

การศึกษาวัดจักรการถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสมในรีเจเนอเรเตอร์แบบโครงอิฐทนไฟ



นาย จิรชนม์ เสรีวิชัยสวัสดิ์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-13-0362-9

ลิขสิทธิ์ของ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STUDY ON OPTIMUM TIME CYCLE OF A FIRECLAY BRICK REGENERATOR

Mr. Jirachon Sereewichayasawad



สถาบันวิทยบริการ

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 2000

ISBN 974-13-0362-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาวัฏจักรการถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสมในรีเจเนอเรเตอร์
 แบบโครงอิฐทนไฟ
โดย นาย จิรชนม์ เสรีวิชัยสวัสดิ์
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. พงษ์ธร จรรย์ญากรณ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. มานิจ ทองประเสริฐ)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร. เชิดพันธ์ วิฑูรากรณ์)

จิรชนม์ เสรีวิชัยสวัสดิ์ : การศึกษาวัฏจักรการถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสมในรีเจเนอเรเตอร์
แบบโครงอิฐทนไฟ. (A STUDY ON OPTIMUM TIME CYCLE OF A FIRECLAY BRICK
REGENERATOR) อ. ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล , 170 หน้า.
ISBN 974-13-0362-9

งานวิจัยนี้กล่าวถึงการศึกษา วัฏจักรการถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสมใน Regenerator แบบโครงอิฐทนไฟ โดยสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายการกระจายอุณหภูมิอากาศและก๊าซเสีย ตลอดจนโครงอิฐทนไฟใน Regenerator ที่ตำแหน่งและเวลาใดๆ และมีการทดสอบแบบจำลองด้วยการเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ซึ่งปรากฏว่า แนวโน้มค่าต่างๆเป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยค่าอุณหภูมิอากาศและอุณหภูมิก๊าซเสียที่ไหลออกจาก Regenerator จากค่าในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้มีความเบี่ยงเบนค่อนข้างสูงจากค่าที่ตรวจวัด เนื่องจากความร้อนสะสมในอุปกรณ์วัด , ตำแหน่งในการวัด , การประมาณค่าอุณหภูมิโดยใช้การเฉลี่ยและปัจจัยภายนอกที่ไม่สามารถควบคุมได้ นอกจากนี้ยังพบว่า วัฏจักรที่ทำการตรวจวัดซึ่งใช้เวลาในวัฏจักร 30 นาทีที่ยังไม่เข้าสู่ Cyclic Equilibrium และ Thermal Ratio ใน Heating Period มีค่ามากกว่าใน Cooling Period

จากนั้นได้ทำการเปรียบเทียบเพื่อหาแนวโน้มเวลาที่เหมาะสมซึ่งแต่ละวัฏจักรต้องใช้ในการสะสมหรือถ่ายเทความร้อนของ Regenerator ในเตาถลุงดีบุก อันจะทำให้ได้ปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้สูงสุด โดยเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองที่ใช้เวลาในวัฏจักรต่างๆกันเมื่อวัฏจักรเข้าสู่ Cyclic Equilibrium พบว่า ถ้าใช้เวลาน้อยลงกว่าปัจจุบัน (30 นาที) จะทำให้ได้พลังงานความร้อนนำกลับมาใช้มากขึ้น แต่ถ้าใช้เวลานานเกินไป (4 นาทีขึ้นไป) พลังงานความร้อนนำกลับมาใช้จะมีค่าลดลง โดยวัฏจักรที่ทำให้ได้พลังงานความร้อนนำกลับมาใช้สูงสุดคือ วัฏจักรที่ใช้เวลาในการกลับทิศการไหลของอากาศและก๊าซเสียทุกๆ 529 วินาที หรือ ประมาณ 8.82 นาที ซึ่งสามารถนำพลังงานความร้อนกลับมาใช้ใหม่ได้มากกว่าวัฏจักรที่ดำเนินการในปัจจุบัน (30 นาที) เป็น 478,415,436 J/hr หรือเทียบเท่ากับเชื้อเพลิงน้ำมันเตา Type C ที่ประหยัดได้จำนวน 105,378.9 Litre/yr และค่า Thermal Ratio ของ Cooling Period มีค่ามากกว่าของ Heating Period ในทุกวัฏจักรเนื่องจากอัตราการไหลโดยมวลและความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของอากาศน้อยกว่าก๊าซเสีย แต่พลังงานความร้อนที่สะสมจากการที่ก๊าซเสียถ่ายเทให้โครงอิฐทนไฟในช่วง Heating Period มีค่าเท่ากับความร้อนที่โครงอิฐทนไฟถ่ายเทกลับให้อากาศ

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2543

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

4170253121 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD : REGENERATOR / TIME CYCLE / OPTIMUM

JIRACHON SEREEWICHAYASAWAD : A STUDY ON OPTIMUM TIME CYCLE OF A
FIRECLAY BRICK REGENERATOR. THESIS ADVISOR : ASSI. PROF. MINGSAK
TANGTAKUL , 170 pp. ISBN 974-13-0362-9

This study is related to the seek for optimum time cycle of fireclay brick regenerator. The mathematical model was proposed in order to simulate the temperature distribution of air , flue gas and fireclay brick in regenerator. In addition, the direct measurements were done. The developed mathematical model was verified by comparing its results with the measured values. The comparison found that the trend of them is the same. Although, their results were highly fluctuated to each other. There are four reasons why the simulation results were highly different from the measured values namely, Heat accumulation in measuring apparatus , the position of measuring , the use of arithmetic mean in estimation the average value and the external uncontrollable factors. Moreover, from measured values, the present cycle that lasts 30 minutes have not reached "Cyclic Equilibrium ". Also, thermal ratio in heating period was higher than that in cooling period.

After that , the trend of optimum time cycle was discovered by comparing the simulation results which reached Cyclic Equilibrium at different times. The results revealed that if the time cycle is less than present (30 minutes) , it will gain more heat recovery. Nevertheless, it should not be so less (4 minutes down) that it would cause heat recovery reduced. Furthermore, the cycle that obtained highest heat recovery had to switch the direction of air and flue gas flow in every 529 seconds or about 8.82 minutes. Additionally, when compare with the present cycle (30 minutes) , it will achieve heat recovery more than 478,415,436 J/hr or 105,378.9 Litre/yr equivalent to furnace oil type C . Besides, from which mass flow rate and specific heat at constant pressure of air are less than gas's , the heat accumulation of fireclay brick form gas in heating period is equal to the heat dissipation of firclay brick to air as well . Therefore, the thermal ratio in heating period was lower than that in cooling period.

Department Mechanical Engineering

Student's signature

Field of study Mechanical Engineering

Advisor's signature

Academic year 2543

Co-advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน โดยการวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยความช่วยเหลือที่ดีเยี่ยมของบุคคลหลายท่านดังนี้ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ชี้แนะหัวข้อและแนวทางวิจัยตลอดจนคำปรึกษามากมายที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัย พร้อมทั้งสนับสนุนเครื่องมือวัดต่างๆที่ใช้ในการวิจัยทุกอย่าง

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. พงษ์ธร จรัญญาภรณ์ รองศาสตราจารย์ ดร. มานิจ ทองประเสริฐ และ อาจารย์ ดร. เชิดพันธ์ วิฑูราภรณ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและถ่ายทอดประสบการณ์ความรู้ต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องทุกท่าน ในการดำเนินการเป็นธุระและให้คำแนะนำเรื่องการขอทุนอุดหนุนการวิจัย ตลอดจนขั้นตอนการเบิกจ่ายทุกประการ

ขอขอบพระคุณ ผู้บริหาร พี่ๆวิศวกร และพนักงาน โรงงานไทยแลนด์สแมลติ้ง แอนดรีไฟนิง (Thai-Sarco) ทุกๆท่านที่ให้การต้อนรับและอำนวยความสะดวกในการตรวจวัดระหว่างการวิจัยอย่างเต็มที่

ขอขอบคุณหน่วยวิจัยพลังงานจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้ให้โอกาสในการศึกษาค้นคว้า สะสมประสบการณ์ และ เอื้ออำนวยความสะดวกต่างๆ ที่เป็นจำเป็นอย่างสูงในการวิจัย รวมทั้ง คุณพีอัมพา เกลี้ยงสิน ที่ช่วยในงานธุรการต่างๆที่เกี่ยวกับงานวิจัยนี้ คุณประพจน์ ชัยวรวิทย์กุล คุณ ณัฐเดช เพ็ญวงวงศ์ คุณ ประพันธ์ พิกุลทอง และ คุณ บุญลภก ดานะสถิตย์ถาวร ที่ช่วยให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัย

ท้ายที่สุดนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และ ครอบครัว ที่ให้การสนับสนุนผู้วิจัยทั้งในด้านค่าใช้จ่าย อำนวยความสะดวก และกำลังใจมาโดยตลอด ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

จิรชนม์ เสรีวิชัยสวัสดิ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
รายการสัญลักษณ์.....	ฐ

บทที่

1. บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 จุดประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขั้นตอนการทำวิทยานิพนธ์.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3

2. ผลงานวิจัยที่ผ่านมา

.....	4
-------	---

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 กระบวนการกลึงดีบุก.....	6
3.2 ความรู้พื้นฐานของ Regenerator.....	12
3.3 กฎข้อที่ 1 ทางเทอร์โมไดนามิค.....	14
3.4 กฎสี่เหลี่ยมคางหมู.....	14
3.5 การถอดถอยแบบพหุนาม.....	15
3.6 Logarithmic Mean Temperature Difference.....	17
3.7 การถ่ายเทความร้อน.....	19
3.8 ไซโครเมตริกส์.....	29

3.9 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Regenerator.....	31
3.10 Modified Heat transfer coefficient.....	40
3.11 คุณสมบัติของก๊าซผสม.....	44
3.12 พลังงานความร้อนนำกลับมาใช้.....	44
4. การดำเนินการวิจัย	
4.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนใน Regenerator.....	45
4.2 การทดลองวัดข้อมูลของ Regenerator.....	52
4.3 การหาวิธีจักรการถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสม.....	56
5. ผลการทดลอง วิเคราะห์ และ การหาวิธีจักรการถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสม ใน Regenerator แบบโครงอิฐทนไฟรูปปล่องไฟสี่เหลี่ยม	
5.1 ผลการทดลองในการตรวจวัดข้อมูลต่างๆของ Regenerator.....	57
5.2 ผลการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ของ Regenerator.....	68
5.3 การหาวิธีจักรการถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสมใน Regenerator.....	75
6. สรุปและเสนอแนะผลงานวิจัย	
6.1 สรุปผลงานวิจัย.....	81
6.2 เสนอแนะผลงานวิจัยต่อไป.....	82
รายการอ้างอิง.....	83
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. โปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	86
ภาคผนวก ข. ข้อมูลการทดลองของการถ่ายเทความร้อนใน Regenerator แบบโครงอิฐทนไฟ.....	93
ภาคผนวก ค. ข้อมูลและผลการจำลองแบบจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	102
ประวัติผู้เขียน.....	-170

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
1	แสดงข้อมูลเบื้องต้นของการถลุงแร่ดีบุก.....	58
2	แสดงองค์ประกอบก๊าซเสียจากการเผาไหม้.....	59
3	แสดงอัตราการไหลโดยปริมาตรของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้.....	61
4	แสดงอัตราการไหลโดยมวลของน้ำมันที่ใช้ในการเผาไหม้.....	61
5	แสดงคุณสมบัติของโครงอิฐทนไฟกับอากาศหรือก๊าซเสียในแต่ละ Period.....	62



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูปภาพ

รูปภาพ		หน้า
1	แผนผังการถลุงแร่ดีบุกแบบสองชั้น.....	7
2	แสดงลักษณะของเตานอน.....	9
3	ภาพตัดขวางของ Regenerator ที่ติดตั้งคู่กับเตาถลุง.....	10
4	Fixed two-bed regenerator system.....	13
5	แสดงการประมาณค่าอินทิกรัลโดยใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมู	14
6	แสดงการถอดถอยแบบพหุนามโดยการประดิษฐ์ฟังก์ชันพหุนาม จากชุดของข้อมูลที่กำหนด.....	15
7	แสดงการกระจายอุณหภูมิของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Parallel-Flow.....	17
8	แสดงการพัฒนาของ Velocity Boundary Layer ของของไหลที่ไหลภายในท่อ.....	21
9	การพัฒนาของ Thermal Boundary Layer ของของไหลที่ไหลภายในท่อ.....	21
10	แสดง Emissivity ของ H ₂ O ที่ Total Pressure 1 atm และ Partial Pressure ใกล้เคียง.....	26
11	แสดง Emissivity ของ CO ₂ ที่ Total Pressure 1 atm และ Partial Pressure ใกล้เคียง.....	27
12	แสดง Correction Factor , C _w ของ ϵ_w ที่ Total Pressure p atm.....	27
13	แสดง Correction Factor , C _c ของ ϵ_c ที่ Total Pressure p atm.....	28
14	แสดง Correction Factor for Overlap , $\Delta\epsilon$ สำหรับก๊าซของผสมที่มีทั้ง ไอน้ำ และ คาร์บอนไดออกไซด์.....	28
15	ภาพตัดแนวยาวของโครงฮีททรีนไฟใน Regenerator (Front View).....	31
16	ภาพตัดขวางของโครงฮีททรีนไฟส่วนบน Regenerator (Top View).....	32
17	แสดง Control Volume ของโครงฮีททรีนไฟ.....	33
18	Finite difference mesh for the numerical solution of the regenerator equation.....	36
19	แสดงอุณหภูมิของฮีททรีนไฟและของไหลที่หน้าตัดใดๆของ Regenerator กับ เวลา.....	40
20	แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในฮีททรีนไฟที่เวลาใดๆ.....	41
21	แสดงส่วนประกอบต่างๆของเตาถลุงดีบุก.....	52

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปภาพ		หน้า
22	ตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลใน Regenerator.....	55
23	แสดงหน้าตัดขวางและรูปร่างของโครงอิฐทนไฟใน Regenerator.....	58
24	แสดงแนวโน้มของข้อมูลในตารางที่ 2.....	59
25	แสดงแนวโน้มของข้อมูลในตารางที่ 2 (ต่อ 1).....	60
26	แสดงแนวโน้มของข้อมูลในตารางที่ 2 (ต่อ 2).....	60
27	แสดงอัตราการไหลโดยปริมาตรของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้.....	61
28	แสดงอัตราการไหลโดยมวลของน้ำมันที่ใช้ในการเผาไหม้.....	62
29	แสดงการกระจายอุณหภูมิของไหลและอิฐทนไฟใน Regenerator ตลอด 12 ชั่วโมง.....	63
30	แสดงผลจากการแผ่รังสีที่มีต่ออุปกรณ์วัดที่ด้านบน Regenerator	65
31	แสดงผลจากการแผ่รังสีที่มีต่ออุปกรณ์วัดที่ด้านล่าง Regenerator	66
32	แสดงการกระจายอุณหภูมิของไหลและอิฐทนไฟใน Regenerator เมื่อคำนึงถึงผลจาก Radiation ที่มีต่อเครื่องมือวัด.....	68
33	แสดงการกระจายอุณหภูมิต่างๆจากผลการจำลองแบบ Regenerator.....	69
34	แสดงการเปรียบเทียบผลการวัดและการจำลองอุณหภูมิของไหล ด้านบน regenerator.....	70
35	แสดงการเปรียบเทียบผลการวัดและการจำลองอุณหภูมิของไหล ด้านล่าง regenerator.....	70
36	แสดงการเปรียบเทียบผลการวัดและการจำลองอุณหภูมิอิฐทนไฟ ด้านบน regenerator.....	71
37	แสดงการเปรียบเทียบผลการวัดและการจำลองอุณหภูมิอิฐทนไฟ ด้านล่าง regenerator.....	71
38	แสดงการกระจายอุณหภูมิในอิฐทนไฟ.....	73
39	แสดงสมดุลความร้อนของ regenerator ในช่วง Cooling Period.....	74
40	แสดงสมดุลความร้อนของ regenerator ในช่วง Heating Period.....	75
41	แสดง Thermal Ratio ของ Regenerator ที่ Cyclic Equilibrium ในช่วง Heating Period.....	76

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปภาพ	หน้า
42 แสดง Thermal Ratio ของ Regenerator ที่ Cyclic Equilibrium ใน Cooling Period.....	77
43 แสดงปริมาณ Heat Recovery ที่เวลา 1 ชั่วโมงของวัฏจักรต่างๆ.....	78
44 ปริมาณ Heat Recovery ที่เวลา 1 ชั่วโมงของวัฏจักรต่างๆ เมื่อเทียบกับวัฏจักร 30 นาที.....	79



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
A	Heat transfer surface area	m ²
c	Specific heat at constant pressure	kJ/kg K
\bar{h}	Modified heat transfer coefficient	W/m ² K
h	Surface heat-transfer coefficient	W/m ² K
k	Thermal conductivity	W/m ² K
L	Length of unit	m
M	Total mass of storage material	kg
m_f	Mass of fluid in storage channels	kg
\dot{m}_f	Mass rate of flow	kg/s
P	Duration of Heating or Cooling period for regenerator	s
R	Resistance	Ω
S	Cross-sectional Area	m ²
T	Nondimensional temperature	-
t	Temperature	°C , K
w	Semi-thickness of storage material for heat storage units	m
x	Axial coordinate	m
Greek		
η	Nondimensional time	-
η_{REG}	Thermal ratio , dimensionless	-
Λ	Reduced length ($\frac{\bar{h}A}{\dot{m}_f c_f}$)	-
ξ	Nondimensional axial distance	-
Π	Reduced period , dimensionless ($\frac{\bar{h}A \left(P - \frac{m_f}{\dot{m}_f} \right)}{M_m c_m}$)	-
ρ	Density	kg/m ³

ϕ	Overall heat transfer correction factor	-
τ	Time	s

Subscripts

cond	Conduction
conv	Convection
rad	Radiation
1	Heating Period
2	Cooling Period
f	Fluid
fi	Fluid at entrance to unit
fo	Fluid at exit of one unit
m	Storage material
s	Surface

Superscripts

'	Heating period for regenerator
“	Cooling period for regenerator

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์

ในปัจจุบันการประหยัดพลังงานเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาในการดำเนินงานทางวิศวกรรม เพราะค่าใช้จ่ายในด้านพลังงานนั้นสูงมาก โดยเฉพาะกรณีที่ใช้เชื้อเพลิงที่ใช้คือน้ำมัน ซึ่งต้องนำเข้ามาจากต่างประเทศ อุตสาหกรรมต่างๆในประเทศจึงต้องมีการปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องจักร และใช้พลังงานอย่างคุ้มค่าที่สุด

อุตสาหกรรมการถลุงแร่ดีบุก เป็นหนึ่งในหลายๆอุตสาหกรรมที่ใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิงหลักในการถลุง เตาถลุงดีบุกต้องใช้ปริมาณความร้อนสูงในการหลอมแร่ให้เหลวเพื่อแยกเอาโลหะดีบุกที่บริสุทธิ์ออกมาจากสินแร่ โดยได้รับความร้อนจากการเผาไหม้ของน้ำมันและอากาศช่วยในการเผาไหม้ อากาศเมื่อผ่านการเผาไหม้แล้วจะเปลี่ยนเป็นก๊าซเสีย โดยก๊าซเสียที่ออกจากเตามีอุณหภูมิสูงถึง $1,350\text{ }^{\circ}\text{C}$ เพื่อเป็นการประหยัดพลังงานจึงมีการติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับถ่ายเทความร้อนจากก๊าซเสียที่ออกจากเตาให้กับอากาศที่ช่วยในการเผาไหม้ แต่ด้วยสภาพของอุณหภูมิก๊าซเสียที่สูง และความดันแตกต่างอย่างมากระหว่างอากาศและก๊าซเสีย อาจก่อให้เกิดการกัดกร่อนของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ทำให้การใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Recuperative Heat Exchanger จึงแทบเป็นไปได้และมีราคาสูงมาก ดังนั้น Thermal Regenerator หรือ Regenerative Heat Exchanger ซึ่งสามารถทนต่อสภาพดังกล่าวได้ จึงถูกนำมาใช้งานเพื่อถ่ายเทพลังงานความร้อนจากก๊าซเสียที่มีอุณหภูมิสูงมาสะสมในโครงอิฐทนไฟ (Checkerwork of Fireclay Brick) ใน Regenerator เมื่อก๊าซเสียหลังจากใช้ในการเผาไหม้ไหลผ่าน Regenerator เป็นเวลาหนึ่งแล้วจึงสลับให้อากาศที่ช่วยในการเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าไหลผ่าน ทำให้อากาศมีอุณหภูมิสูงขึ้น โดยโครงอิฐทนไฟจะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศที่ช่วยในการเผาไหม้ กับ ก๊าซเสีย หากอากาศที่ช่วยในการเผาไหม้มีอุณหภูมิสูงเท่าใด ก็จะประหยัดเชื้อเพลิงได้มากเท่านั้น

การจะทำให้อากาศที่ช่วยในการเผาไหม้มีอุณหภูมิสูงมากขึ้นนั้น เมื่อพิจารณาถึงผลกระทบต่อกระบวนการการทำงานของเตาหลอมและเงินลงทุนที่ต้องใช้ การศึกษาเรื่องการปรับเวลาที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนทำให้เกิดปัญหาดังกล่าวน้อยและสามารถทำได้สะดวกที่สุด รวมทั้งไม่ต้องใช้เงินลงทุนใดๆเพิ่มเติม จึงมีการศึกษาวิจัยทางด้านเวลาที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อน ในการทำให้อากาศที่ช่วยในการเผาไหม้เมื่อผ่าน Regenerator มีอุณหภูมิสูงมากที่สุด หรือ ให้ได้ก๊าซเสียหลัง

จากการเผาไหม้เมื่อผ่าน Regenerator มีอุณหภูมิต่ำมากที่สุด เพื่อให้มีปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้ (Heat Recovery) มากที่สุด

1.2 จุดประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาและวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศและก๊าซเสียกับโครงอิฐทนไฟรูปปล่องไฟสี่เหลี่ยมใน Regenerator ของเตาถลุงดีบุก
2. สร้างวิธีการหาอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้หรือก๊าซเสียจากการเผาไหม้ที่ไหลออกจาก Regenerator และ อุณหภูมิของโครงอิฐทนไฟเมื่อเวลาผ่านไปตามต้องการได้ ตลอดจนปริมาณความร้อนที่อากาศได้รับจาก Regenerator
3. วิเคราะห์หาเวลาที่เหมาะสมที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนของ Regenerator เพื่อเป็นการปรับปรุง Effectiveness of Regenerator

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาและวิเคราะห์การทำงานของ Regenerator แบบโครงอิฐทนไฟรูปปล่องไฟพื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยใช้ Regenerator ในเตาถลุงดีบุกของบริษัท ไทยแลนด์ สเมลติงแอนดรีไฟนิง ที่จังหวัดภูเก็ต โดยครอบคลุมรายละเอียดดังนี้
 - 1.1 การถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศและก๊าซเสียกับโครงอิฐทนไฟรูปปล่องไฟพื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสใน Regenerator
 - 1.2 Effectiveness of Regenerator แสดงในรูปของ Thermal Ratio
 - 1.3 เวลาที่เหมาะสมในการถ่ายเทความร้อนเพื่อปรับปรุง Thermal Ratio
2. ทำการตรวจวัดและหาข้อมูลต่างๆของ Regenerator เพื่อนำมาใช้ประกอบในการวิเคราะห์ และเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์กับผลการตรวจวัดจริง เพื่อนำมาปรับปรุงให้ได้ผลที่ถูกต้องมากขึ้นประกอบด้วย อุณหภูมิของอากาศที่ช่วยในการเผาไหม้และอุณหภูมิของก๊าซเสียหลังจากการเผาไหม้ทั้งขาเข้าและออกจากโครงอิฐทนไฟ และค่าอื่นๆที่ใช้ประกอบการวิเคราะห์

1.4 ขั้นตอนการทำวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลของ โครงอิฐทนไฟรูปปล่องไฟสี่เหลี่ยมใน Regenerator

ของเตาถลุงดีบุก

2. ศึกษาค้นคว้าหาทฤษฎีและสมการเชิงอนุพันธ์ของสมดุลความร้อนที่ใช้กับ เครื่องอิฐทนไฟรูปปล่องไฟสี่เหลี่ยมใน Regenerator
3. ศึกษาค้นคว้าหาระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้ในการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ของสมดุลความร้อนที่ใช้กับ เครื่องอิฐทนไฟรูปปล่องไฟสี่เหลี่ยมใน Regenerator
4. พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์จากระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อหาคำตอบของสมการเชิงอนุพันธ์ของสมดุลความร้อนที่ใช้กับ เครื่องอิฐทนไฟรูปปล่องไฟสี่เหลี่ยมใน Regenerator
5. วิเคราะห์ผลจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับการใช้พลังงานของเตา ถายเทความร้อนของ Regenerator เพื่อปรับปรุงการใช้พลังงานของเตา
6. ดำเนินการตรวจวัดค่าต่างๆที่ระบุไว้ในขอบเขตของวิทยานิพนธ์ของเครื่องอิฐทนไฟรูปปล่องไฟสี่เหลี่ยมใน Regenerator จริงที่โรงงานถลุงดีบุกของบริษัท ไทยแลนด์สเมลติงแอนดรีไฟนิง ที่จังหวัดภูเก็ต แล้วนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลจากการวิเคราะห์ เพื่อหาข้อสรุป
7. จัดทำรายงานเพื่อนำเสนอข้อมูลและผลสรุปที่ทำการศึกษา พร้อมแจ้งผลการวิเคราะห์ไปยังโรงงานเพื่อเป็นแนวทางเลือกปฏิบัติของผู้ประกอบการต่อไป

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำเวลาที่เหมาะสมสำหรับการถ่ายเทความร้อนของ Regenerator ไปเป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจในการปรับเปลี่ยนการควบคุมการทำงาน ของ Regenerator ภายในโรงงานเพื่อการประหยัดพลังงานได้
2. สามารถนำเอาแนวทางเดียวกันนี้ไปใช้กับเครื่องอิฐทนไฟรูปแบบอื่นๆเพื่อพัฒนาเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ไว้วิเคราะห์ปรับปรุงการควบคุมการทำงาน ของ Regenerator ในโรงงานที่ใช้เตาหลอมแบบเดียวกัน
3. ทำให้ทราบวิธีการอนุรักษ์พลังงานใน Regenerator และเป็นแนวทางปฏิบัติเพื่อการประหยัดพลังงานต่อไป

บทที่ 2

ผลงานวิจัยที่ผ่านมา

หลายปีที่ผ่านมาได้มีการตื่นตัวทางด้านการศึกษาพลังงาน เพื่อหาแนวทางลดต้นทุนการผลิต ดังนั้นงานวิจัยจึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะพัฒนาความเป็นไปได้ในการหาแนวทางในการประหยัดพลังงานนี้ ต่อไปนี้คือผลงานวิจัยที่ผ่านมาของทฤษฎีที่ใช้ใน Regenerator

F.W. Schmidt และ A.J. Willmott (1981) นำเสนอ วิธีปฏิบัติในการแสดงความต้านทานการถ่ายเทความร้อน ภายในโครงอิฐทนไฟ โดยใช้ lumped heat-transfer coefficients ซึ่งความต้านทานนี้จะถูกบวกเพิ่มเข้าไปในความต้านทานระหว่าง ก๊าซ และ ของแข็ง ที่ผิวของโครงอิฐทนไฟ ซึ่งหัวข้อนี้ได้อธิบายถึงผลของการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของการนำความร้อนในของแข็งตามแนวอนที่แสดงในรูปของ lumped heat-transfer coefficients โดยในช่วงกลางของ Regenerator คุณสมบัติของ solid จะเปลี่ยนแปลงตามเวลาแบบ linear ทั้งใน Heating และ Cooling Period ถึงแม้ว่าคุณสมบัติของ solid จะเปลี่ยนแปลงแบบ nonlinear เมื่อเทียบกับเวลาที่ตำแหน่งทางเข้าของ Regenerator เนื่องจากคุณสมบัติของ fluid วนเข้าไม่เปลี่ยนแปลง

และกล่าวถึงการหา Transient Response ของ Solid sensible heat storage unit ที่มีช่องการไหลของก๊าซเป็นรูปทรงกระบอกและทำงานในสภาพ Single-blow โดยใช้วิธี Finite-conductivity- model เพื่อหาผลลัพธ์จากการไหล 2 แบบ กรณีแรก fluid ไหลผ่านผิวทรงกระบอกด้านในโดยพิจารณาให้ผิวทรงกระบอกด้านนอกเป็น Adiabatic ในกรณีที่ 2 fluid ไหลผ่านผิวนอกของทรงกระบอกโดย พิจารณาให้ผิวทรงกระบอกด้านในเป็น Adiabatic ผลที่ได้พบว่าสามารถทำนายสมรรถนะของ heat storage unit ได้หลายชนิด ที่เวลาใดๆ Response ของ Storage unit ประกอบด้วย series ของช่องทรงกระบอกที่แบ่งเป็นส่วนๆที่มีขนาดเท่าๆกันสามารถทำนายได้โดยการประกอบกันของ series ของช่องทรงกระบอกที่มีผิวภายนอกเป็น Adiabatic และ fluid ไหลผ่านผิวด้านใน

นอกจากนั้นมีการแสดง Transient Response ของ Solid sensible heat storage unit ซึ่งรับความร้อนมาจาก single flowing fluid ตัว storage unit ประกอบไปด้วยช่องที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับ fluid ไหลผ่าน คั่นด้วยวัสดุสะสมความร้อน จากนั้นแก๊สการพลังงานของ fluid และ transient conduction ของตัวสะสมความร้อนโดยใช้ Finite difference method ผลลัพธ์ที่เหมาะสมในการทำนายอัตราของคุณสมบัติของ Heat storage และ fluid วนออกจาก storage unit จะแสดงในรูปของ function ของ พารามิเตอร์ไร้มิติ

J. Schofield , P. Butterfield และ P. A. Young (1961) เป็นการอธิบายทางกายภาพของทฤษฎี regenerator ของ Hausen รวมทั้งทำการวัดเพื่อเปรียบเทียบกับทฤษฎี และยังมีการใช้ทฤษฎีของ Hausen ในการทำนาย dome temperature , stack temperature รวมถึง Optimum cycle time ด้วย รวมทั้งมีการเปรียบเทียบระหว่าง three- and four- stove system

J. Schofield , P. Butterfield และ P. A. Young (1963) จากข้อสรุปของทฤษฎี regenerator ของ Hausen พบว่าใช้ได้กับ uniform stove conditions และในกรณีของ non-linear time variations ในอุณหภูมิของโครงอิฐทนไฟ จึงมีการศึกษาต่อในกรณีของ Non-uniform เช่น การถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสี , รูปร่างของโครงอิฐ , สัมประสิทธิ์การนำความร้อน และความจุความร้อน โดยในพื้นที่ฐานของทฤษฎีจะมีการเปรียบเทียบต้นทุนระหว่าง Three- and four-stove systems , และระหว่างโครงอิฐรูปตารางหมากรุกหลายๆแบบ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 กระบวนการถลุงดีบุก (Tin Smelting Process)

ดีบุกเป็นโลหะที่มีราคาแพงเมื่อเทียบกับโลหะพื้นฐานอื่นๆ เช่น ทองแดง ตะกั่ว และสังกะสี แหล่งแร่ดีบุกเกิดอย่างจำกัดตามส่วนต่างๆ ของโลก ในเปลือกโลกประกอบด้วยดีบุกเพียงสามส่วนในล้านส่วน ในขณะที่มีทองแดงและสังกะสี 70 และ 80 ส่วนในล้านส่วนตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ดีบุกก็มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจการเหมืองของโลกไม่น้อย และยังเป็นโลหะชนิดเดียวเท่านั้นที่ผลิตขึ้นภายใต้ความตกลงระหว่างประเทศ

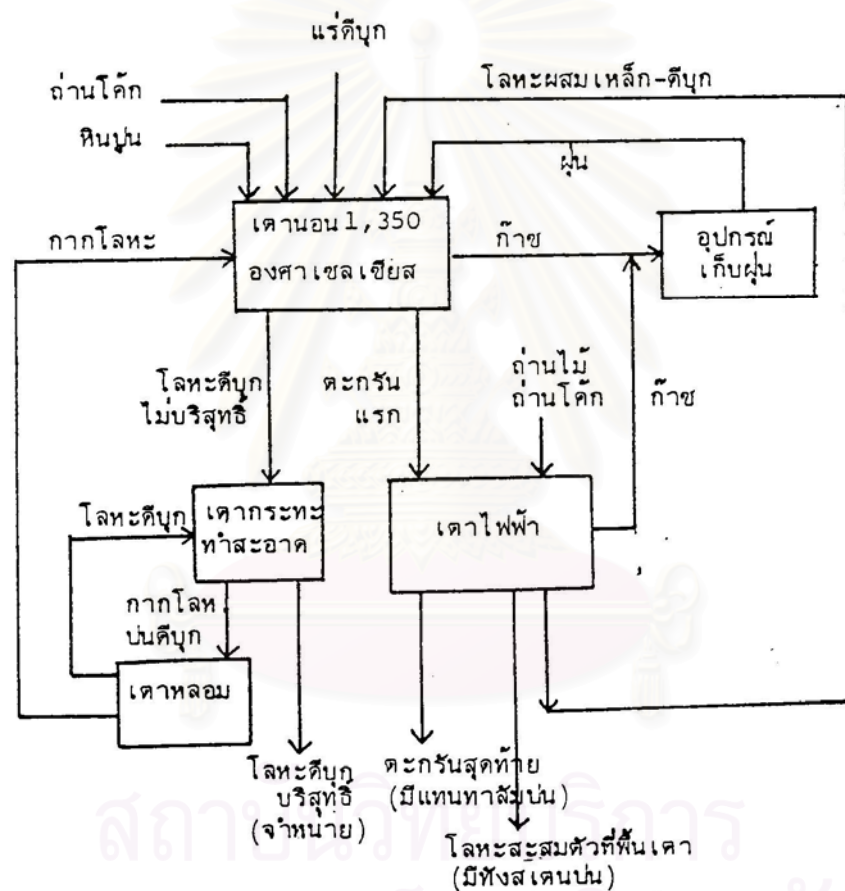
ปัจจุบันการใช้โลหะดีบุกภายในประเทศมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ประมาณ 40 % ใช้ในอุตสาหกรรมเคลือบแผ่นเหล็กเพื่อทำแผ่นเหล็กกิลาส 18 % ใช้ในอุตสาหกรรมตะกั่วบัดกรี และส่วนที่เหลือใช้ในการผลิตคอมพิวเตอร์และอื่นๆ โลหะดีบุกบริสุทธิ์ 99.9+ % ที่ผลิตในประเทศไทยส่วนใหญ่จะถูกส่งออกไปจำหน่ายในประเทศอุตสาหกรรมต่างๆ เพื่อใช้ในการผลิตแผ่นเหล็กกิลาสสำหรับทำกระป๋องบรรจุอาหารและเครื่องดื่ม และเป็นภาชนะบรรจุสิ่งอื่นๆ ใช้ในการผลิตตะกั่วบัดกรีสำหรับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ใช้ในอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ เช่น เพื่อทำสารประกอบอินทรีย์ดีบุกสำหรับผลิตพีวีซี ยาฆ่าเห็ดรา และเพื่อถนอมเนื้อไม้ และใช้ในการผลิตโลหะผสมเพื่อทำฝาประทับเพลลา

แร่ดีบุกส่วนใหญ่ที่นำมาถลุงให้เป็นโลหะคือ สแตนิกออกไซด์ หรือ แคสซิเทอไรต์ มีสูตรทางเคมีว่า SnO_2 ซึ่งจะพบในแหล่งแร่ 2 ชนิดคือ แหล่งลานแร่กับสายแร่ โดยแร่ดีบุกที่ได้จากแหล่งลานแร่จะมีปริมาณเนื้อดีบุกสูงกว่าและปริมาณมลทินปนอยู่ต่ำ โลหะดีบุกที่นำไปใช้งานควรมีเกรดสูงกล่าวคือมีเนื้อดีบุกบริสุทธิ์มากที่สุด จึงต้องมีการแต่งทำความสะอาดแร่ด้วย ซึ่งตามมาตรฐาน ASTM พบว่าโลหะดีบุกที่ผลิตทั้งหมดประมาณ 80-90 % อยู่ในเกรด A คือมีปริมาณเนื้อดีบุกไม่ต่ำกว่า 99.8 % โดยมีผู้ผลิตรายใหญ่ได้แก่ มาเลเซีย โบลิเวีย อินโดนีเซีย และประเทศไทย

นอกจากแร่ดีบุกแล้ว วัตถุดิบที่ใช้ในการถลุงคือ ถ่านหิน ถ่านโค้ก น้ำมันและก๊าซธรรมชาติ วัตถุดิบดังกล่าวใช้เป็นทั้งเชื้อเพลิงและตัวลดออกซิเจน ถ่านหินที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงควรบดให้มีขนาดเล็กเพื่อประสิทธิภาพในการสันดาปสูงเวลาพ่นผ่านหัวเผาพร้อมอากาศ ซึ่งจะเกิดเปลวไฟภายในคล้ายกับการใช้น้ำมันหรือก๊าซเชื้อเพลิง แต่การใช้ถ่านหินจะสกปรกกว่า ส่วนถ่านโค้กผลิตขึ้นด้วยวิธีการเผาถ่านหินในที่ซึ่งไม่มีอากาศเพื่อกำจัดสารระเหยออกไปให้ได้เนื้อคาร์บอนสูง มีคุณสมบัติเกาะเป็นก้อนแข็งไม่แตก่วนเพราะต้องรับน้ำหนักของวัตถุดิบที่กดอยู่ข้างบน

และต้องช่วยให้มีช่องว่างภายในเตาอย่างเพียงพอเพื่อให้ก๊าซผ่านขึ้นจากส่วนล่างของเตาได้สะดวก และมีวัตถุดิบอีกชนิดหนึ่งคือสารเชื้อ ที่สำคัญคือหินปูน (CaCO_3) เมื่อนำไปใช้จะสลายตัวเป็นปูนขาวหรือ (CaO และ CO_2) ที่อุณหภูมิสูง

ในขบวนการถลุงแร่ นอกจากจะได้โลหะออกมาแล้วยังมีส่วนประกอบอื่นที่ไม่ถูกลดออกซิเจนให้เป็นโลหะซึ่งจะรวมตัวกันเป็นตะกั่วของพวกโลหะออกไซด์ ซิลิเกต และอาจมีซิลไฟด์ คาร์ไบด์หรือเฮไลด์ ตะกั่วควรมีจุดหลอมตัว ความถ่วงจำเพาะ และความหนืดต่ำเพื่อให้เม็ดโลหะแยกตัวออกได้เร็วและไหลออกจากเตาถลุงได้สะดวก ซึ่งทำได้โดยการผสมสารเชื้อในวัตถุดิบเพื่อให้มีคุณสมบัติดังกล่าวนั่นเอง

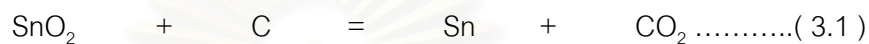


รูปที่ 1 แผนผังการถลุงแร่ดีบุกแบบสองขั้น (ชาคร จารุพิสิฐธร, 2525)

กรรมวิธีการถลุงที่ใช้เป็นแบบสองขั้น คือจะทำการผสมหัวแร่ให้เข้ากับตัวลดออกซิเจน (ใช้ประมาณ 15 ถึง 20 % ของน้ำหนักหัวแร่) สารเชื้อ (2 % ของน้ำหนักหัวแร่) กากโลหะหมุนเวียน ฝุ่นดีบุก (จากอุปกรณ์เก็บฝุ่น) และโลหะผสมเหล็ก-ดีบุก จากการถลุงขั้นที่สองหรือถลุงตะกั่วขั้นแรก แล้วประจุวัตถุดิบทั้งหมดเข้าเตาถลุงขณะที่ปฏิกิริยาดำเนินอยู่นั้นจะทำการเจาะเตาถลุงให้น้ำโลหะดีบุกที่เกิดขึ้นไหลออกจากเตาลงสู่เบ้าเมื่อวัตถุดิบประจุภายในเตาเริ่มหลอมละลายรวมกันจึงอุดรูเจาะของเตาไว้ รอจนกระทั่งทุกอย่างภายในเตาละลายจนหมดแล้ว จึงเจาะ

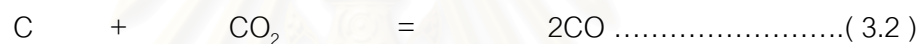
เตาอีกครั้งหนึ่ง ปล่อยให้ให้น้ำโลหะดีบุกและตะกั่วไหลออกมาลงสู่เบ้าที่ซึ่งโลหะจะแยกตัวจากตะกั่ว ตะกั่วนี้เรียกว่าตะกั่วแรก จะถูกทำให้มีขนาดเล็กพอเหมาะสำหรับการถลุงใหม่ในขั้นที่สองต่อไป เพราะยังมีดีบุกเหลืออยู่มากประมาณ 15-20 % ส่วนโลหะดีบุกที่ได้จะนำไปทำให้บริสุทธิ์ ก่อนที่จะหล่อเป็นแท่งเพื่อส่งจำหน่ายต่อไป ในการถลุงขั้นที่สองหรือขั้นถลุงตะกั่วแรก จะทำการผสมตะกั่วแรกให้เข้ากับตัวลดออกซิเจนและสารเชื้อแล้วประจุเข้าเตา ซึ่งจะถลุงให้ได้ตะกั่วสุดท้ายที่มีดีบุกต่ำ (ประมาณ 1 %) สามารถทิ้งไปได้

ในการถลุงจะเกิดปฏิกิริยาเคมีพื้นฐานของการถลุงประกอบด้วยปฏิกิริยาลดออกซิเจนจากแร่แคสซิเทอไรต์ด้วยคาร์บอน ตามสมการ



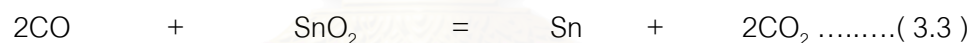
(สแตนนิกออกไซด์) (คาร์บอน) (ดีบุก) (คาร์บอนไดออกไซด์)

ปฏิกิริยาเช่นนี้จะเกิดเป็นขั้นๆ โดยในขณะที่วัตถุประจุในเตาถูกเผาให้ร้อนขึ้นเรื่อยๆนั้น คาร์บอนจากตัวลดออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีอยู่ในบรรยากาศของเตาให้คาร์บอนมอนอกไซด์ออกมาดังสมการ



(คาร์บอน) (คาร์บอนไดออกไซด์) (คาร์บอนมอนอกไซด์)

ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ได้จะทำปฏิกิริยาที่ผิวของเม็ดแร่แคสซิเทอไรต์ได้โลหะดีบุกและคาร์บอนไดออกไซด์



(คาร์บอนมอนอกไซด์) (สแตนนิกออกไซด์) (ดีบุก) (คาร์บอนไดออกไซด์)

ในการถลุงช่วงแรก รูเจาะของเตาถลุงมักจะเปิดทิ้งไว้เพื่อให้ น้ำดีบุกที่เกิดขึ้นไหลออกมาได้ ในระหว่างการถลุง คาร์บอนมอนอกไซด์จะลดออกซิเจนจากดีบุกออกไซด์ และ เหล็กออกไซด์ซึ่งมีอยู่ในแร่ตามสมการ



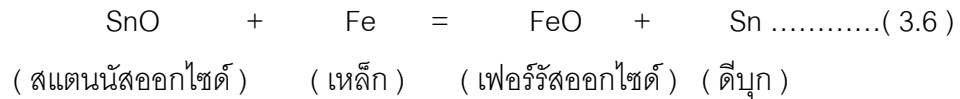
(สแตนนิกออกไซด์) (คาร์บอนมอนอกไซด์) (สแตนนัสออกไซด์) (คาร์บอนไดออกไซด์)



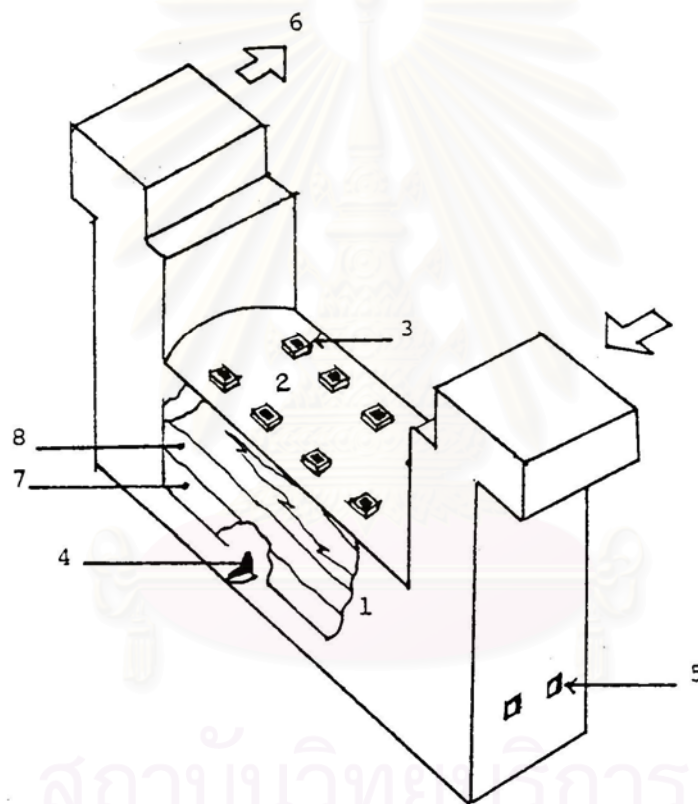
(เฟอริกออกไซด์) (คาร์บอนมอนอกไซด์) (เฟอรัสออกไซด์) (คาร์บอนไดออกไซด์)

เมื่ออุณหภูมิเตาสูงขึ้น สแตนนัสออกไซด์และเฟอรัสออกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยา (3.4) และ (3.5) จะหลอมรวมกับสารเชื้อและมลทินอื่นๆที่อยู่ภายในเตากลายเป็นตะกั่วเหลว ถึงช่วงนี้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จะทำหน้าที่ดึงเอาส่วนประกอบต่างๆที่อยู่ในตะกั่วออกมาในสภาพโลหะได้ช้า ในขณะที่คาร์บอนที่อยู่ในสภาพของแข็งจะทำหน้าที่แยกเอาดีบุกและเหล็กออกจากตะกั่วได้ดีเหล็กที่ได้นี้กับเหล็กซึ่งมีอยู่ในวัตถุประจุ (เช่นเหล็กในโลหะผสมเหล็ก-ดีบุก) ก็ทำหน้าที่ดึงดีบุก

ออกจากตะกรันได้เช่นกัน ซึ่งเมื่อปฏิกิริยาถึงภาวะสมดุลและวัตถุประจุละลายหมดแล้ว ก็เจาะเอาโลหะและตะกรันออกจากเตาได้ ปฏิกิริยาระหว่างชั้นของโลหะกับชั้นของตะกรันที่ภาวะสมดุลแทนได้ด้วยสมการ



เตาที่ใช้ทำปฏิกิริยามีหลายแบบ ปัจจัยสำคัญในการเลือกเตาพิจารณาจากลักษณะของหัวแร่และชนิดเชื้อเพลิงที่มีอยู่ ตลอดจนประสิทธิภาพในการเก็บโลหะและอัตราการผลิต โดยเตาที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเตานอน (Reverberatory Furnace)



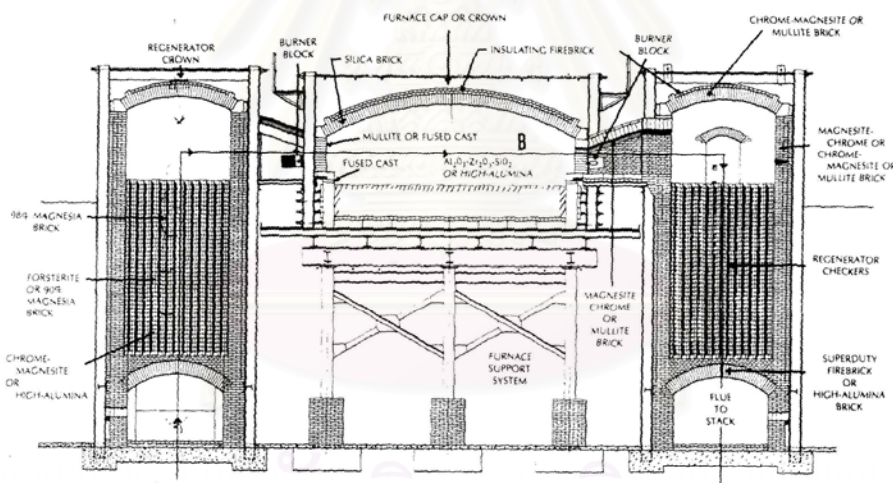
เตานอน

- | | |
|----------------------|------------------|
| 1. ตัวเตา | 6. ทางออกของก๊าซ |
| 2. หลังคาเตา | 7. ชั้นโลหะ |
| 3. ช่องประจุวัตถุดิบ | 8. ชั้นตะกรัน |
| 4. รูเจาะ | |
| 5. หัวเผา | |

รูปที่ 2 แสดงลักษณะของเตานอน (ชาคร จารุพิสิฐธร, 2525)

เตานอนนี้มีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม หลังคาโค้ง พื้นเตาลาดเอียงเล็กน้อยไปยังรูเจาะ สร้างด้วยวัสดุทนไฟ เป็นเตาที่ออกแบบให้ปล่อยน้ำโลหะออกจากเตาได้ทันทีที่เกิดขึ้น เชื้อเพลิง

สำหรับให้ความร้อนภายในเตาใช้ทั้งถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ เตาอนสมัยใหม่ มักจะเผาด้วยน้ำมันหรือก๊าซธรรมชาติ และมีอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อน (Heat Regenerator) ประกอบอยู่ด้วย Heat Regenerator ทำด้วยอิฐทนไฟ จะรับความร้อนของก๊าซเสียจากเตาถลุง แล้วถ่ายเทให้แก่อากาศเย็นที่จะผ่านเข้าไปในเตาเพื่อสันดาปกับเชื้อเพลิงอีกต่อหนึ่ง เป็นการนำความร้อนในก๊าซเสียมาใช้ให้เกิดประโยชน์ช่วยประหยัดเชื้อเพลิงที่เตาถลุงต้องใช้ ในการทำงาน จะปล่อยให้ regenerator รับความร้อนจากก๊าซเสียที่ออกจากเตาจนร้อนถึงระดับที่ต้องการ จากนั้นจึงค่อยผ่านอากาศเย็นเข้าไปใน regenerator ดังกล่าวแทน ทำให้อากาศร้อนขึ้น ในขณะที่ก๊าซเสียจะเปลี่ยนไปถ่ายเทความร้อนให้แก่ Regenerator อีกตัวหนึ่งดังนั้นเตาอนจึงต้องมีหัวเผา และ Regenerator ติดตั้งสองชุดที่ปลายทั้งสองด้านของเตา โดยหัวเผาดังกล่าวจะสลับกันทำงาน ครั้งละประมาณครึ่งชั่วโมง เช่นเดียวกับ Regenerator แต่ละตัวที่ทำหน้าที่รับความร้อนและถ่ายเทความร้อนสลับกันไป



รูปที่ 3 ภาพตัดขวางของ Regenerator ที่ติดตั้งคู่กับเตาถลุง (Nicholas P. Cheremisinoff)

ด้านข้างของตัวเตาจะมีรูเจาะ ส่วนช่องหรือประตูสำหรับประจุวัตถุดิบอาจทำไว้ที่หลังคาเตาหรือด้านข้างของเตาซึ่งอยู่ตรงข้ามกับรูเจาะก็ได้ ตัวเตาคาดด้วยเหล็กหรือแถบเหล็กเพื่อให้เตาทรงรูปอยู่ได้ และตั้งอยู่บนคานเหล็กรองรับด้วยเสาเหล็ก ส่วนล่างของเตาเป็นพื้นโล่ง เตาอนมีขนาดต่างๆกัน ขนาดเล็กประจุแร่ได้ครั้งละ 4 - 5 เมตริกตัน ขนาดใหญ่ประจุแร่ได้ครั้งละ 60 - 70 เมตริกตัน วัตถุดิบที่ประจุภายในจะได้รับความร้อนจากเปลวไฟที่หัวเผาโดยตรงกับความร้อนที่

สะท้อนมาจากหลังคาเตาและผนังเตา เตาถลุงต้องเผาให้ร้อนก่อนที่จะประจุแร่ซึ่งผสมกับ
ตัวลดออกซิเจนและสารเชื้อแล้ว

การประจุแร่อาจประจุสองครั้งโดยแบ่งแร่ออกเป็นสองส่วนให้ส่วนแรกมากกว่าส่วนที่สอง
หลังจากประจุแร่ส่วนแรกอีกราวสองชั่วโมงจึงค่อยประจุส่วนที่เหลือ พยายามเกลี่ยวัตถุดิบประจุให้แผ่
ไปทั่วเตา หลังการประจุแล้วเตาจะเย็นลงชั่วคราวหนึ่ง เพราะส่วนผสมนั้นดึงความร้อนเข้าตัวไป
บ้าง ระหว่างนี้จะทำการเร่งอุณหภูมิเตาให้สูงขึ้นถึงจุดที่ต้องการโดยการบังคับหัวเผา หลังการ
ประจุเตาแล้วประมาณหนึ่งชั่วโมง วัตถุดิบประจุจะเริ่มหลอมละลายอย่างช้าๆ เมื่อเวลาผ่านไปสี่
ชั่วโมง การหลอมละลายจะเร็วขึ้นมาก การกววนเตาอาจจะทำทุกชั่วโมงเพื่อให้ปฏิกิริยาเคมีภายใน
เตาเกิดได้อย่างทั่วถึง ภายในแปดชั่วโมง วัตถุดิบประจุจะละลายหมดและสามารถนำโลหะและ
ตะกั่วออกจากเตาได้ เมื่อเจาะเตาเรียบร้อยแล้ว ปิดรูเจาะด้วยดินทนไฟ เตาที่พร้อมที่จะรับการ
ประจุแร่ต่อไป ในกรณีที่เตานอนมีขนาดใหญ่ เช่นประจุแร่ได้ครั้งละ 30 – 40 เมตริกตัน จะต้องใช้
เวลาถลุงแต่ละครั้งนานประมาณ 20 – 24 ชั่วโมง แต่โดยปกติหลังจากป้อนแร่เข้าเตาแล้ว
ประมาณ 8 ชั่วโมง ก็สามารถเจาะเตาได้ เมื่อน้ำโลหะที่เกิดขึ้นไหลออกมาจนหมดจึงปิดรูเจาะ
และจะเจาะอีกครั้งหนึ่งเมื่อทุกอย่างภายในเตาละลายหมดแล้ว เพื่อเอาโลหะที่เกิดขึ้นอีกกับ
ตะกั่วที่เหลือออกจากเตาให้หมด โดยจะปล่อยให้ตะกั่วไหลลงสู่บ่อซึ่งมีน้ำจืดอยู่ตลอดเวลา
เพื่อให้ตะกั่วที่แข็งตัวมีขนาดเล็กเหมาะสำหรับการถลุงต่อไป

ตัวอย่างปริมาณวัตถุดิบแต่ละตัวที่ใช้ในการถลุงแร่มีดังนี้

แร่ดีบุก (เนื้อดีบุก 74 %)	100	หน่วยน้ำหนัก
ถ่านโค้ก	20	“
หินปูน	2	“
โลหะผสมเหล็ก-ดีบุก	8	“
ฝุ่นดีบุก	5	“
กากโลหะ	1	“

สำหรับวัตถุดิบในการถลุงตะกั่วประกอบด้วย

ตะกั่วแรก (มีดีบุกประมาณ 20 %)	100	หน่วยน้ำหนัก
ถ่าน	20	“
หินปูน	4	“

เมื่อผสมตะกรันแรกเข้ากับถ่านและหินปูนแล้วจึงประจุเข้าเตาอบ และเผาในลักษณะเดียวกันกับการถลุงแร่ ตะกรันเมื่อร้อนก็จะเริ่มเหนียว ดีบุกในตะกรันจะเริ่มลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งเหลืออยู่เพียงประมาณร้อยละ 1 หลังจากตะกรันเหลวดีแล้ว จึงเปิดรูเจาะให้ของเหลวภายในเตาไหลออกมาจนหมด ผลผลิตที่ได้มาจากเตาถลุงตะกรันแรกมีโลหะผสมเหล็ก-ดีบุก และตะกรันสุดท้าย โลหะผสมดังกล่าวจะนำไปถลุงใหม่ในเตาถลุงแร่ ส่วนตะกรันสุดท้ายทิ้งไปได้ถ้าไม่มีสารประกอบที่มีค่าเจือปนอยู่

การใช้เตาอบถลุงแร่ นั้นจะมีฝุ่นดีบุกเกิดขึ้น และฟุ้งออกมาพร้อมกับก๊าซเสีย ปริมาณดีบุกในฝุ่นอาจมีมากถึงร้อยละ 4 ของปริมาณดีบุกทั้งหมดที่ป้อนเข้าเตา ฝุ่นดังกล่าวจะถูกเก็บไว้ด้วยอุปกรณ์เก็บฝุ่นที่มีประสิทธิภาพ แล้วนำมาทำเป็นก้อนขนาดพอเหมาะที่จะนำกลับไปถลุงใหม่พร้อมกับแร่

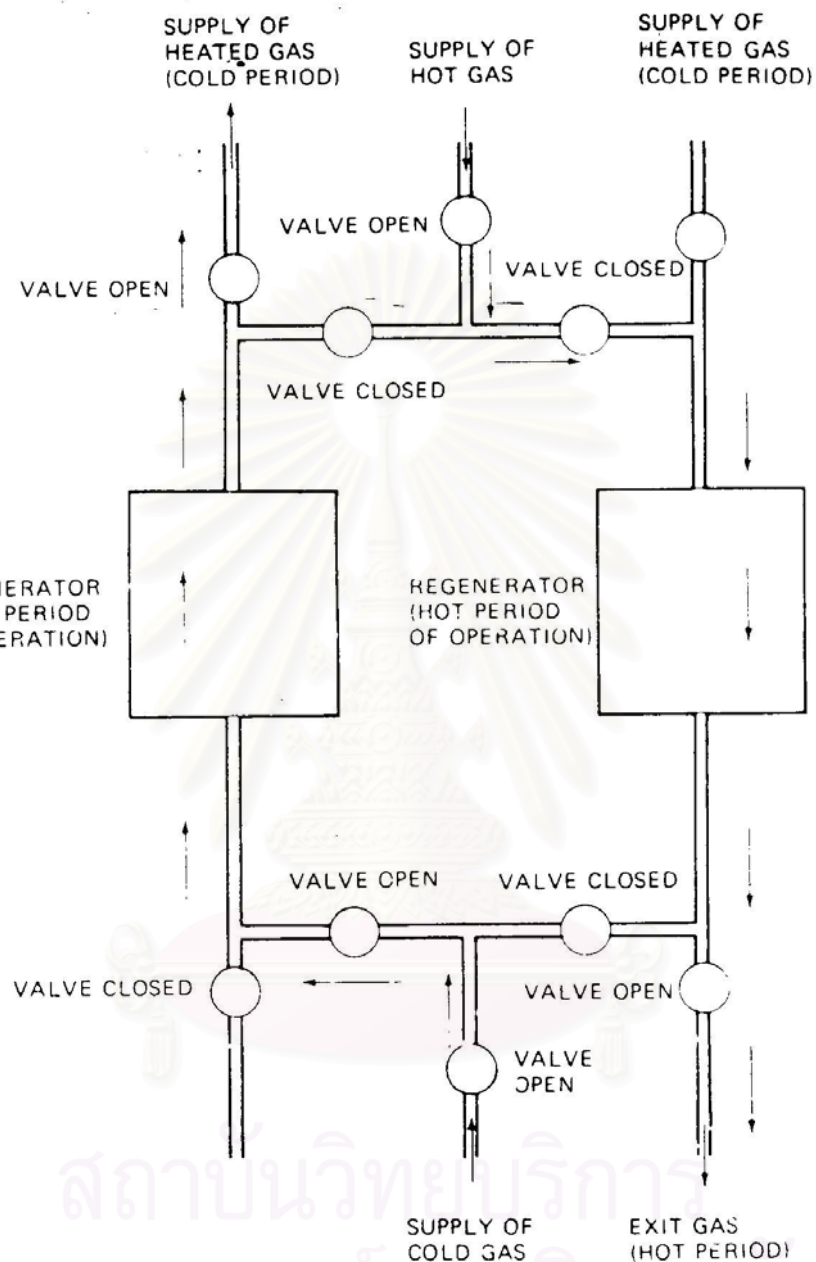
3.2 ความรู้พื้นฐานของ Regenerator (Regenerator Fundamentals)

Thermal Regenerator หรือ Regenerative Heat Exchanger เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหล 2 ชนิด (ส่วนมากเป็น ก๊าซ) โดยมีโครงร่างของวัสดุที่เป็นของแข็ง (Chequerwork) เป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน การทำงานของ Regenerator จะแบ่งเป็น 2 ช่วงเรียกว่า ช่วงสะสมความร้อน (Heating Period) และ ช่วงคายความร้อน (Cooling Period)

ในช่วง Heating Period ก๊าซที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจะไหลผ่านโครงร่างของตัวกลางซึ่งเป็นของแข็งด้วยอัตราการไหลและอุณหภูมิค่าหนึ่ง พร้อมกับถ่ายเทความร้อนให้กับตัวกลางสะสมไว้เป็นระยะเวลาหนึ่ง จากนั้นในช่วงปลายของ Period จึงทำการกลับทิศ (Reversal) เพื่อเข้าสู่ช่วง Cooling Period โดยตัดการไหลของก๊าซที่มีอุณหภูมิสูงดังกล่าว แล้วสลับให้ก๊าซที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าไหลผ่านตัวกลางดังกล่าวแทนในทิศสวนทางกับการไหลของก๊าซในช่วง Heating Period ความร้อนที่สะสมในตัวกลางจึงถ่ายเทไปสู่ก๊าซที่มีอุณหภูมิต่ำดังกล่าว เมื่อเวลาผ่านไปสักระยะเวลาหนึ่งจึงทำการกลับทิศเพื่อเข้าสู่ช่วง Heating Period อีกครั้ง แล้วดำเนินการเป็นวัฏจักรเช่นนี้ไปจนจบการทำงาน

การควบคุมการทำงานของ Regenerator จะใช้ valve ในการเปิดปิดการไหลของอากาศที่ช่วยในการเผาไหม้ และ ก๊าซเสียจากการเผาไหม้ โดยจะสลับให้ของไหลทั้ง 2 ไหลผ่าน Regenerator ทั้งซ้ายและขวาตามลำดับดังนี้ เปิด-ปิด valve ให้ก๊าซเสียจากการเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิสูงไหลเข้าทาง Regenerator ทางด้านขวา ในขณะที่เดียวกันให้อากาศที่ช่วยในการเผาไหม้

ที่มีอุณหภูมิต่ำไหลผ่าน Regenerator ทางด้านซ้าย เมื่อใช้เวลานานหนึ่งจึงสลับให้ก๊าซเสียจากการเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิสูงไหลเข้าทาง Regenerator ทางด้านซ้าย



รูปที่ 4 Fixed two-bed regenerator system (Frank W. Schmidt and A. John Willmott, 1981)

แล้วให้อากาศที่ช่วยในการเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิต่ำไหลผ่าน Regenerator ทางด้านขวา ทำเช่นนี้เป็นวัฏจักร โดยเมื่อก๊าซเสียจากการเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิสูงไหลเข้า Regenerator ความร้อนก็จะถ่ายเทและสะสมไว้ใน Regenerator จากนั้นเมื่อสลับให้อากาศที่ช่วยในการเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิต่ำไหลผ่าน ความร้อนที่สะสมอยู่ใน Regenerator ก็จะถ่ายเทมาสู่อากาศซึ่งเป็นการทำให้อากาศที่ช่วยในการเผาไหม้มีอุณหภูมิสูงขึ้น

3.3 กฎข้อที่ 1 ทางเทอร์โมไดนามิก (First Law of Thermodynamics)

จากกฎข้อที่ 1 ทางเทอร์โมไดนามิก ระบบเปิดซึ่งมีมวลไหลตัดผ่านเส้นแบ่งขอบเขตระหว่างระบบและสิ่งแวดล้อมสามารถเขียนกฎข้อที่ 1 ทางเทอร์โมไดนามิกได้ดังนี้

$$\Delta U_c + \Delta H_f + \Delta KE + \Delta PE = Q - W \dots\dots\dots(3.7)$$

เมื่อ ΔU_c คือ การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในปริมาตรควบคุม

ΔH_f คือ การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของกระแสการไหลของของไหล

ΔKE คือ การเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์

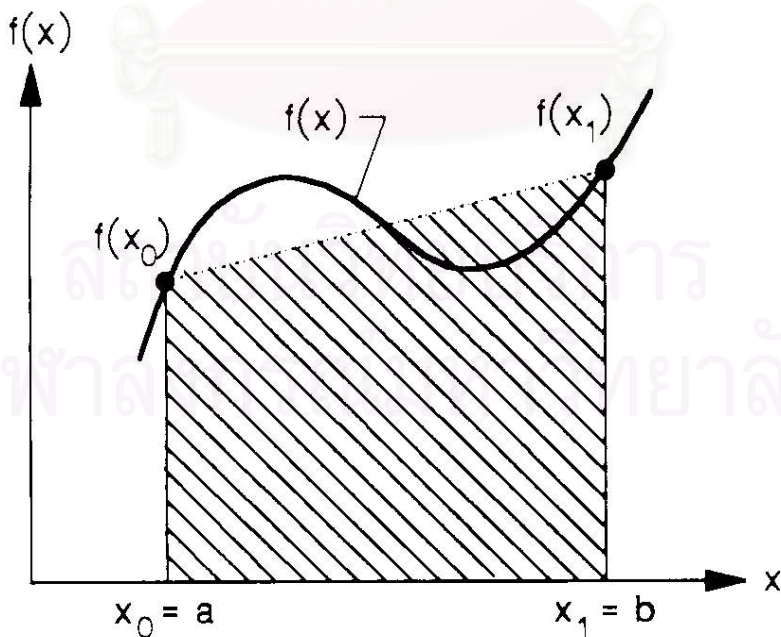
ΔPE คือ การเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์

Q คือ ความร้อนที่ถ่ายเทระหว่างผนังปริมาตรควบคุมกับสิ่งแวดล้อม

W คือ งานเพลลาที่แลกเปลี่ยนระหว่างผนังปริมาตรควบคุมกับสิ่งแวดล้อมรวมกับงานจากการหดหรือขยายตัวของปริมาตรควบคุม

3.4 กฎสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal rule)

การหาค่าอินทิกรัลของฟังก์ชันใดๆ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ออกมาเป็นตัวเลข สามารถทำได้โดยคำนวณมาจากพื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมูดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 แสดงการประมาณค่าอินทิกรัลโดยใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมู (ปราโมทย์ เดชะอำไพ, 2538)

จากลักษณะการกระจายของฟังก์ชัน $f(x)$ ใดๆ ในช่วง $a \leq x \leq b$ วัตถุประสงค์ คือการหาค่าอินทิกรัล

$$I = \int_a^b f(x)dx \dots\dots\dots(3.8)$$

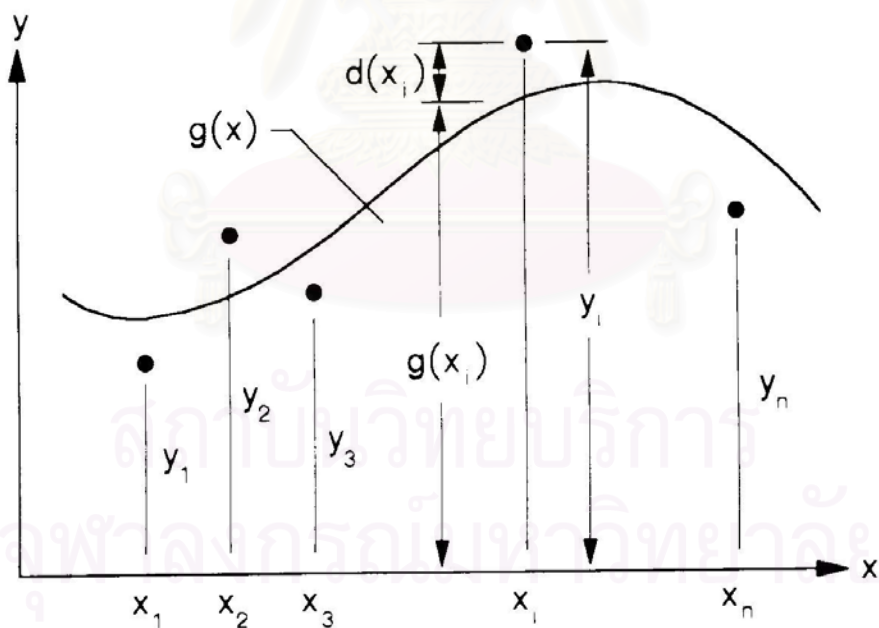
แต่ค่าอินทิกรัลก็คือพื้นที่ใต้ฟังก์ชัน $f(x)$ นั้นในที่นี่จะประมาณค่าอินทิกรัลดังกล่าวด้วยพื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมู (พื้นที่ที่แสดงด้วยเส้นเฉียงในรูปที่ 5) นั่นคือ

$$I \approx (x_1 - x_0) \frac{f(x_0) + f(x_1)}{2}$$

$$I = \frac{h}{2} (f(x_0) + f(x_1)) \dots\dots\dots(3.9)$$

3.5 การถดถอยแบบพหุนาม (Polynomial Regression)

การถดถอยแบบพหุนามเป็นระเบียบวิธีที่ใช้ประติษฐานฟังก์ชันพหุนามสำหรับข้อมูลที่มีการกระจายโดยทั่วไปที่ไม่อยู่ในรูปแบบของเชิงเส้นหรือสมการกำลังดังในรูปที่ 6



รูปที่ 6 แสดงการถดถอยแบบพหุนามโดยการประติษฐานฟังก์ชันพหุนามจากชุดของข้อมูลที่กำหนด (ปราโมทย์ เดชะอำไพ, 2538)

ชุดข้อมูลนี้ประกอบด้วย $x_i, y_i; i = 1, 2, \dots, n$ กล่าวคือมีจำนวนข้อมูลทั้งสิ้น n ข้อมูล ในที่นี่จะทำการประติษฐานฟังก์ชันพหุนามอันดับ m สำหรับข้อมูลชุดนี้

$$g(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m \dots\dots\dots(3.10)$$

โดย $a_0, a_1, a_2, \dots, a_m$ เป็นค่าคงตัวที่ไม่รู้ค่าซึ่งจะคำนวณหาจากเงื่อนไขที่ว่า สมการพหุนามที่จะประดิษฐ์ขึ้นมาทำให้เกิดค่าความผิดพลาดโดยเฉลี่ยที่น้อยที่สุดจากข้อมูลทั้งหมดที่กำหนดมาให้ ขั้นตอนในการประดิษฐ์สมการพหุนามนี้ เริ่มจากการหาค่าความผิดพลาด E ทั้งหมดที่เกิดขึ้นจาก n ข้อมูล ในรูปแบบดังนี้

$$E = \sum_{i=1}^n [d(x_i)]^2 \dots\dots\dots(3.11)$$

ซึ่งสามารถเขียนให้ประกอบด้วยฟังก์ชันพหุนามดังนี้

$$E = \sum_{i=1}^n [y_i - g(x_i)]^2$$

$$E = \sum_{i=1}^n [y_i - (a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m)]^2$$

ในการหาตัวไม่รู้ค่า $a_0, a_1, a_2, \dots, a_m$ รวมทั้งสิ้น $m+1$ ค่า นั้น จะใช้วิธีกำลังสองน้อยสุด (least-squares) ซึ่งทำจากวิธีการหาค่าต่ำสุด (minimization) ของค่าความผิดพลาด E โดยเกี่ยวข้องกับตัวไม่รู้ค่า ก่อให้เกิดระบบสมการที่ประกอบด้วย $m+1$ สมการย่อยนั้นคือ

$$\frac{\partial E}{\partial a_0} = 0, \frac{\partial E}{\partial a_1} = 0, \dots, \frac{\partial E}{\partial a_m} = 0$$

ดังตัวอย่างเช่น สมการแรกในระบบสมการนี้สามารถประดิษฐ์ได้ดังนี้

$$2 \sum_{i=1}^n [y_i - (a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2 + \dots + a_mx_i^m)](-1) = 0$$

$$\sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n a_0 - \sum_{i=1}^n x_i a_1 - \sum_{i=1}^n x_i^2 a_2 - \dots - \sum_{i=1}^n x_i^m a_m = 0$$

$$na_0 + (\sum_{i=1}^n x_i)a_1 + (\sum_{i=1}^n x_i^2)a_2 + \dots + (\sum_{i=1}^n x_i^m)a_m = \sum_{i=1}^n y_i$$

และเช่นเดียวกันกับสมการที่สอง

$$2 \sum_{i=1}^n [y_i - (a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2 + \dots + a_mx_i^m)](-x_i) = 0$$

$$\sum_{i=1}^n y_i x_i - \sum_{i=1}^n x_i a_0 - \sum_{i=1}^n x_i^2 a_1 - \sum_{i=1}^n x_i^3 a_2 - \dots - \sum_{i=1}^n x_i^{m+1} a_m = 0$$

$$(\sum_{i=1}^n x_i)a_0 + (\sum_{i=1}^n x_i^2)a_1 + (\sum_{i=1}^n x_i^3)a_2 + \dots + (\sum_{i=1}^n x_i^{m+1})a_m = \sum_{i=1}^n x_i y_i$$

และสมการอื่นๆที่เหลือก็สามารถทำได้ในทำนองเดียวกัน สมการทั้งหมดที่ประดิษฐ์ขึ้นมาได้นี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของระบบสมการที่ประกอบด้วย $m+1$ สมการย่อยได้ดังนี้

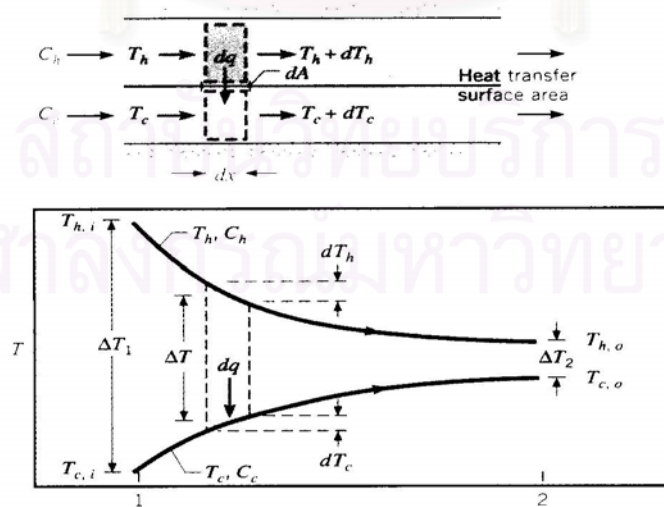
$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \dots & \sum_{i=1}^n x_i^m \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 & \dots & \sum_{i=1}^n x_i^{m+1} \\ \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 & \sum_{i=1}^n x_i^4 & \dots & \sum_{i=1}^n x_i^{m+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_i^m & \sum_{i=1}^n x_i^{m+1} & \sum_{i=1}^n x_i^{m+2} & \dots & \sum_{i=1}^n x_i^{2m} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_m \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_i^m y_i \end{Bmatrix}$$

...(3.12)

โดยเมตริกจัตุรัสขนาด $(m+1) \times (m+1)$ ทางด้านซ้ายของระบบสมการนี้เป็นเมตริกซ์สมมาตรที่รู้ค่า และเวกเตอร์ขนาด $(m+1) \times 1$ ทางด้านขวาของระบบสมการก็รู้ค่าเช่นกันดังนั้นถ้าไม่รู้ค่า $a_0, a_1, a_2, \dots, a_m$ รวมทั้งสิ้น $m+1$ ค่า สามารถคำนวณหาได้จากระบบสมการนี้

3.6 Logarithmic Mean Temperature Difference

พิจารณาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Parallel-Flow ใดๆที่มี Working Fluid 2 ชนิด คือ Hot Fluid และ Cold Fluid ตลอดหน้าสัมผัสของการถ่ายเทความร้อนจะมีการกระจายอุณหภูมิของของไหลทั้ง 2 ชนิด โดยที่ทางเข้าของช่องการไหล ความต่างของอุณหภูมิทั้ง 2 จะมาก และจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อระยะ x เพิ่มขึ้น แต่อุณหภูมิของ Cold Fluid จะไม่มีทางมากกว่าอุณหภูมิของ Hot Fluid



รูปที่ 7 แสดงการกระจายอุณหภูมิของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Parallel-Flow

(Frank P. Incropera and David P. Dewitt, 1996)

ในรูปที่ 7 Subscripts 1 และ 2 หมายถึงทางเข้าและทางออกของช่องการไหลตามลำดับ โดยสมมูลพลังงานของปริมาตรควบคุม (เส้นประ) และการวิเคราะห์ตั้งอยู่บนสมมติฐานว่า

1. มีการหุ้มฉนวนป้องกันการถ่ายเทความร้อนระหว่างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและสิ่งแวดล้อม จนมีการถ่ายเทความร้อนเฉพาะกับ Hot และ Cold Fluid
2. ไม่คำนึงถึงการนำความร้อนตามทิศทางการไหลของ Fluid
3. ไม่คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์และพลังงานจลน์
4. ความจุความร้อนจำเพาะของ Fluid มีค่าคงที่
5. Overall Heat Transfer Coefficient มีค่าคงที่

จึงสามารถเขียนสมการแสดงการถ่ายเทความร้อนได้ดังนี้

$$Q = UA\Delta t_{lm} \dots\dots\dots(3.13)$$

โดย Q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Parallel-Flow (W)

U คือ Overall Heat Transfer Coefficient ($W/m^2 K$)

A คือ พื้นที่การถ่ายเทความร้อน (m^2)

Δt_{lm} คือ Logarithmic Mean Temperature Difference (K)

$$\Delta t_{lm} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{\ln \frac{\theta_2}{\theta_1}} = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\ln \frac{\theta_1}{\theta_2}} \dots\dots\dots(3.14)$$

สำหรับ Parallel-Flow จะได้ว่า $\theta_1 = t_{h,1} - t_{c,1} = t_{h,i} - t_{c,i}$ สำหรับทางเข้า

และ $\theta_2 = t_{h,2} - t_{c,2} = t_{h,o} - t_{c,o}$ สำหรับทางออก

3.7 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)

การถ่ายเทความร้อนมักเกิดขึ้นเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิ (Temperature Gradient) ระหว่างตัวกลางชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดก็ได้ ในกรณีของ Regenerator เนื่องจากพื้นผิวภายนอกของมันเป็นฉนวนไฟถึง 3 ชั้น ทำให้อุณหภูมิผิวภายนอกไม่ต่างจากสิ่งแวดล้อมมากนัก เมื่อเทียบกับอุณหภูมิภายใน Regenerator จึงถือว่าไม่มีการถ่ายเทความร้อนผ่านพื้น

ผิวภายนอกนี้ ดังนั้นในการพิจารณาการถ่ายเทความร้อนของ Regenerator ในเรื่องวัฏจักรที่เหมาะสมนี้ จะพิจารณาเฉพาะภายในโครงอิฐทนไฟ (Storage Unit) ที่มีอุณหภูมิสูงเป็นหลักซึ่งแบ่งเป็น 3 รูปแบบคือ การนำ การพา และการแผ่รังสีความร้อน

3.7.1 การนำความร้อน (Conduction Heat Transfer)

เป็นการถ่ายเทพลังงานจากการมีปฏิสัมพันธ์กันของอนุภาคที่มีพลังงานสูงไปสู่อนุภาคที่มีพลังงานต่ำกว่าที่อยู่ติดกัน การนำความร้อนสามารถเกิดขึ้นได้ในตัวกลางที่เป็นของแข็ง ของเหลว และ ก๊าซ ในกรณีของแข็ง การนำความร้อนเกิดจากการสั่นของโมเลกุลในโครงร่างผลึกของตัวกลาง พลังงานดังกล่าวจะถูกถ่ายเทโดยอิเล็กตรอนอิสระ ส่วนกรณีของเหลวและก๊าซ การนำความร้อนจะเกิดจากการชนและการแพร่ของโมเลกุลที่เคลื่อนที่ไปมา อัตราการนำความร้อนผ่านตัวกลางขึ้นอยู่กับรูปร่าง, ความหนาและชนิดของตัวกลาง รวมทั้งความแตกต่างของอุณหภูมิด้วย ตามกฎของ Fourier สามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\dot{Q} = -kA \frac{dt}{dx} \dots\dots\dots(3.15)$$

โดย \dot{Q} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนจากการนำความร้อน (Watt)

k คือ ค่าความสามารถการนำความร้อนของตัวกลาง (Watt / (m K))

A คือ พื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่าน (m^2)

$\frac{dt}{dx}$ คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิต่อระยะทางที่ความร้อนถ่ายเทผ่าน (K/m)

เครื่องหมายลบมีเพื่อให้การถ่ายเทความร้อนมีค่าเป็นบวกในทิศทางบวกของ x

3.7.2 การพาความร้อน (Convection Heat Transfer)

เป็นรูปแบบการถ่ายเทพลังงานระหว่างพื้นผิวของของแข็งกับของไหล (ของเหลว หรือ ก๊าซ) ที่อยู่ติดกัน และเกี่ยวข้องกับ การนำความร้อนรวมถึงการเคลื่อนที่ของของไหลด้วย ของไหลที่เคลื่อนที่เร็วกว่าจะพาความร้อนได้ดีกว่า ส่วนของไหลที่อยู่นิ่งจะมีเพียงการนำความร้อนเท่านั้น ตามกฎของ Newton สามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\dot{Q}_{conv} = hA(t_s - t_a) \dots\dots\dots(3.16)$$

- โดย \dot{Q}_{conv} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนจากการพาความร้อน (Watt)
 h คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Watt / (m² K))
 A คือ พื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่าน (m²)
 t_s คือ อุณหภูมิพื้นผิว (เท่ากับอุณหภูมิของของไหลที่อยู่ติดกัน) (°C)
 t_α คือ อุณหภูมิของของไหล ณ ตำแหน่งห่างจากพื้นผิวไหลออกไป (°C)

ใน Regenerator ที่ทำการวิจัยการพาความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างผิวอิฐทนไฟกับก๊าซเสียหรืออากาศจะเป็นแบบบังคับ (Forced Convection) มีพัดลมเป็นตัวขับเคลื่อน และเป็นการไหลภายในท่อ (Internal Flow) โดยสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h ขึ้นอยู่กับรูปแบบการพาความร้อนตลอดจนคุณสมบัติทางกายภาพของระบบ ดังนี้

- รูปแบบการไหลในท่อ (Flow Regimes in a Tube)

การไหลในท่อสามารถเป็นไปได้ทั้ง 2 แบบ คือ แบบราบเรียบ (Laminar) และแบบปั่นป่วน (Turbulent) โดยถูกกำหนดด้วย Reynolds Number ดังนี้ (Yunus A. Cengel, 1998)

$$Re = \frac{v_m D_h}{\nu} = \frac{\dot{m} D_h}{A_c \mu} \dots\dots\dots (3.17)$$

- โดย Re คือ Reynolds Number เมื่อ $Re < 2,300$ Laminar flow
 $2,300 \leq Re \leq 4,000$ Transition to Turbulence
 $Re > 4,000$ Turbulent Flow

v_m คือ ความเร็วเฉลี่ยของของไหล (m/s)

D_h คือ Hydraulic Diameter (m) ; $D_h = \frac{4A_c}{p}$; $A_c =$ พื้นที่หน้าตัดของท่อ

$p =$ เส้นรอบรูปของหน้าตัดท่อ

ν คือ Kinematic Viscosity ของของไหล (m²/s)

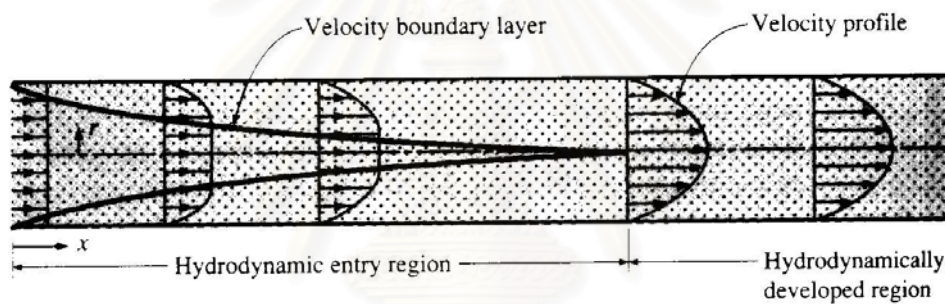
\dot{m} คือ อัตราการไหลโดยมวลของของไหล (kg/s)

A_c คือ พื้นที่หน้าตัดการไหล (m²)

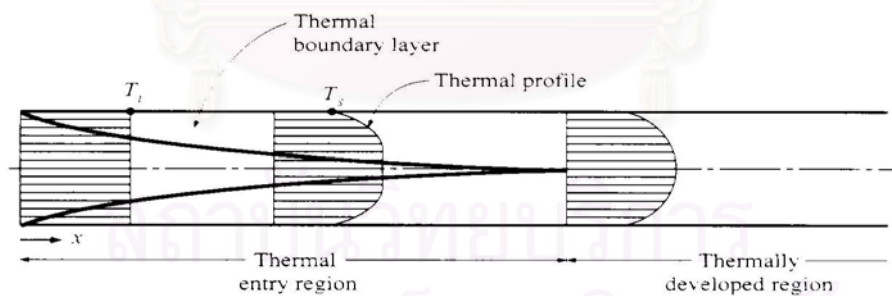
μ คือ Absolute Viscosity (kg/(m s))

- Hydrodynamic and Thermal Entry Lengths

พิจารณา fluid ที่ไหลในท่อ อนุภาคของของไหลในชั้นที่ติดกับพื้นผิวท่อจะหยุดนิ่ง ซึ่งจะ
ทำให้อนุภาคของของไหลในชั้นถัดไปเคลื่อนไหลช้าลงจากแรงเสียดทาน เพื่อเป็นการชดเชย
ความเร็วที่ลดลง ความเร็วของของไหลตรงกลางท่อต้องเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการไหลโดยมวลที่
คงที่ จึงเกิด Velocity Boundary layer ขึ้นตลอดความยาวท่อ ความหนาของ Boundary Layer
จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามทิศทางการไหล จนมาบรรจบกันตรงกลางท่อดังรูปที่ 8 พื้นที่จากทางเข้าของ
ท่อจนถึงจุดที่ Boundary Layer มาบรรจบกันเรียกว่า Hydrodynamic Entry Region และความ
ยาวของพื้นที่นี้เรียกว่า Hydrodynamic Entry Length , L_h ส่วนพื้นที่ที่เลยจากนี้ไปซึ่ง Velocity
Profile พัฒนาเต็มที่ และไม่เปลี่ยนแปลงอีกเรียกว่า Hydrodynamically Developed Region โดย
Velocity Profile ในพื้นที่นี้จะเป็นรูปโค้งแบบ Parabolic สำหรับการไหลแบบ Laminar แต่จะแบน
ราบกว่าสำหรับการไหลแบบ Turbulent



รูปที่ 8 แสดงการพัฒนาของ Velocity Boundary Layer ของของไหลที่ไหลภายในท่อ



รูปที่ 9 การพัฒนาของ Thermal Boundary Layer ของของไหลที่ไหลภายในท่อ

(Yunus A. Cengel, 1998)

เมื่อพิจารณาของไหลที่มีอุณหภูมิคงที่แบบ Uniform ไหลเข้าท่อที่มีอุณหภูมิสูงหรือต่ำกว่า
อนุภาคของของไหลในชั้นที่ติดกับพื้นผิวท่อจะถือว่ามีความร้อนเท่ากัน ซึ่งเป็นการเริ่มต้นการพา
ความร้อนในท่อและการพัฒนา Thermal Boundary Layer ไปตามท่อ โดยความหนาของ
Boundary Layer นี้จะเพิ่มขึ้นตามทิศทางการไหลจนมาบรรจบกันที่กลางท่อดังรูปที่ 9 พื้นที่จากที่ มี
การไหลและ Thermal Boundary Layer พัฒนาขึ้นจนถึงจุดที่ Boundary Layer มาบรรจบกัน

เรียกว่า Thermal Entry Region และความยาวของพื้นที่นี้เรียกว่า Thermal Entry Length , L_t ส่วนพื้นที่ที่เหลือจากนี้ไปซึ่ง Profile ของ Dimensionless Temperature , $\frac{(t - t_s)}{(t_m - t_s)}$ 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 ทั้งสองชนิดจะพัฒนาไปพร้อมๆกัน และสามารถประมาณ Hydrodynamic กับ Thermal Entry Lengths ได้ดังนี้ (Yunus A. Cengel,1998:377)

$$\begin{aligned} L_{h,laminar} &\approx 0.05 Re D_h \\ L_{t,laminar} &\approx 0.05 Re Pr D_h \dots\dots\dots(3.18) \end{aligned}$$

ในกรณีของการไหลแบบ Turbulent ค่า Hydrodynamic กับ Thermal Entry Lengths จะไม่ขึ้นอยู่กับ Re และ Pr จึงได้ว่า

$$L_{h,turbulent} \approx L_{t,turbulent} \approx 10D_h \dots\dots\dots(3.19)$$

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

$$\bar{h}_{conv} = \frac{\bar{Nu}_{D_h} k}{D_h} \dots\dots\dots(3.20)$$

โดย \bar{h}_{conv} คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยตลอดความยาวท่อ (Watt / (m² K))

D_h คือ Hydraulic Diameter (m)

k คือ ค่าความสามารถการนำความร้อนของของไหล (Watt / (m K))

\bar{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) นอกจากนั้นยังไม่ใช่ของไหลที่มีค่า $Pr \gg 1$

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

(Thermal and Velocity) Entry Length และ $[t_s = \text{constant}] , [0.48 < Pr < 16,700] , [0.0044 < (\frac{\mu}{\mu_s}) < 9.75]$ (Frank P. Incropera and David P. Dewitt,1996:443-444)

$$\bar{Nu}_{D_h} = 1.86(\frac{Re_{D_h} Pr}{L/D_h})^{1/3} (\frac{\mu}{\mu_s})^{0.14} \dots\dots\dots(3.21)$$

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

ไหลแบบ Fully Developed

$$\bar{Nu}_{D_h} = 2.98 \dots\dots\dots(3.22)$$

คุณสมบัติทุกอย่างที่ปรากฏในสมการหาได้ที่อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหล , \bar{t}_f

$$\frac{(t_{f.in} + t_{f.out})}{2} \text{ ยกเว้น } \mu_s \text{ หาได้ที่อุณหภูมิผิวท่อ}$$

สำหรับ Turbulent Flow ที่คุณสมบัติต่างๆมีการเปลี่ยนแปลงมาก สมการที่ใช้จึงต้องมีการประมาณที่ดี และสามารถใช้ได้กับสภาพ Uniform surface Temperature และ Uniform Heat Flux ดังนี้ (Frank P. Incropera and David P. Dewitt,1996:445)

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

$$Nu_{D_h} = 0.027 Re_{D_h}^{4/5} Pr^{1/3} (\frac{\mu}{\mu_s})^{0.14} \dots\dots\dots(3.23)$$

คุณสมบัติทุกอย่างที่ปรากฏในสมการหาได้ที่อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหล , \bar{t}_f

$$\frac{(t_{f.in} + t_{f.out})}{2} \text{ ยกเว้น } \mu_s \text{ หาได้ที่อุณหภูมิผิวท่อ และสามารถใช้ประมาณค่าสัมประสิทธิ์เมื่อ}$$

$2,300 \leq Re \leq 4,000$ ได้โดยเฉพาอย่างยิ่งเมื่อ Re เข้าใกล้ 4,000

3.7.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation Heat Transfer)

การแผ่รังสีคือการปล่อยพลังงานที่อยู่ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงรูปแบบทาง electronic ของอะตอมหรือโมเลกุลออกมา โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง และเป็นพลังงานที่ถ่ายเทได้เร็วที่สุด (เท่าความเร็วแสง)

จากกฎของ Stefan-Boltzmann สมการแสดงอัตราการแผ่รังสีความร้อนระหว่างพื้นผิวใดๆกับสิ่งแวดล้อม คือ

$$\dot{Q}_{rad} = \epsilon \sigma A (t_s^4 - t_\infty^4) \dots\dots\dots(3.24)$$

โดย \dot{Q}_{rad} คือ อัตราการแผ่รังสีความร้อน (Watt)

ϵ คือ Emissivity ของพื้นผิว ; $0 \leq \epsilon \leq 1$

σ คือ Stefan-Boltzmann constant มีค่า $5.67E-8$ Watt/($m^2 \cdot K^4$)

A คือ พื้นที่ผิวของการแผ่รังสี (m^2)

t_s คือ อุณหภูมิสมบูรณ์ของพื้นผิว (K)

t_∞ คือ อุณหภูมิสมบูรณ์ของสิ่งแวดล้อม (K)

การแผ่รังสีความร้อนใน Regenerator เป็นการถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศ (Cooling Period) หรือ ก๊าซเสีย (Heating Period) กับพื้นผิวโครงอิฐทนไฟ องค์ประกอบในอากาศและก๊าซเสียที่เป็นหลักในการดูดซับหรือคายพลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีคือ ก๊าซชนิดต่างๆ นั้นเอง แต่ที่มีคุณสมบัติโดดเด่นเป็น Polar Molecules มีขอบเขตของอุณหภูมิในการดูดซับหรือคายพลังงานกว้าง และมีปริมาณมากคือ ไอน้ำ (H_2O)_g และ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)

สมการ Heat Flux ของการแผ่รังสีความร้อนระหว่างโครงอิฐทนไฟกับอากาศหรือ ก๊าซเสีย จึงมีค่าเท่ากับ (Frank W. Schmidt and A. John Willmott, 1981:164-166)

$$Q_{rad} = \sigma \left(\frac{\epsilon_s + 1}{2} \right) (\epsilon_g t_f^4 - \alpha_g t_s^4) \dots\dots\dots(3.25)$$

รูปแบบของสมการ Heat Flux นี้เป็น nonlinear เพื่อความสะดวกสามารถประมาณให้เป็น linear โดยใช้ Equivalent Radiative Heat Transfer Coefficient , h_R ว่า

$$Q_{rad} = h_{rad} (t_f - t_s) \dots\dots\dots(3.26)$$

โดย Q_{rad} คือ ปริมาณ Heat Flux ของการแผ่รังสีความร้อนระหว่างโครงอิฐทนไฟกับอากาศหรือ ก๊าซเสีย (Watt/m²)

h_{rad} คือ Equivalent Radiative Heat Transfer Coefficient (W/m² K) เป็นค่าประมาณของการเฉลี่ย สามารถใช้ได้ตลอดทั้ง Period สำหรับการจำลองการทำงานของ Regenerator โดยใช้ Linear Model หาได้จาก

$$h_{rad} = \sigma \left(\frac{\epsilon_s + 1}{2} \right) \left(\frac{\epsilon_g t_f^4 - \alpha_g t_s^4}{t_f - t_s} \right) \dots\dots\dots(3.27)$$

- σ คือ Stefan-Boltzmann constant มีค่า 5.67E-8 (Watt/(m²*K⁴))
- ϵ_s คือ Emissivity ของพื้นผิวอิฐทนไฟ
- ϵ_g คือ Emissivity ของอากาศหรือก๊าซเสีย ((H₂O)_g , CO₂ เป็นหลัก)
- α_g คือ Absorptivity ของอากาศหรือก๊าซเสีย ((H₂O)_g , CO₂ เป็นหลัก)
- t_f คือ Arithmetic Mean ของอุณหภูมิสมบูรณ์ของอากาศหรือก๊าซเสีย (K)
- t_s คือ อุณหภูมิสมบูรณ์เฉลี่ยของพื้นผิวอิฐทนไฟ (K)

พจน์ของ $\frac{\epsilon_s + 1}{2}$ ใช้ในกรณีที่ Emissivity ของพื้นผิวอิฐทนไฟมีค่าต่ำกว่า 1 ซึ่งบางส่วนของ การแผ่รังสีของก๊าซจะสะท้อนกลับมาจากพื้นผิวนั้นได้ โดยส่วนใหญ่จะไม่ซึมซับเข้าไปในก๊าซ นั้นอีก แต่จะถูกซึมซับโดยพื้นผิวรอบๆที่เหลือแทน (M. Fishenden & O.A. Saunders :25-26)

เมื่ออุณหภูมิของของไหลและอิฐทนไฟมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องตลอดพื้นที่การ ถ่ายเทความร้อน สามารถประมาณจากการใช้ Arithmetic Mean ของอุณหภูมิของไหลโดยเพิ่ม พจน์ของ Logarithmic Mean ของผลต่างอุณหภูมิเข้าไป จากการพิจารณาให้ Regenerator เสมือนเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอิฐทนไฟกับของไหล

$$t_f = t_s + \frac{(\theta_1 - \theta_2)}{\ln \frac{\theta_1}{\theta_2}} \dots\dots\dots(3.28)$$

โดย θ_1 คือ ผลต่างอุณหภูมิของไหลกับอิฐทนไฟที่ทางเข้าช่องการไหล

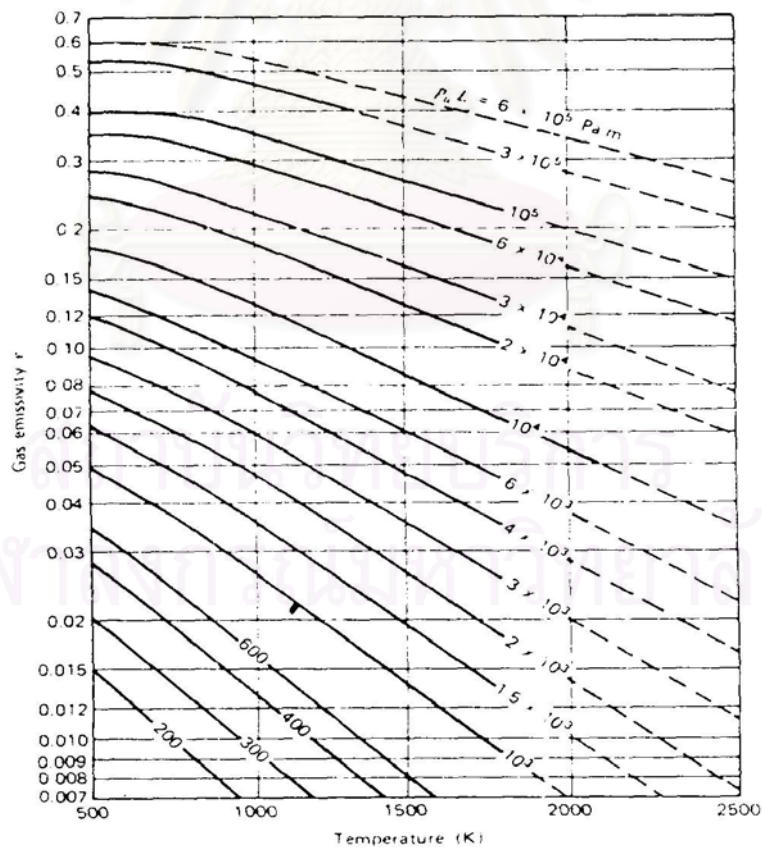
θ_2 คือ ผลต่างอุณหภูมิของไหลกับอิฐทนไฟที่ทางออกช่องการไหล

Hottel, H. C.(1954) กล่าวว่าเมื่อองค์ประกอบของไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ปรากฏอยู่ในรูปของผลรวมร่วมกับก๊าซที่ไม่มีคุณสมบัติในการแผ่รังสีอื่นๆ การหาค่า ϵ_g ของอากาศ (Cooling Period) หรือ ก๊าซเสีย (Heating Period) ทำได้ดังนี้

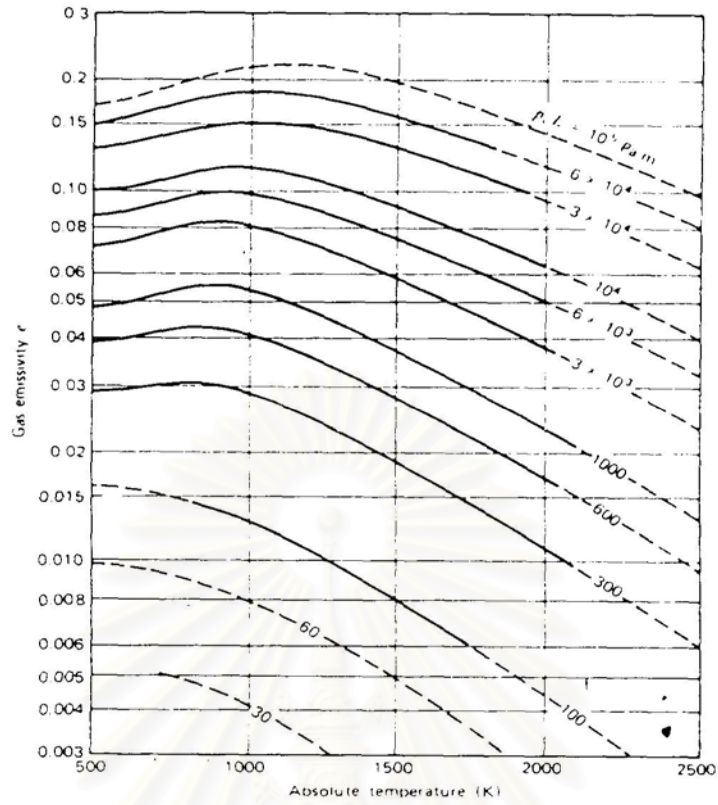
$$\epsilon_g = C_w \epsilon_w + C_c \epsilon_c - \Delta \epsilon \dots\dots\dots(3.29)$$

โดย Emissivity ของไอน้ำ ϵ_w และ คาร์บอนไดออกไซด์ ϵ_c หาได้จากกราฟที่ Plot ในรูปที่ 8 และ 9 ตามลำดับซึ่งขึ้นอยู่กับ

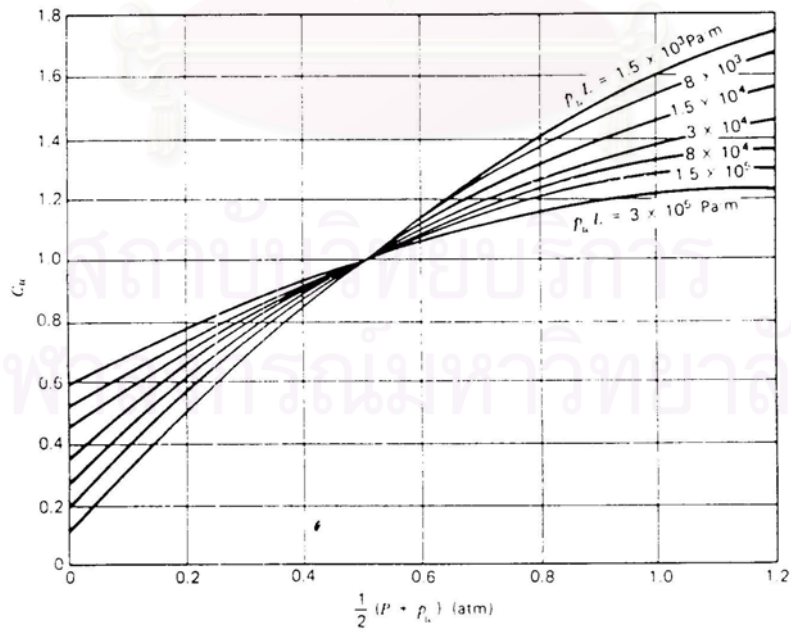
- อุณหภูมิ t_f ณ Total Pressure , p ของอากาศหรือก๊าซเสียที่ 1 atm
- Partial Pressure p_w ของไอน้ำ = Moles Fraction ของ H₂O * Total Pressure
- " p_c ของคาร์บอนไดออกไซด์ = Moles Fraction ของ CO₂ * Total Pressure
 (Moles Fraction คือ อัตราส่วนโดยโมล หรือ %by Volume ของก๊าซชนิดนั้นต่อก๊าซทั้งหมด)
- และ Effective Mean Beam Length , $L = 3.4 * \frac{\text{volume}}{\text{area}}$ สำหรับ Gas Enclosures ใดๆ



รูปที่ 10 แสดง Emissivity ของ H₂O ที่ Total Pressure 1 atm และ Partial Pressure ใกล้เคียงศูนย์

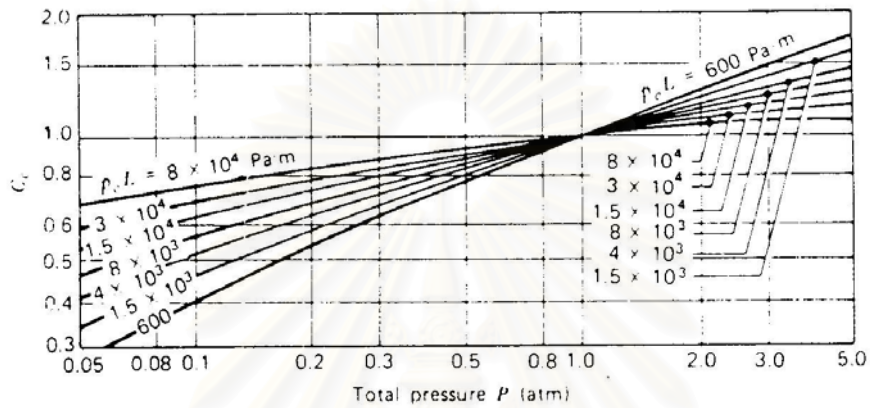


รูปที่ 11 แสดง Emissivity ของ CO_2 ที่ Total Pressure 1 atm และ Partial Pressure ใกล้เคียงศูนย์



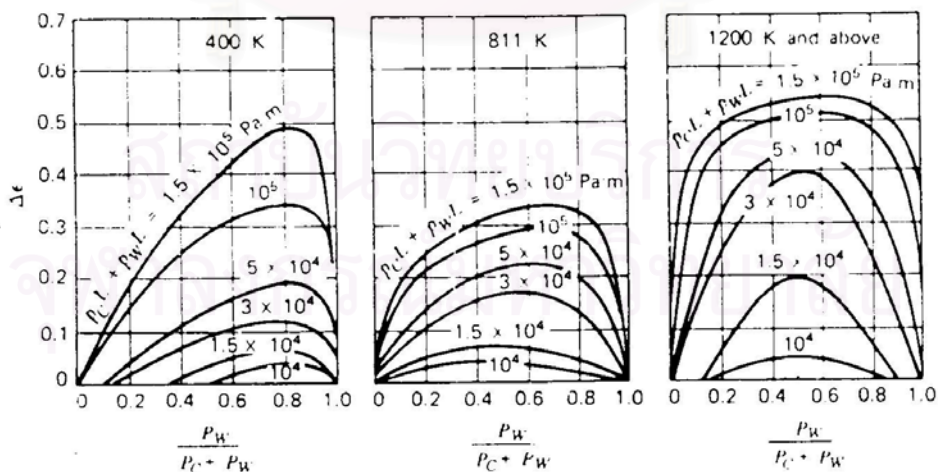
รูปที่ 12 แสดง Correction Factor, C_w ของ ϵ_w ที่ Total Pressure p atm

Correction Factor, C_w ของไอน้ำ และ C_c ของคาร์บอนไดออกไซด์ หาได้จากรูปที่ 12 และ 13 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 13 แสดง Correction Factor , C_c ของ ϵ_c ที่ Total Pressure p atm

ส่วน $\Delta\epsilon$ คือ Correction Factor for Overlap ใช้เมื่อ ไอน้ำ และ คาร์บอนไดออกไซด์ รวมกันอยู่ในรูปก๊าซของผสม หาได้จากรูปที่ 14



รูปที่ 14 แสดง Correction Factor for Overlap , $\Delta\epsilon$ สำหรับก๊าซของผสมที่มีทั้ง ไอน้ำ และ คาร์บอนไดออกไซด์

ในกรณีของ Absorptivity, α_g ของก๊าซของผสมระหว่างไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ สามารถหาได้ดังนี้

$$\alpha_g = \alpha_w + \alpha_c - \Delta\alpha \dots\dots\dots(3.30)$$

โดย $\alpha_w = C_w \left(\frac{t_g}{t_s}\right)^{0.45} \varepsilon_w(t_s, p_w L_e \frac{t_s}{t_g})$ และ $\alpha_c = C_c \left(\frac{t_g}{t_s}\right)^{0.65} \varepsilon_c(t_s, p_w L_e \frac{t_s}{t_g})$

$\varepsilon_w, \varepsilon_c$ หาได้จากรูปที่ 8 และ 9 ตามลำดับ แต่ใช้คุณสมบัติของ t_s แทน t_g และ ใช้คุณสมบัติของ $p_w L_e \frac{t_s}{t_g}$ 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 10 และ 11 ตามลำดับโดยใช้คุณสมบัติเดิม
 $\Delta\alpha = \Delta\varepsilon$ หาได้จากรูปที่ 12 โดยใช้คุณสมบัติเดิม

3.8 ไสโครเมตริกส์ (Psychrometric)

การศึกษาคุณสมบัติของอากาศชื้นหรืออากาศที่มีไอน้ำผสมอยู่ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณไอน้ำที่อยู่ในอากาศก่อนเข้า Regenerator ซึ่งจำเป็นต่อการคำนวณหาอัตราการไหลโดยมวลและสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน ในทางปฏิบัติพบว่าสูตรต่างๆของก๊าซสมบูรณใช้ได้ดี มาก โดยเฉพาะที่ความดันใกล้เคียงความดันบรรยากาศ (101.325 kPa หรือ 14.7 psi)

- สูตรก๊าซสมบูรณ์เบื้องต้น (ฤชากร จิรกาลวสาน,2541)

$$Pv = Rt \text{ หรือ } PV = mRt \dots\dots\dots(3.31)$$

โดย P คือ ความดันอากาศแห้ง, P_a หรือ ความดันไอน้ำ, P_w (kPa)
 ความดันอากาศทั้งหมดมีค่าเท่ากับความดันของอากาศแห้งรวมกับความดันของไอน้ำในอากาศ ไอน้ำที่อยู่ในอากาศจะมีปริมาตรเท่ากับปริมาตรอากาศ แต่ความดันของไอน้ำจะน้อยกว่าความดันของอากาศแห้งมากเพราะมวลน้อยกว่ามาก มวลของไอน้ำในอากาศทั่วไปจะมีเพียงประมาณ 1 – 2 % เท่านั้น

- v คือ ปริมาตรจำเพาะ (m^3 / kg)
- V คือ ปริมาตรทั้งหมด (m^3)

m คือ มวลของอากาศชื้น, m_a คือมวลของอากาศแห้ง, m_w คือมวลของไอน้ำ (kg)

t คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ของอากาศ (K)

R คือ ค่าคงที่มีค่า 0.287 kJ/ (kg K) สำหรับอากาศแห้ง, R_a หรือ
0.462 kJ/ (kg K) สำหรับไอน้ำ, R_v

- ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity) (ฤชากร จิรกาลวสาน,2541)

$$RH = \phi = \frac{y_v}{y_{vs}} \dots\dots\dots(3.32)$$

โดย ϕ คือ Relative Humidity

y_v คือ สัดส่วนโดยโมลของไอน้ำ

y_{vs} คือ สัดส่วนโดยโมลของไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิและความดันเดิม

สำหรับก๊าซผสมจากพื้นฐานทางเทอร์โมไดนามิกส์ได้ว่า สัดส่วนโดยโมลของไอน้ำใน

อากาศจะเท่ากับสัดส่วนของความดันไอน้ำ $y_v = \frac{n_v}{n} = \frac{P_v}{P}$ และ $y_{vs} = \frac{n_{vs}}{n} = \frac{P_{vs}}{P}$ จะได้ว่า

$$\frac{y_v}{y_{vs}} = \frac{P_v}{P_{vs}} \text{ ทำให้}$$

$$RH = \phi = \frac{y_v}{y_{vs}} = \frac{P_v}{P_{vs}} \dots\dots\dots(3.33)$$

โดย P_v คือ ความดันไอน้ำ (Pascal) = $P - P_a = \phi P_{vs}$

P_{vs} คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิเดิมของก๊าซผสมไอน้ำนั้น (Pascal) หาได้จากตารางไอน้ำหรือสูตรสำเร็จจากเอกสารไซโครเมตริกส์ในรายการอ้างอิง ดังต่อไปนี้

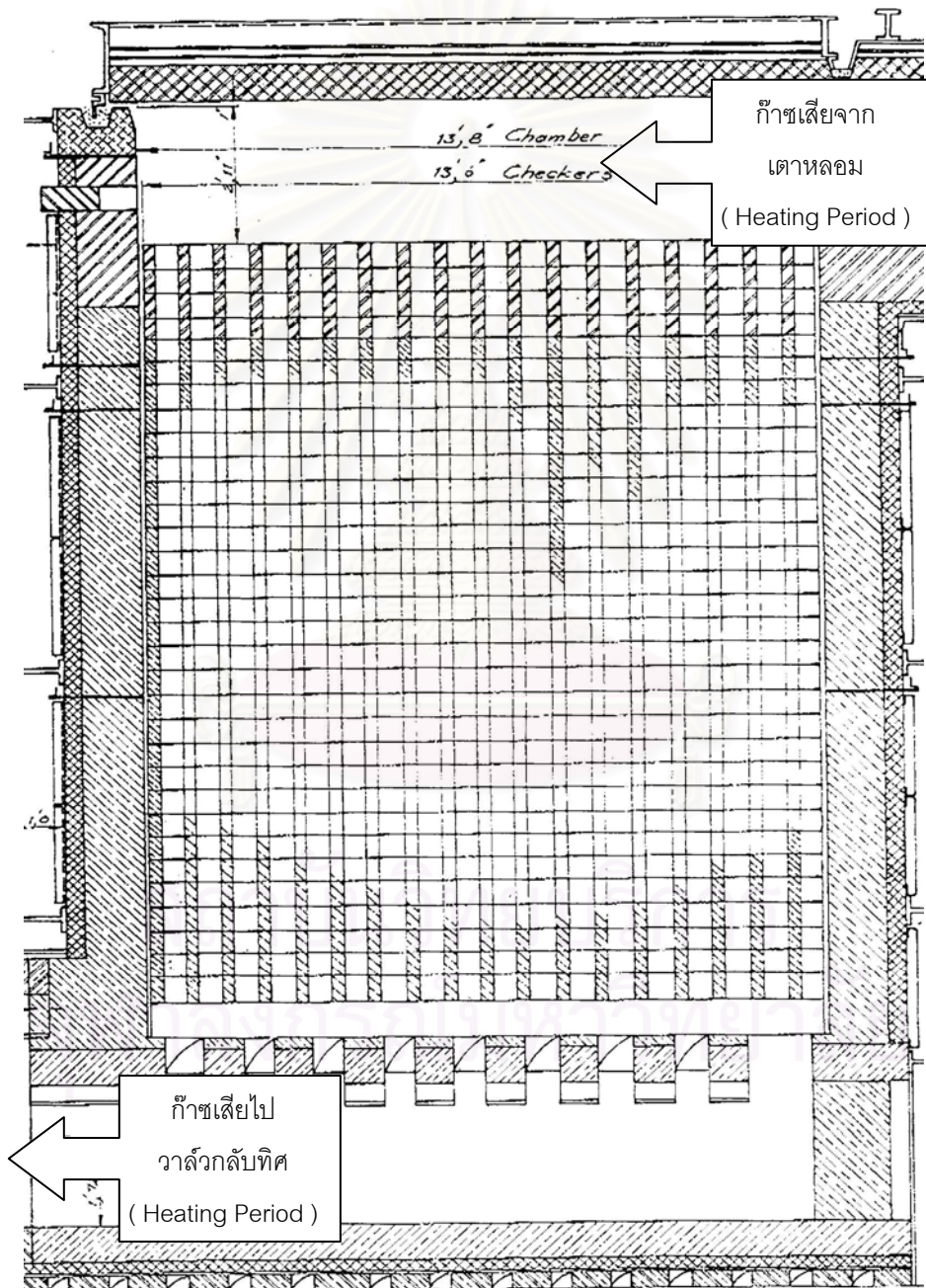
สำหรับช่วงอุณหภูมิ 0 °C ถึง 200 °C (ฤชากร จิรกาลวสาน,2541)

$$\ln(P_{vs}) = -\frac{5800.2206}{t} + 1.3914993 - 0.04860239t + (4.1764768E - 5)t^2 \dots\dots\dots(3.34)$$

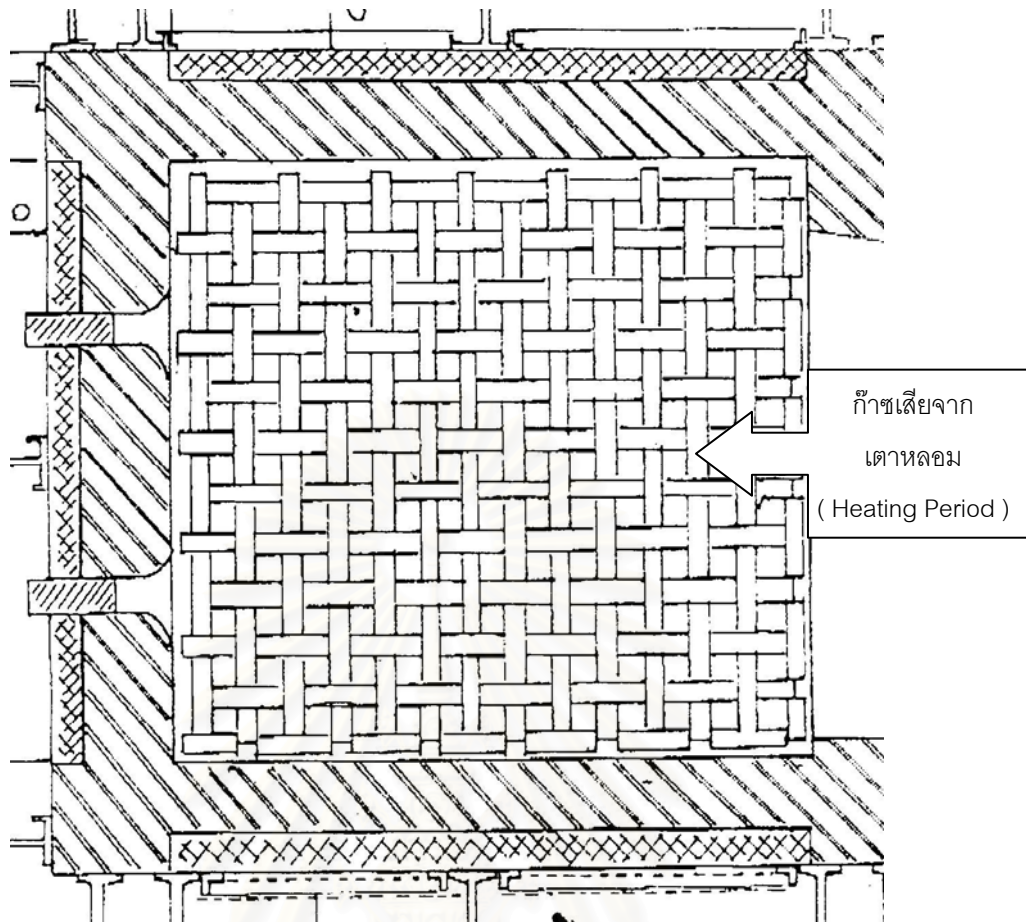
$$- (1.445209E - 8)t^3 + 6.5459673 \ln t$$

3.9 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Regenerator

Regenerator ที่ทำการวิจัย เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ติดตั้งกับเตาหลอมดิบบุกของโรงงาน ไทยแลนด์สเมลดิ่งแอนดรีไฟนิง จำกัด (ไทยชาร์โก้) จังหวัดภูเก็ต ทุกพื้นผิวใน Regenerator ประกอบขึ้นจากอิฐทนไฟก่อเรียงเป็นรูปปล้องไฟสี่เหลี่ยมรวมทั้งหมดที่ล้อมรอบอิฐทนไฟจะทำหน้าที่สะสมและถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหล 2 ชนิดที่ไหลผ่าน



รูปที่ 15 ภาพตัดแนวยาวของโครงอิฐทนไฟใน Regenerator (Front View)



รูปที่ 16 ภาพตัดขวางของโครงอิฐทนไฟส่วนบน Regenerator (Top View)

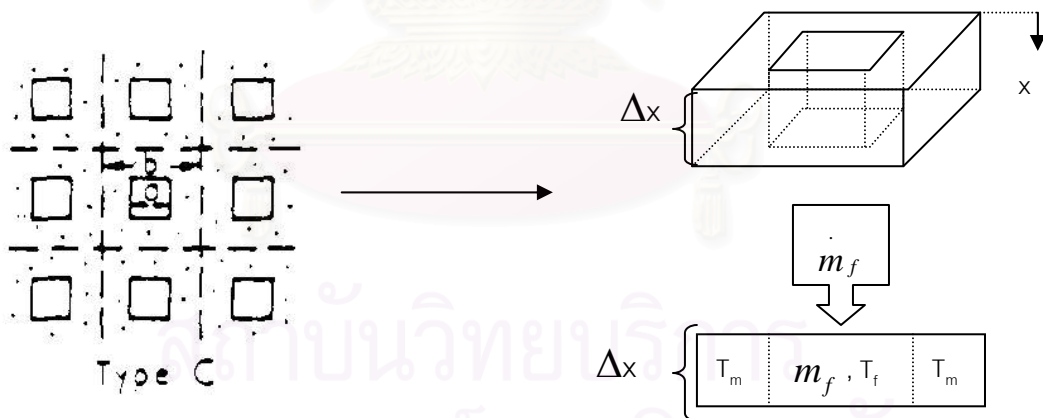
A.J. WILLMOTT (1964) ได้เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาการกระจายอุณหภูมิของโครงอิฐทนไฟและ fluid ที่ไหลผ่านใน Regenerator โดยใช้วิธีจำลองแบบจากบทความของ LAMBERTSON แต่มีการประยุกต์เอาระเบียบวิธีเชิงตัวเลขมาใช้ในการอินทิเกรตสมการเชิงอนุพันธ์เพิ่มเติม ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้มาจากการคำนวณเป็นรอบๆ จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่ (Equilibrium)

อากาศที่ช่วยในการเผาไหม้และก๊าซเสียจะไหลผ่านโครงอิฐทนไฟโดยมีสมมติฐานดังนี้

1. ไม่คำนึงถึงผลจากการนำความร้อนของอิฐทนไฟและ fluid ในทิศทางการไหลของ fluid
2. ไม่คำนึงถึงผลจากการผสมกันของ fluid เก่าที่คงเหลืออยู่ใน Regenerator กับ fluid ใหม่ที่เข้ามาแทนที่ในทิศทางตรงกันข้ามเมื่อเริ่มสลับทิศการไหล (Reversal)
3. ในแต่ละ Period อัตราการไหลโดยมวลของ fluid ทั้ง 2 ชนิดไม่มีการเปลี่ยนแปลง
4. อุณหภูมิของอากาศและก๊าซเสียที่ไหลเข้า Regenerator คงที่ทั้ง 2 Period (Heating / Cooling)

5. การถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลกับอิฐทนไฟสามารถแทนได้ด้วยเทอมของ Overall Heat Transfer Coefficient ที่มีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติของ fluid และคุณสมบัติเฉลี่ยของโครงอิฐทนไฟ
6. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมทั้งคุณสมบัติทางความร้อนของอิฐทนไฟ และ fluid ไม่เปลี่ยนแปลงในแต่ละ Period และยังมีค่าเท่ากันในทุกส่วนของ Regenerator ใน Period นั้นๆ
7. ไม่คำนึงถึงความร้อนที่ถ่ายเทออกทางด้านข้าง, ด้านบนและด้านล่างของ Storage Unit
8. ของไหลมีความเร็วคงที่ และ เป็น Uniform Flow
9. คุณสมบัติของโครงอิฐทนไฟและ fluid เปลี่ยนแปลงเป็นแบบ linear เทียบกับเวลา

จากสมมติฐานที่กล่าวมาจึงเลือกใช้ Control Volume โดยพิจารณาจากรูปที่ 17 เป็นภาพตัดขวางใดๆของ Regenerator ซึ่งแบ่งช่องการไหลของ fluid เป็น element เล็กๆขนาดเท่ากัน ให้ความสมมาตรตามแนวเส้นประ (ไม่มีการถ่ายเทความร้อนผ่านเส้นประ) ส่วนที่กั้นระหว่างช่องต่างๆคือเนื้ออิฐทนไฟ โดย a คือความกว้างของช่องการไหลของ fluid รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส และ b คือความกว้างของ element รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีความลึก Δx เมตร เมื่อ Regenerator มีความยาว L เมตรจะมีจำนวน Control Volume รวม $L / \Delta x$ elements ต่อ 1 ช่องการไหล



รูปที่ 17 แสดง Control Volume ของโครงอิฐทนไฟ

3.9.1 สมการเชิงอนุพันธ์ (The Differential Equations)

จาก Control Volume ในรูปที่ 17 เนื่องจากแต่ละช่องมีความสมมาตรกัน จึงพิจารณาช่องการไหลใดๆเพียง 1 ช่องเพื่อเป็นต้นแบบ ดังนั้นจะได้สมการสมดุลทางความร้อนที่ต้องพิจารณา 2 สมการคือ

1. สมการสมดุลความร้อนของของไหล คือ สมการเชิงอนุพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างโครงอิฐท่อนไฟกับก๊าซเสียจากการเผาไหม้ (Heating Period) หรืออากาศที่ช่วยในการเผาไหม้ (Cooling Period) กับ อัตราการถ่ายเทและสะสมความร้อน ในก๊าซเสียจากการเผาไหม้หรืออากาศที่ช่วยในการเผาไหม้ เมื่อ L ในสมการ 3.35 คือความยาวของ element ที่พิจารณา (Frank W. Schmidt and A. John Willmott,1981)

$$\bar{h}A(t_m - t_f) = \dot{m}_f c_f L \frac{\partial t_f}{\partial x} + m_f c_f \frac{\partial t_f}{\partial \tau} \dots\dots\dots (3.35)$$

โดย \bar{h} คือ Modified heat transfer Coefficient (W/m² K)

x คือ ระยะความยาวของโครงอิฐท่อนไฟ โดยวัดไปในทิศทางเดียวกันกับการไหลของ fluid ใน Period นั้นๆ (m)

2. สมการสมดุลความร้อนของของแข็ง คือ สมการเชิงอนุพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างโครงอิฐท่อนไฟกับก๊าซเสียจากการเผาไหม้ (Heating Period) หรืออากาศที่ช่วยในการเผาไหม้ (Cooling Period) กับ อัตราการถ่ายเทและสะสมความร้อนในโครงอิฐท่อนไฟ

$$\bar{h}A(t_f - t_m) = M_m c_m \frac{\partial t_m}{\partial \tau} \dots\dots\dots (3.36)$$

โดย M_m คือ มวลของ Storage Channel (kg)

เพื่อความสะดวกในการคำนวณจึงแปลงสมการ 3.35 และ 3.36 ให้อยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless Variable) โดยกำหนดพารามิเตอร์ไร้มิติ (Dimensionless Parameter) ดังนี้ (Frank W. Schmidt and A. John Willmott,1981)

$$\xi = \frac{\bar{h}Ax}{m_f c_f L} \dots\dots\dots (3.37) \quad \text{พารามิเตอร์ไร้มิติทางระยะทาง (ZETTA)}$$

$$\eta = \frac{\bar{h}A}{M_m c_m} \left(\tau - \frac{m_f x}{m_f L} \right) \dots\dots\dots (3.38) \quad \text{พารามิเตอร์ไร้มิติทางเวลา (ETTA)}$$

และตัวแปรไร้มิติดังนี้

$$T_f = \frac{t_f - t_{fi}}{t_{fi} - t_{fi}} \dots\dots\dots (3.39) \quad \text{ตัวแปรไร้มิติของอุณหภูมิของของ}$$

$$\text{ไหล } T_m = \frac{t_m - t_{fi}}{t_{fi} - t_{fi}} \dots\dots\dots (3.40) \quad \text{ตัวแปรไร้มิติของอุณหภูมิของของแข็ง}$$

จากสมการ 3.37,3.38,3.39 และ 3.40 จะได้สมการ 3.35 และ 3.36 อยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติคือ

$$\frac{\partial T_f}{\partial \xi} = T_m - T_f \dots\dots\dots(3.41)$$

$$\frac{\partial T_m}{\partial \eta} = T_f - T_m \dots\dots\dots(3.42)$$

นอกจากนี้พารามิเตอร์ไร้มิติในสมการ 3.37 และ 3.38 ยังทำให้เกิด Dimensionless Groups อีก 2 กลุ่มดังนี้

เมื่อ $x = L$ และ $\tau = P$ จะได้

$$\Lambda = \frac{\bar{h}A}{\dot{m}_f c_f} = \text{“ Reduced Length “} \dots\dots\dots(3.43)$$

$$\Pi = \frac{\bar{h}A}{M_m c_m} \left(P - \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_f} \right) = \text{“ Reduced Period “} \dots\dots(3.44)$$

จากสมการเชิงอนุพันธ์ 3.41 และ 3.42 เมื่ออินทิเกรตแล้วใช้การประมาณค่าอินทิกรัลด้วยพื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมูก็จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของโครงอิฐทนไฟกับก๊าซเสียจากการเผาไหม้หรืออากาศที่ช่วยในการเผาไหม้ที่เวลาใดๆซึ่งสามารถนำไปพัฒนาเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้

3.9.2 เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions)

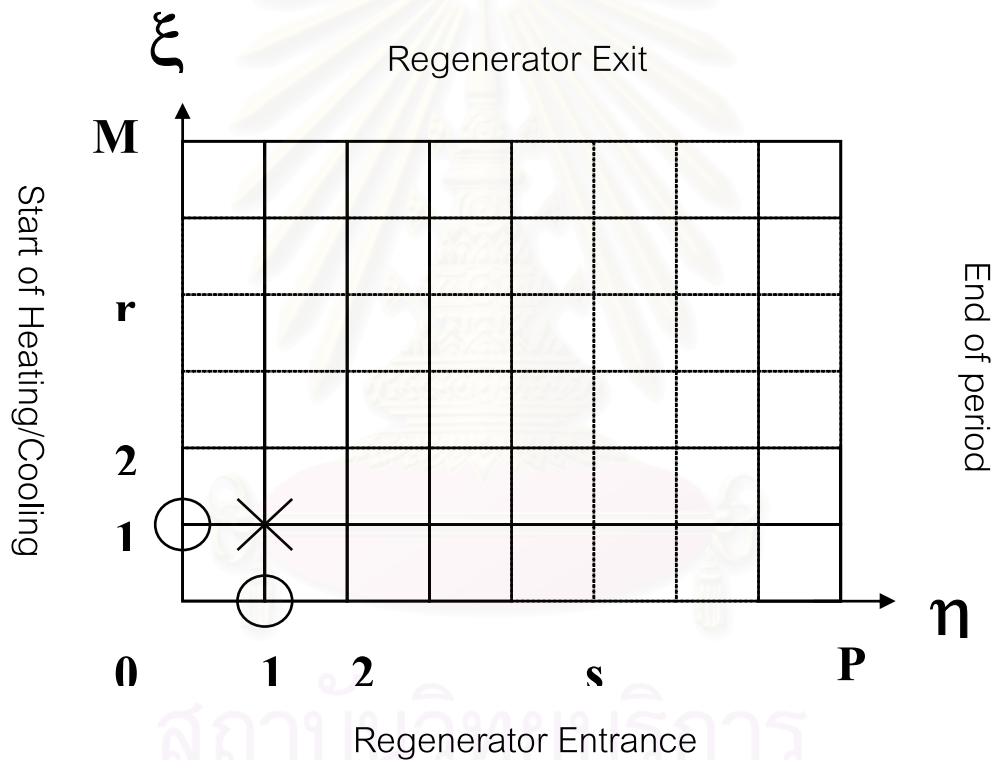
จากสมการเชิงอนุพันธ์ทั้ง 2 สมการดังกล่าว มีเงื่อนไขขอบเขต 2 เงื่อนไขคือ

1. อุณหภูมิของอากาศและก๊าซเสียที่ไหลเข้า Regenerator คงที่ทั้ง 2 Period (Heating / Cooling)
2. อุณหภูมิของโครงอิฐทนไฟที่ตำแหน่งเดียวกันเมื่อสิ้นสุด Period ใดๆ (Heating/Cooling Period) จะเท่ากับเมื่อเริ่มต้น Period ถัดไป

3.9.3 ระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite Difference Method)

ในการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของ fluid “ $T_f(r, s)$ “ และโครงอิฐทนไฟ “ $T_m(r, s)$ “ ใน Regenerator 1 ช่องการไหลที่ตำแหน่งและเวลาใดๆ เนื่องจากมีจำนวนจุดต่อที่

ต้องพิจารณาเป็นจำนวนมาก เพื่อความสะดวกจึงแบ่งจุดต่อของโครงอิฐทนไฟใน Regenerator ออกเป็น 2 แกนเพื่อแสดงอุณหภูมิที่จุดต่อนั้นๆตามความละเอียดที่ต้องการ คือ แกน Nondimensional time (η) เป็นแกนของเวลาในการสะสมหรือคายความร้อนใน 1 Period จาก เริ่มต้น Period ไปจนถึงสิ้นสุด Period (0 ถึง P)แบ่งเป็นช่วงๆละ $\Delta\eta$ ($=\frac{\Pi}{P}$) และแกน Nondimensional axial distance (ξ) เป็นแกนของตำแหน่งใดๆใน 1 ช่องการไหลของโครงอิฐทนไฟใน Regenerator จากทางเข้าของช่องการไหลไปยังทางออกของช่องการไหล (0 ถึง M) แบ่งเป็นช่วงๆละ $\Delta\xi$ ($=\frac{\Lambda}{M}$) โดยทิศทางของแกนระยะทางนี้จะอยู่ในทิศเดียวกับการไหลของ fluid ใน Period นั้นๆ (Frank W. Schmidt and A. John Willmott, 1981)



รูปที่ 18 Finite difference mesh for the numerical solution of the regenerator equation
 Fluid

เมื่อพิจารณาจาก fluid ที่ไหลผ่านช่องการไหลจะได้รับความสัมพันธ์ดังนี้

$$T_f(r+1, s+1) = T_f(r, s+1) + \int_r^{r+1} \frac{\partial T_f}{\partial \xi} d\xi \dots\dots\dots(3.45)$$

ใช้วิธีหาค่า Integral ด้วย Trapezoidal rule

$$T_f(r+1, s+1) = T_f(r, s+1) + \frac{\Delta\xi}{2} \left(\frac{\partial T_f}{\partial \xi}_{r+1} + \frac{\partial T_f}{\partial \xi}_r \right)$$

แทนค่าด้วยสมการที่ 3.41

$$T_f(r+1, s+1) = A_1 T_f(r, s+1) + A_2 [T_m(r+1, s+1) + T_m(r, s+1)] \dots\dots\dots(3.46)$$

โดยที่ $A_1 = \frac{2 - \Delta\xi}{2 + \Delta\xi}$ และ $A_2 = \frac{\Delta\xi}{2 + \Delta\xi}$

ที่เวลาใดๆ s+1 ถ้าทราบ Solid Temperature และ Inlet Gas Temperature จะสามารถหา Gas Temperature ที่ตำแหน่งใดๆลงไปตามความยาวของโครงอิฐทนไฟได้

Solid

เมื่อพิจารณาจาก solid ที่ไหลผ่านช่องการไหลจะได้รับความสัมพันธ์ดังนี้

$$T_m(r+1, s+1) = T_m(r+1, s) + \int_s^{s+1} \frac{\partial T_m}{\partial \eta} d\eta \dots\dots\dots(3.47)$$

ใช้วิธีหาค่า Integral ด้วย Trapezoidal rule

$$T_m(r+1, s+1) = T_m(r+1, s) + \frac{\Delta\eta}{2} \left(\frac{\partial T_m}{\partial \eta}_{s+1} + \frac{\partial T_m}{\partial \eta}_s \right)$$

แทนค่าด้วยสมการที่ 3.42

$$T_m(r+1, s+1) = K_1 T_m(r+1, s) + K_2 T_f(r+1, s) + K_3 T_m(r, s+1) + K_4 T_f(r, s+1) \dots\dots\dots(3.48)$$

โดยที่ $K_1 = \frac{B_1}{X}$ $K_2 = \frac{B_2}{X}$ $K_3 = \frac{A_2 B_2}{X}$ $K_4 = \frac{A_1 B_2}{X}$

$$\text{และ} \quad B_1 = \frac{2 - \Delta\eta}{2 + \Delta\eta} \quad B_2 = \frac{\Delta\eta}{2 + \Delta\eta} \quad X = 1 - A_2 B_2$$

ที่ขณะใดๆ $(r+1, s+1)$ ถ้าทราบอุณหภูมิของโครงอิฐทนไฟและของไหลที่ $(r, s+1)$ และ $(r+1, s)$ วงกลมแสดงในรูปที่ 18 จะหาอุณหภูมิของโครงอิฐทนไฟที่ $(r+1, s+1)$ จากบาทแสดงในรูปที่ 18 ได้

จากความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของโครงอิฐทนไฟ กับ fluid ในสมการ ** จะหาอุณหภูมิของโครงอิฐทนไฟ ณ ตำแหน่งทางเข้าของช่องการไหล ที่เวลาใดๆได้ดังนี้

$$T_m(0, s+1) = B_1 T_m(0, s) + B_2 [T_f(0, s) + T_f(0, s+1)] \quad \dots\dots\dots(3.49)$$

โดยที่ Fluid Temperature ขาเข้า $T_f(0, s)$ มีค่า 1 (Heating Period) , 0 (Cooling Period)

3.9.4 กระบวนการอินทิเกรต (Integration Procedure)

ในการเริ่มต้นการอินทิเกรต จะต้องมีเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial Condition) ซึ่งได้มาจากเงื่อนไขขอบเขตว่า

1. ทราบค่า $T_f(0, s)$ ซึ่งมีค่าคงที่สำหรับทุกๆเวลา s ($s = 0, 1, 2, \dots, P$) ใน Period ใดๆ
2. ณ เวลาเริ่มต้น Period แรก ทราบค่า $T_m(r, 0)$ ในทุกๆตำแหน่ง r ($r = 0, 1, 2, \dots, M$) และ เมื่อเริ่ม Period ถัดไป ค่า $T(r, 0)$ หาได้จากเงื่อนไขขอบเขต $T'_m(x, 0) = T_m(L - x, P)$; $0 \leq x \leq L$ (หมายถึง Period ถัดไป)

ดังนั้นที่เวลาเริ่มต้นของ Period แรก เมื่อทราบการกระจายอุณหภูมิของโครงอิฐทนไฟที่ตำแหน่งต่างๆ $T_m(r, 0)$; $r = 0, 1, 2, \dots, M$ ($M = \frac{\Lambda}{\Delta\xi}$) และ อุณหภูมิของ fluid ที่ตำแหน่งทางเข้าช่องการไหล $T_f(0, 0)$ แล้วนำมาใส่ในสมการ 3.46 ตามวิธีที่อธิบายดังกล่าว ก็จะได้การกระจายอุณหภูมิของ fluid ครบทุกตำแหน่งที่เหลือ $T_f(r, 0)$; $r = 1, 2, \dots, M$ ซึ่งนำไปใช้หาการกระจายอุณหภูมิของโครงอิฐทนไฟที่เวลาถัดไป $T_m(r, 1)$; $r = 0, 1, 2, \dots, M$ จากสมการ 3.48 และสามารถเริ่มต้นกระบวนการอินทิเกรตตามช่วงเวลาข้างต้นเป็นรอบๆจนจบ Period ได้ตั้งขั้นตอนต่อไปนี้

1. หาอุณหภูมิของโครงอิฐทนไฟ ณ ตำแหน่งทางเข้าช่องการไหลที่เวลาใดๆได้จาก

$$\text{Heating Period : } T_m(0, s+1) = 2B_2 + B_1 T_m(0, s) \quad \dots\dots\dots(3.50)$$

Cooling Period : $T_m(0, s + 1) = B_1 T_m(0, s) \dots \dots \dots (3.51)$

2. หาอุณหภูมิของ fluid ณ ตำแหน่งใดๆจากการกระจายอุณหภูมิของโครงอิฐทนไฟที่ตำแหน่งต่างๆ เมื่อเริ่มต้น Period จาก

$$T_f(r + 1, s) = A_1 T_f(r, s) + A_2 [T_m(r, s) + T_m(r + 1, s)] \dots \dots \dots (3.52)$$

3. จากนั้นหาอุณหภูมิของโครงอิฐทนไฟ ณ ตำแหน่งใดๆที่เวลาถัดไปได้จาก

$$T_m(r + 1, s + 1) = K_1 T_m(r + 1, s) + K_2 T_f(r + 1, s) + K_3 T_m(r, s + 1) + K_4 T_f(r, s + 1) \dots (3.53)$$

4. หาอุณหภูมิของ fluid และ โครงอิฐทนไฟ ที่ตำแหน่งและเวลาใดๆที่เหลือจากการทำตามข้อ 2 และ 3 เป็นรอบๆจนครบทุกตำแหน่งและเวลาจนจบ Period

5. เมื่อเริ่มต้น Period ถัดไปการกระจายอุณหภูมิของโครงอิฐทนไฟที่ตำแหน่งต่างๆหาได้จากเงื่อนไขขอบเขต $T'_m(x, 0) = T_m(L - x, P)$; $0 \leq x \leq L$ (หมายถึง Period ถัดไป) แล้วจึงดำเนินการอินทิเกรตตามวิธีข้างต้น จนจบ Period จากนั้นจึงเริ่มต้น Period ถัดไปอีก ทำเช่นนี้เป็นวัฏจักรจนกว่า Regenerator จะเข้าสู่ Cyclic Equilibrium

3.9.5 Cyclic Equilibrium

วัฏจักรการทำงาน 1 รอบของ Regenerator ประกอบด้วย Period หนึ่ง (Heating / Cooling) ตามด้วยอีก Period หนึ่ง (Cooling / Heating) ในแต่ละ Period จะมีค่า Reduced Length (Λ) , Reduced Period (Π) และ อุณหภูมิ fluid ขาเข้าที่คงที่ เป็นของตัวเอง หลังจาก Regenerator ทำงานเป็นวัฏจักรไปเป็นเวลาหนึ่ง ผลลัพธ์ที่ได้จากการบวนการอินทิเกรตสมการเชิงอนุพันธ์ข้างต้น จะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของโครงอิฐทนไฟที่เป็นเงื่อนไขเริ่มต้นอีกต่อไป ซึ่งเรียกสภาวะเช่นนี้ว่า “ Cyclic Equilibrium “ นั่นคือผลลัพธ์ดังกล่าวจะเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง ไม่ว่าจะทำงานต่อไปเป็นเวลานานเท่าใด การเข้าสู่ “ Cyclic Equilibrium “ หรือไม่ จะพิจารณาจากการคำนวณ Pseudo-Thermal Ratio เมื่อสิ้นสุด Cooling Period ดังนี้

$$\Phi(n) = \frac{t''_{fo} - t'_f}{t'_f - t''_{fi}} \dots \dots \dots (3.54)$$

เมื่อ $\Phi(n) - \Phi(n-1)$ หรืออีกแง่หนึ่งคือผลต่างอุณหภูมิ fluid ขาออกของ Cooling Period น้อยกว่าค่าที่ยอมรับได้ วัฏจักรที่ n จะถือว่าเข้าสู่ Cyclic Equilibrium และจะสามารถคำนวณค่า Thermal Ratio η_{REG} ได้ทั้ง 2 Period จาก (A. J. Willmott, 1964)

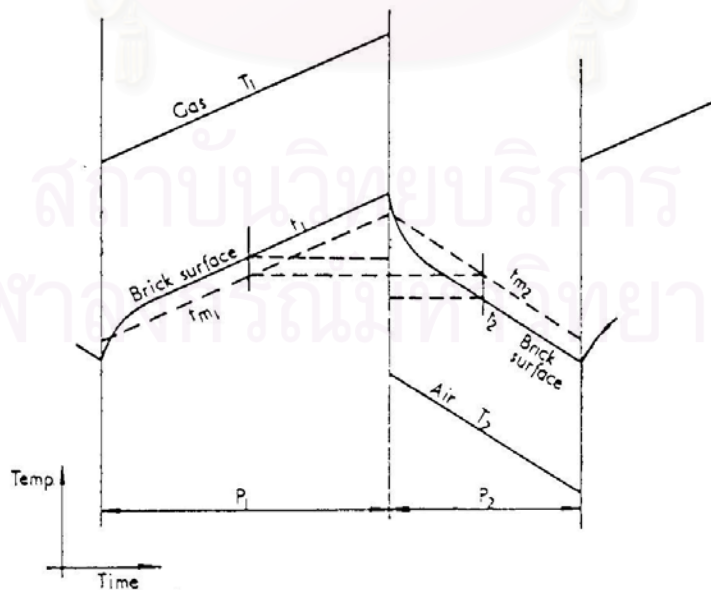
$$\eta'_{REG} = \frac{t'_{fi} - t'_{fo}}{t'_{fi} - t_{fi}} = 1 - T'_{fo} \text{ สำหรับ Heating Period.....(3.55)}$$

$$\eta''_{REG} = \frac{t''_{fo} - t''_{fi}}{t_{fi} - t''_{fi}} = T''_{fo} \text{ สำหรับ Cooling Period.....(3.56)}$$

โดยค่า Thermal Ratio เหล่านี้จะเป็นตัววัดว่า Regenerator ทำงานมีประสิทธิภาพเช่นไร

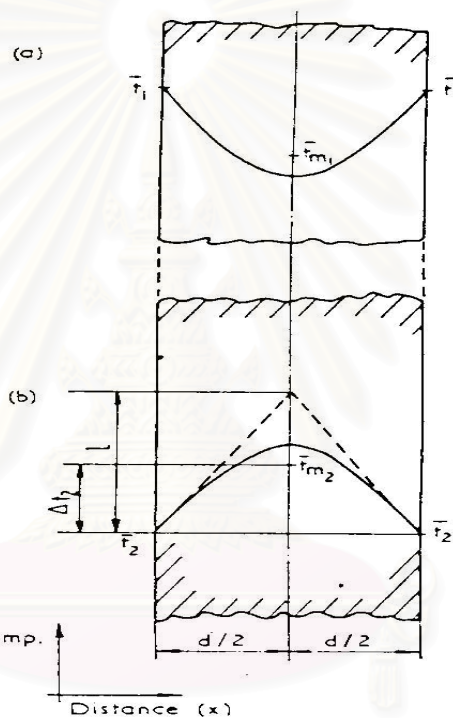
3.10 Modified Heat transfer coefficient

ใน Regenerator ที่ทำมาจากโลหะ ณ ตำแหน่ง , เวลา หรือ Period ใดๆ สามารถพิจารณาให้เป็น Uniform Temperature ภายในเนื้อโลหะได้ ในกรณีนี้ผลจากความต้านทานการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลกับโลหะจะเกิดขึ้นที่พื้นผิวของโลหะ จึงพิจารณาการถ่ายเทความร้อนเฉพาะการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนเท่านั้น โดยอุณหภูมิภายในโลหะและที่ผิวโลหะจะเป็นค่าเดียวกัน แต่สำหรับ Regenerator แบบโครงอิฐทนไฟที่มีส่วนของเนื้ออิฐในการสะสมความร้อนค่อนข้างหนา และมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำ ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนทั้งภายในและที่ผิวของอิฐทนไฟจะมีความสำคัญพอๆกัน J. Schofield , P. A. Young และ P. Butterfield (1961) ได้กล่าวถึงการใช้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสำหรับกรณีนี้ว่า



รูปที่ 19 แสดงอุณหภูมิของอิฐทนไฟและของไหลที่หน้าตัดใดๆของ Regenerator กับ เวลา

จากรูปที่ 19 อุณหภูมิของของไหลกับอิฐทนไฟจะเปลี่ยนไปตามตำแหน่งและเวลา ในช่วง Heating Period (P₁) อุณหภูมิของ gas , T₁ จะสูงกว่าอุณหภูมิของอิฐทนไฟ , t₁ รวมถึงอุณหภูมิเฉลี่ยตามเวลาของอิฐทนไฟ , t_m ด้วย ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของ gas กับเวลา เป็นแบบ Linear ยกเว้นช่วงแรกของ Period แต่ก็จะกลับเข้าสู่ความเป็น linear อีกครั้งอย่างรวดเร็ว ใน Cooling Period (P₂) ก็เช่นเดียวกัน การกระจายของอุณหภูมิอิฐทนไฟในช่วง P₁ สามารถแสดงได้ในรูปที่ 20 (a) ส่วนช่วง P₂ แสดงในรูปที่ 20 (b) ซึ่งรูปจะกลับกัน โดยในช่วงต่อระหว่าง Period รูปแบบการกระจายจะมีการเปลี่ยนเว้าเพื่อเข้าสู่รูปแบบหนึ่ง จึงสามารถสมมติได้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอิฐทนไฟกับเวลาเป็นแบบ Linear



a Heating, on gas
b Cooling, on blast

รูปที่ 20 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในอิฐทนไฟที่เวลาใดๆ

เมื่อพิจารณาแผ่นระนาบใดๆที่ไม่มีแหล่งกำเนิดความร้อนภายใน จะได้ว่าสมการ Heat Conduction Equation อยู่ในรูป

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \dots\dots\dots(3.57)$$

โดย τ คือ เวลา (s)

x คือ ระยะพิกัด x ตามรูปที่ 20 (m)

α_m คือ Thermal Diffusivity ของอิฐทนไฟ มีค่าเท่ากับ $\frac{k}{c_p \rho}$ (m²/s) ; $k =$

Thermal Conductivity (W/m K) , $c_p =$ Specific Heat at Constant Pressure (J/kg K) และ $\rho =$ Density (kg/m³)

t คือ อุณหภูมิอิฐทนไฟเฉลี่ยตามเวลา (°C)

ถ้าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอิฐทนไฟกับเวลาเป็นแบบ Linear จะได้ว่า $\frac{\partial t}{\partial \tau} =$

ค่าคงที่ ดังนั้นทำให้ $\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} =$ ค่าคงที่ด้วย นั้นหมายความว่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอิฐทนไฟกับพิคัด x จะเป็นแบบพาราโบลา

ดังนั้นจากการใช้อุณหภูมิของโครงอิฐทนไฟเป็นค่าเฉลี่ยของในแต่ละ Cross Section ที่เวลาใดๆ , \bar{t}_m เมื่อต้องการหาอัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างโครงอิฐทนไฟกับของไหล ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจึงต้องมีการปรับปรุงให้สามารถนำมาใช้กับอุณหภูมิเฉลี่ยของโครงอิฐทนไฟได้ดังสมการต่อไปนี้ (J. Schofield , P. A. Young and P. Butterfield,1961)

$$\frac{1}{h} = \frac{1}{h_s} + \phi_1 \frac{w}{3k} \dots\dots\dots(3.58)$$

โดย \bar{h} คือ Modified Heat Transfer Coefficient (W/m² K)

h_s คือ Surface Heat Transfer Coefficient (W/m² K) หาได้จากผลรวมระหว่างสัมประสิทธิ์การพาความร้อน, h_{conv} กับ Equivalent Radiative Heat Transfer Coefficient , h_{rad}

w คือ Semi -Thickness มีค่าเท่ากับ $(b^2 - a^2) / 4a$ สำหรับโครงอิฐทนไฟรูปปล้องไฟสี่เหลี่ยม (m) (J. Schofield , P. A. Young และ P. Butterfield,1963)

k คือ Conductivity (W/m K)

ϕ_1 คือ ค่าเฉลี่ยผลของการเบี่ยงเบนการกระจายอุณหภูมิภายในอิฐทนไฟไปจากรูป Parabola ระหว่าง Reversal Effect เพื่อให้ใช้ค่า Modified Heat Transfer Coefficient นี้ได้ตลอดช่วงของการพิจารณาหาได้ดังนี้ (Frank W. Schmidt and A. John Willmott.,1981)

$$\text{เมื่อ } \frac{w^2}{\alpha_m} \left(\frac{1}{P_1} + \frac{1}{P_2} \right) \leq 5$$

$$\phi = 1 - \frac{w^2}{15\alpha_m} \left(\frac{1}{P_1} + \frac{1}{P_2} \right) \dots\dots\dots(3.59)$$

$$\text{เมื่อ } \frac{w^2}{\alpha_m} \left(\frac{1}{P_1} + \frac{1}{P_2} \right) > 5$$

$$\phi = \frac{2.142}{\sqrt{0.3 + \frac{4w^2 \left(\frac{1}{P_1} + \frac{1}{P_2} \right)}{2\alpha_m}}} \dots\dots\dots(3.60)$$

พจน์ $\phi_1 \frac{\Delta}{3k}$ คือ ค่าความต้านทานเฉลี่ยของการถ่ายเทความร้อนภายในอิฐทนไฟ โดยที่ค่า $\frac{\Delta}{3k}$ ได้จากการประมาณการกระจายอุณหภูมิภายในอิฐทนไฟที่เป็นรูป Parabola มาเป็นค่าเฉลี่ย \bar{t}_{m2} จากรูปที่ 14

ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทจากภายในอิฐสู่ผนัง = ปริมาณความร้อนจาก Convection ... (3.61)

$$\frac{Q}{P} = -kA_s \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)_{x=0} \Rightarrow \frac{Q}{A_s} \left(\frac{d}{2kP} \right) = \frac{d}{2} \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)_{x=0}$$

เนื่องจากความสูงของ Parabola คือ $\frac{l}{2}$ และระยะ Δt_2 (เท่ากับความสูงของ \bar{t}_{m2}) มีค่าเป็น 2

ใน 3 ของความสูง Parabola จะได้ $\Delta t_2 = \bar{t}_{m2} - \bar{t}_2 = \frac{2}{3} \left(\frac{l}{2} \right) = \frac{l}{3} \Rightarrow l = 3(\bar{t}_{m2} - \bar{t}_2)$

$$\frac{\partial t}{\partial x}_{x=0} = \frac{l}{\left(\frac{d}{2} \right)} = \frac{3(\bar{t}_{m2} - \bar{t}_2)}{\left(\frac{d}{2} \right)}$$

แทนค่ากลับจะได้

$$(\bar{t}_{m2} - \bar{t}_2) = \frac{Q}{A_s} \left(\frac{d}{6kP} \right)$$

ในที่นี้ A_s คือพื้นที่การถ่ายเทความร้อนจากรูปที่ 21 จะมี 2 ด้าน เมื่อนำมาใช้กับ Control Volume ในรูปที่ 17 A_s จะมีเพียง 1 ด้าน ดังนั้น

$$(\bar{t}_{m2} - \bar{t}_2) = \frac{Q}{A_s} \left(\frac{d}{3kP} \right)$$

จะได้ว่า $\left(\frac{d}{3k} \right)$ คือ Internal Thermal Resistant ($d = w =$ Semi-Thickness)

3.11 คุณสมบัติของก๊าซผสม (Thermal Properties of Mixed Gas)

ของไหลที่ไหลผ่าน Regenerator ไม่ว่าจะเป็น ก๊าซเสียในช่วง (Hot Period) หรือ อากาศในช่วง (Cold Period) มักปรากฏอยู่ในรูปของก๊าซหลายชนิดผสมกันอยู่ ซึ่งก๊าซแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติทางความร้อนแตกต่างกันไป ถ้าก๊าซชนิดใดมีปริมาณมากคุณสมบัติของก๊าซชนิดดังกล่าวก็จะเด่นมากกว่าก๊าซที่มีปริมาณน้อยกว่า มีดังนั้นในการพิจารณาคุณสมบัติทางความร้อนของของไหล จึงต้องพิจารณาปริมาณของก๊าซชนิดต่างๆที่อยู่ในของไหลด้วยดังนี้

ถ้าให้ของไหลประกอบไปด้วยก๊าซ 3 ชนิด ชนิดแรกมีปริมาณ x_1 kg/s ชนิดที่ 2 มีปริมาณ x_2 kg/s ชนิดที่ 3 มีปริมาณ x_3 kg/s เมื่อต้องการหาความหนาแน่นของของไหล , ρ_f จะหาได้ดังนี้

$$\rho_f = \left(\frac{x_1}{x_1 + x_2 + x_3} \right) \rho_1 + \left(\frac{x_2}{x_1 + x_2 + x_3} \right) \rho_2 + \left(\frac{x_3}{x_1 + x_2 + x_3} \right) \rho_3 \dots (3.62)$$

โดย ρ_f คือ ความหนาแน่นของของไหล (kg/m³)

ρ_1 คือ ความหนาแน่นของก๊าซชนิดแรก (kg/m³)

ρ_2 คือ ความหนาแน่นของก๊าซชนิดที่สอง (kg/m³)

ρ_3 คือ ความหนาแน่นของก๊าซชนิดที่สาม (kg/m³)

สำหรับคุณสมบัติอื่นๆก็สามารถหาได้เช่นเดียวกัน

3.12 พลังงานความร้อนนำกลับมาใช้ (Heat Recovery)

พลังงานความร้อนนำกลับมาใช้คือพลังงานความร้อนที่อากาศได้รับจากการไหลผ่านโครงอิฐทนไฟในช่วง (Cooling Period) เพื่อเป็นการอุ่นตัวเองให้มีอุณหภูมิสูงสำหรับเผาไหม้ต่อไปสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$Q = mc_p dt \dots \dots \dots (3.63)$$

โดย Q คือ ปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้ (kJ)

m คือ อัตราการไหลโดยมวลของอากาศ (kg/s)

c_p คือ Specific Heat at Constant Pressure (kJ/kg K)

dt คือ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการรับความร้อนจากอิฐทนไฟ (°C)

บทที่ 4

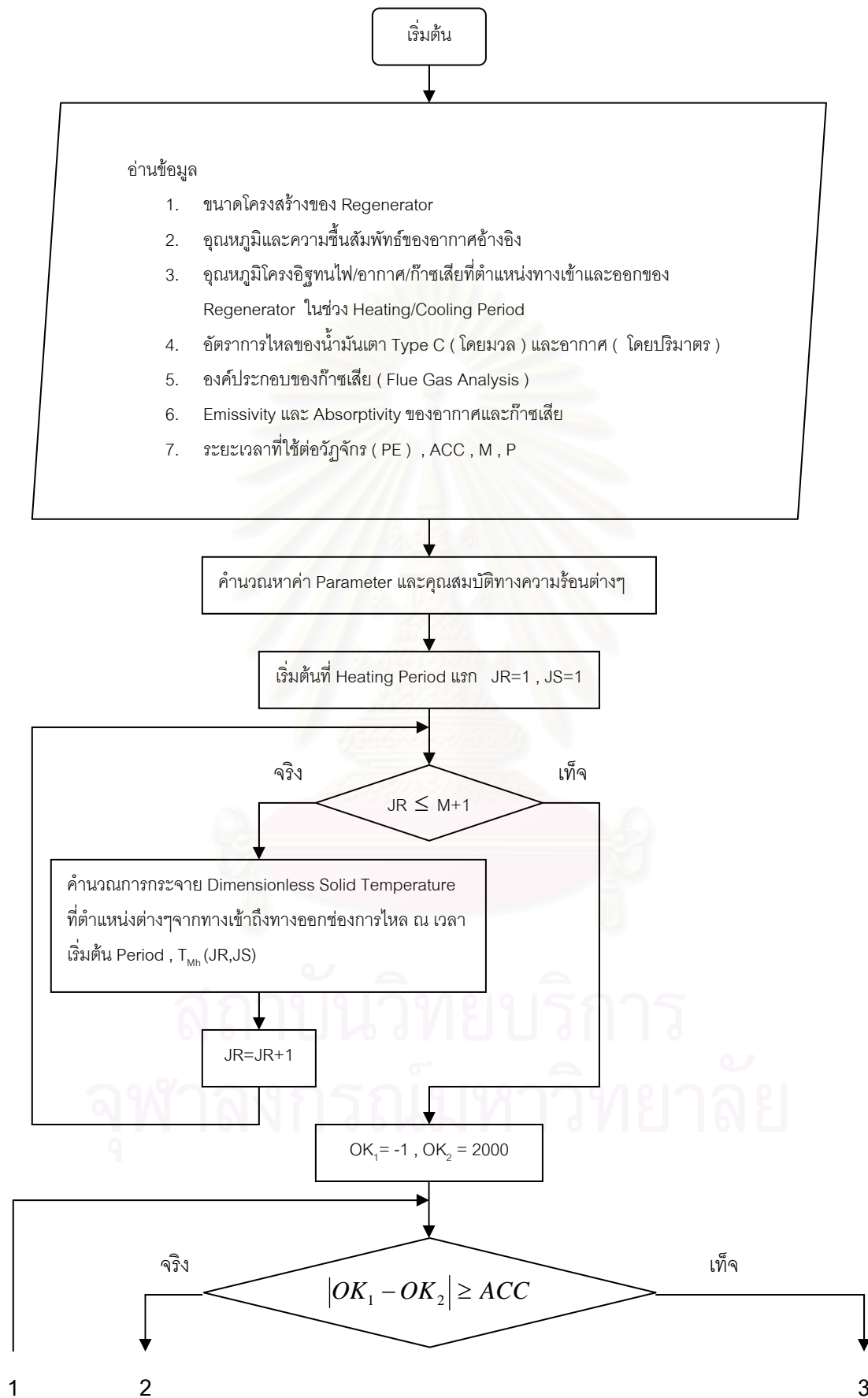
การดำเนินการวิจัย

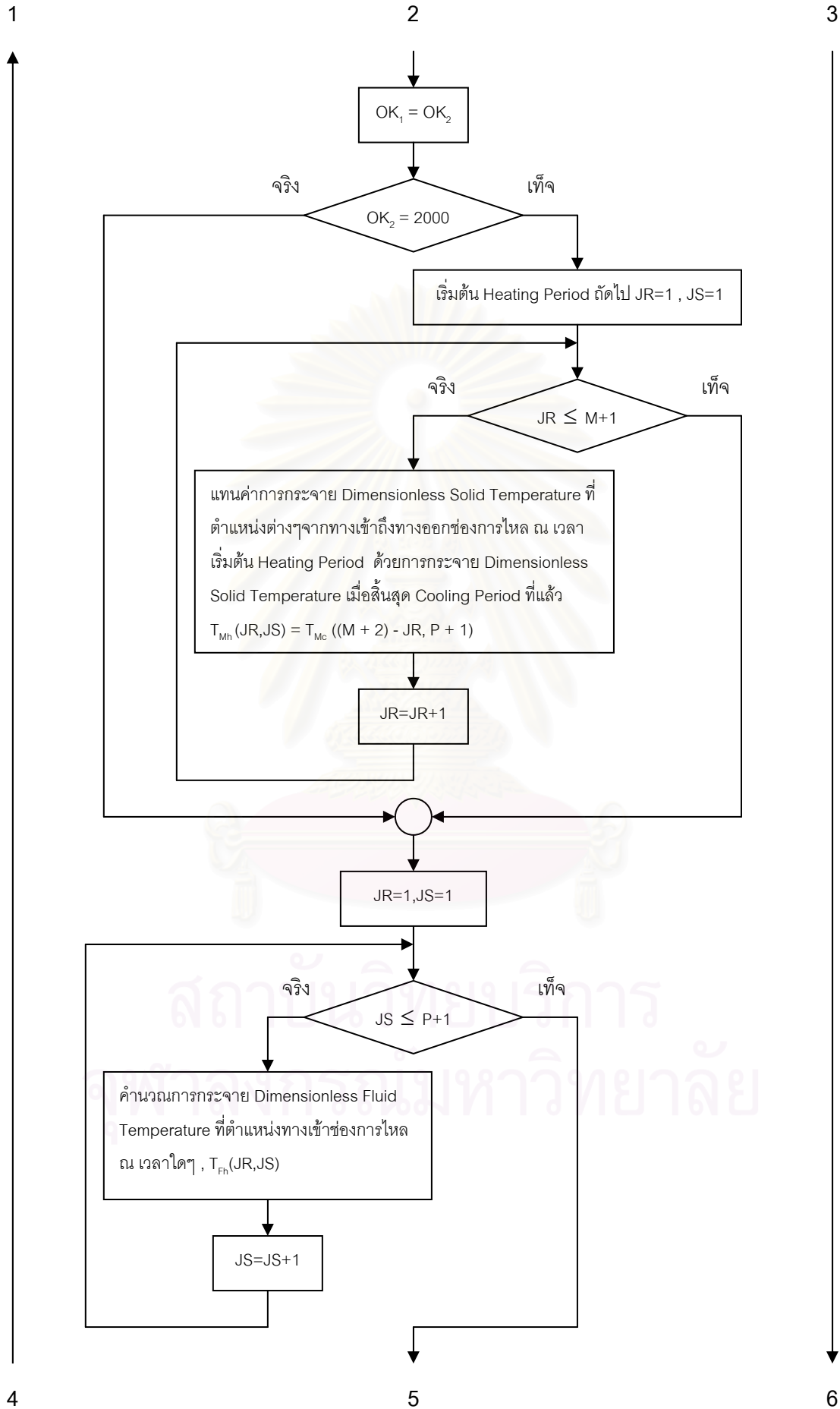
ในการดำเนินการวิจัยสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนคือ การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนใน Regenerator แบบโครงอิฐทนไฟรูปปล่องไฟสี่เหลี่ยม และการทดลองวัดการทำงานของ Regenerator จริงเพื่อหาข้อมูลต่างๆที่จำเป็นในการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ รวมทั้งเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

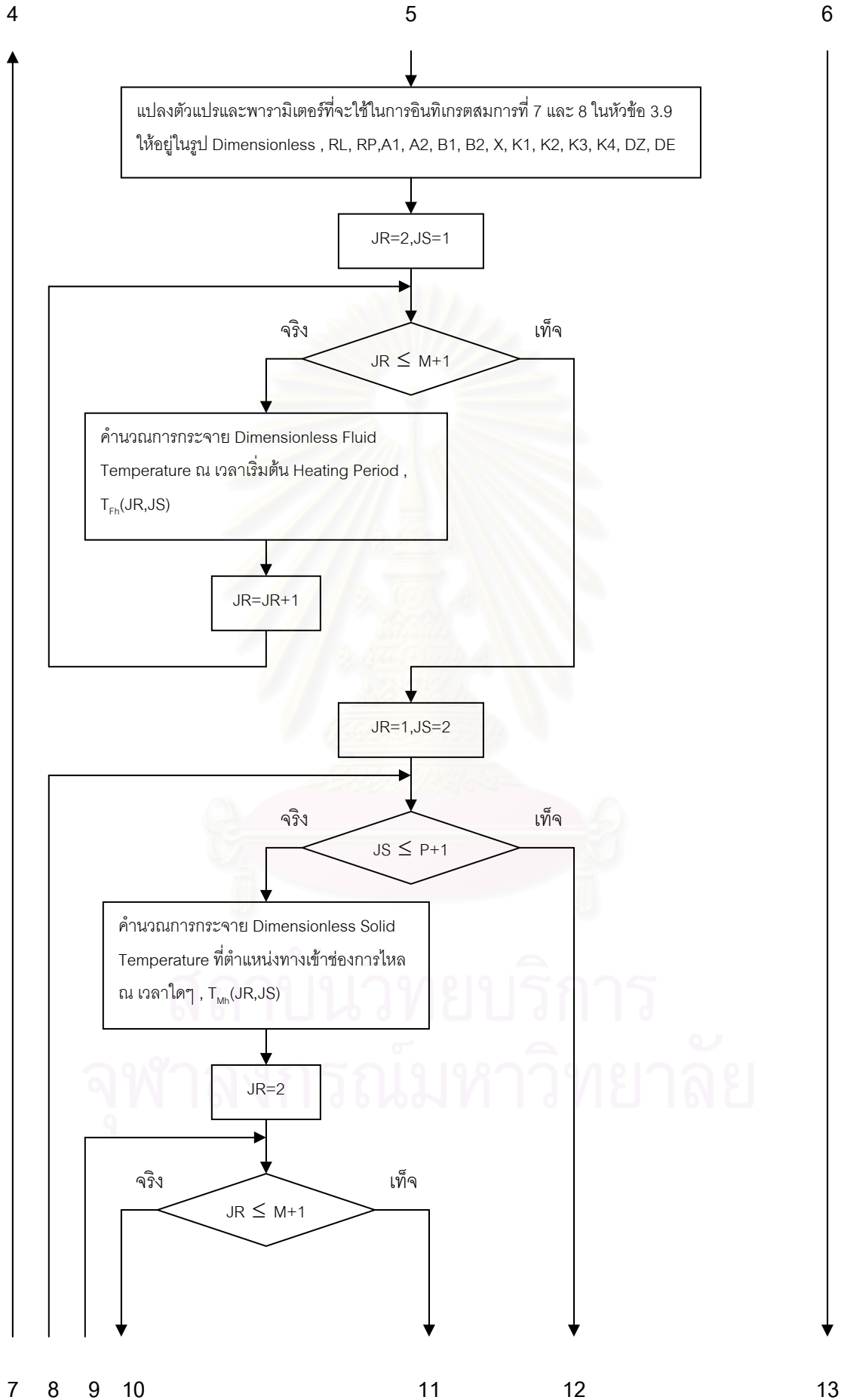
4.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนใน Regenerator

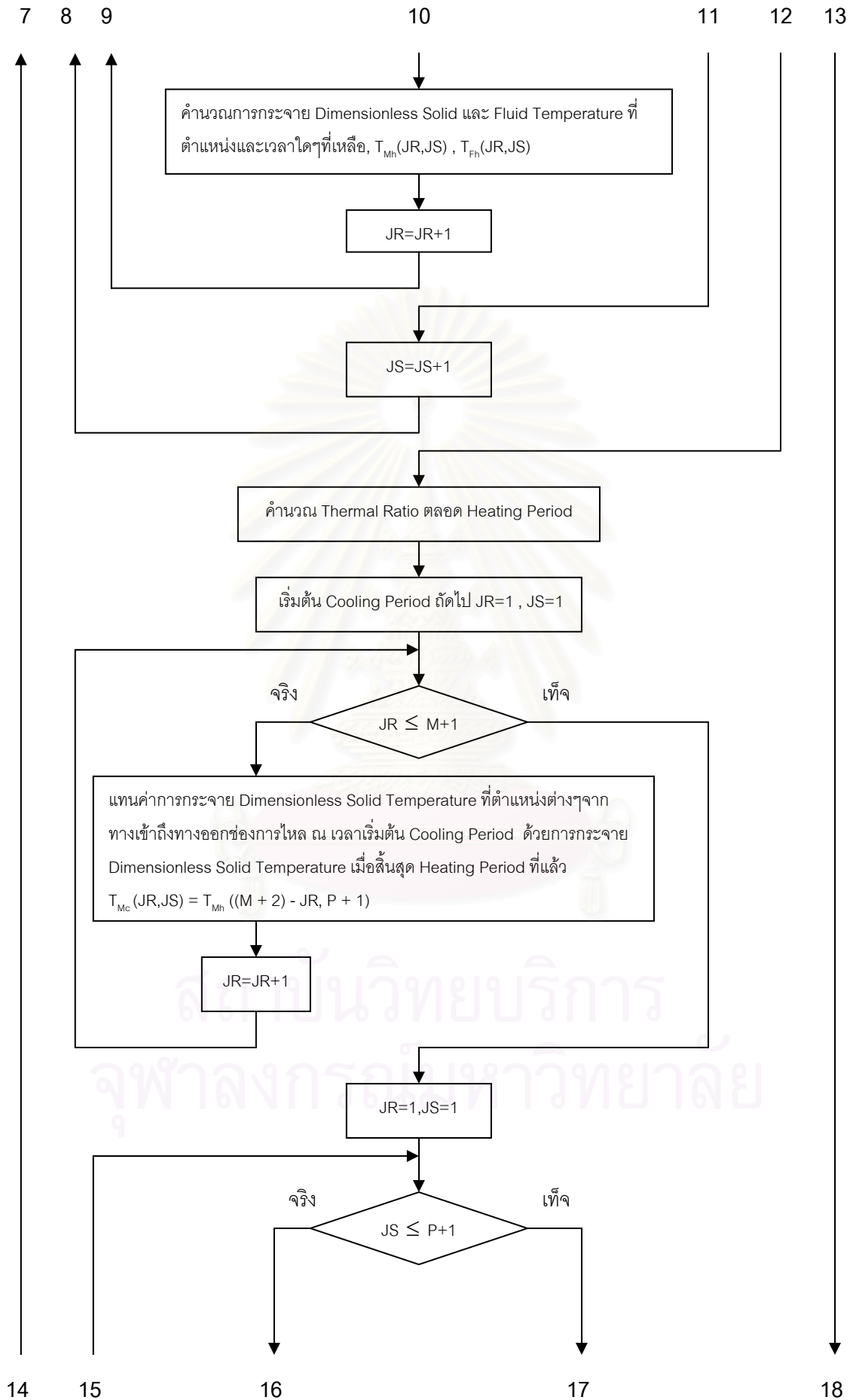
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ทำขึ้นเพื่อคำนวณหาการกระจายอุณหภูมิของโครงอิฐทนไฟกับของไหล ในที่นี้คือ อากาศ (Cooling Period) หรือ ก๊าซเสียจากการเผาไหม้ (Heating Period) ณ ตำแหน่ง และ เวลาใดๆ , ปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้ รวมถึง ประสิทธิภาพทางความร้อน เมื่อ Regenerator ทำงานจนเข้าสู่สภาวะ Cyclic Equilibrium ในวัฏจักรการทำงานที่มีเวลาจำกัดค่าหนึ่ง ผลที่ได้ดังกล่าวจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้จะนำมาวิเคราะห์ร่วมกับข้อมูลอื่นๆของ Regenerator ในการหาวัฏจักรการถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสมต่อไปได้

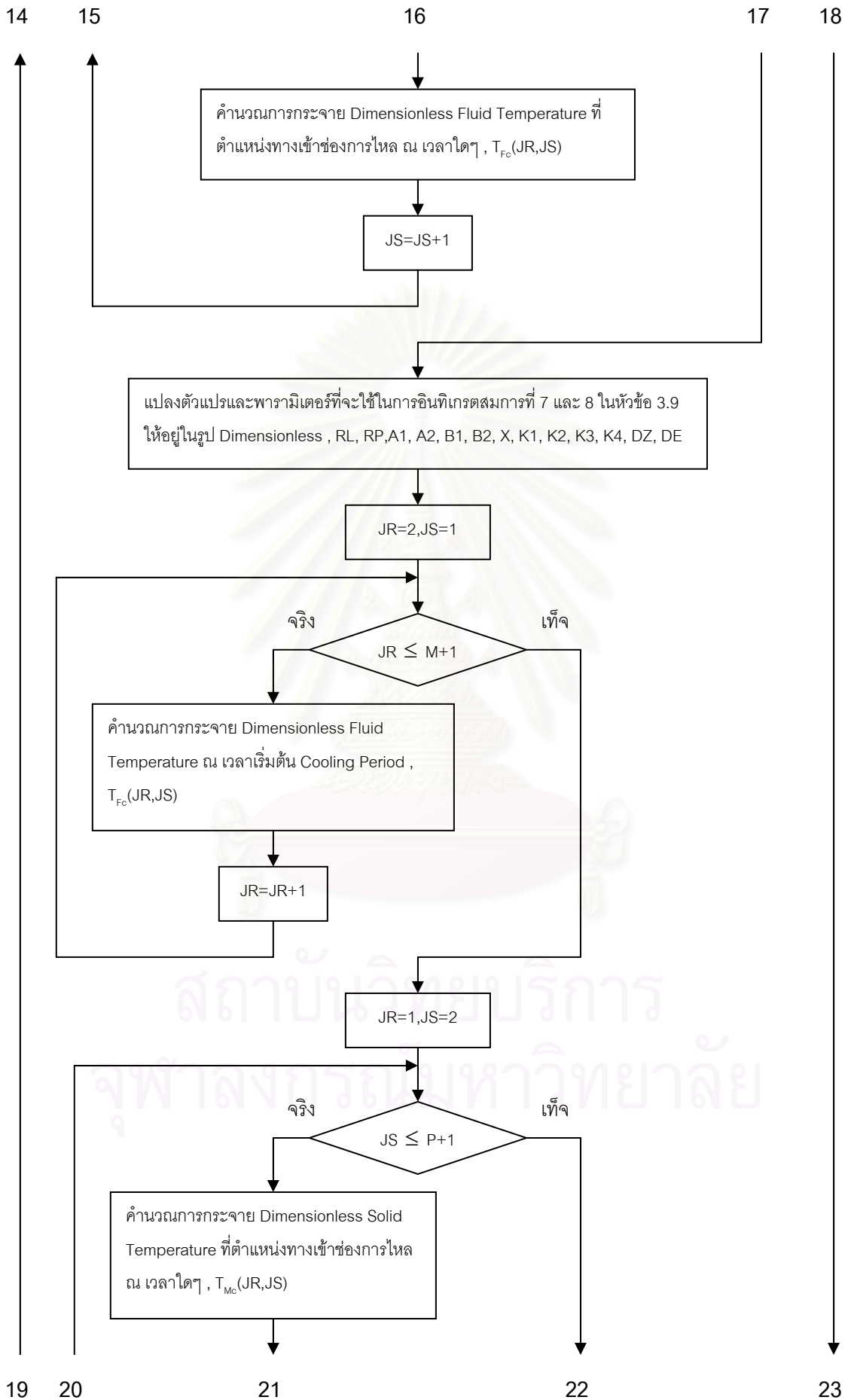
ในการคำนวณหาการกระจายอุณหภูมิใน Regenerator จะพิจารณาจากการถ่ายเทความร้อนร่วมกับทฤษฎีอื่นๆที่เกี่ยวข้อง อันประกอบไปด้วยสมการต่างๆ ซึ่งแสดงไว้ในบทที่ 3 โดยทฤษฎีต่างๆมีที่มาจากหนังสือ , ตำราภาษาอังกฤษ และ วารสารที่สั่งสำเนาจากต่างประเทศ เนื่องจากมีสมการและข้อมูลที่ต้องพิจารณามาก รวมถึงกระบวนการอินทิเกรตสมการเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย เพื่อความสะดวกในการใช้งาน และให้ได้ค่าที่ถูกต้องแม่นยำประหยัดเวลาในการคำนวณ จึงจัดทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งเขียนโดยใช้ภาษา Visual Basic และสามารถใช้งานร่วมกับโปรแกรมไมโครซอฟท์ Excel ที่มีอยู่ในไมโครคอมพิวเตอร์ทั่วไป โดยการอ่านข้อมูลและการแสดงผลจะกระทำผ่านทางโปรแกรม Excel ส่วนการคำนวณจะใช้โปรแกรม Visual Basic ซึ่งเป็นเครื่องมือที่อยู่ในโปรแกรม Excel เป็นตัวประมวลผล ดังสามารถแสดงกระบวนการทำงานได้ตาม Flow Chart ต่อไปนี้

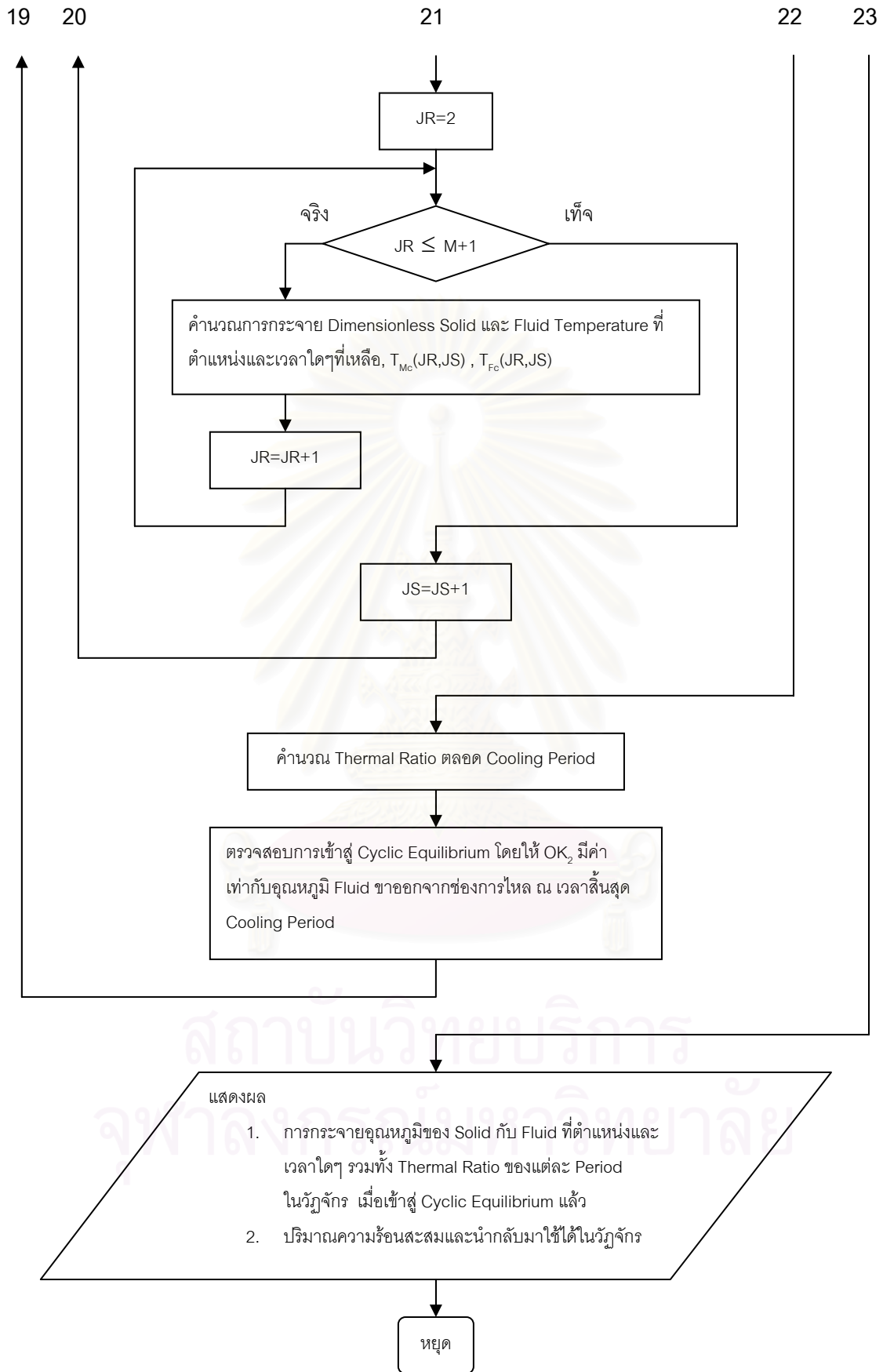








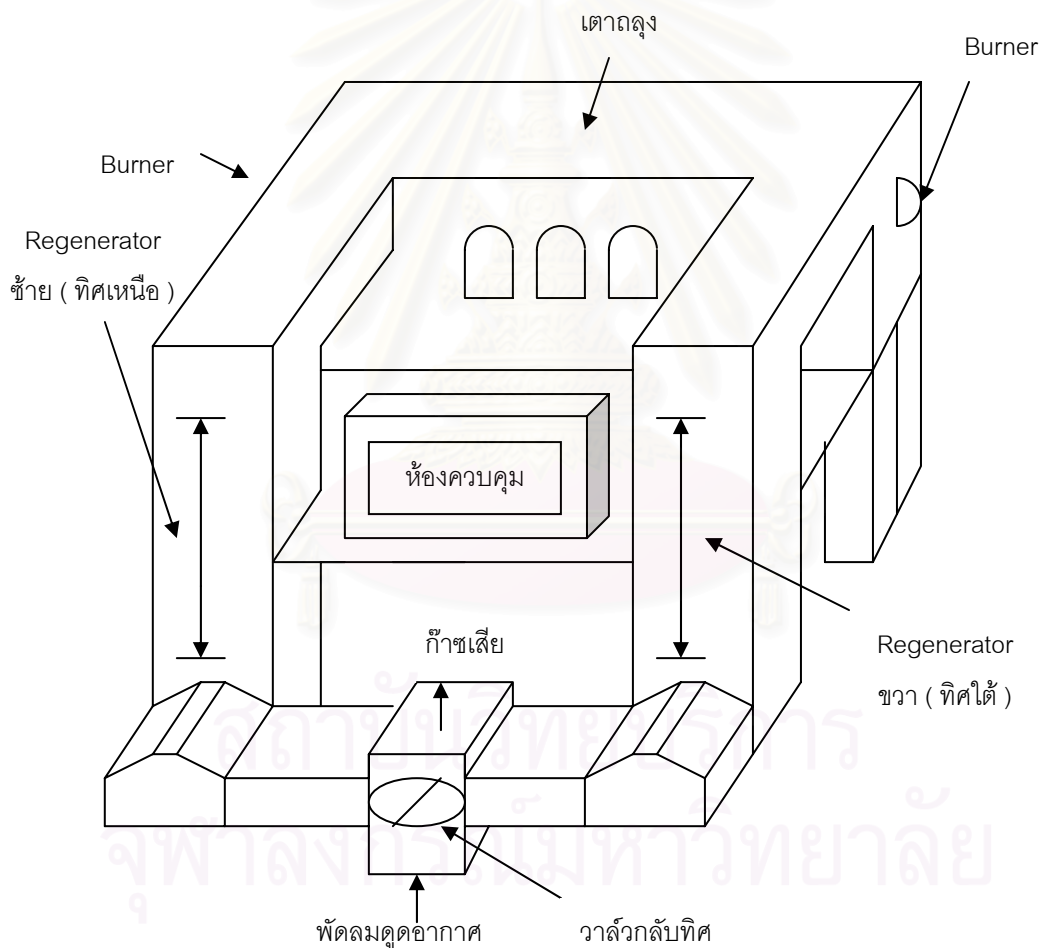




4.2 การทดลองวัดข้อมูลของ Regenerator

การทดลองวัดการทำงานของ Regenerator มีจุดประสงค์ในการหาข้อมูลต่างๆที่จำเป็นในการถ่ายเทความร้อนมาใส่ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดย Regenerator ที่ทำการตรวจวัดเป็น Regenerator แบบโครงอิฐทนไฟรูปปล่องไฟสี่เหลี่ยมในเตาถลุงดีบุก ของโรงงานถลุงดีบุก บริษัท ไทยแลนด์สเมลต์ติ้งแอนดรีไฟนิง จำกัด (ไทยซาร์โก้) ซึ่งตั้งอยู่ที่ ถนนศักดิ์เดช อำเภอเมือง ตู๊ ป.ณ.2 จังหวัด ภูเก็ต 83000 โทรศัพท์ (076)-391111-7 การทดลองแบ่งได้เป็นหัวข้อดังนี้

4.2.1 การศึกษาการทำงานของ Regenerator แบบโครงอิฐทนไฟรูปปล่องไฟสี่เหลี่ยม



รูปที่ 21 แสดงส่วนประกอบต่างๆของเตาถลุงดีบุก

Regenerator ในโรงงานถลุงดีบุกไทยซาร์โก้มีหลักการทำงานคือ พัดลมจะดูดอากาศจากภายนอกแล้วเป่าผ่านวาล์วกลับทิศทางด้านล่างซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนทิศทางการไหลของอากาศ

ให้ผ่านไปยัง Regenerator ด้านขวาที่ทำงานอยู่ในช่วง Cooling Period (ในขณะเดียวกัน ก๊าซเสียจาก Regenerator ด้านซ้ายที่ทำงานอยู่ในช่วง Heating Period ก็จะไม่ไหลผ่านวาล์วกลับทิศออกไปยังอุปกรณ์เก็บฝุ่นได้) อากาศเมื่อได้รับความร้อนจากโครงฮีททิงไฟรูปปล่องไฟสี่เหลี่ยมใน Regenerator จะไหลเข้าไปช่วยในการเผาไหม้ น้ำมันที่ฉีดออกมาจาก Burner ซึ่งน้ำมันจะถูกอุ่นให้มีอุณหภูมิสูงด้วย Heater ประกอบกับอุณหภูมิภายในเตาที่สูงมากจะทำให้ น้ำมันติดไฟได้ทันที เตาถลุงที่พิจารณานี้เป็นแบบเตานอน (Reverberatory Furnace) ดังแสดงในหัวข้อที่ 3.1 เมื่อน้ำมันสันดาปกับอากาศแล้วจะคายความร้อนให้กับแร่ดีบุกและตัวเตา ก๊าซเสียที่เกิดขึ้นจะไม่ไหลออกจากเตาแล้วผ่านไปยัง Regenerator ทางด้านซ้ายซึ่งทำงานอยู่ในช่วง Heating Period ความร้อนจากก๊าซเสียจะถ่ายเทให้กับโครงฮีททิงไฟรูปปล่องไฟสี่เหลี่ยมใน Regenerator จากนั้นจึงไหลออกไปยังวาล์วกลับทิศ วัฏจักรการทำงานดำเนินไปเป็นระยะเวลาหนึ่ง เมื่อสิ้นสุด Heating Period จึงหมุนวาล์วกลับทิศให้อากาศไหลเข้าไปในทิศสวนทางกับการไหลของก๊าซเสียเดิมและเป็นการเริ่มต้นการทำงานในช่วง Cooling Period ของ Regenerator ด้านซ้าย การควบคุมการทำงานจะทำโดยผู้ปฏิบัติการที่ประจำอยู่ในห้องควบคุม

4.2.2 ข้อมูลที่ต้องตรวจวัดและรวบรวม

ข้อมูลต่าง ๆ ที่ต้องตรวจวัดและรวบรวมเพื่อใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีดังนี้

1. อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอ้างอิง (สิ่งแวดล้อม)
2. อุณหภูมิอากาศและฮีททิงไฟ ณ ตำแหน่งทางเข้าช่องการไหลของโครงฮีททิงไฟในช่วง Cooling Period
3. อุณหภูมิอากาศและฮีททิงไฟ ณ ตำแหน่งทางออกช่องการไหลของโครงฮีททิงไฟในช่วง Cooling Period
4. อุณหภูมิก๊าซเสียและฮีททิงไฟ ณ ตำแหน่งทางเข้าช่องการไหลของโครงฮีททิงไฟในช่วง Heating Period
5. อุณหภูมิก๊าซเสียและฮีททิงไฟ ณ ตำแหน่งทางออกช่องการไหลของโครงฮีททิงไฟในช่วง Heating Period
6. เวลาที่ใช้ในแต่ละ Period (มีค่าเท่ากัน)
7. อัตราการไหลของอากาศโดยปริมาตร
8. อัตราการไหลโดยมวลและอุณหภูมิของน้ำมัน
9. Flue Gas Analysis (องค์ประกอบของก๊าซเสีย)

10. เครื่องมือวัดที่ใช้ในการเก็บข้อมูล

เครื่องมือดังต่อไปนี้ ข้อ 1-4 ได้จัดซื้อจาก บริษัทแสงชัยมิเตอร์ จำกัด 694/23-26 ถ. พหลโยธิน แขวงสามเสนใน เขตพญาไท กรุงเทพฯ 10400 โทร.616-8031 ข้อ 5-6 ได้จองที่ หน่วยวิจัยพลังงานจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ห้องพลังงาน ชั้น 4 ตึกฮันส์บันตลี ภาค เรืองกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โทร. 218-6642 ส่วนข้อ 7-8 ทางโรงงานถลุงดีบุก บริษัท ไทยแลนด์สเมลต์ติ้งแอนดรีไฟนิง จำกัด (ไทยซาร์โก้) ซึ่งตั้งอยู่ที่ ถนนศักดิ์เดช อำเภอเมือง ตู๊ ป.ณ.2 จังหวัด ภูเก็ต 83000 โทรศัพท์ (076)-391111-7 ได้มีการติดตั้งไว้เรียบร้อยแล้ว โดยได้รับเงินทุนอุดหนุนการวิจัยจาก กองทุนอนุรักษ์พลังงานทดแทน สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ 394/14 ถ. สามเสน เขตดุสิต กรุงเทพฯ 10300 โทร 612-1555

1. เทอร์โมคัปเปิล TYPE R ขนาด 15*800 mm PR 13 % รุ่น JB-35C หุ้มด้วยเซรามิกใช้วัดอุณหภูมิก๊าซเสียที่ไหลเข้าโครงอิฐทนไฟ (Heating Period) และอากาศที่ไหลออกจากโครงอิฐทนไฟ (Cooling Period) โดยวัดอุณหภูมิได้ถึง 1,600 °C

2. เทอร์โมคัปเปิล TYPE K ขนาด 15.9*1000 mm CA รุ่น JB-35 หุ้มด้วยสแตนเลสใช้วัดอุณหภูมิก๊าซเสียที่ไหลออกจากโครงอิฐทนไฟ (Heating Period) และอากาศที่ไหลเข้าโครงอิฐทนไฟ (Cooling Period) โดยวัดอุณหภูมิได้ถึง 700 °C

3. ไล้เทอร์โมคัปเปิล TYPE K ขนาด 3.2 mm หุ้มด้วยเซรามิกกระดุกงูใช้วัดอุณหภูมิทางเข้าโครงอิฐทนไฟเมื่อก๊าซเสียไหลผ่าน (Heating Period) และทางออกโครงอิฐทนไฟเมื่ออากาศไหลผ่าน (Cooling Period) โดยวัดอุณหภูมิได้ถึง 1,200 °C

4. ไล้เทอร์โมคัปเปิล TYPE K ขนาด 1.6 mm หุ้มด้วยเซรามิกกระดุกงูใช้วัดอุณหภูมิทางออกโครงอิฐทนไฟเมื่อก๊าซเสียไหลผ่าน (Heating Period) และทางเข้าโครงอิฐทนไฟเมื่ออากาศไหลผ่าน (Cooling Period) โดยวัดอุณหภูมิได้ถึง 700 °C

5. เครื่องอ่านและบันทึกข้อมูล (Hybrid Recorder) ยี่ห้อ YOKOGAWA HR1300 Model 3750 ใช้อ่านและบันทึกข้อมูลอุณหภูมิในข้อ 1-4 ตลอดทั้ง Heating และ Cooling Period

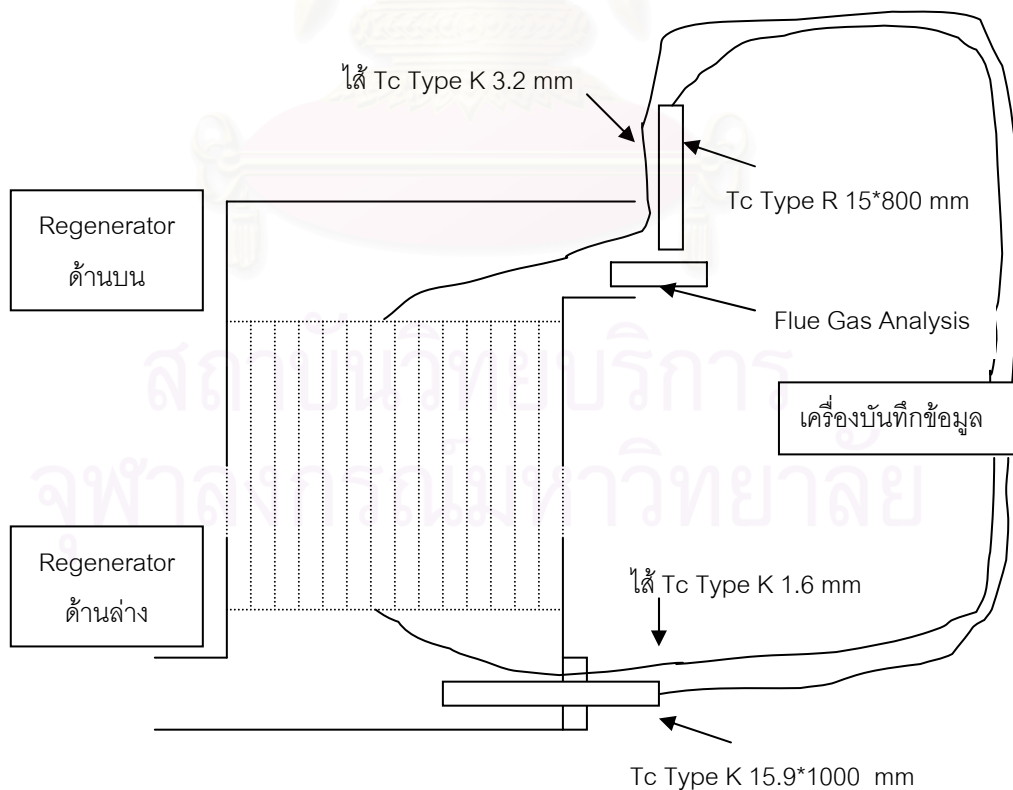
6. Flue Gas Analysis ยี่ห้อ Testo รุ่น 350 ประกอบไปด้วย Probe Flue gas + เทอร์โมคัปเปิลในตัว , Condensate trap และ The Analyser Unit สามารถวัดก๊าซเสียได้ในช่วงอุณหภูมิ ลบ40 ถึง + 1,200 °C และจำแนกองค์ประกอบก๊าซเสียได้ 6 ชนิดได้แก่ O₂ (ถึง 21% โดยปริมาตร) , CO₂ (จากการคำนวณปริมาณ O₂ ที่ลดลง) , CO (ถึง 10,000 ppm) , NO (ถึง 3,000 ppm) , NO₂ (ถึง 500 ppm) , SO₂ (ถึง 5,000 ppm) โดยใช้ Electrochemical Meas. Cell เป็นตัววัด แสดงผลด้วยตัวเลข

7. เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศโดยปริมาตร ใช้หลักการของ Orifice plate โดยวัดความดันแตกต่างเมื่ออากาศไหลผ่าน Orifice plate เพื่อนำไปแปลงเป็นสัญญาณแสดงผลยังตัวเขียนกราฟวงกลม Fofboro / Yeuu ยี่ห้อ YOKOGAWA ในห้องควบคุม ซึ่งค่าที่แสดงในกราฟเมื่ออ่านได้แล้วนำมาคูณด้วย 100 จะได้อัตราการไหลโดยปริมาตรของอากาศมีหน่วยเป็น m^3/hr

8. เครื่องวัดอัตราการไหลโดยมวลและอุณหภูมิของน้ำมันใช้ Turbine Flowmeter และมี D/p cell วัดความดันของที่แตกต่างกันของน้ำมันมีขอบเขตการวัดระหว่าง 3 ถึง 15 psi เพื่อนำไปแปลงเป็นสัญญาณแสดงผลยังตัวเขียนกราฟวงกลม Fofboro / Yeuu ยี่ห้อ YOKOGAWA ในห้องควบคุม ซึ่งค่าที่แสดงในกราฟเมื่ออ่านได้แล้วนำมาคูณด้วย 10 จะได้อัตราการไหลโดยปริมาตรของน้ำมันมีหน่วยเป็น Litre/hr จากนั้นจึงแปลงเป็นอัตราการไหลโดยมวลมีหน่วยเป็น kg/hr (น้ำมันเตา type C มีความหนาแน่น $898.8 \text{ kg}/\text{m}^3$ ที่ 100°C)

4.2.3 ขั้นตอนการทดลอง

1. เดินทางไปยังโรงงานเพื่อเก็บข้อมูลเบื้องต้นและกำหนดจุดวัดรวมทั้งสภาพการวัด เนื่องจาก Regenerator ทั้ง 2 ด้านในรูปที่ 21 มีความสมมาตรกันจึงเลือกตรวจวัดเพียงด้านเดียวคือด้านซ้าย



รูปที่ 22 ตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลใน Regenerator

2. จัดซื้อ, จองและสอบเทียบเครื่องมือต่างๆตามหัวข้อ 4.2.3

3. เดินทางไปยังโรงงานเพื่อเก็บข้อมูลโดยละเอียด โดยติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลและไส้เทอร์โมคัปเปิ้ล ระหว่างที่เตาถลุงหยุดซ่อมบำรุงตามตำแหน่งต่างๆดังรูปที่ 22 เทอร์โมคัปเปิ้ลและไส้จะต่อ Extension Wire มายังเครื่องบันทึกข้อมูลซึ่งเมื่อเริ่มเดินเตาจะเก็บค่าทุกๆ 1 นาที ตลอดการถลุงแร่ 1 รอบ (12 ชั่วโมง)

4. ติดตั้ง Flue Gas Analysis พร้อมหัววัดตามตำแหน่งในรูปที่ 22 โดยเมื่อเริ่มเดินเตาจะทำการเก็บค่าในช่วง Heating Period ทุกๆ ครึ่งชั่วโมง เป็นเวลา 8 ชั่วโมง เพื่อหาค่าเฉลี่ย

5. อ่านค่าอัตราการไหลของอากาศโดยปริมาตรที่ใช้พัดลมขับจากกราฟที่บันทึกค่าบน Chart วงกลมในห้องควบคุม ตลอดช่วงการถลุงแร่ 1 เทียว (12 ชั่วโมง) เพื่อหาค่าเฉลี่ย

6. อ่านค่าอัตราการไหลโดยมวลและอุณหภูมิของน้ำมันที่ใช้ใน Burner จากกราฟซึ่งบันทึกค่าบน Chart วงกลมในห้องควบคุม ตลอดช่วงการถลุงแร่ 1 เทียว (12 ชั่วโมง) เพื่อหาค่าเฉลี่ย

4.3 การหาวัฏจักรการถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสม

เมื่อได้ข้อมูลต่างๆจากการตรวจวัดแล้ว จึงนำข้อมูลเหล่านั้นมาใส่ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในหัวข้อ 4.1 เพื่อจำลองการถ่ายเทความร้อนใน Regenerator โดยแสดงการกระจายของอุณหภูมิอากาศหรือก๊าซเสีย กับโครงอิฐทนไฟ ที่ตำแหน่งและเวลาใดๆ ใน 1 วัฏจักรการถ่ายเทความร้อน (Heating Period + Cooling Period) พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัด และ เวลาที่ใช้ใน 1 วัฏจักร ซึ่งทำให้ได้ประสิทธิภาพทางความร้อนของ Regenerator รวมทั้งปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้สูงสุด

ผลการทดลอง วิเคราะห์ และ การหาวัฏจักรการถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสม ใน Regenerator แบบโครงอิฐทนไฟรูปปล่องไฟสี่เหลี่ยม

ในบทนี้จะแสดงผลการทดลองในการตรวจวัดข้อมูลต่างๆของ Regenerator แบบโครงอิฐทนไฟรูปปล่องไฟสี่เหลี่ยม ที่จำเป็นต่อการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ ในโรงงานถลุงดีบุกไทยชาร์โก้ และแสดงผลการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ รวมทั้งเปรียบเทียบผลจากการวัดและผลจากการจำลองแบบ ตลอดจนหาวัฏจักรที่เหมาะสมในการถ่ายเทความร้อนด้วย

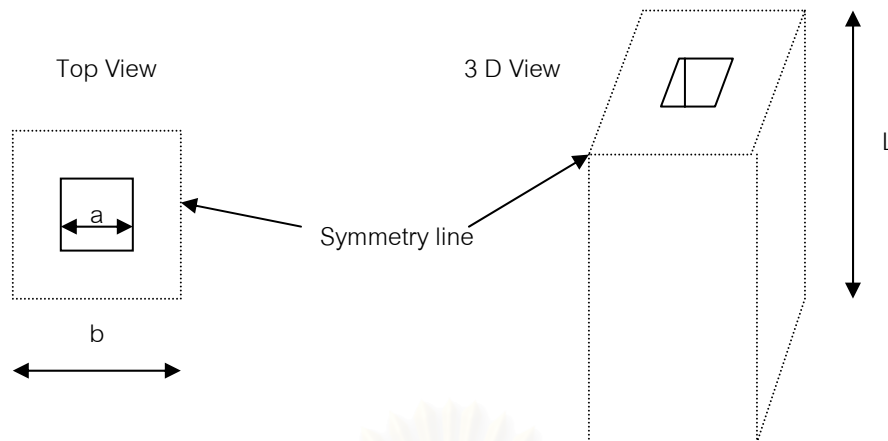
5.1 ผลการทดลองในการตรวจวัดข้อมูลต่างๆของ Regenerator

ในการตรวจวัดข้อมูลต่างๆที่จำเป็นต่อการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ดังแสดงในหัวข้อ 4.2 ได้ทำการเก็บข้อมูลระหว่างการถลุงดีบุกของ Regenerator ด้านทิศเหนือในเตาน้ำมันเบอร์ 4 (Rf 4) โดยเดินทางไปยังโรงงานถลุงดีบุก บริษัท ไทยแลนด์สเมลตติ้งแอนดรีไฟนิง จำกัด (ไทยชาร์โก้) ซึ่งตั้งอยู่ที่ ถนนศักดิ์เดช อำเภอเมือง ต.ป.ณ.2 จังหวัด ภูเก็ต 83000 โทรศัพท์ (076)-391111-7 จำนวน 2 ครั้ง ครั้งแรกระหว่างวันที่ 15 ตุลาคม พ.ศ. 2542 เพื่อเก็บข้อมูลเบื้องต้นอันได้แก่ ขนาด , รูปร่าง ของ Regenerator รวมทั้งอุปกรณ์วัดบางส่วนที่ทางโรงงานมีการติดตั้งอยู่แล้ว พร้อมกำหนดจุดวัดและสภาพการวัดต่างๆ เพื่อเตรียมจัดซื้อและจองเครื่องมือวัด จากนั้นในครั้งที่ 2 ระหว่างวันที่ 4-8 กันยายน พ.ศ. 2543 เพื่อเก็บข้อมูลโดยละเอียด โดยได้ทำการติดตั้งเครื่องมือต่างๆในช่วงท้ายของการปิดซ่อมบำรุงรักษาและเก็บข้อมูลเมื่อเริ่มเดินเตาน้ำมันเบอร์ 4

ข้อมูลต่างๆที่ได้ทำการตรวจวัดมีดังต่อไปนี้

5.1.1 ข้อมูลเบื้องต้น

รายละเอียดและรูปร่างของ Regenerator ได้แสดงไว้แล้วในหัวข้อที่ 3.9 รูปที่ 15 และ 16 ส่วนโครงอิฐทนไฟที่อยู่ภายในมีลักษณะเป็นรูปปล่องไฟสี่เหลี่ยม หน้าตัดขวางเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส โครงอิฐทนไฟนี้ทำมาจาก Super-Duty Fireclay Brick ASTM C 27-93, Regular Type รุ่น K 43 TSR 47 ขนาด 18" X 9" X 3" เรียงประกอบสลับกันจากตรงกลางให้มีช่องว่างขนาด 0.18 X 0.18 (a X a) เมตรจำนวน 15 X 8 (120) ช่อง ส่วนที่เป็นกำแพงรอบนอกจะเติมเต็มด้วย TSR 48 ขนาด 10.5" X 9" X 3" ซึ่งเป็นเนื้ออิฐเดียวกัน มีความสูง (L) 5.04 เมตร แต่ละช่องมีขนาด 0.26 X 0.26 เมตร (b X b แบ่งตาม Symmetry line) ดังรูปที่ 23



รูปที่ 23 แสดงหน้าตัดขวางและรูปร่างของโครงอิฐทนไฟใน Regenerator

ในการถลุงแร่ดีบุกจะแบ่งเป็นรอบ แต่ละรอบใช้เวลารวมทั้งปริมาณแร่เท่ากัน โดยข้อมูลการถลุงมีดังนี้

วัน เดือน ปี	เวลา	เตาถลุง	เชื้อเพลิง	ชั่วโมงการถลุง (ชั่วโมง)	ปริมาณแร่แห้ง (ตัน)	ความชื้นแร่ (% แร่เปียก)
4 ก.ย. 2543	10.00-22.00 น	Rf4	น้ำมันเตาC	12	23	7.52

ตารางที่ 1 แสดงข้อมูลเบื้องต้นของการถลุงแร่ดีบุก

การขังแร่ก่อนประจุลงเตาจะขังเป็นน้ำหนักแร่แห้ง 23 ตัน (น้ำหนักแร่เปียกด้วยความชื้น 7.52 %) แล้วผสมกับวัตถุประจุอีกเล็กน้อย (ไม่มีความชื้น) แบ่งใส่เป็น 2 ช่วงคือ เวลา 10.00 น. ใส่ 16 ตันแร่ และ เวลา 13.00น.ใส่อีก 7 ตันแร่ การสลับรอบ Regenerator ทำทุกๆ 30 นาที

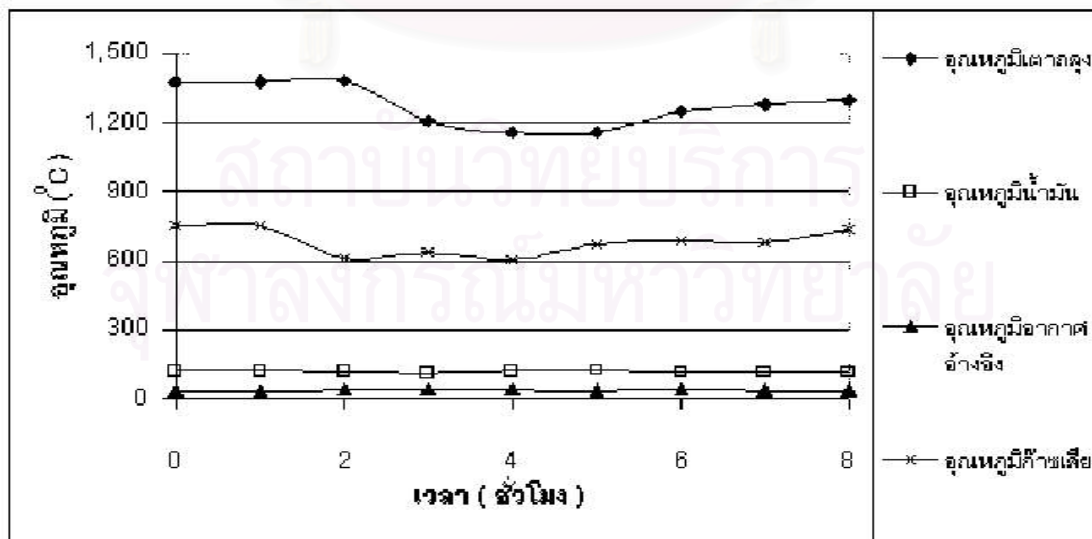
5.1.2 ข้อมูลโดยละเอียด

ประกอบด้วยข้อมูลขององค์ประกอบของก๊าซเสีย , อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้, เชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ และอุณหภูมิของโครงอิฐทนไฟกับอากาศหรือก๊าซเสียที่ทางเข้าและออกในแต่ละ Period ที่ทำการตรวจวัดในวันที่ 4 กันยายน พ.ศ. 2543 ระหว่างเวลา 10.00 – 22.00 น. ดังนี้

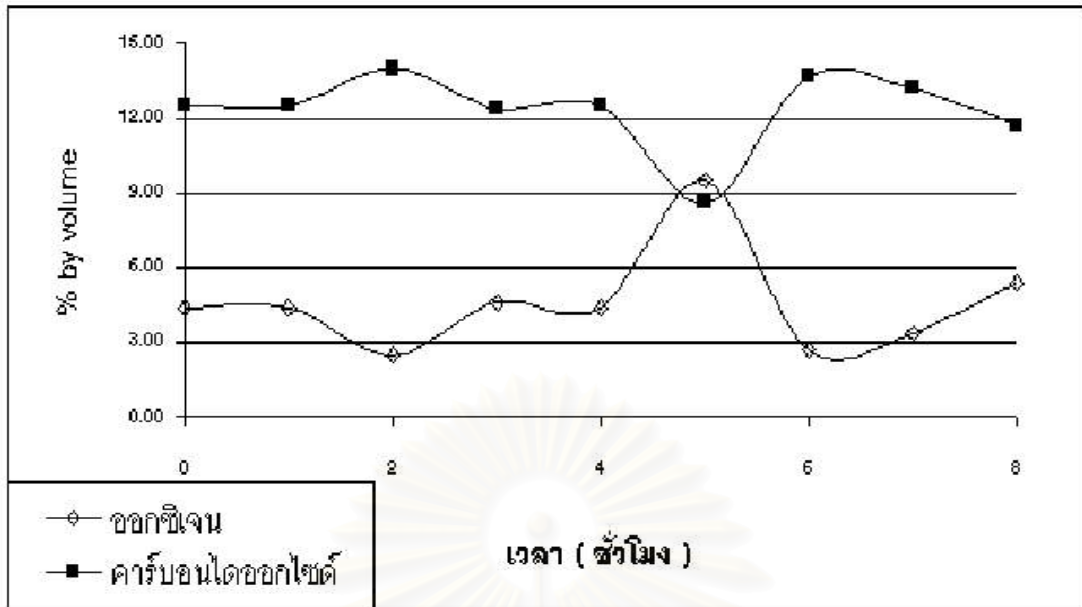
1. องค์ประกอบของก๊าซเสีย คือองค์ประกอบของก๊าซเสียจากการเผาไหม้ที่ออกมาจากเตาถลุงก่อนไหลเข้า Regenerator ทำการวัดทุกๆ 30 นาทีที่ Regenerator ทำงานอยู่ในช่วง Heating Period เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จนค่าต่างๆเริ่มคงที่ ซึ่งประกอบด้วยก๊าซชนิดต่างๆดังนี้

เวลา	8.50	9.45	10.45	11.45	13.45	14.52	15.45	17.00	เฉลี่ย	หน่วย
T _{เตาถลุง}	1,378	1,384	1,209	1,158	1,159	1,250	1,280	1,300	1,265	°C
P	0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0	0	-0.1	0	mmWA
T _{oil}	122	120	112	123	125	115	113	114	118	°C
T _{ref}	35	40	39	39	38	39	38	38	38	°C
T _{flue gas}	753	613	636	603	674	686	678	738	673	°C
O ₂	4.40	2.50	4.60	4.40	9.50	2.70	3.40	5.40	4.61	% vol
CO ₂	12.50	14.00	12.40	12.50	8.60	13.70	13.20	11.70	12.33	% vol
CO	987	307	59	588	108	118	283	569	377	ppm
NO	142	145	163	137	131	125	86	49	122	ppm
NO ₂	0	0	0	0	0	0	0	0	0	ppm
SO ₂	4,014	3,414	805	334	430	125	119	140	1,173	ppm

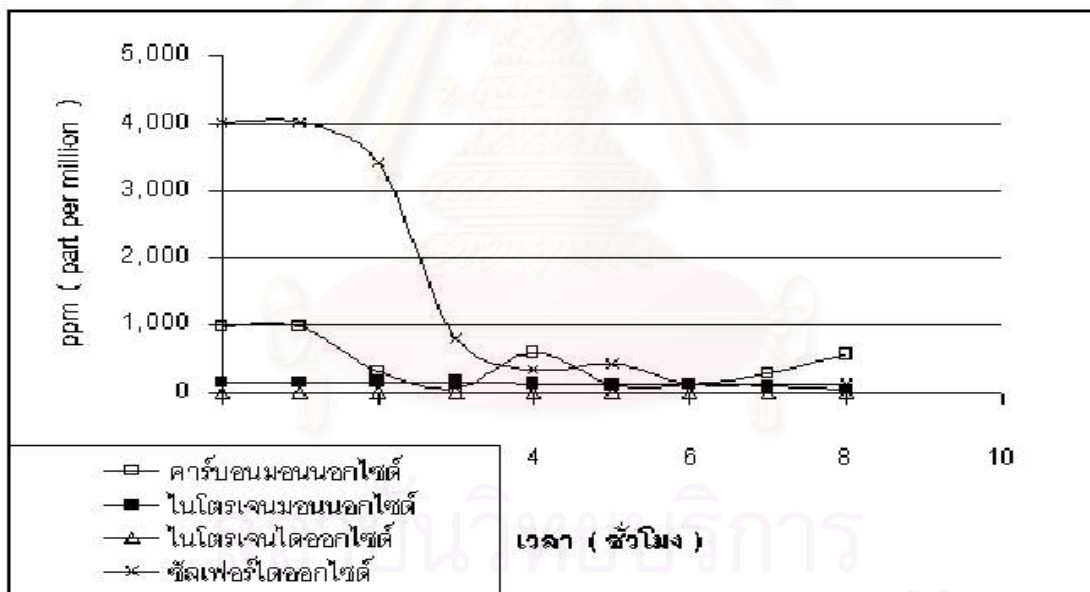
ตารางที่ 2 แสดงองค์ประกอบก๊าซเสียจากการเผาไหม้



รูปที่ 24 แสดงแนวโน้มของข้อมูลในตารางที่ 2



รูปที่ 25 แสดงแนวโน้มของข้อมูลในตารางที่ 2 (ต่อ 1)

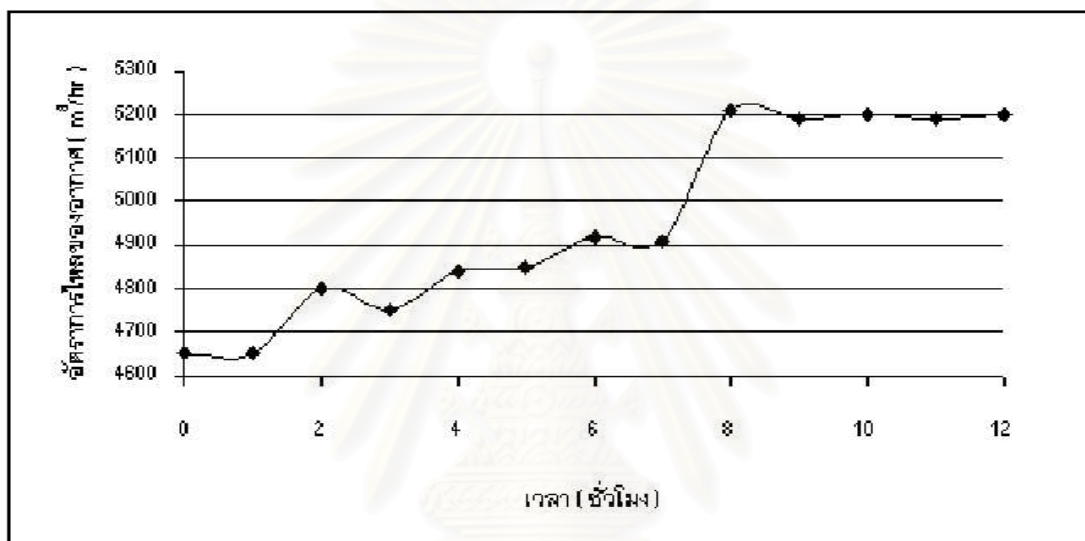


รูปที่ 26 แสดงแนวโน้มของข้อมูลในตารางที่ 2 (ต่อ 2)

2. อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ มาจากอากาศภายนอกที่มีอุณหภูมิเฉลี่ย 38°C ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 80 % ไหลผ่าน Regenerator ข้อมูลอัตราการไหลโดยปริมาตรของอากาศ ทำการวัดต่อเนื่องตลอดช่วงการทดลองซึ่งใช้เวลา 12 ชั่วโมง ทำให้ข้อมูลจำนวนมากจึงทำการเฉลี่ยเป็นรายชั่วโมงแสดงดังนี้

เวลา	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00	19.00	20.00	21.00	22.00	น.
ชั่วโมง	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	ชั่วโมง
อัตราการไหล	4,650	4,650	4,800	4,750	4,840	4,850	4,920	4,910	5,210	5,190	5,200	5,190	5,200	(m ³ /hr)
เฉลี่ย	4,951	(m ³ /hr)												

ตารางที่ 3 แสดงอัตราการไหลโดยปริมาตรของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้

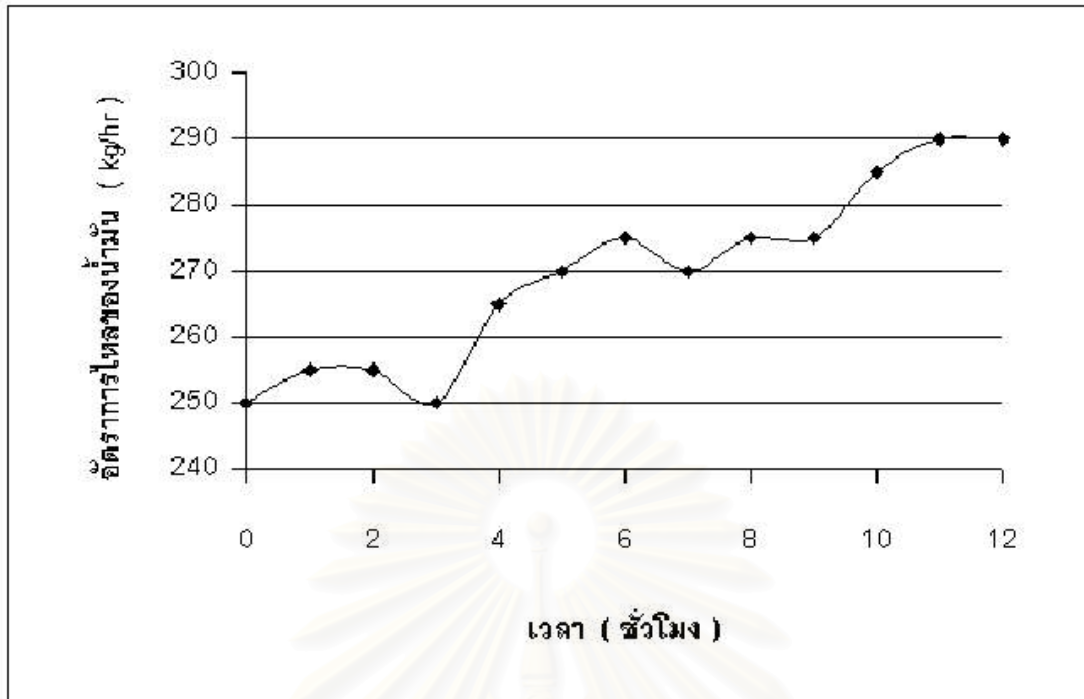


รูปที่ 27 แสดงอัตราการไหลโดยปริมาตรของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้

3. เชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ คือน้ำมันเตาชนิด C ซึ่งผ่านการอุ่นโดยใช้ Heater ไฟฟ้าจนมีอุณหภูมิสูงถึง 100 °C ข้อมูลอัตราการไหลโดยมวลของน้ำมันทำการวัดต่อเนื่องตลอดช่วงการทดลองซึ่งใช้เวลา 12 ชั่วโมง ทำให้ข้อมูลจำนวนมากจึงทำการเฉลี่ยเป็นรายชั่วโมงแสดงดังนี้

เวลา	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00	19.00	20.00	21.00	22.00	น.
ชั่วโมง	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	ชั่วโมง
อัตราการไหล	250	255	255	250	265	270	275	270	275	275	285	290	290	(kg/hr)
เฉลี่ย	270	(kg/hr)												

ตารางที่ 4 แสดงอัตราการไหลโดยมวลของน้ำมันที่ใช้ในการเผาไหม้

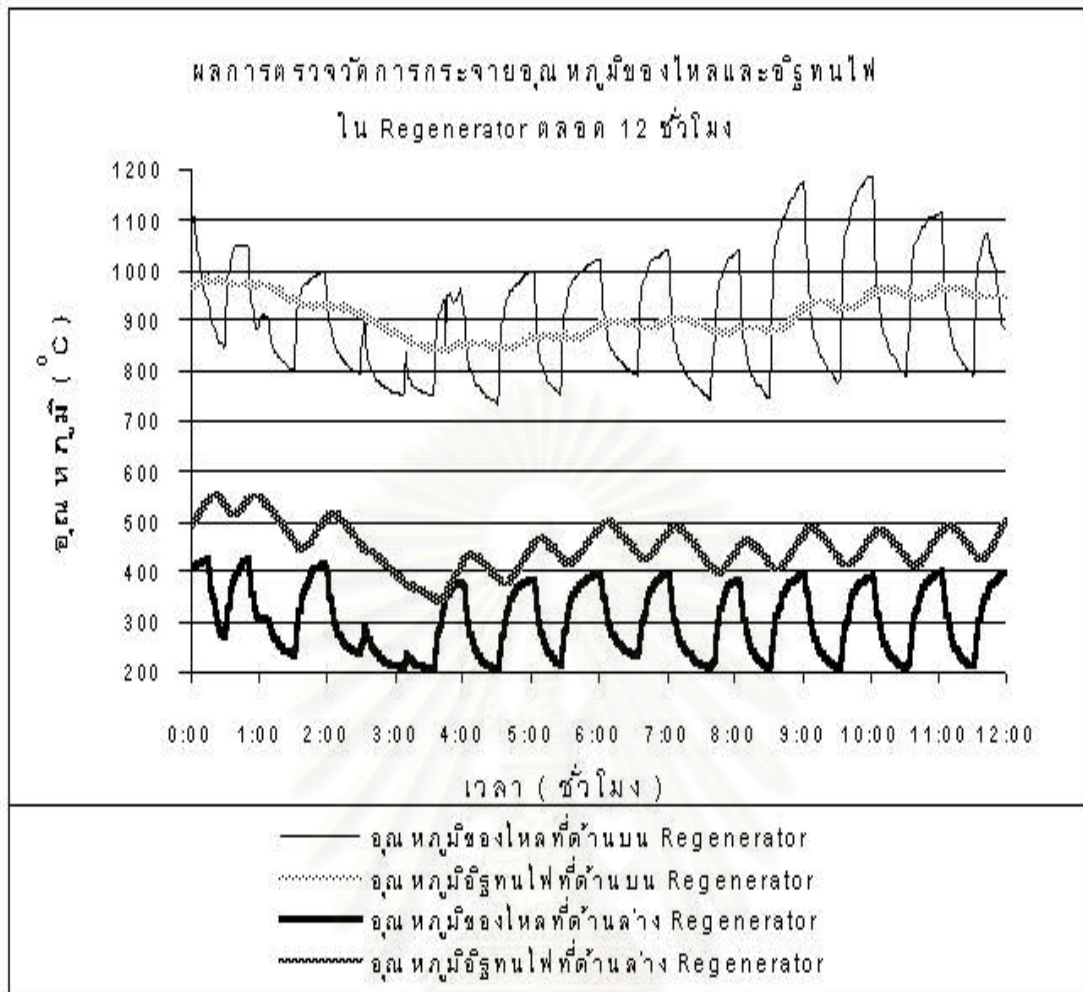


รูปที่ 28 แสดงอัตราการไหลโดยมวลของน้ำมันที่ใช้ในการเผาไหม้

4. คุณหมุมิของโครงอิฐทนไฟกับอากาศหรือก๊าซเสียที่ทางเข้าและออกในแต่ละ Period เนื่องจากทำการบันทึกข้อมูลคุณหมุมิทุกนาทีจึงทำให้มีข้อมูลปริมาณมาก ดังนั้นเพื่อความสะดวกจึงทำการเฉลี่ยข้อมูลเพื่อใช้เป็นตัวแทนของแต่ละ Period สามารถแสดงได้ดังนี้

Heating Period	คุณหมุมิก๊าซเสียขาเข้า (ด้านบน) Regenerator เฉลี่ย	1,052	$^{\circ}\text{C}$
	คุณหมุมิก๊าซเสียขาออก (ด้านล่าง) Regenerator เฉลี่ย	434	$^{\circ}\text{C}$
	คุณหมุมิโครงอิฐทนไฟด้านบน Regenerator เฉลี่ย	907	$^{\circ}\text{C}$
	คุณหมุมิโครงอิฐทนไฟด้านล่าง Regenerator เฉลี่ย	420	$^{\circ}\text{C}$
Cooling Period	คุณหมุมิอากาศขาเข้า (ด้านล่าง) Regenerator เฉลี่ย	241	$^{\circ}\text{C}$
	คุณหมุมิอากาศขาออก (ด้านบน) Regenerator เฉลี่ย	751	$^{\circ}\text{C}$
	คุณหมุมิโครงอิฐทนไฟด้านบน Regenerator เฉลี่ย	402	$^{\circ}\text{C}$
	คุณหมุมิโครงอิฐทนไฟด้านล่าง Regenerator เฉลี่ย	890	$^{\circ}\text{C}$

ตารางที่ 5 แสดงคุณหมุมิของโครงอิฐทนไฟกับอากาศหรือก๊าซเสียในแต่ละ Period



รูปที่ 29 แสดงการกระจายอุณหภูมิของไหลและอิฐทนไฟใน Regenerator ตลอด 12 ชั่วโมง

จากรูปในช่วงครึ่งชั่วโมงแรกของแต่ละชั่วโมง Regenerator จะอยู่ในช่วง Cooling Period ก่อนแล้วตามด้วยช่วง Heating Period เมื่อทำงานเข้าสู่ครึ่งชั่วโมงถัดไปของแต่ละชั่วโมง ในช่วง 2 – 3 ชั่วโมงแรกของรอบการถลุง จะมีการปิดพัดลมเป็นพักๆ เพื่อใส่แร่และกววนเตาทำให้การเผาไหม้ในช่วงนี้ไม่ต่อเนื่อง ตลอดจนการกลับทิศการไหลของอากาศหรือก๊าซเสียก็จะเป็นระบบอย่างสม่ำเสมอทุกครึ่งชั่วโมง ดังนั้นอุณหภูมิที่วัดได้จึงไม่มีรูปแบบที่แน่นอน จนเมื่อเริ่มเข้าสู่ชั่วโมงที่ 4 จึงจะเข้าสู่กระบวนการตามปกติ เมื่อถลุงมาจนถึงชั่วโมงที่ 9 อุณหภูมิในเตาจะเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากแร่ที่อยู่ในเตาได้รับความร้อนจากก๊าซเสียในการเผาไหม้มาเต็มที่แล้ว ความร้อนจากการเผาไหม้จะถ่ายเทให้กับแร่และตัวเตาน้อยลง ก๊าซเสียที่ออกมาจากเตาจึงมีอุณหภูมิสูงขึ้น รวมทั้งมีการเร่งอุณหภูมิของเตาให้สูงจากการปรับเพิ่มปริมาณน้ำมันและอากาศในการเผาไหม้ เพื่อให้

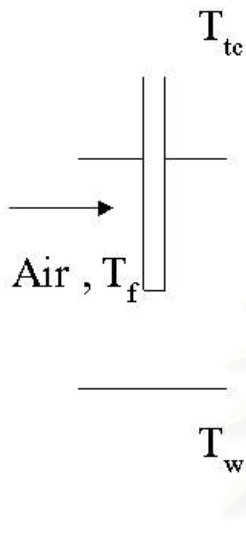
ปฏิกิริยาเคมีในเตาเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ หลังจากนั้นเมื่อเข้าสู่ช่วงโหมงสุดท้ายจึงเริ่มเจาะเตาเพื่อนำแร่ดีบุกบริสุทธิ์ออกมา ในช่วง Cooling Period ของไหลที่ด้านบน Regenerator คืออากาศร้อนที่ไหลออกจาก Regenerator เข้าไปช่วยเผาไหม้ในเตาถลุง ซึ่งจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าอิฐทนไฟที่ด้านบน Regenerator โดยในช่วงแรกอุณหภูมิอากาศวัดได้สูงกว่าอิฐทนไฟเนื่องจากอุปกรณ์วัดยังมีความร้อนสะสมอยู่ในตัว ค่าที่วัดได้จึงเบี่ยงเบนไป หลังจากนั้นอุณหภูมิจึงลดลงจนต่ำกว่าอิฐทนไฟ เมื่อดูจากแนวโน้มอุณหภูมิอากาศพบว่ายังคงลดลงอย่างต่อเนื่องและมีอัตราการลดลงที่ค่อนข้างมากจึงพอสรุปได้ว่า ค่าที่วัดออกมายังไม่ใช่อุณหภูมิที่แท้จริงของอากาศแต่เป็นค่าที่วัดโดยรวมเอาผลจากความร้อนสะสมในอุปกรณ์วัดไว้ด้วย ในการวัดจนได้อุณหภูมิที่แท้จริงซึ่งมีแนวโน้มต่ำกว่าค่าต่ำสุดนี้อีกเล็กน้อยจะทำให้ใช้เวลาวัดเกินกว่าเวลาใน 1 Period (30 นาที) จึงใช้ค่าต่ำสุดในแต่ละ Period มาเฉลี่ยเป็นค่าอุณหภูมิอากาศที่ออกจาก Regenerator ส่วนของไหลด้านล่าง Regenerator ก็คืออากาศเช่นเดียวกันซึ่งจะไหลเข้า Regenerator เพื่อรับความร้อนจากอิฐทนไฟที่มีอุณหภูมิสูงกว่า ค่าที่ได้มีความเบี่ยงเบนในลักษณะเดียวกับอากาศทางด้านบน Regenerator โดยก่อนหน้านั้นพัดลมจะดูดอากาศภายนอกแล้วเป่าผ่านท่อนำลมที่หุ้มภายในด้วยอิฐทนไฟซึ่งรับความร้อนมาจากก๊าซเสียที่ไหลผ่านเมื่อ Regenerator ทำงานอยู่ใน Heating Period ที่แล้ว ท่อนี้จึงประพฤติตัวเสมือนเป็น Regenerator ด้วย โดยความร้อนในอิฐทนไฟที่หุ้มภายในจะถ่ายเทให้กับอากาศมาตลอดทางจนอากาศมีอุณหภูมิถึง 241°C โดยเฉลี่ยที่ปากทางเข้าด้านล่าง Regenerator

ในช่วง Heating Period ของไหลที่ด้านบน Regenerator คือ ก๊าซเสียอุณหภูมิสูงที่ไหลออกจากเตาถลุงเข้าสู่ Regenerator เพื่อถ่ายเทความร้อนให้กับอิฐทนไฟที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยค่าที่วัดได้ในช่วงแรกมีการเบี่ยงเบนเนื่องจากอุปกรณ์วัดมีความจุความร้อนในตัวเองทำให้ต้องใช้เวลามากกว่านี้ในการวัดอุณหภูมิให้มีความแม่นยำ อุณหภูมิที่วัดได้สูงสุดคือ 1052°C โดยเฉลี่ยที่ปากทางเข้าด้านบน Regenerator ส่วนของไหลด้านล่าง Regenerator คือก๊าซเสียที่ไหลออกมาหลังจากถ่ายเทความร้อนให้กับอิฐทนไฟแล้ว โดยอุณหภูมิของก๊าซเสียส่วนใหญ่วัดได้ต่ำกว่าอิฐทนไฟที่ด้านล่าง Regenerator เนื่องจากตำแหน่งที่ทำการวัดอุณหภูมิก๊าซเสียอยู่ห่างจากปากช่องการไหล ก๊าซเสียที่ออกมาอาจถ่ายเทความร้อนบางส่วนให้กับสิ่งแวดล้อม รวมทั้งผลที่เกิดจากความจุความร้อนในอุปกรณ์วัดด้วย แต่อย่างไรก็ดีค่าที่วัดได้ก็เป็นค่าที่มีลักษณะเดียวกับอุณหภูมิก๊าซเสียที่ด้านบน Regenerator โดยรวมแล้วจากข้อมูลที่ทำการตรวจวัดพบว่ากระบวนการถลุงดีบุกในช่วงเวลาดังกล่าวยังไม่เข้าสู่ Cyclic Equilibrium เนื่องจากมีความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศร้อนที่ออกจาก Regenerator ระหว่าง Cooling Period ใดๆอยู่

อนึ่งเนื่องจากการวัดอุณหภูมิของไหลที่มีอุณหภูมิสูงด้วยอุปกรณ์เทอร์โมคัปเปิ้ล ผลจากการแผ่รังสีระหว่างอุปกรณ์วัดและผนังอิฐทนไฟจึงมีค่อนข้างมาก ดังนั้นเมื่อคำนึงถึงการแผ่รังสีจะได้ว่า

Cooling Period ด้านบน Regen.

$$T_w > T_{tc} > T_f$$



$$q_{conv, to air} = q_{rad, from wall}$$

$$h(t_{tc} - t_f) = \epsilon_{tc} \sigma (t_w^4 - t_{tc}^4)$$

$$t_f = t_{tc} - \frac{\epsilon_{tc} \sigma (t_w^4 - t_{tc}^4)}{h}$$

รูปที่ 30 แสดงผลจากการแผ่รังสีที่มีต่ออุปกรณ์วัดที่ด้านบน Regenerator (Yunus A. Cengel, 1998:549-551)

พิจารณาการวัดที่ด้านบน Regenerator ในช่วง Cooling Period ของไหลที่วัดในขณะนี้คืออากาศที่ได้รับความร้อนจาก Regenerator อุณหภูมิที่เทอร์โมคัปเปิ้ล, T_{tc} วัดได้จะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิอากาศจริง, T_f เนื่องจากในสภาวะดังรูปที่ 30 การถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์วัดจะอยู่ในรูปแบบดังนี้ สมมติให้อุณหภูมิผนังอิฐทนไฟ, T_w มีค่าคงที่ ผนังอิฐทนไฟซึ่งมีอุณหภูมิสูงเนื่องจากได้รับความร้อนจากก๊าซเสียในช่วง Heating Period ที่แล้วจะแผ่รังสีความร้อนไปสู่อุปกรณ์วัดซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าในขณะที่อากาศจะพาความร้อนไปจากอุปกรณ์วัดจึงทำให้อุณหภูมิของอากาศที่วัดได้มีค่าต่ำลงเรื่อยๆจนจบ Period ที่ขณะใดๆ Heat flux ของการแผ่รังสีความร้อนกับการพาความร้อนมีค่าเท่ากัน จะหาอุณหภูมิของอากาศที่แท้จริงได้ดังนี้

$$T_f = T_{tc} - \frac{\epsilon_{tc} \sigma (T_w^4 - T_{tc}^4)}{h} \dots\dots\dots(5.1)$$

T_w คืออุณหภูมิผนังอิฐทนไฟมีค่าประมาณ 1153 K

ϵ_{tc} คือ Emissivity ของอุปกรณ์วัดมีค่าประมาณ 0.3

σ คือ Stefan-Boltzmann constant มีค่า $5.67E-8$ (Watt/($m^2 \cdot K^4$))

h คือค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยสำหรับ Forced Convection flow across Cylinder มีค่าประมาณ 62.02 (W/ $m^2 \cdot K$) มาจาก

$$Nu_{cyl} = \frac{hD}{k} = 0.3 + \frac{0.62 * Re^{1/2} * Pr^{1/3}}{[1 + (0.4 / Pr)^{2/3}]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re}{28,200} \right)^{5/8} \right]^{4/5} \dots\dots(5.2)$$

โดย k คือ ค่าความสามารถการนำความร้อนของของไหล (Watt / (m K))

D คือ diameter ของ Cylinder (m)

Re คือ Reynolds number

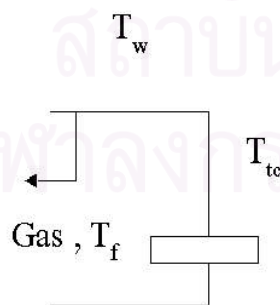
Pr คือ Prandtl number

คุณสมบัติทุกชนิดในสมการ 5.1 และ 5.2 หาที่ $T_{film} = \frac{(t_{fluid} + t_{surface})}{2}$

เมื่อแทนค่าต่างๆลงในสมการ 5.1 จะได้ $T_f = 678.84$ °C ซึ่งมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิที่เทอร์โมคัปเปิ้ลวัดได้ $T_{tc} = 800$ °C ดังนั้นจึงทำให้อุณหภูมิที่วัดได้สูงกว่าอุณหภูมิของของไหลจริงจากการแผ่รังสี

Heating Period ดังในข้าง Regen.

$$T_w < T_{tc} < T_f$$



$$q_{conv,fromgas} = q_{rad,towall}$$

$$h(t_f - t_{tc}) = \epsilon_{tc} \sigma (t_{tc}^4 - t_w^4)$$

$$t_f = t_{tc} + \frac{\epsilon_{tc} \sigma (t_{tc}^4 - t_w^4)}{h}$$

รูปที่ 31 แสดงผลจากการแผ่รังสีที่มีต่ออุปกรณ์วัดที่ด้านล่าง Regenerator

(Yunus A. Cengel, 1998:549-551)

พิจารณาการวัดที่ด้านล่าง Regenerator ในช่วง Heating Period ของไหลที่วัดในขณะนี้เป็นคือ ก๊าซเสียที่ไหลออกจากโครงอิฐทนไฟ อุณหภูมิที่เทอร์โมคัปเปิ้ล, T_{tc} วัดได้จะมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศจริง, T_f เนื่องจากในสภาวะดังรูปที่ 31 การถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์วัดจะอยู่ในรูปแบบดังนี้ สมมติให้อุณหภูมิผนังอิฐทนไฟ, T_w มีค่าคงที่ ผนังอิฐทนไฟซึ่งมีอุณหภูมิต่ำเนื่องจากถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศในช่วง Cooling Period ที่แล้ว อุปกรณ์วัดซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าจะแผ่รังสีความร้อนไปสู่ผนังอิฐทนไฟ ในขณะที่อากาศจะพาความร้อนมาสู่อุปกรณ์วัดจึงทำให้อุณหภูมิของอากาศที่วัดได้มีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆจนจบ Period ที่ขณะใดๆ Heat flux ของการแผ่รังสีความร้อนกับการพาความร้อนมีค่าเท่ากัน จะหาอุณหภูมิของอากาศที่แท้จริงได้ดังนี้

$$T_f = T_{tc} - \frac{\epsilon_{tc} \sigma (T_w^4 - T_{tc}^4)}{h} \dots\dots\dots (5.3)$$

โดย T_{tc} คืออุณหภูมิที่เทอร์โมคัปเปิ้ลวัดได้มีค่าประมาณ 673 K

T_w คืออุณหภูมิผนังอิฐทนไฟมีค่าประมาณ 473 K

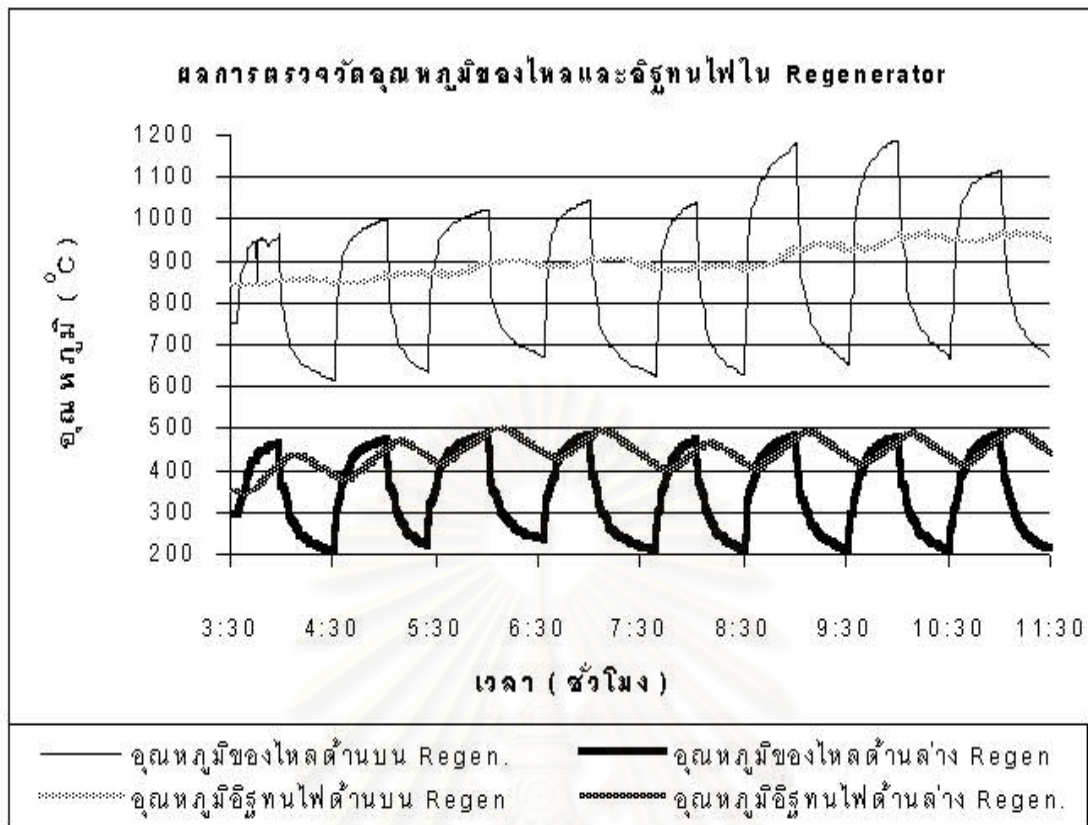
ϵ_{tc} คือ Emissivity ของอุปกรณ์วัดมีค่าประมาณ 0.25

σ คือ Stefan-Boltzmann constant มีค่า $5.67E-8$ (Watt/($m^2 \cdot K^4$))

h คือค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยสำหรับ Forced Convection flow across Cylinder มีค่าประมาณ 26.24 (W/ $m^2 \cdot K$) หาจากสมการ 5.2

เมื่อแทนค่าต่างๆลงในสมการ 5.3 จะได้ $T_f = 483.79$ °C ซึ่งมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิที่เทอร์โมคัปเปิ้ลวัดได้ $T_{tc} = 400$ °C ดังนั้นจึงทำให้อุณหภูมิที่วัดได้ต่ำกว่าอุณหภูมิของของไหลจริงจากการแผ่รังสี

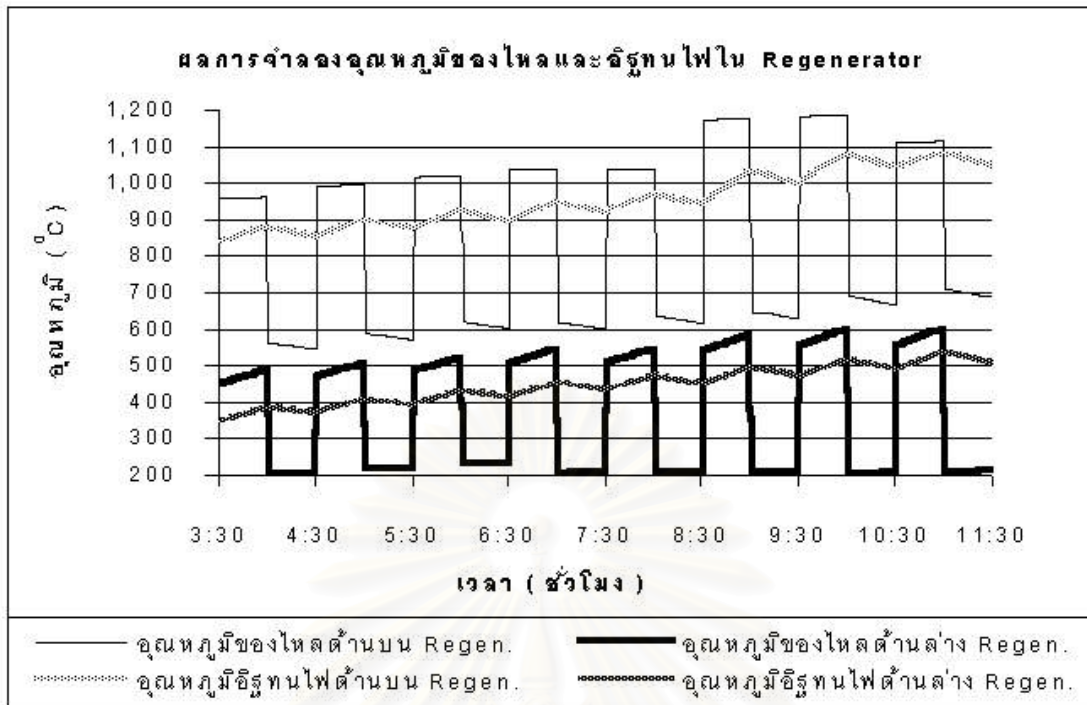
ดังนั้นจากรูปที่ 29 เมื่อมีการคำนึงถึงผลจากการแผ่รังสีระหว่างเทอร์โมคัปเปิ้ลกับผนังอิฐทนไฟใน Regenerator ทำให้อุณหภูมิของอากาศที่วัดได้ที่ด้านบน Regenerator ในช่วง Cooling Period มีค่าต่ำลงประมาณ 121.16 °C ขณะที่อุณหภูมิของก๊าซเสียที่วัดได้ที่ด้านล่าง Regenerator ในช่วง Heating Period มีค่าสูงขึ้นประมาณ 83.79 °C จึงสามารถอธิบายได้ถึงสาเหตุที่อุณหภูมิก๊าซเสียที่ออกมาจาก Regenerator ในช่วง Heating Period มีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิของอิฐทนไฟ โดยสามารถแสดงค่าแนวโน้มอุณหภูมิที่ได้มีการคำนึงถึงผลจากการแผ่รังสีความร้อนต่อเครื่องมือวัดอุณหภูมิดังรูปที่ 32 เนื่องจากในช่วง 3 ชั่วโมงแรกการกลับทิศการไหลของของไหลใน regenerator ยังไม่เป็นวัฏจักรที่ต่อเนื่องสม่ำเสมอ เนื่องจากมีการหยุดเตาถลุงและปิดพัดลมระหว่างการใส่แร่ จึงแสดงค่าตั้งแต่ชั่วโมงที่ 3 เป็นต้นไป



รูปที่ 32 แสดงการกระจายอุณหภูมิของไหลและอิฐทนไฟใน Regenerator เมื่อคำนึงถึงผลจากรadiation ที่มีต่อเครื่องมือวัด

5.2 ผลการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ของ Regenerator

ในการจำลองแบบการทำงานของ Regenerator ได้จัดทำเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยให้ทำการคำนวณได้สะดวกขึ้น โดยเมื่อใส่ข้อมูลต่างๆที่ทำการตรวจวัดในหัวข้อ 5.1 พร้อมทั้งค่าแบ่งความละเอียดแกนความยาวและแกนเวลา เป็น 20 และ 40 ตามลำดับ , ค่าความยอมรับได้ (Pseudo-Thermal Ratio) เป็น 15 (อุณหภูมิอากาศขาออก Regenerator ในช่วง Cooling Period ต่างจาก Cooling Period ที่แล้วไม่เกิน 15 องศาเซลเซียส) เนื่องจากยังไม่เป็น Cyclic Equilibrium) รวมถึงค่า Emissivity ของอากาศและก๊าซเสีย เป็น 0.034 และ 0.133 กับค่า Absorptivity ของอากาศและก๊าซเสีย เป็น 0.0299 และ 0.1189 ซึ่งคำนวณจากวิธีการตามหัวข้อ 3.7.3 โดยให้ในแต่ละชั่วโมงมีการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการไหลโดยมวลของอากาศ , อุณหภูมิของก๊าซเสียขาเข้า Regenerator ในช่วง Heating Period และ อุณหภูมิอากาศขาเข้า Regenerator ในช่วง Cooling Period แล้วแสดงผลในรูปแบบเดียวกับรูปที่ 32 ซึ่งจะได้ผลดังนี้

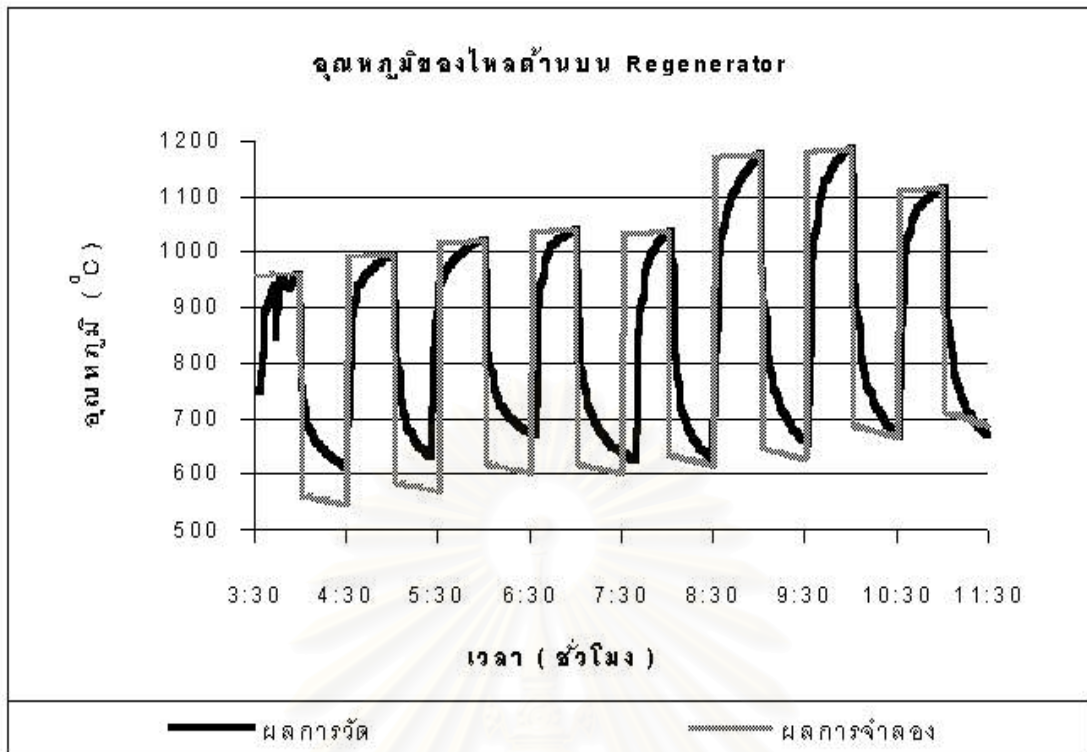


รูปที่ 33 แสดงการกระจายอุณหภูมิต่างๆจากผลการจำลองแบบ Regenerator

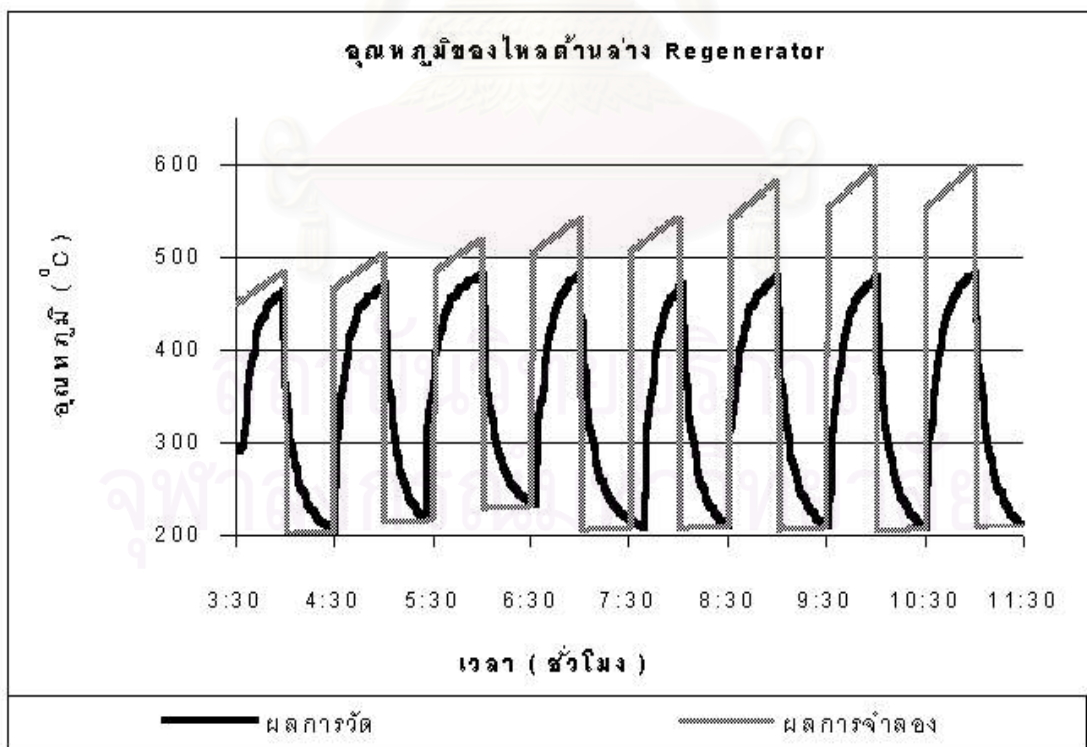
จากรูปพบว่าวัฏจักรเริ่มต้นที่ Heating Period ที่ด้านบน Regenerator ของไหลคือ ก๊าซเสียที่ไหลเข้า Regenerator จะอุณหภูมิสูงกว่าอิฐทนไฟและค่าทั้งสองมีแนวโน้มสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเวลาผ่านไป โดยอิฐทนไฟจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นจากพลังงานความร้อนที่ได้รับจากก๊าซเสีย ส่วนที่ด้านล่าง Regenerator อุณหภูมิของก๊าซเสียที่ออกมาจะมีอุณหภูมิสูงกว่าอิฐทนไฟ และค่าอุณหภูมิทั้งสองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจากอิฐทนไฟได้รับพลังงานความร้อนจากก๊าซเสีย ในขณะที่ก๊าซเสียจะถ่ายเทพลังงานความร้อนให้อิฐทนไฟได้น้อยลงเมื่อเวลาผ่านไป ก๊าซเสียที่ออกจึงมีอุณหภูมิสูงขึ้นจนจบ Period

เมื่อครบ 30 นาที วัฏจักรจึงเข้าสู่ Cooling Period ที่ด้านล่าง Regenerator ของไหลคืออากาศที่ไหลเข้ามีอุณหภูมิต่ำกว่าอิฐทนไฟและค่าทั้งสองมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาผ่านไป โดยอิฐทนไฟจะมีอุณหภูมิลดลงเนื่องจากถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ส่วนที่ด้านบน regenerator อุณหภูมิอากาศที่ออกมาจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าอิฐทนไฟ และค่าอุณหภูมิทั้งสองมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจากอิฐทนไฟถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ส่วนอากาศก็ได้รับพลังงานความร้อนจากอิฐทนไฟน้อยลงด้วย

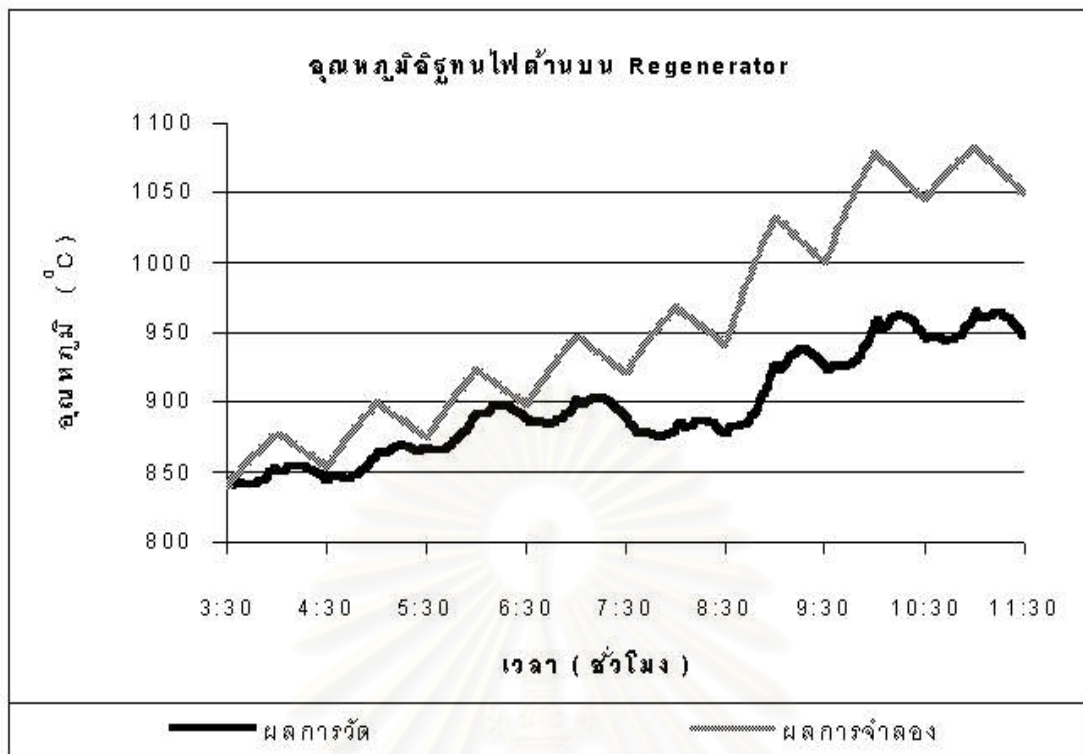
พบว่าแนวโน้มค่าอุณหภูมิจากการจำลองแบบของ ของไหลและอิฐทนไฟใน Regenerator ทั้งสอง Period เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับค่าที่ได้จากการวัด โดยสามารถแยกเปรียบเทียบอุณหภูมิต่างๆได้ดังนี้



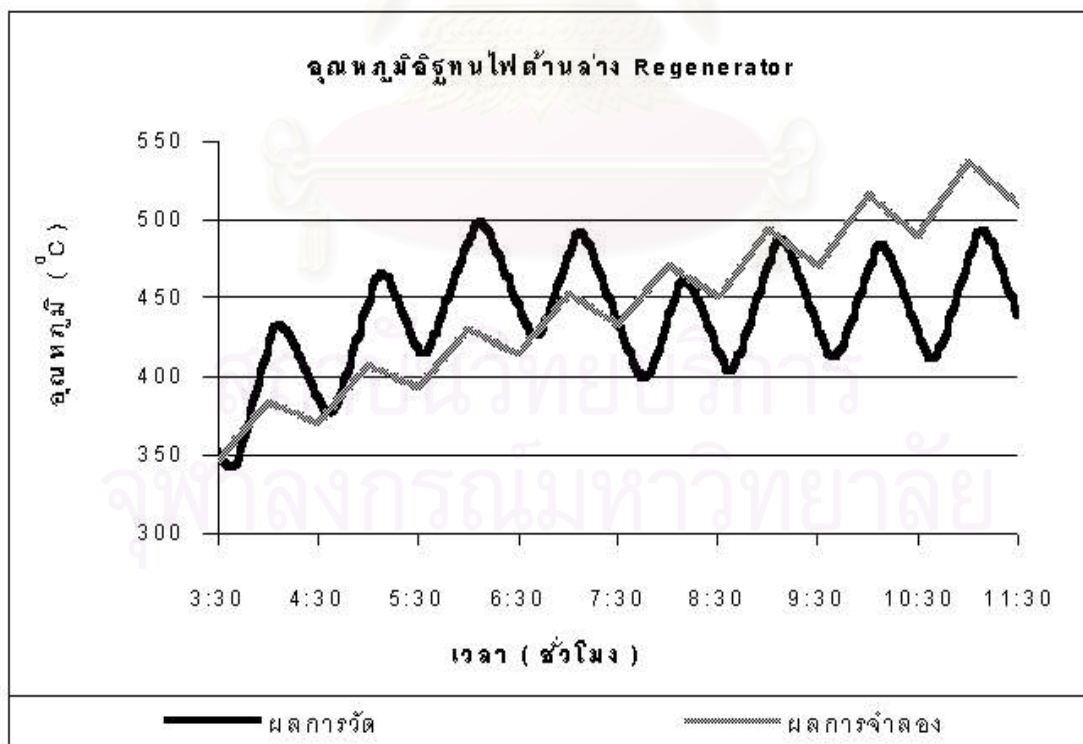
รูปที่ 34 แสดงการเปรียบเทียบผลการวัดและการจำลองอุณหภูมิของไหลด้านบน regenerator



รูปที่ 35 แสดงการเปรียบเทียบผลการวัดและการจำลองอุณหภูมิของไหลด้านล่าง regenerator



รูปที่ 36 แสดงการเปรียบเทียบผลการวัดและการจำลองอุณหภูมิอิฐทนไฟด้านบน regenerator



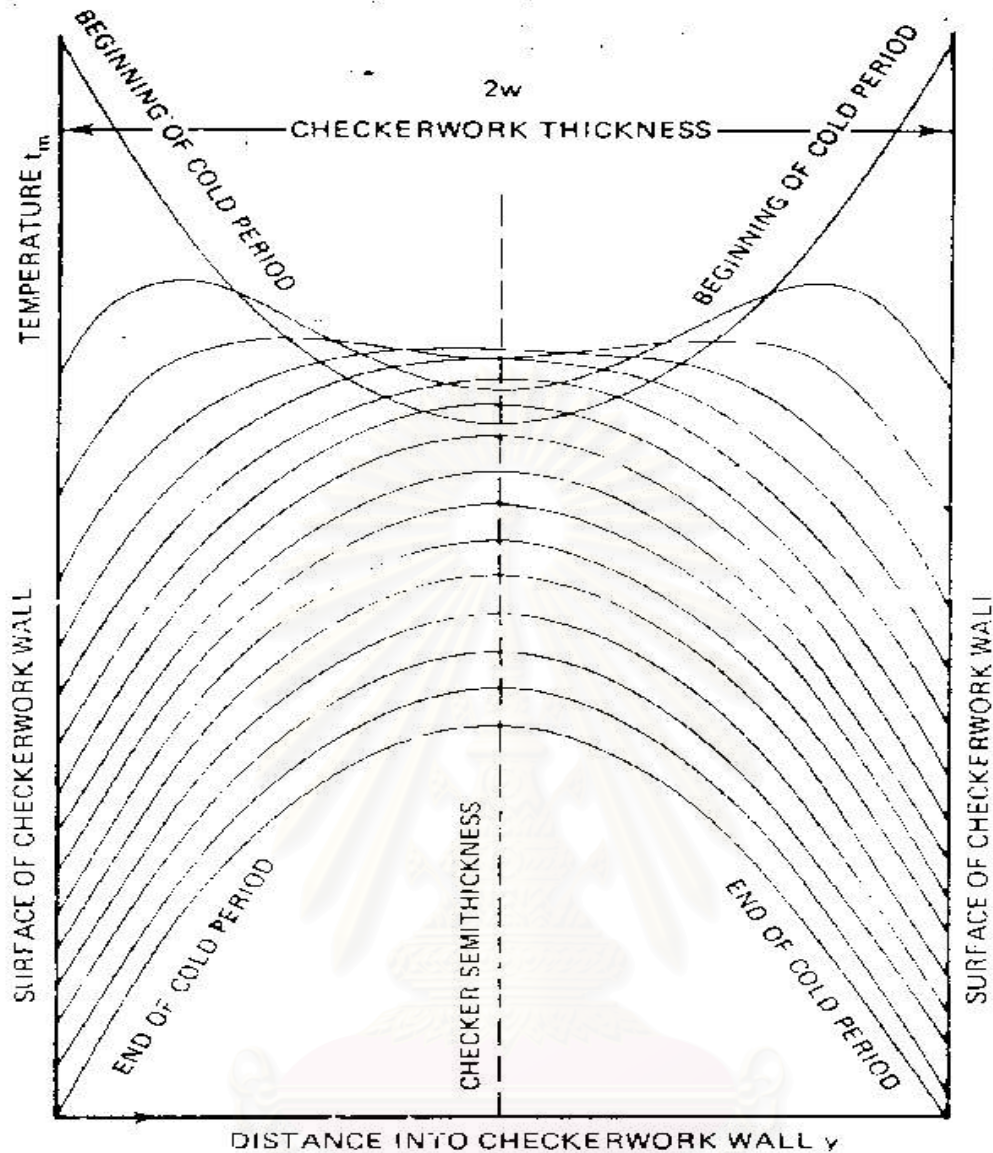
รูปที่ 37 แสดงการเปรียบเทียบผลการวัดและการจำลองอุณหภูมิอิฐทนไฟด้านล่าง regenerator

จากรูปที่ 34 ที่ด้านบน Regenerator พบว่าในช่วง Heating Period อุณหภูมิก๊าซเสียที่วัดได้จะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในตอนแรกเนื่องจาก Response time ของเทอร์โมคัปเปิ้ล ที่ใน Period ที่แล้วเป็นการวัดอากาศที่อุ่นแล้วซึ่งมีอุณหภูมิต่ำ จึงต้องใช้เวลารวมมากกว่าจะวัดค่าได้ใกล้เคียงกับก๊าซเสียจริง โดยจะใช้เป็นค่าเริ่มต้น (Input) ในการจำลองแบบ ส่วนในช่วง Cooling Period ของไหลที่วัดและจำลองคืออากาศที่ออกมาจาก Regenerator โดยจะต้องใช้เวลาพอสมควรกว่าที่ค่าที่ได้จากการวัดจะค่อนข้างคงที่ โดยยังมีแนวโน้มที่ลดลงอยู่ นอกจากนี้เมื่อเวลาผ่านไปแต่ละชั่วโมงค่าอุณหภูมิอากาศที่จำลองแบบจะมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากแนวโน้มของอุณหภูมิก๊าซเสียที่ไหลเข้า Regenerator ที่มีค่าสูงขึ้น โดยความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศจากการจำลองที่ออกมาจาก Regenerator มีค่าคลาดเคลื่อนจากค่าที่วัดได้ประมาณ 8.33 %

จากรูปที่ 35 ที่ด้านล่าง Regenerator พบว่าในช่วง Cooling Period ของไหลที่วัดและจำลองคืออากาศที่ไหลเข้า Regenerator ซึ่งต้องใช้เวลารวมกว่าที่ค่าอุณหภูมิที่ได้จากการวัดจะค่อนข้างคงที่ ค่าดังกล่าวจะใช้เป็นค่าเริ่มต้น (Input) โดยยังมีแนวโน้มที่ลดลงอยู่ ในช่วง Heating Period อุณหภูมิก๊าซเสียที่วัดได้จะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในตอนแรกเนื่องจาก Response time ของเทอร์โมคัปเปิ้ล ที่ใน Period ที่แล้วเป็นการวัดอากาศที่ไหลเข้า Regenerator ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำ จึงต้องใช้เวลารวมกว่าจะวัดค่าได้ใกล้เคียงกับก๊าซเสียจริง ส่วนในการจำลองแบบอุณหภูมิก๊าซเสียที่ไหลออกมาจะมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อเวลาผ่านไปแต่ละชั่วโมงค่าอุณหภูมิอากาศที่จำลองแบบจะมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากแนวโน้มของอุณหภูมิก๊าซเสียที่ไหลเข้า Regenerator ที่มีค่าสูงขึ้น โดยความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิก๊าซเสียจากการจำลองที่ออกมาจาก Regenerator มีค่าคลาดเคลื่อนจากค่าที่วัดได้ในช่วงแรกต่ำแต่จะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเข้าสู่ชั่วโมงที่ 11 ซึ่งมีค่าประมาณ 20 % เมื่อพิจารณาจากแนวโน้มของก๊าซเสียที่ไหลเข้า regenerator ทางด้านบนซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปในแต่ละชั่วโมง แต่อุณหภูมิก๊าซเสียที่ไหลออกจาก Regenerator ทางด้านล่างที่วัดได้กลับมีค่าค่อนข้างคงที่ ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากการที่ตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดที่ด้านล่างอยู่ในจุดอับและอยู่ห่างจากปากช่องการไหลที่ทำการจำลอง ซึ่งทำให้ไม่ได้วัด flow การไหลของช่องการไหลตรงกลางโดยตรง โดยถ้ามีการติดตั้งเครื่องมือให้อยู่ในตำแหน่งที่เป็น down stream ทางด้านตรงข้ามจะทำให้วัดค่าอุณหภูมิได้สูงขึ้นซึ่งทำให้ความคลาดเคลื่อนลดลงด้วย

จากรูปที่ 36 พบว่าแนวโน้มของค่าอุณหภูมิอิฐทนไฟจากการวัดและการจำลองจะเป็นไปในทิศทางเดียวกันคือเพิ่มสูงขึ้นในแต่ละชั่วโมง โดยอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นในช่วง Heating Period และลดลงในช่วง Cooling Period ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 10.5 %

จากรูปที่ 37 พบว่าแนวโน้มของค่าอุณหภูมิอิฐทนไฟจากการวัดและการจำลองก็เป็นไปในทิศทางเดียวกันคือเพิ่มสูงขึ้นในแต่ละชั่วโมง โดยอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นในช่วง Heating Period และลดลงในช่วง Cooling Period ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 11 %



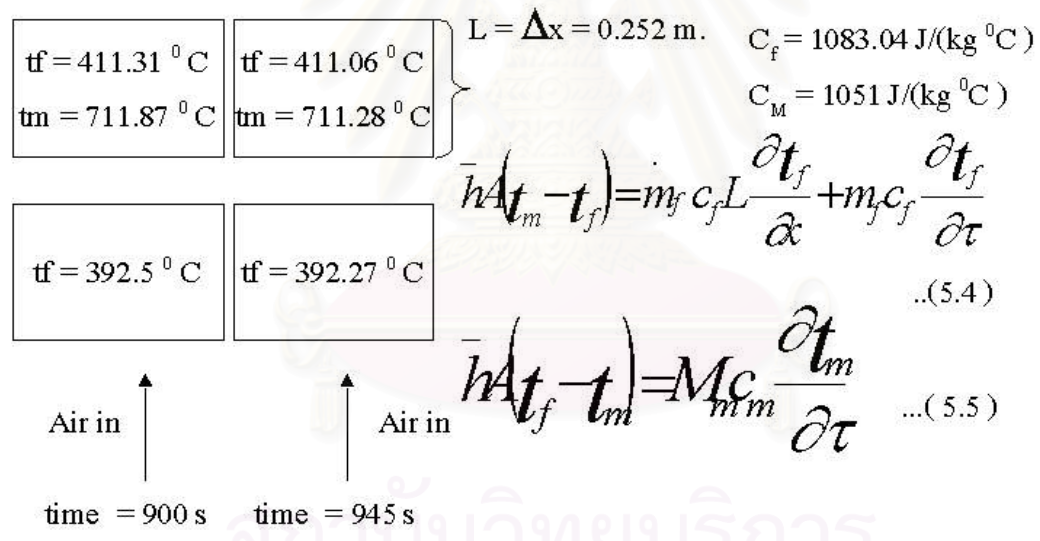
รูปที่ 38 แสดงการกระจายอุณหภูมิในอิฐทนไฟ (Frank W. Schmidt and A. John Willmott, 1981:131)

ค่าความคลาดเคลื่อนของอิฐทนไฟและของไหลจากการจำลองแบบมาจากการตั้งสมมติฐานที่ว่าไม่มีการนำความร้อนในทิศทางการไหลของของไหลในอิฐทนไฟ และการประมาณการนำความร้อนในทิศทางตั้งฉากการไหลของของไหลในอิฐทนไฟ โดยเมื่อพิจารณาถึงการกระจายอุณหภูมิในอิฐทนไฟพบว่าในช่วงเริ่ม Cooling Period ที่แกนกลางของอิฐทนไฟจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าที่ผิวด้านนอกทั้งสองด้านของอิฐทนไฟ ดังนั้นอุณหภูมิที่แกนกลางจะไม่ลดลงทันทีแต่จะเพิ่ม

ขึ้นจากการนำความร้อนเข้าสู่แกนกลาง ก่อนที่ผิวด้านนอกของอิฐทนไฟจะมีอุณหภูมิต่ำลงจากนั้น อุณหภูมิที่แกนกลางจึงมีค่าลดลง นอกจากนี้ยังมีการนำความร้อนในทิศทางกรไหล จากทางด้านบนซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าด้วย ค่าความคลาดเคลื่อนนี้มีผลมากเนื่องจากเมื่อพิจารณาค่าของมวลและความจุความร้อนจำเพาะของอิฐทนไฟ จะมีค่ามากกว่ามวลและความจุความร้อนจำเพาะของของไหลมาก ปริมาณความร้อนจำนวนนี้จึงทำให้ค่าที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อนพอสมควร ในกรณีของ Heating Period ก็เช่นเดียวกัน และยังพบว่าอิฐทนไฟมีความหนามากไปเนื่องจากในช่วง Cooling Period อุณหภูมิของอิฐทนไฟที่วัดได้ลดลงน้อยมาก

เมื่อพิจารณาถึงสมดุลความร้อนของ Regenerator ทั้งสอง Period จากการจำลองแบบที่ element ใดๆ พบว่ามีความสมดุลดังรูปที่ 39 และ 40 โดยมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยจากเลขน้อยสำคัญ

Cooling Period



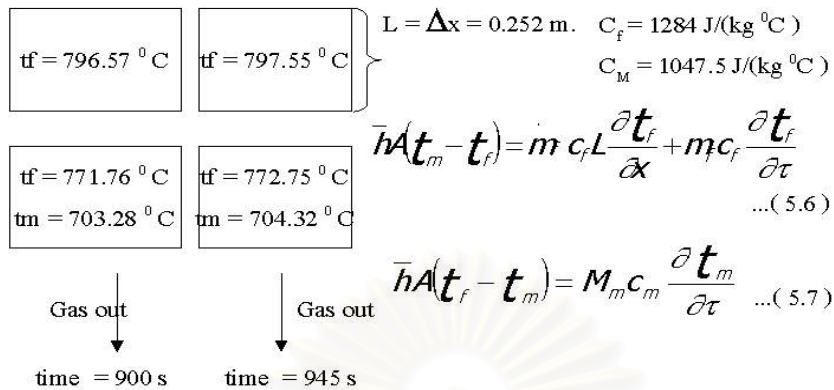
สมการ 5.4 = สมการ 5.5

$$0.013464 * 1083.024 * (411.31 - 392.5) + (0.075223 / 20) * 1083.024 * (411.06 - 411.31) / 45 = 274.26 \text{ Watt} \dots (5.4)$$

$$(400.828 / 20) * 1051 * (711.28 - 711.87) / 45 = - 276.16 \text{ Watt} \dots (5.5)$$

รูปที่ 39 แสดงสมดุลความร้อนของ regenerator ในช่วง Cooling Period

Heating Period



สมการ 5.6 = สมการ 5.7

$$0.015195 * 1284 * (771.76 - 796.57) + (0.060156 / 20) * 1284 * (772.75 - 771.76) / 45 = -483.97 \text{ Watt} \dots (5.6)$$

$$(400.828 / 20) * 1047.5 * (704.32 - 703.28) / 45 = 485.18 \text{ Watt} \dots (5.7)$$

รูปที่ 40 แสดงสมดุลความร้อนของ regenerator ในช่วง Heating Period

นอกจากนี้ผลการจำลองแบบเมื่อพิจารณาจาก Thermal Ratio ใน Heating และ Cooling Period

$$(\eta'_{REG} = \frac{t_{fi} - t_{fo}}{t_{fi} - t_{fi}} \text{ และ } \eta''_{REG} = \frac{t_{fo} - t_{fi}}{t_{fi} - t_{fi}} \text{ ตามลำดับ) พบว่า } \eta'_{REG} \text{ มีค่าประมาณ } 0.64 \text{ ซึ่ง}$$

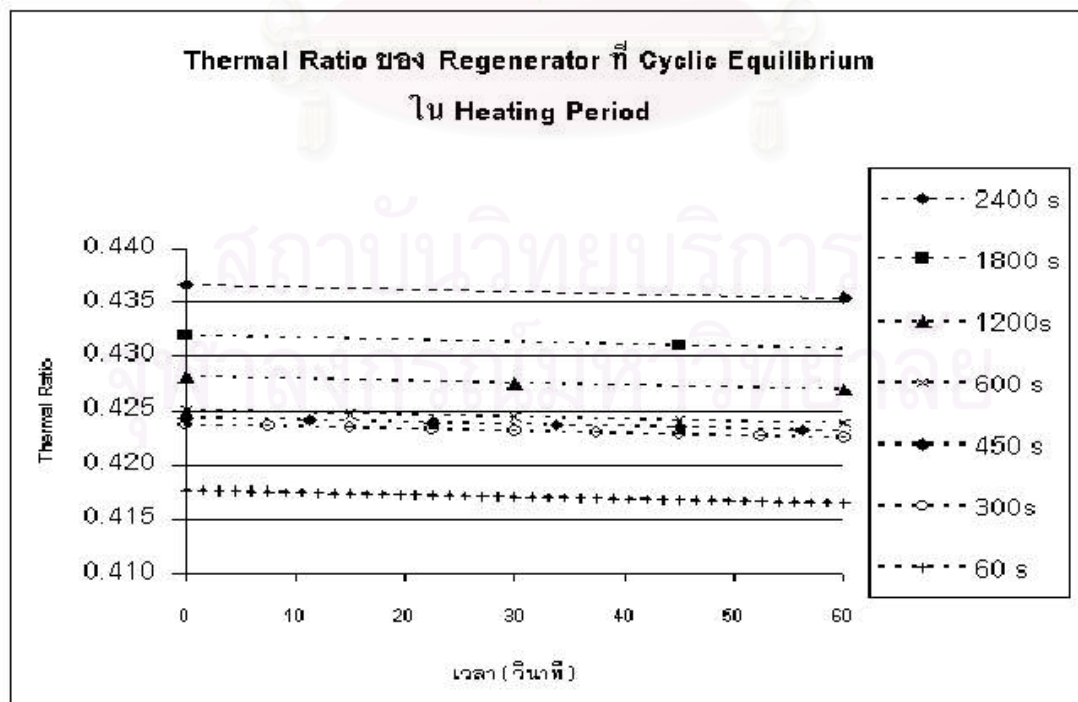
มากกว่า η''_{REG} ที่มีค่าเพียง 0.473 นั้นหมายถึงในช่วง Heating Period อุณหภูมิของก๊าซเสียจะลดลงมากกว่าอุณหภูมิของอากาศที่เพิ่มขึ้นเมื่อไหลผ่าน Regenerator ในช่วง Cooling Period เนื่องจาก ความร้อนที่สะสมจากการที่ก๊าซเสียถ่ายเทให้โครงอิฐทนไฟในช่วง Heating Period มีค่า 17.9 MJ มากกว่าความร้อนที่โครงอิฐทนไฟถ่ายเทกลับให้อากาศซึ่งมีค่า 10.0 MJ วัฏจักรดังกล่าวจึงยังไม่เข้าสู่ Cyclic Equilibrium รวมทั้งผลจากอัตราการไหลโดยมวลและความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของก๊าซเสียมีค่ามากกว่าอากาศ นอกจากนั้นค่าของทั้ง 2 Period จะค่อยๆลดลงเหมือนกัน

5.3 การหาวัฏจักรการถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสมใน Regenerator

ในการพิจารณาหาวัฏจักรการถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสมของ Regenerator อันเป็นวัฏจักรที่สามารถนำความร้อนกลับมาใช้ได้สูงสุด ได้ทำการเปรียบเทียบวัฏจักรหลายๆวัฏจักรที่ใช้เวลาในการกลับทิศทางไหลของอากาศหรือก๊าซเสียไม่เท่ากัน ดังนี้

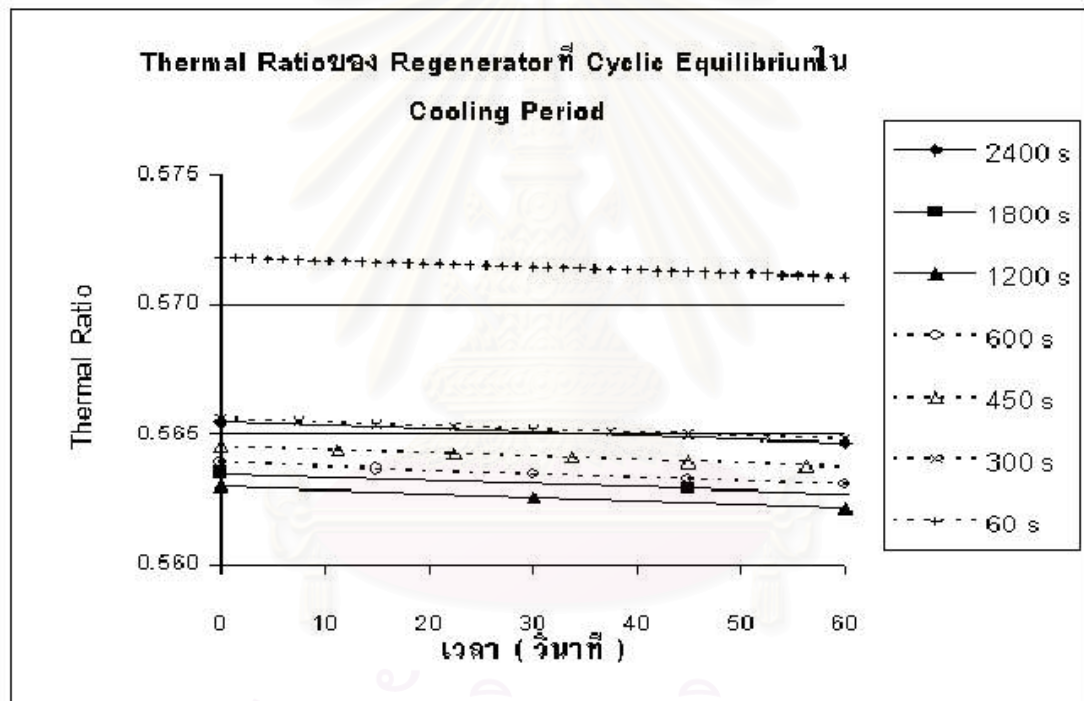
5.3.1 การหาแนวโน้มของวัฏจักรการถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสม

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่จัดทำเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์เมื่อใส่ข้อมูลต่างๆในหัวข้อ 5.1 และ 5.2 แล้วให้โปรแกรมคำนวณหาการกระจายอุณหภูมิของอากาศกับก๊าซเสียและโครงอิฐทนไฟที่ตำแหน่งต่างๆใน 1 ช่องการไหลของ Regenerator โดยเปลี่ยนเวลาในการกลับทิศทางไหล (Time Cycle) จำนวน 11 ค่า ซึ่งจะได้วัฏจักรที่มีผลการกระจายของอุณหภูมิต่างๆดังกล่าวจำนวน 11 วัฏจักร ในการพิจารณาเปรียบเทียบวัฏจักรการถ่ายเทความร้อนแต่ละวัฏจักรของ Regenerator วัฏจักรดังกล่าวจะต้องดำเนินจนเข้าสู่ Cyclic Equilibrium กล่าวคือไม่ว่าวัฏจักรเหล่านั้นจะดำเนินต่อไปนานเพียงใด อุณหภูมิของอากาศที่ออกมาจาก Regenerator ในช่วง Cooling Period ใดๆจะไม่เปลี่ยนแปลง คาบการแกว่งของอุณหภูมิต่างๆใน Regenerator จะมีความคงที่ นอกจากนั้นยังไม่ขึ้นกับอุณหภูมิเริ่มต้นของโครงอิฐทนไฟในแต่ละ Period ด้วย ซึ่งสามารถจำลองแบบจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่จัดทำขึ้น โดยตั้งค่าความยอมรับได้ (Pseudo-Thermal Ratio) ไว้ที่ 0.001 ก่อนการคำนวณ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ของวัฏจักรต่างๆสามารถเปรียบเทียบได้ดังนี้



รูปที่ 41 แสดง Thermal Ratio ของ Regenerator ที่ Cyclic Equilibrium ใน Heating Period

จากรูปที่ 41 ค่า Thermal Ratio ของ Regenerator ที่ Cyclic Equilibrium ใน Heating Period มีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาผ่านไปทุกวัฏจักร เพราะอุณหภูมิก๊าซเสียที่ออกจาก Regenerator จะมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากก๊าซเสียถ่ายเทความร้อนให้โครงอิฐทนไฟได้น้อยลง นอกจากนั้นวัฏจักรยิ่งใช้เวลาน้อยค่า Thermal Ratio จะยิ่งน้อยด้วย หรืออีกนัยหนึ่งคืออุณหภูมิก๊าซเสียที่ออกมาจาก Regenerator มีค่าสูงขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ในวัฏจักรน้อยลง เนื่องจากโครงอิฐทนไฟมีเวลาสะสมความร้อนน้อยลง และเมื่อเข้าสู่ Cooling Period โครงอิฐทนไฟก็จะมีเวลาถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศน้อยลงทำให้อุณหภูมิตัวมันเองลดลงไม่มากเทียบกับวัฏจักรที่ใช้เวลามากกว่า เมื่อกลับเข้ามาสู่ Heating Period อีกครั้งโครงอิฐทนไฟก็จะรับความร้อนได้อีกไม่มาก เช่นเดียวกัน

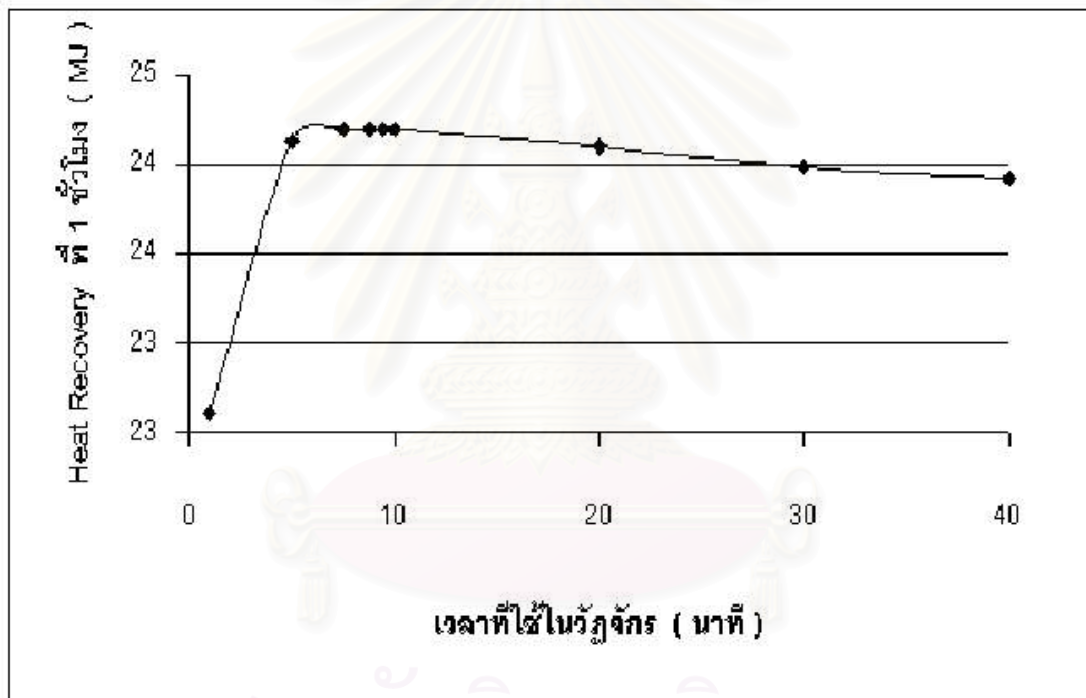


รูปที่ 42 แสดง Thermal Ratio ของ Regenerator ที่ Cyclic Equilibrium ใน Cooling Period

จากรูปที่ 42 ค่า Thermal Ratio ของ Regenerator ที่ Cyclic Equilibrium ใน Cooling Period มีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาผ่านไปทุกวัฏจักร เพราะอุณหภูมิอากาศที่ออกจาก Regenerator จะมีค่าลดลงเนื่องจากอากาศรับความร้อนจากโครงอิฐทนไฟได้น้อยลง นอกจากนั้นยังพบว่าวัฏจักรที่ใช้เวลาตั้งแต่ 1,200 s ขึ้นไป ยิ่งใช้เวลาน้อยค่า Thermal Ratio จะยิ่งน้อยเนื่องจากโครงอิฐทนไฟมีเวลาถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศน้อยลง แต่วัฏจักรที่ใช้เวลาน้อยกว่า 1,200 s (20 นาที) ลงมายิ่งใช้เวลาน้อยค่า Thermal Ratio จะยิ่งมาก ซึ่งเป็นผลมาจาก อัตราการไหลโดยมวล

กับความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของอากาศมีค่าน้อยกว่าก๊าซเสีย และ ผลที่เกิดจากการสะสมความร้อนในช่วง Heating Period

จากการเปรียบเทียบค่า Thermal Ratio ระหว่าง Heating กับ Cooling Period ยังพบอีกว่า Thermal Ratio ของ Cooling Period มีค่ามากกว่าของ Heating Period เนื่องจากที่ Cyclic Equilibrium ความร้อนที่ก๊าซเสียถ่ายเทให้กับอิฐทนไฟใน Heating Period ต้องมีปริมาณเท่ากับความร้อนที่อากาศได้รับจากอิฐทนไฟใน Cooling Period แต่อัตราการไหลโดยมวลและความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของอากาศมีค่าน้อยกว่าก๊าซเสีย ดังนั้นความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศใน Cooling Period จึงมากกว่าความแตกต่างของอุณหภูมิก๊าซเสียใน Heating Period ซึ่งทำให้ Thermal Ratio มีค่ามากกว่าด้วย



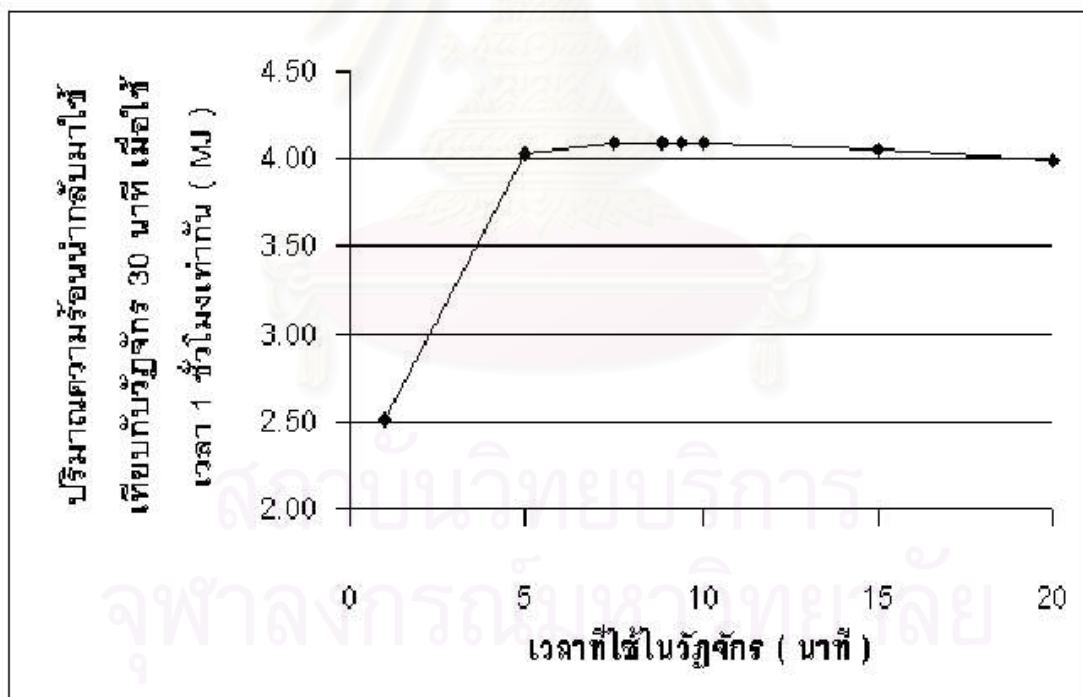
รูปที่ 43 แสดงปริมาณ Heat Recovery ที่เวลา 1 ชั่วโมงของวัจเจอร์ต่างๆ

ในการพิจารณาเรื่องความร้อนนำกลับมาใช้ จากรูปที่ 43 เป็นการเปรียบเทียบปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้ (Heat Recovery) ของ Regenerator ที่วัจเจอร์ต่างๆสามารถทำได้ เมื่อดำเนินเข้าสู่ Cyclic Equilibrium เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าแนวโน้มปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้ มีค่าต่ำสำหรับวัจเจอร์ที่ใช้เวลาน้อยและจะเพิ่มขึ้นด้วยอัตราค่อนข้างมากเมื่อใช้เวลามากขึ้นจนถึงจุดสูงสุดจากนั้นปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้จะค่อยๆลดลงเมื่อใช้เวลามากไปกว่านี้ เมื่อเปรียบเทียบกับวัจเจอร์ที่ใช้เวลา 30 นาทีซึ่งมีเวลาเท่ากับวัจเจอร์ที่ Regenerator ดำเนินการอยู่จากการ

ตรวจวัดจึงสรุปได้ว่าถ้าใช้เวลาในวัฏจักรให้น้อยลงก็จะได้ปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้มากขึ้นแต่ต้องไม่น้อยไปกว่าประมาณ 4 นาที ในขณะที่เดียวกันถ้าใช้เวลามากกว่า 30 นาทีจะได้ปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้ลดลง เนื่องจากถ้าใช้น้อยเกินไปในช่วง Heating Period โครงอิฐทนไฟจะสะสมความร้อนได้น้อยมาก และถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศในช่วง Cooling Period ได้น้อยมากเช่นกัน ในขณะที่เมื่อใช้เวลามาก ถึงแม้ว่าในช่วงแรกของ Period โครงอิฐทนไฟจะสะสมหรือถ่ายเทความร้อนได้ดีแต่เมื่อเข้าสู่ช่วงปลาย Period การถ่ายเทความร้อนจะต่ำมากถ้าเทียบกับวัฏจักรที่ใช้เวลาน้อยกว่า

5.3.2 การหาเวลาที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ความร้อนนำกลับมาใช้มากที่สุด

เมื่อทราบแนวโน้มของเวลาที่เหมาะสมแล้วจึงทำการเปรียบเทียบวัฏจักรที่เข้าสู่ Cyclic Equilibrium จำนวน 10 วัฏจักรที่ใช้เวลาน้อยกว่า 30 นาทีกับวัฏจักรที่ Regenerator ดำเนินการอยู่ซึ่งใช้เวลา 30 นาที เพื่อหาวัฏจักรที่ได้ปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้สูงสุดดังนี้



รูปที่ 44 ปริมาณ Heat Recovery ที่เวลา 1 ชั่วโมงของวัฏจักรต่างๆเมื่อเทียบกับวัฏจักร 30 นาที

จากรูปพบว่า วัฏจักรที่ได้ปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้มากที่สุดใน 1 ช่องการไหลของ Regenerator เมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมงคือ วัฏจักรที่ใช้เวลาในการกลับทิศการไหลของอากาศและ

ก๊าซเสียทุก (Time Cycle) 529 วินาที หรือ ประมาณ 8.82 นาที ซึ่งมีปริมาณความร้อนที่สะสมได้ในช่วง Heating Period เท่ากับปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้ในช่วง Cooling Period เป็น 3,533,601.5 J/Cycle เมื่อเทียบกับวัฏจักรที่ดำเนินการในปัจจุบัน (30 นาที) ซึ่งสามารถนำความร้อนกลับมาใช้ได้ 10,008,594 J/Cycle ในเวลา 1 ชั่วโมงเท่ากัน (24,003,983 – 20,017,188 J/hr) จะได้ปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้มากกว่าประมาณ 3,986,795 J/hr คิดเป็นอัตราส่วน 19.92 % ของวัฏจักร 30 นาที นอกจากนี้ เมื่อคิดรวมช่องการไหลทั้งหมด 120 ช่อง จะได้ปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้มากขึ้นทั้งสิ้นเป็น 478,415,436 J/hr หรือเทียบเท่ากับเชื้อเพลิงน้ำมันเตา Type C ที่ประหยัดได้จำนวน 12.0296 Litre/hr (ค่าความร้อนของน้ำมันเตา Type C คือ 39.77 MJ/Litre) หรือ 105,378.9 Litre/yr ในขณะที่วัฏจักรที่ใช้เวลาตั้งแต่ 5 -20 นาที ก็มีปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้อยู่ในเกณฑ์ที่พอใช้ได้ โดยที่เวลา 20 นาทีจะประหยัดเชื้อเพลิงมากขึ้น 102,753 Litre/yr ที่เวลา 15 นาทีจะประหยัดเชื้อเพลิงมากขึ้น 104,261.6 Litre/yr และที่เวลา 10 นาทีจะประหยัดเชื้อเพลิงมากขึ้น 105,302.9 Litre/yr ทั้งนี้เวลาที่ไม่น้อยจนเกินไปจะทำให้การกลับทิศการไหลของอากาศและก๊าซเสียกระทำได้ง่ายและสะดวกกว่า



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

สรุป และเสนอแนะผลงานวิจัย

ในบทนี้จะเป็นการสรุปผลการวิจัยเป็นหัวข้อ และมีการเสนอแนะแนวทางการวิจัยต่อไป ด้วย ดังนี้

6.1 สรุปผลงานวิจัย

1. การลดเวลาในการกลับทิศการไหลของอากาศและก๊าซเสียลงจะได้พลังงานความร้อนนำกลับมาใช้มากขึ้น แต่ต้องไม่ต่ำกว่า 4 นาที ในขณะที่การเพิ่มเวลาจะได้พลังงานความร้อนนำกลับมาใช้น้อยลง โดยวัฏจักรการถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสมใน Regenerator แบบโครงอิฐทนไฟรูปปล่องไฟสี่เหลี่ยม ซึ่งจะทำให้ได้พลังงานความร้อนนำกลับมาใช้สูงที่สุดคือ วัฏจักรที่ Regenerator ใช้เวลาในการกลับทิศการไหลของอากาศและก๊าซเสียทุกๆ 529 วินาที หรือ ประมาณ 8.82 นาที ซึ่งสามารถนำพลังงานความร้อนกลับมาใช้ใหม่ได้มากกว่าวัฏจักรที่ดำเนินการในปัจจุบัน (30 นาที) เป็น 478,415,436 J/hr หรือเทียบเท่ากับเชื้อเพลิงน้ำมันเตา Type C ที่ประหยัดได้จำนวน 105,378.9 Litre/yr

2. วัฏจักรที่ใช้ในการกลับทิศการไหลของอากาศและก๊าซเสียทุกๆ 10 , 15 และ 20 นาที ก็มีปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้อยู่ในเกณฑ์ที่พอใช้ได้ ขึ้นอยู่กับความสะดวกในการดำเนินการของผู้ควบคุม

3. วัฏจักรที่ดำเนินการในปัจจุบัน (30 นาที) ยังไม่เข้าสู่ Cyclic Equilibrium เนื่องจากคาบการแกว่งของอุณหภูมิก๊าซเสียและอากาศเข้า Regenerator รวมถึง อัตราการไหลโดยมวลของก๊าซเสียและอากาศ ไม่คงที่มีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่สามารถกำหนดรูปแบบได้

4. ผลการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สามารถทำนายแนวโน้มการกระจายอุณหภูมิก๊าซเสียและอากาศ ตลอดจนโครงอิฐทนไฟที่ตำแหน่งและเวลาใดๆ ได้ โดยมีความคลาดเคลื่อนของข้อมูลเล็กน้อยซึ่งเกิดจากปัจจัยภายนอกที่ไม่สามารถตรวจวัดได้ เช่น ปริมาณฝุ่นดีบุกและถ่านที่ออกมาพร้อมก๊าซเสียจากเตาถลุงซึ่งมีผลต่อค่าอัตราการไหลโดยมวลของก๊าซเสีย , ความชื้นของแร่และถ่านหินก่อนประจุเข้าเตาซึ่งมีผลต่อค่าอัตราการไหลโดยมวลของก๊าซเสียและการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีของทั้งอากาศกับก๊าซเสีย , เวลาที่ทำการกลับทิศการไหลไม่แม่นยำเกินหรือขาดไปบ้าง เนื่องจากกระบวนการการถลุงและการควบคุมของผู้ปฏิบัติการ รวมทั้งความร้อนสะสมในอุปกรณ์วัดและความไวในการวัดต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง

อย่างมากจากการกลับทิศการไหลทำให้ค่าที่วัดได้ไม่แม่นยำ นอกจากนี้สัมมัตฐานของการจำลองแบบที่ไม่คำนึงถึงการนำความร้อนในอิฐทนไฟในทิศทางการไหลและการประมาณการนำความร้อนของอิฐทนไฟในทิศตั้งฉากการไหลก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่ง นอกจากนี้ยังมีผลจากตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดที่ห่างจากตำแหน่งจริง และสุดท้ายผลของการแผ่รังสีความร้อนที่มีต่ออุปกรณ์วัด

5. เมื่อวัฏจักรเข้าสู่ Cyclic Equilibrium พบว่า Thermal Ratio ของ Cooling Period มีค่ามากกว่าของ Heating Period เนื่องจากอัตราการไหลโดยมวลและความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของอากาศน้อยกว่าก๊าซเสีย

6. ในขณะที่วัฏจักรยังไม่เข้าสู่ Cyclic Equilibrium ค่า Thermal Ratio ใน Heating Period จะมากกว่าใน Cooling Period เนื่องจากความร้อนที่สะสมจากการที่ก๊าซเสียถ่ายเทให้โครงอิฐทนไฟในช่วง Heating Period มีค่ามากกว่าความร้อนที่โครงอิฐทนไฟถ่ายเทกลับให้อากาศและอัตราการไหลโดยมวลและความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของอากาศน้อยกว่าก๊าซเสีย

7. ส่วนใหญ่การไหลของอากาศและก๊าซเสียในโครงอิฐทนไฟจะเป็นแบบราบเรียบ (Laminar) โดยความร้อนจะถ่ายเทในรูปแบบของการแผ่รังสีมากกว่าการพาความร้อน และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในช่วง Heating Period มีค่ามากกว่า Cooling Period อันเนื่องมาจากปริมาณของไอน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งมีคุณสมบัติเด่นในการดูดซับหรือถ่ายเท พลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีในก๊าซเสียมีมากกว่าในอากาศ

6.2 เสนอแนะผลงานวิจัยต่อไป

1. ควรมีการใช้ Mathematical Model ในการจำลองแบบการถ่ายเทความร้อนของ Regenerator ที่เป็นแบบ Nonlinear คือ สามารถทำนายเมื่ออัตราการไหลโดยมวลของก๊าซเสียกับอากาศ , สัมประสิทธิ์การพาความร้อน มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา รวมทั้งเมื่อความร้อนจำเพาะของก๊าซเสียกับอากาศเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ และมีการคำนึงถึงการนำความร้อนของอิฐทนไฟในทิศทางการไหลและตั้งฉากการไหลด้วย เพื่อเปรียบเทียบผลกับ Linear Model

2. ควรมีการศึกษาถึงขนาดความหนาของอิฐทนไฟที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ความร้อนนำกลับมาใช้สูงสุด

3. ควรศึกษาการถ่ายเทความร้อนของ Regenerator เมื่อโครงอิฐทนไฟที่อยู่ภายในเป็นรูปแบบอื่นนอกจากรูปปล้องไฟสี่เหลี่ยม

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

ชาคร จารุพิสิฐธร. 2525. ถลุงแร่ดีบุก. กรุงเทพมหานคร: ภาคโลหะการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปราโมทย์ เดชะอำไพ. 2538. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1.

กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ฤชากร จีรกาลวสาน. 2541. ไซโครเมตริกส์. กรุงเทพมหานคร: ภาคเครื่องกล คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาษาอังกฤษ

- A. J. Willmott. 1964. Digital Computer Simulation of A Thermal Regenerator. Int.J. Heat Mass Transfer. 7: 1291-1303.
- Frank P. Incropera and David P. Dewitt. 1996. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 4th ed. New York: John Wiley & Sons
- Frank W. Schmidt and A. John Willmott. 1981. Thermal Energy Storage and Regeneration. New York: McGraw-Hill.
- Hottel, H. C. 1954. Radiant-Heat Transmission. Heat Transmission. 3rd ed. New York: McGraw-Hill
- J. Schofield , P. Butterfield and P.A. Young. 1961. Hot blast stoves. Journal of the Iron and Steel Institute. 199: 229 – 240.
- J. Schofield , P. Butterfield and P.A. Young 1963. Hot blast stoves : part 2. Journal of the Iron and Steel Institute. 201: 497 – 508.
- M. Fishenden & O.A. Saunders. An Introduction to Heat transfer. New York: McGraw-Hill
- Nicholas P. Cheremisinoff and Paul N. Cheremisinoff. Heat Transfer Equipment. New York: McGraw-Hill
- Yunus A. Cengel. 1998. Heat Transfer A Practical Approach. International ed. New York: McGraw-Hill.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

โปรแกรมคอมพิวเตอร์

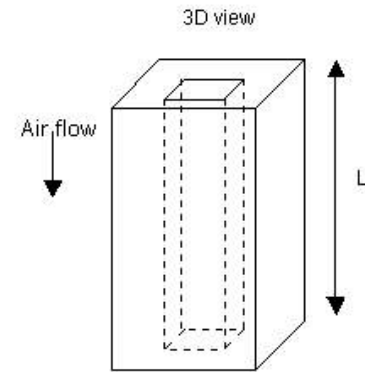
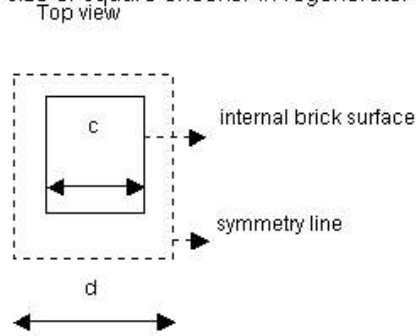
วิธีใช้โปรแกรม Simulation for Thermal Regenerator

1. เปิดโปรแกรมด้วย Microsoft Excel กรอกข้อมูลเริ่มต้นในแผ่นงาน Input_data
2. สั่งดำเนินการโปรแกรมด้วย Visual Basic ที่อยู่บน Microsoft Excel
3. ผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆจะแสดงอยู่ในแผ่นงาน Input_data ด้วย
4. ผลการจำลองแบบการกระจายอุณหภูมิต่างๆใน Regenerator จะแสดงในแผ่นงาน tf_dis.h , tf_dis.c , tm_dis.h , tm_dis.c , th.ratio_dis โดย Hot Period คือ Heating Period และ Cold Period คือ Cooling Period



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.) Input size of square checker in regenerator



$$c = 0.18 \text{ m}$$

$$d = 0.26 \text{ m}$$

$$\text{time Batcl} = 12 \text{ Hr}$$

$$L = 5.04 \text{ m}$$

$$\text{channel} = 120.0 \text{ channel}$$

2.) Input heat transfer data

time mean ambient temperature, t_a	=	38 °C	
time mean relative humidity	=	80 %	
deviding Length	=	20 deviding Time	= 40
time mean fluid temperature (in), t_{fih}	=	1052 °C	} hot period
time mean fluid temperature (out), t_{foh}	=	434 °C	
time mean solid temperature (in), t_{mih}	=	907 °C	
time mean solid temperature (out), t_{moh}	=	420 °C	
time mean fluid temperature (in), t_{fic}	=	241 °C	} cold period
time mean fluid temperature (out), t_{foc}	=	751 °C	
time mean solid temperature (in), t_{mic}	=	402 °C	
time mean solid temperature (out), t_{noc}	=	890 °C	
Time cycle, PE	=	1800 s	
Dry weight ore =	23000 kg	%H ₂ O =	7.52 % by Wet weight
Accuracy, ACC	=	15	
Fluid volume flow rate (cold period)	=	4950 m ³ /hr	
Oil mass flow rate	=	270 kg/hr	
	CO ₂	=	12.33 (% vol.)
component of fluid (hot period)	CO	=	377 (ppm)
	O ₂	=	4.61 (% vol.)
Emissivity of gas hot period, E_g	=	0.133	
Absorptivity of gas hot period, A_g	=	0.1189	
Emissivity of gas cold period, E_g	=	0.034	
Absorptivity of gas cold period, A_g	=	0.0299	

solid temperature distribution hot period (degree C)

regenerator entrance

	0	45	90	135	180	225	270	315	360	405	450	495	540	585	630	675	720	765	810	855	900	945	990	1,035	1,080	1,125	1,170	1,215	1,260	1,305	1,350	1,395	1,440	1,485	1,530	1,575	1,620	1,665	1,710	1,755	1,800	time (x)
0	932	933	935	936	937	938	940	941	942	943	945	946	947	948	949	950	952	953	954	955	956	957	958	959	960	961	962	963	964	965	966	967	968	969	970	971	972	972	973	974	975	
0	906	907	908	910	911	912	913	915	916	917	918	919	920	922	923	924	925	926	927	928	929	930	932	933	934	935	936	937	938	939	940	941	942	943	944	945	945	946	947	948	949	
1	880	881	883	884	885	886	887	889	890	891	892	893	894	896	897	898	899	900	901	902	903	904	905	906	908	909	910	911	912	913	914	915	916	917	918	919	920	921	922	922	923	
1	855	856	857	858	860	861	862	863	864	865	866	868	869	870	871	872	873	874	875	876	877	879	880	881	882	883	884	885	886	887	888	889	890	891	892	893	894	895	896	897	898	
1	830	831	832	833	834	835	837	838	839	840	841	842	843	844	845	847	848	849	850	851	852	853	854	855	856	857	858	859	860	861	862	864	865	866	867	868	869	870	871	872	873	
1	805	806	807	808	809	810	812	813	814	815	816	817	818	819	820	821	822	824	825	826	827	828	829	830	831	832	833	834	835	836	837	838	839	840	841	842	843	844	845	846	847	
2	780	781	782	783	784	786	787	788	789	790	791	792	793	794	795	796	797	799	800	801	802	803	804	805	806	807	808	809	810	811	812	813	814	815	816	817	818	819	820	821	822	
2	755	757	758	759	760	761	762	763	764	765	766	767	768	769	771	772	773	774	775	776	777	778	779	780	781	782	783	784	785	786	787	788	789	790	791	792	794	795	796	797	798	
2	731	732	733	734	735	736	737	739	740	741	742	743	744	745	746	747	748	749	750	751	752	753	754	755	756	757	758	760	761	762	763	764	765	766	767	768	769	770	771	772	773	
2	707	708	709	710	711	712	713	714	715	716	717	718	719	720	721	722	724	725	726	727	728	729	730	731	732	733	734	735	736	737	738	739	740	741	742	743	744	745	746	747	748	
3	682	684	685	686	687	688	689	690	691	692	693	694	695	696	697	698	699	700	701	702	703	704	705	706	707	708	709	711	712	713	714	715	716	717	718	719	720	721	722	723	724	
3	658	659	660	661	662	664	665	666	667	668	669	670	671	672	673	674	675	676	677	678	679	680	681	682	683	684	685	686	687	688	689	690	691	692	693	694	695	696	697	698	699	
3	634	635	636	637	638	639	640	641	642	644	645	646	647	648	649	650	651	652	653	654	655	656	657	658	659	660	661	662	663	664	665	666	667	668	669	670	671	672	673	674	675	
3	610	611	612	613	614	615	616	617	618	619	620	622	623	624	625	626	627	628	629	630	631	632	633	634	635	636	637	638	639	640	641	642	643	644	645	646	647	648	649	650	651	
4	586	587	588	589	590	591	592	593	594	595	597	598	599	600	601	602	603	604	605	606	607	608	609	610	611	612	613	614	615	616	617	618	619	620	621	622	623	624	625	626	627	
4	562	564	565	566	567	568	569	570	571	572	573	574	575	576	577	578	579	580	581	582	583	584	585	586	587	588	589	590	591	592	593	594	595	596	597	598	599	600	601	602	603	
4	539	540	541	542	543	544	545	546	547	548	549	550	551	552	553	554	555	556	557	558	559	560	561	562	563	564	565	566	567	568	569	570	571	572	573	574	575	576	577	578	579	
4	515	516	517	518	519	520	521	522	523	524	525	526	527	528	529	530	531	532	533	534	535	536	537	538	539	540	541	542	543	544	545	546	547	548	549	550	551	552	553	554	555	
5	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521	522	523	524	525	526	527	528	529	530	531	
5	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490	491	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501	502	503	504	505	506	507	
5	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480	481	482	483	484	

Length (m)

regenerator exit

time to cyclic equilibrium 2 hr

start of period

Heat storage 17,909,033 J

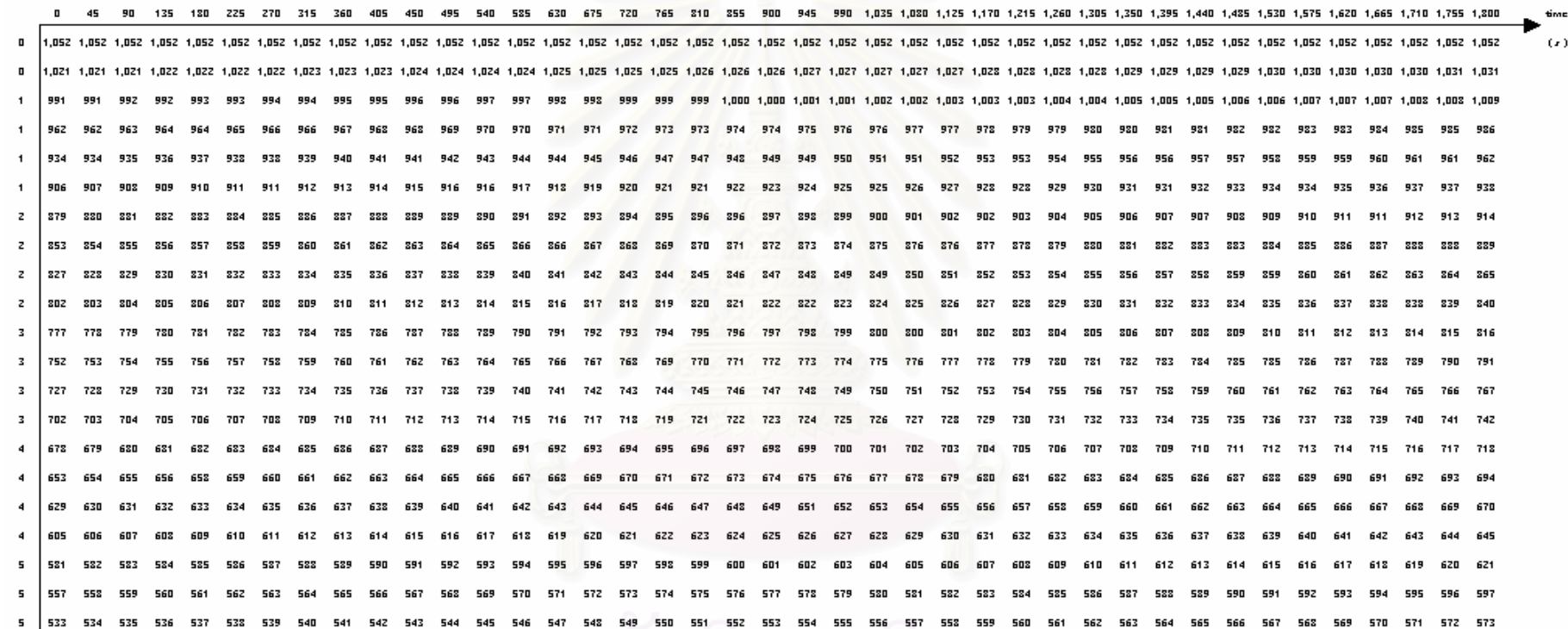
end of period

Heat recovery 10,054,682 J

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

fluid temperature distribution hot period (degree C)

regenerator exit



สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

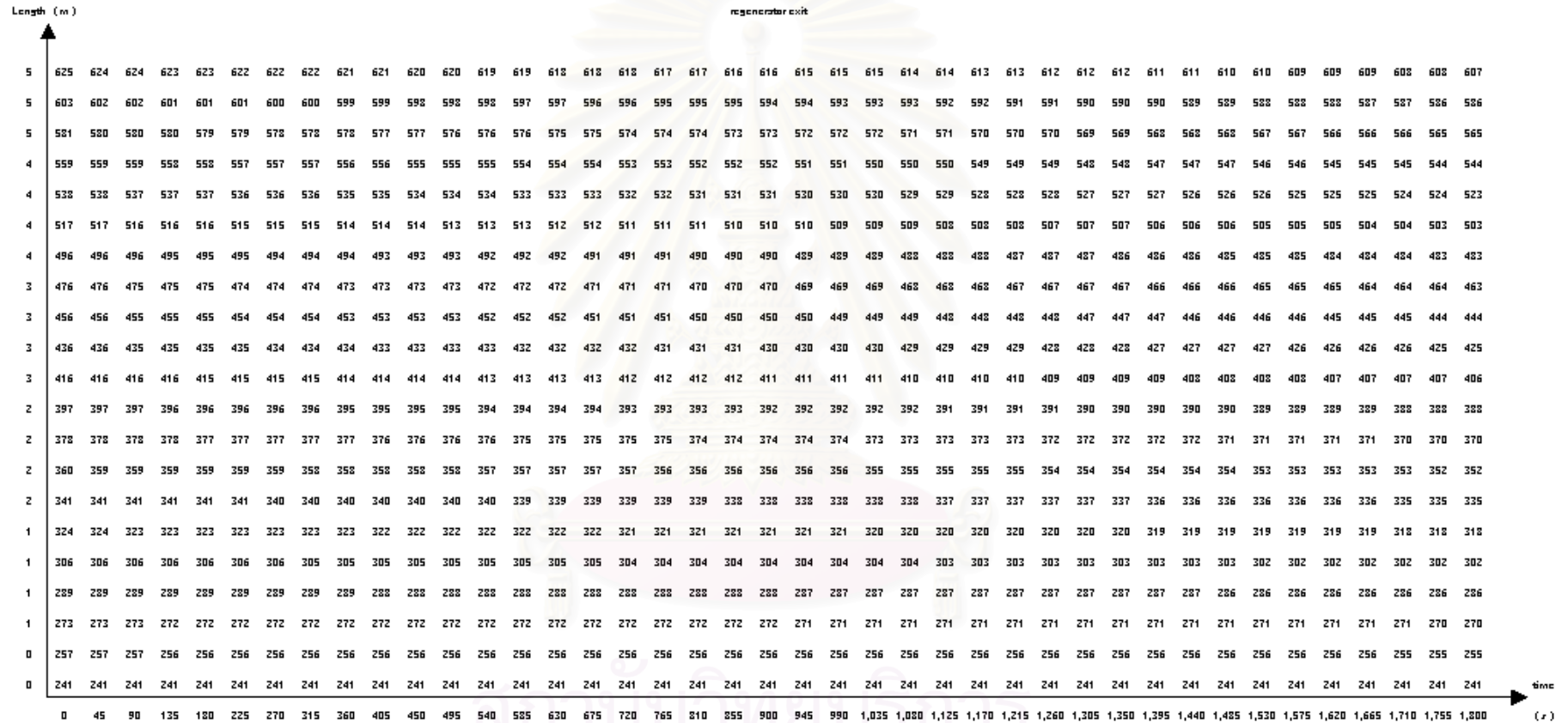
regenerator entrance

Length (m)

start of period

end of period

fluid temperature distribution cold period (degree C)



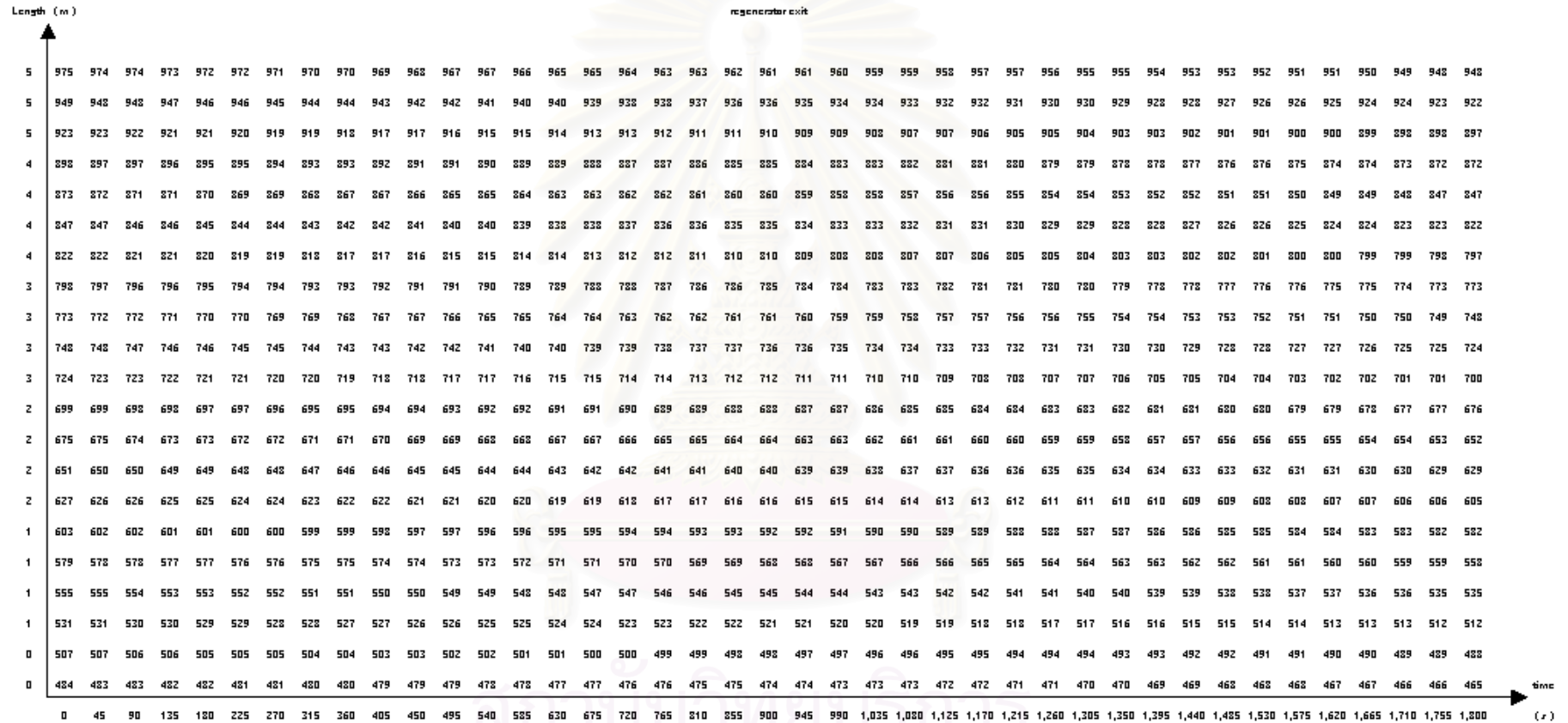
start of period

regenerator entrance

end of period

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

solid temperature distribution cold period (degree C)

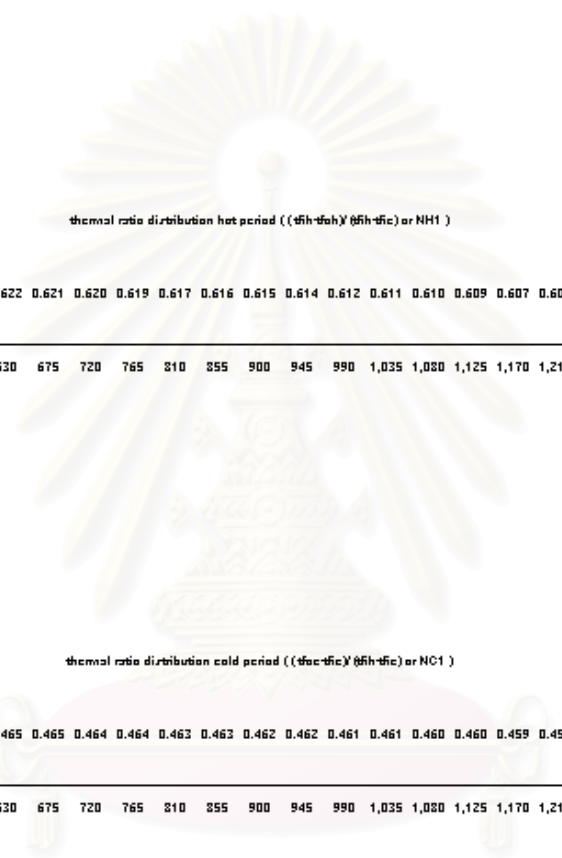


start of period

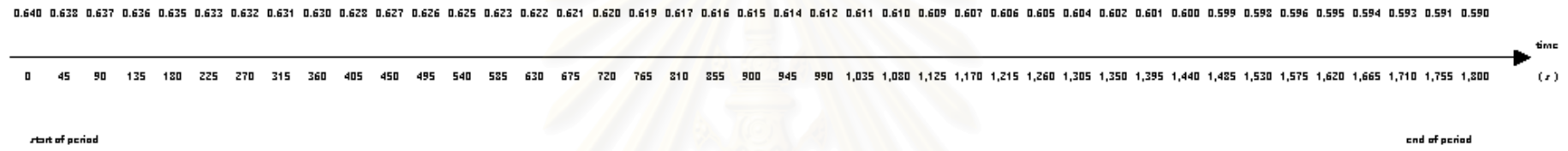
regenerator entrance

end of period

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



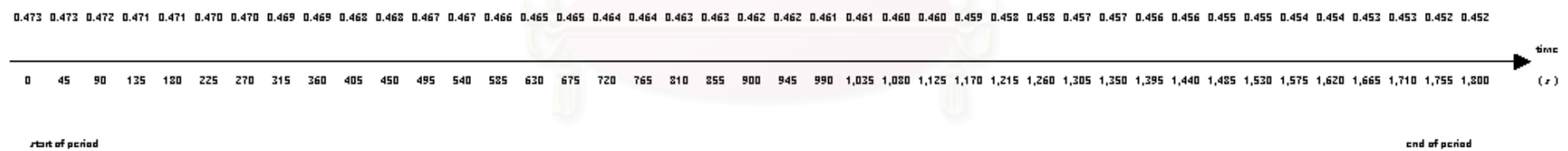
thermal ratio distribution hot period ((θ_{h-c}) (θ_{h-c}) or NH1)



start of period

end of period

thermal ratio distribution cold period ((θ_{c-c}) (θ_{c-c}) or NC1)



start of period

end of period

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ข้อมูลการทดลองของการถ่ายเทความร้อนใน Regenerator แบบโครงอิฐทนไฟ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เวลา	T1	T2	T3	T4	เวลา	T1	T2	T3	T4	เวลา	T1	T2	T3	T4
0.00	1109.3	963.9	412.6	491.8	0.31	905.6	974.6	282.2	526.5	1.01	902.3	971.8	306.5	547
0.01	1093.6	964.9	413.2	495.2	0.32	951.2	975.3	300.6	523	1.02	906.5	972	307.1	544.6
0.02	1105.6	966.7	413.2	498.7	0.33	982.5	975.3	319.8	523	1.03	908.3	971.8	307.7	541.8
0.03	1102.9	970.2	412.9	500.8	0.34	1005.1	974.8	337.3	517.4	1.04	908.4	971.4	307.7	539.4
0.04	1084.2	970.2	413.3	504.3	0.35	1019.7	974.1	362.1	515.5	1.05	907.5	970.9	307.4	536.6
0.05	1062.6	971.1	414.1	508	0.36	1029	973.7	364.5	514.6	1.06	906.4	970.4	307	533.8
0.06	1041.8	972	415	511.5	0.37	1035.6	973	374.9	514.3	1.07	905.3	969.8	306.5	531.1
0.07	1023.6	973.1	416.1	515	0.38	1040.4	972.4	383.5	514.5	1.08	902	968.9	305.2	528.6
0.08	1007.4	974.4	417.5	518.6	0.39	1043.7	971.6	390.6	515.2	1.09	885.8	965.8	300.2	526.2
0.09	994.9	975.5	418.4	522.2	0.4	1045.3	971.1	396.7	516.5	1.1	867.3	963.9	293	523.6
0.1	985.2	976.7	419.2	525.5	0.41	1044.9	970.9	401.8	517.9	1.11	856.4	962.6	286.1	521.1
0.11	970.9	978.1	420.9	529.2	0.42	1044.8	970.5	405.9	519.7	1.12	849.3	961.4	279.9	518.5
0.12	957.2	979.1	422.5	532.4	0.43	1046.1	970.6	409.5	521.8	1.13	843.8	960.4	274.6	515.4
0.13	947.3	979.8	423.6	535.7	0.44	1046.8	970.7	412.7	524.2	1.14	839.2	959.3	270.1	512.6
0.14	944	980.3	424.2	538.7	0.45	1047	970.8	415.4	526.7	1.15	835.3	958.5	266.1	509.6
0.15	940.9	981	424.7	541.8	0.46	1047.1	971	417.8	529.3	1.16	831.6	957.4	262.6	506.5
0.16	936.1	980.5	415.1	544.2	0.47	1047.1	971.4	419.9	532.1	1.17	828.6	956.4	259.4	503.4
0.17	920.2	979.3	396.2	546.6	0.48	1047.4	971.8	421.8	534.8	1.18	825.7	955	256.4	500.2
0.18	905	978.9	375.8	549	0.49	1047.9	972	423.4	537.5	1.19	823.2	953.4	253.4	497
0.19	893.9	978.5	356.2	550.6	0.5	1048.6	972.2	424.9	540.4	1.2	820.8	952.1	250.8	493.9
0.2	885.2	978.5	340.3	551.2	0.51	1044	972.4	426.2	543.5	1.21	818.4	950.8	248.7	490.6
0.21	878.3	978.1	327.6	551	0.52	1002.5	969.3	413.3	546.1	1.22	816.2	949.5	246.8	487.3
0.22	872.4	977.7	316.7	550.3	0.53	963.5	968	392.9	548.5	1.23	814.2	948.1	245	484.1
0.23	867	977.5	307.5	549	0.54	936.8	967.6	372.8	550.7	1.24	812.3	946.9	243.4	481
0.24	862.6	976.9	299.6	547	0.55	917.6	967.6	353.7	552.2	1.25	810.4	945.5	241.8	477.8
0.25	858.7	976.3	292.6	544.8	0.56	902.1	967.6	337	552.8	1.26	808.6	943.9	240.2	474.6
0.26	855	975.7	286.4	542.3	0.57	891.7	967.9	325.3	552.8	1.27	806.8	942.2	238.8	471.4
0.27	851.6	974.9	281.3	539.7	0.58	883.1	968	315.1	552.2	1.28	804.9	940.6	237.7	468.6
0.28	848.3	973.9	276.5	536.6	0.59	884.8	969.4	308.2	550.8	1.29	803.2	939.2	236.5	465.5
0.29	844.9	973.2	272.5	533.2	1	894.7	970.9	306.5	549	1.3	801.4	937.7	235.2	462.6
0.30	848.1	973.1	270.7	529.8	ชั่วโมง	°C	°C	°C	°C	ชั่วโมง	°C	°C	°C	°C
ชั่วโมง	°C	°C	°C	°C										

* T1 = อุณหภูมิของไหลที่ด้านบน Regenerator T2 = อุณหภูมิอิฐทนไฟที่ด้านบน Regenerator

T3 = อุณหภูมิของไหลที่ด้านล่าง Regenerator T4 = อุณหภูมิอิฐทนไฟที่ด้านล่าง Regenerator

เวลา	T1	T2	T3	T4	เวลา	T1	T2	T3	T4	เวลา	T1	T2	T3	T4
1.31	799.6	936	234	459.6	2.01	923	927.6	382.2	510.6	2.31	835.6	911.2	245.4	449.4
1.32	824.2	936.9	239	456.8	2.02	901.8	927.5	363.4	513	2.32	882.8	911.7	263.7	446.8
1.33	877.3	937.3	255.6	454.1	2.03	886.6	927.3	345.7	514.6	2.33	910.7	911.1	284.2	444.3
1.34	911.7	936.6	276.6	451.4	2.04	875	927.4	332	515.7	2.34	885.2	907.4	291.8	442.4
1.35	932.2	935.8	296.9	449	2.05	865.7	927.6	320.6	516	2.35	857.7	904.9	287.3	441
1.36	945.3	934.8	314.9	447.5	2.06	857.6	927.6	310.7	515.4	2.36	835.3	902.9	279.3	440.2
1.37	953.5	933.9	330.4	446.6	2.07	850.6	927.6	302	514.6	2.37	820.1	901.3	271.3	439.5
1.38	960.1	932.9	343.4	446.5	2.08	845.1	927.4	294.3	513.1	2.38	809.3	900	264.2	438.8
1.39	965.3	931.8	354.2	447	2.09	840.3	927.3	287.9	511.3	2.39	801.4	898.7	258.3	438
1.4	969.5	930.9	363.2	448.2	2.1	835.9	927.3	282.5	509.2	2.4	795.6	897.4	252.9	436.9
1.41	972.8	930.1	370.8	449.8	2.11	832.2	926.9	277.5	506.8	2.41	791.3	896.1	248.4	435.5
1.42	975.3	929.3	377.1	451.8	2.12	829	926.6	273	504.3	2.42	787.8	895.2	244.4	434.1
1.43	976.9	928.9	382.7	454.2	2.13	825.7	926	269	501.6	2.43	784.5	894.2	241	432.4
1.44	978.7	928.4	387.3	457	2.14	822.8	925.3	265.4	498.9	2.44	781.8	893	238	430.6
1.45	980.3	927.8	391	459.8	2.15	820.1	924.9	262.3	496.2	2.45	779.4	892	235	428.6
1.46	981.8	927.7	394.4	462.7	2.16	817.5	924.2	259.4	493.2	2.46	777.1	890.8	232.4	426.6
1.47	983.5	927.7	397.2	465.8	2.17	815.1	923.3	256.6	490.2	2.47	775.1	889.7	230.2	424.6
1.48	985.2	927.5	399.8	469.1	2.18	812.7	922.4	254.5	487.1	2.48	773.1	888.5	228.3	422.2
1.49	986.3	927.4	402.1	472.2	2.19	810.4	921.6	252.2	484.1	2.49	771.1	887.4	226.5	419.9
1.5	987.8	927.7	404.2	475.8	2.2	808.4	920.5	250.1	481.1	2.5	769.3	886.3	225	417.6
1.51	988.7	928	406.1	479	2.21	806.3	919.4	248.3	478.2	2.51	767.8	885	223.2	415.3
1.52	989.8	928.4	407.8	482.6	2.22	804.3	918.3	246.5	475.3	2.52	766	883.8	221.8	413
1.53	990.9	928.7	409.4	485.8	2.23	802.5	917.2	244.8	472.5	2.53	764.5	882.5	220.6	411
1.54	991.5	928.9	410.8	489	2.24	800.7	916.1	243.2	469.4	2.54	763.1	881.4	219.6	408.8
1.55	992.5	929.3	412.2	492.2	2.25	798.8	914.9	241.8	466.5	2.55	761.5	880.3	218.6	406.7
1.56	993.2	929.7	413.4	495.4	2.26	797.3	913.7	240.2	463.6	2.56	760.2	879	217.4	404.3
1.57	994	930.2	414.6	498.4	2.27	795.6	912.5	239	460.8	2.57	758.6	877.9	216.1	402.1
1.58	994.6	930.9	415.8	501.6	2.28	794	911.4	237.8	458	2.58	757.3	876.6	215.3	400.1
1.59	989.3	931	415.7	504.7	2.29	792.5	910.1	236.5	455	2.59	755.9	875.3	214.3	397.8
2	954.1	928.4	401.4	507.6	2.3	791.9	909.4	235.5	452.1	3	754.5	874	213.2	395.4
ชั่วโมง	°C	°C	°C	°C	ชั่วโมง	°C	°C	°C	°C	ชั่วโมง	°C	°C	°C	°C

* T1 = อุณหภูมิของไหลที่ด้านบน Regenerator T2 = อุณหภูมิอิฐทนไฟที่ด้านบน Regenerator

T3 = อุณหภูมิของไหลที่ด้านล่าง Regenerator T4 = อุณหภูมิอิฐทนไฟที่ด้านล่าง Regenerator

เวลา	T1	T2	T3	T4	เวลา	T1	T2	T3	T4	เวลา	T1	T2	T3	T4
3.01	757.8	873.5	212.8	393.3	3.31	752	842.3	206.2	350.2	4.01	898.8	850.1	360.7	421
3.02	757.8	872	212.2	391.2	3.32	751.4	841.4	205.6	349	4.02	867.1	850.1	342.6	424.6
3.03	756.4	870.6	211.6	389.4	3.33	750.5	840.5	205	347.7	4.03	844.8	850.6	325.3	427.8
3.04	754.7	869.3	211	387.4	3.34	752.5	840.3	205.4	346.3	4.04	828.3	851.2	309.8	430.2
3.05	752.8	868	210.2	385.4	3.35	801.9	842.1	215.2	345	4.05	816.2	851.9	295.5	432
3.06	751	866.5	209.5	383.3	3.36	847.5	842.4	232	343.7	4.06	806.5	852.6	284.2	433
3.07	751.9	865.8	209.1	381.3	3.37	878.3	842.3	250.7	342.6	4.07	798.8	853.3	274.6	433.1
3.08	761.5	865.6	211	379.3	3.38	899.2	842.1	268.6	342.2	4.08	792.5	853.9	266.2	432.8
3.09	791.8	866.2	215.8	377.4	3.39	913.2	841.7	284.6	342.2	4.09	787.1	854.1	259.3	432.2
3.1	836.8	865.3	229.4	375.6	3.4	922.3	841.5	298.7	343	4.1	782.4	854.5	253.4	431.2
3.11	813.2	862.3	234.5	374	3.41	928.4	841.3	310.7	344.6	4.11	778.3	854.5	248.1	429.8
3.12	796.4	860.5	234	372.6	3.42	933.1	841.2	320.9	346.7	4.12	774.4	854.6	243.5	428.2
3.13	785.9	859.5	231.7	371.9	3.43	937	841.1	329.6	349.4	4.13	771.1	854.8	239.3	426.3
3.14	779	858.5	228.7	371.1	3.44	940.3	841	337.1	352.6	4.14	768	854.9	235.5	424.5
3.15	774.1	857.3	226	370.3	3.45	844	841.2	343.4	356.2	4.15	765	854.6	232.2	422.4
3.16	770.6	856.2	223.7	369.4	3.46	947.1	841.4	348.8	360	4.16	762.3	854.2	229	420.2
3.17	767.6	855	221.5	368.3	3.47	949.6	841.7	353.4	363.8	4.17	759.8	854.1	226.2	417.8
3.18	765.7	854.1	219.4	367.1	3.48	951.8	842.5	357.4	368.1	4.18	757.3	853.7	223.7	415.4
3.19	764.1	853.3	217.8	366	3.49	954.3	843.2	361	372.6	4.19	754.7	853	221.3	413
3.2	762.5	852.5	216.2	364.8	3.5	946.9	843.2	363.8	377	4.2	752.6	852.5	219.4	410.6
3.21	761.2	851.5	214.9	363.6	3.51	939	843.7	366.2	381.5	4.21	750.4	851.9	217.5	408.6
3.22	760	850.5	213.6	362.3	3.52	933	844.1	368	385.8	4.22	748.5	851.2	215.8	406.1
3.23	759	849.7	212.5	361	3.53	932.9	845.2	369.7	390	4.23	746.5	850.5	214.2	403.8
3.24	758	848.9	211.5	359.8	3.54	940.5	846.6	371.4	394.1	4.24	744.7	849.7	212.7	401.5
3.25	757.1	847.9	210.6	358.5	3.55	947	847.9	373.1	398	4.25	742.9	848.9	211.2	399
3.26	756	846.8	209.7	357	3.56	952	849.2	374.9	401.8	4.26	741.3	848.1	209.8	396.6
3.27	755.3	846	209	355.6	3.57	955.6	850.6	376.6	405.8	4.27	739.7	847.2	208.6	394.2
3.28	754.5	845	208.1	354.2	3.58	958.5	851.7	378.2	409.4	4.28	738.1	846.4	207.4	391.8
3.29	753.6	844.1	207.4	352.8	3.59	960.8	852.9	379.6	413.1	4.29	736.4	845.3	206.2	389.4
3.3	752.8	843.2	206.8	351.4	4	941.7	851.7	376.4	416.9	4.3	734.7	844.1	205.2	387.1
ชั่วโมง	°C	°C	°C	°C	ชั่วโมง	°C	°C	°C	°C	ชั่วโมง	°C	°C	°C	°C

* T1 = อุณหภูมิของไหลที่ด้านบน Regenerator T2 = อุณหภูมิอิฐทนไฟที่ด้านบน Regenerator

T3 = อุณหภูมิของไหลที่ด้านล่าง Regenerator T4 = อุณหภูมิอิฐทนไฟที่ด้านล่าง Regenerator

เวลา	T1	T2	T3	T4	เวลา	T1	T2	T3	T4	เวลา	T1	T2	T3	T4
4.31	733.4	843.3	204.2	385	5.01	996.2	863.9	385.7	448.7	5.31	930.6	867.4	289.3	415
4.32	768.9	845.3	209.8	382.7	5.02	996.3	865.3	386.8	452.1	5.32	944.3	866.9	303.4	414.7
4.33	826.6	846.7	225	380.6	5.03	956.7	863.3	377.8	455.4	5.33	953.4	866.6	315.8	414.6
4.34	866.9	847	243.6	378.6	5.04	912.3	862.5	360	458.7	5.34	960.1	866.1	326.5	414.9
4.35	893.9	846.9	262	377.1	5.05	880.8	862.9	342.1	461.4	5.35	965.3	865.8	335.4	415.9
4.36	912.4	846.5	279	376.1	5.06	858	863.6	325.5	463.4	5.36	969.9	865.8	343	417.4
4.37	925.1	846.1	293.9	375.9	5.07	841	864.5	310.8	464.9	5.37	973.6	865.7	349.6	419
4.38	934.7	845.8	306.6	376.3	5.08	827.7	865.4	297.8	465.8	5.38	977.5	865.7	355	421
4.39	942	845.5	317.5	377.1	5.09	817.8	866.1	286.7	466	5.39	981.1	865.9	359.7	423.4
4.4	947.4	845.3	326.7	378.6	5.1	809.5	866.9	276.6	465.4	5.4	984.8	866.1	363.7	426.2
4.41	952.3	845	334.6	380.7	5.11	802.7	867.6	268.6	464.2	5.41	987.3	866.6	367.2	429
4.42	956.4	845.2	341.3	383.3	5.12	796.5	868.2	261.8	462.8	5.42	990.6	867.3	370.3	432
4.43	959.6	845.3	347	386	5.13	791.3	868.7	256.2	461.2	5.43	993.5	868	373	435
4.44	962.5	845.3	351.8	389	5.14	786.7	868.7	251	459.1	5.44	996.3	868.6	375.4	437.9
4.45	965.1	845.7	356.1	392.2	5.15	782.2	869	246.3	456.8	5.45	998.6	869.7	377.5	440.8
4.46	967.7	846.1	359.7	395.7	5.16	778.2	869.1	242.1	454.3	5.46	1000.7	870.7	379.4	443.8
4.47	970	846.7	362.7	399.2	5.17	774.6	868.9	238.4	451.9	5.47	1002.7	871.6	381.2	446.9
4.48	972.2	847.3	365.5	402.7	5.18	771.4	868.5	235.1	449.4	5.48	1004.4	872.7	382.8	449.8
4.49	974.5	848.3	368	406.2	5.19	768.4	868.2	232.2	446.8	5.49	1006.2	874.1	384.2	452.8
4.5	976.6	849.3	370.1	410	5.2	765.5	868	229.4	444	5.5	1007.7	875.3	385.4	455.7
4.51	978.7	850.3	372	413.6	5.21	762.7	867.4	226.6	441.2	5.51	1009.3	876.5	386.6	458.7
4.52	980.9	851.4	373.8	417	5.22	760	866.9	224.4	438.5	5.52	1010.7	877.9	388	461.8
4.53	983.2	852.6	375.4	420.6	5.23	757.5	866.1	222.1	435.6	5.53	1012.4	879.5	389.2	464.7
4.54	985.4	853.9	376.9	424.2	5.24	755.1	865.3	220.2	432.9	5.54	1013.6	880.9	390.3	467.7
4.55	987.2	855.3	378.4	427.8	5.25	752.8	864.5	218.5	430.2	5.55	1014.7	882.5	391.3	470.4
4.56	989.3	856.7	379.6	431.3	5.26	750.7	863.7	217	427.3	5.56	1015.6	884	392.2	473.1
4.57	990.8	858.1	380.9	434.8	5.27	748.2	865.7	222.1	424.6	5.57	1016.3	885.4	393.3	476.1
4.58	992.4	859.3	382.2	438.5	5.28	843.7	867	236.6	421.6	5.58	1017.1	887	394.2	478.8
4.59	993.8	860.8	383.5	441.9	5.29	883.9	867.6	254.7	419.2	5.59	1018	888.8	395.3	481.5
5	995.1	862.5	384.6	445.4	5.3	911.8	867.6	272.7	417	6	1019	890.4	396.2	484.2
ชั่วโมง	°C	°C	°C	°C	ชั่วโมง	°C	°C	°C	°C	ชั่วโมง	°C	°C	°C	°C

* T1 = อุณหภูมิของไหลที่ด้านบน Regenerator T2 = อุณหภูมิอิฐทนไฟที่ด้านบน Regenerator

T3 = อุณหภูมิของไหลที่ด้านล่าง Regenerator T4 = อุณหภูมิอิฐทนไฟที่ด้านล่าง Regenerator

เวลา	T1	T2	T3	T4	เวลา	T1	T2	T3	T4	เวลา	T1	T2	T3	T4
6.01	1019.8	891.9	397.2	486.8	6.31	794.5	887.6	234.2	444	7.01	1040.3	901	397.8	478
6.02	996.9	891.4	393.4	489.7	6.32	792.9	886.5	232.9	441.5	7.02	1018.8	900.1	395	481
6.03	956.5	890.9	378.6	492.2	6.33	791.4	885.5	231.9	439	7.03	967.3	898	379	484
6.04	926.5	891.3	361.8	494.4	6.34	789.9	884.6	230.9	436.4	7.04	928.1	897.7	360.5	486.8
6.05	904.9	891.9	346.6	496.3	6.35	813.6	885.5	234.5	433.8	7.05	897.9	898.4	341.5	489.2
6.06	888.5	892.6	332.8	497.6	6.36	872.3	886.3	247.8	431.4	7.06	873.1	899.1	325.2	490.5
6.07	876.2	893.5	320.7	498.2	6.37	922.7	886.6	265	429.2	7.07	859.5	900.2	312.7	491
6.08	866.8	894.5	310.2	498.2	6.38	952.2	886.5	282.6	427.4	7.08	849	900.9	300.2	491.5
6.09	859.2	895.4	301.4	497.5	6.39	970.2	885.7	298.6	426.2	7.09	839.4	901.5	289.9	490.9
6.1	852.7	896.3	293.7	496.4	6.4	983	885.3	312.7	425.5	7.1	831.4	902.1	281.3	489.6
6.11	847.1	896.9	286.9	494.9	6.41	992	885.1	325	425.5	7.11	824.3	902.6	273.4	487.9
6.12	842.2	897.2	281	493	6.42	998.5	884.7	335.3	426	7.12	818.2	902.9	266.5	485.9
6.13	837.7	897.3	275.9	491.2	6.43	1003.5	884.5	344	427.1	7.13	812.6	903.1	260.5	483.8
6.14	833.8	897.5	271.4	488.9	6.44	1007.9	884.4	351.4	428.8	7.14	807.5	903.1	255.4	481.3
6.15	830.4	897.7	267.2	486.6	6.45	1011.7	884.6	357.7	430.8	7.15	803	903	250.9	478.5
6.16	827	897.8	263.7	484	6.46	1014.5	884.9	363	433	7.16	798.8	902.6	247.1	475.8
6.17	823.8	897.7	260.5	481.5	6.47	1017.2	885.3	367.8	435.8	7.17	794.7	902.1	243.8	473
6.18	820.9	897.4	257.4	478.6	6.48	1019.2	885.8	371.8	438.4	7.18	791.2	901.6	240.5	470.1
6.19	818.2	896.9	254.6	476.1	6.49	1021.1	886.6	375.4	441.3	7.19	787.8	901.2	237.6	467.4
6.2	815.9	896.6	251.9	473.4	6.5	1022.9	887.2	378.5	444.4	7.2	784.4	900.5	234.9	464.4
6.21	813.3	896.1	249.6	470.6	6.51	1024.8	887.9	381.4	447.5	7.21	781.3	899.8	232.5	461.4
6.22	811	895.7	247.7	467.8	6.52	1026.5	888.9	383.8	450.6	7.22	778.3	898.9	230.3	458.5
6.23	808.9	894.8	245.8	465.2	6.53	1028.5	889.9	385.9	453.7	7.23	775.7	898	228.4	455.6
6.24	806.9	894.1	243.9	462.6	6.54	1030	891	387.8	456.6	7.24	773.1	896.9	226.5	452.6
6.25	804.9	893.3	242.5	460	6.55	1031.5	892.3	389.7	459.8	7.25	770.6	895.8	224.6	449.8
6.26	803	892.5	241	457.4	6.56	1033.1	893.5	391.3	463	7.26	768.4	894.6	223.2	446.8
6.27	801.1	891.6	239.4	454.6	6.57	1034.8	894.9	392.8	466.1	7.27	766.4	893.4	221.6	443.9
6.28	799.3	890.6	238.2	451.7	6.58	1036.2	896.5	394.2	469.1	7.28	764.5	892.2	220.1	441
6.29	797.7	889.7	236.9	449.2	6.59	1037.4	897.8	395.4	472	7.29	762.5	890.9	218.7	438
6.3	796	888.7	235.8	446.6	7	1038.7	899.3	396.7	475.1	7.3	760.8	889.4	217.5	435.1
ชั่วโมง	°C	°C	°C	°C	ชั่วโมง	°C	°C	°C	°C	ชั่วโมง	°C	°C	°C	°C

* T1 = อุณหภูมิของไหลที่ด้านบน Regenerator T2 = อุณหภูมิอิฐทนไฟที่ด้านบน Regenerator

T3 = อุณหภูมิของไหลที่ด้านล่าง Regenerator T4 = อุณหภูมิอิฐทนไฟที่ด้านล่าง Regenerator

เวลา	1) Tfi	2) Tmi	3) Tfo	4) Tmo	เวลา	1) Tfi	2) Tmi	3) Tfo	4) Tmo	เวลา	1) Tfi	2) Tmi	3) Tfo	4) Tmo
7.31	758.9	888.1	216.3	432.2	8.01	1033.4	882.2	382.9	438.3	8.31	751.6	877.5	209.5	415
7.32	757	886.6	215	429.4	8.02	1034.9	883.6	384.6	441.8	8.32	843.2	880.9	219.4	412.3
7.33	755.1	885.3	214	426.6	8.03	1036.7	885.2	386.2	445.1	8.33	918.4	882.1	236.3	409.8
7.34	753.4	883.8	212.8	424.1	8.04	1016	884.6	383.9	448.6	8.34	971.4	882.7	255	407.6
7.35	751.5	882.2	211.8	421.4	8.05	965.6	882.3	369.3	451.9	8.35	1009.3	882.8	273	405.8
7.36	749.8	880.8	210.7	418.6	8.06	921.3	881.4	351.3	455	8.36	1033.1	882.7	289.1	404.6
7.37	748.1	879.4	209.8	416.1	8.07	889.4	881.8	333.9	457.6	8.37	1050.5	882.7	303.3	404.2
7.38	746.2	877.7	208.7	413.4	8.08	865.8	882.2	318	459.4	8.38	1064	882.7	315.5	404.6
7.39	744.6	876.3	207.8	411	8.09	848.3	883.1	303.8	460.8	8.39	1074.7	882.9	326	405.6
7.4	757.5	876.9	209.5	408.4	8.1	834.7	884.1	291.2	461.4	8.4	1084.1	883.3	335	407
7.41	817	878.1	221.6	405.9	8.11	823.8	884.7	280.7	461.2	8.41	1091.5	883.7	342.6	408.9
7.42	870.6	878.6	239.6	403.6	8.12	814.9	885.3	271.5	460.5	8.42	1098.6	884.4	349.1	411.1
7.43	909.9	878.4	258.6	401.5	8.13	807.5	885.9	263.4	459.4	8.43	1105.6	885.5	354.9	413.8
7.44	937.4	877.7	276.5	399.9	8.14	801.1	886.4	257	457.8	8.44	1112.2	886.8	359.6	416.6
7.45	956.4	877.2	292.5	399	8.15	795.4	886.6	251.1	456	8.45	1116.8	888.1	363.8	419.6
7.46	969.4	876.6	306.3	399	8.16	790.4	886.8	246.1	454.1	8.46	1120.2	889.7	367.5	422.9
7.47	979.1	876.1	318.2	399.4	8.17	785.8	886.8	241.4	451.8	8.47	1125.6	891.3	370.7	426.2
7.48	987.1	875.5	328.4	400.4	8.18	781.7	886.6	237.2	449.3	8.48	1130.5	893.4	373.5	429.5
7.49	993.5	875.2	337.1	402	8.19	777.7	886.2	233.5	446.8	8.49	1134.3	895.3	376	433
7.5	999.2	875	344.5	404.1	8.2	774	885.9	230.4	444.4	8.5	1138.2	897.6	378.2	436.4
7.51	1004.2	874.7	350.8	406.3	8.21	770.7	885.5	227.6	441.9	8.51	1142.6	900	380.4	439.9
7.52	1008.4	875	356.3	409	8.22	767.5	885	225	439.4	8.52	1145.4	902.3	382.2	443.2
7.53	1012	875.2	360.8	411.8	8.23	764.4	884.4	222.6	436.6	8.53	1149.8	905	383.9	446.6
7.54	1015.8	875.7	365	415	8.24	761.7	883.5	220.4	434	8.54	1152.2	907.8	385.5	450.1
7.55	1019	876.2	368.5	418.1	8.25	759.1	882.5	218.2	431.1	8.55	1155.3	910.8	387	453.4
7.56	1021.7	876.8	371.6	421.3	8.26	756.3	881.7	216.4	428.5	8.56	1158.3	913.7	388.4	457
7.57	1024.3	877.7	374.4	424.6	8.27	753.9	880.6	214.5	425.8	8.57	1160.7	916.5	389.6	460.1
7.58	1026.6	878.6	376.9	428	8.28	751.6	879.5	212.9	422.9	8.58	1166.1	919.5	390.8	463.3
7.59	1029.1	879.7	379	431.5	8.29	749.2	878.3	211.2	420.2	8.59	1171.8	922.9	392.2	466.6
8	1031.3	880.9	381	435	8.3	747.1	877.1	209.7	417.5	9	1175.1	926.1	393.4	469.9
ชั่วโมง	°C	°C	°C	°C	ชั่วโมง	°C	°C	°C	°C	ชั่วโมง	°C	°C	°C	°C

* T1 = อุณหภูมิของไหลที่ด้านบน Regenerator T2 = อุณหภูมิอิฐทนไฟที่ด้านบน Regenerator

T3 = อุณหภูมิของไหลที่ด้านล่าง Regenerator T4 = อุณหภูมิอิฐทนไฟที่ด้านล่าง Regenerator

เวลา	1) Tfi	2) Tmi	3) Tfo	4) Tmo	เวลา	1) Tfi	2) Tmi	3) Tfo	4) Tmo	เวลา	1) Tfi	2) Tmi	3) Tfo	4) Tmo
9.01	1176.3	926.5	394.6	473.1	9.31	777.3	924	209.4	429	10.01	1183.9	956.7	392.8	469
9.02	1141.7	926.6	392.5	476.3	9.32	774.6	922.5	208.1	426.2	10.02	1176.6	958.7	393.5	472
9.03	1067	923.4	377	479.3	9.33	783.3	922.9	208.8	423.4	10.03	1104.9	952.9	382.5	475
9.04	1010.4	923.8	358.1	482.2	9.34	863.3	924.9	219.7	420.6	10.04	1041.6	951.9	364	477.8
9.05	969.9	925.3	340	484.6	9.35	946.6	926.2	236.6	418	10.05	995.7	952.5	345.5	480.1
9.06	940.6	927.3	323.8	486.2	9.36	1004.1	926.5	255.2	415.6	10.06	962.5	953.6	328.4	481.9
9.07	918.4	928.9	309.8	487.3	9.37	1042.2	926.6	273.4	413.8	10.07	938.3	955.2	313.2	483.1
9.08	901	930.5	297.9	487.6	9.38	1065.8	926.3	289.7	412.7	10.08	920	956.7	300.5	483.6
9.09	887.3	932	287	487.1	9.39	1082.5	925.8	303.9	412.2	10.09	905.6	958.1	289	483.3
9.1	875.8	933.3	277.4	486.2	9.4	1097.1	925.7	316.2	412.3	10.1	893.6	959.3	278.8	482.5
9.11	866.1	934.7	269.7	484.7	9.41	1107.6	925.7	326.8	413.1	10.11	883.3	960.3	270.4	481
9.12	857.7	935.7	262.7	482.8	9.42	1116	925.6	335.9	414.3	10.12	874.5	961.2	263	479.4
9.13	850.3	936.5	256.8	480.7	9.43	1124.1	925.7	343.5	416.1	10.13	866.6	961.6	256.7	477.4
9.14	843.2	937	251.4	478.3	9.44	1132.1	926.1	350.2	418.1	10.14	859.8	962.1	251.2	475.1
9.15	837.2	937.4	246.8	475.8	9.45	1137.2	926.9	355.8	420.5	10.15	853.2	962.5	246.5	472.7
9.16	831.5	937.7	242.7	473	9.46	1141.4	927.3	360.5	422.9	10.16	847.2	962.4	242.2	470
9.17	826.3	937.6	238.9	470.2	9.47	1145.8	928.1	364.6	425.6	10.17	841.7	962.1	238	467.3
9.18	821.5	937.5	235.5	467.4	9.48	1150.4	929.3	368.5	428.5	10.18	836.8	961.8	234.4	464.6
9.19	816.9	937.1	232.3	464.5	9.49	1155.1	930.4	371.7	431.5	10.19	832.1	961.4	231.4	461.7
9.2	812.6	936.9	229.4	461.4	9.5	1161.4	932.4	374.5	434.6	10.2	827.6	960.6	228.3	458.7
9.21	808.6	936.1	226.8	458.4	9.51	1165.6	934	377	437	10.21	823.5	959.7	225.6	455.8
9.22	804.7	935.4	224.4	455.4	9.52	1168.5	935.7	379.3	441	10.22	819.5	958.5	223.4	452.8
9.23	801.1	934.5	222.4	452.3	9.53	1170.9	937.7	381.3	444.2	10.23	815.7	957.7	221.1	449.8
9.24	797.7	933.7	220.2	449.4	9.54	1173.6	939.4	383	447.3	10.24	812.3	956.5	219.1	447
9.25	794.6	932.5	218.3	446.4	9.55	1176.9	941.6	384.6	450.4	10.25	808.8	955.4	217.4	444.2
9.26	791.4	931.3	216.6	443.4	9.56	1179.1	944.3	386	453.6	10.26	805.5	954.1	215.8	441.3
9.27	788.5	929.9	215	440.6	9.57	1180.6	946.5	387.5	456.8	10.27	802.5	952.7	213.9	438.3
9.28	785.7	928.6	213.6	437.7	9.58	1182.2	948.9	388.9	459.9	10.28	799.3	951.1	212.2	435.3
9.29	782.7	927.1	212.1	434.6	9.59	1183.1	951.4	390.3	463	10.29	796.4	949.3	210.6	432.4
9.3	780.1	925.6	210.7	431.8	10	1183.3	953.9	391.5	466	10.3	793.5	947.9	209.4	429.6
ชั่วโมง	°C	°C	°C	°C	ชั่วโมง	°C	°C	°C	°C	ชั่วโมง	°C	°C	°C	°C

* T1 = อุณหภูมิของไหลที่ด้านบน Regenerator T2 = อุณหภูมิอิฐทนไฟที่ด้านบน Regenerator

T3 = อุณหภูมิของไหลที่ด้านล่าง Regenerator T4 = อุณหภูมิอิฐทนไฟที่ด้านล่าง Regenerator

เวลา	1) Tfi	2) Tmi	3) Tfo	4) Tmo	เวลา	1) Tfi	2) Tmi	3) Tfo	4) Tmo	เวลา	1) Tfi	2) Tmi	3) Tfo	4) Tmo
10.31	790.7	946.1	208	426.6	11.01	1112.7	963.1	398.7	475.8	11.31	795.7	946.9	211.5	436.4
10.32	788	944.1	206.9	423.8	11.02	1113.9	964.9	399.8	479	11.32	870.6	949.5	222.1	433.5
10.33	818.7	945.9	210.6	420.9	11.03	1079.9	961.7	395	482.2	11.33	931.6	950.1	239.4	430.7
10.34	897.7	947.4	224.5	418.2	11.04	1021.7	959.3	377.9	485.4	11.34	972.6	950.1	258.9	428.2
10.35	953.8	948	243.2	415.7	11.05	978.4	959	358.8	488.2	11.35	998.3	949.8	278.1	426.5
10.36	990.7	947.6	262.3	413.6	11.06	947.5	959.8	341.3	490.8	11.36	1016.2	949	295	425.2
10.37	1015.8	946.9	280.4	412.1	11.07	924.4	960.2	325.3	492.4	11.37	1030.3	948.2	309.5	424.7
10.38	1033.2	946.1	296.3	411.1	11.08	906.6	960.9	311	493.2	11.38	1041.8	947.4	322.2	425.2
10.39	1045.8	945.5	310.2	411	11.09	892.9	961.8	299	493.4	11.39	1051.5	946.9	332.8	426.2
10.4	1055.5	944.7	322.3	411.6	11.1	882	962.4	288.3	493	11.4	1059.2	946.5	341.8	427.8
10.41	1062.4	944.3	332.5	412.7	11.11	872.6	963.1	279.1	492	11.41	1065.8	946.2	349.6	429.9
10.42	1068.6	943.7	341.3	414.4	11.12	864	963.6	270.6	490.3	11.42	1071.8	946.1	356.3	432.5
10.43	1073.6	943.5	348.7	416.5	11.13	856.8	964	263.6	488.6	11.43	1067.2	945.5	362	435.3
10.44	1077.8	943.4	355.2	419	11.14	849.4	963.7	257.4	486.2	11.44	1056.5	945.3	366.2	438.2
10.45	1081.7	943.7	360.7	421.8	11.15	842.9	963.6	251.8	483.7	11.45	1041.3	944.9	369.7	441.3
10.46	1085.4	944.1	365.5	424.7	11.16	837.6	963.3	247	481	11.46	1024.4	945.3	372.2	444.6
10.47	1088.5	944.6	369.7	427.9	11.17	832.9	962.8	242.6	478.1	11.47	1034.7	945.3	374.5	448.1
10.48	1091.3	945.3	373.4	431.3	11.18	828.8	962.1	238.7	475.2	11.48	1028.2	945.1	377.1	451.7
10.49	1094.1	945.9	376.6	434.6	11.19	824.8	961.4	235	472.2	11.49	1017.4	944.8	380.1	455.7
10.5	1096.5	946.8	379.4	438.1	11.2	820.7	960.5	231.8	469.1	11.5	998.7	944.9	382.8	459.8
10.51	1099.4	948	382.2	441.7	11.21	817	959.4	228.9	466	11.51	981.2	945.2	385	464
10.52	1101.4	949.3	384.7	445.2	11.22	813.5	958.3	226	463	11.52	962.6	945.2	386.9	468.2
10.53	1103.1	950.7	386.8	448.6	11.23	810	957.1	223.6	459.9	11.53	948	945.5	388.8	472.3
10.54	1104.6	952.1	388.8	452.1	11.24	806.8	955.9	221.4	457	11.54	933.6	945.8	390.9	476.6
10.55	1105.9	953.7	390.5	455.7	11.25	803.7	954.7	219.2	453.9	11.55	920	945.8	392.4	480.6
10.56	1107	954.9	392.1	459	11.26	801	953.3	217.5	451	11.56	904.1	946.1	393.8	484.6
10.57	1108.2	956.4	393.4	462.3	11.27	798.4	951.7	216.1	447.9	11.57	891.7	946.1	395	488.6
10.58	1109.4	957.9	395	465.8	11.28	795.6	950.1	214.3	445	11.58	886.3	946.1	395.9	492.3
10.59	1110.4	959.7	396.4	469.2	11.29	792.9	948.8	212.6	442.1	11.59	883.4	946.4	397	496
11	1111.7	961.6	397.6	472.5	11.3	790.6	947	211.2	439.2	12	887.1	946.1	396.4	499.4
ชั่วโมง	°C	°C	°C	°C	ชั่วโมง	°C	°C	°C	°C	ชั่วโมง	°C	°C	°C	°C

* T1 = อุณหภูมิของไอน้ำที่ด้านบน Regenerator T2 = อุณหภูมิอิฐทนไฟที่ด้านบน Regenerator

T3 = อุณหภูมิของไอน้ำที่ด้านล่าง Regenerator T4 = อุณหภูมิอิฐทนไฟที่ด้านล่าง Regenerator

ภาคผนวก ค

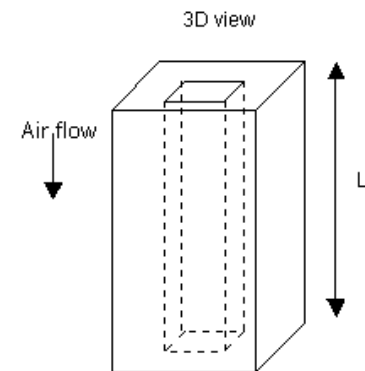
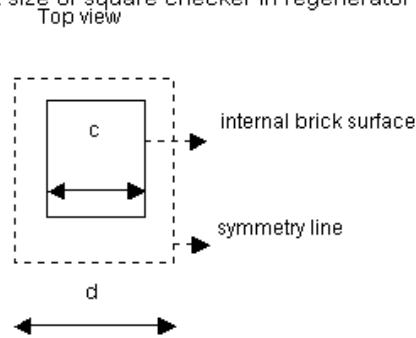
ข้อมูลและผลการจำลองแบบจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

time cycle (s)	2400	1800	1200	600	565	531	529	527	450	300	60	ACC=0.001
Heat storage (1 ch)	16,003,655	12,037,649	8,062,969	4,048,158	3,812,360	3,582,875	3,569,694	3,556,166	3,035,776	2,019,163	379,098	J/cycle
Heat recovery (1 ch)	15,946,925	11,994,464	8,033,716	4,033,547	3,798,499	3,570,045	3,556,469	3,543,032	3,024,721	2,011,217	376,897	J/cycle
Heat recovery in 1 hour (1 ch)	23,920,387	23,988,929	24,101,149	24,201,279	24,202,826	24,203,692	24,202,810	24,202,878	24,197,768	24,134,606	22,613,795	J/hr
compare wih 1800s (1 ch)	-68542	0	112220	212351	213897	214763	213881	213949	208839	145677	-1375134	J/hr
compare wih 1800s (1 ch)	-0.2857	0.0000	0.4678	0.8852	0.8916	0.8953	0.8916	0.8919	0.8706	0.6073	-5.7324	%
Heat storage (120 ch)	1,920,438,564	1,444,517,856	967,556,335	485,778,939	457,483,161	429,945,000	428,363,260	426,739,878	364,293,132	242,299,516	45,491,732	J/cycle
Heat recovery (120 ch)	1,913,630,972	1,439,335,730	964,045,965	484,025,590	455,819,883	428,405,344	426,776,222	425,163,893	362,966,518	241,346,061	45,227,589	J/cycle
Heat recovery in 1 hour (120 ch)	2,870,446,458	2,878,671,460	2,892,137,894	2,904,153,538	2,904,339,075	2,904,443,014	2,904,337,239	2,904,345,381	2,903,732,145	2,896,152,730	2,713,655,350	J/hr
compare wih 1800s (120 ch)	-8,225,002	0	13,466,433	25,482,077	25,667,615	25,771,553	25,665,779	25,673,921	25,060,685	17,481,270	-165,016,110	J/hr
compare wih 1800s (120 ch)	-0.2857	0	0.4678	0.8852	0.8916	0.8953	0.8916	0.8919	0.8706	0.6073	-5.7324	%
oil saving (120 ch)	-0.2068	0	0.3386	0.6407	0.6454	0.6480	0.6454	0.6456	0.6301	0.4396	-4.1493	Litre/hr
	-1811.69	0.00	2966.20	5612.85	5653.72	5676.61	5653.31	5655.11	5520.03	3850.54	-36347.53	Litre/yr
time cycle (s)	1800	1200	900	600	565	531	529	527	450	300	60	ACC=0.001
Heat storage (1 ch)	17,909,033	8,062,969	6,062,231	4,048,158	3,812,360	3,582,875	3,569,694	3,556,166	3,035,776	2,019,163	379,098	J/cycle
Heat recovery (1 ch)	10,054,682	8,033,716	6,039,756	4,033,547	3,798,499	3,570,045	3,556,469	3,543,032	3,024,721	2,011,217	376,897	J/cycle
Heat recovery in 1 hour (1 ch)	20,109,364	24,101,149	24,159,025	24,201,279	24,202,826	24,203,692	24,202,810	24,202,878	24,197,768	24,134,606	22,613,795	J/hr
compare wih 1800s (1 ch)	0	3,991,785	4,049,660	4,091,915	4,093,461	4,094,327	4,093,446	4,093,514	4,088,403	4,025,242	2,504,430	J/hr
compare wih 1800s (1 ch)	0	19.85	20.14	20.35	20.36	20.36	20.36	20.36	20.33	20.02	12.45	%
Heat storage (120 ch)	2,149,083,996	967,556,335	727,467,714	485,778,939	457,483,161	429,945,000	428,363,260	426,739,878	364,293,132	242,299,516	45,491,732	J/cycle
Heat recovery (120 ch)	1,206,561,869	964,045,965	724,770,741	484,025,590	455,819,883	428,405,344	426,776,222	425,163,893	362,966,518	241,346,061	45,227,589	J/cycle
Heat recovery in 1 hour (120 ch)	2,413,123,738	2,892,137,894	2,899,082,965	2,904,153,538	2,904,339,075	2,904,443,014	2,904,337,239	2,904,345,381	2,903,732,145	2,896,152,730	2,713,655,350	J/hr
compare wih 1800s (120 ch)	0	479,014,156	485,959,228	491,029,800	491,215,337	491,319,276	491,213,501	491,221,643	490,608,407	483,028,992	300,531,612	J/hr
compare wih 1800s (120 ch)	0	19.85	20.14	20.35	20.36	20.36	20.36	20.36	20.33	20.02	12.45	%
oil saving (120 ch)	0	12.04	12.22	12.35	12.35	12.35	12.35	12.35	12.34	12.15	7.56	Litre/hr
ACC 1800 = 15	0	105510.79	107040.55	108157.43	108198.30	108221.19	108197.89	108199.69	108064.61	106395.12	66197.06	Litre/yr

1.) Input size of square checker in regenerator



$$c = 0.18 \text{ m}$$

$$d = 0.26 \text{ m}$$

$$\text{time Batcl} = 12 \text{ Hr}$$

$$L = 5.04 \text{ m}$$

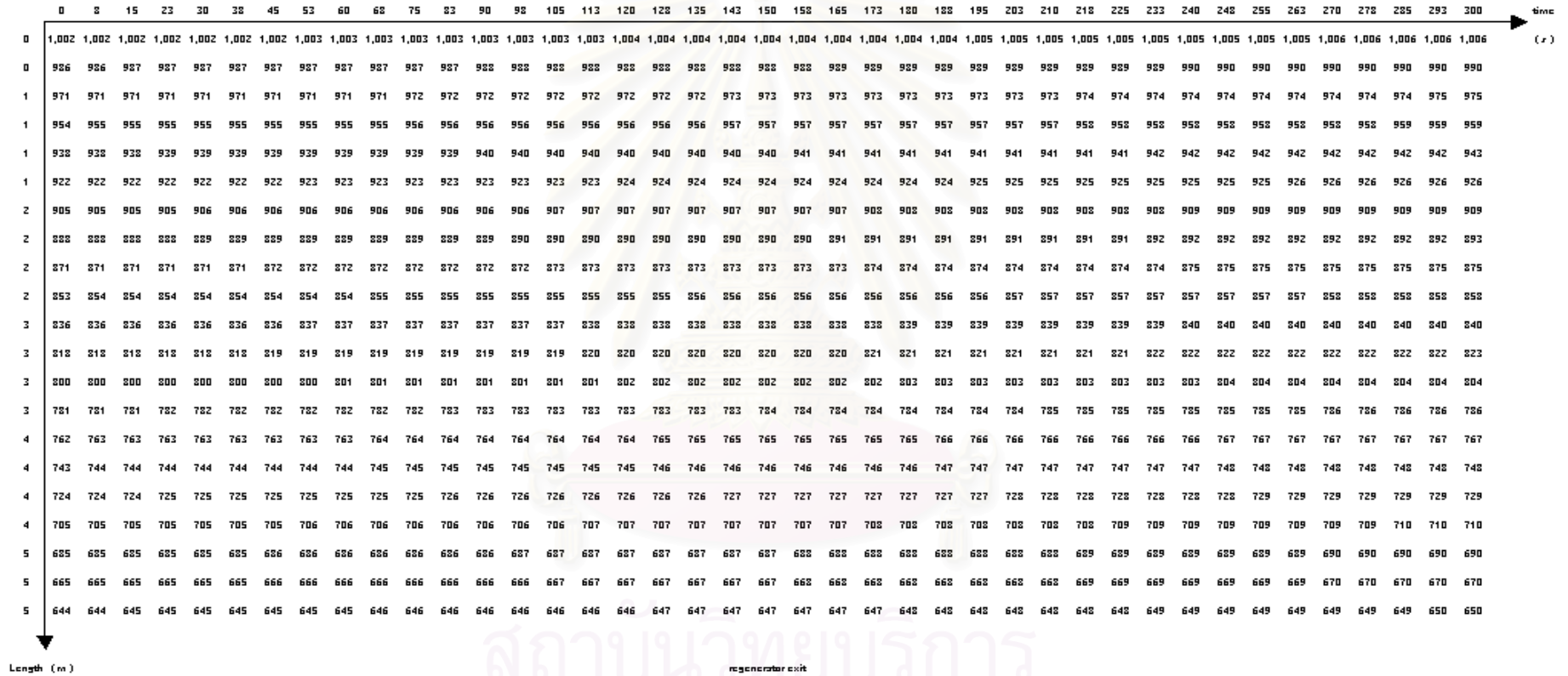
$$\text{channel} = 120.0 \text{ channel}$$

2.) Input heat transfer data

time mean ambient temperature, t_a	=	38 °C	
time mean relative humidity	=	80 %	
deviding Length	=	20 deviding Time	= 40
time mean fluid temperature (in), t_{fih}	=	1052 °C	} hot period
time mean fluid temperature (out), t_{foh}	=	434 °C	
time mean solid temperature (in), t_{mih}	=	907 °C	
time mean solid temperature (out), t_{moh}	=	420 °C	
time mean fluid temperature (in), t_{fic}	=	241 °C	} cold period
time mean fluid temperature (out), t_{foc}	=	751 °C	
time mean solid temperature (in), t_{mic}	=	402 °C	
time mean solid temperature (out), t_{noc}	=	890 °C	
Time cycle, PE	=	300 s	
Dry weight ore =	23000 kg	%H ₂ O =	7.52 % by Wet weight
Accuracy, ACC	=	0.001	
Fluid volume flow rate (cold period)	=	4950 m ³ /hr	
Oil mass flow rate	=	270 kg/hr	
	CO ₂ =	12.33 (% vol.)	
component of fluid (hot period)	CO =	377 (ppm)	
	O ₂ =	4.61 (% vol.)	
Emissivity of gas hot period, E_g	=	0.133	
Absorptivity of gas hot period, A_g	=	0.1189	
Emissivity of gas cold period, E_g	=	0.034	
Absorptivity of gas cold period, A_g	=	0.0299	

solid temperature distribution hot period (degree C)

regenerator entrance



time to cyclic equilibrium 274 hr

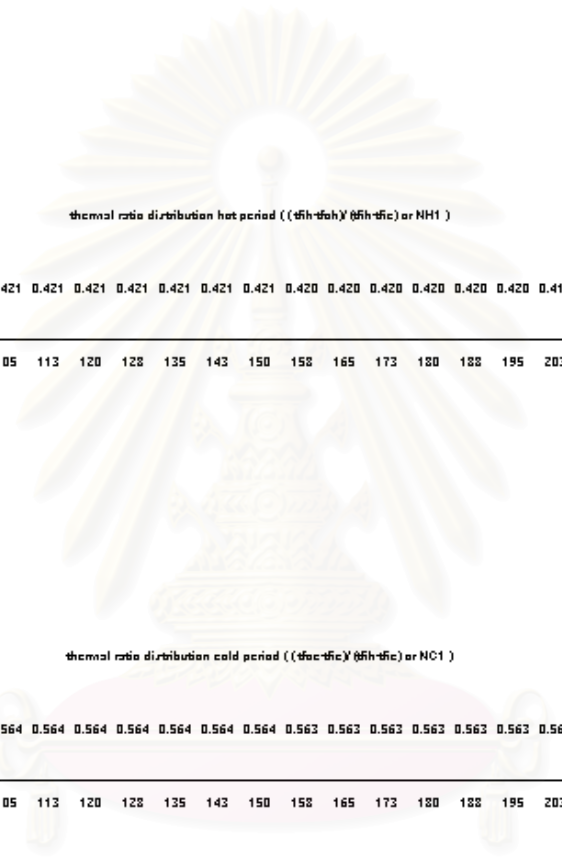
start of period

Heat storage 2,019,163 J

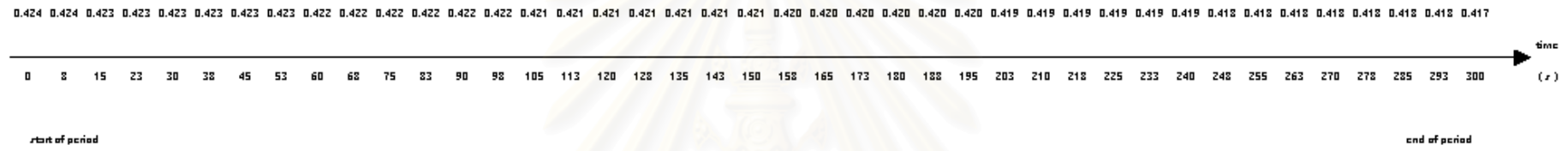
end of period

Heat recovery 2,011,217 J

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



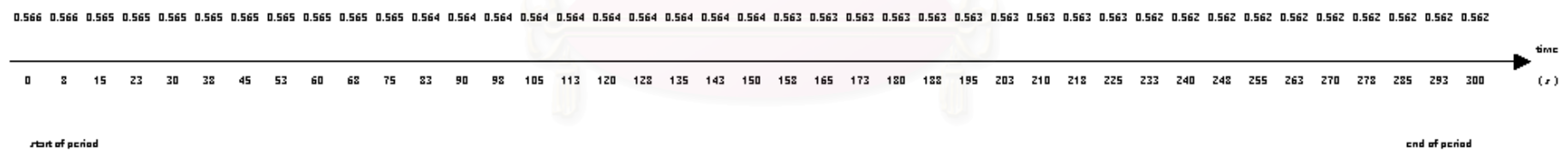
thermal ratio distribution hot period ((ශීතලය) (ශීතලය) or NH1)



start of period

end of period

thermal ratio distribution cold period ((ශීතලය) (ශීතලය) or NC1)

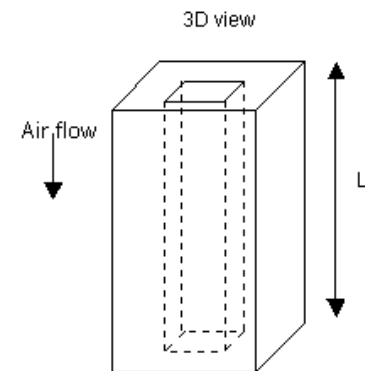
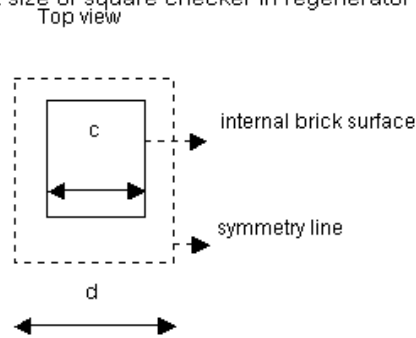


start of period

end of period

ස්ථාප්නවිෂයවර්ග
උපාලනග්‍රන්ථවිෂය

1.) Input size of square checker in regenerator



$$c = 0.18 \text{ m}$$

$$d = 0.26 \text{ m}$$

$$\text{time Batcl} = 12 \text{ Hr}$$

$$L = 5.04 \text{ m}$$

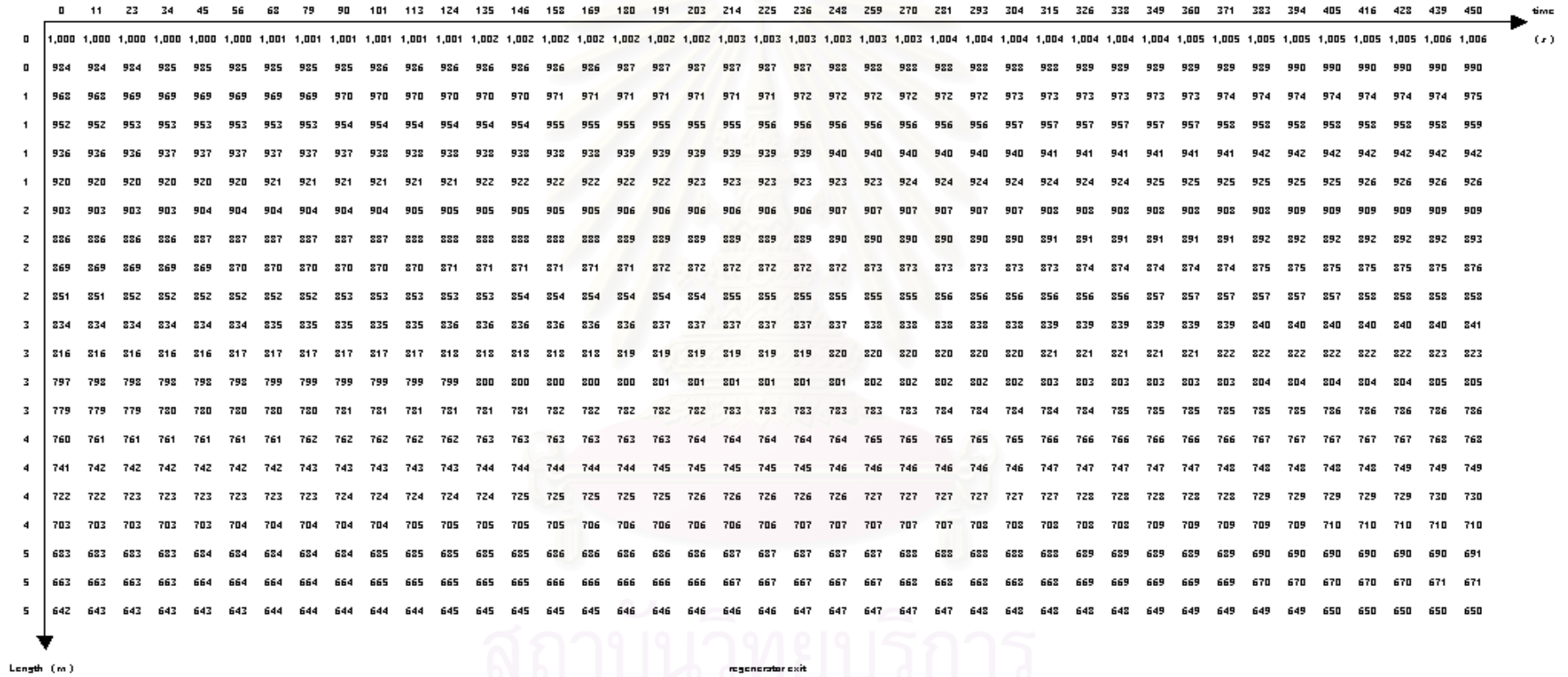
$$\text{channel} = 120.0 \text{ channel}$$

2.) Input heat transfer data

time mean ambient temperature, t_a	=	38 °C	
time mean relative humidity	=	80 %	
deviding Length	=	20 deviding Time	= 40
time mean fluid temperature (in), t_{fih}	=	1052 °C	} hot period
time mean fluid temperature (out), t_{foh}	=	434 °C	
time mean solid temperature (in), t_{mih}	=	907 °C	
time mean solid temperature (out), t_{moh}	=	420 °C	
time mean fluid temperature (in), t_{fic}	=	241 °C	} cold period
time mean fluid temperature (out), t_{foc}	=	751 °C	
time mean solid temperature (in), t_{mic}	=	402 °C	
time mean solid temperature (out), t_{noc}	=	890 °C	
Time cycle, PE	=	450 s	
Dry weight ore =	23000 kg	%H ₂ O =	7.52 % by Wet weight
Accuracy, ACC	=	0.001	
Fluid volume flow rate (cold period)	=	4950 m ³ /hr	
Oil mass flow rate	=	270 kg/hr	
	CO ₂ =	12.33 (% vol.)	
component of fluid (hot period)	CO =	377 (ppm)	
	O ₂ =	4.61 (% vol.)	
Emissivity of gas hot period, E_g	=	0.133	
Absorptivity of gas hot period, A_g	=	0.1189	
Emissivity of gas cold period, E_g	=	0.034	
Absorptivity of gas cold period, A_g	=	0.0299	

solid temperature distribution hot period (degree C)

regenerator entrance



regenerator exit

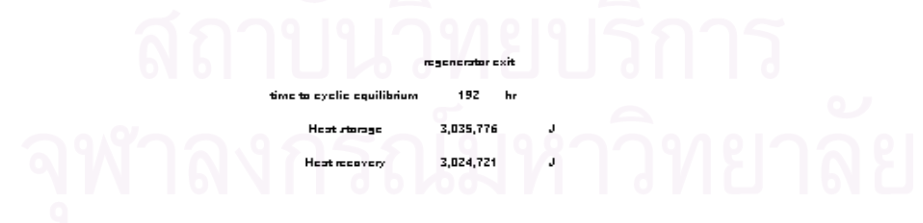
time to cyclic equilibrium 192 hr

start of period

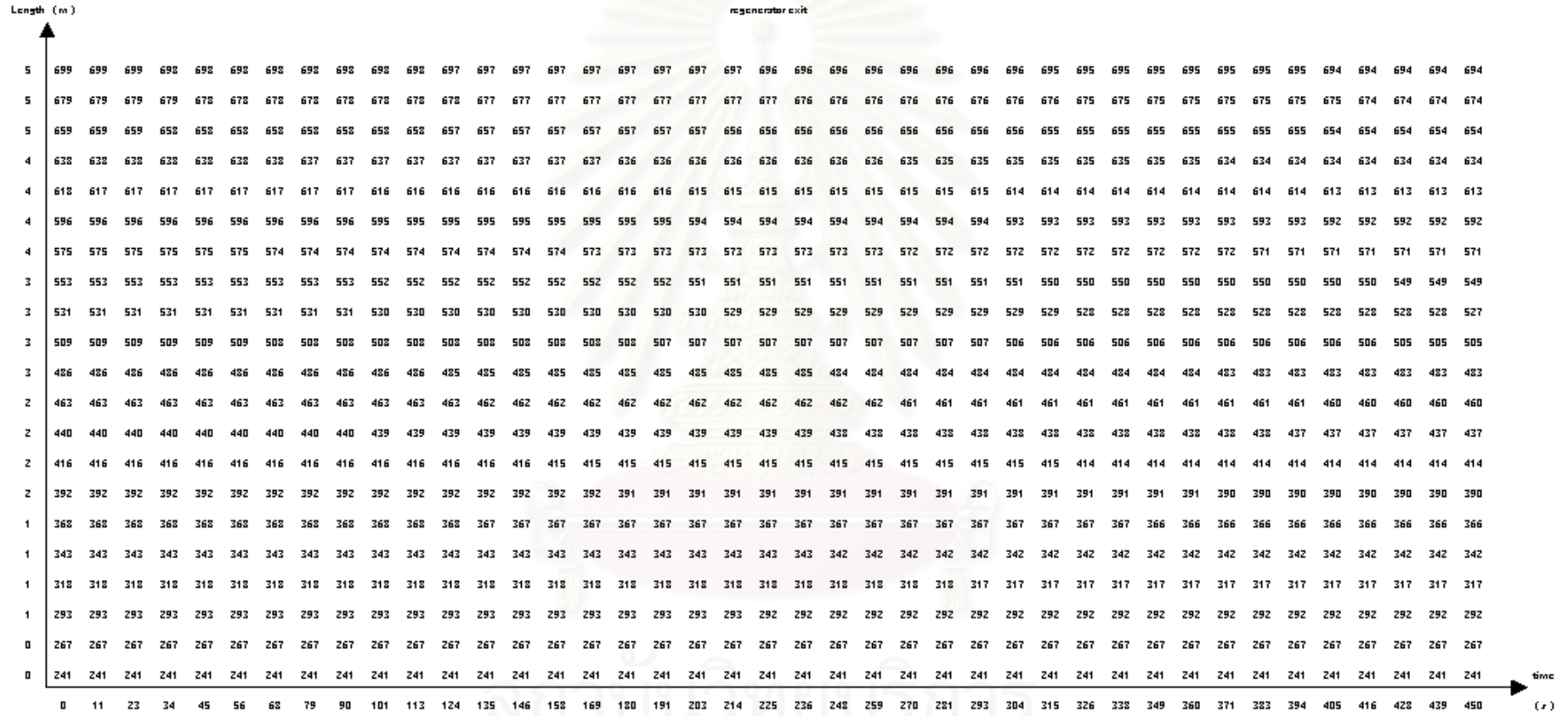
Heat storage 3,035,776 J

end of period

Heat recovery 3,024,721 J



fluid temperature distribution cold period (degree C)



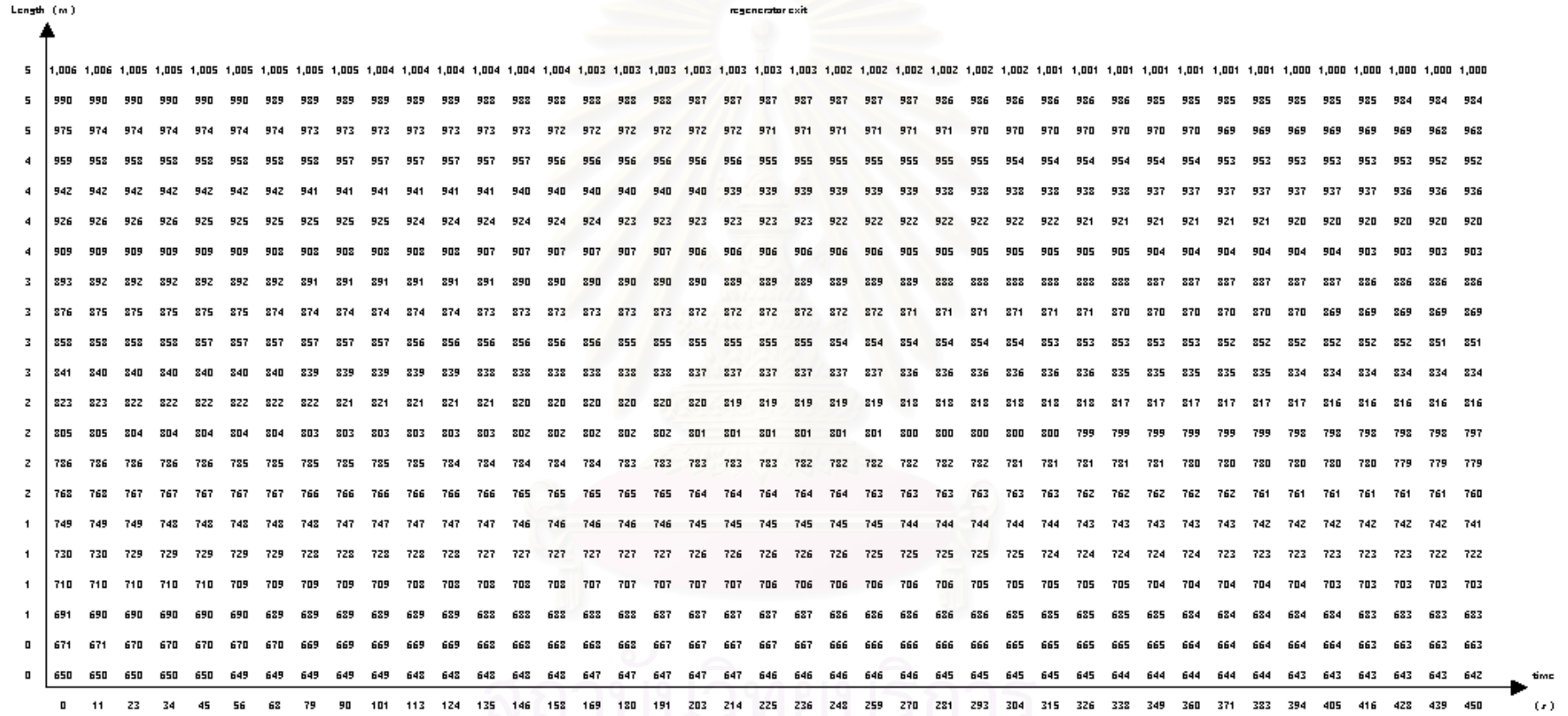
start of period

regenerator entrance

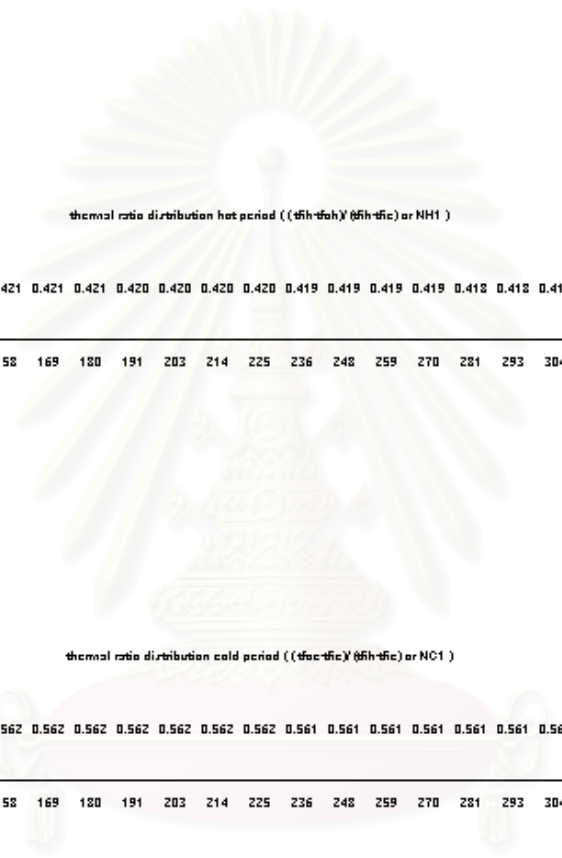
end of period

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

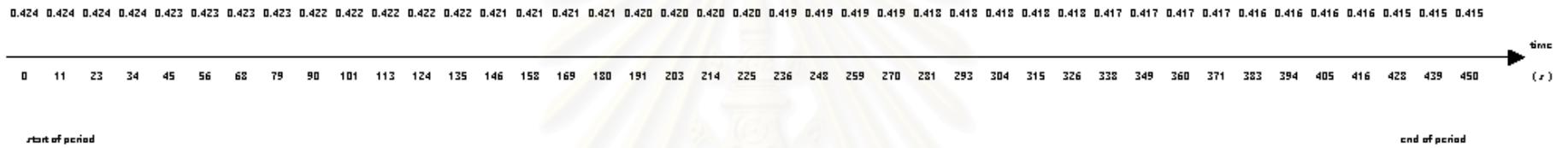
solid temperature distribution cold period (degree C)



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



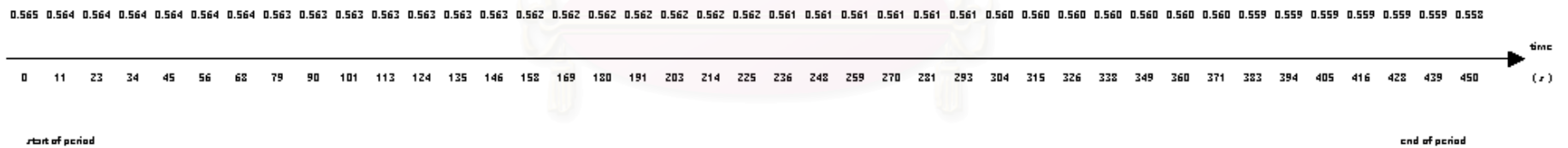
thermal ratio distribution hot period ((θ_{h-c}) (θ_{h-c}) or NH1)



start of period

end of period

thermal ratio distribution cold period ((θ_{c-c}) (θ_{c-c}) or NC1)

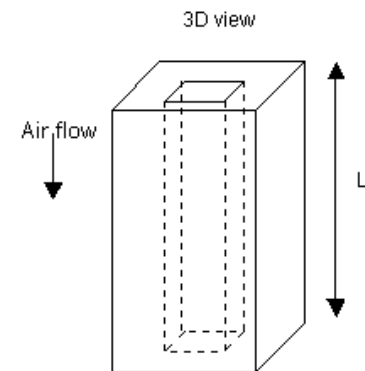
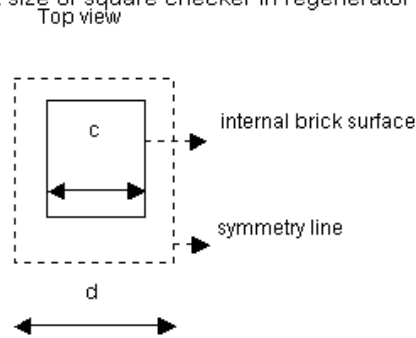


start of period

end of period

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.) Input size of square checker in regenerator



$$c = 0.18 \text{ m}$$

$$d = 0.26 \text{ m}$$

$$\text{time Batcl} = 12 \text{ Hr}$$

$$L = 5.04 \text{ m}$$

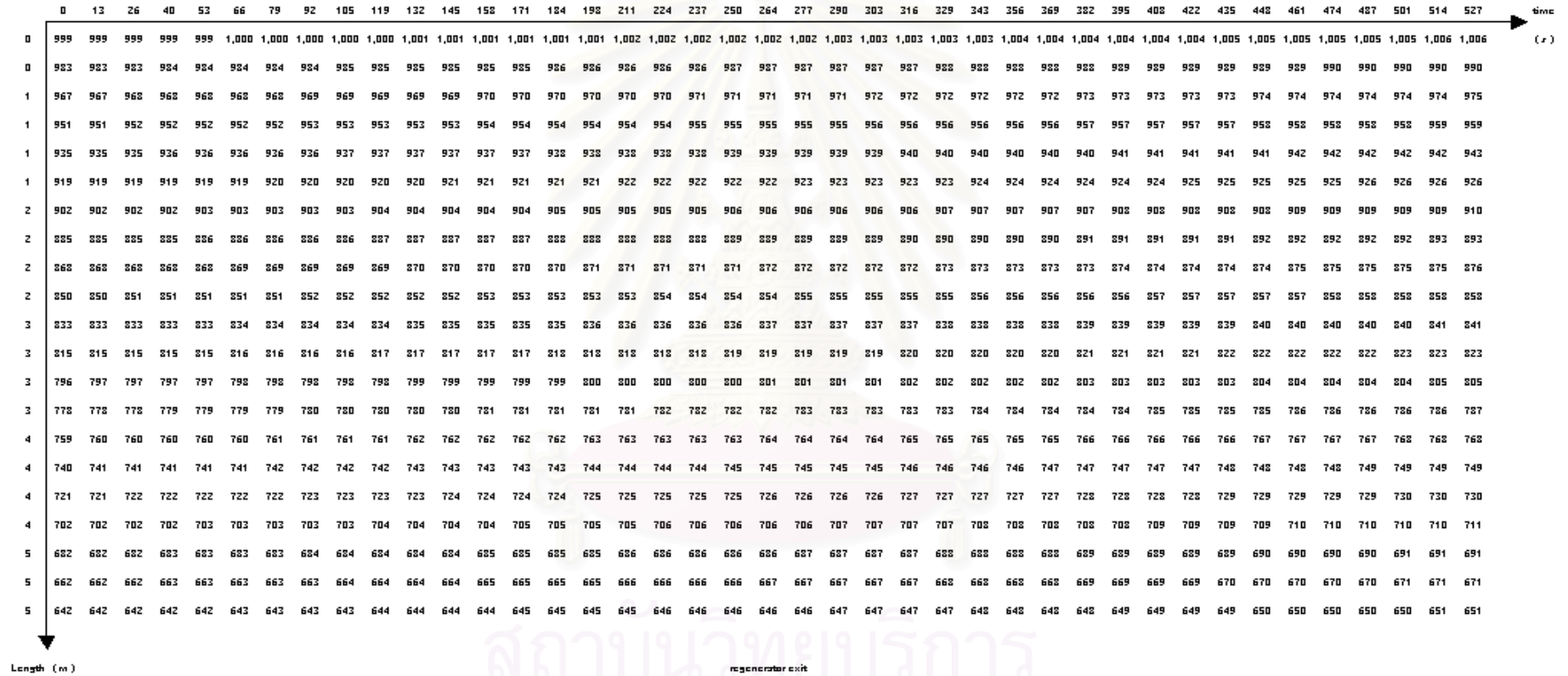
$$\text{channel} = 120.0 \text{ channel}$$

2.) Input heat transfer data

time mean ambient temperature, t_a	=	38 °C	
time mean relative humidity	=	80 %	
deviding Length	=	20	deviding Time = 40
time mean fluid temperature (in), t_{fih}	=	1052 °C	} hot period
time mean fluid temperature (out), t_{foh}	=	434 °C	
time mean solid temperature (in), t_{mih}	=	907 °C	
time mean solid temperature (out), t_{moh}	=	420 °C	
time mean fluid temperature (in), t_{fic}	=	241 °C	} cold period
time mean fluid temperature (out), t_{foc}	=	751 °C	
time mean solid temperature (in), t_{mic}	=	402 °C	
time mean solid temperature (out), t_{noc}	=	890 °C	
Time cycle, PE	=	527 s	
Dry weight ore =	23000 kg	%H ₂ O =	7.52 % by Wet weight
Accuracy, ACC	=	0.001	
Fluid volume flow rate (cold period)	=	4950 m ³ /hr	
Oil mass flow rate	=	270 kg/hr	
	CO ₂ =	12.33 (% vol.)	
component of fluid (hot period)	CO =	377 (ppm)	
	O ₂ =	4.61 (% vol.)	
Emissivity of gas hot period, E_g	=	0.133	
Absorptivity of gas hot period, A_g	=	0.1189	
Emissivity of gas cold period, E_g	=	0.034	
Absorptivity of gas cold period, A_g	=	0.0299	

solid temperature distribution hot period (degree C)

regenerator entrance



time to cyclic equilibrium 167 hr

start of period

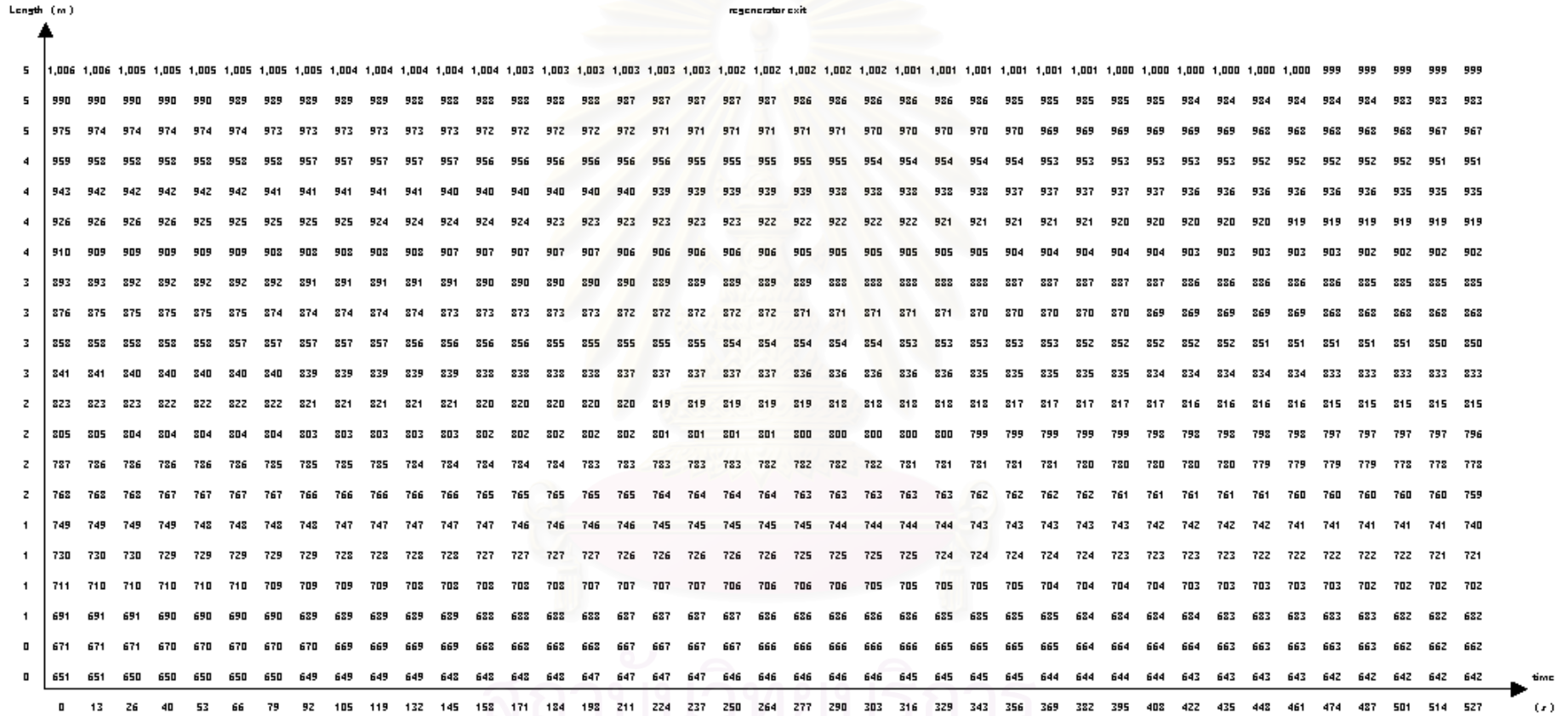
Heat storage 3,556,166 J

end of period

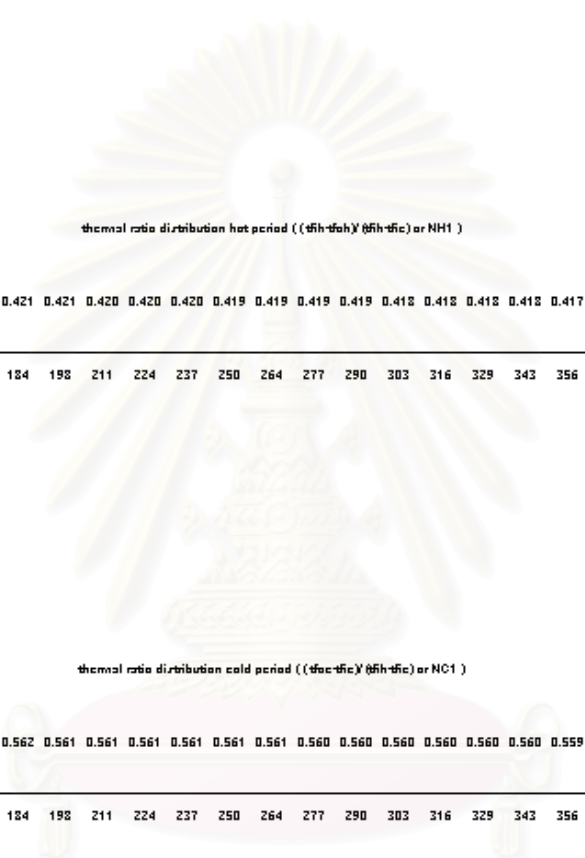
Heat recovery 3,543,032 J

สถาบันนายบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

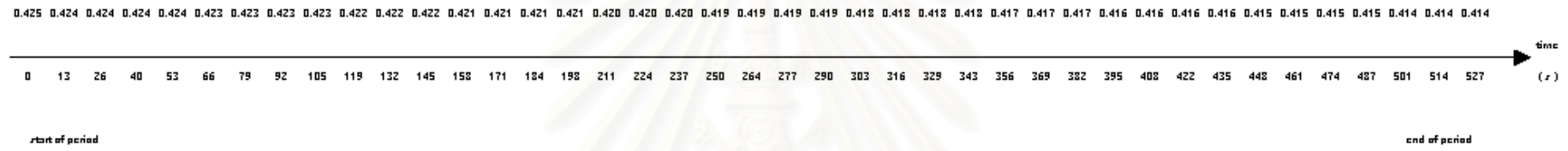
solid temperature distribution cold period (degree C)



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



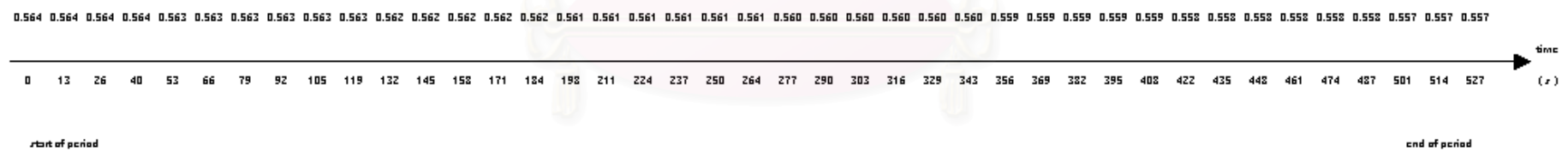
thermal ratio distribution hot period ((t_{hr} - t_{hc}) / (t_{hr} - t_{fc})) or NH1)



start of period

end of period

thermal ratio distribution cold period ((t_{fc} - t_{hc}) / (t_{hr} - t_{fc})) or NC1)

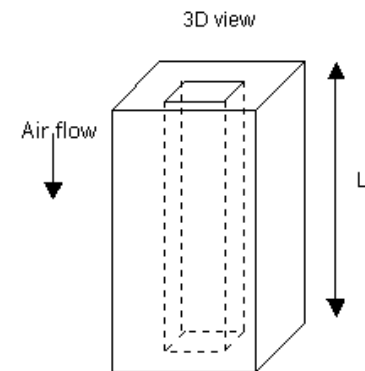
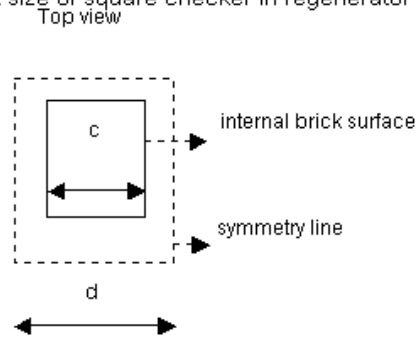


start of period

end of period

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.) Input size of square checker in regenerator



$$c = 0.18 \text{ m}$$

$$d = 0.26 \text{ m}$$

$$\text{time Batcl} = 12 \text{ Hr}$$

$$L = 5.04 \text{ m}$$

$$\text{channel} = 120.0 \text{ channel}$$

2.) Input heat transfer data

time mean ambient temperature, t_a	=	38 °C	
time mean relative humidity	=	80 %	
deviding Length	=	20 deviding Time	= 40
time mean fluid temperature (in), t_{fih}	=	1052 °C	} hot period
time mean fluid temperature (out), t_{foh}	=	434 °C	
time mean solid temperature (in), t_{mih}	=	907 °C	
time mean solid temperature (out), t_{moh}	=	420 °C	
time mean fluid temperature (in), t_{fic}	=	241 °C	} cold period
time mean fluid temperature (out), t_{foc}	=	751 °C	
time mean solid temperature (in), t_{mic}	=	402 °C	
time mean solid temperature (out), t_{noc}	=	890 °C	
Time cycle, PE	=	529 s	
Dry weight ore =	23000 kg	%H ₂ O =	7.52 % by Wet weight
Accuracy, ACC	=	0.001	
Fluid volume flow rate (cold period)	=	4950 m ³ /hr	
Oil mass flow rate	=	270 kg/hr	
	CO ₂ =	12.33 (% vol.)	
component of fluid (hot period)	CO =	377 (ppm)	
	O ₂ =	4.61 (% vol.)	
Emissivity of gas hot period, E_g	=	0.133	
Absorptivity of gas hot period, A_g	=	0.1189	
Emissivity of gas cold period, E_g	=	0.034	
Absorptivity of gas cold period, A_g	=	0.0299	

solid temperature distribution hot period (degree C)

regenerator entrance

	0	13	26	40	53	66	79	93	106	119	132	145	159	172	185	198	212	225	238	251	265	278	291	304	317	331	344	357	370	384	397	410	423	436	450	462	476	489	503	516	529	time (r)		
0	999	999	999	999	999	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,002	1,002	1,002	1,002	1,002	1,002	1,003	1,003	1,003	1,003	1,003	1,004	1,004	1,004	1,004	1,004	1,004	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005	1,006	1,006			
0	983	983	983	984	984	984	984	984	985	985	985	985	985	985	985	986	986	986	986	986	987	987	987	987	987	987	988	988	988	988	988	988	989	989	989	989	989	989	990	990	990	990		
1	967	967	968	968	968	968	968	969	969	969	969	969	969	970	970	970	970	970	971	971	971	971	971	971	972	972	972	972	972	972	973	973	973	973	973	974	974	974	974	974	974	974	975	
1	951	951	952	952	952	952	952	953	953	953	953	953	954	954	954	954	954	955	955	955	955	955	955	956	956	956	956	956	956	957	957	957	957	957	957	958	958	958	958	958	958	959	959	
1	935	935	935	936	936	936	936	936	937	937	937	937	937	937	938	938	938	938	938	939	939	939	939	939	940	940	940	940	940	940	941	941	941	941	941	941	942	942	942	942	942	942	943	
1	918	919	919	919	919	919	920	920	920	920	920	921	921	921	921	921	922	922	922	922	922	923	923	923	923	923	923	924	924	924	924	924	925	925	925	925	925	925	925	926	926	926	926	
2	902	902	902	902	903	903	903	903	904	904	904	904	904	905	905	905	905	905	906	906	906	906	906	906	906	907	907	907	907	907	908	908	908	908	908	908	909	909	909	909	909	909	909	910
2	885	885	885	885	886	886	886	886	887	887	887	887	887	888	888	888	888	889	889	889	889	889	889	890	890	890	890	890	890	891	891	891	891	891	892	892	892	892	892	892	893	893		
2	868	868	868	868	868	869	869	869	869	869	870	870	870	870	871	871	871	871	871	872	872	872	872	872	873	873	873	873	873	874	874	874	874	874	875	875	875	875	875	875	875	876		
2	850	850	851	851	851	851	851	852	852	852	852	853	853	853	853	854	854	854	854	855	855	855	855	856	856	856	856	856	856	857	857	857	857	857	858	858	858	858	858	858	858			
3	833	833	833	833	833	834	834	834	834	834	835	835	835	835	835	836	836	836	836	837	837	837	837	837	838	838	838	838	839	839	839	839	839	839	840	840	840	840	840	841	841			
3	815	815	815	815	815	816	816	816	816	817	817	817	817	818	818	818	818	818	819	819	819	819	819	820	820	820	820	820	821	821	821	821	822	822	822	822	822	822	823	823	823			
3	796	797	797	797	797	797	798	798	798	799	799	799	799	799	800	800	800	800	800	801	801	801	801	801	802	802	802	802	802	803	803	803	803	803	804	804	804	804	804	805	805			
3	778	778	778	779	779	779	779	780	780	780	780	781	781	781	781	782	782	782	782	783	783	783	783	783	783	783	784	784	784	784	785	785	785	785	786	786	786	786	786	786				
4	759	760	760	760	760	761	761	761	761	762	762	762	762	763	763	763	763	763	764	764	764	764	765	765	765	765	765	766	766	766	766	766	767	767	767	767	767	768	768	768				
4	740	741	741	741	741	742	742	742	743	743	743	743	743	744	744	744	744	745	745	745	745	745	746	746	746	746	747	747	747	747	747	748	748	748	748	748	749	749	749	749				
4	721	721	722	722	722	722	723	723	723	724	724	724	724	724	725	725	725	725	726	726	726	726	727	727	727	727	727	728	728	728	728	729	729	729	729	729	730	730	730					
4	702	702	702	703	703	703	703	704	704	704	704	705	705	705	705	706	706	706	706	707	707	707	707	708	708	708	708	709	709	709	709	710	710	710	710	710	710	710						
5	682	682	682	683	683	683	683	684	684	684	684	685	685	685	686	686	686	686	687	687	687	687	688	688	688	688	689	689	689	689	689	690	690	690	690	691	691	691						
5	662	662	662	663	663	663	663	664	664	664	664	665	665	665	666	666	666	667	667	667	667	668	668	668	668	669	669	669	669	670	670	670	670	671	671	671								
5	642	642	642	642	643	643	643	644	644	644	645	645	645	645	646	646	646	646	647	647	647	647	648	648	648	648	649	649	649	649	650	650	650	650	651	651								

Length (m)

regenerator exit

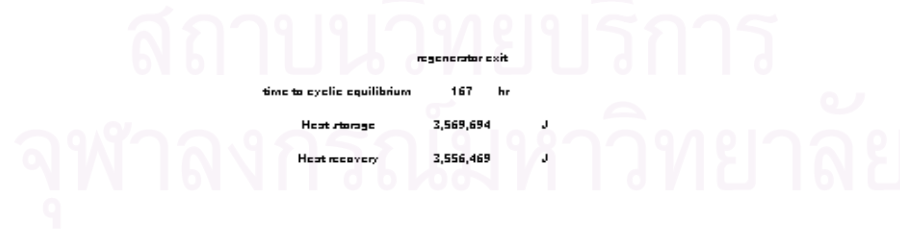
time to cyclic equilibrium 167 hr

start of period

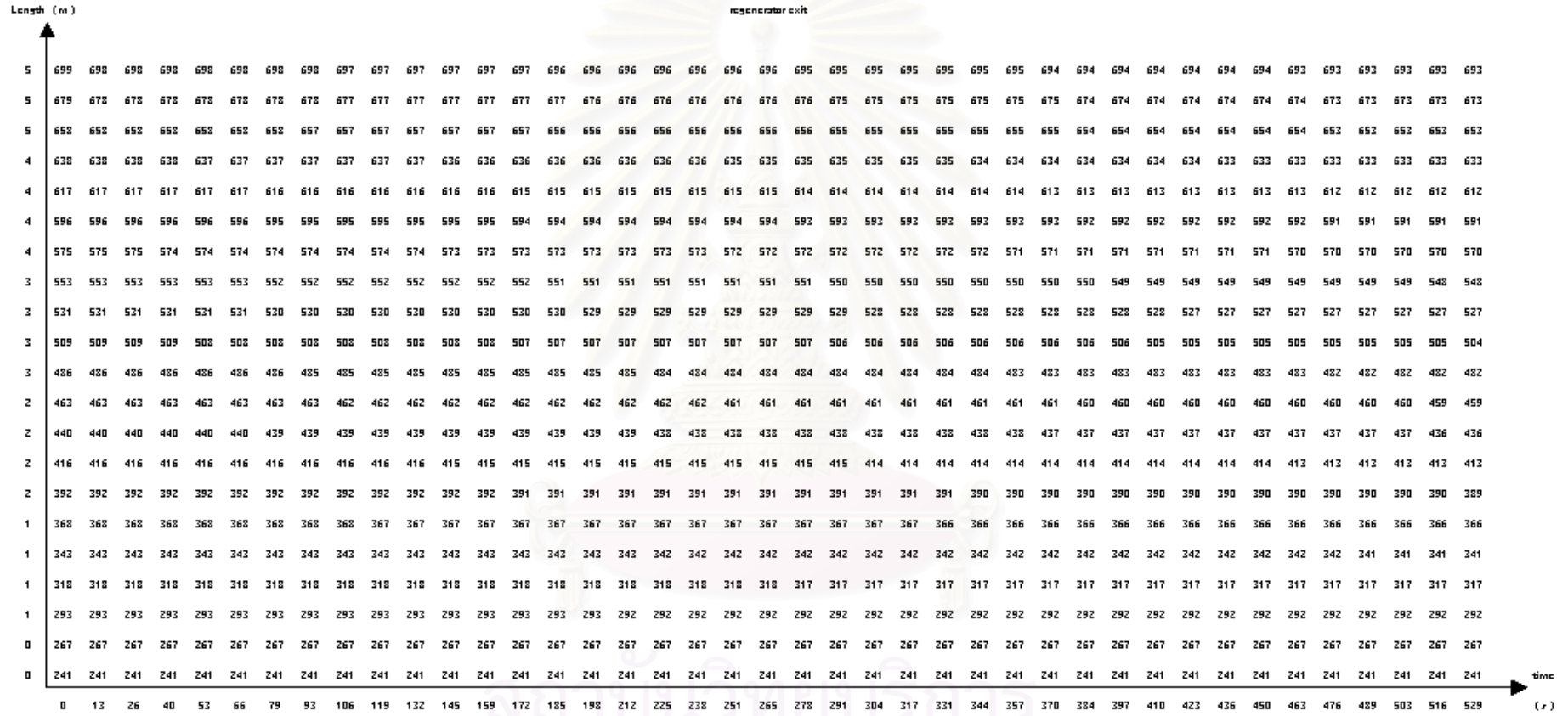
Heat storage 3,569,694 J

end of period

Heat recovery 3,556,469 J



fluid temperature distribution cold period (degree C)



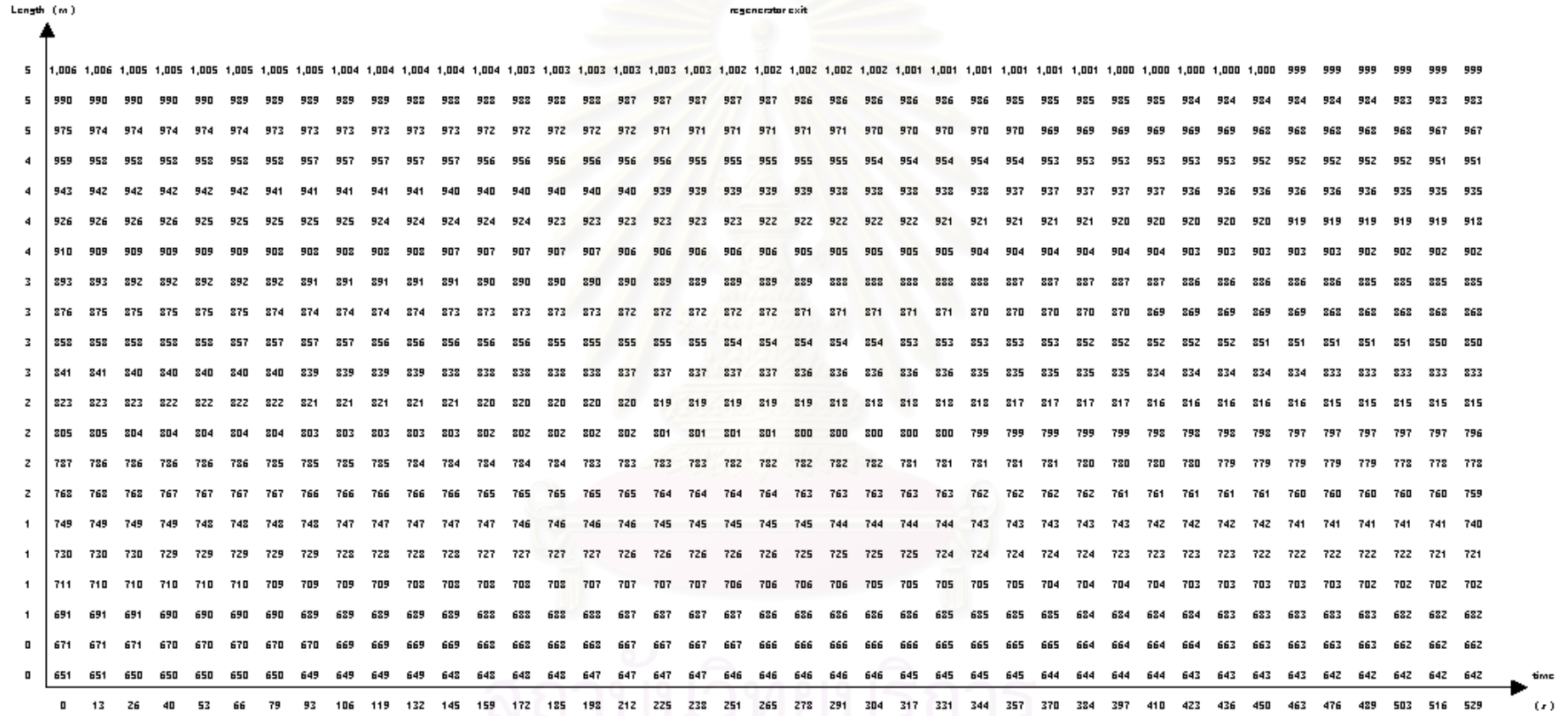
start of period

regenerator entrance

end of period



solid temperature distribution cold period (degree C)

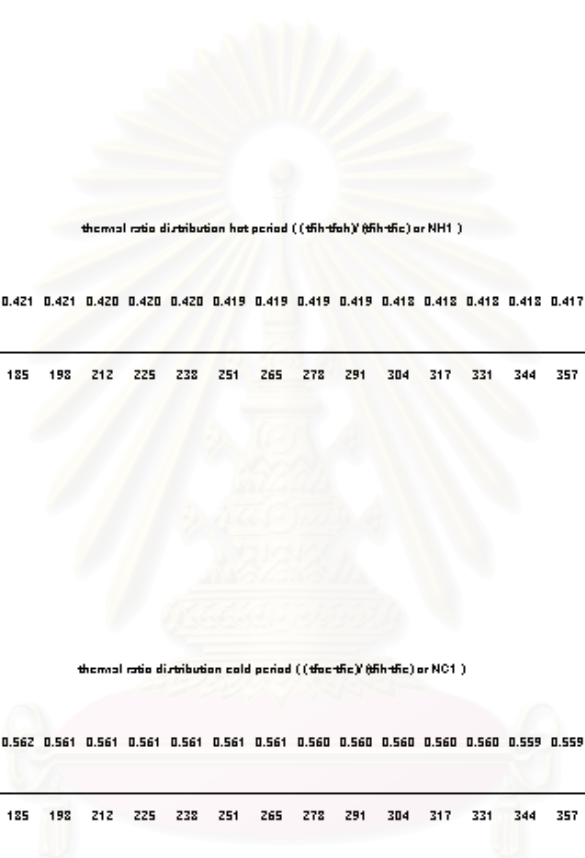


start of period

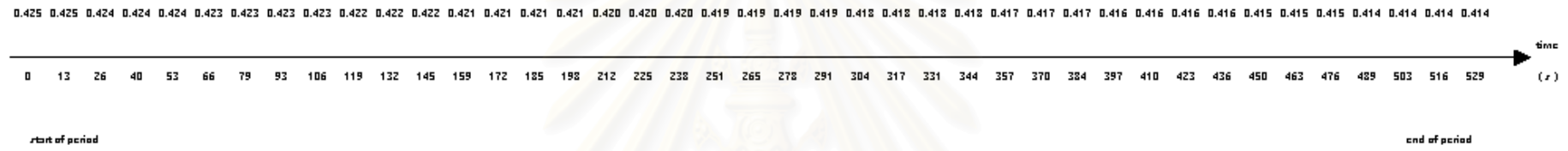
regenerator entrance

end of period





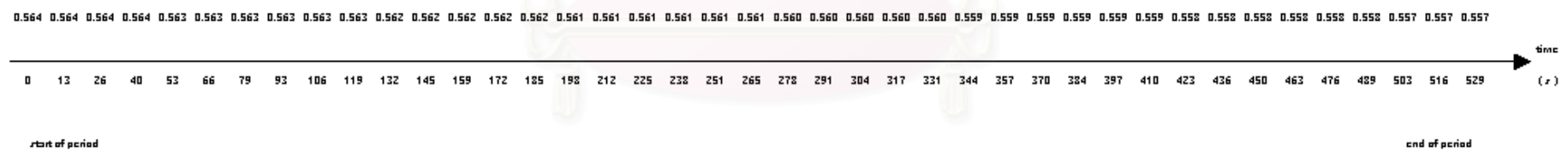
thermal ratio distribution hot period ((θ_{h-c}) (θ_{h-c}) or NH1)



start of period

end of period

thermal ratio distribution cold period ((θ_{c-h}) (θ_{c-h}) or NC1)

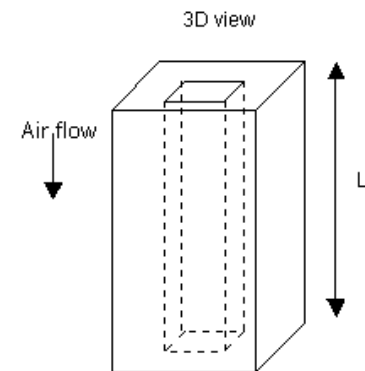
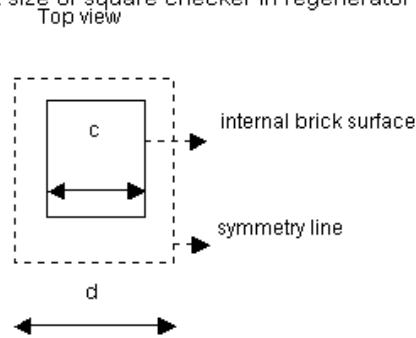


start of period

end of period

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.) Input size of square checker in regenerator



$$c = 0.18 \text{ m}$$

$$d = 0.26 \text{ m}$$

$$\text{time Batcl} = 12 \text{ Hr}$$

$$L = 5.04 \text{ m}$$

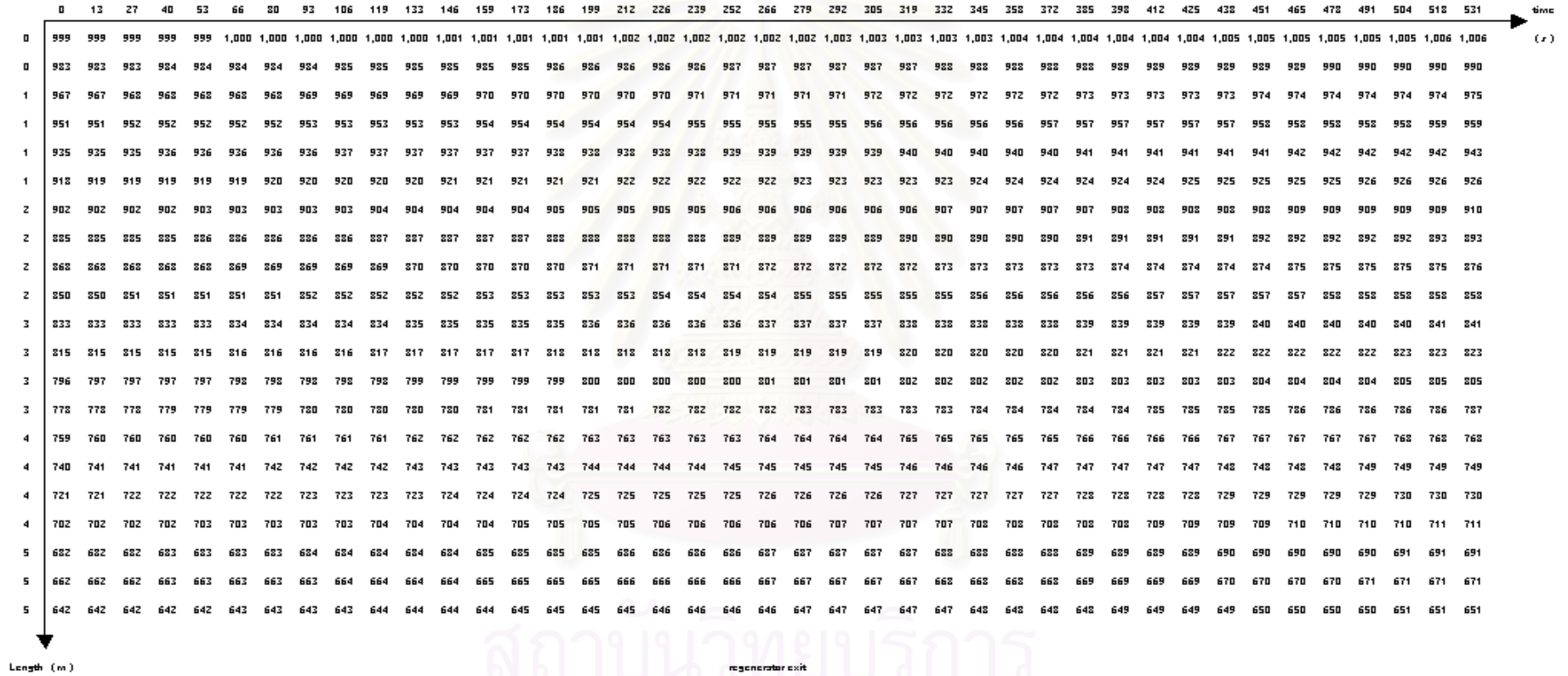
$$\text{channel} = 120.0 \text{ channel}$$

2.) Input heat transfer data

time mean ambient temperature, t_a	=	38 °C	
time mean relative humidity	=	80 %	
deviding Length	=	20 deviding Time	= 40
time mean fluid temperature (in), t_{fih}	=	1052 °C	} hot period
time mean fluid temperature (out), t_{foh}	=	434 °C	
time mean solid temperature (in), t_{mih}	=	907 °C	
time mean solid temperature (out), t_{moh}	=	420 °C	
time mean fluid temperature (in), t_{fic}	=	241 °C	} cold period
time mean fluid temperature (out), t_{foc}	=	751 °C	
time mean solid temperature (in), t_{mic}	=	402 °C	
time mean solid temperature (out), t_{noc}	=	890 °C	
Time cycle, PE	=	531 s	
Dry weight ore =	23000 kg	%H ₂ O =	7.52 % by Wet weight
Accuracy, ACC	=	0.001	
Fluid volume flow rate (cold period)	=	4950 m ³ /hr	
Oil mass flow rate	=	270 kg/hr	
	CO ₂	=	12.33 (% vol.)
component of fluid (hot period)	CO	=	377 (ppm)
	O ₂	=	4.61 (% vol.)
Emissivity of gas hot period, E_g	=	0.133	
Absorptivity of gas hot period, A_g	=	0.1189	
Emissivity of gas cold period, E_g	=	0.034	
Absorptivity of gas cold period, A_g	=	0.0299	

solid temperature distribution hot period (degree C)

regenerator entrance



time to cyclic equilibrium 166 hr

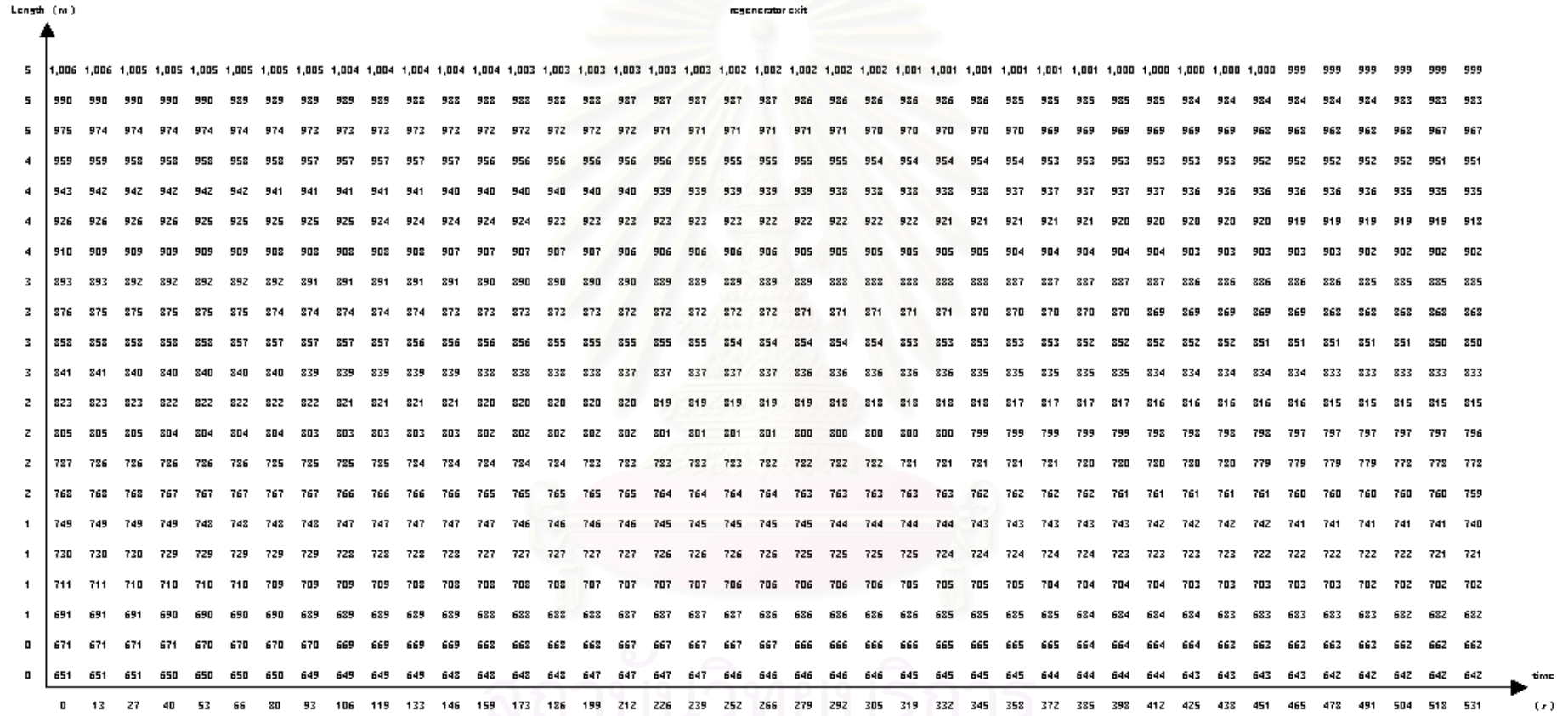
Heat storage 3,522,075 J
Heat recovery 3,570,045 J

start of period

end of period

สถาบันนายบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

solid temperature distribution cold period (degree C)

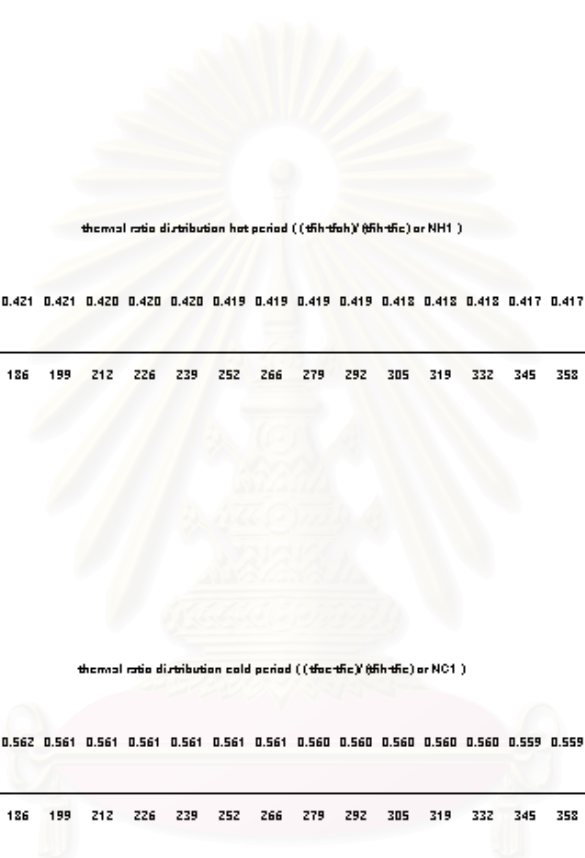


start of period

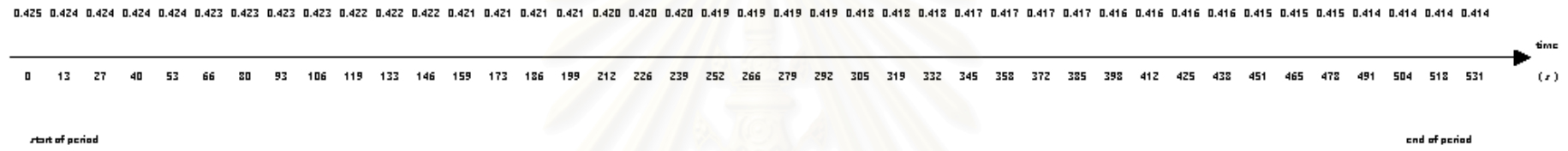
regenerator entrance

end of period





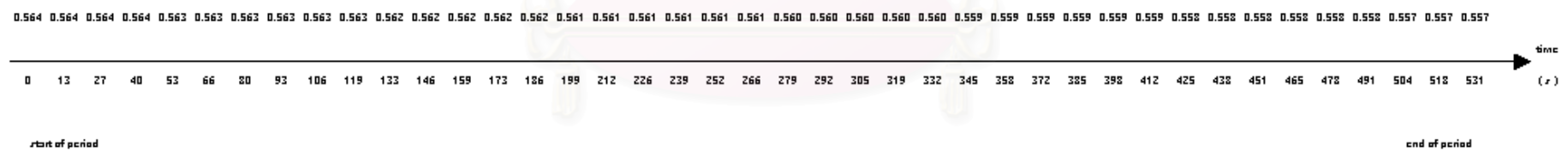
thermal ratio distribution hot period ((t_{hr} - t_{hc}) / (t_{hr} - t_{fc})) or NH1)



start of period

end of period

thermal ratio distribution cold period ((t_{fc} - t_{hc}) / (t_{hr} - t_{fc})) or NC1)

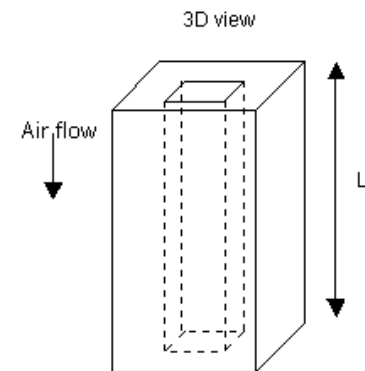
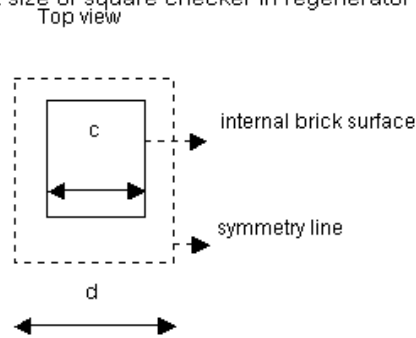


start of period

end of period

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.) Input size of square checker in regenerator



$$c = 0.18 \text{ m}$$

$$d = 0.26 \text{ m}$$

$$\text{time Batcl} = 12 \text{ Hr}$$

$$L = 5.04 \text{ m}$$

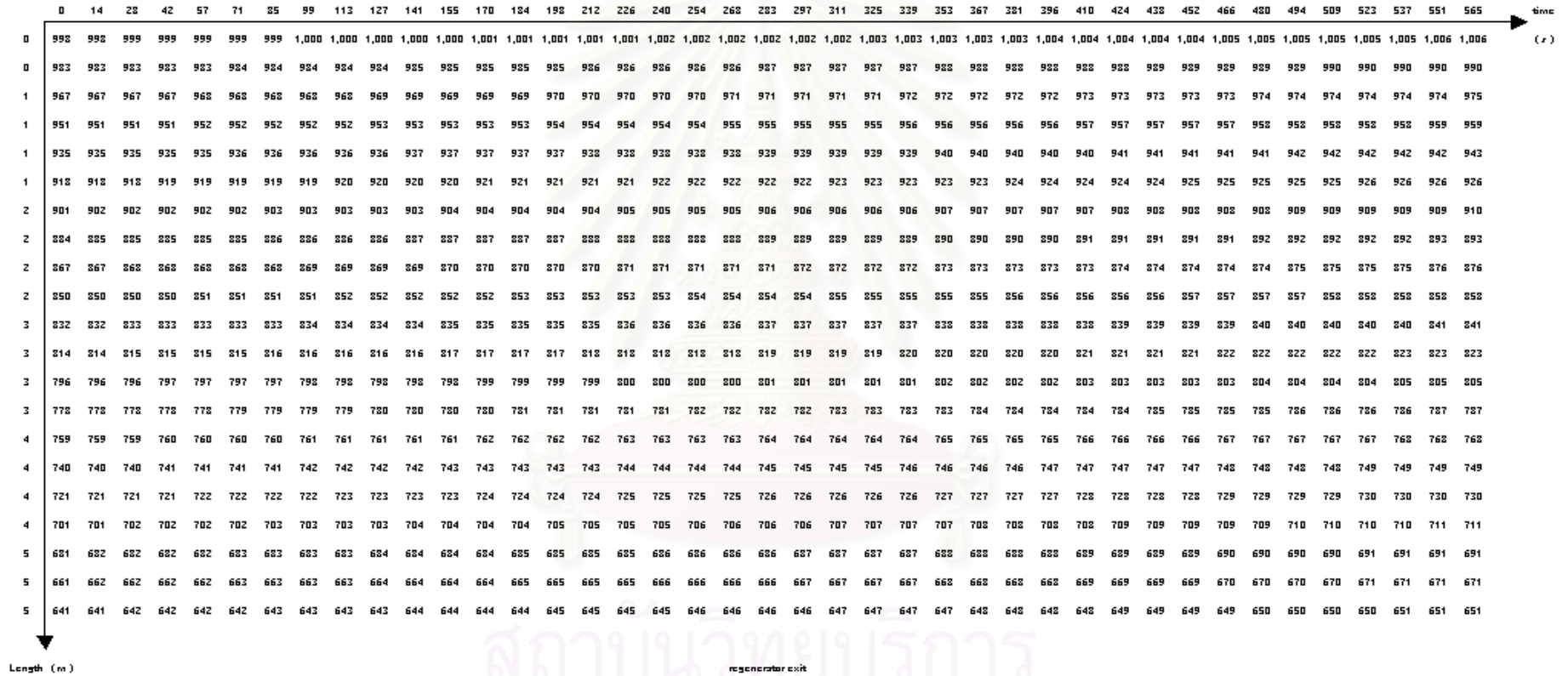
$$\text{channel} = 120.0 \text{ channel}$$

2.) Input heat transfer data

time mean ambient temperature, t_a	=	38 °C	
time mean relative humidity	=	80 %	
deviding Length	=	20 deviding Time	= 40
time mean fluid temperature (in), t_{fih}	=	1052 °C	} hot period
time mean fluid temperature (out), t_{foh}	=	434 °C	
time mean solid temperature (in), t_{mih}	=	907 °C	
time mean solid temperature (out), t_{moh}	=	420 °C	
time mean fluid temperature (in), t_{fic}	=	241 °C	} cold period
time mean fluid temperature (out), t_{foc}	=	751 °C	
time mean solid temperature (in), t_{mic}	=	402 °C	
time mean solid temperature (out), t_{noc}	=	890 °C	
Time cycle, PE	=	565 s	
Dry weight ore =	23000 kg	%H ₂ O =	7.52 % by Wet weight
Accuracy, ACC	=	0.001	
Fluid volume flow rate (cold period)	=	4950 m ³ /hr	
Oil mass flow rate	=	270 kg/hr	
	CO ₂	=	12.33 (% vol.)
component of fluid (hot period)	CO	=	377 (ppm)
	O ₂	=	4.61 (% vol.)
Emissivity of gas hot period, E_g	=	0.133	
Absorptivity of gas hot period, A_g	=	0.1189	
Emissivity of gas cold period, E_g	=	0.034	
Absorptivity of gas cold period, A_g	=	0.0299	

solid temperature distribution hot period (degree C)

regenerator entrance



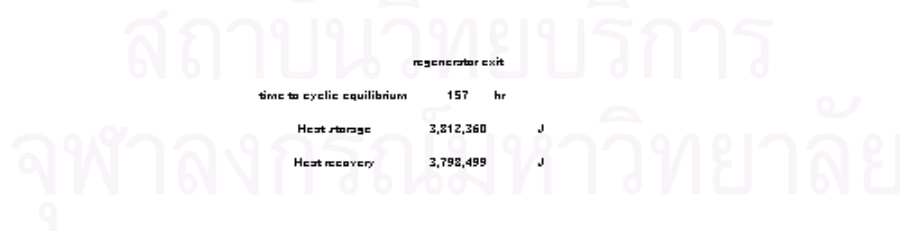
time to cyclic equilibrium 157 hr

start of period

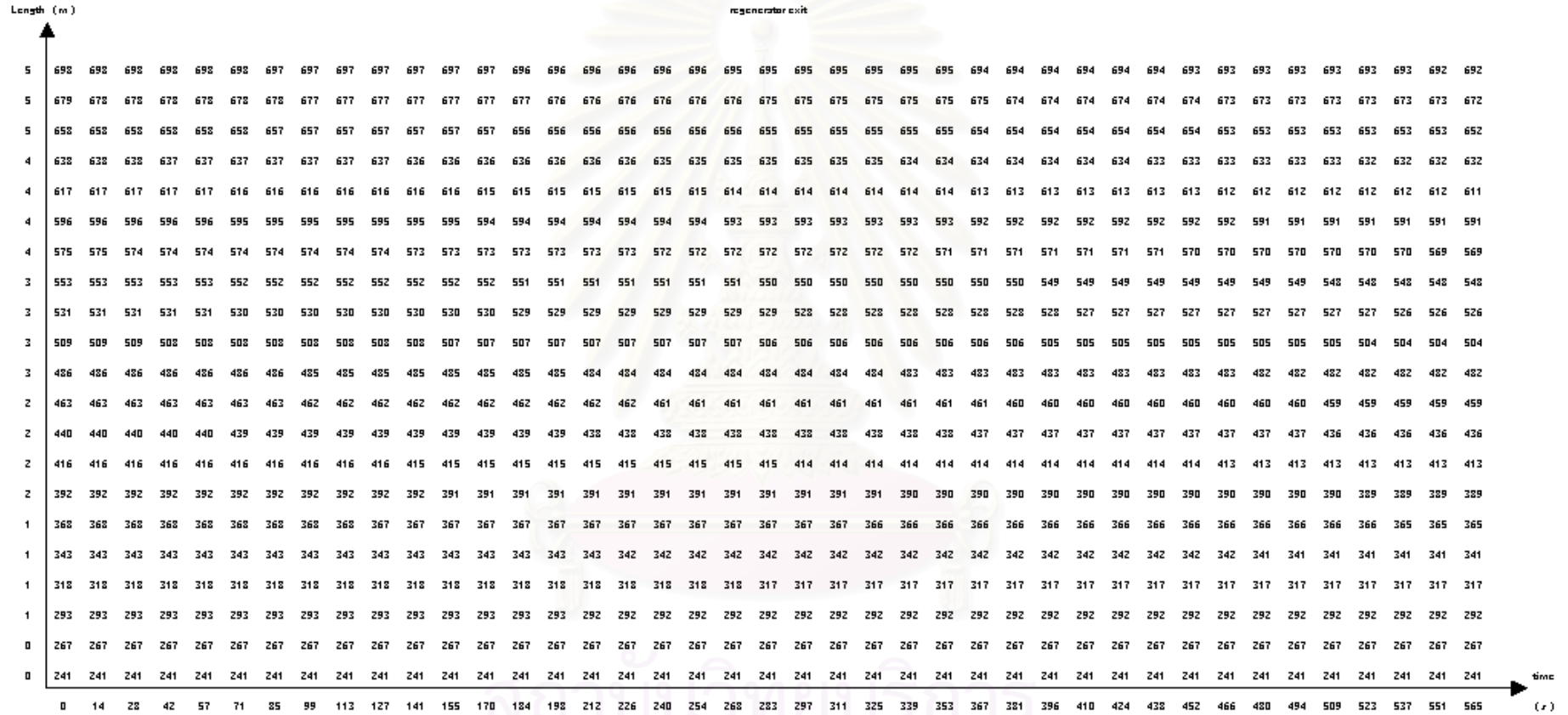
Heat storage 3,812,360 J

end of period

Heat recovery 3,798,499 J



fluid temperature distribution cold period (degree C)



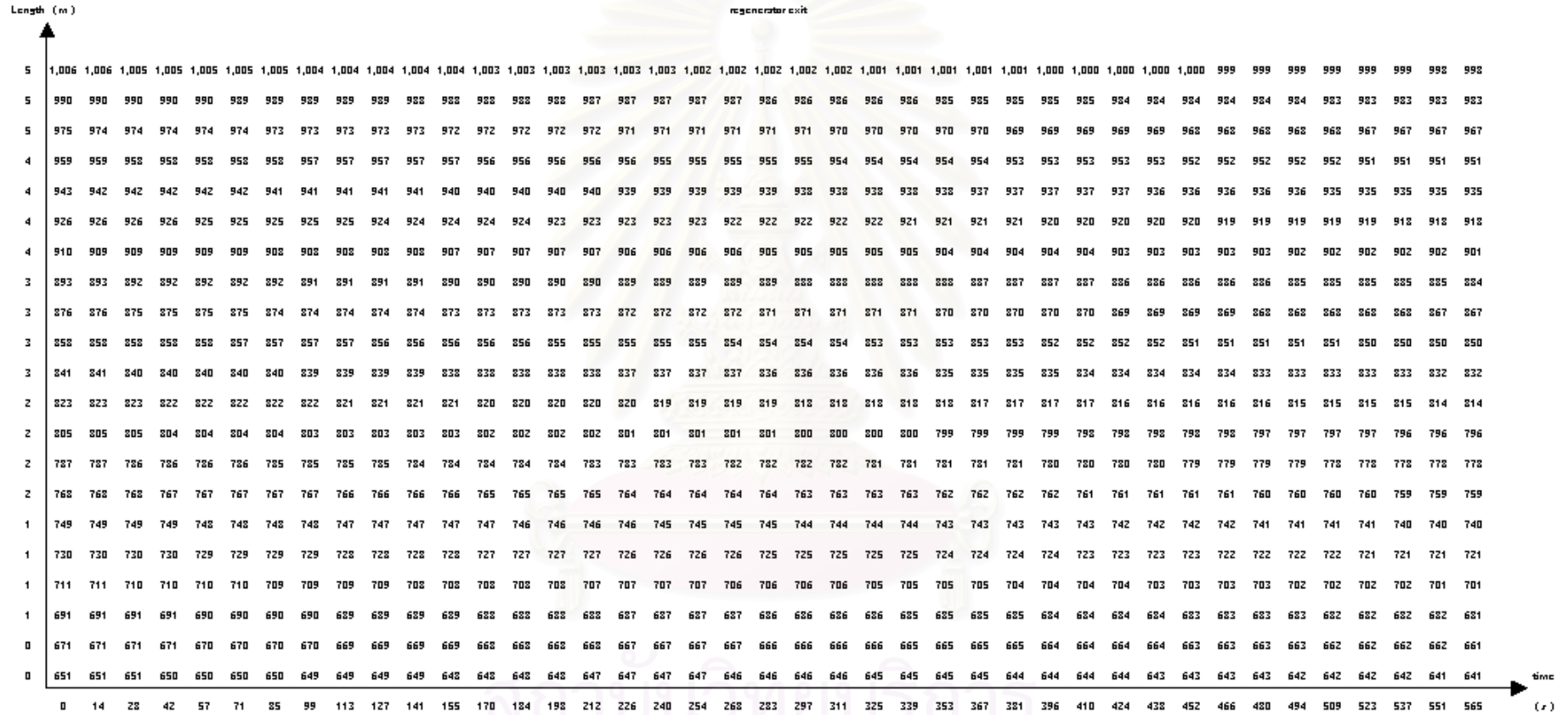
start of period

regenerator entrance

end of period

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

solid temperature distribution cold period (degree C)

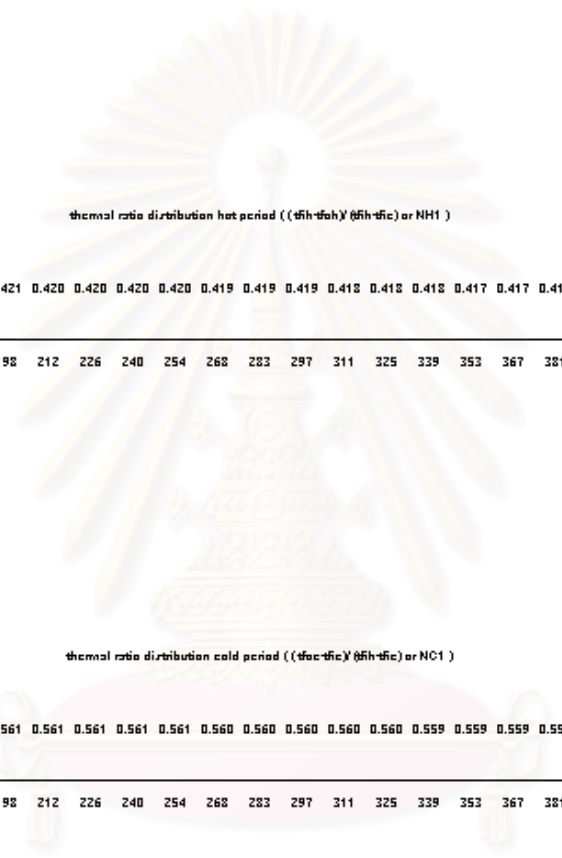


start of period

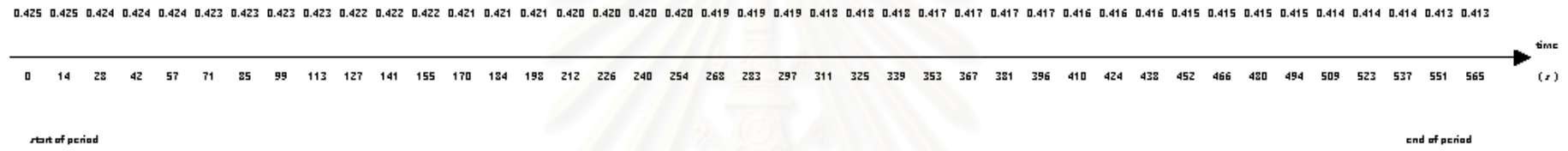
regenerator entrance

end of period





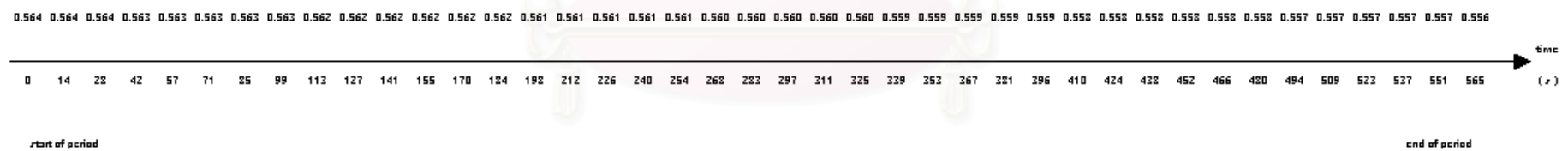
thermal ratio distribution hot period ((t_{hr} - t_{hc}) (t_{hr} - t_{hc}) or NH1)



start of period

end of period

thermal ratio distribution cold period ((t_{hc} - t_{hr}) (t_{hc} - t_{hr}) or NC1)

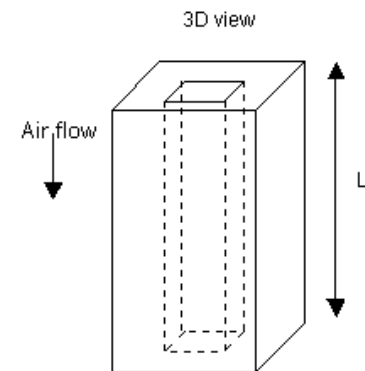
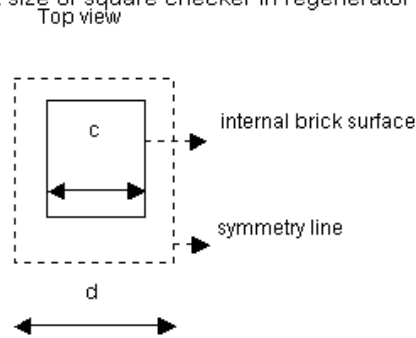


start of period

end of period

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.) Input size of square checker in regenerator



$$c = 0.18 \text{ m}$$

$$d = 0.26 \text{ m}$$

$$\text{time Batcl} = 12 \text{ Hr}$$

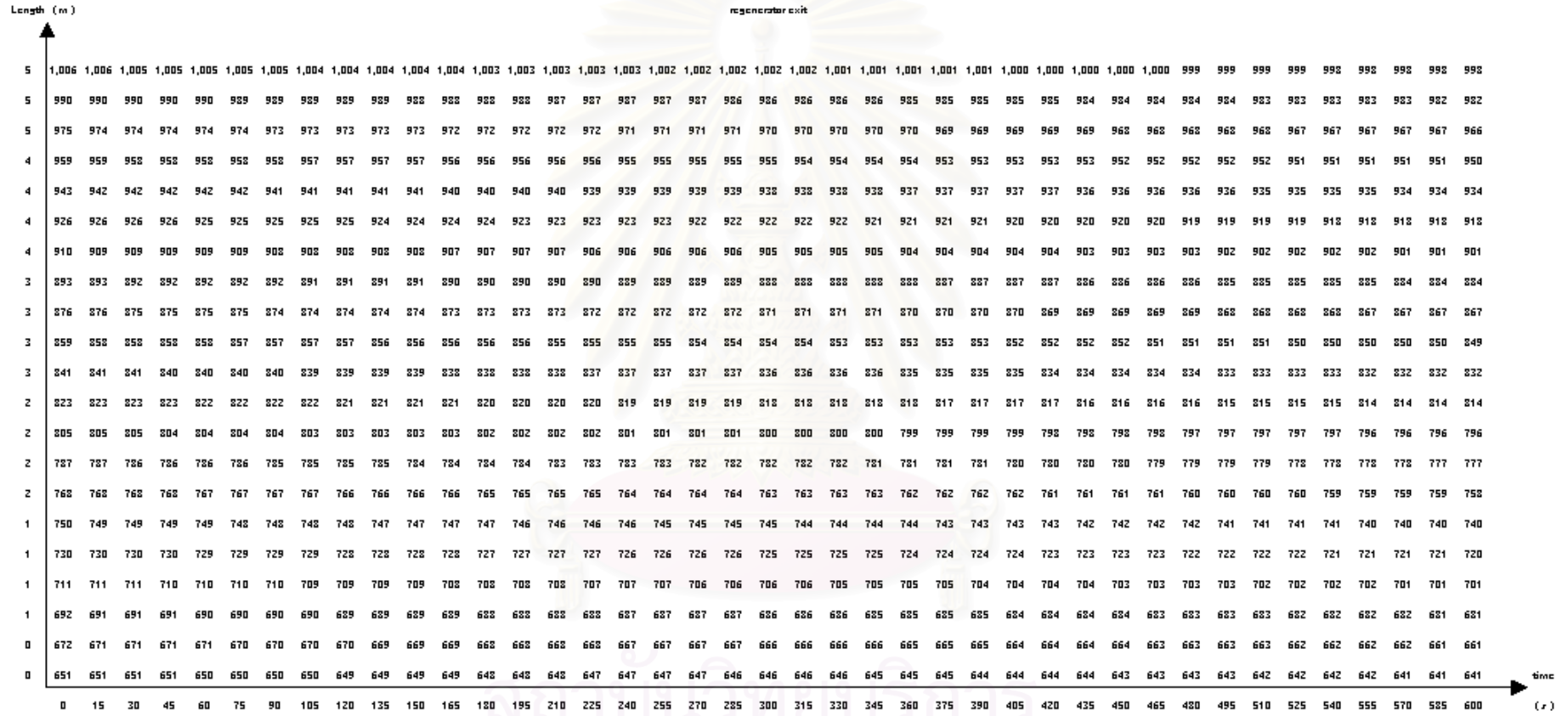
$$L = 5.04 \text{ m}$$

$$\text{channel} = 120.0 \text{ channel}$$

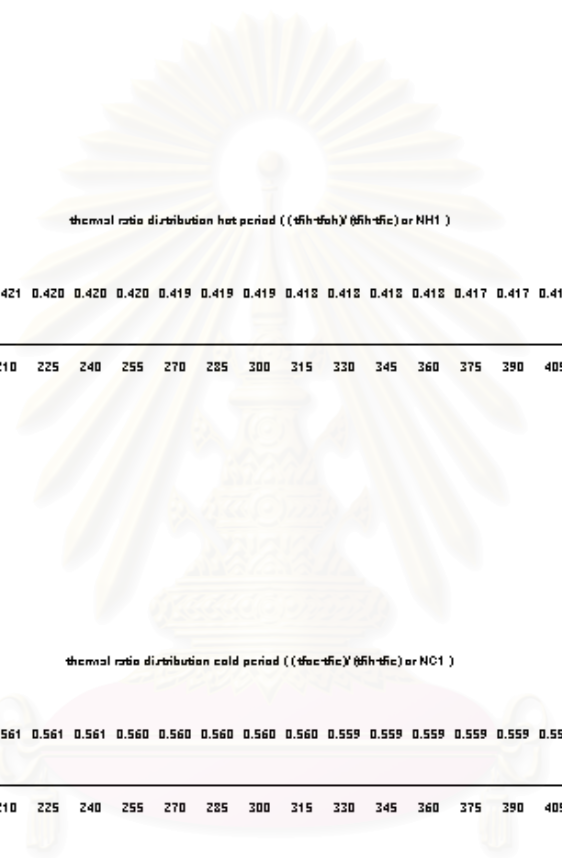
2.) Input heat transfer data

time mean ambient temperature, t_a	=	38 °C	
time mean relative humidity	=	80 %	
deviding Length	=	20 deviding Time	= 40
time mean fluid temperature (in), t_{fih}	=	1052 °C	} hot period
time mean fluid temperature (out), t_{foh}	=	434 °C	
time mean solid temperature (in), t_{mih}	=	907 °C	
time mean solid temperature (out), t_{moh}	=	420 °C	
time mean fluid temperature (in), t_{fic}	=	241 °C	} cold period
time mean fluid temperature (out), t_{foc}	=	751 °C	
time mean solid temperature (in), t_{mic}	=	402 °C	
time mean solid temperature (out), t_{noc}	=	890 °C	
Time cycle, PE	=	600 s	
Dry weight ore =	23000 kg	%H ₂ O =	7.52 % by Wet weight
Accuracy, ACC	=	0.001	
Fluid volume flow rate (cold period)	=	4950 m ³ /hr	
Oil mass flow rate	=	270 kg/hr	
	CO ₂	=	12.33 (% vol.)
component of fluid (hot period)	CO	=	377 (ppm)
	O ₂	=	4.61 (% vol.)
Emissivity of gas hot period, E_g	=	0.133	
Absorptivity of gas hot period, A_g	=	0.1189	
Emissivity of gas cold period, E_g	=	0.034	
Absorptivity of gas cold period, A_g	=	0.0299	

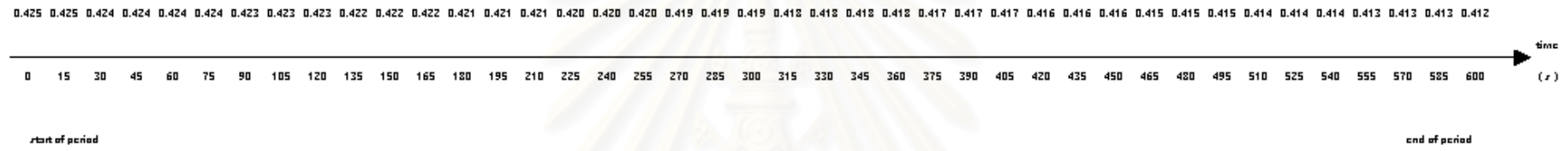
solid temperature distribution cold period (degree C)



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



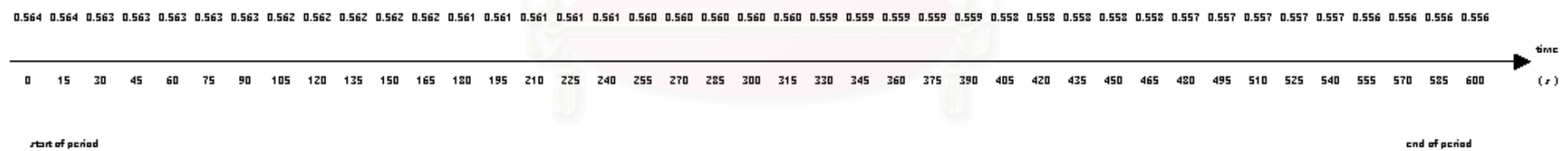
thermal ratio distribution hot period ((θ_{h-c}) (θ_{h-c}) or NH1)



start of period

end of period

thermal ratio distribution cold period ((θ_{c-c}) (θ_{c-c}) or NC1)

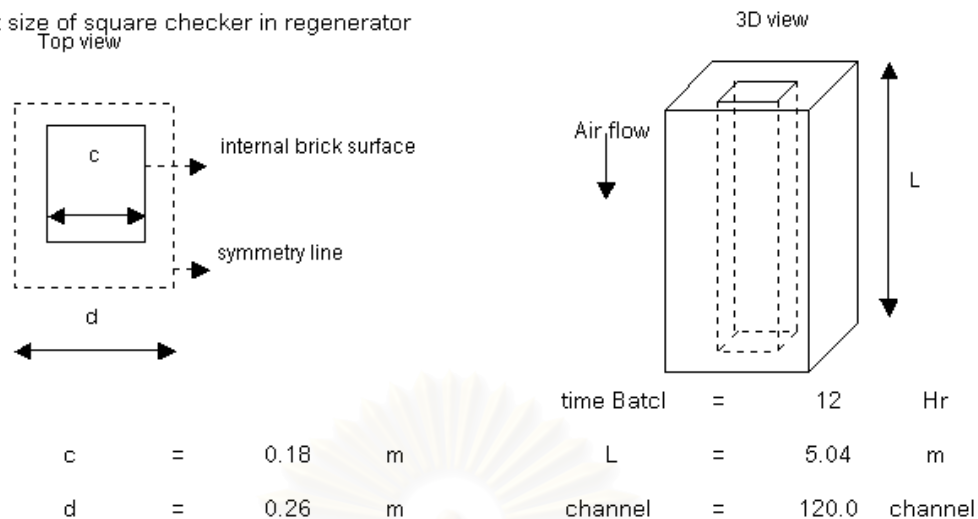


start of period

end of period

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.) Input size of square checker in regenerator



2.) Input heat transfer data

time mean ambient temperature, t_a	=	38 °C	
time mean relative humidity	=	80 %	
deviding Length	=	20 deviding Time	= 40
time mean fluid temperature (in), t_{fih}	=	1052 °C	} hot period
time mean fluid temperature (out), t_{foh}	=	434 °C	
time mean solid temperature (in), t_{mih}	=	907 °C	
time mean solid temperature (out), t_{moh}	=	420 °C	
time mean fluid temperature (in), t_{fic}	=	241 °C	} cold period
time mean fluid temperature (out), t_{foc}	=	751 °C	
time mean solid temperature (in), t_{mic}	=	402 °C	
time mean solid temperature (out), t_{noc}	=	890 °C	
Time cycle, PE	=	900 s	
Dry weight ore =	23000 kg	%H ₂ O =	7.52 % by Wet weight
Accuracy, ACC	=	0.001	
Fluid volume flow rate (cold period)	=	4950 m ³ /hr	
Oil mass flow rate	=	270 kg/hr	
	CO ₂ =	12.33 (% vol.)	
component of fluid (hot period)	CO =	377 (ppm)	
	O ₂ =	4.61 (% vol.)	
Emissivity of gas hot period, E_g	=	0.133	
Absorptivity of gas hot period, A_g	=	0.1189	
Emissivity of gas cold period, E_g	=	0.034	
Absorptivity of gas cold period, A_g	=	0.0299	

solid temperature distribution hot period (degree C)

regenerator entrance

	0	23	45	68	90	113	135	158	180	203	225	248	270	293	315	338	360	383	405	428	450	473	495	518	540	563	585	608	630	653	675	698	720	743	765	788	810	833	855	878	900	time (x)	
0	994	994	995	995	995	996	996	996	997	997	997	998	998	998	999	999	999	1,000	1,000	1,000	1,000	1,001	1,001	1,001	1,002	1,002	1,002	1,003	1,003	1,003	1,003	1,004	1,004	1,004	1,005	1,005	1,005	1,005	1,006	1,006	1,006		
0	978	979	979	979	980	980	980	981	981	981	982	982	982	983	983	983	984	984	984	985	985	985	986	986	986	986	987	987	987	988	988	988	989	989	989	989	990	990	990	991	991		
1	963	963	963	964	964	964	965	965	965	966	966	966	967	967	967	968	968	968	969	969	969	970	970	970	971	971	971	972	972	972	973	973	973	973	974	974	974	975	975	975			
1	947	947	947	948	948	948	949	949	949	950	950	950	951	951	951	952	952	952	953	953	953	954	954	954	955	955	955	956	956	956	957	957	957	958	958	958	959	959	959	959			
1	930	931	931	931	932	932	932	933	933	933	934	934	934	935	935	935	936	936	936	937	937	937	938	938	938	939	939	939	940	940	940	941	941	941	942	942	942	943	943	943			
1	914	914	915	915	915	916	916	916	917	917	917	918	918	918	919	919	920	920	920	921	921	921	922	922	922	923	923	923	924	924	924	925	925	925	925	926	926	926	927	927			
2	897	898	898	898	899	899	899	900	900	900	901	901	901	902	902	902	903	903	903	904	904	904	905	905	905	906	906	906	907	907	907	908	908	908	909	909	909	910	910	910	911		
2	880	881	881	881	882	882	882	883	883	883	884	884	884	885	885	885	886	886	886	887	887	887	888	888	888	889	889	890	890	890	891	891	891	892	892	892	893	893	893	894			
2	863	864	864	864	865	865	865	866	866	866	867	867	867	868	868	868	869	869	869	870	870	870	871	871	871	872	872	872	873	873	873	874	874	874	875	875	875	876	876	876	877		
2	846	846	847	847	847	848	848	848	849	849	849	850	850	850	851	851	851	852	852	852	853	853	853	854	854	854	855	855	856	856	856	857	857	857	858	858	858	859	859	859	860		
3	828	829	829	829	830	830	830	831	831	831	832	832	832	833	833	833	834	834	834	835	835	836	836	836	837	837	837	838	838	838	839	839	839	840	840	840	841	841	841	842	842		
3	810	811	811	811	812	812	812	813	813	813	814	814	815	815	815	816	816	816	817	817	817	818	818	818	819	819	820	820	820	821	821	821	822	822	822	823	823	823	824	824	824		
3	792	792	793	793	794	794	794	795	795	795	796	796	796	797	797	798	798	798	799	799	799	800	800	800	801	801	801	802	802	802	803	803	803	804	804	804	805	805	805	806	806	807	
3	774	774	774	775	775	776	776	776	777	777	777	778	778	778	779	779	780	780	780	781	781	781	782	782	783	783	783	784	784	784	785	785	785	786	786	786	787	787	788	788	788		
4	755	755	756	756	757	757	757	758	758	758	759	759	760	760	760	761	761	761	762	762	762	763	763	764	764	764	765	765	765	766	766	767	767	767	768	768	768	769	769	769	770		
4	736	737	737	737	738	738	738	739	739	740	740	740	741	741	741	742	742	743	743	743	744	744	744	745	745	746	746	746	747	747	747	748	748	749	749	749	750	750	750	751	751		
4	717	717	718	718	719	719	719	720	720	720	721	721	722	722	722	723	723	723	724	724	725	725	725	726	726	727	727	727	728	728	728	729	729	730	730	730	731	731	731	732	732		
4	698	698	698	699	699	700	700	700	701	701	701	702	702	703	703	703	704	704	705	705	705	706	706	706	707	707	708	708	708	709	709	710	710	710	711	711	711	712	712	713	713		
5	678	678	679	679	679	680	680	681	681	681	682	682	683	683	683	684	684	685	685	685	686	686	686	687	687	688	688	688	689	689	690	690	690	691	691	692	692	692	693	693	693		
5	658	658	659	659	659	660	660	661	661	661	662	662	663	663	663	664	664	665	665	665	666	666	667	667	667	668	668	669	669	669	670	670	671	671	671	672	672	673	673	673	674		
5	638	638	638	639	639	640	640	641	641	642	642	642	643	643	644	644	644	645	645	646	646	646	647	647	648	648	648	649	649	650	650	650	651	651	652	652	653	653	653	654			

Length (m)

regenerator exit

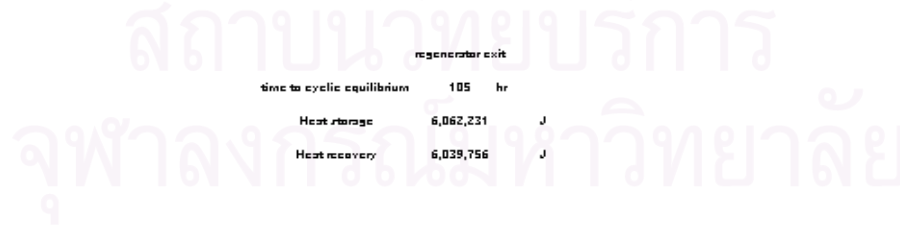
time to cyclic equilibrium 105 hr

start of period

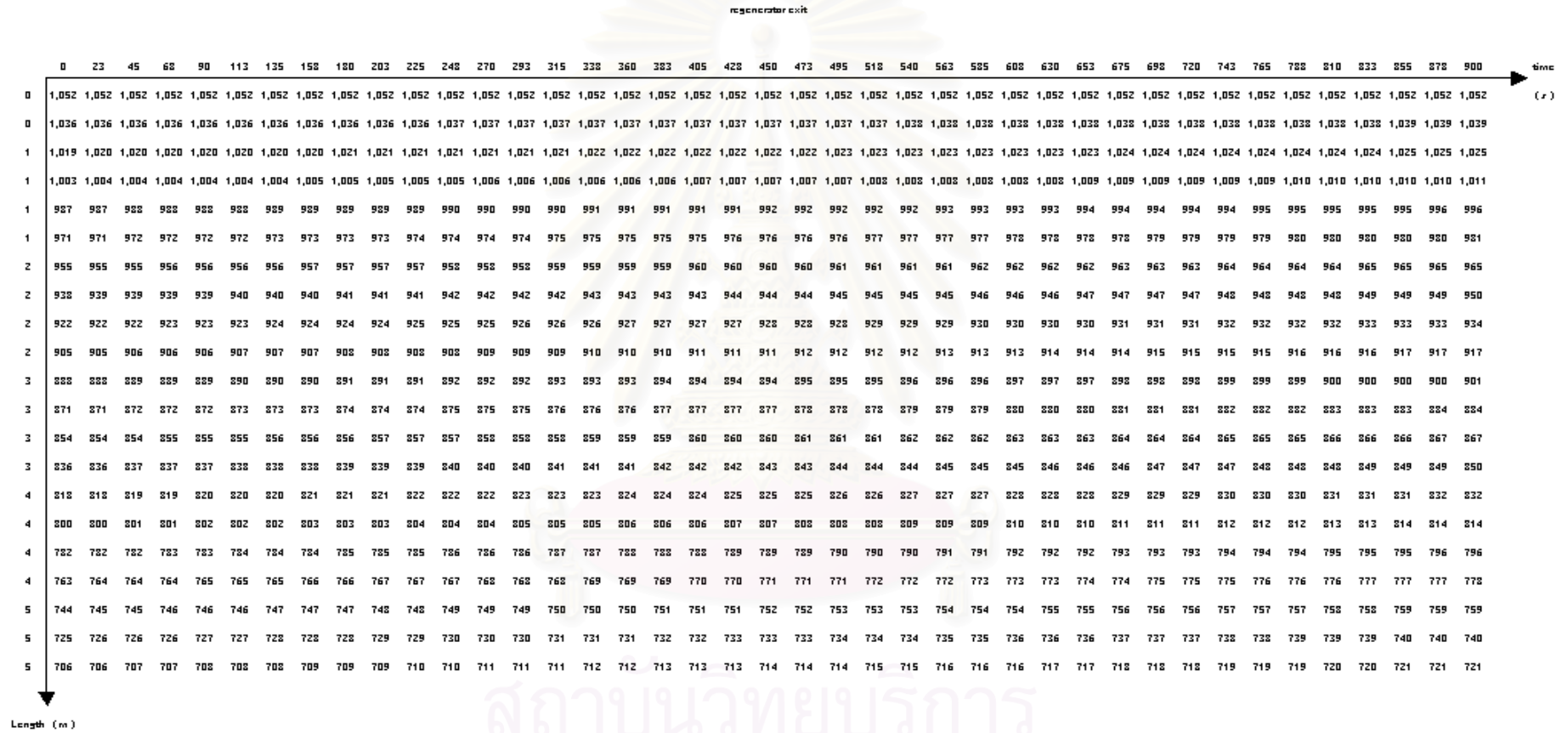
Heat storage 6,062,231 J

end of period

Heat recovery 6,039,756 J

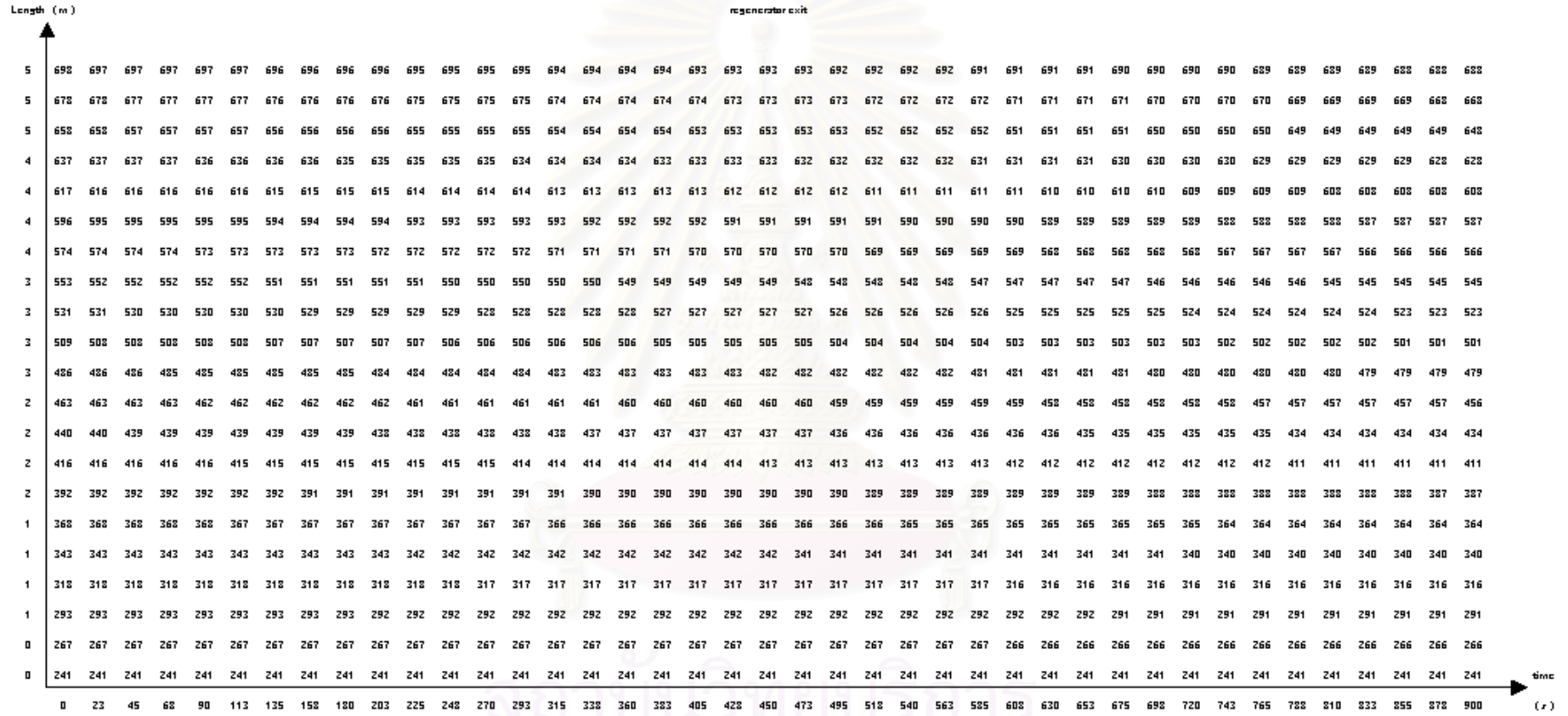


fluid temperature distribution hot period (degree C)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

fluid temperature distribution cold period (degree C)



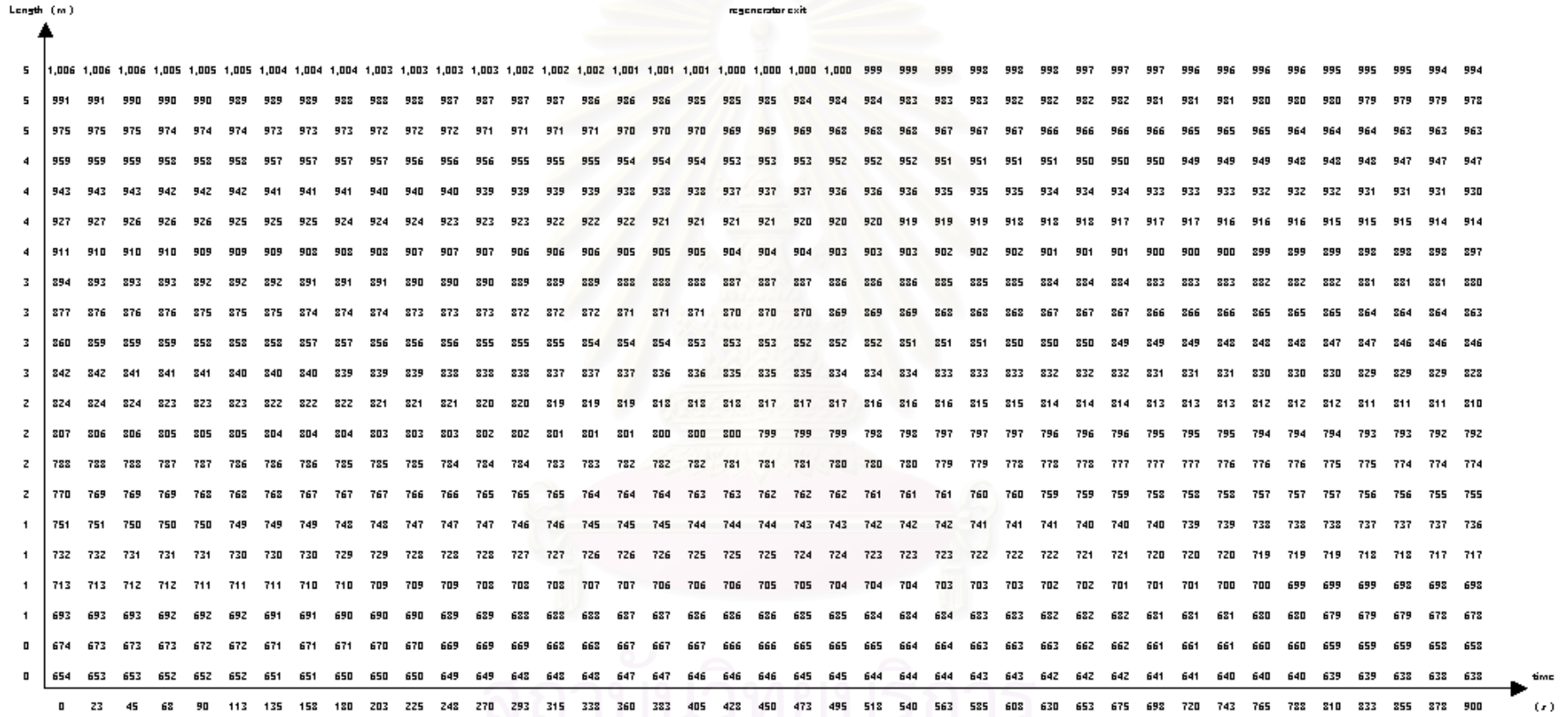
start of period

regenerator entrance

end of period

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

solid temperature distribution cold period (degree C)

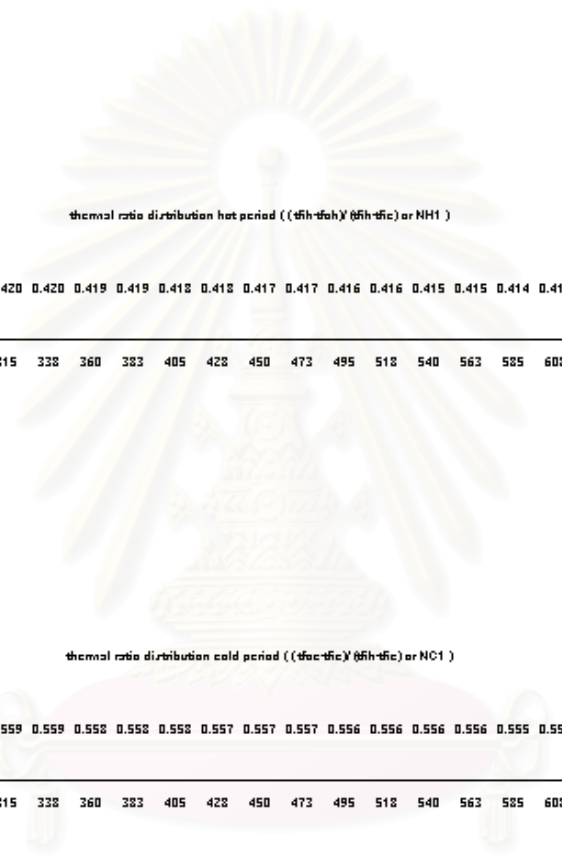


start of period

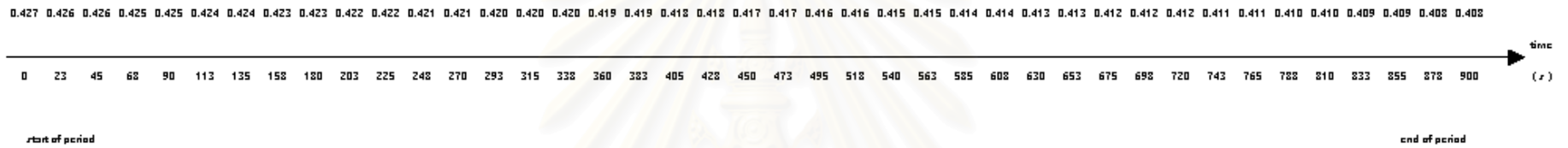
regenerator entrance

end of period





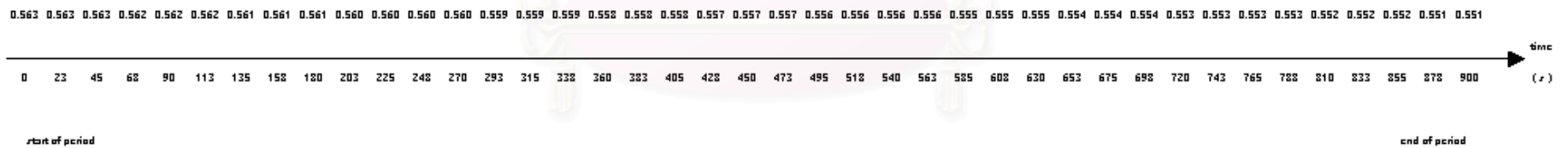
thermal ratio distribution hot period ((θ_{h-c}) (θ_{h-c}) or NH1)



start of period

end of period

thermal ratio distribution cold period ((θ_{c-c}) (θ_{c-c}) or NC1)

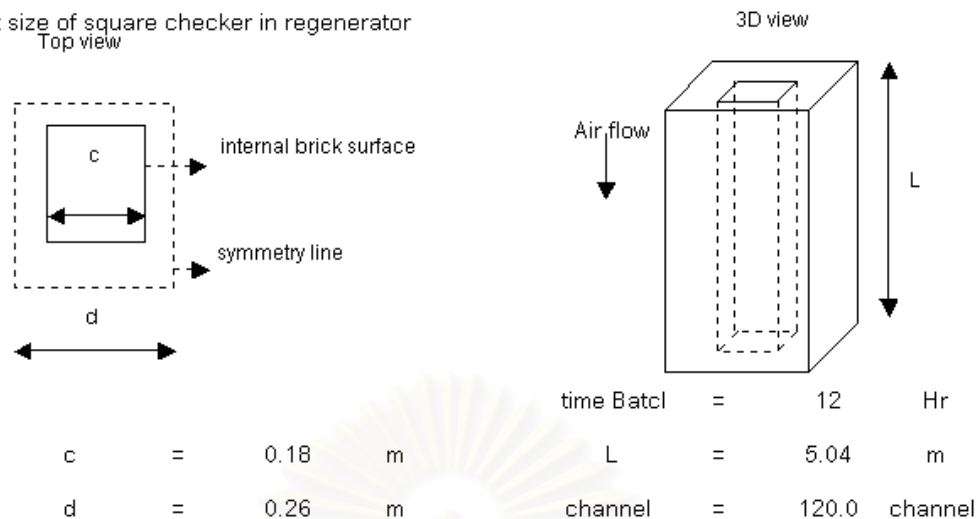


start of period

end of period

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

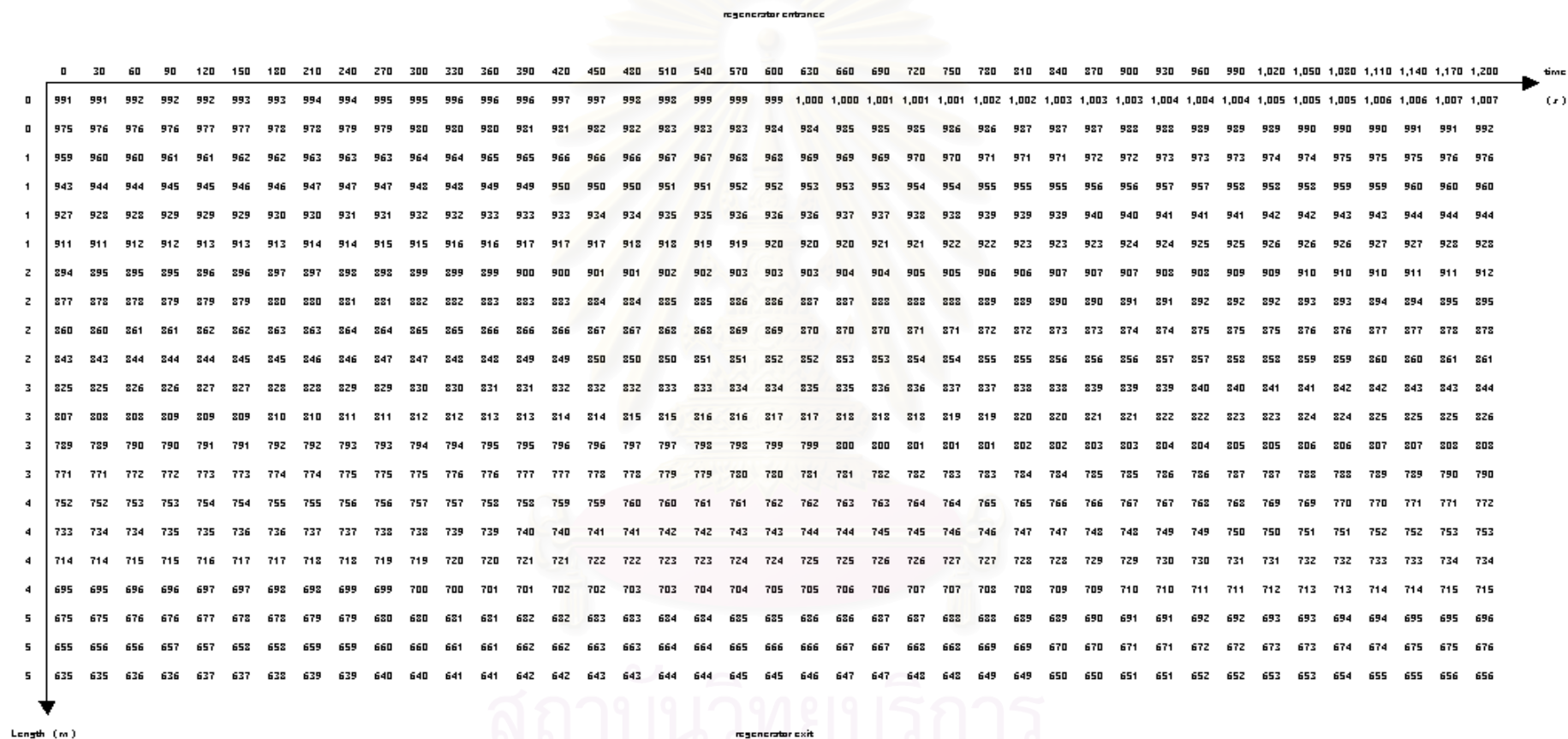
1.) Input size of square checker in regenerator



2.) Input heat transfer data

time mean ambient temperature, t_a	=	38 °C	
time mean relative humidity	=	80 %	
deviding Length	=	20 deviding Time	= 40
time mean fluid temperature (in), t_{fih}	=	1052 °C	} hot period
time mean fluid temperature (out), t_{foh}	=	434 °C	
time mean solid temperature (in), t_{mih}	=	907 °C	
time mean solid temperature (out), t_{moh}	=	420 °C	
time mean fluid temperature (in), t_{fic}	=	241 °C	} cold period
time mean fluid temperature (out), t_{foc}	=	751 °C	
time mean solid temperature (in), t_{mic}	=	402 °C	
time mean solid temperature (out), t_{noc}	=	890 °C	
Time cycle, PE	=	1200 s	
Dry weight ore =	23000 kg	%H ₂ O =	7.52 % by Wet weight
Accuracy, ACC	=	0.001	
Fluid volume flow rate (cold period)	=	4950 m ³ /hr	
Oil mass flow rate	=	270 kg/hr	
	CO ₂	=	12.33 (% vol.)
component of fluid (hot period)	CO	=	377 (ppm)
	O ₂	=	4.61 (% vol.)
Emissivity of gas hot period, E_g	=	0.133	
Absorptivity of gas hot period, A_g	=	0.1189	
Emissivity of gas cold period, E_g	=	0.034	
Absorptivity of gas cold period, A_g	=	0.0299	

solid temperature distribution hot period (degree C)



สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

start of period

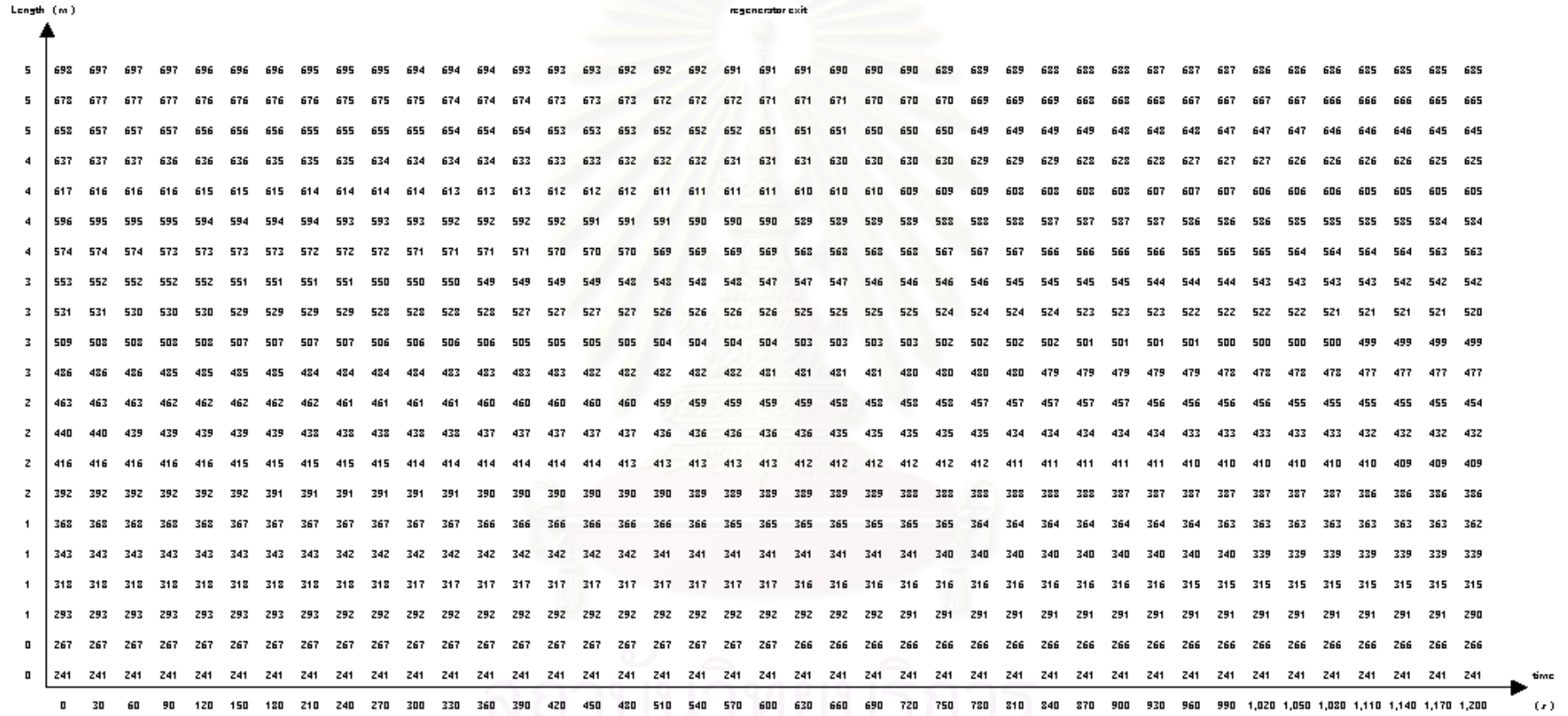
time to cyclic equilibrium 81 hr

Heat storage 2,062,969 J

Heat recovery 2,033,716 J

end of period

fluid temperature distribution cold period (degree C)



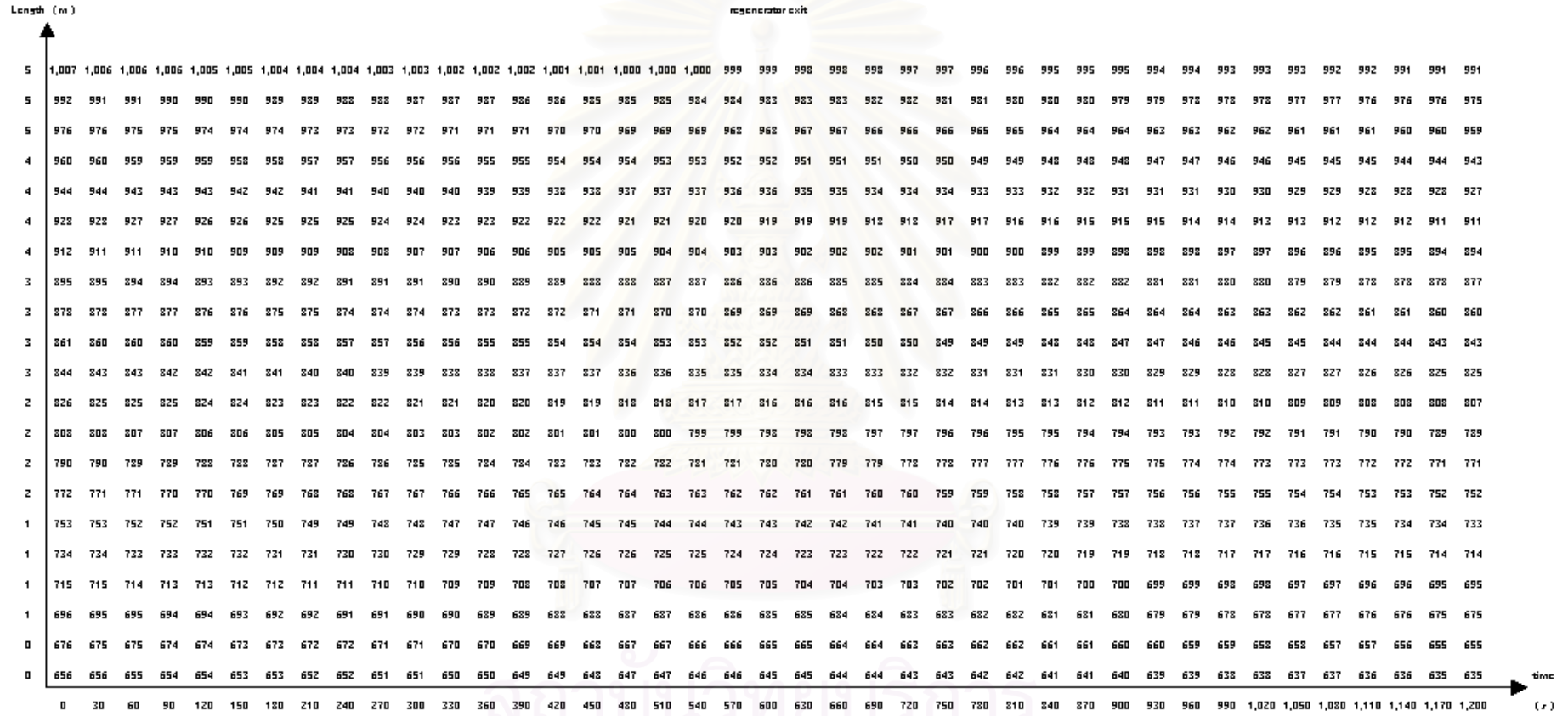
start of period

regenerator entrance

end of period



solid temperature distribution cold period (degree C)

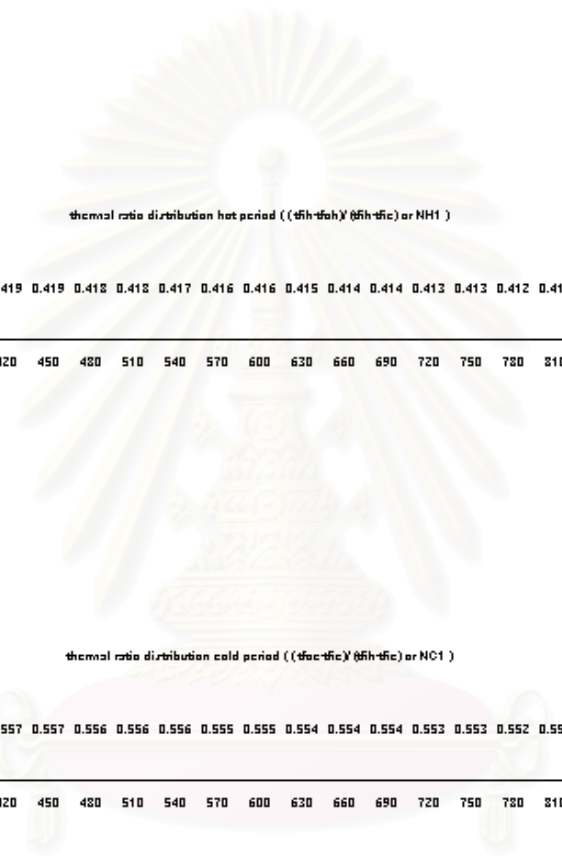


start of period

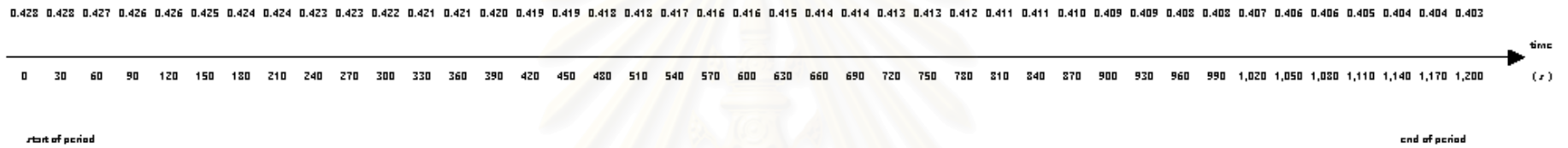
regenerator entrance

end of period

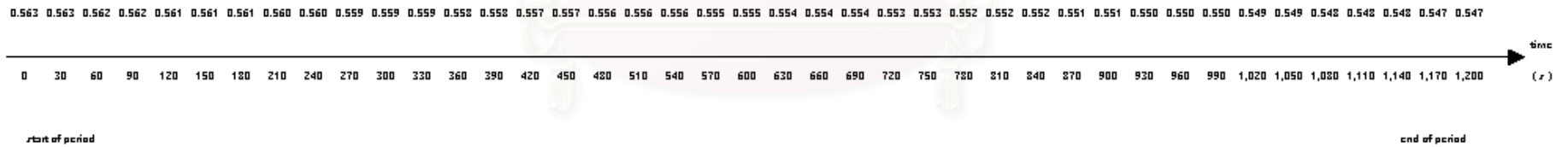




thermal ratio distribution hot period ((θ_{h-c}) (θ_{h-c}) or NH1)

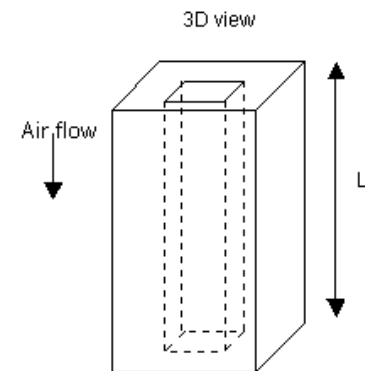
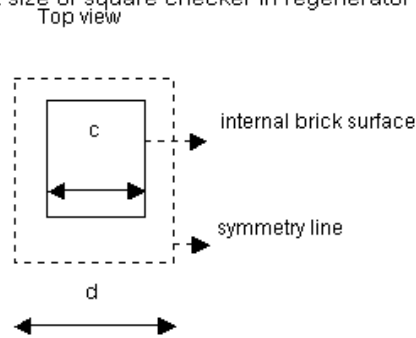


thermal ratio distribution cold period ((θ_{c-c}) (θ_{c-c}) or NC1)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.) Input size of square checker in regenerator



$$c = 0.18 \text{ m}$$

$$d = 0.26 \text{ m}$$

$$\text{time Batcl} = 12 \text{ Hr}$$

$$L = 5.04 \text{ m}$$

$$\text{channel} = 120.0 \text{ channel}$$

2.) Input heat transfer data

time mean ambient temperature, t_a	=	38 °C	
time mean relative humidity	=	80 %	
deviding Length	=	20 deviding Time	= 40
time mean fluid temperature (in), t_{fih}	=	1052 °C	} hot period
time mean fluid temperature (out), t_{foh}	=	434 °C	
time mean solid temperature (in), t_{mih}	=	907 °C	
time mean solid temperature (out), t_{moh}	=	420 °C	
time mean fluid temperature (in), t_{fic}	=	241 °C	} cold period
time mean fluid temperature (out), t_{foc}	=	751 °C	
time mean solid temperature (in), t_{mic}	=	402 °C	
time mean solid temperature (out), t_{noc}	=	890 °C	
Time cycle, PE	=	1800 s	
Dry weight ore =	23000 kg	%H ₂ O =	7.52 % by Wet weight
Accuracy, ACC	=	0.001	
Fluid volume flow rate (cold period)	=	4950 m ³ /hr	
Oil mass flow rate	=	270 kg/hr	
	CO ₂ =	12.33 (% vol.)	
component of fluid (hot period)	CO =	377 (ppm)	
	O ₂ =	4.61 (% vol.)	
Emissivity of gas hot period, E_g	=	0.133	
Absorptivity of gas hot period, A_g	=	0.1189	
Emissivity of gas cold period, E_g	=	0.034	
Absorptivity of gas cold period, A_g	=	0.0299	

solid temperature distribution hot period (degree C)

regenerator entrance

	0	45	90	135	180	225	270	315	360	405	450	495	540	585	630	675	720	765	810	855	900	945	990	1,035	1,080	1,125	1,170	1,215	1,260	1,305	1,350	1,395	1,440	1,485	1,530	1,575	1,620	1,665	1,710	1,755	1,800	time (x)	
0	984	985	986	987	987	988	989	989	990	991	991	992	993	993	994	995	995	996	997	997	998	998	999	1,000	1,000	1,001	1,001	1,002	1,002	1,003	1,003	1,004	1,005	1,005	1,006	1,006	1,007	1,007	1,008	1,008	1,009		
0	969	970	970	971	972	972	973	974	975	975	976	977	977	978	978	979	980	980	981	982	982	983	983	984	985	985	986	986	987	988	988	989	989	990	990	991	991	992	992	993	993		
1	953	954	955	955	956	957	957	958	959	959	960	961	961	962	963	963	964	965	965	966	966	967	968	968	969	970	970	971	971	972	973	973	974	974	975	975	976	976	977	978	978		
1	937	938	939	939	940	941	941	942	943	943	944	945	945	946	947	947	948	949	949	950	951	951	952	952	953	954	954	955	956	956	957	958	959	959	960	960	961	961	962	963	963		
1	921	922	922	923	924	925	925	926	927	927	928	929	929	930	931	931	932	932	933	934	934	935	936	936	937	938	938	939	939	940	941	941	942	943	943	944	944	945	946	946	947		
1	905	905	906	907	907	908	909	909	910	911	911	912	913	913	914	915	915	916	917	917	918	919	919	920	921	921	922	923	923	924	924	925	926	926	927	928	928	929	929	930	931		
2	888	889	889	890	891	891	892	893	894	894	895	896	896	897	898	898	899	900	900	901	902	902	903	904	904	905	905	906	907	907	908	909	909	910	911	911	912	912	913	914	914		
2	871	872	873	873	874	875	875	876	877	877	878	879	879	880	881	881	882	883	883	884	885	885	886	887	888	889	889	890	891	891	892	893	893	894	895	895	896	897	897	898	899	899	
2	854	855	855	856	857	858	858	859	860	860	861	862	862	863	864	864	865	866	866	867	868	868	869	870	870	871	872	872	873	874	874	875	876	876	877	878	878	879	880	880	881		
2	837	837	838	839	839	840	841	842	842	843	844	844	845	846	846	847	848	848	849	850	851	851	852	853	853	854	855	855	856	857	857	858	859	859	860	861	861	862	863	863	864		
3	819	820	820	821	822	823	823	824	825	825	826	827	828	828	829	830	830	831	832	832	833	834	835	835	836	837	837	838	839	839	840	841	841	842	843	843	844	845	845	846	847		
3	801	802	803	803	804	805	806	806	807	808	808	809	810	810	811	812	813	813	814	815	815	816	817	818	818	819	820	820	821	822	822	823	824	825	825	826	827	827	828	829	829		
3	783	784	785	785	786	787	787	788	789	790	790	791	792	793	793	794	795	795	796	797	798	798	799	800	800	801	802	803	803	804	805	805	806	807	807	808	809	810	810	811	812		
3	765	766	766	767	768	768	769	770	771	771	772	773	774	774	775	776	776	777	778	779	779	780	781	782	782	783	784	784	785	786	787	787	788	789	789	790	791	792	792	793	794		
4	746	747	748	748	749	750	751	752	753	754	754	755	756	757	757	758	759	759	760	761	762	762	763	764	765	765	766	767	768	768	769	770	770	771	772	773	773	774	775	776			
4	727	728	729	730	730	731	732	733	733	734	735	736	736	737	738	739	739	740	741	742	742	743	744	745	745	746	747	748	748	749	750	750	751	752	753	753	754	755	756	756	757		
4	708	709	710	711	711	712	713	714	714	715	716	717	717	718	719	720	720	721	722	723	723	724	725	726	726	727	728	729	729	730	731	732	732	733	734	735	735	736	737	738	738		
4	689	690	690	691	692	693	694	694	695	696	697	697	698	699	700	700	701	702	703	703	704	705	706	707	707	708	709	710	710	711	712	713	713	714	715	716	716	717	718	719	719		
5	669	670	671	672	672	673	674	675	676	676	677	678	679	679	680	681	682	683	683	684	685	686	686	687	688	689	689	690	691	692	693	693	694	695	696	696	697	698	699	699	700		
5	649	650	651	652	653	653	654	655	656	657	657	658	659	660	661	662	663	664	664	665	666	667	668	668	669	670	671	671	672	673	674	675	675	676	677	678	678	679	680	681			
5	629	630	631	632	632	633	634	635	636	636	637	638	639	640	640	641	642	643	644	644	645	646	647	648	648	649	650	651	652	652	653	654	655	656	656	657	658	659	659	660	661		

Length (m)

regenerator exit

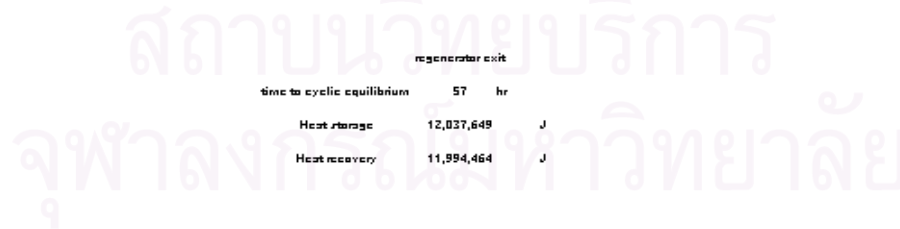
time to cyclic equilibrium 57 hr

start of period

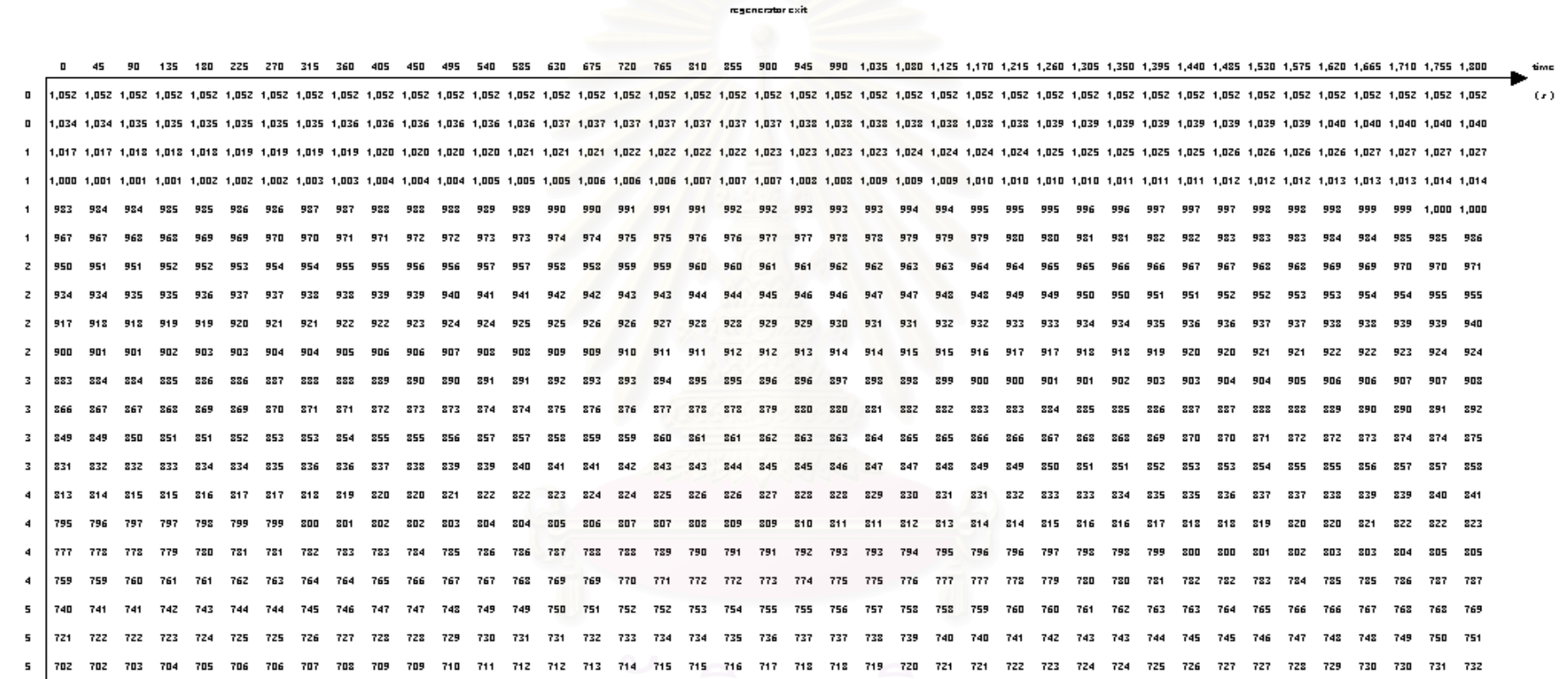
Heat storage 12,037,649 J

end of period

Heat recovery 11,994,464 J

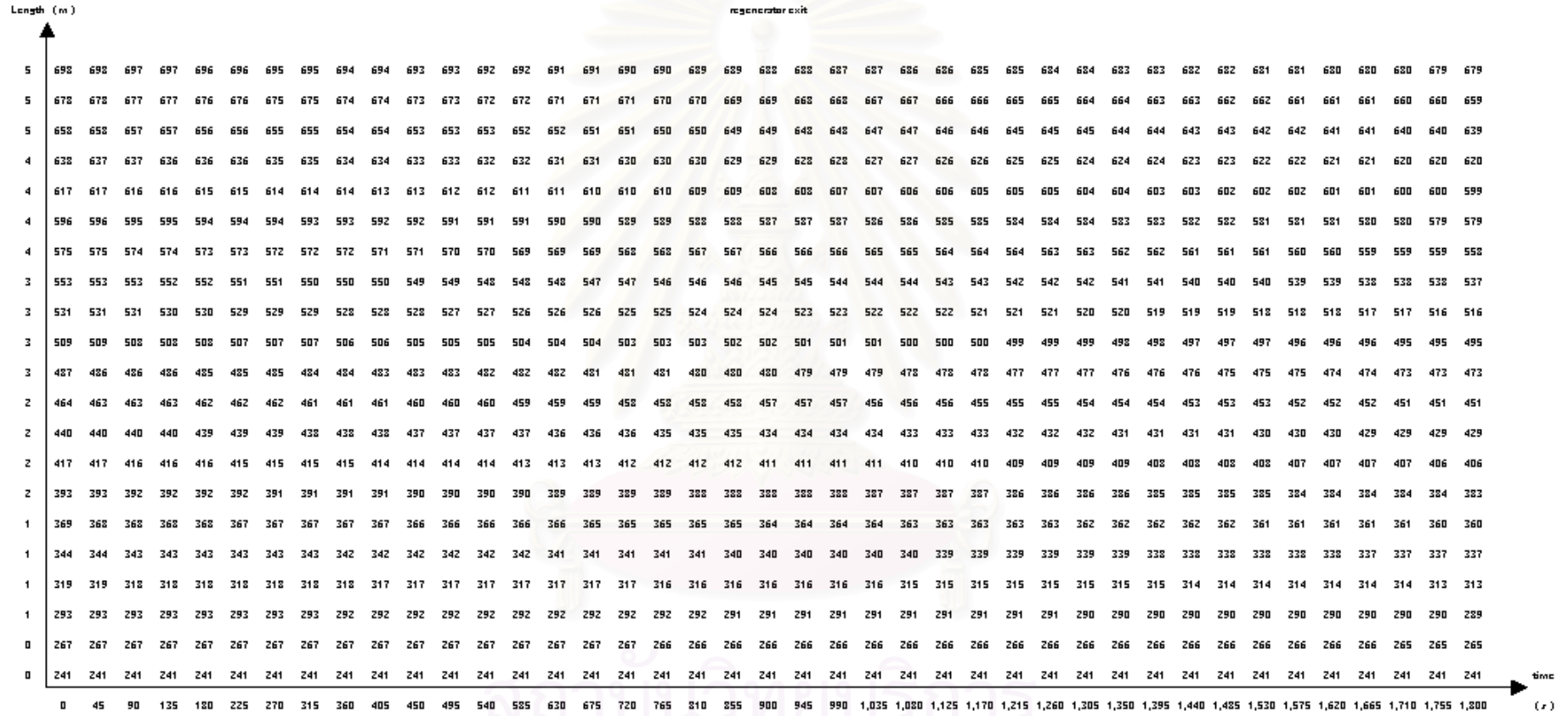


fluid temperature distribution hot period (degree C)



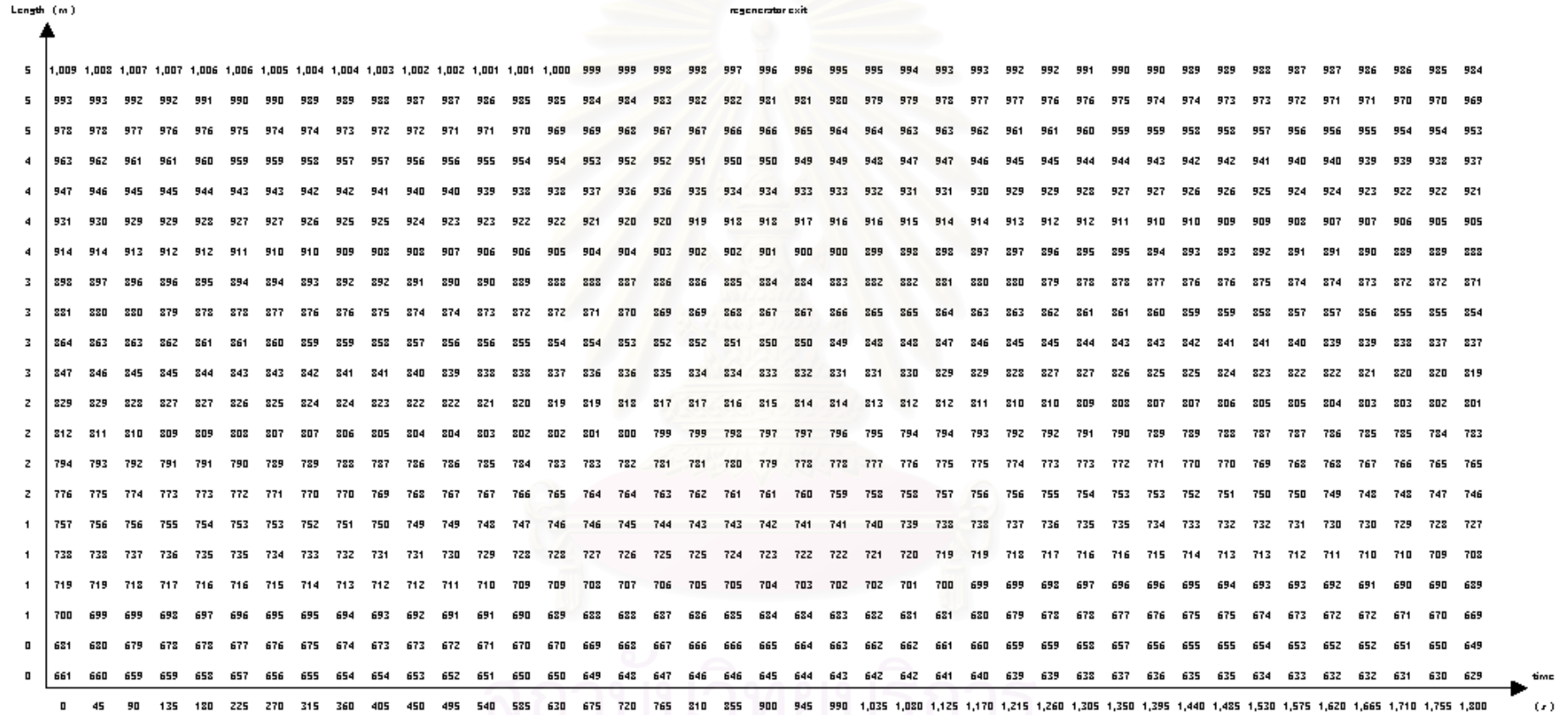
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

fluid temperature distribution cold period (degree C)



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

solid temperature distribution cold period (degree C)

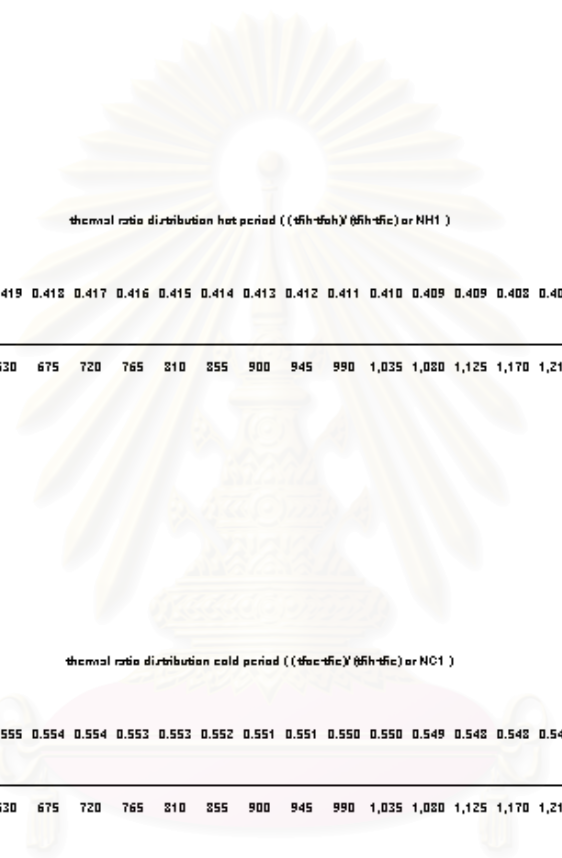


start of period

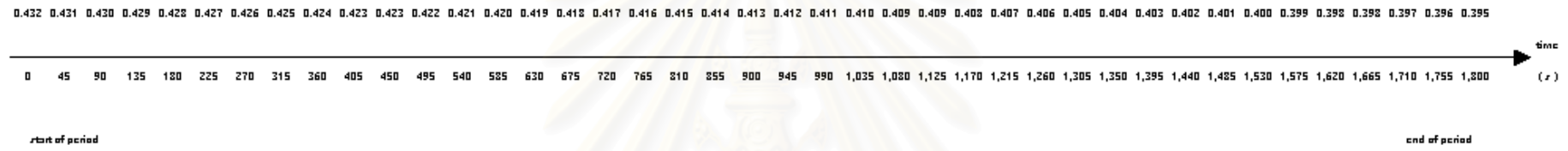
regenerator entrance

end of period

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



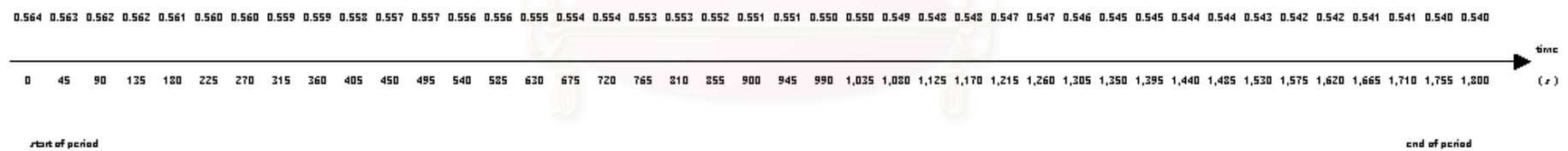
thermal ratio distribution hot period ((θ_{h-c}) (θ_{h-c}) or NH1)



start of period

end of period

thermal ratio distribution cold period ((θ_{c-c}) (θ_{c-c}) or NC1)

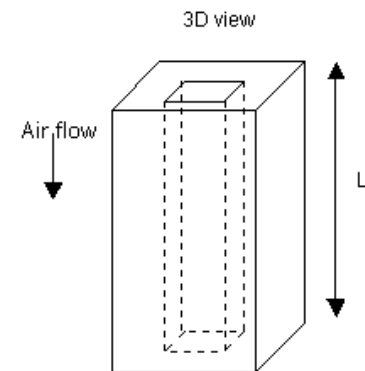
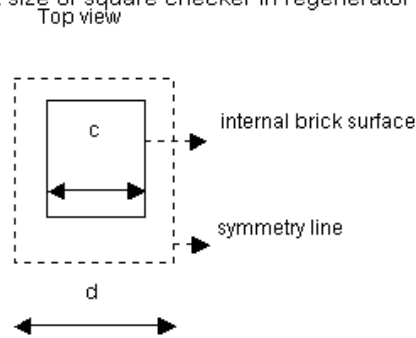


start of period

end of period

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.) Input size of square checker in regenerator



$$c = 0.18 \text{ m}$$

$$d = 0.26 \text{ m}$$

$$\text{time Batcl} = 12 \text{ Hr}$$

$$L = 5.04 \text{ m}$$

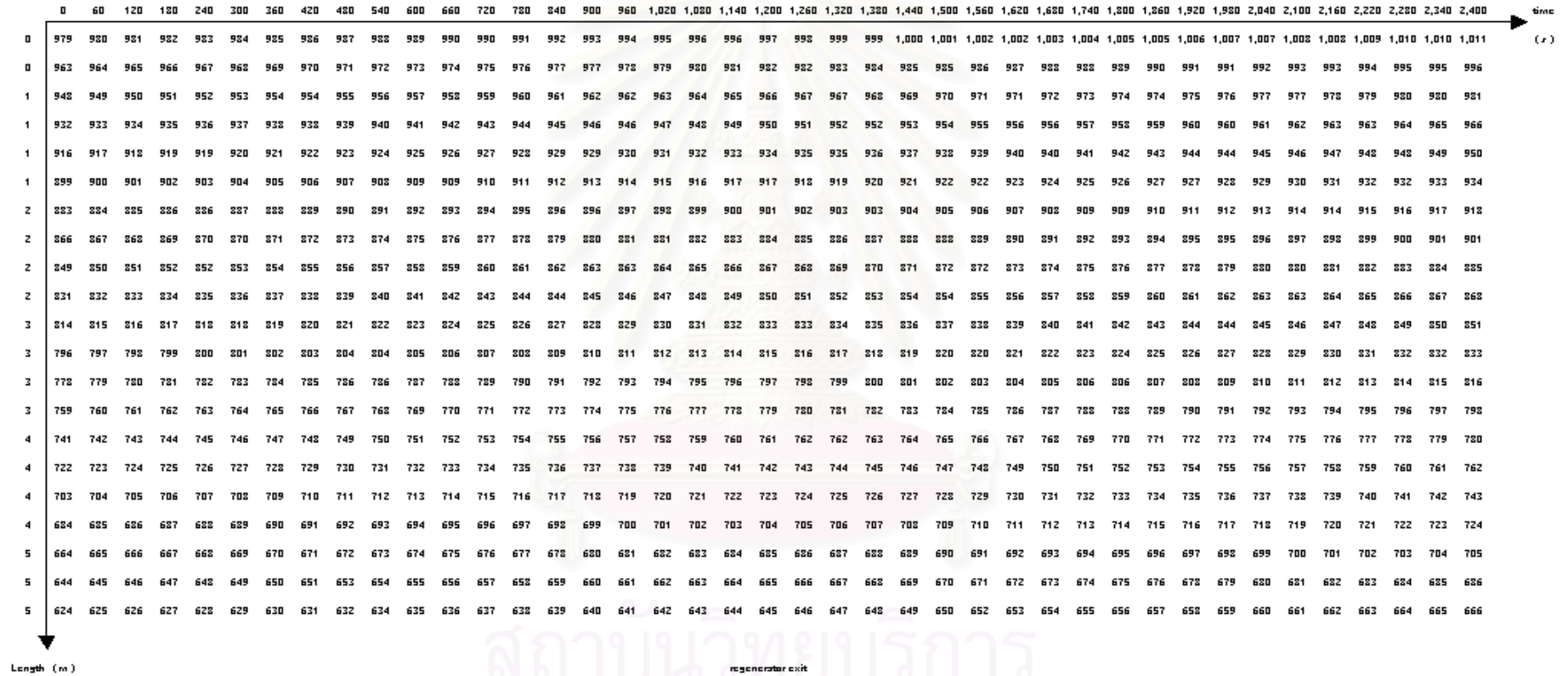
$$\text{channel} = 120.0 \text{ channel}$$

2.) Input heat transfer data

time mean ambient temperature, t_a	=	38 °C	
time mean relative humidity	=	80 %	
deviding Length	=	20 deviding Time	= 40
time mean fluid temperature (in), t_{fih}	=	1052 °C	} hot period
time mean fluid temperature (out), t_{foh}	=	434 °C	
time mean solid temperature (in), t_{mih}	=	907 °C	
time mean solid temperature (out), t_{moh}	=	420 °C	
time mean fluid temperature (in), t_{fic}	=	241 °C	} cold period
time mean fluid temperature (out), t_{foc}	=	751 °C	
time mean solid temperature (in), t_{mic}	=	402 °C	
time mean solid temperature (out), t_{noc}	=	890 °C	
Time cycle, PE	=	2400 s	
Dry weight ore =	23000 kg	%H ₂ O =	7.52 % by Wet weight
Accuracy, ACC	=	0.001	
Fluid volume flow rate (cold period)	=	4950 m ³ /hr	
Oil mass flow rate	=	270 kg/hr	
	CO ₂	=	12.33 (% vol.)
component of fluid (hot period)	CO	=	377 (ppm)
	O ₂	=	4.61 (% vol.)
Emissivity of gas hot period, E_g	=	0.133	
Absorptivity of gas hot period, A_g	=	0.1189	
Emissivity of gas cold period, E_g	=	0.034	
Absorptivity of gas cold period, A_g	=	0.0299	

solid temperature distribution hot period (degree C)

regenerator entrance

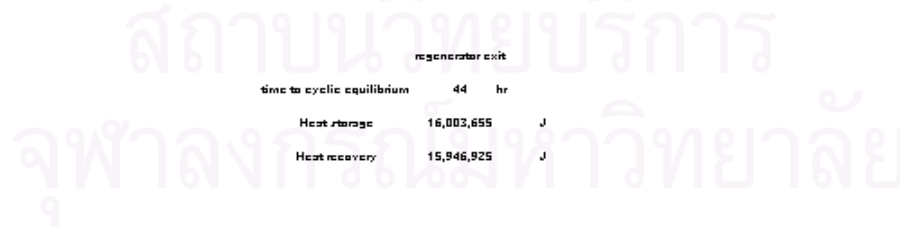


regenerator exit
time to cyclic equilibrium 44 hr

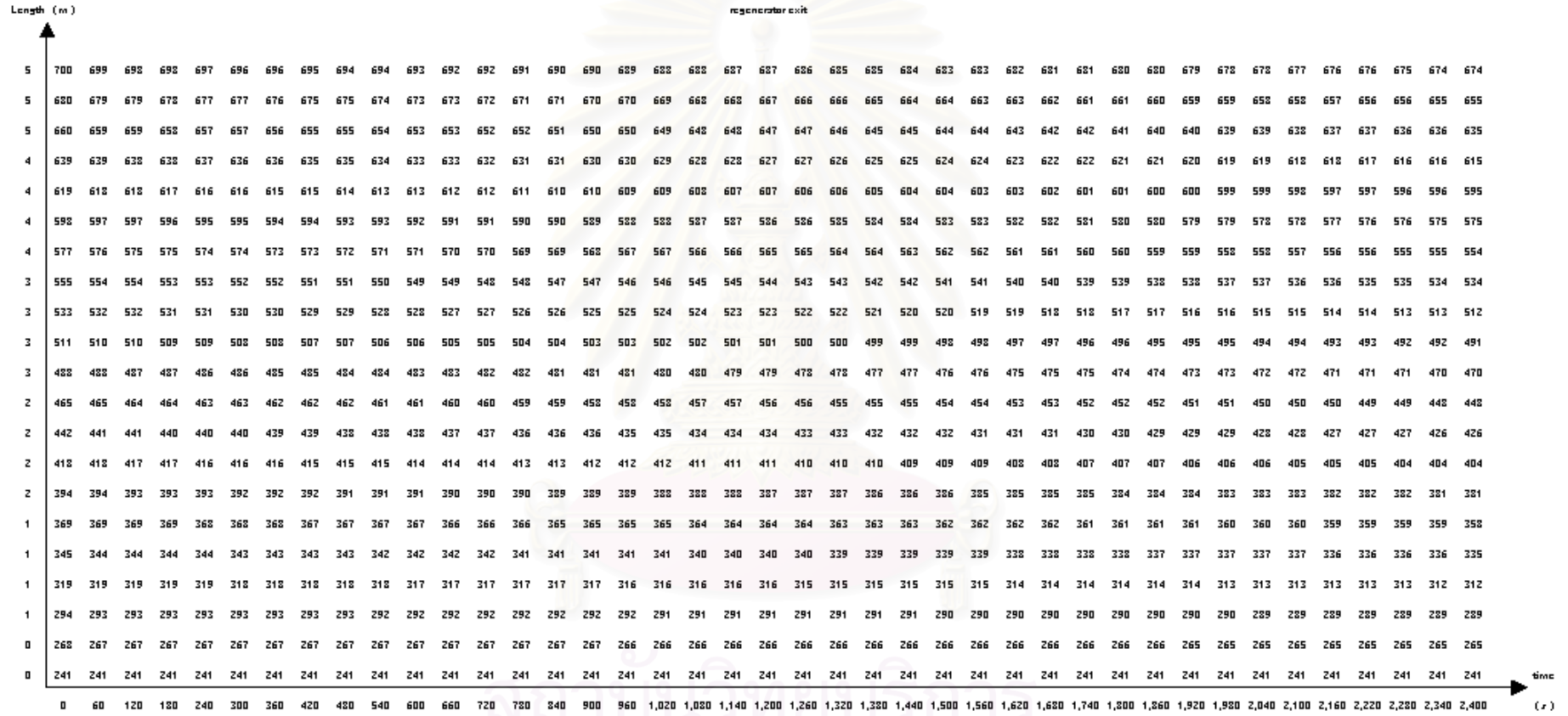
start of period

Heat storage 16,003,655 J
Heat recovery 15,946,925 J

end of period



fluid temperature distribution cold period (degree C)



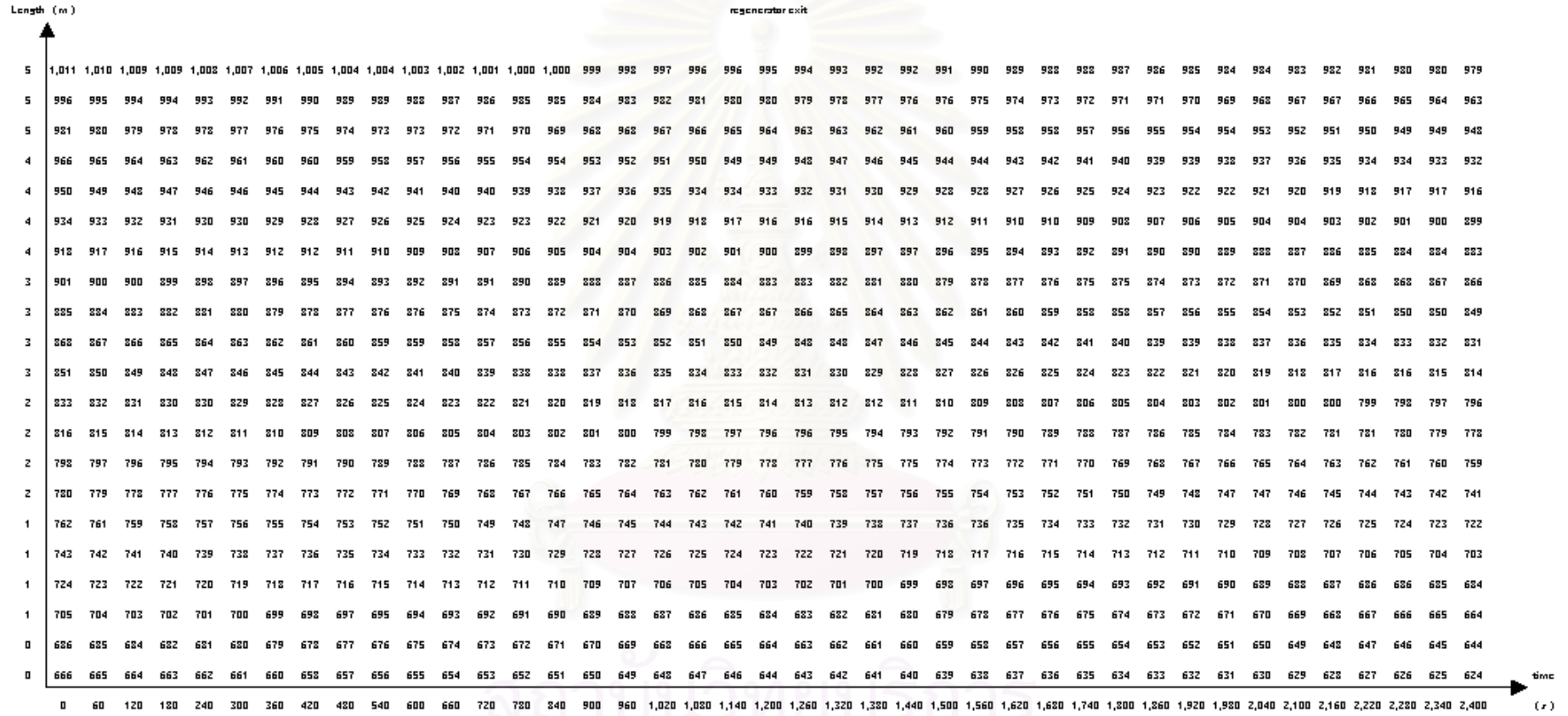
start of period

regenerator entrance

end of period

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

solid temperature distribution cold period (degree C)

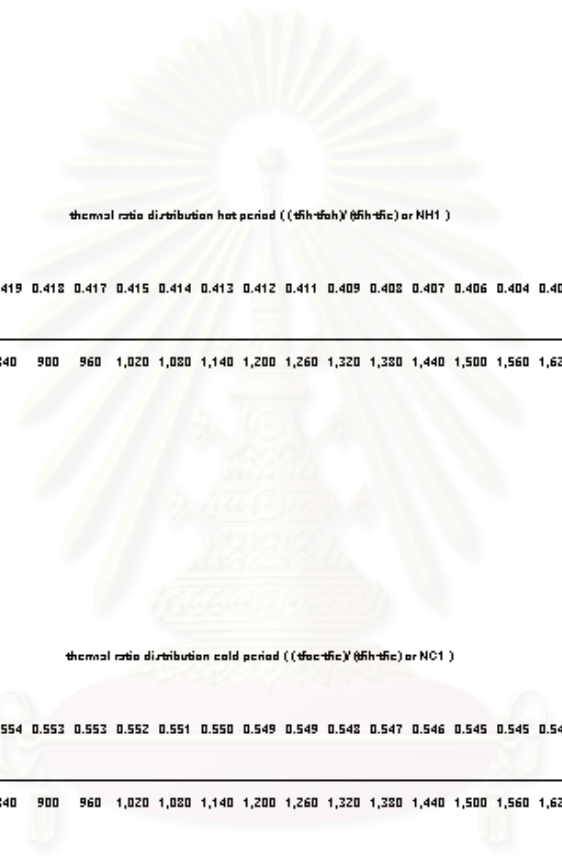


start of period

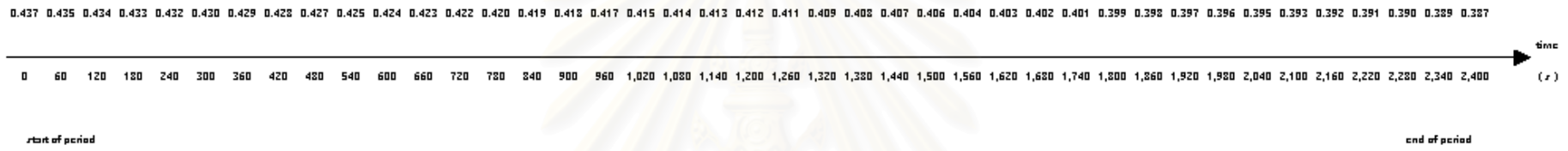
regenerator entrance

end of period

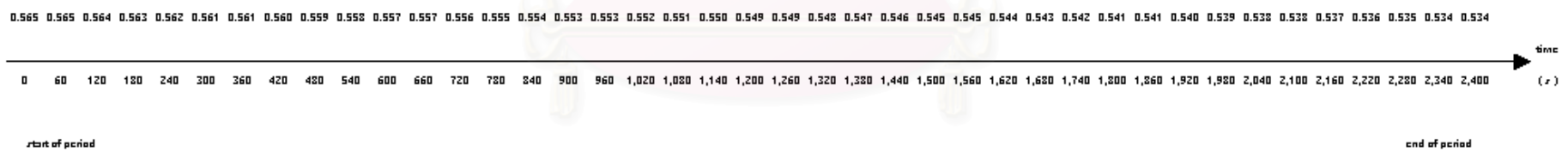
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



thermal ratio distribution hot period ((θ_{h-c}) (θ_{h-c}) or NH1)



thermal ratio distribution cold period ((θ_{c-c}) (θ_{c-c}) or NC1)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายจิรชนม์ เสรีวิชัยสวัสดิ์ เกิดวันที่ 12 มิถุนายน พ.ศ. 2520 ที่โรงพยาบาล หัว
 เฉียว กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขา
 วิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 ในปีการศึกษา 2541 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่จุฬาลงกรณ์
 มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2541 ระหว่างการศึกษาได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากบัณฑิต
 วิทยาลัย และ กองทุนอนุรักษ์พลังงาน รวมทั้งทุนผู้ช่วยสอน นอกจากนี้ได้เข้าร่วมกับหน่วยวิจัย
 พลังงานจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในการตรวจสอบการใช้พลังงานเบื้องต้นของโรงงานควบคุม
 ระหว่างทำการศึกษา ด้วย



สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย