

การจำลองแบบเชิงตัวเลขของการถ่ายโอนความร้อนในดินโดยระเบียบวิธีผลต่างอันตะแบบชัดแจ้ง

Numerical Simulation of Heat Transfer in Soil by Explicit Finite Difference Method

นฤทธิ์ กล่อมพงษ์^{1*} จอมภพ แว่วศักดิ์² และ กรวิกา ก้องกุล³
Narit Klompong^{1*}, Jompob Waewsak² and Konvika Kongkul³

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการจำลองแบบเชิงตัวเลขของการถ่ายโอนความร้อนในดินภายใต้เงื่อนไขสภาพภูมิอากาศธรรมชาติทั่วไป โดยอาศัยสมการสมดุลพลังงานที่มีพื้นฐานมาจากกลไกการถ่ายโอนความร้อนเป็นสมการควบคุมและใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งเป็นเงื่อนไขสภาพแวดล้อมทางภาคใต้ของประเทศไทย ในแบบจำลองนี้ได้อาศัยระเบียบวิธีผลต่างอันตะแบบชัดแจ้งสำหรับการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยและใช้ระเบียบวิธีทำซ้ำหนึ่งขั้นของเกาส์-ไซเดลสำหรับการคำนวณหาอุณหภูมิดิน ณ ตำแหน่งต่างๆ โดยใช้โปรแกรม MATLAB สำหรับพัฒนารหัสคอมพิวเตอร์จากแบบจำลองได้ทำการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิดินรายชั่วโมงที่ระดับพื้นผิวถึงระดับความลึก 3 m ของ 4 วันสำคัญทางดาราศาสตร์ ผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่า อุณหภูมิดินทั้ง 4 วัน มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากในช่วงระดับความลึก 0-0.5 m ที่ระดับความลึกมากกว่า 0.5 m อุณหภูมิดินมีค่าคงที่ นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิดินมีค่าสูงสุดและต่ำสุดอยู่ที่บริเวณผิวดิน

คำสำคัญ : การจำลองแบบเชิงตัวเลข การถ่ายโอนความร้อน ผลต่างอันตะ ชัดแจ้ง

¹ ห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานลม-แสงอาทิตย์ ศูนย์วิจัยและสาธิตระบบพลังงานทดแทน

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานลม-แสงอาทิตย์ ศูนย์วิจัยและสาธิตระบบพลังงานทดแทน

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ

³ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ

* โทร. 074-693975 โทรสาร 074-693975 อีเมลล์ klompong_rit@hotmail.com

Abstract

The aim of this research was to simulate the heat transfer in soil under natural climatic condition. This was done by applying the energy balance on the basis of heat transfer mechanism as governing equations and using parameters of such climatic conditions. For implementing the model based upon the numerical scheme, the explicit finite difference method was used to discretize the parabolic equations. Gauss-Seidel single step iteration was then used to compute the soil temperature at various depths. By using the MATLAB for generating computer code, the simulation model was developed and used for prediction of hourly variations of soil temperature difference varying from ground to 3.0 m underground depth during 4 principal astronomy days. The numerical results revealed that soil temperature varied largely within 0.5 m. The soil temperature at depths below 0.5 m was nearly constant. Furthermore, the minimum and maximum temperatures were occurred at soil surface.

Keywords : Numerical Modeling, Heat Transfer, Finite Difference, Explicit

คำนำ

ดินเป็นเทววัตถุธรรมชาติที่ปกคลุมผิวโลกอยู่บ้าง เกิดขึ้นจากการแปรสภาพหรือผุพังของหินและแร่ และอินทรีย์วัตถุผสมคลุกเคล้าเป็นเนื้อเดียวกัน ดินมีความสำคัญต่อมนุษย์โลกเป็นอย่างมาก การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดินนั้นส่งผลต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ คุณสมบัติของดินที่สำคัญได้แก่ สมบัติทางเคมี สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางชีวภาพ คุณสมบัติของดินเหล่านี้มีความสัมพันธ์ต่อกัน สมบัติบางประการของดินเปลี่ยนไปจะส่งผลให้สมบัติอีกประการหนึ่งเปลี่ยนแปลงไปด้วย

กระบวนการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นในดินโดยกลไกต่างๆ ได้แก่ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อนมีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิดิน ซึ่งอุณหภูมิดินมีความสำคัญในการกำหนดอัตราและทิศทางของการเกิดกระบวนการทางฟิสิกส์ เคมี และชีวภาพ เช่น กระบวนการระเหยของน้ำในดิน กระบวนการแตกตัว กระบวนการรวมตัว การเปลี่ยนแปลงสมดุลทางเคมี การเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารเคมี

กระบวนการเปลี่ยนแปลงรูปของสารเคมีโดยจุลินทรีย์ในดิน การเปลี่ยนสถานะของสารเคมีจากสถานะหนึ่งไปอีกสถานะหนึ่ง การเปลี่ยนแปลงความเหมาะสมในการดำเนินกิจกรรมของจุลินทรีย์ และการเจริญเติบโตของพืช เป็นต้น ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิดิน คือ พลังงานความร้อนที่ได้รับจากรังสีอาทิตย์ ในเวลากลางวันพื้นดินมีการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ซึ่งอยู่ในรูปของพลังงานความร้อนเอาไว้ทำให้ผิวดินมีอุณหภูมิสูงเกิดการส่งผ่านพลังงานความร้อนลงสู่ดินชั้นล่างด้วยกระบวนการนำความร้อน จนกระทั่งเวลากลางคืนพื้นโลกซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าบรรยากาศแวดล้อมส่งผลทำให้ดินชั้นล่างเกิดการส่งผ่านพลังงานความร้อนไปยังผิวดินด้วยกระบวนการนำความร้อนเช่นเดียวกัน กระบวนการถ่ายโอนความร้อนดังกล่าวขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางความร้อนและทางฟิสิกส์ของดิน เช่น ค่าสภาพการดูดกลืนความร้อน ค่าสภาพการนำความร้อน ความร้อนจำเพาะ ความหนาแน่น และความพรุน เป็นต้น ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการถ่ายโอนความร้อนในดินมีความสัมพันธ์ต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิดินเป็นอย่างมาก

การศึกษาให้ได้มาซึ่งข้อมูลนี้จะเป็นประโยชน์อย่างมาก
สำหรับด้านธรณีฟิสิกส์ ด้านเกษตรกรรมและด้าน
วิศวกรรม

การศึกษากลไกดังกล่าวสามารถกระทำได้โดย
การติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิดินที่ระดับความลึกต่างๆ
ซึ่งจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์วัด มีค่าใช้จ่ายสูง และยังจำเป็น
ต้องใช้ระยะเวลานานในการเก็บรวบรวมข้อมูลสำหรับการ
วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลง อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลง
ของอุณหภูมิดินสามารถทำการศึกษาค้นคว้าวิธีหนึ่ง
นอกจากการทดลองโดยการวัด นั่นคือ การจำลองแบบ
ซึ่งเป็นการจำลองปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นนั่นเอง
Mihalakakou et al. [1] ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
เพื่อทำนายการเปลี่ยนแปลงรายวันและรายปีของอุณหภูมิ
ผิวดิน พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความ
สอดคล้องกับผลการทดลอง นอกจากนี้ยังพบว่าค่า
สภาพการนำความร้อนมีความสัมพันธ์กับปริมาณของน้ำ
El-Din [2] เสนอการพัฒนาการทำนายช่วงการ
เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดินที่ระดับความลึกต่างๆ พบว่า
การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดินขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ที่สำคัญ
หลายตัว ได้แก่ ความชื้นสัมพัทธ์ การดูดกลืนพลังงาน
ของดิน การระเหยของน้ำ และความเร็วลม Cichota et al.
[3] ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ระเบียบวิธี
ผลต่างอันดับแบบชัดเจนเพื่อทำนายอุณหภูมิดิน พบว่า
การเลือกกระยะห่างของปริภูมิและขั้นเวลามีผลต่อค่าความ
ผิดพลาดของการคำนวณ Li et al. [4] พบว่าค่าสภาพการ
นำความร้อนมีอิทธิพลต่ออุณหภูมิดินมากกว่าค่าความจุ
ความร้อนจำเพาะ และค่าสภาพการนำความร้อนที่เพิ่มขึ้น
ทำให้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดินลดน้อยลง Liu et al. [5]
พบว่าชั้นผิวดินมีความสำคัญต่อการถ่ายโอนความร้อน
และความชื้นในดินโดยมีอิทธิพลต่ออุณหภูมิน้ำในดิน
Zhong and Braun [6] พบว่าผลของการถ่ายโอน
ความร้อนแบบไม่คงตัวในพื้นที่คอนกรีตบนดินที่ได้จาก
แบบจำลองพื้นฐานมีค่าขึ้นอยู่กับโครงสร้างของพื้น
คอนกรีต ขอบเขตความหนา คุณสมบัติของดิน ตำแหน่ง และ
เวลา ทั้งนี้การจำลองแบบที่ถูกต้องจะสามารถเพิ่ม

ประสิทธิภาพของการทำนายอุณหภูมิดินที่เปลี่ยนแปลง
ได้อย่างแม่นยำ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์หลัก
เพื่อทำการจำลองแบบเชิงตัวเลขการถ่ายโอนความร้อน
ในดินสำหรับทำนายอุณหภูมิดินที่ระดับความลึกต่างๆ
ภายในระยะ 3 m จากผิวดิน

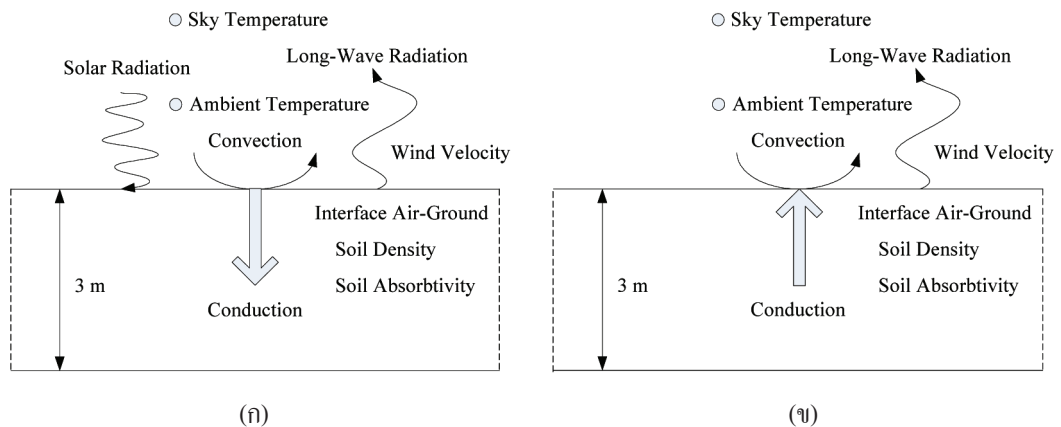
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

1. ปรากฏการณ์ทางกายภาพ

ดินมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในอยู่ตลอดเวลา
ซึ่งในตอนกลางวันผิวดินได้รับพลังงานความร้อน
จากรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบและมีการถ่ายโอนความร้อน
ให้แก่ดินชั้นล่างโดยการนำความร้อน ดินมีการเก็บกัก
พลังงานความร้อนบางส่วนเอาไว้ ในตอนกลางคืน
พลังงานความร้อนที่ถูกเก็บกักเอาไว้จะมีการถ่ายโอน
ความร้อนจากดินชั้นล่างไปยังผิวดินโดยการนำความร้อน
เช่นเดียวกัน นอกจากนี้บริเวณผิวดินยังมีการสูญเสีย
พลังงานความร้อนโดยการพาความร้อนและการแผ่รังสี
แสดงดังรูปที่ 1 (ก) และ (ข) กระบวนการทางเทอร์โม
ไดนามิกส์นี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางความร้อนของดิน
เช่น ความจุความร้อนจำเพาะ (Specific heat capacity)
สภาพการนำความร้อน (Conductivity) สภาพการ
ดูดกลืนรังสี (Absorptivity) และสภาพการแผ่รังสีของดิน
(Emissivity) เป็นต้น นอกจากนี้ปริมาณรังสีอาทิตย์
(Solar radiation) อุณหภูมิอากาศแวดล้อม (Ambient
temperature) และอุณหภูมิท้องฟ้า (Sky temperature)
ยังมีผลต่อกระบวนการนี้อีกด้วย

2. สมมติฐาน (Assumptions)

เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำการ
ศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นแบบจำลองสำหรับการทำนาย
อุณหภูมิดินโดยอาศัยหลักการสมดุลพลังงานซึ่งอ้างอิง
กลไกการถ่ายโอนความร้อน 3 กลไก ได้แก่ การนำ
ความร้อน การพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน และ
เพื่อให้ง่ายต่อการจำลองแบบจึงได้ตั้งสมมติฐานต่างๆ
ดังต่อไปนี้



รูปที่ 1 ปรากฏการณ์ทางกายภาพของการถ่ายโอนความร้อนบริเวณผิวดินตอนกลางวัน (ก) และตอนกลางคืน (ข)

- 1) ดินเป็นเนื้อเดียวกันหมด แท้ ไม่มีสิ่งปกคลุม และไม่มีแหล่งกำเนิดความร้อนภายในดิน
- 2) อุณหภูมิดินถูกพิจารณาภายใต้สภาวะเงื่อนไขแบบไม่คงตัว (Transient)
- 3) การนำความร้อนในดินเป็นแบบ 1 มิติ
- 4) สมบัติทางกายภาพของดินเป็นอิสระต่ออุณหภูมิ
- 5) รังสีบรรยากาศเกิดขึ้นเนื่องจากพิจารณาให้ท้องฟ้าเป็นวัตถุเทา

3. สมการควบคุม (Governing Equation)

เมื่อพิจารณาปริมาตรควบคุมในดินที่มีการนำความร้อนแบบไม่คงตัวและไม่มีความร้อนเกิดขึ้นภายในดิน สามารถเขียนสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยในระบบพิกัดฉากของการถ่ายโอนความร้อนภายในดินได้เป็น

$$\rho c_p \frac{\partial T_z}{\partial t} = k \nabla^2 T \quad (1)$$

ในระบบ 1 มิติ สมการ (1) จะเขียนได้เป็น

$$\rho c_p \frac{\partial T_z}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T_z}{\partial z^2} \quad (2)$$

- เมื่อ T_z คือ อุณหภูมิดิน ($^{\circ}\text{C}$)
 k คือ สภาพการนำความร้อนของดิน ($\text{W/m}^{\circ}\text{C}$)
 ρ คือ ความหนาแน่นของดิน (kg/m^3)
 c_p คือ ความจุความร้อนจำเพาะของดิน ($\text{J/kg}^{\circ}\text{C}$)
 t คือ เวลา (s)
 z คือ ระยะทางตามแนวแกน z (m)

4. เงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบ

- เงื่อนไขเริ่มต้น

ในการคำนวณหาอุณหภูมิดินได้ทำการกำหนดค่าเริ่มต้นให้อุณหภูมิดินทุกจุด มีค่า $T_z^0 = 28^{\circ}\text{C}$

- เงื่อนไขขอบ

เมื่อพิจารณาบริเวณผิวดินโดยใช้หลักสมดุลพลังงานสามารถเขียนสมการสมดุลพลังงานและสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยได้ดังสมการ (3) และ (4) ตามลำดับ

$$\Delta \dot{E} = \dot{E}_{\text{solar}} - \dot{E}_{\text{conv}} - \dot{E}_{\text{rad}} - \dot{E}_{\text{cond}} \quad (3)$$

- เมื่อ $\dot{E}$ คือ พลังงานภายใน (W/m^2)
 $\dot{E}_{\text{solar}}$ คือ พลังงานจากรังสีอาทิตย์ (W/m^2)
 $\dot{E}_{\text{conv}}$ คือ การสูญเสียพลังงานจากการพา (W/m^2)
 $\dot{E}_{\text{rad}}$ คือ การสูญเสียพลังงานจากการแผ่รังสี (W/m^2)
 $\dot{E}_{\text{cond}}$ คือ การสูญเสียพลังงานจากการนำ (W/m^2)

$$\rho c_p \frac{\Delta z}{2} \frac{\partial T_z}{\partial t} = \frac{\alpha I}{3,600} - h_c (T_z - T_a) - h_r (T_z - T_s) - k \frac{\partial T_z}{\partial z} \quad (4)$$

เมื่อ T_a คือ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม ($^{\circ}\text{C}$)
 T_s คือ อุณหภูมิท้องฟ้า ($^{\circ}\text{C}$)
 I คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์รายชั่วโมง (W/m^2)
 α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์
 h_c คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($\text{W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$)
 h_r คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสี ($\text{W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$)
 บริเวณล่างสุดของชั้นดิน ($z=3$) พิจารณาให้
 เกรเดียนท์ของอุณหภูมิมีค่าเป็นศูนย์ดังนี้

$$\frac{\partial T_z}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

5. การจำแนกสมการ (Discretization)

การจำแนกสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการ
 ถ่ายโอนความร้อนภายในดินดังสมการ (2) สามารถจำแนก
 ได้โดยอาศัยระเบียบวิธีผลต่างอันดับแบบชัดแจ้งได้ดัง
 สมการ (6) สำหรับทำนายอุณหภูมิดินที่ตำแหน่งต่างๆ
 ได้ดังนี้

$$T_z^{t+1} = \left(1 - \frac{kr_t}{\Delta z}\right) T_z^t + \frac{kr_t}{2\Delta z} (T_{z+1}^t + T_{z-1}^t) \quad (6)$$

$$r_t = \frac{2\Delta t}{\Delta z \rho c_p} \quad (7)$$

เมื่อ T_z^t คือ อุณหภูมิดินตำแหน่ง z เวลา t

6. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

เนื่องจากมีจำนวนสมการไม่มากและเพื่อเป็นการ
 ใช้หน่วยความจำอย่างมีประสิทธิภาพจึงได้อาศัยระเบียบ
 วิธีทำซ้ำหนึ่งขั้นของเกาส์-ไซด์ล (Gauss-Seidel Single
 Step Iteration) สำหรับการแก้ระบบสมการเชิงเส้นเพื่อ
 หาอุณหภูมิของดิน ณ ตำแหน่งต่างๆ โดยตั้งค่าความ
 ผิดพลาดที่ระดับ 0.01 และได้กำหนดให้ค่าระยะห่างของ

ปริภูมิ (Δz) เท่ากับ 0.05 m และช่วงเวลา (Δt) เท่ากับ 600 s
 โดยเลือกทำการคำนวณอุณหภูมิดิน 4 วันสำคัญทาง
 ดาราศาสตร์ ได้แก่ วันที่ 21 มี.ค. 21 มิ.ย. 21 ก.ย. และ
 21 ธ.ค.

7. เงื่อนไขสภาพแวดล้อมและสมบัติทางกายภาพของดิน

- เงื่อนไขสภาพแวดล้อม ก่อนการคำนวณหาค่า
 อุณหภูมิดินโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ทำ
 การคำนวณหาค่าเงื่อนไขสภาพแวดล้อมที่เกี่ยวข้องก่อน
 ได้แก่ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์รายเดือนและรายชั่วโมง
 แสดงดังสมการ (8) [7] และสมการ (9) [8] ตามลำดับ
 อัตราเร็วลมผิวพื้นแสดงดังสมการ (10) [9] อุณหภูมิ
 อากาศแวดล้อมแสดงดังสมการ (11) [10] และอุณหภูมิ
 ท้องฟ้าแสดงดังสมการ (12) [11]

$$\bar{H} = \bar{H}_o \left[a_1 + b_1 \left(\frac{\bar{s}}{\bar{s}_0} \right) \right] \quad (8)$$

$$\bar{I} = r\bar{H} \quad (9)$$

$$v = v_{\text{mean}} + a_2 \cdot \sin \left[\left(\frac{2\pi}{24} \right) (hr + b_2) \right] \quad (10)$$

$$T_a(t) = \frac{1}{2} [(T_{\text{max}} - T_{\text{min}}) \sin \left(\frac{2\pi}{24} (t - 9) \right) + (T_{\text{max}} + T_{\text{min}})] \quad (11)$$

$$T_s = 0.0552 T_a^{1.5} \quad (12)$$

เมื่อ $\bar{H}$ คือ ค่าเฉลี่ยรายเดือนของรังสีรวมรายวัน
 บนพื้นราบ ($\text{MJ/m}^2\text{-day}$)

$\bar{H}_o$ คือ ค่าเฉลี่ยรายเดือนของรังสีอาทิตย์
 นอกบรรยากาศโลก ($\text{MJ/m}^2\text{-day}$)

r คือ อัตราส่วนรังสีรวมรายชั่วโมงต่อรังสีรวม
 รายวัน (h/day)

$\bar{s}$ คือ จำนวนชั่วโมงที่มีแดดเฉลี่ยรายเดือน (h)

$\bar{s}_0$ คือ ความยาวนานของวันเฉลี่ยรายเดือน (h)

v คือ อัตราเร็วลมผิวพื้น (m/s)

hr คือ เวลาชั่วโมง (h)

v_{mean} คือ อัตราเร็วลมผิวพื้นเฉลี่ย (m/s)

T_{max} คือ อุณหภูมิอากาศแวดล้อมสูงสุด ($^{\circ}\text{C}$)

T_{min} คือ อุณหภูมิอากาศแวดล้อมต่ำสุด ($^{\circ}\text{C}$)

a_1, b_1, a_2, b_2 คือ สัมประสิทธิ์การถดถอย

ในแต่ละพารามิเตอร์

- สมบัติทางกายภาพของดิน สมบัติทางกายภาพ
ของดินที่ใช้ในการรันโปรแกรมแสดงดังตารางที่ 1

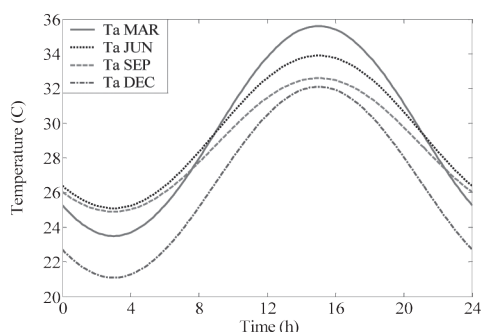
ผลการวิจัย

เงื่อนไขสภาพแวดล้อมเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่ง
ของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดิน การคำนวณค่าเหล่านี้
จึงมีความสำคัญต่อแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ใน
การทำนายอุณหภูมิดิน จากการศึกษาพบว่าอุณหภูมิอากาศ

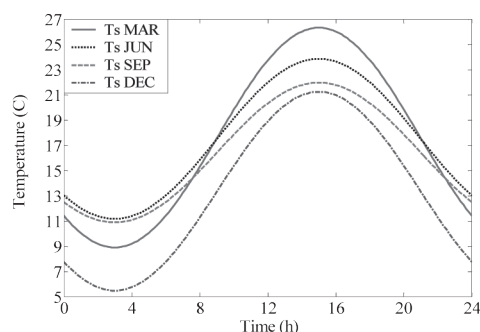
แวดล้อมในวันที่ 21 มี.ค. มีค่าสูงสุดเท่ากับ 35.6°C
ในเวลาประมาณ 15.00 น. แสดงดังรูปที่ 2 (ก) อุณหภูมิ
ท้องฟ้ามีค่าสูงสุดเท่ากับ 26.3°C ในวันที่ 21 มี.ค. เวลา
ประมาณ 15.00 น. แสดงดังรูปที่ 2 (ข) ปริมาณรังสีอาทิตย์
รายชั่วโมงทั้ง 4 วัน มีค่าสูงเวลาประมาณ 12.00 น. โดย
วันที่ 21 มี.ค. มีค่าสูงสุดเท่ากับ $4.2 \text{ MJ/h}\cdot\text{m}^2$ แสดง
ดังรูปที่ 3 (ก) และอัตราเร็วลมรายชั่วโมงทั้ง 4 วันมีค่า
สูงสุดอยู่ในช่วงเวลาประมาณ 12.00-18.00 น. โดยวันที่
21 มี.ค. มีค่าสูงสุดเท่ากับ 2.75 m/s และยังพบว่าตลอด
ทั้งวันอัตราเร็วลมของวันที่ 21 มี.ค. สูงกว่าวันอื่นๆ
แสดงดังรูปที่ 3 (ข)

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพของดิน [4]

Physical Properties of Soil	Value
1. ความหนาแน่น (kg/m^3)	1,500
2. ความจุความร้อนจำเพาะ ($\text{J/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$)	2,200
3. สภาพการนำความร้อน ($\text{W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$)	0.9
4. สภาพการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ (ไร้หน่วย)	0.91
5. สภาพการเปล่งรังสี (ไร้หน่วย)	0.95

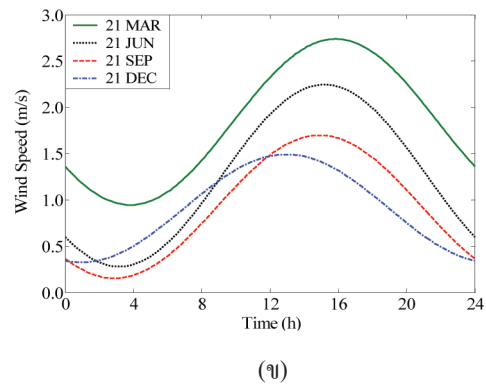
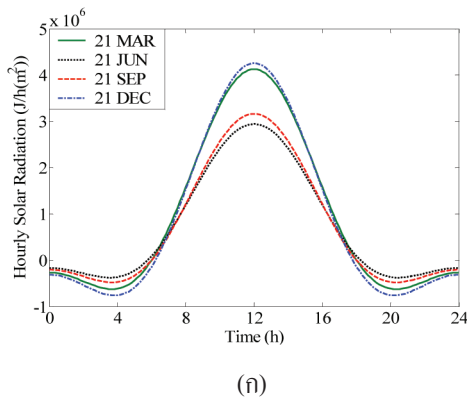


(ก)



(ข)

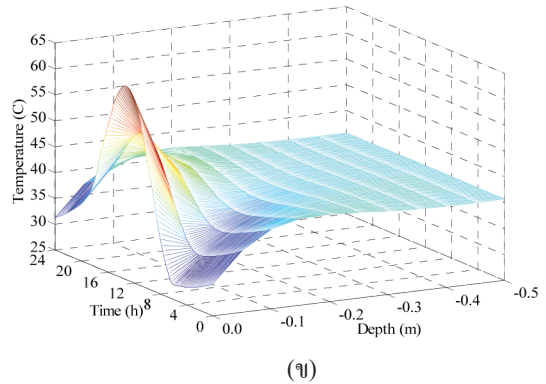
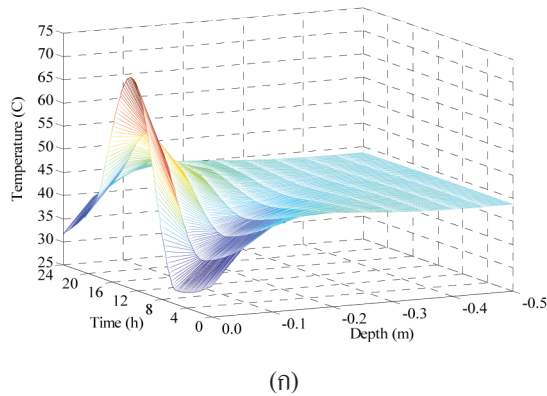
รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศแวดล้อม (ก) และอุณหภูมิท้องฟ้า (ข)
ในวันที่ 21 มี.ค. 21 มิ.ย. 21 ก.ย. และ 21 ธ.ค.



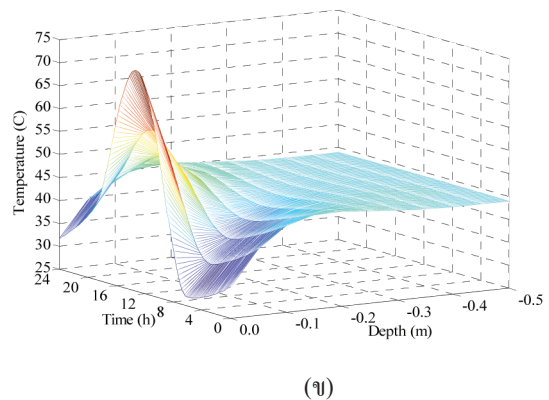
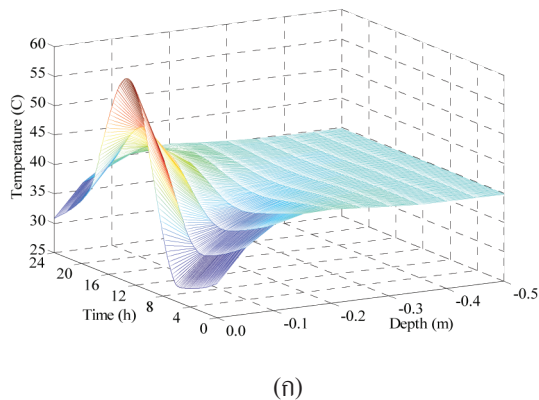
รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงความเข้มรังสีอาทิตย์ (ก) และอัตราเร็วลม (ข)
ในวันที่ 21 มี.ค. 21 มิ.ย. 21 ก.ย. และ 21 ธ.ค.

การจำลองแบบเชิงตัวเลขโดยอาศัยระเบียบวิธีผลต่างอันดับสองแบบชัดเจน พบว่า ระเบียบวิธีผลต่างอันดับสองแบบชัดเจนมีข้อจำกัดทางด้านเสถียรภาพของการคำนวณผลลัพธ์ที่ถูกต้อง จึงจำเป็นต้องเลือกค่าระยะห่างของปริภูมิและขั้นเวลาที่เหมาะสม ดังนั้นการจำลองแบบเชิงตัวเลขนี้ได้กำหนดค่าระยะห่างของปริภูมิเท่ากับ 0.05 m และขั้นเวลาเท่ากับ 600 s เพื่อเสถียรภาพของการคำนวณ การจำลองแบบเชิงตัวเลขโดยอาศัยระเบียบวิธีผลต่างอันดับสองแบบชัดเจนเพื่อทำนายการกระจายอุณหภูมิดินที่ระดับความลึกไม่เกิน 3 m โดยทำการคำนวณอุณหภูมิดินของวันที่ 21 มี.ค. 21 มิ.ย. 21 ก.ย. และ 21 ธ.ค. พบว่าอุณหภูมิดินของแต่ละวันมีลักษณะการกระจายตัวคล้ายกัน แต่มีค่าอุณหภูมิแตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 4 และ 5 ซึ่งอุณหภูมิดินมีการเปลี่ยนแปลงบริเวณดินชั้นบนในช่วงระดับความลึก 0-0.5 m ที่ระดับความลึกมากกว่า 0.5 m อุณหภูมิดินมีค่าคงที่ เนื่องจากสภาพการนำความร้อนและ

ความจุความร้อนของดินมีค่าต่ำทำให้การถ่ายโอนความร้อนไปยังดินชั้นล่างเป็นไปได้ยาก ส่งผลให้อุณหภูมิบริเวณดินชั้นบนที่ระดับความลึก 0-0.5 m มีค่าสูง ลักษณะการแกว่งของอุณหภูมิดินที่บริเวณดินชั้นบนขึ้นอยู่กับช่วงเวลาในแต่ละวัน โดยในตอนกลางวันอุณหภูมิที่ผิวดินมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิภายในชั้นดิน ส่วนในตอนกลางคืนอุณหภูมิที่ผิวดินมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิภายในชั้นดิน เนื่องจากในตอนกลางวันผิวดินได้รับปริมาณรังสีอาทิตย์ทำให้ผิวดินมีอุณหภูมิสูงเกิดการถ่ายโอนความร้อนลงสู่ดินชั้นล่าง ในตอนกลางคืนผิวดินไม่ได้รับรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิอากาศแวดล้อมและอุณหภูมิท้องฟ้ามีค่าต่ำทำให้ผิวดินมีอุณหภูมิต่ำตามไปด้วย และยังพบอีกว่าค่าอุณหภูมิดินสูงสุดและต่ำสุดอยู่ที่บริเวณผิวดิน โดยมีค่าต่ำสุดและสูงสุดเท่ากับ 26.61 °C และ 73 °C ตามลำดับ ในวันที่ 21 ธ.ค.



รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดินในวันที่ 21 มี.ค. (ก) และวันที่ 21 มิ.ย. (ข)



รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดินในวันที่ 21 ก.ย. (ก) และวันที่ 21 ธ.ค. (ข)

สรุปผลการวิจัย

จากการจำลองแบบการถ่ายโอนความร้อนในดินภายใต้เงื่อนไขสภาพแวดล้อมตามธรรมชาติเพื่อทำนายการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิดินที่ระดับพื้นผิวและที่ระดับความลึกต่างๆ จนถึง 3 m ของ 4 วันสำคัญทางดาราศาสตร์ ได้แก่ วันที่ 21 มี.ค. 21 มิ.ย. 21 ก.ย. และ 21 ธ.ค. โดยอาศัยระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่องแบบชัดเจนพบว่า อุณหภูมิดินทั้ง 4 วัน มีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะคล้ายกันคืออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงในช่วงระดับ

ความลึก 0-0.5 m ที่ระดับความลึกมากกว่า 0.5 m อุณหภูมิดินมีค่าคงที่ เนื่องจากสภาพการนำความร้อนและความจุความร้อนของดินมีค่าต่ำ ส่วนลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิดินในตอนกลางวันขึ้นอยู่กับค่าความเข้มรังสีอาทิตย์เป็นหลักและลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิดินในตอนกลางคืนขึ้นอยู่กับค่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อมและอุณหภูมิท้องฟ้า นอกจากนี้ยังพบว่าบริเวณผิวดินมีค่าอุณหภูมิดินสูงสุดและต่ำสุด ดังนั้นคุณสมบัติทางความร้อนของดินเป็นปัจจัยสำคัญ

ต่อขอบเขตความลึกในการถ่ายโอนความร้อนในดิน
ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ ค่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อมและ
ค่าอุณหภูมิท้องฟ้าเป็นปัจจัยสำคัญต่อลักษณะของการ
เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดิน

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยทักษิณ
สำหรับทุนอุดหนุนการวิจัย และขอขอบคุณบัณฑิต
วิทยาลัยสำหรับทุนอุดหนุนการวิจัยระดับบัณฑิต
รวมทั้งขอขอบคุณ หน่วยวิจัยพลังงานลม-แสงอาทิตย์
สำหรับการเอื้อเฟื้อสถานที่และการอำนวยความสะดวก
ในการศึกษาวิจัยของโครงการ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Mihalakakou, G., Santamouris, M., Lewis, J. O. & Asimakopoulou, D. N. (1997). On the application of the energy balance equation to predict ground temperature profiles. **Solar Energy**. **60**, 181-190.
- [2] El-Din, S.M. (1999). On the heat flow into the ground. **Renewable Energy**. **18**, 473-490.
- [3] Cichota, R., Elias, E. A. & Jong van Lier, Q. (2004). Testing a finite-difference model for soil heat transfer by comparing numerical and analytical solutions. **Environmental Modelling & Software**. **19**, 495-506.
- [4] Li, X., Zhao, J. & Zhao, Q. (2005). Inner heat source model with heat and moisture transfer in soil around the underground heat exchanger. **Applied Thermal Engineering**. **25**, 1565-1577.
- [5] Liu, B. C., Liu, W. & Peng, S.W. (2005). Study of heat and moisture transfer in soil with a dry surface layer. **Heat and Mass Transfer**. **48**, 4579-4589.
- [6] Zhong, Z. & Braun, J. E. (2007). A simple method for estimating transient heat transfer in slab-on ground floors. **Building and Environment**. **42**, 1071-1080.
- [7] Hirunlabh, J., Santisirisomboon, J. & Namprakai, P. (1994). **Assessment of solar radiation for Thailand**. International Workshop: Calculation Methods for Solar Energy System. COMPLES. 29-30 September. Université de Perpignan. France. 14.
- [8] Namprakai, P. & Hirunlabh, J. (1989). A study of hourly to daily radiation ratio correlations at Bangkok, Thailand. **KMITT Research and Development Journal**. **12**(1), 40-51.
- [9] Waewsak, J., Khedari, J., Sarachitti, R. & Hirunlabh, J. (2002). Direction and velocity of surface wind in Bangkok. **Thammasat International Journal of Science and Technology**. **7**(1), 56-61.
- [10] Lasnier, F. & Juen, W. Y. (1990). The sizing of stand-alone photovoltaic systems using the simulation technique. **RERIC International Energy Journal**. **12**, 22-23.
- [11] Givoni, B. (1982). Review and evaluation of cooling by long-wave radiation. **Passive Solar Journal**. **1**(3), 131-150.