

บทที่ 2

งานวิจัย และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง



2.1 งานวิจัยที่ผ่านมา

J.A. Edwards และ P.K. Vitta (1985) ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของการถ่ายเทความร้อนของชุดท่อที่ฝังอยู่ในพื้นดิน และศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิในดินบริเวณที่รอบ ๆ ชุดท่อที่ฝัง โดยนำผลการทดลองที่ได้ มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลองด้วยวิธี Finite Difference ชุดท่อใต้ดินจำนวน 2 ชุด แต่ละชุดจะต่อกับปั๊มความร้อน และให้มีการทำงานทั้งแบบทำความเย็น และแบบทำความร้อน ซึ่งชุดท่อสร้างจากเหล็กหล่อ มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.2 นิ้ว มีความยาว 90 ฟุต และฝังเอาไว้ที่ความลึก 2.75 ฟุต ใช้ช่วงเวลาในการทดลองทั้งหมด 7 เดือน จากผลการทดลองพบว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้น เมื่อความชื้นในดินเพิ่มขึ้น และอัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนกับพื้นดิน จะมีค่าค่อนข้างสูง เมื่อมีการแลกเปลี่ยนความร้อนกันในตอนแรก ต่อมาอัตราการถ่ายเทความร้อนจะค่อยๆ ลดลง เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ซึ่งอุณหภูมิของอากาศจะไม่มีผลต่ออุณหภูมิของดินที่ความลึก 2.75 ฟุต และพบว่า ในช่วงฤดูหนาว อุณหภูมิของดินจะสูงกว่าอุณหภูมิของอากาศ ผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้ในการทำนายอุณหภูมิของดิน พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลที่ทดลองได้จริง

สุพจน์ ดวงสินทวีกุล (2537) ได้ศึกษาการลดอุณหภูมิของอากาศผ่านชุดท่อใต้ดิน โดยมีสถานที่ทำการทดลองอยู่ในกรุงเทพมหานคร ชุดทดลองประกอบด้วยท่อสแตนเลส หนา 0.55 มิลลิเมตร มีท่อหลัก 2 ท่อซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 นิ้ว และท่อย่อย ยาว 8 เมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่แตกต่างกันคือ 12, 10 และ 8 นิ้ว อย่างละ 1 ท่อ ซึ่งแต่ละท่อจะวางห่างกัน 1 เมตร ซึ่งลักษณะการจัดวางระบบท่อจะวางท่อย่อยให้ตั้งฉากกับท่อหลัก และท่อหลักจะวางขนานกัน จะมีท่อย่อยเชื่อมท่อหลักทั้งสอง โดยจะติดพัดลมดูดอากาศไว้ที่ปลายท่อหลักด้านหนึ่ง ทำการฝังชุดการทดลองที่ความลึก 1.10 เมตร เพื่อทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิอากาศที่ตำแหน่งของท่อย่อยต่าง ๆ ซึ่งจะเก็บข้อมูลที่ความเร็วลมเข้า 2 ค่าคือ 150 FPM และ 100 FPM จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิของดินที่ความลึก 1.10 เมตร จะค่อนข้างคงที่ อยู่ที่ 28 - 29°C ถึงแม้ว่าอุณหภูมิอากาศมีการเปลี่ยนแปลงมากก็ตาม และขนาดของท่อมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของอากาศ กล่าวคือ ท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า จะลดอุณหภูมิอากาศได้ดีกว่าท่อที่มีขนาดเส้น

ผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า เนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสผิวดินที่มากกว่า และพบว่าอากาศที่ผ่านเข้าห้องมี อุณหภูมิลดลงในช่วงเวลากลางวัน และอากาศจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นในเวลากลางคืน อุณหภูมิที่ลดลงหรือเพิ่มขึ้นนี้ได้นำมาผ่านกระบวนการสหสัมพันธ์ (Regression) เพื่อหาความสัมพันธ์กับตัวแปรอื่น เช่นอุณหภูมิอากาศ อุณหภูมิดิน ความเร็วลมในท่อ และขนาดของท่อ โดยได้สมการดังนี้

$$HE = -1.873 + 0.295(OS) + 0.019(A) + 0.002(V)$$

โดย OS = ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศกับอุณหภูมิดิน (องศาเซนติเกรด)

A = พื้นที่ผิวท่อที่สัมผัสอากาศ (ตารางฟุต)

V = ความเร็วลมในท่อ (ฟุตต่อนาที)

HE = ความร้อนที่ลดลง (บีทียูต่อชั่วโมง)

M. SANTAMOURIS, G.MIHALAKAKOU, C.A. BALARAS, A. ARGIROU, D.ASIMAKOPOULOS และ M.VALLINDRAS (1995) ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างดินกับอากาศ (Earth to air heat exchanger) โดยใช้ท่อฝังลงในดิน เพื่อทำหน้าที่เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และใช้อากาศเป็นตัวดูดซับความเย็นจากดิน เพื่อใช้กับโรงเรือนเพาะชำ พืชผลเกษตร ซึ่งมีพื้นที่ 1000 ตารางเมตร ในเมือง Agrinion ประเทศกรีซ โดยได้ศึกษาถึงขนาดท่อ ความยาวท่อ ความลึกของการฝังท่อ และความเร็วของอากาศที่ไหลในท่อ ที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของระบบ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ของโรงเรือนแก้ว พบว่าอุณหภูมิภายในโรงเรือนจะลดลง หากเพิ่มความยาวของท่อให้มากขึ้น ลดขนาดรัศมีของท่อให้เล็กลง เพิ่มความลึกมากกว่า 4 เมตร และลดความเร็วของอากาศที่ไหลภายในท่อ

วัชระ เพิ่มชาติ (2541) ได้ทำการศึกษาอุณหภูมิดินที่ความลึก 0.5, 1, 1.5 และ 2 เมตร และเก็บข้อมูลพื้นฐานต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิอากาศ ค่ารังสีดวงอาทิตย์ ความเร็วลม เพื่อนำไปทำนายอุณหภูมิดินที่ความลึกต่างๆ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าผลการคำนวณอุณหภูมิดินที่ได้จากการใช้แบบจำลอง และค่าที่วัดจริงมีค่าใกล้เคียงกัน จึงสามารถใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้เป็นตัวทำนายอุณหภูมิดินแทน เพื่อสะดวกในการใช้งาน จากนั้นจึงได้ทำการดัดแปลงส่วน Condensing Unit ของเครื่องปรับอากาศขนาด 12,000 บีทียูต่อชั่วโมง ให้ถ่ายเทความร้อนลงสู่พื้นดิน โดยทำการฝังคอยล์ร้อนลงในดินที่ความลึก 1 เมตร และไม่ใช่พัดลมระบายความร้อน วิธีนี้เรียกว่า Condensing Modify ซึ่งคอยล์ร้อนนี้ทำจากท่อทองแดง มีขนาดเส้นผ่าน

ศูนย์กลาง 1.27 เซนติเมตร ทำการขุดท่อทองแดงซึ่งยาว 67 เมตร (ท่อคอยล์ร้อนเดิมยาว 22 เมตร) ใช้สารทำความเย็น R-22 ปริมาณ 5.8 กิโลกรัม (เครื่องปรับอากาศเดิมใช้ 1.2 กิโลกรัม) จากผลการทดลอง เมื่อทำการวัดประสิทธิภาพของเครื่องปรับอากาศทั้งระบบเดิม และ ระบบที่ปรับปรุงขึ้น โดยพิจารณาค่า COP ของเครื่องปรับอากาศแบบที่ปรับปรุงมีค่าเฉลี่ยประมาณ 7.1 ในเวลากลางวัน ถึง 8.1 ในเวลากลางคืน ในขณะที่เครื่องปรับอากาศแบบเดิมมีค่าเฉลี่ยระหว่าง 2.8 ในเวลากลางวัน ถึง 3.1 ในเวลากลางคืน สำหรับปริมาณการใช้ไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศแบบใหม่ลดลง 13.47 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังได้วัดอุณหภูมิดินบริเวณที่ทำการฝังขุดท่อ พบว่า ความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องปรับอากาศ ไม่ทำให้อุณหภูมิดินเปลี่ยนแปลงมาก จึงสามารถ ใช้ประโยชน์จากดินในการเพาะปลูกได้ตามปกติ

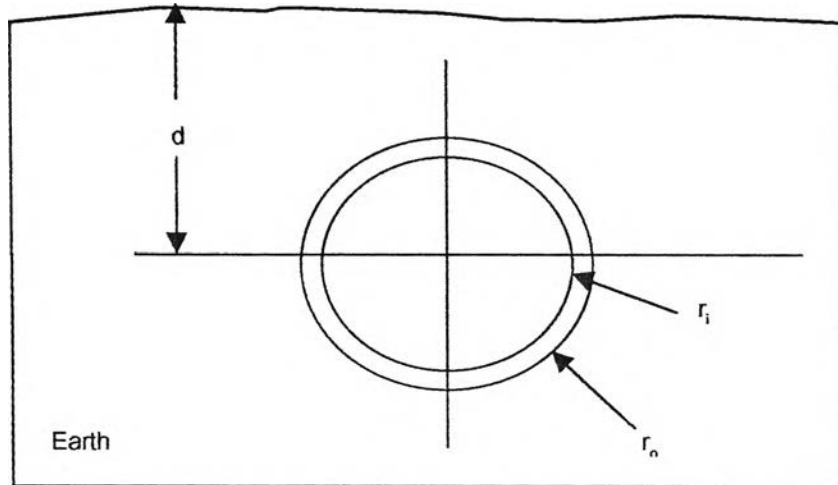
สมศรี ฤทธิดำ (2544) ได้ทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิดิน และศึกษาการถ่ายเทความร้อนแต่ระดับความลึก ใน 3 พื้นที่ทางภาคเหนือของประเทศไทย ได้แก่ หลุมในพื้นที่ บ้านโป่งปู่เฟื่อง อำเภอแม่สรวย จังหวัดเชียงราย สามารถวัดอุณหภูมิได้ลึกถึง 10 เมตร โดยอุณหภูมิที่วัดได้อยู่ในช่วง 72 - 79 องศาเซลเซียส หลุมในพื้นที่ บ้านโป่งผาเสริฐ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย สามารถวัดอุณหภูมิได้ถึงความลึก 40 เมตร โดยมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 33 - 60 องศาเซลเซียส และ หลุมในพื้นที่ บ้านเมืองงาม อำเภอแม่สาย จังหวัดเชียงใหม่ สามารถวัดอุณหภูมิได้ถึงความลึก 81 เมตร อุณหภูมิที่วัดได้อยู่ในช่วง 32 - 65 องศาเซลเซียส จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาศึกษาถึงความสัมพันธ์ของค่าอุณหภูมิที่ได้กับระดับความลึกต่าง ๆ รวมถึงศึกษาอัตราการถ่ายเทความร้อนในแต่ละระดับความลึก ซึ่งทั้ง 3 พื้นที่ที่ทำการทดลอง พบว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิช่วงแรกจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด แต่เมื่อความลึกมากขึ้น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะเริ่มน้อยลง ช่วงเวลาไม่มีผลกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมากนัก ปัจจัยที่มีผลอยู่บ้างคือ อุณหภูมิบรรยากาศ สำหรับการคำนวณการถ่ายเทความร้อนแต่ละระดับความลึก ได้ใช้ตัวประกอบรูปร่างในการนำความร้อน (conduction shape factor) มาช่วยพิจารณา ซึ่งพบว่าเมื่อความลึกเพิ่มขึ้น อัตราการถ่ายเทความร้อนก็จะเพิ่มขึ้นด้วย

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การคำนวณค่าความต้านทานความร้อนของท่อที่ฝังในดิน

จะพิจารณาค่าความต้านทานความร้อน 2 ค่า คือ

1. ค่าความต้านทานความร้อนของดิน (Thermal resistance of soil, R_s)¹



รูปที่ 2.1 แสดงท่อเดี่ยวที่ฝังใต้ดิน ไม่มีการหุ้มฉนวน

จากรูปเมื่อพิจารณาท่อที่ฝังใต้ดินเป็นท่อเดี่ยว และไม่มีการหุ้มฉนวน (Single Uninsulated Buried Pipe) ค่าความต้านทานความร้อนของดินพิจารณาจาก

$$R_s = \frac{\ln\left\{\frac{d}{r_o} + \left[\left(\frac{d}{r_o}\right)^2 - 1\right]^{1/2}\right\}}{2\pi K_s} \quad \text{สำหรับ } d/r_o > 1 \quad (2.1)$$

$$R_s = \frac{\ln(2d/r_o)}{2\pi K_s} \quad \text{สำหรับ } d/r_o > 4 \quad (2.2)$$

โดยที่

R_s = ความต้านทานความร้อนของดิน, $m \cdot K/W$

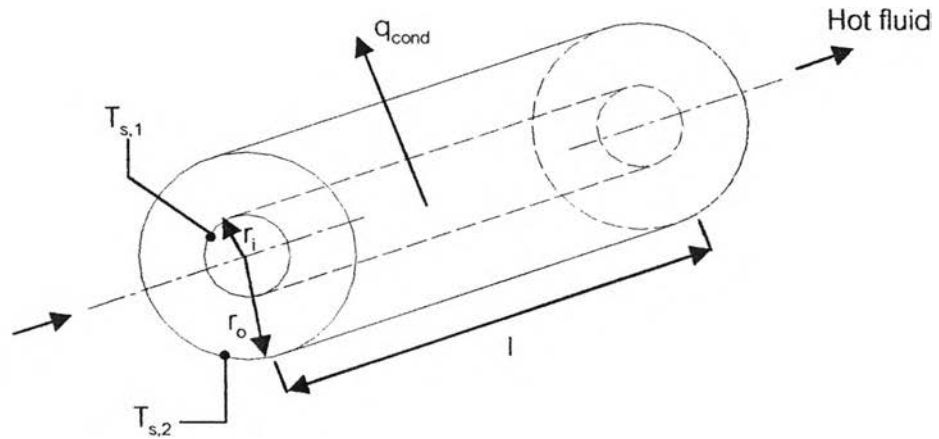
K_s = ค่าการนำความร้อนของดิน, $W/(m \cdot K)$

¹ ASHRAE, ASHRAE System and Equipment Handbooks (SI) 1996. Atlanta, 1996 p. 11.13

d = ความลึกในการฝังท่อ วัดจากผิวดินมาถึงกึ่งกลางท่อ, m

r_o = รัศมีภายนอกของท่อ, m

2. ค่าความต้านทานความร้อนของท่อ (Thermal resistance of wall, R_p)² พิจารณาจากการนำความร้อนผ่านผนังท่อทรงกระบอก



รูปที่ 2.2 การนำความร้อนผ่านผนังท่อทรงกระบอก

สำหรับท่อทรงกระบอกที่สภาวะคงตัว และไม่มีการสร้างความร้อนภายใน สมการความร้อนในพิกัดทรงกระบอกคือ

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(kr \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (2.3)$$

การกระจายของอุณหภูมิในผนังท่อตามแนวรัศมีหาได้โดยการแก้สมการที่ 2.3 ซึ่งมีสมมติฐานว่าค่าสภาพการนำความร้อนของผนังท่อมีค่าคงที่สม่ำเสมอ ทำการอินทิเกรตสมการที่ 2.3 สองครั้ง และใช้เงื่อนไขขอบเขต

$$T(r_1) = T_{s,1} \quad \text{และ} \quad T(r_2) = T_{s,2}$$

จะได้การกระจายอุณหภูมิในผนังท่อตามแนวรัศมีเป็น

² Ibid., p. 11.13

จะได้การกระจายอุณหภูมิในผนังท่อตามแนวรัศมีเป็น

$$T(r) = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{\ln(r_i / r_o)} \ln\left(\frac{r}{r_2}\right) + T_{s,2} \quad (2.4)$$

แทนสมการของการกระจายของอุณหภูมิตั้งในสมการฟูเรียร์

$$q = -kA \frac{dT}{dr} = -k(2\pi rL) \frac{dT}{dr} \quad (2.5)$$

จะได้อัตราการนำความร้อนผ่านผนังท่อเป็น

$$q_{cond} = \frac{2\pi Lk(T_{s,1} - T_{s,2})}{\ln(r_o / r_i)} \quad (2.6)$$

ดังนั้นความต้านทานทางความร้อนของผนังท่อทรงกระบอกแสดงได้เป็น

$$R_{t,cond} = \frac{\ln(r_o / r_i)}{2\pi Lk} \quad (2.7)$$

หรือ

$$R_p = \frac{\ln(r_o / r_i)}{2\pi K_p} \quad (2.8)$$

โดยที่

R_p = ความต้านทานความร้อนของท่อ, $m \cdot K/W$

K_p = ค่าการนำความร้อนของท่อ, $W / (m \cdot K)$

r_i = รัศมีภายในของท่อ, m

การคำนวณอัตราความร้อนที่ถ่ายเทต่อหน่วยความยาวของท่อ³ พิจารณาจากสมการ

$$q = \frac{t_f - t_s}{R_t} \quad (2.9)$$

โดยที่

R_t = ความต้านทานความร้อนรวม ($R_s + R_p$), $m \cdot K / W$

t_f = อุณหภูมิของของไหล, $^{\circ}C$

t_s = อุณหภูมิดินเฉลี่ยรายปี, $^{\circ}C$

q = ความร้อนที่สูญเสียหรือได้รับ ต่อหน่วยความยาวของระบบ, W/m

โดยการคำนวณจะไม่พิจารณาค่าความต้านทานความร้อนที่ผิวสัมผัสระหว่างของเหลวและผนังท่อ เนื่องจากค่าความต้านทานดังกล่าวมีค่าน้อยมากสำหรับของเหลวที่มีการไหล

³ Ibid., p. 11.13

ลักษณะทางกายภาพของดิน

นิยามของดิน

นิยามของดินเชิงธรณีวิทยา กล่าวว่า ดินคือแร่และหินที่สลายตัว และผ่านกระบวนการสลายตัวทางธรณีวิทยามาแล้ว เป็นผิวชั้นบนที่หุ้มห่อโลก แร่และหินที่ผุพังมานี้เรียกว่า วัสดุต้นกำเนิดดิน (parent material) ซึ่งมาผสมกับอินทรีย์วัตถุ (organic matter) จนกลายเป็นดินที่พืชสามารถเจริญเติบโตได้

นิยามของดินเชิงวิศวกรรม กล่าวว่า ดินคือวัตถุอ่อนไม่แข็งตัวของแร่และหิน เช่น กรวดทราย (gravel) ทราย (sand) ทรายแป้ง (silt) และดินเหนียว (clay) หรือส่วนผสมของสิ่งเหล่านี้ที่มารวมตัวกัน ดินสามารถแยกออกจากกันได้โดยวิธีง่าย ๆ เช่น บี ทูบ โดยไม่ต้องใช้การระเบิด

นิยามของดินเชิงปฐพีวิทยา กล่าวว่า ดินเป็นวัตถุที่บปคคลุมเป็นชั้นบางๆ อยู่บนส่วนใหญ่ของพื้นผิวเปลือกโลก ที่เกิดจากการสลายตัวของ แร่ หิน และของดินชนิดอื่น ปะปนกันในสภาพของแข็ง ของเหลว ก๊าซ ผสมผสานกัน สามารถแบ่งชั้นนั้นได้เป็นรูปหน้าตัดของดิน (soil profile) เมื่อมีสภาวะที่เหมาะสม ดินเป็นสิ่งที่ค้าจุนและให้ธาตุอาหารแก่พืช

เนื้อดิน (soil texture)

เนื้อดินเป็นสมบัติทางฟิสิกส์ขั้นมูลฐาน ซึ่งจะมีผลควบคุมสมบัติทางฟิสิกส์อื่นๆ ของดิน เนื้อดินสื่อความหมายด้านขนาดหรือความหยาบ-ละเอียดของอนุภาคอนินทรีย์ (inorganic particles) ที่เป็นองค์ประกอบของดินนั้น

ในด้านปฐพีวิทยา เนื้อดินถูกจำแนกออกเป็นหลายประเภท สิ่งที่กำหนดประเภทของเนื้อดิน คือสัดส่วนโดยมวลของอนุภาคอนินทรีย์ 3 กลุ่มขนาด (soil separates) คือ

1. Sand หรืออนุภาคทราย จัดเป็นกลุ่มขนาดโตที่สุดในดิน
2. Silt หรืออนุภาคทรายตะกอนหรืออนุภาคทรายแป้ง จัดเป็นกลุ่มขนาดปานกลาง
3. Clay หรืออนุภาคดินเหนียว จัดเป็นกลุ่มขนาดเล็กที่สุดในดิน

เหตุที่เรียกว่ากลุ่มขนาด (separate) เป็นเพราะแต่ละกลุ่มจะประกอบด้วยอนุภาคหลายชนิด จัดได้เป็นช่วงซึ่งกำหนดโดยพิกัดของขนาด พิกัดของขนาดนี้มีทั้งพิกัดบน (upper limit) และพิกัดล่าง (lower limit) ซึ่งอนุภาคทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว ต่างก็มีพิกัดของขนาดที่แตกต่างกัน

- สัดส่วนผสมของอนุภาคหลายกลุ่มขนาดนี้ จะมีผลต่อสมบัติทางฟิสิกส์หลายประการ เช่น
1. ความสามารถในการอุ้มน้ำ (water holding capacity) ซึ่งหมายถึงสมบัติของดินในการบรรจุน้ำไว้ได้มากหรือน้อย
 2. ความสามารถในการถ่ายเทอากาศ (aeration) ซึ่งหมายถึงความสามารถของดินในการบรรจุน้ำและถ่ายเทแก๊สออกอากาศ และความสามารถในการถ่ายเทแลกเปลี่ยนแก๊สระหว่างดินและบรรยากาศ
 3. ความแข็งของดิน (soil strength) ซึ่งหมายถึงความหนาแน่นของการเกาะตัวกันของอนุภาคดินเป็นก้อนดิน หรือเป็นหน้าตัดดิน

ความสามารถของดินในการอุ้มน้ำ และถ่ายเทอากาศมีความผูกพันกับจำนวน และขนาดของช่องในดิน ซึ่งได้รับผลโดยตรงจากขนาดของอนุภาค ส่วนความแข็งของดินผูกพันกับความแข็งแรงของการเชื่อมยึดระหว่างอนุภาคเดียวโดยอิทธิพลของสารเชื่อม ความแข็งของดินได้รับผลโดยอ้อมจากขนาดของอนุภาค โดยที่ถ้าอนุภาคดินมีขนาดเล็ก พื้นที่ผิวสัมผัสรวมทั้งจุดสัมผัสระหว่างอนุภาคจะมีค่าเพิ่มขึ้น หากพื้นที่สัมผัสระหว่างอนุภาคมีค่าเพิ่มขึ้น การเชื่อมยึดอนุภาคโดยสารเชื่อมจะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

ลักษณะจำเพาะของอนุภาคดินแต่ละกลุ่มขนาด

ทราย (Sand) มีลักษณะดังนี้

- เป็นเม็ดเล็กๆ ของแร่ quartz และ feldspar ที่สลายตัวผุพังจากหินต้นกำเนิด
- ขนาดโต มองเห็นด้วยตาเปล่า (ยกเว้นกลุ่มที่ละเอียดมาก หรือ very fine sand) สัมผัสระคายมือ
- ร่วน ไม่เกาะกันเป็นเม็ดดิน (aggregate) ถ้าไม่มีอนุภาคกลุ่มขนาดอื่นๆ อยู่ด้วยจะปรากฏตัวเป็นเม็ดเดี่ยว (single grain)
- เม็ดทรายเมื่อเรียงตัวกันจะเกิดช่อง (pore) ขนาดใหญ่ การระบายน้ำและระบายอากาศดี แต่มีความสามารถอุ้มน้ำ (water retention) ต่ำ
- กลุ่มอนุภาคทรายมีเนื้อที่ผิวจำเพาะน้อย จึงมีพื้นผิวสำหรับดูดซับ (absorb) สารต่างๆ เช่น น้ำและธาตุอาหาร น้อย

ทรายแป้ง (Silt) มีลักษณะดังนี้

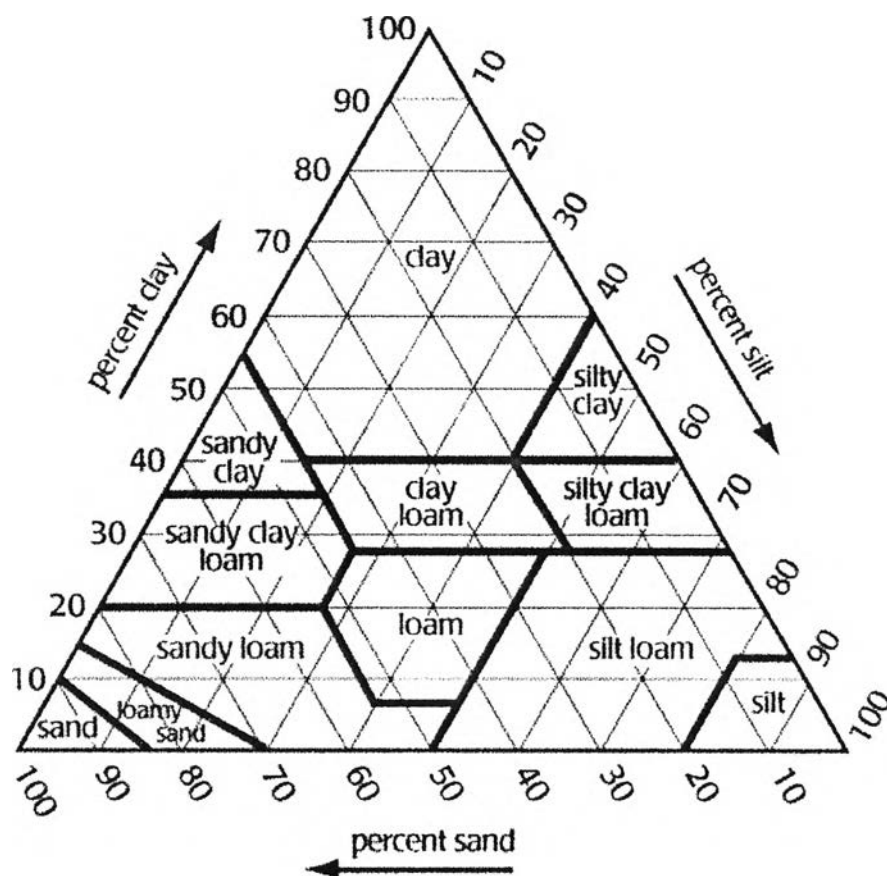
- เป็นกลุ่มอนุภาคขนาดปานกลาง มีองค์ประกอบทางแร่เหมือนกลุ่มขนาดทราย
- อนุภาคมีขนาดเล็กมองไม่เห็นด้วยตาเปล่า เหลี่ยมมุมของอนุภาคมีน้อย สัมผัสลื่นมือ คล้ายแป้ง
- ร่วน ไม่เกาะกันเป็นเม็ดดิน เหมือน sand
- ทรายแป้งเมื่อเรียงตัวกันเป็นก้อนดิน จะเกิดช่องขนาดเหมาะสมที่จะอุ้มน้ำไว้ และพืชสามารถใช้ประโยชน์จากน้ำในช่องนี้ได้เป็นส่วนใหญ่

ดินเหนียว (Clay) มีลักษณะดังนี้

- กลุ่มอนุภาค clay มักหมายถึง secondary minerals ที่สังเคราะห์ขึ้นจากแร่ดั้งเดิม ที่สลายตัวยุพั้งแล้ว และทับถมอยู่ในดิน
- เป็นกลุ่มอนุภาคขนาดเล็กที่สุด มองไม่เห็นด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดธรรมดา อนุภาคมีลักษณะเป็นแผ่นของสารประกอบ aluminosilicates ที่เรียงกันเป็นชั้นๆ สัมผัสเมือแห้งจะแข็งกระด้าง สากมือคล้ายเม็ดทราย แต่ถ้าเปียกจะเหนียวลื่นและเกาะติดนิ้ว
- อนุภาคดินเหนียวเกาะยึดกันเองหรือมีความเชื่อมแน่น (cohesion) ได้ดีเมื่อแห้ง เกาะยึดสารอื่น (adhesion) ได้ดีเมื่อเปียก เนื่องจากมีเนื้อที่ผิวจำเพาะสูง เมื่อแห้งจึงเกาะกันเป็นก้อนแข็ง เมื่อชื้นพอเหมาะสามารถปั้นเป็นรูปต่างๆได้ เมื่อดินเปียกน้ำจะเกาะยึดอุปกรณ์ไถพรวนได้แน่น ดินเหนียวไม่ปรากฏตัวเป็นอนุภาคเดี่ยว แต่จะเกาะกันเป็นกลุ่มก้อน ดินเหนียวบางชนิดสามารถพองตัว (swelling) เมื่อได้รับน้ำ และหดตัว (shrinking) เมื่อสูญเสียน้ำ
- อนุภาคดินเหนียวเมื่อเรียงตัวกันเป็นก้อนดินจะเกิดช่องระหว่างอนุภาคที่มีขนาดเล็ก และมีปริมาตรรวมของช่องมาก มีความพรุนสูง จึงอุ้มน้ำได้ดีมาก แต่รากพืชดูดน้ำจากช่องเหล่านั้นได้น้อย เนื่องจากมีแรงดึงน้ำสูง ดินเหนียวมีการระบายน้ำและระบายอากาศเลว
- เนื่องจากดินเหนียวมีเนื้อที่ผิวมาก และอนุภาคไม่เป็นกลาง อนุภาคดินเหนียวจึงดูดซับสารต่างๆได้ดี เช่น น้ำ และธาตุอาหารพืช ดินเหนียวส่วนมากจึงเป็นดินอุดมสมบูรณ์

การจำแนกประเภทเนื้อดิน (Textural Classification)

ดินโดยทั่วไปจะประกอบด้วยอนุภาคทั้ง 3 กลุ่มขนาดคือ ทราย (sand), ทรายแป้ง (silt) และดินเหนียว (clay) ดินแต่ละเขตที่มีความแตกต่างกันทางด้านธรณีวิทยา ลักษณะภูมิประเทศ และภูมิอากาศ จะมีสัดส่วนของอนุภาคทั้ง 3 กลุ่มขนาดแตกต่างกัน เป็นผลให้เกิดเนื้อดินหลายชนิด และเนื่องจากสัดส่วนผสมของกลุ่มอนุภาคที่วิเคราะห์จริงจากตัวอย่างดินที่มีสมบัติคล้ายกัน อาจแตกต่างกันได้ นักวิทยาศาสตร์ทางดินจึงจัดเนื้อดินเป็นกลุ่มประเภท (textural classes) ซึ่งมีด้วยกัน 12 ประเภทดังแสดงในรูปที่ 2.3 เนื้อดินที่ถูกจัดให้อยู่ในประเภทเดียวกัน ถึงแม้จะมีความผันแปรของสัดส่วนผสมของอนุภาค 3 ชนิดได้ แต่จะมีสมบัติทางฟิสิกส์ที่คล้ายกัน



รูปที่ 2.3 ไคอะแกรมสามเหลี่ยมแรงประเภทของเนื้อดิน (soil textural triangle)⁴ ตามสัดส่วนโดยมวลของทราย (sand) ทรายแป้ง (silt) และดินเหนียว (clay)

การประเมินประเภทเนื้อดินอาจทำได้เมื่อทราบสัดส่วนเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของทราย (sand), ทรายแป้ง (silt), และดินเหนียว (clay) ดังตัวอย่าง สมมติว่าตัวอย่างดินชนิดหนึ่งมีทราย 40% มีทรายแป้ง 38% และมีดินเหนียว 22% เมื่อตรวจสอบกับไคอะแกรมสามเหลี่ยมแรง

⁴ มณฑิเยร์ กังคิเทียม, กลศาสตร์ของดินด้านวิศวกรรม, หน้า 36.

ประเภทเนื้อดิน (Soil Textural Triangle) ดังแสดงในภาพแล้ว พบว่ามีประเภทของเนื้อดินเป็นดินร่วน (loam)

แต่ละมุมของไดอะแกรมสามเหลี่ยมจะเป็นกลุ่มประเภทของเนื้อดินที่แสดงลักษณะเด่นของแต่ละกลุ่มขนาดอนุภาค

มุมบนเป็นประเภทดินเหนียว (clay)

มุมล่างซ้ายเป็นประเภทดินทราย (sand)

มุมล่างขวาเป็นประเภทดินทรายแป้ง (silt)

เห็นได้ว่าประเภทเนื้อดินเหนียวกินขอบเขตของพื้นที่มากที่สุดบนไดอะแกรมสามเหลี่ยมดินซึ่งมีสัดส่วนของอนุภาคดินเหนียวเกิน 40% ถือว่ามีเนื้อดินหลักเป็นประเภทดินเหนียว (clayey soils) ในขณะที่เนื้อดินหลักประเภทดินทรายแป้ง (silty soils) และประเภทดินทราย (sandy soils) จะต้องมีสัดส่วนของกลุ่มอนุภาคทรายแป้ง และอนุภาคทรายเกิน 80% และ 90% ตามลำดับ ทั้งนี้เพราะอนุภาคดินเหนียวมีอิทธิพลต่อสมบัติของดินสูงกว่าอนุภาคขนาดทรายแป้งและขนาดทรายตามลำดับ

กลุ่มเนื้อดินหลักอีกประเภทหนึ่งคือ เนื้อดินร่วน (loam) กลุ่มนี้สมบัติของดินได้รับอิทธิพลของกลุ่มอนุภาคทราย, ทรายแป้ง, และดินเหนียว ในระดับใกล้เคียงกัน เนื้อดินที่มีชื่อดินร่วน (loam) ในไดอะแกรมพบว่า จะประกอบด้วยกลุ่มอนุภาคทราย และทรายแป้งใกล้เคียงกัน โดยมีกลุ่มอนุภาคดินเหนียวเป็นสัดส่วนที่ต่ำกว่า 2 กลุ่มข้างต้น นี่ก็แสดงว่ากลุ่มอนุภาคดินเหนียว มีอิทธิพลสูงกว่ากลุ่มอื่นๆ ในการกำหนดสมบัติของดิน

อุณหภูมิดิน

ในธรรมชาติ อุณหภูมิดินผันแปรอย่างต่อเนื่อง สาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบอุณหภูมิมิถวิทยาระหว่างดิน และบรรยากาศ การเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นได้ทั้งในเวลากลางวัน กลางคืน ฤดูร้อน และฤดูหนาว อิทธิพลของคุณสมบัติของดินเองก็มีส่วนในการผันแปรของวงจรอุณหภูมิดินทั้งในรอบวันหรือรอบปี การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดินเช่น ความสามารถในการสะท้อนกลับ ความจุความร้อน ความสามารถในการนำความร้อน ความแห้งแล้ง หรือความชุ่มชื้น ก็มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของดิน รวมทั้งลักษณะทางภูมิประเทศและพืชพรรณที่ขึ้นปกคลุม

การแปรผันอุณหภูมิดินตามวันเวลาและความลึกระดับต่างๆ สามารถทำนายได้โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ โดยสมมติว่าคลื่นอุณหภูมิ (Soil temperature wave) ทุกๆ ระดับความลึกจะ

มีการแกว่งไกวขึ้น - ลง เป็นรูป Sine Curve ตามฟังก์ชันของเวลารอบอุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวดิน อุณหภูมิผิวดิน ณ เวลาใดๆ สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$T(0, t) = T + A(0) \sin \omega t \quad (2.10)^5$$

- เมื่อ $T(0, t)$ คืออุณหภูมิที่ความลึก $Z = 0$ (คือผิวดิน) ตามฟังก์ชันของเวลา t
 T คืออุณหภูมิเฉลี่ยของผิวดิน (หรืออุณหภูมิเฉลี่ยของโปรไฟล์)
 $A(0)$ คือแอมพลิจูด (Amplitude) ของคลื่นอุณหภูมิ (ช่วงอุณหภูมิมระหว่างค่าสูงสุด หรือต่ำสุดกับค่าเฉลี่ย)
 ω คือคาบเวลาของการแกว่งไกว ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2π หารด้วยช่วงเวลาของการแกว่งไกวในรอบวัน
 เช่น $\omega = 2\pi / 24 \text{ ชม.}^{-1}$ เมื่อ t มีหน่วยเป็นชั่วโมง
 และสำหรับเวลาในรอบปี $\omega = 2\pi / 365 \text{ วัน}^{-1}$ เมื่อ t มีหน่วยเป็นวัน

อุณหภูมิดินที่ระดับความลึก Z และเวลา t ใด ๆ สามารถหาได้โดยการประยุกต์สมการ (2.10) ซึ่งได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$T(Z, t) = T + A(Z) \sin(\omega t - Z / D) \quad (2.11)^6$$

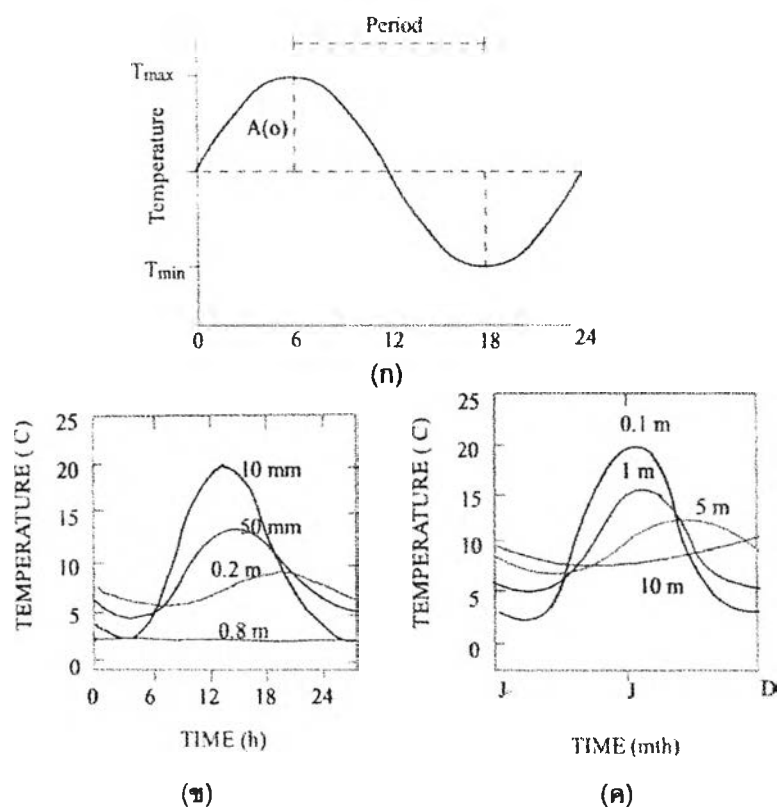
- เมื่อ $T(Z, t)$ คืออุณหภูมิดินที่ระดับความลึก Z และเวลา t
 และ $A(Z) = A(0)e^{-Z/D}$

ค่าคงที่ D นี้เรียกว่า damping depth ซึ่งแอมพลิจูดของอุณหภูมิดิน ณ ความลึก Z เท่ากับ D มีค่าลดลง $1/e$ หรือ 0.37 เท่าของแอมพลิจูดของอุณหภูมิผิวดิน $A(0)$

damping depth มีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางความร้อนของดิน และความถี่ของการแกว่งไกว ($D = (2k / \omega)^{1/2}$) การล้าช้าของยอดคลื่นอุณหภูมิ (peak) ที่ความลึก Z ใดๆ เมื่อเปรียบเทียบกับคลื่นอุณหภูมิผิวดินมีค่าเท่ากับ $-Z/D$

⁵ Daniel Hillel, *Fundamental of soil physics*. p. 304.

⁶ *Ibid.*, p. 304.



- รูปที่ 2.4⁷ (ก) แสดงการแปรผันของอุณหภูมิดิน ซึ่งเป็นไปตามสมการ 2.10
 (ข) การแปรผันของอุณหภูมิดินตามเวลาและความลึกต่างๆ ในรอบวัน
 (ค) การแปรผันของอุณหภูมิดินตามเวลาและความลึกต่างๆ ในรอบปี

แหล่งที่มาของพลังงานความร้อนของดิน

ดวงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานเดียวที่ให้พลังงานแก่โลก โลกได้รับพลังงานเริ่มต้นในรูปของรังสีแสงอาทิตย์ที่แผ่มาถึงโลก คิดเป็นพลังงานเพียงแค่ 0.0005 % ของรังสีที่ดวงอาทิตย์แผ่มาทั้งหมด เรียกรังสีส่วนนี้ว่ารังสีแสงอาทิตย์ที่แผ่ถึงชั้นบรรยากาศโลก (extraterrestrial solar radiation) ซึ่งเริ่มนับจากส่วนบนสุดของชั้นบรรยากาศ รังสีส่วนนี้มีผู้ประเมินว่ามีค่าประมาณ 1360 W / m^2 หรือคิดเป็นค่าเฉลี่ยพลังงานประมาณ $29.4 \text{ MJ / (m}^2 \text{ day)}$ รังสีในส่วนนี้จะมีความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง 300 – 400 nm

⁷ Ibid., p. 305

เนื่องจากชั้นบรรยากาศโลกมีแก๊สต่าง ๆ เช่นโมเลกุลของ CO_2 , O_2 , O_3 , H_2O และฝุ่นละออง โมเลกุลเหล่านี้จะทำให้เกิดการสะท้อนกลับของรังสีบางส่วน และเกิดการกระเจิง (scatter) ของรังสีอีกบางส่วน อีกทั้งมีการดูดซับพลังงานของรังสีโดยโมเลกุลของแก๊สเหล่านี้ จึงทำให้รังสีทะลุผ่านชั้นบรรยากาศลงมาได้เพียงส่วนหนึ่งของรังสีที่แผ่มาถึงชั้นบรรยากาศทั้งหมด ถ้ารังสีที่แผ่มาถึงชั้นบรรยากาศโลกมี 100 % รังสีจำนวนประมาณ 19 % จะทะลุมายังผิวโลก (เรียก direct beam) ประมาณ 28 % จะสะท้อนกลับไปนอกชั้นบรรยากาศ โดยเมฆและโมเลกุลต่าง ๆ ของแก๊ส (เรียก reflection) ประมาณ 16 % จะถูกดูดซับโดยโมเลกุลดังกล่าว (เรียก absorption) ประมาณ 37 % ของรังสีที่แผ่มาทั้งหมดเกิดการกระเจิง (เรียก scattering) ซึ่งบางส่วนของรังสีที่กระเจิงนี้ จะกระเจิงออกไปนอกชั้นบรรยากาศ และบางส่วนจะกระเจิงภายในชั้นบรรยากาศเอง ซึ่งในที่สุดรังสีกระเจิงส่วนหลังจะสามารถทะลุชั้นบรรยากาศถึงผิวโลกได้ (เรียก sky radiation) เมื่อรวมทั้งหมดแล้วรังสีที่ทะลุชั้นบรรยากาศโลกจนถึงผิวโลกได้นั้น (เรียก global radiation) มีสัดส่วนประมาณ 45 % ของรังสีทั้งหมดที่แผ่มาถึงชั้นบรรยากาศ สัดส่วนรังสีต่าง ๆ ข้างต้นได้จากการประเมินในฤดูร้อน ซึ่งเป็นช่วงที่ท้องฟ้าแจ่มใสและ รังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบผิวโลกเกือบเป็นแนวตั้งฉาก จึงอาจกล่าวได้ว่าสัดส่วนรังสีที่ระบุไว้นี้จะแตกต่างกันไปในแต่ละพื้นที่ ขึ้นกับว่าเป็นช่วงฤดูกาลใด และตำแหน่งที่ตั้งของพื้นที่เป็นพื้นที่ใด เช่นถ้าเป็นฤดูฝนมีเมฆมาก หรือเป็นแถบขั้วโลกได้ สัดส่วนของรังสีน่าจะมีความแตกต่างอย่างมากกับสัดส่วนที่ได้นำเสนอข้างต้นนั้น

รังสีที่ตกกระทบผิวโลกได้ (global radiation) จะถูกใช้ไปในด้านต่าง ๆ ได้แก่ 1) สะท้อนกลับสู่ชั้นบรรยากาศ 2) รังสีบางส่วนถูกดูดซับโดยชั้นบรรยากาศเองหรือโดยผิวดิน ซึ่งจะทำให้ชั้นบรรยากาศและดินมีอุณหภูมิสูงขึ้น 3) รังสีบางส่วนจะถูกใช้ไปเพื่อเปลี่ยนสถานะของน้ำ เช่นการระเหยน้ำที่ผิวดินหรือการคายน้ำที่ใบพืชและ 4) รังสีบางส่วนจะทำให้ผิวดินมีอุณหภูมิสูงขึ้นและเกิดการแผ่รังสีความร้อนจากดินสู่บรรยากาศ

ที่ผิวดินนับเป็นจุดที่มีความสำคัญที่สุดในเรื่องอุณหภูมิผิวดิน เพราะที่ผิวดินเป็นรอยต่อระหว่างดินกับชั้นบรรยากาศ ที่มีการถ่ายเทกลับไปกลับมาของพลังงานความร้อนระหว่างภายในชั้นหน้าตัดดินและชั้นบรรยากาศ การถ่ายเทพลังงานเป็นสาเหตุให้อุณหภูมิของดินภายในชั้นหน้าตัดดินมีการเปลี่ยนแปลง

ในเบื้องต้นต้องเข้าใจเสียก่อนว่า พลังงานและความร้อนสามารถเปลี่ยนรูปกลับไปกลับมาได้ พลังงานที่ผิวดินได้รับจากรังสีแสงอาทิตย์ในเวลากลางวันจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนแล้วมีผลทำให้อุณหภูมิที่ผิวดินมีค่าสูงขึ้น พลังงานความร้อนที่สะสมไว้ที่ผิวดินจะถูกเคลื่อนย้ายลงไปในชั้นหน้าตัดดิน ซึ่งมีผลทำให้อุณหภูมิในชั้นหน้าตัดดินสูงขึ้นตามไปด้วย ในทางกลับกันเวลากลางคืนผิวดินไม่ได้รับพลังงานความร้อนเพิ่มเติม แต่พลังงานความร้อนที่สะสมไว้ภายในชั้นหน้า

ดินเองในเวลากลางวัน จะมีการถ่ายเทพลังงานความร้อนจากภายในชั้นหน้าตัดดินสู่บรรยากาศ จึงมีผลทำให้อุณหภูมิดินในชั้นหน้าตัดดินในช่วงเวลากลางคืนลดลง

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดินภายในชั้นหน้าตัดดินจะมากน้อยเพียงไรขึ้นกับว่า ช่วงเวลาที่มีแสงแดดนานเท่าไร หรือรังสีแสงอาทิตย์ที่กระทบผิวดินในช่วงเวลากลางวันมีมากน้อยเพียงไร และนานเท่าไร รวมทั้งขึ้นกับความสามารถในการส่งผ่านความร้อนของหน้าตัดดินเอง ในกรณีแรกถ้ามีเมฆมาก โอกาสที่รังสีแสงอาทิตย์จะตกกระทบผิวดินด้วยความเข้มข้นที่สูงก็มีน้อย ผลก็คือผิวดินจะได้รับพลังงานแสงอาทิตย์น้อยกว่าขณะที่ท้องฟ้าโปร่งไม่มีเมฆมากนัก และการที่เมฆปกคลุมดินมีความหนาแน่นที่ต่างกัน ทำให้รังสีแสงอาทิตย์ที่จะตกกระทบผิวโลกมีความแตกต่างกัน จึงเป็นเหตุที่ให้ดินแต่ละพื้นที่ในแนวอนได้รับพลังงานที่แตกต่างกันออกไป ผลคือการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดในชั้นหน้าดินจะไม่มีสม่ำเสมอ

กระบวนการส่งผ่านความร้อน (heat transfer processes)

เมื่อพลังงานรังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบที่ผิวดินแล้ว พลังงานในรูปของรังสีจะเปลี่ยนไปเป็นพลังงานในรูปความร้อน ซึ่งต้องเกิดการส่งผ่านพลังงานความร้อนที่ได้รับดังกล่าวเข้าไปในชั้นหน้าตัดดิน หรือเปลี่ยนไปเป็นรังสีความร้อนคลื่นยาวแผ่กลับไปสู่บรรยากาศ การส่งผ่านพลังงานจะเกิดขึ้นใน 3 ลักษณะ ได้แก่ การแผ่รังสีความร้อน (radiation) การพาความร้อน (heat convection) และ การนำความร้อน (heat conduction)

1. การแผ่รังสีความร้อน

กระบวนการนี้เกิดจากการที่วัตถุที่มีอุณหภูมิสูงกว่าศูนย์เคลวิน (0 K) จะสามารถแผ่รังสีได้ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electro-magnetic waves) ตามกฎของ Stephan-Boltzmann การแผ่รังสีความร้อนจากผิววัตถุจะไม่แผ่ที่ความยาวคลื่นเดียว แต่จะแผ่ออกมาในช่วงของความยาวคลื่นต่าง ๆ ที่มีความต่อเนื่องกัน

2. การพาความร้อน

การพาความร้อนเป็นการส่งผ่านความร้อนที่ต้องอาศัยตัวกลางที่มีการเคลื่อนที่ เช่น การเคลื่อนที่ของน้ำ และอากาศ การเคลื่อนที่ของของไหลเหล่านี้ซึ่งมีอุณหภูมิในตัวของมันเอง เมื่อตัวกลางมีการเคลื่อนที่ไป ความร้อนจะถูกส่งผ่านจากจุดเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งปลายทางของการเคลื่อนที่ ตัวอย่างเช่นการเคลื่อนที่ของน้ำฝนที่ตกลงมาผ่านลงสู่ชั้นหน้าตัดดิน ถ้าอุณหภูมิของน้ำฝนสูงกว่าอุณหภูมิในชั้นหน้าตัดดิน จะมีผลทำให้อุณหภูมิดินสูงขึ้นตลอดแนวทางการเคลื่อนที่ของน้ำฝนที่ไหลผ่านชั้นหน้าตัดดิน อีกตัวอย่างหนึ่งคือการที่อุณหภูมิของอากาศภายใน

ในชั้นหน้าตัดดินสองแหล่งมีความแตกต่างกัน จะมีการเคลื่อนที่ของอากาศที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิเหนือระยะทางการเคลื่อนที่ (temperature gradient) ซึ่งจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอากาศในดินจากแหล่งที่มีอุณหภูมิสูง ไปสู่แหล่งที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ผลทำให้อุณหภูมิดินทั้งในส่วนที่เป็นช่องอากาศ ช่องที่บรรจุน้ำ และตัวของแข็งของดินมีอุณหภูมิสูงขึ้น

3. การนำความร้อน

การนำความร้อนเป็นการส่งผ่านความร้อนที่อาศัยตัวกลาง แต่ตัวกลางที่นำความร้อนจะไม่มี การเคลื่อนที่ ความร้อนจะส่งผ่านในระดับของโมเลกุลของตัวกลางเอง ตัวอย่างเช่นองค์ประกอบของดินที่เป็นของแข็ง ถ้าอุณหภูมิสองด้านของของแข็งเหล่านั้นมีความแตกต่างกัน ความร้อนจากด้านที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจะถูกส่งผ่านไปยังอีกด้านหนึ่ง ไม่เฉพาะของแข็งในดินเท่านั้นที่สามารถนำความร้อนได้ น้ำที่อยู่ในช่องของดินก็สามารถนำความร้อนได้ จึงสามารถกล่าวได้ว่า องค์ประกอบของดินทุกอย่างสามารถนำความร้อนได้ เนื่องจากดินมีความหลากหลายทางองค์ประกอบ เช่นปริมาณอนุภาคขนาดทราย ซิลต์ ดินเหนียว อินทรีย์วัตถุ และปริมาณน้ำในช่องดินมีความแตกต่างกัน อีกทั้งองค์ประกอบเหล่านี้มีความสามารถในการนำความร้อนที่แตกต่างกัน ทำให้ดินในแต่ละแหล่งมีความไม่สม่ำเสมอของความสามารถในการนำความร้อน

นอกจากการส่งผ่านความร้อนทั้งสามกระบวนการแล้ว ปรากฏการณ์ที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของดิน คือกระบวนการใช้พลังงานความร้อนไปกับการกลายเป็นไอ (latent heat of evaporation) หรือการควบแน่นของน้ำ (latent heat of condensation) เนื่องจากน้ำเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่มีอยู่ในดิน การเปลี่ยนแปลงสถานะของน้ำ ต้องมีความร้อนบางส่วนปลดปล่อยออกมา หรือถูกดูดกลืน จึงกล่าวได้ว่ามีความร้อนเพียงบางส่วนเท่านั้นที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในชั้นหน้าตัดดิน

การพาความร้อนจะเกิดขึ้นเมื่อมีการเคลื่อนที่ของน้ำและอากาศ และเนื่องจากการพาความร้อนต้องการช่องเพื่อการเคลื่อนที่ดังกล่าว ดังนั้นสมบัติของดินที่มีผลต่อการพาความร้อนในดินจึงขึ้นกับความต่อเนื่องของช่องภายในดิน และพื้นที่หน้าตัดของช่องที่เกิดขึ้น ความคดเคี้ยวของความต่อเนื่องของช่อง ก็มีส่วนในการกำหนดอัตราการส่งผ่านความร้อนโดยการพาที่เกิดขึ้นภายในชั้นหน้าตัดดิน ปัจจัยที่สำคัญอีกประการหนึ่งซึ่งทำให้เกิดการพาความร้อน คือความแตกต่างของอุณหภูมิ ถ้าความแตกต่างของอุณหภูมิมีมาก โอกาสที่ความร้อนในชั้นหน้าตัดดินจะถูกส่งผ่านในรูปของการพาก็มีมากขึ้น

การนำความร้อนเกิดขึ้น เมื่อมีความแตกต่างกันของอุณหภูมิมระหว่างแหล่งสองแหล่งภายในชั้นหน้าตัดดิน ถ้าภายในชั้นหน้าตัดดินมีความแตกต่างของอุณหภูมิสูง โอกาสที่จะเกิดการส่งผ่านความร้อนด้วยการนำก็มีมากขึ้น แต่คงต้องพิจารณาอีกว่ากระบวนการนำความร้อนต้องการ

ความต่อเนื่องของตัวกลางในการนำความร้อน และเนื่องจากการที่ดินประกอบด้วยอนุภาคขนาดต่างๆ กันเรียงต่อกันในชั้นหน้าตัดดิน ความต่อเนื่องของตัวกลางนำความร้อนก็คือจุดสัมผัสระหว่างอนุภาคดินเอง ถ้าพื้นที่สัมผัสกันของอนุภาคดินมีมาก ความต่อเนื่องของตัวกลางที่จะนำความร้อนก็มีมากตามไปด้วย ปริมาณน้ำในดินก็มีความสำคัญต่อการส่งผ่านความร้อนโดยวิธีนี้ กล่าวคือน้ำที่ล้อมรอบอนุภาคดินจะเสมือนเป็นตัวเชื่อมตัวกลางการนำความร้อน เพราะทำให้อนุภาคดินมีจุดสัมผัสมากขึ้น อีกทั้งยังเพิ่มพื้นที่ของจุดสัมผัส ผลทำให้ตัวกลางของการนำความร้อนมีความต่อเนื่อง และมีพื้นที่ในการนำความร้อนที่เพิ่มขึ้น

แต่การที่น้ำมีความจุความร้อนที่สูงมาก น้ำจึงเปรียบเสมือนตัวคอยดูดซับความร้อนภายในชั้นหน้าตัดดิน เพื่อไม่ให้ดินมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว อีกทั้งการเปลี่ยนแปลงสถานะของน้ำเหลวเป็นไอน้ำต้องใช้พลังงานมากไปกับความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ ผลทำให้พลังงานความร้อนบางส่วนถูกนำไปใช้เพื่อการนี้ อุณหภูมิของดินในบริเวณที่ได้รับพลังงานความร้อนสูง ๆ จึงไม่เปลี่ยนแปลงเร็วมากนัก และมีค่าไม่สูงมากนักด้วย จึงเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ปริมาณน้ำที่ผิวดินจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในชั้นหน้าตัดดินอย่างมาก กล่าวคือ 1) เป็นการต่อต้านการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิดินที่จะเกิดขึ้นและ 2) เพิ่มเติมช่องทางสำหรับการนำความร้อนลงสู่ชั้นหน้าตัดดิน หรือเส้นทางกลับกัน

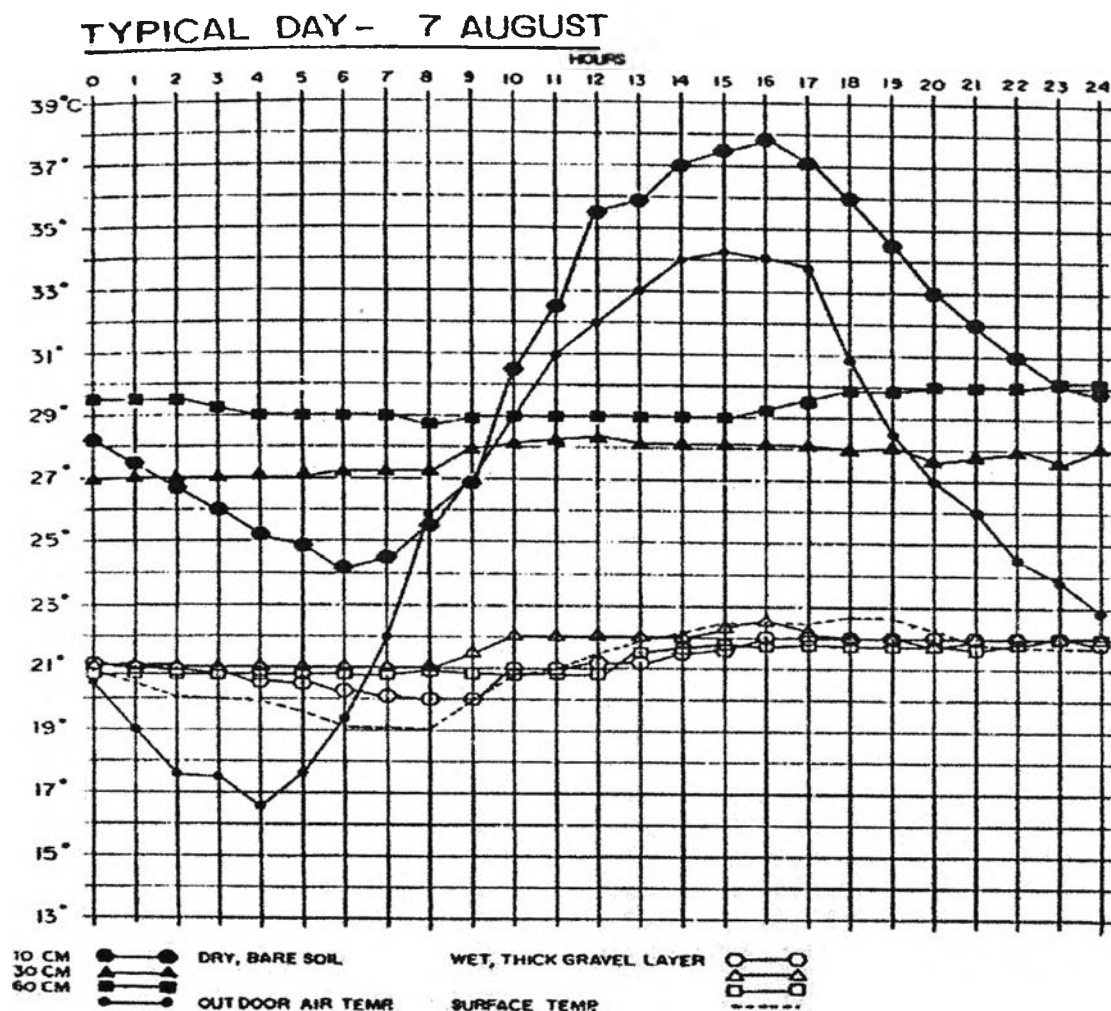
การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผิวดินอาจเกิดได้จากกระบวนการทั้งสี่ แต่ถ้าพิจารณาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในชั้นหน้าตัดดินเองแล้ว กระบวนการแผ่รังสีความร้อน การพาความร้อน และการใช้ความร้อนสำหรับการเปลี่ยนแปลงสถานะของน้ำจะไม่สำคัญมากนัก เพราะกระบวนการเหล่านี้จะเกิดขึ้นได้น้อย กระบวนการที่มีบทบาทมากในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในชั้นหน้าตัดดินจึงเกิดจากการนำความร้อนเป็นหลัก

สิ่งที่ต้องคำนึงถึงอีกในเรื่องการส่งผ่านความร้อนในชั้นหน้าตัดดินคือ แหล่งกำเนิดหรือแหล่งดูดซับความร้อนในหน้าตัดดินนอกเหนือจากที่ได้กล่าวไปแล้ว แหล่งกำเนิดหรือแหล่งดูดซับความร้อนในชั้นหน้าตัดดิน อาจเกิดได้จากปฏิกิริยาทางเคมี เช่นการเกิดสารประกอบทางเคมีในดิน (complexation and speciation) ซึ่งบางครั้งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (exothermic reactions) หรือบางครั้งเป็นปฏิกิริยาดูดกลืนความร้อน (endothermic reactions) ส่วนปฏิกิริยาทางชีวเคมีที่เกิดในดินก็เป็นเช่นเดียวกัน กล่าวคืออาจมีการดูดกลืน และการคายพลังงานความร้อนออกมา ซึ่งการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของพลังงานความร้อนจะมีผลทำให้อุณหภูมิดินเปลี่ยนแปลงไปได้

ลักษณะทั่วไปของความชื้นที่เก็บสะสมในดิน

โดยทั่วไปพื้นดินจะสามารถเก็บสะสมความร้อนที่รับมาจากดวงอาทิตย์ได้ ซึ่งความร้อนที่เก็บสะสมไว้นี้ จะมีปริมาณที่ไม่คงที่ และแตกต่างกันไปในแต่ละพื้นที่ BARUCH GIVONI และ LEON KATZ ได้กล่าวไว้ว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการสะสมความร้อนในดิน มีดังนี้

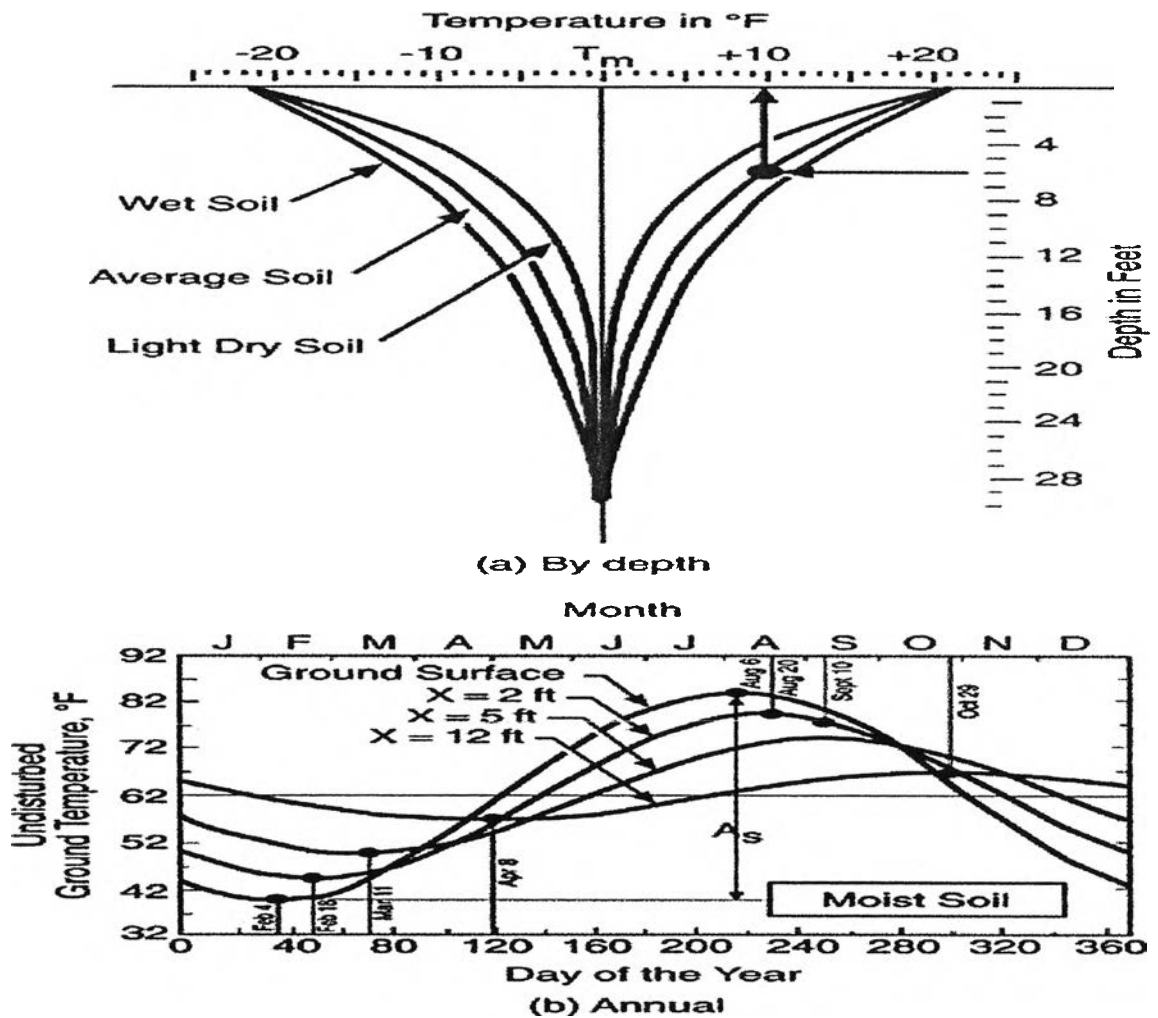
- สมบัติของดิน (Soil Properties)
- สภาพพื้นที่ (Local conditions)
- เวลาหรือฤดูกาล (Time or Season)
- ความลึก (Depth)



รูปที่ 2.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของดินรายชั่วโมง ที่ความลึกต่างๆ กัน สำหรับดินแห้งไม่มีสิ่งปกคลุมด้านบน และดินเปียกที่มีชั้นของกรวดหินปกคลุมผิวดิน

จากภาพของ BARUCH GIVONI และ LEON KATZ แสดงให้เห็นว่า ในวันหนึ่งๆ อุณหภูมิของดินที่ความลึกค่าหนึ่ง เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เช่นเดียวกับอุณหภูมิของอากาศ แต่ อุณหภูมิของดิน จะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าอุณหภูมิของอากาศ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวนี้ จะมีค่าน้อยลง เมื่อความลึกของดินเพิ่มมากขึ้น

จากงานวิจัยของ Bharadwaj และ Bansal เมื่อสภาพพื้นที่แตกต่างกัน ในขณะที่คุณสมบัติของดินเหมือนกัน คือถ้าเป็นดินแห้งถูกแสงแดด (Dry sunlite surface) และดินเปียกชื้นถูกแสงแดด (Wet sunlite surface) การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิดินที่ความลึกต่าง ๆ ก็จะมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่เท่ากัน ซึ่งสรุปได้ว่า ดินที่เปียกชื้นจะมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมากกว่า



รูปที่ 2.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของดิน

การดูดซับและการสูญเสียความร้อน

ปริมาณความร้อนที่ดูดซับโดยดิน จะพิจารณาจากปริมาณต่าง ๆ ที่มีผลมาจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์สู่พื้นโลก ซึ่งปริมาณดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ แต่ปริมาณของพลังงานที่เข้าสู่ดินจะมากหรือน้อยขึ้นกับปัจจัยทางกายภาพดังนี้

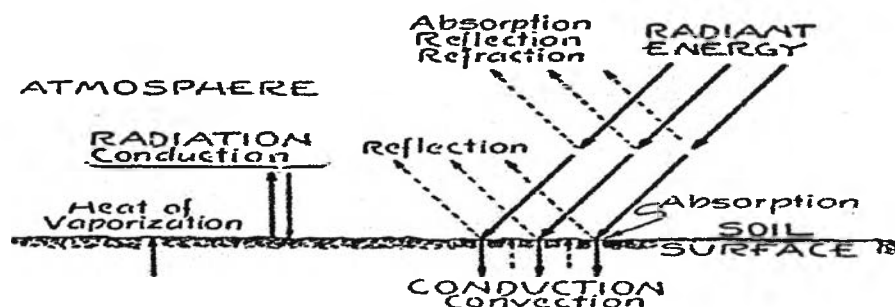
- (1) สีของดิน
- (2) ความชื้นของพื้นที่
- (3) พืชที่ปกคลุมอยู่

เป็นที่รู้กันดีว่า ดินที่มีสีดําเข้ม จะดูดซับพลังงานได้มากกว่าดินที่มีสีอ่อนกว่า และดินสีแดงและสีเหลืองจะแสดงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิได้รวดเร็วกว่าสีขาว จากการสังเกตพบว่ามุมของแสงแดดที่ตกกระทบ จะมีผลต่อการดูดซับพลังงาน



รูปแผนภาพแสดงพื้นที่ของดินที่ถูกทำให้อุ่นขึ้น โดยดูผลของรังสีจากดวงอาทิตย์ที่กระทำกับ ระนาบของพื้นดิน ถ้าให้ปริมาณการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์สู่ดินโดยตรง (รูปซ้าย) การแผ่รังสีจะมีความเข้มข้นอยู่ในบริเวณพื้นที่ที่เล็ก และดินจะอุ่นขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่ถ้าให้ปริมาณการแผ่รังสีปริมาณเท่ากันสู่ดิน โดยทำมุม 45 องศา (รูปขวา) พื้นที่ที่มีผลกระทบจะมีขนาดใหญ่ขึ้น ดังนั้นการแผ่รังสีจึงมีความเข้มข้นไม่มาก และดินก็จะอุ่นได้ช้าลง

ไม่ว่าดินที่ว่างเปล่า หรือดินที่มีพืชปกคลุมอยู่ก็ตาม ก็จะได้รับผลจากแสงแดดที่ส่องลงมา ซึ่งจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในดิน ดินที่ว่างเปล่านั้นจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นได้อย่างรวดเร็ว และก็เย็นลงได้อย่างรวดเร็วกว่าดินที่มีสิ่งปกคลุมพื้นผิวอยู่ กระบวนการในการได้รับความร้อน การดูดซับ และการสูญเสียความร้อน แสดงได้ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 2.7 แผนภาพแสดงความร้อนที่ได้รับ การสูญเสีย และการเคลื่อนที่ของความร้อนสู่ดิน

ความชื้นของดิน

ระดับความชื้นของดิน (soil moisture content) เป็นสิ่งที่แสดงถึงจำนวน หรือ ปริมาณ (quantity) ของความชื้นที่มีอยู่ในดินจำนวนหนึ่งๆ การแสดงระดับความชื้นของดินอาจทำได้หลายวิธีเช่น ระดับความชื้นโดยมวล (mass water content), ระดับความชื้นโดยปริมาตร (volume water content) และ ระดับความชื้นเป็นความสูงของน้ำ (depth water content) ซึ่งในการศึกษาวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาระดับความชื้นของดินแบบ ระดับความชื้นโดยมวลเท่านั้น

ระดับความชื้นโดยมวล

ระดับความชื้นโดยมวลหมายถึง สัดส่วนระหว่างมวลของน้ำกับมวลของดินแห้ง ซึ่งบรรจุ น้ำจำนวนนั้นอยู่ แสดงได้ตามสมการ

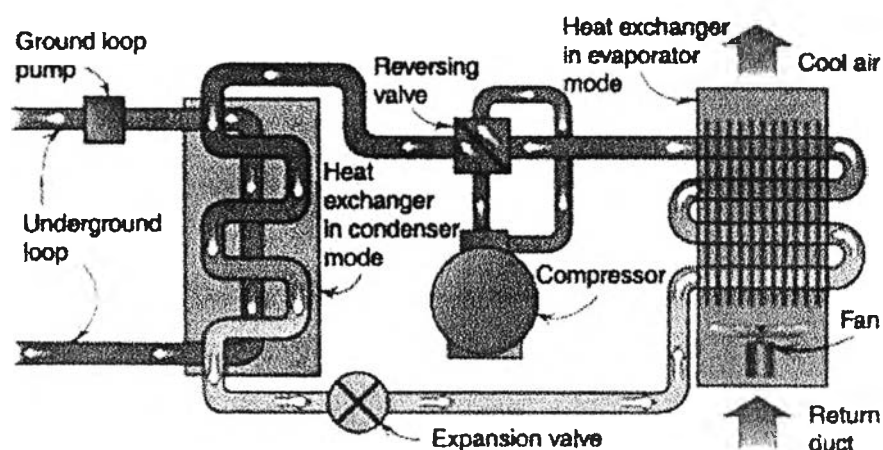
$$w = \frac{M_w}{M_s} \times 100 \quad (2.12)$$

| | | | |
|--------|-------|---|---|
| โดยที่ | w | = | ระดับความชื้นโดยมวลของดิน (แสดงเป็นเปอร์เซ็นต์) |
| | M_w | = | มวลของน้ำในดิน |
| | M_s | = | มวลของดินแห้งสนิท |

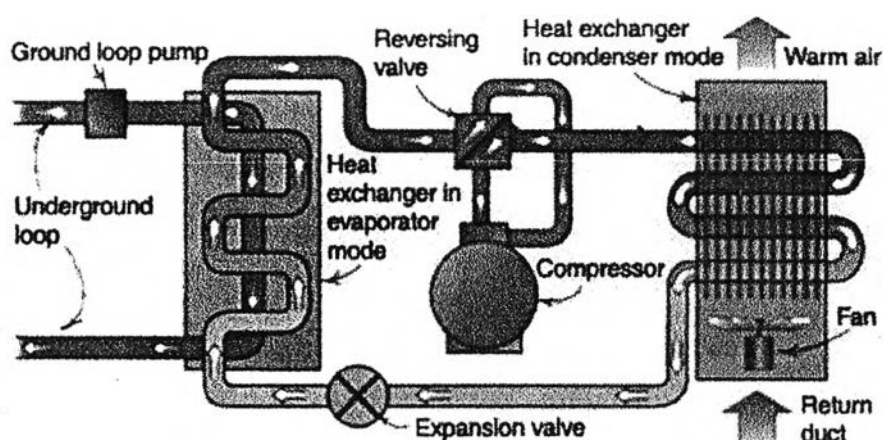
มวลของดินแห้งสนิทในที่นี้หมายถึงดินที่ผ่านการอบแห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 105 ถึง 110 องศาเซลเซียส จนดินนั้นมีน้ำหนักคงที่ ซึ่งโดยปกติต้องใช้เวลาอบไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง การอบดินโดยวิธีการนี้จะทำให้ทุก ๆ ส่วนของความชื้นของดิน ยกเว้นส่วนที่เป็นองค์ประกอบทางทางเคมีของอนุภาคดิน หายไปจากดินอย่างสิ้นเชิง แต่ไม่ทำให้สิ่งอื่นๆ ที่ไม่ใช่ความชื้นสูญเสียไปจากดินแต่อย่างใด ดินที่ได้ผ่านการอบตามวิธีการนี้แล้วเรียกว่า oven-dry soil

การใช้ประโยชน์จากการแลกเปลี่ยนความร้อนของดิน

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นจะพบว่า อุณหภูมิของดินจะไม่คงที่ แต่จะแปรเปลี่ยนไปตามปัจจัยต่าง ๆ แต่ปัจจัยที่สำคัญก็คือ ฤดูกาล ดังนั้นการใช้ประโยชน์ในการแลกเปลี่ยนความร้อนของดิน จึงแตกต่างกันไปเมื่อฤดูกาลเปลี่ยนไป กล่าวคือ ในช่วงที่อุณหภูมิอากาศสูงหรือในช่วงฤดูร้อน อุณหภูมิของดินจะต่ำกว่าอุณหภูมิของอากาศ เราจะนำเอาพลังงานความร้อนจากดินไปใช้ประโยชน์ในรูปของความเย็น แต่ในทางกลับกัน ในช่วงที่อุณหภูมิอากาศต่ำหรือช่วงฤดูหนาว อุณหภูมิของดินจะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิอากาศ ดังนั้นพลังงานที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ จึงอยู่ในรูปของความร้อน



รูปที่ 2.8 แสดงปั๊มความร้อน เมื่อใช้งานในการทำความเย็น

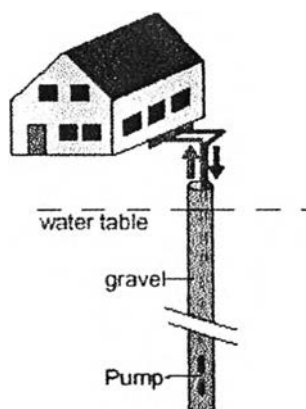


รูปที่ 2.9 แสดงปั๊มความร้อน เมื่อใช้งานในการทำความร้อน

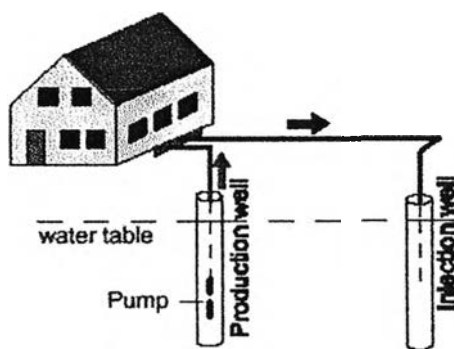
จากรูปจะพบว่า ดินจะเป็นแหล่งกำเนิดความร้อน (heat source) เมื่อทำงานในการทำความร้อน และดินจะเป็นแหล่งรับความร้อน (heat sink) เมื่อทำงานในการทำความเย็น

ในชุดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนกับดินนั้น จะมีชุดของท่อซึ่งทำหน้าที่นำเอาของไหลที่เป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน ไปถ่ายเทความร้อนสู่ดิน ซึ่งจะเรียกว่า ชุดท่อใต้ดิน (underground loop) ซึ่งชุดท่อใต้ดินนี้ แบ่งได้เป็น 2 แบบคือ (1) วงจรเปิด (open loop) (2) วงจรปิด (closed loop)

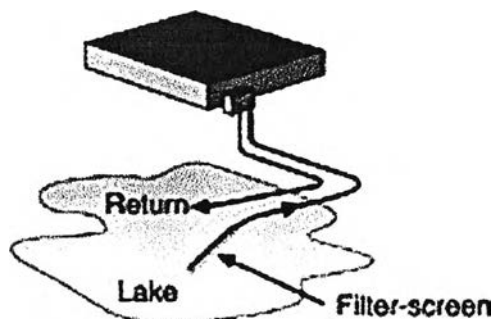
วงจรเปิด (open loop) จะใช้น้ำใต้ดิน เป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนจากบิ๊มความร้อน โดยอาจจะขุดบ่อน้ำ (well) 1 บ่อ เพื่อใช้เป็นทั้งแหล่งจ่ายน้ำและแหล่งรับน้ำที่ใช้แล้ว หรือจะขุดเพิ่มอีก 1 บ่อ เพื่อใช้เป็นบ่อที่รับน้ำที่ใช้แล้วต่างหากก็ได้ หรืออาจจะใช้น้ำจากผิวน้ำ (surface water) ก็ได้



รูปที่ 2.10 แสดงชุดท่อแบบวงจรเปิด เมื่อใช้บ่อน้ำ 1 บ่อ



รูปที่ 2.11 แสดงชุดท่อแบบวงจรเปิด เมื่อใช้บ่อน้ำ 2 บ่อ

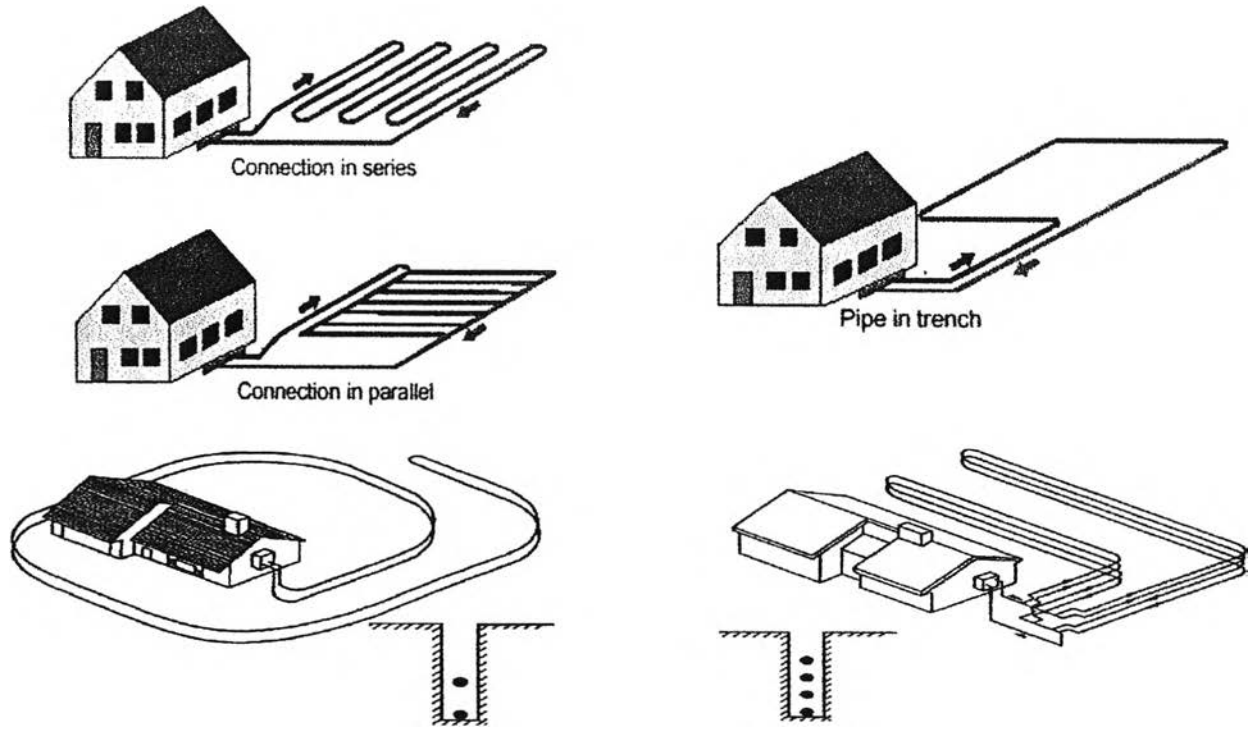


รูปที่ 2.12 แสดงชุดท่อแบบวงจรมืด เมื่อใช้น้ำจากผิวน้ำ

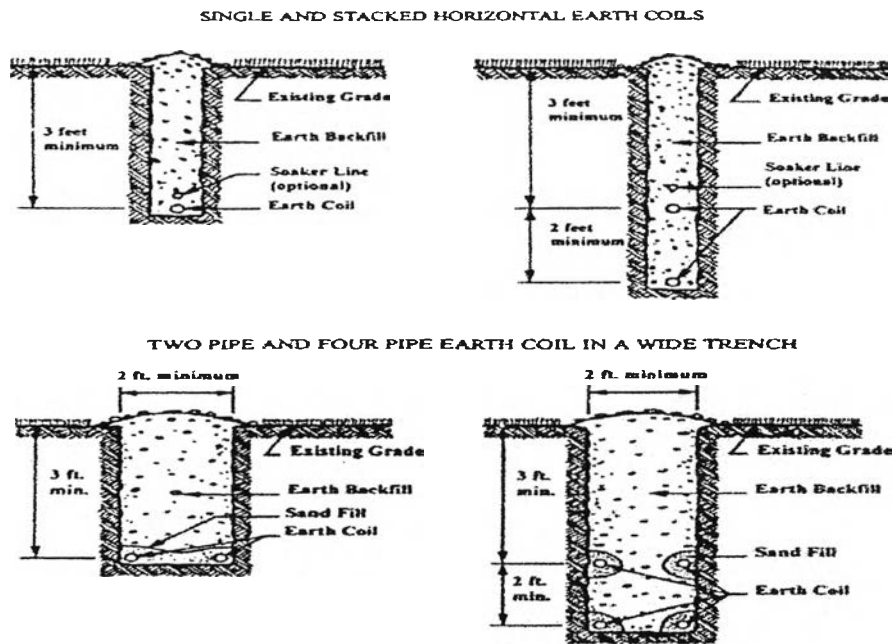
เนื่องจากระบบท่อวงจรมืดจะใช้น้ำซึ่งจะอยู่ในธรรมชาติโดยตรง ดังนั้นจึงมีความเสี่ยงในเรื่องของ สภาพทางเคมีของน้ำที่นำไปใช้ และอาจจะเป็นที่สะสมของเชื้อโรคด้วย หากไม่มีการจัดการที่ดีพอ ซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดความเสียหายแก่ระบบท่อ และส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมโดยตรง

วงจรมืด (closed loop) หรือเรียกว่า earth loop มีลักษณะเป็นชุดท่อที่เป็นระบบปิด ที่วางตัวอยู่ใต้ดิน ในลักษณะต่าง ๆ กัน โดยของไหลที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนซึ่งอยู่ภายในท่อ โดยทั่วไปจะใช้น้ำ แต่อาจจะใช้สารละลายป้องกันการแข็งตัว (antifreeze solution) ในกรณีระบบถูกใช้ในที่มีอุณหภูมิต่ำมากๆ แบ่งระบบท่อวงจรมืดออกเป็น 4 แบบใหญ่ ๆ ได้แก่

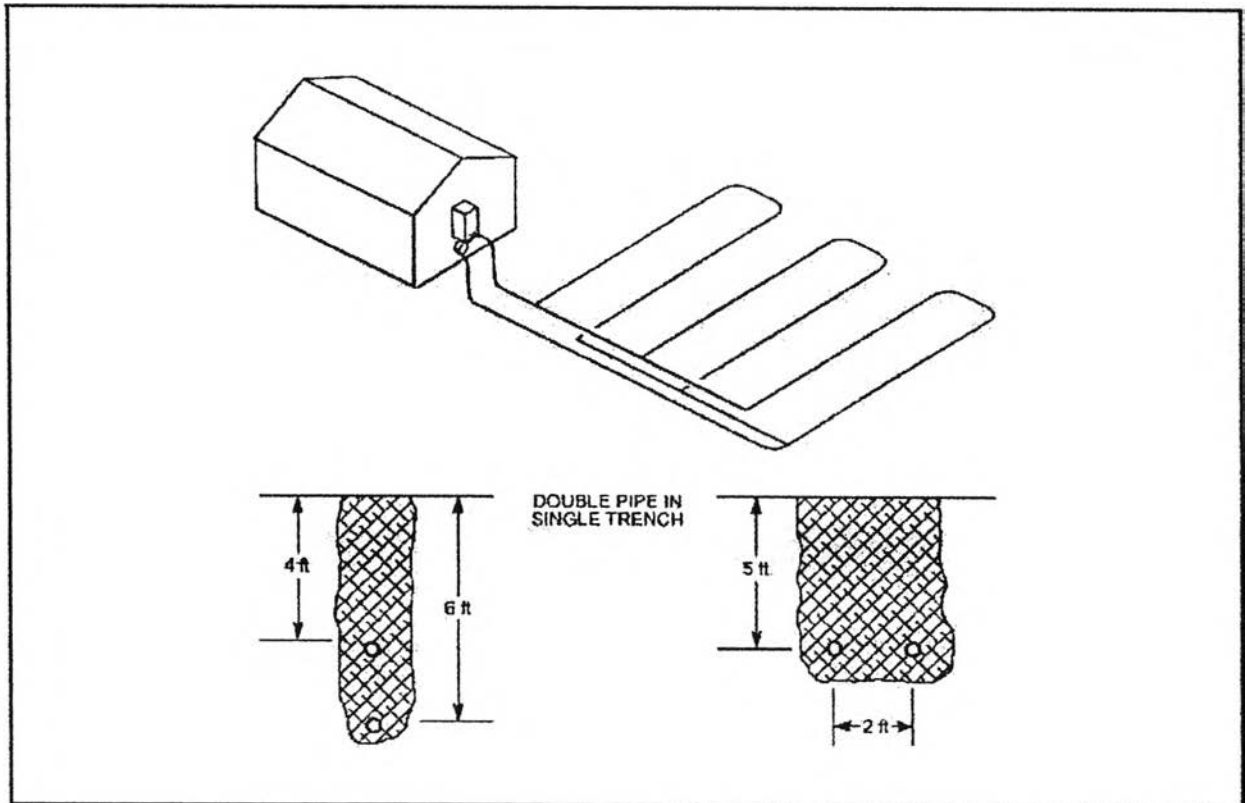
- *Horizontal Loops* จะเป็นชุดท่อที่ฝังอยู่ใต้ดิน ที่ความลึกไม่มาก ประมาณ 3 ถึง 8 ฟุต ใต้พื้นดิน การจะฝังท่อในลักษณะนี้ได้ จะต้องมีส่วนที่มากพอ และมีสภาพของดินที่เอื้ออำนวยต่อการขุดด้วย ความลึกของหลุมที่ขุดเพื่อทำการฝังท่อ จะต้องสามารถปกป้องผลของอุณหภูมิอากาศที่แปรเปลี่ยนข้างนอกได้ การฝังท่อแบบนี้จะมีค่าใช้จ่ายถูก เนื่องจากไม่ต้องใช้เครื่องจักรในการขุดหลุมที่ลึก แต่ข้อเสียก็คือ อุณหภูมิของดิน และคุณสมบัติเชิงความร้อนต่าง ๆ จะมีการแปรเปลี่ยนอยู่เสมอ เนื่องจากระดับที่ฝังท่อไว้นี้ไม่ลึกมาก



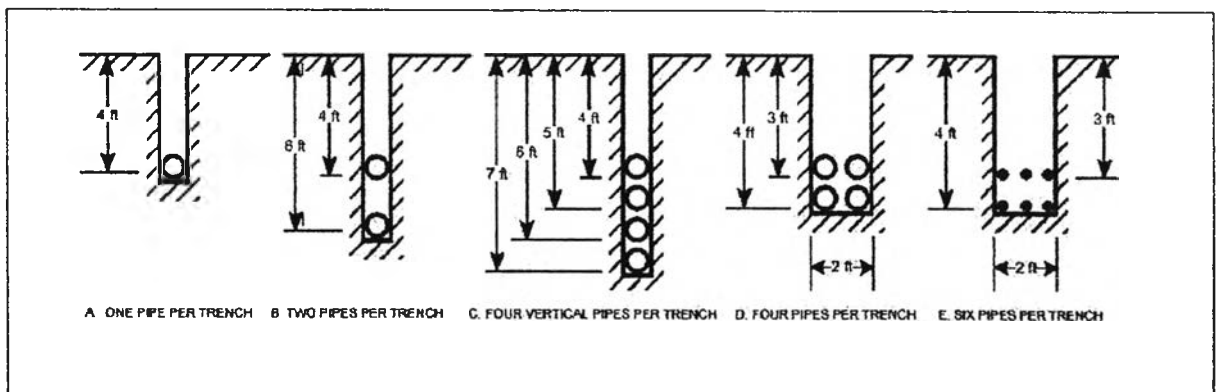
รูปที่ 2.13 แสดงระบบท่อวงจรปิดแบบ Horizontal Loops



รูปที่ 2.14 แสดงระยะห่างที่แนะนำ สำหรับการฝังท่อแบบ Horizontal Loops



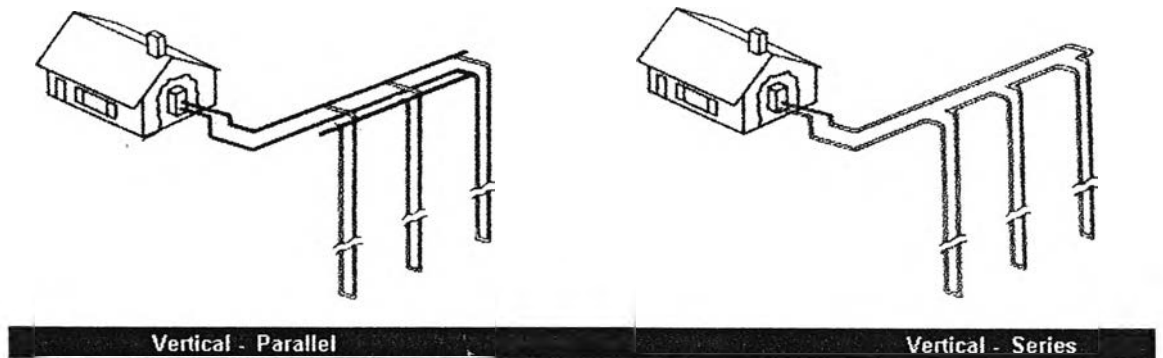
Horizontal Ground-Coupled Heat Pump Piping



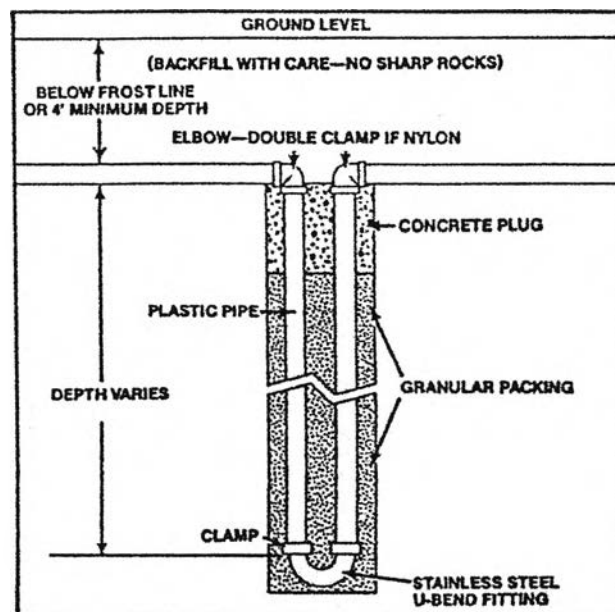
Horizontal Ground Loop Configurations

รูปที่ 2.15 แสดงระยะห่างในการวางท่อที่แนะนำ สำหรับการฝังท่อแบบ Horizontal Loops

- *Vertical Loops* การฝังท่อในลักษณะนี้ จะใช้พื้นที่ไม่มาก เหมาะสำหรับการใช้งานในบริเวณที่มีพื้นที่จำกัด ในส่วนของท่อที่สัมผัสกับดิน จะมีการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิ และคุณสมบัติเชิงความร้อนเพียงเล็กน้อย การติดตั้งจะใช้ค่าใช้จ่ายสูง เพราะมีความจำเป็นในการใช้เครื่องมือเป็นพิเศษ

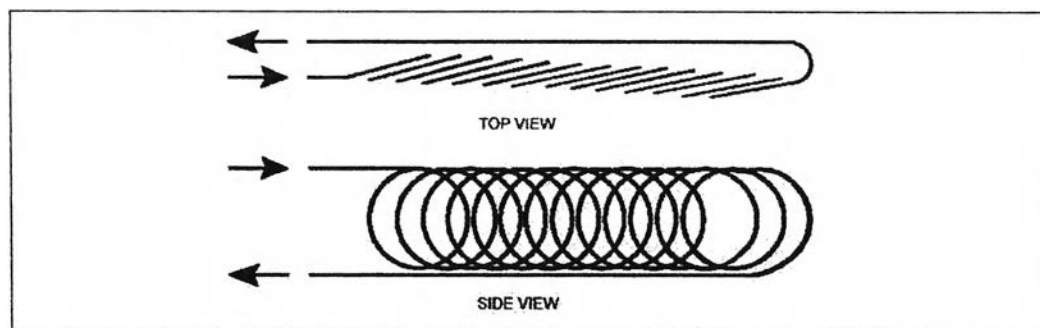
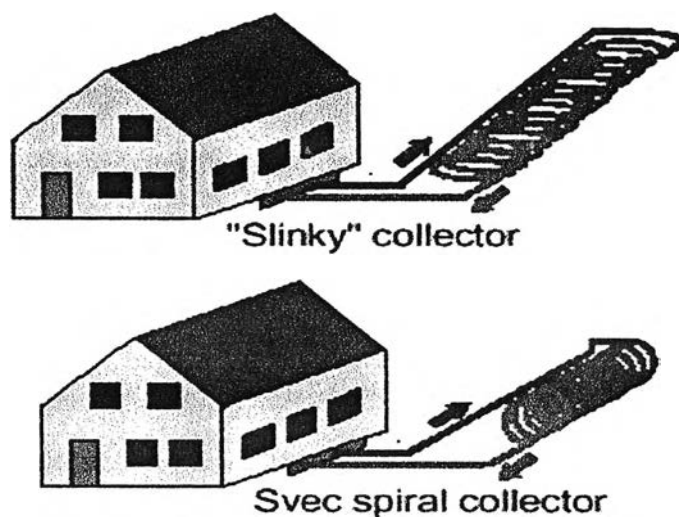


รูปที่ 2.16 แสดงระบบท่อวงจรถัดแบบ Vertical Loops



รูปที่ 2.17 แสดงลักษณะโครงสร้างทั่วไปของขดท่อแบบ Vertical Loops

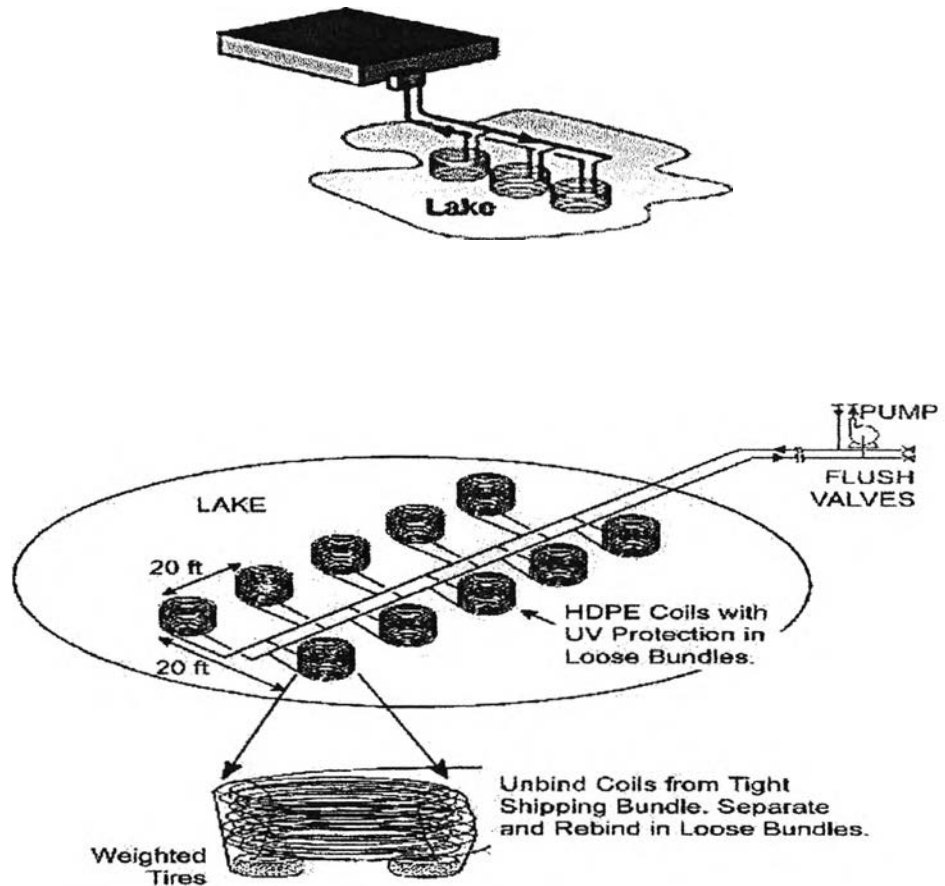
- *Slinky Loops* การฝังท่อในลักษณะนี้ เพื่อประโยชน์ในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ต่อขนาดของหลุมที่ขุด ทำให้สามารถถ่ายเทความร้อนได้มากขึ้น ซึ่งต้องใช้ความยาวของท่อเพิ่มขึ้น ขณะที่ความยาวของหลุมลดลง



General Layout of a Spiral Earth Coil

รูปที่ 2.18 แสดงระบบท่อวงจรมัดแบบ Slinky Loops

- *Pond Loops* การฝังท่อลักษณะนี้ เป็นกรณีพิเศษ ซึ่งจะต้องมีแหล่งน้ำ สระน้ำ หนองน้ำ หรือ ทะเลสาบ ที่มีความลึกเพียงพอ และมีการไหลเวียนที่เพียงพอ โดยจะวางชุดท่อที่ส่วนล่างของแหล่งน้ำดังรูป



Lake Loop Piping

รูปที่ 2.19 แสดงระบบท่อวงจรมัดแบบ Pond Loops