

การวิเคราะห์เชิงตัวเลขของวัฏจักรการทำงานที่เหมาะสมสำหรับรีเจเนอเรเตอร์แบบโครงอิฐทนไฟ



นายมนโสมิทธิ์ แจ้จอบ

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

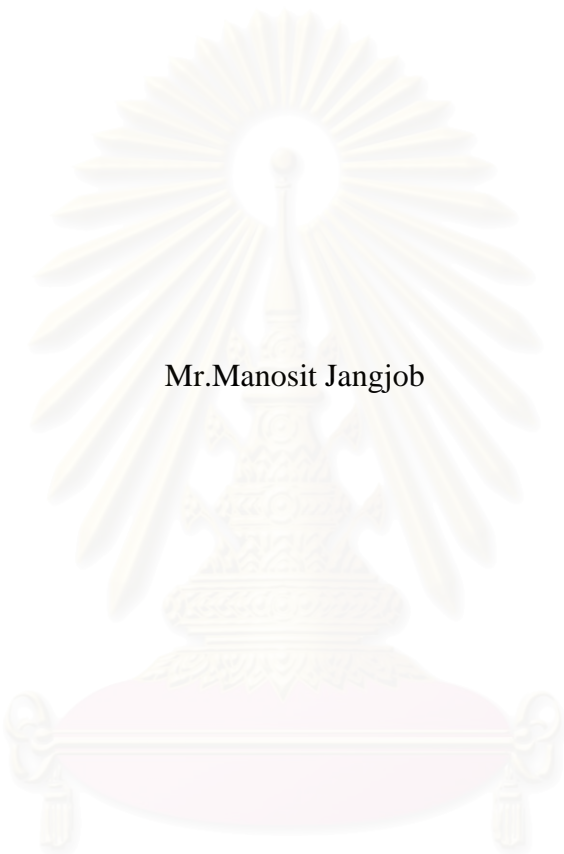
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-53-1447-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

NUMERICAL ANALYSIS OF OPTIMUM TIME CYCLE FOR A FIRECLAY BRICK  
REGENERATOR



Mr.Manosit Jangjob

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 2004

ISBN 974-53-1447-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์                      การวิเคราะห์เชิงตัวเลขของวัฏจักรการทำงานที่เหมาะสมสำหรับ  
รีเจนเนอเรเตอร์แบบโครงอิฐทนไฟ  
โดย    นายมนโณสิทธิ์ แจ่มจบ  
สาขาวิชา                                    วิศวกรรมเครื่องกล  
อาจารย์ที่ปรึกษา                          รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ธร จรรย์ญากรณ์  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม                    ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

..... คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.มานิจ ทองประเสริฐ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ธร จรรย์ญากรณ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษิณี มณีรัตน์)

มนสิทธิ แจ้จบ : การวิเคราะห์เชิงตัวเลขของวัฏจักรการทำงานที่เหมาะสมสำหรับรีเจเนอเรเตอร์แบบโครงอิฐทนไฟ (NUMERICAL ANALYSIS OF OPTIMUM TIME CYCLE FOR A FIRECLAY BRICK REGENERATOR) อ. ที่ปรึกษา : รศ. ดร.พงษ์ธร จรรย์ญากรณ์, อ. ที่ปรึกษาร่วม : ผศ. ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์, 198 หน้า. ISBN 974-53-1447-1.

วิทยานิพนธ์นี้มีจุดประสงค์เพื่อหาค่าของวัฏจักรการทำงานที่ดีที่สุดของระบบ รีเจเนอเรเตอร์ ซึ่งสามารถหาได้จากลักษณะการกระจายของอุณหภูมิของกระบวนการนำความร้อนที่กลับมาใช้ใหม่ในรีเจเนอเรเตอร์ โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขประกอบกันกับการทำการทดลอง ทั้งนี้ได้ทำการทดลองตรวจวัดและเก็บข้อมูลที่เป็นต่างๆ เช่น อุณหภูมิของไหลและโครงอิฐทนไฟ ส่วนประกอบก๊าซเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ และอัตราการใช้น้ำมัน โดยได้ทำการทดลองที่บริษัท ไทยแลนด์สเมลดิงแอนดรีไฟนิง จำกัด (ไทยซาร์โก) ซึ่งเป็นโรงงานถลุงแร่ดีบุก สำหรับระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้ในที่นี้ จะใช้วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ในการคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิและปริมาณความร้อนที่นำกลับมาได้มากที่สุด ซึ่งจะได้พิจารณาผลกระทบของการนำความร้อนทั้งในทิศทางตามแนวการไหลและในทิศทางตั้งฉากกับการไหลที่มีต่อตัววัสดุสะสมความร้อน ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับทำการทดลอง และนำมาวิเคราะห์เพื่อสร้าง โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถใช้ในการคำนวณหาค่าวัฏจักรการทำงานที่ดีที่สุดของรีเจเนอเรเตอร์

จากการตรวจสอบพบว่า ผลการคำนวณที่ได้มีความสอดคล้องกันดีกับผลเฉลยแม่นยำตรง และผลการทดลองที่นำมาเปรียบเทียบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโปรแกรมคอมพิวเตอร์นี้มีความถูกต้องอยู่ในระดับที่น่าพอใจ

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ถูกพัฒนาให้สามารถใช้งานได้โดยง่าย บนระบบ Windows และได้นำไปใช้ในการคำนวณหาวัฏจักรการทำงานที่เหมาะสมของรีเจเนอเรเตอร์ของบริษัท ไทยแลนด์ สเมลดิงแอนดรีไฟนิง จำกัด ซึ่งในปัจจุบันมีการสลับคาบการไหลของรีเจเนอเรเตอร์ ที่เวลา 30 นาที และสามารถนำความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้ได้ 32.80% จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรมที่สร้างขึ้นพบว่าเมื่อใช้เวลาในการสลับคาบการไหล 6 นาที สามารถนำความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้ได้มากที่สุด 33.26% ซึ่งเพิ่มขึ้นเพียง 0.46% เมื่อพิจารณาในแง่ของความสะดวกในการทำงาน จึงสรุปได้ว่าคาบการทำงานที่ใช้อยู่ในปัจจุบันมีความเหมาะสมกับโครงสร้าง และแบบของรีเจเนอเรเตอร์แล้ว

ภาควิชา .....วิศวกรรมเครื่องกล.....  
สาขาวิชา .....วิศวกรรมเครื่องกล.....  
ปีการศึกษา .....2547.....

ลายมือชื่อนิสิต .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

## 4470464521 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: REGENERATOR/FINITE DIFFERENCE METHOD

MANOSIT JANGJOB : NUMERICAL ANALYSIS OF OPTIMUM TIME CYCLE FOR A FIRECLAY BRICK REGENERATOR. THESIS ADVISOR : PONGTORN CHARUNYAKORN, Ph.D. THESIS CO-ADVISOR : SOMPONG PUTIVISUTISAK, Ph.D. 198 pp. ISBN 974-53-1447-1.

The objective of this thesis is to find the optimum time cycle of the regenerator system. The temperature distributions of the overall heat recovery process in a fireclay brick regenerator are investigated by experiments and numerical simulation. The experiments were conducted at Thailand Smelting and Refining Co.,Ltd. (Thaisarco), a tin smelting factory, in order to measure and record essential data, such as the fluid temperature, heat storage element temperature, exhaust gas composition and fuel consumption. In the numerical side, the finite difference method is employed to calculate the temperature distribution and the maximum heat recovery. Effects of both axial and transverse conductions on the sensible heat storage element were considered. The developed computer program for optimum time cycle was validated by comparing with the experimental data.

From the validation, it was found that the result was in good agreement with exact solution and experiment data. Therefore, present computer program yields fairly satisfactory results of calculation.

The computer program was developed for operating on Microsoft Windows OS and employed to find the optimum time cycle and the maximum heat recovery for the regenerator of Thailand Smelting and Refining Co., Ltd. The time cycle for changing periods currently used in smelting process is 30 minutes, which can recover about 32.80% of exhaust heat. From the calculation, the optimum time cycle is 6 minutes, which can recover exhaust heat of 33.26%. or 0.46% increase compared to the present time cycle. Thus, in view of field practice, it may be concluded that the factory has already been operating at a suitable condition.

Department	<u>Mechanical Engineering</u>	Student's signature	.....
Field of study	<u>Mechanical Engineering</u>	Advisor's signature	.....
Academic Year	<u>2004</u>	Co-advisor's signature	.....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ธร จรรย์ญากรณ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้ทั้งความรู้ คำแนะนำ ตลอดจนข้อคิดต่างๆ ที่มีคุณค่าอย่างยิ่ง อันเป็นแรงบันดาลใจและกำลังใจให้ผู้วิจัยสามารถทำงานได้สำเร็จลุล่วง

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.มานิจ ทองประเสริฐ ประธานกรรมการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษิณี มณีรัตน์ กรรมการ ที่ได้ให้คำแนะนำและถ่ายทอดความรู้ตลอดระยะเวลาในการทำงานวิจัยนี้ ซึ่งทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่ได้ให้การสนับสนุนเงินทุนวิจัย โครงการทุนสนับสนุนด้านเทคโนโลยีสะอาด

ขอขอบพระคุณ ผู้บริหาร พี่ๆวิศวกร และพนักงาน โรงงานไทยแลนด์ สเมลต์ติ้ง แอนด์รีไฟนิง จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ทดลอง ตลอดจนอำนวยความสะดวกตลอดระยะเวลาวิจัย

ขอขอบคุณ คุณประพันธ์ พิภพทอง อาจารย์ณัฐเดช เพ็ญจรวงศ์ คุณจิรชนย์ เสรีวิชัยสวัสดิ์ ที่ได้ถ่ายทอดความรู้ ประสบการณ์ และคำปรึกษาในทุกๆ ด้าน ขอขอบคุณ พี่โต พี่โก้ พี่โป่ง พี่ตูน พี่เจมส์ พี่อัม น้องนุ๊ก น้องแอน พี่ๆในห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงาน และสถาบันวิจัยพลังงานจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับคำแนะนำ กำลังใจและความเอื้อเฟื้อเพื่อนำใจตลอดเวลาการทำงานวิจัยนี้ ขอขอบคุณ

ท้ายสุดนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัว ที่คอยให้กำลังใจ และสนับสนุนการศึกษาของผู้วิจัยมาโดยตลอด อนึ่ง ประโยชน์และคุณค่าอันใดที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์นี้ ขอมอบเป็นกตัญญูตราบูชาแต่บิดามารดา ครูอาจารย์ ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ค
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 หลักการเหตุผลและผลงานที่มีมาก่อน.....	10
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	15
3.1 หลักการทำงานของ Counter Flow Regenerator.....	15
3.2 การถ่ายเทความร้อน.....	17
3.3 ไซโครเมตริกส์.....	29
3.4 สมมติฐานเบื้องต้น.....	31
3.5 ทฤษฎีสำหรับ Regenerator .....	33
3.6 Cyclic Equilibrium.....	37
บทที่ 4 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	39
4.1 ปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะอยู่ตัว.....	39
4.2 ปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่อยู่ตัว.....	50
4.3 การพัฒนาโปรแกรมและการตรวจสอบกับกรณีมีโดเมนเหมือน การใช้งานจริง.....	59

	หน้า
<b>บทที่ 5</b> อุปกรณ์การทดลองและวิธีดำเนินการทดลอง.....	75
5.1 เก็บข้อมูลเบื้องต้น.....	75
5.2 การจัดเตรียมอุปกรณ์.....	77
5.3 การทำการทดลองโดยละเอียด.....	78
5.4 รายละเอียดอุปกรณ์การทดลอง.....	79
5.5 สภาพะในการทดลอง.....	85
5.6 วิธีการทดลอง .....	86
5.7 ปัญหาที่เกิดขึ้นในการทดลอง.....	90
<b>บทที่ 6</b> การเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากระเบียบวิธีเชิงตัวเลขกับการทดลอง.....	91
6.1 การเปรียบเทียบผลลัพธ์และการวิเคราะห์ผล.....	91
6.2 การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดของโปรแกรม.....	151
6.3 การหาวิธีการทำงานที่เหมาะสม.....	157
<b>บทที่ 7</b> บทสรุป ปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะ.....	160
7.1 บทสรุป.....	160
7.2 ปัญหาที่พบในขณะที่ทำการวิจัย.....	160
7.3 ข้อเสนอสำหรับงานวิจัยในอนาคต.....	161
<b>รายการอ้างอิง</b> .....	162
<b>ภาคผนวก</b> .....	164
ภาคผนวก ก. COMPUTER PROGRAM.....	164
ภาคผนวก ข. คู่มือการใช้งาน โปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	175
ภาคผนวก ค. ตารางแสดงรายละเอียดของตัวแปรที่ใช้คำนวณเวลาสลับคาบการไหล.....	192
<b>ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์</b> .....	198



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 4.1	รายละเอียดของตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ และการเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างผลของ Schmidt and Willmott [13] กับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมที่สร้างขึ้น..... 67
ตารางที่ 5.1	ข้อมูลที่ได้จากเก็บข้อมูลเบื้องต้นจากโรงงาน..... 76
ตารางที่ 6.1	ค่ามัธยฐานของค่าความผิดพลาดในช่วง Heating period ที่ตำแหน่งและเวลาที่ใช้ในการสลับคาบการไหลต่างๆ..... 105
ตารางที่ 6.2	ค่ามัธยฐานของค่าความผิดพลาดในช่วง Cooling period ที่ตำแหน่งและเวลาที่ใช้ในการสลับคาบการไหลต่างๆ..... 106
ตารางที่ 6.3	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของของไหลในช่วง Heating period ที่เวลาเริ่มการไหล กลางคาบการไหล และปลายคาบการไหล สำหรับการสลับคาบการไหลต่างๆ..... 107
ตารางที่ 6.4	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของไหลในช่วง Heating period ที่เวลาเริ่มการไหล กลางคาบการไหล และปลายคาบการไหล เมื่อเทียบกับที่เวลาเริ่มคาบการไหล สำหรับการสลับคาบการไหลต่างๆ..... 108
ตารางที่ 6.5	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของไหลในช่วง Cooling period ที่เวลาเริ่มการไหล กลางคาบการไหล และปลายคาบการไหล สำหรับการสลับคาบการไหลต่างๆ..... 111
ตารางที่ 6.6	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของไหลในช่วง Cooling period ที่เวลาเริ่มการไหล กลางคาบการไหล และปลายคาบการไหล เมื่อเทียบกับที่เวลาเริ่มคาบการไหล สำหรับการสลับคาบการไหลต่างๆ.....112
ตารางที่ 6.7	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุสะสมความร้อนในช่วง Heating period ที่เวลาเริ่มการไหล กลางคาบการไหล และปลายคาบการไหล สำหรับการสลับคาบการไหลต่างๆ..... 115
ตารางที่ 6.8	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุสะสมความร้อนในช่วง Heating period ที่เวลาเริ่มการไหล กลางคาบการไหล และปลายคาบการไหล เมื่อเทียบกับที่เวลาเริ่มคาบการไหล สำหรับการสลับคาบการไหลต่างๆ.....116

ตารางที่ 6.9	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนในช่วง Cooling period ที่เวลาเริ่มการไหล กลางคาบการไหล และปลายคาบการไหล สำหรับการสลับคาบการไหลต่างๆ.....	119
ตารางที่ 6.10	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนในช่วง Cooling period ที่เวลาเริ่มการไหล กลางคาบการไหล และปลายคาบการไหล เมื่อเทียบกับที่เวลาเริ่มคาบการไหล สำหรับการสลับคาบการไหลต่างๆ..	120



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญรูปภาพ

		หน้า
รูปที่ 1.1	เตาถลุงดิบูก และ Regenerator ของโรงงาน ไทยแลนด์ สเมตติ้งแอนคร์ไฟนึ่ง จำกัด.....	3
รูปที่ 1.2	แบบจำลองเตาถลุง.....	4
รูปที่ 3.1	(a) Regenerator ทางด้านซ้ายมืออยู่ในช่วง Cooling period ส่วน Regenerator ทางด้านขวามืออยู่ในช่วง Heating period.....	15
	(b) Regenerator ทางด้านซ้ายมืออยู่ในช่วง Heating period ส่วน Regenerator ทางด้านขวามืออยู่ในช่วง Cooling period.....	16
รูปที่ 3.2	การพัฒนาของ Velocity boundary layer ของของไหลที่ไหลภายในท่อ.....	20
รูปที่ 3.3	การพัฒนาของ Thermal boundary layer ของของไหลที่ไหลภายในท่อ.....	20
รูปที่ 3.4	Emissivity ของ H <sub>2</sub> O ที่ Total pressure 1 atm และ Partial pressure ใกล้เคียง.....	26
รูปที่ 3.5	Emissivity ของ CO <sub>2</sub> ที่ Total pressure 1 atm และ Partial pressure ใกล้เคียง.....	26
รูปที่ 3.6	Correction factor, C <sub>w</sub> ของ ε <sub>w</sub> ที่ Total pressure p atm.....	27
รูปที่ 3.7	Correction Factor, C <sub>c</sub> ของ ε <sub>c</sub> ที่ Total Pressure p atm.....	27
รูปที่ 3.8	Correction factor for overlap , Δε สำหรับก๊าซของผสมที่มีทั้งไอน้ำ และ คาร์บอนไดออกไซด์.....	28
รูปที่ 3.9	ภาพหน้าตัดของช่องทางการไหล และ ภาพตัดของช่องทางการไหล 1 ช่อง.....	31
รูปที่ 3.10	ภาพแบบจำลองช่องทางการไหล.....	32
รูปที่ 4.1	ปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะอยู่ตัวกรณีเงื่อนไขขอบแบบ อุณหภูมิคงที่ และฟลักซ์ถ่ายเทความร้อนคงที่.....	39
รูปที่ 4.2	การแบ่ง Node ของ Domain ปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะ อยู่ตัวกรณีมีเงื่อนไขขอบแบบอุณหภูมิคงที่ และฟลักซ์ถ่ายเทความร้อนคงที่.....	41
รูปที่ 4.3	การทดสอบความเป็น Grid independent ของปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติ ในสถานะอยู่ตัว กรณีมีเงื่อนไขขอบแบบอุณหภูมิคงที่ และฟลักซ์ถ่ายเทความร้อนคงที่.....	43

## หน้า

รูปที่ 4.4	ผลเปรียบเทียบระหว่าง Numerical solution และ Exact solution ของปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะอยู่ตัวกรณีมีเงื่อนไขขอบแบบอุณหภูมิคงที่ และฟังก์ชันถ่ายเทความร้อนคงที่.....	43
รูปที่ 4.5	การกระจายอุณหภูมิ ของปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะอยู่ตัวกรณีมีเงื่อนไขขอบแบบอุณหภูมิคงที่ และฟังก์ชันถ่ายเทความร้อนคงที่.....	44
รูปที่ 4.6	ปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะอยู่ตัว กรณีมีเงื่อนไขขอบแบบอุณหภูมิคงที่ และมีการพาที่ผิว.....	44
รูปที่ 4.7	Node ของ Domain ปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะอยู่ตัวกรณีมีเงื่อนไขขอบแบบอุณหภูมิคงที่ และมีการพาความร้อนที่ผิว.....	46
รูปที่ 4.8	การทดสอบความเป็นGrid independent ของปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะอยู่ตัว กรณีมีเงื่อนไขขอบแบบอุณหภูมิคงที่ และมีการพาความร้อนที่ผิว.....	49
รูปที่ 4.9	ผลเปรียบเทียบระหว่าง Numerical solution และ Exact solution ของปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะอยู่ตัว กรณีมีเงื่อนไขขอบแบบอุณหภูมิคงที่ และมีการพาความร้อนที่ผิว.....	49
รูปที่ 4.10	การกระจายอุณหภูมิ ของปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะอยู่ตัวกรณีมีเงื่อนไขขอบแบบอุณหภูมิคงที่ และมีการพาความร้อนที่ผิว.....	50
รูปที่ 4.11	ปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่อยู่ตัว กรณีมีเงื่อนไขขอบแบบฟังก์ชันถ่ายเทความร้อนคงที่ และมีการพาความร้อนที่ผิว.....	51
รูปที่ 4.12	การแบ่ง Node ของ Domain ในปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่อยู่ตัวกรณีมีเงื่อนไขขอบแบบฟังก์ชันถ่ายเทความร้อนคงที่ และมีการพาความร้อนที่ผิว.....	52
รูปที่ 4.13	การทดสอบความเป็นGrid independent ของปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่อยู่ตัว กรณีมีเงื่อนไขขอบแบบฟังก์ชันถ่ายเทความร้อนคงที่ และมีการพาความร้อนที่ผิว.....	56

รูปที่ 4.14	ผลเปรียบเทียบระหว่าง Numerical solution และ Exact solution ของปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่อยู่ตัว กรณีเงื่อนไขขอบแบบฟลักซ์ถ่ายเทความร้อนคงที่ และมีการพาความร้อนที่ผิว.....	56
รูปที่ 4.15	การกระจายอุณหภูมิ ของปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่อยู่ตัว กรณีเงื่อนไขขอบแบบฟลักซ์ถ่ายเทความร้อนคงที่ และมีการพาความร้อนที่ผิว ที่เวลา (a) 0 วินาที.....	57
	(b) 3 วินาที และ (c) 7 วินาที.....	58
รูปที่ 4.16	ปัญหาการไหลผ่านช่องสี่เหลี่ยมโดยมีการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่อยู่ตัวในวัสดุสะสมความร้อน กรณีมีเงื่อนไขขอบแบบฟลักซ์ถ่ายเทความร้อนคงที่ และมีการพาความร้อนที่ผิว.....	59
รูปที่ 4.17	การแบ่ง Node ของ Domain ในปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่อยู่ตัว กรณีมีเงื่อนไขขอบแบบฟลักซ์ถ่ายเทความร้อนคงที่ และมีการพาที่ผิวด้านบน.....	61
รูปที่ 4.18	การทดสอบความเป็นGrid independent ของปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่อยู่ตัว กรณีมีเงื่อนไขขอบแบบฟลักซ์ถ่ายเทความร้อนคงที่ และมีการพาที่ผิวด้านบน.....	65
รูปที่ 4.19	การกระจายอุณหภูมิ ปัญหาการไหลในช่องสี่เหลี่ยมโดยคิดการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่อยู่ตัวในของแข็ง กรณีมีเงื่อนไขขอบแบบฟลักซ์ถ่ายเทความร้อนคงที่ และมีการพาที่ผิว ที่เวลา (a) 0 วินาที (b) 5400วินาที, และ (c) 10800 วินาที..	68
รูปที่ 4.20	การทดสอบความเป็นGrid independent ของปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่อยู่ตัว กรณีมีเงื่อนไขขอบแบบฟลักซ์ถ่ายเทความร้อนคงที่ และมีการพาความร้อนที่ผิวด้านบน.....	74
รูปที่ 4.21	ผลเปรียบเทียบระหว่างระเบียบวิธีแบบชัดเจน กับ ระเบียบวิธีแบบปริยายของปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่อยู่ตัว กรณีมีเงื่อนไขขอบแบบฟลักซ์ถ่ายเทความร้อนคงที่ และมีการพาความร้อนที่ผิวด้านบน.....	74
รูปที่ 5.1	ชุดอุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่จะต้องติดตั้งกับ Regenerator.....	80
รูปที่ 5.2	ตำแหน่งติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลในของไหล.....	80
รูปที่ 5.3	ตำแหน่งติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลในวัสดุสะสมความร้อน.....	81
รูปที่ 5.4	การเจาะวัสดุสะสมความร้อนด้านบนเพื่อติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ล.....	82

	หน้า
รูปที่ 5.5	การเจาะวัสดุสะสมความร้อนด้านข้างเพื่อติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ล..... 82
รูปที่ 5.6	การหุ้มสายเทอร์โมคัปเปิ้ลด้วยเซรามิกไฟเบอร์หลังจากการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ล เพื่อกันความร้อนเนื่องจากด้านบนของ Regenerator มีความร้อนสูงมากกว่า 700°C..... 83
รูปที่ 5.7	ดาตาสล็อกเกอร์ที่ได้ทำการเชื่อมต่อกับสายสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิ้ล..... 83
รูปที่ 5.8	อุปกรณ์วิเคราะห์ประสิทธิภาพการเผาไหม้..... 84
รูปที่ 5.9	แบบจำลองเตาถลุงที่ใช้กับ Regenerator แบบ 2 ตัว..... 87
รูปที่ 5.10	ขั้นตอนการทดลอง..... 90
รูปที่ 6.1	การกระจายตัวของอุณหภูมิของของไหลที่ระนาบกึ่งกลางของของไหล สำหรับการสลับคาบการไหล 25 นาที..... 93
รูปที่ 6.2	การกระจายตัวของอุณหภูมิของสะสมความร้อนที่ระนาบผิววัสดุสะสมความร้อน สำหรับการสลับคาบการไหล 25 นาที..... 94
รูปที่ 6.3	การกระจายตัวของอุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนที่ระนาบที่สมมติให้เป็น Adiabatic plane สำหรับการสลับคาบการไหล 25 นาที..... 95
รูปที่ 6.4	การกระจายตัวของอุณหภูมิของของไหลที่ระนาบกึ่งกลางของของไหล สำหรับการสลับคาบการไหล 20 นาที..... 96
รูปที่ 6.5	การกระจายตัวของอุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนที่ระนาบผิววัสดุสะสมความร้อน สำหรับการสลับคาบการไหล 20 นาที..... 97
รูปที่ 6.6	การกระจายตัวของอุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนที่ระนาบที่สมมติให้เป็น Adiabatic plane สำหรับการสลับคาบการไหล 20 นาที..... 98
รูปที่ 6.7	การกระจายตัวของอุณหภูมิของของไหลที่ระนาบกึ่งกลางของของไหล สำหรับการสลับคาบการไหล 15 นาที..... 99
รูปที่ 6.8	การกระจายตัวของอุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนที่ระนาบผิววัสดุสะสมความร้อน สำหรับการสลับคาบการไหล 15 นาที..... 100
รูปที่ 6.9	การกระจายตัวของอุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนที่ระนาบที่สมมติให้เป็น Adiabatic plane สำหรับการสลับคาบการไหล 15 นาที..... 101

## หน้า

รูปที่ 6.10	การกระจายตัวของอุณหภูมิของของไหลที่ระนาบกึ่งกลางของของไหล สำหรับการสลับคาบการไหล 10 นาที.....	102
รูปที่ 6.11	การกระจายตัวของอุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนที่ระนาบผิววัสดุสะสมความร้อน สำหรับการสลับคาบการไหล 10 นาที.....	103
รูปที่ 6.12	การกระจายตัวของอุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนที่ระนาบที่สมมติให้เป็น Adiabatic plane สำหรับการสลับคาบการไหล 10 นาที.....	104
รูปที่ 6.13	อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของของไหลในช่วง Heating period ที่ตำแหน่ง 4.74 เมตร ที่เวลาเริ่มการไหล กลางคาบการไหล และปลาย คาบการไหล สำหรับการสลับคาบการไหล 25 นาที.....	109
รูปที่ 6.14	อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของของไหลในช่วง Heating period ที่ตำแหน่ง 0.3 เมตร ที่เวลาเริ่มการไหล กลางคาบการไหล และปลายคาบการไหล สำหรับการสลับคาบการไหล 25 นาที.....	109
รูปที่ 6.15	อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของของไหลในช่วง Heating period ที่ตำแหน่ง 0 เมตร ที่เวลาเริ่มการไหล กลางคาบการไหล และปลายคาบการไหล สำหรับการสลับคาบการไหล 25 นาที.....	110
รูปที่ 6.16	อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของของไหลในช่วง Cooling period ที่ตำแหน่ง 5.04 เมตร ที่เวลาเริ่มการไหล กลางคาบการไหล และปลายคาบการไหล สำหรับการสลับคาบการไหล 25 นาที.....	113
รูปที่ 6.17	อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของของไหลในช่วง Cooling period ที่ตำแหน่ง 4.47 เมตร ที่เวลาเริ่มการไหล กลางคาบการไหล และปลายคาบการไหล สำหรับการสลับคาบการไหล 25 นาที.....	113
รูปที่ 6.18	อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของของไหลในช่วง Cooling period ที่ตำแหน่ง 0.3 เมตร ที่เวลาเริ่มการไหล กลางคาบการไหล และปลายคาบการไหล สำหรับการสลับคาบการไหล 25 นาที.....	114
รูปที่ 6.19	อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุสะสมความร้อนในช่วง Heating period ที่ตำแหน่ง 5.04 เมตร ที่เวลาเริ่มการไหล กลางคาบการไหล และปลายคาบการไหล สำหรับการสลับคาบการไหล 25 นาที.....	117

## หน้า

รูปที่ 6.20	อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุสะสมความร้อนในช่วง Heating period ที่ตำแหน่ง 4.74 เมตร ที่เวลาเริ่มการไหล กลางคาบการไหล และปลายคาบการไหล สำหรับการสลับคาบการไหล 25 นาที.....	117
รูปที่ 6.21	อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุสะสมความร้อนในช่วง Heating period ที่ตำแหน่ง 0.3 เมตร ที่เวลาเริ่มการไหล กลางคาบการไหล และปลายคาบการไหล สำหรับการสลับคาบการไหล 25 นาที.....	118
รูปที่ 6.22	อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุสะสมความร้อนในช่วง Heating period ที่ตำแหน่ง 0 เมตร ที่เวลาเริ่มการไหล กลางคาบการไหล และปลายคาบการไหล สำหรับการสลับคาบการไหล 25 นาที.....	118
รูปที่ 6.23	อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุสะสมความร้อนในช่วง Cooling period ที่ตำแหน่ง 5.04 เมตร ที่เวลาเริ่มการไหล กลางคาบการไหล และปลายคาบการไหล สำหรับการสลับคาบการไหล 25 นาที.....	121
รูปที่ 6.24	อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุสะสมความร้อนในช่วง Cooling period ที่ตำแหน่ง 4.74 เมตร ที่เวลาเริ่มการไหล กลางคาบการไหล และปลายคาบการไหล สำหรับการสลับคาบการไหล 25 นาที.....	121
รูปที่ 6.25	อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุสะสมความร้อนในช่วง Cooling period ที่ตำแหน่ง 0.3 เมตร ที่เวลาเริ่มการไหล กลางคาบการไหล และปลายคาบการไหล สำหรับการสลับคาบการไหล 25 นาที.....	122
รูปที่ 6.26	อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุสะสมความร้อนในช่วง Cooling period ที่ตำแหน่ง 0 เมตร ที่เวลาเริ่มการไหล กลางคาบการไหล และปลายคาบการไหล สำหรับการสลับคาบการไหล 25 นาที.....	122
รูปที่ 6.27	การกระจายตัวของอุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนที่ระนาบที่สมมติให้เป็น Adiabatic plane สำหรับการสลับคาบการไหล 20 นาที เมื่อปรับลดค่า $C_p$ จาก $920 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$ เหลือ $220 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$ .....	155



## หน้า

- รูปที่ 6.28 การกระจายตัวของอุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนที่ระนาบที่สมมติให้เป็น  
Adiabatic plane สำหรับการสลับคาบการไหล 20 นาที เมื่อปรับเพิ่มค่า  
 $C_p$  จาก  $920 \frac{J}{kg.^{\circ}C}$  เป็น  $2200 \frac{J}{kg.^{\circ}C}$  .....  
156
- รูปที่ 6.29 ปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้ที่เวลาในการสลับคาบการไหลต่างๆ  
ต่อ 1 ช่องทางการไหล ต่อ 1 ชั่วโมง..... 158
- รูปที่ 6.30 ค่า Thermal ratio ของ Cooling period และ Heating period..... 159



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## คำอธิบายสัญลักษณ์

<i>Symbol</i>	<i>Meaning</i>	<i>Unit</i>
$A$	Heat transfer surface area	$m^2$
$a$	Flow channel width	m
$Bi$	Biot number	
$b$	Test section width	m
$c$	Specific heat at constant pressure	$kJ/kg.K$
$F_0$	Nondimensional time	
$G^+$	Nondimensional parameter	
$H$	Convective film coefficient	$W/m^2.K$
$k$	Thermal conductivity	$W/m.K$
$L$	Length	m
$\dot{m}_f$	Mass rate of flow	$kg/s$
$P$	Heated perimeter of flow channel	m
$Q$	Total heat stored	W
$Q_{max}$	Maximum heat storage	W
$Q^+$	Nondimensional heat storage	
$S$	Cross-sectional area	$m^2$
$T$	Temperature	K
$V^+$	Nondimensional parameter	
$X$	Nondimensional axial coordinate	
$x$	Axial coordinate	m
$Y$	Nondimensional transverse coordinate	
$y$	Transverse coordinate	m
$w$	Semi-thickness of storage material for heat storage units	m

## บทที่ 1

### บทนำ

อุตสาหกรรมหลายประเภทในประเทศไทยมีการใช้เตาเผาที่มีการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง (800-1,400 °C) ซึ่งโรงงานอุตสาหกรรมหลายแห่งไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อนำความร้อนทิ้งจากไอเสียกลับมาใช้ ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานมาก ในขณะที่บางโรงงานที่มีอุปกรณ์นำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ก็ใช้งานอุปกรณ์เหล่านี้อย่างไม่เหมาะสม ทำให้ประสิทธิภาพในการนำความร้อนกลับมาใช้ต่ำกว่า 10% สำหรับในกรณีของโรงงานที่มีการติดตั้ง Regenerator เพื่อนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้งาน โดยมากก็ไม่ได้มีการออกแบบเพื่อให้ Regenerator ทำงานที่จุดที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากขาดข้อมูลการออกแบบที่สมบูรณ์

อุตสาหกรรมภายในประเทศที่สามารถใช้ Regenerator เป็นอุปกรณ์นำความร้อนทิ้งกลับมาใช้งาน สามารถแบ่งเป็นประเภทต่างๆ ได้ดังนี้ คือ อุตสาหกรรมการถลุงแร่ อุตสาหกรรมหลอม-รีด โลหะ-อลูมิเนียม อุตสาหกรรมหลอมแก้ว โดยมีรายชื่อของบางบริษัทดังนี้

- อุตสาหกรรมการถลุงแร่ เช่น บริษัท ไทยแลนด์ สเมลติงแอนดรีไฟนิง จำกัด บริษัท ผาแดง อินดัสทรี จำกัด (มหาชน) เป็นต้น
- อุตสาหกรรมหลอม-รีดโลหะ-อลูมิเนียม เช่น บริษัท สายไฟฟ้าบางกอกเคเบิ้ล จำกัด บริษัท สายไฟฟ้าไทย-ยชาภิ จำกัด บริษัท โรงงานเหล็กกรุงเทพฯ จำกัด บริษัท แอล พี เอ็น เพลท มิล จำกัด (มหาชน) เป็นต้น
- อุตสาหกรรมหลอมแก้ว เช่น บริษัท กระจกสยาม จำกัด บริษัท บางนาคริสตอล จำกัด บริษัท ล็กก็กลาส จำกัด บริษัท อุตสาหกรรมทำเครื่องแก้วไทย จำกัด เป็นต้น

การถลุงแร่ดีบุกเป็นอุตสาหกรรมหนึ่ง ที่มีการใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้เพื่อถลุงสินแร่ โดยมีการให้ความร้อนจากการเผาไหม้โดยตรงซึ่งต้องทำความร้อนให้สูงถึง 1,350 °C เพื่อให้ได้อุณหภูมิสูงถึงจุดที่ดีบุกมีการหลอมเหลว ผลที่ตามมาคือเกิดก๊าซเสียจากการเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิสูงมาก การปล่อยก๊าซเสียอุณหภูมิสูงนี้ออกสู่บรรยากาศนอกจากจะทำให้สภาวะแวดล้อมมีอุณหภูมิสูงขึ้นแล้ว ก๊าซเสียเหล่านี้ยังพาพลังงานความร้อนจำนวนมหาศาลทิ้งไปอีกด้วย ซึ่งพลังงานความร้อนนี้สามารถทำประโยชน์ได้อย่างมหาศาล ถ้าเราสามารถนำกลับมาใช้ได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ

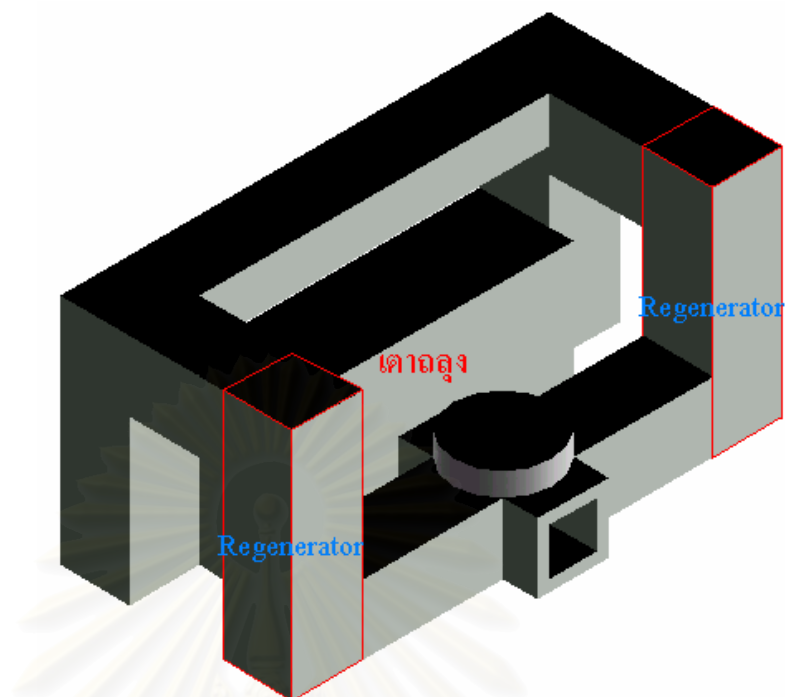
Regenerator เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดหนึ่งที่สามารถนำความร้อน อุณหภูมิสูงกลับมาใช้ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยโรงงานไทยแลนด์ สเมตติ้ง แอนดรีไฟนิง จำกัด (ไทยชาร์โก) เป็นโรงงานถลุงแร่ดีบุก ที่มีการใช้ Regenerator เป็นอุปกรณ์นำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งเตาถลุงประกอบด้วย Regenerator จำนวน 2 ตัว ต่อเตาถลุง 1 เตา ดังแสดงในรูปที่ 1.1 และ แบบจำลองของเตาถลุง และ Regenerator ดังแสดงในรูปที่ 1.2

เนื่องจาก Regenerator เป็นอุปกรณ์ที่ทำงานแบบไม่ต่อเนื่อง ซึ่งมีการทำงานสลับกันเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงคายความร้อน (Heating period) และช่วงดูดความร้อน (Cooling period) การหาเวลา สำหรับวัฏจักรการทำงานที่ถูกต้อง (เวลาในการสลับ Period) จะทำให้การนำความร้อนกลับมาใช้มี ประสิทธิภาพที่สุด ซึ่งคณะวิจัยเห็นว่าการหาวัฏจักรการทำงานที่ถูกต้องใน Regenerator เป็นเรื่องที่น่าสนใจและยังเป็นประโยชน์กับอุตสาหกรรมที่มีการทิ้งความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงปริมาณมาก ในปัจจุบัน โรงงานอุตสาหกรรมในประเทศไทย ยังขาดความรู้เกี่ยวกับการหาวัฏจักรการทำงานที่ถูกต้อง ใน Regenerator ทำให้การสลับวัฏจักรการไหลเป็นไปอย่างไม่เหมาะสม ทำให้การนำความร้อนสูญเสีย กลับมาใช้มีประสิทธิภาพต่ำ ดังนั้นการหาคาบการไหลที่เหมาะสมจะช่วยให้ Regenerator สามารถนำ ความร้อนกลับมาใช้ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ เนื่องจากการคำนวณโดยใช้วิธีวิเคราะห์ (Analytical method) ไม่สามารถทำได้โดยง่าย เพราะสมการอนุพันธ์ที่ใช้คำนวณ อยู่ในลักษณะไม่เชิงเส้น อีกทั้งการ ทำการทดลองกับโรงงานต้องใช้งบประมาณค่อนข้างสูงมาก เนื่องจากอุปกรณ์ตรวจวัดที่ใช้ต้องสามารถ ทนความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงได้ การติดตั้งที่ทำได้ยากเนื่องจากรูปร่างของตัว Regenerator เอง การเปิด- ปิด Regenerator แต่ละครั้งซึ่งสูญเสียพลังงานมหาศาล รวมทั้งการทำการทดลองที่ได้ไม่สะดวกเพราะ การทดลองแต่ละรอบใช้เวลาานาน ตัวอย่าง เช่น โรงงานไทยแลนด์ สเมตติ้ง แอนดรีไฟนิง จำกัด (ไทยชาร์โก) ใช้เวลาในการถลุงดีบุก 8 ชั่วโมงต่อรอบการถลุง (16 ตัน) แต่ละรอบการถลุงต้องทำการ สลับคาบการไหลทุกๆ 30 นาที (เวลาในการสลับคาบการไหลในปัจจุบัน) และในการทดลองต้องทำการ เปลี่ยนคาบเวลาในการไหลหลายๆแบบเพื่อสร้างกราฟเพื่อหาวัฏจักรที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ทำให้การ หาวัฏจักรที่เหมาะสมในการสลับคาบการไหลด้วยการทดลองต้องใช้ระยะเวลาานาน จึงจะได้ผลลัพธ์ที่ ถูกต้อง ดังนั้นเราจึงศึกษาหาวิธีการที่รวดเร็วและสะดวกในการใช้งานมากกว่าวิธีการวิเคราะห์และการ ทดลองที่สามารถใช้ในการหาวัฏจักรที่ทำให้ Regenerator มีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งวิธีที่ทางผู้วิจัย เลือกใช้ คือ การใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการคำนวณนั่นเอง



รูปที่ 1.1 เตาถลุงดีบุก และ Regenerator ของโรงงานไทยแลนด์ สเมลติ้งแอนดรีไฟนิง จำกัด

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 1.2 แบบจำลองเตาถลุง

การใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรม มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในต่างประเทศมาเป็นเวลาหลายทศวรรษ ปัจจุบันประเทศไทยมีการตื่นตัวในการนำระเบียบวิธีเชิงตัวเลขมาใช้ในการแก้ไขปัญหาในทางวิศวกรรม ซึ่งแต่ละระเบียบวิธีก็เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต่างกัน เช่น ระเบียบวิธี Finite element เป็นระเบียบวิธีที่มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางในด้าน Solid Mechanics เพราะความมีประสิทธิภาพในการจำลองรูปร่างของแบบจำลองที่มีลักษณะซับซ้อนได้เป็นอย่างดี เนื่องจากตัว element ที่ใช้ในการแบ่งโครงสร้างสามารถกำหนดให้มีรูปทรงทางเรขาคณิตที่ต่างกันได้ ส่วนระเบียบวิธี Finite difference สามารถใช้ในปัญหาการนำความร้อนในวัสดุที่มีรูปร่างไม่ซับซ้อน เช่น รูปร่างสี่เหลี่ยม ทรงกระบอก และทรงกลม โดยสามารถใช้ในการจำลองการไหลของของไหลได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากสามารถจำลอง control volume ของของไหลได้อย่างชัดเจน นอกจากนี้ยังสามารถจำลองปัญหาที่มีทั้งของไหลและของแข็งอยู่ในโดเมนเดียวกันได้เป็นอย่างดี จากการวิเคราะห์ลักษณะของปัญหาที่เราสนใจพบว่าระเบียบวิธี Finite difference เป็นระเบียบวิธีที่เหมาะสมในการนำมาแก้ปัญหา การนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่อยู่ตัวในโครงอิฐทนไฟซึ่งมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยเรา

สามารถใช้ระเบียบวิธี Finite difference ในการคำนวณหาวัฏจักรการทำงานที่เหมาะสมใน Regenerator ได้

โดยทั่วไปแล้วประสิทธิภาพเชิงความร้อนของ Regenerator จะมีค่าประมาณ 50-60% ซึ่งจากการผลงานวิจัยของ Dong et al. [1] ทำให้ทราบว่า การปรับเวลาในการสลับคาบการไหลที่เหมาะสมจะทำให้มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงถึง 90% การใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขหาเวลาในการสลับคาบการไหลที่เหมาะสมจะทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของ Regenerator สูงขึ้นโดยไม่ต้องมีเงินลงทุนในการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติม ซึ่งการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขนี้นอกจากจะประหยัดค่าใช้จ่ายแล้ว ยังสะดวกและมีความคล่องตัวในการใช้งานสูง ซึ่งถ้าเราต้องการปรับปรุง Regenerator โดยการเปลี่ยนวัสดุสะสมความร้อน เราสามารถใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขทำนายปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้ซ้ำเพิ่มขึ้นหรือลดลง โดยไม่ต้องทำการทดลองเปลี่ยนจริงซึ่งจะต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงมาก อีกทั้งเรายังสามารถประยุกต์ใช้ในการคำนวณปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้ใน Regenerator ที่มีขนาดต่างกัน ซึ่งถ้าเป็นการทดลองเราก็ต้องติดเครื่องมือใหม่ทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนขนาด Regenerator นอกจากนี้แบบจำลองยังสามารถประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมที่มีความเข้มข้นก๊าซเสียต่างกัน ได้

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้ Finite difference method ในการแก้สมการอนุพันธ์พลังงาน ของทั้ง Fluid และ Solid heat storage unit เพื่อหาการกระจายตัวของอุณหภูมิ ทั้งใน Fluid และ Solid heat storage unit ในแต่ละคาบวัฏจักรการทำงานของ Regenerator จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้ออกมาคำนวณหาปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้ของแต่ละคาบวัฏจักรการทำงาน และนำข้อมูลปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้มาเปรียบเทียบกันเพื่อหาปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้ที่มากที่สุด

## 1.1 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาการทำงานของ Regenerator แบบโครงอิฐทนไฟรูปปล่องสี่เหลี่ยม
2. ศึกษาระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่สามารถจำลองรูปแบบการกระจายอุณหภูมิภายในโครงอิฐทนไฟรูปปล่องสี่เหลี่ยม
3. เพื่อประยุกต์แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นกับการใช้งานจริงในอุตสาหกรรม
4. หาวัฏจักรที่เหมาะสมในการสลับคาบการไหลเพื่อให้ได้ความร้อนนำกลับมาใช้มากที่สุด

## 1.2 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาการทำงานของ Regenerator แบบโครงอิฐทนไฟรูปปล่องสี่เหลี่ยม โดยคำนึงถึงการนำความร้อนในทิศตั้งฉากกับการไหลและการนำความร้อนในทิศทางการไหล
2. สร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่สามารถจำลองการกระจายอุณหภูมิภายในโครงอิฐทนไฟ โดยคำนึงถึงการนำความร้อนในทิศตั้งฉากกับการไหลและการนำความร้อนในทิศทางการไหล
3. ประยุกต์ใช้งานแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นกับ Regenerator แบบโครงอิฐทนไฟรูปปล่องสี่เหลี่ยม ซึ่งใช้ร่วมกับเตาถลุงดิบของ บริษัท ไทยแลนด์ สเมลติง แอนด์ ีไฟนิ่ง

## 1.3 ขั้นตอนการดำเนินการ

วิทยานิพนธ์นี้แบ่งเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆคือ

1. การใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการคำนวณหาวัฏจักรการทำงานที่เหมาะสมใน Regenerator
2. การตรวจวัด และบันทึกข้อมูลการทำงานจริงของ Regenerator และนำผลลัพธ์มาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์จากการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข
3. วิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้ และสรุปผล

### 1. การใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการคำนวณหาวัฏจักรการทำงานที่เหมาะสมใน Regenerator

ในส่วนนี้จะทำการศึกษาระบบการทำงาน กลไกทางด้านความร้อนของ Regenerator จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาหาความเหมาะสมในการเลือกใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ให้คำตอบที่มีค่าใกล้เคียงกับการใช้งานจริงมากที่สุด จากการศึกษาเบื้องต้นเราพบว่า ทางโรงงานใช้ K43 Super duty fireclay brick ซึ่งมีค่าการนำความร้อนในเนื้อวัสดุ  $1.57 \text{ W/m.K}$  (ที่  $1000 \text{ K}$ ) ส่วนอากาศมีค่าการนำความร้อน  $0.0672 \text{ W/m.K}$  (ที่  $1000 \text{ K}$ ) จาก Temperature gradients ที่เกิดขึ้น



ภายในเนื้อวัสดุ การนำความร้อนภายในเนื้อวัสดุจะเกิดขึ้นทั้งในทิศทางการไหลและตั้งฉากกับการไหล ซึ่งเราสามารถจำลองรูปแบบโดยใช้ Finite conductivity model ในขั้นตอนการวิจัยเราจะทำการหาค่าประกอบอื่นๆ เช่น เงื่อนไขขอบเขต เงื่อนไขเบื้องต้น ฯลฯ ที่ทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความใกล้เคียงกับรูปแบบของ Regenerator ที่ใช้งานจริงมากที่สุดและจะนำแบบจำลองที่ได้มาดำเนินการสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อทำการคำนวณโดยใช้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น จากนั้นนำค่าที่ได้มาสรุปวิเคราะห์ผลเพื่อการวางแผนงานในการตรวจวัดข้อมูลที่โรงงานต่อไป

## 2. การตรวจวัด และบันทึกข้อมูลการทำงานจริงของ Regenerator และนำผลลัพธ์มาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์จากการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

นำข้อมูลที่ได้จากการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขมาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ และปรับปรุงโปรแกรมคอมพิวเตอร์

## 3. วิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้ และสรุปผล

เป็นการนำผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ และข้อมูลจากการตรวจวัดการทำงานจริงมาวิเคราะห์ สรุปผล เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปใช้ควบคุมการทำงานของ Regenerator ในโรงงานอื่น

### 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบวัฏจักรที่เหมาะสมในการสลับคาบการไหลของ Regenerator แบบโครงอิฐทนไฟรูปปล่องสี่เหลี่ยม ซึ่งผลที่ได้จะนำไปปรับปรุงการสลับคาบการไหลของ Regenerator แบบโครงอิฐทนไฟรูปปล่องสี่เหลี่ยม ของบริษัทไทยแลนด์สเมลดิง แอนด์รีไฟนิง จังหวัดภูเก็ต ซึ่งช่วยให้สามารถลดปริมาณการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงลงได้

2. แนวทางในการควบคุมการทำงานของ Regenerator ในโรงงานอุตสาหกรรมอื่นๆ ที่ใช้ Regenerator ในลักษณะคล้ายคลึงกัน
3. สามารถนำความร้อนทิ้งมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งทำให้อุณหภูมิไอเสียที่ปล่อยทิ้งไปมีค่าลดลง ซึ่งเป็นการรักษาภาวะแวดล้อมโดยอ้อมด้วย
4. แนวทางในการพัฒนา และออกแบบรูปแบบของ Regenerator ที่ใช้ในอุตสาหกรรมให้ทำงานอย่างเหมาะสม

## 1.5 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้แบ่งออกเป็น 7 บท ดังต่อไปนี้

### บทที่ 1 บทนำ

กล่าวถึงความสำคัญและที่มา วัตถุประสงค์ ขอบเขต ขั้นตอนการดำเนินการ ผลที่คาดว่าจะได้รับ และส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

### บทที่ 2 ผลงานวิจัยที่ผ่านมา

กล่าวถึงผลงานวิจัยที่คล้ายคลึงหรือใกล้เคียงกับวิทยานิพนธ์

### บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ประกอบด้วยทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ ทั้งทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน และ Finite difference method ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้

### บทที่ 4 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

กล่าวถึงการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยเปรียบเทียบแบบจำลองที่สร้างขึ้นกับกรณีศึกษาแบบต่างๆ โดยมีทั้งหมด 4 ปัญหาด้วยกัน คือ

#### 4.1 ปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะอยู่ตัว

- 4.1.1 กรณีเงื่อนไขขอบแบบอุณหภูมิคงที่ และการถ่ายเทความร้อนคงที่
- 4.1.2 กรณีเงื่อนไขขอบแบบอุณหภูมิคงที่ และมีการพาความร้อนที่ผิว

#### 4.2 ปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่อยู่ตัว

4.2.1 กรณีเงื่อนไขขอบแบบอุณหภูมิคงที่ และมีการพาความร้อนที่ผิว

#### 4.3 การพัฒนาโปรแกรมและการตรวจสอบกับกรณีมีโดเมนเหมือนการใช้งานจริง

ในหัวข้อนี้จะทำการเปรียบเทียบ กับโปรแกรมที่สร้างขึ้นด้วยระเบียบวิธีแบบชัดเจน และระเบียบวิธีแบบปริยายกับผลการคำนวณเชิงวิเคราะห์

#### บทที่ 5 อุปกรณ์การทดลองและวิธีดำเนินการทดลอง

กล่าวถึง Regenerator ของโรงงานไทยแลนด์สแมลติงแอนดรีไฟนิง จำกัด (ไทยชาร์โก) วิธีการดำเนินการทดลอง และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

#### บทที่ 6 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากระเบียบวิธีเชิงตัวเลข กับ การทดลอง

เป็นบทวิเคราะห์และการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข กับ ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

#### บทที่ 7 บทสรุป ปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะ

ประกอบด้วยบทสรุปของวิทยานิพนธ์ ปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะสำหรับวิทยานิพนธ์ต่อเนื่องที่อาจดำเนินการได้ต่อไปในอนาคต

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### หลักการเหตุผลและผลงานที่มีมาก่อน

Regenerator แบบโครงอิฐทนไฟรูปปล่องสี่เหลี่ยม เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดหนึ่ง ซึ่งมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมทั่วไป โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อุตสาหกรรมที่มีการเผาไหม้ และมีการปล่อยก๊าซเสียที่มีอุณหภูมิสูงทิ้งสู่บรรยากาศ ซึ่งความร้อนส่วนนี้ เราสามารถนำมาอุ่นอากาศก่อนที่จะนำมาใช้ในห้องเผาไหม้ โดยใช้ Regenerator เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เนื่องจาก Regenerator เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีคุณลักษณะที่น่าสนใจ จึงมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกิดขึ้นมากมาย ซึ่งอาจจะสรุปได้คร่าวๆ ดังนี้

Butterfield et al. [2] ใช้ทฤษฎีของ Hausen [3] ในการคำนวณ Heat transfer coefficient และ Temperature gradient ในส่วนของ Stove โดยได้แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับเวลาที่เปลี่ยนไปของของไหลและวัสดุสะสมความร้อน รวมถึง Optimum time cycle โดยไม่เกิดการนำความร้อนในทิศตั้งฉากกับการไหล และแสดงการเปรียบเทียบผลการประหยัดจากการปรับเปลี่ยนพื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อน ของระบบ 3-4 Stove จากข้อสรุปของทฤษฎี Regenerator ของ Hausen พบว่าสามารถใช้ได้ในกรณี เตามีสภาวะภายในเท่ากัน (Uniform stove conditions) และในกรณีของ การเปลี่ยนแปลงแบบไม่เชิงเส้นตามเวลา (Non-linear time variations) ของอุณหภูมิของโครงอิฐทนไฟ

Butterfield et al. [4] จึงได้ศึกษาในกรณี เตามีสภาวะภายในไม่เท่ากัน (Non-uniform stove conditions) เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและค่าความร้อนจำเพาะ แปรผันตามอุณหภูมิภายในเตา การปรับอัตราการไหลแบบไม่คงที่ การเปลี่ยนรูปร่าง สัมประสิทธิ์การนำความร้อน และความจุความร้อนของโครงอิฐทนไฟ โดยในพื้นที่ฐานของทฤษฎีจะมีการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายระหว่าง 3 และ 4 Stove systems และระหว่างโครงอิฐรูปตารางหมากรุกหลายๆแบบ

Willmott [5] ได้กล่าวถึง วิธีการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ ของ Regenerator ซึ่งได้ยกตัวอย่างผลงานที่เคยมีมาทั้งวิธีการแก้สมการโดยตรง และการแก้สมการโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข โดยในงานวิจัยฉบับนี้ได้ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ โดยใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมูเข้ามาช่วยในการคำนวณ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ออกไปเปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขของ Iiffe [6] ซึ่งได้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกัน และในงานวิจัยยังได้พูดถึง

องค์ประกอบที่มีอิทธิพลต่อ Truncation errors และผลของ Hausen ratio  $k/k_0$  ซึ่งแสดงถึงเวลาที่ใช้ในการลู่เข้าสู่ผลลัพท์ โดยถ้าค่า Hausen ratio สูงจะใช้ Time step ในการลู่เข้าสู่ผลลัพท์น้อยกว่า

Willmott [7] ได้ศึกษาวิธีการรักษาอุณหภูมิของ Supplied preheated gas ให้มีอุณหภูมิคงที่ ซึ่งโดยปกติแล้วอุณหภูมิของแก๊สที่ทางออกของ Regenerator จะเปลี่ยนแปลงไปโดยขึ้นกับเวลาในแต่ละรอบ การรักษาอุณหภูมิของ Supplied preheated gas ให้มีอุณหภูมิคงที่สามารถทำได้โดยการ By-pass อากาศมาผสมกับอากาศร้อนจาก Regenerator จนอากาศที่อุณหภูมิคงที่ โดยที่งานวิจัยฉบับนี้แสดงถึงวิธีแก้สมการอนุพันธ์ที่มีพฤติกรรมแบบ Non-linear นี้โดยใช้ Lumped heat transfer coefficients โดยจะศึกษาเพื่อหาความสัมพันธ์ของ Temperature ใน Regenerator ให้เป็นฟังก์ชันของระยะทางในทิศทางกรไหลและเวลา ผลจากการนำความร้อนในทิศทางตั้งฉากกับการไหล สามารถละทิ้งได้ หรือจะรวมให้เป็น Lumped หรือ Overall heat-transfer coefficient ก็ได้

Willmott [8] ได้ศึกษาปัญหาการนำความร้อนที่ขึ้นกับเวลาใน Regenerator ในสามมิติ ซึ่งจากการศึกษาทฤษฎีของ Tipler [9] ทำให้ Willmott พบว่าในกรณีของวัสดุสะสมความร้อนที่เป็นเซรามิก สามารถละทิ้งการนำความร้อนในทิศทางกรไหลได้ และจากทฤษฎีของ Hausen [10] ทำให้ทราบว่าสามารถสรุปสมการให้เหลือสมการการนำความร้อนที่ขึ้นกับเวลาในหนึ่งมิติได้ (คิดเฉพาะทิศตั้งฉากกับการไหล) ส่วนของไหลคิดเฉพาะการนำความร้อนในทิศทางกรไหล จากนั้นนำสมการทั้งสองไปจัดรูปแบบในเทอมไร้มิติ และใช้อุณหภูมิเฉลี่ยของวัสดุสะสมความร้อน (Mean solid temperature) และ Overall heat-transfer coefficient ในการจำลองการนำความร้อนในทิศตั้งฉากการไหล ทำการแก้สมการเชิงอนุพันธ์จากทั้งสองวิธีด้วยระเบียบวิธี Finite difference ซึ่งได้ผลลัพท์ที่ใกล้เคียงกัน แต่ระเบียบวิธี Finite difference ของกรณี Overall heat-transfer coefficient ใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่าและที่ Hausen Ratio สูงๆจะมีปัญหาในเรื่องการลู่ออกน้อยกว่า

Willmott [11] ใช้วิธี Numerical acceleration ของ Aitken [12] ในการช่วยให้โปรแกรมเข้าถึง Cyclic equilibrium ได้เร็วขึ้น เนื่องจาก Packing ของ Thermal regenerator มี Thermal inertia มาก ทำให้ Regenerator ใช้เวลานานกว่าที่จะถึง Cyclic equilibrium ส่งผลให้ Mathematical model ที่จำลองการทำงานของ Regenerator ใช้เวลานานกว่าจะลู่เข้า กระบวนการของ Numerical acceleration ที่พูดถึงในงานวิจัยฉบับนี้แสดงถึงวิธีในการแก้ปัญหาเรื่อง Thermal inertia ที่ทำให้โปรแกรมเข้าถึง Cyclic equilibrium ได้ภายในไม่กี่ Cycle

Schmidt and Willmott [13] ยังได้นำเสนอ Transient response ของโครงอิฐทนไฟ โดยใช้วิธี Lumped หรือ Bulk heat-transfer coefficients ของ Hausen จำลองความต้านทานภายในอิฐบวกเพิ่มกับความต้านทานระหว่างก๊าซกับอากาศไปที่ผิวของ Packing ในงานวิจัยนี้ได้แสดงการ

กระจายตัวของอุณหภูมิในเนื้อโครงอิฐทนไฟ โดยที่ทางเข้าและทางออกจะมีการกระจายตัวเป็นแบบ Non-linear ตามเวลาที่เปลี่ยนไป ส่วนช่วงที่เหลือแสดงพฤติกรรมเป็นแบบ Linear ทั้งในช่วง Heating และ Cooling period

Ridgion and Kerrison [14] นำเสนอวิธีการทดลองวัดสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในโครงอิฐทนไฟ โดย Regenerator ที่ใช้ทดลองมีอุณหภูมิของไหลขาเข้าแตกต่างกัน โดยโครงอิฐทนไฟประกอบด้วยช่อง 7 ช่อง มีพื้นที่หน้าตัด  $4 \times 2$  ตารางฟุต และสูง  $8 \times 2$  ตารางฟุต มวลรวม 2540 lb เครื่องมือวัดจะต้องออกแบบให้มี Heat loss และ Thermal capacity น้อยที่สุด จะได้รับความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน  $h$  เปลี่ยนแปลงเป็นเส้นตรงกับปริมาณอากาศที่ไหลผ่าน

Larsen [15] ทำการคำนวณอุณหภูมิของแข็งและของไหลที่ตำแหน่งใดๆใน Regenerative Heat exchanger โดยใช้วิธีคำนวณโดยตรง ซึ่งวิธีนี้สามารถประยุกต์ใช้กับกรณีอุณหภูมิเริ่มต้นของอิฐทนไฟเปลี่ยนไปตามตำแหน่งในทิศทางการไหลและ อุณหภูมิของของไหลที่ทางเข้าเปลี่ยนไปตามเวลา งานวิจัยที่มีมาก่อนหน้านี้ได้แสดงผลของปัญหาที่มีอุณหภูมิเริ่มต้นของอิฐทนไฟสม่ำเสมอ และได้แสดงตารางและกราฟที่แสดงค่า Dimensionless time ( $\eta$ ) และ Dimensionless length ( $\xi$ ) ในช่วง 0 ถึง 20 ผลของ Linear initial matrix temperature และ Linear entering fluid temperature ก็สามารถแสดงผลด้วยเส้นโค้งและกราฟในรูปแบบเดียวกัน ด้วยตัวแปรในช่วงเดียวกัน ด้วยวิธี Superposition โดยผลลัพธ์จะถูกขยายไปยังกรณี Arbitrary initial matrix temperature และ Arbitrary entering fluid temperature ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธี 2 วิธีในการหาผลลัพธ์ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข วิธีแรกใช้หาค่าโดยวิธี Convolution integral ด้วยเงื่อนไขใดๆ ส่วนวิธีที่สองจะประมาณเงื่อนไขขอบและเงื่อนไขเริ่มต้นใดๆ เป็นหลายๆ Linear segments แล้วนำมารวมกัน

Schmidt and Szego [16] ได้หา Transient response ของ Solid sensible heat storage unit ที่มีช่องพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งรับความร้อนมาจากของไหลที่มีคุณสมบัติเป็นเนื้อเดียวกัน โดยที่งานวิจัยฉบับนี้ได้คิดรวม การนำความร้อนทั้งในทิศตั้งฉากและทิศทาง การไหล โดยแก้สมการอนุพันธ์พลังงานของ Fluid และ Transient conduction ของ Heat storage unit โดยใช้ Finite difference method ผลลัพธ์ในการทำนายอุณหภูมิของ Heat storage unit และ Fluid ขาออกจาก Storage unit จะแสดงในรูปของฟังก์ชันของตัวแปรไร้มิติ ในปี 1978 Schmidt and Szego [17] ได้หา Transient response ของ Solid sensible heat storage unit ที่มีช่อง การไหลของก๊าซเป็นรูปทรงกระบอกและทำงานในสภาพ Single-blow โดยใช้วิธี Finite-conductivity model เพื่อหาผลลัพธ์จากการไหล 2 แบบ กรณีแรกของการไหลไหลภายในทรงกระบอก

โดยที่ผิวนอกเป็น Adiabatic ส่วนในกรณีที่ 2 ของไหลไหลผ่านผิวนอกของทรงกระบอก โดยพิจารณาให้ผิวทรงกระบอกด้านในเป็น Adiabatic โดยของไหลจะเกิดการนำความร้อนที่ขึ้นกับเวลา ในหนึ่งมิติในทิศทางการไหล ส่วนวัสดุสะสมความร้อนเกิดการนำความร้อนที่ขึ้นกับเวลาในสองมิติทั้งการนำความร้อนในแนวรัศมีและการนำความร้อนในทิศทางการไหล โดยใช้ Finite difference method ในการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ และแสดงผลเป็นฟังก์ชันไร้มิติของอุณหภูมิที่ขาออกและปริมาณความร้อนที่สะสมโดยวัสดุสะสมความร้อน

Klein and Eigenberger [18] ใช้ Analytical model ในการหาการกระจายของอุณหภูมิและค่า Effectiveness ของ Regenerator ซึ่งในกรณีนี้จะสนใจเฉพาะกรณีที่ผนังของวัสดุสะสมความร้อนค่อนข้างบาง เช่น ในกรณีที่ผนังสะสมความร้อนทำจากโลหะ อุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงน้อยในทิศตั้งฉากกับการไหล ดังนั้นสามารถละทิ้งการนำความร้อนในทิศตั้งฉากกับการไหล โดยจะสลับคาบการไหลในช่วงเวลาสั้นๆ คณะวิจัยใช้ Taylor-series expansions ในการประมาณค่า Integrals ทั้งการกระจายอุณหภูมิและค่า Effectiveness และได้นำผลลัพธ์ที่ได้มาเปรียบเทียบกับระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน

Dong et al. [1] ได้ทำการทดลองหาประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนใน Regenerator โดยการเปลี่ยนตัวแปรสามตัว คือ เวลาในการสลับคาบการไหล ขนาดของช่องทางการไหล และความยาวของช่องทางการไหล จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาเปรียบเทียบกับระเบียบวิธีเชิงตัวเลขซึ่งใช้โปรแกรมสำเร็จรูป STAR-CD พบว่าแนวโน้มของข้อมูลทั้งสองเป็นไปในทางเดียวกัน แต่ในช่วง Regenerating period ข้อมูลมีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูงซึ่งอาจเป็นเพราะโปรแกรม STAR-CD ไม่สามารถจำลอง Disturbances ที่เกิดจากการสลับคาบการไหลอย่างทันทีทันใด

จิรชนย์ เสรีวิชัยสวัสดิ์ [19] ใช้ Finite difference method ในการหาการกระจายอุณหภูมิทั้งในวัสดุสะสมความร้อนและในของไหล โดยใช้ Lumped heat-transfer coefficient ในการจำลองสมการการนำความร้อนที่ขึ้นกับเวลาในทิศตั้งฉากกับการไหล โดยเทียบกับการทำการทดลองจริงกับโรงงาน โดยมีการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางของของไหลและกึ่งกลางของวัสดุสะสมความร้อนทั้งทางเข้า และทางออก โดยผลจากการทดลองและการคำนวณมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน ในงานวิจัยนี้ใช้ Finite difference method ในการแก้สมการอนุพันธ์พลังงาน ของทั้ง Fluid และ Solid heat storage unit เพื่อหาการกระจายอุณหภูมิ ทั้งใน Fluid และ Solid heat storage unit ในแต่ละคาบวัฏจักรการทำงาน ของ Regenerator โดยนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้ของแต่ละคาบวัฏจักรการทำงาน จากนั้นนำข้อมูลปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้มาเปรียบเทียบกับเพื่อหาปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้ที่มากที่สุด เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้

แบบจำลองแบบ Lumped heat-transfer coefficient ซึ่งไม่สามารถจำลองการกระจายอุณหภูมิในวัสดุสะสมความร้อนได้ ทำให้ไม่สามารถจำลองการไหลในกรณีที่มีค่า Biot number สูงๆได้ ประกอบกับในการทำการทดลอง จิรชนย์ เสรีวิชัยสวัสดิ์ ทำการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลเฉพาะตำแหน่งกึ่งกลางของของไหล และกึ่งกลางของวัสดุสะสมความร้อนทั้งทางเข้าและทางออก ทำให้ไม่สามารถแสดงให้เห็นการกระจายอุณหภูมิในวัสดุสะสมความร้อน

ในงานวิจัยฉบับนี้จะใช้ Finite difference method ในการแก้สมการอนุพันธ์พลังงานที่ขึ้นกับเวลาในสองมิติของ Solid heat storage unit โดยจะคำนึงถึงการนำในทิศทางการไหล และการนำในทิศตั้งฉากกับการไหล เพื่อหาการกระจายอุณหภูมิใน Solid heat storage unit และจะใช้ Simplified model ของ Willmott[13] ในการหาการกระจายอุณหภูมิในของไหล ในแต่ละวัฏจักรการทำงานของ Regenerator นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้ของแต่ละวัฏจักรการทำงาน จากนั้นนำข้อมูลปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้มาเปรียบเทียบกันเพื่อหาปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้ที่มากที่สุด



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

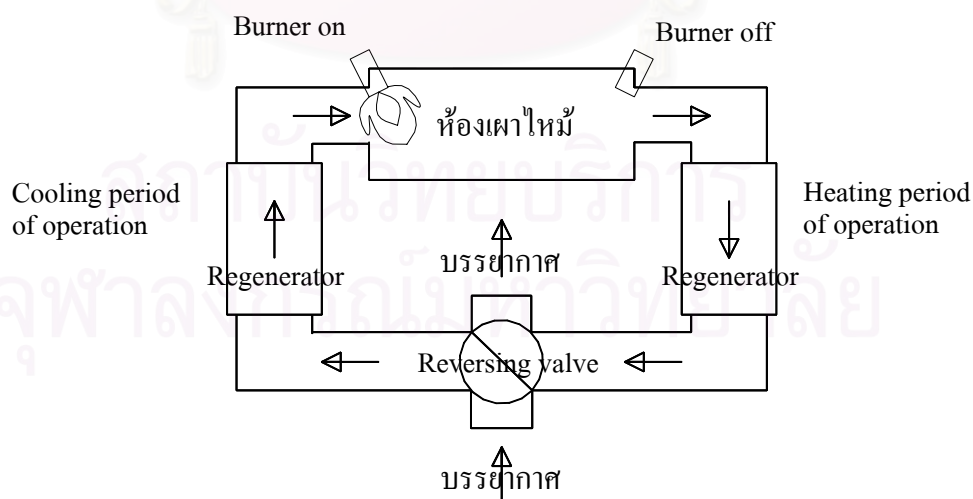


### บทที่ 3

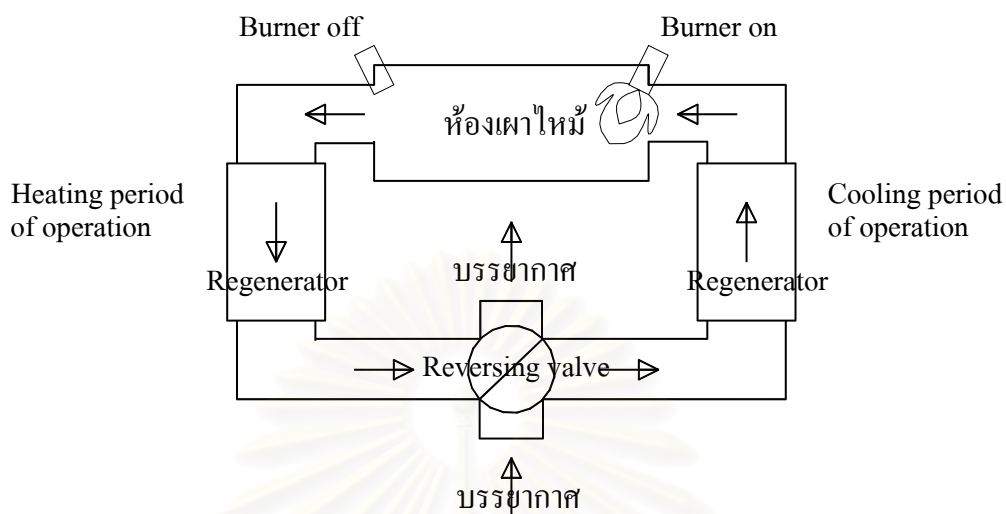
## ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 3.1 หลักการทำงานของ Counter Flow Regenerator

Regenerative Heat Exchanger หรือ Regenerator เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องชนิดหนึ่ง ซึ่งทำการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลสองชนิด โดยใช้ตัวกลางซึ่งเป็นของแข็งในการสะสมความร้อน โดยมีการทำงาน 2 ช่วงคือ ช่วงสะสมความร้อน และช่วงคายความร้อน (Heating period และ Cooling period) ซึ่งช่วงสะสมความร้อนนั้นของไหลที่มีอุณหภูมิสูงจะไหลผ่านตัวกลาง และมีการถ่ายเทความร้อนจากของไหลอุณหภูมิสูง สู่ตัวกลางที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าเป็นระยะเวลาหนึ่ง จากนั้นจึงหยุดปล่อยของไหลอุณหภูมิสูง จากนั้นวัฏจักรจะเข้าสู่ช่วง คายความร้อน ของไหลที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าถูกปล่อยผ่านตัวกลางในทิศสวนทางการไหลกับของไหลอุณหภูมิสูง ความร้อนที่สะสมอยู่ในตัวกลางจะถ่ายเทมายังของไหลที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าเป็นระยะเวลาหนึ่ง จากนั้นจึงหยุดปล่อยของไหลอุณหภูมิต่ำ และวัฏจักรจะเข้าสู่ช่วงสะสมความร้อน ต่อ



รูปที่ 3.1 (a) Regenerator ทางด้านซ้ายมืออยู่ในช่วง Cooling period ส่วน Regenerator ทางด้านขวามืออยู่ในช่วง Heating period



รูปที่ 3.1 (b) Regenerator ทางด้านซ้ายมืออยู่ในช่วง Heating period ส่วน Regenerator ทางด้านขวามืออยู่ในช่วง Cooling period

จากรูปที่ 3.1 แสดงภาพของแบบจำลองการทำงานของ Regenerator โดยตรงกลางคือห้องเผาไหม้ ส่วนอุปกรณ์ด้านซ้ายและขวาคือ Regenerator โดยใช้วาล์วในการควบคุมทิศทางการไหลผ่าน Regenerator สลับการทำงานของ Regenerator ซึ่งอยู่ด้านซ้ายและขวา รูป 3.1 (a) อากาศที่มีอุณหภูมิต่ำไหลเข้า Regenerator ทางด้านซ้ายมือ รับความร้อนจาก Regenerator ทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นและไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้ ส่วนก๊าซเสียที่มีอุณหภูมิสูง จะไหลเข้า Regenerator ด้านขวามือและคายความร้อนให้กับ Regenerator ทำให้มีอุณหภูมิต่ำลง และไหลผ่านวาล์วควบคุมการไหลออกสู่บรรยากาศ กระบวนการจะดำเนินไปชั่วระยะเวลาหนึ่ง จากนั้นวาล์วควบคุมทิศทางจะสลับทิศทางการไหล และดำเนินการกระบวนการไปตามรูป 3.1(b) อากาศที่มีอุณหภูมิต่ำไหลเข้า Regenerator ทางด้านขวา รับความร้อนจาก Regenerator ทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นและไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้ ก๊าซเสียที่มีอุณหภูมิสูง จะไหลเข้า Regenerator ด้านซ้ายมือและคายความร้อนให้กับ Regenerator ทำให้มีอุณหภูมิต่ำลง และไหลผ่านวาล์วควบคุมการไหลออกสู่บรรยากาศ กระบวนการจะดำเนินไปชั่วระยะเวลาหนึ่ง จากนั้นวาล์วควบคุมทิศทางจะสลับทิศทางการไหล และดำเนินการซ้ำเดิมดังรูป 3.1(a)

### 3.2 การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer)

เนื่องจาก Regenerator แบบโครงอิฐทนไฟรูปปล่องสี่เหลี่ยมที่ทำการศึกษา เป็นอุปกรณ์นำความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่ ที่มีการทำงานที่อุณหภูมิสูง โดยจะทำการเก็บสะสมความร้อนจากก๊าซเสียซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ  $1,350^{\circ}\text{C}$  ไว้ในวัสดุสะสมความร้อน หลังจากนั้นจะมีการดึงความร้อนจากวัสดุสะสมความร้อนด้วยอากาศดีเพื่อนำไปใช้ในการเผาไหม้ ซึ่งการทำงานของ Regenerator จะเกิดการถ่ายเทความร้อนทั้ง 3 รูปแบบ คือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน

#### 3.2.1 การนำความร้อน (Conduction heat transfer)

การนำความร้อนเป็นการถ่ายเทพลังงานจากการมีปฏิสัมพันธ์กันของอนุภาคที่มีพลังงานสูงไปสู่อนุภาคที่มีพลังงานต่ำกว่าที่อยู่ติดกัน การนำความร้อนสามารถเกิดขึ้นได้ในตัวกลางที่เป็นของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ในกรณีของแข็ง การนำความร้อนเกิดจากการสั่นของโมเลกุลในโครงร่างผลึกของตัวกลาง พลังงานดังกล่าวจะถูกถ่ายเทโดยอิเล็กตรอนอิสระ ส่วนกรณีของเหลวและก๊าซ การนำความร้อนจะเกิดจากการชนของโมเลกุลที่เคลื่อนที่ไปมา อัตราการนำความร้อนผ่านตัวกลางขึ้นอยู่กับรูปร่าง ความหนา และชนิดของตัวกลาง รวมทั้งความแตกต่างของอุณหภูมิด้วย ตามกฎของ Fourier สามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$Q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (3.1)$$

โดย	$Q$	คือ	อัตราการถ่ายเทความร้อนจากการนำความร้อน (W)
	$k$	คือ	ค่าความสามารถการนำความร้อนของตัวกลาง (W / (m.K))
	$A$	คือ	พื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่าน ( $\text{m}^2$ )
	$\frac{dT}{dx}$	คือ	ความชันของอุณหภูมิเมื่อเทียบกับระยะทางที่เกิดการนำความร้อน (K/m)

### 3.2.2 การพาความร้อน (Convection heat transfer)

การพาความร้อนเป็นรูปแบบการถ่ายเทพลังงานระหว่างพื้นผิวของแข็งกับของไหลที่อยู่ติดกัน และเกี่ยวข้องกับการนำความร้อนรวมถึงการเคลื่อนที่ของของไหลด้วย ของไหลที่เคลื่อนที่เร็วกว่าจะพาความร้อนได้ดีกว่า ส่วนของไหลที่อยู่นิ่งจะมีเพียงการนำความร้อนเท่านั้นตามกฎของ Newton สามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$Q_{conv} = hA(T_w - T_f) \quad (3.2)$$

โดย	$Q_{conv}$	คือ	อัตราการถ่ายเทความร้อนจากการพาความร้อน (W)
	$h$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $W / (m^2 \cdot K)$ )
	$A$	คือ	พื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่าน ( $m^2$ )
	$T_w$	คือ	อุณหภูมิพื้นผิว (เท่ากับอุณหภูมิของของไหลที่อยู่ติดกัน) (K)
	$T_f$	คือ	อุณหภูมิของของไหล ณ ตำแหน่งห่างจากพื้นผิวไหลออกไป (K)

ใน Regenerator ที่ทำการวิจัย การพาความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างผิวอิฐทนไฟกับก๊าซเสียหรืออากาศจะเป็นแบบบังคับ (Forced convection) มี Blower เป็นตัวขับเคลื่อน และเป็นการไหลภายในท่อ (Internal flow) โดยสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  $h$  ขึ้นอยู่กับรูปแบบการไหล คุณสมบัติของของไหล ดังนี้

#### รูปแบบการไหลในท่อ (Flow regimes in a tube)

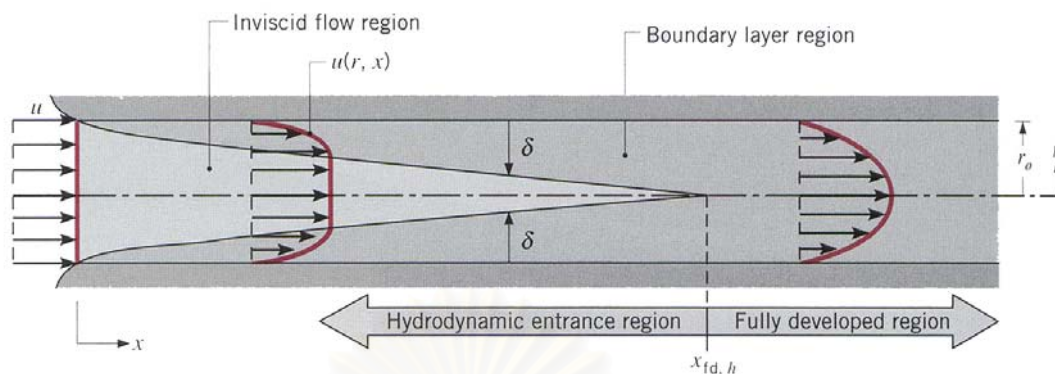
การไหลในท่อสามารถเป็นไปได้อีกทั้ง 2 แบบ คือ แบบราบเรียบ (Laminar) และแบบปั่นป่วน (Turbulent) โดยถูกกำหนดด้วย Reynolds number ดังนี้ [20]

$$Re = \frac{v_m D_h}{\nu} = \frac{\dot{m} D_h}{A_c \mu} \quad (3.3)$$

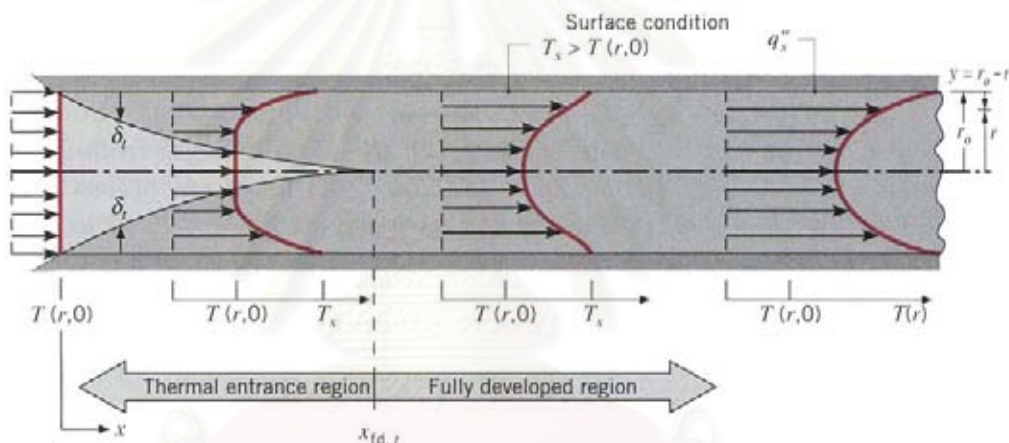
โดย	$Re$	คือ	Reynolds number เมื่อ	$Re < 2,300$ Laminar flow
				$2,300 \leq Re \leq 4,000$ Transition to turbulence
				$Re \geq 4,000$ Turbulent flow
	$v_m$	คือ	ความเร็วเฉลี่ยของของไหล (m/s)	
	$D_h$	คือ	Hydraulic diameter (m); $D_h = \frac{4A_c}{p}$	
	$\nu$	คือ	Kinematic viscosity ของของไหล (m <sup>2</sup> /s)	
	$\dot{m}$	คือ	อัตราการไหลโดยมวลของของไหล (kg/s)	
	$A_c$	คือ	พื้นที่หน้าตัดการไหล (m <sup>2</sup> )	
	$p$	คือ	เส้นรอบวง (m)	
	$\mu$	คือ	Absolute viscosity (kg/(m/s))	

### Hydrodynamic and thermal entry lengths

พิจารณา Fluid ที่ไหลในท่อ อนุภาคของของไหลในชั้นที่ติดกับพื้นผิวท่อจะหยุดนิ่ง ซึ่งจะทำให้อนุภาคของของไหลในชั้นถัดไปเคลื่อนไปช้าลงจากแรงเสียดทาน เพื่อเป็นการชดเชยความเร็วที่ลดลง ความเร็วของของไหลตรงกลางท่อต้องเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการไหลโดยมวลที่คงที่ จึงเกิด Velocity boundary layer ขึ้นตลอดความยาวท่อ ความหนาของ Boundary layer จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามทิศทางการไหล จนมาบรรจบกันตรงกลางท่อดังรูปที่ 3.2 ระยะทางจากทางเข้าของท่อจนถึงจุดที่ Boundary layer มาบรรจบกันเรียกว่า Hydrodynamic entry region และความยาวนี้เรียกว่า Hydrodynamic entry length ,  $L_h$  ส่วนของท่อที่เหลือจากนี้ไปซึ่ง Velocity profile พัฒนาเต็มที่ และไม่เปลี่ยนแปลงอีกเรียกว่า Hydrodynamically developed region โดย Velocity profile ในส่วนนี้จะเป็นรูปโค้งแบบ Parabolic สำหรับการไหลแบบ Laminar แต่สำหรับการไหลแบบ Turbulent จะแบนราบกว่า



รูปที่ 3.2 การพัฒนาของ Velocity boundary layer ของของไหลที่ไหลภายในท่อ [21]



รูปที่ 3.3 การพัฒนาของ Thermal boundary layer ของของไหลที่ไหลภายในท่อ [21]

เมื่อพิจารณาของไหลที่มีอุณหภูมิคงที่แบบ Uniform ไหลเข้าท่อที่มีอุณหภูมิสูงหรือต่ำกว่าอนุภาคของของไหล ในชั้นที่ติดกับพื้นผิวท่อจะถือว่ามีความอุณหภูมิเท่ากัน พัฒนา Thermal boundary layer ไปตามท่อ โดยความหนาของ Boundary layer นี้จะเพิ่มขึ้นตามทิศการไหลจนมาบรรจบกันที่กลางท่อดังรูปที่ 3.3 พื้นที่ที่ Thermal boundary layer พัฒนาขึ้นจนถึงจุดที่ Boundary layer มาบรรจบกันเรียกว่า Thermal entry region และความยาวของพื้นที่นี้เรียกว่า Thermal entry length,  $L_t$  ส่วนพื้นที่ที่เหลือจากนี้ไปซึ่ง Profile ของ Dimensionless temperature,  $\frac{(T - T_s)}{(T_m - T_s)}$  ( $T_m$  คือ Mixed mean fluid temperature) คงที่ไม่เปลี่ยนแปลงอีกเรียกว่า Thermally developed region พื้นที่ที่เป็นทั้ง Hydrodynamically และ Thermally developed จะเรียกว่า “Fully developed flow”

ในกรณีของการไหลแบบ Laminar ค่า Prandtl number,  $Pr$  จะเป็นตัววัดความสัมพันธ์กันของการพัฒนา Velocity และ Thermal boundary layer โดยของไหลที่เป็นก๊าซ ( $Pr \approx 1$ ) Boundary layer ทั้งสองชนิดจะพัฒนาไปพร้อมๆ กัน และสามารถประมาณค่า Hydrodynamic กับ Thermal entry lengths ได้ดังนี้ [20]

$$L_{h,laminar} \approx 0.05 Re D_h \quad (3.4a)$$

$$L_{t,laminar} \approx 0.05 Re Pr D_h \quad (3.4b)$$

ในกรณีของการไหลแบบ Turbulent ค่า Hydrodynamic กับ Thermal entry lengths จะไม่ขึ้นอยู่กับ  $Re$  และ  $Pr$  จึงได้ว่า

$$L_{h,turbulent} \approx L_{t,turbulent} \approx 10 D_h \quad (3.5)$$

ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยตลอดความยาวท่อ,  $\bar{h}_{conv}$  หาได้จากสมการ

$$\bar{h}_{conv} = \frac{\overline{Nu}_{D_h} k}{D_h} \quad (3.6)$$

โดย  $\bar{h}_{conv}$  คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยตลอดความยาวท่อ ( $W/m^2K$ )  
 $D_h$  คือ Hydraulic diameter (m)  
 $k$  คือ ค่าความสามารถนำความร้อนของของไหล ( $W/(m^2K)$ )  
 $\overline{Nu}_{D_h}$  คือ ค่า Nusselt number เฉลี่ยตลอดความยาวท่อซึ่งหาได้ดังนี้

สำหรับ Laminar flow ( $Re < 2,300$ ) หลังจากพิจารณาความยาวของท่อแล้วพบว่าสั้นกว่า  $L_h$  และ  $L_t$  รวมทั้งไม่มี Unheated starting length (ความยาวท่อส่วนที่มีอุณหภูมิเท่ากับของไหลที่ไหลผ่าน)

เมื่อค่า  $[(\frac{Re_{D_h} Pr}{L})^{1/3} (\frac{\mu}{\mu_s})^{0.14}] \geq 2$  ท่อที่พิจารณาจะอยู่ในช่วงของ Combined

(Thermal and velocity) entry length และ  $T_s = \text{constant}$ , [  $0.48 < Pr < 16,700$  ] ,  
 $[0.0044 < (\frac{\mu}{\mu_s}) < 9.75]$  [21]

Subscript  $s$  คือ ที่ตำแหน่งพื้นผิวของท่อ

Subscript  $D_h$  คือ Hydraulic diameter (m)

$$\overline{Nu}_{D_h} = 1.86 \left( \frac{Re_{D_h} Pr}{L} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0.14} \quad (3.7)$$

เมื่อ  $[(\frac{Re_{D_h} Pr}{L})^{1/3} (\frac{\mu}{\mu_s})^{0.14}] < 2$  และ  $T_s = \text{constant}$  พื้นที่ส่วนใหญ่ของท่อจะ

มีการไหลแบบ Fully developed

$$\overline{Nu}_{D_h} = 2.98 \quad (3.8)$$

คุณสมบัติทุกอย่างที่ปรากฏในสมการ หาได้ที่อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหล,

$$\overline{T}_f = \frac{(T_{f,in} + T_{f,out})}{2} \quad \text{ยกเว้น } \mu_s \text{ หาได้ที่อุณหภูมิผิวท่อ}$$

Subscript  $f, in$  คือ ที่ตำแหน่งของไหลที่ทางเข้า

Subscript  $f, out$  คือ ที่ตำแหน่งของไหลที่ทางออก

สำหรับ Turbulent flow ที่คุณสมบัติต่างๆ มีการเปลี่ยนแปลงมาก สมการที่ใช้จึง  
 ต้องมีการประมาณที่ดี และสามารถใช้ได้กับสภาพ Uniform surface temperature และ Uniform  
 heat flux ดังนี้ [21]

สำหรับ  $[0.7 \leq Pr \leq 16,700]$ ,  $[Re_{D_h} \geq 10,000]$ ,  $[\frac{L}{D_h} \geq 10]$



$$\overline{Nu}_{D_h} = 0.027 Re_{D_h} Pr^{\frac{1}{3}} \left( \frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0.14} \quad (3.9)$$

คุณสมบัติทุกอย่างที่ปรากฏในสมการ หาได้ที่อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหล,  $\overline{T}_f = \frac{(T_{f.in} + T_{f.out})}{2}$  ยกเว้น  $\mu_s$  หาได้ที่อุณหภูมิผิวท่อ และสามารถใช้ประมาณค่าสัมประสิทธิ์เมื่อ  $2,300 \leq Re \leq 4,000$

### 3.2.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation heat transfer)

การแผ่รังสีคือการปล่อยพลังงานที่อยู่ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงรูปแบบทาง electronic ของอะตอมหรือโมเลกุลออกมา โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางและเป็นพลังงานที่ถ่ายเทได้เร็วที่สุด (เท่าความเร็วแสง)

จากกฎของ Stefan-Boltzmann สมการแสดงอัตราการแผ่รังสีความร้อนระหว่างพื้นผิวใดๆ กับสิ่งแวดล้อมคือ

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \sigma A (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (3.10)$$

โดย	$\dot{Q}_{rad}$	คือ	อัตราการแผ่รังสีความร้อน (W)
	$\varepsilon$	คือ	Emissivity ของพื้นผิว ( $0 < \varepsilon < 1$ )
	$\sigma$	คือ	Stefan-Boltzmann constant มีค่า $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$
	$A$	คือ	พื้นที่ผิวของการแผ่รังสี ( $\text{m}^2$ )
	$T_s$	คือ	อุณหภูมิสมบูรณ์ของพื้นผิว (K)
	$T_\infty$	คือ	อุณหภูมิสมบูรณ์ของสิ่งแวดล้อม (K)

การแผ่รังสีความร้อนใน Regenerator เป็นการถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศ (Cooling period) หรือก๊าซเสีย (Heating period) กับพื้นผิวโครงอิฐทนไฟ องค์ประกอบในอากาศและก๊าซเสียที่เป็นหลักในการดูดซับหรือคายพลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีคือ ก๊าซชนิดต่างๆ นั้นเอง แต่ที่มีคุณสมบัติโดดเด่นเป็น Polar molecules มีขอบเขตของอุณหภูมิในการดูดซับหรือคายพลังงานกว้าง และมีปริมาณมากคือ ไอน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}_{(g)}$ ) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ )

สมการ Heat flux ของการแผ่รังสีความร้อนระหว่างโครงอิฐทนไฟกับอากาศหรือ ก๊าซเสียสามารถแสดงได้ดังนี้ [13]

$$Q_{rad} = \sigma \left( \frac{\varepsilon_s + 1}{2} \right) (\varepsilon_g T_f^4 - \alpha_g T_s^4) \quad (3.11)$$

รูปแบบของสมการ Heat flux นี้เป็น nonlinear เพื่อความสะดวกสามารถประมาณ ให้เป็น linear โดยใช้ Equivalent radiative heat transfer coefficient,  $h_{rad}$  ดังนี้

$$Q_{rad} = h_{rad} (T_f - T_s) \quad (3.12)$$

โดย  $Q_{rad}$  คือ ปริมาณ Heat flux ของการแผ่รังสีความร้อนระหว่างโครงอิฐทนไฟ กับอากาศหรือ ก๊าซเสีย ( $W/m^2$ )

$h_{rad}$  คือ Equivalent radiative heat transfer coefficient ( $W/m^2K$ ) เป็นค่าประมาณ ของการเฉลี่ยสามารถใช้ได้ตลอดทั้ง Period สำหรับการจำลองการทำงานของ Regenerator โดยใช้ Linear model ซึ่งหาได้จาก

$$h_{rad} = \sigma \left( \frac{\varepsilon_s + 1}{2} \right) \left( \frac{\varepsilon_g T_f^4 - \alpha_g T_s^4}{T_f - T_s} \right) \quad (3.13)$$

$\sigma$	คือ	Stefan-Boltzmann constant มีค่า $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$
$\varepsilon_s$	คือ	Emissivity ของพื้นผิวอิฐทนไฟ
$\varepsilon_g$	คือ	Emissivity ของอากาศหรือก๊าซเสีย ( $H_2O_{(g)}$ , $CO_2$ เป็นหลัก)
$\alpha_g$	คือ	Absorptivity ของอากาศหรือก๊าซเสีย ( $H_2O_{(g)}$ , $CO_2$ เป็นหลัก)
$T_f$	คือ	Arithmetic mean ของอุณหภูมิสมบูรณ์ของอากาศหรือก๊าซเสีย (K)
$T_s$	คือ	อุณหภูมิสัมบูรณ์เฉลี่ยของพื้นผิวอิฐทนไฟ (K)

เมื่ออุณหภูมิของของไหลและอิฐทนไฟมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องตลอด พื้นที่การถ่ายเทความร้อน สามารถประมาณจากการใช้ Arithmetic mean ของอุณหภูมิของไหลโดย เพิ่มพจน์ของ Logarithmic mean ของผลต่างอุณหภูมิเข้าไป จากการพิจารณาให้ Regenerator เสมือนเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอิฐทนไฟกับของไหล

$$T_f = T_s + \frac{(\Theta_1 - \Theta_2)}{\ln \frac{\Theta_1}{\Theta_2}} \quad (3.14)$$

โดย  $\Theta_1$  คือ ผลต่างอุณหภูมิของไหลกับอิฐทนไฟที่ทางเข้าช่องการไหล

$\Theta_2$  คือ ผลต่างอุณหภูมิของไหลกับอิฐทนไฟที่ทางออกช่องการไหล

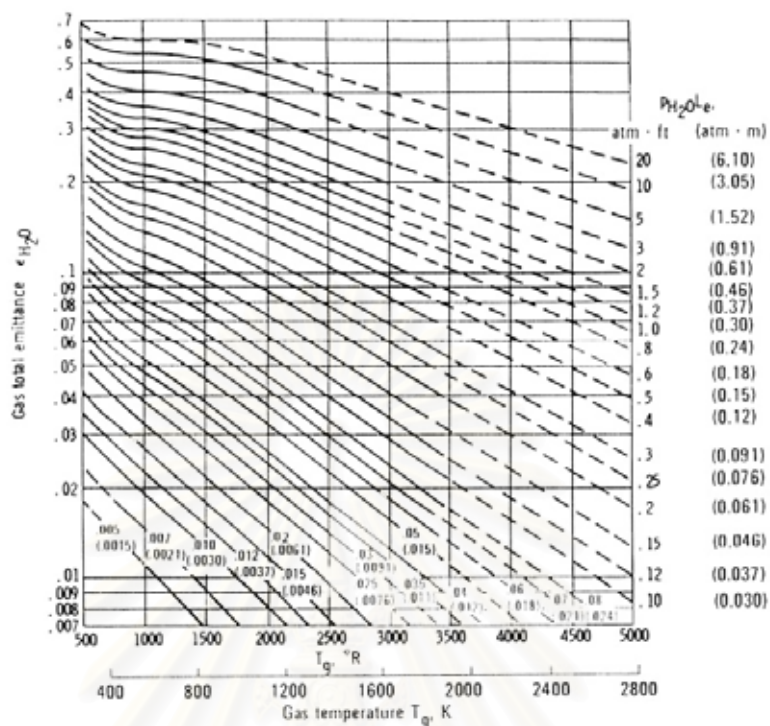
Hottel [22] กล่าวว่าเมื่อองค์ประกอบของไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ปรากฏอยู่ในรูปของผสมรวมกับก๊าซที่ไม่มีคุณสมบัติในการแผ่รังสีอื่นๆ การหาค่า  $\varepsilon_g$  ของอากาศ (Cooling period) หรือก๊าซเสีย (Heating period) ทำได้ดังนี้

$$\varepsilon_g = C_w \varepsilon_w + C_c \varepsilon_c - \Delta \varepsilon \quad (3.15)$$

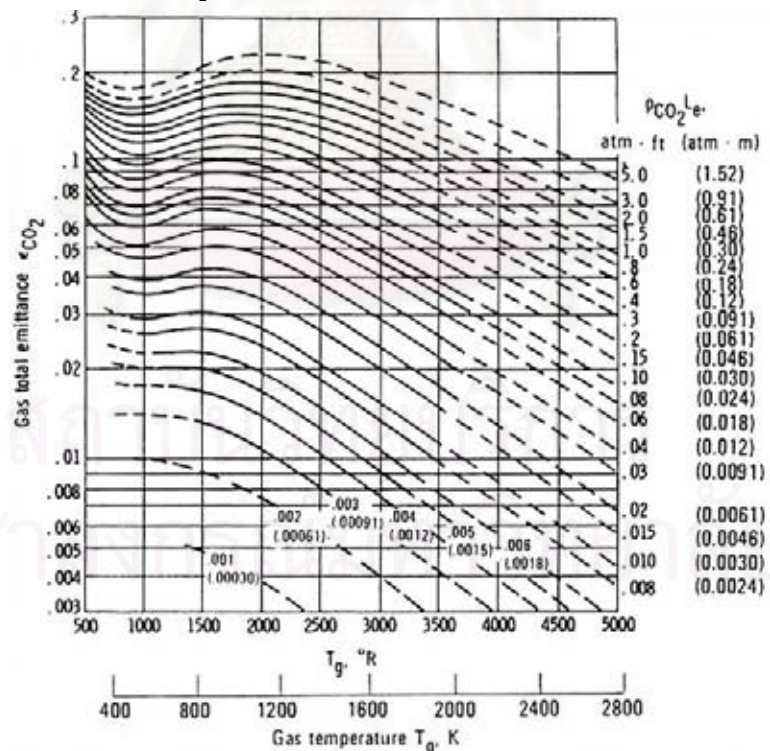
โดย Emissivity ของไอน้ำ  $\varepsilon_w$  และ คาร์บอนไดออกไซด์  $\varepsilon_c$  หาได้จากกราฟในรูปที่ 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ ซึ่งจะมีค่าขึ้นอยู่กับ

- อุณหภูมิ  $T_f$  ณ Total Pressure,  $p$  ของอากาศหรือก๊าซเสียที่ 1 atm
- Partial pressure  $p_w$  ของไอน้ำ = Mole fraction ของ  $H_2O$  x Total pressure  
Partial pressure  $p_c$  ของคาร์บอนไดออกไซด์ = Mole Fraction ของ  $CO_2$  x Total Pressure  
(Mole fraction คืออัตราส่วนโดยโมล หรือ %by Volume ของก๊าซชนิดนั้นต่อก๊าซทั้งหมด)
- Effective mean beam length,  $L = 3.4 \times \frac{\text{Volume}}{\text{Area}}$  สำหรับ Gas enclosures ใดๆ

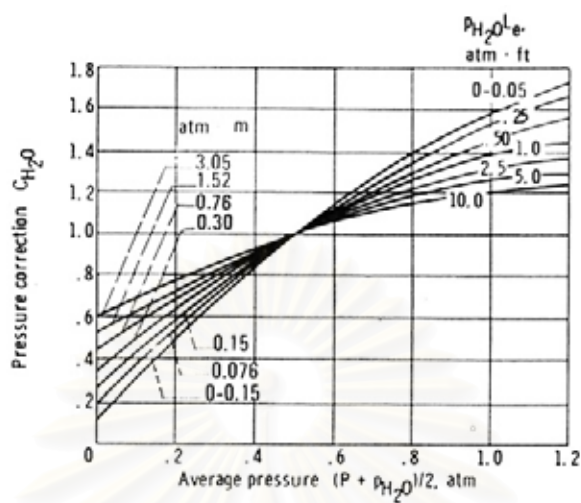
Correction factor,  $C_w$  ของไอน้ำ และ  $C_c$  ของคาร์บอนไดออกไซด์ หาได้จากรูปที่ 3.6 และ 3.7 ตามลำดับ ใช้เมื่อ Total pressure สูงหรือต่ำกว่า 1 atm โดย Emissivity ของก๊าซใดๆ ที่ Total pressure,  $p$  คือ ผลคูณของ Correction factor ที่ได้จากรูป กับ Emissivity ที่ Total pressure 101.3 kPa



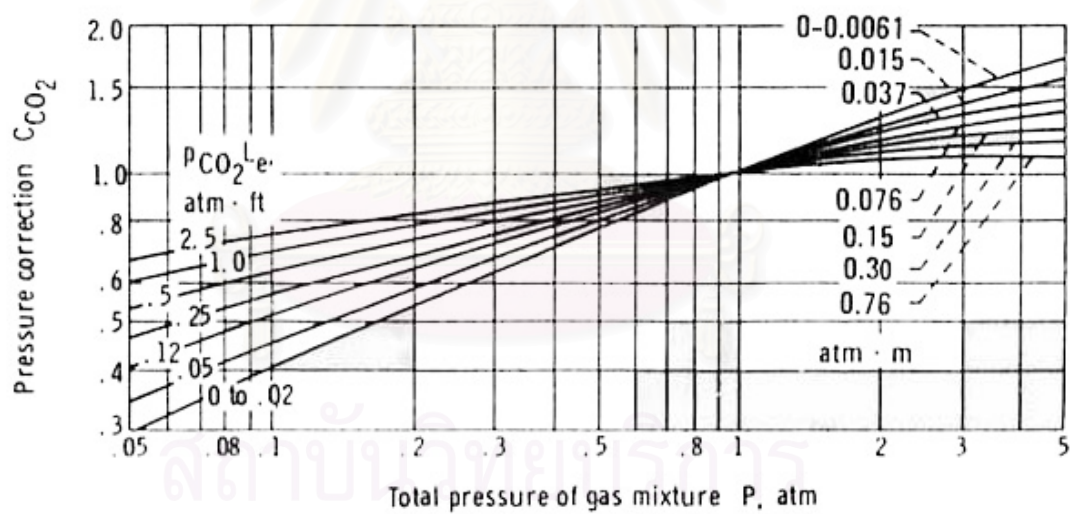
รูปที่ 3.4 Emissivity ของ H<sub>2</sub>O ที่ Total pressure 1 atm และ Partial pressure ใกล้เคียง [23]



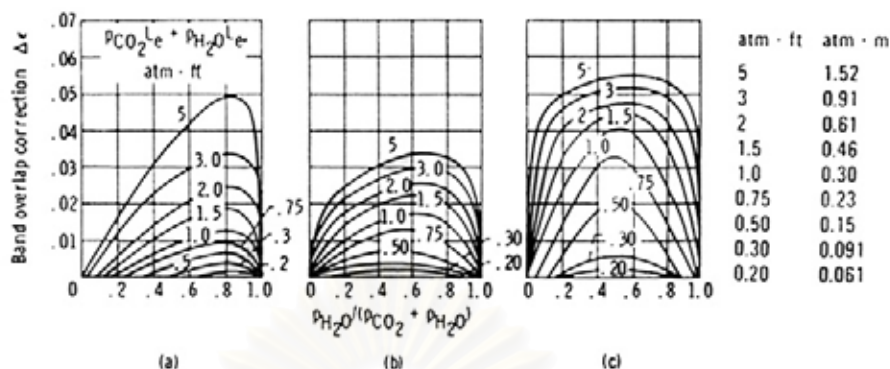
รูปที่ 3.5 Emissivity ของ CO<sub>2</sub> ที่ Total pressure 1 atm และ Partial pressure ใกล้เคียง [23]



รูปที่ 3.6 Correction factor,  $C_w$  ของ  $\varepsilon_w$  ที่ Total pressure  $p$  atm [23]



รูปที่ 3.7 Correction Factor,  $C_c$  ของ  $\varepsilon_c$  ที่ Total Pressure  $p$  atm [23]



รูปที่ 3.8 Correction factor for overlap ,  $\Delta\epsilon$  สำหรับก๊าซของผสมที่มีทั้งไอน้ำ และ คาร์บอนไดออกไซด์

ส่วน  $\Delta\epsilon$  คือ Correction factor for overlap ใช้เมื่อไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ รวมกันอยู่ในรูปก๊าซของผสม หาได้จากรูปที่ 3.8

ในกรณีของ Absorptivity,  $\alpha_g$  ของก๊าซของผสมระหว่างไอน้ำและคาร์บอนได ออกไซด์สามารถหาได้ดังนี้

$$\alpha_g = \alpha_w + \alpha_c - \Delta\alpha \quad (3.16)$$

โดย  $\alpha_w = C_w \left(\frac{T_g}{T_s}\right)^{0.45} \epsilon_w(T_s, p_w L_e \frac{T_s}{T_g})$  และ  $\alpha_c = C_c \left(\frac{T_g}{T_s}\right)^{0.65} \epsilon_c(T_s, p_w L_e \frac{T_s}{T_g})$

$\epsilon_w, \epsilon_c$  หาได้จากรูปที่ 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ แต่ใช้คุณสมบัติของ  $T_s$  แทน  $T_g$  และใช้คุณสมบัติของ  $p_w L_e \frac{T_s}{T_g}$  กับ  $p_c L_e \frac{T_s}{T_g}$  แทน  $p_w L_e$  กับ  $p_c L_e$

$C_w, C_c$  หาได้จากรูปที่ 3.6 และ 3.7 ตามลำดับโดยใช้คุณสมบัติเดิม

และ  $\Delta\alpha = \Delta\epsilon$  หาได้จากรูปที่ 3.8 โดยใช้คุณสมบัติเดิม

### 3.3 ไชโครเมตริกส์ (Psychrometrics)

การศึกษาคุณสมบัติของอากาศชื้นหรืออากาศที่มีไอน้ำผสมอยู่ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณไอน้ำที่อยู่ในอากาศก่อนเข้า Regenerator เป็นสิ่งจำเป็นต่อการคำนวณหาอัตราการไหลโดยมวลและสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน ในทางปฏิบัติพบว่าสูตรต่างๆ ของ Ideal gas ใช้ได้ดีมาก โดยเฉพาะที่ความดันใกล้เคียงความดันบรรยากาศ (101.325 kPa หรือ 14.7 psi)

จากสูตร Ideal gas เบื้องต้น

$$Pv = RT \text{ หรือ } PV = mRT \quad (3.17)$$

$$P = P_a + P_w \quad (3.18)$$

โดย  $P$  คือ เมื่อความดันอากาศทั้งหมดมีค่าเท่ากับความดันของอากาศแห้งรวมกับความดันของไอน้ำในอากาศ (kPa) ไอน้ำที่อยู่ในอากาศจะมีปริมาตรเท่ากับปริมาตรอากาศ แต่ความดันของไอน้ำจะน้อยกว่าความดันของอากาศแห้งมากเพราะมวลน้อยกว่ามาก มวลของไอน้ำในอากาศทั่วไปจะมีเพียงประมาณ 1-2% เท่านั้น

$P_a$	คือ	ความดันอากาศแห้ง (kPa)
$P_w$	คือ	ความดันไอน้ำ (kPa)
$v$	คือ	ปริมาตรจำเพาะ ( $m^3/kg$ )
$V$	คือ	ปริมาตรทั้งหมด ( $m^3$ )
$m$	คือ	มวลของอากาศชื้น, $m_a$ คือมวลของอากาศแห้ง, $m_w$ คือมวลของไอน้ำ (kg)
$T$	คือ	อุณหภูมิสมบูรณ์ของอากาศ (K)
$R$	คือ	ค่าคงที่มีค่า 0.287 kJ/(kg K) สำหรับอากาศแห้ง, $R_a$ หรือ

$$0.462 \text{ kJ/(kg K) สำหรับไอน้ำ, } R_w$$

- ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity) [24]

$$RH = \phi = \frac{Y_w}{Y_{ws}} \quad (3.18)$$

โดย  $\phi$  คือ Relative Humidity  
 $Y_w$  คือ สัดส่วนโดยโมลของไอน้ำ  
 $Y_{ws}$  คือ สัดส่วนโดยโมลของไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิและความดันเดิม

สำหรับก๊าซผสมจากพื้นฐานทางเทอร์โมไดนามิกส์ได้ว่า สัดส่วนโดยโมลของไอน้ำในอากาศจะเท่ากับสัดส่วนของความดันไอน้ำ  $Y_w = \frac{n_w}{n} = \frac{P_w}{P}$  และ  $Y_{ws} = \frac{n_{ws}}{n} = \frac{P_{ws}}{P}$  จะได้ว่า  $\frac{Y_w}{Y_{ws}} = \frac{P_w}{P_{ws}}$  ทำให้

$$RH = \phi = \frac{Y_w}{Y_{ws}} = \frac{P_w}{P_{ws}} \quad (3.19)$$

โดย  $P_w$  คือ ความดันไอน้ำ (Pascal)  $= P - P_a = \phi P_{ws}$   
 $P_{ws}$  คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิเดิมของก๊าซผสมไอน้ำนั้น (Pascal) หาได้จากตารางไอน้ำหรือสูตรสำเร็จดังนี้ [24]

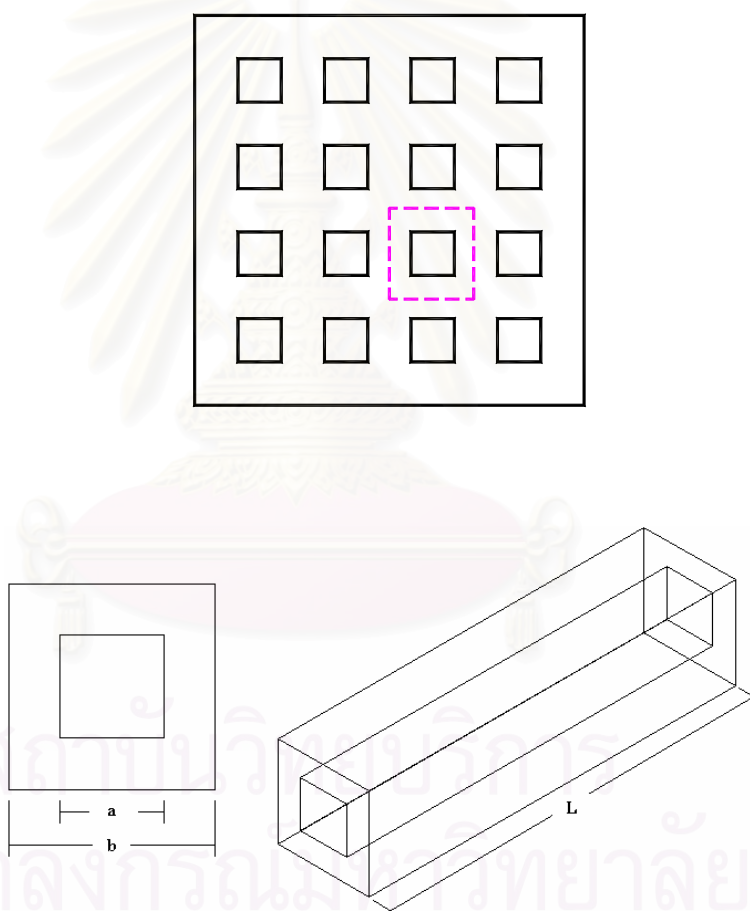
สำหรับช่วงอุณหภูมิ  $0^\circ\text{C}$  ถึง  $200^\circ\text{C}$

$$\ln(P_{ws}) = -\frac{5800.2206}{T} + 1.3914993 - 0.04860239T + (4.1764768E - 5)T^2 - (1.445209E - 8)T^3 + 6.5459673 \ln T \quad (3.20)$$



### 3.4 สมมติฐานเบื้องต้น

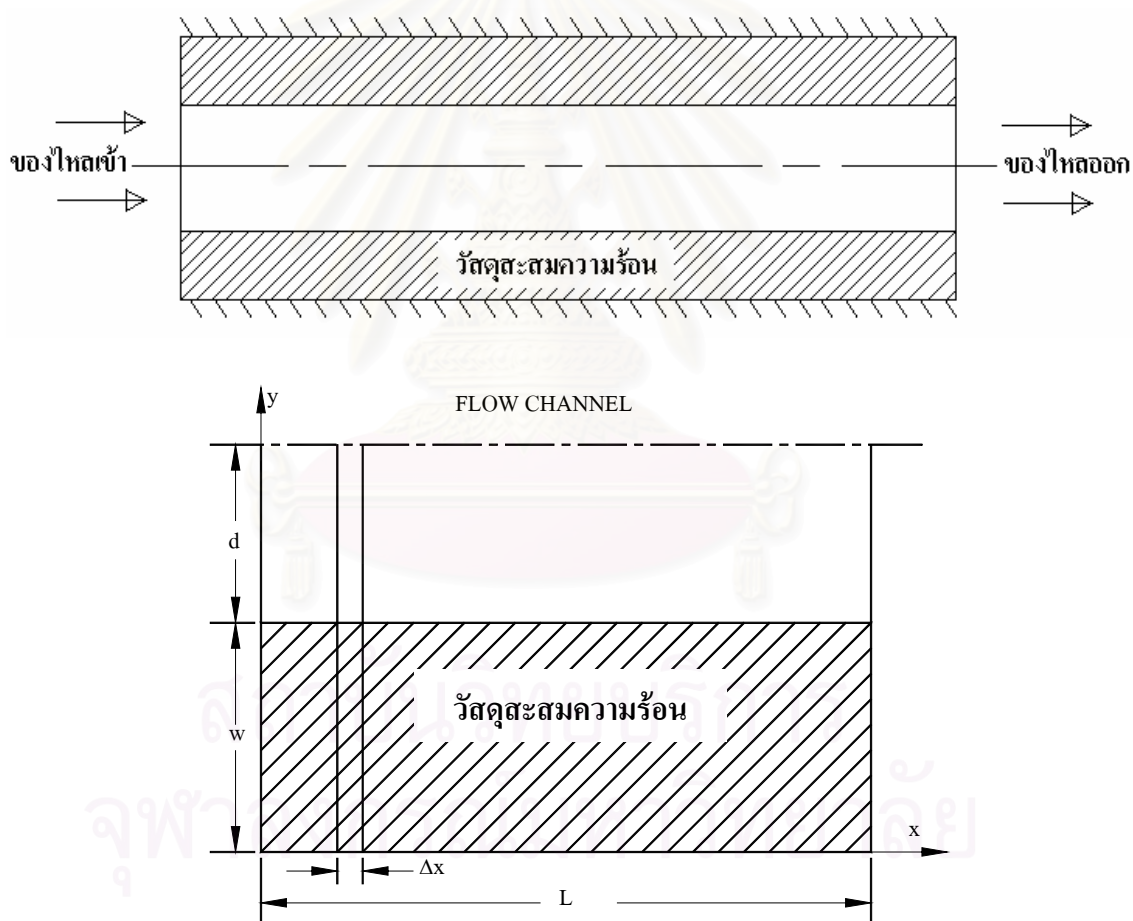
รูปแบบของ Regenerator ที่ศึกษาประกอบด้วยพื้นผิวสะสมความร้อนที่สร้างขึ้นจากอิฐทนไฟซึ่งก่อเรียงเป็นรูปปล่องไฟสี่เหลี่ยม อิฐทนไฟจะทำหน้าที่สะสมและถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหล 2 ชนิด ซึ่งของไหลที่เรานำมาใช้ในการศึกษาคือ ก๊าซเสียที่เกิดจากเผาไหม้และอากาศช่วยในการเผาไหม้ ซึ่งรูปร่างของแบบจำลองมีหน้าตัดดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ภาพหน้าตัดของช่องทางการไหล และ ภาพตัดของช่องทางการไหล 1 ช่อง

กรณีที่มีความต้านทานภายในเนื้อวัสดุกับค่าความต้านทานของอากาศมีขนาดเดียวกัน (ไม่ต่างกันมาก) หรือค่าความต้านทานภายในเนื้อวัสดุมีค่ามากกว่า Temperature gradients จะเกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุ การนำภายในเนื้อวัสดุจะเกิดขึ้นทั้งการนำ ในทิศทางกรไหลและตั้งฉากกับการไหล ซึ่งเราสามารถจำลองรูปแบบโดยใช้ Finite conductivity model ถ้า Biot number มีค่ามาก ของไหลที่เป็นตัวพาเป็นของเหลว หรือค่า Thermal conductivity ของวัสดุเก็บความร้อนมีค่าน้อย การทำนาย Transient response ของ Unit จะแม่นยำเมื่อใช้ Finite conductivity model เช่นกัน

Finite conductivity model ขึ้นกับ Geometric configuration ของ Unit ซึ่งเนื่องจาก ความสมมาตรของรูปร่าง ในที่นี้จะใช้ช่องกรไหลเพียงครึ่งเดียวในการคำนวณดังรูป 3.10 ความสมมาตรของแบบจำลองช่องทางการไหล 1 ช่อง



แบบจำลองช่องทางการไหลครึ่งช่องที่นำมาใช้ในการคำนวณ

รูปที่ 3.10 ภาพแบบจำลองช่องทางการไหล

### สมมติฐาน

1. คุณสมบัติของของไหลและวัสดุสะสมความร้อนมีค่าคงที่
2. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของของไหลมีค่าคงที่
3. มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของก๊าซที่ทางเข้า Regenerator แบบขั้นบันไดเทียบกับเวลา
4. ที่เวลาเริ่มต้นของช่วงการไหล การกระจายของอุณหภูมิในเนื้อวัสดุนำความร้อนมีความสม่ำเสมอ
5. ไม่คำนึงถึงความร้อนที่ถ่ายเทออกทางด้านข้างของ Heat storage unit
6. ของไหลมีความเร็วคงที่

เราจะใช้ สมการอนุรักษ์พลังงานสถานะไม่คงตัวหนึ่งมิติในทิศทางการไหลในการจำลองการไหล และสมการการนำความร้อนในสถานะไม่คงตัวในสองมิติในทิศทางการไหลและทิศตั้งฉากกับการไหล สำหรับวัสดุสะสมความร้อน

### 3.5 ทฤษฎีสำหรับ Regenerator

#### สำหรับของไหล

เราใช้สมดุลพลังงานของสมการอนุรักษ์พลังงาน ในการคำนวณ

$$\frac{hA\Delta x}{L}(T_w - T_f) + \dot{m}_f c_f T_f \Big|_x = \dot{m}_f c_f T_f \Big|_{x+\Delta x} + S_f \Delta x \rho_f c_f \frac{\partial T_f}{\partial \tau} \quad (3.21)$$

$h$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิว	(W/m <sup>2</sup> .K)
$A$	คือ พื้นที่ผิวที่เกิดการพาความร้อน	(m <sup>2</sup> )
$x$	คือ พิกัดบนแกน x	(m)
$L$	คือ ความยาว	(m)
$T_m$	คือ อุณหภูมิที่ผิว	(K)
$T_f$	คือ อุณหภูมิของของไหล	(K)
$\dot{m}_f$	คือ อัตราการไหลเชิงมวลของของไหล	(kg/s)
$c_f$	คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของของไหลที่ความดันคงที่	(kJ/kg.K)

$S_f$	คือ พื้นที่หน้าตัดของของไหล	( $m^2$ )
$\rho_f$	คือ ความหนาแน่นของของไหล	( $kg/m^3$ )
$\tau$	คือ เวลา	(s)

เทอมแรกทางซ้ายมือ คือ ความร้อนที่ถ่ายเทออกมาจากวัสดุสะสมความร้อน เทอมที่สอง คือ ปริมาณความร้อนที่ไหลเข้า Control volume เทอมแรกทางขวามือ คือ ปริมาณความร้อนที่ไหลออกจาก Control volume และ เทอมที่สอง คือ ปริมาณความร้อนที่สะสมใน Control volume ใช้ Taylor-series expansion โดยละเทอมตั้งแต่ผลต่างกำลังสองขึ้นไปออก

$$T_f|_{x+\Delta x} = T_f|_x + \frac{\partial T_f}{\partial x} \Delta x \quad (3.22)$$

สมการที่จะลดรูปเหลือ

$$\frac{hA}{L}(T_w - T_f) + \dot{m}_f c_f \frac{\partial T_f}{\partial x} = S_f \Delta x \rho_f c_f \frac{\partial T_f}{\partial \tau} \quad (3.23)$$

ในทางปฏิบัติเราจะละทิ้งเทอมของพลังงานสะสมในของไหลใน Control volume เพื่อให้ง่ายในการคำนวณ เราจะได้สมการอนุรักษ์พลังงานของการไหลดังนี้

$$\frac{\dot{m}_f c_f L}{hA} \frac{\partial T_f}{\partial x} = T_w - T_f \quad (3.24)$$

สำหรับวัสดุสะสมความร้อน

$$\frac{1}{\alpha_m} \frac{\partial T_m}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 T_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_m}{\partial y^2} \quad (3.25)$$

$T_m$	คือ อุณหภูมิของของแข็ง	(K)
$y$	คือ พิกัดบนแกน y	(m)

$\alpha_m$  คือ Thermal diffusivity ของของแข็ง  $(m^2/s)$

Initial และ Boundary conditions คือ

$$\tau = 0 \quad T_f = T_m = T_0 \quad (3.26a)$$

$$\tau > 0 \quad x = 0 \quad T_f = T_{fi} \quad \frac{\partial T_m}{\partial x} = 0 \quad 0 < y < w \quad (3.26b)$$

$$x = L \quad \frac{\partial T_m}{\partial x} = 0 \quad 0 < y < w \quad (3.26c)$$

$$y = 0 \quad \frac{\partial T_m}{\partial y} = 0 \quad 0 \leq x \leq L \quad (3.26d)$$

$$y = w \quad -k_m \frac{\partial T_m}{\partial y} = h(T_w - T_f) \quad 0 \leq x \leq L \quad (3.26e)$$

$T_{fi}$  คือ อุณหภูมิที่ทางเข้าของของไหล (K)

$T_0$  คือ อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม (K)

$k_m$  คือ ค่าการนำความร้อนของของแข็ง (W/m.K)

โดยมีตัวแปรไร้มิติ คือ

$$X = \frac{x}{L} \quad Y = \frac{y}{w} \quad V^+ = \frac{w}{L} \quad F_0 = \frac{\alpha T}{w^2} \quad G^+ = \frac{Pk_m}{m_f c_f} \quad (3.27)$$

$$Bi = \frac{hw}{k_m} \quad T = \frac{T - T_0}{T_{fi} - T_0}$$

$X$  คือ พิกัดไร้มิติตามแนวแกน x

$Y$  คือ พิกัดไร้มิติตามแนวแกน y

$V^+$  คือ ตัวแปรไร้มิติ

$F_0$  คือ ตัวแปรไร้มิติทางด้านเวลา

$G^+$  คือ ตัวแปรไร้มิติ

$P$  คือ เส้นรอบวงของช่องทางการไหล

$Bi$  คือ Biot number  
 $T$  คือ อุณหภูมิไร้มิติ

จะได้สมการไร้มิติของของไหล

$$\frac{\partial T_f}{\partial X} + \frac{G^+}{V^+} (Bi)(T_f - T_w) = 0 \quad (3.28)$$

วัสดุสะสมความร้อน

$$(V^+)^2 \frac{\partial^2 T_m}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T_m}{\partial Y^2} = \frac{\partial T_m}{\partial F_o} \quad (3.29)$$

Nondimensional initial และ Boundary conditions คือ

$$X = 0 \quad T_f = 1 \quad \frac{\partial T_m}{\partial X} = 0 \quad 0 < Y < 1 \quad (3.30a)$$

$$X = 1 \quad \frac{\partial T_m}{\partial X} = 0 \quad 0 < Y < 1 \quad (3.30b)$$

$$Y = 1 \quad \frac{\partial T_m}{\partial Y} = Bi(T_f - T_w) \quad 0 \leq X \leq 1 \quad (3.30c)$$

$$Y = 0 \quad \frac{\partial T_m}{\partial Y} = 0 \quad 0 \leq X \leq 1 \quad (3.30d)$$

$T_f$  คือ อุณหภูมิไร้มิติของของไหล

$T_w$  คือ อุณหภูมิไร้มิติของผนัง

$T_m$  คือ อุณหภูมิไร้มิติของของแข็ง

จากสมการที่ 3.28 และ 3.29 ทำการแก้สมการเพื่อหา ตัวแปรที่ขึ้นต่อกัน  $T_f$  และ  $T_m$  โดยใช้ Finite difference method

Nondimensional heat storage คือ  $Q^+$  ซึ่งเราสามารถหาได้จาก Temperature distribution ในเนื้อวัสดุ

$$Q^+ = \frac{Q}{Q_{\max}} \quad (3.31)$$

$Q$	คือ ผลรวมของปริมาณความร้อนสะสม	(W)
$Q_{\max}$	คือ ปริมาณความร้อนสะสมที่มากที่สุด	(W)
$Q^+$	คือ ปริมาณความร้อนสะสมไร้มิติ	

พลังงานในของไหล  $Q = m_f c_f (T_{fi} - T_0) \int_0^t (1.0 - T_{f0}) d\tau \quad (3.32)$

พลังงานในวัสดุสะสมความร้อน  $Q = S_m L \rho_m c_m (\bar{T}_m - T_0) \quad (3.33)$

พลังงานในวัสดุสะสมความร้อนสูงสุด  $Q_{\max} = S_m L \rho_m c_m (T_{fi} - T_0) \quad (3.34)$

$T_{fi}$	คือ อุณหภูมิไร้มิติของของไหลที่ทางออก
$\bar{T}_m$	คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของวัสดุสะสมความร้อน

### 3.6 Cyclic equilibrium

วัฏจักรการทำงาน 1 รอบของ Regenerator ประกอบด้วยหนึ่งคาบ (Heating/Cooling) ตามด้วยอีกหนึ่งคาบ (Cooling/Heating) ในแต่ละคาบเวลาจะมีค่า Reduced length ( $\Lambda$ ), Reduced period ( $\Pi$ ) และอุณหภูมิ Fluid เข้าที่คงที่ เป็นของตัวเองหลังจาก Regenerator ทำงานเป็นวัฏจักรไปเป็นเวลาหนึ่ง ผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการอินทิเกรตสมการเชิงอนุพันธ์ข้างต้น จะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิโครงอิฐทนไฟที่เป็นเงื่อนไขเริ่มต้นอีกต่อไปซึ่งเรียกสภาวะเช่นนี้ว่า “Cyclic equilibrium” นั่นคือผลลัพธ์ดังกล่าวจะเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง ไม่ว่าจะทำงานต่อไปเป็นเวลานานเท่าใด การเข้าสู่ Cyclic equilibrium หรือไม่ก็จะพิจารณาจากการคำนวณ Pseudo-Thermal ratio เมื่อสิ้นสุด Cooling period ดังนี้

$$\Phi(n) = \frac{T_{f0}'' - T_{fi}'}{T_{fi}' - T_{fi}''} \quad (3.35)$$

เมื่อ  $\Phi(n) - \Phi(n-1)$  หรืออีกแง่หนึ่งคือผลต่างอุณหภูมิ Fluid ขาออกของ Cooling period น้อยกว่าค่าที่ยอมรับได้ วัฏจักรที่  $n$  จะถือว่าเข้าสู่ Cyclic equilibrium และสามารถคำนวณค่า Thermal ratio  $\eta_{REG}$  ได้ทั้ง 2 Period จาก Willmott [5]

$$\eta'_{REG} = \frac{T'_{fi} - T'_{fo}}{T'_{fi} - T''_{fi}} = 1 - T'_{fo} \quad \text{สำหรับ Heating period} \quad (3.36)$$

$$\eta''_{REG} = \frac{T''_{fo} - T'_{fi}}{T'_{fi} - T''_{fi}} = T''_{fo} \quad \text{สำหรับ Cooling period} \quad (3.37)$$

โดยค่า Thermal ratio เหล่านี้จะเป็นตัววัดว่า Regenerator ทำงานมีประสิทธิภาพเช่นไร

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



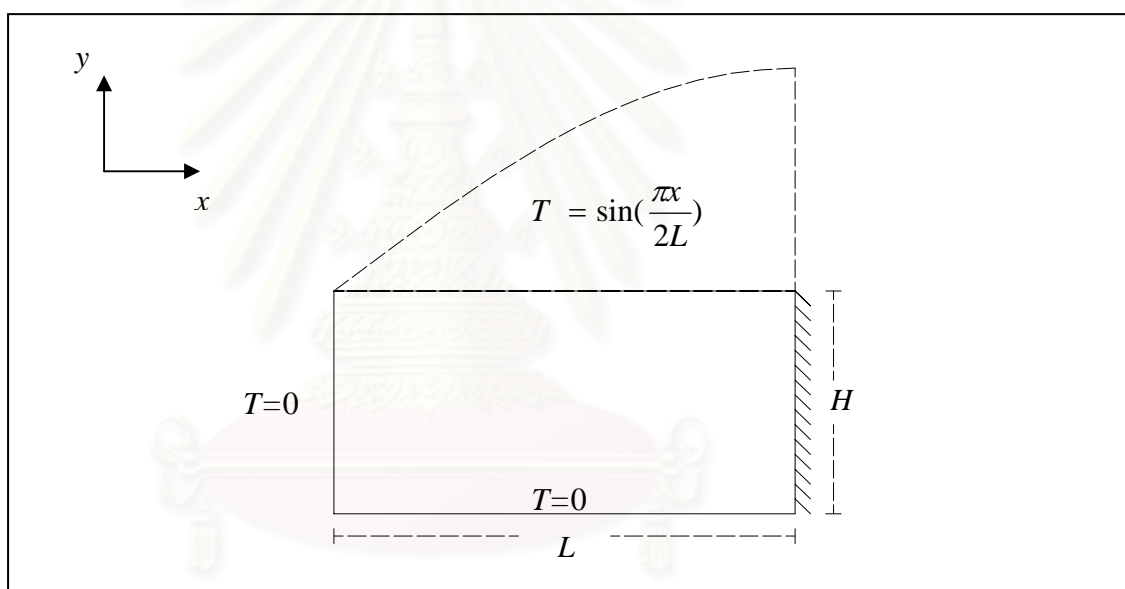
## บทที่ 4

### การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

#### 4.1 ปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะอยู่ตัว

##### 4.1.1 กรณีเงื่อนไขขอบแบบอุณหภูมิคงที่ และฟลักซ์ถ่ายเทความร้อนคงที่

กรณีนี้เป็นการแก้ปัญหานำความร้อนในแผ่นเรียบดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะอยู่ตัวกรณีเงื่อนไขขอบแบบอุณหภูมิคงที่ และฟลักซ์ถ่ายเทความร้อนคงที่

เงื่อนไขขอบของแผ่นเรียบนี้ คือ

1. ด้านซ้ายมีอุณหภูมิคงที่,  $T = 0$
2. ด้านขวาไม่มีฟลักซ์ถ่ายเทความร้อน,  $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$
3. ด้านล่างมีอุณหภูมิคงที่,  $T = 0$
4. ด้านบนมีอุณหภูมิคงที่เป็นฟังก์ชันไซน์ที่ขึ้นกับระยะทางในแนวแกน  $x$ ,  $T = \sin \frac{\pi x}{2L}$

### สมมติฐาน

1. การนำความร้อนเป็นสภาวะแบบอยู่ตัว
2. ไม่มีแหล่งกำเนิดความร้อนภายใน
3. เกิดการนำความร้อนในสองมิติ

รูปแบบของการกระจายอุณหภูมิในแผ่นเรียบ สามารถจำลองได้ด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ของกฎการอนุรักษ์พลังงานดังนี้

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (4.1)$$

### เงื่อนไขขอบ

$$x = 0 \quad T = 0 \quad (4.2a)$$

$$x = L \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (4.2b)$$

$$y = 0 \quad T = 0 \quad (4.2c)$$

$$y = H \quad T = \sin\left(\frac{\pi x}{2L}\right) \quad (4.2d)$$

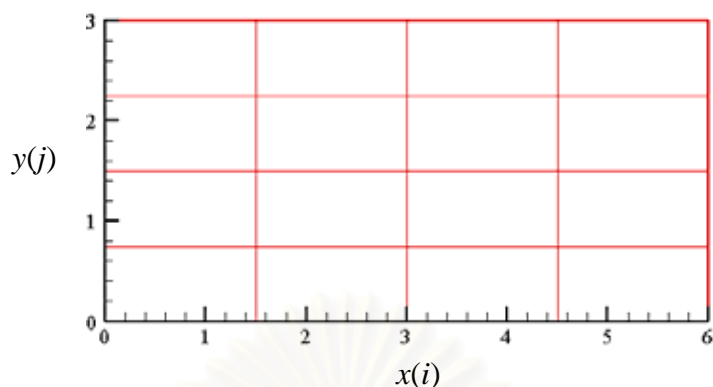
### ผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact Solution)

ผลเฉลยแม่นยำตรงของสมการนี้ คือ

$$T(x, y) = \frac{\sin\left(\frac{\pi x}{2L}\right) \sinh\left(\frac{\pi y}{2L}\right)}{\sinh\left(\frac{\pi H}{2L}\right)} \quad (4.3)$$

### โปรแกรมคอมพิวเตอร์

ในส่วนของโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะใช้ระเบียบวิธี Finite difference ในการแก้ปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติ โดย Grid ที่ใช้ในการคำนวณ แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 การแบ่ง Node ของ Domain ปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะอยู่ตัวกรณีมีเงื่อนไขขอบแบบอุณหภูมิคงที่ และฟลักซ์ถ่ายเทความร้อนคงที่

#### การตั้งค่าให้ Node

จาก Boundary condition เราสามารถตั้งค่าให้ Node ต่างๆ ดังนี้

1. ที่  $i = 1$  ,  $j = 1, 2, 3, \dots$  ตั้งค่าให้  $T_{i,j} = 0$
2. ที่  $j = 1$  ,  $i = 1, 2, 3, \dots$  ตั้งค่าให้  $T_{i,j} = 0$
3. ที่  $j = NJMAX$  ,  $i = 1, 2, 3, \dots$

$$\text{ตั้งค่าให้ } T_{i,NJMAX} = \sin\left(\frac{\pi x}{2L}\right)$$

4. ที่  $i = NIMAX$  สามารถตั้งค่าดังนี้

จากสมการ (4.1) แทนด้วย Second-order central differencing scheme จะได้

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} &= 0 \\ \frac{T_{i+1,j} + T_{i-1,j} - 2T_{i,j}}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{i,j+1} + T_{i,j-1} - 2T_{i,j}}{(\Delta y)^2} &= 0 \\ \frac{T_{i+1,j} + T_{i-1,j}}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{i,j+1} + T_{i,j-1}}{(\Delta y)^2} &= \left( \frac{2}{(\Delta x)^2} + \frac{2}{(\Delta y)^2} \right) T_{i,j} \\ \therefore T_{i,j} &= \left( \frac{T_{i+1,j} + T_{i-1,j}}{(\Delta x)^2} \right) + \left( \frac{T_{i,j+1} + T_{i,j-1}}{(\Delta y)^2} \right) \left( \frac{(\Delta x)^2 (\Delta y)^2}{2(\Delta x)^2 + 2(\Delta y)^2} \right) \quad (4.4) \end{aligned}$$

ที่ Node  $i = NIMAX$

$$T_{NIMAX,j} = \left( \frac{T_{NIMAX+1,J} + T_{NIMAX-1,J}}{(\Delta x)^2} \right) + \left( \frac{T_{NIMAX,J+1} + T_{NIMAX,J-1}}{(\Delta y)^2} \right) \left( \frac{(\Delta x)^2 (\Delta y)^2}{2(\Delta x)^2 + 2(\Delta y)^2} \right) \quad (4.5)$$

จะเห็นได้ว่า Node  $T_{NIMAX,j}$  เป็น Node ที่อยู่นอก Domain

ซึ่งจะใช้คุณสมบัติความเป็น Adiabatic  $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$  ในการประมาณค่าที่ Node นี้

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{T_{NIMAX-1,j} - T_{NIMAX+1,j}}{2x}$$

$$T_{NIMAX+1,j} = T_{NIMAX-1,j} + 2x \frac{\partial T}{\partial x} \quad (4.6)$$

เนื่องจาก  $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$

$$\therefore T_{NIMAX+1,j} = T_{NIMAX-1,j} \quad (4.7)$$

แทนสมการ (4.6) ลงในสมการ (4.4) จะได้

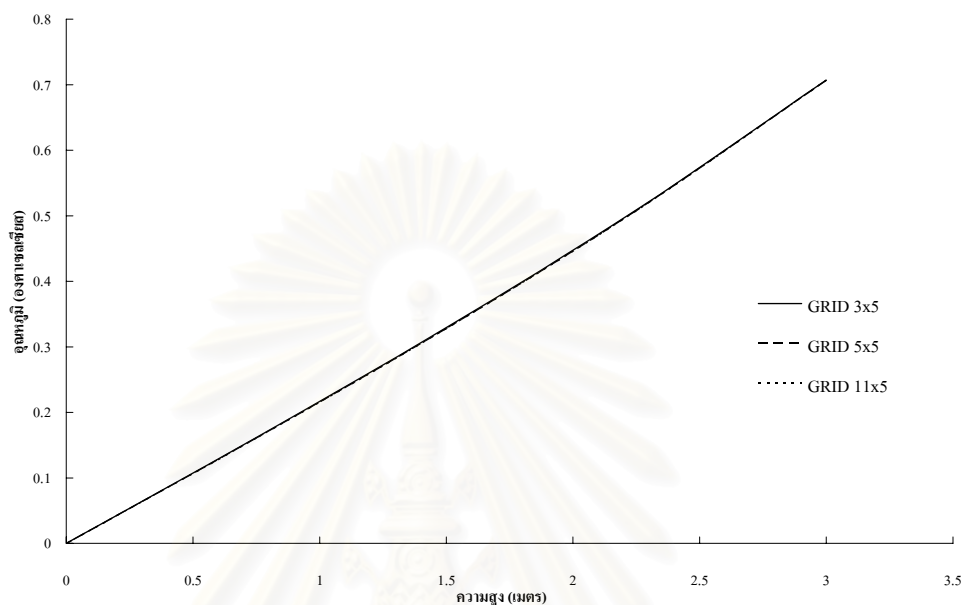
$$T_{NIMAX,j} = \left( \frac{2T_{i-1,j} + T_{i,j+1} + T_{i,j-1}}{(\Delta x)^2} \right) \left( \frac{(\Delta x)^2 (\Delta y)^2}{2((\Delta x)^2 + (\Delta y)^2)} \right) \quad (4.8)$$

สำหรับ Node ภายใน (Node ที่ไม่ใช่ขอบ) สามารถใช้สมการที่ (4.4) ในการแทนค่าอุณหภูมิ

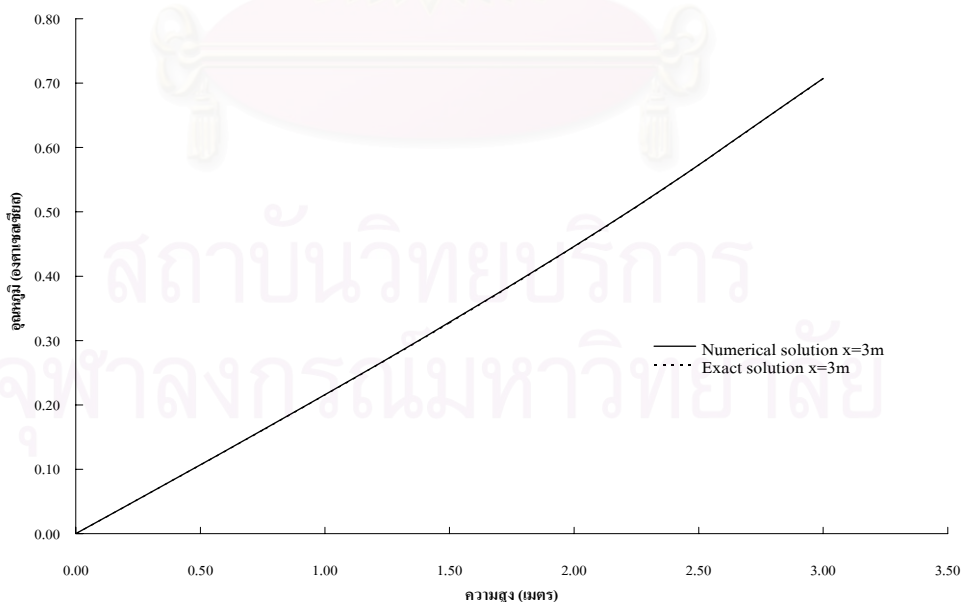
### การเปรียบเทียบผลจากโปรแกรม

แบบจำลองที่นำมาคำนวณมีความยาว 6 เมตร สูง 3 เมตร และมีเงื่อนไขขอบตามรูปที่ 4.1 ซึ่งจากการคำนวณหา Grid independent solution ที่ความละเอียดของ Grid ต่างๆ เราเลือกใช้ Grid ที่มีความละเอียด 3x5, 5x5 และ 11x5 ซึ่งจากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่า Grid ขนาด 5x5

ให้ผลลัพธ์ที่มีความเป็น Grid independence แล้ว ดังนั้นจึงเลือกใช้ Grid ขนาดนี้ ในการเปรียบเทียบผลที่ได้จากระบบวิธีเชิงตัวเลขกับผลเฉลยแม่นยำตรง



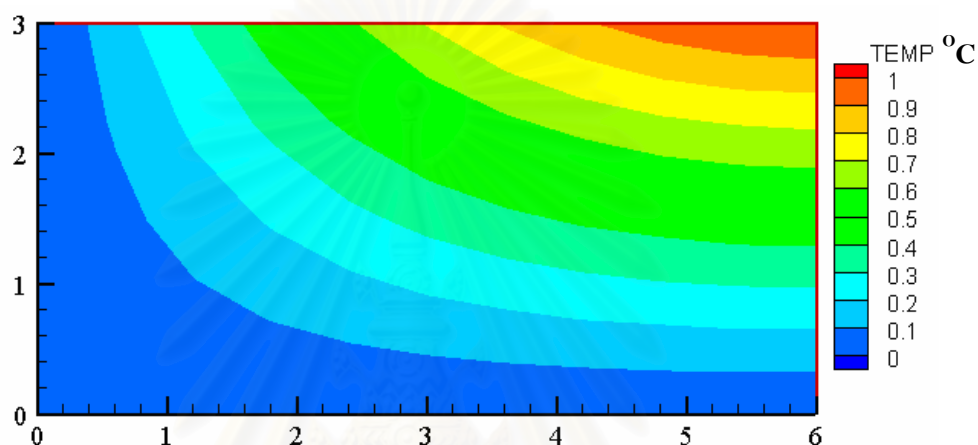
**รูปที่ 4.3** การทดสอบความเป็น Grid independent ของปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะอยู่ตัว กรณีมีเงื่อนไขขอบแบบอุณหภูมิคงที่ และฟังก์ชันถ่ายเทความร้อนคงที่ ที่ระนาบ  $x=3$  เมตร



**รูปที่ 4.4** ผลเปรียบเทียบระหว่าง Numerical solution และ Exact solution ของปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะอยู่ตัวกรณีมีเงื่อนไขขอบแบบอุณหภูมิคงที่ และฟังก์ชันถ่ายเทความร้อนคงที่ ที่ระนาบ  $x=3$  เมตร Grid ขนาด 5x5

สำหรับปัญหานี้เราจะเลือกกระนาบ  $x=3$  เมตร โดยนำค่าของอุณหภูมิที่ Node ต่างๆในแนวแกน  $y$  มาเปรียบเทียบกัน

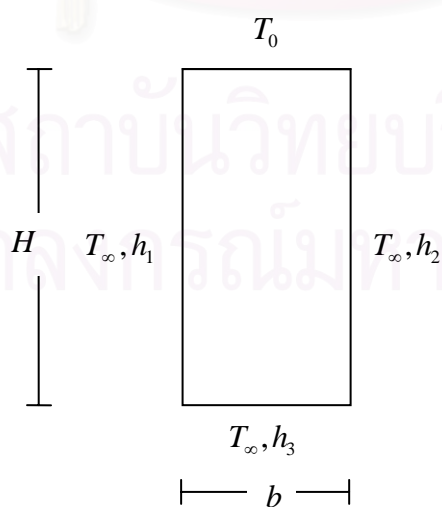
จากรูปที่ 4.4 แกนในแนวนอนแทนตำแหน่งต่างๆ ของ Domain ในแนวแกน  $y$  ตั้งแต่  $y=0$  ถึง  $y=H$  ส่วนแกนในแนวตั้งแทนอุณหภูมิตั้งแต่  $T=0$  ถึง  $T=T_{\max}$  ซึ่งจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ของผลเฉลยแม่นยำตรงและของแบบจำลองมีความสอดคล้องกัน โดยลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิใน Domain ที่ Grid ขนาด  $5 \times 5$  ถูกแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 การกระจายอุณหภูมิ ของปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะอยู่ตัวกรณีเงื่อนไขขอบแบบอุณหภูมิคงที่ และพล็อตถ่ายเทความร้อนคงที่ ที่ Grid ขนาด  $5 \times 5$

#### 4.1.2 กรณีเงื่อนไขขอบแบบอุณหภูมิคงที่ และมีการพาความร้อนที่ผิว

กรณีนี้เป็นการแก้ปัญหการนำความร้อนในแผ่นเรียบดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ปัญหการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะอยู่ตัว กรณีเงื่อนไขขอบแบบอุณหภูมิคงที่ และมีการพาที่ผิว

มีเงื่อนไขขอบสำหรับกรณีนี้ คือ

1. ด้านบนมีอุณหภูมิคงที่,  $T = T_0$
2. ด้านซ้าย ด้านขวาและด้านล่าง มีการพาความร้อนที่ผิวโดยมีอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมคงที่,  
 $T = T_\infty$

สมมติฐาน

1. เงื่อนไขสภาวะอยู่ตัว
2. ไม่มีแหล่งกำเนิดความร้อนภายใน
3. เกิดการนำความร้อนในสองมิติ
4. ไม่คำนึงถึงผลของการแผ่รังสีความร้อนระหว่างสิ่งแวดล้อมกับผนัง

รูปแบบของการกระจายอุณหภูมิในแผ่นเรียบ สามารถจำลองได้ด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ของกฎการอนุรักษ์พลังงานดังนี้

$$\frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} = 0 \quad (4.9)$$

โดยที่  $\Theta = T - T_\infty$

เงื่อนไขขอบ

$$x = 0 \quad k \frac{\partial \Theta}{\partial x} = h\Theta \quad (4.10a)$$

$$x = b \quad -k \frac{\partial \Theta}{\partial x} = h\Theta \quad (4.10b)$$

$$y = 0 \quad k \frac{\partial \Theta}{\partial y} = h\Theta \quad (4.10c)$$

$$y = H \quad \Theta = T_0 - T_\infty = \Theta_0 \quad (4.10d)$$

ผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact Solution)

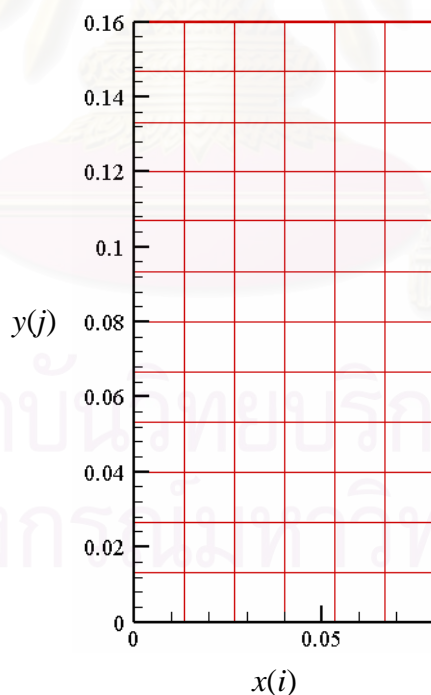
ผลเฉลยแม่นยำตรงสำหรับการกระจายอุณหภูมิในกรณีนี้ คือ

$$\begin{aligned}
T &= T_\infty + 2(T_0 - T_\infty) \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{h}{\alpha_n k} [1 - \cos(\alpha_n b)] + \sin(\alpha_n b) \right\} \\
&\left[ \frac{h}{\alpha_n k} \sin(\alpha_n x) + \cos(\alpha_n x) \right] \left[ \frac{h}{\alpha_n k} \sinh(\alpha_n y) + \cosh(\alpha_n y) \right] / \\
&\left\{ \alpha_n b \left[ 1 + \frac{h^2}{\alpha_n^2 k^2} + \left( 1 - \frac{h^2}{\alpha_n^2 k^2} \right) \cdot \frac{\sin(2\alpha_n b)}{2\alpha_n b} + \frac{2h}{\alpha_n k} \frac{\sin^2(\alpha_n b)}{\alpha_n b} \right] \right\} \\
&\left[ \frac{h}{\alpha_n k} \sinh(\alpha_n H) + \cosh(\alpha_n H) \right] \quad (4.11)
\end{aligned}$$

โดยค่า  $\alpha_n$  สามารถหาได้จากสมการ Eigenvalue

$$\cot(\alpha_n b) = \frac{\alpha_n b}{2Bi} - \frac{Bi}{2(\alpha_n b)}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (4.12)$$

เมื่อ  $Bi$  คือ Biot number,  $Bi = \frac{hb}{k}$



รูปที่ 4.7 Node ของ Domain ปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะอยู่ตัว กรณีมีเงื่อนไขขอบแบบอุณหภูมิคงที่ และมีการพาความร้อนที่ผิว



## โปรแกรมคอมพิวเตอร์

ในส่วนของโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะใช้ระเบียบวิธี Finite difference ในการช่วยแก้ปัญหา โดย Grid ที่ใช้ในการคำนวณ แสดงดังรูปที่ 4.7

### การตั้งค่าอุณหภูมิที่ Node

จาก Boundary conditions เราสามารถตั้งค่าอุณหภูมิที่ Node ต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. ที่  $j = NJMAX, i = 1, 2, 3, \dots$  ตั้งค่าให้  $T_{i, NJMAX} = 0$
2. ที่  $i = 1, j = 1, 2, 3, \dots$

จากสมการ (4.10a) แทนด้วย  $\Theta = T - T_\infty$

$$\begin{aligned}
 k \frac{\partial T}{\partial x} &= h(T - T_\infty) \\
 k \frac{(T_{2,j} - T_{1,j})}{\Delta x} &= h(T_{1,j} - T_\infty) \\
 T_{2,j} - T_{1,j} &= \frac{h\Delta x}{k} T_{1,j} - \frac{h\Delta x}{k} T_\infty \\
 T_{1,j} + \frac{h\Delta x}{k} T_{1,j} &= T_{2,j} + \frac{h\Delta x}{k} T_\infty \\
 T_{1,j} &= \frac{(T_{2,j} + \frac{h\Delta x}{k} T_\infty)}{(1 + \frac{h\Delta x}{k})} \tag{4.13}
 \end{aligned}$$

3. ที่  $j = 1, i = 1, 2, 3, \dots$

จากสมการ (4.10c) แทนด้วย  $\Theta = T - T_\infty$

$$\begin{aligned}
 k \frac{\partial T}{\partial y} &= h(T - T_\infty) \\
 k \frac{(T_{i,2} - T_{i,1})}{\Delta y} &= h(T_{i,1} - T_\infty) \\
 T_{i,2} - T_{i,1} &= \frac{h\Delta y}{k} T_{i,1} - \frac{h\Delta y}{k} T_\infty \\
 T_{i,1} + \frac{h\Delta y}{k} T_{i,1} &= T_{i,2} + \frac{h\Delta y}{k} T_\infty
 \end{aligned}$$

$$T_{i,1} = \frac{(T_{i,2} + \frac{h\Delta x}{k}T_\infty)}{(1 + \frac{h\Delta x}{k})} \quad (4.14)$$

ตั้งค่าให้  $T_{i,NJMAX} = \sin\left(\frac{\pi x}{2L}\right)$

4. ที่  $i = 1, j = 1, 2, 3, \dots$

จากสมการ (4.10b) แทนด้วย  $\Theta = T - T_\infty$

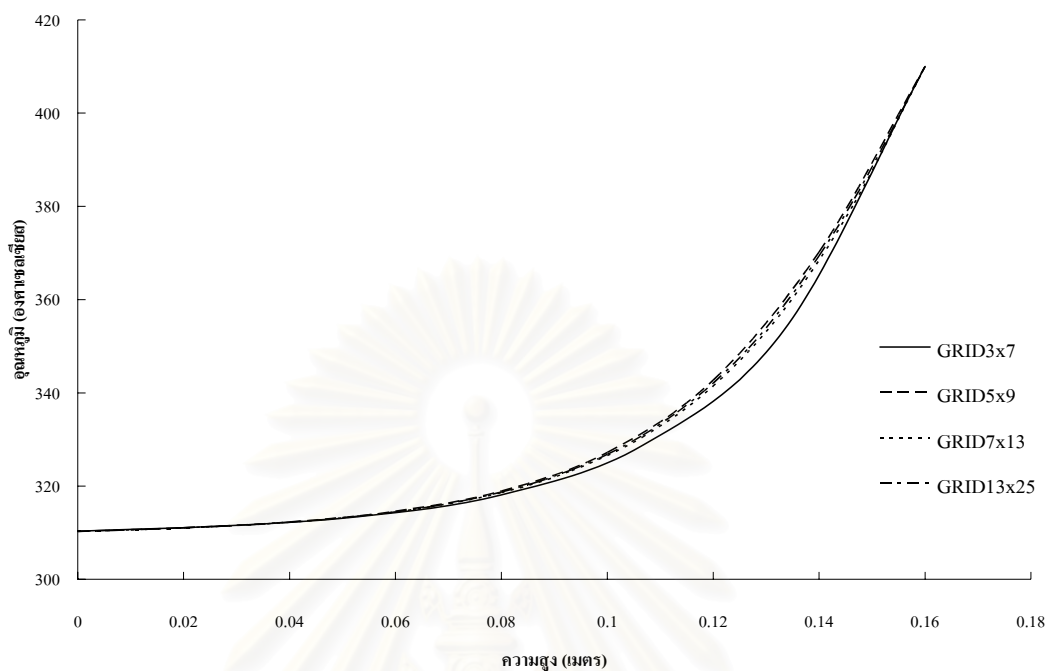
$$\begin{aligned} -k \frac{\partial T}{\partial x} &= h(T - T_\infty) \\ -k \frac{(T_{NXMAX,j} - T_{NXMAX-1,j})}{\Delta x} &= h(T_{NXMAX,j} - T_\infty) \\ T_{NXMAX,j} - T_{NXMAX-1,j} &= \frac{h\Delta x}{k} T_{NXMAX-1,j} - \frac{h\Delta x}{k} T_\infty \\ T_{NXMAX-1,j} + \frac{h\Delta x}{k} T_{NXMAX-1,j} &= T_{NXMAX,j} + \frac{h\Delta x}{k} T_\infty \\ T_{NXMAX-1,j} &= \frac{(T_{NXMAX,j} + \frac{h\Delta x}{k} T_\infty)}{(1 + \frac{h\Delta x}{k})} \end{aligned} \quad (4.15)$$

สำหรับ Node ภายใน (Node ที่ไม่ใช่ขอบ) สามารถใช้สมการที่(4.4) ในการแทนค่าอุณหภูมิ

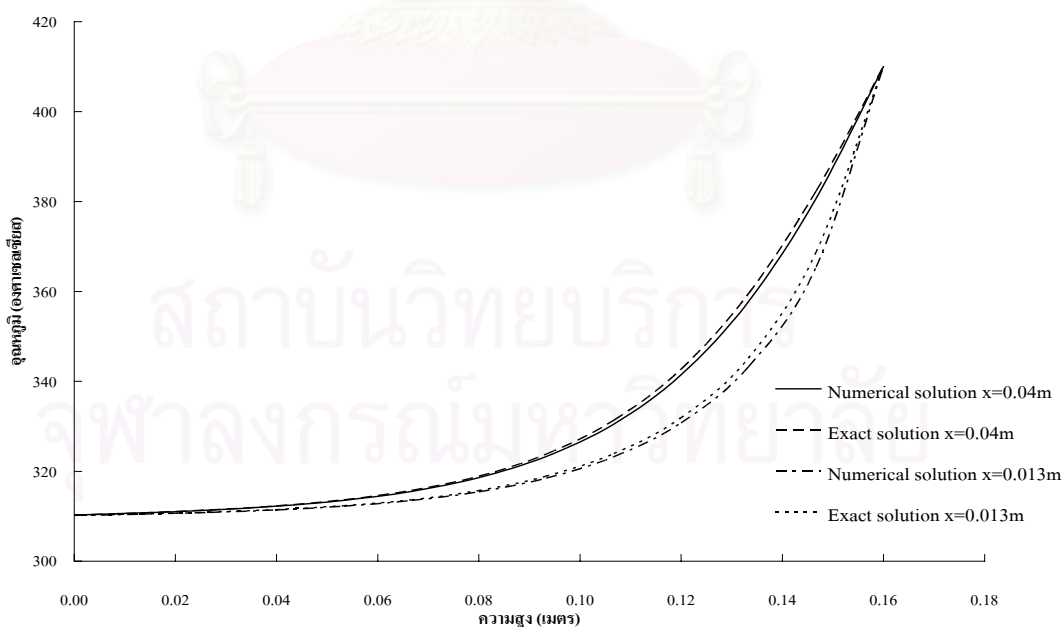
#### การเปรียบเทียบผลจากโปรแกรม

แบบจำลองที่นำมาคำนวณมีเงื่อนไขขอบตามรูปที่ 4.6  $T_\infty = 310^\circ\text{C}$ ,  $T_0 = 410^\circ\text{C}$  ความกว้าง 0.08 เมตร และสูง 0.16 เมตร ซึ่งจากการคำนวณหา Grid independent solution ที่ความละเอียดของ Grid ต่างๆ ได้ผลดังรูปที่ 4.8

ในการทดสอบความเป็น Grid independent ของผลลัพธ์ เราเลือกใช้ Grid ที่มีความละเอียด  $3 \times 7$ ,  $5 \times 9$ ,  $7 \times 13$  และ  $13 \times 25$  ซึ่งจากรูปที่ 4.8 เห็นได้ว่า Grid ขนาด  $7 \times 13$  ก็มีความละเอียดเพียงพอในการหาผลลัพธ์ ดังนั้นจึงเลือกใช้ Grid ขนาดนี้ ในการเปรียบเทียบผลที่ได้จากระบบวิธีเชิงตัวเลขกับผลเฉลยแม่นยำตรง



**รูปที่ 4.8** การทดสอบความเป็นGrid independent ของปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะอยู่ตัว กรณีมีเงื่อนไขขอบแบบอุณหภูมิคงที่ และมีการพาความร้อนที่ผิว ที่ระนาบ  $x=0.013$  เมตร และ  $x=0.04$  เมตร

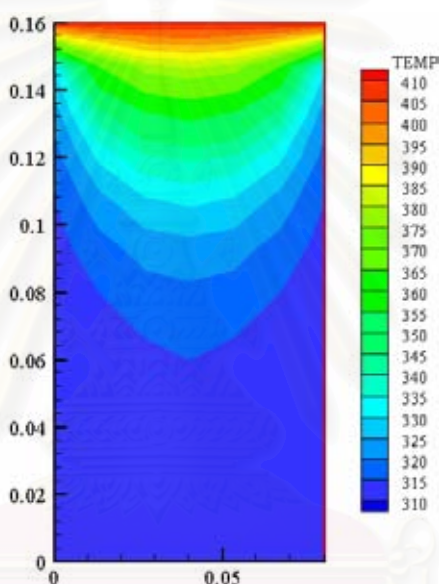


**รูปที่ 4.9** ผลเปรียบเทียบระหว่าง Numerical solution และ Exact solution ของปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะอยู่ตัว กรณีเงื่อนไขขอบแบบอุณหภูมิคงที่ และมีการพาความร้อนที่ผิว ระนาบ  $x=0.013$  เมตร และ  $x=0.04$  เมตร Grid ขนาด 7x13

สำหรับปัญหานี้เราจะเลือกระนาบตามแนวตั้งที่ตำแหน่ง  $x=0.013$  เมตร และ  $x=0.04$  เมตรในการนำค่าของอุณหภูมิที่ Node ต่างๆ ในแนวแกน  $y$  มาเปรียบเทียบกัน

จากรูปที่ 4.9 แกนในแนวนอนแทนตำแหน่งต่างๆ ของ Domain ในแนวแกน  $y$  ตั้งแต่  $y=0$  ถึง  $y=H$  ส่วนแกนในแนวตั้งแทนอุณหภูมิตั้งแต่  $T=0$  ถึง  $T=T_{\max}$  ซึ่งจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ของผลเฉลยแม่นยำตรงและของแบบจำลองมีความสอดคล้องกัน

ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิใน Domain ที่ Grid ขนาด  $7 \times 13$  สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 การกระจายอุณหภูมิ ของปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะอยู่ตัว กรณีเงื่อนไขขอบแบบอุณหภูมิคงที่ และมีการพาความร้อนที่ผิว ที่ Grid ขนาด  $7 \times 13$

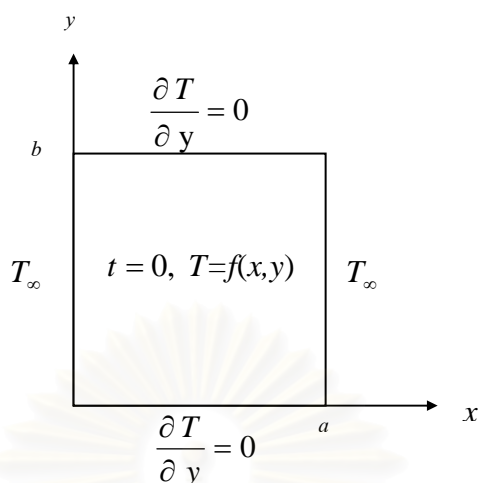
## 4.2 ปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่อยู่ตัว

### 4.2.1 กรณีเงื่อนไขขอบแบบฟลักซ์ถ่ายเทความร้อนคงที่ และมีการพาความร้อนที่ผิว

กรณีนี้เป็นการแก้ปัญหานำความร้อนในแผ่นเรียบดังรูปที่ 4.11

เงื่อนไขขอบและเงื่อนไขเริ่มต้นคือ

1. ด้านบน และด้านล่าง ไม่มีฟลักซ์ถ่ายเทความร้อน,  $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$
2. ด้านซ้าย และด้านขวา มีการพาความร้อนที่ผิว โดยมีอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมคงที่,  $T = T_{\infty}$
3. ที่เวลาเริ่มต้น,  $t = 0$ ,  $T = f(x, y)$



**รูปที่ 4.11** ปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่อยู่ตัว กรณีเงื่อนไขขอบแบบ ฟลักซ์ถ่ายเทความร้อนคงที่ และมีการพาความร้อนที่ผิว

#### สมมติฐาน

1. ไม่มีแหล่งกำเนิดความร้อนภายใน
2. เกิดการนำความร้อนใน 1 มิติ ในทิศทางขนานกับแกน  $x$
3. ไม่คำนึงถึงผลของการแผ่รังสีความร้อนระหว่างสิ่งแวดล้อมกับผนัง

รูปแบบของการกระจายอุณหภูมิในแผ่นเรียบ สามารถจำลองได้ด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ของกฎการอนุรักษ์พลังงานดังนี้

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.16)$$

โดยมีเงื่อนไขขอบ และเงื่อนไขเริ่มต้นคือ

$$x = 0 \quad T = T_\infty \quad (4.17a)$$

$$x = a \quad T = T_\infty \quad (4.17b)$$

$$y = 0 \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (4.17c)$$

$$y = b \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (4.17d)$$

$$t = 0 \quad T = f(x, y) \quad (4.17e)$$

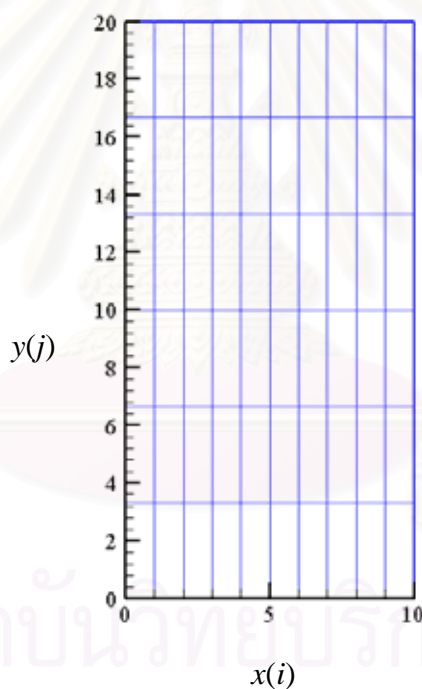
### ผลเฉลยแม่นยำ (Exact Solution)

ผลเฉลยแม่นยำของปัญหานี้ คือ

$$T = T_\infty + \frac{4(T_0 - T_\infty)}{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\sin\left[\frac{(2k+1)\pi}{a}x\right]}{2k+1} \exp\left[-\alpha\pi^2 \frac{(2k+1)^2 t}{a^2}\right] \quad (4.18)$$

### โปรแกรมคอมพิวเตอร์

ในส่วนของโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะใช้ระเบียบ Finite difference ในการแก้ปัญหา โดยจากรูปที่ 4.12 เราสามารถแสดง Node Domain ได้ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 การแบ่ง Node ของ Domain ในปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่อยู่ตัว กรณีเงื่อนไขขอบแบบฟลักซ์ถ่ายเทความร้อนคงที่ และมีการพาความร้อนที่ผิว

### การตั้งค่าให้ Node

สำหรับปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่อยู่ตัว มีวิธีที่ใช้ในการแก้ปัญหาอยู่หลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีก็มีข้อดีต่างกันออกไป ในหัวข้อนี้เราได้ทดลองใช้ทั้งวิธีแบบชัดเจนและแบบปริยายในการแก้ปัญหา

### วิธีแบบชัดแจ้ง (Explicit method)

วิธีนี้ง่ายต่อการทำความเข้าใจและประดิษฐ์โปรแกรม ซึ่งในการใช้วิธีนี้สำหรับระเบียบวิธี Finite difference เราสามารถกระทำได้ดังนี้

1. ประมาณค่า  $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$  และ  $\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$  ด้วย Second order central difference ณ เวลา  $n$
2. ประมาณค่า  $\frac{\partial T}{\partial t}$  ด้วย Time forward differencing scheme

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$

ดังนั้นจะได้สมการดิฟเฟอเรนเชียลของสมการควบคุมดังนี้

$$\frac{T_{i+1}^n + T_{i-1,j}^n - 2T_{i,j}^n}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{i,j+1}^n + T_{i,j-1}^n - 2T_{i,j}^n}{(\Delta y)^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n}{\Delta t}$$

$$T_{i,j}^{n+1} = T_{i,j}^n + \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^2} (T_{i+1}^n + T_{i-1,j}^n - 2T_{i,j}^n) + \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta y)^2} (T_{i,j+1}^n + T_{i,j-1}^n - 2T_{i,j}^n) \quad (4.19)$$

จากสมการจะเห็นได้ว่า  $T_{i,j}^{n+1}$  คืออุณหภูมิที่จุดต่อ  $i,j$  ที่เวลา  $n+1$  ซึ่งสามารถหาค่าได้โดยตรงจาก อุณหภูมิที่จุดต่อต่างๆที่เวลา  $n$  ซึ่งทราบค่ามาแล้วจากการคำนวณครั้งที่  $n$  วิธีนี้จึงเรียกว่าวิธีแบบชัดแจ้ง

สำหรับวิธีนี้การที่ผลลัพธ์จากการคำนวณจะลู่เข้าได้นั้น จะต้องมีความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta t$ ,  $\Delta x$  และ  $\Delta y$  ดังนี้

$$\frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^2} = \frac{k \Delta t}{\rho c (\Delta x)^2} < \frac{1}{2} \quad (4.20)$$

$$\text{และ} \quad \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta y)^2} = \frac{k \Delta t}{\rho c (\Delta y)^2} < \frac{1}{2} \quad (4.21)$$

นั่นคือ ค่า Time step ( $\Delta t$ ) จะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขต่อไปนี้

$$\Delta t < \frac{\rho c (\Delta x)^2}{2k} \quad (4.22)$$

$$\text{และ } \Delta t < \frac{\rho c (\Delta y)^2}{2k} \quad (4.23)$$

จากสมการที่ (4.22) และ (4.23) ทำให้ทราบข้อจำกัดของเวลา โดยเวลาที่ใช้ในการคำนวณต้องมีค่าน้อยกว่าค่าวิกฤต (Critical time step) ในบางกรณีเราต้องการความเที่ยงตรงที่สูงขึ้น ทำให้ต้องใช้จุดต่อที่มากขึ้น ซึ่งส่งผลให้ความกว้างช่วง  $\Delta x$  หรือ  $\Delta y$  ที่เล็กลง ทำให้โปรแกรมต้องใช้เวลาในการคำนวณมากขึ้น (ขนาดของ  $\Delta t$  เล็กลงในอัตราที่เป็นรากที่สองของ  $\Delta x$  หรือ  $\Delta y$  ที่เล็กลง)

จาก **Boundary conditions** เราสามารถตั้งค่าให้อุณหภูมิที่ Node ต่างๆได้ ดังนี้

1. ที่  $i = 1$  ,  $j = 1, 2, 3, \dots$  ตั้งค่าให้  $T = T_\infty$
2. ที่  $i = NIMAX$  ,  $j = 1, 2, 3, \dots$  ตั้งค่าให้  $T = T_\infty$
3. ที่  $j = 1$  ,  $i = 1, 2, 3, \dots$

จะเห็นได้ว่า Node  $T_{i,j-1}$  เป็น Node ที่อยู่นอก Domain ซึ่งจะใช้คุณสมบัติความเป็น Adiabatic  $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$  ในการประมาณค่าที่ Node โดยจะใช้ Piecewise linear profile ในการประมาณค่า

$$\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{T_{i,j+1}^n - T_{i,j-1}^n}{2\Delta y}$$

$$T_{i,j-1}^n = -2\Delta y \frac{\partial T}{\partial y} + T_{i,j+1}^n \quad (4.24)$$

แทนสมการ (4.24) ลงใน สมการ (4.19) จะได้

$$T_{i,j}^{n+1} = T_{i,j}^n + \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^2} (T_{i+1,j}^n + T_{i-1,j}^n - 2T_{i,j}^n) + \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta y)^2} (2T_{i,j+1}^n - 2\Delta y \frac{\partial T}{\partial y} - 2T_{i,j}^n) \quad (4.25)$$

กรณีนี้  $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$  ดังนั้นจะได้



$$T_{i,j}^{n+1} = T_{i,j}^n + \frac{\alpha\Delta t}{(\Delta x)^2}(T_{i+1}^n + T_{i-1,j}^n - 2T_{i,j}^n) + \frac{\alpha\Delta t}{(\Delta y)^2}(2T_{i,j+1}^n - 2T_{i,j}^n) \quad (4.26)$$

$$4. \text{ ที่ } j = NJMAX, \quad i = 1, 2, 3, \dots$$

จะเห็นได้ว่า Node  $T_{i,j-1}$  เป็น Node ที่อยู่นอก Domain ซึ่งจะใช้คุณสมบัติความเป็น Adiabatic  $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$  ในการประมาณค่าที่ Node โดยจะใช้ Piecewise linear profile ในการประมาณค่า

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial y} &= \frac{T_{i,j+1}^n - T_{i,j-1}^n}{2\Delta y} \\ T_{i,j+1}^n &= 2\Delta y \frac{\partial T}{\partial y} + T_{i,j-1}^n \end{aligned} \quad (4.27)$$

แทนสมการ (4.27) ลงใน สมการ (4.19) ได้

$$T_{i,j}^{n+1} = T_{i,j}^n + \frac{\alpha\Delta t}{(\Delta x)^2}(T_{i+1}^n + T_{i-1,j}^n - 2T_{i,j}^n) + \frac{\alpha\Delta t}{(\Delta y)^2}(2\Delta y \frac{\partial T}{\partial y} + 2T_{i,j-1}^n - 2T_{i,j}^n) \quad (4.28)$$

เมื่อ  $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$  จะได้

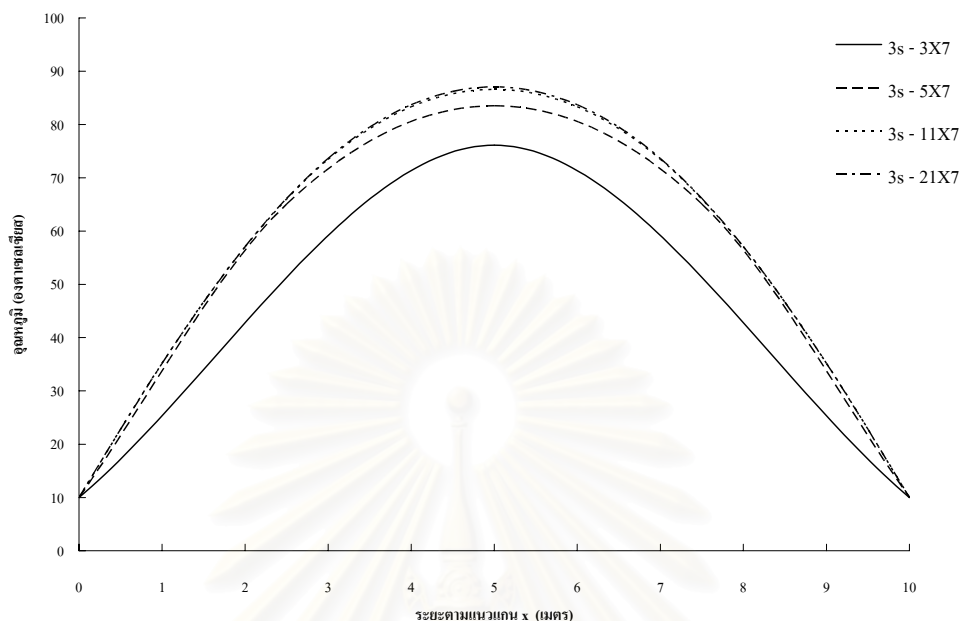
$$T_{i,j}^{n+1} = T_{i,j}^n + \frac{\alpha\Delta t}{(\Delta x)^2}(T_{i+1}^n + T_{i-1,j}^n - 2T_{i,j}^n) + \frac{\alpha\Delta t}{(\Delta y)^2}(2T_{i,j-1}^n - 2T_{i,j}^n) \quad (4.29)$$

5. สำหรับ Node ภายใน สามารถใช้สมการที่(4.19) ในการแทนค่าอุณหภูมิ

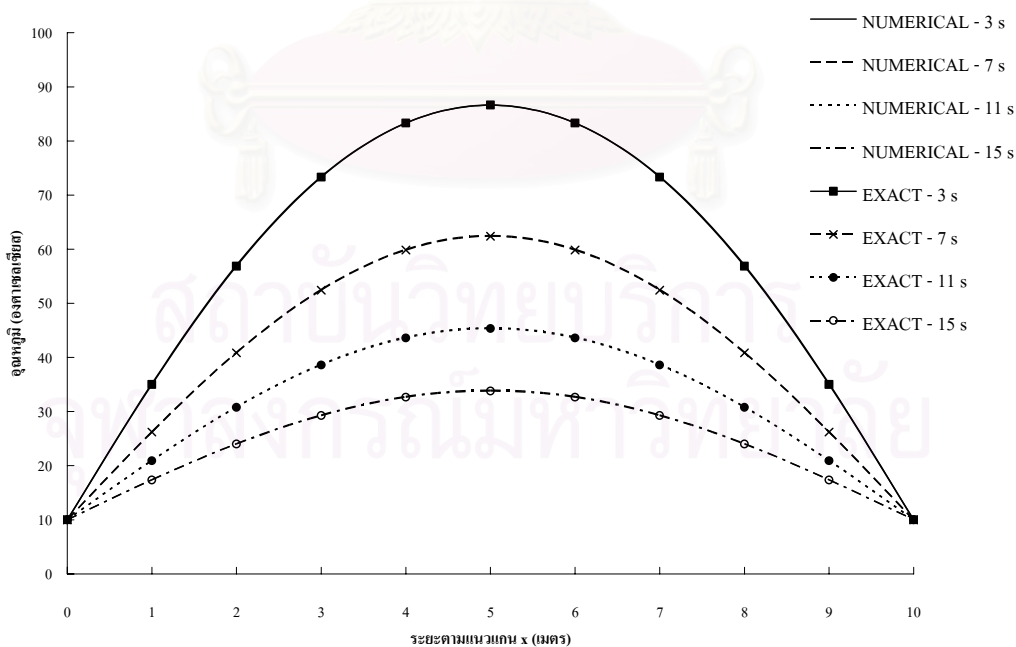
6. สำหรับพจน์ของเวลากำหนดให้  $f(x, y) = T_0$  ดังนั้นที่  $t = 0, T = T_0$

#### การเปรียบเทียบผลจากโปรแกรม

แบบจำลองที่นำมาคำนวณมีเงื่อนไขขอบตามรูปที่ 4.11 โดยมี  $T_\infty = 10^\circ\text{C}$ ,  $T_0 = 100^\circ\text{C}$  ความกว้าง 10 เมตร สูง 20 เมตร ซึ่งจากการคำนวณหา Grid independent solution ที่ความละเอียดของ Grid ต่างๆ ได้ผลดังรูปที่ 4.13



**รูปที่ 4.13** การทดสอบความเป็น Grid independent ของปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติ ในสถานะไม่อยู่ตัว กรณีมีเงื่อนไขขอบแบบฟลักซ์ถ่ายเทความร้อนคงที่ และมีการพาความร้อนที่ผิว ที่ระนาบ  $y=10$  เมตร



**รูปที่ 4.14** ผลเปรียบเทียบระหว่าง Numerical solution และ Exact solution ของปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่อยู่ตัว กรณีเงื่อนไขขอบแบบฟลักซ์ถ่ายเทความร้อนคงที่ และมีการพาความร้อนที่ผิว ที่ระนาบ  $y=10$  เมตร Grid ขนาด  $21 \times 7$

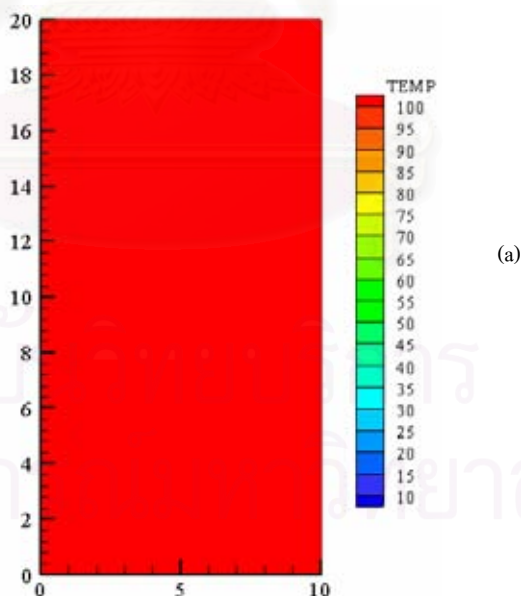
ในการทดสอบความเป็น Grid independent ของผลลัพธ์ เราเลือกใช้ Grid ที่มีความละเอียด 3x7, 5x7, 11x7 และ 21x7 ที่เวลา 3 วินาที ซึ่งจากรูปที่ 4.13 เห็นได้ว่า Grid ขนาด 21x7 ก็มีความละเอียดเพียงพอในการหาผลลัพธ์ ดังนั้นจึงเลือกใช้ Grid ขนาดนี้ ในการเปรียบเทียบผลระหว่าง Numerical solution และผลจาก Exact solution

สำหรับปัญหานี้เราจะเลือกกระนาบตามแนวนอนที่ตำแหน่ง  $y=10$  เมตร และนำค่าของอุณหภูมิที่ Node ต่างๆ ตามแนวแกน  $x$  มาเปรียบเทียบกับผลเฉลยแม่นยำ

จากรูปที่ 4.14 แกนในแนวนอนแทนตำแหน่งต่างๆ ของ Domain ในแนวแกน  $x$  ตั้งแต่  $x=0$  ถึง  $x=a$  ส่วนแกนในแนวตั้งแทนอุณหภูมิตั้งแต่  $T=0$  ถึง  $T=T_{max}$  โดยทำการพล็อตที่เวลาที่เปลี่ยนไป ซึ่งจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ของแบบจำลองและของผลเฉลยแม่นยำมีความสอดคล้องกันที่ทุกตำแหน่ง และเวลา

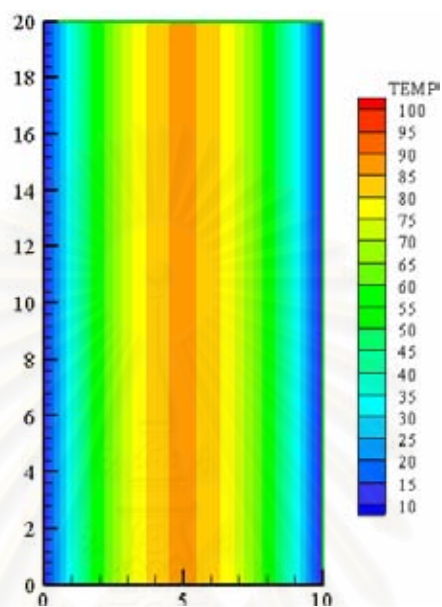
ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิใน Domain ที่เวลาต่างๆ สามารถแสดงได้ดังนี้ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.15

ที่เวลาเริ่มต้น  $t=0$

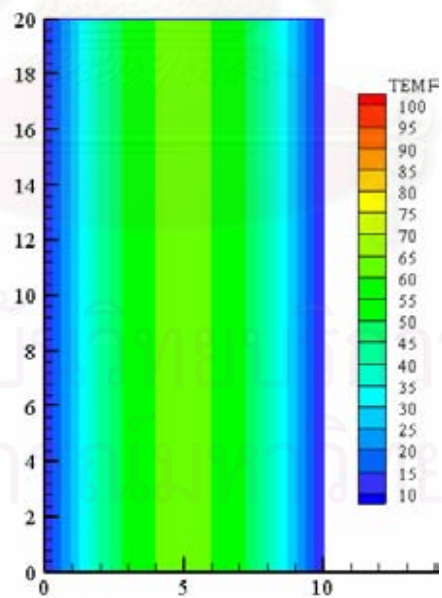


รูปที่ 4.15 การกระจายอุณหภูมิ ของปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่อยู่ตัว กรณีเงื่อนไขขอบแบบฟลักซ์ถ่ายเทความร้อนคงที่ และมีการพาความร้อนที่ผิว ที่เวลา (a) 0 วินาที, (b) 3 วินาที และ (c) 7 วินาที

เวลา 3 วินาที



เวลา 7 วินาที



รูปที่ 4.15 (ต่อ) การกระจายอุณหภูมิ ของปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่อยู่ตัว กรณีเงื่อนไขขอบแบบฟลักซ์ถ่ายเทความร้อนคงที่ และมีการพาความร้อนที่ผิว ที่เวลา (a) 0 วินาที, (b) 3 วินาที และ (c) 7 วินาที

### 4.3 การพัฒนาโปรแกรมและการตรวจสอบกับกรณีมีโดเมนเหมือนการใช้งานจริง

#### 4.3.1 ปัญหาการไหลในช่องสี่เหลี่ยมโดยคิดการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่อยู่ตัวในของแข็ง

##### 4.3.1.1 กรณีเงื่อนไขขอบแบบฟลักซ์ถ่ายเทความร้อนคงที่ และมีการพาความร้อนที่ผิวด้านบน

กรณีนี้เป็นการแก้ปัญหการไหลผ่านช่องสี่เหลี่ยมโดยมีการสะสมความร้อนในวัสดุสะสมความร้อนดังแสดงในรูปที่ 4.16



**รูปที่ 4.16** ปัญหาการไหลผ่านช่องสี่เหลี่ยมโดยมีการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่อยู่ตัวในวัสดุสะสมความร้อน กรณีมีเงื่อนไขขอบแบบฟลักซ์ถ่ายเทความร้อนคงที่ และมีการพาความร้อนที่ผิว

#### เงื่อนไขขอบ

1. ด้านซ้าย ด้านขวา และด้านล่างไม่มีฟลักซ์ถ่ายเทความร้อน,  $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$
2. ด้านบนมีการพาความร้อนที่ผิว

#### สมมติฐาน

1. คุณสมบัติของของไหลและวัสดุสะสมความร้อนมีค่าคงที่
2. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของของไหลมีค่าคงที่
3. ที่เวลาเริ่มต้นของช่วงการไหล การกระจายของอุณหภูมิในเนื้อวัสดุนำความร้อนมีความสม่ำเสมอ

4. ไม่คำนึงถึงความร้อนที่ถ่ายเทออกทางด้านข้างของ Heat storage unit
5. ของไหลมีความเร็วคงที่

#### สำหรับวัสดุสะสมความร้อน

รูปแบบของการกระจายอุณหภูมิในวัสดุสะสมความร้อน สามารถจำลองได้ด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ของกฎการอนุรักษ์พลังงานดังนี้

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.30)$$

#### โดยมีเงื่อนไขขอบดังนี้

$$t = 0 \quad T_f = T_m = T_0 \quad (4.31a)$$

$$t > 0 \quad x = 0 \quad T_f = T_{f1}, \quad \frac{\partial T_m}{\partial x} = 0 \quad 0 < y < w \quad (4.31b)$$

$$x = L \quad \frac{\partial T_m}{\partial x} = 0 \quad 0 < y < w \quad (4.31c)$$

$$y = 0 \quad \frac{\partial T_m}{\partial y} = 0 \quad 0 \leq x \leq L \quad (4.31d)$$

$$y = w \quad -k_m \frac{\partial T_m}{\partial y} = h(T_w - T_f) \quad 0 \leq x \leq L \quad (4.31e)$$

#### สำหรับของไหล

เราใช้สมดุลพลังงานของสมการอนุพันธ์พลังงาน ในการคำนวณ

$$\frac{hA\Delta x}{L} (T_m - T_f) + \dot{m}_f c_f T_f \Big|_x = \dot{m}_f c_f T_f \Big|_{x+\Delta x} + S_f \Delta x \rho_f c_f \frac{\partial T_f}{\partial t} \quad (4.32)$$

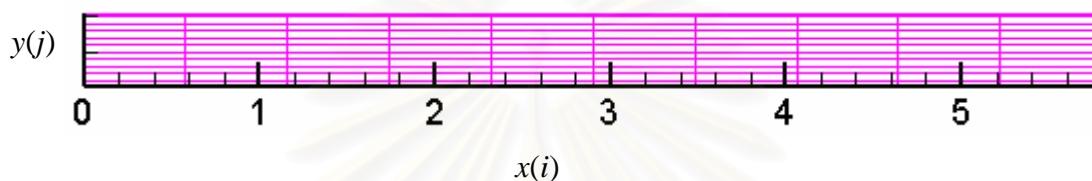
$S_f$  คือ พื้นที่ผิวของวัสดุสะสมความร้อนที่สัมผัสกับของไหล

ซึ่งในทางปฏิบัติเราจะละทิ้งเทอมของพลังงานสะสมสำหรับของไหลใน Control Volume เพื่อให้ง่ายในการคำนวณ ดังนั้นเราจะได้สมการอนุพันธ์พลังงานของการไหลดังนี้

$$\frac{m_f c_f L}{hA} \frac{\partial T_f}{\partial x} = T_w - T_f \quad (4.33)$$

### โปรแกรมคอมพิวเตอร์

ในส่วนของโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะใช้ระเบียบวิธี Finite difference ในการช่วยแก้ปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติ โดย Grid ที่ใช้ในการคำนวณ แสดงดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 การแบ่ง Node ของ Domain ในปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่อยู่ตัว กรณีมีเงื่อนไขขอบแบบฟลักซ์ถ่ายเทความร้อนคงที่ และมีการพาที่ผิวด้านบน

### การตั้งค่าให้ Node

สำหรับหัวข้อนี้เราจะใช้ทั้งวิธีแบบชัดเจน และวิธีแบบปริยายในการแก้ปัญหาสถานะไม่อยู่ตัว ซึ่งจะมีการเปรียบเทียบให้เห็นถึงความแตกต่างของวิธีทั้งสอง

### วิธีแบบชัดเจน (Explicit method)

- สำหรับของแข็ง

ใช้ Explicit method ในการแก้ปัญหา เหมือนในหัวข้อ 4.2.1

จาก Boundary conditions เราสามารถตั้งค่าให้อุณหภูมิที่ Node ต่างๆได้ ดังนี้

1. ที่  $i = 1, j = 1, 2, 3, \dots$

จะเห็นได้ว่า Node  $T_{i-1,j}$  เป็น Node ที่อยู่นอก Domain ซึ่งจะใช้คุณสมบัติความ

เป็น Adiabatic  $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$  ในการประมาณค่าที่ Node โดยใช้ Piecewise linear profile ใน

การประมาณค่า

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{T_{i+1,j}^n - T_{i-1,j}^n}{2\Delta x}$$

$$T_{i-1,j}^n = -2\Delta x \frac{\partial T}{\partial x} + T_{i+1,j}^n \quad (4.34)$$

แทนสมการ (4.34) ลงใน สมการ (4.19) จะได้

$$T_{i,j}^{n+1} = T_{i,j}^n + \frac{\alpha\Delta t}{(\Delta x)^2} (2T_{i+1,j} - 2\Delta x \frac{\partial T}{\partial x} - 2T_{i,j}^n) + \frac{\alpha\Delta t}{(\Delta y)^2} (T_{i,j+1}^n + T_{i,j-1}^n - 2T_{i,j}^n) \quad (4.35)$$

กรณีนี้  $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$  ดังนั้นจะได้

$$T_{i,j}^{n+1} = T_{i,j}^n + \frac{\alpha\Delta t}{(\Delta x)^2} (2T_{i+1,j} - 2T_{i,j}^n) + \frac{\alpha\Delta t}{(\Delta y)^2} (T_{i,j+1}^n + T_{i,j-1}^n - 2T_{i,j}^n) \quad (4.36)$$

2. ที่  $i = NIMAX$ ,  $j = 1, 2, 3, \dots$

จะเห็นได้ว่า Node  $T_{i,j-1}$  เป็น Node ที่อยู่นอก Domain ซึ่งจะใช้คุณสมบัติความ เป็น Adiabatic  $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$  ในการประมาณค่าที่ Node โดยจะใช้ Piecewise linear profile ในการประมาณค่า

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial x} &= \frac{T_{i+1,j}^n - T_{i-1,j}^n}{2\Delta x} \\ T_{i+1,j}^n &= 2\Delta x \frac{\partial T}{\partial x} + T_{i-1,j}^n \end{aligned} \quad (4.37)$$

แทนสมการ (4.37) ลงใน สมการ (4.19) จะได้

$$T_{i,j}^{n+1} = T_{i,j}^n + \frac{\alpha\Delta t}{(\Delta x)^2} (2T_{i-1,j} + 2\Delta x \frac{\partial T}{\partial x} - 2T_{i,j}^n) + \frac{\alpha\Delta t}{(\Delta y)^2} (T_{i,j+1}^n + T_{i,j-1}^n - 2T_{i,j}^n) \quad (4.38)$$

กรณีนี้  $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$  ดังนั้นจะได้



$$T_{i,j}^{n+1} = T_{i,j}^n + \frac{\alpha\Delta t}{(\Delta x)^2} (2T_{i-1,j}^n - 2T_{i,j}^n) + \frac{\alpha\Delta t}{(\Delta y)^2} (T_{i,j+1}^n + T_{i,j-1}^n - 2T_{i,j}^n) \quad (4.39)$$

3. ที่  $j=1, i=1,2,3,\dots$

จะเห็นได้ว่า Node  $T_{i,j-1}$  เป็น Node ที่อยู่นอก Domain ซึ่งจะใช้คุณสมบัติความ  
เป็น Adiabatic  $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$  ในการประมาณค่าที่ Node โดยจะใช้ Piecewise linear profile ใน  
การประมาณค่า

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial y} &= \frac{T_{i,j+1}^n - T_{i,j-1}^n}{2\Delta y} \\ T_{i,j-1}^n &= -2\Delta y \frac{\partial T}{\partial y} + T_{i,j+1}^n \end{aligned} \quad (4.40)$$

แทนสมการ (4.40) ลงใน สมการ (4.19) จะได้

$$T_{i,j}^{n+1} = T_{i,j}^n + \frac{\alpha\Delta t}{(\Delta x)^2} (T_{i+1,j}^n + T_{i-1,j}^n - 2T_{i,j}^n) + \frac{\alpha\Delta t}{(\Delta y)^2} (2T_{i,j+1}^n - 2\Delta y \frac{\partial T}{\partial y} - 2T_{i,j}^n) \quad (4.41)$$

กรณีนี้  $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$  ดังนั้นจะได้

$$T_{i,j}^{n+1} = T_{i,j}^n + \frac{\alpha\Delta t}{(\Delta x)^2} (T_{i+1,j}^n + T_{i-1,j}^n - 2T_{i,j}^n) + \frac{\alpha\Delta t}{(\Delta y)^2} (2T_{i,j+1}^n - 2T_{i,j}^n) \quad (4.42)$$

4. ที่  $j = NJMAX, i = 1,2,3,\dots$

ด้านบนมีการพาความร้อนโดยของไหล โดยมีสมการดังนี้

$$-k_m \frac{\partial T_m}{\partial y} = h(T_w - T_f) \quad (4.43)$$

ใช้ First order forward difference

$$\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{T_{i,j} - T_{i,j-1}}{\Delta y}$$

แทนในพจน์  $\frac{\partial T_m}{\partial y}$  ของสมการ (4.40) จะได้

$$\begin{aligned} -k_m \frac{T_{i,j} - T_{i,j-1}}{\Delta y} &= h(T_{i,j} - T_{fi}) \\ T_{i,j} &= \frac{\frac{k_m}{h\Delta y} T_{i,j-1} + T_{fi}}{\frac{k_m}{h\Delta y} + 1} \end{aligned} \quad (4.44)$$

5. Node ภายใน (Node ที่ไม่ใช่ขอบ) สามารถใช้สมการที่(4.19) ในการแทนค่าอุณหภูมิ

- สำหรับของไหล

จากสมการ

$$\frac{m_f c_f L}{hA} \frac{\partial T_f}{\partial x} = T_w - T_f \quad (4.45)$$

เราใช้ First order backward difference

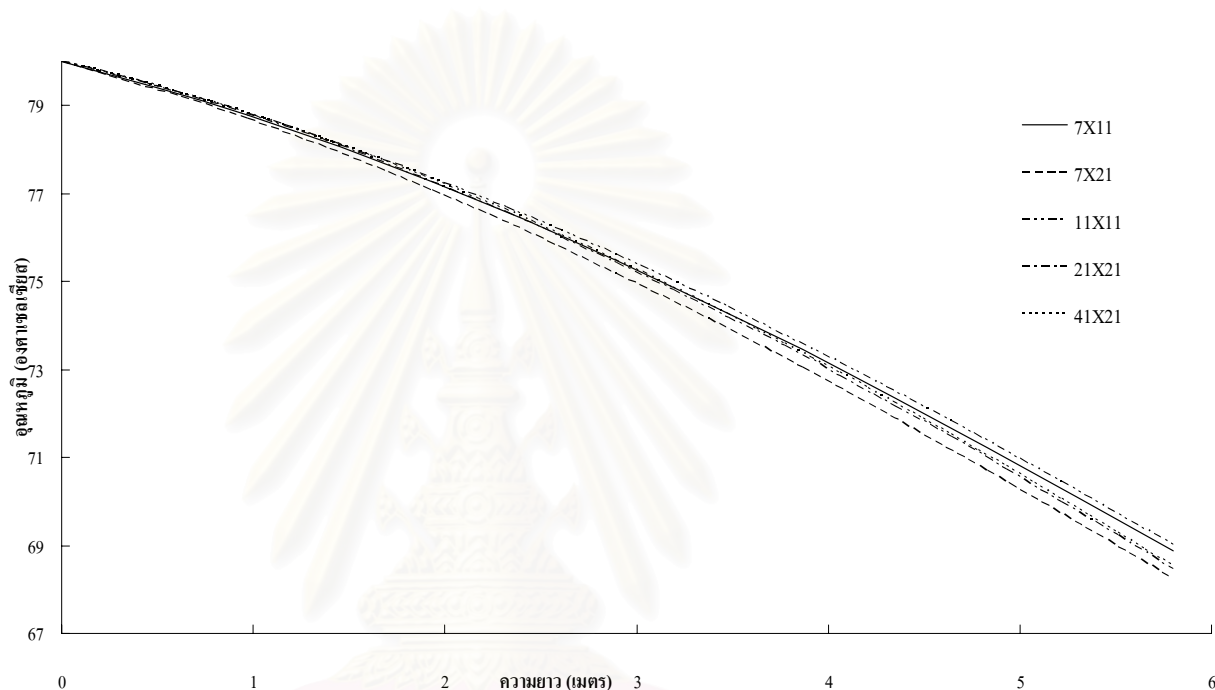
$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta x}$$

นำค่าไปแทนในพจน์  $\frac{\partial T_f}{\partial x}$  ของสมการ (4.45) จะได้

$$\begin{aligned} \frac{m_f c_f L}{hA} \frac{T_{fi} - T_{fi-1}}{\Delta x} &= T_{i,j} - T_{fi} \\ T_{fi} &= \frac{\frac{m_f c_f L}{hA\Delta x} T_{fi-1} + T_{i,j}}{\frac{m_f c_f L}{hA\Delta x} + 1} \end{aligned} \quad (4.46)$$

### การเปรียบเทียบผลจากโปรแกรม

แบบจำลองที่นำมาคำนวณมีเงื่อนไขขอบดังนี้ วัสดุสะสมความร้อนมีความยาว 5.8 เมตร ความกว้าง 0.5 เมตรหนา 0.04 เมตร ใช้เวลาสลับคาบการไหลทุก 3 ชั่วโมง ซึ่งจากการคำนวณหา Grid independent solution ที่ความละเอียดของ Grid ต่างๆ ได้ผลดังนี้ รูปที่ 4.18



**รูปที่ 4.18** การทดสอบความเป็น Grid independent ของปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่อยู่ตัว กรณีมีเงื่อนไขขอบแบบฟลักซ์ถ่ายเทความร้อนคงที่ และมีการพาที่ผิวด้านบน

ในการทดสอบความเป็น Grid independent ของผลลัพธ์ เราเลือกใช้ Grid ที่มีความละเอียด 7x11, 7x21, 11x11, 11x21, 21x21 และ 41x21 ซึ่งจากรูปที่ 4.18 เห็นได้ว่า Grid ขนาด 41x21 ก็มีความละเอียดเพียงพอในการหาผลลัพธ์ ดังนั้นจึงเลือกใช้ Grid ขนาดนี้ ในการเปรียบเทียบผลระหว่าง Exact solution และผลจาก Numerical solution สำหรับปัญหานี้เราจะเลือกการกระจายตัวของอุณหภูมิเมื่อสิ้นสุดคาบการไหล ช่วงสะสมความร้อนมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณของ Schmidt and Willmott [13] ตามตารางที่ 4.1

### สรุปผล

จากผลการคำนวณให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกัน ทั้งค่า Outlet exhaust gas temperature และ Total heat storage โดยมีความผิดพลาดน้อยกว่า 0.01%

ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิใน Domain ที่เวลาต่างๆสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.19

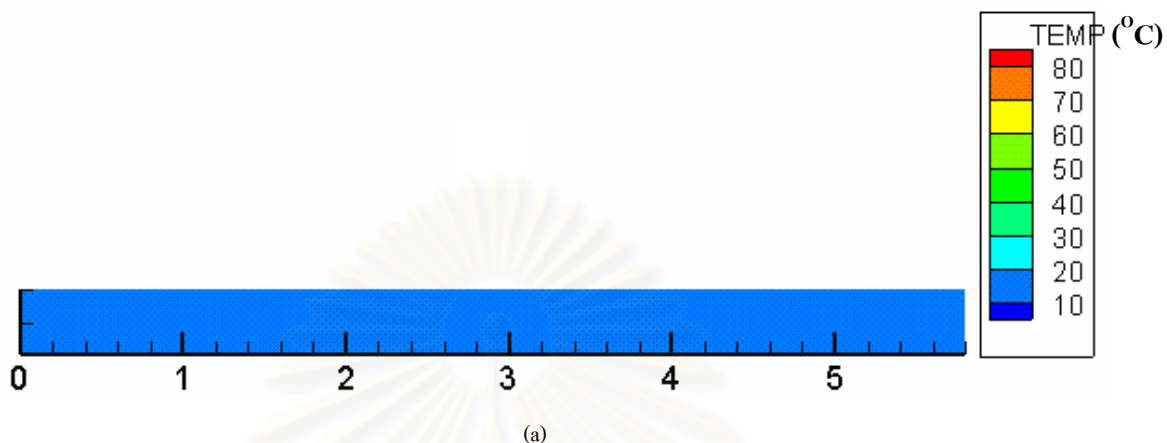


สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

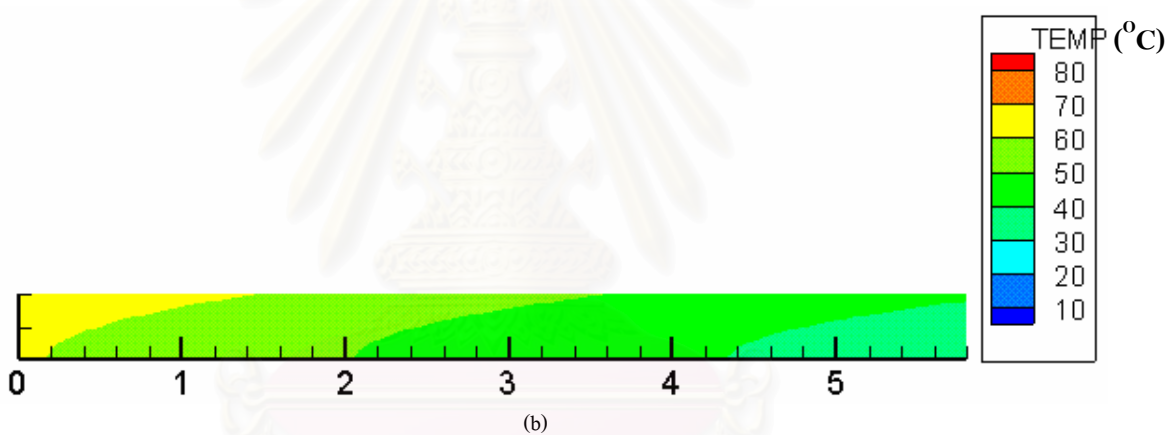
ตาราง 4.1 รายละเอียดของตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ และการเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างผลของ Schmidt and Willmott [13] กับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมที่สร้างขึ้น

รายการ	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่า
<b>For fluid</b>			
Inlet combustion air temperature	$TFC_{in}$	$^{\circ}C$	10.00
Inlet exhaust gas temperature	$TFH_{in}$	$^{\circ}C$	80.00
Density of combustion air at $50^{\circ}C$	$\rho_{air}$	$kg/m^3$	1.095
Specific heat of combustion air at $496^{\circ}C$	$Cp_{air}$	$J/kg \cdot ^{\circ}C$	1011
Mass flow rate of heating period	FMH	kg/s	0.156
Number of channels	NC	channel	12.000
Width	a	m	0.500
Hight of flow channel	h	m	0.019
Length	Xl	m	5.800
Thick	Wt	m	0.040
Velocity of gas flow	V	m/s	15.000
Convection coefficient of hot air at $496^{\circ}C$	HC	$W/m^2 \cdot ^{\circ}C$	50.230
<b>For solid</b>			
Initial temperature of clay brick	$T_{initial}$	$^{\circ}C$	10.00
Conductivity of clay brick air	$K_s$	$W/m \cdot ^{\circ}C$	2.100
Density of clay brick	$\rho_s$	$kg/m^3$	3,900
Specific heat of clay brick	$Cp_s$	$J/kg \cdot ^{\circ}C$	920
<b>Results from Schmidt and Willmott</b>			
Outlet exhaust gas temperature	$TFH_{out}$	$^{\circ}C$	68.52
Total heat storage	Qstore	kJ	47,256,256.320
<b>Results from calculation running at grid 41x21</b>			
Outlet exhaust gas temperature	$TFH_{out}$	$^{\circ}C$	68.53
Total heat storage	Qstore	kJ	47,239,004.468

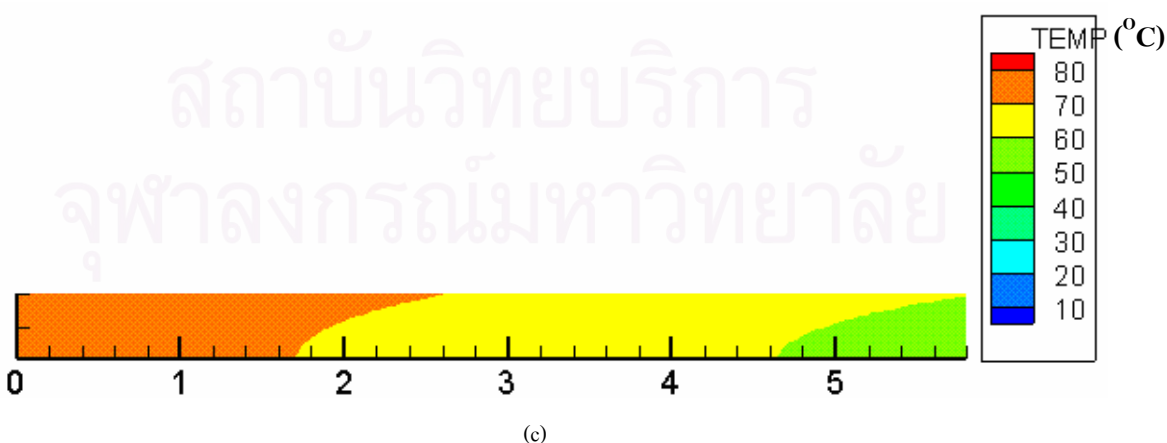
ที่เวลาเริ่มต้น 0 ชั่วโมง



เวลา 1.5 ชั่วโมง



เวลา 3 ชั่วโมง



รูปที่ 4.19 การกระจายอุณหภูมิ ปัญหาการไหลในช่องสี่เหลี่ยมโดยคิดการนำความร้อนแบบสองมิติ ในสถานะไม่อยู่ตัวในของแข็ง กรณีมีเงื่อนไขขอบแบบฟลักซ์ถ่ายเทความร้อนคงที่ และมีการพาที่ผิว ที่เวลา (a) 0 ชั่วโมง, (b) 1.5 ชั่วโมง, และ (c) 3 ชั่วโมง

### วิธีแบบปริยาย (Implicit method)

แม้วิธีแบบชัดแจ้งจะให้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำเพียงพอ แต่เนื่องจากข้อจำกัดในการใช้งานเกี่ยวกับการเลือกใช้ค่าของช่วงเวลา  $\Delta t$  ซึ่งต้องเลือกใช้ค่าของช่วงเวลาให้มีค่าน้อยกว่าค่าช่วงเวลาวิกฤต เพื่อขจัดปัญหาการลู่ออกของผลลัพธ์ วิธีนี้จึงไม่เป็นที่นิยมใช้มากนัก การใช้วิธีแบบปริยายซึ่งมีเสถียรภาพการคำนวณโดยไม่มีเงื่อนไข (Unconditionally stable) ทำให้เราสามารถหลีกเลี่ยงปัญหาการลู่ออกของผลลัพธ์ และยังสามารถใช้ค่าช่วงเวลา  $\Delta t$  ที่สูงกว่าเวลาวิกฤตได้ ซึ่งแม้จะใช้เวลาในการคำนวณเพิ่มขึ้น ก็นับว่าคุ้มกับข้อดีที่ชัดเจนของวิธีนี้ ในการประยุกต์ใช้วิธี Finite difference กับสมการเชิงอนุพันธ์เพื่อแก้ปัญหาคือใช้วิธีแบบปริยาย เราสามารถกระทำได้ดังนี้

1. ประมาณค่า  $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$  และ  $\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$  ด้วย Second order central difference ณ เวลา  $n+1$
2. ประมาณค่า  $\frac{\partial T}{\partial t}$  ด้วย Time forward difference

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$\frac{T_{i+1}^{n+1} + T_{i-1,j}^{n+1} - 2T_{i,j}^{n+1}}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{i,j+1}^{n+1} + T_{i,j-1}^{n+1} - 2T_{i,j}^{n+1}}{(\Delta y)^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n}{\Delta t}$$

$$T_{i,j}^n = -\alpha_x T_{i+1}^{n+1} - \alpha_x T_{i-1,j}^{n+1} + (2\alpha_x + 2\alpha_y + 1)T_{i,j}^{n+1} - \alpha_y T_{i,j+1}^{n+1} - \alpha_y T_{i,j-1}^{n+1} \quad (4.47)$$

โดยที่  $\alpha_x = \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^2}$

$$\alpha_y = \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta y)^2}$$

จากสมการจะเห็นได้ว่าในสมการเราทราบเพียงค่า  $T_{i,j}^n$  ซึ่งหาได้จากการคำนวณครั้งที่  $n$  นอกนั้นเป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่าที่ ณ เวลา  $n+1$  เมื่อประยุกต์สมการที่ (4.47) เข้ากับจุดต่อทั้งหมด เราก็จะได้ระบบสมการซึ่งมีลักษณะเป็นสมการแบบสามแถวทแยง (Tridiagonal system) โดยเราจะใช้วิธี TDMA ในการแก้ระบบสมการเมตริกซ์เพื่อหาผลลัพธ์

จาก Boundary condition เราสามารถตั้งค่าให้อุณหภูมิที่ Node ต่างๆ ดังนี้

- สำหรับของแข็ง

1. ที่  $i = 1, j = 1, 2, 3, \dots$

จะเห็นได้ว่า Node  $T_{i-1,j}$  เป็น Node ที่อยู่นอก Domain ซึ่งจะใช้คุณสมบัติความ  
เป็น Adiabatic  $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$  ในการประมาณค่าที่ Node โดยใช้ Piecewise linear profile ในการ  
ประมาณค่า

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{T_{i+1,j}^{n+1} - T_{i-1,j}^{n+1}}{2\Delta x}$$

$$T_{i-1,j}^{n+1} = -2\Delta x \frac{\partial T}{\partial x} + T_{i+1,j}^{n+1} \quad (4.48)$$

แทนสมการ (4.48) ลงใน สมการ (4.47) จะได้

$$T_{i,j}^n = -2\alpha_x T_{i+1,j}^{n+1} + 2\alpha_x \Delta x \frac{\partial T}{\partial x} + (2\alpha_x + 2\alpha_y + 1)T_{i,j}^{n+1} - \alpha_y T_{i,j+1}^{n+1} - \alpha_y T_{i,j-1}^{n+1} \quad (4.49)$$

กรณีนี้  $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$  ดังนั้นจะได้

$$T_{i,j}^n = -2\alpha_x T_{i+1,j}^{n+1} + (2\alpha_x + 2\alpha_y + 1)T_{i,j}^{n+1} - \alpha_y T_{i,j+1}^{n+1} - \alpha_y T_{i,j-1}^{n+1} \quad (4.50)$$

2. ที่  $i = NIMAX, j = 1, 2, 3, \dots$

จะเห็นได้ว่า Node  $T_{i,j-1}$  เป็น Node ที่อยู่นอก Domain ซึ่งจะใช้คุณสมบัติความ  
เป็น Adiabatic  $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$  ในการประมาณค่าที่ Node โดยจะใช้ Piecewise linear profile ในการ  
ประมาณค่า

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{T_{i+1,j}^{n+1} - T_{i-1,j}^{n+1}}{2\Delta x}$$



$$T_{i+1,j}^{n+1} = 2\Delta x \frac{\partial T}{\partial x} + T_{i-1,j}^{n+1} \quad (4.51)$$

แทนสมการ (4.51) ลงใน สมการ (4.47) จะได้

$$T_{i,j}^n = -2\alpha_x T_{i-1,j}^{n+1} - 2\alpha_x \Delta x \frac{\partial T}{\partial x} + (2\alpha_x + 2\alpha_y + 1)T_{i,j}^{n+1} - \alpha_y T_{i,j+1}^{n+1} - \alpha_y T_{i,j-1}^{n+1} \quad (4.52)$$

กรณีนี้  $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$  ดังนั้นจะได้

$$T_{i,j}^n = -2\alpha_x T_{i-1,j}^{n+1} + (2\alpha_x + 2\alpha_y + 1)T_{i,j}^{n+1} - \alpha_y T_{i,j+1}^{n+1} - \alpha_y T_{i,j-1}^{n+1} \quad (4.53)$$

3. ที่  $j = 1, i = 1, 2, 3, \dots$

จะเห็นได้ว่า Node  $T_{i,j-1}$  เป็น Node ที่อยู่นอก Domain ซึ่งจะใช้คุณสมบัติความเป็น Adiabatic  $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$  ในการประมาณค่าที่ Node โดยจะใช้ Piecewise linear profile ในการประมาณค่า

$$\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{T_{i,j+1}^{n+1} - T_{i,j-1}^{n+1}}{2\Delta y}$$

$$T_{i,j-1}^{n+1} = -2\Delta y \frac{\partial T}{\partial y} + T_{i,j+1}^{n+1} \quad (4.54)$$

แทนสมการ (4.54) ลงใน สมการ (4.47) จะได้

$$T_{i,j}^n = -\alpha_x T_{i+1,j}^{n+1} - \alpha_x T_{i-1,j}^{n+1} + (2\alpha_x + 2\alpha_y + 1)T_{i,j}^{n+1} - 2\alpha_y T_{i,j+1}^{n+1} + 2\alpha_y \Delta y \frac{\partial T}{\partial y} \quad (4.55)$$

กรณีนี้  $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$  ดังนั้นจะได้

$$T_{i,j}^n = -\alpha_x T_{i+1,j}^{n+1} - \alpha_x T_{i-1,j}^{n+1} + (2\alpha_x + 2\alpha_y + 1)T_{i,j}^{n+1} - 2\alpha_y T_{i,j+1}^{n+1} \quad (4.56)$$

4. ที่  $j = NJMAX$  ,  $i = 1, 2, 3, \dots$

ด้านบนมีการพาความร้อนโดยของไหล โดยมีสมการดังนี้

$$-k_m \frac{\partial T_m}{\partial y} = h(T_w - T_f) \quad (4.57)$$

ใช้ First order forward difference

$$\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y}$$

แทนในพจน์  $\frac{\partial T_m}{\partial y}$  ของสมการ (4.57) จะได้

$$\begin{aligned} -k_m \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y} &= h(T_{i,j}^{n+1} - T_{fi}^{n+1}) \\ T_{i,j}^{n+1} &= \frac{\frac{k_m}{h\Delta y} T_{i,j-1}^{n+1} + T_{fi}^{n+1}}{\frac{k_m}{h\Delta y} + 1} \end{aligned} \quad (4.58)$$

5. Node ภายใน (Node ที่ไม่ใช่ขอบ) สามารถใช้สมการที่ (4.47) ในการแทนค่าอุณหภูมิ

$$T_{i,j}^n = -\alpha_x T_{i+1}^{n+1} - \alpha_x T_{i-1,j}^{n+1} + (2\alpha_x + 2\alpha_y + 1)T_{i,j}^{n+1} - \alpha_y T_{i,j+1}^{n+1} - \alpha_y T_{i,j-1}^{n+1} \quad (4.47)$$

- สำหรับของไหล

จากสมการ

$$\frac{m_f c_f L}{hA} \frac{\partial T_f}{\partial x} = T_w - T_f \quad (4.59)$$

เราใช้ First order backward difference

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{T_{fi}^{n+1} - T_{fi-1}^{n+1}}{\Delta x}$$

นำค่าไปแทนในพจน์  $\frac{\partial T_f}{\partial x}$  ของสมการ (4.45) จะได้

$$\frac{m_f c_f L}{hA} \frac{T_{fi}^{n+1} - T_{fi-1}^{n+1}}{\Delta x} = T_{i,j}^{n+1} - T_{fi}^{n+1}$$

เพราะฉะนั้น

$$T_{fi}^{n+1} = \frac{\frac{m_f c_f L}{hA \Delta x} T_{fi-1}^{n+1} + T_{i,j}^{n+1}}{\frac{m_f c_f L}{hA \Delta x} + 1} \quad (4.60)$$

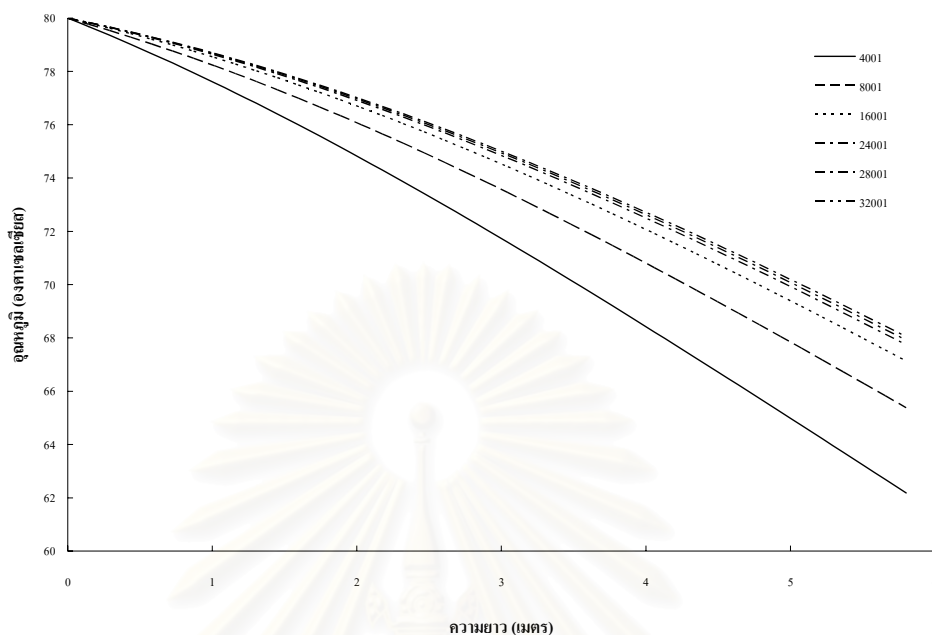
### การเปรียบเทียบผลจากโปรแกรม

แบบจำลองที่นำมาคำนวณมีเงื่อนไขขอบเช่นเดียวกันกับ ระเบียบวิธีแบบชัดเจน คือ วัสดุสะสมความร้อนมีความยาว 5.8 เมตร ความกว้าง 0.5 เมตร หนา 0.04 เมตร ใช้เวลาสลับคาบการไหลทุก 3 ชั่วโมง ซึ่งจากการคำนวณหา Grid independent solution ที่ความละเอียดของ Grid ต่างๆ ได้ผลดังนี้

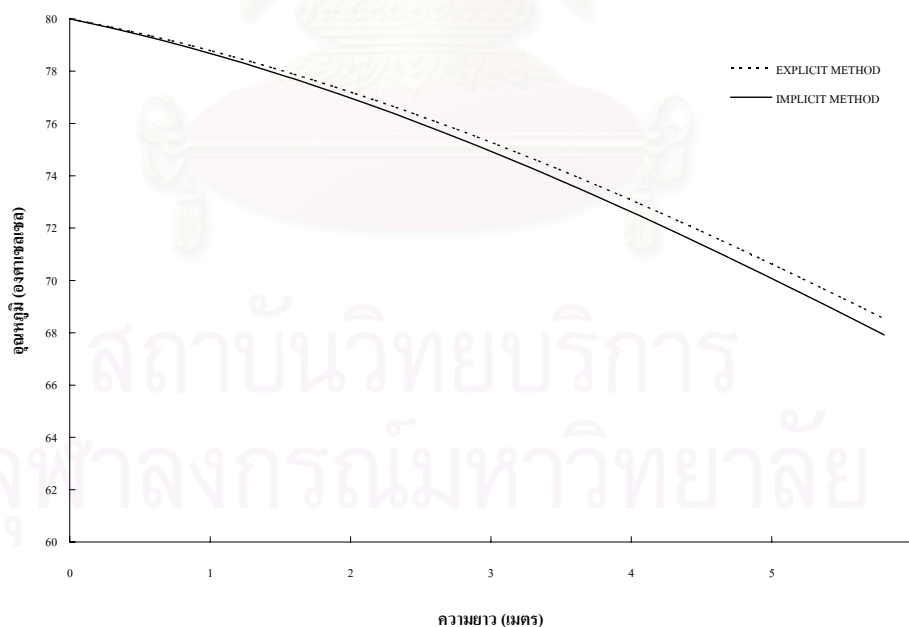
ในการทดสอบความเป็น Time independent ของผลลัพธ์ เราเลือกใช้ Time grid ที่มีความละเอียด 4001, 8001, 16001, 24001, 28001 และ 32001 ซึ่งจากรูปที่ 4.20 เห็นได้ว่า Time grid ขนาด 28001 ก็มีความละเอียดเพียงพอในการหาผลลัพธ์ ดังนั้นจึงเลือกใช้ Grid ขนาดนี้ ในการเปรียบเทียบผลระหว่าง วิธีแบบชัดเจน กับ วิธีแบบปริยายสำหรับปัญหานี้เราจะเลือกการกระจายตัวของอุณหภูมิเมื่อสิ้นสุดคาบการไหล ช่วงสะสมความร้อน มาเปรียบเทียบกัน

รูปที่ 4.21 แสดงผลเปรียบเทียบอุณหภูมิของของไหลโดยการแก้ปัญหาโดยใช้วิธีแบบชัดเจน กับ วิธีแบบปริยาย ที่ความละเอียดของ Grid 41x21

จากรูปจะเห็นได้ว่าวิธีทั้งสองให้ผลลัพธ์ที่มีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยเมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิที่จุดปลายของ Domain พบว่ามีค่าความผิดพลาด 0.9% แต่วิธีแบบปริยายมีเสถียรภาพดีกว่า ดังนั้นคณะผู้วิจัยจะเลือกใช้วิธีแบบปริยายในการแก้ปัญหานี้ในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 4.20 การทดสอบความเป็นGrid independent ของปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่อยู่ตัว กรณีมีเงื่อนไขขอบแบบฟลักซ์ถ่ายเทความร้อนคงที่ และมีการพาความร้อนที่ผิวด้านบน



รูปที่ 4.21 ผลเปรียบเทียบระหว่างวิธีแบบชัดแจ้ง กับ วิธีแบบปริยาย ของปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่อยู่ตัว กรณีมีเงื่อนไขขอบแบบฟลักซ์ถ่ายเทความร้อนคงที่ และมีการพาความร้อนที่ผิวด้านบน

## บทที่ 5

### อุปกรณ์การทดลองและวิธีดำเนินการทดลอง

ผู้วิจัยได้วางแผนในการเก็บข้อมูลที่บริษัทไทยแลนด์สเมตติ้งแอนดรีไฟนิ่งจำกัด (ไทยชาร์โก) โดยแบ่งการดำเนินการออกเป็นขั้นตอน คือ ขั้นการเก็บข้อมูลเบื้องต้น ผู้วิจัยจะทำการสำรวจสภาพแวดล้อมโดยรอบ ตำแหน่งที่จะทำการติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง และเก็บข้อมูลเพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ขั้นที่สองคือ การจัดเตรียมอุปกรณ์ เพื่อเตรียมนำไปติดตั้งกับ Regenerator ขั้นที่สามคือ การทำการทดลองโดยละเอียด โดยจะทำการติดตั้งอุปกรณ์กับ Regenerator และทำการทดลองเก็บข้อมูลโดยละเอียด เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้อาจจากการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข และนำผลลัพธ์ที่ได้ไปปรับปรุงโปรแกรมคอมพิวเตอร์ต่อไป

#### 5.1 การเก็บข้อมูลเบื้องต้น

หลังจากที่ได้ประดิษฐ์ และตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณหาวัฏจักรที่เหมาะสมในการสลับคาบการไหลของ Regenerator เรียบร้อยแล้ว จากนั้นผู้วิจัยได้เดินทางไปยังบริษัทไทยแลนด์สเมตติ้งแอนดรีไฟนิ่งจำกัด (ไทยชาร์โก) เพื่อทำการสำรวจสภาพแวดล้อมโดยรอบ และหาตำแหน่งที่จะทำการติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง และเก็บข้อมูลเพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นใน โปรแกรมคอมพิวเตอร์

คณะวิจัยได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูล ซึ่งประกอบด้วย ขนาดของ Regenerator ชนิดของวัสดุสะสมความร้อนที่ใช้ อุณหภูมิของก๊าซเสีย และอากาศดีทั้งทางเข้าและทางออก ปริมาณอากาศที่ไหลเข้า ซึ่งข้อมูลเบื้องต้นนี้ (ตารางที่ 5.1) จะใช้ในการหาคุณสมบัติต่างๆ ที่ใช้ประกอบในการคำนวณต่อไป

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลที่ได้จากเก็บข้อมูลเบื้องต้นจากโรงงาน

รายการ	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่า
<b>For fluid</b>			
Inlet combustion air temperature	$TFC_{in}$	$^{\circ}C$	514.15
Outlet combustion air temperature	$TFC_{out}$	$^{\circ}C$	1,024.15
Inlet exhaust gas temperature	$TFH_{in}$	$^{\circ}C$	1,325.15
Outlet exhaust gas temperature	$TFH_{out}$	$^{\circ}C$	707.15
Quantity of $CO_2$ by volume	$CO_2$	%	12.33
Quantity of $O_2$ by volume	$O_2$	%	4.61
Quantity of $N_2$ by volume	$N_2$	%	78
Volume flow rate	VFC	$m^3/s$	1.375
<b>For solid</b>			
Initial temperature of clay brick	$T_{initial}$	$^{\circ}C$	473.15
Conductivity of clay brick air at $600^{\circ}C$	$K_s$	$W/m. ^{\circ}C$	1.48
Density of clay brick	$\rho_s$	$kg/m^3$	2,260
Specific heat of clay brick	$Cp_s$	$J/kg. ^{\circ}C$	960
Number of channels	NC	channel	120
Width	a	m	0.18
Thick	Wt	m	0.08
Length	Xl	m	5.04
Area of flow per channel	AF	$m^2$	0.032
Hydraulic diameter $Dh=4*AF/(4*a)$	Dh	m	0.18

## 5.2 การจัดเตรียมอุปกรณ์

### เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยมีหลายรายการ จึงทำการแบ่งอุปกรณ์ออกเป็นหมวดหมู่ ดังนี้

#### 5.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิ

5.2.1.1 คาลาดีอกเกอร์ Hioki 8422-51

5.2.1.2 เทอร์โมคัปเปิ้ล Type K

5.2.1.3 สายสัญญาณ Type K

#### 5.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดส่วนประกอบของก๊าซเสียจากการเผาไหม้

5.2.2.1 เครื่องวิเคราะห์ก๊าซเสียอุณหภูมิสูง Testo 300M

#### 5.2.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดปริมาณลม

5.2.3.1 ชุด Pitot tube พร้อม Pressure transducer ยี่ห้อ Yোগงาวา

#### 5.2.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดอัตรา การไหลของน้ำมัน

5.2.4.1 Oil flow meter ยี่ห้อ Yোগงาวา

#### 5.2.5 อุปกรณ์อื่นๆ

5.2.5.1 ลวดฮีทเตอร์เพื่อใช้ในการยึดอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิภายในเตา

5.2.5.2 เต้ากระเบื้องเพื่อใช้ในการเชื่อมต่อสายสัญญาณ

5.2.5.3 ผ้าเทปเซรามิกไฟเบอร์กันความร้อน

5.2.5.4 เทปฟอยด์กันความร้อน

5.2.5.5 ดอกสว่าน

### 5.3 การทำการทดลองโดยละเอียด

เนื่องจากการติดตั้งอุปกรณ์ทดลองต้องทำในช่วงที่ทางโรงงานหยุดการทำงานเพื่อซ่อมแซมเตาถลุง ผู้วิจัยจึงต้องตรวจสอบตารางการถลุงกับทางโรงงาน เพื่อทำการวางแผนในการติดตั้งอุปกรณ์ เมื่อได้วันเวลาที่แน่นอนแล้ว ผู้วิจัยได้ทำการจัดซื้อและ จัดเตรียมอุปกรณ์การทดลอง จากนั้นผู้วิจัยได้เดินทางไปยังบริษัทไทยแลนด์สแมลตีงแอนคร์ไฟนิงจำกัด (ไทยชาร์โก) เพื่อทำการติดตั้งอุปกรณ์และทำการเก็บข้อมูลอย่างละเอียด เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากระเบียบวิธีเชิงตัวเลข โดยข้อมูลก็นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์ประกอบด้วย

#### 5.3.1 อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ

##### 5.3.1.1 ข้อมูลช่วง Heating Period

###### 5.3.1.1.1 อุณหภูมิของก๊าซเสีย

- อุณหภูมิก๊าซเสียที่ตำแหน่งทางเข้าของก๊าซเสีย
- อุณหภูมิก๊าซเสียที่ตำแหน่ง 0.3 เมตร จากทางเข้าของก๊าซเสีย
- อุณหภูมิก๊าซเสียที่ตำแหน่ง 0.3 เมตร ก่อนถึงทางออกของก๊าซเสีย
- อุณหภูมิก๊าซเสียที่ตำแหน่งทางออกของก๊าซเสีย

###### 5.3.1.1.2 อุณหภูมิอิฐทนไฟ

- อุณหภูมิอิฐทนไฟที่ตำแหน่งทางเข้าของก๊าซเสีย
- อุณหภูมิอิฐทนไฟที่ตำแหน่ง 0.3 เมตร จากทางเข้าของก๊าซเสีย
- อุณหภูมิอิฐทนไฟที่ตำแหน่ง 0.3 เมตร ก่อนถึงทางออกของก๊าซเสีย
- อุณหภูมิอิฐทนไฟที่ตำแหน่งทางออกของก๊าซเสีย

###### 5.3.1.1.3 อุณหภูมิผนังอิฐด้านนอก Regenerator

###### 5.3.1.1.4 อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม

##### 5.3.1.2 ช่วง Cooling Period

###### 5.3.1.2.1 อุณหภูมิของอากาศดี

- อุณหภูมิของอากาศดีที่ตำแหน่งทางเข้าของอากาศดี
- อุณหภูมิของอากาศดีที่ตำแหน่ง 1 เมตร จากทางเข้าของของอากาศดี



- อุณหภูมิของอากาศที่ตำแหน่ง 1 เมตร ก่อนถึงทางออกของอากาศ
- อุณหภูมิของอากาศที่ตำแหน่งทางออกของอากาศ

#### 5.3.1.2.2 อุณหภูมิอิฐทนไฟ

- อุณหภูมิอิฐทนไฟที่ตำแหน่งทางเข้าของอากาศ
- อุณหภูมิอิฐทนไฟที่ตำแหน่ง 1 เมตร จากทางเข้าของอากาศ
- อุณหภูมิอิฐทนไฟที่ตำแหน่ง 1 เมตร ก่อนถึงทางออกของอากาศ
- อุณหภูมิอิฐทนไฟที่ตำแหน่งทางออกของอากาศ

#### 5.3.1.2.3 อุณหภูมิผนังอิฐด้านนอก Regenerator

#### 5.3.1.2.4 อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม

### 5.3.2 อัตราการไหลของอากาศ

### 5.3.3 อัตราการใช้น้ำมัน

### 5.3.4 ส่วนประกอบของก๊าซเสียที่เกิดจากการเผาไหม้

### 5.3.5 ความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม

## 5.4 รายละเอียดอุปกรณ์การทดลอง

### 5.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิ

รูปที่ 5.1 ชุดอุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่จะต้องติดตั้งกับ Regenerator โดยต้องทำการจัดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ดังต่อไปนี้

#### 5.4.1.1 การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ล

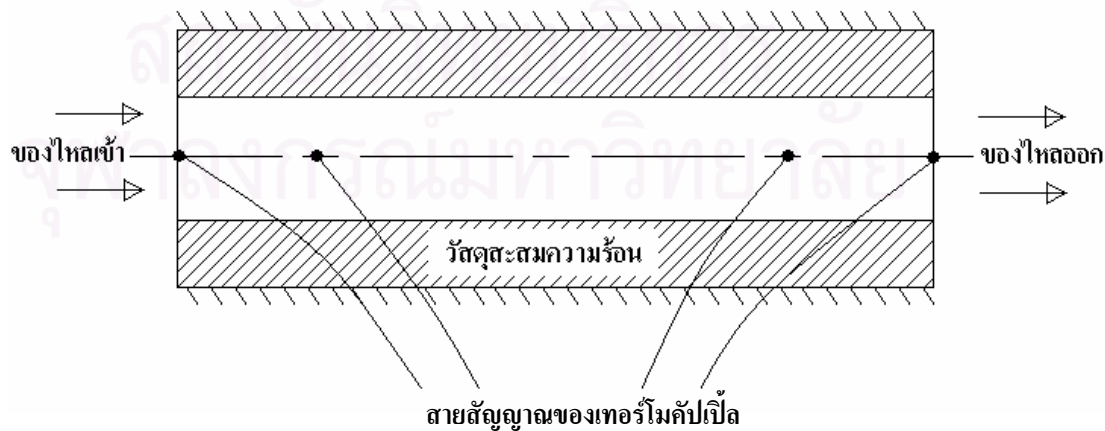
ทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ เพื่อวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิทั้งในของไหล และ วัสดุสะสมความร้อน โดยมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 5.1 ชุดอุปกรณ์วัสดุอนุหภูมิที่จะต้องติดตั้งกับ Regenerator

- ตำแหน่งติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลในของไหล

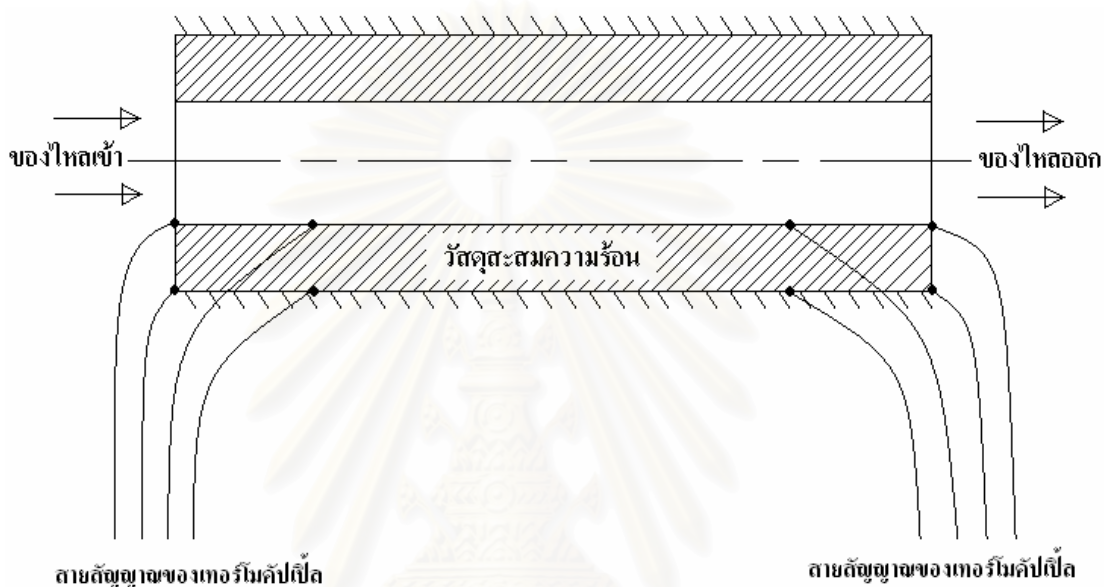
ที่ตำแหน่งต่างๆของของไหลเราจะทำการติดตั้ง เทอร์โมคัปเปิ้ล 4 จุด ที่ตำแหน่ง  $x=0, 0.3, 4.74$  และ  $5.04$  เมตร ในแนวกึ่งกลางของช่องทางการไหล ดังแสดงในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 ตำแหน่งติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลในของไหล

- ตำแหน่งติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลในวัสดุสะสมความร้อน

ที่ตำแหน่งต่างๆของอิฐทนไฟจะทำการติดตั้ง เทอร์โมคัปเปิ้ล 8 ตำแหน่ง คือที่ผิวและกึ่งกลางระหว่างช่องทางการไหล ที่ตำแหน่ง  $x=0, 0.3, 4.74$  และ  $5.04$  เมตร ดังแสดงในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 ตำแหน่งติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลในวัสดุสะสมความร้อน

ในการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลนั้นจำเป็นต้องมี การเจาะวัสดุสะสมความร้อนเพื่อทำการฝังหัวเทอร์โมคัปเปิ้ล โดยทางโรงงานได้จัดเตรียมผู้ที่มีความชำนาญช่วยประสานงานในการการเจาะพื้นผิวของ Regenerator เพื่อติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ล และซ่อมแซมพื้นผิวส่วนที่สึกกร่อน ดังแสดงในรูปที่ 5.4 – 5.6

#### 5.4.1.2 การเชื่อมต่อสัญญาณ

หลังจากติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลแล้วจะต้องทำการเดินสายสัญญาณไปยังดาตาลีอกเกอร์เพื่อทำการบันทึกข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 5.7

#### 5.4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดส่วนประกอบของก๊าซเสียจากการเผาไหม้

สำหรับอุปกรณ์วัดส่วนประกอบของก๊าซเสีย ผู้วิจัยได้ใช้ Testo 300M ซึ่งเป็นอุปกรณ์วัดก๊าซเสียแบบพกพา โดยจะใช้วัดก๊าซเสียที่ตำแหน่งที่ออกจาก Regenerator แล้ว ดังแสดงในรูปที่ 5.8



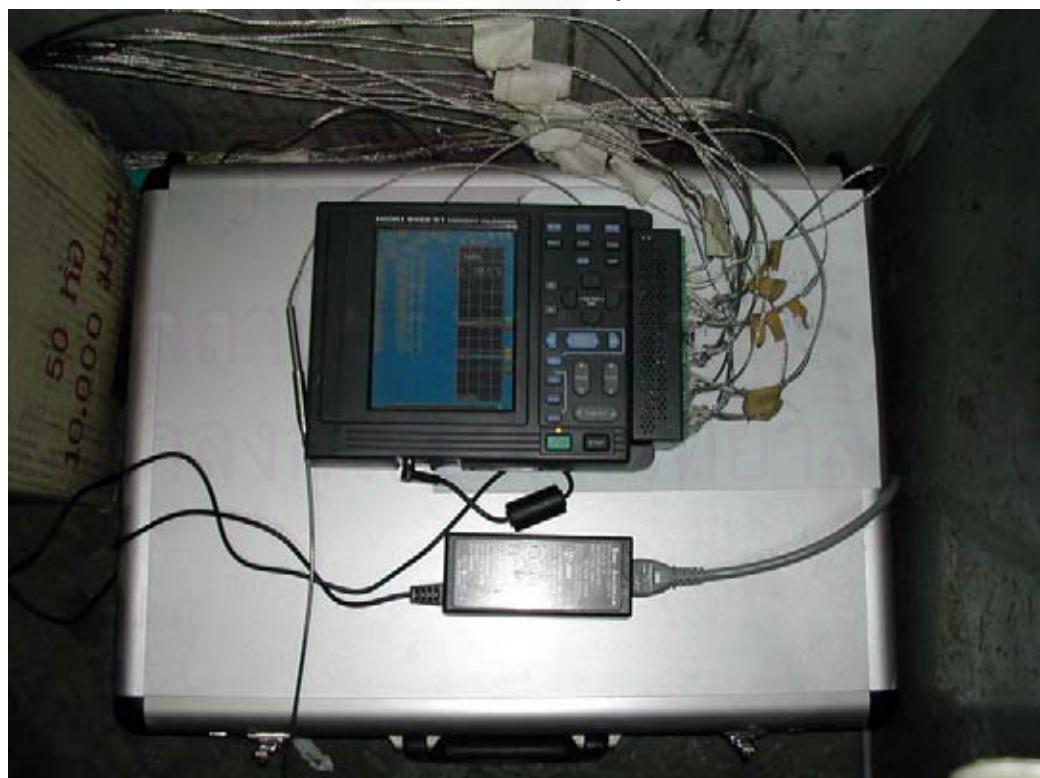
รูปที่ 5.4 การเจาะวัสดุสะสมความร้อนด้านบนเพื่อติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ล



รูปที่ 5.5 การเจาะวัสดุสะสมความร้อนด้านล่างเพื่อติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ล



รูปที่ 5.6 การหุ้มสายเทอร์โมคัปเปิลด้วยเซรามิกไฟเบอร์หลังจากการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล เพื่อกันความร้อนเนื่องจากด้านบนของ Regenerator มีความร้อนสูงมากกว่า  $700^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 5.7 คาตาส็อกเกอร์ที่ได้ทำการเชื่อมต่อกับสายสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิล



รูปที่ 5.8 อุปกรณ์วิเคราะห์ประสิทธิภาพการเผาไหม้

#### 5.4.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดปริมาณลม

ทางโรงงานมีอุปกรณ์ตรวจวัดอัตราการไหลของอากาศ โดยติดตั้งชุด Pitot tube เพื่อวัดความดันของอากาศที่ตำแหน่งก่อนทางเข้า Regenerator ซึ่งจะต่อเข้า Pressure transducer ของ Yogogawa โดยข้อมูลจะถูกส่งไปยังคอมพิวเตอร์ส่วนกลาง เพื่อนำไปประมวลผลเพื่อแปลงเป็นอัตราการไหล และบันทึกข้อมูลลงในหน่วยความจำต่อไป

#### 5.4.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดอัตราการไหลของน้ำมัน

ทางโรงงานติดตั้ง Oil flow meter ของ Yogogawa เพื่อวัดอัตราการไหลของน้ำมัน โดยข้อมูลจะถูกส่งไปคอมพิวเตอร์ส่วนกลางเพื่อนำไปประมวลผล และบันทึกข้อมูลลงในหน่วยความจำต่อไป

#### 5.4.5 อุปกรณ์อื่นๆ

สำหรับอุปกรณ์อื่นๆเป็นส่วนประกอบในการติดตั้งสายสัญญาณกับ

Regenerator

### 5.5 สภาพในการทดลอง

เนื่องจากการถลุงแร่ดีบุกเป็นกระบวนการที่ใช้ความร้อนสูง ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในการเก็บข้อมูลเพื่อหาจุดที่เหมาะสมในการใช้งาน ในการเก็บข้อมูลครั้งนี้ ข้อมูลที่มีข้อจำกัดในการตรวจวัดมากที่สุด คือ อุณหภูมิภายใน Regenerator เนื่องจากบางจุดมีอุณหภูมิสูงกว่า  $1,200^{\circ}\text{C}$  ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้วัดอุณหภูมิที่นิยมใช้ทั่วไปในโรงงาน คือ เทอร์โมคัปเปิล Type R แบบหัวกะโหลก ซึ่งสามารถทนอุณหภูมิสูง และมีความทนทานในการใช้งาน แต่มีข้อจำกัด คือ มีขนาดใหญ่ ถึง 25 mm เมื่อเทียบกับจุดที่ต้องการตรวจวัดอุณหภูมิคือ เนื้ออิฐซึ่งจุดติดตั้งที่ใกล้กันที่สุดมีระยะห่าง 35 mm ซึ่งหัวเทอร์โมคัปเปิลแบบนี้ไม่สามารถนำมาใช้งานได้ และอีกส่วนคือช่องทางการไหลของของไหลซึ่งมีขนาด  $180 \times 180$  mm ซึ่งการนำเทอร์โมคัปเปิลขนาด 25 mm มาใช้จะรบกวนการไหลเป็นอย่างมาก

จากการศึกษาพบว่า เทอร์โมคัปเปิลแบบหัวกะโหลกมีเทอร์มอลแมสค่อนข้างสูง ทำให้รับ และคายอุณหภูมิได้ช้า ทำให้ไม่สามารถวัดอุณหภูมิแบบ Real time ได้ ซึ่งในการใช้งานจริงจำเป็นต้องใช้หัวเทอร์โมคัปเปิลที่มีขนาดเล็กเพื่อไม่รบกวนการไหล และ ต้องสามารถวัดอุณหภูมิแบบ Real time ได้ ดังนั้นจึงเลือกใช้ Thermocouple wire ceramic fiber insulated  $2,200^{\circ}\text{F}$  ( $1,204^{\circ}\text{C}$ ) ของ TEW&C ซึ่งเป็นเทอร์โมคัปเปิลคุณภาพสูงที่หุ้มด้วยฉนวนที่ทำจาก Ceramic fiber ซึ่งสามารถทนอุณหภูมิแบบต่อเนื่องได้สูงถึง  $1,204^{\circ}\text{C}$  สามารถวัดอุณหภูมิได้แบบ Real time ได้ และมีขนาดเล็กเพียง  $2.6 \times 4.4$  mm ซึ่งไม่รบกวนช่องทางการไหล แต่ก็มีข้อจำกัด คือ รูปร่างค่อนข้างบอบบางกว่าเทอร์โมคัปเปิลแบบหัวกะโหลก และอาจเสียหายได้ถ้าอุณหภูมิมีค่าเกิน  $1,204^{\circ}\text{C}$  แต่ในการถลุงดีบุกจริงอุณหภูมิในเตาหลอมจะมีค่าอยู่ในช่วง  $1,300$ - $1,400^{\circ}\text{C}$  ซึ่งในบางครั้งอุณหภูมิที่มาถึง Regenerator อาจสูงกว่า  $1,204^{\circ}\text{C}$  ทำให้ต้องวางแผนในการเก็บข้อมูลให้ได้มากที่สุดในช่วงสั้น ก่อนที่จะเทอร์โมคัปเปิลจะเสียหาย

ข้อจำกัดเรื่องต่อไปคือสภาพในการปฏิบัติงานของผู้ปฏิบัติงานเนื่องจากบริเวณโดยรอบที่ปฏิบัติงานมีอุณหภูมิสูง มีเสียงดังตลอดเวลา ประกอบกับมีก๊าซพิษที่อันตราย เช่น สารหนู พรอท ตะกั่ว  $\text{NO}_x$  ฯลฯ และสารกำมันตรังสีที่เกิดจากการถลุง ทำให้ผู้วิจัยไม่สามารถอยู่ในสถานที่ทดลองต่อเนื่องเป็นเวลานานๆได้ แต่เนื่องจาก Regenerator ของทางโรงงานเป็นระบบ

Manual การปรับวาล์วเพื่อสลับทิศทางการไหลของอากาศที่เข้าและออก Regenerator ต้องทำด้วยมือ ทำให้เกิดข้อจำกัดในการทดลอง คือผู้วิจัยต้องทำการปรับวาล์วสลับทิศทางการไหลด้วยมือเอง ตลอดเวลา (ซึ่งรายละเอียดในการปรับจะกล่าวในหัวข้อต่อไป) แต่ในการทดลองเพื่อให้สถานะเข้าสู่ Cyclic equilibrium นั้นจำเป็นต้องใช้เวลาค่อนข้างนาน ทำให้ในแต่ละวันผู้ปฏิบัติงานมีความจำเป็นต้องปฏิบัติงานอยู่หน้าเตาเป็นเวลานาน โดยไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ ดังนั้นจึงต้องทำการทดลองให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในเวลาที่มีน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้

ทางโรงงานได้วางแผนเตรียมการถลุง ดังนี้ คือ วันที่ 27 สิงหาคม – 4 กันยายน พ.ศ. 2547 จะทำการอุ่นเตาเพื่อให้เตาร้อนขึ้นอย่างช้าๆเพื่อลดการแตกของเตาเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบทันทีทันใด โดยจะอุ่นเตาจากอุณหภูมิห้องโดยใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง ในช่วงนี้ยังไม่มีการปล่อยก๊าซร้อนเข้า Regenerator เมื่อเตามีอุณหภูมิภายในประมาณ  $900^{\circ}\text{C}$  ก็จะหยุดการใช้น้ำมันดีเซลมาใช้น้ำมันเตาแทน โดยจะเริ่มมีการอุ่น Regenerator ด้วย และจะทำการอุ่นจนภายในเตามีอุณหภูมิถึง  $1,300^{\circ}\text{C}$  ก็จะทำการใส่แร่เพื่อถลุงต่อไป

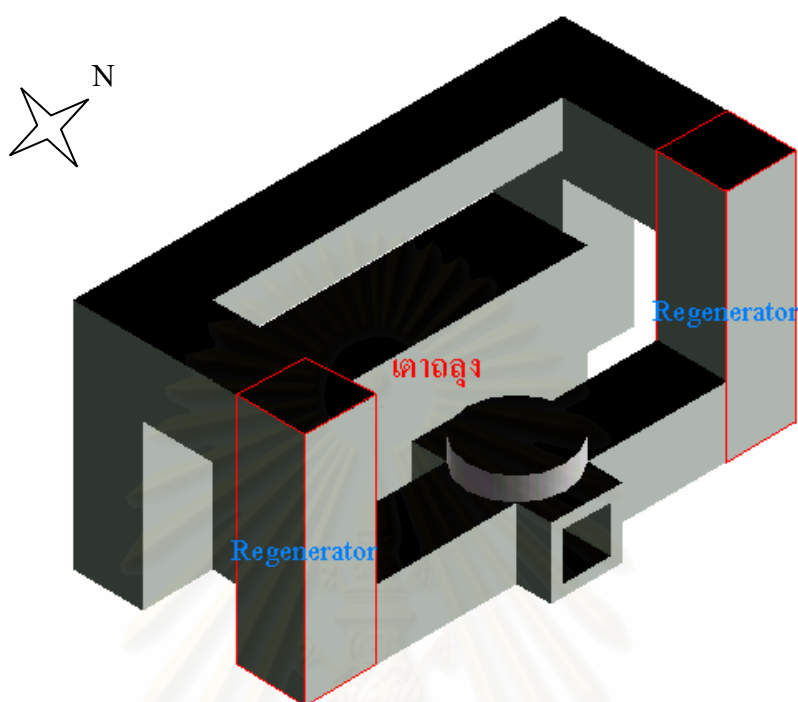
เมื่อทราบแผนงานของทางโรงงาน ประกอบกับข้อจำกัดของการปฏิบัติงานดังที่ได้กล่าวมา ผู้วิจัยจึงได้วางแผนงานในการเก็บข้อมูลดังนี้

เนื่องจากในช่วงที่มีการอุ่น Regenerator มีสถานะที่เหมาะสมที่สุดในการทดลอง เนื่องจากมีอุณหภูมิภายในเตาอยู่ในช่วง  $900 - 1,300^{\circ}\text{C}$  อุณหภูมิก๊าซเสียก่อนเข้า Regenerator มีค่าไม่เกิน  $1,000^{\circ}\text{C}$  และยังไม่มียุส Slag หรือฝุ่นผงจากการถลุงมาเกาะอุปกรณ์ตรวจวัดทำให้สามารถควบคุมสถานะในการวัดได้ดียิ่งขึ้น ส่วนในช่วงถลุงผู้วิจัยก็ได้ทำการตรวจวัดเช่นกัน แต่เนื่องจากในช่วงที่มีการถลุงไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิภายในให้คงที่ได้เนื่องจากทางโรงงานไม่มีระบบอัตโนมัติในการควบคุมการจ่ายน้ำมัน ทำให้ต้องปรับน้ำมันอัตราการไหลด้วยมือ และในช่วงที่มีการถลุงมีการเปิดฝาเตาบ่อย ทำให้ไม่สามารถรักษารักษาอุณหภูมิให้คงที่ได้ดีนัก นอกจากนี้ในบางครั้งอุณหภูมิภายในเตายังสูงถึง  $1,470^{\circ}\text{C}$  ทำให้มีหัวเทอร์โมคัปเปิ้ลบางหัวเสียไป ข้อมูลที่ได้ระหว่างการถลุงจึงถูกใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการคำนวณหาวัฏจักรที่เหมาะสมในการสลับทิศทางการไหล โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สร้างขึ้นสำหรับสถานะการทำงานจริง

## 5.6 วิธีการทดลอง

ตามที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 เนื่องจาก Regenerator เป็นอุปกรณ์นำความร้อนกลับมาใช้ที่ทำงานแบบไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นในเตาถลุง 1 ตัว จะมี Regenerator 2 ตัว เพื่อสลับกันรับและคายความร้อน ดังแสดงในแบบจำลองในรูปที่ 5.9





รูปที่ 5.9 แบบจำลองเตาถลุงที่ใช้กับ Regenerator แบบ 2 ตัว

ในการทดลองผู้วิจัยได้เลือกใช้เตาถลุงตัวที่ 2 และได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์ทดลองกับ Regenerator ทางด้านทิศเหนือ โดยหลักการทำงานของ Regenerator สามารถดูได้จากรายละเอียดในบทที่ 3 ในการทดลองเก็บข้อมูลจะปล่อยอากาศดีเข้าทาง Regenerator ทางด้านใต้เพื่อรับความร้อนที่ถูกเก็บเอาไว้แล้วนำไปใช้ในการเผาไหม้ ต่อจากนั้นก๊าซเสียก็จะไหลเข้า Regenerator ทางด้านทิศเหนือเพื่อคายความร้อนให้วัสดุสะสมความร้อน เมื่อครบเวลาตามคาบที่กำหนดก็ทำการหมุนวาล์วเพื่อสลับทิศของอากาศดีให้ไหลเข้า Regenerator ทางด้านทิศเหนือเพื่อรับความร้อนนำไปใช้ในการเผาไหม้ หลังจากนั้นก๊าซเสียที่ได้จากการเผาไหม้ก็จะไหลเข้า Regenerator ทางด้านทิศใต้เพื่อเก็บสะสมความร้อนต่อไป เมื่อครบเวลาตามคาบที่กำหนดก็ทำการหมุนวาล์วเพื่อสลับทิศของอากาศดีให้ไหลเข้า Regenerator ทางด้านทิศใต้ต่อไป ทำเช่นนี้สลับกันเรื่อยไปจนอุณหภูมิในอิฐเข้าใกล้สภาวะ Cyclic equilibrium โดยวัฏจักรการทำงานของ Regenerator ทางด้านทิศเหนือจะเป็น Heating period และ Cooling period สลับกัน

ตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่แล้วว่า Regenerator ของทางโรงงานเป็นระบบ Manual ดังนั้นการทำการทดลองเพื่อสลับการทำงานของ Regenerator ต้องทำด้วยมือทุกขั้นตอน โดยขั้นตอนในการสลับการไหลของ Regenerator แสดงในรูปที่ 5.10 โดยมีรายละเอียดดังนี้

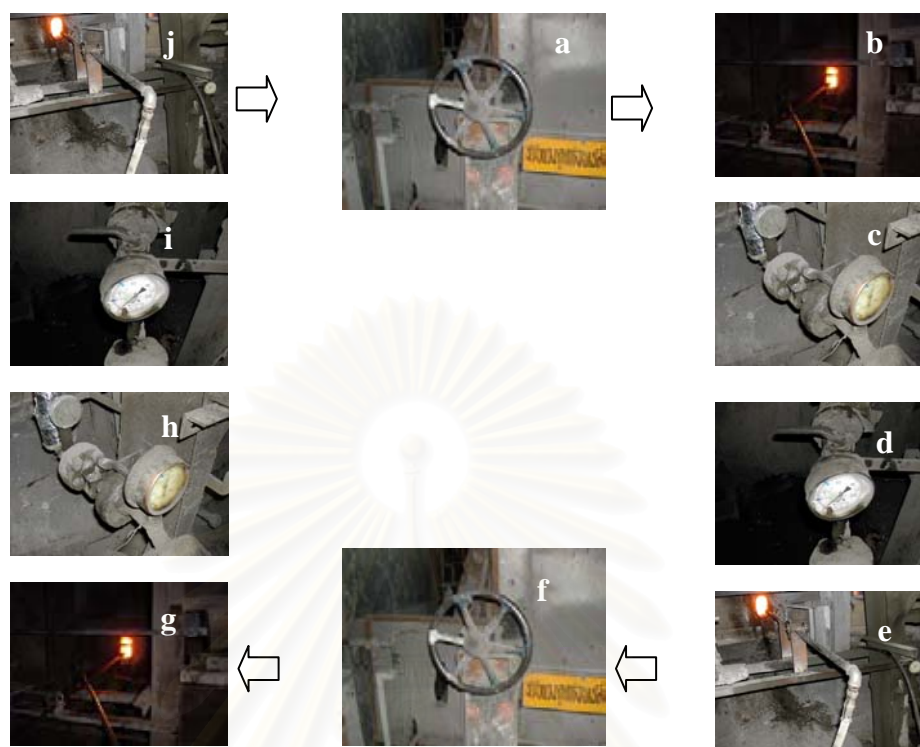
1. หมุนวาล์วเพื่อปรับทิศทางของอากาศดีที่ใช้ในการเผาไหม้ให้อยู่ในตำแหน่งไหลเข้า Regenerator ทางด้านทิศใต้ โดยลักษณะของวาล์วปรับทิศทางการไหลแสดงในรูปที่ 5.10(a)
2. ทำการใส่หัวเผาที่ตำแหน่งปากทางเข้าเตาถลุงทางด้านทิศใต้ โดยลักษณะของหัวเผาแสดงในรูปที่ 5.10(b)
3. เปิดวาล์วน้ำมัน ดังแสดงในรูปที่ 5.10(c) เพื่อให้ น้ำมันไหลเข้าเตาถลุง ใสน้ำกากกันแสงเพื่อดูเปลวไฟ โดยต้องสังเกตให้เปลวไฟกระจายอย่างสม่ำเสมอ ถ้าเปลวไฟกระจายไม่สม่ำเสมอต้องรีบนำหัวเผาออกมาเพื่อรอทำความสะอาด แล้วรีบใส่หัวเผาสำรองแทน หลังจากนั้นเลื่อนตำแหน่งหัวฉีดให้อยู่ในตำแหน่งที่น้ำมันกระจายเข้าในเตาอย่างเหมาะสม แล้วทำการขันสกรูเพื่อยึดหัวเผาให้แน่น
4. กลับไปยังตำแหน่ง Monitor เพื่อสังเกตอัตราการไหลของน้ำมัน และสังเกตอุณหภูมิภายในเตา พยายามรักษาอัตราการไหลของน้ำมัน และอุณหภูมิภายในเตาให้คงที่ ถ้าอัตราการไหลของน้ำมัน และอุณหภูมิภายในเตาไม่คงที่ให้กลับไปปรับวาล์วน้ำมัน เพื่อเพิ่มหรือลดปริมาณน้ำมัน จากนั้นกลับไปยังตำแหน่ง Monitor คอยสังเกตอัตราการไหลของน้ำมัน และอุณหภูมิภายในเตา และคอยปรับวาล์วน้ำมันเพื่อให้อัตราการไหลของน้ำมัน และอุณหภูมิภายในเตาคงที่มากที่สุด
5. เมื่อครบเวลาที่กำหนด ให้ปิดวาล์วน้ำมันทางด้านทิศใต้ 5.10(d)
6. ถลายสกรูที่ยึดหัวเผา เลื่อนหัวเผาออกจากปากเตา 5.10(e) (เนื่องจากเมื่อสลับการไหลเปลวไฟจะไหลย้อนกลับมาทางด้านทิศใต้ซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายได้)
7. หมุนวาล์วเพื่อปรับทิศทางของอากาศดีที่ใช้ในการเผาไหม้ให้อยู่ในตำแหน่งไหลเข้า Regenerator ทางด้านทิศเหนือ 5.10(f)
8. ทำการใส่หัวเผาที่ตำแหน่งปากทางเข้าเตาถลุงทางด้านทิศเหนือ 5.10(g)
9. เปิดวาล์วน้ำมันเพื่อให้ น้ำมันไหลเข้าเตาถลุง 5.10(h) ใสน้ำกากกันแสงเพื่อดูเปลวไฟ โดยต้องสังเกตให้เปลวไฟกระจายอย่างสม่ำเสมอ ถ้าเปลวไฟกระจายไม่สม่ำเสมอต้องรีบนำหัวเผาออกมาเพื่อรอทำความสะอาด แล้วรีบใส่หัวเผาสำรองแทน หลังจากนั้นเลื่อนตำแหน่งหัวฉีดให้อยู่ในตำแหน่ง

ที่น้ำมันกระจายเข้าไปในเตาอย่างเหมาะสม แล้วทำการขันสกรูเพื่อยึดหัวเผาให้แน่น

10. กลับไปยังตำแหน่ง Monitor เพื่อสังเกตอัตราการไหลของน้ำมัน และสังเกตอุณหภูมิภายในเตา พยายามรักษาอัตราการไหลของน้ำมัน และอุณหภูมิภายในเตาให้คงที่ ถ้าอัตราการไหลของน้ำมัน และอุณหภูมิภายในเตาไม่คงที่ให้กลับไปปรับวาล์วน้ำมัน เพื่อเพิ่มหรือลดปริมาณน้ำมัน จากนั้นกลับไปยังตำแหน่ง Monitor คอยสังเกตอัตราการไหลของน้ำมัน และอุณหภูมิภายในเตา และคอยปรับวาล์วน้ำมันเพื่อให้อัตราการไหลของน้ำมัน และอุณหภูมิภายในเตาคงที่มากที่สุด
11. เมื่อครบคาบเวลาที่กำหนด ให้ปิดวาล์วน้ำมันทางด้านทิศเหนือ 5.10(i)
12. คลายสกรูที่ยึดหัวเผา เลื่อนหัวเผาออกจากปากเตา 5.10(j) (เนื่องจากเมื่อสลับการไหลเปลวไฟจะไหลย้อนกลับมาทางด้านทิศเหนือซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายได้)
13. หมุนวาล์วเพื่อปรับทิศทางของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ให้อยู่ในตำแหน่งไหลเข้า Regenerator ทางด้านทิศใต้ 5.10(a)
14. ทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2-13 จนค่าต่างๆเข้าสู่ Cyclic equilibrium
15. ทำการทดลองที่คาบเวลา 25, 20, 15 และ 10 นาที

เนื่องจากหัวเผาทางทิศเหนือกับทิศใต้อยู่ห่างกันประมาณ 20 เมตรดังนั้นทุกขั้นตอนจะต้องมีการวิ่งไปกลับ และทำตามขั้นตอนต่างๆให้เร็วที่สุดเพื่อรักษาอุณหภูมิภายในเตาให้คงที่มากที่สุด เพื่อลดการผิดพลาดเนื่องจากการตรวจวัด

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.10 ขั้นตอนการทดลอง

### 5.7 ปัญหาที่เกิดขึ้นในการทดลอง

เนื่องจากสภาวะแวดล้อมมีอุณหภูมิสูง และมีสารพิษที่เกิดจากการถลุง แต่มีความจำเป็นต้องทำการทดลองต่อเนื่องกันมากกว่าวันละ 20 ชั่วโมง โดยไม่สามารถหยุดพัก (เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ) และประกอบกับผู้ปฏิบัติงานต้องวิ่งไปมาขณะที่สวมหมวกนิรภัย รองเท้านิรภัย และหน้ากากกันสารพิษตลอดเวลา ทำให้เกิดความอ่อนล้าในการทำงาน เมื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์ ได้พบข้อบกพร่องในการทดลองบางส่วนทำให้ต้องตัดข้อมูลทิ้งไปไม่สามารถนำผลลัพธ์ในส่วนที่คลาดเคลื่อนมากนั้นมาแสดงได้ โดยจะทำการสรุปข้อผิดพลาดในส่วนของการวิเคราะห์ผลในบทต่อไป

## บทที่ 6

### การเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากระเบียบวิธีเชิงตัวเลข กับ การทดลอง

วิทยานิพนธ์นี้มีรายละเอียด 2 ส่วนคือ 1. การทดลองโดยการบันทึกข้อมูลการทำงานจริงในโรงงาน เพื่อหาการกระจายตัวของอุณหภูมิในของไหล และวัสดุสะสมความร้อน และ 2. การใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการคำนวณหาการกระจายตัวของอุณหภูมิทั้งในของไหล และวัสดุสะสมความร้อน ข้อมูลที่ได้จากทั้ง 2 ส่วนจะถูกนำมาเปรียบเทียบเพื่อวิเคราะห์หาข้อจำกัดที่เหมาะสมในการสลับคาบการไหลเพื่อให้สามารถนำความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้มากที่สุด

#### 6.1 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ และการวิเคราะห์ผล

เนื่องจากข้อมูลการกระจายตัวของอุณหภูมิทั้งในของไหล และวัสดุสะสมความร้อน มีค่อนข้างมาก ผู้วิจัยจึงนำเสนอข้อมูลต่างๆ ในรูปแบบกราฟ โดยมีรายละเอียดอยู่ในภาคผนวก ค.

กราฟต่อไปนี้เป็นกราฟที่ใช้แสดงการเปรียบเทียบผลลัพธ์ ที่ได้จากการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการคำนวณ เปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองที่ได้จากการเก็บข้อมูลจริงที่โรงงาน โดยจะแบ่งการเปรียบเทียบออกเป็น 3 ส่วนดังนี้ 1. กราฟเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิของของไหลที่ระนาบกึ่งกลางของของไหล 2. กราฟเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิของอิฐทนไฟที่ระนาบผิววัสดุสะสมความร้อน และ 3. กราฟเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิของอิฐทนไฟที่ระนาบที่สมมติให้เป็น Adiabatic plane ซึ่งสามารถดูรูปประกอบได้จากรูปที่ 5.2 และ 5.3

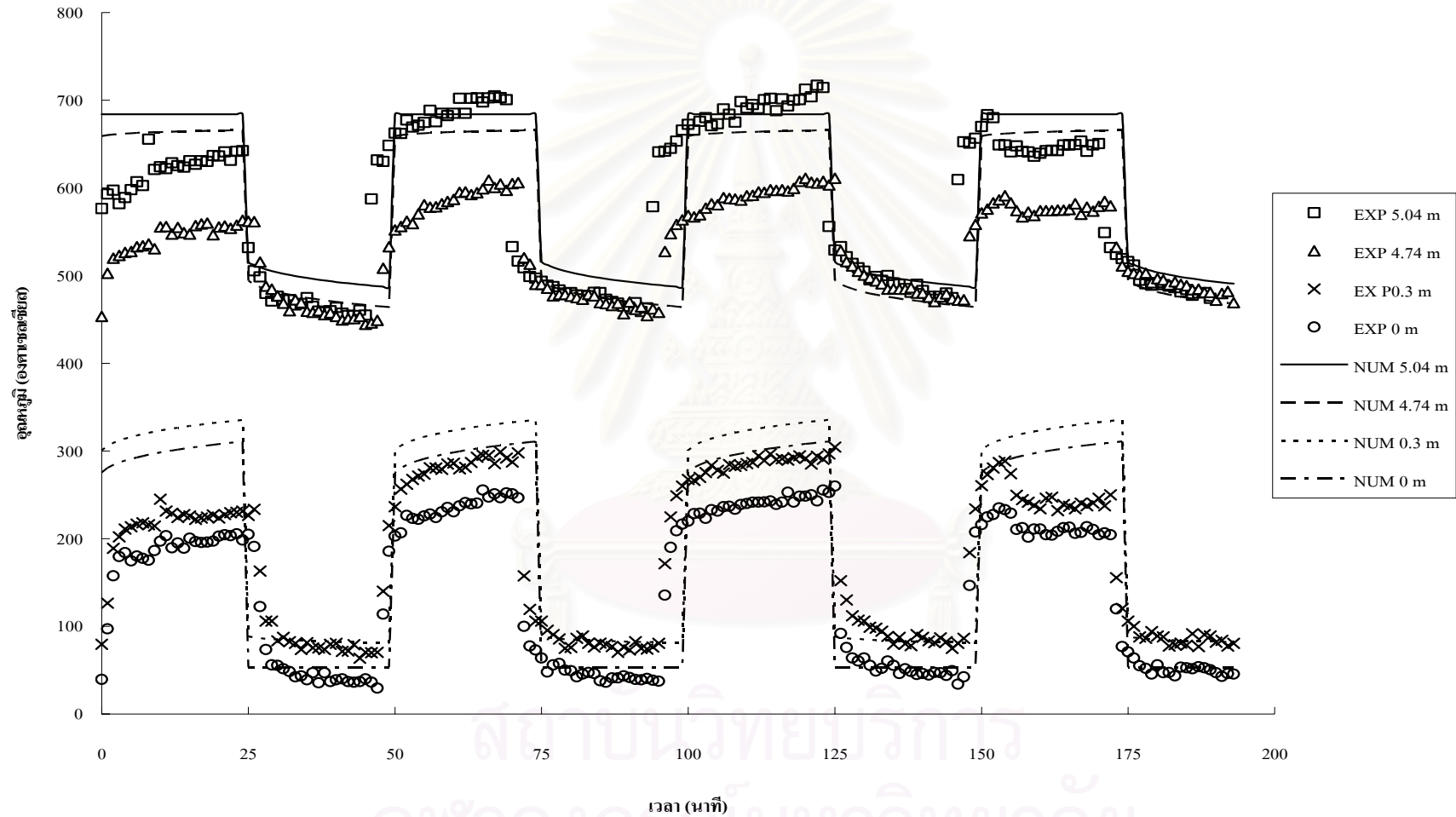
การเปรียบเทียบผลจะกระทำที่เวลาการสลับคาบการไหล 25, 20, 15 และ 10 นาที ตามลำดับ ซึ่งแสดงในรูปที่ 6.1 - 6.12 โดยรูปที่ 6.1 - 6.3 แสดงการสลับคาบการไหลที่เวลา 25 นาที รูปที่ 6.4 - 6.6 แสดงการสลับคาบการไหลที่เวลา 20 นาที รูปที่ 6.7 - 6.9 แสดงการสลับคาบการไหลที่เวลา 15 นาที และรูปที่ 6.10 - 6.12 แสดงการสลับคาบการไหลที่เวลา 10 นาที

ในตารางที่ 6.1 และ 6.2 แสดงค่ามัธยฐานของค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิ ที่ตำแหน่ง และเวลาที่ใช้ในการสลับคาบการไหลต่างๆ ส่วนในตารางที่ 6.3 - 6.10 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในของไหล และผิวของวัสดุสะสมความร้อน ที่เวลาเริ่มการไหล กลางคาบการไหล และปลายคาบการไหล สำหรับการสลับคาบการไหลต่างๆ

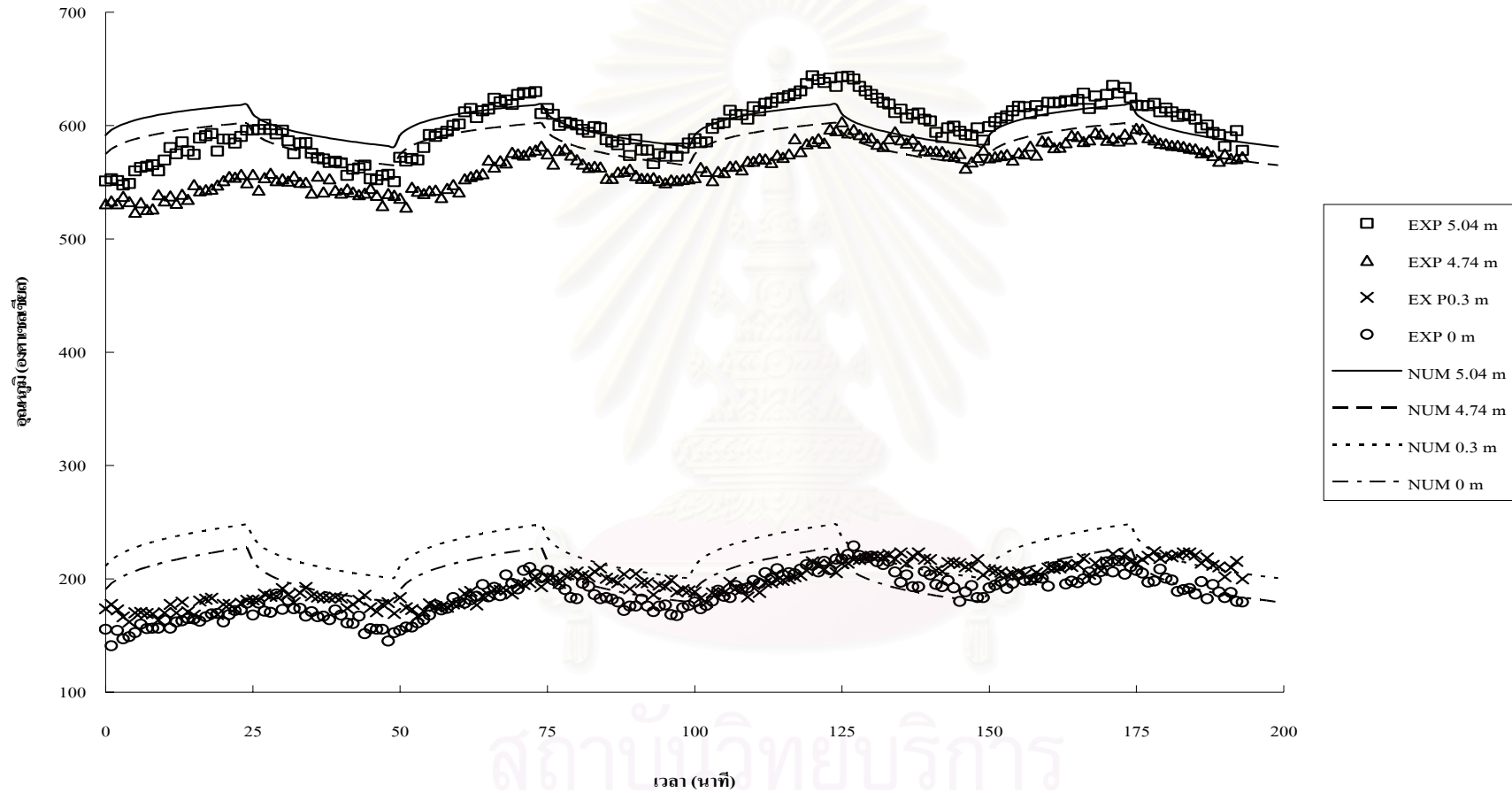
### 6.1.1 การวิเคราะห์ผลลัพท์

ในขั้นแรกจะทำการอธิบายผลลัพท์ และวิเคราะห์กราฟ ซึ่งได้จากการทดลอง หลังจากนั้นจะทำการอธิบายผลลัพท์ และวิเคราะห์กราฟ ซึ่งได้จากการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ และจะนำข้อมูลจากทั้งสองส่วนมาเปรียบเทียบให้เห็นความแตกต่าง ข้อดี และจุดบกพร่องของระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่นำมาใช้งาน ในที่นี้จะใช้วัฏจักรเวลาในการสลับคาบการไหล 25 นาที มาเป็นตัวอย่างในการวิเคราะห์ โดยรูปที่ 6.1 ถึง 6.3 จะแสดงให้เห็นผลการเปรียบเทียบผลลัพท์ที่ได้จากระเบียบวิธีเชิงตัวเลข และผลลัพท์จากทดลองสลับคาบการไหลของ Regenerator ที่คาบเวลา 25 นาที โดยเริ่มต้นจาก Heating period ต่อจากนั้นก็ทำการสลับคาบการไหลไปเป็น Cooling period โดยทำการสลับการไหล จนสังเกตได้ว่ากราฟเริ่มลู่เข้าสู่ Cyclic equilibrium โดยทำการวิเคราะห์ผลลัพท์บนสามระนาบ คือ

1. ระนาบกึ่งกลางของของไหล
2. ระนาบผิววัสดุสะสมความร้อน
3. ระนาบสมมาตรในวัสดุสะสมความร้อนที่สมมติให้เป็น Adiabatic plane

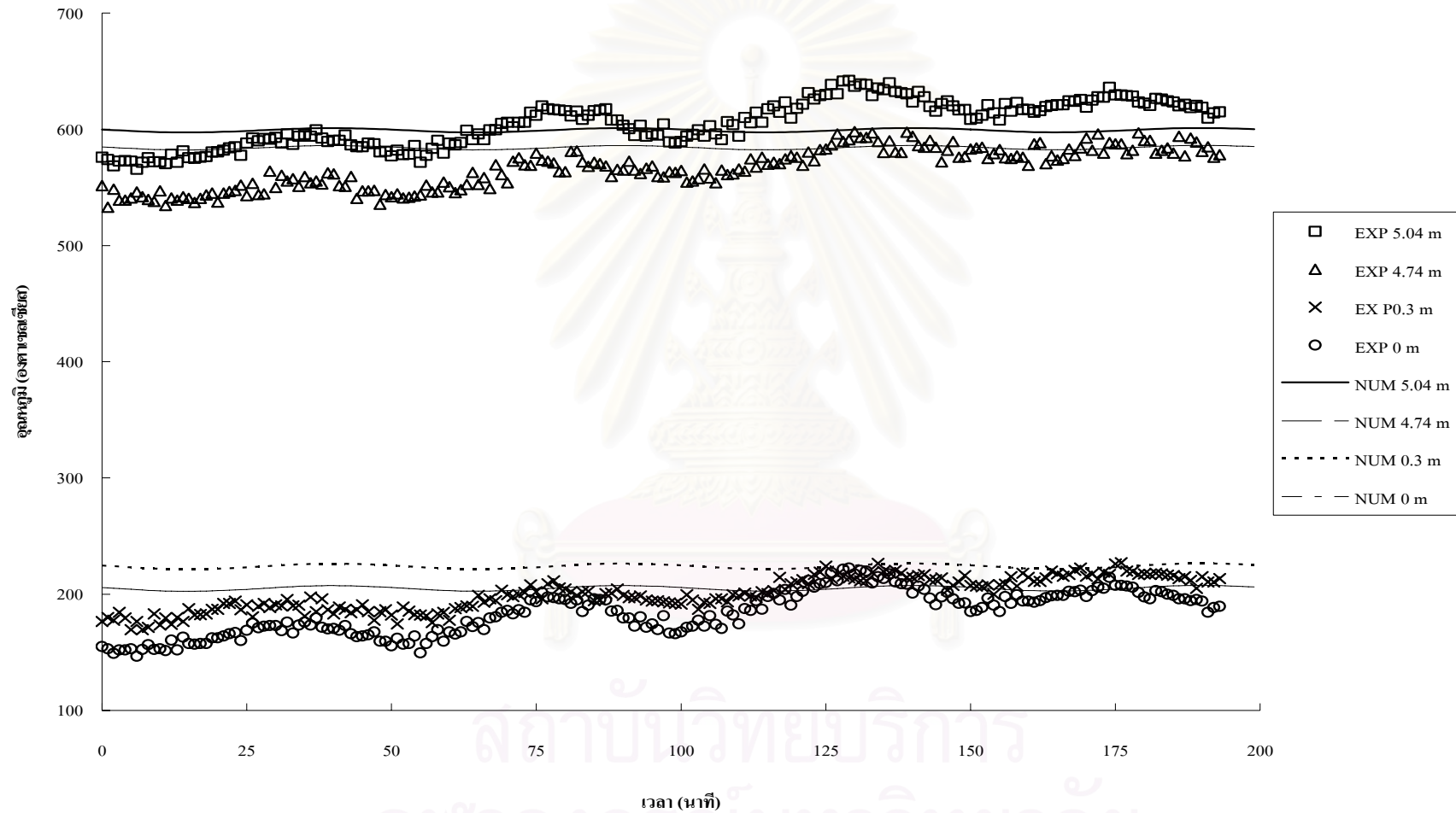


รูปที่ 6.1 การกระจายตัวของอนุภาคนิวเคลียสของไอโกลที่ระนาบกึ่งกลางของของไหล สำหรับการสลับคาบการไหล 25 นาที

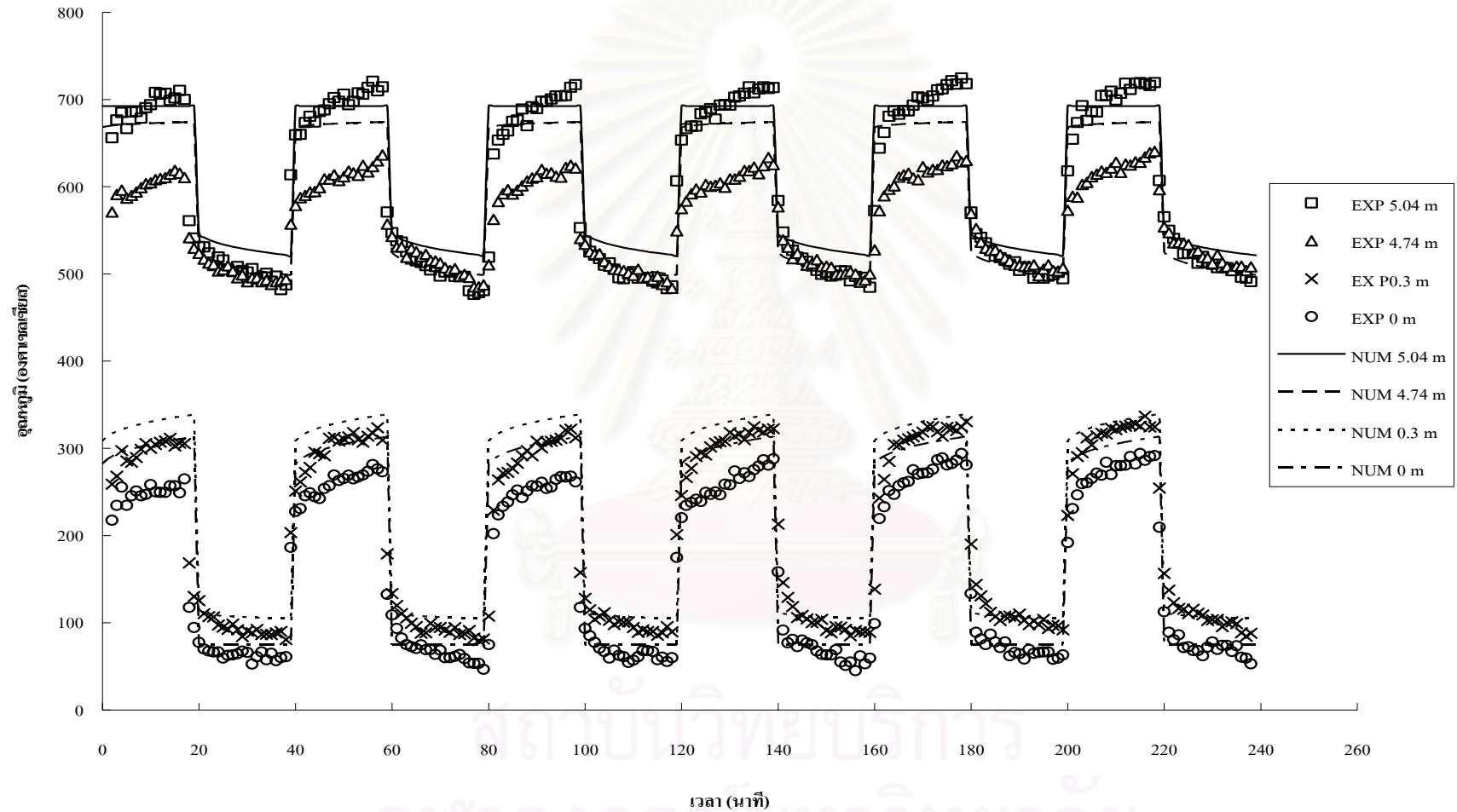


รูปที่ 6.2 การกระจายตัวของอุณหภูมิของวัสดุผสมความร้อนที่ระนาบผิววัสดุผสมความร้อน สำหรับการสลับคาบการไหล 25 นาที

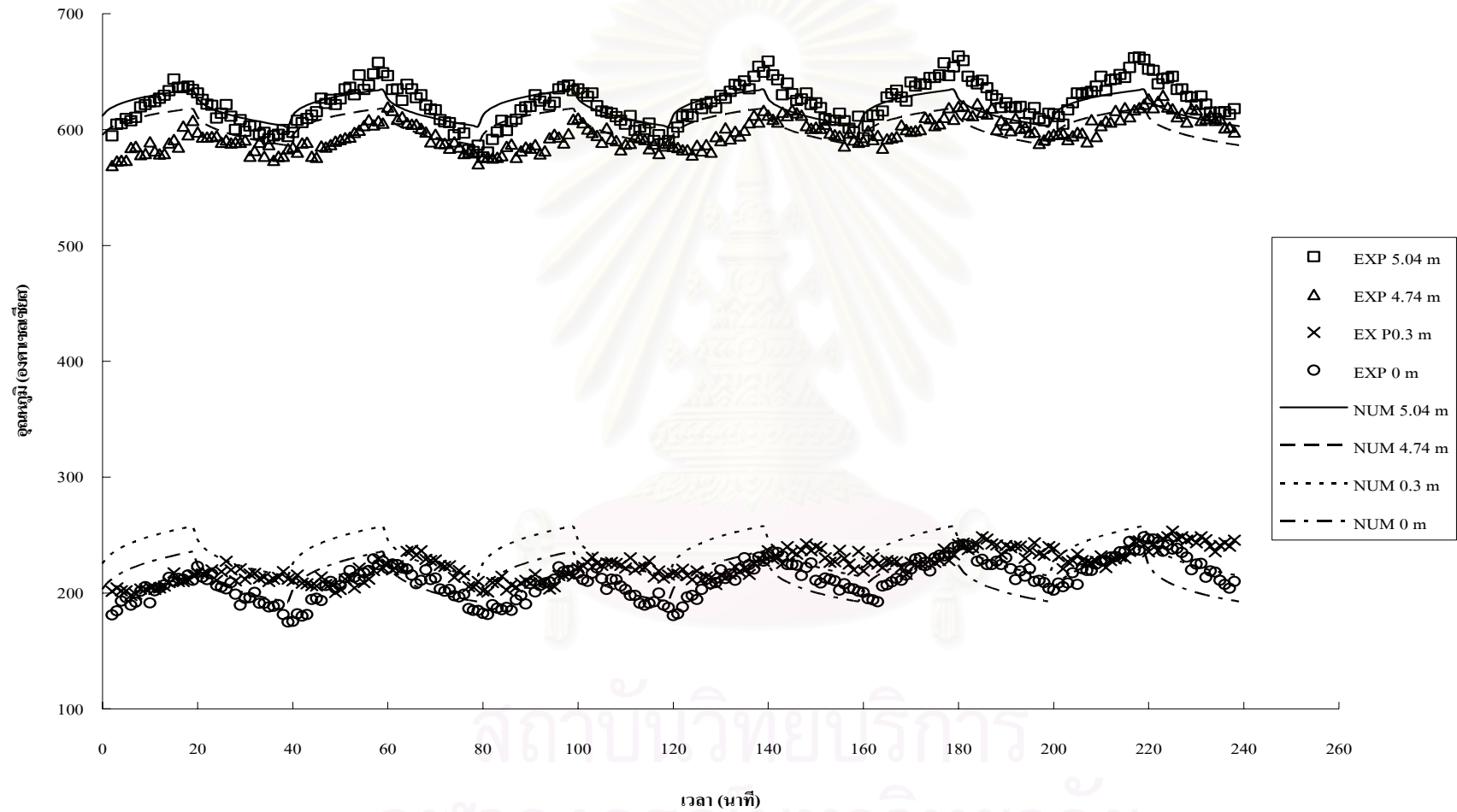




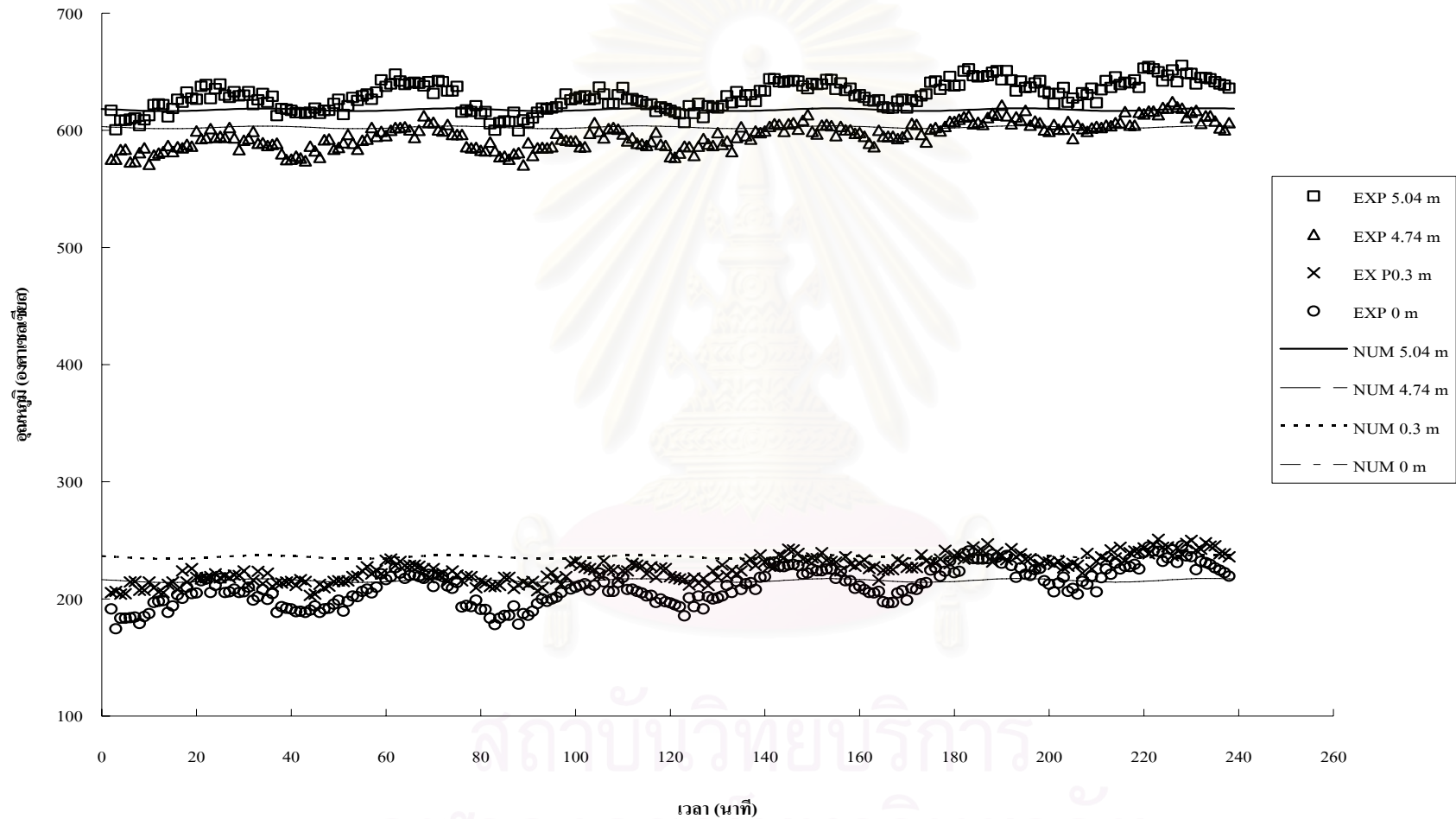
รูปที่ 6.3 การกระจายตัวของอุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนที่ระนาบที่สมมติให้เป็น Adiabatic plane สำหรับการสลับคาบการไหล 25 นาที



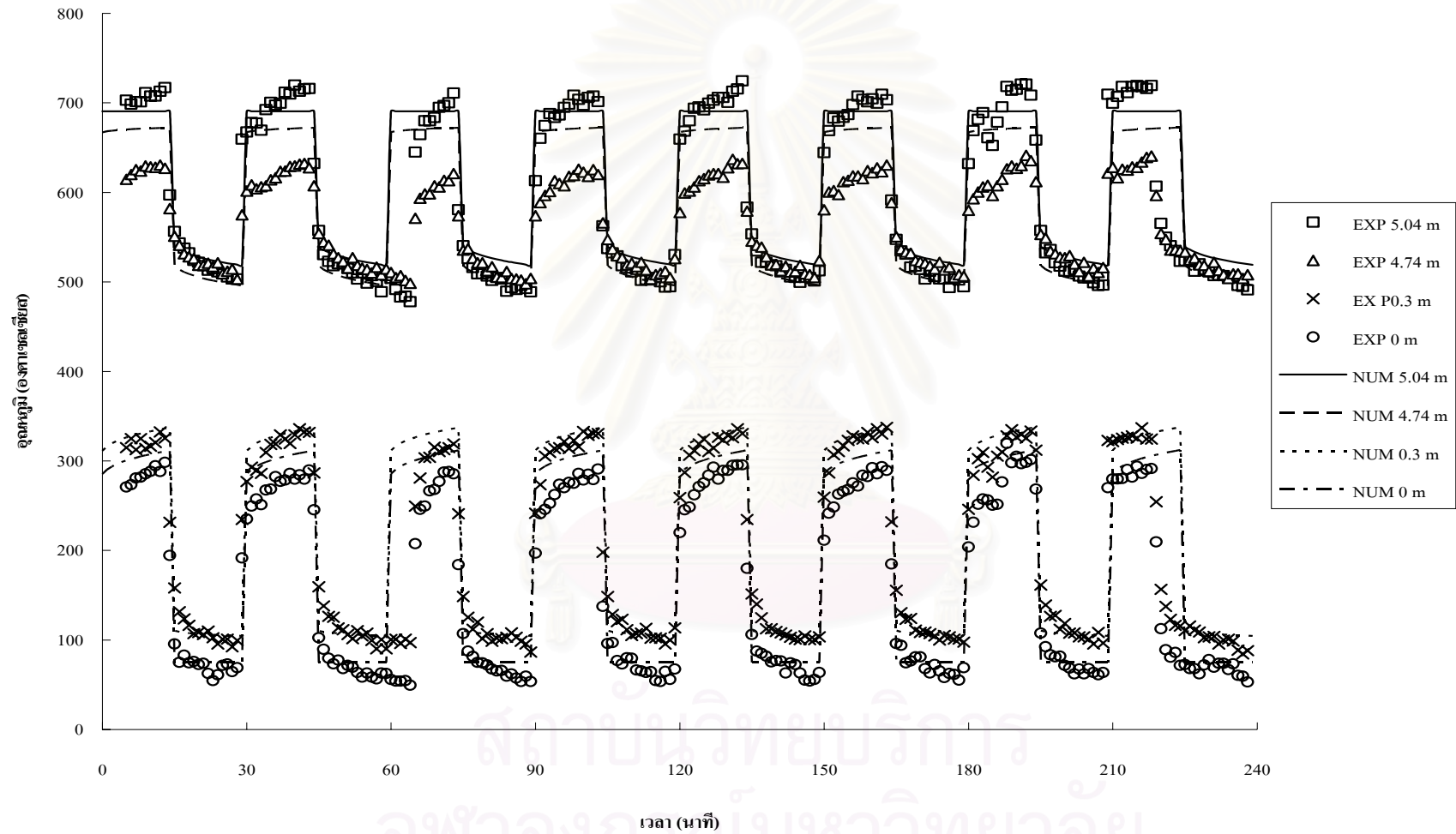
รูปที่ 6.4 การกระจายตัวของอุณหภูมิของของไหลที่ระนาบกึ่งกลางของของไหล สำหรับการสลับคาบการไหล 20 นาที



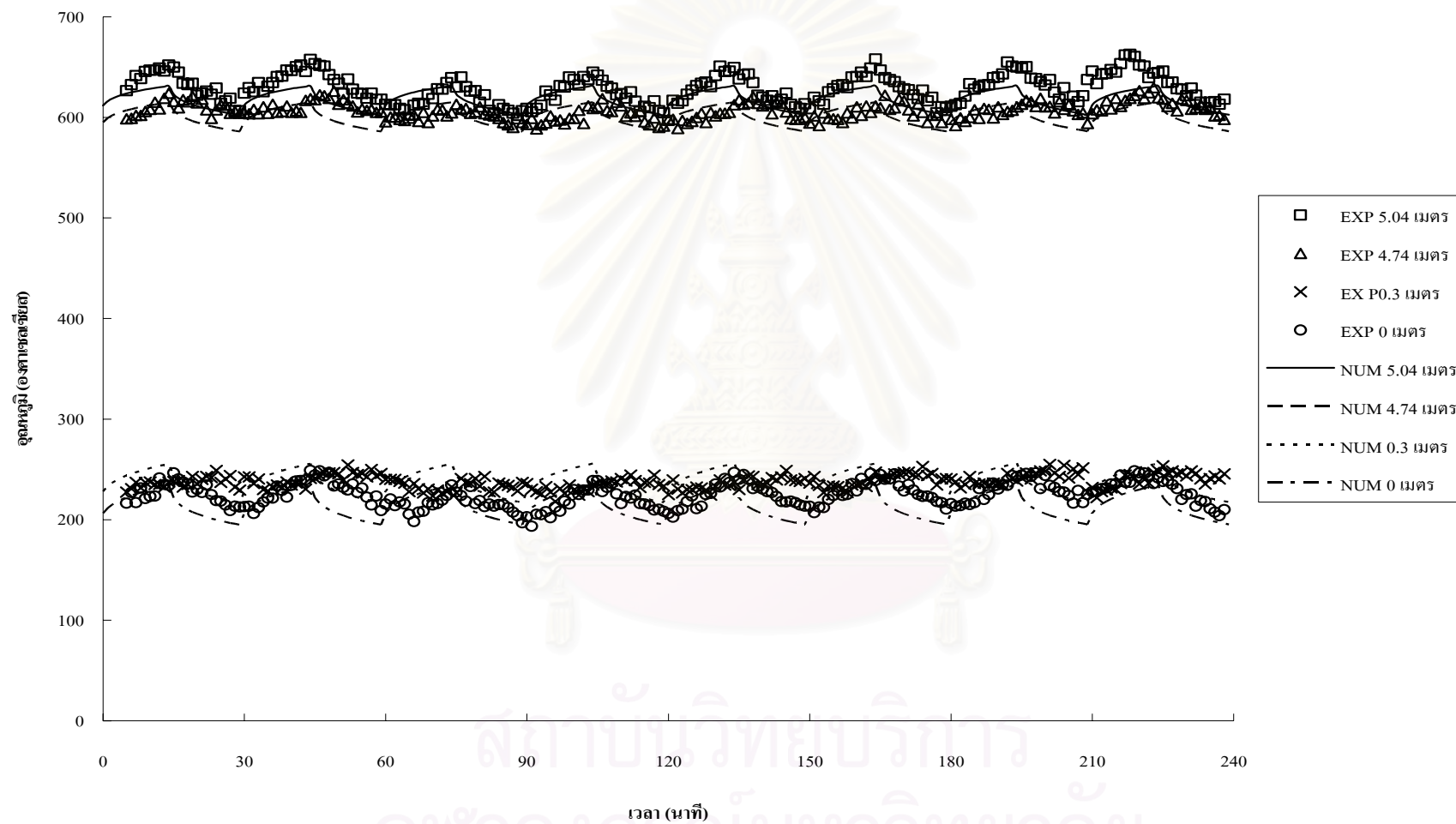
รูปที่ 6.5 การกระจายตัวของอุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนที่ระนาบผิววัสดุสะสมความร้อน สำหรับการสับคาบการไหล 20 นาที



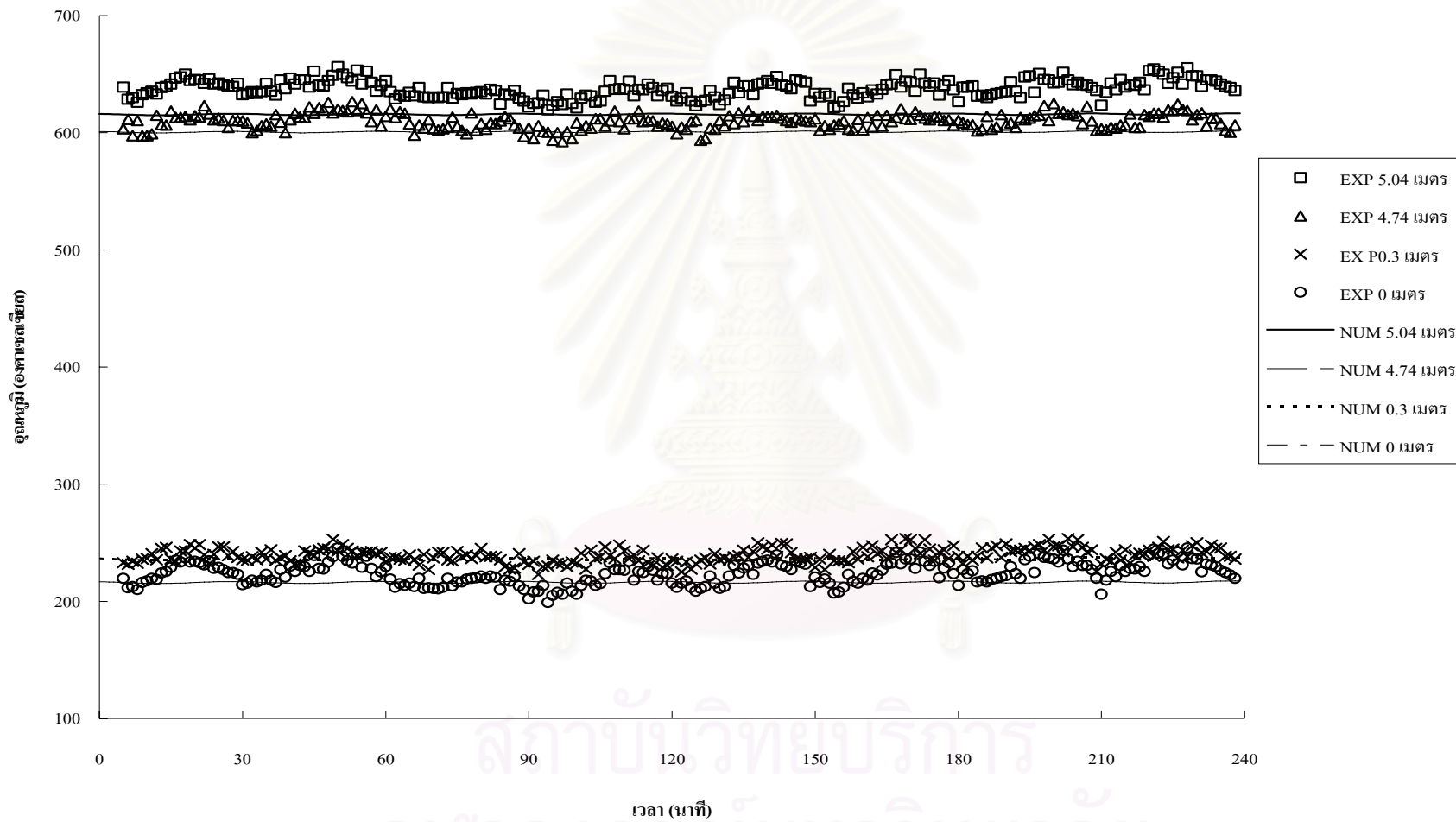
รูปที่ 6.6 การกระจายตัวของอุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนที่ระนาบที่สมมติให้เป็น Adiabatic plane สำหรับการสลับคาบการไหล 20 นาที



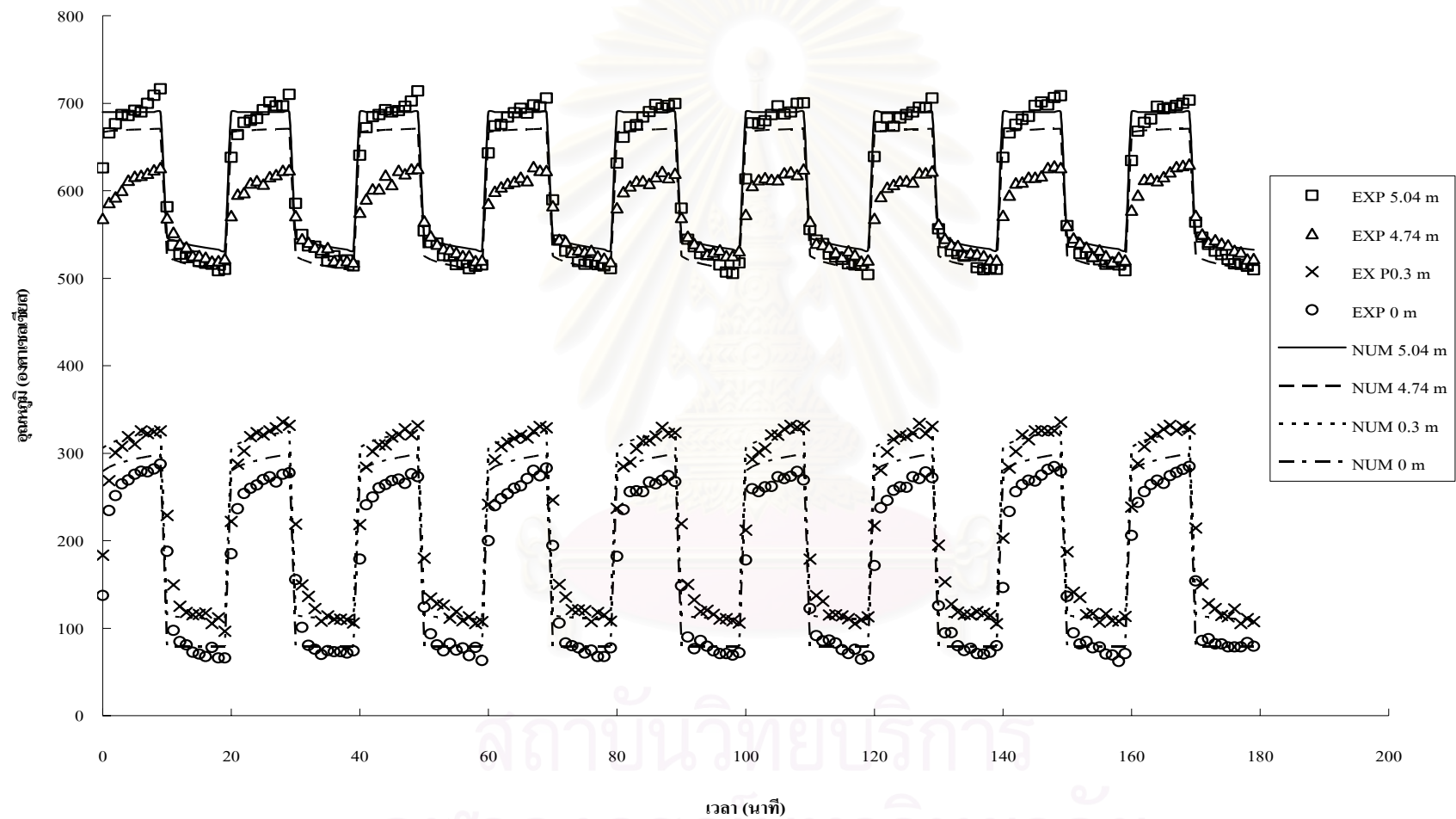
รูปที่ 6.7 การกระจายตัวของอนุภาคของของไหลที่ระนาบกึ่งกลางของของไหล สำหรับการสลับคาบการไหล 15 นาที



รูปที่ 6.8 การกระจายตัวของอุณหภูมิของวัสดุผสมความร้อนที่ระนาบผิววัสดุผสมความร้อน สำหรับการสลับคาบการไหล 15 นาที

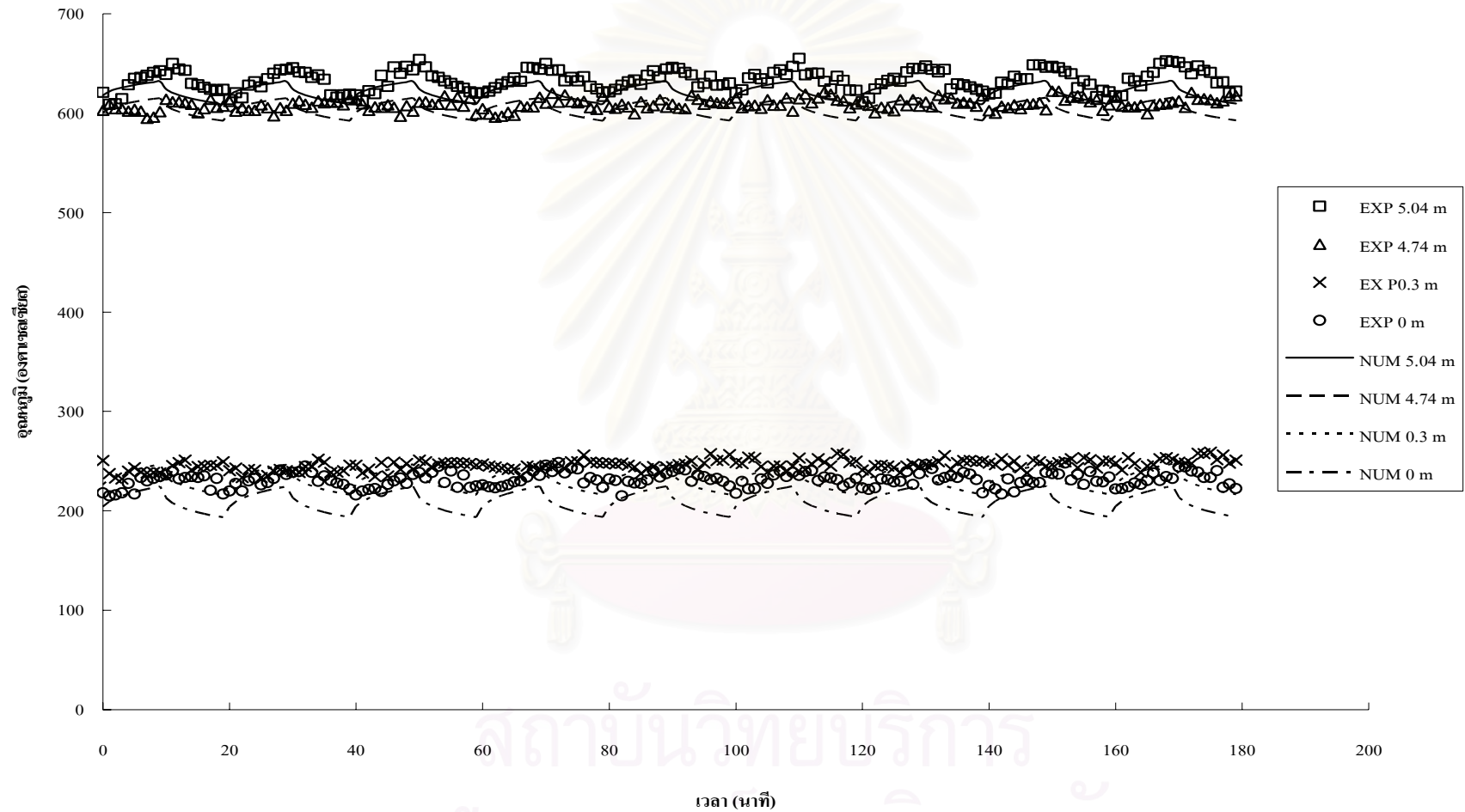


รูปที่ 6.9 การกระจายตัวของอุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนที่ระนาบที่สมมติให้เป็น Adiabatic plane สำหรับการสลับคาบการไหล 15 นาที

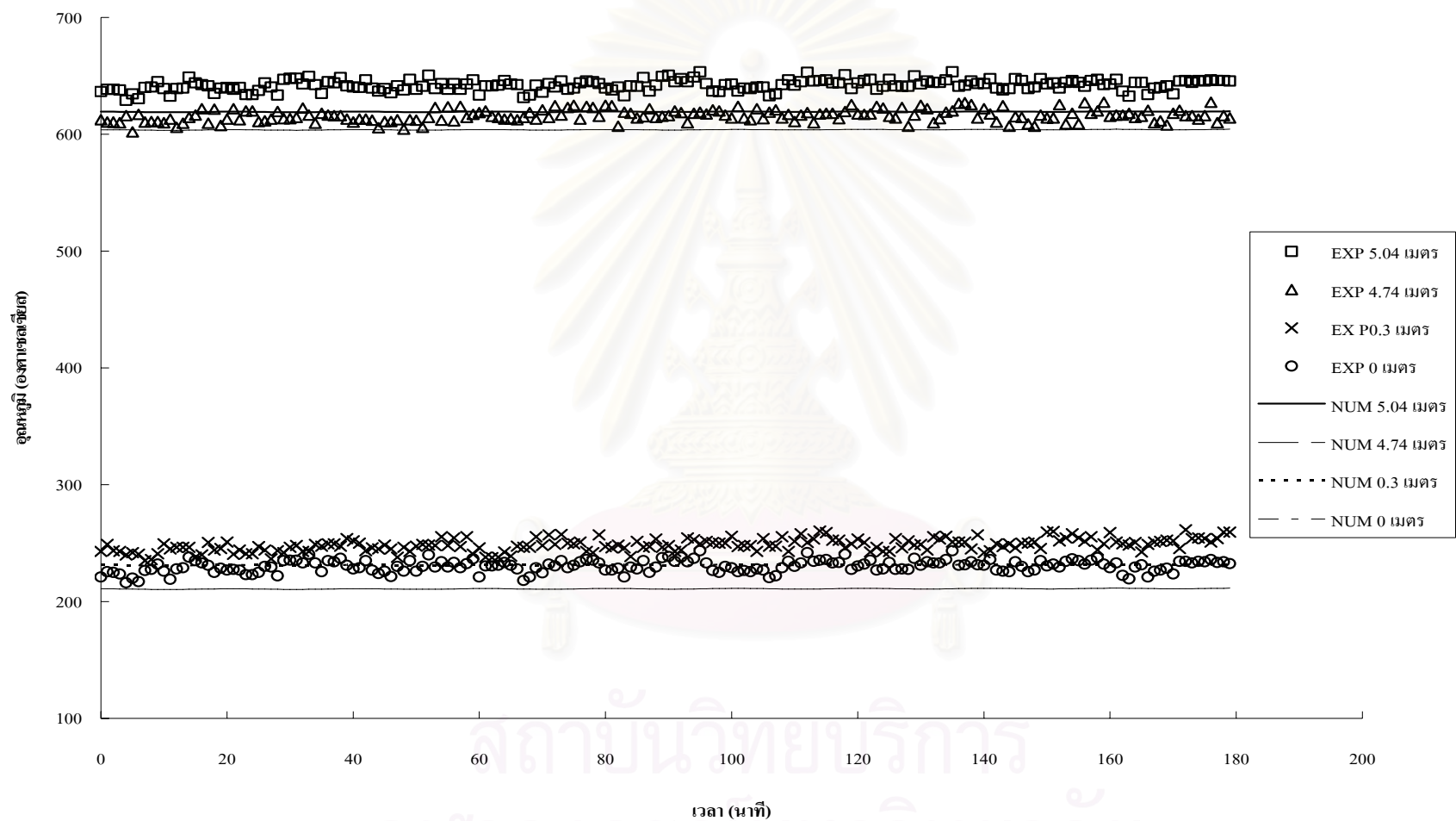


รูปที่ 6.10 การกระจายตัวของอนุภาคมิกของของไหลที่ระนาบกึ่งกลางของของไหล สำหรับการสับคาบการไหล 10 นาที





รูปที่ 6.11 การกระจายตัวของอุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนที่ระนาบผิววัสดุสะสมความร้อน สำหรับการสลับคาบการไหล 10 นาที



รูปที่ 6.12 การกระจายตัวของอุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนที่ระนาบที่สมมติให้เป็น Adiabatic plane สำหรับการสลับคาบการไหล 10 นาที

ตารางที่ 6.1 ค่ามัธยฐานของค่าความผิดพลาดในช่วง Heating period ที่ตำแหน่ง และเวลาที่ใช้ในการสลับคาบการไหลต่างๆ

เวลาที่ใช้ในการสลับคาบการไหล	ตำแหน่ง	ค่ามัธยฐานของค่าความผิดพลาดที่ตำแหน่งต่างๆ (%)			
		ERR 5.04 m	ERR 4.74 m	ERR 0.3 m	ERR 0 m
25 min	ที่ระนาบกึ่งกลางของของไหล	1.92	10.44	11.73	19.60
20 min		2.20	8.38	4.80	10.98
15 min		1.87	8.30	1.99	10.55
10 min		1.85	8.12	1.48	8.42
25 min	ที่ระนาบผิววัสดุสะสมความร้อน	1.69	3.93	17.08	7.84
20 min		1.40	1.87	9.37	3.86
15 min		1.03	1.14	5.43	1.90
10 min		0.99	0.67	2.99	4.22
25 min	ที่ระนาบสมมาตรในวัสดุสะสมความร้อนที่ สมมติให้เป็น Adiabatic plane	1.72	2.55	10.25	7.74
20 min		0.97	1.01	2.49	5.45
15 min		2.77	0.89	1.41	1.80
10 min		3.83	1.14	6.92	8.75

ตารางที่ 6.2 ค่ามัธยฐานของค่าความผิดพลาดในช่วง Cooling period ที่ตำแหน่ง และเวลาที่ใช้ในการสลับคาบการไหลต่างๆ

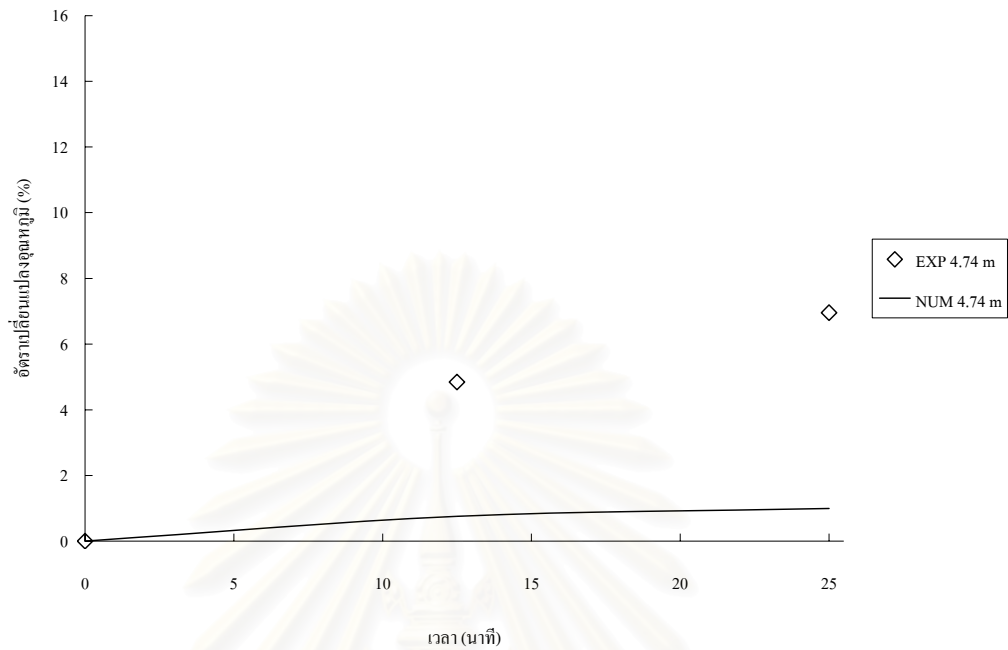
เวลาที่ใช้ในการสลับคาบการไหล	ตำแหน่ง	ค่ามัธยฐานของค่าความผิดพลาดที่ตำแหน่งต่างๆ (%)			
		ERR 5.04 m	ERR 4.74 m	ERR 0.3 m	ERR 0 m
25 min	ที่ระนาบกึ่งกลางของของไหล	2.11	2.49	8.34	13.79
20 min		3.80	1.54	6.03	12.79
15 min		3.26	3.31	3.62	12.72
10 min		2.71	3.10	4.30	11.13
25 min	ที่ระนาบผิววัสดุสะสมความร้อน	2.95	1.21	3.94	5.71
20 min		2.17	1.71	7.51	9.56
15 min		2.78	2.32	8.91	11.70
10 min		2.87	2.69	11.53	17.19
25 min	ที่ระนาบสมมาตรในวัสดุสะสมความร้อนที่ สมมติให้เป็น Adiabatic plane	5.07	0.93	4.59	4.57
20 min		4.60	2.26	0.66	7.31
15 min		4.24	1.89	3.19	7.42
10 min		4.18	1.58	10.68	11.70

ตารางที่ 6.3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของของไหลในช่วง Heating period ที่เวลาเริ่มการไหล กลางคาบการไหล และปลายคาบการไหล สำหรับการสลับคาบการไหลต่างๆ

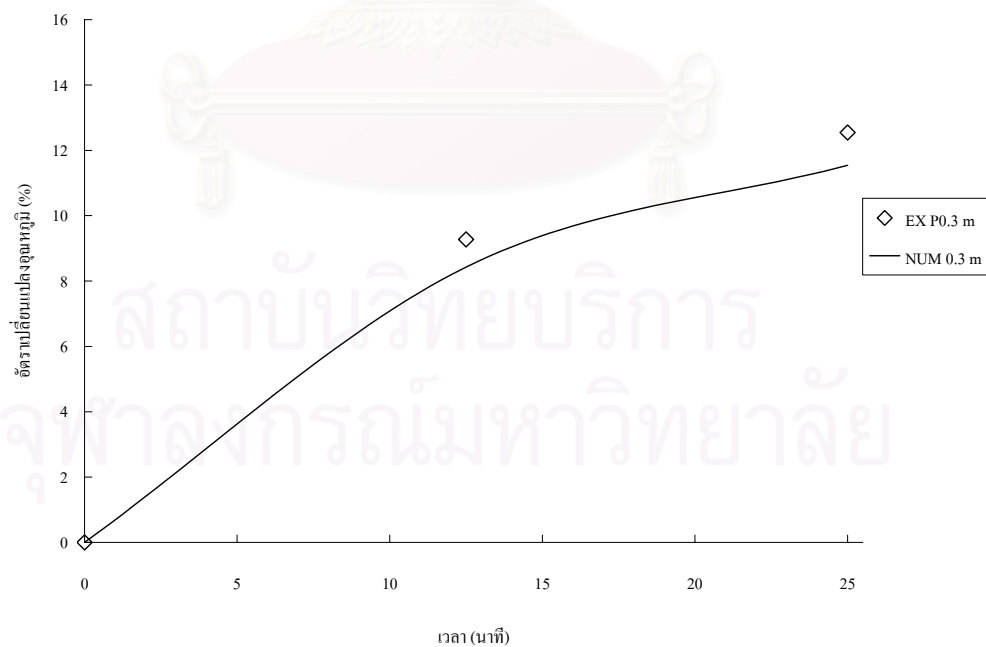
เวลาที่ใช้ในการสลับคาบการไหล	ช่วงเวลาในคาบการไหล	อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ (องศาเซลเซียส)							
		EXP 5.04 m	EXP 4.74 m	EXP 0.3 m	EXP 0 m	NUM 5.04 m	NUM 4.74 m	NUM 0.3 m	NUM 0 m
25 นาที	เริ่มคาบการไหล (ที่เวลา100นาที)	643.50	567.75	267.00	224.25	684.13	659.26	300.85	275.56
	กลางคาบการไหล (ที่เวลา112.5นาที)	686.75	595.25	291.75	241.75	684.13	664.25	326.21	301.32
	ปลายคาบการไหล (ที่เวลา125นาที)	708.25	607.25	300.50	256.25	684.13	665.81	335.57	310.86
20 นาที	เริ่มคาบการไหล (ที่เวลา160นาที)	683.75	599.00	294.75	249.25	692.34	668.41	308.93	282.65
	กลางคาบการไหล (ที่เวลา180นาที)	700.25	620.00	321.75	271.75	692.34	672.86	330.88	305.02
	ปลายคาบการไหล (ที่เวลา200นาที)	721.00	632.00	322.50	290.25	692.34	674.30	339.18	313.49
15 นาที	เริ่มคาบการไหล (ที่เวลา150นาที)	676.00	601.25	296.75	245.00	690.59	667.32	311.77	285.78
	กลางคาบการไหล (ที่เวลา165นาที)	705.75	617.00	324.75	278.00	690.59	671.07	330.41	304.76
	ปลายคาบการไหล (ที่เวลา180นาที)	706.50	626.75	333.75	291.50	690.59	672.09	336.15	310.62
10 นาที	เริ่มคาบการไหล (ที่เวลา140นาที)	678.75	609.50	311.50	260.00	690.00	669.07	315.55	289.15
	กลางคาบการไหล (ที่เวลา150นาที)	699.50	616.25	325.75	271.50	690.00	670.17	321.09	294.80
	ปลายคาบการไหล (ที่เวลา160นาที)	707.50	627.50	330.50	282.00	690.00	670.91	325.00	298.80

ตารางที่ 6.4 เปรอ์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของไหลในช่วง Heating period ที่เวลาเริ่มการไหล กลางคาบการไหล และปลายคาบการไหล เมื่อเทียบกับที่เวลาเริ่มคาบการไหล สำหรับการสลับคาบการไหลต่างๆ

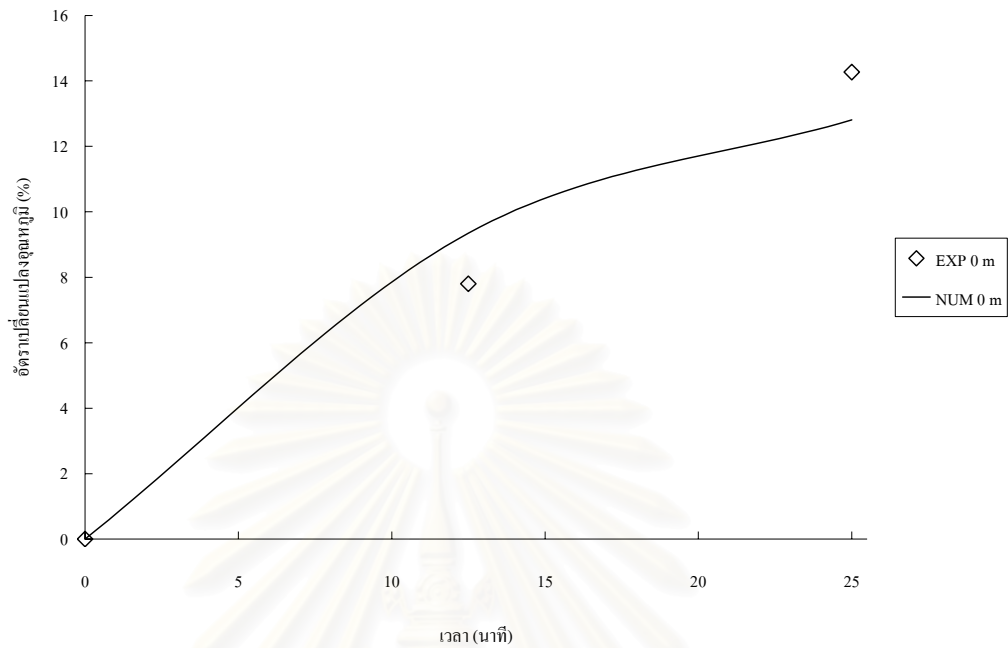
เวลาที่ใช้ในการสลับคาบการไหล	ช่วงเวลาในคาบการไหล	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อเทียบกับช่วงเริ่มคาบการไหล (%)							
		EXP 5.04 m	EXP 4.74 m	EXP 0.3 m	EXP 0 m	NUM 5.04 m	NUM 4.74 m	NUM 0.3 m	NUM 0 m
25 นาที	เริ่มคาบการไหล (ที่เวลา100นาที)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	กลางคาบการไหล (ที่เวลา112.5นาที)	6.72	4.84	9.27	7.80	0.00	0.76	8.43	9.35
	ปลายคาบการไหล (ที่เวลา125นาที)	10.06	6.96	12.55	14.27	0.00	0.99	11.54	12.81
20 นาที	เริ่มคาบการไหล (ที่เวลา160นาที)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	กลางคาบการไหล (ที่เวลา180นาที)	2.41	3.51	9.16	9.03	0.00	0.67	7.11	7.91
	ปลายคาบการไหล (ที่เวลา200นาที)	5.45	5.51	9.41	16.45	0.00	0.88	9.79	10.91
15 นาที	เริ่มคาบการไหล (ที่เวลา150นาที)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	กลางคาบการไหล (ที่เวลา165นาที)	4.40	2.62	9.44	13.47	0.00	0.56	5.98	6.64
	ปลายคาบการไหล (ที่เวลา180นาที)	4.51	4.24	12.47	18.98	0.00	0.72	7.82	8.69
10 นาที	เริ่มคาบการไหล (ที่เวลา140นาที)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	กลางคาบการไหล (ที่เวลา150นาที)	3.06	1.11	4.57	4.42	0.00	0.17	1.76	1.96
	ปลายคาบการไหล (ที่เวลา160นาที)	4.24	2.95	6.10	8.46	0.00	0.28	3.00	3.34



**รูปที่ 6.13** อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของของไหลในช่วง Heating period ที่ตำแหน่ง 4.74 เมตร ที่เวลาเริ่มการไหล กลางคาบการไหล และปลายคาบการไหล สำหรับการสลับคาบการไหล 25 นาที



**รูปที่ 6.14** อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของของไหลในช่วง Heating period ที่ตำแหน่ง 0.3 เมตร ที่เวลาเริ่มการไหล กลางคาบการไหล และปลายคาบการไหล สำหรับการสลับคาบการไหล 25 นาที



**รูปที่ 6.15** อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของของไหลในช่วง Heating period ที่ตำแหน่ง 0 เมตร ที่เวลาเริ่มการไหล กลางคาบการไหล และปลายคาบการไหล สำหรับการสลับคาบการไหล 25 นาที

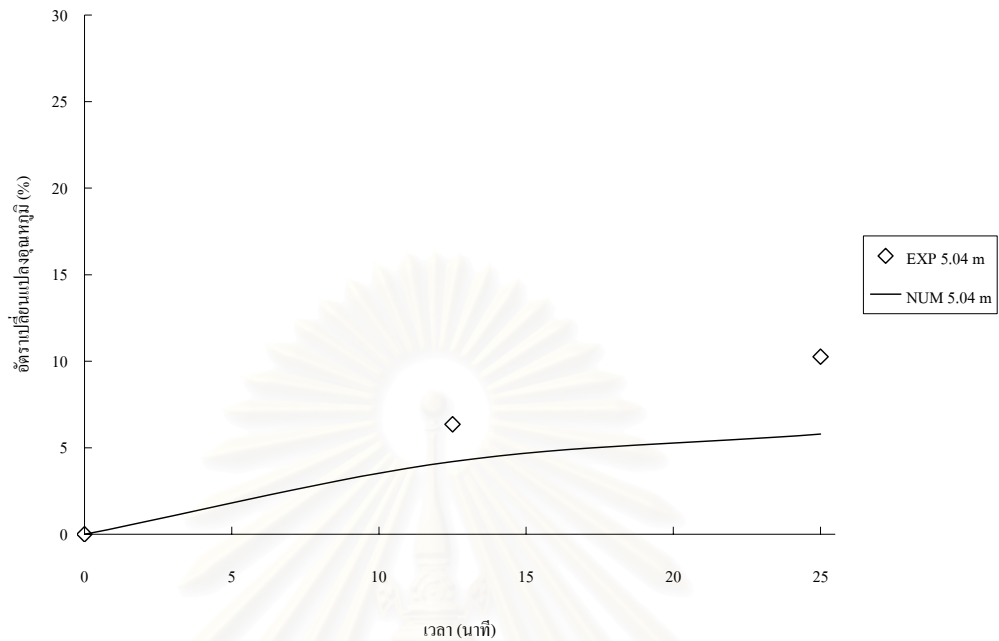


ตารางที่ 6.5 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของไหลในช่วง Cooling period ที่เวลาเริ่มการไหล กลางคาบการไหล และปลายคาบการไหล สำหรับการสลับคาบการไหลต่างๆ

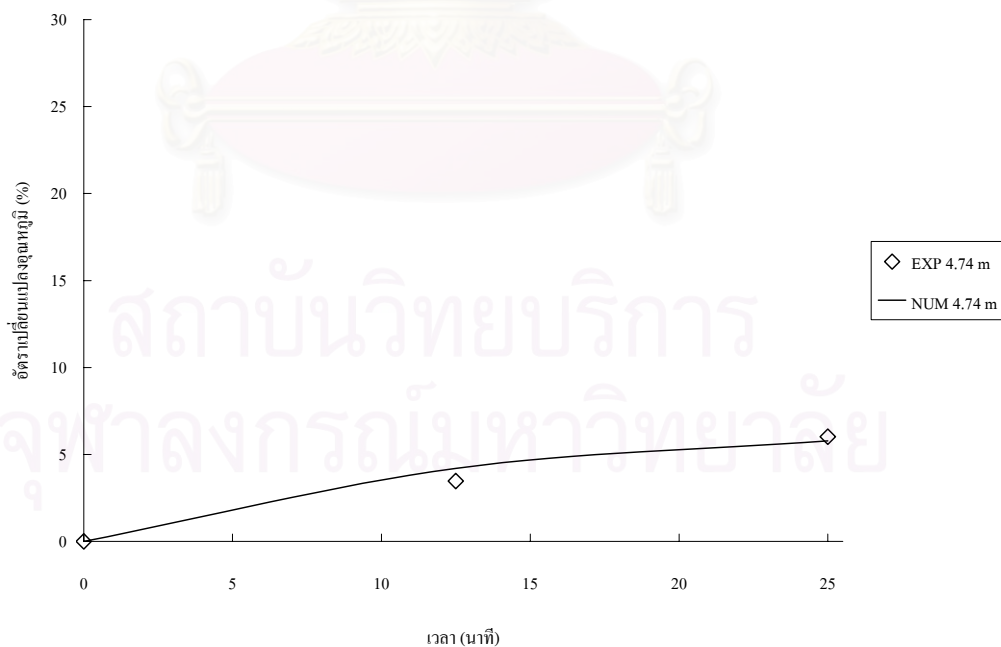
เวลาที่ใช้ในการสลับคาบการไหล	ช่วงเวลาในคาบการไหล	อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ (องศาเซลเซียส)							
		EXP 5.04 m	EXP 4.74 m	EXP 0.3 m	EXP 0 m	NUM 5.04 m	NUM 4.74 m	NUM 0.3 m	NUM 0 m
25 นาที	เริ่มคาบการไหล (ที่เวลา100นาที)	531.00	502.75	106.50	62.25	516.74	494.38	88.39	53.36
	กลางคาบการไหล (ที่เวลา112.5นาที)	497.25	485.25	79.00	50.00	495.02	472.44	83.06	53.36
	ปลายคาบการไหล (ที่เวลา125นาที)	476.50	472.50	75.00	42.50	486.86	464.24	81.31	53.36
20 นาที	เริ่มคาบการไหล (ที่เวลา160นาที)	541.17	539.33	132.33	81.83	546.37	524.28	111.70	75.11
	กลางคาบการไหล (ที่เวลา180นาที)	504.00	510.00	110.00	64.50	528.29	505.91	106.52	75.11
	ปลายคาบการไหล (ที่เวลา200นาที)	498.00	505.25	94.25	61.25	521.33	498.87	104.77	75.11
15 นาที	เริ่มคาบการไหล (ที่เวลา150นาที)	541.00	543.50	143.00	95.00	538.27	516.08	109.78	75.05
	กลางคาบการไหล (ที่เวลา165นาที)	509.00	516.25	105.75	67.75	524.88	502.51	106.11	75.05
	ปลายคาบการไหล (ที่เวลา180นาที)	502.75	506.50	101.00	58.25	520.06	497.63	104.90	75.05
10 นาที	เริ่มคาบการไหล (ที่เวลา140นาที)	528.00	538.00	125.25	83.50	540.58	518.00	112.50	79.61
	กลางคาบการไหล (ที่เวลา150นาที)	518.50	529.25	111.75	74.50	535.99	513.35	111.20	79.61
	ปลายคาบการไหล (ที่เวลา160นาที)	511.75	522.50	110.75	66.50	532.74	510.06	110.31	79.61

ตารางที่ 6.6 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของไหลในช่วง Cooling period ที่เวลาเริ่มการไหล กลางคาบการไหล และปลายคาบการไหล เมื่อเทียบกับที่เวลาเริ่มคาบการไหล สำหรับการสลับคาบการไหลต่างๆ

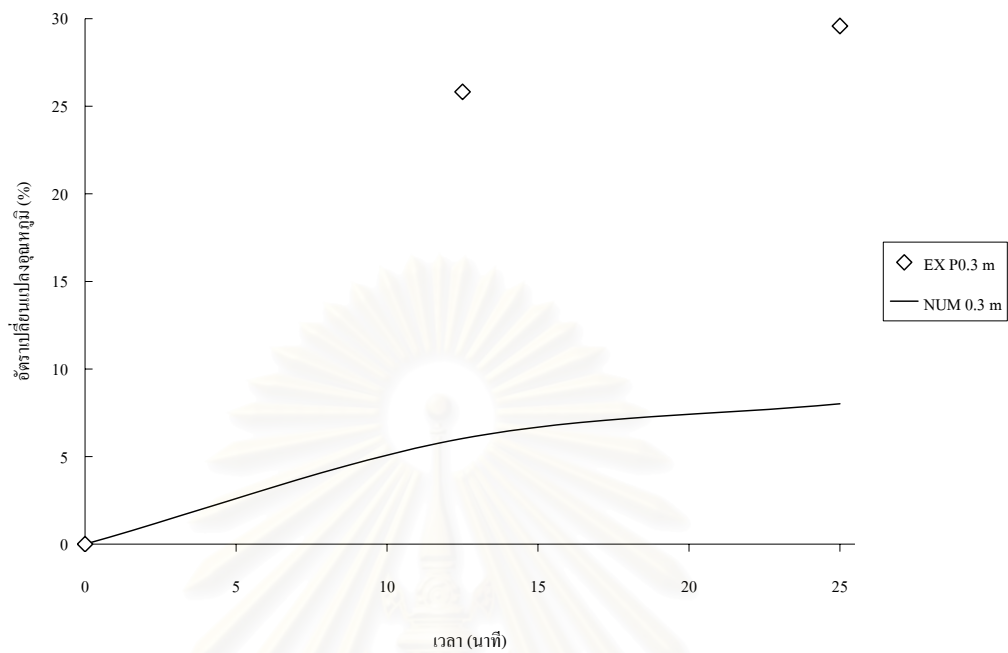
เวลาที่ใช้ในการสลับคาบการไหล	ช่วงเวลาในคาบการไหล	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อเทียบกับช่วงเริ่มคาบการไหล (%)							
		EXP 5.04 m	EXP 4.74 m	EXP 0.3 m	EXP 0 m	NUM 5.04 m	NUM 4.74 m	NUM 0.3 m	NUM 0 m
25 นาที	เริ่มคาบการไหล (ที่เวลา100นาที)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	กลางคาบการไหล (ที่เวลา112.5นาที)	6.36	3.48	25.82	19.68	4.20	4.44	6.03	0.00
	ปลายคาบการไหล (ที่เวลา125นาที)	10.26	6.02	29.58	31.73	5.78	6.09	8.01	0.00
20 นาที	เริ่มคาบการไหล (ที่เวลา160นาที)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	กลางคาบการไหล (ที่เวลา180นาที)	6.87	5.44	16.88	21.18	3.31	3.50	4.64	0.00
	ปลายคาบการไหล (ที่เวลา200นาที)	7.98	6.32	28.78	25.15	4.58	4.85	6.20	0.00
15 นาที	เริ่มคาบการไหล (ที่เวลา150นาที)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	กลางคาบการไหล (ที่เวลา165นาที)	5.91	5.01	26.05	28.68	2.49	2.63	3.35	0.00
	ปลายคาบการไหล (ที่เวลา180นาที)	7.07	6.81	29.37	38.68	3.38	3.58	4.45	0.00
10 นาที	เริ่มคาบการไหล (ที่เวลา140นาที)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	กลางคาบการไหล (ที่เวลา150นาที)	1.80	1.63	10.78	10.78	0.85	0.90	1.16	0.00
	ปลายคาบการไหล (ที่เวลา160นาที)	3.08	2.88	11.58	20.36	1.45	1.53	1.95	0.00



**รูปที่ 6.16** อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของของไหลในช่วง Cooling period ที่ตำแหน่ง 5.04 เมตร ที่เวลาเริ่มการไหล กลางคาบการไหล และปลายคาบการไหล สำหรับการสลับคาบการไหล 25 นาที



**รูปที่ 6.17** อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของของไหลในช่วง Cooling period ที่ตำแหน่ง 4.47 เมตร ที่เวลาเริ่มการไหล กลางคาบการไหล และปลายคาบการไหล สำหรับการสลับคาบการไหล 25 นาที



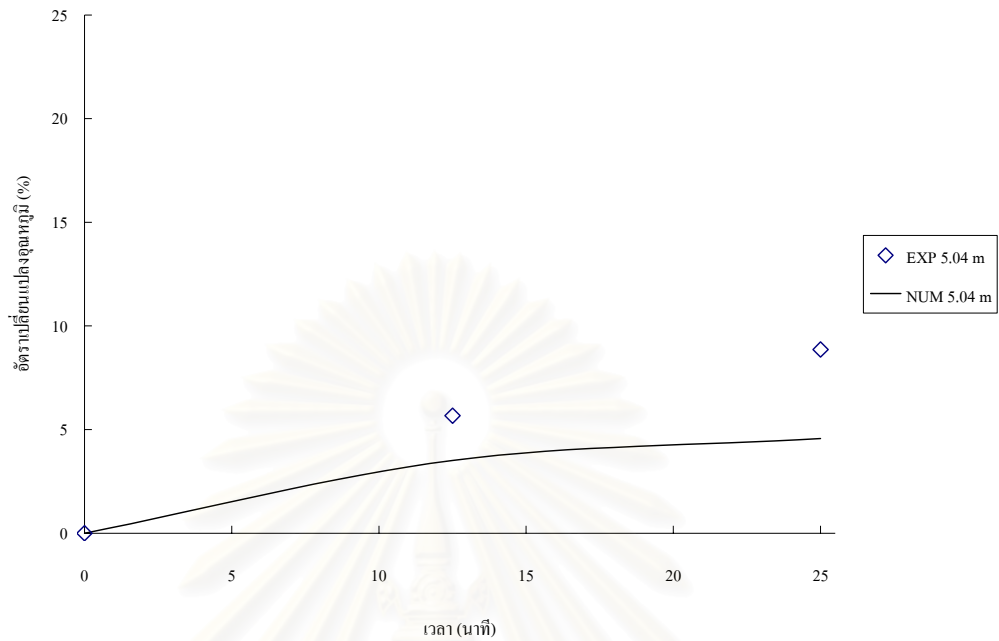
**รูปที่ 6.18** อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของของไหลในช่วง Cooling period ที่ตำแหน่ง 0.3 เมตร ที่เวลาเริ่มการไหล กลางคาบการไหล และปลายคาบการไหล สำหรับการสลับคาบการไหล 25 นาที

ตารางที่ 6.7 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุสะสมความร้อนในช่วง Heating period ที่เวลาเริ่มการไหล กลางคาบการไหล และปลายคาบการไหล สำหรับการสลับคาบการไหลต่างๆ

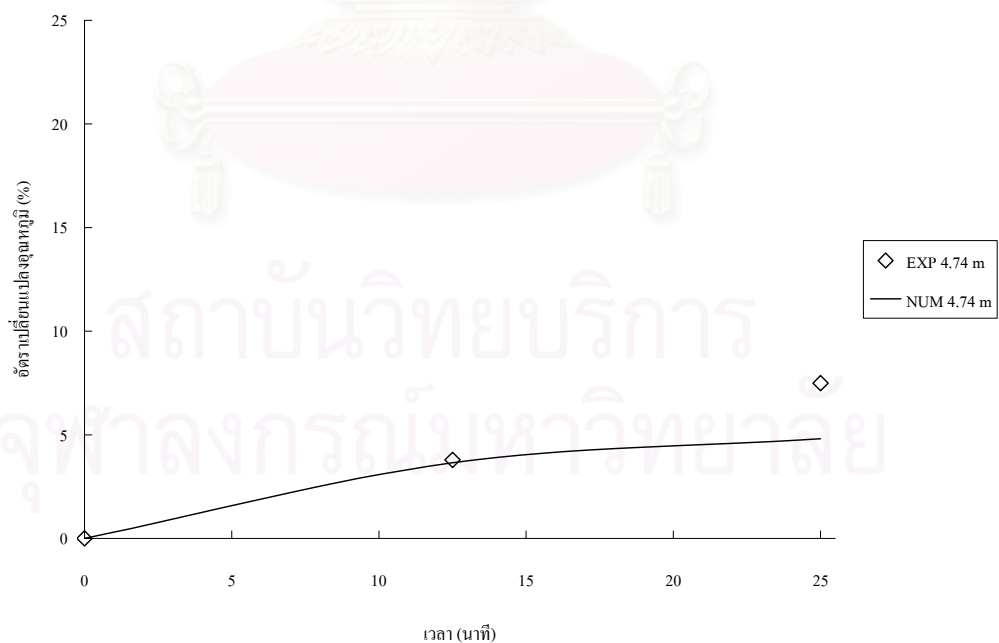
เวลาที่ใช้ในการสลับคาบการไหล	ช่วงเวลาในคาบการไหล	อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ (องศาเซลเซียส)							
		EXP 5.04 m	EXP 4.74 m	EXP0.3 m	EXP 0 m	NUM 5.04 m	NUM 4.74 m	NUM 0.3 m	NUM 0 m
25 นาที	เริ่มคาบการไหล (ที่เวลา100นาที)	586.75	558.50	183.00	173.50	591.65	574.93	211.58	190.74
	กลางคาบการไหล (ที่เวลา112.5นาที)	620.00	569.00	199.00	205.50	612.41	595.92	238.39	217.77
	ปลายคาบการไหล (ที่เวลา125นาที)	638.75	599.50	213.50	217.50	618.70	602.59	248.43	227.92
20 นาที	เริ่มคาบการไหล (ที่เวลา160นาที)	614.25	590.00	219.00	199.25	612.32	595.62	225.82	203.67
	กลางคาบการไหล (ที่เวลา180นาที)	639.25	604.00	226.50	225.00	629.21	612.77	249.10	227.23
	ปลายคาบการไหล (ที่เวลา200นาที)	652.00	614.75	233.00	233.50	634.48	618.40	257.97	236.25
15 นาที	เริ่มคาบการไหล (ที่เวลา150นาที)	608.50	596.75	227.00	209.75	612.17	595.45	228.51	206.55
	กลางคาบการไหล (ที่เวลา165นาที)	640.00	604.50	234.50	228.50	626.56	610.08	248.29	226.58
	ปลายคาบการไหล (ที่เวลา180นาที)	649.00	611.50	243.25	245.00	630.37	614.10	254.43	232.80
10 นาที	เริ่มคาบการไหล (ที่เวลา140นาที)	619.00	602.50	246.50	224.50	625.25	608.29	236.63	214.24
	กลางคาบการไหล (ที่เวลา150นาที)	634.50	610.50	251.00	229.50	629.21	612.39	242.51	220.22
	ปลายคาบการไหล (ที่เวลา160นาที)	647.25	622.00	252.50	233.50	631.81	615.14	246.67	224.43

ตารางที่ 6.8 เปรอ์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุสะสมความร้อนในช่วง Heating period ที่เวลาเริ่มการไหล กลางคาบการไหล และปลายคาบการไหล เมื่อเทียบกับที่เวลาเริ่มคาบการไหล สำหรับการสลับคาบการไหลต่างๆ

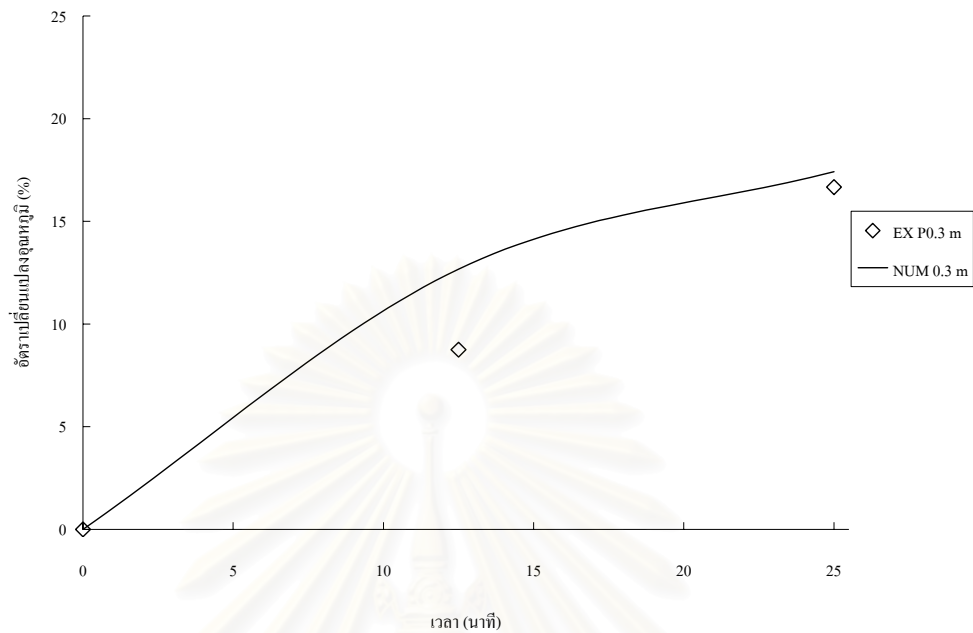
เวลาที่ใช้ในการสลับคาบการไหล	ช่วงเวลาในคาบการไหล	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อเทียบกับช่วงเริ่มคาบการไหล (%)							
		EXP 5.04 m	EXP 4.74 m	EXP 0.3 m	EXP 0 m	NUM 5.04 m	NUM 4.74 m	NUM 0.3 m	NUM 0 m
25 นาที	เริ่มคาบการไหล (ที่เวลา100นาที)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	กลางคาบการไหล (ที่เวลา112.5นาที)	5.67	3.79	8.74	18.44	3.51	3.65	12.67	14.17
	ปลายคาบการไหล (ที่เวลา125นาที)	8.86	7.40	16.67	25.36	4.57	4.81	17.42	19.49
20 นาที	เริ่มคาบการไหล (ที่เวลา160นาที)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	กลางคาบการไหล (ที่เวลา180นาที)	4.07	2.37	3.42	12.92	2.76	2.88	10.31	11.57
	ปลายคาบการไหล (ที่เวลา200นาที)	6.15	4.19	6.39	17.19	3.62	3.83	14.24	16.00
15 นาที	เริ่มคาบการไหล (ที่เวลา150นาที)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	กลางคาบการไหล (ที่เวลา165นาที)	5.18	1.30	3.30	8.94	2.35	2.46	8.66	9.69
	ปลายคาบการไหล (ที่เวลา180นาที)	6.66	2.47	7.16	16.81	2.97	3.13	11.34	12.71
10 นาที	เริ่มคาบการไหล (ที่เวลา140นาที)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	กลางคาบการไหล (ที่เวลา150นาที)	2.50	1.33	1.83	2.23	0.63	0.67	2.49	2.79
	ปลายคาบการไหล (ที่เวลา160นาที)	4.56	3.24	2.43	4.01	1.05	1.13	4.24	4.76



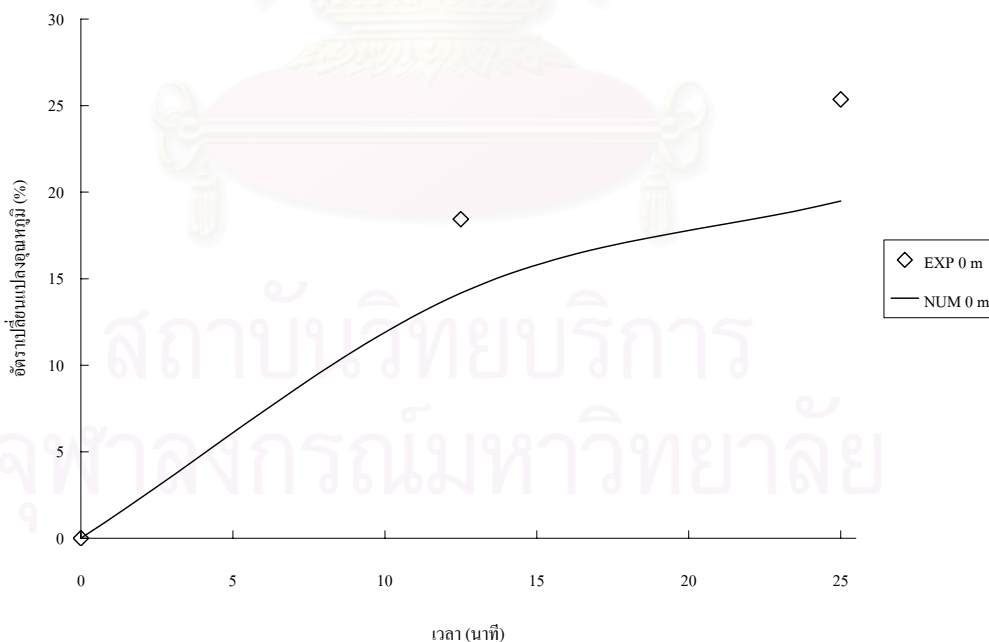
**รูปที่ 6.19** อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุสะสมความร้อนในช่วง Heating period ที่ตำแหน่ง 5.04 เมตร ที่เวลาเริ่มการไหล กลางคาบการไหล และปลายคาบการไหล สำหรับการสลับคาบการไหล 25 นาที



**รูปที่ 6.20** อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุสะสมความร้อนในช่วง Heating period ที่ตำแหน่ง 4.74 เมตร ที่เวลาเริ่มการไหล กลางคาบการไหล และปลายคาบการไหล สำหรับการสลับคาบการไหล 25 นาที



**รูปที่ 6.21** อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุสะสมความร้อนในช่วง Heating period ที่ตำแหน่ง 0.3 เมตร ที่เวลาเริ่มการไหล กลางคาบการไหล และปลายคาบการไหล สำหรับการสลับคาบการไหล 25 นาที



**รูปที่ 6.22** อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุสะสมความร้อนในช่วง Heating period ที่ตำแหน่ง 0 เมตร ที่เวลาเริ่มการไหล กลางคาบการไหล และปลายคาบการไหล สำหรับการสลับคาบการไหล 25 นาที

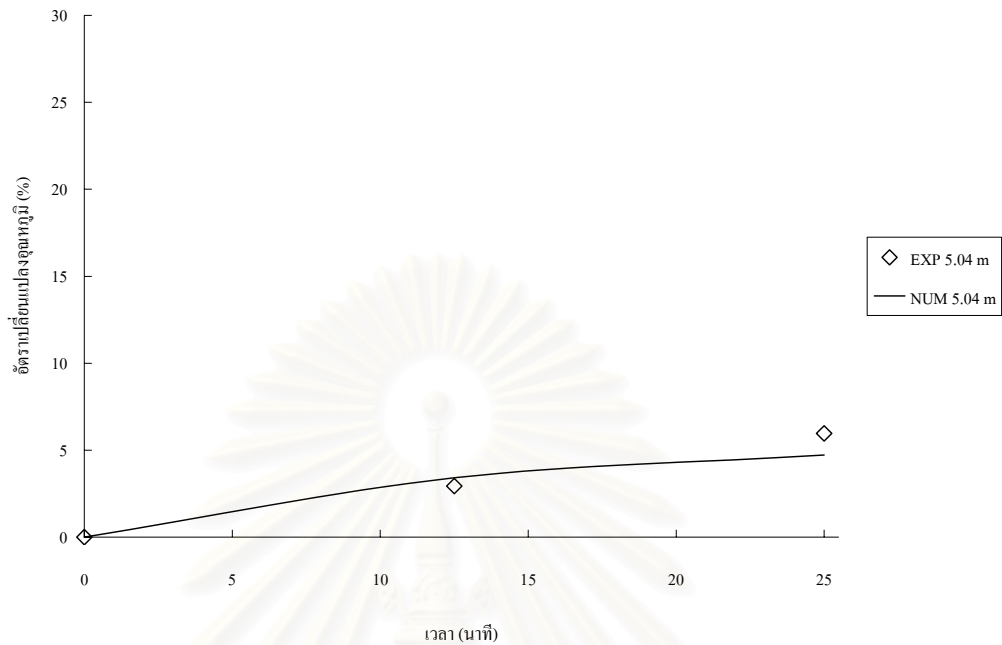


ตารางที่ 6.9 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนในช่วง Cooling period ที่เวลาเริ่มการไหล กลางคาบการไหล และปลายคาบการไหล สำหรับการสลับคาบการไหลต่างๆ

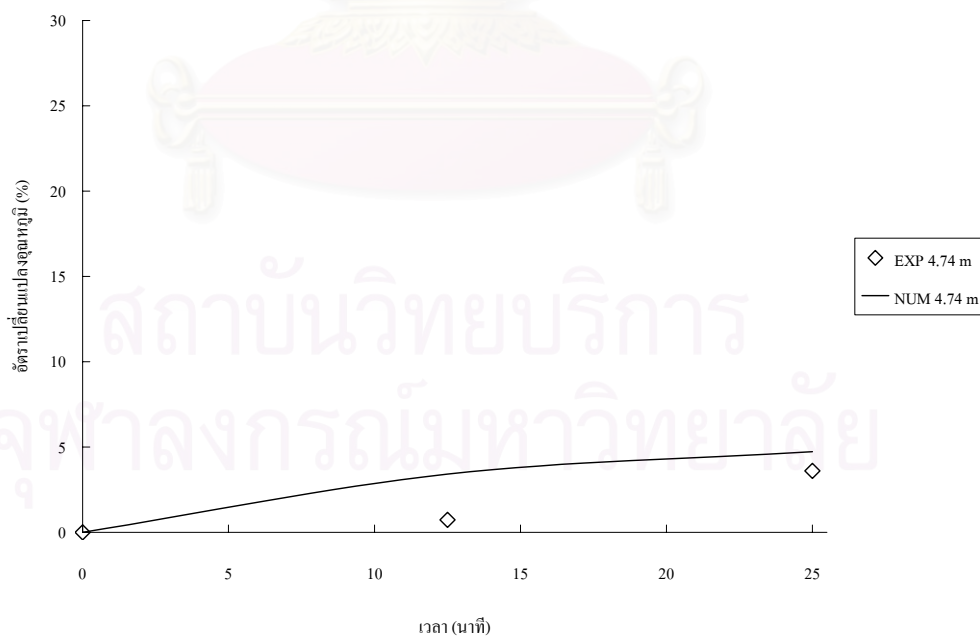
เวลาที่ใช้ในการสลับคาบการไหล	ช่วงเวลาในคาบการไหล	อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ (องศาเซลเซียส)							
		EXP 5.04 m	EXP 4.74 m	EXP 0.3 m	EXP 0 m	NUM 5.04 m	NUM 4.74 m	NUM 0.3 m	NUM 0 m
25 นาที	เริ่มคาบการไหล (ที่เวลา100นาที)	629.00	589.25	219.00	219.25	610.26	594.05	236.24	215.35
	กลางคาบการไหล (ที่เวลา112.5นาที)	610.50	585.00	213.50	193.00	589.43	573.04	209.47	188.40
	ปลายคาบการไหล (ที่เวลา125นาที)	591.50	568.00	210.50	183.50	581.42	565.00	200.59	179.71
20 นาที	เริ่มคาบการไหล (ที่เวลา160นาที)	649.00	620.00	243.00	241.00	626.63	610.43	245.95	223.77
	กลางคาบการไหล (ที่เวลา180นาที)	623.00	604.00	239.00	224.50	609.57	593.17	222.80	200.39
	ปลายคาบการไหล (ที่เวลา200นาที)	610.75	592.75	236.25	209.00	602.89	586.43	214.90	192.64
15 นาที	เริ่มคาบการไหล (ที่เวลา150นาที)	643.25	622.00	247.50	242.50	621.17	604.84	241.10	219.05
	กลางคาบการไหล (ที่เวลา165นาที)	620.50	607.50	244.75	227.25	608.46	592.00	224.28	202.11
	ปลายคาบการไหล (ที่เวลา180นาที)	607.50	598.75	237.50	217.50	603.81	587.32	218.72	196.63
10 นาที	เริ่มคาบการไหล (ที่เวลา140นาที)	642.00	617.50	252.50	239.50	617.50	600.70	226.54	203.83
	กลางคาบการไหล (ที่เวลา150นาที)	630.75	611.50	250.00	229.50	613.13	596.29	220.96	198.25
	ปลายคาบการไหล (ที่เวลา160นาที)	622.25	605.75	248.00	222.50	610.01	593.15	217.17	194.51

**ตารางที่ 6.10** เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนในช่วง Cooling period ที่เวลาเริ่มการไหล กลางคาบการไหล และปลายคาบการไหล เมื่อเทียบกับที่เวลาเริ่มคาบการไหล สำหรับการสลับคาบการไหลต่างๆ

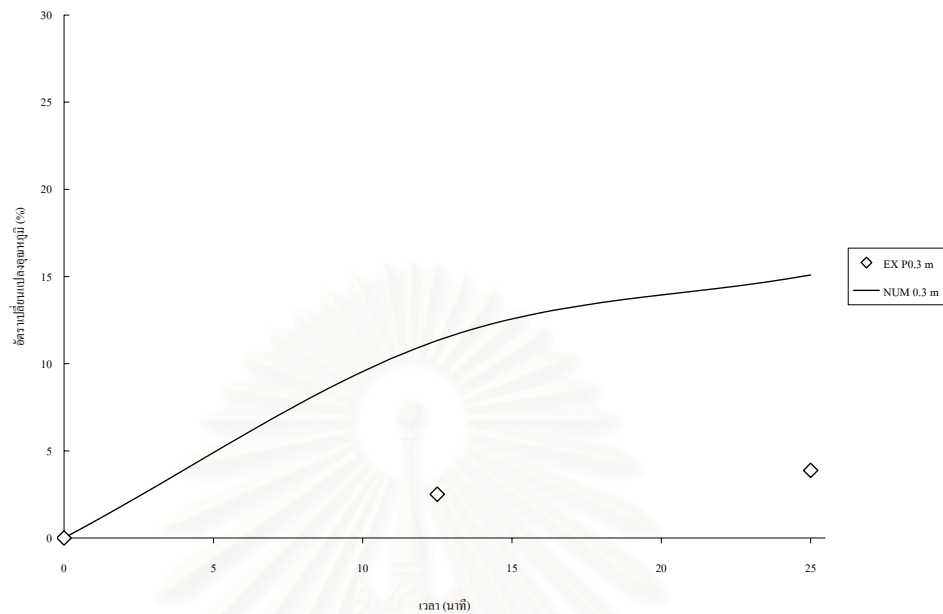
เวลาที่ใช้ในการสลับคาบการไหล	ช่วงเวลาในคาบการไหล	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อเทียบกับช่วงเริ่มคาบการไหล (%)							
		EXP 5.04 m	EXP 4.74 m	EXP 0.3 m	EXP 0 m	NUM 5.04 m	NUM 4.74 m	NUM 0.3 m	NUM 0 m
25 นาที	เริ่มคาบการไหล (ที่เวลา100นาที)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	กลางคาบการไหล (ที่เวลา112.5นาที)	2.94	0.72	2.51	11.97	3.41	3.54	11.33	12.51
	ปลายคาบการไหล (ที่เวลา125นาที)	5.96	3.61	3.88	16.31	4.73	4.89	15.09	16.55
20 นาที	เริ่มคาบการไหล (ที่เวลา160นาที)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	กลางคาบการไหล (ที่เวลา180นาที)	4.01	2.58	1.65	6.85	2.72	2.83	9.41	10.45
	ปลายคาบการไหล (ที่เวลา200นาที)	5.89	4.40	2.78	13.28	3.79	3.93	12.63	13.91
15 นาที	เริ่มคาบการไหล (ที่เวลา150นาที)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	กลางคาบการไหล (ที่เวลา165นาที)	3.54	2.33	1.11	6.29	2.05	2.12	6.98	7.74
	ปลายคาบการไหล (ที่เวลา180นาที)	5.56	3.74	4.04	10.31	2.79	2.90	9.28	10.24
10 นาที	เริ่มคาบการไหล (ที่เวลา140นาที)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	กลางคาบการไหล (ที่เวลา150นาที)	1.75	0.97	0.99	4.18	0.71	0.73	2.47	2.74
	ปลายคาบการไหล (ที่เวลา160นาที)	3.08	1.90	1.78	7.10	1.21	1.26	4.14	4.57



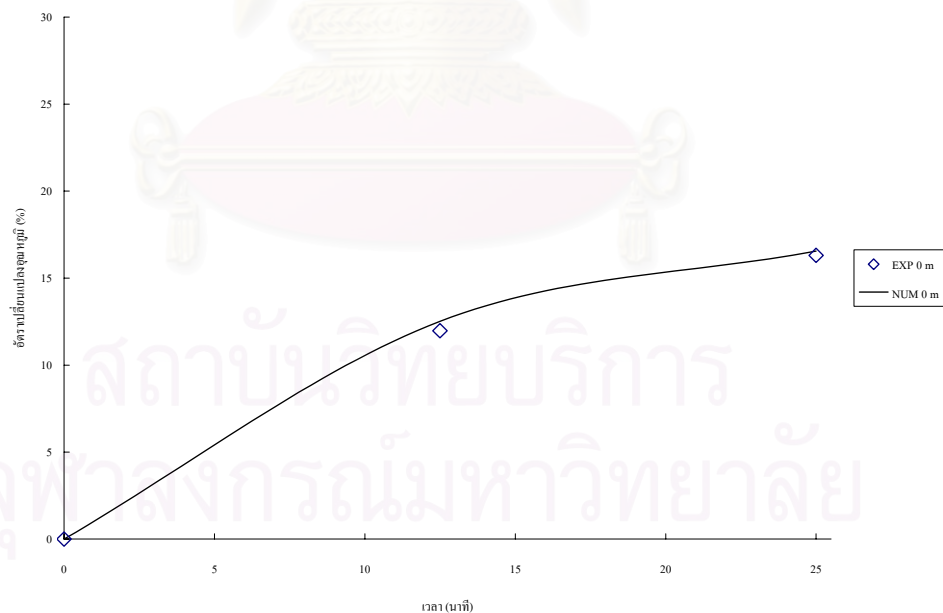
**รูปที่ 6.23** อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุสะสมความร้อนในช่วง Cooling period ที่ตำแหน่ง 5.04 เมตร ที่เวลาเริ่มการไหล กลางคาบการไหล และปลายคาบการไหล สำหรับการสลับคาบการไหล 25 นาที



**รูปที่ 6.24** อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุสะสมความร้อนในช่วง Cooling period ที่ตำแหน่ง 4.74 เมตร ที่เวลาเริ่มการไหล กลางคาบการไหล และปลายคาบการไหล สำหรับการสลับคาบการไหล 25 นาที



**รูปที่ 6.25** อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุสะสมความร้อนในช่วง Cooling period ที่ตำแหน่ง 0.3 เมตร ที่เวลาเริ่มการไหล กลางคาบการไหล และปลายคาบการไหล สำหรับการสลับคาบการไหล 25 นาที



**รูปที่ 6.26** อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุสะสมความร้อนในช่วง Cooling period ที่ตำแหน่ง 0 เมตร ที่เวลาเริ่มการไหล กลางคาบการไหล และปลายคาบการไหล สำหรับการสลับคาบการไหล 25 นาที

### 6.1.1.1 ระบายกึ่งกลางของของไหล

ในรูปที่ 6.1 ข้อมูลที่แทนด้วยสัญลักษณ์ คือ ผลลัพธ์จากการทดลอง ส่วนที่พล็อตเป็นเส้นต่อเนื่อง คือ ผลลัพธ์ที่คำนวณจากระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ที่เวลา 0 นาที วัฏจักรการไหลเริ่มต้นจาก Heating period และดำเนินต่อไปเป็นเวลา 25 นาที จากนั้นก็จะเข้าสู่ Cooling period และดำเนินต่อไปเป็นเวลา 25 นาที จากนั้นก็จะเข้าสู่ Heating period สลับกันไปทั้งหมด 4 วัฏจักร ซึ่งเราใช้ช่วง Heating period ของวัฏจักรที่ 3 ที่เวลา 100 นาที ซึ่งจะได้กราฟที่มีความสมบูรณ์ที่สุด โดยมีประเด็นที่น่าสนใจหลายประเด็นดังนี้

#### Heating period

##### 1. การลดลงของอุณหภูมิก๊าซเสียตามระยะทางในช่องทางการไหล

#### วิเคราะห์ผลจากการทดลอง

ก๊าซเสียอุณหภูมิสูงจะไหลเข้า Regenerator ที่ตำแหน่ง 5.04 เมตร โดยมีอุณหภูมิ  $643.50^{\circ}\text{C}$  เมื่อก๊าซเสียไหลผ่านช่องทางการไหลจนถึงที่ตำแหน่ง 4.74 เมตร จะสังเกตเห็นว่าอุณหภูมิของก๊าซเสียมีค่าลดลง เนื่องจากก๊าซเสียได้ถ่ายเทความร้อนให้แก่วัสดุสะสมความร้อน และเมื่อก๊าซเสียไหลผ่านช่องทางการไหลไกลขึ้นอุณหภูมิของก๊าซเสียก็จะมีค่าลดลง ดังจะสังเกตเห็นได้จากอุณหภูมิของก๊าซเสียที่ตำแหน่ง 0.3 และ 0 เมตร ในช่วงเวลาเดียวกัน (100-125 นาที) ก๊าซเสียที่ตำแหน่ง 0.3 เมตร จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าที่ตำแหน่ง 4.74 เมตร และที่ตำแหน่ง 0 เมตร จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าที่ตำแหน่ง 0.3 เมตร เนื่องมาจากก๊าซเสียยังคงคายความร้อนให้แก่วัสดุสะสมความร้อน ทำให้อุณหภูมิลดลงเช่นกัน

#### วิเคราะห์ผลจากระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

ก๊าซเสียอุณหภูมิสูงจะไหลเข้า Regenerator ที่ตำแหน่ง 5.04 เมตร ด้วยอุณหภูมิกว่า  $684.13^{\circ}\text{C}$  เมื่อก๊าซเสียไหลผ่านช่องทางการไหลจนถึงที่ตำแหน่ง 4.74 เมตร จะสังเกตเห็นว่าอุณหภูมิของก๊าซเสียมีค่าลดลง เนื่องจากก๊าซเสียได้ถ่ายเทความร้อนให้แก่วัสดุสะสมความร้อน และเมื่อก๊าซเสียไหลผ่านช่องทางการไหลไกลขึ้นอุณหภูมิของก๊าซเสียก็จะมีค่าลดลง ดังจะสังเกตเห็นได้จากอุณหภูมิของก๊าซเสียที่ตำแหน่ง

0.3 และ 0 เมตร ในช่วงเวลาเดียวกัน (100-125 นาที) ก๊าซเสียที่ตำแหน่ง 0.3 เมตร จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าที่ตำแหน่ง 4.74 เมตร และที่ตำแหน่ง 0 เมตร จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าที่ตำแหน่ง 0.3 เมตร เนื่องจากก๊าซเสียยังคงคายความร้อนให้แก่วัสดุสะสมความร้อน ทำให้อุณหภูมิลดลงเช่นกัน

#### เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองกับระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

จากผลที่ได้จากระเบียบวิธีเชิงตัวเลข และผลที่ได้จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าก๊าซเสียที่ไหลเข้า Regenerator มีอุณหภูมิลดลงตามระยะทางในช่องทางการไหลที่มากขึ้น จากการวิเคราะห์ค่าผิดพลาดระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากระเบียบวิธีเชิงตัวเลข และผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง ซึ่งสามารถสรุปหาค่ามัธยฐานของค่าความผิดพลาดที่ตำแหน่งต่างๆ ได้ดังตารางที่ 6.1 แสดงให้เห็นว่าค่าผิดพลาดในทุกตำแหน่งมีค่าสูงสุดน้อยกว่า 20 % โดยมีค่ามัธยฐานของค่าความผิดพลาดรวมทุกการทดลองของช่วง Heating period เท่ากับ 2.77 % ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถจำลองการถ่ายเทความร้อนของก๊าซเสีย ให้แก่วัสดุสะสมความร้อนตามแนวทิศทางการไหลได้ โดยที่ค่าความผิดพลาดนี้อาจเกิดจาก ลักษณะทางกายภาพของ Regenerator การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ล และ Slag ที่เกาะผนังเตา ซึ่งอาจจะทำให้ผลลัพธ์บางส่วนคลาดเคลื่อนจากสมมติฐานที่ตั้งไว้ โดยที่สามารถดูรายละเอียดการวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดในหัวข้อ 6.2

สังเกตผลที่ได้จากการทดลองสลับคาบการไหลที่เวลา 20, 15 และ 10 นาที ซึ่งแสดงในรูปที่ 6.4, 6.7 และ 6.10 มีแนวโน้มของผลการทดลองในทิศทางเดียวกันกับการทดลองสลับคาบการไหลที่เวลา 25 นาที คือ อุณหภูมิของก๊าซเสียก็มีค่าลดลงตามระยะทางในช่องทางการไหลที่มากขึ้นเช่นกัน

2. การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิตามเวลา ให้สังเกตที่ตำแหน่ง 4.74, 0.3 และ 0 เมตร ในรูปที่ 6.1 และตารางที่ 6.3 และ 6.4 อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาดังนี้

### วิเคราะห์ผลจากการทดลอง

- ที่ตำแหน่ง 5.04 เมตร ที่เวลาเริ่มต้น 100 นาที ของไหลมีอุณหภูมิ 643.50 °C แต่เมื่อเวลาผ่านไปครึ่งคาบการไหล (ที่เวลา 112.5 นาที) อุณหภูมิของของไหลจะเพิ่มขึ้นเป็น 686.75 °C ซึ่งเพิ่มขึ้นจากที่เวลาเริ่มต้น 6.298% แต่เมื่อเวลาผ่านไปครบ 1 คาบ ของไหลจะมีอุณหภูมิ 708.25 °C ซึ่งเพิ่มขึ้นจากที่เวลาเริ่มต้น 10.062% จะสังเกตได้ว่าในช่วงแรกของการไหล ก๊าซเสียจะสามารถถ่ายเทความร้อนให้กับวัสดุสะสมความร้อนได้ดี มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 6.298% แต่เมื่อเวลาผ่านไปนานมากขึ้น ความสามารถในการรับความร้อนของวัสดุสะสมความร้อนก็มึ้น้อยลง ทำให้ในช่วงเวลาเท่ากันก๊าซเสียจะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเพียง 3.762% แสดงให้เห็นว่าถ้าเวลาเพิ่มขึ้นความสามารถในการคายความร้อนของก๊าซเสียให้แก่อิฐทนไฟมีค่าน้อยลง

- ที่ตำแหน่ง 4.47 เมตร ที่เวลาเริ่มต้น 100 นาที ของไหลมีอุณหภูมิ 567.75 °C แต่เมื่อเวลาผ่านไปครึ่งคาบการไหล (ที่เวลา 112.5 นาที) อุณหภูมิของของไหลจะเพิ่มขึ้นเป็น 595.25 °C ซึ่งเพิ่มขึ้นจากที่เวลาเริ่มต้น 4.620% แต่เมื่อเวลาผ่านไปครบ 1 คาบ ของไหลจะมีอุณหภูมิ 607.25 °C ซึ่งเพิ่มขึ้นจากที่เวลาเริ่มต้น 6.957% จะสังเกตได้ว่าในช่วงแรกของการไหลก๊าซเสียจะสามารถถ่ายเทความร้อนให้กับวัสดุสะสมความร้อนได้ดี มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 4.620% แต่เมื่อเวลาผ่านไปนานมากขึ้น ความสามารถในการรับความร้อนของวัสดุสะสมความร้อนก็มึ้น้อยลง ทำให้ในช่วงเวลาเท่ากันก๊าซเสียจะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเพียง 2.377% แสดงให้เห็นว่าถ้าเวลาเพิ่มขึ้นความสามารถในการคายความร้อนของก๊าซเสียให้แก่อิฐทนไฟมีค่าน้อยลง

- ที่ตำแหน่ง 0.3 เมตร ที่เวลาเริ่มต้น 100 นาที ของไหลมีอุณหภูมิ 267.00 °C แต่เมื่อเวลาผ่านไปครึ่งคาบการไหล (ที่เวลา 112.5 นาที) อุณหภูมิของของไหลจะเพิ่มขึ้นเป็น 291.75 °C ซึ่งเพิ่มขึ้นจากที่เวลาเริ่มต้น 8.483% แต่เมื่อเวลาผ่านไปครบ 1 คาบ ของไหลจะมีอุณหภูมิ 300.50 °C ซึ่งเพิ่มขึ้นจากที่เวลาเริ่มต้น 12.547% จะสังเกตได้ว่าในช่วงแรกของการไหลก๊าซเสียจะสามารถถ่ายเทความร้อนให้กับวัสดุสะสมความร้อนได้ดี มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 8.483% แต่เมื่อเวลาผ่านไปนานมากขึ้น ความสามารถในการรับความร้อนของวัสดุสะสมความร้อนก็มึ้น้อยลง ทำให้ในช่วงเวลาเท่ากันก๊าซเสียจะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเพียง 4.065% แสดงให้เห็นว่าถ้าเวลาเพิ่มขึ้นความสามารถในการคายความร้อนของก๊าซเสียให้แก่อิฐทนไฟมีค่าน้อยลง

- ที่ตำแหน่ง 0 เมตร ที่เวลาเริ่มต้น 100 นาที ของไหลมีอุณหภูมิ 224.25 °C แต่เมื่อเวลาผ่านไปครึ่งคาบการไหล (ที่เวลา 112.5 นาที) อุณหภูมิของของไหลจะ

เพิ่มขึ้นเป็น  $241.75\text{ }^{\circ}\text{C}$  ซึ่ง เพิ่มขึ้นจากที่เวลาเริ่มต้น  $7.239\%$  แต่เมื่อเวลาผ่านไปครบ 1 คาบ ของไหลจะมีอุณหภูมิ  $256.25\text{ }^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเพิ่มขึ้นจากที่เวลาเริ่มต้น  $14.270\%$  จะสังเกตได้ว่าที่ในช่วงแรกของคาบการไหล ก๊าซเสียจะสามารถถ่ายเทความร้อนให้กับวัสดุสะสมความร้อนได้ดี มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น  $7.239\%$  แต่เมื่อเวลาผ่านไปนานมากขึ้น ความสามารถในการรับความร้อนของวัสดุสะสมความร้อนก็มึ้น้อยลง ทำให้ในช่วงเวลาเท่ากันก๊าซเสียจะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเพียง  $7.031\%$  แสดงให้เห็นว่าถ้าเวลาเพิ่มขึ้นความสามารถในการคายความร้อนของก๊าซเสียให้แก่อิฐทนไฟมีค่าน้อยลง

จากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทั้ง 4 ตำแหน่ง พบว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือ เมื่อเวลาผ่านไปนานมากขึ้น อากาศก็จะมีอุณหภูมิสูงขึ้นแต่มีอัตราการสูงขึ้นของอุณหภูมิในอัตราที่น้อยลง แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการคายความร้อนของก๊าซเสียให้กับอิฐทนไฟ ซึ่งจะมีค่าลดลงเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้น และที่ตำแหน่งต้นทางของช่องทางการไหล  $4.74$  เมตร จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้อยกว่าที่ปลายทางของช่องทางการไหล ซึ่งจะสังเกตได้ว่าที่ตำแหน่ง  $4.74$  เมตร มีค่าเพียง  $6.957\%$  ที่เวลาสิ้นสุดคาบการไหลที่  $25$  นาที ส่วนที่ตำแหน่ง  $0$  เมตร มีค่ามากถึง  $14.270\%$  ที่เวลาสิ้นสุดคาบการไหลที่  $25$  นาที เนื่องจากที่ต้นทางของช่องทางการไหลวัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิสูงใกล้เคียงกับของไหล ทำให้วัสดุสะสมความร้อนรับความร้อนได้ในปริมาณที่น้อยกว่า และที่ปลายทางของช่องทางการไหลมีของไหลมีอุณหภูมิต่ำ แต่วัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิสูง ทำให้วัสดุสะสมความร้อนคายความร้อนได้ในปริมาณที่มากกว่า ยกเว้นที่ตำแหน่ง  $5.04$  เมตร อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสูงกว่าที่ตำแหน่ง  $4.74$  และ  $0.3$  เมตร เนื่องจากที่ปากทางเข้ามีผลกระทบจากผนังท่อส่งก๊าซมายัง Regenerator และการสลับคาบการไหล ซึ่งจะมีรายละเอียดการวิเคราะห์ในหัวข้อต่อไป

#### วิเคราะห์ผลจากระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

- ที่ตำแหน่ง  $4.74$  เมตร ที่เวลาเริ่มต้น  $100$  นาที ของไหลมีอุณหภูมิ  $659.23\text{ }^{\circ}\text{C}$  แต่เมื่อเวลาผ่านไปครึ่งคาบการไหล (ที่เวลา  $112.5$  นาที) อุณหภูมิของของไหลจะเพิ่มขึ้นเป็น  $664.23\text{ }^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเพิ่มขึ้นจากที่เวลาเริ่มต้น  $0.758\%$  แต่เมื่อเวลาผ่านไปครบ 1 คาบ ของไหลจะมีอุณหภูมิ  $665.80\text{ }^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเพิ่มขึ้นจากที่เวลาเริ่มต้น  $0.996\%$  จะสังเกตได้ว่า ที่ในช่วงแรกของคาบการไหลก๊าซเสียจะสามารถถ่ายเทความร้อนให้กับวัสดุ



สะสมความร้อนได้ดี มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 0.758% แต่เมื่อเวลาผ่านไปนานมากขึ้น ความสามารถในการรับความร้อนของวัสดุสะสมความร้อนก็มึ้น้อยลง ทำให้ในช่วงเวลาเท่ากันก๊าซเสียจะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเพียง 0.238% แสดงให้เห็นว่าถ้าเวลาเพิ่มขึ้นความสามารถในการคายความร้อนของก๊าซเสียให้แก่อิฐทนไฟมีค่าน้อยลง

- ที่ตำแหน่ง 0.3 เมตร ที่เวลาเริ่มต้น 100 วินาที ของไหลมีอุณหภูมิ 300.68 °C แต่เมื่อเวลาผ่านไปครึ่งคาบการไหล (ที่เวลา 112.5 นาที) อุณหภูมิของของไหลจะเพิ่มขึ้นเป็น 326.04 °C ซึ่งเพิ่มขึ้นจากที่เวลาเริ่มต้น 8.433% แต่เมื่อเวลาผ่านไปครบ 1 คาบ ของไหลจะมีอุณหภูมิ 335.39 °C ซึ่งเพิ่มขึ้นจากที่เวลาเริ่มต้น 11.545% จะสังเกตได้ว่าในช่วงแรกของการไหลก๊าซเสียจะสามารถถ่ายเทความร้อนให้กับวัสดุสะสมความร้อนได้ดี มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 8.433% แต่เมื่อเวลาผ่านไปนานมากขึ้นความสามารถในการรับความร้อนของวัสดุสะสมความร้อนก็มึ้น้อยลง ทำให้ในช่วงเวลาเท่ากันก๊าซเสียจะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเพียง 3.112% แสดงให้เห็นว่าถ้าเวลาเพิ่มขึ้นความสามารถในการคายความร้อนของก๊าซเสียให้แก่อิฐทนไฟมีค่าน้อยลง

- ที่ตำแหน่ง 0 เมตร ที่เวลาเริ่มต้น 100 วินาที ของไหลมีอุณหภูมิ 275.40 °C แต่เมื่อเวลาผ่านไปครึ่งคาบการไหล (ที่เวลา 112.5 นาที) อุณหภูมิของของไหลจะเพิ่มขึ้นเป็น 326.04 °C ซึ่งเพิ่มขึ้นจากที่เวลาเริ่มต้น 9.348% แต่เมื่อเวลาผ่านไปครบ 1 คาบ ของไหลจะมีอุณหภูมิ 310.69 °C ซึ่งเพิ่มขึ้นจากที่เวลาเริ่มต้น 12.814% จะสังเกตได้ว่าในช่วงแรกของการไหลก๊าซเสียจะสามารถถ่ายเทความร้อนให้กับวัสดุสะสมความร้อนได้ดี มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 9.348% แต่เมื่อเวลาผ่านไปนานมากขึ้นความสามารถในการรับความร้อนของวัสดุสะสมความร้อนก็มึ้น้อยลง ทำให้ในช่วงเวลาเท่ากันก๊าซเสียจะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเพียง 3.466% แสดงให้เห็นว่าถ้าเวลาเพิ่มขึ้นความสามารถในการคายความร้อนของก๊าซเสียให้แก่อิฐทนไฟมีค่าน้อยลง

จากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทั้ง 3 ตำแหน่ง พบว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือ เมื่อเวลาผ่านไปนานมากขึ้นอากาศก็จะมีอุณหภูมิสูงขึ้นแต่มีอัตราการสูงขึ้นของอุณหภูมียู่ในอัตราที่ลดลง แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการคายความร้อนของก๊าซเสียให้กับอิฐทนไฟ ซึ่งจะมีค่าลดลงเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้น และที่ตำแหน่งต้นทางของช่องทางไหล 4.74 เมตร จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้อยกว่าที่ปลายทางของช่องทางไหล ซึ่งจะสังเกตได้ว่าที่ตำแหน่ง 4.74 เมตร มีค่าเพียง 0.996% ที่เวลาสิ้นสุดคาบการไหลที่ 1,500 วินาที

ส่วนที่ตำแหน่ง 0 เมตร มีค่ามากถึง 12.814% ที่เวลาสิ้นสุดคาบการไหลที่ 1,500 วินาที เนื่องจากที่ต้นทางของช่องทางการไหลวัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิสูงใกล้เคียงกับของไหล ทำให้วัสดุสะสมความร้อนรับความร้อนได้ในปริมาณที่น้อยกว่า แต่ที่ปลายทางของช่องทางการไหลมีของไหล และวัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิต่ำ ทำให้วัสดุสะสมความร้อนรับความร้อนได้ในปริมาณที่มากกว่า

*เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองกับระเบียบวิธีเชิงตัวเลข*

ผลที่ได้จากระเบียบวิธีเชิงตัวเลข และผลที่ได้จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าก๊าซเสียมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้น โดยมีแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเร็วในช่วงแรก และค่อยๆ ลดลงในช่วงปลายคาบการไหล ดังแสดงในรูปที่ 6.13 – 6.15 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในช่วงต้นคาบการไหล ก๊าซเสียสามารถถ่ายเทความร้อนให้กับวัสดุสะสมความร้อนได้มาก หลังจากนั้นวัสดุสะสมความร้อนจะเริ่มอึดตัว และรับความร้อนได้ในปริมาณที่น้อยลงตามลำดับ

สังเกตผลที่ได้จากการทดลองสลับคาบการไหลที่เวลา 20, 15 และ 10 นาที ซึ่งแสดงในรูปที่ 6.4, 6.7 และ 6.10 และตารางที่ 6.3 และ 6.4 ซึ่งมีแนวโน้มของผลการทดลองในทิศทางเดียวกันกับการทดลองสลับคาบการไหลที่เวลา 25 นาที คือ เมื่อเวลาผ่านไปนานมากขึ้นอากาศก็จะมีอุณหภูมิสูงขึ้น แต่มีอัตราการสูงขึ้นของอุณหภูมิในอัตราที่น้อยลง โดยที่ตำแหน่งต้นทางของช่องทางการไหลจะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้อยกว่าที่ปลายทางของช่องทางการไหล

3. *ความชันของกราฟอุณหภูมิเมื่อเทียบกับเวลา* ประเด็นนี้ก็เป็นอีกประเด็นหนึ่งที่น่าสนใจเนื่องจากจะบอกถึงลักษณะทางกายภาพของการไหล ให้สังเกตความชันของกราฟที่ได้จากการทดลอง และระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ในช่วงเวลา 100 -125 นาที ที่ตำแหน่ง 4.74, 0.3 และ 0 เมตร จะพบว่าอุณหภูมิของก๊าซเสียมีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ ซึ่งจะดูได้จากความชันของกราฟที่ได้มีค่อนข้างน้อย แสดงให้เห็นว่าก๊าซเสียมีอัตราการพาความร้อนค่อนข้างต่ำ เมื่อเทียบกับอัตราการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งสอดคล้องกับอัตราการไหลของก๊าซเสียที่ได้จากการทดลองซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับอุณหภูมิของก๊าซ โดยผลที่ได้จากทั้งระเบียบวิธีเชิงตัวเลขและการทดลองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

สังเกตผลที่ได้จากการทดลองสลับคาบการไหลที่เวลา 20, 15 และ 10 นาที ซึ่งแสดงในรูปที่ 6.4, 6.7 และ 6.10 มีแนวโน้มของผลการทดลองในทิศทางเดียวกันกับการทดลองสลับคาบการไหลที่เวลา 25 นาที คือ ในช่วง Heating period ความชันของกราฟที่ได้มีค่าค่อนข้างน้อย แสดงให้เห็นว่าก๊าซเสียมีอัตราการพาความร้อนค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับอัตราการแผ่รังสีความร้อนเช่นกัน

หลังการสิ้นสุดการไหลในช่วง Heating period ที่เวลา 125 นาทีแล้ว ก็จะมีการสลับคาบการไหลให้เป็น Cooling period และดำเนินต่อไปเป็นเวลา 25 นาที จนสิ้นสุดคาบการไหลที่เวลา 150 นาที ซึ่งในช่วง Cooling period ซึ่งมีประเด็นที่น่าสนใจคล้ายๆกับในช่วง Heating period แต่พฤติกรรมต่างๆจะเป็นไปในทิศทางตรงกันข้ามดังนี้

### Cooling period

1. การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศที่ใช้เผาไหม้ตามระยะทางในช่องทางการไหลที่มากขึ้น

#### วิเคราะห์ผลจากการทดลอง

เนื่องจากการสลับทิศทางการไหลของวาล์วปรับทิศทางการไหล ทำให้อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ไหลเข้าช่องทางการไหลของ Regenerator ในทิศทางตรงกันข้าม คือไหลเข้าที่ตำแหน่ง 0 เมตร ด้วยอุณหภูมิ  $62.25^{\circ}\text{C}$  เมื่ออากาศไหลผ่านช่องทางการไหลจนถึงที่ตำแหน่ง 0.3 เมตร จะสังเกตได้ว่าอุณหภูมิของอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากอากาศได้รับความร้อนจากวัสดุสะสมความร้อน และเมื่ออากาศไหลผ่านช่องทางการไหลไกลขึ้น อุณหภูมิของอากาศก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น ดังจะสังเกตได้จากอุณหภูมิของอากาศที่ตำแหน่ง 4.74 และ 5.04 เมตร ในช่วงเวลาเดียวกัน (125 - 150 นาที) อากาศที่ตำแหน่ง 4.74 เมตร จะมีอุณหภูมิสูงกว่าที่ตำแหน่ง 0.3 เมตร และที่ตำแหน่ง 5.04 เมตร จะมีอุณหภูมิสูงกว่าที่ตำแหน่ง 4.74 เมตร เนื่องจากอากาศยังคงรับความร้อนจากวัสดุสะสมความร้อน ทำให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเช่นกัน

### วิเคราะห์ผลจากระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

เนื่องจากการสลับทิศทางการไหลของวาล์วปรับทิศทางการไหล ทำให้อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ไหลเข้าช่องทางการไหลของ Regenerator ในทิศทางตรงกันข้าม คือไหลเข้าที่ตำแหน่ง 0 เมตร ด้วยอุณหภูมิคงที่  $53.36^{\circ}\text{C}$  เมื่ออากาศไหลผ่านช่องทางการไหลจนถึงตำแหน่ง 0.3 เมตร จะสังเกตได้ว่าอุณหภูมิของอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากอากาศได้รับความร้อนจากวัสดุสะสมความร้อน และเมื่ออากาศไหลผ่านช่องทางการไหลไกลขึ้น อุณหภูมิของอากาศก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น ดังจะสังเกตได้จากอุณหภูมิของอากาศที่ตำแหน่ง 4.74 และ 5.04 เมตร ในช่วงเวลาเดียวกัน (125 - 150 นาที) อากาศที่ตำแหน่ง 4.74 เมตร จะมีอุณหภูมิสูงกว่าที่ตำแหน่ง 0.3 เมตร และที่ตำแหน่ง 5.04 เมตร จะมีอุณหภูมิสูงกว่าที่ตำแหน่ง 4.74 เมตร เนื่องมาจากอากาศยังคงรับความร้อนจากวัสดุสะสมความร้อน ทำให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเช่นกัน

### เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองกับระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

ผลที่ได้จากระเบียบวิธีเชิงตัวเลข และผลที่ได้จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าก๊าซเสียที่ไหลเข้า Regenerator มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามระยะทางในช่องทางการไหลที่มากขึ้น จากการวิเคราะห์ค่าผิดพลาดระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากระเบียบวิธีเชิงตัวเลข และผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง สามารถสรุปหาค่ามัธยฐานของค่าความผิดพลาดที่ตำแหน่งต่างๆ ได้ดังตารางที่ 6.2 แสดงให้เห็นว่าค่าผิดพลาดในทุกตำแหน่งมีค่าสูงสูดน้อยกว่า 18 % โดยมีค่ามัธยฐานของค่าความผิดพลาดรวมทุกการทดลองของช่วง Heating period เท่ากับ 3.94 % ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถจำลองการถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศ กับวัสดุสะสมความร้อนตามแนวทิศทางการไหลได้ โดยที่สามารถดูรายละเอียดการวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดในหัวข้อ 'วิเคราะห์ค่าความผิดพลาดของโปรแกรม'

สังเกตผลที่ได้จากการทดลองสลับคาบการไหลที่เวลา 20, 15 และ 10 นาที ซึ่งแสดงในรูปแบบที่ 6.4, 6.7 และ 6.10 มีแนวโน้มของผลการทดลองในทิศทางเดียวกันกับการทดลองสลับคาบการไหลที่เวลา 25 นาที คือ อุณหภูมิของอากาศก็มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะทางในช่องทางการไหลที่มากขึ้นเช่นกัน

2. การลดลงของอุณหภูมิตามเวลา ให้สังเกตที่ตำแหน่ง 0.3, 4.74 และ 5.04 เมตร ในรูปที่ 6.1 และตารางที่ 6.5 และ 6.6 กราฟจะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทียบกับเวลาดังนี้

#### วิเคราะห์ผลจากการทดลอง

- ที่ตำแหน่ง 0 เมตร ที่เวลาเริ่มต้น 125 นาที ของไหลมีอุณหภูมิ  $62.25^{\circ}\text{C}$  แต่เมื่อเวลาผ่านไปครึ่งคาบการไหล (ที่เวลา 137.5 นาที) อุณหภูมิของของไหลจะลดลงเป็น  $50.00^{\circ}\text{C}$  ซึ่ง ลดลงจากที่เวลาเริ่มต้น 19.679% แต่เมื่อเวลาผ่านไปครบ 1 คาบ ของไหลจะมีอุณหภูมิ  $42.50^{\circ}\text{C}$  ซึ่ง ลดลงจากที่เวลาเริ่มต้น 31.727% จะสังเกตได้ว่าในช่วงแรกของคาบการไหล อากาศจะสามารถรับความร้อนจากวัสดุสะสมความร้อนได้ดี มีอุณหภูมิลดลง 19.679% แต่เมื่อเวลาผ่านไปนานมากขึ้นความสามารถในการคายความร้อนของวัสดุสะสมความร้อนก็มีน้อยลง ทำให้ในช่วงเวลาเท่ากันอากาศจะมีอุณหภูมิลดลงเพียง 12.048% แสดงให้เห็นว่าถ้าเวลาเพิ่มขึ้นความสามารถในการรับความร้อนของอากาศจากอิฐทนไฟมีค่าน้อยลง

- ที่ตำแหน่ง 0.3 เมตร ที่เวลาเริ่มต้น 125 นาที ของไหลมีอุณหภูมิ  $106.50^{\circ}\text{C}$  แต่เมื่อเวลาผ่านไปครึ่งคาบการไหล (ที่เวลา 137.5 นาที) อุณหภูมิของของไหลจะลดลงเป็น  $79.00^{\circ}\text{C}$  ซึ่ง ลดลงจากที่เวลาเริ่มต้น 25.822% แต่เมื่อเวลาผ่านไปครบ 1 คาบ ของไหลจะมีอุณหภูมิ  $75.00^{\circ}\text{C}$  ซึ่ง ลดลงจากที่เวลาเริ่มต้น 29.577% จะสังเกตได้ว่าในช่วงแรกของคาบการไหล อากาศจะสามารถรับความร้อนจากวัสดุสะสมความร้อนได้ดี มีอุณหภูมิลดลง 25.822% แต่เมื่อเวลาผ่านไปนานมากขึ้นความสามารถในการคายความร้อนของวัสดุสะสมความร้อนก็มีน้อยลง ทำให้ในช่วงเวลาเท่ากันอากาศจะมีอุณหภูมิลดลงเพียง 3.756% แสดงให้เห็นว่าถ้าเวลาเพิ่มขึ้นความสามารถในการรับความร้อนของอากาศจากอิฐทนไฟมีค่าน้อยลง

- ที่ตำแหน่ง 4.74 เมตร ที่เวลาเริ่มต้น 125 นาที ของไหลมีอุณหภูมิ  $502.75^{\circ}\text{C}$  แต่เมื่อเวลาผ่านไปครึ่งคาบการไหล (ที่เวลา 137.5 นาที) อุณหภูมิของของไหลจะลดลงเป็น  $485.25^{\circ}\text{C}$  ซึ่ง ลดลงจากที่เวลาเริ่มต้น 3.481% แต่เมื่อเวลาผ่านไปครบ 1 คาบ ของไหลจะมีอุณหภูมิ  $472.5^{\circ}\text{C}$  ซึ่ง ลดลงจากที่เวลาเริ่มต้น 6.017% จะสังเกตได้ว่าในช่วงแรกของคาบการไหล อากาศจะสามารถรับความร้อนจากวัสดุสะสมความร้อนได้ดี มีอุณหภูมิลดลง 3.481% แต่เมื่อเวลาผ่านไปนานมากขึ้นความสามารถในการคายความร้อนของวัสดุสะสมความร้อนก็มีน้อยลง ทำให้ในช่วงเวลาเท่ากัน

อากาศดีจะมีอุณหภูมิลดลงเพียง 2.536% แสดงให้เห็นว่าถ้าเวลาเพิ่มขึ้นความสามารถในการรับความร้อนของอากาศดีจากอิฐทนไฟมีค่าน้อยลง

- ที่ตำแหน่ง 5.04 เมตร ที่เวลาเริ่มต้น 125 นาที ของไหลมีอุณหภูมิ  $531.00^{\circ}\text{C}$  แต่เมื่อเวลาผ่านไปครึ่งคาบการไหล (ที่เวลา 137.5 นาที) อุณหภูมิของของไหลจะลดลงเป็น  $497.25^{\circ}\text{C}$  ซึ่ง ลดลงจากที่เวลาเริ่มต้น 6.356% แต่เมื่อเวลาผ่านไปครบ 1 คาบ ของไหลจะมีอุณหภูมิ  $476.5^{\circ}\text{C}$  ซึ่ง ลดลงจากที่เวลาเริ่มต้น 10.264% จะสังเกตได้ว่าในช่วงแรกของคาบการไหล อากาศดีจะสามารถรับความร้อนจากวัสดุสะสมความร้อนได้ดี มีอุณหภูมิลดลง 6.356% แต่เมื่อเวลาผ่านไปนานมากขึ้นความสามารถในการคายความร้อนของวัสดุสะสมความร้อนก็มีน้อยลง ทำให้ในช่วงเวลาเท่ากันอากาศดีจะมีอุณหภูมิลดลงเพียง 3.908% แสดงให้เห็นว่าถ้าเวลาเพิ่มขึ้นความสามารถในการรับความร้อนของอากาศดีจากอิฐทนไฟมีค่าน้อยลง

จากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทั้ง 4 ตำแหน่ง พบว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือ เมื่อเวลาผ่านไปนานมากขึ้นอากาศดีก็จะมีอุณหภูมิลดลงแต่มีอัตราการลดลงของอุณหภูมิในอัตราที่น้อยลง โดยที่ตำแหน่งต้นทางของช่องทางการไหล จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมากกว่าที่ปลายทางของช่องทางการไหล ซึ่งจะสังเกตได้ว่าที่ตำแหน่ง 0.3 เมตร มีค่ามากถึง 29.577% ที่เวลาสิ้นสุดคาบการไหลที่ 150 นาที ส่วนที่ตำแหน่ง 5.04 เมตร มีค่าเพียง 10.264% ที่เวลาสิ้นสุดคาบการไหลที่ 150 นาที เนื่องจากที่ปลายทางของช่องทางการไหลวัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิสูงใกล้เคียงกับของไหล ทำให้วัสดุสะสมความร้อนรับความร้อนได้ในปริมาณที่น้อยกว่า และที่ต้นทางของช่องทางการไหลมีของไหลมีอุณหภูมิต่ำ แต่วัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิสูง ทำให้วัสดุสะสมความร้อนคายความร้อนได้ในปริมาณที่มากกว่า

#### วิเคราะห์ผลจากระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

- ที่ตำแหน่ง 0.3 เมตร ที่เวลาเริ่มต้น 125 นาที ของไหลมีอุณหภูมิ  $88.36^{\circ}\text{C}$  แต่เมื่อเวลาผ่านไปครึ่งคาบการไหล (ที่เวลา 137.5 นาที) อุณหภูมิของของไหลจะลดลงเป็น  $83.04^{\circ}\text{C}$  ซึ่งลดลงจากที่เวลาเริ่มต้น 6.025% แต่เมื่อเวลาผ่านไปครบ 1 คาบ ของไหลจะมีอุณหภูมิ  $81.29^{\circ}\text{C}$  ซึ่ง ลดลงจากที่เวลาเริ่มต้น 8.008 % จะสังเกตได้ว่าในช่วงแรกของคาบการไหล อากาศดีจะสามารถรับความร้อนจากวัสดุสะสม

ความร้อนได้ดี มีอุณหภูมิลดลง 6.025% แต่เมื่อเวลาผ่านไปนานมากขึ้นความสามารถในการคายความร้อนของวัสดุสะสมความร้อนก็มีน้อยลง ทำให้ในช่วงเวลาเท่ากันอากาศดีจะมีอุณหภูมิลดลงเพียง 1.983% แสดงให้เห็นว่าถ้าเวลาเพิ่มขึ้นความสามารถในการรับความร้อนของอากาศดีจากอิฐทนไฟมีค่าน้อยลง

- ที่ตำแหน่ง 4.74 เมตร ที่เวลาเริ่มต้น 125 นาที ของไหลมีอุณหภูมิ 494.24 °C แต่เมื่อเวลาผ่านไปครึ่งคาบการไหล (ที่เวลา 137.5 นาที) อุณหภูมิของของไหลจะลดลงเป็น 472.30 °C ซึ่งลดลงจากที่เวลาเริ่มต้น 4.440% แต่เมื่อเวลาผ่านไปครบ 1 คาบ ของไหลจะมีอุณหภูมิ 464.10 °C ซึ่ง ลดลงจากที่เวลาเริ่มต้น 6.099 % จะสังเกตได้ว่าในช่วงแรกของคาบการไหล อากาศดีจะสามารถรับความร้อนจากวัสดุสะสมความร้อนได้ดี มีอุณหภูมิลดลง 4.440% แต่เมื่อเวลาผ่านไปนานมากขึ้นความสามารถในการคายความร้อนของวัสดุสะสมความร้อนก็มีน้อยลง ทำให้ในช่วงเวลาเท่ากันอากาศดีจะมีอุณหภูมิลดลงเพียง 1.659% แสดงให้เห็นว่าถ้าเวลาเพิ่มขึ้นความสามารถในการรับความร้อนของอากาศดีจากอิฐทนไฟมีค่าน้อยลง

- ที่ตำแหน่ง 5.04 เมตร ที่เวลาเริ่มต้น 125 นาที ของไหลมีอุณหภูมิ 516.62 °C แต่เมื่อเวลาผ่านไปครึ่งคาบการไหล (ที่เวลา 137.5 นาที) อุณหภูมิของของไหลจะลดลงเป็น 494.89 °C ซึ่งลดลงจากที่เวลาเริ่มต้น 4.207% แต่เมื่อเวลาผ่านไปครบ 1 คาบ ของไหลจะมีอุณหภูมิ 486.72 °C ซึ่ง ลดลงจากที่เวลาเริ่มต้น 5.788 % จะสังเกตได้ว่าในช่วงแรกของคาบการไหล อากาศดีจะสามารถรับความร้อนจากวัสดุสะสมความร้อนได้ดี มีอุณหภูมิลดลง 4.207% แต่เมื่อเวลาผ่านไปนานมากขึ้นความสามารถในการคายความร้อนของวัสดุสะสมความร้อนก็มีน้อยลง ทำให้ในช่วงเวลาเท่ากันอากาศดีจะมีอุณหภูมิลดลงเพียง 1.581% แสดงให้เห็นว่าถ้าเวลาเพิ่มขึ้นความสามารถในการรับความร้อนของอากาศดีจากอิฐทนไฟมีค่าน้อยลง

จากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทั้ง 3 ตำแหน่ง พบว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือ เมื่อเวลาผ่านไปนานมากขึ้นอากาศดีก็จะมีอุณหภูมิลดลงแต่มีอัตราการลดลงของอุณหภูมิอยู่ในอัตราที่ลดลง โดยที่ตำแหน่งต้นทางของช่องทางการไหล จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมากกว่าที่ปลายทางของช่องทางการไหล ซึ่งจะสังเกตได้ว่าที่ตำแหน่ง 0.3 เมตร มีค่ามากถึง 8.008% ที่เวลาสิ้นสุดคาบการไหลที่ 25 นาที ส่วนที่ตำแหน่ง 5.04 เมตร มีค่าเพียง 1.581% ที่เวลาสิ้นสุดคาบการไหลที่ 25 นาที เนื่องจากที่ปลายทางของช่องทางการ

ไหลวัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิสูงใกล้เคียงกับของไหล ทำให้วัสดุสะสมความร้อนรับความร้อนได้ในปริมาณที่น้อยกว่า และที่ต้นทางของช่องทางการไหลมีของไหลมีอุณหภูมิต่ำ แต่วัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิสูง ทำให้วัสดุสะสมความร้อนคายความร้อนได้ในปริมาณที่มากกว่า

*เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองกับระเบียบวิธีเชิงตัวเลข*

ผลที่ได้จากระเบียบวิธีเชิงตัวเลข และผลที่ได้จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าก๊าซเสียมีอุณหภูมิลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น โดยมีแนวโน้มของการลดลงของอุณหภูมิเร็วในช่วงแรก และค่อยๆ ลดลงในช่วงปลายคาบการไหล ดังแสดงในรูปที่ 6.16 – 6.18 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในช่วงต้นคาบการไหลก๊าซเสียสามารถรับความร้อนได้จากวัสดุสะสมความร้อนได้มาก หลังจากนั้นก๊าซเสียจะเริ่มอึดตัว และรับความร้อนได้ในปริมาณที่น้อยลงตามลำดับ

สังเกตผลที่ได้จากการทดลองสลับคาบการไหลที่เวลา 20, 15 และ 10 นาที ซึ่งแสดงในรูปที่ 6.4, 6.7 และ 6.10 และตารางที่ 6.5 และ 6.6 ซึ่งมีแนวโน้มของผลการทดลองในทิศทางเดียวกันกับการทดลองสลับคาบการไหลที่เวลา 25 นาที คือ เมื่อเวลาผ่านไปนานมากขึ้นอากาศดีก็จะมีอุณหภูมิลดลง แต่มีอัตราการลดลงของอุณหภูมิในอัตราที่ลดลง โดยที่ตำแหน่งต้นทางของช่องทางการไหล จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมากกว่าที่ปลายทางของช่องทางการไหล

3. ความชันของกราฟอุณหภูมิเมื่อเทียบกับเวลา ให้สังเกตความชันของกราฟที่ได้จากการทดลอง และระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ในช่วงเวลา 125 -150 นาที ที่ตำแหน่ง 5.04, 4.74 และ 0.3 เมตร พบว่าอุณหภูมิของอากาศดีมีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ ซึ่งจะดูได้จากความชันของกราฟที่ได้มีค่าค่อนข้างน้อย แสดงให้เห็นว่าก๊าซเสียมีอัตราการพาความร้อนค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับอัตราการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งสอดคล้องกับอัตราการไหลของก๊าซเสียที่ได้จากการทดลองซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับอุณหภูมิของก๊าซ โดยผลที่ได้จากทั้งระเบียบวิธีเชิงตัวเลขและการทดลองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน



สังเกตผลที่ได้จากการทดลองสลับคาบการไหลที่เวลา 20, 15 และ 10 นาที ซึ่งแสดงในรูปที่ 6.4, 6.7 และ 6.10 มีแนวโน้มของผลการทดลองในทิศทางเดียวกันกับการทดลองสลับคาบการไหลที่เวลา 25 นาที คือ ในช่วง Cooling period ความชันของกราฟที่ได้มีค่าค่อนข้างน้อย แสดงให้เห็นว่าก๊าซเสียมีอัตราการพาความร้อนค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับอัตราการแผ่รังสีความร้อนเช่นกัน

#### 6.1.1.2 ระบายผิววัสดุสะสมความร้อน

ที่ระนาบนี้พฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ในวัสดุสะสมความร้อนมีลักษณะคล้ายๆกันกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในของไหล ต่างกันเพียงช่วงที่มีการสลับคาบการไหลอุณหภูมิของของไหลจะเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดแต่ในวัสดุสะสมความร้อนจะเป็นแบบค่อยเป็นค่อยไป ซึ่งสังเกตได้จากเส้นกราฟในรูปที่ 6.1 และ 6.2 ที่เวลา 125 นาที มีการสลับคาบการไหลจาก Heating period เป็น Cooling period ในรูปที่ 6.1 ของไหลมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว แต่จากรูปที่ 6.2 สังเกตได้ว่า ที่เวลาเดียวกันวัสดุสะสมความร้อนมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบค่อยเป็นค่อยไป ในการวิเคราะห์ผลลัพธ์จะใช้เวลาในช่วงเวลาเดียวกันกับของไหล คือ ช่วง Heating period ของวัฏจักรที่ 3 ที่เวลา 100 นาที โดยมีประเด็นที่น่าสนใจหลายประเด็นดังนี้

#### Heating period

1. การลดลงของอุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อน ตามระยะทางในช่องทางการไหลที่มากขึ้น

#### วิเคราะห์ผลจากการทดลอง

ในช่วงเริ่มต้นคาบการไหลในช่วง Heating period ที่ตำแหน่ง 5.04 เมตร วัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิ  $586.75^{\circ}\text{C}$  ที่ตำแหน่ง 4.74 เมตรจะสังเกตได้ว่า อุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนมีค่าลดลง เนื่องจากก๊าซเสียที่ตำแหน่งนี้มีอุณหภูมิต่ำลงทำให้อุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนมีค่าน้อยตามไปด้วย และเมื่อระยะทางตามแนวการไหลเพิ่มขึ้นอุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนก็จะมีค่าลดลง ดังจะสังเกตได้จากอุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนที่ตำแหน่ง 0.3 และ 0 เมตร ในช่วงเวลา

เดียวกัน (100-125 นาที) ที่ตำแหน่ง 0.3 เมตร จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าที่ตำแหน่ง 4.74 เมตร และที่ตำแหน่ง 0 เมตร จะมีอุณหภูมิสูงกว่าที่ตำแหน่ง 0.3 เมตร เนื่องมาจากก๊าซเสียมีอุณหภูมิต่ำลง ความร้อนที่ถ่ายเทสู่วัสดุสะสมความร้อนก็มีค่าน้อยลงเช่นกัน

#### วิเคราะห์ผลจากระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

ในช่วงเริ่มต้นคาบการไหลในช่วง Heating period ที่ตำแหน่ง 5.04 เมตร วัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิ  $591.65^{\circ}\text{C}$  ที่ตำแหน่ง 4.74 เมตรจะสังเกตได้ว่า อุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนมีค่าลดลง เนื่องจากก๊าซเสียที่ตำแหน่งนี้มีอุณหภูมิต่ำลงทำให้อุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนมีค่าน้อยตามไปด้วย และเมื่อระยะทางตามแนวการไหลเพิ่มขึ้นอุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนก็จะมีค่าลดลง ดังจะสังเกตได้จากอุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนที่ตำแหน่ง 0.3 และ 0 เมตร ในช่วงเวลาเดียวกัน (100-125 นาที) ที่ตำแหน่ง 0.3 เมตร จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าที่ตำแหน่ง 4.74 เมตร และที่ตำแหน่ง 0 เมตร จะมีอุณหภูมิสูงกว่าที่ตำแหน่ง 0.3 เมตร เนื่องมาจากก๊าซเสียมีอุณหภูมิต่ำลง ความร้อนที่ถ่ายเทสู่วัสดุสะสมความร้อนก็มีค่าน้อยลงเช่นกัน

#### เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองกับระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

ผลที่ได้จากระเบียบวิธีเชิงตัวเลข และผลที่ได้จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าวัสดุสะสมความร้อน มีอุณหภูมิลดลงตามระยะทางในช่องทางการไหลที่มากขึ้น จากการวิเคราะห์ค่าผิดพลาดระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากระเบียบวิธีเชิงตัวเลข และผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง สามารถสรุปหาค่ามัธยฐานของค่าความผิดพลาดที่ตำแหน่งต่างๆ ได้ ดังตารางที่ 6.1 แสดงให้เห็นว่าค่าผิดพลาดในทุกตำแหน่งมีค่าสูงสุดน้อยกว่า 18 % โดยมีค่ามัธยฐานของค่าความผิดพลาดรวม ทุกการทดลองของช่วง Heating period เท่ากับ 2.77 % ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถจำลองการถ่ายเทความร้อนของก๊าซเสีย ให้แก่วัสดุสะสมความร้อนตามแนวทิศทางการไหลได้ โดยที่สามารถดูรายละเอียดการวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดในหัวข้อ ‘วิเคราะห์ค่าความผิดพลาดของโปรแกรม’

สังเกตผลที่ได้จากการทดลองสลับคาบการไหลที่เวลา 20, 15 และ 10 นาที ซึ่งแสดงในรูปแบบที่ 6.5, 6.8 และ 6.11 มีแนวโน้มของผลการทดลองในทิศทางเดียวกันกับ

การทดลองสลับคาบการไหลที่เวลา 25 นาที คือ อุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนก็มีค่าลดลงตามระยะทางในช่องทางการไหลที่มากขึ้นเช่นกัน

2. การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิตามเวลา ให้สังเกตที่ตำแหน่ง 4.74, 0.3 และ 0 เมตร ในรูปที่ 6.2 และตารางที่ 6.7 และ 6.8 กราฟจะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทียบกับเวลาดังนี้

วิเคราะห์ผลจากการทดลอง

ที่ตำแหน่ง 5.04 เมตร ที่เวลาเริ่มต้น 100 นาที วัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิ  $586.75^{\circ}\text{C}$  แต่เมื่อเวลาผ่านไปครึ่งคาบการไหล (ที่เวลา 112.5 นาที) อุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนจะเพิ่มขึ้นเป็น  $620.00^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเพิ่มขึ้นจากที่เวลาเริ่มต้น 5.67% แต่เมื่อเวลาผ่านไปครบ 1 คาบ วัสดุสะสมความร้อนจะมีอุณหภูมิ  $638.75^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเพิ่มขึ้นจากที่เวลาเริ่มต้น 8.86% จะสังเกตได้ว่า ที่ในช่วงแรกของคาบการไหลก๊าซเสียจะสามารถถ่ายเทความร้อนให้กับวัสดุสะสมความร้อนได้ดี ทำให้วัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 5.67% แต่เมื่อเวลาผ่านไปนานมากขึ้นความสามารถในการรับความร้อนของวัสดุสะสมความร้อนก็มีน้อยลง ทำให้ในช่วงเวลาเท่ากันวัสดุสะสมความร้อนจะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเพียง 3.19% แสดงให้เห็นว่าถ้าเวลาเพิ่มขึ้นความสามารถในการรับความร้อนของวัสดุสะสมความร้อนจะมีค่าน้อยลง

- ที่ตำแหน่ง 4.74 เมตร ที่เวลาเริ่มต้น 100 นาที วัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิ  $554.00^{\circ}\text{C}$  แต่เมื่อเวลาผ่านไปครึ่งคาบการไหล (ที่เวลา 112.5 นาที) อุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนจะเพิ่มขึ้นเป็น  $575.00^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเพิ่มขึ้นจากที่เวลาเริ่มต้น 3.79% แต่เมื่อเวลาผ่านไปครบ 1 คาบ วัสดุสะสมความร้อนจะมีอุณหภูมิ  $695.50^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเพิ่มขึ้นจากที่เวลาเริ่มต้น 7.49% จะสังเกตได้ว่า ที่ในช่วงแรกของคาบการไหลก๊าซเสียจะสามารถถ่ายเทความร้อนให้กับวัสดุสะสมความร้อนได้ดี ทำให้วัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 3.79% แต่เมื่อเวลาผ่านไปนานมากขึ้นความสามารถในการรับความร้อนของวัสดุสะสมความร้อนก็มีน้อยลง ทำให้ในช่วงเวลาเท่ากันวัสดุสะสมความร้อนจะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเพียง 3.7% แสดงให้เห็นว่าถ้าเวลาเพิ่มขึ้นความสามารถในการรับความร้อนของวัสดุสะสมความร้อนจะมีค่าน้อยลง

- ที่ตำแหน่ง 0.3 เมตร ที่เวลาเริ่มต้น 100 นาที วัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิ  $183.00^{\circ}\text{C}$  แต่เมื่อเวลาผ่านไปครึ่งคาบการไหล (ที่เวลา 112.5 นาที) อุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนจะเพิ่มขึ้นเป็น  $199.00^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเพิ่มขึ้นจากที่เวลาเริ่มต้น 8.74%

แต่เมื่อเวลาผ่านไปครบ 1 คาบ วัสดุสะสมความร้อนจะมีอุณหภูมิ 213.50 °C ซึ่งเพิ่มขึ้นจากที่เวลาเริ่มต้น 16.67% จะสังเกตได้ว่า ที่ในช่วงแรกของคาบการไหลก๊าซเสียจะสามารถถ่ายเทความร้อนให้กับวัสดุสะสมความร้อนได้ดี ทำให้วัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 8.74% แต่เมื่อเวลาผ่านไปนานมากขึ้นความสามารถในการรับความร้อนของวัสดุสะสมความร้อนก็มีน้อยลง ทำให้ในช่วงเวลาเท่ากันวัสดุสะสมความร้อนจะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเพียง 7.92% แสดงให้เห็นว่าถ้าเวลาเพิ่มขึ้นความสามารถในการรับความร้อนของวัสดุสะสมความร้อนจะมีค่าน้อยลง

- ที่ตำแหน่ง 0 เมตร ที่เวลาเริ่มต้น 100 นาที วัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิ 173.50 °C แต่เมื่อเวลาผ่านไปครึ่งคาบการไหล (ที่เวลา 112.5 นาที) อุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนจะเพิ่มขึ้นเป็น 205.50 °C ซึ่งเพิ่มขึ้นจากที่เวลาเริ่มต้น 18.44% แต่เมื่อเวลาผ่านไปครบ 1 คาบ วัสดุสะสมความร้อนจะมีอุณหภูมิ 217.50 °C ซึ่งเพิ่มขึ้นจากที่เวลาเริ่มต้น 25.36% จะสังเกตได้ว่า ที่ในช่วงแรกของคาบการไหลก๊าซเสียจะสามารถถ่ายเทความร้อนให้กับวัสดุสะสมความร้อนได้ดี ทำให้วัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 18.44% แต่เมื่อเวลาผ่านไปนานมากขึ้นความสามารถในการรับความร้อนของวัสดุสะสมความร้อนก็มีน้อยลง ทำให้ในช่วงเวลาเท่ากันวัสดุสะสมความร้อนจะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเพียง 6.92% แสดงให้เห็นว่าถ้าเวลาเพิ่มขึ้นความสามารถในการรับความร้อนของวัสดุสะสมความร้อนจะมีค่าน้อยลง

จากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทั้ง 4 ตำแหน่ง พบว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือ เมื่อเวลาผ่านไปนานมากขึ้น วัสดุสะสมความร้อนก็จะมีอุณหภูมิสูงขึ้น แต่มีอัตราการสูงขึ้นของอุณหภูมิในอัตราที่น้อยลง แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการคายความร้อนของก๊าซเสียให้กับอิฐทนไฟ ซึ่งจะมีค่าลดลงเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้น และที่ตำแหน่งต้นทางของช่องทางการไหล 5.04 เมตร จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้อยกว่าที่ปลายทางของช่องทางการไหล ซึ่งจะสังเกตได้ว่าที่ตำแหน่ง 5.04 เมตร มีค่าเพียง 8.86 % ที่เวลาสิ้นสุดคาบการไหลที่ 1,500 วินาที ส่วนที่ตำแหน่ง 0 เมตร มีค่ามากถึง 25.36 % ที่เวลาสิ้นสุดคาบการไหลที่ 1,500 วินาที เนื่องจากที่ต้นทางของช่องทางการไหลวัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิสูงใกล้เคียงกับของไหล ทำให้วัสดุสะสมความร้อนรับความร้อนได้ในปริมาณที่น้อยกว่า แต่ที่ปลายทางของช่องทางการไหลมีของไหล และวัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิต่ำ ทำให้วัสดุสะสมความร้อนรับความร้อนได้ในปริมาณที่มากกว่า

### วิเคราะห์ผลจากระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

- ที่ตำแหน่ง 5.04 เมตร ที่เวลาเริ่มต้น 100 นาที วัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิ  $591.65^{\circ}\text{C}$  แต่เมื่อเวลาผ่านไปครึ่งคาบการไหล (ที่เวลา 112.5 นาที) อุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนจะเพิ่มขึ้นเป็น  $612.41^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเพิ่มขึ้นจากที่เวลาเริ่มต้น 3.51 % แต่เมื่อเวลาผ่านไปครบ 1 คาบ วัสดุสะสมความร้อนจะมีอุณหภูมิ  $618.70^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเพิ่มขึ้นจากที่เวลาเริ่มต้น 4.57 % จะสังเกตได้ว่า ที่ในช่วงแรกของคาบการไหลก๊าซเสียจะสามารถถ่ายเทความร้อนให้กับวัสดุสะสมความร้อนได้ดี ทำให้วัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 3.51% แต่เมื่อเวลาผ่านไปนานมากขึ้นความสามารถในการรับความร้อนของวัสดุสะสมความร้อนก็มีน้อยลง ทำให้ในช่วงเวลาเท่ากันวัสดุสะสมความร้อนจะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเพียง 1.06 % แสดงให้เห็นว่าถ้าเวลาเพิ่มขึ้นความสามารถในการรับความร้อนของวัสดุสะสมความร้อนจะมีค่าน้อยลง

- ที่ตำแหน่ง 4.74 เมตร ที่เวลาเริ่มต้น 100 นาที วัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิ  $574.93^{\circ}\text{C}$  แต่เมื่อเวลาผ่านไปครึ่งคาบการไหล (ที่เวลา 112.5 นาที) อุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนจะเพิ่มขึ้นเป็น  $595.92^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเพิ่มขึ้นจากที่เวลาเริ่มต้น 3.65 % แต่เมื่อเวลาผ่านไปครบ 1 คาบ วัสดุสะสมความร้อนจะมีอุณหภูมิ  $602.59^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเพิ่มขึ้นจากที่เวลาเริ่มต้น 4.81 % จะสังเกตได้ว่า ที่ในช่วงแรกของคาบการไหลก๊าซเสียจะสามารถถ่ายเทความร้อนให้กับวัสดุสะสมความร้อนได้ดี ทำให้วัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 3.65 % แต่เมื่อเวลาผ่านไปนานมากขึ้นความสามารถในการรับความร้อนของวัสดุสะสมความร้อนก็มีน้อยลง ทำให้ในช่วงเวลาเท่ากันวัสดุสะสมความร้อนจะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเพียง 1.16 % แสดงให้เห็นว่าถ้าเวลาเพิ่มขึ้นความสามารถในการรับความร้อนของวัสดุสะสมความร้อนจะมีค่าน้อยลง

- ที่ตำแหน่ง 0.3 เมตร ที่เวลาเริ่มต้น 100 นาที วัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิ  $211.58^{\circ}\text{C}$  แต่เมื่อเวลาผ่านไปครึ่งคาบการไหล (ที่เวลา 112.5 นาที) อุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนจะเพิ่มขึ้นเป็น  $238.39^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเพิ่มขึ้นจากที่เวลาเริ่มต้น 12.67 % แต่เมื่อเวลาผ่านไปครบ 1 คาบ วัสดุสะสมความร้อนจะมีอุณหภูมิ  $248.43^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเพิ่มขึ้นจากที่เวลาเริ่มต้น 17.42 % จะสังเกตได้ว่า ที่ในช่วงแรกของคาบการไหลก๊าซเสียจะสามารถถ่ายเทความร้อนให้กับวัสดุสะสมความร้อนได้ดี ทำให้วัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 12.67 % แต่เมื่อเวลาผ่านไปนานมากขึ้นความสามารถในการรับความร้อนของวัสดุสะสมความร้อนก็มีน้อยลง ทำให้ในช่วงเวลาเท่ากันวัสดุสะสม

ความร้อนจะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเพียง 4.74% แสดงให้เห็นว่าถ้าเวลาเพิ่มขึ้นความสามารถในการรับความร้อนของวัสดุสะสมความร้อนจะมีค่าน้อยลง

- ที่ตำแหน่ง 0 เมตร ที่เวลาเริ่มต้น 100 นาที วัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิ 190.74 °C แต่เมื่อเวลาผ่านไปครึ่งคาบการไหล (ที่เวลา 112.5 นาที) อุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนจะเพิ่มขึ้นเป็น 217.77 °C ซึ่งเพิ่มขึ้นจากที่เวลาเริ่มต้น 14.17 % แต่เมื่อเวลาผ่านไปครบ 1 คาบ วัสดุสะสมความร้อนจะมีอุณหภูมิ 227.92 °C ซึ่งเพิ่มขึ้นจากที่เวลาเริ่มต้น 19.49 % จะสังเกตได้ว่า ที่ในช่วงแรกของคาบการไหลก๊าซเสียจะสามารถถ่ายเทความร้อนให้กับวัสดุสะสมความร้อนได้ดี ทำให้วัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 14.17 % แต่เมื่อเวลาผ่านไปนานมากขึ้นความสามารถในการรับความร้อนของวัสดุสะสมความร้อนก็มีน้อยลง ทำให้ในช่วงเวลาเท่ากันวัสดุสะสมความร้อนจะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเพียง 5.32 % แสดงให้เห็นว่าถ้าเวลาเพิ่มขึ้นความสามารถในการรับความร้อนของวัสดุสะสมความร้อนจะมีค่าน้อยลง

จากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทั้ง 4 ตำแหน่ง พบว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือ เมื่อเวลาผ่านไปนานมากขึ้นวัสดุสะสมความร้อนก็จะมีอุณหภูมิสูงขึ้น แต่มีอัตราการสูงขึ้นของอุณหภูมิในอัตราที่น้อยลง แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการคายความร้อนของก๊าซเสียให้กับอิฐทนไฟซึ่งจะมีค่าลดลงเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้น และที่ตำแหน่งต้นทางของช่องทางการไหล 5.04 เมตร จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้อยกว่าที่ปลายทางของช่องทางการไหล ซึ่งจะสังเกตได้ว่าที่ตำแหน่ง 5.04 เมตร มีค่าเพียง 4.57 % ที่เวลาสิ้นสุดคาบการไหลที่ 1,500 วินาที ส่วนที่ตำแหน่ง 0 เมตร มีค่ามากถึง 19.49 % ที่เวลาสิ้นสุดคาบการไหลที่ 1,500 วินาที เนื่องจากที่ต้นทางของช่องทางการไหลวัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิสูงใกล้เคียงกับของไหล ทำให้วัสดุสะสมความร้อนรับความร้อนได้ในปริมาณที่น้อยกว่า แต่ที่ปลายทางของช่องทางการไหลมีของไหล และวัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิต่ำ ทำให้วัสดุสะสมความร้อนรับความร้อนได้ในปริมาณที่มากกว่า

*เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองกับระเบียบวิธีเชิงตัวเลข*

ผลที่ได้จากระเบียบวิธีเชิงตัวเลข และผลที่ได้จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าวัสดุสะสมความร้อน มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้น โดยมีแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเร็วในช่วงแรก และค่อยๆลดลงในช่วงปลายคาบการไหล ดังแสดง

ในรูปที่ 6.19 – 6.22 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในช่วงต้นคาบการไหล ก๊าซเสียสามารถถ่ายเทความร้อนให้กับวัสดุสะสมความร้อนได้มาก หลังจากนั้นวัสดุสะสมความร้อนจะเริ่มอิ่มตัว และรับความร้อนได้ในปริมาณที่น้อยลงตามลำดับ ซึ่งก็มีพฤติกรรมคล้ายๆกันกับพฤติกรรมการเพิ่มอุณหภูมิในของไหล

สังเกตผลที่ได้จากการทดลองสลับคาบการไหลที่เวลา 20, 15 และ 10 นาที ซึ่งแสดงในรูปที่ 6.5, 6.8 และ 6.11 และตารางที่ 6.7 และ 6.8 ซึ่งมีแนวโน้มของผลการทดลองในทิศทางเดียวกันกับการทดลองสลับคาบการไหลที่เวลา 25 นาที คือ เมื่อเวลาผ่านไปนานมากขึ้นวัสดุสะสมความร้อนก็จะมีอุณหภูมิสูงขึ้น แต่มีอัตราการสูงขึ้นของอุณหภูมิในอัตราที่น้อยลง โดยที่ตำแหน่งต้นทางของช่องทางการไหลจะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้อยกว่าที่ปลายทางของช่องทางการไหล

หลังการสิ้นสุดการไหลในช่วง Heating period ที่เวลา 125 นาทีแล้ว ก็จะมีการสลับคาบการไหลให้เป็น Cooling period และดำเนินต่อไปเป็นเวลา 25 นาที จนสิ้นสุดคาบการไหลที่เวลา 150 นาที ซึ่งในช่วง Cooling period ซึ่งมีประเด็นที่น่าสนใจคล้ายๆกันในช่วง Heating period แต่พฤติกรรมต่างๆจะเป็นไปในทิศทางตรงกันข้ามดังนี้

### Cooling period

1. การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิวัสดุสะสมความร้อน ตามระยะทางในช่องทางการไหลที่มากขึ้น

วิเคราะห์ผลจากการทดลอง

เนื่องจากการสลับทิศทางการไหลของวาล์วปรับทิศทางการไหล ทำให้อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ไหลเข้าช่องทางการไหลของ Regenerator ในทิศทางตรงกันข้าม คือ ไหลเข้าที่ตำแหน่ง 0 เมตร ด้วยอุณหภูมิ  $62.25^{\circ}\text{C}$  โดยทำให้วัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิ  $219.25^{\circ}\text{C}$  เนื่องจากวัสดุสะสมความร้อนซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าอากาศ วัสดุสะสมความร้อนก็จะคายความร้อนให้อากาศ เนื่องจากการสะสมความร้อนของวัสดุสะสมความร้อนจากช่วง Heating period ที่ตำแหน่งต่างๆตามระยะทางการไหลที่มากขึ้นวัสดุจะสะสมความร้อนจะมีอุณหภูมิสูงมากขึ้น ทำให้เกิดการคายความร้อนจากวัสดุสะสมความร้อนสู่ของไหล ตลอดระยะทางตามแนวการไหลที่

เพิ่มขึ้น ให้สังเกตที่ตำแหน่ง 0.3 เมตร วัสดุสะสมความร้อนซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าที่ตำแหน่ง 4.74 และ 5.04 เมตร

#### วิเคราะห์ผลจากระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

เนื่องจากการสลับทิศทางการไหลของวาล์วปรับทิศทางการไหล ทำให้อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ไหลเข้าช่องทางการไหลของ Regenerator ในทิศทางตรงกันข้าม คือไหลเข้าที่ตำแหน่ง 0 เมตร ด้วยอุณหภูมิคงที่  $53.36^{\circ}\text{C}$  โดยทำให้วัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิ  $215.35^{\circ}\text{C}$  เนื่องจากวัสดุสะสมความร้อนซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าอากาศ วัสดุสะสมความร้อนก็จะคายความร้อนให้อากาศ เนื่องจากการสะสมความร้อนของวัสดุสะสมความร้อนจากช่วง Heating period ที่ตำแหน่งต่างๆตามระยะทางการไหลที่มากขึ้นวัสดุจะสะสมความร้อนจะมีอุณหภูมิสูงมากขึ้น ทำให้เกิดการคายความร้อนจากวัสดุสะสมความร้อนสู่ของไหล ตลอดระยะทางตามแนวการไหลที่เพิ่มขึ้น ให้สังเกตที่ตำแหน่ง 0.3 เมตร วัสดุสะสมความร้อนซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าที่ตำแหน่ง 4.74 และ 5.04 เมตร

#### เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองกับระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

ผลที่ได้จากระเบียบวิธีเชิงตัวเลข และผลที่ได้จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าวัสดุสะสมความร้อน มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามระยะทางในช่องทางการไหลที่มากขึ้น จากการวิเคราะห์ค่าผิดพลาดระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากระเบียบวิธีเชิงตัวเลข และผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง สามารถสรุปหาค่ามัธยฐานของค่าความผิดพลาด ที่ตำแหน่งต่างๆได้ดังตารางที่ 6.2 แสดงให้เห็นว่าค่าผิดพลาดในทุกตำแหน่งมีค่าสูงสุดน้อยกว่า 18 % โดยมีค่ามัธยฐานของค่าความผิดพลาดรวม ทุกการทดลองของช่วง Heating period เท่ากับ 3.94 % ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถจำลองการถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศ กับวัสดุสะสมความร้อนตามแนวทิศทางการไหลได้ โดยที่สามารถดูรายละเอียดการวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดในหัวข้อ ‘วิเคราะห์ค่าความผิดพลาดของโปรแกรม’

สังเกตผลที่ได้จากการทดลองสลับคาบการไหลที่เวลา 20, 15 และ 10 นาที ซึ่งแสดงในรูปแบบที่ 6.5, 6.8 และ 6.11 มีแนวโน้มของผลการทดลองในทิศทางเดียวกันกับ



การทดลองสลับคาบการไหลที่เวลา 25 นาที คือ อุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะทางในช่องทางการไหลที่มากขึ้นเช่นกัน

2. การลดลงของอุณหภูมิตามเวลา ให้สังเกตที่ตำแหน่ง 0, 0.3, 4.74 และ 5.04 เมตร ในรูปที่ 6.2 และตารางที่ 6.9 และ 6.10 กราฟจะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทียบกับเวลาดังนี้

#### วิเคราะห์ผลจากการทดลอง

- ที่ตำแหน่ง 0 เมตร ที่เวลาเริ่มต้น 125 นาที วัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิ  $219.25^{\circ}\text{C}$  แต่เมื่อเวลาผ่านไปครึ่งคาบการไหล (ที่เวลา 137.5 นาที) อุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนจะลดลงเป็น  $193.00^{\circ}\text{C}$  ซึ่งลดลงจากที่เวลาเริ่มต้น 11.97% แต่เมื่อเวลาผ่านไปครบ 1 คาบ วัสดุสะสมความร้อนจะมีอุณหภูมิ  $183.50^{\circ}\text{C}$  ซึ่งลดลงจากที่เวลาเริ่มต้น 16.31 % จะสังเกตได้ว่าที่ในช่วงแรกของคาบการไหล อากาศดีจะสามารถรับความร้อนจากวัสดุสะสมความร้อนได้ดี ทำให้วัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิลดลง 11.97 % แต่เมื่อเวลาผ่านไปนานมากขึ้นความสามารถในการคายความร้อนของวัสดุสะสมความร้อนก็มีน้อยลง ทำให้ในช่วงเวลาเท่ากันวัสดุสะสมความร้อนจะมีอุณหภูมิลดลงเพียง 4.33 % แสดงให้เห็นว่าถ้าเวลาเพิ่มขึ้นความสามารถในการรับความร้อนของอากาศดีจากวัสดุสะสมความร้อนมีค่าน้อยลง

- ที่ตำแหน่ง 0.3 เมตร ที่เวลาเริ่มต้น 125 นาที วัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิ  $219.00^{\circ}\text{C}$  แต่เมื่อเวลาผ่านไปครึ่งคาบการไหล (ที่เวลา 137.5 นาที) อุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนจะลดลงเป็น  $213.50^{\circ}\text{C}$  ซึ่งลดลงจากที่เวลาเริ่มต้น 2.51% แต่เมื่อเวลาผ่านไปครบ 1 คาบ วัสดุสะสมความร้อนจะมีอุณหภูมิ  $210.50^{\circ}\text{C}$  ซึ่งลดลงจากที่เวลาเริ่มต้น 3.88 % จะสังเกตได้ว่าที่ในช่วงแรกของคาบการไหล อากาศดีจะสามารถรับความร้อนจากวัสดุสะสมความร้อนได้ดี ทำให้วัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิลดลง 2.51 % แต่เมื่อเวลาผ่านไปนานมากขึ้นความสามารถในการคายความร้อนของวัสดุสะสมความร้อนก็มีน้อยลง ทำให้ในช่วงเวลาเท่ากันวัสดุสะสมความร้อนจะมีอุณหภูมิลดลงเพียง 1.37 % แสดงให้เห็นว่าถ้าเวลาเพิ่มขึ้นความสามารถในการรับความร้อนของอากาศดีจากวัสดุสะสมความร้อนมีค่าน้อยลง

- ที่ตำแหน่ง 4.74 เมตร ที่เวลาเริ่มต้น 125 นาที วัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิ  $589.25^{\circ}\text{C}$  แต่เมื่อเวลาผ่านไปครึ่งคาบการไหล (ที่เวลา 137.5 นาที) อุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนจะลดลงเป็น  $585.00^{\circ}\text{C}$  ซึ่งลดลงจากที่เวลาเริ่มต้น 0.72%

แต่เมื่อเวลาผ่านไปครบ 1 คาบ วัสดุสะสมความร้อนจะมีอุณหภูมิ  $568.00\text{ }^{\circ}\text{C}$  ซึ่งลดลงจากที่เวลาเริ่มต้น  $3.61\%$  จะสังเกตได้ว่าที่ในช่วงแรกของคาบการไหล อากาศดีจะสามารถรับความร้อนจากวัสดุสะสมความร้อนได้ดี ทำให้วัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิลดลง  $0.72\%$  แต่เมื่อเวลาผ่านไปนานมากขึ้นความสามารถในการคายความร้อนของวัสดุสะสมความร้อนก็มีน้อยลง ทำให้ในช่วงเวลาเท่ากันวัสดุสะสมความร้อนจะมีอุณหภูมิลดลงเพียง  $2.89\%$  แสดงให้เห็นว่าถ้าเวลาเพิ่มขึ้นความสามารถในการรับความร้อนของอากาศดีจากวัสดุสะสมความร้อนมีค่าน้อยลง

- ที่ตำแหน่ง 5.04 เมตร ที่เวลาเริ่มต้น 125 นาที วัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิ  $629.00\text{ }^{\circ}\text{C}$  แต่เมื่อเวลาผ่านไปครึ่งคาบการไหล (ที่เวลา 137.5 นาที) อุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนจะลดลงเป็น  $610.50\text{ }^{\circ}\text{C}$  ซึ่งลดลงจากที่เวลาเริ่มต้น  $2.94\%$  แต่เมื่อเวลาผ่านไปครบ 1 คาบ วัสดุสะสมความร้อนจะมีอุณหภูมิ  $591.50\text{ }^{\circ}\text{C}$  ซึ่งลดลงจากที่เวลาเริ่มต้น  $5.96\%$  จะสังเกตได้ว่าที่ในช่วงแรกของคาบการไหล อากาศดีจะสามารถรับความร้อนจากวัสดุสะสมความร้อนได้ดี ทำให้วัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิลดลง  $2.94\%$  แต่เมื่อเวลาผ่านไปนานมากขึ้นความสามารถในการคายความร้อนของวัสดุสะสมความร้อนก็มีน้อยลง ทำให้ในช่วงเวลาเท่ากันวัสดุสะสมความร้อนจะมีอุณหภูมิลดลงเพียง  $2.02\%$  แสดงให้เห็นว่าถ้าเวลาเพิ่มขึ้นความสามารถในการรับความร้อนของอากาศดีจากวัสดุสะสมความร้อนมีค่าน้อยลง

จากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทั้ง 4 ตำแหน่ง พบว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือ เมื่อเวลาผ่านไปนานมากขึ้น วัสดุสะสมความร้อน ก็จะมีอุณหภูมิลดลงแต่มีอัตราการลดลงของอุณหภูมิในอัตราที่น้อยลง โดยที่ตำแหน่งต้นทางของช่องทางกรไหล จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมากกว่าที่ปลายทางของช่องทางกรไหล ซึ่งจะสังเกตได้ว่าที่ตำแหน่ง 0 เมตร มีค่ามากถึง  $16.31\%$  ที่เวลาสิ้นสุดคาบการไหลที่ 25 นาที ส่วนที่ตำแหน่ง 5.04 เมตร มีค่าเพียง  $5.96\%$  ที่เวลาสิ้นสุดคาบการไหลที่ 25 นาที เนื่องจากที่ปลายทางของช่องทางกรไหลวัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิสูงใกล้เคียงกับของไหล ทำให้วัสดุสะสมความร้อนรับความร้อนได้ในปริมาณที่น้อยกว่า และที่ต้นทางของช่องทางกรไหลมีของไหลมีอุณหภูมิต่ำ แต่วัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิสูง ทำให้วัสดุสะสมความร้อนคายความร้อนได้ในปริมาณที่มากกว่า

### วิเคราะห์ผลจากระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

- ที่ตำแหน่ง 0 เมตร ที่เวลาเริ่มต้น 125 นาที วัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิ 215.35 °C แต่เมื่อเวลาผ่านไปครึ่งคาบการไหล (ที่เวลา 137.5 นาที) อุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนจะลดลงเป็น 188.40 °C ซึ่งลดลงจากที่เวลาเริ่มต้น 12.51% แต่เมื่อเวลาผ่านไปครบ 1 คาบ วัสดุสะสมความร้อนจะมีอุณหภูมิ 179.71 °C ซึ่งลดลงจากที่เวลาเริ่มต้น 16.55 % จะสังเกตได้ว่าที่ในช่วงแรกของคาบการไหล อากาศดีจะสามารถรับความร้อนจากวัสดุสะสมความร้อนได้ดี ทำให้วัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิลดลง 12.51 % แต่เมื่อเวลาผ่านไปนานมากขึ้นความสามารถในการคายความร้อนของวัสดุสะสมความร้อนก็มึ้น้อยลง ทำให้ในช่วงเวลาเท่ากันวัสดุสะสมความร้อนจะมีอุณหภูมิลดลงเพียง 4.04 % แสดงให้เห็นว่าถ้าเวลาเพิ่มขึ้นความสามารถในการรับความร้อนของอากาศดีจากวัสดุสะสมความร้อนมีค่าน้อยลง

- ที่ตำแหน่ง 0.3 เมตร ที่เวลาเริ่มต้น 125 นาที วัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิ 236.24 °C แต่เมื่อเวลาผ่านไปครึ่งคาบการไหล (ที่เวลา 137.5 นาที) อุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนจะลดลงเป็น 209.47 °C ซึ่งลดลงจากที่เวลาเริ่มต้น 11.33 % แต่เมื่อเวลาผ่านไปครบ 1 คาบ วัสดุสะสมความร้อนจะมีอุณหภูมิ 200.59 °C ซึ่งลดลงจากที่เวลาเริ่มต้น 15.09 % จะสังเกตได้ว่าที่ในช่วงแรกของคาบการไหล อากาศดีจะสามารถรับความร้อนจากวัสดุสะสมความร้อนได้ดี ทำให้วัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิลดลง 11.33 % แต่เมื่อเวลาผ่านไปนานมากขึ้นความสามารถในการคายความร้อนของวัสดุสะสมความร้อนก็มึ้น้อยลง ทำให้ในช่วงเวลาเท่ากันวัสดุสะสมความร้อนจะมีอุณหภูมิลดลงเพียง 3.76 % แสดงให้เห็นว่าถ้าเวลาเพิ่มขึ้นความสามารถในการรับความร้อนของอากาศดีจากวัสดุสะสมความร้อนมีค่าน้อยลง

- ที่ตำแหน่ง 4.74 เมตร ที่เวลาเริ่มต้น 125 นาที วัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิ 594.05 °C แต่เมื่อเวลาผ่านไปครึ่งคาบการไหล (ที่เวลา 137.5 นาที) อุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนจะลดลงเป็น 573.04 °C ซึ่งลดลงจากที่เวลาเริ่มต้น 3.54% แต่เมื่อเวลาผ่านไปครบ 1 คาบ วัสดุสะสมความร้อนจะมีอุณหภูมิ 565.00 °C ซึ่งลดลงจากที่เวลาเริ่มต้น 4.89 % จะสังเกตได้ว่าที่ในช่วงแรกของคาบการไหล อากาศดีจะสามารถรับความร้อนจากวัสดุสะสมความร้อนได้ดี ทำให้วัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิลดลง 3.54 % แต่เมื่อเวลาผ่านไปนานมากขึ้นความสามารถในการคายความร้อนของวัสดุสะสมความร้อนก็มึ้น้อยลง ทำให้ในช่วงเวลาเท่ากันวัสดุสะสมความร้อน

ร้อนจะมีอุณหภูมิลดลงเพียง 1.35 % แสดงให้เห็นว่าถ้าเวลาเพิ่มขึ้นความสามารถในการรับความร้อนของอากาศจากวัสดุสะสมความร้อนมีค่าน้อยลง

- ที่ตำแหน่ง 5.04 เมตร ที่เวลาเริ่มต้น 125 นาที วัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิ 610.26 °C แต่เมื่อเวลาผ่านไปครึ่งคาบการไหล (ที่เวลา 137.5 นาที) อุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนจะลดลงเป็น 589.43 °C ซึ่งลดลงจากที่เวลาเริ่มต้น 3.41 % แต่เมื่อเวลาผ่านไปครบ 1 คาบ วัสดุสะสมความร้อนจะมีอุณหภูมิ 581.42 °C ซึ่งลดลงจากที่เวลาเริ่มต้น 4.73 % จะสังเกตได้ว่าที่ในช่วงแรกของคาบการไหล อากาศจะสามารถรับความร้อนจากวัสดุสะสมความร้อนได้ดี ทำให้วัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิลดลง 3.41 % แต่เมื่อเวลาผ่านไปนานมากขึ้นความสามารถในการคายความร้อนของวัสดุสะสมความร้อนก็มีน้อยลง ทำให้ในช่วงเวลาเท่ากันวัสดุสะสมความร้อนจะมีอุณหภูมิลดลงเพียง 1.32 % แสดงให้เห็นว่าถ้าเวลาเพิ่มขึ้นความสามารถในการรับความร้อนของอากาศจากวัสดุสะสมความร้อนมีค่าน้อยลง

จากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทั้ง 4 ตำแหน่ง พบว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือ เมื่อเวลาผ่านไปนานมากขึ้น วัสดุสะสมความร้อน ก็จะมีอุณหภูมิลดลงแต่มีอัตราการลดลงของอุณหภูมิในอัตราที่น้อยลง โดยที่ตำแหน่งต้นทางของช่องทางการไหล จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมากกว่าที่ปลายทางของช่องทางการไหล ซึ่งจะสังเกตได้ว่าที่ตำแหน่ง 0 เมตร มีค่ามากถึง 16.55 % ที่เวลาสิ้นสุดคาบการไหลที่ 25 นาที ส่วนที่ตำแหน่ง 5.04 เมตร มีค่าเพียง 4.73 % ที่เวลาสิ้นสุดคาบการไหลที่ 25 นาที เนื่องจากที่ปลายทางของช่องทางการไหลวัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิสูงใกล้เคียงกับของไหล ทำให้วัสดุสะสมความร้อนรับความร้อนได้ในปริมาณที่น้อยกว่า และที่ต้นทางของช่องทางการไหลมีของไหลมีอุณหภูมิต่ำ แต่วัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิสูง ทำให้วัสดุสะสมความร้อนคายความร้อนได้ในปริมาณที่มากกว่า

*เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองกับระเบียบวิธีเชิงตัวเลข*

ผลที่ได้จากระเบียบวิธีเชิงตัวเลข และผลที่ได้จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าวัสดุสะสมความร้อน มีอุณหภูมิลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น โดยมีแนวโน้มของการลดลงของอุณหภูมิเร็วในช่วงแรก และค่อยๆลดลงในช่วงปลายคาบการไหล ดังแสดงในรูปที่ 6.23 – 6.26 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในช่วงต้นคาบการไหลก๊าซเสียสามารถรับ

ความร้อนให้จากวัสดุสะสมความร้อนได้มาก หลังจากนั้นก๊าซเสียจะเริ่มอึดตัว และรับความร้อนได้ในปริมาณที่น้อยลงตามลำดับ

สังเกตผลที่ได้จากการทดลองสลับคาบการไหลที่เวลา 20, 15 และ 10 นาที ซึ่งแสดงในรูปที่ 6.5, 6.8 และ 6.11 และตารางที่ 6.9 และ 6.10 ซึ่งมีแนวโน้มของผลการทดลองในทิศทางเดียวกันกับการทดลองสลับคาบการไหลที่เวลา 25 นาที คือ เมื่อเวลาผ่านไปนานมากขึ้นวัสดุสะสมความร้อนก็จะมีอุณหภูมิลดลง แต่มีอัตราการลดลงของอุณหภูมิในอัตราที่น้อยลง โดยที่ตำแหน่งต้นทางของช่องทางการไหล จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมากกว่าที่ปลายทางของช่องทางการไหล

### 6.1.1.3 ระบุว่าที่สมมติให้เป็น Adiabatic plane ของวัสดุสะสมความร้อน

ที่ระนาบนี้พฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในวัสดุสะสมความร้อน มีลักษณะคล้ายๆกันกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในของไหล และผิวของวัสดุสะสมความร้อน ต่างกันเพียงช่วงที่มีการสลับคาบการไหลอุณหภูมิของของไหลจะเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด แต่ในวัสดุสะสมความร้อนจะเป็นแบบค่อยเป็นค่อยไป ซึ่งสังเกตได้จากเส้นกราฟในรูปที่ 6.1 และ 6.3 ที่เวลา 125 นาที มีการสลับคาบการไหลจาก Heating period เป็น Cooling period ในรูปที่ 6.1 ของไหลมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่างรวดเร็ว แต่จากรูปที่ 6.3 สังเกตได้ว่าที่เวลาเดียวกันวัสดุสะสมความร้อนมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบค่อยเป็นค่อยไป แต่เมื่อเทียบกับพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อน ที่ระนาบผิววัสดุสะสมความร้อน ในรูปที่ 6.2 พบว่ามีพฤติกรรมคล้ายกันแต่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้อยกว่ากราฟที่ได้มีลักษณะแบนราบกว่า ในการวิเคราะห์ผลลัพธ์จะใช้เวลาในช่วงเวลาเดียวกันกับของไหล คือ ช่วง Heating period ของวัฏจักรที่ 3 ที่เวลา 100 นาที โดยมีประเด็นที่น่าสนใจหลายประเด็นดังนี้

#### Heating period

1. การลดลงของอุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อน ตามระยะทางในช่องทางการไหลที่มากขึ้น

### วิเคราะห์ผลจากการทดลอง

ในช่วงเริ่มต้นคาบการไหลในช่วง Heating period ที่ตำแหน่ง 5.04 เมตร วัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิ 594.00 °C ที่ตำแหน่ง 4.74 เมตรจะสังเกตได้ว่า อุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนมีค่าลดลง เนื่องจากก๊าซเสียที่ตำแหน่งนี้มีอุณหภูมิ ต่ำลงทำให้อุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนมีค่าน้อยตามไปด้วย และเมื่อระยะทาง ตามแนวการไหลเพิ่มขึ้นอุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนก็จะมีค่าลดลง ดังจะสังเกต ได้จากอุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนที่ตำแหน่ง 0.3 และ 0 เมตร ในช่วงเวลา เดียวกัน (100-125 นาที) ที่ตำแหน่ง 0.3 เมตร จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าที่ตำแหน่ง 4.74 เมตร และที่ตำแหน่ง 0 เมตร จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าที่ตำแหน่ง 0.3 เมตร เนื่องมาจากก๊าซ เสียมีอุณหภูมิต่ำลง ความร้อนที่ถ่ายเทสู่วัสดุสะสมความร้อนก็มีค่าน้อยลงเช่นกัน

### วิเคราะห์ผลจากระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

ในช่วงเริ่มต้นคาบการไหลในช่วง Heating period ที่ตำแหน่ง 5.04 เมตร วัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิ 599.81 °C ที่ตำแหน่ง 4.74 เมตรจะสังเกตได้ว่า อุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนมีค่าลดลง เนื่องจากก๊าซเสียที่ตำแหน่งนี้มีอุณหภูมิ ต่ำลงทำให้อุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนมีค่าน้อยตามไปด้วย และเมื่อระยะทาง ตามแนวการไหลเพิ่มขึ้นอุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนก็จะมีค่าลดลง ดังจะสังเกต ได้จากอุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนที่ตำแหน่ง 0.3 และ 0 เมตร ในช่วงเวลา เดียวกัน (100-125 นาที) ที่ตำแหน่ง 0.3 เมตร จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าที่ตำแหน่ง 4.74 เมตร และที่ตำแหน่ง 0 เมตร จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าที่ตำแหน่ง 0.3 เมตร เนื่องมาจากก๊าซ เสียมีอุณหภูมิต่ำลง ความร้อนที่ถ่ายเทสู่วัสดุสะสมความร้อนก็มีค่าน้อยลงเช่นกัน

### เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองกับระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

ผลที่ได้จากระเบียบวิธีเชิงตัวเลข และผลที่ได้จากการทดลองแสดงให้เห็น ว่าวัสดุสะสมความร้อน มีอุณหภูมิลดลงตามระยะทางในช่องทางการไหลที่มากขึ้น จากการวิเคราะห์ค่าผิดพลาดระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากระเบียบวิธีเชิงตัวเลข และ ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง สามารถสรุปหาค่ามัธยฐานของค่าความผิดพลาดที่ ตำแหน่งต่างๆได้ ดังตารางที่ 6.1 แสดงให้เห็นว่าค่าผิดพลาดในทุกตำแหน่งมีค่าสูงสุด น้อยกว่า 11 % โดยมีค่ามัธยฐานของค่าความผิดพลาดรวม ทุกการทดลองของช่วง Heating period เท่ากับ 2.77 % ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถจำลองการ

ถ่ายเทความร้อนของก๊าซเสีย ให้แก่วัสดุสะสมความร้อนตามแนวทิศทางการไหลได้ โดยที่สามารถดูรายละเอียดการวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดในหัวข้อ ‘วิเคราะห์ค่าความผิดพลาดของโปรแกรม’

สังเกตผลที่ได้จากการทดลองสลับคาบการไหลที่เวลา 20, 15 และ 10 นาที ซึ่งแสดงในรูปที่ 6.6, 6.9 และ 6.12 มีแนวโน้มของผลการทดลองในทิศทางเดียวกันกับการทดลองสลับคาบการไหลที่เวลา 25 นาที คือ อุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนก็มีค่าลดลงตามระยะทางในช่องทางการไหลที่มากขึ้นเช่นกัน

หลังการสิ้นสุดการไหลในช่วง Heating period ที่เวลา 125 นาทีแล้ว ก็จะมีการสลับคาบการไหลให้เป็น Cooling period และดำเนินต่อไปเป็นเวลา 25 นาที จนสิ้นสุดคาบการไหลที่เวลา 150 นาที ซึ่งในช่วง Cooling period ซึ่งมีประเด็นที่น่าสนใจคล้ายๆกับในช่วง Heating period แต่พฤติกรรมต่างๆจะเป็นไปในทิศทางตรงกันข้ามดังนี้

### Cooling period

1. การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิวัสดุสะสมความร้อน ตามระยะทางในช่องทางการไหลที่มากขึ้น

#### วิเคราะห์ผลจากการทดลอง

เนื่องจากการสลับทิศทางการไหลของวาล์วปรับทิศทางการไหลทำให้อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ไหลเข้าช่องทางการไหลของ Regenerator ในทิศทางตรงกันข้าม คือไหลเข้าที่ตำแหน่ง 0 เมตร ด้วยอุณหภูมิ  $62.25^{\circ}\text{C}$  โดยทำให้วัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิ  $220.00^{\circ}\text{C}$  เนื่องจากวัสดุสะสมความร้อนซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าอากาศ วัสดุสะสมความร้อนก็จะคายความร้อนให้อากาศ เนื่องจากการสะสมความร้อนของวัสดุสะสมความร้อนจากช่วง Heating period ที่ตำแหน่งต่างๆตามระยะทางการไหลที่มากขึ้นวัสดุจะสะสมความร้อนจะมีอุณหภูมิสูงมากขึ้น ทำให้เกิดการคายความร้อนจากวัสดุสะสมความร้อนสู่ของไหล ตลอดระยะทางตามแนวการไหลที่เพิ่มขึ้น ให้สังเกตที่ตำแหน่ง 0.3 เมตร วัสดุสะสมความร้อนซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าที่ตำแหน่ง 4.74 และ 5.04 เมตร

### วิเคราะห์ผลจากระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

เนื่องจากการสลับทิศทางการไหลของวาล์วปรับทิศทางการไหลทำให้อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ไหลเข้าช่องทางการไหลของ Regenerator ในทิศทางตรงกันข้าม คือ ไหลเข้าที่ตำแหน่ง 0 เมตร ด้วยอุณหภูมิคงที่  $53.36^{\circ}\text{C}$  โดยทำให้วัสดุสะสมความร้อนมีอุณหภูมิ  $204.25^{\circ}\text{C}$  เนื่องจากวัสดุสะสมความร้อนซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าอากาศ วัสดุสะสมความร้อนก็จะคายความร้อนให้อากาศ เนื่องจากการสะสมความร้อนของวัสดุสะสมความร้อนจากช่วง Heating period ที่ตำแหน่งต่างๆตามระยะทางการไหล ที่มากขึ้นวัสดุสะสมความร้อนจะมีอุณหภูมิสูงมากขึ้น ทำให้เกิดการคายความร้อนจากวัสดุสะสมความร้อนสู่ของไหล ตลอดระยะทางตามแนวการไหลที่เพิ่มขึ้น ให้สังเกตที่ตำแหน่ง 0.3 เมตร วัสดุสะสมความร้อนซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าที่ตำแหน่ง 4.74 และ 5.04 เมตร

### เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองกับระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

ผลที่ได้จากระเบียบวิธีเชิงตัวเลข และผลที่ได้จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าวัสดุสะสมความร้อน มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามระยะทางในช่องทางการไหลที่มากขึ้น จากการวิเคราะห์ค่าผิดพลาดระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากระเบียบวิธีเชิงตัวเลข และผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง สามารถสรุปหาค่ามัธยฐานของค่าความผิดพลาด ที่ตำแหน่งต่างๆได้ดังตารางที่ 6.2 แสดงให้เห็นว่าค่าผิดพลาดในทุกตำแหน่งมีค่าสูงสุดน้อยกว่า 12 % โดยมีค่ามัธยฐานของค่าความผิดพลาดรวม ทุกการทดลองของช่วง Heating period เท่ากับ 3.94 % ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถจำลองการถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศ กับวัสดุสะสมความร้อนตามแนวทิศทางการไหลได้

สังเกตผลที่ได้จากการทดลองสลับคาบการไหลที่เวลา 20, 15 และ 10 นาที ซึ่งแสดงในรูปที่ 6.6, 6.9 และ 6.12 มีแนวโน้มของผลการทดลองในทิศทางเดียวกันกับการทดลองสลับคาบการไหลที่เวลา 25 นาที คือ อุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะทางในช่องทางการไหลที่มากขึ้นเช่นกัน



## 6.2 การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดของโปรแกรม

ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยจะทำการวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดของโปรแกรม โดยทำการเปรียบเทียบผลจากโปรแกรมเทียบกับผลจากการทดลอง ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

### 6.2.1 ระบายกึ่งกลางของของไหล

ในระนาบนี้แนวโน้มของกราฟที่ได้จากการทดลอง และระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเป็นไปในทิศทางเดียวกัน แต่ก็ยังมีข้อบกพร่องซึ่งขึ้นกับสมมติฐาน และข้อจำกัดในการทดลอง ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

เนื่องจากภายในเตาถลุงจะถูกควบคุมให้มีอุณหภูมิคงที่ ดังนั้นสมมติฐานจึงถูกสมมติให้มีอุณหภูมิของของไหลที่ทางเข้า ทั้ง Heating period และ Cooling period มีค่าคงที่ ซึ่งในความเป็นจริงแล้วมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เนื่องจากความร้อนที่สะสมหรือคายจากช่องทางการไหลก่อนที่จะถึง Regenerator ซึ่งใช้อิฐทนไฟก่อเป็นผนัง โดยที่อิฐทนไฟเหล่านี้มีคุณสมบัติในการสะสมความร้อนเช่นเดียวกับ ในช่องทางการไหลของ Regenerator ทำให้อุณหภูมิที่ทางปากเข้าทั้งในช่วง Heating period และ Cooling Period ไม่คงที่

การสมมติแบบจำลองของการไหลเป็นแบบ Simplified model ซึ่งคิดเพียงค่าความร้อนเข้า ความร้อนออก และค่าการพาความร้อน ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความถูกต้องของโปรแกรม

เนื่องจากการติดตั้งจะต้องติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ล ที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่องทางการไหลต้องทำการติดตั้งโดยระวัง เพื่อไม่ก่อให้เกิดการรบกวนต่อการไหล ประกอบกับช่องทางการไหลมีขนาดเล็ก ประมาณ 0.18x0.18 เมตร แต่ต้องทำการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลที่ของไหลถึง 4 จุด ผู้วิจัยจึงติดตั้งหัววัดอุณหภูมิโดยทำการชิงเชือกทนความร้อนเป็นแกนกลางพร้อมทั้งเดินสายสัญญาณเทอร์โมคัปเปิ้ลกับแกนเชือก ซึ่งวิธีนี้ส่งผลกระทบต่อ การไหลของของไหลน้อยแต่อาจเกิดการสั่นของหัววัดอุณหภูมิ

ที่ตำแหน่ง 4.74 เมตร ในช่วง Heating period สังเกตผลที่ได้จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิของก๊าซเสี่ยลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากมี Slag ที่เกิดจากการถลุงแร่เกาะอยู่ค่อนข้างหนา โดยจะหนามากบริเวณปากทางเข้าก๊าซเสี่ยและลดความหนาลงไปตามระยะทางตามแนวการไหล ทำให้ที่ปากทางเข้าช่องทางการไหลมีขนาดเล็กกว่าที่

ตำแหน่งอื่นๆ ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ปากทางเข้ามีค่าสูงขึ้นเกิดการถ่ายเทความร้อนมากกว่าบริเวณอื่นๆ อีกทั้ง Slag มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงกว่าอิฐทนไฟ ทำให้ก๊าซเสียถ่ายเทความร้อนให้แก่ Slag ได้เร็วกว่าอิฐทนไฟ

ซึ่งค่าความผิดพลาดจากการทดลอง และระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ถูกแสดงในตารางที่ 6.1 และ 6.2 โดยที่ในช่วง Heating period ที่เวลาที่ใช้ในการสลับคาบการไหล 25 นาที มีค่ามัธยฐานของความผิดพลาดสูงสุด 19.60% ที่เวลาที่ใช้ในการสลับคาบการไหล 20 นาที มีค่ามัธยฐานของความผิดพลาดสูงสุด 10.98% ที่เวลาที่ใช้ในการสลับคาบการไหล 15 นาที มีค่ามัธยฐานของความผิดพลาดสูงสุด 10.55% และ ที่เวลาที่ใช้ในการสลับคาบการไหล 10 นาที มีค่ามัธยฐานของความผิดพลาดสูงสุด 8.42% ส่วนในช่วง Cooling period ที่เวลาที่ใช้ในการสลับคาบการไหล 25 นาที มีค่ามัธยฐานของความผิดพลาดสูงสุด 13.79% ที่เวลาที่ใช้ในการสลับคาบการไหล 20 นาที มีค่ามัธยฐานของความผิดพลาดสูงสุด 12.79% ที่เวลาที่ใช้ในการสลับคาบการไหล 15 นาที มีค่ามัธยฐานของความผิดพลาดสูงสุด 12.72% และ ที่เวลาที่ใช้ในการสลับคาบการไหล 10 นาที มีค่ามัธยฐานของความผิดพลาดสูงสุด 11.13%

## 6.2.2 ระบายความร้อนวัสดุสะสมความร้อน

ในระนาบนี้แนวโน้มของกราฟที่ได้จากการทดลอง และระเบียบวิธีเชิงตัวเลขก็เป็นไปในทิศทางเดียวกัน แต่ก็ยังมีข้อบกพร่องซึ่งขึ้นกับสมมติฐาน และข้อจำกัดในการทดลอง ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

ค่าผิดพลาดอาจเกิดจากการสมมติให้ค่าการนำความร้อน ค่าความจุความร้อนจำเพาะ ค่าความหนาแน่นของวัสดุในการคำนวณ มีค่าคงที่ แต่ในความเป็นจริงพื้นผิวของช่องทางการไหลใน Regenerator ที่ใช้งานในโรงงานมีซึ่งมีลักษณะขรุขระมาก เนื่องจากถูกปกคลุมด้วยเศษ Slag ที่เกิดจากการถลุงดิบๆ ซึ่งความหนาของเศษ Slag จะมีมากที่บริเวณใกล้ปากทางเข้าของก๊าซเสีย และความหนาของเศษ Slag จะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ทำให้ต้องทำความสะอาดช่องทางการไหลทุกๆ 2-3 อาทิตย์ ซึ่ง Slag นี้จะมีผลต่อค่าการนำความร้อนของวัสดุสะสมความร้อน และเปลี่ยนลักษณะพื้นผิวของช่องทางการไหล

การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลจำเป็นต้องคิดที่ตำแหน่งลึกจากผิวประมาณ 0.5 cm เนื่องจากต้องฝังเทอร์โมคัปเปิ้ลให้แน่นเพื่อให้มั่นใจว่า เมื่อทำการทดลองเทอร์โมคัปเปิ้ลจะไม่หลุดจากตำแหน่งที่ติดตั้ง

ซึ่งค่าความผิดพลาดจากการทดลอง และระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ถูกแสดงในตารางที่ 6.1 และ 6.2 โดยที่ในช่วง Heating period ที่เวลาที่ใช้ในการสลับคาบการไหล 25 นาที มีค่ามัธยฐานของความผิดพลาดสูงสุด 7.84% ที่เวลาที่ใช้ในการสลับคาบการไหล 20 นาที มีค่ามัธยฐานของความผิดพลาดสูงสุด 3.86% ที่เวลาที่ใช้ในการสลับคาบการไหล 15 นาที มีค่ามัธยฐานของความผิดพลาดสูงสุด 1.90% และ ที่เวลาที่ใช้ในการสลับคาบการไหล 10 นาที มีค่ามัธยฐานของความผิดพลาดสูงสุด 4.22% ส่วนในช่วง Cooling period ที่เวลาที่ใช้ในการสลับคาบการไหล 25 นาที มีค่ามัธยฐานของความผิดพลาดสูงสุด 5.71% ที่เวลาที่ใช้ในการสลับคาบการไหล 20 นาที มีค่ามัธยฐานของความผิดพลาดสูงสุด 9.56% ที่เวลาที่ใช้ในการสลับคาบการไหล 15 นาที มีค่ามัธยฐานของความผิดพลาดสูงสุด 11.70% และ ที่เวลาที่ใช้ในการสลับคาบการไหล 10 นาที มีค่ามัธยฐานของความผิดพลาดสูงสุด 17.19%

### 6.2.3 ระเบียบวิธีสมมติให้เป็น Adiabatic plane ของวัสดุสะสมความร้อน

ในระนาบนี้แนวโน้มของกราฟที่ได้จากการทดลอง และระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ยังไม่สามารถจำลองได้ดัดนัก ซึ่งข้อบกพร่องอาจเกิดจากสมมติฐาน และข้อจำกัดในการทดลอง และลักษณะของวัสดุสะสมความร้อนซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

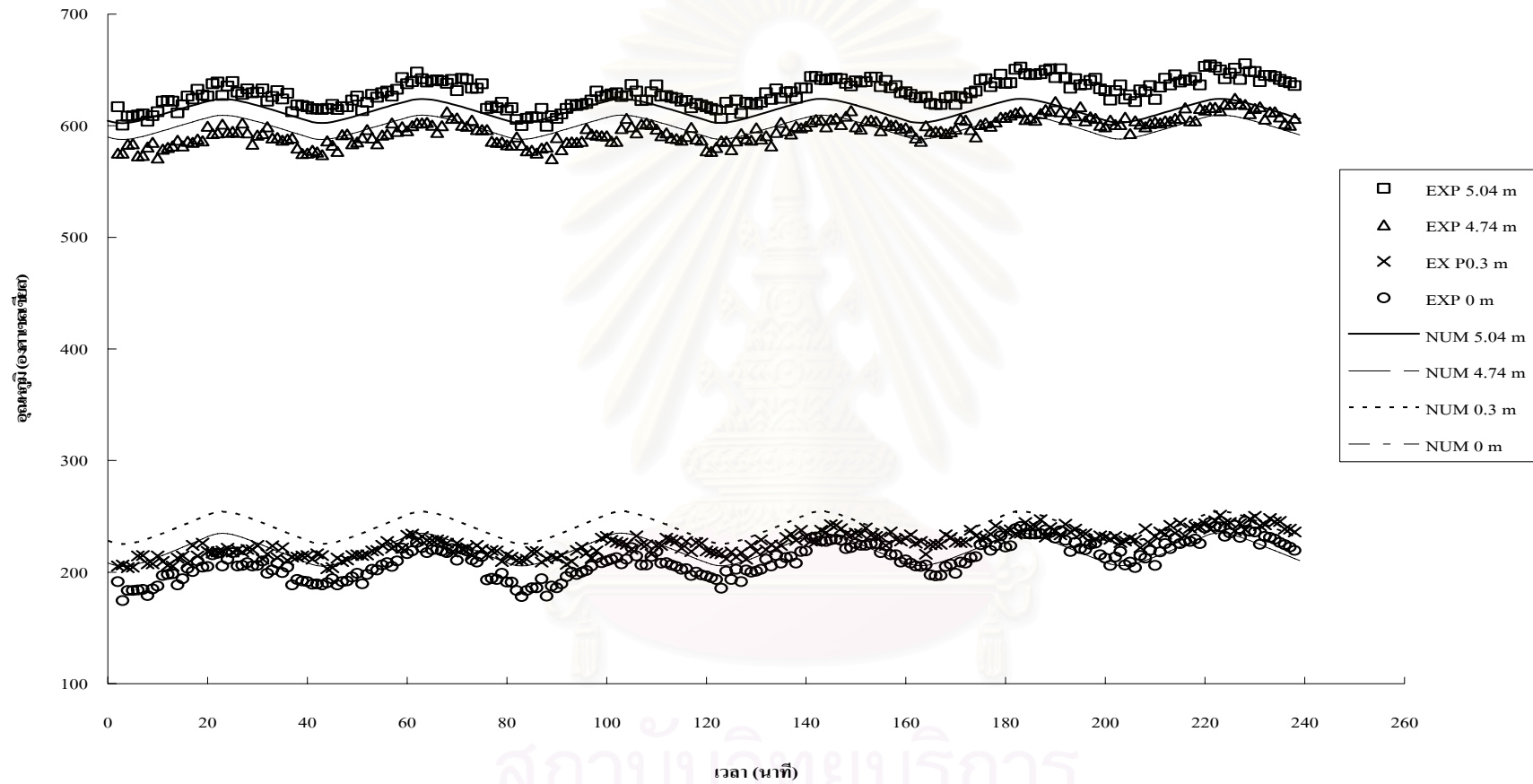
เนื่องจากพื้นผิววัสดุสะสมความร้อนมีลักษณะขรุขระ เนื่องจากการเกาะของ Slag และการกัดกร่อนของพื้นผิว ทำให้จุดติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลมีความผิดพลาดไปบ้าง

ค่าผิดพลาดอาจเกิดจากการสมมติให้ค่าการนำความร้อน ค่าความจุความร้อนจำเพาะ ค่าความหนาแน่นของวัสดุในการคำนวณ มีค่าคงที่ แต่ในความเป็นจริงพื้นผิวของช่องทางการไหลใน Regenerator ที่ถูกปกคลุมด้วย Slag จะมีจะมีค่าการนำความร้อน ค่าความจุความร้อนจำเพาะ ค่าความหนาแน่นของวัสดุไม่เท่ากัน เนื่องจากในเนื้อ Slag มีส่วนประกอบของสารเจือปนไม่เท่ากัน และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับอิฐทนไฟพบว่ามีความคุณสมบัติต่างกัน

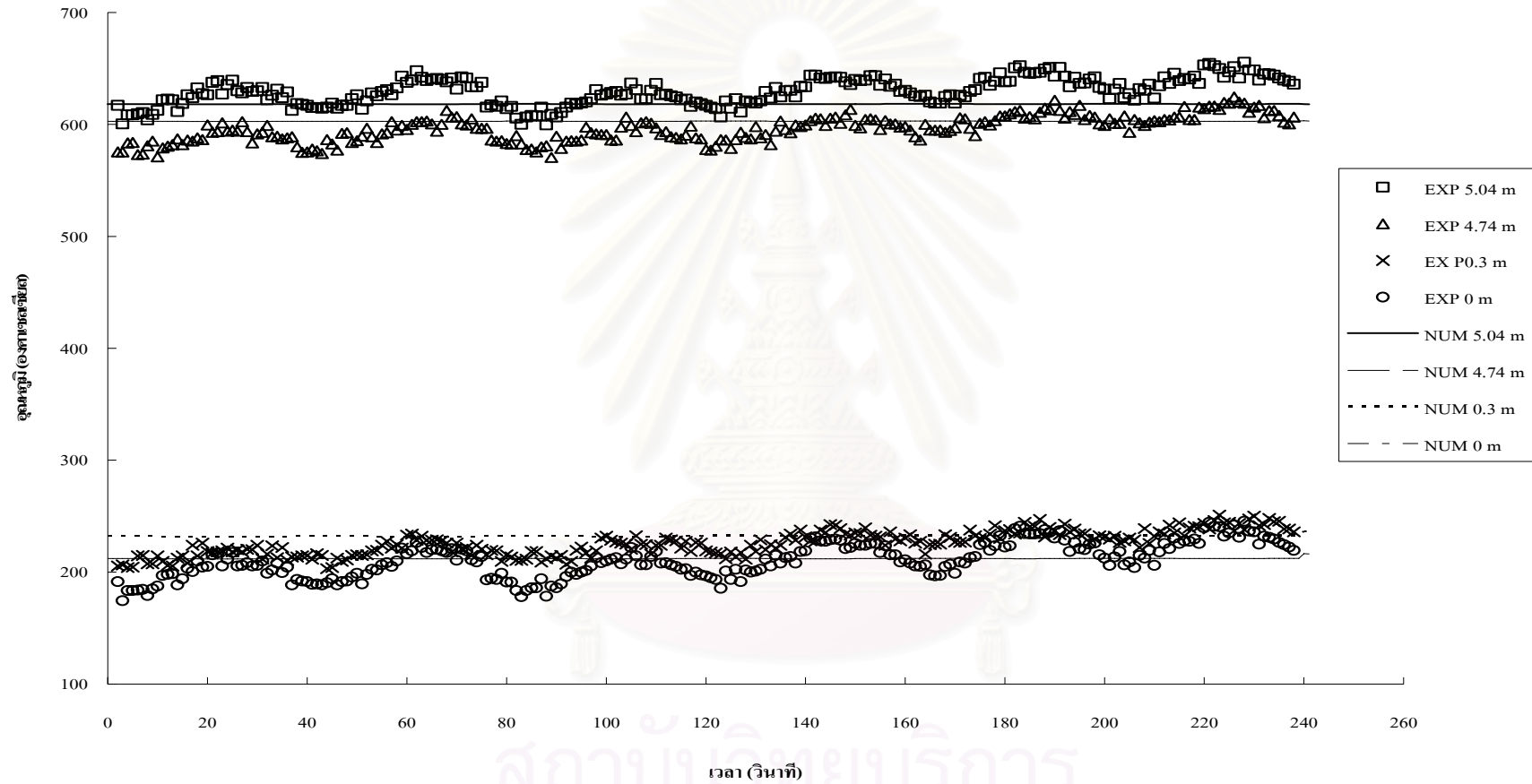
เนื่องจากผลที่ได้จากการวิเคราะห์ ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่แสดงในรูปแบบที่ 3, 6, 9 และ 12 มีค่าความแตกต่างของกราฟค่อนข้างน้อย เมื่อเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง แสดงให้เห็นว่า Thermal mass ของวัสดุสะสมความร้อนที่ใช้ในระเบียบวิธีเชิงตัวเลขอาจจะมีค่าสูงมากกว่าความเป็นจริง ผู้วิจัยจึงได้ทดสอบสมมติฐานเบื้องต้นเพื่อเป็นแนวทางในการทำงานวิจัยในอนาคต โดยจะปรับลด Thermal mass ของวัสดุสะสมความร้อน

ร้อนโดยการลดค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุสะสมความร้อนลง โดยคงค่าความหนาแน่นของวัสดุไว้ ซึ่งจะนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองที่เวลา 20 นาที โดยแสดงผลการเปรียบเทียบไว้ในรูปที่ 27 - 28 ซึ่งจากผลการทดสอบโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สร้างขึ้นพบว่าเมื่อปรับค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุสะสมความร้อนเพิ่ม จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในเนื้อวัสดุสะสมความร้อนน้อยลง แต่เมื่อปรับลดค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุสะสมความร้อนลง จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในเนื้อวัสดุสะสมความร้อนมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับกราฟที่ได้จากการทดลอง แสดงให้เห็นว่าค่าคุณสมบัติของวัสดุสะสมความร้อนใน Regenerator มีการเปลี่ยนแปลงจากค่ามาตรฐานของโรงงานผู้ผลิต ซึ่งอาจเกิดจากการเกาะตัวของ Slag ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น

ค่าซึ่งค่าความผิดพลาดจากการทดลอง และระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ถูกแสดงในตารางที่ 6.1 และ 6.2 โดยที่ในช่วง Heating period ที่เวลาที่ใช้ในการสลับคาบการไหล 25 นาที มีค่ามัธยฐานของความผิดพลาดสูงสุด 7.84% ที่เวลาที่ใช้ในการสลับคาบการไหล 20 นาที มีค่ามัธยฐานของความผิดพลาดสูงสุด 3.86% ที่เวลาที่ใช้ในการสลับคาบการไหล 15 นาที มีค่ามัธยฐานของความผิดพลาดสูงสุด 1.90% และ ที่เวลาที่ใช้ในการสลับคาบการไหล 10 นาที มีค่ามัธยฐานของความผิดพลาดสูงสุด 4.22% ส่วนในช่วง Cooling period ที่เวลาที่ใช้ในการสลับคาบการไหล 25 นาที มีค่ามัธยฐานของความผิดพลาดสูงสุด 4.75% ที่เวลาที่ใช้ในการสลับคาบการไหล 20 นาที มีค่ามัธยฐานของความผิดพลาดสูงสุด 7.31% ที่เวลาที่ใช้ในการสลับคาบการไหล 15 นาที มีค่ามัธยฐานของความผิดพลาดสูงสุด 7.42% และ ที่เวลาที่ใช้ในการสลับคาบการไหล 10 นาที มีค่ามัธยฐานของความผิดพลาดสูงสุด 11.70%



รูปที่ 6.27 การกระจายตัวของอุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนที่ระนาบที่สมมติให้เป็น Adiabatic plane สำหรับการสลับคาบการไหล 20 นาที เมื่อปรับลดค่า  $C_p$  จาก  $920 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$  เหลือ  $220 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$



รูปที่ 6.28 การกระจายตัวของอุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อนที่ระนาบที่สมมติให้เป็น Adiabatic plane สำหรับการสลับคาบการไหล 20 นาที เมื่อปรับเปลี่ยนค่า  $C_p$  จาก  $920 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$  เป็น  $2200 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$

### 6.3 การหาวัฏจักรการทำงานที่เหมาะสมใน Regenerator ของบริษัทไทยแลนด์สเมลดิงแอนด์รีไฟนิงจำกัด (ไทยชาร์โก)

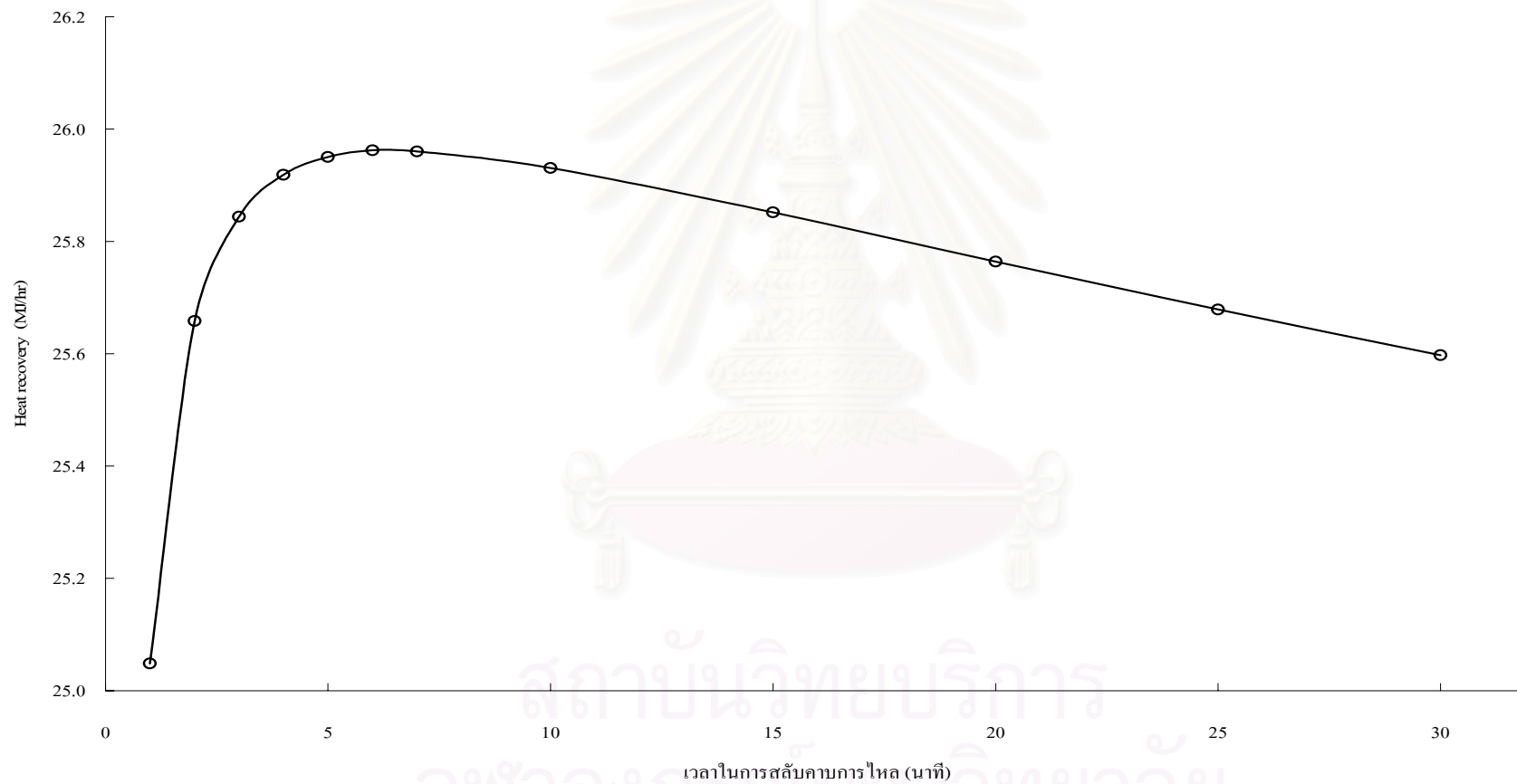
จากการเปรียบเทียบผลที่ได้การทดลอง และการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข พบว่าแนวโน้มของกราฟการกระจายตัวของอุณหภูมิทั้งในของไหล และวัสดุสะสมความร้อนมีความสอดคล้องกัน ในหลายๆการทดลอง แม้ว่าจะมีสภาวะการทำงานที่ต่างกันออกไป ทำให้มั่นใจได้ว่าโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สร้างขึ้นสามารถนำไปใช้งานได้อย่างถูกต้อง

ผู้วิจัยได้ทำการเก็บข้อมูลสภาวะการทำงานจริงของ Regenerator ขณะที่มีการถลุง และมาทำการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาวัฏจักรการทำงานที่เหมาะสมที่ใช้ในการสลับคาบการไหลใน Regenerator ของบริษัทไทยแลนด์สเมลดิงแอนด์รีไฟนิงจำกัด (ไทยชาร์โก) โดยผลการคำนวณได้แสดงเป็นกราฟดังรูปที่ 6.29 - 6.30

จากรูปที่ 6.29 แสดงให้เห็นว่าที่เวลาในการสลับคาบการไหล 6 นาที จะให้ปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้สูงที่สุด เท่ากับ 25.962 MJ ต่อ 1 ช่องทางการไหล ต่อ 1 ชั่วโมง ซึ่งเมื่อทางโรงงานปรับการสลับคาบการไหลจากเดิมสลับการไหลที่คาบเวลา 30 นาที เปลี่ยนมาเป็นเดิมสลับการไหลที่คาบเวลา 6 นาที จะทำให้ประหยัดพลังงาน 0.365 MJ ต่อ 1 ช่องทางการไหล ต่อ 1 ชั่วโมง

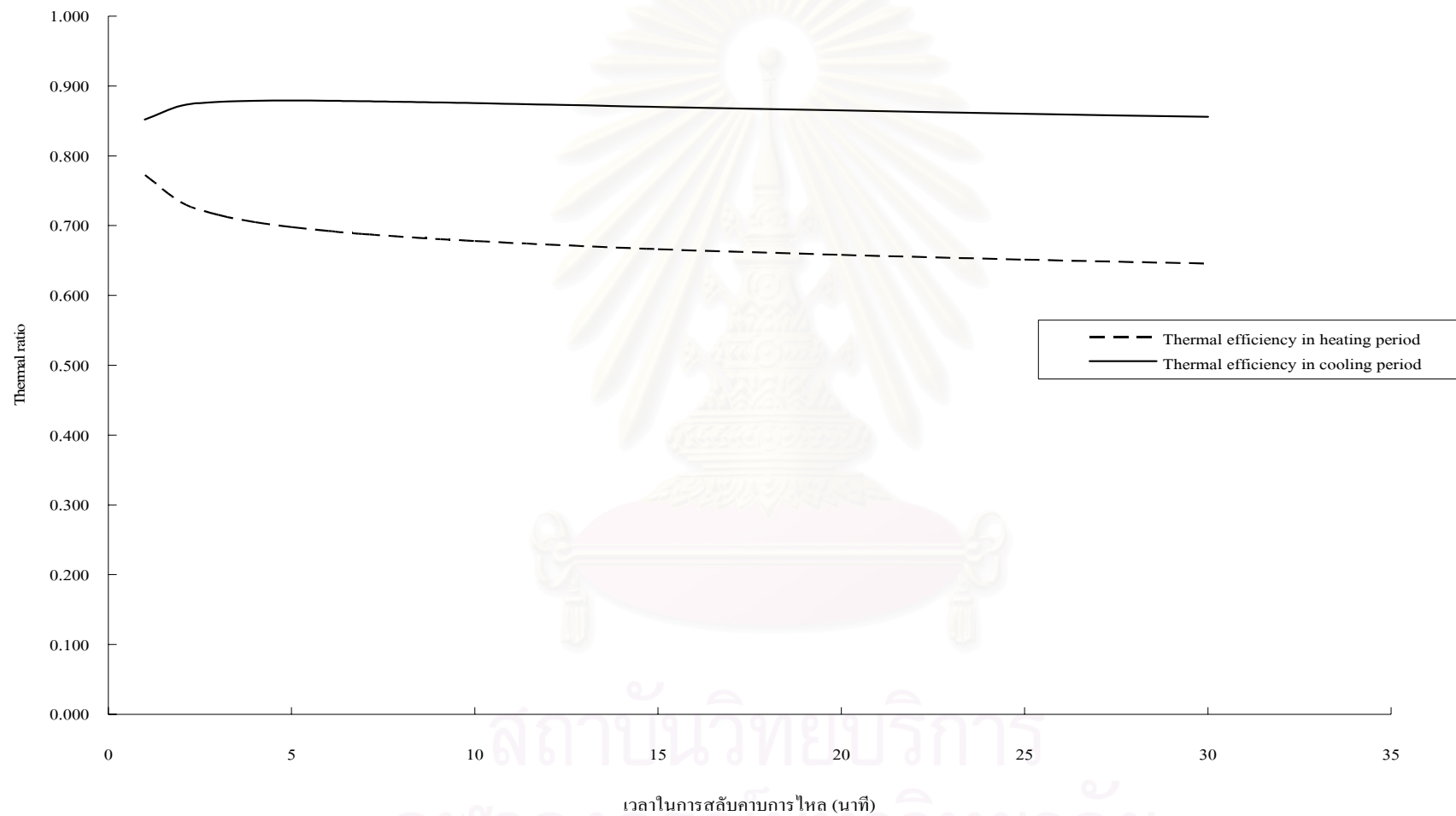
ส่วนค่า Thermal Ratio ของทั้ง Cooling period และ Heating period (รูปที่ 6.30) แสดงให้เห็นว่า Regenerator ตัวนี้มีประสิทธิภาพค่อนข้างดี คือ มีค่า Thermal Ratio ของ Cooling period เท่ากับ 0.878 และ Thermal Ratio ของ Heating period เท่ากับ 0.6922

เนื่องจากที่เวลา 30 นาที ใช้น้ำมันเตาเกรด C (ค่าความร้อน 39.77 MJ/ลิตร) ในการถลุง 235.5 ลิตร/ชั่วโมง คิดเป็นพลังงาน 9,365.84 MJ/ชั่วโมง Regenerator ของทางโรงงานประกอบไปด้วยช่องทางการไหล 120 ช่อง ที่เวลาสลับคาบการไหล 30 นาที จะสามารถนำความร้อนกลับมาใช้ 3,071.68 MJ/ชั่วโมง หรือคิดเป็น 32.80% ของปริมาณความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิง เมื่อสลับคาบการไหล 6 นาที จะสามารถนำความร้อนกลับมาใช้ 3,115.49 MJ/ชั่วโมง หรือคิดเป็น 33.26% ซึ่งจะได้ความร้อนนำกลับมาใช้เพิ่มขึ้น 0.46% ปัจจุบันทางโรงงานใช้เชื้อเพลิง 1,100,000 ลิตร/ปี ซึ่งจะช่วยให้โรงงานประหยัดพลังงานได้ 5,145.40 ลิตร/ปี หรือคิดเป็นเงิน 47,440.59 บาท/ปี (คิดราคาน้ำมันเตา C เท่ากับ 9.22 บาท/ลิตร) จากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าปัจจุบันทางโรงงานได้ปรับการสลับคาบการไหลของ Regenerator ที่ 30 นาที อยู่ในเกณฑ์ที่ดีแล้ว



รูปที่ 6.29 ปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้ที่เวลาในการสลับคานการไหลต่างๆ ต่อ 1 ช่องทางการไหล ต่อ 1 ชั่วโมง





รูปที่ 6.30 ค่า Thermal ratio ของ Cooling period และ Heating period

## บทที่ 7

### บทสรุป ปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะ

#### 7.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาวัฏจักรที่เหมาะสมในการสลับคาบการไหลของ Regenerator เพื่อให้ได้ปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้มากที่สุด โดยการศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิทั้งในของไหล และวัสดุสะสมความร้อน

วิทยานิพนธ์นี้ใช้ระเบียบวิธี Finite difference ในการแก้ปัญหาการนำความร้อนในสถานะไม่อยู่ตัวแบบสองมิติ โดยได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมกับ กรณีศึกษาต่างๆ หลังจากนั้นผู้วิจัยได้ทำการทดลองเก็บข้อมูลจากการใช้งานจริงในโรงงานอุตสาหกรรม แล้วนำผลที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข พบว่าผลลัพธ์ที่ได้มีความสอดคล้องกัน ทำให้มั่นใจได้ว่าโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สร้างขึ้นมีความถูกต้องในขอบเขตที่น่าพอใจ

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สร้างขึ้น ถูกใช้ในการหาปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้สูงสุด และ ค่า Thermal Ratio ของทั้ง Cooling period และ Heating period ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าที่ เวลาในการสลับคาบการไหล 6 นาที จะให้ปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้สูงสุด เท่ากับ 25.962 MJ ต่อ 1 ช่องทางการไหล (3,115.49 MJ/ชั่วโมง ต่อ 120 ช่องทางการไหล) หรือคิดเป็น 25.049 % ของปริมาณความร้อนเมื่อไม่ติดตั้ง Regenerator โดยมีค่า Thermal Ratio ของ Cooling period เท่ากับ 0.8789 และ Thermal Ratio ของ Heating period เท่ากับ 0.6922

#### 7.2 ปัญหาที่พบในขณะที่ทำวิทยานิพนธ์

จากการสำรวจ Regenerator ที่ใช้งานจริงในโรงงานพบว่าช่องทางการไหลถูกปกคลุมด้วย เศษ Slag ที่เกิดจากการถลุงดีบุก และความหนาของเศษ Slag จะมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ทำให้ต้องทำความสะอาดช่องทางการไหลทุกๆ 2-3 อาทิตย์ ซึ่ง Slag นี้จะมีผลต่อค่าการนำความร้อนของวัสดุสะสมความร้อน และเปลี่ยนลักษณะพื้นผิวของช่องทางการไหล

จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิที่ปากทางเข้าของ Regenerator มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากความร้อนที่สะสม หรือคายจากช่องทางการไหลก่อนที่จะถึง Regenerator ซึ่งใช้อิฐทนไฟก่อเป็นผนัง โดยที่อิฐทนไฟเหล่านี้มีคุณสมบัติในการสะสมความร้อนเช่นเดียวกับ ในช่องทางการ

ไหลของ Regenerator ทำให้อุณหภูมิที่ทางปากเข้าทั้งใน ช่วง Heating period และ Cooling Period ไม่คงที่ นอกจากนี้ในการถลุงจริงจะมีฝุ่นผงจากการถลุง ซึ่งอาจจะทำให้คุณสมบัติของก๊าซเสียเปลี่ยนแปลงไปตลอดเวลา

### 7.3 ข้อเสนอสำหรับวิทยานิพนธ์ในอนาคต

Regenerator เป็นอุปกรณ์นำความร้อนกลับมาใช้ที่มีลักษณะพิเศษ คือ มีการทำงานแบบไม่ต่อเนื่อง และการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขึ้นกับเวลา ทำให้ยากในการคำนวณด้วยมือ ปัจจุบันการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขช่วยในการคำนวณผลลัพธ์เริ่มเป็นที่นิยมมากขึ้น ประกอบกับสามารถใช้คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลมีประสิทธิภาพสูง ทำให้การคำนวณได้ผลลัพธ์ที่มีความเที่ยงตรง แม่นยำ

วิทยานิพนธ์นี้สามารถขยายผลเพื่อนำศึกษาเพื่อเติมในอนาคตได้มากมาย โดยมีประเด็นที่น่าสนใจที่พอสรุปได้ดังนี้

- 7.3.1 จำลองการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ทางเข้า Regenerator ในกรณีที่มีอุณหภูมิไม่คงที่
- 7.3.2 ศึกษาถึงผลของ Slag ที่เกาะบนพื้นผิววัสดุสะสมความร้อน
- 7.3.3 ศึกษาผลของฝุ่นผงที่เกิดจากการถลุงที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนใน Regenerator

## รายการอ้างอิง

- [1] Dong, S.N., Sung, K.H., Hong, S.R., and Seong, H.L. An Experimental and Numerical Study on Thermal Performance of a Regenerator System with Ceramic Honeycomb. KSME International Journal 15 (2001): 357-365.
- [2] Butterfield, P., Schofield, J.S., and Young, P.A. Hot Blast Stove Part 1. Journal of The Iron and Steel Institute 199 (1961): 229-240.
- [3] Hausen, H. Vervollstandigte Berechnung des Warmaustausches in Regeneratoren. Beiheft Verfahrenstechnik 2 (1942): 31-43.
- [4] Butterfield, P., Schofield, J.S., and Young, P.A. Hot Blast Stove Part 2. Journal of The Iron and Steel Institute 201 (1963): 497-508.
- [5] Willmott, A.J. Digital Computer Simulation of a Thermal Regenerator. International Journal of Heat and Mass Transfer 7 (1964): 1291-1302.
- [6] Iliffe, C.E. Thermal Analysis of The Counter Flow Regenerative Heat Exchanger. Journal of the Institute Mechanics Engineers 44 (1948): 363-372.
- [7] Willmott, A.J. Simulation of a Thermal Regenerator Under Conditions of Variable Mass Flow. International Journal of Heat and Mass Transfer 11 (1968): 1105-1116.
- [8] Willmott, A.J. The Regenerative Heat Exchanger Computer Representation. International Journal of Heat and Mass Transfer 12 (1969): 997-1014.
- [9] Tipler, W. A Simple Theory of The Heat Regenerator, Shell Technical Report ICT 14 (1947).
- [10] Hausen, H., Wärmeübertragung in Gegenstrom, Gleichstrom und Kreuzstrom. Berlin: Springer Verlag, 1950.
- [11] Willmott, A.J. Numerical Acceleration of Thermal Regenerator Simulations. Journal of Numerical Methods in Engineering 11 (1977): 533-511.
- [12] Aitken, A.C. On Bernoulli's Numerical Solution of Algebraic Equations. Proceedings Royal Society of Edinburgh 46 (1926): 289-305.
- [13] Schmidt, F. W., and Willmott, A.J. Thermal Energy Storage and Regeneration, First Edition. McGraw-Hill Series in Thermal and Fluid Engineering. New York: McGraw-Hill, 1981.

- [14] Ridgion, J.M., and Kerrison, B. Measurement of Heat Transfer Coefficients for Stove Checkers. Journal of The Iron and Steel Institute 202 (1964): 315-318.
- [15] Larsen, F.W. Rapid Calculation of Temperature in a Regenerative Heat Exchanger Having Arbitrary Initial Solid and Fluid Temperatures. International Journal of Heat and Mass Transfer 10 (1966): 149-168.
- [16] Schmidt, F.W., and Szego J. Transient Response of Solid Sensible Heat Thermal Storage Units-Single Fluid. Journal of Heat Transfer Transactions of the ASME 98 (1976): 471-477.
- [17] Schmidt, F.W., and Szego, J. Transient Response of a Hollow Cylindrical-Cross-Section Solid Sensible Heat Storage Unit-Single Fluid. Journal of Heat Transfer Transactions of the ASME 100 (1978): 737-739.
- [18] Klein, H., and Eigenberger, G. Approximate Solutions for Metallic Regenerative Heat Exchangers. International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 44 (2001): 3553-3563.
- [19] จิรชนย์ เสรีวิชัยสวัสดิ์. การศึกษาวัฏจักรการถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสมในรีเจนเนอเรเตอร์แบบโครงอิฐทนไฟ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2001.
- [20] Cengel, Y.A. Thermodynamics an Engineering Approach, Second Edition, McGraw-Hill Series in Thermal and Fluid Engineering. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [21] Incropera, F.P., and Dewitt, D.P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Fourth Edition, New York: John Wiley & Sons, 1996.
- [22] Hottel, H.C. Radiant-Heat Transmission, Third Edition, McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering. Singapore: McGraw-Hill, 1954.
- [23] Siegel, R., and Howell, J.R. Thermal Radiation Heat Transfer, Second Edition, McGraw-Hill, 1981.
- [24] ฤชากร จิรกาลวสาน. ไซโครเมตริกส์. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
- [25] Willmott, A.J. Modeling and Dynamics of Regenerative Heat Transfer, First Edition, Taylor&Francis Series in Computational and Physical Processes in Mechanics and Thermal Science. New York: Taylor&Francis, 2001.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก.

### COMPUTER PROGRAM

การแก้ปัญหาด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ ใช้ระเบียบวิธี Finite difference แก้ปัญหาการนำความร้อนทั้งในสถานะอยู่ตัว และไม่อยู่ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

แบบจำลองที่สร้างขึ้นกับกรณีศึกษาแบบต่างๆ โดยมีทั้งหมด 4 ปัญหาด้วยกัน คือ

1. ปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะอยู่ตัว
  - 1.1 กรณีเงื่อนไขขอบแบบอุณหภูมิคงที่ และการถ่ายเทความร้อนคงที่
  - 1.2 กรณีเงื่อนไขขอบแบบอุณหภูมิคงที่ และมีการพาความร้อนที่ผิว
2. ปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่อยู่ตัว
  - 2.1 กรณีเงื่อนไขขอบแบบถ่ายเทความร้อนคงที่ และมีการพาความร้อนที่ผิว
3. การพัฒนาโปรแกรมและการตรวจสอบกับกรณีมีโมเดลเหมือนการใช้งานจริง

การแก้ปัญหาด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

#### 1. Discretisation

มี Discretisation ในการหาคำตอบดังนี้

##### 1.1 Space discretisation

ประมาณค่า  $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$  และ  $\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$  ด้วย Second order central difference scheme

##### 1.2 Time discretisation

ประมาณค่า  $\frac{\partial T}{\partial t}$  ด้วย Time forward differencing scheme

#### 2. Scheme

ใช้ Scheme ในการหาคำตอบดังนี้

##### 2.1 Space discretisation

กรณีปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะอยู่ตัว

ประมาณค่า  $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$  และ  $\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$  ด้วย Second order central difference scheme

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{T_{i+1,j} + T_{i-1,j} - 2T_{i,j}}{(\Delta x)^2} \quad (ก.1)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{T_{i,j+1} + T_{i,j-1} - 2T_{i,j}}{(\Delta y)^2} \quad (ก.2)$$

**กรณีปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่อยู่ตัว**

**กรณี Explicit method**

ประมาณค่า  $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$  และ  $\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$  ด้วย Second order central difference scheme ณ เวลา  $n$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{T_{i+1}^n + T_{i-1,j}^n - 2T_{i,j}^n}{(\Delta x)^2} \quad (ก.3)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{T_{i,j+1}^n + T_{i,j-1}^n - 2T_{i,j}^n}{(\Delta y)^2} \quad (ก.4)$$

**กรณี Implicit method**

ประมาณค่า  $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$  และ  $\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$  ด้วย Second order central difference scheme ณ เวลา

$n+1$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{T_{i+1}^{n+1} + T_{i-1,j}^{n+1} - 2T_{i,j}^{n+1}}{(\Delta x)^2} \quad (ก.5)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{T_{i,j+1}^{n+1} + T_{i,j-1}^{n+1} - 2T_{i,j}^{n+1}}{(\Delta y)^2} \quad (ก.6)$$



## 2.2 Time discretisation

กรณี Explicit method และ Implicit method

ประมาณค่า  $\frac{\partial T}{\partial t}$  ด้วย Time forward differencing scheme

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n}{\Delta t} \quad (\text{ก.7})$$

## 3. Finite difference equation

กรณีปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะอยู่ตัว

ในกรณีของนี้จะมีดิสมกรีไทซ์ของสมการควบคุมดังนี้

$$\frac{T_{i+1,j} + T_{i-1,j} - 2T_{i,j}}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{i,j+1} + T_{i,j-1} - 2T_{i,j}}{(\Delta y)^2} = 0$$

จัดรูปแบบสมการใหม่ได้ดังนี้

$$T_{i,j} = \left( \frac{T_{i+1,j} + T_{i-1,j}}{(\Delta x)^2} \right) + \left( \frac{T_{i,j+1} + T_{i,j-1}}{(\Delta y)^2} \right) \left( \frac{(\Delta x)^2 (\Delta y)^2}{2(\Delta x)^2 + 2(\Delta y)^2} \right) \quad (\text{ก.8})$$

กรณีปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่อยู่ตัว และการพัฒนาโปรแกรมและการตรวจสอบกับกรณีมีโดเมนเหมือนการใช้งานจริง

ในกรณีนี้จะมีวิธีในการดิสมกรีไทซ์สมการควบคุมได้ 2 วิธีดังนี้

กรณี Explicit method

จะมีดิสมกรีไทซ์ของสมการควบคุมดังนี้

$$\frac{T_{i+1}^n + T_{i-1,j}^n - 2T_{i,j}^n}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{i,j+1}^n + T_{i,j-1}^n - 2T_{i,j}^n}{(\Delta y)^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n}{\Delta t}$$

จัดรูปแบบสมการใหม่ได้ดังนี้

$$T_{i,j}^{n+1} = T_{i,j}^n + \frac{\alpha\Delta t}{(\Delta x)^2}(T_{i+1}^n + T_{i-1,j}^n - 2T_{i,j}^n) + \frac{\alpha\Delta t}{(\Delta y)^2}(T_{i,j+1}^n + T_{i,j-1}^n - 2T_{i,j}^n) \quad (\text{ก.9})$$

**กรณี Implicit method**

จะมีดิครีไทซ์ของสมการควบคุมดังนี้

$$\frac{T_{i+1}^{n+1} + T_{i-1,j}^{n+1} - 2T_{i,j}^{n+1}}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{i,j+1}^{n+1} + T_{i,j-1}^{n+1} - 2T_{i,j}^{n+1}}{(\Delta y)^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n}{\Delta t}$$

จัดรูปแบบสมการใหม่ได้ดังนี้

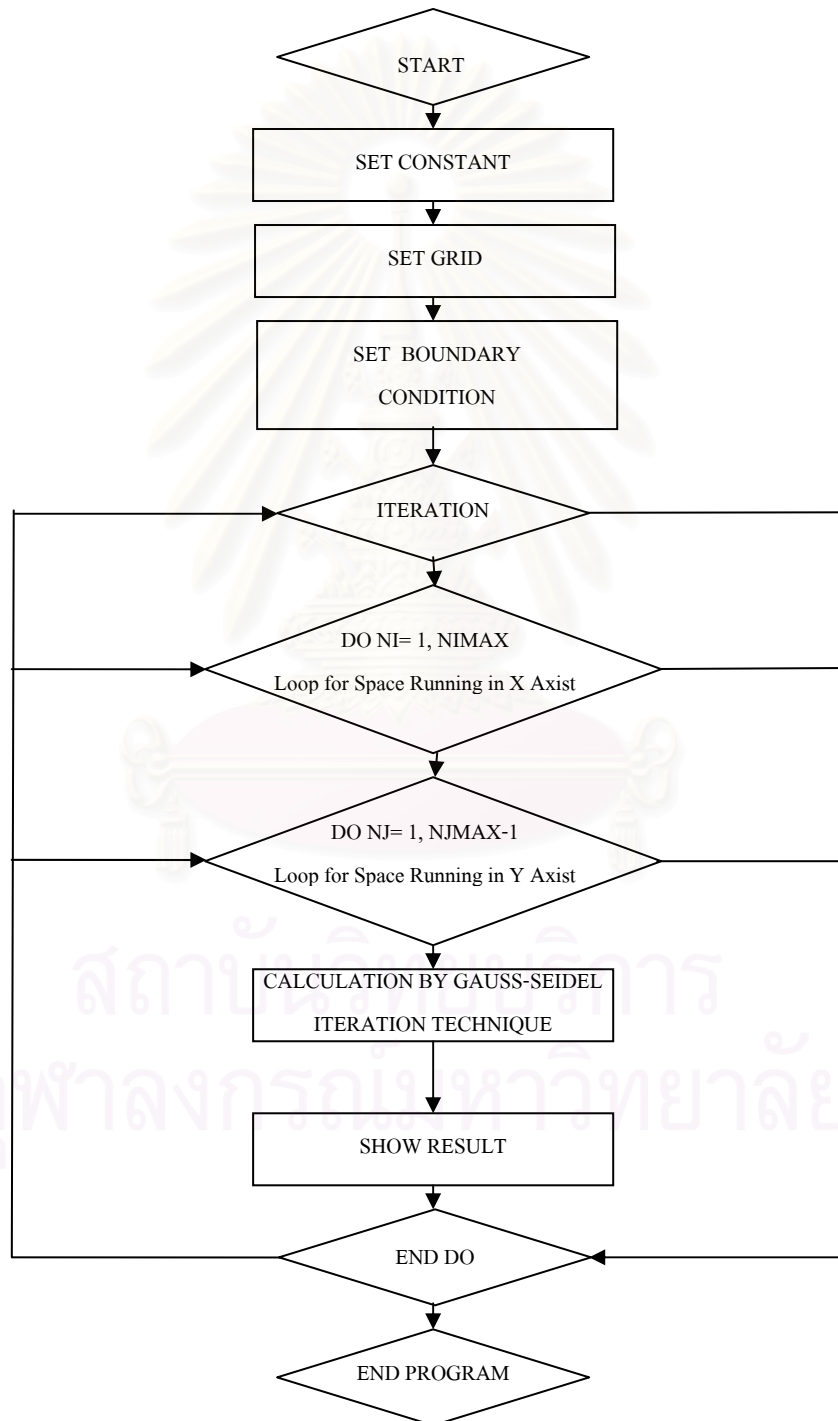
$$T_{i,j}^n = -\alpha_x T_{i+1}^{n+1} - \alpha_x T_{i-1,j}^{n+1} + (2\alpha_x + 2\alpha_y + 1)T_{i,j}^{n+1} - \alpha_y T_{i,j+1}^{n+1} - \alpha_y T_{i,j-1}^{n+1} \quad (\text{ก.10})$$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4. Solver and Algorithm

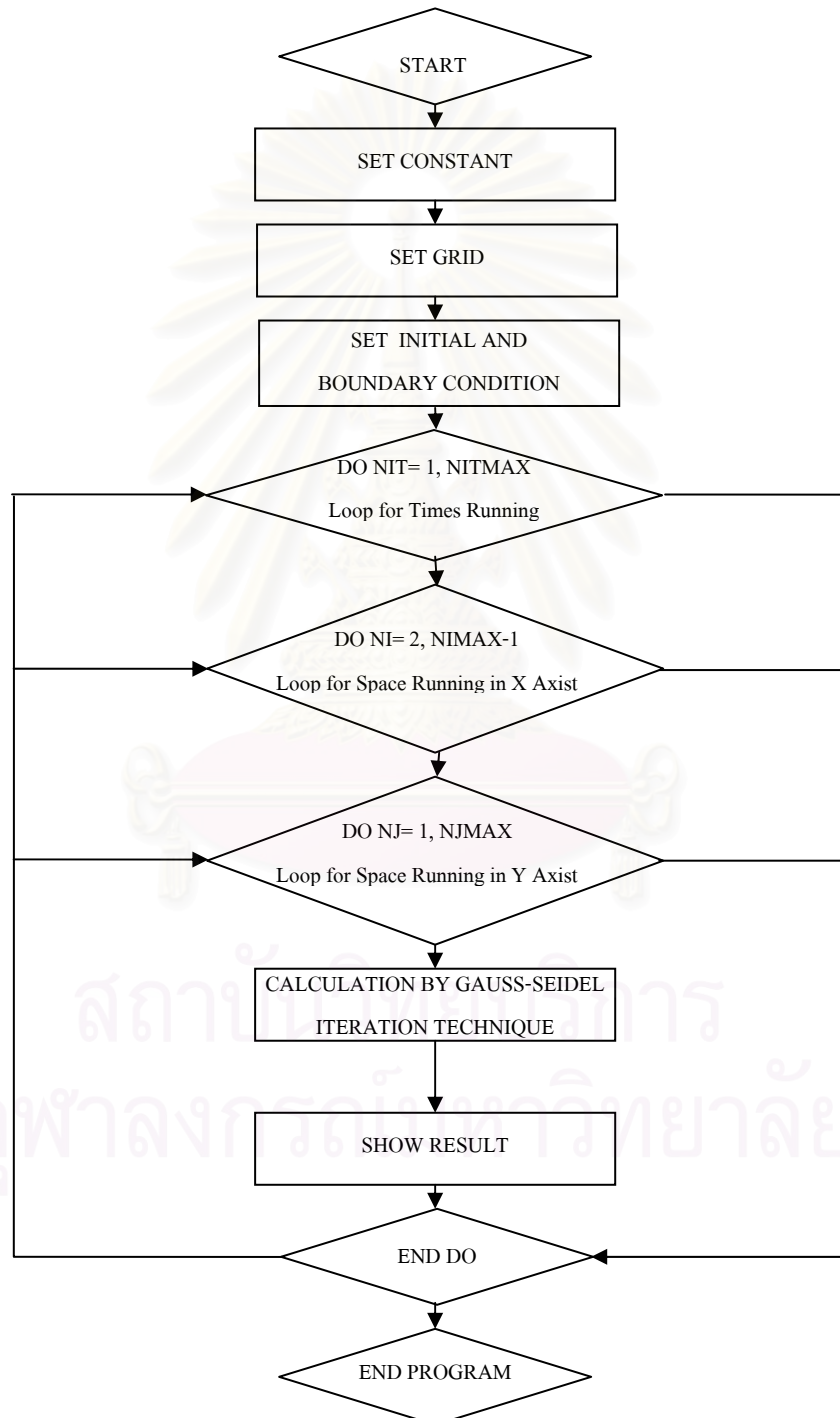
ปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะอยู่ตัว

กรณีเงื่อนไขขอบแบบอุณหภูมิคงที่ และการถ่ายเทความร้อนคงที่ และกรณีเงื่อนไขขอบแบบอุณหภูมิคงที่ และมีการพาความร้อนที่ผิว  
ขั้นตอนการคำนวณ



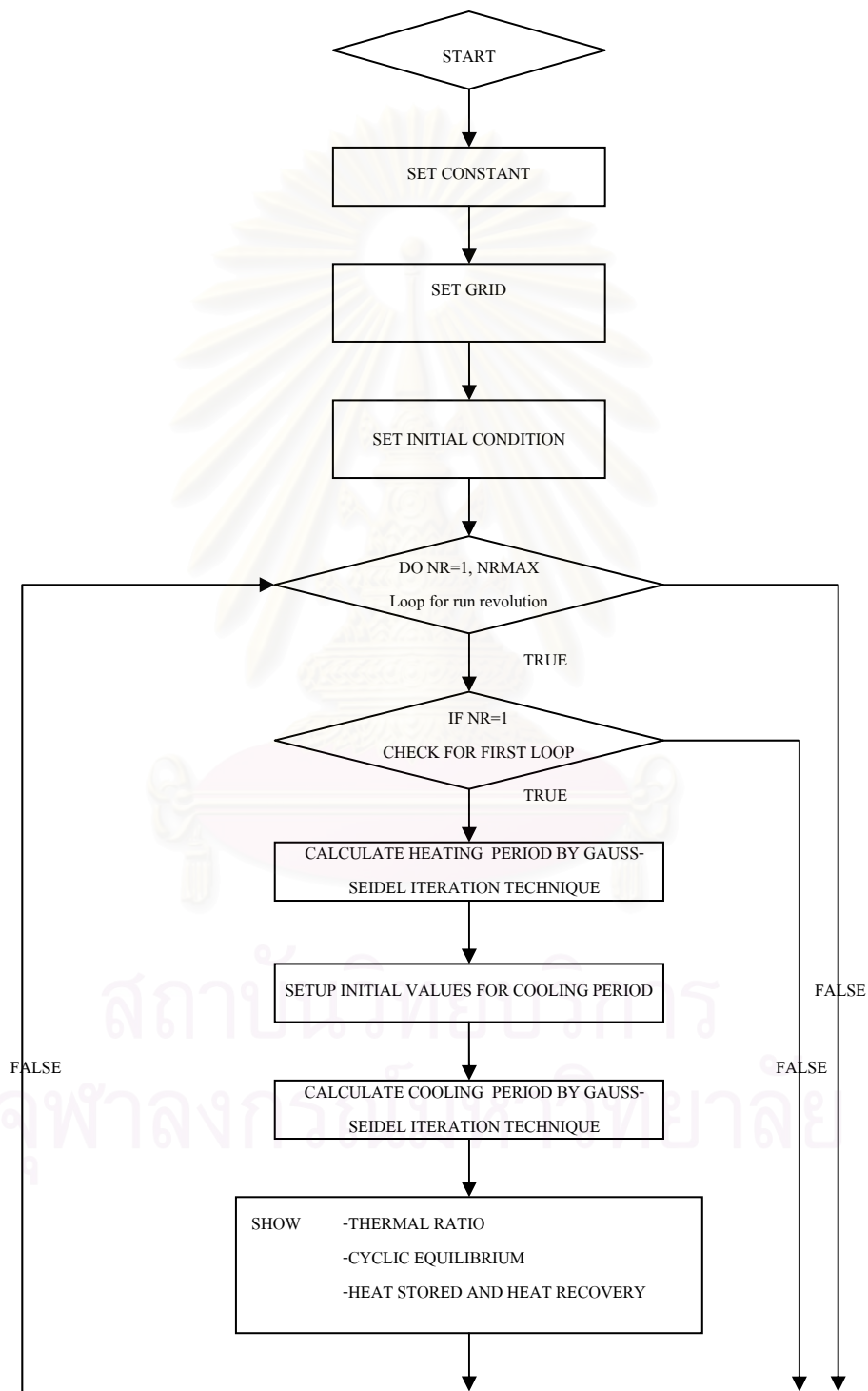
รูปที่ ก.1 ขั้นตอนการคำนวณของปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะอยู่ตัว

ปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่อยู่ตัว  
 กรณีเงื่อนไขขอบแบบถ่ายเทความร้อนคงที่ และมีการพาความร้อนที่ผิว  
 กรณี Explicit method  
 ขั้นตอนการคำนวณ

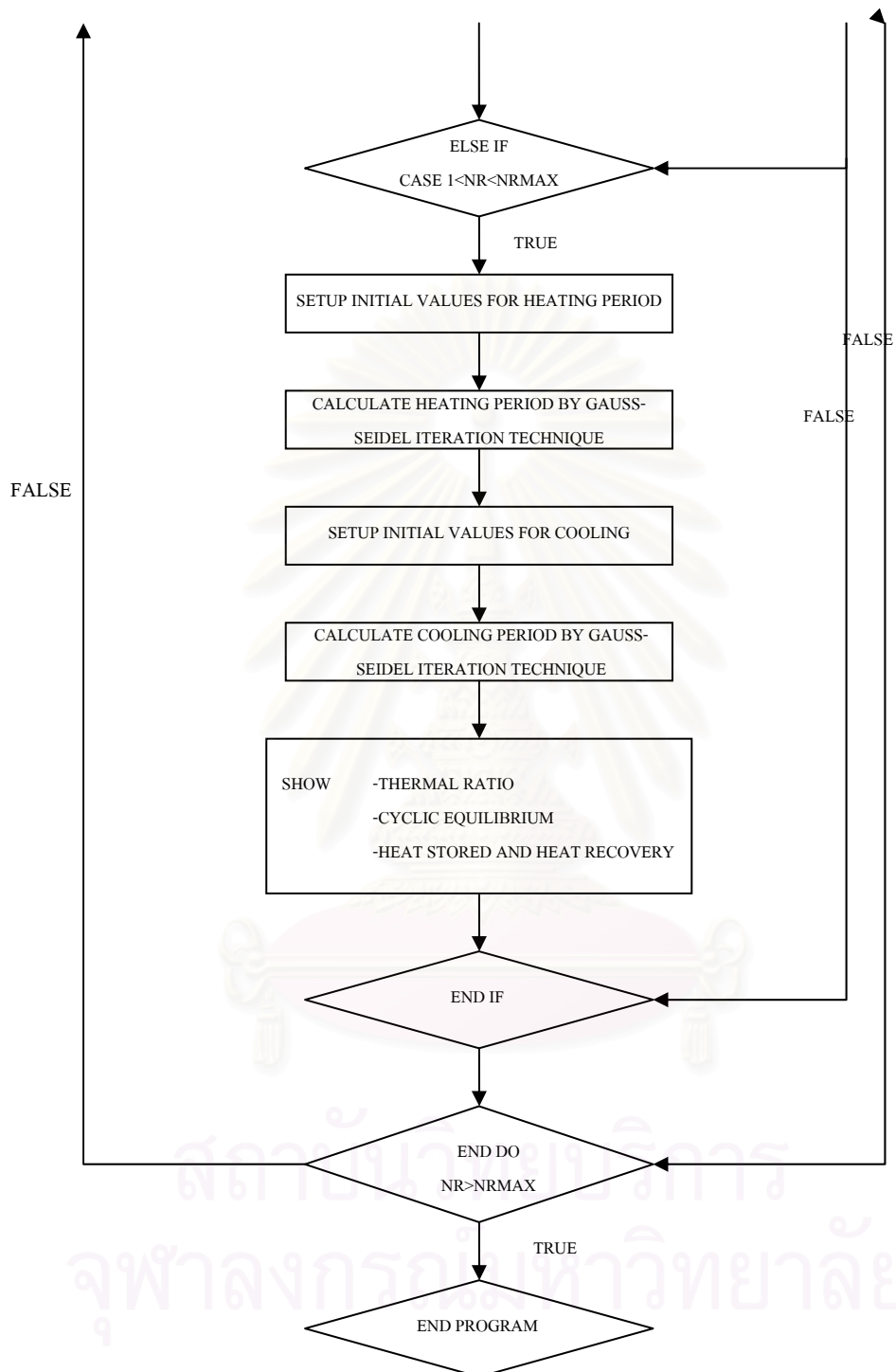


รูปที่ ก.2 ขั้นตอนการคำนวณของปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่อยู่ตัว

การพัฒนาโปรแกรมและการตรวจสอบกับกรณีมีโดเมนเหมือนการใช้งานจริง  
 กรณี Explicit method  
 ขั้นตอนการคำนวณ

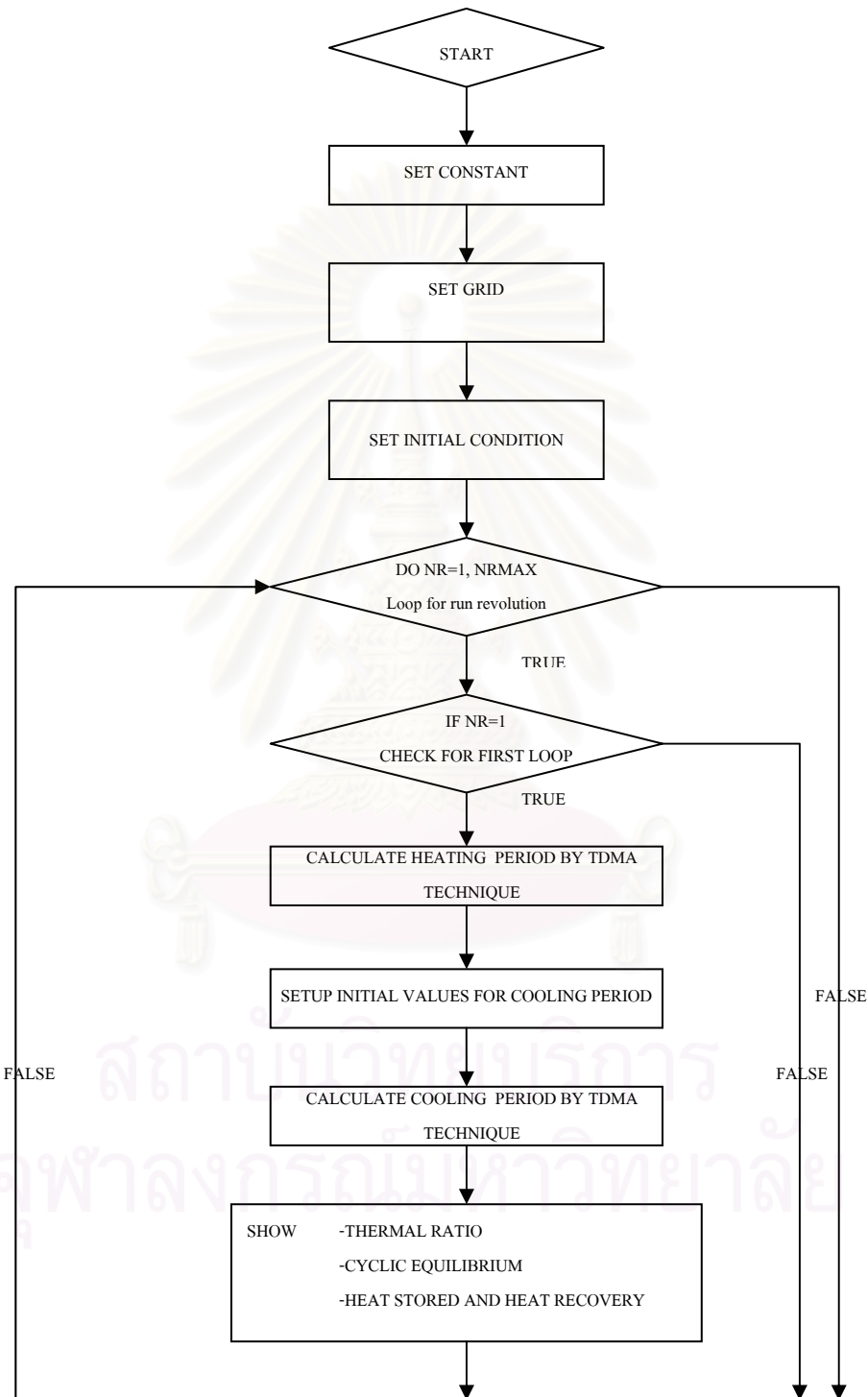


รูปที่ ก.3 ขั้นตอนการคำนวณของปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่อยู่ตัวกรณีมีโดเมนเหมือนการใช้งานจริง โดยใช้ Explicit method

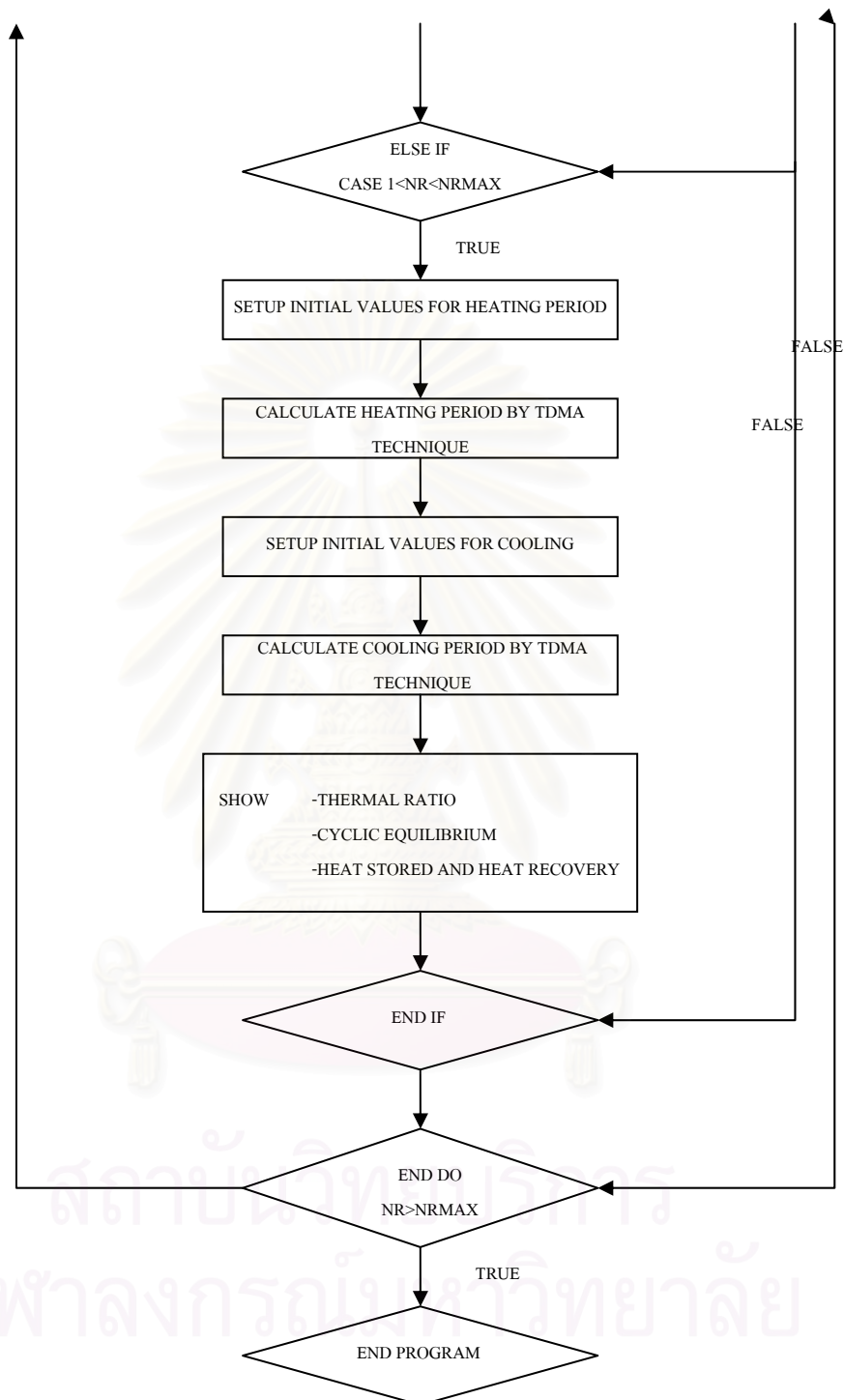


รูปที่ ก.3 (ต่อ) ขั้นตอนการคำนวณของปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่อยู่ตัวกรณีมีโดเมนเหมือนการใช้งานจริง โดยใช้ Explicit method

**กรณี Implicit method**  
**ขั้นตอนการคำนวณ**



รูปที่ ก.4 ขั้นตอนการคำนวณของปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่อยู่ตัวกรณีมีโดเมนเหมือนการใช้งานจริง โดยใช้ Implicit method



รูปที่ ก.4 (ต่อ) ขั้นตอนการคำนวณของปัญหาการนำความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่อยู่ตัวกรณีมีโดเมนเหมือนการใช้งานจริง โดยใช้ Implicit method



ภาคผนวก ข.  
คู่มือการใช้งานโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การกรอกข้อมูล สามารถกรอกได้ 2 วิธี

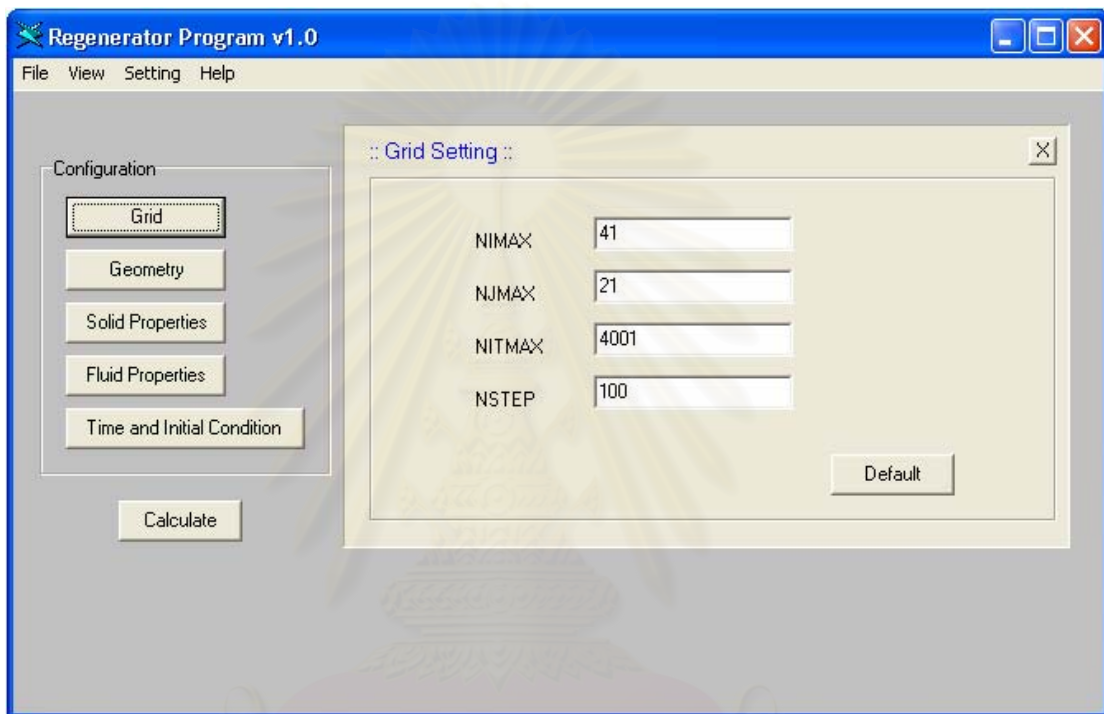
วิธีที่ 1

- เปิดไฟล์ Regenerator.exe หน้าต่างของโปรแกรม Regenerator Program V.1 จะปรากฏขึ้นมาดังรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 หน้าต่างของโปรแกรม Regenerator Program V.1

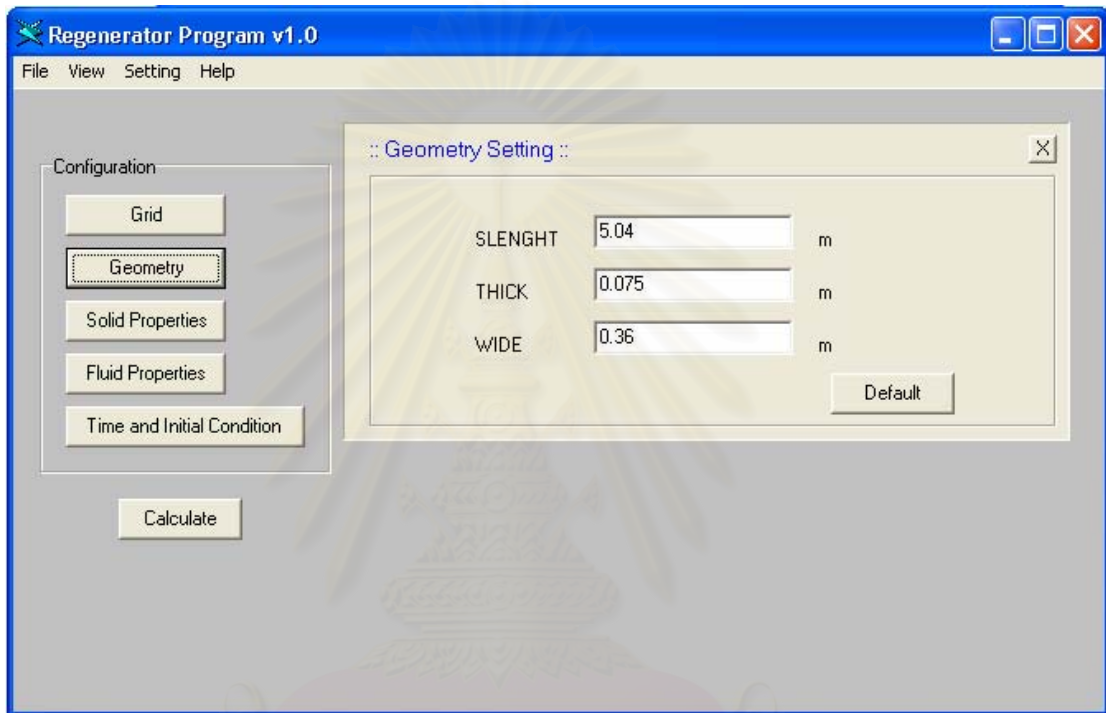
- click ที่ 'Grid' button แล้วกรอกข้อมูล NIMAX, NJMAX, NITMAX และ NSTEP (ดูความหมายได้ในภาคผนวก ข.2) ดังรูปที่ ข.2



รูปที่ ข.2 การกรอกข้อมูลใน Grid Setting Panel

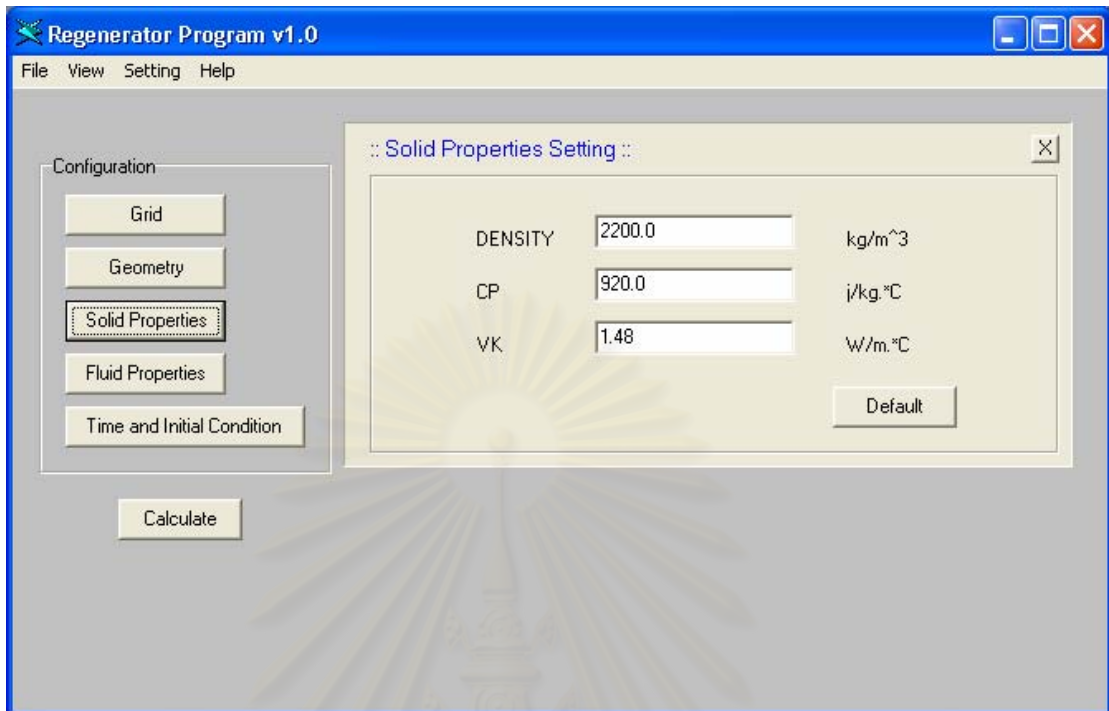
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- click ที่ Geometry, Solid Properties, Fluid Properties และ Time and Initial Condition แล้วกรอกข้อมูลเช่นเดียวกับใน 'Grid' button (รายละเอียดย่อสามารถดูได้ในภาคผนวก ข.2) หรือclick 'Default' เพื่อใส่ค่าเริ่มต้น ดังรูปที่ ข.3, ข.4, ข.5 ตามลำดับ

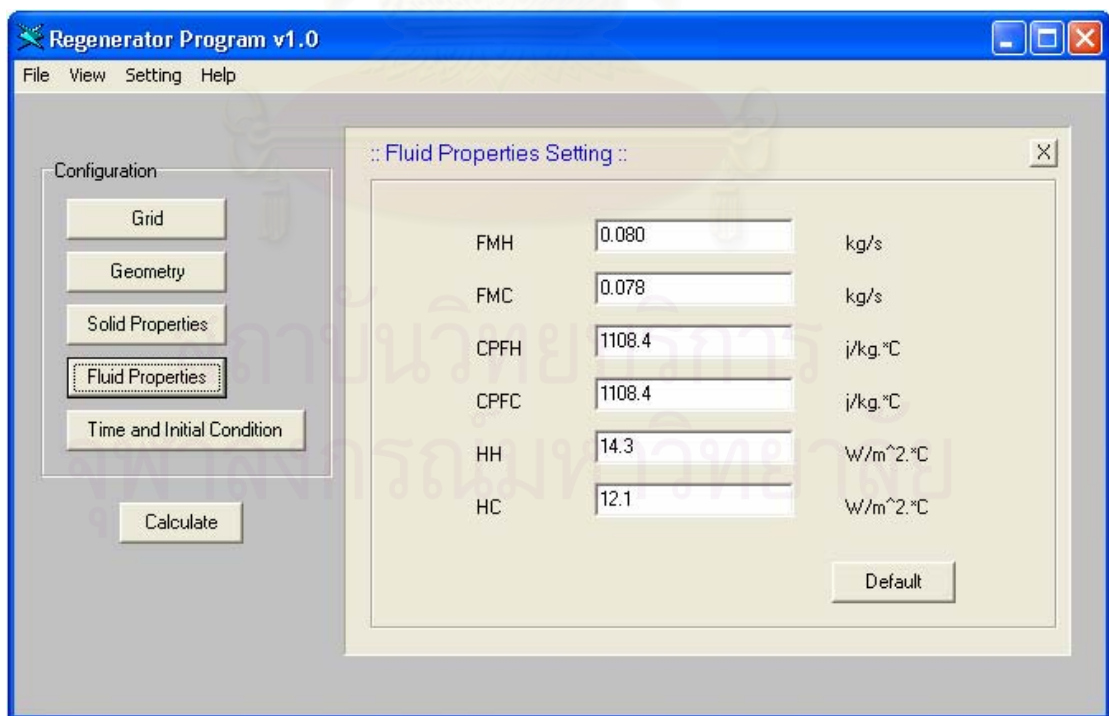


รูปที่ ข.3 การกรอกข้อมูลใน Geometry Setting Panel

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

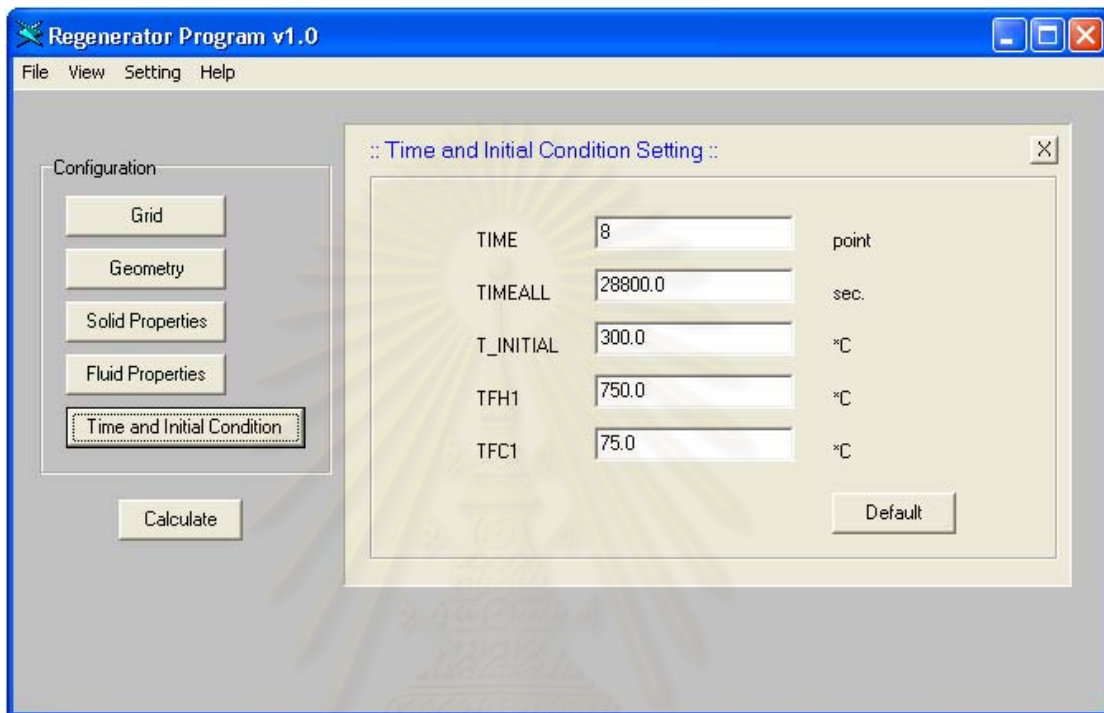


รูปที่ ข.4 การกรอกข้อมูลใน Solid Properties Setting Panel



รูปที่ ข.5 การกรอกข้อมูลใน Fluid Properties Setting Panel

- click ที่ 'Time and Initial Condition' button แล้วกรอกข้อมูล TIME, TIMEALL, T\_INITIAL, TFH1 และ TFC1 (ดูความหมายได้ในภาคผนวก ข.2) ดังรูปที่ ข.6



รูปที่ ข.6 การกรอกข้อมูลใน Time and Initial Condition Setting Panel

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

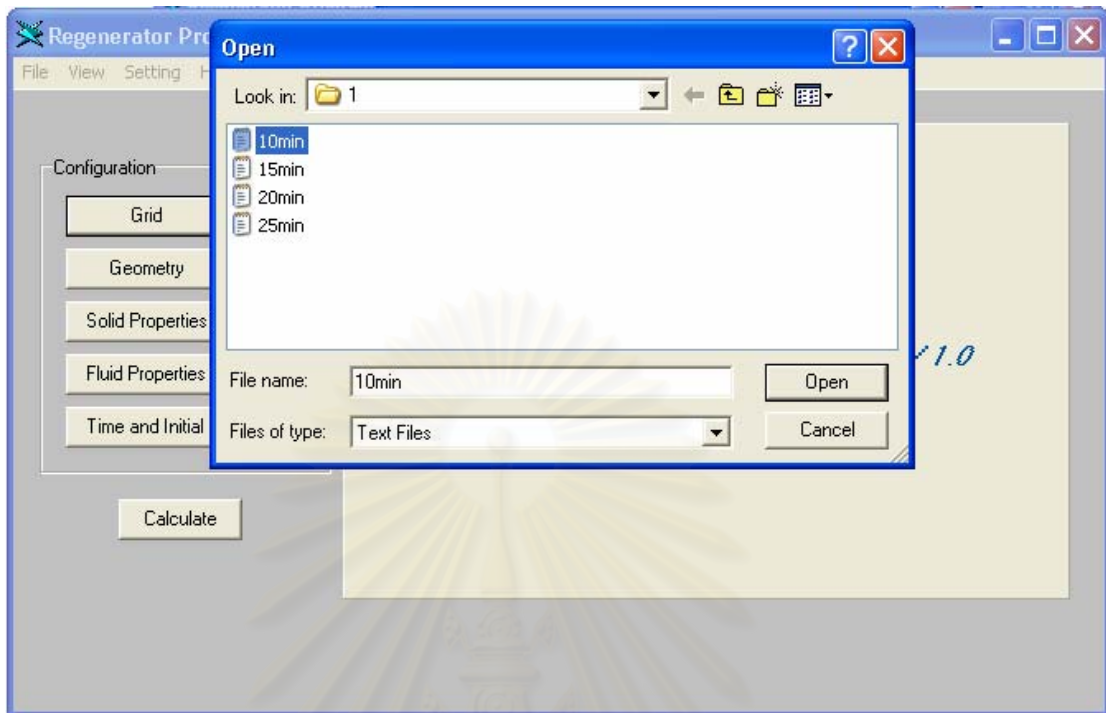
## วิธีที่ 2

- เปิดไฟล์ Regenerator.exe
- click 'File' => 'Open' => แล้วเลือกไฟล์ข้อมูลที่ได้บันทึกไว้ ดังรูปที่ ข.7 และ ข.8



รูปที่ ข.7 ที่เมนู bar click 'File' => 'Open'

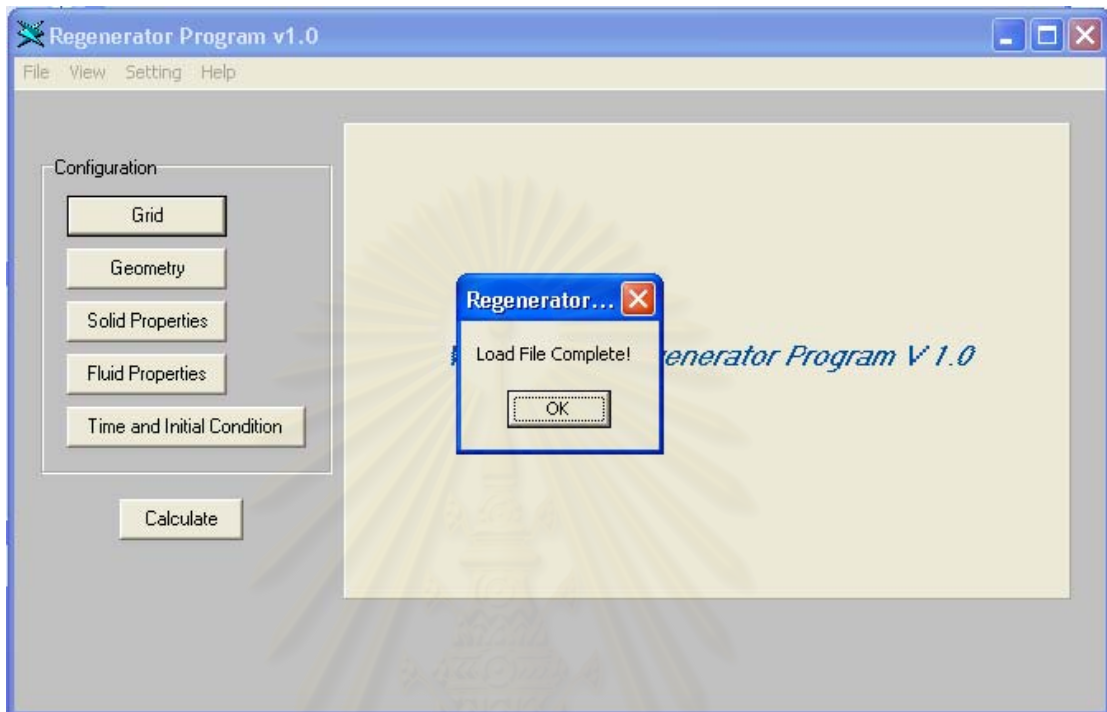
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข.8 เลือกไฟล์ข้อมูลที่ได้บันทึกไว้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- หลังจากนั้นจะขึ้นหน้าต่างยืนยันว่าไฟล์ได้ถูกโหลดแล้ว click 'OK' button ดังรูปที่ ข.9



รูปที่ ข.9 ไฟล์ข้อมูลได้ถูกโหลดเรียบร้อยแล้ว click 'OK'

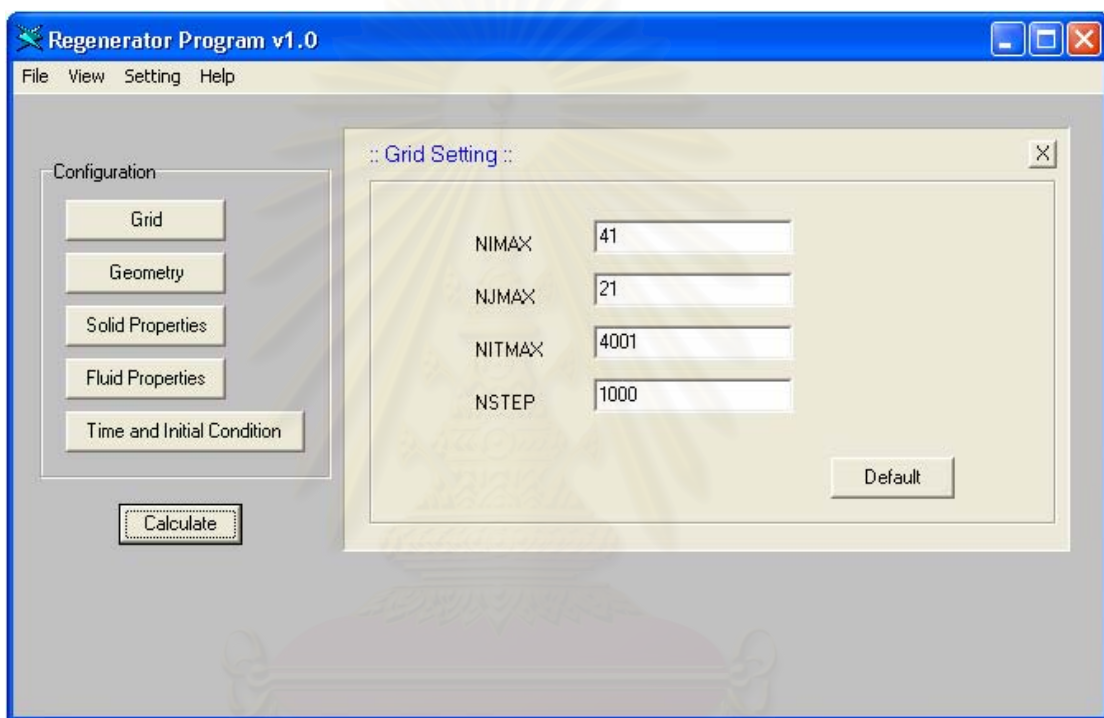
- โปรแกรมจะทำการกรอกข้อมูลให้โดยอัตโนมัติ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



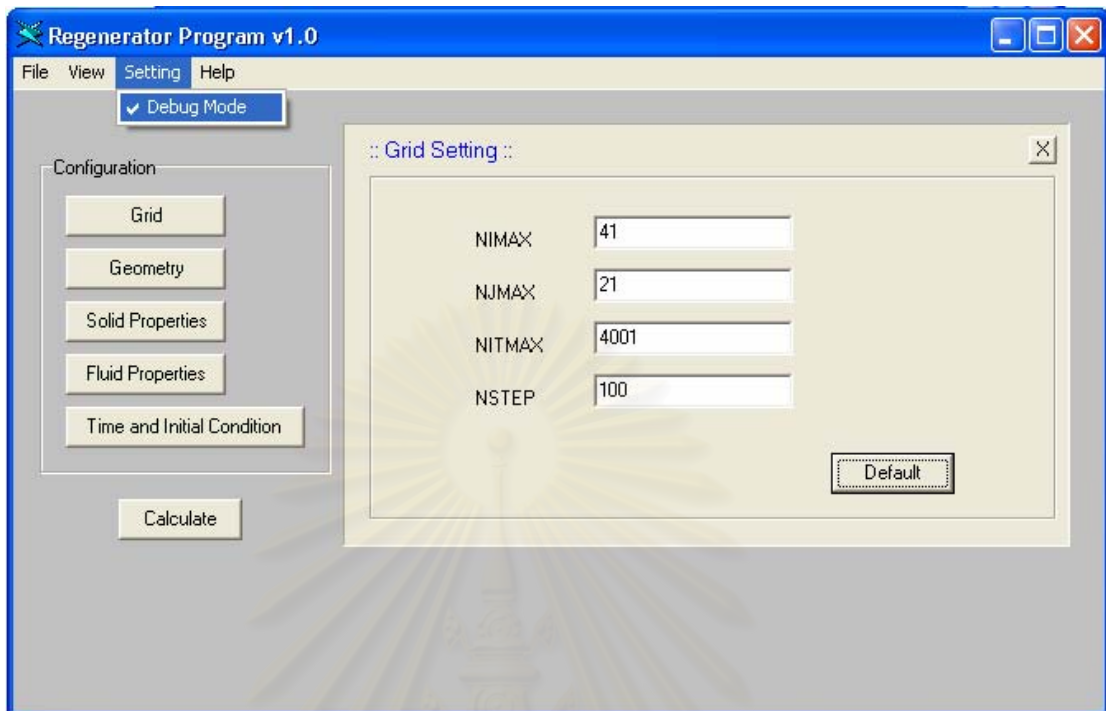
### การ Run program

- หลังจากกรอกข้อมูลเรียบร้อยแล้วให้ click 'Calculate' button ดังรูปที่ ข.10 เพื่อเริ่มต้นการคำนวณ
- หากต้องการแสดงผลการรันข้อมูลให้ click 'File' => 'Debug Mode' จะมีเครื่องหมายถูกแสดงขึ้นมาด้านหน้าข้อความ 'Debug Mode' ดังรูปที่ ข.11



รูปที่ ข.10 clickปุ่ม 'Calculate' เพื่อเริ่มต้นการคำนวณ

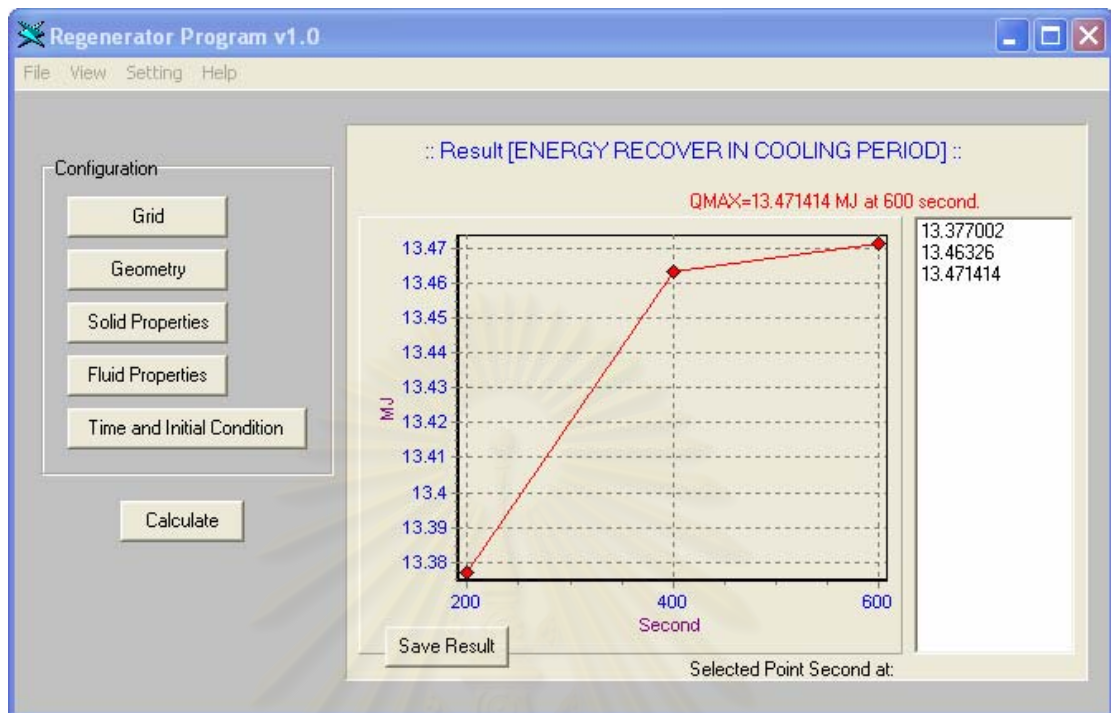
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข.11 click 'File' => 'Debug Mode' เพื่อแสดงการรันข้อมูล

- เมื่อโปรแกรมทำการคำนวณเสร็จเรียบร้อยแล้ว ผลลัพธ์จะแสดงขึ้นมาบนหน้าจอโดยอัตโนมัติในรูปของกราฟ สามารถอ่านค่าปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้ที่มากที่สุด (QMAX) และเวลาที่เหมาะสมที่ใช้ในการสลับคาบการไหลได้จากค่าที่แสดงเหนือกราฟ ดังแสดงในรูปที่ ข.11

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

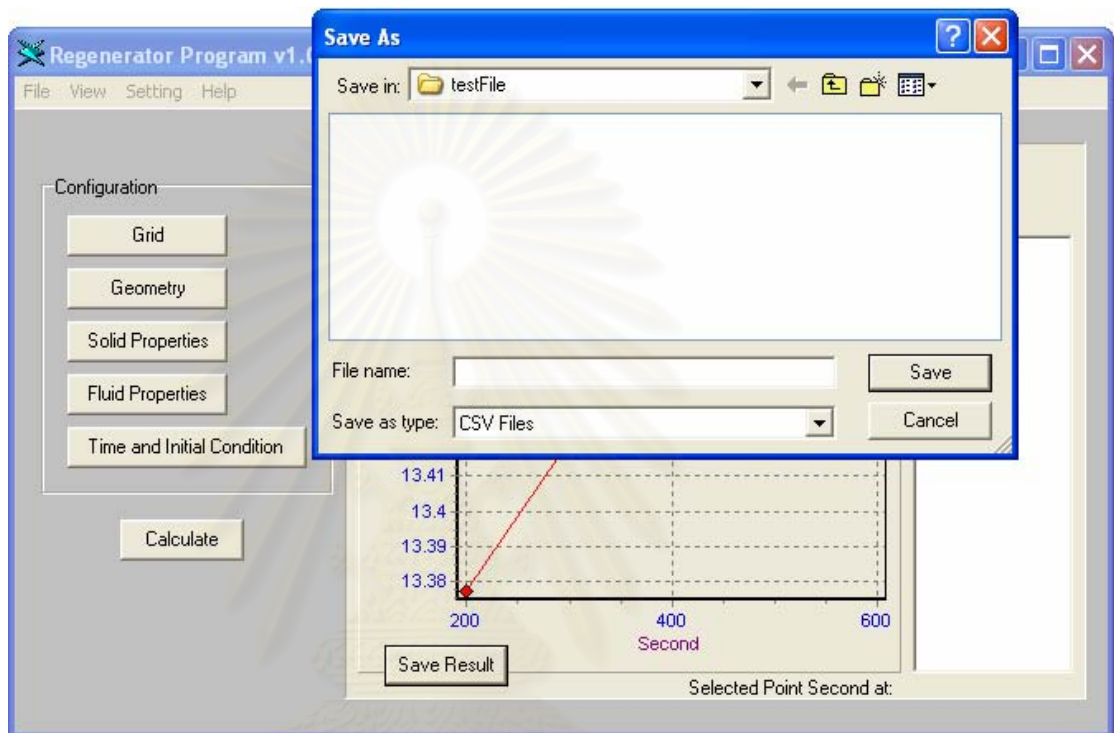


รูปที่ ข.12 หน้าจอแสดงผลลัพธ์

- สามารถ Zoom in โดยการ Drag mouse สร้างกรอบสี่เหลี่ยมจากมุมบนซ้ายมามุมล่างขวา ของจุดที่ต้องการทราบค่า และ Zoom out ได้โดย Drag mouse จากมุมล่างขวาไปมุมบนซ้าย (รูปที่ ข.12)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- หากต้องการบันทึกผลลัพธ์ที่ได้ให้ click ที่ 'Save Result' button และเลือกโฟลเดอร์ที่ต้องการ ใส่ชื่อไฟล์ที่จะทำการบันทึกและ click 'Save' button เพื่อบันทึกไฟล์ (รูปที่ ข.13)



รูปที่ ข.13 ทำการบันทึกผลลัพธ์ click 'Save Result' button เลือกโฟลเดอร์ ใส่ชื่อไฟล์ จากนั้น click 'Save' button

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ข.2

### คำอธิบายความหมาย

#### 'Grid'

NIMAX : Grid resolution ในแนวแกน x

NJMAX : Grid resolution ในแนวแกน y

NITMAX : Time grid resolution

NSTEP : ช่วงของเวลาที่ใช้ในการ Sampling ข้อมูล เพื่อแสดงในไฟล์ Fluid.dat และ Tecplot.dat

#### 'Geometry'

SLENGHT : ความยาวของ Domain ในแนวแกน x (m)

THICK : ความสูงในแนวแกน y (m)

WIDE : ความลึกในแนวแกน z (m)

#### 'Solid Properties'

DENSITY : ความหนาแน่นของวัสดุสะสมความร้อน ( $\text{kg/m}^3$ )

CP : ค่าความจุความร้อนของวัสดุสะสมความร้อน ( $\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ )

VK : ค่าการนำความร้อนของวัสดุสะสมความร้อน ( $\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ )

#### 'Fluid Properties'

FMH : อัตราการไหลโดยมวลของของไหลในช่วง Heating period ( $\text{kg/s}$ )

FMC : อัตราการไหลโดยมวลของของไหลในช่วง Cooling period ( $\text{kg/s}$ )

CPFH : ค่าความจุความร้อนของของไหลในช่วง Heating period ( $\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ )

CPFC : ค่าความจุความร้อนของของไหลในช่วง Cooling period ( $\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ )

HH : Convection + Radiation heat transfer coefficient ในช่วง Heating period ( $\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ )

HC : Convection + Radiation heat transfer coefficient ในช่วง Cooling period ( $\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ )

#### 'Time and Initial Condition'

TIME : จำนวนจุดของข้อมูลที่ต้องการ (Point)

TIMEALL : เวลาทั้งหมดที่ใช้ในการถลุง (s)

T\_INITIAL : อุณหภูมิเริ่มต้นของวัสดุสะสมความร้อน ( $^\circ\text{C}$ )

TFH1 : อุณหภูมิของของไหล ณ.ทางเข้าในช่วง Heating period ( $^\circ\text{C}$ )

TFC1 : อุณหภูมิของของไหล ณ.ทางเข้าในช่วง Cooling period ( $^\circ\text{C}$ )

### Menu bar

มีส่วนประกอบดังนี้ **File, View, Setting** และ **Help**

'File' ประกอบด้วย Open, Save และ Exit ดังรูปที่ ข.14



รูปที่ ข.14 ส่วนประกอบของ File

click Open เพื่อเปิดไฟล์ข้อมูลที่ได้บันทึกไว้

Save เพื่อบันทึกข้อมูลที่ได้กรอกไว้เรียบร้อยแล้ว

Exit เมื่อต้องการออกจากโปรแกรม

'View' ประกอบด้วย Grid, Geometry, Solid, Fluid, Time และ Result ดังรูปที่ ข.15



รูปที่ ข.15 ส่วนประกอบของ View

click Grid เมื่อต้องการกรอกข้อมูลใน Grid setting panel

Geometry เมื่อต้องการกรอกข้อมูลใน Geometry setting panel

Solid เมื่อต้องการกรอกข้อมูลใน Solid properties setting panel

Fluid เมื่อต้องการกรอกข้อมูลใน Fluid properties setting panel

Time เมื่อต้องการกรอกข้อมูลใน Time and initial condition setting panel

Result เมื่อต้องการดูกราฟผลลัพธ์ของข้อมูล

'Setting' ประกอบด้วย Debug Mode ดังรูปที่ ข.16



รูปที่ ข.16 ส่วนประกอบของ Setting

click Debug Mode เมื่อต้องการกรอกข้อมูลใน แสดงการรันข้อมูล

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



'Help' ประกอบด้วย About ดังรูปที่ ข.17



รูปที่ ข.17 ส่วนประกอบของ Help

click About เมื่อต้องการดูรายละเอียดของโปรแกรม

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ค.

## ตารางแสดงรายละเอียดของตัวแปรที่ใช้คำนวณเวลาสลับคาบการไหล

ตาราง ค.1 รายละเอียดของตัวแปรที่ใช้คำนวณที่เวลาสลับคาบการไหล 10 นาที

รายการ	ค่า	หน่วย
NIMAX	41	-
NJMAX	21	-
NITMAX	4001	-
NSTEP	1000	-
SLENGHT	5.04	m
THICK	0.075	m
WIDE	0.36	m
DENSITY	2200	kg/m <sup>3</sup>
CP	920	J/kg.°C
VK	1.48	W/m.°C
FMH	0.0082	kg/s
FMC	0.0078	kg/s
CPFH	1179.56	J/kg.°C
CPFC	1044.42	J/kg.°C
HH	15.35	W/m <sup>2</sup> .°C
HC	10.727	W/m <sup>2</sup> .°C
TIME	1	Point
TIMEALL	1200	s
T_INITIAL	300	°C
TFH 1	690	°C
TFC 1	79.61	°C

ตาราง ค.2 รายละเอียดของตัวแปรที่ใช้คำนวณที่เวลาสลับคาบการไหล 15 นาที

รายการ	ค่า	หน่วย
NIMAX	41	-
NJMAX	21	-
NITMAX	4001	-
NSTEP	1000	-
SLENGHT	5.04	m
THICK	0.075	m
WIDE	0.36	m
DENSITY	2200	Kg/m <sup>3</sup>
CP	920	J/kg.°C
VK	1.48	W/m.°C
FMH	0.0087	kg/s
FMC	0.0083	kg/s
CPFH	1181.63	J/kg.°C
CPFC	1043.05	J/kg.°C
HH	15.212	W/m <sup>2</sup> .°C
HC	10.418	W/m <sup>2</sup> .°C
TIME	1	Point
TIMEALL	1800	s
T_INITIAL	300	°C
TFH 1	690.59	°C
TFC 1	75.05	°C

ตาราง ค.3 รายละเอียดของตัวแปรที่ใช้คำนวณที่เวลาสับคาบการไหล 20 นาที

รายการ	ค่า	หน่วย
NIMAX	41	-
NJMAX	21	-
NITMAX	4001	-
NSTEP	1000	-
SLENGHT	5.04	m
THICK	0.075	m
WIDE	0.36	m
DENSITY	2200	kg/m <sup>3</sup>
CP	920	J/kg.°C
VK	1.48	W/m.°C
FMH	0.0084	kg/s
FMC	0.008	kg/s
CPFH	1180.58	J/kg.°C
CPFC	1043.34	J/kg.°C
HH	14.863	W/m <sup>2</sup> .°C
HC	10.32	W/m <sup>2</sup> .°C
TIME	1	Point
TIMEALL	2400	s
T_INITIAL	300	°C
TFH 1	692.34	°C
TFC 1	75.11	°C

ตาราง ค.4 รายละเอียดของตัวแปรที่ใช้คำนวณที่เวลาสลับคาบการไหล 25 นาที

รายการ	ค่า	หน่วย
NIMAX	41	-
NJMAX	21	-
NITMAX	4001	-
NSTEP	1000	-
SLENGHT	5.04	m
THICK	0.075	m
WIDE	0.36	m
DENSITY	2200	kg/m <sup>3</sup>
CP	920	J/kg.°C
VK	1.48	W/m.°C
FMH	0.0088	kg/s
FMC	0.0085	kg/s
CPFH	1171.24	J/kg.°C
CPFC	1038.48	J/kg.°C
HH	13.856	W/m <sup>2</sup> .°C
HC	9.508	W/m <sup>2</sup> .°C
TIME	1	Point
TIMEALL	3000	s
T_INITIAL	300	°C
TFH 1	684.13	°C
TFC 1	53.36	°C

ตาราง ค.5 รายละเอียดของตัวแปรที่ใช้คำนวณที่เวลาสลับคาบการไหล 20 นาที เมื่อทำการปรับลด  
ค่า  $C_p$  จาก  $920 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$  เหลือ  $220 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$

รายการ	ค่า	หน่วย
NIMAX	41	-
NJMAX	21	-
NITMAX	4001	-
NSTEP	1000	-
SLENGHT	5.04	m
THICK	0.075	m
WIDE	0.36	m
DENSITY	2200	kg/m <sup>3</sup>
CP	220	J/kg.°C
VK	1.48	W/m.°C
FMH	0.0084	kg/s
FMC	0.008	kg/s
CPFH	1180.58	J/kg.°C
CPFC	1043.34	J/kg.°C
HH	14.863	W/m <sup>2</sup> .°C
HC	10.32	W/m <sup>2</sup> .°C
TIME	1	Point
TIMEALL	2400	s
T_INITIAL	300	°C
TFH 1	692.34	°C
TFC 1	75.11	°C

ตาราง ค.6 รายละเอียดของตัวแปรที่ใช้คำนวณที่เวลาสลับคาบการไหล 20 นาที เมื่อทำการปรับเพิ่มค่า  $C_p$  จาก  $920 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$  เป็น  $2200 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$

รายการ	ค่า	หน่วย
NIMAX	41	-
NJMAX	21	-
NITMAX	4001	-
NSTEP	1000	-
SLENGHT	5.04	m
THICK	0.075	m
WIDE	0.36	m
DENSITY	2200	kg/m <sup>3</sup>
CP	2200	J/kg.°C
VK	1.48	W/m.°C
FMH	0.0084	kg/s
FMC	0.008	kg/s
CPFH	1180.58	J/kg.°C
CPFC	1043.34	J/kg.°C
HH	14.863	W/m <sup>2</sup> .°C
HC	10.32	W/m <sup>2</sup> .°C
TIME	1	Point
TIMEALL	2400	s
T_INITIAL	300	°C
TFH 1	692.34	°C
TFC 1	75.11	°C

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายมนโสมสิทธิ์ แจ้จวบ เกิดเมื่อวันที่ 8 เดือนมีนาคม พุทธศักราช 2523 ที่โรงพยาบาลวชิระ จังหวัดภูเก็ต สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จากสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เมื่อปีการศึกษา 2543 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2544 ระหว่างการศึกษาได้รับเงินทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ โครงการทุนสนับสนุนด้านเทคโนโลยีสะอาด ทุนผู้ช่วยสอน นอกจากนี้ยังได้เข้าร่วมกับสถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในการตรวจสอบการใช้พลังงาน ในอาคาร และโรงงาน ระหว่างการศึกษา



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย