

การศึกษาการเปลี่ยนอุณหภูมิเชิงเวลาและวัฏจักรการทำงานที่เหมาะสม
ของรีเจเนอเรเตอร์



นายพรชัย เพชรสงคราม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-17-6776 -5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STUDY ON TEMPERATURE HISTORY AND OPTIMUM TIME CYCLE
OF FIRECLAY BRICK REGENERATOR

Mr. Pornchai Phetsongkram

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

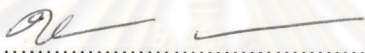
Chulalongkorn University

Academic Year 2004

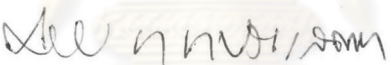
ISBN 974-17-6776-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาการเปลี่ยนอุณหภูมิเชิงเวลาและวัฏจักรการทำงานที่เหมาะสมของ
รีเจเนอเรเตอร์
โดย นายพรชัย เพชรสงคราม
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัญศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.มานิจ ทองประเสริฐ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ธร จริญญากรณ์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์)

นายพรชัย เพชรสงคราม: การศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเชิงเวลาและวัฏจักรการทำงานที่เหมาะสมของรีเจเนอเรเตอร์. (A STUDY ON TEMPERATURE HISTORY AND OPTIMUM TIME CYCLE OF FIRECLAY BRICK REGENERATOR) อ. ที่ปรึกษา: ผศ. มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล, 173 หน้า. ISBN 974-17-6776-5

การวิจัยครั้งนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเชิงเวลา และวัฏจักรการทำงานที่เหมาะสมของรีเจเนอเรเตอร์แบบโครงอิฐทนไฟ โดยทำการสร้างชุดทดลองขึ้นเพื่อทดสอบหาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเชิงเวลา และการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลเย็น (cold fluid) และของไหลร้อน (hot fluid) กับโครงอิฐทนไฟของรีเจเนอเรเตอร์ และหาเวลาที่เหมาะสมที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนของรีเจเนอเรเตอร์

รีเจเนอเรเตอร์ที่ใช้ในการวิจัยเป็นรีเจเนอเรเตอร์ที่ทำมาจากอิฐทนไฟแบบ Super – Duty Fireclay Brick ASTM C 27 – 93, Regular Type รุ่น K 43 SP – 38 โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิของของไหลร้อนเท่ากับ 400°C อัตราการไหลโดยมวลในช่องการไหลของของไหลร้อน และของไหลเย็นเท่ากับ $4.069 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$ และเวลาที่ใช้ในวัฏจักรเท่ากับ 10, 20 และ 30 นาที

จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิของของไหล และอิฐทนไฟจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นและจะคงที่เมื่อวัฏจักรเข้าสู่ Cyclic Equilibrium และค่า Thermal ratio ของรีเจเนอเรเตอร์ ในช่วงสะสมความร้อน จะมีแนวโน้มลดลง และในช่วงคายความร้อนจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปทุกวัฏจักร และจะคงที่เมื่อวัฏจักรเข้าสู่ Cyclic Equilibrium และเมื่อนำค่า Thermal ratio ของแต่ละเวลาที่ใช้ในวัฏจักรมาเปรียบเทียบกันปรากฏว่าค่า Thermal ratio ของเวลาที่ใช้ในวัฏจักรเท่ากับ 10 นาที มีค่ามากกว่า Thermal ratio ของเวลาที่ใช้ในวัฏจักรเท่ากับ 20 และ 30 นาที

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
 ปีการศึกษา....2547.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4470424421 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: REGENERATOR/ TIME CYCLE / OPTIMUM

PORNCHAI PHETSONGKRAM: A STUDY ON TEMPERATURE HISTORY AND OPTIMUM TIME CYCLE OF FIRECLAY BRICK REGENERATOR. THESIS ADVISOR: ASST. PROF. MINGSAK TANGTAKUL, 173 pp. ISBN 974-17-6776-5.

The aim of this thesis is to study on temperature history and optimum time cycle of fireclay brick regenerator. The experimental apparatus has been set up to carry out the temperature history and heat transfer between both fluids, hot and cold fluids, and fireclay brick regenerator.

The regenerator have been made from Super – Duty Fireclay Brick ASTM C 27 – 93, Regular Type, Model K 43 SP – 38. The hot fluid temperature is 400 °C. Mass flow rate of hot and cold fluids is 4.069×10^{-3} kg/s. Time cycles are 10, 20 and 30 minutes, respectively.

The results have shown that fluid temperatures have gradually increased along with time cycles. The fluid temperatures are constant when cyclic equilibrium is reached. The thermal ratio of regenerator of heating period has decreased with time cycle, otherwise, cooling period has enhanced as time cycles increase. The thermal ratios of both periods are constant when the cyclic equilibrium is reached. Comparing thermal ratio of each time period shows the thermal ratio of 10 minutes is higher than the ones of 20 minutes and 30 minutes.

Department.....Mechanical Engineering...Student's signature.....*พอร์ช เพชรสงคราม*
 Field of study...Mechanical Engineering...Advisor's signature.....*อ.พร อภิบาล*
 Academic year.....2004.....Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนเพื่อการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน โดยการวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของบุคคลหลายท่านดังนี้ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ชี้แนะหัวข้อและแนวทางวิจัยตลอดจนคำปรึกษามากมายที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัย พร้อมทั้งสนับสนุนเครื่องมือวัดต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิจัยทุกอย่าง

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. มานิจ ทองประเสริฐ ประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร. พงษ์ธร จรัญญากรณ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์ กรรมการ ที่ช่วยให้คำปรึกษาและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อวิทยานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา ยงเจริญ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ฤชากร จิรกาลวสาน ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ขอกราบขอบพระคุณหน่วยวิจัยพลังงานจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้ให้โอกาสในการศึกษาค้นคว้า สะสมประสบการณ์ และ เอื้ออำนวยอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่จำเป็นอย่างสูงในการวิจัย รวมทั้ง อาจารย์ณัฐเดช เพ็ญวรวงศ์ คุณประพันธ์ พิภูลทอง คุณนิสิต ไสยลักษณ์ คุณพีอำพา คงวิโรจน์ ที่ช่วยในงานธุรการต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับงานวิจัยนี้ และพี่ ๆ ช่างเทคนิคของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่ช่วยให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัย

ท้ายที่สุดนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และ ครอบครัว ที่ให้การสนับสนุนผู้วิจัยทั้งในด้านค่าใช้จ่าย อำนวยความสะดวก และกำลังใจมาโดยตลอด ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
รายการสัญลักษณ์.....	ฐ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญ และที่มาของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขั้นตอนการทำวิทยานิพนธ์.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2. ผลงานวิจัยที่ผ่านมา.....	4
3. ทฤษฎี.....	5
3.1 ความรู้พื้นฐานของรีเจเนอเรเตอร์.....	5
3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของรีเจเนอเรเตอร์.....	6
3.3 Logarithmic Mean Temperature Difference.....	15
3.4 การถ่ายเทความร้อน.....	16
3.5 คุณสมบัติของก๊าซผสม.....	27
3.6 พลังงานความร้อนที่นำกลับมาใช้.....	28
4. อุปกรณ์การทดลองและวิธีการดำเนินการวิจัย.....	29
4.1 ลักษณะโดยทั่วไปของอุปกรณ์การทดลอง.....	29
4.2 อุปกรณ์การทดลองอื่น ๆ.....	31
4.3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	32

บทที่	หน้า
5. ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....	43
5.1 ผลการทดลอง.....	43
5.2 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของของไหลและอิฐทนไฟ.....	55
5.3 การวิเคราะห์ Thermal ratio.....	55
5.4 การวิเคราะห์ Heat storage และ Heat recovery.....	56
5.5 การวิเคราะห์การเปรียบเทียบ Thermal ratio.....	56
5.6 การวิเคราะห์การเปรียบเทียบ Heat recovery.....	57
6. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	58
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	58
6.2 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยต่อไป.....	58
รายการอ้างอิง.....	60
ภาคผนวก.....	61
ภาคผนวก ก.....	62
ภาคผนวก ข.....	166
ภาคผนวก ค.....	167
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	173

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1ก ผลการทดลองของเวลาที่ใช้ในวัฏจักรเท่ากับ 10 นาที.....	63
2ก ผลการทดลองของเวลาที่ใช้ในวัฏจักรเท่ากับ 20 นาที.....	93
3ก ผลการทดลองของเวลาที่ใช้ในวัฏจักรเท่ากับ 30 นาที.....	122
4ก แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยของของไหล และอิฐทนไฟของเวลาที่ใช้ในวัฏจักรเท่ากับ 10 นาที.....	152
5ก แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยของของไหล และอิฐทนไฟของเวลาที่ใช้ในวัฏจักรเท่ากับ 20 นาที.....	157
6ก แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยของของไหล และอิฐทนไฟของเวลาที่ใช้ในวัฏจักรเท่ากับ 30 นาที.....	160
7ก แสดง Thermal ratio.....	162
8ก แสดง Heat storage และ Heat recovery.....	164


 ศูนย์วิจัยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูปรภาพ

รูปที่	หน้า
3.1 Fix two-bed regenerator system.....	5
3.2 ปริมาตรควบคุมของโครงอิฐทนไฟ.....	7
3.3 แสดงอุณหภูมิของอิฐทนไฟและของไหลที่หน้าตัดใด ๆ ของรีเจเนอเรเตอร์ กับเวลา.....	11
3.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเนื้ออิฐทนไฟที่เวลาใด ๆ.....	12
3.5 แสดงการกระจายอุณหภูมิของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการไหลแบบขนานกัน.....	15
3.6 แสดงการพัฒนาของ Velocity Boundary Layer ของของไหลที่ไหลภายในท่อ.....	19
3.7 แสดงการพัฒนาของ Thermal Boundary Layer ของของไหลที่ไหลภายในท่อ.....	19
3.8 แสดงค่าการแผ่รังสีของ H ₂ O ที่ Total Pressure 1 atm และ Partial Pressure ใกล้เคียงศูนย์.....	24
3.9 แสดงค่าการแผ่รังสีของ CO ₂ ที่ Total Pressure 1 atm และ Partial Pressure ใกล้เคียงศูนย์.....	25
3.10 แสดง Correction Factor, C _w ของ ϵ_w ที่ Total Pressure p atm.....	25
3.11 แสดง Correction Factor, C _c ของ ϵ_c ที่ Total Pressure p atm.....	26
3.12 แสดง Correction Factor for Overlap, $\Delta\epsilon$ สำหรับก๊าซของผสมที่มีทั้งไอน้ำ และคาร์บอนไดออกไซด์.....	26
4.1 แสดงชุดทดสอบและตำแหน่งวัดอุณหภูมิ.....	36
4.2 แสดงลักษณะทางด้านข้างของรีเจเนอเรเตอร์.....	37
4.3 แสดงลักษณะทางด้านหน้าของรีเจเนอเรเตอร์.....	37
4.4 แสดงฮีตเตอร์ที่ใช้ในการทำของไหลร้อน.....	38
4.5 แสดงระบบป้อนของไหลร้อน.....	38
4.6 แสดงระบบป้อนของไหลเย็น.....	39
4.7 แสดงเทอร์โมคัปเปิ้ลที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิ.....	39
4.8 แสดงตำแหน่งวัดอุณหภูมิของเนื้ออิฐทนไฟ.....	40
4.9 แสดงตำแหน่งวัดอุณหภูมิของของไหล.....	40
4.10 แสดงอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบของมอเตอร์.....	41
4.11 แสดงอุปกรณ์บันทึกอุณหภูมิ.....	41
4.12 แสดงอุปกรณ์วัดความเร็วของอากาศ.....	42
4.13 แสดงอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิของฮีตเตอร์.....	42

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของของไหลและอิฐทนไฟกับเวลา เมื่อเวลาที่ใช้ในวัฏจักร (P) เท่ากับ 10 นาที.....	44
5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของของไหลและอิฐทนไฟกับเวลาของวัฏจักรที่ 42 ถึง 45 เมื่อเวลาที่ใช้ในวัฏจักร (P) เท่ากับ 10 นาที.....	44
5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของของไหลกับเวลาเมื่อเวลาที่ใช้ในวัฏจักร (P) เท่ากับ 10 นาที.....	45
5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอิฐทนไฟกับเวลา เมื่อเวลาที่ใช้ในวัฏจักร (P) เท่ากับ 10 นาที.....	45
5.5 แสดง Thermal ratio ของรีเจเนอเรเตอร์ เมื่อเวลาที่ใช้ในวัฏจักร (P) เท่ากับ 10 นาที.....	46
5.6 แสดงปริมาณ Heat storage และ Heat recovery เมื่อเวลาที่ใช้ในวัฏจักร (P) เท่ากับ 10 นาที.....	46
5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของของไหลและอิฐทนไฟกับเวลา เมื่อเวลาที่ใช้ในวัฏจักร (P) เท่ากับ 20 นาที.....	47
5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของของไหลและอิฐทนไฟกับเวลาของวัฏจักรที่ 19 ถึง 22 เมื่อเวลาที่ใช้ในวัฏจักร (P) เท่ากับ 20 นาที.....	47
5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของของไหลกับเวลา เมื่อเวลาที่ใช้ในวัฏจักร (P) เท่ากับ 20 นาที.....	48
5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอิฐทนไฟกับเวลาเมื่อเวลาที่ใช้ในวัฏจักร(P) เท่ากับ 20 นาที.....	48
5.11 แสดง Thermal ratio ของรีเจเนอเรเตอร์ เมื่อเวลาที่ใช้ในวัฏจักร (P) เท่ากับ 20 นาที.....	49
5.12 แสดง Heat storage และ Heat recovery เมื่อเวลาที่ใช้ในวัฏจักร (P) เท่ากับ 20 นาที.....	49
5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของของไหลและอิฐทนไฟกับเวลาที่เวลา เมื่อเวลาที่ใช้ในวัฏจักร(P) เท่ากับ 30 นาที.....	50
5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของของไหลและอิฐทนไฟกับเวลาที่เวลาของวัฏจักรที่ 12 ถึง 15 เมื่อเวลาที่ใช้ในวัฏจักร (P) เท่ากับ 30 นาที.....	50
5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของของไหลกับเวลา เมื่อเวลาที่ใช้ในวัฏจักร(P) เท่ากับ 30 นาที.....	51

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอิฐทนไฟกับเวลา เมื่อเวลาที่ใช้ในวัฏจักร(P) เท่ากับ 30 นาที.....	51
5.17 แสดง Thermal ratio ของรีเจเนอเรเตอร์ เมื่อเวลาที่ใช้ในวัฏจักร (P) เท่ากับ 30 นาที.....	52
5.18 แสดง Heat storage และ Heat recovery เมื่อเวลาที่ใช้ในวัฏจักร (P) เท่ากับ 30 นาที.....	52
5.19 แสดง Thermal ratio ของรีเจเนอเรเตอร์ในช่วงสะสมความร้อน.....	53
5.20 แสดง Thermal ratio ของรีเจเนอเรเตอร์ในช่วงคายความร้อน.....	53
5.21 แสดงปริมาณความร้อนในช่วงคายความร้อน.....	54
1 ข กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนจำเพาะของอากาศ กับอุณหภูมิ.....	166


 ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
A	Heat transfer area	m ²
c _p	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
T	Nondimensional temperature	-
t	Temperature	°C, K
w	Semi-thickness of storage material for heat storage unit	m
x	Axial coordinate	m
Greek		
η	Nondimensional time	-
η_{REG}	Thermal ratio, dimensionless	-
Λ	Reduced length	-
ξ	Nondimensional axial distance	-
Π	Reduced period, dimensionless	-
ρ	Density	kg/m ³
ϕ	Overall heat transfer correction factor	-
τ	Time	s

Subscripts

Cond	Conduction
Conv	Convection
Rad	Radiation
f	Fluid
m	Storage material
s	Surface

Superscripts

'	Heating period for regenerator
“	Cooling period for regenerator



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย