่ 4.7 การหาค่าต่าง ๆ ในการคำนวณ $\% \Delta t_n$ ในกรณีอุณหภูมิของช่องปิดที่หนึ่งอยู่ในช่วงขาขึ้น



รูปที่ 4.8 การหาค่าต่าง ๆ ในการคำนวณ $\% \Delta t_n$ ในกรณีอุณหภูมิของช่องปิดที่หนึ่งอยู่ในช่วงขาลง



รูปที่ 4.9 ร้อยละของเวลาเคลื่อนระหว่างเริ่มเปิดเครื่องทำความร้อนของสองช่องปิดเทียบกับรอบการควบคุมในแต่ละกรณีเริ่มควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบในช่องปิดที่สอง

จากรูปที่ 4.9 ในช่วงเริ่มควบคุมอุณหภูมิพร้อมกันทั้งสองช่องและก่อนที่คาบของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของทั้งสองช่องปิดจะมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงพบว่าสามารถแบ่งได้ 2 กลุ่ม ดังนี้ กลุ่มที่ร้อยละของเวลาเคลื่อนในช่วงเริ่มควบคุมมีค่าเป็นบวก และ กลุ่มที่ร้อยละของเวลาเคลื่อนในช่วงเริ่มควบคุมมีค่าเป็นลบ

สำหรับกลุ่มที่มีร้อยละของเวลาเคลื่อนในช่วงเริ่มควบคุมเป็นลบ จะเป็นกลุ่มที่เริ่มควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดที่สองเมื่อช่องปิดที่หนึ่งมีอุณหภูมิอยู่ในช่วงขาขึ้นหรือกรณีที่ อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 299 K ถึง 301 K แสดงว่าจะมีช่วงเวลาที่เครื่องทำความร้อนเปิดพร้อมกันทั้งสองช่องปิด ซึ่งจะเห็นได้ว่าเครื่องทำความร้อนของช่องปิดที่หนึ่งจะเริ่มทำงานก่อนเครื่องทำความร้อนของช่องปิดที่สองเสมอและเมื่อเวลาผ่านไปจนคาบของการควบคุมอุณหภูมิไม่มีการเปลี่ยนแปลงคาบของการควบคุมอุณหภูมิจะมีค่าที่เท่ากัน

ในส่วนของกลุ่มที่มีร้อยละของเวลาเคลื่อนในช่วงเริ่มควบคุมเป็นบวกจะเป็นกลุ่มที่เริ่มควบคุมอุณหภูมิของช่องปิดที่สองเมื่ออุณหภูมิของช่องปิดที่หนึ่งอยู่ในช่วงขาลงหรือกรณีที่ อุณหภูมิลดลงจาก 301 K ถึง 299 K นั่นคือเครื่องทำความร้อนของช่องปิดที่สองจะเริ่มทำงานเมื่อเครื่องทำความร้อนของช่องปิดที่หนึ่งปิดแล้ว ซึ่งพบว่าในช่วงเริ่มต้นเครื่องทำความร้อนของช่องปิดที่สองได้เริ่มทำงานก่อนแต่เมื่อเวลาผ่านไปจนคาบของการควบคุมอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงเครื่องทำความร้อนของช่องปิดที่หนึ่งได้เริ่มทำงานก่อนซึ่งทำให้ผลต่างของระยะเวลาเป็นลบ นั่นคือแสดงว่ามีการสลับลำดับการเปิดและปิดของเครื่องทำความร้อนโดยในกลุ่มนี้จะใช้เวลาเพื่อเข้าสู่สภาวะคงตัวของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบที่นานกว่า ซึ่งจะเห็นได้จากจำนวนรอบการควบคุมเข้าสู่สภาวะคงตัวที่แสดงในตารางที่ 4.2 มีจำนวนที่มากกว่า

เป็นที่น่าสังเกตว่า เมื่อเวลาผ่านไปจนคาบของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้วพบว่า การเริ่มควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดที่สองเมื่อช่องปิดที่หนึ่งมีอุณหภูมิอยู่ในช่วงขาขึ้น ไม่ว่าจะมียุณหภูมิอยู่ที่ 299 K หรือ 300 K พบว่าทั้งสองกรณีมีร้อยละของเวลาเคลื่อน ที่ใกล้เคียงกัน แสดงดังตารางที่ 4.2 และสำหรับการเริ่มควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดที่สองเมื่อช่องปิดที่หนึ่งมีอุณหภูมิอยู่ในช่วงขาลง ไม่ว่าจะมียุณหภูมิอยู่ที่ 301 K หรือ 300 K ก็มีร้อยละของเวลาเคลื่อนที่ใกล้เคียงกันจึงมีความน่าสนใจถึงสาเหตุที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์นี้ในการศึกษาในอนาคตต่อไป

ตารางที่ 4.2 จำนวนรอบการควบคุมที่คาบการควบคุมเข้าสู่ค่าคงตัวและร้อยละของเวลาเคลื่อนระหว่างการเริ่มเปิดเครื่องทำความร้อนของสองช่องปิดในแต่ละกรณีเริ่มควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบในช่องปิดที่สอง

	Rising 299 K	Rising 300 K	Falling 301 K	Falling 300 K
N_{steady}	12	16	29	23
$\% \Delta t_{\text{steady}}$	-3.204	-3.546	-1.945	-1.945

4.2 ผลของสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นผนังร่วมที่มีต่อการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดทั้งสองช่อง

ในส่วนนี้จะเป็นส่วนของการศึกษาผลของสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นผนังร่วมที่มีผลต่อการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดทั้งสองช่อง โดยกำหนดเงื่อนไขของแบบจำลองเหมือนกับในหัวข้อที่ 4.1 เนื่องจากในหัวข้อที่ 4.1 เห็นได้ว่าไม่ว่าจะเริ่มควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องที่สองเมื่ออุณหภูมิของช่องที่หนึ่งอยู่ในช่วงขาขึ้นหรือช่วงขาลงก็ตาม อุณหภูมิของช่องปิดทั้งสองช่องได้มีการเคลื่อนเข้าหากันและมีค่าคงที่เมื่อเวลาผ่านไป ดังนั้นในส่วนของการศึกษาผลของสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นผนังร่วมจึงทำการศึกษาเฉพาะกรณีที่เริ่มควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบในช่องที่สองเมื่ออุณหภูมิในช่องที่หนึ่งอยู่ในช่วงขาลงที่ 301 K หรือ ในขณะที่ช่วงที่เครื่องทำความร้อนของช่องที่หนึ่งเริ่มปิด (ในช่วงเริ่มต้นควบคุมจะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทั้งสองช่องตามรูปที่ 4.3 (ค)) โดยจะเปลี่ยนวัสดุที่ใช้เป็นผนังร่วมเป็น 3 ชนิดได้แก่ อลูมิเนียม, ทองแดง และ นิกเกิล ซึ่งมีสมบัติที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 4.3 และกำหนดให้เงื่อนไขอื่น ๆ มีค่าคงที่ดังนี้ อุณหภูมิภายนอกเป็น 297.15 K และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนคงที่เท่ากับ $3.4309 \text{ W/m}^2\text{-K}$

ตารางที่ 4.3 สมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นผนังร่วม

Materials	ρ (kg/m^3)	C_p (J/kg-K)	k (W/m-K)	Thermal storage ($\text{kJ/m}^3\text{-K}$)	$\alpha \times 10^5$ (m^2/s)
Copper	8978	381	387.6	3420.618	11.30
Aluminum	2719	871	202.4	2368.249	8.55
Nickel	8900	460.6	91.74	4099.340	2.24

4.2.1 การเตรียมการของการศึกษาผลของสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นผนังร่วมต่อการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบในช่องปิดทั้งสองช่อง

ในส่วนของการเตรียมการก่อนสร้างแบบจำลองในกรณีของการศึกษาผลของสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นผนังร่วม 3 ชนิด ได้ทำการเช่นเดียวกันกับในหัวข้อที่ 4.1.1 คือจะควบคุมเฉพาะช่องที่หนึ่ง ผลของการควบคุมทั้งสามกรณีมีลักษณะคล้ายกับที่แสดงในรูปที่ 4.1 แต่มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยในส่วนของการคาบในสถานะคงตัวขณะที่ควบคุมเฉพาะช่องปิดที่หนึ่งดังแสดงให้เห็นในตารางที่ 4.4 ซึ่งจะมีค่าแตกต่างกันในแต่ละชนิดของผนัง ในกรณีที่ผนังร่วมคือ ทองแดงมีค่าเป็น 38.75 วินาที ซึ่งมีค่าแตกต่างไปในแต่ละชนิดของผนัง ในกรณีที่ผนังร่วมคือ อลูมิเนียม และ นิกเกิล มีค่าเป็น 38.85 วินาทีและ 38.65 วินาทีตามลำดับ ในขณะที่กรณีที่มีผนังร่วมคือทองแดงมีค่าเป็น 38.75 วินาที ซึ่งทั้งสามกรณีมีค่าคาบในสถานะคงตัวขณะที่ควบคุมเฉพาะช่องปิดที่หนึ่งต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

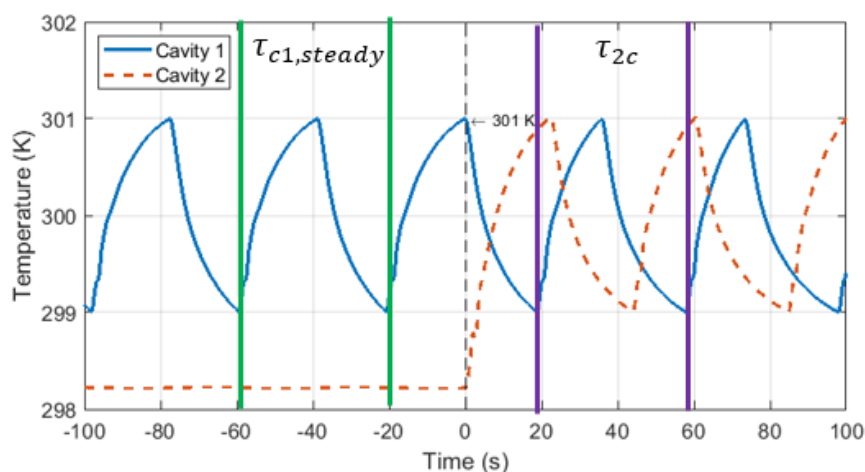
ตารางที่ 4.4 ค่าของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบเฉพาะช่องปิดที่หนึ่งในกรณีของผนังร่วมแต่ละชนิด

Materials	$T_{c1,steady}$	$t_{on,c1,steady}$	$t_{off,c1,steady}$	$T_{avg,cavity2}$
Copper	38.75	20.70	18.05	298.22020
Aluminum	38.85	20.75	18.10	298.22017
Nickel	38.65	20.65	18.00	298.22081

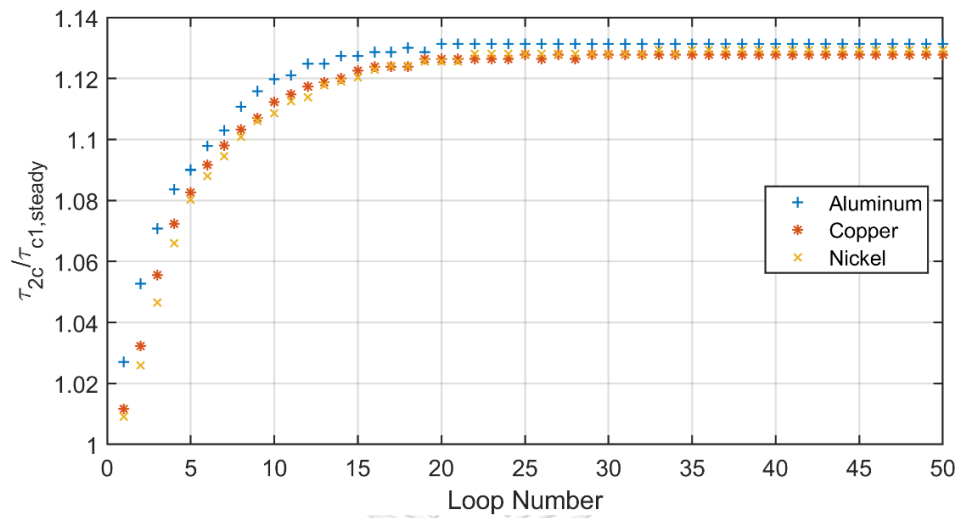
4.2.2 การเปรียบเทียบผลของสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นผนังร่วมต่อการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดทั้งสองช่อง

เมื่อพิจารณาลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของทั้ง 2 ช่องเมื่อมีการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบเมื่อมีผนังร่วมแตกต่างกัน ในทุกกรณีของผนังร่วมที่ทำการศึกษาพบว่ามีลักษณะใกล้เคียงกันทุกกรณี โดยมีลักษณะคล้ายกับที่แสดงในรูปที่ 4.3 (ค) และ 4.4 (ค) กล่าวคือทั้งสองช่องจะมีความแตกต่างกันมากในช่วงต้นแล้วจึงมีการปรับเข้าหากันเมื่อเวลาผ่านไป

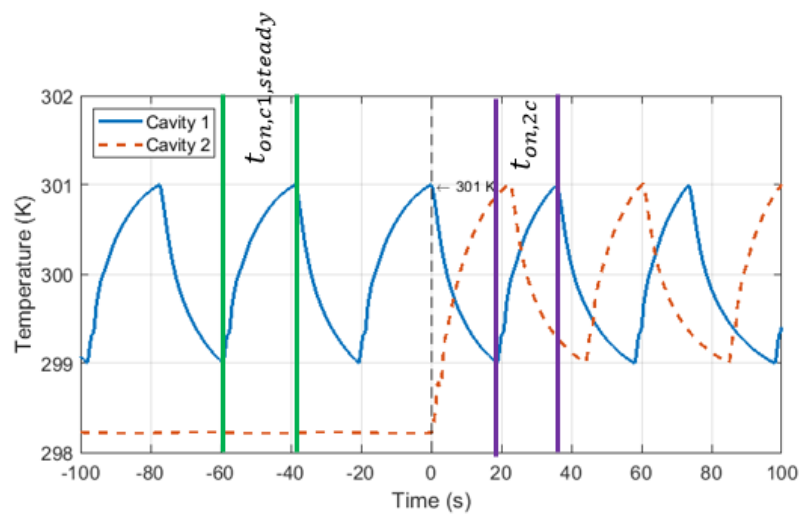
เพื่อวิเคราะห์ความแตกต่างให้ชัดเจนยิ่งขึ้น จึงทำการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของการควบคุมของช่องที่หนึ่ง ระหว่างหลังควบคุมอุณหภูมิของช่องปิดที่สองเทียบกับก่อนควบคุมอุณหภูมิของช่องปิดที่สองในขณะที่คาบของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดที่หนึ่งเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้วโดยจะเปรียบเทียบเป็นอัตราส่วนตามตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 4.10 โดยการแสดงผลต่อจากนี้กำหนดให้นับเวลาใหม่เป็น 0 วินาที



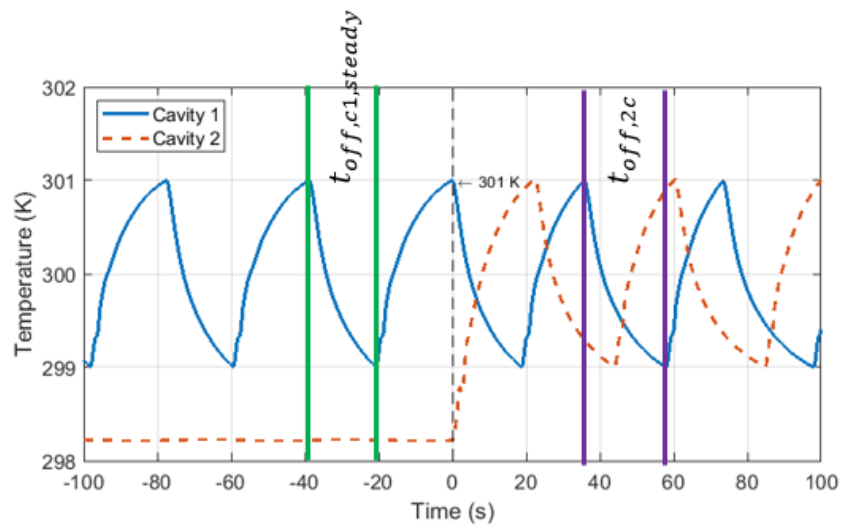
รูปที่ 4.10 ตัวแปร $T_{c1,steady}$ และ T_{2c} สำหรับแสดงอัตราส่วน



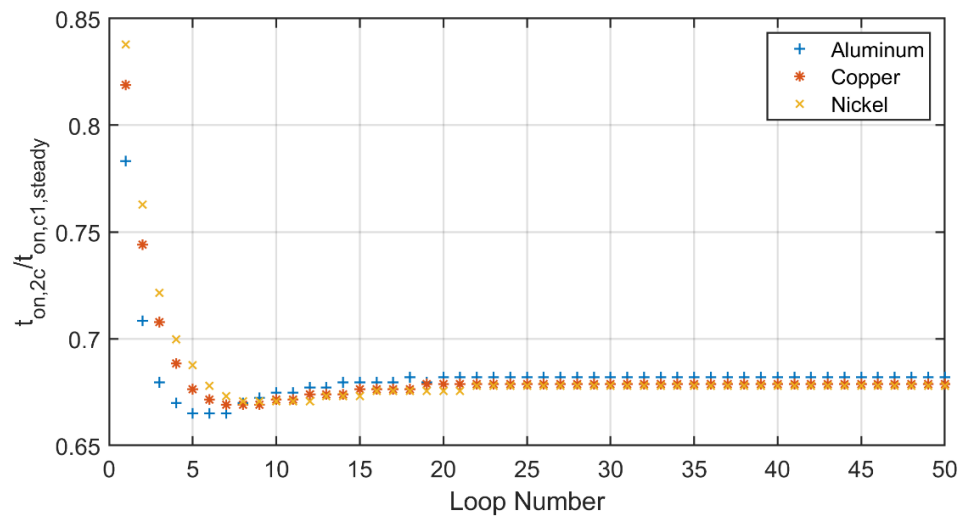
รูปที่ 4.11 อัตราส่วนของคาบในการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดที่หนึ่งกับคาบของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบเฉพาะช่องปิดที่หนึ่งในกรณีของการศึกษาผลของสมบัติของวัสดุ



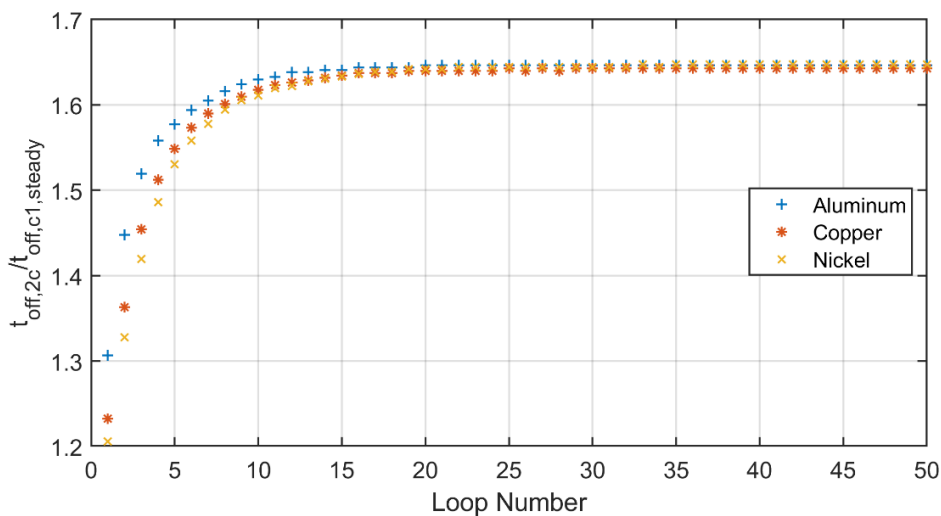
รูปที่ 4.12 ตัวแปร $t_{on,c1,steady}$ และ $t_{on,2c}$ สำหรับแสดงอัตราส่วน



รูปที่ 4.13 ตัวแปร $t_{\text{off},c1,\text{steady}}$ และ $t_{\text{off},2c}$ สำหรับแสดงอัตราส่วน



รูปที่ 4.14 อัตราส่วนเวลาในการเปิดเครื่องทำความร้อนของช่องปิดที่หนึ่งกับเวลาในการเปิดของเครื่องทำความร้อนเมื่อควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบเฉพาะช่องปิดที่หนึ่งในกรณีของการศึกษาผลของสมบัติของวัสดุ



รูปที่ 4.15 อัตราส่วนเวลาในการปิดเครื่องทำความร้อนของช่องปิดที่หนึ่งกับเวลาในการปิดของเครื่องทำความร้อนเมื่อควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบเฉพาะช่องปิดที่หนึ่งในกรณีของการศึกษาผลของสมบัติของวัสดุ

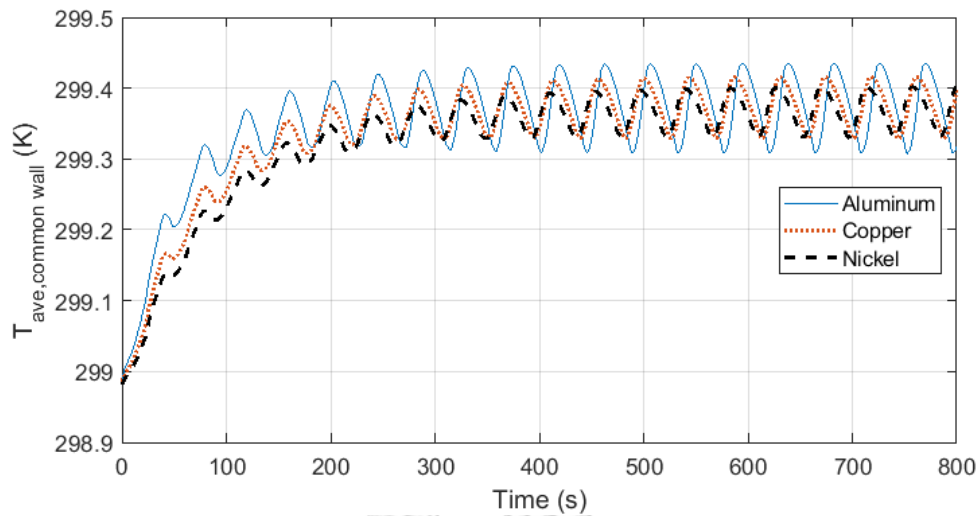
รูปที่ 4.11 แสดงอัตราส่วนของคาบในการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดที่หนึ่งหลังเริ่มควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดที่สองเทียบกับก่อนเริ่มควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดที่สองในขณะที่คาบของการควบคุมอุณหภูมิของช่องปิดที่หนึ่งเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้วในกรณีของการศึกษาผลของสมบัติของวัสดุ พบว่าคาบของการควบคุมอุณหภูมิในทุกวัสดุมีคาบที่มากขึ้น เมื่อคาบของการควบคุมอุณหภูมิมียุคค่าที่แล้วคาบของการควบคุมอุณหภูมิไม่มีความแตกต่างกันมากอย่างเห็นได้ชัด แต่ช่วงก่อนที่คาบของการควบคุมอุณหภูมิจะมีค่าที่คงที่พบว่า ผนังร่วมชนิดอลูมิเนียมเปลี่ยนแปลงคาบของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบมากที่สุดอย่างเห็นได้ชัด รองลงมาคือ ผนังร่วมชนิดทองแดงและนิกเกิลตามลำดับ โดยที่ผนังร่วมชนิดทองแดงและนิกเกิลมีการเปลี่ยนแปลงของคาบใกล้เคียงกัน

นอกเหนือจากการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของคาบหลังการเริ่มควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดทั้งสอง ผลของการเปลี่ยนแปลงสมบัติของวัสดุของผนังร่วมจะเห็นผลได้ชัดเจนขึ้นเมื่อพิจารณาอัตราส่วนเวลาเปิดและปิดเครื่องทำความร้อนซึ่งแสดงตัวอย่างการนิยามอัตราส่วนดังกล่าวในรูปที่ 4.12 และ 4.13 โดยที่ผลจากการจำลองแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.14 และ 4.15 จะเห็นว่าแม้ว่าคาบของการควบคุมอุณหภูมิจะยาวขึ้นทั้งสามกรณีแต่เวลาที่เปิดเครื่องทำความร้อนกลับสั้นลงทั้งสามกรณี ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ช่องปิดที่สองมีอุณหภูมิสูงกว่าตอนที่ยังไม่มี การควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบ จึงทำให้การสูญเสียพลังงานความร้อนของช่องที่หนึ่งลดลง ส่งผลให้ระยะเวลาในการเปิดเครื่องทำความร้อนของช่องที่หนึ่งสั้นลง ในขณะที่เดียวกันก็ทำให้ระยะเวลาในการปิดเครื่องทำความร้อน

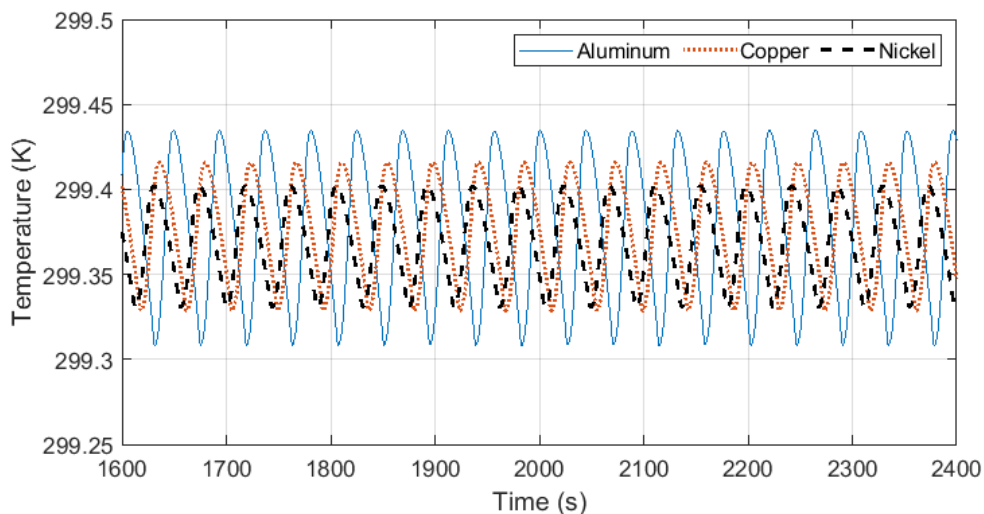
ยาวนานขึ้นด้วยซึ่งผลโดยรวมทำให้คาบการควบคุมยาวขึ้นกว่าขณะที่ไม่ได้มีการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบที่ช่องที่สอง

เมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาในการปิดของเครื่องทำความร้อนก่อนที่คาบของการควบคุมอุณหภูมิจะมีค่าคงที่ในรูปที่ 4.15 พบว่าผนังร่วมชนิดอลูมิเนียมมีระยะเวลาในการปิดเครื่องทำความร้อนนานที่สุดและรองลงมาเป็นทองแดงและนิกเกิล หลังจากคาบของการควบคุมอุณหภูมิมียังคงค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงแล้วพบว่าระยะเวลาของการปิดเครื่องทำความร้อนไม่มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน

นอกจากนี้ในช่วงแรกของการเริ่มควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของทั้งสองช่องปิดพบว่าผนังร่วมชนิดอลูมิเนียมมีระยะเวลาในการเปิดเครื่องทำความร้อนสั้นที่สุด รองลงมาคือผนังร่วมชนิดทองแดงและนิกเกิลตามลำดับและหลังจากรอบของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบที่ 8 พบว่ามีการสลับลำดับของเวลาในการเปิดเครื่องทำความร้อน เนื่องจากในช่วงแรกของการเริ่มควบคุมอุณหภูมิทั้งสองช่องเครื่องทำความร้อนของช่องที่หนึ่งอยู่ในขณะปิดและเครื่องทำความร้อนของช่องที่สองกำลังเปิดทำให้อุณหภูมิของทั้งสองช่องมีความแตกต่างกันมากทำให้ความร้อนจากช่องปิดที่สองถ่ายเทเข้ามาช่องปิดที่หนึ่งส่งผลให้ระยะเวลาในการเปิดเครื่องทำความร้อนสั้นลงและเมื่ออุณหภูมิของทั้งสองช่องเข้าใกล้กันมากขึ้นทำให้ระยะเวลาในการเปิดยาวนานขึ้นเล็กน้อย แสดงในรูปที่ 4.14 ซึ่งมีความสอดคล้องกับรูปที่ 4.16 แสดงให้เห็นว่าในช่วงเวลา 0 – 300 วินาทีซึ่งเป็นรอบของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบรอบที่ 1 - 8 พบว่าผนังร่วมชนิดอลูมิเนียมมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงที่สุดรองลงมาคือทองแดงและนิกเกิลตามลำดับซึ่งเป็นผลมาจากการเปิดเครื่องทำความร้อนของช่องปิดที่สอง และในช่วงหลังจาก 300 วินาทีเป็นต้นไปซึ่งอุณหภูมิของทั้งสองช่องเริ่มเคลื่อนเข้าใกล้กัน พบว่าอุณหภูมิของผนังอลูมิเนียมมีการแกว่งมากที่สุดเนื่องมาจากว่าอลูมิเนียมมีค่า Thermal Storage ต่ำที่สุดและมีลักษณะเป็นเช่นนี้ไปจนกว่าคาบของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบเข้าสู่สภาวะคงตัว แสดงดังรูปที่ 4.17 ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ค่าของการควบคุมอุณหภูมิมียังคงค่าคงที่แล้ว



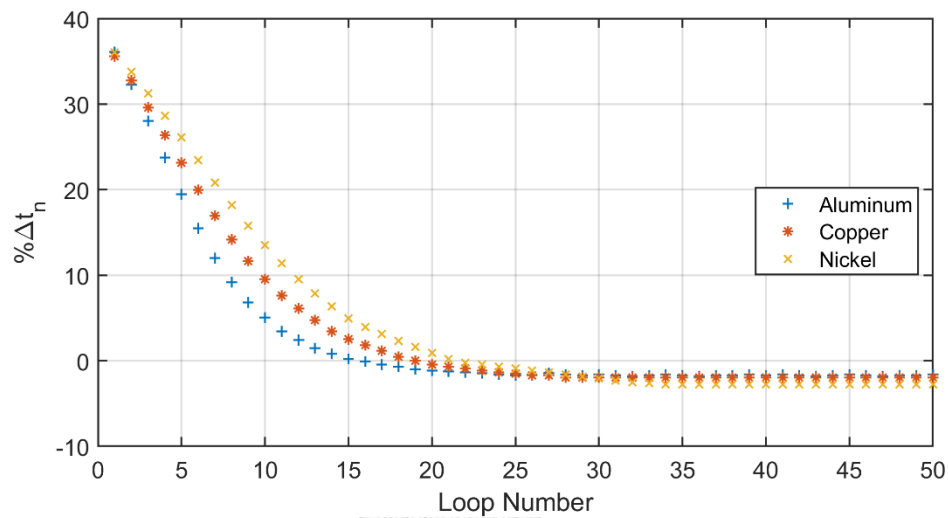
รูปที่ 4.16 อุณหภูมิเฉลี่ยของผนังร่วมในกรณีของการศึกษาผลของสมบัติของวัสดุ



รูปที่ 4.17 อุณหภูมิเฉลี่ยของผนังร่วมในกรณีของการศึกษาผลของสมบัติของวัสดุเมื่อคาบของการควบคุมอุณหภูมิไม่มีการเปลี่ยนแปลง

ร้อยละของเวลาเคลื่อนของเวลาในการเปิดเครื่องทำความร้อนพบว่าผนังร่วมชนิดอลูมิเนียมมีการเข้าสู่สภาวะคงตัวเร็วที่สุดตรงลงมาเป็นผนังร่วมชนิดทองแดงและนิกเกิลเกิดจากที่ผนังอลูมิเนียมซึ่งส่งผลให้มีจำนวนรอบในการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบที่เข้าสู่สภาวะคงตัวที่น้อยที่สุด แสดงดังรูปที่ 4.18 และแสดงดังตารางที่ 4.5 ซึ่งจากที่กล่าวมาข้างต้นพบว่ามีความสัมพันธ์กับสมบัติ Thermal storage ที่มาจากผลคูณของ ρC_p ซึ่งเป็นตัวแปรที่พบได้บ่อยในการวิเคราะห์ปัญหาการถ่ายเทความร้อน โดยที่ค่า specific heat (C_p) เป็นการแสดงการกักเก็บความร้อนในหน่วยของมวล และ

Thermal storage (ρC_p) เป็นการแสดงให้เห็นความสามารถในการกักเก็บความร้อนของวัสดุในหน่วยของปริมาตร ตามลำดับ ซึ่งวัสดุชนิดอลูมิเนียมมีค่าน้อยที่สุด รองลงมาคือทองแดงและนิกเกิล ผลที่ได้สามารถอธิบายในทางกายภาพได้คือวัสดุที่มีค่า Thermal Storage ที่ต่ำเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิรอบข้างก็จะเข้าสู่สภาวะสมดุลความร้อนได้เร็วกว่าเพราะใช้พลังงานความร้อนน้อยกว่าในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุนั้น ด้วยการนี้จึงทำให้กรณีที่ผนังทำด้วยอลูมิเนียมจึงเข้าสู่สภาวะควบคุมคงตัวเร็วที่สุด



รูปที่ 4.18 ร้อยละของเวลาเคลื่อนระหว่างการเริ่มเปิดเครื่องทำความร้อนของสองช่องปิดเทียบกับรอบการควบคุมในแต่ละกรณีของวัสดุที่เป็นผนังร่วม

ตารางที่ 4.5 จำนวนรอบการควบคุมที่คาบการควบคุมเข้าสู่สภาวะคงตัวและร้อยละของเวลาเคลื่อนระหว่างการเริ่มเปิดเครื่องทำความร้อนของสองช่องปิดในแต่ละกรณีของผนังร่วมแต่ละชนิด

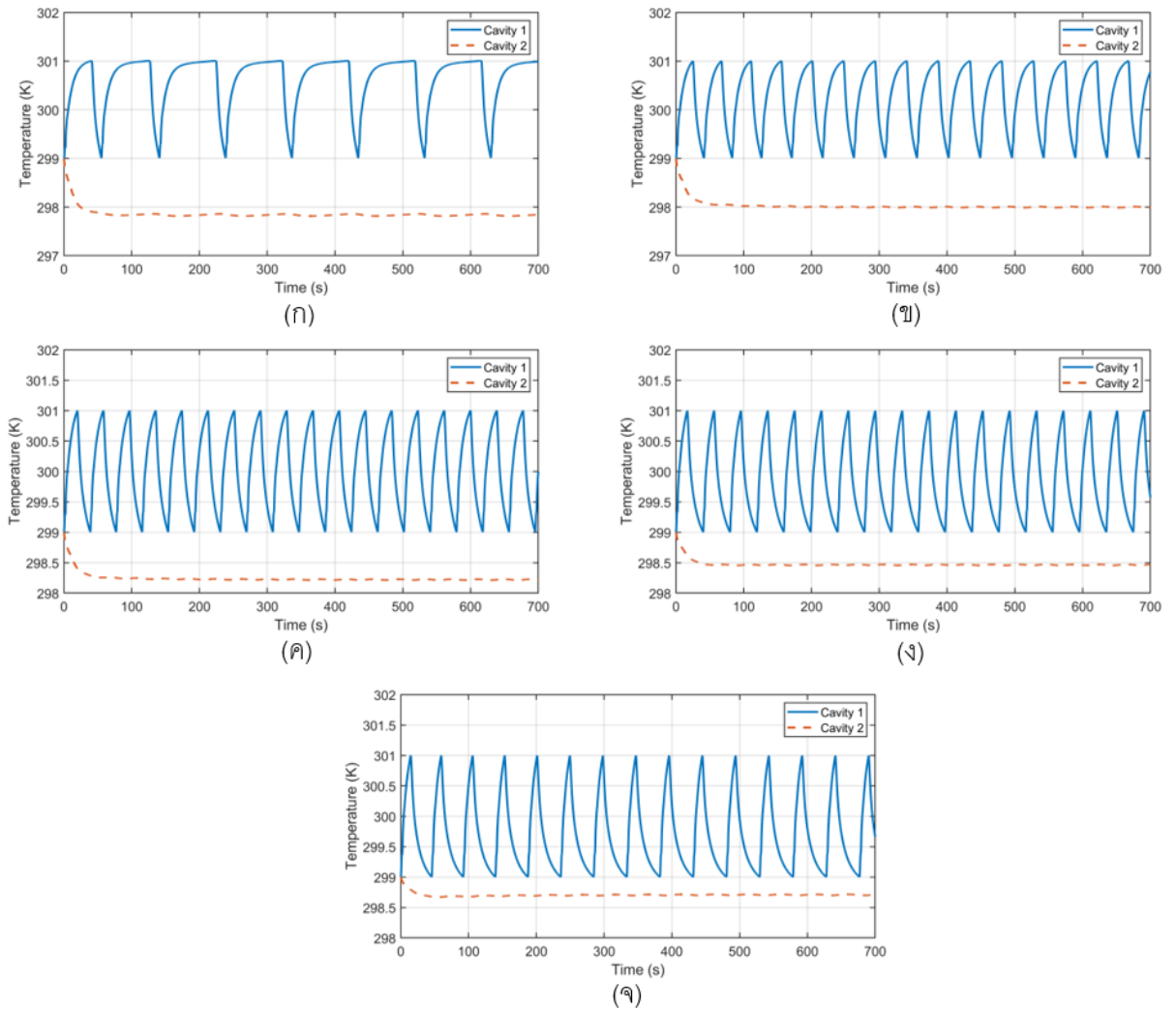
	Aluminum	Copper	Nickel
N_{steady}	23	29	35
$\% \Delta t_{\text{steady}}$	-1.478	-1.945	-2.749

4.3 ผลของอุณหภูมิภายนอกที่มีต่อการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดทั้งสองช่อง

ในส่วนนี้จะเป็นส่วนของการศึกษาผลของอุณหภูมิภายนอกต่อการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดทั้งสองช่อง เช่นเดียวกับกับหัวข้อที่ 4.2 การศึกษานี้จะกำหนดเงื่อนไขของแบบจำลองเหมือนกับในหัวข้อที่ 4.1 และศึกษาเฉพาะกรณีที่เริ่มควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบในช่องที่สองเมื่ออุณหภูมิในช่องที่หนึ่งอยู่ในช่วงขาลงที่ 301 K หรือ ในขณะที่ช่วงที่เครื่องทำความร้อนของช่องที่หนึ่งเริ่มปิด (ในช่วงเริ่มต้นควบคุมจะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทั้งสองช่องตามรูปที่ 4.3 (ค)) โดยที่ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิภายนอกทั้งหมด 5 อุณหภูมิ ได้แก่ 296.15 K, 296.65 K, 297.15K, 297.65 K และ 298.15 K อนึ่ง ถ้าทำการศึกษาอุณหภูมิภายนอกที่ต่ำกว่า 296.15 K จะไม่สามารถทำการศึกษาการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบได้เพราะเครื่องทำความร้อนจะทำการเปิดเพียงอย่างเดียว จึงทำการศึกษาถึงแค่กรณีที่อุณหภูมิภายนอกอยู่ที่ 296.15 K และกำหนดให้เงื่อนไขอื่น ๆ คือ ผนังร่วมเป็นวัสดุทองแดง และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนคงที่เท่ากับ $3.4309 \text{ W/m}^2\text{-K}$



4.3.1 การเตรียมการของการศึกษาผลของอุณหภูมิภายนอกต่อการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดทั้งสองช่อง



รูปที่ 4.19 การเตรียมการของการศึกษาผลของอุณหภูมิภายนอก

(ก) อุณหภูมิภายนอก 296.15 K (ข) อุณหภูมิภายนอก 296.65 K (ค) อุณหภูมิภายนอก 297.15 K

(ง) อุณหภูมิภายนอก 297.65 K (จ) อุณหภูมิภายนอก 298.15 K

ตารางที่ 4.6 ค่าของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบเฉพาะช่องปิดที่หนึ่งในกรณีอุณหภูมิภายนอกแต่ละค่า

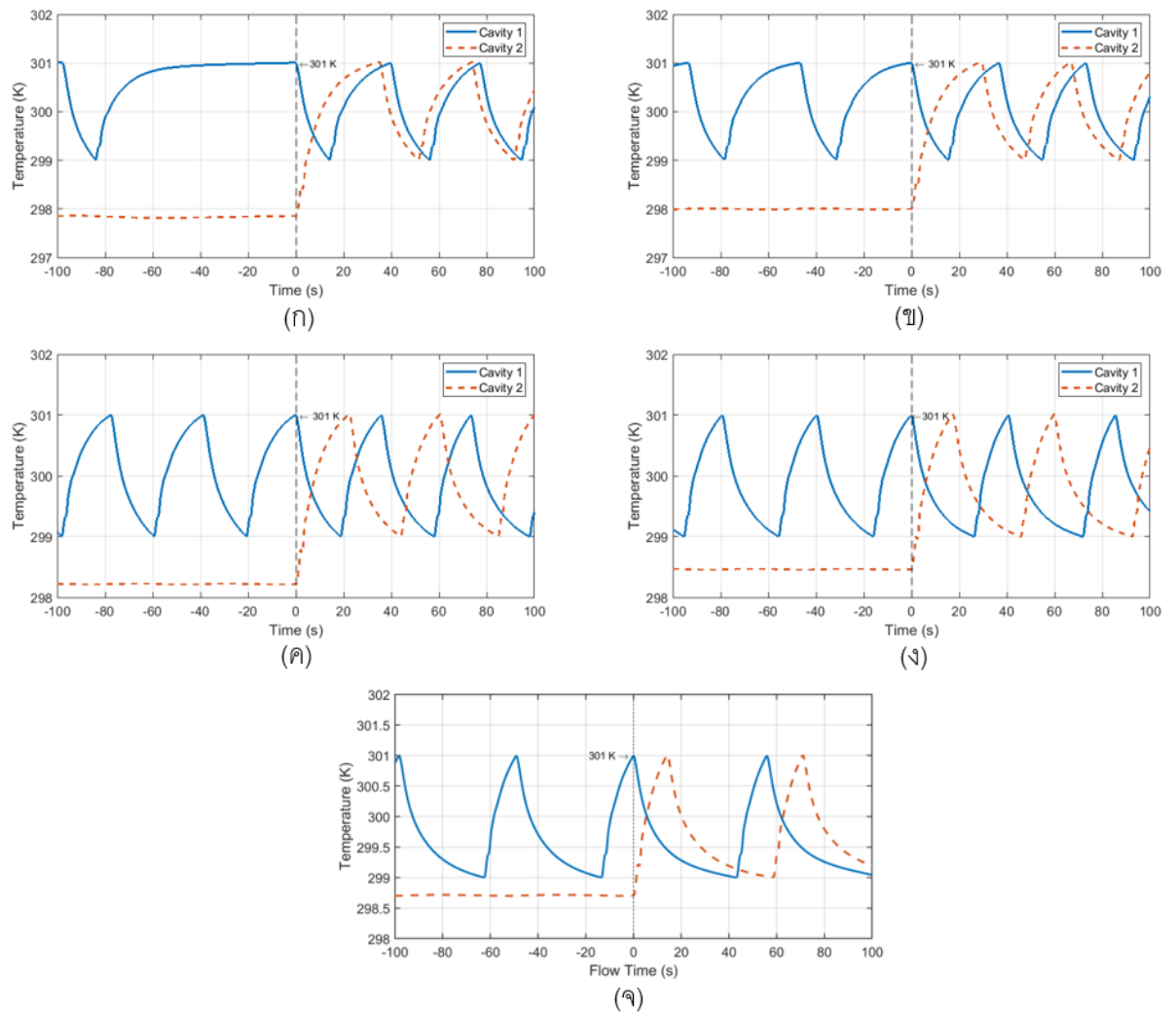
T_{out}	$\tau_{c1,steady}$ (s)	$t_{on,c1,steady}$ (s)	$t_{off,c1,steady}$ (s)	$T_{avg,cavity2}$ (K)
296.15 K	97.85	83.95	13.90	297.83472
296.65 K	46.75	31.65	15.10	297.99764
297.15 K	38.75	20.70	18.05	298.22020
297.65 K	39.65	16.00	23.65	298.46375
298.15 K	49.10	13.45	35.65	298.70884

ในส่วนของการเตรียมการก่อนสร้างแบบจำลองในกรณีของการศึกษาผลของอุณหภูมิภายนอกทั้งหมด 5 ค่าซึ่งได้ทำการเช่นเดียวกันกับในหัวข้อที่ 4.1.1 คือจะควบคุมเฉพาะช่องที่หนึ่ง ซึ่งจากรูปที่ 4.19 และตารางที่ 4.6 เห็นได้ชัดว่าผลของอุณหภูมิภายนอกส่งผลกระทบต่อระยะเวลาในการเปิดและปิดของเครื่องทำความร้อนของช่องปิดที่หนึ่งอย่างมาก และส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยของช่องปิดที่สองลดลงตามอุณหภูมิภายนอก

4.3.2 การเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิภายนอกต่อการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดทั้งสองช่อง

จากรูปที่ 4.20 จะเห็นว่าเมื่อมีการเริ่มควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบพร้อมกันในช่องปิดทั้งสองช่องพบว่าระยะเวลาในการเปิดเครื่องทำความร้อนเพื่อให้อุณหภูมิของอากาศเพิ่มขึ้นจาก 299 K ไปยัง 301 K สั้นลงอย่างเห็นได้ชัด และระยะเวลาในการปิดเครื่องทำความร้อนเพื่อให้อุณหภูมิของอากาศลดลงจาก 301 K มายัง 299 K นานขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบในช่องปิดที่สองทำให้มีการสูญเสียพลังงานความร้อนจากช่องที่หนึ่งลดลงตามที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่แล้ว

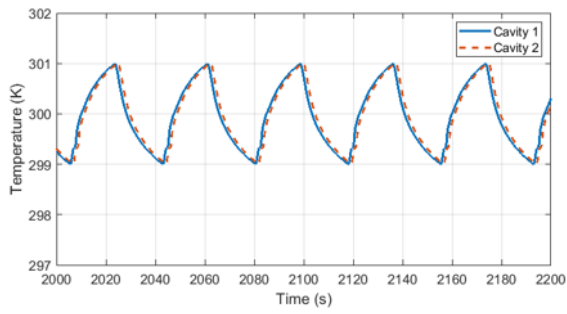
ในช่วงท้ายของการจำลองคือช่วงที่คาบของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบเข้าสู่ภาวะคงตัวแล้วพบว่า สามารถแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่อุณหภูมิของทั้งสองช่องปิดมีค่าที่ใกล้เคียงกันส่งผลให้เครื่องทำความร้อนของทั้งสองช่องปิดมีการเปิดที่ใกล้เคียงกันแสดงในรูปที่ 4.21 (ก) ถึง 4.21 (ง) และกรณีที่อุณหภูมิของช่องปิดที่สองมีค่าที่แตกต่างกันส่งผลให้เครื่องทำความร้อนของทั้งสองช่องปิดสลับการทำงานกันตลอดการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบ แสดงดังรูปที่ 4.21 โดยจะทำการวิเคราะห์โดยละเอียดต่อไป



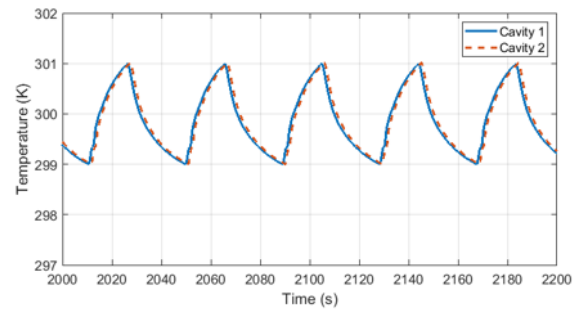
รูปที่ 4.20 การเริ่มควบคุมอุณหภูมิพร้อมกันทั้งสองช่องปิดเมื่อมีอุณหภูมิภายนอกที่ต่างต่างกัน

(ก) อุณหภูมิภายนอก 296.15 K (ข) อุณหภูมิภายนอก 296.65 K (ค) อุณหภูมิภายนอก 297.15 K

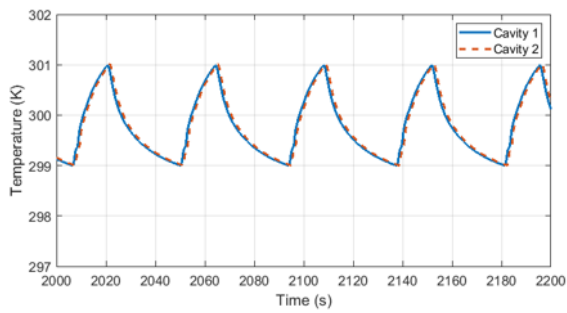
(ง) อุณหภูมิภายนอก 297.65 K (จ) อุณหภูมิภายนอก 298.15 K



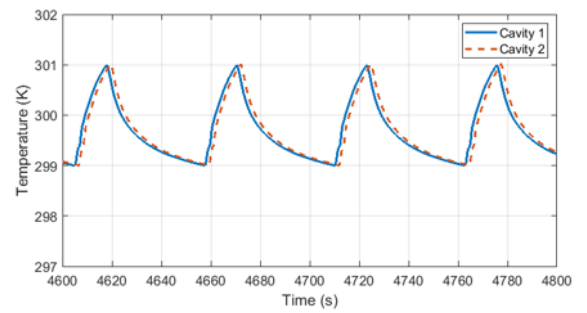
(ก)



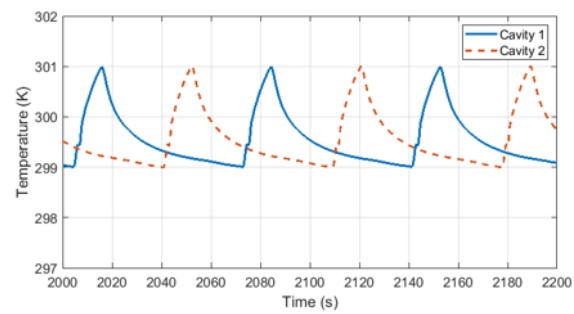
(ข)



(ค)



(ง)



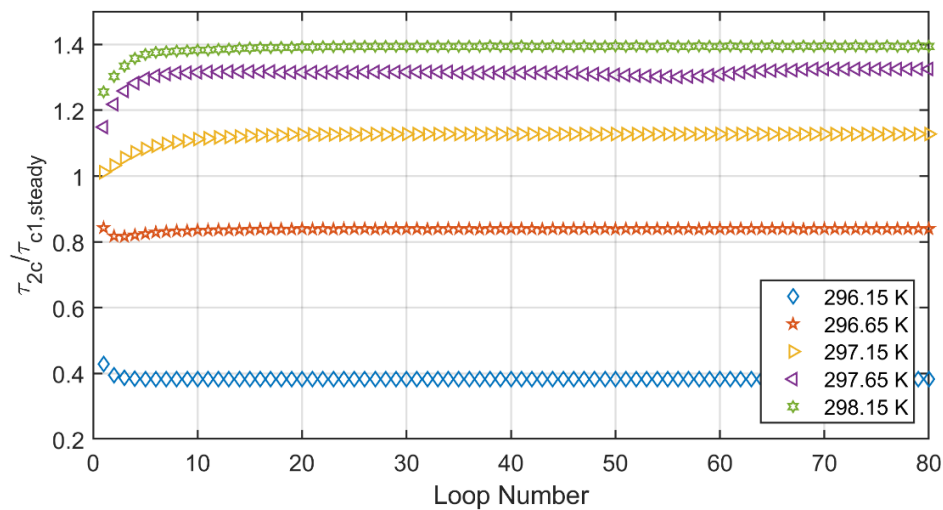
(จ)

รูปที่ 4.21 การควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดทั้งสองเมื่อมีอุณหภูมิภายนอกที่ต่างกัน

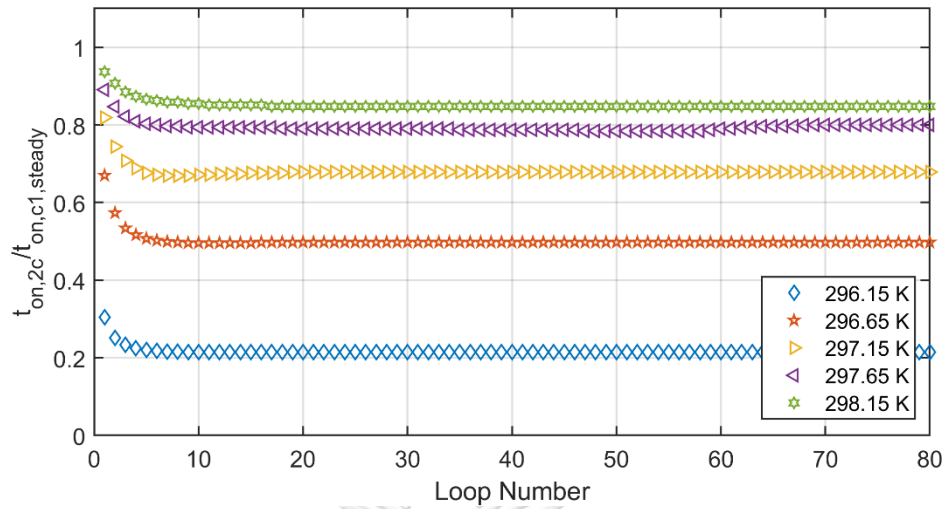
(ก) อุณหภูมิภายนอก 296.15 K (ข) อุณหภูมิภายนอก 296.65 K (ค) อุณหภูมิภายนอก 297.15 K

(ง) อุณหภูมิภายนอก 297.65 K (จ) อุณหภูมิภายนอก 298.15 K

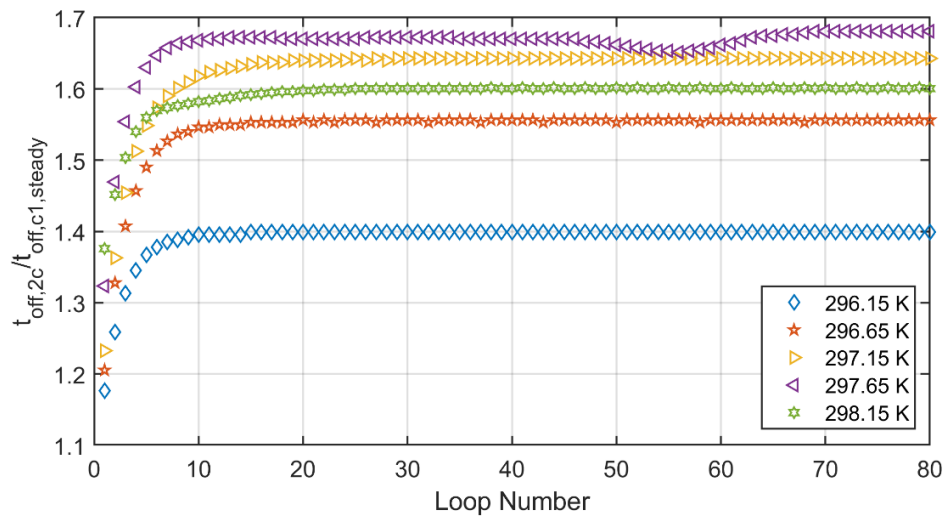
เพื่อวิเคราะห์ความแตกต่างให้ชัดเจนยิ่งขึ้น จึงทำการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของคาบ, ระยะเวลาในการเปิดเครื่องทำความร้อนและระยะเวลาในการเปิดเครื่องทำความร้อน ระหว่างหลังควบคุมอุณหภูมิของช่องปิดที่สองแล้วเทียบกับก่อนควบคุมอุณหภูมิของช่องปิดที่สองในขณะที่คาบของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดที่หนึ่งเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้ว โดยที่หลังจากมีการควบคุมอุณหภูมิของช่องปิดที่สองพร้อมกับช่องปิดที่หนึ่งแล้วจะเริ่มนับเวลาใหม่ที่ 0 วินาที โดยจะแสดงผลเป็นอัตราส่วนดังแสดงในรูปที่ 4.22 – 4.24 และร้อยละของเวลาเคลื่อนระหว่างการเริ่มเปิดเครื่องทำความร้อนของสองช่องปิดเทียบกับรอบการควบคุมในแต่ละกรณีเริ่มควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบในช่องปิดที่สอง แสดงในรูปที่ 4.25 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบเช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 4.2.2



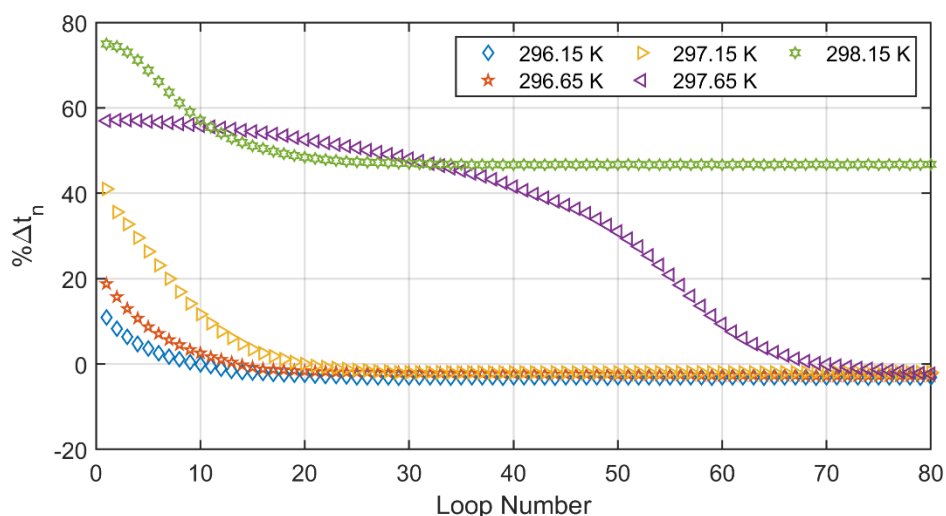
รูปที่ 4.22 อัตราส่วนคาบในการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดที่หนึ่งกับคาบของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบเฉพาะช่องปิดที่หนึ่งในกรณีของการศึกษาผลของอุณหภูมิภายนอก



รูปที่ 4.23 อัตราส่วนเวลาในการเปิดเครื่องทำความร้อนของช่องปิดที่หนึ่งกับเวลาในการเปิดของเครื่องทำความร้อนเมื่อควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบเฉพาะช่องปิดที่หนึ่งในแต่ละกรณีของอุณหภูมิภายนอก



รูปที่ 4.24 อัตราส่วนเวลาในการปิดเครื่องทำความร้อนของช่องปิดที่หนึ่งกับเวลาในการปิดของเครื่องทำความร้อนเมื่อควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบเฉพาะช่องปิดที่หนึ่งในแต่ละกรณีของอุณหภูมิภายนอก



รูปที่ 4.25 ร้อยละของเวลาเคลื่อนที่ระหว่างการเริ่มเปิดเครื่องทำความร้อนของสองช่องปิดเทียบกับรอบการควบคุมในแต่ละกรณีของอุณหภูมิภายนอก

ตารางที่ 4.7 จำนวนรอบการควบคุมที่คาบการควบคุมเข้าสู่สภาวะคงตัวและร้อยละของเวลาเคลื่อนที่ระหว่างการเริ่มเปิดเครื่องทำความร้อนของสองช่องปิดในแต่ละกรณีของอุณหภูมิภายนอก

	296.15 K	296.65 K	297.15 K	297.65 K	298.15 K
N_{steady}	25	28	29	79	25
$\% \Delta t_{\text{steady}}$	-3.070	-2.038	-1.945	-2.093	47.333

การเปลี่ยนแปลงของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบพบที่สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ คาบของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบมีค่ามากขึ้นและลดลงจากการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบเฉพาะช่องที่หนึ่ง สำหรับอุณหภูมิภายนอกที่ส่งผลให้มีคาบของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบมากขึ้นมี ดังนี้ อุณหภูมิภายนอก 297.15 K, 297.65 K และ 298.15 K หรือผลต่างของอุณหภูมิภายนอกกับค่ากลางของอุณหภูมิอากาศ มีค่าตั้งแต่ 1.85 K ถึง 2.85 K ตามลำดับ และอุณหภูมิภายนอกที่ส่งผลให้คาบของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบน้อยลงมี ดังนี้ 296.15 K และ 296.65 K หรือผลต่างของอุณหภูมิภายนอกกับค่ากลางของอุณหภูมิอากาศ มีค่าตั้งแต่ 3.35 K ถึง 3.85 K ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.22 การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยการพิจารณาระยะเวลาเปิดและปิดเครื่องทำความร้อน ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.23 และ 4.24

เมื่อพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงของระยะเวลาในการเปิดและปิดเครื่องทำความร้อนพบว่าสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ กลุ่มแรกคือ กลุ่มที่อุณหภูมิภายนอกมีค่า 296.15 K และ 296.65 K หรือมีผลต่างของอุณหภูมิภายนอกกับค่ากลางของอุณหภูมิอากาศตั้งแต่ 3.35 K ถึง 3.85 K ส่งผลให้คาบของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบโดยรวมสั้นลง แสดงดังรูปที่ 4.22 ถึงแม้ว่าระยะเวลาในการปิดเครื่องทำความร้อนจะยาวนานขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.24 เป็นเพราะว่าเมื่อผลต่างของอุณหภูมิมีมากเท่าไรก็ส่งผลให้ต้องใช้เวลาในการเปิดเครื่องทำความร้อนที่ยาวนานขึ้นจึงทำให้ความร้อนจากช่องปิดที่สองได้สูญเสียไปยังช่องปิดที่หนึ่งจึงทำให้ระยะเวลาในการเปิดเครื่องทำความร้อนของช่องปิดที่หนึ่งสั้นลงอย่างมากเมื่อเทียบกับควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบเฉพาะช่องปิดที่หนึ่งเพียงอย่างเดียว แสดงดังรูปที่ 4.23 จึงส่งผลให้คาบในการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบมีค่าน้อยลงอย่างชัดเจน และส่งผลให้รอบของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบที่เข้าสู่สภาวะคงตัวที่เร็วขึ้นตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4.7

กลุ่มที่สองคือ กลุ่มที่อุณหภูมิภายนอกมีค่า 297.15 K และ 297.65 K หรือมีผลต่างของอุณหภูมิภายนอกกับค่ากลางของอุณหภูมิอากาศตั้งแต่ 2.35 K ถึง 2.85 K ส่งผลให้คาบของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบโดยรวมยาวนานขึ้นเล็กน้อย แสดงดังรูปที่ 4.22 ถึงแม้ว่าระยะเวลาในการเปิดเครื่องทำความร้อนจะสั้นลงเพียงเล็กน้อย แสดงดังรูปที่ 4.23 แต่ด้วยมีผลต่างของอุณหภูมิที่อยู่ในช่วงกลาง ๆ จึงทำให้ความร้อนบางส่วนได้สูญเสียไปยังอุณหภูมิภายนอกได้น้อยกว่าในกลุ่มแรกจึงทำให้มีระยะเวลาในการปิดเครื่องทำความร้อนที่ยาวนานขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.24 จึงทำให้คาบของการควบคุมอุณหภูมิโดยรวมยาวนานขึ้นเล็กน้อย และส่งผลให้รอบของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบที่เข้าสู่สภาวะคงตัวที่เร็วขึ้นตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4.7

กลุ่มสุดท้ายคือ กลุ่มที่อุณหภูมิภายนอกมีค่า 298.15 K หรือมีผลต่างของอุณหภูมิภายนอกกับค่ากลางของอุณหภูมิอากาศเท่ากับ 1.85 K ซึ่งเป็นผลต่างของอุณหภูมิต่ำที่สุดจึงส่งผลให้คาบของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบโดยรวมยาวนานขึ้นอย่างมาก แสดงดังรูปที่ 4.22 แม้ว่าระยะเวลาในการเปิดเครื่องทำความร้อนจะสั้นมาก แสดงดังรูปที่ 4.23 จึงทำให้ความร้อนบางส่วนได้สูญเสียไปยังอุณหภูมิภายนอกที่น้อยมาก และผลต่างของอุณหภูมิต่ำมากจึงทำให้มีระยะเวลาในการปิดเครื่องทำความร้อนที่นานมาก แสดงดังรูปที่ 4.24 จนไม่สามารถส่งผลให้อุณหภูมิของช่องปิดทั้งสองเคลื่อนเข้าใกล้กัน และส่งผลให้รอบของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบที่เข้าสู่สภาวะคงตัวที่แตกต่างกับกรณีอุณหภูมิภายนอกอื่น ๆ อย่างสิ้นเชิง แสดงดังตารางที่ 4.7

เมื่อพิจารณาร้อยละของเวลาเคลื่อนระหว่างการเริ่มเปิดเครื่องทำความร้อนของสองช่องปิดเทียบกับรอบการควบคุมพบว่าเมื่อคาบของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้วแสดง

ดังรูปที่ 4.25 พบว่าสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ ร้อยละของเวลาเคลื่อนเป็นบวก และ ร้อยละของเวลาเคลื่อนเป็นลบ แม้ว่าในขณะที่มีการเริ่มควบคุมอุณหภูมิของทั้งสองช่องปิดเมื่อช่องปิดที่หนึ่งมีอุณหภูมิอยู่ในช่วงขาลงที่ 301 K ยังสามารถปรากฏกลุ่มที่มีร้อยละของเวลาเคลื่อนเป็นบวก ซึ่งมีเพียงมีกรณีอุณหภูมิภายนอก 298.15 K เพียงค่าเดียว ส่วนกลุ่มที่มีร้อยละของเวลาเคลื่อนเป็นลบมีทั้งหมด 4 ค่า ดังนี้ 296.15 K, 296.65 K, 297.15 K และ 297.65 K เมื่อคาบของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้ว สำหรับกรณีที่ร้อยละของเวลาเคลื่อนมีค่าเป็นลบ โดยที่อุณหภูมิภายนอกมีค่าน้อยที่สุด ส่งผลให้คาบของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบเข้าสู่สภาวะคงตัวได้เร็วขึ้น ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.7

จากรูปที่ 4.25 ในกรณีที่อุณหภูมิภายนอก 297.65 K พบว่าในช่วงเริ่มต้นของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบมีลักษณะของการเปลี่ยนแปลงของเวลาเคลื่อนที่แตกต่างกันออกไปจากกรณีอื่น ซึ่งดูเหมือนว่าอุณหภูมิของทั้งสองช่องปิดจะไม่มีค่าที่ใกล้เคียงกันและจากรูปที่ 4.22 – 4.25 เมื่อเวลาผ่านไปจนถึงรอบของการควบคุมที่ 50 – 60 เนื่องจากน่าจะเกิด Unstability บางอย่างขึ้น พบว่าร้อยละของเวลาเคลื่อนเริ่มมีค่าที่ลู่เข้าสู่ 0 และเมื่อคาบของการควบคุมอุณหภูมิเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้วพบว่าอุณหภูมิขิงทั้งสองช่องปิดมีค่าที่ใกล้เคียงกัน เช่นเดียวกับ ในกรณีที่อุณหภูมิภายนอก 296.15 K, 296.65K และ 297.15 K แต่ในขณะเดียวกันนั้นพบว่าที่อุณหภูมิภายนอก 298.15 K มีความแตกต่างออกไปอย่างสิ้นเชิงเนื่องจากร้อยละของเวลาเคลื่อนจะไม่มีการลู่เข้าสู่ 0 และเมื่อคาบของการควบคุมอุณหภูมิเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้วพบว่าอุณหภูมิของทั้งสองช่องปิดจะมีความแตกต่างกันอย่างมากซึ่งแตกต่างกันกับกรณีอุณหภูมิภายนอกอื่น ๆ จึงมีความน่าสนใจที่จะทำการศึกษาต่อไปในอนาคต

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาผลของสมบัติของวัสดุและผลของอุณหภูมิภายนอกที่มีผลต่อการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดทั้งสองช่องที่ติดกันโดยที่ในแต่ละช่องมีการควบคุมอุณหภูมิที่แยกกันอย่างอิสระ โดยผลของการเริ่มควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดที่สองเมื่อช่องปิดที่หนึ่งมีอุณหภูมิในช่วงขึ้นและลงที่แตกต่างกัน ดังนี้ 299 K, 300 K, 301 K และ 300 K, การศึกษาผลของสมบัติของวัสดุ 3 ชนิด ดังนี้ อลูมิเนียม, ทองแดง และนิกเกิล และการศึกษาผลของอุณหภูมิภายนอก 5 ค่า ดังนี้ 296.15 K, 296.65 K, 297.15 K, 297.65 K และ 298.15 K

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ผลของการเริ่มควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดที่สองต่อการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดทั้งสองช่อง

จากของผลการวิจัยพบว่าการเริ่มควบคุมอุณหภูมิพร้อมกันในขณะที่ช่องปิดที่หนึ่งมีอุณหภูมิในช่วงขาขึ้นและขาลงสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ สำหรับอุณหภูมิของช่องปิดที่หนึ่งมีอุณหภูมิในช่วงขาขึ้น พบว่าเมื่อเริ่มต้นควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบพร้อมกันเครื่องทำความร้อนของช่องปิดที่หนึ่งจะเริ่มทำงานก่อนเครื่องทำความร้อนในช่องปิดที่สองเสมอตลอดการสร้างแบบจำลองส่วนอุณหภูมิของช่องปิดที่หนึ่งมีอุณหภูมิในช่วงขาลง พบว่าเมื่อเริ่มต้นควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบพร้อมกันเครื่องทำความร้อนของช่องปิดที่สองจะเริ่มทำงานก่อนแต่เมื่อเวลาผ่านไปจนคาบของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบเข้าสู่สภาวะคงตัวเครื่องทำความร้อนของช่องปิดที่หนึ่งเริ่มทำงานก่อนช่องปิดที่สองแต่อย่างไรก็ตามเมื่อคาบของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้ว แต่ละกลุ่มจะให้ร้อยละของเวลาเคลื่อนที่เท่ากัน

5.1.2 ผลของสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นผนังร่วมที่มีต่อการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดทั้งสองช่อง

ในการศึกษาผลของสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นผนังร่วมจะเริ่มควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบพร้อมกันเมื่ออุณหภูมิของช่องปิดที่หนึ่งมีอุณหภูมิอยู่ในช่วงขาลงที่ 301 K ซึ่งลักษณะของร้อยละของเวลาเคลื่อนที่มีลักษณะที่ใกล้เคียงกันกับในหัวข้อที่ 5.1.1 จากผลการวิจัยพบว่าในช่วงเริ่มต้นของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบ สมบัติ Thermal Storage ของวัสดุจะส่งผลต่อการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดทั้งสองช่อง เนื่องจากค่า Thermal Storage (pC_p) เป็นสมบัติที่บ่งบอกถึงความสามารถในการกักเก็บความร้อนของวัสดุซึ่งในกรณีผนังร่วมเป็นวัสดุชนิดอลูมิเนียมมีค่า Thermal Storage น้อยที่สุด

นั่นหมายความว่าเมื่อช่องปิดสองช่องที่อยู่ติดกันและแต่ละช่องมีอุณหภูมิที่แตกต่างกันอย่างมาส่งผลให้ความร้อนสามารถถ่ายเทมายังอีกช่องปิดได้มากกว่าเพราะว่าความร้อนบางส่วนถูกกักเก็บไว้ในผนังร่วมเพียงเล็กน้อยเท่านั้นจึงทำให้คาบในการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบเข้าสู่สภาวะคงตัวได้เร็วกว่าวัสดุที่มีสมบัติ Thermal Storage สูงกว่า แต่หลังจากที่คาบของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบมีเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้ว พบว่า สมบัติ Thermal Storage ของวัสดุไม่ส่งผลต่อการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบเนื่องจากในช่องปิดทั้งสองช่องมีผลต่างของอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยเท่านั้น สมบัติของวัสดุจึงไม่มีผลต่อการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบในช่วงที่คาบของการควบคุมอุณหภูมิเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้ว

5.1.3 ผลของอุณหภูมิภายนอกที่มีต่อการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดทั้งสองช่อง

ในการศึกษาผลของอุณหภูมิภายนอกต่อการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบจะเริ่มควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบพร้อมกันเมื่ออุณหภูมิของช่องปิดที่หนึ่งมีอุณหภูมิอยู่ในช่วงขาลงที่ 301 K ซึ่งอุณหภูมิภายนอกที่มีค่า 296.15 K, 296.65 K, 297.15 K และ 297.65 K ให้ลักษณะของร้อยละเวลาเคลื่อนเป็นเช่นเดียวกันกับในหัวข้อที่ 5.1.1

โดยผลของอุณหภูมิภายนอกต่อการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดทั้งสองแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ กลุ่มแรกคือเมื่ออุณหภูมิภายนอกกับค่ากลางของอุณหภูมิอากาศภายในช่องปิดมีผลต่างอยู่ในช่วง 3.35 K ถึง 3.85 K จะส่งผลให้คาบของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบที่สั้นลงถึงแม้ว่าระยะเวลาในการปิดเครื่องทำความร้อนจะยาวนานขึ้นก็ตาม เป็นเพราะว่าเมื่อมีผลต่างของอุณหภูมิที่มากกว่าทำให้มีระยะเวลาในการเปิดเครื่องทำความร้อนนานกว่าจึงทำให้ความร้อนบางส่วนที่เหลือจากการทำให้ช่องปิดที่สองมีอุณหภูมิไปถึง 301 K ถูกถ่ายเทมายังช่องปิดที่หนึ่งส่งผลให้ระยะเวลาในการเปิดเครื่องทำความร้อนของช่องที่หนึ่งสั้นลงกว่าการควบคุมอุณหภูมิเฉพาะช่องปิดที่หนึ่งอย่างเห็นได้ชัด จึงส่งผลให้คาบของการควบคุมอุณหภูมิโดยรวมสั้นลงถึงแม้ว่าระยะเวลาในการปิดเครื่องทำความร้อนจะยาวนานขึ้นเล็กน้อย

กลุ่มที่สองคือเมื่อผลต่างของอุณหภูมิภายนอกกับค่ากลางของอุณหภูมิของอากาศภายในช่องปิดในช่วง 2.35K ถึง 2.85 K ทำให้ระยะเวลาในการเปิดเครื่องทำความร้อนสั้นลงกว่าการควบคุมอุณหภูมิเฉพาะช่องปิดที่หนึ่งเพียงเล็กน้อยแต่ในทางกลับกันนั้นทำให้ระยะเวลาในการปิดเครื่องทำความร้อนยาวนานขึ้นจึงให้คาบของการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบยาวนานกว่าการควบคุมอุณหภูมิเฉพาะช่องปิดที่หนึ่งเพียงเล็กน้อย สำหรับอุณหภูมิภายนอกที่ 297.65 K หรือผลต่างของอุณหภูมิภายนอกกับค่ากลางของอุณหภูมิอากาศมีค่าเท่ากับ 2.35 K พบว่าในช่วงรอบของการควบคุมที่ 50 – 60 เนื่องจากน่าจะเกิด Unstability บางอย่างขึ้นและร้อยละของเวลาเคลื่อนเริ่มมีค่าที่ลู่เข้าสู่ 0 ซึ่ง

แตกต่างกันกับช่วงแรกที่เราเริ่มควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบพร้อมกัน จึงมีความน่าสนใจที่จะทำการศึกษาต่อไปในอนาคต

กลุ่มสุดท้ายเมื่อผลต่างของอุณหภูมิภายนอกกับค่ากลางของอุณหภูมิของอากาศที่น้อยที่สุดคือ 1.85 K ให้ลักษณะของเวลาเคลื่อนที่แตกต่างกันออกไปอย่างสิ้นเชิง เป็นเพราะว่ามีผลต่างของอุณหภูมิภายนอกกับอุณหภูมิภายในช่องปิดน้อยจนเกินไปทำให้ระยะเวลาในการเปิดเครื่องทำความร้อนมีเวลาที่สั้นมากจึงทำให้ความร้อนบางส่วนถูกถ่ายเทไปยังอีกช่องปิดน้อยมาก และทำให้ระยะเวลาในการปิดเครื่องทำความร้อนมีระยะเวลาที่นานมากจนไม่สามารถส่งผลให้อุณหภูมิของช่องปิดทั้งสองเคลื่อนเข้าใกล้กัน

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

จากการจำลองการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบของช่องปิดสองช่องที่ติดกันในงานวิจัยนี้เป็นการจำลองการไหลแบบสองมิติ และการถ่ายเทความร้อนภายในช่องปิดทั้งสองผ่านผนังร่วม จึงมีความน่าสนใจที่จะทำการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคตดังนี้ ทำการศึกษาพฤติกรรมการกระจายตัวของอุณหภูมิอัตราเร็วของอากาศ และการถ่ายเทความร้อนภายในช่องปิดที่มีทั้งการนำความร้อนและการพาความร้อนตามธรรมชาติในช่องปิดทั้งสองช่อง และการกำหนดเงื่อนไขต่าง ๆ หรือการสร้างแบบจำลองของโดเมนที่มีความซับซ้อนสูงขึ้นเพื่อทำการศึกษารูปแบบการควบคุมอุณหภูมิเชิงคาบในลักษณะต่าง ๆ ได้

บรรณานุกรม

- [1] J. Tu, G. H. Yeoh, and C. Liu, "Chapter 2 - CFD Solution Procedure—A Beginning," in *Computational Fluid Dynamics*, J. Tu, G. H. Yeoh, and C. Liu, Eds. Burlington: Butterworth-Heinemann, 2008, pp. 29-64.
- [2] J. Reddy and A. J. J. o. H. T. Satake, "A comparison of a penalty finite element model with the stream function-vorticity model of natural convection in enclosures," vol. 102, no. 4, pp. 659-666, 1980.
- [3] G. J. I. J. f. n. m. i. f. de Vahl Davis, "Natural convection of air in a square cavity: a bench mark numerical solution," vol. 3, no. 3, pp. 249-264, 1983.
- [4] N. C. Markatos, K. J. I. J. o. H. Pericleous, and M. Transfer, "Laminar and turbulent natural convection in an enclosed cavity," vol. 27, no. 5, pp. 755-772, 1984.
- [5] J. D. Hall, A. Bejan, J. B. J. I. j. o. h. Chaddock, and f. flow, "Transient natural convection in a rectangular enclosure with one heated side wall," vol. 9, no. 4, pp. 396-404, 1988.
- [6] M. Hortmann, M. Perić, and G. J. I. j. f. n. m. i. f. Scheuerer, "Finite volume multigrid prediction of laminar natural convection: bench-mark solutions," vol. 11, no. 2, pp. 189-207, 1990.
- [7] O. Aydin, A. Ünal, T. J. I. J. o. H. Ayhan, and M. Transfer, "Natural convection in rectangular enclosures heated from one side and cooled from the ceiling," vol. 42, no. 13, pp. 2345-2355, 1999.
- [8] K. Ben Nasr, R. Chouikh, C. Kerkeni, and A. Guizani, "Numerical study of the natural convection in cavity heated from the lower corner and cooled from the ceiling," *Applied Thermal Engineering*, vol. 26, no. 7, pp. 772-775, 2006.
- [9] M. M. Ganzarolli, L. F. J. I. J. o. H. Milanez, and M. Transfer, "Natural convection in rectangular enclosures heated from below and symmetrically cooled from the sides," vol. 38, no. 6, pp. 1063-1073, 1995.
- [10] O. Aydin, W.-J. J. I. J. o. N. M. f. H. Yang, and F. Flow, "Natural convection in enclosures with localized heating from below and symmetrical cooling from sides," vol. 10, no. 5, pp. 518-529, 2000.

- [11] D. Kaminski, C. J. I. J. o. H. Prakash, and M. Transfer, "Conjugate natural convection in a square enclosure: effect of conduction in one of the vertical walls," vol. 29, no. 12, pp. 1979-1988, 1986.
- [12] D. Misra, A. J. C. m. i. a. m. Sarkar, and engineering, "Finite element analysis of conjugate natural convection in a square enclosure with a conducting vertical wall," vol. 141, no. 3-4, pp. 205-219, 1997.
- [13] M. Mobedi, "Conjugate natural convection in a square cavity with finite thickness horizontal walls," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 35, no. 4, pp. 503-513, 2008.
- [14] H. Turkoglu, N. J. H. Yücel, and M. Transfer, "Natural convection heat transfer in enclosures with conducting multiple partitions and side walls," vol. 32, no. 1-2, pp. 1-8, 1996.
- [15] M. Khatamifar, W. Lin, S. W. Armfield, D. Holmes, and M. P. Kirkpatrick, "Conjugate natural convection heat transfer in a partitioned differentially-heated square cavity," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 81, pp. 92-103, 2017.



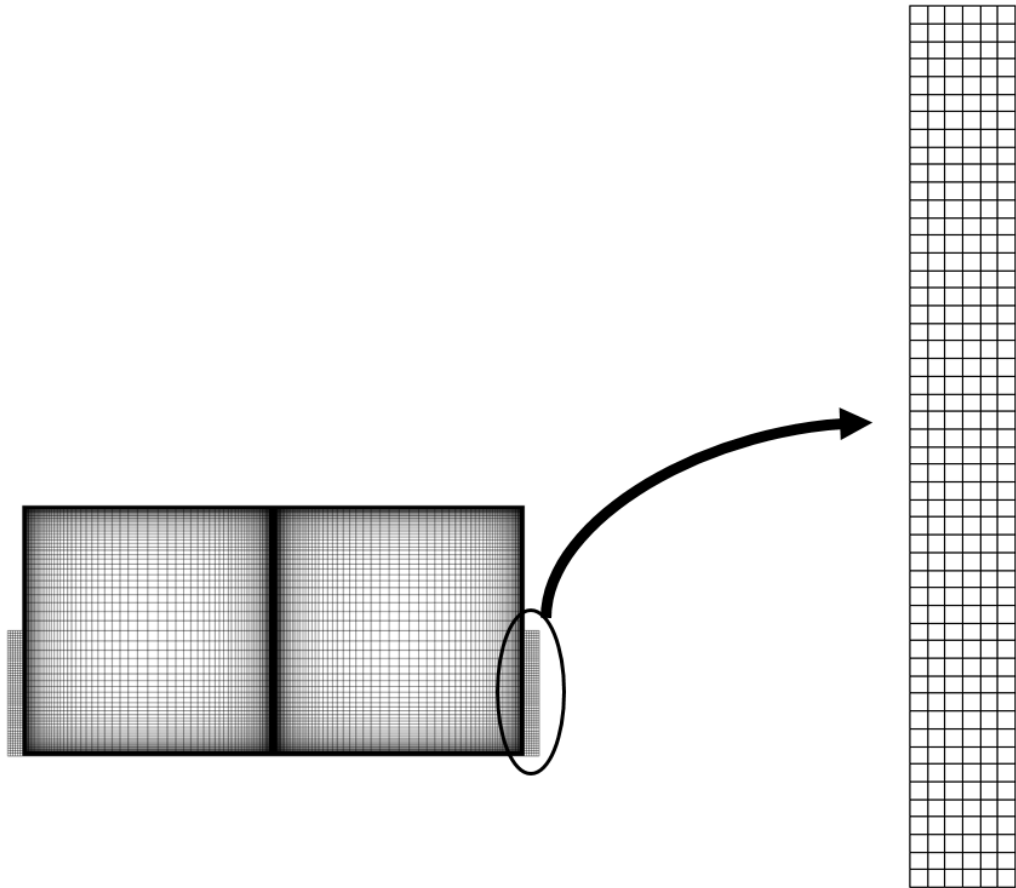
ภาคผนวก ก

ลักษณะเอลิเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ก.1 ลักษณะเอลิเมนต์ของเครื่องทำความร้อน

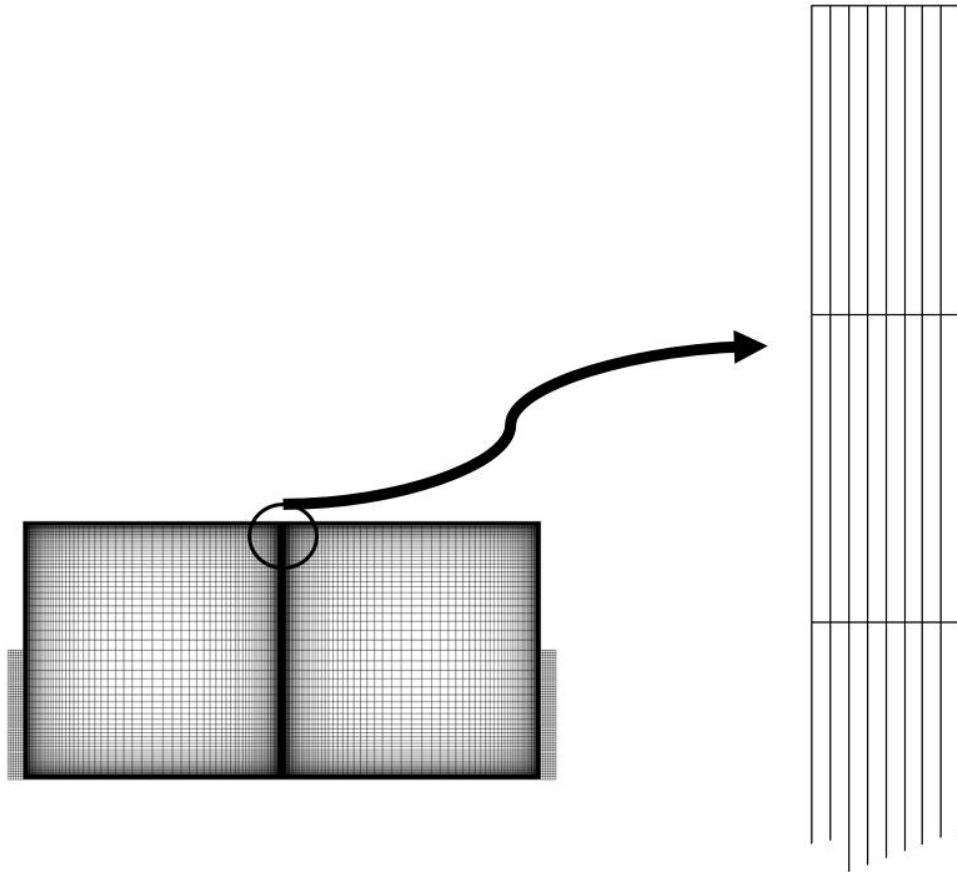
เครื่องทำความร้อนมีจำนวนเอลิเมนต์เท่ากับ 300 เอลิเมนต์



รูปที่ ก.1 เอลิเมนต์ของเครื่องทำความร้อนของช่องปิดทั้งสอง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ก.2 ลักษณะเอลิเมนต์ของผนังร่วม

ผนังร่วมมีจำนวนเอลิเมนต์เท่ากับ 800 เอลิเมนต์



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รูปที่ ก.2 เอลิเมนต์ของผนังร่วมของช่องเปิดทั้งสอง
CHULALONGKORN UNIVERSITY

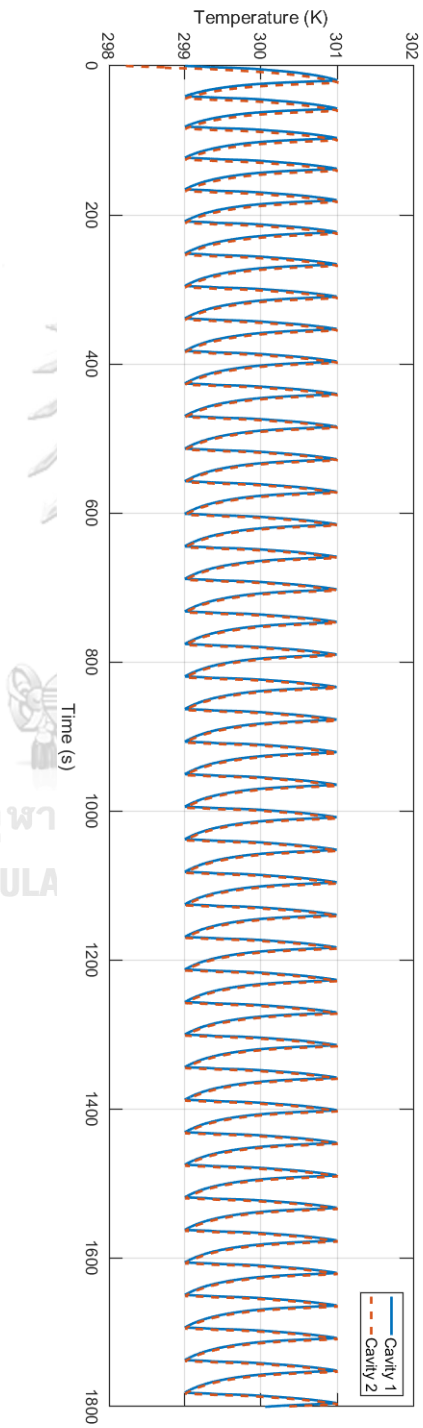


ภาคผนวก ข

ผลการจำลองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของช่องปิดทั้งสองเมื่อเริ่มควบคุมอุณหภูมิเชิง
คาบของช่องปิดที่สองที่เงื่อนไขต่างกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

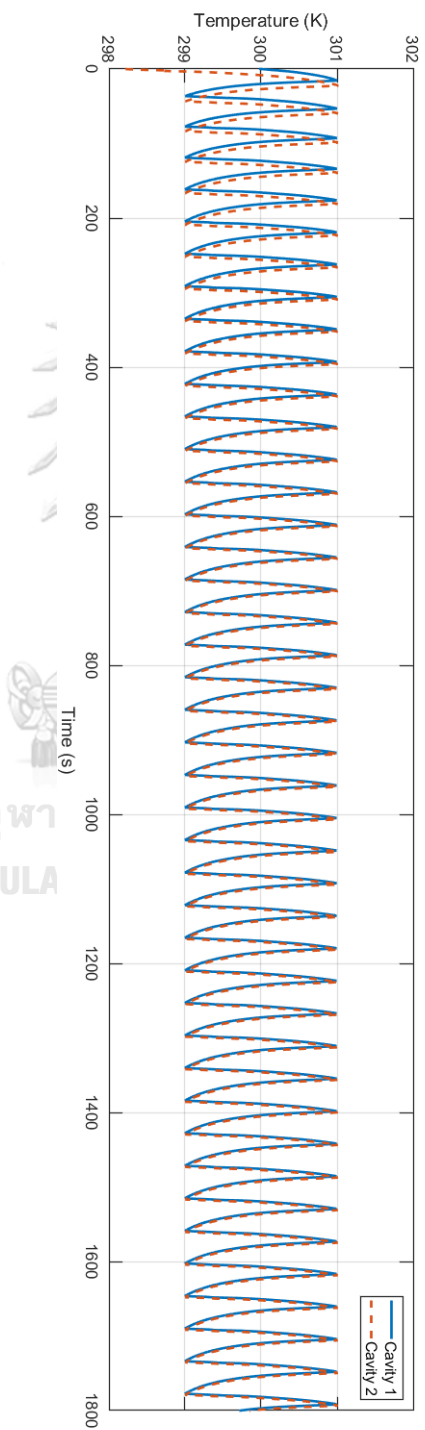
ข.1 เมื่อเริ่มควบคุมอุณหภูมิของช่องปิดที่สองเมื่ออุณหภูมิของช่องปิดที่หนึ่งอยู่ในช่วงขาขึ้นที่ 299 K



รูปที่ ข.1 เริ่มควบคุมอุณหภูมิของช่องปิดที่สองเมื่ออุณหภูมิของช่องปิดที่หนึ่งอยู่ในช่วงขาขึ้นที่ 299 K

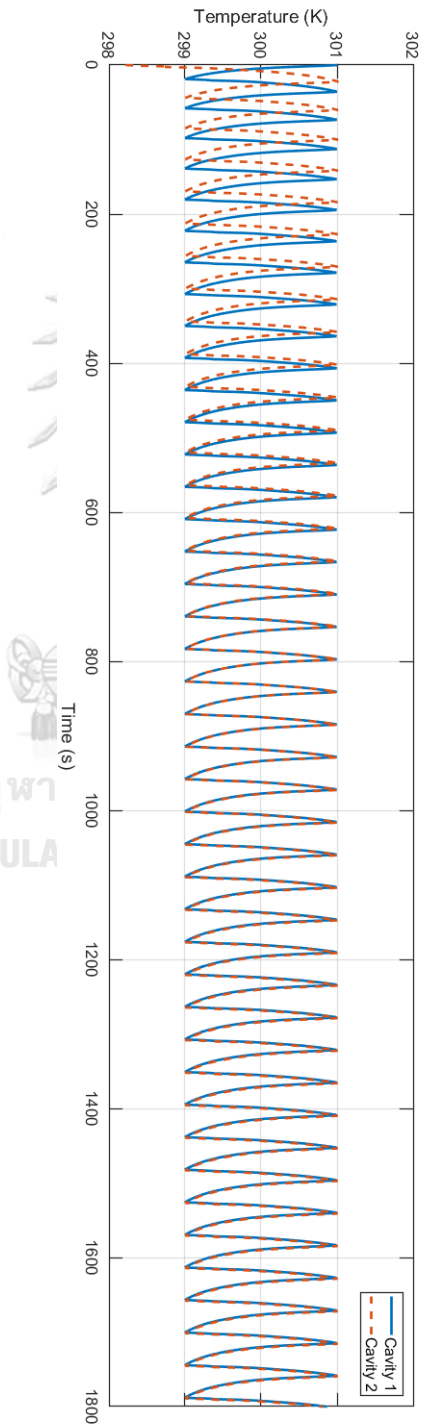
ช่วงเวลาตั้งแต่ 0-1800 วินาที

ข.2 เมื่อเริ่มควบคุมอุณหภูมิของช่องปิดที่สองเมื่ออุณหภูมิของช่องปิดที่หนึ่งอยู่ในช่วงขาขึ้นที่ 300 K



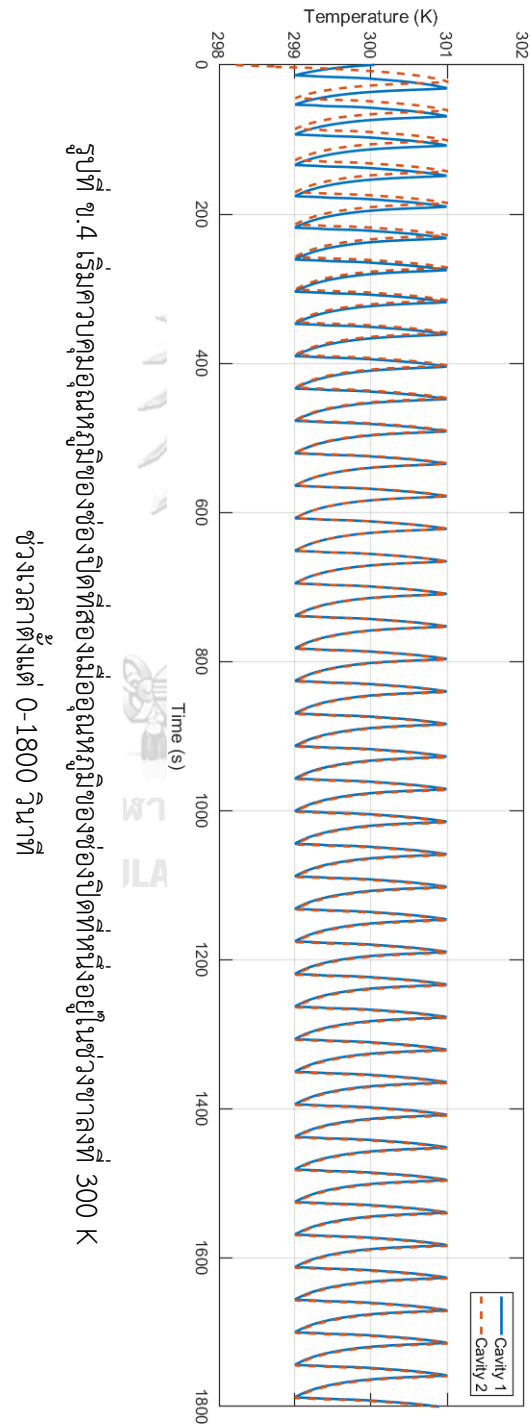
รูปที่ ข.2 เริ่มควบคุมอุณหภูมิของช่องปิดที่สองเมื่ออุณหภูมิของช่องปิดที่หนึ่งอยู่ในช่วงขาขึ้นที่ 300 K
ช่วงเวลาตั้งแต่ 0-1800 วินาที

ข.3 เมื่อเริ่มควบคุมอุณหภูมิของช่องปิดที่สองเมื่ออุณหภูมิของช่องปิดที่หนึ่งอยู่ในช่วงขาลงที่ 301 K



รูปที่ ข.3 เริ่มควบคุมอุณหภูมิของช่องปิดที่สองเมื่ออุณหภูมิของช่องปิดที่หนึ่งอยู่ในช่วงขาลงที่ 301 K
ช่วงเวลาที่ตั้งแต่ 0-1800 วินาที

ข.4 เมื่อเริ่มควบคุมอุณหภูมิของช่องปิดที่สองเมื่ออุณหภูมิของช่องปิดที่หนึ่งอยู่ในช่วงขาลงที่ 300 K



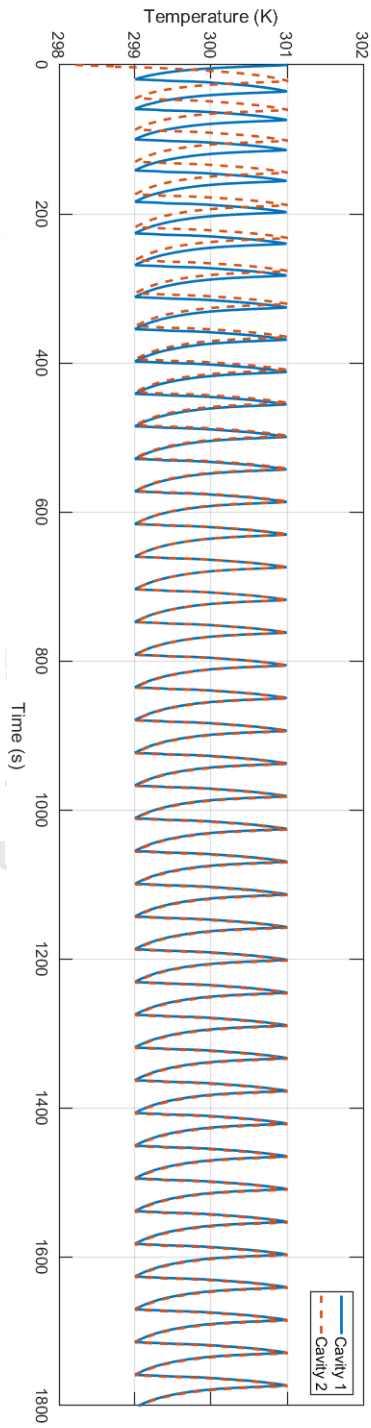


ภาคผนวก ค

ผลการจำลองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของช่องปิดทั้งสองเมื่อมีผนังร่วมที่ต่างชนิดกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

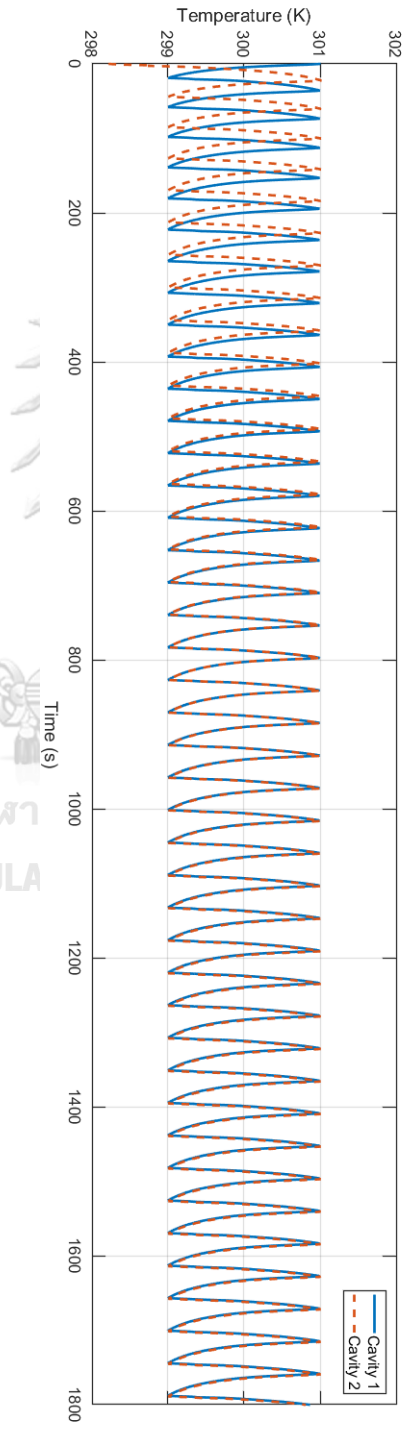
ค.1 ผังร่วมชนิดอสมิเนียม



รูปที่ ค.1 การควบคุมอุณหภูมิของห้องปิดในการฝึกผังร่วมชนิดอสมิเนียม

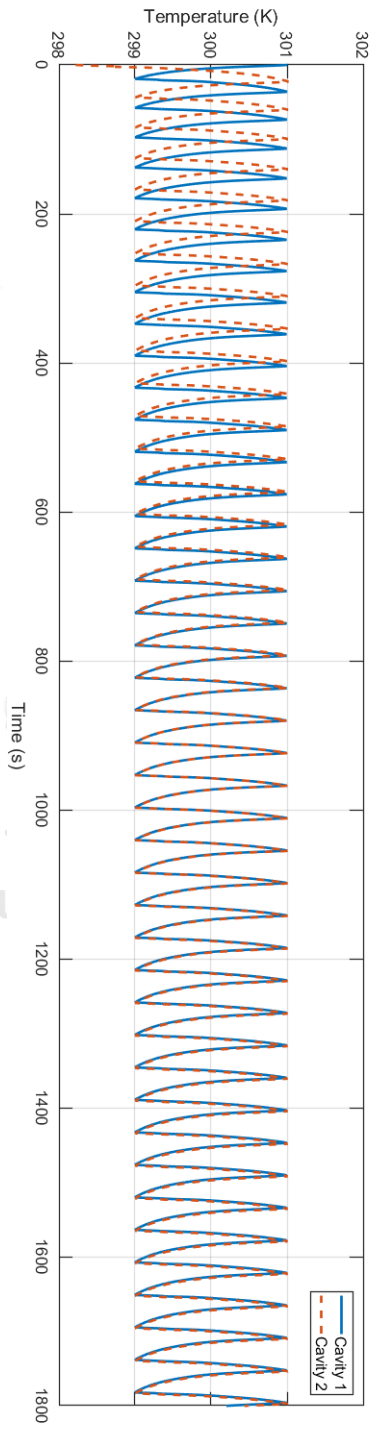
ช่วงเวลาตั้งแต่ 0-1800 วินาที

ค.2 ผนังร่วมชนิดทองแดง



รูปที่ ค.2 การควบคุมอุณหภูมิของทั้งสองช่องปัดในกรณีผนังร่วมชนิดทองแดง
ช่วงเวลาตั้งแต่ 0-1800 วินาที

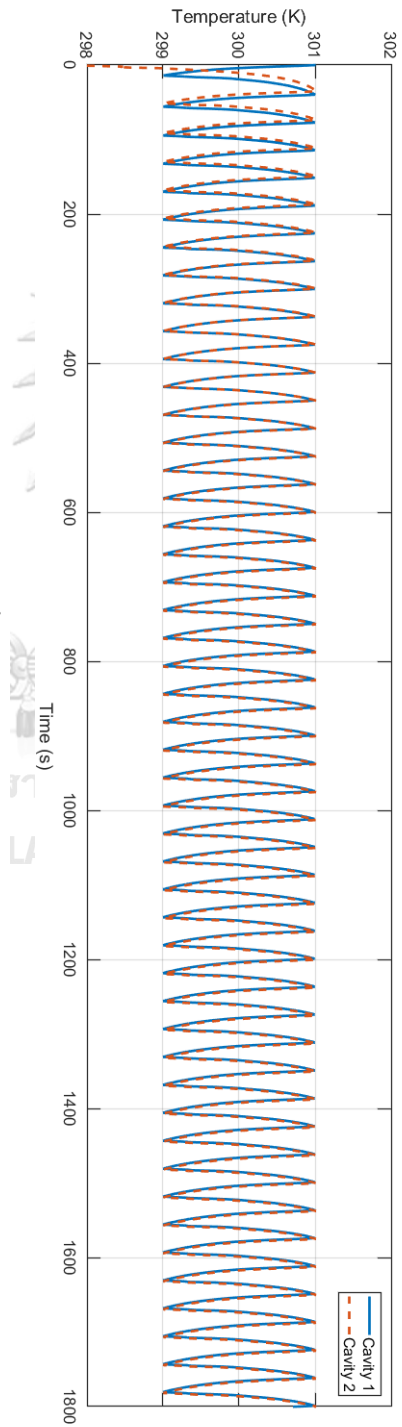
ค.2 ผังร่วมชนิดนิกเกิล



รูปที่ ค.3 การควบคุมอุณหภูมิของห้องสองช่องปิดในการผังก่อร่วมชนิดนิกเกิล
ช่วงเวลาตั้งแต่ 0-1800 วินาที

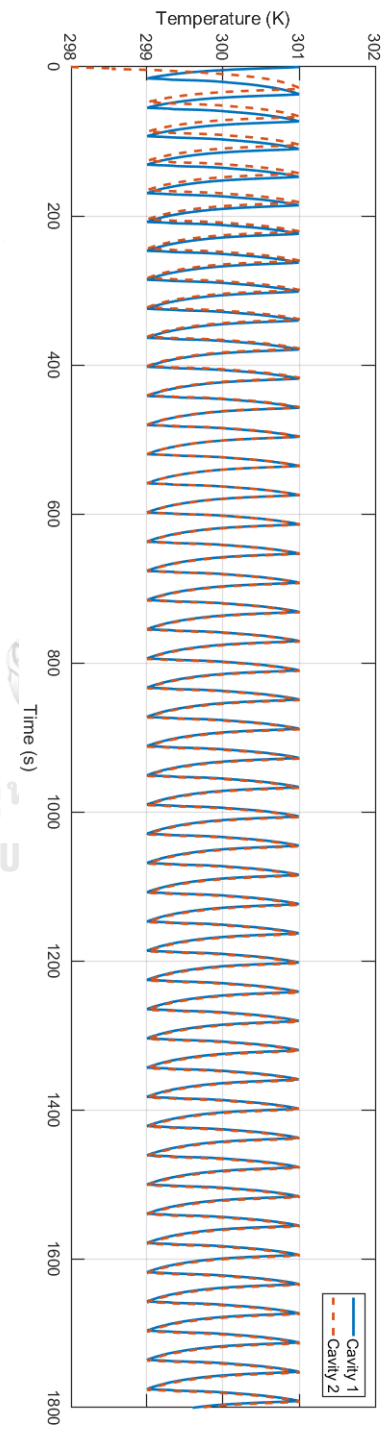


ง.1 อุณหภูมิภายนอกมีค่าเท่ากับ 296.15 K



รูปที่ ง.1 การควบคุมอุณหภูมิของห้องปฏิบัติการในการนำอุณหภูมิภายนอกมีค่าเท่ากับ 296.15 K ช่วงเวลาตั้งแต่ 0-1800 วินาที

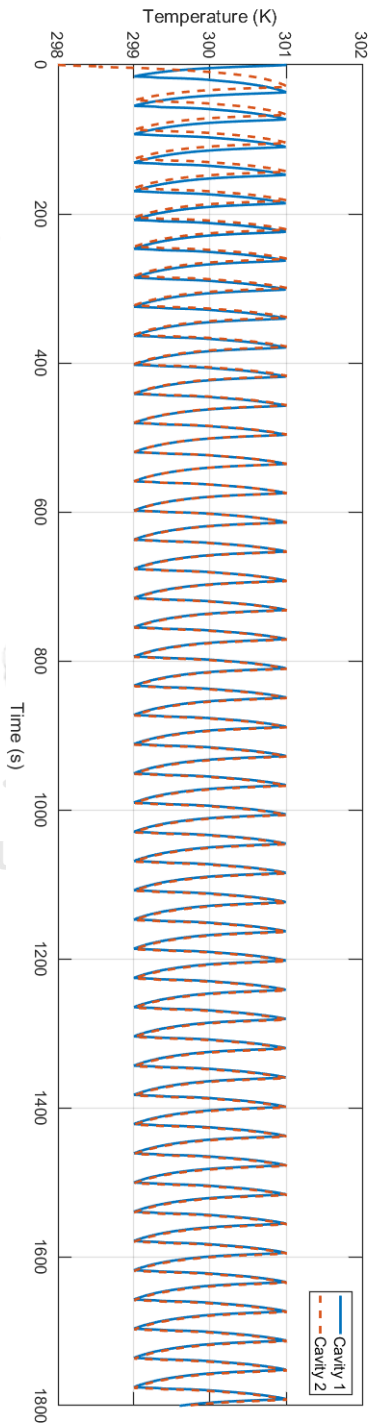
ง.2 อุณหภูมิภายนอกมีค่าเท่ากับ 296.65 K



รูปที่ ง.2 การควบคุมอุณหภูมิของห้องปิดในการณีอุณหภูมิภายนอกมีค่าเท่ากับ 296.65 K

ช่วงเวลาตั้งแต่ 0-1800 วินาที

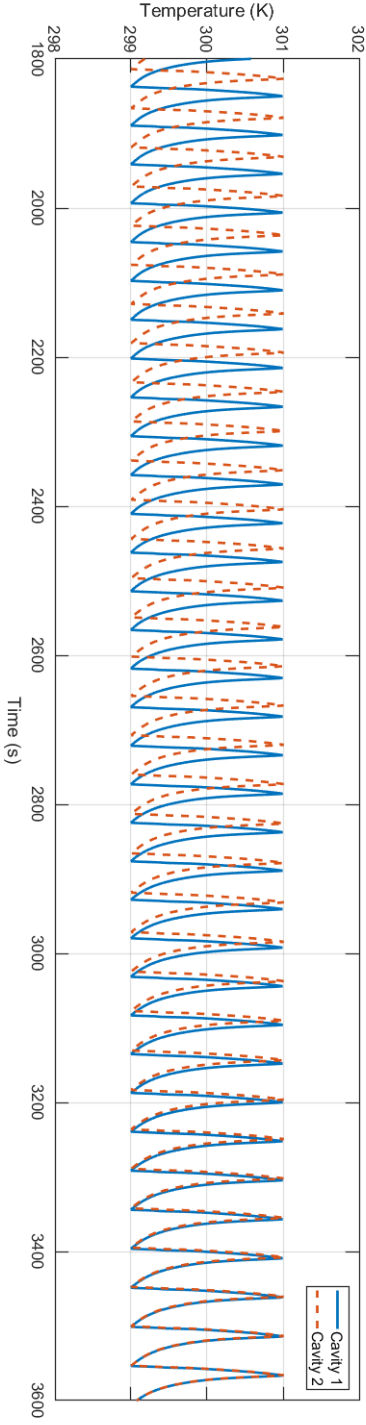
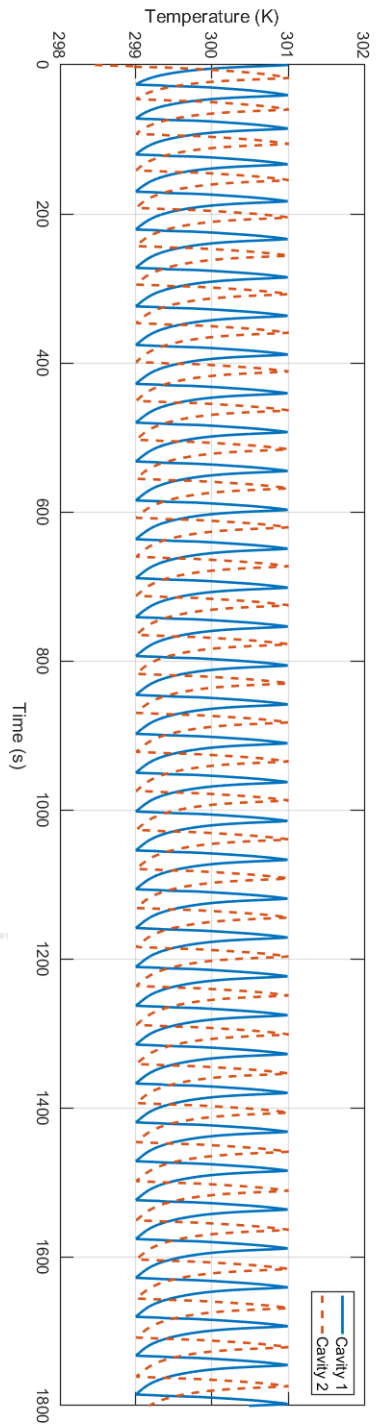
ง.3 อุณหภูมิภายนอกมีค่าเท่ากับ 297.15 K



รูปที่ ง.3 การควบคุมอุณหภูมิของทั้งสองช่องปิดในกรณีอุณหภูมิภายนอกมีค่าเท่ากับ 297.15 K

ช่วงเวลาที่ตั้งแต่ 0-1800 วินาที

๑.4 อุณหภูมิภายนอกมีค่าเท่ากับ 297.65 K

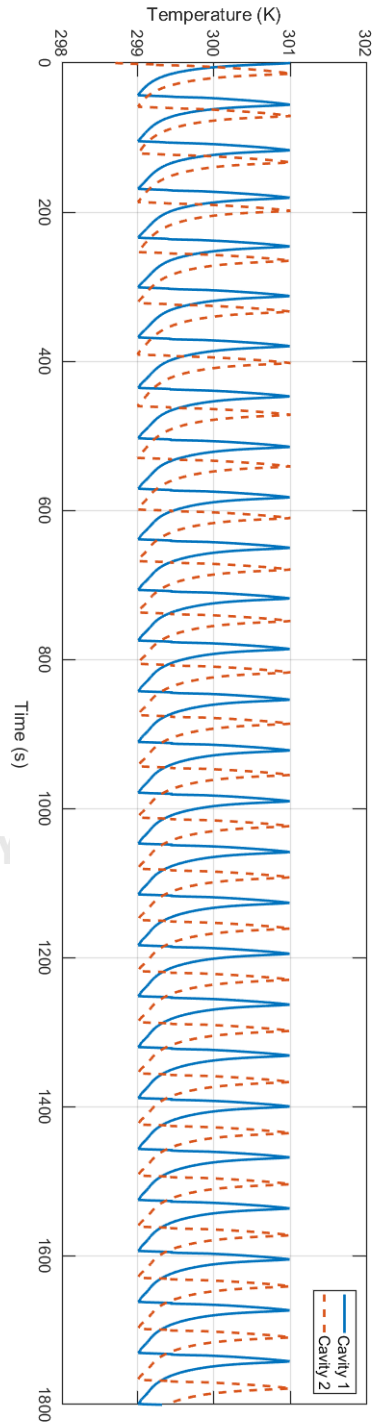


รูปที่ ๑.4 การควบคุมอุณหภูมิของห้องปิดในการณีอุณหภูมิภายนอกมีค่าเท่ากับ 297.65 K

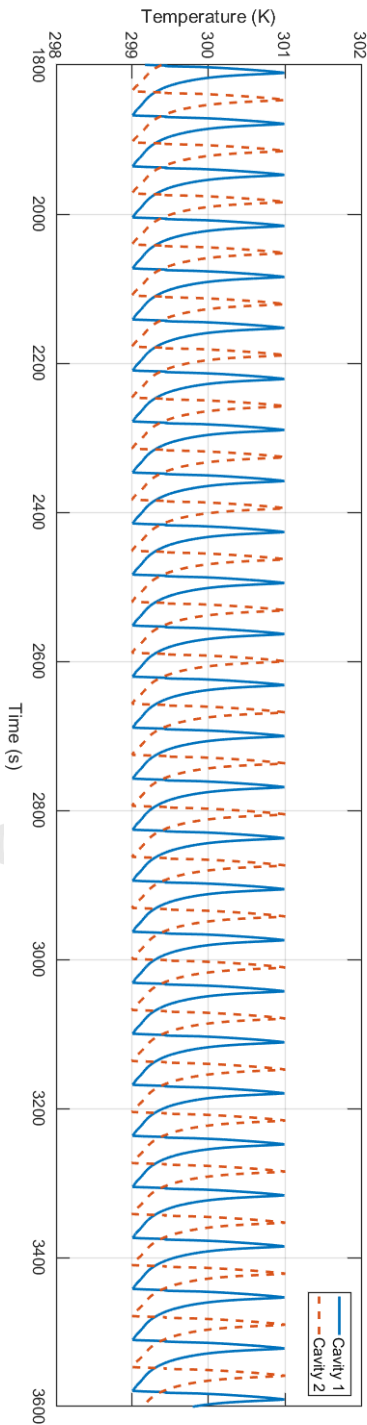
(ก) ช่วงเวลาตั้งแต่ 0-1800 วินาที

(ข) ช่วงเวลาตั้งแต่ 1800-3600 วินาที

จ.5 อุณหภูมิภายนอกมีค่าเท่ากับ 298.15 K



(ก)



(ข)

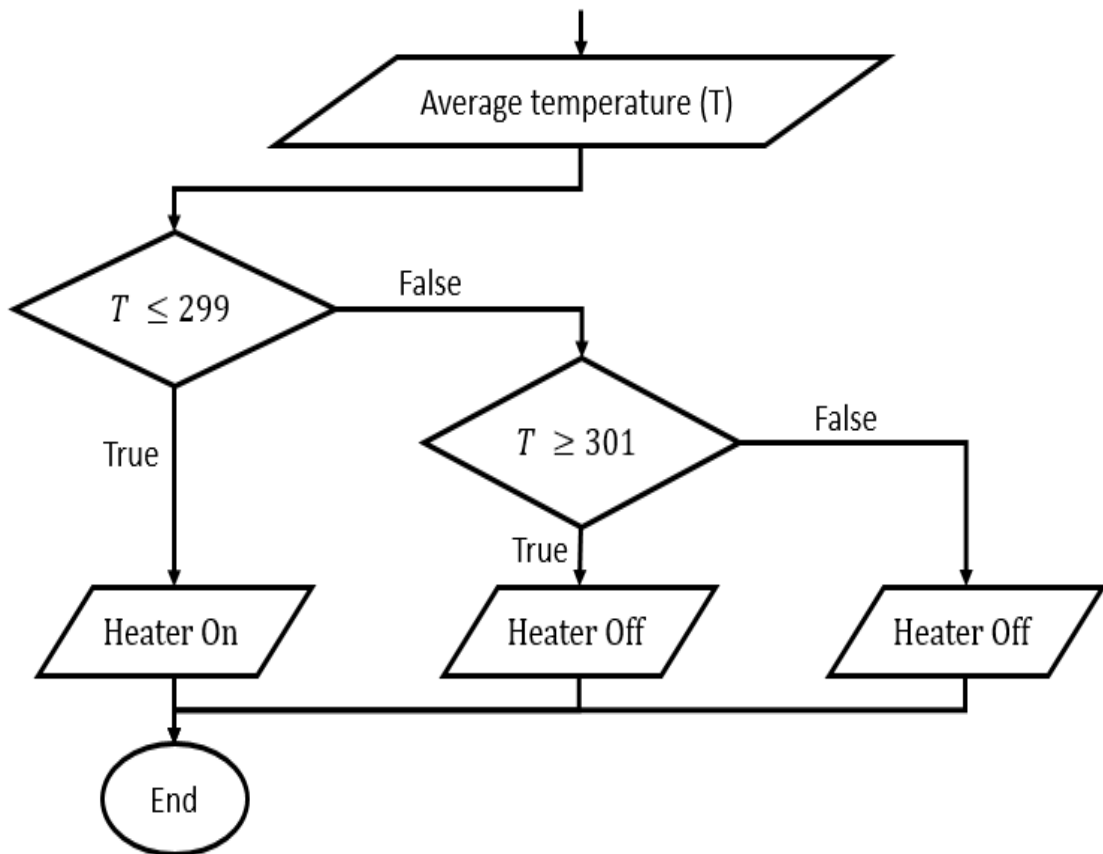
รูปที่ จ.5 การควบคุมอุณหภูมิของทั้งสองช่องเปิดในกรณีอุณหภูมิภายนอกมีค่าเท่ากับ 298.15 K

(ก) ช่วงเวลาตั้งแต่ 0-1800 วินาที

(ข) ช่วงเวลาตั้งแต่ 1800-3600 วินาที



จ.1 การทำงานของ UDF



CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ จ.1 Flow Chart ของ UDF

จ.2 Code สำหรับการควบคุมอุณหภูมิของช่องปิด

```

#include "udf.h"

real thermosensor_averagetemp1;
real thermosensor_averagetemp2;
real source1;
real source2;
cell_t c;
Domain *d;
Thread *t;
real temp_on;
real temp_off;
DEFINE_EXECUTE_AT_END(tempsensor)
{
real thermosensor_temperature_11;
real thermosensor_temperature_12;
real thermosensor_temperature_13;
real thermosensor_temperature_14;
real thermosensor_temperature_15;
real thermosensor_temperature_16;
real thermosensor_temperature_17;
real thermosensor_temperature_18;
real thermosensor_temperature_19;
real thermosensor_temperature_21;
real thermosensor_temperature_22;
real thermosensor_temperature_23;
real thermosensor_temperature_24;
real thermosensor_temperature_25;
real thermosensor_temperature_26;
real thermosensor_temperature_27;
real thermosensor_temperature_28;
real thermosensor_temperature_29;
real thermosensor_coordinate[ND_ND];
real x,y;

```



```

real
nt_11,nt_12,nt_13,nt_14,nt_15,nt_16,nt_17,nt_18,nt_19,nt_21,nt_22,nt_23,nt_24,nt_25,nt_26,nt_2
7,nt_28,nt_29;
real x11min,x11max,y11min,y11max;
real x12min,x12max,y12min,y12max;
real x13min,x13max,y13min,y13max;
real x14min,x14max,y14min,y14max;
real x15min,x15max,y15min,y15max;
real x16min,x16max,y16min,y16max;
real x17min,x17max,y17min,y17max;
real x18min,x18max,y18min,y18max;
real x19min,x19max,y19min,y19max;
real x21min,x21max,y21min,y21max;
real x22min,x22max,y22min,y22max;
real x23min,x23max,y23min,y23max;
real x24min,x24max,y24min,y24max;
real x25min,x25max,y25min,y25max;
real x26min,x26max,y26min,y26max;
real x27min,x27max,y27min,y27max;
real x28min,x28max,y28min,y28max;
real x29min,x29max,y29min,y29max;
d = Get_Domain(1);
//Cavity1
x11min=0.003;
x11max=0.007;
y11min=0.043;
y11max=0.047;
x12min=0.023;
x12max=0.027;
y12min=0.043;
y12max=0.047;
x13min=0.043;
x13max=0.047;

```

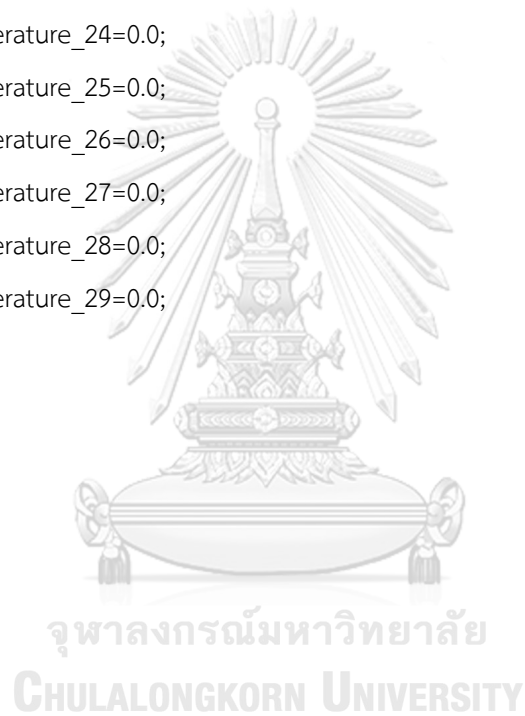
y13min=0.043;
y13max=0.047;
x14min=0.003;
x14max=0.007;
y14min=0.023;
y14max=0.027;
x15min=0.023;
x15max=0.027;
y15min=0.023;
y15max=0.027;
x16min=0.043;
x16max=0.047;
y16min=0.023;
y16max=0.027;
x17min=0.003;
x17max=0.007;
y17min=0.003;
y17max=0.007;
x18min=0.023;
x18max=0.027;
y18min=0.003;
y18max=0.007;
x19min=0.043;
x19max=0.047;
y19min=0.003;
y19max=0.007;
//Cavity2
x21min=0.05324;
x21max=0.05724;
y21min=0.043;
y21max=0.047;
x22min=0.07324;
x22max=0.07724;



y22min=0.043;
y22max=0.047;
x23min=0.09324;
x23max=0.09724;
y23min=0.043;
y23max=0.047;
x24min=0.05324;
x24max=0.05724;
y24min=0.023;
y24max=0.027;
x25min=0.07324;
x25max=0.07724;
y25min=0.023;
y25max=0.027;
x26min=0.09324;
x26max=0.09724;
y26min=0.023;
y26max=0.027;
x27min=0.05324;
x27max=0.05524;
y27min=0.003;
y27max=0.007;
x28min=0.07324;
x28max=0.07724;
y28min=0.003;
y28max=0.007;
x29min=0.09324;
x29max=0.09724;
y29min=0.003;
y29max=0.007;
thermosensor_temperature_11=0.0;
thermosensor_temperature_12=0.0;
thermosensor_temperature_13=0.0;



thermosensor_temperature_14=0.0;
thermosensor_temperature_15=0.0;
thermosensor_temperature_16=0.0;
thermosensor_temperature_17=0.0;
thermosensor_temperature_18=0.0;
thermosensor_temperature_19=0.0;
thermosensor_temperature_21=0.0;
thermosensor_temperature_22=0.0;
thermosensor_temperature_23=0.0;
thermosensor_temperature_24=0.0;
thermosensor_temperature_25=0.0;
thermosensor_temperature_26=0.0;
thermosensor_temperature_27=0.0;
thermosensor_temperature_28=0.0;
thermosensor_temperature_29=0.0;
nt_11=0.0;
nt_12=0.0;
nt_13=0.0;
nt_14=0.0;
nt_15=0.0;
nt_16=0.0;
nt_17=0.0;
nt_18=0.0;
nt_19=0.0;
nt_21=0.0;
nt_22=0.0;
nt_23=0.0;
nt_24=0.0;
nt_25=0.0;
nt_26=0.0;
nt_27=0.0;
nt_28=0.0;
nt_29=0.0;



```

thread_loop_c(t,d)
{
begin_c_loop(c,t)
{
C_CENTROID(thermosensor_coordinate,c,t);
x=thermosensor_coordinate[0];
y=thermosensor_coordinate[1];
// Cavity 1
if (( x >= x11min ) && ( x <= x11max ) && ( y >= y11min ) && ( y <= y11max))
    {
        thermosensor_temperature_11=thermosensor_temperature_11 + C_T(c,t);
        nt_11=nt_11+1.0;
    }
if (( x >= x12min ) && ( x <= x12max ) && ( y >= y12min ) && ( y <= y12max))
    {
        thermosensor_temperature_12=thermosensor_temperature_12 + C_T(c,t);
        nt_12=nt_12+1.0;
    }
if (( x >= x13min ) && ( x <= x13max ) && ( y >= y13min ) && ( y <= y13max))
    {
        thermosensor_temperature_13=thermosensor_temperature_13 + C_T(c,t);
        nt_13=nt_13+1.0;
    }
if (( x >= x14min ) && ( x <= x14max ) && ( y >= y14min ) && ( y <= y14max))
    {
        thermosensor_temperature_14=thermosensor_temperature_14 + C_T(c,t);
        nt_14=nt_14+1.0;
    }
if (( x >= x15min ) && ( x <= x15max ) && ( y >= y15min ) && ( y <= y15max))
    {
        thermosensor_temperature_15=thermosensor_temperature_15 + C_T(c,t);
        nt_15=nt_15+1.0;
    }
}
}

```

```

if (( x >= x16min ) && ( x <= x16max ) && ( y >= y16min ) && ( y <= y16max))
{
    thermosensor_temperature_16=thermosensor_temperature_16 + C_T(c,t);
    nt_16=nt_16+1.0;
}
if (( x >= x17min ) && ( x <= x17max ) && ( y >= y17min ) && ( y <= y17max))
{
    thermosensor_temperature_17=thermosensor_temperature_17 + C_T(c,t);
    nt_17=nt_17+1.0;
}
if (( x >= x18min ) && ( x <= x18max ) && ( y >= y18min ) && ( y <= y18max))
{
    thermosensor_temperature_18=thermosensor_temperature_18 + C_T(c,t);
    nt_18=nt_18+1.0;
}
if (( x >= x19min ) && ( x <= x19max ) && ( y >= y19min ) && ( y <= y19max))
{
    thermosensor_temperature_19=thermosensor_temperature_19 + C_T(c,t);
    nt_19=nt_19+1.0;
}
// Cavity 2
if (( x >= x21min ) && ( x <= x21max ) && ( y >= y21min ) && ( y <= y21max))
{
    thermosensor_temperature_21=thermosensor_temperature_21 + C_T(c,t);
    nt_21=nt_21+1.0;
}
if (( x >= x22min ) && ( x <= x22max ) && ( y >= y22min ) && ( y <= y22max))
{
    thermosensor_temperature_22=thermosensor_temperature_22 + C_T(c,t);
    nt_22=nt_22+1.0;
}
if (( x >= x23min ) && ( x <= x23max ) && ( y >= y23min ) && ( y <= y23max))
{

```

```

        thermosensor_temperature_23=thermosensor_temperature_23 + C_T(c,t);
        nt_23=nt_23+1.0;
    }
if (( x >= x24min ) && ( x <= x24max ) && ( y >= y24min ) && ( y <= y24max))
    {
        thermosensor_temperature_24=thermosensor_temperature_24 + C_T(c,t);
        nt_24=nt_24+1.0;
    }
if (( x >= x25min ) && ( x <= x25max ) && ( y >= y25min ) && ( y <= y25max))
    {
        thermosensor_temperature_25=thermosensor_temperature_25 + C_T(c,t);
        nt_25=nt_25+1.0;
    }
if (( x >= x26min ) && ( x <= x26max ) && ( y >= y26min ) && ( y <= y26max))
    {
        thermosensor_temperature_26=thermosensor_temperature_26 + C_T(c,t);
        nt_26=nt_26+1.0;
    }
if (( x >= x27min ) && ( x <= x27max ) && ( y >= y27min ) && ( y <= y27max))
    {
        thermosensor_temperature_27=thermosensor_temperature_27 + C_T(c,t);
        nt_27=nt_27+1.0;
    }
if (( x >= x28min ) && ( x <= x28max ) && ( y >= y28min ) && ( y <= y28max))
    {
        thermosensor_temperature_28=thermosensor_temperature_28 + C_T(c,t);
        nt_28=nt_28+1.0;
    }
if (( x >= x29min ) && ( x <= x29max ) && ( y >= y29min ) && ( y <= y29max))
    {
        thermosensor_temperature_29=thermosensor_temperature_29 + C_T(c,t);
        nt_29=nt_29+1.0;
    }

```

```

}
end_c_loop(c,t)
}
thermosensor_averagetemp1=(thermosensor_temperature_11/nt_11+thermosensor_temperature_12/nt_12+thermosensor_temperature_13/nt_13+thermosensor_temperature_14/nt_14+thermosensor_temperature_15/nt_15+thermosensor_temperature_16/nt_16+thermosensor_temperature_17/nt_17+thermosensor_temperature_18/nt_18+thermosensor_temperature_19/nt_19)/9;
thermosensor_averagetemp2=(thermosensor_temperature_21/nt_21+thermosensor_temperature_22/nt_22+thermosensor_temperature_23/nt_23+thermosensor_temperature_24/nt_24+thermosensor_temperature_25/nt_25+thermosensor_temperature_26/nt_26+thermosensor_temperature_27/nt_27+thermosensor_temperature_28/nt_28+thermosensor_temperature_29/nt_29)/9;
printf("thermosensor_averagetemp1 %f \n",thermosensor_averagetemp1);
printf("thermosensor_averagetemp2 %f \n",thermosensor_averagetemp2);
temp_on=299;
temp_off=301;
//Cavity 1
if (thermosensor_averagetemp1 <= temp_on)
{
    source1 = 11321.4;
    printf("ON source11 %f\n",source1);
}
else if(thermosensor_averagetemp1 >= temp_off)
{
    source1 = 0;
    printf("OFF source12 %f\n",source1);
}
//Cavity 2
if (thermosensor_averagetemp2 <= temp_on)
{
    source2 = 11321.4;
    printf("ON source21 %f\n",source2);
}
else if(thermosensor_averagetemp2 >= temp_off)

```



```
{  
    source2 = 0;  
    printf("OFF source22 %f\n",source2);  
}  
}  
DEFINE_SOURCE(heater_source1,cell,thread,dS,eqn)  
{  
    return source1;  
}  
DEFINE_SOURCE(heater_source2,cell,thread,dS,eqn)  
{  
    return source2;  
}
```



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	เทิดพงศ์ ช่วยแก้ว
วัน เดือน ปี เกิด	1 ตุลาคม 2537
สถานที่เกิด	นครศรีธรรมราช
วุฒิการศึกษา	วศ.บ. วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่
ที่อยู่ปัจจุบัน	16/8 ถนน ริมทะเล ตำบล บ่อทราย อำเภอ เมืองสงขลา จังหวัด สงขลา 90000
ผลงานตีพิมพ์	The 10th Thai Society of Mechanical Engineers, International Conference on Mechanical Engineering (TSME - ICoME 2019) December 10th – 13rd