การประยุกต์เสาเข็มท่อเหล็กไมโครไพล์เป็นเสาเข็มพลังงานเพื่อถ่ายเทความร้อนจากระบบปรับอากาศในอาคารบ้านพักอาศัย

Application of steel tube micro-piles as heat exchanging energy piles for air-conditioning system of a residential building

อภินิติ โชติสังกาศ[1,*] ธิติ ชาญชญานนท์[2] อรรถพร วิเศษสินธุ์[3] สกาวรัตน์ สัตยานันท์[4] และ สินีนาฏ อ่อนคำ[5]

[1,2,4,5] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จ.กรุงเทพฯ
[3] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จ.กรุงเทพฯ
**Corresponding author; E-mail address: fengatj@ku.ac.th*

บทคัดย่อ

เสาเข็มพลังงาน ทำหน้าที่สองประการ ได้แก่ (1) รับน้ำหนักอาคาร ส่งถ่ายแรงสู่ชั้นดินฐานรากที่มีความแข็งแรงเพียงพอ ลดการทรุดตัวของอาคาร และ (2) ส่งถ่ายความร้อน (หรือความเย็น) จากระบบปรับอากาศสู่ดิน เนื่องจากดินมีความสามารถถ่ายเทความร้อนดีกว่าอากาศ ในประเทศไทย พบว่าพื้นดินมีอุณหภูมิคงที่ตลอดปีที่ประมาณ 28-30 องศา จึงสามารถใช้ดูดซับความร้อนจากระบบปรับอากาศเพื่อลดการใช้พลังงานในอาคารได้ บทความนี้นำเสนอการประยุกต์เสาเข็มท่อเหล็กไมโครไพล์ขนาด 6 นิ้วเป็นเสาเข็มพลังงานเพื่อถ่ายเทความร้อนจากระบบปรับอากาศจากอาคารบ้านพักอาศัย โดยอธิบายการติดตั้งเสาเข็มพลังงานจำนวน 13 ต้น ที่ความลึก 17-18 เมตร ปลายเข็มอยู่ในชั้นทราย จากผลการทดสอบการตอบสนองทางอุณหภูมิของเสาเข็มพบว่าชั้นดินมีค่าสัมประสิทธิการนำความร้อนประมาณ 1.49-2 วัตต์ต่อเมตรต่อองศาเซลเซียส การวิเคราะห์ในเบื้องต้นคาดว่าเสาเข็มพลังงานนี้สามารถใช้งานกับระบบปรับอากาศขนาด 9000 BTU/hr ได้โดยไม่ทำให้อุณหภูมิโดยรอบเสาเข็มสูงเกิน 6 องศา หากใช้งานตลอด 24 ชม.ติดต่อกัน 6 เดือน

คำสำคัญ: เสาเข็มพลังงาน, การถ่ายเทความร้อนในดิน, อาคารประหยัดพลังงาน

Abstract

Energy piles serves two purposes, namely, (1) bearing the building load and transferring it to the competent foundation soil layer and reducing settlement (2) transferring the heat (or coolness) from the air-conditioning system into the ground. Since the ground has much better heat transferring property and heat capacity than that of air, and in Thailand, the ground temperature ranges between 28-30 degrees Celsius throughout the year, the ground thus can be used to absorb the heat from condensing unit of air-conditioning system in Thailand. In this study, the steel tube micropile (6" diameter) was used as energy pile to transfer heat from air-conditioning system of a residential house. The installation of 13 energy piles to depth of 17-18 m embedded in the sand layer was explained. The results of thermal response test indicated the thermal conductivity of about 1.49-2 Watts/m/Celsius. Based on preliminary analysis, it is expected that this set of energy piles can be used as ground source heat exchanger for 9000 BTU/hr air conditioning system without causing the temperature at the pile perimeter to rise above 6 degree Celsius for 24 hour operation time in 6 months.

Keywords: Energy pile, Ground heat transfer, Energy-saving building

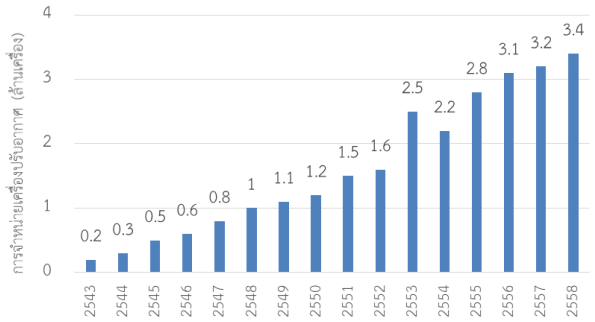
1. คำนำ

ปัจจุบันความต้องการด้านพลังงานของประเทศไทย เพิ่มมากยิ่งขึ้นทุกปี การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานอย่างประหยัดในทุกภาคส่วน และการใช้พลังงานหมุนเวียน (Renewable energy) จึงเป็นความจำเป็นเร่งด่วนเพื่อลดอัตราการเพิ่มความต้องการใช้พลังงานของประเทศ การใช้พลังงานในบ้านพักอาศัยมีปริมาณสูงเป็นอันดับสามเมื่อจำแนกตามสาขาเศรษฐกิจ [1] ในขณะที่การใช้พลังงานหมุนเวียน (Renewable energy) ยังมีสัดส่วนไม่มากนักเพียง 15.2% เมื่อเทียบกับพลังงานฟอสซิลซึ่งมีถึง 75.8%

จากปัญหาดังกล่าว จึงได้มีแนวคิดการออกแบบและก่อสร้างอาคารเพื่ออนุรักษ์พลังงานและสิ่งแวดล้อม หรือที่รู้จักในชื่อ อาคารเขียว (Green building) มีการพัฒนาเกณฑ์การประเมินต่างๆ อาทิ BREEAM และ LEED สำหรับประเทศไทยได้พัฒนาเกณฑ์ที่คล้ายคลึงกันขึ้นใช้ชื่อว่า TREES (Thai's Rating of Energy and Environmental Sustainability)

เพื่อให้สิทธิประโยชน์ต่างๆต่อโครงการที่ผ่านเกณฑ์ เพื่อสร้างแรงจูงใจในการอนุรักษ์พลังงานและสิ่งแวดล้อมต่อผู้พัฒนาโครงการ

Arifwidodo [2] ระบุว่า ระบบปรับอากาศนั้นมีส่วนภาระทางไฟฟ้า (Electricity load) ถึง 60% ของการปริมาณการใช้ไฟฟ้าในเขตกรุงเทพฯ ทั้งนี้เนื่องจากประเทศไทยอยู่ในเขตร้อน การใช้ระบบปรับอากาศได้กลายเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับอาคารแทบทุกหลัง รูปที่ 1 แสดงแนวโน้มปริมาณการใช้เครื่องปรับอากาศในประเทศไทย ซึ่งสูงขึ้นทุกปีเป็นไปตามการเติบโตของเศรษฐกิจและการขยายตัวของเขตเมือง จึงเป็นส่วนหนึ่งที่ก่อให้เกิดปรากฏการณ์เกาะความร้อนในเมือง (Urban heat island) หรือการที่อุณหภูมิในเขตเมืองสูงขึ้นกว่าเขตนอกเมืองซึ่งมีต้นไม้อยู่หนาแน่นกว่า ระบบปรับอากาศทั่วไปยังปลดปล่อยความร้อนสู่อากาศโดยตรงจึงยิ่งส่งผลให้การใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้นอย่างทวีคูณ และเกิดการกระจุกตัวของมลภาวะในเขตเมือง

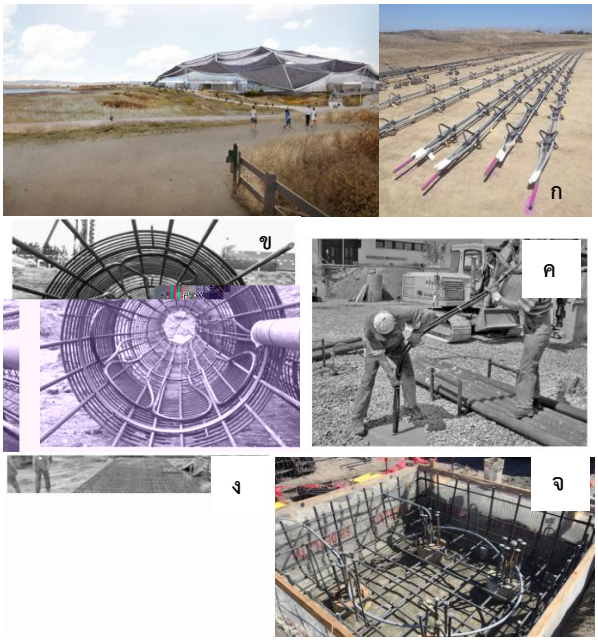


รูปที่ 1 สถิติการจำหน่ายเครื่องปรับอากาศในประเทศไทยตั้งแต่ปีพ.ศ. 2543-2558 [3]

การพัฒนาเ โนโลยีอาคารประหยัดพลังงานในรูปแบบต่างๆจึงได้รับการพัฒนาขึ้นอย่างหลากหลาย อาทิ หลังคาโซลาร์เซลล์ การติดตั้งฉนวนในส่วนต่างๆ ของอาคาร การปลูกหญ้าบนหลังคา ฯลฯ ในส่วนของฐานรากอาคาร ได้มีการอาศัยการแลกเปลี่ยนพลังงานสู่ใต้ดินที่ระดับตื้น (Shallow geothermal energy) มาใช้ประโยชน์ในการปรับสภาพอากาศภายในอาคารให้เหมาะสม ด้วยหลักการ Ground Source Heat Pump (GSHP) [4,5] โดยอาศัย หลุมเจาะเป็นส่วนถ่ายเ วามร้อนจากระบบปรับอากาศ หรือ ฐานรากของอาคาร เช่น เ า เ ม กำแพงห้องใต้ดิน หรือ อุโมงค์ เป็นส่วนถ่ายเ วามร้อนกับดิน เรียก Energy geostructure [6,7] ดังรูปที่ 2

ดังนั้น เ า เ มพลังงาน (Energy pile) จะทำหน้าที่สองประการ ได้แก่ (1) รับน้ำหนักอาคารน้ำหนักบรรทุกจรต่างๆ ส่งถ่ายแรงสู่ชั้นดินฐานรากที่มีความแข็งแรงเพียงพอ ลดการทรุดตัวของอาคาร ซึ่งเป็นหน้าที่ปกติของเสาเข็มทั่วไป (2) ส่งถ่ายความร้อน (หรือความเย็น) จากระบบปรับอากาศสู่ดิน เสาเข็มพลังงานประกอบไปด้วยเสาเข็ม และ ท่อลูปพลังงาน (Thermal loop pipe) โดยทั่วไปจะทำจากพลาสติกชนิด HDPE และฝังอยู่ภายในเ า เ ม โดยมี ท่อด้านบน (Header pipes) เ อมต่อระหว่างเา เ มแต่ละต้น เ ป็นวงจรนำของเ หลวถ่ายเ ทพลังงาน (transfer fluid) เ อมต่อกับปั๊ม วามร้อน เ อถ่ายเ วามร้อนจากระบบทำ วามเย็นสู่ดิน (หรือถ่ายเทความร้อนจากดินสู่ระบบทำความร้อน ในเขตอากาศหนาว)

ทั้งนี้เ องจากดินมี วามสามารถถ่ายเ ว ซึ่งดีกว่าอากาศ การเ ิ่มประสิ ิภาพของระบบปรับอากาศได้อย่างเ ในประเ ไทย พบว่าดินที่ วามลึก 60 เมตร มีอุณหภูมิ งที่ตลอดปีที่ประมาณ 28-30 อง า จึง ามารถใช้ดูดซับ วามร้อนจาก Condensing unit เ พื่อเ พิ่มประสิ ิภาพของระบบปรับอากาศ หรือเป็นการใช้เสาเข็มทำหน้าที่ส่งผ่านความร้อน (Heat exchanger) นั่นเอง



รูปที่ 2 การใช้เสาเข็มพลังงานในต่างประเทศ ก) อาคาร Bay View campus ของบริษัทกูเกิ้ล ประเทศสหรัฐอเมริกา ข) เสาเข็มเจาะซึ่งผูกท่อ HDPE ไว้กับเหล็กเสริม เพื่อทำหน้าที่แลกเปลี่ยนความร้อน ค) เ ิ่มท่อเหล็กเพื่อติดตั้งท่อในรูตรงกลางแล้วเทด้วยคอนกรีต ง) ลักษณะการติดตั้งท่อ HDPE กับเหล็กเสริมสำหรับกำแพงไดอะแฟรม จ) การติดตั้งท่อ HDPE ภายในฐานราก [6,8]

การศึกษาด้านเาเข็มพลังงานในประเทไทยนั้นได้ดำเนินการอย่างต่อเนื่องกว่า 10 ปี ที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิท าลัยเกษตรศาสตร์ [9-18] ทั้งการศึกษาโดยใช้แบบ ำลองกายภาพ แบบ ำลองคณิตศาสตร์ การศึกษาพฤติกรรมการทรุดตัวของดินเ นียวและดินทรายกรุงเทพฯต่อการเ ลี่ยนแปลงอุณ ภูมิ การตรวจวัดพฤติกรรมเสาเ จริง ในบ ความนี้จะนำเ อแนวทางการประยุกต์เ า เ มพลังงานในบ้านพักอาศัย การออกแบบและการศึกษาการตอบสนองช งอุณหภูมิ (Thermal response test) ของเสาเข็มกลุ่มในสนาม

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบ Ground-source heat pump

ปั๊ม วามร้อน (Heat Pump) คือชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการถ่ายเ ทพลังงานความร้อน จากแหล่งหนึ่งเรียกว่า Heat source มาทำให้ร้อนขึ้น โดย

Compressor แล้วส่งไปยังอีกแหล่ง หรือ Heat sink เครื่องปรับอากาศที่นิยมใช้ในที่พักอาศัยทั่วไปจัดเป็น Air-source heat pump ที่ใช้อากาศภายนอกเป็น Heat sink รับความร้อนจาก Condenser ซึ่งถ่ายเทความร้อนออกจากภายในอาคาร (หรือ Heat source) ทำให้อากาศในอาคารเย็นขึ้น แต่ในกรณีเสาเข็มพลังงาน จัดเป็น Ground source heat pump เนื่องจากใช้เสาเข็มและพื้นดินเป็น Heat sink ในการรับความร้อนจาก Condensing Unit

ประสิทธิภาพของปั๊มความร้อน แสดงโดย **ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน** (Coefficient of Performance, COP) คือ อัตราส่วนระหว่างพลังงานที่ถ่ายเทได้จากปั๊มความร้อน, $\dot{Q}_s$, ต่อ พลังงานที่ปั๊มใช้, $\dot{Q}_i$ (หน่วยเป็น Watts หรือ BTU/hr) โดยค่า COP เป็นค่าที่ขึ้นกับชนิดของอุปกรณ์

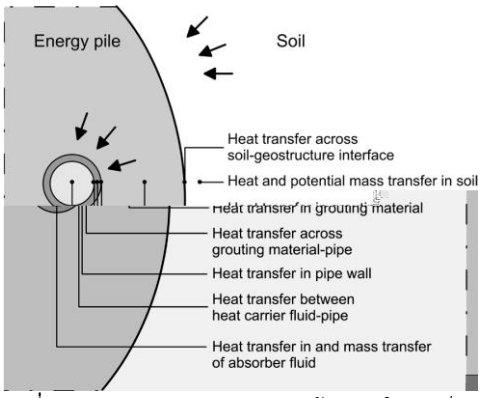
$$\text{COP} = \frac{\text{energy output after heat pump [kW]}}{\text{energy input for operation [kW]}} = \frac{\dot{Q}_s}{\dot{Q}_i} \quad (1)$$

Takashima et al [4] ได้ทดลองระบบ Ground Source Heat Pump โดยใช้ระบบแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดท่อพลาสติก HDPE ฝังในดินแบบ Horizontal loop ที่ความลึก ประมาณ 1 เมตร ยาว 200 ม. ทดลองได้ค่า COP ประมาณ 3-4 สำหรับการออกแบบเสาเข็มพลังงาน ค่า COP จะนำไปใช้ในการคำนวณพลังงานที่ถ่ายเทสู่เสาเข็ม, $\dot{Q}_r$ โดยเมื่อทราบ ความต้องการของระบบทำความเย็น $\dot{Q}_s$ (BTU/hr หรือ Watts) จะสามารถคำนวณพลังงานที่จะถ่ายเทสู่เสาเข็ม $\dot{Q}_r$ ได้ดังสมการที่ 2

$$\dot{Q}_r = \frac{(\text{COP}+1)\dot{Q}_s}{\text{COP}} \quad (2)$$

2.2 การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนสู่เสาเข็มและดิน

ในระหว่างการใช้งาน ปั๊มความร้อนหรือระบบปรับอากาศจะถ่ายเทความร้อนผ่านน้ำซึ่งไหลเวียนภายในท่อพลาสติก HDPE เข้าสู่เสาเข็มและดินโดยรอบ ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยน้ำที่หมุนเวียนในท่อ HDPE ซึ่งรับความร้อนจาก Condensing Unit จะมีอุณหภูมิประมาณ 38-40 องศาเซลเซียส และดินโดยรอบเสาเข็มจะมีอุณหภูมิประมาณ 28-30 องศาเซลเซียส จากผลต่างของอุณหภูมินี้จะส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนขึ้น



รูปที่ 3 ภาพตัดแสดงการถ่ายเทความร้อนภายในเสาเข็มพลังงาน [7]

การถ่ายเทการถ่ายเทความร้อนในเสาเข็มพลังงานจะเกิดขึ้นผ่านวัสดุ 4 ชนิดด้วยกัน ได้แก่ (1) ของเหลว (โดยทั่วไปจะใช้ น้ำ) ที่หมุนเวียนภายในท่อเพื่อพาความร้อนสู่ดิน (2) ท่อ โดยทั่วไปจะทำจากพลาสติก HDPE (3) เสาเข็ม ซึ่งประกอบไปด้วย วัสดุที่ใช้ผลิตเสาเข็ม ได้แก่ คอนกรีตเสริมเหล็ก คอนกรีตอัดแรง เหล็กกล้าชุบสังกะสี ฯลฯ รวมถึงวัสดุเกราท์ช่องว่างตรงกลางเสาเข็ม เช่น มอร์ตาซีเมนต์ และ (4) ดินรอบเสาเข็ม ในการวิเคราะห์เพื่อออกแบบเสาเข็มพลังงาน [7] ในเบื้องต้นจะใช้การวิเคราะห์แบบง่าย Simplified infinite line source model [19] เพื่อคำนวณหาอุณหภูมิรอบเสาเข็มและดิน โดยพิจารณาเฉพาะการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนและไม่พิจารณาความต้านทานความร้อนของเสาเข็ม (Zero thermal resistance of pile) ได้ดังสมการที่ 3

$$T(t,R) - T_0 = \dot{q}_l \frac{1}{4\pi\lambda}\left[ln\frac{4\alpha_d t}{R^2} - \gamma_E\right] \quad (3)$$

เมื่อ $T(t,R)$ คืออุณหภูมิที่ เวลา t และระยะ R จากแกนกลางเสาเข็ม T_0 คือค่าอุณหภูมิเริ่มต้นในดินและเสาเข็ม (ปกติมีค่า $T_0 \sim 30\ C$), $\dot{q}_l$ คือค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อความยาวหนึ่งหน่วย *(Linear power inject into pile, W/m),* λ คือค่าสัมประสิทธิการนำความร้อนของดิน *(W/(m°C),* α_d คือค่าสัมประสิทธิการแพร่ความร้อน *(Ground thermal diffusivity, m²/s)* γ_E คือค่าคงที่ของ *Euler* มีค่าเท่ากับ *0.5772*

สมการที่ (3) สามารถนำไปคำนวณหาอุณหภูมิที่จะเพิ่มขึ้นโดยรอบเสาเข็มระหว่างการใช้งานเป็นระยะเวลานาน และเพื่อประเมินผลกระทบจากการถ่ายเทความร้อนสู่ดินได้ในเบื้องต้น

3. กรณีศึกษาบ้านพักอาศัย เขตหลักสี่

3.1 เสาเข็มพลังงานและการติดตั้ง

ในการศึกษานี้ได้ออกแบบและติดตั้งเสาเข็มพลังงาน โดยใช้เสาเข็มไมโครไพล์ขนาด 6 นิ้ว ส่วนหนึ่งของอาคารในการแลกเปลี่ยนความร้อนกับชั้นดิน (รูปที่ 4) เสาเข็มตอกลึกถึงชั้นทรายกรุงเทพชั้นแรก ปลายเสาเข็มอยู่ที่ความลึกประมาณ 17.5-18 เมตร โดยใช้เสาเข็มทั้งหมด 13 ต้น ความยาวซึ่งใช้แลกเปลี่ยนความร้อน (Thermo-active length) รวม 227 เมตร แบ่งเสาเข็มทั้งหมดเป็น 2 ลูป (Loop 1 สีเหลือง และ Loop 2 สีแดง) เสาเข็มแต่ละต้นจะทำการใส่ท่อ HDPE ขนาด 32 มม. ลงไปภายในช่องว่างตรงกลางเข็มไมโครไพล์ ในลักษณะ Single U-tube ดังรูปที่ 5 จากนั้นจึงเชื่อมท่อ HDPE ในลักษณะอนุกรมสำหรับเสาเข็มในแต่ละลูป ในการใช้งานจะต้องมีระบบปั๊มทำหน้าที่หมุนเวียนน้ำ (Circulation) นำน้ำร้อน จากระบบหล่อเย็นของ Condensing Unit แลกเปลี่ยนความร้อนสู่ดิน โดยน้ำที่หมุนเวียนภายในท่อ HDPE จะเป็นระบบปิดและไม่สัมผัสกับดินโดยตรง



รูปที่ 4 ตำแหน่งเสาเข็มพลังงานในบ้านพักอาศัย เขตหลักสี่

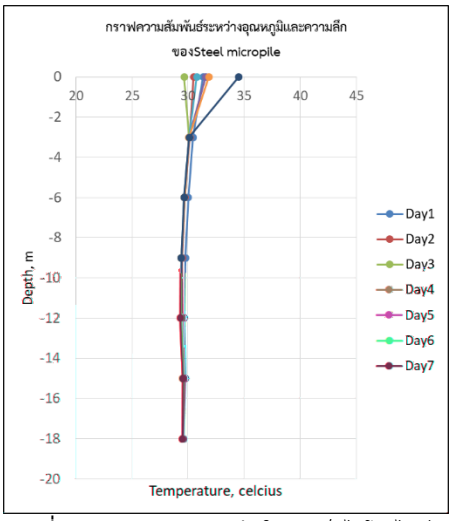
การติดตั้งท่อลูปภายในเสาเข็มไมโครไพล์แสดงดังรูปที่ 5 เมื่อประกอบท่อลูปแล้วเสร็จ หย่อนท่อลูปลงภายในเสาเข็ม แล้วเติมน้ำในท่อลูปไล่อากาศออกจากท่อจนหมด อัดแรงดันน้ำไปที่ 8 บาร์เพื่อตรวจสอบการรั่วซึมของท่อ แล้วจึงเทคอนกรีตลงในเสาเข็ม ระมัดระวังไม่ให้เกิดโพรงภายในรูกลวง ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการถ่ายเทความร้อน



รูปที่ 5 การติดตั้งท่อ HDPE ในเสาเข็มพลังงานไมโครไพล์

3.2 การศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเสาเข็มพลังงาน

ในการศึกษานี้ประเมินความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของเสาเข็มพลังงานแบบไมโครไพล์โดยการทดสอบ Thermal response test (TRT) โดยขั้นตอนแรกในการศึกษาจะเป็นการตรวจวัดอุณหภูมิภายในเสาเข็มไมโครไพล์เพื่อประเมินค่า Background temperature หรือ T_0 ในสมการที่ 3 จากผลการตรวจวัดแสดงดังรูปที่ 6 พบว่าอุณหภูมิใต้ดินมีค่าค่อนข้างคงที่ประมาณ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยในอดีต [4,5,14]



รูปที่ 6 อุณหภูมิตามความลึก ในเสาเข็มไมโครไพล์ [16]

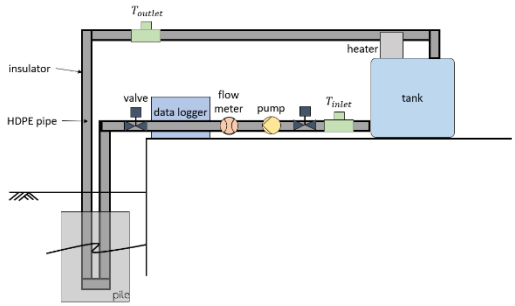
การทดสอบ TRT นั้นมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้มาซึ่งคุณสมบัติของดินด้านการถ่ายเทความร้อนได้แก่ λ คือค่าสัมประสิทธิการนำความร้อนของดิน *(W/(m°C)* เป็นหลัก และอาจรวมไปถึง α_d คือค่าสัมประสิทธิการแพร่ความร้อน *(Ground thermal diffusivity, m^2/s)* หากมีการตรวจวัดอุณหภูมิในดินที่บริเวณรอบเสาเข็มด้วย การทดสอบอาศัยหลักการหมุนเวียนน้ำที่อุณหภูมิสูงกว่าดินเข้าไปภายในท่อลูบ HDPE ด้วยอัตราคงที่ $\dot{m}$ และวัดค่าอุณหภูมิน้ำขาเข้าสู่ลูป T_{in} และขาออกจากลูป T_{out} โดยปกติหากมีการถ่ายเทความร้อนสู่ดิน ค่า T_{in} จะมากกว่าค่า T_{out} และสามารถคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนสู่เสาเข็ม $(\dot{Q}_r)$ ได้ดังสมการที่ 6

$$\dot{Q}_r = \dot{m}C\Delta T \tag{6}$$

โดย $\dot{m}$ คืออัตราการไหลของน้ำในท่อ (kg/sec), C คือ ค่าความจุความร้อนของน้ำ เท่ากับ 4.1175 kJ/kg. Kelvin สำหรับน้ำที่อุณหภูมิ 30 องศา $\Delta T = T_{in} - T_{out}$ คือผลต่างระหว่างอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าสู่เสาเข็มและหลังออกจากเสาเข็ม และสามารถคำนวณค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อความยาวหนึ่งหน่วย $\dot{q}_l$ *(Linear power inject into pile, W/m)*

$$\dot{q}_l = \frac{\dot{Q}_r}{L} \tag{7}$$

โดย L คือความยาวของเสาเข็ม (เฉพาะส่วนที่มีการติดตั้งท่อ HDPE)



ก)



ข)

รูปที่ 7 อุปกรณ์และการทดสอบ Thermal Response Test

รูปที่ 7 แสดงอุปกรณ์ในการทดสอบ TRT ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้ (1) เปิดปั๊มเพื่อทำการไหลเวียนน้ำที่ยังไม่ได้รับความร้อนเป็นเวลา 30-60 นาที เพื่อบันทึกค่าอุณหภูมิในเสาเข็ม (2) เปิด heater โดยตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 50°C เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำที่จะไหลเวียนเข้าไปในระบบ ขั้นตอนนี้ยังไม่ต้องเปิดปั๊ม เรียกขั้นตอนนี้ว่า stage 1 (3) เมื่ออุณหภูมิน้ำเท่ากับ 50°C แล้วให้ทำการเปิดปั๊มเพื่อไหลเวียนน้ำร้อนเข้าไปในระบบ โดยใช้ระยะเวลาในขั้นตอนนี้ 2-3 วัน เรียกขั้นตอนนี้ว่า stage 2 (4) เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำเฉลี่ยและเวลา ซึ่งเขียนเป็นสมการเส้นตรงได้ดังนี้

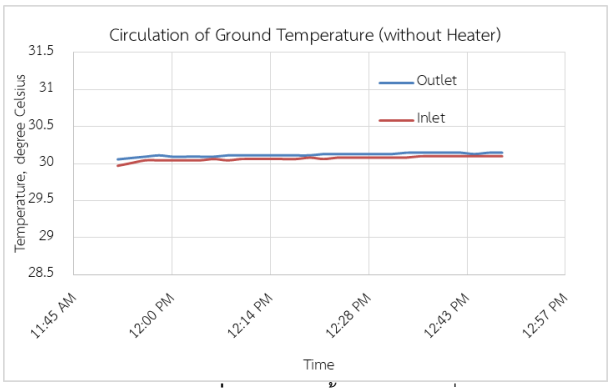
$$T_f(t) = \mathbf{k} \cdot \mathbf{ln(t)} + \mathbf{c} \quad (8)$$

ค่าความชัน k นำไปคำนวณหาค่าการนำความร้อน λ ได้ดังสมการที่ 9

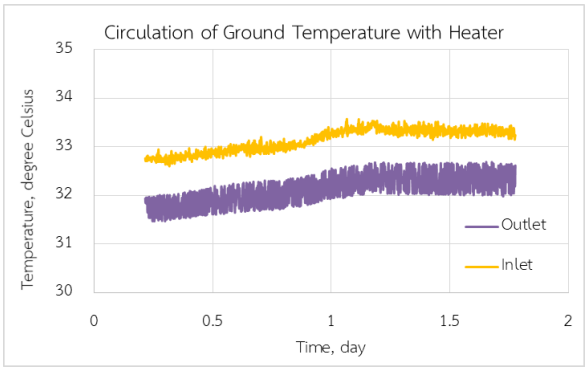
$$\lambda = \frac{\dot{q}}{4\pi \cdot k} \quad (9)$$

หลังจากได้ข้อมูลเพียงพอแล้วทำการปิด heater เพื่อบันทึกอุณหภูมิหลังจากการทดสอบ TRT เรียกขั้นตอนนี้ว่า stage 3

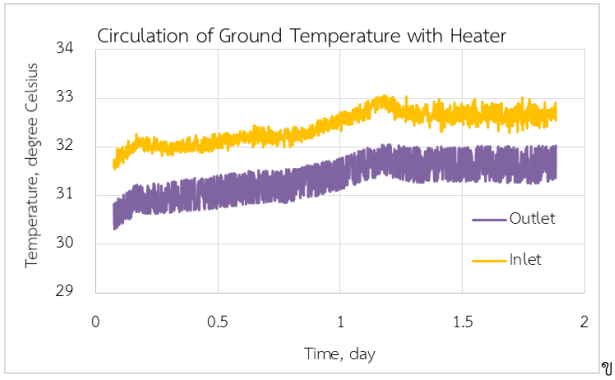
ตัวอย่างผลการทดสอบใน Stage 1 แสดงดังรูปที่ 8 พบว่าอุณหภูมิในน้ำที่ไหลเวียนผ่านท่อลูปมีค่าประมาณ 30 องศา ซึ่งใกล้เคียงกับค่าซึ่งตรวจวัดภายในเสาเข็มดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 8 อุณหภูมิพื้นหลังของลูปที่ 1



ก

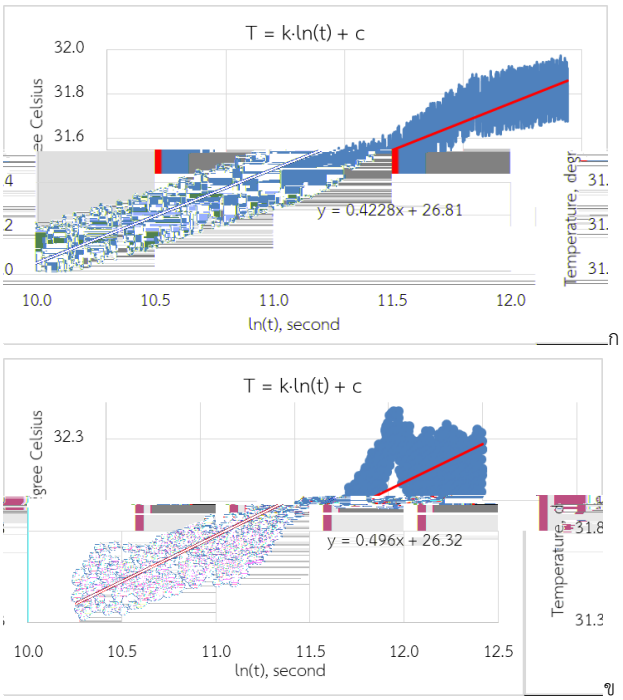


ข

รูปที่ 9 ผลการทดสอบ TRT ในช่วง Stage 2 สำหรับ ก) ลูปที่ 1 และ ข) ลูปที่2

รูปที่ 9 แสดงผลการทดสอบ TRT ในช่วง Stage 2 ทั้งกรณีลูปที่ 1 และ 2 จากการทดสอบมีการตั้งอุณหภูมิของ Heater ไว้ที่ 40 องศาเซลเซียส เนื่องจากอุณหภูมินี้มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิของส่วนที่ใช้ระบายความร้อนจาก **Condensing Unit** ของเครื่องปรับอากาศ แต่เนื่องจากปั๊มหมุนเวียนน้ำ ที่ใช้ในการทดสอบไม่สามารถควบคุมอัตราการไหลได้ น้ำมีอัตราการไหลสูงถึง 16 ลิตรต่อนาที เมื่อติดตั้งกับลูปภายในเสาเข็ม ทำให้อุปกรณ์ Heater ที่ใช้ไม่สามารถให้ความร้อนกับน้ำได้ทัน อุณหภูมิของน้ำที่เข้าสู่ระบบจึงมีค่าต่ำกว่าค่าที่ตั้งไว้อยู่ที่ประมาณ 32 องศาเซลเซียส ทั้งนี้อุณหภูมิของน้ำมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากสภาพอากาศเพียงเล็กน้อยตลอดการทดสอบ ผลการทดสอบได้ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิของน้ำที่เข้าและออกจากลูปที่ 1 และ 2 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.0094 และ 1.0468 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

จากนั้นนำค่าความแตกต่างของอุณหภูมิขาเข้าและออกจากลูปคำนวณไปคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนสู่เสาเข็มต่อความยาว ตามสมการที่ 6 และ 7 ผลการคำนวณได้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสู่เสาเข็มต่อความยาวเฉลี่ยของลูปที่ 1 และ 2 เท่ากับ 10.7413 และ 9.2932 W/m ตามลำดับ จากนั้นนำค่านี้ไปคำนวณค่าการนำความร้อนโดยใช้สมการที่ 9 ได้เท่ากับ 2.0145 และ 1.4911 **W/m°C** ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 10



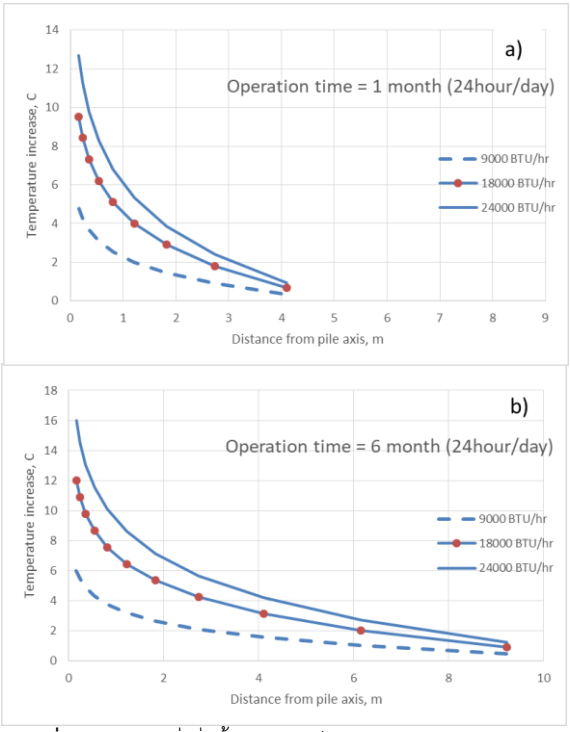
รูปที่ 10 การคำนวณค่าสัมประสิทธิการนำความร้อนจากผลการทดสอบ TRT ก) ลูปที่ 1 ข) ลูปที่ 2

3.3 การวิเคราะห์การใช้งานระบบ Ground Source Heat Pump

ในการศึกษานี้ได้ตั้งสมมุติฐานการใช้งานเสาเข็มพลังงานกับระบบปรับอากาศที่ความจุต่างๆกันดังแสดงในตารางที่ 1 เพื่อประเมินหาค่าความร้อนที่จะต้องถ่ายเทสู่ดิน และความร้อนที่อาจเกิดขึ้นโดยรอบเสาเข็ม โดยใช้แบบจำลอง Simplified infinite line source model โดยกำหนดค่า $\boldsymbol{\lambda}$= 1.745 W/(m°C) และค่า $\boldsymbol{\alpha_d}$= 1.2E^{-6} m^2/s และกำหนดรูปแบบการใช้งานระบบปรับอากาศตลอด 24 ชั่วโมงในหนึ่งวัน ต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 1 เดือน และ 6 เดือน นำไปคำนวณค่าอุณหภูมิที่คาดว่าจะเพิ่มขึ้นโดยรอบเสาเข็ม ดังแสดงในรูปที่ 11 ทั้งนี้รูปแบบการใช้งานเครื่องปรับอากาศนี้กำหนดให้เป็น extreme simplified case ในความเป็นจริง การใช้งานระบบปรับอากาศมักไม่ตลอดช่วงเวลา 24 ชม.ในหนึ่งวัน นอกจากนั้นลักษณะการถ่ายเทความร้อนสู่ดินจะมีลักษณะ 2 หรือ 3 มิติ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้โดยวิธี Finite Difference หรือ Finite Element และอาจมีผลจากการไหลของน้ำใต้ดินในชั้นทราย ซึ่งจะช่วยถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้น ผลการวิเคราะห์ในรูปที่ 11 เป็นเพียงผลการวิเคราะห์สำหรับการออกแบบในเบื้องต้นเท่านั้น

ตารางที่ 1 สมมุติฐานการใช้งานเสาเข็มพลังงานกับระบบปรับอากาศ

Q's		COP	Q'r	Total thermo-active length	Actual injected power into energy pile, q'
BTU/hr	Watts		Watts	m	W/m
9000	2637.6	3.5	3391.3	227	14.9
18000	5275.3	3.5	6782.5	227	29.9
24000	7033.7	3.5	9043.3	227	39.8



รูปที่ 11 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นรอบเสาเข็ม ภายใต้สภาวะการใช้งานต่างๆ

อย่างไรก็ดี จากผลการวิเคราะห์ในรูปที่ 11 หากกำหนดเกณฑ์การออกแบบให้อุณหภูมิโดยรอบเสาเข็มสูงขึ้นไม่เกิน 40 องศา ซึ่งเป็นค่าอุณหภูมิของน้ำภายในท่อ HDPE ซึ่งรับความร้อนจากชุด CDU ของระบบปรับอากาศ เนื่องจากหากอุณหภูมิรอบเสาเข็มสูงขึ้นใกล้เคียงกับอุณหภูมิของน้ำในท่อ HDPE ก็จะเป็นการลดประสิทธิภาพของระบบ Ground source heat pump ลงได้ จากข้อพิจารณาดังกล่าวก็สามารถนำไปกำหนดค่า BTU/hr ที่มีความเหมาะสมกับจำนวนเสาเข็มในเบื้องต้นได้เท่ากับ 9000 BTU/hr ทั้งนี้จำเป็นต้องมีการติดตามและประเมินผลในระยะยาวต่อไป

4. บทสรุป

บทความนี้นำเสนอผลการศึกษาการใช้เสาเข็มท่อเหล็กไมโครไพล์ขนาด 6 นิ้ว เป็นเสาเข็มพลังงาน เพื่อทำหน้าที่รับน้ำหนักอาคารและส่งถ่ายความร้อนจากระบบปรับอากาศสู่ดิน พบว่าพื้นดินมีอุณหภูมิคงที่ตลอดความลึกที่ประมาณ 30 องศา โดยอธิบายการติดตั้งเสาเข็มพลังงานจำนวน 13 ต้น ที่ความลึก 17-18 เมตร ปลายเข็มอยู่ในชั้นทราย จากผลการทดสอบการตอบสนองทางอุณหภูมิของเสาเข็มพบว่าชั้นดินมีค่าสัมประสิทธิการนำความร้อนประมาณ 1.49-2 วัตต์ต่อเมตรต่อองศาเซลเซียส จากผลการวิเคราะห์ในเบื้องต้นคาดว่าสามารถใช้งานกับระบบปรับอากาศขนาด 9000 BTU/hr ได้โดยไม่ทำให้อุณหภูมิโดยรอบเสาเข็มสูงเกิน 6 องศา หากใช้งานตลอด 24 ชม.ติดต่อกัน 6 เดือน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ดร.ชญาพร เริงพิทยา ซึ่งอนุญาติให้ดำเนินการศึกษาในอาคารที่พักอาศัยได้ การศึกษาครั้งนี้ได้รับการสนับสนุนส่วนหนึ่งโดยภาควิชาวิศวกรรมโยธา และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

[1] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน (2558) *โครงการลดใช้พลังงานในภาครัฐ* ปีงบประมาณ 2558

[2] Arifwidodo, S.D. (2015) Factors contributing to urban heat island in Bangkok, Thailand. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. VOL. 10, NO. 15, 6435-6439.

[3] *สารสถิติ ปีที่ 28* ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม-มีนาคม (2560) สำนักงานสถิติแห่งชาติ

[4] Takashima, I., Yasukawa, K., Uchida, Y., Yoshioka, M. and Won-in, K. (2011) A geothermal heat pump system in Bangkok, Thailand, *Proceedings of the 9 th Asian Geothermal Symposium*, 7-9 November 2011, pp 96-101.

[5] Chokchai, S., Chotpantarat, S., Takashima, I., Uchida, Y. Widiatmojo, A., Yasukawa, K., Charusiri P. A Pilot Study on Geothermal Heat Pump (GHP) Use for Cooling Operations, and on GHP Site Selection in Tropical Regions Based on a Case Study in Thailand. *Energies*, 11(9) (2018)

[6] Brandl H. (2006) Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Geotechnique*.;56(2):81–122.

[7] Laloui, L., Rotta Loria, A. (2019) *Analysis and Design of Energy Geostructures*, 1 st Edition, Theoretical Essentials and Practical Application, Academic Press

[8] Peters, A (2017) *Google's New Office Will Be Heated And Cooled By The Ground Underneath*. Fastcompany. https://www.fastcompany.com/40484709/googles-new-office-will-be-heated-and-cooled-by-the-ground-underneath

[9] พงษ์ศักดิ์ สินธีรภาพ, มนต์ชัย ทองไทย, พิพัฒน์ภูมิ ยิ้มแฉ่ง (2552) *การแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนใต้ดินสำหรับสารทำความเย็นเพื่อการปรับอากาศ* โครงงานวิศวกรรมเครื่องกล ระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

[10] จิตวีร์ สิทธิดำรง, ภรัณยู ด้วงอินทร์, วรพล วรรณวิเลขกิจ (2557) *การศึกษาและพัฒนาต้นแบบเสาเข็มพลังงานในดินเหนียวอ่อน* โครงงานวิศวกรรมโยธา ระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

[11] จิตวีร์ สิทธิดำรง (2561) *อิทธิพลจากความร้อนของเสาเข็มพลังงานต่อมุมเสียดทาน และพฤติกรรมทางปริมาตร ของดินทรายกรุงเทพฯ* วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

[12] การัณย์ ปิลเลย์, จอมพล ผลิตวานนท์, ศรัณย์ จุลเอียด (2558) *การศึกษาประสิทธิภาพของเสาเข็มพลังงานในดินทรายกรุงเทพฯ* โครงงานวิศวกรรมโยธา ระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

[13] ชลธิดา ศรีสงคราม, พิมพ์ชนก ทองดีนอก, ชญานิษฐ์ ดิษยบุตร (2561) *การศึกษาผลกระทบที่มีต่อดินเหนียวเนื่องจากการใช้เสาเข็มพลังงาน* โครงงานวิศวกรรมโยธา ระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

[14] คเชนทร์ ตั้งคุ้มวงศ์, พงษ์พัฒน์ อาวพิทักษ์, พัทธดนย์ เลาหศรีสกุล (2561) *การศึกษาคุณสมบัติและประสิทธิภาพของเสาเข็มพลังงานในชั้นดินกรุงเทพมหานคร* โครงงานวิศวกรรมโยธา ระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

[15] ไกรวิชญ์ ชัยปิติ, พนธกร เลิศภิรมย์ลักษณ์, พีรภัทร วงษ์ล้อม (2561) *การถ่ายเทความร้อนสู่ดิน* โครงงานวิศวกรรมเครื่องกล ระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

[16] สกาวรัตน์ สัตยานันท์ และ สินีนาฏ อ่อนคำ (2562) *การประยุกต์เสาเข็มเหล็กและเสาเข็มสปันคอนกรีตเป็นเสาเข็มพลังงานเพื่อถ่ายเทความร้อนจากระบบปรับอากาศ* โครงงานวิศวกรรมโยธา ระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

[17] Jotisankasa A, Sittidumrong J, and Chantawarangul K. (2015) Preliminary investigation of energy piles in soft Bangkok clay. *Proceedings of the 1st International Conference on Geo-Energy and Geo-Environment*, Hong Kong.

[18] Sittidumrong, J., Jotisankasa, A., and Chantawarangul, K. (2019) Effect of thermal cycles on volumetric behaviour of Bangkok sand, *Geomechanics for Energy and the Environment*, Volume 20, December 2019, 100127,

[19] Carslaw, H.S. Jaeger, J.C (1959) *Conduction of heat in solids.* Oxford at the Clarendon Press.