

การเพิ่มประสิทธิภาพการทำความเย็นของท่อใต้ดินโดยวิธีเพิ่มความชื้นดิน เพื่อใช้ในโรงเรือนเกษตร

Enhancement of the Cooling Performance of Earth Tube System by Increasing Soil Moisture for Use in Agricultural Greenhouse

สุลักษณ์ มงคล^{1*} และสราวุธ พลวงษ์ศรี¹

Received: July, 2015; Accepted: May, 2016

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาความเป็นไปได้ของการเพิ่มประสิทธิภาพการทำความเย็นโดยใช้ท่อใต้ดินเพื่อการประยุกต์ใช้ในโรงเรือนเกษตรโดยวิธีเพิ่มความชื้นดิน ภายใต้สภาวะอากาศร้อนชื้นในฤดูฝนทางภาคเหนือของประเทศไทย ท่อใต้ดินที่ศึกษาเป็นท่อใต้ดินแบบตัวยู (U-Tube Heat Exchanger) ทำจากท่อพลาสติกโพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC) เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.08 m ความยาว 12.5 m ฝังใต้ดินความลึก 1 m ทดสอบ ณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ จากการศึกษาพบว่า ท่อใต้ดินแบบตัวยูสามารถลดอุณหภูมิอากาศและทำความเย็นได้เฉพาะช่วงเวลากลางวันที่มีอุณหภูมิอากาศที่ไหลเข้าท่อค่อนข้างสูง โดยท่อใต้ดินที่ทดสอบสามารถทำงานได้ตั้งแต่เวลา 09.00 - 15.00 น. ทั้งนี้ความสามารถในการลดอุณหภูมิของท่อใต้ดินจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิแวดล้อม ซึ่งได้รับผลจากค่ารังสีอาทิตย์ สำหรับการวิเคราะห์หาค่ามุมการเปิดวาล์วที่เหมาะสม พบว่าค่ามุมวาล์วน้อยจะสามารถลดอุณหภูมิได้ดีกว่าค่ามุมที่กว้างกว่า และการเปิดมุมวาล์วที่ 45° จะสามารถลดอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านท่อได้มากที่สุด จากนั้นจึงทำการทดสอบสมรรถนะการทำความเย็นที่เงื่อนไขความชื้นดินต่าง ๆ กันพบว่า หากความชื้นดินมากจะสามารถลดอุณหภูมิดินได้ไม่เกิน 1°C และมีผลต่อการเพิ่มสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นหรือค่า COP น้อยเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่เกิดจากการเพิ่มผลต่างอุณหภูมิอากาศที่ไหลเข้าท่อกับอุณหภูมิดิน ดังนั้นกรณีดินที่มีความชื้นน้อยจะช่วยให้สมรรถนะการทำความเย็นของระบบมากกว่าดินที่มีความชื้นมาก

คำสำคัญ : ระบบท่อใต้ดิน; ท่อใต้ดินแบบตัวยู; โรงเรือนเกษตร; ความชื้นในดิน

¹ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่

* Corresponding Author E - mail Address: s_mongkon@hotmail.com

Abstract

This research studied the cooling possibility of earth tube system (ETS) by increasing soil moisture for agricultural greenhouse. The study was under taken during the raining season of northern Thailand. The type of ETS was the U-Tube heat exchanger made from polyvinyl chloride (PVC). The tube diameter and length were 0.08 m and 12.5 m, respectively embedded horizontally at a depth of 1 m at the School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai. The results showed that the air temperature would be cooled only during daytime when inlet air temperature was relatively high. The U-Tube heat exchanger could operate in cooling mode from 9 a.m. to 3 p.m. The ability of air temperature reducing depended on the ambient temperature which was affected by solar radiation. The valve opening for airflow control into the U-Tube heat exchanger showed that the narrow angles could reduce air temperature better than the wide angle. The suitable angle of valve opening was 45° , at which the blower temperature increased in the acceptable range. For the performance study of various soil moistures, soil temperature was slightly reduced (not exceeding 1°C), with slight effect on the COP while the difference between the inlet air temperature and soil temperature influenced soil moisture variation. Therefore, the COP of lowest soil moisture showed to increase than in other conditions.

Keywords: Earth Tube System; U-Tube Heat Exchanger; Agricultural Greenhouse; Soil Moisture

บทนำ

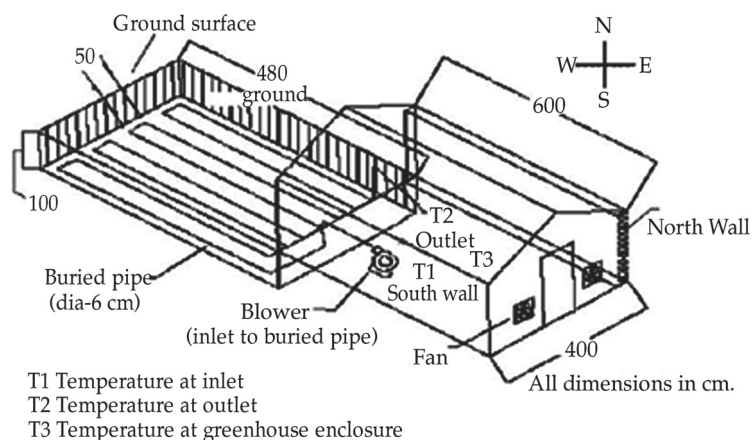
การทำความเย็นโดยใช้ท่อใต้ดิน (Earth Tube Cooling System) เป็นการทำความเย็นโดยวิธีธรรมชาติ (Passive Cooling) โดยอาศัยหลักการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างผนังท่อที่ฝังลงใต้ดินและอากาศร้อนที่ไหลผ่านท่อโดยใช้พัดลมดูดอากาศจากภายนอกไหลเข้าสู่ท่อ และจะได้อากาศเย็นไปใช้ลดอุณหภูมิอากาศในโรงเรือนได้ ในภูมิอากาศแบบเขตร้อนอุณหภูมิของดินในเวลากลางวันที่ระดับความลึกต่าง ๆ จะมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมিবรรยากาศแวดล้อม ดังนั้นดินสามารถทำหน้าที่เป็นแหล่งดูดกลืนความร้อน (Heat Sink) ได้ การศึกษาการใช้งานของท่อใต้ดินในโรงเรือนเกษตรในประเทศที่อยู่เขตร้อน เช่น Tiwari, G.N. et al. [1] ได้ศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของโรงเรือนที่มีระบบท่อใต้ดินที่ทำจากท่อ PVC ในประเทศอินเดีย พบว่า ในช่วงฤดูร้อนอุณหภูมิอากาศที่ออกจากท่อใต้ดินมีค่าเกือบคงที่ที่มีค่า $28 - 32^\circ\text{C}$ ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบ (Coefficient of Performance: COP) จะมากขึ้นในช่วงฤดูร้อนมีค่าระหว่าง $0.96 - 1.41$ และศักยภาพการทำความเย็นที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่าศักยภาพการทำความร้อนเท่ากับ 30% [2] ได้ศึกษาศักยภาพในการปรับอากาศในโรงเรือนที่ใช้ระบบท่อใต้ดิน พบว่า ในช่วงฤดูร้อนท่อใต้ดินสามารถลดอุณหภูมิอากาศ

ให้ต่ำกว่าที่ไม่ใช้ท่อใต้ดิน $5 - 6^{\circ}\text{C}$ และพบว่า การเปลี่ยนแปลงชนิดของดินที่ฝังท่อใต้ดินจะมีผลต่อการเพิ่มอุณหภูมิ อันเนื่องจากการสมบัติทางความร้อนของดิน เช่น การนำความร้อน และค่าความจุความร้อนของดินแต่ละชนิด [3] ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุความร้อน ค่าการนำความร้อน และ Temperature Profile ของดินเปียกและดินแห้งที่มีความชื้นต่างกันจากการวิเคราะห์ค่าฟลักซ์ความร้อน (Heat Flux Density) ของชั้นดินที่ความลึกต่าง ๆ พบว่า ความชื้นในดินมีผลต่อสมบัติทางความร้อนของดิน โดยดินจะนำความร้อนได้เพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นมากขึ้น และมีค่าลดลงในดินที่เป็นดินแห้ง และมีเสถียรภาพการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดินจะดีขึ้นเมื่อดินเริ่มอิ่มตัวไปด้วยน้ำ และยังสามารถรักษาเสถียรภาพการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดินได้ดีโดยเฉพาะเมื่อดินอิ่มตัวไปด้วยน้ำ

สำหรับการศึกษาในประเทศไทย Mongkon, S. et al. [4] และ Mongkon, S. et al. [5] พบว่า การใช้ท่อใต้ดินทำความเย็นในโรงเรียนสามารถลดอุณหภูมิในโรงเรียนได้ดีในระดับหนึ่ง แต่เนื่องจากค่ารังสีอาทิตย์ที่เข้าสู่โรงเรียนมีค่าสูงมาก จึงทำให้ผลต่างอุณหภูมิในโรงเรียนที่ลดลงได้มีค่าน้อยกว่าการใช้ท่อใต้ดินในเขตภูมิอากาศแบบอื่น เช่น เขตอบอุ่น หรือเขตหนาว เมื่อทำการประเมินค่า COP ท่อใต้ดินที่นำมาใช้งาน พบว่า มีค่าต่ำกว่าของเครื่องปรับอากาศ 25.26% จึงจำเป็นต้องหาวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนของท่อใต้ดินให้มากขึ้น จากประโยชน์ของความชื้นที่มีต่อสมบัติทางความร้อนของดินและยังไม่มีมีการพิสูจน์เมื่อใช้งานจริง ซึ่งการศึกษาส่วนใหญ่จะเน้นเฉพาะด้านใดด้านหนึ่ง เช่น ศึกษาการใช้งานของท่อใต้ดิน และศึกษาสมบัติของดินแยกออกจากกัน ไม่ได้นำทั้ง 2 เรื่องมาวิเคราะห์ร่วมกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและหาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อใต้ดินโดยเพิ่มความชื้นให้แก่ดินบริเวณที่มีการฝังท่อ และทำการประเมินประสิทธิภาพการทำความเย็นของท่อใต้ดินจากการใช้งานภายใต้สภาพภูมิอากาศของจังหวัดเชียงใหม่ โดยคาดหวังว่าจะสามารถนำไปแก้ไขปัญหาเมื่อนำท่อใต้ดินไปใช้งานจริงในโรงเรียนเกษตรได้

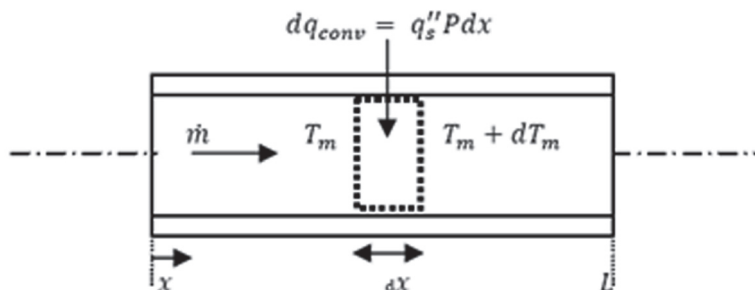
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การนำประโยชน์จากดินมาใช้นั้นสามารถนำมาใช้เป็นแหล่งผลิตความร้อนและในขณะเดียวกันก็นำมาเป็นแหล่งผลิตความเย็นให้โรงเรียน โดยใช้ความเย็นจากผิวดินลึกลงไปตั้งแต่ $1 - 4\text{ m}$ ระบบทำความเย็นจากดินเรียกว่า ระบบ Earth-To-Air Heat Exchanger System (ETAHE) หรือ Earth Tube System (ETS) [6] ระบบการทำความเย็นด้วยท่อใต้ดิน มีอยู่ 2 ระบบ คือ ระบบเปิด (Open Loop) คือ การนำอากาศจากภายนอกโรงเรียนมาทำความเย็นด้วยระบบท่อใต้ดินก่อนเข้าสู่โรงเรียน และระบบปิด (Closed Loop) คือ การนำเอาอากาศภายในโรงเรียนมาผ่านระบบท่อใต้ดิน อากาศที่ได้จะมีอุณหภูมิลดลงและนำกลับสู่โรงเรียนอีกครั้ง



รูปที่ 1 โรงเรือนเกษตรที่ใช้ระบบทำความเย็นด้วยท่อใต้ดินของ Tiwari, G.N. et al. [1]

ในการวิเคราะห์ค่าการถ่ายเทความร้อน และสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบ จะเป็นการพาความร้อนแบบบังคับ (Force Convection) ระหว่างอากาศที่ไหลเข้าสู่ห้องจากการใช้พัดลมดูดอากาศ (Blower) ที่มีความเร็วของอากาศค่าหนึ่งไหลเข้าสู่ห้องกับผิวท่อที่มีอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ในการพิจารณาการแลกเปลี่ยนความร้อนจะกำหนดให้อุณหภูมิดินบริเวณฝังท่อคงที่ (Constant Temperature Condition) เมื่อพิจารณาอุณหภูมิที่ไหลออกจากท่อใต้ดิน (T_{out}) จะขึ้นอยู่กับอัตราการพาความร้อนแบบบังคับระหว่างอากาศที่ไหลเข้าสู่ห้องกับผิวท่อที่มีอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนของท่อใต้ดิน

อัตราการถ่ายเทความร้อนจากที่ระยะ dx จะสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศที่ไหลเข้าท่อ (T_{in}) และอากาศที่ไหลออกจากท่อ เช่นเดียวกับอัตราการถ่ายเทความร้อน ซึ่งหาได้จากฟลักซ์จากการพาความร้อนที่เกิดขึ้นในท่อ ดังสมการที่ (1) โดย q_{conv} คือ ความร้อนที่เกิดจากการพาความร้อนในท่อ (W) q_s'' คือ ฟลักซ์ความร้อนที่เกิดขึ้นในท่อ (W/m^2) T_m คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศในท่อ (K) P คือ เส้นรอบวงท่อ (m) $\dot{m}$ คือ อัตราการไหลโดยมวลของอากาศในท่อ (kg/s) และ C_p คือ ความจุความร้อนของอากาศ ($J/kg \cdot K$) [7] - [8]

$$dq_{conv} = \dot{m}C_p dT_m = q_s'' Pdx \quad (1)$$

ในการหาประสิทธิภาพการทำงานของชุดทดสอบท่อใต้ดิน จะใช้วิธีหาค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient of Performance: COP) ซึ่งหาได้จากอัตราส่วนระหว่างความร้อนที่ถ่ายเทผ่านท่อใต้ดิน (Q_t) และกำลังของพัดลมดูดอากาศ (W_b) ดังสมการที่ (2) และ (3) หาก COP มีค่ามาก นั้นหมายถึงท่อใต้ดินมีประสิทธิภาพสูง [7]

$$q_t = \dot{m}_a C_p (T_{out} - T_{in}) \quad (2)$$

$$COP = Q_t / W_b \quad (3)$$

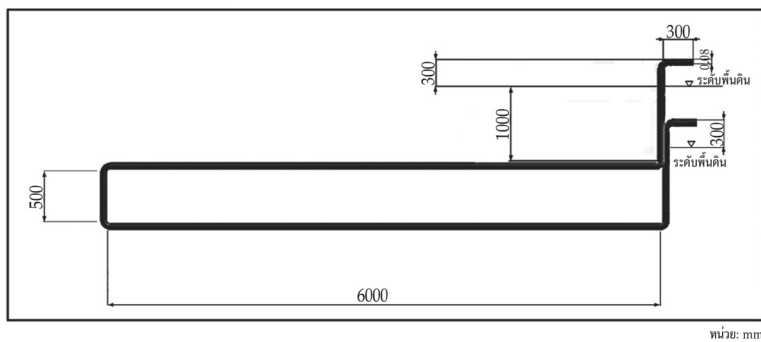
โดยที่ ($\dot{m}_a$) คือ อัตราการไหลโดยมวลของอากาศที่ไหลเข้าสู่ท่อ (kg/s) C_p คือ ความร้อนจำเพาะของอากาศ (J/kg-K) T_{out} คือ อุณหภูมิอากาศที่ไหลออกจากท่อ (K) และ T_{in} คือ อุณหภูมิอากาศที่ไหลเข้าสู่ท่อ (K)

สำหรับค่าการนำความร้อนของดินเป็นสมบัติทางฟิสิกส์ของดินที่สำคัญที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของท่อใต้ดิน ขึ้นอยู่กับประเภทของเนื้อดิน ความชื้นในดิน และความหนาแน่นรวมของดินระดับความชื้นของดินที่สูงขึ้น ค่าการนำความร้อนของดินจะสูงขึ้น เมื่อช่องว่างระหว่างอนุภาคดินมีน้ำบรรจุมากขึ้น การหาค่าการนำความร้อนของดินตามธรรมชาติโดยประเมินจากค่าความหนาแน่นของดิน และความชื้นภายในดินนั้น ๆ ดังสมการที่ (4) โดยที่ k คือ ค่าการนำความร้อน (W/m-K) W คือ ความชื้นดิน (%db) และ ρ_d คือ ความหนาแน่นรวมของดิน (kg/m³) [9]

$$k = 0.1442[(0.7 \log W + 0.4) * 10^{0.6243 * \rho_d}] \quad (4)$$

วิธีดำเนินการวิจัย

ชุดทดสอบท่อใต้ดินแบบตัวยู (U-Tube Heat Exchanger) ที่ใช้ในการทดสอบติดตั้งระบบ ณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ เพื่อประเมินค่าการถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบก่อนนำไปประยุกต์ใช้กับโรงเรือนจริง ท่อใต้ดินทำจากท่อพีวีซี (Polyvinyl Chloride: PVC) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.08 m ความหนา 0.005 m ความยาวรวม 15.4 m ผึงดินที่ความลึก 1 m จากผิวดิน ใช้พัดลมดูดอากาศชนิดหอยโข่งขนาด 120 W ติดตั้งอยู่บริเวณปลายท่อทางออกเพื่อทำให้อากาศเคลื่อนที่ และมีการหุ้มฉนวนเพื่อลดการสูญเสียพลังงานสู่บรรยากาศภายนอก ทำให้ได้อากาศที่ทางออกของท่อมีอุณหภูมิลดลง แสดงดังรูปที่ 3 สำหรับความเร็วของอากาศที่ไหลเข้าท่อจะสามารถควบคุมได้โดยใช้วาล์วซึ่งติดตั้งบริเวณท่ออากาศเข้าเพื่อใช้หาความเร็วของอากาศที่เหมาะสมที่ภายใต้สภาวะอากาศที่ใกล้เคียงกับ



หน่วย: mm

(ก) Isometric ของชุดทดสอบและจุดวัดอุณหภูมิของระบบ



(ข) ท่อใต้ดินแบบตัวยู และการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิดิน



(ค) ลักษณะของดินบริเวณก่อสร้างชุดทดสอบ

รูปที่ 3 ชุดทดสอบท่อใต้ดินแบบตัวยู (U-Tube Heat Exchanger)

ในการศึกษาได้ทำการเก็บตัวอย่างดินไปวิเคราะห์หาชนิดของดินโดยวิธี Wet Sieving ตามมาตรฐาน ASTM D422 และหาค่าความหนาแน่นของดิน (Field Test Density) โดยภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และทำการหาความชื้นดิน ได้ทำการทดสอบโดยใช้ตูบไมโครเวฟในห้องปฏิบัติการ เพื่อนำไปคำนวณค่าความจุความร้อนจำเพาะเชิงปริมาตร และค่าการนำความร้อนของดิน โดยผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติของดิน ณ บริเวณทำการทดลอง

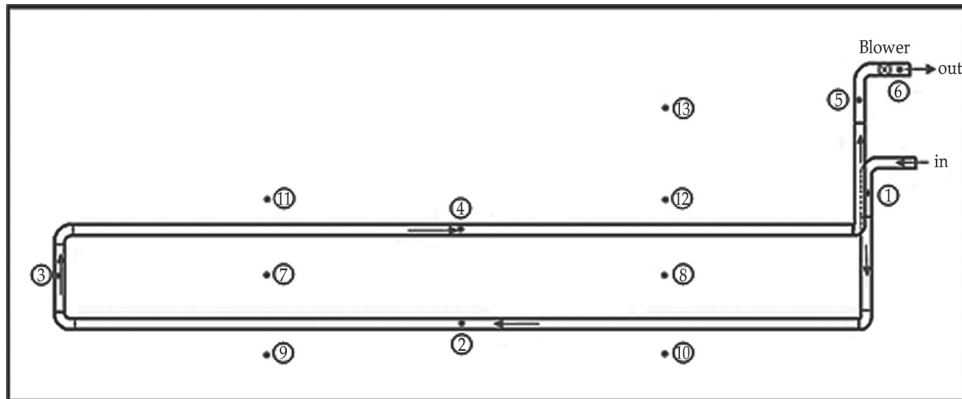
Soil properties	Value	Unit
Soil type	sand	-
Percent of sand (diameter 4.75 – 0.075 mm)	99.86	%
Percent of silt and clay (diameter < 0.075 mm)	0.14	%
Moisture content (%wb)	9.96	%wb
Moisture content (%db)	11.07	%db
Bulk density	1,195	kg/m ³
Volumetric specific heat	2,664	J/m ³ -K
Thermal conductivity	0.91	W/m-K

การทดสอบระบบท่อใต้ดินในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ กรณีศึกษาที่ 1 ทดสอบระบบเพื่อหาความเร็วของอากาศที่เหมาะสมที่ทำให้อุณหภูมิอากาศลดลงมากที่สุดภายใต้สภาวะอากาศที่ใกล้เคียงกัน โดยจะทำการเปิดวาล์วท่อทางเข้า โดยแบ่งเป็นเงื่อนไขต่าง ๆ ได้แก่ การเปิดวาล์วที่ 30° การเปิดวาล์วที่ 45° การเปิดวาล์วที่ 60° และการเปิดวาล์วที่ 90° ดังรูปที่ 4(ก) สำหรับกรณีศึกษาที่ 2 เป็นการทดสอบระบบในกรณีที่ดินมีความชื้นที่แตกต่างกัน เพื่อวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบ และลักษณะการถ่ายโอนความร้อนของระบบ ได้แก่ กรณีที่ดินมีความชื้นน้อยที่สุด (Minimum Moisture) กรณีที่ดินมีความชื้นปานกลาง (Moderate Moisture) และกรณีที่ดินที่มีความชื้นมากที่สุด (Maximum Moisture) โดยในการวิเคราะห์ได้ทำการเลือกความชื้นดินที่มีค่าแตกต่างกันมากที่สุดของการเก็บข้อมูลมาทำการวิเคราะห์เพื่อเป็นตัวแทนของแต่ละกรณี

ในการเก็บข้อมูลจะทำการวัดค่าต่าง ๆ ดังรูปที่ 4(ข) ได้แก่ อุณหภูมิของอากาศที่ไหลเข้าท่อ อุณหภูมิของอากาศที่ไหลออกจากท่อ อุณหภูมิอากาศในท่อใต้ดิน อุณหภูมิผิวท่อใต้ดิน อุณหภูมิดิน อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม โดยใช้สายเทอร์โมคัปเปิล Type K บันทึกลงในเครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger) ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านท่อทางเข้าและท่อทางออกทุก ๆ 10 นาที โดยใช้เครื่องวัดความเร็วลม (Hot Wire Anemometer) ตั้งแต่เวลา 07.00 – 17.00 น. การเก็บข้อมูลดำเนินการระหว่างเดือนกรกฎาคมถึงตุลาคม 2557 ซึ่งเป็นช่วงฤดูฝน จากนั้นนำข้อมูลไปวิเคราะห์ลักษณะการทำงานของระบบ ค่าการถ่ายเทความร้อน และสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบ



(ก) มุมของการเปิดวาล์วท่อทางเข้า



(ข) ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิและค่าต่าง ๆ

รูปที่ 4 เงื่อนไขการทดสอบและตำแหน่งการวัดค่าต่าง ๆ ของท่อใต้ดินแบบด้วย

ผลการทดลองและวิจารณ์

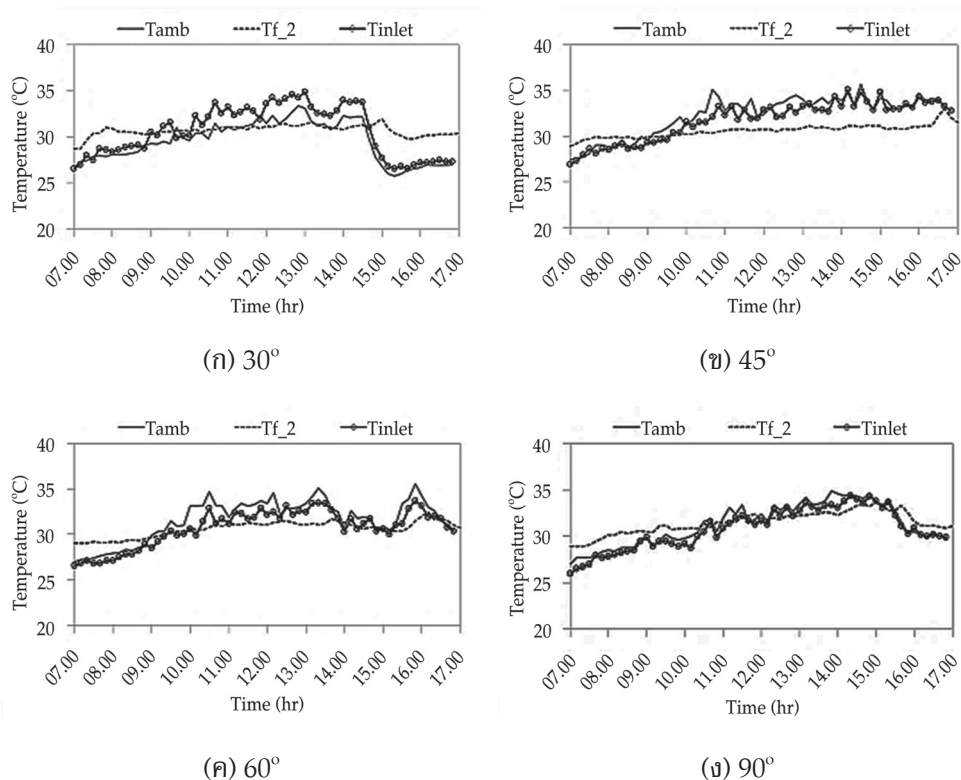
ผลการศึกษาประกอบด้วย ผลการทดสอบชุดทดสอบท่อใต้ดินแบบ U-Tube Heat Exchanger เพื่อหาเงื่อนไขความเร็วอากาศในการใช้งานที่เหมาะสม และการศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานของท่อใต้ดินที่ความชันดิน ผลการศึกษารูปได้ดังต่อไปนี้

ผลการทดสอบระบบเพื่อหาความเร็วของอากาศที่เหมาะสมในชุดทดสอบ U-Tube Heat Exchanger จากการเปิดวาล์วให้อากาศไหลเข้าบริเวณท่อทางเข้าที่ค่ามุมต่าง ๆ กัน ได้แก่ การเปิดวาล์วที่มุม 30° 45° 60° และ 90° แสดงผลการทดสอบดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบท่อใต้ดินจากการเปิดวาล์วที่มุมต่าง ๆ

Valve angle	V_{out} (m/s)	h_c (W/m ² -K)	T_{amb} (°C)	T_s (°C)	W (%db)	$T_{inlet}-T_{f,2}$ (°C)
30°	0.93	5.79	29.53	29.77	6.57	3.4
45°	4.05	18.79	32.20	29.66	6.05	4.1
60°	6.70	28.15	31.59	29.83	8.15	2.3
90°	7.20	29.81	31.29	30.36	13.13	1.2

จากตารางที่ 2 แสดงผลการทดสอบท่อใต้ดินที่ค่ามุมวาล์วต่าง ๆ พบว่า ความเร็วของอากาศเมื่อเปิดวาล์วที่ค่ามุมเท่ากับ 30° มีค่าความเร็วของอากาศน้อยที่สุดเท่ากับ 0.93 m/s เมื่อเทียบกับมุมวาล์ว 45° 60° และ 90° ที่มีความเร็วอากาศในท่อเท่ากับ 4.05 m/s 6.70 m/s และ 7.20 m/s ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h_c) ที่มุม 90° มากกว่ามุมอื่น ๆ 3 - 5 เท่า สำหรับค่าเฉลี่ยอุณหภูมิแวดล้อม (T_{amb}) ของทั้ง 4 เงื่อนไข พบว่า แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศแวดล้อมจะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน โดยวันที่ทำการทดลองที่เงื่อนไขมุมวาล์ว 60° และ 90° มีค่าใกล้เคียงกันมาก ในขณะที่มุมวาล์ว 30° มีค่าต่ำกว่ากรณีอื่นเล็กน้อย เนื่องจากมีฝนในช่วงเวลา 15.00 น. จึงทำให้ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิแวดล้อมต่ำกว่าเงื่อนไขอื่น ๆ เล็กน้อย สำหรับมุมวาล์ว 45° มีค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิแวดล้อมสูงกว่าวันอื่น ๆ เล็กน้อยประมาณ 0.5°C สำหรับอุณหภูมิของดินที่ความลึก 1 m ของทั้ง 4 กรณี มีค่าใกล้เคียงกันโดยมีความแตกต่างอุณหภูมิไม่เกิน $0 - 0.6^\circ\text{C}$ และความชื้นดินที่ได้จากการทดสอบมีค่าเท่ากับ 6.57%db 6.05%db 8.15%db และ 13.13%db



รูปที่ 5 อุณหภูมิของอากาศที่ไหลเข้า - ออก ท่อใต้ดินแบบตัวยูที่มุมเปิดของวาล์ว

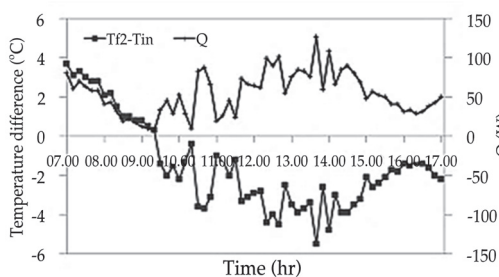
จากรูปที่ 5 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอากาศที่ไหลเข้า (T_{inlet}) อุณหภูมิอากาศที่ไหลออกจากท่อ (T_{f_2}) อุณหภูมิแวดล้อม (T_{amb}) และอุณหภูมิของดินที่ความลึก 1 m ที่ค่ามุมวาล์วต่าง ๆ พบว่า ทั้ง 4 กรณี ชุดทดสอบท่อใต้ดินสามารถลดอุณหภูมิอากาศที่ไหลเข้าท่อเพื่อนำไปใช้ทำความเย็นได้ ในช่วงเวลากลางวัน โดยเฉพาะช่วงเวลาที่อุณหภูมิแวดล้อมสูงหรือเป็นช่วงที่มีค่าความชื้นรังสีอาทิตย์สูง

จากการวิเคราะห์ความสามารถในการลดอุณหภูมิของค่ามุมวาล์วต่าง ๆ ข้างต้น พบว่า การเปิดมุมวาล์ว ด้านท่ออากาศเข้าที่ค่ามุมน้อย ๆ เช่น การเปิดวาล์ว 30° จะให้ประสิทธิภาพการลดอุณหภูมิของอากาศ ที่ออกจากท่อใต้ดินดีกว่าการเปิดมุมวาล์วที่กว้างกว่า แต่ผลข้างเคียงที่ตามมาอุณหภูมิอากาศหลังจาก ผ่านพัดลมดูดอากาศจะมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิของอากาศที่ผ่านจากท่อใต้ดินก่อนไหลผ่านพัดลมดูดอากาศ เนื่องจากมอเตอร์ของพัดลมทำงานที่ภาระโหลดค่อนข้างต่ำ ดังนั้นการเลือกเปิดวาล์วที่ 30° จึงไม่เหมาะสม สำหรับการเปิดวาล์วที่มุม 90° ลดอุณหภูมิของอากาศได้น้อยเกินไป จึงได้ทำการเปรียบเทียบผลการศึกษา จากมุมเปิดวาล์วที่ 45° และ 60° พบว่า กรณีมุมวาล์ว 45° จะสามารถลดอุณหภูมิอากาศได้มากที่สุด โดยผลต่างสูงสุดระหว่างอุณหภูมิอากาศที่ไหลเข้าและไหลออกจากท่อใต้ดิน 4.10°C สำหรับมุม 30° 60° และ 90° มีผลต่างสูงสุดเท่ากับ 3.40°C 2.30°C และ 1.20°C ตามลำดับ จึงเลือกใช้การควบคุมความเร็ว ของอากาศที่ไหลผ่านท่อที่มุมเปิดของวาล์วเท่ากับ 45°

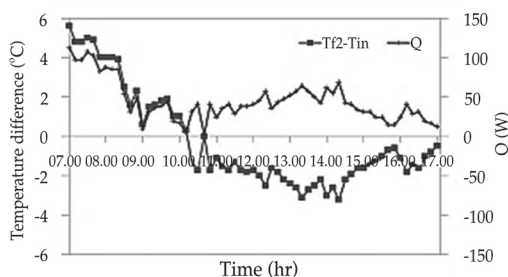
ตารางที่ 3 ผลการทดสอบท่อใต้ดินกรณีค่าความชื้นดินต่าง ๆ

Data	Moisture case study		
	Min.	Moderate	Max.
Soil moisture (%db)	9.75	11.60	15.04
Thermal conductivity, k (W/m-K)	0.88	0.92	0.98
Average ambient temperature ($^\circ\text{C}$)	31.57	30.21	28.69
Average soil temperature ($^\circ\text{C}$)	29.36	30.08	28.71
Average tube surface temperature ($^\circ\text{C}$)	29.91	30.61	29.13
Average inlet temperature ($^\circ\text{C}$)	31.45	30.76	28.28
Average outlet temperature ($^\circ\text{C}$)	29.98	30.51	28.92
Maximum temperature difference (inlet-outlet, $^\circ\text{C}$)	0-5.5	0-3.2	0-2.4

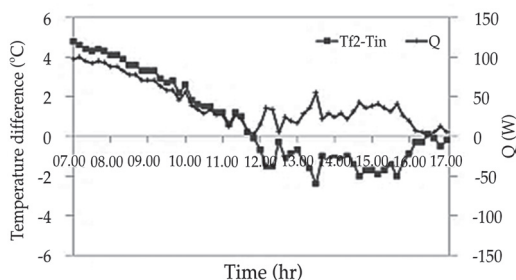
จากตารางที่ 3 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบท่อใต้ดินกรณีความชื้นดินต่าง ๆ กัน พบว่าความชื้นดิน จะเปลี่ยนแปลงตามปริมาณน้ำฝนที่ได้รับ ทำให้อุณหภูมิดินในกรณีความชื้นมากที่สุดมีค่าต่ำกว่ากรณีดิน ที่มีความชื้นปานกลางและความชื้นน้อยที่สุดประมาณ $1.2 - 1.37^\circ\text{C}$ และยังทำให้ค่าการนำความร้อนของดิน มากที่สุด เนื่องจากดินที่มีปริมาณน้ำมากจะสามารถรักษาเสถียรภาพการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดินและเพิ่ม ความสามารถในการนำความร้อนของดินมากขึ้น โดยค่าการนำความร้อนเท่ากับ 0.88 W/m-K 0.92 W/m-K และ 0.98 W/m-K ตามลำดับ สำหรับอุณหภูมิอากาศในท่อจะมีค่าแตกต่างจากอุณหภูมิดินเล็กน้อย โดยทั้ง 3 กรณีจะมีความแตกต่างไม่เกิน 1°C ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับช่วงเวลาที่อุณหภูมิอากาศแวดล้อมได้รับความร้อน จากค่ารังสีอาทิตย์ก่อนไหลลงสู่ท่อใต้ดิน สำหรับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศที่ไหลเข้าท่อเทียบกับ อุณหภูมิแวดล้อมพบว่า มีการเปลี่ยนแปลงที่ใกล้เคียงกัน ยกเว้นบางช่วงเวลาที่อุณหภูมิต่ำกว่าแวดล้อม เนื่องจากอากาศที่ไหลเข้าท่ออากาศเกิดการสูญเสียพลังงานจากแรงเสียดทานของผิวท่อทางเข้า และ เมื่ออากาศไหลเข้าสู่ท่อใต้ดินและมีอุณหภูมิอากาศที่ไหลออกจากท่อลดลงจนเข้าใกล้อุณหภูมิผิวท่อ



(ก) minimum moisture



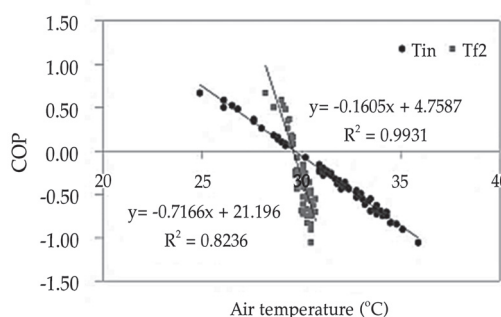
(ข) moderate moisture



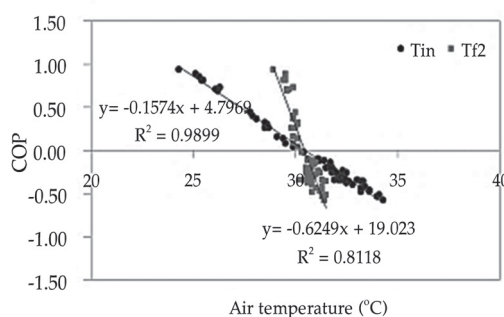
(ค) maximum moisture

รูปที่ 6 ความร้อนที่ถ่ายโอนสู่ดิน ในกรณีที่ดินมีความชื้นต่าง ๆ

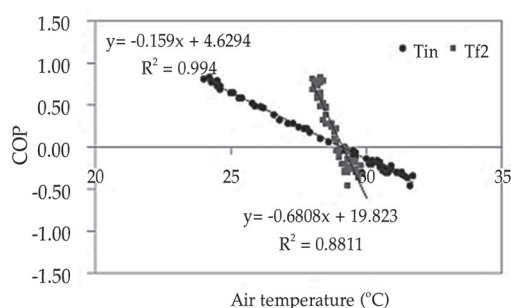
จากรูปที่ 6 แสดงถึงความร้อนที่ถ่ายเทจากท่อใต้ดินแบบตัวยู่สู่ดินในกรณีที่ดินมีความชื้นต่าง ๆ พบว่า ดินที่มีความชื้นน้อยที่สุดจะสามารถลดอุณหภูมิของอากาศในท่อได้มากที่สุด 5.5°C จึงทำให้ถ่ายโอนความร้อนสู่ดินได้เท่ากับ $9.57 - 126.78 \text{ W}$ หรือคิดเป็นค่าความจุความร้อน 2.70 kW/day สำหรับกรณีดินมีความชื้นปานกลางนั้น อุณหภูมิในท่อใต้ดินจะลดลง $0 - 3.2^{\circ}\text{C}$ ทำให้ถ่ายโอนความร้อนสู่ดินได้ $2.39 - 68.44 \text{ W}$ คิดเป็นค่าความจุความร้อน 1.52 kW/day สำหรับกรณีดินที่มีความชื้นมากที่สุด อากาศที่ไหลผ่านท่อจะถูกลดอุณหภูมิลงตั้งแต่ $0 - 2.4^{\circ}\text{C}$ ทำให้ถ่ายโอนความร้อนสู่ดินเท่ากับ $4.79 - 54.75 \text{ W}$ และมีค่าความจุความร้อนเท่ากับ 0.77 kW/day สำหรับช่วงเวลาอื่น ๆ ทั้ง 3 กรณี อากาศในท่อใต้ดินจะเกิดการรับความร้อนจากดินมีค่าตั้งแต่ $7.21 - 100.02 \text{ W}$ จากข้อสังเกตพบว่า กรณีที่ดินมีความชื้นน้อยที่สุดจะสามารถถ่ายเทความร้อนสู่ดินได้นานกว่าดินที่มีความชื้นปานกลางและดินที่มีความชื้นมาก โดยระยะเวลาในการทำความเย็นประมาณ 8 ชั่วโมง 6 ชั่วโมง และ 4 ชั่วโมง ตามลำดับ



(ก) minimum moisture



(ข) moderate moisture



(ค) maximum moisture

รูปที่ 7 สัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบท่อใต้ดินในกรณีที่ดินมีความชื้นต่าง ๆ

เมื่อพิจารณารูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิอากาศที่ไหลเข้าท่อใต้ดิน (T_{in}) และอุณหภูมิอากาศที่ไหลออกจากท่อใต้ดิน (T_{f2}) กับค่า COP หรือสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบของดินที่มีค่าความชื้นต่าง ๆ กัน พบว่าค่า COP ของท่อใต้ดินจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอากาศที่ไหลเข้าท่อเป็นหลัก เมื่ออุณหภูมิอากาศที่ไหลเข้าท่อมักสูงขึ้นเช่นในวันที่ดินมีความชื้นน้อย การแกว่งตัวของอุณหภูมิที่ไหลเข้าท่อใต้ดินระหว่างวันจะแปรปรวนมากท่อใต้ดินสามารถถ่ายเทความร้อนให้กับดินได้มากส่งผลให้ค่า COP ของระบบที่คำนวณได้เพิ่มขึ้น สำหรับอิทธิพลเนื่องจากความชื้นดินที่สามารถเพิ่มค่าการนำความร้อนของดินนั้นจะส่งผลต่อการทำงานของระบบน้อยมาก เมื่อเทียบกับผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศแวดล้อมที่ได้รับความร้อนจากรังสีอาทิตย์โดยตรง แม้ว่าค่าการนำความร้อนของดินจะเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับน้ำเพิ่มขึ้น แต่ในภาพรวมค่าการนำความร้อนของดินยังคงค่อนข้างต่ำ ($k = 0.88 - 0.98 \text{ W/m-K}$) ซึ่งในการทดสอบค่าความชื้นของดินนั้น เนื่องจากการทดสอบกระทำในสภาพภูมิอากาศจริง ทำให้การควบคุมปริมาณความชื้นดินให้มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนกระทำได้ยาก จึงทำให้ค่าความชื้นดินในแต่ละกรณีที่น่ามาเปรียบเทียบและค่าการนำความร้อนของดินที่คำนวณจากสมการที่ (4) มีความแตกต่างเล็กน้อยและมีอิทธิพลน้อยที่จะทำให้เห็นผลลัพธ์ของการถ่ายโอนความร้อนสู่ดินได้อย่างชัดเจน เมื่อเทียบกับผลการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดจากความแตกต่างอุณหภูมิของอากาศที่ไหลเข้าท่อกับอุณหภูมิดิน ซึ่งเหตุผลนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Beaker, B.R. and Fricke, B. A. [10] ที่ค้นพบว่า เมื่อดินมีความชื้นน้อยหรืออยู่ในสภาวะความชื้นต่ำ (Low Saturation) ความชื้นจะเคลือบที่ผิวอนุภาคดินเท่านั้นสำหรับช่องว่างระหว่างอนุภาคดิน

จะมีความชื้นน้อยและมีช่องว่างของอากาศมาก ส่งผลให้ค่าการนำความร้อนเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยและมีผลต่อการเพิ่มถ่ายเทความร้อนน้อยมาก นอกจากนั้นในวันที่ทำการทดสอบเงื่อนไขดินที่มีความชื้นปานกลางและดินที่มีความชื้นสูงจะอยู่ภายใต้สภาวะอากาศที่มีฝนตก ไม่มีแสงแดด และมีอุณหภูมิแวดล้อมค่อนข้างคงที่ ดังนั้นเมื่ออากาศแวดล้อมที่มีความแปรปรวนน้อยไหลลงสู่ท่อใต้ดินที่มีอุณหภูมิดินบริเวณโดยรอบที่ค่อนข้างคงที่ จะทำให้แลกเปลี่ยนความร้อนได้ในอัตราที่น้อยกว่าจึงทำให้ภาพรวมการลดอุณหภูมิอากาศในท่อใต้ดินมีค่าต่ำกว่า และส่งผลให้สมรรถนะการทำความเย็นของท่อใต้ดินต่ำไปด้วย ด้วยเหตุนี้ ผลการศึกษาในกรณีที่ดินมีความชื้นน้อยที่สุดจึงมีค่า COP สูงกว่ากรณีดินมีความชื้นปานกลาง และดินมีความชื้นมากที่สุด โดยแต่ละกรณีมีค่า COP เท่ากับ 0.24 - 1.06, 0.02 - 0.57 และ 0.02 - 0.36

นอกจากนั้นได้พบข้อสังเกตพฤติกรรมการทำงานของชุดทดสอบท่อใต้ดินแบบตัวยูที่ใช้ในการทดลอง โดยพบว่าระบบจะสามารถทำความเย็นได้ตั้งแต่ช่วงเวลา 09.00 น. ไปจนถึงจนถึงเวลา 15.00 น. โดยประมาณ ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศดังกล่าวส่งผลให้การทำงานของระบบแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่ 1 การเพิ่มความร้อนให้กับอากาศ (Heating System) สังเกตจากรูปที่ 6(ก) 6(ข) และ 6(ค) ค่า COP ของชุดทดสอบท่อใต้ดินเป็นบวก ซึ่งสาเหตุแบ่งได้ 2 กรณี คือ กรณีที่อุณหภูมิที่ไหลเข้าท่อมียาค่าต่ำมาก ๆ เช่น ในเวลาเช้า และในกรณีที่พัดลมเกิดการสะสมความร้อนมากขึ้นและระบายสู่อากาศภายนอกได้น้อยลงในช่วงเวลาบ่ายถึงเย็น สำหรับการทำงานของช่วงที่ 2 การลดอุณหภูมิอากาศ (Cooling System) สังเกตจากรูปที่ 6(ก) 6(ข) และ 6(ค) ค่า COP ของชุดทดสอบท่อใต้ดินเป็นลบ ในกรณีนี้จะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิอากาศไหลเข้าท่อใต้ดินสูงกว่าอุณหภูมิดินเท่านั้น ดังนั้นหากนำท่อใต้ดินไปใช้งานจริงสามารถเลือกใช้งานท่อใต้ดินในช่วงเวลาตามความต้องการ จะทำให้ช่วยให้ประหยัดพลังงานไฟฟ้ามากขึ้น

บทสรุป

การทดสอบท่อใต้ดินแบบตัวยูที่ฝังอยู่ภายใต้ดินที่มีความชื้นต่าง ๆ กัน 3 กรณี ได้แก่ กรณีดินมีความชื้นน้อยที่สุด กรณีดินมีความชื้นปานกลาง และกรณีดินมีความชื้นมากที่สุด ทำให้ทราบว่ากรณีที่ดินมีความชื้นดินมากจะสามารถลดอุณหภูมิดินต่ำกว่ากรณีอื่น ๆ เล็กน้อย ประมาณ 1°C แต่มีนัยสำคัญต่อการเพิ่มสมรรถนะของระบบทำความเย็นโดยใช้ท่อใต้ดินน้อย กล่าวคือ ความชื้นดินส่งผลต่อการลดอุณหภูมิและเพิ่มสมรรถนะการทำความเย็นของระบบท่อใต้ดินน้อยมากเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศที่ไหลเข้าท่อซึ่งเป็นอากาศแวดล้อม โดยเฉพาะกรณีที่อากาศแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูงมากไหลเข้าสู่ท่อใต้ดินที่มีอุณหภูมิคงที่ที่จะทำให้ได้สมรรถนะของระบบสูงสุด ดังนั้นหากจะนำท่อใต้ดินแบบตัวยูไปประยุกต์ใช้ในโรงเรียนเกษตรกรรม ควรเลือกใช้งานในกรณีที่ดินมีความชื้นน้อยที่สภาวะอากาศที่มีท้องฟ้าเปิดมีแสงแดด จะมีความเหมาะสมมากที่สุด เนื่องจากท่อใต้ดินจะทำงานได้ประสิทธิภาพสูงสุดและสามารถลดอุณหภูมิอากาศในท่อได้มาก เมื่อนำไปใช้ทำความเย็นในโรงเรียนจะสามารถลดอุณหภูมิในโรงเรียนได้มากเช่นกัน อีกทั้งสามารถลดอุณหภูมิได้ในช่วงเวลาที่ยาวนานกว่าความชื้นดินกรณีอื่น ๆ อีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักวิจัยและส่งเสริมวิชาการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่สนับสนุนทุนวิจัยประจำปีงบประมาณ 2557 และขอขอบคุณวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการศึกษา มา ณ โอกาสนี้

References

- [1] Tiwari, G.N., Akhtar, M.A., Shula, A. and Khan, Emran, M. (2006). Annual Thermal Performance of Greenhouse with an Earth-Air Heat Exchangers: An Experimental Validation. *Renewable Energy*. Vol. 31. pp. 2432-2446
- [2] Glosal, M.K. and Tiwari, G.N. (2006). Modeling and Parametric Studies for Thermal Performance of an Earth to Air Heat Exchanger Integrated with a Greenhouse. *Energy Conversion and Management*. Vol. 47. pp. 1779-1798
- [3] Poulouvassilis, A., Kerkides, P., Alexandris, S. and Rizos, S. (1998). A Contribution to the Study of the Water and Energy Balances of an Irrigated Soil Profile: A Heat Flux Estimates. *Soil and Tillage Research*. Vol. 15. pp. 189-198
- [4] Mongkon, S. Thepa S. Namprakai P. and Pratinthong N. (2013). Cooling Performance and Condensation Evaluation of Horizontal Earth Tube System for the Tropical Greenhouse. *Energy and Buildings*. Vol. 66. pp. 104-111
- [5] Mongkon, S. Thepa S. Namprakai P. and Pratinthong N. (2014). Cooling Performance Assessment of Horizontal Earth Tube System and Effect on Planting in Tropical Greenhouse. *Energy Conversion and Management*. Vol. 78. pp. 225-236
- [6] Florides, F. and Kalogirou, S. (2007). Ground Heat Exchanger - A Review of Systems, Models and Applications. *Renewable Energy*. Vol. 32. pp. 2461-2478
- [7] Tiwari, G.N. (2003). *Greenhouse Technology for Controlled Environment*. Alpha Science International: United Kingdom
- [8] Incropera, F.P. Dewitt, D.P., Bergman, T.L. and Lavine, A.S. (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John Willy and Sons: United State of America
- [9] Anderland, O.B. and Ladanyi, B. (2004). *Frozen Ground Engineering*. The American Society of Civil Engineering and John Wiley and Sons: United State of America
- [10] Beaker, B.R. and Fricke, B. A. (1997). *Effect of Saturation and Dry Density on Soil Thermal Conductivity*. Department of Mechanical and Aerospace Engineering. University of Missouri-Kansas City. United State of America