

ประสิทธิผลของการทำความเย็นด้วยท่อใต้ดิน ในการออกแบบอาคารพักอาศัย
ในภูมิภาคอากาศแบบร้อนชื้น : กรณีศึกษา บ้านพักอาศัย จ. ชัยภูมิ



นายธนวิษต์ ลิ้มปศุบุตรถาวร

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาสถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาสถาปัตยกรรม ภาควิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-0886-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

THE EFFECTIVENESS OF EARTH TUBE TECHNIQUE IN RESIDENTIAL DESIGN
IN HOT AND HUMID CLIMATE: A CASE STUDY OF A HOUSE IN
CHAIYAPHUM PROVINCE

MR. Tanarach Limpakuptathaworn



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Architecture in Architecture

Department of Architecture
Faculty of Architecture

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-0886-6

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ประสิทธิผลของการทำความเข้าใจด้วยท่อไต้ดิน ในการออกแบบอาคารพัก
อาศัยในภูมิอากาศแบบร้อนชื้น : กรณีศึกษา บ้านพักอาศัย จ. ชัยภูมิ
โดย นายธนรัชต์ ลิ้มปคุปตถาวร
สาขาวิชา สถาปัตยกรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ธนิต จินดาวงศ์

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับ
นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. วีระ สัจกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ สมสิทธิ์ นิตยะ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ธนิต จินดาวงศ์)

..... กรรมการ
(อาจารย์ พีรส์ พัชรเศวต)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นายธนรัชต์ ลิ้มปคุปตถาวร : ประสิทธิภาพของการทำความเย็นด้วยท่อใต้ดิน ในการออกแบบอาคารพักอาศัย ในภูมิอากาศแบบร้อนชื้น : กรณีศึกษา บ้านพักอาศัย จ. ชัยภูมิ (THE EFFECTIVENESS OF EARTH TUBE TECHNIQUE IN RESIDENTIAL DESIGN IN HOT AND HUMID CLIMATE: A CASE STUDY OF A HOUSE IN CHAIYAPHUM PROVINCE) อ. ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์. ธนิต จินดาวงนิค จำนวน 109 หน้า. ISBN 974-17-0886-6.

ในขณะที่อุณหภูมิอากาศมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงแตกต่างกันมากตลอดทั้งวัน แต่อุณหภูมิใต้ดินที่ระดับความลึก 1.10 เมตร ค่อนข้างคงที่ที่ระดับ 28-29 °c และการนำอากาศผ่านระดับความลึกดังกล่าว ก่อนนำมาใช้ภายในอาคาร จะทำให้อุณหภูมิอากาศเย็นลงใกล้เคียงกับอุณหภูมิเฉลี่ยอากาศ เนื่องจากการถ่ายเทแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศกับดิน ทำให้อุณหภูมิอยู่ในเขตสภาวะน่าสบายด้านอุณหภูมิ แต่การนำเทคนิคการทำความเย็นด้วยระบบท่อใต้ดิน ยังไม่ได้มีการนำมาปรับใช้กับอาคารในสภาพภูมิอากาศแบบร้อนชื้นอย่างประเทศไทย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาถึงประสิทธิภาพของการใช้ระบบท่อใต้ดิน ตำแหน่งที่เหมาะสม ตลอดจนช่วงเวลาที่ใช้งาน เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบ

การวิจัยนี้เป็นการทดสอบถึงประสิทธิภาพของการทำความเย็นด้วยระบบท่อใต้ดินสำหรับห้องขนาด 24 ตารางเมตร โดยทำการฝังท่อ พีวีซี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลงใต้ดินที่ความลึก 1.10 ในความยาวที่ 30 และ 40 เมตร โดยแบ่งออกเป็น 2 ระบบคือ ระบบเปิดเป็นการนำอากาศจากภายนอกอาคารผ่านท่อใต้ดินเข้ามา และระบบปิดเป็นการนำอากาศจากภายในอาคารหมุนเวียนผ่านท่อใต้ดินกลับเข้าสู่อาคาร ซึ่งอากาศจะเคลื่อนที่ผ่านท่อใต้ดินด้วยพัดลมดูดอากาศ งานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 5 ช่วง โดย 4 ช่วงแรกทำการทดสอบระบบดังกล่าวตลอดเวลาและทำการวัดผลเป็นเวลา 48 ชั่วโมง เมื่อทำการทดลองในแต่ละระบบ พบว่าระบบปิดที่มีความยาวท่อ 40 เมตร สามารถทำความเย็นได้สูงสุด จึงนำผลการทดลองดังกล่าวมาวิเคราะห์ เพื่อหาเวลาการใช้งานที่เหมาะสมและทำการทดลองครั้งที่ 5 โดย เปิด-ปิด การใช้งานเป็นช่วงเวลา ของระบบท่อใต้ดินเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการทำความเย็นสูงสุด

ผลการวิจัยสรุปได้ว่า การทำความเย็นให้กับห้องขนาด 24 ตารางเมตรด้วยระบบท่อใต้ดิน สามารถช่วยปรับลดอุณหภูมิอากาศ ได้โดยระบบท่อใต้ดิน ที่ความยาว 40 เมตร ระบบปิด สามารถลดอุณหภูมิอากาศในห้องได้โดยเฉลี่ย 3-3.5 °c ตั้งแต่เวลา 8.00-24.00 น. และระบบท่อใต้ดินยังมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการลงทุนเลือกใช้ระบบ แต่ระบบท่อใต้ดินยังมีข้อด้อย คือความสามารถในการทำความเย็นยังเป็นมาตรฐานของสภาวะน่าสบายในระดับต่ำ และปัญหาความชื้นที่เกิดขึ้นยังเป็นปัญหาหลักในการสร้างสภาวะน่าสบาย

ภาควิชา สถาปัตยกรรมศาสตร์

สาขาวิชา สถาปัตยกรรม

ปีการศึกษา 2545

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

4474148025: MAJOR ARCHITECTURE

KEY WORD: EARTH TUBE / UNDERGROUND /

TANARACH LIMPAKUPTATHAWORN : THE EFFECTIVENESS OF EARTH TUBE
TECHNIQE IN RESIDENTIAL DESIGN IN HOT AND HUMID CLIMATE: A CASE
STUDY OF A HOUSE IN CHAIYAPHUM PROVINCE. THESIS ADVISOR :
Asst.PROF.THANIT CHINDAVANICH , 109 pp. ISBN 974-17-0886-6.

In an area where the temperatures have a high degree of fluctuation during the day while the temperature at 1.10 meters below the land surface averages between 28-29 degrees Celsius, the air temperature will cause a structure's temperature to lower to the average air temperature. This is after air and soil temperatures are both transferred to the building and a balance, or average, is achieved. Temperatures can also be lowered in the structure to cooler, more comfortable levels by installing underground pipes. Still, this technique has not yet been employed in Thailand, a country with a hot and humid, or tropical climate.

This study concentrated on testing the efficiency of underground piping cooling the temperature of a 24 sq. meter room. 6-in diameter PVC piping was buried to a depth of 1.10 meters at lengths of 20 and 30 meters. The project was dived into 2 systems, an opening system where outside air is brought into the building through the underground piping and two, a closed system in which air within the building is circulated through the underground piping. The air is circulated using ventilation fans with adjustable speeds. The tests were conducted at 5 periods, the first 4 had the system operating continuously with measurements taken after 48 hours. After testing both systems, it was found the 40 length pipes were the most efficient for cooling down temperatures. Tests results were the analyzed to determine when it was best to operate the systems. The 5 test period thus had the systems turned on and off.

Results showed that for a 24-sq. meter room the underground pipe cooling system could help reduce interior temperatures. The 40-meter pipes were most efficient. The closed system could lower room temperature by an average 3-3.5 degrees Celsius between 8.00 a.m. – 12.00 midnight. Furthermore, the underground piping does have an economic value as far as investment. Still, it doesn't yet achieve a comfortable temperature and produces other problems yet to be solved, particularly a high level of dampness, or humidity.

Department of Architecture

Student's signature.....

Field of Study Architecture

Advisor's signature.....

Academic year 2002

กิตติกรรมประกาศ

ความสำเร็จของการจัดทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ เป็นผลมาจากความกรุณาอนุเคราะห์ช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกในการดำเนินการจากผู้เกี่ยวข้องมากมาย โดยเฉพาะ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ธนิต จินดาวงนิค รองศาสตราจารย์ สมลิตี นิตยะ และอาจารย์ พิรัช พัทธเสวต ที่กรุณาถ่ายทอดองค์ความรู้ทางวิชาการพร้อมทั้งให้คำปรึกษา แนะนำในฐานะเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้ช่วยเหลือ อำนวยความสะดวก ในการทำการวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี โดยเฉพาะคุณแม่ ผู้ที่คอยช่วยเหลือทั้งทางด้านทุนการวิจัย และในฐานะผู้ช่วยในการทำการวิจัยตั้งแต่ต้นจนจบ และที่จะลืมไม่ได้เลยคือ ขอขอบคุณพี่น้องห้องภาค พี่หนึ่ง เพื่อนๆ และฝั่งผู้เป็นกำลังใจเสมอมา



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฎ
สารบัญแผนภูมิ.....	ฏ
สารบัญตาราง.....	ฒ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของหัวข้อการศึกษา.....	1
วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
สมมติฐานการวิจัย.....	2
ขอบเขตในการศึกษา.....	3
ระเบียบวิธีการศึกษา.....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
1. สภาวะนำสบายทางด้านอุณหภูมิ.....	5
2. การใช้ประโยชน์จากอุณหภูมิจากใต้ดิน.....	7
2.1 กลยุทธ์การลดอุณหภูมิอากาศโดยอาศัยท่อใต้ดิน The Villa Acolia.....	8
2.2 งานวิจัยของ Donald W.Abrams.....	9
2.3 งานวิจัยของ Fuller Moore.....	10
3. หลักการออกแบบระบบ earth tube.....	10
4. คุณสมบัติของดิน.....	12
4.1 คุณสมบัติทางด้านอุณหภูมิของดิน.....	12
อุณหภูมิดิน.....	12
อุณหภูมิดินเฉลี่ยตลอดปี.....	12
amplitude ของอุณหภูมิดิน.....	13
steady state.....	14

สารบัญ(ต่อ)

conductive capacity ของดิน.....	14
thermal diffusivity ของดิน.....	15
phase constant.....	15
time lag ของดิน.....	15
การหาค่าอุณหภูมิของดิน.....	17
Stein & Reynolds (1992).....	17
Kenneth Labs (1993).....	17
givoni Baruch (1994).....	18
สิ่งปกคลุมผิวดิน.....	19
4.2 ประเภทของดินแบ่งตามคุณลักษณะของสีและชนิดของดิน.....	20
เนื้อดิน.....	20
สีของดิน.....	20
ลักษณะทางกายภาพของดิน.....	21
4.3 อุณหภูมิที่ระดับความลึกต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นผิวชนิดต่างกัน.....	22
4.4 อุณหภูมิดินที่ระดับความลึกต่างๆ ในสภาพแวดล้อมที่ต่างกัน.....	23
4.5 ข้อมูลเกี่ยวกับอุณหภูมิดินที่ความลึก 6 นิ้ว.....	24
5. การถ่ายเทความร้อน.....	25
5.1 การถ่ายเทความร้อนเบื้องต้น.....	25
ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (thermal conductivity – K).....	26
ค่าการนำความร้อน (thermal conductance – C).....	26
ค่าการต้านทานความร้อน (thermal resistance – R value).....	26
ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (co-efficient of transmission – U value)....	27
5.2 ขบวนการสหสัมพันธ์ ของงานวิจัยท่อใต้ดินในประเทศไทย.....	28
5.3 สถานภาพของปริมาณความร้อนจากอากาศที่ผ่านระบบท่อใต้ดิน.....	29
การคำนวณ cooling load.....	30
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการ.....	31
1. ขั้นตอนการเตรียมการทดลอง.....	32
ศึกษาสถานที่ทำการทดลอง.....	32

สารบัญ(ต่อ)

วัสดุก่อสร้างห้องทำการทดลอง.....	33
ขนาดและตำแหน่งการใช้งานของห้องทดลอง.....	36
พื้นที่สำหรับระบบท่อใต้ดิน.....	36
อุปกรณ์ท่อใต้ดิน.....	37
คุณสมบัติของการไหล.....	37
แนวโน้มของการเกิดการออกซิเดชัน หรือการผุกร่อน.....	38
ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน.....	38
การป้องกันน้ำและความชื้น.....	38
ข้อจำกัดทางด้านเศรษฐศาสตร์.....	38
ความยาวท่อใต้ดิน.....	38
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง.....	39
ระบบท่อใต้ดิน(close loop & open loop).....	40
อุปกรณ์อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง.....	42
วัสดุฉนวน.....	42
พัดลมดูดอากาศ.....	42
เครื่องมือวัดผลการทดลอง.....	44
เครื่องวัดอุณหภูมิ stowaway logger.....	44
เครื่องวัดความชื้น stowaway data logger.....	45
เครื่องวัดค่าความเร็วลม airflow thermal anemometers รุ่น : TA-5).....	46
2. ขั้นตอนการออกแบบและติดตั้งระบบ.....	47
ข้อจำกัดเบื้องต้นของระบบท่อใต้ดิน.....	47
จัดวางระบบท่อใต้ดินในแต่ละความยาวของแต่ละระบบ.....	47
ตำแหน่งปลายท่อลมเข้าและออก.....	47
ท่อลมออก.....	48
ท่อลมเข้า.....	48
3. ขั้นตอนในการวัดผล.....	51
บทที่ 4 การเก็บผลและวิเคราะห์ข้อมูล	53
การเก็บผลการทดลอง ครั้งที่ 1.....	53

สารบัญ(ต่อ)

การเก็บผลการทดลอง ครั้งที่ 2.....	54
การเก็บผลการทดลอง ครั้งที่ 3.....	54
การเก็บผลการทดลอง ครั้งที่ 4.....	55
การวิเคราะห์ข้อมูล.....	56
การวิเคราะห์ข้อมูลในการทดลอง ครั้งที่ 1.....	56
สรุปผลการเก็บข้อมูลในการทดลองครั้งที่ 1.....	56
การวิเคราะห์ข้อมูลในการทดลอง ครั้งที่ 2.....	60
สรุปผลการเก็บข้อมูลในการทดลองครั้งที่ 2.....	60
การวิเคราะห์ข้อมูลในการทดลอง ครั้งที่ 3.....	64
สรุปผลการเก็บข้อมูลในการทดลองครั้งที่ 3.....	64
การวิเคราะห์ข้อมูลในการทดลอง ครั้งที่ 4.....	68
สรุปผลการเก็บข้อมูลในการทดลองครั้งที่ 4.....	68
เปรียบเทียบความสามารถในการทำความเย็นระบบ.....	73
ระบบเปิด ความยาวท่อ 40 เมตร.....	73
ระบบปิด ความยาวท่อ 40 เมตร.....	78
ระบบปิด ความยาวท่อ 30 เมตร.....	83
ระบบเปิด ความยาวท่อ 30 เมตร.....	88
สรุปเปรียบเทียบความสามารถในการทำความเย็นของแต่ละระบบ.....	93
การวิเคราะห์ข้อมูลในการทดลองครั้งที่ 5.....	95
การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์.....	101
บทที่ 5 สรุป วิจัย และเสนอแนะ.....	104
สรุปกระบวนการวิจัย.....	104
สรุปผลการวิจัย.....	105
ข้อวิจารณ์และเสนอแนะ.....	105
รายการอ้างอิง	107
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	110

สารบัญภาพ

หน้า

บทที่ 2 การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ภาพ 2-1 แสดงลักษณะการใช้อากาศหมุนเวียนภายในท่อ.....	7
ภาพ 2-2 แสดงแนวคิดการบังคับทิศทางลมให้ผ่านถ้ำ เพื่อลดอุณหภูมิก่อนระบายที่หมู่บ้าน The VILLA ACOLIA.....	8
ภาพ 2-3 แสดงการใช้ประโยชน์จากการสะสมความเย็นของใต้ดินแล้วนำมาใช้ในอาคาร.....	10

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการ

ภาพ 3-1 รูปผังบริเวณอาคารที่ทำการทดลอง.....	32
ภาพ 3-2 รูปผังห้องนั่งเล่น.....	33
ภาพ 3-3 รูปผังห้องที่ทำการทดลอง.....	36
ภาพ 3-4 แสดงพื้นที่สำหรับวางระบบท่อใต้ดิน.....	37
ภาพ 3-5 แสดงเปรียบเทียบคุณสมบัติของความสามารถในการทำความเย็นของท่อใต้ดิน....	39
ภาพ 3-6 แสดงการใช้งานของระบบ open loop.....	40
ภาพ 3-7 แสดงการใช้งานของระบบ close loop	40
ภาพ 3-8 แบบแปลนกล่องควบคุม.....	41
ภาพ 3-9 แสดงพัดลมดูดอากาศที่ใช้ในการทดลอง.....	42
ภาพ 3-10 แสดงเครื่องปรับการจ่ายกำลังไฟฟ้า.....	43
ภาพ 3-11 เครื่องวัดอุณหภูมิ stowaway logger.....	44
ภาพ 3-12 เครื่องวัดความชื้น stowaway logger.....	45
ภาพ 3-13 เครื่องวัดค่าความเร็วลม.....	46
ภาพ 3-14 แสดงการวางระยะระหว่างท่อและความลึกจากพื้นดิน.....	47
ภาพ 3-15 แสดงการออกแบบจัดวางตำแหน่งท่อใต้ดิน.....	48
ภาพ 3-16 แสดงระยะความยาวในแต่ละระบบ.....	49
ภาพ 3-17 แสดงลักษณะการทำงานของท่อใต้ดิน.....	50
ภาพ 3-18 แสดงตำแหน่งที่ทำการติดตั้งเครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้น.....	51

บทที่ 4 การเก็บผลและวิเคราะห์ข้อมูล

ภาพ 4-1 แสดงทิศทางลมและตำแหน่งเครื่องวัดอุณหภูมิ ระบบเปิด ความยาว 40 เมตร.....	53
ภาพ 4-2 แสดงทิศทางลมและตำแหน่งเครื่องวัดอุณหภูมิ ระบบปิด ความยาว 40 เมตร.....	54

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพ 4-3 แสดงทิศทางการลมและตำแหน่งเครื่องวัดอุณหภูมิ ระบบปิด ความยาว 30 เมตร.....	55
ภาพ 4-4 แสดงทิศทางการลมและตำแหน่งเครื่องวัดอุณหภูมิ ระบบเปิด ความยาว 30 เมตร.....	55

สารบัญแผนภูมิ

บทที่ 2 การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แผนภูมิ 2-1 แสดงความสัมพันธ์ของความยาว ขนาด และอากาศที่หมุนเวียนภายในท่อ.....	9
แผนภูมิ 2-2 แสดงความสัมพันธ์ของความยาวและอากาศที่หมุนเวียนภายในท่อ ขนาด 6"...	9
แผนภูมิ 2-3 แสดงอุณหภูมิดินที่ระดับความลึกต่างๆ ณ เวลาเดียวกัน.....	13
แผนภูมิ 2-4 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ผิวตามสภาพแวดล้อมที่ต่างกัน.....	19
แผนภูมิ 2-5 แสดงชนิดของดินและสิ่งปกคลุมที่มีผลต่ออุณหภูมิที่ผิวของดิน.....	21
แผนภูมิ 2-6 แสดงความแปรปรวนอุณหภูมิของดิน ที่ระดับความลึกต่างๆ.....	22
แผนภูมิ 2-7 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิดินใต้ต้นไม้ที่ระดับความลึกต่างๆ.....	23
แผนภูมิ 2-8 แสดงการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดินกับการเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิอากาศ.....	25
แผนภูมิ 2-9 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศที่ปลายท่อที่มีขนาดแตกต่างกัน.....	28

บทที่ 4

แผนภูมิ 4-1 แสดงอุณหภูมิที่ได้จากการวัดผลการทดลองท่อใต้ดินระบบเปิด (open loop system) ที่ความยาวท่อ 40 เมตร.....	57
แผนภูมิ 4-2 แสดงความชื้นที่ได้จากการวัดผลการทดลองท่อใต้ดินระบบเปิด (open loop system) ที่ความยาวท่อ 40 เมตร.....	58
แผนภูมิ 4-3 แสดงเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการวัดผลการทดลองท่อใต้ดินระบบเปิด (open loop system) ที่ความยาวท่อ 40 เมตร.....	59
แผนภูมิ 4-4 แสดงอุณหภูมิที่ได้จากการวัดผลการทดลองท่อใต้ดินระบบปิด (close loop system) ที่ความยาวท่อ 40 เมตร.....	61
แผนภูมิ 4-5 แสดงความชื้นที่ได้จากการวัดผลการทดลองท่อใต้ดินระบบปิด (close loop system) ที่ความยาวท่อ 40 เมตร.....	62
แผนภูมิ 4-6 แสดงเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการวัดผลการทดลองท่อใต้ดินระบบปิด (close loop system) ที่ความยาวท่อ 40 เมตร.....	63

สารบัญแผนภูมิ(ต่อ)

แผนภูมิ 4-7 แสดงอุณหภูมิที่ได้จากการวัดผลการทดลองท่อใต้ดินระบบปิด (close loop system) ที่ความยาวท่อ 30 เมตร.....	65
แผนภูมิ 4-8 แสดงความชื้นที่ได้จากการวัดผลการทดลองท่อใต้ดินระบบปิด (close loop system) ที่ความยาวท่อ 30 เมตร.....	66
แผนภูมิ 4-9 แสดงเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการวัดผลการทดลองท่อใต้ดินระบบปิด (close loop system) ที่ความยาวท่อ 30 เมตร.....	67
แผนภูมิ 4-10 แสดงอุณหภูมิที่ได้จากการวัดผลการทดลองท่อใต้ดินระบบเปิด (open loop system) ที่ความยาวท่อ 30 เมตร.....	70
แผนภูมิ 4-11 แสดงความชื้นที่ได้จากการวัดผลการทดลองท่อใต้ดินระบบเปิด (open loop system) ที่ความยาวท่อ 30 เมตร.....	71
แผนภูมิ 4-12 แสดงเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการวัดผลการทดลองท่อใต้ดินระบบเปิด (open loop system) ที่ความยาวท่อ 30 เมตร.....	72
แผนภูมิ 4-13 แสดงปริมาณการเพิ่มและลดอุณหภูมิตามช่วงเวลา ของท่อใต้ดินระบบเปิด (open loop system) ที่ความยาวท่อ 40 เมตร.....	74
แผนภูมิ 4-14 แสดงปริมาณการเพิ่มและลดความชื้นตามช่วงเวลา ของท่อใต้ดินระบบเปิด (open loop system) ที่ความยาวท่อ 40 เมตร.....	75
แผนภูมิ 4-15 แสดงอุณหภูมิที่เพิ่มและลดลงของท่อใต้ดินระบบเปิด (open loop system) ที่ความยาวท่อ 40 เมตร.....	76
แผนภูมิ 4-16 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศที่ลดหรือเพิ่มจากการทดลอง กับอุณหภูมิจากการทำนายระบบเปิด ที่ความยาวท่อ 40 เมตร.....	77
แผนภูมิ 4-17 แสดงปริมาณการเพิ่มและลดอุณหภูมิตามช่วงเวลา ของท่อใต้ดินระบบปิด (close loop system) ที่ความยาวท่อ 40 เมตร.....	79
แผนภูมิ 4-18 แสดงปริมาณการเพิ่มและลดความชื้นตามช่วงเวลา ของท่อใต้ดินระบบปิด (close loop system) ที่ความยาวท่อ 40 เมตร.....	80
แผนภูมิ 4-19 แสดงอุณหภูมิที่เพิ่มและลดลงของท่อใต้ดินระบบปิด (close loop system) ที่ความยาวท่อ 40 เมตร.....	81
แผนภูมิ 4-20 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศที่ลดหรือเพิ่มจากการทดลองกับ อุณหภูมิจากการทำนายระบบปิด ที่ความยาวท่อ 40 เมตร.....	82

สารบัญแผนภูมิ(ต่อ)

แผนภูมิ 4-21 แสดงปริมาณการเพิ่มและลดอุณหภูมิตามช่วงเวลา ของท่อใต้ดินระบบปิด (close loop system) ที่ความยาวท่อ 30 เมตร.....	84
แผนภูมิ 4-22 แสดงปริมาณการเพิ่มและลดความชื้นตามช่วงเวลา ของท่อใต้ดินระบบปิด (close loop system) ที่ความยาวท่อ 30 เมตร.....	85
แผนภูมิ 4-23 แสดงอุณหภูมิที่เพิ่มและลดลงของท่อใต้ดินระบบปิด (close loop system) ที่ความยาวท่อ 30 เมตร.....	86
แผนภูมิ 4-24 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศที่ลดหรือเพิ่มจากการทดลองกับ อุณหภูมิจากการทำนายระบบปิด ที่ความยาวท่อ 30 เมตร.....	87
แผนภูมิ 4-25 แสดงปริมาณการเพิ่มและลดอุณหภูมิตามช่วงเวลา ของท่อใต้ดินระบบเปิด (open loop system) ที่ความยาวท่อ 30 เมตร.....	89
แผนภูมิ 4-26 แสดงปริมาณการเพิ่มและลดความชื้นตามช่วงเวลา ของท่อใต้ดินระบบเปิด (open loop system) ที่ความยาวท่อ 30 เมตร.....	90
แผนภูมิ 4-27 แสดงอุณหภูมิที่เพิ่มและลดลงของท่อใต้ดินระบบเปิด (open loop system) ที่ความยาวท่อ 30 เมตร.....	91
แผนภูมิ 4-28 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศที่ลดหรือเพิ่มจากการทดลองกับ อุณหภูมิจากการทำนายระบบเปิด ที่ความยาวท่อ 30 เมตร.....	92
แผนภูมิ 4-29 แสดงความสามารถในการปรับลดอุณหภูมิในแต่ละระบบตามช่วงเวลาต่าง..	94
แผนภูมิ 4-30 แสดงอุณหภูมิจากการทดลองหลังจากเปิด ปิดระบบในช่วงเวลาที่เหมาะสม ของท่อใต้ดินระบบปิด (close loop system) ความยาวท่อ 40 เมตร.....	97
แผนภูมิ 4-31 แสดงความชื้นจากการทดลองหลังจากเปิด ปิดระบบในช่วงเวลาที่เหมาะสม ของท่อใต้ดินระบบปิด (close loop system) ความยาวท่อ 40 เมตร.....	98
แผนภูมิ 4-32 แสดงปริมาณการเพิ่มและลดอุณหภูมิหลังจากเปิด ปิดระบบตามช่วงเวลา ของท่อใต้ดินระบบปิด (close loop system) ที่ความยาวท่อ 40 เมตร.....	99
แผนภูมิ 4-33 แสดงเปรียบเทียบอุณหภูมิหลังจากเปิด ปิด ระบบ ตามช่วงเวลาที่เหมาะสม กับเขตสภาวะน่าสบาย.....	100

สารบัญตาราง

หน้า

บทที่ 2 การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตาราง 2-1 แสดงค่า Time Lag ต่อความลึก 1 ฟุต ของดินแต่ละชนิดในภูมิภาค.....16

ตาราง 2-2 แสดงค่า Damping factor ของดินชนิดต่างๆ ในภูมิภาคแบบต่างๆ..... 19

บทที่ 4 การเก็บผลและวิเคราะห์ข้อมูล

ตาราง 4-1 แสดงอุณหภูมิที่ได้จากท่อใต้ดินในระบบเปิด ความยาว 40 เมตร.....56

ตาราง 4-2 แสดงอุณหภูมิที่ได้จากท่อใต้ดินในระบบปิด ความยาว 40 เมตร.....60

ตาราง 4-3 แสดงอุณหภูมิที่ได้จากท่อใต้ดินในระบบปิด ความยาว 30 เมตร..... 64

ตาราง 4-4 แสดงอุณหภูมิที่ได้จากท่อใต้ดินในระบบเปิด ความยาว 30 เมตร..... 68

ตาราง 4-5 แสดงการสรุปเปรียบเทียบความสามารถในการทำความเย็นของแต่ละระบบ..... 93

ตาราง 4-6 แสดงอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองระบบท่อใต้ดินหลังจากการปรับปรุงเวลา
ใช้งานแล้ว..... 95

ตาราง 4-7 แสดงรายการค่าใช้จ่ายสำหรับการติดตั้งระบบท่อใต้ดิน..... 101

ตาราง 4-8 แสดงรายการคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบท่อใต้ดิน..... 102

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของหัวข้อการศึกษา

พื้นที่ในประเทศไทยส่วนใหญ่ถูกจัดอยู่ในสภาพภูมิอากาศแบบร้อนชื้น ทำให้เป็นการยากในการออกแบบอาคารพักอาศัยที่จะรับภาระในการลดอุณหภูมิและความชื้น ให้อากาศภายในอาคารอยู่ในเขตสภาวะน่าสบาย (comfort zone) ดังนั้นการเลือกใช้เครื่องปรับอากาศจึงดูเหมือนเป็นทางเลือกเดียวและเป็นทางเลือกที่สำคัญที่ใช้ในการแก้ปัญหาดังกล่าว และการเลือกใช้เครื่องปรับอากาศยังเป็นการสร้างอิสรภาพในการออกแบบรูปทรงและหน้าต่างของอาคาร ซึ่งขาดการคำนึงถึงความเหมาะสมต่อสภาพภูมิอากาศที่แท้จริง โดยทั่วไปสถาปนิกและวิศวกรมักจะมองข้ามพลังงานจากธรรมชาติที่อยู่ในสถานที่โครงการนั่นเองซึ่งเป็นพลังงานที่ได้เปล่าและสามารถสร้างทดแทนได้ ผลที่ตามมาคือปัญหาทางด้านพลังงานในการทำงานของเครื่องปรับอากาศจำนวนมากที่กำลังจะหมดไป

จากการศึกษา (สุพจน์ ตวงสินทวีกุล, 2537) พบว่าตำแหน่งใต้ระดับพื้นดินโล่งไม่มีสิ่งปกคลุมเป็นระยะ 1.10 เมตรมีอุณหภูมิค่อนข้างคงที่ที่ระดับ 28 – 29°C ในขณะที่อุณหภูมิอากาศมีการขึ้นลงแตกต่างกันมากตลอดวันและการนำอากาศผ่านท่อใต้ดินในระดับ 1.10 เมตร ก่อนนำอากาศมาใช้ในอาคารนั้นจะทำให้อุณหภูมิอากาศเย็นลงใกล้เคียงกับอุณหภูมิเฉลี่ยอากาศที่ระดับ 28 – 29°C เนื่องมาจากการถ่ายเทแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศกับดินผลออกมาจึงสามารถทำให้อุณหภูมิอยู่ในเขตสภาวะน่าสบาย แต่ในสภาพความเป็นจริงการนำเทคนิคทำความเย็นด้วยระบบท่อใต้ดินยังไม่ได้มีการนำมาปรับใช้อย่างมีประสิทธิภาพกับอาคารที่พักอาศัยในสภาพอากาศที่ร้อนชื้นอย่างประเทศไทย “โดยส่วนมากการออกแบบสถาปนิก วิศวกร ตลอดจนผู้ออกแบบทั่วไป มักจะไม่มี การวิเคราะห์วิจัยถึงความเหมาะสมอาคารในภูมิอากาศแบบร้อนชื้น การออกแบบเท่าที่ผ่านมาในอดีตส่วนใหญ่จึงอาศัยการอ้างอิงงานวิจัยจากต่างประเทศโดยปราศจากการคำนึงถึงความเหมาะสมกับการใช้งาน” ปัญหาสำคัญที่ตามมาคือ ปัญหาอันเนื่องมาจากความชื้น การบำรุงรักษาวัสดุอุปกรณ์ ตำแหน่งในการติดตั้งและปริมาณอากาศที่เหมาะสม ตลอดจนความคุ้มค่าในการเลือกใช้ระบบ ซึ่งปัญหาเหล่านี้เป็นตัวแปรสำคัญสำหรับใช้ร่วมพิจารณาในการออกแบบเพื่อรองรับการใช้งานอย่างจริงจังในอนาคต

ความมุ่งหมายสำคัญของการศึกษานี้จึงเป็นการวิจัยที่ได้มาซึ่งการทดสอบประสิทธิผลของระบบท่อใต้ดินในการทำความเย็นให้กับอาคารและจะเป็นแนวทางการนำเทคนิควิธีการทำความเย็นให้กับอาคารด้วยระบบท่อใต้ดิน มาใช้ร่วมในการออกแบบอาคารพักอาศัยในภูมิภาคแบบร้อนชื้น ด้วยการค้นคว้าทดลองเพื่อได้ตำแหน่งและขนาดวัสดุอุปกรณ์ที่เหมาะสม ตลอดจนอัตราการลงทุนในการปรับปรุงอาคารเพื่อหาจุดคุ้มทุนในการเลือกใช้ระบบท่อใต้ดิน ในการประยุกต์ใช้กับอาคารเพื่อการประหยัดพลังงานต่อไป

วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อเป็นการนำแนวความคิดในการปรับอากาศด้วยระบบท่ออากาศใต้ดินเพื่อเป็นการสร้างสภาวะน่าสบาย มาประยุกต์ใช้กับอาคารประเภทพักอาศัยในสภาพภูมิอากาศแบบร้อนชื้นอย่างประเทศไทยให้เหมาะสมและมีความคุ้มค่าต่อเศรษฐกิจ เพื่อเป็นการประหยัดพลังงาน โดยผู้วิจัยได้ทำการกำหนดวัตถุประสงค์การทำวิจัยไว้ดังนี้

1. ศึกษาถึงประสิทธิผลของระบบท่อนำอากาศเย็นใต้ดินในการนำมาใช้กับอาคารพักอาศัยในสภาพอากาศแบบร้อนชื้น
2. ศึกษาหาแนวทางที่มีความเหมาะสมสำหรับตำแหน่งและขนาดวัสดุอุปกรณ์ที่เหมาะสม ตลอดจนรูปแบบการวางท่อใต้ดินเพื่อเพิ่มประสิทธิผลในการทำความเย็นให้กับอาคาร
3. ศึกษาหาช่วงเวลาที่มีความเหมาะสมสำหรับการทำงานของระบบ
4. ศึกษาถึงระดับความชื้นที่เกิดขึ้นในระบบที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากการใช้ท่อใต้ดินเพื่อเป็นแนวทางการแก้ปัญหาต่อไป

สมมติฐานการวิจัย

การออกแบบอาคารโดยใช้เทคนิคทำความเย็นจากอากาศที่ผ่านท่อนำอากาศใต้ดิน สามารถทำความเย็นให้กับอาคารพักอาศัยในภูมิภาคแบบร้อนชื้น

ขอบเขตในการศึกษา

1. เป็นการศึกษาวิจัยในเชิงทดลองเพื่อความเหมาะสมในการควบคุมตัวแปรต่าง ๆ และมีความใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงในช่วงเดือนเมษายนถึงเดือนพฤษภาคม และการศึกษาครั้งนี้ได้เลือกทำการทดลองกับอาคารพักอาศัยจริง
2. การศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาถึงตัวแปรการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความเร็วลม และความชื้นที่เกิดขึ้นเท่านั้น
3. เนื่องจากเป็นการศึกษาวิจัยกับบ้านพักอาศัยจริงจึงมีความจำเป็นต้องทำการออกแบบการทดลองและวัสดุอุปกรณ์ในพื้นที่ที่จำกัดของกรณีศึกษา

ระเบียบวิธีการศึกษา

เป็นการวิจัยเชิงทดลอง ซึ่งการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่ออุณหภูมิภายในอาคาร ตั้งสมมติฐานเป็นประเด็นในการศึกษา

1. **ศึกษาข้อมูลเบื้องต้น**ที่เป็นหลักพื้นฐานในการวิจัย ทั้งจากข้อมูลปฐมภูมิและข้อมูลทุติยภูมิ โดยทำการค้นคว้าจากเอกสารอ้างอิง และการสัมภาษณ์
2. **ทำการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพของระบบท่อใต้ดิน (earth tube)** เป็นการทดลองเบื้องต้นโดยมีขั้นตอนย่อยดังนี้
 - 2.1 **เตรียมการทดลอง** เป็นการศึกษาถึงปัจจัยต่างที่อาจมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ
 - 2.2 **เตรียมการอาคารทดลอง** จัดหาอาคารตัวอย่างขึ้นมา 1 หลัง และหุ่นจำลองตามสมมติฐาน
 - 2.3 **จัดเตรียมวัสดุที่ใช้ในการทดลอง** โดยใช้ท่อพลาสติก พีวีซี เพราะสามารถหาซื้อได้โดยทั่วไป
 - 2.4 **กำหนดความเร็วลม** จากความเหมาะสมกับพื้นที่อาคารพักอาศัยโดยทั่วไป
 - 2.5 **การวัดและบันทึกข้อมูล** เพื่อเป็นการศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายนอกของวัสดุที่เกิดขึ้นตลอดทั้งวัน ดังนั้นจึงต้องทำการวัดและบันทึกอุณหภูมิ แล้วนำมาแสดงข้อมูลในรูปแบบแผนภูมิให้ง่ายต่อการวิเคราะห์
3. **วิเคราะห์ข้อมูล** โดยการนำเอาหลักทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และวิเคราะห์พฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในอาคารช่วงเวลาต่าง ๆ

4. **การพิสูจน์ ทบทวนสมมติฐาน** หมายถึงการนำผลการวิเคราะห์ไปประเมินความถูกต้องของข้อสันนิษฐาน
5. **สรุปผล** เป็นการสรุปผลการทดลองและนำผลการทดลองมาทำการออกแบบเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาปรับปรุงใช้กับอาคารอื่นๆและเพื่อเป็นแนวทางในการทำให้คุณหมูกายในต่ำสุดตามความต้องการของผู้ใช้และประหยัดพลังงาน

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เพื่อเป็นแนวทางในการนำเทคนิควิธีการทำความเข้าใจให้กับอาคารด้วยระบบท่อใต้ดิน มาใช้ร่วมในการออกแบบอาคารพักอาศัยในภูมิอากาศแบบร้อนชื้น ให้มีประสิทธิภาพ เพื่อการประหยัดพลังงานอีกทั้งยังเป็นข้อมูล และแนวทางในการออกแบบให้กับอาคารเพื่อการประหยัดพลังงานหลังอื่นๆ ต่อไปในอนาคต และยังเป็นประโยชน์ต่อการสร้างความรู้ความเข้าใจให้แก่สถาปนิกผู้ออกแบบ เพื่อเป็นทัศนคติและสำนึกที่ดีต่อการออกแบบอาคารประหยัดพลังงาน โดยเฉพาะ เมื่อโครงการวิจัยปรับปรุงอาคารตัวอย่างเสร็จสิ้นลง จะเป็นแหล่งข้อมูลที่สถาปนิกและผู้สนใจ ได้มาศึกษาหาความรู้จากการก่อสร้างจริง เพื่อทราบถึงข้อดีข้อเสียของการออกแบบเลือกใช้ระบบท่อใต้ดิน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาวิจัยนี้เป็นการทดสอบถึงประสิทธิผลของการทำความเย็นให้กับอากาศภายในอาคารโดยผ่านระบบท่อใต้ดิน (cooling tube) เป็นแนวความคิดหนึ่งโดยอาศัยความเย็นจากใต้ดินในระดับที่มีอุณหภูมิคงที่ ซึ่งอุณหภูมิอากาศในช่วงกลางวันสูงกว่าอุณหภูมิดินมาก เพื่อเป็นพื้นฐานในการทำความเข้าใจถึงตัวแปรหรือปัจจัยที่สำคัญของงานวิจัยนี้ อีกทั้งยังเป็นการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องที่เคยมีการทำวิจัยมาแล้ว มีดังต่อไปนี้

1. สภาวะนำสบายทางด้านอุณหภูมิ

สภาวะนำสบาย คือ สภาวะที่ไม่รู้สึกว่าไม่สบาย ไม่รู้สึกว่าจะสูญเสียความร้อน หรือได้รับความร้อนจากสภาพแวดล้อม เป็นสภาวะที่สมดุลทางอุณหภูมิ หรือสมดุลระหว่างความร้อนของร่างกายกับสภาพแวดล้อม (Fanger, 1967)

จากการศึกษาเกี่ยวกับความรู้สึกสบายของคนเราโดยละเอียดพบว่า มีตัวแปรหรือปัจจัยที่มีอิทธิพล ต่อความรู้สึกสบายของคนเราในสภาวะที่ร่างกายปกติอยู่ 6 ตัวแปรด้วยกัน โดยแบ่งออกเป็นตัวแปรด้านสภาพแวดล้อม 4 ตัวแปร และตัวแปรทางด้านบุคคล 2 ตัวแปร (Stein and Reynolds, 1992) ดังนี้

1. ตัวแปรด้านสภาพแวดล้อม
 - อุณหภูมิอากาศ (ambient air temperature)
 - อุณหภูมิพื้นผิวโดยรอบ (mean radiant temperature)
 - ความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity)
 - ความเร็วลม (wind speed)
2. ตัวแปรทางด้านบุคคล
 - อัตราการเผาผลาญพลังงาน (metabolism)
 - เสื้อผ้าที่สวมใส่ (clo value)

โดยที่ตัวแปรด้านสภาพแวดล้อมเป็นตัวแปรที่สามารถวัดได้ (Stein and Reynolds, 1992) โดยอุณหภูมิอากาศจะเป็นตัวบ่งบอกถึงสภาวะนำสบาย ซึ่งอยู่ในช่วงระหว่าง 20°C - 26°C (69°F - 79°F) ถ้าอุณหภูมิอยู่สูงหรือต่ำกว่าในช่วงนี้ จะต้องมีการปรับให้อยู่ในสภาวะนำสบาย โดยการทำ

ความร้อน หรือลดความร้อน ซึ่งอุณหภูมิพื้นผิวโดยรอบ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม ก็เป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อสภาวะน่าสบายเช่นกัน

จากการศึกษาตัวแปรที่จะช่วยให้มนุษย์เกิดความรู้สึกเย็นลงกว่า อุณหภูมิอากาศ ที่สามารถวัดได้จริงในสภาพอากาศร้อนชื้น มีดังนี้

1. การมีความเร็วลมที่เพียงพอ จากการวิเคราะห์ความเร็วมที่มีผลต่อความรู้สึกมนุษย์ เมื่อใช้ความเร็วลมเป็นตัวแปรตัวเดียว ในสภาพความชื้นสัมพัทธ์สูงพบว่า ทุกๆ 100 fpm. ของความเร็วลมที่เพิ่มขึ้น มนุษย์จะมีความรู้สึกเย็นลงประมาณ 0.4°C ซึ่งหมายความว่า แม้อุณหภูมิอากาศจะร้อนกว่าปกติ แต่ถ้ามีความเร็วของลมที่เพียงพอมาช่วย ก็จะทำให้เสมือนอยู่ในสภาวะน่าสบายได้

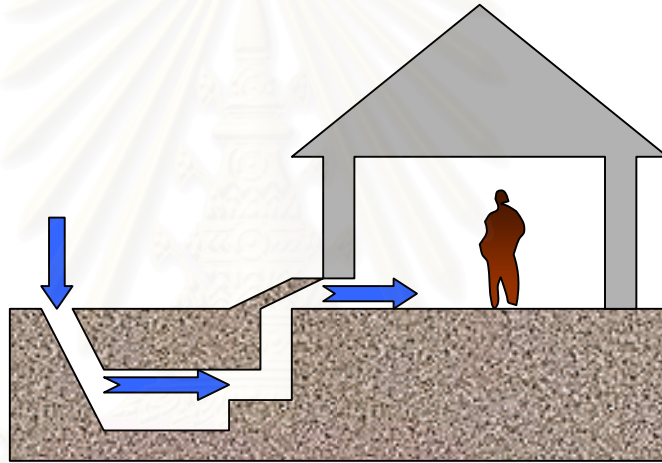
2. การที่มีอุณหภูมิที่ผิวเฉลี่ยของวัตถุรอบๆ ตัว(mean radiant temperature) แตกต่างไปจากอุณหภูมิอากาศปกติ โดยที่ 1 องศาของ MRT จะเท่ากับ 1.4 องศาของอุณหภูมิอากาศ (dry bulb temperature) เช่น ถ้าอุณหภูมิเฉลี่ยของผิววัตถุที่อยู่รอบๆ ตัวต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศ 1°C จะมีความรู้สึกเสมือนว่าเย็นลง 1.4°C เป็นต้น

3. การระเหยของน้ำ(evaporative) เนื่องจากขบวนการที่น้ำระเหยกลายเป็นไอน้ำ (vapor) มีการใช้ความร้อนเพื่อช่วยในการเปลี่ยนสถานะ โดยการระเหยของน้ำ 1 ปอนด์ ต้องใช้ความร้อนประมาณ 1,000 BTU. (American Society of Heating, 1989) ซึ่งหมายความว่าถ้าน้ำสามารถระเหยกลายเป็นไอน้ำได้ในอากาศ จะมีการดึงความร้อนในอากาศมาช่วยในการเปลี่ยนสถานะอากาศก็จะเย็นลงกว่าปกติ แต่จะเย็นลงเล็กน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับปริมาณของน้ำที่ระเหยไป จากการศึกษาพบว่าในสภาพอากาศแบบร้อนชื้น ที่มีค่าความชื้นสัมพัทธ์สูง(ประมาณ 55% ขึ้นไป) การระเหยของน้ำจะระเหยได้ในอัตราที่ช้า

แต่ได้มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับขอบเขตของสภาวะน่าสบาย ว่ามีอีกปัจจัยหนึ่งคือความคุ้นเคยกับสภาพอากาศ(acclimation) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้กล่าวถึงขอบเขตสภาวะน่าสบายสำหรับประเทศไทย พบว่าขอบล่างอยู่ที่ 26.1°C ขอบบนของอุณหภูมิในขอบเขตสภาวะน่าสบายสามารถสูงได้ถึง 31°C (John F. Busch, 1991) โดยทำการศึกษามาจากพนักงานในบริษัทที่เป็นระบบไม่ปรับอากาศ ภายในเขตกรุงเทพมหานคร เป็นจำนวน 1,100 คน

2. การใช้ประโยชน์จากอุณหภูมิจากใต้ดิน

การออกแบบอาคารโดยใช้ประโยชน์จากความเย็นของท่อใต้ดิน (earth tube) เป็นวิธีการที่ใช้อากาศไหลเวียนภายในท่อ ซึ่งโดยทั่วไปใช้ท่อพลาสติกหรือ ท่อ PVC โดยดูดอากาศจากภายนอกอาคารที่มีอุณหภูมิสูงผ่านท่อที่ฝังอยู่ใต้ดิน ความแตกต่างอุณหภูมิจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำความร้อนจากอากาศภายในท่อสู่อุณหภูมิดินที่เย็นกว่า เป็นการช่วยลดอุณหภูมิอากาศดังกล่าว ดังนั้นอากาศที่เข้ามาในอาคารจึงมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิดิน แต่ในภูมิภาคนี้ซึ่งมีความชื้นสูงอย่างประเทศไทย ควรมีการป้องกันความชื้นที่มากับอากาศ การนำมาใช้หากไม่สามารถป้องกันความชื้นได้จะทำให้ผู้ใช้สอยอาคารรู้สึกไม่สบายตัว หากเป็นอาคารปรับอากาศจะทำให้สิ้นเปลืองพลังงานอย่างมากในการรีดความชื้น

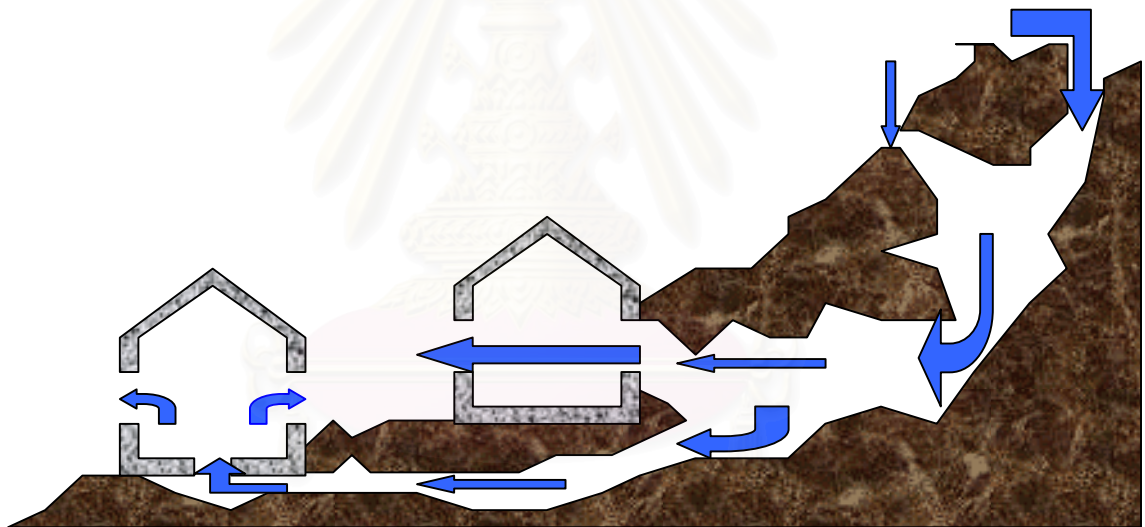


ภาพ 1 แสดงลักษณะการใช้อากาศหมุนเวียนภายในท่อ

สาเหตุของความชื้น โดยทั่วไปเกิดจากการนำอากาศภายนอกซึ่งปกติมีความชื้นในปริมาณที่สูงอยู่มาก แล้วเข้าสู่อาคารโดยยังไม่ได้มีการรีดความชื้นออกก่อน และอีกสาเหตุหนึ่งคือการรั่วซึมของท่อทำให้ความชื้นภายในดินซึมผ่านเข้าสู่ระบบ ทำให้อากาศภายในท่อเกิดความชื้นมากขึ้น วิธีแก้ปัญหารีดความชื้นที่มากับอากาศในท่อนำความเย็นคือ ต้องจัดการกับสภาพแวดล้อมที่ปลายท่อนำอากาศเข้าและทำการออกแบบให้เกิดความชื้นน้อยที่สุด หรือใช้การไหลเวียนในระบบปิด กล่าวคือนำอากาศภายในอาคารซึ่งควบคุมความชื้นในปริมาณที่มีความเหมาะสมมาไหลเวียนผ่านท่อใต้ดินเพื่อลดอุณหภูมิแล้วย้อนกลับมาปล่อยเข้าสู่อาคารอีกครั้งหนึ่ง โดยทั่วไปจะมีความเหมาะสมกับอาคารที่ใช้ระบบ Active หรืออาคารที่ใช้เครื่องปรับอากาศ

2.1 กลยุทธ์การลดอุณหภูมิอากาศโดยอาศัยท่อใต้ดิน The Villa Acolia

กลยุทธ์หนึ่งในการลดอุณหภูมิภายในอาคารโดยทำให้อากาศไหลผ่านท่อใต้ดิน เป็นวิธีที่ดัดแปลงมาจากแนวคิดในอดีตที่ Villa Acolia ออกแบบโดย Count Francesco Trento ในปี 1550 ซึ่งอากาศจะถูกทำให้เย็นลง โดยผ่านเข้าไปในถ้ำทางด้านข้างของภูเขาที่เปิดอยู่เหนือถ้ำและเชื่อมต่อกับท่อผ่านไปทางใต้ดินของหมู่บ้าน การเคลื่อนตัวของอากาศ จะทำให้เย็นและมีการควบแน่นของอากาศมากกว่าภายนอก การแสดงกลยุทธ์โบราณนี้ สามารถวัดอุณหภูมิคงที่ภายในถ้ำได้ 52 องศาฟาเรนไฮต์(11.5 องศาเซลเซียส) ตลอดปี และในขณะที่ช่วงฤดูร้อน อุณหภูมิภายนอกสูงถึง 90 องศาฟาเรนไฮต์(32 องศาเซลเซียส) อุณหภูมิภายในระบบอยู่ที่ 55-57 องศาฟาเรนไฮต์ ถูกนำไปใช้ในหมู่บ้านซึ่งอากาศมีอุณหภูมิผสมอยู่ที่ 68-71 องศาฟาเรนไฮต์

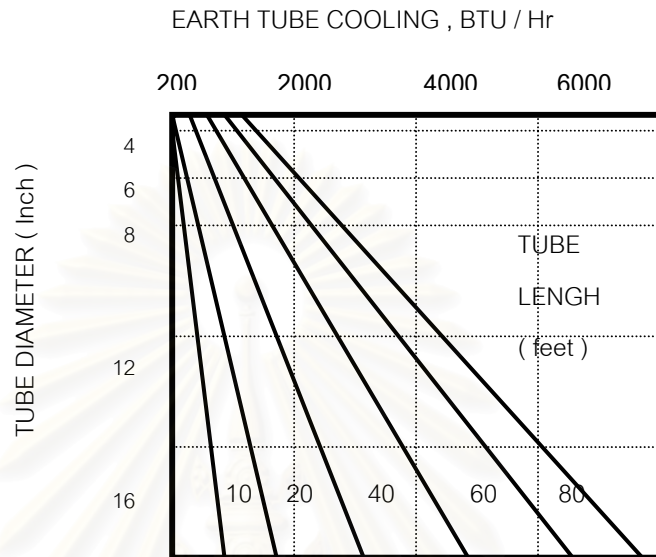


ภาพ 2 แสดงแนวคิดการบังคับทิศทางลมให้ผ่านถ้ำ เพื่อลดอุณหภูมิก่อนระบายที่หมู่บ้าน
The VILLA ACOLIA

ที่มา : Fuller Moore, Environment Control System, 1993, p.215

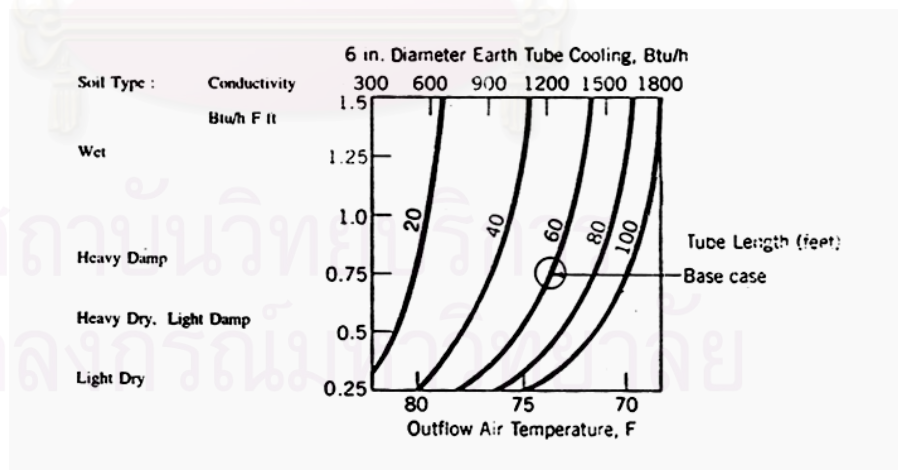
2.2 งานวิจัยของ Donald W. Abrams

จากการหาความสัมพันธ์ดังกล่าวซึ่งมีงานวิจัยต่างประเทศได้ทำการสรุปผลการทดลองถึงลักษณะการเลือกใช้ขนาดของท่อที่มีผลต่อความยาวและความเร็วลมที่สามารถประยุกต์ใช้ได้ง่าย



แผนภูมิ 1 แสดงความสัมพันธ์ของความยาว ขนาด และอากาศที่หมุนเวียนภายในท่อ
ที่มา : Stein, Reynold and McGuinness. P. 223

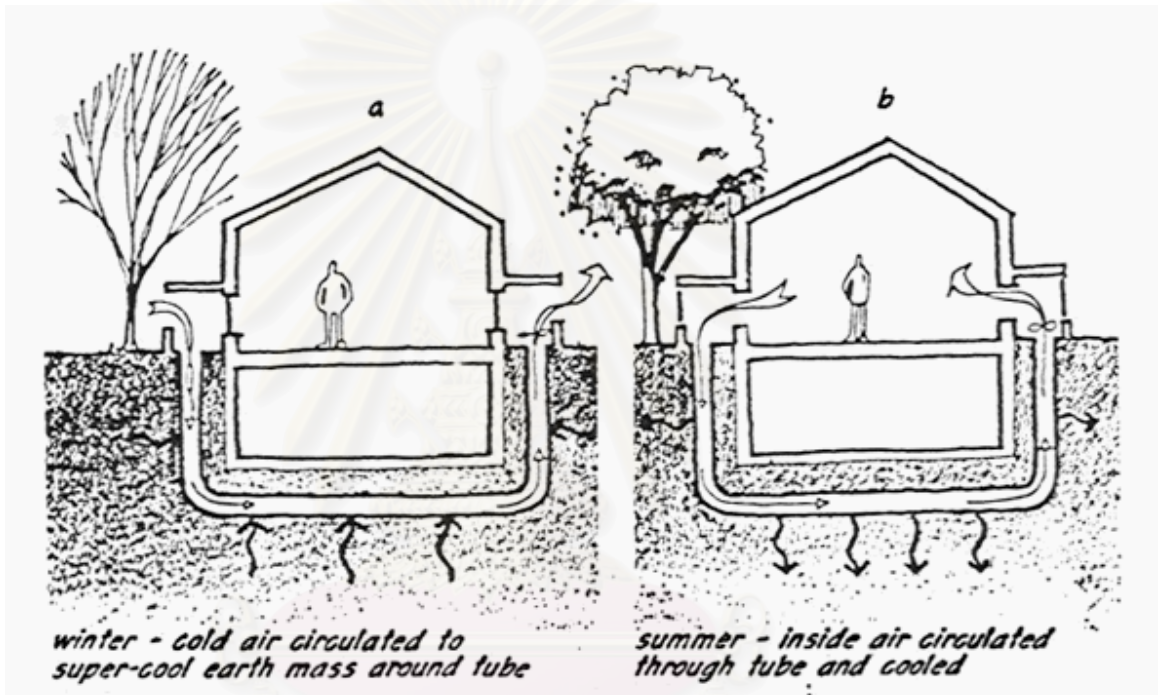
และการศึกษาลงในรายละเอียดกับท่อใต้ดินขนาด 6 นิ้วที่มีความยาว 60 ฟุต(18 เมตร) และทำการวัดอุณหภูมิในแต่ละจุด ซึ่งเปรียบเทียบกับสภาพภูมิอากาศภายนอก ดังนี้



แผนภูมิ 2 แสดงความสัมพันธ์ของความยาวและอากาศที่หมุนเวียนภายในท่อ ขนาด 6”
ที่มา : Stein, Reynold and McGuinness. P. 223

2.3 งานวิจัยของ Fuller Moore

US. Department of Housing and Urban Development Cycle Five Demonstration Program, Cincinnati ได้ทำการทดลองโดยใช้ท่อ PVC ขนาด 6 นิ้ว ยาว 70 ฟุตฝังใต้ดินลึก 8 ฟุต โดยใช้พัดลมขนาด 1/10 ของแรงม้าดูดอากาศผ่านท่อ ในช่วงฤดูหนาวจะดูดอากาศภายนอกผ่านท่อเพื่อไปทำให้ดินบริเวณที่ฝังท่อที่มีการสะสมความเย็นอยู่ ในฤดูร้อนจะใช้พัดลมตัวเดียวกันดูดอากาศจากภายในอาคารผ่านท่อ เพื่อไปนำความเย็นที่สะสมอยู่ในดินมาช่วยในการลดอุณหภูมิอากาศภายในอาคารดังรูป



ภาพ 3 แสดงการใช้ประโยชน์จากการสะสมความเย็นของใต้ดินแล้วนำมาใช้ในอาคาร

ที่มา : Stein, Reynold and McGuinness. P. 223

3. หลักการออกแบบระบบ earth tube

การใช้งานจะใช้ได้ดีในกรณีที่ดินมีอุณหภูมิต่ำกว่า 21°C (Givoni Baruch, 1994) สำหรับดินที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 27°C นั้นไม่เหมาะที่จะเลือกใช้ทำความเย็นโดยตรง แต่อาจจะเหมาะสมสำหรับเพื่อลดอุณหภูมิอากาศก่อนนำไปสู่ระบบปรับอากาศหรือลดการทำงานของเครื่องปรับอากาศลง และระบบท่อใต้ดินยังสามารถแบ่งย่อยลงไปได้อีก 2 ระบบคือ

1. ระบบ open loop คือการนำอากาศจากภายนอกอาคารมาทำความเย็นด้วย earth tube ก่อนนำเข้าสู่อาคาร ระบบนี้เหมาะสมกับอาคารที่ต้องการ ventilation rate ที่สูง เช่น โรงเรียน ห้องสมุด หรือในอาคารสาธารณะ

2. ระบบ close loop คือการนำเอาอากาศภายในอาคารซึ่งมักมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิภายนอก มาผ่าน earth tube แล้วนำกลับไปสู่อาคารอีกครั้งหนึ่งเพื่อประหยัดพลังงานในการทำความเย็น ระบบนี้มักใช้ในกรณีที่อากาศภายนอกมีความรุนแรงมาก หรือเป็นอาคารที่มี ventilation rate ต่ำ เช่นที่พักอาศัย

- ท่อและการวางท่อ

ส่วนใหญ่ท่อที่ใช้ในระบบ earth tube มักจะใช้เป็นท่อ พีวีซี เนื่องจากไม่มีปัญหาเรื่องการผุกร่อนของท่อ โดยทั่วไปแล้วการต้านทานความร้อนของดินมีค่าสูงมากดังนั้นชนิดของวัสดุที่ใช้จึงไม่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนระหว่างดินกับอากาศ(Moore Fuller, 1993) ท่อที่ใช้มักจะมีเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 4 นิ้ว ไปจนถึง 20 นิ้ว(หรือประมาณ 0.10 ม.-0.50 ม.) ความเร็วลมในท่อควรมีประมาณ 500 ฟุตต่อนาที(Stein & Reynolds, 1992) โดยมีระดับความลึกของท่อให้มากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ เพื่ออุณหภูมิที่ต่ำและมีความสม่ำเสมอ(โดยทั่วไปแล้วจะมีความลึกอยู่ระหว่าง 1.2 ม.-3.0 ม.เนื่องมาจากปัญหาจากการก่อสร้าง) อากาศจะมีการแลกเปลี่ยนความร้อนกับดินอย่างรวดเร็ว ดังนั้นท่อจึงไม่ควรยาวเกินกว่า 15 เมตรต่อ 1 ท่อ(Givoni, 1994) ดังนั้นเพื่อให้ได้ flow rate ที่กำหนดจึงทำได้โดยการเพิ่มจำนวนท่อให้มากขึ้น และเพิ่มขนาดของท่อให้มีขนาดใหญ่ขึ้น จะเห็นได้ว่าท่อ earth tube ไม่ควรจะเป็นแค่อ่างๆ เดียวที่มีความยาวมาก แต่ควรเป็นท่อที่ประกอปกกันหลายๆ ท่อที่มี inlet และ outlet ร่วมกันโดยมีระยะห่างในแต่ละท่ออย่างน้อย 1.20 เมตร ซึ่งการกระจายท่อมักแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ แบบ radias(แบบรัศมี) และแบบ parallel(แบบขนาน) การใช้งานระบบ earth tube อย่างต่อเนื่องและ spacing ระหว่างท่อน้อยเกินไปจะมีผลทำให้อุณหภูมิดินบริเวณรอบๆ สูงขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดต่ำลง ดังนั้นจึงควรมีการพิจารณาถึงระยะการใช้งานและการจัด spacing ที่เหมาะสม

การเป่าลมที่มีอุณหภูมิสูงกว่าเข้าไปในท่ออาจจะทำให้เกิดการควบแน่นขึ้นภายในท่อได้ ดังนั้นจึงควรมีการป้องกันโดยเลือกวางท่อลมเข้าในบริเวณที่มีอุณหภูมิไม่สูงมาก(แต่ทั้งนี้สำหรับเขตที่มีภูมิอากาศแบบร้อนชื้น ควรหลีกเลี่ยงการวางท่อลมเข้าที่ได้ฤดูแล้งเพราะตามปกติแล้วอากาศในบริเวณใต้อาคารมักมีความชื้นสูงกว่าบริเวณอื่น) หรือมีการจัดการกับน้ำที่จะเกิดขึ้นภายในท่อเพื่อคุณภาพอากาศที่ดีภายในอาคารด้วย

4. คุณสมบัติของดิน

อุณหภูมิโดยปกติของดิน สามารถแบ่งได้ตามระดับความลึกเป็น 2 ระดับ คือที่ระดับพื้นผิวและที่บริเวณใต้ผิวดิน ณ ความลึกลักษณะต่างๆ ในพื้นที่ที่มีขนาดใหญ่และดินมีความลึกมาก อุณหภูมิที่ความลึกของดินจะเทียบเท่ากับค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิบริเวณโดยเฉลี่ยตลอดปี ในขณะที่เดียวกันในพื้นที่เล็กๆและดินมีมวลสารไม่มากนัก อุณหภูมิของดิน จะแปรผันตามอิทธิพลจากผิวน้ำดินเช่นสีของดิน ความสามารถในการดูดกลืน การสะท้อน สภาพพื้นผิว และปริมาณความชื้นในดินรวมไปถึงปริมาณน้ำฝน ซึ่งปริมาณการแผ่รังสีความร้อนมีผลกับอุณหภูมิผิวดินมากที่สุดในฤดูร้อน โดยเฉพาะในช่วงที่อากาศแห้งซึ่งการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์มีอิทธิพลมากที่สุด

ในขณะที่เดียวกันในฤดูหนาวอิทธิพลการแผ่รังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์จะมีน้อยกว่า อุณหภูมิบริเวณผิวดินจะเปลี่ยนแปลงตามการดูดกลืนพลังงานความร้อนและอุณหภูมิโดยรอบ ช่วงของอุณหภูมิในระหว่างวันจะมีผลมากที่สุดใฤดูร้อน นอกจากนี้ยังมีตัวแปรที่มีอิทธิพลต่ออุณหภูมิระดับใต้ดิน ดังนี้

4.1 คุณสมบัติทางด้านอุณหภูมิของดิน

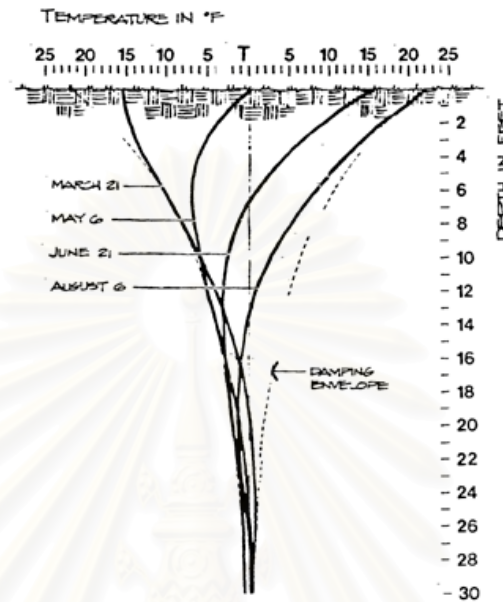
- อุณหภูมิดิน

ในแต่ละวัน ในขณะที่อุณหภูมิอากาศมีค่าความแปรปรวนที่สูงโดยขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ แต่อุณหภูมิดินจะมีการแปรปรวนที่น้อยกว่าอุณหภูมิอากาศ โดยความแปรปรวนของอุณหภูมิจะลดลงตามระดับความลึกของดิน การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในระหว่างวัน (diurnal swing) มีผลกับอุณหภูมิดินที่ความลึกเพียง 0.60 เมตร เท่านั้น (Givoni Baruch, 1994) ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในระหว่างฤดูกาล(seasonal swing) จะมีผลต่ออุณหภูมิที่อยู่ลึกลงไปหลายเมตร

- อุณหภูมิดินเฉลี่ยตลอดปี

ในปีหนึ่งๆอุณหภูมิของดินที่ระดับความลึกหนึ่ง จะมีการแกว่งตัวขึ้นลง โดยมีอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดทั้งปีที่เท่ากันในทุกระดับความลึก อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดปีของดินนี้ นอกจากจะทราบได้จากการเก็บข้อมูลอุณหภูมิดินโดยตรงแล้ว ยังสามารถหาได้จากอุณหภูมิน้ำใต้ดินหรืออุณหภูมิของน้ำในบ่อ(well water) ที่อยู่ลึกลงไปใต้ดินได้อีกด้วย(Labs Kenneth, 1983) นอกจากนี้อุณหภูมิดินเฉลี่ยตลอดปียังสามารถหาได้จากการนำอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดปีของอากาศ

มาบวกเพิ่มขึ้นไปประมาณ 2 – 3⁰F (IBID) แต่ทั้งนี้อาจมีการคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่สูงกว่าเล็กน้อย



แผนภูมิ 3 แสดงอุณหภูมิดินที่ระดับความลึกต่างๆ ณ เวลาเดียวกัน (Labs, Kenneth, 1983)

- amplitude ของอุณหภูมิดิน

amplitude(ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยกับอุณหภูมิต่ำสุดเฉลี่ยตลอดทั้งปี) ของอุณหภูมิดิน มีความสัมพันธ์กับระดับความลึกและค่า thermal diffusivity ของดิน ทั้งนี้ amplitude ของอุณหภูมิดินจะลดลงเมื่อมีระดับความลึกมากขึ้น(Labs Kenneth, 1983)

ได้สมการเพื่อหาค่า amplitude ของอุณหภูมิดินที่ระดับความลึกต่างๆ ได้ดังนี้

$$A_x = A_s e^{-x(0.00861/K)^{1/2}} \quad \text{หรือ} \quad A_x = A_s e^{-xr} \quad \text{เมื่อ } r = (0.00861/K)^{1/2}$$

- กำหนดให้
- A_x = amplitude ของอุณหภูมิดินที่ระดับความลึก x ฟุต (⁰F)
 - A_s = amplitude ของอุณหภูมิดินที่ระดับผิวดิน
 - X = ระดับความลึก (ฟุต)
 - K = ค่า thermal diffusivity ของดิน(ตารางฟุต / วัน)
 - e = ค่าคงที่ (2.71828)

- **steady state**

steady state เป็นอุณหภูมิของดินที่ระดับหนึ่งที่มีค่า amplitude ไม่เกินกว่า 5% ของค่า amplitude ที่ผิวดิน อุณหภูมิที่ระดับ steady state จะมีความสม่ำเสมอสูง กล่าวได้ว่า steady state ของดินจะขึ้นอยู่กับชนิดของดินและระดับน้ำในดิน โดยจะสามารถหาระดับที่มี steady state ได้จากสูตร (Kenneth Labs, 1983)

$$X_{ss} = -[\ln(A_x/A_s)]/r \text{ เมื่อ } r = (0.00861/K)^{1/2}$$

กำหนดให้

A_x	=	amplitude ของอุณหภูมิดินที่ระดับความลึก x ฟุต ($^{\circ}F$)
A_s	=	amplitude ของอุณหภูมิดินที่ระดับผิวดิน
X	=	ระดับความลึก (ฟุต)
K	=	ค่า thermal Diffusivity ของดิน(ตารางฟุต / วัน)
e	=	ค่าคงที่ (2.71828)

Stein และ Reynold(1992) ได้ประมาณระดับของ steady state อย่างคร่าวๆ ของดินในแต่ละชนิดดังนี้

ดินแห้ง	14	ฟุต
ดินปกติ	18	ฟุต
ดินเปียก	22	ฟุต

- **conductive capacity ของดิน**

conductive capacity เป็นค่า square root ของผลคูณของ heat capacity ของดิน กับค่า conductivity ของดิน วัสดุที่มีค่า conductive capacity สูงจะมีศักยภาพในการสะสมความร้อนหรือเป็น heat sink ที่ดี(Kenneth Labs, 1983) ผลอีกประการหนึ่งของการมีค่า conductive capacity ที่สูงก็คือจะทำให้มีอุณหภูมิผิวที่สม่ำเสมอมากขึ้นค่า amplitude ของอุณหภูมิที่ผิวลดลง

- **thermal diffusivity ของดิน**

thermal diffusivity หรือค่าการกระจายความร้อนของดินมีความแตกต่างกันออกไปตามความหนาแน่นของดินและปริมาณของน้ำใต้ดิน ซึ่งปริมาณน้ำในดินจะมีผลต่อค่า conductivity และค่า specific heat ของดินอีกด้วย และเนื่องจากปริมาณน้ำในดินมีค่าไม่คงที่ตามฤดูกาลจึงทำให้ค่า thermal diffusivity ของดินโดยทั่วไปจะมีค่าประมาณ $0.6 \text{ Ft}^2/\text{day}$

- **phase constant**

ในการคิดสูตรอุณหภูมิดินที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อน เมื่อให้ความลึกจากระดับดิน (x) เท่ากับ 0 จะเห็นว่า การถ่ายเทความร้อนที่ผิวดินจะเร็วกว่าอุณหภูมิผิวดินประมาณ $1/8$ รอบของปีหรือประมาณ 46 วัน เมื่อกำหนดให้พลังงานจากดวงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนของดิน ทำให้ทราบได้ว่า อุณหภูมิผิวดินมีค่าสูงสุดหลังจาก summer solstice (เป็นวันที่มีค่าพลังงานดวงอาทิตย์สูงสุด) อยู่ 46 วัน และในขณะเดียวกับเมื่อค่าพลังงานดวงอาทิตย์มีค่าต่ำสุดในวันที่ 21 ธันวาคม (winter solstice) ก็ทำให้อุณหภูมิผิวดินมีค่าต่ำสุดห่างจาก winter solstice ออกไป 46 วัน (ในวันที่ 4 กุมภาพันธ์) เช่นกัน

เมื่อถือว่าพลังงานจากดวงอาทิตย์จะมีค่าต่ำที่สุดเมื่อวันที่ 1 มกราคม (ด้วยค่าความคลาดเคลื่อน ± 10 วัน จากวันที่ 21 ธันวาคม) การจัดให้ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจากดวงอาทิตย์ตรงกันกับอุณหภูมิผิวดิน ทำได้โดยเลื่อนวันที่อุณหภูมิผิวดินต่ำสุดขึ้นไปจนถึงวันที่ 1 มกราคม (หรือเลื่อนขึ้นไปประมาณ 35 วัน) ซึ่งจะทำให้สามารถจัดความสัมพันธ์ ในรูปแบบ cosine curve ได้ ระยะเวลาที่เลื่อนขึ้นนั้นคือค่าของ phase constant นั้นเองโดยปกติค่า phase constant จะมีค่าประมาณ 34.5 วัน

- **Time lag ของดิน**

time lag ของดินเป็นระยะเวลาที่ดินในระดับชั้นหนึ่งๆ เริ่มได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ชั้นผิวดิน time lag ของดินมีความสัมพันธ์เป็นลักษณะเส้นตรงกับระดับความลึก (Kenneth Labs, 1983.) ได้ให้สมการเพื่อหาค่า time lag ไว้ดังนี้

$$L = (x/2) (116/K)^{1/2}$$

กำหนดให้ x = ระดับความลึกจากผิวดิน (ฟุต)

K = thermal diffusivity ของดิน

Watson (1983) ก็ได้ให้สมการเพื่อหาค่า time lag ไว้ดังนี้

$$L = 0.5 \sqrt{365/\alpha}$$

เมื่อ α = ค่า thermal diffusivity ของดิน

นอกจากนี้ Givoni (1994) ก็ได้ให้สมการเพื่อหาค่า time lag ไว้ดังนี้

$$\text{Time lag} = L * z$$

กำหนดให้ L = ค่า time lag ของดินต่อความลึก 1 ฟุต ซึ่งมีค่าเปลี่ยนไปตามสภาพ
ภูมิอากาศของชนิดดิน (ดูตาราง)
 z = ระดับความลึกจากผิวดิน

CLIMATE	SOIL TYPE		
	LOAM/CLAY	MIXED	SANDY
Desert	24	25	26
Arid	22.5	23.5	24.5
Intermediate	21	22	23
Humid	19.5	20.5	21.5
Wet	18	19	20

ตาราง 1 แสดงค่า time Lag ต่อความลึก 1 ฟุต ของดินชนิดต่างๆในภูมิอากาศแบบ
ต่างๆ (Givoni, Baruch, 1994)

- **การหาค่าอุณหภูมิของดิน**

ในการหาอุณหภูมิของดินเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบนั้น มีนักวิชาการหลายท่านได้ให้สูตรในการหาอุณหภูมิไว้ต่างๆดังนี้

- **Stein & Reynolds (1992)**

Stein & Reynolds ได้เสนอวิธีหาค่าอุณหภูมิดินที่ระดับต่างๆอย่างคร่าวๆไว้ โดยการ “หาค่าเฉลี่ยตลอดปีของอุณหภูมิของดิน โดยดูจากอุณหภูมิน้ำบ่อ(well water) ในบริเวณนั้นๆแล้วจัดเป็น steady state ที่ระดับต่างๆ โดยดูจากชนิดของดิน(ดูหัวข้อ steady state) จากนั้นจึงหาค่า amplitude เฉลี่ยผิวดินของพื้นที่ในบริเวณนั้น แล้วจึงทำการประมาณค่าอย่างคร่าวๆโดยเมื่อต้องการทราบอุณหภูมิดินในฤดูร้อน ให้รวมค่า amplitude เข้ากับอุณหภูมิเฉลี่ยของดิน ก็จะได้ อุณหภูมิที่ผิวดินในฤดูร้อน จากนั้นก็ประมาณการถึงความลึกต่างๆว่าควรมีอุณหภูมิเท่าใด (ระหว่าง อุณหภูมิเฉลี่ยและอุณหภูมิผิวดิน) สำหรับในฤดูหนาวก็ให้นำ amplitude ของผิวดินไปลบกับ อุณหภูมิเฉลี่ย แล้วใช้วิธีประมาณการคร่าวๆเช่นกัน”

- **Kenneth Labs (1993)** ได้เขียนสมการไว้ดังนี้

$$T_{(x,t)} = T_m - A_s e^{-x(0.00861/K)^{1/2}} \text{COS}(0.1726(t-t_0 - (x/2)(0.00861/K)^{1/2}))$$

กำหนดให้	$T_{(x,t)}$	=	อุณหภูมิที่ความลึก x เมตร และเวลา t
	T_m	=	อุณหภูมิเฉลี่ยของดินตลอดทั้งปี ($^{\circ}\text{F}$)
	A_s	=	amplitude ของอุณหภูมิมิวดินตลอดทั้งปี ($^{\circ}\text{F}$)
	x	=	ระดับความลึกจากผิวดิน (ฟุต)
	K	=	thermal diffussivity ของดิน(ตารางฟุตต่อวัน)
	t	=	เวลา(1 มกราคม = 1, 31 ธันวาคม = 365)
	t_0	=	phase constant (วัน)

และสมการการหาอุณหภูมิเฉลี่ยของดินดังนี้

$$T_{(a-b,t)} = T_m + A_s / [(a-b)r(1.414)] e^{-xr} \text{COS}[1.0173(t-t_0-46)-xr] \Big|_b^a$$

กำหนดให้	a	=	ระดับขอบบนของชั้นดินที่ต้องการหาอุณหภูมิ
	b	=	ระดับขอบล่างของชั้นดินที่ต้องการหาอุณหภูมิ
	r	=	$(0.0086/K)^{1/2}$

- Givoni Baruch (1994)

Givoni Baruch ได้ให้สมการเพื่อหาอุณหภูมิผิวดินไว้ดังนี้

$$T_{z,t} = T_m - A_s e^{-z/(365a)} \text{COS}\{(2/365)[t-t_0-(x/2)(365/a)1/2]\}$$

- $T_{z,t}$ = อุณหภูมิที่ความลึก z เมตร และเวลา t
 T_m = อุณหภูมิเฉลี่ยของดินตลอดทั้งปี ($^{\circ}\text{F}$)
 A_s = amplitude ของอุณหภูมิผิวดินตลอดทั้งปี ($^{\circ}\text{F}$)
 a = Thermal diffusivity ของดิน (ตารางฟุตต่อวัน)
 t = เวลา (1 มกราคม = 1, 31 ธันวาคม = 365)
 t_0 = วันที่มีอุณหภูมิผิวดินต่ำที่สุด

และได้ให้สมการเมื่อคำนึงถึง time lag และ range damping factor ไว้ดังนี้

$$T_s = T + A_0 * e^{(-Fz)} * \text{Sin} (0.986*N-125-Lz)$$

- กำหนดให้ T_s = อุณหภูมิที่ความลึก D เมตร และเวลา N ($^{\circ}\text{C}$)
 T = อุณหภูมิเฉลี่ยของดินตลอดทั้งปี ($^{\circ}\text{C}$)
 A_0 = amplitude ของอุณหภูมิผิวดินตลอดทั้งปี (=range ของอุณหภูมิผิวดินตลอดปี/2) ($^{\circ}\text{C}$)
 F = range damping factor (ดูตาราง)
 z = ระดับความลึกจากผิวดิน (เมตร)
 L = time lag/1 M.Depth. (วัน)
 0.986 = จำนวนวันใน 1 ปีเขียนในรูปขององศา(360/365)
 N = วัน ; นับจากต้นปี
 125 = วันที่มีอุณหภูมิผิวดินสูงสุดในรอบปี ; จากการสังเกตพบ

ว่าตรงกับวันที่ 25 เมษายน อาจคลาดเคลื่อนบ้างเล็กน้อย

TABLE 6-A1. DAMPING FACTOR (F) FOR DIFFERENT CLIMATES AND SOIL TYPES

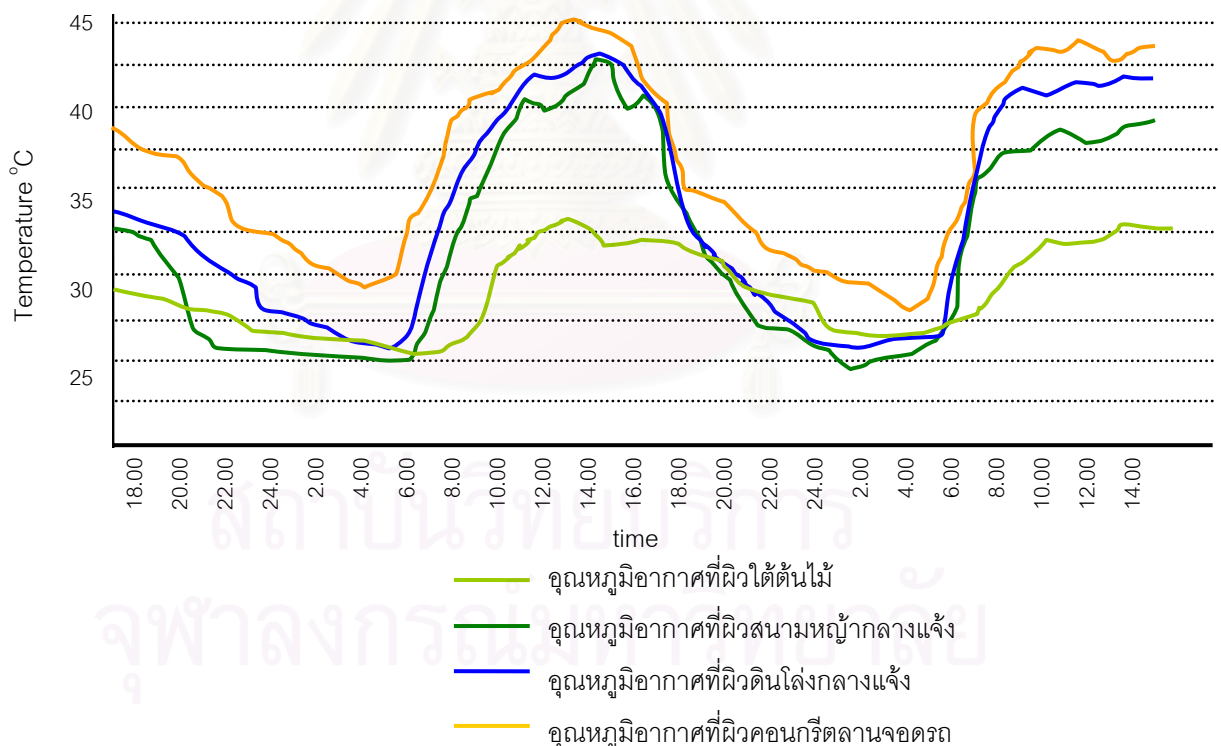
Climate	Soil Type		
	Loam/clay	Intermediate	Sandy
Desert	0.45	0.50	0.55
Arid	0.40	0.45	0.50
Intermediate	0.35	0.40	0.45
Humid	0.25	0.35	0.40
Wet	0.20	0.30	0.35

ตารางที่ 2 แสดงค่า Damping factor ของดินชนิดต่างๆ ในภูมิอากาศแบบต่างๆ

(Givoni, Baruch, 1994.)

สิ่งปกคลุมผิวดิน

จากการรายงานการวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ผิวดินที่มีสิ่งปกคลุมจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าดินที่ไม่มีสิ่งปกคลุม เนื่องจากการลดการดูดซับรังสีความร้อนที่ผิวหน้าดิน อีกทั้งยังช่วยลดการสูญเสียน้ำในผิวดินด้วย



แผนภูมิ 4 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ผิวตามสภาพแวดล้อมที่ต่างกัน

ที่มา: สุพจน์ ดวงสินทวีกุล, 2537

4.2 ประเภทของดินแบ่งตามคุณลักษณะของสีและชนิดของเนื้อดิน

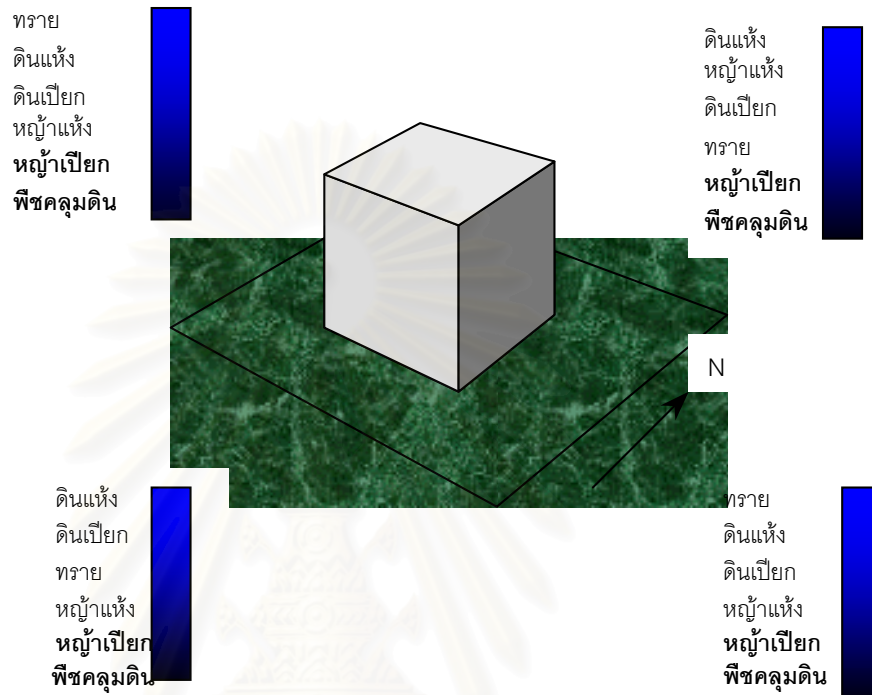
- **เนื้อดิน** การแบ่งประเภทของดินตามเนื้อดิน พิจารณาจากปริมาณอนุภาคมวลสารแต่ละชนิด ซึ่งประกอบด้วยอนุภาค เม็ดทราย เม็ดซิลท์ และเม็ดดินเหนียว โดยทั่วไปดินในสภาพพื้นที่ระดับต่ำประกอบด้วยอนุภาคเม็ดดินเหนียวมากกว่าดินในสภาพพื้นที่ระดับสูงกว่า ดินในสภาพพื้นที่ระดับต่ำมีเนื้อดินเป็นจำพวก clay loam ในขณะที่ดินในพื้นที่ระดับสูงกว่ามีเนื้อดินเป็นพวก sandy loam หรืออาจกล่าวได้ว่า ดินมีเนื้อหยาบขึ้นเมื่อระดับพื้นที่สูงขึ้น

เนื้อดินที่แตกต่างกัน เช่นดินที่มีความสามารถในการระบายน้ำต่ำ ดินที่มีความสามารถในการระบายน้ำปานกลาง และดินที่มีความสามารถในการระบายน้ำสูง ส่งผลต่อระดับความชื้นในดินให้แตกต่างกันด้วย เป็นที่ทราบกันดีว่าความชื้นในดินมีผลให้อุณหภูมิดินใกล้เคียงกับอุณหภูมิกระเปาะเปียกและมีความสามารถในการนำความร้อนสูงกว่าดินที่มีความชื้นต่ำ ดังนั้นเมื่อดินที่มีความชื้นต่างกันย่อมส่งผลให้แนวทางการใช้ประโยชน์จากอุณหภูมิดินแตกต่างกันไปด้วย แต่การเก็บข้อมูลความชื้นในดินของประเทศไทยยังมีอยู่น้อยมาก จึงถือเป็นงานที่ผู้เกี่ยวข้องต้องทำการวิจัยต่อไป

- **สีของดิน** สีของดินเป็นตัวแปรหนึ่งซึ่งทำให้อุณหภูมิในเนื้อดินมีความแตกต่างกัน หากไม่มีวัสดุปกคลุมดินแล้ว ดินที่มีสีเข้มจะมีความสามารถในการดูดซับรังสีได้ดี ดินสีอ่อนจะมีความสามารถในการดูดซับน้อยลงและจะมีค่าสะท้อนรังสีความร้อนมากขึ้นตามลำดับ หน่วยวัดความเข้มสีของดินใช้ค่า Hue ในเกณฑ์ ดินในประเทศไทยสีของดินชั้นบนส่วนใหญ่คล้ายกันคือเป็นสีน้ำตาล น้ำตาลเข้ม สีเทา และน้ำตาลปนเทา สำหรับดินชั้นล่างขึ้นอยู่กับประเภทและชนิดของดิน แต่โดยมากพบตั้งแต่สีเทาหรือสีน้ำตาลปนเทาจนถึงน้ำตาลในบริเวณที่ลุ่ม ส่วนในที่ดอน ดินในระดับล่างมักเป็นสีน้ำตาลแกมแดง สีแดง หรือสีปะปนระหว่างแดงและเหลือง

อย่างไรก็ตาม ในการพิจารณาสีของดินซึ่งมีผลต่ออุณหภูมิของดิน ควรเลือกพิจารณาดินชั้นบนเป็นเกณฑ์ เนื่องจากอยู่ในตำแหน่งที่ได้รับรังสีโดยตรงจากดวงอาทิตย์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับมวลสาร

และในแต่ละทิศทางของอาคารการรับรังสีโดยตรงจากดวงอาทิตย์มีผลต่อดินในแต่ละประเภทไม่เหมือนกัน อันนี้เนื่องมาจากการดูดซับและการคายความร้อนตามคุณสมบัติของดินต่างกัน สามารถเรียงลำดับจากอุณหภูมิร้อนไปเย็นดังนี้



แผนภูมิ 5 แสดงชนิดของดินและสิ่งปกคลุมที่มีผลต่ออุณหภูมิที่ผิวของดิน

- ลักษณะทางกายภาพของดิน

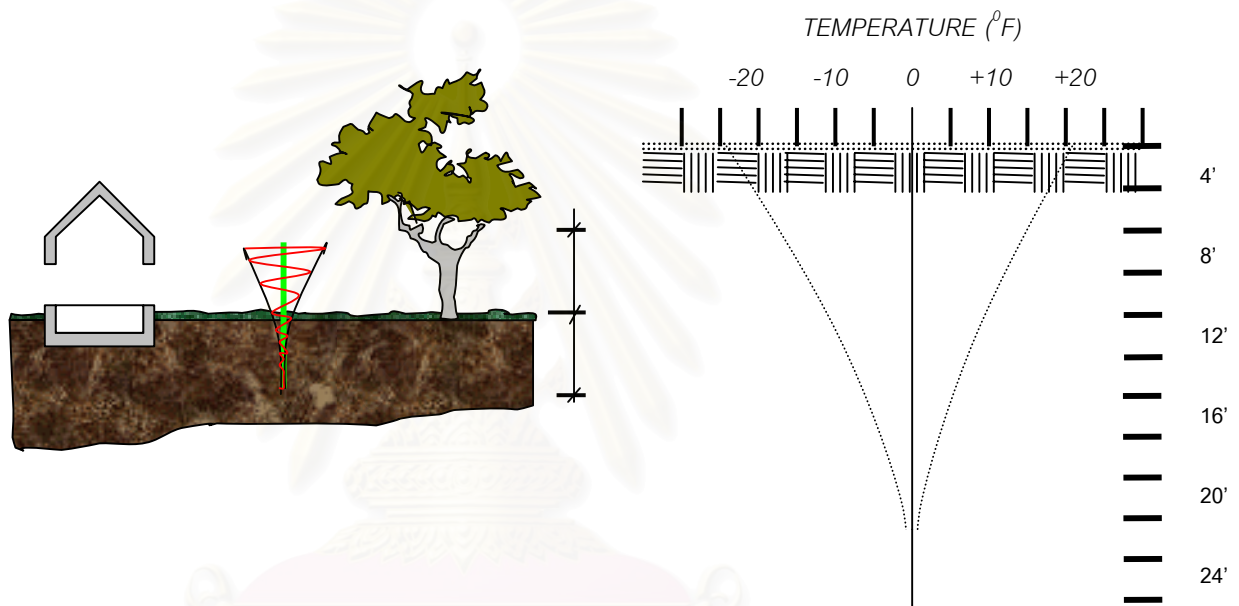
ลักษณะทางกายภาพของดินสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะด้วยกันคือ

- ความสามารถในการระบายน้ำ ดินที่เปียกชื้นจะมีค่าการนำความร้อนและค่าความสามารถในการกระจายความร้อนได้ดีกว่าดินแห้ง ดังนั้นดินเปียกจะมีช่วงของอุณหภูมิที่ผิวดินในระหว่างวันน้อยกว่า และมีการส่งผ่านความร้อนผ่านพื้นผิวได้เร็วกว่า

- การนำความร้อนและค่าความจุความร้อน ยังมีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างพื้นดินกับมวลสารใต้ดินเร็วเท่าใด ยิ่งทำให้ความชื้นของผิวดินและอุณหภูมิดินเปลี่ยนแปลงเร็วเท่านั้น

4.3 อุณหภูมิที่ระดับความลึกต่างๆเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นผิวต่างชนิดกัน

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงวัน จะมีผลน้อยลงไปเรื่อยๆเมื่อมีความลึกเพิ่มมากขึ้นที่ระดับความลึกตั้งแต่ 1 เมตรขึ้นไป อุณหภูมิดินส่วนใหญ่จะเริ่มคงที่ หรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 1°C ดังนั้นเมื่อพิจารณาการนำอุณหภูมิของดินมาช่วยทำความเย็นให้กับเปลือกอาคารที่ระดับความลึกนี้ ควรพิจารณาเพียงความแตกต่างในแต่ละเดือนหรือฤดูกาลเท่านั้น ดังนั้นการพิจารณานำเอาความเย็นจากดินมาใช้ให้เกิดประโยชน์จึงมักพิจารณาโดยอาศัยความลึกของดินมากกว่าอุณหภูมิที่ผิวดิน



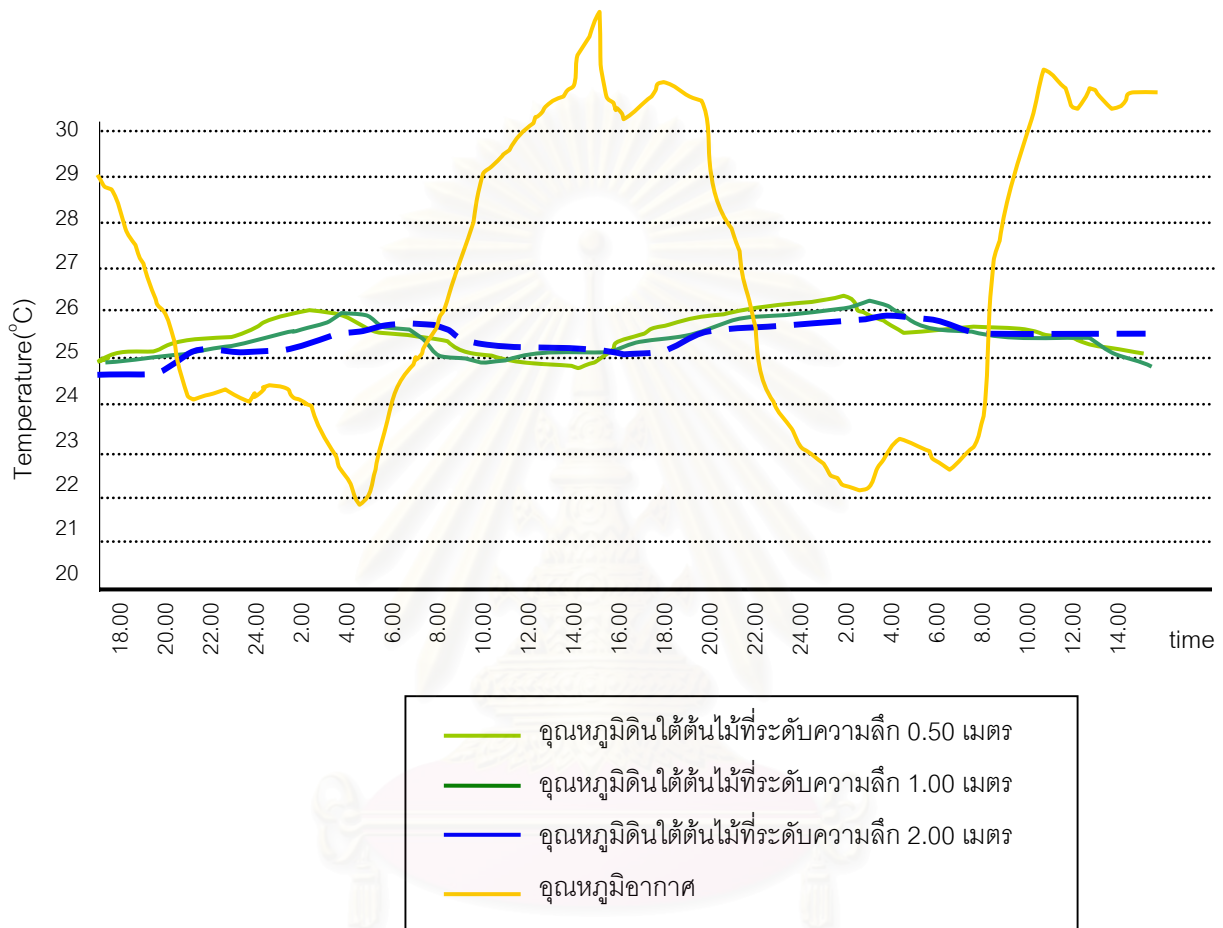
แผนภูมิ 6 แสดงความแปรปรวนอุณหภูมิของดิน ที่ระดับความลึกต่างๆ

ในช่วงฤดูร้อนความร้อนที่สะสมจะถ่ายเทลงสู่ผิวดินโดยการนำความร้อน และเคลื่อนที่สู่ผิวดินในช่วงฤดูหนาว การแผ่รังสีความร้อนโดยรวม ขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของผิวดินกับอุณหภูมิของอากาศโดยรอบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4 อุณหภูมิดินที่ระดับความลึกต่างๆในสภาพแวดล้อมที่ต่างกัน

จากงานวิจัยพบว่าอุณหภูมิของดินที่ระดับความลึกต่างๆกันที่ระดับความลึก 0.50 ม. 1.00 ม. และ 2.00 ม. ในสภาพแวดล้อมอยู่ใต้ต้นไม้เดียวกันพบว่าที่ความลึกระดับ 2 เมตร ในเวลากลางวัน มีอุณหภูมิต่ำที่สุดตามลำดับ



แผนภูมิ 7 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิดินใต้ต้นไม้ที่ระดับความลึกต่างๆ

จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบอุณหภูมิดินที่ผิวแต่ต่างสภาพแวดล้อมกัน พบว่าดินบริเวณใต้ต้นไม้ใหญ่มีอุณหภูมิต่ำกว่าสภาพแวดล้อมอื่นๆ เนื่องจากพุ่มใบของต้นไม้ทำหน้าที่กั้นกรอง ดูดซับและสะท้อนรังสีจากดวงอาทิตย์ ความร้อนที่ถูกดูดซับโดยดินจึงจะไม่มากเท่าบริเวณสนามหญ้า และพื้นที่ดินโล่ง ในส่วนสนามหญ้ากลางแจ้ง พบว่าหญ้าสามารถป้องกันรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ได้บ้าง ในขณะที่บริเวณที่ดินโล่งแจ้งมีอุณหภูมิดินสูงที่สุด

การวิเคราะห์ต่อมาเป็นการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ระดับความลึกต่างๆ ในสภาพความร้อนเดียวกัน พบว่าอุณหภูมิดินที่ระดับความลึก 0.50 เมตร มีความแปรผันตามอุณหภูมิอากาศมากที่สุด

สุด เนื่องจากมีค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิสูงสุดและอุณหภูมิต่ำสุด(ΔT) มากที่สุด ส่วนอุณหภูมิที่ระดับความลึก 1.00 เมตร และ 2.00 เมตร ของทุกสภาพแวดล้อม ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิสูงสุดและอุณหภูมิต่ำสุดลดลง ตามลำดับ

หากพิจารณาที่ระดับความลึกมากขึ้น พบว่าอุณหภูมิดินซึ่งมีวัสดุปกคลุมที่แตกต่างกันเริ่มมีอุณหภูมิใกล้เคียงกันมากขึ้น เช่นที่ระดับความลึก 9 เมตร อุณหภูมิมีความแตกต่างกันระหว่างต่ำสุดกับสูงสุดเพียง 2°F เท่านั้น ต่างกับระดับ 0.30 เมตร ที่มีอุณหภูมิต่างกันระหว่างต่ำสุดกับสูงสุดที่ 21°F แสดงว่าอุณหภูมิต่างกันที่เกิดจากอิทธิพลของสิ่งปกคลุมหน้าดินจะแปรผกผันกับระดับความลึกของดิน

4.5 ข้อมูลเกี่ยวกับอุณหภูมิดินที่ความลึก 6 นิ้ว

อุณหภูมิดินที่ความลึก 6-8 นิ้ว (15 เซนติเมตร) ธนิต จินดาวณิก (2527) ได้ทำการเก็บข้อมูลตามสถานที่ 3 แห่ง ดังนี้

1. อาคารศูนย์วัฒนธรรมแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. บ้านพักอาศัยของรองศาสตราจารย์ผุสดี ทิพทัส
3. บ้านพักอาศัยของคุณณลินี จินดาวณิก

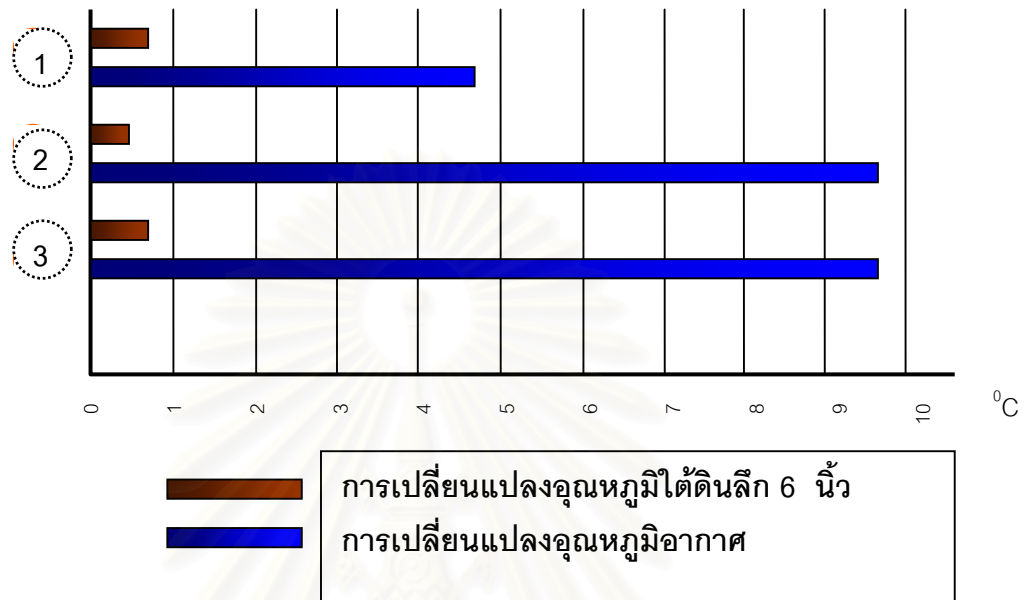
พบว่า ดินมีความสามารถสร้างสภาวะที่น่าสบาย ภายในอาคารและที่อยู่อาศัย โดยเก็บข้อมูลของอุณหภูมิดินได้ผลการเก็บข้อมูลดังนี้

อาคารศูนย์วัฒนธรรมแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อุณหภูมิดินที่ความลึก 6 นิ้ว ในเดือนตุลาคม 2535 โดยมีอุณหภูมิดินอยู่ในช่วง 25.5 ถึง 26.5 องศาเซลเซียส ซึ่งมีความเปลี่ยนแปลง 0.6 องศาเซลเซียส ในขณะที่อุณหภูมิกาศมีความเปลี่ยนแปลง 4.7 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 29.2 องศาเซลเซียส

บ้านพักอาศัยของรองศาสตราจารย์ผุสดี ทิพทัส ในเดือน พฤศจิกายน 2535 อุณหภูมิดินที่ความลึก 6 นิ้ว โดยมีอุณหภูมิดินอยู่ในช่วง 24.23 ถึง 24.66 องศาเซลเซียส ซึ่งมีความเปลี่ยนแปลง 0.43 องศาเซลเซียส ในขณะที่อุณหภูมิกาศมีความเปลี่ยนแปลง 9.75 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 32.7 องศาเซลเซียส

บ้านพักอาศัยของคุณณลินี จินดาวณิก อุณหภูมิดินที่ความลึก 8 นิ้ว ในเดือน มกราคม 2536 โดยมีอุณหภูมิดินอยู่ในช่วง 26.0 ถึง 26.6 องศาเซลเซียส ซึ่งมีความเปลี่ยนแปลง 0.6 องศาเซลเซียส ในขณะที่อุณหภูมิกาศมีความเปลี่ยนแปลง 9.71 องศาเซลเซียส

จากกรณีดังกล่าวจะเห็นว่าอุณหภูมิดินค่อนข้างคงที่ และมีอุณหภูมิโดยเฉลี่ยต่ำกว่าอุณหภูมิภายนอกโดยเฉพาะช่วงเวลาร้อนจัด ดังรูป



แผนภูมิ 8 แสดงการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดินกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศ

5 การถ่ายเทความร้อน

5.1 การถ่ายเทความร้อนเบื้องต้น

ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของวัตถุนั้น นอกจากจะได้รับอิทธิพลจากสภาพแวดล้อมภายนอกแล้ว ยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติต่างๆ ของแต่ละวัตถุด้วย

คุณสมบัติที่มีอิทธิพลต่อการถ่ายเทความร้อน ได้แก่

- 1 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (thermal conductivity – K)
- 2 ค่าการนำความร้อน (thermal conductance – C)
- 3 ค่าการต้านทานความร้อน (thermal resistance – R value)
- 4 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (coefficient of transmission – U value)

1 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Thermal conductivity – K)

คือ ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนของวัตถุใดๆ หรือ ปริมาณความร้อนภายใต้สภาวะคงที่ ที่ถ่ายเทผ่าน 1 หน่วยพื้นที่ของวัตถุที่มีความหนา 1 หน่วย ใน 1 หน่วยเวลา โดยมีความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิววัสดุทั้ง 2 ด้าน 1 หน่วย มีหน่วยเป็น(Btu.-in/hr.ft².°F.) และมีหน่วย SI คือ (W/m².K) (Benjamin Stain and Reynolds, 1992)

2 ค่าการนำความร้อน (Thermal conductance – C)

คือ ค่าการนำความร้อนของวัตถุใดๆ หรืออัตราส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของวัตถุใดๆ ต่อความหนาของวัตถุหรือวัสดุ ที่มีความหนาตามมาตรฐาน ในพื้นที่ 1 หน่วย มีหน่วยเป็น (Btu./hr. ft².°F.) และมีหน่วย SI คือ (W/m².K) (Benjamin Stain and Reynolds, 1992) ซึ่งมีสมการดังต่อไปนี้

$$C = \frac{K}{dX}$$

กำหนดให้

C	คือ	ค่าการนำความร้อนของวัตถุหรือวัสดุ
X	คือ	ความหนาของวัตถุหรือวัสดุ

3 ค่าการต้านทานความร้อน (Thermal resistance – R value)

เป็นค่าที่แสดงถึงประสิทธิภาพในการเป็นฉนวนกันความร้อนของวัตถุ และเป็น ส่วนกลับของค่าการนำความร้อน หมายถึง จำนวนชั่วโมงสำหรับงานความร้อนที่ถ่ายเทผ่านความหนาของวัตถุหนึ่งในพื้นที่ 1 หน่วย เมื่อมีอุณหภูมิที่ผิววัตถุทั้งสองด้านแตกต่างกัน 1 หน่วย มีหน่วย คือ (hr. ft².°F./Btu.) และมีหน่วย SI คือ (m².K/W) (Benjamin Stain and Reynolds, 1992.) ซึ่งมีสมการดังต่อไปนี้

$$\frac{R}{C} = \frac{1}{K} = dX$$

กำหนดให้

R	คือ	ค่าการต้านทานความร้อนของวัตถุหรือวัสดุ
---	-----	--

4 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Co-efficient of transmission U value)

คือ การคำนวณหาปริมาณความร้อนที่เข้าสู่ตัวอาคาร หรือออกจากตัวอาคาร เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ โดยจะใช้ U value เป็นหลัก มีหน่วยเป็น Btu./hr.ft³. (Watson, FAIA, และ Kenneth Labs, 1983) โดยมีสูตรดังนี้

$$U = \frac{1}{\sum R}$$

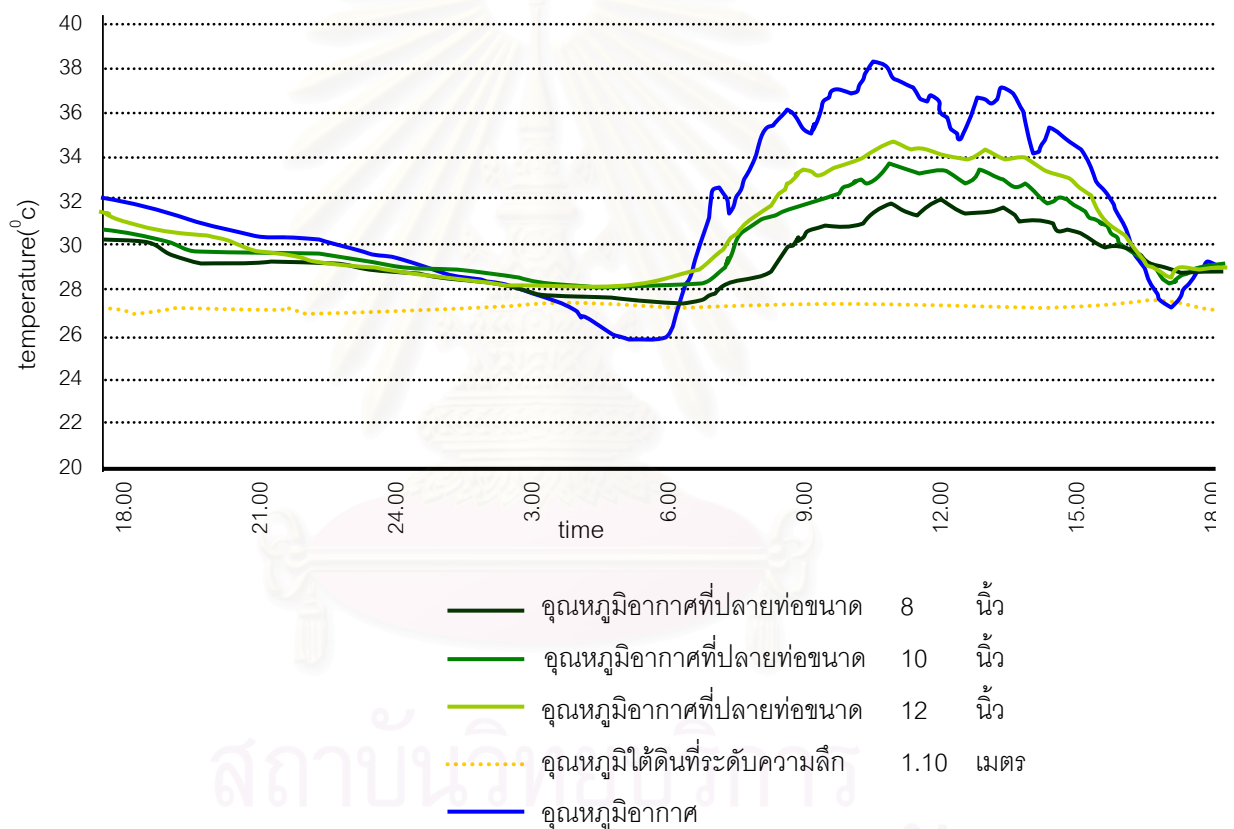
กำหนดให้

$\sum R$ คือ ผลรวมค่าการต้านทานความร้อนของวัตถุหรือเปลือกอาคาร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2 ขบวนการสหสัมพันธ์ ของงานวิจัยท่อใต้ดินในประเทศไทย

มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำความเข้าใจเกี่ยวกับอาคารโดยใช้ท่อใต้ดิน (สุพจน์ ตวงสินทวีกุล, 2537) ซึ่งมีสถานที่ทำการทดลองที่กรุงเทพมหานคร เก็บข้อมูลในช่วงระหว่างเดือนมีนาคม ถึงเดือนเมษายน ซึ่งเป็นช่วงฤดูร้อน ในการทดลองใช้ท่อสแตนเลสหนา 0.55 มิลลิเมตร โดยมีขนาดท่อหลัก เส้นผ่านศูนย์กลาง 12 นิ้ว 10 นิ้ว และ 8 นิ้ว ตามลำดับ พร้อมทั้งติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิ้ลเพื่อวัดอุณหภูมิอากาศภายในท่อตลอดความยาว โดยใช้พัดลมเป็นตัวดูดอากาศให้เคลื่อนที่ และทำการวัดอุณหภูมิ พร้อมบันทึกข้อมูลตลอดเวลา



แผนภูมิ 9 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศที่ปลายท่อที่มีขนาดแตกต่างกัน

จากผลการทดลอง พบว่าในช่วงเวลากลางวันท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 นิ้ว สามารถลดอุณหภูมิอากาศที่ผ่านได้ดีกว่าท่อขนาด 10 นิ้ว และ 8 นิ้ว ตามลำดับ โดยอากาศที่ผ่านเข้าท่อมี

อุณหภูมิลดลงในเวลากลางวัน และอากาศที่ผ่านเข้าห้องมีอุณหภูมิสูงขึ้นในเวลากลางคืน อุณหภูมิที่ลดลงและเพิ่มขึ้นนี้ได้ผ่านขบวนการสหสัมพันธ์ (regression) เพื่อหาความสัมพันธ์กับตัวแปรอื่นๆ เช่น อุณหภูมิอากาศ อุณหภูมิพื้น ความเร็วลมในท่อ และขนาดของท่อ ได้สมการดังนี้

$$HE = -1.873 + 0.295 (OS) + 0.019(A) + 0.002(V)$$

OS = ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศกับอุณหภูมิพื้น ($^{\circ}\text{C}$)

A = พื้นที่ผิวท่อที่อากาศสัมผัส (ตารางฟุต)

V = ความเร็วลมในท่อ (ฟุตต่อนาที)

HE = อุณหภูมิที่ลดลง (BTU/Hr)

5.3 สถานภาพของปริมาณความร้อนจากอากาศที่ผ่านระบบท่อใต้ดิน

โดยปกติทั่วไป ความร้อนเข้าสู่ตัวอาคารได้หลายหนทาง ไม่ว่าจะเป็นการนำ การพา และการแผ่รังสี สำหรับปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นจากการระบายอากาศ หรืออากาศที่ผ่านเข้ามาจากท่อใต้ดิน เข้าสู่อาคารสามารถหาปริมาณความร้อนที่ผ่านเข้ามาหรือความสามารถในการลดความร้อนของระบบได้ดังนี้

$$Q = 1.08 \times \text{CFM} \times (T_o - T_i)$$

กำหนดให้

Q = ปริมาณความร้อนที่ลดลงโดยผ่านระบบท่อใต้ดิน (BTU/Hr)

CFM = อัตราการไหลของอากาศ (ft^3/min)

$T_o - T_i$ = ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิภายนอก และภายใน ($^{\circ}\text{F}$)

1.08 = ค่าคงที่ซึ่งได้จากผลคูณระหว่างความหนาแน่นของอากาศกับ sensible heat ของอากาศ ($\text{BTU min. /ft}^3 \cdot \text{F Hr}$)

จะเห็นว่าปริมาณความร้อน ที่เข้ามาภายในอาคารจากระบบระบายอากาศ จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับการระบายอากาศ ลักษณะการใช้งาน และจำนวนผู้อยู่อาศัย ส่วนความแตกต่างของอุณหภูมิภายนอกและภายในนั้น ถ้าสามารถทำให้อุณหภูมิภายนอกลดต่ำลง ปริมาณ

ความร้อนที่เข้าสู่ภายในอาคารก็จะต่ำลงตามสัดส่วนความแตกต่างอุณหภูมิที่ลดลงจึงมีผลทำให้ภาระการปรับอากาศลดลง

- การคำนวณ cooling load

Givoni (1994) เขียนไว้ว่า “ ในการทดลองของ Princeton Energy Group ที่เมือง Trenton รัฐ New Jersey โดยใช้ท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.38 เมตร ยาว 24.4 เมตร ที่ระดับความลึก 1.2 เมตร ด้วยปริมาณลมที่ 680 m³/Hr เป็นเวลา 3 เดือนของฤดูร้อน(เดือน มิถุนายน-เดือนสิงหาคม) โดยมีอุณหภูมิดินที่ 10⁰C “จากนั้นทำการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ ด้วยวิธี Regression แล้วทำให้ได้สูตรในการคำนวณ expected cooling ดังนี้

$$\text{expected cooling(kwh)} = (0.8 * F) + (2.54 * D) + (16.1 * L) + (28.5 * C) + (0.92 * HC)$$

กำหนดให้

F = ปริมาณอากาศ(ลบ.ม./ชม.)

D = เส้นผ่าศูนย์กลางท่อ(ชม.)

L = ความยาวท่อ(เมตร)

C = ค่า conductivity ของดิน(วัตต์/ตร.ม.⁰C)

HC = heat capacity ของดิน(วัตต์.ชม./ลบ.ม.⁰C)

และ Givoni ได้ให้สูตรในการคำนวณประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของ earth tube ไว้ดังนี้

$$E = \frac{(\text{Inlet temp.}) - (\text{Outlet temp.})}{(\text{Inlet temp.}) - (\text{Undisturbed soil temp.})}$$

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการ

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลอง ซึ่งการศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่ออุณหภูมิภายในอาคาร เพื่อใช้ประโยชน์จากระบบท่อใต้ดินนั้น จำเป็นต้องทำการศึกษาถึงข้อมูลเบื้องต้นที่เป็นพื้นฐานในการวิจัย ทั้งจากข้อมูลปฐมภูมิและข้อมูลทุติยภูมิ โดยทำการค้นคว้าจากเอกสารอ้างอิง และทำการศึกษาทดลองนำร่อง ที่เกี่ยวเนื่องกับระบบท่อใต้ดิน แล้วจากนั้นจึงนำมาเป็นข้อมูลพื้นฐานในการทดลองต่อไป ซึ่งขั้นตอนในการทดลอง จะสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

1. ขั้นตอนเตรียมการทดลอง

เป็นขั้นตอนในการศึกษาถึงความพร้อมทางด้านสถานที่ วัสดุอุปกรณ์ของท่อใต้ดิน ตลอดจนข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับเครื่องมือในการวัดผลการวิจัย ในเบื้องต้นก่อนทำการวางท่อใต้ดิน

2. ขั้นตอนการออกแบบและติดตั้งระบบ

ขั้นตอนนี้จะรวมถึงการออกแบบที่ใช้ข้อมูลเบื้องต้นจากขั้นตอนเตรียมการทดลอง และขั้นตอนการวางระบบ ตั้งแต่การรังวัดบริเวณฝังท่อไปจนถึงขั้นตอนการเก็บงานขั้นสุดท้ายของการวางระบบท่อใต้ดิน

3. ขั้นตอนการวัดผล

ขั้นตอนนี้จะกล่าวถึงการวางตำแหน่งเครื่องมือในการวัดผลการทดลอง และรายละเอียดปลีกย่อยถึงระยะเวลาในการวัดผลการทดลอง ตลอดจนกำหนดความเร็วลมที่มาจากสมมุติฐานการวิจัย

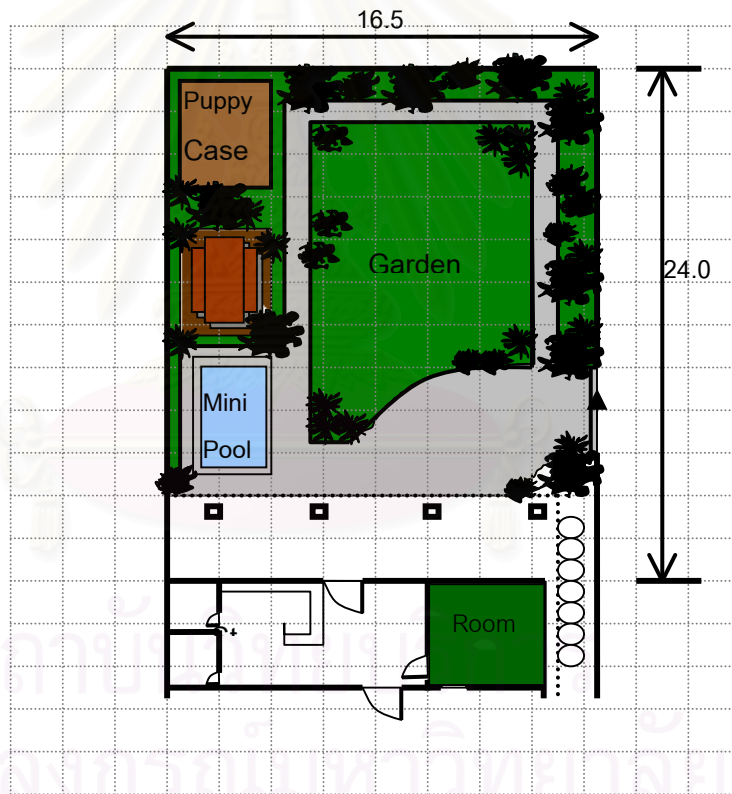
โดยขั้นตอนการติดตั้งระบบและขั้นตอนการวัดผลการทดลอง จะอยู่ในช่วงเดือน พฤษภาคม จนถึงเดือนมิถุนายนซึ่งมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดในรอบปี เพื่อเป็นการทดสอบถึงประสิทธิภาพสูงสุดของการทำความเย็นด้วยระบบท่อใต้ดิน ให้กับอาคาร ในสภาพอากาศแบบร้อนชื้น

1. ขั้นตอนการเตรียมการทดลอง

เป็นขั้นตอนในการศึกษาถึงความพร้อมทางด้านสถานที่ วัสดุอุปกรณ์ของท่อใต้ดิน ตลอดจน ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับเครื่องมือในการวัดผลการวิจัย ในเบื้องต้นก่อนทำการวางท่อใต้ดิน

- ศึกษาสถานที่ทำการทดลอง

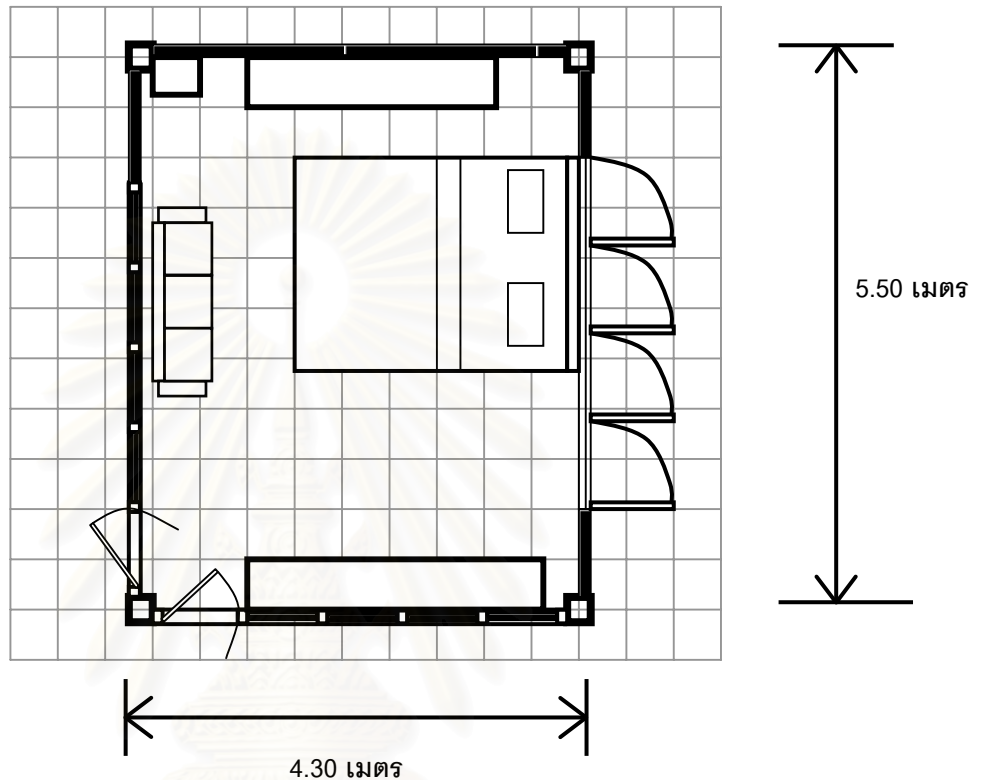
ตำแหน่งสถานที่ทำการทดลองอยู่ที่ บ้านเลขที่ 555 หมู่ 1 ตำบล นายางกลัก อำเภอ เทพสถิต จังหวัด ชัยภูมิ โดยลักษณะภูมิประเทศส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ราบสูงและมีภูเขาล้อมรอบ การใช้งานพื้นที่โดยรอบ ส่วนมากเป็นการใช้พื้นที่เพื่อการเกษตรกรรม และเพื่อพักอาศัย โดยอาคารที่ทำการทดลอง เป็นบ้านพักอาศัยของ นายอนันต์ ลิ้มคุปตดาวร พื้นที่อาคารและบริเวณรอบ ๆ อาคารขนาด 44x 16.50 เมตร คิดเป็นพื้นที่ 726 ตารางเมตร แบ่งเป็นพื้นที่อาคาร 330 ตารางเมตร พื้นที่ว่าง 396 ตารางเมตร



ภาพ 3-1 รูปผังบริเวณอาคารที่ทำการทดลอง

โดยการทดลองนี้ จะใช้บริเวณที่ว่าง 396 ตารางเมตร เพื่อเป็นสถานที่ฝังท่อใต้ดิน สำหรับการทำความเย็นให้กับห้องนั่งเล่น ที่มีขนาด 4.3x5.50 เมตร (24 ตารางเมตร) ซึ่งกิจกรรมหลักของห้องนั่งเล่นจะสามารถแบ่งได้เป็น 2 ช่วงเวลาคือ เวลากลางวันจะใช้เพื่อนั่งเล่นและชมรายการโทรทัศน์ มีผู้มาใช้ประจำ

ในเวลากลางวัน สูงสุดจำนวน 5 คน และใช้ชั้นนอนพักผ่อนในเวลากลางคืน 1 คน ภายในห้องจะประกอบไปด้วย ชุดเก้าอี้รับแขก ตู้โชว์ เติียง และตู้โทรทัศน์



ภาพ 3-2 รูปผังห้องนั่งเล่น

ห้องทำการทดลอง(ห้องนั่งเล่น) มีผนัง 3 ด้านที่ติดกับส่วนภายในอาคาร ส่วนผนังทิศตะวันออกติดกับอากาศภายนอกอาคารมีช่องแสงขนาด 2.40X1.00 เมตร สูงจากพื้น 90 เซนติเมตร ระยะจากพื้นถึงฝ้า 2.73 เซนติเมตร ซึ่งรวมปริมาตรห้องทำการทดลองได้ 63.8 ลูกบาศก์เมตร

- วัสดุก่อสร้างห้องทำการทดลอง

วัสดุก่อสร้างห้องทดลองจะมีส่วนสำคัญในการหาค่าภาระการปรับอากาศ (cooling load) ของระบบทำความเย็นโดยท่อใต้ดิน เพื่อเป็นการตัดตัวแปรอื่นและเป็นข้อพิจารณาในการเลือกใช้วิธีในการปรับปรุงอาคาร เพื่อปรับลดความร้อนภายในอาคาร จึงจำเป็นต้องหาค่าคุณสมบัติเฉพาะของวัสดุดังนี้

1. พื้น คสล. หนา 10 เซนติเมตร ปูกระเบื้อง 0.5 เซนติเมตร ติดกับพื้นดินทั้งระนาบ
2. ผนังจะประกอบไปด้วยวัสดุต่าง ๆ กันดังนี้

2.1 ผนังก่ออิฐฉาบปูนหนา 10 เซนติเมตร



No.	construction	R
1	outside surface (moving air)	0.044
2	ปูนฉาบหนา 0.01 เมตร	0.007
3	อิฐมอญหนา 0.75 เมตร	0.124
4	ปูนฉาบหนา 0.01 เมตร	0.007
5	inside surface (still air)	0.12
total		0.302

$$U = 1/R$$

$$U = 3.311$$

2.2 กระจกใสหนา 6 มิลลิเมตร



No.	construction	R
1	outside surface (moving air)	0.044
2	กระจกใสหนา 6 มิลลิเมตร	0.0057
3	inside surface (still air)	0.12
total		0.1697

$$U = 1/R$$

$$U = 5.89$$

2.3 กระจกสีชาหนา 8 มิลลิเมตร



No.	construction	R
1	outside surface (moving air)	0.044
2	กระจกสีชาหนา 8 มิลลิเมตร	0.0075
3	inside surface (still air)	0.12
total		0.171

$$U = 1/R$$

$$U = 5.84$$

3. หลังคากระเบื้องลอนคู่ และช่องว่างอากาศ และฝ้ายิปซัม 9 มิลลิเมตร



No.	construction	R
1	outside surface (moving air)	0.055
2	กระเบื้องลอนคู่	0.014
3	ช่องว่างอากาศ	0.83
4	ฝ้ายิปซัม	0.063
5	inside surface (still air)	0.148
total		1.11

$$U = 1/R$$

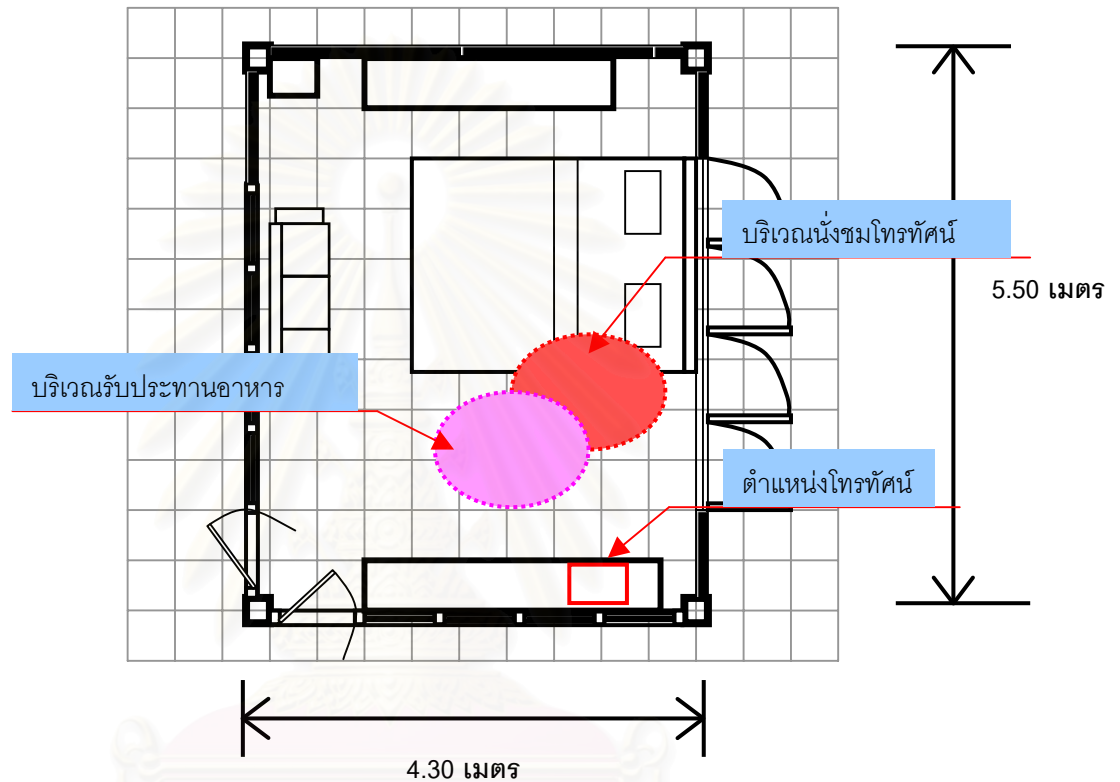
$$U = 0.9$$

สรุปค่าคุณสมบัติวัสดุ ที่ใช้ก่อสร้างห้องทดลอง

No.	Wall type	R	U-value (W/Sq.m)	พื้นที่ (Sq.m)
1	ผนังก่ออิฐฉาบปูน	0.302	3.311	24.34
2	กระจกใสหนา 6 มิลลิเมตร	0.1697	5.89	2.4
3	กระจกสีชาหนา 8 มิลลิเมตร	0.171	5.84	26.74
4	หลังคากระเบื้อง	1.11	0.9	24

- ขนาดและตำแหน่งการใช้งานของห้องทดลอง

ห้องที่ใช้ในการทดลองมีขนาด 24 ตารางเมตร ซึ่งกิจกรรมหลักๆ ของห้องนี้ใช้เพื่อการพักผ่อนและชมรายการโทรทัศน์ โดยรายละเอียดของผังมีดังต่อไปนี้



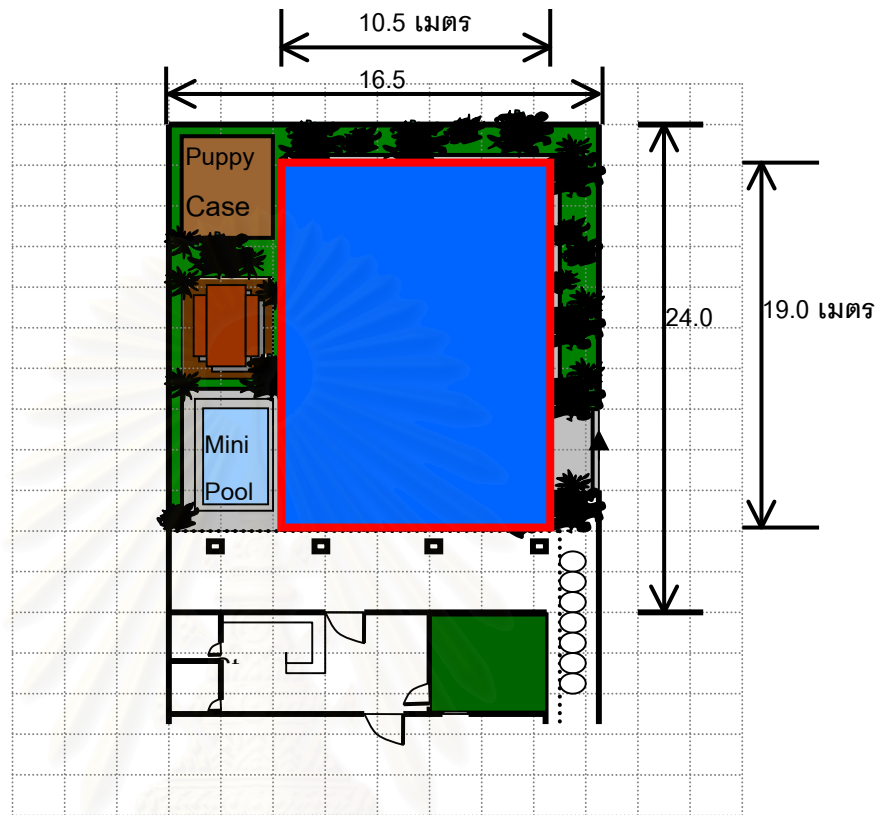
ภาพ 3-3 รูปผังห้องที่ทำการทดลอง

ตำแหน่งและระยะในการนั่งจะอยู่ห่างจากตู้วางโทรทัศน์ เป็นระยะ 2.00-3.00 เมตร ก่อให้เกิดตำแหน่งเตียงนอน ส่วนพฤติกรรมการนั่งดูโทรทัศน์ก็จะนั่งกับพื้นกระบือองและนั่งดูบนเตียงนอน หรือบางครั้งก็นำอาหารมานั่งรับประทานในส่วนนั้นด้วย ในบริเวณนั้นจึงมีความเหมาะสมที่จะติดตั้งตำแหน่งที่อลมเข้าเพื่อลดอุณหภูมิของห้อง

- พื้นที่สำหรับระบบท่อใต้ดิน

พื้นที่ส่วนบริเวณสวนหลังบ้าน ที่ติดกับห้องที่ทำการทดลองเป็นบริเวณที่จะใช้ในการวางระบบท่อใต้ดินเข้ามาสู่ห้อง มีขนาดพื้นที่ 16.5 x 24.0 ตารางเมตร(396 ตารางเมตร) โดยเป็นพื้นที่ใช้ประโยชน์ในการทำเป็นคอกสุนัข 16 ตารางเมตร ศาลานั่งพัก 16 ตารางเมตร และใช้เป็นบ่อเลี้ยง

ปลา 24 ตารางเมตร พื้นที่บริเวณโดยรอบเป็นต้นไม้ขนาดปานกลางทรงพุ่มใช้พื้นที่ทั้งหมดเป็น 80 ตารางเมตร รวมเป็นพื้นที่ใช้งาน 136 ตารางเมตร



ภาพ 3-4 แสดงพื้นที่สำหรับวางระบบท่อใต้ดิน

ดังนั้นจึงเหลือพื้นที่สำหรับวางระบบท่อใต้ดิน เป็นพื้นที่ 260 ตารางเมตร ซึ่งเป็นพีชคลุมดิน และปลูกพืชผักสวนครัว ลักษณะดินทั่วทั้งบริเวณเป็นดินเหนียวปนทราย มีสีแดงปนเหลือง มีความสามารถในการระบายน้ำต่ำ ส่งผลให้ดินมีความชื้นสูง ซึ่งดินมีสีที่เข้มจะมีความสามารถในการดูดซับรังสีได้มากอีกด้วย

- อุปกรณ์ท่อใต้ดิน

ในการพิจารณาเลือกใช้วัสดุที่จะนำมาใช้กับระบบท่อใต้ดินมีหลักดังนี้

1. คุณสมบัติของการไหล

ปกติการไหลของของไหล ในท่อมักจะเป็นการไหลแบบอยู่ตัว หมายถึง การไหลที่มีอัตราเร็วคงที่และอยู่ตัว ปริมาณของไหลที่ไหลผ่านจุดใดจุดหนึ่งจะเท่ากับจุดอื่นๆ ในระบบดังนั้น การพิจารณาจึงเลือกท่อที่มีความเสียดทานที่ผิวในน้อย

2. แนวโน้มของการเกิดการออกซิเดชั่น หรือการผุกร่อน

การออกซิเดชั่น คือการเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน ทำให้โลหะขึ้นสนิมและเกิดการผุกร่อนได้ และโลหะบางชนิดอาจทำให้เกิดก๊าซพิษ ดังนั้นวัสดุที่จะนำมาเลือกใช้กับท่อใต้ดินจึงต้องเป็นวัสดุที่ไม่ก่อให้เกิดสนิม

3. ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

ในการพิจารณาเลือกท่อสำหรับการทดลอง ต้องการท่อที่มีสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่สูง เพื่อให้เป็นไปตามแนวคิด ในการแลกเปลี่ยนหรือถ่ายเทความร้อนของอากาศ ภายในท่อกับผิวท่อที่สัมผัสดินอยู่โดยรอบ ซึ่งอากาศจะถ่ายเทความร้อนให้กับดินโดยผ่านท่อที่มีสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูง ถ้าเลือกท่อที่มีสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ต่ำหรือเป็นวัสดุที่เป็นฉนวน อุณหภูมิภายในท่อ จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก

4. การป้องกันน้ำและความชื้น

เพื่อไม่ให้เป็นการเพิ่มความชื้นให้กับระบบท่อใต้ดิน ซึ่งจะเป็นการสร้างปัญหาในการอยู่อาศัยและการทำความเย็น จึงจำเป็นต้องเลือกวัสดุที่ไม่ยอมให้น้ำและความชื้นเข้าสู่ระบบได้ ถ้าหากส่วนประกอบใดที่ไม่สามารถป้องกันน้ำและความชื้นได้จำเป็นต้องมีการเคลือบด้วยวัสดุป้องกันความชื้นที่มีประสิทธิภาพ

5. ข้อจำกัดทางด้านเศรษฐศาสตร์

ในการเลือกใช้วัสดุกับระบบท่อใต้ดินนั้นควรจะต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายที่จะเกิดขึ้นซึ่งอาจจะทำให้ไม่คุ้มค่ากับการลงทุนเลือกใช้ระบบนี้ จึงควรมีการเปรียบเทียบค่าลงทุนกับวัสดุที่เลือกใช้กับความสามารถในการลดอุณหภูมิทั้งระบบท่อใต้ดินและระบบเครื่องปรับอากาศ

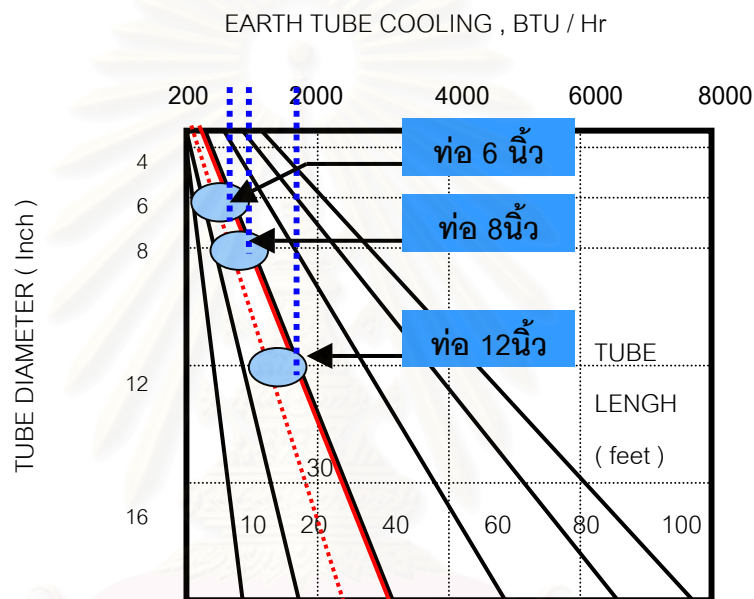
- ความยาวท่อใต้ดิน

จากงานวิจัยที่เคยได้มีการทดลองมาแล้ว แต่เป็นงานวิจัยที่ทำการทดลองและใช้งานในต่างประเทศซึ่งมีเงื่อนไข(condition) ทางด้านสภาพแวดล้อมที่ต่างกับประเทศไทย โดยสภาพอากาศแบบร้อนชื้นมีความต้องการที่จะปรับอุณหภูมิอากาศให้เย็นลงและความแตกต่างทางอุณหภูมิจากภายนอกและภายในอาคารมีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น(ประมาณ 5 องศาเซลเซียส) ในขณะที่สภาพอากาศที่ต่างประเทศที่เคยมีการทดลองนั้นล้วนเป็นสภาพอากาศที่หนาวเย็น หรือเป็นสภาพอากาศที่มีความแห้ง ซึ่งความแตกต่างของอุณหภูมิจากภายนอกและภายในอาจต่างกันถึง 10 องศาเซลเซียส

งานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้ท่อพีวีซี ที่มีความยาว 120 ฟุต(40 เมตร) เพื่อเป็นการพิสูจน์ถึง ประสิทธิภาพของระบบท่อใต้ดินตามทฤษฎีจากต่างประเทศ และความยาวที่ 30 เมตรเพื่อเป็นการเปรียบเทียบถึงประสิทธิภาพของระบบท่อใต้ดินที่สั้นลงมาในเชิงความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์อีกด้วย

- **ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง**

เปรียบเทียบคุณสมบัติของความสามารถในการทำความเย็น ตามทฤษฎีของ Stein & Reynolds ดังนี้



ภาพ 3-5 แสดงเปรียบเทียบคุณสมบัติของความสามารถในการทำความเย็นของท่อใต้ดิน

ที่มา : Stein, Reynold and McGuinness. P. 223

จากการเปรียบเทียบของขนาดท่อ 6, 8 และ 12 นิ้ว ที่ความยาวที่ 30 และ 40 เมตรจะพบว่าในแต่ละขนาด(diameter) จะมีความสามารถในการทำความเย็นที่ต่างกันดังนี้

ความยาวที่ 30 เมตร ขนาดท่อที่ 6 นิ้ว สามารถทำความเย็นได้ 550 BTU/Hr

ความยาวที่ 40 เมตร ขนาดท่อที่ 6 นิ้ว สามารถทำความเย็นได้ 700 BTU/Hr

ความยาวที่ 30 เมตร ขนาดท่อที่ 8 นิ้ว สามารถทำความเย็นได้ 900 BTU/Hr

ความยาวที่ 40 เมตร ขนาดท่อที่ 8 นิ้ว สามารถทำความเย็นได้ 1,100 BTU/Hr

ความยาวที่ 30 เมตร ขนาดท่อที่ 12 นิ้ว สามารถทำความเย็นได้ 1,400 BTU/Hr

ความยาวที่ 40 เมตร ขนาดท่อที่ 12 นิ้ว สามารถทำความเย็นได้ 1,800 BTU/Hr

จากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นได้ว่าควรพิจารณาเลือก ความยาวและขนาดท่อที่ 40 เมตร ขนาดท่อที่ 12 นิ้ว เพราะสามารถทำความเย็นได้ถึง 1,800 BTU/Hr

แต่ในความเป็นจริง ราคาของท่อตามท้องตลาด ท่อขนาด 12 นิ้ว มีราคามากกว่าท่อขนาด 8 นิ้วถึง 2 เท่าและราคาท่อขนาด 8 นิ้วมีราคาแพงกว่า ท่อขนาด 6 นิ้ว ถึง 2 เท่า เมื่อเทียบถึงความคุ้มค่าแล้วจึงเลือกท่อที่มีขนาด 6 นิ้ว ซึ่งมีความสามารถในการทำความเย็นต่ำกว่าท่อขนาด 8 นิ้ว เพียง 400 BTU/Hr

- ระบบท่อใต้ดิน(close loop & open loop)

การทดสอบประสิทธิภาพของท่อใต้ดินในการทำความเย็นได้แบ่งออกเป็นระบบย่อยๆ 2 ระบบดังนี้

1. ระบบเปิด(open loop system)

ระบบ Open loop คือ การนำอากาศจากภายนอกอาคารมาทำความเย็นด้วย ระบบท่อใต้ดิน ก่อนนำเข้าสู่อาคาร ระบบนี้เหมาะสมกับอาคารที่มีความต้องการ ventilation rate สูง



ภาพ 3-6 แสดงการใช้งานของระบบ open loop

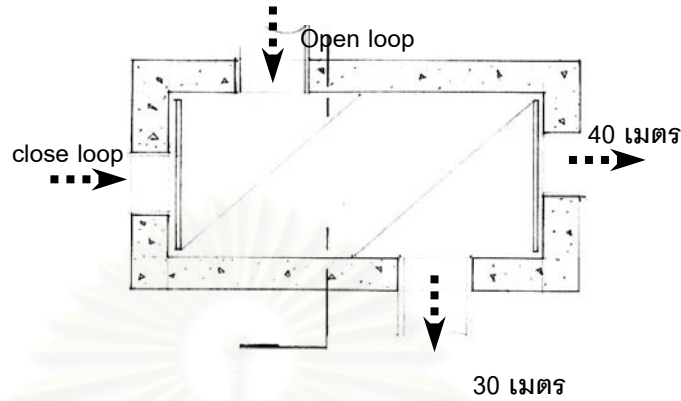
2. ระบบปิด(close loop system)

ระบบ close loop คือการนำเอาอากาศภายในอาคารซึ่งมักจะมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่า อุณหภูมิภายนอกมาผ่านระบบท่อใต้ดินเพื่อนำกลับไปสู่อาคารอีกครั้งหนึ่งเพื่อลดอุณหภูมิภายในห้อง ระบบนี้มักจะใช้กับกรณีที่อากาศภายนอกมีความรุนแรงมาก หรือเป็นอาคารที่มี ventilation rate ต่ำ



ภาพ 3-7 แสดงการใช้งานของระบบ close loop

ซึ่งในการทำการทดลองมีความจำเป็นต้องฝังท่อทั้ง 2 ระบบ ลงไปในครั้งเดียวจึงทำการ ออกแบบระบบเปิดปิดวาล์วสำหรับการเปลี่ยนระบบและปรับเปลี่ยนความยาวท่อที่ 30 และ 40 เมตร ดังนี้



ภาพ 3-8 แบบแปลนกล่องควบคุม

และวัสดุที่ใช้ในการทำกล่องควบคุมทิศทางของลมจะประกอบไปด้วย

1. กล่องควบคุม

กล่องควบคุมทำจาก คสล. หนา 0.08 เมตร หล่อขึ้นรูปแบบ โดยที่เว้นช่องว่างสำหรับต่อท่อ พีวีซี ขนาด 6 นิ้ว และเว้นที่สำหรับอุปกรณ์ควบคุมการเปิดปิดท่อ

2. วาล์วเปิดปิด

เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ปิด เปิด เพื่อเปลี่ยนทิศทางลม จำนวน 2 ชุด เป็นลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมต่อกันยาว 1.80 เมตร ส่วนปลายก้านต่อเชื่อมด้วยอุปกรณ์มือจับสำหรับจับหมุนเปิดปิดระบบ และอุปกรณ์ย่อยอื่น ๆ จะเป็นอุปกรณ์เพื่อจัดยึดตำแหน่งของวาล์ว ปิด เปิดนั้น ๆ ซึ่งอุปกรณ์ในการควบคุมทิศทางทั้งหมดจะทำมาจากสแตนเลสทุกชิ้น เพื่อป้องกันปัญหาการผุกร่อน และจะก่อกำเนิดมลพิษขึ้นในระบบ

3. วัสดุยาแนว

เนื่องจากกล่องควบคุมจะมีความจำเป็นต้องฝังอยู่ใต้ระดับดินที่มีความลึก 2.00 เมตร ซึ่งอาจจะอยู่ใกล้ระดับใต้ดิน และวัสดุของกล่องควบคุมทำจาก คสล. ไม่สามารถป้องกันน้ำและความชื้น จึงต้องมีการออกแบบหรือวิธีแก้ไขที่จะป้องกันให้กับระบบได้ และส่วนประกอบของกล่องควบคุมประกอบไปด้วยตัวกล่องและฝาปิด รอยต่อจะยาแนวด้วยซิลิโคน ทั่วบริเวณรอยต่อ ส่วนผิวสัมผัสรอบๆ กล่องที่สัมผัสกับดินจะเคลือบด้วยวัสดุเคลือบ Flintkote ทั้ง 6 ด้าน จากนั้นจึงหุ้มด้วยผ้าใบอีกครั้งเพื่อความแน่นอน

อุปกรณ์อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

1. วัสดุฉนวน

ส่วนท่อที่ต่อขึ้นมาจากใต้ดินเพื่อต่อเข้าห้องนั้นจะมีส่วนที่ต่อขึ้นบนพื้นดินสัมผัสอากาศ เพื่อเป็นการป้องกันความร้อนจากอากาศที่จะส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิภายในท่อ จึงต้องมีการหุ้มวัสดุฉนวน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้เป็นฉนวนใยแก้วขนาดความหนา 3 นิ้ว มีค่าความต้านทาน 14 แล้วก่อปิดทั้งหมดด้วยอิฐมวลเบาเพื่อความสวยงาม และยังเป็น การลดความร้อนอีกทางหนึ่งด้วย

2. พัดลมดูดอากาศ

เนื่องจากความเร็วลมที่คงที่将有ส่วนสำคัญต่อการทดลองมาก จึงได้มีการจัดเตรียมพัดลมและอุปกรณ์ปรับความเร็วลม เพื่อหาความสัมพันธ์ของความเร็วลมและปริมาณการแลกเปลี่ยนอากาศ (air exchange) ภายในท่อกับอุณหภูมิใต้ดิน ซึ่งพัดลมจะติดตั้งในตำแหน่งทางออกของท่อเพื่อดูดอากาศโดยที่ความเร็วลมแต่ละระดับจะมีความสอดคล้องกับความสามารถในการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิและปริมาณอากาศที่เหมาะสมกับการใช้งานของผู้อยู่อาศัย จึงต้องมีอุปกรณ์ปรับระดับ (dimmer)

โดยปกติภายในห้องที่ใช้ในการทดลองมีปริมาณผู้ใช้สอยทั้งหมด 5 คน ซึ่งมาตรฐานของความเหมาะสมในการแลกเปลี่ยนอากาศอย่างฉับพลันคนละ 20 cfm และความสามารถของพัดลมดูดอากาศที่มีขายโดยทั่วไปสามารถเร่งความเร็วได้สูงสุดที่ 200 cfm



ภาพ 3-9 แสดงพัดลมดูดอากาศที่ใช้ในการทดลอง

ดังนั้นอุปกรณ์ปรับค่าความเร็วจึงแบ่งออกเป็นระยะต่าง ๆ ที่ 100, 150 และ 200 cfm ตามลำดับ



ภาพ 3-10 แสดงเครื่องปรับการจ่ายกำลังไฟฟ้า

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เครื่องมือวัดผลการทดลอง

- เครื่องวัดอุณหภูมิ stowaway logger
เครื่องเก็บข้อมูลอัตโนมัติ (data logger)
stowaway temperature logger



ภาพ 3-11 เครื่องวัดอุณหภูมิ stowaway logger

เป็นเครื่องเก็บข้อมูลความอุณหภูมิได้อัตโนมัติ หน่วยที่ได้จากการบันทึกและประมวลผลโดยซอฟต์แวร์เป็นได้ทั้ง องศาเซลเซียส และองศาฟาเรนไฮต์ สามารถจัดเก็บข้อมูลได้ 1 ช่องสัญญาณ ต่อเครื่องบันทึกข้อมูลได้สูงสุดถึง 15,000 ข้อมูล ต่อการติดตั้ง 1 ครั้ง สามารถวัดได้แบบ off line

การวัดแบบ off line สามารถทำได้โดยการ set up เครื่องโดย run program boxcarpro version 3.1 แล้วตั้งค่าอุณหภูมิตามหน่วยที่ต้องการจะวัด และช่วงห่างของเวลาที่ต้องการจะบันทึก แล้วจึงนำไปติดตั้งตามสถานที่ต่างๆ โดยไม่ต้องต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ ขณะบันทึกข้อมูล เครื่องนี้ไม่มีจอแสดงผลระหว่างการตรวจวัดข้อมูล เมื่อบันทึกค่าในช่วงเวลาที่ต้องการเรียบร้อยแล้ว จึงนำมา off load ลงในเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ และนำค่าที่บันทึกไปใช้ใน program ประเภท spread sheet ได้ สามารถวัดค่าอุณหภูมิเป็นหน่วย องศาเซลเซียส หรือ องศาฟาเรนไฮต์ได้

- เครื่องวัดความชื้น stowaway data logger
เครื่องเก็บข้อมูลอัตโนมัติ (data logger)
stowaway humidity logger



ภาพ 3-12 เครื่องวัดความชื้น stowaway data logger

เป็นเครื่องเก็บข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ได้อัตโนมัติ หน่วยที่ได้จากการการบันทึกและประมวลผลโดยซอฟต์แวร์เป็น เปอร์เซนต์ ของความชื้นสัมพัทธ์ สามารถจัดเก็บข้อมูลได้ 1 ช่องสัญญาณต่อเครื่องบันทึกข้อมูลได้สูงสุดถึง 15,000 ข้อมูล ต่อการติดตั้ง 1 ครั้ง สามารถวัดได้แบบ off line

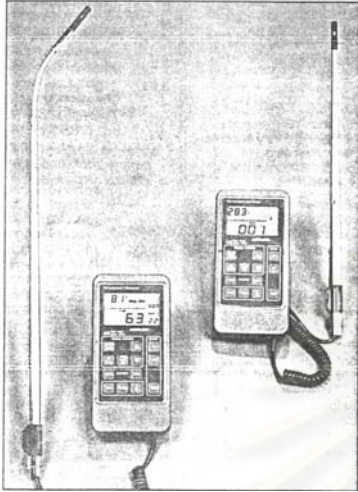
การวัดแบบ off line สามารถทำได้โดยการ set up เครื่องโดย run program boxcarpro version 3.1 แล้วตั้งค่าช่วงห่างของเวลาที่ต้องการจะบันทึก แล้วจึงนำไปติดตั้งตามสถานที่ต่าง ๆ โดยไม่ต้องต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ขณะบันทึกข้อมูล เครื่องนี้ไม่มีจอแสดงผลระหว่างการตรวจวัดข้อมูล

เมื่อบันทึกค่าในช่วงเวลาที่ต้องการเรียบร้อยแล้ว จึงนำมา off load ลงในเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์และนำค่าที่บันทึกไปใช้ใน program ประเภท spread sheet ได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เครื่องวัดค่าความเร็วลม

(AIRFLOW THERMAL ANEMOMETERS รุ่น: TA-5)



ภาพ 3-13 เครื่องวัดค่าความเร็วลม

ลักษณะทั่วไป

เครื่องวัดค่าความเร็วลมรุ่น TA-5 สามารถเลือกใช้งานได้ 2 แบบ อ่านค่าได้ตามสภาพปัจจุบัน (REAL TIME) และการเรียกค่า (RECALL) ในขณะที่อ่านสภาพปัจจุบัน (REAL TIME) จะแสดงค่าความเร็วลม อุณหภูมิทั้งสองพร้อมกัน ส่วนการเรียกกลับ (RECALL) เป็นการนำข้อมูลที่เก็บไว้ซึ่งสามารถเก็บได้เป็นจำนวนมากกลับมาอ่านอีกครั้ง

เครื่องวัดค่าความเร็วลมรุ่น TA-5 ทุกเรื่องมีระยะการวัด 3 ระยะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของเครื่องวัดความเร็วลมและสถานที่

0-2 m/s หรือ 0-400 ft/min

0-15 m/s หรือ 0-3000 ft/min

0-30 m/s หรือ 0-6000 ft/min

การวัดอุณหภูมิเป็นระยะ 0-80 หรือ 32-176 ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างวัดอุณหภูมิและสถานที่

ลักษณะและการทำงานของชุดคำสั่ง

ลักษณะชุดคำสั่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน

- ส่วนของปุ่มออกคำสั่ง
- อุปกรณ์ต่อเชื่อมรับค่าและข้อมูลต่างๆ

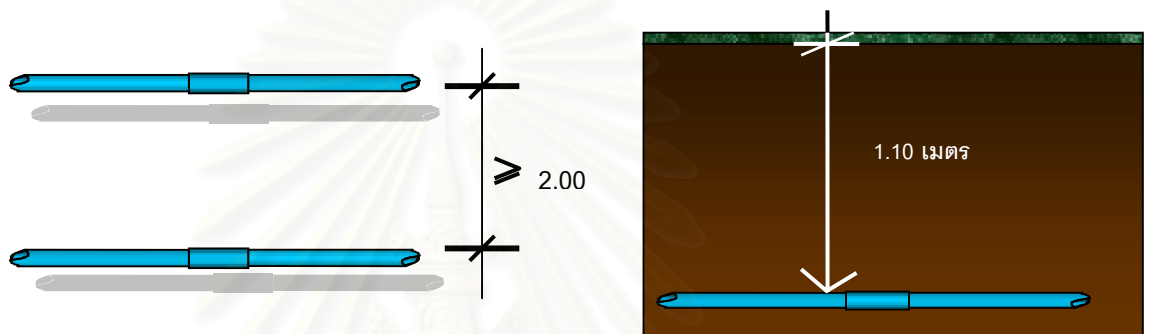
การวัดค่า m/sec เป็น mph

2. ขั้นตอนการออกแบบและติดตั้งระบบ

เป็นขั้นตอนการวางระบบซึ่งจำเป็นต้องมีการเตรียมพร้อม ทั้งทางด้านอุปกรณ์และพื้นที่ทำการทดลอง โดยออกแบบและจัดวางแผนผังต้องทำการศึกษาระเบียบต่างๆ ดังนี้

- ข้อจำกัดเบื้องต้นของระบบท่อใต้ดิน

ข้อจำกัดคือความเหมาะสมของระยะห่างระหว่างท่อใต้ดินในแต่ละแนวจะต้องมีระยะห่างอย่างน้อย 2.00 เมตร คือมีปริมาตรดินที่มีรัศมีโดยรอบ 1 เมตร ซึ่งความยาวท่อทั้งหมดมีระยะ 40 เมตร ผังพร้อมกล่องควบคุมลงบนพื้นที่ทั้งหมด 260 ตารางเมตร



ภาพ 3-14 แสดงการวางระยะระหว่างท่อและความลึกจากพื้นดิน

- จัดวางระบบท่อใต้ดินในแต่ละความยาวของแต่ละระบบ

เพื่อให้ได้มาซึ่งผลการทดลองในหลายๆ กรณี ดังนี้

- ความยาวท่อ 30 เมตร ระบบปิด close loop system
- ความยาวท่อ 30 เมตร ระบบเปิด open loop system
- ความยาวท่อ 40 เมตร ระบบปิด close loop system
- ความยาวท่อ 40 เมตร ระบบเปิด open loop system

จึงได้ทำการวางแผนผังระบบท่อใต้ดิน แบ่งพื้นที่ออกเป็นกลุ่ม (zoning) เพื่อจัดการควบคุมทิศทางกระแสลมที่กล่องควบคุมในจุดเดียว

- ตำแหน่งปลายท่อลมเข้าและออก

เป็นการจัดวางตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับปลายท่อลมเข้าและออก ให้เกิดความสัมพันธ์กับตำแหน่งของการใช้งาน และตำแหน่งของการนำอากาศที่สะอาดเข้ามาสู่อาคาร

- ท่อลมออก

คือ ส่วนปลายท่อที่ลมได้ผ่านการทำความเย็นมาจากระบบท่อใต้ดินแล้วกลับมาสู่ห้อง ซึ่งตำแหน่งนั้นควรให้ตรงกับตำแหน่งที่จะใช้งานประจำ เพราะอากาศเย็นที่มาจากท่อใต้ดินจะถูกนำมาใช้ได้โดยตรง และไม่มีผลกระทบจากปัจจัยภายนอกมากนัก จากการพิจารณาพื้นที่ใช้งานพบว่าตำแหน่งที่เหมาะสมคือ ตำแหน่งในบริเวณที่ใช้เพื่อนั่งชมโทรทัศน์และนั่งรับประทานอาหาร มีระยะสูงจากพื้น 40 เซนติเมตร โดยอาศัยแรงลมจากพัดลมดูดอากาศ

- ท่อลมเข้า

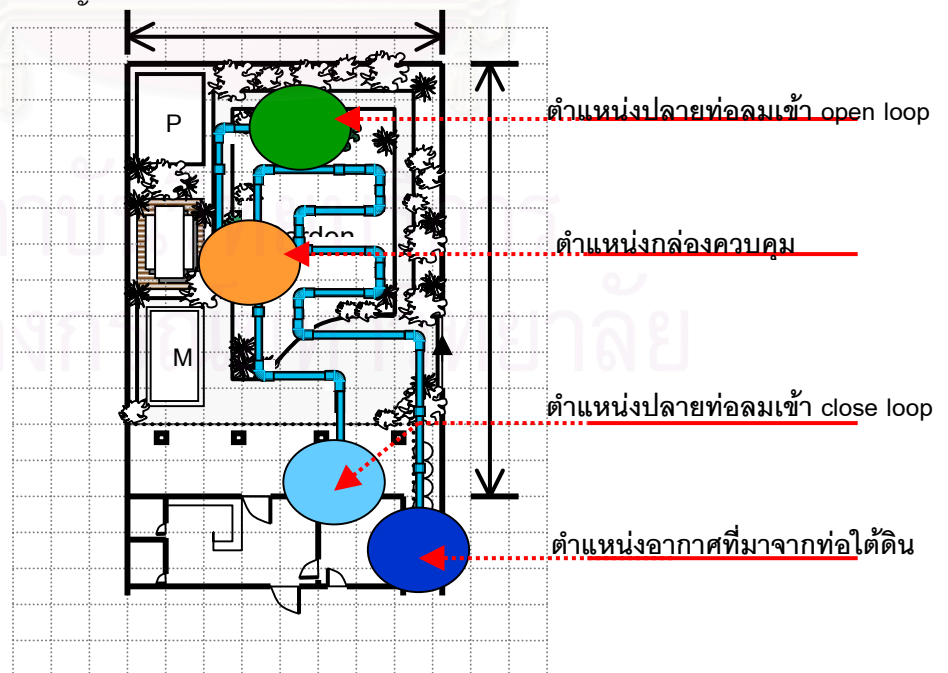
คือ ส่วนปลายท่อที่นำอากาศจากภายนอกหรือจากอาคารเริ่มผ่านเข้าสู่ท่อใต้ดินเพื่อเข้าสู่กระบวนการทำความเย็น โดยจะสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ท่อคือ

- ปลายท่อลมเข้าของระบบปิด close loop system

คือตำแหน่งปลายท่อที่ต่อจากภายในอาคาร ซึ่งตำแหน่งนี้จะออกแบบโดยอาศัยหลักการ stack ventilation อากาศที่ร้อนกว่าจะลอยตัวอยู่บน ส่วนอากาศที่เย็นก็จะตกลงสู่ด้านล่าง ดังนั้นจึงควรให้อากาศที่ร้อนกว่านำไปทำความเย็น

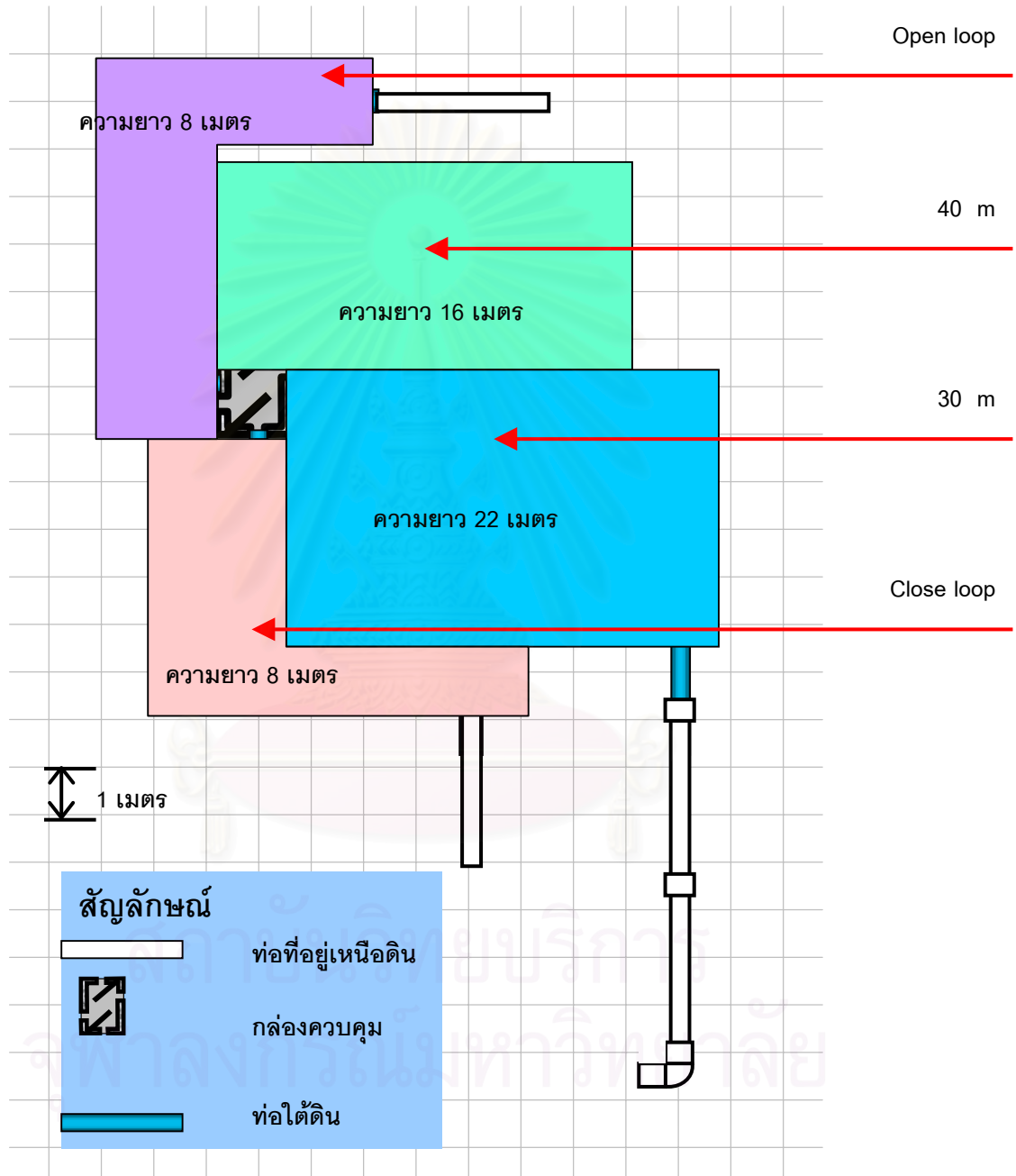
- ปลายท่อลมเข้าของระบบเปิด open loop system

คือตำแหน่งที่จะนำอากาศที่สะอาดกว่าจากภายนอกของอาคาร แล้วมาทำความเย็นผ่านท่อใต้ดินก่อนนำมาใช้ภายในอาคาร พิจารณาเลือกตำแหน่งปลายท่อให้อยู่ในบริเวณใต้ต้นไม้ใหญ่ เพราะอุณหภูมิอากาศต่ำกว่าบริเวณโดยรอบ และปริมาณออกซิเจนยังมากกว่าด้วย จากตำแหน่งต่าง ๆ ที่สำคัญทั้งหมดนี้ จึงนำมาใช้ในการออกแบบจัดวางท่อใต้ดินให้ลงตัวได้ดังนี้



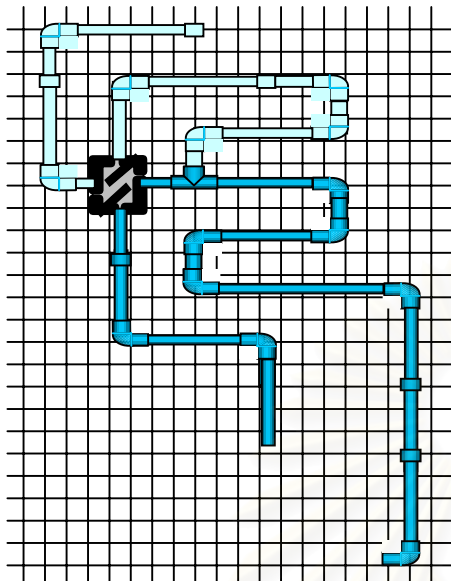
ภาพ 3-15 แสดงการออกแบบจัดวางตำแหน่งท่อใต้ดิน

ระดับความลึกในการฝังท่อใต้ดิน พิจารณาจากระดับความลึกที่มีอุณหภูมิแกว่งตัวขึ้นลงไม่มากนัก โดยตามทฤษฎีแล้วจะใช้ที่ความลึก 1.10 เมตร และสิ่งที่พึงพิจารณาคือระดับน้ำใต้ดิน ซึ่งอาจจะสร้างปัญหาให้กับระบบและการก่อสร้างได้ โดยมีระยะความยาวท่อดังต่อไปนี้

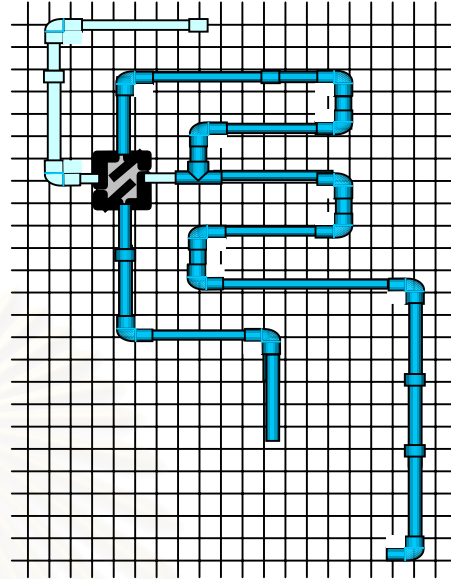


ภาพ 3-16 แสดงระยะความยาวในแต่ละระบบ

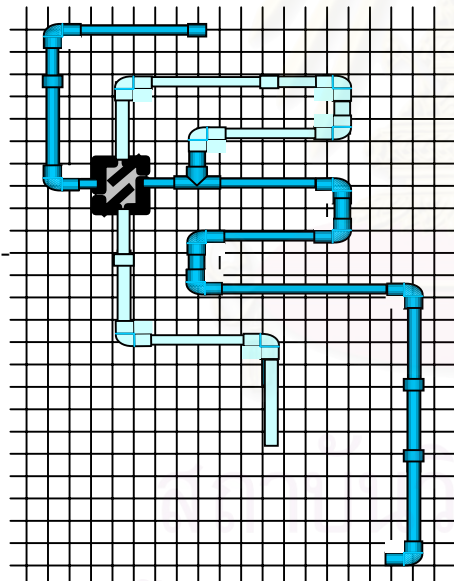
การทำงานของระบบต่างๆ



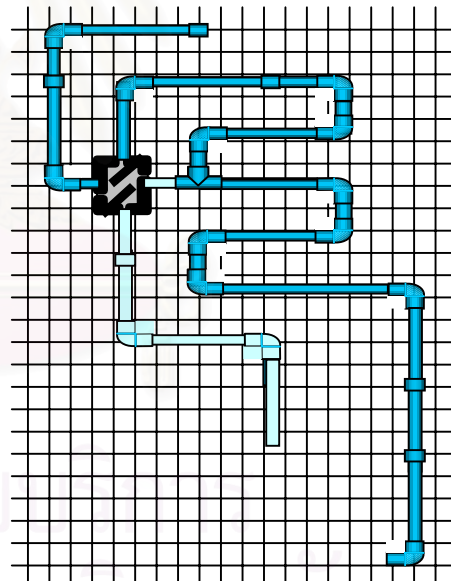
Close loop



Close loop


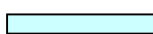


Open loop



Open loop

สัญลักษณ์

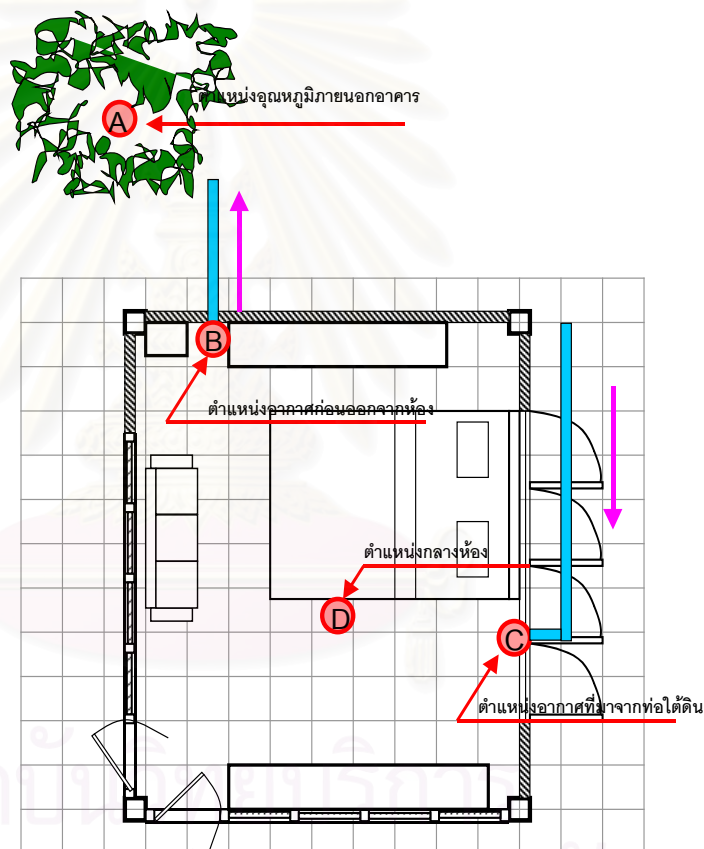
	ท่อที่มีลมผ่าน		ท่อที่ไม่มีลมผ่าน
---	----------------	---	-------------------

ภาพ 3-17 แสดงลักษณะการทำงานของท่อใต้ดิน

3. ขั้นตอนในการวัดผล

ท่อและอุปกรณ์ใต้ดินทั้งหมดถูกนำมาเตรียมไว้บริเวณรอบๆ สถานที่ก่อสร้างรวมไปถึงกล่องควบคุมกระแสทิศทางลม ที่ได้ทำการหล่อขึ้นรูปไว้แล้วทำการประกอบ จากนั้นก็เริ่มชุดแล้ววางระบบทั้งหมด สุดท้ายก็ฝังกลบใช้เวลาทั้งหมดภายใน 1 วัน เพราะเป็นการรักษาความชื้นและอุณหภูมิในดินไว้ด้วย

ขั้นตอนวัดผลเริ่มหลังจากฝังกลบคืนเป็นเวลา 7 วัน ทั้งนี้เพราะให้สภาพดินและความร้อนที่สะสมอยู่ที่ผิวภายในบ่อดินคลายความร้อน เพื่อเป็นการรักษาสมดุลของอุณหภูมิดินที่ระดับความลึกของดิน โดยการวัดผลแต่ละกรณีนั้นจะเก็บข้อมูลกรณีละ 48 ชั่วโมงที่ตำแหน่งต่างๆ ดังนี้



ภาพ 3-18 แสดงตำแหน่งที่ทำการติดตั้งเครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้น

ตำแหน่ง	A	ภายนอกอาคารบริเวณพื้นที่โล่งใต้ร่มไม้
	B	อยู่บริเวณปลายท่อลมออกจากห้อง
	C	อยู่บริเวณปลายท่อลมเข้าสู่ห้อง
	D	อยู่กึ่งกลางห้องสูง 50 เซนติเมตร

ช่วงเวลาของการเก็บวัดค่านี้อยู่ในระหว่างเดือนเมษายน – พฤษภาคม ซึ่งเป็นช่วงที่มี อุณหภูมิอากาศร้อนมากพอสมควร การวัดอุณหภูมิและความชื้นจะเก็บข้อมูลในแต่ละกรณีอย่างละ 48 ชั่วโมงและเก็บข้อมูลทุกๆ 15 นาที โดยที่ปรับความเร็วลมที่ 200 FPM หลังจากเก็บข้อมูลในแต่ละช่วงแล้วก็จะทำการพักเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วทำการเก็บข้อมูลในรอบต่อไป



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

การเก็บผลข้อมูลในงานวิจัยถึงประสิทธิภาพในการทำความเย็นของท่อใต้ดินนี้ ได้แบ่งออกเป็น 4 ช่วง คือ

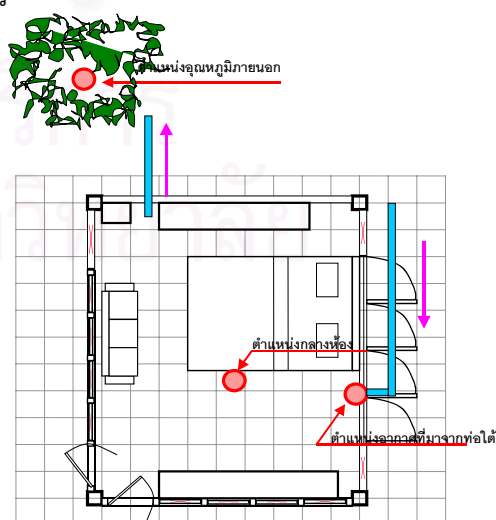
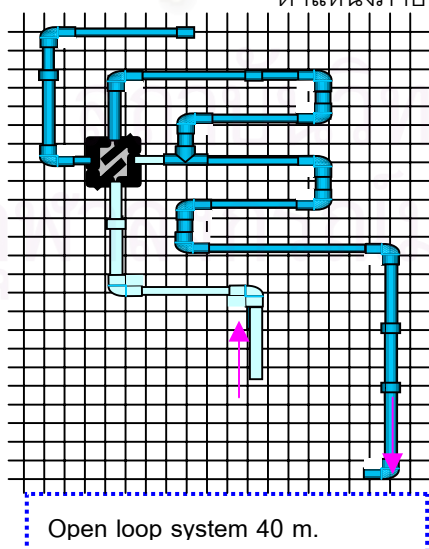
1. ระบบ open loop system ความยาว 40 เมตร
2. ระบบ close loop system ความยาว 40 เมตร
3. ระบบ close loop system ความยาว 30 เมตร
4. ระบบ open loop system ความยาว 30 เมตร

โดยแต่ละกรณีจะทำการเก็บข้อมูลเป็นเวลา 48 ชั่วโมง และพักในแต่ละช่วงเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วทำการวัดผลในกรณีต่อไป ซึ่งในแต่ละครั้งทำการบันทึกข้อมูลอุณหภูมิและความชื้น ทุกๆ 30 นาที ตลอดช่วงเวลาการเก็บข้อมูล โดยมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

- การเก็บผลการทดลอง ครั้งที่ 1

เป็นการเก็บผลดำเนินการของระบบ open loop system ความยาว 40 เมตร เริ่มตั้งแต่วันที่ 2 มิถุนายน 2545 จนถึงเวลา 12.00 น. ของวันที่ 4 มิถุนายน 2545 โดยเก็บผลข้อมูลเป็นระยะเวลาติดต่อกัน 48 ชม. ซึ่งข้อมูลที่เก็บมาได้มี 2 ประเภท คือ อุณหภูมิและความชื้น และเก็บ ณ ตำแหน่งต่างๆ ดังนี้

- บริเวณปลายท่อลมออกจากท่อมาสู่ห้อง
- บริเวณกลางห้อง
- ตำแหน่งภายนอกอาคาร

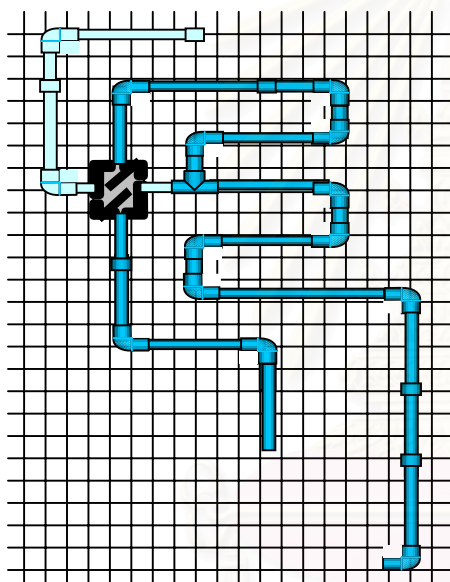


ภาพ 4-1 แสดงทิศทางลมและตำแหน่งเครื่องวัดอุณหภูมิของระบบเปิด ความยาวท่อ 40 เมตร

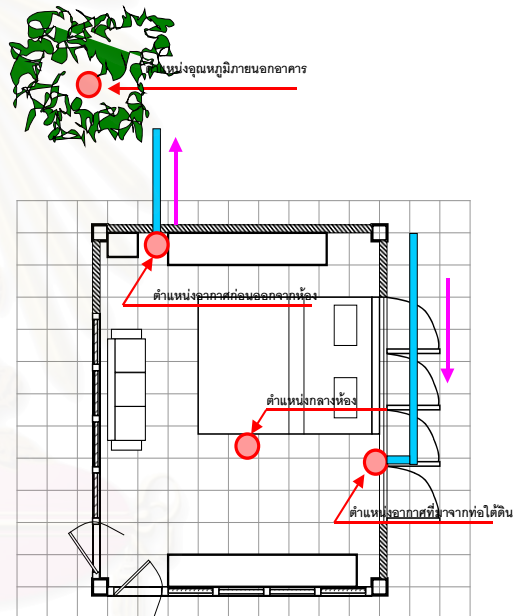
- การเก็บผลการทดลอง ครั้งที่ 2

เป็นการเก็บผลการดำเนินการของระบบ close loop system ความยาว 40 เมตร เริ่มตั้งแต่เวลา 10.00 น. ของวันที่ 5 มิถุนายน 2545 จนถึงเวลา 10.00 น. ของวันที่ 7 มิถุนายน 2545 โดยเก็บผลข้อมูลเป็นระยะติดต่อกัน 48 ชั่วโมง ซึ่งข้อมูลที่เก็บมาได้มี 2 ประเภท คือ อุณหภูมิและความชื้นและเก็บผล ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ดังนี้

- บริเวณปลายท่อลมออกจากท่อมาสู่ห้อง
- บริเวณกลางห้อง
- ตำแหน่งภายนอกอาคาร
- บริเวณปลายท่อลมออกจากห้องสู่ท่อใต้ดิน



close loop system 40 m.



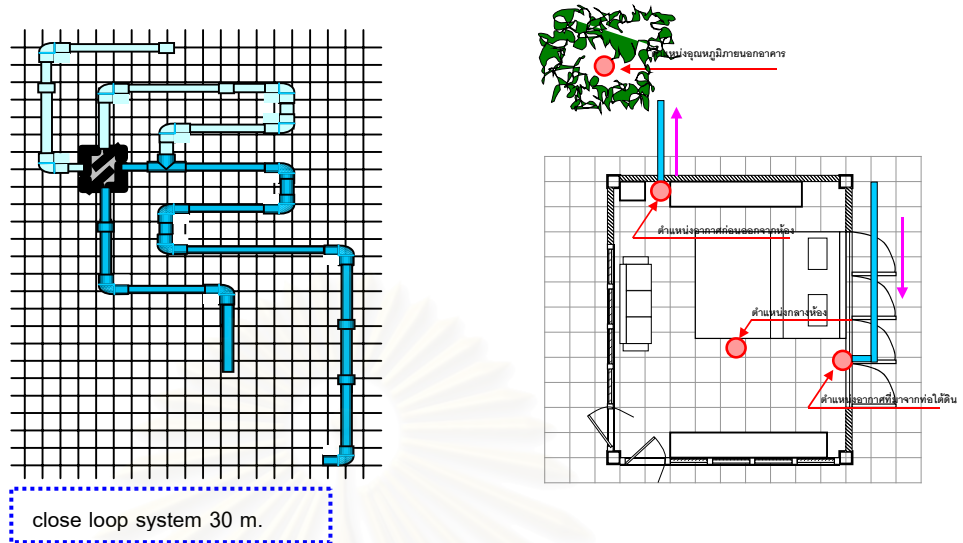
ภาพ 4-2 แสดงทิศทางลมและตำแหน่งเครื่องวัดอุณหภูมิของระบบปิด ความยาวท่อ 40 เมตร

- การเก็บผลการทดลอง ครั้งที่ 3

เป็นการเก็บผลการดำเนินการของระบบ close loop system ความยาว 30 เมตร เริ่มตั้งแต่เวลา 13.00 น. ของวันที่ 7 มิถุนายน 2545 จนถึงเวลา 13.00 น. ของวันที่ 9 มิถุนายน 2545 โดยเก็บผลข้อมูลเป็นระยะเวลาติดต่อกัน 48 ชั่วโมง ซึ่งข้อมูลที่เก็บมาได้มี 2 ประเภท คือ อุณหภูมิและความชื้น และเก็บผล ณ ตำแหน่งต่างๆ ดังนี้

- บริเวณปลายท่อลมออกจากท่อมาสู่ห้อง
- บริเวณกลางห้อง

- ตำแหน่งภายนอกอาคาร
- บริเวณปลายท่อลมออกจากห้องสู่ท่อใต้ดิน

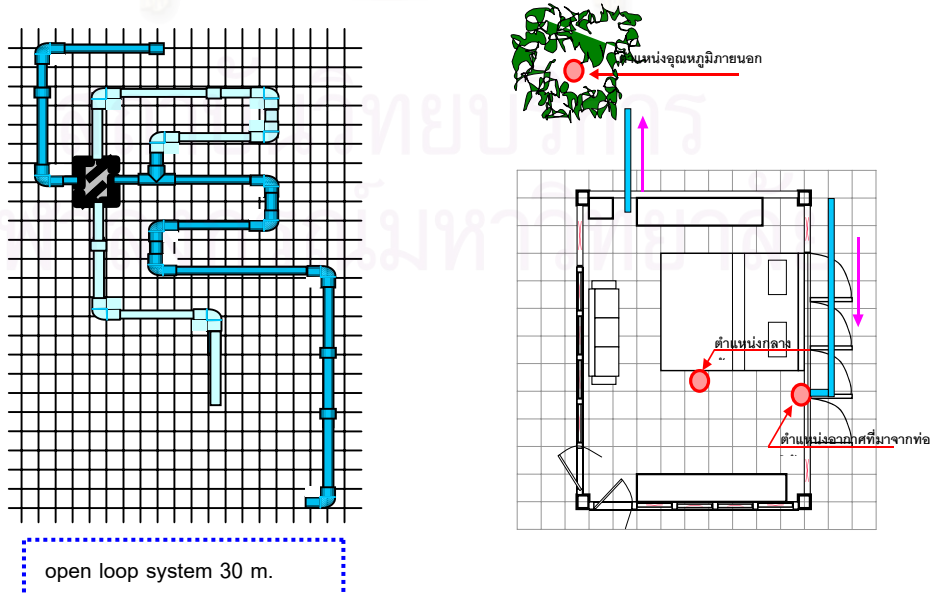


ภาพ 4-3 แสดงทิศทางลมและตำแหน่งเครื่องวัดอุณหภูมิของระบบปิด ความยาวท่อ 30 เมตร

- การเก็บผลการทดลอง ครั้งที่ 4

เป็นการเก็บผลการดำเนินการของระบบ open loop system ความยาว 30 เมตร เริ่มตั้งแต่เวลา 14.00 น. ของวันที่ 9 มิถุนายน 2545 จนถึงเวลา 14.00 น. ของวันที่ 11 มิถุนายน 2545 โดยเก็บผลข้อมูลเป็นระยะเวลาติดต่อกัน 48 ชั่วโมง ซึ่งข้อมูลที่เก็บมาได้มี 2 ประเภท คือ อุณหภูมิและความชื้น และเก็บจากตำแหน่งต่างๆ ดังนี้

- บริเวณปลายท่อลมออกจากห้องสู่ห้อง
- บริเวณกลางห้อง
- ตำแหน่งภายนอกอาคาร



ภาพ 4-4 แสดงทิศทางลมและตำแหน่งเครื่องวัดอุณหภูมิของระบบเปิด ความยาวท่อ 30 เมตร

ผลการทดลอง

- การวิเคราะห์ข้อมูลในการทดลอง ครั้งที่ 1 ระบบเปิด ความยาวท่อ 40 เมตร

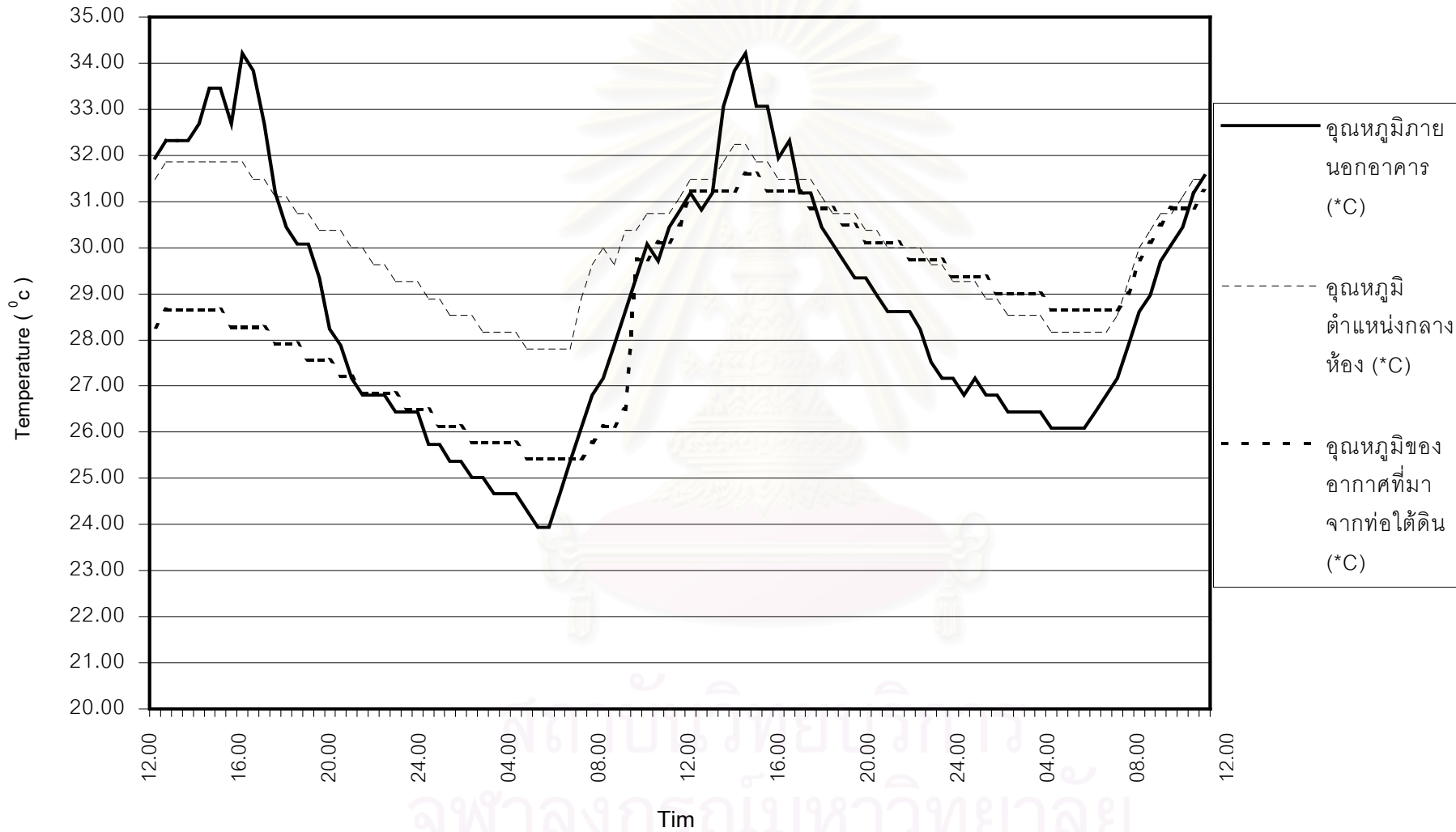
สภาพอากาศโดยทั่วไปตลอดทั้ง 2 วัน มีท้องฟ้าแจ่มใส อากาศโปร่งและร้อนมีเมฆน้อย โดยทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิและความชื้น ณ ตำแหน่งภายนอกอาคารได้อุณหภูมิสูงสุดของการทดลองที่ 36.18 องศาเซลเซียส ที่ความชื้น 44 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงเวลา 16.00 น. ของวันที่ 3 มิถุนายน 2545 ในขณะที่อุณหภูมิต่ำสุดของตำแหน่งปลายท่อลมออกจากใต้ดินมาสู่ห้องนั้นมีอุณหภูมิที่ 29.38 องศาเซลเซียส ความชื้นที่ 66 เปอร์เซ็นต์ และอุณหภูมิต่ำสุดที่วัดได้จากการทดลองอยู่ที่ 24.66 องศาเซลเซียส ที่ความชื้น 95 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงเวลา 05.30 น. ของวันที่ 4 มิถุนายน 2545 ในขณะที่อุณหภูมิต่ำสุดของตำแหน่งปลายท่อลมออกจากใต้ดินมาสู่ห้องนั้นมีอุณหภูมิที่ 26.13 องศาเซลเซียส ความชื้นที่ 80 เปอร์เซ็นต์(ดูตารางที่ 4-1 ประกอบ) ในการทดลองครั้งนี้ กำหนดให้ความเร็วลมที่ปลายท่อลมออกเป็น 200 fpm

	อุณหภูมิภายนอกสูงสุด		อุณหภูมิต่ำสุด	
	อุณหภูมิภายนอก	อุณหภูมิปลายท่อ	อุณหภูมิภายนอก	อุณหภูมิปลายท่อ
อุณหภูมิ	36.18	29.38	24.66	26.13
ความชื้น	44	66	95	80

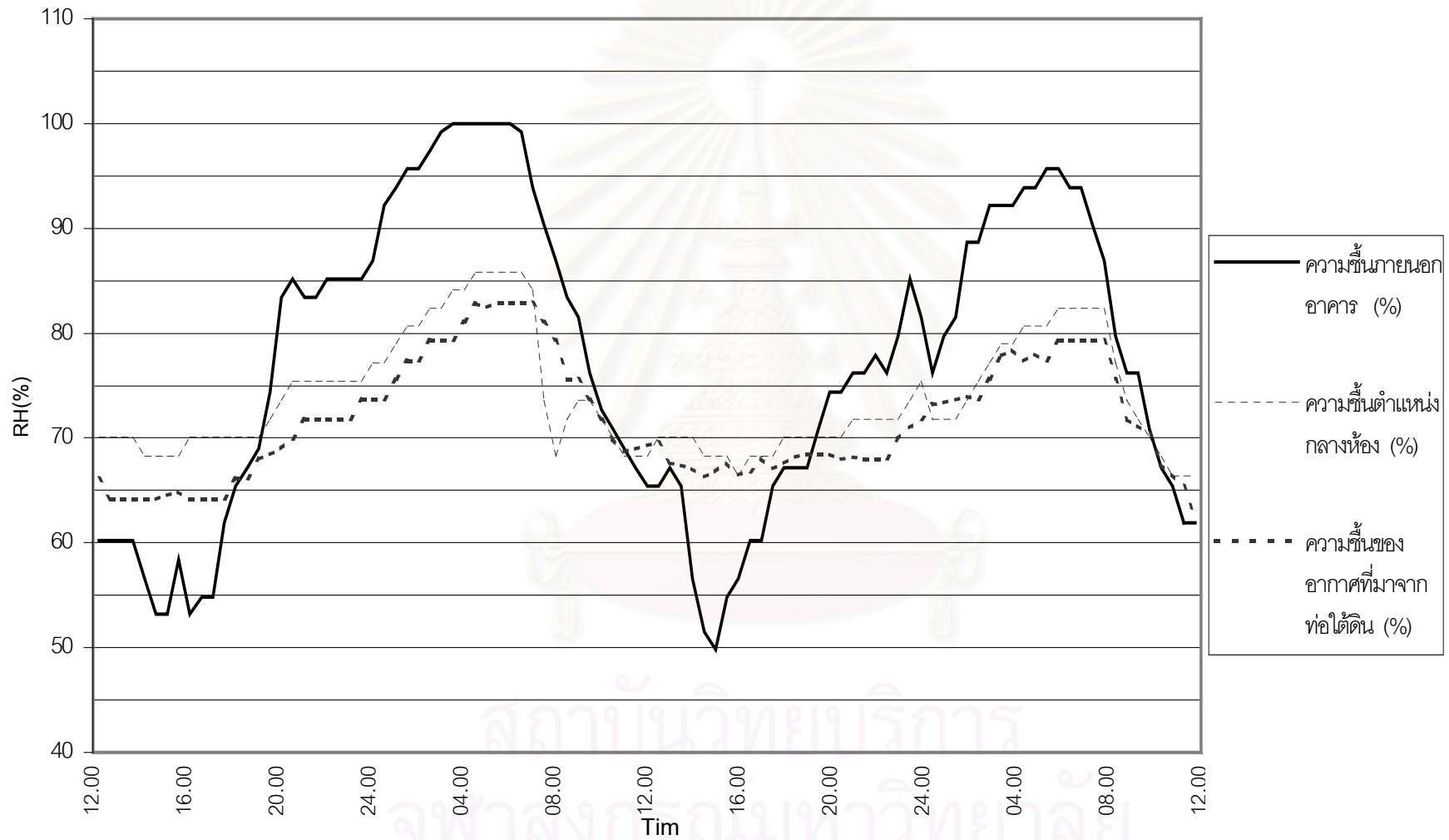
ตารางที่ 4-1 แสดงอุณหภูมิที่วัดจากท่อใต้ดินในระบบเปิด (open loop system) ความยาว 40 เมตร

จากการเก็บข้อมูลในครั้งที่ 1 สามารถสรุปได้ดังนี้

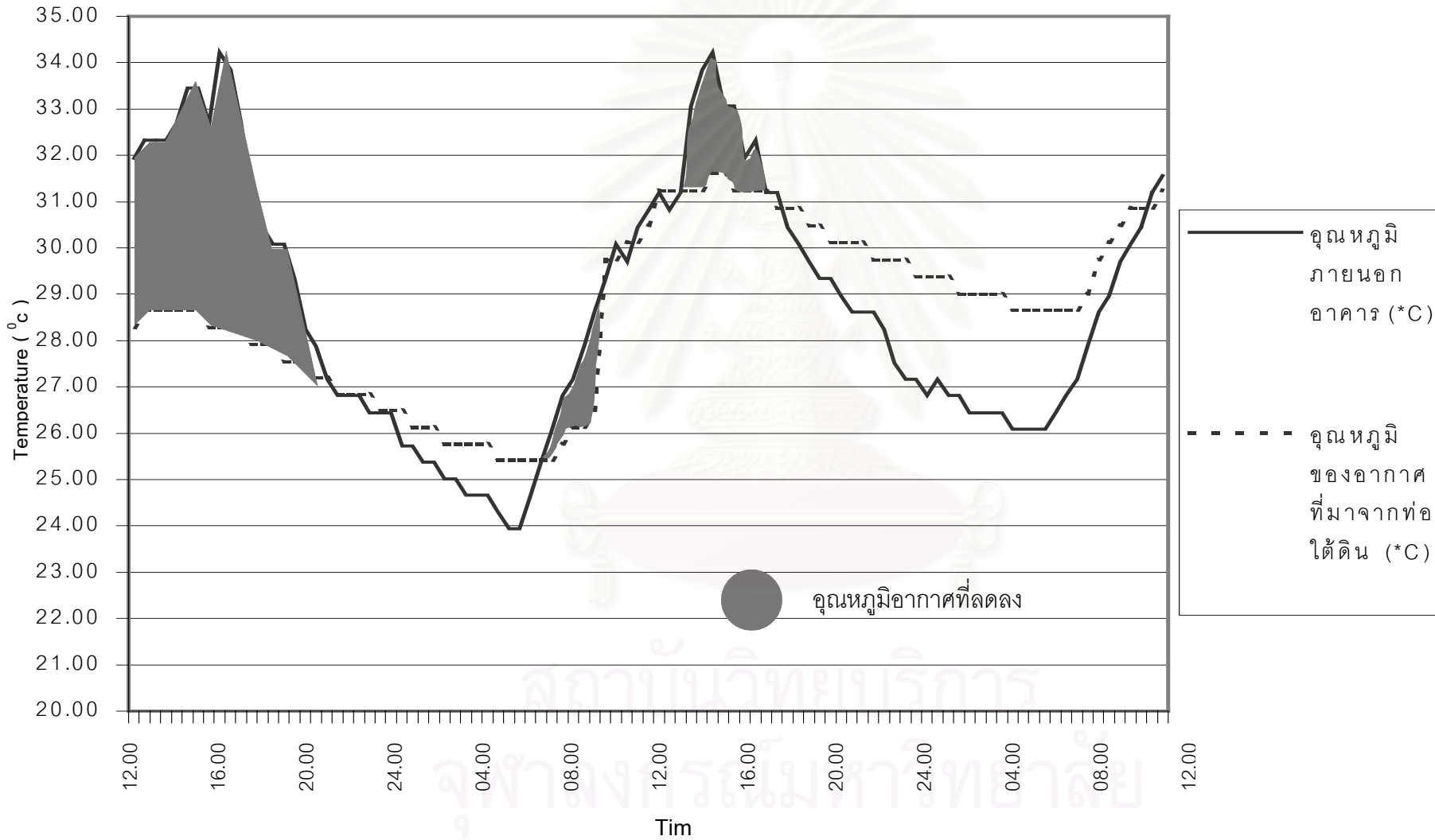
1. จากอุณหภูมิอากาศภายนอกที่มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงกลางวันและกลางคืนสูง เมื่อนำอากาศมาผ่านท่อใต้ดินในระบบเปิด ความยาว 40 เมตร สามารถปรับอุณหภูมิของอากาศที่ร้อนที่สุด 36.18 องศาเซลเซียส ลดลงเหลือ 29.38 องศาเซลเซียส เกิดส่วนต่าง 6.8 องศาเซลเซียส และปรับอุณหภูมิต่ำสุดที่ 24.66 องศาเซลเซียส ขึ้นเป็น 26.13 องศาเซลเซียส เกิดส่วนต่าง -1.47 องศาเซลเซียส (ดูแผนภูมิ 4-1 ประกอบ)
2. อากาศที่นำมาผ่านระบบท่อใต้ดินนั้นนำมาจากภายนอกอาคาร ดังนั้นจึงมีอุณหภูมิอากาศจากระบบท่อใต้ดินซึ่งไม่มีความแตกต่างจากอุณหภูมิภายนอกมากนัก
3. ความชื้นระหว่างภายในและภายนอกไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากเป็นระบบเปิด ซึ่งอากาศที่มาจากท่อใต้ดินมีการเปลี่ยนแปลงของความชื้นขึ้น-ลง ในระหว่างวันน้อยกว่า ความชื้นภายนอก (ดูแผนภูมิ 4-2 ประกอบ)
4. ในช่วงเวลาตอนกลางวันอุณหภูมิอากาศจะสูงกว่าอุณหภูมิพื้นดิน เมื่ออุณหภูมิสูงของอากาศผ่านท่อใต้ดินพบว่าอุณหภูมิที่สูงของดินจะถ่ายเทให้กับอากาศ จึงทำให้อากาศมีอุณหภูมิสูงขึ้น เมื่อผ่านท่อออกมา (ดูแผนภูมิ 4-3 ประกอบ)



แผนภูมิ 4-1 แสดงอุณหภูมิที่ได้จากการวัดผลการทดลองท่อใต้ดินระบบเปิด (open loop system) ที่ความยาวท่อ 40 เมตร



แผนภูมิ 4-2 แสดงความชื้นที่ได้จากการวัดผลการทดลองท่อใต้ดินระบบเปิด (open loop system) ที่ความยาวท่อ 40 เมตร



แผนภูมิ 4-3 แสดงเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการวัดผลการทดลองท่อใต้ดินระบบเปิด (open loop system) ที่ความยาวท่อ 40 เมตร

- การวิเคราะห์ข้อมูลในการทดลอง ครั้งที่ 2 ระบบปิด ความยาว 40 เมตร

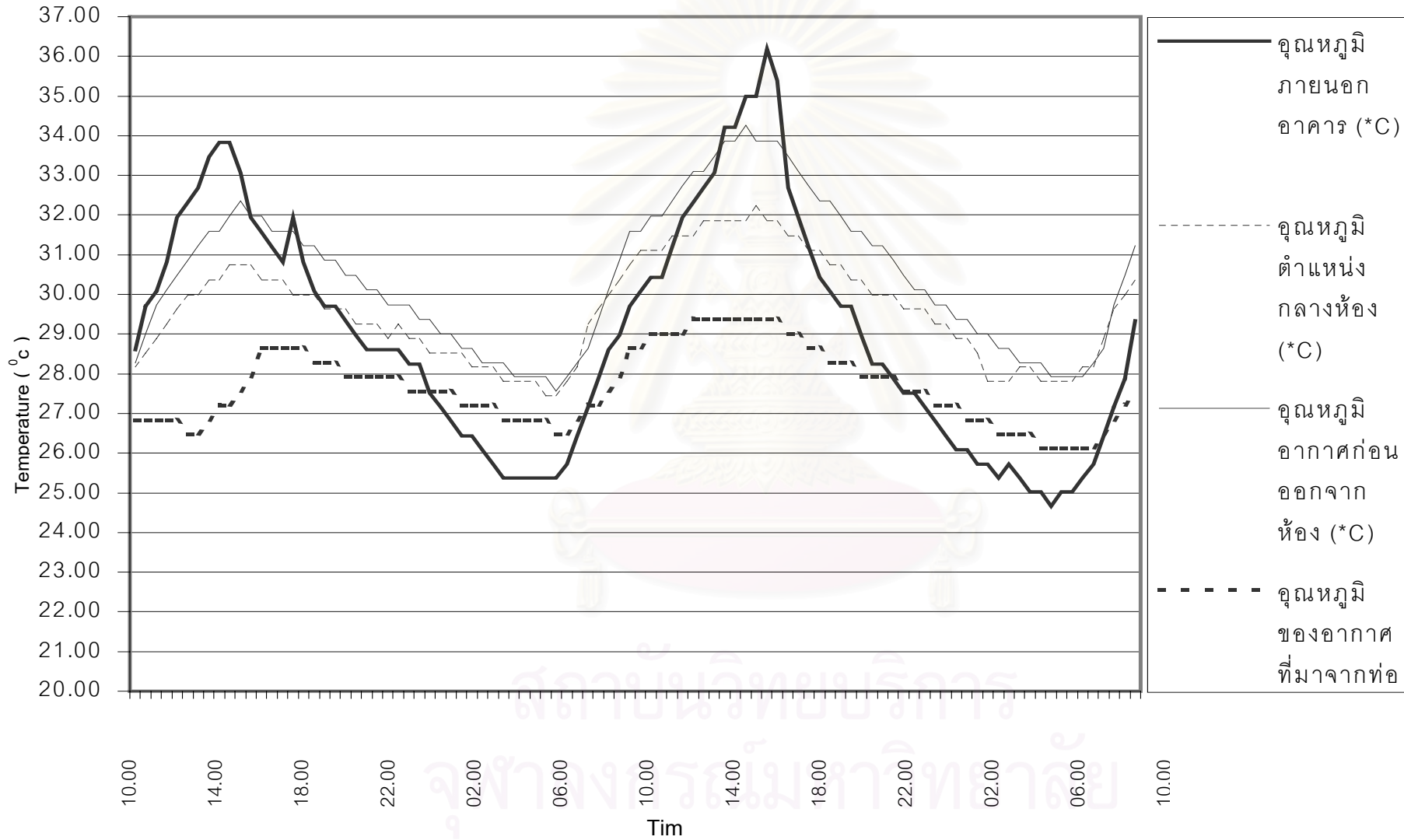
สภาพอากาศโดยทั่วไปตลอดทั้ง 2 วัน มีท้องฟ้าแจ่มใส อากาศโปร่งและร้อนมีเมฆในปริมาณปานกลาง โดยทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิและความชื้น ณ ตำแหน่งภายนอกอาคารได้ อุณหภูมิสูงสุดของการทดลองที่ 34.22 องศาเซลเซียส ที่ความชื้น 54 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงเวลา 16.00 น. ของวันที่ 5 มิถุนายน 2545 ในขณะที่อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งปลายท่อลมออกจากใต้ดินมาสู่ห้องนั้นมีอุณหภูมิที่ 28.28 องศาเซลเซียส ความชื้นที่ 64 เปอร์เซ็นต์ และอุณหภูมิต่ำสุดที่วัดได้จากการทดลองอยู่ที่ 23.94 องศาเซลเซียส ที่ความชื้น 95 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงเวลา 06.00 น. ของวันที่ 6 มิถุนายน 2545 ในขณะที่อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งปลายท่อลมออกจากใต้ดินมาสู่ห้องนั้น มีอุณหภูมิที่ 25.42 องศาเซลเซียส ความชื้นที่ 83 เปอร์เซ็นต์ (ดูตาราง 4-2 ประกอบ) ในการทดลองครั้งนี้ กำหนดให้ความเร็วลมที่ปลายท่อออกเป็น 200 fpm

	อุณหภูมิภายนอกสูงสุด		อุณหภูมิภายนอกต่ำสุด	
	อุณหภูมิภายนอก	อุณหภูมิปลายท่อ	อุณหภูมิภายนอก	อุณหภูมิปลายท่อ
อุณหภูมิ	34.22	28.28	23.94	25.42
ความชื้น	54	64	95	83

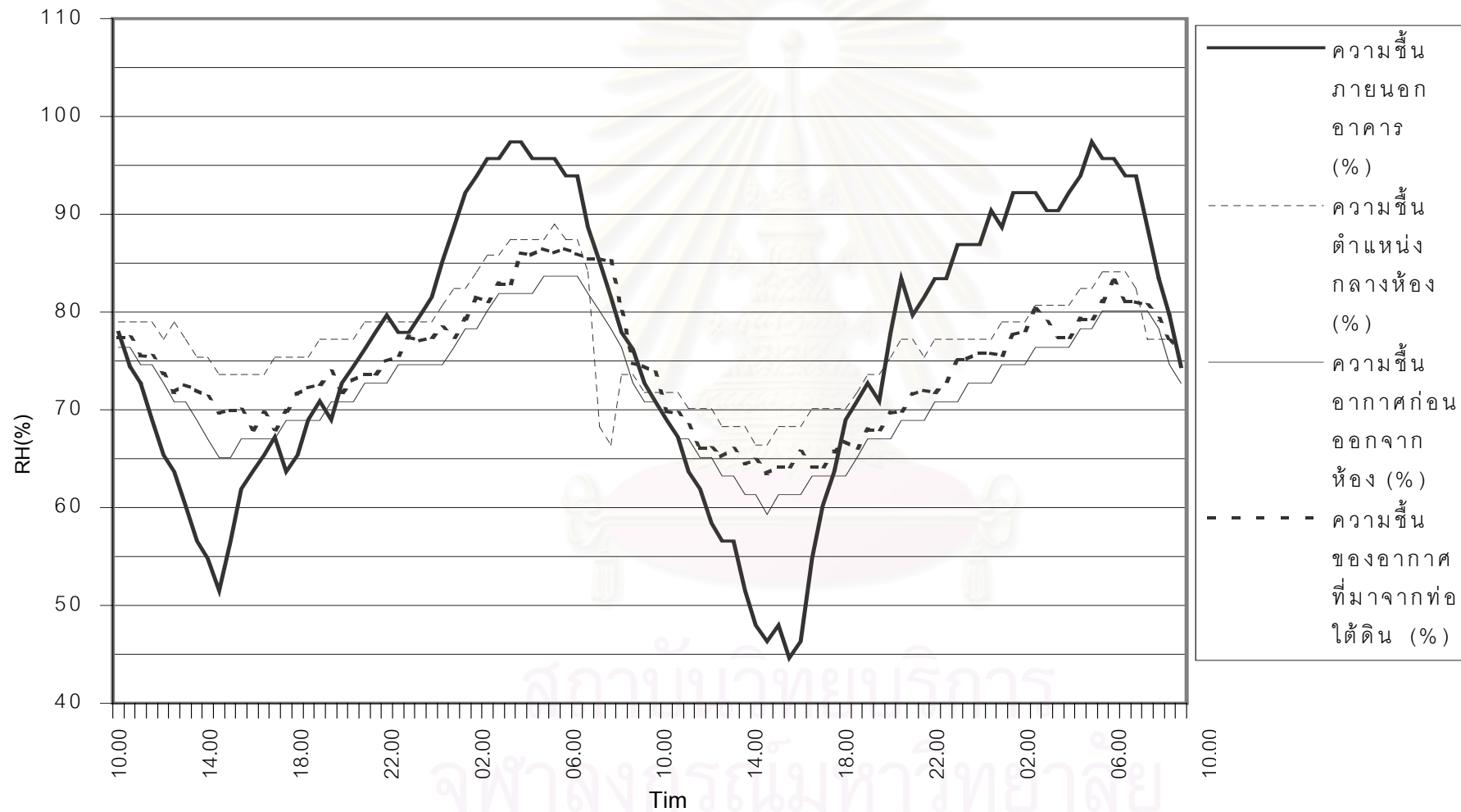
ตาราง 4-2 แสดงอุณหภูมิที่ใต้ดินที่ท่อใต้ดินในระบบปิด (close loop system) ความยาว 40 เมตร

จากการเก็บข้อมูลในครั้งที่ 2 สามารถสรุปได้ดังนี้

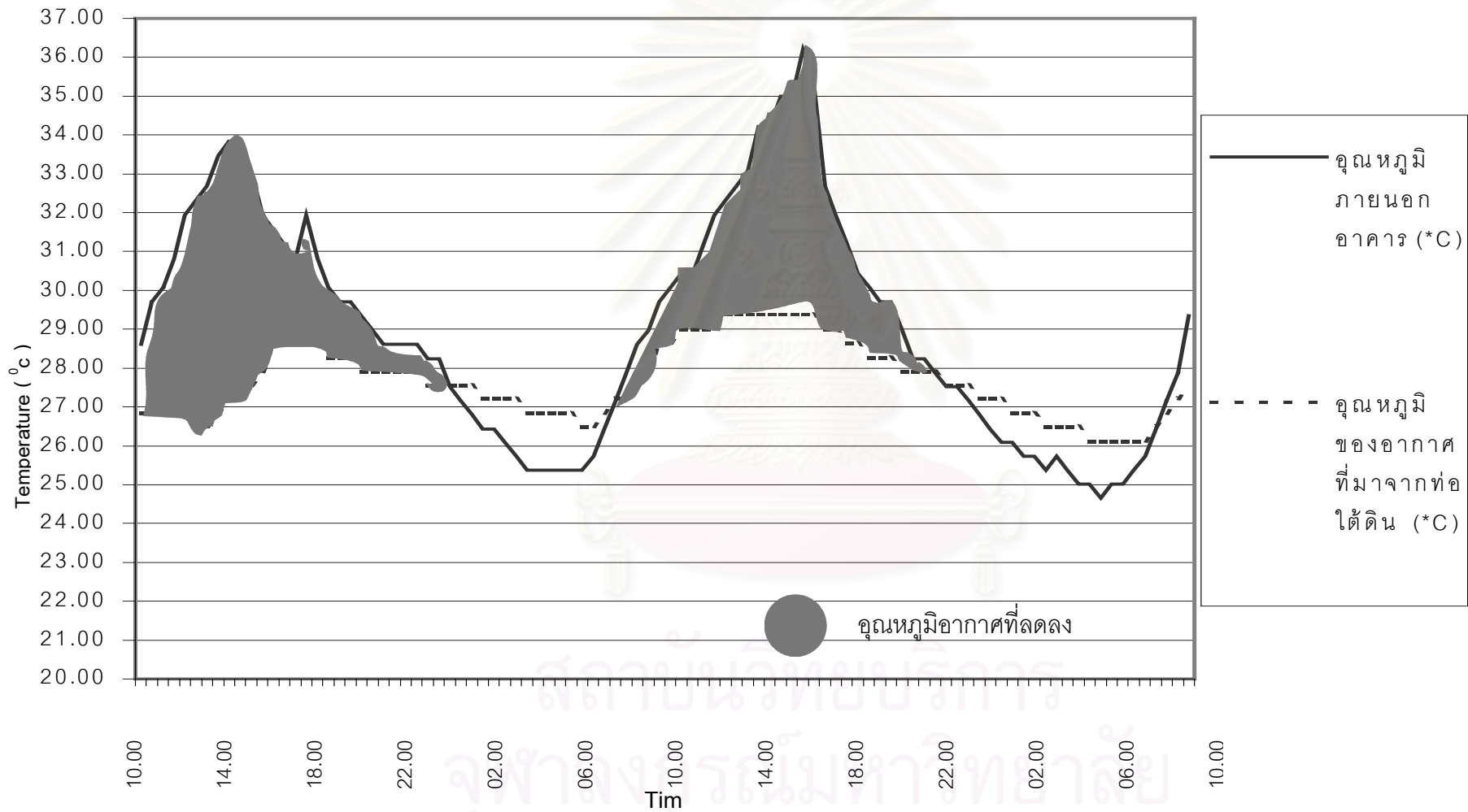
1. จากอุณหภูมิอากาศภายนอกที่มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงกลางวันและกลางคืนสูง เมื่อนำอากาศมาผ่านท่อใต้ดินในระบบปิด(close loop system) ความยาว 40 เมตร สามารถปรับอุณหภูมิของอากาศที่สูงสุดที่ 34.22 องศาเซลเซียส ลดลงเหลือ 28.28 องศาเซลเซียส จึงเกิดส่วนต่าง 5.94 องศาเซลเซียส และปรับอุณหภูมิกอากาศที่ต่ำสุดที่ 23.94 องศาเซลเซียส ขึ้นมาเป็น 25.42 องศาเซลเซียส เกิดส่วนต่างเป็น 1.48 องศาเซลเซียส(ดูแผนภูมิที่ 4-4 ประกอบ)
2. อุณหภูมิของอากาศภายในห้องและอุณหภูมิกอากาศ ที่ออกมาจากท่อใต้ดินมีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องในการขึ้นและลงของอุณหภูมิกันโดยตลอด
3. ความชื้นมีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องในการขึ้นและลงของปริมาณความชื้นระหว่างความชื้นภายในห้องและความชื้นที่ออกมาจากท่อใต้ดิน (ดูแผนภูมิ 4-5 ประกอบ)
4. ในช่วงเวลาตอนกลางวัน อุณหภูมิอากาศภายนอกจะสูงกว่าอุณหภูมิกอากาศที่มาจากท่อใต้ดิน ตั้งแต่เวลา 12.00 น. วันที่ 5 มิถุนายน 2545 จนถึง เวลา 21.00 น. วันที่ 5 มิถุนายน 2545 จากนั้นอุณหภูมิกอากาศภายนอกจะต่ำกว่าอุณหภูมิกอากาศที่มาจากท่อจนถึงเวลา 06.30 น. วันที่ 6 มิถุนายน 2545 อุณหภูมิภายนอกจึงจะกลับมาสูงกว่าอุณหภูมิกอากาศ ที่มาจากท่อใต้ดินอีกครั้ง (ดูแผนภูมิ 4-6 ประกอบ)



แผนภูมิ 4-4 แสดงอุณหภูมิที่ได้จากการวัดผลการทดลองท่อใต้ดินระบบปิด (close loop system) ที่ความยาวท่อ 40 เมตร



แผนภูมิ 4-5 แสดงความชื้นที่ได้จากการวัดผลการทดลองท่อใต้ดินระบบปิด (close loop system) ที่ความยาวท่อ 40 เมตร



แผนภูมิ 4-6 แสดงเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการวัดผลการทดลองท่อใต้ดินระบบปิด (close loop system) ที่ความยาวท่อ 40 เมตร

การวิเคราะห์ข้อมูลในการทดลอง ครั้งที่ 3 ระบบปิด ความยาว 30 เมตร

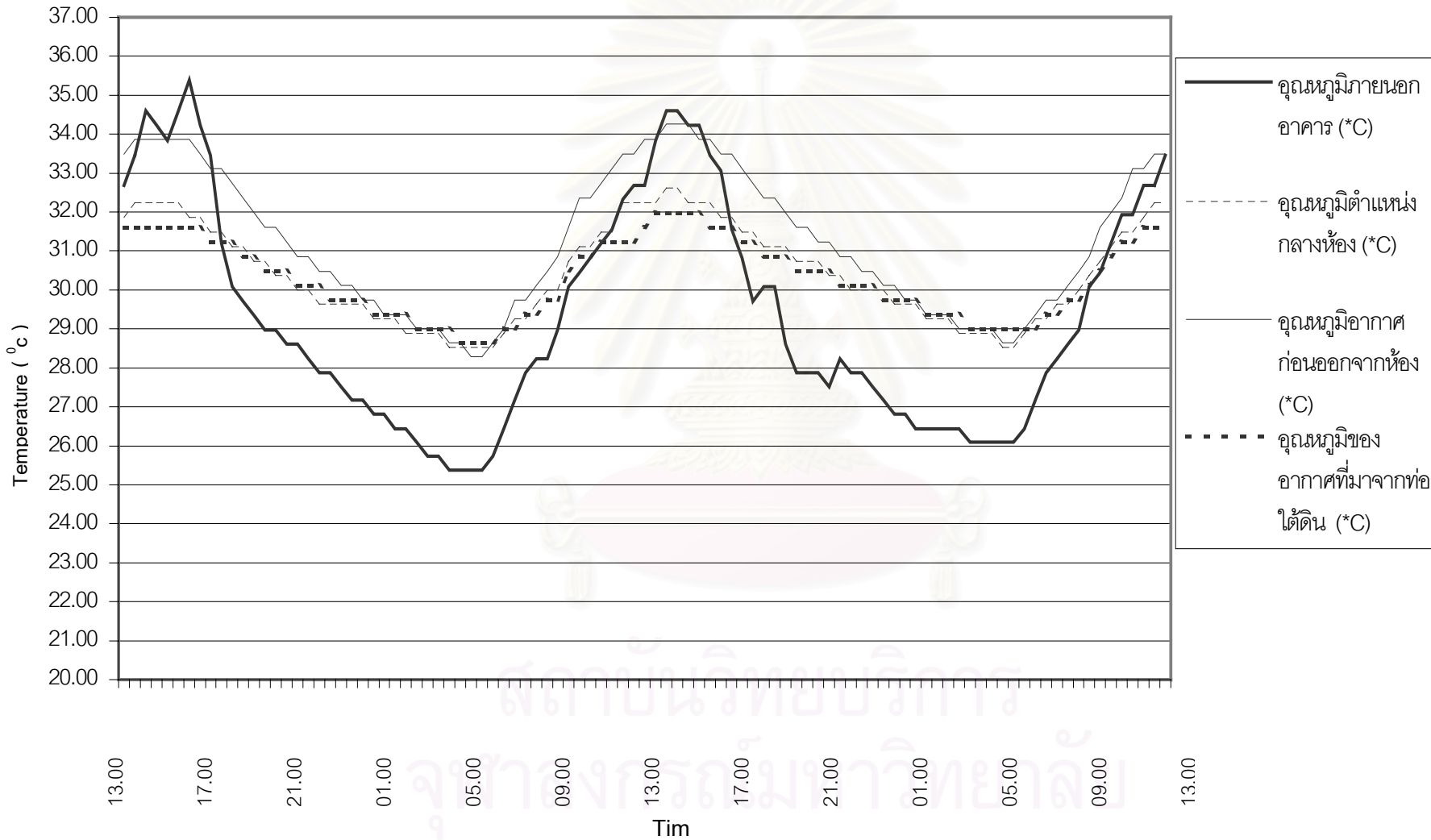
สภาพอากาศโดยทั่วไปตลอดทั้ง 2 วัน มีท้องฟ้าแจ่มใส อากาศโปร่งและร้อนจัด มีเมฆน้อย โดยทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิและความชื้น ณ ตำแหน่งภายนอกอาคารได้อุณหภูมิสูงสุดของการทดลองที่ 35.39 องศาเซลเซียส ที่ความชื้น 48 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงเวลา 16.00 น. ของวันที่ 7 มิถุนายน 2545 ในขณะที่อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งปลายท่อลมออกจากใต้ดินมาสู่ห้องนั้นมีอุณหภูมิต่ำสุดที่วัดได้จากการทดลองอยู่ที่ 25.37 องศาเซลเซียส ที่ความชื้น 92 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงเวลา 03.00 น. ของวันที่ 8 มิถุนายน 2545 ในขณะที่อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งปลายท่อลมออกจากใต้ดินมาสู่ห้องนั้นมีอุณหภูมิต่ำสุดที่วัดได้จากการทดลองอยู่ที่ 25.37 องศาเซลเซียส ที่ความชื้น 92 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงเวลา 03.00 น. ของวันที่ 8 มิถุนายน 2545 ในขณะที่อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งปลายท่อลมออกจากใต้ดินมาสู่ห้องนั้นมีอุณหภูมิต่ำสุดที่วัดได้จากการทดลองอยู่ที่ 25.37 องศาเซลเซียส ที่ความชื้น 92 เปอร์เซ็นต์ (ดูตาราง 4-3 ประกอบ)

	อุณหภูมิภายนอกสูงสุด		อุณหภูมิต่ำสุด	
	อุณหภูมิภายนอก	อุณหภูมิปลายท่อ	อุณหภูมิภายนอก	อุณหภูมิปลายท่อ
อุณหภูมิ	35.39	31.61	25.37	28.65
ความชื้น	48	60	92	73

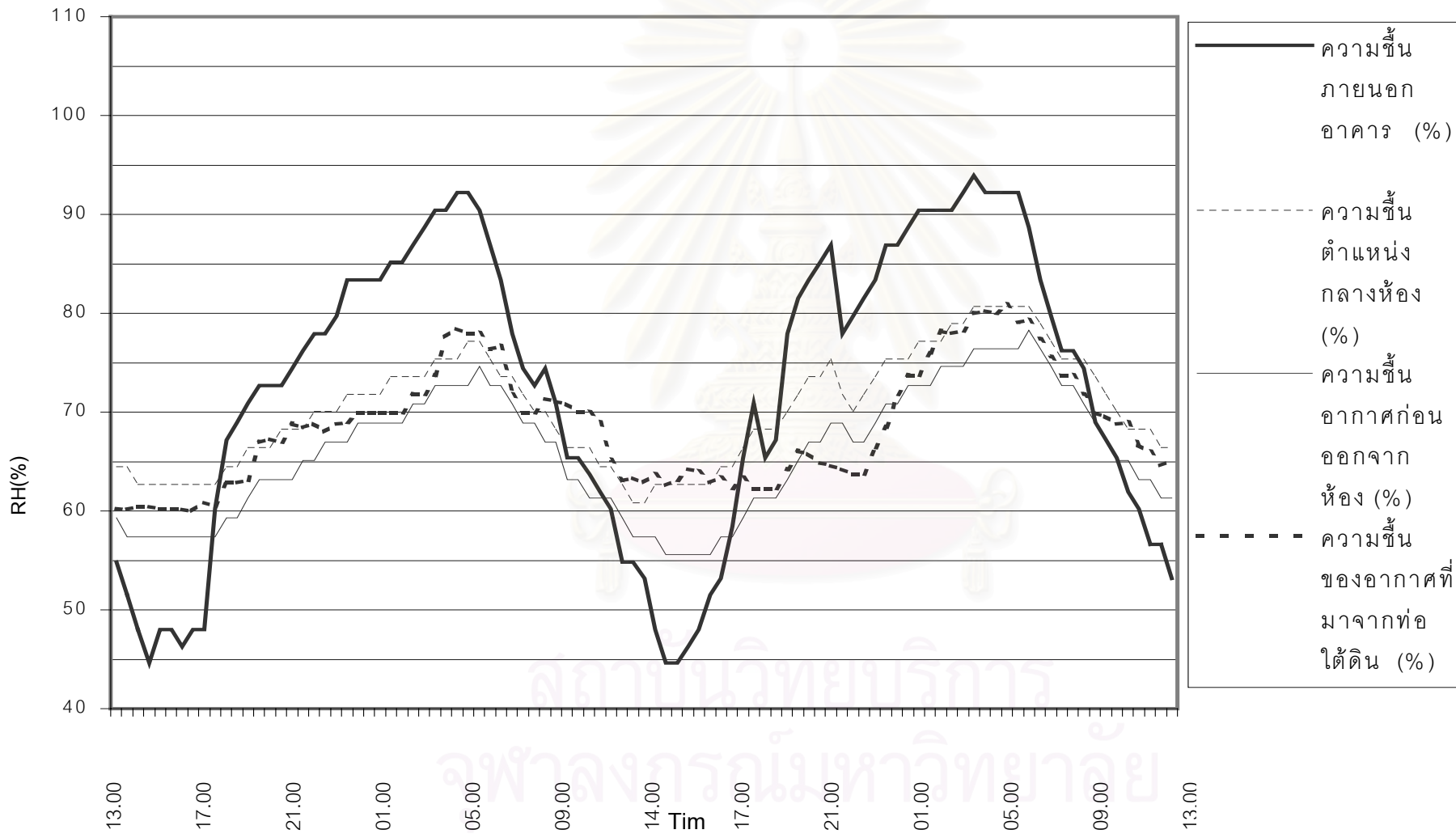
ตาราง 4-3 แสดงอุณหภูมิที่ได้จากท่อใต้ดินในระบบปิด (close loop system) ความยาว 30 เมตร

จากการเก็บข้อมูลในครั้งที่ 3 สามารถสรุปได้ดังนี้

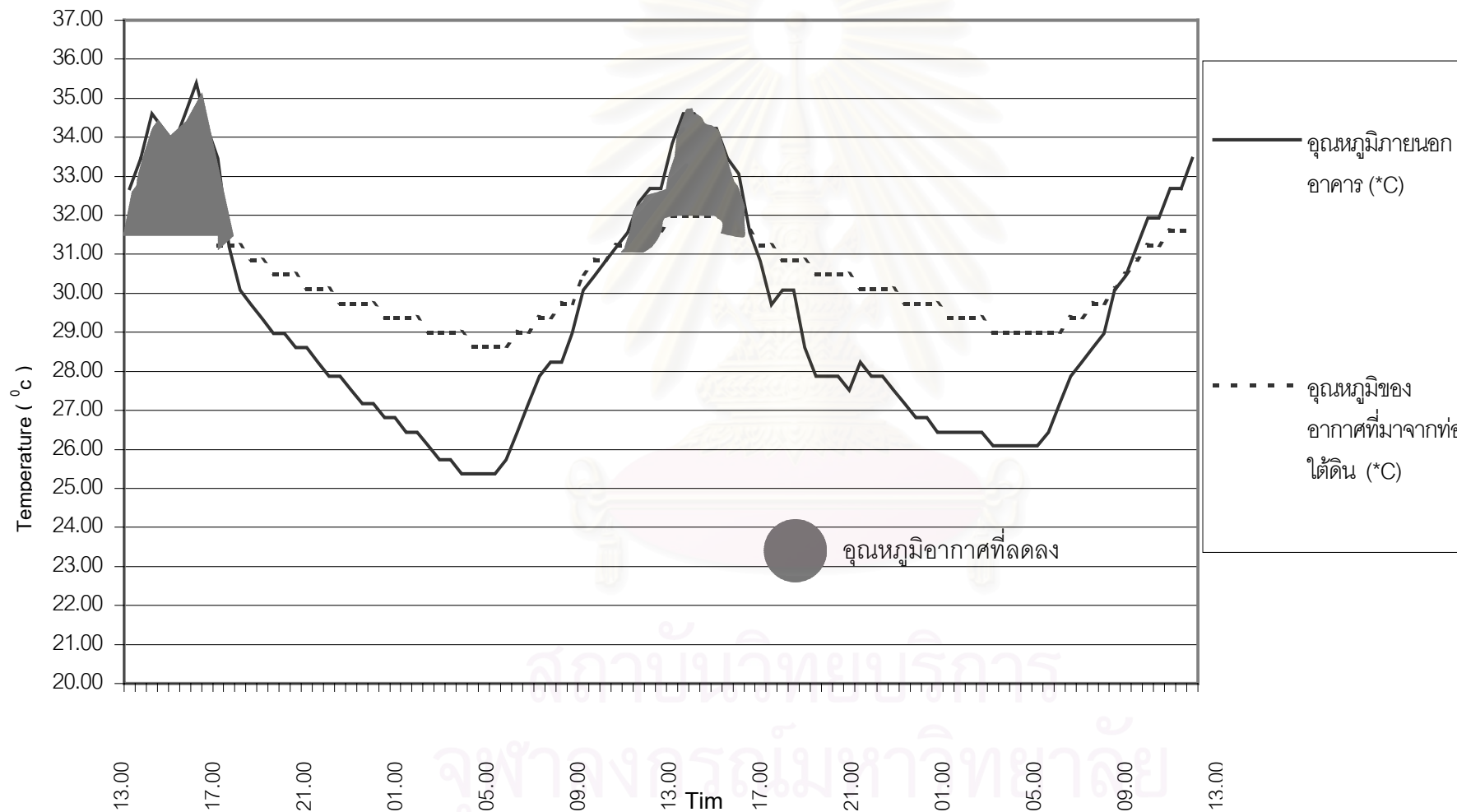
1. จากอุณหภูมิอากาศภายนอกที่มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงกลางวันและกลางคืนสูงเมื่อนำอากาศมาผ่านท่อใต้ดินในระบบปิด (close loop system) ความยาวที่ 30 เมตร สามารถปรับอุณหภูมิของอากาศที่สูงสุดที่ 35.39 องศาเซลเซียส ลงเหลือ 31.61 องศาเซลเซียส คิดเป็นส่วนต่าง 3.78 องศาเซลเซียส และปรับอุณหภูมิต่ำสุดที่ 25.37 องศาเซลเซียส ขึ้นมาเป็น 28.65 องศาเซลเซียส เกิดส่วนต่างเป็น 3.28 องศาเซลเซียส(ดูแผนภูมิ 4-7 ประกอบ)
2. จากการที่เป็นระบบปิด คือนำอากาศภายในห้องมาผ่านระบบท่อใต้ดิน จึงทำให้อุณหภูมิของอากาศภายในห้องและอุณหภูมิอากาศ ที่ออกมาจากท่อใต้ดินมีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องในการขึ้นและลงของอุณหภูมิกันโดยตลอด
3. ความชื้นของการทดลองในวันที่ 7 – 9 มิถุนายน มีความแตกต่างจากวันอื่นๆ คือสภาพอากาศมีความร้อนและแห้ง ดังนั้นความชื้นภายนอกอาคารจะต่ำมาก แต่ความชื้นภายในอาคารจะอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกันตลอดวัน(ดูแผนภูมิที่ 4-8 ประกอบ)
4. ในช่วงเวลาตอนกลางวัน อุณหภูมิอากาศภายนอกจะสูงกว่าอุณหภูมิอากาศที่มาจากท่อใต้ดิน ตั้งแต่เวลา 13.00 น.วันที่ 7 มิถุนายน 2545 จนถึง เวลา 18.00 น.วันที่ 7 มิถุนายน 2545 จากนั้นอุณหภูมิอากาศภายนอกจะต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศ ที่มาจากท่อใต้ดิน จนถึงเวลา 12.00 น. วันที่ 8 มิถุนายน 2545 อุณหภูมิภายนอกจึงจะกลับมาสูงกว่าอุณหภูมิอากาศ ที่มาจากท่อใต้ดินอีกครั้ง(ดูแผนภูมิ 4-9 ประกอบ)



แผนภูมิ 4-7 แสดงอุณหภูมิที่ได้จากการวัดผลการทดลองท่อใต้ดินระบบปิด (close loop system) ที่ความยาวท่อ 30 เมตร



แผนภูมิ 4-8 แสดงความชื้นที่ได้จากการวัดผลการทดลองท่อใต้ดินระบบปิด (close loop system) ที่ความยาวท่อ 30 เมตร



แผนภูมิ 4-9 แสดงเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการวัดผลการทดลองท่อใต้ดินระบบปิด (close loop system) ที่ความยาวท่อ 30 เมตร

- การวิเคราะห์ข้อมูลในการทดลอง ครั้งที่ 4 ระบบเปิด ความยาว 30 เมตร

สภาพอากาศโดยทั่วไปตลอดวันที่ 9 มีท้องฟ้าแจ่มใส อากาศโปร่งและมีอุณหภูมิที่ร้อนจัดในช่วงบ่าย มีเมฆมาก ส่วนในวันที่ 10 มีอากาศค่อนข้างแปรปรวน คือ เวลาช่วงเช้าตั้งแต่ 06.00 น. ท้องฟ้าแจ่มใส มีเมฆมากจนถึงเวลา 14.00 น. อากาศร้อนจัด ฟ้าสลับ จากนั้น เวลา 16.00 น. ฝนตกจนถึงเวลา 09.00 น. ของวันที่ 11 มิถุนายน 2545 โดยการเก็บข้อมูลอุณหภูมิและความชื้น ณ ตำแหน่งภายนอกอาคารได้อุณหภูมิสูงสุดของการทดลองที่ 35.78 องศาเซลเซียส ที่ความชื้น 40 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงเวลา 15.00 น. ของวันที่ 10 มิถุนายน 2545 ในขณะที่อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งปลายท่อลมออกจากใต้ดินมาสู่ห้องนั้นมีอุณหภูมิที่ 32.36 องศาเซลเซียส ที่ความชื้น 60 เปอร์เซ็นต์ และอุณหภูมิต่ำสุดที่วัดได้จากการทดลองอยู่ที่ 22.53 องศาเซลเซียส ที่ความชื้น 100 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงเวลา 20.00 น. ของวันที่ 10 มิถุนายน 2545 ในขณะที่อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งปลายท่อลมออกจากใต้ดินมาสู่ห้องนั้นมีอุณหภูมิที่ 30.49 องศาเซลเซียส ความชื้นที่ 73 เปอร์เซ็นต์ (ดูตารางที่ 4-4 ประกอบ) ในการทดลองครั้งนี้ กำหนดให้ความเร็วลมที่ปลายท่อเป็น 200 fpm

	อุณหภูมิภายนอกสูงสุด		อุณหภูมิภายนอกต่ำสุด	
	อุณหภูมิภายนอก	อุณหภูมิปลายท่อ	อุณหภูมิภายนอก	อุณหภูมิปลายท่อ
อุณหภูมิ	35.78	32.36	22.53	30.49
ความชื้น	40	60	100	73

ตาราง 4-4 แสดงอุณหภูมิที่ได้จากท่อใต้ดินในระบบเปิด (open loop system) ความยาว 30 เมตร

จากการเก็บข้อมูลในครั้งที่ 4 สามารถสรุปได้ดังนี้

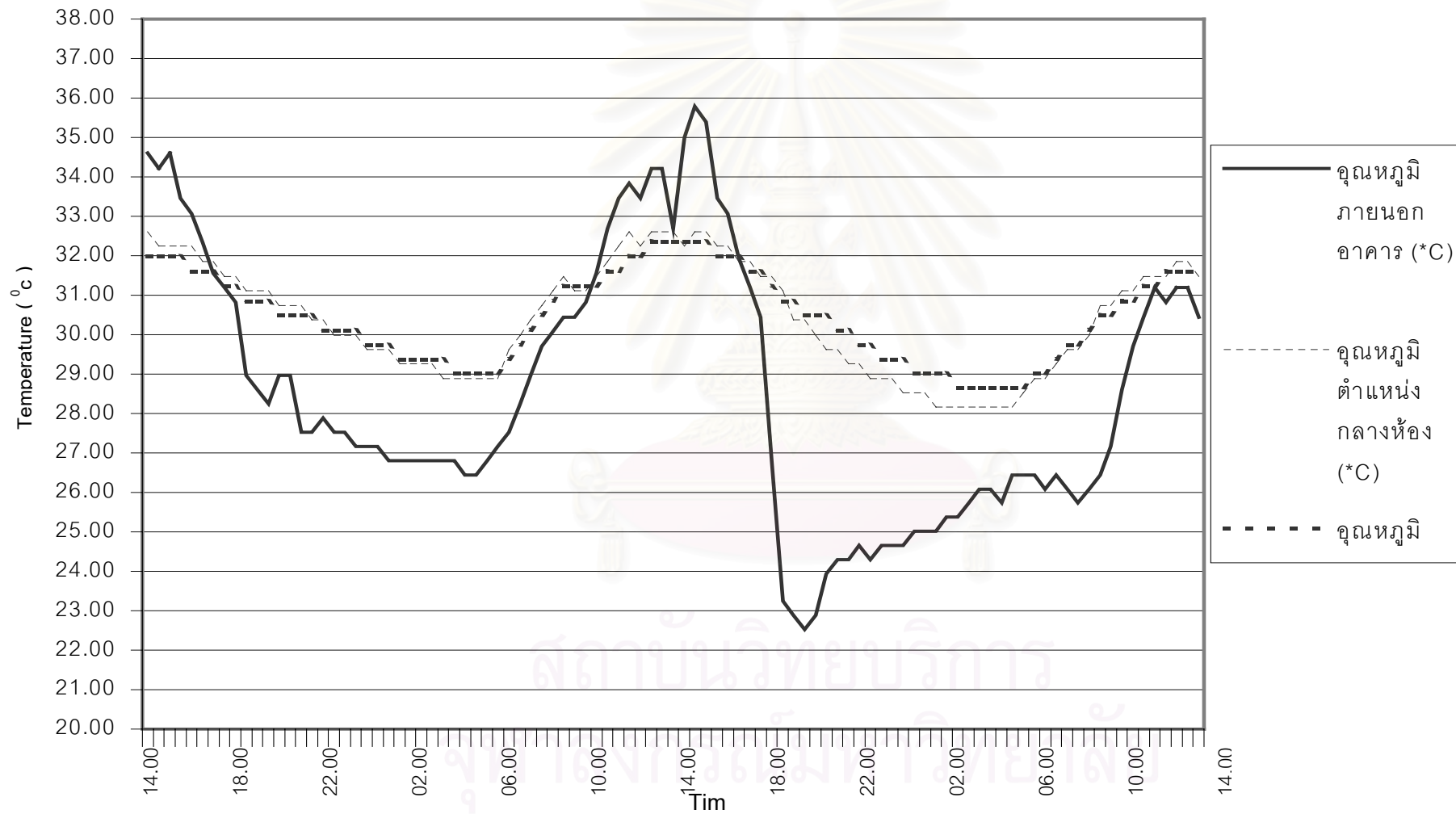
1. จากอุณหภูมิอากาศภายนอกที่มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงกลางวัน และช่วงกลางคืนสูง เมื่อนำอากาศมาผ่านท่อใต้ดินในระบบเปิด (open loop system) ความยาว 30 เมตร สามารถปรับอุณหภูมิของอากาศที่สูงสุดที่ 35.78 องศาเซลเซียส ลดลงเหลือ 32.36 องศาเซลเซียส เกิดส่วนต่าง 3.42 องศาเซลเซียส และปรับอุณหภูมิกอากาศที่ต่ำสุดที่ 22.53 องศาเซลเซียส ขึ้นมาเป็น 30.49 องศาเซลเซียส เกิดส่วนต่างมากถึง 7.96 องศาเซลเซียส เนื่องมาจากการหน่วงความร้อนของดินมากจากช่วงเวลา 14.00 น. ของวันที่ 10 มิถุนายน 2545 ส่งผลทำให้อุณหภูมิดินสูงในช่วงเวลา 15.00 น. – 16.00 น. (ดูแผนภูมิ 4-10 ประกอบ)
2. จากการที่เป็นระบบเปิดอากาศที่นำเข้ามาผ่านระบบท่อใต้ดินนั้น นำมาจากภายนอกอาคาร ดังนั้นจึงมีอุณหภูมิอากาศจากระบบไม่แตกต่างกันมากนัก

3. ความชื้นในช่วงเวลา 14.00 น. ของวันที่ 9 มิถุนายน 2545 ถึงช่วงเวลา 15.00 น. ของวันที่ 10 มิถุนายน 2545 ไม่มีความแตกต่างระหว่างภายในและภายนอกอาคารมากนัก เนื่องจากเป็นระบบเปิด ซึ่งอากาศที่มาจากท่อใต้ดินมีการเปลี่ยนแปลงความชื้นขึ้นลงในระหว่างวันน้อยกว่าความชื้นภายนอก และในเวลาตั้งแต่ 15.30 น. ของวันที่ 10 มิถุนายน 2545 จนเวลา 9.00 น. ของวันที่ 10 มิถุนายน 2545 ความชื้นภายนอกสูงถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ภายในห้องมีความเฉลี่ยอยู่ที่ 75 – 80 เปอร์เซ็นต์ (ดูแผนภูมิ 4-11 ประกอบ)

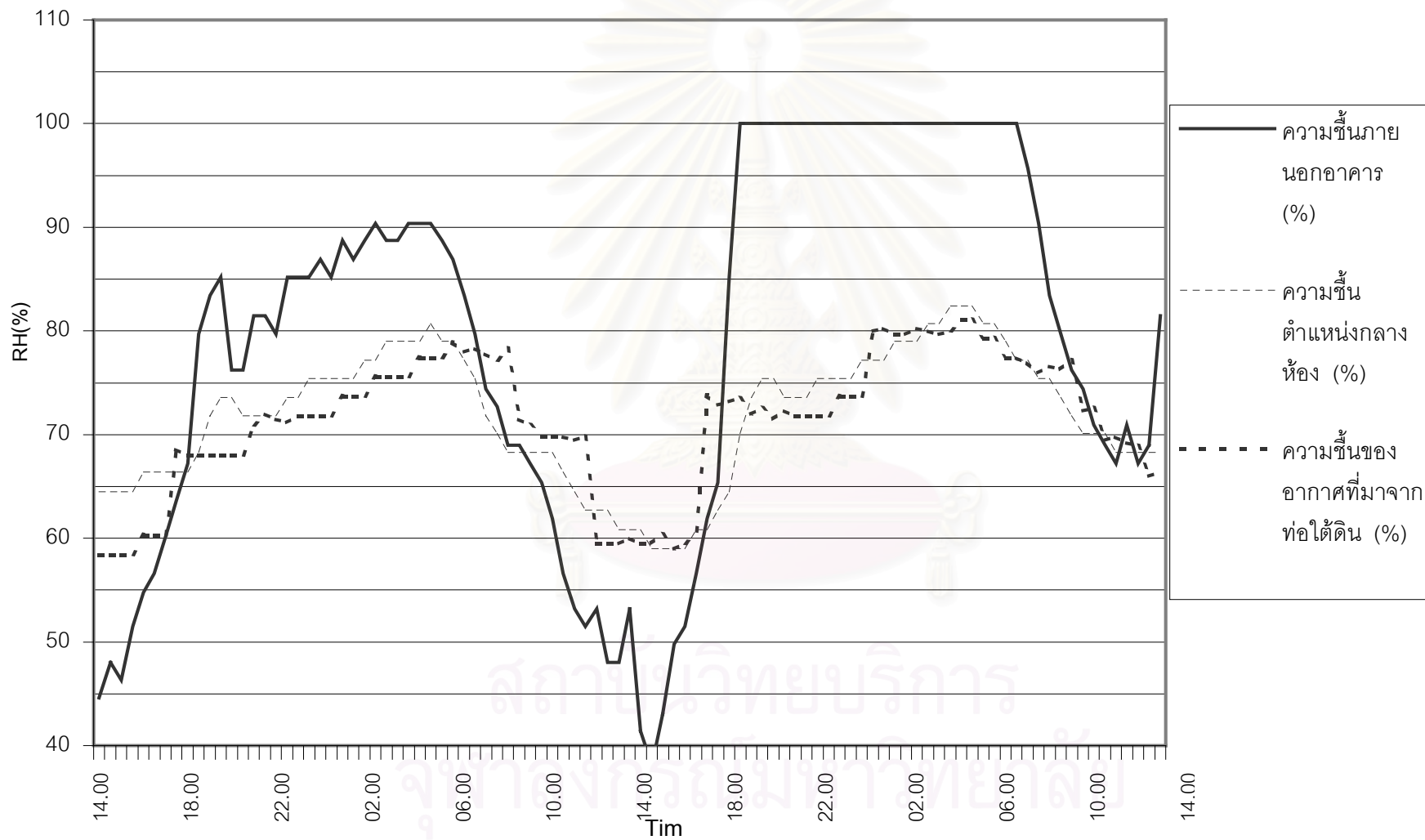
4. ในช่วงเวลาตอนกลางวัน อุณหภูมิอากาศจะสูงกว่าอุณหภูมิอากาศที่มาจากท่อใต้ดิน ตั้งแต่เวลา 14.00 น. วันที่ 9 มิถุนายน 2545 จนถึง เวลา 17.00 น. วันที่ 9 มิถุนายน 2545 จากนั้นอุณหภูมิอากาศภายนอกจะต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศ ที่มาจากท่อใต้ดิน จนถึงเวลา 9.00 น. วันที่ 10 มิถุนายน 2545 อุณหภูมิภายนอกจึงจะกลับมาสูงกว่าอุณหภูมิอากาศที่มาจากท่อใต้ดินอีกครั้ง จนถึงเวลา 16.00 น. ของวันที่ 10 จากนั้นเกิดฝนตกตลอดวันที่ 10 และ 11 มิถุนายน 2545 ทำให้อุณหภูมิภายนอกต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศที่มาจากท่อใต้ดินตลอดจนถึงเวลา 14.00 น. ของวันที่ 11 มิถุนายน 2545 (ดูแผนภูมิ 4-12 ประกอบ)



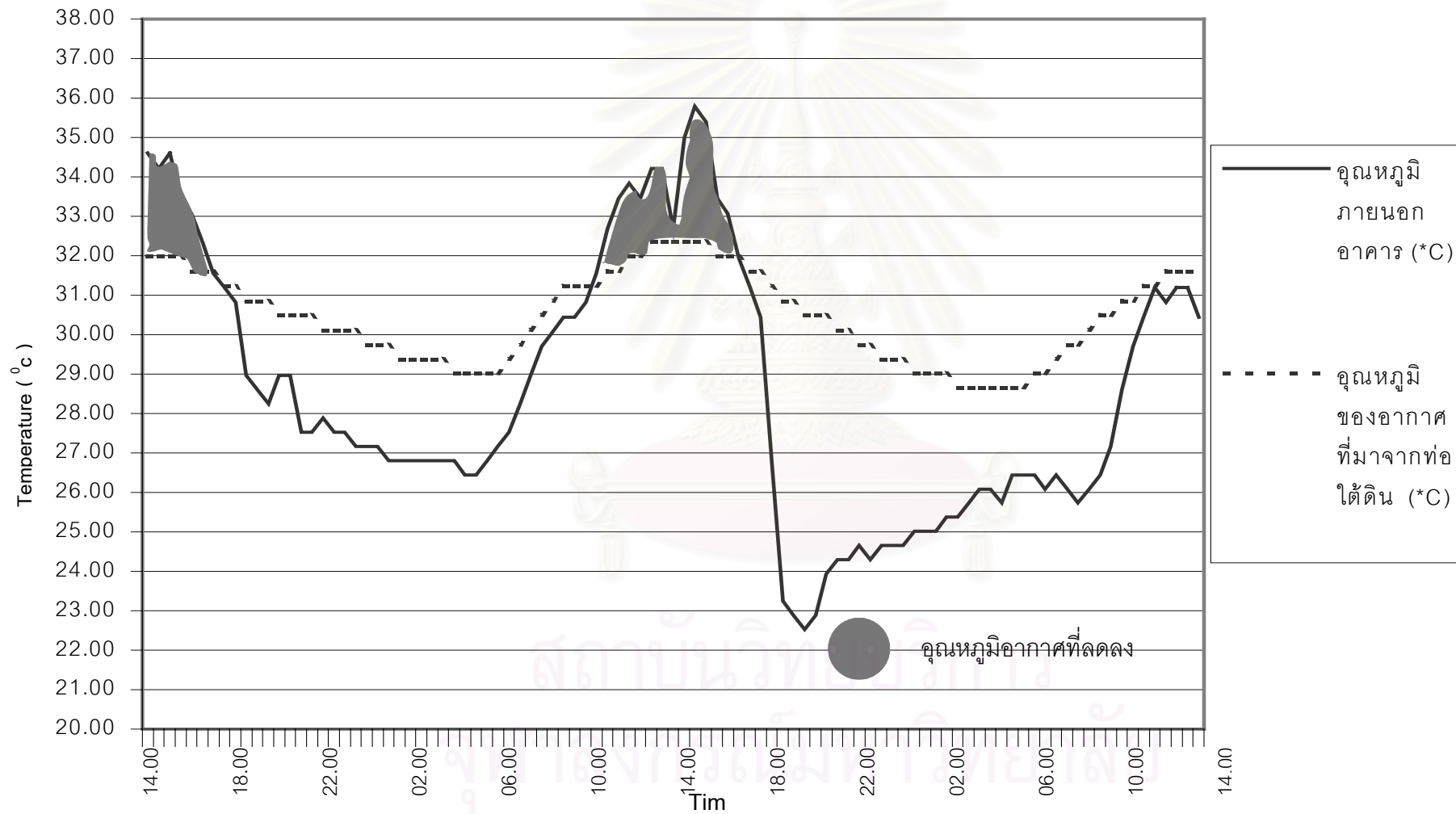
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



แผนภูมิ 4-10 แสดงอุณหภูมิที่ได้จากการวัดผลการทดลองห้องใต้ดินระบบเปิด (open loop system) ที่ความยาวท่อ 30 เมตร



แผนภูมิ 4-11 แสดงความชื้นที่ได้จากการวัดผลการทดลองท่อใต้ดินระบบเปิด (open loop system) ที่ความยาวท่อ 30 เมตร



แผนภูมิ 4-12 แสดงเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการวัดผลการทดลองท่อใต้ดินระบบเปิด (open loop system) ที่ความยาวท่อ 30 เมตร

วิเคราะห์ผลการทดลอง

เปรียบเทียบความสามารถในการทำความเย็น

เมื่อพิจารณาถึงอุณหภูมิอากาศ ที่ผ่านการปรับอุณหภูมิโดย ระบบท่อใต้ดินซึ่งอาศัยหลักการถ่ายเทความร้อนแลกเปลี่ยนระหว่างอากาศในท่อกับอุณหภูมิใต้ผิวดินลึก ในแต่ละระบบ และแต่ละความยาว เพื่อเปรียบเทียบถึงความสามารถในการทำความเย็น ตลอดจนช่วงเวลาที่เหมาะสมในการใช้งานระบบท่อใต้ดิน

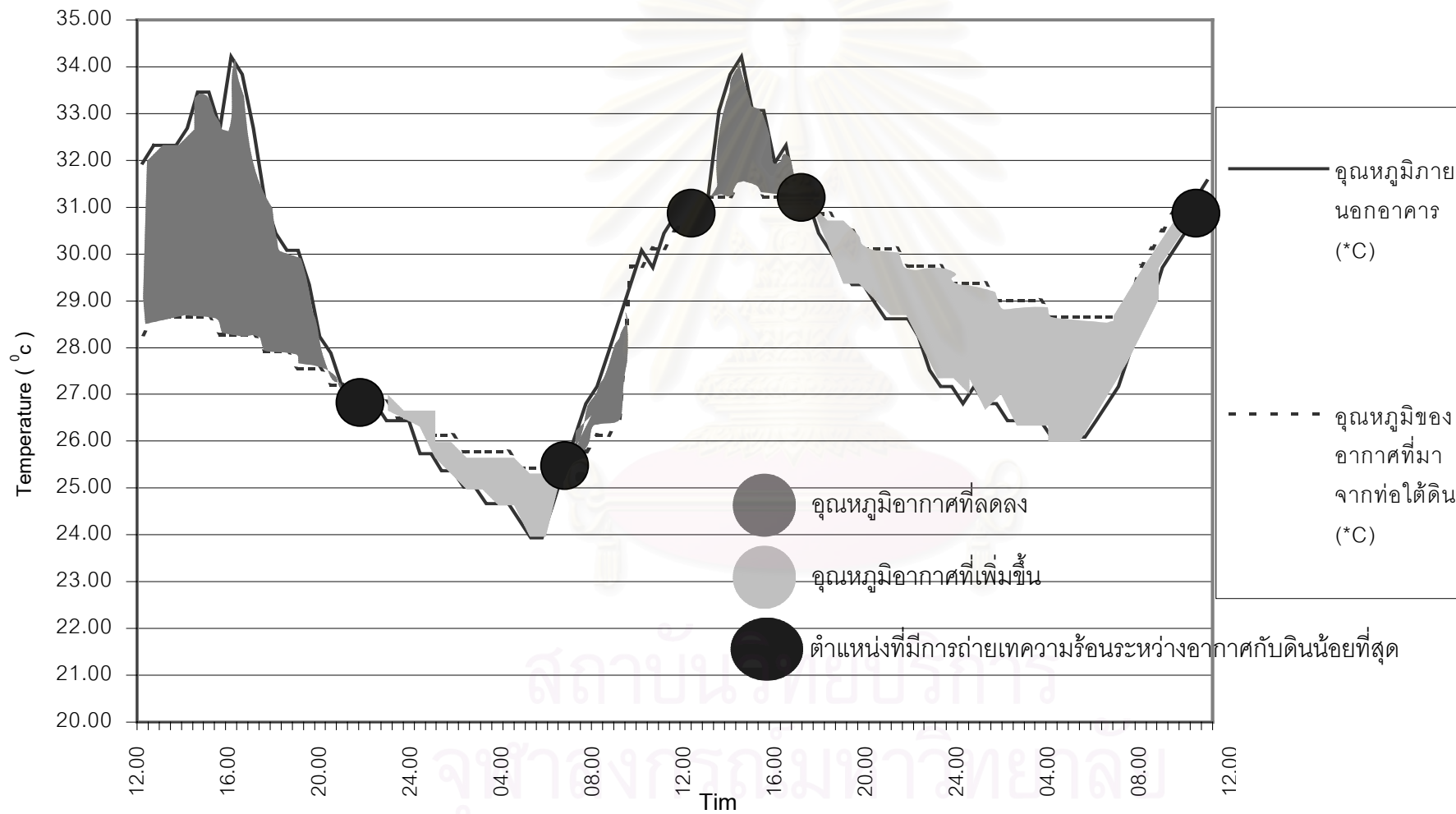
- ระบบเปิด(open loop system) ความยาวท่อ 40 เมตร

เป็นการทำความเย็น โดยอาศัยการนำอากาศจากภายนอกอาคารในบริเวณที่มีความบริสุทธิ์กว่าภายในอาคาร มาผ่านท่อใต้ดินความยาว 40 เมตร เพื่อให้อุณหภูมิอากาศที่สูงกว่า ถ่ายเทลงสู่ดินที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า จากผลการทดลองพบว่า ท่อใต้ดินในระบบเปิดที่มีความยาวท่อ 40 เมตร มีความสามารถในการปรับลดอุณหภูมิอากาศที่ผ่านมาจากท่อใต้ ตั้งแต่ช่วงเวลา 7.00 น. จนถึงช่วงเวลา 21.00 น. และจากการวัดผลอุณหภูมิพบว่าในช่วงเวลา 16.30 น. ของวันที่ 2 มิถุนายน 2545 อุณหภูมิอากาศชั้นสูงถึง 34.22 องศาเซลเซียส ในขณะที่อุณหภูมิอากาศที่ตำแหน่งปลายท่อก่อนเข้าสู่ห้อง ลดต่ำลงมา 5.94 องศาเซลเซียส คือเหลือ 28.28 องศาเซลเซียส (ดูแผนภูมิ 4-13,4-14 ประกอบ) และเมื่อพิจารณาถึงส่วนต่างของอุณหภูมิอากาศภายนอกกับภายในแล้ว พบว่าท่อใต้ดินระบบเปิดที่มีความยาวท่อ 40 เมตร จะมีความสามารถในการปรับลดอุณหภูมิโดยเฉลี่ย ลงได้ประมาณ 2.50 ถึง 3 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 ชั่วโมง คือตั้งแต่เวลา 7.00 น. จนถึงช่วงเวลา 21.00 น. (ดูแผนภูมิ 4-15 ประกอบ) ส่วนเวลาที่เหลืออีก 10 ชั่วโมง ท่อใต้ดินระบบเปิดที่มีความยาวท่อ 40 เมตร จะมีความสามารถในการปรับเพิ่มอุณหภูมิโดยเฉลี่ย ขึ้นได้ประมาณ 1 องศาเซลเซียส

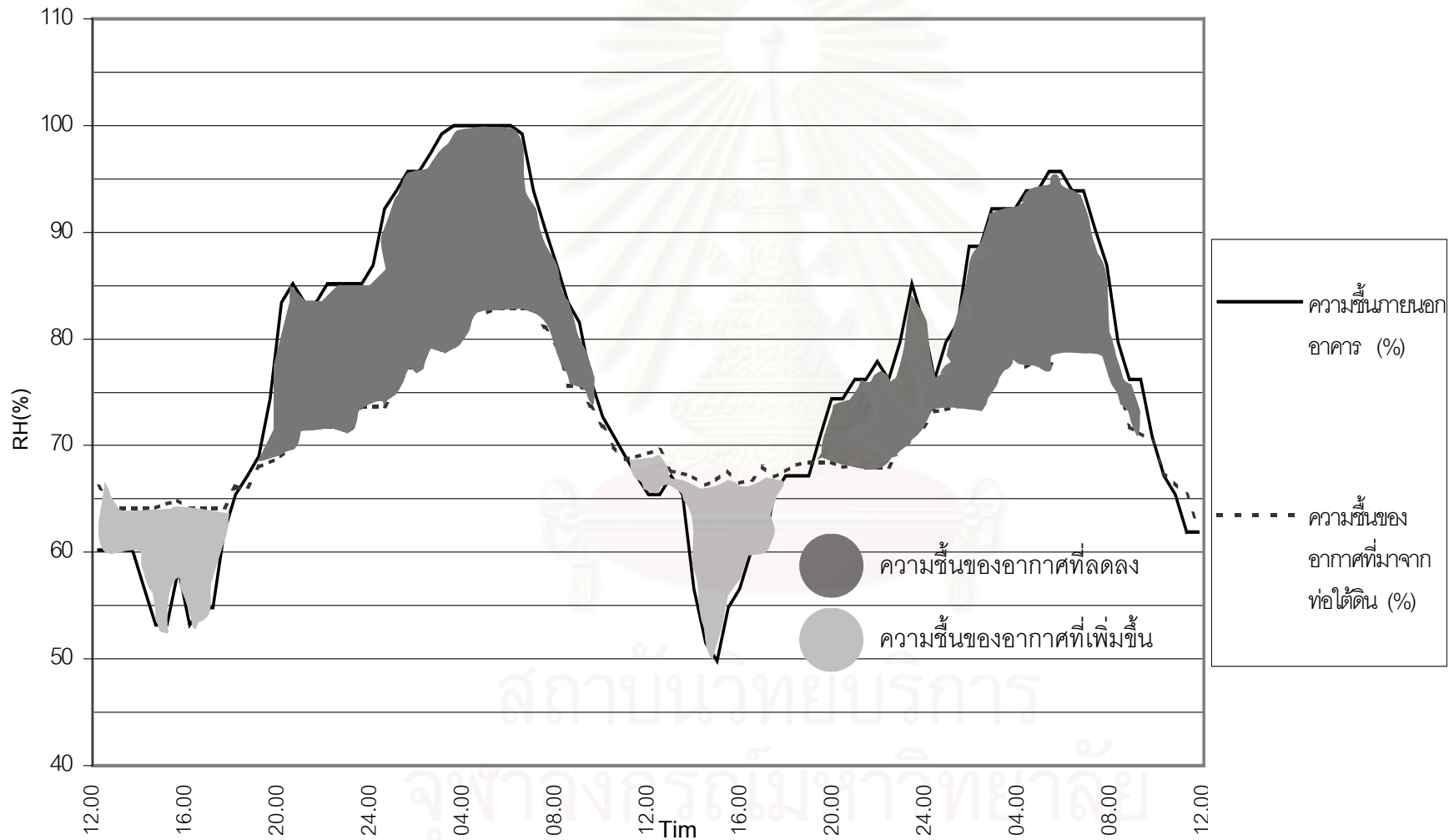
จากผลการทดลอง เมื่อพิจารณากลับไปถึงงานวิจัย ที่เคยได้มีการทำการทดลองกับการใช้งานของระบบท่อใต้ดินมาแล้ว พบว่าอุณหภูมิที่ทำนายจากรายการคำนวณ กับอุณหภูมิที่ได้จากการทำการทดลองครั้งนี้ มีแนวโน้มของการเพิ่มและลดของอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน (ดูแผนภูมิ 4-16 ประกอบ) แต่เนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมาได้เลือกใช้วัสดุท่อใต้ดินเป็นสแตนเลส (สุพจน์ ดวงสินทวีกุล, 2537) ซึ่งแตกต่างกับการทำการวิจัยครั้งนี้ และความเร็วลมที่ใช้ก็แตกต่างกัน จึงส่งผลทำให้เกิดความคาดเคลื่อนของอุณหภูมิทั้งสอง ซึ่งจะเปรียบเทียบโดยใช้สมการดังนี้

$$HE = -1.873 + 0.295 (OS) + 0.019(A) + 0.002 (V)$$

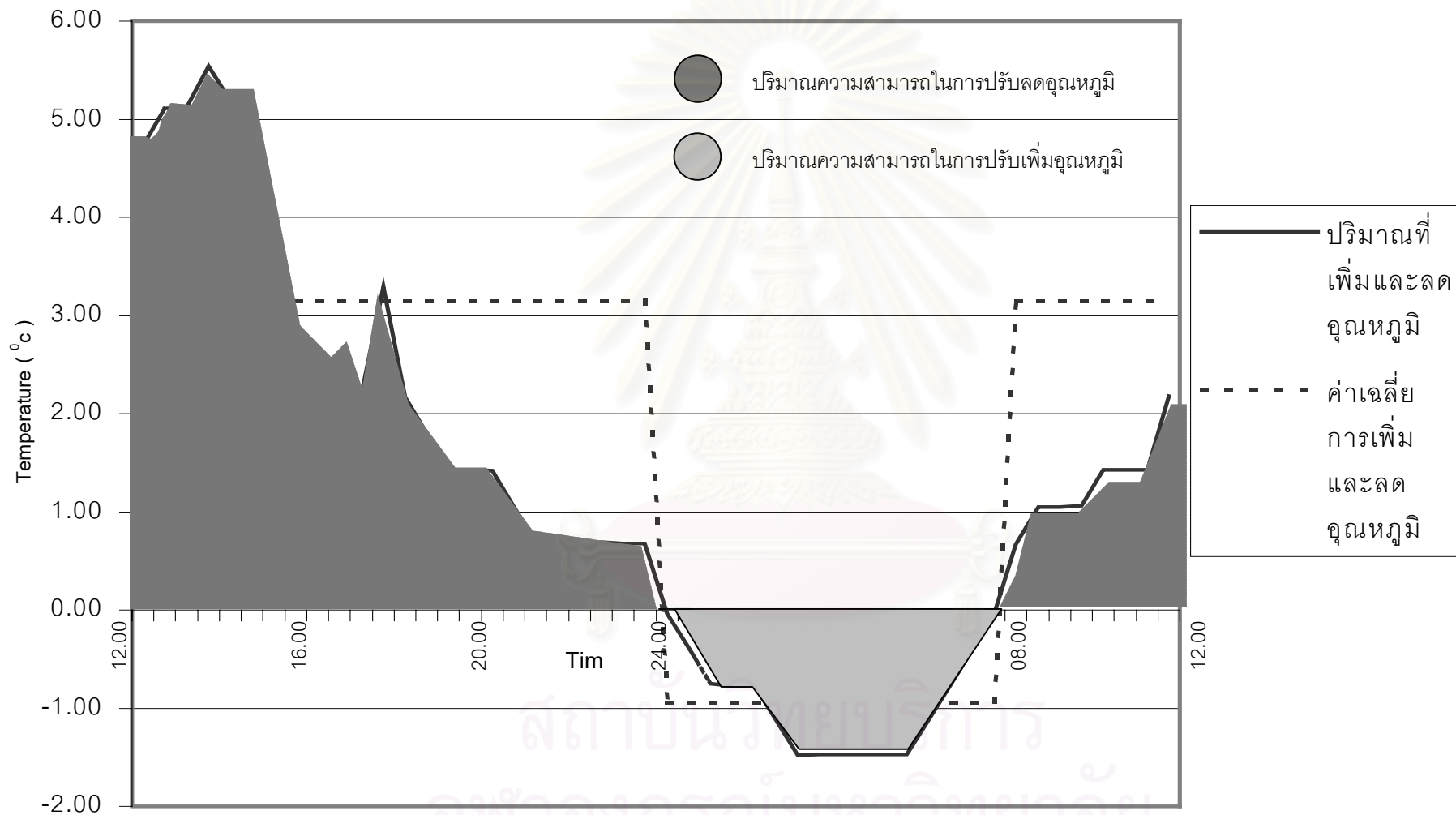
โดยที่ OS = ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศกับอุณหภูมิดิน ($^{\circ}C$)
A = พื้นที่ผิวท่อกับอากาศสัมผัส (ตารางฟุต)
V = ความเร็วลมในท่อ (ฟุตต่อนาที)
HE = อุณหภูมิที่ลดลง (BTU/Hr)



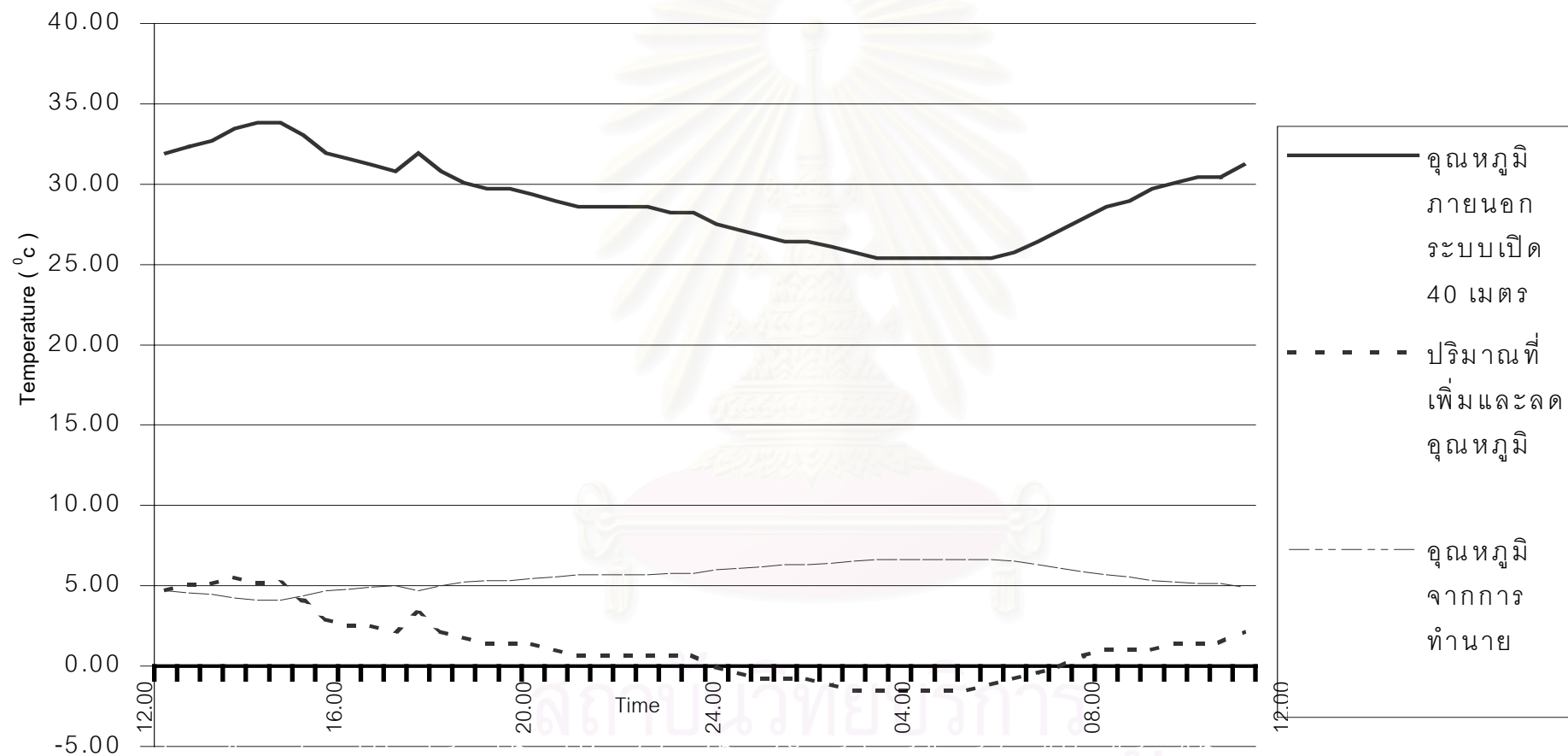
แผนภูมิ 4-13 แสดงปริมาณการเพิ่มและลดอุณหภูมิตามช่วงเวลา ของท่อใต้ดินระบบเปิด (open loop system) ที่ความยาวท่อ 40 เมตร



แผนภูมิ 4-14 แสดงปริมาณการเพิ่มและลดความชื้นตามช่วงเวลา ของท่อใต้ดินระบบเปิด (open loop system) ที่ความยาวท่อ 40 เมตร



แผนภูมิ 4-15 แสดงอุณหภูมิที่เพิ่มและลดลงของท่อใต้ดินระบบเปิด (open loop system) ที่ความยาวท่อ 40 เมตร



แผนภูมิ 4-16 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศที่ลดหรือเพิ่มจากการทดลองกับอุณหภูมิจากการทำนาย ระบบเปิด ที่ความยาวท่อ 40 เมตร

ระบบปิด(close loop system) ความยาวท่อ 40 เมตร

เป็นการทำความเย็น โดยอาศัยการนำอากาศจากภายในอาคารที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าภายนอกอยู่แล้ว มาผ่านท่อใต้ดินความยาว 40 เมตร เพื่อให้อุณหภูมิอากาศที่สูงกว่าถ่ายเทลงสู่ดินที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า จากผลการทดลองพบว่า ท่อใต้ดินในระบบปิดที่มีความยาวท่อ 40 เมตร มีความสามารถในการปรับลดอุณหภูมิอากาศที่ผ่านมาจากท่อใต้ ตั้งแต่ช่วงเวลา 8.00 น. จนไปถึงช่วงเวลา 24.00 น. และจากการวัดผลอุณหภูมิพบว่าในช่วงเวลา 14.00 น. ของวันที่ 5 มิถุนายน 2545 อุณหภูมิอากาศขึ้นสูงถึง 33.90 องศาเซลเซียส ในขณะที่อุณหภูมิอากาศที่ตำแหน่งปลายท่อก่อนเข้าสู่ห้อง ลดต่ำลงมา 6.8 องศาเซลเซียส คือเหลือ 27.10 องศาเซลเซียส (ดูแผนภูมิ 4-17, 4-18 ประกอบ) และเมื่อพิจารณาถึงส่วนต่างของอุณหภูมิอากาศภายนอกกับภายในแล้ว พบว่าท่อใต้ดินระบบปิดที่มีความยาวท่อ 40 เมตร จะมีความสามารถในการปรับลดอุณหภูมิโดยเฉลี่ย ลงได้ประมาณ 3 ถึง 3.5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง คือตั้งแต่เวลา 8.00 น. จนไปถึงช่วงเวลา 24.00 น. (ดูแผนภูมิ 4-19 ประกอบ) ส่วนเวลาที่เหลืออีก 8 ชั่วโมง ท่อใต้ดินระบบปิดที่มีความยาวท่อ 40 เมตร จะมีความสามารถในการปรับเพิ่มอุณหภูมิโดยเฉลี่ยขึ้นได้ประมาณ 1 องศาเซลเซียส

จากผลการทดลอง เมื่อพิจารณากลับไปถึงงานวิจัย ที่เคยได้มีการทำการทดลองกับการใช้งานของระบบท่อใต้ดินมาแล้ว พบว่าอุณหภูมิที่ทำนายจากรายการคำนวณ กับอุณหภูมิที่ได้จากการทำการทดลองครั้งนี้ มีแนวโน้มของการเพิ่มและลดของอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน (ดูแผนภูมิ 4-20 ประกอบ) แต่เนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมาได้เลือกใช้วัสดุท่อใต้ดินเป็นสแตนเลส (สุพจน์ ดวงสินทวีกุล, 2537) ซึ่งแตกต่างกับการทำการวิจัยครั้งนี้ และความเร็วลมที่ใช้ก็แตกต่างกัน จึงส่งผลทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิทั้งสอง ซึ่งจะเปรียบเทียบโดยใช้สมการดังนี้

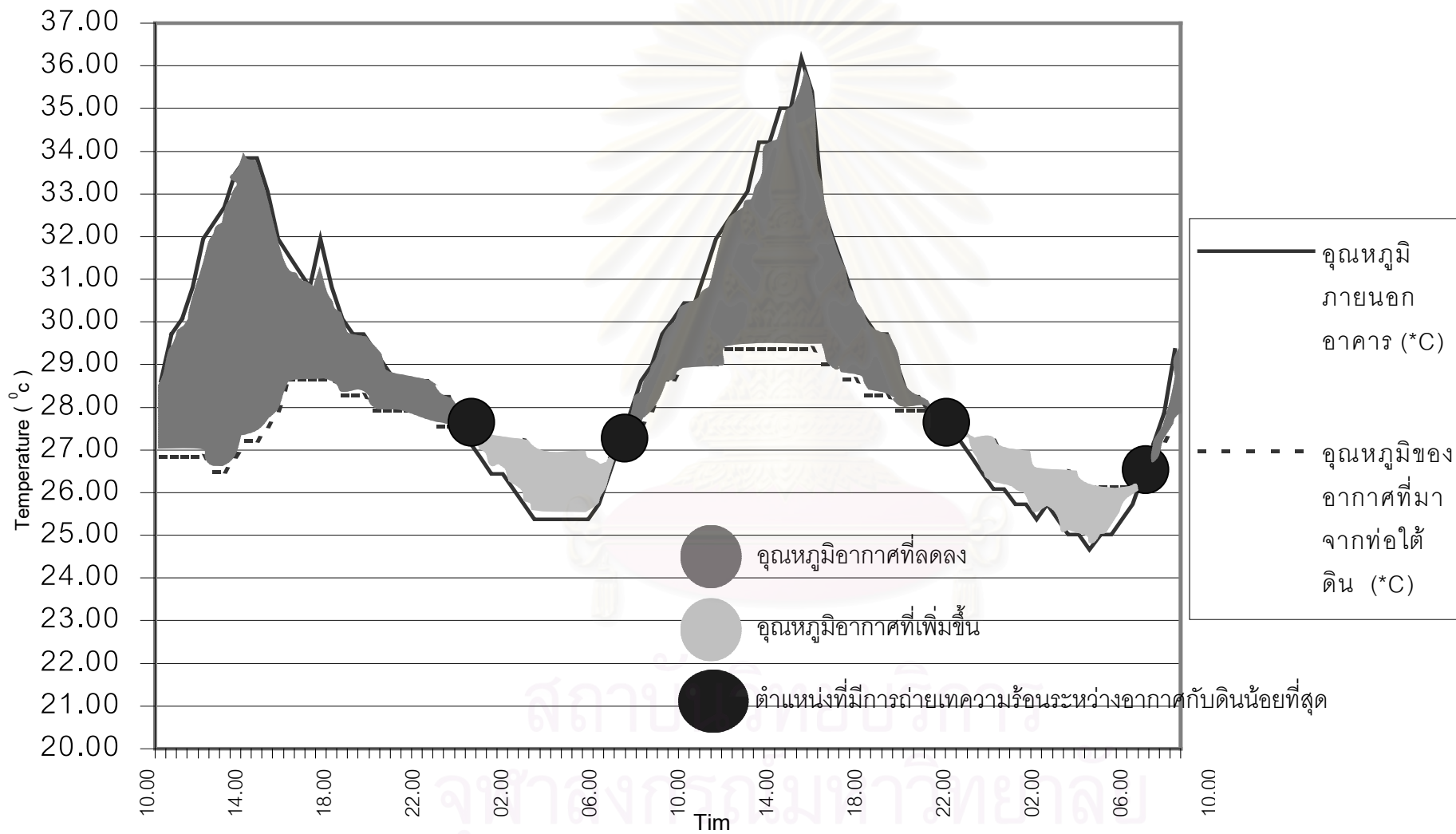
$$HE = -1.873 + 0.295 (OS) + 0.019(A) + 0.002 (V)$$

โดยที่ OS = ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศกับอุณหภูมิดิน ($^{\circ}C$)

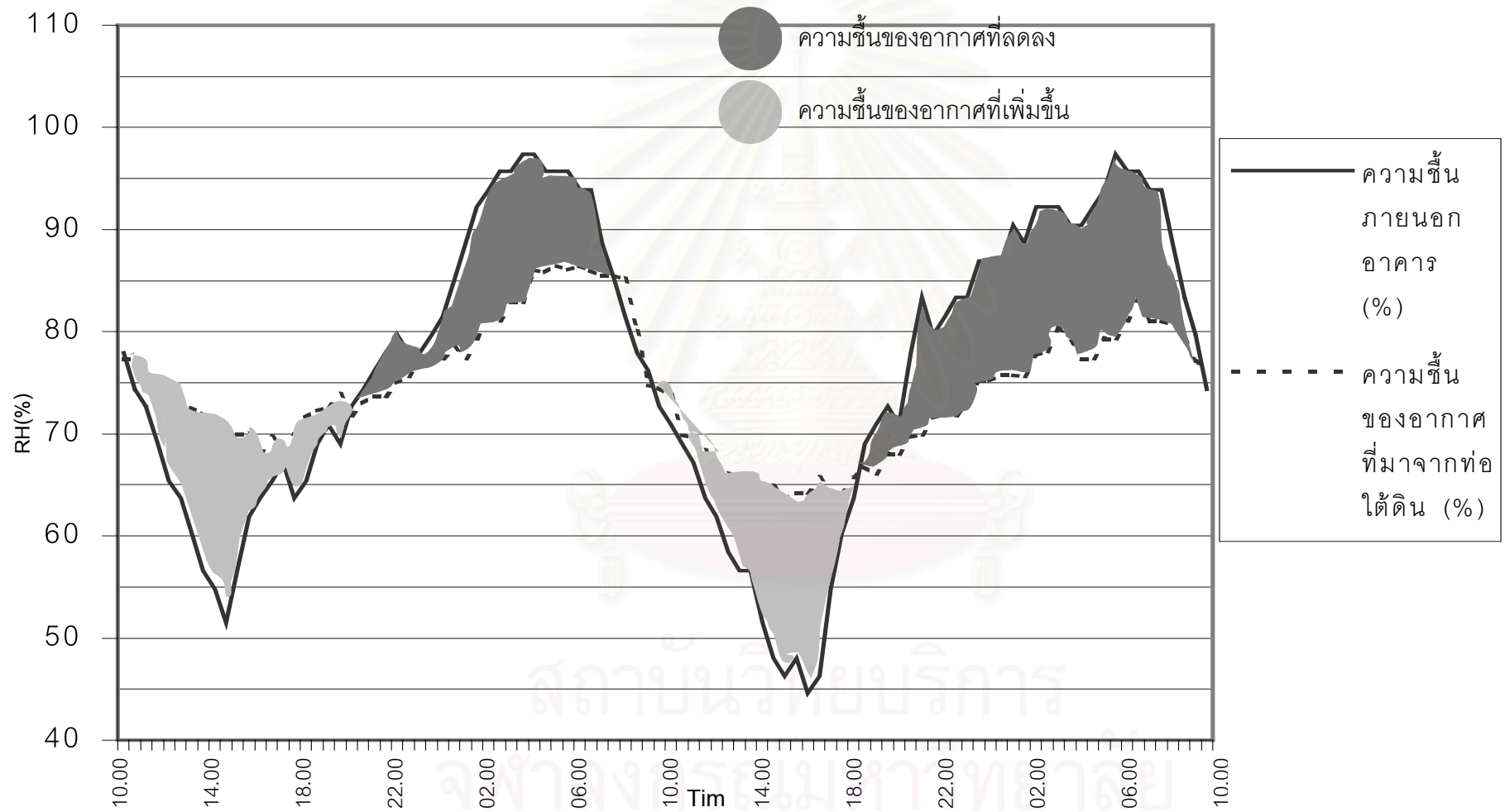
A = พื้นที่ผิวท่อที่อากาศสัมผัส (ตารางฟุต)

V = ความเร็วลมในท่อ (ฟุตต่อนาที)

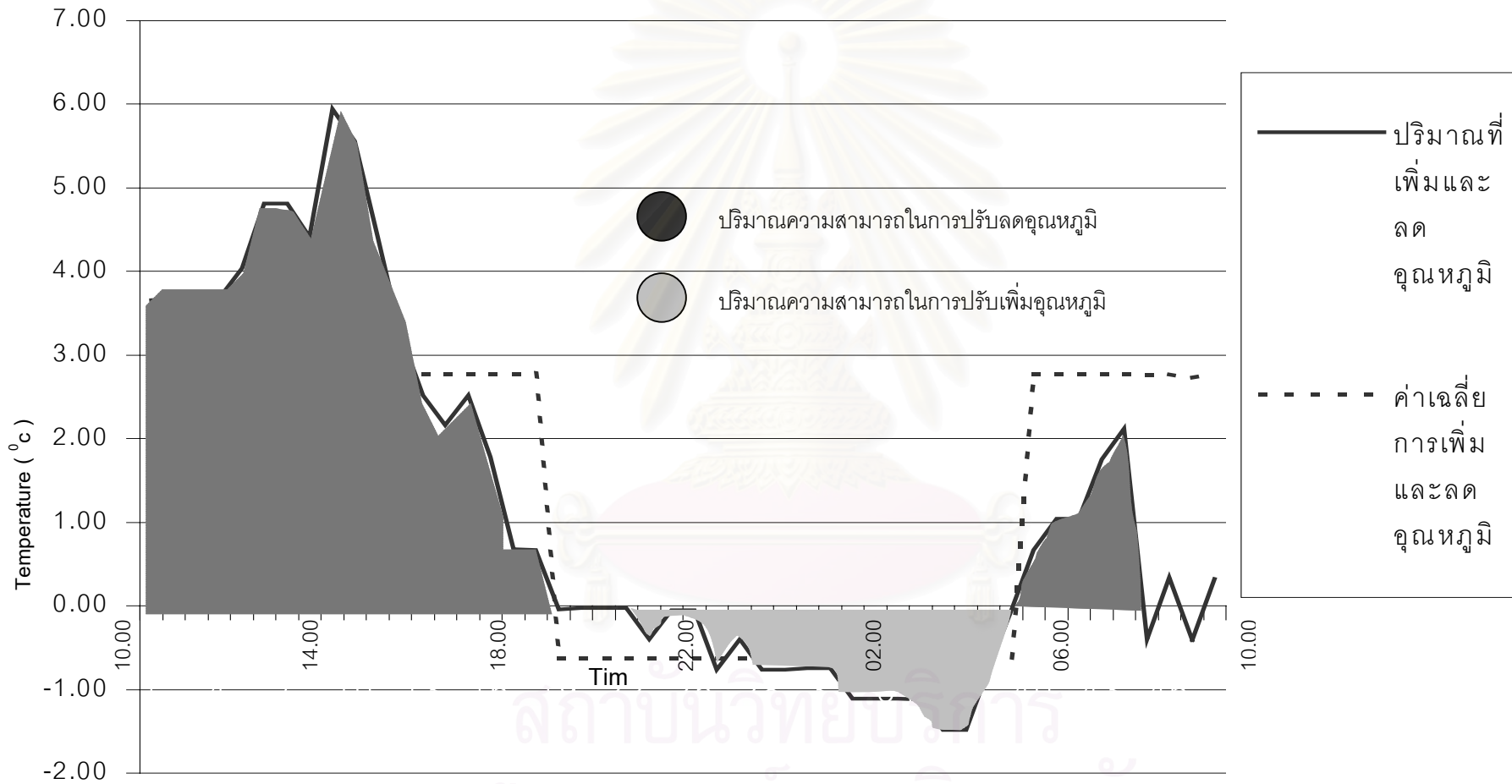
HE = อุณหภูมิที่ลดลง (BTU/Hr)



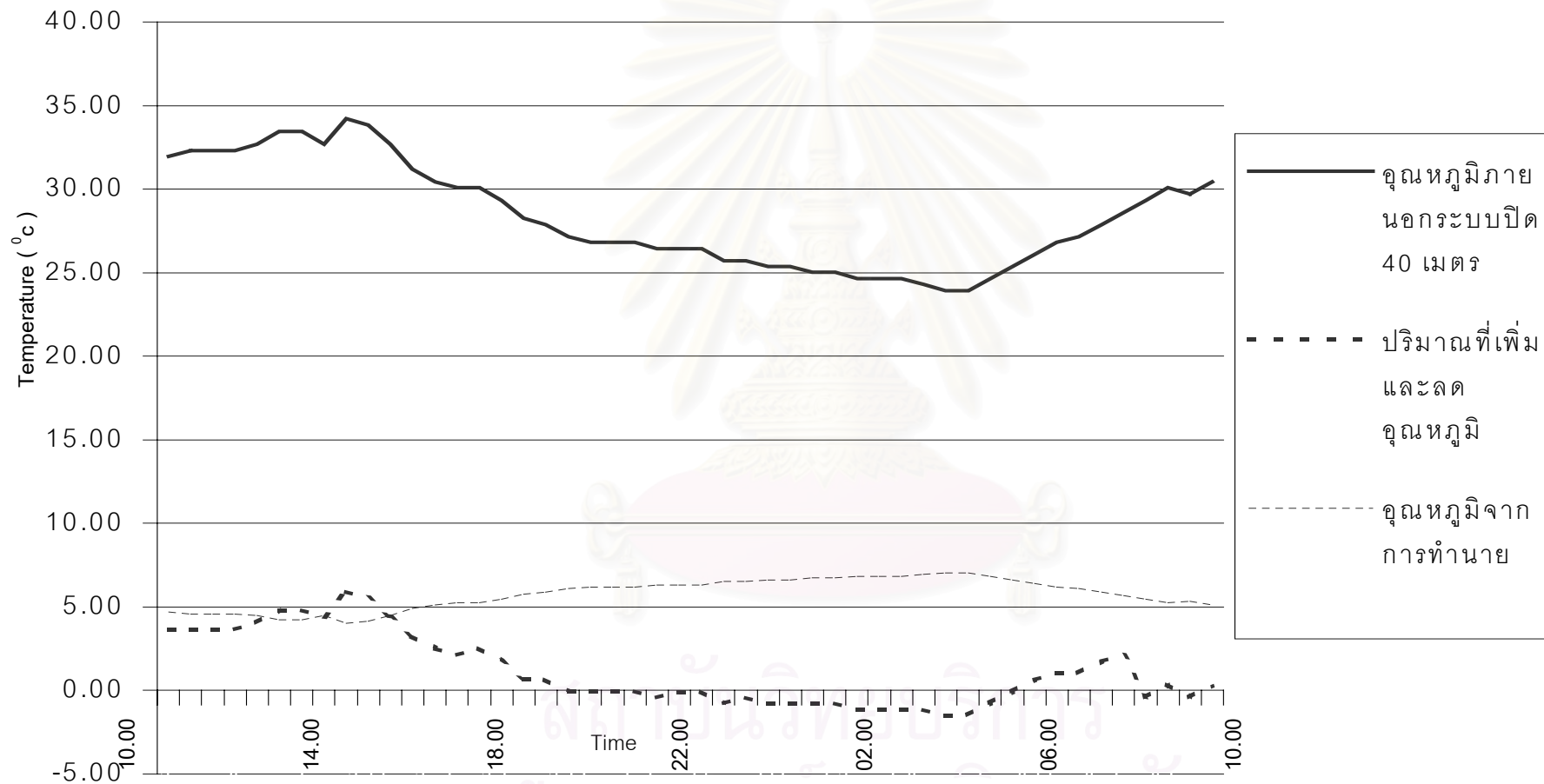
แผนภูมิ 4-17 แสดงปริมาณการเพิ่มและลดอุณหภูมิตามช่วงเวลา ของท่อใต้ดินระบบปิด (close loop system) ที่ความยาวท่อ 40 เมตร



แผนภูมิ 4-18 แสดงปริมาณการเพิ่มและลดความชื้นตามช่วงเวลา ของท่อใต้ดินระบบปิด (close loop system) ที่ความยาวท่อ 40 เมตร



แผนภูมิ 4-19 แสดงอุณหภูมิที่เพิ่มและลดลงของท่อใต้ดินระบบปิด (close loop system) ที่ความยาวท่อ 40 เมตร



แผนภูมิ 4-20 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศที่ลดหรือเพิ่มจากการทดลองกับอุณหภูมิจากการทำนายนาย ระบบปิด ที่ความยาวท่อ 40 เมตร

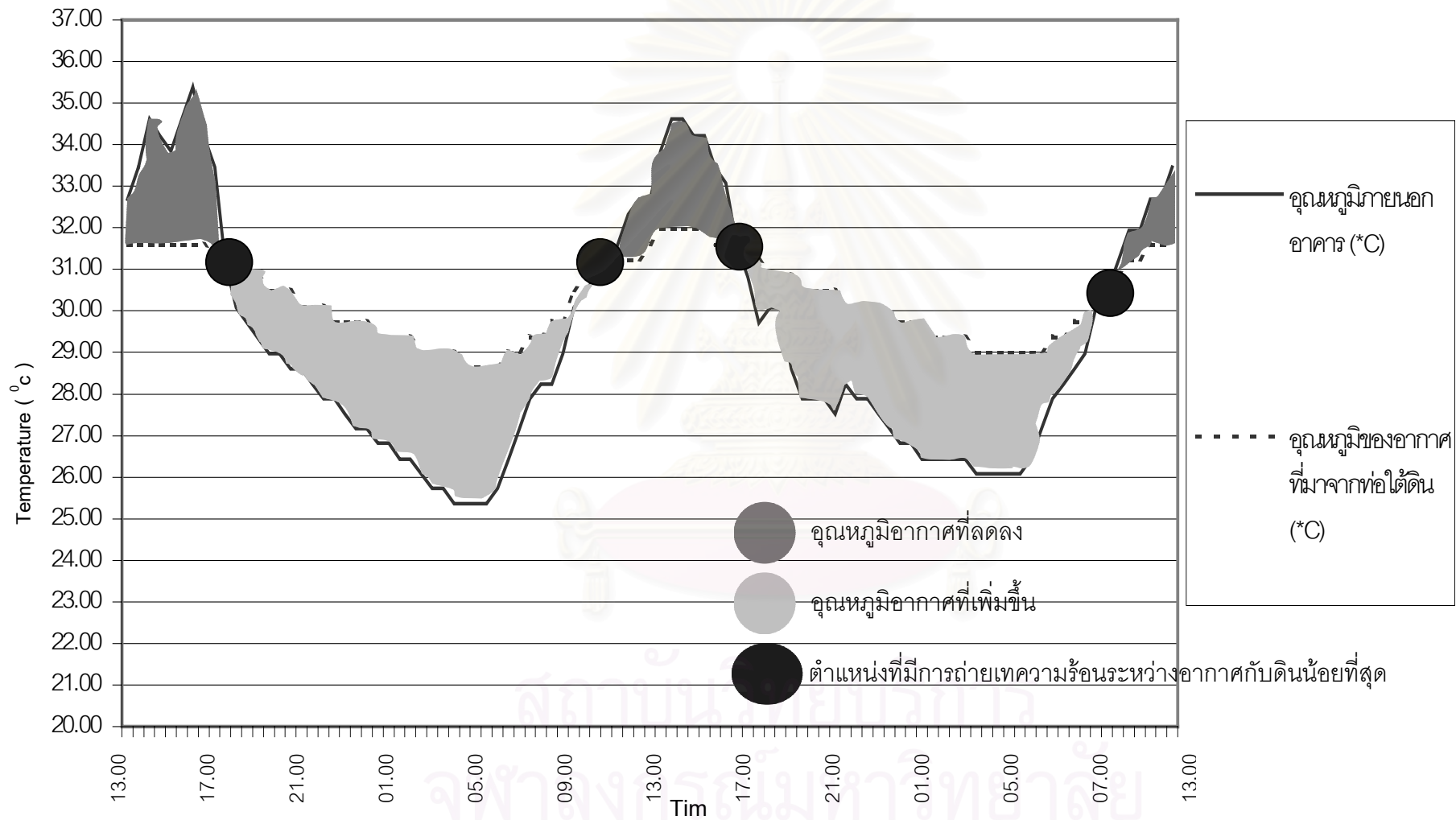
- ระบบปิด(close loop system) ความยาวท่อ 30 เมตร

เป็นการทำความเย็น โดยอาศัยการนำอากาศจากภายในอาคารที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าภายนอกอยู่แล้ว มาผ่านท่อใต้ดินความยาว 30 เมตร เพื่อให้อุณหภูมิอากาศที่สูงกว่าถ่ายเทลงสู่ดินที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า จากผลการทดลองพบว่า ท่อใต้ดินในระบบปิดที่มีความยาวท่อ 30 เมตร มีความสามารถในการปรับลดอุณหภูมิอากาศที่ผ่านมาจากท่อใต้ ตั้งแต่ช่วงเวลา 11.00 น. จนไปถึงช่วงเวลา 18.00 น. และจากการวัดผลอุณหภูมิพบว่าในช่วงเวลา 16.30 น. ของวันที่ 7 มิถุนายน 2545 อุณหภูมิอากาศขึ้นสูงถึง 35.40 องศาเซลเซียส ในขณะที่อุณหภูมิอากาศที่ตำแหน่งปลายท่อก่อนเข้าสู่ห้อง ลดต่ำลงมา 3.8 องศาเซลเซียส คือเหลือ 31.60 องศาเซลเซียส (ดูแผนภูมิ 4-21, 4-22 ประกอบ) และเมื่อพิจารณาถึงส่วนต่างของอุณหภูมิอากาศภายนอกกับภายในแล้ว พบว่าท่อใต้ดินระบบปิดที่มีความยาวท่อ 30 เมตร จะมีความสามารถในการปรับลดอุณหภูมิโดยเฉลี่ย ลงได้ประมาณ 2 ถึง 2.5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 ชั่วโมง คือตั้งแต่เวลา 11.00 น. จนไปถึงช่วงเวลา 18.00 น. (ดูแผนภูมิ 4-23 ประกอบ) ส่วนเวลาที่เหลืออีก 17 ชั่วโมง ท่อใต้ดินระบบปิดที่มีความยาวท่อ 30 เมตร จะมีความสามารถในการปรับเพิ่มอุณหภูมิโดยเฉลี่ยขึ้นได้ประมาณ 2.5 ถึง 3 องศาเซลเซียส

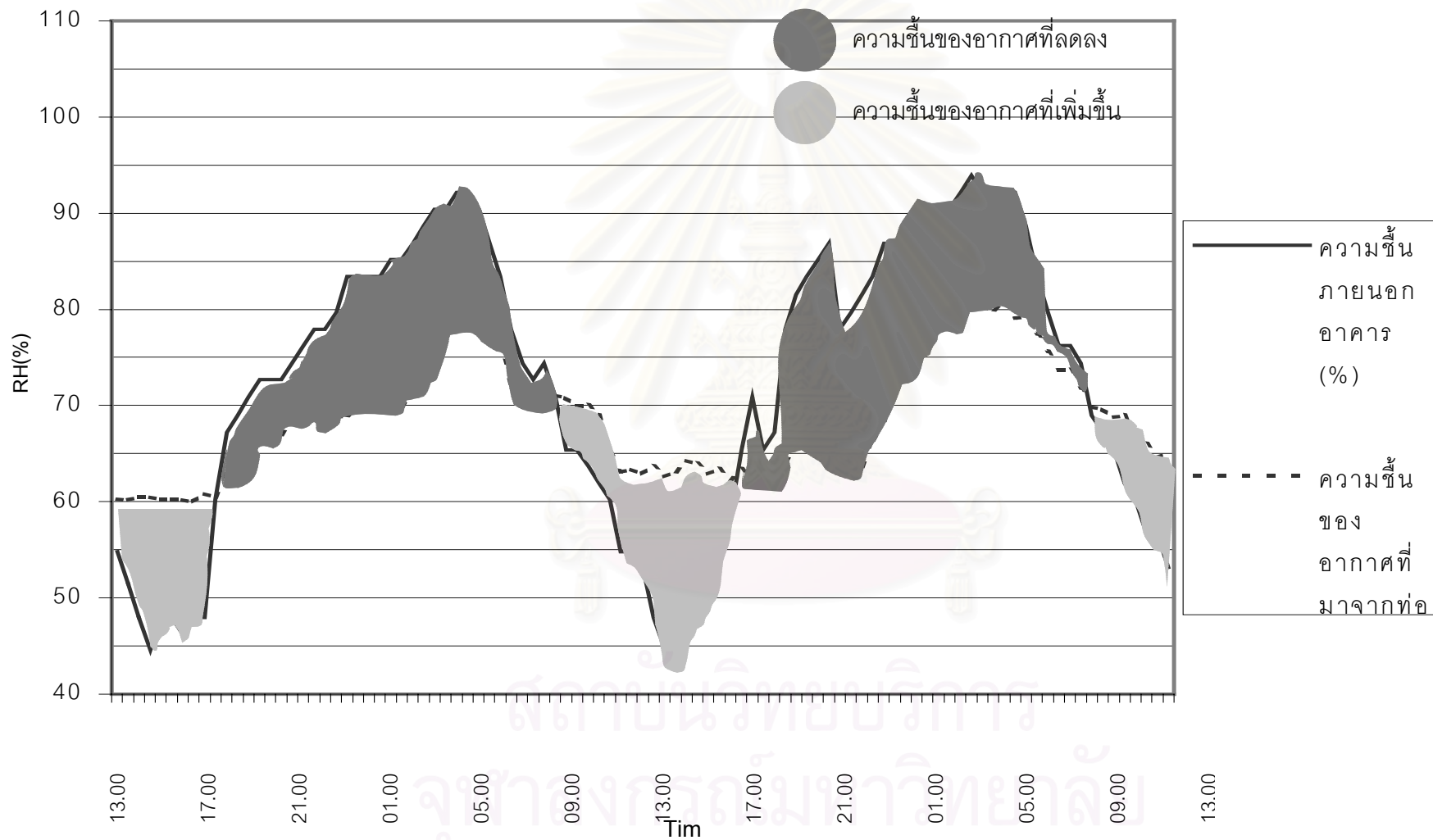
จากผลการทดลอง เมื่อพิจารณากลับไปถึงงานวิจัย ที่เคยได้มีการทำการทดลองกับการใช้งานของระบบท่อใต้ดินมาแล้ว พบว่าอุณหภูมิที่ทำนายจากรายการคำนวณ กับอุณหภูมิที่ได้จากการทำการทดลองครั้งนี้ มีแนวโน้มของการเพิ่มและลดของอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน (ดูแผนภูมิ 4-24 ประกอบ) แต่เนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมาได้เลือกใช้วัสดุท่อใต้ดินเป็นสแตนเลส (สุพจน์ ดวงสินทวีกุล, 2537) ซึ่งแตกต่างกับการทำการวิจัยครั้งนี้ และความเร็วลมที่ใช้ก็แตกต่างกัน จึงส่งผลทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิทั้งสอง ซึ่งจะเปรียบเทียบโดยใช้สมการดังนี้

$$HE = -1.873 + 0.295 (OS) + 0.019(A) + 0.002 (V)$$

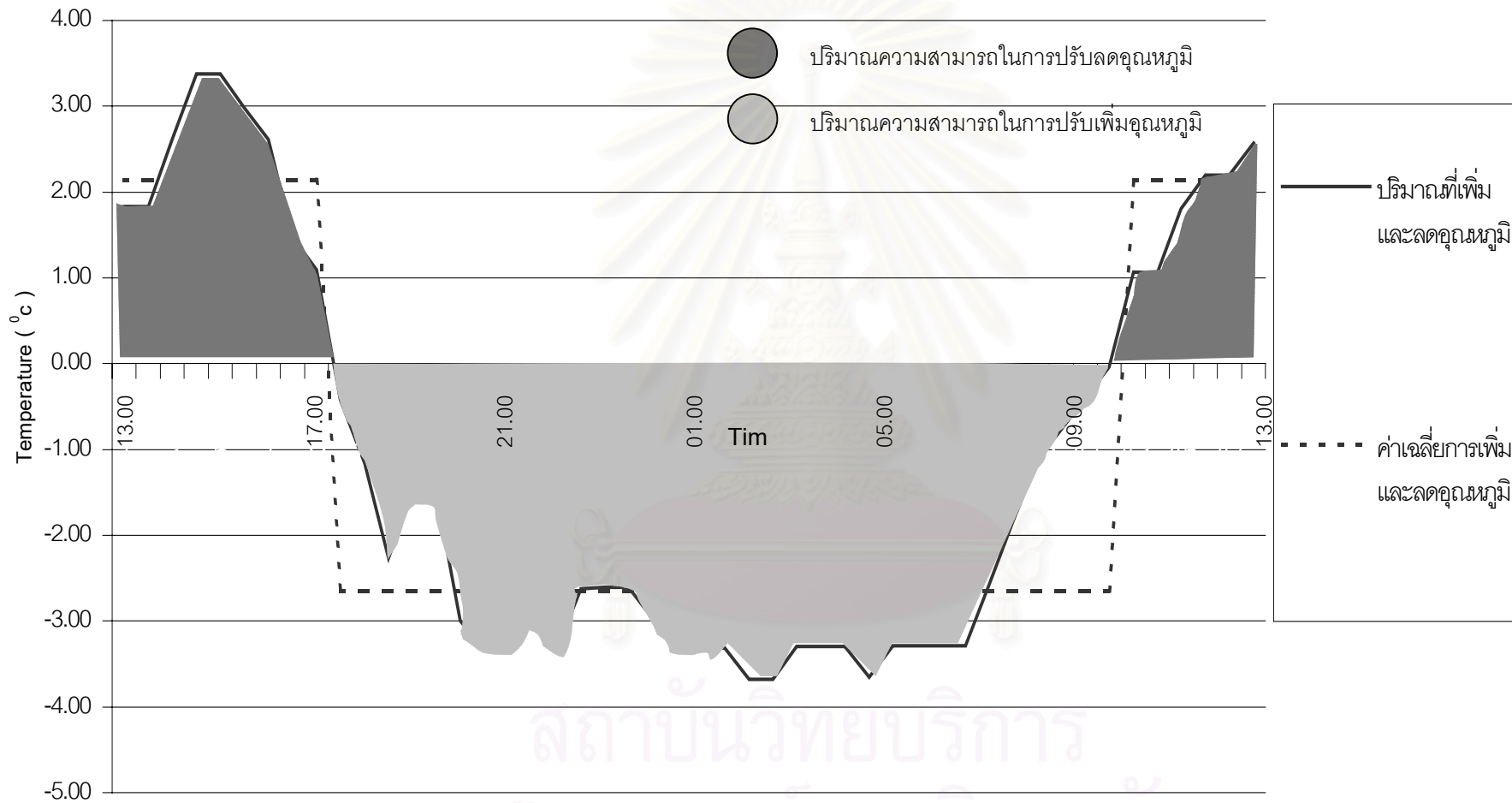
โดยที่ OS = ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศกับอุณหภูมิดิน ($^{\circ}C$)
A = พื้นที่ผิวท่อที่อากาศสัมผัส (ตารางฟุต)
V = ความเร็วลมในท่อ (ฟุตต่อนาที)
HE = อุณหภูมิที่ลดลง (BTU/Hr)



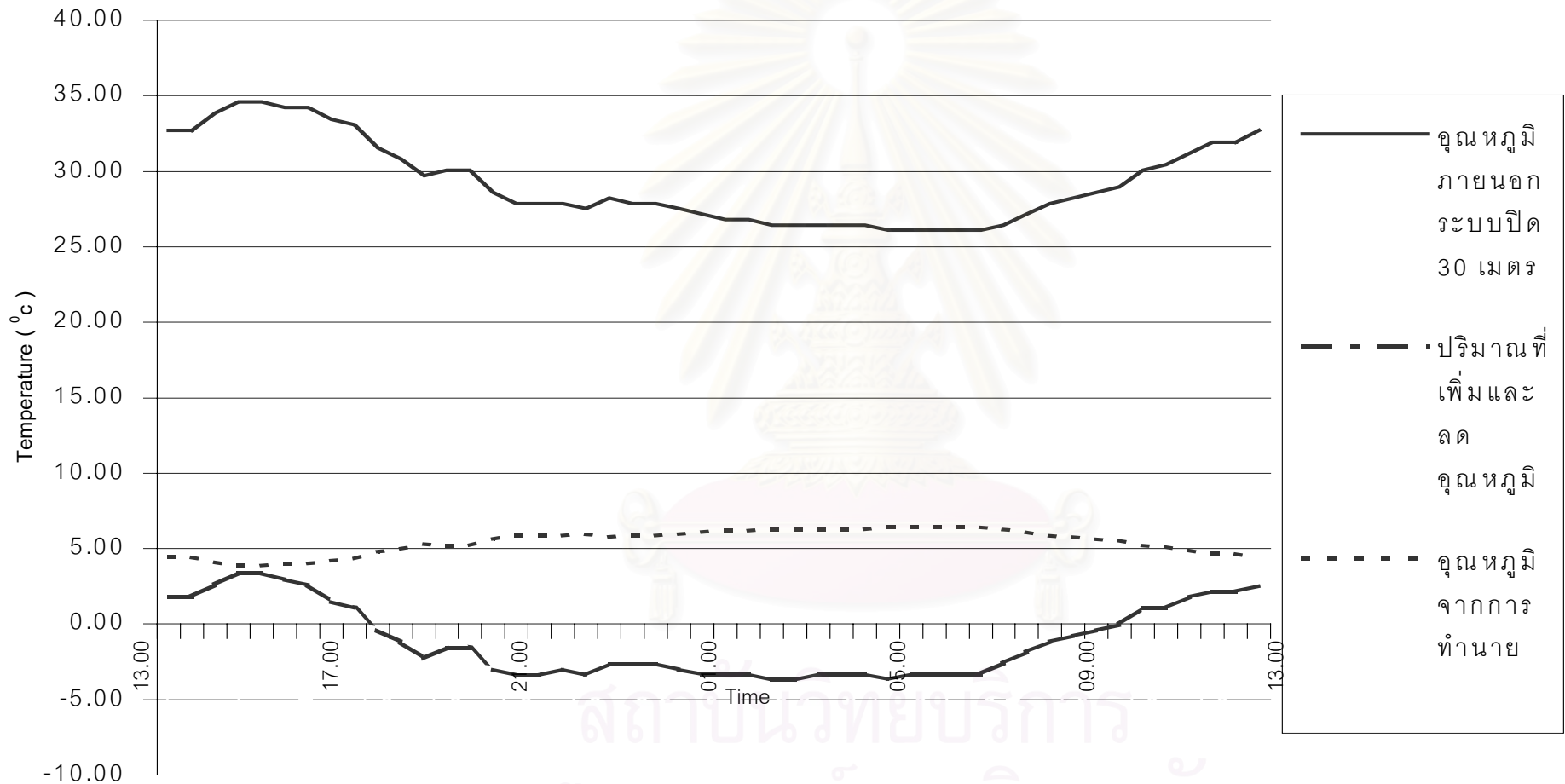
แผนภูมิ 4-21 แสดงปริมาณการเพิ่มและลดอุณหภูมิตามช่วงเวลา ของท่อใต้ดินระบบปิด (close loop system) ที่ความยาวท่อ 30 เมตร



แผนภูมิ 4-22 แสดงปริมาณการเพิ่มและลดความชื้นตามช่วงเวลา ของท่อใต้ดินระบบปิด (close loop system) ที่ความยาวท่อ 30 เมตร



แผนภูมิ 4-23 แสดงอุณหภูมิที่เพิ่มและลดลงของท่อใต้ดินระบบปิด (close loop system) ที่ความยาวท่อ 30 เมตร



แผนภูมิ 4-24 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศที่ลดหรือเพิ่มจากการทดลองกับอุณหภูมิจากการทำนาย ระบบปิด ที่ความยาวท่อ 30 เมตร

- ระบบเปิด(open loop system) ความยาวท่อ 30 เมตร

เป็นการทำความเย็น โดยอาศัยการนำอากาศจากภายนอกอาคารในบริเวณที่มีความบริสุทธิ์กว่าภายในอาคาร มาผ่านท่อใต้ดินความยาว 30 เมตร เพื่อให้อุณหภูมิอากาศที่สูงกว่าถ่ายเทลงสู่ดินที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า จากผลการทดลองพบว่า ท่อใต้ดินในระบบเปิดที่มีความยาวท่อ 30 เมตร มีความสามารถในการปรับลดอุณหภูมิอากาศที่ผ่านมาจากท่อได้ ตั้งแต่ช่วงเวลา 10.30 น. จนไปถึงช่วงเวลา 17.00 น. และจากการวัดผลอุณหภูมิพบว่าในช่วงเวลา 14.00 น. ของวันที่ 9 มิถุนายน 2545 อุณหภูมิอากาศขึ้นสูงถึง 34.60 องศาเซลเซียส ในขณะที่อุณหภูมิอากาศที่ตำแหน่งปลายท่อก่อนเข้าสู่ห้อง ลดต่ำลงมา 2.60 องศาเซลเซียส คือเหลือ 32.0 องศาเซลเซียส (ดูแผนภูมิ 4-25,4-26 ประกอบ) และเมื่อพิจารณาถึงส่วนต่างของอุณหภูมิอากาศภายนอกกับภายในแล้ว พบว่าท่อใต้ดินระบบเปิดที่มีความยาวท่อ 30 เมตร จะมีความสามารถในการปรับลดอุณหภูมิโดยเฉลี่ย ลงได้ประมาณ 2 ถึง 2.5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมงครึ่ง คือตั้งแต่เวลา 10.30 น. จนไปถึงช่วงเวลา 17.00 น. (ดูแผนภูมิ 4-27 ประกอบ) ส่วนเวลาที่เหลืออีก 17 ชั่วโมงครึ่ง ท่อใต้ดินระบบเปิดที่มีความยาวท่อ 30 เมตร จะมีความสามารถในการปรับเพิ่มอุณหภูมิโดยเฉลี่ย ขึ้นได้ประมาณ 4.5 ถึง 5 องศาเซลเซียส

จากผลการทดลอง เมื่อพิจารณากลับไปถึงงานวิจัย ที่เคยได้มีการทำการทดลองกับการใช้งานของระบบท่อใต้ดินมาแล้ว พบว่าอุณหภูมิที่ทำนายจากรายการคำนวณ กับอุณหภูมิที่ได้จากการทำการทดลองครั้งนี้ มีแนวโน้มของการเพิ่มและลดของอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน (ดูแผนภูมิ 4-28 ประกอบ) แต่เนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมาได้เลือกใช้วัสดุท่อใต้ดินเป็นสแตนเลส (สุพจน์ ดวงสินทวีกุล, 2537) ซึ่งแตกต่างกับการทำการวิจัยครั้งนี้ และความเร็วลมที่ใช้ก็แตกต่างกัน จึงส่งผลทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิทั้งสอง ซึ่งจะเปรียบเทียบโดยใช้สมการดังนี้

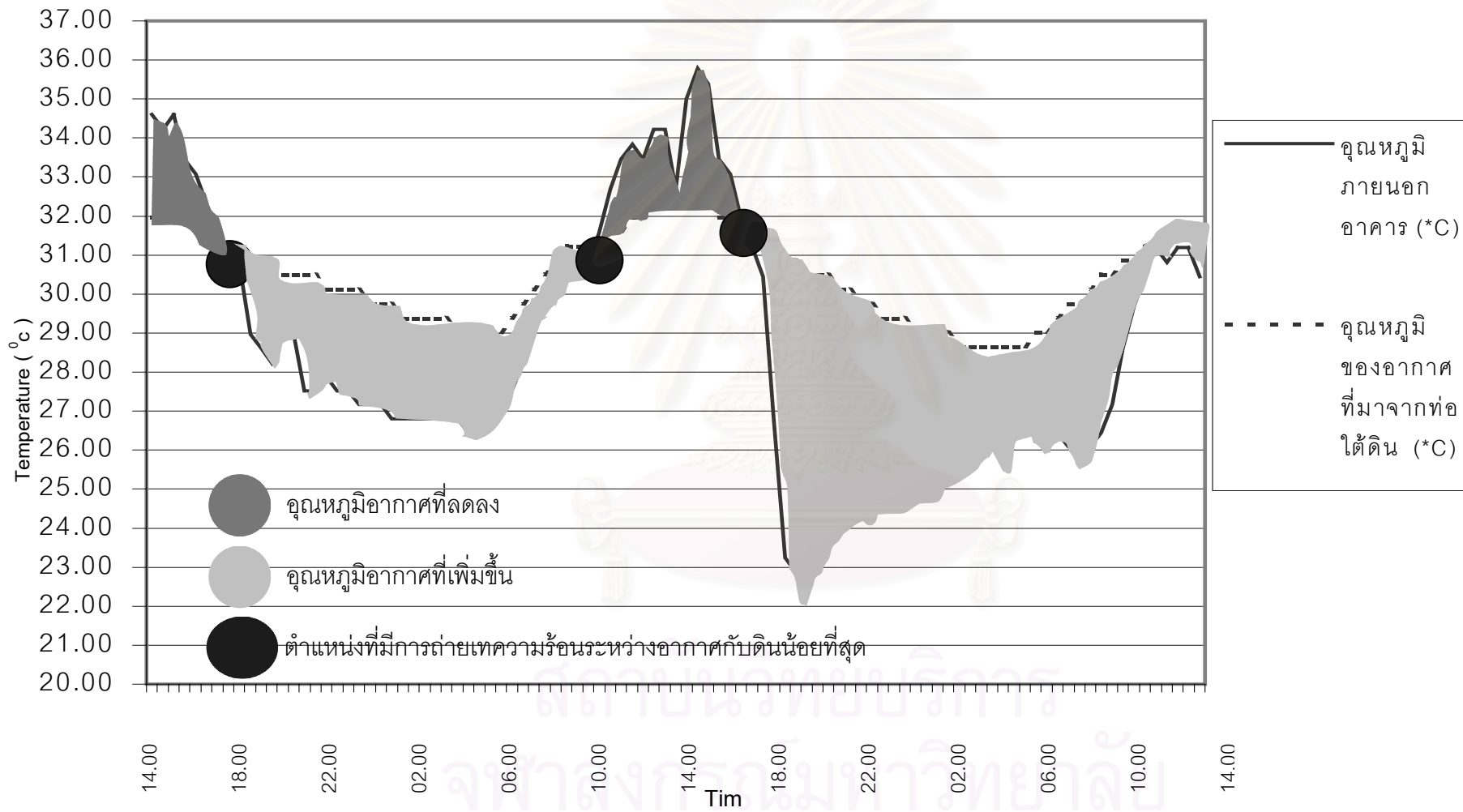
$$HE = -1.873 + 0.295 (OS) + 0.019 (A) + 0.002 (V)$$

โดยที่ OS = ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศกับอุณหภูมิดิน ($^{\circ}C$)

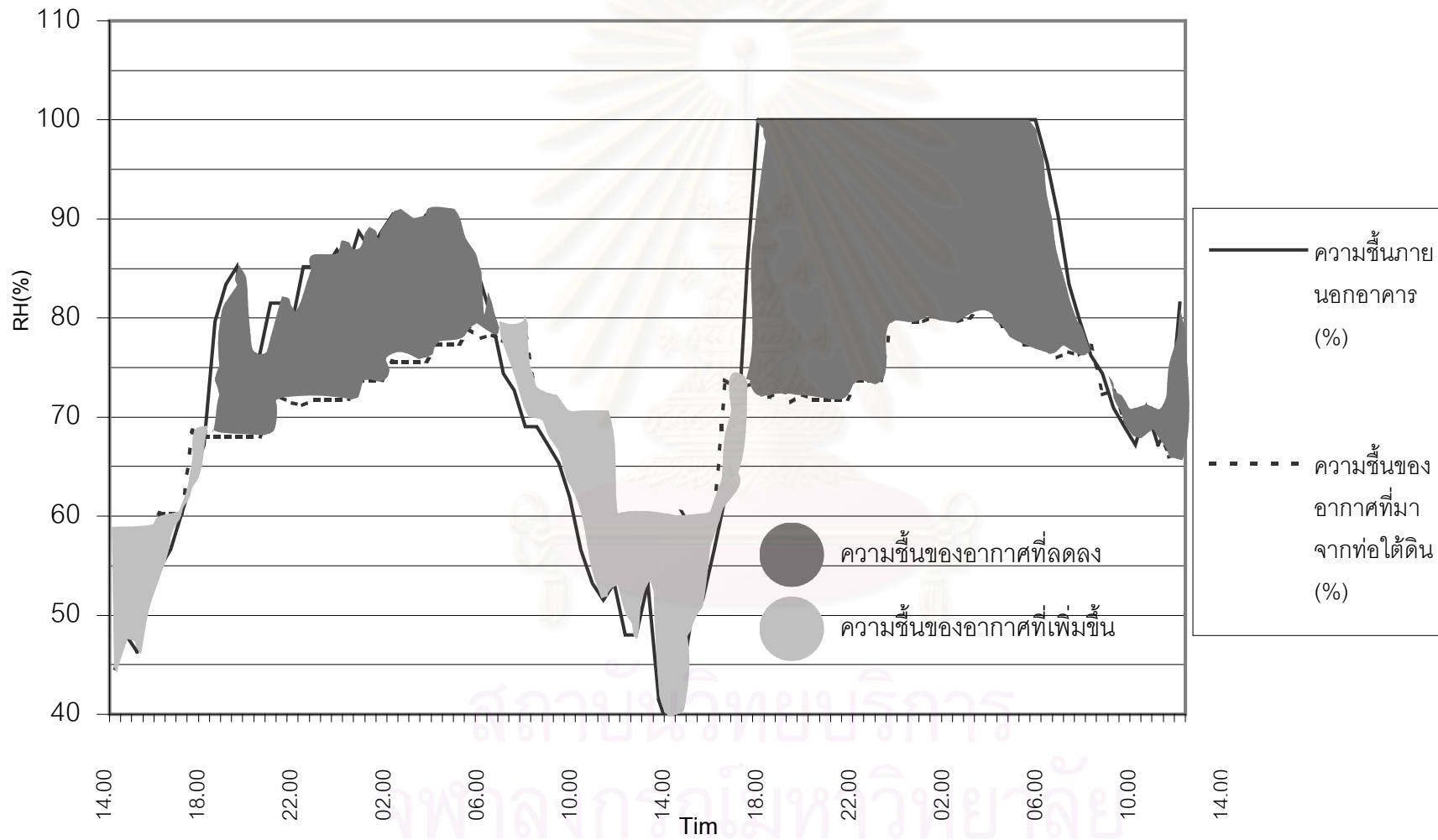
A = พื้นที่ผิวท่อที่อากาศสัมผัส (ตารางฟุต)

V = ความเร็วลมในท่อ (ฟุตต่อวินาที)

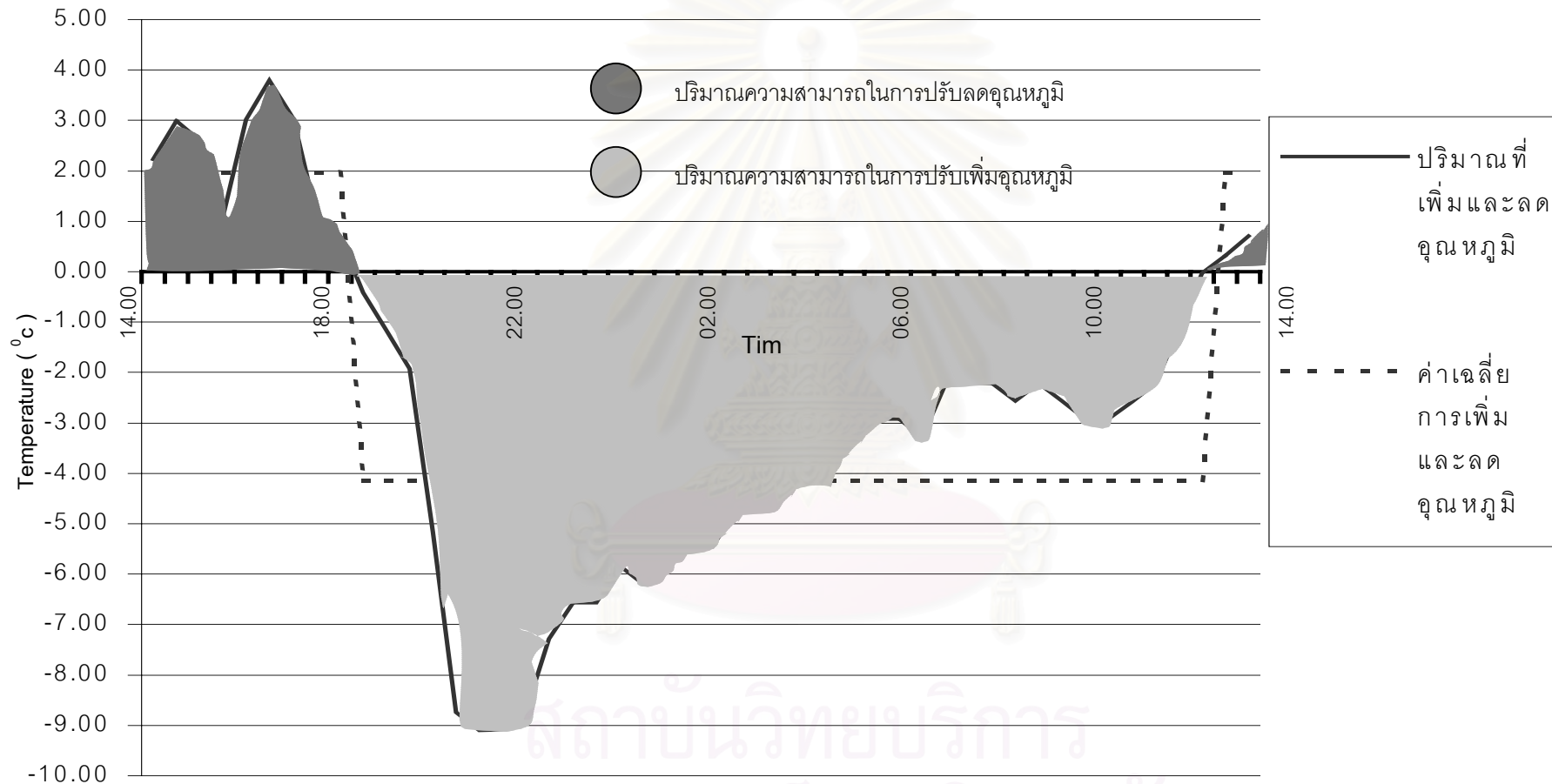
HE = อุณหภูมิที่ลดลง (BTU/Hr)



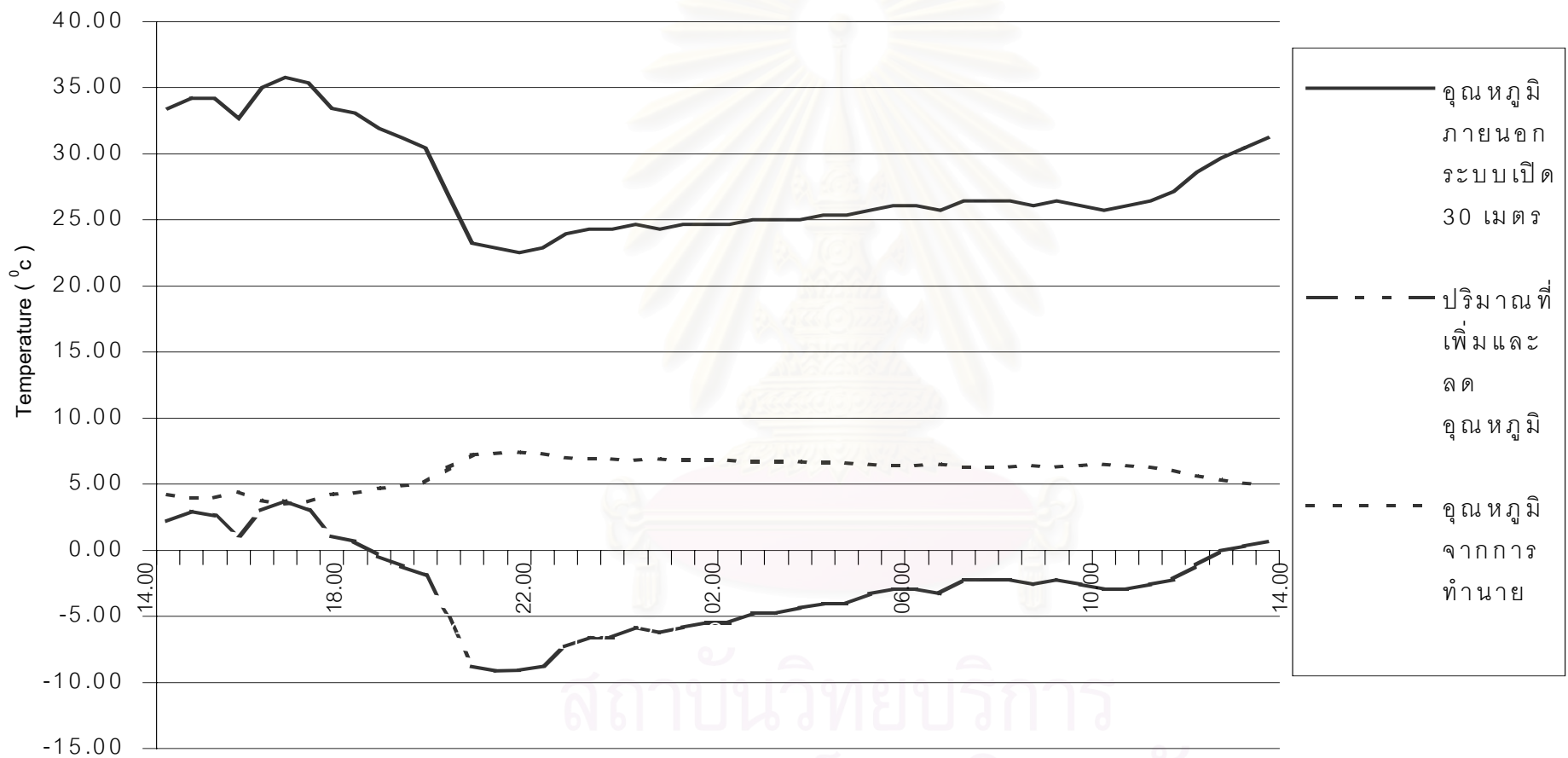
แผนภูมิ 4-25 แสดงปริมาณการเพิ่มและลดอุณหภูมิตามช่วงเวลา ของท่อใต้ดินระบบเปิด (open loop system) ที่ความยาวท่อ 30 เมตร



แผนภูมิ 4-26 แสดงปริมาณการเพิ่มและลดความชื้นตามช่วงเวลา ของท่อใต้ดินระบบเปิด (open loop system) ที่ความยาวท่อ 30 เมตร



แผนภูมิ 4-27 แสดงอุณหภูมิที่เพิ่มและลดลงของท่อใต้ดินระบบเปิด (open loop system) ที่ความยาวท่อ 30 เมตร



แผนภูมิ 4-28 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศที่ลดหรือเพิ่มจากการทดลองกับอุณหภูมิจากการทำนาย ระบบเปิด ที่ความยาวท่อ 30 เมตร

สรุปเปรียบเทียบความสามารถในการทำความเย็น ของแต่ละระบบ

เป็นการคำนวณถึงความสามารถในการปรับอุณหภูมิอากาศ จากความแตกต่างของอุณหภูมิ จาก 2 ตำแหน่งคือ ระหว่างบริเวณปลายท่ออากาศที่มาจากท่อใต้ดิน กับอุณหภูมิอากาศภายนอกของระบบเปิด และระหว่างบริเวณปลายท่ออากาศที่มาจากท่อใต้ดิน กับอุณหภูมิบริเวณปลายท่ออากาศออกจากห้องของระบบปิด ซึ่งปริมาณการถ่ายเทความร้อนสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Q = 1.08 \times \text{cfm} \times (t_o - t_i)$$

โดยที่ cfm = ความเร็วลม x พื้นที่หน้าตัดท่อ

t_o = อุณหภูมิอากาศภายนอก

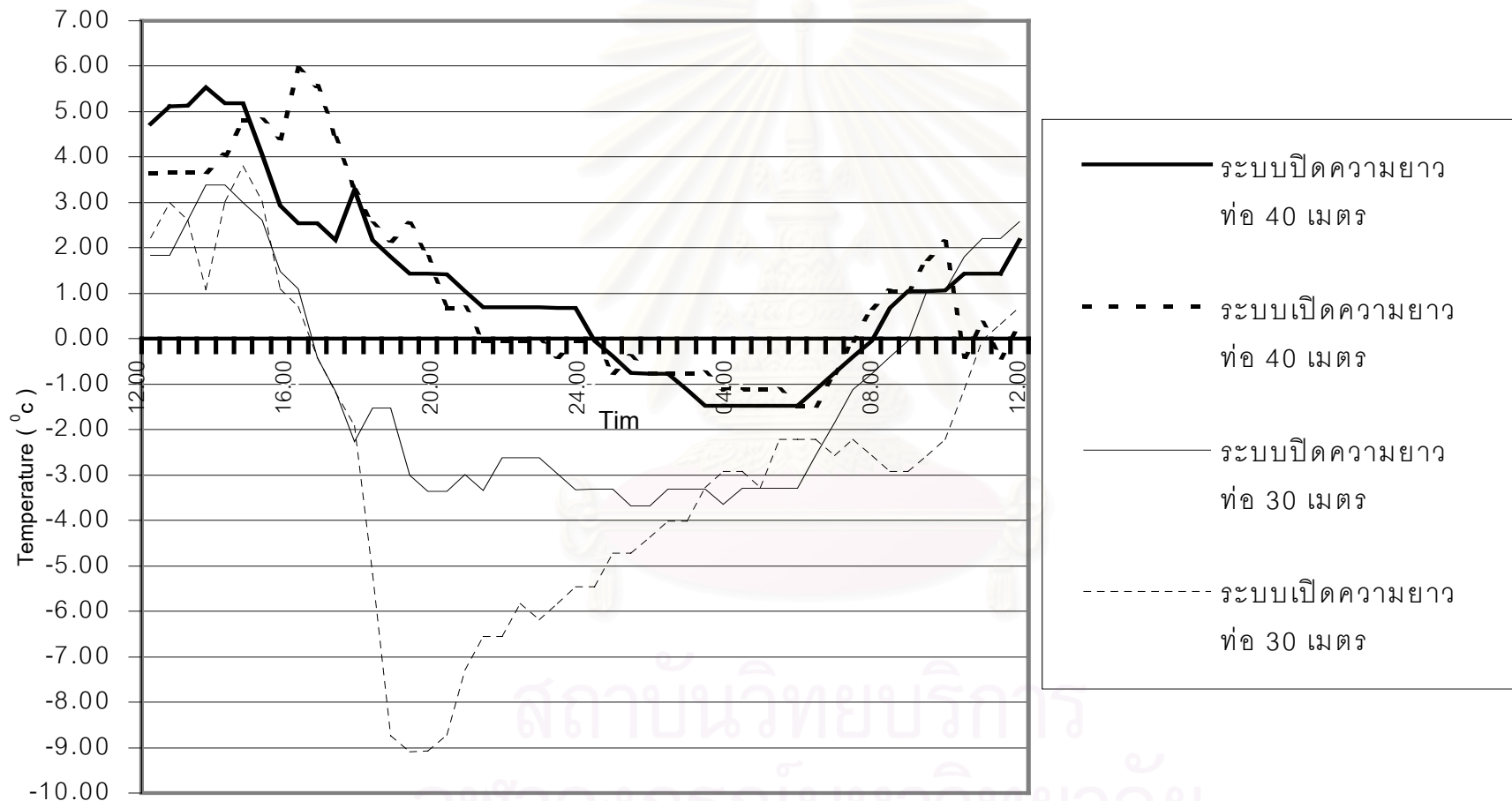
t_i = อุณหภูมิอากาศภายใน

ระบบท่อใต้ดิน และ ความยาวท่อ	อุณหภูมิสูงสุด		ผลต่าง อุณหภูมิ	Cooling load BTU/Hr	EER
	ภายนอก	ภายใน			
ระบบเปิด 40 เมตร	34.22	28.28	5.94	1283.04	15.09
ระบบปิด 40 เมตร	36.18	29.38	6.8	1468.80	17.28
ระบบปิด 30 เมตร	35.39	31.61	3.78	816.48	9.6
ระบบเปิด 30 เมตร	35.78	32.36	3.42	738.72	8.69

หมายเหตุ ทุกระบบใช้ความเร็วลมที่ 200 cfm และใช้พัดลมสองตัวรวมกันเป็น 85 วัตต์

ตาราง 4-5 แสดงการสรุปเปรียบเทียบความสามารถในการทำความเย็นในแต่ละระบบ

ในการทำการทดลองพบว่า อุณหภูมิอากาศที่ผ่านมาจากท่อใต้ดินสามารถลดลงตามช่วงเวลา ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความยาวของแต่ละระบบ เมื่อนำอุณหภูมิอากาศภายนอกอาคารลบออกด้วยอุณหภูมิอากาศที่มาจากท่อใต้ดินจะเกิดผลต่างของอุณหภูมิ(ดูแผนภูมิ 4-29 ประกอบ) ซึ่งในการเปรียบเทียบนั้นจะใช้เวลาในช่วงเดียวกัน คือ 12.00 น. ถึง 12.00 น. เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และประสิทธิภาพในการทำความเย็น(EER) จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถในการทำความเย็นสุทธิต่อพลังงานไฟฟ้าที่ป้อน ซึ่งสรุปได้ว่าระบบปิด 40 เมตร มีความเหมาะสมที่สุด



แผนภูมิ 4-29 แสดงความสามารถในการปรับลดอุณหภูมิในแต่ละระบบตามช่วงเวลาต่างๆ

ผลจากการเก็บข้อมูล

หลังจากสรุปผลการทดลองแล้ว จึงได้เลือกใช้ท่อใต้ดินระบบปิดที่มีความยาวท่อ 40 เมตร มาพิจารณาใช้งาน เพราะระบบนี้สามารถลดอุณหภูมิอากาศในช่วงเวลาที่ร้อนที่สุดของวันได้สูงถึง 6.8 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิอากาศที่มาจากท่อใต้ดินจะมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศภายนอกเกือบตลอดเวลา คือตั้งแต่เวลา 8.00 น. ถึง 24.00น. รวมเป็นเวลา 16 ชั่วโมง และส่วนเวลาที่เหลืออุณหภูมิภายนอกจะต่ำกว่าอุณหภูมิภายในห้อง ดังนั้นจึงปิดระบบการใช้งานท่อใต้ดินในเวลาดังกล่าว แล้วทำการวัดผลดังนี้

- การวิเคราะห์ข้อมูลในการทดลอง ครั้งที่ 5

สภาพอากาศโดยทั่วไปตลอดทั้ง 2 วัน มีท้องฟ้าแจ่มใส อากาศโปร่งและร้อนมีเมฆในปริมาณปานกลาง โดยทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิและความชื้น ณ ตำแหน่งภายนอกอาคารได้ อุณหภูมิสูงสุดของการทดลองที่ 34.32 องศาเซลเซียส ที่ความชื้น 84 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงเวลา 16.00 น. ของวันที่ 25 กรกฎาคม 2545 ในขณะที่อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งปลายท่อลมออกจากใต้ดินมาสู่ห้องนั้นมีอุณหภูมิต่ำสุดที่วัดได้จากการทดลองอยู่ที่ 26.13 องศาเซลเซียส ที่ความชื้น 95 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงเวลา 06.00 น. ของวันที่ 26 กรกฎาคม 2545 ในขณะที่นั้นได้ทำการปิดระบบตั้งแต่เวลา 24.00 น. ถึง 8.00 น. จึงทำการเปิดระบบอีกครั้ง (ดูตาราง 4-2 ประกอบ) ในการทดลองครั้งนี้ กำหนดให้ความเร็วลมที่ปลายท่อออกเป็น 200 fpm และเพื่อเป็นการปรับปรุงสภาพอากาศภายในอาคารให้มีความเหมาะสมกับการอยู่อาศัย จึงได้มีการเปิดช่องระบายอากาศ 2 จุดเป็นพื้นที่รวม 0.40 ตารางเมตรในตำแหน่งภายในอาคาร เพื่อลดปัจจัยภายนอกที่อาจจะส่งผลกระทบต่อ การทดลอง

	อุณหภูมิภายนอกสูงสุด		อุณหภูมิภายนอกต่ำสุด	
	อุณหภูมิภายนอก	อุณหภูมิปลายท่อ	อุณหภูมิภายนอก	อุณหภูมิปลายท่อ
อุณหภูมิ	34.32	28.30	26.13	-
ความชื้น	84	79	95	-

ตาราง 4-6 แสดงอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองท่อใต้ดินระบบปิดความยาว 40 เมตร หลังจากปรับปรุงเวลาการใช้งานแล้ว

จากการเก็บข้อมูลในครั้งที่ 2 สามารถสรุปได้ดังนี้

1. จากอุณหภูมิอากาศภายนอกที่มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงกลางวันและกลางคืนสูง เมื่อนำอากาศมาผ่านท่อใต้ดินในระบบปิด (close loop system) ความยาว 40 เมตร สามารถ

ปรับอุณหภูมิของอากาศที่สูงสุดที่ 34.32 องศาเซลเซียส ลดลงเหลือ 28.30 องศาเซลเซียส
จึงเกิดส่วนต่าง 6.02 องศาเซลเซียส (ดูแผนภูมิ 4-30 ประกอบ)

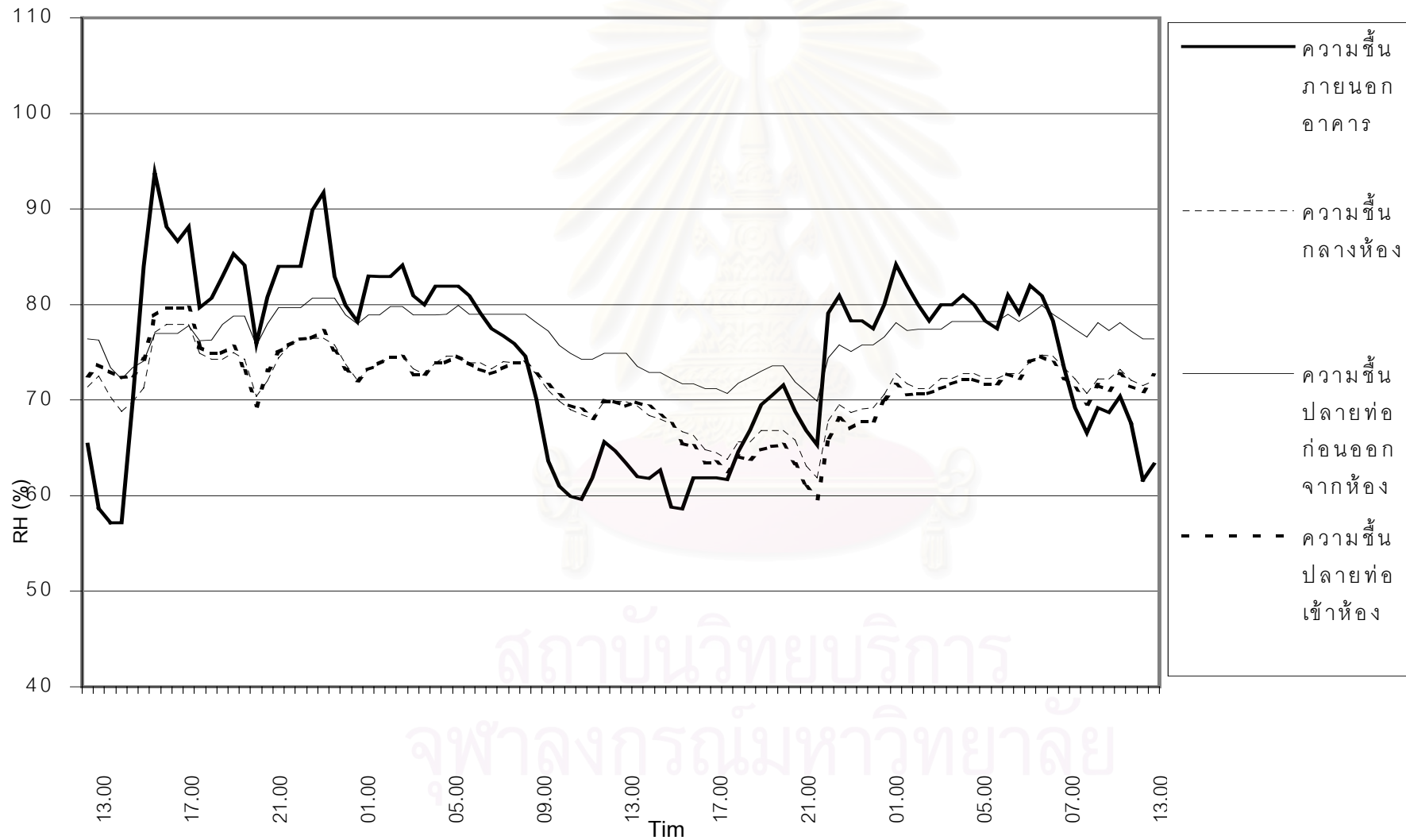
2. จากการทำเป็นระบบปิด คือนำอากาศภายในห้องมาผ่านระบบท่อใต้ดิน จึงทำให้
อุณหภูมิของอากาศภายในห้องและอุณหภูมิอากาศ ที่ออกมาจากท่อใต้ดินมีความสัมพันธ์
เกี่ยวเนื่องในการขึ้นและลงของอุณหภูมิกันโดยตลอด

3. ความชื้นมีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องในการขึ้นและลงของปริมาณความชื้นระหว่าง
ความชื้นภายในห้องและความชื้นที่ออกมาจากท่อใต้ดิน (ดูแผนภูมิ 4-31 ประกอบ)

4. ในช่วงเวลาตอนกลางวัน อุณหภูมิอากาศภายนอกจะสูงกว่าอุณหภูมิอากาศที่มาจาก
ท่อใต้ดิน ตั้งแต่เวลา 08.00 น. วันที่ 25 กรกฎาคม 2545 จนถึง เวลา 24.00 น. วันที่ 25
กรกฎาคม 2545 จากนั้นอุณหภูมิอากาศภายนอกจะต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศที่มาจากท่อจนถึง
เวลา 08.00 น. วันที่ 26 กรกฎาคม 2545 อุณหภูมิภายนอกจึงจะกลับมาสูงกว่าอุณหภูมิ
อากาศ ที่มาจากท่อใต้ดินอีกครั้ง (ดูแผนภูมิ 4-32 ประกอบ)

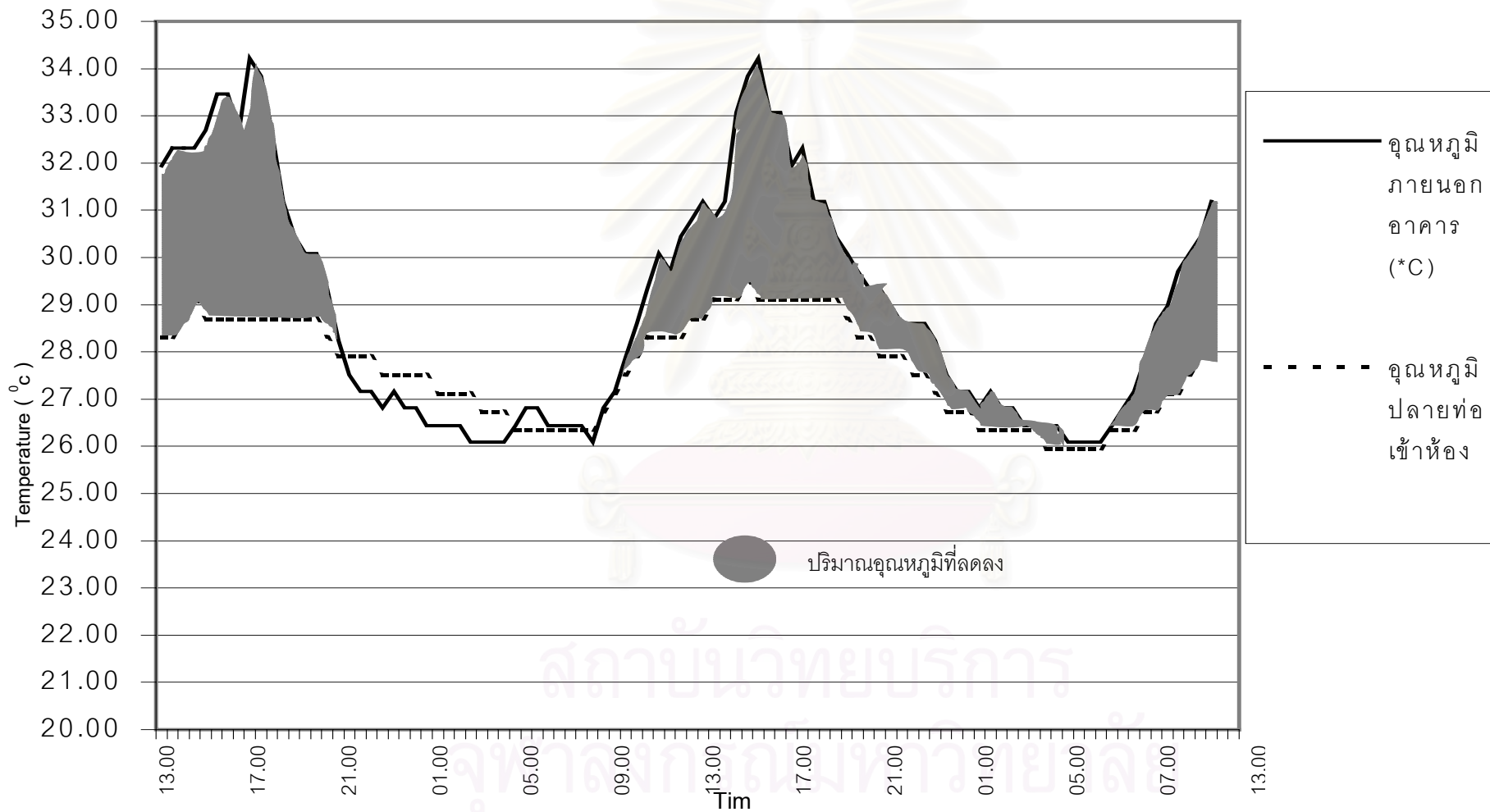
5. เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศที่ได้จากการทดลอง หลังจากเปิด-ปิดระบบตามเวลา
ที่มีความเหมาะสม กับเขตสภาวะน่าสบายของ John F. Busch จะพบว่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้น
ตลอดทั้ง 24 ชั่วโมงจัดอยู่ในสภาวะน่าสบายทางด้านอุณหภูมิ (ดูแผนภูมิ 4-33 ประกอบ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

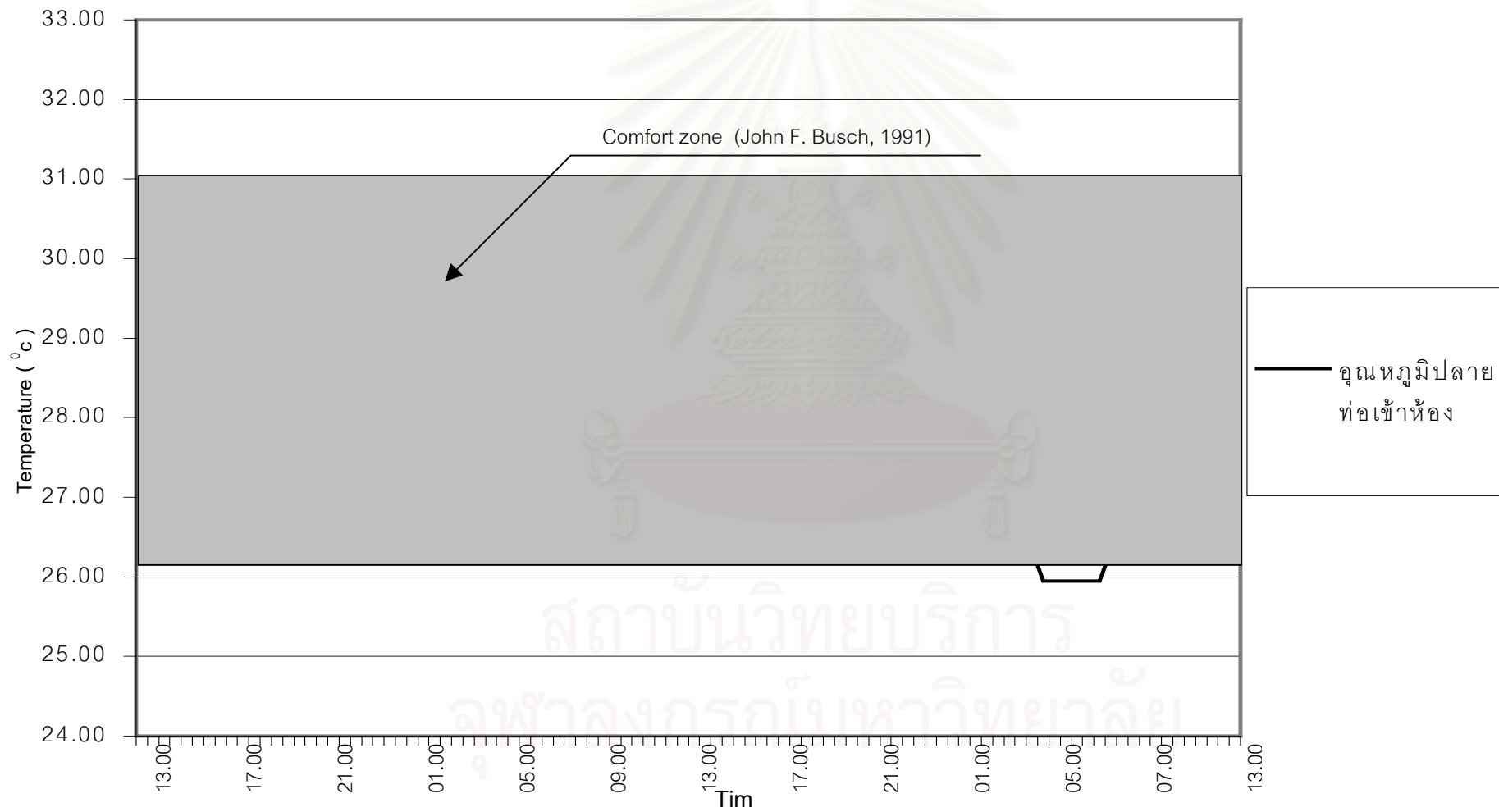


แผนภูมิ 4-31 แสดงความชื้นจากการทดลองหลังจากเปิด ปิดระบบในช่วงเวลาที่เหมาะสม ของท่อใต้ดินระบบปิด (close loop system)

ความยาวท่อ 40 เมตร



แผนภูมิ 4-32 แสดงปริมาณการเพิ่มและลดอุณหภูมิหลังจากเปิด ปิดระบบตามช่วงเวลา ของท่อใต้ดินระบบปิด (close loop system) ที่ความยาวท่อ 40 เมตร



แผนภูมิ 4-33 แสดงเปรียบเทียบอุณหภูมิหลังจากเปิด ปิด ระบบ ตามช่วงเวลาที่เหมาะสม กับเขตสภาวะน่าสบาย

การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

ในการเลือกใช้ระบบท่อใต้ดิน เพื่อปรับปรุงภูมิอากาศ ต้องมีการลงทุนค่อนข้างสูง เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องปรับอากาศโดยทั่วๆ ไป แต่ระบบท่อใต้ดินสามารถประหยัดค่าไฟฟ้าได้มาก เพราะระบบท่อใต้ดินใช้กำลังไฟเพียงแค่ 85 วัตต์ สำหรับพัดลมดูดอากาศและพัดลมตั้งพื้น ที่จะช่วยให้อากาศภายในห้องเกิดการเคลื่อนที่เพื่อหมุนเวียนอากาศเท่านั้น ส่วนเครื่องปรับอากาศจะต้องใช้กำลังไฟเพื่อนำความร้อนภายในห้องระบายสู่ภายนอก ซึ่งจะเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานอย่างมหาศาล

การเปรียบเทียบค่าใช้จ่าย จะใช้ราคารวมในการก่อสร้างท่อใต้ดินระบบปิด ที่ความยาวท่อ 40 เมตร เปรียบเทียบกับเครื่องปรับอากาศ ขนาด 12,500 บีทียู 5 ที่มีค่า EER 10.6 เป็นรุ่นที่มีราคาในระดับปานกลาง ซึ่งโดยทั่วๆ ไปราคาเครื่องปรับอากาศในระดับนี้จะอยู่ที่ 18,000 บาท ส่วนระบบท่อใต้ดินจำเป็นจะต้องมีค่าใช้จ่ายดังนี้

ลำดับ	รายการค่าใช้จ่าย	จำนวน	ราคา	รวม	หมายเหตุ
1	ท่อ พีวีซี 6 นิ้ว ยาว 4 เมตร	12	950	11,400*	รายการคำนวณนี้คิด
2	ข้อต่อ พีวีซี 6 นิ้ว	14	180	2,520*	เฉพาะการติดตั้งใน
3	ฉนวนใยแก้วหนา 3 นิ้ว	4	235	940*	ระบบปิดความยาว 40
4	พัดลมดูดอากาศ 33 วัตต์	1	760	760*	เมตร
5	พัดลมตั้งพื้น 52 วัตต์	1	1,400	1,400	*ราคา ณ วันที่ 31
6	กาวและวัสดุเคลือบผิวกันน้ำ	12	100	1,200	พฤษภาคม 2545
7	ค่าแรงติดตั้งระบบ	-	-	2,000*	**คิดจากค่าชุดและฝั่ กลบลึก 1.20 เมตรยาว 40 เมตร
รวม				20,220	

ตาราง 4-7 แสดงรายการค่าใช้จ่ายสำหรับการติดตั้งระบบท่อใต้ดิน

ดังนั้นค่าใช้จ่ายเริ่มต้นในการติดตั้งของระบบท่อใต้ดินเป็นจำนวนเงิน 20,220 บาท และเครื่องปรับอากาศเป็นจำนวนเงิน 18,000 บาท ส่วนการพิจารณาถึงค่าไฟฟ้าที่จะเกิดขึ้นในอนาคตคือ ระบบท่อใต้ดินใช้พัดลม 2 จุดรวมกันเป็น 85 วัตต์ เปิดเครื่อง 16 ชั่วโมงต่อวัน ดังนั้นใน 1 ปีจะเสียค่าไฟเป็นจำนวนเงิน 1,241 บาท ขณะที่เครื่องปรับอากาศ ใช้กระแสไฟคิดเป็นจำนวนเงิน 15,943 บาท(จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรม OTTVEE version 1.0a โดยตั้งค่าอุณหภูมิภายในไว้ที่ 27^oc)

รายการ	เครื่องปรับอากาศ EER =10.6	ท่อใต้ดิน EER = 17.28	หมายเหตุ
First cost	18,000	20,220	ราคาเครื่องปรับอากาศเบอร์ 5 *จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรม OTTVEE version 1.0a
ค่าไฟต่อปี	14,693.89*	1,241	
n= 10ปี [A→ P] i= 8%	จากตาราง $\frac{1}{0.1490} = 6.7114$	6.7114	
PW ของค่าไฟ	14,693.89 [6.7114]	1,241 [6.7114]	
A [A→ P]	98616.57 บาท	8328.84 บาท	
Total PW	18,000 + 98616.57 =116,616.57 บาท	20,220 + 8328.84 =28,548.84 บาท	

ตาราง 4-8 แสดงรายการคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบท่อใต้ดิน

Payback period

$$T \text{ (yrs)} = \frac{\ln [(r-d) C/A + 1]}{\ln [(1+r) / (1+d)]}$$

$$d = 8 \%$$

C = investment over the base case (EER = 10.6)

$$= 20,220 - 18,000$$

$$= 2,220$$

A = annual savings

$$= 14,693.89 - 1,241$$

$$= 13452.89$$

$$r = 0 \quad T \text{ (yrs)} = \frac{\ln [(r-d) C/A + 1]}{\ln [(1+r) / (1+d)]}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{\ln [(-0.08)^{2,220/13452.89} + 1]}{\ln [1 / 1.08]} \\
&= \frac{\ln 0.98679}{\ln 0.92593} \\
&= \frac{- 0.01329}{- 0.07696} \\
&= 0.17 \text{ ปี}
\end{aligned}$$

∴ Payback period สำหรับการให้ระบบท่อใต้ดิน เปรียบเทียบกับเครื่องปรับอากาศ(EER = 10.6) คือ 0.17 ปี หรือประมาณ 2 เดือน

จากรายการคำนวณค่าใช้จ่าย แล้วจะพบว่าระบบท่อใต้ดินมีความคุ้มค่าในการลงทุนกว่าการติดตั้งเครื่องปรับอากาศ และระบบนี้จะมีค่าคุ้มค่างานกว่าเครื่องปรับอากาศ เมื่อขึ้นเดือนที่ 2 แต่ระบบท่อใต้ดินมีความสามารถทำความเย็นต่ำ และไม่สามารถรีดความชื้นได้อย่างเครื่องปรับอากาศ จึงยังเป็นข้อด้อยของระบบนี้อยู่

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุป วิจารณ์และเสนอแนะ

สรุปกระบวนการทดลอง

การวิจัยนี้เป็นการทดสอบถึงประสิทธิผลของการทำความเย็นด้วยระบบท่อใต้ดิน ในสภาพภูมิอากาศแบบร้อนชื้น โดยทำการฝังท่อลงใต้ดินลึก 1.10 เมตร ซึ่งอากาศจะเคลื่อนผ่านท่อในความยาวที่ 30 และ 40 เมตร ของระบบปิด และระบบเปิด ซึ่งในแต่ละระบบ จะควบคุมการไหลเวียนของอากาศภายในท่อ โดยกล่องควบคุมอากาศจากภายในอาคารของระบบปิด และอากาศจากภายนอกอาคารของระบบเปิดจะเคลื่อนที่ลงใต้ดิน เพื่อปรับอุณหภูมิ ก่อนนำมาใช้ในอาคาร ด้วยพัดลมที่ตำแหน่งปลายท่อนำอากาศเข้าสู่อาคาร ที่สามารถปรับค่าความเร็วได้ ระบบท่อที่ใช้ในการทดลองจะประกอบไปด้วยท่อ พีวีซี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว ความยาวรวมทั้งหมด 60 เมตร โดยที่อยู่ใต้ดิน 40 เมตร อยู่เหนือดิน 20 เมตร และกล่องควบคุมทำจากคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อขึ้นรูปเป็นกล่อง ทำหน้าที่เป็นวาล์วควบคุมทิศทางการไหล ขนาด 0.80 x 1.20 x 0.70 ลูกบาศก์เมตร การวางท่อจะเว้นระยะห่างของแต่ละท่อ เป็นระยะ 2 เมตร มีปลายท่อ 3 จุด คือ ปลายท่อนำอากาศจากภายนอก ปลายท่อนำอากาศจากภายในอาคาร และปลายท่อนำอากาศสู่ภายในอาคาร ทำการวัดผลและเก็บข้อมูลตามตำแหน่งที่ต้องการ

การทดลองนี้ได้แบ่งงานวิจัยเป็น 5 ช่วง โดย 4 ครั้งแรก จะเป็นการทดสอบหาระบบ และความยาวที่เหมาะสมที่สุด และการทดลองครั้งสุดท้าย เป็นการปรับปรุงแก้ไข และปรับเวลาการใช้งานให้เกิดประโยชน์สูงสุดของท่อ เพื่อสรุปผล และแต่ละช่วงของ 4 ครั้งแรกทำการวัดผลเป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นจะทำการพักท่อ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อเตรียมการทดลองครั้งต่อไป

เมื่อทำการทดลองในแต่ละระบบ พบว่าระบบปิดความยาวท่อ 40 เมตร สามารถทำความเย็นได้สูงสุด จึงนำมาวิเคราะห์ เพื่อหาเวลาการใช้งานที่เหมาะสม ในการทดลองอุณหภูมิอากาศภายในอาคาร และทำการทดลองครั้งที่ 5 โดย เปิด-ปิด การใช้งานเป็นช่วงเวลา คือ เปิดใช้ตั้งแต่ 8.00 น. ถึง เวลา 24.00 น.

จากผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ในช่วงเดือนพฤษภาคม อุณหภูมิอากาศมีค่าอยู่ระหว่าง 24-38 องศาเซลเซียส และมีค่าสูงสุดของวันอยู่ที่เวลา 14.00 น. – 16.00 น.

2. อุณหภูมิอากาศที่มาจากท่อใต้ดินที่ลดลง จะแปรผันกับความยาวท่อ ซึ่งความยาวท่อที่ 30 เมตร จะมีอุณหภูมิอากาศสูงกว่าอุณหภูมิอากาศที่มาจากท่อที่มีความยาว 40 เมตร ในระบบปิดและระบบเปิดเดียวกัน อยู่ประมาณ 4 องศาเซลเซียส

3. อุณหภูมิอากาศที่มาจากท่อระบบปิด จะต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศที่มาจากท่อระบบเปิด อยู่ประมาณ 0.5 – 1 องศาเซลเซียส ในความยาวท่อเดียวกัน อันเนื่องมาจากระบบเปิดจะต้องนำอากาศจากภายนอกที่มีความรุนแรงสุด มาปรับลดอุณหภูมิ ในขณะที่ระบบปิดจะนำอากาศจากภายในห้องที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าภายนอกอยู่แล้วมาปรับลด

4. ในสภาพอากาศแบบร้อนชื้น สามารถใช้ประโยชน์จากการลดอุณหภูมิอากาศ ด้วยระบบท่อใต้ดิน ในช่วงเวลา 8.00 น. – 24.00 น. ซึ่งเป็นช่วงอากาศที่ออกมาจากระบบท่อใต้ดิน จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศ ส่วนเวลาที่เหลือ อุณหภูมิอากาศจะต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศที่มาจากท่อใต้ดิน จึงไม่จำเป็นที่จะต้องนำอุณหภูมิที่สูงกว่านี้ มาใช้ประโยชน์ ยกเว้นในช่วงฤดูหนาวบางพื้นที่ ที่มีอากาศหนาวเย็นมาก อาจนำอากาศที่อุ่นนี้ มาสร้างสภาวะน่าสบายด้านอุณหภูมิได้

5. ระบบการทำความเย็นด้วยท่อใต้ดิน จะสามารถใช้งานได้ตั้งแต่เวลา 8.00 น. – 24.00 น. รวมเป็นเวลา 16 ชั่วโมงใน 1 วัน ส่วนเวลาที่เหลืออีก 8 ชั่วโมงนั้น อุณหภูมิอากาศภายนอกอาคาร อยู่ในเขตสภาวะน่าสบายทางอุณหภูมิอยู่แล้ว จึงสามารถลดการใช้เครื่องปรับอากาศตลอด 24 ชั่วโมงได้ และค่าใช้จ่ายจะคุ้มทุนอยู่ที่ 2 เดือนนับว่ามีความคุ้มค่าในการลงทุนในการทำระบบท่อใต้ดิน เพื่อปรับลดอุณหภูมิกับบ้านพักอาศัยได้

สถาบันนวัตกรรมการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข้อวิจารณ์และเสนอแนะ

ในช่วงที่ทำการวิจัยนี้เป็นช่วงฤดูร้อน ดังนั้นค่าวัดได้ของอุณหภูมิ จะเป็นช่วงอุณหภูมิสูงหรือสูงสุดของปี แต่สภาพภูมิอากาศในปีนี้มีสภาพแปรปรวน และบางวันฝนตกหนักในช่วงที่จะเตรียมทำการวิจัย ดังนั้นจึงเกิดผลกระทบต่ออุณหภูมิ ความร้อน ซึ่งอุณหภูมิความร้อนที่ใช้งานนั้นเป็นไมโครไฟเบอร์ ที่ห่อหุ้มท่อใต้ดิน มีการเปียกชื้น ทำให้ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้เต็มประสิทธิภาพ ซึ่งอาจทำให้มีการคลาดเคลื่อนของข้อมูลในบางจุด และเนื่องด้วยเป็นการทดลองที่ฝังอยู่ใต้ดิน จึงยากแก่การแก้ไข เมื่อเกิดข้อบกพร่องในการทดลอง ดังนั้นข้อมูลนี้อาจจะมีผลใกล้เคียงกับความจริง เมื่อนำมาใช้ในช่วงคาบเกี่ยว ระหว่างฤดูร้อน และฤดูฝน และเมื่อนำระบบนี้ไปใช้งานจริง ควรเปิดให้มีการระบายอากาศบางส่วน เพื่อลดความชื้นภายในอาคาร และเพิ่มคุณภาพอากาศในการอยู่อาศัย และในการใช้งานจริง จำเป็นต้องใช้พัดลมในการหมุนเวียนอากาศภายในอาคารด้วย

แต่ระบบท่อใต้ดินยังมีข้อด้อย คือความสามารถในการทำความเย็นยังเป็นมาตรฐานของสภานะนำสบายในระดับต่ำ (low comfort standard) และปัญหาความชื้นที่เกิดขึ้นยังเป็นปัญหาหลักในการสร้างสภานะนำสบาย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

คู่มือการอนุรักษ์พลังงานในอาคาร. กรุงเทพฯ: กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, 2536.

ธนิต จินดาวงศ์. การแสวงหาประโยชน์จากสภาพแวดล้อมเพื่อสร้างสภาวะน่าสบายและประหยัดพลังงาน. กรุงเทพฯ: คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2536.

ตริงใจ บุรณะสมภพ. การออกแบบอาคารที่มีประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงาน. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2539.

ตริงใจ บุรณะสมภพ. การออกแบบสถาปัตยกรรมเขตร้อน. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2539.

มหาวิทยาลัยรังสิต. Building Equipment. กรุงเทพฯ: คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต, 2538.

วิชัย อธิวิศวกุล. อิทธิพลของสภาพแวดล้อมทางธรรมชาติที่มีผลต่อ อุณหภูมิบริเวณอาคาร.

วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.

วิเชียร สุวรรณรัตน์. ภูมิอากาศวิทยาและการออกแบบสถาปัตยกรรม. กรุงเทพฯ:

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2537.

สมสิทธิ์ นิตยะ. การออกแบบอาคารสำหรับภูมิอากาศเขตร้อนชื้น. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.

สุภาวดี รัตนมาศ. บ้านธรรมชาติในเขตร้อนชื้น. กรุงเทพฯ: คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, มปป.

สุพจน์ ดวงสินทวีกุล. การทำความเย็นให้กับอาคารด้วยระบบท่อใต้ดิน. กรุงเทพฯ: คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์, บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.

สุนทร บุญญาธิการ. รายงานฉบับสุดท้าย: โครงการการวิจัยประยุกต์ ประกอบการออกแบบอาคารประหยัดพลังงาน. กรุงเทพฯ: สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.

อุษณีย์ มิ่งวิมล. แนวทางการทำแบบประเมินภาคการประหยัดพลังงานในอาคารพักอาศัย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีอาคาร ภาควิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.

ภาษาอังกฤษ

Alternative Construction: Contemporary Natural Building Methods. New York: John Wiley & Sons. 2000.

American Society of Heating Refrigeration and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). Fundamentals. n.p, 1985.

American Society of Heating. ASHRAE Applications Handbook. n.p, 1989.

Baruch Givoni. Passive and Low Energy Cooling of Building. USA: Van Nostrend Reinhold, 1994.

Benjamin Stain, John S, Reynolds. Mechanical and Electrical Equipment for Buildings. n.p, 1992.

Donald, FAIA and Kenneth Labs. Climate design. USA: McGraw-Hill, 1983.

Energy Conservation Through Building Design. New York: McGraw - Hill Book Company, 1979.

Geotsch, W., and Muehling, A.J. Earth – tube heat exchangers for swine building. Energy Tips No. 2, Dept.of Agricultural Engineering, University of Illinois at Urbana - Champaign, 1981.

Givoni, Baruch. Man, climate and architecture. Amsterdam: Elsevier Publishing, 1994.

Givoni, Baruch. Passive and Low Energy Cooling of Building. New York: Van Nostand Rienhold, 1994.

Goswami,D.Y., and Ileslamlou, S. Performance analysis of a closed loop climate control system using underground air tunel. Journal of Solar Energy Engineering, 1979.

Goswami,D.Y.,Sinha,R.,and Klett, D.E. Theoretical and Experimental Analysis of Passive Cooling Using Underground Air Pipe. Proceedings of ISES Meeting, Brighton,England, 1981.

Guise, D. Design and Technology in Architecture Revised Edition. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991.

Henry j. Cowan. Handbook of Architectural Technology. New York: Van Nostrend Reinhold, 1991.

- John F. Busch. A tale of two populations: thermal comfort in air-conditioned and naturally ventilated office in Thailand. n.p, 1991.
- Kreider, F.J. and Rabal, A.J. Heating and cooling of Building: Design For Efficiency. Singapore: McGraw-Hill Book Company, 1994.
- Labs Kenneth. Passive Solar; Subdivitions, window, Underground. n.p, 1983.
- M, David Egan. Concepts in Thermal Comfort. New Jersey: Englewood Cliffs. 1975.
- Meier, A. ed. Energy and Buildings. Lausanne: Elsevier Sequoia. 1983.
- Moore, Fuller. Environmental control systems: heating cooling lighting. New York: McGraw – Hill, 1993.
- Narendra K. Bansal. Passive Building Design. University of Kassel, Germany: Eisevier science B.V., 1994.
- Nopadon, S., ed. Green Architecture: The Sustainable Built Environment the New Millennium April 21-22, 2000. Bangkok: The Council Of Deans of Architecture School of Thailand, 2000.
- Richard, D.R., ed. The Building System Integration Handbook. New York: John Wiley & Sons, 1986.
- Richard L, Crowther. Sun/Earth Alternative Energy Design for Architecture. New York: Ven Nostrend Reinhold, 1976.
- Robinette, G.O. Energy Efficient Site Design. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1983.
- Santamouris, M. and Asimakopoulos, D. Passive Cooling of Buildings. London: James & James(Science Publishers), 1996.
- Stein, Reynold and McGuinness. Mechanical and Electrical Equipment for Building. 8th edition. New York: John Wiley & Sons, 1992.
- Victor Olgyay. Design with Climate. USA: Ven Nostrend Reinhold, 1992.
- Wagner, W.F. Energy-Efficient Building. New York: McGraw - Hill Book Company, 1983.
- Watson, d. and Labs, K. Climatic Design. New York: McGraw-Hill Book Company, 1983.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายธนรัชต์ ลิ้มปคุปตถาวร เกิดวันที่ 23 กรกฎาคม พ.ศ. 2519 จ.ชัยภูมิ สำเร็จปริญญาตรี สถาปัตยกรรมศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาสถาปัตยกรรม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต ในปีการศึกษา 2542 และได้เข้ารับการศึกษาคือต่อในหลักสูตรสถาปัตยกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในสาขาวิชาสถาปัตยกรรม



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย