

การวิเคราะห์และประเมินการนำความร้อนของดิน



โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2560

การวิเคราะห์และประเมินการนำความร้อนของดิน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับโครงการฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบโครงการ

(ศ. ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.ปรียาพร โกษา)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ)

(ดร.อิทธิกร ภูมิพันธ์)

กรรมการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

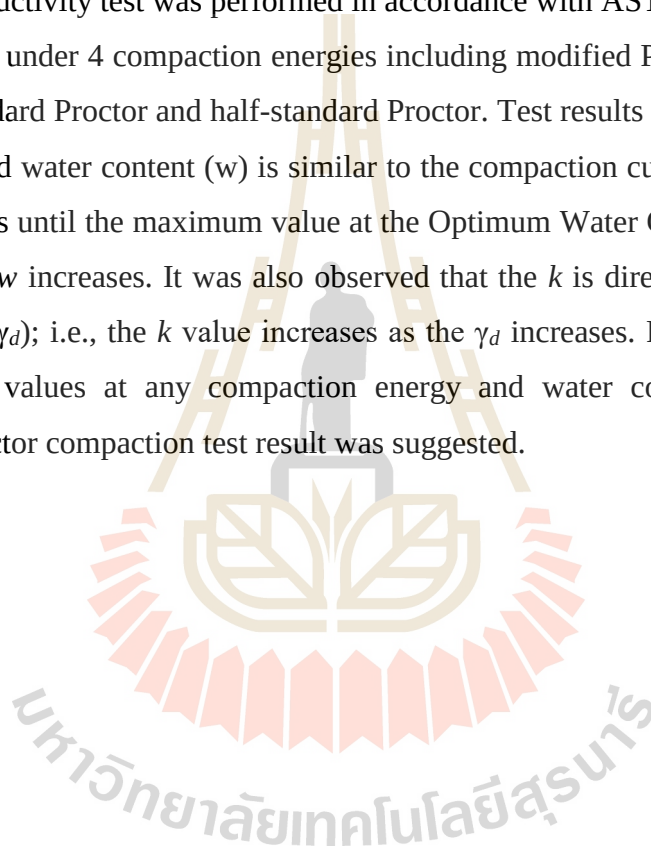
อภิรัฐ ปัญญาแก้ว : การวิเคราะห์และประเมินการนำความร้อนของดิน (ANALYSIS AND ASSESSMENT OF SOIL THERMAL CONDUCTIVITY) อาจารย์ที่ปรึกษา :

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรียาพร โกษา

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของการบดอัดต่อค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity, k) ของดินภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา การทดสอบหาค่าการนำความร้อนใช้วิธี Heat Flow Meter ตามมาตรฐานมาตรฐาน ASTM C518 ตัวอย่างทดสอบเตรียมโดยใช้ค่าพลังงานการบดอัด 4 ค่า ได้แก่ สูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor) ครึ่งสูงกว่ามาตรฐาน (Half-modified Proctor) มาตรฐาน (Standard Proctor) และครึ่งมาตรฐาน (Half-standard Proctor) ผลการทดสอบ พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนและปริมาณความชื้นมีลักษณะคล้ายกับกราฟการบดอัด โดยที่ค่าการนำความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณความชื้นจนกระทั่งถึงค่าสูงสุดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม (Optimum Water Content, OWC) หลังจากนั้นค่าการนำความร้อนมีค่าลดลงเมื่อปริมาณความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ผลทดสอบยังแสดงให้เห็นว่าค่าการนำความร้อนมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความหนาแน่นแห้ง โดยที่ค่าการนำความร้อนเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นแห้ง ทำยสุด ผู้วิจัยได้นำเสนอวิธีการประมาณค่าการนำความร้อนที่พลังงานการบดอัดต่าง ๆ โดยใช้เพียงผลทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน

APIRUT PUNYAKAEW : ANALYSIS AND ASSESSMENT OF SOIL
THERMAL CONDUCTIVITY. ADVISOR : ASST. PROF.
PREEYAPHORN KOSA, Ph.D.

This research studies the effect of compaction energy on the soil thermal conductivity (k). Soil sample used in this study was obtained from the campus Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima Province, Thailand. Soil thermal conductivity test was performed in accordance with ASTM C518. Soil sample was prepared under 4 compaction energies including modified Proctor, half-modified Proctor, standard Proctor and half-standard Proctor. Test results show that relationship between k and water content (w) is similar to the compaction curve which k increases as w increases until the maximum value at the Optimum Water Content (OWC) then k decreases as w increases. It was also observed that the k is directly related to the dry unit weight (γ_d); i.e., the k value increases as the γ_d increases. Finally, the method to determine k values at any compaction energy and water content by using only standard Proctor compaction test result was suggested.



School of Construction and Infrastructure Management Student's Signature_____

Academic Year 2017 Advisor's Signature_____

กิตติกรรมประกาศ

โครงการมหابัณฑิตฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้จัดทำต้องขอกราบขอบคุณ กลุ่มบุคคลและหน่วยงานต่างๆ ที่กรุณาแนะนำให้คำปรึกษาช่วยเหลือทั้งทางด้านวิชาการและการดำเนินโครงการ อาทิเช่น

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริยาพร โกษา เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการมหابัณฑิตซึ่งเป็นบุคคล สำคัญอย่างยิ่งที่คอยให้คำปรึกษาแนะนำ ช่วยเหลือในด้านต่างๆ จนโครงการมหابัณฑิตฉบับนี้สำเร็จ ด้วยดี

อาจารย์ ดร.อภิชาติ สุกดีพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมโครงการมหابัณฑิตที่คอยแนะนำให้คำปรึกษา ในการเขียนและตรวจทานโครงการมหابัณฑิตจนโครงการมหابัณฑิตเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณพี่พนักงานผู้ดูแลห้องปฏิบัติการต่าง ๆ ของศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่กรุณาเอื้อเฟื้อเครื่องมือการทดสอบ และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำโครงการมหابัณฑิต

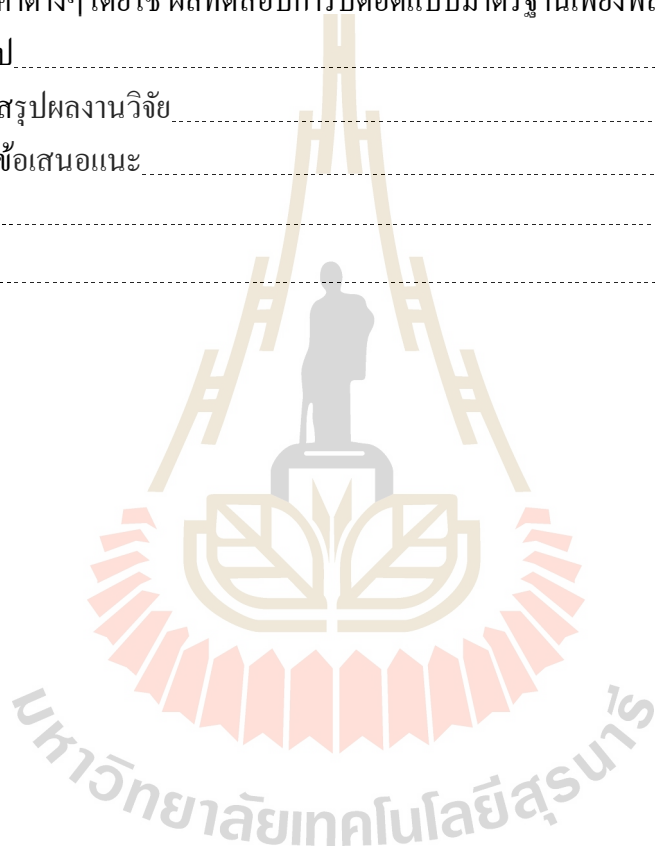
ท้ายนี้คุณงามความดีอันใดที่เกิดจากโครงการมหابัณฑิตเล่มนี้ผู้จัดทำขอมอบแด่ บิดามารดา ที่ให้การอบรมเลี้ยงดู และเป็นกำลังใจให้ตลอดมาและบุคคลต่างๆ ที่อาจกล่าวถึงไม่หมดตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์อันมีค่าให้แก่ผู้จัดทำ จนกระทั่งโครงการมหابัณฑิตฉบับนี้สำเร็จ

อภิรัฐ ปัญญาแก้ว

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	2
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 การนำความร้อน (Thermal conductivity, k).....	3
2.2 ระบบปรับอากาศ.....	7
2.2.1 หลักการทำงานของระบบปรับอากาศ.....	7
2.2.2 อุปกรณ์หลักในระบบปรับอากาศ.....	8
2.2.3 วัฏจักรการทำความเย็นแบบอัดไอ.....	10
2.3 การประยุกต์ใช้ GHE ในระบบปรับอากาศ.....	12
2.4 พื้นฐานของการออกแบบระบบแลกเปลี่ยนความร้อนใต้ดิน (S.A. M. Said et al).....	15
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19
2.5.1 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในต่างประเทศ.....	19
2.5.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องงานวิจัยในประเทศ.....	22
2.6 การประมาณค่าการนำความร้อนที่พลังงานการบดอัดและปริมาณความชื้น ค่าต่างๆ โดยใช้ผลทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานเพียงพลังงานเดียว.....	25
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	27
3.1 ขอบเขตของการดำเนินงานวิจัย.....	27
3.2 วิธีการดำเนินโครงการ.....	27
3.2.1 การทดสอบ Basic properties.....	27

3.2.2	การเตรียมตัวอย่างทดสอบ	28
3.2.3	Heat flow meter (HFM)	28
3.3	อุปกรณ์หรือเทคโนโลยีที่จะนำมาใช้ในโครงการ	29
4	การทดสอบและวิเคราะห์ผล	31
4.1	บทนำ	31
4.2	ผลการทดสอบ	31
4.3	การประมาณค่าการนำความร้อนที่พลังงานการบดอัดและปริมาณความชื้น ค่าต่างๆโดยใช้ผลทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานเพียงพลังงานเดียว	34
5	บทสรุป	41
5.1	สรุปผลงานวิจัย	41
5.2	ข้อเสนอแนะ	41
	เอกสารอ้างอิง	44
	ประวัติผู้เขียน	46



สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบของเครื่อง Heat flow meter.....	5
2.2 ช่วงของเครื่องมือที่เหมาะสมในการวัดค่าสภาพการนำความร้อน.....	6
2.3 เปรียบเทียบค่า thermal conductivity ที่วัดจากวิธี GHP และ HFM.....	7
2.4 แผนภาพระบบปรับอากาศ.....	8
2.5 วัฏจักรการทำความเย็นแบบอัดไอ.....	12
2.6 ระบบ GHE ประเภท Closed-Loop System แบบ Horizontal.....	13
2.7 ระบบ GHE ประเภท Closed-Loop System แบบ Vertical.....	14
2.8 ระบบ GHE ประเภท Closed-Loop System แบบ Pond/Lake.....	14
2.9 ระบบ GHE ประเภท Open-Loop System.....	15
2.10 ระบบการแลกเปลี่ยนความร้อนใต้ดิน (GHE).....	17
2.11 ส่วนประกอบของท่อ.....	18
2.12 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนพื้นดินแนวนอน.....	18
2.13 ประเทศในแถบที่มีการใช้ระบบ GHE Sanner et al. (2003).....	20
2.14 การติดตั้งเครื่อง GHE แบบ BHE (Borehole Heat Exchange) ในยุโรปกลาง Sanner et al. (2003).....	21
2.15 ค่าการนำความร้อนของ Ca-smectite เป็นสมบัติของความหนาแน่นแห้งที่ความชื้นต่างๆ.....	23
2.16 ค่าการนำความร้อนของ palygorskite เป็นสมบัติของความหนาแน่นแห้งที่ความชื้นต่างๆ.....	24
2.17 ค่าการนำความร้อนของ Na-smectite เป็นสมบัติของความหนาแน่นแห้งที่ความชื้นต่างๆ.....	24
3.1 การหาค่าการนำความร้อน (Thermalconductivity, k).....	29
3.2 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย.....	30
4.1 กราฟการบดอัดที่พลังงานต่างๆ ของตัวอย่างดินในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.....	32
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนกับปริมาณความชื้น ที่พลังงานการบดอัดต่าง ๆ.....	33
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนและค่าหน่วยน้ำหนักแห้ง.....	33
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมต่อปริมาณความชื้นที่พลังงาน การบดอัดแบบมาตรฐานและพลังงานการบดอัด.....	36
4.5 เปรียบเทียบผลการสอบการบดอัดและผลจากการประมาณโดยวิธีของ Horpibulsuk และคณะ (2008).....	37

4.6 การประมาณค่าการนำความร้อนโดยใช้ผลทดสอบการบดอัด	
แบบมาตรฐาน (Standard Proctor) เพียงอย่างเดียว.....	38
4.7 การประมาณค่าการนำความร้อนโดยใช้ผลทดสอบการบดอัด	
แบบมาตรฐาน (Standard Proctor) เพียงอย่างเดียว.....	39
4.8 การประมาณค่าการนำความร้อนโดยใช้ผลทดสอบการบดอัด	
แบบมาตรฐาน (Standard Proctor) เพียงอย่างเดียว.....	40



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในยุคประเทศไทย 4.0 ซึ่งเน้นการเจริญเติบโตทางด้านเศรษฐกิจอย่างมั่นคงและยั่งยืน การประหยัดพลังงานและการอนุรักษ์สภาพแวดล้อมเป็นเรื่องสำคัญยิ่งและจำเป็นต้องดำเนินการควบคู่กัน ด้วยเหตุนี้เอง รัฐบาลจึงได้ส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานทดแทนเพื่อใช้ทดแทนพลังงานจากฟอสซิลที่กำลังจะหมดไป อย่างไรก็ตาม แม้ว่าจะมีการศึกษาวิจัยพลังงานทดแทนในหลายรูปแบบในประเทศไทย (อาทิ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม ชีวมวล ชยะและก๊าซชีวภาพ) แต่กลับมีการใช้พลังงานทดแทนในส่วนของพลังงานไฟฟ้าเพียงร้อยละ 2.31 เท่านั้น อีกทั้งพลังงานทดแทนเหล่านี้มีกระบวนการที่ก่อให้เกิด Carbon footprint (CFP) ค่อนข้างสูง เช่น พลังงานแสงอาทิตย์มีค่า CFP ระหว่าง 13 ถึง 731 gCO₂/kWh ขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และเชื้อเพลิงชีวมวลมีค่า CFP ระหว่าง 25 ถึง 93 gCO₂/kWh ขึ้นอยู่กับเชื้อเพลิงชีวมวล ข้อมูลการใช้พลังงานในประเทศไทยจากกรมพลังงานทดแทนในปี 2559 พบว่าการใช้พลังงานจากไฟฟ้าคิดเป็นร้อยละ 20.7 ซึ่งสูงเป็นอันดับสองรองจากการใช้พลังงานจากน้ำมันสำเร็จรูป การใช้ไฟฟ้าในแต่ละปีมีปริมาณสูงมากในฤดูร้อน (ปลายเดือนมีนาคม – พฤษภาคม) เนื่องจากการใช้เครื่องปรับอากาศของประชาชนเพื่อบรรเทาความร้อน ผลการวิจัยเชิงสถิติพบว่าอุณหภูมิที่เพิ่มทุก 1 องศาเซลเซียส จะส่งผลต่อการเพิ่มปริมาณการใช้ไฟฟ้าของประเทศถึงประมาณ 350 เมกะวัตต์ ระบบแลกเปลี่ยนความร้อนใต้ดิน (Ground heat exchanger, GHE) เป็นทางเลือกหนึ่งในการประหยัดพลังงานที่ใช้กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยใช้ดินซึ่งมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าเป็นตัวกลาง นอกจากประหยัดพลังงานแล้ว ระบบ GHE ยังมีค่า Carbon footprint ที่ต่ำกว่าพลังงานทดแทนในรูปแบบอื่น ระบบ GHE สามารถประยุกต์ใช้ร่วมกับปั๊มความร้อน (Heat pump) ซึ่งจะช่วยเพิ่มอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนใต้ดิน และสามารถควบคุมอุณหภูมิหลังจากแลกเปลี่ยนความร้อนได้ตามต้องการ ในการออกแบบระบบ GHE จำเป็นต้องทราบค่าการนำความร้อนของดิน (Thermal conductivity, k) เพื่อใช้ในการออกแบบระบบท่อหมุนเวียนน้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนจากเครื่องปรับอากาศลงสู่ชั้นดินที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า คุณสมบัติการนำความร้อนของดินขึ้นอยู่กับ แร่ องค์ประกอบของดิน ค่าความอึดตัวด้วยน้ำ และความหนาแน่นแห้ง โดยค่าระดับความอึดตัวด้วยน้ำถูกอธิบายโดยปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในดิน ขณะที่ความหนาแน่นแห้งคือน้ำหนักของอนุภาคของดินต่อปริมาตร การเพิ่มขึ้นของทั้งระดับความอึดตัวด้วยน้ำและระดับของความหนาแน่นแห้งของดินส่งผลต่อค่าการนำความร้อน (Kersten 1949; Penner et al. 1975; Salomone et al. 1984; Salomone

and Kovacs 1984 ; Salomone and Marlow 1989; Brandon and Mitchell 1989 ; Mitchell 1991 ; Becker et al.1992) งานวิจัยนี้มีความประสงค์ที่จะศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าการนำความร้อนของดิน เพื่อสร้างสมการทำนายค่าการนำความร้อนของดินสำหรับออกแบบระบบ GHE

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาค่าการนำความร้อนของดิน (soil thermal conductivity) ในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

- 1.3.1 การทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อหาคุณสมบัติด้านความร้อนของดิน ได้แก่ การนำความร้อน (Thermal conductivity) ในพจน์ของคุณสมบัติพื้นฐานของดิน ปริมาณความชื้น และพลังงานการบดอัด
- 1.3.2 การทดสอบเพื่อศึกษาค่าการนำความร้อนของดินในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในพจน์ของปริมาณความชื้นและพลังงานการบดอัด โดยใช้เครื่องทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C518

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

ได้ทราบคุณสมบัติด้านความร้อนของดินในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

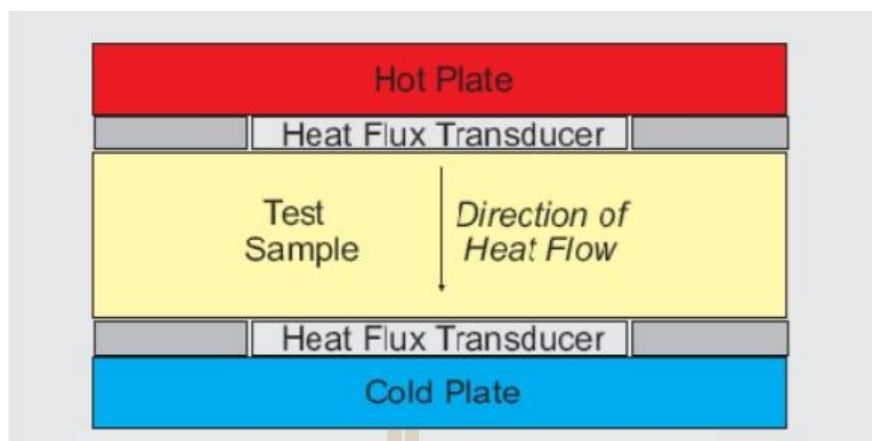
2.1 การนำความร้อน (Thermal conductivity, k)

เป็นที่ทราบกันดีว่าการถ่ายเทความร้อนของวัสดุโดยทั่วไปมีสามลักษณะคือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน การนำความร้อน (Heat conduction) ซึ่งการนำความร้อนเป็นปรากฏการณ์ที่พลังงานความร้อนมีการถ่ายเทภายในวัสดุใดๆหรือระหว่างวัสดุสองชิ้นที่สัมผัสกันโดยมีทิศทางของการเคลื่อนที่ของพลังงานความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าโดยที่ตัวกลางไม่มีการเคลื่อนที่ในการวัดสมบัติการนำความร้อนของวัสดุจะมีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของวัสดุคือค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity, k) ซึ่งเป็นการวัดอัตราการไหลของความร้อนที่จุดใดๆ ผ่านมวลวัสดุที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันระหว่างพื้นผิวของวัสดุโดยจะมีค่าแตกต่างกันตามชนิดของวัสดุถ้าวัสดุสามารถนำความร้อนได้ดีก็จะมีค่า k ที่สูงเราจะเรียกวัดสุประเภทนี้ว่า “ตัวนำความร้อน” ตัวอย่างเช่น โลหะ แต่ถ้าวัสดุใดสามารถนำความร้อนได้น้อยหรือมีค่า k ต่ำๆวัสดุประเภทนี้จะเรียกว่า “ฉนวนความร้อน” มีสมบัติในการป้องกันการถ่ายเทความร้อนได้ดีดังนั้นจึงนิยมนำมาใช้ในการหุ้มท่อในระบบต่างๆเพื่อให้ประหยัดการใช้พลังงาน โดย การวัดค่าสภาพการนำความร้อนสามารถแบ่งตามเทคนิคของการวัดได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆคือ (<http://www.ndted.org>)

1. การวัดแบบสถานะไม่คงที่ (Transient method) เป็นการวัดในขณะที่มีการให้ความร้อนเข้าไป เป็นการวัดแบบเป็น function กับเวลาซึ่งการวัดแบบนี้มีข้อดีคือไม่จำเป็นต้องรอให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่จึงทำให้ใช้เวลาในการวัดที่รวดเร็วแต่ในขณะเดียวกันก็มีข้อจำกัดอยู่บ้างคือการคำนวณจะยุ่งยากใช้สมการที่ซับซ้อนตัวอย่างวิธีการวัดแบบสถานะไม่คงที่ เช่น - Hot wire probe (ขดลวดความร้อน)การวัดแบบนี้จะใช้แหล่งความร้อนที่เป็นเส้นลวดที่ยาวมากๆเป็นตัวให้ความร้อน โดยลวดนั้นต้องไม่มีการหดหรือขยายตัวที่อุณหภูมิใด ๆ ขณะใช้งานโดยทั่วไปจะนิยมใช้ลวดทองแดงการวัดการนำความร้อนวิธีนี้สามารถประยุกต์ใช้ได้หลากหลายสะดวกรวดเร็วใช้เวลาในการวัดน้อยไม่จำกัดขนาดชิ้นงานในการวัดและสามารถวัดได้ตั้งแต่อุณหภูมิประมาณ RT ถึง 1500°C - Laser flash method วิธีนี้จะวัดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของชิ้นงานแผ่นบางเมื่อมีการให้พลังงาน laser เข้าไป แบบ pulse การวัดแบบนี้มีความรวดเร็วเหมาะกับวัสดุหลายชนิดประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายเนื่องจากช่วงอุณหภูมิของการวัดที่กว้าง

ตั้งแต่ประมาณ -120 ถึง 2800°C วิธี laser flash นั้นนอกจากจะวัดค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุแล้วยังสามารถวัดค่า Thermal diffusivity ได้อีกด้วย (en.wikipedia.org)

2. การวัดแบบสภาวะคงที่ (Steady-state method) นิยมใช้เมื่ออุณหภูมิของวัสดุที่ทำการวัดไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิในการวัด เช่น วัสดุประเภทฉนวนความร้อนซึ่งในการวัดค่าสภาพการนำความร้อนของฉนวนความร้อนมี 2 วิธีหลักๆ คือ
 - Guard hot plate (GHP) เป็นวิธีการวัดแบบ absolute method คือการวัด heat flux โดยตรง จึงไม่ต้องมีการ calibration มีความแม่นยำสูงมีช่วงของอุณหภูมิการวัดที่กว้างตั้งแต่ -160 ถึง 650°C แต่วิธีนี้มีข้อเสียคือใช้เวลาในการวัดที่นานโดยในการวัดต้องใช้ตัวอย่างในการทดสอบ 2 ชิ้นเพื่อยืนยัน ว่ามีการถ่ายเทความร้อนอย่างสมมาตรวิธีแบบ GHP นี้เป็นการวัดตามมาตรฐาน ISO 8302 และ ASTM C177
 - Heat flow meter (HFM) เป็นวิธีการวัดแบบ comparative method โดยการวัด heat flow เป็นวิธีที่ง่ายและรวดเร็วใช้ชิ้นงานทดสอบแค่ชิ้นเดียวแต่เครื่อง HFM ต้องมีการออกแบบเครื่องมือที่ดีเพื่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อนไปในทิศทางเดียวเครื่อง HFM ประกอบไปด้วย plate 2 อันที่มี อุณหภูมิแตกต่างกันคือ hot plate และ cold plate ตัวอย่างที่ทดสอบจะถูกใส่ระหว่าง plate (ดังแสดงในรูปที่ 2.1) โดยความร้อนจะมีการถ่ายเทจากอุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำ (hot plate ไปยัง cold plate) และในตัวเครื่องจะใช้ sensor ในการวัด heat flow ดังนั้นเมื่อเครื่องเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady-state) นั่นคือมี temperature gradient เป็นศูนย์เครื่องจะคำนวณเป็นสภาพการนำความร้อนการวัดค่าสภาพการนำความร้อนของฉนวนโดยวิธี Heat flow meter นี้จะเป็นการวัดตาม มาตรฐาน ASTM C518 ISO 8301 JISA 1412 และ DINEN 13163 เป็นต้น (ASTM C518: Standard Test Method for Steady-State)



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของเครื่อง Heat flow meter (en.wikipedia.org)

การคำนวณค่าสภาพการนำความร้อนของการวัด แบบ Heat flow meter จะใช้สมการการถ่ายเทความร้อนของ Fourier's law แบบ 1 มิติ คือ

$$q = -k \frac{dt}{dx} \quad \text{.....(2.1)}$$

เมื่อ

q = heat flux (W/m^2)

k = ค่าสภาพการนำความร้อน (W/m-K)

$\frac{dt}{dx}$ = temperature gradient (K/m)

ส่วนค่าความต้านทานการนำความร้อนของวัสดุ (R) สามารถคำนวณได้จาก

$$R = \frac{\Delta x}{k} \quad \text{.....(2.2)}$$

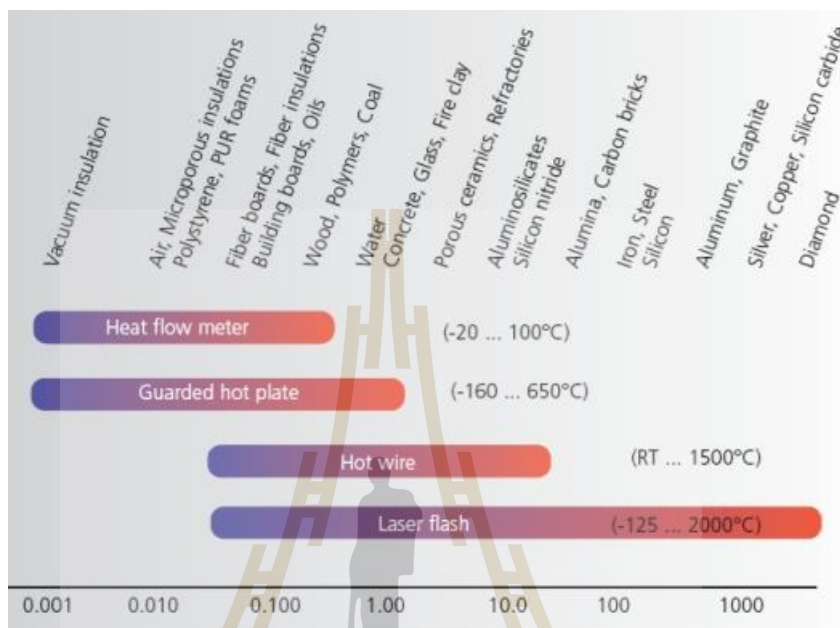
เมื่อ

Δx = ความหนาของวัสดุ (m)

R = ความต้านทานความร้อน ($\text{m}^2 \text{ K/W}$)

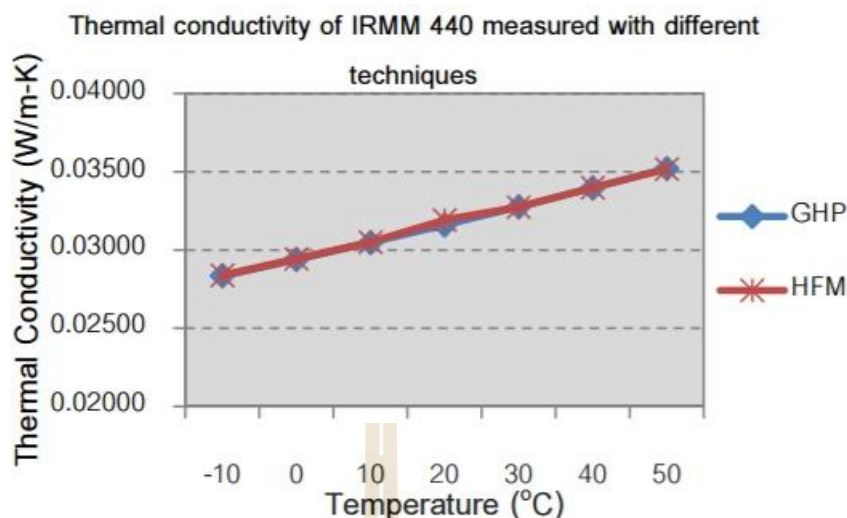
จากสมการ (2.1) ค่าความต้านทานความร้อนจะขึ้นอยู่กับความหนาและค่าสภาพการนำความร้อน โดยเมื่อความหนามากขึ้นค่าความต้านทานความร้อนจะเพิ่มขึ้นตามด้วยจะเห็นได้ว่าการวัดค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุมีหลายวิธีการเลือกเครื่องมือจึงควรเลือกให้เหมาะสมกับ

ช่วงค่าการนำความร้อนของวัสดุซึ่งถ้าเป็นวัสดุประเภทนวนจะนิยมใช้เครื่อง Guard hot plate และ Heat flow meter เนื่องจากเครื่องนี้เหมาะกับวัสดุที่มีค่าสภาพการนำความร้อนที่ต่ำซึ่งจากรูปที่ 2.2 จะแสดงถึงช่วงของเครื่องมือวัดที่เหมาะสมกับการวัดค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุแต่ละประเภท



รูปที่ 2.2 ช่วงของเครื่องมือที่เหมาะสมในการวัดค่าสภาพการนำความร้อน (en.wikipedia.org)

นอกจากนี้การวัดการนำความร้อนด้วยวิธี Guard hot plate (GHP) และ Heat flow meter (HFM) ยังมีข้อแตกต่าง กันอยู่บ้างกล่าวคือ การไหลของความร้อนโดยวิธี Heat flow meter มีการไหลแบบทิศทางเดียว ในขณะที่วิธี Guard hot plate ซึ่งใช้ตัวอย่างจำนวน 2 ชิ้น ความร้อนจะถ่ายเททั้ง ทิศทางขึ้นและลงแต่หลังจากทำการทดลองเปรียบเทียบค่าสภาพการนำความร้อนที่วัดได้จากทั้งสองวิธี โดยใช้ Resinbonded glass fiber board ซึ่งเป็น Certified reference material (IRMM-440 S137) ในช่วงอุณหภูมิเฉลี่ยตั้งแต่ -10 ถึง 50 °C ผลการทดลองพบว่าค่าสภาพการนำความร้อนจากทั้งสองวิธีมีค่าใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งจะเห็นได้ว่าวิธีการวัด Heat flow meter มีการถ่ายเทความร้อนไปในทิศทางเดียวค่าสภาพการนำความร้อนที่ได้ก็มีความถูกต้อง แม่นยำสูงไม่แตกต่างจากวิธีการแบบ Guard hot plate (www.netzsch-thermal-analysis.com)



รูปที่ 2.3 เปรียบเทียบค่า thermal conductivity ที่วัดจากวิธี GHP และ HFM
(www.netzsch-thermal-analysis.com)

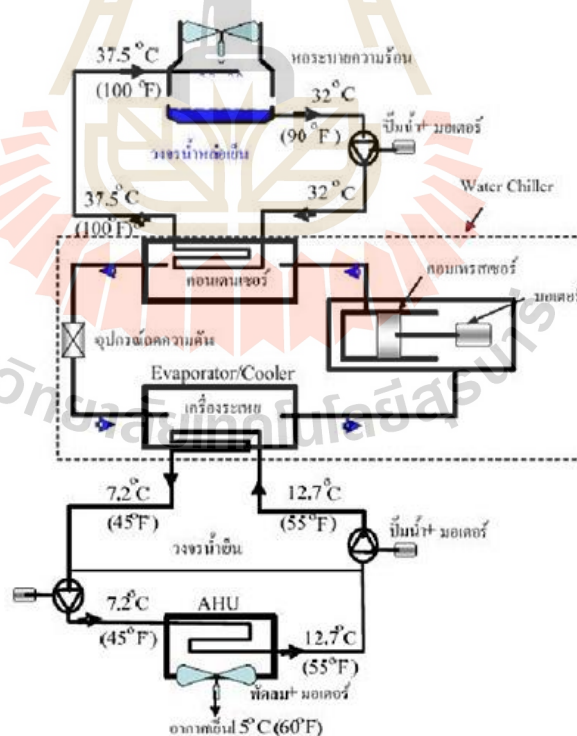
2.2 ระบบปรับอากาศ

การปรับอากาศเป็นกระบวนการควบคุมสถานะของอากาศเพื่อให้เป็นไปตามความต้องการ โดยทั่วไปปัจจัยหรือพารามิเตอร์ของอากาศที่ต้องควบคุมประกอบด้วย อุณหภูมิ ความชื้น ความสะอาด การกระจายลม และปริมาณลม การปรับอากาศมุ่งให้เกิดความรู้สึกสบายต่อผู้อยู่อาศัย อย่างไรก็ตามในอุตสาหกรรมการปรับอากาศอาจใช้เพื่อควบคุมภาวะอากาศในกระบวนการผลิต สำหรับประเทศไทยซึ่งมีภูมิอากาศแบบร้อนชื้นหน้าที่หลักของระบบปรับอากาศคือการทำความเย็นหรือการถ่ายเทความร้อนออกจากพื้นที่ด้วยวิธีการดึงอากาศออกไปโดยตรงหรือด้วยการหมุนเวียนอากาศภายในห้องผ่านคอยล์เย็นโดยใช้พัดลม น้ำยาหรือสารทำความเย็นที่อยู่ในระบบปรับอากาศจะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการขนถ่ายความร้อนเพื่อออกไประบายทิ้งภายนอกผ่านคอยล์ร้อนโดยปกติไม่ว่าจะเป็นอาคารพาณิชย์หรือโรงงานอุตสาหกรรม ระบบปรับอากาศมีการใช้พลังงานที่สูงมากการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศจึงสามารถประหยัดพลังงานและลดค่าใช้จ่ายโดยรวมได้เป็นอย่างมาก

2.2.1 หลักการทำงานของระบบปรับอากาศ

สำหรับโรงงานและอาคารธุรกิจขนาดใหญ่ ระบบปรับอากาศที่นิยมติดตั้งและใช้มักเป็นระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์ (Central Air-conditioning System) โดยเครื่องทำน้ำเย็น (Chiller) เป็นแบบระบายความร้อนด้วยน้ำ ซึ่งมีประสิทธิภาพการทำงานสูงกว่าแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 1 เครื่องทำน้ำเย็นแบบอัดไอประกอบด้วยคอมเพรสเซอร์ (Compressor) คอนเดนเซอร์ (Condenser) อีวาพอเรเตอร์ (Evaporator) และเอ็กแพนชันวาล์ว (Expansion Valve) โดยมีสารทำความเย็น เช่น R22 หรือ R134a บรรจุอยู่ในวงจรสารทำความ

เย็น เมื่อป้อนไฟฟ้าให้คอมเพรสเซอร์ คอมเพรสเซอร์จะดูดไอสารทำความเย็นจากอีวาพอเรเตอร์ แล้วอัดส่งไปที่คอนเดนเซอร์ ที่อีวาพอเรเตอร์ สารทำความเย็นจะมีความดันและอุณหภูมิต่ำ สารทำความเย็นจะดูดความร้อนจากน้ำเย็นที่ไหลผ่านอีวาพอเรเตอร์และระเหยกลายเป็นไอในขณะเดียวกันที่คอนเดนเซอร์ สารทำความเย็นจะมีความดันและอุณหภูมิสูงความร้อนจากสารทำความเย็นจะถ่ายเทให้กับน้ำหล่อเย็นทำให้สารทำความเย็นกลั่นตัวกลายเป็นของเหลวที่ความดันสูง เมื่อสารทำความเย็นไหลผ่านเอ็กแพนชันวาล์ว ความดันก็จะลดลงเท่ากับความดันต่ำที่อีวาพอเรเตอร์ สารทำความเย็นก็จะไหลครบวัฏจักรสารทำความเย็นน้ำหล่อเย็นเมื่อได้รับความร้อนจากคอนเดนเซอร์จะมีอุณหภูมิสูงขึ้น เมื่อถูกเครื่องสูบน้ำหล่อเย็นส่งไปที่หอทำความเย็น (Cooling Tower) ก็จะถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศโดยการระเหยน้ำ ทำให้น้ำที่เหลือเย็นลงแล้วไหลกลับไปรับความร้อนที่คอนเดนเซอร์อีกทำให้ครบวัฏจักรน้ำหล่อเย็นน้ำเย็นเมื่อถ่ายเทความร้อนให้กับอีวาพอเรเตอร์ก็มีอุณหภูมิต่ำลง เมื่อถูกเครื่องสูบน้ำเย็นส่งไปที่เครื่องส่งลมเย็น (Air Handling Unit) ก็จะถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศทำให้น้ำร้อนขึ้นแล้วไหลกลับไปถ่ายเทความร้อนให้กับอีวาพอเรเตอร์อีกทำให้ครบวัฏจักรน้ำเย็นเครื่องส่งลมเย็นจะดูดอากาศร้อนจากห้องปรับอากาศผ่านระบบท่อลมไปถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำเย็นทำให้อากาศมีอุณหภูมิต่ำลงแล้วส่งกลับไปที่ห้องปรับอากาศทำให้ครบวัฏจักรลมเย็น



รูปที่ 2.4 แผนภาพระบบปรับอากาศ (www.netzsch-thermal-analysis.com)

2.2.2 อุปกรณ์หลักในระบบปรับอากาศ

2.2.2.1 เครื่องทำน้ำเย็น (Water Chiller)

เครื่องทำน้ำเย็นแบบอัดไอประกอบด้วย คอมเพรสเซอร์ (Compressor) คอนเดนเซอร์ (Condenser) อีวาพอเรเตอร์ (Evaporator) และเอ็กแพนชันวาล์ว (Expansion Valve) มีสารทำความเย็น เช่น R22 หรือ R134a บรรจุอยู่ภายใน โดยทำหน้าที่ผลิตน้ำเย็นส่งไปให้กับเครื่องส่งลมเย็น เครื่องทำน้ำเย็นใช้คอมเพรสเซอร์ได้หลายแบบ

- ก) เครื่องทำน้ำเย็นขนาดใหญ่ประมาณ 500 ตันความเย็น (Ton) นิยมใช้คอมเพรสเซอร์แบบเซ็นทริฟิวเกิล (Centrifugal) ซึ่งจะมีประสิทธิภาพสูง เช่น 0.6 kW/Ton
- ข) เครื่องทำน้ำเย็นขนาดกลางประมาณ 300 ตันความเย็นจะใช้คอมเพรสเซอร์แบบสกรู (Screw) ซึ่งจะมีประสิทธิภาพปานกลาง เช่น 0.8 kW/Ton และ
- ค) เครื่องทำน้ำเย็นขนาดเล็กประมาณ 100 ตันความเย็นจะใช้คอมเพรสเซอร์ลูกสูบ (Piston) ซึ่งจะมีประสิทธิภาพต่ำ เช่น 1.0 kW/Ton

2.2.2.2 เครื่องสูบน้ำ (Water Pump)

เป็นอุปกรณ์หลักในการขับเคลื่อนของเหลว ซึ่งในที่นี้คือน้ำโดยการป้อนพลังงานเชิงกลเข้าไป ทำให้น้ำที่ถูกขับมีความดันสูงขึ้นความดันดังกล่าวจะทำหน้าที่เอาชนะแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจากท่อ ข้อต่อวาล์วและอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อให้ได้อัตราการไหลตามที่ต้องการการขับเคลื่อนเครื่องสูบน้ำนั้นอาจจะใช้แรงจากคนหรือมอเตอร์ไฟฟ้าซึ่งจะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกลในระบบปรับอากาศนั้นเครื่องสูบน้ำจะสามารถพบได้ทั้งในระบบน้ำเย็นและระบบน้ำระบายความร้อน (ระบบน้ำหล่อเย็น) เครื่องสูบน้ำจะสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบใหญ่ๆ คือ

- ก) แบบ Positive Displacement เครื่องสูบน้ำแบบนี้จะอาศัยการกักน้ำในบริเวณที่มีปริมาตรจำกัดแล้วอาศัยแรงดันเพื่อลดปริมาตรนั้นลงส่งผลให้เกิดการไหลขึ้นตัวอย่างได้แก่ แบบลูกสูบแบบโรตารีเวน และแบบไดอะแฟรม เป็นต้น เครื่องสูบน้ำประเภทนี้จะให้ความดันสูงและอัตราการไหลต่ำ
- ข) แบบ Rotodynamic เครื่องสูบน้ำแบบนี้จะอาศัยหลักการเหวี่ยงของใบพัดเพื่อให้น้ำมีความเร็วเพิ่มขึ้นและพลังงานจลน์ที่ได้จะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของความดันของน้ำที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการไหลขึ้นเช่นกัน ตัวอย่างได้แก่ แบบหอยโข่งซึ่งมีใช้กันอยู่อย่างแพร่หลายใน

ที่อยู่อาศัยอาคารพาณิชย์และโรงงานอุตสาหกรรม เครื่องสูบน้ำประเภทนี้จะให้ความดันต่ำถึงปานกลาง และอัตราการไหลสูง

2.2.2.3 หอทำความเย็น (Cooling Tower)

หอทำความเย็นเป็นอุปกรณ์ทางด้านปลายทางของระบบน้ำหล่อเย็น ซึ่งทำหน้าที่ลดอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นสู่บรรยากาศปริมาณของน้ำหล่อเย็นที่ผ่านหอทำความเย็นจะมีปริมาณลดลงจากการระเหยและ Drift Loss จึงต้องมีการเติมน้ำจากแหล่งน้ำภายนอกเข้าสู่ตัวหอทำความเย็นเพื่อรักษาปริมาณน้ำในระบบให้คงที่หอทำความเย็นสามารถแบ่งตามลักษณะทิศทางการไหลระหว่างอากาศและน้ำได้เป็น 2 ชนิดคือ แบบการไหลสวนทาง (Counter Flow) และแบบการไหลตั้งฉาก (Cross Flow)

2.2.2.4 เครื่องส่งลมเย็น (Air Handling Unit)

เครื่องส่งลมเย็นเป็นอุปกรณ์ทางด้านปลายทางของระบบน้ำเย็นซึ่งทำหน้าที่แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำเย็นที่มาจากเครื่องทำน้ำเย็นกับอากาศส่งผลให้อากาศที่ผ่านออกไปมีอุณหภูมิต่ำลงและนำไปใช้เพื่อปรับอากาศต่อไป เครื่องส่งลมเย็นเป็นเครื่องชุดคอยล์ทำลมเย็นที่ประกอบด้วยพัดลม คอยล์ทำความเย็น แดมเปอร์ และแผงกรองอากาศรวมอยู่ในตัวเครื่องเดียวกัน เครื่องส่งลมเย็นขนาดใหญ่มักจะนิยมเรียกสั้นๆว่า AHU (Air Handling Unit) สำหรับเครื่องขนาดเล็กจะเรียกว่า FCU (Fan Coil Unit) การติดตั้งเครื่องมักจะติดตั้งอยู่ภายในอาคาร โดยถ้าเป็นเครื่องขนาดเล็กมักจะติดตั้งโดยการแขวนใต้ฝ้าเพดานยึดติดกับผนังตั้งพื้นหรือซ่อนในฝ้าเพดานสำหรับเครื่องขนาดใหญ่จะจัดให้มีห้องเครื่องและนำเครื่องส่งลมเย็นขนาดใหญ่มาตั้งภายในห้องนี้หากมีการใช้ระบบท่อลมในการส่งลมเย็นก็จะต่อท่อลมมาเข้ากับเครื่องท่อลมที่ออกจากเครื่องเรียกว่า ท่อลมส่ง (Supply Air Duct) ท่อลมที่นำลมภายในห้องกลับมาที่เครื่อง เรียกว่า ท่อลมกลับ (Return Air Duct)

2.2.3 วัฏจักรการทำความเย็นแบบอัดไอ

โดยส่วนใหญ่ ระบบปรับอากาศจะใช้หน่วยทำความเย็น (Refrigeration Unit) ที่ทำงานโดยอาศัยหลักการของวัฏจักรการทำความเย็นแบบอัดไอ (Vapor Compression Cycle) วัฏจักรการทำความเย็นแบบอัดไอประกอบด้วยอุปกรณ์พื้นฐาน 4 ตัว (รูปที่ 2) ได้แก่

2.2.3.1 อีวาโปเรเตอร์หรือคอยล์เย็น (Evaporator)

ทำหน้าที่ดึงความร้อนจากอากาศ (หรือน้ำในกรณีของเครื่องทำน้ำเย็น) ที่เคลื่อนผ่านคอยล์เย็นโดยสารทำความเย็นซึ่งไหลอยู่ภายในคอยล์เย็นจะเปลี่ยนสถานะจากของผสมระหว่างของเหลวและไอที่ความดันต่ำและอุณหภูมิต่ำไปเป็นไอร้อนยิ่งยวดที่ความดันและอุณหภูมิใกล้เคียงกัน

2.2.3.2 คอมเพรสเซอร์ (Compressor)

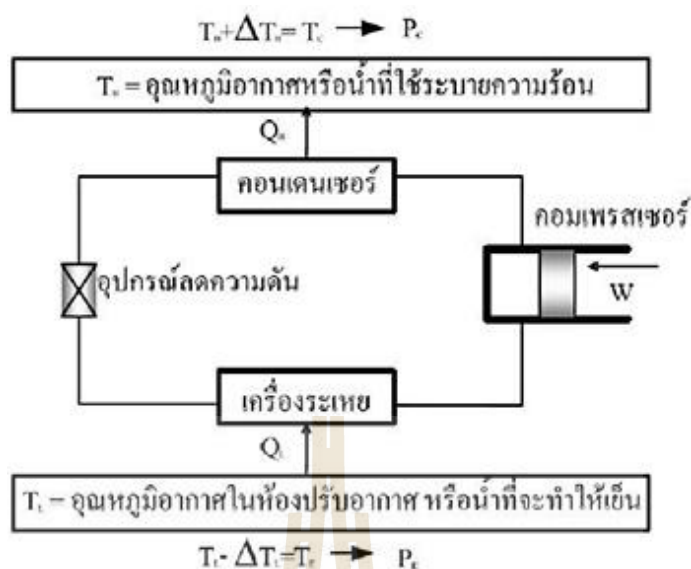
ทำหน้าที่เพิ่มความดันและอุณหภูมิของสารทำความเย็น คอมเพรสเซอร์จะอัดไอสารทำความเย็นซึ่งมีความดันและอุณหภูมิต่ำให้มีความดันและอุณหภูมิสูงขึ้น เพื่อส่งต่อไปยังคอนเดนเซอร์ คอมเพรสเซอร์เป็นอุปกรณ์ที่ทำให้สารทำความเย็นเกิดการไหลเวียนในระบบและมีอุณหภูมิสูงพอที่จะระบายความร้อนทิ้งสู่สิ่งแวดล้อม

2.2.3.3 คอนเดนเซอร์หรือคอยล์ร้อน (Condenser)

ทำหน้าที่ระบายความร้อนออกจากสารทำความเย็นที่มาจากคอมเพรสเซอร์ โดยสารทำความเย็นจะเปลี่ยนสถานะจากไอที่มีความดันสูงและอุณหภูมิสูง เป็นของเหลวที่ความดันสูงและอุณหภูมิสูงการระบายความร้อนอาจใช้วิธีระบายความร้อนด้วยอากาศหรือน้ำก็ได้

2.2.3.4 วาล์วลดความดัน (Expansion Valve)

ทำหน้าที่ลดความดันของสารทำความเย็นที่มาจากคอนเดนเซอร์ สารทำความเย็นจะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวความดันสูงและอุณหภูมิสูง เป็นของผสมระหว่างของเหลวและไอที่มีความดันต่ำและอุณหภูมิต่ำก่อนไหลเข้าสู่อีวาโปเรเตอร์ต่อไปไม่ว่าจะเป็นเครื่องปรับอากาศ อีตปั๊ม ตู้เย็น ตู้แช่ เครื่องทำน้ำแข็ง และอีกหลายอย่างจะมีหลักการเดียวกันหมด ดังแสดงในรูปที่ 2.5 คือ อาศัยกฎธรรมชาติทำให้สารเปลี่ยนแปลงสถานะ เช่น ถ้าเป็นของเหลวที่มีความดันสูงอยู่ ก็ทำให้ความดันลดลงถึงค่าหนึ่ง สารทำความเย็นจะกลายเป็นไอ วิธีการลดความดันก็ให้ไหลผ่านอุปกรณ์ลดความดัน เช่น ท่อทองแดงขนาดเล็กเรียกว่า หลอดรูเล็ก (Capillary tube) หรือวาล์วลดความดัน (Expansion Valve) มวลที่กลายเป็นไอส่วนหนึ่ง เช่น ในเครื่องปรับอากาศจะประมาณร้อยละ 20-30 สารทำความเย็นจะต้องเอาความร้อนแฝงใส่ตัวเองจำนวนมาก โดยการดูดจากมวลส่วนที่ยังเป็นของเหลวอยู่ประมาณร้อยละ 70-80 ทำให้ของเหลวเย็นลงอย่างมาก (ไอก็เย็นตามไปด้วย) ของเหลวที่เหลือซึ่งเย็นนี้ คือ ส่วนที่ใช้ในการทำความเย็นโดยจะให้น้ำไหลเข้าไปในเครื่องระเหย (Evaporator) หรือคอยล์ทำความเย็น ของเหลวที่เย็นนี้จะดูดความร้อนจำนวน Q_L จากสิ่งที่ต้องการทำให้เย็น จนตัวเองกลายเป็นไอไปหมด



รูปที่ 2.5 วัฏจักรการทำความเย็นแบบอัดไอ (www.netzsch-thermal-analysis.com)

โดยอาศัยกฎธรรมชาติในทางกลับกัน คือ ถ้าสารนั้นเป็นไออยู่เมื่อเพิ่มความดันถึงค่าหนึ่ง สารทำความเย็นต้องกลายเป็นของเหลว การเพิ่มความดันก็โดยใช้คอมเพรสเซอร์อัด คือ การเพิ่มพลังงานให้กับไอ ไอจะร้อนขึ้นมากไอร้อนนี้ถูกนำไประบายความร้อนที่คอนเดนเซอร์จนอุณหภูมิไอร้อนลดลงถึงจุดจุดหนึ่งจนเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวการเปลี่ยนสถานะจากไอเป็นของเหลวได้ จะต้องคายความร้อนแฝงออกมามาก ซึ่งความร้อนทั้งหมดที่คอนเดนเซอร์นี้คือที่ต้องระบายทิ้งจำนวน Q_H ของเหลวความดันสูงก็จะไหลผ่านวาล์วลดความดันอีกวนเวียนเป็นวัฏจักรจะเห็นว่าระบบทำความเย็นเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนสถานะของสารทำความเย็น คือความดันสูงก็จะกลายเป็นของเหลวแม้จะร้อน (อุณหภูมิสูง) สำหรับความดันต่ำก็จะกลายเป็นไอได้แม้จะเย็น (อุณหภูมิต่ำ) นั่นคือ ในวัฏจักรทำความเย็น จะมีส่วนความดันต่ำและส่วนความดันสูง ซึ่งคอมเพรสเซอร์ คือ หัวใจในการดูดสารทำความเย็นจากความดันต่ำอัดให้เป็นความดันสูง ซึ่งเป็นตัวสำคัญที่ใช้พลังงานส่วนใหญ่ ถ้าต้องการอัดมวลจำนวนเดียวกัน ความดันด้านสูงยิ่งสูงก็จะใช้พลังงานในการอัดยิ่งมาก หรือความดันด้านต่ำหรือความดันระเหยยิ่งต่ำก็จะใช้พลังงานในการอัดยิ่งมากเช่นกัน

2.3 การประยุกต์ใช้ GHE ในระบบปรับอากาศ

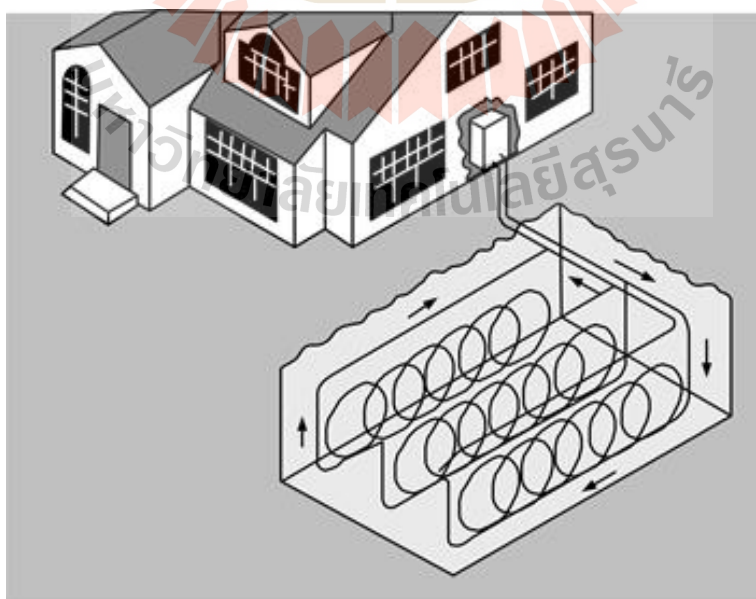
Ground Heat Exchanger (GHE) คือ การนำความร้อนใต้ดินระดับดินมาประยุกต์ ซึ่งได้มีการใช้อย่างกว้างขวางในหลายประเทศ เช่น สวีเดน สวิตเซอร์แลนด์ อเมริกา และแคนาดา เป็นต้น

ระบบ GHE นั้นเป็นระบบพื้นฐานอย่างง่ายในการนำความร้อนจากใต้ดินระดับตื้นขึ้นมาใช้ในห้องหรือช่องว่างที่ต้องการให้มีอุณหภูมิที่สูงขึ้นหรือต่ำลงแล้วแต่กรณี โดยใต้ผิวดินนั้นทำหน้าที่เป็นแหล่งพลังงานขนาดใหญ่และมีเสถียรภาพสูงทั้งยังสามารถช่วยลดการใช้พลังงานและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้อีกด้วยระบบ GHE แบ่งเป็น 2 ประเภทคือดังนี้ Closed-Loop System และ Open-Loop System ดังนี้

2.3.1 Closed-Loop Systems เป็นระบบ GHE แบบปิดที่หมุนเวียนความร้อนจากใต้ดินมาใช้ภายในห้อง ซึ่งสามารถแบ่งตามลักษณะการวางแนวท่อได้ 3 แนวคือ Horizontal, Vertical และ Pond/Lake ดังนี้

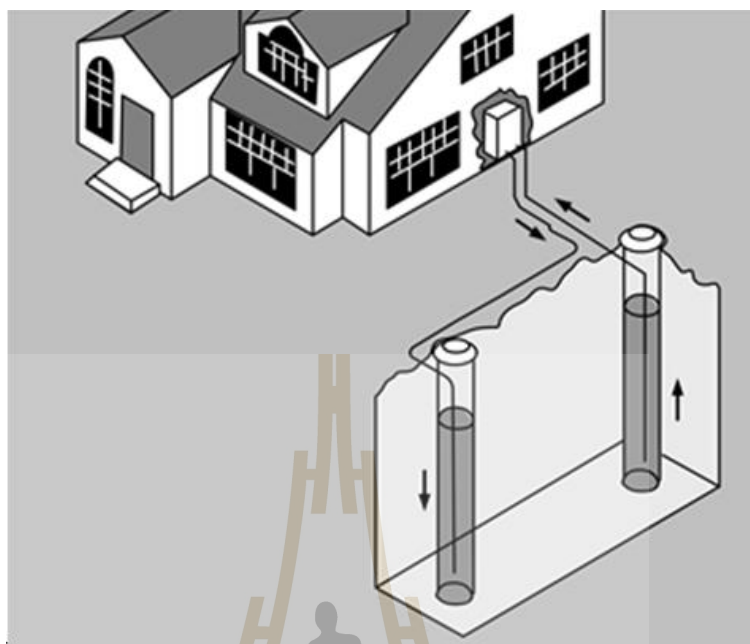
- Horizontal เป็นการวางแนวระบบ GHE ตามแนวนอน ซึ่งเหมาะสมที่สุดในการนำมาประยุกต์ใช้ในที่อยู่อาศัย โดยใช้ความลึกเพียง 4 ฟุต ดังรูปที่ 2.6
- Vertical เป็นการวางแนวระบบ GHE ตามแนวตั้ง ซึ่งเหมาะสำหรับนำมาประยุกต์ใช้ตามอาคารหรือสำนักงาน (larger scale) ซึ่งมีพื้นที่จำกัด แต่มีค่าใช้จ่ายสูง ดังรูปที่ 2.7
- Pond/Lake เป็นการวางระบบ GHE ในพื้นที่ที่มีบ่อน้ำ หรือแอ่งน้ำ โดยการหมุนเวียนน้ำผ่านบ่อน้ำ หรือแอ่งน้ำ ดังรูปที่ 2.8

2.3.2 Open-Loop System เป็นระบบ GHE แบบเปิด โดยการหมุนเวียนน้ำใต้ดินที่สะอาดมาใช้แลกเปลี่ยนอุณหภูมิภายในห้อง ดังรูปที่ 2.9

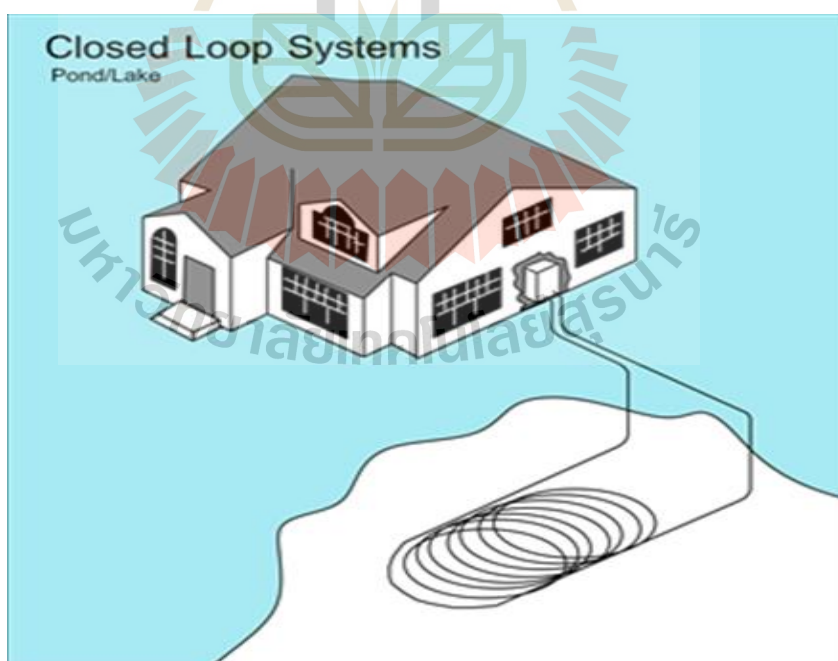


รูปที่ 2.6 ระบบ GHE ประเภท Closed-Loop System แบบ Horizontal

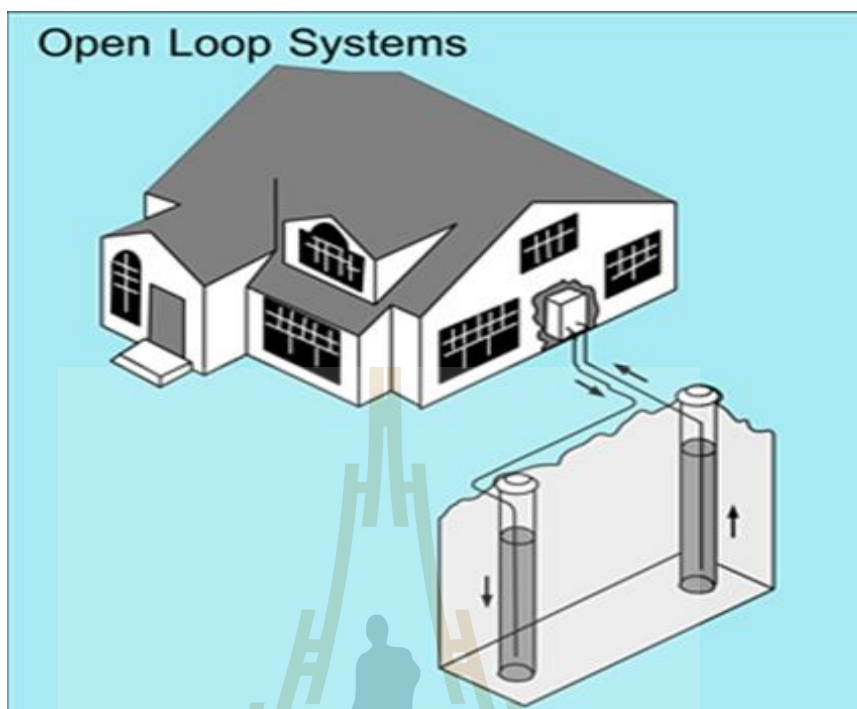
(www.netzsch-thermal-analysis.com)



รูปที่ 2.7 ระบบ GHE ประเภท Closed-Loop System แบบ Vertical
(www.netzsch-thermal-analysis.com)



รูปที่ 2.8 ระบบ GHE ประเภท Closed-Loop System แบบ Pond/Lake
(www.netzsch-thermal-analysis.com)



รูปที่ 2.9 ระบบ GHE ประเภท Open-Loop System

(www.netzsch-thermal-analysis.com)

2.4 พื้นฐานของการออกแบบระบบแลกเปลี่ยนความร้อนใต้ดิน (S.A. M. Said et al)

เมื่อทราบความสามารถของปั๊มความร้อน (Q_L) Entering water temperature (EWT) water flow rate (GPM) และ Energy Efficiency Ratio (EER) หรือ COP การถ่ายเทความร้อน (Q_H) และความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำ (T_{w-in} , T_{w-out}) สามารถหาได้จาก

$$COP = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} \quad \dots\dots\dots(2.3)$$

$$Q_H = m_w^o \times c_w \times (T_{w-out} - T_{w-in}) \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

สมมติว่าท่อแนวนอนมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน D_i และเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก D_o ฝังอยู่ที่ความลึก d จากผิวดินตามที่แสดงใน รูปที่ 2.11 ค่าความต้านทานต่อความยาวท่อ (R_{cov}) ชนิดท่อ (R_{pipe}) และดิน (R_{soil}) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$R_{total} = R_{conv} + R_{pipe} + R_{soil} \quad \text{..... (2.5)}$$

$$R_{conv} = \frac{1}{\pi D_i h_w} \quad \text{.....(2.6)}$$

$$R_{pipe} = \frac{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2\pi k_{pipe}} \quad \text{.....(2.7)}$$

$$R_{soil} = \frac{1}{SK_{soil}} \quad \text{.....(2.8)}$$

เมื่อ S คือค่าสัมประสิทธิ์รูปร่างของท่อให้เป็น (Incropera and DeWitt-2002) แสดงได้ดังนี้

$$S = \frac{2\pi}{\ln\left[\left(\frac{2d}{D_o}\right) + \sqrt{\left(\frac{2d}{D_o}\right)^2 - 1}\right]} \quad \text{.....(2.9)}$$

คุณสมบัติของน้ำมีการประเมินที่อุณหภูมิน้ำโดยเฉลี่ยเนื่องจากความแปรผันไม่สำคัญ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน h_w ได้รับการประเมินโดยใช้ความสัมพันธ์ของ Nusselt Number ดังต่อไปนี้:

$$Nu = \frac{h_w D_i}{k} = 0.023 \left(\frac{\rho V D_i}{\mu}\right)^{0.8} (Pr)^{0.3} \quad \text{..... (2.10)}$$

การทำสมดุลพลังงานกับ dx ที่แสดงในรูปที่ 2.10 การถ่ายเทความร้อนที่แตกต่างกันสามารถแสดงได้ดังนี้

$$dq = -m_w^o c_w dT_w = \frac{T_w - T_g}{R_{total}} dx$$

$$\theta_w = T_w - T_g \text{ and } X = \frac{x}{m_w^o c_w R_{total}}$$

ดังนั้นสมการการถ่ายเทความร้อนที่แตกต่างกันสามารถเขียนได้ดังนี้

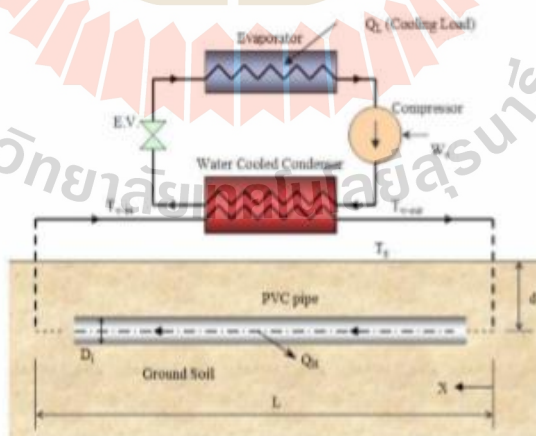
$$\frac{d\theta_w}{dX} = \theta_w \quad \text{..... (2.11)}$$

สมการการแก้สมการ (2.11) กับเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดการกระจายอุณหภูมิของน้ำตามแนวท่อและความยาวของท่อที่ต้องการได้ดังสมการที่ 2.12 และ 2.13

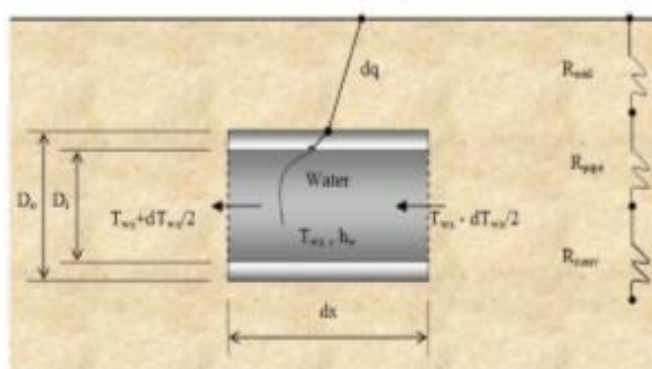
$$\frac{\theta_w}{\theta_{w_out}} = \text{Exp} \left(\frac{-x}{m_w^o c_w R_{total}} \right) \quad \text{.....(2.12)}$$

$$L = (m_w^o c_w R_{total}) \ln \left(\frac{\theta_{w_in}}{\theta_{w_out}} \right) \quad \text{.....(2.13)}$$

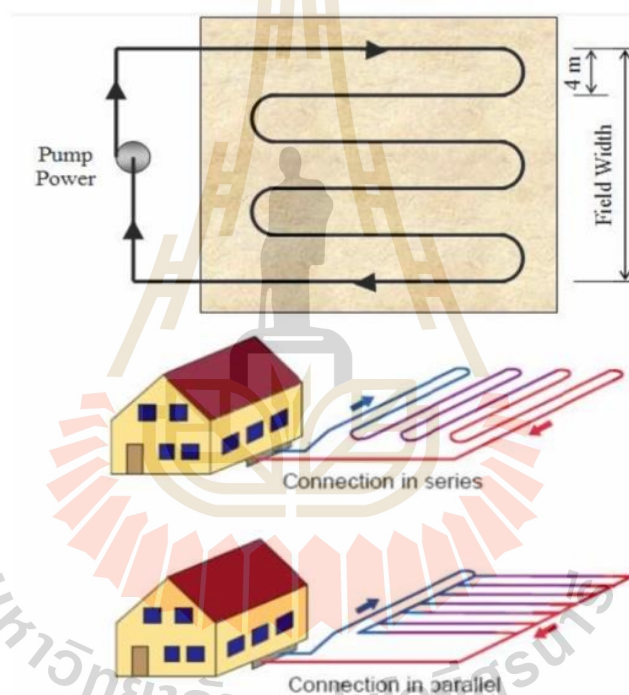
โปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้รับการพัฒนาเพื่อทำการคำนวณโดยใช้ซอฟต์แวร์ Engineering Equation Solver (EES) โปรแกรมจะคำนวณความยาวของท่อที่ต้องการจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนใต้ดินในแนวนอนโดยอิงจากรูปแบบการอธิบายข้างต้นและกำลังใช้ปั๊มน้ำหมุนเวียนที่ต้องการซอฟต์แวร์มีความสามารถในการพิจารณาการกำหนดค่าท่อปิดแบบต่างๆ (ชุดหรือขนาน) ตามที่แสดงในรูปที่ 2.14 รวมทั้งเขตข้อมูลที่ต้องใช้ตามระยะทางที่ จำกัด ที่แนะนำระหว่างท่อ



รูปที่ 2.10 ระบบการแลกเปลี่ยนความร้อนใต้ดิน(GHE) (S.A. M. Said et al)



รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบของท่อ (S.A. M. Said et al)



รูปที่ 2.12 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนพื้นดินแนวนอน (S.A. M. Said et al)

2.4.1 ศัพท์เฉพาะ

M_{wa} อัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่าน GHX

COP_{hp} ค่าสัมประสิทธิ์การทำความเย็นของชุดปั๊มความร้อน

COP_{overall} ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบทั้งหมด

C_w ความร้อนจำเพาะของน้ำ

d ความลึกของดิน

D การแพร่กระจายความร้อนของวัสดุ หมายถึงอัตราส่วนของการนำความร้อน
ของความจุความร้อน D_i เส้นผ่านศูนย์กลางภายในฝังอยู่ที่ความลึก d จากพื้นผิว
พื้นผิว

D_o เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกฝังอยู่ที่ความลึก d จากพื้นดิน

D_s ความสามารถในการกระจายความร้อนของดิน

hw ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

k_s ค่าการนำความร้อนของดิน

QH ภาระการแลกเปลี่ยนความร้อน

QL กำลังการผลิตป้อนความร้อน

S ค่าสัมประสิทธิ์การนำของท่อ

T อุณหภูมิของพื้นดินที่ความลึกที่กำหนด $^{\circ}C$,

T_a ความกว้างของอุณหภูมิผิวที่สัมผัสตลอดทั้งปี

T_i, a อุณหภูมิที่ไหลเข้าของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนพื้นดิน

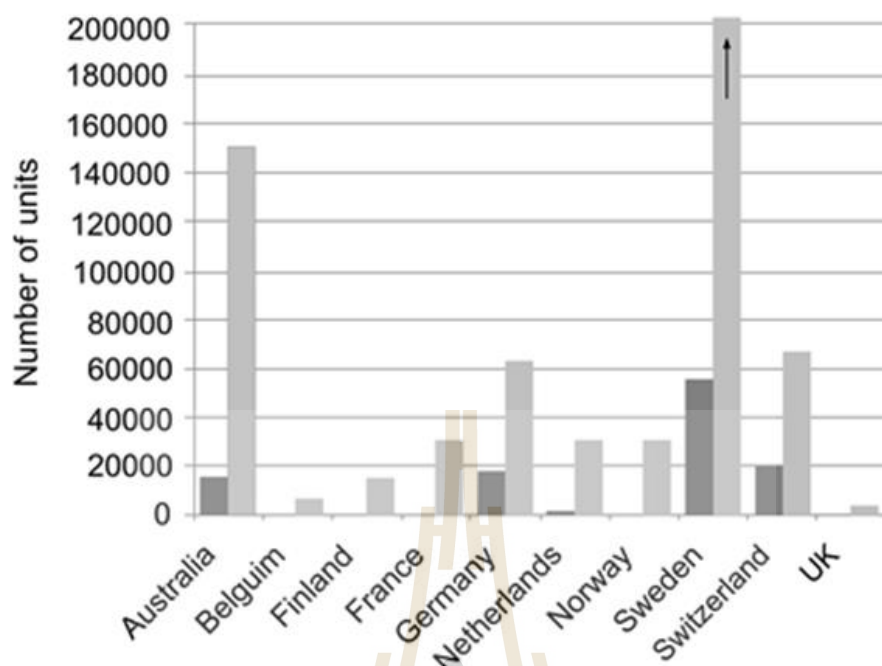
T_m อุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ย (อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยหรือดินที่ลึก)

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผลการทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้องและงานวิจัยเดิม สามารถแบ่งงานวิจัยและการศึกษา
ออกเป็น 2 ประเภทคือ เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในต่างประเทศ และเอกสารและงานวิจัยที่
เกี่ยวข้องงานวิจัยในประเทศ ดังนี้

2.5.1 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในต่างประเทศ

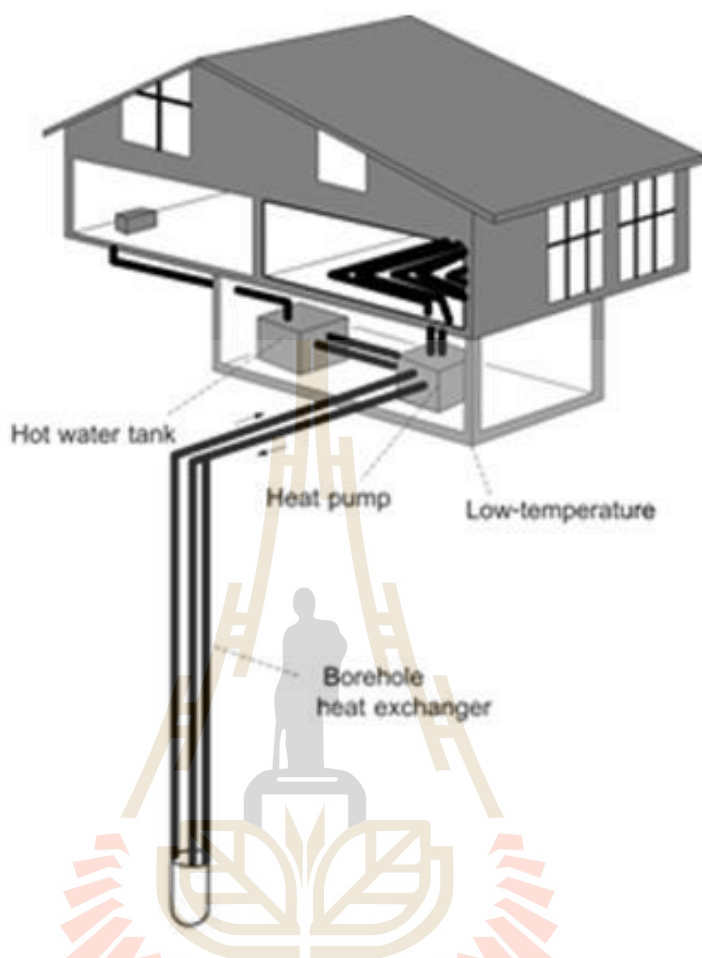
Sanner et al. (2003) ได้กล่าวว่าการแลกเปลี่ยนความร้อนใต้ดิน (GHE) มีการใช้กัน
กันมายาวนานกว่า 50 ปี ทั่วโลก โดยประเทศแรกคือประเทศอเมริกา ซึ่งเป็นเทคโนโลยีในระยะ
เริ่มต้น ที่ใช้พลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิลและการแลกเปลี่ยนความร้อนจากอากาศสู่อากาศ ระบบ
GHE ยังนิยมใช้ในประเทศเยอรมัน สวิตเซอร์แลนด์ ออสเตรีย สวีเดน เดนมาร์ก นอร์เวย์ และ
ฝรั่งเศส (รูปที่ 2.13)



รูปที่ 2.13 ประเทศในแถบที่มีการใช้ระบบ GHE Sanner et al. (2003)

Sanner et al. (2003) ได้แสดงลักษณะของระบบ GHE และแหล่งกักเก็บพลังงานความร้อนใต้ดินในยุโรป ดังนี้

- GSHP (Ground Source Heat Pump)
- BHE (Borehole Heat Exchange)
- UTES (Underground Thermal Energy Storage)



รูปที่ 2.14 การติดตั้งเครื่อง GHE แบบ BHE (Borehole Heat Exchange)

ในยุโรปกลาง Sanner et al. (2003)

โดยส่วนใหญ่ประเทศในแถบยุโรปไม่สามารถสะสมแหล่งพลังงานน้ำได้ การใช้ประโยชน์ของชั้นน้ำบาดาลเอนทาลปีเพื่อใช้ในการทำความร้อนให้กับผู้บริโภคจำนวนมากมีข้อจำกัดในพื้นที่ อันเนื่องมาจากสภาพทางธรณีวิทยา การประยุกต์ใช้ระบบ GHE จึงเป็นตัวเลือกที่สำคัญในการใช้พลังงานจากแหล่งความร้อนใต้ดินระดับตื้น ระบบ GHE โดยส่วนใหญ่จะใช้โหมดความร้อน และนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในยุโรปตอนใต้ โดยเฉพาะในประเทศกรีซและทางตะวันตกของประเทศตุรกี (Papageoragakis, 1993) ต่อมา ระบบ GHE ได้ถูกนำมาใช้ติดตั้งที่ National Technical University of Athens โดยใช้ทำความร้อนกับความเย็นให้กับตึกวิศวกรรม

เหมืองแร่ (Karytsas et al., 2002) ต่อมาเทคโนโลยี GHE ได้ถูกนำมาใช้กับเครื่องทำความเย็นอย่างแพร่หลายในยุโรปตอนใต้ (Mendrinis et al., 2002)

GSHP (Ground Source Heat Pump) เป็นระบบ GHE ที่ต้องใช้ฮีทปั๊มและระบบการแลกเปลี่ยนความร้อนบนผิวดิน (รูปที่ 8) ประกอบด้วยตัวแลกเปลี่ยนความร้อนผิวดินหรือระบบป้อนน้ำบาดาลจากบ่อ โดยความร้อนจะส่งผ่านออกมาสู่พื้นดิน ส่วนประกอบของ GSHP ได้แก่ บ่อบาดาล borehole heat exchanges (BHE) ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนในแนวนอน การศึกษาวิจัยในระบบ GSHP มีอย่างแพร่หลายในประเทศสวีเดน (Claesson and Eskilson, 1988; Eskilson and Claesson, 1988) ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ (Gilby and Hopkirk, 1985; Hopkirk et al. 1988) และประเทศเยอรมัน (Sanner, 1986)

2.5.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องงานวิจัยในประเทศ

Uchida et al. (2009) ศึกษาอุณหภูมิใต้ดินในที่ราบเจ้าพระยาในประเทศไทย และพบว่าที่ราบเจ้าพระยาตอนบน มีอุณหภูมิใต้ดินลดลง 1 องศาเซลเซียส ทุกๆ 100 เมตร ในขณะที่ที่ราบเจ้าพระยาตอนล่าง นั้นกลับมีอุณหภูมิใต้ดินสูงและสูงกว่าพื้นที่โดยรอบอีกด้วย ดังนั้น ที่ราบเจ้าพระยาตอนบนจึงเหมาะสำหรับการติดตั้งระบบ GHE เพื่อนำความเย็นใต้ดินมาใช้ประโยชน์

Yasukawa et al. (2009) ศึกษาอุณหภูมิใต้ดินในทวีปเอเชียเขตร้อน พบว่าที่ระดับความลึก 50 เมตร เป็นอย่างน้อยเหมาะสำหรับการติดตั้ง GHE นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาในแถบที่ราบลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาของประเทศไทย ในจังหวัดกรุงเทพมหานคร อโยธยา นครสวรรค์ พิษณุโลก สุโขทัย และกาญจนบุรี และพบว่าที่จังหวัดพิษณุโลก นครสวรรค์ และกาญจนบุรี อุณหภูมิใต้ดินมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศไม่ตลอดทั้งปี ส่วนจังหวัดสุโขทัยนั้น กลับมีอุณหภูมิใต้ดินสูงกว่าอุณหภูมิอากาศตลอดทั้งปี ซึ่งไม่เหมาะสมอย่างยิ่งในการนำมาใช้ในการทำความเย็น แต่ที่จังหวัดกรุงเทพมหานครและอโยธยานั้น มีอุณหภูมิใต้ดินต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศเกือบตลอดทั้งปี

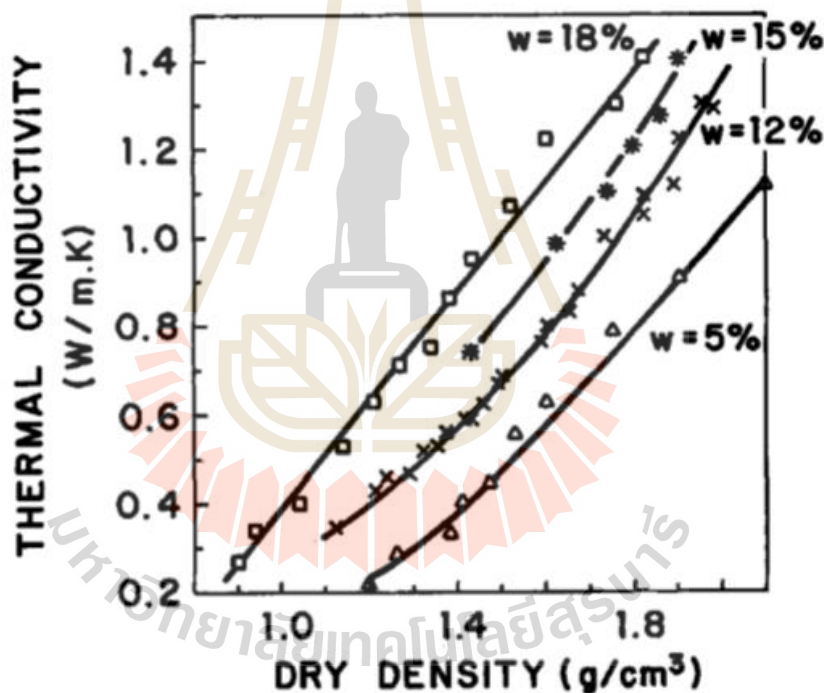
Yasukawa et al. (2009) วิจัยการทำงานของเครื่อง GHE โดยติดตั้งที่จังหวัดกำแพงเพชรเป็นระยะเวลา 17 เดือน ตั้งแต่เดือน ต.ค. 2549 ถึง พ.ย. 2551 ที่ระดับความลึก 56 เมตร เพื่อนำความเย็นจากใต้ดินมาใช้ประโยชน์ พบว่าอุณหภูมิในท่อใต้ดินเพิ่มขึ้นร้อยละ 85 หลังจากเครื่อง GHE ทำงาน และความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของน้ำที่ไหลเข้าและไหลออกจากห้องวิจัยมีค่าไม่เกิน 5K

Takashima et al. (2006) วิจัยการใช้ระบบ GHE ในประเทศไทยครั้งแรกในภาคกลางที่ จ.กำแพงเพชร เมื่อปี 2006 และต่อมาที่กรุงเทพมหานคร ในปี 2010 Takashima et al. (2011) พบว่าอุณหภูมิใต้ดินโดยเฉลี่ยของประเทศไทยมีค่า 5-10 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิในบรรยากาศ และสามารถนำมาทดแทนการใช้พลังงานจากเครื่องปรับอากาศได้ถึงร้อยละ 20 ถึง 40

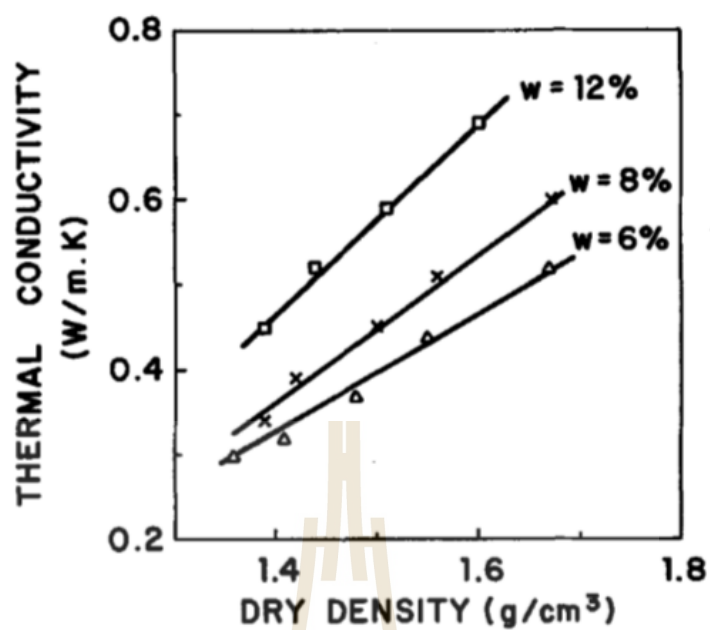
การฝังท่อในแนวระนาบที่ระดับความลึก 1 เมตร เหมาะสมสำหรับประเทศในเขตร้อนเนื่องจากมีค่าใช้จ่ายต่ำ

2.5.3 ผลกระทบของค่าความหนาแน่นและค่าความชื้นต่อค่าการนำความร้อนของดินเหนียว

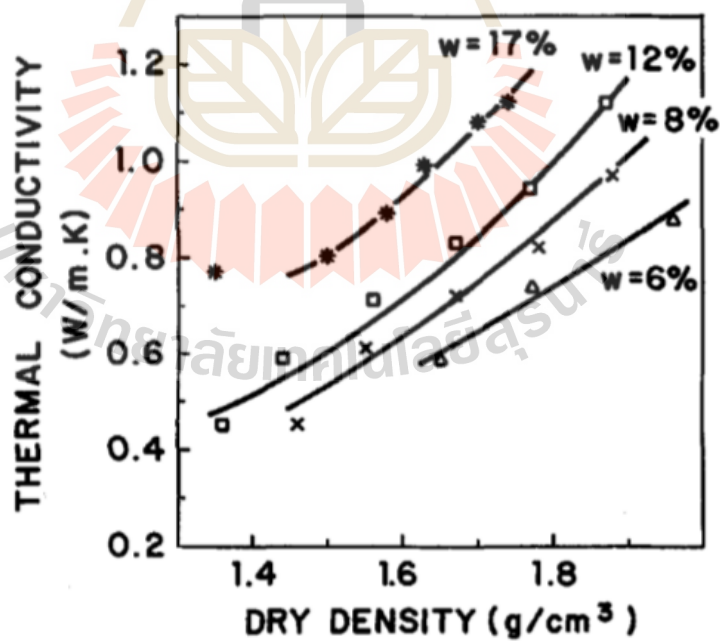
ALAIN BEZIAT et al. (1988) ได้นำเสนอข้อมูลการนำความร้อนสำหรับ Ca-smectite, Na-smectite, illite และ palygorskite ที่มีการอัดแน่นในรูปของความหนาแน่น (ความดันอัด) ปริมาณน้ำและอุณหภูมิ ดินเหนียวทั้งหมดมีลักษณะคล้ายคลึงกันคือการนำความร้อนเพิ่มขึ้นโดยตรงกับความหนาแน่นและปริมาณน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 0.63 เป็น 1.32 W / m.K เนื่องจากความหนาแน่นแห้งเพิ่มขึ้นจาก 1.2 เป็น 1.8 g / cm³



รูปที่ 2.15 ค่าการนำความร้อนของ Ca-smectite เป็นสมบัติของความหนาแน่นแห้งที่ความชื้นต่างๆ (ALAIN BEZIAT et al. 1988)



รูปที่ 2.16 ค่าการนำความร้อนของ palygorskite เป็นสมบัติของความหนาแน่นแห้งที่ความชื้นต่าง ๆ (ALAIN BEZIAT et al. 1988)



รูปที่ 2.17 ค่าการนำความร้อนของ Na-smectite เป็นสมบัติของความหนาแน่นแห้งที่ความชื้นต่าง ๆ (ALAIN BEZIAT et al. 1988)

ดังแสดงในรูปที่ 2.15-2.17 ค่าการนำความร้อนเพิ่มขึ้นด้วยความหนาแน่นและปริมาณน้ำ ตัวอย่างเช่นค่าการนำความร้อนของ Ca-smectite ที่มีปริมาณน้ำ 12% เพิ่มขึ้นจาก 0.5 เป็น 1.3 W / m K เมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้นจาก 1.30 เป็น 1.95 g / cm a. ค่าการนำความร้อนของตัวอย่างที่มีความหนาแน่นแห้งเท่ากับ 1.6 กรัม / ซม. เพิ่มขึ้นจาก 0.6 เป็น 1.2 W / m.K เนื่องจากปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นจาก 5 ถึง 18% ผลลัพธ์เหล่านี้สามารถอธิบายได้โดยการพิจารณาค่าที่เกี่ยวข้องของการนำความร้อนเฉพาะ (ALAIN BEZIAT et al 1988)

2.6 การประมาณค่าการนำความร้อนที่พลังงานการบดอัดและปริมาณความชื้นค่าต่างๆ โดยใช้ผลทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานเพียงพลังงานเดียว

2.6.1 การทำนายกราฟการบดอัด

Horpibulsuk และคณะ (2008) ได้เสนอวิธีการประมาณค่าความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นที่พลังงานการบดอัดค่าต่างๆ โดยใช้ความสัมพันธ์นี้ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและอัตราส่วนการอิ่มตัวด้วยน้ำที่พลังงานการบดอัดค่าหนึ่ง

$$w = A_d S^{B_d} \text{ สำหรับด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสม} \quad \dots\dots\dots(4.2)$$

$$w = A_w S^{B_w} \text{ สำหรับด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม} \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

เมื่อ A_d A_w B_d และ B_w คือ ค่าคงที่ w คือ ปริมาณความชื้น และ S คือ อัตราส่วนการอิ่มตัวด้วยน้ำ โดยที่ w และ S แสดงค่าเป็นร้อยละและอัตราส่วนทศนิยม ตามลำดับ
ค่า A_d และ A_w สามารถประมาณโดยใช้สมการที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ ดังนี้

$$A_d = \frac{OWC}{ODS^{B_d}} \quad \dots\dots\dots (4.4)$$

$$A_w = \frac{OWC}{ODS^{B_w}} \quad \dots\dots\dots (4.5)$$

เมื่อ OWC คือ อัตราส่วนการอิ่มตัวด้วยน้ำเหมาะสม ค่า B_d มีค่าประมาณ 0.70 ถึง 0.86 และ B_w มีค่าประมาณ 1.50 ถึง 2.72

เมื่อทราบปริมาณความชื้นและอัตราส่วนการอิ่มตัวด้วยน้ำที่พลังงานการบดอัดค่าหนึ่งแล้วสามารถคำนวณค่าความหนาแน่นแห้งของดินได้โดยใช้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\gamma_d = \gamma_w / \left(\frac{w}{S} + \frac{1}{G_s} \right) \quad \dots\dots\dots (4.6)$$

เมื่อ γ_w คือ ความหนาแน่นของน้ำและ G_s คือ ความถ่วงจำเพาะของดิน
นอกจากนี้ Horpibulsuk และคณะ (2008) ยังได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมต่อปริมาณความชื้นที่พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐานและพลังงานการบดอัด ดังนี้

$$\frac{OWC}{OWC_{st}} = 2.09 - 0.39 \log E \quad \dots\dots\dots (4.7)$$

เมื่อ OWC คือปริมาณความชื้นเหมาะสม OWC_{st} คือปริมาณความชื้นเหมาะสมที่พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน และ E คือพลังงานการบดอัด รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ตามสมการที่ 4.5 และผลจากการทดสอบที่ได้จากงานวิจัยนี้ จะเห็นว่าผลการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับความสัมพันธ์ที่เสนอโดย Horpibulsuk และคณะ (2008)

บทที่ 3

วิธีดำเนินการศึกษา

3.1 ขอบเขตของการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินการของโครงการวิจัยนี้แบ่งออกเป็นสองส่วนหลักคือ 1) การทดสอบเพื่อศึกษาค่าการนำความร้อนของดินในห้องปฏิบัติการ 2) ใช้ค่าการนำความร้อนที่ได้จากการศึกษาวิเคราะห์และออกแบบระบบ GHE แบบระบบปิดโดยจัดวางท่อในแนวนอน (Horizontal closed-loop system) เพื่อลดอุณหภูมิของน้ำยาทำความเย็น (Refrigerant)

งานส่วนแรกเป็นการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อหาคุณสมบัติด้านความร้อนของดิน ได้แก่ การนำความร้อน (Thermal conductivity) ในพจน์ของคุณสมบัติพื้นฐานของดิน อุณหภูมิ ปริมาณความชื้น และพลังงานการบดอัด งานส่วนที่สองเป็นการนำผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการและลักษณะการใช้ระบบปรับอากาศมาใช้ในการออกแบบเบื้องต้น อันได้แก่ ความยาวท่อ รูปแบบการจัดวางท่อ และขนาดปั๊มที่เหมาะสมของระบบ GHE แบบระบบปิดที่จัดวางท่อในแนวนอน (Horizontal closed-loop system)

3.2 วิธีการดำเนินโครงการ

งานวิจัยนี้จะมีการดำเนินการ ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยแบ่งการทำงานออกเป็นสี่ส่วนหลักดังนี้

3.2.1 การทดสอบ Basic properties

3.2.1.1 Liquid limit ด้วยวิธี Casagrande method ใช้อุปกรณ์ของ Casagrande (kah-sah grahn-dey) ซึ่งทดสอบโดยการนำ ดินคลุกกับน้ำ แล้วป้ายลงบน กระดาษทองเหลืองแล้วปาดร่องในดินให้ถึงก้นกระดาษด้วยเครื่องมือปาดร่องให้ดินแยกเป็น 2 ส่วน จากนั้น เคาะโดยการยกกระดาษให้สูงขึ้น 10 ซม. แล้วปล่อยให้ตกอย่างอิสระจนดินไหลมาชนกันเป็นระยะประมาณ 13 มิลลิเมตร โดยตัวอย่างทดสอบมีค่า Liquid limit = 50%

Plastic limit คือปริมาณความชื้นในดิน (Moisture contents) ที่ จุดที่ปั้นดินให้เป็นเส้นยาวมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 มม. แล้วดินเริ่มร่วนและแตกออก โดยตัวอย่างทดสอบมีค่า Plastic limit = 11.2%

เนื่องจากค่า LL = 50% จึงสามารถจำแนกดินได้เป็นดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกสูง (High Plasticity Clay), (CH)

3.2.1.2 ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Specific gravity, G_s) คืออัตราส่วนระหว่างหน่วยน้ำหนักโดยเฉลี่ยของเม็ดดินต่อหน่วยน้ำหนักของน้ำที่อุณหภูมิ 4°C ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของดิน ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 2.6-2.9 โดยทราย ซึ่งมีแร่องค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นควอตซ์ (quartz) เรามักจะสมมุติว่าดินนั้นมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.65 แต่ถ้าดินนั้นมีแร่องค์ประกอบอื่นๆอยู่ด้วยค่าความถ่วงจำเพาะก็จะเปลี่ยนไป ในกรณีของดินเหนียว แร่ องค์ประกอบส่วนใหญ่จะมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าควอตซ์ซึ่งมีค่าทั่วไปโดยประมาณ 2.66-2.90 และใน ดินที่มีออกไซด์ของโลหะเป็นองค์ประกอบจะมีค่าความถ่วงจำเพาะสูงกว่าทรายและดินเหนียว ในทาง ตรงกันข้ามถ้าดินมีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบจะมีค่าความถ่วงจำเพาะน้อยกว่า 2.65 ซึ่งในบางกรณีอาจจะ ต่ำกว่า 2.0 หรือในกรณีที่ดินมีรูพรุนจะทำให้มีค่าความถ่วงจำ เพาะที่ได้จากการทดสอบต่ำกว่าค่าความถ่วงจำ เพาะของเนื้อดินจริงๆ

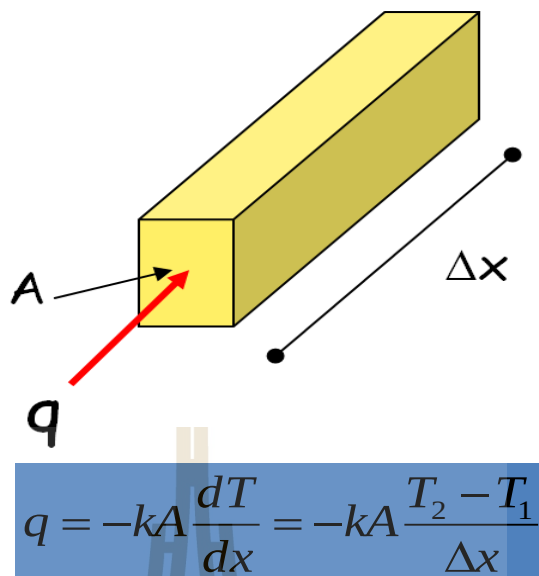
3.2.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

นำดินภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีมาทดสอบการบดอัดในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ปริมาณความชื้นและพลังงานการบดอัดค่าต่างๆ

โดยจะมีตัวอย่างทดสอบ 4 กลุ่ม โดยบดอัดที่พลังงานแบบ modified proctor half modified proctor Standard proctor และ half Standard proctor โดยในแต่ละกลุ่มตัวอย่างจะใช้ค่าที่ 0.6 0.8 1.0 1.2 และ 1.4 ของค่าปริมาณความชื้นเหมาะสม (Optimum Water Content, OWC) เพื่อนำมาทดสอบหาค่า Thermal Conductivity ต่อไป

3.2.3 Heat flow meter (HFM)

วิธีการวัดแบบ comparative method โดยการวัด heat flow เป็นวิธีที่ง่ายและ รวดเร็ว ใช้ในงานทดสอบแค่ชิ้นเดียว แต่เครื่อง HFM ต้องมีการ ออกแบบเครื่องมือที่ดีเพื่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อนไปในทิศทางเดียว เครื่อง HFM ประกอบไปด้วย plate 2 อันที่มี อุณหภูมิแตกต่างกัน คือ hot plate และ cold plate ตัวอย่างที่ทดสอบจะถูกใส่ระหว่าง plate โดย ความร้อนจะมีการถ่ายเทจากอุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำ (hot plate ไปยัง cold plate) และในตัวเครื่องจะใช้ sensor ในการวัด heat flow ดังนั้นเมื่อเครื่องเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady-state) นั่นคือมี temperature gradient เป็นศูนย์เครื่องจะคำนวณเป็นสภาพการนำความร้อน การวัดค่าสภาพการนำความร้อนของฉนวนโดยวิธี Heat flow meter นี้จะเป็นการวัดตาม มาตรฐาน ASTM C518 ISO 8301 JIS A 1412 และ DIN EN13163 เป็นต้น



รูปที่ 3.1 การหาค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity, k)

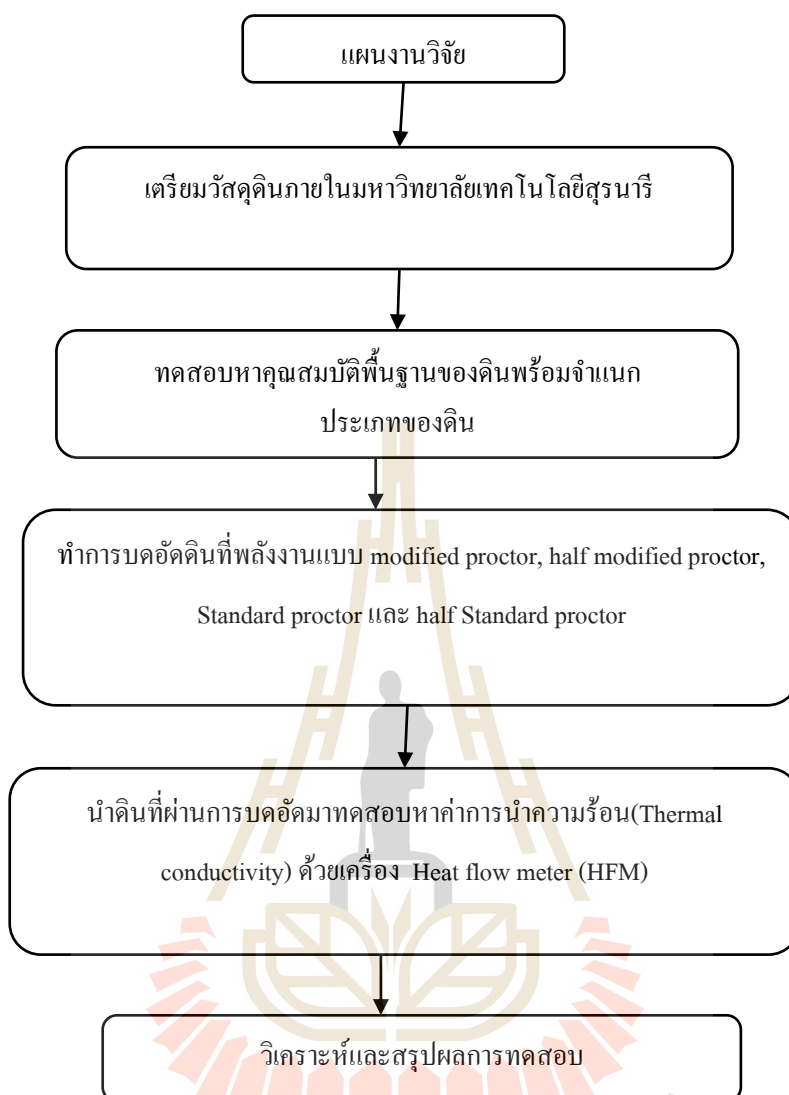
- q = อัตราการนำความร้อน, W
- A = พื้นที่ในการถ่ายโอนความร้อน, m^2
- ΔT = ความแตกต่างของอุณหภูมิ, $^{\circ}C$
- Δx = ระยะทางที่ความร้อนเคลื่อนที่ผ่าน, m
- K = ค่าการนำความร้อน thermal conductivity, $W/m^{\circ}C$

3.3 อุปกรณ์หรือเทคโนโลยีที่จะนำมาใช้ในโครงการ

3.3.1 อุปกรณ์หรือเทคโนโลยีที่มีอยู่แล้ว

3.3.1.1 เครื่องมือวัดค่าการนำความร้อนของดิน (Soil thermal conductivity) เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดการนำความร้อนด้วยวิธี comparative method ซึ่งเป็นค่าที่สำคัญอย่างมากในการออกแบบระบบท่อหมุนเวียนน้ำของระบบ GHE เพื่อใช้ลดอุณหภูมิของน้ำยาทำความเย็นในระบบปรับอากาศ

3.3.1.2 ดินภายในพื้นที่ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย

บทที่ 4

การทดสอบและวิเคราะห์ผล

4.1 บทนำ

บทนี้จะนำเสนอผลการทดสอบการหาค่าการนำความร้อน ตั้งแต่การเตรียมตัวอย่างทดสอบ จนถึงขั้นตอนการทดสอบการหาค่าการนำความร้อน โดยใช้ตัวอย่างทดสอบคือ ดินภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยจะทำการเตรียมตัวอย่างทดสอบที่ค่าพลังงานการบดอัดค่าต่างๆ โดยจะมีตัวอย่างทดสอบ 4 กลุ่มโดยบดอัดที่พลังงานแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor) ครึ่งสูงกว่ามาตรฐาน (Half-Modified Proctor) มาตรฐาน (Standard Proctor) และครึ่งมาตรฐาน (half Standard proctor) โดยในแต่ละกลุ่มตัวอย่างจะใช้ค่าที่ 0.6 0.8 1.0 1.2 และ 1.4 ของค่าปริมาณความชื้นเหมาะสม (Optimum Water Content, OWC)

4.2 ผลการทดสอบ

4.2.1 จากกราฟการบดอัดดังรูปที่ 4.1 กราฟจะมีลักษณะเป็นรูปประฆังคว่ำ โดยที่ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งหน่วยน้ำหนักแห้งจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นจนถึงค่าปริมาณความชื้นเหมาะสม (Optimum Water content, OWC) จะมีค่า หน่วยน้ำหนักแห้งมากที่สุด และเมื่อค่า ปริมาณความชื้น เพิ่มขึ้นจนเลยจุดที่เป็นปริมาณความชื้นเหมาะสม ค่าหน่วยน้ำหนักแห้ง จะมีค่าลดลง

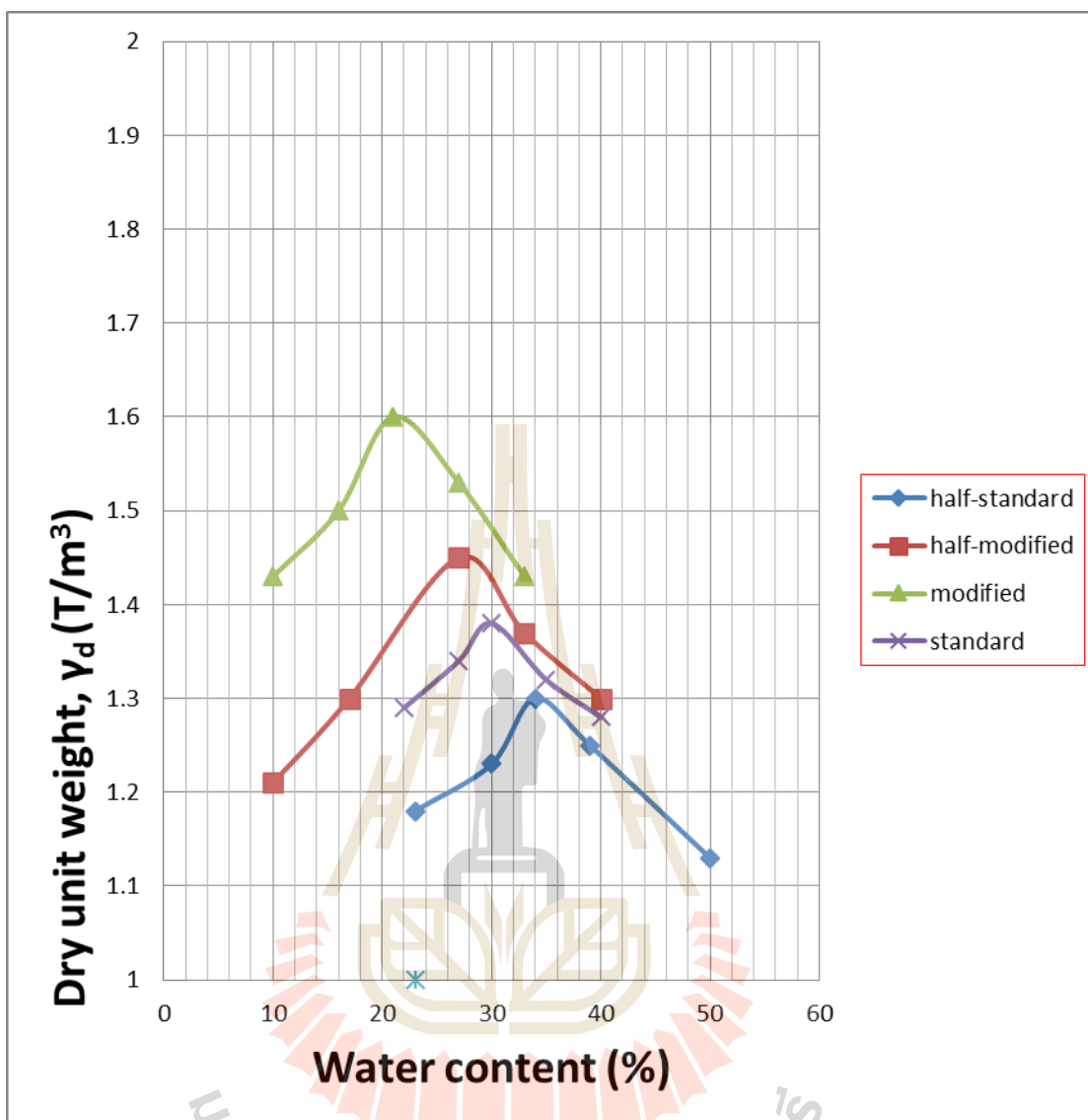
4.2.2 จากกราฟการบดอัด ดังรูปที่ 4.1 เมื่อพิจารณาที่ค่าพลังงานการบดอัดจะเห็นว่าเมื่อค่าพลังงานการบดอัดสูงขึ้นค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดมีค่าสูงขึ้นเช่นกัน แต่ ปริมาณความชื้นเหมาะสมจะมีค่าที่ลดลง ดังนี้

พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modify Proctor) 2693.3 kJ/m^3 , ปริมาณความชื้นเหมาะสมเท่ากับร้อยละ 18 หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดเท่ากับ 1.56 T/m^3

พลังงานการบดอัดมาตรฐาน (Standard Proctor) 592.5 kJ/m^3 , ปริมาณความชื้นเหมาะสมเท่ากับร้อยละ 30 หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดเท่ากับ 1.38 T/m^3

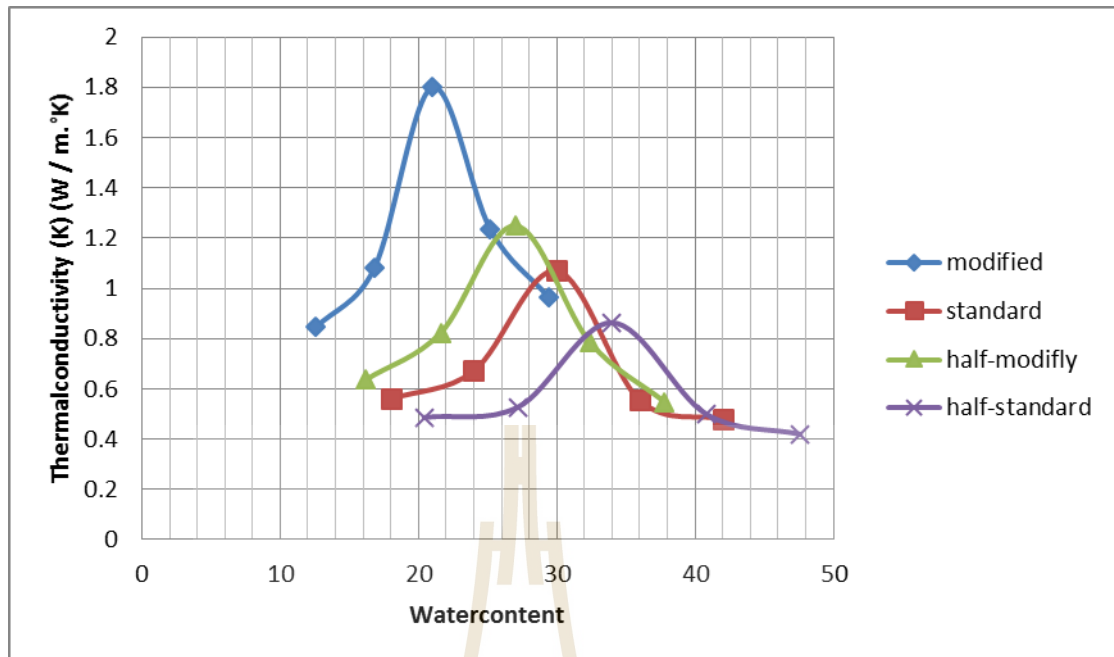
พลังงานการบดอัดแบบครึ่งสูงกว่ามาตรฐาน (Half-Modify Proctor) 1346.65 kJ/m^3 , ปริมาณความชื้นเหมาะสมเท่ากับร้อยละ 25 หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดเท่ากับ 1.45 T/m^3

พลังงานการบดอัดครึ่งมาตรฐาน (Half-Standard Proctor) 269.25 kJ/m^3 , Optimum ปริมาณความชื้นเท่ากับร้อยละ 35 หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดเท่ากับ 1.3 T/m^3

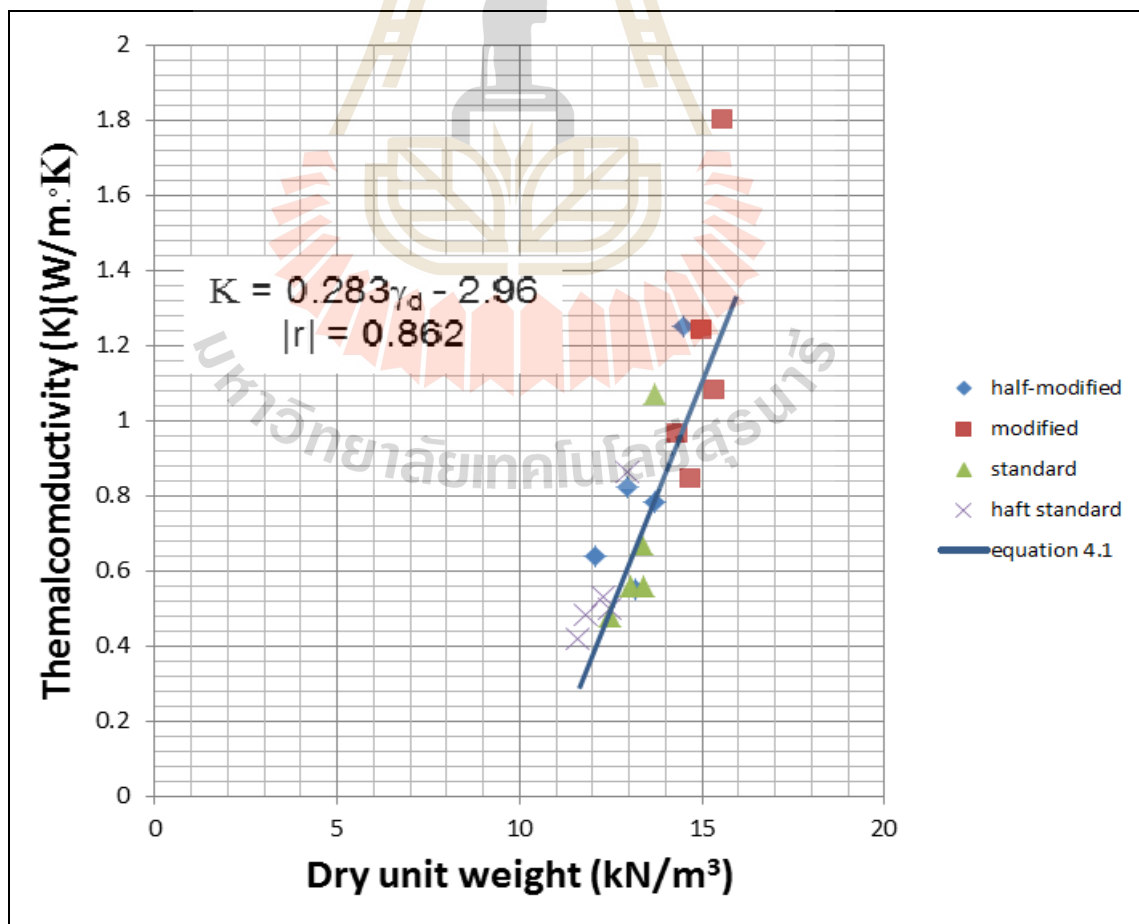


รูปที่ 4.1 กราฟการบดอัดที่พลังงานต่างๆ ของตัวอย่างดินในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.2.3 รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนและปริมาณความชื้นของดินในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่บดอัดด้วยพลังงานการบดอัดแตกต่างกันและใช้ปริมาณความชื้นเท่ากับ 0.6 0.8 1.0 1.2 และ 1.4 เท่าของปริมาณความชื้นเหมาะสม จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวมีลักษณะเป็นรูประฆังคว่ำซึ่งจะมีค่าการนำความร้อนสูงสุดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมและยิ่งพลังงานการบดอัดเพิ่มขึ้นค่าการนำความร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกราฟการบดอัด



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนกับปริมาณความชื้นที่พลังงานการบดอัดต่างๆ



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนและค่าหน่วยน้ำหนักแห้ง

4.2.4 จากผลการทดสอบการบดอัดและการทดสอบหาค่าการนำความร้อนเมื่อนำข้อมูลของค่าการนำความร้อนมาเปรียบเทียบกับค่าหน่วยน้ำหนักแห้งแสดงดังรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าเมื่อความหนาแน่นแห้งเพิ่มขึ้นค่าการนำความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นในทิศทางเดียวกันในทุกพลังงานการบดอัด ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนและค่าความการนำความร้อนและความหนาแน่นแห้งที่พลังงานการบดอัดค่าต่างๆ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 4.1

$$K = 0.283\gamma_d - 2.96 \quad \text{.....(4.1)}$$

เมื่อ K คือค่าการนำความร้อนของดินและ γ_d คือความหนาแน่นแห้งมีหน่วยเป็น T/m^3 ความสัมพันธ์นี้มีประโยชน์ในการใช้ประมาณค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของดินเมื่อทราบค่าความหนาแน่นที่แห้งของดิน

4.3 การประมาณค่าการนำความร้อนที่พลังงานการบดอัดและปริมาณความชื้นค่าต่างๆ โดยใช้ผลทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานเพียงพลังงานเดียว

4.3.1 การทำนายกราฟการบดอัด

Horpibulsuk และคณะ (2008) ได้เสนอวิธีการประมาณค่าความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นที่พลังงานการบดอัดค่าต่าง ๆ โดยใช้ความสัมพันธ์นี้ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและอัตราส่วนการอิ่มตัวด้วยน้ำที่พลังงานการบดอัดค่าหนึ่ง

$$w = A_d S^{B_d} \text{ สำหรับด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสม} \quad \text{..... (4.2)}$$

$$w = A_w S^{B_w} \text{ สำหรับด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม} \quad \text{..... (4.3)}$$

เมื่อ A_d A_w B_d และ B_w คือ ค่าคงที่ w คือ ปริมาณความชื้น และ S คือ อัตราส่วนการอิ่มตัวด้วยน้ำ โดยที่ w และ S แสดงค่าเป็นร้อยละและอัตราส่วนทศนิยม ตามลำดับ ค่า A_d และ A_w สามารถประมาณโดยใช้สมการที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ ดังนี้

$$A_d = \frac{OWC}{ODS^{B_d}} \quad \text{..... (4.4)}$$

$$A_w = \frac{OWC}{ODS^{B_w}} \quad \text{..... (4.5)}$$

เมื่อ ODS คือ อัตราส่วนการอิ่มตัวด้วยน้ำเหมาะสม ค่า B_d มีค่าประมาณ 0.70 ถึง 0.86 และ B_w มีค่าประมาณ 1.50 ถึง 2.72

เมื่อทราบปริมาณความชื้นและอัตราส่วนการอิ่มตัวด้วยน้ำที่พลังงานการบดอัดค่าหนึ่งแล้วสามารถคำนวณค่าความหนาแน่นแห้งของดินได้โดยใช้ความสัมพันธ์ดังนี้

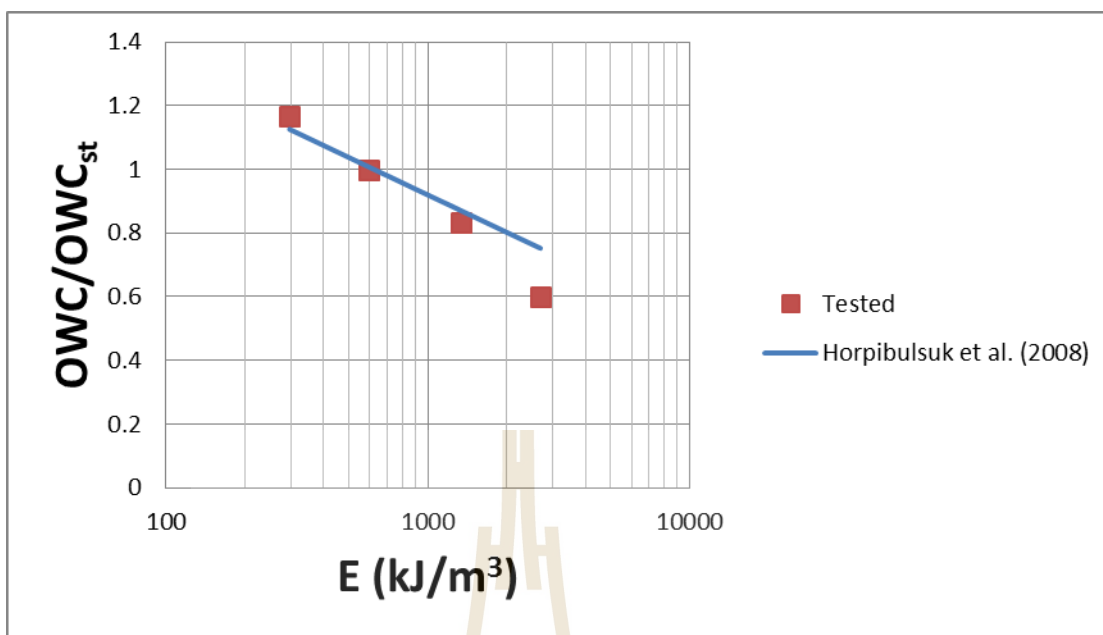
$$\gamma_d = \gamma_w / \left(\frac{w}{S} + \frac{1}{G_s} \right) \quad \text{..... (4.6)}$$

เมื่อ γ_w คือ ความหนาแน่นของน้ำและ G_s คือ ความถ่วงจำเพาะของดิน

นอกจากนี้ Horpibulsuk และคณะ (2008) ยังได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมต่อปริมาณความชื้นที่พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐานและพลังงานการบดอัด ดังนี้

$$\frac{OWC}{OWC_{st}} = 2.09 - 0.39 \log E \quad \text{..... (4.7)}$$

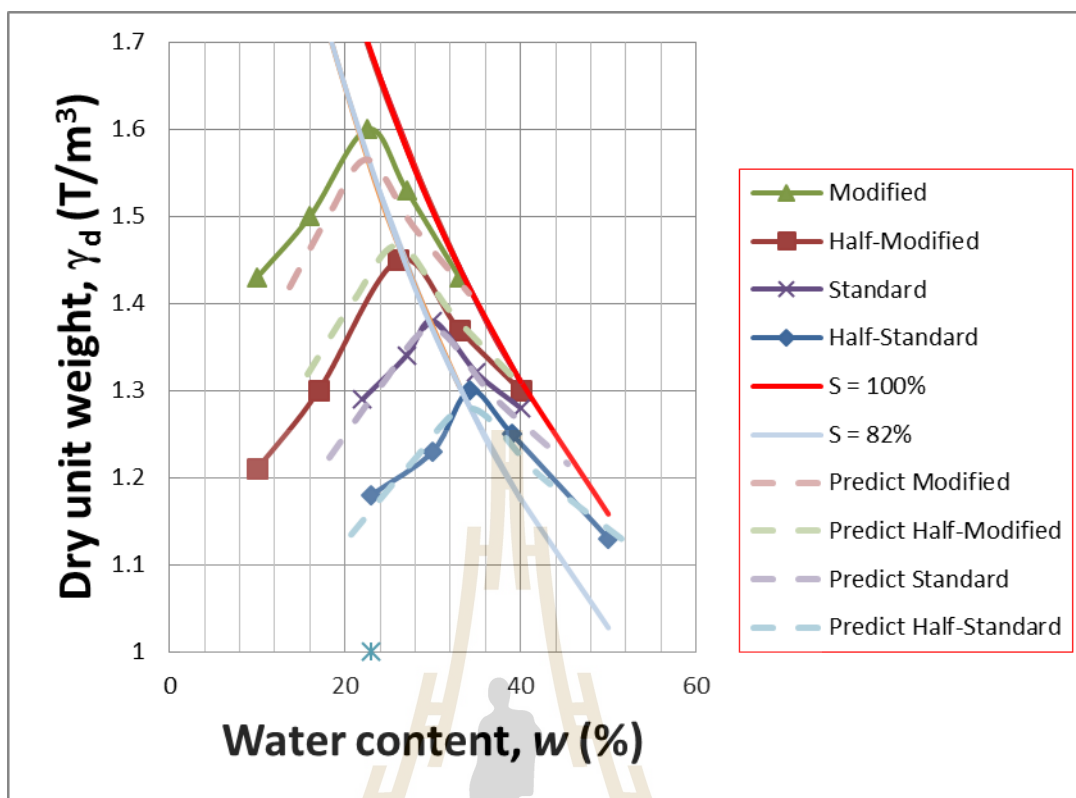
เมื่อ OWC คือปริมาณความชื้นเหมาะสม OWC_{st} คือปริมาณความชื้นเหมาะสมที่พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน และ E คือพลังงานการบดอัด รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ตามสมการที่ 4.5 และผลจากการทดสอบที่ได้จากงานวิจัยนี้ จะเห็นว่าผลการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับความสัมพันธ์ที่เสนอโดย Horpibulsuk และคณะ (2008)



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมต่อปริมาณความชื้น
ที่พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐานและพลังงานการบดอัด

จากความสัมพันธ์ที่ 4.2 ถึง 4.6 สามารถทำนายกราฟการบดอัดของดินที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 4.5 โดยใช้ค่าความถ่วงจำเพาะของดินเท่ากับ 2.75 ค่า ODS เท่ากับ 0.82 ค่า B_d เท่ากับ 0.70 และ B_w เท่ากับ 2.2 จะเห็นว่ากราฟการบดอัดของดินที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถประมาณได้โดยใช้ความสัมพันธ์ที่เสนอโดย Horpibulsuk และคณะ (2008)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบผลการสอบการบดอัดและผลจากการประมาณ

โดยวิธีของ Horpibulsuk และคณะ (2008)

4.3.2 ข้อเสนอแนะในการประมาณค่าการนำความร้อน

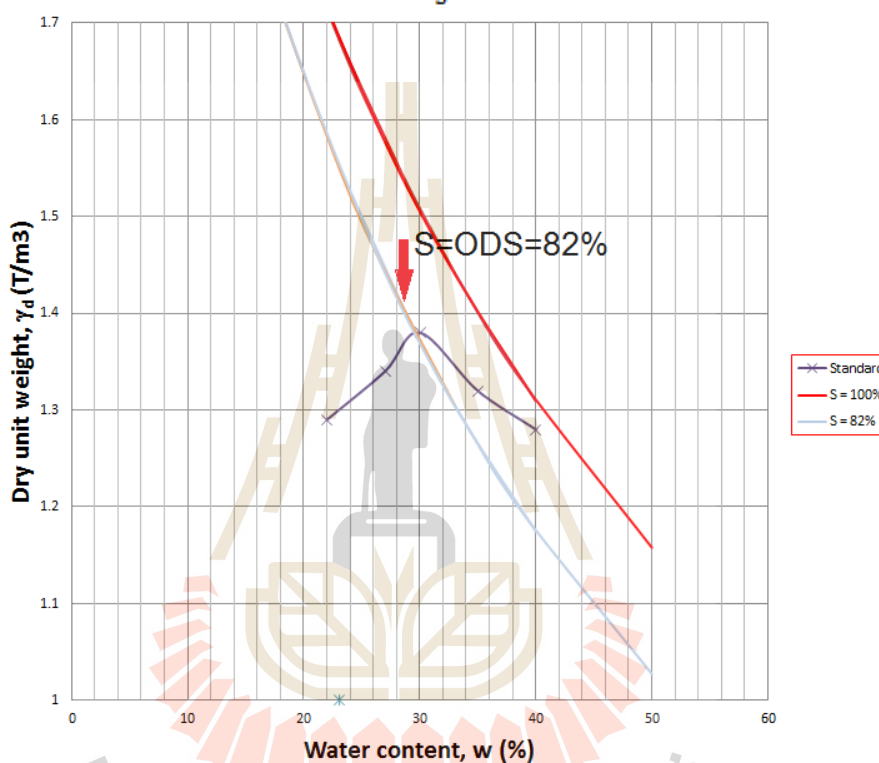
จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบและวิธีการทำนายกราฟการบดอัดที่เสนอโดย Horpibulsuk และคณะ (2008) สามารถประมาณค่าการนำความร้อนที่พลังงานการบดอัดและปริมาณความชื้นค่าต่างๆ โดยใช้ผลทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor) เพียงอย่างเดียวได้ดังนี้

- 1) ทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานเพื่อหาค่า OWC_{st} และหาค่า ODS จากสมการที่ 4.6
- 2) หาค่า OWC ที่พลังงานการบดอัดที่ต้องการโดยใช้สมการที่ 4.7
- 3) หาค่า A_d และ A_w โดยใช้สมการที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ
- 4) ทำนายกราฟการบดอัดที่พลังงานงานการบดอัดโดยใช้สมการที่ 4.2 4.3 และ 4.6 โดยใช้ค่า B_d ระหว่าง 0.70 ถึง 0.86 และ B_w ระหว่าง 1.50 ถึง 2.72
- 5) คำนวณค่าการนำความร้อนจากความหนาแน่นแห้งที่ได้จากข้อ 4) โดยใช้สมการที่ 4.1

4.3.3 ตัวอย่างการประมาณค่าการนำความร้อนโดยโดยใช้ผลทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor) เพียงอย่างเดียว

1. ทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานเพื่อหาค่า OWC_{st} และหาค่า ODS จากสมการ

$$\gamma_d = \gamma_w / \left(\frac{w}{S} + \frac{1}{G_s} \right)$$



รูปที่ 4.6 การประมาณค่าการนำความร้อนโดยใช้ผลทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor) เพียงอย่างเดียว

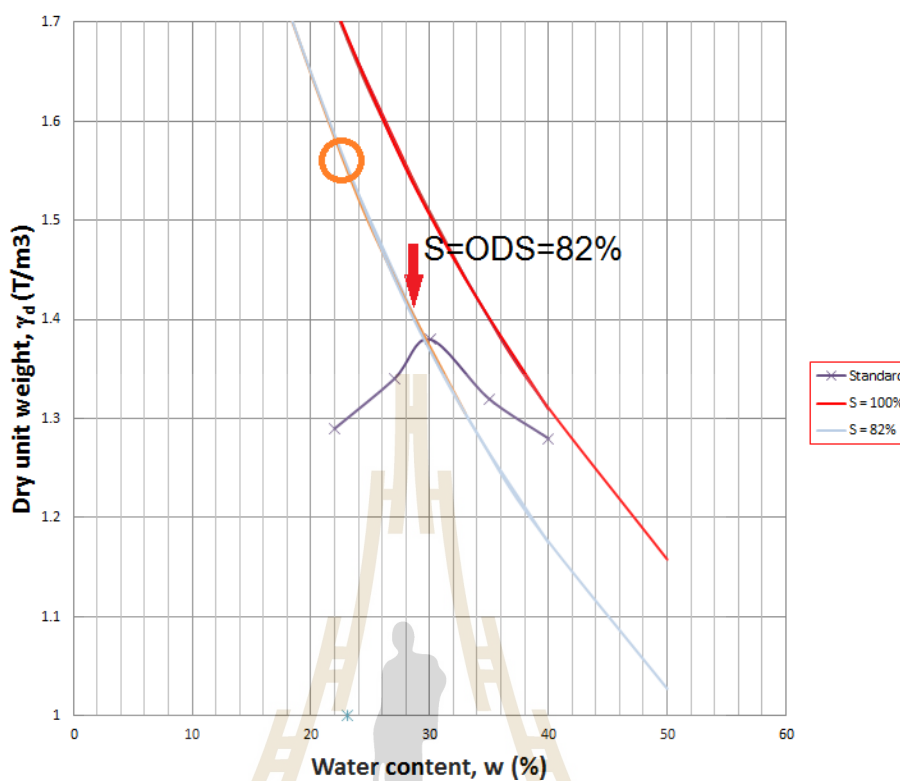
2. หาค่า OWC ที่พลังงานการบดอัดที่ต้องการโดยใช้สมการ

$$\frac{OWC}{OWC_{st}} = 2.09 - 0.39 \log E$$

3. หาค่า A_d และ A_w โดยใช้สมการ

$$A_d = \frac{OWC}{ODS^{B_d}}$$

$$A_w = \frac{OWC}{ODS^{B_w}}$$



รูปที่ 4.7 การประมาณค่าการนำความร้อนโดยใช้ผลทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor) เพียงอย่างเดียว

4. ทำนายกราฟการบดอัดที่พลังงานงานการบดอัดโดยใช้สมการ

$$w = A_d S^{B_d} \text{ สำหรับด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสม}$$

$$w = A_w S^{B_w} \text{ สำหรับด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม}$$

$$\gamma_d = \gamma_w / \left(\frac{w}{S} + \frac{1}{G_s} \right)$$

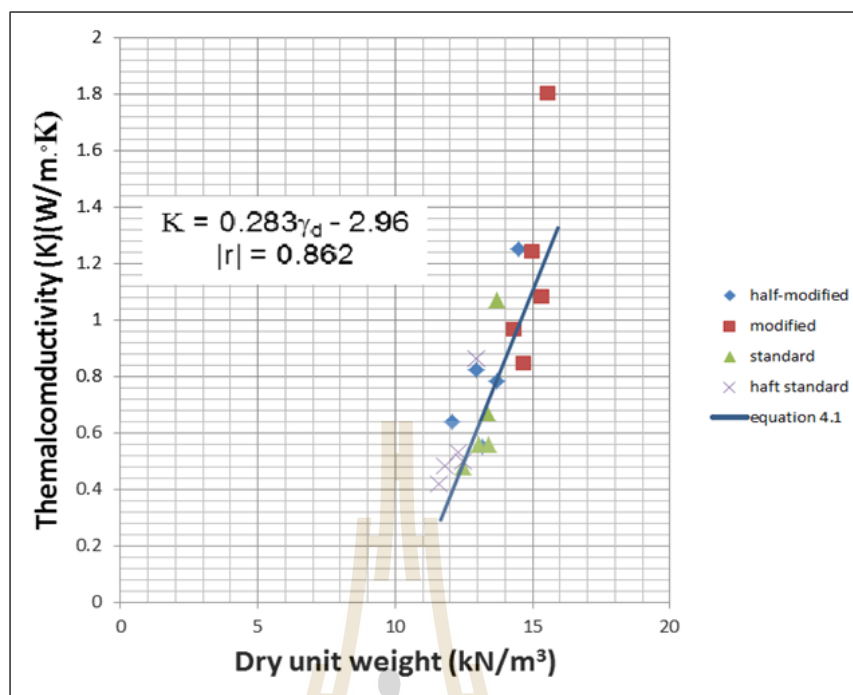
$$B_d=0.7$$

$$B_w=2.2$$

โดยใช้ค่า B_d ระหว่าง 0.70 ถึง 0.86 และ B_w ระหว่าง 1.50 ถึง 2.72 (Horpibulsuk และคณะ)

5. คำนวณค่าการนำความร้อนจากความหนาแน่นแห้งที่ได้จากสมการ

$$K = 0.283\gamma_d - 2.96$$



รูปที่ 4.8 การประมาณค่าการนำความร้อนโดยใช้ผลทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor) เพียงอย่างเดียว

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลงานวิจัย

5.1.1 งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาค่าการนำความร้อนของดินภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งใช้ตัวอย่างทดสอบที่ค่าพลังงานการบดอัดที่พลังงานต่างๆจากกราฟการบดอัด กราฟจะมีลักษณะเป็นรูปประฆังคว่ำ โดยที่ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งหน่วยน้ำหนักแห้งจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นจนถึงค่าปริมาณความชื้นเหมาะสม (Optimum Water content, OWC) จะมีค่า หน่วยน้ำหนักแห้งมากที่สุด และเมื่อค่า ปริมาณความชื้น เพิ่มขึ้นจนเลยจุดที่เป็นปริมาณความชื้นเหมาะสม ค่าหน่วยน้ำหนักแห้ง จะมีค่าลดลง และ เมื่อพิจารณาที่ค่าพลังงานการบดอัดจะเห็นว่าเมื่อค่าพลังงานการบดอัดสูงขึ้นค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดมีค่าสูงขึ้นเช่นกัน แต่ปริมาณความชื้นเหมาะสมจะมีค่าที่ลดลง

5.1.2 จากผลการทดสอบการบดอัดและการทดสอบหาค่าการนำความร้อนเมื่อนำข้อมูลของของค่าการนำความร้อนมาเปรียบเทียบกับค่าหน่วยน้ำหนักแห้งกราฟจะมีลักษณะเป็นรูปประฆังคว่ำเหมือนกับกราฟการบดอัด จะเห็นว่าเมื่อความหนาแน่นแห้งเพิ่มขึ้นค่าการนำความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นในทิศทางเดียวกันในทุกพลังงานการบดอัด ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนและค่าความการนำความร้อนและความหนาแน่นแห้งที่พลังงานการบดอัดค่าต่างๆ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 4.1

$$K = 0.283\gamma_d - 2.96 \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

5.1.3 จากผลการทดสอบจะสามารถทำนายกราฟการบดอัดที่เสนอโดย Horpibulsuk และคณะ (2008) สามารถประมาณค่าการนำความร้อนที่พลังงานการบดอัดและปริมาณความชื้นค่าต่างๆ โดยใช้ผลทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor) เพียงอย่างเดียว

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในการทดสอบนี้มีการใช้ตัวอย่างดินทดสอบชนิดเดียวกันนั้นจากสมการการหาค่าการนำความร้อนข้างต้นจะใช้ไม่ได้กับทุกชนิดของดินดังนั้นจึงควรมีการใช้ตัวอย่างดินทดสอบหลายๆชนิดเพื่อทดสอบหาค่าการนำความร้อนของดินแต่ละชนิด

5.2.2 จากการทดลองมาสามารถนำค่าการนำความร้อนมาออกแบบระบบได้จากสมการดังนี้

$$R_{total} = R_{conv} + R_{pipe} + R_{soil} \quad \text{.....(5.1)}$$

$$R_{conv} = \frac{1}{\pi D_i h_w} \quad \text{.....(5.2)}$$

$$R_{pipe} = \frac{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2\pi k_{pipe}} \quad \text{.....(5.3)}$$

$$R_{soil} = \frac{1}{SK_{soil}} \quad \text{.....(5.4)}$$

เมื่อ S คือค่าสัมประสิทธิ์รูปร่างของท่อให้เป็น (Incropera and DeWitt-2002) แสดงได้ดังนี้

$$S = \frac{2\pi}{\ln\left[\left(\frac{2d}{D_o}\right) + \sqrt{\left(\frac{2d}{D_o}\right)^2 - 1}\right]} \quad \text{.....(5.5)}$$

คุณสมบัติของน้ำมีการประเมินที่อุณหภูมิน้ำโดยเฉลี่ยเนื่องจากความแปรผันไม่สำคัญ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน h_w ได้รับการประเมินโดยใช้ความสัมพันธ์ของ Nusselt Number ดังต่อไปนี้:

$$Nu = \frac{h_w D_i}{k} = 0.023 \left(\frac{\rho V D_i}{\mu}\right)^{0.8} (Pr)^{0.3} \quad \text{..... (5.6)}$$

การทำสมดุลพลังงานกับ dx ที่แสดงในรูปที่ 2.10 การถ่ายเทความร้อนที่แตกต่างกันสามารถแสดงได้ดังนี้

$$dq = -m_w^o c_w dT_w = \frac{T_w - T_g}{R_{total}} dx$$

$$\theta_w = T_w - T_g \text{ and } X = \frac{x}{m_w^o c_w R_{total}}$$

ดังนั้นสมการการถ่ายเทความร้อนที่แตกต่างกันสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{d\theta_w}{dX} = \theta_w \quad \text{.....(5.7)}$$

สมการการแก้สมการ (2.11) กับเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดการกระจายอุณหภูมิของน้ำตามแนวท่อและความยาวของท่อที่ต้องการได้ดังสมการที่ 2.12 และ 2.13

$$\frac{\theta_w}{\theta_{w_out}} = \text{Exp} \left(\frac{-x}{m_w^o c_w R_{total}} \right) \quad \text{.....(5.8)}$$

$$L = (m_w^o c_w R_{total}) \ln \left(\frac{\theta_{w_in}}{\theta_{w_out}} \right) \quad \text{..... (5.9)}$$

เอกสารอ้างอิง

ALAIN BEZIAT,¹ MICHEL DARDAINE,^t AND VICTOR GABIS²

1 Commissariat ~ l'Energie Atomique, DRDD/SESD B.P. 6, 92265 Fontenay-aux-Roses,
France 2 Universit6 d'Orl6ans, ESEM, Laboratoire de Min6ralogie Appliqu6e B.P. 6749,
45067 Od6ans Cedex 2, France.

ASTM C518: Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means
of the Heat Flow Meter Apparatus.

Thermal Conductivity. (29 January 2013). [Online] Available at

http://www.ndted.org/EducationResources/CommunityCollege/Materials/Physical_Chemical/ThermalConductivity.htm. [14 July 2017].

Thermal conductivity measurement. (29 January 2013). [Online] Available at

http://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_conductivity_measurement. [14 July 2017].

Thermal Diffusivity and Conductivity LFA / GHP / HFM / TCT. (29 January 2013). [Online]

Available at <http://www.netzsch-thermal-analysis.com/en/products/lfa-hfm-tct>.
[14 July 2017].

Galgaro, A., Emmi, G., Zarrella, A., and Carli, M.D. (2014). **Possible applications of ground coupled heat pumps in high geothermal gradient zones**. Energy and Building 79: 12-22.

Genchi, H. (2001). **New countermeasures for mitigating heat-island effect–District heat supply systems, underground thermal energy storage, systems using underground as a heat sink**. Energy and Resources (in Japanese) 22(4): 306-310.

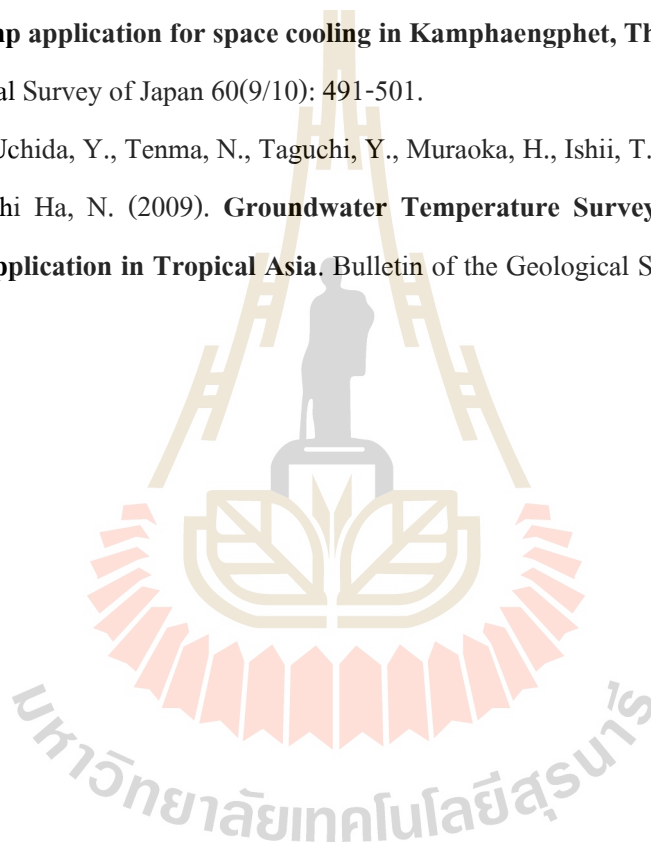
Loosea, A., and Drücka, H. (2014). **Field test of an advanced solar thermal and heat pump system with solar roof tile collectors and geothermal heat source**. ScienceDirect 48: 904 – 913.

Morrone, B., Coppola, G. and Raucci, V. (2014). Energy and economic savings using geothermal heat pumps in different climates 88, December 2014: 189–198.

Perry, S., Klemes, J., Bulatov, I. (2008). **Integrating waste and renewable energy to reduce the carbon footprint of locally integrated energy sectors**. Energy 33(10), 1489-1497.

S.A. M. Said, M .A. Habib, E.M.A. Mokheimer, N. Al-Shayea and M. Sharqawi King Fahd University of Petroleum & Minerals Dhahran Saudi Arabia.

- Sanner, B., Karytsas, C., Mendrinos, D. and Rybach, L. (2003). **Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe**. *Geothermics* 32(4–6) August–December 2003: 579– 588.
- Uchida, Y., Yasukawa, K., Tenma, N., Taguchi, Y., Suwanlert, J. and Buapeng, S. (2009). **Subsurface Thermal Regime in the Chao-Phraya Plain, Thailand**. *Bulletin of the Geological Survey of Japan* 60 (9/10): 469- 489.
- Yasukawa, K., Takashima, I., Uchida, Y., Tenma, N. and Lorphensri, O. (2009). **Geothermal heat pump application for space cooling in Kamphaengphet, Thailand**. *Bulletin of the Geological Survey of Japan* 60(9/10): 491-501.
- Yasukaw, K., Uchida, Y., Tenma, N., Taguchi, Y., Muraoka, H., Ishii, T., Suwanlert, J., Buapeng, S. and Thi Ha, N. (2009). **Groundwater Temperature Survey for Geothermal Heat Pump Application in Tropical Asia**. *Bulletin of the Geological Survey of Japan* 60(9/10): 459-467.



ประวัติผู้เขียน

นายอภิรัฐ ปัญญาแก้ว เกิดเมื่อวันที่ 24 มกราคม 2534 ที่อำเภอเมือง จังหวัดกาฬสินธุ์ การศึกษาเริ่มเรียนระดับชั้นประถมศึกษาปีที่ 1-6 จากโรงเรียนอนุบาลกาฬสินธุ์ระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1-6 จากโรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2556 โดยหลังจากสำเร็จการศึกษา 2 ปีได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ปัจจุบันประกอบอาชีพวิศวกรฝ่ายโยธา ที่บริษัท เอทู เทคโนโลยี จำกัด

