การจำลองแบบถังสะสมความร้อนชนิดใช้อากาศและก้อนหิน

นายวิเชษฐ์ รัชยพิชิตกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2530

ISBN 974-567-414-1

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

012519

i 10298915

Simulation of Air-Rock Bed Thermal Storage Tank

Mr. Wichet .Reechaipichitkul

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Mechanical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

1987

ISBN 974-567-414-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจำลองแบบถังละลมความร้อนยนิดใช้อากาศและก้อนหิน
โดย	นายวิเชษฐ์ รัชัยพิชิตกุล
ภาควิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. สมศรี จงรุ่งเรือง
	รองศาสตราจารย์ ดร. มานิจ ทองประเสริฐ

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดี บัณฑิตวิทยาลัย

(ศาสตราจารย์ ดร. ถาวร วัชราภัย)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. วริทธิ์ อึงภากรณ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.สมศรี จงรุ่งเรือง)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(รองศาสตราจารย์ ดร.มานิจ ทองประเสริฐ)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา ยงเจริญ)

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ช

รายการตารางประกอบ ..... ญ

รายการรูปประกอบ ..... ฏ

รายการสัญญลักษณ์ ..... ฏ

1. บทนำ 1

2. ทฤษฎี 5

3. ถังเก็บสะสมความร้อนและเครื่องมือ 22

4. การทดลองและไดอะแกรมโปรแกรม TRNSYS 26

5. ผลการทดลอง 36

6. สรุป วิจารณ์และข้อเสนอแนะ ..... 56 56.

เอกสารอ้างอิง ..... 61 61.

ภาคผนวก 63 63

ประวัติผู้เขียน 155 155

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจำลองแบบถังสะสมความร้อนชนิดใช้อากาศและก้อนหิน
ชื่อนิสิต	นายวิเชษฐ์ รัชัยพิชิตกุล
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. สมศรี จงรุ่งเรือง
	รองศาสตราจารย์ ดร. มานิจ ทองประเสริฐ
ภาควิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา	2529

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ กล่าวถึงการจำลองแบบถังสะสมความร้อนชนิดอากาศ-ก้อนหิน โดยใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเป็นตัวให้พลังงานความร้อนแทนแผงรับแสงอาทิตย์ การศึกษากระทำทั้งภาคทฤษฎีและภาคการทดลอง ในการศึกษาทางทฤษฎีได้อาศัยโปรแกรม TRNSYS ซึ่งเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ โครงสร้างของโปรแกรม TRNSYS ประกอบด้วยโปรแกรมหลักและโปรแกรมย่อย โปรแกรมหลักจะทำหน้าที่เรียกโปรแกรมย่อยเพื่อทำการคำนวณผล ส่วนโปรแกรมย่อยจะเขียนขึ้นแทนระบบย่อย เช่น แผงรับแสงอาทิตย์ ถังสะสมความร้อน ฯลฯ สำหรับระบบการสะสมความร้อนชนิดอากาศ-ก้อนหิน ที่มีการคำนวณผลโดยอาศัยโปรแกรม TRNSYS ต้องกำหนดโมเดลทางคณิตศาสตร์ สำหรับระบบย่อยเพื่อนำมาต่อเข้าด้วยกันเป็นระบบสะสมความร้อนแบบอากาศ-ก้อนหิน และต้องใส่พารามิเตอร์ของระบบเข้าไปด้วย จากการใช้โปรแกรม TRNSYS ได้คำนวณหาอุณหภูมิอากาศที่ออกจากถังสะสมความร้อนที่เวลาใด ๆ และนอกจากนี้ยังใช้โปรแกรม TRNSYS ช่วยในการคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของถังสะสมความร้อนอีกด้วย ได้มีการสร้างถังสะสมความร้อนขึ้นเพื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองและผลจากการคำนวณโดยโปรแกรม TRNSYS

ถังสะสมความร้อนที่สร้างขึ้นเพื่อการทดลองเป็นรูปทรงกระบอก มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.76 เมตร สูง 0.70 และ 1.05 เมตร บรรจุก้อนหินภายในมีค่าความพรุนของเบด 0.46 ชนิดของก้อนหินที่ใช้เป็นหินปูน (Lime stone) และได้ทำการคัดก้อนหินออกเป็น 3 ขนาด คือ $\frac{1}{2}$" - $\frac{3}{4}$", $\frac{3}{4}$" - 1", 1"- $1\frac{1}{2}$" อุณหภูมิของอากาศที่เข้าสู่เบดควบคุมให้คงที่ที่ 60°C และอัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการทดลองมีค่า 202.32, 238.9, 267.2 $ม^3$/ชั่วโมง

ผลการเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลจากการคำนวณโดยโปรแกรม TRNSYS ของถังสะสมความร้อน พบว่า ในช่วงการสะสมความร้อน อุณหภูมิของเบดที่เวลาใด ๆ ที่ได้จากผลการทดลอง มีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรม TRNSYS มีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิเท่ากับ 0-3°ซ ส่วนในช่วงการนำความร้อนออกใช้งานค่าอุณหภูมิของอากาศที่ออกจากเบดที่เวลาใด ๆ ที่ได้จากผลการทดลองมีค่าแตกต่างจากผลการคำนวณโดยโปรแกรม มีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิประมาณ 0-4°ซ

ผลการเปรียบเทียบในเชิงเศรษฐศาสตร์ของถังสะสมความร้อน เมื่อนำไปทดแทนพลังงานไฟฟ้า พบว่า พลังงานความร้อนสะสมเมื่อนำไปใช้จากถังสะสมความร้อนสามารถทดแทนพลังงานความร้อนที่ได้รับจากพลังงานไฟฟ้า คิดเป็นราคาพลังงานเท่ากับ 2.54 บาท/กิโลวัตต์-ชั่วโมง เมื่อราคาแผงรับแสงอาทิตย์ตารางเมตรละ 2500 บาท ช่วงการสะสมความร้อนใช้เวลานาน 8 ชั่วโมง และนำความร้อนออกใช้งานได้เป็นเวลานาน 7 ชั่วโมง สามารถให้พลังงานความร้อนได้ครั้งละ 43 MJ. อุณหภูมิที่นำไปใช้งานอยู่ระหว่าง 45°ซ ถึง 55°ซ และช่วงเวลาที่ความร้อนถูกใช้งานเป็น 80% ของปี แต่ถ้าราคาแผงรับแสงอาทิตย์เปลี่ยนไปเป็นตารางเมตรละ 2000 บาท และ 1500 บาท จะให้ราคาพลังงานเท่ากับ 2.30 และ 2.07 บาท/กิโลวัตต์-ชั่วโมง ตามลำดับ คิดอายุการใช้งานของถังสะสมความร้อน 12 ปี อัตราดอกเบี้ย 15% ต่อปี และกระแสไฟฟ้ามีราคาหน่วยละ 2.10 บาท ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ราคาพลังงานความร้อนที่ได้รับจากถังสะสมความร้อนมีราคาแพงกว่าพลังงานความร้อนซึ่งผลิตจากกระแสไฟฟ้า จึงไม่คุ้มค่าต่อการที่จะนำพลังงานความร้อนสะสมจากถังสะสมความร้อนมาใช้แทนพลังงานความร้อนที่ได้จากพลังงานไฟฟ้า

Thesis Title Simulation of Air-Rock Bed Thermal Storage Tank

Name Mr. Wichet Reechaipichitkul

Thesis Advisor Associate Professor Somsri Chongrungreong, Ph.D.

Associate Professor Manit Thongprasert, Ph.D.

Department Mechanical Engineering

Academic Year 1986

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ABSTRACT

This thesis describes about a simulation of air-rock bed thermal storage tank by using an electric heater as a heat source instead of solar collector. This included the theoretical and experimental study. Computer program "TRNSYS" is used as a mathematical model for air-rock bed storage. Also a thermal storage tank was set up in order to compare experimental results and computer program results.

Computer program "TRNSYS" is a program for simulating the solar energy systems. TRNSYS is composed of executive program and a number of component subroutines. General component subroutines have been written for types of solar energy systems eg., collectors, storage tank etc. Computer programs were used to predict the outlet air temperature from the storage tank at any time and also gave the optimum size of thermal storage tank.

Thermal storage tank has a cylindrical shape with 0.76 metres diameter. It contained structural rocks (Lime stone) 0.70 and 1.05 metres in height. The rocks were placed randomly into the bed resulting in void fraction of 0.46. The rocks were separated by mechanical seive into three sizes : $\frac{1}{2}$" - $\frac{3}{4}$" , $\frac{3}{4}$" - 1" and 1"- $1\frac{1}{2}$" . Inlet air temperature to

the bed was kept constant a 60^{o}C and the air flow rates of 202.32 and 238.9, 267.2 m^{3}/hr were used.

Comparison between the results of the experiments and computer program showed that, during charged period the temperature of the bed at any time was about 0-3^{o}C different from the theoretical results. While discharged period, outlet air temperature from the bed at any time differed from the computer program within the range of 4^{o}C.

An economic evaluation indicated that the thermal storage tank gave an energy cost of 2.54 Baht/kw-hr. for the solar collector cost of 2500 Baht/m^{2}. If the cost of solar collector changed to 2000 Baht/m^{2} and 1500 Baht/m^{2} the thermal storage tank will give the cost of energy 2.30, 2.07 Baht/kw-hr. respectively. The storage tank has life cycle 12 years, loan interest rate 15% per year, the cost of electricity 2.10 Baht/kw-hr. Charged period for thermal storage tank was 8 hours. During discharged period, the storage tank has given energy about 43 MJ. within 7 hours.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. มานิจ ทองประเสริฐ และ รองศาสตราจารย์ ดร. สมศรี จงรุ่งเรือง ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ของการวิจัยมาด้วยดีตลอด จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วง

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา ยงเจริญ ซึ่งท่านได้กรุณาช่วยแก้ปัญหาและให้คำแนะนำตลอดระยะเวลาที่ทำการวิจัย

ท้ายนี้ผู้เขียนใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ซึ่งสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจ แก่ผู้เขียนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

รายการตารางประกอบ

หน้า

ตารางที่

2.1 คุณสมบัติของวัสดุสะสมความร้อน 6

4.1 ข้อมูลเพื่อหาคุณสมบัติทางกายภาพของหิน 27

4.2 อุณหภูมิน้ำในคาลอรีมิเตอร์เป็น ^{o}F ที่เวลาต่าง ๆ เมื่อใส่ก้อนหิน อุณหภูมิ 212 ^{o}F ลงไป 28

4.3 แสดงอุณหภูมิภายในถังสะสมความร้อนเมื่ออัตราการไหลของอากาศ 267.2 m^3/hr, ขนาดก้อนหิน 1" - $1\frac{1}{2}$", เบดสูง 1.05 m. .. 32

5.1 คุณสมบัติทางกายภาพของก้อนหิน 37

5.2 ค่าความดันลดเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลทางทฤษฎี 44

6.1 ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลคำนวณจากโปรแกรม TRNSYS 58

รายการรูปประกอบ

หน้า

รูปที่

2.1 แสดงถังสะสมความร้อนแบ่งออกเป็น N ชั้น โดยแต่ละชั้นมีความหนา ΔX .. 8

2.2 แสดงการแบ่งถังสะสมความร้อนออกเป็นส่วน ๆ เมื่อต้องการหาคำตอบโดยใช้วิธีไฟไนท์ดิฟเฟอเรนซ์ 19

3.1 แสดงรูปถังสะสมความร้อนที่ใช้ในการทดลอง 24

3.2 แสดงระบบถังสะสมความร้อนที่ใช้ในการทดลอง 25

4.1 แสดงตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิ เมื่อเบดมีความสูง 0.70 เมตร 30

4.2 แสดงตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิ เมื่อเบดมีความสูง 1.05 เมตร 31

4.3 ไดอะแกรมการส่งข้อมูลของโปรแกรม TRNSYS เมื่อต้องการเปรียบเทียบผลคำนวณจากโปรแกรม TRNSYS กับผลการทดลอง 35

5.1 เปรียบเทียบอุณหภูมิของอากาศและอุณหภูมิก้อนหินที่เวลาต่าง ๆ กัน 39

5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในเบดกับความสูงของเบดเมื่อเวลาเปลี่ยนไป สำหรับอัตราการไหลของอากาศ 267.2 m^3/hr, ขนาดหิน 1" - $1\frac{1}{2}$", เบดสูง 1.05 m. 40

5.3 เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลจากโปรแกรม TRNSYS สำหรับอัตราการไหลของอากาศ 267.2 $m^3/hr.$, ขนาดหิน 1" - $1\frac{1}{2}$", เบดสูง 1.05 m. ... 41

5.4 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ชั้นล่างของเบดระหว่างผลการทดลองกับผลจากโปรแกรม TRNSYS สำหรับอัตราการไหลของอากาศ 267.2 M^3/hr, ขนาดหิน 1" - $1\frac{1}{2}$", เบดสูง 105 cm. 42

5.5 ไดอะแกรมการส่งข้อมูลของโปรแกรม TRNSYS สำหรับใช้หาขนาดที่เหมาะสมของเบด 47

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สัญญลักษณ์

A	–	พื้นที่หน้าตัดของรอคเบด , m^2
C_p, C_{pa}	–	ความร้อนจำเพาะของอากาศ , $kJ/kg\,^oK$
C_{pb}, C_{pr}	–	ความร้อนจำเพาะของก้อนหิน , $kJ/kg\,^oK$
D_b	–	เส้นผ่าศูนย์กลางของรอคเบด , m
D_e	–	เส้นผ่าศูนย์กลางเทียบเท่าทรงกลมของก้อนหิน , m.
G	–	อัตราการไหลของอากาศต่อพื้นที่หน้าตัดของเบด , kg/m^2-s
h_v	–	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร , $W/m^3\,^oK$
i	–	อัตราดอกเบี้ย
k	–	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน , $kW/m\,^oK$
L	–	ความยาวของเบด , m.
m	–	มวลของวัสดุสะสมความร้อน , kg.
$\dot{m}$, $\dot{m}_a$	–	อัตราการไหลของอากาศ , kg/s
$\dot{M}_i$	–	อัตราการไหลมวลของอากาศที่เข้าเครื่องทำความร้อนเสริม , kg/hr.
$\dot{M}_0$	–	อัตราการไหลมวลของอากาศที่ออกจากเครื่องทำความร้อนเสริม , kg/hr.
n	–	อายุการใช้งานของระบบ , ปี
N	–	จำนวนก้อนหิน
P	–	เส้นรอบรูปของรอคเบด , m.
ΔP	–	ความดันลด , N/m^2
Q	–	อัตราการถ่ายเทความร้อน , kJ.
$\dot{Q}_{aux}$	–	อัตราความร้อนที่ต้องการ , kJ.
$\dot{Q}_{ENV}$	–	อัตราพลังงานที่สูญเสียสู่บรรยากาศ, kJ.
$\dot{Q}_{max}$	–	ความจุความร้อนสูงสุดของเครื่องทำความร้อนเสริม, kJ.
$\dot{Q}_{TANK}$	–	อัตราพลังงานที่ออกจากถังสะสมความร้อนไปยังภาระ (LOAD) , kJ.
t	–	เวลา , min,hr.
Δt	–	ช่วงเวลาที่จะหาคำตอบของสมการโมเดล , sec.
T_i	–	อุณหภูมิอากาศและก้อนหินชั้นที่ i, ^oC
T_i	–	อุณหภูมิของอากาศที่เข้าเครื่องทำความร้อนเสริม , ^oC

T_{in}	–	อุณหภูมิอากาศที่เข้าสู่รอคเบด , ^{o}C
T_{0}	–	อุณหภูมิอากาศที่ออกจากเครื่องทำความร้อนเล่ริม , ^{o}C
T_{env}	–	อุณหภูมิบรรยากาศ , ^{o}C
T_{a}, T_{f}	–	อุณหภูมิของอากาศ , ^{o}C
T_{b}, T_{r}	–	อุณหภูมิของเบด , ^{o}C
T_{wf}	–	อุณหภูมิสุดท้ายของน้ำในแคลอรีมิเตอร์
T_{wi}	–	อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำในแคลอรีมิเตอร์
ΔT	–	ความแตกต่างของอุณหภูมิ DEAD BAND
ΔT_{1}	–	UPPER DEAD BAND
ΔT_{2}	–	LOWER DEAD BAND
$(\frac{dT}{dt})_{0}$	–	ค่าอนุพันธ์ของตัวแปรตามที่เวลา $(t - \Delta t)$
U	–	สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนจากรอคเบดสู่บรรยากาศ
V	–	ปริมาตรของรอคเบด , m^3
$\overline{V}$	–	อัตราความเร็วของอากาศ , m/s
ε	–	ความพรุนของเบด
μ	–	ความหนืดสัมบูรณ์ , kg/m-rec.
ρ, ρ_a, ρ_f	–	ความหนาแน่นของอากาศ , kg/m^3
ρ_b, ρ_r	–	ความหนาแน่นของก้อนหิน , kg/m^3
γ_i	–	ฟังชั่นควบคุมการปิด-เปิดที่ใส่เข้าไป
γ_0	–	ฟังชั่นควบคุมการปิด-เปิดที่ออกมา