



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

เรื่อง การเพิ่มประสิทธิภาพการทำความเย็นของท่อใต้ดินที่ใช้ในโรงเรือนเกษตรโดยวิธีเพิ่มความชื้นในดิน

Enhancement the cooling performance of earth tube system in agricultural greenhouse by increasing soil moisture

ได้รับการจัดสรรงบประมาณวิจัย ประจำปี 2557

จำนวน 50,000 บาท

หัวหน้าโครงการ

นางสาวสุลัดดา มงคล

ผู้ร่วมโครงการ

นายสรวิช พลงษ์ศรี

งานวิจัยเสร็จสิ้นสมบูรณ์

30 เมษายน 2558

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบคุณสำนักวิจัยและส่งเสริมวิชาการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่สนับสนุนทุนวิจัยประจำปีงบประมาณ 2557 ทำให้โครงการการเพิ่มประสิทธิภาพการทำความเย็นของท่อไต้ดินที่ใช้ในโรงเรือนเกษตรโดยวิธีเพิ่มความชื้นในดินให้สำเร็จลุล่วง ขอขอบคุณผู้อำนวยการวิทยาลัยพลังงานทดแทน ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้สถานที่ในวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ในการทำวิจัย และขอขอบคุณคณาจารย์ บุคลากร และนักศึกษาวิทยาลัยพลังงานทดแทนทุกท่าน ที่มีส่วนช่วยเหลือในงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงมา ณ ที่นี้

สุลักษณ์ มงคล และสรายุทธ พลวงษ์ศรี

สารบัญ

หน้า

สารบัญตาราง	ค
สารบัญภาพ	ง
บทคัดย่อ	ฉ
Abstract	ช
คำนำ	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	20
ผลการวิจัย	27
วิจารณ์ผลการวิจัย	47
สรุปผลการวิจัย	50
เอกสารอ้างอิง	51
ภาคผนวก	53

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 จำแนกดินตามส่วนประกอบเป็นเปอร์เซ็นต์ตามน้ำหนักอนุภาคของดิน	5
ตารางที่ 2 ค่าความถ่วงจำเพาะของดินชนิดต่างๆ	8
ตารางที่ 3 สมบัติของดิน ณ บริเวณทำการทดลอง	23
ตารางที่ 4 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้	25
ตารางที่ 5 ความเร็วของอากาศในท่อไต่ดินจากการเปิดวาล์วที่มุมต่างๆ	27
ตารางที่ 6 เปรียบเทียบความเร็วของอากาศต่างๆ เพื่อนำมาใช้กับระบบท่อไต่ดิน	33
ตารางที่ 7 ความชื้นของดินในกรณีดินมีความชื้นน้อยที่สุด	36
ตารางที่ 8 ความชื้นของดินในกรณีดินมีความชื้นปานกลาง	37
ตารางที่ 9 ความชื้นของดินใน กรณีดินมีความชื้นมากที่สุด	38
ตารางที่ 10 ค่าอุณหภูมิอากาศในการทดสอบกรณีความชื้นดินต่างๆ	42

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1 องค์ประกอบของดิน	3
ภาพที่ 2 สัดส่วนการกระจายตัวของอนุภาคดิน	4
ภาพที่ 3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ความลึกต่างๆในช่วง 1 วัน	10
ภาพที่ 4 ท่อใต้ดินแบบระบบเปิด (Open loop mode)	11
ภาพที่ 5 ท่อใต้ดินแบบระบบปิด (Closed loop)	12
ภาพที่ 6 กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนของท่อใต้ดินเมื่อเพิ่มความชื้นให้กับดินบริเวณรอบท่อ	13
ภาพที่ 7 การใช้ระบบท่อใต้ดินทำความเย็นในโรงเรือนของ Mongkon et al. (2013)	15
ภาพที่ 8 ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในโรงเรือนที่มีการฝังท่อใต้ดินในดินที่ต่างชนิดกันของ Glosal and Tiwari (2006)	16
ภาพที่ 9 โรงเรือนเกษตรที่ใช้ระบบทำความเย็นท่อใต้ดินของ Tiwari et al. (2006)	16
ภาพที่ 10 ผลการเปลี่ยนแปลงความจุความร้อนจำเพาะและค่าการแพร่ความร้อนของดินในงานวิจัยของ Abu-Hamdeh (2003)	17
ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิดินและความจุความร้อนจำเพาะของดินที่ระดับความลึกต่างๆ ในงานวิจัยของ Poulouvassilis et al. (1998)	18
ภาพที่ 12 ประสิทธิภาพสมรรถนะของระบบ (COP) กับความเร็วอากาศในงานวิจัยของ Dubey et al. (2013)	19
ภาพที่ 13 ชุดทดสอบ U-tube heat exchanger	21
ภาพที่ 14 อุปกรณ์สำหรับหาความหนาแน่นและความชื้นของดิน	22
ภาพที่ 15 จุดวัดอุณหภูมิบริเวณต่างๆของท่อ	24
ภาพที่ 16 ขั้นตอนการทดลอง	26
ภาพที่ 17 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนในท่อใต้ดิน ณ ความเร็วต่างๆ	28
ภาพที่ 18 อุณหภูมิอากาศดิน ณ ความลึก 1 m กรณีหาความเร็วอากาศที่เหมาะสม	30
ภาพที่ 19 อุณหภูมิอากาศในท่อใต้ดิน กรณีหาความเร็วอากาศที่เหมาะสม	32
ภาพที่ 20 อุณหภูมิอากาศที่ไหลเข้าและออกท่อใต้ดิน กรณีหาความเร็วอากาศที่เหมาะสม	35
ภาพที่ 21 อุณหภูมิดินในกรณีที่ดินมีความชื้นต่างๆ	39
ภาพที่ 22 อุณหภูมิอากาศที่ไหลเข้าและไหลออกจากท่อ ในกรณีที่ดินมีความชื้นต่างๆ	41
ภาพที่ 23 ความร้อนที่ถ่ายเทสู่ดิน ในกรณีที่ดินมีความชื้นต่างๆ	44

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 24 สัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบท่อใต้ดิน ในกรณีที่ดินมีความชื้นต่างๆ	45
ภาพที่ 25 ผลต่างอุณหภูมิของอากาศที่ไหลเข้าท่อและผิวท่อเทียบกับผลต่างอุณหภูมิของอากาศที่ไหลออกจากท่อและผิวท่อ กรณีที่ดินมีความชื้นต่างๆ	48

การเพิ่มประสิทธิภาพการทำความเย็นของท่อใต้ดินที่ใช้ในโรงเรือนเกษตร
โดยวิธีเพิ่มความชื้นในดิน

Enhancement the cooling performance of earth tube system in agricultural greenhouse
by increasing soil moisture

สุลักษณา มงคล และสรารัฐ พลวงษ์ศรี
Sulaksana Mongkon and Sarawut Polvongsri

วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จ.เชียงใหม่ 50290

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายศึกษาความเป็นไปได้ของการเพิ่มประสิทธิภาพการทำความเย็นโดยใช้ท่อใต้ดินเพื่อการประยุกต์ใช้ในโรงเรือนเกษตรโดยวิธีเพิ่มความชื้นให้แก่ดิน ท่อใต้ดินที่ศึกษาเป็นท่อใต้ดินแบบตัวยู (U-tube heat exchanger) ทำจากท่อพลาสติกโพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC) เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.08 m ความยาว 12.5 m ฝังใต้ดิน ณ ความลึก 1 m ทดสอบ ณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ การทดสอบกระทำภายใต้สภาวะอากาศร้อนชื้นในฤดูฝนทางภาคเหนือของประเทศไทย

จากการศึกษาพบว่า ท่อใต้ดินแบบตัวยูสามารถลดอุณหภูมิอากาศและทำความเย็นได้เฉพาะช่วงเวลากลางวันที่มีอุณหภูมิอากาศที่ไหลเข้าท่อก่อนข้างสูง โดยท่อใต้ดินที่ทดสอบสามารถทำงานได้ตั้งแต่เวลา 9.00-15.00 น. ทั้งนี้ความสามารถในการลดอุณหภูมิของท่อใต้ดินจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิแวดล้อมซึ่งได้รับผลจากค่ารังสีอาทิตย์ สำหรับการวิเคราะห์หาค่ามุมการเปิดวาล์วที่เหมาะสม พบว่า ค่ามุมวาล์วน้อยจะสามารถลดอุณหภูมิได้ดีกว่าค่ามุมที่กว้างกว่า และการเปิดมุมวาล์วที่ 45° จะสามารถลดอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านท่อได้มากที่สุด จากนั้นจึงทำการทดสอบสมรรถนะการทำความเย็นที่เงื่อนไขความชื้นดินต่างๆ กัน พบว่า หากความชื้นดินมากจะสามารถลดอุณหภูมิได้ไม่เกิน 1°C และมีผลต่อการเพิ่มสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นหรือค่า COP น้อยเมื่อเปรียบเทียบผลที่เกิดจากการเพิ่มผลต่างอุณหภูมิอากาศที่ไหลเข้าท่อกับอุณหภูมิดิน ซึ่งกรณีดินที่มีความชื้นน้อยจะทำให้สมรรถนะการทำความเย็นของระบบมากกว่าดินที่มีความชื้นมาก

คำสำคัญ: ระบบท่อใต้ดิน/ท่อใต้ดินแบบตัวยู/โรงเรือนเกษตร/ความชื้นในดิน

Abstract

This research proposes to study the cooling possibility of earth tube system (ETS) by increasing soil moisture for the agricultural greenhouse application. The study was under taken during the raining season of northern Thailand. The type of ETS was the U-tube heat exchanger that made from polyvinylchloride (PVC). The tube diameter and length were 0.08 m and 12.5 m, respectively embedded horizontally at a depth of 1 m at School of Renewable Energy, Maejo University.

The results found that the air temperature would be cooled only during daytime which had a relatively high temperature of inlet air. The U-tube heat exchanger could operate in cooling mode from 9 a.m. to 3 p.m. The ability of air temperature reducing was depends on the ambient temperature which was affected by solar radiation. The valve opening considering for airflow control into the U-tube heat exchanger showed that the less angles could reduce air temperature better than the wide angle. The suitable angle of valve opening was 45° which the blower temperature was incresed in the acceptable range. For the performance study of various soil moistures, the performance of U-tube heat exchangar at the highest moisture could slightly reduce soil temperature not exceed 1°C and had a few effect of COP. While the temperature difference between inlet air and 1 m depth of soil had more resulted than soil moisture variation. The COP of lowest soil moisture showed be the greater than other conditions.

Keywords: Earth tube system/U-tube heat exchanger/Agricultural greenhouse/Soil moisture

คำนำ

การทำความร้อนโดยใช้ท่อใต้ดิน (Earth tube cooling system) เป็นการทำความร้อนโดยวิธีธรรมชาติ (Passive cooling) ประเภทหนึ่งซึ่งใช้พลังงานน้อยและไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม โดยธรรมชาติของดินมี Thermal mass ที่สะสมพลังงานได้มากและมีอุณหภูมิค่อนข้างคงที่ ในภูมิอากาศแบบเขตร้อนอย่างเช่นประเทศไทย ในช่วงเวลากลางวันอุณหภูมิของดินที่ระดับความลึกต่างๆ จะมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิบรรยากาศแวดล้อม ดังนั้นจึงสามารถใช้ดินเป็นแหล่งดูดกลืนความร้อน (Heat sink) ได้เป็นอย่างดี การนำประโยชน์จากดินมาใช้ทำความเย็นในโรงเรือนเกษตรไม่ยุ่งยากซับซ้อนสามารถออกแบบระบบให้ใช้งานได้ง่ายโดยอาศัยหลักการการแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) ระหว่างผนังท่อที่ฝังลงใต้ดิน (Earth tubes) และอากาศร้อนที่ไหลผ่านท่อ (Working fluid) ซึ่งเคลื่อนที่โดยใช้พัดลมดูดอากาศจากในโรงเรือนเคลื่อนที่ผ่านท่อใต้ดิน จะได้อากาศที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอากาศที่ไหลเข้าสู่ท่อ และสามารถนำอากาศเย็นหรือลมเย็นนี้ไปใช้ลดอุณหภูมิอากาศในโรงเรือนได้ การศึกษาการใช้งานของท่อใต้ดินในโรงเรือนเกษตรมีอย่างแพร่หลายทั้งในต่างประเทศและในประเทศไทย สำหรับการศึกษาในประเทศไทยนั้น Mongkon *et al.* (2013) และ Mongkon *et al.* (2014) พบว่า การใช้ท่อใต้ดินทำความเย็นในโรงเรือนสามารถลดอุณหภูมิในโรงเรือนได้ดีในระดับหนึ่งและเมื่อนำไปประยุกต์ใช้กับพืชที่ปลูกในโรงเรือนจะให้ผลดีกว่าคุณภาพของพืชที่ปลูกในโรงเรือนที่ไม่มีการทำความเย็น อย่างไรก็ตามความร้อนจากรังสีอาทิตย์ที่เข้าสู่โรงเรือนมีค่าสูงมาก จึงทำให้ผลต่างอุณหภูมิในโรงเรือนที่ลดลงได้มีค่าน้อยกว่าการใช้ท่อใต้ดินในเขตภูมิอากาศแบบอื่น เช่น เขตอบอุ่น หรือเขตหนาว เมื่อทำการประเมินค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบ (Coefficient of performance) ท่อใต้ดินที่นำมาใช้งาน พบว่า มีค่าต่ำกว่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของเครื่องปรับอากาศโดยคิดเป็น 74.74 % จึงจำเป็นต้องหาวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนของท่อให้มากขึ้น (Mongkon *et al.*, 2013)

อีกปัจจัยหนึ่งที่น่าสนใจในการศึกษานี้ คือ การพิจารณาสมบัติทางฟิสิกส์ของดิน ซึ่งดินในแต่ละแห่งแต่ละสถานที่ย่อมมีสมบัติทางฟิสิกส์ที่แตกต่างกันและส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนระหว่างดินกับท่อใต้ดินโดยตรง ความชื้นในดินเป็นสมบัติทางฟิสิกส์ของดินสมบัติหนึ่งที่ค่อนข้างมีผลต่อสมบัติทางความร้อนของดินหลายตัวแปร ได้แก่ ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) และค่าจุความร้อนโดยปริมาตร (Volumetric specific heat) สมบัติทางความร้อนต่างๆ จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อดินมีความชื้นมากขึ้น และมีค่าลดลงในดินที่เป็นดินแห้ง นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาในชั้นหน้าตัดดินตามธรรมชาติ ความชื้นในดินจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในด้านของการเพิ่มความต่อเนื่องในการถ่ายเทความร้อน เพิ่มพื้นที่ในการนำความร้อนภายในชั้นหน้าตัดดิน

และยังสามารถรักษาเสถียรภาพการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดินได้ดีโดยเฉพาะเมื่อดินอึดตัวไปด้วยน้ำ (Miller and Donahue, 1995), (Smith and Mullins, 2001)

จากประโยชน์ของการใช้ท่อใต้ดินในการทำความเย็นในโรงเรือนเกษตร และประโยชน์ของความชื้นที่มีต่อสมบัติทางความร้อนของดิน จึงมีความสนใจที่จะทำการศึกษาและหาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อใต้ดิน โดยเพิ่มความชื้นให้แก่ดินบริเวณที่มีการฝังท่อ ซึ่งการศึกษนี้จะกระทำภายใต้ชุดทดสอบท่อใต้ดินแบบตัวยู หรือ U-tube heat exchanger ภายใต้ภูมิอากาศของจังหวัดเชียงใหม่

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อหาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อใต้ดินที่มีการประยุกต์ใช้ในโรงเรือนเกษตร โดยเลือกใช้วิธีเพิ่มความชื้นให้แก่ดิน
2. เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์ถึงการถ่ายเทความร้อนในท่อที่ทำการศึกษา และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับท่อใต้ดินและโรงเรือนเกษตรที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ต่างๆ ได้

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

จากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยที่ตั้งไว้ ผู้วิจัยคาดว่า ผลลัพธ์ของโครงการหลังการดำเนินเสร็จสิ้นจะก่อให้เกิดประโยชน์ ดังนี้

1. ได้แนวทางเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการทำความเย็นโดยใช้ท่อใต้ดินให้ดีขึ้น และสามารถนำไปแก้ไขปัญหาเมื่อนำท่อใต้ดินไปใช้งานจริงในโรงเรือนเกษตร หรือสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอาคารได้
2. สามารถดึงศักยภาพการทำความเย็นจากดินมาใช้ให้เกิดประโยชน์มากขึ้น เนื่องจากดินเป็นแหล่งรับความร้อนที่มีศักยภาพสูง
3. พัฒนาและต่อยอดงานวิจัยด้านพลังงานทดแทนเนื่องจากการใช้พลังงานจากดินถือเป็นพลังงานทางเลือกอย่างหนึ่ง
4. เผยแพร่ผลงานวิจัยในการวารสารวิชาการ งานประชุมวิชาการ และบทความทั่วไป เพื่อนำไปใช้ประโยชน์สำหรับเกษตรกร นักวิชาการ หรือผู้ที่สนใจต่อไป

การตรวจเอกสาร

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

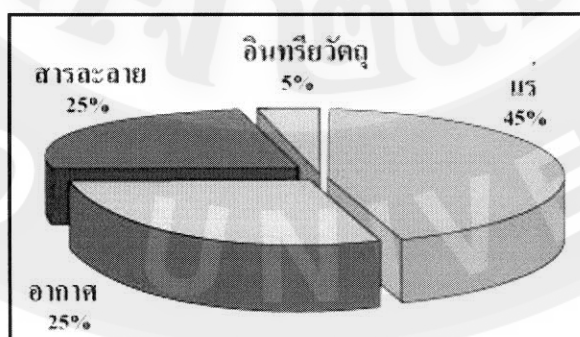
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งเกี่ยวข้องกับดิน และคุณสมบัติของดิน เช่น ความชื้นในดิน สมบัติทางความร้อนของดิน อุณหภูมิดิน และประสิทธิภาพการทำความเย็นในทอมของค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะดิน ดังต่อไปนี้

1. ดิน

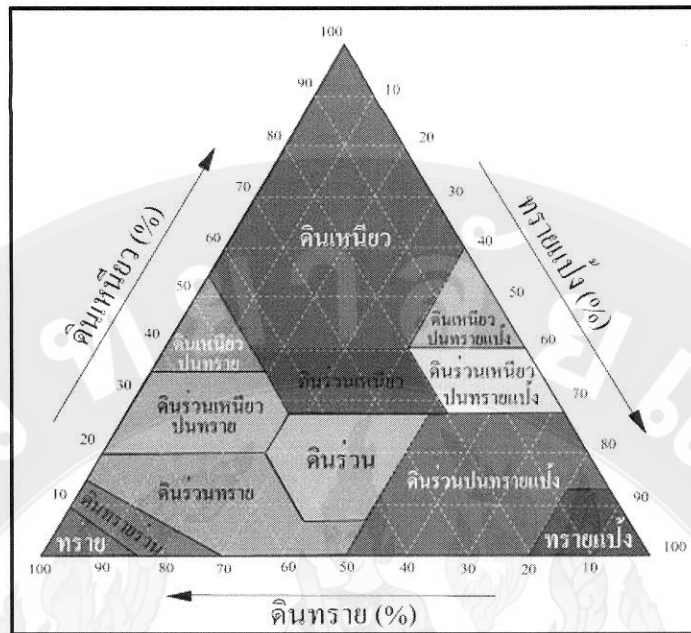
ดิน (Soil) คือ วัสดุธรรมชาติที่ปกคลุมผิวโลกอยู่บางๆ เกิดขึ้นจากผลของการแปรสภาพหรือผุพังของหินและแร่ และอินทรีย์วัตถุผสมคลุกเคล้ากัน โดยมีส่วนประกอบดังนี้ (วัฒนา และ วินิต, 2532)

1. อนินทรีย์วัตถุ (Mineral matter) ได้แก่ส่วนของแร่ต่างๆ ภายในหินซึ่งผุพังสีกกร่อนเป็นชิ้นเล็กชิ้นน้อย โดยทางเคมี ฟิสิกส์ และชีวเคมี
2. อินทรีย์วัตถุ (Organic matter) ได้แก่ส่วนที่เกิดจากการเน่าเปื่อยผุพังหรือสลายตัวของซากพืชซากสัตว์ที่ทับถมกัน มีอยู่ประมาณ
3. น้ำหรือสารละลาย ซึ่งพบอยู่ในช่องระหว่างเม็ดดิน (Aggregate) หรืออนุภาคดิน (Particle)
4. อยู่ในที่ว่างระหว่างเม็ดดินหรืออนุภาคดิน ก๊าซส่วนใหญ่ที่พบทั่วไปในดิน ได้แก่ ไนโตรเจน ออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์

ปริมาณของแต่ละส่วนประกอบของดิน โดยทั่วไปจะมีแร่ 45 % อินทรีย์วัตถุ 5 % น้ำ 25 % และอากาศ 25 % ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 องค์ประกอบของดิน



ภาพที่ 2 สัดส่วนการกระจายตัวของอนุภาคดิน

ในภาพที่ 2 สามารถจำแนกประเภทของดินได้จากสัดส่วนของอนุภาคต่างๆ ซึ่งปกติจะแบ่งดินออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ (วัฒนา และ วินิต, 2532)

1. ดินเหนียว เป็นดินที่มีเนื้อละเอียด ในสภาพดินแห้งจะแตกออกเป็นก้อนแข็งมาก เมื่อเปียกน้ำแล้วจะมีความยืดหยุ่น สามารถปั้นเป็นก้อนหรือคลึงเป็นเส้นยาวได้ เหนียวเหนอะหนะติดมือ เป็นดินที่มีการระบายน้ำและอากาศไม่ดี
2. ดินร่วน เป็นดินที่เนื้อดินค่อนข้างละเอียดนุ่มมือในสภาพดินแห้งจะจับกันเป็นก้อนแข็งพอประมาณ ในสภาพดินชื้นจะยืดหยุ่นได้บ้าง เมื่อสัมผัสหรือคลึงดินจะรู้สึกนุ่มมือแต่อาจจะรู้สึกสากมืออยู่บ้างเล็กน้อย เมื่อกำดินให้แน่นในฝ่ามือแล้วคลายมือออก ดินจะจับกันเป็นก้อนไม่แตกออกจากกัน เป็นดินที่มีการระบายน้ำได้ดีปานกลาง
3. ดินทราย เป็นดินที่มีอนุภาคนาขนาดทรายเป็นองค์ประกอบอยู่มากกว่า 85 % เนื้อดินมีการเกาะตัวกันหลวมๆ มองเห็นเป็นเม็ดเดี่ยวๆ ได้ ถ้าสัมผัสดินที่อยู่ในสภาพแห้งจะรู้สึกสากมือเมื่อลองกำดินที่แห้งนี้ไว้ในอุ้งมือแล้วคลายมือออกดินก็จะแตกออกจากกันได้ แต่ถ้ากำดินที่อยู่ในสภาพชื้นจะสามารถทำให้เป็นก้อนหลวมๆ ได้ แต่พอสัมผัสจะแตกออกจากกันทันที ดินทรายเป็นดินที่มีการระบายน้ำและอากาศดีมาก มีความสามารถในการอุ้มน้ำต่ำ

นักปฐพีวิทยาแบ่งดินออกเป็น 12 ชนิด โดยการศึกษาสัดส่วนการกระจายอนุภาคของดินตามรูปที่ 2.2 เช่น ดินทรายร่วนประกอบด้วยอนุภาคทราย 80 %, อนุภาคทรายแป้ง 10 %, อนุภาคดินเหนียว 10 %, ดินร่วนประกอบด้วยอนุภาคทราย 40 %, อนุภาคทรายแป้ง 40 %, อนุภาคดิน

เหนียว 20 % และ ดินเหนียวประกอบด้วยอนุภาคทราย 20 %, อนุภาคทรายแป้ง 20 %, อนุภาคดินเหนียว 60 % เป็นต้น การจำแนกดิน ช่วยให้ทราบถึงลักษณะของดินแต่ละประเภท ได้แก่ ความสามารถในการกักเก็บน้ำ และการถ่ายเทพลังงานความร้อน ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในทางเกษตรกรรม และวิศวกรรมได้ (วัฒนา และ วินิต, 2532)

จากภาพที่ 2 สัดส่วนการกระจายตัวของอนุภาคดิน เพื่อให้เข้าใจได้ง่ายยิ่งขึ้นสามารถดูจากตารางที่ 1

ตารางที่ 1 จำแนกดินตามส่วนประกอบเป็นเปอร์เซ็นต์ตามน้ำหนักอนุภาคของดิน (สง่า, 2541)

ชื่อดิน	ส่วนประกอบเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก		
	ทราย	ทรายแป้ง	ดินเหนียว
ดินทราย	85-100	0-15	0-10
ดินทรายปนร่วน	70-100	0-30	10-15
ดินร่วนปนทราย	50-100	0-50	15-20
ดินร่วน	50-72	28-50	48-75
ดินร่วนปนทรายแป้ง	10-50	73-88	50-100
ดินร่วนเหนียวปนทราย	45-80	0-28	20-55
ดินร่วนปนเหนียว	20-45	16-53	28-40
ดินร่วนเหนียวปนทรายแป้ง	0-20	40-73	28-40
ดินทรายแป้ง	0-20	80-100	0-12
ดินเหนียวปนทราย	35-55	0-20	35-55
ดินเหนียวปนทรายแป้ง	0-20	40-60	40-60
ดินเหนียว	55-100	0-40	40-100

2. สมบัติของดิน

สมบัติของดินจะมีผลกระทบทางตรงและทางอ้อมต่ออุณหภูมิดินที่ความลึกต่างๆ ดินในแต่ละแห่งอาจมีความแตกต่างขององค์ประกอบในดินแต่ละชั้น เช่น สัดส่วนของเนื้อดินที่แตกต่างกัน สัดส่วนของสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์วัตถุต่างๆ ทำให้สมบัติของดินแปรเปลี่ยนได้ ในที่นี้สมบัติของดินที่ทำการรวบรวมเป็นสมบัติทางฟิสิกส์ของดิน (Physical properties of soil) หรืออาจเรียกว่าเป็นสมบัติเชิงวิศวกรรม (Engineering properties) ประกอบด้วย คุณสมบัติด้านปริมาตร สมบัติด้านน้ำหนัก คุณสมบัติด้านความถ่วงจำเพาะ และความหนาแน่นของดิน (ชูศักดิ์, 2554), (สง่า, 2549)

สมบัติทางด้านปริมาตร

ปริมาตรของดินโดยแท้จริงแล้ว ไม่ว่าดินจะอยู่ในสภาวะธรรมชาติ แห้ง หรืออิ่มตัว ปริมาตรส่วนที่เป็นของแข็งมักจะมีช่องว่างเล็กปรากฏอยู่เสมอไม่ใช่ของแข็ง 100% คุณสมบัติที่สำคัญทางด้านปริมาตรมีดังนี้

ก. อัตราส่วนช่องว่าง (Void ratio) คือ อัตราส่วนของปริมาตรทั้งหมดของช่องว่างระหว่างเม็ดดินต่อปริมาตรทั้งหมดของเม็ดดินดังสมการที่ 1

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (1)$$

ข. ความพรุน (Porosity) คือ อัตราส่วนของปริมาตรทั้งหมดของช่องว่างระหว่างเม็ดดินต่อปริมาตรทั้งหมดของเนื้อดิน ดังสมการที่ 2

$$n = \frac{V_v}{V} \quad (2)$$

ค. ระดับความอิ่มตัว (Degree of saturation) คือ อัตราส่วนของปริมาตรของน้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดินต่อปริมาตรทั้งหมดของช่องว่างระหว่างเม็ดดินในเนื้อดิน ดังสมการที่ 3

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \quad (3)$$

ง. ปริมาณของอากาศ (Air content) อัตราส่วนของปริมาณอากาศในช่องว่างระหว่างเม็ดดินต่อปริมาตรทั้งหมดของเนื้อดิน ดังสมการที่ 4

$$A = \frac{V_a}{V} \quad (4)$$

จ. เปอร์เซ็นต์อากาศในช่องว่าง (Percent air void) คือ อัตราส่วนของปริมาณอากาศในช่องว่างระหว่างเม็ดดินต่อปริมาตรทั้งหมดของช่องว่างระหว่างเม็ดดินในเนื้อดิน ดังสมการที่ 5

$$A_c = \frac{V_a}{V_v} \quad (5)$$

โดยที่	e	คือ อัตราส่วนช่องว่าง
	n	คือ ความพรุนของดิน
	S _r	คือ ระดับความอิ่มตัวของดิน

- A คือ ปริมาณของอากาศ
 A_c คือ เปอร์เซ็นต์อากาศในช่องว่าง
 V คือ ปริมาตรเนื้อดิน (m^3)
 V_w คือ ปริมาตรน้ำ (m^3)
 V_v คือ ปริมาตรของช่องว่าง (m^3)
 V_s คือ ปริมาตรเม็ดดิน (m^3)
 V_a คือ ปริมาณอากาศในช่องว่าง (m^3)

สมบัติทางด้านน้ำหนัก

ความชื้นของดิน คือ สัดส่วนระหว่างปริมาณของน้ำกับดินที่น้ำนั้นบรรจุอยู่ น้ำในดินอาจอยู่ในรูปของเหลวหรือไอน้ำและถูกดูดซับอยู่ในรูปของฟิล์มบางๆ ความชื้นโดยมวลหาได้จากสมการที่ 6 (สง่า, 2549) เป็นสมการหาความชื้นดินแบบมาตรฐานแห้ง (Dry basis)

$$\theta_m = m_w / m_s \quad (6)$$

- โดยที่ θ_m คือ ระดับความชื้นโดยมวล
 m_w คือ มวลของน้ำในดิน (kg)
 m_s คือ มวลของดินแห้งสนิท ที่ผ่านการอบแห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 100-110 °C จนมีมวลคงที่ (kg)

สำหรับระดับความชื้นโดยปริมาตรหาได้จากสมการที่ 7

$$\theta_v = V_w / V_b \quad (7)$$

- โดยที่ θ_v คือ ระดับความชื้นโดยปริมาตร
 V_w คือ ปริมาตรของน้ำในดิน (m^3)
 V_b คือ ปริมาตรรวมของดิน (m^3)

สมบัติด้านความถ่วงจำเพาะ

ค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินของมวลดินใดๆ ก็ตามถือว่าเป็นค่าเฉลี่ยของความถ่วงจำเพาะของมวลดินนั้น ซึ่งค่าความถ่วงจำเพาะของมวลดินมีความสำคัญต่อการหาคุณสมบัติอย่างอื่นของดิน ค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินหาได้จากการนำค่าน้ำหนักของเม็ดดินแห้งมา

เปรียบเทียบกับน้ำหนักน้ำที่อุณหภูมิ 4 °C และมีปริมาตรเท่ากับปริมาตรของเม็ดดินแห่งดังกล่าวที่ 8 (สง่า, 2549)

$$G_s = \frac{W_s}{V_s \gamma_w} = \frac{\gamma_d}{\gamma_w} \quad (8)$$

โดยที่ G_s คือ ความถ่วงจำเพาะของดิน
 V_s คือ ปริมาตรเม็ดดิน (m³)

ตารางที่ 2 ค่าความถ่วงจำเพาะของดินชนิดต่างๆ (มานะ, 2535)

ชนิดของดิน	ความถ่วงจำเพาะ (G_s), (ไม่มีหน่วย)
ทรายแร่ควอตซ์ (Quartz Sand)	2.64 – 2.66
ดินตะกอน/ตะกอนทราย (Silt)	2.67 – 2.73
ดินเหนียว (Clay)	2.70 – 2.90
ดินชอล์ก (Chalk)	2.60 – 2.75
ดินลมหอบ (Loess)	2.65 – 2.73
ดินพีท (Peat)	1.30 – 1.90

ความหนาแน่นของดิน

เป็นอัตราส่วนของน้ำหนักของเนื้อดินต่อปริมาตรของเนื้อดินนั้น จะขึ้นอยู่กับสภาพต่างๆ ของมวลดินเช่น แห้ง อิ่มตัว หรือจมน้ำ ซึ่งความหนาแน่นแต่ละแบบหาได้ดังนี้

ก. ความหนาแน่นรวมของดิน คือ มวลของเนื้อดินต่อปริมาตรของเนื้อดิน ดังสมการที่ 9

$$\rho = \frac{G_s + S_r e}{1 + e} \quad (9)$$

ข. ความหนาแน่นอิ่มตัวของดิน คือ ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นอิ่มตัวกับความหนาแน่นของน้ำกับอัตราส่วนช่องว่างและความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินดังสมการที่ 10

$$\rho_{sat} = \frac{G_s + S_r e}{1 + e} \rho_w \quad (10)$$

ค. ความหนาแน่นของดินแห้ง คือ ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับความหนาแน่นของน้ำกับอัตราส่วนช่องว่างและความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินดังสมการที่ 11

$$\rho_d = \frac{G_s}{1+e} \rho_w \quad (11)$$

โดยที่ ρ คือ ความหนาแน่นรวมของดิน (kg/m^3)
 ρ_{sat} คือ ความหนาแน่นอิ่มตัวของดิน (kg/m^3)
 ρ_d คือ ความหนาแน่นของดินแห้ง (kg/m^3)

ความจุความร้อนเชิงปริมาตรของดิน

ความจุความร้อนจำเพาะโดยปริมาตรของดินหาได้จากสมการความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอนุภาคของดินที่สัมพันธ์กับค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ (Anderland and Ladanyi, 2004)

$$C_v = \left(\frac{\rho_d}{\rho_w} \right) \left(0.17 + 1.0 \frac{W}{100} C_{vw} \right) \quad (12)$$

โดยที่ C_v = ค่าความจุความร้อนเชิงปริมาตรของดิน ($\text{J/m}^3\text{-K}$)
 W = ค่าความชื้นดิน (%)
 ρ_w = ความหนาแน่นของน้ำ (kg/m^3)
 C_{vw} = ความจุความร้อนเชิงปริมาตรของน้ำในดิน ($\text{J/m}^3\text{-K}$)

ความการนำความร้อนของดิน

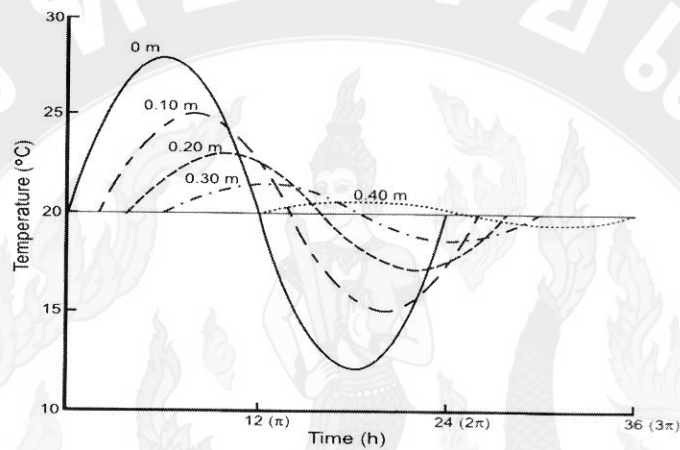
ค่าการนำความร้อนของดิน คือ ความร้อนที่ถูกส่งผ่านตัวกลางที่มีหน้าตัดหนึ่งหน่วยต่อหนึ่งเวลาและต่อหนึ่งหน่วยความชันของอุณหภูมิ การหาค่าการนำความร้อนของดินจะเกี่ยวข้องกับชนิดของเนื้อดินและแร่ธาตุที่อยู่ในดินเช่นเดียวกับการหาค่าความจุความร้อน สำหรับการหาค่าการนำความร้อนของดินตามธรรมชาติโดยประเมินจากค่าความหนาแน่นของดิน และความชื้นภายในดินนั้นๆ (Anderland and Ladanyi, 2004)

$$k = 0.1142 \left[\left(0.9 \log W - 0.2 \right) * 10^{0.6243 * \frac{\rho_d}{1000}} \right] \quad (13)$$

โดยที่ k คือ ค่าการนำความร้อนของดิน (W/m-K)

3. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดิน (Hillel, 1998)

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดินจะอยู่ในแบบของ Sine wave ซึ่งในรอบหนึ่งวันนั้น อุณหภูมิอากาศแวดล้อมมีค่าการเปลี่ยนแปลงสูง แต่อุณหภูมิดินจะมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยกว่า อุณหภูมิอากาศ และมีแนวโน้มลดลงตามระดับความลึกของดินเนื่องจากดินที่อยู่ลึกมากขึ้น เนื่องจากค่าแรงเฉื่อยทางความร้อน (Thermal inertia) ของดินสูงมากขึ้น ทำให้เกิด Time lag ของ อุณหภูมิในแต่ละชั้นดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ความลึกต่างๆในช่วง 1 วัน

เมื่อพิจารณาที่ผิวดิน ($z = 0$) จะสามารถหาอุณหภูมิผิวดินได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวดินและค่า Amplitude โดยพิจารณาในรูปของ Harmonic of time ดังสมการที่ 14

$$T(0,t) = T_{ave} + A_o \sin \omega t \quad (14)$$

โดยที่

- $T(0,t)$ คือ อุณหภูมิที่ผิวดิน ($^{\circ}\text{C}$)
- T_{ave} คือ อุณหภูมิเฉลี่ยผิวดินรายปี ($^{\circ}\text{C}$)
- A_o คือ Amplitude ของอุณหภูมิที่ผิวดิน ($^{\circ}\text{C}$)
- ω คือ $\frac{2\pi}{t}$ หรือ Radial frequency (Radian)

และเมื่อพิจารณาที่ความลึกใดๆ ของดิน จะสามารถหาอุณหภูมิดินได้จากสมการที่ 15

$$T(z,t) = T_{ave} + A_o e^{-z/d} \sin (\omega(t-\phi) - z/d - \phi) \quad (15)$$

โดยที่

- d คือ Damping depth (m)
- ϕ คือ Phase constant (hr)

Damping depth เป็นความลึกของดินที่ค่า Amplitude ของอุณหภูมิดิน ณ ความลึกใดๆ มีค่าลดลงเป็นสัดส่วน $1/e = 1/2.718 = 0.37$ ของ Amplitude ของอุณหภูมิผิวดิน สามารถหาได้จากสมบัตินทาง ความร้อนของดินและค่าความถี่จากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

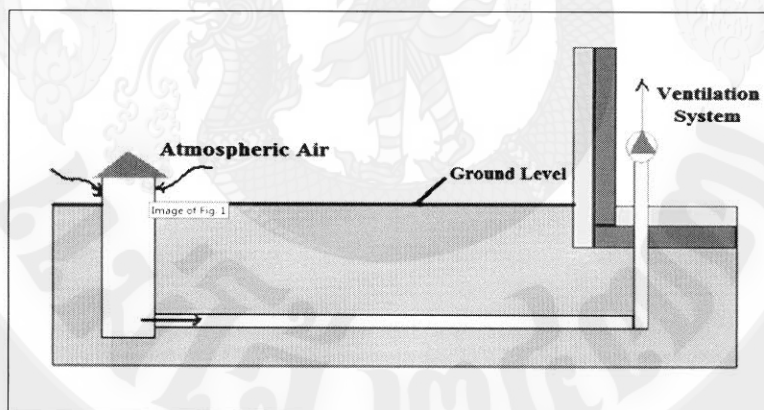
$$d = \sqrt{\frac{2k}{C_v \omega}} \quad (16)$$

4. การหาค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบ (Coefficient of performance: COP)

ระบบการทำความเย็นด้วยท่อใต้ดิน มีอยู่ 2 ระบบ คือ ระบบเปิด (Open loop) และระบบปิด (Closed loop)

1) ระบบเปิด (Open loop)

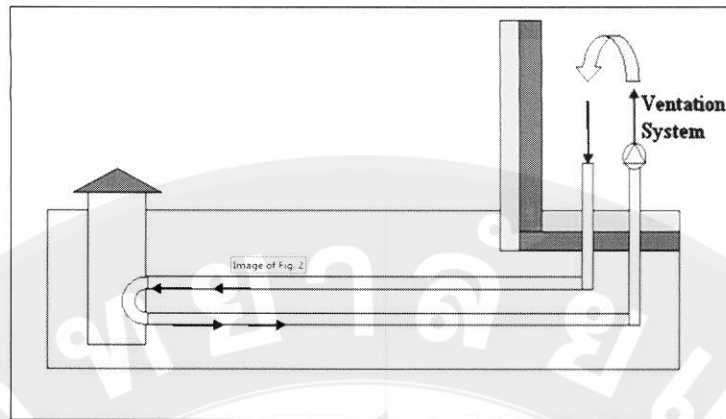
ระบบเปิด คือ การนำอากาศจากภายนอกอาคารมาทำความเย็นด้วยระบบท่อใต้ดินก่อนเข้าสู่อาคาร ระบบนี้เหมาะกับอาคารที่มีความต้องการอัตราการระบายอากาศ (Ventilation rate) สูง โดยระบบจะทำงานได้มีประสิทธิภาพดี เมื่อมีอุณหภูมิภายนอกต่ำกว่าอุณหภูมิภายในอาคาร [16]



ภาพที่ 4 ท่อใต้ดินแบบระบบเปิด (Open loop mode)

2) ระบบปิด (Closed loop)

ระบบปิด คือการนำเอาอากาศภายในอาคารมาผ่านระบบท่อใต้ดิน อากาศที่ได้จะมีอุณหภูมิลดลงและนำกลับสู่อาคารอีกครั้ง เพื่อลดอุณหภูมิภายในห้อง ระบบนี้มักจะใช้กับกรณีที่อากาศภายนอกมีความรุนแรง ต้องการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในอาคาร หรือเป็นอาคารที่มีอัตราการระบายอากาศ (Ventilation rate) ต่ำ



ภาพที่ 5 ท่อใต้ดินแบบระบบปิด (Closed loop)

การหาประสิทธิภาพการทำงานของท่อใต้ดินที่จะใช้เป็นชุดทดสอบต้นแบบ จะใช้วิธีหาค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient of performance) หรือค่า COP โดยคำนวณและทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบสมรรถนะการทำงานของระบบในกรณีการเพิ่มความชื้นให้กับดินในกรณีต่างๆ ค่า COP จะหาได้จากอัตราส่วนระหว่างค่าความร้อนที่ถ่ายเทผ่านท่อใต้ดินและกำลังของพัดลมดูดอากาศที่ใช้ดังสมการที่ 17 หาก COP มีค่ามาก นั้นหมายถึง ท่อใต้ดินมีประสิทธิภาพสูง (Tiwari, 2003)

$$COP = Q_t / W_b \quad (17)$$

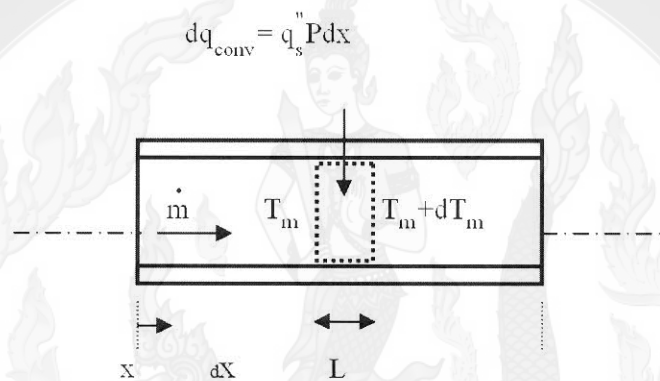
โดยที่ Q_t คือ พลังงานความร้อนที่ระบบสามารถทำได้ (W)
 W_b คือ กำลังของพัดลมดูดอากาศที่ใช้ (W)

สำหรับค่าความร้อนที่ถ่ายเทผ่านท่อใต้ดิน ศักยภาพจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิดินที่คงที่ อุณหภูมิของอากาศที่ไหลเข้าระบบและอุณหภูมิของท่อ ดังสมการที่ 18 ซึ่งการคำนวณในที่นี้สมมติให้ผนังท่อบี้อุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิของดิน ณ ความลึกที่ทำการฝังท่อ (Tiwari, 2003)

$$q_t = \dot{m}_a C_p (T_{out} - T_{in}) \quad (18)$$

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

จากภาพที่ 6 เมื่อพิจารณาอุณหภูมิที่ไหลออกจากท่อใต้ดิน (T_{out}) จะขึ้นอยู่กับพาความร้อนระหว่างอากาศที่ไหลเข้าสู่ท่อที่ผิวท่อที่มีอุณหภูมิที่แตกต่างกัน การพาความร้อนที่เกิดขึ้นจะเป็นการพาความร้อนแบบบังคับ (Force convection) เนื่องจากใช้พัดลมดูดอากาศ (Blower) ในการกำหนดความเร็วของอากาศที่ไหลเข้าสู่ท่อ ในเทอมของสัมประสิทธิ์การพาความร้อน อัตราการถ่ายเทความร้อนจากที่ระยะ dx จะมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศที่ไหลเข้าและออกจากท่อ เช่นเดียวกับอัตราการถ่ายเทความร้อนจะสามารถหาได้จากพลักซ์จากการพาความร้อนที่เกิดขึ้นในท่อดังสมการที่ 19 (Tiwari, 2003), (Incropera *et al.*, 2007)



ภาพที่ 6 กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนของท่อใต้ดินเมื่อเพิ่มความชื้นให้กับดินบริเวณรอบท่อ

$$dq_{conv} = \dot{m} c_p dT_m = q_s'' P dx \quad (19)$$

โดย	q_{conv}	คือ ความร้อนที่เกิดจากการพาความร้อนในท่อ (W)
	q_s''	คือ พลักซ์ความร้อนที่เกิดขึ้นในท่อ (W/m^2)
	T_m	คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศในท่อ (K)
	P	คือ พื้นที่หน้าตัดท่อ (m^2)
	$\dot{m}$	คือ อัตราการไหลโดยมวลของอากาศในท่อ (kg/s)
	c_p	คือ ความจุความร้อนของอากาศ ($J/kg-K$)

เมื่อทำการแทนค่า $q_s'' = h(T_s - T_m)$ จาก Newton's Law of cooling และจัดรูปสมการและอินทิเกรตของผลต่างอุณหภูมิตลอดความยาวท่อ จะได้สมการสำหรับคำนวณหาอุณหภูมิอากาศที่ไหลออกจากท่อดังสมการที่ 20

$$T_{out} = T_o - \left\{ (T_o - T_{in}) \left\{ \exp \left(- \frac{\pi D L}{m \dot{c}_a} h_f \right) \right\} \right\} \quad (20)$$

โดยที่	T_o	คือ อุณหภูมิดิน ณ ความลึกที่พิจารณา (K)
	h_f	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างของอากาศภายในท่อ (W/m ² -K)
	D	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (m)
	L	คือ ความยาวของท่อ (m)

สำหรับการหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อได้ดิน (h_f) นั้น เป็นการพาความร้อนแบบบังคับในท่อทรงกระบอก โดยการไหลแบบเต็มท่อ (Fully developed) สามารถหาได้จากสมการที่ 21 ถึงสมการที่ 23 (Incropera et al., 2007)

$$h_f = \frac{Nu_D \cdot k}{D} \quad (21)$$

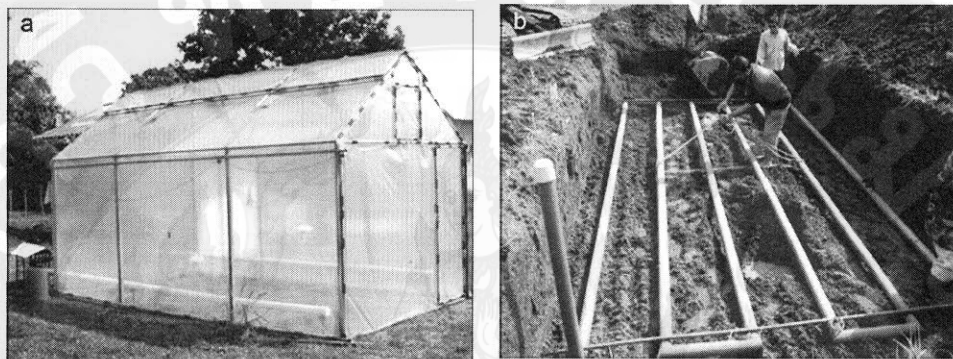
$$Nu_D = 0.023 Re_D^{4/5} Pr^{1/3} \quad (22)$$

$$Re_D = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (23)$$

โดยที่	Nu_D	คือ Nusselt number (Dimentionless)
	Re_D	คือ Reynolds number (Dimentionless)
	v	คือ Air velocity (m ² /s)
	D	คือ Pipe diameter (m)

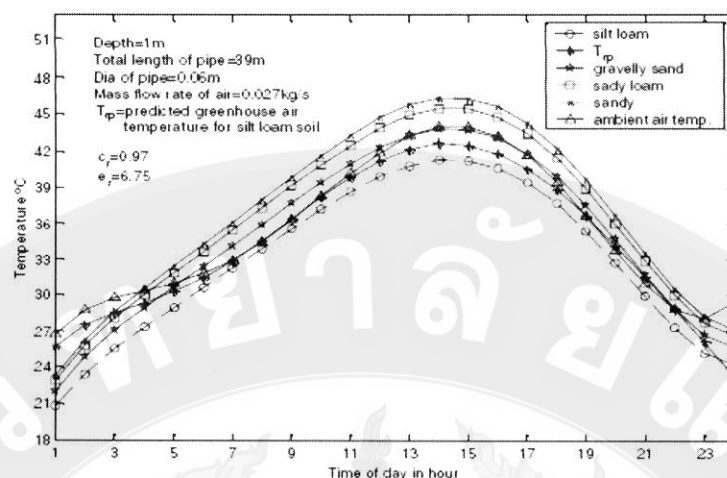
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาครั้งนี้ ได้ทำการรวบรวมงานวิจัยจากต่างประเทศในแต่ละแห่งที่มีลักษณะภูมิอากาศที่แตกต่างกัน และงานวิจัยในประเทศบางส่วน ซึ่งแบ่งเป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ท่อใต้ดินโดยตรง และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายความร้อนในดินไว้ดังนี้



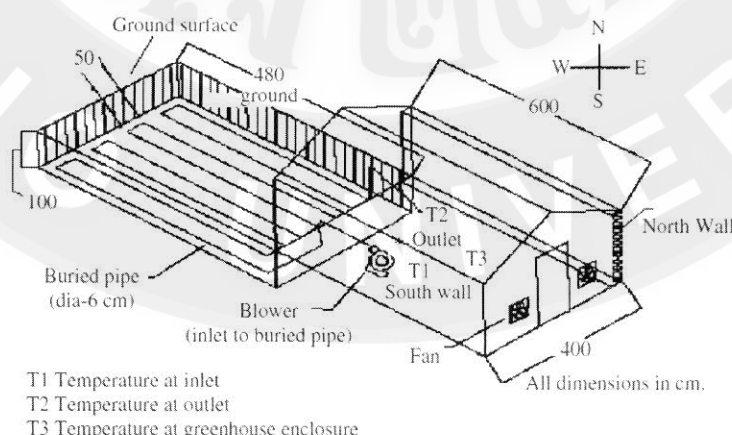
ภาพที่ 7 การใช้ระบบท่อใต้ดินทำความเย็นในโรงเรือนของ Mongkon et al. (2013)

Mongkon et al. (2013) ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ของการนำระบบท่อใต้ดินมาใช้ในการทำความเย็นในโรงเรือนปลูกไม้ดอกที่ตั้งอยู่ในภูมิอากาศเขตอบอากาศร้อนชื้นทางภาคเหนือของประเทศไทยดังภาพที่ 7 โดยท่อใต้ดินที่ทำการศึกษาเป็นท่อเหล็กความยาว 38.50 m ฝังใต้สนามหญ้าลึก 1 m ของโรงเรือนพลาสติกโพลีเอทิลีนที่มีขนาด กว้าง 3 m ยาว 5 m สูง 3 m จากการศึกษาพบว่า ระบบท่อใต้ดินจะสามารถทำความเย็นในโรงเรือนได้เฉพาะช่วงเวลากลางและให้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบ (COP) ปานกลาง ตั้งแต่ 0-3.13 และให้ค่าเฉลี่ยของ COP มากที่สุดในฤดูร้อนเท่ากับ 2.32 หรือคิดเป็น 74.74 % ของเครื่องปรับอากาศชนิดหนึ่งตันทำความเย็น ทั้งนี้ประสิทธิภาพในการใช้งานในฤดูต่างๆ จะขึ้นอยู่กับอิทธิพลของสภาพแวดล้อม ได้แก่ ค่ารังสีอาทิตย์ และปริมาณน้ำฝน โดยจะมีผลต่อเสถียรภาพการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้นในบรรยากาศในช่วงวันเวลาต่างๆ กัน



ภาพที่ 8 ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในโรงเรือนที่มีการฝังท่อใต้ดินในดินที่ต่างชนิดกัน
ของ Ghosal and Tiwari (2006)

Ghosal and Tiwari (2013) ได้ทำพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาศักยภาพในการทำปรับอากาศในโรงเรือนที่ใช้ระบบท่อใต้ดินโดยใช้โปรแกรม Matlab ทำการทดลอง ณ Indian Institute Technology ประเทศอินเดีย จากการทดลองพบว่า ในช่วงฤดูหนาวท่อใต้ดินสามารถเพิ่มอุณหภูมิในโรงเรือนให้สูงกว่าโรงเรือนที่ไม่มีการใช้ระบบท่อใต้ดินได้เท่ากับ 7-8 °C และในช่วงฤดูร้อนจะลดอุณหภูมิอากาศให้ต่ำกว่าที่ไม่ใช้ท่อใต้ดิน 5-6 °C และพบว่า การเปลี่ยนแปลงชนิดของดินที่ฝังท่อใต้ดินจะมีผลต่อการเพิ่มอุณหภูมิ อันเนื่องจากการสมบัติทางความร้อนของดิน เช่น การนำความร้อน และค่าความจุความร้อนของดินแต่ละชนิด ได้แก่ ดินทราย ดินทรายปนดินร่วน ดินทรายปนกรวด และดินร่วน จะมีผลต่อการเพิ่มอุณหภูมิในโรงเรือนเพิ่มขึ้นในฤดูหนาวและฤดูร้อนมาก ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 9 โรงเรือนเกษตรที่ใช้ระบบทำความเย็นท่อใต้ดินของ Tiwari et al. (2006)

Tiwari *et al.*, (2006) ได้ทำการศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของโรงเรือนที่มีระบบ EAHE ณ IIT Delhi, New Delhi ประเทศอินเดีย โดยโรงเรือนที่ใช้ในการทดลองมีพื้นที่ขนาด 8.54×4 m และทำการติดตั้งระบบ EAHE ดังภาพที่ 9 โดยระบบ EAHE จะประกอบด้วยท่อ PVC ยาว 39 m เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.06 m ท่อถูกฝังไว้ใต้พื้นดินลึก 1 m ผลจากการศึกษาพบว่าอุณหภูมิอากาศที่ออกจากระบบ EAHE มีค่าเกือบคงที่ โดยมีค่า $18-19^\circ\text{C}$ ในช่วงฤดูหนาวและ $28-32^\circ\text{C}$ ในช่วงฤดูร้อนในโรงเรือน ค่าศักยภาพการทำความร้อนและทำความเย็นมีค่าน้อยกว่า 0.4 MJ สามารถหยุดใช้ระบบ EAHE การเพิ่มชั่วโมงการทำงานของ EAHE ค่า COP จะเพิ่มขึ้นตาม ระบบ EAHE มีประสิทธิภาพมากขึ้นในช่วงฤดูร้อนและฤดูหนาวค่าสูงสุดของศักยภาพทำความร้อนพบว่า มี 423 MJ ในเดือนพฤศจิกายน เมื่อค่าสูงสุดของศักยภาพทำความเย็นพบว่ามี 566 MJ ในเดือนมิถุนายน ศักยภาพการทำความเย็นที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่าศักยภาพการทำความร้อน 30% และพบว่า ค่า COP ในช่วงฤดูหนาวคือ $0.63-0.78$ ในฤดูฝน $0.457-0.095$ และในช่วงฤดูร้อน $0.96-1.41$

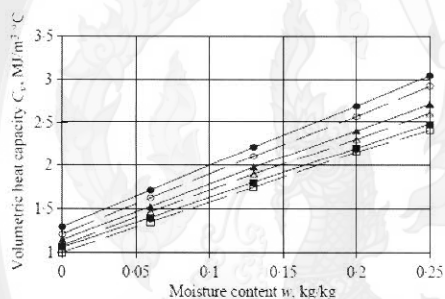


Fig. 4. Observed (—) and predicted (---) volumetric heat capacity as a function of moisture content for a sandy soil at the bulk densities: ■ and □, 1200 kg m^{-3} ; ▲ and △, 1300 kg m^{-3} ; ● and ○, 1400 kg m^{-3}

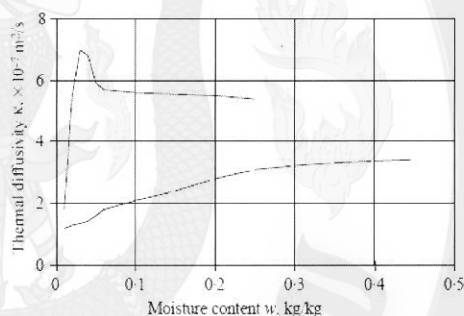
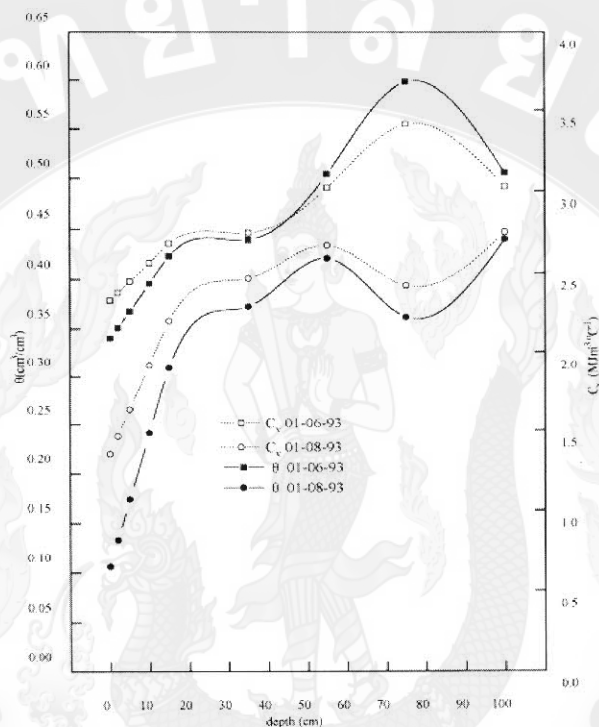


Fig. 5. Thermal diffusivity as a function of moisture content for clay (---) and sandy (—) soils

ภาพที่ 10 ผลการเปลี่ยนแปลงความจุความร้อนจำเพาะและค่าการแพร่ความร้อนของดิน ในงานวิจัยของ Abu-Hamdeh (2003)

Abu-Hamdeh (2003) ได้ทำการศึกษาค่าความหนาแน่นและความชื้นในดินที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางความร้อนของดินได้แก่ ค่าความจุความร้อนจำเพาะต่อมวล ค่าจุความร้อนจำเพาะต่อปริมาตร และค่าการแพร่ความร้อนของดิน โดยได้ทำการทดลองในห้องทดลองและใช้ดินที่ผ่านการแยกขนาดและอัดแน่นขึ้นใหม่แบ่งเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มของดินทรายและดินเหนียว จากการทดลองดังภาพที่ 10 พบว่า หากเพิ่มความชื้นให้กับดินมีค่า $0-0.25$ และให้ค่าความหนาแน่นแปรผันระหว่าง $1,200-1,400 \text{ kg/m}^3$ จะทำให้ค่าความจุความร้อนจำเพาะต่อปริมาตรเพิ่มขึ้น โดยดินเหนียวมีค่าเท่ากับ $1.4-3.54 \text{ MJ/m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$ และดินทรายมีค่าเท่ากับ $1.09-3.04 \text{ MJ/m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$ สำหรับค่าจุความร้อนจำเพาะต่อมวลนั้นจากการทดลองที่ความชื้น $0.02-0.25$ และความหนาแน่นของดิน $1,300 \text{ kg/m}^3$ พบว่าจะมีค่าเท่ากับ $1.17-2.25 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ สำหรับดินเหนียวและ $0.83-1.67$

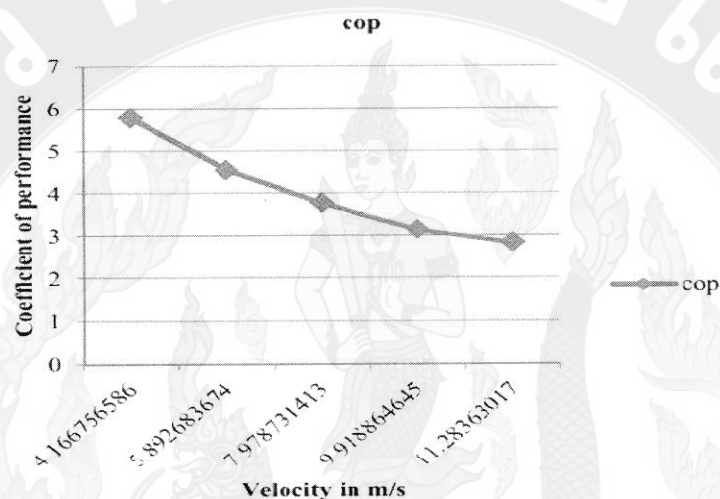
$\text{kJ/kg}^{\circ}\text{C}$ สำหรับดินทราย ตามลำดับ จากนั้นได้ทำการศึกษาค่าการแพร่ความร้อนของดินพบว่า ค่าการแพร่ความร้อนจะแปรผันตามกับค่าความชื้น และฟลักซ์ความร้อนที่ได้รับ ซึ่งดินทรายจะมีค่าการแพร่ความร้อนมากที่สุดเมื่อให้มีความชื้นมากที่สุดในขณะที่ดินเหนียวจะให้ค่าการแพร่ความร้อนที่มีค่าน้อยกว่า



ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิดินและความจุความร้อนจำเพาะของดินที่ระดับความลึกต่างๆ ในงานวิจัยของ Poulouvassilis et al. (1998)

Poulouvassilis et al. (1998) ได้ทำการศึกษการเปลี่ยนแปลงของ Temperature profile ของดินเปียกและดินแห้งเนื่องจากการถ่ายเทฟลักซ์ความร้อน (Heat flux densities) ผ่านชั้นดินที่ความลึก 2, 5, 10, 20 และ 50 cm พื้นที่ที่ใช้ในการทดลองเป็นพื้นที่ราบมีขนาด 100 ha ตั้งอยู่เมือง Kopais Boiotia ประเทศ Greece จากนั้นนำผลค่าฟลักซ์ความร้อนที่ได้จากการวัดไปคำนวณหาโปรไฟล์ของคุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ ค่าความจุความร้อนต่อปริมาตร และอุณหภูมิดินในแต่ละระดับความลึกพบว่า การเพิ่มขึ้นของความชื้นจะทำให้ค่าจุความร้อนจำเพาะเพิ่มขึ้น และผิวดินจะมีค่าอุณหภูมิสูงที่สุดและมีค่ามากกว่า 7°C เมื่อเทียบกับชั้นดินที่อยู่ลึก 2 cm ผลดังภาพที่ 11

Dubey et al. (2013) ได้ทำการศึกษาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระบบท่อใต้ดินในการต่อแบบขนาน ทำการทดลองโดยใช้ท่อแนวนอน 0.064 m เส้นผ่าศูนย์กลางท่อด้านในมีความยาวรวม 17 m มีท่อยาว 3 m 3 ท่อ และแต่ละท่อทำการเชื่อมต่อกันในการเชื่อมต่อแบบขนาน ผังลึก 1.5 m พบว่าอุณหภูมิของส่วนทางเข้าและทางออกท่อที่ความลึก 1.5 m ในการเชื่อมต่อแบบขนานมีอุณหภูมิแตกต่างกันไป 8.6-4.18 °C ที่ความเร็วแตกต่างกัน 4.1-11.6 m/s ค่า COP ในการต่อแบบขนานมีค่า 5.7-2.6 °C เมื่อเพิ่มความเร็วจาก 4.16-11.2 m/s ดังภาพที่ 12



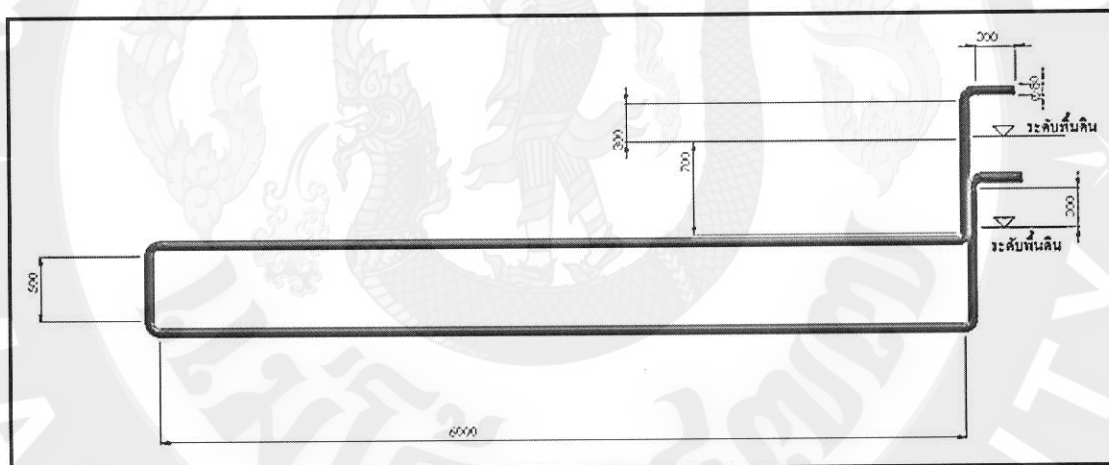
ภาพที่ 12 ประสิทธิภาพสมรรถนะของระบบ (COP) กับความเร็วอากาศ
งานวิจัยของ Dubey et al. (2013)

จากงานวิจัยต่างๆ ที่ได้กล่าวมาพบว่า ยังไม่ได้มีการศึกษาผลจากการเปลี่ยนแปลงของความชื้นดินที่มีต่อสมรรถนะทำความเย็นของระบบท่อใต้ดินที่ประยุกต์ใช้ทำความเย็นในโรงเรียนเกษตร ซึ่งการศึกษาส่วนใหญ่จะเน้นเฉพาะด้านใดด้านหนึ่ง เช่น ศึกษาการใช้งานของท่อใต้ดิน และศึกษาสมบัติของดินแยกออกจากกัน ไม่ได้นำทั้ง 2 ด้านมาบูรณาการร่วมกัน ประกอบกับได้สังเกตเห็นถึงประโยชน์ของความชื้นในดินที่สามารถเพิ่มสมบัติทางความร้อนที่มีผลต่อการใช้งานของท่อใต้ดิน ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะทำการศึกษาในครั้งนี้

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การสร้างชุดทดสอบ U-tube heat exchanger

ชุดทดสอบท่อได้ดินแบบตัวยู (U-tube heat exchanger) ที่ใช้ในการทดสอบติดตั้งระบบ ณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ วัสดุทำจากท่อได้ดินทำจากท่อพีวีซี (Polyvinyl chloride: PVC) ความหนา 0.5 cm มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 8 cm ความยาวท่อรวม 12.5 m ฟังท่อที่ความลึก 1 m หลักการทำงานของท่อได้ดินจะอาศัยการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างผิวท่อที่มีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิดินกับอากาศร้อนที่ไหลผ่านท่อสู่ท่อ ซึ่งอากาศจะเคลื่อนที่โดยใช้พัดลมที่มีกำลังขนาด 120 W ติดตั้งอยู่บริเวณปลายท่อทางออก ทำให้ได้อากาศที่ทางออกของท่อมีอุณหภูมิลดลง ความเร็วของอากาศที่ไหลเข้าท่อจะสามารถควบคุมได้โดยใช้วาล์ว ซึ่งติดตั้งบริเวณท่ออากาศเข้า นอกจากนั้นผิวท่ออากาศเข้าและท่ออากาศออกมีการหุ้มฉนวนเพื่อลดการสูญเสียพลังงานออกอากาศสู่บรรยากาศภายนอก ท่อได้ดินแบบตัวยูแสดงในภาพที่ 13



หน่วย: mm

(ก) Isometric ของชุดทดสอบ



(ข) ท่อได้ดินแบบตัวยู และการติดตั้งพรบวัดอุณหภูมิดิน



(ง) พัฒนาคู่อากาศ และเครื่องบันทึกข้อมูล

ภาพที่ 13 ชุดทดสอบ U-tube heat exchanger

2. การวิเคราะห์สมบัติของดิน

ในงานวิจัยได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางความร้อนของดิน ณ บริเวณที่จะทำการทดลอง ดังภาพที่ 9 โดยได้ทำการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ได้แก่

1. การวิเคราะห์หาค่าขนาดของเม็ดดินเพื่อกำหนดชนิดของดิน โดยวิธี Wet sieving ตามมาตรฐาน ASTM D422 ทำการทดสอบโดยภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

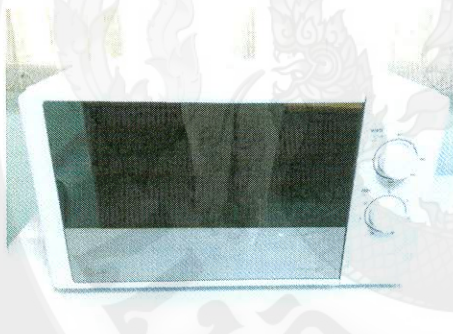
2. การวิเคราะห์หาความถ่วงจำเพาะของดิน (Specific gravity test) ตามมาตรฐาน ASTM D854-83 ทำการทดสอบโดยภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

3. การหาความหนาแน่นของดินจะทำการทดสอบของดินในสนาม (Field test density) โดยทำการทดสอบหาความหนาแน่นเปียก และความหนาแน่นแห้งในรูปของเปอร์เซ็นต์

4. ความชื้นดินได้ทำการทดสอบโดยใช้ตู้อบไมโครเวฟในห้องปฏิบัติการ โดยหาความชื้นดินมาตรฐานเปียก (%wb) และความชื้นดินมาตรฐานแห้ง (%db) ดังภาพที่ 14



(ก) ลักษณะของดินบริเวณก่อสร้างชุดทดสอบ



(ข) ไมโครเวฟ



(ค) เครื่องชั่งน้ำหนัก ความละเอียด 0.1 g



(ง) จานและถ้วยกระเบื้องเคลือบ

ภาพที่ 14 อุปกรณ์สำหรับหาความหนาแน่นและความชื้นของดิน

สมบัติของดินที่ทำการทดสอบแสดงดังตารางที่ 3 จะนำไปประเมินหาค่าความจุความร้อนจำเพาะโดยปริมาตร และค่าการนำความร้อนของดินประกอบการศึกษาในแบบจำลองคณิตศาสตร์

ตารางที่ 3 สมบัติของดิน ณ บริเวณทำการทดลอง

สมบัติของดิน	ค่า
ชนิดของดิน	ดินทราย
สีของดิน	สีน้ำตาลเหลือง
เปอร์เซ็นต์ของทราย (Sand, diameter 4.75 – 0.075 mm)	99.86 %
เปอร์เซ็นต์ของแป้งและดินเหนียว (Silt and clay, diameter < 0.075 mm)	0.14 %
ความหนาแน่นเปียก (Wet density)	1,328.31 kg/m ³
ความหนาแน่นแห้ง (Dry density)	1,195.96 kg/m ³
ความชื้นดินโดยมวล Wet basis moisture content	9.96 %
ความชื้นดินโดยมวล Dry basis moisture content	11.07 %
ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)	2.66

3. การออกแบบการทดลอง

เงื่อนไขการทดสอบชุดทดสอบท่อใต้ดิน

การออกแบบวิธีการทดลองจะมุ่งเน้นการเก็บผลอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านท่อใต้ดินเพื่อนำไปวิเคราะห์หาศักยภาพของชุดทดสอบท่อใต้ดินในเงื่อนไขสภาพภูมิอากาศต่างๆ และความชื้นดินที่ค่าต่างๆ และจะนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลจากการคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น

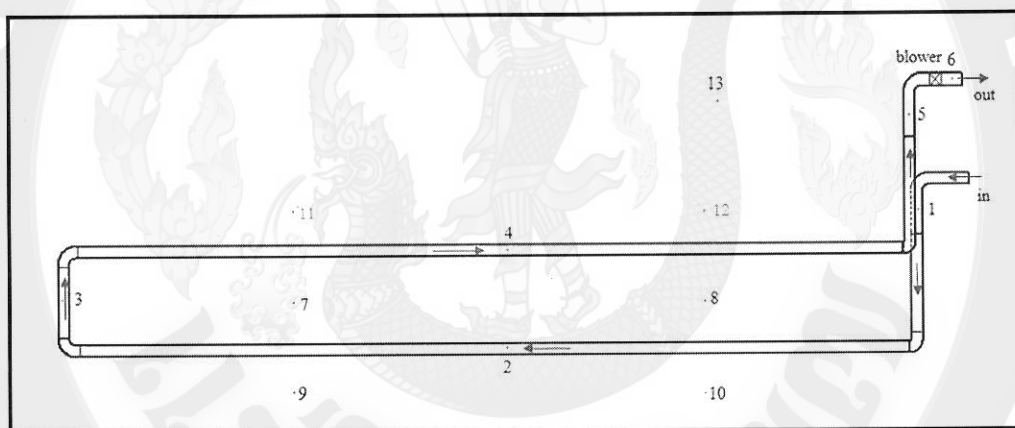
การทดสอบระบบท่อใต้ดินในงานวิจัยนี้แบ่ง การทดลองออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

กรณีศึกษาที่ 1 การทดสอบระบบเพื่อหาความเร็วของอากาศที่เหมาะสมที่ทำให้อุณหภูมิอากาศลดลงมากที่สุดภายใต้สภาวะอากาศที่ใกล้เคียงกัน โดยจะทำการเปิดวาล์วทางท่อแบ่งเป็นเงื่อนไขต่างๆ ดังนี้

- เปิดวาล์วที่ 30°
- เปิดวาล์วที่ 45°
- เปิดวาล์วที่ 60°
- เปิดวาล์วที่ 90°

- ดินที่มีความชื้นน้อยที่สุด
- ดินที่มีความชื้นปานกลาง
- ดินที่มีความชื้นมากที่สุด

ในการทดลองจะทำการวัดค่าต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิของอากาศที่ไหลเข้าท่อ อุณหภูมิของอากาศที่ไหลออกจากท่อ อุณหภูมิอากาศในท่อใต้ดิน อุณหภูมิผิวท่อใต้ดิน อุณหภูมิดินที่ความลึก 1 m อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม รวมทั้งสิ้น 13 จุด ทุกๆ 10 นาที และทำการวัดความเร็วอากาศที่ไหลเข้าท่อ และความเร็วอากาศที่ไหลออกจากท่อ 2 จุด ของการเก็บข้อมูลในแต่ละวัน แสดงดังภาพที่ 15



ภาพที่ 15 จุลวัตถุอุณห์ภูมิบริเวณต่างๆของท่อ

1. วัดอุณหภูมิจุดใต้เท้า

- จุดที่ 1 วัดอุณหภูมิอากาศบริเวณทางเข้าท่อ
- จุดที่ 2 วัดอุณหภูมิผิวท่อทางเข้าที่ความยาว 4.3 m
- จุดที่ 3 วัดอากาศบริเวณในท่อที่ความยาว 7.55 m
- จุดที่ 4 วัดอุณหภูมิผิวท่อจากท่อทางเข้าที่ความยาว 10.8 m
- จุดที่ 5 วัดอุณหภูมิอากาศที่ออกจากท่อใต้ดินก่อนผ่าน Blower
- จุดที่ 6 วัดอุณหภูมิบริเวณทางออกท่อ
- จุดที่ 7 วัดอุณหภูมิดินจุดที่ 1 (ความยาวจากท่อทางเข้า 4.5 m ห่างจากท่อทางเข้า 25 cm)

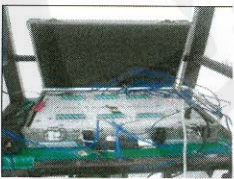
- จุดที่ 8 วัดอุณหภูมิจุดที่ 2 (ความยาวจากท่อทางเข้า 1.5 m ห่างจากท่อทางเข้า 25 cm)
 จุดที่ 9 วัดอุณหภูมิจุดที่ 3 (ความยาวจากท่อทางเข้า 4.5 m ห่างจากท่อทางเข้า 10 cm)
 จุดที่ 10 วัดอุณหภูมิจุดที่ 4 (ความยาวจากท่อทางเข้า 1.5 m ห่างจากท่อทางเข้า 10 cm)
 จุดที่ 11 วัดอุณหภูมิจุดที่ 5 (ความยาวจากท่อทางออก 4.5 m ห่างจากท่อทางออก 10 cm)
 จุดที่ 12 วัดอุณหภูมิจุดที่ 6 (ความยาวจากท่อทางออก 1.5 m ห่างจากท่อทางออก 10 cm)
 จุดที่ 13 วัดอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม

2. วัดความเร็วลมที่ไหลทางเข้าและทางออกท่อ

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้

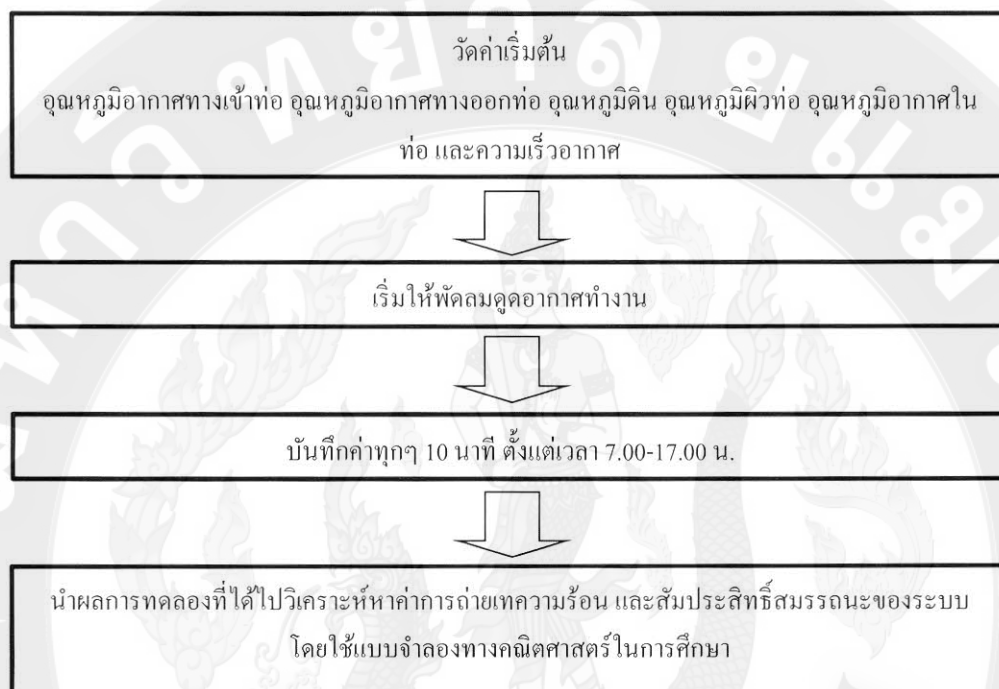
เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้

อุปกรณ์	Model	รายละเอียด
1. สายเทอร์โมคัปเปิล 	Sang Chai Meter	Thermocouple type K 4/0.32 mm X 2 (20-90 °C)
2. Data logger 	TSUS GROUP	Data logger 24 channels input thermocouple all type mV, V, mA
3. เครื่องวัดความเร็วลม 	Kimo	Hotwire anemometer type VT 200
4. เครื่องวัดความชื้น 	Digicon HT-770	Humidity/Temp./Dew point

วิธีการทดลอง

ในการเก็บผลการทดลองในแต่ละกรณี ระบบท่อใต้ดินจะต้องมีการตรวจเช็คก่อนเริ่มเดินระบบทุกครั้ง รวมทั้งสายวัดอุณหภูมิและเครื่องมือวัดต่างๆ ต้องอยู่ในสภาพเรียบร้อยพร้อมทำงาน ขั้นตอนทดลองดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 ขั้นตอนการทดลอง

ผลการวิจัย

ผลการศึกษาประกอบด้วย ผลการทดสอบชุดทดสอบท่อใต้ดินแบบ U-tube heat exchanger เพื่อหาเงื่อนไขความเร็วอากาศในการใช้งานที่เหมาะสม และการศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานของท่อใต้ดินที่ความชันดิน ผลการศึกษารูปได้ดังต่อไปนี้

ผลการทดสอบกรณีศึกษาเพื่อหาความเร็วอากาศที่เหมาะสม

1. ความเร็วของอากาศในท่อใต้ดิน

ผลการทดสอบกรณีศึกษาที่ 1 เป็นการทดสอบระบบเพื่อหาความเร็วของอากาศที่เหมาะสมในชุดทดสอบ U-tube heat exchanger จากการเปิดวาล์วให้อากาศไหลเข้าบริเวณท่อทางเข้าที่ค่ามุมต่างๆ กัน ได้แก่

- เปิดวาล์วที่มุม 30° ดำเนินการเก็บข้อมูลเมื่อวันที่ 18 กรกฎาคม 2557 สภาพอากาศทั่วไปตลอดทั้งวัน ท้องฟ้ามีเมฆมาก โดยเริ่มเก็บข้อมูลตั้งแต่เวลา 7.00 น.-17.00 น.

1) เปิดวาล์วที่มุม 45° ดำเนินการเก็บข้อมูลเมื่อวันที่ 1 สิงหาคม 2557 สภาพอากาศทั่วไปตลอดทั้งวัน ท้องฟ้ามีเมฆบางส่วน เริ่มเก็บข้อมูลตั้งแต่เวลา 7.00 น.-17.00 น.

2) เปิดวาล์วที่มุม 60° ดำเนินการเก็บข้อมูลเมื่อวันที่ 17 กรกฎาคม 2557 สภาพอากาศทั่วไปตลอดทั้งวัน ท้องฟ้ามีเมฆบางส่วน เริ่มเก็บข้อมูลตั้งแต่เวลา 7.00 น.-17.00 น.

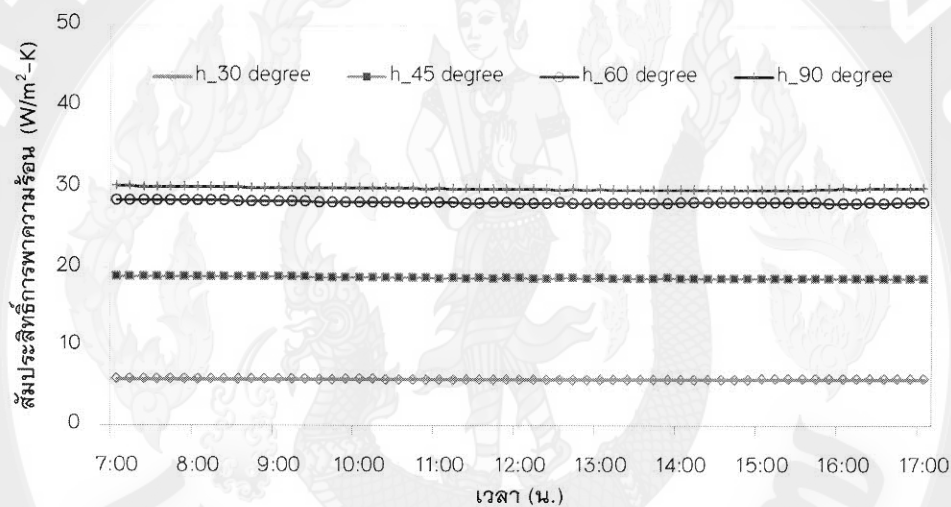
3) เปิดวาล์วที่มุม 90° ดำเนินการเก็บข้อมูลเมื่อวันที่ 15 กรกฎาคม 2557 สภาพอากาศทั่วไปตลอดทั้งวัน ท้องฟ้ามีเมฆบางส่วน เก็บข้อมูลตั้งแต่เวลา 7.00 น.-17.00 น.

จากผลการทดสอบให้ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านชุดทดสอบท่อใต้ดินแตกต่างกัน ดังผลในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ความเร็วของอากาศในท่อใต้ดินจากการเปิดวาล์วที่มุมต่างๆ

มุมวาล์ว (องศา)	ความเร็วอากาศใน ท่อ (m/s)	ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิ แวดล้อม ($^{\circ}\text{C}$)	ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิดิน ($^{\circ}\text{C}$)
30°	0.93	29.53	29.77
45°	4.05	32.20	29.66
60°	6.70	31.59	29.83
90°	7.20	31.29	30.36

จากตารางที่ 5 จะเห็นได้ว่า ความเร็วของอากาศเมื่อเปิดวาล์วที่ค่ามุมเท่ากับ 30° มีค่าความเร็วของอากาศน้อยที่สุดเท่ากับ 0.95 m/s เมื่อเทียบกับมุมวาล์ว 45° 60° และ 90° ที่มีความเร็วอากาศในท่อเท่ากับ 4.05 m/s 6.70 m/s และ 7.20 m/s ตามลำดับ ในส่วนของค่าเฉลี่ยอุณหภูมิแวดล้อมของวันที่ทำการทดลองทั้ง 3 เดือน พบว่า วันที่ทำการทดลองที่เดือนมิถุนายนวาล์ว 60° และ 90° มีค่าใกล้เคียงกันมาก ในขณะที่มุมวาล์ว 30° มีค่าต่ำกว่ากรณีอื่นเล็กน้อย เนื่องจากมีฝนในช่วง 15.00 น. ทำให้อุณหภูมิแวดล้อมลดลงอย่างรวดเร็ว สำหรับมุมวาล์ว 45° มีค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิแวดล้อมสูงกว่าวันอื่นๆ เล็กน้อยประมาณ 0.5°C สำหรับอุณหภูมิของดินของทั้ง 4 กรณี มีค่าใกล้เคียงกันโดยมีความแตกต่างอุณหภูมิไม่เกิน $0-0.6^\circ\text{C}$

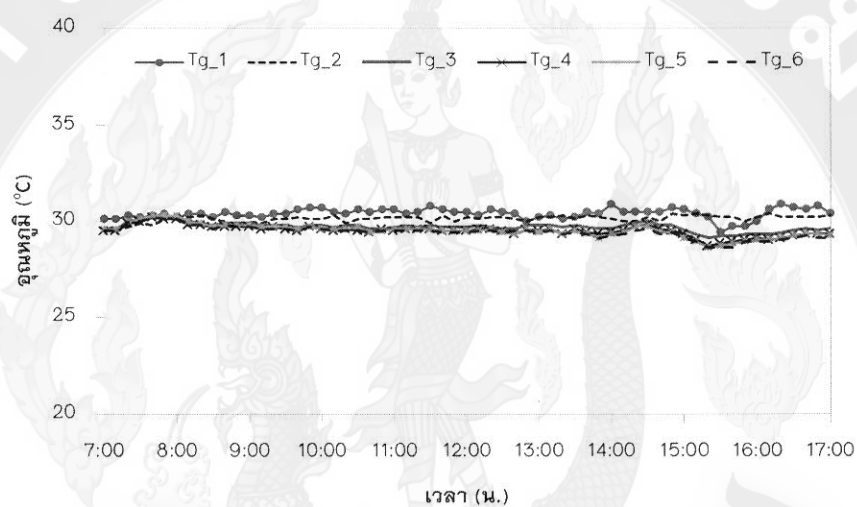


ภาพที่ 17 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนในท่อใต้ดิน ณ ความเร็วต่างๆ

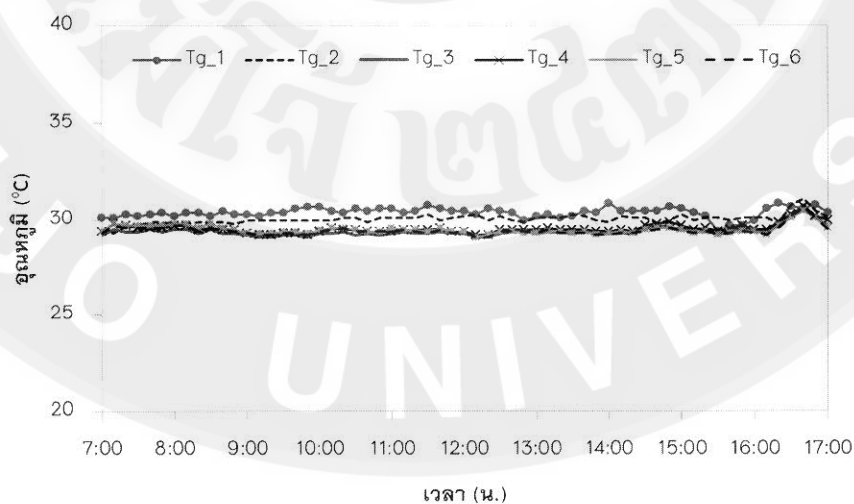
จากผลความเร็วของอากาศที่วัดได้ในการเปิดวาล์วแต่ละกรณีได้หาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศ (Convective heat transfer coefficient: h_p) ที่ไหลผ่านท่อ ดังภาพที่ 17 พบว่า กรณีเปิดมุมวาล์วเท่ากับ 60° และ 90° มีค่าสูงกว่ากรณีอื่นๆ โดยมีค่าเฉลี่ย $28.15 \text{ W/m}^2\text{-K}$ และ $29.81 \text{ W/m}^2\text{-K}$ ตามลำดับ สำหรับการเปิดวาล์วที่มุม 45° ให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนอยู่ในระดับกลาง โดยมีค่าเฉลี่ย $18.79 \text{ W/m}^2\text{-K}$ และการเปิดวาล์วที่มุม 30° ให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนน้อยที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ย $5.79 \text{ W/m}^2\text{-K}$ หรือน้อยกว่ากรณีอื่นๆ 3-5 เท่า

2. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดิน ณ ความลึก 1 m

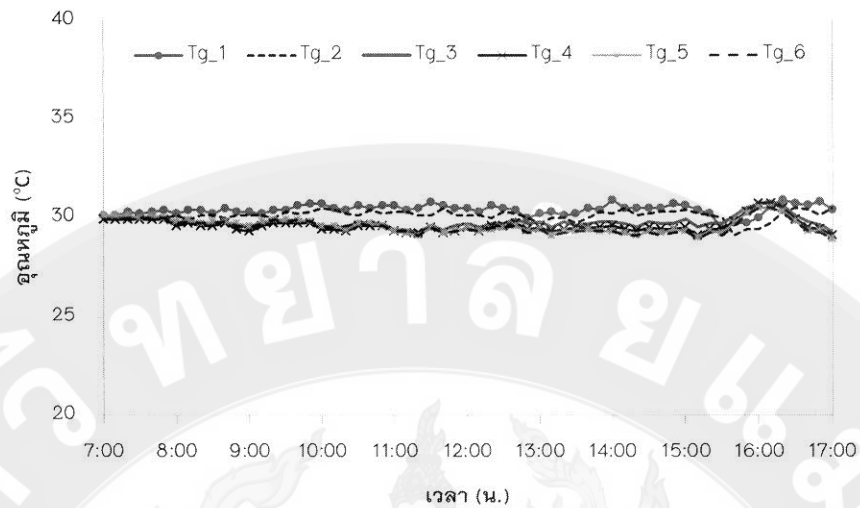
การศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดิน (T_g) ผู้วิจัยได้ทำการวัดอุณหภูมิดินที่ความลึก 1 m จำนวน 6 จุด ได้แก่ อุณหภูมิดินจุด 1 (T_{g_1}) อยู่กึ่งกลางชุดทดสอบท่อใต้ดินที่ระยะ 4.5 m อุณหภูมิดินจุด 2 (T_{g_2}) อยู่กึ่งกลางชุดทดสอบท่อใต้ดินที่ระยะ 1.5 m อุณหภูมิดินจุด 3 (T_{g_3}) อยู่ข้างท่ออากาศเข้าที่ระยะ 4.5 m อุณหภูมิดินจุด 4 (T_{g_4}) อยู่ข้างท่ออากาศเข้าที่ระยะ 1.5 m อุณหภูมิดินจุด 5 (T_{g_5}) อยู่ข้างท่ออากาศออกที่ระยะ 4.5 m และอุณหภูมิดินจุด 6 (T_{g_6}) อยู่ข้างท่ออากาศออกที่ระยะ 1.5 m



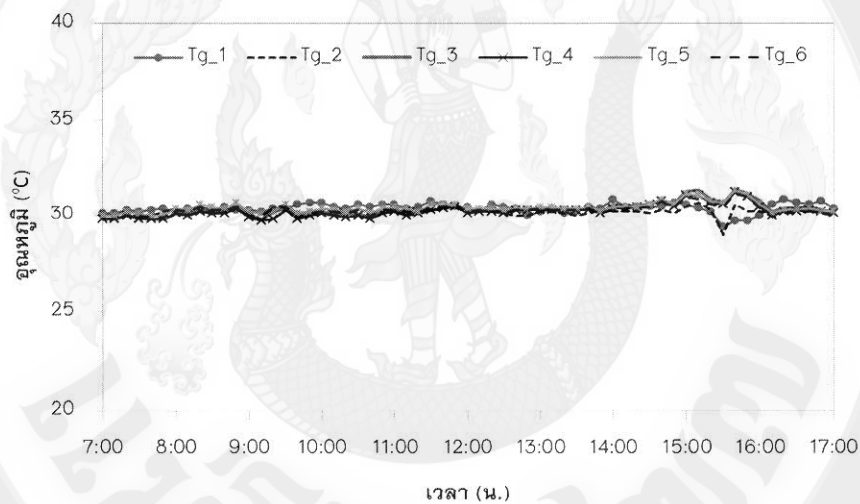
(ก) การเปิดวาล์วที่มุม 30°



(ข) การเปิดวาล์วที่มุม 45°



(ก) การเปิดวาล์วที่มุม 60°



(ง) การเปิดวาล์วที่มุม 90°

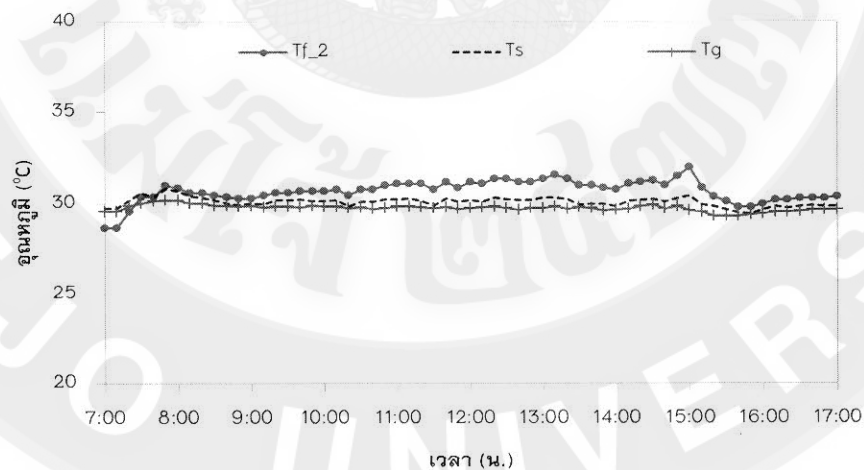
ภาพที่ 18 อุณหภูมิอากาศดิน ณ ความลึก 1 m กรณีหาความเร็วอากาศที่เหมาะสม

จากภาพที่ 18 (ก) แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิดินทั้ง 6 จุด ณ ชั้นดินเดียวกันที่ระดับความลึก 1 m ของวันที่ทำการทดลองเปิดมุมวาล์วอากาศที่ไหลเข้าท่อเท่ากับ 30° พบว่าอุณหภูมิดินที่วัดได้สามารถแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่ม 1 จุดวัดอุณหภูมิ 1 และ 2 ที่อยู่ตรงกลางระยะห่างจากท่อ 25 cm กลุ่ม 2 จุดวัดอุณหภูมิ 3, 4, 5 และ 6 จุดที่อยู่ระยะห่างจากท่อ 10 cm จากการวิเคราะห์ พบว่า กลุ่ม 1 มีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงกว่า กลุ่ม 2 เพราะอยู่ตรงกลางระหว่างท่อทางเข้า/ออก ทำให้ได้รับความร้อนจากท่อทั้งสองข้าง ส่วนกลุ่ม 2 อุณหภูมิเฉลี่ยของดินของจุดที่ 5 และจุดที่ 6 จะต่ำกว่าจุดที่ 3 และจุดที่ 4 เนื่องจากอากาศที่ไหลในท่อได้เกิดการถ่ายเทความร้อนมาก่อนจะถึงจุดที่ 6 ซึ่งเป็นจุดก่อนที่จะออกสู่ผิวดินและมีการถ่ายเทความร้อนน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับจุดอื่นๆ

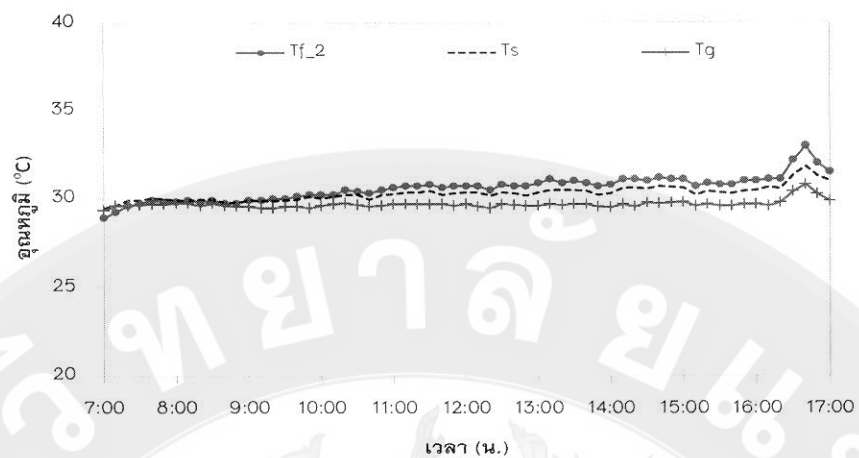
สำหรับผลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิดินที่การทดลองเปิดวาล์วที่มุม 45° และ 60° ดังในภาพที่ 18 (ข) และภาพที่ 18 (ค) มีแนวโน้มเป็นเช่นเดียวกับผลการเปิดวาล์วที่มุม 30° แต่ความแตกต่างของอุณหภูมิทั้ง 2 กลุ่มจะเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะเมื่อเปิดวาล์วที่มุมน้อยๆ กว่า สาเหตุเพราะดินได้รับการถ่ายความร้อนในอัตราที่น้อยกว่าเนื่องจากความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านท่อมีค่าน้อยกว่า ทำให้การถ่ายเทความร้อนสู่ดินเป็นไปอย่างช้าๆ จึงมีเวลาถ่ายเทสู่ดินบริเวณรอบข้างได้ดี ในขณะที่การเปิดวาล์วกว้างกว่า เช่น การเปิดวาล์วที่มุม 90° ดังภาพที่ 18 (ง) ความเร็วของอากาศในท่อและค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในท่อจะสูงกว่ากรณีอื่นๆ ทำให้การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่เนื่องจากผิวท่อที่ทำจากพลาสติกพีวีซีที่มีค่าการนำความร้อนต่ำ ทำให้ถ่ายเทความร้อนออกสู่ดินได้น้อยและเกิดการสะสมความร้อนในผิวท่อ จึงทำให้อุณหภูมิดินทั้ง 6 จุดมีค่าใกล้เคียงกัน ถึงแม้ว่าท่อใต้ดินในกรณีที่อากาศไหลผ่านด้วยความเร็วสูงนั้น จะทำให้อัตราการรับความร้อนระหว่างดินมีความถี่ที่สูงกว่ากรณีอื่นๆ แต่ไม่ส่งผลจนเกิดนัยสำคัญ ซึ่งสังเกตจากอุณหภูมิดินแต่ละจุดมีค่าห่างกันไม่มากนัก

3. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศในชุดทดสอบ U-tube heat exchanger

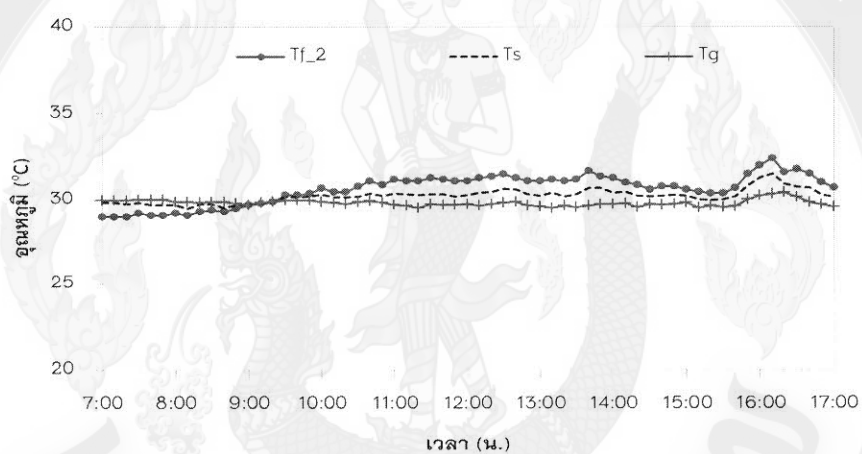
ท่อใต้ดินทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศที่ไหลผ่านกับผิวท่อที่ฝังอยู่ในดิน ในทางทฤษฎีผิวท่อควรมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิดินที่ความลึก 1 m ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศในท่อจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอากาศที่ไหลเข้าสู่ท่อและผิวท่อ



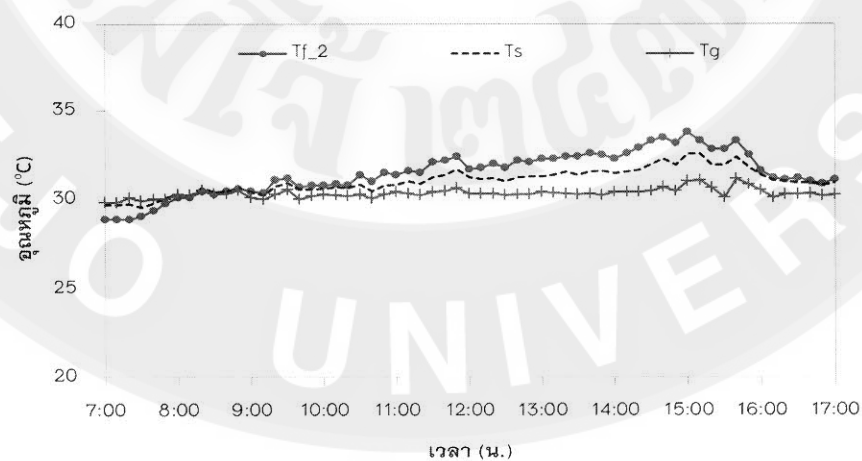
(ก) การเปิดวาล์วที่มุม 30°



(ข) การเปิดวาล์วที่มุม 45°



(ค) การเปิดวาล์วที่มุม 60°



(ค) การเปิดวาล์วที่มุม 90°

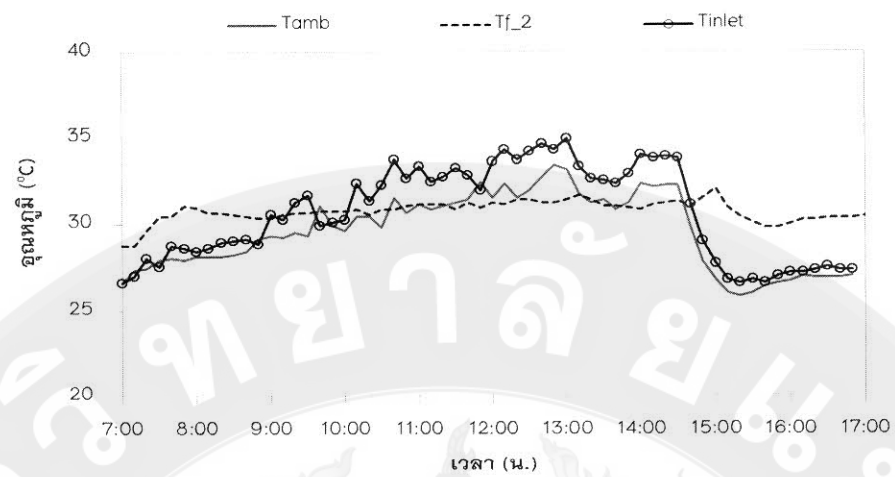
ภาพที่ 19 อุณหภูมิอากาศในท่อใต้ดิน กรณีหาความเร็วอากาศที่เหมาะสม

จากภาพที่ 19 (ก)-(ง) แสดงอุณหภูมิของอากาศที่ไหลภายในท่อ (T_p) เปรียบเทียบกับ อุณหภูมิดินที่ความลึก 1 m (T_g) และอุณหภูมิผิวท่อ (T_s) ของวันที่ทดลองโดยเปลี่ยนแปลงค่ามุม วาล์วที่ใช้ควบคุมอัตราการไหลของอากาศเข้าสู่ชุดทดสอบ ได้แก่ 30° 45° 60° และ 90° จากลักษณะการ เปลี่ยนแปลงของมุมวาล์วต่างๆ ค่า ที่มีเงื่อนไขของอุณหภูมิดินใกล้เคียงกัน พบว่า ความเร็วของ อากาศจะมีผลต่ออุณหภูมิผิวท่อและอุณหภูมิอากาศ กล่าวคือ เมื่อให้ค่ามุมวาล์วเท่ากับ 30° อุณหภูมิ ของอากาศในท่อจะลดลงและใกล้เคียงกับอุณหภูมิผิวท่อและอุณหภูมิดิน ค่าแตกต่างไม่เกิน 1°C แต่ความแตกต่างอุณหภูมิของอากาศในท่อและอุณหภูมิผิวท่อจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อปรับค่ามุมวาล์ว ความควบคุมอัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น เช่น ผลต่างอุณหภูมิอากาศในท่อและอุณหภูมิดินที่มุม วาล์ว 45° มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1°C และที่มุมวาล์ว 60° และมุมวาล์ว 90° มีผลต่างอยู่ในช่วง $1.5\text{--}2^\circ\text{C}$ ซึ่งเป็นผลมาจากความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านชุดทดสอบท่อใต้ดินมีค่ามากกว่า (ดังค่าความเร็ว อากาศในตารางที่ 3) จึงทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนในช่วงเวลาสั้นๆ และแลกเปลี่ยนความร้อนได้ น้อยลง เมื่อเทียบกับอากาศที่ไหลผ่านที่มีความเร็วต่ำกว่า

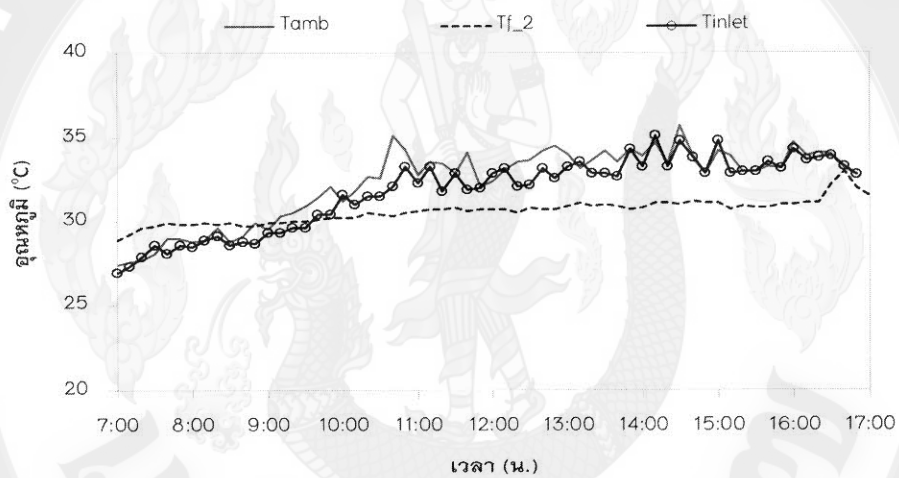
ข้อสังเกตอีกประการหนึ่ง พบว่า ที่มุม 45° 60° และ 90° อุณหภูมิผิวท่อใต้ดินจะมีค่าสูงกว่า อุณหภูมิผิวท่อที่มุมวาล์ว 30° จากการวิเคราะห์พบว่า อาจเป็นผลจากการที่ผิวท่อได้รับความร้อน สะสมเนื่องจากอัตราการไหลของอากาศที่สูง กล่าวคือ ในช่วงเวลาทำการทดลองตั้งแต่ช่วงเช้าถึง ช่วงตอนเย็น อากาศที่ไหลผ่านด้วยความเร็วสูงจะสามารถนำความร้อนจากอากาศเข้าสู่ท่อใต้ดินใน แต่ละรอบในปริมาณมากกว่าความเร็วลมต่ำ หรือมีความถี่ของการรับความร้อนมากกว่าจึงทำให้ เกิดการสะสมความร้อนในวัสดุของท่อได้

4. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศที่ไหลเข้าและไหลออกจากชุดทดสอบ U-tube heat exchanger

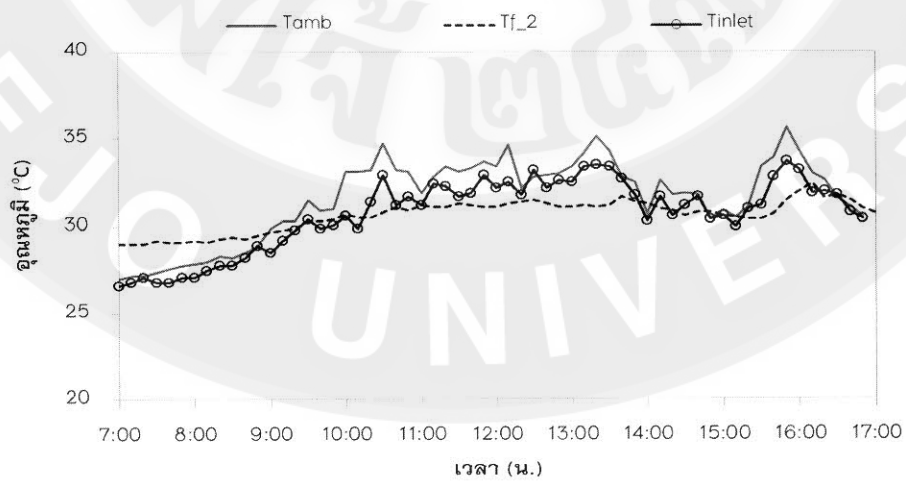
สำหรับการศึกษาอุณหภูมิอากาศที่ไหลเข้า (T_{inlet}) และอุณหภูมิอากาศที่ไหลออกจากท่อใต้ ดิน (T_{out}) มีจุดประสงค์เพื่อการวิเคราะห์หาช่วงเวลาใน 1 วัน ที่ระบบท่อใต้ดินจะสามารถทำความ เย็นได้



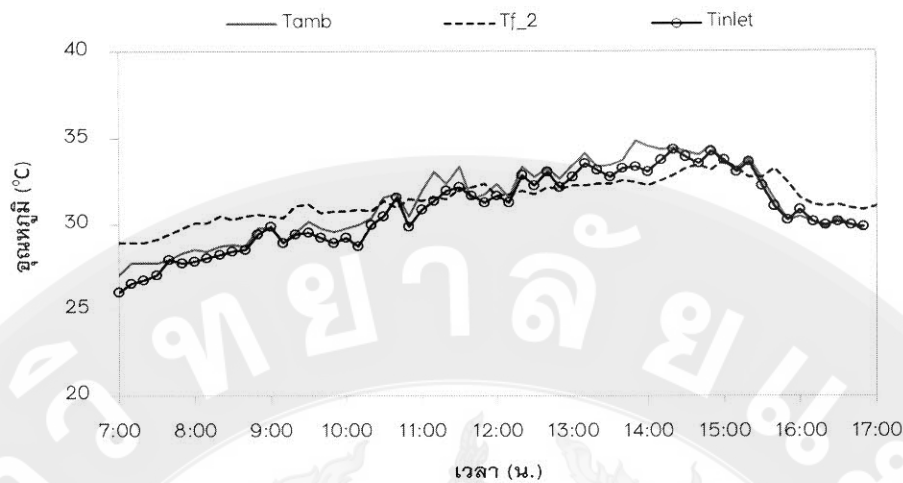
(ก) การเปิดวาล์วที่มุม 30°



(ข) การเปิดวาล์วที่มุม 45°



(ค) การเปิดวาล์วที่มุม 60°



(ง) การเปิดวาล์วที่มุม 90°

ภาพที่ 20 อุณหภูมิอากาศที่ไหลเข้าและออกท่อใต้ดิน
กรณีหาความเร็วอากาศที่เหมาะสม

จากภาพที่ 20 (ก)-(ง) แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอากาศที่ไหลเข้า (T_{inlet}) อุณหภูมิอากาศที่ไหลออกจากท่อ (T_{f_2}) อุณหภูมิแวดล้อม (T_{amb}) และอุณหภูมิของดินที่ความลึก 1 m โดยเปลี่ยนแปลงค่ามุมวาล์วที่ใช้ควบคุมอัตราการไหลอากาศ ได้แก่ มุม 30° 45° 60° และ 90° จากรูปพบว่า ทั้ง 3 กรณีชุดทดสอบท่อใต้ดินสามารถลดอุณหภูมิอากาศที่ไหลเข้าท่อได้ โดยท่อใต้ดินสามารถลดอุณหภูมิอากาศที่ไหลเข้าสู่ท่อได้ในช่วงเวลากลางวัน โดยเฉพาะช่วงที่มีอุณหภูมิแวดล้อมสูงๆ หรือวันที่มีแดด จากการวิเคราะห์ความสามารถในการลดอุณหภูมิของค่ามุมวาล์วต่างๆ ข้างต้น กรณีมุมวาล์ว 45° จะสามารถลดอุณหภูมิอากาศได้มากที่สุดและมีผลต่างสูงสุดระหว่างอุณหภูมิอากาศที่ไหลเข้าและไหลออกจากท่อใต้ดิน 4.10 °C สำหรับมุม 30° 60° และ 90° มีผลต่างสูงสุดเท่ากับ 3.40 °C, 2.30 °C และ 1.20 °C ตามลำดับ ดังข้อมูลในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบความเร็วของอากาศต่างๆ เพื่อนำมาใช้กับระบบท่อใต้ดิน

เปิดวาล์ว	ความเร็วของอากาศ (m/s)		อุณหภูมิอากาศ สิ่งแวดล้อม (°C)	ความชื้นของดินที่ ความลึก 15 cm (%wb)	ผลต่างของอุณหภูมิ $T_{inlet}-T_{f_2}$ (°C)
	V_{in}	V_{out}			
90°	5.85	7.20	31.29	13.13	1.2
60°	5.45	6.70	31.59	8.15	2.3
45°	3.50	4.05	32.20	6.05	4.1
30°	0.80	0.93	29.53	6.57	3.4

ผลการศึกษาระบบที่ใช้งานในกรณีที่ดินมีความชื้นที่แตกต่างกัน

การศึกษาการทำงานของท่อใต้ดินแบบตัวยูที่ความชื้นดิน จะแบ่งเป็น 3 กรณี ได้แก่ ดินที่มีความชื้นน้อยที่สุด ดินที่มีความชื้นปานกลาง และดินที่มีความชื้นมากที่สุด ผู้วิจัยได้ทำการเลือกความชื้นดินที่มีค่าแตกต่างกันมากที่สุดของการเก็บข้อมูลมาทำการวิเคราะห์เพื่อเป็นตัวแทนของแต่ละกรณี โดยตัวแทนของวันที่ดินมีความชื้นน้อยที่สุด ได้แก่ ข้อมูลของวันที่ 11 กันยายน 2557 ดินที่มีความชื้นปานกลาง ได้แก่ วันที่ 16 กันยายน 2557 และวันที่ดินมีความชื้นมากที่สุดในการทดลอง ได้แก่ วันที่ 6 กันยายน 2557 ผลการวิเคราะห์ประกอบด้วย

1. การเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นดิน

การเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นของดินที่นำมาวิเคราะห์ในแต่ละกรณีมีความแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำฝนที่ได้รับ ตัวอย่างดินในแต่ละวันจะถูกเก็บที่ความลึก 0 m (ผิวดิน) ความลึก 15 cm และความลึก 30 m และนำผลที่ได้มาหาค่าความชื้นมาตรฐานเปียกและความชื้นมาตรฐานแห้งและนำมาวิเคราะห์ถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดินร่วมกับการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศของวันที่ทำการทดลอง และนำค่าความชื้นของดินที่ความลึก 30 cm วิเคราะห์ร่วมกับผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศที่ไหลออกจากท่อ ผลการทดสอบหาความชื้นของดินตารางที่ 7-9 ดังนี้

ตารางที่ 7 ความชื้นของดินในกรณีดินมีความชื้นน้อยที่สุด

ตัวอย่างดิน		น้ำหนักดินเปียก (g)	น้ำหนักดินแห้ง (g)	น้ำหนักน้ำ (g)	ความชื้นดิน (%wb)	ความชื้นดิน (%db)
0 cm	1	100	94.45	5.55	5.55	5.88
	2	100	94.50	5.50	5.50	5.82
	3	100	95.05	4.95	4.95	5.21
เฉลี่ย					5.33	5.63
15 cm	1	100	89.85	10.15	10.15	11.30
	2	100	89.75	10.25	10.25	11.42
	3	100	90.05	9.95	9.95	11.05
เฉลี่ย					10.12	11.26
30 cm	1	100	89.08	10.92	10.92	12.26
	2	100	88.95	11.05	11.05	12.42
	3	100	88.95	11.05	11.05	12.42
เฉลี่ย					11.01	12.37
ความชื้นดินเฉลี่ยโดยรวม					8.82	9.75

จากผลความชื้นดินในตารางที่ 7 จะได้ว่า ผิวดินมีความชื้นต่ำสุด และความชื้นเพิ่มมากขึ้นเมื่อความลึกเพิ่มขึ้น เนื่องจากสภาพอากาศโดยทั่วไปของวันที่ 11 กันยายน 2557 ตลอดทั้งวันมีแดด และไม่มีฝนตก ทำให้บริเวณผิวดินที่ได้รับความร้อนจากดวงอาทิตย์โดยตรง น้ำบริเวณผิวดินจึงระเหยสู่บรรยากาศ และด้วยสมบัติของดินที่มีแรงเฉื่อยสูงจึงทำให้ความร้อนจากรังสีอาทิตย์ถ่ายเทสู่ชั้นดินที่ลึกกว่าถ่ายเทอย่างช้าๆ ทำให้ความชื้นที่อยู่ในดินลดลงไม่มากนัก โดยค่าเฉลี่ยความชื้นของดินในกรณีที่ดินมีความชื้นน้อย มีค่าเท่ากับ 8.82 %wb และ 9.75 %db

ตารางที่ 8 ความชื้นของดินในกรณีดินมีความชื้นปานกลาง

ตัวอย่างดิน		น้ำหนักดินเปียก (g)	น้ำหนักดินแห้ง (g)	น้ำหนักน้ำ (g)	ความชื้นดิน (%wb)	ความชื้นดิน (%db)
0 cm	1	100	87.60	12.40	12.40	14.16
	2	100	87.50	12.50	12.50	14.29
	3	100	87.85	12.15	12.15	13.83
เฉลี่ย					12.35	14.09
15 cm	1	100	91.55	8.45	8.45	9.23
	2	100	91.20	8.80	8.80	9.65
	3	100	91.25	8.75	8.75	9.59
เฉลี่ย					8.67	9.49
30 cm	1	100	89.90	10.10	10.10	11.23
	2	100	89.90	10.10	10.10	11.23
	3	100	89.95	10.05	10.05	11.17
เฉลี่ย					10.08	11.21
ความชื้นดินเฉลี่ยโดยรวม					10.37	11.60

จากผลความชื้นดินในตารางที่ 8 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงจะแตกต่างกับผลในวันที่ 11 กันยายน 2557 โดยที่ผิวดินมีความชื้นสูงที่สุด เนื่องจากช่วงหัวค่ำของวันก่อนการทดลองมีฝนตกเล็กน้อย ทำให้ความชื้นที่ผิวดินมีค่ามากที่สุด แต่ฝนตกเพียงเล็กน้อยทำให้น้ำฝนซึมลงไปไม่ถึงดินชั้นล่าง ในขณะที่ชั้นดินที่ความลึก 30 cm มีความชื้นสะสมอยู่พอสมควร ประกอบกับสภาพอากาศในวันที่ 16 กันยายน 2557 ท้องฟ้ามีเมฆตลอดทั้งวัน ทำให้ความร้อนจากดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบผิวดินไม่สูงเหมือนวันที่มีแดด ค่าความชื้นเฉลี่ยโดยรวมของกรณีดินที่มีความชื้นปานกลางเท่ากับ 10.37 %wb และ 11.60 %db

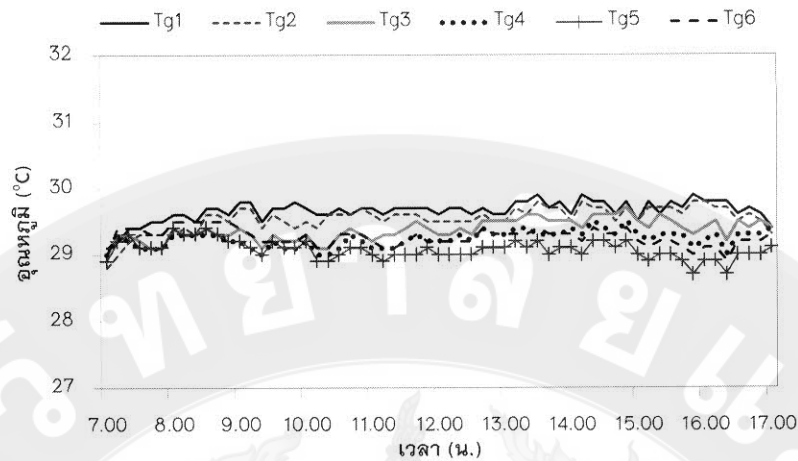
ตารางที่ 9 ความชื้นของดินในกรณีดินมีความชื้นมากที่สุด

ตัวอย่างดิน		น้ำหนักดินเปียก (g)	น้ำหนักดินแห้ง (g)	น้ำหนักน้ำ (g)	ความชื้นดิน (%wb)	ความชื้นดิน (%db)
0 cm	1	100	85.60	14.40	14.40	16.82
	2	100	85.30	14.70	14.70	17.23
	3	100	84.65	15.35	15.35	18.13
เฉลี่ย					14.82	17.39
15 cm	1	100	87.15	12.85	12.85	14.75
	2	100	87.50	12.50	12.50	14.29
	3	100	87.25	12.75	12.75	14.61
เฉลี่ย					12.70	14.55
30 cm	1	100	88.40	11.60	11.60	13.12
	2	100	88.25	11.75	11.75	13.32
	3	100	88.45	11.55	11.55	13.06
เฉลี่ย					11.63	13.17
ความชื้นดินเฉลี่ยโดยรวม					13.05	15.04

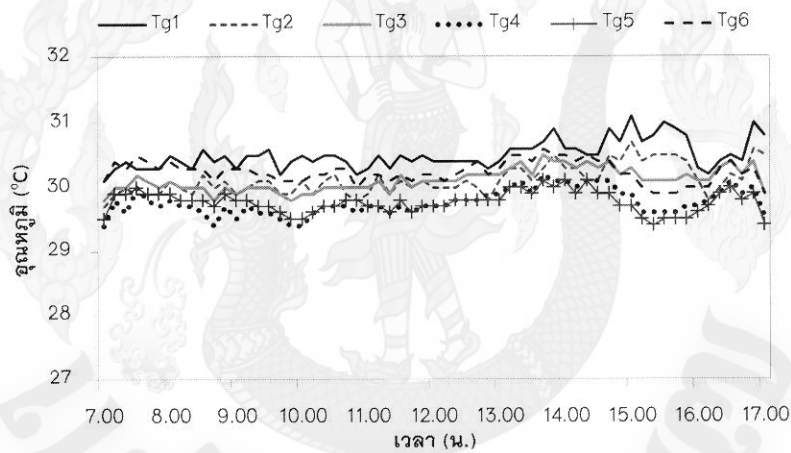
จากผลความชื้นดินในตารางที่ 9 พบว่า ความชื้นดินที่วิเคราะห์ได้ในวันที่ 6 กันยายน 2557 จะมีค่าลดลงเมื่อความลึกเพิ่มขึ้น เนื่องจากสภาพอากาศโดยทั่วไปของวันที่ 6 กันยายน 2557 ตลอดทั้งวันมีในตกเล็กน้อย และมีเมฆครึ้มเกือบตลอดทั้งวัน และมีแดดเล็กน้อยในช่วงบ่าย ทำให้ผิวดินมีความชื้นสูงสุดเนื่องจากได้รับปริมาณน้ำจากน้ำฝนและได้รับความร้อนจากดวงอาทิตย์ในปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับอีก 2 เงื่อนไขที่กล่าวมาแล้ว ที่ระดับความลึก 15 cm และ 30 cm มีค่าความชื้นลดลงเล็กน้อย โดยค่าความชื้นของดินในกรณีที่ดินมีความชื้นมากมีค่าเท่ากับ 13.05 %wb และ 15.04 %db

2. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดินที่ความชื้นต่างๆ

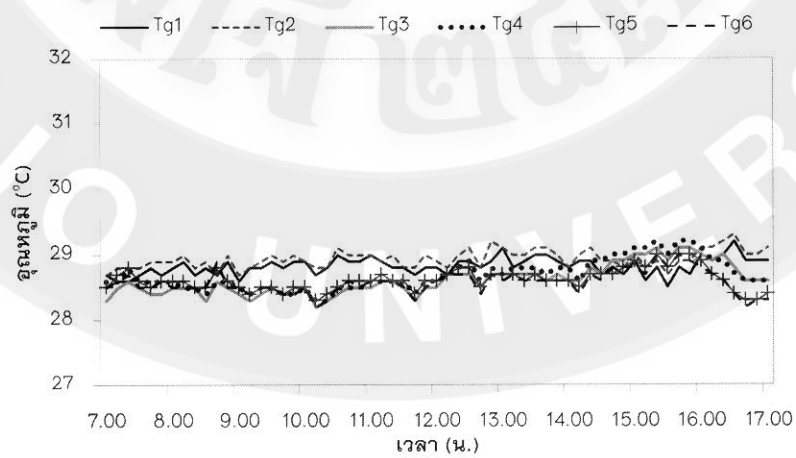
ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดินที่ความชื้นต่างๆ ได้ทำการวัดอุณหภูมิดินที่ความลึก 1 m จำนวน 6 จุด เช่นเดียวกับการทดลองในกรณีหาความเร็วที่เหมาะสม



(ก) กรณีดินมีความชื้นน้อยที่สุด



(ข) กรณีดินมีความชื้นปานกลาง



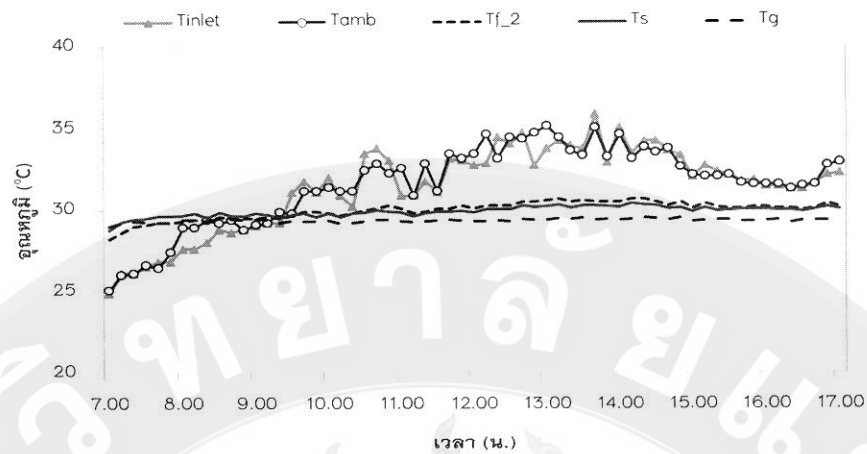
(ค) กรณีดินมีความชื้นมากที่สุด

ภาพที่ 21 อุณหภูมิดินในกรณีที่ดินมีความชื้นต่างๆ

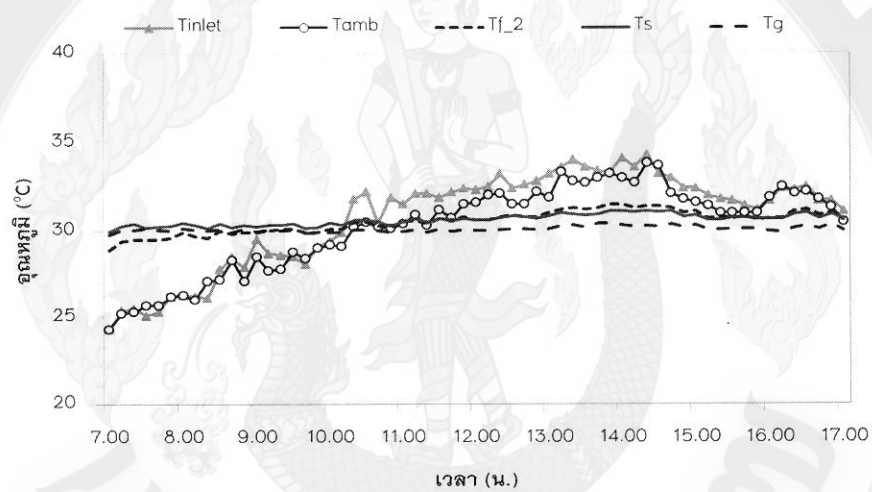
จากภาพที่ 21 (ก)-(ค) แสดงอุณหภูมิดิน ณ ความลึก 1 m ของวันที่ทำการเก็บข้อมูลในกรณีดินมีความชื้นน้อยที่สุด ดินมีความชื้นปานกลาง และดินมีความชื้นมากที่สุด ตามลำดับ โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดินในกรณีที่ดินมีความชื้นน้อยที่สุดดังภาพที่ 21 (ก) จะมีลักษณะเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิดินในกรณีดินที่มีความชื้นปานกลาง ดังภาพที่ 21 (ข) กล่าวคือ มีอุณหภูมิดินโดยรวมสูงกว่ากรณีดินที่มีความชื้นมากที่สุด โดยอุณหภูมิจุดที่ 1 และจุดที่ 2 จะสูงกว่าอุณหภูมิจุดที่ 3-6 เนื่องจากอุณหภูมิอากาศที่ไหลเข้าท่อมี่ค่าสูงซึ่งเป็นผลจากการได้รับความร้อนจากรังสีอาทิตย์ในปริมาณที่มากกว่าวันที่ดินมีความชื้นมากที่สุดที่มีฝนตก และสาเหตุอีกประการคือ หากดินมีความชื้นมากจะสามารถรักษาเสถียรภาพของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ดีกว่าดินที่มีความชื้นน้อย เนื่องจากน้ำในดินเป็นตัวช่วยรับความร้อนอีกทางหนึ่ง นอกเหนือจากการสะสมความร้อนในเนื้อดินเพียงอย่างเดียว ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิดินของกรณีดินมีความชื้นน้อยที่สุด ดินมีความชื้นปานกลาง และดินมีความชื้นมากที่สุด เท่ากับ 29.36°C 30.08°C และ 28.71°C ตามลำดับ

3. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศที่ไหลเข้าและไหลออกจากท่อใต้ดิน

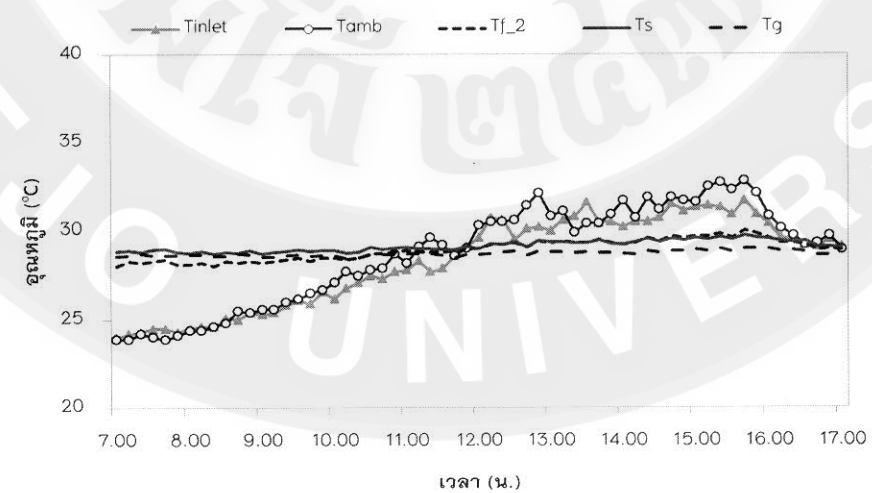
สำหรับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศที่ออกจากท่อใต้ดิน (T_{f2}) เทียบกับอุณหภูมิดิน (T_g) และอุณหภูมิผิวท่อ (T_s) พบว่า การเปลี่ยนแปลงทั้ง 3 กรณี มีลักษณะที่คล้ายกัน ดังภาพที่ 22 (ก)-(ค) กล่าวคือ อุณหภูมิของอากาศในท่อมี่ค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิผิวท่อแสดงว่ามีการแลกเปลี่ยนกันได้ค่อนข้างดี อย่างไรก็ตามอุณหภูมิอากาศในท่อจะค่าแตกต่างจากอุณหภูมิดินเล็กน้อย โดยในกรณีวันดินมีความชื้นน้อยที่สุด มีผลต่างประมาณ $0-1^{\circ}\text{C}$ กรณีดินมีความชื้นปานกลาง ผลต่างประมาณ $0-0.8^{\circ}\text{C}$ และกรณีดินที่มีความชื้นมากที่สุด ผลต่างประมาณ $0-0.5^{\circ}\text{C}$ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับช่วงเวลาที่อุณหภูมิอากาศแวดล้อมได้รับความร้อนจากค่ารังสีอาทิตย์ก่อนไหลลงสู่ท่อใต้ดิน จากเหตุผลดังกล่าวทำให้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศในท่อในกรณีดินที่มีความชื้นน้อยที่สุดจะมากกว่ากรณีอื่นๆ ประมาณ $0.5-1^{\circ}\text{C}$



(ก) กรณีดินมีความชื้นน้อยที่สุด



(ข) กรณีดินมีความชื้นปานกลาง



(ค) กรณีดินมีความชื้นมากที่สุด

ภาพที่ 22 อุณหภูมิอากาศที่ไหลเข้าและไหลออกจากท่อ ในกรณีที่ดินมีความชื้นต่างๆ

สำหรับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศที่ไหลเข้าท่อ (T_{in}) เทียบกับอุณหภูมิแวดล้อม (T_{amb}) พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงที่ใกล้เคียงกัน ยกเว้นบางช่วงเวลาที่อุณหภูมิต่ำกว่าแวดล้อม เนื่องจากอากาศที่ไหลเข้าท่ออากาศเกิดการสูญเสียพลังงานจากแรงเสียดทานของผิวท่อทางเข้าซึ่งมีความยาวประมาณ 1.6 m โดยอุณหภูมิสูงสุดของอากาศที่ไหลเข้าท่อในกรณีดินมีความชื้นน้อยที่สุด ดินมีความชื้นปานกลาง และดินมีความชื้นมากที่สุด ประมาณ 35 °C 34 °C และ 33 °C ตามลำดับ จากนั้นอากาศจะไหลเข้าสู่ท่อใต้ดินและมีอุณหภูมิอากาศที่ไหลออกจากท่อ (T_{out}) ลดลงจนเข้าใกล้อุณหภูมิผิวดินที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น โดยกรณีที่ดินมีความชื้นน้อยที่สุดจะสามารถลดอุณหภูมิอากาศที่ไหลผ่านท่อได้มากที่สุดเท่ากับ 5.5 °C ลำดับต่อมาคือ กรณีดินมีความชื้นปานกลาง 3.2 °C และกรณีดินที่มีความชื้นมากที่สุด 2.4 °C อย่างไรก็ตามอุณหภูมิอากาศที่ไหลออกจากท่อจะมีการแกว่งตัวบ้างขึ้นอยู่กับช่วงเวลา โดย ณ เวลา 0.00-9.00 น. อุณหภูมิอากาศที่ไหลออกจากท่อจะต่ำกว่าอุณหภูมิดินและอุณหภูมิผิวดินเล็กน้อย เนื่องจากอุณหภูมิอากาศที่ไหลเข้าสู่ท่อต่ำกว่าอุณหภูมิดิน และหลังจากเวลา 9.00 น. อุณหภูมิอากาศในท่อจะสูงขึ้นตามความร้อนที่ได้รับจากรังสีอาทิตย์ และมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิดินมากขึ้นเรื่อยๆ

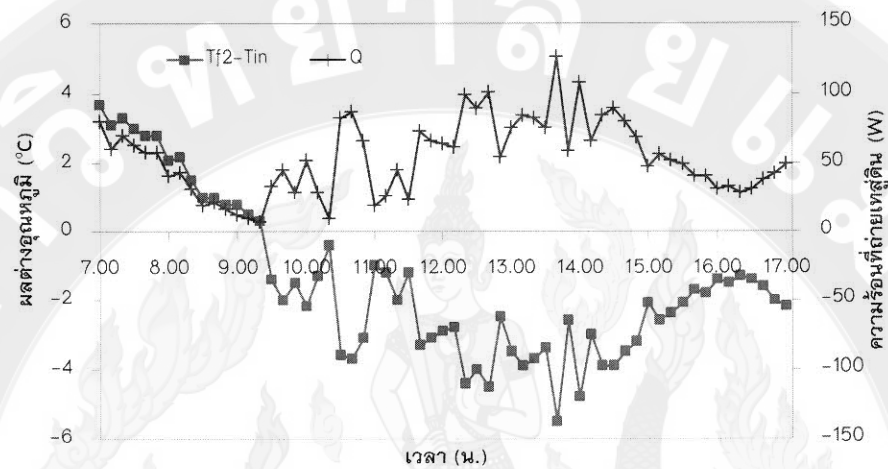
จากข้อมูลต่างๆ ในภาพที่ 22 ผู้วิจัยได้ทำการสรุปข้อมูลอุณหภูมิต่างๆ ดังในตารางที่ 10 ดังนี้

ตารางที่ 10 ค่าอุณหภูมิอากาศในการทดสอบกรณีความชื้นดินต่างๆ

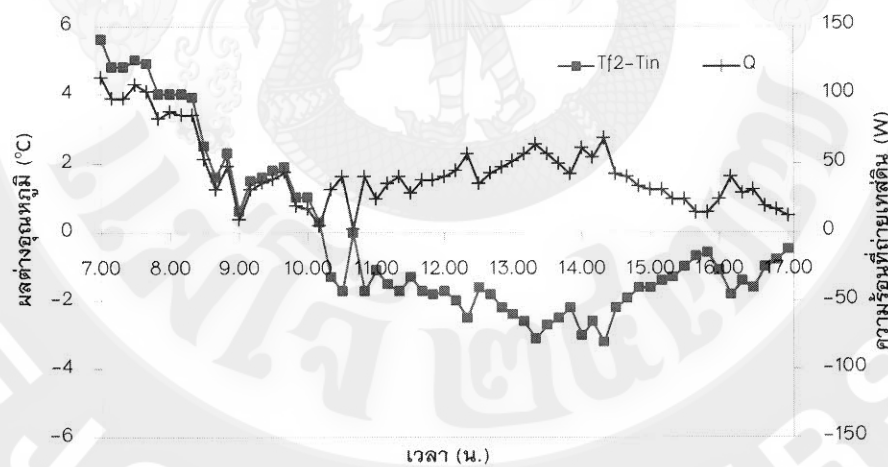
ข้อมูล	กรณีศึกษา		
	ดินมีความชื้นน้อยที่สุด	ดินมีความชื้นปานกลาง	ดินมีความชื้นมากที่สุด
อุณหภูมิแวดล้อมสูงสุด (°C)	35.20	33.80	32.80
อุณหภูมิแวดล้อมต่ำสุด (°C)	25.10	24.30	23.90
อุณหภูมิอากาศที่ไหลเข้าท่อสูงสุด (°C)	35.90	34.30	31.70
อุณหภูมิอากาศที่ไหลเข้าท่อต่ำสุด (°C)	24.90	24.30	24.00
อุณหภูมิอากาศที่ไหลออกท่อสูงสุด (°C)	30.70	31.50	30.00
อุณหภูมิอากาศที่ไหลออกท่อต่ำสุด (°C)	28.20	28.90	28.00
อุณหภูมิดินสูงสุด (°C)	29.55	30.40	29.00
อุณหภูมิดินต่ำสุด (°C)	28.97	29.77	28.42
อุณหภูมิผิวดินสูงสุด (°C)	30.40	31.10	29.75
อุณหภูมิผิวดินต่ำสุด (°C)	28.75	29.95	28.70

4. สมรรถนะการทำความเย็นของท่อใต้ดินแบบตัวยูในกรณีต่างๆ

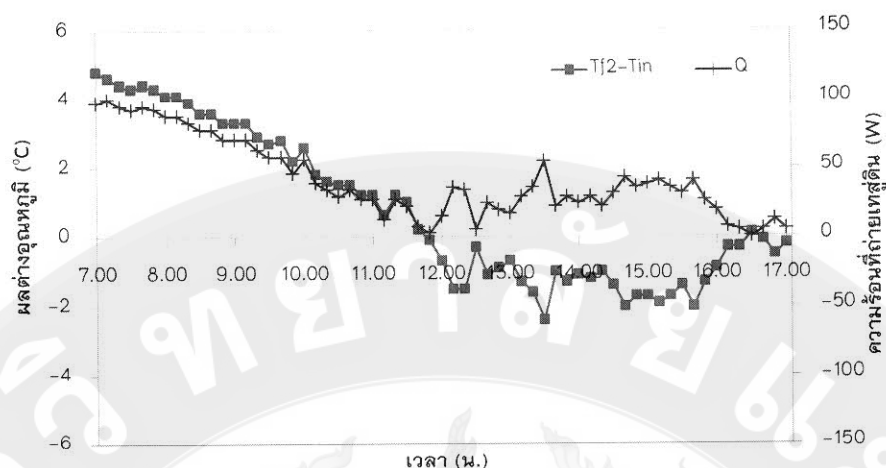
ความสามารถของการทำความเย็นของท่อใต้ดินแบบตัวยูในกรณีต่างๆ จะประเมินจากค่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายค่าการถ่ายเทความร้อนสู่ดิน (Q) และค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบ (Coefficient of performance: COP) ซึ่งผลการศึกษามีดังนี้



(ก) กรณีดินมีความชื้นน้อยที่สุด



(ข) กรณีดินมีความชื้นปานกลาง

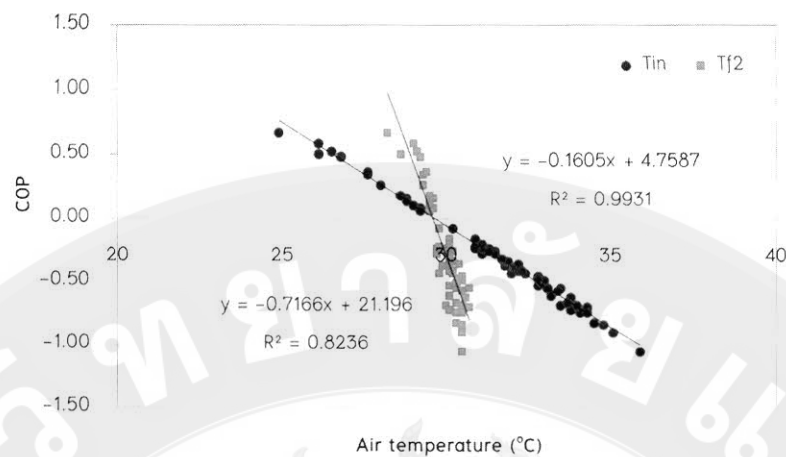


(ค) กรณีดินมีความชื้นมากที่สุด

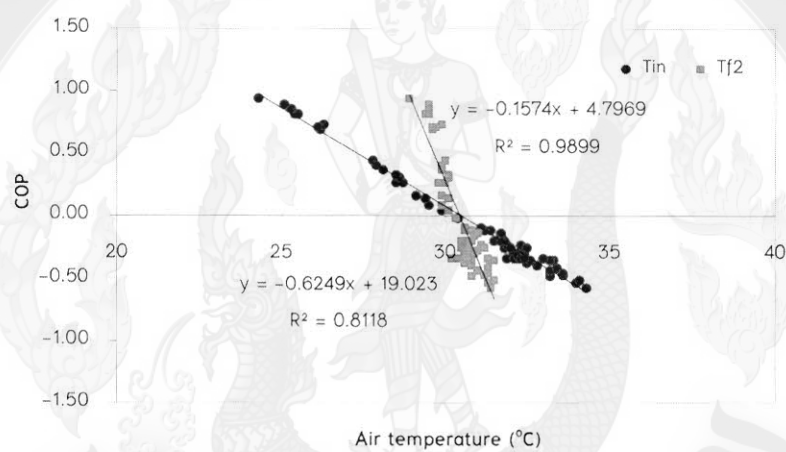
ภาพที่ 23 ความร้อนที่ถ่ายเทสู่ดิน ในกรณีที่ดินมีความชื้นต่างๆ

จากภาพที่ 23 (ก)-(ค) แสดงถึงความร้อนที่ถ่ายเทจากท่อใต้ดินแบบตัวยูที่ถ่ายเทสู่ดินบริเวณที่ทำการทดลองในกรณีต่างๆ พบว่า กรณีดินที่มีความชื้นน้อยที่สุดจะสามารถลดอุณหภูมิในท่อได้ $0-5.5^{\circ}\text{C}$ จึงทำให้ถ่ายเทความร้อนสู่ดินได้ ตั้งแต่เวลา 9.20-17.00 น. มีค่าเท่ากับ $9.57-126.78\text{ W}$ คิดเป็นค่าความร้อนเฉลี่ย 58.87 W และมีค่าความจุความร้อน 2.70 kW/day ส่วนช่วงเวลา 7.00-9.20 น. ท่อใต้ดินจะรับความร้อนจากดิน จะมีค่าตั้งแต่ $7.20-80.31\text{ W}$

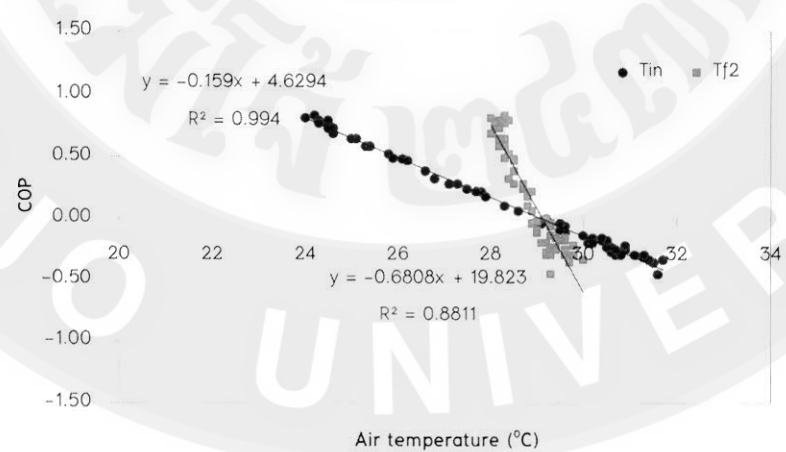
สำหรับกรณีดินมีความชื้นปานกลางนั้น อุณหภูมิในท่อใต้ดินจะลดลง $0-3.2^{\circ}\text{C}$ ทำให้ถ่ายเทความร้อนสู่ดินได้ตั้งแต่เวลา 10.20-17.00 น. มีค่าตั้งแต่ $2.39-68.44\text{ W}$ คิดเป็นค่าเฉลี่ย 37.02 W และมีค่าความจุความร้อน 1.52 kW/day ส่วนช่วงเวลา 7.00-10.20 น. จะรับความร้อนจากดิน มีค่าตั้งแต่ $4.79-112.18\text{ W}$ สำหรับกรณีดินที่มีความชื้นมากที่สุด อากาศที่ไหลผ่านท่อจะถูกลดอุณหภูมิลงตั้งแต่ $0-2.4^{\circ}\text{C}$ ทำให้ถ่ายเทความร้อนสู่ดินได้ตั้งแต่ 11.50-16.30 น. ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง $4.79-54.75\text{ W}$ มีค่าความจุความร้อนเท่ากับ 0.77 kW/day ส่วนช่วงเวลาอื่นๆ นั้น อากาศในท่อใต้ดินจะเกิดการรับความร้อนจากดิน $7.21-100.02\text{ W}$ จากข้อสังเกตจะเห็นได้ว่า กรณีที่ดินมีความชื้นน้อยที่สุดจะสามารถถ่ายเทความร้อนสู่ดินได้นานกว่ากรณีดินมีความชื้นปานกลาง และดินมีความชื้นมากที่สุด โดยระยะเวลาในการทำความเย็นประมาณ 8 ชั่วโมง, 6 ชั่วโมง และ 4 ชั่วโมง ตามลำดับ



(ก) กรณีดินมีความชื้นน้อยที่สุด



(ข) กรณีดินมีความชื้นปานกลาง



(ค) กรณีดินมีความชื้นมากที่สุด

ภาพที่ 24 สัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบท่อใต้ดิน ในกรณีที่ดินมีความชื้นต่างๆ

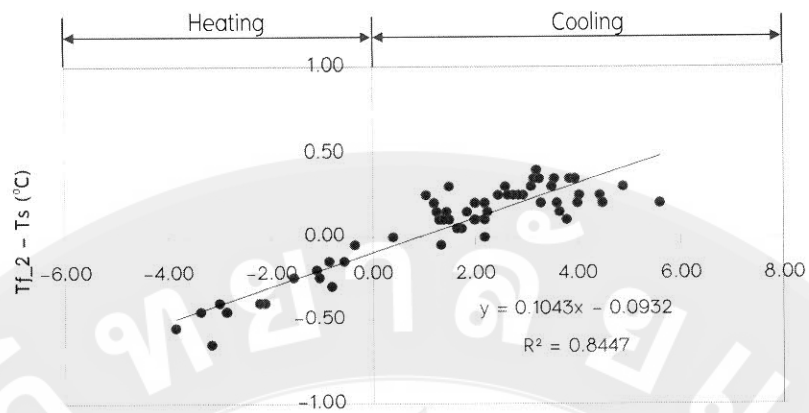
จากภาพที่ 24 (ก)-(ค) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศที่ไหลเข้าท่อใต้ดิน (T_{in}) และอุณหภูมิอากาศที่ไหลออกจากท่อใต้ดิน (T_{out}) กับค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบ (COP) ในกรณีดินที่มีความชื้นต่างๆ กัน พบว่า ความสัมพันธ์ของสมการทุกกรณีเป็นสมการเส้นตรง (Linear equation) โดยค่า COP ของระบบท่อใต้ดินจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอากาศที่ไหลเข้าท่อ เมื่ออุณหภูมิอากาศที่ไหลเข้าท่อมียิ่งสูงขึ้นและมีช่วงการแกว่งตัวของอุณหภูมิที่ไหลเข้าใต้ดินระหว่างวันมากจะส่งผลให้ค่า COP ของระบบที่คำนวณได้เพิ่มขึ้น ดังตัวอย่างของอุณหภูมิอากาศที่ไหลเข้าสู่ท่อใต้ดินในกรณีดินมีความชื้นน้อยที่สุดเท่ากับ 35.9°C ทำให้ค่า COP มีค่าสูงสุดด้วยเช่นกัน ด้วยการเปลี่ยนแปลงในลักษณะนี้กรณีดินที่มีความชื้นน้อยที่สุดจึงมีค่า COP สูงกว่ากรณีดินมีความชื้นปานกลาง และดินมีความชื้นมากที่สุด โดยแต่ละกรณีมีค่า COP เท่ากับ 0.24-1.06, 0.02-0.57 และ 0.02-0.36 ตามลำดับ สำหรับค่า COP ของการทำความร้อนของท่อใต้ดินจะที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาเช้าของทุกกรณี มีค่าแปรผันระหว่าง 0.06-0.93

วิจารณ์ผลการวิจัย

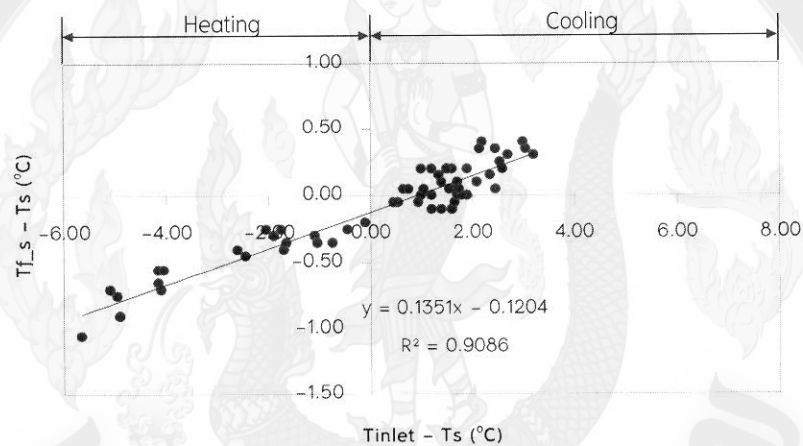
เมื่อวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงของความเร็วอากาศที่เหมาะสมเพื่อนำมาใช้กับระบบท่อใต้ดิน พบว่า การเปิดมุมวาล์วด้านท่ออากาศเข้าที่ค่ามุนน้อยๆ จะให้ประสิทธิภาพการลดอุณหภูมิของอากาศที่ออกจากท่อใต้ดินต่ำกว่าการเปิดมุมวาล์วที่กว้างกว่า แต่ผลข้างเคียงที่ตามมาอุณหภูมิอากาศหลังจากผ่านพัดลมดูดอากาศ มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิของอากาศที่ผ่านจากท่อใต้ดินก่อนไหลผ่านพัดลมดูดอากาศ เนื่องจากอากาศที่ออกจากท่อได้รับความร้อนจากพัดลมดูดอากาศที่ติดไว้ที่ปลายทางออก ซึ่งทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นหลังจากผ่านพัดลมดูดอากาศ โดยการทดลองที่การเปิดวาล์ว 30° มีค่ามากที่สุด และมุม 45° 60° และ 90° ตามลำดับ

จากการวิเคราะห์พบว่า การเปิดมุมวาล์วค่าน้อยๆ จะทำให้มอเตอร์ของพัดลมทำงานที่ภาระโหลดค่อนข้างต่ำทำให้ตัวมอเตอร์เปลี่ยนพลังงานที่ได้จากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนและเกิดการสะสมความร้อนที่ตัวพัดลมดูดอากาศ ความร้อนดังกล่าวได้ถ่ายเทสู่อากาศที่ไหลผ่านทำให้อุณหภูมิอากาศสูงขึ้นอีกประการหนึ่งจะส่งผลต่อการสึกหรอหรือชำรุดของมอเตอร์พัดลมดูดอากาศในระยะยาว ดังนั้นการเปิดวาล์วควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่ 30° จึงไม่เหมาะสมสำหรับการเปิดวาล์วที่มุม 90° ลดอุณหภูมิของอากาศได้น้อยเกินไป จึงได้ทำการเปรียบเทียบผลการศึกษาจากมุมเปิดวาล์วที่ 45° และ 60° ซึ่งให้ค่าอุณหภูมิของอากาศที่เพิ่มขึ้นจากพัดลมดูดอากาศใกล้เคียงกันซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนว่า มุม 45° สามารถลดอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านท่อได้มากที่สุด ดังนั้นในการทดลองเงื่อนไขการทดสอบระบบในกรณีสภาพแวดล้อมต่างๆ กัน เพื่อวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบ จึงเลือกใช้การควบคุมความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านท่อที่มุมเปิดของวาล์วเท่ากับ 45°

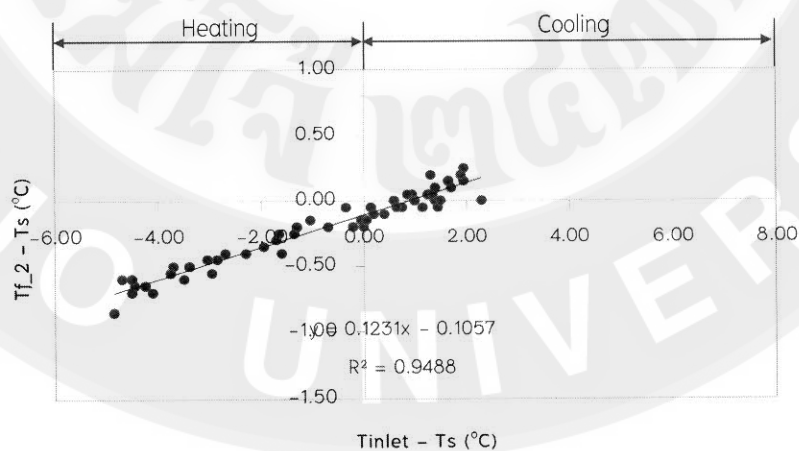
สำหรับการศึกษาการทำงานของท่อใต้ดินแบบตัวยูที่ความชันดินทั้ง 3 กรณี ได้แก่ ดินที่มีความชันน้อยที่สุด ดินที่มีความชันปานกลาง และดินที่มีความชันมากที่สุด โดยวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างอุณหภูมิอากาศที่ไหลเข้าท่อกับอุณหภูมิผิวท่อ (แกน x) และผลต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศที่ไหลออกจากท่อและอุณหภูมิผิวท่อ (แกน y) ของกรณีความชันดินทั้ง 3 กรณี ดังภาพที่ 25 (ก)-(ค) พบว่า การถดถอยของเส้นแนวโน้มในรูปเป็นแบบเชิงเส้น (Linear regression) ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2) ของสมการ เท่ากับ 0.84, 0.90 และ 0.94 ตามลำดับ



(ก) กรณีดินมีความชื้นน้อยที่สุด



(ข) กรณีดินมีความชื้นปานกลาง



(ค) กรณีดินมีความชื้นมากที่สุด

ภาพที่ 25 ผลต่างอุณหภูมิของอากาศที่ไหลเข้าท่อและผิวท่อเทียบกับผลต่างอุณหภูมิของอากาศที่ไหลออกจากท่อและผิวท่อ กรณีที่ดินมีความชื้นต่างๆ

จากการวิเคราะห์ภาพที่ 25 พบข้อสังเกตว่า ปัจจัยหลักของการลดอุณหภูมิและความสามารถในการทำความเย็นของท่อใต้ดินจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศแวดล้อมที่ไหลเข้าท่อและอุณหภูมิดินเป็นหลัก เช่น ในกรณีวันที่ดินมีความชื้นน้อย อุณหภูมิอากาศที่ไหลเข้าท่อในช่วงเวลากลางวันมักจะมีค่าสูงขึ้น จะส่งผลให้อากาศในท่อใต้ดินสามารถถ่ายเทความร้อนให้กับดินได้มากขึ้น จึงสามารถลดอุณหภูมิอากาศที่ออกจากท่อได้มากกว่าและเป็นระยะเวลานานกว่ากรณีดินมีความชื้นปานกลางและดินมีความชื้นมากที่สุด สำหรับผลเนื่องจากความชื้นดินที่มีผลต่อการทำงานของท่อใต้ดิน พบว่า มีอิทธิพลน้อยเมื่อเทียบกับผลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศแวดล้อม ซึ่งได้รับความร้อนจากรังสีอาทิตย์โดยตรง โดยดินที่มีความชื้นมากส่วนใหญ่แล้วจะอยู่ภายใต้สภาวะอากาศที่มีฝนตกหรือไม่มีแดด ดินอุ้มน้ำมากและมีอุณหภูมิก่อนข้างคงที่ เมื่ออากาศแวดล้อมที่มีแปรปรวนน้อยกว่าวันที่ดินมีความชื้นน้อยซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นวันที่มีแดดไหลลงสู่ท่อใต้ดินที่มีอุณหภูมิดินบริเวณโดยรอบค่อนข้างคงที่ จะทำให้แลกเปลี่ยนความร้อนได้ในอัตราที่น้อยกว่าจึงทำให้ภาพรวมการลดอุณหภูมิอากาศในท่อใต้ดินมีต่ำกว่า และส่งผลให้สมรรถนะการทำความเย็นของท่อใต้ดินต่ำไปด้วย

นอกจากนั้นผู้วิจัยได้พบข้อสังเกต 2 ประการ จากผลการศึกษาในงานวิจัย

1. ชุดทดสอบท่อใต้ดินแบบตัวยูที่ใช้ในการทดลองจะสามารถทำความเย็นได้ตั้งแต่ช่วงเวลา 09.00 น. ไปจนถึงเวลา 15.00 น. โดยประมาณ ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศดังกล่าวส่งผลให้การทำงานของระบบแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่

1) ช่วงที่ 1 การเพิ่มความร้อนให้กับอากาศ (Heating system) ซึ่งอาจแบ่งได้อีก 2 กรณี คือ กรณีที่อุณหภูมิที่ไหลเข้าท่อมีย่านค่ามากๆ เช่น ในเวลาเช้า และในกรณีที่พัดลมเกิดการสะสมความร้อนมากขึ้นและระบายสู่อากาศภายนอกได้น้อยลงในช่วงเวลาบ่ายถึงเย็น

2) ช่วงที่ 2 การลดอุณหภูมิอากาศ (Cooling system) กรณีที่อุณหภูมิอากาศไหลเข้าท่อใต้ดินสูงกว่าอุณหภูมิดิน ดังนั้นหากนำท่อใต้ดินไปใช้งานจริงสามารถเลือกใช้ในช่วงเวลาตามความต้องการ จะทำให้ช่วยให้ประหยัดพลังงานไฟฟ้ามากขึ้น

2. อุณหภูมิของผิวท่อพีวีซีที่นำมาใช้เป็นท่อใต้ดินแบบตัวยู เมื่อนำมาฝังดินแล้วอุณหภูมิจะมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิดิน อย่างไรก็ตามเมื่อให้ท่อใต้ดินทำงานตลอดทั้งวัน อุณหภูมิผิวท่อจะเริ่มสูงกว่าอุณหภูมิดินมากขึ้นเรื่อยๆ โดยเฉพาะในช่วงบ่าย จากการวิเคราะห์พบว่า เป็นผลมาจากท่อพีวีซีมีค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ต่ำ จึงระบายความร้อนออกสู่ดินไม่ทันกับความร้อนที่รับมาจากอากาศ ดังนั้นจึงเกิดการสะสมบริเวณผิวท่อ ซึ่งหากท่อใต้ดินมีความหนามากก็จะเกิดการสะสมความร้อนมากขึ้น ดังนั้นการปรับปรุงระบบในอนาคตสามารถเลือกใช้วัสดุที่มีการนำความร้อนสูงเช่น ท่อเหล็ก หรือท่อพีอีที่มีความหนาน้อยๆ ได้ดินที่ใช้ทำการทดสอบ แต่ควรจะพิจารณาถึงต้นทุนของการก่อสร้างร่วมด้วย

สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสมรรถนะการทำความเย็นของท่อใต้ดินแบบตัวยูที่มีการใช้งานในดินที่มีความชื้นต่างๆ โดยมุ่งหวังว่าจะสามารถเพิ่มสมรรถนะในการทำความเย็นได้มากขึ้น ผ่านชุดทดสอบท่อใต้ดินแบบตัวยูที่ทำจากท่อพีวีซี เส้นผ่านศูนย์กลาง 8 cm ความยาว 12.5 m ผ่านการใช้งานแบบ Open loop หรือการใช้อากาศแวดล้อมผ่านท่อใต้ดินเพื่อทำความเย็น ในการศึกษาแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้ การหาความเร็วอากาศในท่อใต้ดินที่เหมาะสม เพื่อนำไปสู่การศึกษาในส่วนที่ 2 คือ การศึกษาสมรรถนะการทำความเย็นของท่อใต้ดินกรณีใช้งานในดินที่มีความชื้นต่างๆ

จากผลการทดลองเพื่อหาความเร็วที่เหมาะสมของระบบท่อใต้ดินผ่านการทดลองชุดทดสอบ U-tube heat exchanger โดยกำหนดตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ มุมของวาล์วที่ควบคุมอากาศที่ไหลเข้าท่อที่ 30° 45° 60° และ 90° จากผลการทดลองทำให้ทราบว่า การศึกษาจากมุมเปิดวาล์วควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่ 45° มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับชุดทดสอบ U-tube heat exchanger ที่ออกแบบในงานวิจัยนี้ สำหรับการทดสอบท่อใต้ดินแบบตัวยูที่ฝังอยู่ภายใต้ดินที่มีความชื้นต่างๆ กัน 3 กรณี ได้แก่ กรณีดินมีความชื้นน้อยที่สุด กรณีดินมีความชื้นปานกลาง และกรณีดินมีความชื้นมากที่สุด จากผลการศึกษา ทำให้ทราบว่า การที่ดินมีความชื้นดินมากจะสามารถลดอุณหภูมิดินต่ำกว่ากรณีอื่นๆ เล็กน้อย ประมาณ 1°C แต่มีนัยสำคัญต่อการเพิ่มสมรรถนะของระบบทำความเย็นโดยใช้ท่อใต้ดินน้อย กล่าวคือ ความชื้นดินส่งผลต่อการลดอุณหภูมิและเพิ่มสมรรถนะการทำความเย็นของระบบท่อใต้ดินน้อยมากเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศที่ไหลเข้าท่อซึ่งเป็นอากาศแวดล้อม โดยเฉพาะกรณีที่อากาศแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูงมากไหลเข้าสู่ท่อใต้ดินที่มีอุณหภูมิคงที่จะทำให้ได้สมรรถนะของระบบสูงสุด

ดังนั้นหากจะนำท่อใต้ดินแบบตัวยูไปประยุกต์ใช้ในโรงเรือนเกษตรกรรม ควรเลือกใช้งานในกรณีที่ดินมีความชื้นน้อยที่สภาวะอากาศที่มีท้องฟ้าเปิด มีแสงแดด จะมีความเหมาะสมมากที่สุด เนื่องจากท่อใต้ดินจะทำงานได้ประสิทธิภาพสูงสุดและสามารถลดอุณหภูมิอากาศในท่อได้มาก เมื่อนำไปใช้ทำความเย็นในโรงเรือนจะสามารถลดอุณหภูมิในโรงเรือนได้มากเช่นกัน อีกทั้งสามารถลดอุณหภูมิได้ในช่วงเวลาที่ยาวนานกว่าความชื้นดินกรณีอื่นๆ อีกด้วย

เอกสารอ้างอิง

- Adu-Hamdeh, N.H. 2003. Thermal properties of soils as affected by density and water content. **Biosystems Engineering**. 86(1): 97-102.
- 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: 384 pages.
- Dubey, M., Bhagoria, J.L. and Atullanjewar, 2013. Earth-air heat exchangers in Parallel Connection. **Engineering Trends and Technology**. 6: 2231-2381.
- 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**. 47: 1779-1798.
- Hillel, D. 1998. **Environmental soil physics**. Academic Press: United State of America. 771 pages.
- Incropera, F.P. Dewitt, D.P., Bergman, T.L. and Lavine, A.S. 2007. **Fundamentals of heat and mass transfer**. John Willy & Sons: United State of America: 486-533.
- Miller, R. W. and Donahue, R.L. 1995. **Soil in our Environment**. Prentice Hall: United State of America: 95-126.
- 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**. 66: 104-111.
- 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**. 78: 225-236.
- Poulovassilis, 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 & Tillage Research**. 15: 189-198.
- Smith, K. A. and Mullins, C.E. 2001. **Soil and environmental analysis**. Physical Method, Marcel Dekker: United State of America: 539-563.
- Tiwari, G.N. 2003. **Greenhouse technology for controlled environment**. Alpha Science International: United Kingdom: 226-331.

Tiwari, G.N. Akhtar, M.A. Shula, Ashish and Khan, Emran, M. 2006. Annual thermal performance of greenhouse with an earth–air heat exchangers: An experimental validation. **Renewable Energy**. 31: 2432-2446.

วัฒนา ธรรมมงคล และวินิต ช่อวิเชียร. 2532. **ปฐพีกลศาสตร์**. พิมพ์ลักษณ์: กรุงเทพฯ: 328 หน้า.

ชูศักดิ์ ศิริรัตน์. 2554. **ปฐพีกลศาสตร์**. พิมพ์ลักษณ์: กรุงเทพฯ. 813 หน้า.

มานะ อภิพัฒน์มนตรี. 2535. **วิศวกรรมปฐพีและฐานราก**. พิมพ์ครั้งที่ 4. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น): 410 หน้า.

สง่า ตั้งชวล. 2541. **ธรณีวิศวกรรมชั้นพื้นฐาน**. พิมพ์ครั้งที่ 4. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพฯ. 460 หน้า.

ภาคผนวก ก.1 ผลการทดลองกรณีเปิดวาล์วมุม 30°

30 Degree SamplingTime	Tinlet (°C)	Ts_1 (°C)	Tf_1 (°C)	Ts_2 (°C)	Ts (°C)	Tf_2 (°C)	Tg_1 (°C)	Tg_2 (°C)	Tg_3 (°C)	Tg_4 (°C)	Tg_5 (°C)	Tg_6 (°C)	Tg (°C)	Tamb (°C)	Tf_2-Tinlet (°C)
7:00	26.6	29.80	29.50	29.70	29.75	28.70	29.70	29.50	29.60	29.50	29.60	29.50	29.57	26.60	2.10
7:10	26.6	29.80	29.50	29.70	29.75	28.70	29.70	29.50	29.60	29.50	29.60	29.50	29.57	26.60	2.10
7:20	27	30.20	29.90	30.20	30.20	29.60	29.90	29.70	30.00	29.90	30.00	30.00	29.92	27.30	2.60
7:30	28	30.60	30.30	30.60	30.60	30.40	30.20	29.90	30.10	30.00	30.10	30.00	30.05	27.40	2.40
7:40	27.5	30.40	30.20	30.40	30.40	30.40	30.20	29.80	30.30	30.20	30.30	30.20	30.17	27.90	2.90
7:50	28.7	30.80	30.70	30.90	30.85	31.00	30.40	30.10	30.20	30.10	30.30	30.10	30.20	28.00	2.30
8:00	28.6	30.70	30.50	30.70	30.70	30.90	30.40	30.20	30.20	30.10	30.30	30.10	30.22	27.90	2.30
8:10	28.4	30.50	30.30	30.40	30.45	30.60	30.40	30.20	30.00	29.80	30.00	29.80	30.03	28.10	2.20
8:20	28.6	30.30	30.10	30.40	30.35	30.60	30.50	30.30	29.90	29.80	29.90	29.80	30.03	28.10	2.00
8:30	28.9	30.30	30.20	30.10	30.20	30.50	30.40	30.10	29.80	29.70	29.70	29.60	29.88	28.10	1.60
8:40	29	30.10	30.10	30.00	30.05	30.40	30.20	30.00	29.90	29.70	29.80	29.80	29.90	28.20	1.40
8:50	29.1	30.00	30.00	29.90	29.95	30.30	30.10	29.90	29.90	29.70	29.80	29.70	29.85	28.40	1.20
9:00	28.8	30.10	30.00	30.00	30.05	30.30	30.20	30.00	29.90	29.70	29.80	29.70	29.88	29.10	1.50
9:10	30.5	30.00	30.20	30.00	30.00	30.50	30.20	29.90	29.80	29.60	29.70	29.60	29.80	29.30	0.00
9:20	30.2	30.30	30.30	30.10	30.20	30.60	30.30	30.10	29.80	29.70	29.70	29.60	29.87	29.20	0.40
9:30	31.2	30.30	30.40	30.10	30.20	30.60	30.40	30.10	29.80	29.60	29.70	29.60	29.87	29.50	-0.60
9:40	31.6	30.30	30.30	30.20	30.25	30.70	30.30	30.20	29.70	29.50	29.60	29.50	29.80	29.30	-0.90

ภาคผนวก ก.1 ผลการทดลองกรณีเปิดวาล์วมุม 30° (ต่อ)

30 Degree SamplingTime	Tinlet (°C)	Ts_1 (°C)	Tf_1 (°C)	Ts_2 (°C)	Ts (°C)	Tf_2 (°C)	Tg_1 (°C)	Tg_2 (°C)	Tg_3 (°C)	Tg_4 (°C)	Tg_5 (°C)	Tg_6 (°C)	Tg (°C)	Tamb (°C)	Tf_2-Tinlet (°C)
9:50	29.90	30.20	30.30	30.10	30.15	30.70	30.30	30.10	29.80	29.70	29.70	29.70	29.88	31.00	0.80
10:00	30.10	30.20	30.30	30.10	30.15	30.70	30.30	30.10	29.80	29.60	29.60	29.60	29.83	29.90	0.60
10:10	30.20	30.20	30.30	30.20	30.20	30.80	30.40	30.30	29.70	29.50	29.60	29.50	29.83	29.60	0.60
10:20	32.30	29.90	30.20	29.80	29.85	30.50	30.20	29.90	29.80	29.60	29.60	29.50	29.77	30.40	-1.80
10:30	31.30	30.20	30.40	30.00	30.10	30.80	30.20	30.10	29.80	29.50	29.70	29.50	29.80	30.40	-0.50
10:40	32.20	30.10	30.40	30.10	30.10	30.80	30.40	30.10	29.60	29.40	29.40	29.40	29.72	29.80	-1.40
10:50	33.70	30.30	30.60	30.20	30.25	31.00	30.30	30.20	29.60	29.60	29.50	29.50	29.78	31.50	-2.70
11:00	32.60	30.30	30.70	30.20	30.25	31.10	30.50	30.20	29.70	29.50	29.60	29.50	29.83	30.60	-1.50
11:10	33.30	30.30	30.60	30.30	30.30	31.10	30.30	30.20	29.80	29.60	29.60	29.50	29.83	31.10	-2.20
11:20	32.40	30.20	30.60	30.10	30.15	31.10	30.30	30.20	29.70	29.60	29.60	29.50	29.82	30.80	-1.30
11:30	32.70	29.90	30.40	29.90	29.90	30.80	30.30	29.90	29.80	29.60	29.60	29.50	29.78	31.00	-1.90
11:40	33.20	30.30	30.70	30.30	30.30	31.20	30.50	30.30	29.70	29.50	29.50	29.40	29.82	31.20	-2.00
11:50	32.80	30.10	30.60	30.10	30.10	30.90	30.20	30.00	29.70	29.50	29.50	29.40	29.72	31.40	-1.90
12:00	31.90	30.20	30.70	30.20	30.20	31.20	30.40	30.20	29.70	29.50	29.50	29.40	29.78	32.40	-0.70
12:10	33.60	30.10	30.60	30.10	30.10	31.10	30.30	30.10	29.80	29.60	29.50	29.50	29.80	31.50	-2.50
12:20	34.30	30.30	30.90	30.40	30.35	31.40	30.50	30.20	29.70	29.60	29.60	29.50	29.85	32.30	-2.90
12:30	33.70	30.20	30.80	30.30	30.25	31.40	30.50	30.20	29.60	29.50	29.40	29.40	29.77	31.50	-2.30

ภาคผนวก ก.1 ผลการทดลองกรณีเปิดวาล์วมุม 30° (ต่อ)

30 Degree SamplingTime	Tinlet (°C)	Ts_1 (°C)	Tf_1 (°C)	Ts_2 (°C)	Ts (°C)	Tf_2 (°C)	Tg_1 (°C)	Tg_2 (°C)	Tg_3 (°C)	Tg_4 (°C)	Tg_5 (°C)	Tg_6 (°C)	Tg (°C)	Tamb (°C)	Tf_2-Tinlet (°C)
12:40	34.20	30.20	30.80	30.20	30.20	31.20	30.30	30.10	29.60	29.30	29.30	29.50	29.68	31.90	-3.00
12:50	34.60	30.20	30.80	30.20	30.20	31.20	30.20	30.00	29.80	29.60	29.60	29.50	29.78	32.70	-3.40
13:00	34.30	30.30	30.90	30.40	30.35	31.40	30.40	30.20	29.80	29.50	29.40	29.40	29.78	33.40	-2.90
13:10	34.90	30.30	30.90	30.40	30.35	31.60	30.40	30.20	29.80	29.60	29.60	29.50	29.85	33.10	-3.30
13:20	33.30	30.20	30.80	30.30	30.25	31.40	30.50	30.30	29.70	29.30	29.30	29.30	29.73	31.70	-1.90
13:30	32.60	29.90	30.50	30.00	29.95	31.00	30.40	30.10	29.80	29.60	29.50	29.40	29.80	31.20	-1.60
13:40	32.50	30.00	30.60	30.00	30.00	31.00	30.50	30.30	29.70	29.40	29.30	29.30	29.75	31.40	-1.50
13:50	32.30	30.00	30.40	30.00	30.00	30.90	30.50	30.20	29.60	29.30	29.10	29.10	29.63	30.80	-1.40
14:00	32.90	29.80	30.30	29.90	29.85	30.80	30.30	30.10	29.60	29.40	29.30	29.20	29.65	31.20	-2.10
14:10	34.00	30.10	30.70	30.20	30.15	31.10	30.20	30.00	29.80	29.50	29.40	29.30	29.70	32.30	-2.90
14:20	33.80	30.20	30.80	30.20	30.20	31.20	30.20	30.00	29.90	29.70	29.70	29.50	29.83	32.10	-2.60
14:30	33.90	30.20	30.70	30.30	30.25	31.30	30.40	30.20	30.00	29.80	29.70	29.60	29.95	32.20	-2.60
14:40	33.80	30.10	30.60	30.10	30.10	31.00	30.30	30.00	29.80	29.60	29.40	29.30	29.73	32.20	-2.80
14:50	31.10	30.20	30.80	30.40	30.30	31.50	30.70	30.40	29.80	29.50	29.40	29.40	29.87	29.80	0.40
15:00	29.00	30.20	30.70	30.70	30.45	32.00	30.50	30.30	29.50	29.30	29.10	29.10	29.63	27.80	3.00
15:10	27.70	29.80	30.10	30.10	29.95	30.90	30.70	30.40	29.30	29.00	28.90	28.90	29.53	26.80	3.20
15:20	26.80	29.70	29.90	30.00	29.85	30.40	30.50	30.30	29.10	28.70	28.60	28.60	29.30	26.00	3.60

ภาคผนวก ก.1 ผลการทดลองกรณีเปิดวาล์วมุม 30° (ต่อ)

30 Degree SamplingTime	Tinlet (°C)	Ts_1 (°C)	Tf_1 (°C)	Ts_2 (°C)	Ts (°C)	Tf_2 (°C)	Tg_1 (°C)	Tg_2 (°C)	Tg_3 (°C)	Tg_4 (°C)	Tg_5 (°C)	Tg_6 (°C)	Tg (°C)	Tamb (°C)	Tf_2-Tinlet (°C)
15:30	26.60	29.60	29.60	29.70	29.65	30.10	30.50	30.20	29.20	28.80	28.70	28.60	29.33	25.80	3.50
15:40	26.80	29.60	29.50	29.40	29.50	29.80	30.30	30.20	29.20	28.90	28.80	28.60	29.33	26.00	3.00
15:50	26.60	29.50	29.30	29.40	29.45	29.80	30.30	30.00	29.30	29.00	28.90	28.90	29.40	26.40	3.20
16:00	27.00	29.70	29.50	29.60	29.65	30.00	30.30	30.20	29.30	29.10	29.00	28.90	29.47	26.60	3.00
16:10	27.20	29.90	29.70	29.80	29.85	30.20	30.60	30.40	29.30	29.00	29.00	28.90	29.53	26.70	3.00
16:20	27.20	29.80	29.70	29.70	29.75	30.20	30.50	30.20	29.40	29.10	29.10	29.00	29.55	27.00	3.00
16:30	27.30	29.90	29.70	29.80	29.85	30.30	30.30	30.20	29.50	29.20	29.20	29.10	29.58	26.90	3.00
16:40	27.50	29.90	29.70	29.90	29.90	30.30	30.50	30.20	29.60	29.30	29.30	29.20	29.68	26.90	2.80
16:50	27.30	29.90	29.60	29.80	29.85	30.30	30.50	30.20	29.50	29.30	29.30	29.10	29.65	26.90	3.00
17:00	27.30	29.80	29.50	29.90	29.85	30.40	30.50	30.30	29.60	29.30	29.20	29.10	29.67	27.00	3.10

ภาคผนวก ก.2 ผลการทดลองกรณีเปิดวาล์วมุม 45°

45 Degree SamplingTime	Tinlet (°C)	Ts_1 (°C)	Tf_1 (°C)	Ts_2 (°C)	Ts (°C)	Tf_2 (°C)	Tg_1 (°C)	Tg_2 (°C)	Tg_3 (°C)	Tg_4 (°C)	Tg_5 (°C)	Tg_6 (°C)	Tg (°C)	Tamb (°C)	Tf_2-Tinlet (°C)
7:00	26.1	29.50	28.50	29.40	29.45	28.90	29.20	29.40	29.20	29.40	29.40	29.30	29.32	26.70	2.80
7:10	26.9	29.70	28.80	29.50	29.60	29.20	29.30	29.30	29.50	29.80	29.80	29.70	29.57	27.40	2.30
7:20	27.3	30.00	29.20	29.80	29.90	29.60	29.50	29.70	29.40	29.70	29.70	29.60	29.60	27.60	2.30
7:30	27.9	30.00	29.40	29.80	29.90	29.70	29.70	29.70	29.40	29.60	29.70	29.60	29.62	27.70	1.80
7:40	28.6	30.10	29.60	30.00	30.05	29.90	29.70	29.90	29.50	29.60	29.70	29.60	29.67	28.10	1.30
7:50	28.1	30.10	29.50	29.90	30.00	29.80	29.70	29.90	29.40	29.60	29.70	29.60	29.65	29.00	1.70
8:00	28.6	30.00	29.80	29.80	29.90	29.80	29.70	29.80	29.50	29.70	29.80	29.70	29.70	29.00	1.20
8:10	28.5	30.00	29.70	29.80	29.90	29.90	29.70	29.80	29.50	29.70	29.80	29.70	29.70	28.80	1.40
8:20	28.9	30.10	29.70	29.80	29.95	29.80	29.80	29.90	29.30	29.50	29.60	29.40	29.58	28.90	0.90
8:30	29.1	30.00	29.70	29.90	29.95	29.90	29.90	29.90	29.50	29.60	29.80	29.60	29.72	29.60	0.80
8:40	28.60	29.80	29.50	29.70	29.75	29.70	29.80	29.90	29.30	29.50	29.60	29.50	29.60	28.80	1.10
8:50	28.80	29.80	29.50	29.70	29.75	29.70	29.80	29.80	29.30	29.50	29.50	29.40	29.55	29.10	0.90
9:00	28.70	29.90	29.70	29.90	29.90	29.90	30.00	30.00	29.20	29.30	29.30	29.30	29.52	29.90	1.20
9:10	29.30	29.90	29.80	29.80	29.85	29.90	30.00	30.00	29.10	29.20	29.30	29.20	29.47	29.50	0.60
9:20	29.30	29.90	29.80	29.80	29.85	30.00	30.00	30.00	29.10	29.20	29.30	29.20	29.47	30.30	0.70
9:30	29.60	30.00	29.90	29.80	29.90	30.00	30.00	30.00	29.20	29.30	29.40	29.30	29.53	30.50	0.40
9:40	29.60	30.00	30.00	29.90	29.95	30.10	30.00	30.00	29.20	29.30	29.40	29.30	29.53	30.90	0.50

ภาคผนวก ก.2 ผลการทดลองกรณีเปิดวาล์วมุม 45° (ต่อ)

45 Degree SamplingTime	Tinlet (°C)	Ts_1 (°C)	Tf_1 (°C)	Ts_2 (°C)	Ts (°C)	Tf_2 (°C)	Tg_1 (°C)	Tg_2 (°C)	Tg_3 (°C)	Tg_4 (°C)	Tg_5 (°C)	Tg_6 (°C)	Tg (°C)	Tamb (°C)	Tf_2-Tinlet (°C)
9:50	30.40	30.10	30.30	30.10	30.10	30.20	29.90	30.00	29.10	29.20	29.30	29.20	29.45	31.40	-0.20
10:00	30.40	30.00	30.40	30.00	30.00	30.20	30.00	30.00	29.30	29.40	29.50	29.40	29.60	32.10	-0.20
10:10	31.60	30.10	30.50	30.10	30.10	30.20	29.90	30.00	29.30	29.60	29.60	29.50	29.65	31.20	-1.40
10:20	31.00	30.20	30.70	30.20	30.20	30.50	30.00	30.10	29.40	29.50	29.60	29.60	29.70	31.80	-0.50
10:30	31.50	30.20	30.70	30.20	30.20	30.40	30.10	30.10	29.20	29.50	29.50	29.40	29.63	32.70	-1.10
10:40	31.50	29.90	30.60	30.00	29.95	30.30	29.90	29.90	29.30	29.40	29.40	29.40	29.55	32.60	-1.20
10:50	32.10	30.10	30.90	30.30	30.20	30.50	30.00	30.10	29.20	29.40	29.40	29.40	29.58	35.10	-1.60
11:00	33.30	30.20	31.20	30.30	30.25	30.60	30.10	30.10	29.30	29.40	29.60	29.40	29.65	34.30	-2.70
11:10	32.30	30.20	31.30	30.50	30.35	30.70	30.00	30.10	29.40	29.50	29.50	29.50	29.67	32.80	-1.60
11:20	33.30	30.20	31.40	30.50	30.35	30.70	30.10	30.10	29.30	29.50	29.50	29.40	29.65	33.60	-2.60
11:30	31.80	30.30	31.30	30.60	30.45	30.80	30.20	30.30	29.30	29.50	29.40	29.30	29.67	33.50	-1.00
11:40	32.90	30.10	31.10	30.30	30.20	30.60	30.00	30.00	29.40	29.60	29.60	29.50	29.68	32.90	-2.30
11:50	31.90	30.20	31.10	30.40	30.30	30.70	30.10	30.10	29.30	29.40	29.40	29.30	29.60	34.10	-1.20
12:00	32.00	30.20	31.20	30.50	30.35	30.70	30.20	30.20	29.30	29.40	29.40	29.40	29.65	32.10	-1.30
12:10	32.90	30.20	31.20	30.50	30.35	30.70	30.30	30.30	29.10	29.20	29.10	29.10	29.52	32.40	-2.20
12:20	33.20	30.00	31.20	30.30	30.15	30.50	30.00	30.00	29.10	29.20	29.20	29.10	29.43	33.10	-2.70
12:30	32.10	30.20	31.30	30.50	30.35	30.80	30.30	30.20	29.30	29.50	29.40	29.40	29.68	33.60	-1.30

ภาคผนวก ก.2 ผลการทดลองกรณีเปิดวาล์วมุม 45° (ต่อ)

45 Degree SamplingTime	Tinlet (°C)	Ts_1 (°C)	Tf_1 (°C)	Ts_2 (°C)	Ts (°C)	Tf_2 (°C)	Tg_1 (°C)	Tg_2 (°C)	Tg_3 (°C)	Tg_4 (°C)	Tg_5 (°C)	Tg_6 (°C)	Tg (°C)	Tamb (°C)	Tf_2-Tinlet (°C)
12:40	32.20	30.10	31.30	30.50	30.30	30.70	30.00	30.00	29.40	29.50	29.40	29.40	29.62	33.70	-1.50
12:50	33.20	30.00	31.40	30.30	30.15	30.70	30.00	29.90	29.40	29.50	29.30	29.40	29.58	34.20	-2.50
13:00	32.60	30.20	31.50	30.50	30.35	30.90	30.10	30.10	29.30	29.50	29.30	29.30	29.60	34.50	-1.70
13:10	33.30	30.30	31.80	30.70	30.50	31.10	30.00	30.10	29.40	29.60	29.40	29.50	29.67	34.00	-2.20
13:20	33.60	30.40	31.80	30.60	30.50	30.90	30.10	30.10	29.40	29.50	29.40	29.30	29.63	33.20	-2.70
13:30	32.90	30.30	31.60	30.70	30.50	31.00	30.30	30.30	29.30	29.50	29.30	29.30	29.67	33.70	-1.90
13:40	32.90	30.20	31.60	30.70	30.45	30.90	30.20	30.20	29.40	29.50	29.40	29.30	29.67	34.20	-2.00
13:50	32.70	30.00	31.30	30.40	30.20	30.70	30.10	30.00	29.30	29.40	29.20	29.20	29.53	33.60	-2.00
14:00	34.30	30.10	31.60	30.50	30.30	30.80	29.90	29.90	29.30	29.40	29.30	29.20	29.50	34.30	-3.50
14:10	33.30	30.40	31.80	30.80	30.60	31.10	30.20	30.20	29.30	29.50	29.40	29.30	29.65	33.90	-2.20
14:20	35.10	30.40	32.00	30.80	30.60	31.10	29.90	30.10	29.30	29.40	29.30	29.30	29.55	34.70	-4.00
14:30	33.30	30.30	31.70	30.80	30.55	31.00	30.20	30.10	29.60	29.70	29.50	29.40	29.75	33.50	-2.30
14:40	34.80	30.50	32.10	30.90	30.70	31.20	29.80	29.80	29.70	29.80	29.60	29.50	29.70	35.70	-3.60
14:50	33.80	30.50	31.90	30.80	30.65	31.10	30.00	30.00	29.60	29.90	29.60	29.60	29.78	33.90	-2.70
15:00	32.90	30.40	31.70	30.80	30.60	31.10	30.40	30.30	29.50	29.70	29.50	29.40	29.80	32.90	-1.80
15:10	34.80	30.00	31.50	30.40	30.20	30.70	30.00	30.00	29.50	29.50	29.30	29.30	29.60	34.20	-4.10
15:20	32.90	30.20	31.50	30.70	30.45	30.90	30.10	30.10	29.50	29.60	29.40	29.40	29.68	33.90	-2.00

ภาคผนวก ก.2 ผลการทดลองกรณีเปิดวาล์วมุม 45°(ต่อ)

45 Degree SamplingTime	Tinlet (°C)	Ts_1 (°C)	Tf_1 (°C)	Ts_2 (°C)	Ts (°C)	Tf_2 (°C)	Tg_1 (°C)	Tg_2 (°C)	Tg_3 (°C)	Tg_4 (°C)	Tg_5 (°C)	Tg_6 (°C)	Tg (°C)	Tamb (°C)	Tf_2-Tinlet (°C)
15:30	33.00	30.10	31.50	30.60	30.35	30.80	30.20	30.10	29.30	29.40	29.20	29.20	29.57	33.00	-2.20
15:40	33.00	30.10	31.40	30.50	30.30	30.80	30.00	30.00	29.40	29.50	29.30	29.30	29.58	33.00	-2.20
15:50	33.60	30.20	31.70	30.70	30.45	31.00	30.00	30.10	29.50	29.70	29.40	29.40	29.68	33.30	-2.60
16:00	33.20	30.30	31.60	30.70	30.50	31.00	30.20	30.10	29.50	29.50	29.40	29.30	29.67	33.20	-2.20
16:10	34.30	30.40	31.90	30.90	30.65	31.10	30.10	30.10	29.40	29.50	29.20	29.20	29.58	34.70	-3.20
16:20	33.70	30.40	31.90	30.70	30.55	31.10	29.80	29.80	29.70	29.90	29.70	29.60	29.75	33.90	-2.60
16:30	33.80	31.00	32.30	31.70	31.35	32.20	30.70	30.80	30.20	30.30	30.10	30.20	30.38	34.10	-1.60
16:40	33.90	31.50	32.70	32.20	31.85	33.00	31.20	31.10	30.60	30.70	30.50	30.60	30.78	34.00	-0.90
16:50	33.30	31.00	32.20	31.60	31.30	32.00	30.40	30.50	30.10	30.20	30.10	30.10	30.23	33.20	-1.30
17:00	32.80	30.70	31.80	31.30	31.00	31.50	30.10	30.10	29.70	30.00	29.60	29.50	29.83	32.80	-1.30

ภาคผนวก ก.3 ผลการทดลองกรณีเปิดวาล์วมุม 60°

60 Degree SamplingTime	Tinlet (°C)	Ts_1 (°C)	Tf_1 (°C)	Ts_2 (°C)	Ts (°C)	Tf_2 (°C)	Tg_1 (°C)	Tg_2 (°C)	Tg_3 (°C)	Tg_4 (°C)	Tg_5 (°C)	Tg_6 (°C)	Tg (°C)	Tamb (°C)	Tf_2-Tinlet (°C)
7:00	26.6	30.10	28.60	29.60	29.85	29.00	30.10	30.00	30.00	29.90	30.10	29.90	30.00	27.00	2.40
7:10	26.6	30.10	28.60	29.60	29.85	29.00	30.10	30.00	30.00	29.90	30.10	29.90	30.00	27.00	2.40
7:20	26.8	29.90	28.60	29.60	29.75	29.00	30.10	29.90	30.00	29.90	30.10	30.00	30.00	27.20	2.20
7:30	27.1	30.10	28.60	29.60	29.85	29.20	30.30	30.00	30.00	29.90	30.00	30.00	30.03	27.20	2.10
7:40	26.8	29.90	28.60	29.50	29.70	29.10	30.20	29.90	30.00	29.90	30.10	30.00	30.02	27.40	2.30
7:50	26.8	29.90	28.60	29.50	29.70	29.10	30.30	30.00	30.00	29.90	30.00	30.00	30.03	27.60	2.30
8:00	27.1	29.90	28.60	29.50	29.70	29.20	30.40	30.10	29.70	29.60	29.80	29.70	29.88	27.80	2.10
8:10	27.1	29.70	28.60	29.30	29.50	29.10	30.20	29.90	29.90	29.70	29.90	29.80	29.90	27.90	2.00
8:20	27.5	29.90	28.60	29.60	29.75	29.30	30.40	30.10	29.70	29.60	29.70	29.70	29.87	28.00	1.80
8:30	27.8	29.90	28.60	29.60	29.75	29.40	30.40	30.10	29.70	29.60	29.80	29.70	29.88	28.30	1.60
8:40	27.8	29.70	28.60	29.40	29.55	29.30	30.20	30.00	29.80	29.70	29.80	29.80	29.88	28.20	1.50
8:50	28.20	29.80	28.60	29.60	29.70	29.50	30.50	30.10	29.60	29.40	29.70	29.60	29.82	28.50	1.30
9:00	28.90	29.90	28.60	29.60	29.75	29.70	30.30	30.10	29.50	29.30	29.60	29.50	29.72	28.90	0.80
9:10	28.50	29.90	28.60	29.70	29.80	29.80	30.30	30.10	29.70	29.60	29.80	29.70	29.87	29.90	1.30
9:20	29.20	30.00	28.60	29.70	29.85	29.90	30.20	30.00	29.80	29.70	29.90	29.90	29.92	30.30	0.70
9:30	29.80	30.30	28.60	30.10	30.20	30.30	30.40	30.30	29.80	29.70	29.90	29.80	29.98	30.30	0.50
9:40	30.40	30.20	28.60	30.10	30.15	30.30	30.40	30.20	29.80	29.70	29.90	29.90	29.98	31.50	-0.10

ภาคผนวก ก.3 ผลการทดลองกรณีเปิดวาล์วมุม 60° (ต่อ)

60 Degree SamplingTime	Tinlet (°C)	Ts_1 (°C)	Tf_1 (°C)	Ts_2 (°C)	Ts (°C)	Tf_2 (°C)	Tg_1 (°C)	Tg_2 (°C)	Tg_3 (°C)	Tg_4 (°C)	Tg_5 (°C)	Tg_6 (°C)	Tg (°C)	Tamb (°C)	Tf_2-Tinlet (°C)
9:50	29.90	30.30	28.60	30.10	30.20	30.40	30.60	30.30	29.80	29.70	29.80	29.80	30.00	30.90	0.50
10:00	30.10	30.40	28.60	30.30	30.35	30.70	30.70	30.50	29.50	29.40	29.60	29.60	29.88	31.00	0.60
10:10	30.60	30.20	28.60	30.10	30.15	30.50	30.70	30.40	29.50	29.40	29.60	29.50	29.85	33.10	-0.10
10:20	29.90	30.20	28.60	30.10	30.15	30.50	30.50	30.20	29.50	29.30	29.40	29.60	29.75	33.10	0.60
10:30	31.40	30.20	28.60	30.20	30.20	30.80	30.40	30.10	29.80	29.60	29.70	29.70	29.88	33.20	-0.60
10:40	32.90	30.40	28.60	30.40	30.40	31.10	30.60	30.40	29.70	29.60	29.70	29.60	29.93	34.70	-1.80
10:50	31.20	30.20	28.60	30.30	30.25	30.90	30.50	30.20	29.70	29.60	29.60	29.60	29.87	33.20	-0.30
11:00	31.70	30.30	28.60	30.50	30.40	31.20	30.60	30.30	29.40	29.30	29.30	29.30	29.70	33.10	-0.50
11:10	31.20	30.20	28.60	30.50	30.35	31.10	30.60	30.30	29.40	29.20	29.20	29.30	29.67	31.90	-0.10
11:20	32.40	30.20	28.60	30.40	30.30	31.10	30.40	30.10	29.30	29.20	29.10	29.10	29.53	32.80	-1.30
11:30	32.30	30.20	28.60	30.50	30.35	31.30	30.50	30.10	29.60	29.50	29.50	29.50	29.78	33.40	-1.00
11:40	31.70	30.20	28.60	30.50	30.35	31.20	30.80	30.50	29.40	29.20	29.20	29.20	29.72	33.10	-0.50
11:50	31.90	30.00	28.60	30.40	30.20	31.10	30.60	30.10	29.60	29.30	29.30	29.30	29.70	33.30	-0.80
12:00	32.90	30.10	28.60	30.50	30.30	31.10	30.50	30.10	29.70	29.50	29.50	29.40	29.78	33.70	-1.80
12:10	32.20	30.30	28.60	30.60	30.45	31.30	30.50	30.10	29.50	29.30	29.30	29.30	29.67	33.40	-0.90
12:20	32.50	30.40	28.60	30.60	30.50	31.40	30.30	30.00	29.70	29.60	29.40	29.50	29.75	34.60	-1.10
12:30	31.80	30.50	28.60	30.80	30.65	31.50	30.60	30.30	29.70	29.60	29.50	29.50	29.87	32.20	-0.30

ภาคผนวก ก.3 ผลการทดลองกรณีเปิดวาล์วมุม 60° (ต่อ)

60 Degree SamplingTime	Tinlet (°C)	Ts_1 (°C)	Tf_1 (°C)	Ts_2 (°C)	Ts (°C)	Tf_2 (°C)	Tg_1 (°C)	Tg_2 (°C)	Tg_3 (°C)	Tg_4 (°C)	Tg_5 (°C)	Tg_6 (°C)	Tg (°C)	Tamb (°C)	Tf_2-Tinlet (°C)
12:40	33.20	30.50	28.60	30.70	30.60	31.30	30.50	30.20	29.90	29.70	29.60	29.60	29.92	32.80	-1.90
12:50	32.20	30.20	28.60	30.50	30.35	31.10	30.40	30.00	29.70	29.40	29.30	29.20	29.67	32.90	-1.10
13:00	32.60	30.10	28.60	30.40	30.25	31.10	30.00	29.70	29.80	29.50	29.40	29.40	29.63	33.00	-1.50
13:10	32.50	30.30	28.60	30.60	30.45	31.20	30.20	30.00	29.50	29.30	29.10	29.10	29.53	33.40	-1.30
13:20	33.40	30.10	28.60	30.30	30.20	31.10	30.30	30.00	29.80	29.40	29.30	29.20	29.67	34.20	-2.30
13:30	33.50	30.20	28.60	30.50	30.35	31.20	30.10	29.70	29.60	29.50	29.30	29.30	29.58	35.10	-2.30
13:40	33.40	30.60	28.60	30.80	30.70	31.70	30.20	30.00	29.70	29.50	29.40	29.30	29.68	34.30	-1.70
13:50	32.70	30.60	28.60	30.80	30.70	31.40	30.50	30.30	29.80	29.50	29.30	29.30	29.78	32.80	-1.30
14:00	31.80	30.30	28.60	30.60	30.45	31.30	30.40	30.20	29.80	29.60	29.30	29.30	29.77	32.50	-0.50
14:10	30.30	30.40	28.60	30.60	30.50	31.00	30.90	30.50	29.70	29.40	29.20	29.10	29.80	30.70	0.70
14:20	31.70	30.10	28.60	30.40	30.25	30.90	30.50	30.10	29.50	29.30	29.10	29.10	29.60	32.60	-0.80
14:30	30.60	30.10	28.60	30.30	30.20	30.60	30.50	30.20	29.80	29.50	29.30	29.20	29.75	31.80	0.00
14:40	31.20	30.20	28.60	30.30	30.25	30.80	30.50	30.30	29.70	29.40	29.20	29.10	29.70	31.90	-0.40
14:50	31.70	30.20	28.60	30.40	30.30	30.80	30.50	30.30	29.70	29.40	29.40	29.20	29.75	31.80	-0.90
15:00	30.40	30.20	28.60	30.30	30.25	30.60	30.70	30.40	29.90	29.50	29.30	29.30	29.85	30.40	0.20
15:10	30.60	30.00	28.60	30.10	30.05	30.50	30.60	30.20	29.50	29.10	29.00	28.90	29.55	30.90	-0.10
15:20	30.00	29.90	28.60	30.10	30.00	30.40	30.40	30.10	29.70	29.40	29.30	29.20	29.68	30.50	0.40

ภาคผนวก ก.3 ผลการทดลองกรณีเปิดวาล์วมุม 60° (ต่อ)

60 Degree SamplingTime	Tinlet (°C)	Ts_1 (°C)	Tf_1 (°C)	Ts_2 (°C)	Ts (°C)	Tf_2 (°C)	Tg_1 (°C)	Tg_2 (°C)	Tg_3 (°C)	Tg_4 (°C)	Tg_5 (°C)	Tg_6 (°C)	Tg (°C)	Tamb (°C)	Tf_2-Tinlet (°C)
15:40	31.20	30.20	28.60	30.20	30.20	30.70	29.40	29.10	30.10	29.80	29.70	29.60	29.62	33.40	-0.50
15:50	32.80	30.80	28.60	30.90	30.85	31.50	29.70	29.40	30.50	30.30	30.20	30.10	30.03	33.90	-1.30
16:00	33.70	31.20	28.60	31.40	31.30	32.00	29.70	29.40	30.70	30.70	30.50	30.50	30.25	35.60	-1.70
16:10	33.20	31.40	28.60	31.60	31.50	32.40	30.00	29.70	30.80	30.70	30.50	30.50	30.37	34.30	-0.80
16:20	31.90	30.90	28.60	31.00	30.95	31.60	30.60	30.30	30.60	30.50	30.30	30.20	30.42	33.00	-0.30
16:30	32.00	30.60	28.60	30.90	30.75	31.80	30.90	30.50	30.10	29.90	29.80	29.70	30.15	32.60	-0.20
16:40	31.80	30.50	28.60	30.90	30.70	31.50	30.70	30.40	29.80	29.50	29.30	29.30	29.83	31.60	-0.30
16:50	30.80	30.10	28.60	30.50	30.30	31.00	30.60	30.10	29.60	29.40	29.30	29.20	29.70	31.10	0.20
17:00	30.40	30.10	28.60	30.20	30.15	30.70	30.80	30.50	29.30	29.10	28.90	28.90	29.58	30.50	0.30

ภาคผนวก ก.4 ผลการทดลองกรณีเปิดวาล์วมุม 90°

90 Degree SamplingTime	Tinlet (°C)	Ts_1 (°C)	Tf_1 (°C)	Ts_2 (°C)	Ts (°C)	Tf_2 (°C)	Tg_1 (°C)	Tg_2 (°C)	Tg_3 (°C)	Tg_4 (°C)	Tg_5 (°C)	Tg_6 (°C)	Tg (°C)	Tamb (°C)	Tf_2-Tinlet (°C)
7:00	26	29.80	28.20	29.60	29.70	28.90	30.00	29.80	29.80	29.80	30.00	29.80	29.87	27.00	2.90
7:10	26	29.80	28.20	29.60	29.70	28.90	30.00	29.80	29.80	29.80	30.00	29.80	29.87	27.00	2.90
7:20	26.5	29.90	28.30	29.60	29.75	28.90	30.30	30.10	30.00	30.00	30.20	30.00	30.10	27.70	2.40
7:30	26.7	29.70	28.50	29.50	29.60	29.10	30.10	29.80	29.90	29.80	30.10	30.00	29.95	27.70	2.40
7:40	27	30.00	29.00	29.60	29.80	29.40	30.60	30.00	29.80	29.80	30.00	29.90	30.02	27.70	2.40
7:50	27.9	30.20	29.20	30.00	30.10	29.80	30.60	30.20	29.80	29.80	30.00	29.90	30.05	27.90	1.90
8:00	27.7	30.40	29.40	30.20	30.30	30.10	30.70	30.30	30.10	30.10	30.40	30.30	30.32	28.30	2.40
8:10	27.8	30.30	29.50	30.20	30.25	30.10	30.70	30.30	30.10	30.00	30.30	30.20	30.27	28.50	2.30
8:20	28	30.70	29.70	30.60	30.65	30.50	30.90	30.50	30.40	30.20	30.60	30.50	30.52	28.40	2.50
8:30	28.2	30.50	29.60	30.40	30.45	30.30	30.70	30.30	30.30	30.10	30.50	30.30	30.37	28.70	2.10
8:40	28.4	30.50	29.80	30.50	30.50	30.50	30.70	30.30	30.30	30.10	30.40	30.30	30.35	28.80	2.10
8:50	28.50	30.60	29.90	30.70	30.65	30.60	30.70	30.30	30.50	30.40	30.70	30.50	30.52	28.70	2.10
9:00	29.40	30.50	30.10	30.40	30.45	30.50	30.50	30.20	30.00	29.90	30.20	30.00	30.13	29.80	1.10
9:10	29.90	30.30	30.10	30.20	30.25	30.40	30.50	30.10	29.80	29.70	30.10	30.00	30.03	29.80	0.50
9:20	28.90	30.70	30.30	30.80	30.75	31.10	30.90	30.40	30.20	29.80	30.20	30.40	30.32	28.90	2.20
9:30	29.40	30.90	30.40	31.00	30.95	31.20	31.10	30.60	30.40	30.30	30.60	30.50	30.58	29.50	1.80
9:40	29.50	30.50	30.40	30.60	30.55	30.70	30.50	30.10	29.90	29.80	30.10	29.90	30.05	30.20	1.20

ภาคผนวก ก.4 ผลการทดลองกรณีเปิดวาล์วมุม 90° (ต่อ)

90 Degree SamplingTime	Tinlet (°C)	Ts_1 (°C)	Tf_1 (°C)	Ts_2 (°C)	Ts (°C)	Tf_2 (°C)	Tg_1 (°C)	Tg_2 (°C)	Tg_3 (°C)	Tg_4 (°C)	Tg_5 (°C)	Tg_6 (°C)	Tg (°C)	Tamb (°C)	Tf_2-Tinlet (°C)
9:50	29.20	30.60	30.30	30.50	30.55	30.80	30.60	30.20	30.10	30.00	30.20	30.10	30.20	29.80	1.60
10:00	28.90	30.60	30.20	30.60	30.60	30.80	30.70	30.20	30.20	30.10	30.40	30.20	30.30	29.60	1.90
10:10	29.20	30.70	30.40	30.70	30.70	30.90	30.70	30.30	30.10	30.00	30.30	30.20	30.27	29.80	1.70
10:20	28.70	30.60	30.30	30.70	30.65	30.80	30.60	30.30	30.10	29.90	30.20	30.10	30.20	30.00	2.10
10:30	30.00	30.80	30.80	30.90	30.85	31.40	30.70	30.30	30.10	30.00	30.40	30.30	30.30	30.40	1.40
10:40	30.50	30.50	30.90	30.50	30.50	31.00	30.50	30.20	29.90	29.80	30.10	30.00	30.08	31.60	0.50
10:50	31.60	30.70	31.40	30.90	30.80	31.50	30.60	30.20	30.20	30.10	30.40	30.30	30.30	31.80	-0.10
11:00	29.90	30.70	31.00	31.00	30.85	31.40	30.90	30.40	30.30	30.20	30.50	30.30	30.43	30.50	1.50
11:10	30.90	30.90	31.20	31.10	31.00	31.60	30.90	30.50	30.20	30.00	30.40	30.20	30.37	32.00	0.70
11:20	31.40	30.80	31.50	31.00	30.90	31.50	30.60	30.30	30.10	30.10	30.20	30.10	30.23	33.10	0.10
11:30	32.00	31.10	31.90	31.40	31.25	32.10	30.70	30.30	30.30	30.30	30.60	30.50	30.45	32.40	0.10
11:40	32.20	31.20	32.20	31.60	31.40	32.20	30.70	30.30	30.40	30.40	30.60	30.50	30.48	33.40	0.00
11:50	31.70	31.50	32.00	31.90	31.70	32.40	31.00	30.60	30.60	30.50	30.60	30.60	30.65	31.50	0.70
12:00	31.30	31.10	31.50	31.40	31.25	31.70	30.80	30.30	30.30	30.10	30.40	30.20	30.35	31.80	0.40
12:10	31.70	31.00	31.60	31.30	31.15	31.80	30.70	30.30	30.30	30.20	30.40	30.30	30.37	32.40	0.10
12:20	31.30	31.00	31.70	31.40	31.20	32.00	30.70	30.30	30.30	30.20	30.40	30.20	30.35	31.60	0.70
12:30	32.90	30.80	32.00	31.20	31.00	31.80	30.50	30.10	30.20	30.10	30.30	30.20	30.23	33.40	-1.10

ภาคผนวก ก.4 ผลการทดลองกรณีเปิดวาล์วมุม 90° (ต่อ)

90 Degree SamplingTime	Tinlet (°C)	Ts_1 (°C)	Tf_1 (°C)	Ts_2 (°C)	Ts (°C)	Tf_2 (°C)	Tg_1 (°C)	Tg_2 (°C)	Tg_3 (°C)	Tg_4 (°C)	Tg_5 (°C)	Tg_6 (°C)	Tg (°C)	Tamb (°C)	Tf_2-Tinlet (°C)
12:40	32.30	31.00	32.10	31.50	31.25	32.20	30.50	30.00	30.30	30.30	30.40	30.30	30.30	32.80	-0.10
12:50	33.10	31.10	32.10	31.50	31.30	32.10	30.50	30.00	30.30	30.30	30.40	30.30	30.30	33.30	-1.00
13:00	32.20	31.10	32.20	31.50	31.30	32.30	30.70	30.20	30.40	30.30	30.50	30.40	30.42	32.70	0.10
13:10	32.80	31.20	32.40	31.60	31.40	32.30	30.60	30.20	30.40	30.30	30.50	30.30	30.38	33.50	-0.50
13:20	33.60	31.30	32.60	31.80	31.55	32.40	30.60	30.10	30.30	30.30	30.40	30.30	30.33	34.20	-1.20
13:30	33.20	31.20	32.60	31.60	31.40	32.40	30.40	30.00	30.30	30.30	30.40	30.30	30.28	33.40	-0.80
13:40	32.80	31.30	32.60	31.80	31.55	32.60	30.50	30.10	30.40	30.30	30.50	30.40	30.37	33.50	-0.20
13:50	33.30	31.40	32.60	31.80	31.60	32.50	30.60	30.30	30.20	30.10	30.20	30.10	30.25	33.80	-0.80
14:00	33.40	31.20	32.50	31.70	31.45	32.30	30.60	30.20	30.60	30.40	30.50	30.30	30.43	34.90	-1.10
14:10	33.10	31.30	32.70	31.80	31.55	32.60	30.60	30.20	30.60	30.40	30.50	30.40	30.45	34.60	-0.50
14:20	33.80	31.40	33.00	31.90	31.65	32.90	30.60	30.20	30.50	30.50	30.50	30.40	30.45	34.40	-0.90
14:30	34.40	31.70	33.20	32.20	31.95	33.30	30.50	30.10	30.70	30.60	30.60	30.50	30.50	34.50	-1.10
14:40	34.00	32.00	33.50	32.60	32.30	33.50	30.60	30.30	30.80	30.80	30.90	30.80	30.70	34.30	-0.50
14:50	33.60	31.60	33.10	32.20	31.90	33.20	30.50	30.10	30.70	30.50	30.60	30.50	30.48	34.10	-0.40
15:00	34.30	32.20	33.60	32.90	32.55	33.80	30.90	30.50	31.30	31.10	31.20	31.00	31.00	34.60	-0.50
15:10	33.80	32.30	33.30	32.80	32.55	33.30	31.10	30.70	31.40	31.10	31.10	30.90	31.05	33.60	-0.50
15:20	33.10	31.70	32.70	32.10	31.90	32.80	30.60	30.30	30.90	30.70	30.80	30.60	30.65	33.30	-0.30

ภาคผนวก ก.4 ผลการทดลองกรณีเปิดวาล์วมุม 90° (ต่อ)

90 Degree SamplingTime	Tinlet (°C)	Ts_1 (°C)	Tf_1 (°C)	Ts_2 (°C)	Ts (°C)	Tf_2 (°C)	Tg_1 (°C)	Tg_2 (°C)	Tg_3 (°C)	Tg_4 (°C)	Tg_5 (°C)	Tg_6 (°C)	Tg (°C)	Tamb (°C)	Tf_2-Tinlet (°C)
15:30	33.70	31.70	32.90	32.10	31.90	32.80	29.30	29.00	30.70	30.60	30.70	30.50	30.13	33.90	-0.90
15:40	32.30	32.10	32.90	32.60	32.35	33.30	31.00	30.60	31.40	31.30	31.40	31.20	31.15	32.70	1.00
15:50	31.10	31.60	31.90	32.00	31.80	32.50	30.60	30.20	31.20	31.00	31.10	31.00	30.85	31.50	1.40
16:00	30.30	31.30	31.30	31.50	31.40	31.60	30.60	30.20	30.80	30.50	30.60	30.40	30.52	30.30	1.30
16:10	30.90	30.90	31.10	31.20	31.05	31.20	30.40	30.10	30.20	30.00	30.10	29.90	30.12	30.50	0.30
16:20	30.20	30.90	31.00	31.10	31.00	31.10	30.50	30.20	30.40	30.20	30.30	30.10	30.28	30.20	0.90
16:30	30.00	30.90	30.80	31.00	30.95	31.20	30.50	30.20	30.40	30.20	30.30	30.10	30.28	29.90	1.20
16:40	30.20	30.90	30.80	31.00	30.95	31.00	30.50	30.20	30.50	30.30	30.40	30.20	30.35	30.40	0.80
16:50	30.00	30.70	30.70	30.90	30.80	30.90	30.40	30.10	30.30	30.20	30.20	30.10	30.22	30.00	0.90
17:00	29.90	30.90	30.70	31.00	30.95	31.10	30.60	30.30	30.20	30.10	30.20	30.00	30.23	29.70	1.20

ภาคผนวก ข.1 ผลการทดลองในกรณีดินมีความชื้นน้อยที่สุด

Time	Tinlet (°C)	Ts_1 (°C)	Tf_1 (°C)	Ts_2 (°C)	Ts (°C)	Tf_2 (°C)	Tg_1 (°C)	Tg_2 (°C)	Tg_3 (°C)	Tg_4 (°C)	Tg_5 (°C)	Tg_6 (°C)	Tg (°C)	Tamb (°C)	Tf_2-Tinlet (°C)
7.00	24.9	28.90	27.90	28.60	28.75	28.20	29.10	28.80	29.00	29.00	28.90	29.00	28.97	25.10	3.70
7.10	26.1	29.30	28.40	29.20	29.25	28.60	29.20	29.00	29.30	29.30	29.20	29.40	29.23	26.00	3.10
7.20	26.1	29.50	28.70	29.40	29.45	29.00	29.40	29.20	29.30	29.20	29.30	29.40	29.30	26.10	3.30
7.30	26.5	29.50	28.90	29.50	29.50	29.10	29.40	29.30	29.20	29.10	29.10	29.40	29.25	26.60	3.00
7.40	26.8	29.70	29.00	29.60	29.65	29.20	29.50	29.30	29.10	29.10	29.10	29.30	29.23	26.40	2.80
7.50	26.8	29.70	29.00	29.60	29.65	29.20	29.50	29.30	29.10	29.10	29.10	29.30	29.23	27.40	2.80
8.00	27.6	29.70	29.20	29.70	29.70	29.30	29.60	29.30	29.40	29.30	29.40	29.50	29.42	28.90	2.10
8.10	27.6	29.80	29.30	29.80	29.80	29.40	29.60	29.40	29.30	29.30	29.30	29.50	29.40	28.90	2.20
8.20	28	29.60	29.40	29.50	29.55	29.30	29.50	29.30	29.30	29.30	29.30	29.50	29.37	29.40	1.50
8.30	28.8	29.90	29.70	29.80	29.85	29.60	29.70	29.60	29.40	29.30	29.40	29.50	29.48	29.20	1.00
8.40	28.60	29.80	29.60	29.60	29.70	29.50	29.70	29.60	29.30	29.30	29.30	29.50	29.45	29.40	1.00
8.50	28.80	29.70	29.70	29.60	29.65	29.50	29.60	29.50	29.30	29.20	29.20	29.50	29.38	28.80	0.80
9.00	29.00	29.80	29.70	29.80	29.80	29.50	29.80	29.70	29.40	29.20	29.20	29.40	29.45	29.10	0.80
9.10	29.20	29.80	29.60	29.70	29.75	29.60	29.80	29.70	29.30	29.10	29.10	29.30	29.38	29.20	0.50
9.20	29.20	29.60	29.70	29.50	29.55	29.50	29.50	29.40	29.10	29.00	29.00	29.20	29.20	29.90	0.30
9.30	31.10	29.80	30.10	29.70	29.75	29.70	29.70	29.60	29.30	29.20	29.20	29.20	29.37	29.80	-1.40
9.40	31.80	29.80	30.20	29.80	29.80	29.90	29.70	29.50	29.20	29.10	29.10	29.20	29.30	31.20	-2.00

ภาคผนวก ข.1 ผลการทดลองในกรณีดินมีความชื้นน้อยที่สุด (ต่อ)

Time	Tinlet (°C)	Ts_1 (°C)	Tf_1 (°C)	Ts_2 (°C)	Ts (°C)	Tf_2 (°C)	Tg_1 (°C)	Tg_2 (°C)	Tg_3 (°C)	Tg_4 (°C)	Tg_5 (°C)	Tg_6 (°C)	Tg (°C)	Tamb (°C)	Tf_2-Tinlet (°C)
9.50	31.10	29.60	30.20	29.60	29.60	29.90	29.80	29.40	29.20	29.10	29.10	29.20	29.30	31.20	-1.50
10.00	32.00	29.80	30.40	29.80	29.80	29.80	29.70	29.50	29.30	29.20	29.20	29.30	29.37	31.40	-2.20
10.10	30.90	29.60	30.10	29.60	29.60	29.70	29.60	29.40	29.10	29.00	28.90	29.10	29.18	31.20	-1.30
10.20	30.20	29.80	30.30	29.80	29.80	29.80	29.60	29.60	29.10	29.00	28.90	29.10	29.22	31.20	-0.40
10.30	33.50	29.80	30.70	29.90	29.85	30.00	29.70	29.60	29.30	29.10	29.00	29.30	29.33	32.50	-3.60
10.40	33.80	29.90	30.90	30.10	30.00	30.10	29.60	29.60	29.40	29.30	29.10	29.30	29.38	32.90	-3.70
10.50	33.10	29.80	31.00	30.00	29.90	30.30	29.70	29.70	29.30	29.20	29.10	29.30	29.38	32.30	-3.10
11.00	30.90	29.80	30.60	29.90	29.85	30.10	29.70	29.60	29.20	29.10	29.00	29.20	29.30	32.60	-1.00
11.10	30.90	29.60	30.20	29.70	29.65	29.80	29.60	29.50	29.30	29.10	28.90	29.10	29.25	30.90	-1.20
11.20	31.80	29.80	30.60	29.80	29.80	29.90	29.70	29.60	29.30	29.10	29.00	29.10	29.30	32.90	-2.00
11.30	31.10	29.90	30.50	29.90	29.90	30.10	29.70	29.60	29.40	29.20	29.00	29.20	29.35	31.20	-1.20
11.40	33.20	29.90	30.70	29.90	29.90	30.10	29.70	29.60	29.50	29.30	29.00	29.30	29.40	33.50	-3.30
11.50	33.10	29.90	31.00	30.00	29.95	30.30	29.70	29.50	29.40	29.20	29.10	29.20	29.35	33.20	-3.10
12.00	32.80	29.80	30.90	29.90	29.85	30.10	29.60	29.50	29.30	29.20	29.00	29.20	29.30	33.50	-2.90
12.10	32.90	30.00	31.10	30.10	30.05	30.30	29.70	29.50	29.30	29.20	29.00	29.20	29.32	34.70	-2.80
12.20	34.50	30.00	31.40	30.10	30.05	30.30	29.70	29.50	29.40	29.30	29.00	29.20	29.35	33.20	-4.40
12.30	34.10	30.00	31.10	30.10	30.05	30.30	29.60	29.50	29.30	29.20	29.00	29.20	29.30	34.50	-4.00

ภาคผนวก ข.1 ผลการทดลองในกรณีดินมีความชื้นน้อยที่สุด (ต่อ)

Time	Tinlet (°C)	Ts_1 (°C)	Tf_1 (°C)	Ts_2 (°C)	Ts (°C)	Tf_2 (°C)	Tg_1 (°C)	Tg_2 (°C)	Tg_3 (°C)	Tg_4 (°C)	Tg_5 (°C)	Tg_6 (°C)	Tg (°C)	Tamb (°C)	Tf_2-Tinlet (°C)
12.40	34.80	30.30	31.60	30.30	30.30	30.50	29.70	29.60	29.50	29.40	29.10	29.40	29.45	34.40	-4.50
12.50	32.80	30.10	31.30	30.30	30.20	30.50	29.60	29.50	29.50	29.30	29.10	29.30	29.38	34.80	-2.50
13.00	33.80	30.20	31.40	30.30	30.25	30.60	29.60	29.50	29.50	29.30	29.10	29.30	29.38	35.20	-3.50
13.10	34.30	30.30	31.50	30.40	30.35	30.70	29.80	29.70	29.50	29.40	29.20	29.30	29.48	34.50	-3.90
13.20	34.00	30.00	31.30	30.30	30.15	30.50	29.80	29.60	29.60	29.40	29.10	29.30	29.47	33.70	-3.70
13.30	33.80	30.20	31.20	30.40	30.30	30.60	29.90	29.80	29.60	29.30	29.20	29.40	29.53	33.40	-3.40
13.40	35.90	30.20	31.70	30.40	30.30	30.50	29.70	29.70	29.50	29.30	29.00	29.30	29.42	35.10	-5.50
13.50	33.00	30.10	31.40	30.40	30.25	30.50	29.80	29.70	29.50	29.30	29.10	29.30	29.45	33.30	-2.60
14.00	35.10	30.10	31.60	30.30	30.20	30.50	29.60	29.50	29.50	29.40	29.10	29.30	29.40	34.70	-4.80
14.10	33.50	30.30	31.50	30.50	30.40	30.70	29.90	29.80	29.40	29.30	29.00	29.20	29.43	33.20	-3.00
14.20	34.30	30.30	31.60	30.40	30.35	30.70	29.80	29.70	29.60	29.50	29.20	29.40	29.53	33.90	-3.90
14.30	34.30	30.20	31.40	30.40	30.30	30.50	29.80	29.70	29.60	29.40	29.20	29.30	29.50	33.60	-3.90
14.40	33.70	30.00	31.10	30.20	30.10	30.30	29.60	29.50	29.60	29.30	29.10	29.30	29.40	33.80	-3.50
14.50	33.40	30.10	31.10	30.20	30.15	30.50	29.80	29.70	29.70	29.50	29.20	29.40	29.55	32.70	-3.20
15.00	32.10	29.80	30.80	30.00	29.90	30.10	29.50	29.50	29.50	29.30	29.00	29.20	29.33	32.20	-2.10
15.10	32.80	30.10	30.90	30.20	30.15	30.40	29.80	29.70	29.40	29.20	28.90	29.10	29.35	32.10	-2.60
15.20	32.40	29.90	30.70	30.00	29.95	30.20	29.60	29.70	29.60	29.30	29.00	29.20	29.40	32.10	-2.40

ภาคผนวก ข.1 ผลการทดลองในกรณีดินมีความชื้นน้อยที่สุด

Time	Tinlet (°C)	Ts_1 (°C)	Tf_1 (°C)	Ts_2 (°C)	Ts (°C)	Tf_2 (°C)	Tg_1 (°C)	Tg_2 (°C)	Tg_3 (°C)	Tg_4 (°C)	Tg_5 (°C)	Tg_6 (°C)	Tg (°C)	Tamb (°C)	Tf_2-Tinlet (°C)
15.30	32.20	29.90	30.60	30.10	30.00	30.10	29.80	29.70	29.50	29.30	29.00	29.20	29.42	32.20	-2.10
15.40	31.80	30.00	30.60	30.10	30.05	30.10	29.70	29.60	29.40	29.30	28.90	29.10	29.33	31.70	-1.70
15.50	31.90	30.00	30.60	30.10	30.05	30.20	29.90	29.80	29.30	29.10	28.70	29.00	29.30	31.60	-1.80
16.00	31.50	30.00	30.60	30.10	30.05	30.20	29.80	29.80	29.40	29.20	28.90	29.10	29.37	31.60	-1.40
16.10	31.50	30.00	30.50	30.00	30.00	30.10	29.80	29.70	29.50	29.30	28.90	29.10	29.38	31.60	-1.50
16.20	31.30	30.00	30.50	30.00	30.00	30.10	29.80	29.70	29.20	29.00	28.70	28.90	29.22	31.30	-1.30
16.30	31.30	29.90	30.40	29.90	29.90	30.00	29.60	29.50	29.50	29.30	29.00	29.20	29.35	31.50	-1.40
16.40	31.70	30.00	30.50	30.10	30.05	30.10	29.70	29.60	29.40	29.30	29.00	29.20	29.37	31.60	-1.60
16.50	32.20	30.20	30.80	30.20	30.20	30.40	29.60	29.50	29.50	29.30	29.00	29.20	29.35	32.80	-2.00
17.00	32.30	30.00	30.70	30.10	30.05	30.20	29.40	29.30	29.40	29.40	29.10	29.30	29.32	33.00	-2.20

ภาคผนวก ข.2 ผลการทดลองในกรณีดินมีความชื้นปานกลาง

Time	Tinlet (°C)	Ts_1 (°C)	Tf_1 (°C)	Ts_2 (°C)	Ts (°C)	Tf_2 (°C)	Tg_1 (°C)	Tg_2 (°C)	Tg_3 (°C)	Tg_4 (°C)	Tg_5 (°C)	Tg_6 (°C)	Tg (°C)	Tamb (°C)	Tf_2-Tinlet (°C)
7.00	24.3	30.00	28.50	29.90	29.95	28.90	30.10	29.70	29.80	29.40	29.50	30.10	29.77	24.30	5.60
7.10	25.4	30.40	28.90	30.20	30.30	29.40	30.30	29.90	30.00	29.80	29.90	30.40	30.05	25.20	4.80
7.20	25.5	30.50	29.10	30.30	30.40	29.50	30.40	30.00	30.00	29.60	29.90	30.30	30.03	25.30	4.80
7.30	25.1	30.30	29.00	30.10	30.20	29.50	30.30	29.90	30.20	30.00	30.00	30.50	30.15	25.70	5.00
7.40	25.3	30.30	29.00	30.20	30.25	29.50	30.30	29.90	30.10	29.80	29.90	30.40	30.07	25.70	4.90
7.50	26.2	30.40	29.20	30.20	30.30	29.60	30.30	29.90	30.00	29.70	29.90	30.30	30.02	26.20	4.00
8.00	26.3	30.60	29.40	30.30	30.45	29.90	30.50	30.10	30.10	29.80	29.90	30.40	30.13	26.30	4.00
8.10	26.2	30.50	29.10	30.20	30.35	29.70	30.40	30.00	30.00	29.70	29.80	30.30	30.03	26.00	4.00
8.20	26.1	30.30	29.10	30.00	30.15	29.60	30.30	29.90	30.00	29.70	29.80	30.30	30.00	27.10	3.90
8.30	27.8	30.50	29.70	30.30	30.40	30.00	30.60	30.20	30.00	29.60	29.80	30.30	30.08	27.20	2.50
8.40	28.50	30.30	29.70	30.10	30.20	29.80	30.40	30.00	29.80	29.40	29.70	30.10	29.90	28.30	1.60
8.50	27.90	30.50	29.80	30.20	30.35	29.90	30.50	30.10	30.00	29.70	29.90	30.30	30.08	27.10	2.30
9.00	29.50	30.40	30.00	30.10	30.25	29.90	30.30	29.90	29.90	29.50	29.80	30.30	29.95	28.50	0.60
9.10	28.70	30.50	30.00	30.20	30.35	30.00	30.50	30.00	30.00	29.70	29.80	30.30	30.05	27.70	1.50
9.20	28.60	30.50	30.00	30.20	30.35	30.10	30.50	30.10	30.00	29.60	29.70	30.20	30.02	27.80	1.60
9.30	28.50	30.50	30.10	30.30	30.40	30.10	30.60	30.10	30.00	29.60	29.70	30.20	30.03	28.80	1.80
9.40	28.10	30.30	29.80	30.00	30.15	29.90	30.20	29.90	29.90	29.50	29.60	30.10	29.87	28.40	1.90

ภาคผนวก ข.2 ผลการทดลองในกรณีดินมีความชื้นปานกลาง (ต่อ)

Time	Tinlet (°C)	Ts_1 (°C)	Tf_1 (°C)	Ts_2 (°C)	Ts (°C)	Tf_2 (°C)	Tg_1 (°C)	Tg_2 (°C)	Tg_3 (°C)	Tg_4 (°C)	Tg_5 (°C)	Tg_6 (°C)	Tg (°C)	Tamb (°C)	Tf_2-Tinlet (°C)
9.50	29.10	30.30	30.00	30.10	30.20	29.90	30.40	29.90	29.80	29.40	29.50	30.10	29.85	29.00	1.00
10.00	29.40	30.50	30.20	30.40	30.45	30.10	30.50	30.10	29.90	29.40	29.50	30.10	29.92	29.20	1.00
10.10	29.90	30.50	30.40	30.20	30.35	30.10	30.40	29.90	29.90	29.60	29.60	30.20	29.93	29.10	0.30
10.20	31.80	30.70	30.60	30.50	30.60	30.50	30.50	30.10	30.00	29.70	29.70	30.20	30.03	30.20	-1.30
10.30	32.20	30.70	30.80	30.50	30.60	30.50	30.50	30.20	30.00	29.70	29.70	30.30	30.07	30.50	-1.70
10.40	30.40	30.60	30.60	30.40	30.50	30.30	30.40	29.90	30.00	29.70	29.80	30.30	30.02	30.20	0.00
10.50	31.90	30.40	30.60	30.20	30.30	30.20	30.20	29.80	30.00	29.60	29.80	30.00	29.90	30.10	-1.70
11.00	31.50	30.60	30.80	30.40	30.50	30.50	30.30	29.90	30.00	29.70	29.70	30.20	29.97	30.40	-1.10
11.10	32.10	30.80	31.00	30.60	30.70	30.60	30.50	30.20	30.10	29.70	29.70	30.20	30.07	30.90	-1.50
11.20	32.10	30.50	30.90	30.40	30.45	30.40	30.30	29.90	29.90	29.60	29.60	30.10	29.90	30.30	-1.70
11.30	31.90	30.80	31.10	30.60	30.70	30.70	30.50	30.10	30.20	29.70	29.80	30.20	30.08	31.20	-1.30
11.40	32.20	30.60	31.00	30.50	30.55	30.60	30.40	30.00	30.00	29.60	29.60	30.10	29.95	30.70	-1.70
11.50	32.40	30.80	31.20	30.60	30.70	30.80	30.50	30.10	30.10	29.70	29.70	30.20	30.05	31.50	-1.80
12.00	32.30	30.60	31.10	30.60	30.60	30.60	30.40	30.00	30.10	29.70	29.70	30.20	30.02	31.60	-1.70
12.10	32.50	30.70	31.20	30.50	30.60	30.60	30.40	30.00	30.10	29.70	29.70	30.10	30.00	32.00	-2.00
12.20	33.20	30.80	31.30	30.70	30.75	30.80	30.40	30.00	30.10	29.80	29.80	30.20	30.05	32.10	-2.50
12.30	32.40	30.90	31.40	30.80	30.85	30.90	30.40	30.10	30.20	29.80	29.80	30.30	30.10	31.50	-1.60

ภาคผนวก ข.2 ผลการทดลองในกรณีดินมีความชื้นปานกลาง (ต่อ)

Time	Tinlet (°C)	Ts_1 (°C)	Tf_1 (°C)	Ts_2 (°C)	Ts (°C)	Tf_2 (°C)	Tg_1 (°C)	Tg_2 (°C)	Tg_3 (°C)	Tg_4 (°C)	Tg_5 (°C)	Tg_6 (°C)	Tg (°C)	Tamb (°C)	Tf_2-Tinlet (°C)
12.40	32.60	30.80	31.30	30.80	30.80	30.80	30.40	30.00	30.20	29.80	29.80	30.40	30.10	31.50	-1.80
12.50	32.80	30.80	31.20	30.60	30.70	30.80	30.30	29.80	30.20	29.90	29.80	30.20	30.03	32.20	-2.20
13.00	33.20	30.90	31.50	30.80	30.85	31.00	30.40	30.10	30.20	29.90	29.80	30.30	30.12	31.90	-2.40
13.10	33.60	31.00	31.70	31.00	31.00	31.20	30.60	30.30	30.30	30.00	30.00	30.50	30.28	33.30	-2.60
13.20	34.00	31.00	31.70	30.90	30.95	31.30	30.60	30.30	30.40	30.10	30.00	30.50	30.32	32.80	-3.10
13.30	33.60	30.90	31.70	30.90	30.90	31.20	30.60	30.10	30.20	29.90	29.90	30.40	30.18	32.70	-2.70
13.40	33.40	31.00	31.70	30.90	30.95	31.30	30.70	30.30	30.50	30.20	30.10	30.60	30.40	33.00	-2.50
13.50	33.30	31.10	31.80	31.10	31.10	31.50	30.90	30.50	30.40	30.10	30.00	30.50	30.40	33.20	-2.20
14.00	34.10	31.10	31.90	31.10	31.10	31.50	30.60	30.30	30.40	30.10	30.10	30.50	30.33	33.00	-3.00
14.10	33.60	31.10	31.70	31.00	31.05	31.30	30.60	30.30	30.30	30.00	29.90	30.40	30.25	32.70	-2.60
14.20	34.30	31.10	31.90	31.10	31.10	31.40	30.50	30.10	30.40	30.10	30.10	30.50	30.28	33.80	-3.20
14.30	33.20	31.10	31.90	31.00	31.05	31.40	30.50	30.10	30.30	30.10	29.90	30.40	30.22	33.70	-2.20
14.40	33.00	31.10	31.70	31.10	31.10	31.30	30.90	30.50	30.40	30.10	29.90	30.40	30.37	32.10	-1.90
14.50	32.40	30.80	31.30	30.80	30.80	31.00	30.70	30.40	30.20	29.90	29.70	30.20	30.18	31.80	-1.60
15.00	32.40	31.00	31.40	30.80	30.90	31.10	31.10	30.70	30.30	29.90	29.70	30.20	30.32	31.60	-1.60
15.10	32.00	30.60	31.00	30.60	30.60	30.70	30.70	30.40	30.10	29.60	29.50	30.00	30.05	31.40	-1.40
15.20	31.80	30.70	30.80	30.50	30.60	30.80	30.80	30.50	30.10	29.60	29.40	29.90	30.05	31.00	-1.30

ภาคผนวก ข.2 ผลการทดลองในกรณีดินมีความชื้นปานกลาง (ต่อ)

Time	Tinlet (°C)	Ts_1 (°C)	Tf_1 (°C)	Ts_2 (°C)	Ts (°C)	Tf_2 (°C)	Tg_1 (°C)	Tg_2 (°C)	Tg_3 (°C)	Tg_4 (°C)	Tg_5 (°C)	Tg_6 (°C)	Tg (°C)	Tamb (°C)	Tf_2-Tinlet (°C)
15.30	31.70	30.80	31.10	30.70	30.75	30.70	31.00	30.50	30.10	29.60	29.50	29.90	30.10	31.00	-1.00
15.40	31.40	30.80	31.00	30.70	30.75	30.80	30.90	30.50	30.10	29.60	29.50	29.90	30.08	31.00	-0.70
15.50	31.20	30.70	30.90	30.60	30.65	30.60	30.80	30.40	30.20	29.70	29.50	30.00	30.10	31.00	-0.60
16.00	31.70	30.70	31.00	30.60	30.65	30.70	30.30	30.10	30.10	29.70	29.60	30.00	29.97	31.90	-1.10
16.10	32.40	30.70	31.00	30.60	30.65	30.70	30.20	29.80	30.10	29.80	29.70	30.00	29.93	32.50	-1.80
16.20	32.30	31.00	31.30	30.90	30.95	31.10	30.40	30.00	30.30	29.90	29.90	30.30	30.13	32.10	-1.40
16.30	32.50	31.10	31.40	30.90	31.00	31.20	30.50	30.20	30.40	30.10	30.00	30.40	30.27	32.20	-1.60
16.40	31.70	30.70	31.10	30.70	30.70	30.90	30.40	30.10	30.20	29.90	29.80	30.20	30.10	31.80	-1.00
16.50	31.70	31.00	31.10	30.90	30.95	31.00	31.00	30.60	30.40	30.00	29.90	30.30	30.37	31.30	-0.80
17.00	31.10	30.70	30.80	30.60	30.65	30.60	30.80	30.50	29.90	29.50	29.40	29.90	30.00	30.50	-0.50

ภาคผนวก ข.3 ผลการทดลองในกรณีดินมีความชื้นมากที่สุด

Time	Tinlet (°C)	Ts_1 (°C)	Tf_1 (°C)	Ts_2 (°C)	Ts (°C)	Tf_2 (°C)	Tg_1 (°C)	Tg_2 (°C)	Tg_3 (°C)	Tg_4 (°C)	Tg_5 (°C)	Tg_6 (°C)	Tg (°C)	Tamb (°C)	Tf_2-Tinlet (°C)
7.00	24	28.90	27.50	28.80	28.85	28.00	28.70	28.70	28.30	28.60	28.50	28.50	28.55	23.90	4.80
7.10	24.2	29.00	27.70	28.80	28.90	28.30	28.60	28.80	28.50	28.60	28.70	28.60	28.63	23.90	4.60
7.20	24.3	28.90	27.60	28.70	28.80	28.20	28.60	28.80	28.60	28.80	28.80	28.70	28.72	24.20	4.40
7.30	24.5	29.10	27.70	28.80	28.95	28.30	28.70	28.80	28.50	28.60	28.60	28.50	28.62	24.00	4.30
7.40	24.5	29.10	27.70	28.90	29.00	28.40	28.80	28.90	28.40	28.60	28.50	28.50	28.62	23.90	4.40
7.50	24.3	29.00	27.70	28.60	28.80	28.10	28.70	28.90	28.40	28.60	28.60	28.60	28.63	24.10	4.30
8.00	24.5	28.90	27.60	28.60	28.75	28.10	28.80	28.90	28.50	28.60	28.60	28.50	28.65	24.40	4.10
8.10	24.6	29.00	27.70	28.70	28.85	28.20	28.90	29.00	28.50	28.50	28.60	28.50	28.67	24.40	4.10
8.20	24.6	28.90	27.40	28.50	28.70	28.00	28.70	28.80	28.50	28.50	28.50	28.50	28.58	24.60	3.90
8.30	25.10	28.90	27.70	28.70	28.80	28.30	28.80	28.90	28.30	28.40	28.50	28.50	28.57	24.80	3.60
8.40	25.00	28.90	27.70	28.60	28.75	28.20	28.70	28.70	28.60	28.60	28.80	28.90	28.72	25.50	3.60
8.50	25.40	29.10	27.80	28.70	28.90	28.30	28.90	29.00	28.50	28.60	28.60	28.50	28.68	25.40	3.30
9.00	25.30	28.80	27.70	28.60	28.70	28.20	28.60	28.70	28.40	28.50	28.50	28.50	28.53	25.60	3.30
9.10	25.40	28.90	27.80	28.70	28.80	28.30	28.80	28.80	28.30	28.40	28.40	28.40	28.52	25.60	3.30
9.20	25.80	29.00	27.90	28.70	28.85	28.40	28.80	28.90	28.40	28.50	28.50	28.50	28.60	26.00	2.90
9.30	26.10	29.10	28.00	28.80	28.95	28.50	28.90	29.00	28.50	28.50	28.50	28.50	28.65	26.20	2.70
9.40	25.90	29.00	28.00	28.70	28.85	28.30	28.80	28.90	28.40	28.40	28.40	28.40	28.55	26.50	2.80

ภาคผนวก ข.3 ผลการทดลองในกรณีดินมีความชื้นมากที่สุด (ต่อ)

Time	Tinlet (°C)	Ts_1 (°C)	Tf_1 (°C)	Ts_2 (°C)	Ts (°C)	Tf_2 (°C)	Tg_1 (°C)	Tg_2 (°C)	Tg_3 (°C)	Tg_4 (°C)	Tg_5 (°C)	Tg_6 (°C)	Tg (°C)	Tamb (°C)	Tf_2-Tinlet (°C)
9.50	26.60	29.00	28.20	28.80	28.90	28.50	28.90	29.00	28.40	28.40	28.50	28.40	28.60	26.70	2.20
10.00	26.20	29.00	28.20	28.80	28.90	28.50	28.90	28.90	28.50	28.50	28.50	28.50	28.63	27.10	2.60
10.10	26.80	28.90	28.20	28.60	28.75	28.40	28.70	28.80	28.20	28.30	28.30	28.20	28.42	27.70	1.80
10.20	27.10	28.90	28.30	28.70	28.80	28.50	28.80	28.80	28.30	28.30	28.40	28.30	28.48	27.50	1.60
10.30	27.50	29.20	28.60	29.00	29.10	28.70	29.00	29.10	28.40	28.50	28.50	28.50	28.67	27.80	1.50
10.40	27.30	29.10	28.50	28.80	28.95	28.70	28.90	29.00	28.50	28.50	28.60	28.60	28.68	27.90	1.50
10.50	27.70	29.20	28.60	28.90	29.05	28.80	28.90	29.00	28.50	28.50	28.60	28.50	28.67	28.70	1.20
11.00	27.80	29.20	28.80	29.00	29.10	28.90	29.00	29.00	28.50	28.60	28.60	28.60	28.72	28.20	1.20
11.10	28.30	29.10	28.80	28.90	29.00	28.80	28.90	28.90	28.60	28.60	28.70	28.60	28.72	29.10	0.60
11.20	27.70	29.10	28.80	28.90	29.00	28.80	28.80	29.00	28.60	28.60	28.60	28.60	28.70	29.60	1.20
11.30	27.90	29.00	28.80	28.90	28.95	28.80	28.80	28.80	28.50	28.60	28.60	28.50	28.63	29.20	1.00
11.40	28.60	29.10	28.90	28.80	28.95	28.90	28.70	28.80	28.30	28.40	28.40	28.30	28.48	28.60	0.20
11.50	29.10	29.30	29.10	29.00	29.15	29.00	28.80	29.00	28.50	28.60	28.60	28.50	28.67	29.00	-0.10
12.00	29.60	29.10	29.20	28.90	29.00	29.00	28.80	28.90	28.50	28.60	28.60	28.60	28.67	30.30	-0.70
12.10	30.70	29.30	29.50	29.20	29.25	29.20	28.70	28.80	28.70	28.70	28.70	28.70	28.72	30.50	-1.50
12.20	30.60	29.30	29.60	29.10	29.20	29.20	28.90	29.00	28.70	28.80	28.80	28.70	28.82	30.50	-1.50
12.30	29.50	29.50	29.50	29.20	29.35	29.30	28.90	29.10	28.70	28.90	28.80	28.70	28.85	30.60	-0.30

ภาคผนวก ข.3 ผลการทดลองในกรณีดินมีความชื้นมากที่สุด (ต่อ)

Time	Tinlet (°C)	Ts_1 (°C)	Tf_1 (°C)	Ts_2 (°C)	Ts (°C)	Tf_2 (°C)	Tg_1 (°C)	Tg_2 (°C)	Tg_3 (°C)	Tg_4 (°C)	Tg_5 (°C)	Tg_6 (°C)	Tg (°C)	Tamb (°C)	Tf_2-Tinlet (°C)
12.40	30.10	29.20	29.40	29.00	29.10	29.10	28.80	28.80	28.50	28.60	28.50	28.40	28.60	31.40	-1.10
12.50	30.20	29.60	29.50	29.30	29.45	29.40	28.90	29.20	28.70	28.80	28.70	28.70	28.83	32.10	-0.90
13.00	30.00	29.40	29.70	29.30	29.35	29.30	29.10	29.10	28.70	28.70	28.70	28.60	28.82	30.80	-0.70
13.10	30.60	29.40	29.70	29.30	29.35	29.40	28.80	29.00	28.70	28.80	28.70	28.70	28.78	31.10	-1.30
13.20	30.80	29.40	29.60	29.20	29.30	29.30	28.90	29.00	28.70	28.80	28.60	28.60	28.77	29.90	-1.60
13.30	31.60	29.40	29.70	29.20	29.30	29.30	29.00	29.10	28.70	28.80	28.70	28.60	28.82	30.40	-2.40
13.40	30.40	29.50	29.70	29.40	29.45	29.50	29.00	29.10	28.60	28.70	28.60	28.60	28.77	30.40	-1.00
13.50	30.50	29.30	29.50	29.20	29.25	29.30	28.90	29.00	28.70	28.80	28.60	28.60	28.77	30.90	-1.30
14.00	30.20	29.30	29.60	29.10	29.20	29.20	28.80	28.80	28.60	28.80	28.60	28.60	28.70	31.70	-1.10
14.10	30.50	29.40	29.70	29.30	29.35	29.30	28.90	29.00	28.60	28.60	28.50	28.40	28.67	30.70	-1.20
14.20	30.50	29.60	29.80	29.50	29.55	29.60	28.90	29.10	28.80	28.90	28.70	28.70	28.85	31.90	-1.00
14.30	30.70	29.40	29.80	29.30	29.35	29.40	28.70	28.90	28.70	28.90	28.70	28.60	28.75	31.20	-1.40
14.40	31.50	29.60	30.00	29.50	29.55	29.70	28.80	28.90	28.90	29.00	28.70	28.80	28.85	31.90	-2.00
14.50	31.10	29.50	29.90	29.40	29.45	29.60	28.70	28.80	28.90	29.00	28.80	28.80	28.83	31.70	-1.70
15.00	31.30	29.60	30.10	29.60	29.60	29.70	28.90	29.00	29.00	29.10	28.90	28.80	28.95	31.60	-1.70
15.10	31.40	29.50	30.10	29.50	29.50	29.70	28.60	28.80	29.00	29.10	28.80	28.70	28.83	32.50	-1.90
15.20	31.30	29.70	30.20	29.60	29.65	29.80	28.80	28.90	29.10	29.20	29.00	29.00	29.00	32.70	-1.70

ภาคผนวก ข.3 ผลการทดลองในกรณีดินมีความชื้นมากที่สุด (ต่อ)

Time	Tinlet (°C)	Ts_1 (°C)	Tf_1 (°C)	Ts_2 (°C)	Ts (°C)	Tf_2 (°C)	Tg_1 (°C)	Tg_2 (°C)	Tg_3 (°C)	Tg_4 (°C)	Tg_5 (°C)	Tg_6 (°C)	Tg (°C)	Tamb (°C)	Tf_2-Tinlet (°C)
15.30	30.90	29.50	30.00	29.50	29.50	29.60	28.50	28.70	28.90	29.00	28.80	28.80	28.78	32.30	-1.40
15.40	31.70	29.80	30.40	29.70	29.75	30.00	28.80	28.90	29.10	29.20	29.00	29.00	29.00	32.80	-2.00
15.50	30.90	29.60	30.10	29.60	29.60	29.80	28.70	28.90	29.10	29.20	29.00	28.90	28.97	32.10	-1.30
16.00	30.40	29.60	29.90	29.50	29.55	29.60	29.00	29.10	29.00	29.10	28.90	28.80	28.98	30.80	-0.90
16.10	29.60	29.50	29.50	29.30	29.40	29.30	28.90	29.10	28.90	28.90	28.70	28.70	28.87	30.10	-0.30
16.20	29.50	29.50	29.40	29.20	29.35	29.30	29.00	29.20	29.00	28.90	28.60	28.60	28.88	29.70	-0.30
16.30	29.20	29.50	29.30	29.30	29.40	29.20	29.20	29.30	28.80	28.70	28.40	28.40	28.80	29.20	0.10
16.40	29.10	29.20	29.00	29.00	29.10	28.90	28.90	29.00	28.60	28.60	28.30	28.20	28.60	29.30	-0.10
16.50	29.50	29.20	29.00	29.00	29.10	29.00	28.90	29.00	28.60	28.60	28.30	28.30	28.62	29.70	-0.50
17.00	29.10	29.20	29.00	28.90	29.05	28.90	28.90	29.10	28.60	28.60	28.40	28.30	28.65	28.90	-0.20

ภาคผนวก ก.1 ผลการคำนวณสมรรถนะการทำความเย็นของท่อใต้ดินแบบตัวยู กรณีดินมีความชื้นน้อยที่สุด

Time	Dia. Tube (m)	Length (m)	Area (m ²)	Vel (m/s)	ra (kg/m ³)	Cp (J/kg-K)	m (N-s/m ²)	k (W/m-K)	n (m ² /s)	Pr	Re	Nu _p	h (W/m ² -K)	m (kg/s)	Q (W)	COP
7.00	0.08	12.50	0.005	4.05	1.18751	1006.728	0.00003095	0.02603	1.57400E-05	0.70949	20584.50	58.59	19.06	0.02417	80.31	0.67
7.10	0.08	12.50	0.005	4.05	1.18273	1006.772	0.00003101	0.02612	1.58500E-05	0.70919	20441.64	58.26	19.02	0.02408	60.60	0.51
7.20	0.08	12.50	0.005	4.05	1.18273	1006.772	0.00003101	0.02612	1.58500E-05	0.70919	20441.64	58.26	19.02	0.02408	70.30	0.59
7.30	0.08	12.50	0.005	4.05	1.18115	1006.787	0.00003102	0.02615	1.58900E-05	0.70909	20390.18	58.14	19.01	0.02405	62.94	0.52
7.40	0.08	12.50	0.005	4.05	1.17996	1006.798	0.00003104	0.02618	1.59200E-05	0.70901	20351.76	58.05	18.99	0.02402	58.04	0.48
7.50	0.08	12.50	0.005	4.05	1.17996	1006.798	0.00003104	0.02618	1.59200E-05	0.70901	20351.76	58.05	18.99	0.02402	58.04	0.48
8.00	0.08	12.50	0.005	4.05	1.17681	1006.828	0.00003107	0.02624	1.59900E-05	0.70881	20262.66	57.84	18.97	0.02396	41.01	0.34
8.10	0.08	12.50	0.005	4.05	1.17681	1006.828	0.00003107	0.02624	1.59900E-05	0.70881	20262.66	57.84	18.97	0.02396	43.42	0.36
8.20	0.08	12.50	0.005	4.05	1.17525	1006.843	0.00003109	0.02627	1.60300E-05	0.70871	20212.10	57.72	18.95	0.02393	31.32	0.26
8.30	0.08	12.50	0.005	4.05	1.17212	1006.872	0.00003113	0.02633	1.61000E-05	0.70851	20124.22	57.52	18.93	0.02386	19.22	0.16
8.40	0.08	12.50	0.005	4.05	1.17290	1006.865	0.00003112	0.02632	1.60900E-05	0.70856	20136.73	57.55	18.93	0.02388	21.64	0.18
8.50	0.08	12.50	0.005	4.05	1.17212	1006.872	0.00003113	0.02633	1.61000E-05	0.70851	20124.22	57.52	18.93	0.02386	16.82	0.14
9.00	0.08	12.50	0.005	4.05	1.17134	1006.880	0.00003114	0.02635	1.61200E-05	0.70846	20099.26	57.46	18.92	0.02385	12.00	0.10
9.10	0.08	12.50	0.005	4.05	1.17057	1006.887	0.00003115	0.02636	1.61400E-05	0.70841	20074.35	57.40	18.92	0.02383	9.60	0.08
9.20	0.08	12.50	0.005	4.05	1.17057	1006.887	0.00003115	0.02636	1.61400E-05	0.70841	20074.35	57.40	18.92	0.02383	7.20	0.06
9.30	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16323	1006.957	0.00003124	0.02651	1.63200E-05	0.70794	19852.94	56.88	18.85	0.02368	-33.38	-0.28

ภาคผนวก ก.1 ผลการคำนวณสมรรถนะการทำความเย็นของท่อใต้ดินแบบตัวยู กรณีดินมีความชื้นน้อยที่สุด (ต่อ)

Time	Dia. Tube (m)	Length (m)	Area (m ²)	Vel (m/s)	ra (kg/m ³)	Cp (J/kg-K)	m (N-s/m ²)	k (W/m-K)	n (m ² /s)	Pr	Re	Nu _D	h (W/m ² -K)	m (kg/s)	Q (W)	COP
9.40	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16055	1006.983	0.00003127	0.02656	1.63900E-05	0.70776	19768.15	56.68	18.82	0.02363	-45.20	-0.38
9.50	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16323	1006.957	0.00003124	0.02651	1.63200E-05	0.70794	19852.94	56.88	18.85	0.02368	-28.61	-0.24
10.00	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15979	1006.991	0.00003128	0.02658	1.64100E-05	0.70771	19744.06	56.63	18.81	0.02361	-52.31	-0.44
10.10	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16400	1006.950	0.00003123	0.02649	1.63000E-05	0.70799	19877.30	56.94	18.86	0.02370	-28.63	-0.24
10.20	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16669	1006.924	0.00003119	0.02644	1.62400E-05	0.70816	19950.74	57.11	18.88	0.02375	-9.57	-0.08
10.30	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15410	1007.046	0.00003135	0.02670	1.65500E-05	0.70734	19577.04	56.24	18.77	0.02349	-82.81	-0.69
10.40	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15296	1007.057	0.00003136	0.02672	1.65800E-05	0.70726	19541.62	56.15	18.75	0.02347	-87.46	-0.73
10.50	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15561	1007.031	0.00003133	0.02667	1.65100E-05	0.70744	19624.47	56.35	18.78	0.02353	-66.33	-0.55
11.00	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16400	1006.950	0.00003123	0.02649	1.63000E-05	0.70799	19877.30	56.94	18.86	0.02370	-19.09	-0.16
11.10	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16400	1006.950	0.00003123	0.02649	1.63000E-05	0.70799	19877.30	56.94	18.86	0.02370	-26.25	-0.22
11.20	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16055	1006.983	0.00003127	0.02656	1.63900E-05	0.70776	19768.15	56.68	18.82	0.02363	-45.20	-0.38
11.30	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16323	1006.957	0.00003124	0.02651	1.63200E-05	0.70794	19852.94	56.88	18.85	0.02368	-23.85	-0.20
11.40	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15523	1007.035	0.00003133	0.02667	1.65200E-05	0.70741	19612.59	56.32	18.78	0.02352	-73.42	-0.61
11.50	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15561	1007.031	0.00003133	0.02667	1.65100E-05	0.70744	19624.47	56.35	18.78	0.02353	-66.33	-0.55
12.00	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15675	1007.020	0.00003131	0.02664	1.64800E-05	0.70751	19660.19	56.43	18.79	0.02355	-64.03	-0.53
12.10	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15637	1007.024	0.00003132	0.02665	1.64900E-05	0.70749	19648.27	56.40	18.79	0.02354	-61.64	-0.51

ภาคผนวก ก.1 ผลการคำนวณสมรรถนะการทำความเย็นของท่อใต้ดินแบบตัวยู กรณีดินมีความชื้นน้อยที่สุด (ต่อ)

Time	Dia. Tube (m)	Length (m)	Area (m ²)	Vel (m/s)	ra (kg/m ³)	Cp (J/kg-K)	m (N-s/m ²)	k (W/m-K)	n (m ² /s)	Pr	Re	Nu _p	h (W/m ² -K)	m (kg/s)	Q (W)	COP
12.20	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15033	1007.083	0.00003139	0.02677	1.66400E-05	0.70709	19471.15	55.99	18.74	0.02342	-99.05	-0.83
12.30	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15184	1007.068	0.00003137	0.02674	1.66100E-05	0.70719	19506.32	56.07	18.74	0.02345	-89.73	-0.75
12.40	0.08	12.50	0.005	4.05	1.14921	1007.094	0.00003141	0.02680	1.66700E-05	0.70701	19436.11	55.90	18.73	0.02340	-101.31	-0.84
12.50	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15675	1007.020	0.00003131	0.02664	1.64800E-05	0.70751	19660.19	56.43	18.79	0.02355	-54.54	-0.45
13.00	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15296	1007.057	0.00003136	0.02672	1.65800E-05	0.70726	19541.62	56.15	18.75	0.02347	-75.64	-0.63
13.10	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15108	1007.076	0.00003138	0.02676	1.66200E-05	0.70714	19494.58	56.04	18.74	0.02343	-84.96	-0.71
13.20	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15221	1007.065	0.00003137	0.02673	1.66000E-05	0.70721	19518.07	56.10	18.75	0.02346	-82.68	-0.69
13.30	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15296	1007.057	0.00003136	0.02672	1.65800E-05	0.70726	19541.62	56.15	18.75	0.02347	-75.64	-0.63
13.40	0.08	12.50	0.005	4.05	1.14510	1007.135	0.00003146	0.02688	1.67800E-05	0.70674	19308.70	55.60	18.68	0.02331	-126.78	-1.06
13.50	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15599	1007.028	0.00003132	0.02666	1.65000E-05	0.70746	19636.36	56.38	18.79	0.02353	-59.25	-0.49
14.00	0.08	12.50	0.005	4.05	1.14809	1007.105	0.00003142	0.02682	1.67000E-05	0.70694	19401.20	55.82	18.71	0.02337	-108.28	-0.90
14.10	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15410	1007.046	0.00003135	0.02670	1.65500E-05	0.70734	19577.04	56.24	18.77	0.02349	-66.25	-0.55
14.20	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15108	1007.076	0.00003138	0.02676	1.66200E-05	0.70714	19494.58	56.04	18.74	0.02343	-84.96	-0.71
14.30	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15108	1007.076	0.00003138	0.02676	1.66200E-05	0.70714	19494.58	56.04	18.74	0.02343	-89.68	-0.75
14.40	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15334	1007.053	0.00003136	0.02671	1.65700E-05	0.70729	19553.41	56.18	18.76	0.02348	-80.39	-0.67
14.50	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15447	1007.042	0.00003134	0.02669	1.65400E-05	0.70736	19588.88	56.26	18.77	0.02350	-68.64	-0.57

ภาคผนวก ค.1 ผลการคำนวณสมรรถนะการทำความเย็นของท่อใต้ดินแบบตัวยู กรณีดินมีความชื้นน้อยที่สุด (ต่อ)

Time	Dia. Tube (m)	Length (m)	Area (m ²)	Vel (m/s)	ra (kg/m ³)	Cp (J/kg-K)	m (N-s/m ²)	k (W/m-K)	n (m ² /s)	Pr	Re	Nu _D	h (W/m ² -K)	m (kg/s)	Q (W)	COP
15.00	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15941	1006.994	0.00003128	0.02659	1.64200E-05	0.70769	19732.03	56.60	18.81	0.02360	-47.54	-0.40
15.10	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15675	1007.020	0.00003131	0.02664	1.64800E-05	0.70751	19660.19	56.43	18.79	0.02355	-56.91	-0.47
15.20	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15827	1007.005	0.0000313	0.02661	1.64400E-05	0.70761	19708.03	56.54	18.81	0.02358	-52.24	-0.44
15.30	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15903	1006.998	0.00003129	0.02660	1.64300E-05	0.70766	19720.02	56.57	18.81	0.02359	-49.90	-0.42
15.40	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16055	1006.983	0.00003127	0.02656	1.63900E-05	0.70776	19768.15	56.68	18.82	0.02363	-40.44	-0.34
15.50	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16017	1006.987	0.00003127	0.02657	1.64000E-05	0.70774	19756.10	56.66	18.82	0.02362	-40.43	-0.34
16.00	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16170	1006.972	0.00003125	0.02654	1.63600E-05	0.70784	19804.40	56.77	18.83	0.02365	-30.96	-0.26
16.10	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16170	1006.972	0.00003125	0.02654	1.63600E-05	0.70784	19804.40	56.77	18.83	0.02365	-33.34	-0.28
16.20	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16246	1006.965	0.00003125	0.02653	1.63400E-05	0.70789	19828.64	56.83	18.84	0.02366	-28.60	-0.24
16.30	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16246	1006.965	0.00003125	0.02653	1.63400E-05	0.70789	19828.64	56.83	18.84	0.02366	-30.98	-0.26
16.40	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16093	1006.979	0.00003126	0.02656	1.63800E-05	0.70779	19780.22	56.71	18.83	0.02363	-38.08	-0.32
16.50	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15903	1006.998	0.00003129	0.02660	1.64300E-05	0.70766	19720.02	56.57	18.81	0.02359	-42.77	-0.36
17.00	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15865	1007.002	0.00003129	0.02660	1.64400E-05	0.70764	19708.03	56.54	18.80	0.02359	-49.88	-0.42

ภาคผนวก ก.2 ผลการคำนวณสมรรถนะการทำความเย็นของท่อใต้ดินแบบตัวยู กรณีดินมีความชื้นปานกลาง

Time	Dia. Tube (m)	Length (m)	Area (m ²)	Vel (m/s)	ra (kg/m ³)	Cp (J/kg-K)	m (N-s/m ²)	k (W/m-K)	n (m ² /s)	Pr	Re	Nu _D	h (W/m ² -K)	m (kg/s)	Q (W)	COP
7.00	0.08	12.50	0.005	4.05	1.18991	1006.706	0.00003092	0.02598	1.56800E-05	0.70964	20663.27	58.78	19.09	0.02422	112.18	0.93
7.10	0.08	12.50	0.005	4.05	1.18552	1006.746	0.00003097	0.02607	1.57800E-05	0.70936	20532.32	58.47	19.05	0.02413	97.19	0.81
7.20	0.08	12.50	0.005	4.05	1.18512	1006.750	0.00003098	0.02608	1.57900E-05	0.70934	20519.32	58.44	19.05	0.02413	97.16	0.81
7.30	0.08	12.50	0.005	4.05	1.18671	1006.735	0.00003096	0.02604	1.57500E-05	0.70944	20571.43	58.56	19.06	0.02416	107.01	0.89
7.40	0.08	12.50	0.005	4.05	1.18591	1006.743	0.00003097	0.02606	1.57700E-05	0.70939	20545.34	58.50	19.06	0.02414	102.08	0.85
7.50	0.08	12.50	0.005	4.05	1.18234	1006.776	0.00003101	0.02613	1.58600E-05	0.70916	20428.75	58.23	19.02	0.02407	82.39	0.69
8.00	0.08	12.50	0.005	4.05	1.18194	1006.780	0.00003101	0.02614	1.58700E-05	0.70914	20415.88	58.20	19.01	0.02406	87.21	0.73
8.10	0.08	12.50	0.005	4.05	1.18234	1006.776	0.00003101	0.02613	1.58600E-05	0.70916	20428.75	58.23	19.02	0.02407	84.81	0.71
8.20	0.08	12.50	0.005	4.05	1.18273	1006.772	0.00003101	0.02612	1.58500E-05	0.70919	20441.64	58.26	19.02	0.02408	84.84	0.71
8.30	0.08	12.50	0.005	4.05	1.17603	1006.835	0.00003108	0.02625	1.60100E-05	0.70876	20237.35	57.78	18.96	0.02394	53.03	0.44
8.40	0.08	12.50	0.005	4.05	1.17329	1006.861	0.00003112	0.02631	1.60800E-05	0.70859	20149.25	57.58	18.93	0.02389	31.26	0.26
8.50	0.08	12.50	0.005	4.05	1.17564	1006.839	0.00003109	0.02626	1.60200E-05	0.70874	20224.72	57.75	18.96	0.02393	48.19	0.40
9.00	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16940	1006.898	0.00003116	0.02639	1.61700E-05	0.70834	20037.11	57.31	18.90	0.02381	9.59	0.08
9.10	0.08	12.50	0.005	4.05	1.17251	1006.868	0.00003113	0.02632	1.60900E-05	0.70854	20136.73	57.55	18.94	0.02387	31.24	0.26
9.20	0.08	12.50	0.005	4.05	1.17290	1006.865	0.00003112	0.02632	1.60900E-05	0.70856	20136.73	57.55	18.93	0.02388	36.06	0.30
9.30	0.08	12.50	0.005	4.05	1.17329	1006.861	0.00003112	0.02631	1.60800E-05	0.70859	20149.25	57.58	18.93	0.02389	38.48	0.32

ภาคผนวก ก.1 ผลการคำนวณสมรรถนะการทำความร้อนของท่อใต้ดินแบบตัวยู กรณีดินมีความชื้นปานกลาง (ต่อ)

Time	Dia. Tube (m)	Length (m)	Area (m ²)	Vel (m/s)	ra (kg/m ³)	Cp (J/kg-K)	m (N-s/m ²)	k (W/m-K)	n (m ² /s)	Pr	Re	Nu _D	h (W/m ² -K)	m (kg/s)	Q (W)	COP
9.40	0.08	12.50	0.005	4.05	1.17485	1006.846	0.0000311	0.02628	1.60400E-05	0.70869	20199.50	57.69	18.95	0.02392	43.35	0.36
9.50	0.08	12.50	0.005	4.05	1.17095	1006.883	0.00003114	0.02635	1.61300E-05	0.70844	20086.79	57.43	18.92	0.02384	19.20	0.16
10.00	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16979	1006.894	0.00003116	0.02638	1.61600E-05	0.70836	20049.50	57.34	18.91	0.02381	16.78	0.14
10.10	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16785	1006.913	0.00003118	0.02642	1.62100E-05	0.70824	19987.66	57.20	18.89	0.02377	4.79	0.04
10.20	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16055	1006.983	0.00003127	0.02656	1.63900E-05	0.70776	19768.15	56.68	18.82	0.02363	-30.93	-0.26
10.30	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15903	1006.998	0.00003129	0.02660	1.64300E-05	0.70766	19720.02	56.57	18.81	0.02359	-40.39	-0.34
10.40	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16592	1006.931	0.0000312	0.02646	1.62600E-05	0.70811	19926.20	57.06	18.87	0.02374	-2.39	-0.02
10.50	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16017	1006.987	0.00003127	0.02657	1.64000E-05	0.70774	19756.10	56.66	18.82	0.02362	-40.43	-0.34
11.00	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16170	1006.972	0.00003125	0.02654	1.63600E-05	0.70784	19804.40	56.77	18.83	0.02365	-23.81	-0.20
11.10	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15941	1006.994	0.00003128	0.02659	1.64200E-05	0.70769	19732.03	56.60	18.81	0.02360	-35.65	-0.30
11.20	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15941	1006.994	0.00003128	0.02659	1.64200E-05	0.70769	19732.03	56.60	18.81	0.02360	-40.41	-0.34
11.30	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16017	1006.987	0.00003127	0.02657	1.64000E-05	0.70774	19756.10	56.66	18.82	0.02362	-28.54	-0.24
11.40	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15903	1006.998	0.00003129	0.02660	1.64300E-05	0.70766	19720.02	56.57	18.81	0.02359	-38.02	-0.32
11.50	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15827	1007.005	0.0000313	0.02661	1.64400E-05	0.70761	19708.03	56.54	18.81	0.02358	-37.99	-0.32
12.00	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15865	1007.002	0.00003129	0.02660	1.64400E-05	0.70764	19708.03	56.54	18.80	0.02359	-40.38	-0.34
12.10	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15789	1007.009	0.0000313	0.02662	1.64500E-05	0.70759	19696.05	56.52	18.80	0.02357	-45.10	-0.38

ภาคผนวก ก.1 ผลการคำนวณสมรรถนะการทำความเย็นของท่อใต้ดินแบบตัวยู กรณีดินมีความชื้นปานกลาง (ต่อ)

Time	Dia. Tube (m)	Length (m)	Area (m ²)	Vel (m/s)	ra (kg/m ³)	Cp (J/kg-K)	m (N-s/m ²)	k (W/m-K)	n (m ² /s)	Pr	Re	Nu _D	h (W/m ² -K)	m (kg/s)	Q (W)	COP
12.20	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15523	1007.035	0.00003133	0.02667	1.65200E-05	0.70741	19612.59	56.32	18.78	0.02352	-56.84	-0.47
12.30	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15827	1007.005	0.0000313	0.02661	1.64400E-05	0.70761	19708.03	56.54	18.81	0.02358	-35.62	-0.30
12.40	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15751	1007.013	0.00003131	0.02663	1.64600E-05	0.70756	19684.08	56.49	18.80	0.02356	-42.71	-0.36
12.50	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15675	1007.020	0.00003131	0.02664	1.64800E-05	0.70751	19660.19	56.43	18.79	0.02355	-47.43	-0.40
13.00	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15523	1007.035	0.00003133	0.02667	1.65200E-05	0.70741	19612.59	56.32	18.78	0.02352	-52.10	-0.43
13.10	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15372	1007.050	0.00003135	0.02670	1.65600E-05	0.70731	19565.22	56.21	18.76	0.02349	-56.77	-0.47
13.20	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15221	1007.065	0.00003137	0.02673	1.66000E-05	0.70721	19518.07	56.10	18.75	0.02346	-63.78	-0.53
13.30	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15372	1007.050	0.00003135	0.02670	1.65600E-05	0.70731	19565.22	56.21	18.76	0.02349	-56.77	-0.47
13.40	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15447	1007.042	0.00003134	0.02669	1.65400E-05	0.70736	19588.88	56.26	18.77	0.02350	-49.70	-0.41
13.50	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15485	1007.039	0.00003134	0.02668	1.65300E-05	0.70739	19600.73	56.29	18.77	0.02351	-42.62	-0.36
14.00	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15184	1007.068	0.00003137	0.02674	1.66100E-05	0.70719	19506.32	56.07	18.74	0.02345	-61.40	-0.51
14.10	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15372	1007.050	0.00003135	0.02670	1.65600E-05	0.70731	19565.22	56.21	18.76	0.02349	-54.40	-0.45
14.20	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15108	1007.076	0.00003138	0.02676	1.66200E-05	0.70714	19494.58	56.04	18.74	0.02343	-68.44	-0.57
14.30	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15523	1007.035	0.00003133	0.02667	1.65200E-05	0.70741	19612.59	56.32	18.78	0.02352	-42.63	-0.36
14.40	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15599	1007.028	0.00003132	0.02666	1.65000E-05	0.70746	19636.36	56.38	18.79	0.02353	-40.29	-0.34
14.50	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15827	1007.005	0.0000313	0.02661	1.64400E-05	0.70761	19708.03	56.54	18.81	0.02358	-33.24	-0.28

ภาคผนวก ค.1 ผลการคำนวณสมรรถนะการทำความเย็นของท่อใต้ดินแบบด้วย กรณีนดินมีความชื้นปานกลาง (ต่อ)

Time	Dia. Tube (m)	Length (m)	Area (m ²)	Vel (m/s)	ra (kg/m ³)	Cp (J/kg-K)	m (N-s/m ²)	k (W/m-K)	n (m ² /s)	Pr	Re	Nu _D	h (W/m ² -K)	m (kg/s)	Q (W)	COP
15.00	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15827	1007.005	0.0000313	0.02661	1.64400E-05	0.70761	19708.03	56.54	18.81	0.02358	-30.87	-0.26
15.10	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15979	1006.991	0.00003128	0.02658	1.64100E-05	0.70771	19744.06	56.63	18.81	0.02361	-30.91	-0.26
15.20	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16055	1006.983	0.00003127	0.02656	1.63900E-05	0.70776	19768.15	56.68	18.82	0.02363	-23.79	-0.20
15.30	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16093	1006.979	0.00003126	0.02656	1.63800E-05	0.70779	19780.22	56.71	18.83	0.02363	-23.80	-0.20
15.40	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16208	1006.968	0.00003125	0.02653	1.63500E-05	0.70786	19816.51	56.80	18.84	0.02366	-14.29	-0.12
15.50	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16285	1006.961	0.00003124	0.02652	1.63300E-05	0.70791	19840.78	56.86	18.85	0.02367	-14.30	-0.12
16.00	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16093	1006.979	0.00003126	0.02656	1.63800E-05	0.70779	19780.22	56.71	18.83	0.02363	-23.80	-0.20
16.10	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15827	1007.005	0.0000313	0.02661	1.64400E-05	0.70761	19708.03	56.54	18.81	0.02358	-40.37	-0.34
16.20	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15865	1007.002	0.00003129	0.02660	1.64400E-05	0.70764	19708.03	56.54	18.80	0.02359	-28.50	-0.24
16.30	0.08	12.50	0.005	4.05	1.15789	1007.009	0.0000313	0.02662	1.64500E-05	0.70759	19696.05	56.52	18.80	0.02357	-30.86	-0.26
16.40	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16093	1006.979	0.00003126	0.02656	1.63800E-05	0.70779	19780.22	56.71	18.83	0.02363	-19.04	-0.16
16.50	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16093	1006.979	0.00003126	0.02656	1.63800E-05	0.70779	19780.22	56.71	18.83	0.02363	-16.66	-0.14
17.00	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16323	1006.957	0.00003124	0.02651	1.63200E-05	0.70794	19852.94	56.88	18.85	0.02368	-11.92	-0.10

ภาคผนวก ก.1 ผลการคำนวณสมรรถนะการทำความเย็นของท่อใต้ดินแบบตัวยู กรณีดินมีความชื้นมากที่สุด

Time	Dia. Tube (m)	Length (m)	Area (m ²)	Vel (m/s)	ra (kg/m ³)	Cp (J/kg-K)	m (N-s/m ²)	k (W/m-K)	n (m ² /s)	Pr	Re	Nu _D	h (W/m ² -K)	m (kg/s)	Q (W)	COP
7.00	0.08	12.50	0.005	4.05	1.19112	1006.695	0.00003091	0.02596	1.56500E-05	0.70971	20702.88	58.87	19.10	0.02425	97.64	0.81
7.10	0.08	12.50	0.005	4.05	1.19032	1006.702	0.00003092	0.02597	1.56700E-05	0.70966	20676.45	58.81	19.09	0.02423	100.02	0.83
7.20	0.08	12.50	0.005	4.05	1.18991	1006.706	0.00003092	0.02598	1.56800E-05	0.70964	20663.27	58.78	19.09	0.02422	95.11	0.79
7.30	0.08	12.50	0.005	4.05	1.18911	1006.713	0.00003093	0.02600	1.57000E-05	0.70959	20636.94	58.71	19.08	0.02421	92.61	0.77
7.40	0.08	12.50	0.005	4.05	1.18911	1006.713	0.00003093	0.02600	1.57000E-05	0.70959	20636.94	58.71	19.08	0.02421	95.04	0.79
7.50	0.08	12.50	0.005	4.05	1.18991	1006.706	0.00003092	0.02598	1.56800E-05	0.70964	20663.27	58.78	19.09	0.02422	92.67	0.77
8.00	0.08	12.50	0.005	4.05	1.18911	1006.713	0.00003093	0.02600	1.57000E-05	0.70959	20636.94	58.71	19.08	0.02421	87.73	0.73
8.10	0.08	12.50	0.005	4.05	1.18871	1006.717	0.00003094	0.02601	1.57100E-05	0.70956	20623.81	58.68	19.08	0.02420	87.70	0.73
8.20	0.08	12.50	0.005	4.05	1.18871	1006.717	0.00003094	0.02601	1.57100E-05	0.70956	20623.81	58.68	19.08	0.02420	82.83	0.69
8.30	0.08	12.50	0.005	4.05	1.18671	1006.735	0.00003096	0.02604	1.57500E-05	0.70944	20571.43	58.56	19.06	0.02416	77.83	0.65
8.40	0.08	12.50	0.005	4.05	1.18711	1006.732	0.00003095	0.02604	1.57500E-05	0.70946	20571.43	58.56	19.06	0.02417	77.85	0.65
8.50	0.08	12.50	0.005	4.05	1.18552	1006.746	0.00003097	0.02607	1.57800E-05	0.70936	20532.32	58.47	19.05	0.02413	70.46	0.59
9.00	0.08	12.50	0.005	4.05	1.18591	1006.743	0.00003097	0.02606	1.57700E-05	0.70939	20545.34	58.50	19.06	0.02414	70.48	0.59
9.10	0.08	12.50	0.005	4.05	1.18552	1006.746	0.00003097	0.02607	1.57800E-05	0.70936	20532.32	58.47	19.05	0.02413	70.46	0.59
9.20	0.08	12.50	0.005	4.05	1.18392	1006.761	0.00003099	0.02610	1.58200E-05	0.70926	20480.40	58.35	19.04	0.02410	63.09	0.53
9.30	0.08	12.50	0.005	4.05	1.18273	1006.772	0.00003101	0.02612	1.58500E-05	0.70919	20441.64	58.26	19.02	0.02408	58.18	0.48

ภาคผนวก ค.1 ผลการคำนวณสมรรถนะการทำความเย็นของท่อใต้ดินแบบตัวยู กรณีดินมีความชื้นมากที่สุด (ต่อ)

Time	Dia. Tube (m)	Length (m)	Area (m ²)	Vel (m/s)	ra (kg/m ³)	Cp (J/kg-K)	m (N-s/m ²)	k (W/m-K)	n (m ² /s)	Pr	Re	Nu _D	h (W/m ² -K)	m (kg/s)	Q (W)	COP
9.40	0.08	12.50	0.005	4.05	1.18353	1006.765	0.000031	0.02611	1.58300E-05	0.70924	20467.47	58.32	19.03	0.02409	58.22	0.49
9.50	0.08	12.50	0.005	4.05	1.18075	1006.791	0.00003103	0.02616	1.59000E-05	0.70906	20377.36	58.11	19.00	0.02404	45.98	0.38
10.00	0.08	12.50	0.005	4.05	1.18234	1006.776	0.00003101	0.02613	1.58600E-05	0.70916	20428.75	58.23	19.02	0.02407	55.73	0.46
10.10	0.08	12.50	0.005	4.05	1.17996	1006.798	0.00003104	0.02618	1.59200E-05	0.70901	20351.76	58.05	18.99	0.02402	38.70	0.32
10.20	0.08	12.50	0.005	4.05	1.17878	1006.809	0.00003105	0.02620	1.59400E-05	0.70894	20326.22	57.99	18.99	0.02400	33.82	0.28
10.30	0.08	12.50	0.005	4.05	1.17721	1006.824	0.00003107	0.02623	1.59800E-05	0.70884	20275.34	57.87	18.98	0.02397	28.95	0.24
10.40	0.08	12.50	0.005	4.05	1.17799	1006.817	0.00003106	0.02621	1.59600E-05	0.70889	20300.75	57.93	18.98	0.02398	33.80	0.28
10.50	0.08	12.50	0.005	4.05	1.17642	1006.831	0.00003108	0.02625	1.60000E-05	0.70879	20250.00	57.81	18.97	0.02395	26.52	0.22
11.00	0.08	12.50	0.005	4.05	1.17603	1006.835	0.00003108	0.02625	1.60100E-05	0.70876	20237.35	57.78	18.96	0.02394	26.52	0.22
11.10	0.08	12.50	0.005	4.05	1.17407	1006.854	0.00003111	0.02629	1.60600E-05	0.70864	20174.35	57.64	18.94	0.02390	12.03	0.10
11.20	0.08	12.50	0.005	4.05	1.17642	1006.831	0.00003108	0.02625	1.60000E-05	0.70879	20250.00	57.81	18.97	0.02395	26.52	0.22
11.30	0.08	12.50	0.005	4.05	1.17564	1006.839	0.00003109	0.02626	1.60200E-05	0.70874	20224.72	57.75	18.96	0.02393	21.69	0.18
11.40	0.08	12.50	0.005	4.05	1.17290	1006.865	0.00003112	0.02632	1.60900E-05	0.70856	20136.73	57.55	18.93	0.02388	7.21	0.06
11.50	0.08	12.50	0.005	4.05	1.17095	1006.883	0.00003114	0.02635	1.61300E-05	0.70844	20086.79	57.43	18.92	0.02384	-2.40	-0.02
12.00	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16901	1006.902	0.00003117	0.02639	1.61800E-05	0.70831	20024.72	57.29	18.90	0.02380	-14.38	-0.12
12.10	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16477	1006.942	0.00003122	0.02648	1.62800E-05	0.70804	19901.72	57.00	18.87	0.02371	-35.81	-0.30

ภาคผนวก ก.1 ผลการคำนวณสมรรถนะการทำความเย็นของท่อใต้ดินแบบตัวยู กรณีดินมีความชื้นมากที่สุด (ต่อ)

Time	Dia. Tube (m)	Length (m)	Area (m ²)	Vel (m/s)	ra (kg/m ³)	Cp (J/kg-K)	m (N-s/m ²)	k (W/m-K)	n (m ² /s)	Pr	Re	Nu _D	h (W/m ² -K)	m (kg/s)	Q (W)	COP
12.20	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16515	1006.939	0.00003121	0.02647	1.62700E-05	0.70806	19913.95	57.03	18.87	0.02372	-33.44	-0.28
12.30	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16940	1006.898	0.00003116	0.02639	1.61700E-05	0.70834	20037.11	57.31	18.90	0.02381	-4.79	-0.04
12.40	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16708	1006.920	0.00003119	0.02643	1.62300E-05	0.70819	19963.03	57.14	18.88	0.02376	-23.92	-0.20
12.50	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16669	1006.924	0.00003119	0.02644	1.62400E-05	0.70816	19950.74	57.11	18.88	0.02375	-19.13	-0.16
13.00	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16747	1006.917	0.00003119	0.02642	1.62200E-05	0.70821	19975.34	57.17	18.88	0.02377	-16.75	-0.14
13.10	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16515	1006.939	0.00003121	0.02647	1.62700E-05	0.70806	19913.95	57.03	18.87	0.02372	-28.66	-0.24
13.20	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16438	1006.946	0.00003122	0.02649	1.62900E-05	0.70801	19889.50	56.97	18.86	0.02370	-35.80	-0.30
13.30	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16132	1006.976	0.00003126	0.02655	1.63700E-05	0.70781	19792.30	56.74	18.83	0.02364	-54.75	-0.46
13.40	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16592	1006.931	0.0000312	0.02646	1.62600E-05	0.70811	19926.20	57.06	18.87	0.02374	-21.51	-0.18
13.50	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16554	1006.935	0.00003121	0.02646	1.62600E-05	0.70809	19926.20	57.05	18.87	0.02373	-28.67	-0.24
14.00	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16669	1006.924	0.00003119	0.02644	1.62400E-05	0.70816	19950.74	57.11	18.88	0.02375	-23.92	-0.20
14.10	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16554	1006.935	0.00003121	0.02646	1.62600E-05	0.70809	19926.20	57.05	18.87	0.02373	-28.67	-0.24
14.20	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16554	1006.935	0.00003121	0.02646	1.62600E-05	0.70809	19926.20	57.05	18.87	0.02373	-21.50	-0.18
14.30	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16477	1006.942	0.00003122	0.02648	1.62800E-05	0.70804	19901.72	57.00	18.87	0.02371	-31.04	-0.26
14.40	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16170	1006.972	0.00003125	0.02654	1.63600E-05	0.70784	19804.40	56.77	18.83	0.02365	-42.87	-0.36
14.50	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16323	1006.957	0.00003124	0.02651	1.63200E-05	0.70794	19852.94	56.88	18.85	0.02368	-35.77	-0.30

ภาคผนวก ก.1 ผลการคำนวณสมรรถนะการทำความเย็นของท่อใต้ดินแบบตัวยู กรณีดินมีความชื้นมากที่สุด (ต่อ)

Time	Dia. Tube (m)	Length (m)	Area (m ²)	Vel (m/s)	ρ_a (kg/m ³)	Cp (J/kg-K)	m (N-s/m ²)	k (W/m-K)	n (m ² /s)	Pr	Re	Nu _D	h (W/m ² -K)	m (kg/s)	Q (W)	COP
15.00	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16246	1006.965	0.00003125	0.02653	1.63400E-05	0.70789	19828.64	56.83	18.84	0.02366	-38.13	-0.32
15.10	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16208	1006.968	0.00003125	0.02653	1.63500E-05	0.70786	19816.51	56.80	18.84	0.02366	-40.50	-0.34
15.20	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16246	1006.965	0.00003125	0.02653	1.63400E-05	0.70789	19828.64	56.83	18.84	0.02366	-35.74	-0.30
15.30	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16400	1006.950	0.00003123	0.02649	1.63000E-05	0.70799	19877.30	56.94	18.86	0.02370	-31.02	-0.26
15.40	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16093	1006.979	0.00003126	0.02656	1.63800E-05	0.70779	19780.22	56.71	18.83	0.02363	-40.46	-0.34
15.50	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16400	1006.950	0.00003123	0.02649	1.63000E-05	0.70799	19877.30	56.94	18.86	0.02370	-26.25	-0.22
16.00	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16592	1006.931	0.0000312	0.02646	1.62600E-05	0.70811	19926.20	57.06	18.87	0.02374	-19.12	-0.16
16.10	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16901	1006.902	0.00003117	0.02639	1.61800E-05	0.70831	20024.72	57.29	18.90	0.02380	-7.19	-0.06
16.20	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16940	1006.898	0.00003116	0.02639	1.61700E-05	0.70834	20037.11	57.31	18.90	0.02381	-4.79	-0.04
16.30	0.08	12.50	0.005	4.05	1.17057	1006.887	0.00003115	0.02636	1.61400E-05	0.70841	20074.35	57.40	18.92	0.02383	0.00	0.00
16.40	0.08	12.50	0.005	4.05	1.17095	1006.883	0.00003114	0.02635	1.61300E-05	0.70844	20086.79	57.43	18.92	0.02384	-4.80	-0.04
16.50	0.08	12.50	0.005	4.05	1.16940	1006.898	0.00003116	0.02639	1.61700E-05	0.70834	20037.11	57.31	18.90	0.02381	-11.99	-0.10
17.00	0.08	12.50	0.005	4.05	1.17095	1006.883	0.00003114	0.02635	1.61300E-05	0.70844	20086.79	57.43	18.92	0.02384	-4.80	-0.04