การประเมินศักยภาพของระบบปรับอากาศ โดยใช้ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างใต้ดินกับอากาศ

วีระวุฒิ อรุณวรรธนะ [1]

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม 44150

รับเมื่อ 18 กรกฎาคม 2550 ตอบรับเมื่อ 14 พฤษภาคม 2551

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการประเมินศักยภาพของระบบปรับอากาศโดยใช้ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างใต้ดินกับอากาศสำหรับภูมิอากาศทุกฤดูของประเทศไทย ผลจากการทดลองพบว่า ระบบนี้สามารถควบคุมการปรับอากาศภายในอาคารมีทั้งแบบการทำความร้อนและการทำความเย็น การทำความร้อนมีความเหมาะสมในช่วงกลางคืนของฤดูหนาว ในขณะที่การทำความเย็นมีความเหมาะสมในช่วงกลางวันของฤดูร้อน ความสามารถของระบบปรับอากาศเพื่อควบคุมการปรับอากาศภายในอาคารให้อยู่ในโซนสภาวะน่าสบายเกิดขึ้นในช่วงการทำความร้อนของฤดูหนาวเท่านั้น อย่างไรก็ตามในช่วงการทำความเย็นของฤดูร้อนระบบนี้สามารถลดการสะสมความร้อนภายในอาคารได้เป็นอย่างดี

E-mail: we__thermal@hotmail.com

[1] *อาจารย์ ภาควิชาฟิสิกส์ สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ (พลังงาน)*

An Evaluation of the Potential of an Air-conditioning System using the Earth-to-Air Heat Exchanger Duct

Weerawoot Arunwattana [1]

Mahasarakham University, Khamreang, Mahasarakham 44150

Received 18 July 2007 ; accepted 14 May 2008

Abstract

The purpose of this research was to evaluate the potential of an air conditioning system using the earth-to-air heat exchanger duct experimentally for all seasons of Thailand. The results from the experiment showed that this system could control the air condition in the building for both heating and cooling modes. The heating mode was suitable during nighttime of a cool season, while the cooling mode was suitable for daytime of a hot season. The ability of the air conditioning system to provide a comfortable level was found only during the heating mode in the cool season. However, during the cooling mode in the hot season it could effectively decrease the heat accumulation within the building.

E-mail: we__thermal@hotmail.com

[1] *Lecturer, Department of Physics (Applied Physics in Energy).*

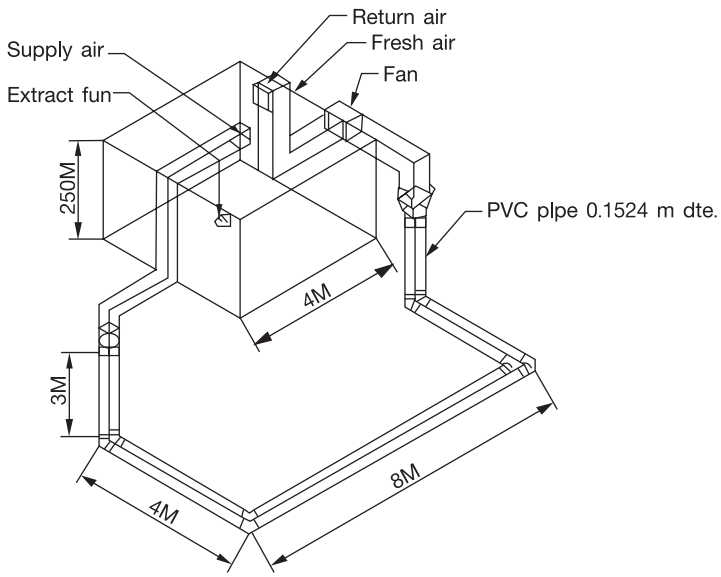
1. บทนำ

ปัจจุบันภาวะวิกฤติทางด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมนับวันจะทวีความรุนแรงขึ้น ส่วนหนึ่งมีผลมาจากการใช้เทคโนโลยีที่ไม่เหมาะสม ด้วยเหตุนี้ นักวิจัยจึงได้พยายามคิดค้นหาเทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อการประหยัดพลังงานและรักษาสิ่งแวดล้อม เทคโนโลยีด้านการปรับอากาศเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่นักวิจัยให้ความสำคัญ เนื่องจากในปัจจุบันระบบปรับอากาศส่วนใหญ่เป็นระบบแบบอัดไอ โดยพบว่าระบบนี้จะใช้พลังงานค่อนข้างสูง และมีผลต่อสภาวะสิ่งแวดล้อมระบบปรับอากาศโดยใช้ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนใต้ดินเป็นระบบหนึ่งที่มีการพิจารณา และนำมาใช้แทนระบบเดิม เนื่องจากดินสามารถเป็นแหล่งให้ความร้อนและความเย็นได้ ทั้งนี้เป็นผลมาจากดินที่ระดับความลึกตั้งแต่ 0.15 ม. จะมีอุณหภูมิคงที่ในรอบวัน และจะคงที่ที่ระดับความลึกประมาณ 4 ม. ในรอบปี [1] โดยเฉพาะในแถบยุโรป ได้มีการวิจัยพัฒนาอย่างต่อเนื่อง และได้นำเอาระบบนี้มาใช้ในเชิงพาณิชย์สำหรับการปรับอากาศในอาคารที่อยู่อาศัย [2] สำหรับในแถบทวีปเอเชียได้มีการวิจัยและติดตั้งระบบนี้เพื่อปรับอากาศให้กับอาคารที่อยู่อาศัย [3] และได้มีการนำระบบนี้มาใช้ปรับอากาศให้กับโรงเรือนสัตว์และโรงเรือนพืช [4-5]

สำหรับประเทศไทย งานวิจัยที่เผยแพร่เพื่อศึกษาการนำเอาระบบท่อแลกเปลี่ยนความร้อนใต้ดินมาปรับอากาศค่อนข้างมีน้อยมาก ทำให้ขาดข้อมูลในการที่จะวิจัย และพัฒนาระบบนี้ต่อไป ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาเพื่อประเมินความสามารถในการปรับอากาศโดยใช้ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนใต้ดินภายในอาคารทดสอบที่ได้ออกแบบและติดตั้งโดย [6] โดยทำการทดสอบในช่วงฤดูร้อน ฤดูฝน และฤดูหนาว เพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการปรับอากาศโดยใช้ระบบนี้

2. ระบบปรับอากาศโดยใช้ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนใต้ดิน

ระบบปรับอากาศโดยใช้ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนใต้ดินที่ออกแบบและติดตั้งโดย [6] เป็นท่อแลกเปลี่ยนความร้อนแบบคู่ขนานที่วางในแนวนอน ติดตั้งที่ระดับความลึก 3 ม. เป็นท่อพีวีซี (thermal conductivity = 0.147 Watt/m/K) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1524 ม. (6 นิ้ว) ใช้พัดลมขนาด 186.5 วัตต์ (1/4 แรงม้า) อัตราความเร็ว 1,250 รอบต่อนาที ในการหมุนเวียนอากาศ โดยมีรูปแบบขนาด และวิธีการติดตั้งดังรูปที่ 1 และมีลักษณะการทำงานที่ได้จากการวัดดังตารางที่ 1



รูปที่ 1 ระบบปรับอากาศโดยใช้ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนใต้ดิน [6]

ตารางที่ 1 ข้อมูลทางเทคนิคของระบบปรับอากาศโดยใช้ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศกับใต้ดิน

การทำงานของระบบ	
อัตราการไหลของอากาศที่จ่าย (ลบ.ม./วินาที)	0.342
อัตราการไหลของอากาศกลับ (ลบ.ม./วินาที)	0.32
ความเร็วอากาศที่จ่าย (ม./วินาที)	3.8
ความเร็วอากาศกลับ (ม./วินาที)	2.0
อัตราการไหลอากาศดี (ลบ.ม./วินาที)	0.029
อัตราการไหลอากาศทิ้ง (ลบ.ม./วินาที)	0.14
ความดันสูญเสียในระบบ (พาสคาล)	600

3. วิธีการทดลอง

ได้ทำการทดลองเพื่อประเมินความสามารถในการปรับอากาศโดยใช้ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนใต้ดิน [6] ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ และอุณหภูมิอากาศภายในอาคารทดสอบที่ปรับได้ ในช่วงฤดูร้อน ฤดูฝน และฤดูหนาว สำหรับสมการในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะใช้สมการที่ 1 ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะได้จากการวัดอุณหภูมิเข้าและออกจากท่อแลกเปลี่ยนความร้อนใต้ดิน วัดความเร็วลม และวัดความดันอากาศที่ไหลภายในท่อ นอกจากนี้ได้วัดอุณหภูมิภายในอาคารทดสอบทั้งหมด 5 ตำแหน่งด้วยกันเพื่อหาค่าเฉลี่ย และวัดอุณหภูมิดินที่ระดับความลึก 3 ม. (ระดับเดียวกับท่อแลกเปลี่ยนความร้อนใต้ดิน) ทำการบันทึกข้อมูลทุก ๆ 1 ชม. ด้วยเครื่องบันทึกข้อมูลยี่ห้อ ΔT รุ่น DL2e No.414-1 โดยมีรายละเอียดเกี่ยวกับอุปกรณ์วัด ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการวัด

การวัด	อุปกรณ์	ช่วงการวัด	ความไม่แน่นอนในการวัด
อุณหภูมิ	เทอร์มอคัปเปิ้ลชนิด K	-50 - 100 °C	±0.4%
ความดัน	มาโนมิเตอร์เอียง Type 4 No. 103483	0 - 2.5 kPa	±2%
ความเร็วลม	อะนีโมมิเตอร์ รุ่น DA-43	0.4 - 30 ม./วินาที	±2%

- ค่าสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะสามารถประเมินได้จาก

$$COP = \frac{\rho_{air}(c_{air}/1000)\dot{V}(T_{inlet} - T_{outlet})}{\Delta P\dot{V}} \quad \textbf{(1)}$$

เมื่อ COP = ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ

c_{air} = ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ, kJ/kgK

ΔP = ค่าความดันสูญเสียของอากาศ, Pa

T_{inlet} = ค่าอุณหภูมิอากาศก่อนเข้าท่อแลกเปลี่ยนความร้อนใต้ดิน, °C

T_{outlet} = ค่าอุณหภูมิอากาศออกจากท่อแลกเปลี่ยนความร้อนใต้ดิน, °C

$\dot{V}$ = อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ, ม.^{3}/วินาที

ρ_{air} = ความหนาแน่นของอากาศ, กก./ม.^{3}

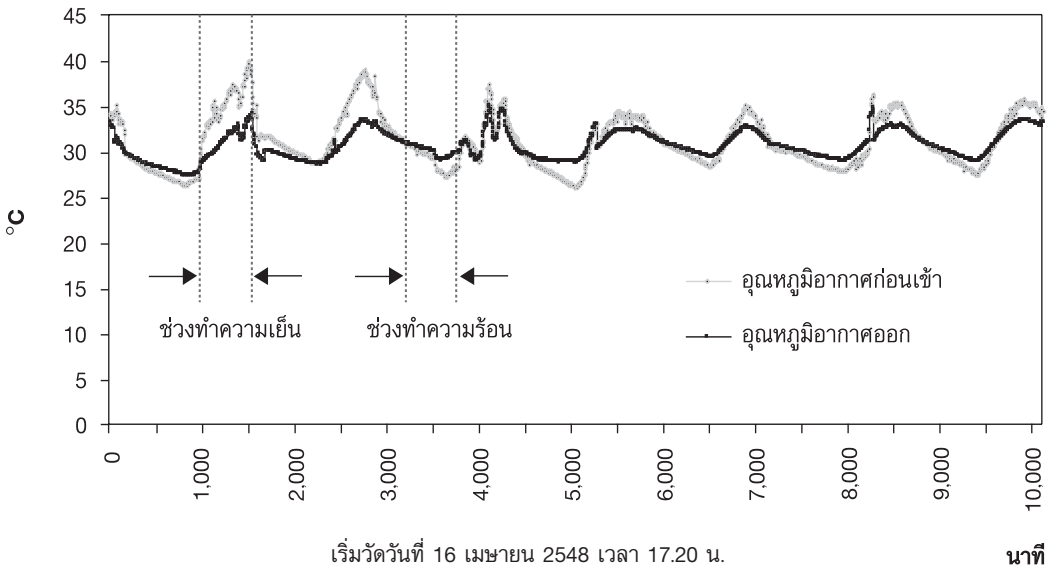
4. ผลการทดลอง

ลักษณะการทำงานของระบบปรับอากาศที่ใช้ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนใต้ดินมีลักษณะการปรับอากาศทั้งการทำความร้อน ซึ่งมีค่า $T_{outlet} > T_{room}$ (อุณหภูมิห้อง), $T_{room} < T_{ground}$ (อุณหภูมิดินที่ระดับความลึก 3 เมตร) และการทำความเย็น ($T_{outlet} < T_{room}$, $T_{room} > T_{ground}$) ทั้งสามฤดู (ดังรูปที่ 2 - 4) โดยพบว่า ในช่วงฤดูร้อนการทำความร้อนจะเกิดขึ้นในช่วงเวลาประมาณ 21.00 - 9.00 น. ส่วนช่วงการทำความเย็นจะเกิดขึ้นในช่วงเวลาประมาณ 9.00 - 21.00 น. ในช่วงฤดูฝนการทำความร้อนจะเกิดขึ้นในช่วงเวลาประมาณ 20.00 - 10.00 น. ส่วนช่วงการทำความเย็นจะเกิดขึ้นในช่วงเวลาประมาณ 10.00 - 20.00 น. สำหรับช่วงฤดูหนาวการทำความร้อนจะเกิดขึ้นในช่วงเวลาประมาณ 17.00 - 11.00 น. ส่วนช่วงการทำความเย็นจะเกิดขึ้นในช่วงเวลาประมาณ 11.00 - 17.00 น. ซึ่งจะเห็นว่า ช่วงการทำความเย็นส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในช่วงเวลากลางวัน ส่วนช่วงการทำความร้อนส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในช่วงเวลากลางคืน และพบว่า ช่วงการทำความเย็นในฤดูร้อนยาวนานที่สุด ส่วนช่วงการทำความร้อนยาวนานที่สุดเกิดขึ้นในช่วงฤดูหนาว สำหรับค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะในการปรับอากาศ (ดังรูปที่ 5 - 7) พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะในการทำความเย็นสูงสุดเกิดขึ้นในช่วงฤดูร้อนมีค่าเท่ากับ 12 (เวลากลางวัน) ส่วนค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะในการทำความร้อนสูงสุดเกิดขึ้นในช่วงฤดูหนาวมีค่าเท่ากับ 11 (เวลากลางคืน)

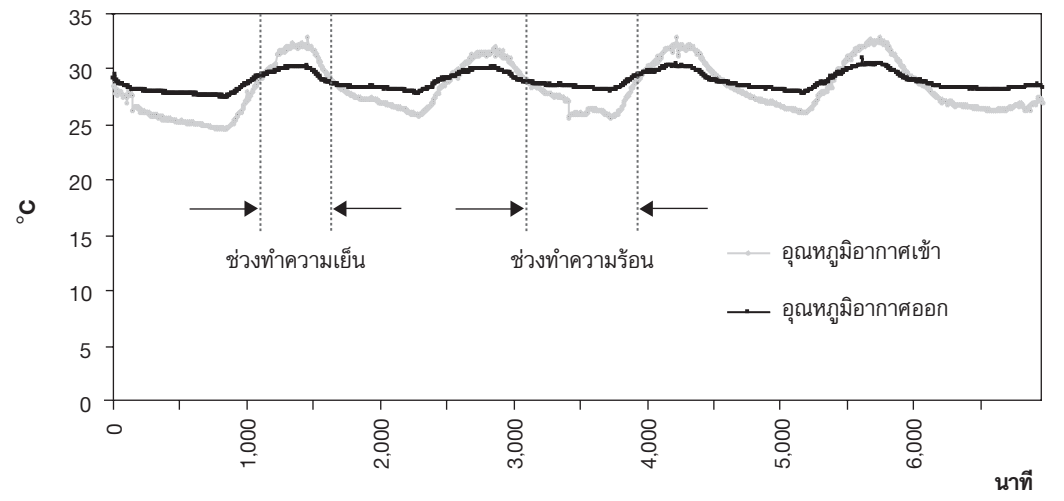
จากรูปที่ 8 - 10 เป็นกราฟแสดงอุณหภูมิอากาศภายในอาคารทดสอบที่ปรับได้และอุณหภูมิอากาศแวดล้อม พบว่า ความสามารถในการลดอุณหภูมิอากาศภายในอาคารทดสอบมีประสิทธิภาพได้ดีที่สุดเกิดขึ้นในช่วงฤดูร้อน (ช่วงการทำความเย็น) สามารถลดอุณหภูมิอากาศได้ต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อมในช่วง 1 - 8 °C ส่วนช่วงการทำความร้อนที่สามารถเพิ่มอุณหภูมิอากาศภายในอาคารมีประสิทธิภาพมากที่สุดเกิดขึ้นในช่วงฤดูหนาว ส่วนในช่วงฤดูฝนในช่วงการทำความเย็นถึงแม้จะไม่สามารถลดอุณหภูมิอากาศภายในอาคารให้ได้ต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อม หรือได้ต่ำเพียงเล็กน้อย แต่ช่วงนี้ก็สามารถลดการสะสมความร้อนภายในอาคารทดสอบได้ เมื่อพิจารณาถึงความสามารถในการปรับอากาศให้อยู่ในโซนสภาวะน่าสบายได้ พบว่า เกิดขึ้นได้ในช่วงการทำความร้อนในช่วงฤดูหนาวเท่านั้น

5. วิจารณ์ผลการทดลอง

จากผลการทดลอง พบว่า การปรับอากาศโดยใช้ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนใต้ดินมีทั้งการทำความร้อนและการทำความเย็นโดยมีตัวแปรที่เป็นตัวกำหนด คือ อุณหภูมิอากาศภายในอาคารทดสอบ (อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าแลกเปลี่ยนกับท่อแลกเปลี่ยนความร้อนใต้ดิน) กับอุณหภูมิดินที่สัมผัสกับท่อแลกเปลี่ยนความร้อนใต้ดิน กรณีที่อุณหภูมิอากาศเข้ามีค่ามากกว่าอุณหภูมิดินที่สัมผัสท่อจะมีลักษณะการปรับอากาศแบบทำความเย็น ส่วนกรณีที่อุณหภูมิอากาศเข้ามีค่าน้อยกว่าอุณหภูมิดินที่สัมผัสท่อจะมีลักษณะการปรับอากาศแบบทำความร้อน ซึ่งจากการวัดอุณหภูมิดินที่สัมผัสกับท่อแลกเปลี่ยนความร้อนใต้ดิน พบว่า ในช่วงฤดูร้อนอุณหภูมิค่อนข้างจะมีค่าคงที่ เท่ากับประมาณ 29°C ในช่วงฤดูฝนอุณหภูมิค่อนข้างจะคงที่ในช่วง 23 - 27°C ส่วนช่วงฤดูหนาวอุณหภูมิค่อนข้างคงที่ในช่วง 27 - 29 °C ดังรูปที่ 11 - 13 ด้วยสาเหตุนี้ ในช่วงฤดูร้อนในเวลากลางวันอากาศภายในอาคารทดสอบจะมีค่าสูง โดยได้รับอิทธิพลมาจากค่ารังสีอาทิตย์ ทำให้ประสิทธิภาพในการทำความเย็นมีค่าสูงตามไปด้วย แต่ระบบนี้ก็ไม่สามารถปรับลดอุณหภูมิอากาศให้อยู่ในโซนสภาวะน่าสบายได้เนื่องจากอุณหภูมิดินที่สัมผัสท่อแลกเปลี่ยนความร้อนใต้ดินมีค่าสูง เช่นเดียวกับการทำความเย็นในช่วงฤดูฝน แต่ในฤดูฝนประสิทธิภาพการทำความเย็นมีค่าน้อยกว่าเนื่อง จากอากาศภายในอาคารทดสอบได้รับอิทธิพลมาจากค่ารังสีอาทิตย์น้อยกว่าในช่วงฤดูร้อน ทำให้อุณหภูมิอากาศสะสมภายในอาคารน้อยกว่าตามไปด้วย ส่วนช่วงฤดูหนาว พิจารณาในช่วงการทำความร้อน พบว่า อุณหภูมิภายในอาคารทดสอบ (ยังไม่มีการปรับอากาศ) มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่อยู่ในโซนสภาวะน่าสบาย เมื่อมีการปรับอากาศทำให้อากาศที่ปรับได้สามารถอยู่ในโซนสภาวะน่าสบายได้เนื่องจากอุณหภูมิดินที่สัมผัสท่อแลกเปลี่ยนความร้อนใต้ดินมีค่าสูงกว่าระดับสภาวะน่าสบายสูงสุด

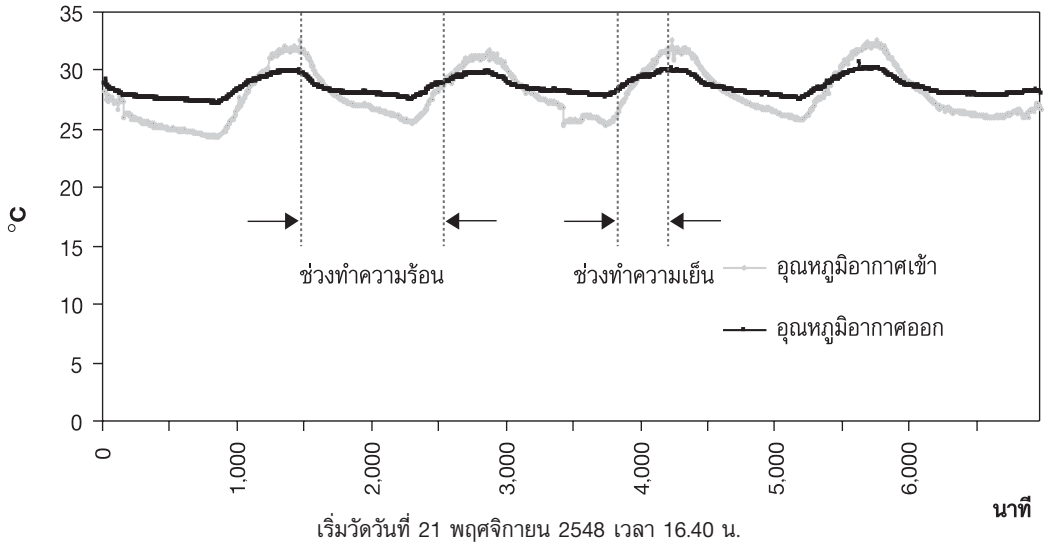


รูปที่ 2 อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าและออกจากระบบท่อแลกเปลี่ยนความร้อนใต้ดินในช่วงฤดูร้อน

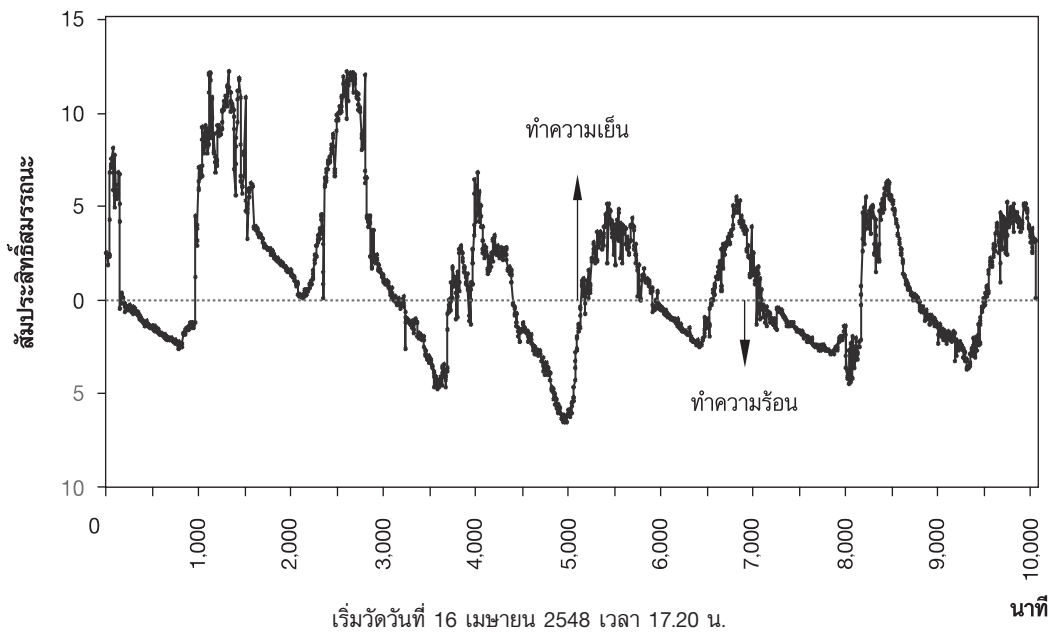


เริ่มวัดวันที่ 3 ตุลาคม 2548 เวลา 16.00 น.

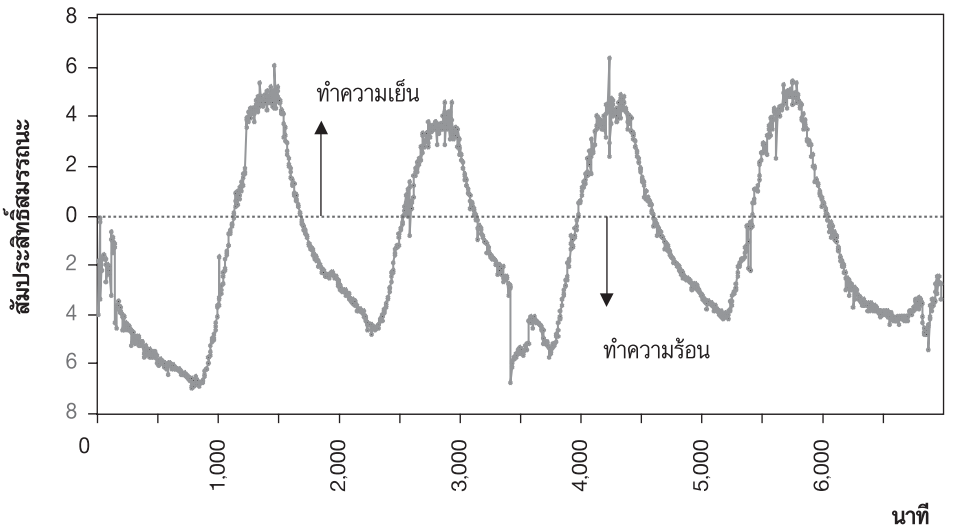
รูปที่ 3 อุณหภูมิอากาศเข้าและออกจากระบบท่อแลกเปลี่ยนความร้อนใต้ดินในช่วงฤดูฝน



รูปที่ 4 อุณหภูมิอากาศเข้าและออกจากระบบท่อแลกเปลี่ยนความร้อนใต้ดินในช่วงฤดูหนาว

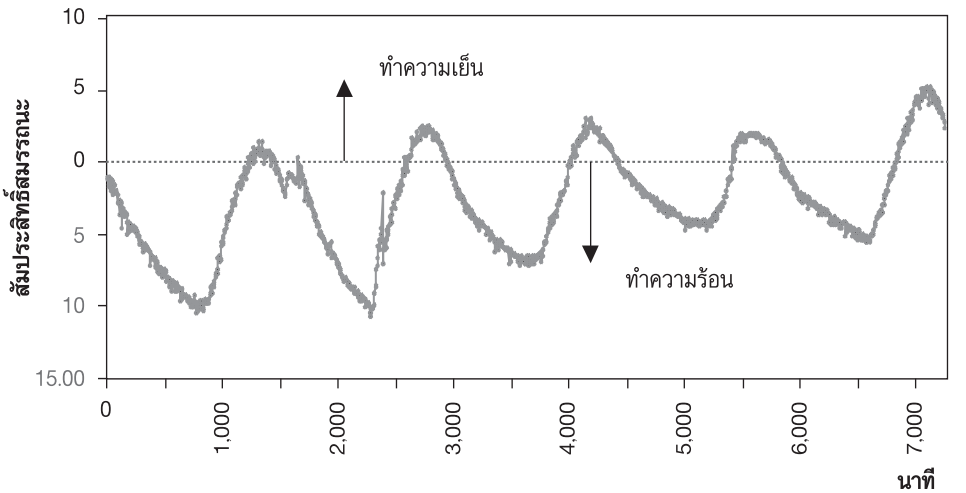


รูปที่ 5 สัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบท่อแลกเปลี่ยนความร้อนใต้ดินในช่วงฤดูร้อน



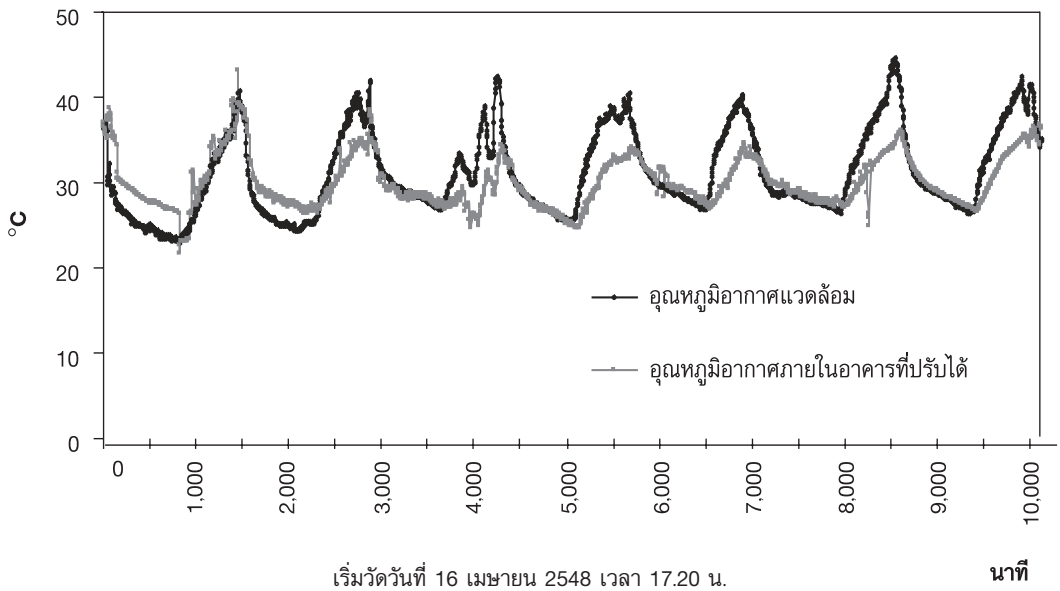
เริ่มวัดวันที่ 3 ตุลาคม 2548 เวลา 16.00 น.

รูปที่ 6 สัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบท่อแลกเปลี่ยนความร้อนใต้ดินในช่วงฤดูฝน



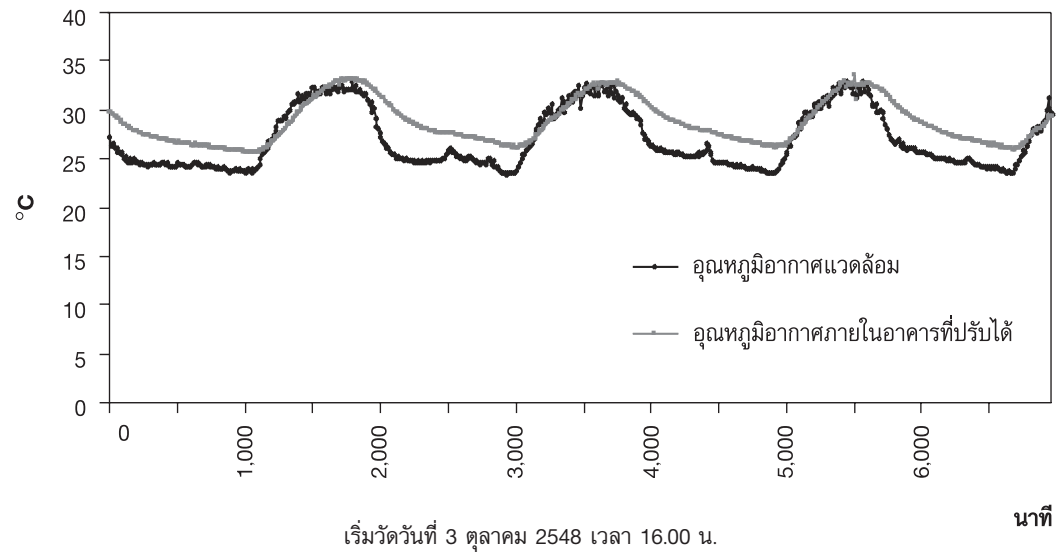
เริ่มวัดวันที่ 21 พฤศจิกายน 2548 เวลา 16.40 น.

รูปที่ 7 สัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบท่อแลกเปลี่ยนความร้อนใต้ดินในช่วงฤดูหนาว



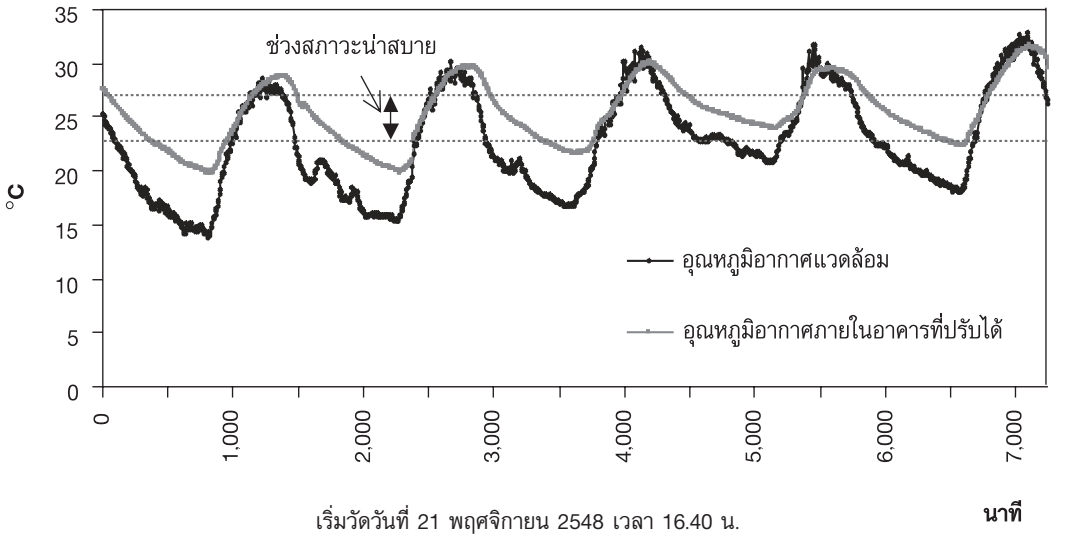
เริ่มวัดวันที่ 16 เมษายน 2548 เวลา 17.20 น.

รูปที่ 8 อุณหภูมิอากาศแวดล้อมและอุณหภูมิอากาศภายในอาคารที่ปรับได้ในช่วงฤดูร้อน



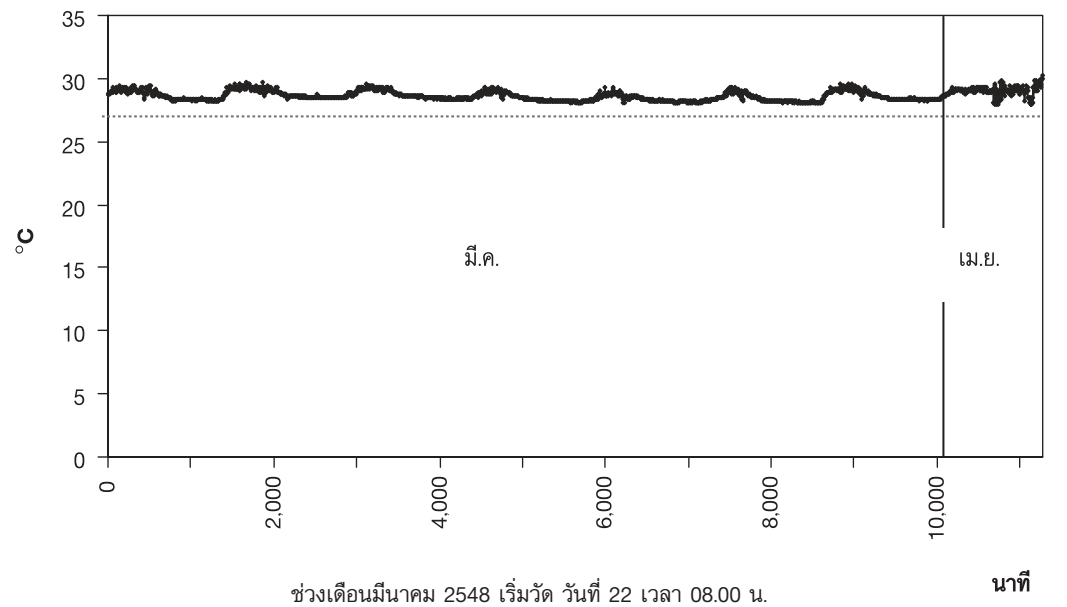
เริ่มวัดวันที่ 3 ตุลาคม 2548 เวลา 16.00 น.

รูปที่ 9 อุณหภูมิอากาศแวดล้อมและอุณหภูมิอากาศภายในอาคารที่ปรับได้ในช่วงฤดูฝน



เริ่มวัดวันที่ 21 พฤศจิกายน 2548 เวลา 16.40 น.

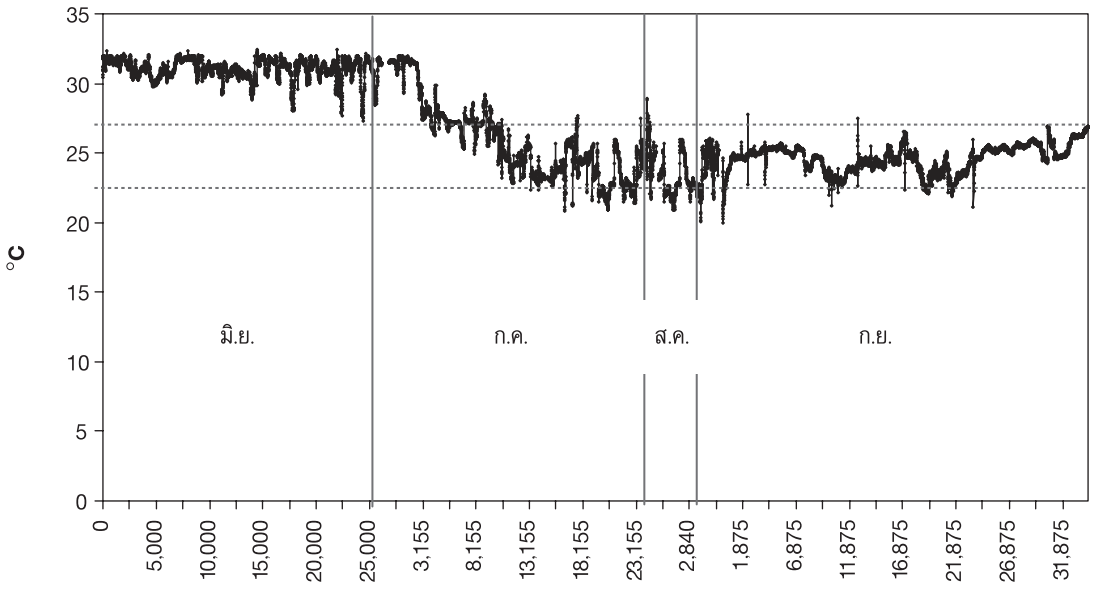
รูปที่ 10 อุณหภูมิอากาศแวดล้อมและอุณหภูมิอากาศภายในอาคารที่ปรับได้ในช่วงฤดูหนาว



ช่วงเดือนมีนาคม 2548 เริ่มวัด วันที่ 22 เวลา 08.00 น.

ช่วงเดือนเมษายน 2548 เริ่มวัด วันที่ 11 เวลา 07.00 น.

รูปที่ 11 อุณหภูมิดินที่ระดับความลึก 3 เมตร ในช่วงฤดูร้อน



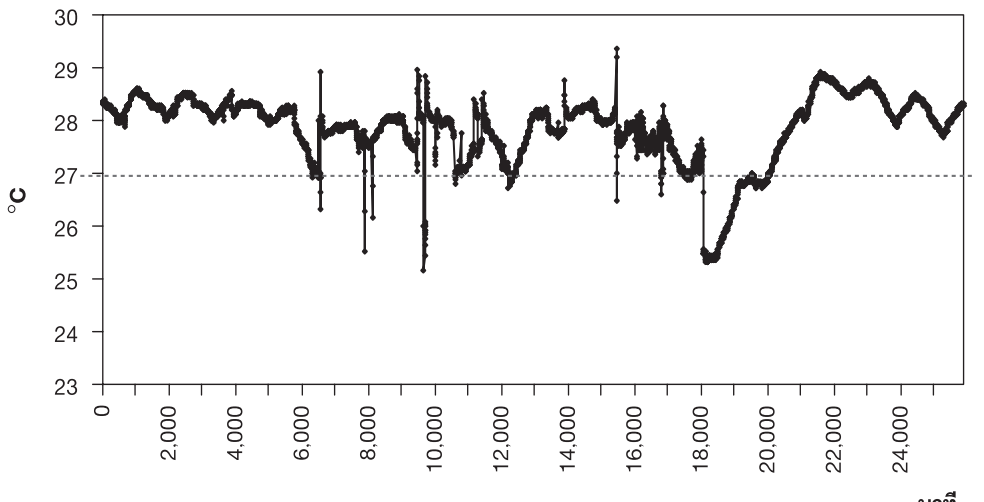
ช่วงเดือนมิถุนายน 2548 เริ่มวัด วันที่ 2 เวลา 15.00 น.

ช่วงเดือนกรกฎาคม 2548 เริ่มวัด วันที่ 1 เวลา 01.00 น.

ช่วงเดือนสิงหาคม 2548 เริ่มวัด วันที่ 19 เวลา 14.00 น.

ช่วงเดือนกันยายน 2548 เริ่มวัด วันที่ 1 เวลา 10.30 น.

รูปที่ 12 อุณหภูมิดินที่ระดับความลึก 3 เมตร ในช่วงฤดูฝน



เริ่มวัดวันที่ 1 พฤศจิกายน 2548 เวลา 24.00 น.

รูปที่ 13 อุณหภูมิดินที่ระดับความลึก 3 เมตร ในช่วงฤดูหนาว

6. สรุปผลการทดลอง

ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการปรับอากาศของระบบท่อแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างใต้ดินกับอากาศ สำหรับในช่วงการทำความเย็นมีค่าโดยเฉลี่ยมากที่สุดเกิดขึ้นในช่วงฤดูร้อน และมีค่าเฉลี่ยต่ำสุดเกิดขึ้นในช่วงฤดูหนาว ในขณะที่ช่วงการทำความร้อนมีค่าโดยเฉลี่ยมากที่สุดเกิดขึ้นในช่วงฤดูหนาว และมีค่าเฉลี่ยต่ำสุดเกิดขึ้นในช่วงฤดูร้อน เมื่อประเมินความเป็นไปได้ในการนำเอาระบบปรับอากาศโดยใช้ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างใต้ดินกับอากาศมาทดแทนระบบปรับอากาศเดิม เมื่อพิจารณาโซนอุณหภูมิสภาวะน่าสบาย พบว่า สามารถนำมาใช้ได้ในช่วงการทำความร้อนในช่วงฤดูหนาวเท่านั้น แต่เมื่อพิจารณาช่วงการทำความเย็นถึงแม้ว่าระบบนี้จะไม่สามารถปรับอากาศให้อยู่ในโซนสภาวะน่าสบายได้แต่ระบบนี้มีประสิทธิภาพช่วยลดการสะสมอุณหภูมิอากาศภายในอาคารได้ค่อนข้างดี โดยเฉพาะในช่วงฤดูร้อน ดังนั้นสามารถนำเอาระบบปรับอากาศนี้มาใช้ร่วมกับพัดลมปรับอากาศภายในอาคารเพื่อเพิ่มสภาวะน่าสบายให้สูงขึ้นกว่าเดิมได้ [6] และสามารถนำไปช่วยลดอุณหภูมิอากาศภายในอาคารในช่วงที่มีการสะสมความร้อนภายในอาคารสูงก่อนที่จะปรับอากาศโดยใช้ระบบปรับอากาศแบบเดิม

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน ที่ได้สนับสนุนทุนสำหรับงานวิจัยนี้

8. เอกสารอ้างอิง

1. Bharadwaj, S.S. and Bansal, N.K., 1981, “Temperature Distribution inside Ground for Various Surface Condition”, *Building and Environment*, Vol. 16, pp. 183-192.

2. Pfafferott, J., 2003, “Evaluation of Earth-to-Air Heat Exchangers with a Standardized Method to Calculate Energy Efficiency”, *Energy and Buildings*, Vol. 35, pp. 971 - 983.

3. Rabindra, N. and Khem, N., 2003, “Earth Air Tunnel System in Nepal”, *Proceeding of International Conference on Renewable Energy Technology for Rural*, Kathmandu, Nepal, pp. 268-271.

4. Sharan, G., Sahu, R.K., and Jadhav, R., 2001, “Earth-tube Heat Exchanger Based Air-conditioning for Tiger Dwellings”, *Zoos Print*, May, pp. RNI 2-8.

5. Santamouris, M., Mihalakaha, G., Balaras, C.A., Argirioua, A.D., and Vallinaras, M., 1995, “Use of Buried Pipes for Energy Conservation in Cooling of Agricultural Greenhouse”, *Solar Energy*, Vol. 35, pp. 111-124.

6. วีระวุฒิ อรุณวรรธนะ, ประยูร สตารัตน์, พิษณุ พูลเจริญศิลป์ และ พรรณวดี ชูเรือง, 2548, “การปรับอากาศภายในอาคารที่อยู่อาศัยโดยใช้ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนใต้ดินสำหรับฤดูร้อนในประเทศไทย”, *วารสารเทคโนโลยีสุรนารี*, ปีที่ 12, ฉบับที่ 4, หน้า 332-342.