



รหัสโครงการ SUT7-719-48-24-65

รายงานการวิจัย

การกักเก็บพลังงานแสงอาทิตย์ในรูปความร้อนในหินถม

Solar Thermal Energy Storage in Rock Fills

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปี
งบประมาณ 2548 และ 2549 ซึ่งงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีก็ด้วยความช่วยเหลือจาก
นางสาวกัลญา พับโพธิ์ ในการพิมพ์รายงานการวิจัย และนางณิชชาภัทร สิทธิคุณ ในการตรวจสอบ
ความถูกต้องของรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ผู้วิจัย

กรกฎาคม 2550

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบกักเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ในหินฉวม ระบบที่นำเสนอ (บางครั้งรู้จักในนามของตัวเก็บพลังงานแสงอาทิตย์) ถูกออกแบบให้ทำงานโดยไม่ใช้ไฟฟ้าจากภายนอก เพื่อให้เหมาะสำหรับคนจนในพื้นที่ห่างไกลจากตัวเมือง ซึ่งได้รับผลกระทบจากอากาศหนาวในฤดูหนาว แนวคิดคือในช่วงกลางวันพลังงานแสงอาทิตย์จะถูกเก็บไว้ในก้อนหินบะซอลต์ที่จัดเรียงอยู่ในหลุมดินรอบข้างและแผ่นพลาสติกใสด้านบน จะใช้เป็นตัวฉนวนความร้อน ในช่วงกลางคืนพลังงานความร้อนจะถูกปล่อยออกมาเพื่อให้ความอบอุ่นแก่บ้านหรือห้อง กิจกรรมหลักของงานวิจัย คือ 1) ทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อหาคุณสมบัติเชิงอุณหภูมิจากหินสปีชชนิดที่พบอย่างกว้างขวางในภาคเหนือและตะวันออกเฉียงเหนือ 2) สร้างแบบจำลองย่อส่วนสำหรับระบบกักเก็บและบ้านเพื่อตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในจุดต่าง ๆ 3) พัฒนาแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์เพื่อเปรียบเทียบและสอบเทียบกับผลการตรวจวัด 4) ร่างแนวทางการออกแบบเพื่อให้ง่ายและสามารถนำไปประยุกต์ใช้อย่างเป็นทางการในพื้นที่ย่าง ๆ หินบะซอลต์จากจังหวัดบุรีรัมย์ได้นำมาทดสอบในแบบจำลองย่อส่วน เพราะมีค่าการส่งผ่านและการจุความร้อนสูงสุด ผลจากการตรวจวัดระบุว่า ระบบกักเก็บพลังงานสามารถเพิ่มอุณหภูมิในบ้านได้สูงกว่าอากาศภายนอกประมาณ 4-6 องศาเซลเซียส ซึ่งผลจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของการจัดเรียงหิน ขนาดของท่อส่ง และอุณหภูมิของอากาศภายนอก แนวทางการออกแบบที่ได้สอบเทียบมาจากผลการตรวจวัดสามารถระบุขนาดของพื้นที่กักเก็บความร้อนของบ่อ ความหนาแน่นของการจัดเรียงหินและขนาดของท่อที่เหมาะสมที่สุด โดยได้พิจารณาถึงขนาดของหินที่มีอยู่ในแต่ละพื้นที่ ปริมาตรของบ้านหรือห้อง และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ต้องการ

Abstract

The objective of this research is to assess the efficiency of solar thermal energy storage system using basalt fills. The proposed system (sometimes known as solar collector) is designed to operate without external electricity, as it is intended for poor people in remote areas who have suffered from severely cold weather during winter. The concept is that during the daytime the solar energy is collected and stored in basalt ballasts filled in a pit. The surrounding soil and acrylic sheet cover are used as insulator. The thermal energy is then released to warm up housing through a system of tubing during the night. The research effort includes (1) laboratory determination of thermal properties of ten rock types that are widely exposed in the north and northeast of Thailand, (2) construction of a scaled down model for the storage system and housing to monitor the temperature change at various system components, (3) derivation of a mathematical model to compare and calibrate with the monitoring results, and (4) development of a design guideline for an ease of actual application in any specific area. Burirum basalt is selected for testing in the scaled down model, as it poses highest thermal conductivity and specific heat. Monitoring results indicate that throughout the night the storage system can increase housing temperature from 4 to 6 Celsius higher than that of the surrounding, depending on the basalt packing density, tube sizes and surrounding temperatures. The proposed design guideline calibrated from the actual measurements can provide recommends on the most suitable solar collecting area, depth of rock pit, rock packing density, and tubing sizes while considering the available rock types, volumes of room to be heated, and the desired temperature increases.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อ.....	ข
Abstract.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทนำ	1
ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	2
ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	2
ผลสำเร็จของการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์.....	4
บทที่ 1 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	5
1.1 ลักษณะภูมิอากาศในฤดูหนาวของประเทศไทย.....	5
1.2 ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย.....	14
1.3 การใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์.....	17
1.3.1 การผลิตกระแสไฟฟ้า.....	17
1.3.2 การทำน้ำร้อน.....	17
1.3.3 การอบแห้ง.....	22
1.3.4 การกลั่นน้ำ.....	22
1.3.5 การประกอบอาหาร.....	26
1.3.6 การทำความเย็นและการปรับอากาศ.....	26
1.3.7 การสูบน้ำ.....	26
1.3.8 สระแสงอาทิตย์.....	29

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
1.4 การเก็บสะสมพลังงานความร้อน	29
1.4.1 ลักษณะการสะสมพลังงาน	29
1.4.2 ตัวแปรที่ต้องพิจารณาในการออกแบบระบบ	34
1.4.3 วัสดุที่ใช้เก็บสะสมพลังงานความร้อน	35
1.5 คุณสมบัติทางด้านอุณหภูมิจากวัสดุทั่วไป	37
1.5.1 ความสามารถในการนำความร้อนของวัสดุ	37
1.5.2 ความร้อนจำเพาะ	38
1.5.3 ความสามารถของการแพร่กระจายความร้อน	38
1.6 คุณสมบัติทางด้านอุณหภูมิจากหิน	38
1.6.1 ความร้อนจำเพาะของหิน	43
1.6.2 การนำความร้อนของหิน	43
1.7 คุณสมบัติทางด้านอุณหภูมิจากดิน	44
1.7.1 ความร้อนจำเพาะของดิน	47
1.7.2 การนำความร้อนของดิน	47
1.8 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์	48
1.9 วัสดุผิวสะท้อนแสง	49
1.9.1 ผิวสะท้อนแสงมาตรฐาน	50
1.9.2 การหาค่าสะท้อนแสงจากแสงอาทิตย์	50
1.9.3 การสอบเทียบค่าการสะท้อนแสงของแมกนีเซียมออกไซด์มาตรฐาน	51
1.10 เทอร์โมไดนามิกส์และการถ่ายเทความร้อน	51
1.10.1 ระบบพลังงาน	51
1.10.2 ชนิดของพลังงาน	52
1.10.3 การถ่ายเทความร้อน	52
1.10.4 ความร้อนจำเพาะ	54
1.10.5 พลังงานภายใน เอนทาลปีและความร้อนจำเพาะ	54

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 2 ธรณีวิทยาหินอัคนีของประเทศไทย.....	57
2.1 กล่าวนำ.....	57
2.2 หินอัคนีแทรกซอน.....	57
2.2.1 หินแกรนิต.....	57
2.2.2 หินเมฟิกและอัลตราเมฟิก.....	59
2.3 หินอัคนีฟู.....	59
2.3.1 หินอัคนีฟูก่อนมหายุคซีโนโซอิก.....	59
2.3.2 หินอัคนีพุนมหายุคซีโนโซอิก.....	62
2.4 ธรณีวิทยาหินอัคนีภูมิภาค.....	62
2.4.1 ภาคเหนือและภาคตะวันตกตอนบน.....	62
2.4.2 บริเวณเทือกเขาเลย-เพชรบูรณ์.....	63
2.5 หินบะซอลต์และปริมาณสำรอง.....	64
2.5.1 บริเวณภาคเหนือ.....	64
2.5.2 บริเวณเทือกเขาเพชรบูรณ์.....	66
2.5.3 บริเวณภาคตะวันตก.....	66
2.5.4 บริเวณภาคตะวันออก.....	67
2.5.5 บริเวณที่ราบสูงโคราช.....	68
2.5.6 ปริมาณสำรอง.....	69
บทที่ 3 การทดสอบคุณสมบัติด้านอุณหภูมิของหิน.....	73
3.1 ชนิดของตัวอย่างหิน.....	73
3.1.1 กลุ่มหินทราย.....	73
3.1.2 หินบะซอลต์.....	75
3.1.3 หินอ่อน.....	75
3.1.4 กลุ่มหินแกรนิต.....	75
3.1.5 หินปูน.....	75
3.1.6 กลุ่มเกลือหิน.....	76

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 การทดสอบคุณสมบัติทางด้านอุณหภูมิของหิน.....	76
3.3 สรุปผลการทดสอบ.....	76
บทที่ 4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	87
4.1 อุณหพลศาสตร์และการถ่ายเทความร้อน.....	87
4.1.1 การนำความร้อน.....	88
4.1.2 การพาความร้อน.....	88
4.1.3 การแผ่รังสีความร้อน.....	89
4.1.4 การพาความร้อนตามธรรมชาติ.....	89
4.1.5 การเปล่งรังสีความร้อน.....	92
4.2 สมดุลพลังงานในระบบ.....	92
4.3 ข้อสมมติฐานเบื้องต้น.....	97
4.4 การถ่ายเทพลังงานความร้อนในช่วงเวลากลางวัน.....	99
4.4.1 อุณหภูมิหิน.....	99
4.4.2 อุณหภูมิอากาศภายนอก.....	102
4.5 การถ่ายเทพลังงานความร้อนในช่วงเวลากลางคืน.....	104
4.5.1 อุณหภูมิหิน.....	104
4.5.2 อุณหภูมิอากาศภายนอก.....	104
4.5.3 อุณหภูมิอากาศภายในบ้าน.....	106
4.6 การพัฒนาคอมพิวเตอร์โปรแกรม.....	109
บทที่ 5 แบบจำลองทางกายภาพ.....	115
5.1 การสร้างแบบจำลองทางกายภาพ.....	115
5.1.1 การสร้างบ่อกักเก็บพลังงาน.....	115
5.1.2 การสร้างบ้านจำลอง.....	117
5.1.3 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ.....	122

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลเบื้องต้น	122
5.3.1 Model I	128
5.3.2 Model II ที่ใช้ท่ออากาศร้อนขนาด 2 นิ้ว	128
5.3.3 Model II ที่ใช้ท่ออากาศร้อนขนาด 4 นิ้ว	128
5.3.4 Model II ที่ใช้ท่ออากาศร้อนขนาด 8 นิ้ว	132
5.3.5 Model II ท่ออากาศร้อน 8 นิ้ว (หिनตลงครึ่งหนึ่ง)	132
5.3.6 Model II ท่ออากาศร้อนหน้าตัดขนาด 0.6×0.6 เมตร (หिनตลงครึ่งหนึ่ง)	136
5.3 สรุปผลการทดสอบ	136
บทที่ 6 การคำนวณพลังงานความร้อนของแบบจำลอง	139
6.1 การเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางกายภาพ	139
6.2 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปร	151
6.3 แนวทางการออกแบบระบบหिनต	159
บทที่ 7 บทสรุป	175
บรรณานุกรม	179
ภาคผนวก ก ผลการตรวจวัดอุณหภูมิของแบบจำลองทางกายภาพ	189
ประวัตินักวิจัย	223

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
1.1	สรุปคุณสมบัติทางด้านอุณหภูมิของหินอัคนีและหินแปรชนิดต่าง ๆ.....	40
1.2	สรุปคุณสมบัติทางด้านอุณหภูมิของดิน.....	46
2.1	ช่วงการเกิดหินอัคนีพุหรือหินภูเขาไฟในประเทศไทย.....	61
2.2	องค์ประกอบของแร่ในหินบะซอลต์ที่พบในประเทศไทย.....	70
3.1	แสดงสถานที่เก็บและชนิดหินและดินที่ใช้ในการทดสอบ.....	74
3.2	ผลการทดสอบหาคคุณสมบัติด้านความร้อนของหินจำนวน 12 ตัวอย่างและดิน 1 ตัวอย่าง.....	80
4.1	ความสัมพันธ์เชิงทดลองสำหรับค่า Nu เฉลี่ยของการพาความร้อนแบบธรรมชาติ.....	91
6.1	ค่าปรับลดอุณหภูมิในบ้านที่เพิ่มขึ้นจากปัจจัยด้านอุณหภูมิตั้งแต่ลมต่ำสุด.....	171

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉลี่ยในรอบ 1 ปี ของประเทศไทย.....	6
1.2 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิรายวันในฤดูหนาวบริเวณภาคเหนือของประเทศไทย.....	7
1.3 แผนที่แสดงจำนวนวันที่มีอุณหภูมิต่ำสุดน้อยกว่า 23 องศาเซลเซียส.....	8
1.4 แผนที่แสดงจำนวนวันที่มีอุณหภูมิต่ำสุดน้อยกว่า 16 องศาเซลเซียส.....	9
1.5 แผนที่ภูมิอากาศของประเทศไทยในเดือนมกราคม.....	10
1.6 แผนที่ภูมิอากาศของประเทศไทยในเดือนกุมภาพันธ์.....	11
1.7 แผนที่ภูมิอากาศของประเทศไทยในเดือนพฤศจิกายน.....	12
1.8 แผนที่ภูมิอากาศของประเทศไทยในเดือนธันวาคม.....	13
1.9 ปริมาณการดูดซับและการสะท้อนกลับของพลังงานจากดวงอาทิตย์.....	15
1.10 ค่าความเข้มของพลังงานแสงอาทิตย์ในช่วงฤดูหนาวของจังหวัดเลย.....	18
1.11 ค่าความเข้มของพลังงานแสงอาทิตย์ในช่วงฤดูหนาวของจังหวัดเชียงใหม่.....	19
1.12 ค่าความเข้มของพลังงานแสงอาทิตย์ในช่วงฤดูหนาวของจังหวัดนครราชสีมา.....	20
1.13 ระบบผลิตและจำหน่ายไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาบ้าน.....	21
1.14 ระบบผลิตน้ำร้อนจากแสงอาทิตย์.....	23
1.15 ส่วนประกอบของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์.....	24
1.16 ระบบกลั่นน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ประสิทธิภาพสูง.....	25
1.17 การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการประกอบอาหาร.....	27
1.18 ระบบทำความเย็นและปรับอากาศโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์.....	28
1.19 ระบบการสูบน้ำโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์.....	30
1.20 การผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้สระแสงอาทิตย์.....	31
1.21 ลักษณะการเก็บกักพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์.....	32
1.22 ความไม่สอดคล้องกันของพลังงานที่มีและพลังงานที่ต้องการ.....	33
1.23 การสะสมพลังงานความร้อนในหินถมเพื่อความอบอุ่นในบ้านเรือน.....	36
1.24 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติทางด้านความร้อนของหิน.....	39
1.25 เปรียบเทียบค่าการนำความร้อนของหินชนิดต่าง ๆ.....	41
1.26 เปรียบเทียบค่าความจุความร้อนจำเพาะของหินชนิดต่าง ๆ.....	42
1.27 ค่าเฉลี่ยของความจุความร้อนเชิงปริมาตรของดิน โดยทั่วไป.....	45

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.1	แผนที่แสดงการแผ่กระจายของหินอัคนีและขอบเขตแนวหินแกรนิตทั้ง 3 แนวของประเทศไทย.....	58
2.2	แผนที่แสดงแนวหินอัคนีแทรกซอนอัลตราเมฟิกและเมฟิก 3 แนวของประเทศไทย.....	60
3.1	การตัดตัวอย่างหินสำหรับการทดสอบคุณสมบัติด้านอุณหภูมิ.....	77
3.2	ตัวอย่างหินที่ได้จัดเตรียมไว้เพื่อการทดสอบคุณสมบัติด้านอุณหภูมิ.....	78
3.3	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติด้านความร้อน.....	79
3.4	เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของหินทั้ง 12 ตัวอย่างโดยเรียงลำดับตามความหนาแน่น.....	81
3.5	เปรียบเทียบค่าความจุความร้อนจำเพาะของหินทั้ง 12 ตัวอย่างโดยเรียงลำดับตามความหนาแน่น.....	82
3.6	เปรียบเทียบค่าการนำความร้อนของหินที่ทดสอบในงานวิจัยนี้กับหินที่ได้ทดสอบในต่างประเทศ.....	84
3.7	เปรียบเทียบค่าความจุความร้อนของหินที่ทดสอบในงานวิจัยนี้กับหินที่ได้ทดสอบในต่างประเทศ.....	85
4.1	ลักษณะการสะท้อน การดูดกลืน และการส่งผ่านพลังงานจากแสงของวัสดุใส.....	93
4.2	ลักษณะการสะท้อนรังสีจากแสงอาทิตย์.....	94
4.3	การถ่ายเทพลังงานในระบบเปิด (Open system หรือ Control volume).....	96
4.4	การจำแนกระบบย่อยในระบบกักเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์และบ้านจำลอง.....	98
4.5	การถ่ายเทพลังงานในระบบหินฉนวนและอากาศในบ่อช่วงเวลากลางวัน.....	100
4.6	การถ่ายเทพลังงานในระบบหินฉนวนและอากาศในบ่อช่วงเวลากลางคืน.....	105
4.7	การถ่ายเทพลังงานความร้อนภายในบ้านจำลอง.....	108
4.8	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิรายวันในฤดูหนาวบริเวณภาคเหนือของประเทศไทย.....	110
4.9	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของดิน ซึ่งเป็นค่าคงที่ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ต้องกรอกเข้าไปในโปรแกรมเพื่อใช้ในการคำนวณ.....	111
4.10	ค่าความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์ในช่วงฤดูหนาวบริเวณจังหวัดนครราชสีมา.....	112
5.1	แบบจำลองทางกายภาพประกอบด้วยระบบกักเก็บพลังงานและแบบจำลองบ้านย่อยส่วน.....	116
5.2	การเรียงหินบนตะแกรงไม้ไผ่เพื่อนำไปวางไว้กลางแดดรับพลังงานความร้อน.....	118

สารบัญรูปร่างภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.3 ระบบกักเก็บพลังงานแบบที่ 1.....	119
5.4 ฝาปิดระบบกักเก็บพลังงานแบบที่ 2.....	120
5.5 ขั้นตอนการสร้างระบบกักเก็บพลังงานแบบที่ 2.....	121
5.6 การติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิหิ้งกลางบ่อ.....	123
5.7 อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิที่ติดตั้งเพื่อวัดอุณหภูมิของอากาศภายในบ่อกักเก็บพลังงาน.....	124
5.8 อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิที่ติดตั้งเพื่อวัดอุณหภูมิปลายท่ออากาศร้อน.....	125
5.9 อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิที่ติดตั้งเพื่อวัดอุณหภูมิภายในบ้านจำลอง.....	126
5.10 อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิที่ติดตั้งเพื่อวัดอุณหภูมิของอากาศนอกร้าน.....	127
5.11 แบบจำลองทางกายภาพ ประกอบด้วยบ่อกักเก็บพลังงานและบ้านจำลอง โดยมี ท่ออากาศร้อนขนาด 2 นิ้วต่ออยู่.....	129
5.12 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดตรวจวัด 5 ตำแหน่ง ของ Model II ที่ใช้ท่ออากาศร้อน ขนาด 2 นิ้ว.....	130
5.13 แบบจำลองทางกายภาพ ประกอบด้วยบ่อกักเก็บพลังงานและบ้านจำลอง โดยมี ท่ออากาศร้อนขนาด 4 นิ้วต่ออยู่.....	131
5.14 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดตรวจวัด 5 ตำแหน่ง ของ Model II ที่ใช้ท่ออากาศร้อน ขนาด 4 นิ้ว.....	133
5.15 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดตรวจวัด 5 ตำแหน่ง ของ Model II ที่ใช้ท่ออากาศร้อน ขนาด 8 นิ้ว.....	134
5.16 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดตรวจวัด 5 ตำแหน่ง ของ Model II ที่ใช้ท่ออากาศร้อน ขนาด 8 นิ้ว และได้เอาหินในระบบกักเก็บออกครึ่งหนึ่ง.....	135
5.17 ระบบกักเก็บพลังงานที่มีท่ออากาศร้อนขนาดหน้าตัด 0.6×0.6 เมตร หุ้มด้วยแผ่น โฟม.....	137
5.18 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดตรวจวัด 5 ตำแหน่ง ของ Model II ที่ใช้ท่ออากาศร้อน ขนาดหน้าตัดเท่ากับ 0.6×0.6 เมตร และได้เอาหินในระบบกักเก็บออกครึ่งหนึ่ง.....	138
6.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของหินและอากาศในบ่อกักเก็บพลังงานที่ได้จากการตรวจวัด เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ของ Model II สำหรับท่ออากาศร้อนขนาด 2 นิ้ว.....	140

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.2 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของหินและอากาศในบ่อกักเก็บพลังงานที่ได้จากการตรวจวัด เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ของ Model II สำหรับท่ออากาศร้อนขนาด 4 นิ้ว.....	141
6.3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของหินและอากาศในบ่อกักเก็บพลังงานที่ได้จากการตรวจวัด เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ของ Model II สำหรับท่ออากาศร้อนขนาด 8 นิ้ว.....	142
6.4 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศในบ้านและนอกบ้านที่ได้จากการตรวจวัด เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ (จุดที่บ) ของ Model II สำหรับท่ออากาศร้อนขนาด 2 นิ้ว.....	144
6.5 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศในบ้านและนอกบ้านที่ได้จากการตรวจวัด เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ (จุดที่บ) ของ Model II สำหรับท่ออากาศร้อนขนาด 4 นิ้ว.....	145
6.6 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศในบ้านและนอกบ้าน ได้จากการตรวจวัด เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ (จุดที่บ) ของ Model II สำหรับท่ออากาศร้อนขนาด 8 นิ้ว.....	146
6.7 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของหินและอากาศในบ่อกักเก็บพลังงานที่ได้จากการตรวจวัด เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ของ Model II สำหรับท่ออากาศร้อนขนาด 8 นิ้ว และใช้ปริมาณหินประมาณ 370 กิโลกรัม.....	147
6.8 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของหินและอากาศในบ่อกักเก็บพลังงานที่ได้จากการตรวจวัด เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ของ Model II สำหรับ ท่ออากาศร้อนขนาดหน้าตัด 0.6×0.6 เมตร และใช้ปริมาณหินประมาณ 370 กิโลกรัม..	148
6.9 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศในบ้านและนอกบ้าน ได้จากการตรวจวัด เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ (จุดที่บ) ของ Model II สำหรับท่ออากาศร้อนขนาด 8 นิ้ว และใช้ปริมาณหินประมาณ 370 กิโลกรัม..	149

สารบัญญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
6.10 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศในบ้านและนอกบ้านได้จากการตรวจวัดเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ (จุดทึบ) ของ Model II สำหรับท่ออากาศร้อนขนาดหน้าตัด 0.6×0.6 เมตร และใช้ปริมาณหินประมาณ 370 กิโลกรัม	150
6.11 ระดับพลังงานสูงสุดและต่ำสุดที่เฉลี่ยในพื้นที่ภาคเหนือช่วงฤดูหนาวของประเทศไทย	152
6.12 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในบ้านภายใต้สภาวะที่มีอุณหภูมิต่ำสุดของสิ่งแวดล้อม	153
6.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในบ้านที่เพิ่มขึ้นที่ได้จากการคำนวณกับค่าความจุ-ความร้อนจำเพาะของหิน 12 ชนิด ที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการในงานวิจัยนี้	155
6.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในบ้านที่เพิ่มขึ้นกับสัดส่วนของปริมาตรบ้าน (V_b) ต่อปริมาตรหินถม (V_p)	156
6.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในบ้านที่เพิ่มขึ้นกับพื้นที่รับพลังงานแสงอาทิตย์ของบ่อ	157
6.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในบ้านที่เพิ่มขึ้นกับขนาดของท่ออากาศร้อนที่ใช้	158
6.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในบ้านที่เพิ่มขึ้นกับการรั่วไหลของบ้าน	160
6.18 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในบ้านที่มีปริมาตร 31.5 ลูกบาศก์เมตร โดยมีพื้นที่รับพลังงานแสงอาทิตย์แตกต่างกัน 4 ขนาด และมีความหนาของชั้นหินถมระหว่าง 0 ถึง 5 เมตร ความหนาที่ทำให้อุณหภูมิในบ้านเพิ่มขึ้นสูงสุดคำนวณเป็นปริมาตรหินถมได้เท่ากับ 6.3 ลูกบาศก์เมตร	161
6.19 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในบ้านที่มีปริมาตร 56 ลูกบาศก์เมตร โดยมีพื้นที่รับพลังงานแสงอาทิตย์แตกต่างกัน 4 ขนาด และมีความหนาของชั้นหินถมอยู่ระหว่าง 0 ถึง 5 เมตร ความหนาที่ทำให้อุณหภูมิในบ้านเพิ่มขึ้นสูงสุดคำนวณเป็นปริมาตรหินถมได้เท่ากับ 7.0 ลูกบาศก์เมตร	162
6.20 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในบ้านที่มีปริมาตร 87.5 ลูกบาศก์เมตร โดยมีพื้นที่รับพลังงานแสงอาทิตย์แตกต่างกัน 4 ขนาด และมีความหนาของชั้นหินถมอยู่ระหว่าง 0 ถึง 5 เมตร ความหนาที่ทำให้อุณหภูมิในบ้านเพิ่มขึ้นสูงสุดคำนวณเป็นปริมาตรหินถมได้เท่ากับ 8.0 ลูกบาศก์เมตร	163
6.21 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของหินถมที่เหมาะสมที่สุด (ทำให้อุณหภูมิในบ้านเพิ่มขึ้นสูงสุด) กับปริมาตรของบ้าน	165

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.22	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาที่เหมาะสมกับพื้นที่รับพลังงานแสงอาทิตย์..... 166
6.23	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในบ้านที่เพิ่มขึ้นกับปริมาตรของบ้าน ภายใต้การออกแบบที่ระบบหिनถมีพื้นที่รับพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 6.25 ตารางเมตร และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่ออากาศร้อนเท่ากับ 0.1 ถึง 0.5 เมตร..... 167
6.24	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในบ้านที่เพิ่มขึ้นกับปริมาตรของบ้าน ภายใต้การออกแบบที่ระบบหिनถมีพื้นที่รับพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 9.0 ตารางเมตร และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่ออากาศร้อนเท่ากับ 0.1 ถึง 0.5 เมตร..... 168
6.25	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในบ้านที่เพิ่มขึ้นกับปริมาตรของบ้าน ภายใต้การออกแบบที่ระบบหिनถมีพื้นที่รับพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 12.25 ตารางเมตร และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่ออากาศร้อนเท่ากับ 0.1 ถึง 0.5 เมตร..... 169
6.26	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในบ้านที่เพิ่มขึ้นกับปริมาตรของบ้าน ภายใต้การออกแบบที่ระบบหिनถมีพื้นที่รับพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 16.0 ตารางเมตร และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่ออากาศร้อนเท่ากับ 0.1 ถึง 0.5 เมตร..... 170
6.27	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปรับลดอุณหภูมิในบ้านที่เพิ่มขึ้นกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมต่ำสุด 172
6.28	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปรับลดอุณหภูมิในบ้านที่เพิ่มขึ้นกับการรั่วไหลของบ้าน 174

บทนำ

ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

พื้นที่ภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยมักจะประสบปัญหาภัยหนาวในช่วงฤดูหนาวของทุกปี ปัญหาดังกล่าวก่อให้เกิดความเสียหายต่อสุขภาพของประชาชนและเศรษฐกิจของประเทศ จากสถิติของกรมอุตุนิยมวิทยาพบว่าบางพื้นที่มีอุณหภูมิต่ำถึง -2 องศาเซลเซียส เช่น ในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ จังหวัดเชียงราย จังหวัดแม่ฮ่องสอน และจังหวัดเลย ทุกปีหน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชนได้ระดมเงินเป็นจำนวนมากเพื่อช่วยเหลือบรรเทาความเดือนร้อนจากภัยหนาว เทคโนโลยีการกักเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ในหินฉวมเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อแก้ปัญหาภัยหนาวนี้ ซึ่งเทคโนโลยีนี้มีแนวคิดคือ ทำการกักเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่มีอยู่มากในช่วงเวลากลางวันไว้ในหินฉวมที่สร้างขึ้นได้ดิน และปล่อยพลังงานความร้อนที่เก็บไว้เพื่อสร้างความอบอุ่นให้กับที่พักอาศัยในช่วงเวลากลางคืนเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง

เทคโนโลยีการกักเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์มีคุณลักษณะเฉพาะคือ วัสดุที่จะนำมาใช้เป็นตัวกลางในการสะสมพลังงานความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพจะต้องเป็นวัสดุที่มีความสามารถในการจุความร้อนได้สูงและเป็นระยะเวลาานาน จากงานวิจัยที่ดำเนินการในต่างประเทศพบว่าหินบางชนิดเป็นวัสดุที่เหมาะสมกับเทคโนโลยีนี้ เช่น หินภูเขาไฟและหินอัคนี และจากการสำรวจของกรมทรัพยากรธรณีพบว่า หินดังกล่าวมีการกระจายตัวอยู่ในหลายพื้นที่ของประเทศไทย ดังนั้นจึงอาจนำหินที่สามารถหาได้ในท้องถิ่นมาใช้ให้เกิดประโยชน์ เทคโนโลยีที่คล้ายคลึงในการกักเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์นี้ได้ถูกพัฒนาและดำเนินการจนประสบความสำเร็จมาแล้วในหลายประเทศ (Coutier and Farber, 1982; Meier et al., 1991; Choudhury et al., 1995; Abbud et al.1995 and Kurklu et al., 2003) แต่โครงการเหล่านั้นจะใช้เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ หรือโดมปฏิกริยาเรือนกระจก เป็นตัวรับแสงและส่งพลังงานความร้อนไปยังชั้นหินฉวม ผ่านอุปกรณ์เพิ่มและถ่ายเทความร้อน ซึ่งเทคนิคดังกล่าวต้องใช้ต้นทุนสูงในการก่อสร้าง ดังนั้นการนำเอาเทคโนโลยีนี้มาใช้จะต้องมีการประยุกต์และปรับเปลี่ยนเพื่อให้เหมาะสมกับสภาพพื้นที่และสภาวะทางเศรษฐกิจของประเทศไทยและเลือกใช้วัสดุในราคาถูกแต่ให้ประสิทธิภาพสูงขึ้น และอีกทั้งข้อได้เปรียบของเทคโนโลยีนี้คือแหล่งพลังงานต้นกำเนิดที่นำมาเป็นพลังงานหลักคือ พลังงานจากแสงอาทิตย์ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่ไม่ต้องลงทุน นอกจากนี้หินฉวมเป็นวัสดุในท้องถิ่นที่ราคาถูก มีอายุการใช้งานที่ยาวนานและปลอดภัย

ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้นจึงจำเป็นต้องทำการศึกษาและพัฒนาเทคโนโลยีนี้ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับสภาพพื้นที่ของประเทศไทย ซึ่งจะเป็นการแก้ปัญหาภัยหนาวอย่างยั่งยืนและดำเนินการตามนโยบายของรัฐบาลในการช่วยเหลือประชาชนระดับรากหญ้า และส่งผลให้ประชาชนมีสุขภาพที่ดี อันจะนำไปสู่การยกระดับคุณภาพชีวิตของประชาชนในชุมชนของประเทศไทยในอนาคต นอกจากคุณประโยชน์ดังกล่าวแล้ว การกักเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ในช่วงเวลากลางวันแล้วนำมาใช้ในเวลากลางคืน ในขณะที่มีอุณหภูมิติดลบยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมการเกษตร เช่น การบ่มเมล็ดพันธุ์พืช โรงเลี้ยงสัตว์ขนาดเล็ก และการเพาะปลูกในเรือนกระจก เป็นต้น

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ เพื่อทดสอบและออกแบบระบบการเก็บกักพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ในหินถมที่สร้างขึ้น โดยระบบจะมีการเก็บพลังงานความร้อนในเวลากลางวันและปล่อยพลังงานความร้อนออกมาใช้ในเวลากลางคืน และไม่อาศัยพลังงานไฟฟ้าหรือจากปิโตรเลียมเข้ามาช่วย โดยมีคุณประโยชน์หลักคือทำให้ความอบอุ่นแก่ครัวเรือนในเวลาที่ไม่มีอากาศหนาว หรืออาจนำไปประยุกต์ใช้แก่อุตสาหกรรมครัวเรือนขนาดเล็กที่จำเป็นต้องใช้ความร้อน เช่น การบ่มใบยาสูบ การอบสมุนไพร การอบแห้งต่าง ๆ ซึ่งเป็นการลดพลังงานไฟฟ้าอีกทางหนึ่ง

ขอบเขตของโครงการวิจัย

1) การศึกษาและประมวลข้อมูลทางด้านธรณีวิทยาและแร่วิทยาของหินอัคนีและหินภูเขาไฟในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย เพื่อกำหนดพื้นที่ สำหรับการสำรวจและเก็บตัวอย่างหินที่คาดว่าจะถูกนำมาใช้เป็นวัสดุหินถม ซึ่งข้อมูลที่นำมาศึกษาจะต้องเป็นข้อมูลที่ได้ถูกเปิดเผยหรือตีพิมพ์โดยหน่วยงานของรัฐและบริษัทเอกชน

2) การสำรวจธรณีวิทยาและการคัดเลือกตัวอย่างในภาคสนาม จะทำการเก็บตัวอย่างหิน 1 ชนิด ที่เป็นตัวแทนภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยใช้เกณฑ์คือวัสดุธรรมชาติเหล่านี้จะต้องหาได้ง่ายในพื้นที่นั้น ๆ

3) การทดสอบตัวอย่างหินในห้องปฏิบัติการ ประกอบด้วยการทดสอบ 2 กลุ่มใหญ่ คือ การทดสอบหาคุณสมบัติทางด้านอุณหพลศาสตร์ของหิน สำหรับการทดสอบในกลุ่มนี้จะประกอบด้วย การทดสอบการนำความร้อน (Thermal conductivity) และการทดสอบหาค่าความร้อนจำเพาะของหิน (Specific heat) ซึ่งการทดสอบดังกล่าวจะดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM

4) การจำลองเชิงกายภาพประกอบด้วยการศึกษาพฤติกรรมด้วยแบบจำลองเชิงกายภาพหรือ ประสิทธิภาพความเป็นฉนวนของดินและความสามารถในการกักเก็บความร้อนของหินที่ถูกคัดเลือกจากกระบวนการในห้องปฏิบัติการ รวมไปถึงตรวจสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบ

5) จัดอบรมแก่บุคคลในองค์กรของรัฐบาลหรือประชาชนที่เป็นกลุ่มเป้าหมายและนำเสนอผลการศึกษา เผยแพร่เทคโนโลยีนี้แก่นักวิชาการที่เกี่ยวข้อง

ผลสำเร็จของการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ

จากผลการวิจัยที่เสนอมานี้มีหลายด้าน ซึ่งสามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

ทางด้านเศรษฐศาสตร์

เนื่องจากแหล่งพลังงานหลักที่นำมาใช้สำหรับเทคโนโลยีนี้ได้มาจากพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นพลังงานที่มีปริมาณมากและสามารถนำมาใช้ได้อย่างไม่จำกัด ดังนั้นค่าใช้จ่ายสำหรับเทคโนโลยีนี้จะลงทุนเฉพาะวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการก่อสร้างเท่านั้น อีกทั้งหินฉนวนที่ใช้เป็นตัวกักเก็บความร้อนและดินที่ใช้เป็นฉนวนกั้นความร้อนเป็นวัสดุธรรมชาติและสามารถหาได้ในท้องถิ่น เมื่อเปรียบเทียบกับงบประมาณรวมที่สูญเสียไปกับการแก้ปัญหาแบบไม่ถาวร เช่น การแจกผ้าห่ม เสื้อกันหนาว และค่าใช้จ่ายในการดูแลด้านสุขภาพ ซึ่งในระยะยาวจะสูงกว่าการแก้ปัญหาด้วยเทคโนโลยีนี้ สำหรับอุตสาหกรรมขนาดเล็กที่ต้องใช้ความร้อนในระดับที่ไม่สูงมาก เช่น อุตสาหกรรมการถนอมอาหาร อุตสาหกรรมการอบสมุนไพร อุตสาหกรรมอบใบยาสูบ และ อุตสาหกรรมอบแห้งข้าว การนำเอาเทคโนโลยีนี้มาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเหล่านี้จะสามารถลดปริมาณการใช้ไฟฟ้าในการให้ความร้อนลงได้

ทางด้านพัฒนาการด้านสาธารณสุข

จากสถิติของกระทรวงของสาธารณสุขพบว่าในแต่ละปีมีผู้เจ็บป่วยจำนวนมากจากปัญหาภัยหนาว และในบางพื้นที่ที่มีอากาศหนาวมากปัญหาดังกล่าวรุนแรงถึงขั้นทำให้มีผู้เสียชีวิต ซึ่งการนำเอาเทคโนโลยีนี้มาใช้จะสามารถสร้างความอบอุ่นในที่พักอาศัยได้สูงกว่าอุณหภูมิภายนอก (คาดว่าจะสามารถเพิ่มได้ 10-15°C) ส่งผลให้สามารถบรรเทาปัญหาทางด้านสุขภาพของประชาชนลงได้อีกทางหนึ่ง

ทางการพัฒนาองค์ความรู้ใหม่ของประเทศ

การศึกษาคุณสมบัติเชิงอุณหพลศาสตร์ของหินและนำคุณสมบัติเฉพาะนี้มาประยุกต์ใช้ในการช่วยลดพลังงาน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง เป็นการนำพลังงานหมุนเวียนในธรรมชาติเข้ามาใช้ประโยชน์ ซึ่งองค์ความรู้ในขณะนี้ยังไม่มี การดำเนินการวิจัยอย่างจริงจังมาก่อนมาประเทศไทย ซึ่งผลสำเร็จของงานวิจัยนอกจากจะนำไปใช้ได้จริงอย่างเป็นรูปธรรมแล้ว ยังเป็นจุดเริ่มต้นขององค์ความรู้ใหม่ที่จะมีการพัฒนาให้สูงขึ้นต่อไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสมบัติของหินแต่ละชนิดเชิงอุณหพลศาสตร์และค่าความซึมผ่านของหินถม เป็นต้น

หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

- 1) อุตสาหกรรมครัวเรือนขนาดเล็ก
 - อุตสาหกรรมถนอมอาหาร
 - อุตสาหกรรมอบสมุนไพร
 - การอบแห้งผลไม้
- 2) หน่วยงานราชการ เช่น หน่วยงานบรรเทาสาธารณภัย
- 3) หน่วยงานเอกชนที่จะนำเทคโนโลยีไปประยุกต์ใช้ในเชิงพาณิชย์
- 4) หน่วยงานในท้องถิ่น เช่น อบต. อบจ.
- 5) บ้านพักอาศัย

บทที่ 1

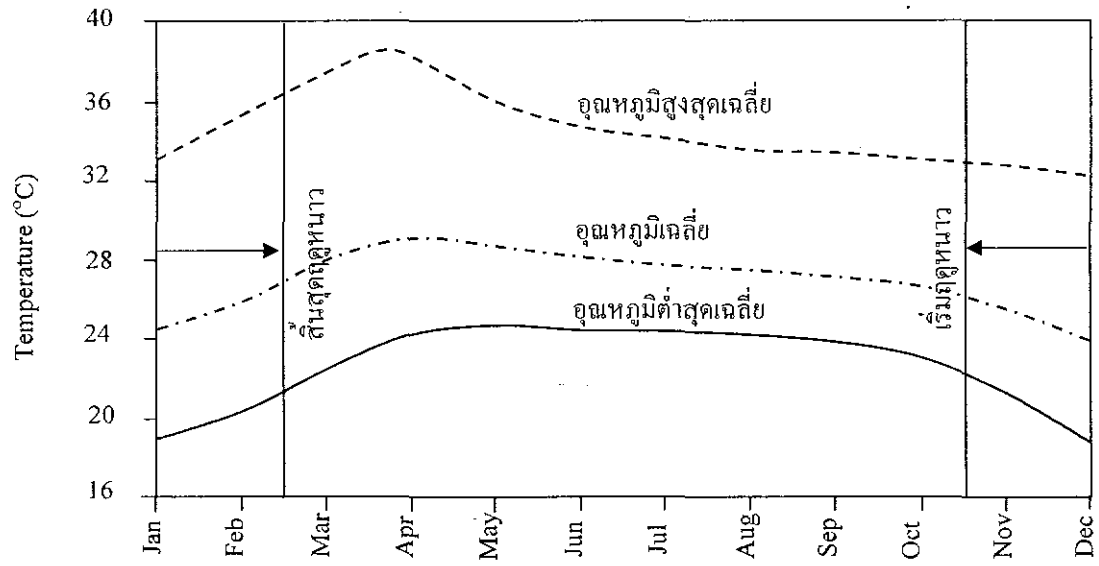
การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้สรุปผลการทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีการกักเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ในหินฉวม โดยเน้นไปที่คุณสมบัติด้านอุณหภูมิของหินและดินเพื่อใช้ประกอบการพิจารณาเลือกวัสดุที่ใช้ในการเก็บสะสมพลังงานความร้อนและใช้เป็นฉนวนกันไม่ให้ความร้อนถ่ายเทออกไปนอกระบบ เนื้อหาแบ่งออกเป็น 10 หัวข้อหลักดังต่อไปนี้ 1) ลักษณะภูมิอากาศในฤดูหนาวของประเทศไทย 2) ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย 3) การใช้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ 4) การเก็บสะสมพลังงานความร้อน 5) คุณสมบัติทางด้านอุณหภูมิของวัสดุทั่วไป 6) คุณสมบัติทางด้านอุณหภูมิของหิน 7) คุณสมบัติทางด้านอุณหภูมิของดิน 8) แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ 9) วัสดุผิวสะท้อนแสง และ 10) หลักการเทอร์โมไดนามิกส์และการถ่ายเทความร้อน

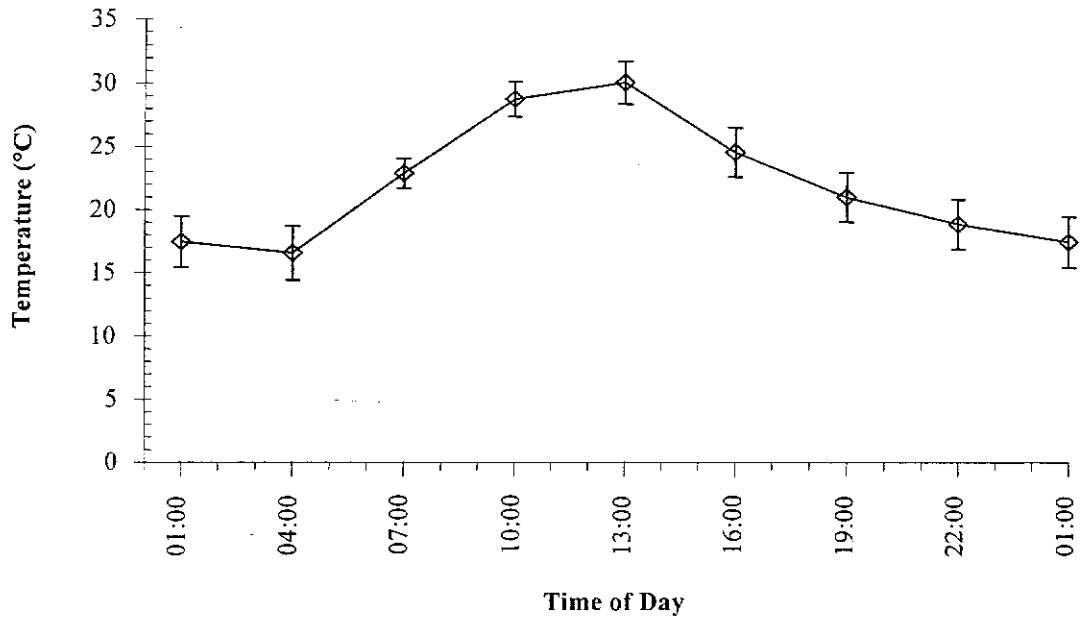
1.1 ลักษณะภูมิอากาศในฤดูหนาวของประเทศไทย

ประเทศไทยมีภูมิอากาศแบ่งได้เป็น 3 ฤดู คือฤดูร้อน ฤดูฝน และฤดูหนาว โดยปกติฤดูหนาวจะมีระยะเวลาประมาณ 4 เดือน เริ่มตั้งแต่กลางเดือนตุลาคมถึงกลางเดือนกุมภาพันธ์ (รูปที่ 1.1) บริเวณประเทศไทยตอนบน โดยเฉพาะในภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือปริมาณฝนจะเริ่มลดลงและมีอากาศเย็นตั้งแต่กลางเดือนตุลาคมเป็นต้นไป และจะหนาวเย็นมากที่สุดในเดือนธันวาคมและมกราคม (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2546) อุณหภูมิต่ำสุดบริเวณภาคเหนือของประเทศไทยจะอยู่ระหว่าง 14 - 23 องศาเซลเซียส (รูปที่ 1.2)

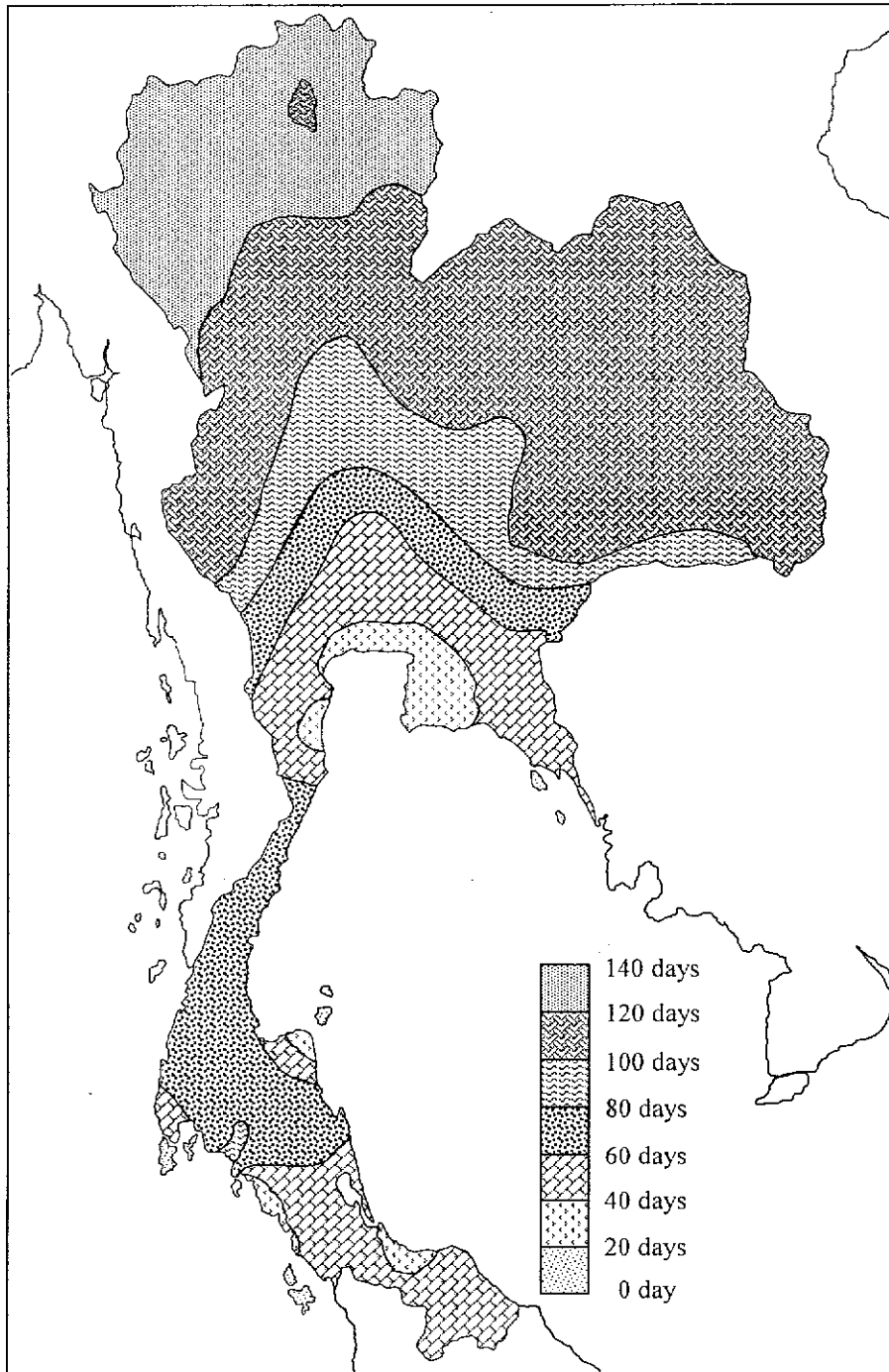
การพิจารณาสภาวะอากาศในช่วงฤดูหนาวจะใช้อุณหภูมิต่ำสุดที่ตรวจวัดได้ในตอนเช้าของแต่ละวันเป็นเกณฑ์ในการพิจารณา กล่าวคือ “อากาศหนาวจัด” หมายถึงมีอุณหภูมิต่ำสุดน้อยกว่า 8 องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) “อากาศหนาว” หมายถึงมีอุณหภูมิต่ำสุดระหว่าง $8.0-15.9^{\circ}\text{C}$ และ “อากาศเย็น” หมายถึงมีอุณหภูมิต่ำสุดระหว่าง $16.0-22.9^{\circ}\text{C}$ นอกจากค่าของอุณหภูมิแล้ว ตัวแปรที่นำมาพิจารณาสภาพความหนาวเย็นของแต่ละปีคือจำนวนวันที่มีอากาศเย็น อากาศหนาว และอากาศหนาวจัด ซึ่งในบริเวณภาคเหนือจะมีระยะเวลาที่มีอากาศเย็นมากกว่า 4 เดือน (รูปที่ 1.3) และในบางพื้นที่ของภาคเหนือจะมีระยะเวลาที่มีอากาศหนาวมากกว่า 3 เดือน (รูปที่ 1.4) ในรูปที่ 1.5 ถึงรูปที่ 1.8 แสดงแผนที่อุณหภูมิเฉลี่ยในช่วงฤดูหนาวของประเทศไทย ระหว่างปี พ.ศ. 2514-2543 (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2546)



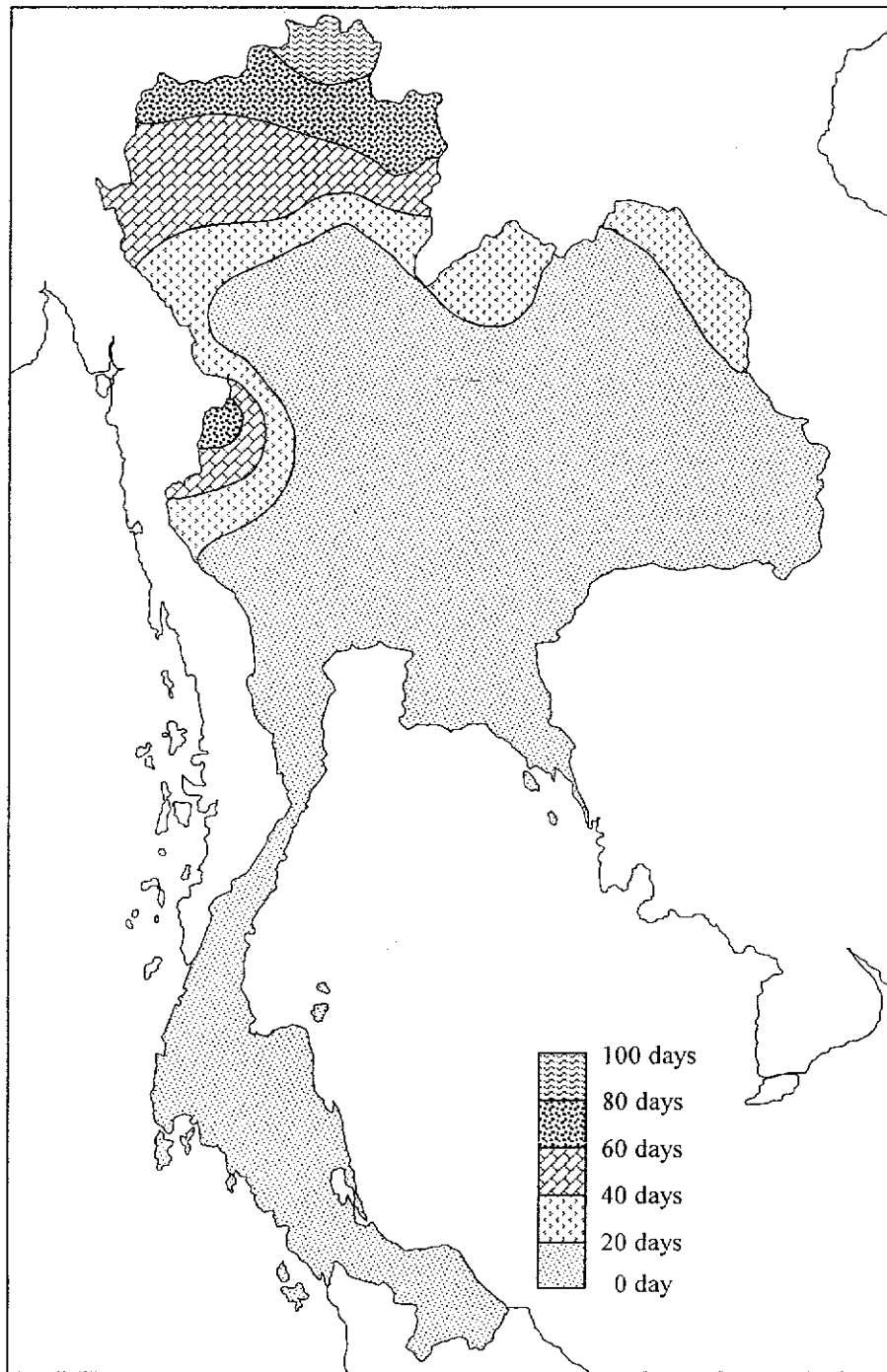
รูปที่ 1.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉลี่ยในรอบ 1 ปี ของประเทศไทย (ข้อมูลจากกรมอุตุนิยมวิทยา, 2545)



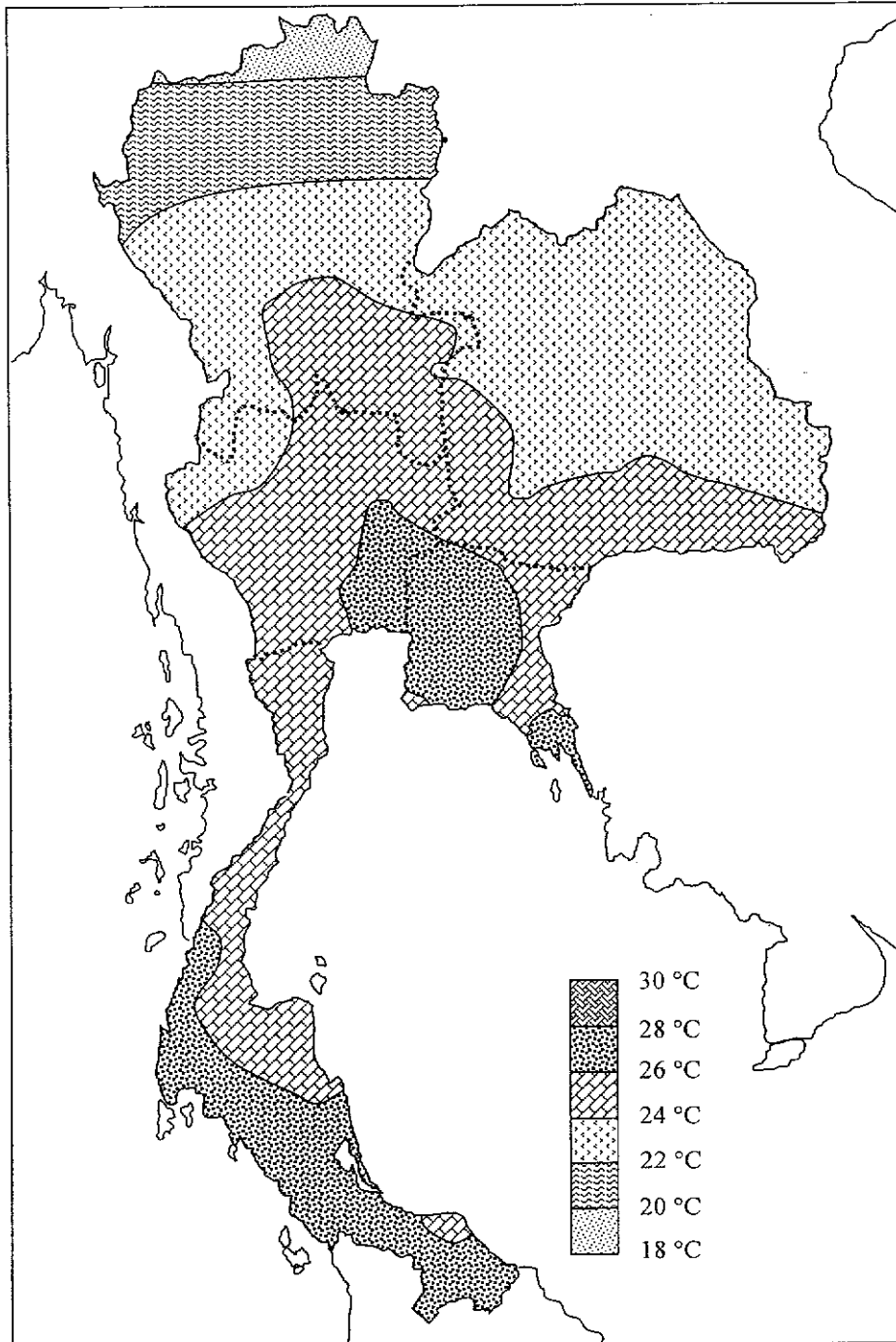
รูปที่ 1.2 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิรายวันในฤดูหนาวบริเวณภาคเหนือของประเทศไทย
ข้อมูลจากจังหวัดเชียงใหม่ ลำพูน ลำปาง และเลย (พ.ศ. 2543 ถึง 2547)



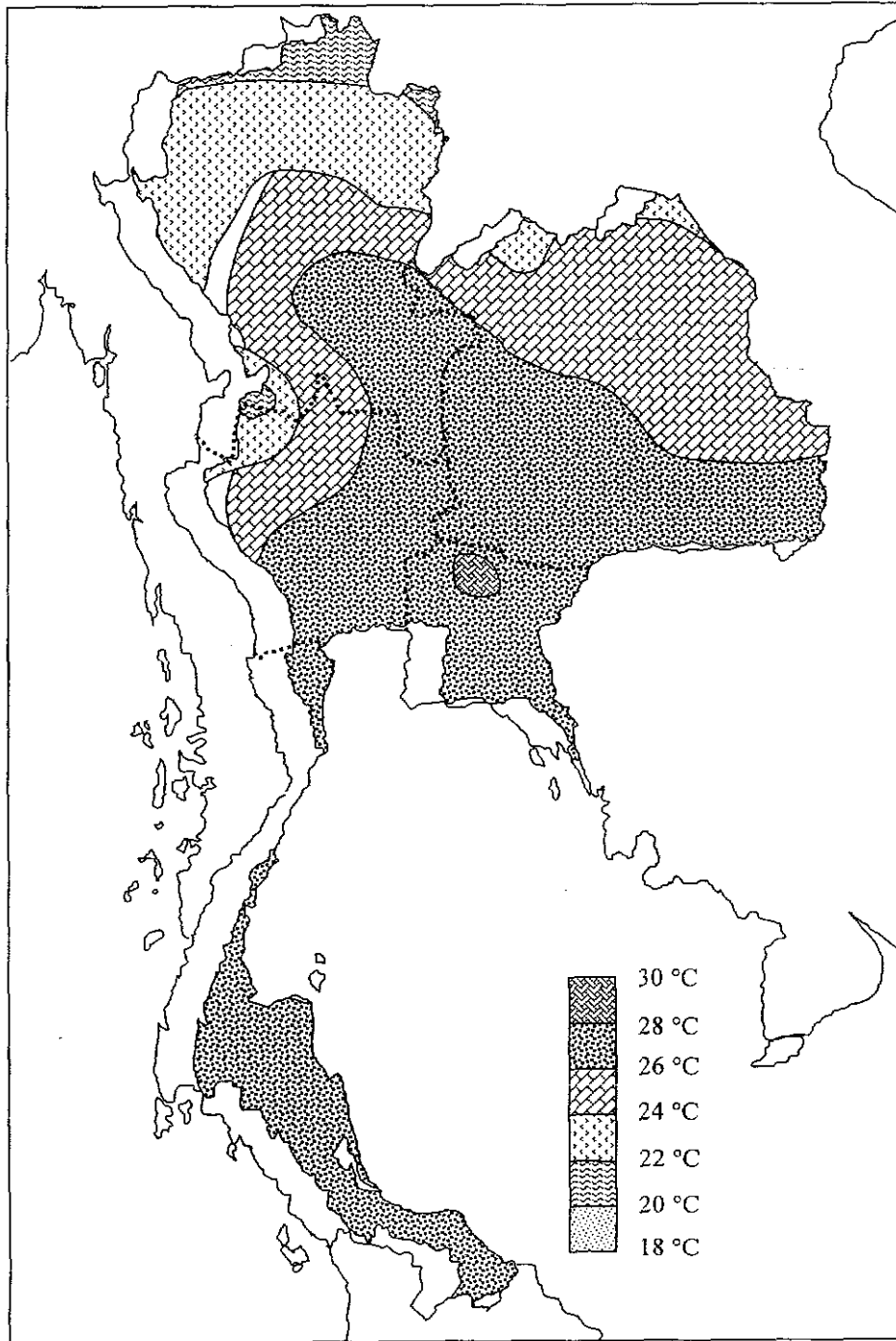
รูปที่ 1.3 แผนที่แสดงจำนวนวันที่มีอุณหภูมิต่ำสุดน้อยกว่า 23 องศาเซลเซียส ข้อมูลระหว่างเดือนพฤศจิกายน 2543 ถึง กุมภาพันธ์ 2544 (ตัดแปลงมาจากกรมอุตุนิยมวิทยา, 2546)



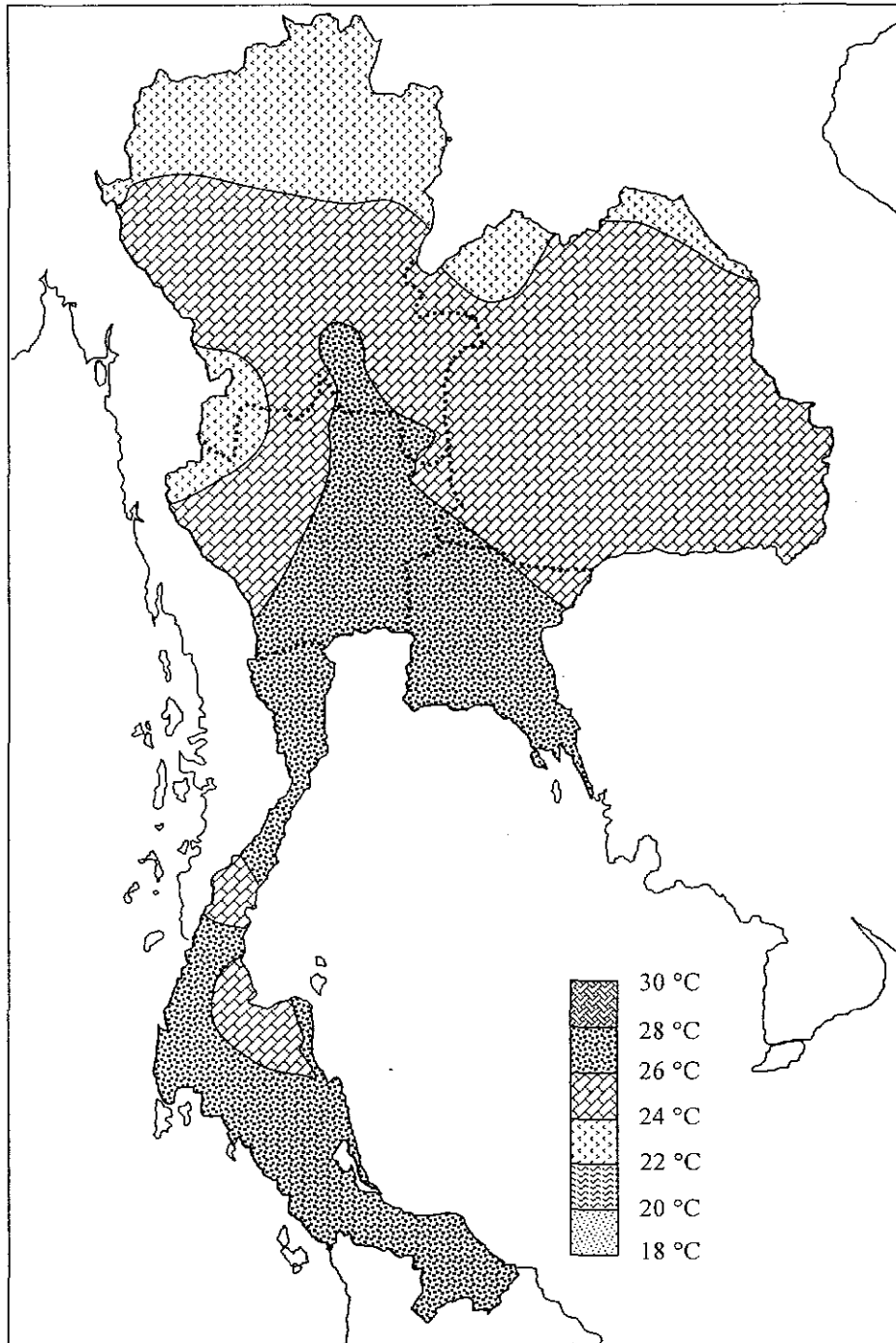
รูปที่ 1.4 แผนที่แสดงจำนวนวันที่มีอุณหภูมิต่ำสุดน้อยกว่า 16 องศาเซลเซียส ข้อมูลระหว่างเดือนพฤศจิกายน 2543 ถึง กุมภาพันธ์ 2544 (ตัดแปลงมาจากกรมอุตุนิยมวิทยา, 2546)



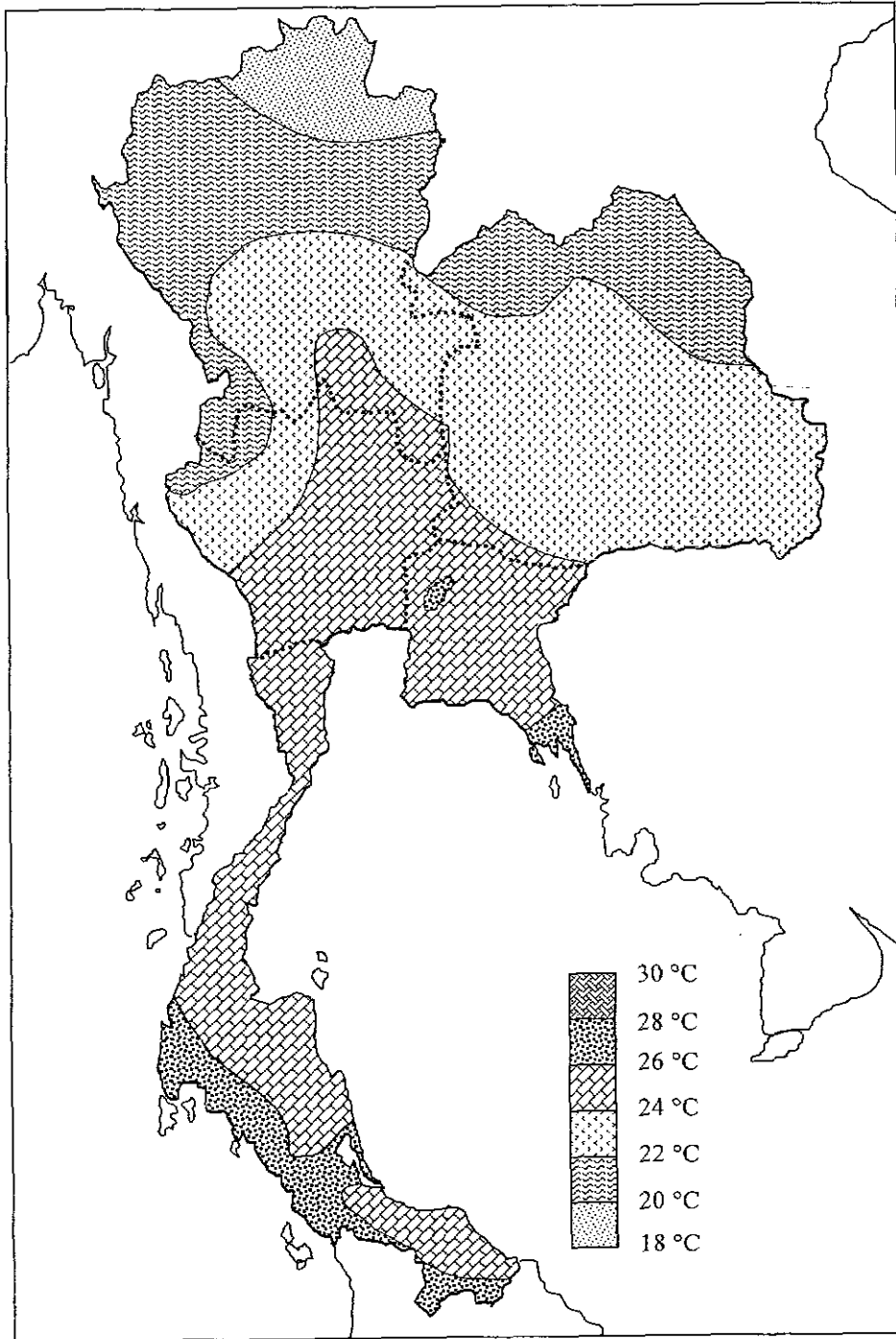
รูปที่ 1.5 แผนที่ภูมิอากาศของประเทศไทยในเดือนมกราคม (ดัดแปลงมาจากกรมอุตุนิยมวิทยา, 2545)



รูปที่ 1.6 แผนที่ภูมิอากาศของประเทศไทยในเดือนกุมภาพันธ์ (ดัดแปลงมาจากกรมอุตุนิยมวิทยา, 2545)



รูปที่ 1.7 แผนที่ภูมิอากาศของประเทศไทยในเดือนพฤศจิกายน (ดัดแปลงมาจากกรมอุตุนิยมวิทยา, 2545)



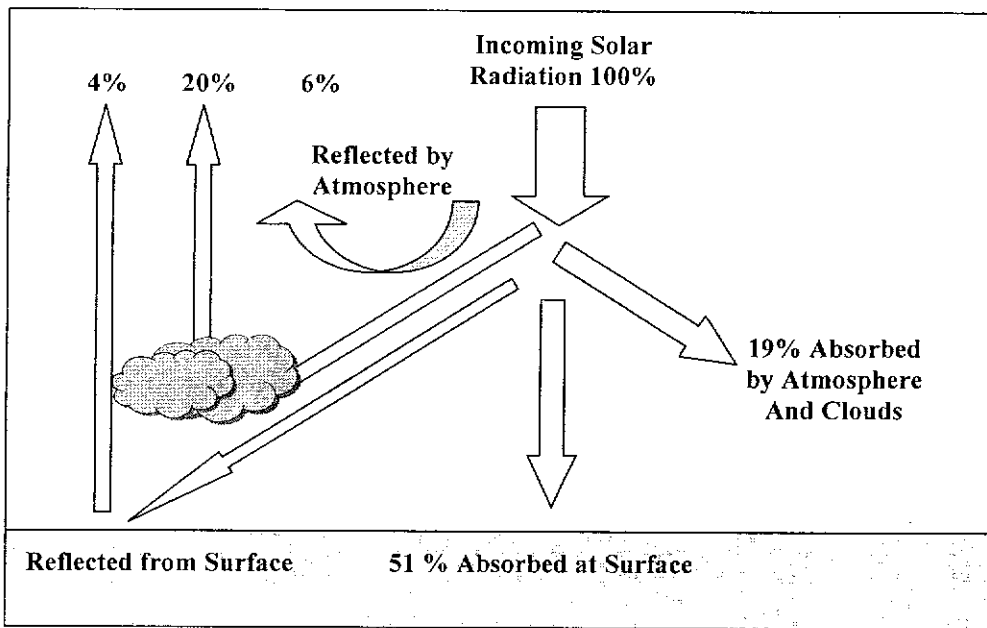
รูปที่ 1.8 แผนที่ภูมิอากาศของประเทศไทยในเดือนธันวาคม (ดัดแปลงมาจากกรมอุตุนิยมวิทยา, 2545)

1.2 ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย

พลังงานแสงอาทิตย์เกิดจากปฏิกิริยาฟิวชั่นของดวงอาทิตย์แล้วปล่อยพลังงานออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เรียกว่ารังสีแสงอาทิตย์ (Solar Radiation) เมื่อรังสีตกกระทบวัตถุจะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ปริมาณแสงจากดวงอาทิตย์และระดับพลังงานที่ได้รับจะขึ้นกับพิสัยหรือตำแหน่งของพื้นที่บนผิวโลก สำหรับประเทศไทยซึ่งมีพื้นที่ตั้งอยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตรหรือเส้นแบ่งครึ่งโลกจะได้รับปริมาณแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูงและยาวนาน ความเข้มแสงอาทิตย์รวมเฉลี่ยของประเทศมีค่าประมาณ $4.7 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{day}$ หากใช้พลังงานแสงอาทิตย์ที่ส่องลงบนพื้นที่ทั้งประเทศเพียงหนึ่งในร้อยส่วนก็สามารถได้รับพลังงานเทียบเท่ากับการใช้น้ำมันดิบประมาณ 7 ล้านตันต่อปี สำหรับพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกเฉลี่ยบนผิวโลกในประเทศไทยขณะแดดจัดช่วงเวลา 12.00 น. ถึง 14.00 น. มีค่าเฉลี่ยประมาณ $1,300 \text{ W/m}^2$ และค่าเฉลี่ยทั้งวันมีประมาณ $1,000 \text{ W/m}^2$ ในเวลา 8-9 ชั่วโมง (พีรศักดิ์ วรสุนทร ไรสธ, 2545) ปกติแล้วพลังงานจากดวงอาทิตย์ที่แผ่มายังโลกจะถูกสะท้อนกลับด้วยชั้นบรรยากาศ 6 เปอร์เซ็นต์ ด้วยเมฆและฝุ่นละอองในอากาศ 20 เปอร์เซ็นต์ ผิวโลก 4 เปอร์เซ็นต์ และถูกดูดซับไว้ในเมฆและฝุ่นละอองในอากาศ 19 เปอร์เซ็นต์ ที่เหลือเพียง 51 เปอร์เซ็นต์เท่านั้นที่ถูกดูดซับไว้ด้วยผิวโลก (รูปที่ 1.9)

จากแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2542 โดยกรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงานและคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร พบว่าการกระจายของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ตามบริเวณต่าง ๆ ในแต่ละเดือนของประเทศได้รับอิทธิพลสำคัญจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ และลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ โดยพื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศได้รับรังสีดวงอาทิตย์สูงสุดระหว่างเดือนเมษายนและพฤษภาคม ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง $20\text{-}24 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{day}$ เมื่อพิจารณาแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปีพบว่าบริเวณที่ได้รับรังสีดวงอาทิตย์สูงสุดเฉลี่ยทั้งปีอยู่ที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยครอบคลุมบางส่วนของจังหวัดนครราชสีมา บุรีรัมย์ สุรินทร์ ศรีสะเกษ ร้อยเอ็ด ยโสธร อุบลราชธานี และอุดรธานี และบางส่วนของภาคกลางที่จังหวัดสุพรรณบุรี ชัยนาท อัญญา และลพบุรี โดยได้รับรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยทั้งปี $19\text{-}20 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{day}$ พื้นที่ดังกล่าวคิดเป็น 14.3 เปอร์เซ็นต์ ของพื้นที่ทั้งหมดของประเทศ นอกจากนี้ยังพบว่า 50.2 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ทั้งหมดได้รับรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยทั้งปีอยู่ระหว่าง $18\text{-}19 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{day}$ จากการคำนวณรังสีรวมของดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปีของพื้นที่ทั่วประเทศพบว่ามีค่าเท่ากับ $18.2 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{day}$ ผลที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่าประเทศไทยมีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูง

ในช่วงฤดูหนาวของประเทศไทย ความเข้มของพลังงานแสงอาทิตย์จะมีค่าลดลง เนื่องจากท้องฟ้าหazy มีเมฆปกคลุม ในเดือนมกราคมความเข้มรังสีของดวงอาทิตย์ที่กระจายอยู่ในบริเวณภาคเหนือจะต่ำกว่าภาคอื่น ๆ เนื่องจากดวงอาทิตย์อยู่ห่างจากเส้นศูนย์สูตรท้องฟ้าประมาณ 20



รูปที่ 1.9 ปริมาณการดูดซับและการสะท้อนกลับของพลังงานจากดวงอาทิตย์

องศาทางด้านซีกใต้ ทำให้ค่ามุมตกกระทบรังสีดวงอาทิตย์ในภาคเหนือมีค่ามากกว่าภาคอื่น ๆ ค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์จึงมีค่าต่ำ นอกจากนี้ในภาคเหนือช่วงเดือนมกราคมจะมีปรากฏการณ์ฟ้าหาว ซึ่งเป็นผลมาจากหมอกและฝุ่นละอองจากอิทธิพลของลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ปรากฏการณ์ดังกล่าวเป็นสาเหตุให้ค่ารังสีดวงอาทิตย์ที่ได้รับค่อนข้างต่ำ โดยมีค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนอยู่ระหว่าง 15-16 MJ/m².day สำหรับในภาคกลางและภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีความเข้มรังสีดวงอาทิตย์อยู่ระหว่าง 17-18 MJ/m².day ในภาคใต้ตั้งแต่จังหวัดชุมพรลงไปจะมีความเข้มรังสีดวงอาทิตย์อยู่ระหว่าง 16-18 MJ/m².day และบริเวณที่มีความเข้มรังสีดวงอาทิตย์สูงสุดคือบริเวณภาคใต้ฝั่งตะวันตกในจังหวัดภูเก็ต พังงา และกระบี่ กล่าวคือมีความเข้มรังสีดวงอาทิตย์อยู่ในช่วง 20-21 MJ/m².day

ในเดือนกุมภาพันธ์ ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์บริเวณภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคกลาง มีการกระจายตัวที่คล้ายคลึงกันคือส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง 16-19 MJ/m².day ยกเว้นบางบริเวณ เช่น จังหวัดเลยที่มีห่อมความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ต่ำอยู่ระหว่าง 15-16 MJ/m².day และจังหวัดอุบลราชธานีที่มีห่อมความเข้มรังสีดวงอาทิตย์สูงอยู่ระหว่าง 19-20 MJ/m².day สำหรับภาคใต้ตอนบนมีความเข้มรังสีดวงอาทิตย์อยู่ในช่วง 19-20 MJ/m².day และภาคใต้ตอนล่างฝั่งตะวันตกมีค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์อยู่ในช่วง 20-21 MJ/m².day กระจายเป็นบริเวณกว้าง ส่วนภาคใต้ฝั่งตะวันออกมีค่าความเข้มรังสีสูงกว่ากรณีของเดือนมกราคม เนื่องจากได้รับอิทธิพลจากมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือน้อยลง

ในเดือนพฤศจิกายน พื้นที่ทั่วประเทศได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ โดยเฉพาะบริเวณภาคใต้ฝั่งตะวันออก ส่งผลให้ท้องฟ้ามีเมฆปกคลุมและท้องฟ้าหาว ทำให้รังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบมีค่าน้อยกว่าภาคใต้ฝั่งตะวันตก ส่วนภาคกลางและภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีการกระจายของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์คล้ายคลึงกัน กล่าวคือ อยู่ระหว่าง 16-18 MJ/m².day

ในเดือนธันวาคม ดวงอาทิตย์เคลื่อนตัวไปอยู่ทางตอนใต้ของเส้นศูนย์สูตรท้องฟ้ามากที่สุด ทำให้รังสีดวงอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกบริเวณภาคใต้จะมากกว่าบริเวณภาคกลาง ภาคเหนือ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ แต่ภาคใต้ได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือจึงทำให้ท้องฟ้ามีเมฆมาก รังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลกมีค่าน้อย ส่วนภาคเหนือ ภาคกลาง และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ถึงแม้ว่าท้องฟ้าจะมีสภาพแจ่มใส แต่รังสีนอกบรรยากาศโลกมีค่าต่ำเนื่องจากดวงอาทิตย์เคลื่อนที่ไปทางใต้ห่างจากเส้นศูนย์สูตรท้องฟ้ามาก ทำให้รังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบมีปริมาณน้อย ลักษณะโดยทั่วไปของการกระจายรังสีดวงอาทิตย์ของเดือนนี้จะคล้ายกับเดือนพฤศจิกายน

เมื่อพิจารณาพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์รายวันจะเห็นว่า พลังงานความร้อนจะเพิ่มขึ้นตั้งแต่ตอนเช้าจนกระทั่งมีค่าสูงสุดในตอนเที่ยงซึ่งเป็นเวลาที่ตำแหน่งของดวงอาทิตย์ทำมุม

ฉากกับผิวโลกมากที่สุด จากนั้นพลังงานจะค่อยลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์หลังจากที่ดวงอาทิตย์ลับขอบฟ้าไปแล้ว รูปที่ 1.10 ถึง 1.12 แสดงค่าความเข้มของพลังงานแสงอาทิตย์ในช่วงฤดูหนาวของจังหวัดเลย เชียงใหม่ และนครราชสีมา ซึ่งค่าพลังงานสูงสุดอยู่ระหว่าง $0.50 - 0.70 \text{ kWh/m}^2$

1.3 การใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์

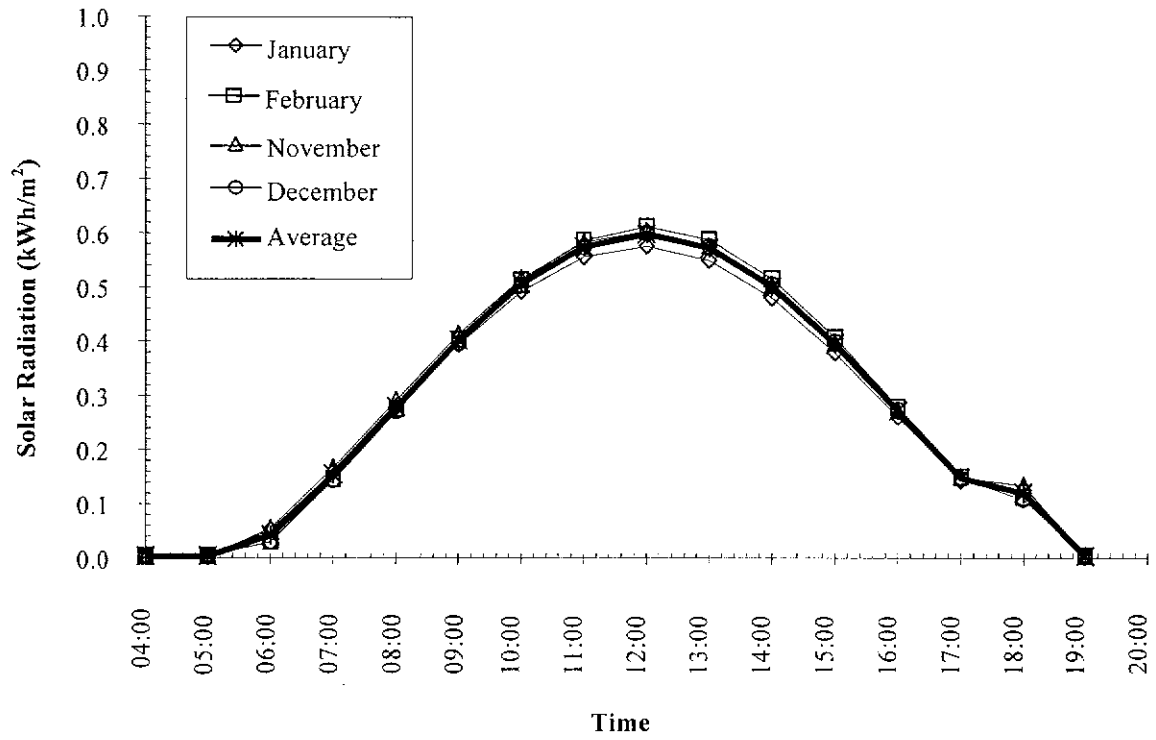
พลังงานจากแสงอาทิตย์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในรูปแบบพลังงานความร้อนและเซลล์แสงอาทิตย์ (มรกด ล้มตระกูล, 2549) ซึ่งการใช้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์สามารถจำแนกได้ 8 รูปแบบ คือ 1) การผลิตไฟฟ้า 2) การทำน้ำร้อน 3) การอบแห้ง 4) การกลั่นน้ำ 5) การประกอบอาหาร 6) การทำความเย็นและการปรับอากาศ 7) การสูบน้ำ และ 8) สระแสงอาทิตย์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1.3.1 การผลิตกระแสไฟฟ้า

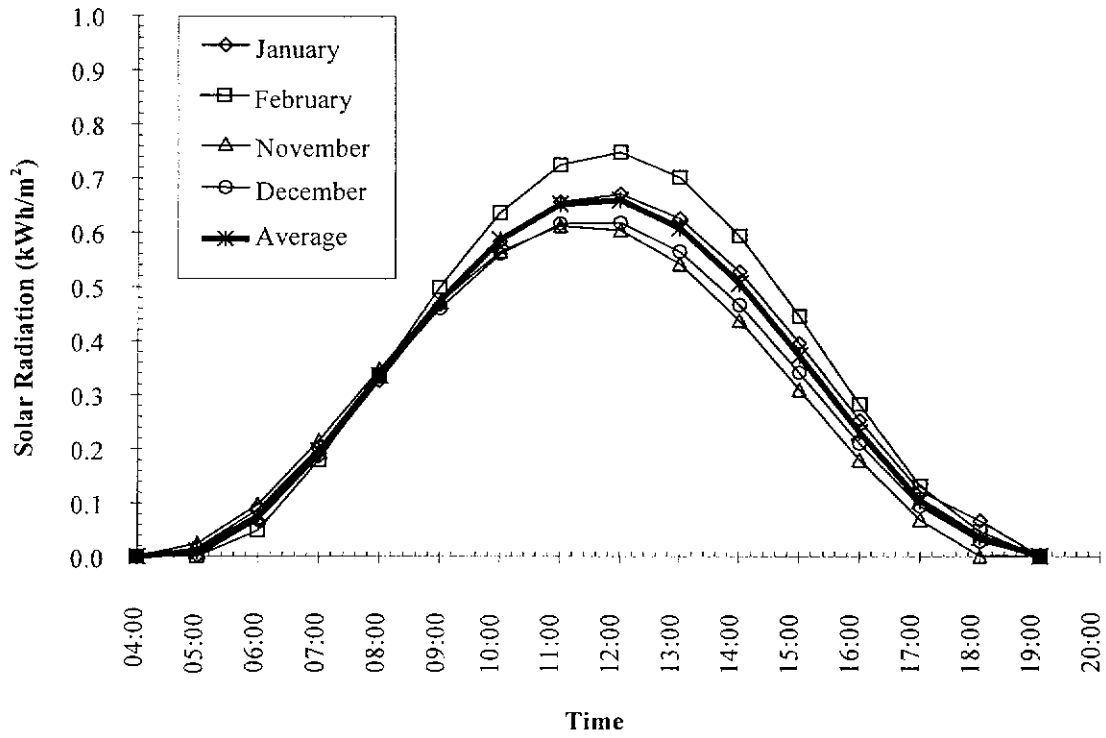
ระบบการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทยเป็นแบบอาศัยการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์โดย "กระบวนการโฟโตโวลเทอิก" ซึ่งเป็นผลให้อิเล็กตรอนเคลื่อนผ่านผิวสัมผัสที่ติดอยู่บนด้านหน้าและด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลสู่วงจรภายนอกกลายเป็นไฟฟ้ากระแสตรง และไหลผ่านระบบควบคุมเข้าสู่เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนจากกระแสตรงให้เป็นกระแสสลับ จากนั้นจึงผ่านมิเตอร์ผลิตไฟฟ้าจ่ายเข้าระบบไฟฟ้าภายในบ้าน ถ้าอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เปิดใช้ภายในบ้านใช้กำลังไฟฟ้าน้อยกว่าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าส่วนที่เกินนั้นจะจ่ายผ่านมิเตอร์ขายไฟฟ้าคืนให้กับการไฟฟ้า แต่ในช่วงที่ไม่มีแสงอาทิตย์หรือมีการเปิดใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีกำลังไฟฟ้าสูงกว่าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าส่วนที่ขาดก็จะถูกซื้อเข้ามาจากระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าโดยผ่านมิเตอร์ซื้อไฟฟ้าตามปกติ (ข้อมูลจากกองพลังงานทดแทน, สำนักงานวิจัยและพัฒนา, กฟผ.) ระบบผลิตและจำหน่ายไฟฟ้าพลังแสงอาทิตย์ (รูปที่ 1.13) ประกอบด้วย 1) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ขนาดกำลังผลิตประมาณ 3.15 กิโลวัตต์ 2) ระบบควบคุม 3) เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (Inverter) 4) มิเตอร์ผลิตไฟฟ้า และ 5) มิเตอร์ซื้อ-ขายไฟฟ้า

1.3.2 การทำน้ำร้อน

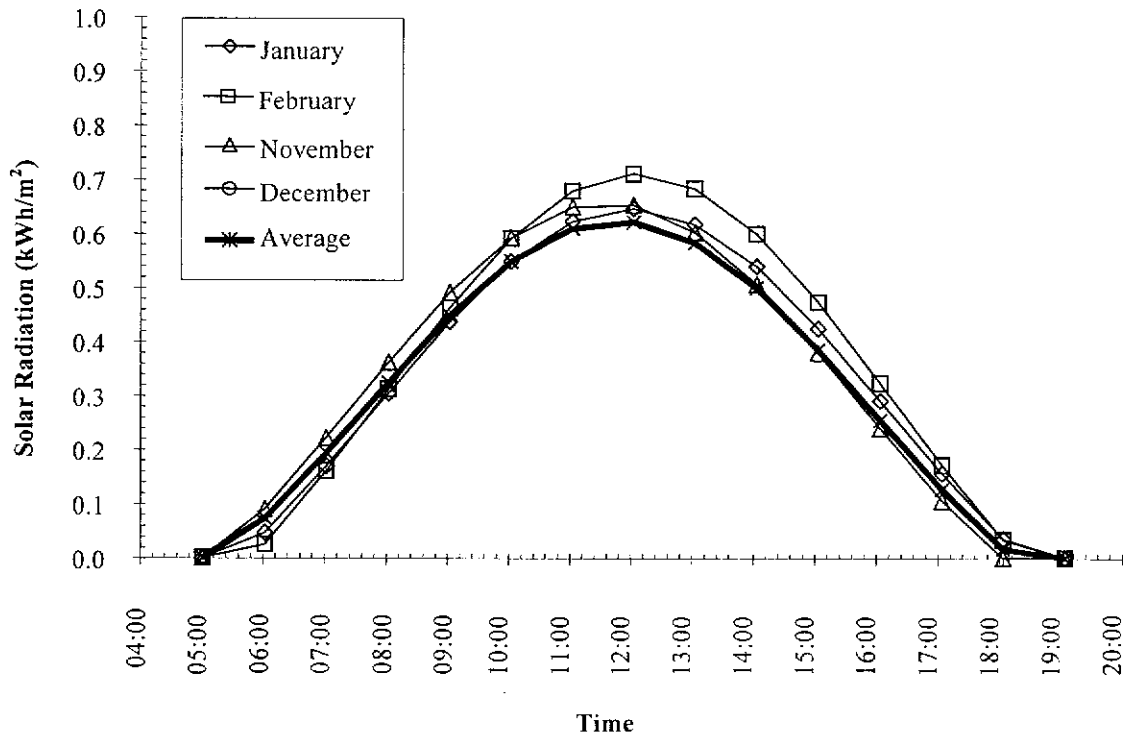
ความร้อนจากแสงอาทิตย์สามารถนำมาใช้ในอีกรูปแบบหนึ่งคือ ระบบผลิตน้ำร้อนจากแสงอาทิตย์ โดยเครื่องทำน้ำร้อนดังกล่าวมีหลักการทำงาน คือ น้ำร้อนในส่วนล่างสุดของถังเก็บความร้อนจะไหลลงสู่ส่วนล่างสุดของแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์ น้ำเย็นในส่วนนี้เมื่อได้รับความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบแผงจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น เกิดการลอยตัวไหลออกจากแผงไปเข้า



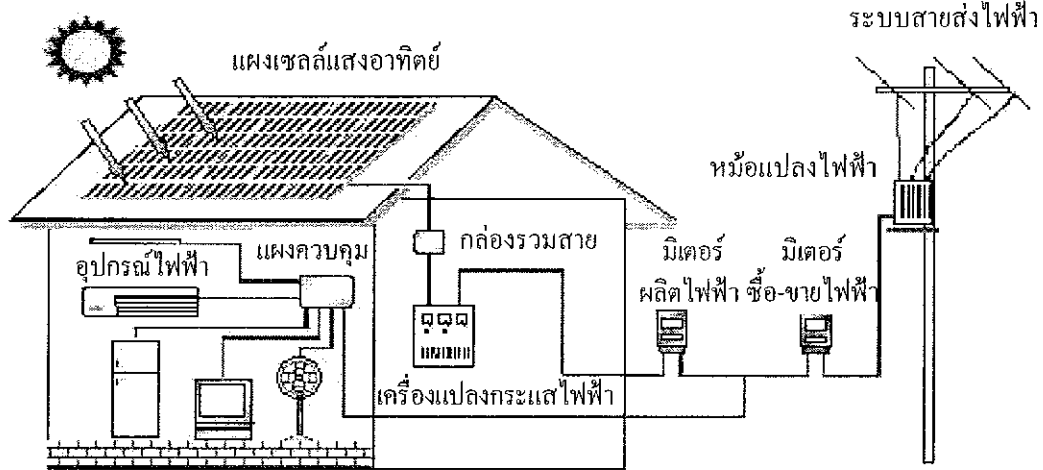
รูปที่ 1.10 ค่าความเข้มของพลังงานแสงอาทิตย์ในช่วงฤดูหนาวของจังหวัดเลย



รูปที่ 1.11 ค่าความเข้มของพลังงานแสงอาทิตย์ในช่วงฤดูหนาวของจังหวัดเชียงใหม่



รูปที่ 1.12 ค่าความเข้มของพลังงานแสงอาทิตย์ในช่วงฤดูหนาวของจังหวัดนครราชสีมา



รูปที่ 1.13 ระบบผลิตและจำหน่ายไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาบ้าน (กองพลังงานทดแทน, สำนักงานวิจัยและพัฒนา, กฟผ.)

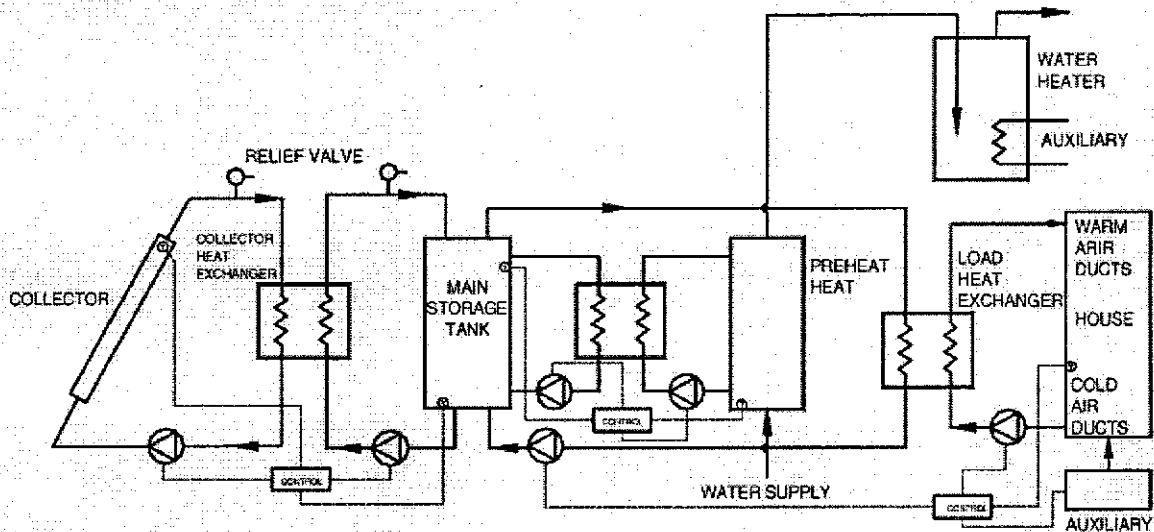
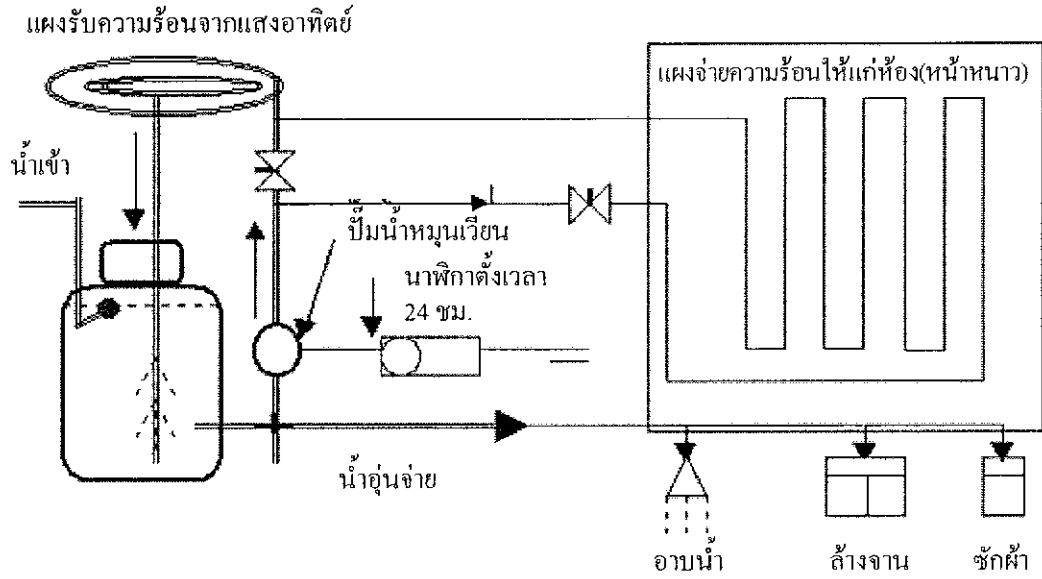
ถึงเก็บ (อนุตร จำลองกุล, 2545) ดังนั้นตลอดเวลาที่มีแสงอาทิตย์ก็จะได้นำน้ำร้อนไหลเข้าถังเก็บตลอดเวลา เมื่อต้องการใช้งานให้เปิดวาล์วน้ำร้อน แรงดันจากน้ำเย็นจะขับไล่น้ำร้อนให้ไหลออกไปใช้งานได้ ระบบผลิตน้ำร้อนจากแสงอาทิตย์แบ่งตามลักษณะการไหลเวียนของของไหลที่ทำงานผ่านแผงรับแสงอาทิตย์ได้ 2 แบบ คือ แบบไหลเวียนตามธรรมชาติ (Thermosyphon system) และแบบไหลเวียนโดยใช้แรงดัน (Forced circulation system) ดังแสดงในรูปที่ 1.14 นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งย่อยตามลักษณะของการถ่ายเทความร้อน และลักษณะของถังเก็บความร้อนที่ใช้ได้ด้วย

1.3.3 การอบแห้ง

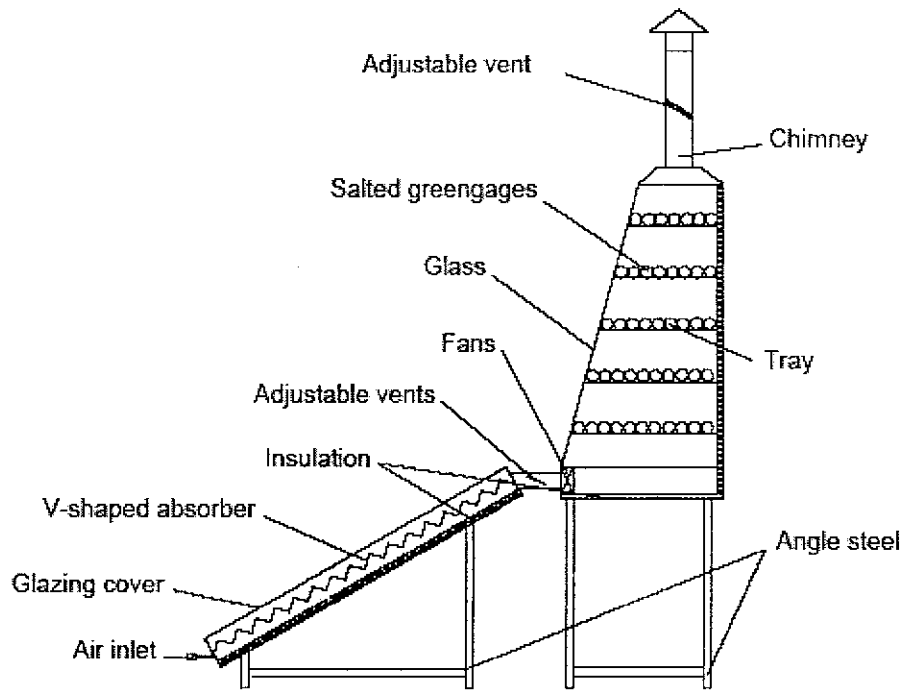
การอบแห้งกลางแจ้งด้วยแสงอาทิตย์ได้ใช้กันนานนับพันปี แต่ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเป็นเครื่องอบแห้งซึ่งทำให้คุณภาพของผลผลิตสูงขึ้น และมีประสิทธิภาพในการทำงานสูงขึ้น เครื่องอบแห้งอาจแบ่งออกได้ตามลักษณะการหมุนเวียนของอากาศ คือ การพาแบบธรรมชาติ และการพาแบบบังคับ หรืออาจแบ่งตามลักษณะการใช้งานของเครื่อง อาทิ อบแห้งพืชเศรษฐกิจต่าง ๆ อบแห้งปลา อบแห้งเมล็ดพืชและไม้ เครื่องอบแห้งสำหรับพืชเศรษฐกิจและปลาที่พัฒนาแล้วมี 3 ประเภท คือ ประเภทกล่อง เต็นท์ และแบบตู้ที่มีแผงรับแสงแยกส่วน ในสองประเภทแรกจะมีราคาค่อนข้างต่ำและประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำ ส่วนแบบตู้จะบรรจุวัสดุที่อบแห้งได้มากกว่าและมีประสิทธิภาพสูงแต่มีราคาค่อนข้างสูงกว่าสองแบบแรก (มรคต ลิมตระกูล, 2547; Soponronnarit, 1995) รูปที่ 1.15 แสดงส่วนประกอบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสม

1.3.4 การกลั่นน้ำ

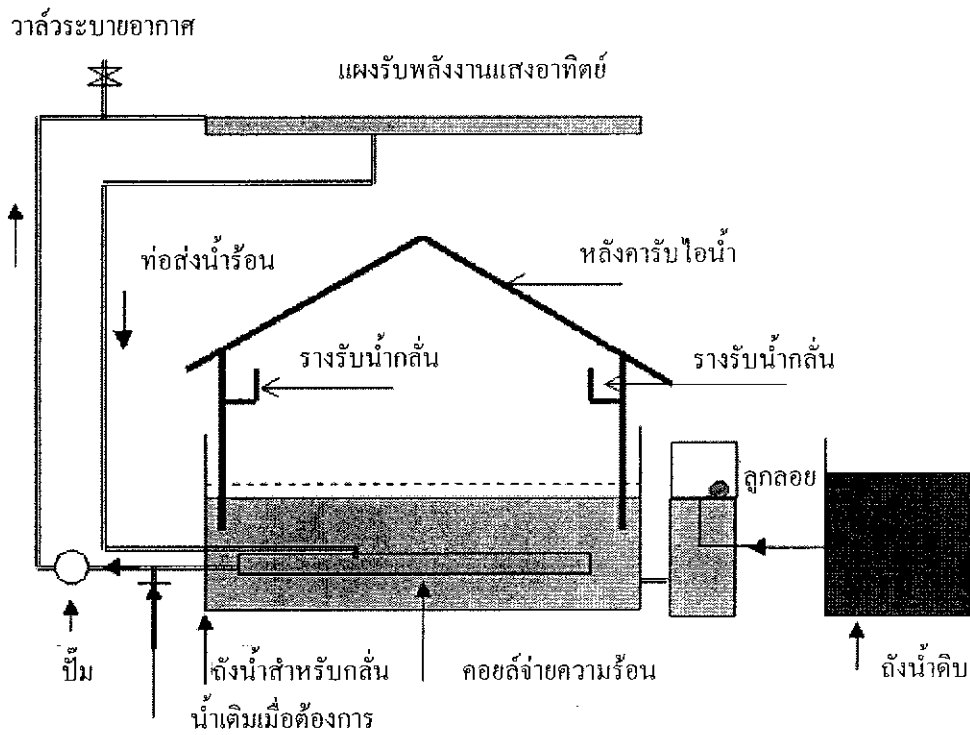
เครื่องกลั่นน้ำด้วยแสงอาทิตย์แบบอ่าง ได้รับการพัฒนาเป็นเวลากว่า 100 ปี โดยขนาดใหญ่ที่สุดมีพื้นที่กว่า 9,000 ตารางเมตร ปัจจุบันได้มีการออกแบบและใช้วัสดุต่าง ๆ กันขึ้นกับสภาพการใช้งาน เช่น ใช้แผ่นกระจกใสเป็นฝาปิดที่มีประสิทธิภาพสูงแต่แตกง่าย หรือใช้แผ่นพลาสติกใสซึ่งมีความเหนียวกว่า แต่อัตราการกลั่นตัวของหยดน้ำต่ำกว่าเนื่องจากความตึงผิวระหว่างแผ่นพลาสติกกับหยดน้ำมีค่าสูง หรืออาจใช้ยางแอสฟัลท์จะทำให้มีการดูดแสงได้ดีแต่น้ำที่กลั่นมีกลิ่นประสิทธิภาพของเครื่องกลั่นน้ำด้วยแสงอาทิตย์แบบอ่างปกติแล้วจะถูกจำกัดด้วยอัตราการสูญเสียความร้อนเนื่องจากการกลั่นตัวของไอน้ำในเครื่อง ปัจจุบันได้มีการวิจัยและพัฒนาเครื่องกลั่นด้วยการนำความร้อนจากการกลั่นมาให้ความร้อนแก่น้ำดิบก่อนเข้าเครื่องกลั่น เครื่องกลั่นน้ำแบบอ่างมีข้อด้อยคือใช้พื้นที่มาก ปัจจุบันได้มีการวิจัยและพัฒนาเครื่องกลั่นที่มีผิวดูดแสงในแนวตั้งเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว (มรคต ลิมตระกูล, 2549) รูปที่ 1.16 แสดงระบบกลั่นน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ประสิทธิภาพสูง



รูปที่ 1.14 ระบบผลิตน้ำร้อนจากแสงอาทิตย์ (Kalogirou, 2004 และมูลนิธิสถาบันประสิทธิภาพพลังงานประเทศไทย)



รูปที่ 1.15 ส่วนประกอบของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (Li et al., 2006)



รูปที่ 1.16 ระบบกักเก็บน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ประสิทธิภาพสูง (ข้อมูลจากมูลนิธิสถาบัน
 ประสิทธิภาพพลังงานประเทศไทย, 2002)

1.3.5 การประกอบอาหาร

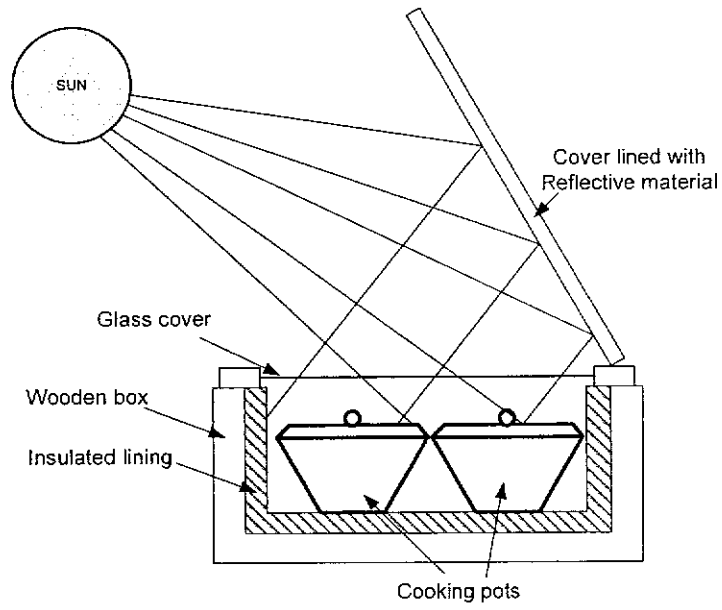
เตาประกอบอาหารด้วยแสงอาทิตย์แบ่งได้เป็น 3 ประเภท ประเภทแรกมีตัวรับแสงแผ่ราบเป็นกระจกสองชั้นเพื่อผลิตไอน้ำหรือของเหลวร้อน โดยให้อุณหภูมิสูงพอสำหรับการต้มและนึ่งเท่านั้น เตาประเภทนี้ไม่ต้องมีอุปกรณ์เคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์จึงไม่ต้องดูแลอยู่ตลอดเวลา และอาจนำความร้อนมาใช้ในการหุงต้มได้ด้วย เตาประเภทที่สองจะมีแผ่นกระจกราบสะท้อนแสงเพื่อเพิ่มอัตราส่วนการรวมแสงจึงให้อุณหภูมิสูงกว่าประเภทแรก สามารถใช้ในการต้ม นึ่ง หรืออบอาหารได้ โดยจะต้องปรับตำแหน่งของกระจกเป็นครั้งคราวระหว่างการใช้งาน เตาประเภทสุดท้ายจะมีการรวมแสงเป็นจุดโดยใช้ผิวสะท้อนแสงรูปทรงโค้งแบบพาราโบลา จึงสามารถให้อุณหภูมิสูงมากกว่า 300°C ซึ่งจะต้องมีอุปกรณ์เคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์ตลอดเวลา ข้อดีของเตาประกอบอาหารทั้งสามประเภทก็คือ ไม่สามารถประกอบอาหารในช่วงเวลาที่มีแสงอาทิตย์อ่อน ๆ ได้ เช่น ตอนเช้าและตอนเย็น จึงต้องมีการพัฒนาระบบสะสมความร้อนที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับการนำไปใช้งานต่อไป รูปที่ 1.17 แสดงการประกอบอาหารโดยใช้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์

1.3.6 การทำความเย็นและการปรับอากาศ

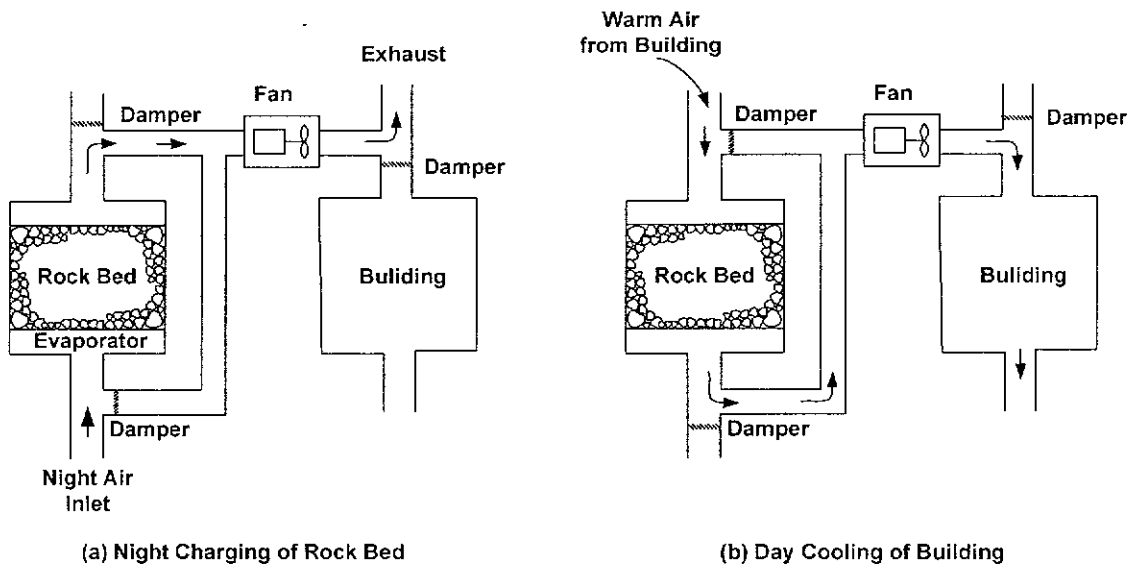
เนื่องจากการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานความร้อนทำได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าการผลิตพลังงานไฟฟ้าหรือพลังงานกล ระบบทำความเย็นแบบระเหยและแบบดูดซึมจึงเหมาะสมสำหรับการทำความเย็นด้วยแสงอาทิตย์มากกว่าระบบทำความเย็นด้วยการอัดเชิงกล เครื่องทำความเย็นแบบระเหยประกอบด้วยภาชนะที่หุ้มด้วยผ้า ตอนล่างของภาชนะจะถูกจุ่มอยู่ในอ่างน้ำในบรรยากาศที่ร้อนและแห้ง การระเหยของน้ำจากผ้าชื้นรอบ ๆ ภาชนะจะทำให้อุณหภูมิกภายในภาชนะลดต่ำกว่าอุณหภูมิแวดล้อมมาก เครื่องทำความเย็นแบบนี้เหมาะสำหรับเก็บรักษาอาหารจำนวนไม่มากนัก จากหลักการเดียวกันนี้สามารถนำมาใช้ปรับอากาศภายในอาคารได้โดยการฉีดน้ำเป็นฝอยบนหลังคา เมื่อน้ำระเหยก็จะทำให้อุณหภูมิในห้องลดลง ข้อดีของระบบนี้คือประสิทธิภาพในการใช้งานต่ำและไม่ค่อยได้ผลนักถ้าความชื้นในบรรยากาศสูง (มรดก ลิ้มตระกูล, 2549) รูปที่ 1.18 แสดงระบบทำความเย็นและปรับอากาศโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์

1.3.7 การสูบน้ำ

การสูบน้ำไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานอย่างต่อเนื่อง ในปัจจุบันหากสูบน้ำด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้กำลังงานต่ำกว่า 10 กิโลวัตต์แล้ว การใช้เซลล์แสงอาทิตย์จะคุ้มค่ากว่าการใช้กระบวนการความร้อน การสูบน้ำด้วยแสงอาทิตย์อาจแบ่งประเภทตามช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน คือ อุณหภูมิต่ำ ปานกลาง และสูง หรืออาจแบ่งตามสถานะของสารทำงานได้แก่ สถานะของเหลว ไอ และก๊าซ ระบบสูบน้ำที่กำลังได้รับการศึกษาอีกลักษณะหนึ่ง คือ การอาศัยความแตกต่างของปริมาตรจำเพาะของสารทำงานเมื่อเปลี่ยนสถานะระหว่างของเหลวและไอ ระบบลักษณะนี้มี 2 ประเภท คือ ระบบหล่อเย็นด้วยอากาศ และหล่อเย็นด้วยน้ำ เมื่อสารทำงานชั้นที่สองถูกเปลี่ยนสถานะใน



รูปที่ 1.17 การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการประกอบอาหาร (Nandwani, 2006)



รูปที่ 1.18 ระบบทำความเย็นและปรับอากาศโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ (Charters and Pryor, 1982)

แต่ละวัฏจักร ปริมาณน้ำที่สูบได้จะมีค่าเท่ากับความแตกต่างของปริมาตร ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนสถานะ การสูบน้ำด้วยแสงอาทิตย์มีศักยภาพสูงโดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศเกษตรกรรม แต่ก็ยังต้องได้รับการพัฒนาและวิจัยอยู่อีกมาก (มรกด ลิมตระกูล, 2549) รูปที่ 1.19 แสดงระบบการสูบน้ำโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์

1.3.8 สระแสงอาทิตย์

สระหรือบ่อที่มีน้ำเกลือเข้มข้นอยู่ที่ก้นบ่อลึกประมาณ 1-2 เมตร อาจรับแสงอาทิตย์และผลิตอุณหภูมิน้ำเกลือบริเวณก้นบ่อได้ถึง 70°C ทั้งนี้เกลือที่ใช้จะต้องละลายน้ำได้ดีเมื่ออุณหภูมิเกลือสูงขึ้น เช่น เกลือแกง (Sodium chloride) สารสีขาวดูดความชื้น (Calcium chloride) เกลือฟอสเฟต (Potassium nitrate) เป็นต้น สระแสงอาทิตย์ที่ดีจะต้องมีความเข้มข้นสูงสุดที่ก้นบ่อ เนื่องจากไม่มีการพาความร้อนในสระ ส่วนน้ำเกลือเจือจางคอนบนทำหน้าที่เป็นฉนวนความร้อน ถึงแม้ว่าสระแสงอาทิตย์มีแนวโน้มที่จะคุ้มค่าน่ากว่าระบบรับแสงอาทิตย์ประเภทอื่นในช่วงอุณหภูมิใช้งานเดียวกัน เพราะสระแสงอาทิตย์ทำหน้าที่เป็นตัวรับแสงและตัวสะสมพลังงานความร้อน แต่ก็ยังมีปัญหาอีกหลายประการ เช่น การสูญเสียความแตกต่างของความเข้มข้นของสระ เนื่องจากกระแสลมฝน และการเปลี่ยนทิศทางของแสง เป็นต้น (มรกด ลิมตระกูล, 2549) รูปที่ 1.20 แสดงเทคโนโลยีการใช้สระแสงอาทิตย์ที่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า

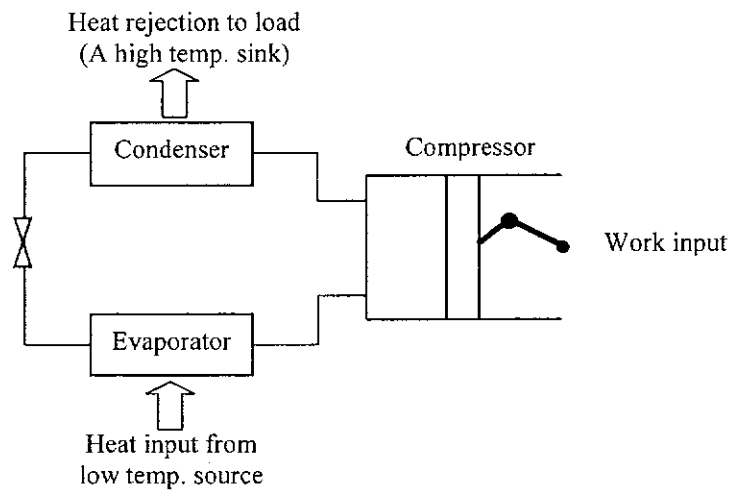
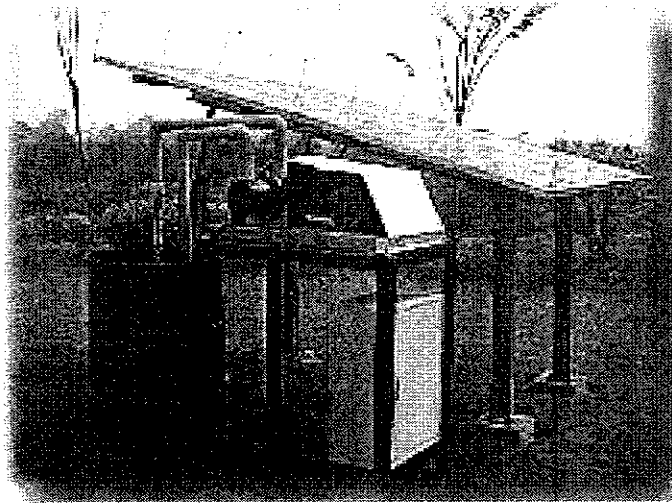
1.4 การเก็บสะสมพลังงานความร้อน

เนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์มีเฉพาะในเวลากลางวัน ดังนั้นถ้าต้องการใช้พลังงานอย่างต่อเนื่องจำเป็นต้องมีระบบเก็บสะสมพลังงาน การเก็บสะสมพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่ดีจึงขึ้นอยู่กับวิธีการเก็บและการนำมาใช้งานได้อย่างเหมาะสม รูปที่ 1.21 แสดงการสะสมพลังงานอาทิตย์ในรูปแบบต่าง ๆ

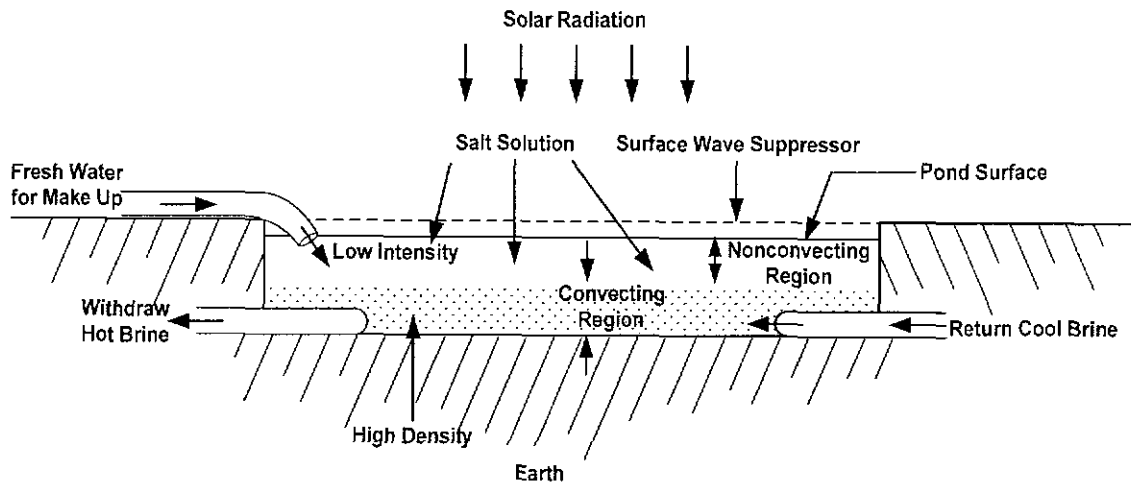
1.4.1 ลักษณะการสะสมพลังงาน

ความจำเป็นที่ต้องมีการสะสมพลังงานเกิดจากความไม่สอดคล้องกันระหว่างความต้องการใช้พลังงานและปริมาณพลังงานที่มีในแต่ละเวลา ลักษณะของความไม่สอดคล้องของพลังงานดังกล่าวสามารถจำแนกออกเป็น 4 ลักษณะ (Gang et al., 1985; ธนาคม สุนทรชัยนาคแสง, 2538) คือ

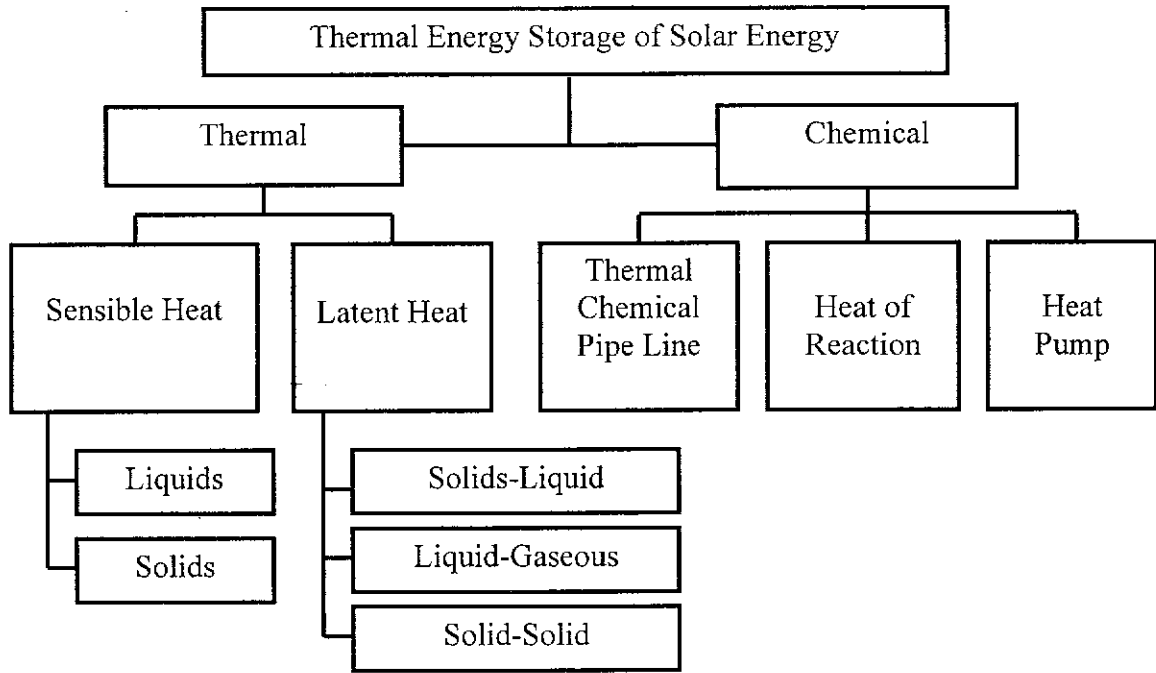
1) พลังงานที่มีค่าคงที่แต่ความต้องการพลังงานของระบบเปลี่ยนแปลงโดยมีความต้องการสูงสุดในช่วงเวลาสั้น ดังแสดงในรูปที่ 1.22 (ก) ในกรณีนี้พลังงานที่เก็บสะสมจะมีปริมาณน้อยเพียงพอที่จะจ่ายพลังงานออกมาในช่วงเวลาอันสั้นตามความต้องการของระบบ ลักษณะเช่นนี้หากไม่มีระบบสะสมพลังงานแล้วจะต้องมีแหล่งผลิตพลังงานขนาดใหญ่พอที่จะจ่ายให้ระบบในช่วงที่มีความต้องการสูง ทำให้ต้องลงทุนสูงและสูญเสียพลังงานไปในช่วงที่ความต้องการใช้พลังงานต่ำ



รูปที่ 1.19 ระบบการสูบน้ำโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ (Charters, 1982)



รูปที่ 1.20 การผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้แสงอาทิตย์ (Garg et al.,1985)

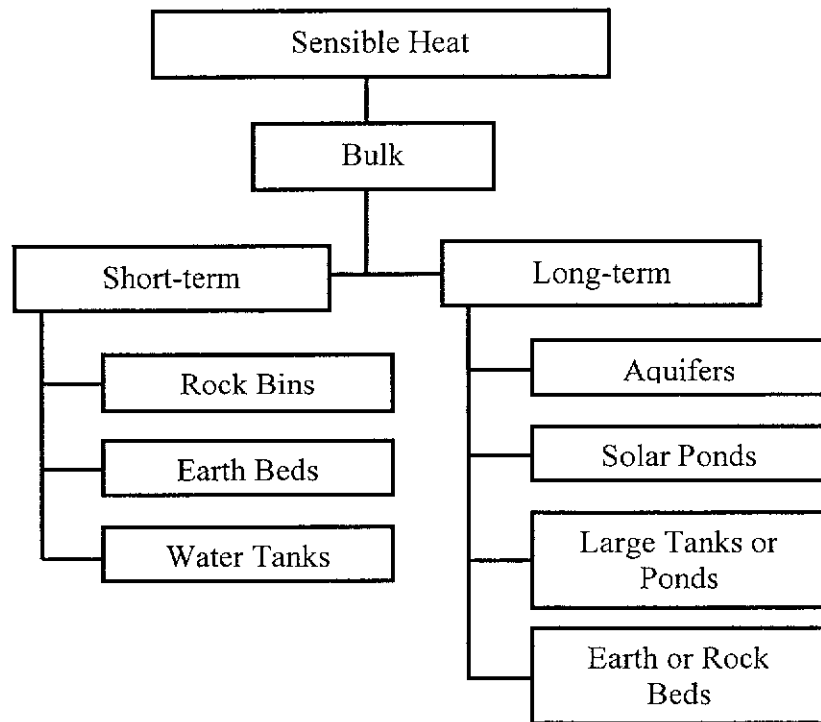


Generic category

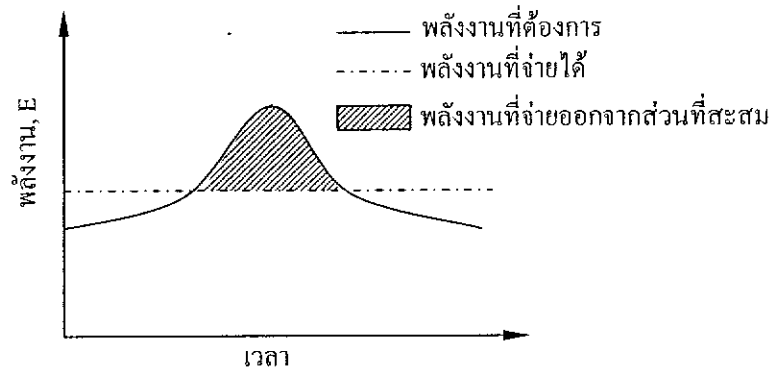
Containment

Storage Durations

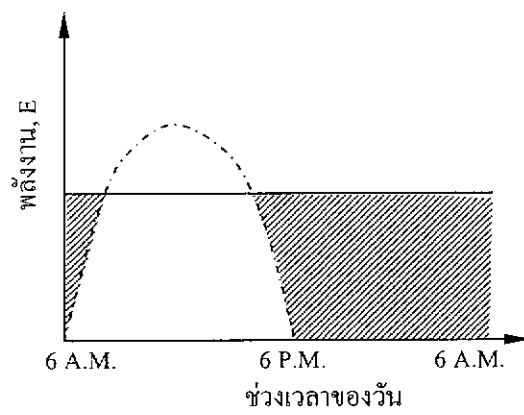
Technologies



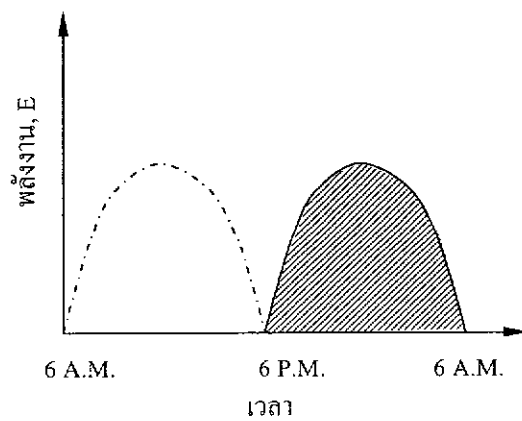
รูปที่ 1.21 ลักษณะการกักเก็บกักพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 1.22 ความไม่สอดคล้องกันของพลังงานที่มีและพลังงานที่ต้องการ (Garg et al., 1985)

2) พลังงานที่มีการเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาแต่ความต้องการพลังงานมีค่าคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 1.22 (ข) เช่น กรณีพลังงานแสงอาทิตย์จะมีพลังงานในช่วงเวลากลางวันที่ไม่เท่ากัน และไม่มีพลังงานเลยในเวลากลางคืนแต่มีความต้องการพลังงานคงที่ ดังนั้นจึงต้องสะสมพลังงานในเวลากลางวันเพื่อนำไปใช้ในเวลากลางคืน พลังงานลักษณะเช่นนี้จะต้องมากพอที่จะใช้ในเวลากลางวันและเก็บสะสมเพื่อใช้ในเวลากลางคืน

3) ปริมาณความต้องการและปริมาณพลังงานที่มีการเปลี่ยนแปลง เช่น กรณีความร้อนจากแสงอาทิตย์ซึ่งมีในช่วงเวลากลางวันแต่ความต้องการในการใช้อาจไม่สม่ำเสมอไปจนถึงเวลากลางคืนด้วย ดังแสดงในรูปที่ 1.22 (ค)

4) พลังงานที่เก็บกักในช่วงเวลาหนึ่งเพื่อนำไปใช้ในเวลาที่อื่นที่มีระยะเวลาห่างกัน เช่น เก็บสะสมพลังงานความร้อนในถุคูร้อนเพื่อนำมาใช้ในฤดูหนาว กรณีนี้พลังงานเก็บสะสมจะต้องมาก ซึ่งส่งผลให้ระบบการเก็บสะสมจะต้องมีขนาดใหญ่ตามไปด้วย

1.4.2 ตัวแปรที่ต้องพิจารณาในการออกแบบระบบ

ปริมาณพลังงานสะสมสัมพันธ์กับค่าความร้อนจำเพาะ (มีหน่วยเป็น $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ หรือ $\text{kW}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) หรือความร้อนต่อปริมาตรจำเพาะ (มีหน่วยเป็น $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$ หรือ $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$) ของวัสดุที่ใช้เป็นตัวสะสม วัสดุที่มีค่าความร้อนจำเพาะมากกว่าจะมีข้อได้เปรียบดังนี้

- 1) มวลหรือปริมาตรของวัสดุสะสมความร้อนที่ใช้จะน้อยกว่า
- 2) เสียค่าใช้จ่ายด้านโครงสร้าง ห้องเก็บ และการขนย้ายน้อยกว่า อย่างไรก็ตามน้ำหนักอาจจะไม่สำคัญสำหรับระบบที่สะสมไว้ใต้ดิน

โดยทั่วไปการสะสมพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์มักสะสมเพื่อใช้ในเวลาที่สั้น หมายถึงการสะสมความร้อนจากแสงอาทิตย์เพื่อใช้งานภายใน 24 ชั่วโมง เช่น ช่วงเวลากลางวัน-กลางคืน บางกรณีอาจสะสมเพื่อใช้ในเวลาอีกสองสามวัน การสะสมในช่วงเวลาสั้นจะเป็นระบบไดนามิก (Baylin, 1979)

การประเมินขนาดที่เหมาะสมของระบบสะสมความร้อนเพื่อการทำความร้อนและความเย็นขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานซึ่งแปรผันตามชนิดและคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุ อุณหภูมิที่เก็บสะสม ค่าความร้อนสะสมที่สูญเสีย ค่าวัสดุที่ใช้สร้างถังเก็บสะสม ชนิดของชุดแลกเปลี่ยนความร้อนและปั๊มพลังงาน อุณหภูมิบรรยากาศ ความเร็วลม สภาพของท้องฟ้า ภาระและลักษณะการใช้งาน พื้นที่และประสิทธิภาพของระบบและค่าตัวแปรต่าง ๆ ของแสงอาทิตย์ที่มีผลต่อภาระความร้อน เป็นต้น

1.4.3 วัสดุที่ใช้เก็บสะสมพลังงานความร้อน

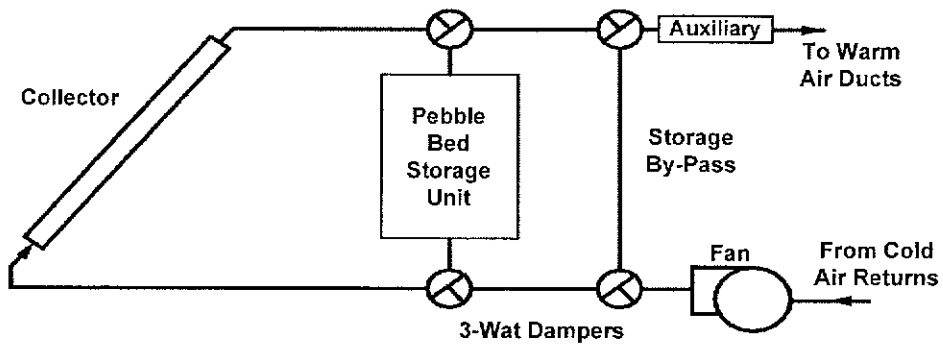
มีวัสดุหลายชนิดที่ใช้เก็บสะสมพลังงานความร้อน เช่น หิน น้ำ ดิน และน้ำเกลือ เมื่อเปรียบเทียบวัสดุแต่ละประเภทแล้วพบว่าหินมีประสิทธิภาพสูงในเชิงปริมาตร กล่าวคือหินจะเก็บสะสมพลังงานความร้อนได้ในปริมาณที่มากกว่าเมื่อเทียบกับดินและน้ำเกลือหรือวัสดุอื่น ๆ

1) การสะสมพลังงานความร้อนในหิน

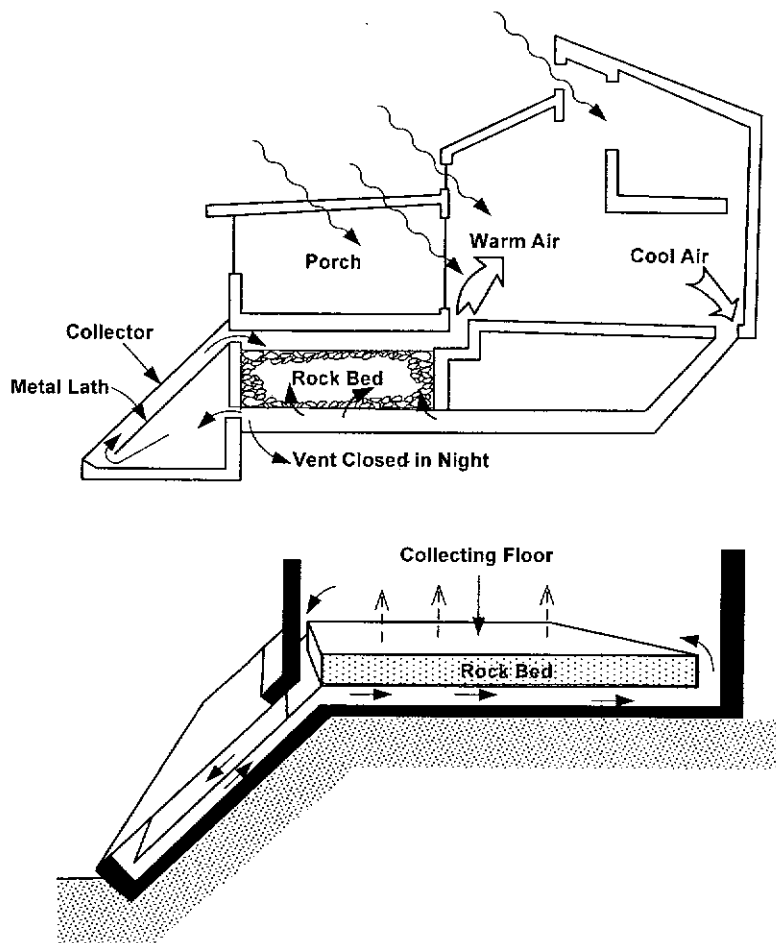
การเก็บความร้อนในชั้นหินเป็นเทคโนโลยีที่ใช้เก็บพลังงานในช่วงระยะสั้น กล่าวคือเก็บสะสมพลังงานจากแสงอาทิตย์ในช่วงเวลากลางวันแล้วนำพลังงานความร้อนที่อยู่ในมวลหินมาใช้ในเวลากลางคืน รูปที่ 1.23 แสดงเทคโนโลยีการเก็บพลังงานในหินถม โดยนำพลังงานที่เก็บสะสมได้ในเวลากลางวันมาสร้างความอบอุ่นแก่บ้านเรือนในเวลากลางคืน

Kurklu et al. (2003) เสนอแนวความคิดการให้ความร้อนกับชั้นหินด้วยเทคนิคปฏิกิริยาเรือนกระจก โดยใช้แผ่น Polyethylene เป็นวัสดุกันความร้อนครอบคลุมพื้นที่ 15 ตารางเมตร โดยนำหินมาถมในหลุมที่ขุดแล้วจากนั้นใช้ดินถมกลบเพื่อเป็นฉนวนกันด้านบน ในระบบจะมีท่ออากาศ 2 ทางเพื่อช่วยในการหมุนเวียนของอากาศ ในช่วงที่อุณหภูมิสูงอากาศร้อนจะถูกดูดและนำไปสะสมไว้ในชั้นหินถม และช่วงเวลาที่อุณหภูมิต่ำลงอากาศร้อนจะถูกดูดด้วยพัดลมความเร็วลม 1,100 m³/h มาปล่อยยังห้องหรืออาคารที่ต้องการ เทคนิคนี้สามารถสร้างความต่างของอุณหภูมิได้ถึง 10°C จากผลการประเมินทางเศรษฐศาสตร์พบว่า การนำเทคโนโลยีดังกล่าวมาใช้จะมีราคาถูกลงกว่าการนำเอาก๊าซธรรมชาติมาเผาเพื่อให้ความร้อน

Choudhury et al. (1995) ศึกษาและออกแบบเทคโนโลยีการกักเก็บพลังงานความร้อนในชั้นหินถมร่วมกับอุปกรณ์การให้ความร้อน (air heater) ในเมืองนิวเดลี ประเทศอินเดีย ตัวแปรที่ถูกพิจารณาและออกแบบประกอบด้วย ช่วงเวลาการให้พลังงานความร้อนที่เหมาะสม ขนาดของชั้นหิน ขนาดหน้าตัดของชั้นหิน ขนาดของก้อนหิน ความเร็วของอากาศต่อพื้นที่การไหล และขนาดของช่องว่าง โดยตัวแปรทั้งหมดจะถูกศึกษาถึงผลกระทบต่อพลังงานรวมที่ได้ และสุดท้ายคือการประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์ของเทคโนโลยีดังกล่าว ผลการศึกษาบ่งชี้ว่าเวลาที่เหมาะสมในการเติมพลังงานเข้าไปกักเก็บคือช่วงเวลา 08.00-16.00 น. ขนาดของหินและช่องว่างระหว่างการจัดเรียงไม่มีผลกระทบมากนักต่อประสิทธิภาพและราคา ค่าความเร็วของมวลอากาศในความหนา 1 เมตร และพื้นที่หน้าตัดของหลุมเก็บ 16 ตารางเมตร มีค่าเท่ากับ 100 kg/h.m² แต่ถ้าต้องการให้มีค่าความเร็วสูง จะทำการลดพื้นที่หน้าตัดลง อย่างไรก็ตามตัวแปรดังกล่าวยังต้องคัดเลือกให้เหมาะสมกับความต้องการระดับอุณหภูมิของแต่ละพื้นที่ที่แตกต่างกัน



(A) Schematic diagram of a solar air heating system (Kalogirou, 2004)



(b) Two possible configuration in which convection loop in combined with rock bed storage (Garg et al., 1985)

รูปที่ 1.23 การสะสมพลังงานความร้อนในหินถมเพื่อความอบอุ่นในบ้านเรือน

Trinestsampan (1981) ได้ทำการศึกษากการเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ใน หินถมที่ระดับความลึก 0.67 เมตร โดยใช้กรวด (หินปูน) ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 6.7 เซนติเมตร ในการเก็บพลังงานความร้อนจากอากาศที่ไหลผ่านชั้นหินถม จากการศึกษาพบว่าเมื่อ อากาศร้อนซึ่งมีความเร็วเท่ากับ $0.177 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ ไหลผ่านชั้นหิน จะมีความดันลดลง 85 N/m^2 และ ปริมาณความร้อนที่อากาศถ่ายเทให้กับมวลหินมีค่าเท่ากับ 1.36 kW/K

2) การสะสมพลังงานความร้อนในชั้นดิน

ธนาคม สุนทรชัยนาคแสง (2538, 2539) และธนาคม สุนทรชัยนาคแสง และคณะ (2539) เสนอแนวความคิดการสะสมพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ไว้ในชั้นดิน โดยทำการศึกษา เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในชั้นดินเทียบกับเวลาและความลึก ซึ่งจากความสัมพันธ์ดังกล่าว จะนำไปสู่การประเมินค่าความร้อนที่เกิดขึ้นในชั้นดิน และการประเมินปริมาณการถ่ายเทความร้อน จากดินสู่สิ่งแวดล้อมโดยใช้หลักการสมดุล ด้วยการศึกษาศามารถของตัวกลางในการกักเก็บ พลังงานความร้อนในสิ่งแวดล้อม เช่น น้ำ หิน และดิน ผลการศึกษาพบว่าค่าการนำความร้อนของดิน จะขึ้นอยู่กับปริมาณที่เกิดการแพร่กระจายอนุภาคของดิน และความร้อนที่สูญเสียจากระบบมี ค่าประมาณ 2-3 เปอร์เซ็นต์ ของค่าความจุความร้อนที่สะสมได้

1.5 คุณสมบัติทางด้านอุณหภูมิของวัสดุทั่วไป

คุณสมบัติทางด้านอุณหภูมิที่มีการศึกษาและทดสอบคือ คุณสมบัติด้านการนำความร้อน (Thermal conductivity) ความจุความร้อนจำเพาะ (Specific heat) และความสามารถในการแพร่ กระจายทางความร้อน (Thermal diffusivity) เพื่อนำไปใช้ประเมินประสิทธิภาพของหินและดินชนิด นั้น ๆ ในเชิงความร้อน และศึกษาถึงความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการกักเก็บพลังงานความร้อน และเป็นฉนวนกันความร้อนออกจากระบบ

1.5.1 ความสามารถในการนำความร้อนของวัสดุ

ในเบื้องต้นจะพิจารณาว่าค่าการนำความร้อนของวัสดุที่เป็นของแข็งจะต้องขึ้นกับ อุณหภูมิเท่านั้น โดยจะต้องไม่ขึ้นกับองค์ประกอบอื่น (Pitts and Sissom, 1977) โดยทั่วไปการนำ ความร้อนในโลหะบริสุทธิ์จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง แต่สำหรับธาตุที่เป็นส่วนประกอบของ โลหะผสมจะมีแนวโน้มในทางกลับกัน โดยค่าความสามารถในการนำความร้อน (k) ของโลหะมักจะ อยู่ในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง ดังนี้

$$k = k_0 (1 + b\theta + c\theta^2) \quad (1.1)$$

เมื่อค่า θ เท่ากับ $(T - T_{ref})$ และ k_0 เป็นค่าการนำความร้อนที่พิจารณาจากค่าอุณหภูมิที่จุดอ้างอิง (T_{ref}) ความสามารถในการนำความร้อนของวัสดุที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Non homogeneous) ตามปกติจะขึ้นกับความหนาแน่นทั่วทั้งก้อนของวัสดุที่ปรากฏจริง (Apparent bulk density) ดังนั้นค่าความสามารถในการนำความร้อนจะเปลี่ยนแปลงตามค่าอุณหภูมิ ค่าของ k ในวัสดุที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น และยังเพิ่มขึ้นตามค่าความหนาแน่นทั่วทั้งก้อนวัสดุที่ปรากฏจริงซึ่งมีค่าสูงขึ้นด้วย

1.5.2 ความร้อนจำเพาะ

ค่าความจุความร้อนจำเพาะของสารเป็นการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงของพลังงานที่สะสมอยู่ด้วยการวัดจากค่าอุณหภูมิ ค่าความจุความร้อนจำเพาะแบ่งออกเป็น ความร้อนจำเพาะที่ปริมาตรคงที่ (c_v) และความจุร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ (c_p) สำหรับกรณีที่เป็นของแข็งนั้นค่าทั้งสองค่าเท่ากันในเชิงตัวเลข ค่าดังกล่าวจะขึ้นกับอุณหภูมิซึ่งเป็นไปในลักษณะที่อุณหภูมิมีอิทธิพลต่อค่าความร้อนจำเพาะไม่มากนัก และขณะเดียวกันจะมีผลกระทบจากค่าความดันน้อยมาก

1.5.3 ความสามารถในการแพร่กระจายความร้อน

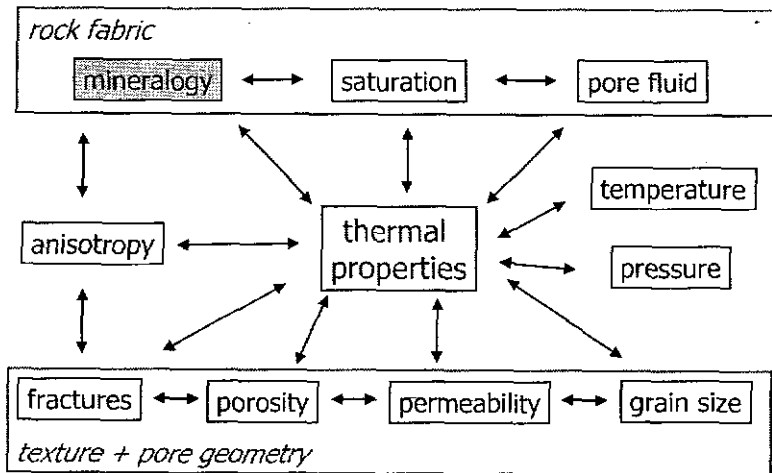
ค่าความสามารถในการแพร่กระจายความร้อน (α) เป็นอัตราส่วนของค่าความสามารถในการนำความร้อนต่อค่าความจุความร้อนของวัสดุ คือ

$$\alpha \equiv k / (\rho \times C_p) \quad (1.2)$$

หน่วยที่ใช้จะเป็น ft^2/hr หรือ m^2/s พลังงานความร้อนจะเกิดการแพร่กระจายอย่างรวดเร็วผ่านสสาร เมื่อมีค่า α ในปริมาณที่สูง และการแพร่กระจายพลังงานจะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ เมื่อ α มีค่าในปริมาณที่ต่ำ

1.6 คุณสมบัติทางด้านอุณหภูมิของหิน

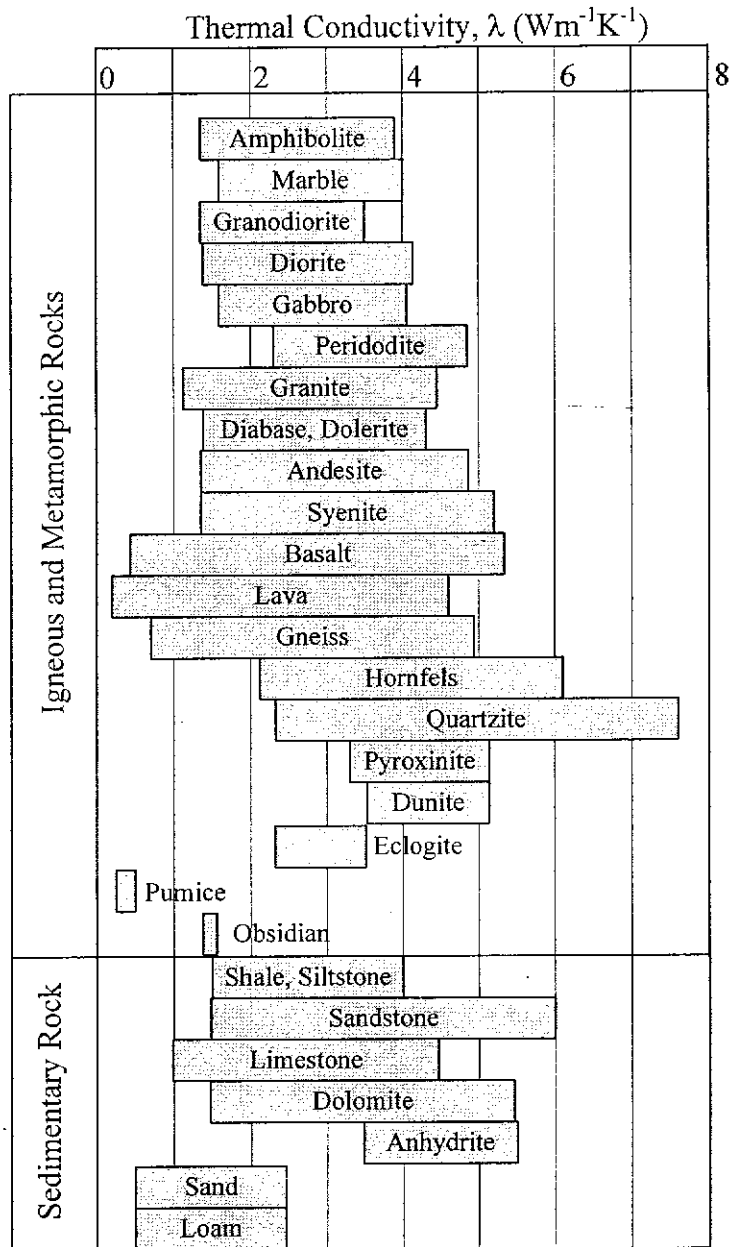
คุณสมบัติทางด้านอุณหภูมิมิมี 2 ประการ คือ ความร้อนจำเพาะ (ความจุความร้อนจำเพาะ) และการนำความร้อนของหิน คุณสมบัติที่กล่าวนี้จะขึ้นกับปัจจัยภายในเนื้อหินเป็นตัวควบคุมได้แก่ แร่ประกอบหิน น้ำในช่องว่างในหิน รอยแตก ความพรุน ค่าการซึมผ่าน และขนาดของผลึก ส่วนปัจจัยภายนอกที่เป็นตัวควบคุมคุณสมบัติดังกล่าวได้แก่ อุณหภูมิ และความดัน (รูปที่ 1.24) ตารางที่ 1.1 สรุปคุณสมบัติทางด้านอุณหภูมิของหินที่รวบรวมได้จากการศึกษาในงานวิจัยทั้งในและต่างประเทศ รูปที่ 1.25 และรูปที่ 1.26 เปรียบเทียบค่าการนำความร้อนและความจุความร้อนจำเพาะของหินชนิดต่าง ๆ



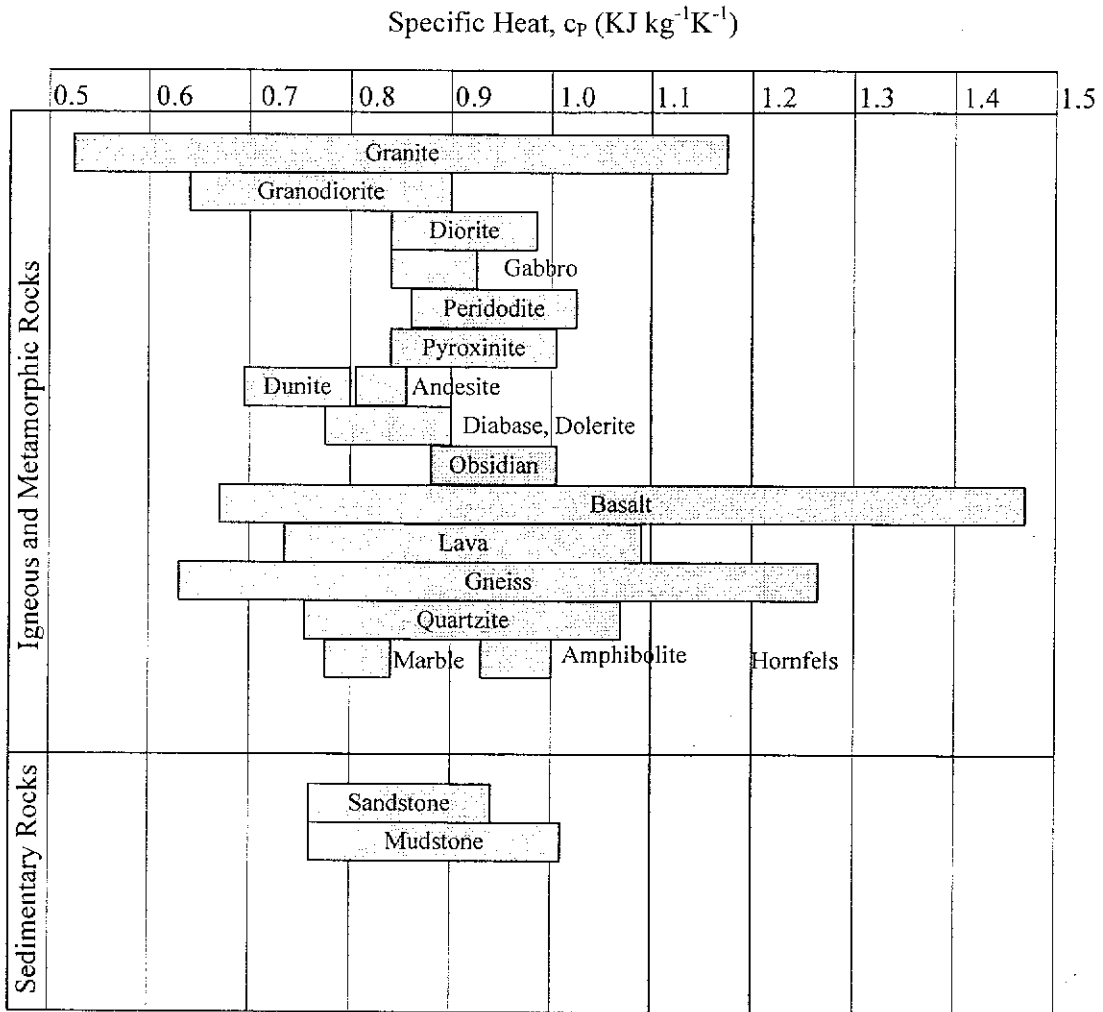
รูปที่ 1.24 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติทางด้านความร้อนของหิน (Department Angewandte Geowissenschaften und Geophysik, 2006)

ตารางที่ 1.1 สรุปคุณสมบัติทางด้านอุณหภูมิของหินอัคนีและหินแปรชนิดต่าง ๆ (ข้อมูลจาก
Department Angewandte Geowissenschaften und Geophysik, 2006)

Rock Type	Thermal Conductivity λ , ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)	Specific Heat c , ($\text{kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)
Granite	1.12-4.45	0.25-1.55
Granodiorite	1.35-3.50	0.74-1.26
Syenite	1.35-5.20	N/A
Diorite	1.38-4.14	0.88-1.17
Gabbro	1.59-4.05	0.88-1.13
Peridotite	2.30-4.85	0.92-1.09
Pyroxenite	3.30-5.14	0.88-1.21
Dumite	3.53-5.14	0.59-0.80
Diabase, Dolerite	1.38-4.30	0.75-1.00
Andesite	1.35-4.86	0.81-0.82
Obsidian	1.38-1.56	0.96-1.21
Basalt	0.44-5.33	0.54-2.14
Lava	0.20-4.60	0.67-1.38
Pumice	0.25-0.50	N/A
Quartzite	2.33-7.60	0.71-1.34
Eclogite	2.31-3.50	N/A
Amphibolite	1.35-3.90	1.06-1.20
Gneiss	0.70-4.93	0.46-1.73
Marble	1.59-4.00	0.75-0.88
Hornfels	2.12-6.10	1.47-1.48



รูปที่ 1.25 เปรียบเทียบค่าการนำความร้อนของหินชนิดต่าง ๆ (คัดแปลงจาก Department Angewandte Geowissenschaften und Geophysik, 2006)



รูปที่ 1.26 เปรียบเทียบค่าความจุความร้อนจำเพาะของหินชนิดต่าง ๆ (ข้อมูลจาก Department Angewandte Geowissenschaften und Geophysik, 2006)

1.6.1 ความร้อนจำเพาะของหิน

ในการศึกษาของ Vosteen and Schellschmidt (2003) ได้ทำการเก็บตัวอย่างหินอัคนี หินแปร และหินตะกอนในพื้นที่ Eastern Alpine ที่ระดับความลึกต่าง ๆ มาทดสอบคุณสมบัติทางด้านความร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง 0-300°C ระบุว่าคุณสมบัติทางด้านความร้อน (Thermal properties) เช่น คุณสมบัติการนำความร้อน (λ) ความร้อนจำเพาะ ($\rho \times C_p$) และความสามารถในการแพร่กระจายความร้อน (κ) ของหินแต่ละชนิดจะขึ้นกับอุณหภูมิ กล่าวคือคุณสมบัติการนำความร้อนและความสามารถในการแพร่กระจายความร้อนของหินจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

ค่าความร้อนจำเพาะของหินในกลุ่มหินภูเขาไฟ หินแปร และหินตะกอนที่วัดได้ที่อุณหภูมิห้องมีค่าอยู่ระหว่าง 0.74-0.85 kJ·kg⁻¹·K⁻¹ และมีค่าสูงสุดวัดได้ที่อุณหภูมิ 300°C เท่ากับ 1.05 kJ·kg⁻¹·K⁻¹ จากการเปรียบเทียบพบว่าค่าความร้อนจำเพาะของหินตะกอนจะสูงกว่าหินใน 2 กลุ่มแรก ในทางตรงข้ามความร้อนจำเพาะของหินกลับเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และผลการศึกษาพบว่า กลุ่มหินที่เกิดจากการตกผลึก (Crystalline rock) ได้แก่ หินอัคนี และหินแปร มีคุณสมบัติทางด้านความร้อนแตกต่างจากกลุ่มหินตะกอน

1.6.2 การนำความร้อนของหิน

จากการศึกษาของ Clauser (1988) และ Clauser and Huengers (1995) พบว่าคุณสมบัติการนำความร้อนของหินอัคนีทั้งที่เป็น Plutonic rock และ Volcanic rock มีความเหมือนกันในทุกทิศทาง ในทางตรงข้ามหินตะกอนบางชนิดและหินแปรจะมีคุณสมบัติทางด้าน การนำความร้อนแตกต่างกันอย่างมากในแต่ละทิศทาง โดยทั่วไปแล้วความสามารถในการนำความร้อนของหินจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ยกเว้นหินในกลุ่ม Amorphous หรือ Fused material เช่น Obsidian มีแนวโน้มไม่เป็นไปตามที่กล่าวข้างต้น

การประเมินค่าการนำความร้อนของหินชนิดต่าง ๆ สามารถที่จะประเมินจากสมการทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นมาจากการทดสอบ ซึ่งหินแต่ละชนิดจะมีแนวโน้มแตกต่างกันไป สมการที่ใช้ก็จะแตกต่างกันไปด้วย โดยมีผู้เสนอไว้หลายท่านดังนี้

Vosteen and Schellschmidt (2003) ได้เสนอสมการในการหาค่าการนำความร้อนของหิน magmatic และ metamorphic ดังนี้คือ

$$\lambda(0) = 0.53\lambda(25) + \frac{1}{2}\sqrt{1.13(\lambda(25))^2 - 0.42\lambda(25)} \quad (1.3)$$

$$\lambda(\tau) = \frac{\lambda(0)}{0.99 + \tau(a - b/\lambda(0))} \quad (1.4)$$

เมื่อ T คือ อุณหภูมิของตัวอย่าง, $\lambda(0)$ และ $\lambda(25)$ คือ ค่าการนำความร้อนของตัวอย่างที่อุณหภูมิเท่ากับ 0 และ 25°C ส่วน a และ b เป็นค่าคงที่ โดยที่ $a = 0.0030 \pm 0.0015$ และ $b = 0.0042 \pm 0.0006$ นอกจากนี้ยังเสนอสมการในการหาค่าการนำความร้อนของหินตะกอนดังสมการข้างล่างนี้

$$\lambda(0) = 0.54\lambda(25) + \frac{1}{2}\sqrt{1.16(\lambda(25))^2 - 0.39\lambda(25)} \quad (1.5)$$

$$\lambda(T) = \frac{\lambda(0)}{0.99 + T(a - b/\lambda(0))} \quad (1.6)$$

เมื่อ $a = 0.0034 \pm 0.0006$ และ $b = 0.0039 \pm 0.0014$

Zoth and Hanel (1988) เสนอสมการที่ใช้ประเมินค่าการนำความร้อนของหินที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยมีรูปสมการทั่วไปดังนี้

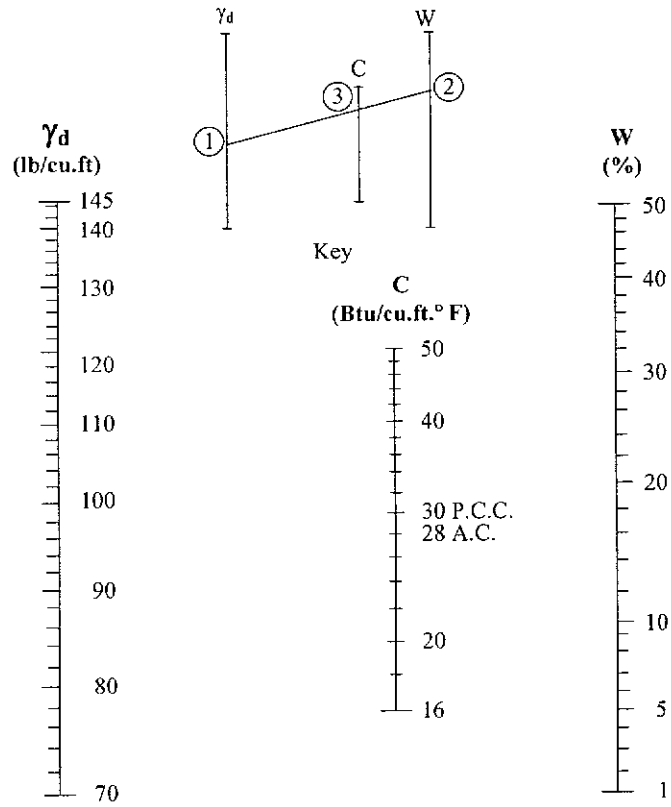
$$\lambda(T) = \frac{A}{(350 + T)} + B \quad (1.7)$$

เมื่อ A และ B เป็นสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นกับชนิดของหิน $\lambda(T)$ มีหน่วยเป็น $\text{Wm}^{-1} \text{K}^{-1}$ และ T มีหน่วยเป็น $^{\circ}\text{C}$ สมการสำหรับหินที่เป็น Metamorphic rocks เช่น amphibolite, phyllite ค่าคงที่ A และ B มีค่าเท่ากับ 807 และ 0.64 หินที่เป็น Acid rocks เช่น granite, granodiorite, quartz porphyry มีค่าคงที่ A และ B เท่ากับ 474 และ 1.18 หินที่เป็น Basic rocks เช่น basalt, gabbro มีค่าคงที่ A และ B เท่ากับ 1,293 และ 0.73 หินที่เป็น Ultrabasic rocks เช่น dunite, olivinite, periodotite มีค่าคงที่ A และ B เท่ากับ 1,073 และ 0.13 และสำหรับหินปูนจะมีค่าคงที่ A และ B เท่ากับ 770 และ 0.70

1.7 คุณสมบัติทางด้านอุณหภูมิของดิน

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อคุณสมบัติทางอุณหภูมิของดิน ได้แก่ ปริมาณน้ำในเนื้อดินและความหนาแน่นของดิน ซึ่งสามารถสร้างความสัมพันธ์ได้ดังแสดงในรูปที่ 1.27 และตารางที่ 1.2 สรุปคุณสมบัติทางด้านอุณหภูมิของดินชนิดต่าง ๆ

ธนาคม สุนทรชัชวาล และคณะ (2539) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติด้านความร้อนของดิน โดยการวิเคราะห์ด้วยการกำหนดระบบให้อยู่ในสภาวะที่สม่ำเสมอ และมีลักษณะของระบบเก็บสะสมความร้อนเป็นครึ่งทรงกลม ผลที่ได้นี้จะใช้เป็นข้อมูลในการพิจารณาเลือกสถานที่และช่วงเวลาที่เหมาะสม ผลสรุปที่ได้คือ 1) สภาวะที่คล้ายหรือใกล้เคียงกับสภาวะคงที่ ค่าของความร้อนที่สูญเสียโดยเฉลี่ยที่เกิดขึ้นเป็นการสูญเสียให้แก่สภาวะแวดล้อมของดิน เมื่อดินมีลักษณะที่ไม่ใช่ฉนวน ค่าความร้อนที่สูญเสียจากระบบสะสมจะมีค่าประมาณ 2-3% ของค่าความจุความร้อนที่สะสม



รูปที่ 1.27 ค่าเฉลี่ยของความจุความร้อนเชิงปริมาตรของดิน โดยทั่วไป
(U.S. Army Corps of Engineers). (ดูตารางที่ 1.2 ประกอบ)

ตารางที่ 1.2 สรุปคุณสมบัติทางด้านอุณหภูมิจนของดิน (ข้อมูลจาก Sundberg, 1998)

Soil Type	Thermal Conductivity λ , ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)	Specific Heat c_p , ($\text{J/m}^3\text{K}^{-1}$) $\times 10^6$
Clay with high clay content	0.85 – 1.1	3.0 – 3.6
Dry crust clay	1.1 – 1.4	2.6 – 3.0
Silty clay	1.1 – 1.5	2.9 – 3.0
Silt	1.2 – 2.4	2.4 – 3.3
Sand, gravel	1.5 – 2.6	2.5 – 3.2
Till	1.5 – 2.5	2.2 – 3.0
Sandy till	0.6 – 1.8	1.3 – 1.9
Peat	0.2 – 0.5	0.7 – 3.2

ได้จริง 2) เวลาที่ใช้กับปริมาณความร้อนที่สูญเสียของระบบใหม่ ๆ (เริ่มด้วยสภาพแวดล้อมของอุณหภูมิในดินที่เกิดขึ้นโดยธรรมชาติ) โดยคำนวณค่าที่ได้ในหนึ่งปีที่สภาวะคงที่ 3) สภาพแวดล้อมของดินที่ใช้สะสมความร้อนมีลักษณะการรวมตัวกันน้อยมาก จึงต้องมีการวัดค่าความจุของระบบที่สะสมไว้ใช้ในช่วงฤดูต่าง ๆ ผลสรุปจากทั้ง 3 ข้อแสดงให้เห็นว่าปัญหามักขึ้นกับสัดส่วนที่กำหนดในปริมาตรที่สะสมได้ดิน ซึ่งจะต้องทำการประเมินค่าฟลักซ์ของน้ำ ค่าการนำความร้อน ค่าความจุของดิน และต้องหาค่าที่ใช้ในแต่ละกรณีรวมทั้งการสูญเสียค่าความร้อนในส่วนย่อย ๆ ที่ออกจากปริมาตรสะสมขึ้นสู่ผิวด้านบน

1.7.1 ความร้อนจำเพาะของดิน

ค่าความจุความร้อนจำเพาะของดินจะขึ้นกับความหนาแน่นของดินและความชื้นในดิน (Departments of the Army and the Air Force, 1988) โดยมีความสัมพันธ์กันดังนี้คือ

ดินที่เป็น unfrozen soil

$$c_u = \gamma_d \left(c + 1.0 \frac{w}{100} \right) \quad (1.8)$$

ดินที่เป็น frozen soil

$$c_f = \gamma_d \left(c + 0.5 \frac{w}{100} \right) \quad (1.9)$$

ดินโดยทั่วไป

$$c_f = \gamma_{avg} \left(c + 0.75 \frac{w}{100} \right) \quad (1.10)$$

ดินโดยทั่วไปจะมีค่าความจุจำเพาะอยู่ที่ประมาณ 0.17 และค่าดังกล่าวจะเปลี่ยนแปลง ตามปริมาณความชื้นและความหนาแน่น

1.7.2 การนำความร้อนของดิน

การนำความร้อนของดินขึ้นกับปริมาณความชื้นหรือน้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดินและความพรุนในเนื้อดิน (Jumikis, 1966) กล่าวคือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนจะมีค่าลดลงเมื่อความพรุนเพิ่มขึ้น โดยจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงที่ความพรุนอยู่ระหว่าง 0 ถึง 15 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเปรียบเทียบที่ความพรุนเท่ากัน สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของดินจะแปรผันตามปริมาณความชื้นในเนื้อดิน ดินที่มีความชื้นสูงจะมีค่าการนำความร้อนสูงด้วย

1.8 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

เทคโนโลยีการกักเก็บพลังงานความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์มาสะสมไว้ในชั้นหินที่สร้างขึ้นได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องในช่วงเวลา 40 ปีที่ผ่านมา ซึ่งการวิจัยส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นการศึกษากระบวนการไหลในเชิงความร้อน ประสิทธิภาพของเทคโนโลยี และตัวแปรที่เหมาะสมในการออกแบบ รวมถึงสมการทางคณิตศาสตร์ที่จะนำมาใช้ในการประเมินและคำนวณตัวแปรในการออกแบบดังกล่าว Rao and Suri (1969) ทำการศึกษากระบวนการนำความร้อนโดยอธิบายในเชิงสมการคณิตศาสตร์ในช่วง Unsteady state ผ่านชั้นหินที่ถูกนำมาเป็นวัสดุกักเก็บในหลุมกักเก็บรูปทรงกลม ในปี 1977 Chark และ Nabozny ทำการพัฒนาโปรแกรมที่นำมาใช้ในการคำนวณการตอบสนองทางพลศาสตร์และความสามารถในการกักเก็บความร้อนของหลุมกักเก็บทั้งในช่วงการเก็บพลังงานและในช่วงการปล่อยพลังงาน

Meier et al. (1991) เสนอสมการเชิงคณิตศาสตร์ในการคำนวณการส่งผ่านความร้อนสำหรับเทคโนโลยีการกักเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่อุณหภูมิสูงในโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ (solar power plants) ซึ่งโปรแกรมที่นำเสนอคือ PACKBEDA โปรแกรมนี้มีการปรับปรุงโดยมีจุดประสงค์เพื่อคำนึงถึงผลกระทบด้านคุณสมบัติของอากาศในเชิงความร้อน เช่น ความหนาแน่น ความหนืด การนำความร้อน และการคำนวณหาการสูญเสียความร้อนต่อผนังที่เป็นฉนวน ซึ่งผลการคำนวณเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบมีผลเป็นที่ยอมรับได้ในระดับหนึ่ง

Sowell and Curry (1980) เปรียบเทียบระเบียบวิธีในการคำนวณเชิงตัวเลขของโปรแกรม TRNSYS ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้คำนวณระบบความร้อนในชั้นหินกักเก็บกันอย่างกว้างขวางกว่าโปรแกรมอื่นในการคำนวณหาอุณหภูมิของไอน้ำที่ผ่านชั้นหินกักเก็บ โดยทำการศึกษาการไหล 2 แบบ คือ การไหลแบบ 2 ทิศทาง (bi-directional flow) และการไหลแบบไม่มีทิศทาง (arbitrary flow) ผลการวิจัยพบว่าวิธีของโปรแกรม TRNSYS ยังต้องการความแม่นยำในการคาดคะเนอุณหภูมิในชั้นหิน ซึ่งวิธีทาง finite difference เป็นวิธีการคำนวณที่มีประสิทธิภาพดีกว่า

Chandra and Willits (1981) ทำการทดสอบและศึกษาเทคโนโลยีการกักเก็บพลังงานความร้อน ได้ข้อสรุปว่าการลดลงของความดันมีผลกระทบมาจากขนาดของหิน ช่องว่างระหว่างหิน และอัตราการไหลของอากาศ และยังพบว่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนเชิงปริมาตรจะขึ้นกับขนาดของหินและอัตราการไหลของอากาศเท่านั้น

Coutier and Farber (1982) เสนอวิธีการแก้ปัญหาสมการ differential ในการอธิบายกระบวนการส่งผ่านความร้อนในชั้นหินกักเก็บความร้อน ซึ่งใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเป็นเครื่องช่วย เช่น การประเมินการสูญเสียความร้อน ผลกระทบของตัวนำความร้อนต่อระบบ ผลการศึกษาพบว่าวิธีการดังกล่าวถือว่าเป็นวิธีการใหม่ในการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนของตัวนำเชิงปริมาตรเพื่อเปรียบเทียบผลทางทฤษฎีและการทดลอง นอกจากนี้ยังสามารถนำสมการดังกล่าวมาคำนวณหาจุดเหมาะสมของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้กับเทคโนโลยีการกักเก็บพลังงานความร้อนในชั้นหิน เช่น ความเร็วของอากาศ ขนาดของอนุภาค และรูปร่างของบ่อกักเก็บ

Clark and Beasley (1982) ทำการพัฒนาแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ 1 และ 2 มิติ เพื่อใช้ในการตอบสนองแบบพลศาสตร์ของอุณหภูมิ ทั้งในรูปของเหลวและของแข็งในชั้นหินกักเก็บ และได้มีการศึกษาผลกระทบของช่องว่างระหว่างหิน การกระจายตัวของอากาศ ความสามารถของผนังในการกักเก็บความร้อน และการสูญเสียความร้อนของผนังกันต่อการตอบสนองทางพลศาสตร์ของชั้นหินกักเก็บภายใต้การแปรเปลี่ยนของอุณหภูมิเข้าและอุณหภูมิเริ่มต้น

Zaez and McCoy (1982) พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการคำนวณอุณหภูมิและพลศาสตร์ของแท่งที่บรรจุหินกักเก็บความร้อนต่อการแปรเปลี่ยนและการขึ้นกับเวลาของอุณหภูมิที่เข้ามาในระบบ ผลการศึกษาพบว่า การกระจายความร้อนในแนวแกนมีการกระจายได้ดี เช่นเดียวกับ *intra particular conduction*

1.9 วัสดุผิวสะท้อนแสง

วัสดุสะท้อนแสงหรือกระจกรวมแสงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการรวบรวมแสงอาทิตย์และสะท้อนส่งผ่านไปยังแหล่งกักเก็บพลังงาน การเลือกใช้วัสดุผิวสะท้อนแสงเพื่อต้องการส่งความร้อนจากแสงอาทิตย์ไปยังหินถมจึงมีผลต่อประสิทธิภาพในการสะท้อนแสง จากการศึกษาของ อนุตรจำลองกุล (2545) สรุปว่าวัสดุสะท้อนแสงโดยทั่วไป ได้แก่ โลหะหรือผิวที่เคลือบโลหะ โดยเฉพาะโลหะผิวเรียบขัดมันจะสะท้อนแสงได้สูงที่มุมของแสงตกกระทบตั้งฉากกับผิวสะท้อนแสง โลหะเงินและอะลูมิเนียมจะสะท้อนแสงได้สูงสุด ส่วนโลหะอื่น ๆ ที่ขัดมันก็จะสะท้อนแสงได้ดี เนื่องจากค่าการสะท้อนแสงของโลหะเหล่านี้ (ยกเว้น ทอง โรเดียม ทองคำขาว และโลหะชั้นสูงอื่น ๆ) จะลดลงอย่างรวดเร็วเพราะเกิดการหมองได้ง่ายเมื่อทิ้งไว้ในบรรยากาศ นอกจากโลหะแล้วอะลูมิเนียมจะลดค่าการสะท้อนแสงลงน้อยที่สุด ทั้งนี้เพราะออกไซด์ของอะลูมิเนียม โปร่งใสจึงเหมาะสมที่สุดในด้านความคงทนต่อสภาพบรรยากาศ

เพื่อเป็นการลดความสูญเสียค่าการสะท้อนแสงเนื่องจากการมัวหมองและความไม่เรียบของผิวสะท้อนแสง จึงมีการใช้โลหะที่มีค่าการสะท้อนแสงสูง อาทิเช่น เงินหรืออะลูมิเนียมเคลือบลงบนวัสดุที่ใช้เป็นพื้นซึ่งเรียกว่า Substrate อาจเป็นผิวโลหะ แก้ว หรือพลาสติก ทั้งนี้ในการเคลือบโลหะลงบน Substrate อาจเคลือบบริเวณด้านหน้าหรือด้านหลังก็ได้

ผลการศึกษาของ Daniel Finch (1981) ระบุว่า การใช้ผิวสะท้อนแสงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการให้แสงของดวงโคมเดิมที่มีประสิทธิภาพสูงอยู่แล้วให้สูงมากยิ่งขึ้นอีก 15 ถึง 30% โดยการใช้วัสดุสะท้อนแสงที่มีค่าการสะท้อนแสงได้สูงซึ่งพบว่ามีอยู่ 3 ชนิดที่ให้ค่าการสะท้อนแสงสูงมากกว่า 90% ได้แก่ ทองคำ (Gold) ทองคำขาว (Platinum) และเงิน (Silver) ประสิทธิภาพในการสะท้อนแสงของผิวสะท้อนแสงในแต่ละวัสดุนั้นจำเป็นต้องคำนึงถึงระยะเวลาและอายุการใช้งานด้วยว่ามีผลต่อประสิทธิภาพอย่างไร จากการสำรวจพบว่าวัสดุสะท้อนแสงที่เป็น SILVER

REFLECTOR มีประสิทธิภาพในการสะท้อนแสงสูงถึง 90-95% ประสิทธิภาพในการสะท้อนแสงของ ANODIZED ALUMINIUM SHEET มีค่าเท่ากับ 70-85% และ WHITE PAINT มีประสิทธิภาพการสะท้อนแสงเพียง 50-80% เท่านั้น (สมาคมอุตสาหกรรมก่อสร้างไทย, 2539)

1.9.1 ผิวสะท้อนแสงมาตรฐาน

แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ถูกนำมาใช้เป็นมาตรฐานในการสอบเทียบค่าการสะท้อนแสงของวัสดุอื่น ๆ โดยให้การสะท้อนแสงมีค่าเท่ากับ 1 แต่เนื่องจากผิวของแมกนีเซียมออกไซด์ค่อนข้างจะเปราะและไม่ทนทานเมื่อใช้งาน ดังนั้นจึงใช้สารอื่นที่มีค่าการสะท้อนแสงใกล้เคียงกับแมกนีเซียมออกไซด์เป็นมาตรฐานแทน

การเตรียมผิวสะท้อนแสงมาตรฐานที่ได้จากแมกนีเซียมออกไซด์หรือแบเรียมซัลเฟตสามารถทำได้ 3 วิธี คือ วิธีการอัด (Press) ซึ่งจะใช้ผงแมกนีเซียมออกไซด์หรือแบเรียมซัลเฟตที่มีความบริสุทธิ์สูงที่สุดมาอัดลงบนแผ่น Substrate ให้ได้ความหนาอย่างน้อย 3 มิลลิเมตร การรมควัน (Smoked) แมกนีเซียมออกไซด์จะเคลือบได้หลายวิธี และทุกวิธีจะใช้แมกนีเซียมที่บริสุทธิ์มาก ส่วน Substrate ไม่มีผลต่อการสะท้อนแสงและการทา (Paint) ซึ่งจะใช้แมกนีเซียมออกไซด์หรือแบเรียมซัลเฟตบริสุทธิ์ผสมกับแอลกอฮอล์ที่บริสุทธิ์ให้ได้ส่วนผสมที่เข้มข้นมาก จากนั้นนำไปเข้าหัวฉีดเพื่อพ่นส่วนผสมนี้ไปเคลือบลงบน Substrate ให้มีความหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร จากนั้นทำให้ผิวแห้งอย่างรวดเร็ว เมื่อผิวแห้งสนิทแล้วควรปิดผิวให้เรียบร้อยแปรงชนอิฐทันที

1.9.2 การหาค่าสะท้อนแสงจากแสงอาทิตย์

การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ในระบบรวมแสง อุปกรณ์ที่ใช้จะต้องสะท้อนแสงจากดวงอาทิตย์โดยตรง ดังนั้นการหาค่าสะท้อนแสงของผิวสะท้อนแสงควรวัดจากแสงอาทิตย์โดยตรงเช่นกัน อุปกรณ์ที่ใช้ในการหาค่าการสะท้อนแสงเรียกว่า Integrating sphere ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกลมโดยผิวภายในเคลือบไว้ด้วยผิวสะท้อนแสงมาตรฐาน บนทรงกลมจะมีช่องทางให้แสงเข้า มีช่องสำหรับใส่ตัวอย่างที่ต้องการหาค่าการสะท้อนแสง และช่องสำหรับใส่แผ่นสะท้อนแสงมาตรฐาน รวมทั้งช่องทางนำแสงไปยังที่วัดแสงด้วย

การทำงานของเครื่องวัดค่าการสะท้อนแสงอาทิตย์ดังกล่าวอาศัยหลักการเปรียบเทียบพลังงานแสงอาทิตย์ที่สะท้อนจากผิวตัวอย่างมาตรฐานกับพลังงานแสงอาทิตย์ที่สะท้อนจากผิวตัวอย่างที่ต้องการหาค่าการสะท้อนแสง แสงที่สะท้อนภายใน Integrating sphere เมื่อตกกระทบบนที่วัดแสงจะเปลี่ยนเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้ามีหน่วยเป็นมิลลิโวลต์ การวัดด้วยเครื่องลักษณะนี้ค่าการสะท้อนแสงที่ได้จะเป็นผลรวมของพลังงานที่ได้รับจากดวงอาทิตย์ในทุกความยาวคลื่นที่ได้รับบนผิวโลก และในขณะที่วัดค่าช่องทางรับแสงจะหมุนตามดวงอาทิตย์โดยการทำงานของ Synchronous motor

1.9.3 การสอบเทียบค่าการสะท้อนแสงของแมกนีเซียมออกไซด์มาตรฐาน

ค่าการสะท้อนแสงสัมบูรณ์ของแมกนีเซียมออกไซด์จะมีค่าประมาณ 0.98 แต่เนื่องจาก Spectroreflectometer อาจมีการใช้งานมานานทำให้ค่าการสะท้อนแสงสัมบูรณ์ของแมกนีเซียมออกไซด์มีค่าเปลี่ยนไป ดังนั้นก่อนที่จะทำการคำนวณหาค่าการสะท้อนแสงจำเป็นจะต้องมีการสอบเทียบเพื่อหาค่าการสะท้อนแสงสัมบูรณ์ของแมกนีเซียมออกไซด์ที่ใช้เป็นแผ่นสะท้อนแสงมาตรฐานเสียก่อน

1.10 เทอร์โมไดนามิกส์และการถ่ายเทความร้อน

ในงานวิจัยนี้ลักษณะแบบจำลองและพฤติกรรมของระบบจะเกี่ยวข้องกับทางด้านเทอร์โมไดนามิกส์ การถ่ายเทความร้อนของวัสดุ และการไหลของอากาศภายในระบบกักเก็บพลังงาน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเข้าใจความรู้พื้นฐานทางด้านนี้ ซึ่งผู้วิจัยได้สรุปไว้ดังนี้

เทอร์โมไดนามิกส์เป็นศาสตร์แขนงหนึ่งที่ว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงของพลังงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะเน้นการศึกษาในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับพลังงานความร้อน งานและคุณสมบัติของสสารที่สัมพันธ์กับความร้อนและงาน กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ (The First Law of Thermodynamics) กล่าวว่า ทั้งความร้อนและงานต่างก็เป็นพลังงานในรูปแบบหนึ่ง ซึ่งสามารถเปลี่ยนรูปได้ คือเปลี่ยนความร้อนเป็นงานหรือเปลี่ยนงานเป็นความร้อน นอกจากนั้นแล้วผลรวมของพลังงานทั้งหมดนี้ต้องคงที่ กฎข้อที่หนึ่งบางครั้งจะรู้จักกันดีกว่าชื่อของกฎของการอนุรักษ์พลังงาน

1.10.1 ระบบพลังงาน

ระบบทางเทอร์โมไดนามิกส์สามารถแบ่งเป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

1) ระบบปิด หรือ ระบบควบคุมมวล (close system or control mass) คือ ระบบที่มวลของสารในระบบคงที่และอยู่ในระบบตลอดเวลา มีเพียงแค่พลังงานเท่านั้นที่สามารถเคลื่อนที่ผ่านเข้าหรือออกจากระบบได้

2) ระบบเปิด หรือ ปริมาตรควบคุม (open system or control volume) คือ ระบบที่ทั้งมวลและพลังงานสามารถเคลื่อนที่ข้ามเส้นขอบเขตได้ ซึ่งขอบเขตของระบบนิยมเรียกว่าพื้นผิวควบคุม (control surface)

3) ระบบโดดเดี่ยว (isolated system) คือ ระบบที่ไม่มีการถ่ายโอนของมวลและพลังงานระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อมเลย นั่นคือในระบบเช่นนี้ทั้งพลังงานและมวลภายในระบบต้องคงที่

1.10.2 ชนิดของพลังงาน

พลังงานที่เรารู้จักมีหลายรูปแบบ เช่น พลังงานความร้อน พลังงานศักย์ พลังงานจลน์ พลังงานไฟฟ้า พลังงานกล พลังงานแม่เหล็ก พลังงานเคมี และพลังงานนิวเคลียร์ ถ้าระบบที่กำลังพิจารณาอยู่นั้นมีพลังงานหลายรูปแบบจะเป็นการสะดวกกว่าที่จะพิจารณาผลรวมของพลังงานทั้งหมดแล้วเรียกว่าเป็น พลังงานรวมของระบบ (Total energy of a system, E) และถ้าพิจารณาพลังงานรวมต่อปริมาตรสารในระบบจำนวนหนึ่งหน่วยมวลก็จะเรียกว่าเป็นพลังงานรวมของระบบต่อหนึ่งหน่วยมวล (e) โดยนิยามว่า $e = E / m$ ทางด้านวิศวกรรมจะรวมพลังงานในระดับโมเลกุลเข้าด้วยกันทั้งหมดแล้วเรียกว่าพลังงานภายใน (Internal Energy, U) แต่ในงานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับพลังงานความร้อนเพียงอย่างเดียวและ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของพลังงาน ดังนั้นจึงศึกษารายละเอียดเฉพาะพลังงานความร้อนเท่านั้น

ผลรวมของพลังงานของระบบจะประกอบด้วยพลังงานในระดับมหภาค ได้แก่ พลังงานจลน์ (KE) และพลังงานศักย์ (PE) และพลังงานในระดับจุลภาค ได้แก่ พลังงานภายใน (U) พลังงานรวมของระบบมีค่าเท่ากับ

$$E = U + KE + PE = U + \frac{mv^2}{2} + mgz \quad (1.11)$$

เมื่อ m คือ มวลในระบบ v คือ ความเร็วระบบ g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก และ z คือ ความสูงของจุดศูนย์กลางมวลของระบบเทียบกับจุดอ้างอิงใด ๆ

ระบบปิดส่วนใหญ่จะ ไม่มีการเคลื่อนที่ของมวลในระบบขณะเกิดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ หรือมีพลังงานที่ใช้ไปในการเคลื่อนที่น้อยมากเมื่อเทียบกับพลังงานส่วนอื่น ซึ่งทำให้เราสามารถประมาณได้ว่าพลังงานศักย์และพลังงานจลน์จะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของพลังงานภายใน หรืออาจ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเลยเพราะระบบปิดส่วนใหญ่จะมีความเร็วและระดับความสูงของจุดศูนย์กลางมวลของระบบคงที่ในระหว่างที่เกิดการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ระบบที่มีลักษณะดังกล่าวจึงนิยมเรียกว่า ระบบหยุดนิ่ง (Stationary systems) ดังนั้นพลังงานรวมของระบบหยุดนิ่งที่เปลี่ยนแปลงไป (ΔE) จะสามารถประมาณค่าเท่ากับการเปลี่ยนแปลงของพลังงานภายใน (ΔU) เท่านั้น

1.10.3 การถ่ายเทความร้อน

ความร้อนเป็นพลังงานรูปหนึ่งที่มีการถ่ายเทระหว่างระบบกับระบบอื่น หรือระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อม การถ่ายเทความร้อนระหว่างวัตถุสองชิ้นใด ๆ จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อวัตถุทั้งสองนั้นมีอุณหภูมิแตกต่างกัน ดังนั้นพลังงานที่ถือว่าเป็นพลังงานความร้อนทางเทอร์โมไดนามิกส์จะหมายถึงพลังงานที่ถ่ายเทระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อม โดยมีสาเหตุมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิ

นอกจากนี้พลังงานที่เรียกว่าความร้อนจะหมายถึงเฉพาะในขณะที่พลังงานนั้นกำลังเดินทางข้ามขอบเขตของระบบเท่านั้น และเมื่อพลังงานได้เดินทางข้ามขอบเขตไปแล้วไม่ว่าจะอยู่ในระบบหรือสิ่งแวดล้อมก็จะถือว่าพลังงานได้เปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานรูปอื่น ไม่ใช่ความร้อนอีกต่อไป ความร้อนเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นที่ขอบเขต (Boundary phenomena) เท่านั้น ความร้อนเกิดขึ้นที่ขอบเขตและจะเปลี่ยนรูปไปทันทีเมื่อข้ามขอบเขตไปแล้ว ฉะนั้นความร้อนจึงไม่สามารถกำหนดสถานะของระบบได้ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือความร้อนไม่เป็นคุณสมบัติของระบบ (Suryanarayana and Arici, 2004)

เนื่องจากความร้อนเป็นพลังงานรูปหนึ่ง ดังนั้นความร้อนจึงเป็นมิติของพลังงาน (หรืองาน) นั่นคือเป็นมิติของแรงคูณกับมิติของระยะทาง ในระบบ SI จะมีหน่วยเป็น kJ (โดย $1 \text{ kJ} = 1 \text{ kN}\cdot\text{m}$) และนิยมใช้สัญลักษณ์ Q_{12} หรือ Q แทนปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทขณะเกิดกระบวนการจากสถานะที่ 1 ไปสู่สถานะที่ 2 สำหรับปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทต่อหน่วยมวล (q) เท่ากับ Q/m ส่วนอัตราการถ่ายเทความร้อน (rate of heat transfer) ก็คือปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทต่อหนึ่งหน่วยเวลา หรือ $\dot{Q} = Q/t$ และมีหน่วยในระบบ SI เป็น kJ/s หรือ kW มีความสัมพันธ์กับ heat flux ดังนี้

$$q = \int q'' dA \quad (1.12)$$

เมื่อ q'' คือ heat flux ที่ตั้งฉากกับผิวของระบบขนาด dA ซึ่งจะขึ้นกับอุณหภูมิและรูปแบบของการถ่ายเทความร้อน คือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสี

เราแบ่งกลไกการถ่ายเทความร้อนออกเป็น 3 ชนิดคือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสี แต่ในความเป็นจริงการถ่ายเทความร้อนทั้งสามชนิดอาจเกิดขึ้นพร้อม ๆ กันอย่างแยกไม่ออกก็เป็นได้

1) การนำความร้อน (Conduction) เป็นการถ่ายเทความร้อนจากโมเลกุลหนึ่งไปสู่อีกโมเลกุลหนึ่งซึ่งอยู่ติดกันไปเรื่อย ๆ จากอุณหภูมิสูงไปสู่อุณหภูมิต่ำ ยกตัวอย่างเช่น ถ้าเราจับทัพพีในหม้อหุงข้าวความร้อนจะเคลื่อนที่ผ่านทัพพีมายังมือของเราทำให้เรารู้สึกร้อน โลหะเป็นตัวนำความร้อนที่ดี ตรงข้ามกับอโลหะและอากาศ

2) การพาความร้อน (Convection) เป็นการถ่ายเทความร้อนด้วยการเคลื่อนที่ของอะตอมและโมเลกุลของสสารซึ่งมีสถานะเป็นของเหลวและก๊าซ ส่วนของแข็งจะมีการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อนและการแผ่รังสีเท่านั้น การพาความร้อนจึงมักเกิดขึ้นในบรรยากาศและมหาสมุทรรวมทั้งภายในโลกและดวงอาทิตย์

3) การแผ่รังสี (Radiation) เป็นการถ่ายเทความร้อนออกรอบตัวทุกทิศทุกทาง โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการส่งถ่ายพลังงาน ดังเช่น การนำความร้อน และการพาความร้อนการแผ่รังสีสามารถถ่ายเทความร้อนผ่านอวกาศได้ วัตถุทุกชนิดที่มีอุณหภูมิสูงกว่า -273°C หรือ 0 K (เคลวิน) ย่อมมีการแผ่รังสี โดยวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงจะแผ่รังสีคลื่นสั้น ส่วนวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำแผ่รังสีคลื่นยาว

1.10.4 ความร้อนจำเพาะ

การพิจารณาค่าความร้อนจำเพาะอันดับแรกจะพิจารณาจากระบบปิดอยู่นิ่งและเป็นกระบวนการปริมาตรคงที่ จากเงื่อนไขข้างต้นสมการแสดงความสัมพันธ์ของกฎข้อที่หนึ่งจะมีรูปดังนี้คือ

$$\Delta q - \Delta w_{\text{other}} = \Delta u \quad (1.13)$$

เมื่อ Δq คือ พลังงานความร้อนที่มีการถ่ายเทสู่ระบบ Δw_{other} คือ พลังงานรูปแบบอื่นที่มีการถ่ายเทสู่ระบบ และ Δu คือ การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของระบบ $\Delta q - \Delta w_{\text{other}}$ เป็นพลังงานที่ถ่ายเทสู่ระบบในรูปของความร้อนและ/และหรืองาน ถ้าพลังงานดังกล่าวทำให้อุณหภูมิของระบบเพิ่มขึ้น dT องศา จากนิยามของ C_v นำมาเปรียบเทียบได้ดังนี้คือ พลังงาน du ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเท่ากับ dT องศา ดังนั้นพลังงาน C_v จะทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเท่ากับ dT (C_v/du) องศา แต่ขณะเดียวกัน พลังงาน C_v ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศา นั่นคือ $dT (C_v/du) = 1$ หรือที่ปริมาตรคงที่จะได้ว่า

$$C_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \quad (1.14)$$

สำหรับกรณีที่เป็นกระบวนการความดันคงที่ซึ่ง $\Delta q - \Delta w_{\text{other}} = dh$ เมื่อเปรียบเทียบในทำนองเดียวกัน จะได้ว่า $C_p dT = dh$ หรือ

$$C_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \quad (1.15)$$

จากสมการ (1.14) และ (1.15) สรุปได้ว่า C_v มีค่าเท่ากับการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในเทียบต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปในขณะที่ปริมาตรคงที่ และ C_p คือการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีเทียบต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปในขณะที่ความดันคงที่ ในกระบวนการต่าง ๆ ค่า C_p จะสูงกว่าค่า C_v เสมอ เพราะในกระบวนการความดันคงที่เมื่อระบบได้รับพลังงานอุณหภูมิจะสูงขึ้นพร้อมกันนั้นระบบก็จะมีการขยายตัวด้วย ดังนั้นพลังงานที่ให้เข้าไปส่วนหนึ่งจะต้องนำไปใช้เพื่อการขยายตัว

1.10.5 พลังงานภายใน เอนทาลปีและความร้อนจำเพาะ

จากการทดลองของ Joule พบว่าค่าความร้อนจำเพาะของก๊าซอุดมคติจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว นั่นคือ ไม่ว่าก๊าซนั้นจะมีความดันหรือปริมาตรจำเพาะเท่าใดก็ตาม เมื่อกำหนดค่าของอุณหภูมิจะทำให้ค่าความร้อนจำเพาะคงที่เสมอ หรือสรุปได้ว่า $C_p = C_p(T)$ และ $C_v = C_v(T)$ และจากนิยามของความร้อนจำเพาะ

$$du = C_v(T)dT, \rightarrow \Delta u = u_2 - u_1 = \int_1^2 C_v(T)dT \quad (1.16)$$

$$dh = C_p(T)dT, \rightarrow \Delta h = h_2 - h_1 = \int_1^2 C_p(T)dT \quad (1.17)$$

สารที่มีค่าปริมาตรจำเพาะ (หรือความหนาแน่น) คงที่เมื่อความดันของสารเปลี่ยนแปลงไปจะเรียกระบบนั้นว่าเป็นสารอัดตัวไม่ได้ (Incompressible substance) โดยทั่วไป ของแข็งและของเหลวจะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรภายใต้ความดันที่เปลี่ยนแปลงไปน้อยมาก ดังนั้นค่าของงานเนื่องจากการเปลี่ยนขนาดของขอบเขตจะน้อยมากจนสามารถตัดออกจากการพิจารณาได้ ซึ่งทำให้การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีแตกต่างจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับพลังงานรูปอื่น ๆ ในกระบวนการ ด้วยเหตุนี้ทำให้ค่า C_v และ C_p ของสารที่อัดตัวไม่ได้ไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งใช้ค่าความร้อนจำเพาะค่าเดียวคือ ใช้สัญลักษณ์ C นั่นคือ $C = C_v = C_p$ และค่าความร้อนจำเพาะจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเท่านั้น

บทที่ 2

ธรณีวิทยาหินอัคนีของประเทศไทย

เนื้อหาในบทนี้ได้สรุปข้อมูลทางธรณีวิทยาของหินอัคนีที่พบในประเทศไทย ซึ่งจากข้อมูลที่ได้ทบทวนวรรณกรรมวิจัยในบทที่ 1 ระบุว่าหินอัคนีเป็นหินที่มีค่าความจุความร้อนจำเพาะสูง ซึ่งลักษณะเฉพาะตัวดังกล่าวนี้จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุกักเก็บพลังงานความร้อน ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาเกี่ยวกับการแผ่กระจายของหินชนิดนี้ เพื่อให้ทราบถึงแหล่งที่พบและสามารถที่จะนำเอามาใช้ประโยชน์ได้

2.1 กล่าวนำ

รายละเอียดเกี่ยวกับขอบเขตและการแผ่กระจายของหินอัคนี ทั้งหินอัคนีพุ (หรือหินภูเขาไฟ) และหินอัคนีแทรกซอน ซึ่งได้จากการสำรวจทำแผนที่ธรณีวิทยาของกรมทรัพยากรธรณี นอกจากนั้นยังได้มีการศึกษาร่วมกันระหว่างกรมทรัพยากรธรณีและมหาวิทยาลัยทั้งในประเทศและต่างประเทศ ข้อมูลบางส่วนยังได้จากบุคลากรสถาบันการศึกษาต่าง ๆ ได้แก่ รายงานการวิจัย หินแกรนิตภาคเหนือ (Teggin, 1975) การวัดอายุหินแกรนิตภาคเหนือ (Braun et al., 1976) การศึกษาหินแกรนิตบริเวณทิศตะวันตกของจังหวัดอุทัยธานี (Nakapadungrat, 1982) การศึกษาหินแกรนิตบริเวณจังหวัดตาก (Mahawat, 1982) การศึกษาหินแกรนิตบริเวณจังหวัดลำปาง (Suensilpong et al., 1977) การศึกษาหินแกรนิตบริเวณจังหวัดเพชรบุรี (Putthapiban and Suensilpong, 1978) การศึกษาหินแกรนิตและแหล่งแร่บริเวณเหมืองแร่แม่เจดีย์ (Hunsavek, 1983) การวัดอายุหินแกรนิตประเทศไทย (Beckinsale et al., 1981) และการศึกษาหินแกรนิตในประเทศไทย (Cobbing et al., 1992)

2.2 หินอัคนีแทรกซอน

หินอัคนีแทรกซอนที่พบในประเทศไทยมีหลายประเภทซึ่งสามารถแยกได้ 2 กลุ่มหลัก ได้แก่ หินแกรนิต (Granite) และหินเมฟิกและอัลตราเมฟิก (Mafic and ultramafic rocks) (ปริญญา พุทธาภิบาล และคณะ, 2543)

2.2.1 หินแกรนิต

หินแกรนิตในประเทศไทยสามารถแบ่งออกเป็น 3 แนว (รูปที่ 2.1) ที่มีลักษณะค่อนข้างเฉพาะตัว (ปริญญา พุทธาภิบาล และคณะ, 2543; Klompe, 1962; Pitakpaivan, 1969 และ Suensilpong and Putthapiban, 1978) คือ 1) หินแกรนิตแนวตะวันออก (Eastern Province Granite หรือ Eastern Belt Granite) ส่วนใหญ่เกิดเป็นมวลหินขนาดเล็ก (Small pluton) แต่บางแห่งก็มีลักษณะเป็นมวล

ขนาดใหญ่ (Batholith) 2) หินแกรนิตแนวตอนกลาง (Central Province Granite หรือ Central Belt Granite) มักเกิดเป็นมวลหินขนาดใหญ่ มีลักษณะเป็นแนวยาวติดต่อกัน 3) หินแกรนิตแนวตะวันตก (Western Province Granite หรือ Western Belt Granite) ส่วนมากมักเกิดเป็นมวลหินขนาดเล็กและขนาดกลางที่แทรกซอนทับกันเป็นแนวยาว

2.2.2 หินเมฟิกและอัลตราเมฟิก

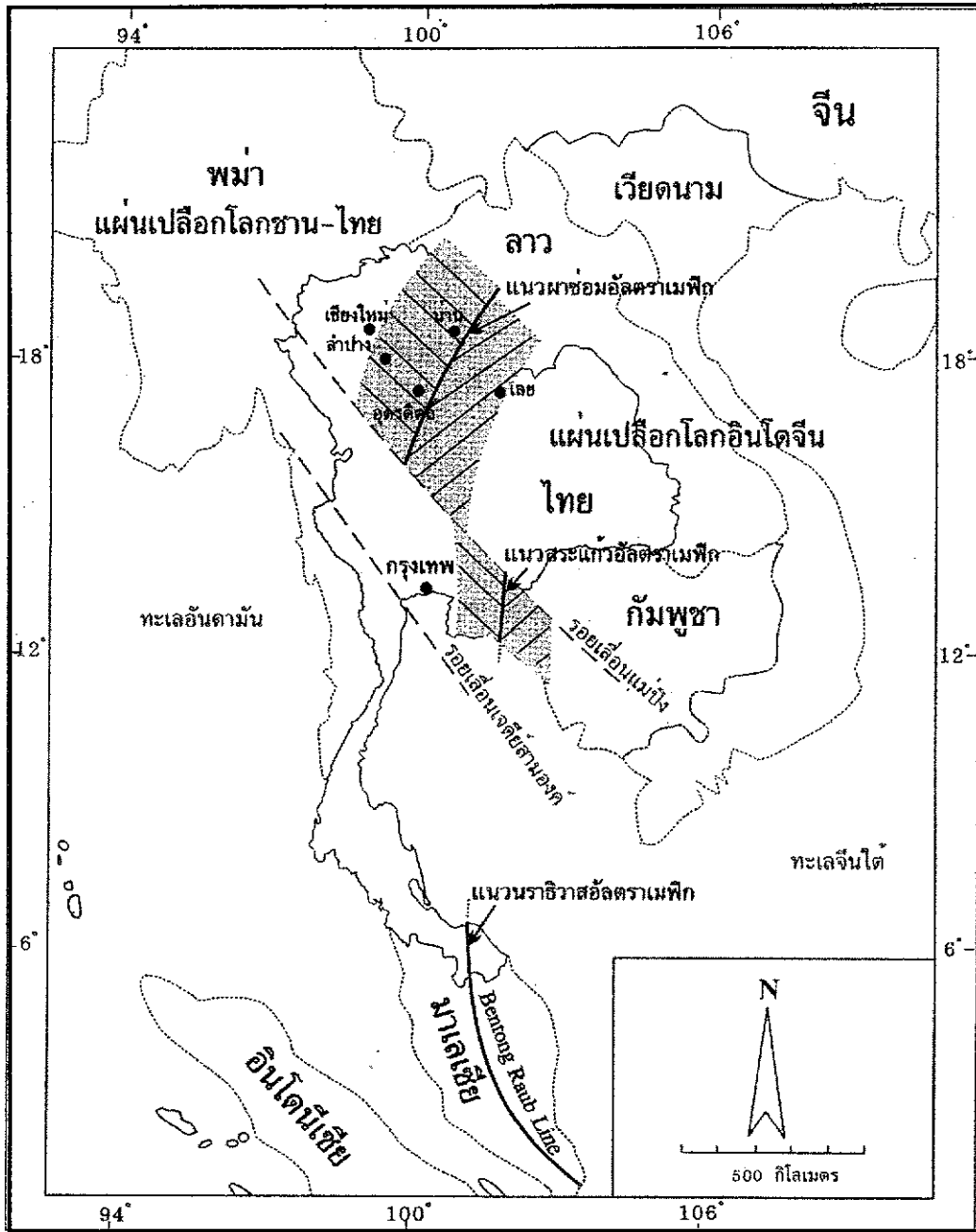
หินอัคนีแทรกซอนเมฟิกและอัลตราเมฟิกเป็นหินอัคนีที่เย็นตัวได้ผิวโลกอาจเกิดเป็นแนว หรืออาจจะพบเป็นหินแปรกลปปลอมในหินบะซอลต์ กลุ่มหินนี้อาจแบ่งได้เป็น 4 ประเภท คือ กลุ่มหินเมฟิก (Mafic Rocks) หินเพอริโดไทต์ (Peridotites) หินไพร็อกซีนีต์ (Pyroxenite) และหินฮอร์นเบลนด์ไดต์ (Hornblendite) หินอัคนีแทรกซอนเมฟิกและอัลตราเมฟิกที่สำคัญในประเทศไทยมี 3 แนวหลัก (รูปที่ 2.2) คือ 1) แนวผาซอมอัลตราเมฟิก (Pha Som Ultramafic) โผล่ให้เห็นตามแนวแม่น้ำน่าน และพื้นที่บริเวณใกล้เคียง 2) แนวสระแก้วอัลตราเมฟิก (Sra Kaeo Ultramafic) พบบริเวณจังหวัดสระแก้วก่อนไปทางตะวันออกเฉียงใต้ ต่อเนื่องเป็นแนวยาว และ 3) แนวนราธิวาสอัลตราเมฟิก (Narathiwat Ultramafic) พบอยู่บริเวณจังหวัดนราธิวาสก่อนไปทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ (ปริญา พุทธาภิบาล และคณะ, 2543 และ German Geological Mission to Thailand Report, 1972)

2.3 หินอัคนีพุ

หินอัคนีพุหรือหินภูเขาไฟ (Extrusive or Volcanic Rock) ได้แก่ หินอัคนีที่เกิดจากการเย็นตัวของมวลหินหนืดบนผิวโลกหรือใกล้ผิวโลกและหินชั้นภูเขาไฟ หินเหล่านี้มักมีขนาดของผลึกแร่ที่เล็กกว่ามากเมื่อเทียบกับหินอัคนีแทรกซอนและบางครั้งเกิดเป็นหินที่มีลักษณะเป็นเนื้อแก้ว (Obsidian) หินดังกล่าวมีอายุของการเกิดเป็นช่วง ๆ สามารถแบ่งตามลักษณะของการเรียงลำดับชั้นหินและความสัมพันธ์ของกลุ่มหินอัคนีต่าง ๆ ออกได้เป็น 4 ช่วง (Bunopas, 1981 ; ปริญา พุทธาภิบาล และ คณะ, 2543) คือ 1) ยุคไชลูเรียนถึงยุคเพอร์เมียนตอนต้น 2) ยุคเพอร์เมียนตอนปลายถึงยุค ไทรแอสซิกตอนต้น 3) ยุคไทรแอสซิกตอนปลาย และ 4) ช่วงปลายมหายุคซีโนโซอิก ในที่นี้จะแบ่งหินอัคนีพุเป็น 2 ช่วงอายุ คือ ก่อนมหายุคซีโนโซอิกและมหายุคซีโนโซอิก ตารางที่ 2.1 แสดงการแบ่งช่วงการเกิดหินอัคนีพุหรือหินภูเขาไฟในประเทศไทย

2.3.1 หินอัคนีพุก่อนมหายุคซีโนโซอิก

หินอัคนีพุก่อนมหายุคซีโนโซอิกสามารถแบ่งตามบริเวณที่พบ ได้แก่ บริเวณที่สูงภาคเหนือและภาคตะวันตก พบหินอัคนีพุที่มีอายุตั้งแต่ช่วงยุค ไชลูเรียน ซึ่งส่วนใหญ่เป็นหินแอนดีไซต์ (Andesite) และหินไรโอไลต์ (Rhyolite) เรื่อยมาจนถึงยุคคาร์บอนิเฟอรัส ซึ่งประกอบด้วยหินแอนดีไซต์ หินไรโอไลต์ หินกรวดภูเขาไฟ (Agglomerate) และหินทัฟฟ์หรือหินถ้ำภูเขาไฟ (Tuff)



แนวชั้นหินคดโค้งสุโขทัย



แนวชั้นหินคดโค้งเลย

รูปที่ 2.2 แผนที่แสดงแนวหินอัคนีแทรกซอนอัลตราเมฟิกและเมฟิก 3 แนวของประเทศไทย (กรมทรัพยากรธรณี, 2544)

ตารางที่ 2.1 ช่วงการเกิดหินอัคนีพุหรือหินภูเขาไฟในประเทศไทย (ดัดแปลงจาก Bunopas, 1981; ปริญา พุทธาภิบาล และ คณะ, 2543)

บรมยุค	มหายุค	ยุค	สมัย	เวลา (ล้านปี)	ช่วงการเกิดหินอัคนี
Phanerozoic	Cenozoic	Quaternary	Holocene	0.011-Today	ช่วงที่ 4
			Pleistocene	1.8-0.011	
		Tertiary	Pliocene	5-1.8	
			Miocene	23-5	
			Oligocene	38-23	
			Eocene	54-38	
			Paleocene	65-54	
	Mesozoic	Cretaceous	-	146-54	ช่วงที่ 3
		Jurassic	-	208-146	
		Triassic	-	245-208	
	Paleozoic	Permian	-	286-245	ช่วงที่ 2
		Carboniferous	Pennsylvanian	325-286	
			Mississippian	360-325	
		Devonian	-	410-360	ช่วงที่ 1
Silurian		-	440-410		
Ordovician		-	505-440		
Cambrian		-	544-505		
Precambrian	Proterozoic	-	2,500-544		
	Archean	-	3,800-2,500		
	Hadean	-	4,500-3,800		

ยุคเพอร์เมียนตอนต้นส่วนใหญ่เป็นหินไรโอไลติกที่ฟฟี่ (Rhyolitic tuff) ยุคเพอร์เมียนตอนปลายถึง ไทรแอสซิกตอนปลายและจูแรสซิกตอนต้น ประกอบด้วยหินแอนดีไซต์ หินไรโอไลต์ และทัฟฟ์

2.3.2 หินอัคนีพุ่มหาญคิโนโซอิก

ส่วนใหญ่ที่พบเป็นหินบะซอลต์ที่เกิดเป็นบริเวณพื้นที่เล็ก ๆ แบ่งตามบริเวณที่พบได้แก่

1) บริเวณภาคเหนือ ได้แก่ หน่วยหินบะซอลต์เชียงราย พบบริเวณอำเภอเทิง จังหวัด เชียงราย หน่วยหินบะซอลต์ลำปาง พบในพื้นที่จังหวัดลำปาง หน่วยหินบะซอลต์เด่นชัย พบบริเวณ พื้นที่อำเภอเด่นชัย อำเภอลอง และอำเภอวังชิ้น จังหวัดแพร่ หน่วยหินบะซอลต์แม่ลามา พบที่บริเวณ บ้านแม่ลามา จังหวัดแม่ฮ่องสอน

2) บริเวณภาคตะวันตก ได้แก่ หน่วยหินบะซอลต์บ่อพลอย พบที่อำเภอบ่อพลอย จังหวัดกาญจนบุรี

3) บริเวณเทือกเขาเพชรบูรณ์ ได้แก่ หน่วยหินบะซอลต์ลำานารายณ์ พบที่บริเวณ ใกล้เคียงกับบ้านลำานารายณ์ อำเภอชัยบาดาล จังหวัดลพบุรี และหน่วยหินบะซอลต์วิเชียรบุรีพบที่ อำเภอวิเชียรบุรี จังหวัดเพชรบูรณ์

4) บริเวณภาคตะวันออก ได้แก่ หน่วยหินบะซอลต์ที่พบในพื้นที่จังหวัดจันทบุรีและ ตราด หน่วยหินบะซอลต์จันทบุรี ประกอบด้วยหน่วยหินบะซอลต์คลองอีตัก อยู่ในบริเวณอำเภอ ท่าใหม่และหน่วยหินบะซอลต์โป่งน้ำร้อน พบที่อำเภอโป่งน้ำร้อน ส่วนหน่วยหินบะซอลต์ตราด พบ ที่อำเภอบ่อไร่ หน่วยหินบะซอลต์เกาะกูด อยู่ทางด้านใต้ของจังหวัดตราด และหน่วยหินบะซอลต์ บ้านแซออ พบที่บ้านแซออ อำเภออรัญประเทศ จังหวัดสระแก้ว

5) บริเวณที่ราบสูงโคราช ได้แก่ หินบะซอลต์ที่พบบริเวณอีสานใต้ ในจังหวัด นครราชสีมา บุรีรัมย์ สุรินทร์ ศรีสะเกษ และอุบลราชธานี ซึ่งแบ่งชื่อหน่วยหินตามชื่อของจังหวัดที่พบ

2.4 ธรณีวิทยาหินอัคนีภูมิภาค

หัวข้อนี้สรุปลักษณะธรณีวิทยาหินอัคนีในระดับภูมิภาคเฉพาะพื้นที่ที่มีภูมิอากาศหนาว เท่านั้น กล่าวคือในภาคเหนือและภาคตะวันตกตอนบน และบริเวณเทือกเขาเพชรบูรณ์-เลย ซึ่งมีความสัมพันธ์กับงานวิจัยนี้ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.4.1 ภาคเหนือและภาคตะวันตกตอนบน

จากรายงานของกรมทรัพยากรธรณีระบุว่าหินอัคนีในภาคเหนือและภาคตะวันตก ตอนบนมีทั้งหินอัคนีแทรกซอนและหินอัคนีพุ หินอัคนีแทรกซอนเป็นพวกหินแกรนิตและหินไนส์- ลิกแกรนิต แบ่งออกได้เป็น 3 แนว ได้แก่

- 1) แนวด้านตะวันออกผ่านเขตของจังหวัดเชียงราย-พะเยา-น่าน-อุตรดิตถ์ หินแกรนิตเป็นมวลหินขนาดเล็ก ลักษณะเนื้อหินค่อนข้างหยาบ อายุหินประมาณ 208 ± 4 ถึง 213 ± 10 ล้านปี
- 2) แนวตอนกลางผ่านทางด้านทิศตะวันตกของจังหวัดเชียงใหม่-ลำปาง และตาก หินแกรนิตเป็นแบบมวลไพศาล เนื้อหินแสดงลักษณะการเรียงตัวของผลึกแร่และในบางพื้นที่ผลึกแร่มีการหลอมตัวบางส่วน อายุหินประมาณ 212 ± 12 ถึง 236 ± 5 ล้านปี และ
- 3) แนวหินแกรนิตด้านตะวันตก เป็นมวลหินขนาดเล็กต่อกันเป็นแนวต้นแทรกผ่านชั้นหินมหายุคพาลีโอโซอิก และหินแกรนิตแนวที่อยู่ตอนกลางบางแห่ง เนื้อหินแสดงลักษณะผลึกแร่เนื้อดอกหยาบและเนื้อหยาบปานกลาง อายุหินประมาณ 130 ± 4 ล้านปี

หินอัคนีพุปรากฏให้เห็นเป็นบริเวณกว้างตั้งแต่ทางด้านทิศตะวันออกของจังหวัดเชียงรายผ่านพะเยา-ลำปาง-แพร่ลงไปถึงจังหวัดตาก หินส่วนใหญ่เป็นหินไรโอไลต์ หินแอนดีไซต์ หินไรโอลิติกทัฟฟ์ หินแอนดีซิดิกทัฟฟ์ และหินบะซอลต์ โดยมีบางส่วนเป็นหินแกบโบรและหินไพรอกซิไนต์ อายุของหินอัคนีพุมีตั้งแต่ยุคไซลูเรียนถึงจูแรสซิก สำหรับหินบะซอลต์ที่พบในเขตอำเภอแม่ทะ อำเภอเกาะคา และอำเภอสบปราบ จังหวัดลำปาง มีอายุประมาณ 5 ถึง 8 แสนปี ที่บริเวณบ้านเชียงเคี่ยน อำเภอเทิงและที่ริมแม่น้ำโขง อำเภอเชียงของ จังหวัดเชียงราย มีอายุประมาณ 1.7 ± 0.12 ล้านปี และที่บ้านบ่อแก้ว อำเภอเด่นชัย จังหวัดแพร่ มีอายุประมาณ 5.64 ± 0.28 ล้านปี

2.4.2 บริเวณเทือกเขาเลย-เพชรบูรณ์

หินอัคนีแทรกซอนแผ่กระจายเป็นแห่ง ๆ พบตั้งแต่เขตจังหวัดเลยจนถึงจังหวัดนครราชสีมา หินแกรนิตแกรโนไดออไรต์ บริเวณภูควายเงิน อำเภอเชียงคาน ที่จังหวัดเลย มีอายุยุคเพอร์เมียนถึงยุคไทรแอสสิก (Jacobson et al., 1969) ส่วนหินอัคนีแทรกซอนในเขตพื้นที่จังหวัดนครราชสีมาและสระบุรี กำหนดอายุให้เป็นยุคเพอร์เมียนถึงยุคไทรแอสสิกหรืออ่อนกว่า

สำหรับหินอัคนีพุหรือหินภูเขาไฟนั้น พบทั้งที่เป็นแบบลาวาหลากและสะสมตัวแบบตะกอนภูเขาไฟ กระจายทั่วไปตลอดแนวเทือกเขาตั้งแต่ด้านทิศเหนือจรดด้านทิศใต้ อายุของหินภูเขาไฟส่วนใหญ่อยู่ในช่วงยุคเพอร์เมียนถึงยุคไทรแอสสิก โดยอาศัยการเทียบสัมพันธ์กับอายุของหินตะกอนที่วางตัวอยู่ด้านบนและด้านล่าง ขอบเขตแนวหินภูเขาไฟในเขตจังหวัดเลยแบ่งออกเป็น 3 แนว ได้แก่

- 1) แนวด้านตะวันตก เป็นพวกหินแอนดีไซต์เนื้อดอก หินกรวดเหลี่ยมภูเขาไฟและหินไรโอไลต์
- 2) แนวตะวันออกเป็นพวกหินไรโอไลต์เนื้อดอก หินไรโอลิติกทัฟฟ์และหินแอนดีไซต์ อายุของหินภูเขาไฟทั้งสองแนวนี้อยู่ในช่วงยุคเพอร์เมียนถึงยุคไทรแอสสิก

3) แนวตอนกลางเป็นกลุ่มหินบะซอลติกแอนดีไซต์อายุช่วงต้นยุคคาร์บอนิเฟอรัส ครอบคลุมพื้นที่ทางด้านทิศใต้ของอำเภอปากชม

นอกจากนี้ยังพบหินภูเขาไฟที่แยกประเภทไม่ได้ของหินไรโอไลต์ หินแอนดีไซต์เนื้อคอก หินทัฟฟ์ หินกรวดเหลี่ยมภูเขาไฟ และหินกรวดภูเขาไฟ ซึ่งอยู่ในช่วงยุคเพอร์เมียน-ไทรแอสซิก ในเขตจังหวัดเพชรบูรณ์ นครราชสีมา ลพบุรี และนครนายก หินภูเขาไฟบริเวณ ลำานารายณ์ จังหวัดลพบุรี ประกอบด้วยหินบะซอลต์ หินแอนดีไซต์และหินไรโอไลต์ ลักษณะเป็นเนื้อแก้ว อายุยุคเทอร์เชียรี ถึงควอเทอร์นารี นอกจากนี้ยังพบหินบะซอลต์ที่มีอายุอ่อนตั้งแต่ยุคเทอร์เชียรีขึ้นมาแผ่คลุมบริเวณที่ราบในแอ่งตั้งแต่อำเภอหนองไผ่ จังหวัดเพชรบูรณ์ ไปถึงอำเภอชัยบาดาล จังหวัดลพบุรี

2.5 หินบะซอลต์และปริมาณสำรอง

หินบะซอลต์เป็นแหล่งหินอัคนีหรือหินภูเขาไฟชนิดหนึ่ง ที่เกิดจากหินหนืด (หรือลาวา) ขึ้นมาเย็นตัวบนผิวโลก โดยผ่านรอยแตกของเปลือกโลกหรือปล่องภูเขาไฟ สีของหินบะซอลต์ส่วนมากเป็นสีดำ เทา เขียว หรือม่วงปนดำ ลักษณะเนื้อหินบะซอลต์ที่พบมีตั้งแต่เนื้อละเอียดจนถึงเนื้อหยาบ ส่วนมากมีรูพรุน แร่ประกอบหินที่สำคัญในหินบะซอลต์เป็นแร่พลาจิโอเคลส เฟลด์สปาร์ โอลิวิน และไพรอกซีน (Phyroxine) ส่วนมากแร่ควอร์ตซ์พบในปริมาณน้อย หินบะซอลต์ที่พบในประเทศไทยเป็นหินต้นกำเนิดของแร่พลอย พบที่จังหวัดกาญจนบุรี แพร่ ลำปาง จันทบุรี ตราด และศรีสะเกษ ส่วนหินบะซอลต์ที่ไม่ใช่แร่พลอยพบแพร่กระจายอยู่หลายพื้นที่ ในจังหวัดเชียงราย ลำปาง เพชรบูรณ์ ลพบุรี นครราชสีมา ชลบุรี สระบุรี อุทัยธานี บุรีรัมย์ อุบลราชธานี และสุรินทร์ (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2547) ในรายละเอียดได้จำแนกหินบะซอลต์ตามภูมิภาคดังนี้

2.5.1 บริเวณภาคเหนือ

หินบะซอลต์ที่เกิดในพื้นที่ภาคเหนือ พบในหลายบริเวณตามจังหวัดต่าง ๆ ได้แก่ จังหวัดลำปาง แพร่ เชียงราย และบริเวณหมู่บ้านแม่ลามา จังหวัดแม่ฮ่องสอน ซึ่งมีชื่อเรียกตามสถานที่พบหินดังกล่าว

1) หน่วยหินบะซอลต์เชียงราย พบเป็นพื้นที่เล็ก ๆ ครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 50 ตารางกิโลเมตร ที่บริเวณบ้านช่างเคียน อำเภอเทิง หินบะซอลต์นี้ไหลปิดทับหินตะกอนประเภทหินทราย หินดินดาน และหินปูนยุคเพอร์เมียน – ไทรแอสซิก ลักษณะหินบะซอลต์มีเนื้อละเอียด สีเทาอ่อน และมักจะมีรูพรุน ประกอบด้วยแร่ประกอบหินที่สำคัญคือ แร่โอลิวิน แร่โคลโนไพรอกซีน และแร่พลาจิโอเคลส (แลบราโดไรต์) โดยเกิดเป็นแร่ดอกขนาดเล็กฝังปะปนในเนื้อหินส่วนละเอียด

2) หน่วยหินบะซอลต์ลำปาง กลุ่มพื้นที่สองบริเวณคือ บริเวณทางตะวันตกเฉียงใต้ของจังหวัดลำปาง ประมาณ 12 กิโลเมตร ได้แก่ บริเวณอำเภอแม่ทะ ซึ่งหินบะซอลต์ไหลปกคลุมพื้นที่ประมาณ 20 ตารางกิโลเมตร ซึ่งเรียกหินบะซอลต์บริเวณนี้ว่า บะซอลต์แม่ทะ บริเวณที่สองคืออยู่ด้านตะวันตกเฉียงใต้ของจังหวัดลำปาง ประมาณ 33 กิโลเมตร บริเวณเส้นทางสายลำปาง-สบปราบ ซึ่งมีหินบะซอลต์ไหลปกคลุมพื้นที่ประมาณ 90 ตารางกิโลเมตร เรียกหินบะซอลต์บริเวณนี้ว่าบะซอลต์สบปราบ

3) หน่วยหินบะซอลต์แม่ทะ ไหลปกคลุมพื้นที่บริเวณบ้านผาลาด และตามเส้นทางบ้านผาลาด-บ้านแม่เมาะ หินบะซอลต์ไหลออกมาจากปล่องภูเขาไฟขนาดเล็กสองลูกที่เรียงตัวกันในแนวเหนือ-ใต้ หินบะซอลต์ไหลปกคลุมหินภูเขาไฟยุคเพอร์เมียน-โทรแอสซิก หินปูนยุคเพอร์เมียน และหินตะกอนยุคเทอร์เชียรี และบริเวณฝั่งแม่น้ำแม่จาง หินบะซอลต์ไหลปิดทับชั้นกรวด ของยุคควอเทอร์นารี ลักษณะหินบะซอลต์แม่ทะมีเนื้อละเอียด สีเทาถึงดำ มีรูพรุนมาก บริเวณใกล้ ๆ ปล่องภูเขาไฟจะพบรูพรุนมาก หินบะซอลต์ประกอบด้วยผลึกของแร่โอลิวีน ฝังตัวในเนื้อหินซึ่งประกอบด้วยแร่แคลซิโอเคลสเกิดเป็นแท่งเล็ก ๆ แร่โคลโนไพรอกซีน แร่แมกนีไทต์ และแก้ว ส่วนประกอบทางเคมีของหินบะซอลต์เป็นพวกบาชไนต์ (Barr and Macdonald, 1978)

4) หน่วยหินบะซอลต์สบปราบ มีลักษณะการไหลเป็นชั้น ๆ อยู่หลายชั้น มีสีเทาถึงดำ มีรูพรุนมาก เวลาจะมีสีน้ำตาลแดง พวกที่มีรูพรุนมากมักจะพบบริเวณช่วงบนของชั้น และพบหินเพริโดไทต์ และเลอซูลิต์เป็นชั้นเล็ก ๆ ในหินบะซอลต์สบปราบ และหินบะซอลต์แม่ทะ (Vichit et al., 1978) Barr and Macdonald (1978) ได้จำแนกหินบะซอลต์บริเวณนี้เป็นพวกฮาวายไอต์ แต่ Panjasawatwong (1983) จำแนกหินบะซอลต์บริเวณสบปราบเป็นพวกหินดิกแอนดีไซต์

5) หน่วยหินบะซอลต์เด่นชัย หินบะซอลต์ไหลกลุ่มพื้นที่ประมาณ 70 ตารางกิโลเมตร บริเวณทิศใต้ของอำเภอเด่นชัย จังหวัดแพร่ มีลักษณะรูปร่างแคบและยาวในแนวตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ หินบะซอลต์ไหลปิดทับหินตะกอนยุคคาร์บอนิเฟอรัส ถึงยุคเพอร์เมียน Barr and Macdonald (1978) ได้ทำการศึกษารายละเอียดของหินบะซอลต์บริเวณนี้ พบว่าหินบะซอลต์มีด้วยกัน 7 ชั้น โดยที่ชั้นที่ 1 ถึงชั้นที่ 4 เป็นพวกทรานสิชัน ฮาวายไอต์ (transition hawaiiite) ชั้นที่ 5 และ 6 เป็นพวกฮาวายไอต์ และชั้นที่ 7 เป็นชั้นบนสุดเป็นพวกบะชไนต์ บริเวณส่วนบน ๆ ของแต่ละชั้นจะเป็นพวกที่มีรูพรุนมาก และแนวสัมผัสระหว่างชั้นจะเห็นชัดเจน

6) หน่วยหินบะซอลต์แม่ลามา หินบะซอลต์เกิดเป็นบริเวณแถบ ๆ ที่บ้านแม่มาลา จังหวัดแม่ฮ่องสอน จากการศึกษาตัวอย่างเนื้อหินโดย Barr and Macdonald (1979) พบว่าหินบะซอลต์กลุ่มนี้มีลักษณะรูพรุนสูงและประกอบด้วยผลึกแร่โอลิวีน แร่แพลจิโอเคลส แร่ไคลโนไพรอกซีน และแร่ทึบแสง และจากส่วนประกอบทางเคมีจัดให้หินบะซอลต์แม่ลามาเป็นพวกโทเลอิต์

2.5.2 บริเวณเทือกเขาเพชรบูรณ์

หินบะซอลต์บริเวณเทือกเขาเพชรบูรณ์แบ่งออกเป็น 2 หน่วยหินได้แก่ หน่วยหินบะซอลต์ลำานารายณ์พบบริเวณที่ราบเนินเขาทางด้านตะวันตกของที่ราบสูงโคราช หินบะซอลต์ไหลปกคลุมพื้นที่อำเภอโคกสำโรง และอำเภอชัยบาดาล จังหวัดลพบุรี และหน่วยหินบะซอลต์วิเชียรบุรี พบบริเวณอำเภอวิเชียรบุรี อำเภอหนองไผ่ จังหวัดเพชรบูรณ์

1) หน่วยหินบะซอลต์ลำานารายณ์ ไหลคลุมพื้นที่ประมาณ 70 ตารางกิโลเมตร บริเวณที่ราบด้านตะวันออกของเทือกเขาภูเขาไฟยุคเก่า หินบะซอลต์ไหลปิดทับหินไรโอไลต์ และเกิดเป็นผนังแทรกเข้าไปในหินไรโอไลต์ หินบะซอลต์บริเวณนี้จะมีเนื้อละเอียด สีเทาเข้มถึงดำ เป็นรูพรุน และมักจะมีแร่มาตกผลึกภายหลัง และเมื่อผุจะกลายเป็นดินสีดำ แร่ประกอบสำคัญได้แก่ แผลึกแร่โอลิวีนและแพลจิโอเคลส

2) หน่วยหินบะซอลต์วิเชียร ไหลคลุมพื้นที่เนินเขาสูงประมาณ 200 ตารางกิโลเมตร มีลักษณะการแตกเป็นแท่ง หินบะซอลต์ไหลปิดทับหมวดหินเขาหลวง ซึ่งประกอบด้วยหินดินดาน ลักษณะของหินบะซอลต์เป็นพวกเนื้อละเอียดสีดำ และมักจะพบชิ้นส่วนของหินอัลตราเมฟิกและแร่สปิเนล

2.5.3 บริเวณภาคตะวันตก

หินบะซอลต์ที่พบบริเวณภาคตะวันตกได้แก่หน่วยหินบะซอลต์บ่อพลอย ซึ่งพบอยู่เป็นบริเวณเล็ก ๆ ในอำเภอบ่อพลอย จังหวัดกาญจนบุรี ตัดแทรกหินแปรแกรดกรีนชีสต์ยุคไซลูเรียน-ดีโวเนียน และจัดเป็นพวกเนฟีลีนโอลิวีนบะซอลต์ (Bunopas and Banjitradula, 1975) หินบะซอลต์ได้ไหลปกคลุมพื้นที่บริเวณที่ต่ำในแนวทิศตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ ลักษณะของหินบะซอลต์ เป็นพวกเนื้อละเอียด แน่น มีสีดำ และเป็นเนื้อออก มักพบชิ้นส่วนของหินอัลตราเมฟิก ที่มีแร่ไคลโนไพรอกซีน สปิเนล ซานิติน และโอลิวีน ผลึกขนาดใหญ่จำนวนมาก หินส่วนที่เป็นเนื้อละเอียดประกอบด้วย แร่ไคลโนไพรอกซีน แร่โอลิวีน และแร่ทึบแสง

2.5.4 บริเวณภาคตะวันออก

หินบะซอลต์บริเวณภาคตะวันออกส่วนใหญ่พบอยู่ในบริเวณจังหวัดจันทบุรีและตราด สามารถแบ่งออกเป็น 5 หน่วยหิน มีรายละเอียดดังนี้

1) หน่วยหินบะซอลต์จันทบุรี ได้แก่ หินบะซอลต์บริเวณเขาพลอยแหวน เขาหัว อำเภอท่าใหม่ จังหวัดจันทบุรี หินดังกล่าวมีเนื้อละเอียด และมีสีดำ มักจะพบชิ้นส่วนของหินอัลตราเมฟิก และผลึกขนาดใหญ่ของแร่สปีเนล ไพรอกซีน และโอลิวีน ส่วนประกอบส่วนใหญ่จะเป็นผลึกแร่โอลิวีน และผลึกแร่ไคลโนไพรอกซีน หินบะซอลต์บริเวณทางด้านตะวันออกของจังหวัดจันทบุรี ไหลปกคลุมพื้นที่ที่เป็นเนินเล็ก ๆ ในแนวเหนือ-ใต้ บริเวณบ้านบ่อเวฬุ บ้านอ่างเอ็ด บ้านบ่ออีแรม บ้านสี่เสียด บ้านสะพานหิน และคลองอีตัก หินบะซอลต์ที่สะพานหินมีเนื้อคอกถึงเนื้อแน่น

2) หน่วยหินบะซอลต์ปองน้ำร้อน ปกคลุมพื้นที่ด้านตะวันออกเฉียงใต้ของอำเภอปองน้ำร้อน จังหวัดจันทบุรี อยู่ในแนวเหนือ-ใต้ มีลักษณะเนื้อแน่น สีเทาดำถึงดำ ประกอบด้วยผลึกแร่โอลิวีน และแร่ไคลโนไพรอกซีนอยู่ในหินเนื้อแน่น ซึ่งจัดเป็นหินพวกบะซาไนต์

3) หน่วยหินบะซอลต์ตราด พบที่บริเวณบ้านหนองบอน บ้านบ่อไร่ อำเภอบ่อไร่ จังหวัดตราด ซึ่งไหลคลุมพื้นที่หุบเขาในแนวเหนือ-ใต้ ปิดทับหินทราย และหินดินดานยุคคาร์บอนิเฟอรัสถึงเพอร์เมียน ลักษณะของหินบะซอลต์ประกอบด้วยผลึกของแร่โอลิวีน เฟลด์สปาร์ และไคลโนไพรอกซีน

4) หน่วยหินบะซอลต์เกาะกูด พบทางด้านทิศตะวันตกของเกาะ หินบะซอลต์ไหลปิดทับหินทราย ยุคจูแรสซิก ลักษณะเนื้อละเอียด สีเทาอมดำ มีรูพรุน ประกอบด้วยแร่โอลิวีนเป็นจำนวนมาก และมีผลึกแร่ไคลโนไพรอกซีนอยู่บ้าง

5) หน่วยหินบะซอลต์บ้านแซอ เกิดเป็นบริเวณเล็ก ๆ ทางด้านใต้ของที่ราบสูงโคราช บริเวณบ้านแซอ อำเภอรัฐประเทพ จังหวัดสระแก้ว ครอบคลุมพื้นที่ 8 ตารางกิโลเมตร มีลักษณะเนื้อละเอียด สีเทาดำ มีรูพรุน มักจะมีแร่โอปอลชนิดไฮยาไลต์ ตกผลึกตามรูพรุน หินส่วนใหญ่เมื่อจะให้สีน้ำตาลแดง

2.5.5 บริเวณที่ราบสูงโคราช

หินบะซอลต์พบกระจายเป็นบริเวณเล็กบนที่ราบสูงโคราชด้านใต้ ตั้งแต่จังหวัดนครราชสีมา บุรีรัมย์ สุรินทร์ ศรีสะเกษ และอุบลราชธานี ซึ่งแบ่งออกเป็น 5 หน่วยหิน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1) หน่วยหินบะซอลต์นครราชสีมา กลุ่มพื้นที่มากที่สุดในกลุ่มหินบะซอลต์บริเวณที่ราบสูงโคราช หินส่วนใหญ่เมื่อผุจะกลายเป็นดินสีน้ำตาลแดง หินบะซอลต์ไหลปิดทับหินทรายหมวดโคกกรวด บริเวณด้านตะวันออกเฉียงใต้ของจังหวัดนครราชสีมา เป็นเนื้อที่ประมาณ 1,400 ตารางกิโลเมตร มีเนื้อละเอียด สีเทาดำ มีรูพรุน มีส่วนประกอบพวกผลึกแร่โอลิวีน หินดังกล่าวถูกจัดให้อยู่ในพวกฮาวายไอต์ (Barr and Macdonald, 1978; นิคม จิงอยู่สุขและชนาวุฒิ ศิรินาวิน, 2525)

2) หน่วยหินบะซอลต์บุรีรัมย์ หินบะซอลต์ไหลปกคลุมพื้นที่ราบรอบเขา เช่น เขากระโดง เขาพนมรุ้ง เขาภูพระอังคาร และเขาไพบูลย์ หินบะซอลต์บริเวณใกล้ปากปล่องภูเขาไฟส่วนใหญ่มักจะมีรูพรุนมาก ลักษณะเนื้อของหินบะซอลต์บุรีรัมย์เป็นเนื้อละเอียด สีเทาถึงเทาดำ ประกอบด้วยแร่โอลิวีน แร่แพลจิโอเคลส และแร่โคลโนไฟรอกซีน หินบริเวณดังกล่าวจัดให้อยู่ในหินพวกฮาวายไอต์

3) หน่วยหินบะซอลต์สุรินทร์ พบบริเวณเขาพนมสวาย และพื้นที่รอบเขา กลุ่มพื้นที่ประมาณ 55 ตารางกิโลเมตร หินบะซอลต์มีสีเทาดำ เนื้อละเอียด และมีรูพรุน มีแร่ประกอบพวกโอลิวีนจำนวนมาก และถูกจัดให้อยู่ในหินพวกเมอเกียไรต์ (Barr and Macdonald, 1978)

4) หน่วยหินบะซอลต์ศรีสะเกษ พบทางด้านใต้ของจังหวัดศรีสะเกษ บริเวณอำเภอกันทรลักษณ์ และอำเภอขุนหาญ โดยพบกระจายอยู่ในบริเวณภูเงิน ภูก้อม และภูมื่น หินส่วนใหญ่เมื่อผุจะกลายเป็นดินสีน้ำตาลแดง หินบะซอลต์ประกอบด้วยผลึกโอลิวีน โคลโนไฟรอกซีน และถูกจัดเป็นหินพวกฮาวายไอต์ถึงพวกเนฟิลินฮาวายไอต์

5) หน่วยหินบะซอลต์อุบลราชธานี พบบริเวณทางทิศใต้ของจังหวัดอุบลราชธานี มีแหล่งที่เกิด 2 บริเวณ คือ บริเวณบ้านหนองน้ำขุ่น และบริเวณเขาน้อย อำเภอน้ำยืน ลักษณะเนื้อมีรูพรุน มีแร่แคลไซต์และแร่ซีโอไลต์ตกผลึกอยู่ตามโพรง หินที่มีเนื้อแน่นจะมีสีเทาดำ ประกอบด้วยแร่โอลิวีนและโคลโนไฟรอกซีน

2.5.6 ปริมาณสำรอง

จากรายงานของกรมทรัพยากรธรรมชาติที่ได้มีการสำรวจปริมาณสำรองหินบะซอลต์ในประเทศไทยพบว่า หินบะซอลต์มีทุกภาคของประเทศไทย ซึ่งมีอยู่ในจังหวัดบุรีรัมย์ (ปริมาณสำรองทั้งหมด 82,689,240เมตริกตัน) นครราชสีมา (ปริมาณสำรองทั้งหมด 10,271,425 เมตริกตัน) ตราด (ปริมาณสำรองทั้งหมด 22,346,691 เมตริกตัน) เพชรบูรณ์ (ปริมาณสำรองทั้งหมด 11,300,700 เมตริกตัน) สุรินทร์ (ปริมาณสำรองทั้งหมด 15,345,494 เมตริกตัน) และจังหวัดลำปาง (ไม่มีรายงานด้านปริมาณสำรอง) ปริมาณสำรองดังกล่าวมีมากพอที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการกักเก็บความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ในหินถมในพื้นที่ที่มีอากาศหนาวเย็นในแต่ละภูมิภาค โดยเฉพาะภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนบน

เนื่องจากหินบะซอลต์มีความสัมพันธ์กับงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงได้รวบรวมคุณสมบัติเชิงแร่วิทยาของหินบะซอลต์ในแต่ละแหล่ง (ซึ่งได้ศึกษาโดยกรมทรัพยากรธรรมชาติ) ไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของแร่ในหินบะซอลต์ที่พบในประเทศไทย (ข้อมูลจาก กรมทรัพยากรธรณี, 2544)

ภูมิภาค	หน่วยหิน	แร่ประกอบหิน
ภาคเหนือ	เชียงราย	โอลิวีน ไคลโนไพรอกซีน แพลจิโอเคลส (แลบราโดไรต์) แมกนีไทต์ และ กลอไรต์ ชื่อเรียก: โทเลอิติกบะซอลต์
	ลำปาง	N/A
	แม่ทะ	โอลิวีน ไคลโนไพรอกซีน แพลจิโอเคลส (แลบราโดไรต์) แมกนีไทต์ และ แก้ว ชื่อเรียก: บะซาลต์
	สบปราบ	ชื่อเรียก: ฮาวายไอต์ (Barr and Macdinald, 1978) บะซอลติกแอนดีไซต์ (Panjasawatwong, 1983)
	เด่นชัย	ชั้นที่ 1 ถึง 6: โอลิวีน แพลจิโอเคลส ไคลโนไพรอกซีน และ แร่ทึบแสง ชั้นที่ 7: แร่โอลิวีนแก้วสีน้ำตาลแดง ไคลโนไพรอกซีน แพลจิโอเคลส (แลบราโดไรต์) และแร่ทึบแสง มีชิ้นส่วนของอัลตราเมฟิก (มีแร่ประกอบคือ อะลูมินัส ไคลโนไพรอกซีน และ สปีเนลสีดำ) ชื่อเรียก: ชั้นที่ 1-4 เป็นพวก ทรานสิชันฮาวาย ชั้นที่ 5-6 เป็นพวก ฮาวายไอต์ และ ชั้นที่ 7 เป็นพวก บะซาลต์
	แม่ลามา	โอลิวีน แพลจิโอเคลส ไคลโนไพรอกซีน และแร่ทึบแสง ชื่อเรียก: โทเลไอต์
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	บ่อพลอย	ไคลโนไพรอกซีน โอลิวีน ซานิตีน แพลจิโอเคลส และแร่ทึบแสง มีชิ้นส่วนของอัลตราเมฟิก (มีแร่ประกอบคือ ไคลโนไพรอกซีน สปีเนล ซานิตีน และ โอลิวีน) ชื่อเรียก: เนฟิลินฮาวายไอต์
เพื่อศึกษาเพชรบูรณ์	ลำน้ำราชันย์	โอลิวีน แพลจิโอเคลส ไคลโนไพรอกซีน แมกนีไทต์
	วิเชียรบุรี	พบชิ้นส่วนของหินอัลตราเมฟิก และแร่สปีเนล

หมายเหตุ: ชื่อเรียกหินบะซอลต์จำแนกโดยอาศัยองค์ประกอบทางเคมี (Geochemistry)

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของแร่ในหินบะซอลต์ที่พบในประเทศไทย (ต่อ)

ภูมิภาค	หน่วยหิน	แร่ประกอบหิน
ภาคตะวันตก	จันทบุรี	บริเวณเขาพลอย เขาหัว อำเภอท่าใหม่: โคลโนไฟรอกซีน โอลิวีน เนฟิลิน และแร่ทึบแสง มีชิ้นส่วนของหินอัลตราเมฟิก และผลึกขนาดใหญ่ของแร่สปิเนล ชื่อเรียก: เนฟิลินไนด์ , บริเวณบ้านสะพานหิน: โอลิวีน โคลโนไฟรอกซีน เฟลด์สปาร์ และแร่ทึบแสง ชื่อเรียก: แอลคาไล-โอลิวีนบะซอลต์
	โป่งน้ำร้อน	โอลิวีน โคลโนไฟรอกซีน เฟลซิโอเคลส แร่ทึบแสง และแก้ว ชื่อเรียก: บะซาลต์
	ตราด	แก้วสีน้ำตาล แร่เฟลด์สปาร์ โคลโนไฟรอกซีน โอลิวีน และแร่ทึบแสง ซึ่งมีผลึกแร่โอลิวีน, เฟลด์สปาร์ และ โคลโนไฟรอกซีน ฝังตัวอยู่ในเนื้อหิน ชื่อเรียก: โอลิวีน-เนฟิลินไนด์
	เกาะกูด	เนื้อหินประกอบด้วยแร่เฟลซิโอเคลส โคลโนไฟรอกซีน โอลิวีนและแร่ทึบแสง และมีผลึกแร่โอลิวีนและโคลโนไฟรอกซีน ฝังตัวอยู่ในเนื้อหิน
	บ้านแซอ	เนื้อหินประกอบด้วยแร่เฟลซิโอเคลส โคลโนไฟรอกซีน และแมกนีไทต์ และมีผลึกแร่โอลิวีนฝังตัวอยู่ในเนื้อหิน
ที่ราบสูงโคราช	นครราชสีมา	เนื้อหินประกอบด้วยแร่เฟลซิโอเคลส (แอนดีซีน) โคลโนไฟรอกซีน และแร่ทึบแสง และมีผลึกของแร่โอลิวีนฝังตัวอยู่ในเนื้อหิน ชื่อเรียก: ฮาวายไอด์
	บุรีรัมย์	เนื้อหินประกอบด้วยแร่เฟลซิโอเคลส (มักพบผลึกอะพาไทต์อยู่ด้วย) โคลโนไฟรอกซีน โอลิวีน และแมกนีไทต์ และมีผลึกแร่โอลิวีน เฟลซิโอเคลส และโคลโนไฟรอกซีนฝังตัวอยู่ในเนื้อหิน ชื่อเรียก: ฮาวายไอด์
	สุรินทร์	เนื้อละเอียดประกอบด้วยแร่เฟลซิโอเคลส โคลโนไฟรอกซีน โอลิวีน และแมกนีไทต์ และมีผลึกแร่โอลิวีน และโคลโนไฟรอกซีนฝังตัวอยู่ในเนื้อหิน ชื่อเรียก: เมอร์เกียไรต์
	ศรีสะเกษ	หินเนื้อละเอียดประกอบด้วยแร่เฟลซิโอเคลส โคลโนไฟรอกซีน และแร่แมกนีไทต์ และมีผลึกแร่โอลิวีน และโคลโนไฟรอกซีนฝังตัวอยู่ในเนื้อหิน ชื่อเรียก: เนฟิลินฮาวายไอด์
	อุบลราชธานี	หินเนื้อละเอียดประกอบด้วยแร่เฟลซิโอเคลส โคลโนไฟรอกซีน แมกนีไทต์ และสปิเนล และมีผลึกแร่โอลิวีนและโคลโนไฟรอกซีน (ไททินอไซด์) ฝังตัวอยู่ในเนื้อหิน

หมายเหตุ: ชื่อเรียกหินบะซอลต์จำแนกโดยอาศัยองค์ประกอบทางเคมี (Geochemistry)

บทที่ 3

การทดสอบคุณสมบัติด้านอุณหภูมิจของหิน

บทนี้อธิบายวิธีการทดสอบและนำเสนอผลที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติด้านอุณหภูมิ (Thermal properties) ของหินที่ใช้ในงานวิจัย ซึ่งประกอบด้วย การทดสอบเพื่อหาค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) และค่าความร้อนจำเพาะ (Specific heat) ตัวอย่างหินที่นำมาทดสอบสามารถพบได้ทั่วไปในพื้นที่ภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย และจะคัดเลือกเพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุกักเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ ค่าคงที่เกี่ยวกับคุณสมบัติด้านอุณหภูมิของหินที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการจะถูกนำไปใช้ในขั้นตอนการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ หินที่มีความเหมาะสมมากที่สุดจะถูกนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลองเชิงกายภาพในขั้นตอนต่อไป

3.1 ชนิดของตัวอย่างหิน

ตัวอย่างหินที่นำมาศึกษาประกอบด้วย กลุ่มหินทราย หินบะซอลต์ หินอ่อน หิน แกรนิต หินปูน และเกลือหิน ซึ่งมีความหลากหลายในเชิงศิลาวิทยา โดยรายละเอียดของชนิด ตำแหน่งที่เก็บ และชุดหิน/หรือหมวดหินทั้งหมดที่ใช้ในการทดสอบ ได้สรุปไว้ในตารางที่ 3.1 นอกจากนี้งานวิจัยนี้ได้ทดสอบคุณสมบัติด้านอุณหภูมิของหินที่อยู่ในบริเวณสถานที่ทดสอบแบบจำลองเชิงกายภาพของงานวิจัยนี้

3.1.1 กลุ่มหินทราย

ตัวอย่างหินทรายที่ใช้ในการทดสอบได้มาจาก 4 แหล่ง ที่อยู่ใน จังหวัดนครราชสีมาซึ่งมีรายละเอียดของพื้นที่และลักษณะทางกายภาพดังต่อไปนี้

1) หินทรายจากอำเภอปากช่อง มีสีเทา-เขียว ขนาดเม็ดละเอียดและลักษณะเป็นเหลี่ยม มีการคัดขนาดดี องค์ประกอบส่วนใหญ่เป็น Lithic fragment ไม่มีแร่ควอตซ์หรือ เฟลด์สปาร์ ทำปฏิกิริยากับสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเล็กน้อย จัดอยู่ในหมวดหินภูกระดึง

2) หินทรายจากอำเภอสีคิ้ว มีสีน้ำตาล-เหลือง ขนาดเม็ดละเอียดและลักษณะเป็นเหลี่ยม มีการคัดขนาดดี แร่ประกอบหินส่วนใหญ่เป็นแร่ควอตซ์ ไม่ทำปฏิกิริยากับสารละลายกรดไฮโดรคลอริก จัดอยู่ในหมวดหินภูพาน

3) หินทรายจากอำเภอสีคิ้ว มีสีขาวอมน้ำตาล ขนาดเม็ดละเอียดและมีการคัดขนาดดี แร่ประกอบหินส่วนใหญ่เป็นแร่ควอตซ์ ไม่ทำปฏิกิริยากับสารละลายกรดไฮโดรคลอริก จัดอยู่ในหมวดหินภูพาน

ตารางที่ 3.1 แสดงสถานที่เก็บและชนิดหินและดินที่ใช้ในการทดสอบ

ลำดับ	วัสดุ	สถานที่	ชุดหิน/หรือหมวดหิน
1	ดินปัดเป็นก้อน (Compacted Soil)	ม.เทคโนโลยีสุรนารี จ. นครราชสีมา	ชุดดินสูงเนิน
2	หินอ่อนสระบุรี (Saraburi Marble)	N/A จ.สระบุรี	กลุ่มหินสระบุรี
3	หินบะซอลต์บุรีรัมย์ (Burirum Basalt)	อ.เมือง จ.บุรีรัมย์	หน่วยหินบะซอลต์บุรีรัมย์
4	หินปูนลพบุรี (Lopburi Limestone)	N/A จ.ลพบุรี	หน่วยหินลพบุรี
5	หินทรายภูกระดึง (Phu Kradung Sandstone)	อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา	หมวดหินภูกระดึง
6	หินทรายภูพาน (Phu Phan Sandstone)	อ.สีคิ้ว จ.นครราชสีมา	หมวดหินภูพาน
7	หินทรายพระวิหาร (Phra Wihan Sandstone)	อ.สีคิ้ว จ.นครราชสีมา	หมวดหินพระวิหาร
8	หินทรายเสาขรัว (Sao Khua Sandstone)	อ.ด่านขุนทด จ.นครราชสีมา	หมวดหินเสาขรัว
9	หินแกรนิตจีน (Chinese Granite)	ประเทศจีน	N/A
10	หินแกรนิตตาก (Tak Granite)	จ.ตาก	หินแกรนิตแนวตะวันออก
11	หินแกรนิตเวียดนาม (Vietnamese Granite)	ประเทศเวียดนาม	N/A
12	เกลือชั้นกลาง (Middle Salt)	กิ่ง อ.พระทองคำ จ.นครราชสีมา	ชุดหินมหาสารคาม
13	เกลือชั้นล่าง (Lower Salt)	กิ่ง อ.พระทองคำ จ.นครราชสีมา	ชุดหินมหาสารคาม

4) หินทรายจาก อำเภอด่านขุนทด มีสีแดง ขนาดเม็ดละเอียดและมีการคัดขนาดดี แร่ประกอบหินส่วนใหญ่เป็นแร่เฟลด์สปาร์ ไม่ทำปฏิกิริยากับสารละลายกรดไฮโดรคลอริก จัดอยู่ในหมวดหินเสาขัว

3.1.2 หินบะซอลต์

ตัวอย่างหินบะซอลต์ได้นำมาจากเหมืองหินราช ตำบลอิสาน อำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์ มีลักษณะเนื้อละเอียด สีเทาถึงเทาดำ มีฟองอากาศปรากฏอยู่เล็กน้อย ประกอบด้วยผลึกแร่โอลิวีน แร่แพลจิโอเคลส และแร่ไคลโนไพรอกซีนบ้างเล็กน้อย จัดอยู่ในหน่วยหินบะซอลต์บุรีรัมย์ เป็นหน่วยหินที่ไหลปิดทับกลุ่มหิน โคราช มีอายุประมาณ 3.28 ล้านปีถึง 0.92 ล้านปี (ยุคเทอร์เชียรี-ควอเทอร์นารี)

3.1.3 หินอ่อน

ตัวอย่างหินอ่อนได้นำมาจากจากเหมืองหินประดับในจังหวัดลพบุรี ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มหินสระบุรี ประกอบด้วยผลึกของ Calcite ขนาดประมาณ 2 มิลลิเมตร ทำปฏิกิริยากับสารละลายกรดไฮโดรคลอริกอย่างรุนแรงโดยไม่ต้องขูดเนื้อหินให้เป็นผง

3.1.4 กลุ่มหินแกรนิต

ตัวอย่างหินแกรนิตที่ใช้ได้นำมาจาก 3 แหล่ง มีรายละเอียดของพื้นที่การเก็บ และลักษณะทางกายภาพดังต่อไปนี้

1) หินแกรนิตจาก จ.ตาก มีสีเทา ลักษณะของผลึกละเอียดสามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า ประกอบด้วยแร่แพลจิโอเคลสและควอตซ์ ผลึกแร่มีขนาดประมาณ 4-5 มิลลิเมตร โดยผลึกของแร่เฟลด์สปาร์และแร่ควอตซ์จะมีขนาดใกล้เคียงกัน พื้นที่เก็บตัวอย่างหินจัดอยู่ในบริเวณหินแกรนิตแนวตะวันออก (การจำแนกหินแกรนิตในประเทศไทยแบ่งออกเป็น 3 แนว คือ หินแกรนิตแนวตะวันออก หินแกรนิตตอนกลาง และหินแกรนิตแนวตะวันตก)

2) หินแกรนิตจากประเทศเวียดนาม มีสีแดง-ชมพู ลักษณะของผลึกละเอียดสามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า ประกอบด้วยแร่แพลจิโอเคลสและควอตซ์ ผลึกแร่มีขนาดประมาณ 2-5 มิลลิเมตร โดยทั่วไปจะพบผลึกของแร่ควอตซ์มีขนาดเล็กกว่าผลึกของแร่เฟลด์สปาร์

3) หินแกรนิตจากประเทศจีน มีสีขาว ลักษณะของผลึกหยาบสามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า ประกอบด้วยแร่แพลจิโอเคลสและควอตซ์ ผลึกของแร่เฟลด์สปาร์และแร่ควอตซ์จะมีขนาดใกล้เคียงกันโดยเฉลี่ยประมาณ 5 มิลลิเมตร

3.1.5 หินปูน

ตัวอย่างหินปูนได้นำมาจากจังหวัดลพบุรี เป็นหินจากหน่วยหินลพบุรี มีสีเทา ทำปฏิกิริยากับสารละลายกรดไฮโดรคลอริกอย่างรุนแรงโดยไม่ต้องขูดเนื้อหินให้เป็นผง

3.1.6 กลุ่มเกลือหิน

ตัวอย่างเกลือหินที่นำมาจากเกลือชั้นกลางที่ระดับความลึก 270.0 เมตร และเกลือชั้นล่างที่ระดับความลึก 333.5 เมตร จากหลุมเจาะหมายเลข SS1 ในพื้นที่ของบริษัทสยามทรัพย์มีจำกัด กิ่งอำเภอพระทองคำ จังหวัดนครราชสีมา

- 1) เกลือชั้นกลาง มีสีขาววันบุรี (Smoky white) มีขนาดผลึกเฉลี่ย 5 มิลลิเมตร มีมลทินที่เป็น Anhydrite และแร่ดินอย่างละ 1 เปอร์เซ็นต์
- 2) เกลือชั้นล่าง มีสีขาวใส มีขนาดผลึกเฉลี่ยประมาณ 5 มิลลิเมตร มีมลทินที่เป็นแร่ดิน 1 เปอร์เซ็นต์

3.2 การทดสอบคุณสมบัติทางด้านอุณหภูมิจนของหิน

การจัดเตรียมตัวอย่างกระทำได้โดยการตัดตัวอย่างหินให้มีขนาดประมาณ $3 \times 3 \times 1$ เซนติเมตร (จำนวน 2 ชิ้นต่อตัวอย่าง) และทำการขัดผิวหน้าตัดให้เรียบทั้ง 2 ด้าน รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการตัดตัวอย่างหิน และรูปที่ 3.2 แสดงตัวอย่างหินทั้งหมดที่ได้จัดเตรียมไว้เพื่อการทดสอบคุณสมบัติด้านอุณหภูมิจน

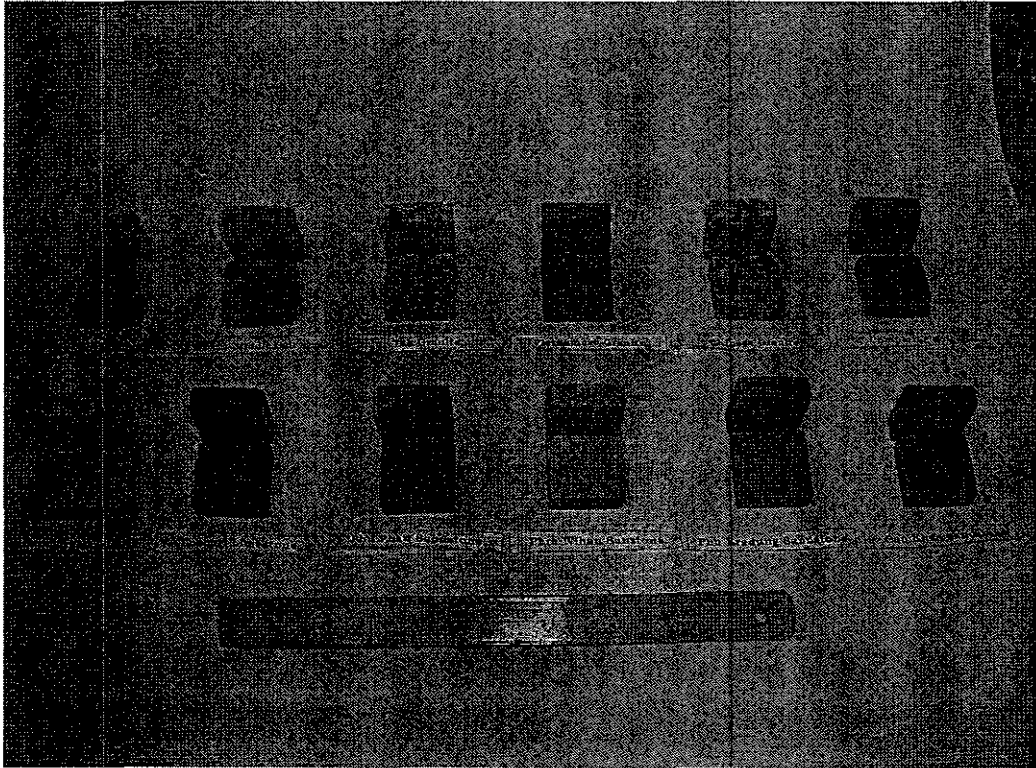
เครื่องมือที่ใช้ทดสอบคือเครื่อง Thermal Constants Analyzer (TCA) ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 3.3 เครื่อง TCA เป็นแบบ Hot Disk มีความสามารถในการวัดค่าการนำความร้อนของตัวอย่างได้ในช่วง $0.005 - 500 \text{ W/m K}$ ($0.003 - 289 \text{ Btu/hr.ft } ^\circ\text{F}$) ที่อุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิห้องถึง 200°C โดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm 2\%$ การทดสอบเป็นวิธี Transient Plane Source (TPS) โดยใช้แผ่นความร้อน (Hot Disk sensor หรือ Transiently heated plane sensor) การทดสอบจะนำตัวอย่าง 2 ชิ้นมาประกบกัน และติดตั้งแผ่นความร้อนระหว่างชิ้นตัวอย่างทั้งสองแท่ง แต่ละตัวอย่างจะทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง ซึ่งหินแต่ละชนิดจะทดสอบอย่างน้อย 1 ตัวอย่าง การทดสอบดังกล่าวดำเนินการโดยศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

3.3 สรุปผลการทดสอบ

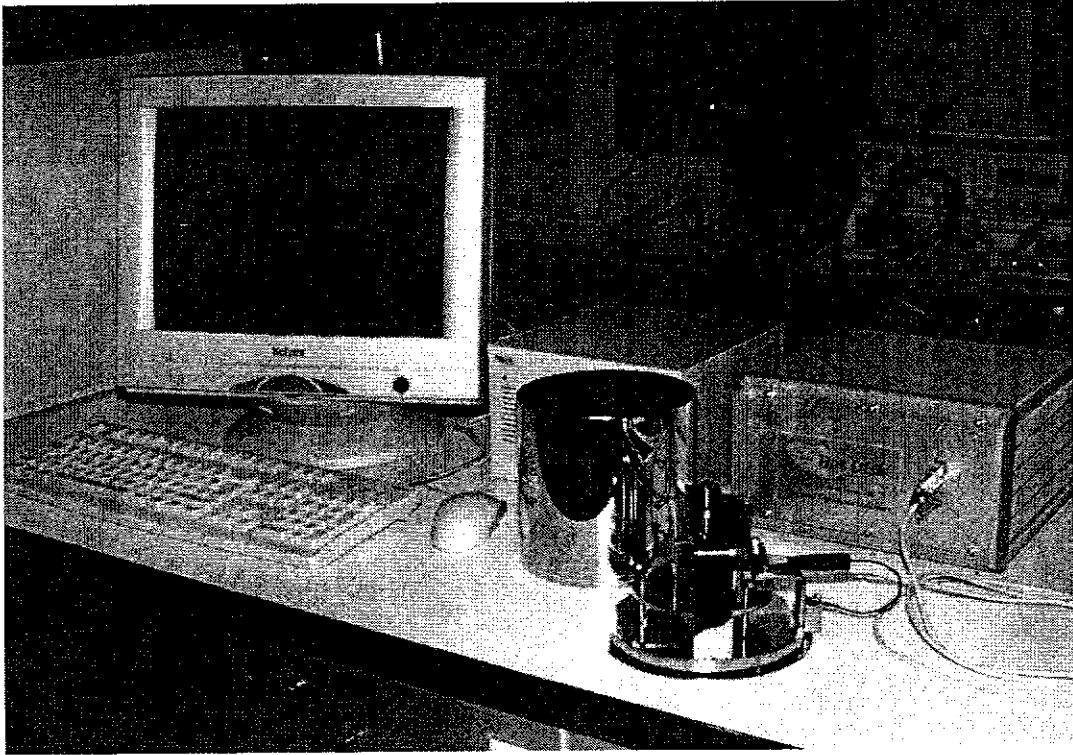
ผลการทดสอบได้สรุปไว้ในตารางที่ 3.2 ซึ่งพบว่าหินบะซอลต์มีค่าความจุความร้อนจำเพาะสูงที่สุดเท่ากับ $3.30 \text{ MJ/m}^3 \cdot \text{K}^{-1}$ ซึ่งทำให้หินชนิดนี้สามารถเก็บความร้อนไว้ได้สูงเมื่อเทียบกับหินชนิดอื่นที่ทดสอบในงานวิจัยนี้ รูปที่ 3.4 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนและความหนาแน่นของหิน และรูปที่ 3.5 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุความร้อนกับค่าความหนาแน่นของหิน



รูปที่ 3.1 การตัดตัวอย่างหินสำหรับการทดสอบคุณสมบัติด้านอุณหภูมิต



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างหินที่ได้จัดเตรียมไว้เพื่อการทดสอบคุณสมบัติด้านอุณหภูมิ

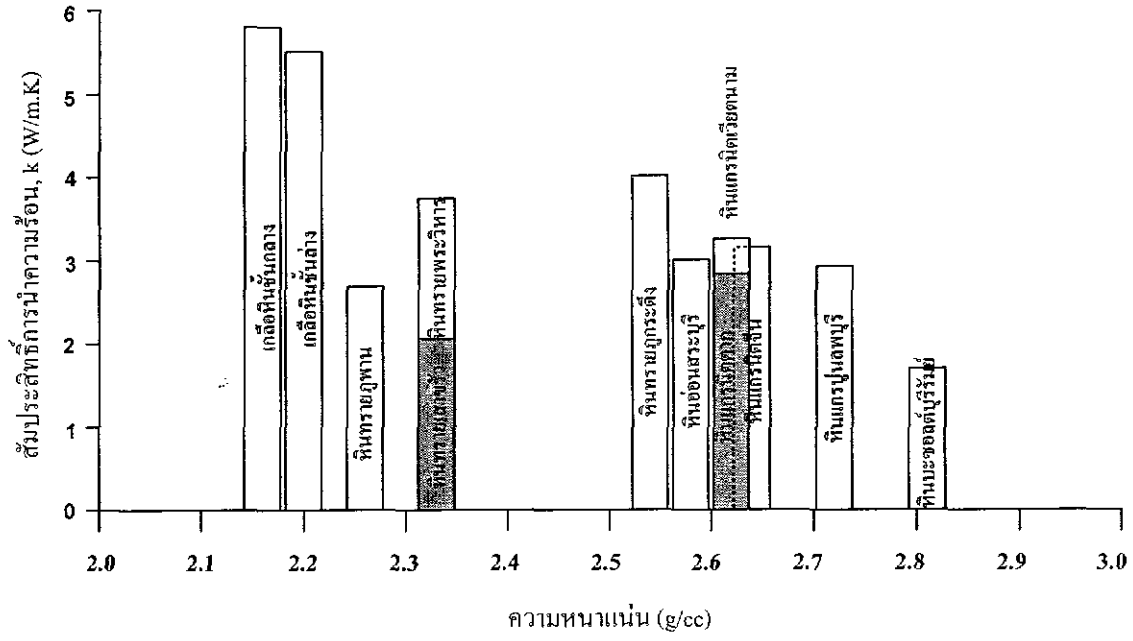


รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติด้านความร้อน (Thermal Constants Analyser แบบ Hot Disk)

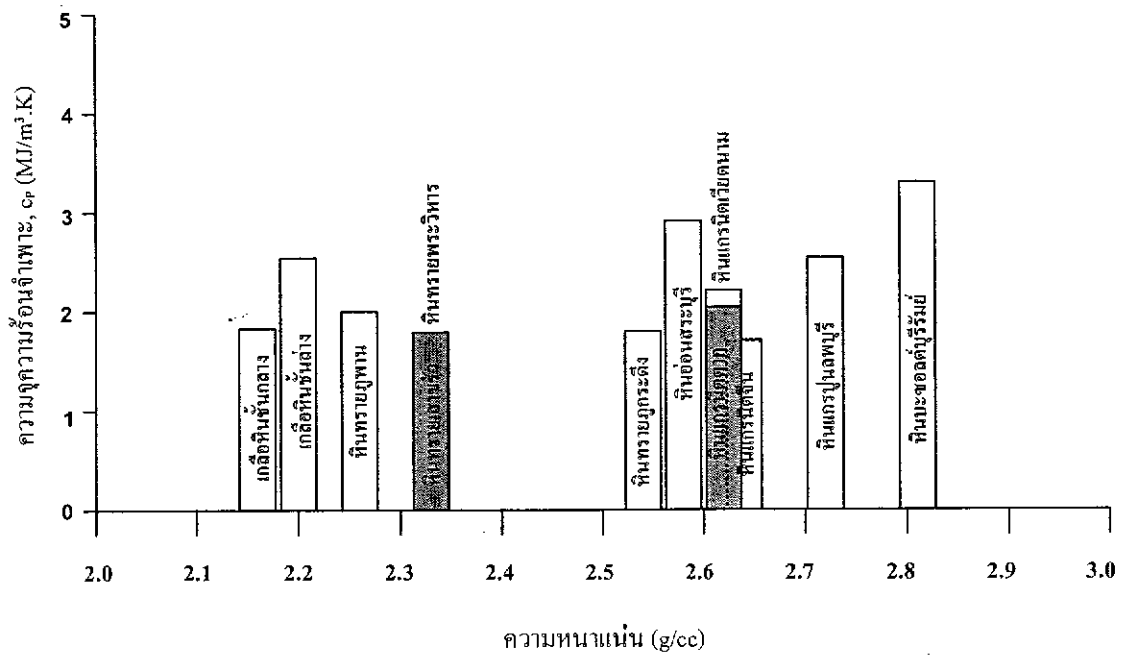
ตารางที่ 3.2 ผลการทดสอบหาคุณสมบัติด้านความร้อนของหินจำนวน 12 ตัวอย่างและดิน 1 ตัวอย่าง

ลำดับ	วัสดุ	ความหนาแน่น	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/mK)*	ความจุความร้อนจำเพาะ (MJ/m ³ K)*
1	ดินบดเป็นก้อน (Compacted Soil)	-	1.19 ± 0.00	2.43 ± 0.01
2	หินอ่อนสระบุรี (Saraburi Marble)	2.58	3.01 ± 0.00	2.91 ± 0.05
3	หินบะซอลต์บุรีรัมย์ (Burirum Basalt)	2.81	1.70 ± 0.05	3.30 ± 0.71
4	หินปูนลพบุรี (Lopburi Limestone)	2.64	2.93 ± 0.00	2.54 ± 0.01
5	หินทรายภูกระดึง (Phu Kradung Sandstone)	2.54	4.02 ± 0.01	1.80 ± 0.03
6	หินทรายภูพาน (Phu Phan Sandstone)	2.26	2.69 ± 0.01	2.00 ± 0.04
7	หินทรายพระวิหาร (Phra Wihan Sandstone)	2.33	3.75 ± 0.00	1.77 ± 0.02
8	หินทรายเสาขรัว (Sao Khua Sandstone)	2.33	2.06 ± 0.01	1.79 ± 0.02
9	หินแกรนิตจีน (Chinese Granite)	2.64	3.16 ± 0.00	1.69 ± 0.01
10	หินแกรนิตตาก (Tak Granite)	2.62	2.84 ± 0.00	2.21 ± 0.01
11	หินแกรนิตเวียดนาม (Vietnamese Granite)	2.62	3.26 ± 0.00	2.04 ± 0.03
12	เกลือชั้นกลาง (Middle Salt)	2.16	5.80 ± 0.01	1.83 ± 0.01
13	เกลือชั้นล่าง (Lower Salt)	2.19	5.51 ± 0.01	2.54 ± 0.01

หมายเหตุ: ผลที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ 3 ครั้งต่อหนึ่งตัวอย่าง



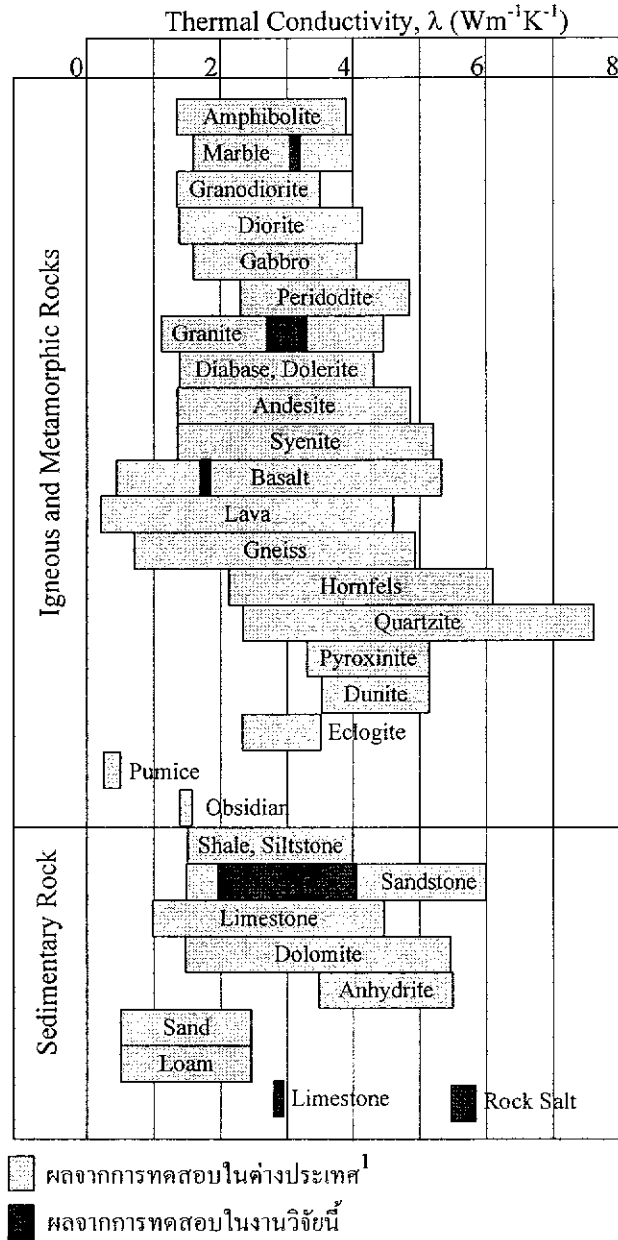
รูปที่ 3.4 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของหินทั้ง 12 ตัวอย่าง โดยเรียงลำดับตามความหนาแน่น



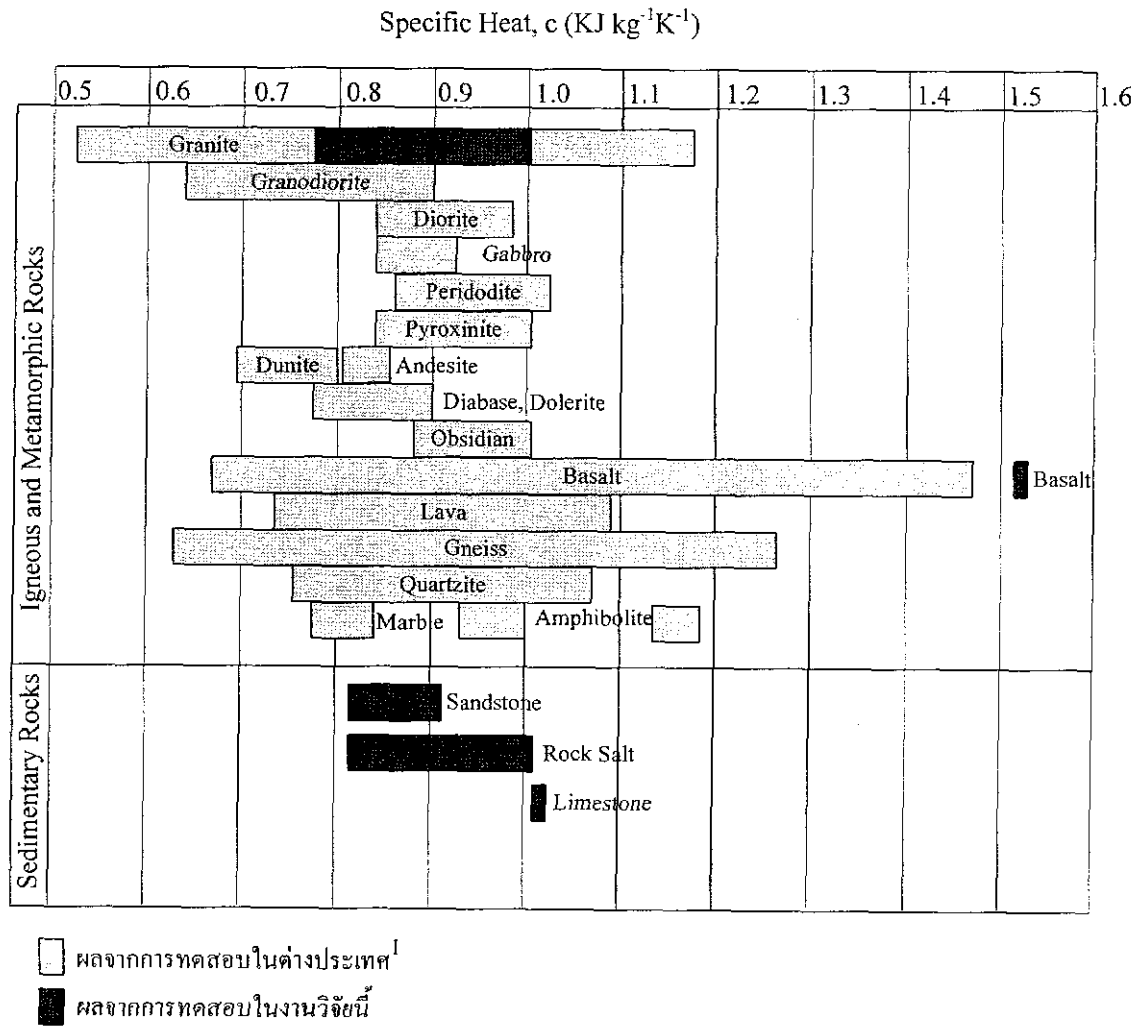
รูปที่ 3.5 เปรียบเทียบค่าความจุความร้อนจำเพาะของหินทั้ง 12 ตัวอย่าง โดยเรียงลำดับตามความหนาแน่น

จากรูปที่ 3.4 และ 3.5 สรุปได้ว่าค่าความจุความร้อนและค่าการนำความร้อนของหินไม่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความหนาแน่นของหิน อาจมีสาเหตุเนื่องมาจากหินประกอบด้วยแร่ที่มีคุณสมบัติทางด้านความร้อนที่แตกต่างกัน พฤติกรรมดังกล่าวนี้แตกต่างกับวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) เช่น เหล็ก อะลูมิเนียม และ เซรามิก โดยที่คุณสมบัติด้านความร้อนของวัสดุเหล่านี้มีความสัมพันธ์กับความหนาแน่น

จากผลการทบทวนวรรณกรรมวิจัยในบทที่ 2 ระบุว่าหินบะซอลต์สามารถพบได้ในพื้นที่ภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ประกอบกับหินบะซอลต์มีราคาถูก จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุกักเก็บความร้อน และยังมีความเป็นไปได้สำหรับประชาชนในระดับรากหญ้าที่จะสร้างระบบกักเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองทางกายภาพหรือระบบกักเก็บต้นแบบ (Pilot scale thermal storage system) จึงใช้หินบะซอลต์เป็นวัสดุกักเก็บพลังงานความร้อน รูปที่ 3.6 และ 3.7 เปรียบเทียบค่าการนำความร้อนและค่าความจุความร้อนของหินบะซอลต์ที่ทดสอบในงานวิจัยนี้กับหินชนิดเดียวกันและชนิดอื่นที่ทดสอบในต่างประเทศ ซึ่งจะเห็นได้ว่าหินบะซอลต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าการนำความร้อนอยู่ในระดับปานกลางและมีค่าความจุความร้อนค่อนข้างสูง



รูปที่ 3.6 เปรียบเทียบค่าการนำความร้อนของหินที่ทดสอบในงานวิจัยนี้กับหินที่ได้ทดสอบในต่างประเทศ (¹ Clauser and Huenges, 1995)



รูปที่ 3.7 เปรียบเทียบค่าความจุความร้อนของหินที่ทดสอบในงานวิจัยนี้กับหินที่ได้ทดสอบในต่างประเทศ (¹ Clauser and Huenges, 1995)

บทที่ 4

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model) เป็นการศึกษาในเชิงทฤษฎีที่มีวัตถุประสงค์เพื่อคำนวณการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของหินถม อากาศภายในบ่อที่อยู่ในระบบกักเก็บพลังงาน และอากาศในบ้านจำลอง จากนั้นนำผลที่ได้มาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิในบ้านกับสิ่งแวดล้อม ปริมาณของหินถมที่ใช้ และปริมาตรบ้าน ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวจะนำมาใช้ในการออกแบบปริมาณของหินถมให้เหมาะสมกับขนาดของบ้าน และอุณหภูมิในบ้านที่ต้องการ องค์ความรู้พื้นฐานทางด้านอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamics) และการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer) ถูกนำมาใช้เพื่ออธิบายพฤติกรรมของระบบกักเก็บพลังงานและบ้านจำลอง ทั้งนี้ผู้วิจัยได้สร้างคอมพิวเตอร์โปรแกรมเพื่อนำมาใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการคำนวณ และมีการคำนวณความอ่อนไหวของตัวแปรแต่ละตัวด้วย

4.1 อุณหพลศาสตร์และการถ่ายเทความร้อน

รูปแบบพลังงาน (Form of energy) ทางด้านเทอร์โมไดนามิกส์สามารถจำแนกได้ 2 ส่วน คือ 1) พลังงานระดับมหัพภาค (Macroscopic form) ได้แก่ พลังงานจลน์ (Kinetic energy, KE) ที่เกิดจากผลของระดับความสูงในสนามแรงโน้มถ่วง และพลังงานศักย์ (Potential energy, PE) ซึ่งเป็นพลังงานอันเนื่องมาจากผลของการเคลื่อนที่เมื่อเทียบกับแกนอ้างอิง และ 2) พลังงานระดับจุลภาค (Microscopic form) ได้แก่ พลังงานภายใน (Internal Energy, U) ซึ่งเป็นพลังงานในระดับโมเลกุล (Cengel, 1997; p.10) โดยที่พลังงานรวมของระบบ (E) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการได้ดังนี้

$$E = U + KE + PE = U + \frac{mv^2}{2} + mgz = m \left(u + \frac{v^2}{2} + gz \right), \text{ หน่วย kJ} \quad (4.1)$$

- เมื่อ
- m คือ มวลของระบบ (หน่วย kg)
 - v คือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของมวลในระบบ (หน่วย m/s)
 - u คือ พลังงานภายในต่อหนึ่งหน่วยมวล (หน่วย kJ/kg)
 - g คือ ความเร่งเนื่องจากสนามแรงโน้มถ่วงของโลก (หน่วย m/s^2) และ
 - z คือ ความสูงจากจุดอ้างอิง (หน่วย m)

พลังงานในระดับมหัพภาคและจุลภาคนี้ไม่สามารถถ่ายเทข้ามขอบเขต (Boundary) ของระบบ ได้ แต่มีพลังงานอีกรูปแบบหนึ่งที่สามารถถ่ายเทข้ามขอบเขตของระบบได้ ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นขณะที่กำลังมีการข้ามขอบเขตเท่านั้น (Boundary phenomena) หรือมีการถ่ายเทพลังงานข้ามขอบเขตของระบบ ได้แก่ พลังงานความร้อน (Heat, Q) และงาน (Work, W) (Cengel, 2003; p.9) สำหรับการถ่ายเทความร้อนในทางกายภาพสามารถแบ่งเป็น 3 ประเภท คือ การนำความร้อน (Thermal conduction) การพาความร้อน (Thermal convection) และการแผ่รังสีความร้อน (Thermal radiation) (Cengel, 1997; p.85-88)

4.1.1 การนำความร้อน

การถ่ายเทความร้อนเป็นการส่งถ่ายพลังงานจากอนุภาคที่มีพลังงานสูงกว่าไปยังอนุภาคที่มีพลังงานต่ำกว่า พลังงานนี้สัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ซึ่งไม่เป็นแบบแผน (Random motion) และการสั่นสะเทือนของโมเลกุล โดยที่โมเลกุลที่มีอุณหภูมิสูงจะมีพลังงานสูง พลังงานจะถูกถ่ายเทจากการกระทบกันของโมเลกุล ถ้าโมเลกุลมีอุณหภูมิต่างกัน (Temperature gradient) พลังงานที่ถูกส่งถ่ายก็คือพลังงานความร้อน และกระบวนการดังกล่าวนี้เรียกว่า การนำความร้อน (Cengel, 2003, p.17-18) จากการที่โมเลกุลของของแข็งอยู่ชิดกันมากกว่าของเหลวจึงส่งผลให้การนำความร้อนเกิดในของแข็งได้มากกว่าของเหลวหรือแก๊ส สำหรับอัตราการถ่ายเทความร้อนใน 1 มิติ สามารถคำนวณได้จาก

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = kA \frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{kA}{L} (T_1 - T_2) \quad (4.2)$$

เมื่อ	\dot{Q}_{cond}	คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน (หน่วย W)
	k	คือ ค่าการนำความร้อนของตัวกลางที่ความร้อนเคลื่อนที่ผ่าน (หน่วย W/m.K)
	A	คือ พื้นที่หน้าตัดที่ความร้อนไหลผ่าน (หน่วย m ²)
	T	คือ อุณหภูมิ (หน่วย K)
	x และ L	คือ ระยะทางของตัวกลางที่ความร้อนเคลื่อนที่ผ่าน (หน่วย m)
	T ₁	คือ อุณหภูมิระนาบแรกที่ความร้อนเคลื่อนที่ผ่าน (หน่วย K) และ
	T ₂	คือ อุณหภูมิที่ระนาบถัดไปเป็นระยะทาง Δx หรือ L (โดยที่ T ₂ > T ₁ หน่วย K)

4.1.2 การพาความร้อน

การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนต้องอาศัยตัวกลางที่เป็นของไหล กระบวนการดังกล่าวสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ การพาความร้อนแบบอิสระ (Free convection) และการพาความร้อนแบบบังคับ (Force convection) โดยทั้ง 2 ลักษณะต่างมีสมการสำหรับหาอัตราการพาความร้อนที่อยู่ในรูปของกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) (Cengel, 2003; p25-26) ซึ่งมีรูปสมการเป็น

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = \bar{h}A_s(T_s - T_\infty) \quad (4.3)$$

- เมื่อ \dot{Q}_{conv} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน (หน่วย W)
 \bar{h} คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย (Average convective heat transfer) ที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหลกับวัตถุ (หน่วย W/m.K)
 A_s คือ พื้นที่ผิวของวัตถุที่สัมผัสกับของไหล (หน่วย m)
 T_s คือ อุณหภูมิที่ผิวของวัตถุ (หน่วย K)
 T_∞ คือ อุณหภูมิของของไหลอิสระที่อยู่ห่างออกไปจากผิววัตถุมากๆ (หน่วย K)

4.1.3 การแผ่รังสีความร้อน

การถ่ายเทความร้อน โดยการแผ่รังสีความร้อน ไม่จำเป็นต้องมีตัวกลางเลย พลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีนั้นจะเคลื่อนที่ไปในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความเร็วเท่ากับความเร็วของแสง (Cengel, 2003; p27-29) การหาอัตราการแผ่รังสีความร้อนสุทธิระหว่างพื้นผิวต่างๆ เป็นเรื่องที่ซับซ้อนมาก อย่างไรก็ตามวิธีที่พบบ่อยในทางปฏิบัตินั้นมักเกี่ยวกับอัตราการแลกเปลี่ยนสุทธิระหว่างพื้นผิวเล็กๆ กับพื้นผิวขนาดใหญ่ซึ่งครอบคลุมผิวเล็กๆ ไว้ทั้งหมด ในกรณีนี้การส่งถ่ายรังสีความร้อนสุทธิระหว่างพื้นผิวกับสิ่งแวดล้อมคำนวณได้จาก

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \sigma \varepsilon A_s (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (4.4)$$

- เมื่อ \dot{Q}_{rad} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสี (หน่วย W)
 σ คือ ค่าคงที่สเตฟาน-โบลทซ์มันน์ (Stefan-Boltzmann constant) มีค่าเท่ากับ $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$
 ε คือ ค่าการแผ่รังสี (Emittance) ของวัตถุเทา มีค่าเท่ากับอัตราส่วนของความร้อนจากการแผ่รังสีของวัตถุเท่ากับวัตถุดำเมื่อมีอุณหภูมิเท่ากัน ($1 \leq \varepsilon \leq 1$)

4.1.4 การพาความร้อนตามธรรมชาติ

การเคลื่อนที่ของของไหลเนื่องจากแรงลอยตัวในของไหลเป็นผลเนื่องมาจากความแตกต่างของความหนาแน่นในของไหล (Density gradient) และความแตกต่างของความหนาแน่นนี้เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิในของไหล การพาความร้อนด้วยการไหลชนิดนี้เรียกว่า การพาความร้อนตามธรรมชาติ (Natural หรือ Free convection) (Cengel, 2003; p466-467) สำหรับระบบหินถมในงานวิจัยนี้ หินได้รับพลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น ในขณะที่ความร้อนในมวลหินจะถ่ายเทให้อากาศโดยรอบ ซึ่งทำให้อากาศมีอุณหภูมิสูงขึ้นด้วย

ถ้าอากาศในระบบไม่มีการไหล การถ่ายเทความร้อนจากหินสู่อากาศจะเป็นการนำความร้อน เมื่ออุณหภูมิของอากาศสูงขึ้น ความหนาแน่นของอากาศจะลดลง แรงลอยตัวทำให้อากาศที่ร้อนลอยขึ้นสู่ด้านบนที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า นั่นคืออากาศรอบๆ หินมีการเคลื่อนที่และพาเอาความร้อนจากหินไปด้วย ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) ประเมินได้จากความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องคือ

$$h = \left(\frac{k}{\delta} \right) \text{Nu} \quad (4.5)$$

เมื่อ Nu คือ นัสเซลท์นัมเบอร์ (Nusselt Number) ซึ่งจะมีค่าแตกต่างกันออกไปตามชนิดของพื้นผิว โดยมีนักวิจัยได้เสนอความสัมพันธ์จากการทดลองไว้ดังตารางที่ 4.1

δ คือ Characteristic length ของวัตถุ สำหรับวัตถุทรงกลมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ D จะมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{2} \pi D$ หรือสามารถเลือกค่าได้จากตารางที่ 4.1

โดยที่

$$\text{Nu} = 2 + \frac{0.589 \text{Ra}^{1/4}}{\left[1 + \left(\frac{0.469}{\text{Pr}} \right)^{9/16} \right]^{4/9}}, \text{ (สำหรับวัตถุทรงกลม)} \quad (4.6)$$

เมื่อ Ra คือ ราเลย์นัมเบอร์ (Rayleigh Number) $\leq 10^{11}$ (เมื่อ $\text{Pr} \geq 0.7$)

Pr คือ พรันด์ท์นัมเบอร์ (Prandtl Number) ของอากาศแห้งที่ความดันบรรยากาศ มีค่าเท่ากับ 0.71 ในช่วงอุณหภูมิ 0 ถึง 300 องศาเซลเซียส (Raznjevic, 1976)

และ

$$\text{Ra} = \text{Gr}_L \text{Pr} = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)\delta^3}{\nu^2} \cdot \text{Pr} \quad (4.7)$$

เมื่อ Gr_L คือ Grashof number

ν คือ ค่าความหนืดจลศาสตร์ (Kinematics viscosity) ของอากาศ มีค่าเท่ากับ 15.7×10^{-6} ถึง $19.4 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ในช่วงอุณหภูมิ 20 ถึง 60 องศาเซลเซียส (Raznjevic, 1976)

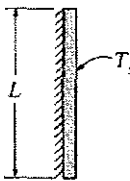
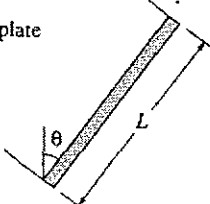

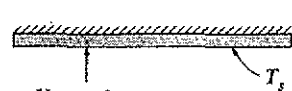
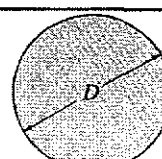
β คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของอากาศ

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกมีค่าเท่ากับ 9.807 m/s^2

โดยที่

$$\text{Gr}_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)\delta^3}{\nu^2} \quad \text{และ} \quad \beta = \frac{1}{T_c(\text{K})} = \frac{1}{T_c(^{\circ}\text{C}) + 273} \quad (4.8)$$

ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์เชิงทดลองสำหรับค่า Nu เฉลี่ยของการพาความร้อนแบบธรรมชาติ
(Cengel, 1998; p.418)

Geometry	Characteristic length δ	Range of Ra	Nu
Vertical plate 	L	10^4-10^9 10^9-10^{13} Entire range	$Nu = 0.59 Ra^{1/4}$ $Nu = 0.1 Ra^{1/3}$ $Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra^{1/6}}{(1 + (0.492/Pr)^{9/16})^{4/27}} \right\}^2$ (complex but more accurate)
Inclined plate 	L		Use vertical plate equations as a first degree of approximation. Replace g by $g \cos \theta$ for $Ra < 10^9$
Horizontal plate (Surface area A and perimeter p) (a) Upper surface of a hot plate (or lower surface of a cold plate)  (b) Lower surface of a hot plate (or upper surface of a cold plate) 	A/p	10^4-10^7 10^7-10^{11} 10^5-10^{11}	$Nu = 0.54 Ra^{1/4}$ $Nu = 0.15 Ra^{1/3}$ $Nu = 0.27 Ra^{1/4}$
Sphere 	$\frac{1}{2} \pi D$	$Ra \leq 10^{11}$ $(Pr \geq 0.7)$	$Nu = 2 + \frac{0.589 Ra^{1/4}}{(1 + (0.469/Pr)^{9/16})^{4/9}}$

4.1.5 การเปล่งรังสีความร้อน

กลไกของการเปล่งรังสีความร้อน (Thermal emission) เกี่ยวข้องกับพลังงานเนื่องจากการสั่นและการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่ประกอบกันเป็นสสาร ซึ่งเป็นผลจากอุณหภูมิภายในสสาร จึงกล่าวได้ว่าการเปล่งรังสีความร้อนเกี่ยวพันกับสภาพทางความร้อนในสสาร สำหรับการแผ่รังสีความร้อนเป็นกระบวนการที่ยู่ยากมาก เนื่องจากค่าสมบัติต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการแผ่รังสีนั้น ไม่คงที่ ขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น สัมประสิทธิ์การแผ่รังสี (ϵ) จะมีค่าได้หลายค่าในหนึ่งพื้นผิวขึ้นอยู่กับช่วงความยาวคลื่นที่จะเปล่งรังสีออกและขึ้นกับมุมของการแผ่รังสีด้วย แต่ในทางวิศวกรรมจะพิจารณาเป็นค่าเฉลี่ยและให้เป็นค่าคงที่ เมื่อรังสีความร้อนไปกระทบกับพื้นผิวใดๆ ส่วนหนึ่งของรังสีจะถูกเก็บเอาไว้ ส่วนหนึ่งถูกสะท้อนกลับไป และส่วนที่เหลือจะถูกส่งผ่านทะลุไป (รูปที่ 4.1) ดังนั้นจึงเรียกสัมประสิทธิ์ α , ρ และ τ ว่า Absorbivity, Reflectivity และ Transmissivity ตามลำดับ (Cengel, 2003; p.582) โดยทั้งสามค่านี้สำหรับวัตถุโปร่งแสง (Semitransparent) มีความสัมพันธ์เป็น

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (4.9)$$

และสำหรับวัตถุทึบแสง เนื่องจากไม่มีการส่งผ่านของรังสีความร้อน ($\tau = 0$) ดังนั้นความสัมพันธ์จึงลดรูปเป็น

$$\alpha + \rho = 1 \quad (4.10)$$

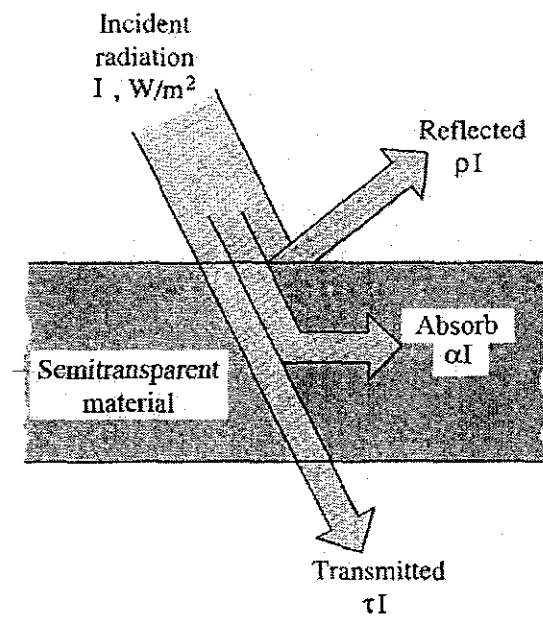
ค่า α , ρ และ τ จะเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับทิศทางและความยาวคลื่นเช่นเดียวกับ ϵ สัมประสิทธิ์ สำหรับการสะท้อนกลับของรังสีนั้นจะมีลักษณะเป็นไปดังรูปที่ 4.2 ซึ่งสำหรับวัตถุที่มีผิวขรุขระในทางวิศวกรรมจะประมาณให้เป็นแบบการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งหมายถึงการเปล่งรังสีความร้อนจะไม่ขึ้นกับทิศทาง ทำให้การคำนวณทำได้สะดวกขึ้น ด้วยการประมาณนี้จึงสามารถคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนได้ง่ายขึ้นดังแสดงไว้แล้วในสมการ (4.4)

4.2 สมดุลพลังงานในระบบ

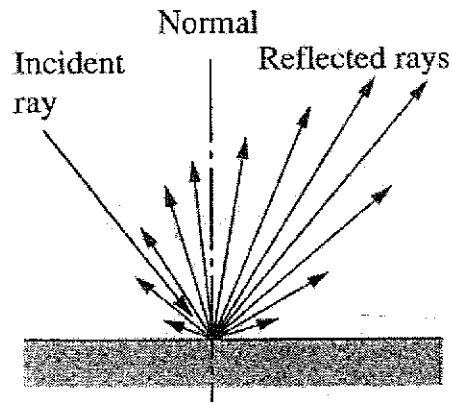
ระบบทางเทอร์โมไดนามิกส์สามารถแบ่งเป็น 3 ประเภท (Cengel, 1997; p.8-9) คือ

1) ระบบปิดหรือระบบควบคุมมวล (Close system or control mass) คือ ระบบที่มวลของสารในระบบคงที่และมวลเหล่านั้นจะอยู่ภายในระบบตลอดเวลา จะมีเพียงแค่พลังงานเท่านั้นที่สามารถเคลื่อนที่ผ่านเข้าหรือออกจากระบบได้

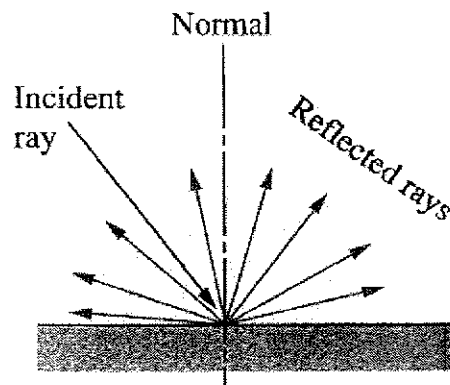
2) ระบบเปิดหรือปริมาตรควบคุม (Open system or control volume) คือ ระบบที่ทั้งมวลและพลังงานสามารถเคลื่อนที่ข้ามเส้นขอบเขต ขอบเขตของระบบแบบนี้นิยมเรียกว่าพื้นผิวควบคุม (Control surface)



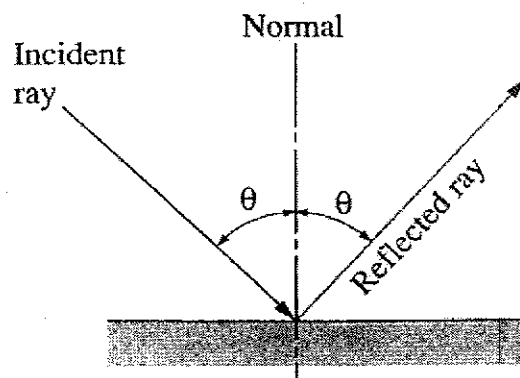
รูปที่ 4.1 ลักษณะการสะท้อน การดูดกลืน และการส่งผ่านพลังงานจากแสงของวัสดุใส (Cengel, 2003)



(a) Actual



(b) Diffuse



(c) Specular

รูปที่ 4.2 ลักษณะการสะท้อนรังสีจากแสงอาทิตย์ (Cengel, 1998)

3) ระบบ โดดเดี่ยว (Isolated system) คือ ระบบที่ไม่มีมีการถ่ายโอนของมวลและพลังงานระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อมเลย นั่นคือในระบบเช่นนี้ทั้งพลังงานและมวลภายในต้องคงที่

สำหรับการเปลี่ยนแปลงของพลังงาน (ΔE) ในระบบเปิด (Open system หรือ Control volume) (รูปที่ 4.3) เกิดจากการเคลื่อนที่ของมวลและพลังงานข้ามเส้นขอบเขตของระบบ (Boundary) หรือที่เรียกว่าผิวควบคุม (Control surface) พลังงานที่ข้ามขอบเขตของระบบมีค่าเท่ากับผลรวมของการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อน (ΔQ) และการเปลี่ยนแปลงงานสุทธิ (ΔW) ส่วนการเปลี่ยนแปลงพลังงานที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของมวลผ่านขอบเขตของระบบ ($\Delta\theta$) มีค่าเท่ากับผลต่างของพลังงานสติกที่เข้า ($\Delta\theta_{in}$) และออก ($\Delta\theta_{out}$) จากระบบ ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์คือ กฎการอนุรักษ์พลังงาน (Cengel, 1997; p.151) ได้ดังนี้

$$\Delta E = \Delta Q + \Delta W + \Delta\theta = \Delta Q + \Delta W + \sum \theta_{in} - \sum \theta_{out} \quad (4.11)$$

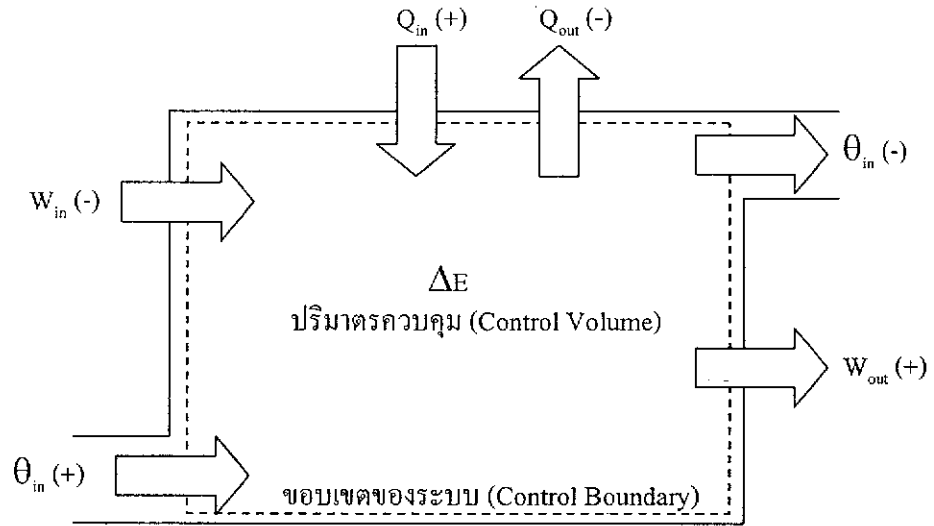
สำหรับการนำความร้อนภายใต้สภาวะที่ยังไม่คงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงแบบสภาวะไม่คงตัว (Unsteady state) สมการ (4.11) สามารถแสดงได้ดังนี้ (Sonntag, et al., 1998; p.145)

$$\frac{dE}{dt} = \frac{d(mCT)}{dt} = \dot{Q} + \dot{W} + \sum \dot{m}_i \theta_{in} - \sum \dot{m}_o \theta_{out} \quad (4.12)$$

เมื่อ \dot{Q} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน (หน่วย W)
 \dot{W} คือ อัตราการถ่ายเทงานในระบบ (หน่วย W)
 \dot{m}_i และ \dot{m}_o คือ อัตราการไหลของมวลเข้าและออกจากระบบต่อหน่วยเวลา (หน่วย kg/s)
 θ_{in} และ θ_{out} คือ พลังงานรวมต่อหน่วยมวล (หน่วย W/kg)

โดยที่
$$\dot{\theta}_{in} = \sum \left(h_i + \frac{v_i^2}{2} + gz_i \right) \dot{m}_i \text{ และ } \dot{\theta}_{out} = \sum \left(h_o + \frac{v_o^2}{2} + gz_o \right) \dot{m}_o \quad (4.13)$$

เมื่อ h_i และ h_o คือ พลังงานเอนทาลปี (Enthalpy) ต่อหน่วยน้ำหนักที่ไหลเข้าและออกจากระบบ (หน่วย J/kg)
 v_i และ v_o คือ ความเร็วในการไหลของมวลที่ทางเข้าและทางออกจากระบบ (หน่วย m/s)
 g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกมีค่าเท่ากับ 9.807 m/s^2
 z_i และ z_o คือ ความสูงจากจุดอ้างอิงถึงทางเข้าและทางออกของระบบ (หน่วย m)



รูปที่ 4.3 การถ่ายเทพลังงานในระบบเปิด (Open system หรือ Control volume)
(ดัดแปลงจาก Cengel, 1997)

ถ้าสมมติให้ระบบมีอัตราการไหล (\dot{m}) และความเร็วในการไหล (v) ของมวลที่ทางเข้า และทางออกจากระบบเท่ากันและระบบไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงของพลังงานสถิตที่แฝงมากับมวลสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\dot{\theta}_{in} - \dot{\theta}_{out} = \sum h_i \dot{m}_i - \sum h_o \dot{m}_o = \dot{m}(h_o - h_i) = \dot{m}C_p \Delta T \quad (4.14)$$

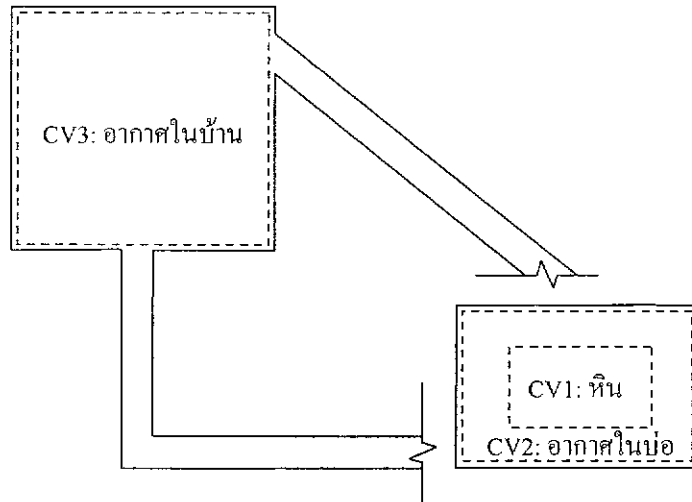
เมื่อ ΔT คือ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในระบบ (หน่วย K) และ
 C_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัตถุที่ความดันคงที่ (หน่วย J/kg.K)

4.3 ข้อสมมติฐานเบื้องต้น

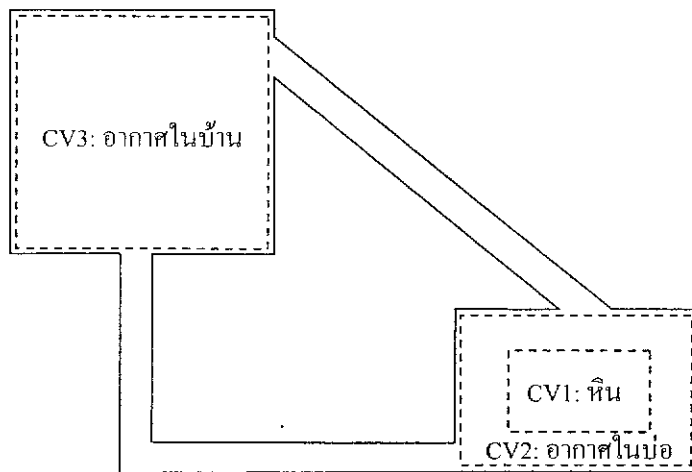
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สร้างโดยอาศัยหลักการสมดุลพลังงาน (Energy balance) กับทุกชิ้นส่วนที่อยู่ในระบบหินถม เนื่องจากระบบส่วนใหญ่ประกอบด้วยหลายระบบย่อยและมีการถ่ายเทความร้อนทั้งแบบการพาความร้อนและการแผ่รังสีเข้ามาเกี่ยวข้อง เพื่อความสะดวกจึงต้องมีการตัดความยุ่งยากบางประการออก ดังนั้นแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ระบบของหินถมจะสร้างภายใต้สมมติฐานหลักต่อไปนี้

- 1) ไม่คำนึงถึงผลของการดูดซับรังสี (Absorbitivity) ของอากาศเนื่องจากมีค่าน้อยมาก
- 2) พลังงานจากแสงอาทิตย์ตกกระทบหินในแนวตั้งฉากเสมอ ไม่พิจารณาผลของการเกิดเงาบังจากการที่ดวงอาทิตย์เปลี่ยนมุม
- 3) สมมติให้อากาศไม่มีความชื้นอยู่เลย จึงทำให้ไม่ต้องพิจารณาผลของความชื้นในอากาศ
- 4) เมื่อแสงกระทบกับผิววัตถุที่บดแสงจะเกิดการสะท้อนกลับแบบกระจาย (Diffuse) เท่านั้น
- 5) ไม่คิดผลจากการสะท้อนรังสีของดวงอาทิตย์จากวัตถุอื่นที่อยู่รอบข้าง
- 6) ไม่พิจารณาความจุความร้อน (Heat capacity) ของแผ่นปิดและผนัง

สำหรับระบบกักเก็บพลังงานความร้อนและบ้านจำลองในงานวิจัยนี้ถูกพิจารณาแยกย่อยเป็น 3 ส่วน คือ หินถม (CV1) อากาศในบ่อ (CV2) และบ้านจำลอง (CV3) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ระบบย่อยแต่ละส่วนสามารถจำแนกให้เป็นระบบปิดได้ในเวลากลางวันเพราะมวลในระบบคงที่อยู่ตลอดเวลา แต่ในเวลากลางคืนจะมีเพียงระบบหินถมเท่านั้นที่เป็นระบบปิด ส่วนระบบย่อยอีก 2 ส่วนถูกจำแนกให้เป็นระบบเปิดเพราะมีการถ่ายเทมวลเข้าและออกจากระบบ



(ค) การพิจารณาระบบย่อยในเวลากลางวัน



(ข) การพิจารณาระบบย่อยในเวลากลางคืน

รูปที่ 4.4 การจำแนกระบบย่อยในระบบกักเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์และบ้านจำลอง

4.4 การถ่ายเทพลังงานความร้อนในช่วงเวลากลางวัน

ในช่วงเวลากลางวันจะพิจารณาเพียง 2 ส่วน คือ หินถมและอากาศภายในบ่อ สำหรับหินถมในบ่อได้รับพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ (I_s) ความสามารถในการดูดซับพลังงานของหินขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การดูดกลืนพลังงานความร้อน (Thermal absorbtivity, α_p) และมีการกระเจิงของพลังงานแสงออกไปสู่อากาศในบ่อ $[(1-\alpha_p)I_s]$ ส่วนการสูญเสียพลังงานออกจากมวลหินเกิดจากการพาความร้อน (\dot{Q}_{conv,r_c}) และการแผ่รังสีความร้อน (\dot{Q}_{rad,r_c}) ให้กับอากาศในบ่อ และการแผ่รังสีความร้อน (\dot{Q}_{rad,r_s}) ให้กับสิ่งแวดล้อม ส่วนอากาศภายในบ่อได้รับพลังงานที่ถ่ายเทออกจากมวลหิน ($\dot{Q}_{conv,r_c} + \dot{Q}_{rad,r_c}$) และพลังงานที่กระเจิงออกจากหิน โดยที่อากาศในบ่อสูญเสียพลังงานในรูปของการนำความร้อนสู่ดินที่อยู่รอบข้าง ($\dot{Q}_{loss,2}$) และการพาความร้อนผ่านแผ่น Acrylic สู่อากาศด้านนอก ($\dot{Q}_{loss,1}$) รูปที่ 4.5 แสดงการถ่ายเทพลังงานในระบบกักเก็บในช่วงเวลากลางวัน

4.4.1 อุณหภูมิหิน

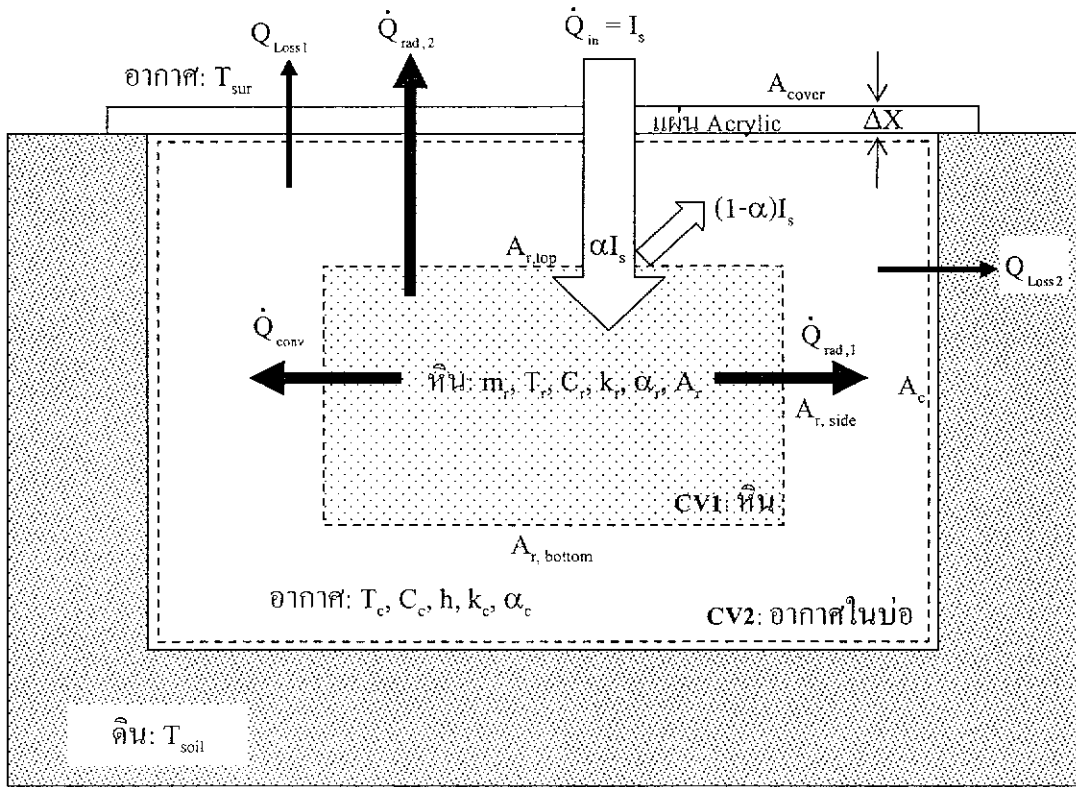
ในหัวข้อนี้จะคำนวณการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของหินในช่วงเวลากลางวันที่ยังมีพลังงานจากแสงอาทิตย์อยู่จนถึงเวลากลางคืนก่อนที่มันจะมีการเปิดต่ออากาศร้อน การเปลี่ยนแปลงพลังงานในมวลหิน (E_{CV1}) มีค่าเท่ากับผลต่างสุทธิของพลังงานความร้อน ($\sum \dot{Q}_{in}$) ที่ระบบได้รับจากแสงอาทิตย์ กับการสูญเสียความร้อนสุทธิในมวลหิน ($\sum \dot{Q}_{out}$) จากการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งสามารถแสดงเป็นสมการพลังงานได้ดังนี้

$$\Delta E_{CV1} = \sum Q_{in} - \sum Q_{out} = Q_{in,sun} - (Q_{rad,r_c} + Q_{rad,c_s} + Q_{con,r_s}) \quad (4.15)$$

สมการ (4.15) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการการเปลี่ยนแปลงแบบสภาวะชั่วคราว (Transient state) หรือสภาวะไม่คงตัว (Unsteady state) คือ

$$\frac{dE_{CV1}}{dt} = \dot{Q}_{in,sun} - \dot{Q}_{rad,r_c} - \dot{Q}_{rad,c_s} - \dot{Q}_{con,r_s} \quad (4.16)$$

เมื่อ $\dot{Q}_{in,sun}$ คือ ความร้อนที่หินได้รับจากดวงอาทิตย์ \dot{Q}_{rad,r_c} คือ ความร้อนที่หินสูญเสียให้กับอากาศในบ่อจากการแผ่รังสี \dot{Q}_{rad,r_s} คือ ความร้อนที่หินสูญเสียให้กับสิ่งแวดล้อมนอกบ่อจากการแผ่รังสี และ \dot{Q}_{con,r_s} คือ ความร้อนที่หินสูญเสียให้กับอากาศในบ่อจากการพาความร้อนแบบอิสระ โดยสมมติว่าอุณหภูมิของผิวบ่อเท่ากับอุณหภูมิอากาศในบ่อ เพื่อให้คำนวณการแผ่รังสีจากหินสู่อากาศในบ่อได้ง่ายขึ้น สมการ (4.16) สามารถแจกแจงโดยละเอียด เมื่อมวลและค่าความจุความร้อนเป็นค่าคงที่ได้ดังนี้



รูปที่ 4.5 การถ่ายเทพลังงานในระบบหินดินและอากาศในบ่อช่วงเวลากลางวัน

$$m_r C_r \frac{dT_r}{dt} = \alpha_r I_s A_{r,top} - \sigma \varepsilon_r A_{rad} (T_r^4 - T_c^4) - \sigma \varepsilon_r A_{r,top} (T_r^4 - T_{sur}^4) - h_r A_r (T_r - T_c) \quad (4.17)$$

- เมื่อ
- m_r คือ มวลของหินในระบบกักเก็บพลังงาน (หน่วย kg)
 - C_r คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของหิน (หน่วย J/kg.K)
 - α_r คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนพลังงานความร้อนของหิน
 - I_s คือ พลักซ์ความร้อนจากแสงอาทิตย์ต่อหน่วยพื้นที่ (หน่วย W/m²)
 - $A_{r,top}$ คือ พื้นที่รับพลังงานจากแสงอาทิตย์และพื้นที่ผิวในการแผ่รังสีความร้อนของหินด้านบน (หน่วย m²)
 - σ คือ ค่าคงที่สเตฟาน-โบลทซ์มันน์ (Stefan-Boltzmann constant) มีค่าเท่ากับ $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$
 - ε_r คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสี (Emissivity) ของหิน
 - A_{rad} คือ พื้นที่ผิวของหินด้านข้างและด้านล่างที่แผ่รังสีความร้อน (หน่วย m²)
 - T_r คือ อุณหภูมิของหิน (หน่วย K)
 - T_c คือ อุณหภูมิของอากาศในบ่อ (หน่วย K)
 - T_{sur} คือ อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม (หน่วย K)
 - T_r^n คือ อุณหภูมิของหินที่ Δt วินาที นั่นคือที่เวลา n ถัดไป (หน่วย K)
 - h_r คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างอากาศในบ่อกับหิน (หน่วย W/m².K)
 - A_r คือ พื้นที่ผิวของหินสุทธิ (ทุกก้อนที่อยู่ในระบบ) (หน่วย m²)

เนื่องจากการอินทิเกรตสมการ (4.17) ด้วยวิธีทางแคลคูลัสนั้นทำได้ยาก จึงทำการหาผลลัพธ์ของสมการนี้ด้วยวิธีเชิงตัวเลขโดยใช้วิธีของออยเลอร์ (Chapra and Canale, 2002; Chapra, 2005) ซึ่งเขียนใหม่ได้เป็น

$$m_r C_r \left(\frac{T_r^n - T_r}{\Delta t} \right) = \alpha_r I_s A_{r,top} - \sigma \varepsilon_r A_{rad} (T_r^4 - T_c^4) - \sigma \varepsilon_r A_{r,top} (T_r^4 - T_{sur}^4) - h_r A_r (T_r - T_c) \quad (4.18)$$

เมื่อ Δt คือ ช่วงการเปลี่ยนแปลงเวลา (หน่วยเป็นวินาที) ดังนั้นสมการที่ (4.18) สามารถจัดใหม่ให้อยู่ในรูปอุณหภูมิของหินที่เวลาใหม่หรือเวลาถัดไป (T_r^n) ได้เป็น

$$T_r^n = T_r + \frac{\Delta t}{m_r C_r} \left[\alpha_r I_s A_{r,top} - \sigma \epsilon_r A_{rad} (T_r^4 - T_c^4) - \sigma \epsilon_r A_{r,top} (T_r^4 - T_{sur}^4) - h_r A_r (T_r - T_c) \right] \quad (4.19)$$

โดยทั่วไป T_r^n ในสมการ (4.19) ซึ่งเป็นอุณหภูมิของหินที่เวลาใหม่จะเขียนแทนเป็น $T_{r(i+1)}$ และ T_r ซึ่งเป็นอุณหภูมิของหินที่เวลาปัจจุบันจะเขียนแทนเป็น $T_{r(i)}$ แต่เพื่อความสะดวกในการเขียนตัวแปรในที่นี้จะกำหนด T_r^n แทนค่าที่เวลาใหม่และ T_r แทนค่าที่เวลาปัจจุบันเท่านั้น

สมมติให้ระบบกักเก็บพลังงานมีการพาความร้อนแบบอิสระ (Free convection) และหินเป็นทรงกลมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ D (หน่วย m) ดังนั้นสัมประสิทธิ์พาความร้อน (Convective heat transfer coefficient, h_r) สามารถคำนวณได้โดยอาศัยความสัมพันธ์จากสมการ (4.5) ถึง (4.8) และตารางที่ 4.1

4.4.2 อุณหภูมิอากาศภายในบ่อ

จากรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าพลังงานที่อากาศภายในบ่อได้รับมีอยู่หลายส่วน ทั้งความร้อนจากดวงอาทิตย์ที่สะท้อนกลับจากหิน ความร้อนที่หินสูญเสียจะเป็นความร้อนเข้าของอากาศในบ่อ จากการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนของหิน ส่วนการสูญเสียของบ่อเกิดจากการสูญเสียพลังงานจากการพาความร้อนที่ผิวบนของระบบกักเก็บ และการสูญเสียจากการนำความร้อนให้กับดินที่ผิวของบ่อ ดังนั้นสมดุลพลังงานของอากาศในบ่อ (E_{cv2}) สามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{dE_{cv2}}{dt} = \dot{Q}_{in} + \dot{Q}_{rad,r,c} + \dot{Q}_{conv,r,c} - \dot{Q}_{loss1} - \dot{Q}_{loss2} \quad (4.20)$$

เมื่อ \dot{Q}_{loss1} และ \dot{Q}_{loss2} เป็นการสูญเสียพลังงานความร้อนเนื่องจากการพาความร้อนบริเวณแผ่น Acrylic และการนำความร้อนจากอากาศในบ่อไปสู่ดินรอบบ่อ ซึ่งสามารถจัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$m_c C_a \frac{dT_c}{dt} = f_{ab} (1 - \alpha_r) I_s A_{r,top} + \sigma \epsilon_r A_{rad} (T_r^4 - T_c^4) + h_r A_r (T_r - T_c) - U_1 A_{acr} (T_c - T_{sur}) - U_2 A_{cham} (T_c - T_{soil}) \quad (4.21)$$

- เมื่อ m_c คือ มวลของอากาศที่อยู่ในบ่อ (หน่วย kg)
 C_a คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ (หน่วย J/kg.K) มีค่าอยู่ระหว่าง 1,012 J/kg.K ถึง 1,017 J/kg.K ในการคำนวณได้สมมติให้คงที่เท่ากับ 1,014 J/kg.K
 f_{ab} คือ แฟกเตอร์การสูญเสียจากการสะท้อนของหิน

- A_{acr} คือ พื้นที่ผิวของแผ่น Acrylic ที่มีการส่งผ่านความร้อน (หน่วย m)
 A_{cham} คือ พื้นที่ผิวด้านข้างและด้านล่างที่ส่งผ่านความร้อน (หน่วย m)
 U_1 คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall Heat Transfer Coefficient) จากอากาศในบ่อผ่านแผ่น Acrylic ไปสู่สิ่งแวดล้อม (หน่วย $W/m^2.K$)
 U_2 คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall coefficient) จากอากาศในบ่อสู่ดินที่เป็นผนังบ่อ (หน่วย $W/m^2.K$)

หรือจัดให้อยู่ในรูปของสมการใหม่ในความสัมพันธ์ของอุณหภูมิของอากาศในบ่อที่เวลาใหม่ได้ดังสมการ ต่อไปนี้

$$T_c^n = T_c + \frac{\Delta t}{m_c C_a} \left[f_{ab} (1 - \alpha_r) I_s A_{r,top} + \sigma \epsilon_r A_{rad} (T_r^4 - T_c^4) + h_r A_r (T_r - T_c) - U_1 A_{acr} (T_c - T_{sur}) - U_2 A_{cham} (T_c - T_{soil}) \right] \quad (4.22)$$

โดยที่ $U_1 = \frac{1}{\frac{1}{h_{i,c}} + \frac{\Delta x}{k_{acr}} + \frac{1}{h_{ex,c}}}$ และ $U_2 = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{\Delta x}{k_{acr}}}$ (4.23)

- และ Δx คือ ความหนาของแผ่น Acrylic (หน่วย m)
 h_i คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศในบ่อ (หน่วย $W/m^2.K$)
 h_{ex} คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศนอกบ่อ (หน่วย $W/m^2.K$)
 k_{acr} คือ ค่าการนำความร้อนของแผ่น Acrylic (หน่วย $W/m^2.K$)

ซึ่งในที่นี้ ค่า $h_{i,c}$ และ $h_{ex,c}$ ประเมินได้จากสมการ (4.5) ถึงสมการ (4.8) และตารางที่ 4.1 สมการ (4.9) สำหรับแผ่นราบที่มีผิวร้อนอยู่ด้านบนและด้านล่างเช่นเดียวกับค่า h_i ซึ่งจะใช้สมการ (4.7) ในตารางที่ 4.1

การคำนวณน้ำหนักของอากาศในระบบสามารถหาได้จากผลคูณระหว่างความหนาแน่นของอากาศ (ρ หน่วย kg/m^3) กับปริมาตรของบ่อ (V) แต่เนื่องจากความหนาแน่นของอากาศมีการเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ กล่าวคืออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความหนาแน่นของอากาศจะลดลง ซึ่งความหนาแน่นของอากาศมีค่าลดลงจาก $1.197 kg/m^3$ ที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส เหลือเท่ากับ $1.054 kg/m^3$ ที่อุณหภูมิ 62 องศาเซลเซียส ซึ่งจะเห็นได้ถึงความหนาแน่นของอากาศมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้นจึงสมมติให้คงที่ได้เท่ากับ $1.103 kg/m^3$

4.5 การถ่ายเทพลังงานความร้อนในช่วงเวลากลางคืน

ระบบถูกพิจารณาเป็น 3 ส่วน คือ หินถม อากาศในบ่อ และอากาศในบ้าน โดยที่พลังงานจากแสงอาทิตย์จะมีค่าเป็นศูนย์ พลังงานที่มีการถ่ายเทระหว่างอากาศในบ่อและอากาศในบ้านเป็นพลังงานที่ถ่ายเทผ่านมวลของอากาศร้อนที่อยู่ในบ่อสู่บ้านจำลอง โดยอาศัยท่ออากาศร้อน รูปที่ 4.6 แสดงการถ่ายเทพลังงานความร้อนระหว่างระบบย่อยที่เป็นหินถม อากาศในบ่อ และอากาศในบ้านจำลอง

4.5.1 อุณหภูมิหิน

การพิจารณาการถ่ายเทพลังงานในระบบหินถมสามารถกระทำได้เช่นเดียวกับเวลากลางวัน แต่มีความแตกต่างกันที่เวลากลางคืนจะไม่มีแหล่งพลังงานจากแสงอาทิตย์ และในเวลากลางคืนจะไม่มี การสูญเสียพลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อม เนื่องจากสมมติว่าในเวลากลางคืนจะมีการปิดบ่อด้วยแผ่นฉนวนกันความร้อนไว้ ดังนั้นสมการ (4.6) สามารถเขียนได้เป็นสมการ (4.17)

$$\frac{dE_{cv1}}{dt} = -\dot{Q}_{rad,r,c} - \dot{Q}_{conv,r,c} \quad (4.24)$$

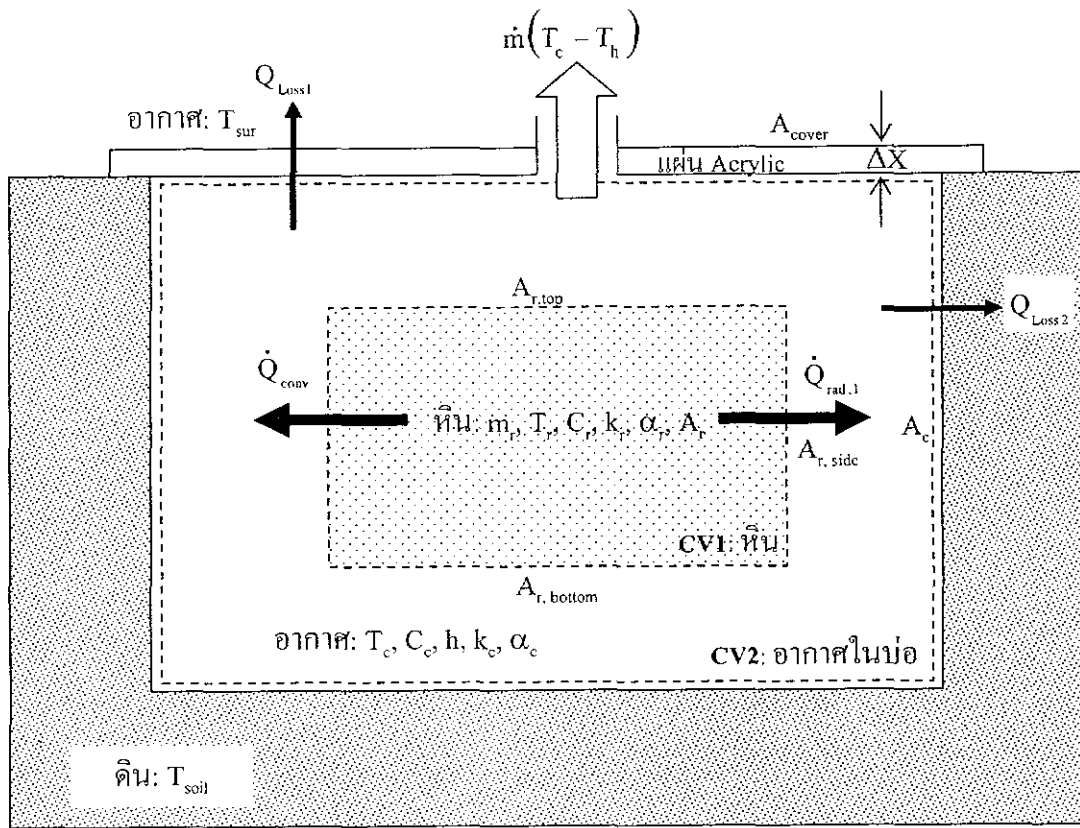
$$m_r C_r \frac{dT_r}{dt} = -\dot{Q}_{rad,r,c} - \dot{Q}_{conv,r,c} \quad (4.25)$$

$$m_r C_r \left(\frac{T_r^n - T_r}{\Delta t} \right) = -\sigma \epsilon_r A_{rad} (T_r^4 - T_c^4) - h_r A_r (T_r - T_c) \quad (4.26)$$

$$T_r^n = T_r + \frac{\Delta t}{m_r C_r} \left[-\sigma \epsilon_r A_{rad} (T_r^4 - T_c^4) - h_r A_r (T_r - T_c) \right] \quad (4.27)$$

4.5.2 อุณหภูมิอากาศในบ่อ

การเปลี่ยนแปลงพลังงานของอากาศในบ่อช่วงเวลากลางคืนสามารถพิจารณาได้เช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของหินถมตรงที่ไม่มีแหล่งพลังงานจากแสงอาทิตย์ แต่เนื่องจากอากาศในบ่อมีการไหลออกจากระบบสู่บ้านจำลอง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณาการสูญเสียพลังงานของอากาศในบ่อเพิ่มขึ้น คือ พลังงานที่ถ่ายเทออกไปกับมวลที่ไหลออกสู่บ้านจำลอง ($\dot{m} C_a (T_c - T_b)$) สมการ (4.13) สามารถจัดรูปแบบได้เป็น



รูปที่ 4.6 การถ่ายเทพลังงานในระบบหินถมและอากาศในบ่อช่วงเวลากลางคืน

$$\frac{dE_{cv2}}{dt} = \dot{Q}_{rad,r_c} + \dot{Q}_{conv,r_c} - \dot{Q}_{loss,1} - \dot{Q}_{loss,2} - \dot{m}C_a(T_c - T_h) \quad (4.28)$$

$$m_c C_c \frac{dT_c}{dt} = \sigma \varepsilon A_{rad} (T_r^4 - T_c^4) + h_r A_r (T_r - T_c) - U_1 A_{acr} (T_c - T_{sur}) - U_2 A_{cham} (T_c - T_{soil}) - \dot{m} C_a (T_c - T_h) \quad (4.29)$$

$$T_c^n = T_c + \frac{\Delta t}{m_c C_c} \left[\sigma \varepsilon A_{rad} (T_r^4 - T_c^4) + h_r A_r (T_r - T_c) - U_1 A_{acr} (T_c - T_{sur}) - U_2 A_{cham} (T_c - T_{soil}) - \dot{m} C_a (T_c - T_h) \right] \quad (4.30)$$

เมื่อ \dot{m} คืออัตราการไหลของมวลของอากาศร้อนจากบ่อกักเก็บพลังงานสู่อาคาร (หน่วย kg/s) อันเนื่องมาจากผลของปล่องลม (Stack Effect) โดยที่พิจารณาว่าอากาศร้อนจะไหลไปสู่อาคารที่เย็นกว่าในบ้านจำลอง ซึ่ง Bansal and Mather (1993) และ Anderson (1995) เสนอความสัมพันธ์ดังนี้

$$\dot{m} = \rho_c C_D A_p \sqrt{2gH \left(\frac{T_c - T_h}{T_c} \right)} \quad \text{เมื่อ} \quad \rho = \frac{P}{RT_c} \quad (4.31)$$

P คือ ความดันบรรยากาศ มีค่าเท่ากับ 101,300 Pa

C_D คือ Discharge Coefficient มีค่าอยู่ระหว่าง 0.60 ถึง 0.75

R คือ ค่าคงที่ของอากาศ (Gas constant) มีค่าเท่ากับ 287 J/kg.K

C_a คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ (หน่วย J/kg.K)

T_h คือ อุณหภูมิของอากาศในบ้าน (หน่วย K)

A_p คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อ (หน่วย m^2)

H คือ ความสูงของท่อในแนวตั้ง (หน่วย m) ซึ่งวัดที่บริเวณทางออกจากบ่อกักเก็บพลังงานเทียบกับบริเวณทางเข้าสู่อาคาร

4.5.3 อุณหภูมิอากาศภายในบ้าน

บ้านจำลองได้รับพลังงานจากมวลอากาศร้อนที่ไหลเข้ามาสู่อาคารโดยการพาความร้อนอย่างอิสระ ($\dot{m}C_a(T_c - T_h)$) และมีการสูญเสียพลังงานในรูปแบบการพาความร้อนจากอาคารใน

บ้านสูญเสียความร้อน ($\dot{Q}_{\text{loss},3}$) การแผ่รังสีความร้อนจากอากาศในบ้านสูญเสียความร้อน ($\dot{Q}_{\text{loss},4}$) และการรั่วไหล (Leak) โดยสมมติให้มีค่าเท่ากับ 10% ของพลังงานที่ถ่ายเทเท่ากับมวลของอากาศร้อนจากบ่อรูปที่ 4.7 แสดงการถ่ายเทพลังงานภายในบ้านจำลอง โดยที่สมมติให้ไม่มีการไหลของอากาศภายในบ้านจำลองผ่านท่ออากาศเย็นสู่บ่อเก็บพลังงาน และเนื่องจากอากาศภายในบ่อมีอุณหภูมิสูงกว่าอากาศภายในบ้าน ดังนั้นอากาศภายในบ้านจึงไม่สามารถถ่ายเทพลังงานในรูปแบบการพาความร้อนอย่างอิสระสู่ระบบกักเก็บได้ การเปลี่ยนแปลงพลังงานในบ้านจำลองสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการดังนี้

$$\frac{dE_{\text{CV3}}}{dt} = \dot{m}C_a (T_c - T_h) - \dot{Q}_{\text{loss},3} - \dot{Q}_{\text{loss},4} - \text{Leak} \quad (4.32)$$

$$m_h C_a \frac{dT_h}{dt} = \dot{m}C_a (T_c - T_h) - U_h A_h - \sigma \epsilon_h A_h (T_h^4 - T_{\text{sur}}^4) - 0.1 \dot{m}C_a (T_c - T_h) \quad (4.33)$$

$$T_h^n = T_h + \frac{\Delta t}{m_h C_a} \left[\dot{m}C_a (T_c - T_h) - U_h A_h (T_h - T_{\text{sur}}) - \sigma \epsilon_h A_h (T_h^4 - T_{\text{sur}}^4) - 0.1 \dot{m}C_a (T_c - T_h) \right] \quad (4.34)$$

โดยที่

$$U_h = \frac{1}{\frac{1}{h_{i,h}} + \frac{\Delta x}{k_w} + \frac{1}{h_{\text{ex},h}}} \quad (4.35)$$

U_h คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวม (Overall heat transfer coefficient) จากอากาศในบ้านผ่านผนังไปสู่สิ่งแวดล้อม (หน่วย $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)

m_h คือ มวลของอากาศที่อยู่ในบ้าน (หน่วย kg)

$h_{i,h}$ คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในบ่อ (หน่วย $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)

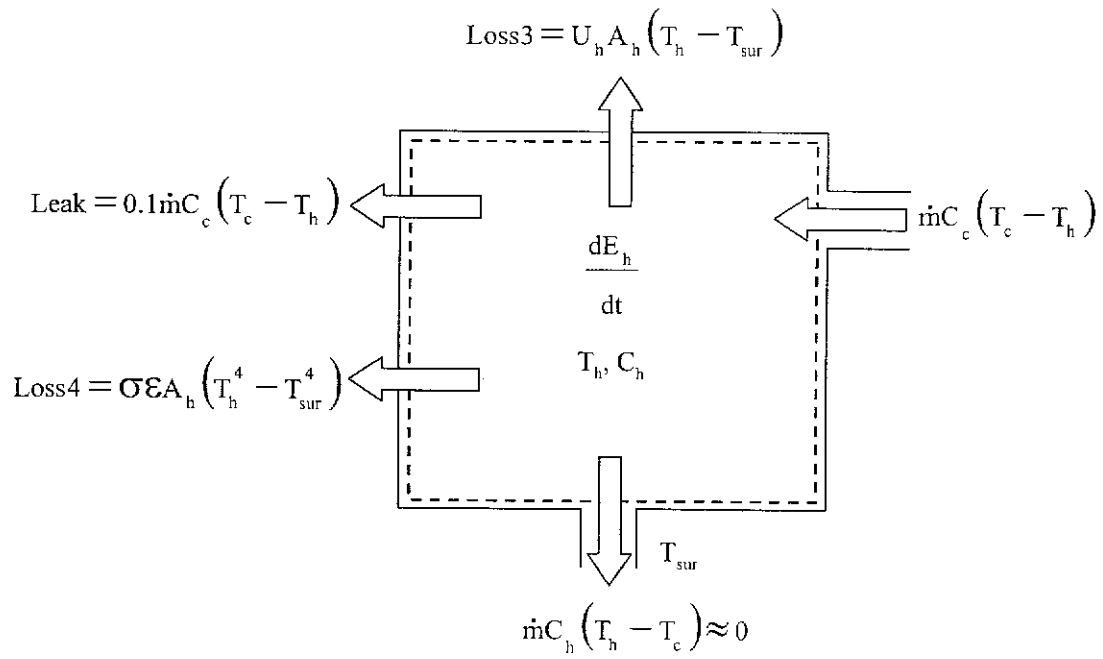
$h_{\text{ex},h}$ คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายนอกบ่อ (หน่วย $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)

k_w คือ ค่าการนำความร้อนของผนังบ้าน (หน่วย $\text{W/m} \cdot \text{K}$)

A_h คือ พื้นที่ผิวของบ้าน ที่มีการส่งผ่านความร้อน (หน่วย m^2)

Δx คือ ความหนาของผนังบ้าน (หน่วย m)

สำหรับค่า $h_{i,h}$ และ $h_{\text{ex},h}$ ประเมินได้จากตารางที่ 1 และใช้สมการ 4.5 และ 4.6



รูปที่ 4.7 การถ่ายเทพลังงานความร้อนภายในบ้านจำลอง

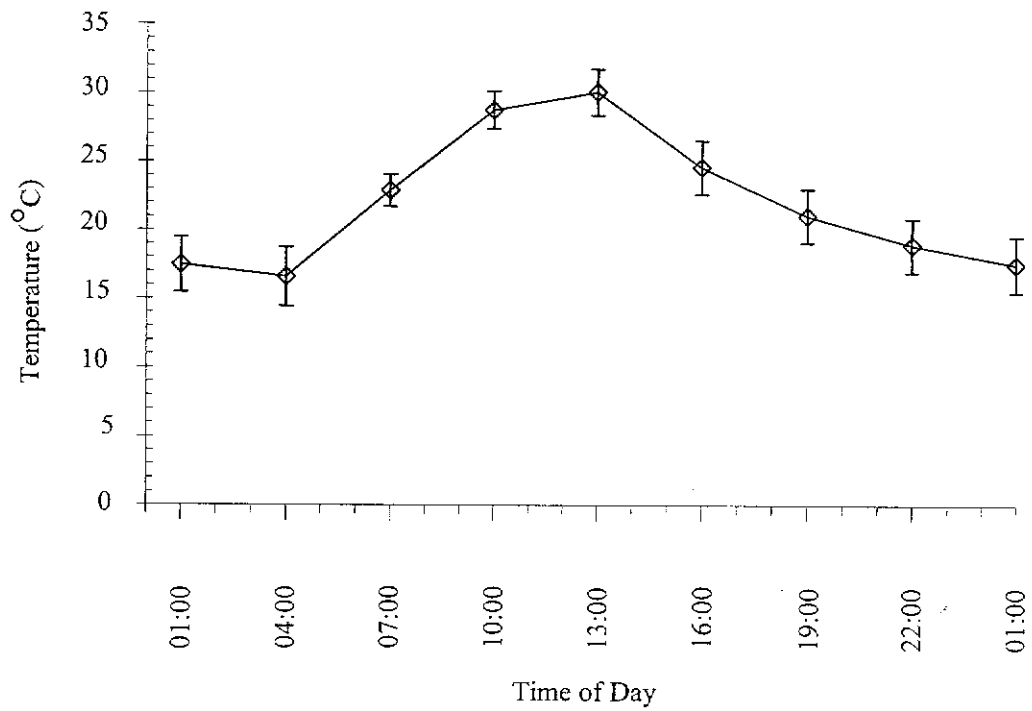
4.6 การพัฒนาคอมพิวเตอร์โปรแกรม

โปรแกรมการวิเคราะห์ถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้โปรแกรม MATLAB7 ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความสะดวกและรวดเร็วในการคำนวณระบบกักเก็บพลังงานและบ้านจำลอง รูปแบบการคำนวณของโปรแกรมถูกจำกัดการใช้งานเฉพาะระบบที่มีการจัดรูปแบบเป็นไปตามที่ออกแบบไว้ในงานวิจัยนี้เท่านั้น (รูปที่ 4.4) แต่ก็สามารถเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ของตัวแปรในระบบได้หลากหลาย เช่น ชนิดของหิน ขนาดของก้อนหิน น้ำหนักของหิน ขนาดของบ่อกักเก็บพลังงาน ขนาดของท่อ ความสูงของท่อ ขนาดของบ้าน เป็นต้น

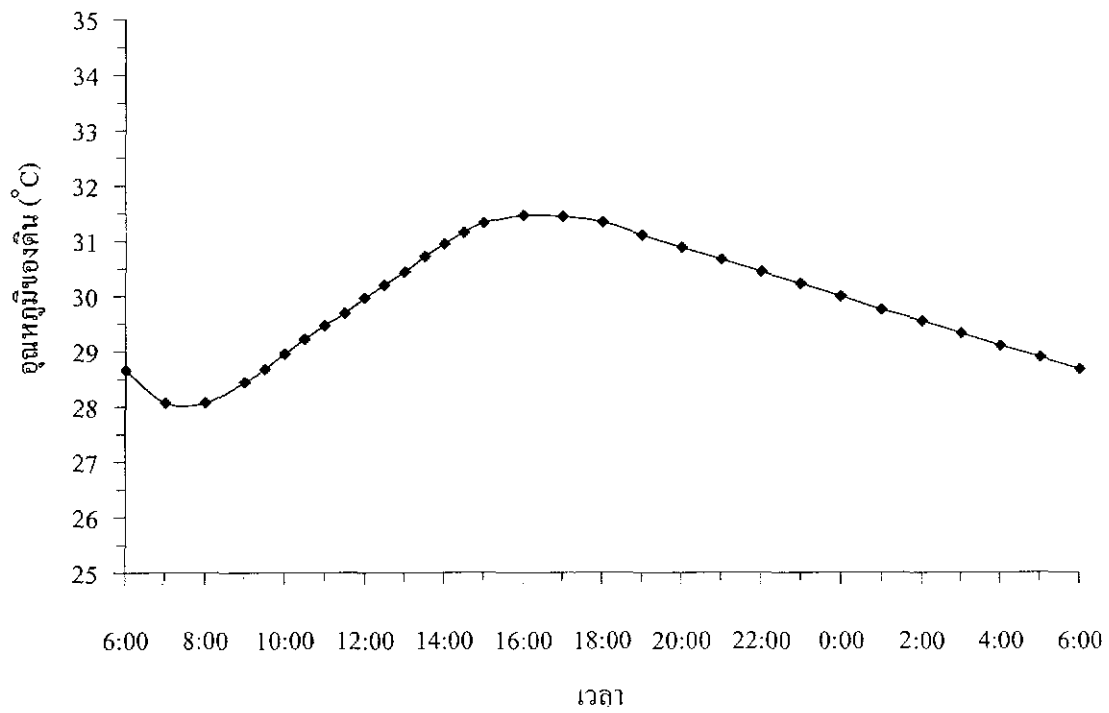
สมการที่ใช้ในคำนวณได้ถูกวิเคราะห์ไว้แล้วในหัวข้อ 4.4 ข้อมูลพื้นฐานที่ป้อนลงในโปรแกรมการคำนวณคือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นข้อมูลทางสถิติช่วงปี พ.ศ. 2545 ถึง 2547 ที่ตรวจวัดจริงในจังหวัดนครราชสีมา (รูปที่ 4.8) อุณหภูมิดินซึ่งเป็นข้อมูลที่ตรวจวัดในพื้นที่จริง (รูปที่ 4.9) และพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นข้อมูลจากการคำนวณด้วยสมการที่อยู่ภายใต้สมมติฐานที่ว่าพลังงานที่ส่งมายังผิวโลกไม่มีการสะท้อนกลับด้วยเมฆ (รูปที่ 4.10) ส่วนข้อมูลเฉพาะที่จะป้อนลงในโปรแกรมเป็นค่าคงที่เกี่ยวกับคุณลักษณะและคุณสมบัติด้านอุณหภูมิของหินกักเก็บพลังงาน บ่อกักเก็บพลังงาน และบ้านจำลอง

ในการคำนวณสามารถพิจารณาตัวแปรเพื่อศึกษาผลกระทบต่อารเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในระบบดังนี้

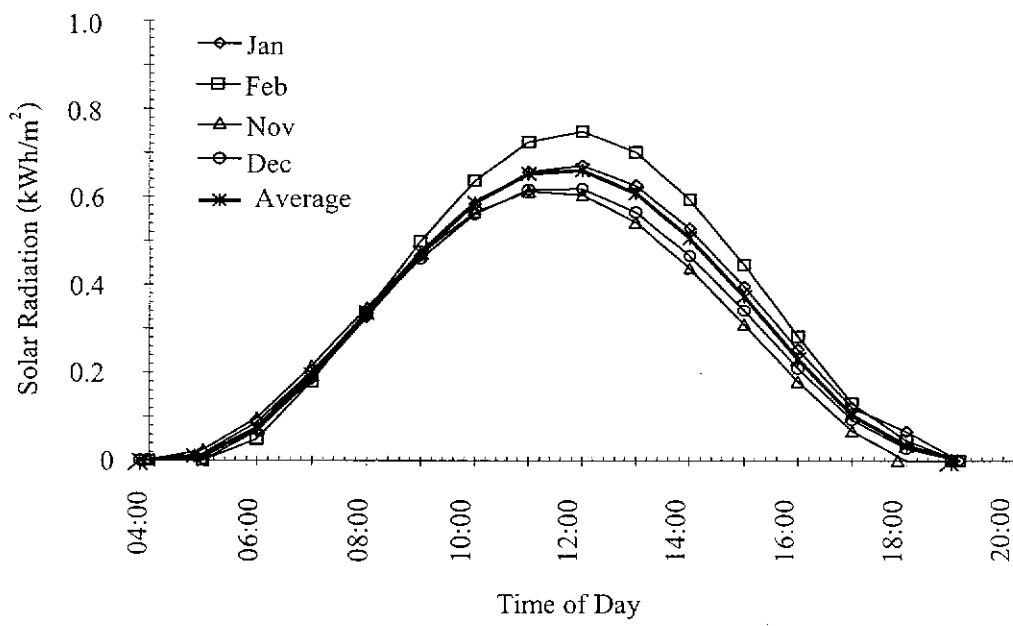
- 1) หินถม ชนิดของหิน (เป็นตัวแปรที่อยู่ในรูปของค่าความจุความร้อน, C_p) ขนาดและจำนวนก้อนที่ใช้สำหรับกักเก็บพลังงาน (เป็นตัวแปรที่อยู่ในรูปมวลของหิน, m , และพื้นที่ผิวทุกก้อนรวมกัน, A_p)
- 2) การจัดวางหินถม ขนาดของหินถม (กว้าง×ยาว×ลึก) ซึ่งจะนำไปคำนวณพื้นที่การแผ่รังสีความร้อนด้านข้าง 4 ด้าน และด้านล่าง 1 ด้าน มีค่าเท่ากับ $[2(\text{กว้าง}+\text{ยาว})\times\text{ลึก}+(\text{กว้าง}\times\text{ยาว})]$ และพื้นที่ผิวรับพลังงานแสง (กว้าง×ยาว)
- 3) บ่อกักเก็บพลังงาน ขนาดของบ่อ (กว้าง×ยาว×สูง) ซึ่งจะนำไปคำนวณน้ำหนักของอากาศในบ่อกักเก็บพลังงาน
- 4) ท่ออากาศร้อน ขนาดของท่อและความสูงของท่อ ซึ่งจะนำไปคำนวณอัตราการไหลของอากาศร้อนและ
- 5) บ้านจำลอง ขนาดของบ้าน (กว้าง×ยาว×สูง) ซึ่งจะนำไปคำนวณน้ำหนักของอากาศในบ้านจำลอง และพื้นที่ที่มีการสูญเสียความร้อนทั้ง 6 ด้าน มีค่าเท่ากับ $2[(\text{กว้าง}+\text{ยาว})\times\text{ลึก}+(\text{กว้าง}\times\text{ยาว})]$



รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิรายวันในฤดูหนาวบริเวณภาคเหนือของประเทศไทย โดยเฉลี่ยข้อมูลอุณหภูมิของจังหวัดเชียงใหม่ ลำพูน ลำปาง และเลย ปี พ.ศ. 2543 ถึง 2547 (ข้อมูลจาก กรมอุตุนิยมวิทยา, 2545)



รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของดิน ซึ่งเป็นค่าคงที่ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ต้องกรอกเข้าไป
ในโปรแกรมเพื่อใช้ในการคำนวณ



รูปที่ 4.10 ค่าความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์ในช่วงฤดูหนาวบริเวณจังหวัดนครราชสีมา (Exell and Kumar, 1981)

ผลการคำนวณสามารถแสดงเป็นอุณหภูมิตลอด 24 ชั่วโมง ซึ่งสามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของหิน อากาศในบ่อ และอากาศในบ้านทั้งก่อนและหลังจากเปิดต่ออากาศร้อน การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของหินในเวลากลางวันมีปัจจัยอันเนื่องมาจากพื้นที่รับแสง ชนิดของหิน การจัดวางหินถม การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศในบ่อมีปัจจัยอันเนื่องมาจากพื้นที่ผิวด้านข้างของหินถมที่แผ่รังสีความร้อนมาสู่อากาศ ส่วนอุณหภูมิในบ้านจะขึ้นกับอัตราการไหลของมวลอากาศร้อนเข้ามายังบ้านจำลอง ถ้าท่อมีความสูงเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อุณหภูมิในบ้านเพิ่มสูงขึ้นด้วย

นอกจากนั้นโปรแกรมสามารถใช้ศึกษาความอ่อนไหวของแต่ละตัวแปร (Sensitivity analysis) ต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ตัวแปรดังกล่าวอาจประกอบด้วย ขนาดและชนิดของหิน ปริมาณของหิน พื้นที่รับแสง คุณลักษณะของท่ออากาศร้อน และปริมาตรบ้าน

บทที่ 5

แบบจำลองทางกายภาพ

การสร้างแบบจำลองทางกายภาพมีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่ได้ทำการออกแบบไว้ โดยทำการสร้างระบบกักเก็บพลังงานจากแสงอาทิตย์ต้นแบบขนาดเล็ก (Pilot scale thermal storage system) และติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทำการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในระบบกักเก็บพลังงานและในบ้านจำลองตลอดเวลา คือในเวลากลางวันขณะที่ระบบสะสมพลังงานจากแสงอาทิตย์ไว้ในหินฉวม และในเวลากลางคืนหลังจากที่ปล่อยให้พลังงานความร้อนจากระบบกักเก็บไหลสู่มบ้านจำลองเพื่อทำให้อากาศภายในบ้านจำลองอุ่นขึ้น โดยได้มีการปรับปรุงและพัฒนาบบหลายครั้งสำหรับทดสอบตัวแปรต่าง ๆ เพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงสุดและมีความเป็นไปได้ในการก่อสร้างให้กับประชาชนในระดับรากหญ้า กล่าวคือ ต้นทุนในการก่อสร้างต่ำ วัสดุที่นำมาใช้สามารถหาได้ในท้องถิ่น ระบบการใช้งานไม่ซับซ้อน และใช้พลังงานจากภายนอก (พลังงานไฟฟ้าหรือปิโตรเลียม) ให้น้อยที่สุดหรือไม่ใช้เลย

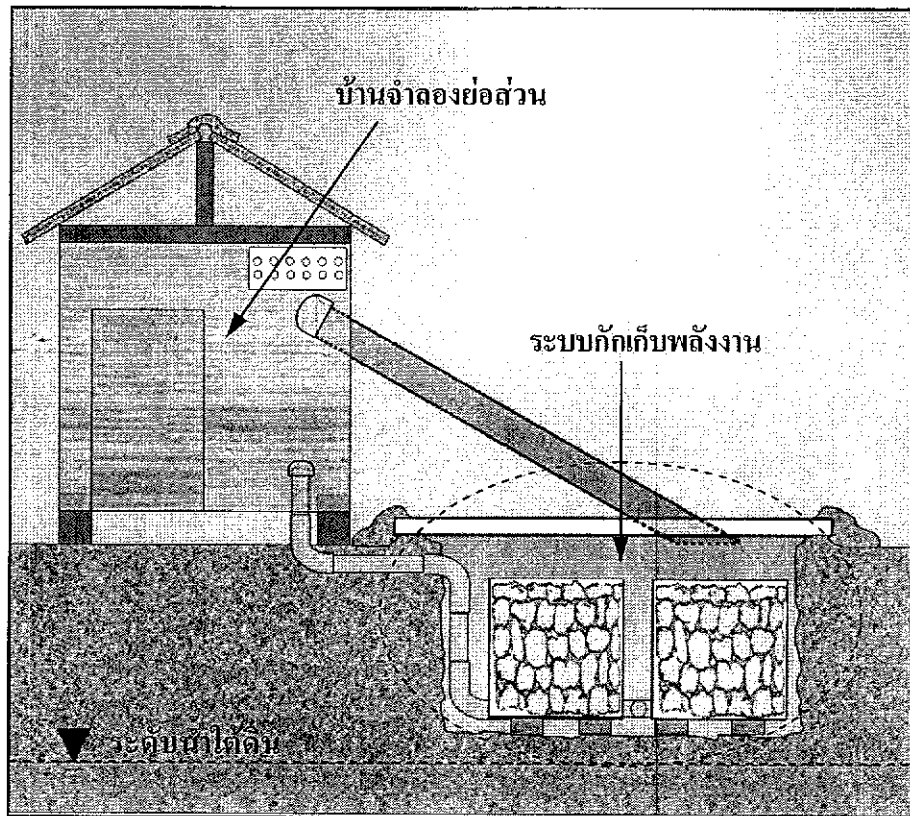
5.1 การสร้างแบบจำลองทางกายภาพ

แบบจำลองทางกายภาพที่สร้างขึ้นมีองค์ประกอบ 2 ส่วน คือ 1) ระบบกักเก็บพลังงาน และ 2) บ้านจำลอง (รูปที่ 5.1) โดยบ่อกักเก็บพลังงานที่สร้างขึ้นได้มีการจัดเรียงหินสะสมที่ทำการคัดขนาดใส่ลงไปในบ่อดินที่ขุดเตรียมเอาไว้ โดยที่ผนังของบ่อดินทั้ง 4 ด้านและพื้นบ่อมีคุณสมบัติเป็นฉนวนป้องกันการสูญเสียความร้อน ความลึกของบ่อจะต้องอยู่สูงกว่าระดับน้ำใต้ดิน และด้านบนของบ่อกักเก็บพลังงานจะต้องเปิดทิ้งไว้เพื่อให้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ส่งผ่านไปยังหินฉวมได้ แบบบ้านจำลองที่สร้างขึ้นเป็นบ้านไม้ หลังคามุงด้วยกระเบื้อง รายละเอียดในการสร้างแบบจำลองทางกายภาพมีดังนี้

5.1.1 การสร้างบ่อกักเก็บพลังงาน

บ่อกักเก็บพลังงานที่สร้างขึ้นมี 2 แบบ คือ แบบที่ 1 (Model I) เป็นบ่อที่สร้างขึ้นโดยใช้ตะแกรงไม้ไผ่เป็นภาชนะบรรจุหิน และแบบที่ 2 (Model II) เป็นบ่อที่สร้างขึ้นโดยใช้ตะแกรงเหล็กเป็นภาชนะบรรจุหิน ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) **Model I** เป็นบ่อขุดขนาด 2.0×2.0 เมตร ลึก 2.0 เมตร (มีปริมาตร (V_{system}) เท่ากับ 8 ลูกบาศก์เมตร) มีท่ออากาศเย็นขนาด 4 นิ้ว ติดตั้งไว้ที่บริเวณก้นบ่อ โดยปลายท่อเย็นไหลออกมายังบริเวณปากบ่อ มีตะแกรงไม้ไผ่ขนาด 0.75×1.50 เมตร จำนวน 20 ตะแกรง แต่ละตะแกรงได้จัดเรียงหินที่มีการคัดขนาดเอาไว้ตั้งแต่ 4-5 นิ้ว ประมาณ 130 ก้อน แต่ละตะแกรงมีน้ำหนักประมาณ 100



รูปที่ 5.1 แบบจำลองทางกายภาพประกอบด้วยระบบกักเก็บพลังงานและแบบจำลองบ้านยอส่วน

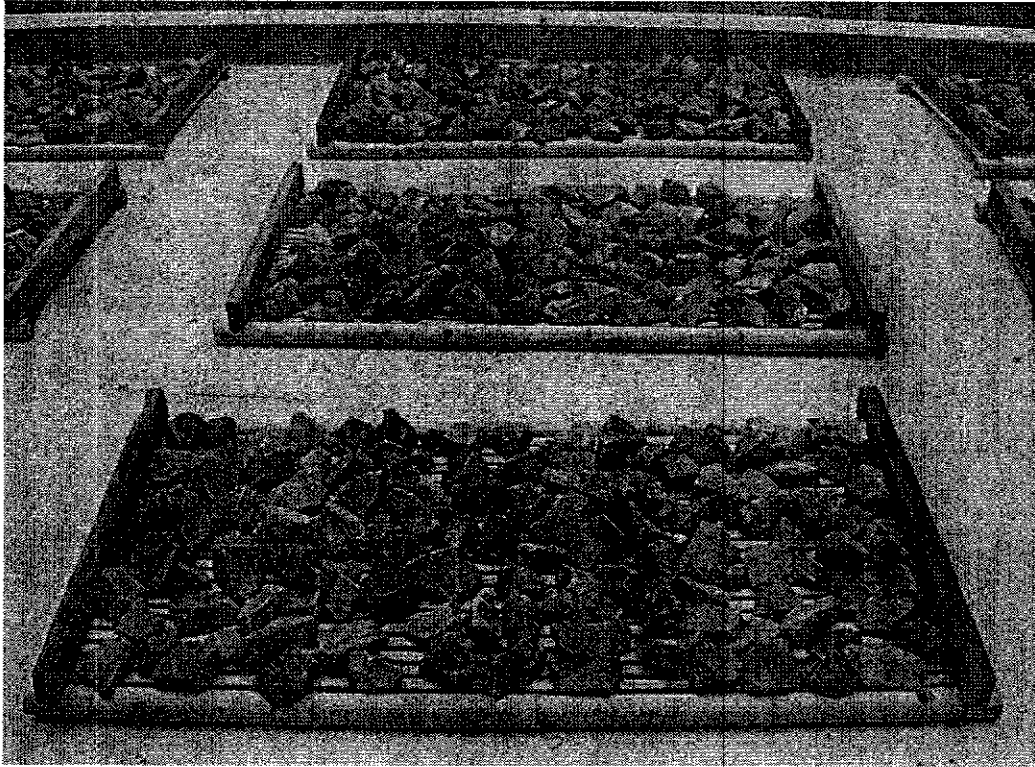
กิโกรัม (รูปที่ 5.2) ในเวลากลางวันจะนำตะแกรงไม้ไผ่ทั้งหมดที่บรรจุหินไปวางไว้กลางแดด ตั้งแต่เวลา 8.00 ถึง 16.00 น. เพื่อให้หินมีการรับและกักเก็บพลังงานความร้อน จากนั้นจะทำการเก็บตะแกรงทั้งหมดลงบ่อกักเก็บเหมือนเดิม โดยจะนำเอาตะแกรงไม้ไผ่วางเรียงซ้อนกันในบ่อเป็น 2 แถว แต่ละแถวมี 10 ตะแกรง โดยที่ด้านบนของบ่อมีฝาปิดทำจากไม้ไผ่ขนาด 1.5×1.5 เมตร จำนวน 4 ชั้น และมีท่ออากาศร้อนขนาด 2 นิ้ว สวมไว้ที่ด้านบนระหว่างรอยต่อของฝาไม้ทั้ง 4 ชั้น (รูปที่ 5.3) นอกจากนั้นบริเวณปากบ่อจะทำเป็นคันดินสูงประมาณ 8 นิ้ว เพื่อป้องกันน้ำบนผิวดินไหลลงสู่บ่อ

2) **Model II** เป็นบ่อขนาด 1.75×1.75 เมตร ลึก 0.75 เมตร (มีปริมาตร เท่ากับ 3.25 ลูกบาศก์เมตร) ภายในบ่อมีตะแกรงสำหรับบรรจุหินจำนวน 4 ตะแกรง แต่ละตะแกรงมีขนาด $0.5 \times 0.5 \times 0.5$ เมตร บรรจุหินบะซอลต์ที่ได้จากการคัดขนาด 4-5 นิ้ว จำนวน 230 ก้อน คิดเป็นปริมาตรรวมทั้ง 4 ตะแกรง (V_{bed}) เท่ากับ 0.5 ลูกบาศก์เมตร หินที่ใช้มีน้ำหนักรวม (W_{rock}) เท่ากับ 743 กิโลกรัม ซึ่งคิดเป็นปริมาตรของหิน (V_{rock}) เท่ากับ 0.21 ลูกบาศก์เมตร ส่วนบนของบ่อจะถูกปิดด้วยแผ่นพลาสติกใส (Acrylic sheet) จำนวน 2 แผ่น ที่เสริมความแข็งแรงด้วยโครงเหล็กขนาด 1.5×2.0 เมตร (รูปที่ 5.4) เพื่อให้แสงอาทิตย์ส่องผ่านถึงหินถมได้และป้องกันการสูญเสียพลังงานความร้อนที่สะสมอยู่จากการพาความร้อนของลม (Force convection) รูปที่ 5.5 แสดงขั้นตอนการสร้างบ่อกักเก็บพลังงาน ซึ่งแนวคิดในการเก็บพลังงานความร้อนใน Model II นี้คือการใช้อากาศภายในบ่อเป็นตัวกลางถ่ายเทพลังงานความร้อนจากหินก้อนหนึ่งไปยังอีกก้อนหนึ่ง

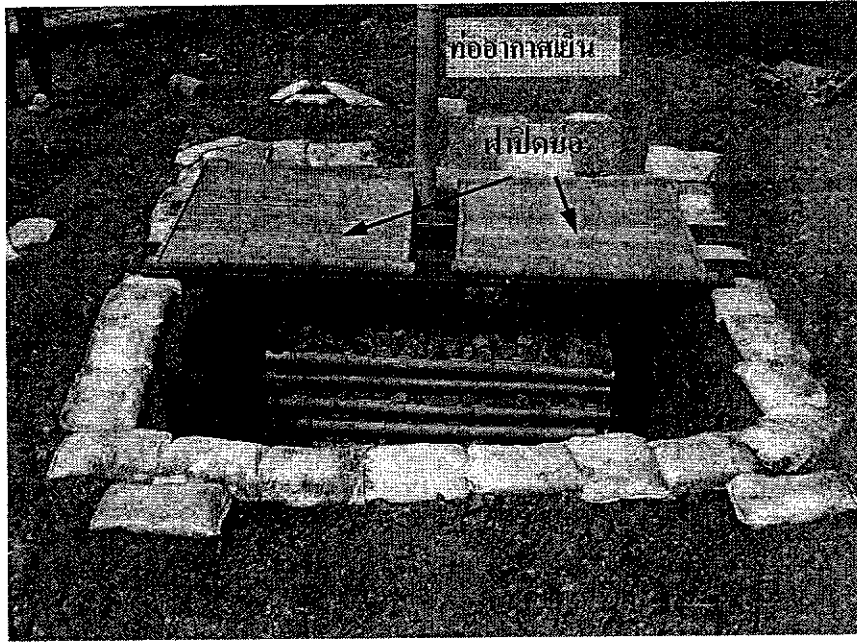
ระบบกักเก็บพลังงานแบบที่ 2 มีอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของบ่อกักเก็บพลังงานและปริมาตรของบ้าน ($V_{system}:V_{house}$) เท่ากับ 1:1 มีอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของหินถม (Bulk volume) โดยไม่รวมที่ว่างในบ่อกักเก็บพลังงานและปริมาตรของบ้าน ($V_{bed}:V_{house}$) เท่ากับ 1:6.5 และมีอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของหินที่ใช้ทั้งหมดและปริมาตรบ้าน (V_{rock}/V_{house}) เท่ากับ 1:16 หินถมในระบบกักเก็บพลังงานมีค่าความพรุน (Porosity) ที่คำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของเนื้อหินต่อปริมาตรของหินถม (V_{rock}/V_{bed}) เท่ากับ 0.53 และมีอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของอากาศต่อปริมาตรเนื้อหินในหินถม (Void's ratio) เท่ากับ 0.90

5.1.2 การสร้างบ้านจำลอง

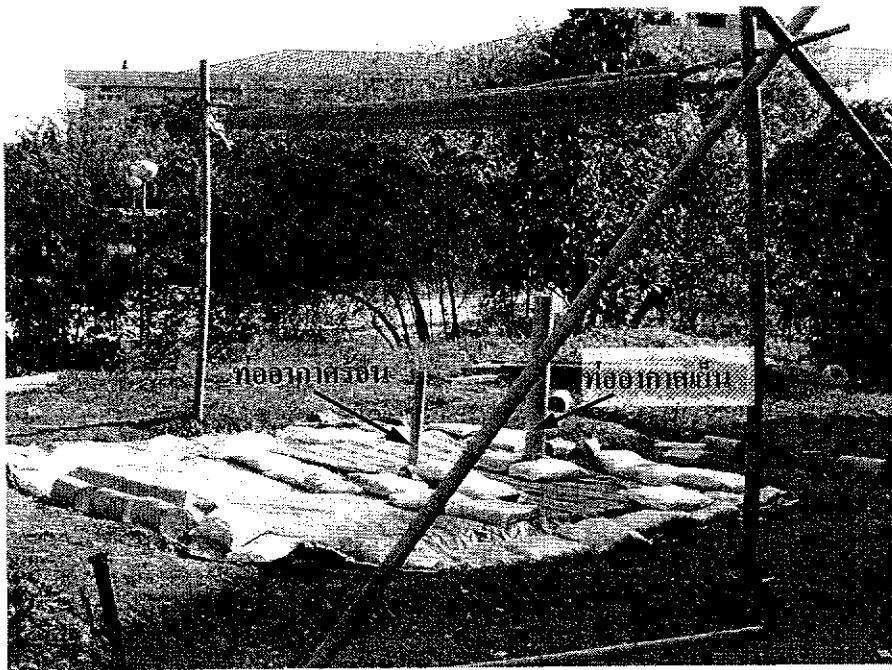
บ้านจำลองสำหรับงานวิจัยนี้ เป็นบ้านไม้ขนาด $1.5 \times 1.5 \times 1.5$ เมตร คิดเป็นปริมาตรเท่ากับ 3.5 ลูกบาศก์เมตร ผนังด้านในปิดทับด้วยแผ่นโฟมที่มีความหนา 1.5 เซนติเมตร ทั้ง 6 ด้านเพื่อป้องกันการรั่วไหลหรือถ่ายเทพลังงานความร้อนจากภายในบ้านสู่อากาศนอกบ้านหรือสิ่งแวดล้อม แต่พบว่าภายในบ้านจำลองก็ยังมี การรั่วไหลของพลังงานอยู่บ้าง บ้านจำลองและระบบกักเก็บพลังงานเชื่อมต่อกันด้วยท่อนำความร้อนมีเส้นผ่าศูนย์กลางผันแปรจาก 2-8 นิ้ว และท่อที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 0.6×0.6 เมตร โดยมีท่ออากาศเย็นขนาด 2 นิ้ว ช่วยทำให้เกิดการไหลเวียนของอากาศเย็นจากบ้านสู่บ่อกักเก็บพลังงานต่ออยู่ที่ส่วนล่างของบ้านกับส่วนล่างของบ่อกักเก็บพลังงาน



รูปที่ 5.2 การเรียงหินบนตะแกรงไม้ไผ่เพื่อนำไปวางไว้กลางแดดรับพลังงานความร้อน (ตะแกรงไม้ไผ่มีขนาด 0.75×1.5 เมตร)

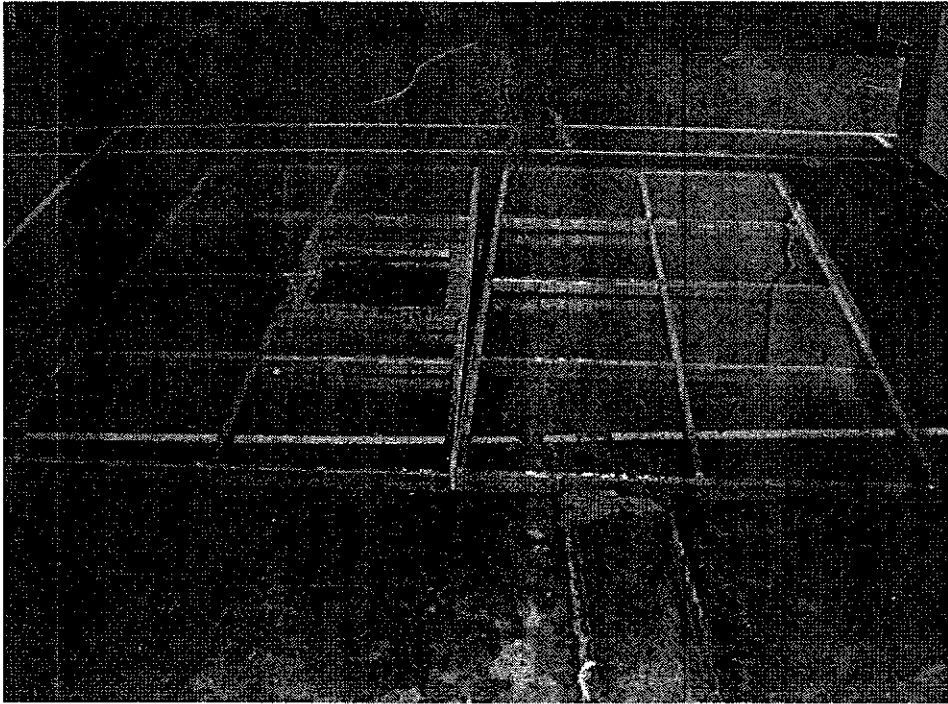


(ก)



(ข)

รูปที่ 5.3 ระบบกักเก็บพลังงานแบบที่ 1 (ก) ตะแกรงไม้ไผ่บรรจุด้วยหินวางซ้อนกันในบ่อและมีฝาปิดที่ทำจากไม้ไผ่ (ข) บริเวณฝาปิดจะปูทับด้วยผ้าใบ และมีท่ออากาศร้อนขนาด 2 นิ้ว



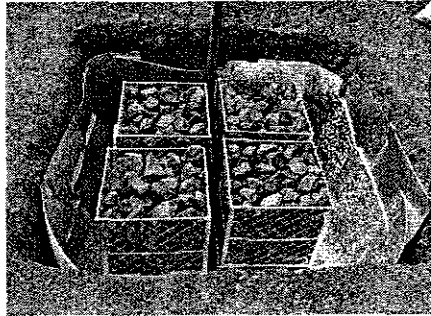
รูปที่ 5.4 ฝาปิดระบบกักเก็บพลังงานแบบที่ 2 ซึ่งเป็นแผ่นพลาสติกใสที่เสริมความแข็งแรงด้วยโครงเหล็ก



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

รูปที่ 5.5 ขั้นตอนการสร้างระบบกักเก็บพลังงานแบบที่ 2

- (ก) ขุดบ่อ วางตะแกรงเหล็ก และท่ออากาศเย็น
- (ข) จัดเรียงหินในตะแกรงและติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ
- (ค) ตะแกรงเหล็กที่มีหินเรียงจนเต็ม
- (ง) ปรับและยกระดับขอบบ่อด้วยคันดินเหนียว
- (จ) ติดตั้งแผ่นพลาสติกใสที่เสริมด้วยโครงเหล็ก

5.1.3 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ

อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ (Thermocouple) ได้ติดตั้งไว้เพื่อตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของหินที่ตำแหน่งกลางบ่อ อากาศภายในบ่อ อากาศปลายท่ออากาศร้อน อากาศภายในบ้าน และอากาศนอกบ้าน การอ่านและบันทึกข้อมูลเป็นแบบจดอ่านค่าในแต่ละช่วงเวลาและแบบอัตโนมัติ ซึ่งรายละเอียดการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ มีดังนี้

1) หินกลางบ่อ การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของหินตำแหน่งกลางบ่อ โดยสมมติให้เป็นตัวแทนอุณหภูมิของหินหรืออุณหภูมิเฉลี่ยของหินทั้งระบบ โดยที่ค่าอุณหภูมิที่ตรวจวัดได้เป็นตัวชี้วัดระดับพลังงานที่หินเก็บสะสมได้ระหว่างที่รับพลังงานจากแสงอาทิตย์ และชี้วัดระดับพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทให้กับบ้านขณะที่เปิดท่ออากาศร้อน (รูปที่ 5.6)

2) อากาศภายในบ่อกักเก็บ ตรวจวัดด้วยการแขวนอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิไว้กลางอากาศระหว่างตะแกรงหินทั้ง 4 ตะแกรง เพื่อตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศภายในบ่อ ซึ่งเป็นตัวตรวจสอบระดับพลังงานที่หินถ่ายเทให้กับอากาศล้อมรอบ (รูปที่ 5.7)

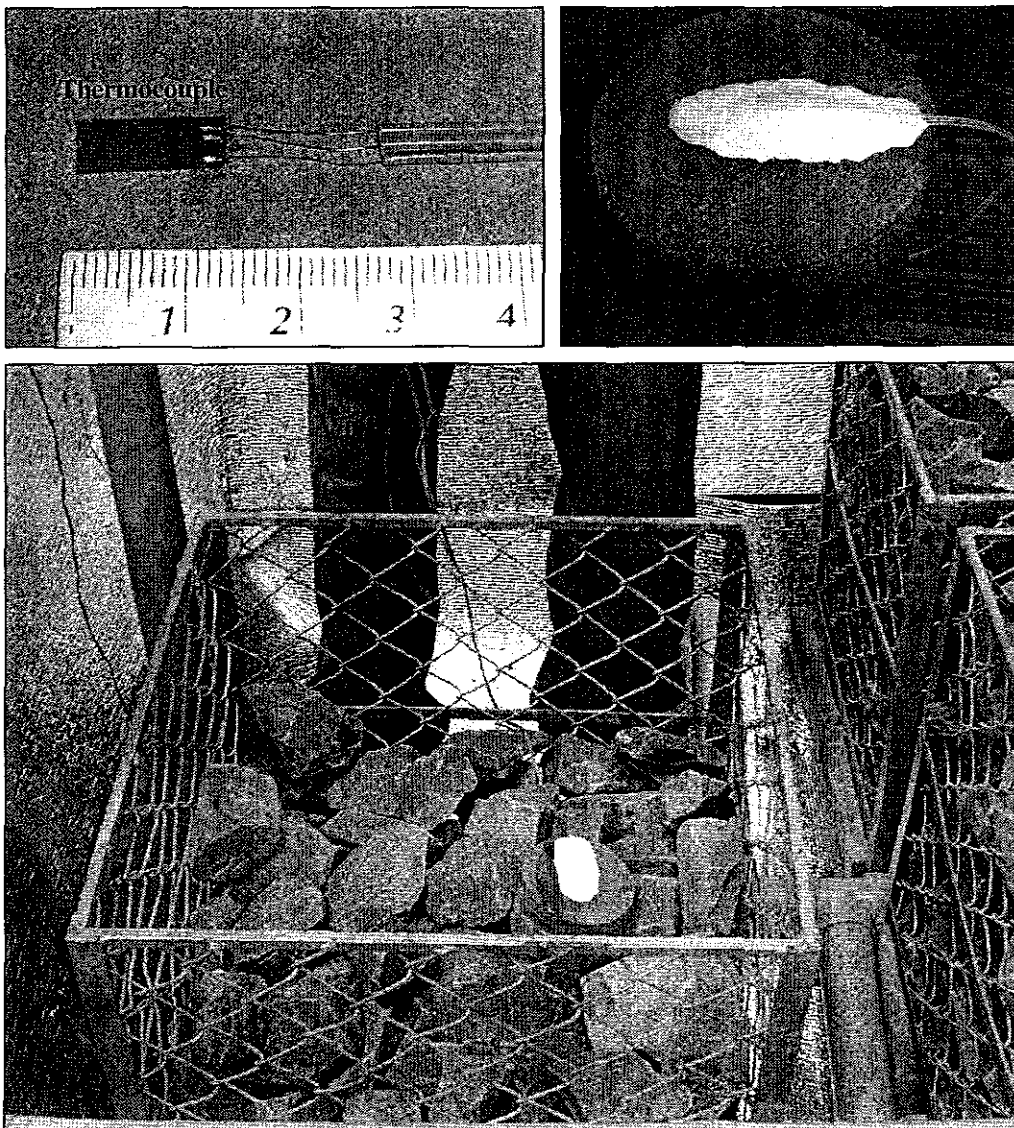
3) อากาศปลายท่ออากาศร้อน ตรวจวัดด้วยการแขวนอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิไว้บริเวณกึ่งกลางของปลายท่ออากาศร้อน ข้อมูลที่ตรวจวัดได้นี้เป็นตัวตรวจสอบว่าพลังงานความร้อนจากบ่อกักเก็บพลังงานมีการถ่ายเทมายังบ้านจำลองหรือไม่และในปริมาณที่มากน้อยเท่าใด (รูปที่ 5.8)

4) อากาศภายในบ้าน ตรวจวัดด้วยการแขวนอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิไว้ในบ้านจำลอง โดยให้อยู่กลางอากาศเพื่อตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในบ้านจำลอง ข้อมูลที่ตรวจวัดได้นี้เป็นตัวชี้วัดถึงปริมาณพลังงานที่ถ่ายเทจากบ่อกักเก็บพลังงานสู่บ้านจำลอง รวมทั้งการสูญเสียพลังงานผ่านผนังทั้ง 6 ด้านด้วย (รูปที่ 5.9)

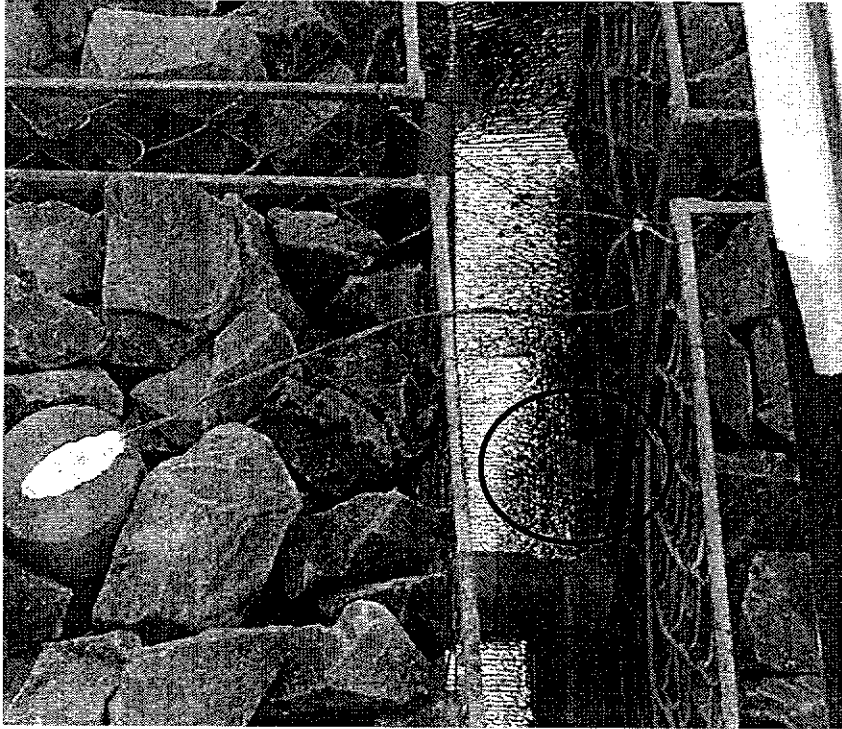
5) อากาศนอกบ้าน อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิไว้ได้หลังคาบ้านซึ่งมีการถ่ายเทอากาศได้ดี ข้อมูลดังกล่าวจะใช้เปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิของอากาศภายในบ้านและอากาศนอกบ้าน เพื่อหาผลต่างของอุณหภูมิของอากาศภายในบ้านที่เพิ่มขึ้น (รูปที่ 5.10) และใช้เป็นดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพของระบบต่อไป

5.2 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลเบื้องต้น

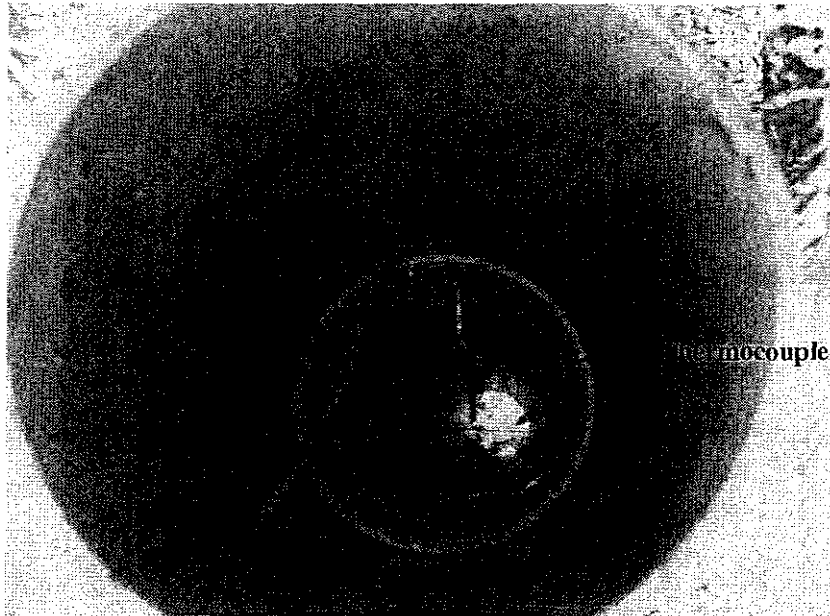
การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทุกตำแหน่งได้มีการตรวจวัดทุก 30 นาที ตลอด 24 ชั่วโมงอย่างต่อเนื่อง โดยมีการตรวจวัด 2 ช่วง คือ ช่วงแรกเมื่อปลายปี 2548 ถึง ต้นปี 2549 เริ่มตั้งแต่วันที่ 20 พ.ย. 2548 ถึงวันที่ 20 เม.ย. 2549 รวม และช่วงที่สองเมื่อปลายปี 2549 ถึงต้นปี 2550 เริ่มตั้งแต่วันที่



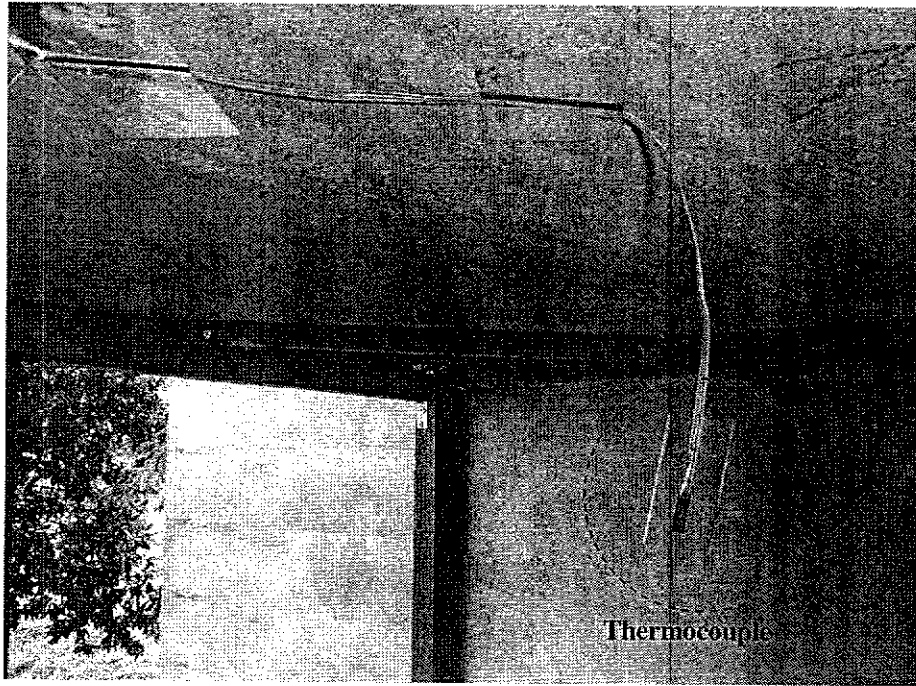
รูปที่ 5.6 การติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิหินกลางบ่อ (รูปล่าง) ด้วย Thermocouple (บนซ้าย) การติดตั้ง Thermocouple เข้ากับหินจะใช้กาวชนิดพิเศษ (บนขวา) ก้อนหินที่ติดตั้งด้วย Thermocouple จะจัดเรียงไว้กลางบ่อโดยมีหินปิดทับอีกชั้นหนึ่ง



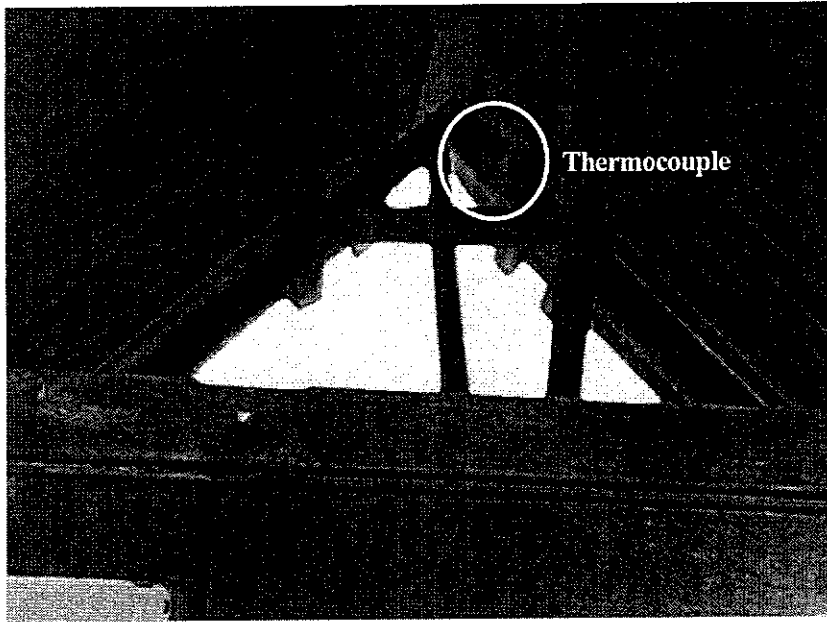
รูปที่ 5.7 อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิที่ติดตั้งเพื่อวัดอุณหภูมิของอากาศภายในบ่อกักเก็บพลังงาน



รูปที่ 5.8 อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิที่ติดตั้งเพื่อวัดอุณหภูมิปลายท่ออากาศร้อน



รูปที่ 5.9 อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิที่ติดตั้งเพื่อวัดอุณหภูมิภายในบ้านจำลอง



รูปที่ 5.10 อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิที่ติดตั้งเพื่อวัดอุณหภูมิของอากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม)

28 พฤศจิกายน 2549 ถึง 30 มีนาคม 2550 ซึ่งผลการตรวจวัดทั้งหมดได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก ตลอดจนการดำเนินงานได้มีการพัฒนาและปรับปรุงระบบหลายครั้ง เช่น เปลี่ยนขนาดท่ออากาศร้อน การติดแผ่นโฟมที่ผนังบ้าน เปลี่ยนเวลาปิด-เปิดบ้านและบ่อกักเก็บพลังงาน และการติดตั้งพัดลมดูดอากาศ มีรายละเอียดดังนี้

5.3.1 Model I

ในระบบดังกล่าวยังไม่มีการตรวจวัดอุณหภูมิด้วย Thermocouple เนื่องจากระบบนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อตรวจวัดการถ่ายเทความร้อนออกมาจากระบบกักเก็บและตรวจสอบความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมกับอุณหภูมิที่ปลายท่ออากาศร้อน โดยอาศัยการสังเกตทิศทางและลักษณะของกลุ่มควันจากรูปที่จุดทิ้งไว้ภายในบ่อกักเก็บและความรู้สึกสัมผัส จากการศึกษพบว่า มีพลังงานความร้อนถ่ายเทมายังปลายท่ออากาศร้อน ซึ่งสามารถรับรู้ได้ด้วยการสัมผัสและกลุ่มควันที่ลอยออกมาจากปากท่ออากาศร้อนมีลักษณะการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) แสดงให้เห็นว่ามีแรงสนับสนุนจากอากาศร้อนที่กำลังลอยตัวและไหลผ่านท่ออากาศร้อนออกมา เนื่องจากการที่จะนำเอาตะแกรงไม้ไผ่ไปวางซ้อนกันภายในบ่อกักเก็บพลังงานและนำขึ้นมาวางไว้กลางแดดเพื่อให้หินกักเก็บพลังงานค่อนข้างยุ่งยากและต้องอาศัยแรงงานมาก ผู้วิจัยจึงตัดสินใจไม่ศึกษาในรายละเอียดของระบบนี้ แต่ได้ออกแบบระบบใหม่ขึ้นคือ Model II

5.3.2 Model II ที่ใช้ท่ออากาศร้อนขนาด 2 นิ้ว

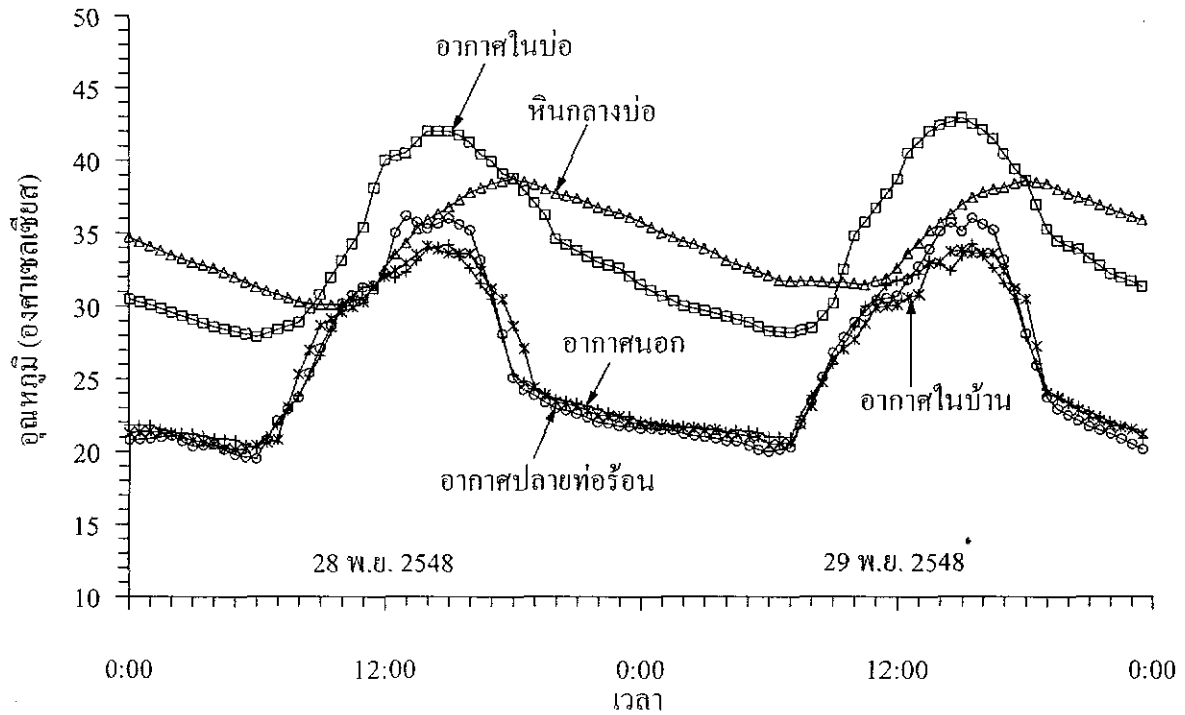
ระบบกักเก็บพลังงานถูกเชื่อมต่อเข้ากับบ้านจำลองด้วยท่ออากาศร้อนขนาด 2 นิ้ว (รูปที่ 5.11) บริเวณด้านบนของบ่อกักเก็บพลังงานมีกรวยฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 0.6×0.6 เมตร ระบบดังกล่าวนี้ไม่มีผ้าใบฉนวนปิดทับด้านบนของบ่อ ผลการตรวจวัดอุณหภูมิปรากฏว่ามีการถ่ายเทความร้อนไปสู่บ้านจำลองในปริมาณน้อยมาก อาจเป็นเพราะมีการรั่วไหลของพลังงานความร้อนผ่านแผ่นพลาสติกใสในปริมาณสูง ขนาดของท่อไม่เหมาะสม หรือเกิดการรั่วไหลของพลังงานความร้อนของบ้านจำลอง รูปที่ 5.12 แสดงตัวแทนผลการตรวจวัดอุณหภูมิที่สามารถวัดได้จากระบบ

5.3.3 Model II ที่ใช้ท่ออากาศร้อนขนาด 4 นิ้ว

ระบบกักเก็บพลังงานถูกเชื่อมต่อเข้ากับบ้านด้วยท่ออากาศร้อนขนาด 4 นิ้ว ติดตั้งทำมุมเอียงประมาณ 30 องศา กับบ้านจำลอง มีความต่างศักย์ระหว่างทางเข้าและทางออกเท่ากับ 1.5 เมตร (รูปที่ 5.13) พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทจากระบบกักเก็บสู่บ้านจำลองไม่แตกต่างจากการใช้ท่อขนาด 2 นิ้ว และเมื่อปิดบ่อด้วยแผ่นผ้าใบพบว่าพลังงานความร้อนมีการถ่ายเทจากบ่อไปสู่บ้านจำลองได้บ้าง มีผลทำให้อุณหภูมิในบ้านจำลองสูงกว่าสิ่งแวดล้อมเล็กน้อย (< 1 องศาเซลเซียส) หลังจากทำการติดแผ่นโฟมที่ผนังบ้านทั้ง 6 ด้านเพื่อลดการสูญเสียความร้อน ผลการตรวจวัดอุณหภูมิระบุว่า



รูปที่ 5.11 แบบจำลองทางกายภาพ ประกอบด้วยบ่อกักเก็บพลังงาน (ซ้าย) และบ้านจำลอง (ขวา) โดยมีห้องอากาศร้อนขนาด 2 นิ้วต่ออยู่



รูปที่ 5.12 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดตรวจวัด 5 ตำแหน่ง ของ Model II ที่ใช้ท่ออากาศร้อนขนาด 2 นิ้ว โดยทำการปิดท่ออากาศร้อนและเปิดบ้านจำลองเวลา 6.00 น. และเปิดท่อร้อนและปิดบ้านจำลองเวลา 18.00 น. (ข้อมูลระหว่างวันที่ 28 และ 29 พฤศจิกายน 2548)



รูปที่ 5.13 แบบจำลองทางกายภาพ ประกอบด้วยบ่อักเก็บพลังงาน (ด้านหน้า) และบ้านจำลอง (ด้านหลัง) โดยมีท่ออากาศร้อนขนาด 4 นิ้วต่ออยู่

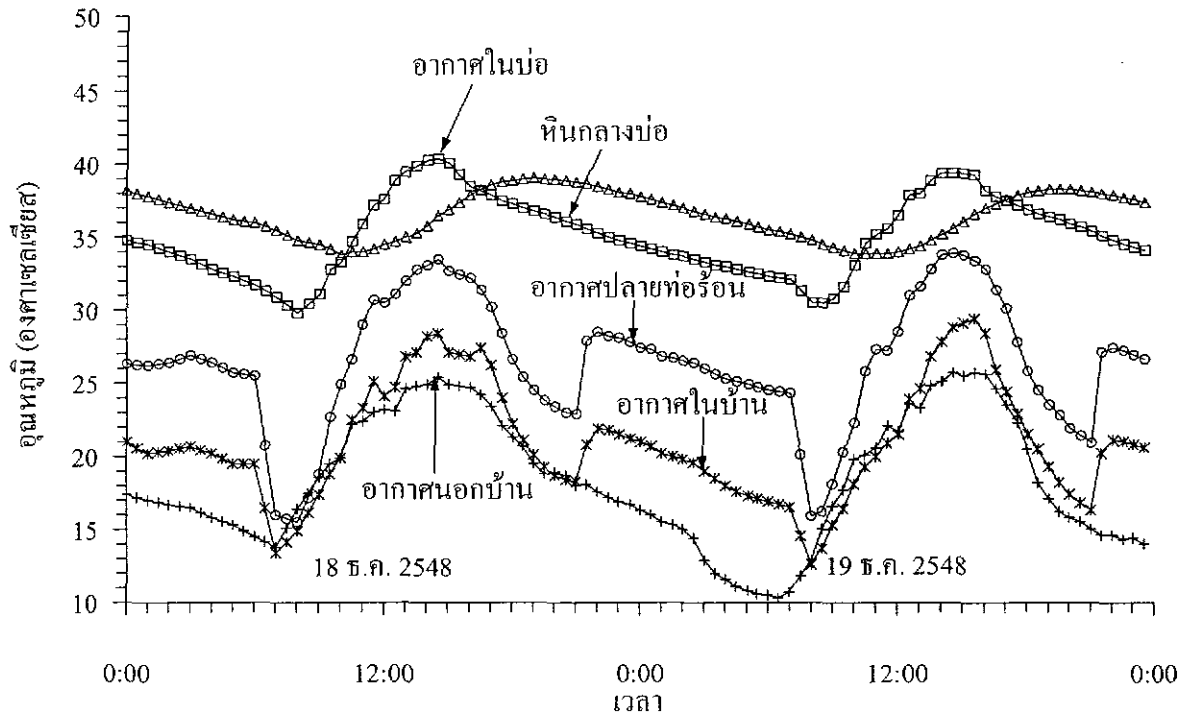
พลังงานความร้อนมีการถ่ายเทไปสู่บ้านจำลองโดยทำให้อุณหภูมิในบ้านเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมมากกว่า 5 องศาเซลเซียส (รูปที่ 5.14) และผลยังชี้ให้เห็นว่าเวลาการปิดและเปิดบ่อกักเก็บพลังงาน และเวลาเปิดท่ออากาศร้อนยังไม่เหมาะสม เพราะในช่วงเวลา ก่อน 9.00 น. และหลังจาก 15.00 น. ระดับพลังงานจากแสงอาทิตย์มีปริมาณน้อยทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานความร้อนจากบ่อกักเก็บมากกว่าการพลังงานที่กักเก็บได้ ประกอบกับอุณหภูมิหลังจากเวลา 6.00 น. ยังไม่สูงมากนัก จึงได้มีการเปลี่ยนแปลงเวลาเปิดบ่อกักเก็บเป็นเวลา 9.00 น. และปิดในเวลา 15.00 น. โดยเปิดท่ออากาศร้อนเวลา 21.00 น.

5.3.4 Model II ที่ใช้ท่ออากาศร้อนขนาด 8 นิ้ว

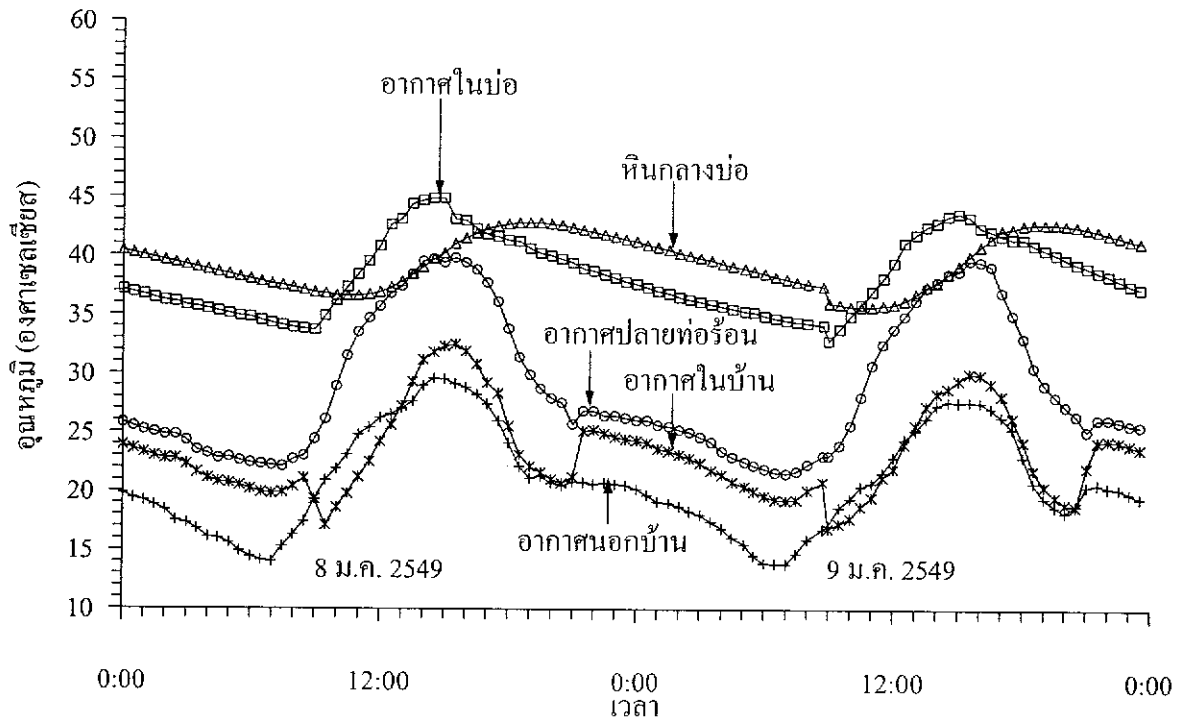
ระบบกักเก็บพลังงานถูกเชื่อมต่อเข้ากับบ้านจำลองด้วยท่ออากาศร้อนขนาด 8 นิ้ว ผลจากการตรวจวัดระบุว่าอุณหภูมิในบ้านจำลองเพิ่มขึ้นมากกว่า 5 องศาเซลเซียส (รูปที่ 5.15) และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในบ้านจำลองมากกว่าที่ใช้ท่ออากาศร้อนขนาด 4 นิ้วเพียงเล็กน้อย (ประมาณ 1 องศาเซลเซียส) ในระบบดังกล่าวได้มีการติดตั้งพัดลม AC ขนาด 12 โวลต์ (บริเวณปลายท่ออากาศเย็นขนาด 2 นิ้ว ที่อยู่ในบ้านจำลอง) เพื่อตรวจสอบความสามารถในการหมุนเวียนของอากาศผ่านท่ออากาศเย็น พัดลมที่ติดตั้งจะดูดเอาอากาศเย็นในบ้านเข้าไปยังบ่อกักเก็บพลังงานเพื่อช่วยในการหมุนเวียนของอากาศและดึงเอาพลังงานความร้อนในก้อนหินมาสู่บ้านจำลอง ผลการตรวจวัดพบว่า การใช้พัดลมสามารถทำให้อุณหภูมิภายในบ้านสูงขึ้นได้ แต่เนื่องจากจุดมุ่งหมายหลักของงานวิจัยนี้ จะไม่นำเอาพลังงานอื่นนอกเหนือจากพลังงานแสงอาทิตย์เข้ามาใช้ในระบบ ดังนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพด้วยพัดลมดูดอากาศจึงเป็นเพียงเพื่อทดสอบการหมุนเวียนของอากาศร้อนในท่อเท่านั้น แต่จะไม่ติดตั้งถาวรหรือมีการวิเคราะห์อย่างละเอียดในการใช้พัดลมไฟฟ้านี้

5.3.5 Model II ท่ออากาศร้อน 8 นิ้ว (หินลดลงครึ่งหนึ่ง)

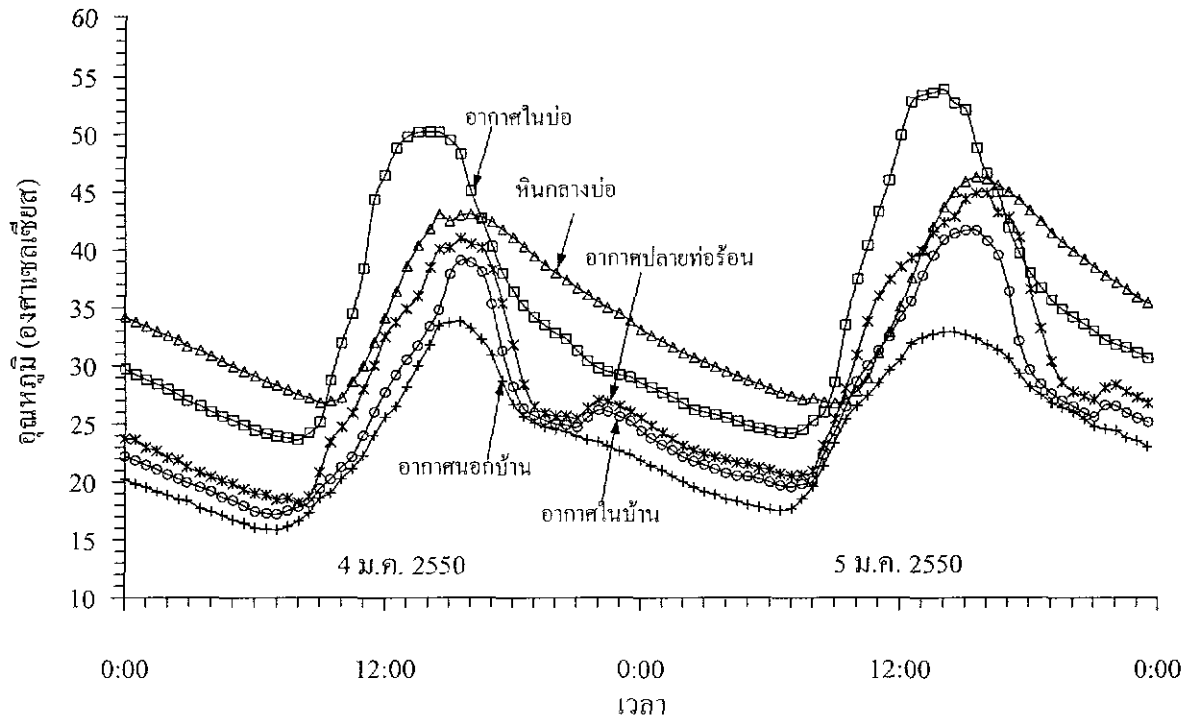
ระบบกักเก็บพลังงานที่กล่าวถึงในหัวข้อนี้เป็นระบบที่ใช้กับท่ออากาศร้อนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้ว แต่หินในระบบกักเก็บถูกเอาออกครึ่งหนึ่ง (เหลืออยู่ประมาณ 370 กิโลกรัม) ประตูบ้านและผ้าใบที่คลุมบ่อกักเก็บพลังงานจะถูกเปิดออกที่เวลา 9.00 น. เพื่อให้บ้านปรับอุณหภูมิเท่ากับสิ่งแวดล้อมและให้หินมีการสะสมพลังงานที่เวลา 15.00 น. จะคลุมบ่อกักเก็บพลังงานเพื่อลดการสูญเสียพลังงาน และที่เวลา 21.00 น. ผ้าปิดท่ออากาศร้อนจะถูกเปิดออก ผลจากการตรวจวัดอุณหภูมิระบุว่าอุณหภูมิในบ้านเพิ่มขึ้นประมาณ 2 ถึง 3 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าลดลงครึ่งหนึ่งเมื่อเทียบกับตอนที่หินยังคงเต็มระบบ รูปที่ 5.16 แสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ตรวจวัดได้ในวันที่ 4 และ 5 มกราคม 2550



รูปที่ 5.14 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดตรวจวัด 5 ตำแหน่ง ของ Model II ที่ใช้ท่ออากาศร้อนขนาด 4 นิ้ว โดยทำการปิดท่ออากาศร้อนและเปิดบ้านจำลองเวลา 6.00 น. ปิดบ่อด้วยกระสอบป่านและผ้าใบเวลา 15.00 น. และเปิดท่อร้อนและปิดบ้านจำลองเวลา 21.00 น. (ข้อมูลระหว่างวันที่ 18 และ 19 ธันวาคม 2548)



รูปที่ 5.15 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดตรวจวัด 5 ตำแหน่ง ของ Model II ที่ใช้ท่ออากาศร้อนขนาด 8 นิ้ว โดยทำการปิดท่ออากาศร้อนและเปิดบ้านจำลองเวลา 6.00 น. ปิดบ่อด้วยกระสอบป่านและผ้าใบเวลา 15.00 น. และเปิดท่อร้อนและเปิดบ้านจำลองเวลา 21.00 น. (ข้อมูลระหว่างวันที่ 8 และ 9 มกราคม 2550)



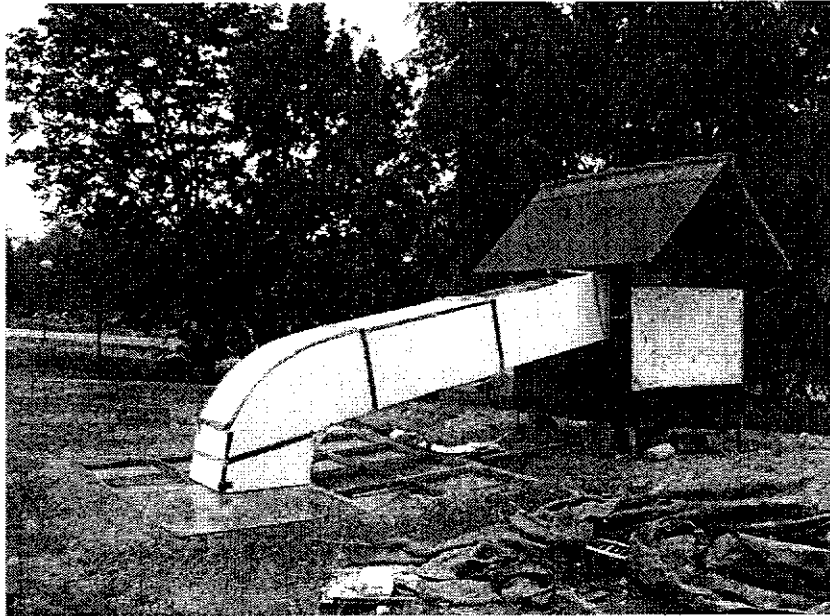
รูปที่ 5.16 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดตรวจวัด 5 ตำแหน่ง ของ Model II ที่ใช้ท่ออากาศร้อนขนาด 8 นิ้ว และได้เอาหินในระบบกักเก็บออกครึ่งหนึ่ง (370 กิโลกรัม) โดยทำการปิดท่ออากาศร้อนและเปิดบ้านจำลองเวลา 9.00 น. ปิดบ่อด้วยกระสอบป่านและผ้าใบเวลา 15.00 น. และเปิดท่อร้อนและเปิดบ้านจำลองเวลา 21.00 น. (ข้อมูลระหว่างวันที่ 4 และ 5 มกราคม 2550)

5.3.6 Model II ท่ออากาศร้อนหน้าตัดขนาด 0.6×0.6 เมตร (หินลดลงครึ่งหนึ่ง)

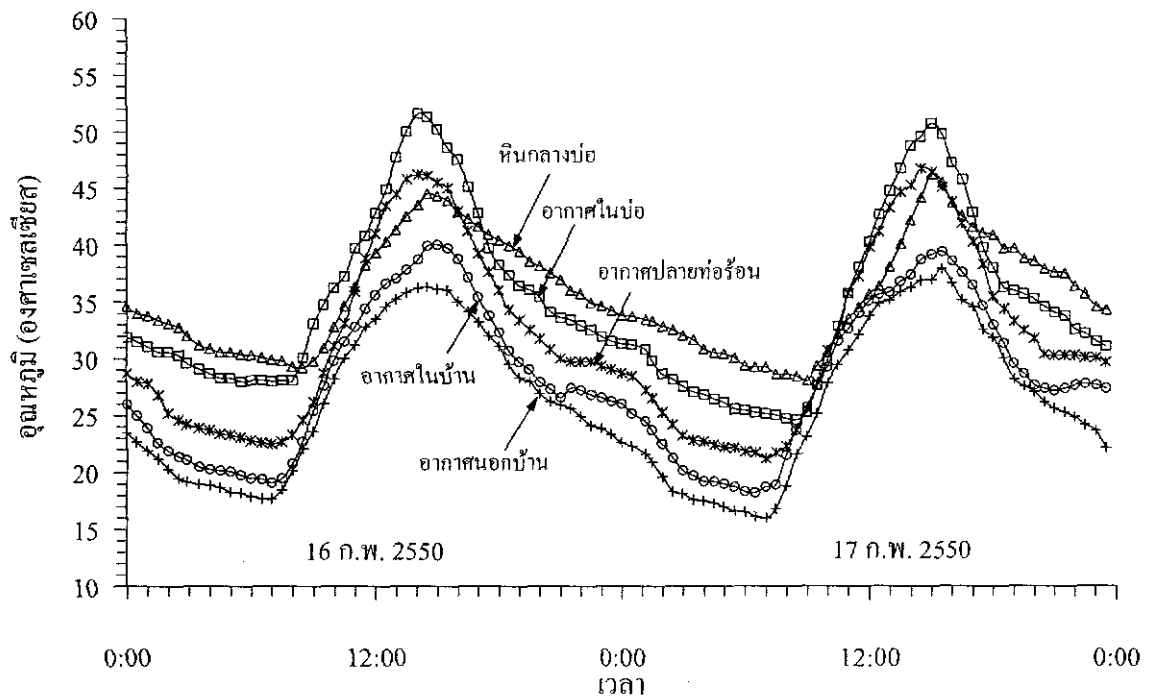
ระบบกักเก็บพลังงานเชื่อมต่อเข้ากับบ้านจำลองด้วยท่ออากาศร้อนขนาดหน้าตัดเท่ากับ 0.6×0.6 เมตร ซึ่งทำจากแผ่นสังกะสีหุ้มด้วยแผ่นโฟมมีความหนาเท่ากับ 2 เซนติเมตร (รูปที่ 5.17) หินในระบบกักเก็บถูกเอาออกครึ่งหนึ่ง (เหลืออยู่ประมาณ 370 กิโลกรัม) ประตูบ้านและผ้าใบที่คลุม บ่อกักเก็บพลังงานจะถูกเปิดออกเวลา 9.00 น. เพื่อให้บ้านปรับอุณหภูมิเท่ากับสิ่งแวดล้อมและให้หิน มีการสะสมพลังงาน เมื่อถึงเวลา 15.00 น. ได้คลุมบ่อกักเก็บพลังงานเพื่อลดการสูญเสียพลังงาน และ เวลา 21.00 น. ท่ออากาศร้อนจะถูกเปิดออก ผลจากการตรวจวัดอุณหภูมิระบุว่าระบบดังกล่าว สามารถทำให้อุณหภูมิในบ้านเพิ่มขึ้นประมาณ 2 ถึง 3 องศาเซลเซียส รูปที่ 5.18 แสดงการ เปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ตรวจวัดได้ในวันที่ 16 และ 17 กุมภาพันธ์ 2550 ซึ่งจะเห็นว่าอุณหภูมิหิน ต่ำกว่าที่ใช้ท่อขนาดอื่น เนื่องจากท่อดังกล่าวไปกีดขวางแสงอาทิตย์ และอาจเป็นผลให้การเพิ่มขึ้น ของอุณหภูมิในบ้านไม่ดีเท่าที่คาดหวังไว้

5.3 สรุปผลการทดสอบ

ประสิทธิภาพของระบบขึ้นอยู่กับระดับพลังงานที่หินได้รับ คุณลักษณะของท่อนำความร้อน (ขนาดหน้าตัดของท่อ) และการสูญเสียของพลังงานผ่านชิ้นส่วนต่าง ๆ ในระบบ ได้แก่ การสูญเสียพลังงานผ่านผนังและส่วนบนของบ่อกักเก็บพลังงาน การสูญเสียผ่านท่ออากาศร้อน และการสูญเสียจากการรั่วไหลของพลังงานผ่านผนังของบ้าน ระบบที่มีประสิทธิภาพในงานวิจัยที่กำลัง ดำเนินการอยู่ในขณะนี้คือ การใช้ท่อขนาดมากกว่า 4 นิ้ว โดยมีผ้าใบปิดทับด้านบนของบ่อกักเก็บ พลังงาน ซึ่งสามารถทำให้อุณหภูมิภายในบ้านเพิ่มขึ้นมากกว่า 5 องศาเซลเซียส แต่เมื่อปล่อยให้ เกิด การถ่ายเทความร้อนจากบ่อกักเก็บสู่บ้านจำลองจนถึงเวลา 9:00 น. อุณหภูมิในบ่อกักเก็บความร้อน ยังคงสูงกว่าอุณหภูมิในบ้านจำลองอยู่มาก อาจเป็นผลมาจากการส่งผ่านความร้อนของระบบยังไม่มี ประสิทธิภาพดีเท่าที่ควร ขั้นตอนต่อไปคือการใช้สมการคณิตศาสตร์ในการคำนวณเพื่อปรับรูปแบบ และระบบการส่งความร้อนให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น กล่าวคือเพื่อให้อุณหภูมิในบ้านจำลองใกล้เคียง กับอุณหภูมิในบ่อกักเก็บในช่วงเวลาที่มีการเปิดท่อส่งความร้อนและเพื่อจำลองพฤติกรรม การถ่ายเท ความร้อนในระบบเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดจากแบบจำลอง รายละเอียดของการ คำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้อธิบายไว้ในบทต่อไป



รูปที่ 5.17 ระบบกักเก็บพลังงานที่มีท่ออากาศร้อนขนาดหน้าตัด 0.6×0.6 เมตร หุ้มด้วยแผ่นโฟม



รูปที่ 5.18 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดตรวจวัด 5 ตำแหน่ง ของ Model II ที่ใช้ท่ออากาศร้อน ขนาดหน้าตัดเท่ากับ 0.6×0.6 เมตร และได้เอาหินในระบบกักเก็บออกครึ่งหนึ่ง (370 กิโลกรัม) โดยทำการปิดท่ออากาศร้อนและเปิดบ้านจำลองเวลา 9.00 น. ปิดบ่อด้วย กระสอบป่านและผ้าใบเวลา 15.00 น. และเปิดท่อร้อนและเปิดบ้านจำลองเวลา 21.00 น. (ข้อมูลระหว่างวันที่ 16 และ 17 กุมภาพันธ์ 2550)

บทที่ 6

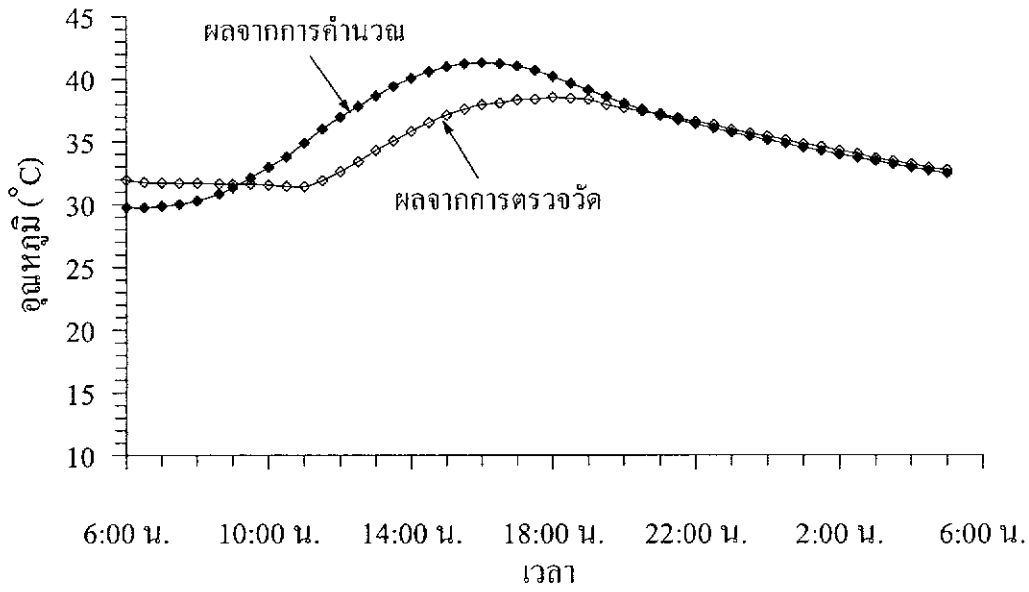
การคำนวณพลังงานความร้อนของแบบจำลอง

เนื้อหาในบทนี้มีข้อเสนอผลการเปรียบเทียบระหว่างการคำนวณพลังงานความร้อนด้วยสมการคณิตศาสตร์และการตรวจวัดจริงจากแบบจำลองทางกายภาพเพื่อศึกษาความเป็นเหตุเป็นผล ความสอดคล้อง และความคลาดเคลื่อนจากผลข้อมูลทั้ง 2 แหล่ง มีการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในบ้านที่เพิ่มขึ้นหลังจากเปิดท้ออากาศร้อนกับปริมาณหินที่ใช้ และขนาดของบ้านจำลอง ความสัมพันธ์ที่ได้นำไปสู่แนวทางออกแบบหรือการกำหนดขนาดของบ่อกักเก็บพลังงานให้เหมาะสมกับขนาดของบ้านแต่ละหลัง เนื้อหาในบทนี้ครอบคลุมการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปรที่เกี่ยวข้อง เช่น ขนาดและความเอียงของท้อ ขนาดของบ่อกักเก็บพลังงาน ความหนาแน่นของมวลหินถม (Packing density) และชนิดของหินที่นำมาใช้

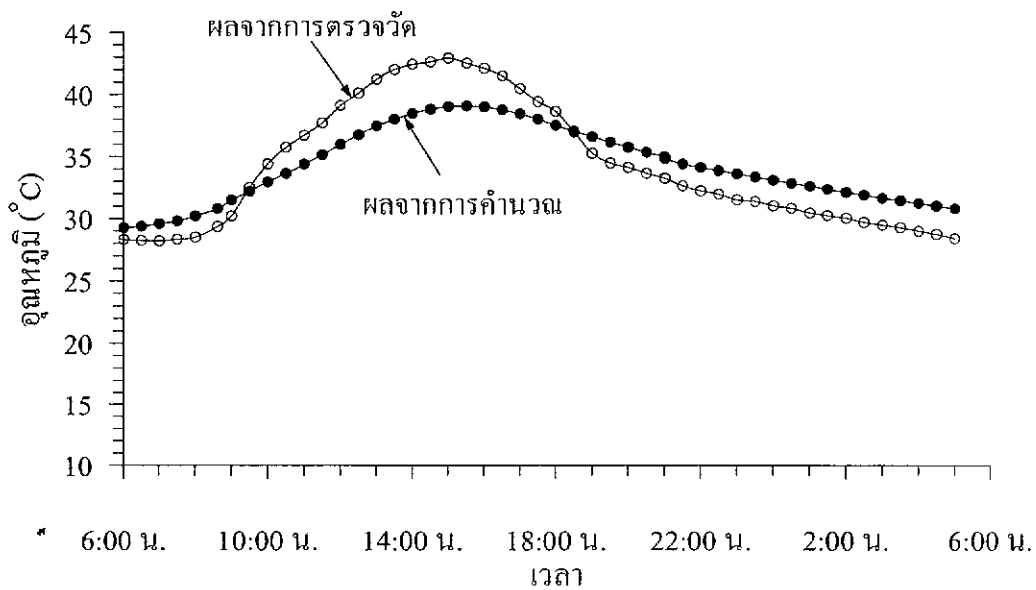
6.1 การเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางกายภาพ

งานวิจัยนี้ได้นำพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในระบบหินถมและบ้านจำลองที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ (เสนอไว้ในบทที่ 4) มาเปรียบเทียบกับผลจากการตรวจวัดจริงจากแบบจำลองทางกายภาพ (เสนอไว้ในบทที่ 5) แบบจำลองที่ศึกษาคือ Model II ซึ่งใช้ท้ออากาศร้อนที่มีขนาดต่างกัน คือ ท้อที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 2, 4 และ 8 นิ้ว และท้อที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 0.6×0.6 เมตร และได้ทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณหินในระบบ 2 ระดับน้ำหนักคือ 370 และ 743 กิโลกรัม ในการวิเคราะห์ได้กำหนดให้การสูญเสียพลังงานความร้อนผ่านบ้านมีปริมาณเท่ากับร้อยละ 10 ของพลังงานที่ถ่ายเทจากระบบหินถมและไม่มีการสูญเสียความร้อนผ่านท้ออากาศร้อน

รูปที่ 6.1 ถึง 6.3 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของหินและอากาศในระบบหินถมที่ได้จากการตรวจวัดและการคำนวณ โดยที่ระบบหินถมใช้หิน 743 กิโลกรัม และใช้ท้ออากาศร้อนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต่างกัน 3 ขนาด (2, 4 และ 8 นิ้ว) ซึ่งพบว่าในช่วงเวลากลางวัน อุณหภูมิของหินที่ได้จากการคำนวณมีค่าสูงสุดที่เวลา 16.00 น. (ประมาณ 4 ชั่วโมง หลังจากที่พักพลังงานแสงอาทิตย์มีค่าสูงสุด) แต่ผลที่ได้จากการตรวจวัดระบุว่าหินมีอุณหภูมิสูงสุดที่เวลา 18.00 น. (ประมาณ 6 ชั่วโมง หลังจากที่พักพลังงานแสงอาทิตย์มีค่าสูงสุด) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากจุดตรวจวัดอยู่ที่ระดับลึกลงไป 25 เซนติเมตร จากผิวที่รับพลังงานแสงอาทิตย์ จึงอาจเกิดการหน่วงของเวลาขณะที่พลังงานส่งผ่านมายังจุดตรวจวัด แต่การคำนวณด้วยสมการถูกสมมติให้หินทุกก้อนมีอุณหภูมิเท่ากัน ดังนั้นจึงไม่เกิดการหน่วงของเวลาที่หินจะเพิ่มอุณหภูมิ ส่วนการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศในระบบ

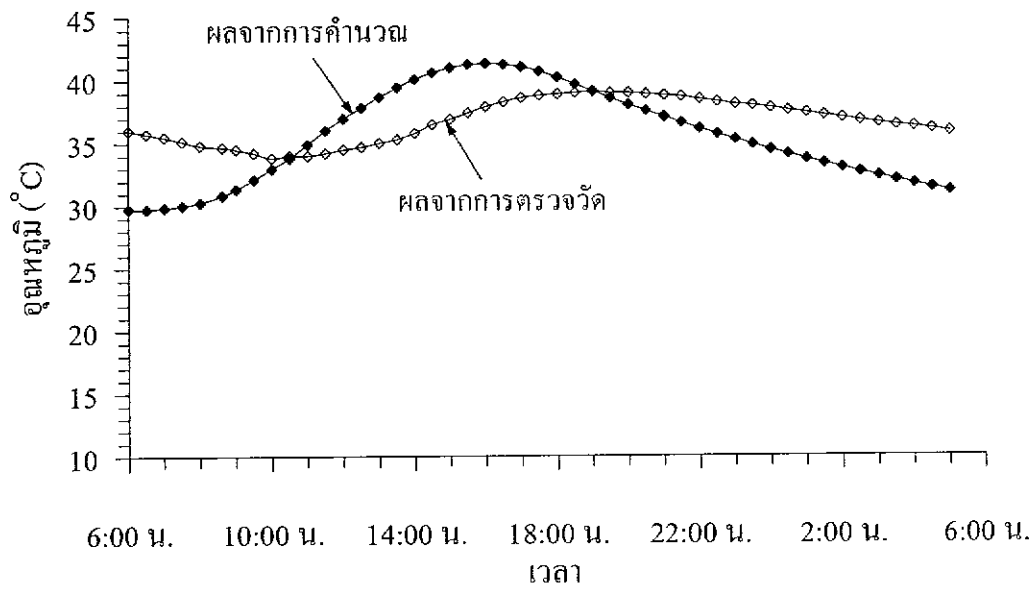


(ก) ทึนกลางบ่อ

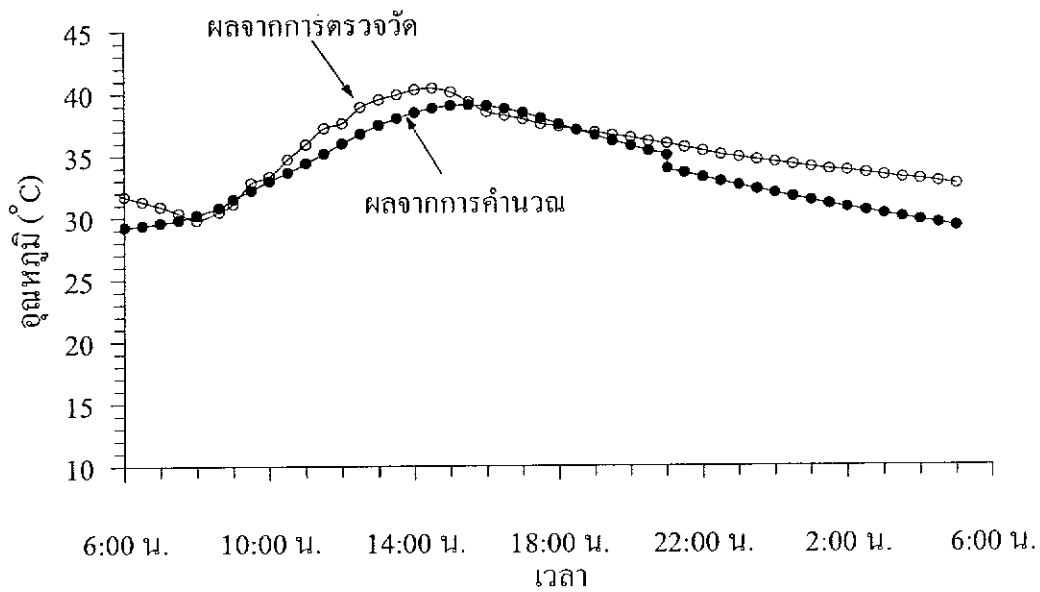


(ข) อากาศในบ่อ

รูปที่ 6.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของทึน (ก) และอากาศ (ข) ในบ่อกักเก็บพลังงานที่ได้จากการตรวจวัดในวันที่ 28 - 29 พฤศจิกายน 2548 เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ของ Model II สำหรับท่ออากาศร้อนขนาด 2 นิ้ว

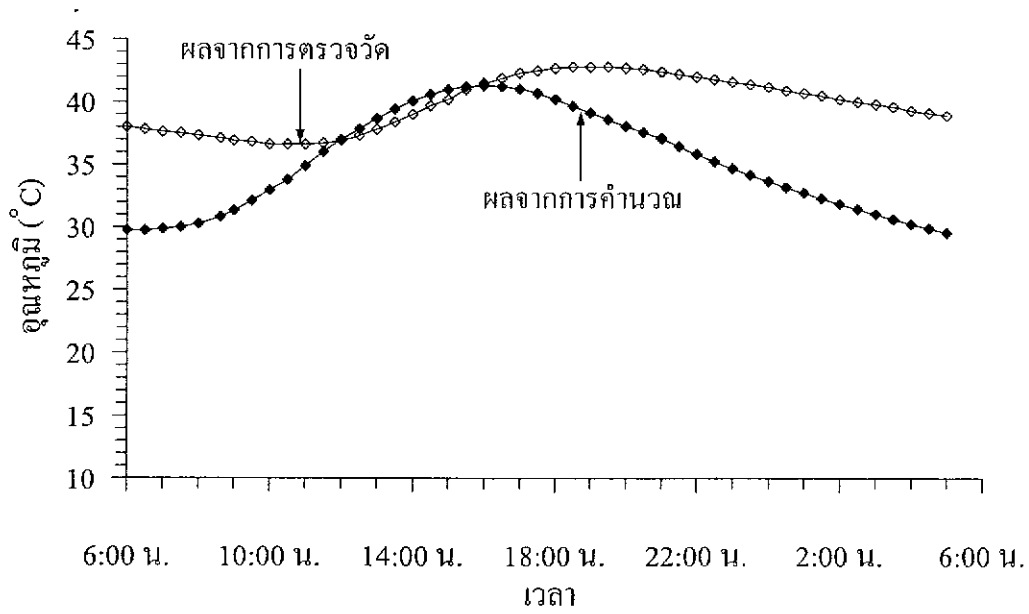


(ก) หินกลางบ่อ

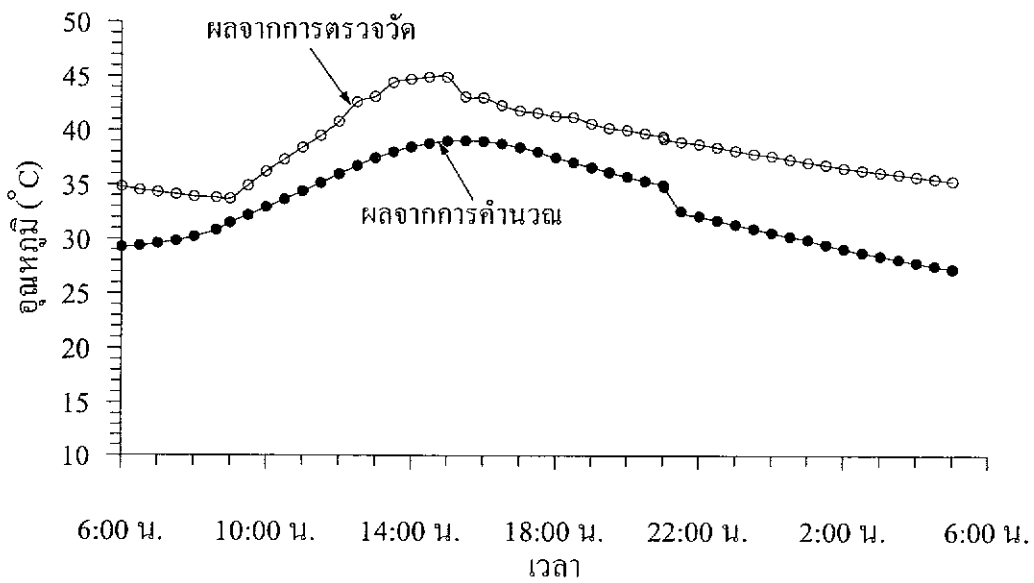


(ข) อากาศในบ่อ

รูปที่ 6.2 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของหิน (ก) และอากาศ (ข) ในบ่อกักเก็บพลังงานที่ได้จากการตรวจวัดในวันที่ 18-19 ธันวาคม 2548 เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ของ Model II สำหรับท่ออากาศร้อนขนาด 4 นิ้ว



(ก) หีนกลางบ่อ



(ข) อากาศในบ่อ

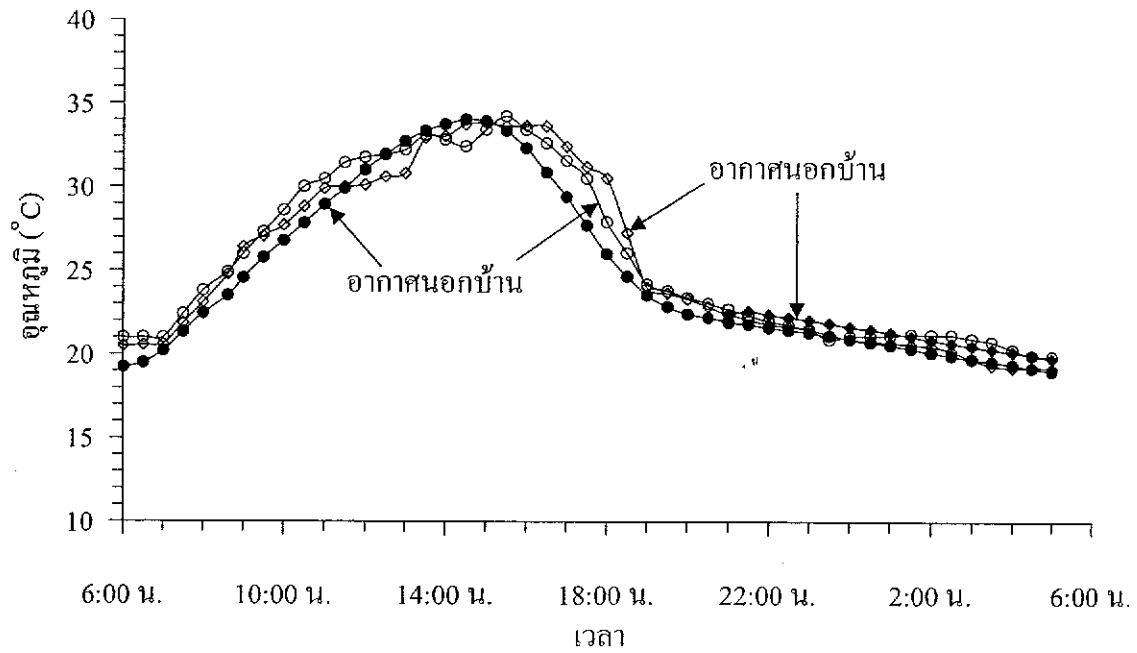
รูปที่ 6.3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของหีน (ก) และอากาศ (ข) ในบ่อที่เก็บพลังงานที่ได้จากการตรวจวัดในวันที่ 8 - 9 มกราคม 2549 เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ของ Model II สำหรับท่ออากาศร้อนขนาด 8 นิ้ว

หिनตมทั้งที่ไ้จากการตรวจวัดและการคำนวณให้ผลที่สอดคล้องกันดีพอสมควร กล่าวคืออุณหภูมิอากาศภายในระบบหिनตมช่วงเวลากลางวันมีค่ามากที่สุดที่เวลา 15.00 น. ส่วนในเวลากลางคืนการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของหिनและอากาศในระบบหिनตมมีความแตกต่างกันเล็กน้อย ระบบที่ใช้ท่ออากาศร้อนขนาดใหญ่ทำให้ความร้อนในหिनถูกดึงและถ่ายเทไปยังบ้านมากกว่าระบบท่อที่มีขนาดเล็ก ดังนั้นอัตราการเย็นตัวหรือการลดลงของอุณหภูมิหिनสำหรับระบบที่ใช้ท่ออากาศร้อนขนาดใหญ่จะสูงกว่าระบบที่ใช้ท่อขนาดเล็ก ส่วนการลดลงของอุณหภูมิอากาศในระบบหिनตมมีแนวโน้มเช่นเดียวกับการลดลงของอุณหภูมิของหिनเอง

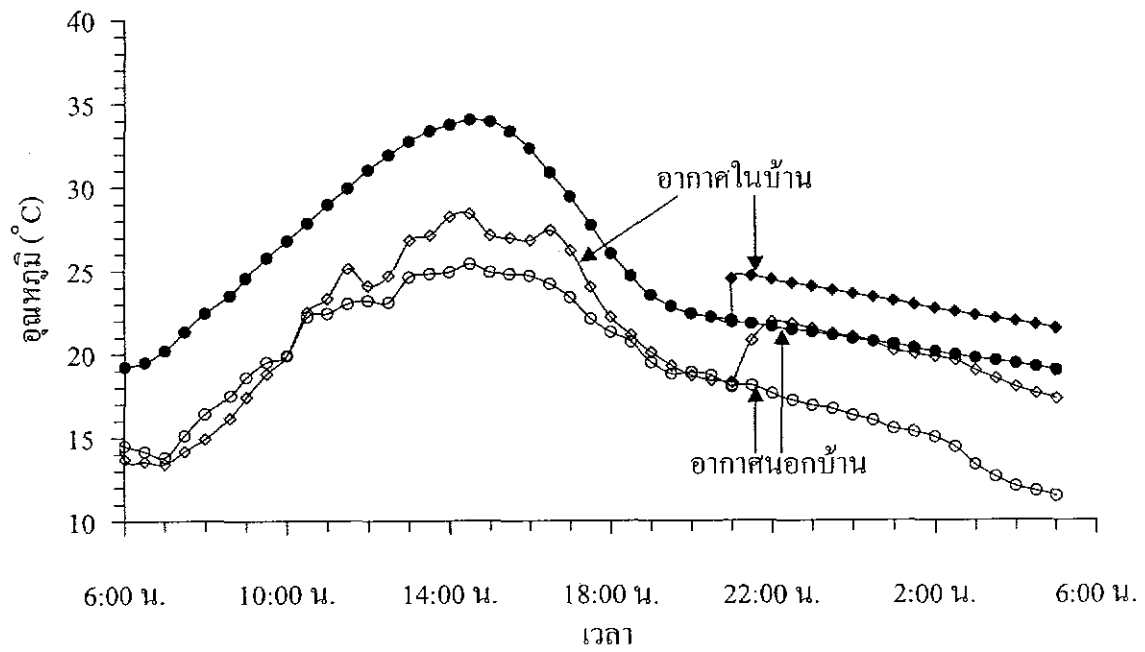
รูปที่ 6.4 ถึง 6.6 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศในบ้านและอากาศนอกบ้านที่ไ้จากการตรวจวัดและการคำนวณ โดยที่ระบบหिनตมใช้หิน 743 กิโลกรัม และใช้ท่ออากาศร้อนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต่างกัน 3 ขนาด (2, 4 และ 8 นิ้ว) ผลที่ได้มีความสอดคล้องกันดี คือเมื่อเพิ่มขนาดท่ออากาศร้อนการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในบ้านจะสูงขึ้นด้วย โดยที่การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในบ้านอยู่ระหว่าง 3 ถึง 6 องศาเซลเซียส

รูปที่ 6.7 และ 6.8 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของหिनและอากาศในระบบหिनตมโดยที่ปริมาณหินในบ่อประมาณ 370 กิโลกรัม และใช้ท่ออากาศร้อนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 ขนาด (8 นิ้ว และขนาดหน้าตัด 0.6×0.6 เมตร) ผลระบุว่าอุณหภูมิหินมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ 16.00 น. (ประมาณ 4 ชั่วโมง หลังจากที่พักงานแสงอาทิตย์มีค่าสูงสุด) ทั้งจากการตรวจวัดและการคำนวณ และยังพบว่าการหน่วงของเวลาที่หินเพิ่มอุณหภูมิขึ้นสูงสุดจะลดลงด้วย (เมื่อเทียบกับระบบที่ใช้หินหนัก 743 กิโลกรัม) สาเหตุอาจเนื่องมาจากจุดตรวจวัดอุณหภูมิอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้กับพื้นผิวรับแสงมากกว่าเดิม คืออยู่ที่ระดับความลึกลงไป 12 เซนติเมตร และหินในระบบหिनตมมีปริมาณลดลงในขณะที่ระดับพลังงานยังเท่าเดิม จึงเป็นสาเหตุให้หินร้อนเร็วขึ้นกว่าเดิม

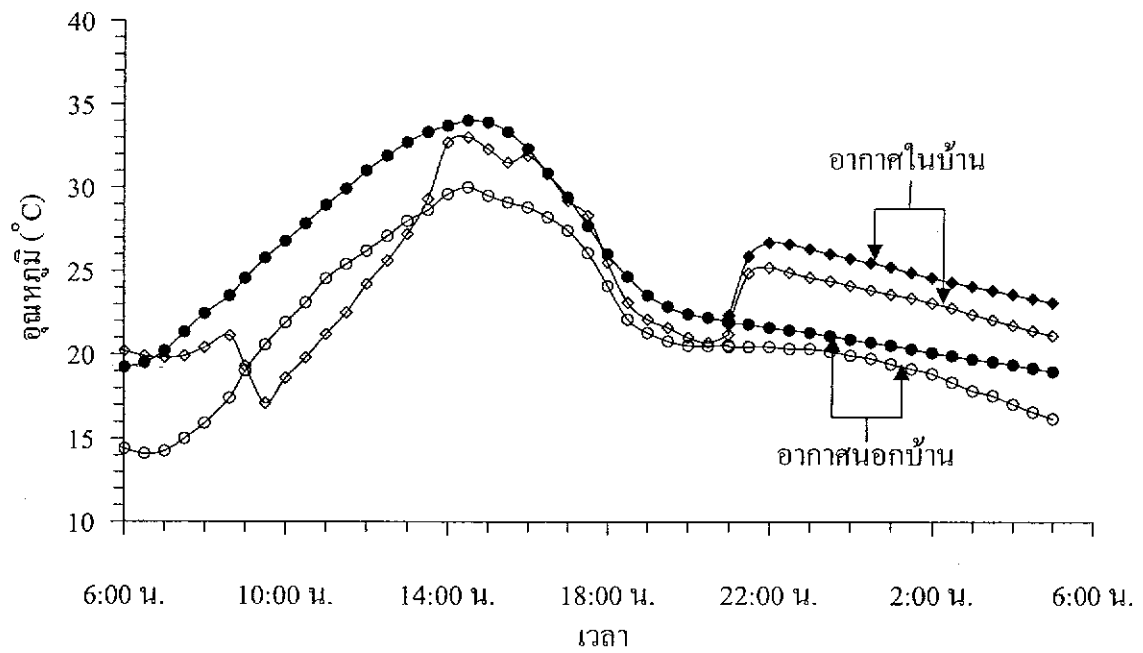
รูปที่ 6.9 และ 6.10 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศในบ้านและอากาศนอกบ้านที่ไ้จากการตรวจวัดและการคำนวณ ใช้ปริมาณหินประมาณ 370 กิโลกรัมและใช้ท่ออากาศร้อนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 ขนาด (8 นิ้ว และขนาดหน้าตัด 0.6×0.6 เมตร) ผลที่ไ้จากการตรวจวัดและการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ให้ผลที่สอดคล้องกัน คือหลังจากเปิดท่ออากาศร้อนแล้วพบว่าอุณหภูมิในบ้านจำลองมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 3 ถึง 4 องศาเซลเซียส และการเปรียบเทียบยังชี้ให้เห็นว่าการลดปริมาณหินลงครึ่งหนึ่ง (จาก 734 กิโลกรัม) มีผลทำให้การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของบ้านจำลองมีค่าลดน้อยกว่าที่ใช้หิน 734 กิโลกรัม ประมาณ 1-2 องศาเซลเซียสเท่านั้น หรืออาจกล่าวอีกนัยหนึ่งไ้ว่าการลดลงของหินร้อยละ 50 ในงานวิจัยนี้ทำให้การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมิค่าลดลงเพียงร้อยละ 20 ถึง 30 เท่านั้น



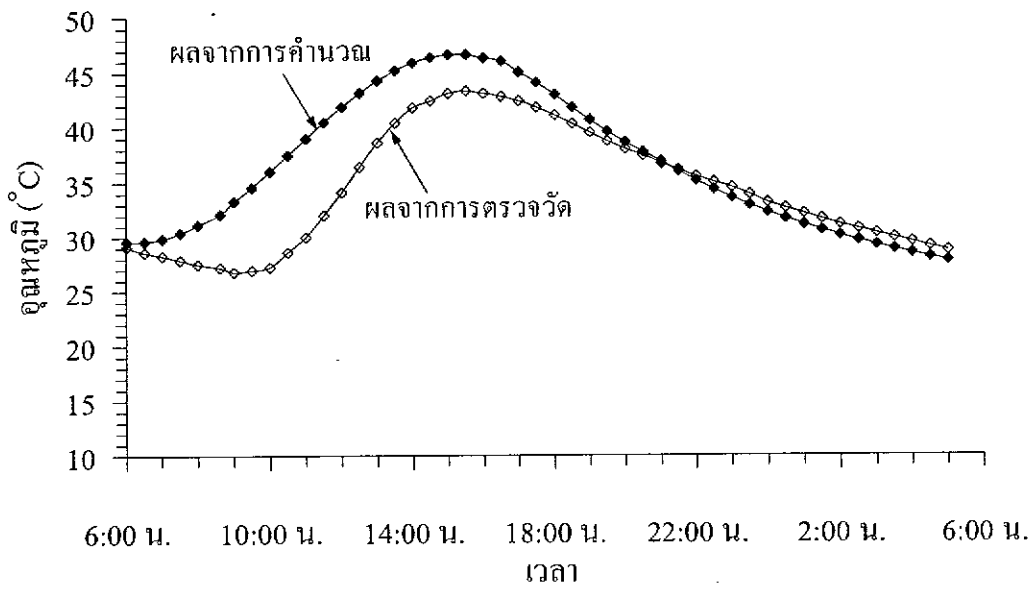
รูปที่ 6.4 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศในบ้านและนอกบ้านที่ได้จากการตรวจวัดในวันที่ 28 - 29 พฤศจิกายน 2548 (จุดโปร่ง) เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ (จุดทึบ) ของ Model II สำหรับท่ออากาศร้อนขนาด 2 นิ้ว



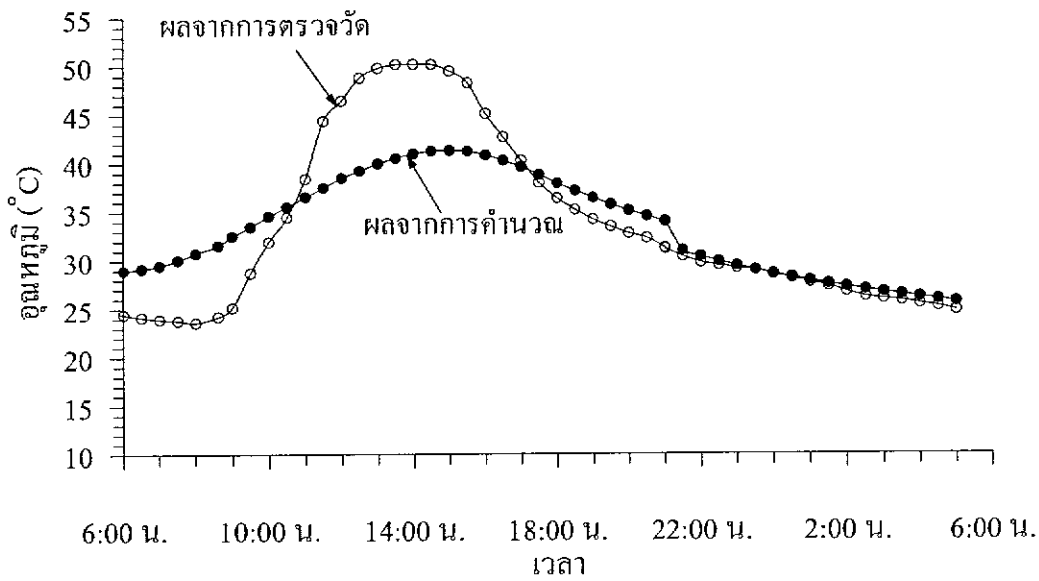
รูปที่ 6.5 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศในบ้านและนอกบ้านที่ได้จากการตรวจวัดในวันที่ 18 - 19 ธันวาคม 2548 (จุดโปร่ง) เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ (จุดทึบ) ของ Model II สำหรับท่ออากาศร้อนขนาด 4 นิ้ว



รูปที่ 6.6 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศในบ้านและนอกบ้านได้จากการตรวจวัดในวันที่ 8-9 มกราคม 2549 (จุดโปร่ง) เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ (จุดทึบ) ของ Model II สำหรับที่อากาศร้อนขนาด 8 นิ้ว

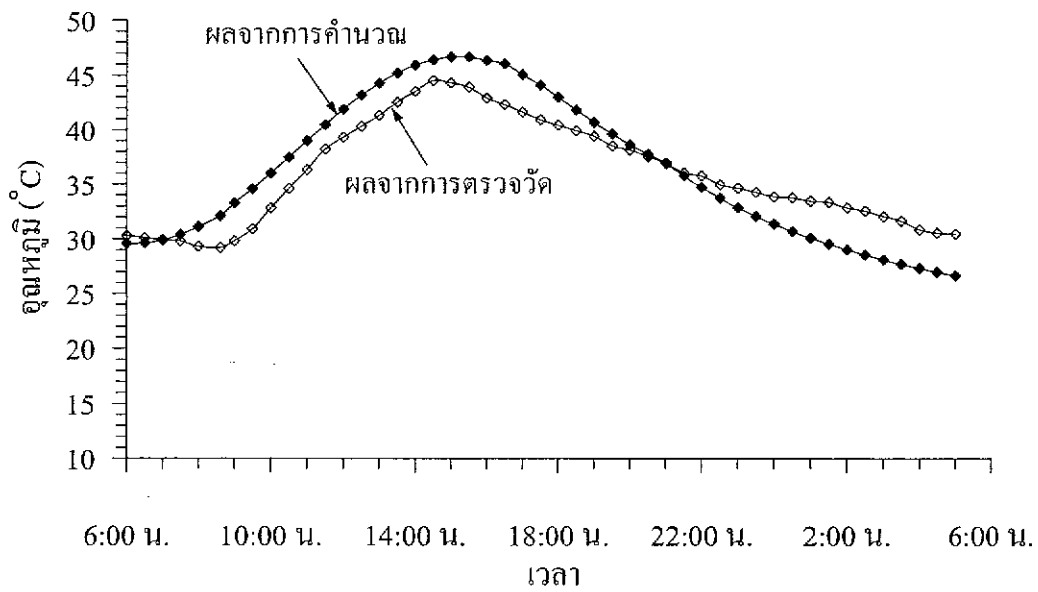


(ก) หินกลางบ่อ

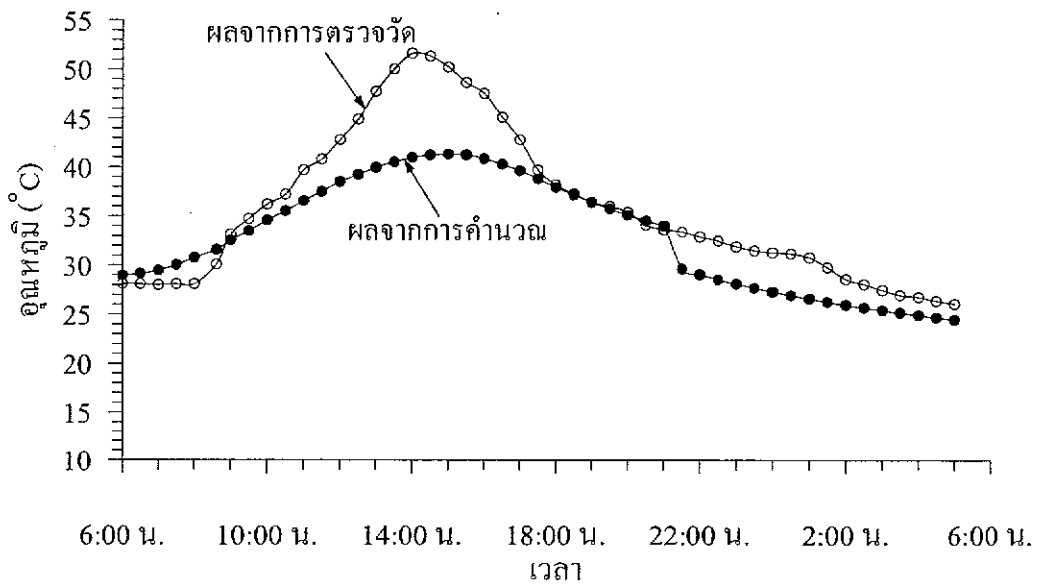


(ข) อากาศในบ่อ

รูปที่ 6.7 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของหิน (ก) และอากาศ (ข) ในบ่อที่เก็บพลังงานที่ได้จากการตรวจวัด ในวันที่ 4-5 มกราคม 2550 เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ของ Model II สำหรับท่ออากาศร้อนขนาด 8 นิ้ว และใช้ปริมาณหินประมาณ 370 กิโลกรัม

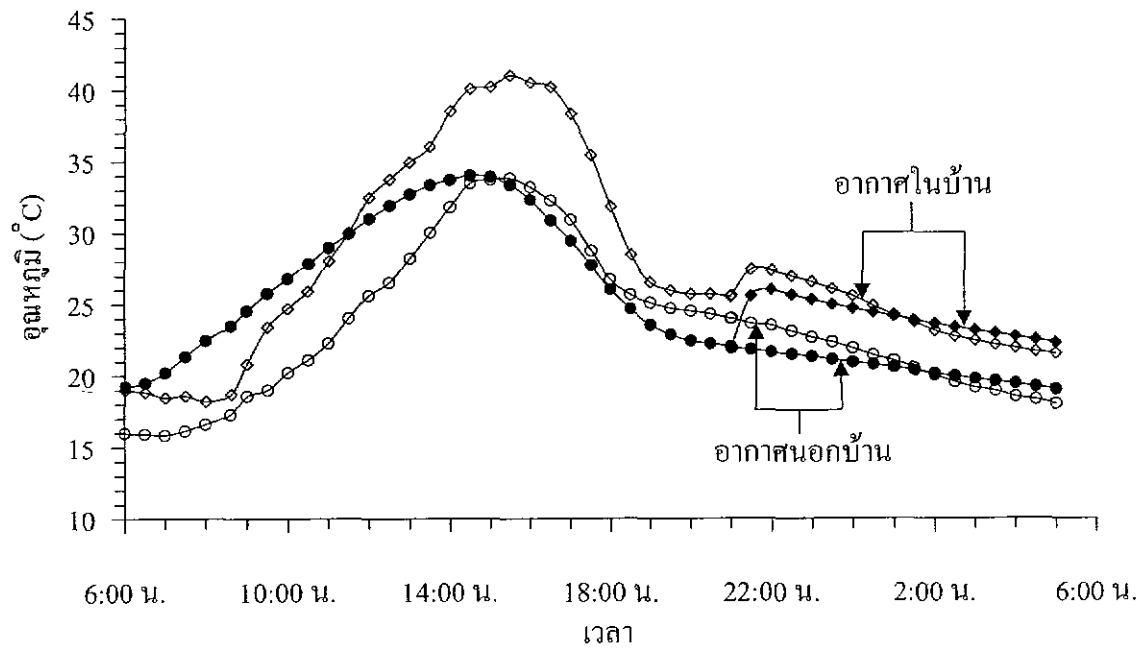


(ก) หินกลางบ่อ

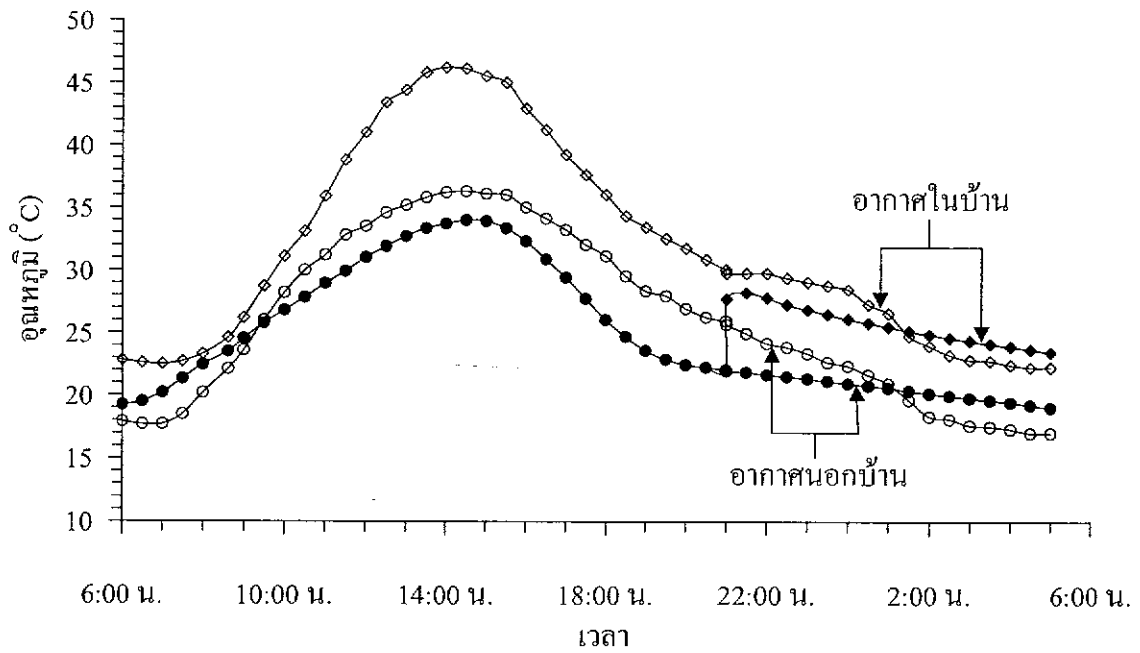


(ข) อากาศในบ่อ

รูปที่ 6.8 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของหิน (ก) และอากาศ (ข) ในบ่อกักเก็บพลังงานที่ได้จากการตรวจวัดในวันที่ 16 - 17 กุมภาพันธ์ 2550 เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ของ Model II สำหรับท่ออากาศร้อนขนาดหน้าตัด 0.6×0.6 เมตร และใช้ปริมาณหินประมาณ 370 กิโลกรัม



รูปที่ 6.9 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศในบ้านและนอกบ้านได้จากการตรวจวัดในวันที่ 4 - 5 มกราคม 2550 (จุดโปร่ง) เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ (จุดทึบ) ของ Model II สำหรับท่ออากาศร้อนขนาด 8 นิ้ว และใช้ปริมาณหินประมาณ 370 กิโลกรัม



รูปที่ 6.10 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศในบ้านและนอกบ้านได้จากการตรวจวัดในวันที่ 16 - 17 กุมภาพันธ์ 2550 (จุดโปร่ง) เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ (จุดทึบ) ของ Model II สำหรับห้องอากาศร้อนขนาดหน้าตัด 0.6×0.6 เมตร และใช้ปริมาณหินประมาณ 370 กิโลกรัม

6.2 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปร

การวิเคราะห์ความอ่อนไหวมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของตัวแปรที่เกี่ยวข้องต่อประสิทธิภาพของระบบกักเก็บพลังงานในหินฉวม ซึ่งผลที่ได้จะนำมากำหนดปัจจัยหลักที่ต้องพิจารณาในขั้นตอนของการออกแบบระบบหินฉวม ตัวแปรที่นำมาวิเคราะห์ความอ่อนไหวแยกเป็น 2 กลุ่ม คือ 1) ตัวแปรจากปัจจัยภายใน ได้แก่ ขนาดของท่ออากาศร้อน ขนาดของห้อง ขนาดของพื้นที่รับพลังงานแสงอาทิตย์ และชนิดของหิน และ 2) ตัวแปรจากปัจจัยภายนอก ได้แก่ การรั่วไหลของห้อง อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม และระดับพลังงานจากแสงอาทิตย์ การวิเคราะห์ได้กำหนดค่าตั้งต้นสำหรับตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้

- 1) ปริมาตรบ้าน (V_b) เท่ากับ 56 ลูกบาศก์เมตร
- 2) ขนาดท่ออากาศร้อน (ϕ) เท่ากับ 10 เซนติเมตร
- 3) ปริมาตรหินฉวม (V_r) เท่ากับ $1/6$ เท่า ของปริมาตรบ้าน (V_b)
- 4) พื้นที่รับพลังงานแสงอาทิตย์ (A_{app}) เท่ากับ 16 ตารางเมตร
- 5) อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมต่ำสุดเท่ากับ 10 องศาเซลเซียส (ที่เวลา 6.00 น.)
- 6) พลังงานแสงอาทิตย์ใช้ค่าต่ำสุดของพลังงานแสงในช่วงฤดูหนาว (รูปที่ 6.1) ซึ่งคิดเป็นพลังงานรวมเท่ากับ $3,480 \text{ W/m}^2$

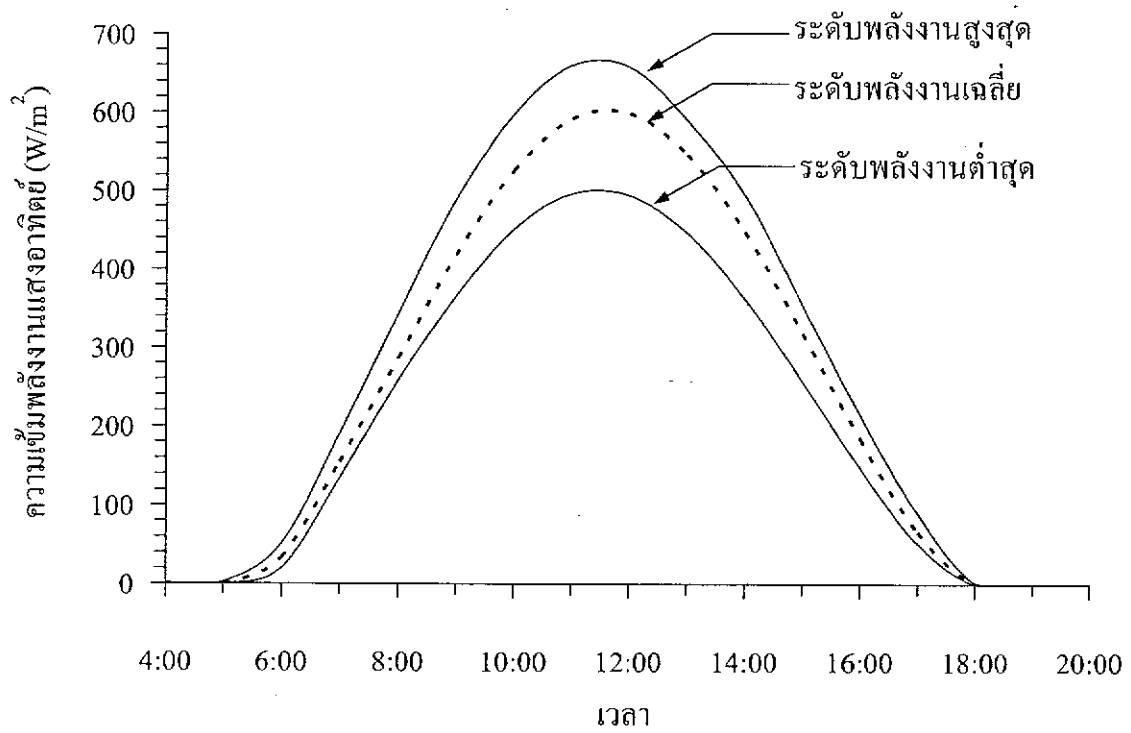
ด้วยข้อกำหนดนี้ ระบบหินฉวมสามารถทำให้อุณหภูมิในบ้านสูงขึ้นกว่าสิ่งแวดล้อมประมาณ 3 องศาเซลเซียส

1) ผลกระทบจากระดับพลังงาน

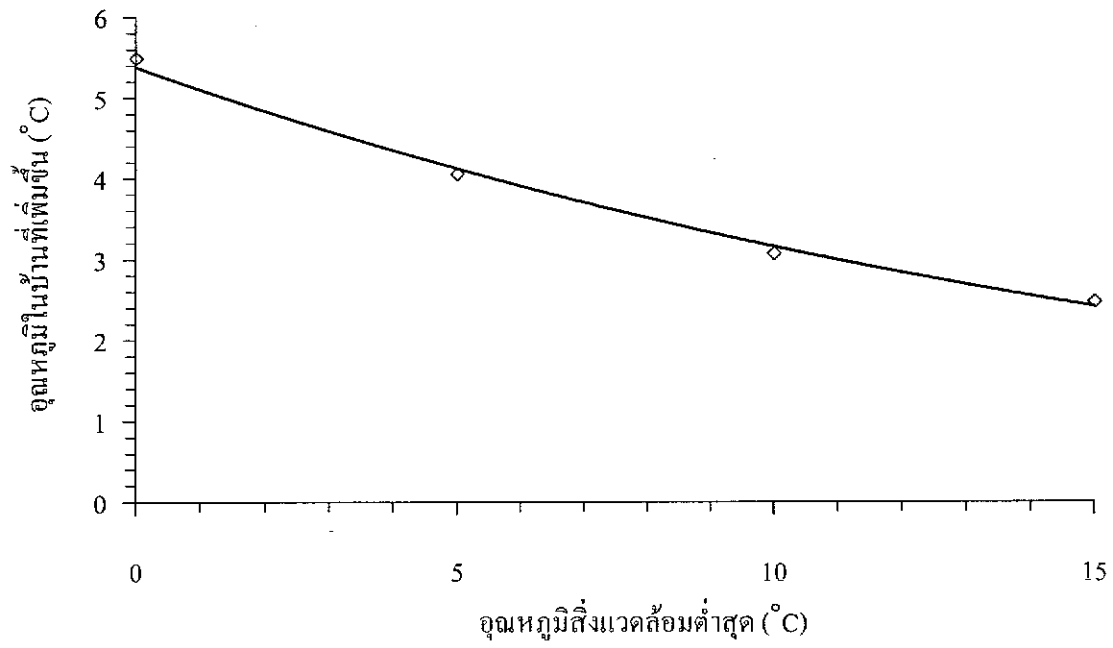
การผันแปรระดับพลังงานจากแสงอาทิตย์โดยใช้ค่าสูงสุด (พลังงานรวม $4,734 \text{ W/m}^2$) และค่าต่ำสุด ($3,480 \text{ W/m}^2$) ที่กระจายในพื้นที่ภาคเหนือช่วงฤดูหนาว (รูปที่ 6.11) พบว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในบ้านที่ระดับพลังงานต่ำสุดมีค่าประมาณ 3 องศาเซลเซียส ส่วนที่ระดับพลังงานสูงสุดมีค่าประมาณ 3.4 องศาเซลเซียส (ร้อยละ 10) ในการวิเคราะห์ผลกระทบจากตัวแปรอื่นจะใช้ค่าพลังงานที่ระดับต่ำสุดเพื่อให้ผลออกมาในเชิงอนุรักษ์

2) ผลกระทบจากลักษณะภูมิอากาศ

การศึกษาในหัวข้อนี้ได้ผันแปรอุณหภูมิแวดล้อมของสิ่งแวดล้อมในช่วงเวลา 6.00 น. ออกเป็น 4 ระดับ คือ 0-5, 5-10, 10-15 และ 15-20 องศาเซลเซียส การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในบ้านจะลดลงเมื่ออุณหภูมิแวดล้อมในตอนเช้าสูงขึ้น (รูปที่ 6.12) นั่นคือที่การออกแบบเดียวกัน หากนำไปใช้สภาวะแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูงขึ้น ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของระบบหินฉวมจะลดลงเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิภายในบ้านและในระบบหินฉวมมีค่าลดลง



รูปที่ 6.11 ระดับพลังงานสูงสุดและต่ำสุดที่เฉลี่ยในพื้นที่ภาคเหนือช่วงฤดูหนาวของประเทศไทย
(Exell and Kumar, 1981)



รูปที่ 6.12 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในบ้านภายใต้สภาวะที่มีอุณหภูมิต่ำสุดของสิ่งแวดล้อม

3) ผลกระทบจากชนิดของหิน (ค่าความจุความร้อนจำเพาะ)

การศึกษาผลกระทบจากค่าความจุความร้อนจำเพาะของหิน ได้มีการผันแปรค่าความจุความร้อนจำเพาะของหินโดยใช้ค่าที่วัดได้จากหินทั้ง 12 ชนิด ที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการ ผลที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 6.13 ซึ่งระบุว่ากลุ่มตัวอย่างที่นำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกันมาก (การเพิ่มขึ้นอยู่ระหว่าง 3.02 ถึง 3.08 องศาเซลเซียส) ดังนั้นไม่ว่าจะใช้หินชนิดใดที่มีการทดสอบในงานวิจัยนี้ ประสิทธิภาพของระบบจะไม่ลดลงไปด้วย

4) ผลกระทบจากขนาดของบ้าน

การศึกษาได้ผันแปรอัตราส่วนระหว่างปริมาตรบ้านต่อปริมาตรหินถมตั้งแต่ 1:1 ถึง 1:12 และกำหนดให้ปริมาตรของหินถมคงที่เท่ากับ 9.33 ลูกบาศก์เมตร (4.0×4.0×0.58 เมตร) ผลที่ได้ระบุว่าเมื่อบ้านมีขนาดใหญ่ขึ้นจะส่งผลให้การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในบ้านลดลง (รูปที่ 6.14) สาเหตุเนื่องมาจากการที่ปริมาตรบ้านสูงขึ้น ปริมาตรของอากาศภายในบ้านก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสามารถแสดงด้วยสมการ

$$\Delta T = 5.08 \left(\frac{V_h}{V_b} \right)^{-0.376} \quad (6.1)$$

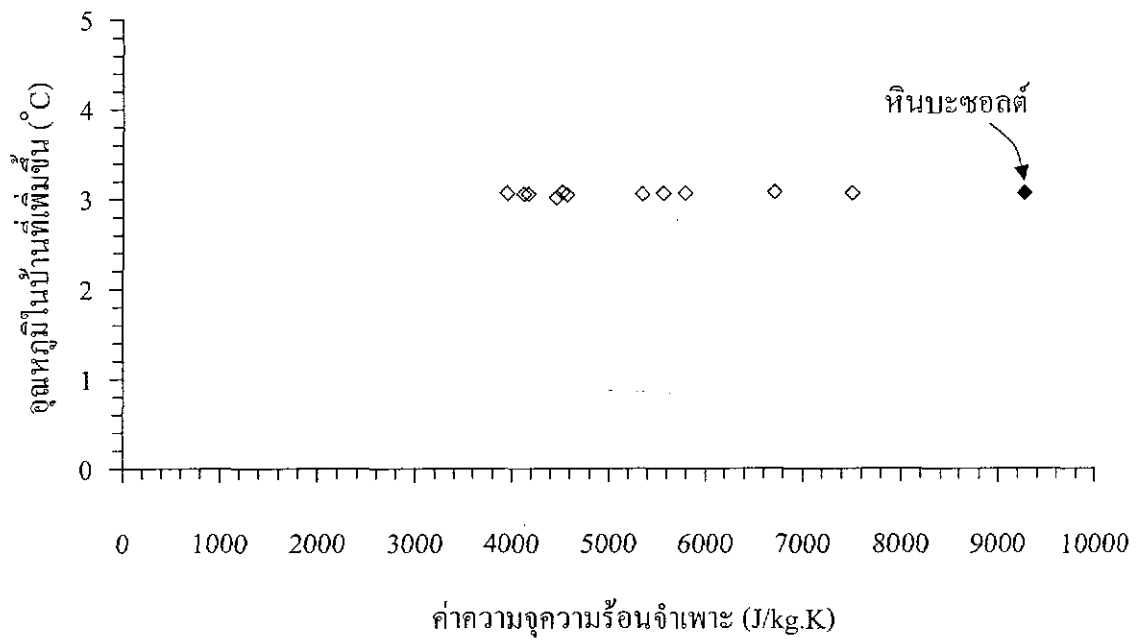
5) ผลกระทบของพื้นที่รับพลังงานแสงอาทิตย์

การศึกษาได้ผันแปรขนาดของพื้นที่รับพลังงานแสงอาทิตย์ตั้งแต่ 4 ตารางเมตร (2.0×2.0 เมตร) ถึง 25 ตารางเมตร (5.0×5.0 เมตร) และกำหนดให้ปริมาตรหินถมที่เท่ากับ 9.33 ลูกบาศก์เมตร ผลที่ได้ระบุว่าถ้าพื้นที่รับพลังงานแสงอาทิตย์มีขนาดใหญ่ขึ้นจะทำให้อุณหภูมิในบ้านสูงขึ้นด้วย (รูปที่ 6.15) เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของพื้นที่รับพลังงานแสงอาทิตย์จะทำให้หินในระบบหินถมรับพลังงานได้สูงขึ้นด้วย ซึ่งสามารถแสดงด้วยสมการ

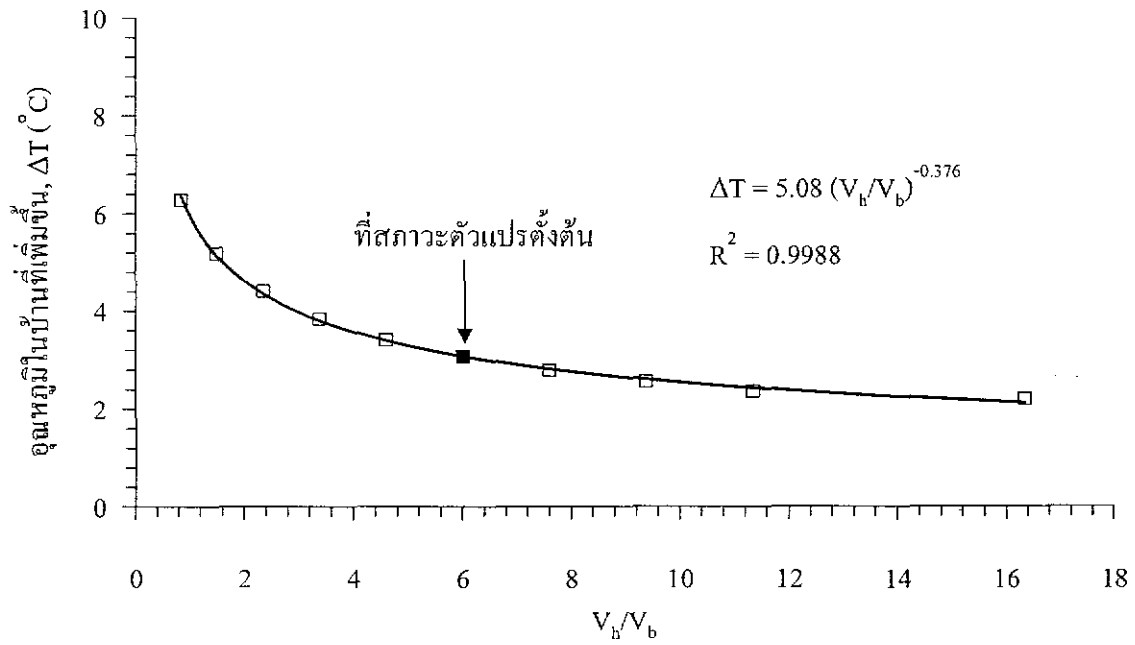
$$\Delta T = 0.043 A_{\text{tcp}} + 2.40 \quad (6.2)$$

6) ผลกระทบของท่ออากาศร้อน

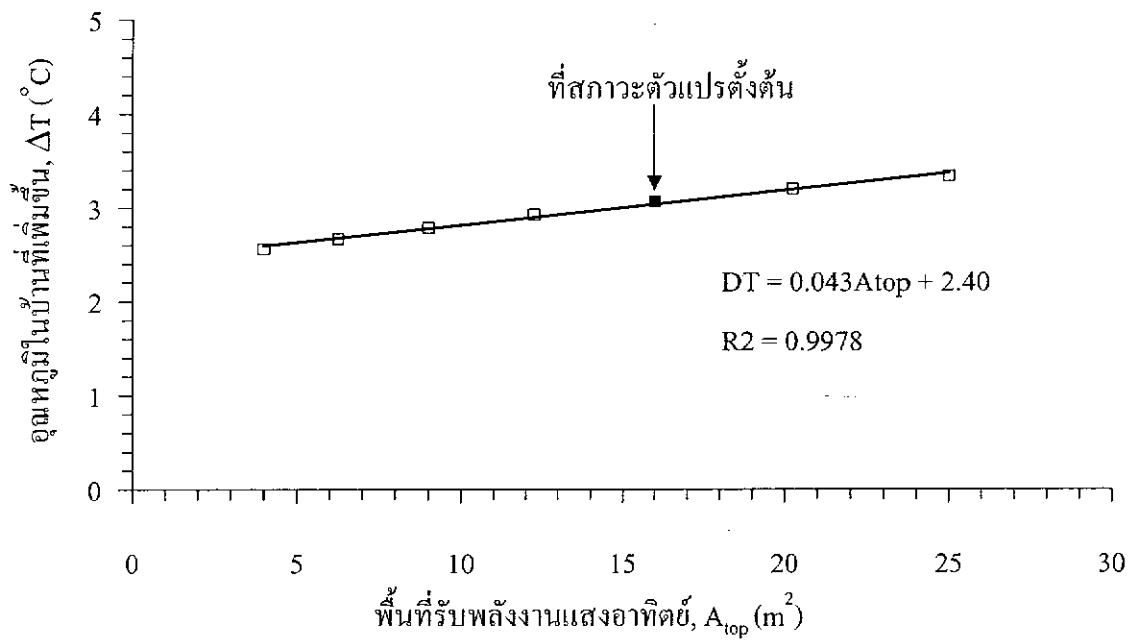
การศึกษาผลกระทบของขนาดท่ออากาศร้อนโดยการผันแปรขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.5 เมตร และได้กำหนดให้ตัวแปรอื่นคงที่ ผลที่ได้ระบุว่าหากต้องการให้อุณหภูมิในบ้านสูงขึ้นจะต้องใช้ท่ออากาศร้อนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นด้วย เพื่อทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนที่แผงมาในมวลอากาศที่ไหลผ่านท่อมีค่าสูงขึ้น รูปที่ 6.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในบ้านที่เพิ่มขึ้นกับขนาดของท่ออากาศร้อน



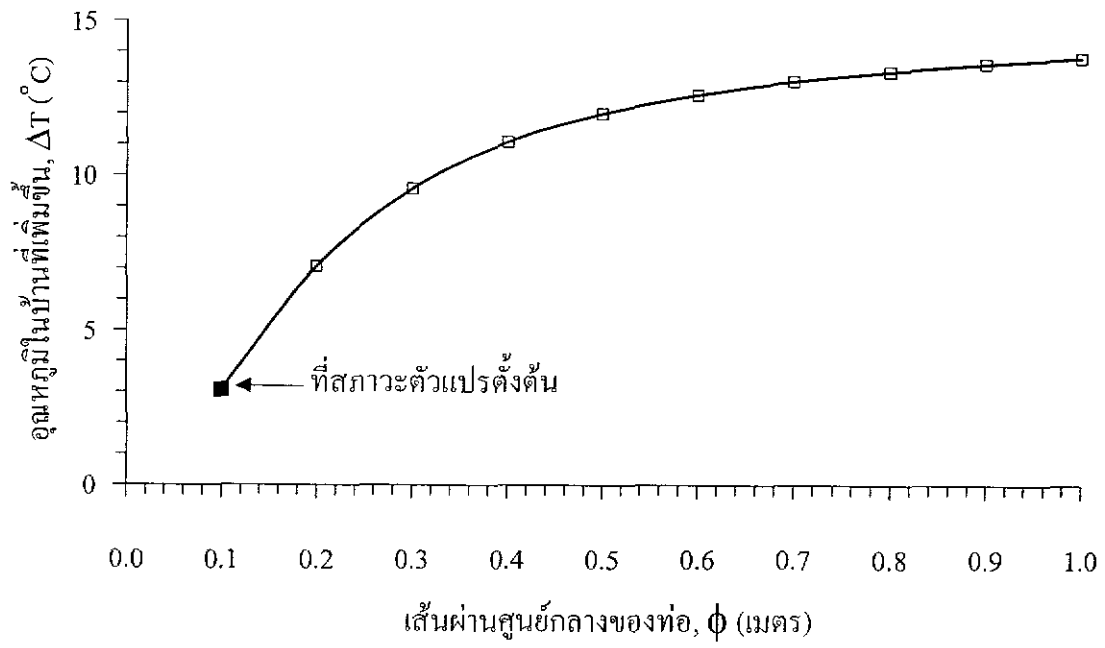
รูปที่ 6.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในบ้านที่เพิ่มขึ้นที่ได้จากการคำนวณกับค่าความจุความร้อนจำเพาะของหิน 12 ชนิด ที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการในงานวิจัยนี้



รูปที่ 6.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในบ้านที่เพิ่มขึ้นกับสัดส่วนของปริมาณบ้าน (V_i) ต่อ ปริมาตรหืนถ (V_o)



รูปที่ 6.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในบ้านที่เพิ่มขึ้นกับพื้นที่รับพลังงานแสงอาทิตย์ของบ่อ



รูปที่ 6.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในบ้านที่เพิ่มขึ้นกับขนาดของท่ออากาศร้อนที่ใช้

7) ผลกระทบจากการรั่วไหลของบ้าน

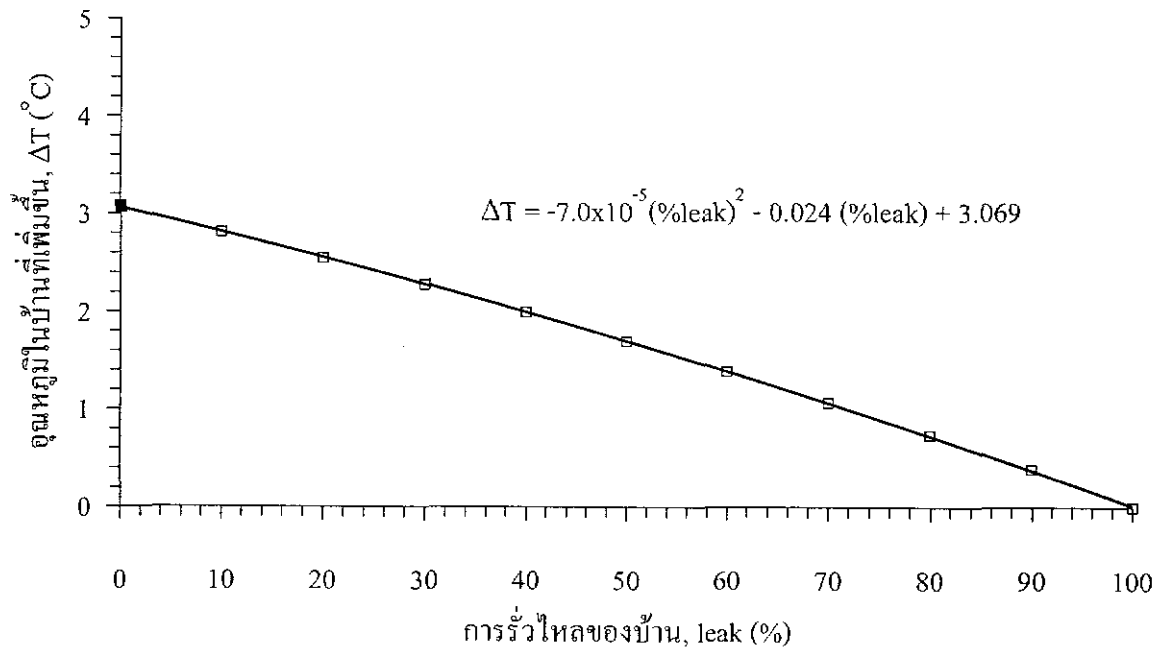
การรั่วไหลของบ้านเป็นอีกปัจจัยหนึ่งซึ่งส่งผลให้การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในบ้านลดลง การรั่วไหลเกิดจากวัสดุที่ใช้สร้างบ้าน รอยต่อของผนังและหน้าต่างนั่นเอง รูปที่ 6.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในบ้านที่เพิ่มขึ้นกับการรั่วไหลของบ้าน

6.3 แนวทางการออกแบบระบบหिनถม

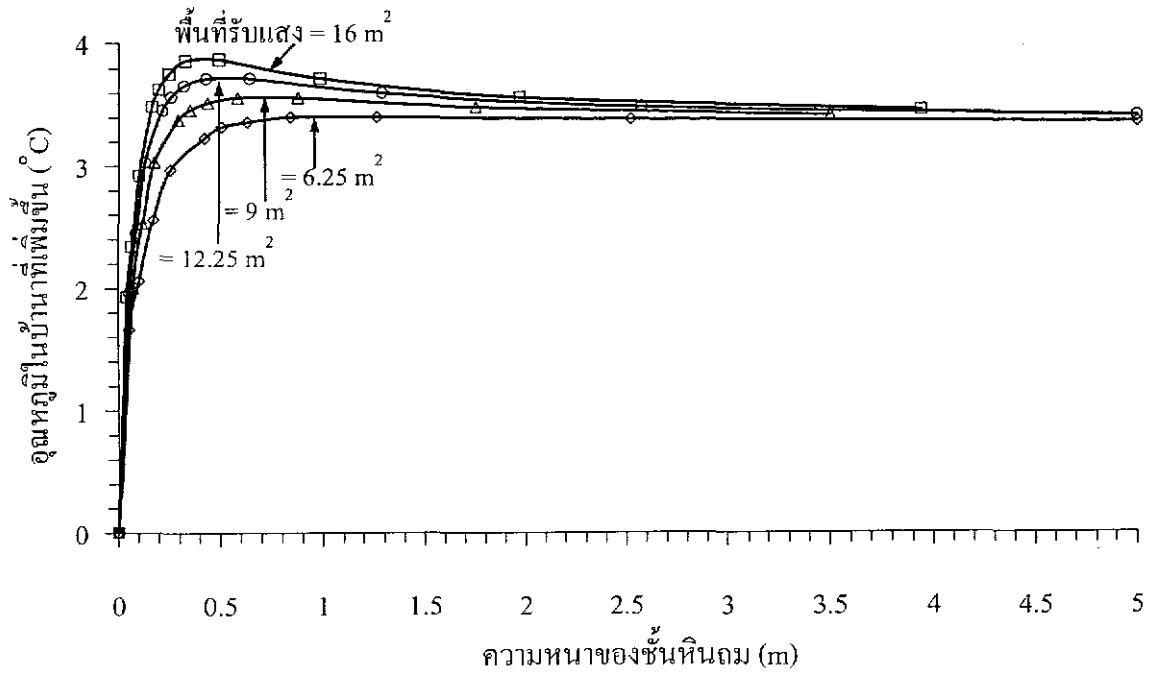
แนวทางการออกแบบระบบหिनถมร่างขึ้นภายใต้สมมติฐานที่ว่า พลังงานความร้อนภายในบ้านไม่มีการรั่วไหลสู่สิ่งแวดล้อมและสภาพอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมต่ำสุดในรอบวันเท่ากับ 0 องศาเซลเซียส โดยประโยชน์ของแนวทางในการออกแบบนี้ก็เพื่อความสะดวกและง่ายต่อการก่อสร้างสำหรับประชาชน การออกแบบจะใช้กราฟช่วยในการกำหนดปริมาณหिनถมให้เหมาะสมกับปริมาณบ้าน (ปริมาตรของห้องที่ต้องการความอบอุ่น) กำหนดความหนาของชั้นหินให้เหมาะสมกับพื้นที่รับพลังงานแสงอาทิตย์ และระบุอุณหภูมิภายในบ้านที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อเชื่อมต่อกับระบบหिनถมด้วยท่ออากาศร้อนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต่างกันตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.5 เมตร และได้กำหนดผลกระทบจากปัจจัยด้านอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมต่ำสุดและการรั่วไหลของบ้านที่จะส่งผลในทางลบต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในบ้าน แนวทางในการออกแบบนี้ยังมีความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติด้วย

จากการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปรที่เกี่ยวข้องสามารถสรุปได้ว่าปัจจัยหลักที่ควรพิจารณาในการออกแบบมี 4 ปัจจัย คือ ปริมาตรของบ้านหรือปริมาตรของห้อง (V_h) ปริมาตรของหिनถม (V_g) ขนาดของพื้นที่รับพลังงานแสงอาทิตย์ (A_{top}) และขนาดของท่ออากาศร้อน (ϕ) ส่วนปัจจัยด้านพลังงาน การรั่วไหลของบ้าน และภูมิอากาศกำหนดให้เป็นปัจจัยภายนอกที่ส่งผลกระทบต่อการออกแบบ โดยจะนำมาพิจารณาการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอุณหภูมิในห้อง

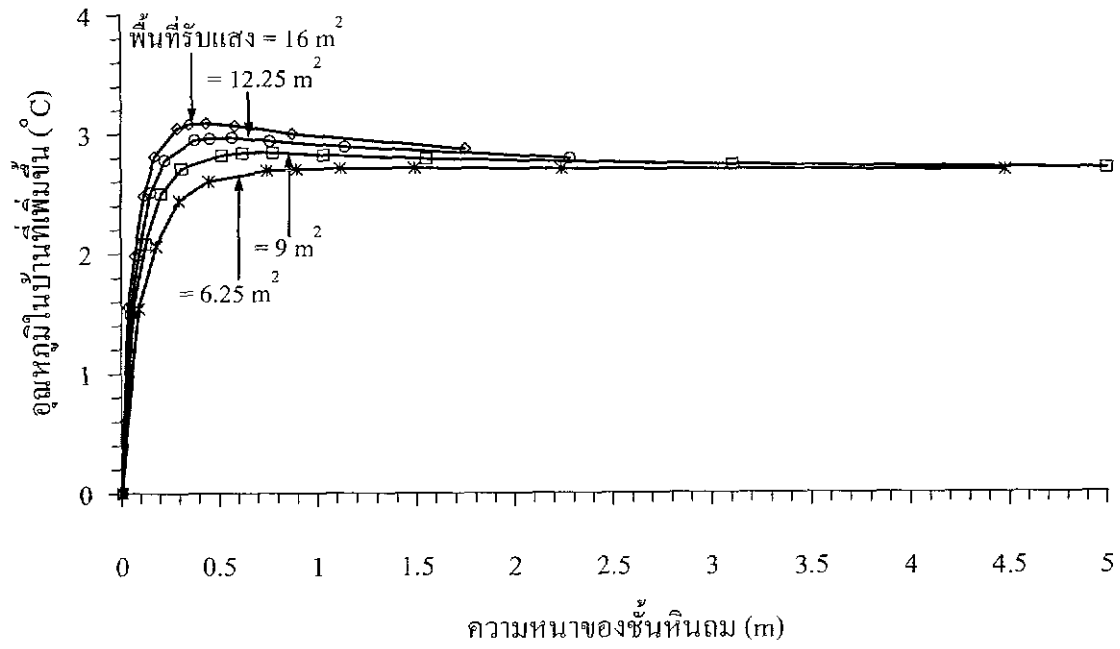
จากการผันแปรพื้นที่รับพลังงานแสงอาทิตย์ 4 ขนาด และความลึก 10 ขนาด พบว่าเมื่อพื้นที่รับพลังงานแสงอาทิตย์ใหญ่ขึ้นความหนาของชั้นหินถมที่ทำให้อุณหภูมิในบ้านเพิ่มขึ้นสูงสุดนั้นจะลดลง (รูปที่ 6.18 ถึง 6.20) แต่เมื่อนำมาคำนวณกลับไปเป็นปริมาณหिनถมแล้วจะได้ปริมาณหिनถมค่าเดียวกัน และเมื่อผันแปรปริมาตรของบ้านจะพบว่า เมื่อปริมาตรของบ้านสูงขึ้น ปริมาตรของหินถมจะต้องสูงขึ้นด้วยเพื่อให้อุณหภูมิในบ้านเพิ่มขึ้นด้วย ถึงตอนนี้จะได้สัดส่วนระหว่างปริมาตรของหินถมที่เหมาะสมที่สุดต่อปริมาตรบ้าน นอกจากนี้ยังได้ผันแปรขนาดของท่ออากาศร้อน อุณหภูมิของอากาศภายนอกที่ต่ำสุด และการรั่วไหลของบ้าน เพื่อนำไปพิจารณาการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่สภาวะต่าง ๆ เหล่านั้น ซึ่งได้เป็นแนวทางในการออกแบบดังนี้



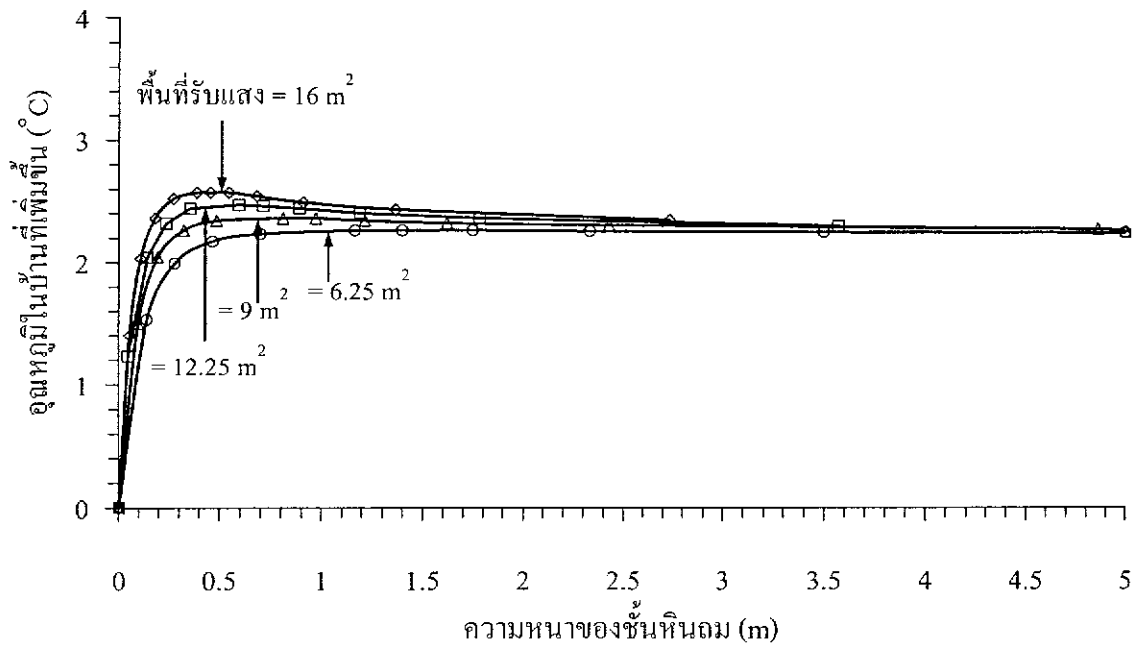
รูปที่ 6.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในบ้านที่เพิ่มขึ้นกับการรั่วไหลของบ้าน



รูปที่ 6.18 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในบ้านที่มีปริมาตร 31.5 ลูกบาศก์เมตร โดยมีพื้นที่รับพลังงานแสงอาทิตย์แตกต่างกัน 4 ขนาด และมีความหนาของชั้นหินฉนวนระหว่าง 0 ถึง 5 เมตร ความหนาที่ทำให้อุณหภูมิในบ้านเพิ่มขึ้นสูงสุดคำนวณเป็นปริมาตรหินฉนวนได้เท่ากับ 6.3 ลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 6.19 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในบ้านที่มีปริมาตร 56 ลูกบาศก์เมตร โดยมีพื้นที่รับพลังงานแสงอาทิตย์แตกต่างกัน 4 ขนาด และมีความหนาของชั้นหินถมอยู่ระหว่าง 0 ถึง 5 เมตร ความหนาที่ทำให้อุณหภูมิในบ้านเพิ่มขึ้นสูงสุดคำนวณเป็นปริมาตรหินถมได้เท่ากับ 7.0 ลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 6.20 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในบ้านที่มีปริมาตร 87.5 ลูกบาศก์เมตร โดยมีพื้นที่รับพลังงานแสงอาทิตย์แตกต่างกัน 4 ขนาด และมีความหนาของชั้นหินฉนวนอยู่ระหว่าง 0 ถึง 5 เมตร ความหนาที่ทำให้อุณหภูมิในบ้านเพิ่มขึ้นสูงสุดคำนวณเป็นปริมาตรหินฉนวนได้เท่ากับ 8.0 ลูกบาศก์เมตร

1) กำหนดปริมาตรหินถมให้เหมาะสมกับปริมาตรของบ้าน

โดยการใช้กราฟความสัมพันธ์ที่แสดงในรูปที่ 6.21 ตัวอย่างเช่น ถ้าบ้านมีขนาด $4.0 \times 4.0 \times 3.5$ เมตร จะต้องใช้หินถมที่มีปริมาตรเท่ากับ 7 ลูกบาศก์เมตร ดังนั้นหากใช้พื้นที่รับพลังงานแสงอาทิตย์เท่ากับ 3 ตารางเมตร ความหนาของหินถมเท่ากับ 0.8 เมตร ซึ่งสามารถตรวจสอบได้ว่าความหนาดังกล่าวอยู่ในช่วงที่เหมาะสมหรือไม่โดยอาศัยรูปที่ 6.22 ปริมาตรหินถมที่เหมาะสมสามารถหาได้จากสมการ

$$V_b = 0.03V_u + 5.36 \quad (6.3)$$

2) กำหนดขนาดของท่อที่จะใช้และตรวจระดับอุณหภูมิในบ้านที่จะเพิ่มขึ้น

ในขั้นตอนนี้จะต้องมีการกำหนดขนาดของท่อที่คาดว่าจะใช้เพื่อนำไปคาดคะเนการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในบ้าน (ΔT) โดยอาศัยกราฟและเลือกตามขนาดของพื้นที่รับพลังงานแสงอาทิตย์ 4 ขนาด คือ 6.3 ตารางเมตร (รูปที่ 6.23) 9.0 ตารางเมตร (รูปที่ 6.24) 12.3 ตารางเมตร (รูปที่ 6.25) และ 16 ตารางเมตร (รูปที่ 6.26) ถ้าพื้นที่รับพลังงานแสงอาทิตย์ต่างจาก 4 ค่านี้ ก็ควรเทียบเคียงเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสม

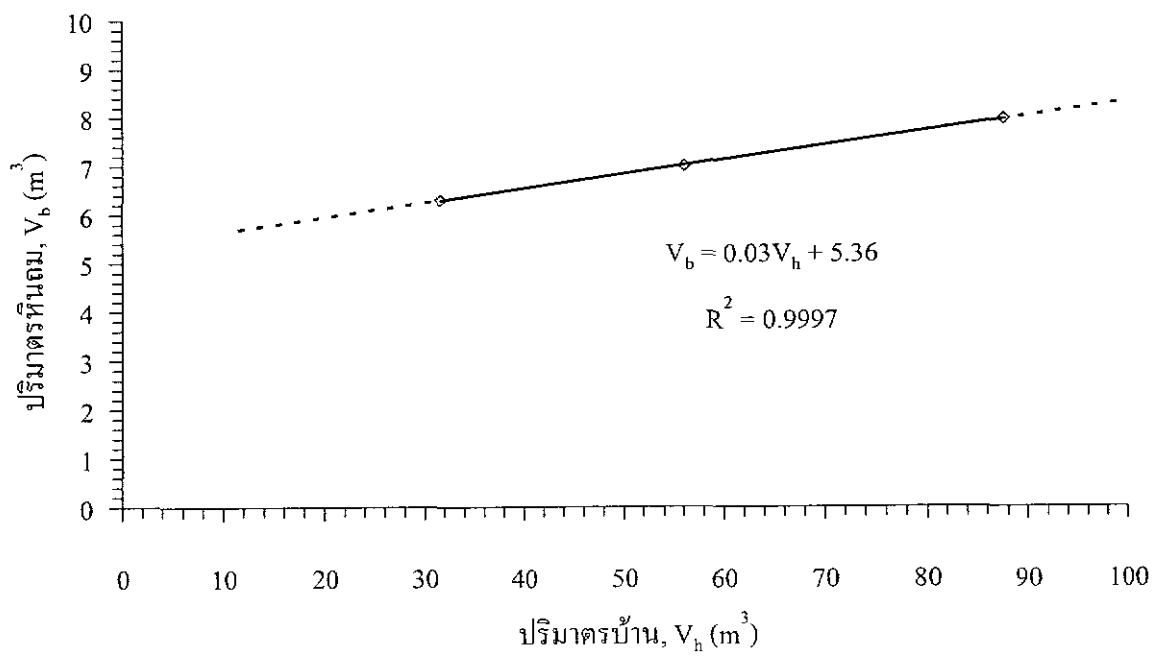
3) ประเมินผลกระทบจากอุณหภูมิอากาศภายนอก (สิ่งแวดล้อม) ต่ำสุด

ในขั้นตอนนี้จะประเมินผลกระทบจากอุณหภูมิอากาศภายนอกที่ต่ำสุด ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ช่วง และได้กำหนดค่าปรับลดอุณหภูมิ (f_1) ในบ้านที่เพิ่มขึ้นไว้ในตารางที่ 6.1 เมื่ออุณหภูมิสิ่งแวดล้อมต่ำสุดอยู่ในช่วง 0 ถึง 5 องศาเซลเซียส การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในบ้านที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 จะลดลงร้อยละ 0 ถึง 15 และจะลดลงร้อยละ 15 ถึง 35 เมื่ออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมอยู่ในช่วง 5 ถึง 10 องศาเซลเซียส (ลดลงเป็นร้อยละ 35 ถึง 45) เมื่ออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมอยู่ในช่วง 10 ถึง 15 องศาเซลเซียส หรือใช้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าปรับลดอุณหภูมิในบ้านที่เพิ่มขึ้นกับอุณหภูมิต่ำสุดของสิ่งแวดล้อม (รูปที่ 6.27) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

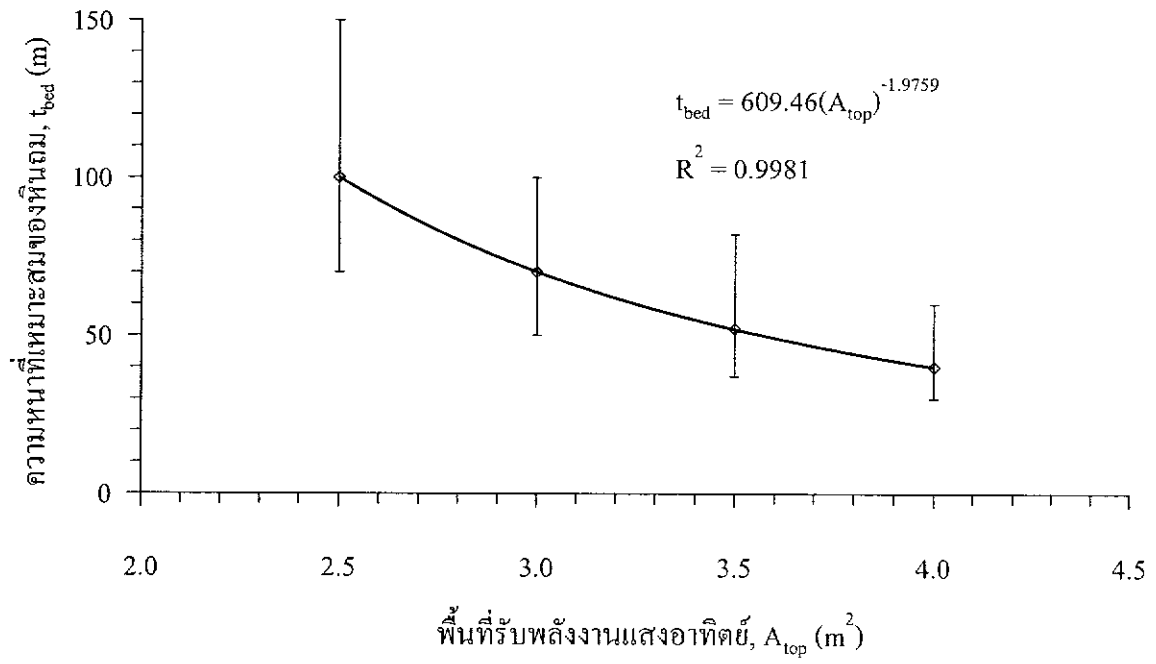
$$f_1 = 3T_{\min} \quad (6.4)$$

4) ประเมินผลกระทบจากการรั่วไหลของบ้าน

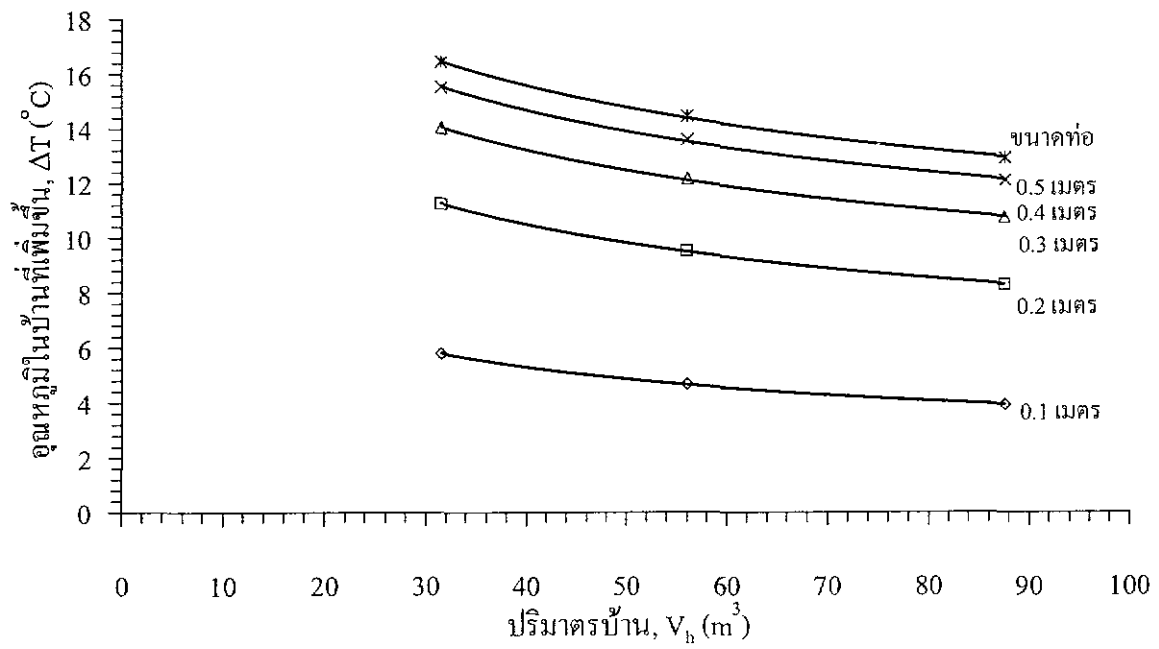
ในขั้นตอนนี้จะประเมินผลกระทบจากการรั่วไหลของบ้าน ซึ่งจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นกับวัสดุที่ใช้สร้างบ้าน รอยรั่วที่เกิดจากรอยต่อขององค์ประกอบต่าง ๆ หากมีการรั่วไหลในปริมาณที่สูง การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในบ้านจะต่ำ แต่เนื่องจากค่าการรั่วไหลดังกล่าวยังไม่มีการวิจัย คนใดประเมินไว้อย่างเป็นทางการ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเสนอค่าที่ใช้ปรับลดเท่ากับ 10% โดยค่าปรับลดอุณหภูมิ (f_2) ในบ้านที่เพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับค่าการรั่วไหลของบ้าน (รูปที่ 6.28) ถ้าบ้านรั่วไหล 10% การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในบ้านจะลดลง 10 เปอร์เซ็นต์ด้วย ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้



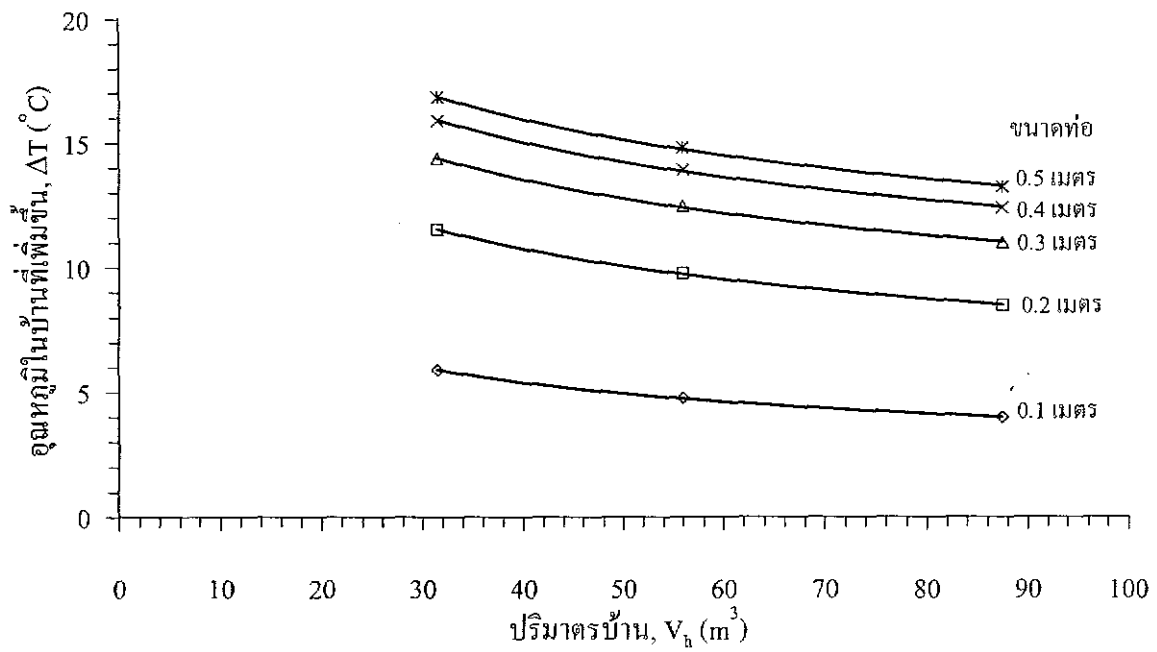
รูปที่ 6.21 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของหีนถมที่เหมาะสมที่สุด (ทำให้อุณหภูมิในบ้านเพิ่มขึ้นสูงสุด) กับปริมาตรของบ้าน



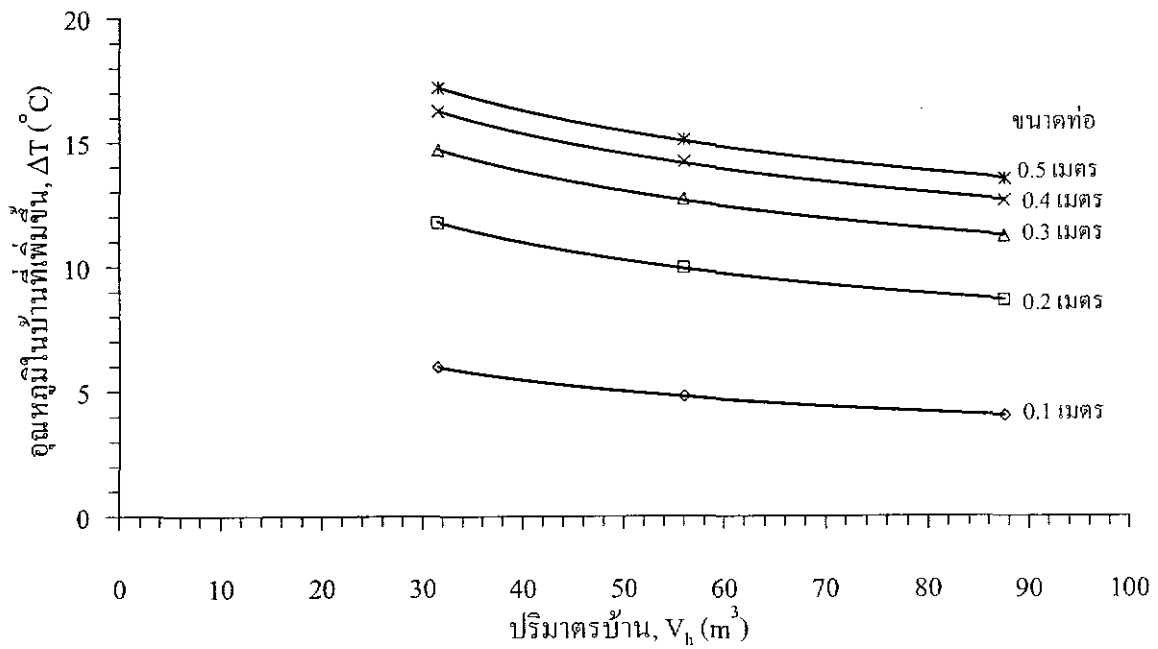
รูปที่ 6.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาที่เหมาะสมกับพื้นที่รับพลังงานแสงอาทิตย์



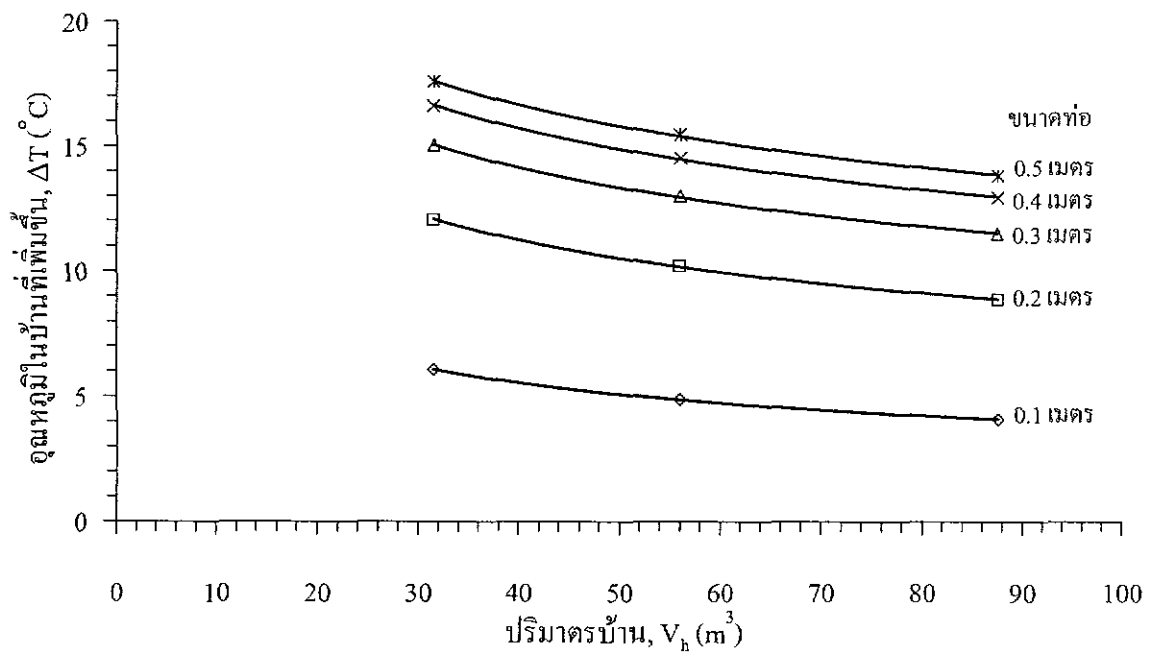
รูปที่ 6.23 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในบ้านที่เพิ่มขึ้นกับปริมาตรของบ้าน ภายใต้การออกแบบที่ระบบหินถมมีพื้นที่รับพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 6.25 ตารางเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออากาศร้อนเท่ากับ 0.1 ถึง 0.5 เมตร



รูปที่ 6.24 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในบ้านที่เพิ่มขึ้นกับปริมาตรของบ้าน ภายใต้การออกแบบที่ระบบหिनถมมีพื้นที่รับพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 9.0 ตารางเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออากาศร้อนเท่ากับ 0.1 ถึง 0.5 เมตร



รูปที่ 6.25 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในบ้านที่เพิ่มขึ้นกับปริมาตรของบ้าน ภายใต้การออกแบบที่ระบบหินฉนวนมีพื้นที่รับพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 12.25 ตารางเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออากาศร้อนเท่ากับ 0.1 ถึง 0.5 เมตร

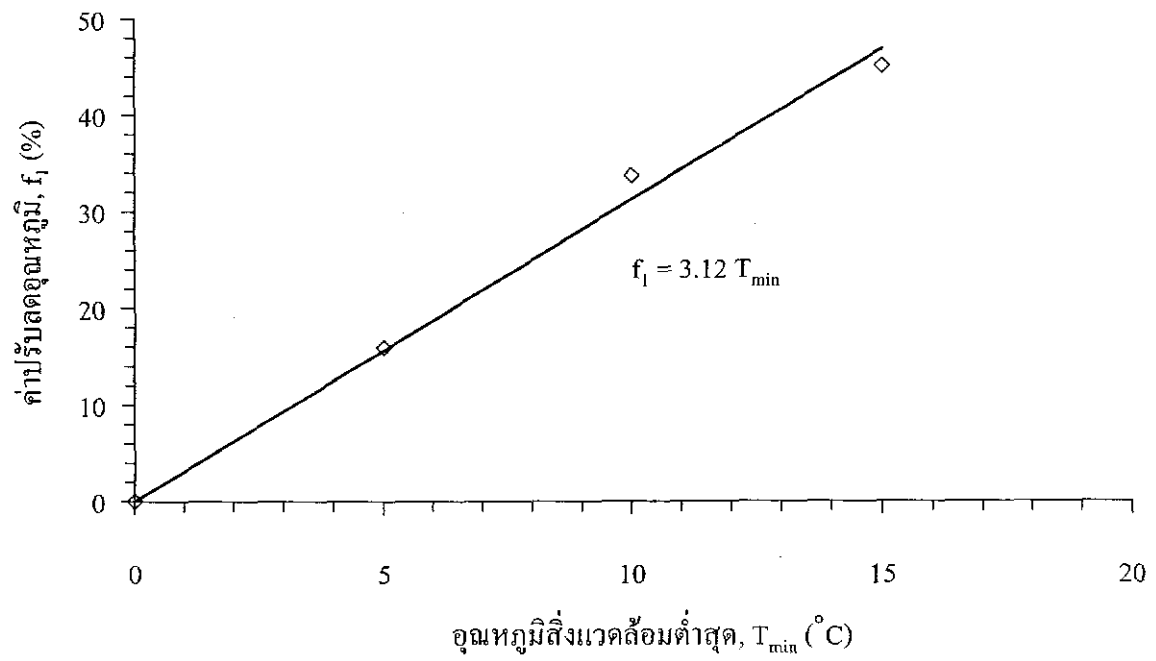


รูปที่ 6.26 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในบ้านที่เพิ่มขึ้นกับปริมาตรของบ้าน ภายใต้การออกแบบที่ระบบหินฉนวนมีพื้นที่รับพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 16.0 ตารางเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออากาศร้อนเท่ากับ 0.1 ถึง 0.5 เมตร

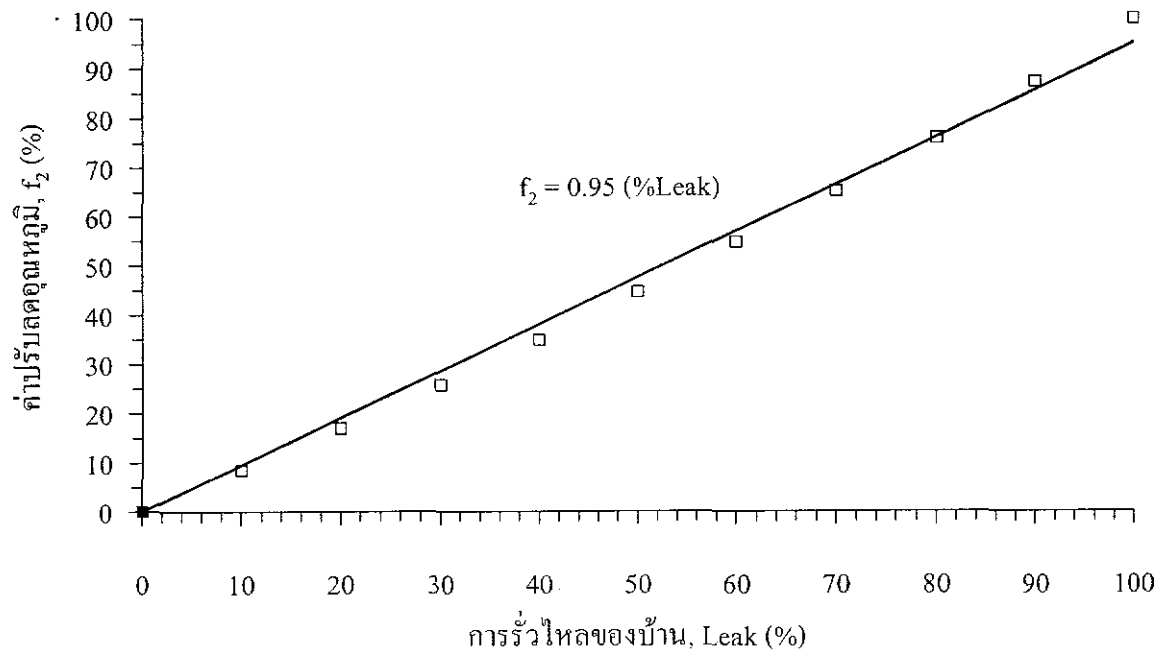
ตารางที่ 6.1 ค่าปรับลดอุณหภูมิในบ้านที่เพิ่มขึ้นจากปัจจัยด้านอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมต่ำสุด

อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมต่ำสุด, T_{min} (องศาเซลเซียส)	ค่าปรับลดอุณหภูมิ, f_1 (%)
0-5	0 - 15
5-10	15 - 35
10-15	35- 45

หมายเหตุ: $f_1 = 3T_{min}$



รูปที่ 6.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปรับลดอุณหภูมิในบ้านที่เพิ่มขึ้นกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมต่ำสุด



รูปที่ 6.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปรับลดอุณหภูมิในบ้านที่เพิ่มขึ้นกับการรั่วไหลของบ้าน

$$f_2 = \%Leak \quad (6.5)$$

5) กำหนดหาอุณหภูมิในบ้านที่จะเพิ่มขึ้นสุทธิ ($\Delta T'$)

การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในบ้านสุทธิมีค่าเท่ากับผลต่างของอุณหภูมิในบ้านที่เพิ่มขึ้นซึ่งหาได้จากขั้นตอนที่ 3 กับค่าปรับลดอุณหภูมิในบ้านที่เพิ่มขึ้นจากขั้นตอนที่ 4 และ 5 โดยแสดงด้วยสมการ

$$\Delta T' = (1 - f_1 - f_2) \Delta T \quad (6.6)$$

บทที่ 7

บทสรุป

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ เพื่อออกแบบระบบการเก็บกักพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ในหินฉวมที่สร้างขึ้น โดยระบบจะมีการเก็บพลังงานความร้อนในเวลากลางวันและปล่อยพลังงานความร้อนออกมาใช้ในเวลากลางคืน โดยไม่อาศัยพลังงานไฟฟ้าหรือปิโตรเลียมเข้ามาช่วย คุณประโยชน์หลักคือการให้ความอบอุ่นแก่ครัวเรือนในช่วงฤดูหนาว ซึ่งแบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอน คือ 1) การรวบรวมและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 2) การศึกษาธรณีวิทยาแหล่งหิน 3) การเก็บและจัดเตรียมตัวอย่างหินและดิน 4) การทดสอบในห้องปฏิบัติการ 5) การสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ 6) การทดสอบและก่อสร้างแบบจำลองทางกายภาพ และ 7) การประเมินตัวแปรการออกแบบและการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์

จากการทบทวนวรรณกรรมวิจัยพบว่าพื้นที่ในภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยมีอากาศหนาวติดต่อกันประมาณ 4 เดือน (กลางเดือนตุลาคมถึงกลางเดือนกุมภาพันธ์) อุณหภูมิต่ำสุดเฉลี่ยประมาณ 14 ถึง 23 องศาเซลเซียส ในช่วงฤดูหนาวความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์มีค่าระหว่าง 15 ถึง 20 MJ.m⁻².day⁻¹ ซึ่งมีศักยภาพเพียงพอสำหรับใช้ในเทคโนโลยีการกักเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ในหินฉวม ส่วนหินที่จะนำมาเป็นวัสดุกักเก็บพลังงานความร้อนควรมีค่าความจุความร้อนจำเพาะสูงเพราะจะทำให้กักเก็บพลังงานไว้ได้มาก คือจะต้องเป็นหินที่มีเนื้อแน่น สีเข้ม เช่น หินบะซอลต์

ผลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการของหินจำนวน 12 ชนิด ได้แก่ หินทรายภูกระดึง หินทรายพระวิหาร หินทรายเสาขรัว หินทรายพระภูพาน หินอ่อนสระบุรี หินบะซอลต์บุรีรัมย์ หินแกรนิตจีน หินแกรนิตตาก หินแกรนิตเวียตนาม หินปูนลพบุรี เกลือหินชั้นกลาง และเกลือหินชั้นล่าง ซึ่งหินเหล่านี้สามารถพบได้ทั่วไปในพื้นที่ภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ค่าความจุความร้อนจำเพาะของหินเหล่านี้อยู่ระหว่าง 3,953 ถึง 9,273 J. kg⁻¹.K⁻¹ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ใช้ในการพิจารณาเลือกหินมาเป็นวัสดุกักเก็บพลังงานความร้อน โดยหินบะซอลต์มีค่าความจุความร้อนจำเพาะสูงที่สุด ดังนั้นจึงเลือกใช้หินบะซอลต์เป็นหินกักเก็บพลังงานในแบบจำลองทางกายภาพ

สมการทางคณิตศาสตร์สร้างขึ้นภายใต้ความรู้พื้นฐานด้านอุณหพลศาสตร์และการถ่ายเทความร้อน โดยแบ่งเป็น 3 ระบบย่อย คือ 1) ระบบหินฉวม 2) ระบบอากาศในบ่อหินฉวม และ 3) อากาศในบ้าน ช่วงเวลากลางวันระบบย่อยทั้ง 3 จะถูกกำหนดให้เป็นระบบปิดเนื่องจากการถ่ายเทมวลข้ามขอบเขตของระบบ และในช่วงเวลากลางคืนระบบหินฉวมจะเป็นระบบปิด ส่วนระบบย่อยอีก 2 ระบบจะถูกกำหนดให้เป็นระบบเปิดเนื่องจากการถ่ายเทมวลของอากาศร้อนข้ามขอบเขต

โดยผ่านท่ออากาศร้อน การถ่ายเทพลังงานได้พิจารณาจาก 2 ลักษณะคือ การพาความร้อน (Convection) และการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) ส่วนการนำความร้อน (Conduction) จะไม่นำมาคำนวณเนื่องจากสมมติว่าหिनในระบบมีอุณหภูมิเท่ากันทุกก้อน สมการที่ใช้คำนวณการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมิมี 3 สมการคือ สมการที่ใช้คำนวณการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของหिन อากาศในบ่อ และอากาศในบ้าน ในการคำนวณได้แบ่งเป็นช่วงเวลาสั้น ๆ (5 วินาที)

บ่อกักเก็บพลังงานต้นแบบ (Pilot Scale Solar Thermal Energy Storage) ได้สร้างขึ้นบริเวณหลังอาคารเครื่องมือ 4 (F4) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี บ่อกักเก็บพลังงานที่ทำการตรวจวัดอุณหภูมิมิมีขนาดหน้าตัด 1.75×1.75 เมตร ลึก 0.75 เมตร ภายในบ่อมีตะแกรงปริมาตรรวม 0.5 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งจัดเรียงหिनบะซอลต์ที่ได้จากการตัดขนาด 4 ถึง 5 นิ้ว รวมน้ำหนักเท่ากับ 743 กิโลกรัม ด้านบนของบ่อปิดทับด้วยแผ่นอะคริลิก (Acrylic) และเชื่อมต่อระบบกักเก็บพลังงานเข้ากับบ้านจำลองที่มีปริมาตร 3.38 ลูกบาศก์เมตร ด้วยท่ออากาศร้อนขนาดต่างกัน มีการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหिनกลางบ่อ อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และอากาศนอกบ้าน ผลการตรวจวัดระบุว่าการใช้ท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 4 นิ้ว โดยติดตั้งเฉียงมากกว่า 30 องศา และมีฝาปิดทับด้านบนของบ่อกักเก็บพลังงาน จะทำให้อุณหภูมิในบ้านเพิ่มสูงขึ้นระหว่าง 3 ถึง 5 องศาเซลเซียส การขยายขนาดของท่ออากาศร้อนส่งผลให้ประสิทธิภาพการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในบ้านสูงขึ้นด้วย การลดปริมาณหिनลงร้อยละ 50 ทำให้อุณหภูมิในบ้านที่เพิ่มขึ้นลดลงเพียงร้อยละ 25 เท่านั้น

จากการตรวจวัดจริงถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลจากการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น โดยสมมติให้การสูญเสียหรือการรั่วไหลของความร้อนจากบ้านเท่ากับร้อยละ 10 ของพลังงานทั้งหมดที่เข้าสู่ระบบบ้าน ผลจากการคำนวณระบุว่า อุณหภูมิของหिनเพิ่มขึ้นสูงสุดหลังจากที่ระดับพลังงานจากแสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นสูงสุดประมาณ 3 ชั่วโมง แต่ผลจากการตรวจวัดจริง อุณหภูมิหिनจะเพิ่มขึ้นสูงสุดช้ากว่าการคำนวณ 3 ชั่วโมง เนื่องจากตำแหน่งตรวจวัดอยู่ที่ระดับลึกลงไปจากพื้นผิวรับพลังงานแสงอาทิตย์ เมื่อหिनลดปริมาณลงและจุดตรวจวัดอยู่ใกล้กับพื้นผิวรับพลังงานแสงมากขึ้นผลที่ได้ทั้งจากการคำนวณและการตรวจวัดจริงให้ผลที่ใกล้เคียงกัน อุณหภูมิในบ้านที่เพิ่มขึ้นมีค่ามากกว่า 5 องศาเซลเซียส ทั้งจากการคำนวณและการตรวจวัดจริง และเมื่อท่ออากาศร้อนมีขนาดใหญ่ขึ้น อุณหภูมิในบ้านที่เพิ่มขึ้นก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย โดยภาพรวมแล้วสมการทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นมานั้นมีความเป็นเหตุเป็นผล และให้ผลใกล้เคียงกับผลที่ตรวจวัดจริง และมีความน่าเชื่อถือพอสมควร

สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้คำนวณการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในระบบกักเก็บพลังงานและบ้านได้มีการค้นแปรตัวแปรที่เกี่ยวข้องเพื่อให้ได้คำตอบที่ครอบคลุมสำหรับการออกแบบ โดยเลือกใช้ค่าที่ทำให้อุณหภูมิในบ้านเพิ่มขึ้นสูงที่สุด และผลลัพธ์สุดท้ายที่ได้คือร่างการออกแบบบ่อกัก-

เก็บพลังงานในชั้นหินถม ซึ่งได้ตั้งข้อเสนอแนะเบื้องต้น ได้แก่ หินที่ใช้ควรมีเนื้อแน่น สีเข้ม (เพื่อการดูดซับพลังงานที่ดี) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 ถึง 10 เซนติเมตร และติดตั้งท่ออากาศร้อนเอียงทำมุมมากกว่า 30 องศา ส่วนอุณหภูมิในบ้านที่จะเพิ่มขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของพื้นที่รับพลังงานแสงอาทิตย์ และขนาดของท่ออากาศร้อน ซึ่งหาได้จากขั้นตอนการออกแบบดังนี้

1) กำหนดขนาดของหินถมที่เหมาะสมกับขนาดของบ้าน โดยมีกราฟช่วยในการกำหนด หรืออาจคำนวณจากความสัมพันธ์ $V_b = 0.03V_h + 5.36$

2) กำหนดขนาดพื้นที่รับพลังงานแสงอาทิตย์ (A_{top}) ที่คาดว่าจะสร้างได้ และคำนวณความหนาของชั้นหินถม (t_{bed}) โดยอาศัยสมการ $t_{bed} = V_b/A_{top}$ อาจจะไปเทียบกับช่วงความหนาที่เหมาะสมจากกราฟความสัมพันธ์ความหนาที่เหมาะสมกับพื้นที่รับพลังงานแสง

3) กำหนดขนาดของท่ออากาศร้อนที่คาดว่าจะใช้ แล้วนำไปหาอุณหภูมิในบ้านที่เพิ่มขึ้น (ΔT) โดยมีกราฟให้เลือกใช้ 4 กราฟ แบ่งตามขนาดพื้นที่รับแสง 4 ขนาด คือ 6.25 ตารางเมตร (2.5×2.5 เมตร) 9.00 ตารางเมตร (3.0×3.0 เมตร) 12.25 ตารางเมตร 6.25 ตารางเมตร (3.5×3.5 เมตร) และ 16 ตารางเมตร (4.0×4.0 เมตร) ขนาดของพื้นที่รับพลังงานแสงอาทิตย์ที่เสนอไว้ในงานวิจัยนี้เป็นขนาดที่คาดว่าจะมีความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ

4) ประเมินผลกระทบจากอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (อุณหภูมินอกบ้าน) ต่ำสุด (T_{min}) ในรอบวัน เพื่อนำไปกำหนดค่าปรับลดอุณหภูมิ (f_1) ในบ้านที่คาดว่าจะเพิ่มขึ้น (จากขั้นตอนที่ 3) ค่าปรับลดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในบ้านคิดเป็นร้อยละ 3 ของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมต่ำสุด หรืออาจคำนวณจากความสัมพันธ์ $f_1 = 3T_{min}$

5) ประเมินค่าการรั่วไหลของความร้อนออกจากบ้านตามวัสดุที่ใช้เป็นผนังห้อง แล้วนำไปกำหนดค่าปรับลดอุณหภูมิ (f_2) การปรับลดอุณหภูมิในบ้านที่เพิ่มขึ้นจะมีค่าเท่ากับการรั่วไหลของความร้อนออกจากบ้าน หมายความว่า ถ้าการรั่วไหลของความร้อนออกจากบ้านมีค่าเท่ากับร้อยละ 10 ของพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทสู่บ้าน การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในบ้านจะลดลง 10 เปอร์เซ็นต์ด้วย ซึ่งสามารถแสดงด้วยสมการ $f_2 = \%Leak$

6) คำนวณหาอุณหภูมิในบ้านที่จะเพิ่มขึ้นสุทธิ ($\Delta T'$) มีค่าเท่ากับผลต่างของอุณหภูมิในบ้านที่เพิ่มขึ้น ซึ่งหาได้จากขั้นตอนที่ 3 กับค่าปรับลดอุณหภูมิในบ้านที่เพิ่มขึ้นจากขั้นตอนที่ 4 และ 5 สามารถแสดงด้วยสมการ $\Delta T' = (1 - f_1 - f_2) \Delta T$

การออกแบบดังกล่าวข้างต้นอยู่ภายใต้สมมติฐานที่ระดับพลังงานจากแสงอาทิตย์มีค่าต่ำสุด ในพื้นที่ที่มีระดับพลังงานสูงขึ้น ประสิทธิภาพของระบบก็จะดีขึ้นด้วย (ไม่เกินร้อยละ 10) ซึ่งทำให้การคำนวณและการออกแบบที่ได้เสนอไว้เป็นไปได้ในเชิงอนุรักษ์

รูปแบบของระบบหินถมในงานวิจัยนี้สามารถปรับเปลี่ยนลักษณะของภาชนะกักเก็บให้มีความหลากหลายยิ่งขึ้น เช่น ใช้ถังขนาดใหญ่ หรือภาชนะอื่นมาบรรจุหิน ซึ่งหลีกเลี่ยงผลกระทบจากระดับน้ำใต้ดินหรือความชื้นที่อยู่ในดินได้ด้วย และยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบให้สูงยิ่งขึ้นสำหรับอุตสาหกรรมครัวเรือน เช่น การติดตั้งพัดลมดูดอากาศ การเพิ่มพื้นที่รับพลังงานแสงอาทิตย์ หรือติดตั้งกระจกสะท้อนพลังงานแสงอาทิตย์สู่ระบบหินถม นอกจากนี้สมาคมทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นนี้อยู่ภายใต้ข้อสมมติฐานหลายประการ เพื่อความแม่นยำของการคำนวณและออกแบบควรใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ประกอบการวิเคราะห์ด้วย

บรรณานุกรม

- กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ (2547). ยุทธศาสตร์อุตสาหกรรมเหมืองแร่และอุตสาหกรรมต่อเนื่อง, กรุงเทพมหานคร, 106 หน้า.
- ชัยยันต์ หินทอง (2528). แผนที่ธรณีวิทยาประเทศไทย มาตราส่วน 1:250,000 ระหว่างจังหวัดพระนครศรีอยุธยา, กองธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงอุตสาหกรรม
- ธนาคม สุนทรชัยนาคแสง (2538). การเก็บสะสมพลังงานความร้อน. วารสารเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, ปีที่ 2, ฉบับที่ 11: หน้า 41-46.
- ธนาคม สุนทรชัยนาคแสง (2539). การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในดินกับระบบการเก็บสะสมพลังงานความร้อน. วารสารเทคนิคเครื่องกล-ไฟฟ้า-อุตสาหกรรม, ฉบับที่ 131: หน้า 101-103.
- ธนาคม สุนทรชัยนาคแสง, ชลวิชัย วิชัย โชคดี, วโรดม ศรีสุขสวัสดิ์, และ สุเทพ ปั้นทรัพย์ (2539). การสะสมพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ไว้ใต้ดิน. วารสารเทคนิคเครื่องกล-ไฟฟ้า-อุตสาหกรรม, ฉบับที่ 137: หน้า 131-136.
- นิคม จึงอยู่สุข และธนวุฒิ ศิรินาวิน (2525). ศึกษาและประเมินเกมมิงของหินบะซอลต์ในที่ราบสูงโคราช บริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย, กองธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี, 88 หน้า
- ฝ่ายกรรมวิธีข้อมูล. สถิติภูมิอากาศของประเทศไทย ในคาบ 30 ปี (พ.ศ. 2504 - 2533). รายงาน ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาเลขที่ 551.582-02-2537, ISBN : 974-7554-80-1, กองภูมิ อากาศ, กรมอุตุนิยมวิทยา, กระทรวงคมนาคม
- มนต์ชัย กาทอง (2542). การถ่ายเทความร้อน (2nd ed.). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
วิรัช มณีสาร, เรือโท. ลักษณะภูมิประเทศและลักษณะอากาศตามฤดูกาลของภาคต่าง ๆ ในประเทศไทย. เอกสารวิชาการเลขที่ 551.582-02-2538, ISBN : 974-7567-25-3, กันยายน 2538.
- วิรัช มณีสาร, เรือโท. สถิติองค์ประกอบอุตุนิยมวิทยาของภาคต่าง ๆ ในประเทศไทยในคาบ 30 ปี (พ.ศ. 2504-2533). เอกสารวิชาการเลขที่ 551.582-03-2538, ISBN : 974-7567-24-5, กันยายน 2538.
- สิโรตม์ ศัลยพงษ์ และ นิคม จึงอยู่สุข (2529). แผนที่ธรณีวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มาตราส่วน 1:50,000, กองธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงอุตสาหกรรม
- สุนันท์ ศรีณนิตย์ (2545). การถ่ายเทความร้อน. กรุงเทพฯ: ส.ศ.ท.
- Abbud, I. A., Löf, G. O. G., and Hittle, D. C. (1995). Simulation of solar air heating at constant temperature. *Solar Energy* 54 (2): 75-83.

- Abhat, A. (1983). Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage materials. **Solar Energy** 30 (4): 313-332.
- Abu-Hamdeh, N. H. and Reeder, R. C. (2000). Soil thermal conductivity: Effects of density, moisture, salt concentration, and organic matter. **SOIL SCI. SOC. AM. J.** 64: 1285-1290.
- Anderson, K. T. (1995). Theoretical considerations on natural ventilation by thermal buoyancy, **Transaction of American Society of Heating, Refrigerating and Air conditioning Engineers** 101(2): 1103–1117.
- ASTM C351-92b, Standard test methods for mean specific heat of thermal insulation. In **Annual Book of ASTM Standards**, 04.08, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- ASTM D1556-00, Standard Test Method for Density and Unit Weight of Soil in Place by the Sand-Cone Method. In **Annual Book of ASTM Standards**, 04.08, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- ASTM D4611-86. Standard test methods for specific heat of rock and soil. In **Annual Book of ASTM Standards**, 04.08, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- ASTM D5334-92. Standard test methods for determination of thermal conductivity of soil and soft rock by thermal needle probe procedure. In **Annual Book of ASTM Standards**, 04.08, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- ASTM D6913-04e1. Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis. In **Annual Book of ASTM Standards**, 04.08, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- ASTM WK11776. New Standard Test Methods for Hydrometer, and Combined Hydrometer and Sieve Analysis of Soils. In **Annual Book of ASTM Standards**, 04.08, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- Bansal, N. K. and Mathur, M. S. (1993). Solar chimney for enhanced stack ventilation. **Building and Environment** 28: 373–377.
- Barr, S.M. and Macdonald, A.S. (1979). Paleomagnetism age and geochemistry of the Denchai basalts, Northern Thailand. **Earth Planet Science Letters** 46: 113-124.

- Beck, A. E. (1988). Methods for determining thermal conductivity and thermal diffusivity. In Haenal, R., Rybach, L. and Stegena, L. (Eds.), **Handbook of Terrestrial Heat-Flow Density Determination**. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Bilskie, J. R. (1994). **Dual probe methods for determining soil thermal properties: Numerical and laboratory study**. Ph.D. Dissertation. Iowa State University.
- Bo Nordell and Göran Hellström (2000). High temperature solar heated seasonal storage system for low temperature heating of buildings. **Solar Energy** 69 (6): 511-523.
- Braun, E. von., Besang, C., Eberle, W., Harre, W., Kreuzer, H., Lenz, H., Muller, P. and Wendt, Il, 1976, Radiometric age determinations of granites in Northern Thailand, *Geologisches Jahrbuch*, Hanover, B 2I, p. 171-204.]
- Bristow, K. L. (2002). Thermal Conductivity. In J.H., Dane and G. C., Clarke (Co-eds.) **Methods of Soil Analysis** (pp.1209-1226). Soil Science Society of America, Madi.
- Campbell, G. S. and Norman, J. M. (1998). **An introduction to environmental biophysics** (2nd ed.). New York: Springer-Verlag.
- Cengel, Y. A. (1997). **Introduction to thermodynamics and heat transfer**. New York: McGraw-Hill.
- Cengel, Y. A. (2003). **Heat Transfer: A Practical Approach** (2nd ed.). Boston: McGraw-Hill.
- Chapra, S. C. (2005). Applied numerical method with MATLAB for engineers and scientists. Boston: McGraw-Hill.
- Chapra, S. C. and Canale, R. P. (1988). **Numerical Methods for Engineers** (2nd ed.). New York: McGraw-Hill.
- Chapra, S. C. and Canale, R. P. (2002). **Numerical Methods for Engineers**. New York: McGraw-Hill.
- Charters, W. W. S. and Pryor, T. (1982). **Theory and Design of Solar Thermal Systems**, Australian Syndicators Pty. Ltd., Melbourne, Australia.
- Choudhury, C. (1996). Economic design of a rock bed storage device for storing solar thermal energy. **Fuel and Energy Abstracts** 37 (2): 118-118.
- Choudhury, C., Chauhan, P. M., and Garg, H. P. (1995). Economic design of a rock bed storage device for storing solar thermal energy. **Solar Energy** 55 (1): 29-37.
- Clark, J. A., Nobozny, R. L., and Heetderks, J. H. (1977). ROCKBED - A computer program for thermal storage. In: **International Solar Energy Society** (17-17 to 17-20). Annual

- Meeting, Orlando, Fla., June 6-10, 1977, Proceedings. Sections 14-25. (A78-11212 01-44) Cape Canaveral, Fla.
- Clauser, C. and Huenges, E. (1995). Thermal conductivity of rocks and minerals. In: **AGU Rock physics and phase relations**. A Handbook of physical constants, AGU Ref. Shelf, 3, edited by T.J. Ahrens, pp. 105-126, AGU, Washington D.C.
- Close, D. J. and Pryor, T. L. (1976). The behaviour of adsorbent energy storage beds. **Solar Energy** 18 (4): 287-292.
- Coutier, J. P. and Farber, E. A. (1982). Two applications of a numerical approach of heat transfer process within rock beds. **Solar Energy** 29 (6): 451-462.
- Crandall, D. M. and Thacher, E. F. (2004). Segmented thermal storage, **Solar Energy** 77 (4): 441.
- de Vries, D. A. (1963). Thermal properties of soils. In W.R. van Wijk (ed.) **Physics of plant environment** (210-235). North-Holland Publishing Company: Amsterdam.
- Department Angewandte Geowissenschaften und Geophysik. (2006). Chapter 8: Thermal Properties of Rocks [On-line]. Available: <http://www.unileoben.ac.at/~geophwww/neu/data/chapter8thermal.pdf>
- Department of Alternative Energy Development and Efficiency and Silpakorn University. (1999). **The Thailand Solar Map** [On-line]. Available: <http://www2.dede.go.th/dede/renew/sola/mapmenu.html>
- Department of Disaster Prevention and Mitigation. (2005). Summary of disaster situation in the winter season during 2000 through 2005 [On-line]. Available: http://www.disaster.go.th/disaster01/disas_05.xls.
- Department of Mineral Resources. (2003). Surveying and reserves estimation of mineral [in Thai]. Report No. STR 2/2003, Bangkok: Bureau of Mineral Resources.
- Departments of the Army and the Air Force, USA. (1988). **Arctic and subarctic construction calculation methods for determination of depths of freeze and thaw in soils**, Technical manual no. TM 5-852-6/AFR 88-19, volume 6, 12 pp.
- Dincer, I. (1999). Evaluation and selection of energy storage systems for solar thermal applications. **International Journal of Energy Research** 23 (12): 1017-1028.
- Dincer, I. and Dost, S. (1996). A perspective on thermal energy storage systems for solar energy applications. **International Journal of Energy Research** 20: 547-557.

- Duffie, J. A. and Beckman, W. A. (1991). **Solar Energy of Thermal Processes**. New York: John Wiley and Sons.
- Duffie, J. A. and Beckman, W. A. (1991). **Solar Energy of Thermal Processes**. New York: John Wiley and Sons.
- Exell, R. H. B. and Kumar, R. (1981). **Solar radiation tables for architects in Thailand**. AIT research no. 128, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.
- Fricker, H. W. (1991). High-temperature heat storage using natural rock. **Solar Energy Materials** 24 (1-4): 249-254.
- Gabroelsson, A., Bergdahl, U. and Noritz, L. (2000). Thermal Energy Storage in Soils at Temperatures Reaching 90°C. **Journal of Solar Energy Engineering** 122 (1): 3-8.
- Garg, H. P., Mullick, S. C., and Bhargava, A. K. (1985). **Solar Thermal Energy Storage**. Holland: D. Reidel Publishing Company.
- Garg, H. P., Sharma, V. K., Mahajan, R. B., and Bhargava, A. K. (1985). Experimental study of an inexpensive solar collector cum storage system for agricultural uses. **Solar Energy** 35 (4): 321-331.
- Goswami, D. Y., Kreith, F., and Kreider, J. F. (2000). **Principals of Solar Engineering**. Philadelphia: Taylor and Francis.
- Gul, I. H. and Maqsood, A. (2006). Thermophysical properties of diorites along with the prediction of thermal conductivity from porosity and density data. **International Journal of Thermophysics** 27 (2): 614-626.
- Gunn, D. A., Jones, L. D., Raines, M. G., Entwisle, D. C., and Hobbs, P. R. N. (2005). Laboratory measurement and correction of thermal properties for application to the rock mass. **Geotechnical and Geological Engineering** 23: 773-791.
- Hollands, K. G. T. and Sullivan, H. F. (1984). Pressure drops across rock bed thermal storage systems. **Solar Energy** 33 (2): 221-225.
- Hollands, K. G. T., Sullivan, H. F., and Shewen, E. C. (1984). Flow uniformity in rock beds. **Solar Energy** 32 (3): 343-348.
- Holman J. P. (2002). **Heat Transfer** (9th ed.). New York: McGraw-Hill.
- Holman J. P. (2002). **Heat Transfer** (9th ed.). New York: McGraw-Hill.
- Jaluria, Y. (1998). **Design and optimization of thermal system**. New York: McGraw-Hill.

- Kalogirou, S. A. (2004). Solar thermal collectors and applications. **Progress in Energy and Combustion Science** 30: 231–295.
- Klompe, Th. H.F. (1962). Igneous and structure features of Thailand, **Monograph of American Geophysics Union** 6: 122-134.
- Kobayasi, K. (1984). Japanese research on thermophysical properties of solids. **International Journal of Thermophysics** 5 (1): 13-21.
- Kurklu, A., Bilgin, S., and Ozkan, B. (2003). A study on the solar energy storing rock-bed to heat a polyethylene tunnel type greenhouse. **Renewable Energy** 28: 683-697.
- Li, Z., Zhong, H., Tang, R., Liu, T., Gao, W., and Zhang, Y. (2006). Experimental investigation on solar drying of salted greengages. **Renewable Energy** 31: 837–847.
- Meier, A., Winkler, C., and Wuillemin, S. (1991). Experiment for modeling high temperature rock bed storage. **Solar Energy** 24: 255-264.
- Mongelli, F., Zito, G., and Loddo, M. (1971). A Method for the Determination of the Thermal Properties of Soil Near the Surface. **Arch. Met. Geoph. Biokl., Ser. A** 20: 35-42.
- Mostafa, M. S., Afify, N., Gaber, A., and Abu, Zaid E. F. (2004). Investigation of thermal properties of some basalt samples in Egypt. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry** 75: 179-188.
- Nandwani, S. S. (2006). Uses of solar energy in Costa Rica. **Renewable Energy** 31: 689-701.
- Ochsner, T. E., Horton, R., and Ren, T. (2001). A new perspective on soil thermal properties. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 65:1641-1647.
- Panjasawatwong, Y. (1983). Chemical variation within a single basalt flow at Denchai, Phrae, In **Proceedings on Annual Technical Meeting, Department of Geological Sciences, Chiang Mai University.**
- Pfannkunch, H. O. and Edens, M. H. (1977). Rock properties for thermal energy storage systems in the 0 to 500 °C range. In **International Solar Energy Society** (18-5 to 18-9). Annual Meeting, Orlando, Fla., Cape Canaveral, Fla.
- Puttapiban, P. (2002). Geology and Geochronology of the Igneous Rocks of Thailand, Symposium on Geology of Thailand, Bangkok, Thailand.
- Putthapiban, P. and Suensilpong, S. (1978). The igneous geology of the granitic rocks of the Hub Kapong-Hua Hin area. **Journal of Geological Society of Thailand** 3: 1-22.

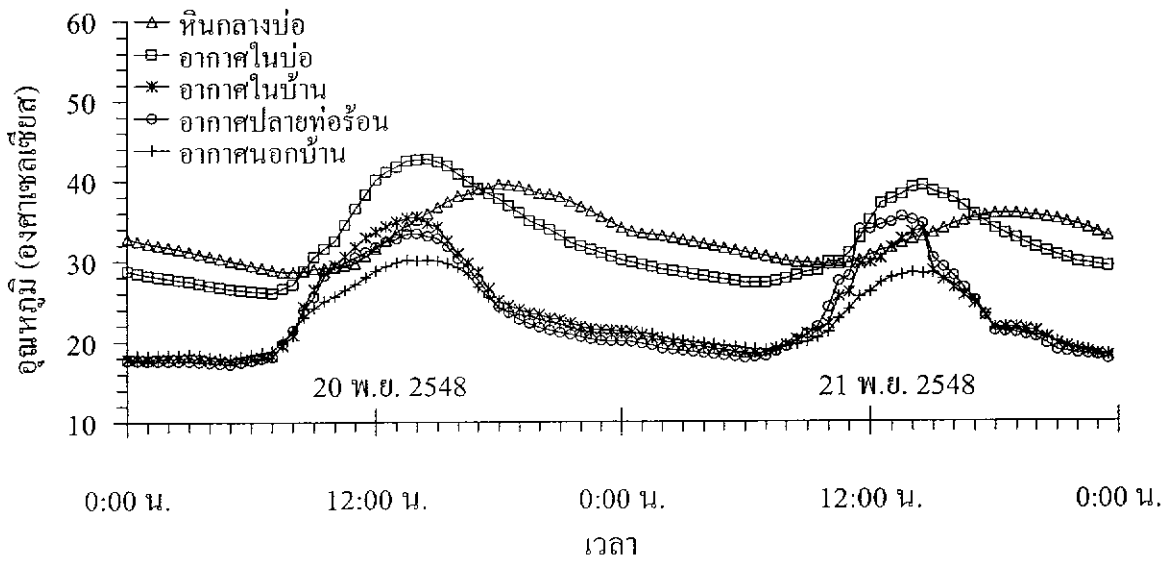
- Raznjevic, K. (1976). **Handbook of thermodynamics tables and charts**. New York: McGraw-Hill.
- Raznjevic, K. (1976). **Handbook of thermodynamics tables and charts**. New York: McGraw-Hill.
- Riaz, M. (1978). Transient analysis of packed-bed thermal storage systems. **Solar Energy** 21 (2): 123-128.
- Rosen, M. A. and Dincer, I. (2003). Energy methods for assessing and comparing thermal storage systems. **International Journal of Energy Research** 27 (4): 415-430.
- Roy, R. F., Beck, A. E., and Touloukian, Y. S. (1981). Thermophysical properties of rocks. In **Physical Properties of Rocks and Minerals**, edited by Y. S. Touloukian, W. R. Judd, and R. F. Roy, pp. 409-502, McGraw-Hill/CINDAS Data Series on Material properties, Volume H-2. McGraw-Hill: New York.
- Salaron Corporation Solar Energy Systems. (1978). **Application Engineering Manual**. Salaron Corporation, 300 Galleria Tower, 720 South Colorado Blvd., Denver, Colorado, 80222.
- Saricali, K. (1974). **Solar radiation in Thailand**, M.S. thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.
- Sass, J. H., Lachenbruch, A. H., Moses, T., Morgan, P. (1992). Heat flow from a scientific research well at Cajon Pass, California. **J. Geophys. Res.**, 97: 5017-5030.
- Scharli, U. and Rybach, L. (2001). Determination of specific heat capacity on rock fragments. **Geothermics**.30 (1): 93-110.
- Schumann, T. E. W. (1929). Heat transfer: liquid flowing through a porous prism. **J. Franklin Inst.** 208: 405-146.
- Seipold, U. (1998). Temperature dependence of thermal transport properties of crystalline rocks – a general law. **Tectonophysics** 291: 161-171.
- Sharma, S. P., Saini, J. S., and Varma, H. K. (1991). Thermal performance of packed-bed solar air heaters. **Solar Energy** 47 (2): 59-67.
- Sharma, V. K., Rizzi, G., and Garg, H. P. (1991). Design and development of an augmented integrated solar collector with rock storage system for heating applications. **Energy Conversion and Management** 31 (4): 369-377.
- Somerton, W. H. (1992). **Thermal properties and temperature-related behavior of rock/fluid systems**. Elsevier: Amsterdam.

- Sontag, E. D. (1998). **Mathematical control theory: deterministic finite dimensional systems** (2nd ed.). New York: Springer.
- Sontag, E. D. (1998). **Mathematical control theory: deterministic finite dimensional systems** (2nd ed.). New York: Springer.
- Soponronnarit, S. (1995). Solar drying in Thailand. **Energy for Sustainable Development** 2 (2): 19-25.
- Sowell, E. F. and Curry, R. L. (1980). A convolution model of rock bed thermal storage units. **Solar Energy** 24: 441-449.
- Sundberg, J. (1988). **Thermal properties of soils and rocks**, SGI Report No. 35.
- Suryanarayana, N. V. and Arici, O. (2004). **Design and simulation of thermal system**. Boston: McGraw-Hill.
- Swartman, S. K. and Ogunlade, O. (1966). An investigation on packed-bed collectors. **Solar Energy** 10 (3): 106-110.
- Teggin, D.E. (1975). The granites of Northern Thailand, unpublished Ph.D. thesis, University of Manchester, U.K.
- Thai Meteorological Department. (2003). Winter season in Thailand for 2000-2001 [in Thai]. Technical Document No. 551.582-01-2003, Climatological Group, Meteorological Research and Development Bureau, Bangkok.
- The Meteorological Department (2002). Climate of Thailand [Online]. Available: <http://www.tmd.go.th/>
- The Schumacher Center for Technology and Development. (n.d.). Solar Thermal Energy [On-line]. Available: http://itdg.org/docs/thechnical_information_survice/solar_thermal_energy.pdf
- Vichit, P., Vudthichatvanich, S. and Hansawek, P. (1978). The distribution and some characteristics of corundium-bearing basalt in Thailand. **Journal of Geological Society of Thailand** 3: 1-8.
- Vosteen, H.-D., Schellschmidt, R. (2003). Influence of temperature on thermal conductivity, thermal capacity and thermal diffusivity for different types of rock. **Physics and Chemistry of the Earth** 28: pp. 499–509.
- Waples, D. W. and Waples, J. S. (2004). A Review and Evaluation of Specific Heat Capacities of Rocks, Minerals, and Subsurface Fluids. Part 1: Minerals and Nonporous Rocks. **Natural Resources Research** 13 (2): 97-122.

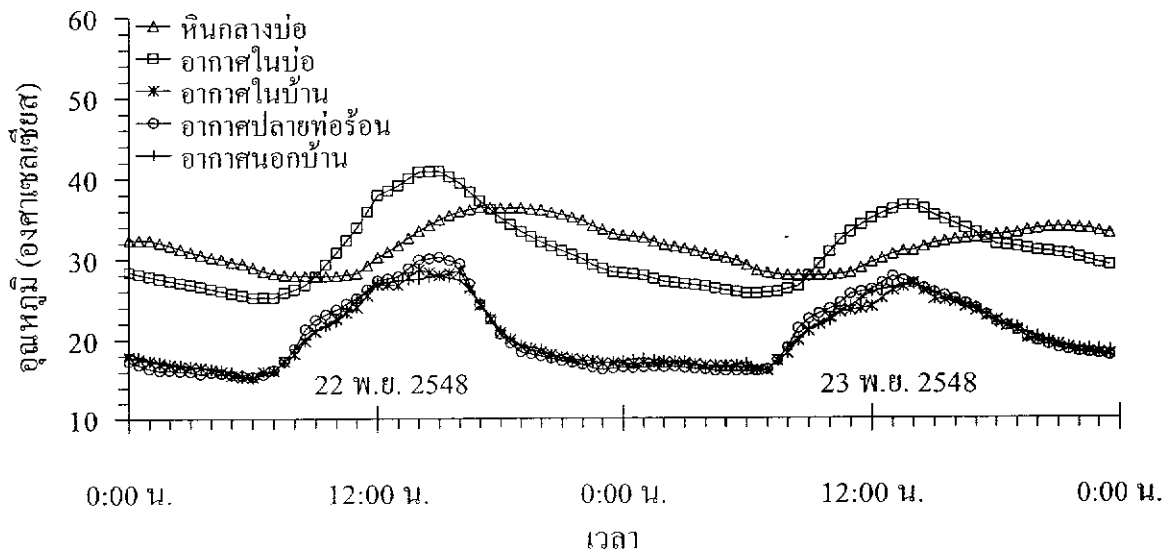
- Yaemniyom, N. (1982). **The petrochemical study of corundum-bearing basalts at Bo Ploi district, Kanchanaburi**. M.Sc. Thesis, Department of Geology, Chulalongkorn University.
- Zoth, G. and Hänel, R. (1988). Appendix, in Handbook of Terrestrial Heat Flow Density Determination, edited by Hänel, R., Rybah, L., and Stegena, L., Kluwer, Dordrecht, pp. 449-466.

ภาคผนวก ก

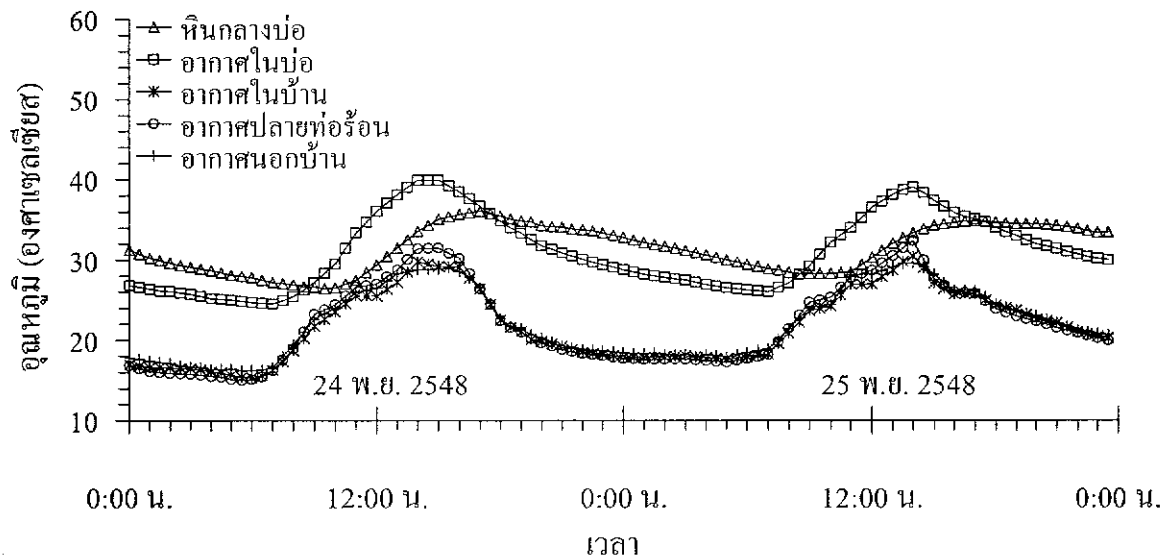
ผลการตรวจวัดอุณหภูมิของแบบจำลองทางกายภาพ



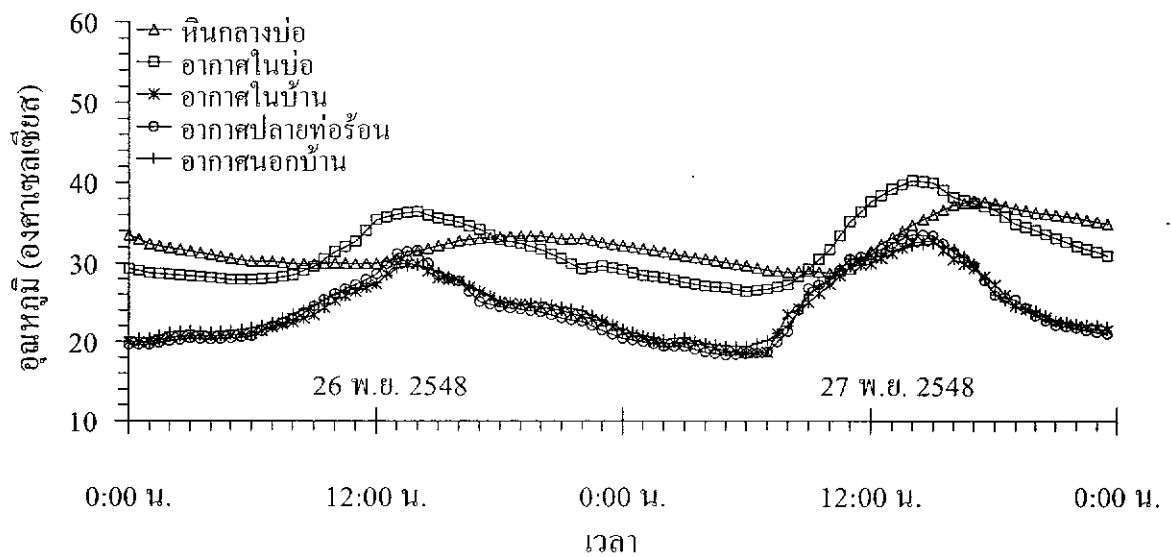
รูปที่ ก-1 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหिनกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ท่ออากาศร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว ข้อมูลวันที่ 20 และ 21 พฤศจิกายน 2548



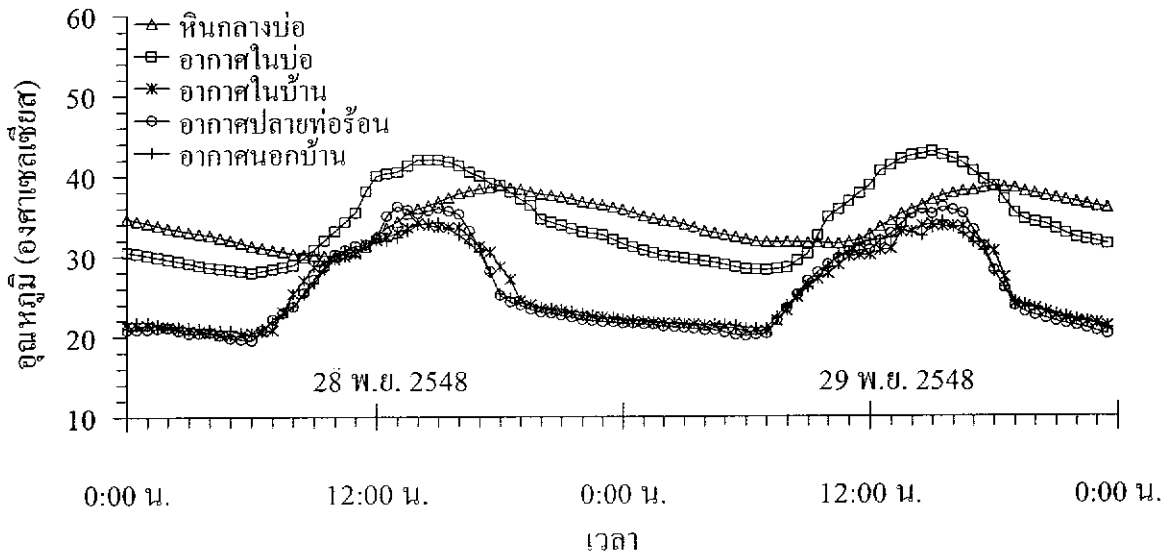
รูปที่ ก-2 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหिनกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ท่ออากาศร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว ข้อมูลวันที่ 22 และ 23 พฤศจิกายน 2548



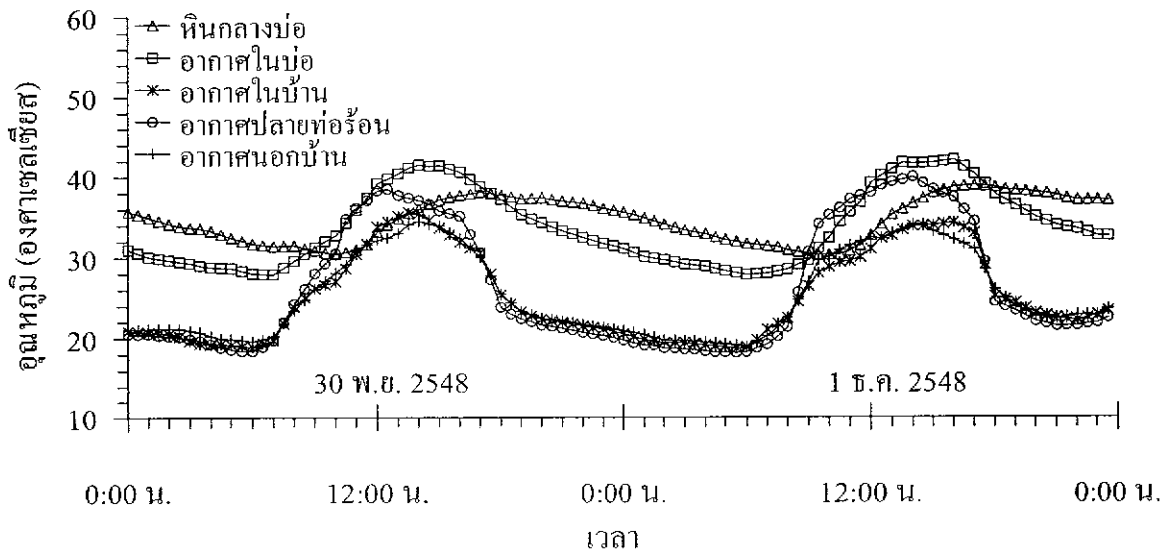
รูปที่ ก-3 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ท่ออากาศร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว ข้อมูลวันที่ 24 และ 25 พฤศจิกายน 2548



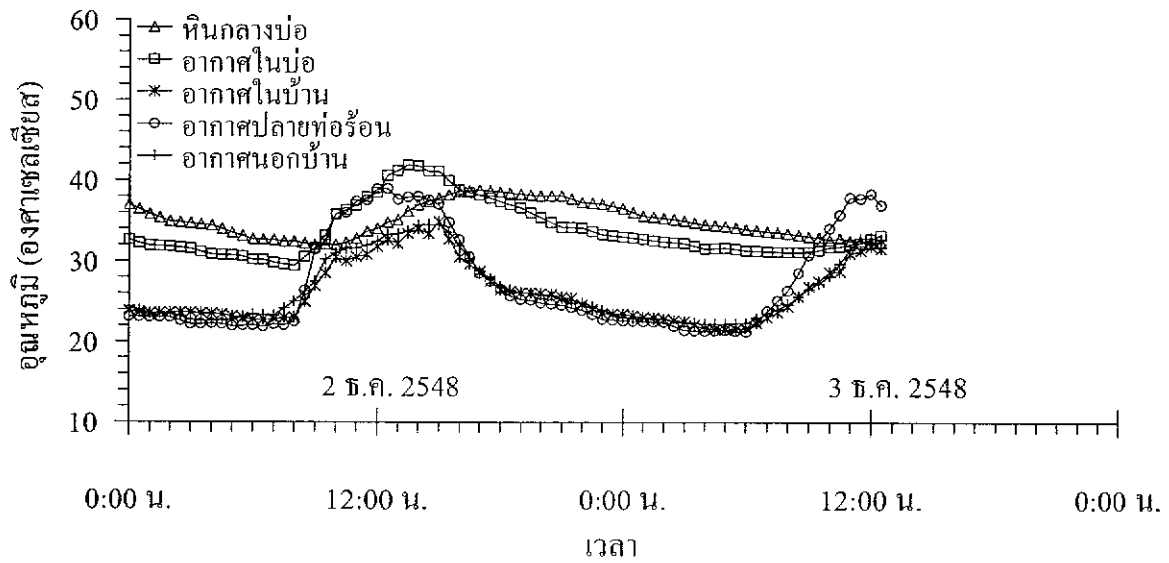
รูปที่ ก-4 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ท่ออากาศร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว ข้อมูลวันที่ 26 และ 27 พฤศจิกายน 2548



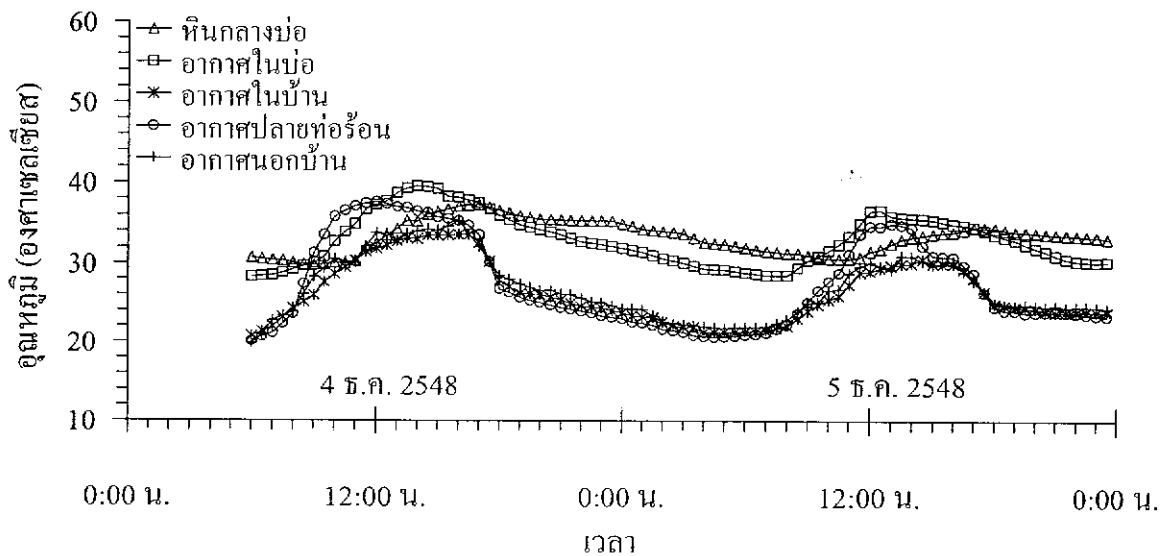
รูปที่ ก-5 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ท่ออากาศร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว ข้อมูลวันที่ 28 และ 29 พฤศจิกายน 2548



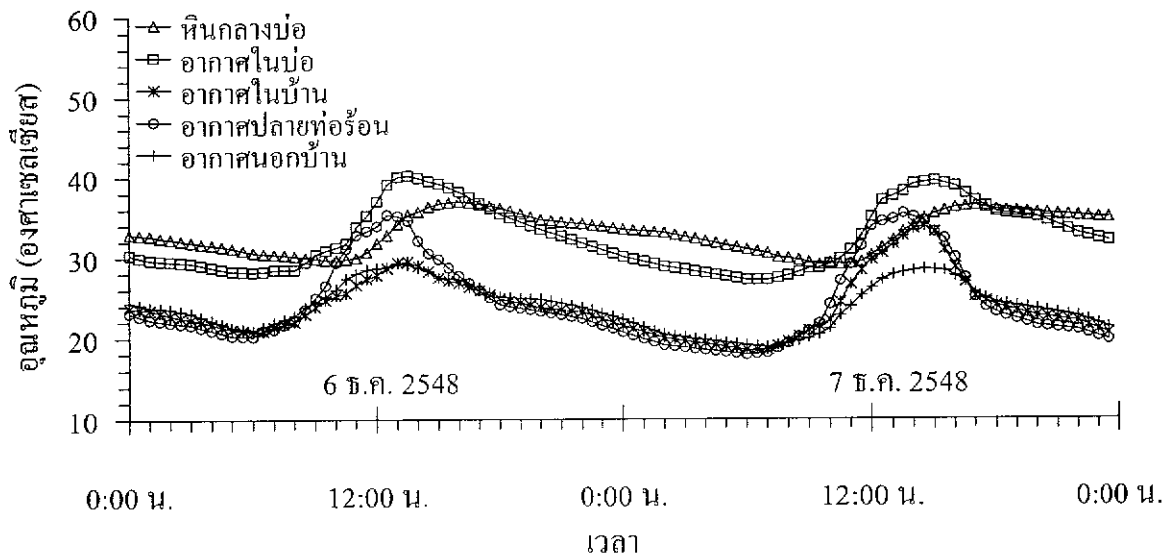
รูปที่ ก-6 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ท่ออากาศร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว ข้อมูลวันที่ 30 พฤศจิกายน และ 1 ธันวาคม 2548



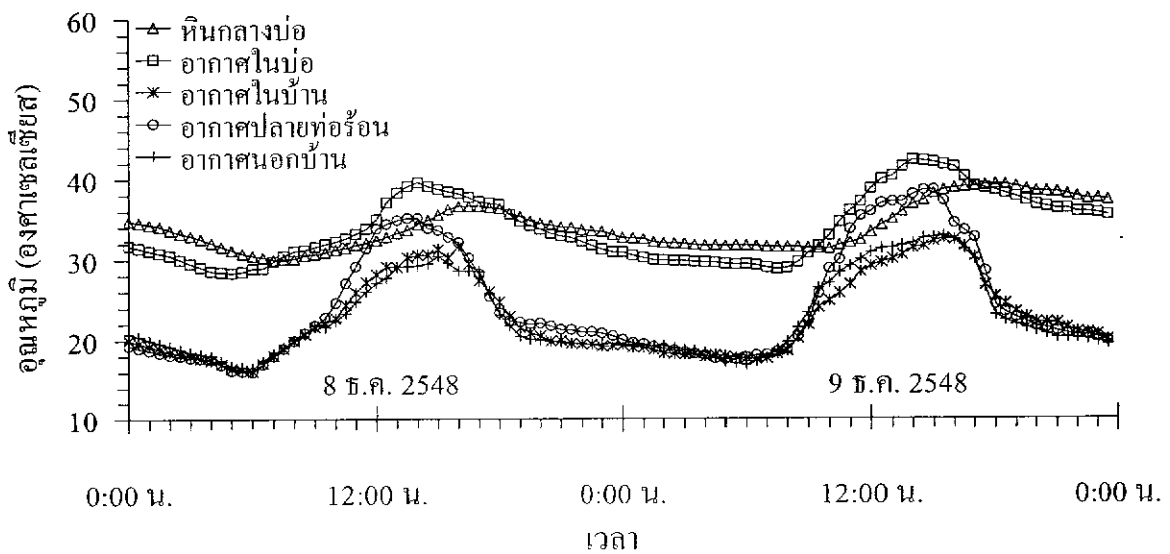
รูปที่ ก-7 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ท่ออากาศร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว ข้อมูลวันที่ 2 และ 3 ธันวาคม 2548



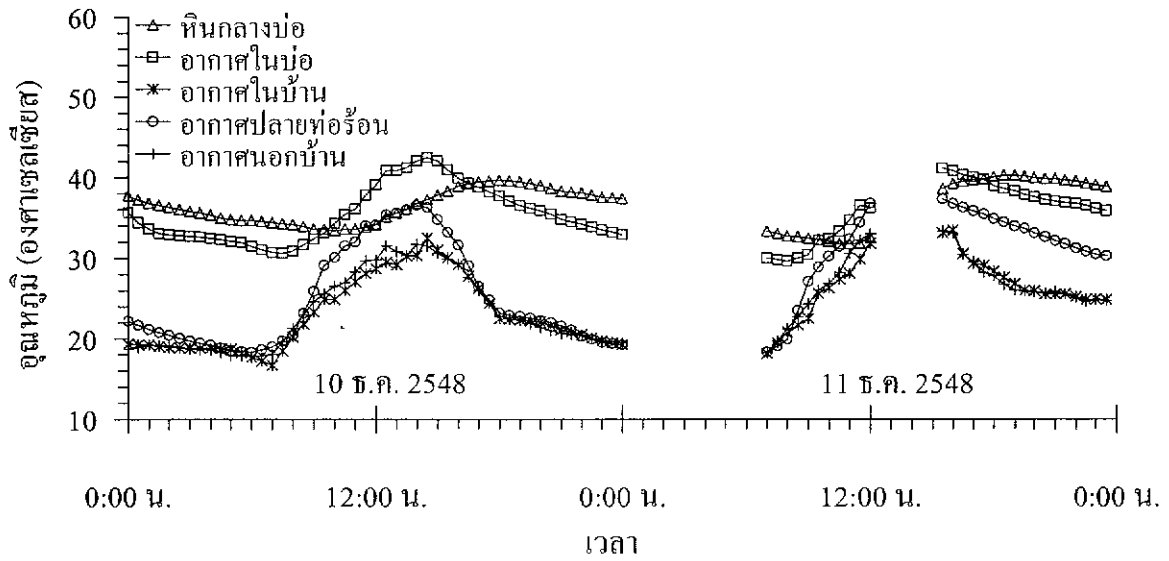
รูปที่ ก-8 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ท่ออากาศร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว ข้อมูลวันที่ 4 และ 5 ธันวาคม 2548



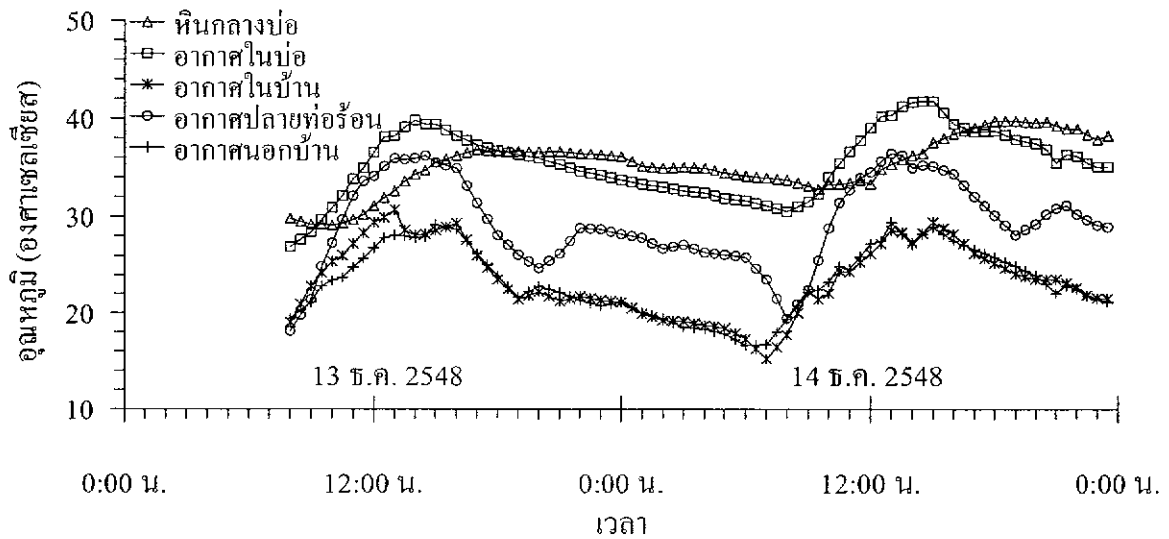
รูปที่ ก-9 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ท่ออากาศร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว ข้อมูลวันที่ 6 และ 7 ธันวาคม 2548



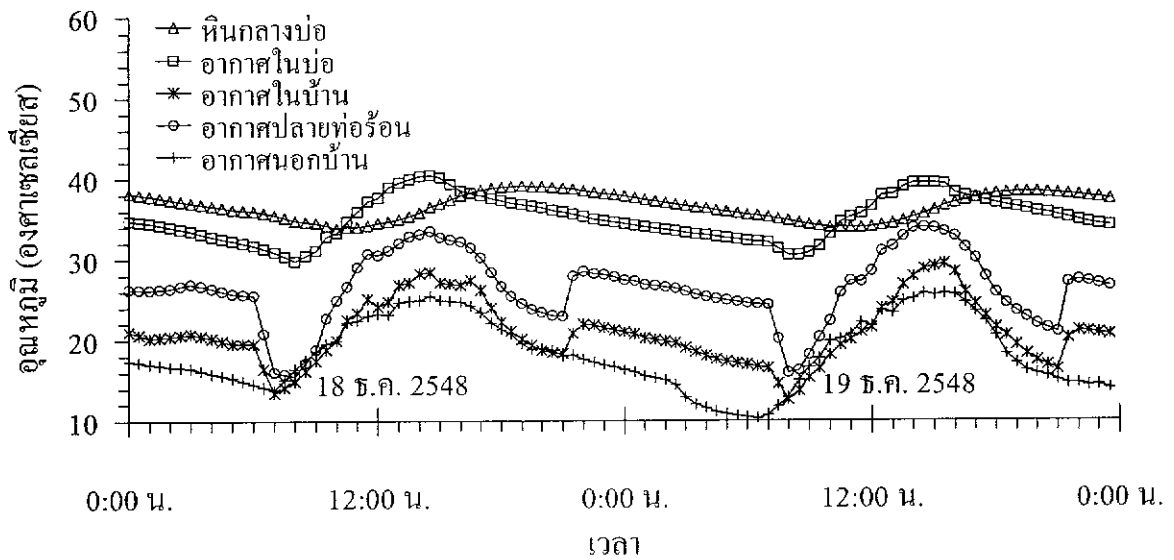
รูปที่ ก-10 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ท่ออากาศร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว ข้อมูลวันที่ 8 และ 9 ธันวาคม 2548



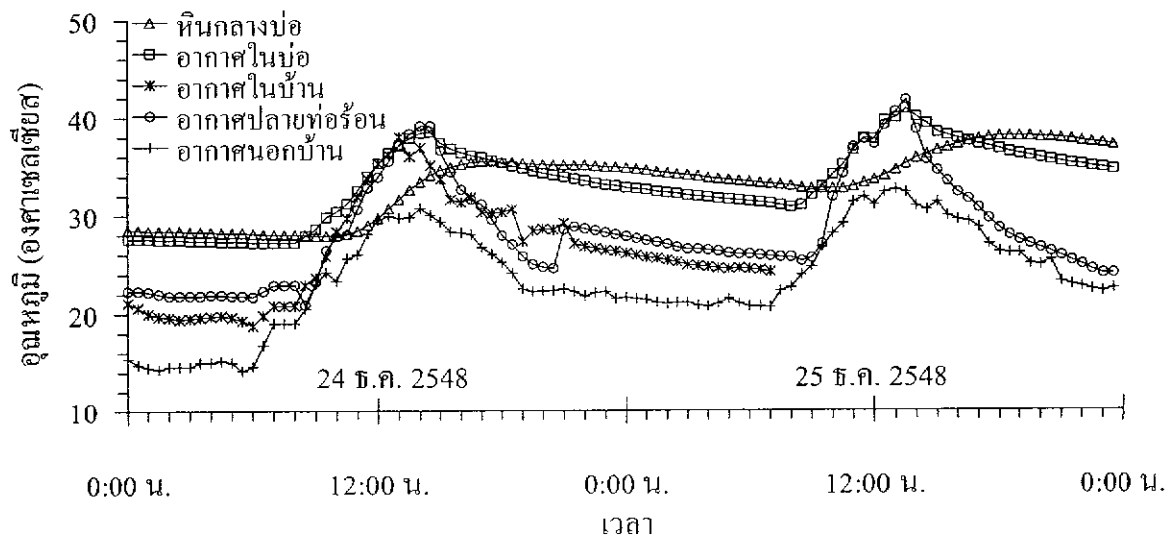
รูปที่ ก-11 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ท่ออากาศร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว ข้อมูลวันที่ 10 และ 11 ธันวาคม 2548



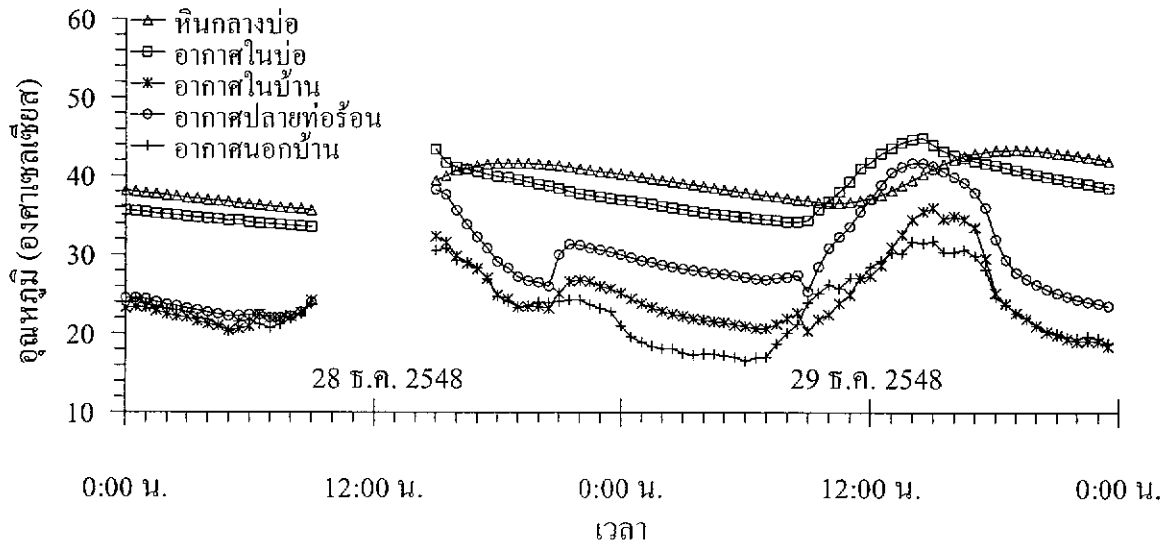
รูปที่ ก-12 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ท่ออากาศร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว ข้อมูลวันที่ 13 และ 14 ธันวาคม 2548



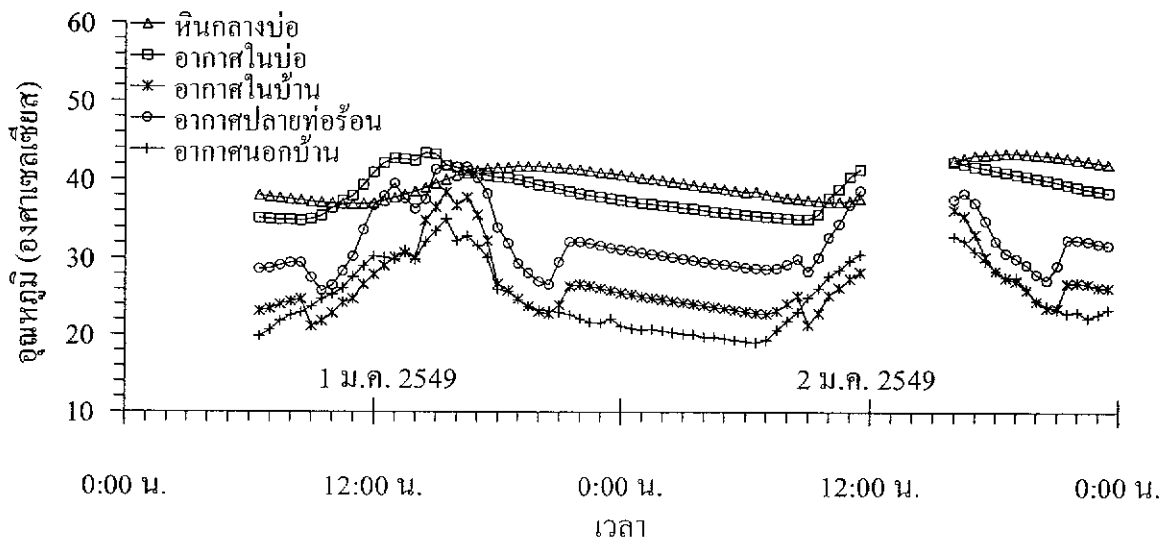
รูปที่ ก-13 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ท่ออากาศร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว ข้อมูลวันที่ 18 และ 19 ธันวาคม 2548



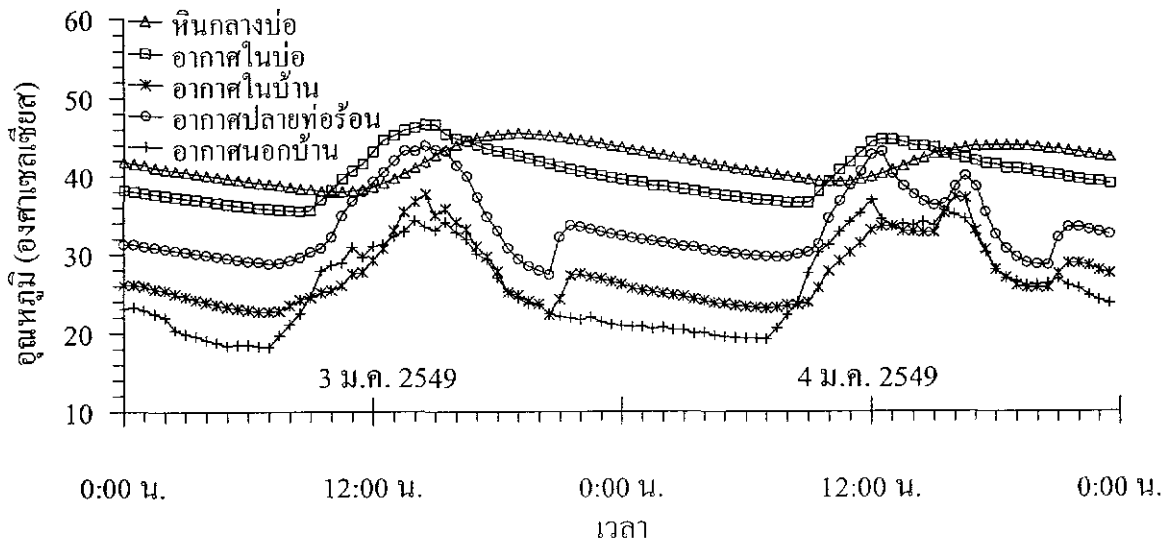
รูปที่ ก-14 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ท่ออากาศร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว ข้อมูลวันที่ 24 และ 25 ธันวาคม 2548



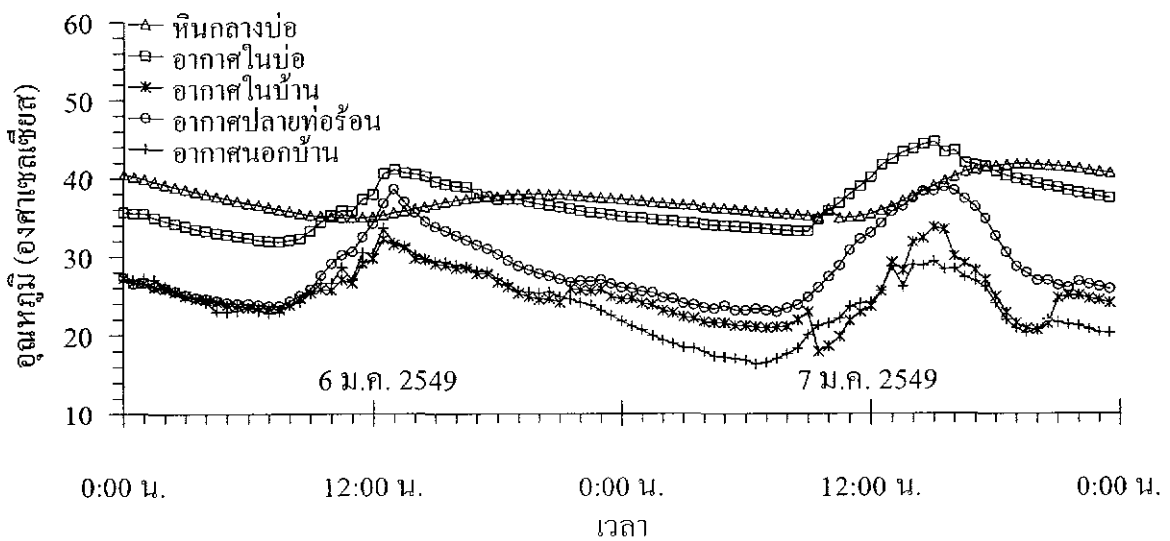
รูปที่ ก-15 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในป่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ท่ออากาศร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว ข้อมูลวันที่ 28 และ 29 ธันวาคม 2548



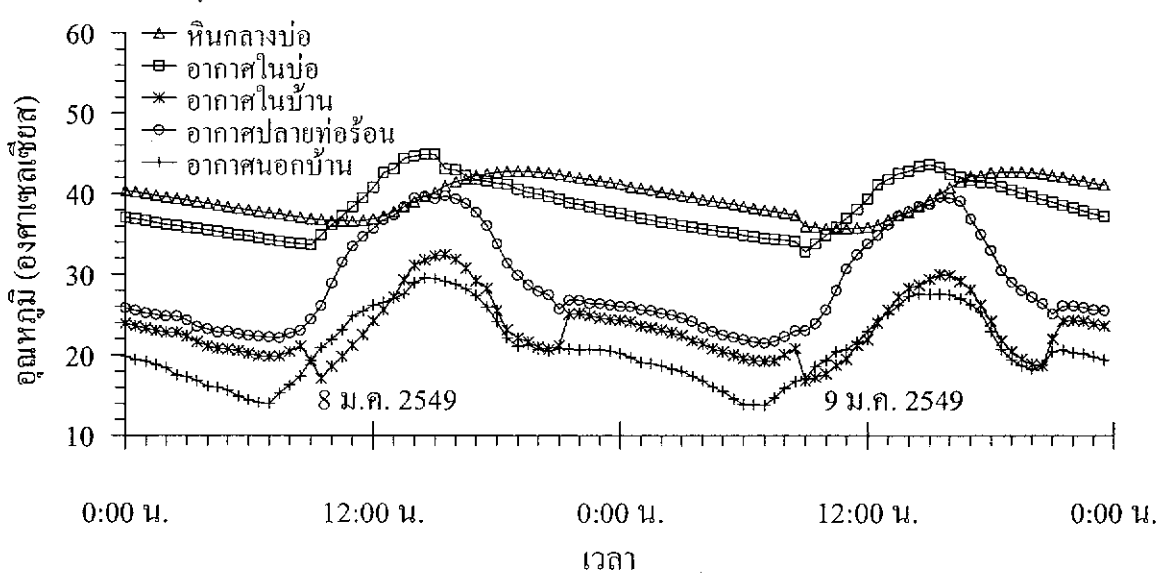
รูปที่ ก-16 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในป่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ท่ออากาศร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว ข้อมูลวันที่ 1 และ 2 มกราคม 2549



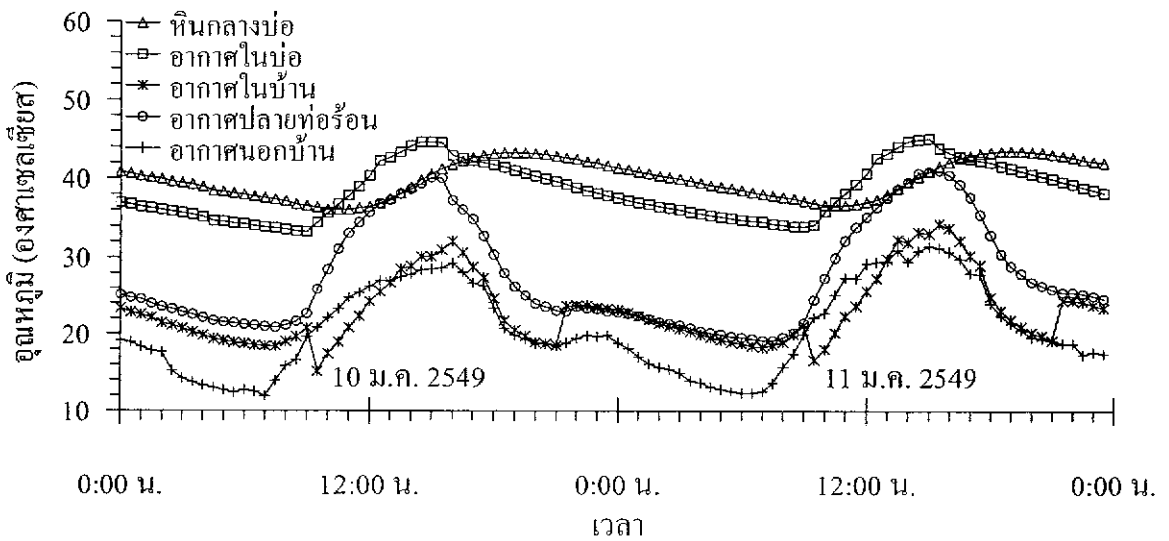
รูปที่ ก-17 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ท่ออากาศร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว ข้อมูลวันที่ 3 และ 4 มกราคม 2549



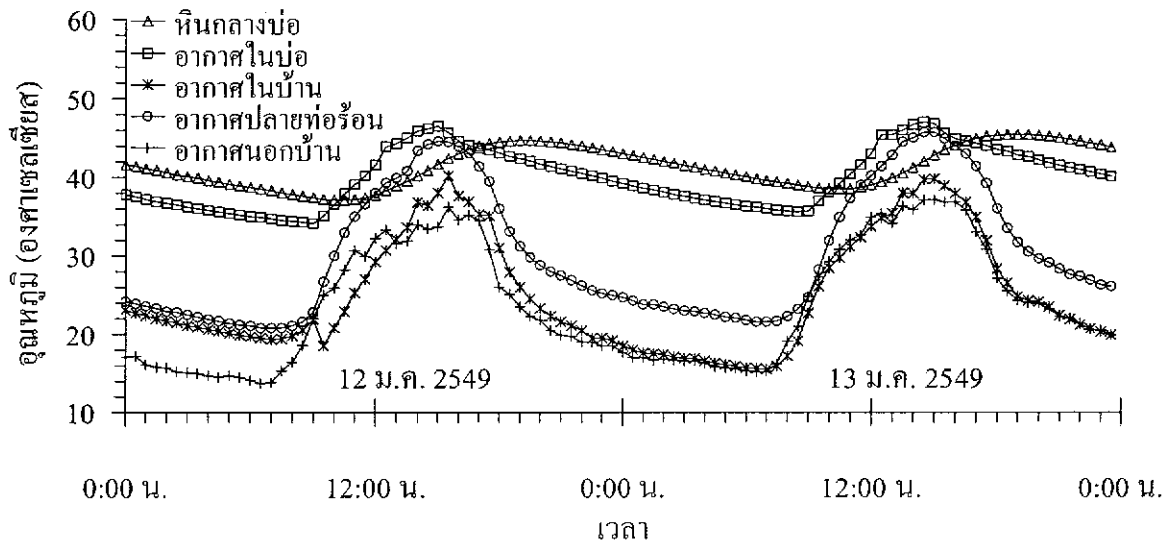
รูปที่ ก-18 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ท่ออากาศร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้ว ข้อมูลวันที่ 6 และ 7 มกราคม 2549



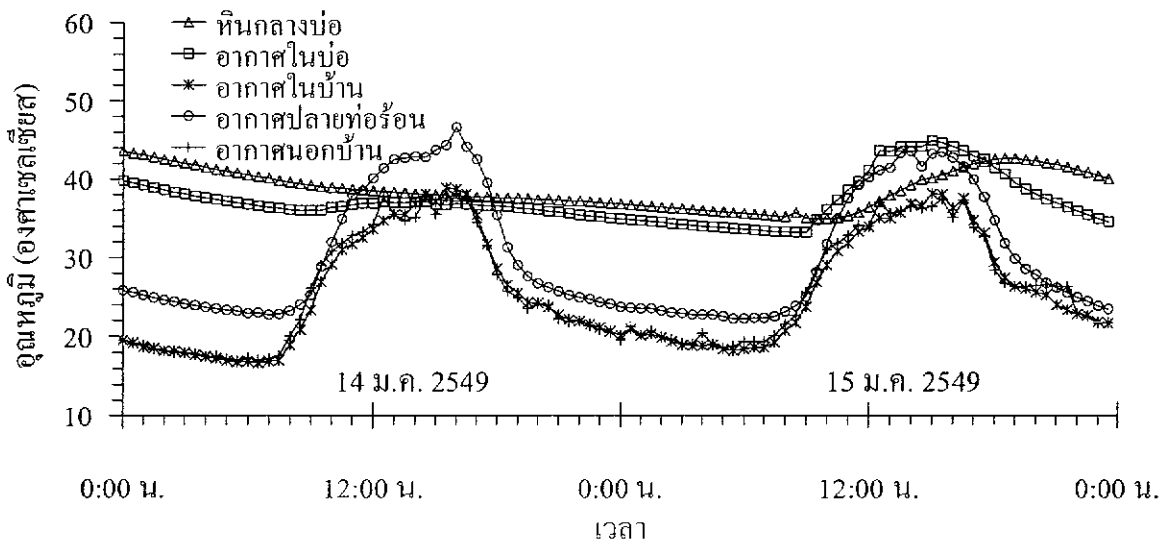
รูปที่ ก-19 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ที่อาคารร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้ว ข้อมูลวันที่ 8 และ 9 มกราคม 2549



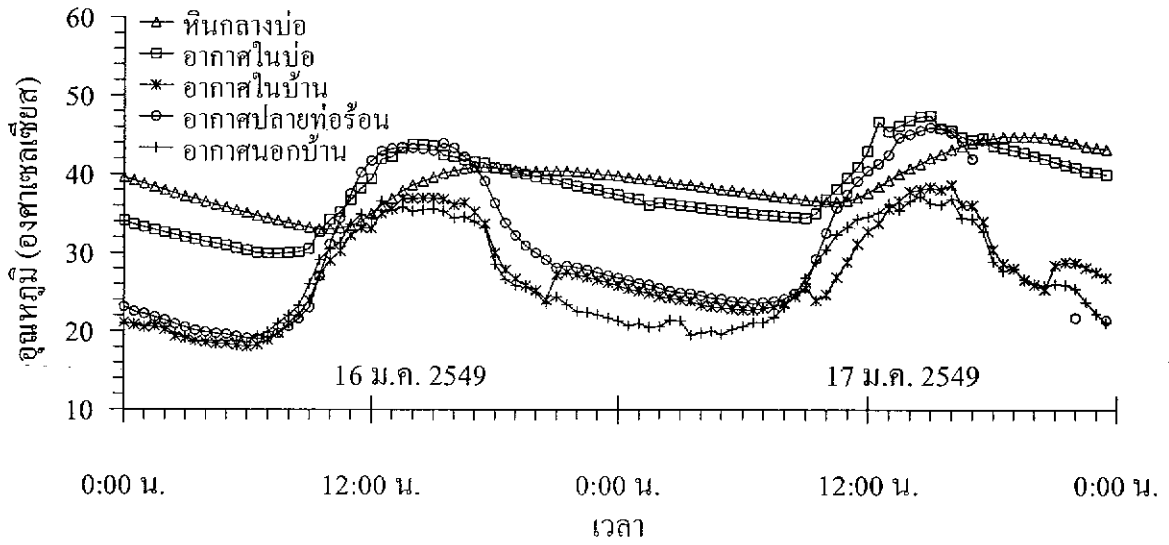
รูปที่ ก-20 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และอากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ที่อาคารร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้ว ข้อมูลวันที่ 10 และ 11 มกราคม 2549



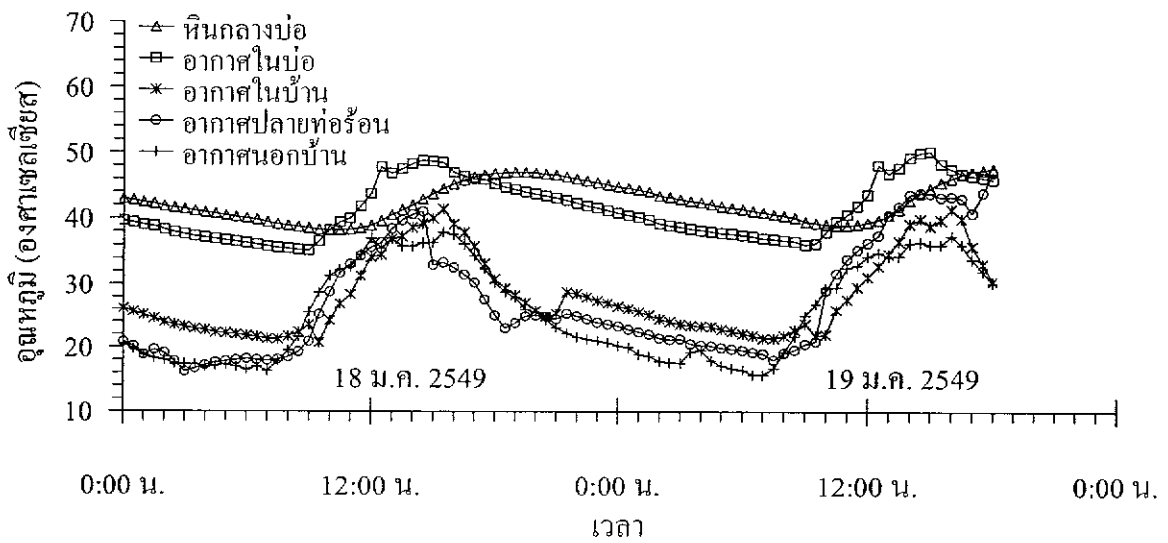
รูปที่ ก-21 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ท่ออากาศร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้ว ข้อมูลวันที่ 12 และ 13 มกราคม 2549



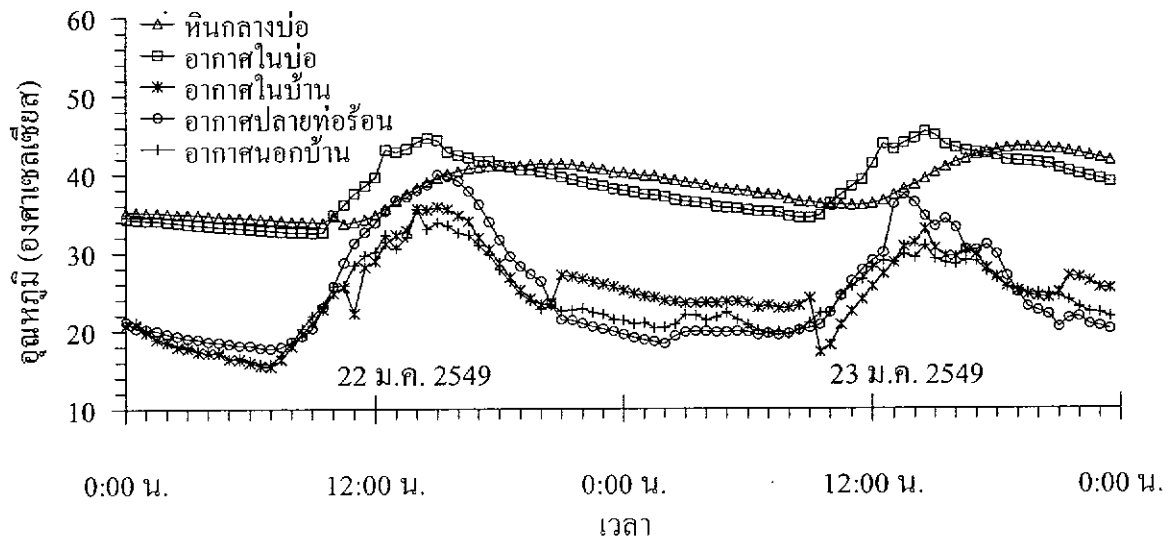
รูปที่ ก-22 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ท่ออากาศร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้ว ข้อมูลวันที่ 14 และ 15 มกราคม 2549



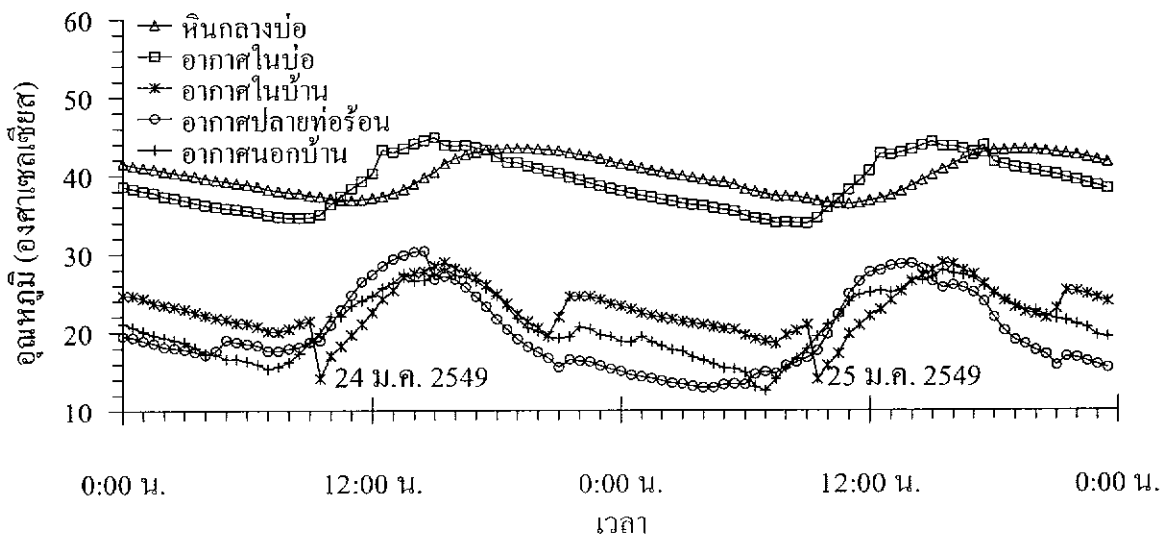
รูปที่ ก-23 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ที่อาคารร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้ว ข้อมูลวันที่ 16 และ 17 มกราคม 2549



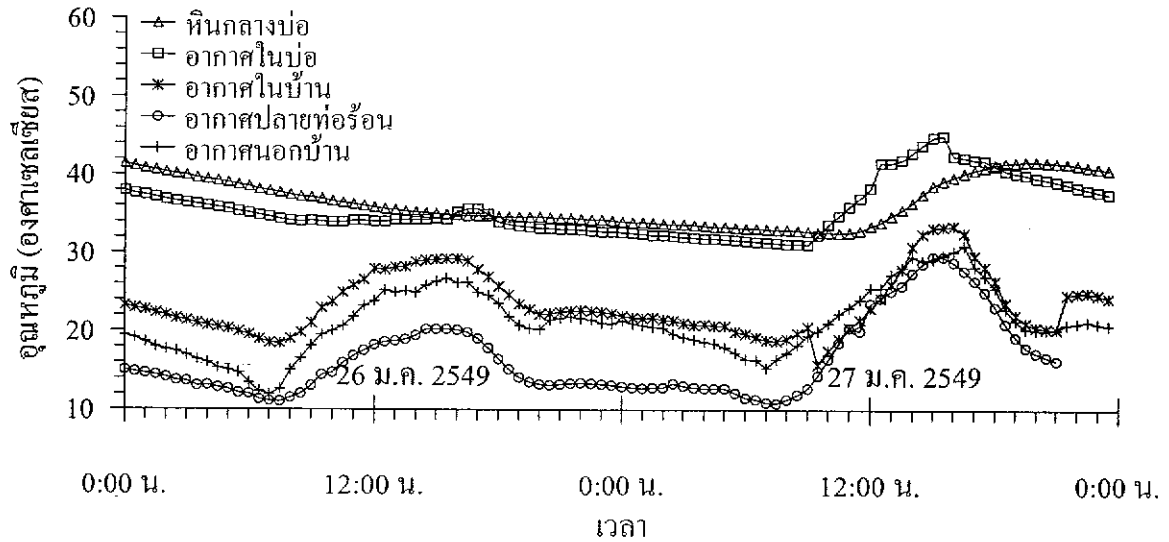
รูปที่ ก-24 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ที่อาคารร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้ว ข้อมูลวันที่ 18 และ 19 มกราคม 2549



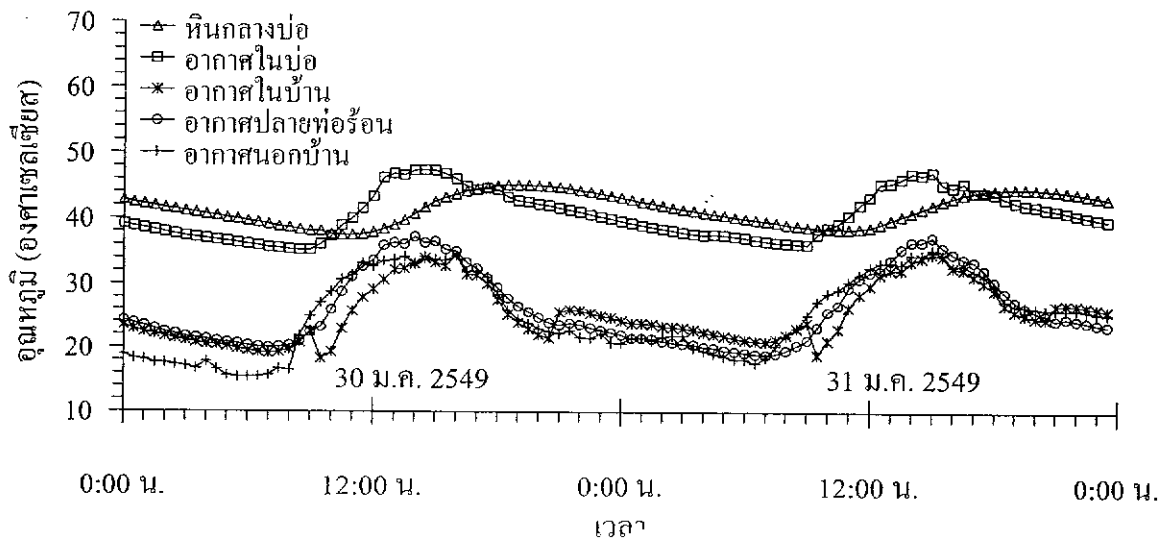
รูปที่ ก-25 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหिनกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ท่ออากาศร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้ว ข้อมูลวันที่ 22 และ 23 มกราคม 2549



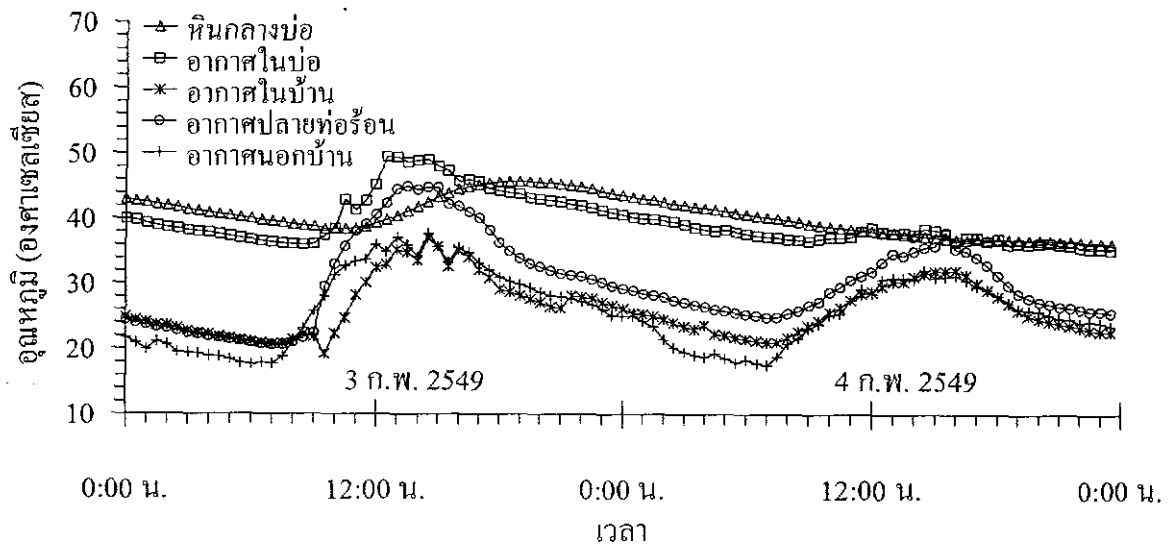
รูปที่ ก-26 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหिनกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ท่ออากาศร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้ว ข้อมูลวันที่ 24 และ 25 มกราคม 2549



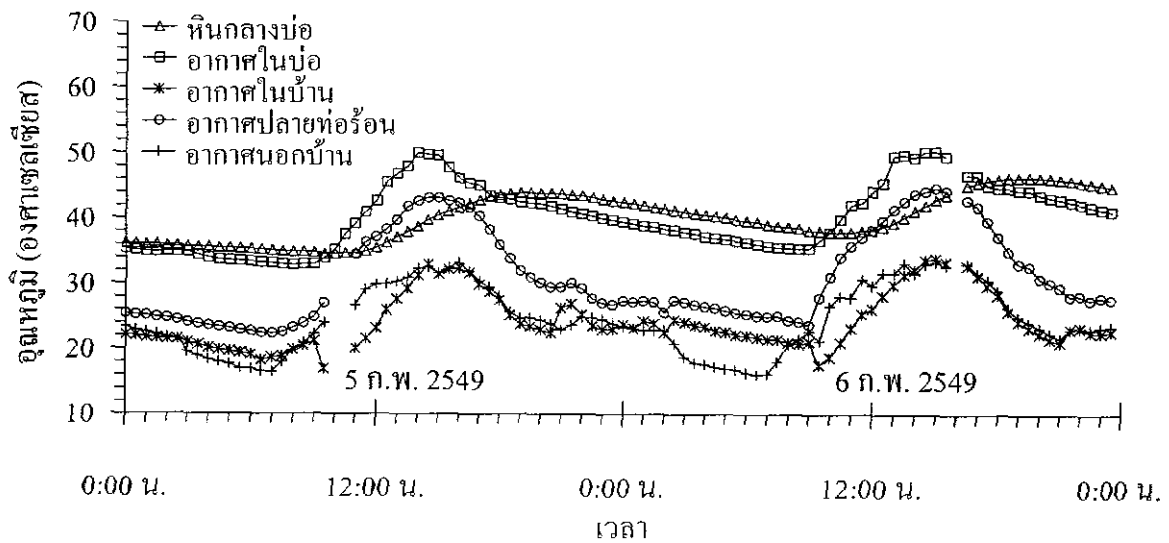
รูปที่ ก-27 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ที่อากาศร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้ว ข้อมูลวันที่ 26 และ 27 มกราคม 2549



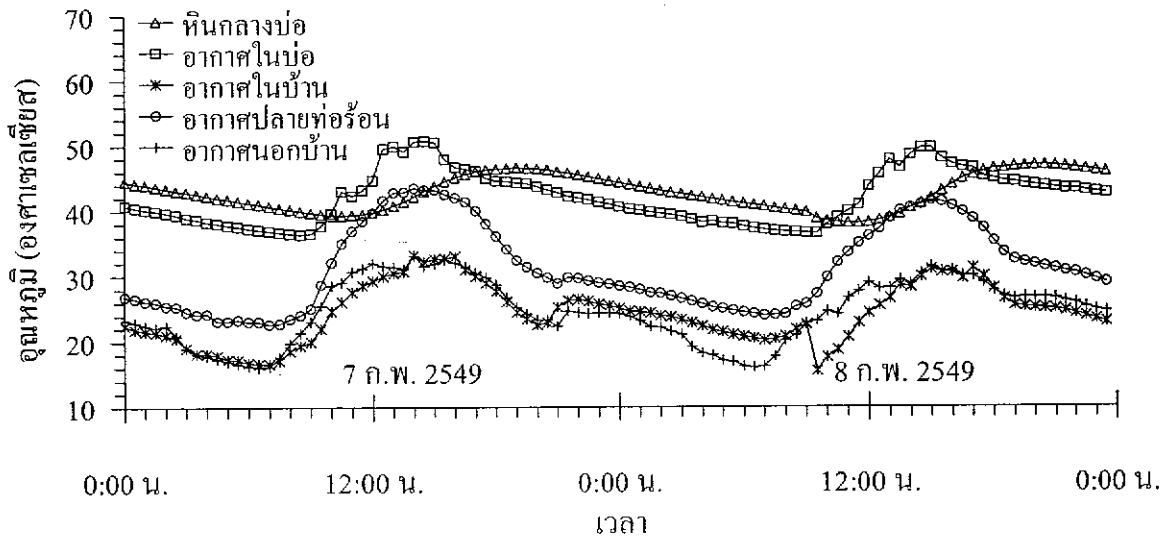
รูปที่ ก-28 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ที่อากาศร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้ว ข้อมูลวันที่ 30 และ 31 มกราคม 2549



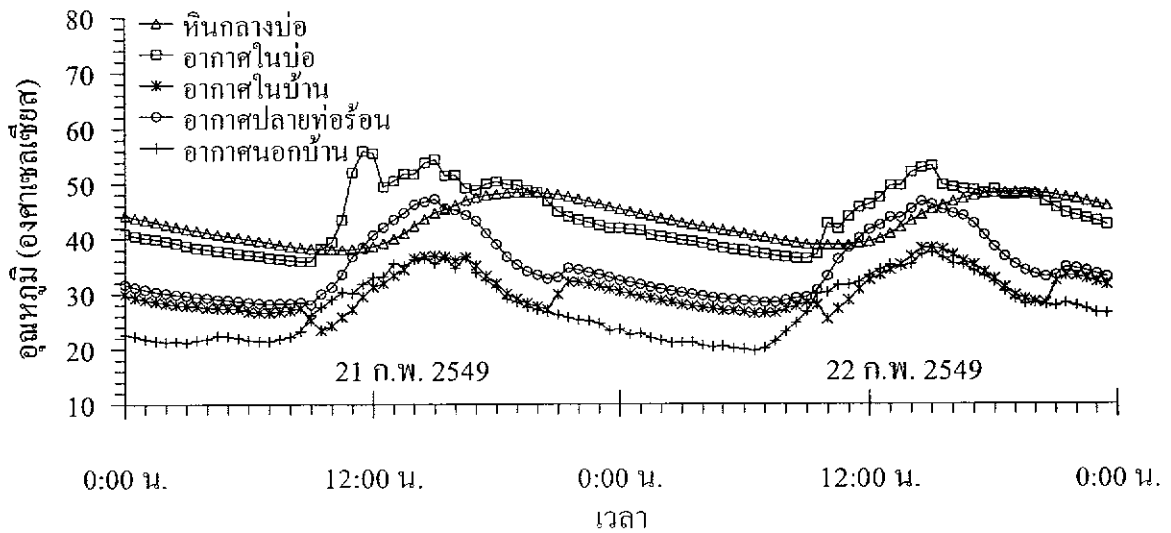
รูปที่ ก-29 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ท่ออากาศร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้ว ข้อมูลวันที่ 3 และ 4 กุมภาพันธ์ 2549



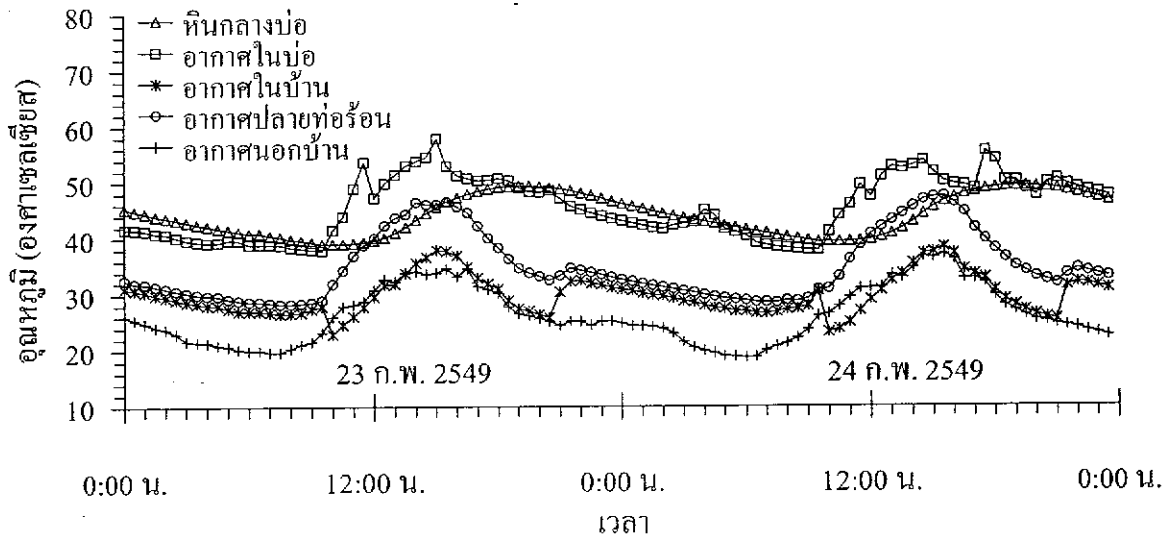
รูปที่ ก-30 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ท่ออากาศร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้ว ข้อมูลวันที่ 5 และ 6 กุมภาพันธ์ 2549



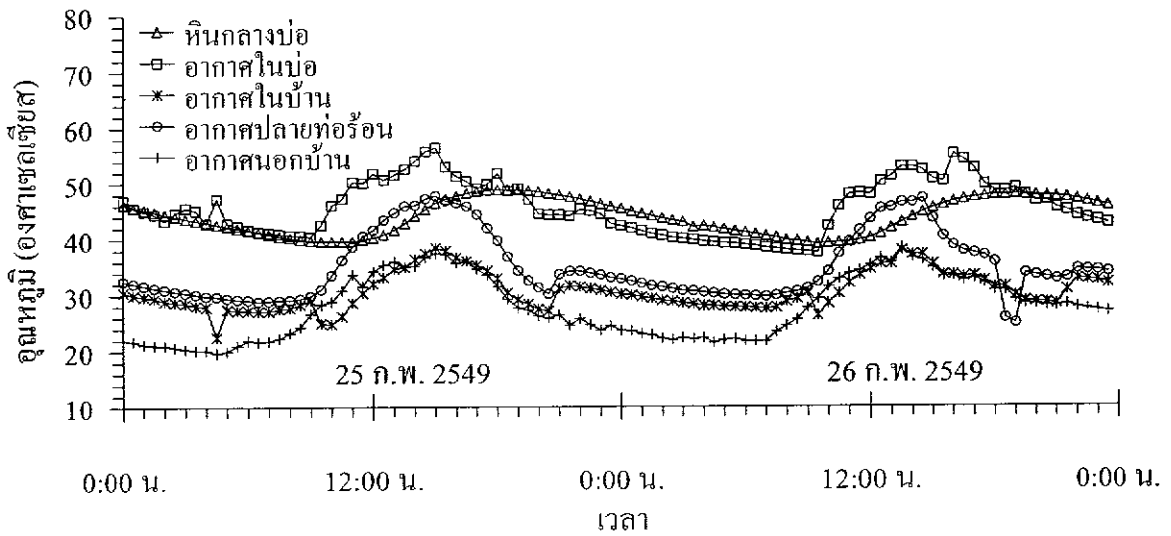
รูปที่ ก-31 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ท่ออากาศร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้ว ข้อมูลวันที่ 7 และ 8 กุมภาพันธ์ 2549



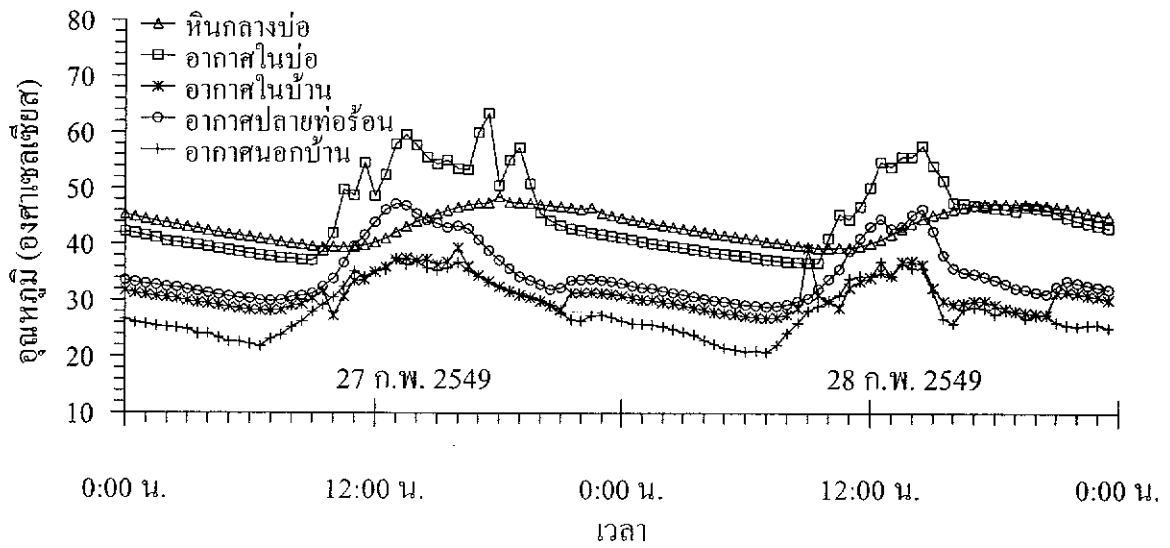
รูปที่ ก-32 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ท่ออากาศร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้ว ข้อมูลวันที่ 21 และ 22 กุมภาพันธ์ 2549



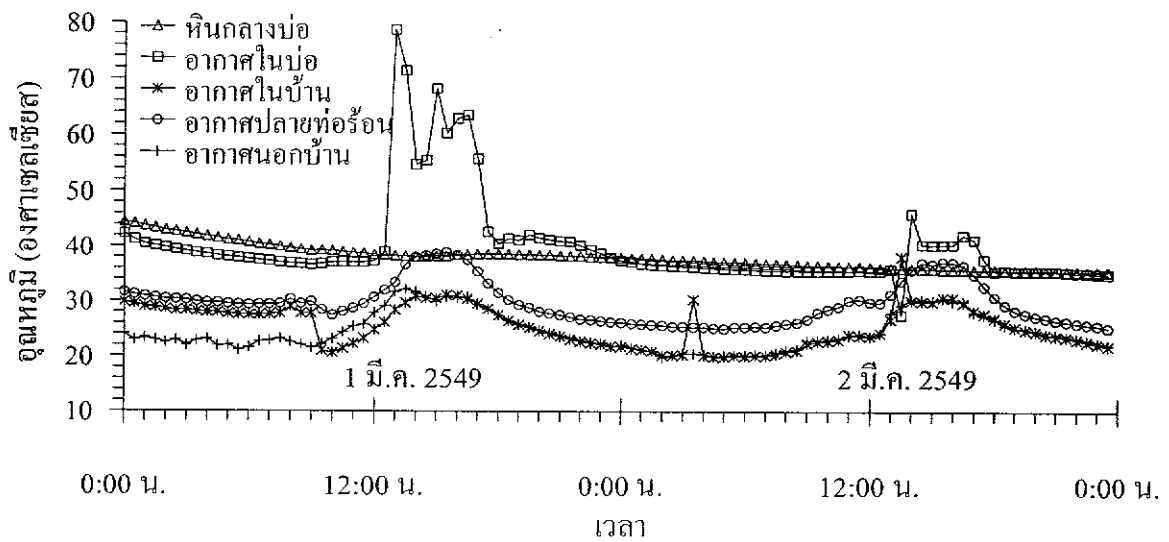
รูปที่ ก-33 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ท่ออากาศร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้ว ข้อมูลวันที่ 23 และ 24 กุมภาพันธ์ 2549



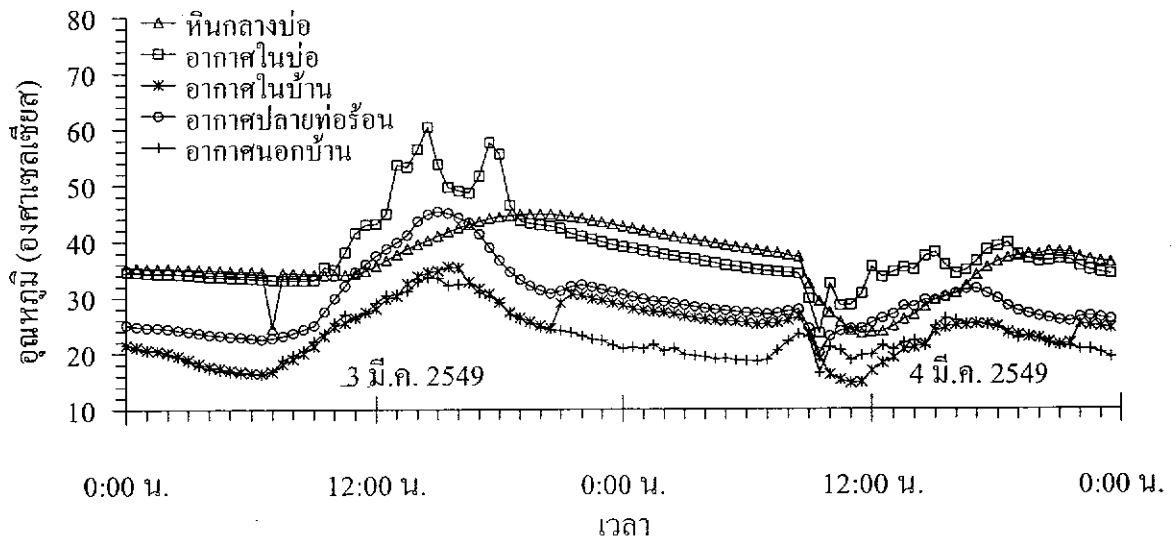
รูปที่ ก-34 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ท่ออากาศร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้ว ข้อมูลวันที่ 25 และ 26 กุมภาพันธ์ 2549



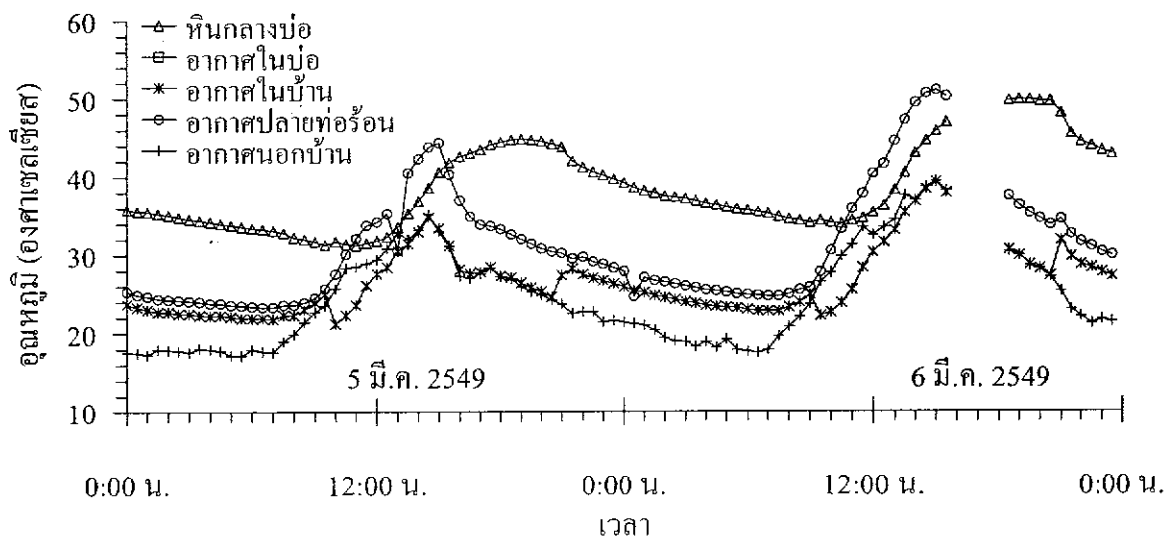
รูปที่ ก-35 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ท่ออากาศร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้ว ข้อมูลวันที่ 27 และ 28 กุมภาพันธ์ 2549



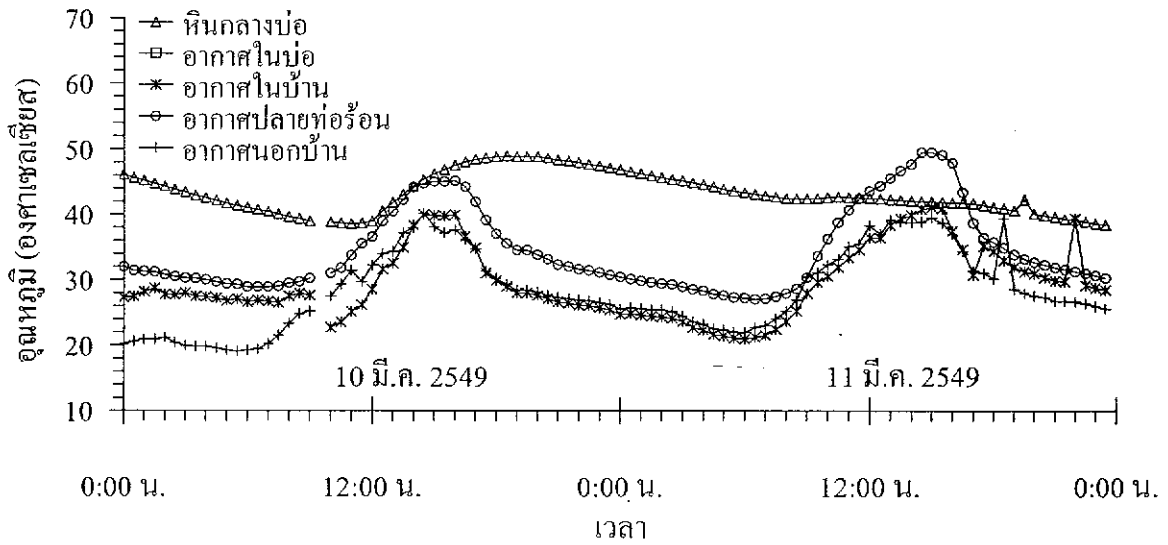
รูปที่ ก-36 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ท่ออากาศร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้ว ข้อมูลวันที่ 1 และ 2 มีนาคม 2549



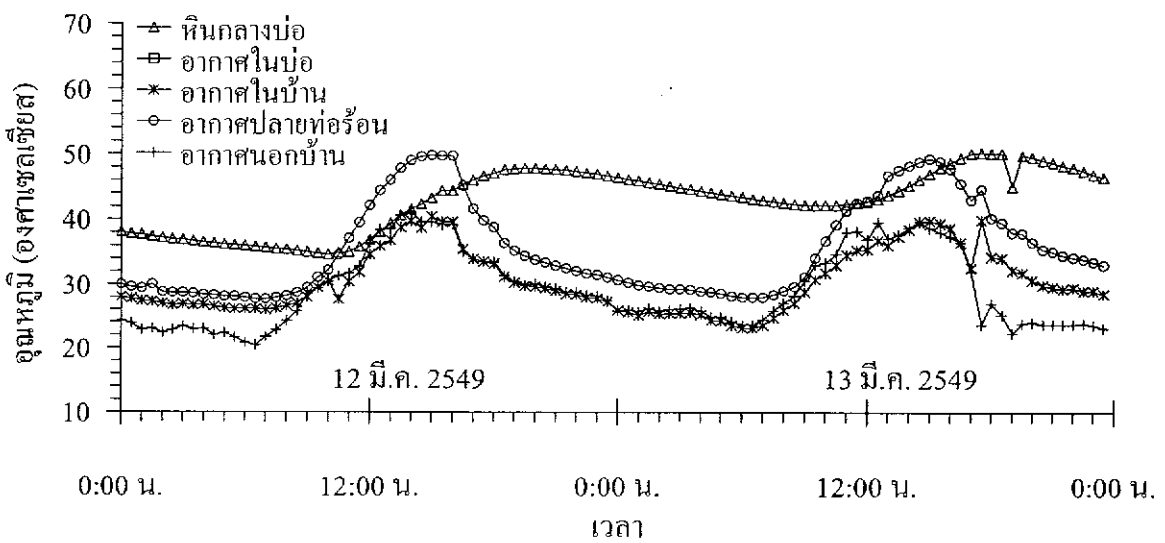
รูปที่ ก-37 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ท่ออากาศร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้ว ข้อมูลวันที่ 3 และ 4 มีนาคม 2549



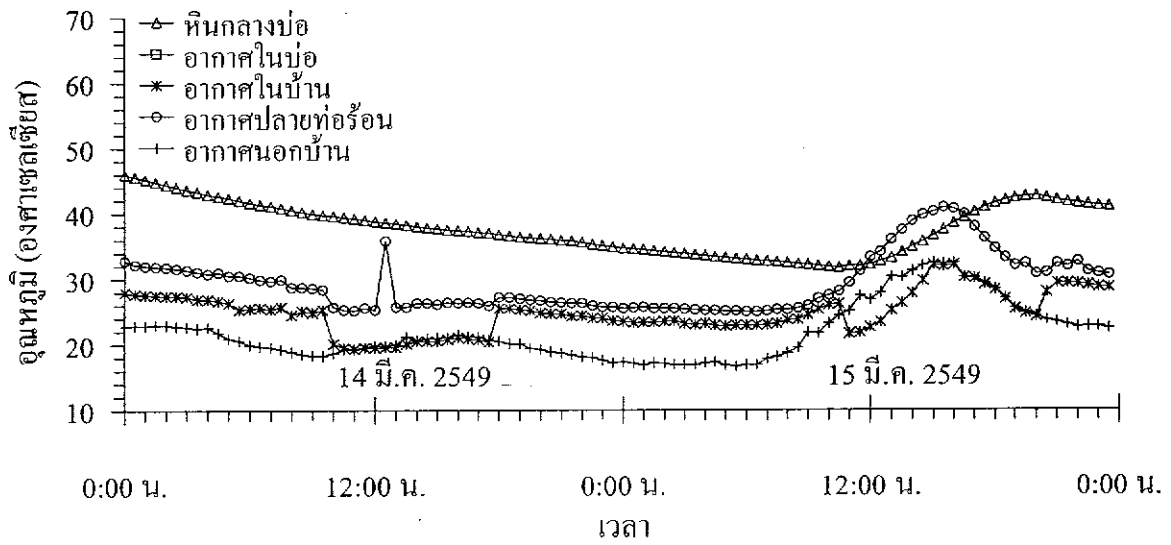
รูปที่ ก-38 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ท่ออากาศร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้ว ข้อมูลวันที่ 5 และ 6 มีนาคม 2549



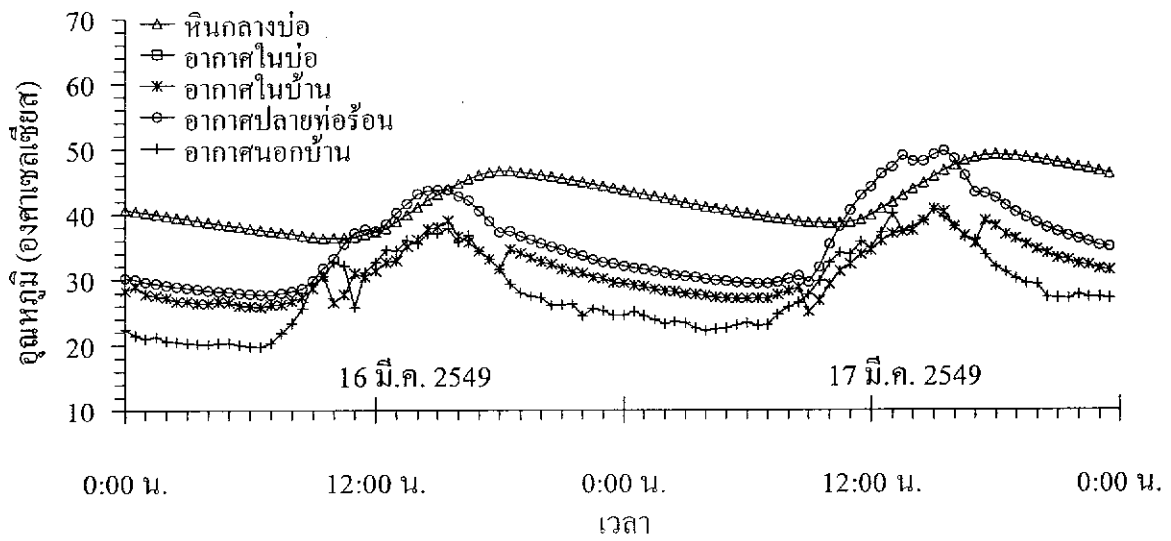
รูปที่ ก-39 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหिनกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ท่ออากาศร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้ว ข้อมูลวันที่ 10 และ 11 มีนาคม 2549



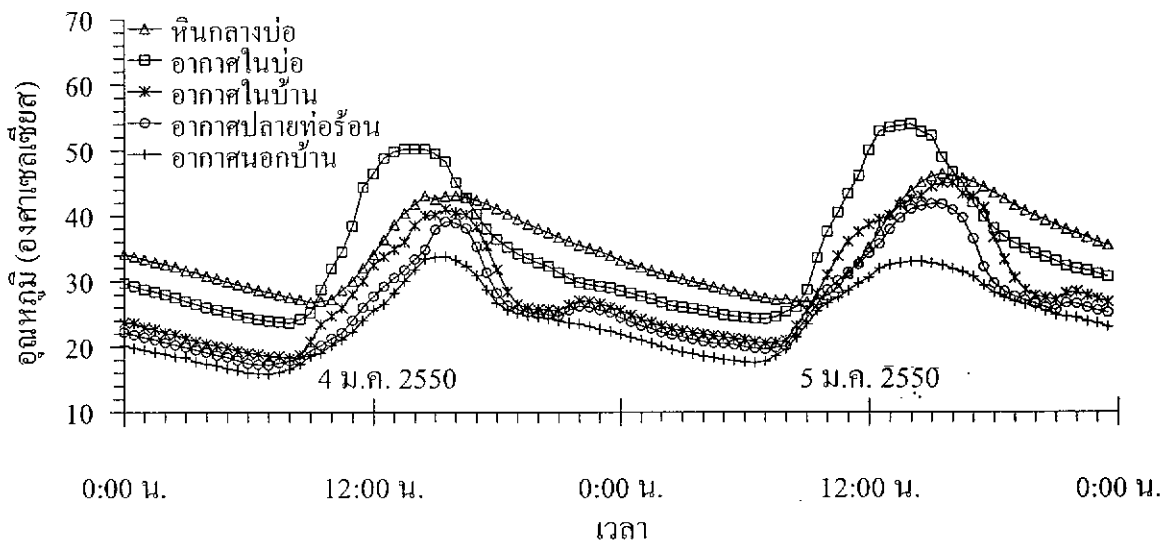
รูปที่ ก-40 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหिनกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ท่ออากาศร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้ว ข้อมูลวันที่ 12 และ 13 มีนาคม 2549



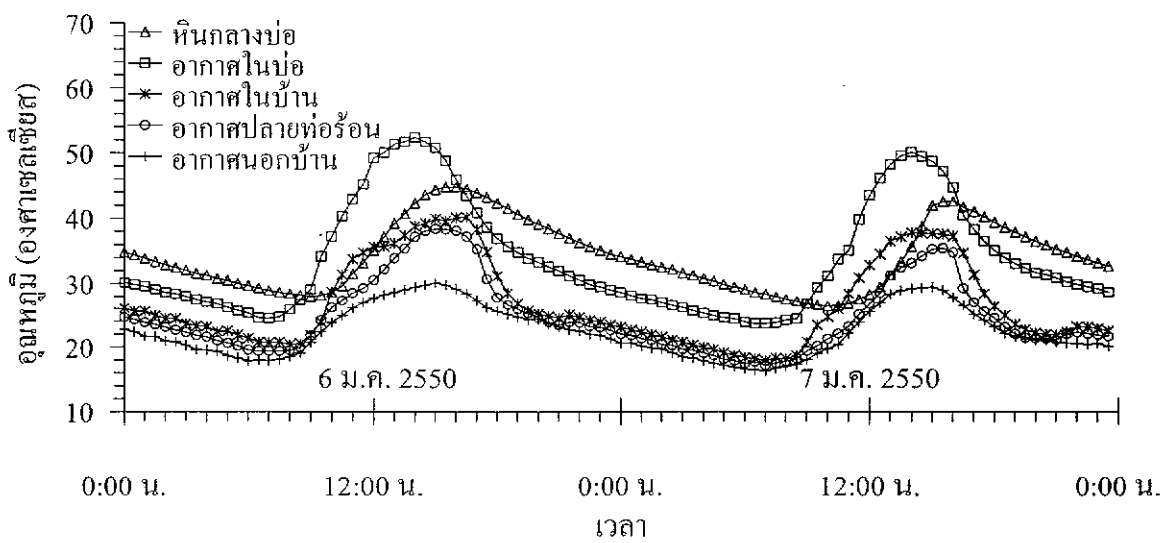
รูปที่ ก-40 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ท่ออากาศร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้ว ข้อมูลวันที่ 14 และ 15 มีนาคม 2549



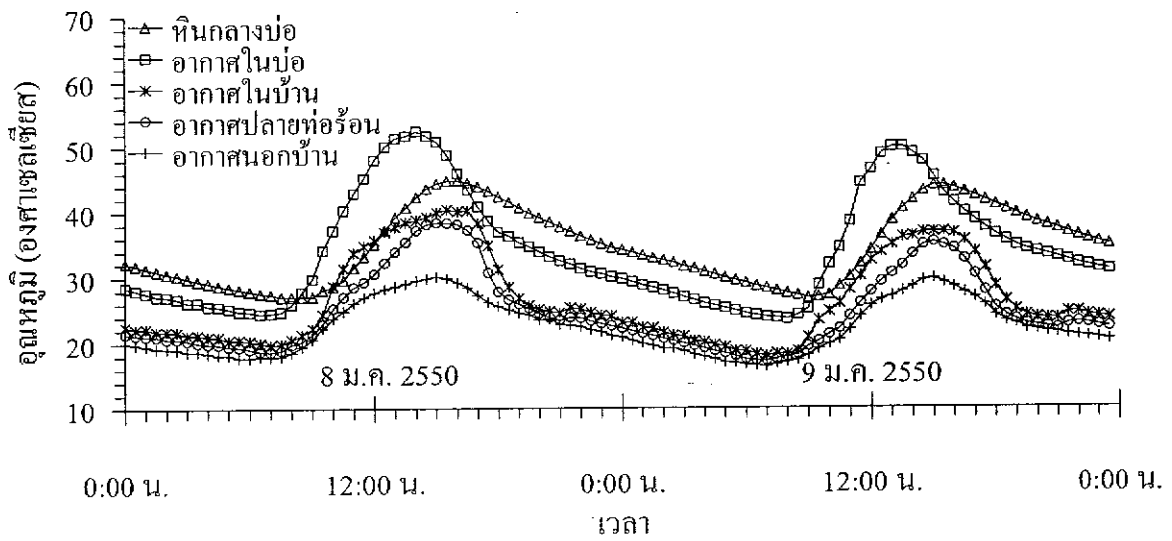
รูปที่ ก-41 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ท่ออากาศร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้ว ข้อมูลวันที่ 16 และ 17 มีนาคม 2549



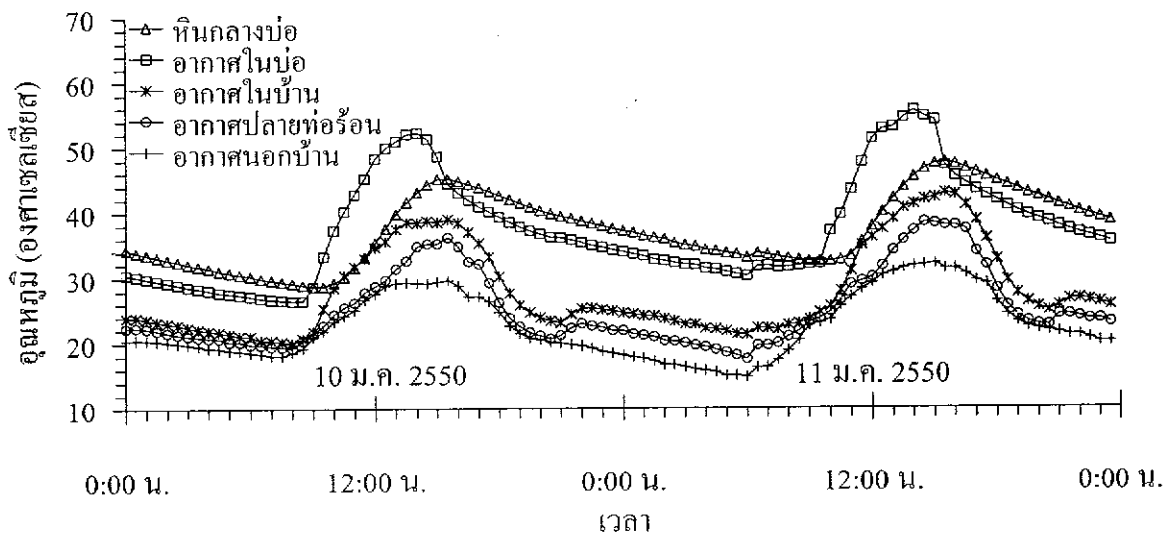
รูปที่ ก-42 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ท่ออากาศร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้ว และใช้หินจำนวน 376 กิโลกรัม ข้อมูลวันที่ 4 และ 5 มกราคม 2550



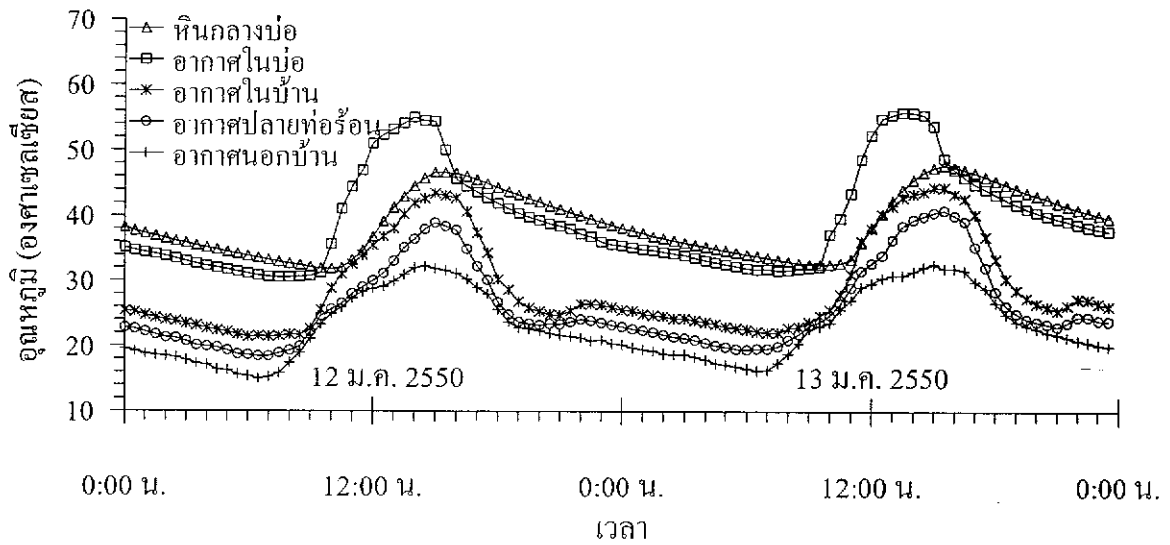
รูปที่ ก-43 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ท่ออากาศร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้ว และใช้หินจำนวน 376 กิโลกรัม ข้อมูลวันที่ 6 และ 7 มกราคม 2550



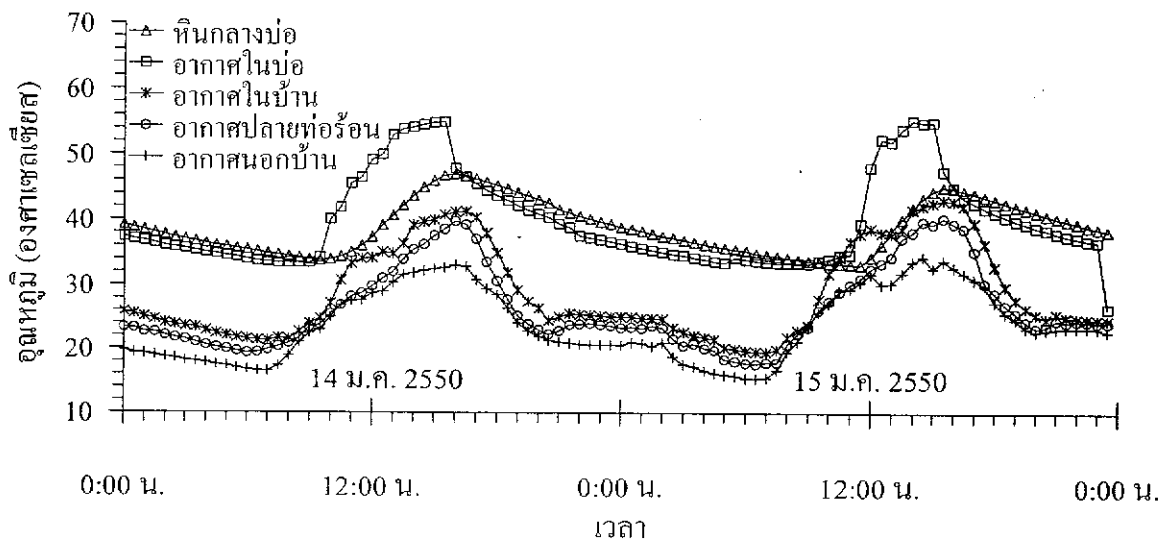
รูปที่ ก-43 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ท่ออากาศร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้ว และใช้หินจำนวน 376 กิโลกรัม ข้อมูลวันที่ 8 และ 9 มกราคม 2550



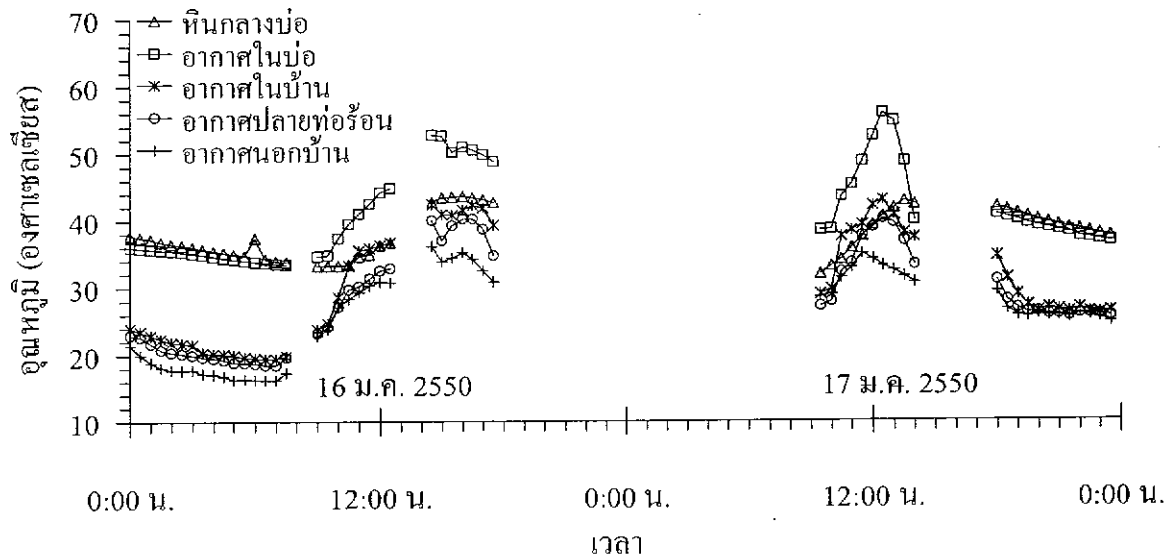
รูปที่ ก-44 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ท่ออากาศร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้ว และใช้หินจำนวน 376 กิโลกรัม ข้อมูลวันที่ 10 และ 11 มกราคม 2550



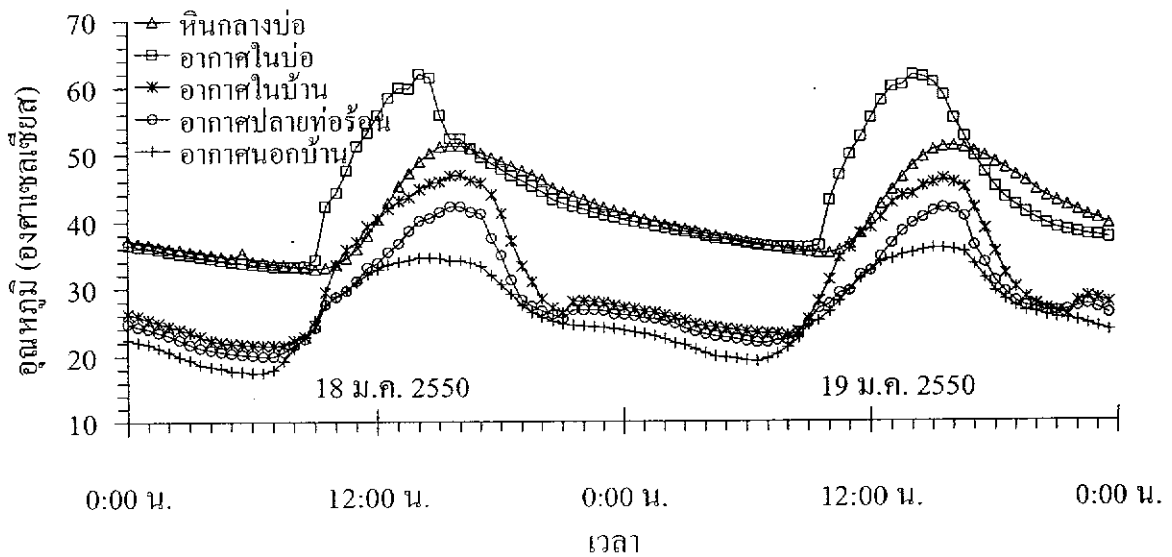
รูปที่ ก-45 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหिनกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ท่ออากาศร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้ว และใช้หिनจำนวน 376 กิโลกรัม ข้อมูลวันที่ 12 และ 13 มกราคม 2550



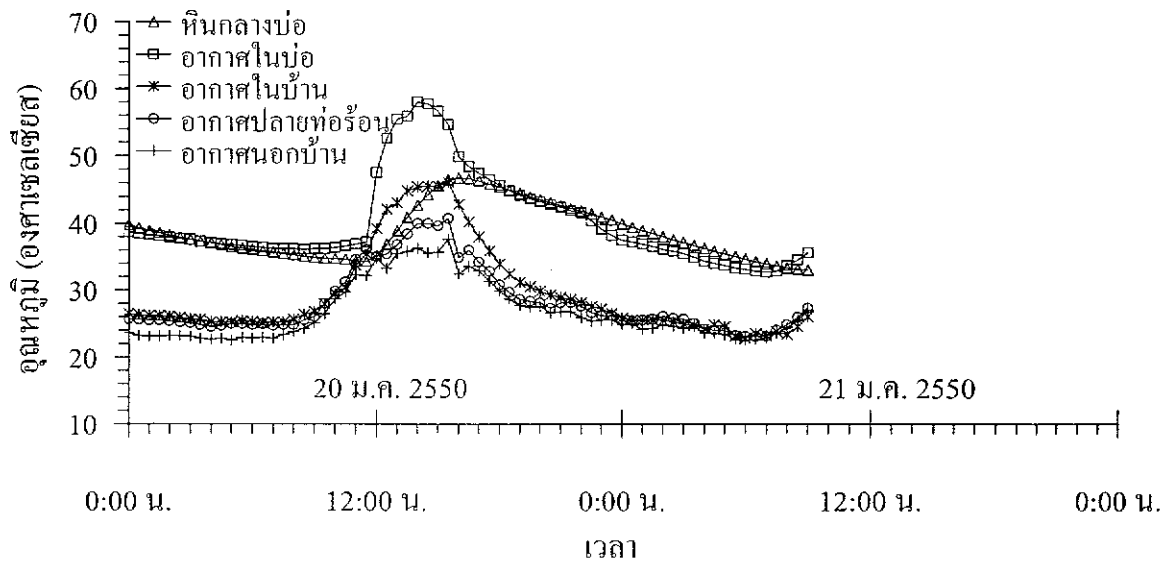
รูปที่ ก-46 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหिनกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ท่ออากาศร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้ว และใช้หिनจำนวน 376 กิโลกรัม ข้อมูลวันที่ 14 และ 15 มกราคม 2550



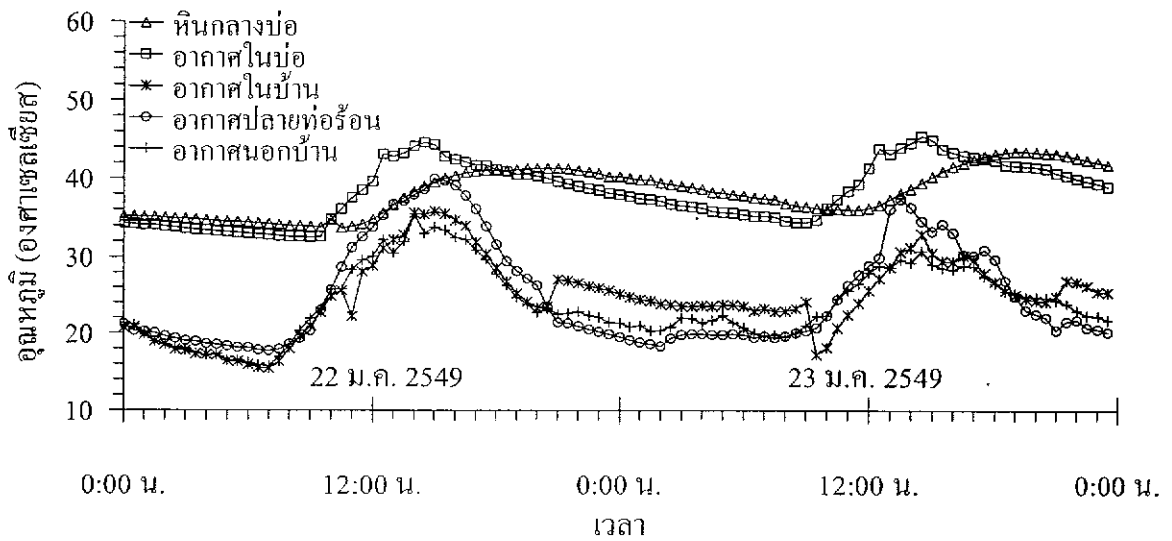
รูปที่ ก-47 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ที่อาคารร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้ว และใช้หินจำนวน 376 กิโลกรัม ข้อมูลวันที่ 16 และ 17 มกราคม 2550



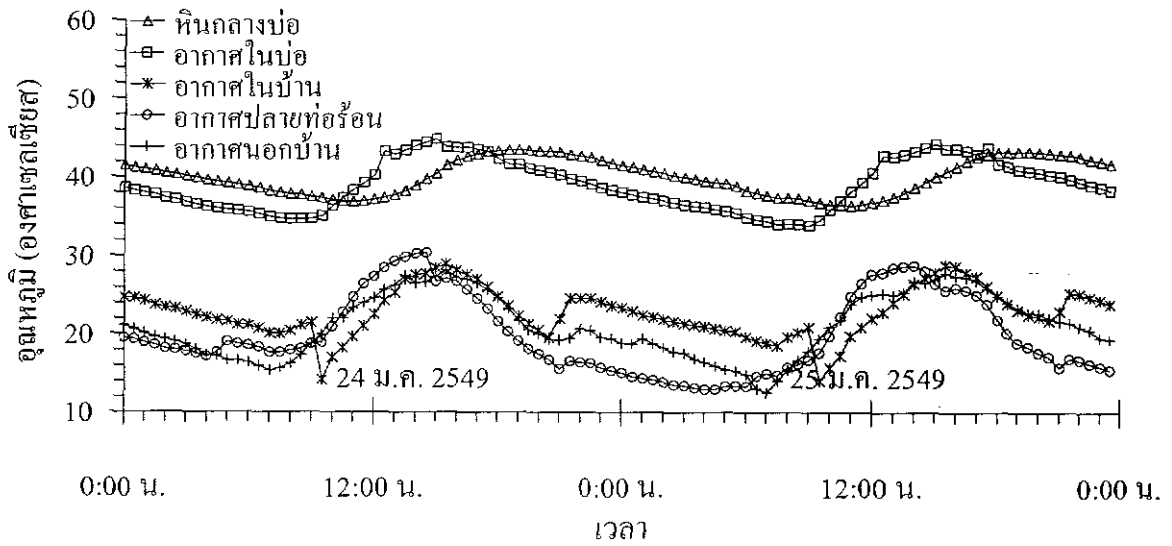
รูปที่ ก-48 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ที่อาคารร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้ว และใช้หินจำนวน 376 กิโลกรัม ข้อมูลวันที่ 18 และ 19 มกราคม 2550



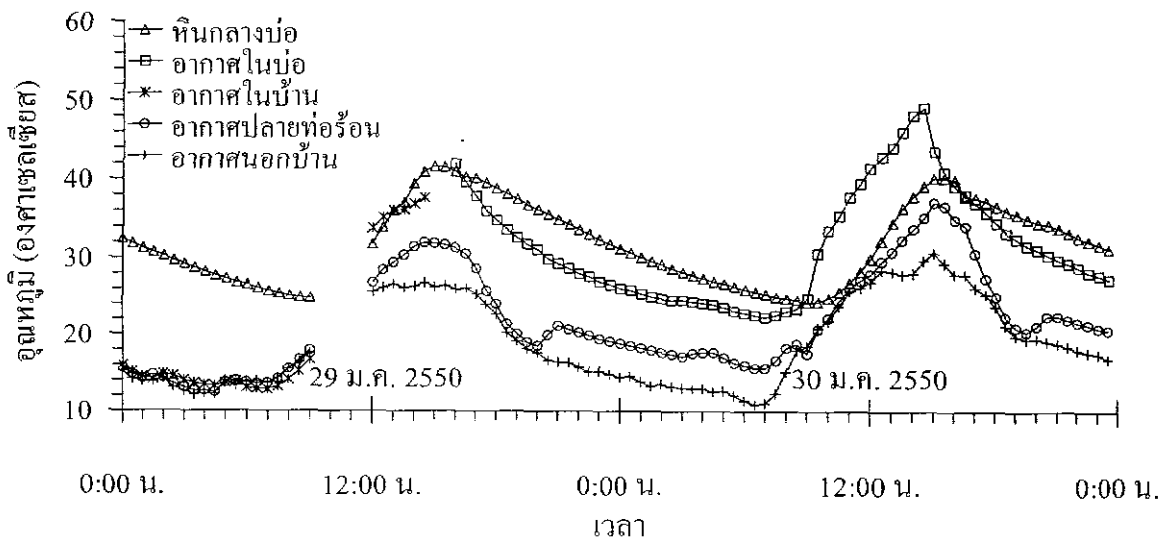
รูปที่ ก-49 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ท่ออากาศร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้ว และใช้หินจำนวน 376 กิโลกรัม ข้อมูลวันที่ 20 และ 21 มกราคม 2550



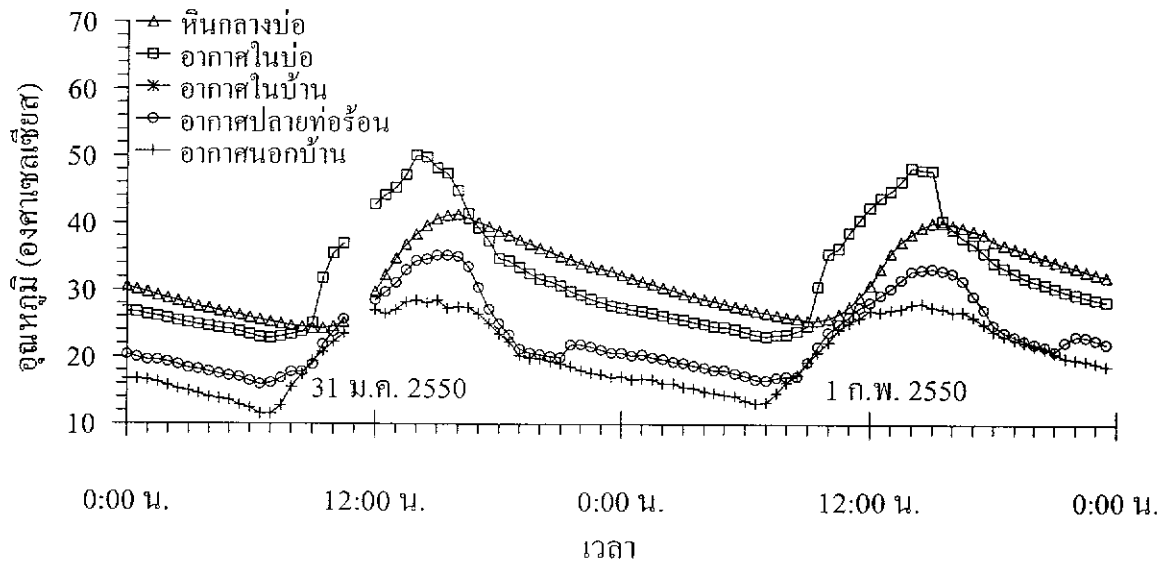
รูปที่ ก-50 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ท่ออากาศร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้ว และใช้หินจำนวน 376 กิโลกรัม ข้อมูลวันที่ 22 และ 23 มกราคม 2550



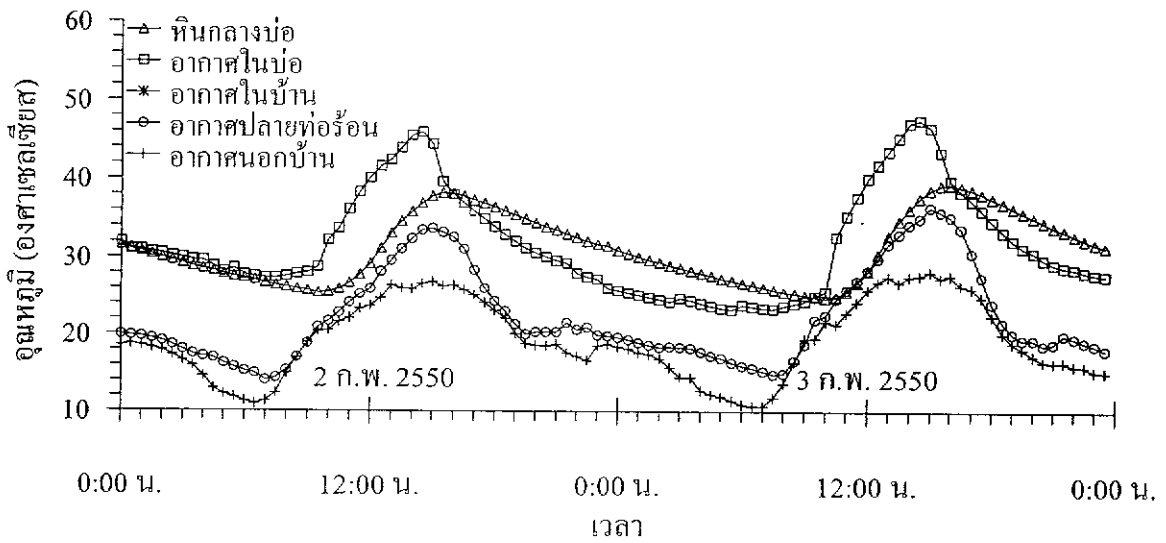
รูปที่ ก-51 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ท่ออากาศร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้ว และใช้หินจำนวน 376 กิโลกรัม ข้อมูลวันที่ 24 และ 25 มกราคม 2550



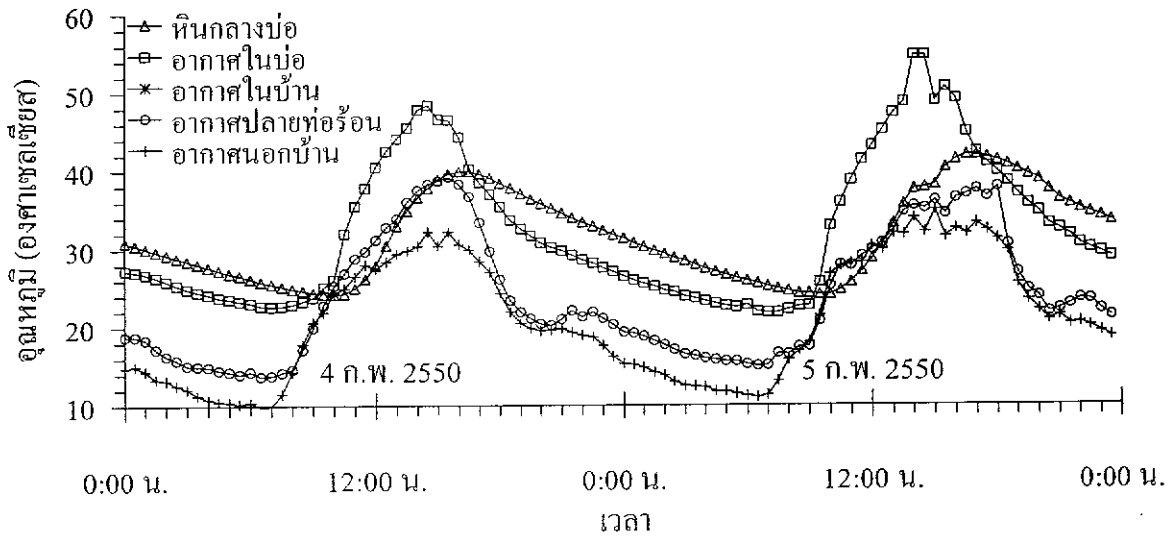
รูปที่ ก-52 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ท่ออากาศร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้ว และใช้หินจำนวน 376 กิโลกรัม ข้อมูลวันที่ 29 และ 30 มกราคม 2550



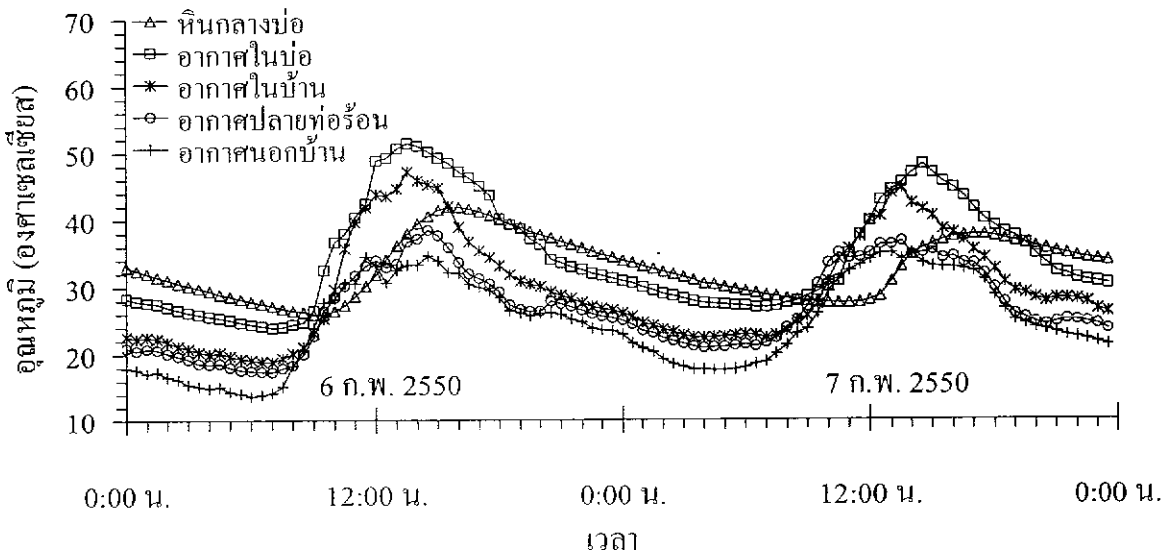
รูปที่ ก-53 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ท่ออากาศร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้ว และใช้หินจำนวน 376 กิโลกรัม ข้อมูลวันที่ 31 มกราคม 2550 ถึง 1 กุมภาพันธ์ 2550



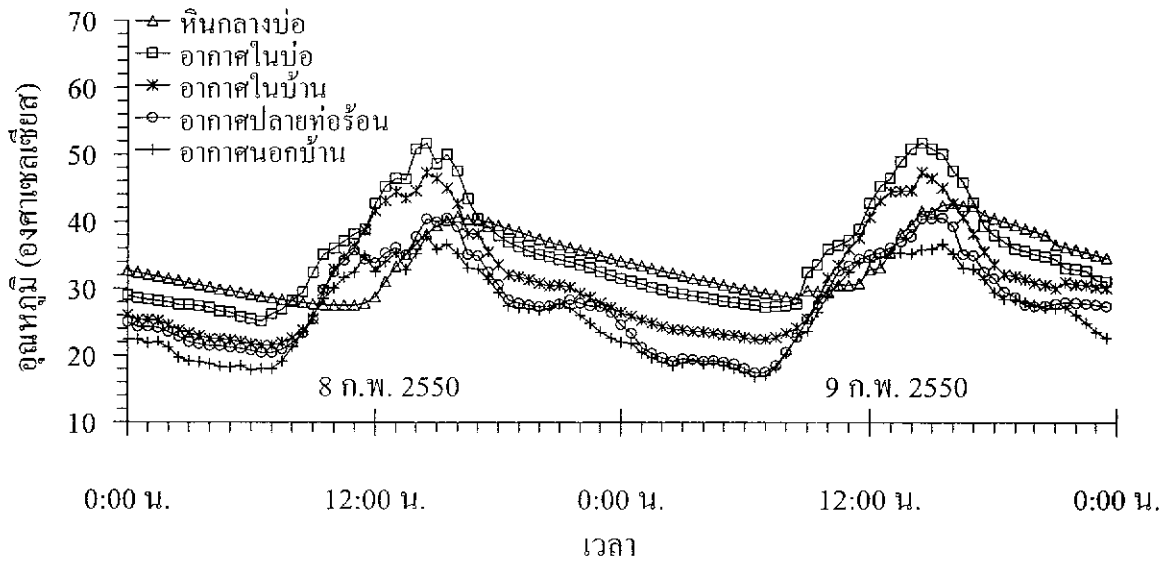
รูปที่ ก-54 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ท่ออากาศร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้ว และใช้หินจำนวน 376 กิโลกรัม ข้อมูลวันที่ 2 และ 3 กุมภาพันธ์ 2550



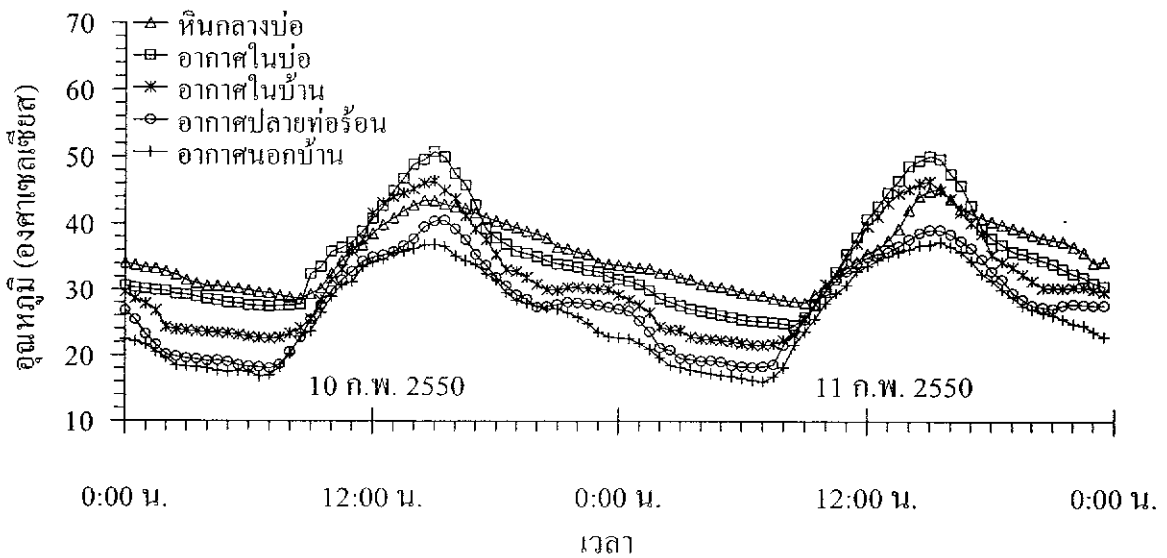
รูปที่ ก-55 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ใช้ท่อสี่เหลี่ยมขนาด 0.6×0.6 ม. และใช้หินจำนวน376 กิโลกรัม ข้อมูลวันที่ 4 และ 5 กุมภาพันธ์ 2550



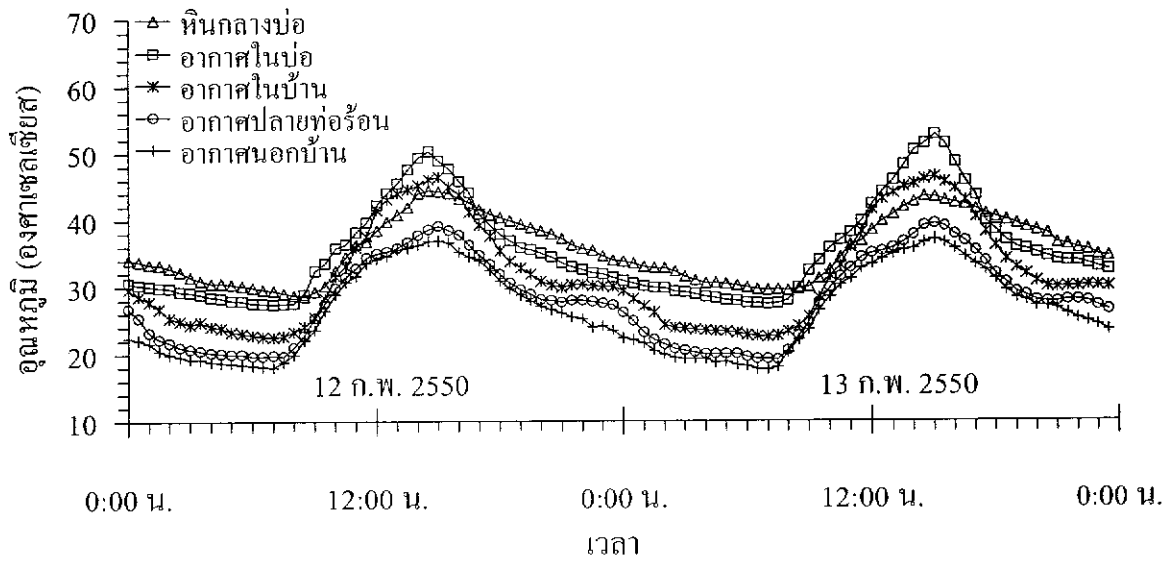
รูปที่ ก-56 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ใช้ท่อสี่เหลี่ยมขนาด 0.6 × 0.6 ม. และใช้หินจำนวน376 กิโลกรัม ข้อมูลวันที่ 6 และ 7 กุมภาพันธ์ 2550



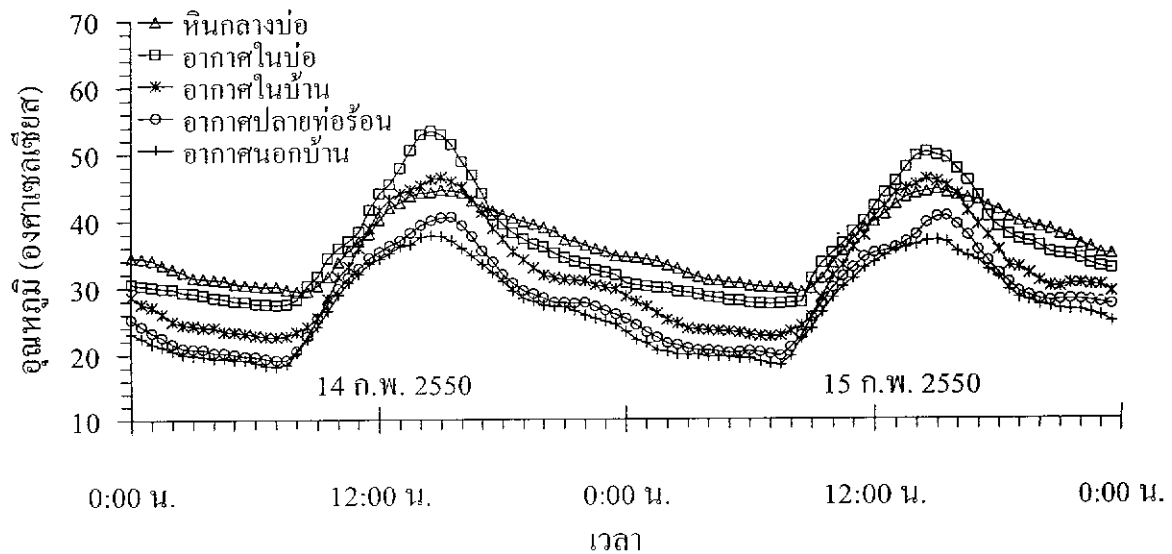
รูปที่ ก-57 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ใช้ท่อสี่เหลี่ยมขนาด 0.6×0.6 ม. และใช้หินจำนวน 376 กิโลกรัม ข้อมูลวันที่ 8 และ 9 กุมภาพันธ์ 2550



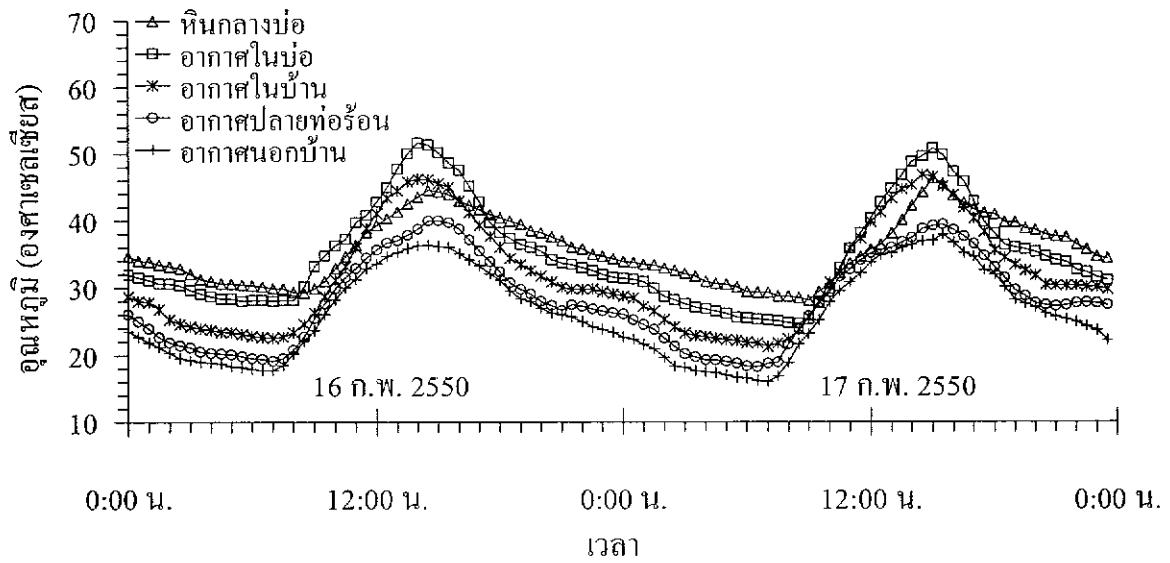
รูปที่ ก-58 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ใช้ท่อสี่เหลี่ยมขนาด 0.6×0.6 ม. และใช้หินจำนวน 376 กิโลกรัม ข้อมูลวันที่ 10 และ 11 กุมภาพันธ์ 2550



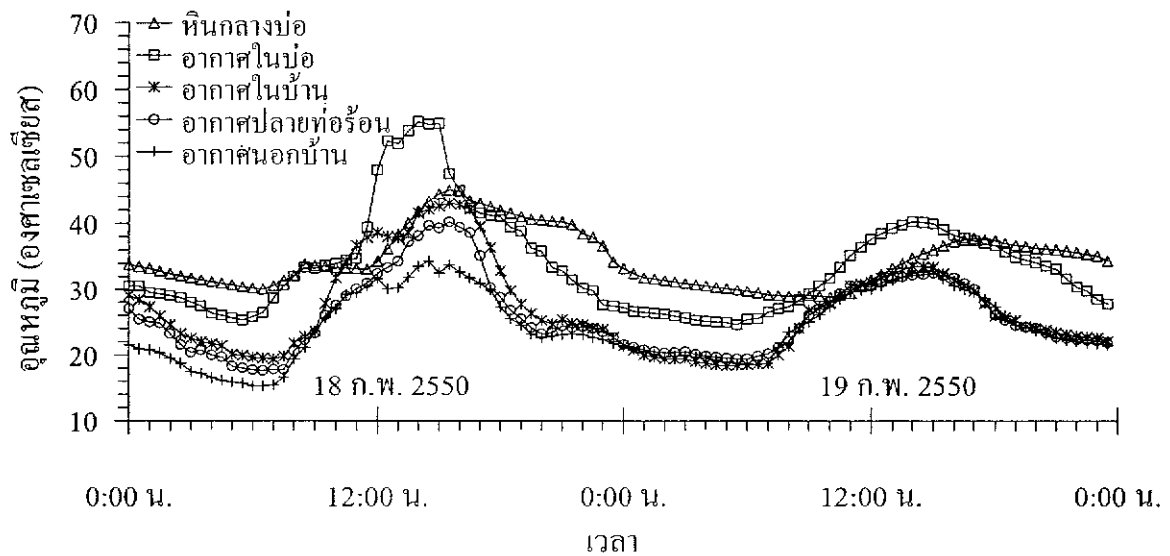
รูปที่ ก-59 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ใช้ท่อสี่เหลี่ยมขนาด 0.6×0.6 ม. และใช้หินจำนวน 376 กิโลกรัม ข้อมูลวันที่ 12 และ 13 กุมภาพันธ์ 2550



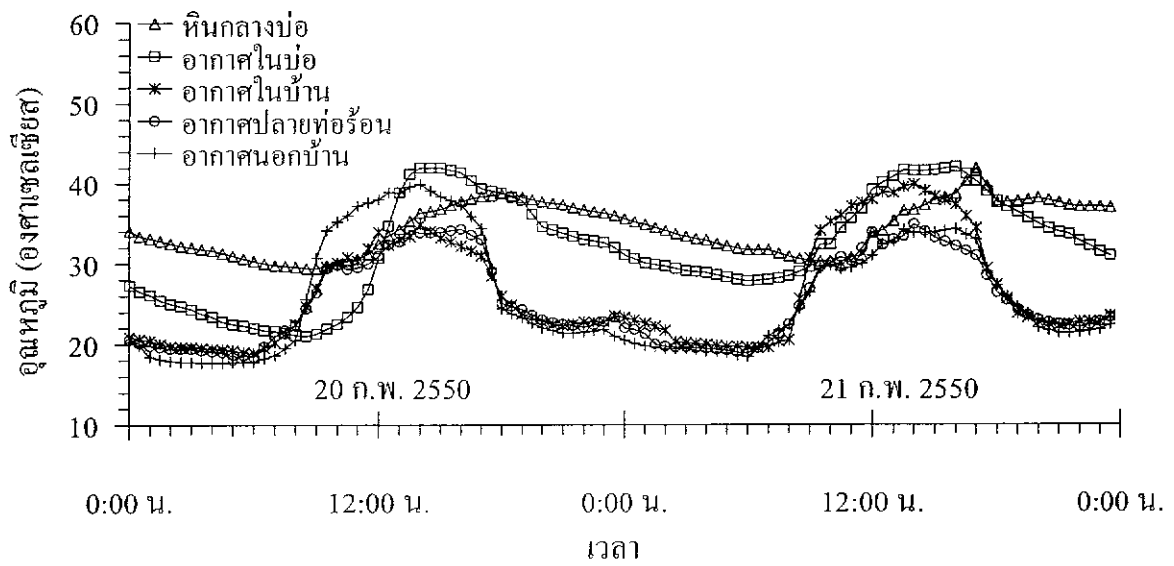
รูปที่ ก-60 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ใช้ท่อสี่เหลี่ยมขนาด 0.6×0.6 ม. และใช้หินจำนวน 376 กิโลกรัม ข้อมูลวันที่ 14 และ 15 กุมภาพันธ์ 2550



รูปที่ ก-61 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ใช้ท่อสี่เหลี่ยมขนาด 0.6×0.6 ม. และใช้หินจำนวน 376 กิโลกรัม ข้อมูลวันที่ 16 และ 17 กุมภาพันธ์ 2550



รูปที่ ก-62 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ใช้ท่อสี่เหลี่ยมขนาด 0.6×0.6 ม. และใช้หินจำนวน 376 กิโลกรัม ข้อมูลวันที่ 18 และ 19 กุมภาพันธ์ 2550



รูปที่ ก-63 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของหินกลาง อากาศในบ่อ อากาศปลายท่อร้อน อากาศในบ้าน และ อากาศนอกบ้าน (สิ่งแวดล้อม) ใช้ท่อสี่เหลี่ยมขนาด 0.6×0.6 ม. และใช้หินจำนวน 376 กิโลกรัม ข้อมูลวันที่ 20 และ 21 กุมภาพันธ์ 2550

ประวัตินักวิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร. กิตติเทพ เพ็ญขจร เกิดเมื่อวันที่ 16 กันยายน 2500 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร จบการศึกษาปริญญาเอกจาก University of Arizona ที่ประเทศสหรัฐอเมริกา สาขาวิชา Geological Engineering ในปี ค.ศ. 1988 และสำเร็จ Post-doctoral Fellows ในปี ค.ศ. 1990 ที่ University of Arizona ปัจจุบันมีตำแหน่งเป็นประธานกรรมการบริษัท Rock Engineering International ประเทศสหรัฐอเมริกา และดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำอยู่ที่สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา มีความชำนาญพิเศษทางด้านกลศาสตร์ของหินในเชิงการทดลอง การออกแบบและการวิเคราะห์โดยใช้คอมพิวเตอร์ ได้เคยทำการวิจัยเป็นหัวหน้าโครงการที่สำเร็จมาแล้วมากกว่า 10 โครงการทั้งในสหรัฐอเมริกาและประเทศไทย มีสิ่งตีพิมพ์นานาชาติมากกว่า 50 บทความ ทั้งวารสาร นิตยสาร รายงานรัฐบาล และบทความการประชุมนานาชาติ เป็นผู้แต่งตำรา “Sealing of Boreholes and Underground Excavations in Rock” ที่ใช้อยู่ในหลายมหาวิทยาลัยในสหรัฐอเมริกา ดำรงตำแหน่งเป็นที่ปรึกษาทางวิชาการขององค์กรรัฐบาลและหลายบริษัทในประเทศสหรัฐอเมริกา และแคนาดา เช่น U.S. Nuclear Regulatory Commission, U.S. Department of Energy, Dow Chemical Co., Southwest Research Institute, UNOCAL, Phelps Dodge Co. และ Amoco Oil Co. เป็นวิศวกรที่ปรึกษาของ UNISEARCH จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นคณะกรรมการในการคัดเลือกข้อเสนอโครงการของ U.S. National Science Foundation และ Idaho State Board of Education และเป็นคณะกรรมการในการคัดเลือกบทความทางวิชาการของสำนักพิมพ์ Chapman & Hall ในประเทศอังกฤษ และ Elsevier Sciences Publishing Co. ในประเทศเนเธอร์แลนด์