



การศึกษาระบบสะสมพลังงานความร้อนชนิดแอร์-รอกเบต

ตอนที่ 1

การหาสูตรหาความดันลดและสัมประสิทธิ์ การพาความร้อนเชิงปริมาตร

โดย

น.ส. สมศรี จรุงเรือง
นาย วิชา ยงเจริญ

โครงการวิจัย เลขที่ 90-ERD-2527
ทุนส่งเสริมการวิจัยวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันวิจัยและพัฒนาของคณะวิศวกรรมศาสตร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
กรุงเทพฯ

พฤศจิกายน 2528

จท
วศ 15
003514

สถาบันวิจัยและพัฒนาของคณะวิศวกรรมศาสตร์ไม่รับผิดชอบ
ต่อผลเสียใด ๆ อันอาจเกิดจากการนำความคิดเห็นในเอกสาร
ฉบับนี้ไปใช้ ความคิดเห็นที่ปรากฏในเอกสารเป็นความคิดเห็น
ของผู้เขียนซึ่งไม่จำเป็นต้องเป็นความคิดเห็นของสถาบัน ฯ

สถาบันวิจัยและพัฒนา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี



การศึกษาระบบสะสมพลังงานความร้อนอินฟราเรด- รอคเบต

ตอนที่ 1

การหาสูตรหาความถี่และสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเชิงปริมาตร

โดย

รศ.ดร. สัมศิริ จงรุ่งเรือง Ph.D (Missouri-Rolla)

รศ.ดร. วิทยา ยงเจริญ Ph.D (Iowa)

โครงการวิจัยเลขที่ 90-ERD-2527

ทุนส่งเสริมการวิจัยวิศวะกรรมศาสตร์

สถาบันวิจัยและพัฒนาของคณะวิศวกรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรุงเทพฯ

พฤศจิกายน 2528

ลํารับัญ



| | หน้า |
|--|------|
| กิตติกรรมประกาศ | ก |
| ลัญลักษณ์ | ข |
| รายการตารางประกอบ | ง |
| รายการรูปประกอบ | จ |
| บทคัดย่อ | ฉ |
| บทที่ 1. บทนำ | |
| 1.1 คำนำ | 1 |
| 1.2 ความเป็นมาของปัญหา | 2 |
| 1.3 การสำรวจผลงานวิจัย | 3 |
| 1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย | 8 |
| 1.5 ขอบเขตของการวิจัย | 8 |
| 1.6 ประโยชน์ที่ได้มาจากการวิจัย | 9 |
| 1.7 วิธีดำเนินการวิจัยตอนที่ 1 | 9 |
| บทที่ 2. ทฤษฎี | |
| 2.1 คำนียาม | 10 |
| 2.2 การลัดลุมความร้อนแบบลัดลุมเฟล็ด | 10 |
| 2.3 ลัดลุมประลัดลุมการถ่ายเทความร้อนของก้อนหินทรงกลม | 11 |
| 2.4 การวิเคราะห์แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนของรอกเบต | 14 |
| 2.5 ความดันลัดลุมของรอกเบต | 16 |
| บทที่ 3. เฟ็งเก็บลัดลุมความร้อนและเครื่องมือ | |
| 3.1 การรอกแบบและลัดลุมเฟ็ง | 17 |
| 3.2 ระบบท้อ | 17 |
| 3.3 ระบบควบคุมอุณหภูมิ | 17 |
| 3.4 เครื่องมือวัด | 18 |
| บทที่ 4. การทดลอง | |
| 4.1 การทดลองหาคุณลัดลุมปัดลุมของก้อนหิน | 22 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| 4.2 การทดลองหาค่า h_v ของเบต | 24 |
| 4.3 การทดลองหาค่าความดันลด ΔP | 28 |
| บทที่ 5. ผลการทดลองและวิจารณ์ | |
| 5.1 คุณสมบัติทางกายภาพของก้อนหินตัวอย่าง | 29 |
| 5.2 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของก้อนหิน | 29 |
| 5.3 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของแอร์-ร็อคเบต | 33 |
| 5.4 ความดันลดในถังสะสมความร้อนชนิดแอร์-ร็อคเบต | 43 |
| บทที่ 6. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ | |
| 6.1 สรุปผลการวิจัย | 49 |
| 6.2 ข้อเสนอแนะ | 50 |
| เอกสารอ้างอิง | 51 |
| ภาคผนวก ก. ข้อมูลการทดลองสำหรับหาค่า h_v | 53 |
| ภาคผนวก ข. คุณสมบัติของอากาศที่ความดันบรรยากาศ | 78 |
| ภาคผนวก ค. ศัพท์บัญญัติ | 79 |

เลข
เลขหมู่ ๐๓ 15
เลขทะเบียน 003514
วัน,เดือน,ปี 17 ก.ย. 29

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้สำเร็จได้ตามกำหนดเวลาก็เพราะความร่วมมือร่วมใจกันของคณะผู้วิจัย
ประการหนึ่ง และอีกประการหนึ่งก็คือเงินทุนเพื่อทำการวิจัย ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงขอกล่าวขอบคุณ
สถาบันวิจัยและพัฒนา ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้ให้ทุนแก่คณะผู้วิจัย



สัญลักษณ์

| | |
|-------------------------------|---|
| A_b | พื้นที่หน้าตัดของเบต, m^2 |
| $C_p; C_{pa}, C_{pb}, C_{pw}$ | ความร้อนจำเพาะ; ความร้อนจำเพาะของอากาศ, ของเบต, ของน้ำ $kJ/kg^\circ K$ |
| $D; D_b$ | เส้นผ่านศูนย์กลาง; เส้นผ่านศูนย์กลางของเบต, m |
| D_e | เส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าทรงกลม, m |
| f, \hat{f} | ฟริคชันแฟคเตอร์, ฟริคชันแฟคเตอร์ค่าคคะเน |
| g | ความเร่งเนื่องจากความโน้มถ่วงของโลก, m/s^2 |
| G_o | ความเร็วมวลต่อพื้นที่, kg/m^2s |
| h_a | สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเชิงผิว, W/m^2oK |
| h_v | สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเชิงปริมาตร, W/m^3oK |
| k | สัมประสิทธิ์การนำความร้อน, $kW/m^\circ K$ |
| L | ความยาวของเบต, m |
| $m; m_r, m_w$ | น้ำหนัก; น้ำหนักก้อนหิน, น้ำ, kg |
| \dot{m}_a | อัตราการไหลของอากาศ, kg/s |
| N | จำนวนก้อนหิน, ก้อน |
| Nu_m | โมติฟายล์เซลล์ทึ่มเบอร์ |
| \hat{Nu}_m | โมติฟายล์เซลล์ทึ่มเบอร์ค่าคคะเน |
| ΔP | ความดันลด, kN/m^2 |
| Pr | แพรมทึลทึ่มเบอร์ |
| Pre | เพรสเชอร์ทึ่มเบอร์ |
| \hat{Pre} | เพรสเชอร์ทึ่มเบอร์ค่าคคะเน |
| $Q; Q_a, Q_r$ | อัตราการถ่ายเทความร้อน; อัตราการถ่ายเทความร้อนของอากาศ, ก้อนหิน, kW |
| R | รัศมีของวงกลม, m |
| Re | เรโนลด์ทึ่มเบอร์ |
| St_m | โมติฟายล์เตตนทึ่มเบอร์ |
| \hat{St}_m | โมติฟายล์เตตนทึ่มเบอร์ค่าคคะเน |

สัญลักษณ์ (ต่อ)

| | |
|------------------------|--|
| t | เวลา, s |
| $T; T_{wf}, T_{wi}$ | อุณหภูมิ; อุณหภูมิของน้ำตอนสุดท้าย, อุณหภูมิของน้ำตอนเริ่มต้น, $^{\circ}\text{C}$, $^{\circ}\text{K}$ |
| V | ปริมาตร; m^3 |
| $V; \bar{V}, V_b$ | ความเร็ว; ความเร็วเฉลี่ย, ความเร็วเบต, m/s |
| W | น้ำหนัก, kg |
| α | ค่าการฟุ้งกระจายของความร้อน, m^2/s |
| ϵ | ความพรุนของเบต |
| $\mu; \mu_a$ | ความหนืดสัมบูรณ์; ความหนืดสัมบูรณ์ของอากาศ, $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ |
| $\rho; \rho_a, \rho_r$ | ความหนาแน่น; ความหนาแน่นอากาศ, ความหนาแน่นของก้อนหิน, kg/m^3 |
| τ | เวลาคงที่, s |

รายการตารางประกอบ

| ตารางที่ | หน้า |
|----------|------|
| 1.1 | 3 |
| 2.1 | 10 |
| 4.1 | 23 |
| 4.2 | 25 |
| 4.3 | 26 |
| 4.4 | 27 |
| 4.5 | 28 |
| 5.1 | 30 |
| 5.2 | 32 |
| 5.3 | 36 |
| 5.4 | 36 |
| 5.5 | 39 |
| 5.6 | 40 |
| 5.7 | 45 |

รายการรูปประกอบ

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|--|------|
| 2.1 | แสดงอุณหภูมิภายในก้อนหินที่เวลา t ในแต่ละกรณี | 13 |
| 2.2 | แผนภาพของอากาศไหลผ่านรอกเบต | 14 |
| 3.1 | ถังเก็บสะสมความร้อนและตำแหน่งวัดอุณหภูมิและความดัน | 19 |
| 3.2 | ระบบถังสะสมความร้อนที่ใช้ในการทดลอง | 20 |
| 3.3 | ภาพถ่ายของระบบถังสะสมความร้อนที่ใช้ในการทดลอง | 21 |
| 5.1 | กราฟแสดงอุณหภูมิต่อเวลาของก้อนหินขนาด $D_e = 0.0285$ m เพื่อ สัมผัสกับอากาศร้อน 46.3°C ความเร็ว 1.2 m/s | 31 |
| 5.2 | อุณหภูมิภายในถังสะสมความร้อนที่เวลาและตำแหน่งต่าง ๆ | 34 |
| 5.3 | อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เวลาต่าง ๆ | 35 |
| 5.4 | สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่อัตราไหลต่าง ๆ | 38 |
| 5.5 | ความสัมพันธ์ระหว่าง Nu_m กับ Re ของก้อนหิน 3 ขนาด | 41 |
| 5.6 | ความสัมพันธ์ระหว่าง St_m กับ Re ของก้อนหิน 3 ขนาด | 42 |
| 5.7 | ความสัมพันธ์ระหว่าง f, \hat{f} กับ Re ของก้อนหิน 3 ขนาด | 44 |
| 5.8 | ชุดไดอะแกรมสำหรับหาฟริกชันแฟคเตอร์ในท่อ | 46 |
| 5.9 | ความสัมพันธ์ระหว่าง Pre, \hat{Pre} กับ Re ของก้อนหิน 3 ขนาด | 48 |

บทคัดย่อ

ในประเทศไทย การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการอบแห้งผลผลิตทางเกษตรมีศักยภาพสูง เป็นที่ทราบกันดีว่าความเข้มของพลังงานแสงอาทิตย์เปลี่ยนแปลงตามเวลาและวัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ถังเก็บสะสมความร้อนเพื่อในการควบคุมอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ในการอบแห้งจะใช้อากาศเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนจากแผงรับแสงอาทิตย์ไปยังผลผลิตจึงต้องใช้ถังสะสมความร้อนชนิดแอร์-ร็อคเบต เพราะไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวอื่น ซึ่งทำให้ระบบไม่ซับซ้อนและมีราคาถูก สมรรถนะของแอร์-ร็อคเบตจะขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของก้อนหินรวมทั้งการไหลของอากาศผ่านเบต ในการวิจัยนี้จะเลือกใช้หินก่อสร้าง (หินปูน) และได้แบ่งการวิจัยออกเป็น 2 ตอน ในตอนแรกได้ศึกษาถึงคุณสมบัติทางกายภาพของเบต สมบัติการพาความร้อนและความดันลด ส่วนในตอนหลังจะศึกษาถึงสมรรถนะของแอร์-ร็อคเบต เช่น ความจุ อัตราการสะสมพลังงานและอัตราการนำพลังงานมาใช้งาน

ในตอนแรกได้นำหินก่อสร้างมาแยกออกจากกันโดยตะแกรงกลออกเป็น 3 ขนาด คือ $1/2''-3/4''$, $3/4''-1''$ และ $1-1\ 1/2''$ และสร้างถังสะสมความร้อนรูปทรงกระบอกตั้งที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.76 เมตร และใส่หินแบบแรนคอมสูง 0.175 เมตร มีความพรุนของเบต 0.463 อุณหภูมิของอากาศตอนเข้าเบตถูกควบคุมให้คงที่ที่ 60°C และอัตราการไหลของอากาศมีค่าเปลี่ยนแปลง 8 ค่า ทำให้เรโนลด์นัมเบอร์มีค่าอยู่ระหว่าง 80 ถึง 260 จากการทดลองพบว่าเพอร์ไมเตอร์ขึ้นอยู่กับเรโนลด์นัมเบอร์เท่านั้น และมีสมการคาดคะเนคือ

$$\hat{P}_{re} = 1559 Re + 120.5 Re^2$$

และสมบัติการพาความร้อนเชิงปริมาตรในเทอมของวิลเลเซลท์หรือสแตนต์นัมเบอร์จะขึ้นอยู่กับทั้งเรโนลด์นัมเบอร์และขนาดของก้อนหิน สมการคาดคะเนคือ

$$\hat{Nu}_m = 4.79 Re^{0.66}$$

$$\hat{St}_m = 6.85 Re^{-0.34}$$

$$\text{เมื่อ } D_e = 0.0235-0.0285 \text{ m}$$

$$\text{และ } \hat{Nu}_m = 4.66 Re^{0.55}$$

$$\hat{St}_m = 7.31 Re^{-0.47}$$

$$\text{เมื่อ } D_e = 0.0167 \text{ m}$$

Abstract

In Thailand, the use of the solar energy for drying agricultural products has a high potential. It is well-known that the intensity of solar energy changes with time and also changes from day to day. So it is necessary to use the thermal storage to control the temperature and the time required for drying process. In drying process, air is usually used as a heat transfer media in the solar collector, therefore, the appropriate thermal storage is the air-rockbed type, since it does not need other heat exchanger in the system and the construction cost is low. The performance of air-rockbed is dependent on size and shape of rocks and the flow conditions. In this research the structural rock (limestone) is chosen for study and the research is divided into two parts. In the first part the physical properties of rockbed, the volumetric heat transfer coefficient and the pressure drop across the bed was studied. In the last part, the performance of air-rockbed such as capacity, charge and discharge rate will be studied later.

In the first part, the structural rock was sized by mechanical seive into three sizes : 1/2"-3/4", 3/4"-1" and 1"-1 1/2". The vertical cylindrical bed was chosen with 0.76 meters diameter and length was 0.175 meters. The rock was placed randomly into the bed resulting in void fraction of 0.463. The entrance air temperature was kept constant at 60°C and the air flow rate was varied in 8 steps resulting in the Reynolds number being varied from 80 to 260. The experiments shown that pressure drop in term of pressure number depended only on Reynolds number and the predicting equation was

$$\hat{P}_{re} = 1559 Re + 120.5 Re^2$$

Also, the volumetric heat transfer coefficient in term of Nusselt or Stanton number depended on both Reynolds number and the rock size.

The predicting equations were

$$\hat{Nu}_m = 4.79 Re^{0.66}$$

$$\hat{St}_m = 6.85 Re^{-0.34}$$

for $D_e = 0.0235-0.0285$ m

and $\hat{Nu}_m = 4.66 Re^{0.55}$

$$\hat{St}_m = 7.31 Re^{-.47}$$

for $D_e = 0.0167$ m



1.1 คำนำ

พลังงานเป็นสิ่งสำคัญสำหรับชีวิตมนุษย์มาก พลังงานมีอยู่มากมายหลายรูป เช่น พลังงานจลน์ พลังงานศักย์ และพลังงานความร้อน เป็นต้น พลังงานความร้อนเป็นพลังงานที่สำคัญที่สุดสำหรับมนุษย์ที่อาศัยอยู่ในประเทศหนาว เพราะถ้าขาดพลังงานความร้อนมนุษย์จะหนาวตาย พลังงานความร้อนนอกจากจะได้จากน้ำมัน เชื้อเพลิงและไฟฟ้าแล้วยังอาจได้จากแสงอาทิตย์ พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่ได้รับความสนใจศึกษามาตั้งแต่สมัยโบราณจนถึงปัจจุบันนี้ ประเทศที่เจริญได้ทำการศึกษานำพลังงานแสงอาทิตย์มาสร้างโรงไฟฟ้าพลังแสงอาทิตย์ โดยใช้ น้ำหนักที่มีจุดเดือดสูงเป็นตัวสะสมความร้อนไว้ แล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า เมื่อต้องการ ใน ประเทศหนาวเช่น ประเทศอเมริกาได้มีการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาให้ความอบอุ่นแก่บ้านเรือน Lof (1) ได้ออกแบบระบบทำอากาศให้ร้อนโดยใช้แผงรับแสงอาทิตย์ที่ทำด้วยแผ่นแก้วซ้อนกัน และใช้ก้อนกรวดเป็นอุปกรณ์สะสมพลังงานความร้อนไว้ใช้ในบ้านที่เมือง Denver Close et al (2) ได้สร้างระบบทำความร้อนเพื่อใช้ให้ความร้อนแก่ตึกปฏิบัติการทดลองในประเทศออสเตรีย ระบบนี้ใช้ฮีทเตอร์อากาศที่ทำเป็นร่องรูปตัว V มีพื้นที่ 56 m^2 และมีหน่วยสะสมพลังงานความร้อนเป็นเบดของก้อนกรวด อากาศที่ไหลผ่านแผงรับแสงอาทิตย์จะถูกควบคุมให้มีอุณหภูมิของอากาศตรงทางออกคงที่ที่ 55°C

พลังงานแสงอาทิตย์นอกจากจะให้ความอบอุ่นแก่บ้านเรือนแล้วยังสามารถนำมาใช้ในการอบแห้งผลผลิตทางเกษตรกรรมได้ในเวลากลางวันที่มีแดด สำหรับการอบแห้งในเวลา กลางคืนจะต้องมีระบบสะสมพลังงานความร้อนไว้ใช้ให้เพียงพอ หรือมีฉะนั้นจะต้องใช้พลังงาน ไฟฟ้าหรือเชื้อเพลิงอื่น ๆ แทน

ระบบสะสมพลังงานความร้อนมีหลายชนิดแล้วแต่ชนิดวัสดุที่จะนำมาใช้สะสมความร้อน การที่จะเลือกระบบสะสมพลังงานความร้อนชนิดใดมาใช้งานจะต้องคำนึงถึงสิ่งต่อไปนี้

1. ความจุความร้อนต่อหน่วยปริมาตรหรือต่อหน่วยน้ำหนัก

2. ช่วงอุณหภูมิที่นำไปใช้งาน
3. กำลังงานที่ใช้ในการนำความร้อนเข้าและออกจากระบบ
4. การแบ่งชั้นของอุณหภูมิในถังสะสมความร้อน
5. ถังบรรจุและชิ้นส่วนโครงสร้างอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับระบบสะสมความร้อน
6. รั่วควบคุมการสูญเสียความร้อนออกจากระบบสะสมพลังงานความร้อน
7. ราคาที่สร้าง

ระบบสะสมความร้อนแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ ระบบสะสมความร้อนสัมผัส (sensible heat storage) และระบบสะสมความร้อนแฝง (latent heat storage) ระบบสะสมความร้อนสัมผัสเป็นที่นิยมนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางเพราะสร้างง่าย ราคาถูกและใช้ง่ายกว่าระบบสะสมความร้อนแฝง วัสดุที่นิยม ใช้เป็นตัวสะสมความร้อนสัมผัสมากที่สุดก็คือ น้ำ แต่การสะสมความร้อนจะต้องทำต่ำกว่าจุดเดือดของน้ำ (100°C ที่ความดันบรรยากาศ) เพราะถ้าน้ำมีอุณหภูมิสูงกว่า 100°C น้ำจะเดือดกลายเป็นไอทำให้ระบบมีความดันสูงและอาจเกิดการกัดกร่อนเมื่อสัมผัสกับโลหะ วัสดุที่นิยม ใช้เป็นตัวสะสมความร้อนสัมผัสมากที่สุดอีกตัวหนึ่งก็คือ ก้อนหิน เพราะราคาถูก หาได้ง่ายเช่นเดียวกับน้ำ

ในระบบที่ใช้ น้ำเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนจะนิยมใช้น้ำเป็นตัวสะสมความร้อน และในระบบที่ใช้อากาศเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนก็จะนิยมใช้ก้อนหินเป็นตัวสะสมความร้อนเพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับตัวแลกเปลี่ยนความร้อน อีกทั้งก้อนหินจะมีการแบ่งชั้นในถังสะสมความร้อนได้ดีกว่าน้ำ และไม่มีปัญหาเกี่ยวกับการผุกร่อนแต่ก้อนหินจะมีค่าความร้อนต่ำกว่าน้ำดังตารางที่ 1.1 (3) จึงทำให้ถังสะสมความร้อนที่ใช้ก้อนหินมีน้ำหนักและปริมาณมากกว่าถังสะสมความร้อนที่ใช้ น้ำ

1.2 ความเป็นมาของปัญหา

เมื่อปี 2520 ได้เกิดวิกฤตการณ์พลังงานขึ้น เนื่องจากเกิดการขาดแคลนน้ำมัน น้ำมันจึงมีราคาสูงขึ้นเรื่อย ๆ ประเทศที่ไม่สามารถผลิตน้ำมันขึ้นเองโดยเฉพาะประเทศที่ด้อยพัฒนาถึงกับต้องออกกฎหมายให้ประชาชนใช้พลังงานอย่างประหยัด และในเวลาเดียวกันก็เร่งค้นคว้าหาพลังงานรูปอื่น ๆ มาทดแทนพลังงานที่ได้จากน้ำมัน

ตารางที่ 1.1 วัสดุสะสมความร้อนล้มผล

| วัสดุ | ความหนาแน่น kg/m^3 | ความจุความร้อนต่อ- มวล $\text{kJ/kg}^\circ\text{K}$ | ความจุความร้อนต่อปริมาตร $\text{kJ/m}^3^\circ\text{K}$ | |
|---------------------------------|--------------------------------|---|---|---------|
| | | | ไม้พูน | 30% พูน |
| น้ำ | 1000 | 4.18 | 4180 | - |
| ก้อนหิน | 2700 | 0.88 | 2400 | 1700 |
| เศษคอนกรีต (scrap concrete.) | 2200 | 1.13 | 2500 | 1750 |
| เศษเหล็ก (scrap iron) | 7800 | 0.46 | 3600 | 2500 |

ในประเทศไทยพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่มีศักยภาพในการนำมาใช้อบแห้ง
ผลิตผลทางการเกษตรเพื่อเก็บรักษา เช่น การอบข้าว ข้าวโพด หรือใช้ในการบริโภค เช่น
การอบกล้วย และอื่น ๆ เป็นต้น ในการอบจำเป็นต้องควบคุมอุณหภูมิของของไหล และในบาง
ครั้งเช่นการอบกล้วยจำเป็นต้องอบติดต่อกันตลอดระยะเวลาที่กำหนด แต่เป็นที่ทราบกันดีว่า
พลังงานแสงอาทิตย์มีเฉพาะในเวลากลางวันและแต่ละเวลาก็มีค่าแปรเปลี่ยนไปตามทิศทางโคจร
ของดวงอาทิตย์ และสภาพของเมฆและฝน จึงจำเป็นต้องมีถังสะสมพลังงานเพื่อสะดวกในการ
ควบคุมอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง

ในการออกแบบถังเก็บสะสมพลังงานจำเป็นต้องทราบคุณสมบัติต่าง ๆ เช่น ความตัน
ลด และสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของแอร์-รอตเบต ความตันลดจะใช้ในการคำนวณหา
ขนาดของพัดลมให้เหมาะสมกับงาน รวมทั้งพลังงานที่ใช้หมุนเวียนอากาศในระบบ ส่วนสัมประสิทธิ์
การพาความร้อนจะเป็นตัวกำหนดปริมาณพลังงานความร้อนต่อเวลาที่สะสมหรือที่นำมาใช้งาน

1.3 การสำรวจผลงานวิจัย

Lof และ Hawley (4) ได้ทำการทดลองหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจาก
อากาศไปยังเบตของก้อนแกรไนท์ (granitic gravel) ขนาดของก้อนแกรไนท์มีค่าจาก
0.5 นิ้ว ถึง 1.5 นิ้ว ความพูนของเบตอยู่ระหว่าง 0.426 ถึง 0.454 อัตราการไหลของ
อากาศจาก 12.05 ถึง 66.3 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาทีต่อตารางฟุตของพื้นที่หน้าตัดที่ใช้ และให้

อากาศที่เข้าไปยังเบตมีอุณหภูมิคงไว้ในช่วง 100 ถึง 250^oF เบตที่ใช้ทดลองวางอยู่ในแนวนอน จากการทดลองเขาได้สูตร เอมไพริคัลสำหรับหาค่าประมาณของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรคือ

$$h_v = 0.79(G_o/D_e)^{0.7} \quad (1.1)$$

เมื่อ h_v คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเชิงปริมาตรมีหน่วยเป็น Btu/hrft^{3o}F G_o คือ อัตราการไหลของอากาศต่อพื้นที่หน้าตัดของเบตมีหน่วยเป็น lb/hrft² และ D_e คือเส้นผ่านศูนย์กลางของก้อนหินที่เทียบเท่าทรงกลมมีหน่วยเป็นฟุต และเขาพบว่า การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศที่เข้าสู่เบตไม่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

Dunkle และ Ellul (5) ได้สรุปวิธีการออกแบบและวิธีการคาดคะเนการพาความร้อน การถ่ายเทมวลและการไหลของของไหลในระบบที่เกี่ยวข้องกับเบตของอนุภาคที่ใส่แบบ แรนดอม ถ้ากำหนดรูปแบบทางเรขาคณิตของอนุภาคแล้ว ความพรุนของเบตจะมีค่าคงที่เมื่อมีการใส่อนุภาคแบบแรนดอม และความพรุนของเบตไม่เปลี่ยนแปลงโดยสำคัญ

สัมประสิทธิ์การพาความร้อนต่อหน่วยปริมาตรของเบตอาจหาได้จากความสัมพันธ์ของ สแตนต์นัมเบอร์เชิงปริมาตร ($h_v D_e / C G_o$) และเรโนลด์นัมเบอร์ สำหรับแก๊สที่มี แพรนทิลนัมเบอร์ 0.72 จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้คือ

$$\frac{h_v D_e}{C G_o} = 2.4 Re^{-0.3}, \quad 10 < Re < 10^5 \quad (1.2)$$

$$\text{เมื่อ } Re = \frac{G_o D_e}{\mu}$$

สำหรับของไหลชนิดอื่นให้ใช้สมการข้างล่าง

$$\frac{h_v D_e}{C G_o} = 2.4 Re^{-0.3} (Pr/0.72)^{-2/3} \quad (1.3)$$

นอกจากนี้ยังได้หาความสัมพันธ์ของความตึงลด (ΔP) คล่อมเบตในรูปของแฟคเตอร์ความเสียดทาน f (friction factor) คือ

$$f = \frac{2 D_e \rho \Delta P}{L G_o^2} = 42 + \frac{3500}{Re} , 1 < Re < 10^5 \quad (1.4)$$

Yoshida et al (6) ได้หาลมการเอมไพริคัลเพื่อคาดคะเนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนไว้ดังนี้คือ

$$\frac{h_a}{C_{p_b} G_o} = 0.9 Re^{-0.51} Pr^{-0.67} , Re < 50 \quad (1.5)$$

และ
$$\frac{h_v}{C_{p_b} G_o} = 0.61 Re^{-0.41} Pr^{-0.67} , Re > 50 \quad (1.6)$$

เมื่อ
$$Re = G_o D_e / 6(1-\epsilon)\mu$$

จากสมการ (1.5) และ (1.6) จะเห็นว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแปรผกผันกับเรโนลด์นัมเบอร์และพราวน์ทิลนัมเบอร์

B.T. Kulakowski และ F.W. Schmidt (7) ได้ใช้สมการหาความดันลดของ Ergun ซึ่งทดลองซ้ำโดย Schmidt, F.W และ Willmott, J.A. (8) เพื่อหาความดันลดในแพคเบต ซึ่งใช้ในระบบทำอากาศให้ร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ สมการสำหรับหาความดันลดในเบตที่ใช้ก้อนกรวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.27-3.8 cm (0.5-1.5 นิ้ว) คือ

$$\frac{\Delta P}{L} g = \frac{G_o (1-\epsilon)}{\rho_f D_e \epsilon^3} \left[1.75 G_o + \frac{150(1-\epsilon)}{D_e} \mu_f \right] \quad (1.7)$$

Chandra et al (9) ได้เสนอสมการสำหรับหาความดันลดของอากาศที่ผ่านรอกเบตคือ

$$\frac{\Delta P \rho D_e^3}{\mu^2 L} = \epsilon^{-2.7} \left[185 \left(\frac{\rho \bar{V} D_e}{\mu} \right) + 1.7 \left(\frac{\rho \bar{V} D_e}{\mu} \right)^2 \right]$$

$$0.33 < \epsilon < 0.38 \text{ และ } 1 < \frac{\rho \bar{V} D_e}{\mu} < 275 \quad (1.8)$$

เขาใช้หินที่ไม่ได้แบ่งชนิดซึ่งแสดงค่าความพรุนต่ำเป็นตัวอย่างในการศึกษาหาสัมภา
 ไรก็ตามรอยแตกที่มีขนาดอนุภาคสม่ำเสมอและใส่ในภาชนะอย่างแรนดอม (random) จะ
 แสดงความพรุนของเบตราว ๆ 0.45 ในบางกรณีสัมภาไรนี้อาจใช้ได้เมื่อเรโนลด์นัมเบอร์สูง
 กว่า 275 เขายังได้ศึกษาสัมภาไรสำหรับหา h_v ของ Lof และ Hawley ในหน่วย SI คือ

$$h_v = 652 (G_o / D_e)^{0.7} \quad (1.9)$$

เมื่อศึกษาข้อมูลการทดลองที่ตีพิมพ์ไว้แล้วพบว่า h_v มีค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิอากาศที่ทางเข้า
 ของรอยแตกถึง 50%

Pitam Chandra และ D.H. Willits (10) ได้ทำการทดลองหาความดันลดและ
 ลักษณะเฉพาะของรอยแตกสำหรับการถ่ายเทความร้อนโดยมีอากาศเป็นตัวกลางถ่ายเทความร้อน
 ก้อนหินที่ใช้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง D_e 1 cm ถึง 3 cm เบตนี้วางในแนวนอนและมีความพรุน
 ระหว่าง 0.38-0.46 เขาพบว่าทั้งความดันลดและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเชิงปริมาตร
 ระหว่างอากาศและรอยแตกขึ้นอยู่กับขนาดของก้อนหินและอัตราการไหลของอากาศ นอกจากนี้
 ความดันลดยังขึ้นอยู่กับความพรุนของรอยแตกด้วย อย่างไรก็ตามข้อมูลนี้ไม่ได้แสดงถึงอิทธิพล
 ของความพรุนของรอยแตก อุณหภูมิอากาศเข้าและอุณหภูมิรอยแตกตอนเริ่มต้นต่อสัมประสิทธิ์การพา
 ความร้อนเชิงปริมาตร ความสัมพันธ์ที่เสนอขึ้นมาก็เพื่อใช้คาดคะเนความดันลดและสัมประสิทธิ์
 การพาความร้อนเชิงปริมาตรในรอยแตกสำหรับหน่วยละสมพลังงานความร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำ

สัมภาไรสำหรับคาดคะเนความดันลดคือ

$$\frac{\Delta P}{\mu^2 L} \rho D_e^3 = \epsilon^{-2.5} \left[185 \left(\frac{\rho \bar{V} D_e}{\mu} \right) + 1.7 \left(\frac{\rho \bar{V} D_e}{\mu} \right)^2 \right]$$

$$0.38 < \epsilon < 0.46, \quad 100 < \frac{\rho \bar{V} D_e}{\mu} < 1000 \quad (1.10)$$

$$\frac{\Delta P}{\mu^2 L} \rho D_e^3 = \epsilon^{-2.6} \left[185 \left(\frac{\rho \bar{V} D_e}{\mu} \right) + 1.7 \left(\frac{\rho \bar{V} D_e}{\mu} \right)^2 \right]$$

$$0.33 < \epsilon < 0.46, \quad 1 < \frac{\rho \bar{V} D_e}{\mu} < 1000 \quad (1.11)$$

สมการสำหรับหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรคือ

$$\frac{h_v D_e^2}{k} = 1.45 \left(\frac{\rho \bar{V} D_e}{\mu} \right) ; 100 < \frac{\rho \bar{V} D_e}{\mu} < 1,000 \quad (1.12)$$

เมื่อเปรียบเทียบกับสมการ (1.12) กับการศึกษาโดย Denton (11) สำหรับเบตทริงกลม ($\epsilon = 0.37$) ที่มีอากาศเป็นตัวกลางถ่ายเทความร้อน สมการของ Denton คือ

$$\frac{h_a D_e}{k} = 0.72 \left(\frac{\rho \bar{V} D_e}{\mu} \right)^{0.7} ; 500 < \frac{\rho \bar{V} D_e}{\mu} < 50,000 \quad (1.13)$$

เมื่อ h_v และ h_a สัมพันธ์กันโดยสมการ (1.14)

$$h_v = 6 h_a (1-\epsilon)/D_e \quad (1.14)$$

สมการ (1.13) อาจเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปของ h_v คือ

$$\frac{h_v D_e^2}{k} = 2.72 \left(\frac{\rho \bar{V} D_e}{\mu} \right)^{0.7} ; 500 < \frac{\rho \bar{V} D_e}{\mu} < 50,000 \quad (1.15)$$

สมการ (1.12) และสมการ (1.15) มีรูปแบบคล้ายกันจะต่างกันก็แต่ค่าสัมประสิทธิ์ของ เรโนลด์นัมเบอร์เท่านั้น

N. Trinet sampan (12) ได้สร้างรอกเบตรูปสี่เหลี่ยมจตุรัสขนาด 0.5 m x 0.5 m และสูง 0.67 m คุ้มครองด้วยแอลเบสทอส ใช้โบลเวอร์เป่าอากาศผ่านเทอร์โมไฟฟ้า เข้าสู่ส่วนบนของรอกเบตและมีอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิของอากาศให้ เข้าสู่รอกเบตมีค่าคงที่ที่ 50 และ 65°C อัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการทดลองคือ 135, 110, 90, 60, 40 และ 25 m³/hr ก้อนหินที่ใช้เป็นตัวกลางสะสมพลังงานความร้อนมีเส้นผ่านศูนย์กลาง D_e เท่ากับ 0.0432 m (1.7 in) ความพรุนของเบตเท่ากับ 0.496 ความหนาแน่นของหินเท่ากับ 2517 kg/m³ ความจุความร้อนของหินเท่ากับ 0.736 kJ/kg°C เขาสรุปผลการทดลองไว้ดังนี้

1. ความดันลดอาจคาดคะเนได้โดยสมการ

$$\frac{\Delta P}{\Delta x} = 3064 G_o^2 + 169.3 G_o \quad (1.16)$$

2. อัตราการสะสมพลังงานความร้อนและการปล่อยพลังงานความร้อนออกจากเบตจะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของอากาศ อุณหภูมิของอากาศที่เข้ามาและเวลาที่ใช้ในการทำงาน

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาจะเห็นว่าทั้งความดันลดและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนยังอยู่ในรูปแบบที่ต่าง ๆ กัน เช่น สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่อยู่ในรูปแบบของสมการเอมไพริคัล เช่น ของ Lof และ Hawley และที่อยู่ในรูปกลุ่มไร้มิติ เช่น $h_v D_e / C G_o$ ของ Dunkle และ Ellul, $h_v D_e^2 / k$ ของ Pitam Chandra และ D.H Willits ซึ่งถึงแม้จะอยู่ในรูปแบบเดียวกันก็ยังมีค่าตัวคงที่ต่างกันมาก แสดงว่ากลุ่มไร้มิตินั้นยังไม่เพียงพอในการอธิบายปรากฏการณ์การพาความร้อนได้ โดยเฉพาะยังขาดกลุ่มไร้มิติที่เกี่ยวข้องกับรูปทรงทางเรขาคณิตของก้อนหิน

1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.4.1 ศึกษาความดันลด (ΔP) ของถังสะสมความร้อนชนิดแอร์-ร็อคเบต เมื่อใช้หินก่อสร้างชนิดหินปูน (limestone) ที่อยู่ในประเทศไทย

1.4.2 ศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร (h_v) ของถังสะสมความร้อนชนิดแอร์-ร็อคเบต เมื่อใช้หินก่อสร้างที่อยู่ในประเทศไทย

1.4.3 หาสมการคาดคะเนของ ΔP และ h_v

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยเรื่องระบบสะสมพลังงานความร้อนชนิดแอร์-ร็อคเบต แบ่งออกเป็น 2 ตอน

ตอนที่ 1 ศึกษาหาความดันลดและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรเพื่อนำมาหาสูตรการคาดคะเนความดันลดและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเชิงปริมาตรของระบบสะสมพลังงานความร้อนที่ใช้ในประเทศไทยต่อไป

ตอนที่ 2 ศึกษาสมรรถนะของหน่วยสะสมพลังงานความร้อน

1.6 ประโยชน์ที่ได้มาจากการวิจัยตอนที่ 1

1.6.1 ได้ล้มการคาดคะเนความดันลดเพื่อใช้ในการออกแบบและเลือกพัดลมของระบบสะสมความร้อนชนิดแอร์-รอกเบต เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมอบแห้งสำหรับประเทศไทย

1.6.2 ได้ล้มการคาดคะเน h_v ของระบบสะสมความร้อนชนิดแอร์-รอกเบตเพื่อใช้ในการออกแบบถังเก็บสะสมความร้อนไว้ใช้ในอุตสาหกรรมอบแห้งสำหรับประเทศไทย

1.7 วิธีดำเนินการวิจัยตอนที่ 1

1.7.1 ศึกษาและเตรียมข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติของก้อนหิน

1.7.2 ศึกษาและออกแบบหน่วยสะสมพลังงานความร้อนชนิดแอร์-รอกเบต

1.7.3 สร้างระบบตาม 1.7.2

1.7.4 ทำการทดลองวัดค่าความดันลดและจุดข้อมูลต่าง ๆ ในการทดลองเพื่อหาค่าของความดันลดและ h_v

1.7.5 หาสูตรเอมไพริคัลที่เหมาะสมสำหรับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

1.7.6 สรุปผลการวิจัยเพื่อใช้ออกแบบถังสะสมที่เป็นประโยชน์สำหรับประเทศไทย

1.7.7 ตีพิมพ์และเผยแพร่

ทฤษฎี

2.1 คำนิยาม

เส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าทรงกลมของก้อนหิน, D_e หมายถึงเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลมที่มีปริมาตรเท่ากับปริมาตรของหินรูปทรงใด ๆ

ความพรุนของร็อคเบด, ϵ หมายถึง อัตราส่วนของปริมาตรช่องว่างระหว่างก้อนหินต่อปริมาตรของเบด

2.2 การสะสมความร้อนแบบสัมผัส (sensible heat storage)

ระบบสะสมความร้อนชนิดสัมผัสเป็นระบบสะสมความร้อนที่ทำได้ง่าย สัมการที่ใช้ในการสะสมความร้อนชนิดสัมผัสคือ

$$Q = mC_p \Delta T \tag{2.1}$$

$$= \rho V C_p \Delta T \tag{2.2}$$

เมื่อกำหนดปริมาตรและผลต่างอุณหภูมิของวัสดุไว้แล้ว พลังงานความร้อนสัมผัสที่เก็บไว้ได้มากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับค่า ρ และ C_p ถ้าวัสดุมีค่า ρ และ C_p สูงจะสามารถเก็บพลังงานความร้อนได้มากดูตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของวัสดุสะสมความร้อน (13)

| วัสดุ | ความร้อนจำเพาะ $C_p, \text{kJ/kg}^\circ\text{K}$ | ความหนาแน่น $\rho, \text{kg/m}^3$ | อุณหภูมิ $T, ^\circ\text{C}$ | ความร้อนจำเพาะเชิงปริมาตร $\text{kJ/m}^3\text{K}$ | ค่าการฟุ้งกระจายของความร้อน $\alpha, \text{m}^2/\text{s}$ |
|-----------|---|--------------------------------------|---------------------------------|--|--|
| อากาศ | 1.011 | 1.20 | 20 | 1.26 | - |
| อิฐ | 0.84 | 1700 | 21 | 1423 | 0.33 |
| คอนกรีต | 0.80 | 2200 | 21 | 1842 | 0.82 |
| ก้อนหิน | 0.88 | 2560 | 20 | 2261 | 1.29 |
| เหล็กกล้า | 0.50 | 7850 | 0-200 | 3944 | 12.43 |
| น้ำ | 4.19 | 1000 | 4 | 4186 | 0.14 |

ในถังที่บรรจุด้วยก้อนหินเล็ก ๆ จะมีช่องว่างระหว่างก้อนหินซึ่งทำให้ความจุความร้อนเชิงปริมาตรของเบตลดลง ถ้าเบตที่มีความพรุน 30% จะมีความจุความร้อนเชิงปริมาตรลดลง 30% ดังแสดงในตารางที่ 1.1

2.3 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของก้อนหินทรงกลม

เมื่อนำก้อนหินทรงกลมตันที่มีรัศมี R และมีอุณหภูมิตอนเริ่มต้นสม่ำเสมอ T_0 มาให้สัมผัสกับอากาศที่มีอุณหภูมิ T_∞ อย่างทันทีทันใด (step function) โดยที่ T_∞ มีค่ามากกว่า T_0 ก็จะมีการถ่ายเทความร้อนจากอากาศไปสู่ก้อนหิน ก้อนหินก็จะมีอุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนในที่สุดก้อนหินจะมีอุณหภูมิเท่ากับอากาศจึงไม่มีการถ่ายเทความร้อนต่อไปอีก อุณหภูมิของก้อนหินที่แต่ละเวลาจะขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของก้อนหินเช่น รัศมีทรงกลม R ความหนาแน่น ρ ความจุความร้อน C และสัมประสิทธิ์การนำความร้อน k นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h_a อีกด้วย

จากการศึกษาพบว่าเหตุการณ์ข้างต้นเกิดขึ้นได้ 3 กรณี ขึ้นอยู่กับค่าของไบโอท นัมเบอร์ (Biot number), $Bi = \frac{h_a R}{k}$ ซึ่งเป็นอัตราส่วนของความต้านทานความร้อนภายใน (internal resistance) ของวัตถุ $\frac{R}{k}$ ต่อความต้านทานความร้อนของผิวภายนอก (external surface resistance) $\frac{1}{h_a}$ จึงเป็นค่าที่แสดงลักษณะเฉพาะของวัตถุ (characteristic values)

กรณีที่ 1 $Bi > 1$ นั่นคือ h_a มีค่ามากกว่า k/R มาก อุณหภูมิภายในของก้อนหินที่ระยะรัศมีใด ๆ และที่เวลาใด ๆ $T(r, t)$ สามารถหาได้จาก (14) ดังสมการ

$$\frac{T(r, t) - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} e^{-\frac{k}{\rho C} \left(\frac{n\pi}{R} \right)^2 t} \frac{\sin \frac{n\pi r}{R}}{\frac{n\pi r}{R}} \quad (2.3)$$

กรณีที่ 2 $Bi < 1$ นั่นคือ h_a มีค่าน้อยกว่า k/R มาก อุณหภูมิภายในของก้อนหินที่ระยะรัศมีใด ๆ และที่เวลาใด ๆ $T(r, t)$ สามารถหาได้จากสมการ

$$\frac{T(r,t)-T_\infty}{T_0-T_\infty} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{\sin \lambda_n R - \lambda_n R \cos \lambda_n R}{\lambda_n R - \sin \lambda_n R \cos \lambda_n R} \right] e^{-\frac{k}{\rho C} \lambda_n^2 t} \frac{\sin \lambda_n r}{\lambda_n r} \quad (2.4a)$$

เมื่อ λ_n หาได้จากสมการ

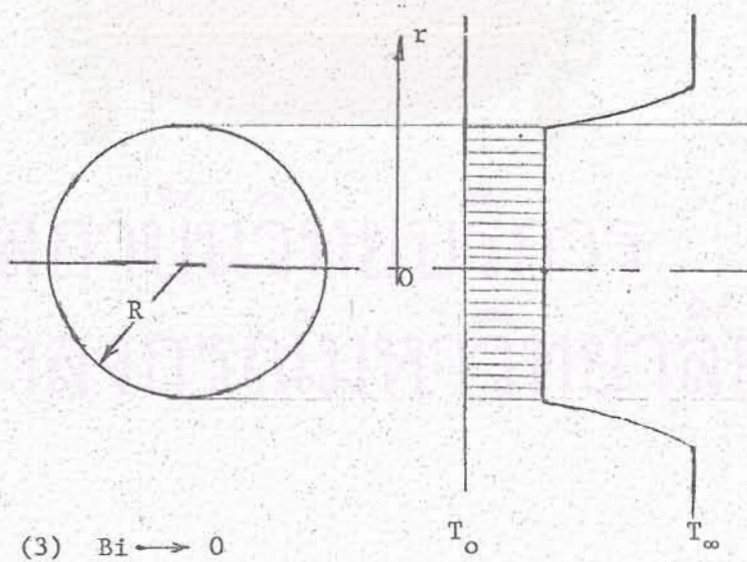
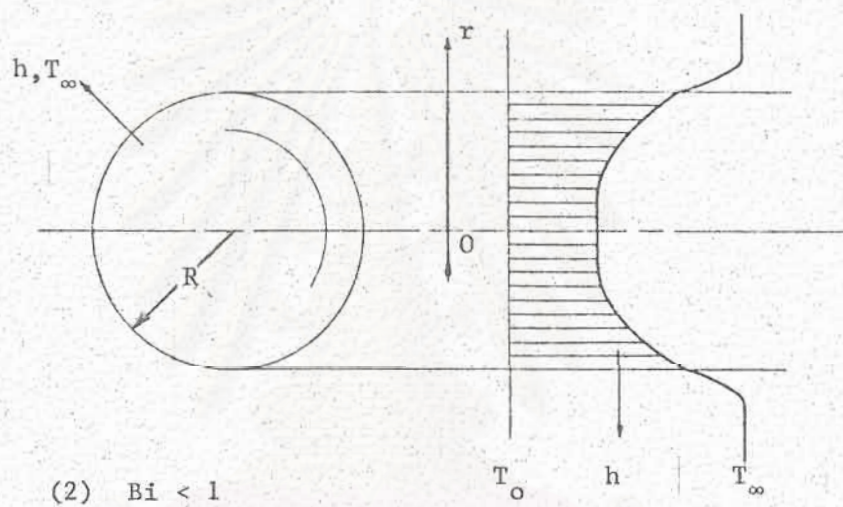
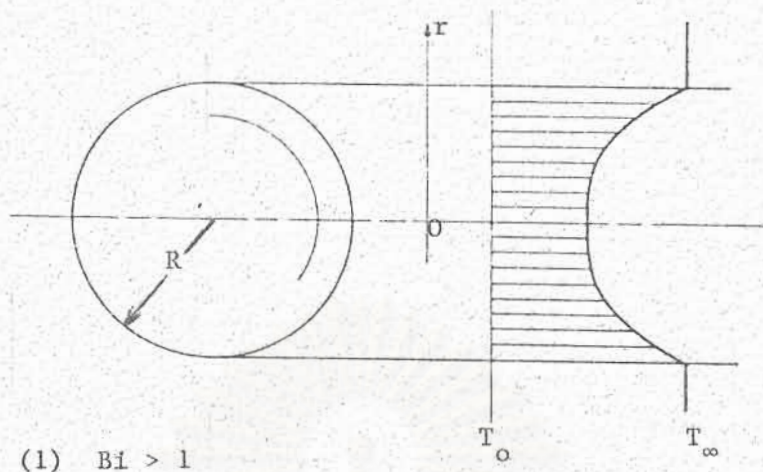
$$\lambda_n R \cos \lambda_n R = (1-Bi) \sin \lambda_n R \quad (2.4b)$$

กรณีที่ 3 $Bi \rightarrow 0$ แสดงว่าค่าความต้านทานความร้อนภายในเนื้อวัตถุ $R/k \rightarrow 0$ กรณีเช่นนี้จะใช้ได้ก็ต่อเมื่อวัตถุมีค่าการนำความร้อน k สูงมากเพียงพอที่จะทำให้ $R/k \rightarrow 0$ เมื่อเทียบกับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิว นั่นคือที่เวลาชั่วขณะใดขณะหนึ่งอุณหภูมิภายในของวัตถุอาจถือเสมือนว่าสม่ำเสมอ ดังนั้นอุณหภูมิของก้อนวัตถุจึงถูกควบคุมโดยความต้านทานความร้อนที่ผิว อุณหภูมิของก้อนหินที่เวลาใด ๆ $T(t)$ หาได้จากสมการ

$$\frac{T(t)-T_\infty}{T_0-T_\infty} = e^{-\left(\frac{3h_a}{\rho C R}\right)t} = e^{-t/\tau} \quad (2.5)$$

เมื่อ $\tau = \frac{\rho C R}{3h_a}$ คือ time constant

รูปที่ 2.1 จะแสดงอุณหภูมิของก้อนหินในแต่ละกรณี



รูปที่ 2.1 แสดงอุณหภูมิภายในก้อนที่เวลา t ในแต่ละกรณี

2.4 การวิเคราะห์แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนของรอกเบต

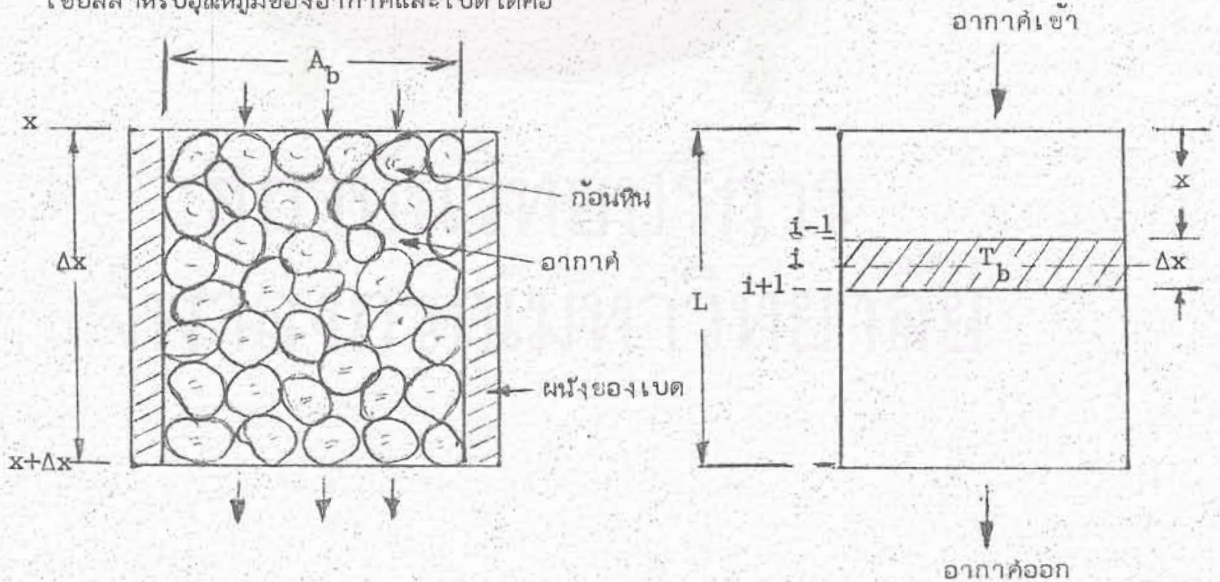
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อแสดงการถ่ายเทความร้อนจากอากาศสู่ก้อนหินในรอกเบต

มีข้อสมมุติดังนี้

1. มีการไหลของอากาศในทิศทางเดียว
2. การไหลของอากาศจะต้องสม่ำเสมอ
3. ไม่มีการนำความร้อนในทิศทางการไหล
4. อุณหภูมิในก้อนหินเท่ากันตลอดทั้งส่วน Δx
5. ไม่มีการสูญเสียความร้อนให้แก่สิ่งแวดล้อม
6. ไม่มีการถ่ายเทมวล
7. ไม่คิดถึงอิทธิพลจากขอบตึง
8. อากาศและก้อนหินมีคุณสมบัติไม่เปลี่ยนแปลง
9. ไม่มีการผลิตความร้อนขึ้นภายในเพคเบต

เมื่อพิจารณาปริมาตรเล็ก ๆ ของเพคเบตตามรูปที่ 2.2 แล้วเขียนสมการตีฟเพื่อเรน-

เขียนสำหรับอุณหภูมิของอากาศและเบตได้คือ



รูปที่ 2.2 แผนภาพของอากาศไหลผ่านรอกเบต



$$(\rho C_p)_a \varepsilon \frac{\partial T_a}{\partial t} + \frac{(\dot{m} C_p)_a}{A_b} \frac{\partial T_a}{\partial x} = h_v (T_b - T_a) \quad (2.6)$$

$$(\rho C_p)_b (1-\varepsilon) \frac{\partial T_b}{\partial t} = h_v (T_a - T_b) \quad (2.7)$$

เมื่อ ε คือ ความพรุนของเบต h_v คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเชิงปริมาตรระหว่างเบตและอากาศ

สมการ (2.6) และสมการ (2.7) ได้มาจากการเขียนสมดุลพลังงานของอากาศและสมดุลพลังงานของเบตก่อนหินตามลำดับ สำหรับเบตที่ใช้อากาศเป็นของไหลไหลผ่านเบต เทอม $(\rho C_p)_a \varepsilon \frac{\partial T_a}{\partial t}$ มีค่าน้อยมากจึงไม่คิด ดังนั้นสมการ (2.6) จะเหลือเพียง

$$\frac{(\dot{m} C_p)_a}{A_b} \frac{\partial T_a}{\partial x} = h_v (T_b - T_a) \quad (2.8)$$

การหาค่า h_v อาจหาได้จากสมการ (2.7) และสมการ (2.8) โดยประมาณได้โดยวิธีไฟไนท์อีลีเมนต์ดังนี้

เมื่อพิจารณาเบตดังรูปที่ 2.2 ที่มีความยาว L มีพื้นที่หน้าตัด A_b ถ้าแบ่งเบตออกเป็นส่วนเล็ก ๆ Δx ตามทิศทางที่อากาศไหลผ่าน จะได้สมการไฟไนท์ของสมการ (2.7) และ (2.8) คือ

$$\frac{(\rho C_p)_b (1-\varepsilon)}{t_{j+1} - t_j} \left[\frac{T_{bi-1,j+1} + T_{bi+1,j+1}}{2} - \frac{T_{bi-1,j} + T_{bi+1,j}}{2} \right] = Q_r$$

$$\frac{(\dot{m} C_p)_a}{A_b \Delta x} \left[(T_{ai-1,j} - T_{ai+1,j}) + (T_{ai-1,j+1} - T_{ai+1,j+1}) \right] / 2 = Q_a$$

$$Q_{av} = (Q_a + Q_r) / 2$$

$$= h_v \left[(T_{ai-1,j} + T_{ai+1,j} + T_{ai-1,j+1} + T_{ai+1,j+1}) / 4 - (T_{bi-1,j} \right.$$

$$\left. + T_{bi+1,j} + T_{bi-1,j+1} + T_{bi+1,j+1} \right) / 4 \quad (2.9)$$

สมการ (2.9) จะให้ค่า h_v ที่ถูกต้องเมื่อค่า $t_{j+1} - t_j$ และ Δx มีค่าน้อย ๆ

2.5 ความต้านลดยของรอกเบต

เมื่ออากาศไหลผ่านชั้นก้อนหินในรอกเบต ความเสียดทานระหว่างก้อนหินกับอากาศ รูปร่างของก้อนหินตลอดจนลักษณะการเรียงตัวของก้อนหินจะทำให้อากาศไหลปั่นป่วนและสูญเสียความดันในทิศทางของการไหล โดยทั่วไปจะได้ความต้านลดยในรูปของกลุ่มีมิติ ซึ่งแสดงโดยสมการ

$$\frac{\Delta P}{\rho_a V_b^2} = f \left(\frac{D_e}{D_b}, \epsilon, Re, \frac{D_e}{L}, \dots \right) \quad (2.10)$$

เมื่อ $\Delta P / (\rho_a V_b^2)$ เป็นออยเลอร์นัมเบอร์ $Re = G_o D_e / \mu_a$ เป็นเรโนลด์นัมเบอร์ และ อัตราส่วนของรูปทรงเรขาคณิต (Geometric ratio) เช่น ϵ , D_e/L , D_e/D_b และอื่น ๆ สำหรับความต้านลดยเมื่ออากาศไหลภายในท่อจะได้ความสัมพันธ์

$$\frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \rho_a V^2} = (f) (L/D) \quad (2.11)$$

เมื่อ $f = f(Re, \epsilon/D)$ หาได้จากมูดีไดอะแกรม (15) จากผลงานวิจัยของ P. Chanda และ D.H. Willits จะได้ความสัมพันธ์ความต้านลดยภายในเบตคือ

$$\frac{\Delta P}{\rho_a V_b^2} = \left(\frac{L}{D_e} \right) \bar{Re}^2 \left[C_1 Re + C_2 \bar{Re}^2 \right] \quad (2.12)$$

โดยค่า C_1 และ C_2 หาได้จากการทดลอง ดังนั้นจึงได้นิยามกลุ่มไร้มิติใหม่เป็น เปรลเชอเรนัมเบอร์ (pressure number)

$$Pre = \left(\frac{\Delta P}{\rho_a V_b^2} \right) \left(\frac{D_e}{L} \right) \bar{Re}^2 = \frac{\Delta P \rho_a D_e^3}{\mu_a^2 L} \quad (2.13)$$

ถังเก็บสะสมความร้อนและเครื่องมือ

3.1 การออกแบบและสร้างถัง

การออกแบบถังเก็บสะสมความร้อนเพื่อใช้ในการทดลองหาคุณสมบัติของถังเก็บสะสมความร้อนชนิดแอร์-ร็อคเบตได้คำนึงถึงความง่ายในการสร้างและราคาเป็นหลักและเพื่อนำไปใช้กับเครื่องอบกล้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีอยู่แล้ว ซึ่งต้องการเก็บพลังงานไว้ 15 MJ ในช่วงเวลา 6 ชั่วโมง โดยมีอุณหภูมิใช้งานอยู่ระหว่าง 50-60°C ดังนั้นตัวถังจะทำจากท่อคอนกรีตซึ่งใช้สำหรับทำท่อลว้และสามารถหาซื้อได้ในท้องตลาดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 76 เซนติเมตร สูง 175 เซนติเมตร และหนา 2 เซนติเมตร นำมาวางต่อกัน 5 ท่อ แล้วฉาบด้วยปูนซีเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ตอนล่างของถังจะหล่อฐานติดกับตะแกรงคอนกรีตเพื่อรองรับน้ำหนักของก้อนหินโดยมีช่องว่างให้อากาศผ่านได้ 33% ที่ตอนล่างและตอนบนของถังจะมีท่อสำหรับให้อากาศผ่านเข้าและออกจากถัง ผนังของถังทุกด้านจะหุ้มด้วยฉนวนใยแก้วหนา 4 นิ้ว ซึ่งจะทำให้ความร้อนสูญเสียให้กับบรรยากาศภายนอกไม่เกิน 5% ของความร้อนที่จะเก็บสะสมไว้

3.2 ระบบท่อ

ระบบท่อทำด้วยท่อใยหินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16.5 เซนติเมตร ต่อไว้สำหรับทดลองการเก็บสะสมและการนำพลังงานความร้อนออกมาใช้งาน โดยในการเก็บสะสมพลังงานอากาศจะเข้าทางด้านบนและออกทางด้านล่าง ส่วนในการนำพลังงานออกมาใช้งานอากาศจะเข้าทางด้านล่างและออกทางด้านบนของเบต ระบบที่ใช้ในการทดลองจะเป็นระบบเปิด กล่าวคืออากาศภายนอกจะถูกพัดลมดูดเข้ามาแล้วส่งไปยังหน่วยทำความร้อนและส่งไปเข้าทางด้านบนหรือด้านล่างของถังซึ่งบังคับทิศทางได้โดยการปิด/เปิดแอดมเปอร์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ รูปที่ 3.2 จะแสดงทิศทางการไหลของอากาศตอนเก็บสะสมพลังงานไว้ในร็อคเบต รูปที่ 3.3 แสดงภาพถ่ายของระบบที่ใช้ทดลอง

3.3 ระบบควบคุมอุณหภูมิ

อุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าถังเก็บสะสมความร้อนจะถูกควบคุมให้คงที่ โดยใช้ตัวควบคุม (controller) ของ Eurotherm รุ่น 810 ซึ่งมีตัววัดอุณหภูมิเป็นเทอร์โมคัพเบิล

ชนิด K ติดอยู่ที่ท่ออากาศเข้า ตัวทำความร้อนประกอบด้วยขดลวดทำความร้อนขนาด 2000 วัตต์ 1 ตัว 1500 วัตต์ 2 ตัว และ 900 วัตต์ 1 ตัว

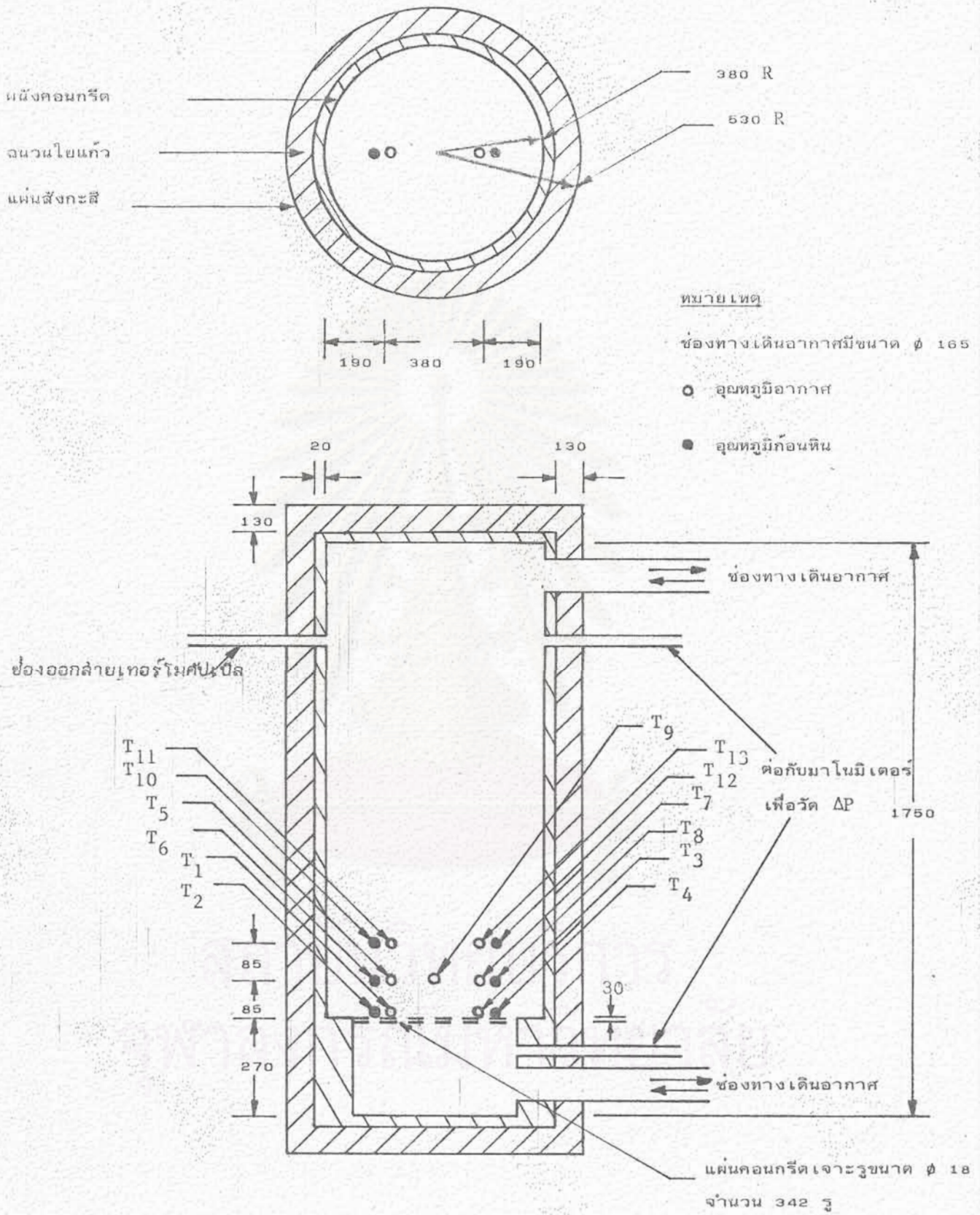
3.4 เครื่องมือวัด

อุณหภูมิ ใช้เครื่องวัดอุณหภูมิของ Omeka รุ่น 2176A-K มีรีโซลูชัน 0.1°C สำหรับวัดอุณหภูมิอากาศและอุณหภูมิของก้อนหิน เมื่อวัดอุณหภูมิอากาศใช้สายเทอร์โมคัพเบิลชนิด K ที่มีขั้วเปลี่ยนวัดส่วนเมื่อวัดอุณหภูมิของก้อนหินใช้สายเทอร์โมคัพเบิลชนิด K ผังตรง ชุดกึ่งกลางของก้อนหิน แล้ววัดด้วยกาวอีพอกซี E5 ของบริษัท Woodhil Chemical Saler.

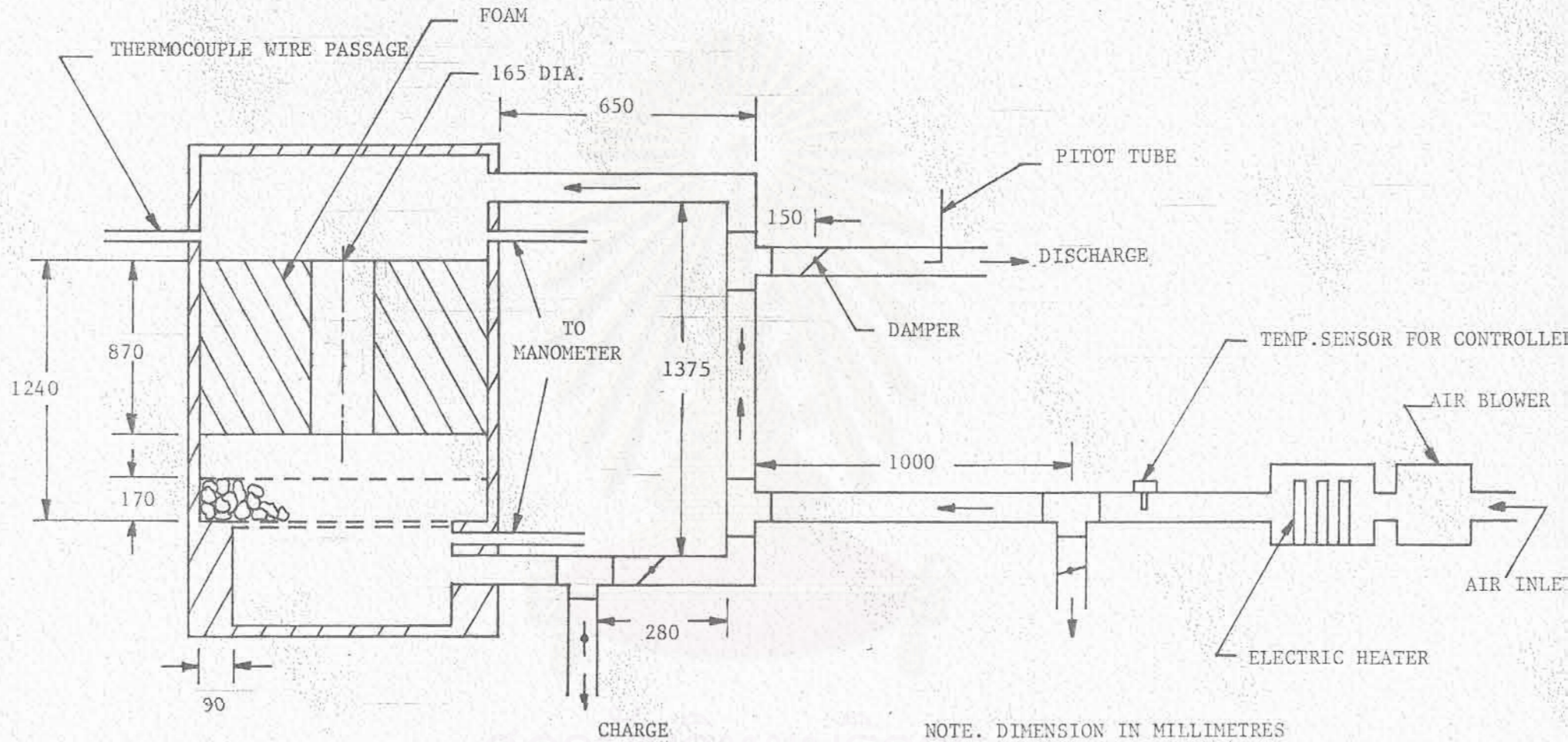
ความดันลด ใช้มาโนมิเตอร์แบบเอียงของ Dwyer รุ่น AV 115 มีรีโซลูชัน 0.005 นิ้วน้ำ

ความเร็วอากาศ ใช้ท่อปีโตและมาโนมิเตอร์ที่ใช้วัดความดัน

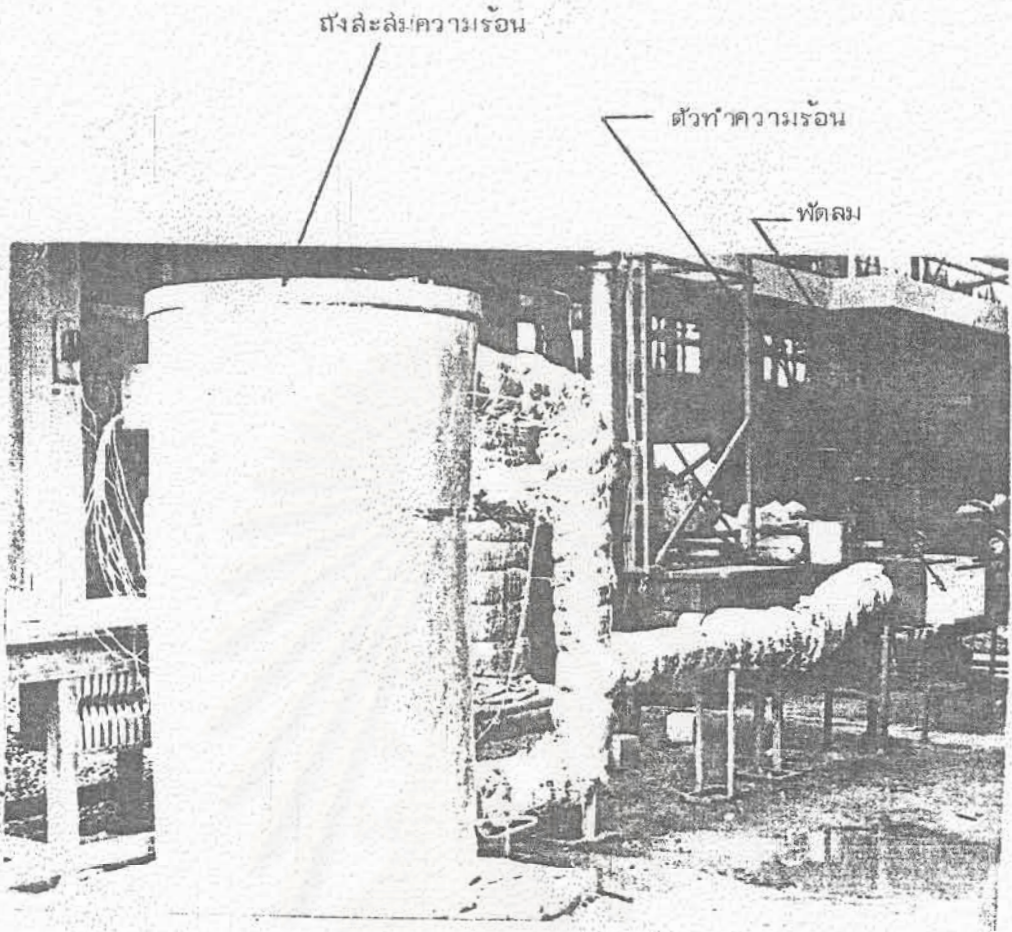
เวลา ใช้นาฬิกาจับเวลาของ Seiko มีรีโซลูชัน 0.01 วินาที



รูปที่ 3.1 ถึงเก็บสะสมความร้อนและตำแหน่งวัดอุณหภูมิและความดัน



รูปที่ 3.2 แสดงระบบถังสะสมความร้อนที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3.3 ภาพถ่ายของระบบถังสะสมความร้อนที่ใช้ในการทดลอง

บทที่ 4

การทดลอง

- การทดลองแบ่งออกเป็น 3 ตอนด้วยกันคือ (1) ทดลองหาคoefficient of expansion
(2) ทดลองหาค่า h_v ของเบต และ (3) ทดลองหาค่า ΔP ของเบต

4.1 การทดลองหาคoefficient of expansion

coefficent of expansion ที่หาได้จากการทดลองมี (1) ขนาดของก้อนหิน D (2) ความหนาแน่นของก้อนหิน ρ (3) เส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าทรงกลมของก้อนหิน D_e (4) ความพรุนของเบต ϵ (5) ความร้อนจำเพาะของก้อนหิน C_p และ (6) สัมประสิทธิ์การพาความร้อน h_v ของก้อนหิน

4.1.1 ขนาดของก้อนหิน น้ำก้อนหินไปร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูตะแกรงต่าง ๆ กัน เช่นขนาด $\frac{1}{2}$ - $\frac{3}{4}$ จะเป็นก้อนหินที่สามารถผ่านตะแกรงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $\frac{3}{4}$ นิ้ว แต่ไม่สามารถผ่านตะแกรงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $\frac{1}{2}$ นิ้ว ในการทดลองนี้จะคัดก้อนหินออกได้เป็น 3 ขนาดคือ (1) ขนาด $\frac{1}{2}$ - $\frac{3}{4}$ (2) ขนาด $\frac{3}{4}$ - 1" และ (3) ขนาด 1" - $1\frac{1}{2}$ "

4.1.2 ความหนาแน่น-เส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าทรงกลม-ความพรุน น้ำก้อนหินแต่ละขนาดมาใส่ในถังรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 28.5 ซม. ความสูง 33.5 ซม. จนเต็มแล้วเติมน้ำลงไปจนถึงอีกจนน้ำเต็มถึง บันทึกน้ำหนักของถังเปล่า W_1 น้ำหนักของถังบวกน้ำหนักของก้อนหิน W_2 น้ำหนักของถังบวกน้ำหนักก้อนหินและน้ำหนักน้ำที่แทนที่ช่องว่างในถัง W_3 แล้วนับจำนวนก้อนหิน บันทึกข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 4.1 แล้วนำข้อมูลไปคำนวณหาความพรุน ϵ ความหนาแน่น ρ_T และเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าทรงกลม D_e ได้ดังแสดงในตารางที่ 5.2

4.1.3 ความร้อนจำเพาะ C_p ของก้อนหิน น้ำก้อนหินขนาดต่าง ๆ กัน ซึ่งมีเทอร์โมคัพเปิลฝังไว้ที่จุดศูนย์กลางไปต้มในน้ำเดือดที่มีอุณหภูมิ 212°F รอจนกระทั่งก้อนหินมีอุณหภูมิเท่ากับ 212°F แล้วจึงหย่อนก้อนหินลงไปในถังคาลอรีมิเตอร์ ซึ่งมีน้ำบรรจุอยู่ แล้วบันทึกข้อมูลการทดลองดังตารางที่ 4.2 ค่าน้ำสัมผัสของถัง Stainless steel คือ $203\text{J}/^\circ\text{C}$

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลสำหรับหาคุณสมบัติทางกายภาพของหิน

| ขนาดของก้อนหิน | W_1 , kg | W_2 , kg | W_3 , kg | N, ก้อน | m_r , kg | m_w , kg |
|----------------|------------|------------|------------|---------|------------|------------|
| 1" - 1 1/2" | 1.5 | 33.2 | 43.0 | 941 | 31.70 | 9.8 |
| | 1.5 | 33.0 | 42.9 | 966 | 31.50 | 9.9 |
| 3/4" - 1" | 1.5 | 33.0 | 42.9 | 1597 | 31.5 | 9.9 |
| | 1.5 | 32.9 | 42.8 | 1606 | 31.4 | 9.9 |
| | 1.5 | 32.8 | 42.9 | 1512 | 31.3 | 10.1 |
| | 1.5 | 31.5 | 41.6 | 2008 | 30.0 | 10.1 |
| 1/2"-3/4" | 1.5 | 32.0 | 41.9 | 4617 | 30.5 | 9.9 |
| | 1.5 | 32.60 | 42.4 | 4655 | 31.1 | 9.8 |
| | 1.5 | 33.10 | 43.0 | 4808 | 31.6 | 9.9 |

- เมื่อ W_1 = น้ำหนักถังรูปทรงกระบอก
- W_2 = น้ำหนักของถัง + ก้อนหิน
- W_3 = น้ำหนักของถัง + ก้อนหิน + น้ำ
- N = จำนวนก้อนหินเต็มถัง
- m_r = น้ำหนักก้อนหินเต็มถัง
- m_w = น้ำหนักน้ำแทนที่ช่องว่างในถังบรรจุก้อนหินเต็ม
- ρ_r = ความหนาแน่นของน้ำ = 1000 kg/m^3
- V = ปริมาตรของถัง = 0.02138 m^3

บันทึกอุณหภูมิของน้ำที่เพิ่มขึ้นทุก ๆ 10 วินาที จนกระทั่งอุณหภูมิของก้อนหินเท่ากับอุณหภูมิของน้ำ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 แล้วนำข้อมูลไปคำนวณหาค่าความร้อนจำเพาะของก้อนหินได้ตาม ตารางที่ 5.1

4.1.4 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของก้อนหิน h_a คัดเลือกก้อนหินที่มีลักษณะค่อนข้างกลมจากหินทั้ง 3 ขนาดคือ $D_e = 0.0167, 0.0235$ และ 0.0285 m มาขัดเพื่อลบมุมแหลมออกแล้วเจาะรูฝังเทอร์โมคัพเปิลไว้ตรงกึ่งกลาง ปล่อยให้ก้อนหินมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้องแล้วจึงให้ก้อนหินสัมผัสกับอากาศร้อนซึ่งมีอุณหภูมิและความเร็วคงที่อย่างทันทีทันใด บันทึกอุณหภูมิของก้อนหินที่เวลาต่าง ๆ กันจนกระทั่งก้อนหินมีอุณหภูมิเท่ากับอากาศร้อน เปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศร้อนแล้วทำการทดลองซ้ำอย่างเดิม ข้อมูลการทดลองได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.3

4.2 การทดลองหาค่า h_v ของเบต

ในการทดลองหาค่า h_v ของแอร์-ร็อคเบตนี้จะเปลี่ยนขนาดของก้อนหินที่บรรจุในเบต 3 ขนาดด้วยกันคือ $D_e = 0.0167, 0.0235$ และ 0.0285 เมตร ในแต่ละขนาดของก้อนหิน จะเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศผ่านเบต 8 ค่าด้วยกันคือ $G_o = 0.09211, 0.10643, 0.11877, 0.13023, 0.14081, 0.15051, 0.15954$ และ 0.16813 $\text{kg/m}^2\text{s}$ ความหนาของชั้นหินจะคงที่ที่ 17.5 เซนติเมตร และแบ่งออกเป็น 2 ชั้นเท่า ๆ กัน ในการทดลองแต่ละครั้งอุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าเบตจะถูกควบคุมให้คงที่ที่ $60 \pm 2^\circ\text{C}$ เมื่ออากาศมีอุณหภูมิตามต้องการแล้วอากาศร้อนจะถูกปล่อยผ่านเข้าสู่เบตอย่างทันทีทันใด ความเร็วของอากาศผ่านเบตจะถูกควบคุมโดยการปรับแอมเปอร์ หลังจากปล่อยอากาศร้อนเข้าสู่เบตแล้วทุก ๆ สองนาที ให้จดบันทึก อุณหภูมิของอากาศตรงตำแหน่งเข้าเบต ออกจากเบต ระหว่างกลางของเบต และอุณหภูมิของก้อนหินที่ชั้นแรก ชั้นกลางและชั้นสุดท้าย

ตารางที่ 4.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ในถึงกับสะสมความร้อนที่ไว้ก้อนหินขนาด 3/4" - 1" และความเร็วอากาศ 0.015 นิวตัน สำหรับข้อมูลการทดลองชุดอื่น ๆ ดูได้จากภาคผนวก ก.

ตารางที่ 4.2 จุดหลอมน้ำในแคลอรีมิเตอร์เป็น °F ที่เวลาต่าง ๆ เมื่อใส่ก้อนหินจุดหลอม 212°F ลงไป

| เวลา วินาที | น้ำหนักก้อนหิน, กิโลกรัม/น้ำหนัก น้ำในถังแคลอรีมิเตอร์, กิโลกรัม | | | | | |
|----------------|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 0.0117/0.3 | 0.0255/0.25 | 0.0222/0.25 | 0.0182/0.25 | 0.0139/0.25 | 0.0138/0.25 |
| 0 | 91.35 | 91.50 | 91.90 | 90.55 | 91.80 | 91.80 |
| 10 | 91.40 | 91.50 | 91.90 | 90.70 | 92.10 | 91.95 |
| 20 | 91.80 | 91.80 | 92.35 | 91.05 | 92.75 | 92.15 |
| 30 | 92.05 | 92.40 | 92.85 | 91.35 | 92.85 | 92.65 |
| 40 | 92.10 | 92.65 | 93.15 | 91.60 | 92.85 | 92.75 |
| 50 | 92.15 | 92.90 | 93.40 | 91.75 | 92.85 | 92.80 |
| 60 | 92.20 | 93.10 | 93.50 | 91.90 | 92.86 | 92.85 |
| 70 | 92.20 | 93.20 | 93.60 | 91.95 | 92.90 | 92.90 |
| 80 | 92.20 | 93.25 | 93.65 | 92.00 | 92.90 | 92.92 |
| 90 | 92.20 | 93.35 | 93.70 | 92.05 | 92.91 | 92.94 |
| 100 | 92.20 | 93.40 | 93.75 | 92.05 | 92.93 | 92.95 |
| 110 | - | 93.45 | 93.76 | 92.06 | 92.93 | 92.95 |
| 120 | - | 93.45 | 93.76 | 92.07 | - | 92.95 |
| 130 | - | 93.48 | 93.76 | 92.07 | - | - |
| 140 | - | 93.50 | - | 92.10 | - | - |
| 150 | - | 93.54 | - | 92.10 | - | - |
| 160 | - | 93.54 | - | - | - | - |



ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิของก้อนหินเป็น $^{\circ}\text{C}$ ที่เวลาต่าง ๆ เมื่อสัมผัสกับอากาศร้อนอย่างทันทีทันใด

| เวลา (นาที) | ความเร็ว 1.2 เมตร/วินาที | | | ความเร็ว 1.7 เมตร/วินาที | | |
|----------------|--------------------------|--------|--------|--------------------------|--------|--------|
| | D_e (เมตร) | | | D_e (เมตร) | | |
| | 0.0167 | 0.0235 | 0.0285 | 0.0167 | 0.0235 | 0.0285 |
| 0 | 29.8 | 30.1 | 31.1 | 30.1 | 30.1 | 31.1 |
| 1 | 33.0 | 32.7 | 33.1 | 34.6 | 34.2 | 33.9 |
| 2 | 35.6 | 35.3 | 35.1 | 38.2 | 37.8 | 36.3 |
| 3 | 37.8 | 37.4 | 36.7 | 40.7 | 40.3 | 38.3 |
| 4 | 39.4 | 39.0 | 38.1 | 42.5 | 42.2 | 39.7 |
| 5 | 40.8 | 40.1 | 39.2 | 43.6 | 43.4 | 41.0 |
| 6 | 41.8 | 41.3 | 40.3 | 44.4 | 44.6 | 42.0 |
| 7 | 42.5 | 42.1 | 41.1 | 44.9 | 45.3 | 42.9 |
| 8 | 43.1 | 42.8 | 41.8 | 45.3 | 45.8 | 43.5 |
| 9 | 43.5 | 43.3 | 42.5 | 45.6 | 46.2 | 44.0 |
| 10 | 43.8 | 43.7 | 43.0 | 45.7 | 46.5 | 44.3 |
| 11 | 44.2 | 44.1 | 43.4 | 45.8 | 46.7 | 44.5 |
| 12 | 44.4 | 44.3 | 43.8 | 46.0 | 46.9 | 44.8 |
| 13 | 44.6 | 44.6 | 44.2 | 46.2 | 47.0 | 45.0 |
| 14 | 44.7 | 44.8 | 44.4 | 46.4 | 47.1 | 45.3 |
| 15 | 44.8 | 44.9 | 44.6 | 46.5 | 47.2 | 45.5 |
| ∞ | 46.1 | 46.5 | 46.3 | 47.9 | 47.8 | 47.6 |

ตารางที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ในถังละลายความร้อนชนิดแอร์-รอกเบต ความเร็วอากาศ 0.015 นิ้ว/วินาที
ขนาดหิน 3/4" - 1"

| Time | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | T ₅ | T ₆ | T ₇ | T ₉ | T ₁₀ | T ₁₁ | T ₁₂ |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 10.20 | 28.2 | 28.8 | 28.0 | 27.8 | 28.2 | 28.0 | 28.0 | 28.2 | 28.2 | 28.6 | 28.4 |
| 10.22 | 28.2 | 28.2 | 28.0 | 27.8 | 29.8 | 28.2 | 28.8 | 28.6 | 33.6 | 41.1 | 33.4 |
| 10.24 | 28.2 | 28.2 | 28.2 | 28.0 | 29.6 | 28.8 | 29.4 | 29.2 | 36.0 | 43.6 | 35.6 |
| 10.26 | 28.5 | 28.3 | 28.2 | 28.0 | 30.6 | 29.4 | 30.2 | 29.9 | 38.2 | 43.7 | 38.0 |
| 10.28 | 28.6 | 28.6 | 28.6 | 28.2 | 31.5 | 30.2 | 31.0 | 30.8 | 39.7 | 44.1 | 39.5 |
| 10.30 | 29.0 | 28.8 | 28.8 | 28.6 | 32.5 | 30.9 | 31.8 | 31.6 | 41.0 | 45.9 | 40.8 |
| 10.32 | 29.5 | 29.1 | 29.2 | 28.7 | 33.7 | 32.1 | 32.6 | 32.6 | 42.0 | 46.3 | 42.2 |
| 10.34 | 30.0 | 29.6 | 29.6 | 29.1 | 34.8 | 32.9 | 33.6 | 33.6 | 42.8 | 46.8 | 43.1 |
| 10.36 | 30.4 | 30.0 | 30.0 | 29.6 | 36.0 | 34.1 | 34.6 | 34.7 | 43.6 | 47.6 | 43.9 |
| 10.38 | 31.1 | 30.7 | 30.7 | 30.1 | 37.2 | 35.3 | 35.6 | 35.9 | 44.6 | 47.7 | 45.0 |
| 10.40 | 31.7 | 31.4 | 31.3 | 30.8 | 38.4 | 36.4 | 36.7 | 37.1 | 45.3 | 48.5 | 45.7 |
| 12.30 | 52.4 | 54.5 | 52.9 | 53.8 | 56.0 | 55.7 | 55.3 | 55.7 | 55.3 | 56.6 | 55.8 |

T₁, T₃ อุณหภูมิอากาศชั้นที่ 1
 T₅, T₇, T₉ อุณหภูมิอากาศชั้นที่ 2
 T₁₃, T₁₁ อุณหภูมิอากาศชั้นที่ 3

T₂, T₄ อุณหภูมิก้อนหินชั้นที่ 1
 T₆, T₈ อุณหภูมิก้อนหินชั้นที่ 2
 T₁₀, T₁₂ อุณหภูมิก้อนหินชั้นที่ 3

ตารางที่ 4.5 ข้อมูลแสดงความดันลดในถังละสมความร้อนชนิดแอร์-รอกเบต

| D_e, m | $G_o, kg/m^2 s$ | Re | $\Delta P, in.H_2O$ |
|----------|-----------------|--------|---------------------|
| 0.0285 | 0.09211 | 138.17 | 0.03 |
| | 0.10643 | 159.65 | 0.04 |
| | 0.11877 | 178.16 | 0.045 |
| | 0.13023 | 195.25 | 0.05 |
| | 0.14081 | 211.22 | 0.06 |
| | 0.15051 | 225.77 | 0.065 |
| | 0.15954 | 239.31 | 0.070 |
| | 0.16813 | 252.20 | 0.080 |
| 0.0235 | 0.09211 | 114.12 | 0.035 |
| | 0.10643 | 131.86 | 0.043 |
| | 0.11877 | 147.15 | 0.050 |
| | 0.13023 | 161.35 | 0.056 |
| | 0.14081 | 174.46 | 0.063 |
| | 0.15051 | 186.47 | 0.070 |
| | 0.15954 | 197.66 | 0.075 |
| | 0.16813 | 208.30 | 0.085 |
| 0.0167 | 0.09211 | 81.11 | 0.040 |
| | 0.10643 | 93.71 | 0.05 |
| | 0.11877 | 104.58 | 0.065 |
| | 0.13023 | 114.67 | 0.075 |
| | 0.14081 | 123.99 | 0.09 |
| | 0.15051 | 132.53 | 0.105 |
| | 0.15954 | 140.48 | 0.12 |
| | 0.16813 | 148.04 | 0.13 |

4.3 การทดลองหาค่าความดันลด ΔP

ในการทดลองหาค่าความดันลดของแอร์-รอกเบตนี้จะเปลี่ยนขนาดของก้อนหินที่บรรจุในเบต 3 ขนาดด้วยกันคือ $D_e = 0.0167, 0.0235$ และ 0.0285 เมตร ในแต่ละขนาดของก้อนหินจะเปลี่ยนความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านเบตด้วยกัน 8 ค่า และบันทึกข้อมูลการทดลองคือ ΔP และอัตราการไหลของอากาศไว้ดังตารางที่ 4.5

ผลการทดลองและวิจารณ์

5.1 คุณสมบัติทางกายภาพของก้อนหินตัวอย่าง

จากผลการทดลองสามารถนำข้อมูลมาคำนวณหาคุณสมบัติทางกายภาพของก้อนหินตัวอย่างโดยใช้สูตรดังต่อไปนี้

$$\text{ความพรุนของเบต} \quad \epsilon = \frac{m_w}{\rho_w V} \quad (5.1)$$

$$\text{ความหนาแน่นของก้อนหิน} \quad \rho_r = \frac{m_r}{V(1-\epsilon)} \quad (5.2)$$

$$\text{เส้นผ่าศูนย์กลางของก้อนหินเทียบเท่าทรงกลม} \quad D_e = \left[\frac{6 m_r}{\pi \rho_r N} \right]^{1/3} \quad (5.3)$$

$$\text{ความร้อนจำเพาะของก้อนหิน} \quad C_p = \frac{(m_w C_{p_w} + m_c C_{p_c}) (T_{wf} - T_{wi})}{m_r (100 - T_{wf})} \quad (5.4)$$

ตารางที่ 5.1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของก้อนหินตัวอย่างทั้ง 3 ขนาด ขนาดของก้อนหินในช่องแรกของตารางเช่นขนาด 1"-1 $\frac{1}{2}$ " เป็นขนาดของรูตะแกรงเพื่อใช้คัดเลือกก้อนหิน ส่วน D_e จะเป็นขนาดของก้อนหินที่ใช้ในการคำนวณเพื่อหาความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์อื่น ๆ ความหนาแน่นเฉลี่ย ความร้อนจำเพาะเฉลี่ยและความพรุนของเบตมีค่าใกล้เคียงกับผู้วิจัยอื่น ๆ โดยมีค่าเฉลี่ย $\rho_r = 2722 \text{ kg/m}^3$ $C_p = 0.873 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ และ $\epsilon = 0.463$

จากผลการทดลองจะเห็นว่าค่า ϵ ไม่มีความสัมพันธ์ที่เด่นชัดกับขนาดของก้อนหิน

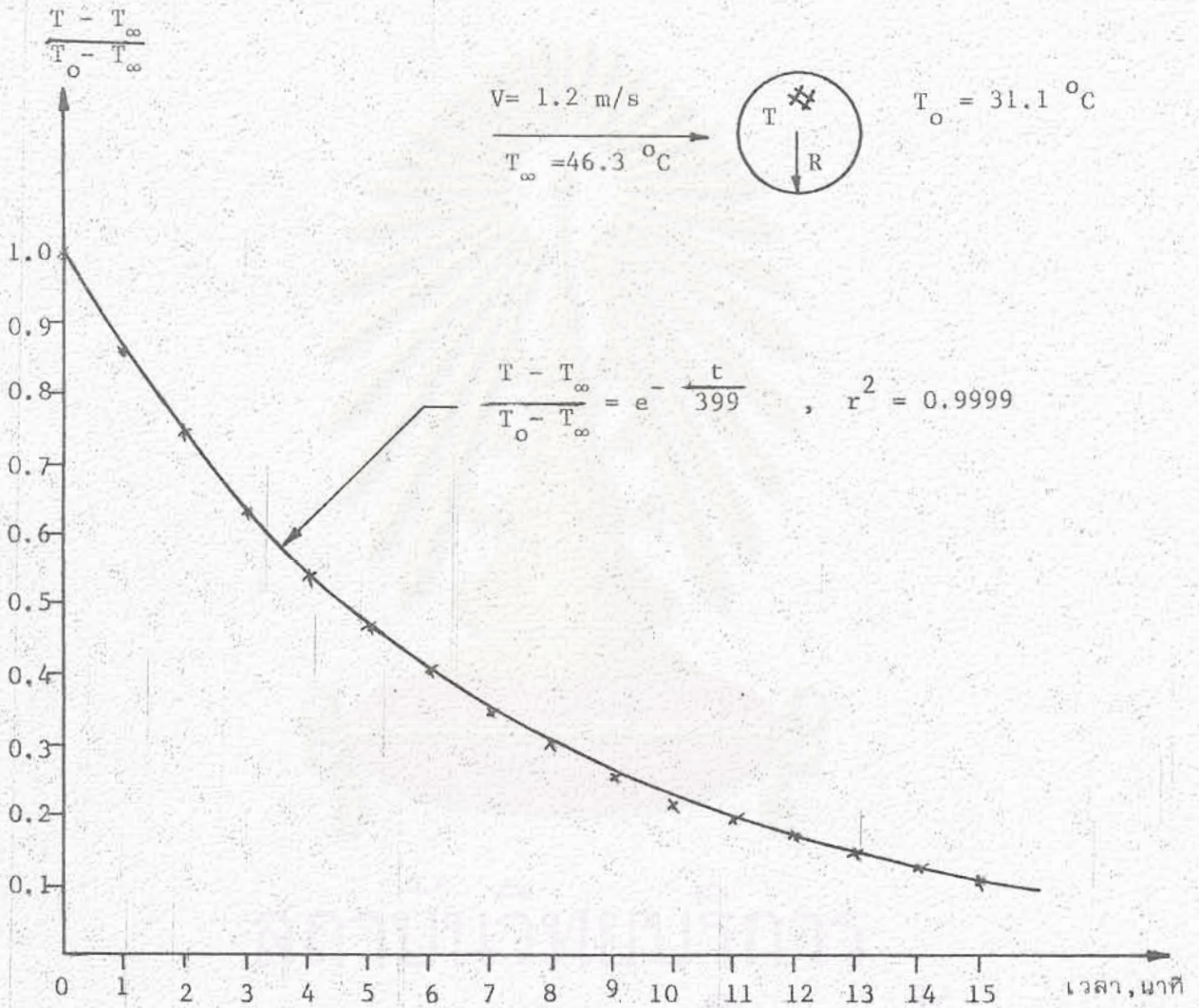
5.2 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของก้อนหิน

เมื่อนำอุณหภูมิของก้อนหินที่เวลาต่าง ๆ ไปพล็อตกราฟ ดังแสดงในรูปที่ 5.1 จะได้กราฟที่มีลักษณะลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลซึ่งสอดคล้องกับสมการ 2.5 คือ

$$\frac{T(t)-T_{\infty}}{T_0-T_{\infty}} = e^{-\left(\frac{6 h_a}{\rho_r C_{p_r} D_e}\right) t} = e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (5.5)$$

ตารางที่ 5.1 คุณสมบัติทางกายภาพของก้อนหินตัวอย่าง

| ขนาดของก้อนหิน | D_e, m | $\rho_r, kg/m^3$ | ϵ | $C_p, kJ/kg^{\circ}C$ |
|--|----------|------------------|------------|-----------------------|
| 1" - 1 1/2" (0.0254 m - 0.0381 m) | 0.0285 | 2741 | 0.461 | 0.865 |
| 3/4" - 1" (0.01905 m - 0.0254 m) | 0.0235 | 2728 | 0.468 | 0.885 |
| 1/2" - 3/4" (0.0127 m - 0.01905 m) | 0.01673 | 2698 | 0.462 | 0.868 |
| ค่าเฉลี่ย | | 2722 | 0.463 | 0.873 |



รูปที่ 5.1 กราฟแสดงอุณหภูมิกับเวลาของก้อนหินขนาด $D_e = 0,0285 \text{ m}$ เพื่อสัมผัสกับอากาศร้อนที่มีอุณหภูมิ $46,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ความเร็ว $1,2 \text{ m/s}$

ตารางที่ 5.2 ผลการทดลองหาค่า τ , h_a และ h_v ของก้อนหิน เมื่อสัมผัสกับอากาศร้อนอย่างทันทีทันใด

| V m/s | τ , s | | | h_a kW/m ² -°C | | | h_v , kW/m ³ -°C | | |
|----------|------------|-------|-------|-----------------------------|-------|-------|-------------------------------|-------|-------|
| | D_e , m | | | D_e , m | | | D_e , m | | |
| | .0167 | .0235 | .0285 | .0167 | .0235 | .0285 | .0167 | .0235 | .0285 |
| 1.2 | 335 | 297 | 399 | .020 | .031 | .028 | 7.093 | 8.001 | 5.955 |
| 1.7 | 226 | 272 | 358 | .029 | .034 | .032 | 10.514 | 8.736 | 6.638 |

โดย $\tau = \rho_r C_{p_r} D_e / 6 h_a$ และเมื่อใช้วิธี Regression จะสามารถหาค่า τ ได้ดังแสดงในตารางที่ 5.2 ซึ่งให้ค่า Coefficient of Determination r^2 มากกว่า 0.99

จากค่า Time constant τ สามารถคำนวณหาค่า h_a และ h_v ได้จากสูตร

$$h_a = \frac{\rho_r C_{p_r} D_e}{6\tau} \tag{5.6}$$

$$\text{และ } h_v = \frac{6h_a}{D_e} \tag{5.7}$$

จากตารางที่ 5.2 จะเห็นว่า

1. Time constant τ มีแนวโน้มที่จะเพิ่มตามขนาดของก้อนหิน และลดลงตามความเร็วที่อากาศไหลผ่านเพราะก้อนหินขนาดเล็ก อุณหภูมิจะเท่ากันทั่วทั้งก้อนเร็วจึงทำให้ Time constant มีค่าน้อยเมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้นจะทำให้มีการพาความร้อนจากอากาศไปสู่ก้อนหินเร็วขึ้น จึงทำให้มี Time constant น้อยลง โดยสรุป Time constant จะมีค่าประมาณ 4-6 นาที และเวลาที่ก้อนหินมีอุณหภูมิเท่ากับอากาศร้อนจะมีค่าประมาณ 5τ 20-30 นาที ซึ่งค่า τ นี้จะเป็นตัวที่กำหนดเวลาในการทดลองหาค่า h_v ของแอร์-ร็อคเบต
2. สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเชิงผิว h_a มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีการพาความร้อนได้ดีเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $0.027 \text{ kW/m}^2\text{°C}$ ที่ความเร็ว 1.2 m/s และเท่ากับ $0.031 \text{ kW/m}^2\text{°C}$ ที่ความเร็ว

1.7 m/s แต่ค่า h_a ไม่ขึ้นกับขนาดของก้อนหินหรือพื้นที่สัมผัสซึ่งสอดคล้องตามทฤษฎีการพาความร้อน

3. สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเชิงปริมาตร h_v มีแนวโน้มลดลงเมื่อก้อนหินมีขนาดใหญ่ขึ้นหรือมีปริมาตรเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องตามสูตร $h_v = \frac{6 h_a}{D_e} a$ แต่ไม่สามารถใช้ได้กับสูตรการถ่ายเทความร้อน เพราะจากสูตร $Q = h_v V \Delta T$ ค่า h_v จะต้องไม่ขึ้นกับปริมาตรของก้อนหิน แต่ที่กำหนดค่าสัมประสิทธิ์ h_v นี้ก็เพื่อจะใช้เปรียบเทียบกับแอร์-รอกเบต

4. ค่า Bi ของก้อนหินที่ใช้ในการทดลองอยู่ระหว่าง 0.1257-0.36 ดังนั้นจึงสามารถใช้สมการ (2.5) ในการหาค่า h_a ได้ ซึ่งจากการทดลอง h_a จะมีค่าระหว่าง 0.02 ถึง 0.034 kW/m²°C

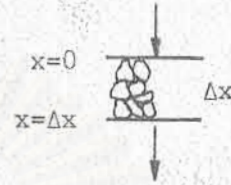
5.3 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของแอร์-รอกเบต , h_v

5.3.1 อุณหภูมิในถังเก็บสะสมความร้อน เมื่อให้อากาศร้อนผ่านชั้นของก้อนหินในถังเก็บสะสมความร้อน อากาศจะถ่ายเทความร้อนให้กับก้อนหิน ก้อนหินก็จะมีอุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อย ๆ โดยในชั้นบน ๆ จะมีอุณหภูมิสูงกว่าชั้นล่าง ในขณะที่เดียวกันอากาศก็จะมีอุณหภูมิลดลงเมื่อผ่านชั้นหิน ดังแสดงในรูปที่ 5.2 รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์การถ่ายเทความร้อนในถังเก็บสะสมความร้อนกับเวลา จากรูปจะเห็นว่า การถ่ายเทความร้อนจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไป ทั้งนี้เนื่องจากก้อนหินมีอุณหภูมิสูงขึ้น ความแตกต่างของอุณหภูมิของก้อนหินกับอุณหภูมิของอากาศจึงลดลง การถ่ายเทความร้อนจะเป็นศูนย์เมื่อก้อนหินมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิของอากาศ เมื่อการถ่ายเทความร้อนเป็นศูนย์แสดงว่าถังเก็บสะสมความร้อนได้เก็บพลังงานไว้จนเต็มที่แล้ว จากการทดลองจะใช้เวลาประมาณ 2 ชั่วโมง จึงได้พลังงานเต็มถัง

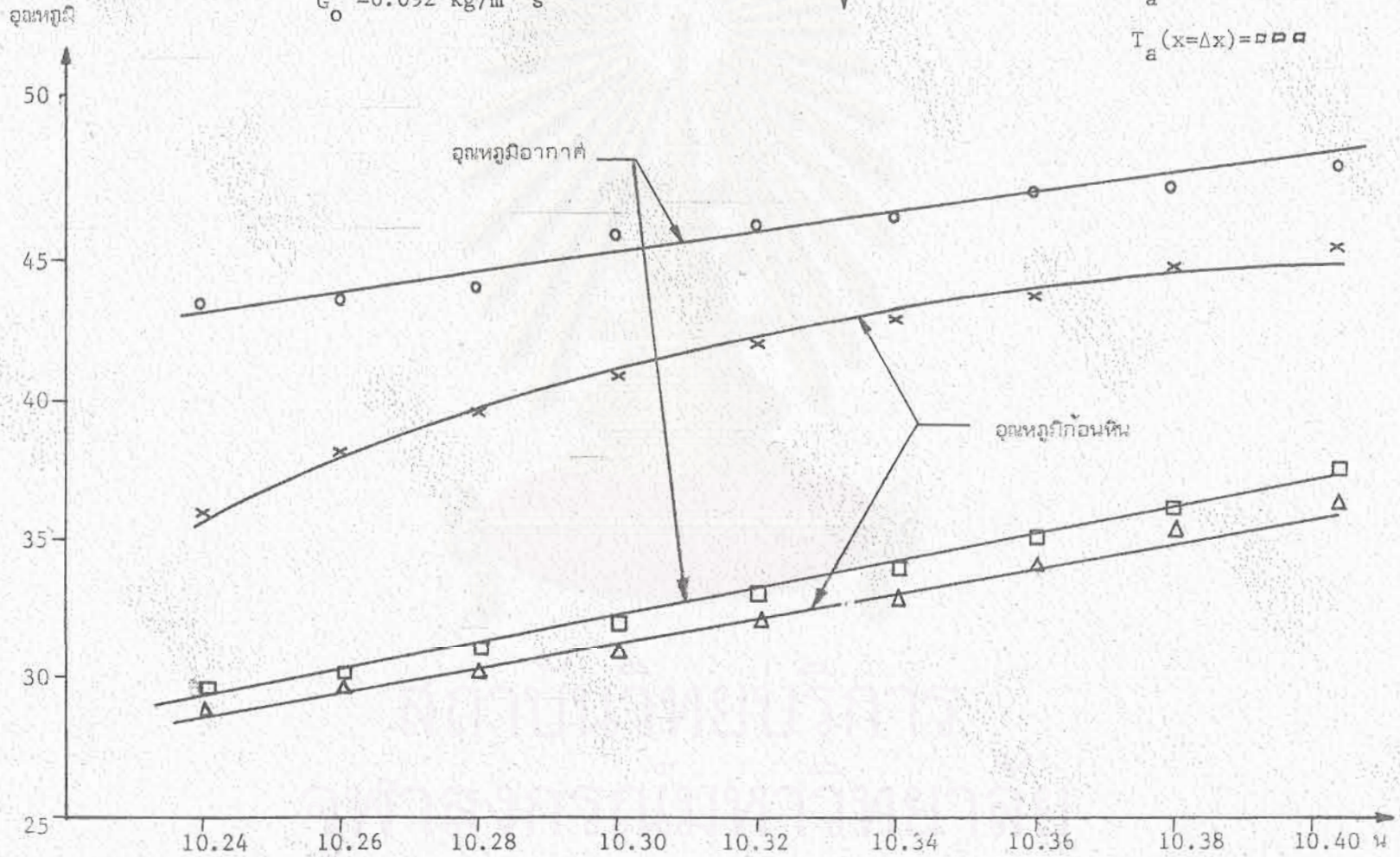
5.3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่เวลาต่าง ๆ ตารางที่ 5.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่เวลาต่าง ๆ จากตารางจะเห็นว่าค่า h_v มีค่าสูงขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ซึ่งไม่เป็นไปตามทฤษฎี แต่ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะค่า h_v ที่คำนวณได้เป็นค่าประมาณโดยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ซึ่งมีค่า $\Delta x = 0.0875$ m และ $\Delta t = 120$ วินาที ในการทดลองไม่สามารถลดเวลาให้น้อยกว่านี้ได้เนื่องจากต้องใช้คนในการอ่านอุณหภูมิของแต่ละจุด ส่วนความหนาของชั้นหินก็ขึ้นอยู่กับขนาดของก้อนหินที่ใช้ ถ้าก้อนหินมีขนาดใหญ่ก็ต้องใช้ Δx มาก ในการทดลองนี้

035355

$\Delta x = 0.0875 \text{ m}$
 $D_e = 0.0235 \text{ m}$
 $G_o = 0.092 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$

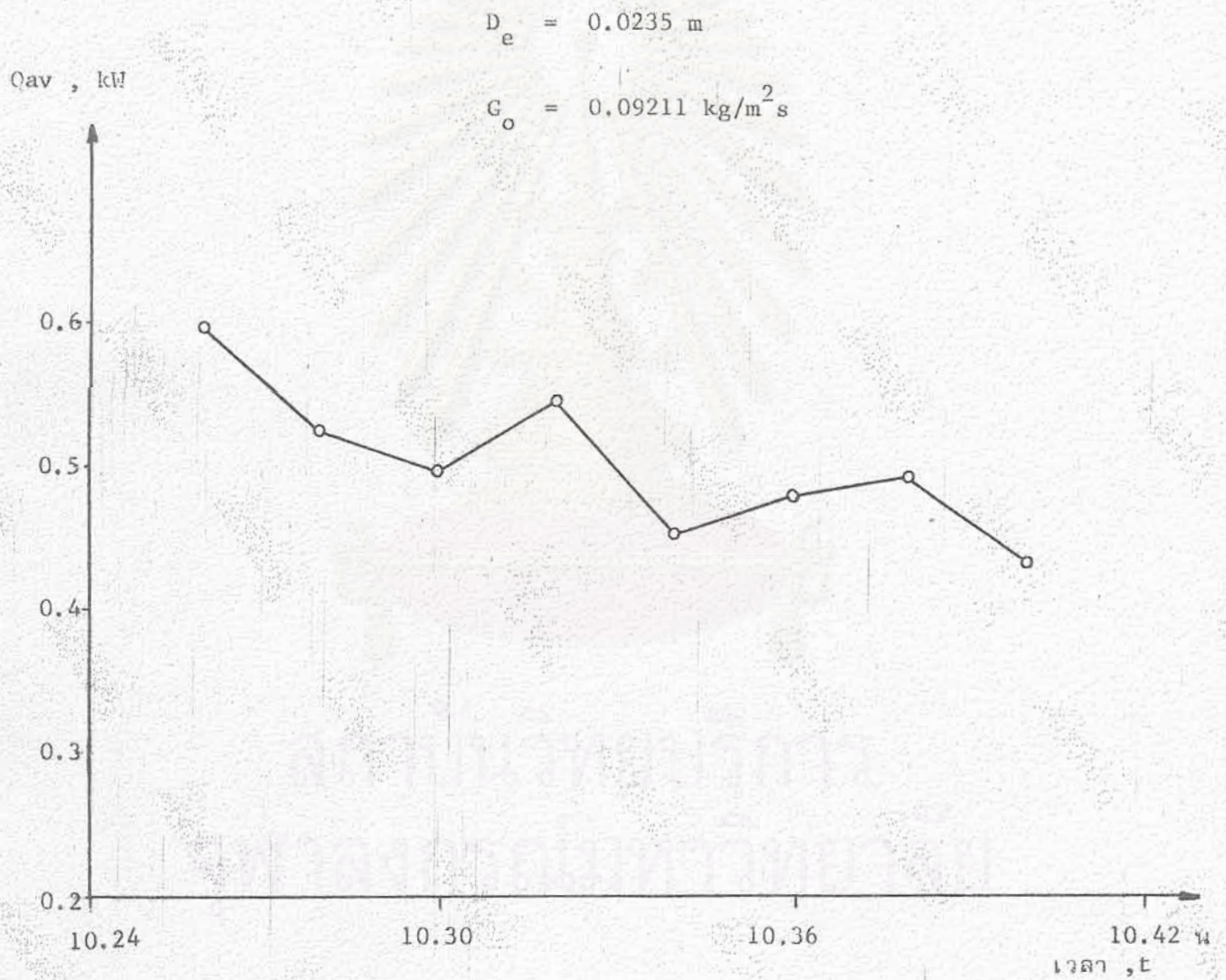


$T_r(x=0) = \times \times \times$
 $T_r(x=\Delta x) = \Delta \Delta \Delta$
 $T_a(x=0) = \circ \circ \circ$
 $T_a(x=\Delta x) = \square \square \square$



รูปที่ 5.2 อุณหภูมิภายในแต่ละลุ่มความร้อนที่เวลาและตำแหน่งต่างๆ

1087



รูปที่ 5.3 อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เวลาต่างๆ

ตารางที่ 5.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเชิงปริมาตรที่เวลาต่าง ๆ ในถังละลายความร้อนชนิดแอร์-รอกเบต ที่ขนาด $D_e = 0.0235 \text{ m}$ $G_o = 0.09211 \text{ kg/m}^2\text{s}$ และ $\Delta x = 0.0875 \text{ m}$

| เวลา | T_r | | T_a | | Q_a | Q_r | Q_{av} | h_v kW/m ³ K |
|-----------|-------|---------------|-------|---------------|-------|-------|----------|------------------------------|
| | x=0 | x= Δx | x=0 | x= Δx | | | | |
| 10.24 | 35.80 | 28.80 | 43.60 | 29.40 | - | - | - | - |
| 10.26 | 38.10 | 29.40 | 43.70 | 30.23 | 0.582 | 0.616 | 0.599 | 4.07 |
| 10.28 | 39.60 | 30.20 | 44.10 | 31.10 | 0.557 | 0.408 | 0.523 | 4.45 |
| 10.30 | 40.90 | 30.90 | 45.90 | 31.96 | 0.567 | 0.426 | 0.496 | 4.36 |
| 10.32 | 42.10 | 32.10 | 46.30 | 32.96 | 0.574 | 0.509 | 0.542 | 4.91 |
| 10.34 | 42.95 | 32.90 | 46.80 | 34.00 | 0.550 | 0.350 | 0.450 | 4.53 |
| 10.36 | 43.75 | 34.10 | 47.60 | 35.10 | 0.532 | 0.425 | 0.479 | 4.92 |
| 10.38 | 44.80 | 35.30 | 47.70 | 36.23 | 0.504 | 0.478 | 0.491 | 5.70 |
| 10.40 | 45.50 | 36.40 | 48.50 | 37.40 | 0.475 | 0.382 | 0.429 | 5.52 |
| ค่าเฉลี่ย | | | | | | | | 4.81 |

ตารางที่ 5.4 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเชิงปริมาตร (kW/m³K) ของก้อนหิน 3 ขนาด สำหรับถังละลายความร้อนชนิดแอร์-รอกเบต

| $G_o, \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}}$ | D_e, m | | |
|---|----------------------|----------------------|----------------------|
| | 0.0167 | 0.0235 | 0.0285 |
| 0.0921 | 5.2 _± 1.1 | 4.8 _± .6 | 4.7 _± .9 |
| 0.1064 | 5.2 _± .4 | 5.3 _± .7 | 4.5 _± .7 |
| 0.11877 | 6.4 _± .7 | 6.5 _± .8 | 5.1 _± 1 |
| 0.13023 | 6.4 _± .6 | 6.7 _± 1.0 | 5.4 _± 1.4 |
| 0.14081 | 6.4 _± .9 | 7.0 _± .8 | 5.1 _± .8 |
| 0.15051 | 6.5 _± .6 | 7.6 _± 1.3 | 5.5 _± .9 |
| 0.15954 | 7.0 _± .9 | 8.0 _± .9 | 5.5 _± .9 |
| 0.16813 | 7.1 _± 1.1 | 8.1 _± .7 | 5.9 _± .8 |

ก้อนหินขนาดใหญ่ที่สุดคือ 0.0381 m หนึ่งถ้า Δx มีค่าน้อย flow pattern ของอากาศก็จะเป็นไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นจึงได้เลือกใช้ $\Delta x = 0.0875$ m

5.3.3 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่อัตราการไหลต่างๆ ตารางที่ 5.4 และรูปที่ 5.4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่อัตราการไหลต่างๆ ของก้อนหินทั้ง 3 ขนาด จากรูปจะเห็นว่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีค่าสูงขึ้นเมื่อความเร็วสูงขึ้นซึ่งก็เป็นไปตามทฤษฎี เพราะเมื่ออัตราการไหลเร็วขึ้นก้อนหินก็จะสัมผัสกับอากาศร้อนได้เร็วขึ้นด้วย ก้อนหินขนาดเล็กจะมีค่า h_v สูงกว่าก้อนหินขนาดใหญ่ทั้งนี้เพราะก้อนหินขนาดเล็กมีจำนวนก้อนมากกว่าก้อนหินขนาดใหญ่ที่มีปริมาตรเบดเดียวกันจึงทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่า และผลอันนี้ก็สอดคล้องกับตัววิจัยอื่นเช่น Loef (4) ซึ่งได้สูตรเอมไพริคัลในรูป $h_v = 650 (G_o/D_e)^{0.7}$ ซึ่งจะให้ค่า h_v สูงเมื่อ D_e มีค่าน้อย

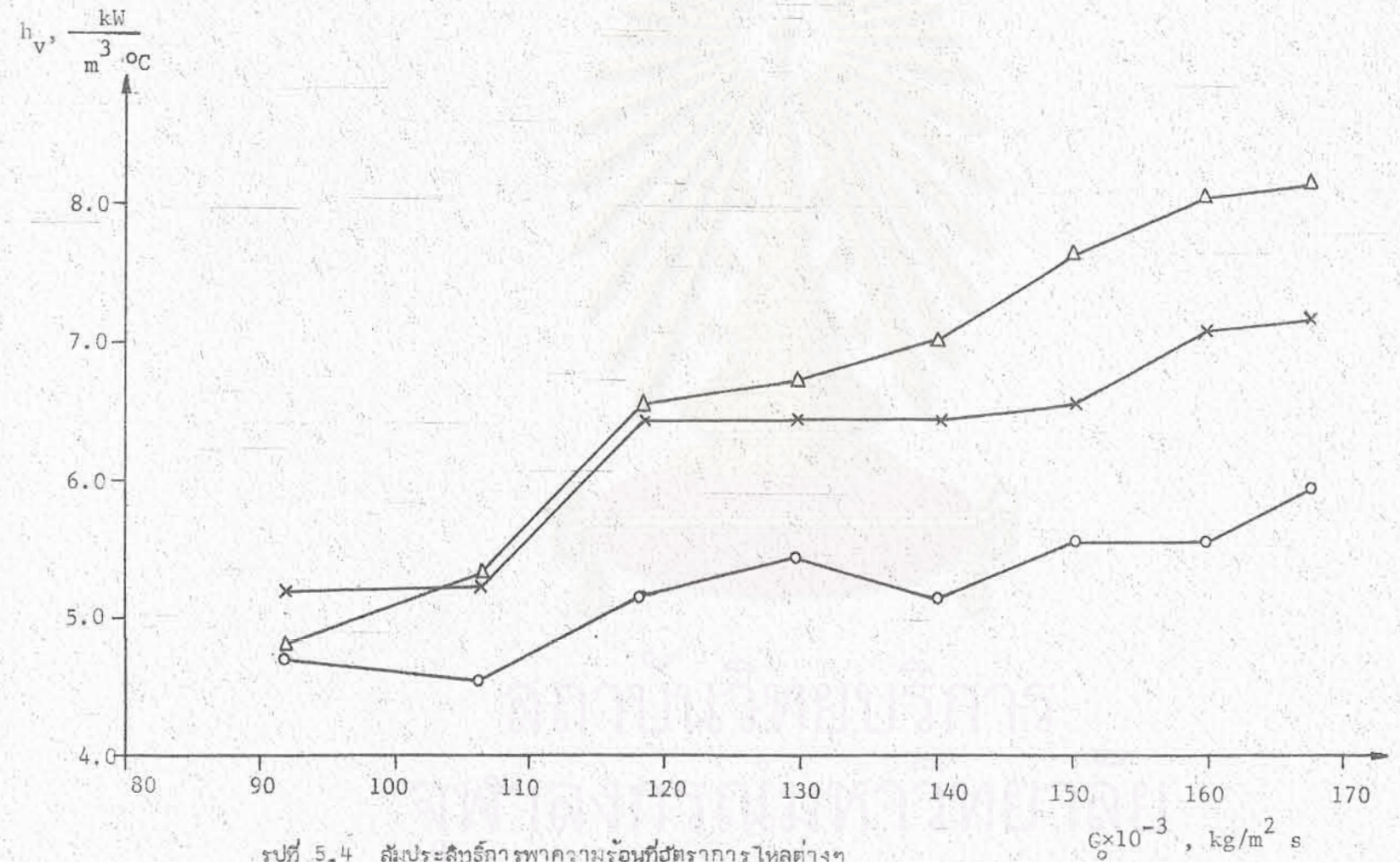
5.3.4 การหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h_v กลุ่มไร้มิติที่น่าจะมีบทบาทในการถ่ายเทความร้อนในรอกเบด คือ $Re = \frac{G D_e}{\mu}$, $Nu_m = \frac{h_v D_e}{k_a}$, $St_m = \frac{h_v D_e}{\rho V C}$ และ geometric ratios รูปที่ 5.5 และตารางที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ของ Nu_m กับ Re ของก้อนหิน 3 ขนาด ส่วนในรูปที่ 5.6 และตารางที่ 5.6 จะแสดงความสัมพันธ์ของ St_m กับ Re ของก้อนหินทั้ง 3 ขนาดเช่นกัน จากรูปที่ 5.5 จะได้ Nu_m มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ Re มีค่าสูงขึ้นโดยก้อนหินขนาดกลาง $D_e = 0.0235$ m และก้อนหินขนาดใหญ่ $D_e = 0.0285$ m มีแนวโน้มเหมือนกัน แต่แตกต่างจากก้อนหินขนาดเล็ก $D_e = 0.0167$ m จึงไม่สามารถแทนด้วยกราฟเดียวกันได้ ในรูปที่ 5.6 จะได้ St_m มีค่าลดลงเมื่อ Re มีค่าสูงขึ้น โดยก้อนหินขนาดกลางและขนาดใหญ่มีแนวโน้มสามารถแทนได้ด้วยเส้นโค้งเดียวกันแต่ต่างจากก้อนหินขนาดเล็ก ดังนั้นในการหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจึงได้รวมก้อนหินขนาดกลางและขนาดใหญ่เข้าด้วยกันจะได้สัมประสิทธิ์มี

สัมประสิทธิ์การพาความร้อนสำหรับก้อนหินขนาดกลางและขนาดใหญ่

$$\hat{Nu}_m = 4.79 Re^{0.66}, \quad r^2 = 0.85$$

$$\hat{St}_m = 6.85 Re^{-0.34}, \quad r^2 = 0.60$$

- ×× $D_e = 0.0167$ m
- △△ $D_e = 0.0235$ m
- $D_e = 0.0285$ m



รูปที่ 5.4 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่อัตราการไหลต่างๆ

ตารางที่ 5.5 การเปรียบเทียบค่าโมดไฟยไนล์ เซลล์นัมเบอร์คาดคะเนกับค่าโมดไฟยไนล์ เซลล์
นัมเบอร์จากการทดลอง

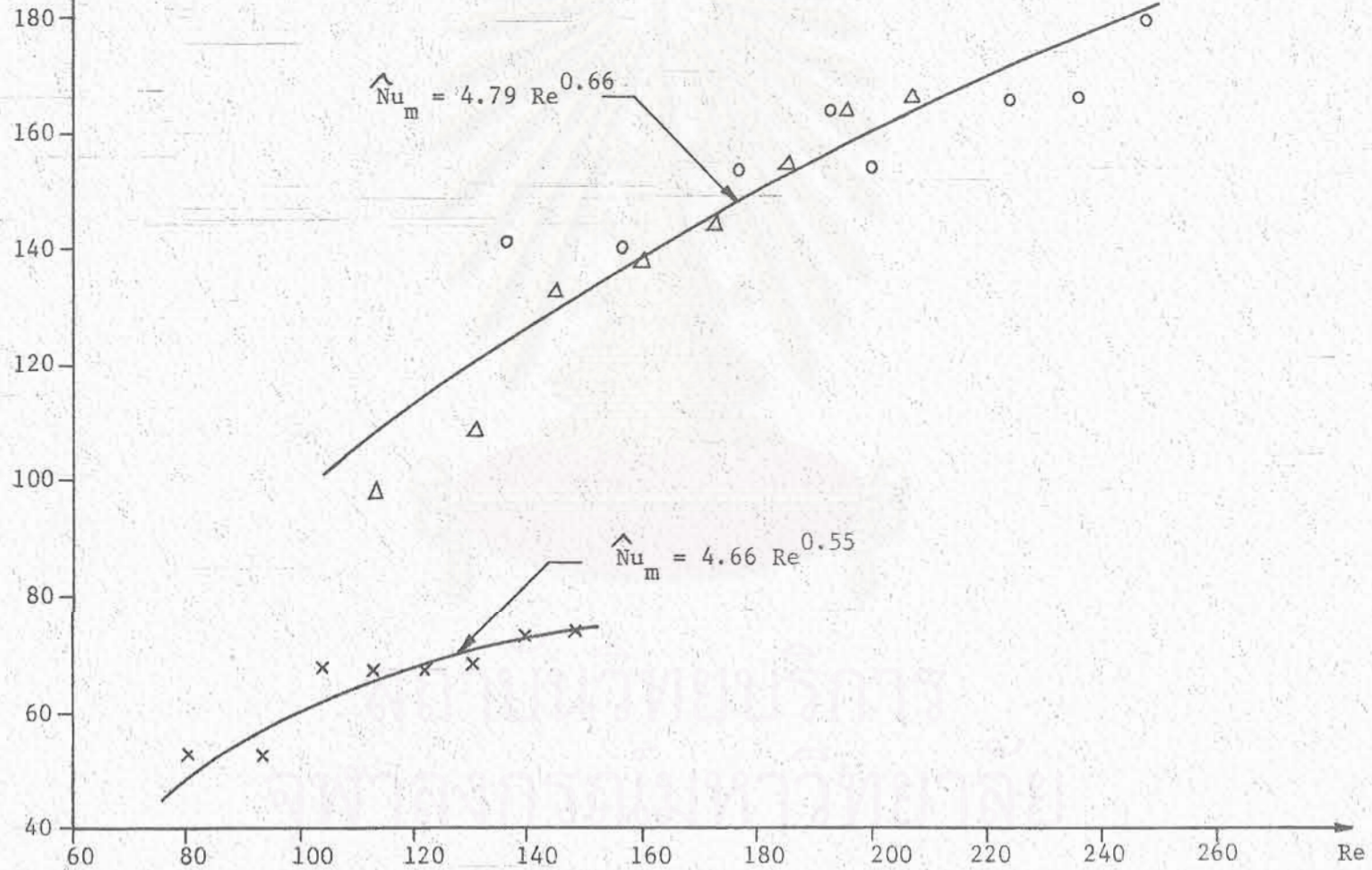
| D_e, m | Re | Nu_m | $\hat{N}u_m$ |
|----------|-----|--------|--------------|
| 0.0167 | 81 | 53.30 | 52.93 |
| | 94 | 53.30 | 57.47 |
| | 104 | 65.60 | 60.77 |
| | 114 | 65.60 | 63.94 |
| | 123 | 65.60 | 66.68 |
| | 132 | 66.63 | 69.34 |
| | 140 | 71.75 | 71.63 |
| | 148 | 72.78 | 73.87 |
| 0.0235 | 114 | 97.44 | 107.58 |
| | 132 | 107.60 | 118.45 |
| | 147 | 131.96 | 127.13 |
| | 161 | 136.02 | 134.96 |
| | 174 | 142.11 | 142.03 |
| | 186 | 154.29 | 148.39 |
| | 197 | 162.41 | 154.10 |
| | 208 | 164.44 | 159.70 |
| 0.0285 | 138 | 140.34 | 121.97 |
| | 159 | 134.37 | 133.86 |
| | 178 | 152.29 | 144.17 |
| | 195 | 161.24 | 153.07 |
| | 211 | 152.29 | 161.21 |
| | 226 | 164.23 | 168.65 |
| | 239 | 164.23 | 174.96 |
| | 252 | 176.17 | 181.16 |

ตารางที่ 5.6 การเปรียบเทียบค่าโมดูลัสและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากค่าโมดูลัสและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่คำนวณได้

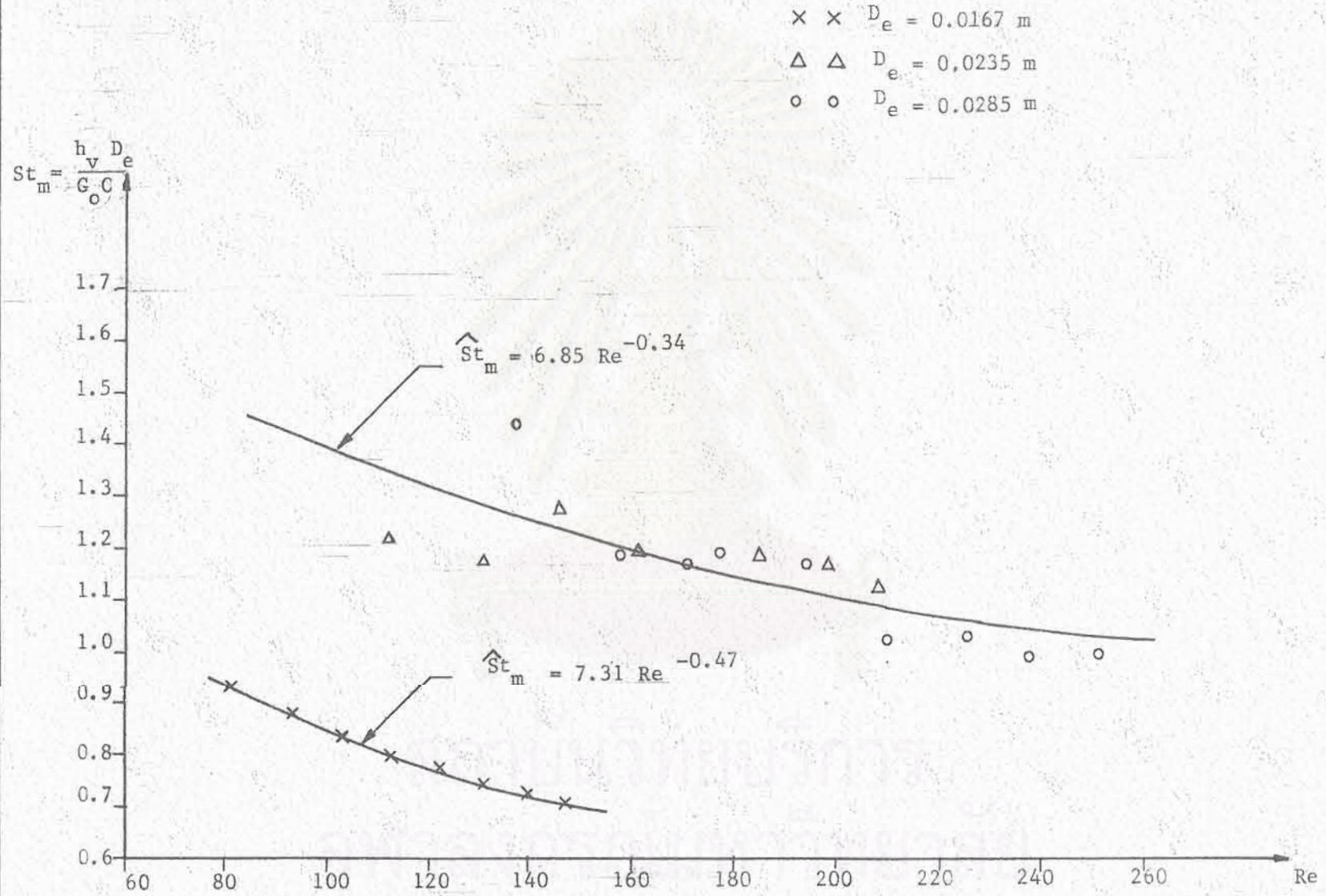
| D_e, m | Re | St_m | \hat{St}_m |
|----------|-----|--------|--------------|
| 0.0167 | 81 | 0.936 | 0.93 |
| | 94 | 0.810 | 0.87 |
| | 104 | 0.894 | 0.83 |
| | 114 | 0.815 | 0.79 |
| | 123 | 0.754 | 0.77 |
| | 132 | 0.716 | 0.74 |
| | 140 | 0.728 | 0.72 |
| | 148 | 0.700 | 0.70 |
| 0.0235 | 114 | 1.216 | 1.34 |
| | 132 | 1.162 | 1.28 |
| | 147 | 1.277 | 1.23 |
| | 161 | 1.200 | 1.19 |
| | 174 | 1.160 | 1.16 |
| | 186 | 1.178 | 1.14 |
| | 197 | 1.170 | 1.11 |
| | 208 | 1.124 | 1.09 |
| 0.0285 | 138 | 1.444 | 1.26 |
| | 159 | 1.197 | 1.20 |
| | 178 | 1.215 | 1.15 |
| | 195 | 1.174 | 1.12 |
| | 211 | 1.025 | 1.09 |
| | 226 | 1.034 | 1.06 |
| | 239 | 0.976 | 1.04 |
| | 252 | 0.993 | 1.02 |

$$Nu_m = \frac{h_v D_e^2}{k}$$

- × × $D_e = 0.0167$ m
- △ △ $D_e = 0.0235$ m
- ○ $D_e = 0.0285$ m



รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nu_m กับ Re ของก้อนหิน 3 ขนาด



รูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง St_m กับ Re ของก้อนหิน 3 ขนาด

สมการคาดคะเนสำหรับก้อนหินขนาดเล็ก

$$\hat{Nu}_m = 4.66 Re^{0.55}, \quad r^2 = 0.85$$

$$\hat{St}_m = 7.31 Re^{-0.47}, \quad r^2 = 0.84$$

ในการที่ต้องใช้ทั้งสองสมการในการหาค่า h_v ของก้อนหินทั้ง 3 ขนาดนั้นก็เนื่องจากยังขาดกลุ่มไร้มิติบางกลุ่มของ geometric ratios ที่จะใช้เป็นตัวแทนของรอกเบดเท่าที่ผู้วิจัยอื่นได้ใช้เช่น ความพรุนของเบด ϵ สำหรับการวิจัยนี้ไม่สามารถใช้ได้เนื่องจากก้อนหินทั้ง 3 ขนาดให้ค่า ϵ ที่ใกล้เคียงกันมากจึงไม่น่าจะเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญ ส่วนกลุ่มไร้มิติอีกตัวหนึ่งที่น่าจะมีความสำคัญคือ พื้นที่ผิวสัมผัส/พื้นที่หน้าตัดของเบดแต่ก็หาได้ยากในทางปฏิบัติจึงทำให้ค่าคงที่ในสมการคาดคะเนของแต่ละผู้วิจัยมีค่าแตกต่างกันไป

5.4 ความดันตกในเชิงเส้นสัมพันธ์ความร้อนชนิดแอร์-รอกเบด

จากการทดลองเมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้นจะได้ความดันตกในเบดเพิ่มขึ้น และจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อก้อนหินมีขนาดเล็กลงดังแสดงในตารางที่ 5.7

5.4.1 ความดันตกในรูปของฟริกชันแฟคเตอร์, f จากการทดลองจะได้ฟริกชันแฟคเตอร์ซึ่งเป็นกลุ่มไร้มิติของความดันตก $f = \frac{\Delta P D_e}{\rho_a v_b^2 L}$ มีความสัมพันธ์กับเรโนลด์นัมเบอร์ ดังแสดงในรูปที่ 5.7 จากรูปจะเห็นว่าเมื่อ Re มีค่าสูงขึ้น f จะมีค่าลดลงสำหรับก้อนหินขนาดกลางและขนาดใหญ่ ส่วนก้อนหินขนาดเล็กจะได้ f มีค่าคงที่ โดยไม่ขึ้นกับ Re และจะมีแนวโน้มเหมือนกับความดันตกของ ๆ โหลภายในท่อกลมดังแสดงใน Moody diagram รูปที่ 5.8 กล่าวคือเมื่อใช้ก้อนหินขนาดเล็กจะเปรียบเทียบกับท่อที่มีผิวขรุขระน้อย เมื่อใช้ก้อนหินที่มีขนาดโตขึ้นก็จะเปรียบเทียบกับท่อที่มีผิวขรุขระมากขึ้น ผิวที่ขรุขระมากก็จะมีค่า f มากขึ้นด้วย ค่า f ที่ได้จากการทดลองสามารถคาดคะเนได้โดยสมการ

สำหรับ $D_e/D_b = 0.038$, $\hat{f} = 160+23800/Re$; $r^2 = 0.91$

สำหรับ $D_e/D_b = 0.031$, $\hat{f} = 110+23100/Re$; $r^2 = 0.99$

สำหรับ $D_e/D_b = 0.022$, $\hat{f} = 124$

$$f = \frac{\Delta P D_e}{\rho_a V_a^2 L}$$

200

175

150

125

100

50

100

150

200

250

Re

× × $D_e = 0.0167$ m

△ △ $D_e = 0.0235$ m

○ ○ $D_e = 0.0285$ m

$\frac{D_e}{D_b} = 0.022, \hat{f} = 124$

$\frac{D_e}{D_b} = 0.038, \hat{f} = 160 + \frac{23800}{Re}$

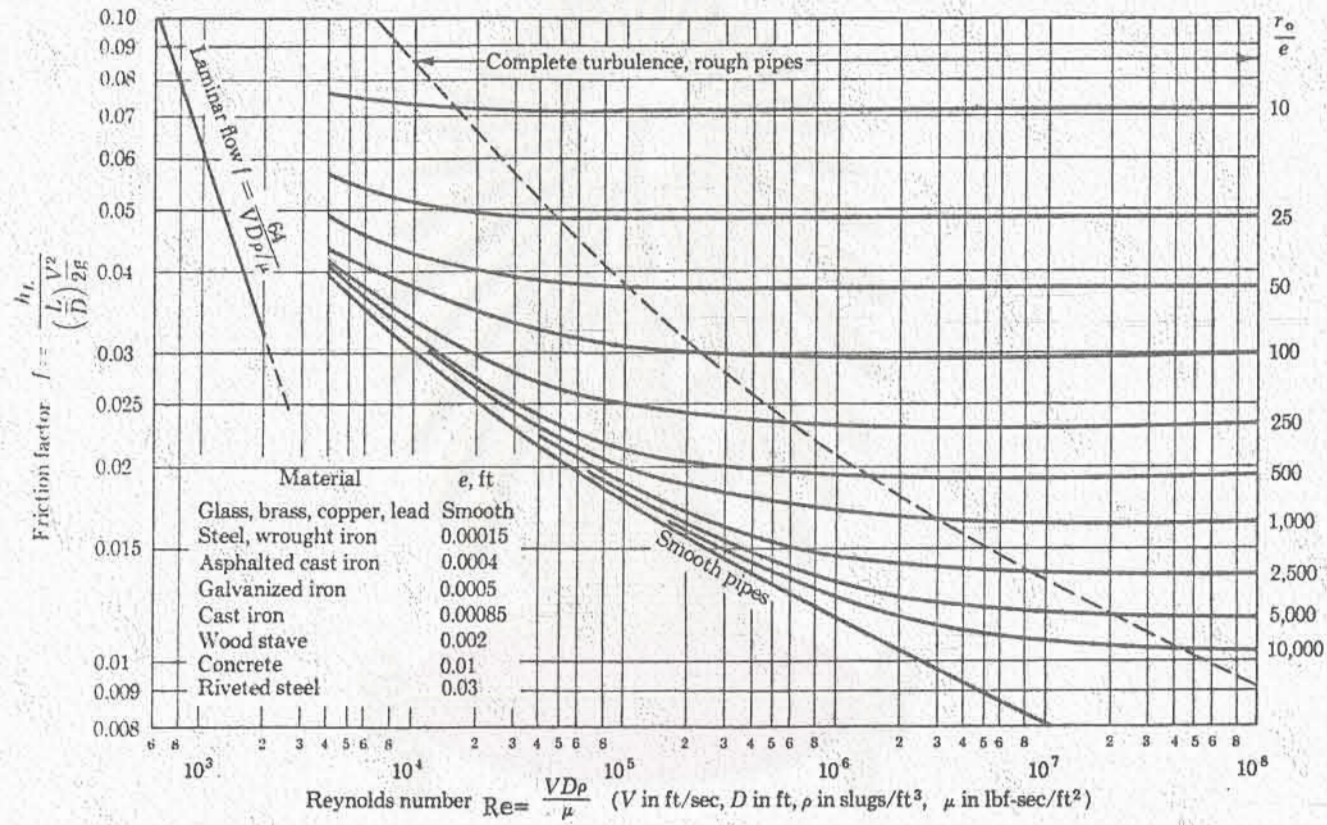
$\frac{D_e}{D_b} = 0.031, \hat{f} = 110 + \frac{23100}{Re}$

รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง f, \hat{f} กับ Re



ตารางที่ 5.7 การเปรียบเทียบค่าฟรictionแฟคเตอร์ค่าดเคเนกับฟรictionแฟคเตอร์จากการทดลอง

| D_e, m | $G_o, \frac{kg}{m^2 s}$ | $\Delta P, in H_2O$ | $\Delta P, \frac{N}{m^2}$ | Re | f | \hat{f} | $Re^2 f \times 10^{-6}$ | $Re^2 \hat{f} \times 10^{-6}$ |
|----------|-------------------------|---------------------|---------------------------|-----|-----|-----------|-------------------------|-------------------------------|
| 0.0285 | 0.092 | 0.03 | 7.5 | 138 | 162 | 165 | 3.09 | 2.51 |
| | 0.106 | 0.04 | 10.0 | 159 | 163 | 150 | 4.12 | 3.29 |
| | 0.119 | 0.045 | 11.2 | 178 | 145 | 146 | 4.65 | 4.14 |
| | 0.130 | 0.05 | 12.5 | 195 | 135 | 140 | 5.13 | 4.89 |
| | 0.141 | 0.06 | 14.9 | 211 | 138 | 135 | 6.20 | 5.75 |
| | 0.151 | 0.065 | 16.2 | 226 | 130 | 132 | 6.70 | 6.56 |
| | 0.160 | 0.070 | 17.4 | 239 | 125 | 129 | 7.20 | 7.31 |
| | 0.168 | 0.08 | 19.9 | 252 | 130 | 126 | 8.26 | 8.05 |
| 0.0235 | 0.092 | 0.035 | 8.7 | 114 | 156 | 156 | 2.03 | 1.74 |
| | 0.106 | 0.043 | 10.7 | 132 | 144 | 142 | 2.47 | 2.27 |
| | 0.119 | 0.05 | 12.5 | 147 | 133 | 133 | 2.87 | 2.83 |
| | 0.130 | 0.056 | 13.9 | 161 | 125 | 126 | 3.24 | 3.37 |
| | 0.141 | 0.063 | 15.7 | 174 | 119 | 121 | 3.60 | 3.92 |
| | 0.151 | 0.070 | 17.4 | 186 | 116 | 117 | 4.06 | 4.51 |
| | 0.160 | 0.075 | 18.7 | 197 | 110 | 113 | 4.31 | 5.03 |
| | 0.168 | 0.085 | 21.2 | 208 | 114 | 110 | 4.93 | 5.54 |
| 0.0167 | 0.092 | 0.040 | 10.0 | 81 | 127 | 124 | 0.83 | 0.92 |
| | 0.106 | 0.05 | 12.5 | 94 | 119 | 124 | 1.03 | 1.10 |
| | 0.119 | 0.065 | 16.2 | 104 | 123 | 124 | 1.36 | 1.49 |
| | 0.130 | 0.075 | 18.7 | 114 | 119 | 124 | 1.55 | 1.74 |
| | 0.141 | 0.09 | 22.4 | 123 | 121 | 124 | 1.86 | 2.05 |
| | 0.151 | 0.105 | 26.2 | 132 | 123 | 124 | 2.18 | 2.34 |
| | 0.160 | 0.12 | 29.9 | 140 | 126 | 124 | 2.51 | 2.62 |
| | 0.168 | 0.13 | 32.4 | 148 | 123 | 124 | 2.69 | 2.87 |



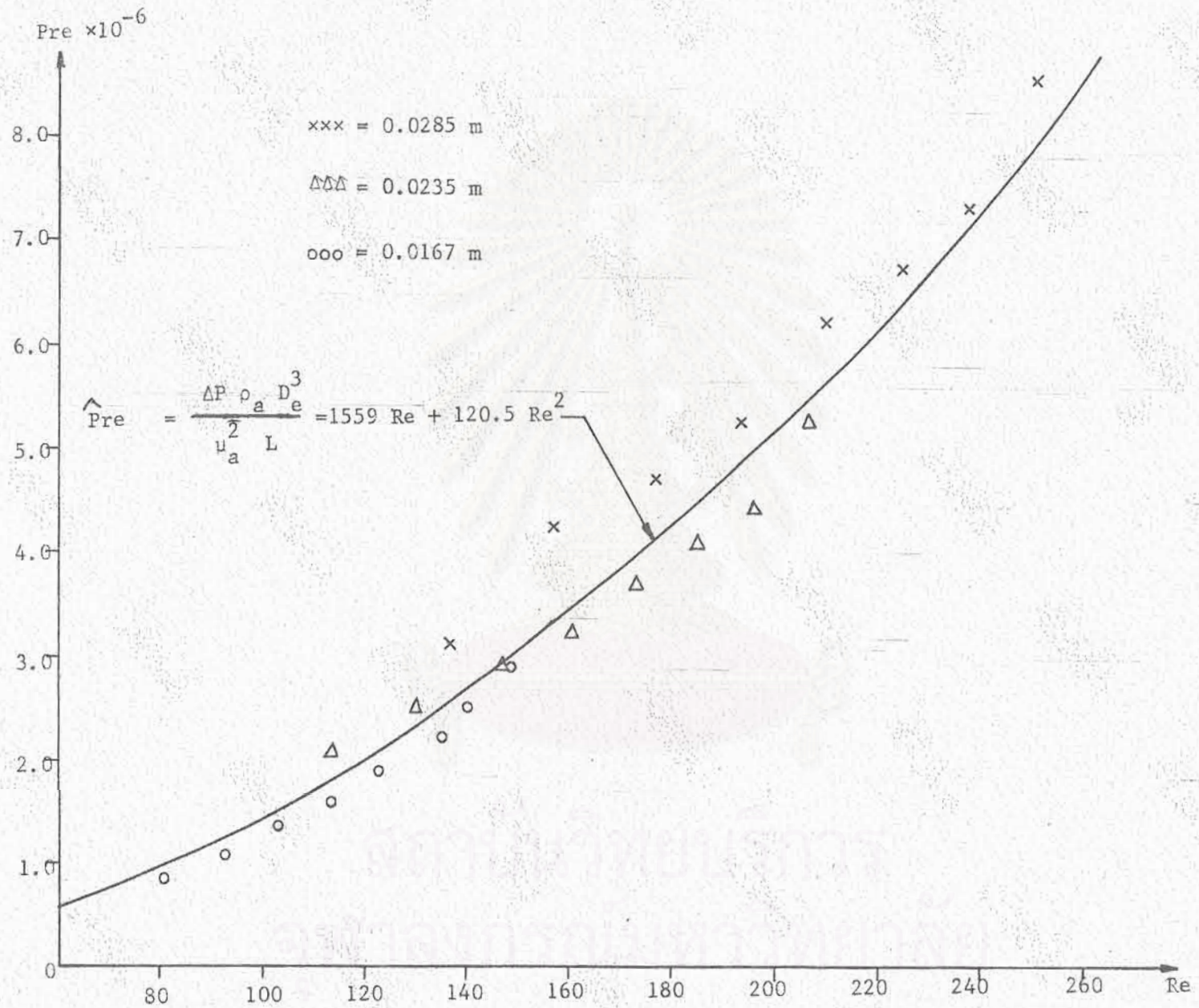
รูปที่ 5.8 มุมติโดอะแกรมสำหรับหาฟริคชันแฟคเตอร์ในท่อ

เมื่อเปรียบเทียบกับผลงานวิจัยของ Dunkle และ Ellul (5) จะเห็นว่าค่าคงที่มีค่าไม่เท่ากันทั้งนี้เป็นเพราะกอนหินที่ใช้มีรูปร่างลักษณะต่างกันถึงแม้ว่าจะมี D_e เท่ากันก็ตาม กอนหินที่ใช้ในการทดลองนี้มีลักษณะค่อนข้างแหลมจึงทำให้ flow pattern แตกต่างกันไป

5.4.2 ความดันลดในรูปของเพรส์เฮอรั่มเบอร์ , Pre เมื่อจัดกลุ่มไรมิติของความดันลดใหม่ให้อยู่ในรูปเพรส์เฮอรั่มเบอร์ตามผลงานวิจัยของ P. Chandra และ D.H. Willits (10) จะได้ความสัมพันธ์ของเพรส์เฮอรั่มเบอร์กับเรโนลด์นัมเบอร์ ดังแสดงในรูปที่ 5.9 ตามรูปจะได้ Pre มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ Re มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อหาสมการคาดคะเนของกอนหินทั้ง 3 ขนาดจะได้

$$\overline{Pre} = \frac{\Delta P \rho_a D_e^3}{\mu_a^2 L} = 1559 Re + 120.5 Re^2$$

เมื่อเปรียบเทียบกับผลงานวิจัยของ P. Chandra และ D.H. Willits จะได้ความสัมพันธ์ลักษณะคล้ายกัน



รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Pre กับ Re ของก้อนหิน 3 ขนาด

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

ในการวิจัยนี้ได้ทำการทดลองหาคoefficient ทางกายภาพของก้อนหิน สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและความต้านลดยของเบต

6.1.1 coeffient ทางกายภาพของก้อนหิน ได้แก่

1. ขนาดของก้อนหิน แบ่งตามขนาดของตะแกรงออกเป็น 3 ขนาด คือ (ก) ขนาดเล็ก 1/2"-3/4" (ข) ขนาดกลาง 3/4"-1" และ (ค) ขนาดใหญ่ 1"-1 1/2" หรือแบ่งตามเส้นผ่าศูนย์กลางเทียบเท่าทรงกลมของก้อนหิน $D_e = 0.0167, 0.0235$ และ 0.0285 เมตร ตามลำดับ

2. ความร้อนจำเพาะ $C_{p_x} = 0.87 \text{ kJ/kg}^\circ\text{K}$

3. ความหนาแน่น $\rho_r = 2722 \text{ kg/m}^3$

4. ความพรุน $\epsilon = 0.46$

5. สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเชิงผิว

$$h_a = 0.027 \text{ kW/m}^2\text{C} \text{ ที่ความเร็ว } 1.2 \text{ m/s}$$

$$= 0.031 \text{ kW/m}^2\text{C} \text{ ที่ความเร็ว } 1.7 \text{ m/s}$$

6. ค่าเวลาดังที่ $\tau = 4-6$ นาที

6.1.2 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของแอร์-รอดเบตในรูปกลุ่มไรต์

สำหรับก้อนหินขนาดกลางและขนาดใหญ่

$$\hat{Nu}_m = 4.79 Re^{0.66}$$

$$80 < Re < 260$$

$$\hat{St}_m = 6.85 Re^{-0.34}$$

สำหรับก้อนหินขนาดเล็ก

$$\hat{Nu}_m = 4.66 Re^{0.55}$$

$$80 < Re < 260$$

$$\hat{St}_m = 7.31 Re^{-0.47}$$

6.1.3 ความต้านลวดของเบดเมื่อใช้ก้อนหินทั้ง 3 ขนาด

$$\hat{Pre} = 1559 Re + 120.5 Re^2, \quad 80 < Re < 260$$

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรใช้เครื่องบันทึกอุณหภูมิแบบอัตโนมัติหลายจุดเพื่อลดเวลา Δt ให้น้อยลง
2. สำหรับก้อนหินที่มีรูปร่างลักษณะอื่นควรทำการทดลองหาค่า h_v ใหม่

เอกสารอ้างอิง

1. Lof, G.O.G, M.M.El-Wakil, and J.P. Chiou, Transactions of the ASHRAE, 77 (October 1963). "Residential Heating with Solar Heated Air-the Colorado Solar House."
2. Close, D.J., R.V. Dunkle, and K.A. Robeson, Mechanical and Chemical Engineering Transactions Inst. Engrs., Australia, MC4, 45 (1968) "Design and Performance of a Thermal Storage Air Conditioner System."
3. William W.S. Charters and Trevor L Pryor, Solar Energy : Theory and Design of Solar Thermal Systems., 1982, Australian Syndicators Pty. Ltd.
4. G.O.G. Lof and R.W. Hawley, Unsteady-State Heat Transfer between Air and Loose Solids. Indust. Engng. Chem. 40(6), 1061-101070(1948)
5. R.V. Dunkle and W.M.J. Ellul, "Randomly-Packed Particulate Bed Regenerators and Evaporative Coolers," Mech, and Chem, Engr, Transactions, November, 1972
6. F. Yoshida, D. Ramaswami, and O.A. Hongen : AIChE Journal. V8, 1962, pp 5-11
7. B.T. Kulakowski and F.W. Schmidt, "Design of a Packed-Bed Thermal Storage Unit for a Solar System," Journal of Solar Energy Engineering, August 1982, Vol.104/223
8. F.W. Schmidt and J.A. Willmott, Thermal Energy Storage and Regeneration, Hemis phere Publishing Corporation, Washington, D.C., 1980

9. P. Chandra, L.D. Albright and G.E. Wilson, Pressure Drop of Unidirectional Air Flow through Rockbeds. Trans. ASAE. in Press (1981)
10. P. Chandra and D.H. Willits, Pressure Drop and Heat Transfer Characteristics of Air-Rockbed Thermal Storage Systems. Solar Energy Vol. 27, No.6 pp 547-553, 1981
11. W.H. Denton, The Heat Transfer and Flow Resistance for Fluid Flow through randomly Packed Spheres. In General Discussion on Heat Transfer. Instit. Mech. Engrs and ASME, London, 370-373 (1951)
12. N. Trinestsampan, "Thermal Rockbed Storage Performance". M.S. Thesis., Asian Institute of Technology., Bangkok, 1981.
13. Bahadori, M.N., and Sayigh, A.A.M., Solar Thermal Energy Storage System, 1979), Solar Energy Application in Building edited by A.A.M. Sayigh, Academic Press, pp.81-104
14. V.S. Arpaci, Conduction Heat Transfer, Addison-Wesley publishing Co.
15. Richard H.F. Pao, Fluid Dynamics, Merrill Books, Inc., Columbus, Ohio, 1967.
16. Duffie, J.A., and Bechman, W.A. (1980), Solar Engineering of Thermal Processes. 2nd Edition, John Wiley & Son Co.Ltd.

ภาคผนวก ก

ข้อมูลการทดลองสำหรับหาค่า h_v

ตารางที่ ผ.1. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ในถังสะสมความร้อนชนิดแอร์-ร็อคเบต ความเร็วอากาศ 0.015 นิ้วน้ำ
ขนาดหิน 3/4" - 1"

| Time | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | T ₅ | T ₆ | T ₇ | T ₉ | T ₁₀ | T ₁₁ | T ₁₂ |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 10.20 | 28.2 | 28.2 | 28.0 | 27.8 | 28.2 | 28.0 | 28.0 | 28.2 | 28.2 | 28.6 | 28.4 |
| 10.22 | 28.2 | 28.2 | 28.0 | 27.8 | 29.8 | 28.2 | 28.8 | 28.6 | 33.6 | 41.1 | 33.4 |
| 10.24 | 28.2 | 28.2 | 28.2 | 28.0 | 29.6 | 28.8 | 29.4 | 29.2 | 36.0 | 43.6 | 35.6 |
| 10.26 | 28.5 | 28.3 | 28.2 | 28.0 | 30.6 | 29.4 | 30.2 | 29.9 | 38.2 | 43.7 | 38.0 |
| 10.28 | 28.6 | 28.6 | 28.6 | 28.2 | 31.5 | 30.2 | 31.0 | 30.8 | 39.7 | 44.1 | 39.5 |
| 10.30 | 29.0 | 28.8 | 28.8 | 28.6 | 32.5 | 30.9 | 31.8 | 31.6 | 41.0 | 45.9 | 40.8 |
| 10.32 | 29.5 | 29.1 | 29.2 | 28.7 | 33.7 | 32.1 | 32.6 | 32.6 | 42.0 | 46.3 | 42.2 |
| 10.34 | 30.0 | 29.6 | 29.6 | 29.1 | 34.8 | 32.9 | 33.6 | 33.6 | 42.8 | 46.8 | 43.1 |
| 10.36 | 30.4 | 30.0 | 30.0 | 29.6 | 36.0 | 34.1 | 34.6 | 34.7 | 43.6 | 47.6 | 43.9 |
| 10.38 | 31.1 | 30.7 | 30.7 | 30.1 | 37.2 | 35.3 | 35.6 | 35.9 | 44.6 | 47.7 | 45.0 |
| 10.40 | 31.7 | 31.4 | 31.3 | 30.8 | 38.4 | 36.4 | 36.7 | 37.1 | 45.3 | 48.5 | 45.7 |
| 12.30 | 52.4 | 54.5 | 52.9 | 53.8 | 56.0 | 55.7 | 55.3 | 55.7 | 55.3 | 56.6 | 55.8 |

ตารางที่ ผ.2. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ในถังสะสมความร้อนชนิดแอร์-รอกเบด ความเร็วอากาศ 0.02 นิ้วน้ำ
ขนาดกอนหิน 3/4"-1"

| Time | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | T ₅ | T ₆ | T ₇ | T ₉ | T ₁₀ | T ₁₁ | T ₁₂ |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 14.30 | 34.7 | 35.2 | 34.7 | 35.1 | 35.8 | 35.6 | 35.6 | 35.7 | 35.8 | 37.4 | 35.9 |
| 14.32 | 35.2 | 35.3 | 35.2 | 35.2 | 36.3 | 35.8 | 36.1 | 36.0 | 39.6 | 46.2 | 39.6 |
| 14.34 | 35.3 | 35.4 | 35.3 | 35.3 | 36.8 | 36.1 | 36.6 | 36.4 | 41.7 | 47.6 | 41.7 |
| 14.36 | 35.5 | 35.5 | 35.5 | 35.4 | 37.5 | 36.6 | 37.2 | 37.0 | 43.4 | 48.2 | 43.3 |
| 14.38 | 35.8 | 35.7 | 35.7 | 35.7 | 38.3 | 37.2 | 38.0 | 37.7 | 45.0 | 49.6 | 44.8 |
| 14.40 | 36.1 | 36.0 | 36.0 | 35.9 | 39.3 | 38.0 | 38.6 | 38.4 | 46.0 | 49.2 | 46.0 |
| 14.42 | 36.6 | 36.4 | 36.4 | 36.3 | 40.2 | 38.8 | 39.4 | 39.2 | 46.9 | 50.6 | 47.0 |
| 14.44 | 36.9 | 36.8 | 36.8 | 36.6 | 41.2 | 39.6 | 40.2 | 40.2 | 47.8 | 50.6 | 47.8 |
| 14.46 | 37.4 | 37.2 | 37.2 | 37.0 | 42.2 | 40.6 | 41.0 | 41.0 | 48.4 | 51.4 | 48.6 |
| 14.48 | 37.8 | 37.8 | 37.8 | 37.4 | 43.1 | 41.5 | 41.8 | 41.9 | 48.1 | 51.6 | 49.3 |
| 14.50 | 38.5 | 38.3 | 38.2 | 38.0 | 44.1 | 42.5 | 42.6 | 42.8 | 49.6 | 52.0 | 49.8 |
| 15.50 | 51.8 | 53.3 | 51.9 | 52.5 | 56.0 | 55.5 | 55.2 | 55.5 | 56.0 | 57.1 | 56.6 |

ตารางที่ ผ.3. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ในถังละลายความร้อนชนิดแอร์-รอกเบต ความเร็วอากาศ 0.025 นิ้วน้ำ

ขนาดกอนหิน 3/4"-1"

| Time | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | T ₅ | T ₆ | T ₇ | T ₉ | T ₁₀ | T ₁₁ | T ₁₂ |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 10.20 | 31.4 | 31.4 | 31.3 | 31.4 | 31.0 | 31.0 | 31.2 | 31.1 | 31.3 | 33.5 | 31.2 |
| 10.22 | 31.4 | 31.4 | 31.4 | 31.3 | 32.1 | 31.4 | 32.3 | 32.0 | 38.1 | 46.0 | 37.8 |
| 10.24 | 31.7 | 31.5 | 31.5 | 31.3 | 33.4 | 32.3 | 33.4 | 33.0 | 41.0 | 46.8 | 40.8 |
| 10.26 | 32.1 | 31.8 | 31.8 | 31.6 | 34.7 | 33.2 | 34.6 | 34.1 | 43.0 | 47.7 | 42.7 |
| 10.28 | 32.6 | 32.2 | 32.3 | 32.0 | 36.1 | 34.6 | 35.7 | 35.6 | 44.5 | 49.5 | 44.6 |
| 10.30 | 33.2 | 32.7 | 32.9 | 32.4 | 37.8 | 36.0 | 37.0 | 36.8 | 46.2 | 50.0 | 46.2 |
| 10.32 | 33.8 | 33.3 | 33.6 | 33.0 | 39.2 | 37.4 | 38.2 | 38.1 | 47.2 | 50.2 | 47.5 |
| 10.34 | 34.6 | 34.2 | 34.4 | 33.7 | 40.7 | 38.9 | 39.5 | 39.7 | 48.0 | 50.5 | 48.2 |
| 10.36 | 35.6 | 35.1 | 35.2 | 34.5 | 42.1 | 40.1 | 40.6 | 41.1 | 48.5 | 51.3 | 49.0 |
| 10.38 | 36.7 | 36.1 | 36.2 | 35.3 | 43.5 | 41.6 | 41.9 | 42.5 | 49.2 | 51.6 | 49.7 |
| 10.40 | 37.5 | 37.1 | 37.0 | 36.4 | 44.5 | 42.9 | 43.0 | 43.6 | 49.7 | 52.1 | 50.2 |
| 11.35 | 53.1 | 54.4 | 53.1 | 53.8 | 56.2 | 56.1 | 55.7 | 56.1 | 56.3 | 57.0 | 56.7 |

ตารางที่ ผ.4. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ในถังสะสมความร้อนชนิดแอร-รอกเบด ความเร็วอากาศ 0.03 นิ้วน้ำ
ขนาดกอน 3/4"-1"

| Time | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | T ₅ | T ₆ | T ₇ | T ₉ | T ₁₀ | T ₁₁ | T ₁₂ |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 13.34 | 35.2 | 35.2 | 35.2 | 35.2 | 35.2 | 35.2 | 35.5 | 35.3 | 35.3 | 35.4 | 35.2 |
| 13.36 | 35.3 | 35.3 | 35.3 | 35.3 | 35.7 | 35.4 | 36.3 | 36.0 | 41.0 | 50.2 | 40.4 |
| 13.38 | 35.6 | 35.5 | 35.4 | 35.3 | 36.9 | 36.0 | 37.0 | 36.6 | 44.0 | 50.4 | 43.6 |
| 13.40 | 35.9 | 35.6 | 35.7 | 35.6 | 38.1 | 36.8 | 37.9 | 37.5 | 45.8 | 50.6 | 45.6 |
| 13.42 | 36.1 | 35.8 | 36.2 | 35.9 | 39.6 | 38.2 | 39.1 | 39.6 | 47.6 | 51.4 | 47.4 |
| 13.44 | 36.9 | 36.5 | 36.6 | 36.3 | 40.6 | 39.1 | 40.1 | 40.0 | 48.4 | 51.8 | 48.4 |
| 13.46 | 37.7 | 37.1 | 37.3 | 36.8 | 42.2 | 40.6 | 41.2 | 41.2 | 49.5 | 52.6 | 49.6 |
| 13.48 | 38.2 | 37.8 | 37.8 | 37.4 | 43.2 | 41.7 | 42.4 | 42.4 | 50.3 | 53.0 | 50.4 |
| 13.50 | 39.1 | 38.6 | 38.7 | 38.1 | 44.7 | 42.9 | 43.6 | 43.8 | 51.2 | 53.6 | 51.2 |
| 13.52 | 40.0 | 39.4 | 39.5 | 38.8 | 45.9 | 44.2 | 44.7 | 45.0 | 51.6 | 53.8 | 51.8 |
| 13.54 | 40.7 | 40.2 | 40.2 | 39.8 | 47.0 | 45.6 | 45.7 | 46.8 | 52.0 | 53.8 | 52.4 |
| 14.35 | 52.6 | 53.8 | 52.4 | 53.1 | 56.0 | 55.8 | 54.8 | 55.8 | 54.8 | 56.7 | 56.4 |

ตารางที่ ผ.5. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ในถังสะสมความร้อนชนิดแอร์-รอกเบต ความเร็วอากาศ 0.035 นิ้วน้ำ
ขนาดกอนหิน 3/4"-1"

| Time | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | T ₅ | T ₆ | T ₇ | T ₉ | T ₁₀ | T ₁₁ | T ₁₂ |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 11.06 | 33.2 | 33.2 | 32.8 | 32.9 | 32.2 | 32.3 | 32.6 | 32.6 | 32.1 | 32.6 | 32.1 |
| 11.08 | 33.2 | 33.2 | 32.8 | 32.8 | 32.8 | 32.4 | 33.2 | 32.8 | 37.2 | 46.4 | 36.8 |
| 11.10 | 33.2 | 33.2 | 32.8 | 32.8 | 34.0 | 33.2 | 34.1 | 33.7 | 40.5 | 47.1 | 40.2 |
| 11.12 | 33.4 | 33.2 | 33.2 | 33.0 | 35.4 | 34.1 | 35.2 | 35.0 | 42.9 | 48.6 | 42.8 |
| 11.14 | 33.8 | 33.5 | 33.6 | 33.2 | 37.1 | 35.4 | 36.6 | 36.4 | 45.0 | 49.7 | 44.9 |
| 11.16 | 34.6 | 34.0 | 34.3 | 33.6 | 38.5 | 37.0 | 38.0 | 37.9 | 46.6 | 50.5 | 46.6 |
| 11.18 | 35.3 | 34.7 | 35.0 | 34.3 | 40.3 | 38.4 | 39.1 | 39.5 | 47.7 | 50.8 | 47.9 |
| 11.20 | 36.3 | 35.6 | 36.0 | 35.2 | 41.9 | 40.0 | 40.8 | 41.2 | 48.8 | 52.1 | 49.1 |
| 11.22 | 37.2 | 36.6 | 36.8 | 35.9 | 43.5 | 41.5 | 42.1 | 42.6 | 49.8 | 52.5 | 50.2 |
| 11.24 | 38.3 | 37.8 | 38.0 | 37.0 | 45.0 | 43.0 | 43.4 | 44.0 | 50.3 | 52.8 | 50.7 |
| 11.26 | 39.4 | 38.8 | 39.0 | 38.2 | 46.2 | 44.4 | 44.6 | 45.4 | 51.0 | 53.2 | 51.5 |
| 12.15 | 53.8 | 55.1 | 53.9 | 54.4 | 56.6 | 56.5 | 56.2 | 56.6 | 56.3 | 56.8 | 56.6 |

ตารางที่ ผ.6. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ในถังสะสมความร้อนชนิดแอร์-รอกเบต ความเร็วอากาศ 0.04 นิ้วน้ำ

ขนาดกอนหิน 3/4"-1"

| Time | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | T ₅ | T ₆ | T ₇ | T ₉ | T ₁₀ | T ₁₁ | T ₁₂ |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 13.40 | 34.6 | 34.4 | 34.2 | 34.2 | 35.0 | 35.0 | 34.9 | 34.8 | 35.8 | 37.0 | 35.6 |
| 13.42 | 35.0 | 34.6 | 34.8 | 34.6 | 36.2 | 35.4 | 36.5 | 36.1 | 41.6 | 49.2 | 41.2 |
| 13.44 | 35.4 | 35.0 | 35.2 | 34.9 | 37.8 | 36.6 | 38.0 | 37.5 | 45.2 | 51.0 | 44.8 |
| 13.46 | 35.8 | 35.3 | 35.8 | 35.2 | 39.0 | 37.7 | 38.8 | 38.5 | 46.8 | 51.8 | 46.8 |
| 13.48 | 36.6 | 36.0 | 36.4 | 35.8 | 40.8 | 38.8 | 40.0 | 40.0 | 48.6 | 52.7 | 48.4 |
| 13.50 | 37.5 | 36.8 | 37.2 | 36.6 | 42.5 | 40.6 | 41.4 | 41.6 | 50.0 | 53.6 | 50.1 |
| 13.52 | 38.5 | 37.8 | 38.2 | 37.4 | 44.2 | 42.2 | 43.0 | 43.3 | 51.2 | 54.6 | 51.4 |
| 13.54 | 39.6 | 38.9 | 39.4 | 38.5 | 45.9 | 43.8 | 44.5 | 45.0 | 52.2 | 55.0 | 52.7 |
| 13.56 | 40.8 | 40.2 | 40.6 | 39.6 | 47.4 | 45.5 | 46.0 | 46.6 | 53.2 | 55.4 | 53.4 |
| 13.58 | 42.0 | 41.4 | 41.6 | 40.7 | 48.7 | 47.0 | 47.6 | 47.9 | 53.8 | 55.4 | 54.0 |
| 14.00 | 43.4 | 42.8 | 43.0 | 42.2 | 50.1 | 48.5 | 48.6 | 49.4 | 53.7 | 55.6 | 54.0 |
| 14.30 | 54.2 | 55.4 | 54.4 | 54.6 | 57.8 | 57.6 | 57.4 | 57.8 | 57.8 | 58.5 | 58.5 |

ตารางที่ ผ.7. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ในถังสะสมความร้อนชนิดแอร์-ร็อคเบต ความเร็วอากาศ 0.045 นิ้วน้ำ
ขนาดก้นหิน 3/4"-1"

| เวลา | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | T ₅ | T ₆ | T ₇ | T ₉ | T ₁₀ | T ₁₁ | T ₁₂ |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 10.16 | 29.6 | 29.6 | 29.4 | 29.4 | 30.0 | 29.4 | 29.4 | 29.6 | 29.6 | 29.7 | 29.6 |
| 10.18 | 29.8 | 29.6 | 29.6 | 29.5 | 30.9 | 29.8 | 30.8 | 30.6 | 35.6 | 44.6 | 35.5 |
| 10.20 | 30.1 | 29.8 | 30.0 | 29.6 | 32.0 | 30.8 | 31.8 | 31.8 | 38.7 | 45.6 | 38.9 |
| 10.22 | 30.8 | 30.2 | 30.6 | 30.1 | 33.6 | 32.4 | 33.4 | 33.6 | 41.7 | 47.4 | 41.8 |
| 10.24 | 31.6 | 31.1 | 31.4 | 30.8 | 36.0 | 34.4 | 35.2 | 35.7 | 44.2 | 49.2 | 44.4 |
| 10.26 | 32.4 | 31.8 | 32.2 | 31.4 | 37.2 | 35.8 | 36.6 | 37.1 | 45.6 | 50.2 | 46.0 |
| 10.28 | 33.5 | 32.8 | 33.2 | 32.2 | 39.4 | 37.6 | 38.2 | 39.2 | 47.1 | 51.0 | 47.6 |
| 10.30 | 34.8 | 34.1 | 34.6 | 33.5 | 40.9 | 39.4 | 40.0 | 40.8 | 48.3 | 51.7 | 48.8 |
| 10.32 | 36.1 | 35.4 | 35.8 | 34.8 | 42.9 | 41.2 | 41.6 | 42.6 | 49.3 | 52.2 | 49.8 |
| 10.34 | 37.4 | 36.8 | 37.0 | 36.0 | 44.2 | 42.8 | 42.8 | 44.2 | 50.1 | 52.4 | 50.6 |
| 10.36 | 38.8 | 38.3 | 38.4 | 37.4 | 45.8 | 44.6 | 44.5 | 45.7 | 50.8 | 53.5 | 51.4 |
| 11.15 | 53.4 | 54.8 | 53.6 | 54.1 | 56.9 | 56.8 | 56.3 | 56.8 | 56.6 | 58.0 | 57.1 |

ตารางที่ ผ.8. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ในถังสะสมความร้อนชนิดแอร์-รอกเบด ความเร็วอากาศ 0.05 นิ้ว/วินาที
ขนาดก้อนหิน 3/4"-1"

| เวลา | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | T ₅ | T ₆ | T ₇ | T ₉ | T ₁₀ | T ₁₁ | T ₁₂ |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 13.20 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.6 | 32.5 | 32.6 | 32.6 | 33.8 | 33.4 | 33.4 |
| 13.22 | 32.6 | 32.4 | 32.6 | 32.4 | 34.3 | 33.2 | 34.6 | 34.1 | 40.4 | 49.6 | 40.0 |
| 13.24 | 33.2 | 32.8 | 33.2 | 32.8 | 36.2 | 34.6 | 36.0 | 35.6 | 44.0 | 50.8 | 43.8 |
| 13.26 | 34.1 | 33.5 | 34.0 | 33.4 | 38.4 | 36.2 | 37.8 | 37.6 | 46.8 | 51.4 | 46.5 |
| 13.28 | 35.2 | 34.4 | 34.9 | 34.1 | 40.4 | 38.0 | 39.4 | 39.4 | 48.4 | 52.0 | 48.2 |
| 13.30 | 36.4 | 35.6 | 36.0 | 35.2 | 42.5 | 40.0 | 41.4 | 41.4 | 49.8 | 52.6 | 49.8 |
| 13.32 | 37.6 | 36.8 | 37.2 | 36.3 | 44.4 | 42.0 | 42.8 | 43.3 | 50.8 | 53.6 | 51.0 |
| 13.34 | 39.1 | 38.2 | 38.6 | 37.7 | 46.2 | 43.8 | 44.5 | 45.2 | 51.8 | 54.4 | 52.0 |
| 13.36 | 40.4 | 39.8 | 40.0 | 39.0 | 47.8 | 45.5 | 46.1 | 46.8 | 52.5 | 54.5 | 53.0 |
| 13.38 | 41.8 | 41.2 | 41.2 | 40.2 | 49.0 | 47.0 | 47.5 | 48.2 | 53.2 | 54.8 | 53.6 |
| 13.40 | 43.1 | 42.7 | 42.6 | 41.6 | 50.2 | 48.4 | 48.8 | 49.6 | 53.6 | 55.0 | 54.0 |
| 14.10 | 54.1 | 55.3 | 54.2 | 54.6 | 57.4 | 57.2 | 56.8 | 57.4 | 57.2 | 57.8 | 57.6 |

ตารางที่ ผ.9. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ในถังสะสมความร้อนชนิดแอร์-รอกเบต ความเร็วอากาศ 0.015 นิ้ว/วินาที
ขนาดก้นหิน 1/2"-3/4"

| เวลา | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | T ₅ | T ₆ | T ₈ | T ₉ | T ₁₀ | T ₁₁ |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| 10.14 | 31.2 | 31.1 | 31.0 | 31.0 | 32.2 | 32.2 | 31.8 | 31.2 | 30.8 | 30.8 |
| 10.16 | 31.3 | 31.1 | 31.1 | 31.0 | 32.2 | 32.2 | 31.8 | 40.1 | 34.6 | 41.4 |
| 10.18 | 31.4 | 31.3 | 31.3 | 31.3 | 32.2 | 32.2 | 31.9 | 41.4 | 36.8 | 42.4 |
| 10.20 | 31.6 | 31.6 | 31.4 | 31.4 | 32.4 | 32.2 | 31.9 | 42.8 | 38.8 | 43.8 |
| 10.22 | 31.7 | 31.7 | 31.6 | 31.6 | 32.9 | 32.2 | 32.2 | 43.8 | 40.6 | 45.2 |
| 10.24 | 31.8 | 31.8 | 31.6 | 31.6 | 33.8 | 32.4 | 32.4 | 44.4 | 42.1 | 45.9 |
| 10.26 | 31.9 | 31.9 | 31.8 | 31.8 | 34.6 | 33.0 | 33.0 | 44.9 | 43.4 | 46.4 |
| 10.28 | 32.1 | 32.2 | 31.9 | 32.0 | 35.8 | 33.6 | 33.6 | 45.6 | 44.4 | 47.1 |
| 10.30 | 32.2 | 32.3 | 32.1 | 32.4 | 36.6 | 34.1 | 34.4 | 46.2 | 45.2 | 47.6 |
| 10.32 | 32.4 | 32.5 | 32.3 | 32.6 | 37.8 | 34.8 | 35.1 | 46.8 | 46.0 | 47.9 |
| 10.34 | 32.6 | 32.8 | 32.6 | 32.9 | 38.8 | 35.6 | 36.2 | 47.0 | 46.8 | 48.6 |
| 11.40 | 48.6 | 51.4 | 48.8 | 52.1 | 53.6 | 52.9 | 53.2 | 53.6 | 54.4 | 54.8 |

ตารางที่ ผ.10. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ในถังละลายความร้อนชนิดแอร์-รอกเบต ความเร็วอากาศ 0.02 นิ้ว/วินาที
ขนาดกอนหิน 1/2"-3/4"

| เวลา | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | T ₅ | T ₆ | T ₈ | T ₉ | T ₁₀ | T ₁₁ |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| 13.10 | 34.8 | 35.2 | 34.6 | 35.4 | 36.0 | 36.0 | 35.8 | 36.4 | 35.2 | 35.8 |
| 13.12 | 35.0 | 35.2 | 35.0 | 35.4 | 36.0 | 36.0 | 35.8 | 44.4 | 39.4 | 45.4 |
| 13.14 | 35.2 | 35.3 | 35.2 | 35.4 | 36.4 | 36.0 | 36.0 | 45.6 | 41.7 | 46.6 |
| 13.16 | 35.4 | 35.5 | 35.3 | 35.6 | 37.2 | 36.2 | 36.4 | 47.0 | 43.9 | 48.2 |
| 13.18 | 35.5 | 35.6 | 35.5 | 35.7 | 37.8 | 36.6 | 36.8 | 48.0 | 45.5 | 49.4 |
| 13.20 | 35.6 | 35.8 | 35.6 | 36.0 | 38.8 | 37.1 | 37.4 | 48.6 | 46.8 | 49.8 |
| 13.22 | 35.8 | 36.0 | 35.8 | 36.3 | 40.0 | 37.8 | 38.0 | 49.1 | 47.8 | 50.2 |
| 13.24 | 36.2 | 36.4 | 36.2 | 36.7 | 41.2 | 38.6 | 38.9 | 49.6 | 48.8 | 50.8 |
| 13.26 | 36.6 | 36.8 | 36.6 | 37.2 | 42.4 | 39.6 | 40.0 | 50.0 | 49.4 | 51.1 |
| 13.28 | 36.8 | 37.4 | 37.0 | 38.0 | 43.6 | 40.6 | 41.0 | 50.2 | 50.0 | 51.6 |
| 13.30 | 37.4 | 37.8 | 37.4 | 38.4 | 44.8 | 41.4 | 42.2 | 51.0 | 50.6 | 52.0 |
| 14.15 | 50.2 | 52.6 | 50.4 | 53.2 | 54.4 | 53.8 | 53.8 | 54.2 | 54.0 | 55.4 |

ตารางที่ ผ.11. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจุดต่าง ๆ ในถังสะสมความร้อนชนิดแอร์-รอกเบต ความเร็วอากาศ 0.025 นิ้ว/วินาที
ขนาดก้นหิน 1/2"-3/4"

| เวลา | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | T ₅ | T ₆ | T ₈ | T ₉ | T ₁₀ | T ₁₁ |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| 15.52 | 36.0 | 36.0 | 35.8 | 36.0 | 35.6 | 35.8 | 36.0 | 36.2 | 35.2 | 35.4 |
| 15.54 | 36.0 | 36.0 | 35.9 | 36.0 | 35.8 | 35.8 | 36.0 | 46.8 | 40.6 | 47.6 |
| 15.56 | 36.0 | 36.0 | 36.0 | 36.0 | 36.6 | 35.9 | 36.1 | 47.4 | 43.4 | 48.2 |
| 15.58 | 36.0 | 36.0 | 36.0 | 36.0 | 37.4 | 36.4 | 36.6 | 48.4 | 45.5 | 49.2 |
| 16.00 | 36.2 | 36.1 | 36.1 | 36.1 | 38.8 | 36.9 | 37.4 | 49.6 | 47.4 | 50.4 |
| 16.02 | 36.4 | 36.4 | 36.4 | 36.4 | 40.4 | 37.8 | 38.6 | 50.2 | 49.0 | 51.0 |
| 16.04 | 36.7 | 36.7 | 36.8 | 37.0 | 41.9 | 39.0 | 39.8 | 50.6 | 50.0 | 51.4 |
| 16.06 | 37.2 | 37.2 | 37.2 | 37.8 | 43.2 | 40.0 | 41.0 | 50.8 | 50.7 | 51.7 |
| 16.08 | 37.7 | 37.7 | 37.7 | 38.6 | 44.8 | 41.3 | 42.4 | 51.0 | 51.3 | 51.9 |
| 16.10 | 38.2 | 38.6 | 38.4 | 39.6 | 45.9 | 42.6 | 43.4 | 51.2 | 51.8 | 52.4 |
| 16.25 | 44.8 | 46.4 | 44.8 | 47.8 | 52.0 | 50.2 | 51.0 | 52.6 | 54.0 | 54.0 |
| 16.55 | 52.2 | 54.0 | 52.0 | 54.6 | 55.4 | 55.0 | 55.6 | 55.2 | 56.2 | 56.2 |

ตารางที่ ผ.12 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ในถังสะสมความร้อนชนิดแอร์-รอกเบต ความเร็วอากาศ 0.03 นิ้วน้ำ
ขนาดกอนหิน 1/2"-3/4"

| เวลา | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | T ₅ | T ₆ | T ₈ | T ₉ | T ₁₀ | T ₁₁ |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| 9.22 | 31.6 | 31.7 | 31.6 | 31.6 | 31.7 | 31.9 | 31.6 | 30.8 | 30.6 | 30.4 |
| 9.24 | 31.6 | 31.7 | 31.6 | 31.6 | 31.7 | 31.9 | 31.6 | 41.6 | 35.2 | 42.6 |
| 9.26 | 31.6 | 31.7 | 31.6 | 31.6 | 32.0 | 31.9 | 31.6 | 43.1 | 38.4 | 44.2 |
| 9.28 | 31.7 | 31.7 | 31.7 | 31.7 | 33.1 | 32.0 | 32.0 | 45.0 | 41.2 | 46.4 |
| 9.30 | 31.8 | 31.8 | 31.8 | 31.8 | 34.6 | 32.6 | 32.8 | 45.8 | 43.4 | 47.2 |
| 9.32 | 32.0 | 32.0 | 32.0 | 31.9 | 36.2 | 33.6 | 34.0 | 46.8 | 45.2 | 48.0 |
| 9.34 | 32.3 | 32.4 | 32.5 | 32.6 | 38.4 | 35.2 | 35.8 | 47.9 | 47.1 | 49.6 |
| 9.36 | 32.8 | 33.0 | 32.9 | 33.4 | 39.6 | 36.2 | 36.9 | 48.8 | 48.0 | 50.2 |
| 9.38 | 33.4 | 33.9 | 33.6 | 34.5 | 41.4 | 37.7 | 38.6 | 49.4 | 49.0 | 50.7 |
| 9.40 | 34.2 | 35.0 | 34.4 | 35.8 | 42.8 | 39.2 | 40.2 | 49.6 | 49.8 | 51.1 |
| 9.55 | 41.8 | 43.4 | 42.0 | 45.1 | 50.6 | 48.2 | 49.0 | 52.3 | 53.4 | 53.8 |
| 10.25 | 51.6 | 53.8 | 51.2 | 54.4 | 55.8 | 55.0 | 55.4 | 56.0 | 56.8 | 57.2 |

ตารางที่ ผ.13. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ในถังสะสมความร้อนชนิดแอร์-รอกเบต ความเร็วอากาศ 0.035 นิ้วน้ำ
ขนาดก้นหิน 1/2"-3/4"

| เวลา | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | T ₅ | T ₆ | T ₈ | T ₉ | T ₁₀ | T ₁₁ |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| 11.46 | 33.7 | 33.8 | 33.7 | 33.9 | 34.8 | 34.6 | 34.6 | 35.0 | 34.6 | 34.2 |
| 11.48 | 34.1 | 34.2 | 34.2 | 34.3 | 35.2 | 34.7 | 34.8 | 46.6 | 40.4 | 47.6 |
| 11.50 | 34.3 | 34.4 | 34.2 | 34.4 | 36.1 | 35.2 | 35.2 | 48.0 | 43.8 | 49.2 |
| 11.52 | 34.5 | 34.6 | 34.6 | 34.8 | 37.4 | 35.6 | 36.0 | 49.0 | 46.0 | 50.2 |
| 11.54 | 34.8 | 35.0 | 35.0 | 35.2 | 39.2 | 36.8 | 37.0 | 49.8 | 48.0 | 51.1 |
| 11.56 | 35.3 | 35.6 | 35.4 | 35.8 | 41.0 | 37.9 | 38.6 | 50.5 | 49.6 | 51.9 |
| 11.58 | 36.0 | 36.3 | 36.1 | 36.8 | 43.0 | 39.6 | 40.2 | 51.2 | 50.7 | 52.5 |
| 12.00 | 36.8 | 37.2 | 36.8 | 37.9 | 44.8 | 41.0 | 41.8 | 52.0 | 51.6 | 53.4 |
| 12.02 | 37.7 | 38.4 | 37.8 | 39.4 | 46.4 | 42.8 | 43.4 | 52.6 | 52.4 | 54.0 |
| 12.04 | 38.6 | 39.6 | 38.8 | 40.6 | 47.8 | 44.2 | 44.8 | 53.0 | 53.2 | 54.4 |
| 12.06 | 39.8 | 41.0 | 40.0 | 42.2 | 49.1 | 45.7 | 46.4 | 53.2 | 53.8 | 54.6 |
| 12.40 | 54.0 | 56.1 | 53.6 | 56.4 | 57.2 | 57.0 | 57.1 | 56.0 | 57.3 | 57.4 |

ตารางที่ ผ.14. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ในถังสะสมความร้อนชนิดแอร-ร็อคเบด ความเร็วอากาศ 0.04 นิ้วน้ำ
ขนาดกอนหิน 1/2"-3/4"

| เวลา | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | T ₅ | T ₆ | T ₈ | T ₉ | T ₁₀ | T ₁₁ |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| 13.50 | 35.4 | 35.4 | 35.4 | 35.5 | 36.8 | 36.6 | 36.6 | 36.8 | 36.4 | 36.0 |
| 13.52 | 36.0 | 36.0 | 36.1 | 36.1 | 36.8 | 36.6 | 36.6 | 48.2 | 41.6 | 48.8 |
| 13.54 | 36.2 | 36.2 | 36.3 | 36.3 | 37.7 | 36.8 | 37.2 | 49.6 | 45.2 | 50.2 |
| 13.56 | 36.4 | 36.4 | 36.4 | 36.5 | 39.0 | 37.4 | 37.8 | 50.4 | 47.3 | 51.2 |
| 13.58 | 36.6 | 36.6 | 36.7 | 36.8 | 40.6 | 38.2 | 38.9 | 51.6 | 49.6 | 52.4 |
| 14.00 | 37.2 | 37.2 | 37.2 | 37.4 | 42.6 | 39.6 | 40.2 | 52.2 | 50.8 | 53.2 |
| 14.02 | 37.6 | 37.7 | 37.8 | 38.0 | 44.2 | 41.0 | 41.4 | 52.8 | 51.8 | 53.6 |
| 14.04 | 38.4 | 38.6 | 38.6 | 39.2 | 46.0 | 42.4 | 42.8 | 53.4 | 52.6 | 54.4 |
| 14.06 | 39.2 | 39.6 | 39.5 | 40.6 | 47.6 | 44.0 | 44.4 | 53.6 | 53.2 | 54.6 |
| 14.08 | 40.2 | 41.0 | 40.6 | 41.8 | 49.0 | 45.6 | 45.9 | 53.8 | 53.8 | 54.8 |
| 14.10 | 41.2 | 42.0 | 41.6 | 43.2 | 50.4 | 47.0 | 47.6 | 54.6 | 54.6 | 55.6 |
| 14.40 | 53.6 | 55.8 | 53.6 | 56.4 | 57.8 | 57.2 | 56.8 | 58.2 | 58.0 | 58.8 |

ตารางที่ ผ.15. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ในถังสะสมความร้อนชนิดแอร์-รอกเบต ความเร็วอากาศ 0.045 นิ้ว/วินาที
ขนาดกอนหิน 1/2"-3/4"

| เวลา | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | T ₅ | T ₆ | T ₈ | T ₉ | T ₁₀ | T ₁₁ |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| 9.56 | 31.2 | 31.2 | 31.2 | 31.3 | 31.2 | 31.6 | 31.3 | 31.2 | 30.8 | 30.8 |
| 9.58 | 31.3 | 31.3 | 31.3 | 31.3 | 31.6 | 31.6 | 31.3 | 43.6 | 37.8 | 45.0 |
| 10.00 | 31.4 | 31.3 | 31.4 | 31.3 | 32.7 | 31.6 | 31.7 | 45.4 | 41.0 | 46.8 |
| 10.02 | 31.5 | 31.5 | 31.5 | 31.4 | 34.7 | 32.4 | 32.8 | 47.0 | 44.0 | 48.2 |
| 10.04 | 31.8 | 31.8 | 31.8 | 31.9 | 36.6 | 33.6 | 34.2 | 47.8 | 46.2 | 49.5 |
| 10.06 | 32.4 | 32.4 | 32.4 | 32.8 | 39.0 | 35.4 | 36.2 | 48.8 | 48.1 | 50.6 |
| 10.08 | 33.1 | 33.2 | 33.2 | 33.9 | 41.1 | 37.0 | 38.0 | 49.4 | 49.2 | 51.0 |
| 10.10 | 34.2 | 34.4 | 34.4 | 35.6 | 43.2 | 39.2 | 40.0 | 50.3 | 50.3 | 51.8 |
| 10.12 | 35.5 | 36.1 | 35.6 | 37.1 | 45.1 | 41.0 | 42.0 | 51.2 | 51.2 | 52.6 |
| 10.14 | 36.6 | 37.4 | 36.9 | 38.5 | 46.6 | 42.8 | 43.8 | 51.3 | 51.3 | 52.8 |
| 10.20 | 40.8 | 42.6 | 40.8 | 43.9 | 50.4 | 47.6 | 48.2 | 52.7 | 52.6 | 54.2 |
| 10.50 | 53.0 | 55.0 | 52.6 | 55.3 | 56.6 | 55.8 | 56.2 | 55.6 | 56.4 | 57.0 |

ตารางที่ ผ.16. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ในถังสะสมความร้อนชนิดแอร์-ร็อคเบต ความเร็วอากาศ 0.05 นิ้ว/วินาที
ขนาดก้อนหิน 1/2"-3/4"

| เวลา | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | T ₅ | T ₆ | T ₈ | T ₉ | T ₁₀ | T ₁₁ |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| 12.10 | 34.4 | 34.3 | 34.4 | 34.4 | 33.8 | 34.0 | 34.0 | 34.1 | 33.6 | 33.4 |
| 12.12 | 34.4 | 34.3 | 34.4 | 34.4 | 34.2 | 34.0 | 34.0 | 46.4 | 39.6 | 47.6 |
| 12.14 | 34.4 | 34.3 | 34.4 | 34.4 | 35.4 | 34.4 | 34.6 | 48.4 | 43.6 | 49.4 |
| 12.16 | 34.5 | 34.4 | 34.6 | 34.4 | 37.2 | 35.2 | 35.6 | 49.6 | 46.6 | 50.8 |
| 12.18 | 34.8 | 34.6 | 35.0 | 34.8 | 39.2 | 36.4 | 37.0 | 50.2 | 48.4 | 51.2 |
| 12.20 | 35.3 | 35.3 | 35.6 | 35.6 | 41.4 | 38.0 | 38.8 | 50.8 | 50.0 | 51.9 |
| 12.22 | 36.0 | 36.1 | 36.2 | 36.4 | 43.6 | 39.8 | 40.6 | 51.5 | 51.0 | 52.6 |
| 12.24 | 36.8 | 37.0 | 37.1 | 37.8 | 45.2 | 41.2 | 42.1 | 52.0 | 51.8 | 53.2 |
| 12.26 | 38.0 | 38.6 | 38.4 | 39.4 | 47.0 | 43.2 | 44.1 | 52.6 | 52.6 | 53.8 |
| 12.28 | 39.2 | 40.0 | 39.4 | 41.1 | 48.4 | 44.4 | 45.7 | 53.0 | 53.0 | 54.3 |
| 12.30 | 40.6 | 41.6 | 40.7 | 42.6 | 49.8 | 46.4 | 47.3 | 53.4 | 53.4 | 54.6 |
| 13.00 | 53.5 | 55.6 | 53.2 | 56.0 | 57.2 | 56.6 | 56.9 | 56.3 | 56.4 | 57.4 |

ตารางที่ ผ.17. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ในถังละลายความร้อนชนิดแอร์-รอกเบต ความเร็วอากาศ 0.015 นิ้วน้ำ
ขนาดก้นหิน 1"-1 1/2"

| เวลา | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | T ₇ | T ₈ | T ₉ | T ₁₀ | T ₁₁ | T ₁₂ |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 11.50 | 29.0 | 28.9 | 29.0 | 28.8 | 29.4 | 29.0 | 30.4 | 29.7 | 30.3 | 30.0 |
| 11.52 | 29.1 | 29.0 | 29.1 | 28.8 | 31.0 | 29.8 | 38.0 | 32.5 | 37.6 | 32.5 |
| 11.54 | 29.3 | 29.1 | 29.2 | 29.0 | 31.8 | 30.2 | 39.7 | 34.6 | 39.1 | 35.2 |
| 11.56 | 29.4 | 29.3 | 29.4 | 29.1 | 32.9 | 30.9 | 41.6 | 36.7 | 41.0 | 37.3 |
| 11.58 | 29.6 | 29.4 | 29.6 | 29.2 | 33.9 | 31.6 | 43.1 | 38.4 | 42.4 | 39.2 |
| 12.00 | 29.7 | 29.5 | 29.8 | 29.4 | 35.0 | 32.5 | 43.6 | 40.0 | 42.8 | 41.0 |
| 12.02 | 30.0 | 29.7 | 30.1 | 29.6 | 36.0 | 33.4 | 44.0 | 41.4 | 43.1 | 42.2 |
| 12.04 | 30.3 | 30.0 | 30.4 | 29.8 | 37.0 | 34.5 | 44.7 | 42.6 | 43.8 | 43.4 |
| 12.06 | 30.6 | 30.3 | 30.8 | 30.1 | 38.0 | 35.6 | 45.3 | 43.4 | 44.2 | 44.2 |
| 12.08 | 30.9 | 30.7 | 31.4 | 30.5 | 39.0 | 36.6 | 45.8 | 44.3 | 44.7 | 45.2 |
| 12.10 | 31.4 | 31.1 | 31.8 | 30.8 | 40.0 | 37.8 | 46.4 | 45.2 | 45.6 | 46.0 |
| 13.40 | 50.0 | 51.5 | 51.3 | 50.2 | 55.1 | 55.1 | 54.7 | 54.8 | 52.9 | 55.5 |

ตารางที่ ผ.18. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ในถังสะสมความร้อนชนิดแอร์-ร็อคเบต ความเร็วอากาศ 0.02 นิ้วน้ำ
ขนาดกอนหิน 1"-1 1/2"

| เวลา | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | T ₇ | T ₈ | T ₉ | T ₁₀ | T ₁₁ | T ₁₂ |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 15.16 | 34.0 | 33.8 | 34.0 | 34.0 | 35.6 | 35.4 | 36.0 | 36.0 | 36.0 | 36.0 |
| 15.18 | 34.3 | 34.2 | 34.3 | 34.3 | 37.2 | 35.8 | 43.9 | 38.5 | 43.3 | 38.8 |
| 15.20 | 34.5 | 34.4 | 34.4 | 34.4 | 37.8 | 36.2 | 45.3 | 40.1 | 44.7 | 40.5 |
| 15.22 | 34.7 | 34.6 | 34.6 | 34.6 | 38.7 | 36.6 | 46.5 | 42.0 | 46.0 | 42.4 |
| 15.24 | 35.0 | 34.9 | 35.0 | 35.0 | 39.6 | 37.4 | 47.4 | 43.6 | 46.6 | 44.2 |
| 15.26 | 35.3 | 35.1 | 35.2 | 35.2 | 40.6 | 38.2 | 48.0 | 44.9 | 47.3 | 45.6 |
| 15.28 | 35.6 | 35.4 | 35.8 | 35.6 | 41.6 | 39.2 | 48.5 | 46.1 | 48.0 | 46.9 |
| 15.30 | 35.9 | 35.8 | 36.1 | 36.1 | 42.5 | 40.1 | 49.4 | 47.2 | 48.5 | 47.9 |
| 15.32 | 36.3 | 36.1 | 36.6 | 36.5 | 43.5 | 41.1 | 49.7 | 48.1 | 48.9 | 48.8 |
| 15.34 | 36.7 | 36.6 | 37.0 | 36.8 | 44.3 | 42.0 | 50.0 | 48.7 | 48.9 | 49.5 |
| 15.36 | 37.2 | 37.1 | 37.7 | 37.3 | 45.1 | 42.9 | 50.7 | 49.4 | 49.5 | 50.1 |
| 16.25 | 49.4 | 50.3 | 50.6 | 49.4 | 55.3 | 55.2 | 54.9 | 55.1 | 53.6 | 55.6 |

ตารางที่ ผ.19. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ในถังสะสมความร้อนชนิดแอร์-รอกเบต ความเร็วอากาศ 0.025 นิ้ว/วินาที
ขนาดก้นหิน 1"-1 1/2"

| เวลา | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | T ₇ | T ₈ | T ₉ | T ₁₀ | T ₁₁ | T ₁₂ |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 10.20 | 33.0 | 33.0 | 33.0 | 32.8 | 32.6 | 32.6 | 32.2 | 32.2 | 32.4 | 32.2 |
| 10.22 | 33.0 | 33.0 | 33.0 | 32.8 | 34.4 | 33.0 | 42.0 | 35.7 | 41.8 | 35.8 |
| 10.24 | 33.0 | 33.0 | 33.0 | 32.8 | 35.4 | 33.6 | 43.7 | 38.1 | 42.9 | 38.4 |
| 10.26 | 33.2 | 33.2 | 33.1 | 32.8 | 36.5 | 34.2 | 45.2 | 40.4 | 45.0 | 40.8 |
| 10.28 | 33.3 | 33.3 | 33.3 | 33.0 | 37.6 | 35.2 | 46.0 | 42.2 | 45.2 | 42.6 |
| 10.30 | 33.6 | 33.6 | 33.6 | 33.2 | 38.8 | 36.2 | 47.2 | 43.8 | 46.4 | 44.3 |
| 10.32 | 33.8 | 33.8 | 34.0 | 33.4 | 40.0 | 37.2 | 47.4 | 45.0 | 46.6 | 45.7 |
| 10.34 | 34.2 | 34.2 | 34.4 | 33.7 | 41.2 | 38.4 | 48.4 | 46.2 | 47.6 | 46.8 |
| 10.36 | 34.7 | 34.6 | 35.0 | 34.2 | 42.2 | 39.8 | 48.6 | 47.2 | 48.0 | 48.0 |
| 10.38 | 35.2 | 35.0 | 35.6 | 34.6 | 43.2 | 40.7 | 49.5 | 48.0 | 48.7 | 48.7 |
| 10.40 | 35.7 | 35.5 | 36.2 | 35.1 | 44.3 | 42.1 | 49.8 | 48.9 | 48.9 | 49.6 |
| 12.40 | 51.0 | 52.2 | 52.2 | 50.8 | 56.6 | 56.6 | 56.2 | 56.2 | 54.8 | 57.0 |

ตารางที่ ผ.20. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ในถังสะสมความร้อนชนิดแนอร์-รอกเบต ความเร็วอากาศ 0.03 นิ้วน้ำ
ขนาดกอนหิน 1"-1 1/2"

| เวลา | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | T ₇ | T ₈ | T ₉ | T ₁₀ | T ₁₁ | T ₁₂ |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 13.20 | 35.0 | 34.6 | 34.8 | 34.8 | 36.2 | 35.8 | 37.1 | 37.0 | 37.1 | 37.0 |
| 13.22 | 35.4 | 35.2 | 35.4 | 35.4 | 37.8 | 36.2 | 45.0 | 39.1 | 44.8 | 39.4 |
| 13.24 | 35.6 | 35.6 | 35.6 | 35.5 | 38.8 | 36.8 | 46.4 | 41.4 | 46.0 | 41.8 |
| 13.26 | 36.0 | 35.7 | 35.9 | 35.9 | 40.0 | 37.6 | 48.0 | 43.4 | 47.3 | 43.8 |
| 13.28 | 36.3 | 36.0 | 36.3 | 36.3 | 41.0 | 38.4 | 48.6 | 45.0 | 47.9 | 45.6 |
| 13.30 | 36.6 | 36.4 | 36.7 | 36.6 | 42.2 | 39.6 | 49.3 | 46.6 | 48.5 | 47.2 |
| 13.32 | 37.0 | 36.8 | 37.2 | 37.0 | 43.6 | 40.8 | 50.4 | 47.9 | 49.7 | 48.5 |
| 13.34 | 37.5 | 37.2 | 37.8 | 37.5 | 42.8 | 41.8 | 50.6 | 48.1 | 49.8 | 49.7 |
| 13.36 | 38.0 | 37.8 | 38.4 | 37.8 | 45.6 | 43.0 | 51.4 | 49.8 | 50.4 | 50.5 |
| 13.38 | 38.6 | 38.3 | 39.1 | 38.5 | 46.2 | 43.6 | 51.6 | 50.4 | 50.5 | 51.2 |
| 13.40 | 39.2 | 38.8 | 39.6 | 39.0 | 47.4 | 45.2 | 52.0 | 51.0 | 50.8 | 51.6 |
| 14.25 | 51.2 | 52.2 | 52.4 | 51.2 | 55.6 | 55.2 | 56.8 | 55.4 | 55.2 | 57.3 |

ตารางที่ ผ.21. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ในถังสะสมความร้อนชนิดแอร์-รอกเบต ความเร็วอากาศ 0.035 นิ้วน้ำ
ขนาดก้นหิน 1"-1 1/2"

| เวลา | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | T ₇ | T ₈ | T ₉ | T ₁₀ | T ₁₁ | T ₁₂ |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 15.56 | 36.4 | 36.1 | 36.2 | 36.2 | 37.2 | 37.2 | 37.1 | 37.2 | 37.4 | 37.0 |
| 15.58 | 36.7 | 36.6 | 36.6 | 36.6 | 39.2 | 37.3 | 46.8 | 40.6 | 46.6 | 40.6 |
| 16.00 | 36.9 | 36.8 | 36.8 | 36.8 | 40.5 | 38.1 | 48.5 | 43.2 | 48.1 | 43.2 |
| 16.02 | 37.2 | 37.0 | 37.2 | 37.2 | 41.7 | 39.0 | 49.6 | 45.2 | 49.1 | 45.6 |
| 16.04 | 37.6 | 37.3 | 37.6 | 37.4 | 42.8 | 40.0 | 50.6 | 47.0 | 50.0 | 47.5 |
| 16.06 | 38.0 | 37.8 | 38.2 | 37.9 | 44.2 | 41.3 | 51.6 | 48.6 | 50.8 | 49.2 |
| 16.08 | 38.5 | 38.2 | 38.6 | 38.4 | 45.4 | 42.6 | 51.8 | 49.8 | 51.0 | 50.6 |
| 16.10 | 39.2 | 38.8 | 39.2 | 39.0 | 46.5 | 43.6 | 52.6 | 50.7 | 51.8 | 51.3 |
| 16.12 | 39.6 | 39.2 | 40.0 | 39.6 | 47.6 | 44.8 | 53.6 | 51.7 | 52.6 | 52.2 |
| 16.14 | 40.2 | 39.8 | 40.6 | 40.2 | 48.7 | 46.1 | 53.7 | 52.4 | 52.7 | 53.0 |
| 16.16 | 40.7 | 40.6 | 41.4 | 40.8 | 49.6 | 47.4 | 53.8 | 53.2 | 52.8 | 53.7 |
| 16.50 | 51.6 | 52.3 | 52.6 | 51.6 | 57.6 | 57.4 | 57.6 | 57.6 | 56.4 | 58.2 |

ตารางที่ ผ.22. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ในถังสะสมความร้อนชนิดแอร์-รอกเบต ความเร็วอากาศ 0.04 นิ้วน้ำ
ขนาดกอนหิน 1"-1 1/2"

| เวลา | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | T ₇ | T ₈ | T ₉ | T ₁₀ | T ₁₁ | T ₁₂ |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 10.10 | 33.0 | 33.0 | 32.8 | 32.8 | 32.2 | 32.2 | 32.1 | 32.1 | 32.2 | 32.0 |
| 10.12 | 33.0 | 33.0 | 32.8 | 32.8 | 34.1 | 32.6 | 40.5 | 35.0 | 40.2 | 34.8 |
| 10.14 | 33.0 | 33.0 | 32.8 | 32.8 | 35.5 | 33.2 | 43.0 | 37.8 | 42.8 | 37.8 |
| 10.16 | 33.2 | 33.1 | 33.0 | 33.0 | 37.0 | 34.2 | 45.1 | 40.3 | 44.6 | 40.6 |
| 10.18 | 33.4 | 33.2 | 33.3 | 33.1 | 38.4 | 35.4 | 46.2 | 42.5 | 45.6 | 42.8 |
| 10.20 | 33.8 | 33.6 | 33.8 | 33.3 | 39.9 | 36.8 | 47.0 | 44.3 | 46.0 | 44.8 |
| 10.22 | 34.3 | 33.8 | 34.4 | 33.6 | 41.2 | 38.2 | 47.6 | 45.6 | 46.7 | 46.2 |
| 10.24 | 34.9 | 34.4 | 35.2 | 34.2 | 43.1 | 40.2 | 48.5 | 47.2 | 47.6 | 47.6 |
| 10.26 | 35.6 | 35.2 | 36.0 | 35.0 | 44.1 | 41.2 | 49.5 | 48.0 | 48.2 | 48.4 |
| 10.28 | 36.4 | 35.8 | 36.8 | 35.6 | 45.3 | 42.4 | 50.2 | 49.0 | 49.1 | 49.5 |
| 10.30 | 37.2 | 36.6 | 37.8 | 36.3 | 46.4 | 43.8 | 50.6 | 49.8 | 49.6 | 50.4 |
| 11.15 | 51.8 | 52.6 | 53.2 | 51.4 | 57.4 | 57.2 | 57.2 | 57.2 | 55.8 | 57.8 |



ตารางที่ ผ.23. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ในถังสะสมความร้อนชนิดแอร์-รอกเบต ความเร็วอากาศ 0.045 นิ้ว/วินาที
ขนาดกอนหิน 1"-1 1/2"

| เวลา | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | T ₇ | T ₈ | T ₉ | T ₁₀ | T ₁₁ | T ₁₂ |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 12.54 | 35.8 | 35.8 | 35.8 | 35.8 | 35.4 | 35.2 | 36.8 | 35.2 | 36.8 | 35.0 |
| 12.56 | 36.1 | 36.1 | 35.8 | 35.8 | 37.2 | 35.6 | 44.4 | 38.2 | 44.0 | 38.2 |
| 12.58 | 36.2 | 36.2 | 35.9 | 35.9 | 38.6 | 36.1 | 46.8 | 40.8 | 46.6 | 41.0 |
| 13.00 | 36.4 | 36.4 | 36.4 | 36.4 | 40.0 | 37.2 | 48.6 | 43.5 | 48.0 | 43.9 |
| 13.02 | 36.7 | 36.6 | 36.6 | 36.6 | 41.6 | 38.5 | 49.6 | 45.6 | 49.1 | 46.2 |
| 13.04 | 37.1 | 36.8 | 37.2 | 37.0 | 43.2 | 40.0 | 50.5 | 47.6 | 49.4 | 48.2 |
| 13.06 | 37.7 | 37.3 | 37.8 | 37.4 | 44.6 | 41.4 | 50.8 | 48.9 | 50.2 | 49.6 |
| 13.08 | 38.3 | 37.8 | 38.4 | 37.8 | 45.7 | 42.7 | 51.7 | 49.9 | 50.8 | 50.6 |
| 13.10 | 38.9 | 38.5 | 39.2 | 38.6 | 46.9 | 44.2 | 52.3 | 50.9 | 51.5 | 51.6 |
| 13.12 | 39.6 | 39.2 | 40.0 | 39.2 | 48.1 | 45.4 | 52.9 | 51.7 | 51.8 | 52.2 |
| 13.14 | 40.4 | 40.0 | 41.0 | 39.8 | 49.1 | 46.6 | 53.3 | 52.2 | 52.0 | 53.1 |
| 13.50 | 52.0 | 52.6 | 53.2 | 51.8 | 57.0 | 57.0 | 57.0 | 57.0 | 57.4 | 57.6 |

ตารางที่ ผ.24. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ในถังสะสมความร้อนชนิดแอร์-รอกเบด ความเร็วอากาศ 0.05 นิ้วน้ำ
ขนาดกอนหิน 1"-1 1/2"

| เวลา | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | T ₇ | T ₈ | T ₉ | T ₁₀ | T ₁₁ | T ₁₂ |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 15.14 | 36.2 | 36.0 | 36.0 | 36.0 | 37.0 | 36.6 | 40.0 | 37.4 | 39.8 | 37.0 |
| 15.16 | 36.4 | 36.1 | 36.2 | 36.2 | 39.4 | 37.2 | 48.1 | 41.2 | 47.8 | 41.2 |
| 15.18 | 36.7 | 36.5 | 36.6 | 36.6 | 41.0 | 38.1 | 49.5 | 44.2 | 49.2 | 44.4 |
| 15.20 | 37.2 | 36.7 | 37.1 | 37.1 | 42.5 | 39.3 | 50.6 | 46.6 | 50.2 | 46.9 |
| 15.22 | 37.8 | 37.2 | 37.8 | 37.7 | 44.2 | 40.8 | 51.6 | 48.6 | 50.8 | 49.0 |
| 15.24 | 38.3 | 37.8 | 38.5 | 38.1 | 45.6 | 42.2 | 52.4 | 50.2 | 51.6 | 50.4 |
| 15.26 | 39.1 | 38.4 | 39.3 | 38.8 | 47.1 | 43.9 | 53.0 | 51.2 | 52.2 | 51.7 |
| 15.28 | 39.8 | 39.2 | 40.3 | 39.5 | 48.4 | 45.5 | 53.2 | 52.2 | 52.3 | 52.6 |
| 15.30 | 40.6 | 40.0 | 41.1 | 40.2 | 49.4 | 46.8 | 53.6 | 52.8 | 52.4 | 53.4 |
| 15.32 | 41.4 | 40.8 | 42.0 | 41.0 | 50.4 | 47.8 | 53.8 | 53.4 | 52.6 | 53.8 |
| 15.34 | 42.3 | 41.8 | 43.1 | 41.8 | 51.2 | 49.2 | 54.6 | 53.8 | 53.6 | 54.4 |
| 16.10 | 53.6 | 54.6 | 54.8 | 53.6 | 58.2 | 58.2 | 57.6 | 57.6 | 56.6 | 58.2 |

ภาคผนวก ข

คุณสมบัติของอากาศที่ความดันบรรยากาศ (16)

| $T, ^\circ\text{C}$ | $\rho, \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ | $C_p, \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$ | $k, \frac{\text{W}}{\text{m K}}$ | $\mu, \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}$ | $\alpha, \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ | Pr |
|---------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|------|
| 0 | 1.292 | 1006 | 0.0242 | 1.72×10^{-5} | 1.86×10^{-5} | 0.72 |
| 20 | 1.204 | 1006 | 0.0257 | 1.81 | 2.12 | 0.71 |
| 40 | 1.127 | 1007 | 0.0272 | 1.90 | 2.40 | 0.70 |
| 60 | 1.059 | 1008 | 0.0287 | 1.99 | 2.69 | 0.70 |
| 80 | 0.999 | 1010 | 0.0302 | 2.09 | 3.00 | 0.70 |
| 100 | 0.946 | 1012 | 0.0318 | 2.18 | 3.32 | 0.69 |
| 120 | 0.898 | 1014 | 0.0333 | 2.27 | 3.66 | 0.69 |
| 140 | 0.854 | 1016 | 0.0345 | 2.34 | 3.98 | 0.69 |
| 160 | 0.815 | 1019 | 0.0359 | 2.42 | 4.32 | 0.69 |
| 180 | 0.779 | 1022 | 0.0372 | 2.50 | 4.67 | 0.69 |
| 200 | 0.746 | 1025 | 0.0386 | 2.57 | 5.05 | 0.68 |
| 220 | 0.715 | 1028 | 0.0399 | 2.64 | 5.43 | 0.68 |
| 240 | 0.688 | 1032 | 0.0412 | 2.72 | 5.80 | 0.68 |
| 260 | 0.662 | 1036 | 0.0425 | 2.79 | 6.20 | 0.68 |

ภาคผนวก ค

ศัพท์บัญญัติ

| | |
|---------------------------------------|--|
| Coefficient of Determination | สัมประสิทธิ์การหา |
| Equivalent Spherical Diameter of Rock | เส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าทรงกลมของก้อนหิน |
| Euler Number | ออยเลอร์นัมเบอร์ |
| Friction Factor | แฟคเตอร์ความเสียดทาน |
| Geometric Ratio | อัตราส่วนเรขาคณิต |
| Heat Capacity | ความจุความร้อนต่อมวล |
| Latent Heat Storage | ระบบสะสมความร้อนแฝง |
| Limestone | หินปูน |
| Moody Diagram | มูดี้ไดอะแกรม |
| Nusselt Number | นัสเซิลท์ นัมเบอร์ |
| Prandtl Number | พรานด์ทล นัมเบอร์ |
| Pressure Drop | ความดันลด |
| Porosity | ความพรุน |
| Random | แรนดอม |
| Reynold Number | เรโนลด์ นัมเบอร์ |
| Rockbed Porosity | ความพรุนของร็อคเบด |
| Specific Heat | ความร้อนจำเพาะ |
| Sensible Heat Storage | ระบบสะสมความร้อนสัมผัส |
| Stanton Number | สแตนตัน นัมเบอร์ |

Thermal Diffusivity

ค่าการฟุ้งกระจายของความร้อน

Volumetric Specific Heat

ความร้อนจำเพาะเชิงปริมาตร

Volumetric Heat Transfer

สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเชิงปริมาตร

Coefficient