

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายอุณหภูมิและความชื้นของดิน  
ที่มีและไม่มีวัสดุคลุมดินสำหรับการปลูกมะนาวในวงบ่อซีเมนต์

วรสิทธิ์ ศรีบุญ

คู่มือฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

กรกฎาคม 2561

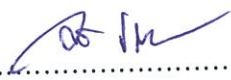
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

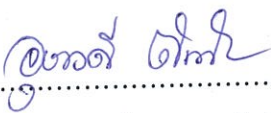
คณะกรรมการควบคุมคุษฎีนิพนธ์และคณะกรรมการสอบคุษฎีนิพนธ์ ได้พิจารณา  
คุษฎีนิพนธ์ของ วรลิตธิ ศรีบุญ ฉบบนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม  
หลักสูตรปรัชญาคุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้


คณะกรรมการควบคุมคุษฎีนิพนธ์

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุษาวดี ตันติวรานุรักษ์)

คณะกรรมการสอบคุษฎีนิพนธ์


  
..... ประธาน  
(ศาสตราจารย์ ดร.นิวัฒน์ เสนาเมือง)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุษาวดี ตันติวรานุรักษ์)

  
..... กรรมการ  
(ดร.ศักดิ์สิทธิ์ สุขประสงค)

  
..... กรรมการ  
(ดร.อภิศักดิ์ ไชยโรจน์วัฒนา)

คณะวิทยาศาสตร์อนุมัติให้รับคุษฎีนิพนธ์ฉบบนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปรัชญาคุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ของมหาวิทยาลัยบูรพา

  
..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกรัฐ ศรีสุข)

วันที่ 31 เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2561

## กิตติกรรมประกาศ

คุณฉันทิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุษาวดี ตันติวรานุรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ แนวทางที่ถูกต้อง ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความละเอียดถี่ถ้วนและเอาใจใส่ด้วยดี เสมอมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์นิวัฒน์ เสนาะเมือง อาจารย์ประจำ ภาควิชาพืชศาสตร์และ ทรัพยากรการเกษตร สาขาโรคพืชวิทยา คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ได้กรุณาเป็น ประธานในการสอบปากเปล่า รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย เทพา อาจารย์ประจำ คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ดร.อภิศักดิ์ ไชยโรจน์วัฒนา อาจารย์ประจำ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา และ ดร.ศักดิ์สิทธิ์ สุขประสงค์ อาจารย์ประจำ คณะวิทยาศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา ที่กรุณาให้ความรู้ ให้ คำปรึกษา ตรวจสอบแก้ไขและวิจารณ์ผลงาน ทำให้งานวิจัยมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ผู้ทรงคุณวุฒิและ คณาจารย์ในภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ใน การตรวจสอบ รวมทั้งให้คำแนะนำแก้ไขเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยให้มีคุณภาพ นอกจากนี้ ยังได้รับความอนุเคราะห์จากเกษตรกรผู้ปลูกมะนาวในเขตภาคตะวันออก ที่ให้องค์ความรู้และความร่วมมือ เป็นอย่างดีในการเก็บรวบรวมข้อมูลที่ใช้ในการวิจัยทำให้คุณฉันทิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี และ ขอขอบพระคุณสำนักงานวิจัยแห่งชาติ (วช.) และมหาวิทยาลัยบูรพาที่ได้สนับสนุนทุนอุดหนุนการ วิจัยในครั้งนี้ รวมถึงภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ภาควิชาวิทยาศาสตร์ พื้นฐานและพลศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา และ สถานีวิจัยประมงศรีราชา คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่สนับสนุนเครื่องมือและอำนวยความสะดวกทางด้านการทำวิจัย จึงขอขอบพระคุณ ณ ที่นี้ด้วย

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อธีระเดช และคุณแม่อัญชลี ศรีบุญ คุณพ่อวิจิตร และ คุณแม่ชูวิทย์ นาสำแดง ครอบครั้ว และญาติ พี่ น้อง เพื่อน ๆ ทุกคนที่ให้กำลังใจ และสนับสนุน ผู้วิจัยเสมอมา

คุณค่าและประโยชน์ของคุณฉันทิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูกตเวทิตาแด่ บพภกัริ บูรพาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่ทำให้ข้าพเจ้าเป็นผู้มีการศึกษา และประสบความสำเร็จมาจนตราบเท่าทุกวันนี้

วรติทธิ ศรีบุญ

57810229: สาขาวิชา: ฟิสิกส์; ปร.ด. (ฟิสิกส์)

คำสำคัญ: แบบจำลองทางคณิตศาสตร์/ อุณหภูมิดิน/ ความชื้นดิน/ วงบ่อซีเมนต์/ มะนาว

วรสิทธิ์ ศรีบุญ: แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายอุณหภูมิและความชื้นของดินที่มีและไม่มีวัสดุคลุมดินสำหรับการปลูกมะนาวในวงบ่อซีเมนต์ (A MATHEMATICAL MODEL FOR PREDICTING SOIL TEMPERATURE AND MOISTURE WITH AND WITHOUT MULCHING FOR GROWING LIME IN CEMENT POND) คณะกรรมการควบคุมคดียุติพันธ์: อุษาวดี ตันติวรานุรักษ์, Ph.D, 151 หน้า. ปี พ.ศ. 2561.

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายอุณหภูมิและความชื้นดินที่มีและไม่มีวัสดุคลุมดินสำหรับการปลูกมะนาวในวงบ่อซีเมนต์ที่มีการรองด้วยแผ่นซีเมนต์ โดยใช้สมการการถ่ายเทความร้อนและมวล สำหรับระบบพิกัดทรงกระบอก และแก้สมการด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข วิธีผลต่างสี่บเนื่อง และตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง โดยประกอบด้วยการสำรวจลักษณะการปลูกมะนาวในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ การหาค่าสมบัติทางความร้อนของดินและสมบัติทางแสงของวัสดุคลุมดิน รวมทั้งการวัดอุณหภูมิและความชื้นดินในวงบ่อซีเมนต์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 cm สูง 40 cm ที่ระดับความลึก 0, 10, 20, 30 และ 40 cm ณ บริเวณสวนมะนาว อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี และภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยบูรพา ผลการทดลองพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นสามารถทำนายอุณหภูมิและความชื้นดินได้ โดยอุณหภูมิดินมีความสอดคล้องสัมพันธ์กับการทดลองตลอดทั้งวัน เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $r$ ) และ สัมประสิทธิ์ความแปรผัน ( $R^2$ ) มีค่าเข้าใกล้ 1 และผลลัพธ์ของอุณหภูมิและความชื้นดินระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE), ค่ากลางของความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (MAE) และค่ากลางของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (MAPE) มีค่าค่อนข้างต่ำ รวมทั้งความแตกต่างระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดลองไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นนี้สามารถทำนายอุณหภูมิและความชื้นดินได้

57810229: MAJOR: PHYSICS; Ph.D. (PHYSICS)

KEYWORDS: MATHEMATICAL MODEL/ SOIL TEMPERATURE/ SOIL MOISTURE/  
CEMENT POND/ LIME

WORASITTI SRIBOON: A MATHEMATICAL MODEL FOR PREDICTING SOIL TEMPERATURE AND MOISTURE WITH AND WITHOUT MULCHING FOR GROWING LIME IN CEMENT POND. ADVISORY COMMITTEE: USAVADEE TUNTIWARANURUK, Ph.D. 151 P. 2018.

The purpose of this research was to build a mathematical model in order to predict soil temperature and moisture with and without mulching materials for lime cultivation in cement ponds with a bottom coverage by using the equation of heat and mass transfer in the cylindrical coordinate system, which was solved by the numerical methods based on the finite differences and verified the accuracy of the model. The experiment consisted of a survey of lime cultivation in eastern Thailand, the investigation of thermal properties of soil and the optical properties of mulching materials. The soil temperature and moisture in the cement pond with is 80 cm diameter and 40 cm high with and without mulching were recorded at 0, 10, 20, 30 and 40 cm soil depth, respectively. The measurement of those data was collected throughout a day in the lime orchard in Sriracha District, Chonburi Province, and on the terrace of the Physics building at Burapha University. The results showed that the mathematical model can be used to predict the soil temperature and moisture. The soil temperature was consistent with the experiment throughout the day due to the relative coefficient ( $r$ ) and the coefficient of variation ( $R^2$ ) are close to 1. The results of soil temperature and moisture of the mathematical model were in agreement with the experiment due to root-mean-square error (RMSE), mean absolute error (MAE) and mean absolute percentage error (MAPE) were still low. The variance between mathematical models and experiments was not statistically significant at the 95% confidence level. So, the mathematical models can be used to predict soil temperature and moisture throughout the day.

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ซ
สารบัญรูปภาพ.....	ฅ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
ขอบเขตของการวิจัย.....	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	4
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
อุณหภูมิดิน.....	5
กระบวนการถ่ายเทความร้อนของดิน.....	7
สมบัติทางกายภาพของดิน.....	13
ความชื้นของดิน.....	15
สมการพลังงานของระบบที่มีหลายองค์ประกอบ.....	16
รังสีอาทิตย์และการประมาณรังสีอาทิตย์.....	22
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	24
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	29
การสำรวจการปลูกระบบในวงบ่อซีเมนต์.....	29
สมบัติทางกายภาพของดินและสมบัติทางแสงของวัสดุคลุมดิน.....	30
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายอุณหภูมิและความชื้นดินที่มีและไม่มี วัสดุคลุมดินสำหรับการปลูกระบบในวงบ่อซีเมนต์.....	38
การทดลองเปรียบเทียบเพื่อตรวจสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	54

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลการวิจัย.....	61
การปลูกมะนาวในวงบ่อซีเมนต์.....	61
สมบัติทางกายภาพของดินและสมบัติทางแสงของวัสดุคลุมดิน.....	63
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายอุณหภูมิและความชื้นดินที่มีและไม่มี วัสดุคลุมดิน.....	66
การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	79
5 อภิปรายและสรุปผล.....	84
อภิปรายผลการทดลอง.....	84
สรุปผลการทดลอง.....	87
บรรณานุกรม.....	89
ภาคผนวก.....	95
ภาคผนวก ก การสำรวจการปลูกมะนาวในวงบ่อซีเมนต์.....	96
ภาคผนวก ข ตัวอย่างโปรแกรมคำนวณ.....	100
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์ชนิดเนื้อดินและสมบัติทางฟิสิกส์ของดิน.....	102
ภาคผนวก ง การหาค่าการนำความร้อนของดินและสมบัติทางแสงของพลาสติก คลุมดิน.....	105
ภาคผนวก จ การทดลองเบื้องต้นกับอุณหภูมิและความชื้นดินสูงสุดและต่ำสุด ระหว่างวันที่มีวัสดุคลุมดินจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	111
ภาคผนวก ฉ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นดินภายในวงบ่อซีเมนต์ ที่มีวัสดุคลุมดิน.....	115
ภาคผนวก ช ข้อมูลการทดลองวัดอุณหภูมิและความชื้นดิน.....	122
ภาคผนวก ซ การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	132
ภาคผนวก ฌ ตารางการแจกแจงแบบ t.....	149
ประวัติย่อของผู้วิจัย.....	151

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 ชั่วโมงที่มีแดดเฉลี่ยรายเดือน .....	23
2-2 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างรังสีรวมรายวันเฉลี่ยรายเดือนและชั่วโมงที่มีแดด .....	24
4-1 การนำความร้อนของดิน.....	67
4-2 การส่งผ่าน การสะท้อน และการดูดกลืนแสง.....	69
4-3 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนทางสถิติของอุณหภูมิที่มีและไม่มีการคลุมดิน ในช่วงเวลากลางวัน.....	77
4-4 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนทางสถิติของอุณหภูมิที่มีและไม่มีการคลุมดิน ในช่วงเวลากลางคืน.....	77
4-5 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนทางสถิติของความชื้นที่มีและไม่มีการคลุมดิน ในช่วงเวลากลางวัน.....	81
4-6 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนทางสถิติของความชื้นที่มีและไม่มีการคลุมดิน ในช่วงเวลากลางคืน.....	81



## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1	พลังงานความร้อนรวมจากการแผ่รังสีที่ตกกระทบบนผิววัตถุ..... 11
2-2	ลักษณะการวิเคราะห์ปริมาณในระบบปิดทรงกระบอก..... 18
2-3	แผนภาพการทดลองการกักเก็บน้ำ..... 27
3-1	การหาค่าความหนาแน่นของดิน..... 30
3-2	ชุดทดลองค่าการนำความร้อนแบบแผ่นเดียว..... 31
3-3	การติดตั้งชุดทดลองการนำความร้อน..... 31
3-4	การเตรียมดินเพื่อใช้วิธีการวิเคราะห์หาเนื้อดิน..... 33
3-5	การผสมดินเพื่อใช้วิธีการวิเคราะห์หาเนื้อดิน..... 34
3-6	การทดลองดินเพื่อใช้วิธีการวิเคราะห์หาเนื้อดิน..... 35
3-7	สัดส่วนการกระจายตัวของอนุภาคดิน..... 35
3-8	การติดตั้งชุดทดลองวัดค่าสมบัติทางแสง..... 36
3-9	ชุดทดลองการนำการส่งผ่านของแสง..... 37
3-10	ชุดทดลองการนำการสะท้อนรังสี..... 38
3-11	วงบ่อซีเมนต์ที่บรรจุดิน..... 39
3-12	การแบ่งตำแหน่งสำหรับการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและมวล..... 40
3-13	สมดุลพลังงานและมวลภายในปริมาตรส่วนย่อย..... 40
3-14	สมดุลพลังงานอันเนื่องมาจากการถ่ายเทความร้อนและมวลสารของดิน ที่ผิวด้านบน กรณีไม่มีวัสดุคลุมดิน..... 42
3-15	สมดุลพลังงานอันเนื่องมาจากการถ่ายเทความร้อนและมวลสารของดิน ที่ผิวด้านบน กรณีไม่มีวัสดุคลุมดินในปริมาตรส่วนย่อย..... 43
3-16	สมดุลมวลสารของดินที่ผิวด้านบน กรณีไม่มีวัสดุคลุมดินในปริมาตรส่วนย่อย..... 44
3-17	สมดุลพลังงานอันเนื่องมาจากการถ่ายเทความร้อนและมวลสารของดินที่ผิวด้านบน กรณีที่มีวัสดุคลุมดิน..... 45
3-18	การแบ่งตำแหน่งสำหรับการวิเคราะห์สำหรับการถ่ายเทความร้อนที่ผิวด้านบน ของวัสดุคลุมดิน..... 45
3-19	การแบ่งตำแหน่งสำหรับการวิเคราะห์สำหรับการถ่ายเทความร้อนและมวล ในชั้นดิน..... 48

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-20 สมดุลพลังงานอันเนื่องมาจากการถ่ายเทความร้อนและมวลสารของดิน ที่ผิวด้านข้าง.....	49
3-21 สมดุลพลังงานอันเนื่องมาจากการถ่ายเทความร้อนและมวลสารของดิน ที่ผิวด้านล่าง.....	52
3-22 แผนภาพแสดงการทำงานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	53
3-23 การติดตั้งเครื่องมือสภาพอากาศแวดล้อม เครื่องมือวัดค่ารังสีอาทิตย์และเครื่องมือ วัดอุณหภูมิและความชื้น.....	54
3-24 การเตรียมดินและพลาสติกคลุมดิน.....	55
3-25 การติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิดินและที่ผิวของวงบ่อซีเมนต์ที่ไม่มีวัสดุคลุมดิน.....	56
3-26 การติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิภายในดิน พลาสติกคลุมดิน และที่ผิววงบ่อซีเมนต์ ที่มีวัสดุคลุมดิน.....	56
3-27 การติดตั้งเครื่องมือวัดความชื้นของดินภายในวงบ่อซีเมนต์ ณ บริเวณสวนกุหลาบ.....	57
3-28 การติดตั้งเครื่องมือวัดความชื้นของดินอยู่ในวงบ่อซีเมนต์ ณ บริเวณศาลา อาคารภาควิชาฟิสิกส์.....	57
3-29 การติดตั้งเครื่องมือวัดสภาพอากาศ.....	58
4-1 การส่งผ่านของวัสดุคลุมดิน.....	64
4-2 การสะท้อนของวัสดุคลุมดิน.....	65
4-3 การดูดกลืนของวัสดุคลุมดิน.....	65
4-4 ปริมาณรังสีอาทิตย์รายเดือนตลอดปี.....	67
4-5 อุณหภูมิอากาศรายเดือนตลอดปี.....	67
4-6 อัตราส่วนความชื้นอากาศรายเดือนตลอดปี.....	68
4-7 อุณหภูมิดินในวงบ่อซีเมนต์ของทุกระดับความลึกที่เปลี่ยนแปลงระหว่างวัน จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	71
4-8 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดินภายในวงบ่อซีเมนต์ทุกระดับความลึกที่มีวัสดุคลุมดิน แบบสีดำ แบบขาวปูน และแบบสะท้อนแสง ของเดือนเมษายน.....	72
4-9 ความชื้นดินในวงบ่อซีเมนต์ของทุกระดับความลึกที่เปลี่ยนแปลงระหว่างวัน จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	73

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4-10	การเปลี่ยนแปลงความชื้นดินภายในวงบ่อซีเมนต์ทุกระดับความลึกที่มีวัสดุคลุมดินแบบสีก่ำ แบบขาวปูน และแบบสะท้อนแสงของเดือนเมษายน.....	74
4-11	การเปรียบเทียบอุณหภูมิดินภายในวงบ่อซีเมนต์ทุกระดับความลึกที่ได้จากแบบจำลองกับการทดลองในเวลากลางวันที่มีและไม่มีการคลุมดิน.....	79
4-12	การเปรียบเทียบอุณหภูมิดินภายในวงบ่อซีเมนต์ทุกระดับความลึกที่ได้จากแบบจำลองกับการทดลองในเวลากลางคืนที่มีและไม่มีการคลุมดิน.....	79
4-13	การเปรียบเทียบความชื้นดินภายในวงบ่อซีเมนต์ทุกระดับความลึกที่ได้จากแบบจำลองกับการทดลองในเวลากลางวันที่มีและไม่มีการคลุมดิน.....	83
4-14	การเปรียบเทียบความชื้นดินภายในวงบ่อซีเมนต์ทุกระดับความลึกที่ได้จากแบบจำลองกับการทดลองในเวลากลางคืนที่มีและไม่มีการคลุมดิน.....	83

# บทที่ 1

## บทนำ

### ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยตั้งอยู่ตอนกลางของคาบสมุทรอินโดจีนในภูมิภาคตะวันออกเฉียงใต้ มีเนื้อที่ทั่วประเทศรวม 513,115 ตารางกิโลเมตร ประเทศไทยนั้นมีความหลากหลายทางลักษณะภูมิประเทศ โดยแบ่งเป็น 4 ภาค ได้แก่ ภาคเหนือ ภาคใต้ ภาคกลาง และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ อีกทั้งในแต่ละภาคของพื้นที่ของประเทศก็ยังมีสภาพภูมิอากาศที่แตกต่างกัน ซึ่งพื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศสามารถแบ่งเป็น 3 ฤดูกาลคือ ฤดูฝนระหว่างเดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคม ฤดูหนาวระหว่างเดือนพฤศจิกายนถึงกลางเดือนกุมภาพันธ์และฤดูร้อนระหว่างเดือนมีนาคมถึงเดือนพฤษภาคม ยกเว้นบริเวณภาคใต้ที่มีอากาศร้อนชื้นตลอดทั้งปี จึงสามารถแบ่งเป็น 2 ฤดู คือ ฤดูฝนและฤดูร้อน (กรมประชาสัมพันธ์, 2558) อุณหภูมิของประเทศไทยในแต่ละฤดูจะแตกต่างกันไม่มากนัก อุณหภูมิจะต่ำสุดในฤดูหนาว อุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือนในเดือนมกราคมจะอยู่ระหว่าง 26 - 28 °C ส่วนในฤดูร้อนระหว่างเดือนเมษายน อุณหภูมิจะอยู่ในช่วง 28 - 32 °C แต่ในภาคใต้ อุณหภูมิ เฉลี่ย รายเดือน จะอยู่ระหว่าง 26 - 30 °C ตลอดทั้งปี (กรมพัฒนาที่ดิน, 2558) ประเทศไทยถือได้ว่ามีลักษณะภูมิประเทศและสภาพภูมิอากาศที่เหมาะสมสำหรับทำเกษตรกรรม (สำนักโรคจากการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อม, 2560) อีกทั้งยังเป็นประเทศที่ประชากรส่วนใหญ่ประกอบอาชีพเกษตรกรรมและมีการส่งออกพืชผลทางการเกษตรที่สำคัญแห่งหนึ่งของโลก (FAO, 2007) แต่เนื่องจากสภาพภูมิประเทศและสภาพอากาศที่แตกต่างกันเป็นปัญหาหนึ่งที่ทำให้พืชบางชนิดไม่สามารถจะเจริญเติบโตและให้ผลผลิตได้อย่างเต็มที่ในบางพื้นที่ เกษตรกรจึงจำเป็นต้องคัดเลือกพืชที่สามารถเจริญเติบโตได้ดีและให้ผลผลิตสูงในเขตพื้นที่นั้น ๆ บางพื้นที่สามารถปลูกพืชที่เป็นที่ต้องการของตลาดและมีมูลค่าสูงได้แต่บางพื้นที่ปลูกไม่ได้ อีกทั้งพืชผักและผลไม้บางชนิดจะมีช่วงการออกผลผลิตตามฤดูกาล โดยผลผลิตที่ได้ในช่วงเวลาดังกล่าวอาจมีจำนวนมากจนเกินความต้องการของตลาด เป็นเหตุให้มีราคาตกต่ำ ผลผลิตเน่าเสียเนื่องจากไม่สามารถจำหน่ายได้ ในทางกลับกันในช่วงนอกฤดูให้ผลผลิตพืชผลบางชนิดที่มีความต้องการมากหรือมีความต้องการในปริมาณเท่า ๆ กันตลอดปี ผลผลิตไม่เพียงพอต่อความต้องการ ส่งผลให้ราคาของผลผลิตปรับตัวสูงขึ้นเกินกว่าความเป็นจริง

มะนาว *Citrus aurantifolia* (Cristm.) Swingle เป็นสายพันธุ์ส้มชนิดหนึ่งที่อยู่ในวงศ์ Rutaceae (Chunlaratthanaphorn et al., 2007) ซึ่งเป็นผลไม้ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจและปลูก

กันอย่างแพร่หลายในบริเวณเขตร้อนและกึ่งเขตร้อน (Sharma, Singh, & Saxena, 2006; Sethpakdee, 1997) มะนาวได้รับความนิยมสำหรับบริโภคในหลายๆ ประเทศและมีความต้องการผลผลิตตลอดทั้งปี เนื่องจากสามารถนำมาใช้เป็นเครื่องปรุงในการประกอบอาหาร ทำเป็นเครื่องดื่ม เป็นสมุนไพรทางการแพทย์ และใช้เป็นวัตถุดิบในภาคอุตสาหกรรม (Penjor, Mimura, Matsumoto, Yamamoto, & Nagano, 2014) ประเทศไทยเป็นประเทศหนึ่งที่นิยมบริโภค การปลูกมะนาวเชิงพาณิชย์ในประเทศไทยมีมานานหลายสิบปีและส่วนใหญ่จะปลูกลงแปลงดิน อีกทั้งยังสามารถปลูกได้ทั่วทุกพื้นที่ในประเทศไทยและให้ผลผลิตได้เกือบตลอดทั้งปี (องอาจ ยมนา, 2545; Nonthanum & Tansakul, 2008) แต่ผลผลิตของมะนาวยังขึ้นอยู่กับฤดูกาลทำให้ประสบปัญหาการขาดแคลนมะนาวในช่วงฤดูแล้ง (นอกฤดูกาล) ประมาณเดือนกุมภาพันธ์ – เมษายน ซึ่งมะนาวจะมีราคาแพงขึ้นมากหลายเท่าตัว ในขณะที่ช่วงฤดูฝน (ในฤดูกาล) จะมีผลผลิตของมะนาวออกสู่ตลาดมากจึงมีราคาตกต่ำ (Sethpakdee, 1997; Kaewsuksaeng, Tatmala, Srilaong, & Pongprasert, 2015; Jittanit, Suriyapornchaikul, & Nithisopha, 2013) วิธีการหนึ่งที่ช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวคือกระตุ้นให้มีการผลิตน้ำมะนาวในเชิงพาณิชย์ เพื่อนำสู่ตลาดที่จะช่วยป้องกันและแก้ไขปัญหาคาดแคลนของมะนาวซึ่งยังเป็นการแก้ปัญหาทางเศรษฐกิจของประเทศไทยอีกทางหนึ่ง (ธรรมรัตน์ รุ่งสังข์, 2551) และจากข้อมูลของกรมวิชาการเกษตร (กรมวิชาการเกษตร, 2558) พบว่าเกษตรกรหันมาปลูกมะนาวในภาชนะ (วงบ่อซีเมนต์หรือบ่อเกรอะ) การนำวงบ่อซีเมนต์มาประยุกต์ปลูกมะนาวเนื่องจากสามารถบังคับให้มะนาวออกดอก ออกผล ได้ตามต้องการตลอดทั้งปี มีการเจริญเติบโตได้ดี ง่ายต่อการดูแลรักษาและกำจัดวัชพืช และช่วยควบคุมการออกดอกและให้ผลผลิตของมะนาวได้ง่ายกว่าการบังคับด้วยวิธีการอื่น ๆ ซึ่งมีวิธีการคือค้ำน้ำแก่ต้นมะนาวในช่วงเดือน ตุลาคม-พฤศจิกายน (ช่วงฤดูฝน) โดยนำแผ่นพลาสติกมาคลุมดิน โคนต้นเพื่อไม่ให้น้ำฝนลงไปบนวงบ่อซีเมนต์ทำให้ต้นมะนาวเกิดอาการขาดน้ำ ใบเหี่ยวและร่วงได้ หลังจากนั้นก็ให้น้ำบำรุงต้น มะนาวก็จะออกดอกติดผลให้เราเก็บเกี่ยวผลผลิตในช่วงฤดูแล้งที่ตลาดมีความต้องการสูง ทำให้สามารถขายผลผลิตมะนาวได้ราคาสูงกว่าช่วงอื่น ๆ คุ่มค่าต่อการลงทุน รวมทั้งเหมาะสำหรับเกษตรกรที่มีเนื้อที่น้อย (นรินทร์ พูลเพิ่ม, 2558; พิชัย สมบูรณ์วงศ์, ม.ป.ป.) แต่การปลูกพืชในภาชนะนั้นก็ยังมีข้อจำกัดทั้งด้านสภาพแวดล้อมการเจริญเติบโตของต้นไม้และการแผ่ขยายของรากพืช แหล่งน้ำและแร่ธาตุต่างๆ ในดิน รวมทั้งการระบายน้ำและช่องอากาศในดินเมื่อเทียบกับการปลูกลงดิน (Meyer & Cunliffe, 2004; Fonteno, 1993; Spomer, 1976)

อุณหภูมิดินและความชื้นดินถือเป็นอีกเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช (Hillel, 1998; มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2541) และมีค่าเปลี่ยนแปลงตามความลึกของดิน (Banimahd & Zand-Parsa, 2013) โดยอุณหภูมิดินมีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการทางชีวภาพและ

ชีวเคมี การเจริญเติบโตของเมล็ดพืช การแพร่ขยายของราก การดูดซับและคายน้ำและแร่ธาตุต่าง ๆ และการเกิดแมลงในดิน (Banimahd & Zand-Parsa, 2013; Kunkel, Wells, & Hancock, 2016) ในขณะที่ความชื้นดินเป็นสิ่งที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช เพราะเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีภายในพืช และส่วนในการลำเลียงสารอาหารและแร่ธาตุที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช อีกทั้งยังช่วยรักษาอุณหภูมิของต้นพืชผ่านการคายน้ำ และสุดท้ายช่วยลดการบวมของใบและผล (Banimahd & Zand-Parsa, 2013; Ma, Qu, Wang, Yang, & Lei, 2016) ซึ่งอุณหภูมิและความชื้นของดินต่างมีกลไกที่ซับซ้อนและพึ่งพาอาศัยซึ่งกันและกัน (Adak & Chakravarty, 2012) จากการศึกษาที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในดินเป็นจำนวนมากแต่ส่วนใหญ่จะพิจารณาดินที่อยู่ในพื้นดินซึ่งมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงเป็นไปตามธรรมชาติของลักษณะดินนั้น โดยไม่มีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของดินระหว่างวันที่อยู่ในวงบ่อซีเมนต์ ซึ่งนำมาประยุกต์ใช้ในการปลูกพืชว่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการปลูกหรือไม่ โดย Rouse and Sherrod (1996) รายงานว่าอุณหภูมิดินที่เหมาะสมสำหรับการงอกของเมล็ดมะนาวคือ  $30.0^{\circ}\text{C}$  และมีช่วงอุณหภูมิอยู่ที่  $20.7 - 40.9^{\circ}\text{C}$  นอกจากนี้พบว่าอุณหภูมิดินที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของรากพืชตระกูลส้มอยู่ในช่วง  $12.0 - 35.0^{\circ}\text{C}$  และจะเจริญเติบโตดีที่สุดในช่วง  $25.0 - 30.0^{\circ}\text{C}$  (Yara Us, n.d.) และยังไม่มียุทธศาสตร์ที่ชัดเจน ในการพิจารณาความชื้นในดินที่เหมาะสมของการปลูกพืช ซึ่งความชื้นดินถือเป็นปัญหาที่สำคัญของเกษตรกรที่ปลูกมะนาวในการจัดการรดน้ำให้แก่ต้นพืช ได้แก่ การกำหนดเวลา ช่วงระยะเวลาการรดน้ำ และปริมาณน้ำ โดยทั่วไปผู้ปลูกมะนาวส่วนใหญ่จะอาศัยประสบการณ์ของตัวเองในการสังเกตลักษณะทางกายภาพของต้นมะนาว

ปัจจุบันแต่ยังไม่มียุทธศาสตร์ที่แสดงข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นของดินที่เหมาะสมสำหรับการปลูกมะนาวในวงบ่อซีเมนต์ และหากต้องการทราบข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นภายในดินจะต้องใช้เวลาในการเก็บข้อมูลเป็นระยะเวลานาน รวมทั้งปัญหาเกี่ยวกับการรดน้ำให้แก่มะนาวในวงบ่อซีเมนต์ยังไม่มียุทธศาสตร์ทำให้มีปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการปลูกมะนาวในวงบ่อซีเมนต์ ซึ่งช่วงการเจริญเติบโตของต้นมะนาวยังมีผลต่อความชื้นในดินอีกด้วย Fares and Ashok K. Alva (2000) นำเสนอว่า สำหรับต้นส้ม ช่วงการออกดอกและเริ่มติดผลผลิตถือว่าเป็นช่วงที่ความชื้นในดินมีผลอย่างยิ่งต่อกระบวนการ ดังนั้นควรต้องรักษาไม่ให้ต่ำกว่า 33% vol ของความชื้นในดินที่นำไปใช้งานได้ ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายอุณหภูมิและความชื้นภายในดินที่มีและไม่มีวัสดุคลุมดินสำหรับการปลูกมะนาวในวงบ่อซีเมนต์ รวมถึงต้องการหาอุณหภูมิและความชื้นดินที่เหมาะสมสำหรับการปลูกต้นมะนาวในวงบ่อซีเมนต์นอกฤดูปลูกที่มีและไม่มีวัสดุคลุมดิน และทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบการทดลอง

### วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. หาค่าอุณหภูมิและความชื้นของดินที่เหมาะสมสำหรับการปลูกมะนาวที่มีและไม่มีวัสดุคลุมดินในวงบ่อซีเมนต์
2. เลือกใช้วัสดุคลุมดินที่เหมาะสมในการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นดินสำหรับการปลูกมะนาวในวงบ่อซีเมนต์
3. เปรียบเทียบอุณหภูมิและความชื้นดินที่มีและไม่มีวัสดุคลุมดินสำหรับการปลูกมะนาวในวงบ่อซีเมนต์ที่ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดลอง

### ขอบเขตของการวิจัย

1. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากสมการพื้นฐานของการถ่ายเทความร้อนและมวลในระบบพิกัดทรงกระบอก 3 มิติ สำหรับทำนายอุณหภูมิและความชื้นดิน สำหรับการปลูกมะนาวในวงบ่อซีเมนต์ และแก้สมการด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข โดยอาศัยวิธีผลต่างสืบเนื่อง
2. ศึกษาคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของดิน ได้แก่ ค่าความหนาแน่น ค่าการนำความร้อน ค่าความจุความร้อน และสัมประสิทธิ์การแพร่มวล
3. ศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงของวัสดุคลุมดิน ได้แก่ ค่าการส่งผ่านแสง ค่าการดูดกลืนแสง โดยเลือกใช้วัสดุคลุมดินที่เกษตรกรนิยม 3 ชนิด ได้แก่ พลาสติกโพลีเอทิลีน (Polyethylene, PE) สีดำ, แบบใส และแบบสะท้อนแสง
4. เก็บข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นดินภายในวงบ่อซีเมนต์ตลอดทั้งวัน แล้วนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นดินที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. ทราบค่าอุณหภูมิและความชื้นของดินสำหรับการปลูกมะนาวในวงบ่อซีเมนต์
2. นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปทำนายอุณหภูมิและความชื้นดิน สำหรับการปลูกพืชและผลไม้ชนิดต่าง ๆ ในวงบ่อซีเมนต์ในแต่ละพื้นที่และฤดูกาลต่าง ๆ ได้
3. เลือกใช้วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับคลุมดินเพื่อควบคุมปัจจัยแวดล้อมในดินให้เหมาะสมกับการปลูกพืชและผลไม้ชนิด ๆ ในวงบ่อซีเมนต์ ทั้งในและนอกฤดูกาลได้ ได้อย่างเหมาะสมตลอดทั้งปี

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายอุณหภูมิและความชื้นของดินที่มีและไม่มีวัสดุคลุมดินสำหรับการปลูกมะนาวในวงบ่อซีเมนต์ จะใช้ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนและมวลที่เกิดขึ้นต่อเนื่องพร้อมกัน โดยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนและมวลต้องอาศัยสมการพลังงานของระบบที่มีหลายองค์ประกอบและตัวแปรในสมการดังกล่าวจะเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของดินและคุณสมบัติทางแสงวัสดุคลุมดินซึ่งมีผลทำให้อุณหภูมิและความชื้นของดินภายในวงบ่อซีเมนต์เปลี่ยนแปลงไป

#### อุณหภูมิดิน

อุณหภูมิดินมีความสำคัญในการกำหนดอัตราและทิศทางของการเกิดกระบวนการทางฟิสิกส์ เคมี และชีวภาพในดิน กระบวนการที่สำคัญทางฟิสิกส์ทางฟิสิกส์ ได้แก่ กระบวนการแลกเปลี่ยนมวลและพลังงานระหว่างในชั้นหน้าตัดดินกับบรรยากาศ โดยมวลที่แลกเปลี่ยนระหว่างดินและบรรยากาศ เช่น แก๊สต่าง ๆ ที่มีอยู่ในหน้าชั้นดิน ส่วนพลังงานคือความร้อน สำหรับกระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นกับอุณหภูมิดิน ได้แก่ กระบวนการแตกตัว (Chemical Speciation) และการรวมตัว (Chemical Compound Formation) ของสารเคมีในดิน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของดินทำให้สมดุลทางเคมีเปลี่ยนแปลง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ปริมาณสารเคมีในแต่ละรูป (Speciation) ที่มีอยู่ในดิน ส่วนกระบวนการทางชีวภาพที่เกิดขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิดิน ได้แก่ กระบวนการเปลี่ยนแปลงของสารเคมีโดยจุลินทรีย์ในดิน การเปลี่ยนรูปธาตุอาหารพืชจากรูปหนึ่งไปยังอีกรูปหนึ่ง หรือเปลี่ยนแปลงสถานะของสารเคมีจากสถานะหนึ่งไปเป็นอีกสถานะหนึ่ง อุณหภูมิที่เหมาะสมในการดำเนินกิจกรรมในช่วงหนึ่ง ๆ เท่านั้น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของดิน อาจทำให้ความเหมาะสมในการดำเนินกิจกรรมของจุลินทรีย์ดินและรากพืชแปรเปลี่ยนไป อีกทั้งการงอกของเมล็ดพืชและการเจริญเติบโตของพืชก็มีความสำคัญอย่างมากกับอุณหภูมิดิน อาจสรุปได้ว่าผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดินสะท้อนให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงสภาพที่เกิดขึ้นกับกระบวนการทั้งฟิสิกส์ เคมี และชีวภาพของดินได้ทั้งในเชิงเวลาและเชิงระยะทาง (Time and Spatial variability) ในรูปของอัตราและทิศทางของการเกิดกระบวนการเหล่านี้ถึงสาเหตุที่ทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลง รวมทั้งกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว รวมทั้งสมบัติ



ของดินอะไรบ้างที่ควบคุมการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิผิวดินต่อกระบวนการทางฟิสิกส์ เคมี และชีวภาพของดิน

ดวงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานเดียวที่ให้พลังงานแก่โลก โดยได้รับพลังงานในรูปรังสีอาทิตย์ซึ่งคิดเป็นพลังงานเพียงแค่ 0.0005% ของรังสีที่ดวงอาทิตย์แผ่มาทั้งหมด เรียกรังสีส่วนนี้ว่า รังสีอาทิตย์ที่แผ่ถึงชั้นบรรยากาศโลก (Extraterrestrial solar radiation) หากเริ่มนับจากส่วนบนสุดของชั้นบรรยากาศ รังสีส่วนนี้ถูกประเมินว่ามีค่าประมาณ  $13.6 \text{ kW/m}^2$  หรือคิดเป็นค่าเฉลี่ยพลังงานประมาณ  $29.4 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$  รังสีส่วนนี้จะมีควมยาวคลื่น 300 – 400 nm เนื่องจากชั้นบรรยากาศโลกมีแก๊สต่าง ๆ เช่น  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  และฝุ่นละออง โมเลกุลเหล่านี้จะทำให้เกิดการสะท้อนกลับของรังสีบางส่วนและเกิดการกระเจิง (Scatter) ของรังสีอีกบางส่วน อีกทั้งมีการดูดซับพลังงานของรังสีที่แผ่มาถึงชั้นบรรยากาศทั้งหมด ถ้ารังสีแผ่มาถึงชั้นบรรยากาศโลกมี 100% รังสีประมาณ 19% จะทะลุมายังผิวโลก (Direct Beam) ประมาณ 28% จะสะท้อนกลับขึ้นไปนอกบรรยากาศ โดยเมฆและโมเลกุลของแก๊สต่าง ๆ (Reflection) ประมาณ 16% และจะถูกดูดซับโดยมวลโมเลกุลดังกล่าว (Absorption) ประมาณ 37% ของรังสีที่แผ่มาทั้งหมดจะเกิดการกระเจิง (Scattering) ซึ่งบางส่วนของรังสีที่กระเจิงนี้ จะกระเจิงออกไปนอกชั้นบรรยากาศและบางส่วนกระเจิงภายในชั้นบรรยากาศเอง โดยในที่สุดรังสีกระเจิงส่วนหลังจะสามารถทะลุบรรยากาศถึงผิวโลกได้ (Global radiation) และมีสัดส่วนประมาณ 45% ของรังสีทั้งหมดที่แผ่มาถึงชั้นบรรยากาศ สัดส่วนต่าง ๆ ข้างต้นได้จากการประเมินในช่วงฤดูร้อนซึ่งเป็นช่วงที่ท้องฟ้าแจ่มใสและรังสีอาทิตย์ตกกระทบผิวโลกเกือบเป็นแนวตั้งฉาก จึงอาจกล่าวได้ว่าสัดส่วนรังสีที่ระบุไว้นี้จะแตกต่างกันไปในแต่ละพื้นที่ขึ้นกับว่าเป็นช่วงฤดูกาลใด และตำแหน่งที่ตั้งของพื้นที่เป็นพื้นที่ใด เช่น ถ้าเป็นฤดูฝนซึ่งมีเมฆมากหรือแถบขั้วโลกใต้ สัดส่วนของรังสีน่าจะมีความแตกต่างอย่างมากกับสัดส่วนที่ได้นำเสนอข้างต้น (มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2541)

รังสีที่ตกกระทบผิวโลกได้จะถูกใช้ไปในด้านต่าง ๆ ได้แก่ สะท้อนกลับสู่ชั้นบรรยากาศ รังสีบางส่วนถูกดูดซับโดยชั้นบรรยากาศเองหรือโดยผิวดิน ซึ่งจะทำให้ชั้นบรรยากาศและดินมีอุณหภูมิสูงขึ้น รังสีบางส่วนจะถูกใช้ไปเพื่อแลกเปลี่ยนสถานะของน้ำ เช่น การระเหยน้ำที่ผิวดินหรือการคายน้ำที่ใบพืช และ รังสีบางส่วนจะทำให้ผิวดินมีอุณหภูมิสูงขึ้นและเกิดการแผ่รังสีความร้อนสู่บรรยากาศ

ผิวดินนับว่าเป็นจุดที่มีความสำคัญที่สุดในเรื่องอุณหภูมิผิวดิน เพราะผิวดินเป็นรอยต่อระหว่างดินกับชั้นบรรยากาศ ที่มีการถ่ายเทกลับไปกลับมาของพลังงานความร้อนระหว่างชั้นหน้าตัดดินและชั้นบรรยากาศ การถ่ายเทพลังงานความร้อนเป็นสาเหตุให้อุณหภูมิของดินภายในชั้นหน้าตัดดินมีการเปลี่ยนแปลง

พลังงานและความร้อนสามารถเปลี่ยนรูปกลับไปกลับมาได้พลังงานที่ผิวดินได้รับจากรังสีแสงอาทิตย์ในช่วงเวลากลางวันจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน แล้วมีผลทำให้อุณหภูมิที่ผิวดินจะถูกเคลื่อนย้ายลงไปในพื้นที่ตัดดินซึ่งมีผลทำให้อุณหภูมิในพื้นที่ตัดดินสูงขึ้นตามไปด้วย ในทางกลับกันช่วงเวลากลางคืนผิวดินไม่ได้รับพลังงานความร้อนเพิ่มเติม แต่พลังงานความร้อนที่สะสมไว้ในพื้นที่ตัดดินเองในช่วงเวลากลางคืน จะมีการถ่ายเทพลังงานความร้อนจากภายในพื้นที่ตัดดินสู่บรรยากาศ จึงมีผลทำให้อุณหภูมิในพื้นที่ตัดดินในช่วงเวลากลางคืนลดลง การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในพื้นที่ตัดดินจะมากน้อยเพียงไรขึ้นกับว่าช่วงเวลามีแสงแดดนานเท่าใด หรือรังสีแสงอาทิตย์ที่กระทบผิวดินในช่วงเวลากลางวันมีมากน้อยเพียงไร และนานเท่าใดรวมทั้งขึ้นความสามารถในการส่งผ่านความร้อนของหน้าตัดดินเอง ในกรณีแรกถ้ามีเมฆมากโอกาสที่รังสีแสงอาทิตย์จะกระทบผิวดินด้วยความเข้มที่สูงก็มีน้อย ผลคือผิวดินจะได้รับพลังงานแสงอาทิตย์น้อยกว่าขณะที่ท้องฟ้าโปร่งไม่มีเมฆมากนัก และการที่เมฆปกคลุมดินมีความหนาแน่นที่ต่างกัน ทำให้รังสีแสงอาทิตย์ที่จะตกกระทบผิวโลกมีความแตกต่างกันจึงเป็นเหตุให้ดินแต่ละพื้นที่ในแนวอนได้รับพลังงานที่แตกต่างกันออกไป ผลคือการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในพื้นที่ตัดดินจะไม่มีควมสม่ำเสมอ

### กระบวนการถ่ายเทความร้อนของดิน

กระบวนการการถ่ายเทความร้อนคือการที่ความร้อนเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าและจะหยุดถ่ายเทเมื่อบริเวณทั้งสองมีอุณหภูมิเท่ากัน โดยปัจจัยที่ทำให้ดินเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมิ 2 ปัจจัยหลัก คือสภาพแวดล้อมและสมบัติทางความร้อนของดิน โดยที่ผิวดินจะได้รับพลังงานความร้อนจากรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบ ทำให้อุณหภูมิที่ผิวดินมีค่าสูงขึ้น และเกิดกระบวนการถ่ายเทความร้อนต่าง ๆ เกิดขึ้น ได้แก่ กระบวนการแผ่รังสีความร้อน กระบวนการพาความร้อน กระบวนการความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะ เมื่อเวลาผ่านไปความร้อนหลงเหลือที่ผิวดินจะส่งความร้อนผ่านไปยังชั้นดินที่อยู่ลึกลงไปซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยกระบวนการนำความร้อน (Heat Conduction) ซึ่งถือเป็นกระบวนการหลักที่เกิดขึ้นในเนื้อดิน

#### 1. กระบวนการนำความร้อน

การนำความร้อนเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญมากในการส่งผ่านความร้อนในดิน โดยความร้อนจะมีการส่งผ่านในระดับโมเลกุลขององค์ประกอบแต่ละองค์ประกอบของดินที่สามารถนำความร้อนได้ ทั้งดินที่เป็นของแข็งหรือน้ำที่อยู่ในช่องดินก็สามารถนำความร้อนได้ เนื่องจากดินมีความหลากหลายทางองค์ประกอบ เช่น ปริมาณอนุภาคนาขนาดทราย ซิลต์ ดินเหนียว

อินทรียวัตถุ และปริมาณน้ำในช่องดินมีความแตกต่างกัน ทำให้ความสามารถในการนำความร้อนแตกต่างกัน ทำให้ดินในแต่ละแหล่งมีความไม่สม่ำเสมอของความสามารถในการนำความร้อน

ปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านในตัวกลางหนึ่งด้วยกระบวนการนำความร้อน สามารถคำนวณได้จากสมการของฟูรีเยร์ (Fourier' law of heat conduction)

$$Q_{CD} = -kA\nabla T \quad (2.1)$$

เมื่อ	$Q_{CD}$	คืออัตราการนำความร้อน (W)
	A	คือพื้นที่การถ่ายเทความร้อน (K)
	k	คือสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/m-K)
	$\nabla T$	คือเกรเดียนต์ของอุณหภูมิ (gradient of temperature) (K)

## 2. กระบวนการการพาความร้อน

การพาความร้อนเป็นการส่งผ่านความร้อนที่ต้องอาศัยตัวกลางในการส่งผ่าน โดยเมื่อตัวกลางซึ่งมีสถานะของไหลสัมผัสกับผิวของวัตถุที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันจะมีการแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนระหว่างของไหลกับวัตถุ รวมถึงการที่อุณหภูมิของอากาศภายในชั้นหน้าตัดดินสองแหล่งมีความแตกต่างกัน จะมีการเคลื่อนที่ของอากาศที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิเหนือระยะทางของการเคลื่อนที่ (Temperature gradient) ซึ่งจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอากาศในดินจากแหล่งที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่แหล่งที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า มีผลทำให้อุณหภูมิดินทั้งในส่วนที่เป็นช่องอากาศ ช่องที่บรรจุน้ำ และตัวของแข็งของดินมีอุณหภูมิสูงขึ้น การพาความร้อนสามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือการพาความร้อนตามธรรมชาติ (Natural convection) และการพาความร้อนแบบบังคับ (Force convection)

แรงที่ทำให้ของไหลเกิดการเคลื่อนที่ไหลของการพาความร้อนตามธรรมชาตินั้นเกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิกายในก้อนของไหลเนื่องมาจากการที่ของไหลสัมผัสกับผิวของวัตถุที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันจนทำให้เกิดแรงลอยตัวเกิดขึ้น ส่วนการพาความร้อนแบบบังคับจะเกิดขึ้นเมื่อมีแรงภายนอกมาบังคับให้ของไหลเคลื่อนที่ผ่านวัตถุที่ร้อนกว่าหรือเย็น สมการสำหรับหาอัตราการพาความร้อนที่อยู่ในรูปของ กฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) ซึ่งมีสมการ

$$Q_{CV} = \bar{h}_c A (T_s - T_\infty) \quad (2.2)$$

เมื่อ	$Q_{CV}$	คืออัตราการพาความร้อน (W)
-------	----------	---------------------------

$\bar{h}_c$  คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย (Average convective heat transfer coefficient) ( $\text{W/m}^2\text{-K}$ )

$T_s$  คืออุณหภูมิของผิววัสดุ (K)

$T_\infty$  คืออุณหภูมิของของไหลอิสระที่อยู่ห่างออกไปจากผิววัตถุมาก ๆ (K)

โดยที่สัมประสิทธิ์การพาความร้อนตามธรรมชาติสามารถหาได้จาก (Cengel, 2003)

$$h = \text{Nu} \frac{k_a}{L_c} \quad (2.3)$$

$$\text{Nu} = c(\text{Ra})^n \quad (2.4)$$

$$\text{Ra} = \text{Gr} \cdot \text{Pr} \quad (2.5)$$

$$\text{Gr} = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2} \quad (2.6)$$

เมื่อ	Nu	คือนัสเซลน์มเบอร์ (Nusselt Number)
	Ra	คือเรเลย์น์มเบอร์ (Rayleigh number)
	Gr	คือกราช็อพน์มเบอร์ (Grashof number)
	Pr	คือแพรด์น์มเบอร์ (Prandtl number)
	$L_c$	คือค่าความยาวลักษณะเฉพาะของรูปทรง (m)
	$g$	คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง ( $\text{m/s}^2$ )
	$\beta$	คือสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตร ( $1/\text{K}$ ) มีค่าเท่ากับ $1/T_f$
	$k_a$	คือค่าการนำความร้อนของอากาศ ( $\text{W/m-K}$ )
	$\nu$	คือความหนืดจลนศาสตร์ ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
	$c$	คือค่าคงที่ เท่ากับ 0.58
	$n$	คือค่าคงที่ เท่ากับ 0.2
	$T_f$	คืออุณหภูมิฟิล์ม (K) มีค่าเท่ากับ $(T_s + T_\infty) / 2$

เมื่อคุณสมบัติของอากาศในฟังก์ชันของอุณหภูมิสามารถหาได้จากวิธีการลดถอยเชิงเส้นซึ่งมีความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้ (ชนเทพ พิทยราชศักดิ์, 2551)

$$C_{pa} = (0.9953 + 3.3 \times 10^{-5}T_f) \times 10^3 \quad (2.7)$$

$$\rho_a = 2.4405 - 4.148 \times 10^{-5}T_f \quad (2.8)$$

$$k_a = 0.0029 + 7.76 \times 10^{-5}T_f \quad (2.9)$$

$$v = (-12.43 + 0.0945T_f) \times 10^{-6} \quad (2.10)$$

$$Pr = 0.784 - 2.5 \times 10^{-4}T_f \quad (2.11)$$

เมื่อ  $C_{pa}$  คือค่าความจุความร้อนของอากาศ (kJ/kg-K)

$\rho_a$  คือความหนาแน่นของอากาศ (kg/m<sup>3</sup>)

สำหรับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเนื่องจากลมบริเวณผิวดิน ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราเร็วลม ( $v$ ) ที่ไหลผ่าน สามารถคำนวณได้จากสมการ (Tiwari, 2013)

$$h_c = 5.7 + 3.8v \quad (2.12)$$

เมื่อ  $v$  คือความเร็วลม (m/s)

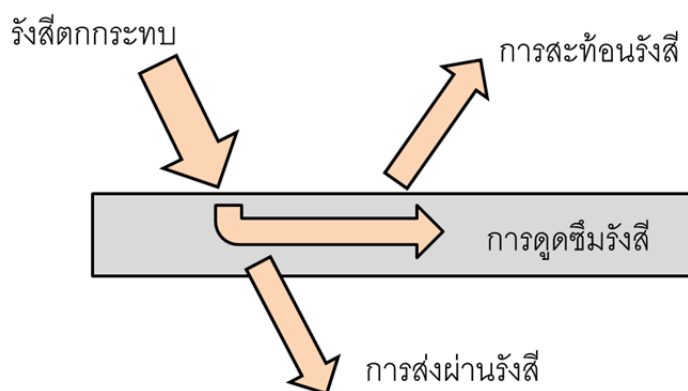
### 3. กระบวนการแผ่รังสีความร้อน

พลังงานความร้อนรวมจากรังสีอาทิตย์ที่ส่งมาทุกทิศทางและตกกระทบลงบนผิวดัตถุสัญลักษณ์  $G$  ดังภาพที่ 2.1 พลังงานบางส่วนจะถูกวัตถุดูดซึมเอาไว้ บางส่วนจะสะท้อนกลับออกไป และบางส่วนจะทะลุผ่านออกจากวัตถุนั้นไป อัตราส่วนของพลังงานที่ถูกดูดซึมไว้ สัญลักษณ์  $G_{abs}$  ต่อพลังงานรวมที่ตกกระทบนั้นเรียกว่า ค่าอัตราการดูดซึมรังสี (Absorptivity) สัญลักษณ์  $\alpha$  อัตราส่วนของพลังงานที่สะท้อนกลับออกไป สัญลักษณ์  $G_{ref}$  ต่อพลังงานรวมที่ตกกระทบนั้นเรียกว่า ค่าการสะท้อนรังสี (Reflectivity) ใช้สัญลักษณ์  $\rho$  และอัตราส่วนของพลังงานที่ถูกส่งผ่าน สัญลักษณ์  $G_{tr}$  ต่อพลังงานรวมที่ตกกระทบนั้นเรียกว่า ค่าการส่งผ่านรังสี (Transmissivity) ใช้สัญลักษณ์  $\tau$  เมื่อเขียนเป็นสมการจะได้ว่า

$$G_{\text{abs}} + G_{\text{ref}} + G_{\text{tr}} = G \quad (2.13)$$

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2.14)$$

หากวัตถุทึบแสง พลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีไม่สามารถทะลุผ่านวัตถุได้เลยค่าการส่งผ่านรังสี  $\tau = 0$  หากวัตถุที่เป็นตัวสะท้อนหรือสะท้อนรังสีได้หมด  $\rho = 1$  หรือ  $\alpha = \tau = 0$  และถ้าหากวัตถุสามารถดูดซึมพลังงานความร้อนได้ทั้งหมด  $\alpha = 1$  หรือ  $\rho = \tau = 0$  ซึ่งจากกฎของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchoff's Law) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมรังสีกับค่าการแผ่รังสี มีใจความว่า วัตถุที่อยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อนนั้นจะมีค่าการดูดซึมรังสี  $\alpha$  เท่ากับค่าการแผ่รังสี  $\epsilon$



ภาพที่ 2-1 พลังงานความร้อนรวมจากการแผ่รังสีที่ตกกระทบบนผิววัตถุ (Cengel, 2003)

วัตถุจริงใด ๆ ไม่สามารถแผ่รังสีความร้อนได้เท่าวัตถุในจินตนาการหรือวัตถุดำ โดยจะแผ่ได้น้อยกว่า ซึ่งการแผ่รังสีพลังงานความร้อนจากดินไปยังอากาศรอบๆ มีสมการเป็น

$$Q_{\text{RD}} = \sigma \epsilon A (T_s^4 - T_{\text{sky}}^4) \quad (2.15)$$

- เมื่อ
- $Q_{\text{RD}}$  คือฟลักซ์ความร้อนการแผ่รังสี (W)
  - $\sigma$  คือค่าคงที่ของของสเตฟาน-โบลต์ซมันน์ มีค่าเท่ากับ  $5.67 \times 10^{-8}$  (W/m<sup>2</sup>-K<sup>4</sup>)
  - $T_s$  คืออุณหภูมิที่ผิวดิน (K)
  - $T_{\text{sky}}$  คืออุณหภูมิท้องฟ้า (K)

โดยที่อุณหภูมิท้องฟ้า สามารถหาได้จาก

$$T_{\text{sky}} = 0.0552T_{\text{amb}}^{1.5} \quad (2.16)$$

เมื่อ  $T_{\text{amb}}$  คืออุณหภูมิอากาศแวดล้อม (K)

ในกรณีที่มีการคลุมดินด้วยพลาสติก สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีระหว่างแผ่นพลาสติกกับผิวดินสามารถหาได้จาก (บัญญัติ นุชนิยม, 2544)

$$Q_{\text{RD},s-\text{ml}} = h_{\text{r},s-\text{ml}}A(T_s - T_c) \quad (2.17)$$

โดยที่

$$h_{\text{r},s-\text{ml}} = \frac{\sigma \varepsilon_s \varepsilon_{\text{ml}} (T_s + T_{\text{ml}}) (T_s^2 + T_{\text{ml}}^2)}{1 - \rho_s \rho_{\text{ml}}} \quad (2.18)$$

เมื่อ  $h_{\text{r},s-\text{ml}}$  คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีระหว่างแผ่นพลาสติกกับผิวดิน ( $\text{W}/\text{m}^2\text{-K}$ )

$\varepsilon_s$  คือค่าการแผ่รังสีของดิน

$\varepsilon_{\text{ml}}$  คือค่าการแผ่รังสีของวัสดุคลุมดิน

$T_{\text{ml}}$  คืออุณหภูมิแผ่นวัสดุคลุมดิน (K)

$\rho_s$  คือค่าสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ผิวดิน

$\rho_{\text{ml}}$  คือค่าสะท้อนรังสีอาทิตย์ของวัสดุคลุมดิน

#### 4. กระบวนการความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะ

กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่ผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นดิน โดยกระบวนการนี้จะดูดกลืนความร้อนในการเปลี่ยนสถานะของน้ำที่อยู่บริเวณผิวดินหรือภายในดินให้กลายเป็นไอ ซึ่งเรียกความร้อนนี้ว่า ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (latent heat of evaporation) หรือคายความร้อนในการควบแน่นไอน้ำให้กลายเป็นน้ำเรียกว่า ความร้อนแฝงของการควบแน่น (latent heat of condensation) โดยค่าความร้อนแฝงสามารถหาได้จากสมการ (นฤทธิ์ กล่อมพงษ์, 2551)

$$LE = F(u)(b(1 - RH) - a(RH \times T_{amb} - T_s)) \quad (2.19)$$

สำหรับ  $263 \leq T \leq 303$  K ค่า  $a$  เท่ากับ  $103$  Pa/K และ  $b$  เท่ากับ  $609$  Pa

เมื่อ LE คือความร้อนแฝง (W/m-K)

RH คือความชื้นสัมพัทธ์ (%)

โดยที่

$$F(u) = -0.0168fh_c \quad (2.20)$$

เมื่อ

$$f = \begin{cases} 1 & \text{สำหรับดินอิมตัว} \\ 0.6 - 0.8 & \text{สำหรับดินชั้น} \\ 0.4 - 0.5 & \text{สำหรับดินแห้ง} \\ 0.1 - 0.2 & \text{สำหรับดินแห้ง} \end{cases}$$

## สมบัติทางกายภาพของดิน

### 1. ความหนาแน่นของดิน

ความหนาแน่น (Density) เป็นสมบัติของดินที่ได้รับผลบางส่วนจากชนิดของเนื้อดิน และอีกบางส่วนจากการเกิดเม็ดดิน (Aggregation) หรือการเกิด โครงสร้างดิน (Soil structure) ความหนาแน่นของดิน (Soil density) มี 2 ประเภท คือความหนาแน่นรวม (Bulb density) และความหนาแน่นอนุภาค (Particle density)

#### 1.1 ความหนาแน่นรวม ( $\rho_b$ )

ความหนาแน่นรวมของดิน ( $\text{kg/m}^3$ ) หมายถึงมวลของดินแห้งต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรรวมทั้งหมดของดิน แสดงได้ตามสมการ

$$\rho_b = \frac{m_s}{V_b} \quad (2.21)$$

โดยที่

$$V_b = V_s + V_p \quad (2.22)$$



เมื่อ	$m_s$	คือมวลของดินแห้ง (kg)
	$V_b$	คือปริมาตรรวมทั้งหมดของดิน ( $m^3$ )
	$V_s$	คือปริมาตรของของแข็ง ( $m^3$ )
	$V_p$	คือปริมาตรของช่องว่าง ( $m^3$ )

## 1.2 ความหนาแน่นอนุภาค ( $\rho_s$ )

ความหนาแน่นอนุภาคดิน ( $kg/m^3$ ) หมายถึงมวลของดินแห้งต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของส่วนที่เป็นของแข็งของดิน แสดงได้ตามสมการ

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad (2.23)$$

จากสมการที่ 2.21 และ 2.23 เมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นทั้งสอง จะพบว่าที่ดินเดียวกันความหนาแน่นรวม  $\rho_b$  จะมีค่าต่ำกว่าความหนาแน่นอนุภาค  $\rho_s$  เสมอ เนื่องจากความหนาแน่นรวมจะมีค่าขึ้นกับปริมาตรช่องว่าง ดังนั้นถ้าดินที่มีการเรียงตัวของอนุภาคแล้วมีช่องว่างมาก ความหนาแน่นรวมจะมีค่าน้อย แต่ถ้าดินที่มีการเรียงตัวของอนุภาคแล้วมีช่องว่างน้อย ความหนาแน่นรวมจะมีค่ามาก

## 2. ความจุความร้อนจำเพาะ

ความจุความร้อนจำเพาะของดิน หมายถึงการเปลี่ยนแปลงความร้อนของดินปริมาตรหนึ่งเมื่อดินนั้นมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิไป 1 องศา ซึ่งหน่วยของความจุความร้อนเป็นคือ  $J/m^3 K$  ความจุความร้อนของดินจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของดินที่มีสถานะเป็นของแข็งและเป็นของเหลวเป็นหลัก ส่วนก๊าซที่เป็นองค์ประกอบหนึ่งของดินนั้น เนื่องจากความจุความร้อนของก๊าซมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับความจุความร้อนของของแข็งและของเหลว จึงไม่จำเป็นต้องพิจารณาองค์ประกอบนี้ของดินเมื่อต้องการทราบค่าความจุความร้อนของดิน ซึ่งการหาค่าความจุความร้อนของดินอาจทำได้ง่าย ๆ โดยการรวมสัดส่วนความจุความร้อนขององค์ประกอบของดินแต่ละตัวเข้าด้วยกัน ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้

$$C = \sum \lambda_{si} C_{si} + \lambda_{wi} C_{wi} \quad (2.24)$$

เมื่อ  $\lambda$  คือสัดส่วนโดยปริมาตรขององค์ประกอบดินแต่ละชนิด ตัวห้อย  $s$  หมายถึงชนิดของของแข็ง ตัวห้อย  $i$  ระบุถึงชนิดขององค์ประกอบดินที่เป็นของแข็ง ตัวห้อย  $w$  หมายถึงชนิดของของเหลว และ  $C$  คือค่าความจุความร้อนเชิงปริมาตรของแต่ละองค์ประกอบย่อยของดิน

### 3. การนำความร้อนของดิน

การหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ( $k$ ) ของดิน อาจสามารถหาได้เช่นเดียวกับการหาค่าความจุความร้อน กล่าวคือจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนโดยปริมาตรขององค์ประกอบดินทั้งหมดไม่ว่าจะเป็นสถานะใด สำหรับการคำนวณการหาค่าการนำความร้อนของดิน สามารถทำได้เช่นเดียวกับการหาค่าความจุความร้อนของดิน โดยเปลี่ยนจากการแทนค่า  $C_i$  ในสมการในสมการ (2.24) เป็นค่า  $k_i$  สัมประสิทธิ์การนำความร้อนขององค์ประกอบดินแทน

### 4. การแพร่ในดิน

ค่าการแพร่ในดิน (Soil water diffusivity) ในสถานะแก๊สสามารถหาได้จากสมการของ Penman (1940) ซึ่งมีความสัมพันธ์การแพร่ของแก๊สในอากาศ และความพรุนของช่องว่างในดิน (Xu, Nieber, & Gupta, 1992; Allaire Lafond, Cabral, & Lange, 2008)

$$\frac{D}{D_o} = 0.66f_a \quad (2.25)$$

เมื่อ  $D$  คือค่าการแพร่ในดิน ( $m^2/s$ ),  $D_o$  คือค่าการแพร่ของไอน้ำในอากาศ ( $m^2/s$ ) และ  $f_a$  ความพรุนช่องบรรจุอากาศ (air-filled porosity) ( $m^3/m^3$ ) โดยที่  $D_o$  สามารถคำนวณได้จากสมการซึ่งมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ  $T$  (K) และความดันของไอน้ำ  $P$  (kPa) (Bittelli et al., 2008)

$$D_o(T, P) = D_o(273.15 \text{ K}, 101.3 \text{ kPa}) \left( \frac{T}{273.15} \right)^{1.75} \left( \frac{101.3}{P} \right) \quad (2.26)$$

### ความชื้นของดิน

การดูดยึดน้ำของดินทำให้น้ำที่แทรกซึมลงในดินยังคงค้างอยู่ตามช่องหรือเคลือบเป็นฟิล์มรอบอนุภาคแสดงอยู่นานพอที่จะตรวจวัดจำนวนได้ การวัดจำนวนของน้ำในดินนิยมวัดเป็นสัดส่วนระหว่างปริมาตรของน้ำกับปริมาตรของดินที่น้ำนั้นบรรจุอยู่ ได้แก่ความชื้นโดยมวล (Mass water content) และความชื้นโดยปริมาตร (Volume water content)

ความชื้นโดยมวล หมายถึง สัดส่วนระหว่างมวลของน้ำและมวลของดินแห้งซึ่งบรรจุน้ำจำนวนนั้น แสดงได้ตามสมการ

$$\theta_m = \frac{m_w}{m_s} \quad (2.27)$$

เมื่อ  $\theta_m$  คือระดับความชื้นโดยมวล (kg/kg)  
 $m_w$  คือมวลของน้ำในดิน (kg)

ความชื้นโดยปริมาตร หมายถึง สัดส่วนระหว่างปริมาตรของน้ำในดินกับปริมาตรรวมทั้งหมดของดิน (Bulk Volume) ในที่นี้หมายถึงผลรวมของปริมาตรของแข็ง (Solid Volume) และปริมาตรช่องว่าง (Pore Volume) ระดับความชื้น โดยปริมาตรแสดงได้ตามสมการ

$$\theta_v = \frac{V_w}{V_b} \quad (2.28)$$

เมื่อ  $\theta_v$  คือระดับความชื้น โดยปริมาตร ( $m^3/m^3$ )  
 $V_w$  คือปริมาตรของน้ำในดิน ( $m^3$ )

จากสมการที่ 2.27 และ 2.28 สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง  $\theta_v$  และ  $\theta_m$  แสดงได้ตามสมการ

$$\theta_v = \frac{\rho_b \theta_w}{\rho_w} \quad (2.29)$$

เมื่อ  $\rho_w$  คือความหนาแน่นของน้ำ ( $kg/m^3$ )

### สมการพลังงานของระบบที่มีหลายองค์ประกอบ

การถ่ายเทพลังงานของระบบที่มีหลายองค์ประกอบ เป็นผลเนื่องจากระบวนการถ่ายเทความร้อน มวลสาร และโมเมนตัม โดยปกติจะทำการศึกษาแยกเป็นแต่ละกระบวนการ แต่ในทางปฏิบัติมีหลายกรณีที่ระบบมีกระบวนการเกิดขึ้นพร้อมกันคู่ใดคู่หนึ่งหรือเกิดขึ้นพร้อมกันทั้ง 3 กระบวนการ เมื่อใดก็ตามที่มีกระบวนการเกิดขึ้นพร้อมกัน การวิเคราะห์ปัญหาจะมีความยุ่งยากและซับซ้อนขึ้น เพราะกระบวนการหนึ่งอาจมีผลกระทบกับอีกกระบวนการหนึ่ง ดังนั้นเมื่อเกิดการถ่ายเทความร้อนพร้อมกับการถ่ายเทมวล ย่อมหมายความว่า การถ่ายเทมวลอาจมีผลต่อการถ่ายเทความร้อน (เปี่ยมสุข สุวรรณคุณ, 2542)

Bird, Stewart, and Lightfoot (2005) ได้เสนอสมการพลังงานในระบบหลายองค์ประกอบ (multi-component system) อันเนื่องมาจากผลของกระบวนการถ่ายเทความร้อน มวลสาร และโมเมนตัม ที่เกิดขึ้นพร้อมกัน หากไม่พิจารณาผลเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก รูปแบบความสัมพันธ์เป็นไปตามกฎอนุรักษ์ (Conservation law) มีสมการดังนี้

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{อัตราการเปลี่ยนแปลง} \\ \text{ปริมาณความร้อน มวลสาร} \\ \text{และโมเมนตัมต่อปริมาตร} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{ปริมาณที่เข้าและออกสุทธิ} \\ \text{ของความร้อน มวลสาร} \\ \text{และโมเมนตัมต่อปริมาตร} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{อัตราของปริมาณความร้อน} \\ \text{มวลสาร และโมเมนตัม} \\ \text{ที่ผลิตขึ้นเองต่อปริมาตร} \end{array} \right\} \quad (2.30)$$

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = -(\nabla \cdot \mathbf{q}) - (\boldsymbol{\tau} : \nabla \mathbf{v}) + \left( \frac{\partial \ln \hat{V}}{\partial \ln T} \right)_{p, x_i} \frac{Dp}{Dt} + \sum_{i=1}^n \bar{H}_i [(\nabla \cdot \mathbf{J}_i) - R_i] \quad (2.31)$$

เมื่อ	$\rho$	คือความหนาแน่นทั้งหมดของวัสดุ ( $\text{kg/m}^3$ )
	$C_p$	คือค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุ ( $\text{KJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ )
	$T$	คืออุณหภูมิ ( $^\circ\text{C}$ )
	$t$	คือเวลา (s)
	$\mathbf{q}$	คือฟลักซ์การนำความร้อน ( $\text{W/m}^2$ )
	$\boldsymbol{\tau}$	คือแรงเฉือน ( $\text{kg/m} \cdot \text{s}^2$ )
	$\mathbf{v}$	คือความเร็ว (m/s)
	$\hat{V}$	คือปริมาตรจำเพาะ ( $\text{m}^3/\text{kg}$ )
	$p$	คือความดัน ( $\text{kg/m} \cdot \text{s}^2$ )
	$\bar{H}_i$	คือเอนทาลปีย่อยเชิงโมล (J/mol)
	$\mathbf{J}_i$	คือฟลักซ์เชิงโมลขององค์ประกอบย่อย ( $\text{mol/s} \cdot \text{m}^2$ )
	$R_i$	คืออัตราการเกิดปฏิกิริยาเชิงโมล ( $\text{mol/s} \cdot \text{m}^3$ )

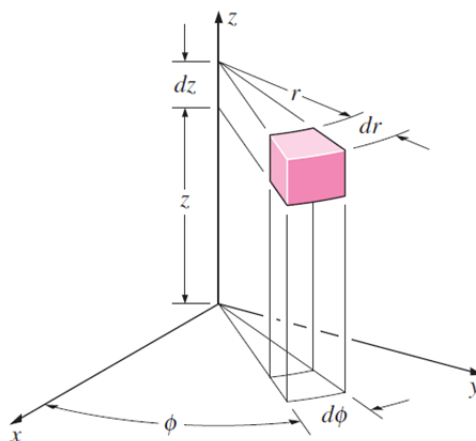
โดยที่พลังงานที่สะสมภายในวัตถุ (เทอมทางซ้ายมือ) มีค่าเท่ากับพลังงานที่เข้า ออก เนื่องจากการนำความร้อน (เทอมที่สอง) พลังงานที่เกิดจากแรงเนื่องจากความหนืดของของไหล (เทอมที่สาม) พลังงานที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความดันและปริมาตร (เทอมที่สี่) และการส่งผ่านพลังงานเนื่องจากการแพร่ของของไหล และการผลิตพลังงานจากปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ (เทอมสุดท้าย) จากสมการดังกล่าวหากไม่พิจารณาเทอมที่สองและเทอมที่สาม โดยถือว่าภายในวัตถุของไหลมีความเร็วในการแพร่น้อยมากจนไม่ส่งผลต่อการขยายตัวของความหนืด (viscous dissipation) ระบบมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรและความดันน้อยมาก และไม่พิจารณาผลเนื่องจากแรงภายนอกอื่น ๆ อีกทั้งในเทอมสุดท้ายภายในวัตถุไม่มีการอัตราผลิตพลังงานจากปฏิกิริยาเคมี เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นภายในดินนั้นส่วนใหญ่จะเป็นกระบวนการนำความร้อน (Hillel, 1998) ซึ่งเมื่อเกิดการถ่ายเทความร้อนจะส่งผลต่อการถ่ายเทมวล ดังนั้นสมการ (2.31) สามารถลดรูปได้ดังนี้

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = k \nabla^2 T + \sum_{i=1}^n \bar{H}_i (\nabla \cdot J_i) \quad (2.32)$$

ในเทอมของการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อนในวัตถุที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกสามารถวิเคราะห์โดยใช้สมการในระบบพิกัดทรงกระบอกที่สถานะไม่คงตัว (Cengel, 2003) ดังภาพที่ 2.2 มีสมการดังนี้

$$k \nabla^2 T = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left( kr \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2.33)$$

เมื่อ	k	คือค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (thermal conductivity) (W/m-K)
	r	คือตำแหน่งในทิศทาง r
	$\phi$	คือตำแหน่งในทิศทาง $\phi$
	Z	คือตำแหน่งในทิศทาง z



ภาพที่ 2-2 ลักษณะการวิเคราะห์ปริมาตรในระบบพิกัดทรงกระบอก (Cengel, 2003)

การถ่ายเทมวลภายในวัสดุจะพิจารณาจากสมการความต่อเนื่องของสารที่มีหลายองค์ประกอบ ซึ่งมีการอธิบายการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้นของมวลแต่ละองค์ประกอบที่ขึ้นกับเวลา ตำแหน่ง ในบริเวณใด ๆ โดยวิธีการแพร่ (diffusion) และวิธีการพา (convection) สามารถเขียนสมการได้ดังนี้ (Bird et al., 2005)

$$\frac{D\rho_i}{Dt} = -\rho_i (\nabla \cdot \mathbf{v}) - (\nabla \cdot \mathbf{j}_i) \quad (2.34)$$

เมื่อเทอมทางซ้ายมือคือการอัตราเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นขององค์ประกอบใด ๆ ภายในวัตถุ เทอมที่สองคือการถ่ายเทมวลด้วยวิธีการพา เทอมที่สามคือการถ่ายเทมวลด้วยวิธีการแพร่ หากพิจารณาว่าระบบมีเฉพาะการถ่ายเทมวลด้วยวิธีการแพร่เท่านั้น ดังนั้นสมการ (2.34) สามารถเขียนสมการ ได้ดังนี้

$$\frac{D\rho_i}{Dt} = -(\nabla \cdot j_i) \quad (2.35)$$

จากกฎการแพร่ข้อที่หนึ่งของฟิค (Fick's first law of diffusion). ที่แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลต่อปริมาตรหรือฟลักซ์ของมวลที่มีการแพร่ในทิศทางต่าง ๆ สามารถเขียนได้เป็น

$$j_i = -\rho D_m (\nabla \cdot \omega) \quad (2.36)$$

เมื่อ  $\rho_i$  คือความหนาแน่นขององค์ประกอบย่อย ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $j_i$  คือฟลักซ์เชิงมวลขององค์ประกอบย่อยของวัสดุ ( $\text{kg/s}\cdot\text{m}^2$ )  
 $D_m$  คือสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (moisture diffusion coefficient) ( $\text{m}^2/\text{s}$ )  
 $\omega$  คือสัดส่วนความชื้นในวัสดุ (%)

จากสมการ (2.35) และ (2.36) สามารถแสดงสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} = \rho D_m \nabla^2 \omega \quad (2.37)$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นขององค์ประกอบใด ๆ ภายในวัตถุกับสัดส่วนความชื้น สามารถหาอัตราการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนความชื้นภายในวัตถุได้เป็น

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = D_m \nabla^2 \omega \quad (2.38)$$

เมื่อนำสมการ (2.37) และ สมการ (2.38) แทนในสมการ (2.32) จะได้สมการอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในวัตถุเนื่องจากการถ่ายความร้อนและมวลเป็น

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho C_p} \nabla^2 T + \frac{H}{C_p} \frac{\partial \omega}{\partial t} \quad (2.39)$$

เมื่อ  $H$  คือค่าพลังงานความร้อนในการระเหยน้ำหนึ่งหน่วยมวล ( $\text{kJ/kg}$ )

โดยที่สมการ (2.38) และสมการ (2.39) เป็นสมการเริ่มต้นในศึกษาการถ่ายเทมวลและความร้อนที่เกิดต่อเนื่องพร้อมกันในวัตถุตามลำดับ ซึ่งมีเงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขตในการพิจารณาดังนี้

เงื่อนไขเริ่มต้น ที่  $t = 0$

$$T = T_i, \quad \omega = \omega_i \quad (2.40)$$

เงื่อนไขขอบเขตที่ 1 เมื่อ  $z = 0, 0 < r < D, t > 0$

### 1. สมดุลพลังงานและสมดุลมวลกรณีไม่มีวัสดุคลุมดิน

ปริมาณความร้อนที่ได้จากรังสีอาทิตย์บริเวณผิวดิน บางส่วนจะถูกดูดกลืนและส่งผ่านไปยังดินที่ลึกลงไปทำให้อุณหภูมิดินมีค่าสูงขึ้น อีกบางส่วนจะมีการถ่ายเทความร้อนออกไปยังสิ่งแวดล้อมรอบนอก และเกิดกระบวนการระเหยน้ำที่บริเวณผิวดิน ซึ่งสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$Q_{SL} = Q_{CV} + Q_{CD} + Q_{RD} + Q_{MD} \quad (2.41)$$

เมื่อ  $Q_{SL}$  คือพลังงานความร้อนจากรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบผิวดิน ( $W/m^2$ )

$Q_{CD}$  คือการถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีการนำความร้อนในดิน ( $W/m^2$ )

$Q_{RD}$  คือการแผ่รังสีความร้อนระหว่างผิวดินกับท้องฟ้า ( $W/m^2$ )

$Q_{MD}$  คือพลังงานเนื่องจากการถ่ายเทมวล ( $W/m^2$ )

ในส่วนของการถ่ายเทมวลที่ผิวดิน ความชื้นที่ผิวดินจะสูญเสียให้แก่บรรยากาศเนื่องจากการพามวลและการแพร่มวลเนื่องจากความชื้นที่แตกต่างกันในแต่ละระดับความลึก ซึ่งสมดุลมวลสามารถหาได้จาก

$$M_{CV} = M_{CD} \quad (2.42)$$

เมื่อ  $M_{CV}$  คือการถ่ายเทมวลด้วยการพาที่บริเวณผิวดิน ( $kg/s$ )

$M_{CD}$  คือการแพร่ความชื้นในดิน ( $kg/s$ )

โดยที่ การถ่ายเทมวลด้วยวิธีการพาสามารถหาได้จาก

$$M_{CV} = h_m(\rho_{v,s} - \rho_{v,\infty}) \quad (2.43)$$

เมื่อ  $h_m$  คือสัมประสิทธิ์การพามวล (mass transfer coefficient) (m/s)  
 $\rho_{v,s}$  คือความหนาแน่นของไอน้ำที่ผิวดิน ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $\rho_{v,\infty}$  คือความหนาแน่นของไอน้ำในอากาศ ( $\text{kg/m}^3$ )

## 2. สมดุลพลังงานและสมดุลมวลกรณีคลุมด้วยวัสดุคลุมดิน

ปริมาณความร้อนที่ได้จากรังสีอาทิตย์บริเวณผิวดินที่มีวัสดุคลุมดินจะแตกต่างจากกรณีไม่มีวัสดุคลุมดิน โดยปริมาณรังสีอาทิตย์ส่วนหนึ่งจะส่งผ่านมายังผิวดินได้ตามคุณสมบัติเฉพาะตัวของการส่งผ่านแสงของวัสดุคลุมดินแต่ละชนิด และบางส่วนจะถูกสะท้อนและดูดกลืนไว้ที่วัสดุคลุมดิน จึงทำให้วัสดุคลุมดินมีอุณหภูมิสูงขึ้น ความร้อนจากวัสดุคลุมดินนี้ยังสามารถก่อให้เกิดกระบวนการถ่ายเทความร้อน ได้แก่ กระบวนการแผ่รังสีความร้อนและการพาความร้อนตามธรรมชาติระหว่างวัสดุคลุมดินกับผิวดิน ส่วนการถ่ายเทมวลจะถือว่าไม่มีการถ่ายเทมวลกับบรรยากาศแวดล้อมเหนือผิวดิน ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น สมดุลพลังงานในปริมาตรควบคุม

$$Q_{SL,ml} = Q_{CV,s-p} + Q_{CD} + Q_{RD,s-p} - Q_{MD} \quad (2.44)$$

เมื่อ  $Q_{SL,ml}$  คือความร้อนจากรังสีดวงอาทิตย์ที่ส่งผ่านจากวัสดุคลุมดินมายังผิวดิน ( $\text{W/m}^2$ )  
 $Q_{CV,s-p}$  คือการพาความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างวัสดุคลุมดินกับผิวดิน ( $\text{W/m}^2$ )  
 $Q_{RD,s-p}$  คือการแผ่รังสีความร้อนระหว่างวัสดุคลุมดินกับผิวดิน ( $\text{W/m}^2$ )

เงื่อนไขขอบเขตที่ 2 เมื่อ  $z = L$ ,  $0 < r < D$  และ  $r = 0$  และ  $r = D$ ,  $0 < z < L$  โดย  $t > 0$

สมดุลพลังงานและสมดุลมวล

$$-k\nabla T = 0 \quad (2.45)$$

$$-D_m \nabla \omega = 0 \quad (2.46)$$



## รังสีอาทิตย์และการประมาณรังสีอาทิตย์

แสงอาทิตย์ที่ตกบนพื้นผิวที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของโลกจะมีค่าแตกต่างกันเนื่องจากปัจจัยหลายต่าง ๆ เช่น ตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ วันและเวลา สภาพอากาศ ความชื้นในอากาศ เมฆและฝุ่นควัน ตลอดจนสภาพแวดล้อมบริเวณนั้น ซึ่งรังสีอาทิตย์ที่ตกบนพื้นโลกแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

1. รังสีตรง (Direct or Beam radiation) เป็นรังสีที่ได้จากรังสีอาทิตย์โดยตรง ทำให้มีทิศทางที่แน่นอนสามารถนำไปใช้งานได้ดี ทิศทางของรังสีตรงอยู่ในแนวลำแสงอาทิตย์
2. รังสีกระจาย (Diffuse Radiation) เป็นรังสีอาทิตย์ที่ได้รับหลังจากที่มีการกระจายหักเห และสะท้อนในชั้นบรรยากาศหรือสิ่งแวดล้อม มีทิศทางไม่แน่นอนและไม่เป็นระเบียบ
3. รังสีรวม (Total or Global Radiation) เป็นผลรวมของรังสีตรงและรังสีกระจาย หรืออาจหาได้จากการรวมความเข้มรังสีอาทิตย์ตลอดช่วงความยาวคลื่น สำหรับกรณีผิวรับแสงเป็นพื้นราบ รังสีรวมจะมาจากครึ่งทรงกลมท้องฟ้าโดยไม่มีส่วนมาจากผิวโลก

การประมาณรังสีอาทิตย์จะหาได้จาก ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยรังสีรวมรายเดือนและชั่วโมงที่มีแดด ดังนี้เมฆเฉลี่ยรายเดือน และความสัมพันธ์ระหว่างรังสีรวมรายชั่วโมงกับรังสีรายวัน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยรังสีรวมรายเดือนและชั่วโมงที่มีแดด  
ค่ารังสีรวมรายเดือนเฉลี่ยบนพื้นราบซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่ารังสีนอกบรรยากาศโลกสามารถคำนวณได้เป็น

$$\bar{H} = \bar{H}_0 \left[ a + b \left( \frac{\bar{s}}{N} \right) \right] \quad (2.47)$$

$$\begin{aligned} \bar{H}_0 = & \frac{24 \times 3600}{\pi} I_{sc} \left[ 1 + 0.033 \cos \left( \frac{360 \times n}{365} \right) \right] \\ & \times \left[ \cos \phi \cos \delta \cos \omega_s + \left( \frac{2\pi \omega_s}{360} \right) \sin \phi \sin \delta \right] \end{aligned} \quad (2.48)$$

เมื่อ	$\bar{H}$	คือค่าเฉลี่ยรายเดือนของค่ารายวันพลังงานรังสีรวมบนพื้นราบ ( $\text{MJ/m}^2 \text{ day}$ )
	$\bar{H}_0$	คือค่ารังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก ( $\text{MJ/m}^2\text{-day}$ )
	$\bar{s}$	คือชั่วโมงที่มีแดดรายเดือน (ตารางที่ 2.1)
	$N$	คือความยาวนานของวันเฉลี่ยรายเดือน มีค่าเท่ากับ $\frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta)$
	$a, b$	คือสัมประสิทธิ์ถดถอย (ตารางที่ 2.2)
	$I_{sc}$	คือค่าคงที่รังสีอาทิตย์ มีค่าเท่ากับ $1,367 \text{ (W/m}^2\text{)}$

- n คือวันที่ของปี  
 $\theta$  คือเส้นรุ้งของตำแหน่งที่ต้องการทราบรังสี  
 $\delta$  คือมุมเดคลิเนชัน (Declination Angle) มีค่าเท่ากับ  $23.45 \sin \left[ 360 \left( \frac{284+n}{365} \right) \right]$   
 $\omega_s$  คือมุมพระอาทิตย์ขึ้น มีค่าเท่ากับ  $\cos^{-1}(\tan \theta \tan \delta)$

ตารางที่ 2-1 ชั่วโมงที่มีแดดเฉลี่ยรายเดือน (ชนเทพ พิทยราชศักดิ์, 2551)

Month	$\bar{s}$	Month	$\bar{s}$
January	8.16	July	5.17
February	8.29	August	4.65
March	8.60	September	4.65
April	7.44	October	5.05
May	6.54	November	5.53
June	4.98	December	7.88

## 2. ดัชนีเมฆเฉลี่ยรายเดือน

ดัชนีเมฆเฉลี่ยรายเดือน ( $\bar{K}_t$ ) คืออัตราส่วนระหว่างรังสีอาทิตย์เฉลี่ยรายเดือนที่ตกบนพื้นราบในแนวระดับ ( $\bar{H}$ ) ต่อค่าเฉลี่ยรายเดือนของรังสีอาทิตย์ในแนวระดับเหนือบรรยากาศ ( $\bar{H}_0$ ) สมการเป็น

$$\bar{K}_t = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} \quad (2.20)$$

## 3. ความสัมพันธ์ระหว่างรังสีรวมรายชั่วโมงกับรังสีรายวัน

Collares-Pereira and Rabl (1979) ได้เสนอสมการหาความสัมพันธ์ระหว่างรังสีรวมรายชั่วโมงกับรังสีรวมรายวันดังนี้ (Tiwari, 2013)

$$I(t) = r_t H_0 / 3600 \quad (2.21)$$

$$r_t = \frac{\pi}{24} (a + b \cos \omega) \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - (2\pi \omega_s / 360) \cos \omega_s} \quad (2.22)$$

เมื่อ  $a = 0.409 + 0.5016\sin(\omega_s - 60)$  และ  $b = 0.6609 - 0.4767\sin(\omega_s - 60)$

เมื่อ  $I(t)$  คือรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยรายเดือน ( $W/m^2$ )

$\omega$  คือ มุมชั่วโมง (องศา)  $\omega = (ST - 12) \times 15^\circ$

ST คือเวลาดวงอาทิตย์ (ชั่วโมง)

ตารางที่ 2-2 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างรังสีรวมรายวันเฉลี่ยรายเดือนและชั่วโมงที่มีแดด

Station	Mean of $\bar{K}_t$	Coefficient		R <sup>+</sup>	RSME <sup>++</sup>
		a	b		
KMUTT	0.5354	0.3097*	0.3914*	0.8776	0.0612
Changmai	0.5694	0.3579	0.3531	0.9049	0.0624
Ubon Raja Thani	0.5534	0.2626	0.4526	0.9369	0.0695
Hat Yai	0.5271	0.2733	0.4344	0.8584	0.0416

\*improved by Satisrisomboon <sup>+</sup>Correlation coefficient <sup>++</sup>Root mean square error (ชนเทพ พิทยราชศักดิ์, 2551)

## งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 1. งานวิจัยในประเทศ

นิพนธ์ กิตติดี, โสระยา ร่มรังษิ และ ณัฐา โพธาภรณ์ (2556) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิอากาศและสภาพดินที่มีผลต่อกลิ้วไม้นางกราย (*Habenaria lindleyana* Steud.) ในพื้นที่ป่าเต็งรังบริเวณศูนย์การศึกษามหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดลำพูน โดยเก็บข้อมูลทุก 1 เดือน ตั้งแต่ปี 2553 - 2555 พบว่าอุณหภูมิดินเฉลี่ย ความชื้นดินเฉลี่ย ที่ระดับความลึก 10 - 15 cm และอุณหภูมิอากาศ มีค่าแตกต่างกันในแต่ละฤดูกาลและในแต่ละพื้นที่ โดยอุณหภูมิดินเฉลี่ย และอุณหภูมิอากาศในฤดูร้อนมีค่าสูงที่สุด รองลงมาเป็นฤดูหนาว และต่ำสุดคือฤดูฝน ความชื้นดินพบว่าในฤดูฝนจะมีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือฤดูร้อนและฤดูหนาวตามลำดับ ส่วนค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณอินทรีย์วัตถุ ปริมาณไนโตรเจน และความเข้มข้นฟอสฟอรัส มีค่าใกล้เคียงกันในทุกฤดูกาล ในขณะที่ความเข้มข้นโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน พบว่าในฤดูร้อนจะมีค่ามากกว่า

ฤดูฝนและฤดูหนาว และผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิอากาศไม่เป็นอุปสรรคต่อการเจริญเติบโตของกล้วยไม้ในประเทศ

มาหะมะพาเคร์ อายุ (2554) ได้พัฒนาตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์เพื่อทำนายอุณหภูมิดิน จังหวัดพัทลุงบนพื้นฐานสมการการนำความร้อนในหนึ่งมิติ โดยนำสมมูลพลังงานที่ผิวดินมาเป็นเงื่อนไขขอบสำหรับตัวแบบเชิงตัวเลขและตัวแบบวิเคราะห์สร้างขึ้นภายใต้สมมุติฐานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดินในคลื่นรูปไซน์ พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลกับการทดลองจริง โดยพบว่าอุณหภูมิดินที่ได้จากแบบเชิงตัวเลขและตัวแบบเชิงวิเคราะห์มีความสอดคล้องกับข้อมูลการทดลอง นอกจากนี้ยังได้ศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับสมมูลพลังงานที่ผิวดินที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดินพบว่า การเพิ่มขึ้นของความชื้นสัมพัทธ์ การดูดกลืนรังสีและอุณหภูมิอากาศ จะทำให้อุณหภูมิดินมีค่าสูงขึ้น และเมื่อการระเหยและความเร็วลมสูงขึ้นจะทำให้ค่าอุณหภูมิดินลดลง

อัญชุลี รัตนภินันท์ชัย (2554) ได้ศึกษาผลของการนำความร้อนของดินที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความชื้นดินต่อปริมาณการใช้น้ำของยางพารา โดยเก็บข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศภายในและเหนือทรงพุ่ม ข้อมูลพลังงานแสงอาทิตย์ อุณหภูมิและความชื้นดินที่ระดับความลึก 0.0 และ 0.10 m ทุก 5 นาที เป็นระยะเวลา 2 ปี ตั้งแต่ 1 มกราคม 2551 – 31 ธันวาคม 2552 พบว่า ในช่วงเวลาเดียวของแต่ละปีมีค่าการใช้น้ำไม่เท่ากัน ทั้งนี้เป็นผลมาจากปริมาณน้ำฝน พลังงานแสงอาทิตย์ ความเร็วลม ที่ส่งผลต่ออุณหภูมิดินและความชื้นดินแตกต่างกันในแต่ละปี นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับอายุและช่วงการเจริญเติบโต เมื่อวิเคราะห์ค่าความชื้นดินกับค่าการนำความร้อนพบว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยเมื่อความชื้นดินต่ำค่าการนำความร้อนของดินจะมีค่าน้อย ส่วนความชื้นดินสูงค่าการนำความร้อนของดินจะมีค่าสูงเช่นกัน

จักรพงษ์ จันทวงศ์, ฌฐา โพธารภรณ์ และ อรพรรณ ฉัตรสิริรุ่ง (2553) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิและความชื้นดินในป่าเต็งรัง บริเวณอุทยานแห่งชาติดอยสุเทพ-ปุย จังหวัดเชียงใหม่ ในฤดูกาลต่าง ๆ ตั้งแต่ปี 2551 – 2552 โดยบันทึกข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นดินทุก 15 วัน ที่มีต่อความหลากหลายของราบนโดไฟท์ในรากกล้วยไม้สกุลว่านจงนาง พบว่าอุณหภูมิดินเฉลี่ยในฤดูฝนและฤดูร้อนแตกต่างกับฤดูหนาวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยฤดูร้อนและฤดูฝนจะมีอุณหภูมิดินเฉลี่ยใกล้เคียงกันและมีค่าสูงกว่าฤดูหนาว ส่วนความชื้นดินเฉลี่ยในฤดูหนาวจะแตกต่างจากฤดูฝนและฤดูร้อนอย่างมีนัยสำคัญ โดยฤดูฝนจะมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือฤดูร้อน และฤดูฝนตามลำดับ โดยในแต่ละฤดูกาลมีสกุลของราที่พบแตกต่างกันไป จากการคำนวณค่า Isolation rate , Colonization rate (%) และดัชนีชี้วัดความหลากหลายของแซนนอนและวีเนอร์ (Shannon–Wiener Index) พบว่าฤดูฝนให้ค่าทั้งหมดสูงที่สุด คือ 1.84, 87.50 และ 2.09 ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบดัชนีความคล้ายคลึงกันของชนิด (similarity index) พบว่าชนิดของราในฤดูร้อนและฤดูหนาว มี

ความคล้ายคลึงกันมากกว่าในฤดูฝน แสดงให้เห็นว่าปัจจัยทางกายภาพที่เปลี่ยนไปตามฤดูกาลต่าง ๆ มีผลต่อชนิดและความหลากหลายของราเอนโคไฟท์

นฤทธิ์ กล่อมพงศ์ (2551) ได้ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนในดินเพื่อดูการกระจายตัวของอุณหภูมิ ณ ที่ระดับความลึกและเวลาต่าง ๆ ในจังหวัดพัทลุง โดยอาศัยวิธีผลต่างสืบเนื่องแบบไม่ชัดแจ้ง และใช้โปรแกรม Matlab ในการแก้สมการดังกล่าวด้วยวิธีการกำจัดแบบเกาส์และวิธีการทำซ้ำแบบเกาส์-ไซเคล โดยทดลองเปรียบเทียบกับดินที่ระดับผิวดินจนถึงระดับความลึก 3 m ผลการเปรียบเทียบพบว่าแบบจำลองสามารถนำมาใช้ทำนายอุณหภูมิดินที่บริเวณดังกล่าวได้ และจากการทดลองยังพบอีกว่าดินมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในแนวระดับความลึกเท่านั้น โดยมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิดินอยู่ในระดับความลึกน้อย ๆ ใกล้ผิวดิน ส่วนที่ระดับความลึกมาก ๆ อุณหภูมิดินจะมีค่าคงที่

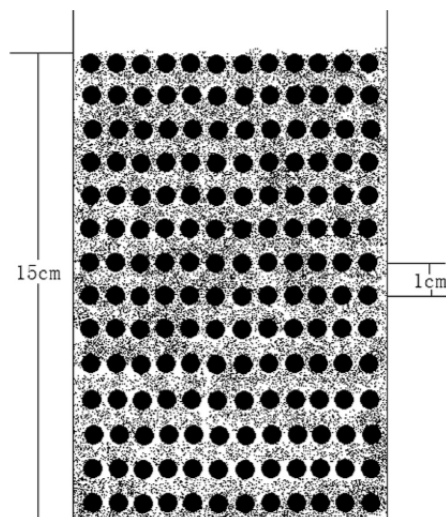
ธนเทพ พิทยราชศักดิ์ (2551) ได้ทำการศึกษาถึงการลดระยะเวลาในการฆ่าเชื้อในดินด้วยพลังงานแสงอาทิตย์โดยการใช้พลาสติกคลุมดินให้สั้นลงและมีประสิทธิภาพสูงมากขึ้น โดยการพัฒนาตัวรับรังสีอาทิตย์รูปประกอบพาราโบลแบบไม่สมมาตร (ACPC) ให้สามารถผลิตน้ำร้อนควบคู่ไปด้วย เพื่อที่จะนำมาใช้ร่วมกับกระบวนการการฆ่าเชื้อในดินด้วยพลังงานแสงอาทิตย์โดยการใช้พลาสติกโดยสามารถลดระยะเวลาในการทำการฆ่าเชื้อในดินด้วยพลังงานแสงอาทิตย์โดยการใช้พลาสติกจาก 4 - 6 สัปดาห์เหลือเพียง 4 ชั่วโมง ซึ่งอุณหภูมิดินที่ระดับความลึกต่าง ๆ มีค่าใกล้เคียงกันประมาณ  $41.25\text{ }^{\circ}\text{C}$  ที่ระดับความลึกไม่เกิน 50 cm

## 2. งานวิจัยในต่างประเทศ

Jun Zhang, Qun Chen, and Changfu You (2015) ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนพื้นฐานของการถ่ายเทความร้อนและมวล ในหนึ่งมิติในสภาวะไม่คงตัว เพื่อทำนายการกักเก็บน้ำในดิน โดยมีการนำถ่านชีวภาพ (Biochar) มาช่วยในการกักเก็บน้ำในดินทราย และแบบจำลองนี้ยังเพิ่มในส่วนของผลเนื่องจากสภาพแวดล้อมต่าง ๆ เช่นความชื้นสัมพัทธ์ และการสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล รวมถึงมีการตรวจสอบความถูกต้องกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองจริง โดยพบว่าการใช้ถ่านชีวภาพในดินทรายจะช่วยให้ดินสามารถกักเก็บน้ำได้ดีขึ้นเมื่อมีความเร็วลมเพิ่มขึ้นและการกักเก็บน้ำจะลดลงเมื่อมีความชื้นสัมพัทธ์สูง ดังภาพที่ 2-3

Banimahd and Zand-Parsa (2013) ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับความชื้นและอุณหภูมิในดิน (SWCT) เพื่อทำนายพลั๊กซ์ของน้ำ (ประกอบด้วยน้ำที่เป็นของเหลวและไอน้ำ) และความชื้นในดิน สมการควบคุมจะถูกแก้สมการโดยใช้ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง (finite difference method) แบบชัดแจ้ง (Explicit method) และมีการทดลองเก็บข้อมูลโดยใช้

อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ และ หัววัด TRD สำหรับวัดปริมาณความชื้น ติดตั้งในดินที่ระดับความลึก 0.05, 0.35, และ 0.5 m และจะใช้สมการของ Penman–Monteith's ในหาการระเหยจริงของผิวดิน



ภาพที่ 2-3 แผนภาพการทดลองการกักเก็บน้ำ

Yuge, Shigematsu, Anan, and Yoshiyuki (2012) ทำการศึกษาผลกระทบของรากที่อยู่ในดินที่มีน้ำและการเคลื่อนไหวยังของน้ำเพื่อปรับปรุงสภาพแวดล้อมของการเจริญเติบโตของพืชและประสิทธิภาพการให้น้ำหรือชลประทานแก่พืช เพื่อจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำในดินโดยพิจารณาผลรากลึกที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของดิน แบบจำลองเชิงตัวเลขจะบรรยายการถ่ายเทน้ำในดินและความร้อน การทดลองเพาะปลูกจะนำไปสู่การแสดงให้เห็นผลกระทบของรากพืชที่อยู่ในดินที่มีน้ำและใช้ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ความสัมพันธ์ระหว่างดินที่มีน้ำและปริมาณรากพืชในดิน พบว่าในบริเวณดินที่มีน้ำมาก ๆ บริเวณนั้นก็จะจะมีปริมาณรากเพิ่มขึ้นด้วย

Jahangir and Sadrnejad (2012) ได้ทำการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการถ่ายเทความร้อน ความชื้น และอากาศ ควบคู่กันภายในดินที่ไม่อิ่มตัว เพื่อจะศึกษาผลของความชื้นโดยปริมาตร การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และความดันของอากาศแห้งภายในดิน โดยใช้ความสัมพันธ์ของตัวแปร 3 ตัว ได้แก่ ค่าการนำความร้อน ค่าการแพร่ และค่าความจุความร้อน ซึ่งทำการทดลองเปรียบเทียบกับแบบจำลองโดยเก็บข้อมูลดินที่ใกล้กับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ฝังอยู่ในดิน ซึ่งพบว่าที่ตำแหน่งเดียวกันอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำความร้อนจะมีค่าน้อยกว่าปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับค่าความจุความร้อนจำเพาะ

De Castro and Rey (2011) พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายของการถ่ายเทความร้อนในสภาวะไม่สม่ำเสมอของดินที่อยู่ใต้พลาสติกคลุมดิน เพื่อศึกษาอิทธิพลของวัสดุคลุม

ดินที่แตกต่างกันที่ส่งผลต่ออุณหภูมิดินที่มีการความถี่ระยะต่าง ๆ กับเวลา สมการควบคุมเชิงอนุพันธ์คำนวณ โดยวิธี Galerkin Finite Element ซึ่งจะคำนึงถึงความไม่เป็นเชิงเส้นของการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างผิวดิน วัสดุคลุมดิน และบรรยากาศ โดยแบบจำลองจะมีการตรวจสอบความถูกต้องกับข้อที่ได้จากการทดลอง ซึ่งแบบจำลองนี้จะมีการคำนวณหาค่าคุณสมบัติที่เหมาะสมเชิงแสงของวัสดุคลุมดินและอุณหภูมิดินด้วยการวิเคราะห์ของทากุจิ เพื่อแสดงให้เห็นว่าวัสดุคลุมดินที่นิยมใช้อยู่ในประเทศโคลัมเบียไม่ได้เป็นสิ่งที่เหมาะสมที่สุดและให้ผลเชิงปริมาณของคุณสมบัติของวัสดุคลุมดินที่ควรจะใช้

กล่าวโดยสรุปจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง อุณหภูมิและความชื้นในดินเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช และต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงเกี่ยวกับเครื่องมือและระยะเวลานานในการศึกษาข้อมูล ดังนั้นการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายจึงเป็นสิ่งที่สามารถช่วยแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้ โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการสร้างและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายอุณหภูมิและความชื้นของดินที่ตำแหน่งต่าง ๆ ต้องอาศัยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนและมวล รวมถึงต้องทราบค่าคุณสมบัติทางกายภาพและทางฟิสิกส์ของดินรวมถึงคุณสมบัติวัสดุที่เกี่ยวข้องอย่างถูกต้อง เพื่อที่จะสามารถทำนายอุณหภูมิและความชื้นของดิน ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

## บทที่ 3

### การดำเนินการวิจัย

เป้าหมายหลักในงานวิจัยนี้คือต้องการทราบอุณหภูมิและความชื้นของดินที่มีและไม่มีวัสดุคลุมดินสำหรับการปลูกมะนาวในวงบ่อซีเมนต์ โดยสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายอุณหภูมิและความชื้นของดิน แล้วนำผลเฉลยที่ได้มาเปรียบเทียบกับการทดลองจริงเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ซึ่งจากการถ่ายเทพลังงานเนื่องจากกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารตามสมการ (2.41) และ (2.44) จำเป็นต้องทราบสมบัติทางกายภาพของดิน ได้แก่ ความหนาแน่น ค่าการนำความร้อน ความจุความร้อนจำเพาะ และสัมประสิทธิ์การแพร่มวล รวมถึงสมบัติทางแสงของวัสดุคลุมดินประกอบด้วยค่าการส่งผ่าน การสะท้อน และการดูดกลืนรังสี ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญในการทำนายอุณหภูมิและความชื้นดินสำหรับการปลูกมะนาวในวงบ่อซีเมนต์ ด้วยปัจจัยดังที่กล่าวงานวิจัยนี้จึงมีขั้นตอนการดำเนินงานดังต่อไปนี้

ตอนที่ 1 การสำรวจการปลูกมะนาวในวงบ่อซีเมนต์

ตอนที่ 2 สมบัติทางกายภาพของดินและสมบัติทางแสงของวัสดุคลุมดิน

ตอนที่ 3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายอุณหภูมิและความชื้นดินที่มีและไม่มีวัสดุคลุมดินสำหรับการปลูกมะนาวในวงบ่อซีเมนต์

ตอนที่ 4 การทดลองเปรียบเทียบเพื่อตรวจสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

#### การสำรวจการปลูกมะนาวในวงบ่อซีเมนต์

การสำรวจการปลูกมะนาวในวงบ่อซีเมนต์ เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และออกแบบการทดลอง การเลือกพื้นที่ในการสำรวจจะใช้วิธีการเลือกแบบบังเอิญ (Haphazard or Accidental sampling) ในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ได้แก่ จังหวัดชลบุรีและจังหวัดระยอง และสอบถามข้อมูลเชิงลึก (In-depth interview) ด้วยวิธีการสัมภาษณ์จากเกษตรกรผู้ปลูกมะนาวจำนวน 5 ตัวอย่าง โดยแบบสอบถามจะแบ่งคำถามออกเป็น 3 ส่วน (ภาคผนวก ก) ดังนี้

1. สภาพโดยทั่วไปของการปลูกมะนาวของเกษตรกร ได้แก่ ขนาดของวงบ่อ พันธุ์มะนาว อายุมะนาว จำนวนวงบ่อ ดินที่ใช้ปลูก
2. ลักษณะการปลูก ได้แก่ การให้น้ำ การกระตุ้นมะนาวให้ออกดอกนอกฤดู การใช้วัสดุคลุมดิน



3. ความรู้เกี่ยวกับอุณหภูมิและความชื้นดินที่เหมาะสมสำหรับการปลูกมะนาว รวมทั้งข้อเสนอแนะในการปลูกมะนาว

### สมบัติทางกายภาพของดินและสมบัติทางแสงของวัสดุคลุมดิน

สมบัติทางกายภาพของดินได้แก่ ความหนาแน่น ค่าการนำความร้อน ความจุความร้อนจำเพาะ และสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี รวมถึงสมบัติทางแสงของวัสดุคลุมดินประกอบด้วยค่าการส่งผ่าน การสะท้อน และการดูดกลืนรังสี ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญในการทำนายอุณหภูมิและความชื้นภายในดิน ซึ่งมีขั้นตอนการหาค่าตัวแปรทางความร้อนดังนี้

#### 1. ความหนาแน่นของดิน

การหาค่าความหนาแน่นของดินสามารถหาได้ โดยนำดินที่ใช้ในการทดลองมาอัดขึ้นรูปเป็นแผ่นขนาด  $15 \times 15 \times 1 \text{ cm}^3$  ตากไว้จนกระทั่งดินแห้งแข็งคงรูปได้ ดังภาพที่ 3-1 นำมาชั่งเพื่อบันทึกค่าน้ำหนักของดินและคำนวณค่าความหนาแน่นจากน้ำหนักของดินต่อปริมาตรของดิน



(ก)



(ข)



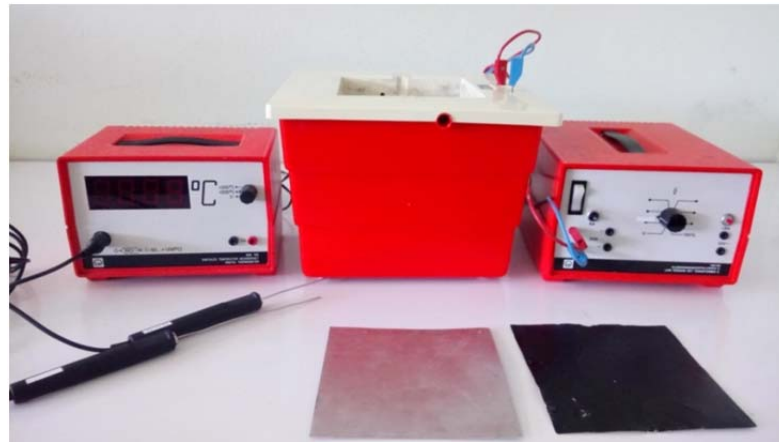
(ค)

ภาพที่ 3-1 การหาค่าความหนาแน่นของดิน (ก) การขึ้นรูปดิน (ข) ดินขึ้นรูป (ค) การชั่งน้ำหนักดิน

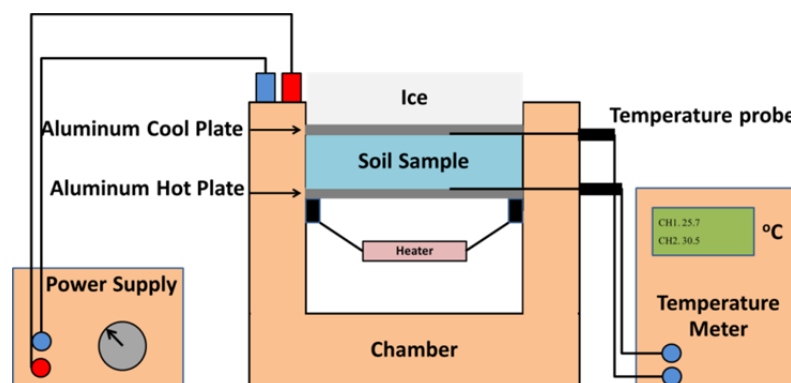
#### 2. การนำความร้อนของดิน

การหาค่าการนำความร้อนของดินจะใช้วิธีการวัดความแตกต่างระหว่างผิวทั้งสองด้านของดิน หรือวิธีแบบการไหลของความร้อน (heat flow meter: HFM) ซึ่งเป็นวิธีการวัดตามมาตรฐาน DIN 52672 วิธีนี้ค่อนข้างง่ายและรวดเร็ว ใช้วัสดุเพียงชิ้นเดียว โดยต้องออกแบบให้ความร้อนมีการไหลภายในวัสดุเพียงทิศทางเดียว ขณะที่ชุดทดลองค่าการนำความร้อนแบบแผ่นเดียว (Determining the thermal conductivity of building materials using the single-plate method) แสดงดังภาพที่ 3-2 อุปกรณ์ประกอบด้วย กล้องแคลอริมิเตอร์, แหล่งจ่ายกระแส 0 - 20V,

โพรบวัดอุณหภูมิแบบ NiCr-Ni type K จำนวน 2 โพรบ, ดิจิตัลเทอร์โมมิเตอร์ และแผ่นอลูมิเนียมจำนวน 2 แผ่น



ภาพที่ 3-2 ชุดทดลองค่าการหาค่าการนำความร้อนแบบแผ่นเดียว



ภาพที่ 3-3 การติดตั้งชุดทดลองการหาค่าการนำความร้อน

ขั้นตอนการเตรียมอุปกรณ์การทดลอง ดินที่ถูกนำมาอัดขึ้นรูปให้เป็นแผ่นแข็งขนาด  $15 \times 15 \times 1 \text{ cm}^3$  จากขั้นตอนการหาความหนาแน่น จะถูกนำมาวางไว้ในกล่องแคลอริมิเตอร์ โดยวางอยู่ระหว่างแผ่นอลูมิเนียม 2 แผ่น (แผ่นล่างจะเป็นแผ่นร้อน ที่รับความร้อนจากแผงวงจรให้ความร้อนภายในกล่องแคลอริมิเตอร์ ส่วนแผ่นบนจะเป็นแผ่นเย็นซึ่งได้รับความเย็นจากน้ำแข็ง) นำโพรบวัดอุณหภูมิเสียบเข้าไปที่ตำแหน่งผิวบนและผิวล่างของดินเพื่อวัดอุณหภูมิ ต่อเข้าเครื่องดิจิตัลเทอร์โมมิเตอร์เพื่ออ่านค่าอุณหภูมิ จากนั้นต่อวงจรเพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้ากับกล่องแคลอริมิเตอร์ ดังภาพที่ 3-3

### ขั้นตอนการทดลอง

2.1 ทำการเปิดแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับแผงวงจรทำความร้อนซึ่งติดตั้งอยู่ในกล่องแคลอริมิเตอร์ โดยปรับค่ากระแสไฟฟ้าแล้วรอนอุณหภูมิอากาศภายในกล่องมีค่าคงที่ประมาณ  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  จากนั้นทำการวัดกระแสไฟฟ้า (I) และศักย์ไฟฟ้า (V) เพื่อนำมาคำนวณกำลังไฟฟ้า (P) จากสมการ (Leybold Didactic, Physics Experiments)

$$P = IV \quad (3.1)$$

2.2 บันทึกค่าอุณหภูมิเริ่มต้นที่ผิวล่าง ( $T_{\text{bottom}}$ ) และผิวบน ( $T_{\text{top}}$ ) ของดิน โดยเก็บข้อมูลทุก 1 นาที เป็นระยะเวลาประมาณ 30 นาที

2.3 นำข้อมูลอุณหภูมิที่ผิวล่างและผิวบนของดินมาทำการคำนวณหาค่าการนำความร้อนของดิน จากสมการสมดุลพลังงาน

$$Q_{\text{electric}} = Q_{\text{Heat}} \quad (3.2)$$

$$P = \frac{kA(T_{\text{bottom}} - T_{\text{top}})}{x} \quad (3.3)$$

$$k = \frac{Px}{A(T_{\text{bottom}} - T_{\text{top}})} \quad (3.4)$$

เมื่อ	k	คือค่าการนำความร้อนของดิน (W/m-K)
	A	คือพื้นที่ผิวของดินแผ่น ( $\text{m}^2$ )
	x	คือความหนาของชั้นงาน (m)

### 3. ความจุความร้อนและค่าการแพร่ของดิน

สำหรับค่าความจุความร้อนและค่าการแพร่ของดินจะใช้วิธีการวิเคราะห์หาเนื้อดินโดยใช้ไฮโดรมิเตอร์ เพื่อหาสัดส่วนของดินทราย (Sand) ดินทรายแป้ง (Silt) และดินเหนียว (Clay) ในดินตัวอย่างโดยวิธีการวิเคราะห์เนื้อดินเป็นไปตามมาตรฐาน Standards Association of Australia. AS 1289.C6.2-1976 ซึ่งมีขั้นตอนการทดลองดังนี้ (เอกสารประกอบการวิเคราะห์หา Texture โดยวิธี Hydrometer)

3.1 เตรียมสารละลาย Calgon 5% ซึ่งเตรียมจาก Dry powered Sodium hexametaphosphate จำนวน 37.5 กรัม และ Anhydrous Sodium Carbonate จำนวน 7.94 กรัม ผสมในน้ำกลั่น ละลายจนหมดในปริมาตร 1 ลิตร

3.2 นำตัวอย่างดินมาบดละเอียดแล้วร่อนด้วยตะแกรงร่อนดินขนาด 2 mm จำนวน 50 กรัม ดังรูปที่ 3-4 (ก) เติงในบีกเกอร์แล้วผสม 5% Calgon ปริมาณ 100 มิลลิลิตร คนให้เข้ากันแล้วแช่ทิ้งไว้ค้างคืน ดังภาพที่ 3.4 (ข)



(ก)



(ข)

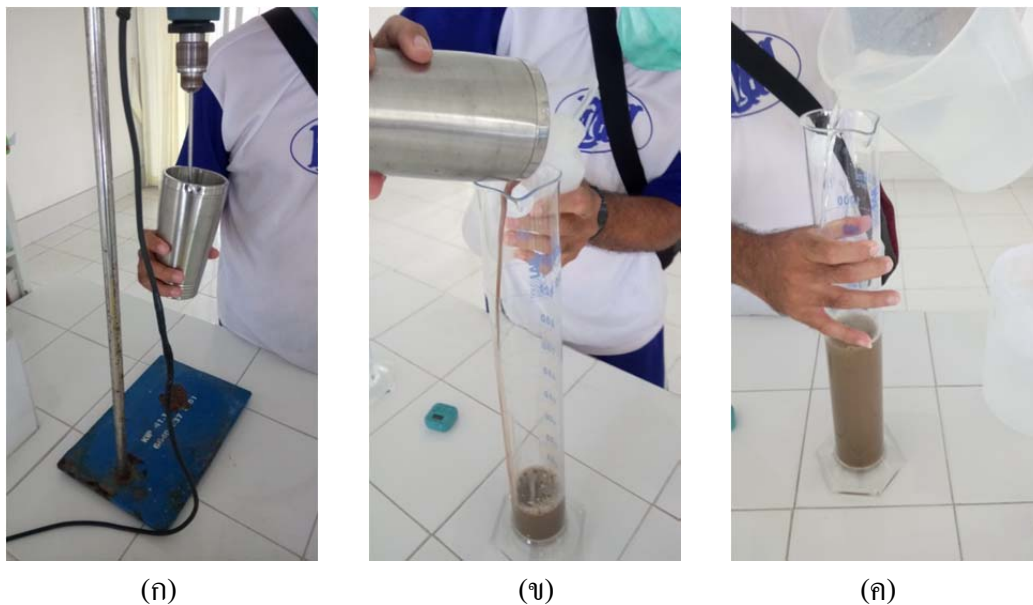
ภาพที่ 3-4 การเตรียมดินเพื่อใช้วิธีการวิเคราะห์หาเนื้อดิน (ก) ตัวอย่างดินร่อนด้วยตะแกรงร่อนดินขนาด 2 mm (ข) ดินตัวอย่างผสม Calgon 5%

3.3 นำดินที่ผสม Calgon 5% ในข้อที่ 2 ถ่ายเทลงใน dispersion cup เพื่อปั่นให้เข้ากันนาน 1-2 นาที จากนั้นนำดินถ่ายเทลงสู่ Sedimentation cylinder แล้วเติมน้ำกลั่นจนกระทั่งมีปริมาณ 1,000 มิลลิลิตร ดังภาพที่ 3-5

3.4 คนด้วย plunger ประมาณ 20 ครั้ง เพื่อให้อนุภาคดินกระจายสม่ำเสมอ จากนั้นเติม Amyl alcohol ประมาณ 1 หยดเพื่อลดปริมาณฟองอากาศ

3.5 นำไฮโกรมิเตอร์หย่อนลงในสารแขวนลอยของดินตัวอย่างแล้วบันทึกค่าที่อ่านได้โดยบันทึกค่าจากไฮโกรมิเตอร์ (Rs) ให้ได้ภายใน 40 วินาที พร้อมวัดอุณหภูมิของสารแขวนลอยของดินตัวอย่าง (Ts)

3.6 ปล่อยให้สารแขวนลอยของดินตัวอย่างทิ้งไว้เป็นเวลาประมาณเกือบ 2 ชั่วโมง (วัดก่อนครบ 2 ชั่วโมงประมาณ 1-2 นาที) จากนั้นหย่อนไฮโกรมิเตอร์ลงในสารแขวนลอยแล้วบันทึกค่าที่อ่านได้อีกครั้งหนึ่ง พร้อมวัดอุณหภูมิของสารแขวนลอยของดินตัวอย่าง



ภาพที่ 3-5 การผสมดินเพื่อใช้วิธีการวิเคราะห์หาเนื้อดิน (ก) ปั่นตัวอย่างดินใน dispersion cup  
(ข) เทดินตัวอย่างลงใน Sedimentation cylinder (ค) เติมน้ำกลั่น

3.7 ทำเหมือนกันอีกครั้งหนึ่ง โดยครั้งนี้จะใช้เพียงน้ำกลั่น (ซึ่งไม่ผสมกับดินตัวอย่าง) ผสมกับ 5% Calgon ปริมาณ 100 มิลลิลิตร คนให้เข้ากันแล้วใน Sedimentation cylinder อีกใบหนึ่ง พร้อมกับบันทึกค่าจากไฮโกรมิเตอร์ (Rb) และวัดอุณหภูมิของสารแขวนลอย (Tb) เพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิง (Blank) สำหรับเปรียบเทียบกับสารแขวนลอยของดินตัวอย่าง ดังภาพที่ 3-6

3.8 นำค่าที่อ่านได้จากไฮโกรมิเตอร์และค่าอุณหภูมิจากเทอร์โมมิเตอร์ ทั้งจากสารแขวนลอยของดินตัวอย่างกับน้ำกลั่น มาคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ของ ดินทราย ดินทรายแป้ง และ ดินเหนียว ดังสมการที่ (3.5) ซึ่งมีรายละเอียดวิธีการคำนวณ ดังต่อไปนี้

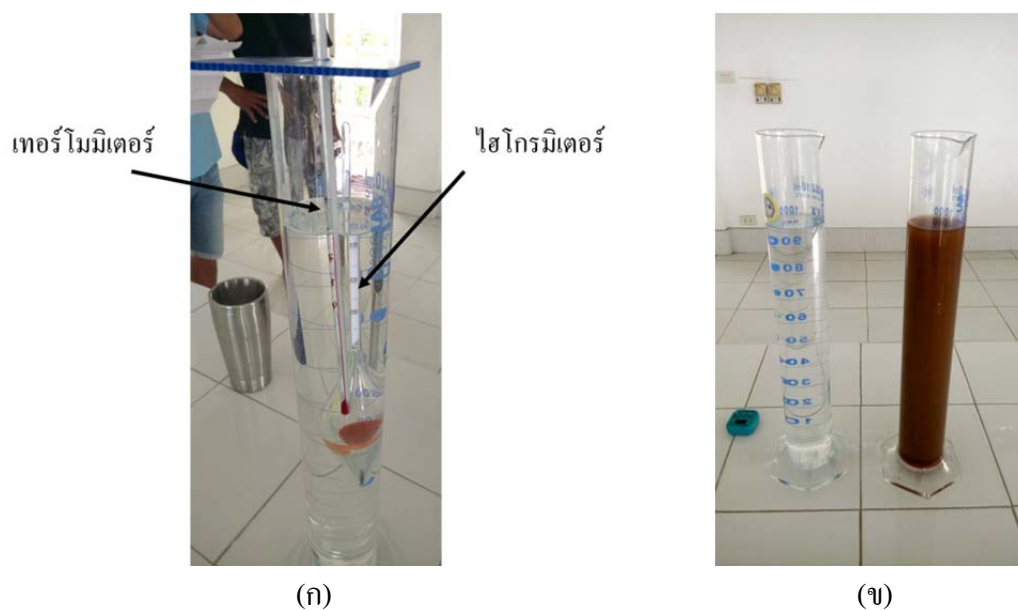
3.8.1 เปอร์เซ็นต์ของ (ดินทรายแป้ง + ดินเหนียว) จะคำนวณจากค่าจากไฮโกรมิเตอร์และค่าอุณหภูมิจากเทอร์โมมิเตอร์ ที่อ่านได้ครั้งแรกในช่วง 40 วินาที

3.8.2 เปอร์เซ็นต์ของดินเหนียว จะคำนวณจากค่าจากไฮโกรมิเตอร์และค่าอุณหภูมิจากเทอร์โมมิเตอร์ ที่อ่านได้ครั้งที่ 2 ณ เวลา 2 ชั่วโมง

3.8.3 เปอร์เซ็นต์ของดินทราย = 100 - เปอร์เซ็นต์ของ (แป้งดิน + ดินเหนียว)

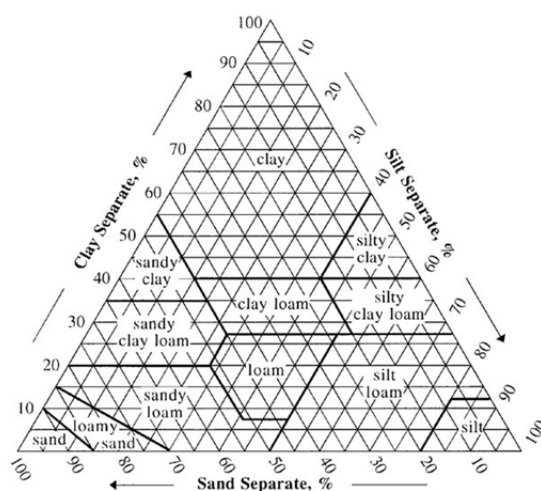
$$\% \text{ Sand, Silt, Clay} = \left[ \frac{(Rs - Rb) + 0.36(Ts - Tb)}{W} \right] \times 100 \quad (3.5)$$

เมื่อ W คือน้ำหนักของดิน (g)



ภาพที่ 3-6 การทดลองดินเพื่อใช้วิธีการวิเคราะห์หาเนื้อดิน (ก) การวัดด้วยไฮโกรมิเตอร์และเทอร์โมมิเตอร์ในน้ำกลั่น (ข) ความแตกต่างระหว่าง ดินตัวอย่าง และ น้ำกลั่น

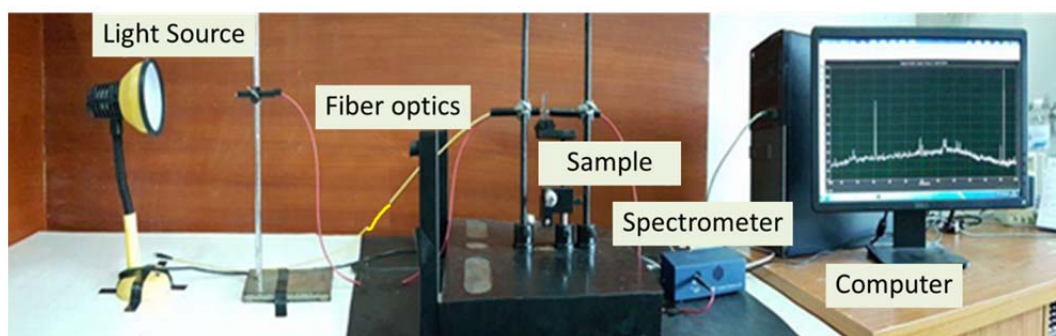
3.8.4 นำค่าเปอร์เซ็นต์ของ ดินทราย ดินทรายแป้ง และดินเหนียว ที่คำนวณได้มาวิเคราะห์สัดส่วนการกระจายอนุภาคของดินตามภาพที่ 3-7



ภาพที่ 3-7 สัดส่วนการกระจายตัวของอนุภาคดิน (www.nrcs.usda.gov)

#### 4. สมบัติทางแสงของวัสดุคลุมดิน

วัสดุคลุมดินที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ พลาสติกโพลีเอทิลีน (Polyethylene, PE) สีดำ แบบใส และ แบบสะท้อนแสง สมบัติทางแสงที่จำเป็นต้องใช้ในการคำนวณอุณหภูมิดินและความชื้นดิน ประกอบด้วย ค่าการส่งผ่านของแสง ค่าการสะท้อน และค่าการดูดกลืน อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองวัดค่าสมบัติทางแสง ประกอบด้วยเครื่องวัดความเข้มแสง (Spectrometer) ยี่ห้อ Science-Surplus รุ่น BTC-110S วัดความยาวคลื่นได้ในช่วง 410-640 nm แหล่งกำเนิดแสงเป็นหลอดไฟขนาด 100 W เส้นใยแก้วนำแสง ตลับใส่พลาสติกเพื่อใส่ตัวอย่าง ขนาด  $5 \times 5 \text{ cm}^2$  คอมพิวเตอร์แสดงผล และพลาสติกตัวอย่าง ได้แก่ พลาสติกใส พลาสติกสีดำ และ พลาสติกสีเงินดำ ขนาดความหนาเท่ากัน  $150 \mu\text{m}$  โดยอุปกรณ์ทั้งหมดได้ถูกติดตั้งแสดงดังภาพที่ 3.8

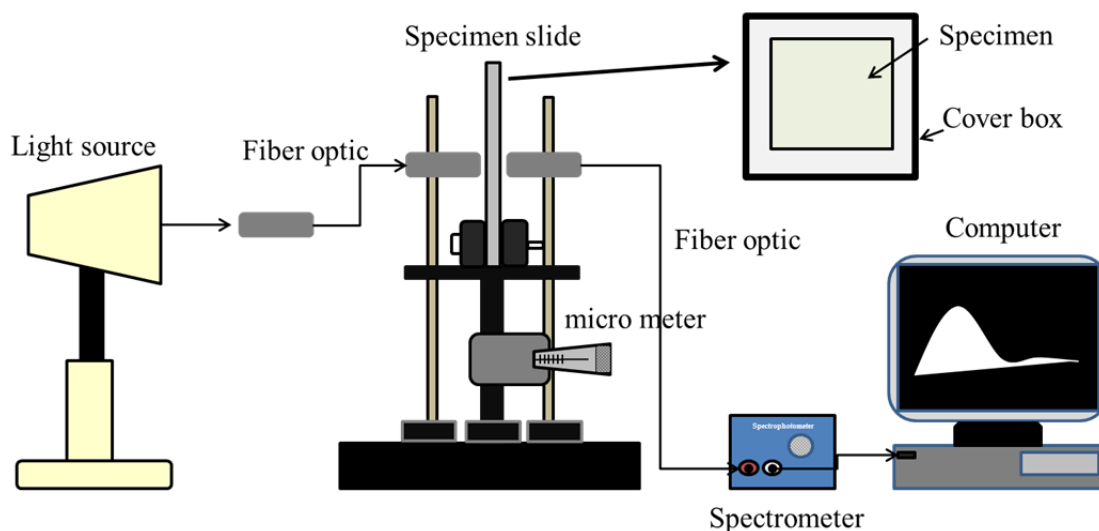


ภาพที่ 3-8 การติดตั้งชุดทดลองวัดค่าสมบัติทางแสง

#### 1. การหาค่าการส่งผ่านของแสง (Transmissivity) ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้ (ภาพที่ 3-9)

1.1 เปิดแหล่งกำเนิดแสง ทำการวัดค่าความเข้มแสงขณะที่ยังไม่มีการใส่พลาสติกตัวอย่าง โดยกำหนดให้เป็นความเข้มแสงเริ่มต้น,  $I_0$

1.2 นำพลาสติกตัวอย่างขนาด  $4 \times 4 \text{ cm}^2$  ใส่ในกล่องใส่ตัวอย่างให้ตรง แล้วนำมาวางที่ช่องเสียบตัวอย่าง จากนั้นปรับตำแหน่งของชิ้นงานให้อยู่ในตำแหน่งตรงกลางของชิ้นงานโดยใช้ไมโครมิเตอร์



ภาพที่ 3-9 ชุดทดลองการหาค่าการส่งผ่านของแสง

1.3 เปิดแหล่งกำเนิดแสง โดยให้แสงเคลื่อนที่เข้าสู่สายใยแก้วนำแสงจากนั้นแสงจะเคลื่อนที่จนออกอีกทางด้านหนึ่งของสายแล้วเข้ากระทบชิ้นงาน ต่อนั้นแสงที่สามารถส่งผ่านได้จะเดินทางเข้าสู่สายใยแก้วนำแสงอีกเส้นหนึ่งทางด้านหลังของชิ้นงานแล้วเคลื่อนที่ต่อไปยัง Spectrometer เพื่อประมวลผลแล้วจึงแสดงผลที่คอมพิวเตอร์

1.4 บันทึกค่าความเข้มแสงที่สามารถส่งผ่านได้เป็นค่า  $I_t$  จากนั้นปรับตำแหน่งของชิ้นงานไปอีก 4 ตำแหน่ง ได้แก่ทางด้านขวา ด้านซ้าย ด้านบน และด้านล่าง จากตำแหน่งแรก และบันทึกค่าความเข้มแสงทุกตำแหน่ง

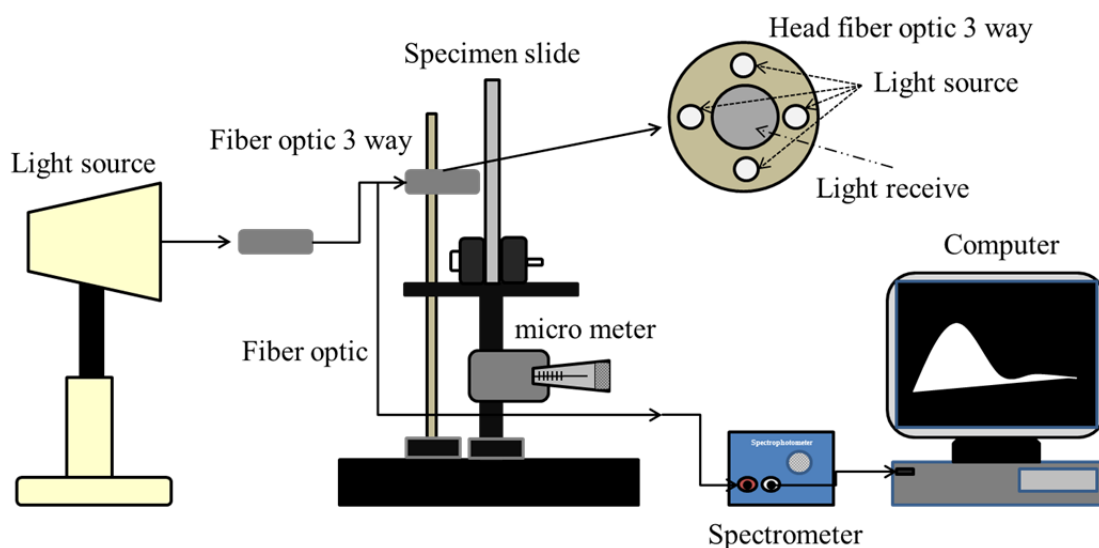
1.5 นำค่า  $I_t$  ทั้ง 5 ตำแหน่งมาทำการหาค่าเฉลี่ยความเข้มแสงที่ส่งผ่าน แล้วจากนั้นนำไปคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสงของตัวอย่าง

1.6 เปลี่ยนพลาสติกตัวอย่างแล้วดำเนินการทำซ้ำ ดังข้อ 1.1 - 1.5 จนครบทุกชิ้นงาน

2. การหาค่าการสะท้อนแสงของวัสดุ (Reflectivity) จะทำการปรับชุดทดลองจากการหาค่าการส่งผ่าน โดยจะใช้สายใยแก้วนำแสงชนิด 3 ทาง โดยมีหัวที่ทำกรับแสงจากแหล่งกำเนิดแสง 1 ทาง มีหัวที่ให้แสงจากโดยหัวนี้จะมีรูที่ให้แสงและรับแสง ดังภาพที่ 3-10 และหัวสุดท้ายจะนำแสงที่สะท้อนจากหัวที่ 2 ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.1 ทำการวัดค่าความเข้มแสงขณะที่ยังไม่มีพลาสติกตัวอย่าง โดยกำหนดให้เป็นความเข้มแสงเริ่มต้น,  $I_0$  แล้วนำพลาสติกชิ้นงานใส่ในช่องเลียบชิ้นงาน เหมือนการทดลองแรก





ภาพที่ 3-10 ชุดทดลองการหาค่าการสะท้อนรังสี

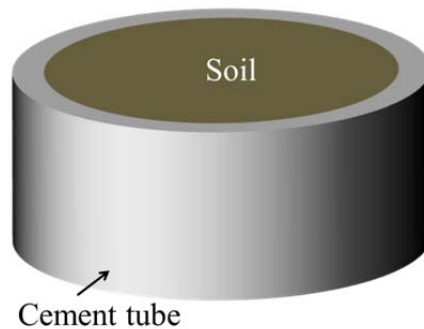
2.2 บันทึกค่าความเข้มแสงที่สะท้อนจากชิ้นงาน จำนวนทั้งสิ้น 5 ตำแหน่ง แล้วหาค่าเฉลี่ยแล้วนำไปคำนวณหาค่าการส่งสะท้อนของชิ้นงานตัวอย่าง

3. การหาค่าการดูดกลืนของแสง (Absorptivity) เมื่อทราบค่าการส่งผ่านของแสงจากการทดลองในข้อที่ 1 และค่าของการสะท้อนในการทดลองข้อที่ 2 จะสามารถหาค่าการดูดกลืนของแสงสำหรับวัสดุนั้นได้จากความสัมพันธ์ของสมบัติการการดูดซึมรังสี การสะท้อนรังสี การส่งผ่านของรังสีตามสมการที่ (2.14) ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$\alpha = 1 - \rho - \tau \quad (3.6)$$

### แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายอุณหภูมิและความชื้นของดินที่มีและไม่มีวัสดุคลุมดินสำหรับการปลูกมะนาวในวงบ่อซีเมนต์

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายอุณหภูมิและความชื้นภายในดินที่มีและไม่มีวัสดุคลุมดินสำหรับการปลูกมะนาวในวงบ่อซีเมนต์ ในระบบพิกัดทรงกระบอก ตามรูปทรงของวงบ่อซีเมนต์ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกระบอก และมีความยาวจำกัด (Finite cylinder) ภายในวงบ่อซีเมนต์บรรจุดินเต็มวงบ่อพอดี ดังภาพที่ 3-11 โดยใช้สมการพลังงานของระบบที่มีหลายองค์ประกอบตามทฤษฎีของการถ่ายเทมวล โมเมนตัม และความร้อน และแก้สมการด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) โดยอาศัยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite difference method)

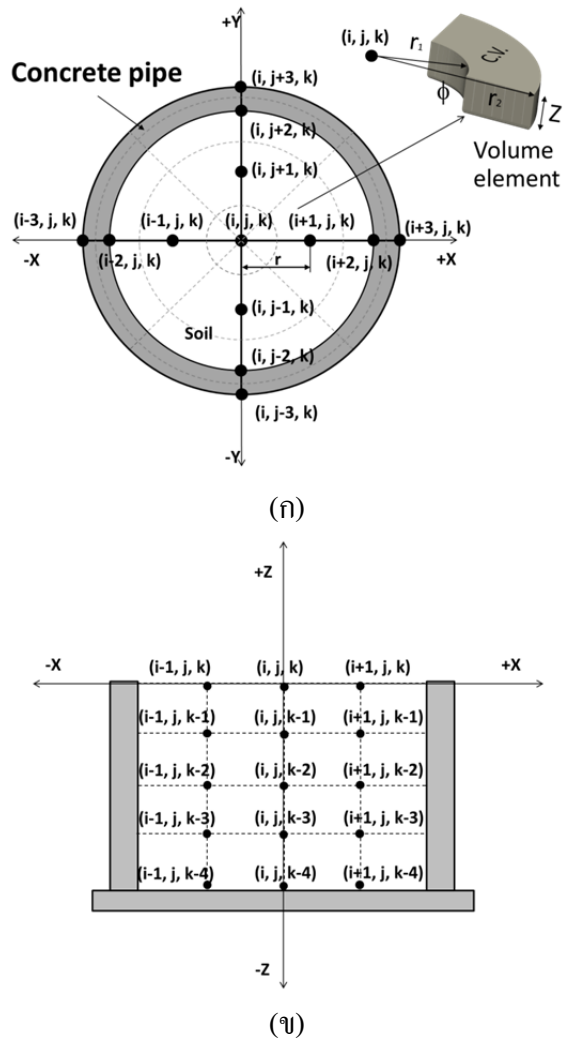


ภาพที่ 3-11 วงบ่อซีเมนต์ที่บรรจุดิน

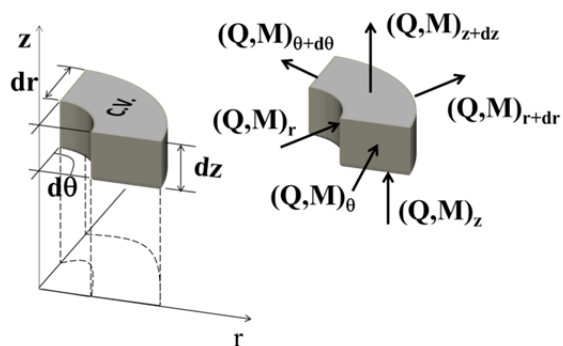
การวิเคราะห์อุณหภูมิและความชื้นดินภายในวงบ่อซีเมนต์จะแบ่งตำแหน่งโดยพิจารณาจากความสูงตามแนวตั้ง 5 ระดับ และแนวระดับตามระยะรัศมีทั้ง 4 ทิศทาง รวมทั้งสิ้น 25 ตำแหน่ง ดังภาพที่ 3-12 โดยกำหนดให้ตำแหน่ง  $i, j, k$  เป็นตำแหน่งที่ผิวบนบริเวณจุดศูนย์กลางของวงบ่อซีเมนต์ ( $z = 0$ ) ตำแหน่งที่ถัดจากจุดศูนย์กลางไปทาง  $+X$  จะเป็นตำแหน่ง  $i+1, j, k$  และ ตำแหน่งที่ถัดจากจุดศูนย์กลางไปทาง  $-X$  จะเป็นตำแหน่ง  $i-1, j, k$  ตำแหน่งที่ถัดจากจุดศูนย์กลางไปทาง  $+Y$  จะเป็นตำแหน่ง  $i, j+1, k$  และ ตำแหน่งที่ถัดจากจุดศูนย์กลางไปทาง  $-Y$  จะเป็นตำแหน่ง  $i, j-1, k$  และ ตำแหน่งที่ถัดจากจุดศูนย์กลางไปทาง  $+Z$  จะเป็นตำแหน่ง  $i, j, k+1$  และ ตำแหน่งที่ถัดจากจุดศูนย์กลางไปทาง  $-Z$  จะเป็นตำแหน่ง  $i, j, k-1$

การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและมวลแต่ละตำแหน่งจะพิจารณาปริมาตรส่วนย่อยในระบบพิกัดทรงกระบอก ( $r, \phi, z$ ) จากภาพที่ 3-13 การถ่ายเทความร้อน ( $Q$ ) และการถ่ายเทมวล ( $M$ ) ต่างมีกลไกเหมือนกัน ดังนั้นสมดุลความร้อนและมวลมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\begin{aligned} \Delta(Q, M)_{\text{element}} = & ((Q, M)_r - (Q, M)_{r+dr}) + ((Q, M)_\theta - (Q, M)_{\theta+d\theta}) \\ & + ((Q, M)_z - (Q, M)_{z+dz}) \end{aligned} \quad (3.7)$$



ภาพที่ 3-12 การแบ่งตำแหน่งสำหรับการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและมวล (ก) ตามแนวระดับ และ (ข) ตามแนวตั้ง



ภาพที่ 3-13 สมดุลพลังงานและมวลภายในปริมาตรส่วนย่อย

## 1. สมมติฐาน

ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายอุณหภูมิและความชื้นภายในดิน เพื่อให้การคำนวณของแบบจำลองหาคำตอบได้ง่ายโดยมีสมมติฐานดังนี้

- 1.1 ดินมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันและสมบัติเหมือนกัน
- 1.2 รังสีอาทิตย์ตกกระทบบนทั่วพื้นที่ผิวดินหรือทั่วพื้นที่ผิวดินว่าวัสดุคลุมในปริมาณที่เท่ากันที่เวลาหนึ่ง ๆ
- 1.3 การถ่ายเทความร้อนภายในดินพิจารณาการนำความร้อนเป็นหลัก การถ่ายเทมวลภายในดินจะพิจารณาเฉพาะการแพร่ไอน้ำ และการระเหยน้ำเกิดขึ้นที่ผิวดินด้านบนเท่านั้น
- 1.5 อุณหภูมิของดินบริเวณที่สัมผัสกับผิวของวงบ่อซีเมนต์ทั้งด้านข้างและด้านล่างของวงบ่อซีเมนต์มีค่าเท่ากัน รวมทั้งอุณหภูมิฝาด้านล่างของวงบ่อซีเมนต์มีค่าเท่ากับอุณหภูมิพื้นดินที่ใต้วงบ่อซีเมนต์และมีค่าคงที่ตลอดทั้งวัน
- 1.6 การแผ่รังสีความร้อนระหว่างผิวด้านข้างของวงบ่อซีเมนต์กับสิ่งแวดล้อมจะไม่พิจารณาเนื่องจากมีค่าน้อยมาก
- 1.7 วัสดุคลุมดินบางมาก จนถึงได้ว่าอุณหภูมิที่ผิวด้านบนและผิวด้านล่างเท่ากัน
- 1.8 สมบัติทางกายภาพของดินและสมบัติทางแสงของวัสดุคลุมดินมีค่าคงที่
- 1.9 กำหนดให้อุณหภูมิดินที่ระดับความลึก 10 - 40 cm มีค่าเริ่มต้นในการคำนวณเท่ากันตลอดทั้งปี

## 2. เงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้น

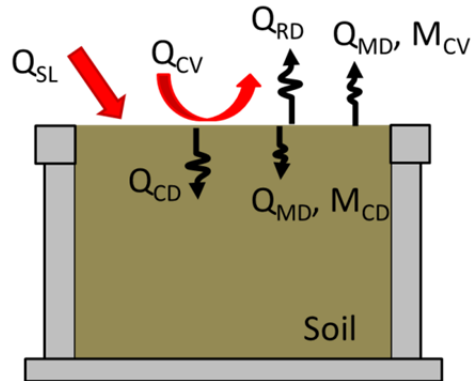
การแก้ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ของการถ่ายเทพลังงานอันเนื่องมาจากผลการถ่ายเทความร้อนและมวล เพื่อหาการกระจายตัวของอุณหภูมิและการแพร่ความชื้นดินที่จุดต่าง ๆ ต้องกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) และเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial condition) ของระบบที่พิจารณา โดยเงื่อนไขขอบเขตจะระบุค่าของอุณหภูมิ ความชื้น อัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลที่ขอบเขตต่าง ๆ ของระบบ ส่วนเงื่อนไขเริ่มต้นเป็นการระบุค่าอุณหภูมิและความชื้นดินที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบที่เริ่มพิจารณา แบ่งเป็น 2 กรณีคือ กรณีที่ไม่มีวัสดุคลุมดินและกรณีที่มีวัสดุคลุมดิน ดังนี้

### 2.1 ตำแหน่งที่ผิวดินด้านบน ( $z = 0$ )

#### 2.1.1 กรณีไม่มีวัสดุคลุมดิน

พลังงานที่สะสมบริเวณผิวด้านบนของดิน ( $Q_{ST}$ ) มีกระบวนการได้รับพลังงานจากรังสีอาทิตย์ ( $Q_{SL}$ ) และสูญเสียพลังงานเนื่องจากการพาความร้อน ( $Q_{CV}$ ) พลังงานเนื่องจากการแผ่รังสีความร้อน ( $Q_{RD}$ ) พลังงานเนื่องจากการนำความร้อนสุทธิ ( $Q_{CD}$ ) และพลังงาน

เนื่องจากการถ่ายเทมวล ( $Q_{MD}$ ) ดังภาพที่ 3.14 ซึ่งสามารถเขียนสมการสมดุลพลังงานในปริมาตรส่วนย่อยได้ดังนี้



ภาพที่ 3-14 สมดุลพลังงานอันเนื่องมาจากผลการถ่ายเทความร้อนและมวลสารของดินที่ผิวด้านบนกรณีไม่มีวัสดุคลุมดิน

การถ่ายเทความร้อนในปริมาตรส่วนย่อยดังภาพที่ 3-15 ในระบบพิกัดทรงกระบอกที่ตำแหน่ง  $(i+1, j, k)$  ดังนั้นจากสมการที่ (3.7) จะสามารถเขียนสมการได้เป็น

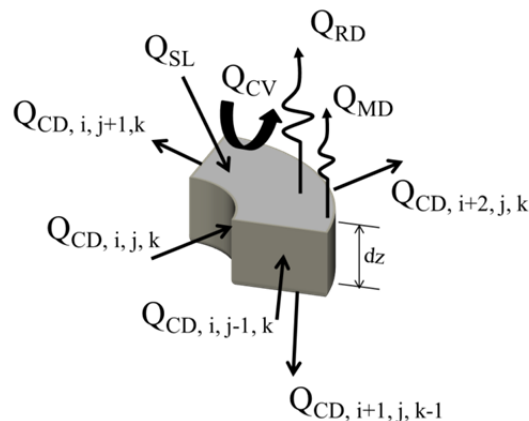
$$\Delta Q_{ST} = [Q_{SL} - (Q_{CV} + Q_{RD} + Q_{MD} + Q_{CD,(i+1,j,k-1)})] \\ + (Q_{CD,(i,j,k)} - Q_{CD,(i+2,j,k)}) + (Q_{CD,(i,j-1,k)} - Q_{CD,(i,j+1,k)}) \quad (3.8)$$

ดังนั้นอุณหภูมิดินที่ตำแหน่ง  $(i+1, j, k)$  สามารถหาได้ดังนี้

$$T_{i+1,j,k}^{t+1} = T_{i+1,j,k}^t + \frac{\Delta t}{\rho_s C_{p,s} (r\Delta\theta\Delta r\Delta z)} \left\{ \alpha_s I (r\Delta\theta\Delta r) - h_c (r\Delta\theta\Delta r) (T_{i+1,j,k} - T_{amb}) \right. \\ \left. - \sigma \varepsilon_s (r\Delta\theta\Delta r) (T_{i+1,j,k}^4 - T_{sky}^4) - k_s (r\Delta\theta\Delta r) \left( \frac{T_{i+1,j,k} - T_{i+1,j,k-1}}{\Delta z} \right) \right. \\ \left. - (r\Delta\theta\Delta r) \left( -0.0168 \times f \times h_c (b(1 - RH) - a(RH \times T_{amb} - T_{i+1,j,k}^t)) \right) \right\}$$

$$\begin{aligned}
& +k_s(r\Delta\theta\Delta z)\left(\frac{T_{i,j,k} - T_{i+1,j,k}}{\Delta r}\right) - k_s(r\Delta\theta\Delta z)\left(\frac{T_{i+1,j,k} - T_{i+2,j,k}}{\Delta r}\right) \\
& +k_s(\Delta r\Delta z)\left(\frac{T_{i,j-1,k} - T_{i+1,j,k}}{r\Delta\theta}\right) - k_s(\Delta r\Delta z)\left(\frac{T_{i+1,j,k} - T_{i,j+1,k}}{r\Delta\theta}\right)
\end{aligned} \tag{3.9}$$

เมื่อ	$k_s$	คือค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของดิน (W/m-K)
	$C_{p,s}$	คือค่าความจุความร้อนที่ความดันคงที่ของดิน (KJ/kg-°C)
	$\alpha_s$	คือค่าการนำความร้อนของดิน
	$\varepsilon_s$	คือค่าการปลดปล่อยรังสีของดิน



ภาพที่ 3-15 สมดุลพลังงานอันเนื่องมาจากผลการถ่ายเทความร้อนและมวลสารของดินที่ผิวด้านบน  
กรณีไม่มีวัสดุคลุมดินในปริมาตรส่วนย่อย

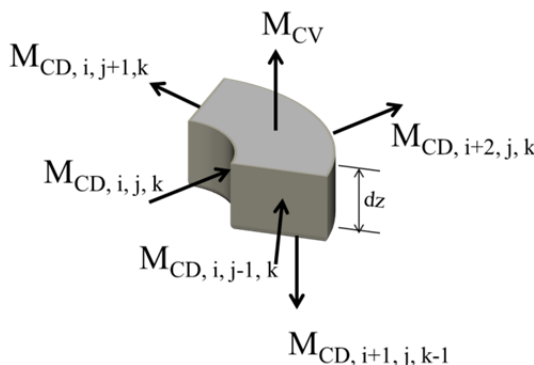
จากภาพที่ 3-16 แสดงสมดุลมวลสารของดินที่ผิวด้านบนกรณีไม่มีวัสดุคลุม  
ดินในปริมาตรส่วนย่อยที่ตำแหน่ง (i+1, j, k) มวลที่สะสมบริเวณผิวด้านบน ( $M_{ST}$ ) เกิดจากถ่ายเท  
มวลเนื่องจากการการพามวล ( $M_{CV}$ ) และการถ่ายเทมวลเนื่องการนำสุทธิ ( $M_{CD}$ ) ซึ่งสามารถเขียน  
สมการสมดุลมวล ณ ตำแหน่งผิวดินด้านบนได้ดังนี้

$$M_{ST} = M_{CV} - M_{CD} \tag{3.10}$$

ดังนั้นความชื้นที่ตำแหน่ง (i+1, j, k) สามารถหาได้เป็น

$$\begin{aligned}
\omega_{i+1,j,k}^{t+1} = & \omega_{i+1,j,k}^t + \frac{\Delta t}{\rho_w(r\Delta\theta\Delta r\Delta z)} [h_m r\Delta\theta\Delta r(\rho_{amb} - \rho_{i+1,j,k})/\rho_w \\
& -D_m(r\Delta\theta\Delta r) \left(\frac{\omega_{i+1,j,k} - \omega_{i+1,j,k-1}}{dz}\right) + D_m(r\Delta\theta\Delta z) \left(\frac{\omega_{i,j,k} - \omega_{i+1,j,k}}{dr}\right) \\
& -D_m(r\Delta\theta\Delta z) \left(\frac{\omega_{i+1,j,k} - \omega_{i+2,j,k}}{dr}\right) + D_m(\Delta r\Delta z) \left(\frac{\omega_{i,j-1,k} - \omega_{i+1,j,k}}{rd\theta}\right) \\
& -D_m(\Delta r\Delta z) \left(\frac{\omega_{i+1,j,k} - \omega_{i,j+1,k}}{rd\theta}\right)] \quad (3.11)
\end{aligned}$$

เมื่อ  $\rho_w$  คือความหนาแน่นของน้ำ ( $\text{kg/m}^3$ )



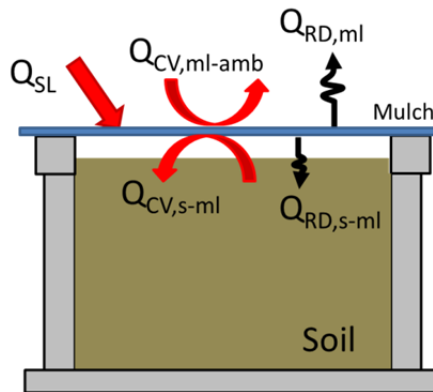
ภาพที่ 3-16 สมดุลมวลสารของดินที่ผิวด้านบนกรณีไม่มีวัสดุคลุมดินในปริมาตรส่วนย่อย

2.1.2 สมการสมดุลพลังงานอันเนื่องมาจากผลการถ่ายเทความร้อนและมวลสารของดินที่ผิวด้านบน  $z = 0, t > 0$  กรณีที่มีวัสดุคลุมดิน

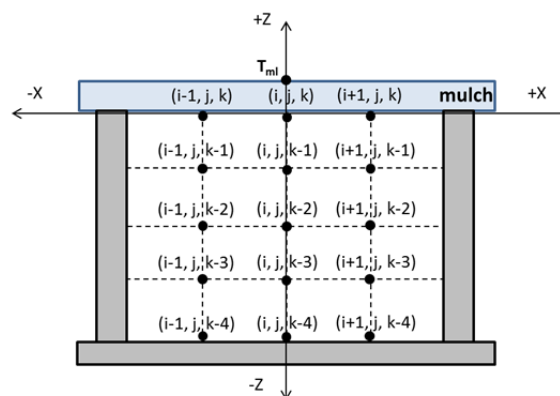
จากภาพที่ 3-17 แสดงสมดุลพลังงานที่ผิวดินด้านบนที่มีวัสดุคลุมดิน มีสมมติฐานว่าไม่มีการถ่ายเทมวลภายในและที่ผิวของวัสดุคลุมดิน ซึ่งมีกระบวนการถ่ายเทความร้อนได้แก่การรับพลังงานความร้อนจากรังสีอาทิตย์ ( $Q_{SL,ml}$ ) ส่วนการสูญเสียพลังงานความร้อนได้แก่การพาความร้อนที่ผิวด้านบนของวัสดุคลุมดิน ( $Q_{CV,ml-amb}$ ) การพาความร้อนที่ผิวด้านล่างของวัสดุคลุมดิน ( $Q_{CV,s-ml}$ ) พลังงานเนื่องจากการแผ่รังสีความร้อนของวัสดุคลุมดินกับสิ่งแวดล้อม ( $Q_{RD,ml}$ ) และ พลังงานเนื่องจากการแผ่รังสีความร้อนของวัสดุคลุมดินกับผิวดิน

$(Q_{RD,s-m})$  ดังนั้นสมการสมดุลพลังงานที่ผิวด้านบนของวัสดุคลุมดิน (ภาพ 3.18) สามารถเขียนได้ดังต่อไปนี้

$$Q_{ST,ml} = Q_{SL,ml} - Q_{CV,ml-amb} - Q_{CV,s-ml} - Q_{RD,ml} - Q_{RD,s-ml} \quad (3.12)$$



ภาพที่ 3-17 สมดุลพลังงานอันเนื่องมาจากการถ่ายเทความร้อนและมวลสารของดินที่ผิวด้านบนกรณีที่มีวัสดุคลุมดิน



ภาพที่ 3-18 การแบ่งตำแหน่งสำหรับการวิเคราะห์สำหรับการถ่ายเทความร้อนที่ผิวด้านบนของวัสดุคลุมดิน

ดังนั้นอุณหภูมิดินที่แผ่นวัสดุคลุมดิน สามารถหาได้ดังนี้

$$T_{ml}^{t+1} = T_{ml}^t + \frac{\Delta t}{\rho_{ml} c_{p,ml} (r\Delta\theta\Delta r\Delta l)} [\alpha_{ml} I (r\Delta\theta\Delta r) - h_c (r\Delta\theta\Delta r) (T_{ml} - T_{amb})]$$



$$\begin{aligned}
& - h(r\Delta\theta\Delta r)(T_{ml} - T_s) - \varepsilon_{ml}\sigma(r\Delta\theta\Delta r)(T_{ml}^4 - T_{sky}^4) \\
& - h_{r,s-ml}(r\Delta\theta\Delta r)(T_{ml} - T_s)] \tag{3.13}
\end{aligned}$$

เมื่อ	$Q_{ST,ml}$	คือความร้อนที่สะสมอยู่ในวัสดุคลุมดิน (W)
	$T_{ml}$	คืออุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวของวัสดุคลุมดิน ( $^{\circ}C$ )
	$\alpha_{ml}$	คือค่าการดูดกลืนแสงของวัสดุคลุมดิน
	$\varepsilon_{ml}$	คือค่าการปลดปล่อยรังสีของวัสดุคลุมดิน

สำหรับที่ผิวดินจะได้รับความร้อนโดยการถ่ายเทพลังงานจากผิวด้านล่างของวัสดุคลุมดินลงสู่ผิวน้ำดิน ด้วยการส่งผ่านความร้อนจากวัสดุคลุมดิน ( $Q_{TM,ml}$ ) การพาความร้อนที่ผิวด้านล่างของวัสดุคลุมดิน ( $Q_{CV,s-ml}$ ) พลังงานเนื่องจากการแผ่รังสีความร้อนของวัสดุคลุมดินกับสิ่งแวดล้อม ( $Q_{RD,s-ml}$ ) ดังนั้นสมการสมดุลพลังงานที่ผิวดินที่มีวัสดุคลุมดินเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่ง  $(i+1, j, k)$  สามารถเขียนได้ดังนี้

$$Q_{ST} = Q_{TM,ml} + Q_{CV,s-ml} + Q_{RD,s-ml} - Q_{CD} - Q_{MD} \tag{3.14}$$

ดังนั้นอุณหภูมิดินที่ตำแหน่ง  $(i+1, j, k)$  สามารถหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
T_{i+1,j,k}^{t+1} &= T_{i+1,j,k}^t + \frac{\Delta t}{\rho_s C_{p,s}} [ \alpha_{ml}(\tau_{ml} I)(r\Delta\theta\Delta r) + h(r\Delta\theta\Delta r)(T_{ml} - T_s) \\
& + h_{r,s-c}A(T_{ml} - T_{amb}) - k_s(r\Delta\theta\Delta r) \left( \frac{T_{i+1,j,k} - T_{i+1,j,k-1}}{\Delta z} \right) \\
& + k_s(r\Delta\theta\Delta z) \left( \frac{T_{i,j,k} - T_{i+1,j,k}}{\Delta r} \right) - k_s(r\Delta\theta\Delta z) \left( \frac{T_{i+1,j,k} - T_{i+2,j,k}}{\Delta r} \right) \\
& + k_s(\Delta r\Delta z) \left( \frac{T_{i,j-1,k} - T_{i+1,j,k}}{r\Delta\theta} \right) - k_s(\Delta r\Delta z) \left( \frac{T_{i+1,j,k} - T_{i,j+1,k}}{r\Delta\theta} \right) \\
& - \rho_s H_s(r\Delta\theta\Delta r\Delta z) \left( \frac{\omega_{i+1,j,k}^{t+1} - \omega_{i+1,j,k}^t}{\Delta t} \right) \tag{3.15}
\end{aligned}$$

เมื่อ	$\tau_{ml}$	คือค่าการส่งผ่านแสงของวัสดุคลุมดิน
-------	-------------	------------------------------------

ดังนั้นความชื้นที่ตำแหน่ง  $(i+1, j, k)$  สามารถหาได้เป็น

$$\begin{aligned} \omega_{i+1,j,k}^{t+1} = & \omega_{i+1,j,k}^t + \frac{\Delta t}{\rho_w(r\Delta\theta\Delta r\Delta z)} \left[ -D_m(r\Delta\theta\Delta r) \left( \frac{\omega_{i+1,j,k} - \omega_{i+1,j,k-1}}{\Delta z} \right) \right. \\ & + D_m(r\Delta\theta\Delta z) \left( \frac{\omega_{i,j,k} - \omega_{i+1,j,k}}{\Delta r} \right) - D_m(r\Delta\theta\Delta z) \left( \frac{\omega_{i+1,j,k} - \omega_{i+2,j,k}}{\Delta r} \right) \\ & \left. + D_m(\Delta r\Delta z) \left( \frac{\omega_{i,j-1,k} - \omega_{i+1,j,k}}{r\Delta\theta} \right) - D_m(\Delta r\Delta z) \left( \frac{\omega_{i+1,j,k} - \omega_{i,j+1,k}}{r\Delta\theta} \right) \right] \end{aligned} \quad (3.16)$$

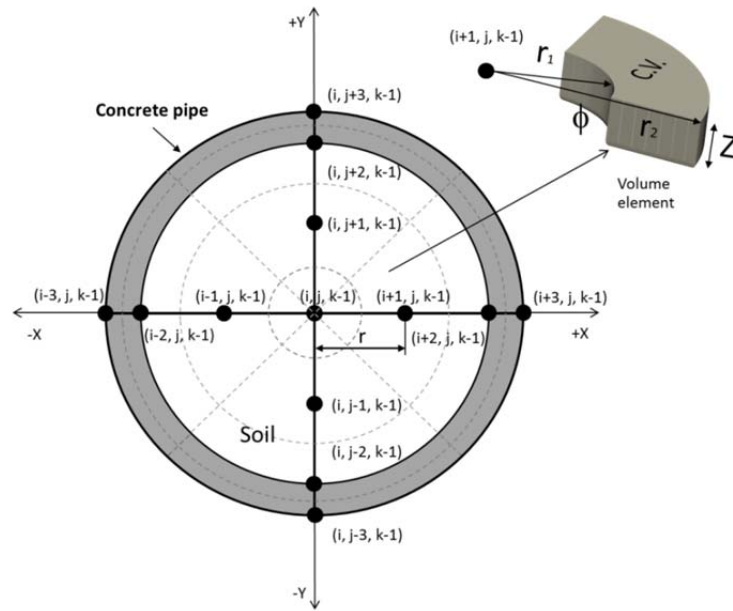
2.1.3 สมการสมดุลความร้อนอันเนื่องมาจากผลการถ่ายเทความร้อนและมวลสารภายในชั้นดิน

พิจารณาภายในผิวชั้นดินที่มีการถ่ายเทความร้อนและมวล โดยการถ่ายเทความร้อนภายในดินเป็นกระบวนการนำความร้อนเป็นหลัก เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่ง  $(i+1, j, k-1)$  จากภาพที่ 3-19 สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$Q_{ST} = Q_{CD} - Q_{MD} \quad (3.17)$$

ดังนั้นอุณหภูมิดินที่ตำแหน่ง  $(i+1, j, k-1)$  สามารถหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} T_{i+1,j,k-1}^{t+1} = & T_{i+1,j,k-1}^t + \frac{\Delta t}{\rho_s C_{p,s}(r\Delta\theta\Delta r\Delta z)} \left[ k_s(r\Delta\theta\Delta r) \left( \frac{T_{i+1,j,k} - T_{i+1,j,k-1}}{\Delta z} \right) \right. \\ & - k_s(r\Delta\theta\Delta r) \left( \frac{T_{i+1,j,k-1} - T_{i+1,j,k-2}}{\Delta z} \right) + k_s(r\Delta\theta\Delta z) \left( \frac{T_{i,j,k-1} - T_{i+1,j,k-1}}{\Delta r} \right) \\ & - k_s(r\Delta\theta\Delta z) \left( \frac{T_{i+1,j,k-1} - T_{i+2,j,k-1}}{\Delta r} \right) + k_s(\Delta r\Delta z) \left( \frac{T_{i,j-1,k-1} - T_{i+1,j,k-1}}{r\Delta\theta} \right) \\ & \left. - k_s(\Delta r\Delta z) \left( \frac{T_{i+1,j,k-1} - T_{i,j+1,k-1}}{r\Delta\theta} \right) - \rho_s H_s(r\Delta\theta\Delta r\Delta z) \left( \frac{\omega_{i+1,j,k+1}^{t+1} - \omega_{i+1,j,k+1}^t}{\Delta t} \right) \right] \end{aligned} \quad (3.18)$$



ภาพที่ 3-19 การแบ่งตำแหน่งสำหรับการวิเคราะห์สำหรับการถ่ายเทความร้อนและมวลในชั้นดิน

สมการการถ่ายเทมวลภายในชั้นดิน สามารถเขียนสมการได้เป็น

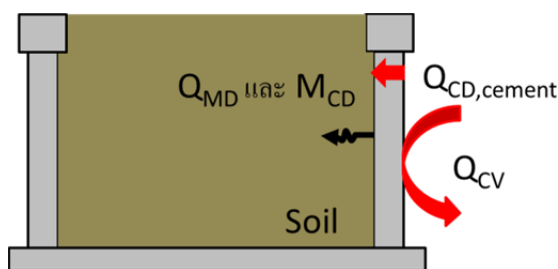
$$M_{ST} = M_{CD} \quad (3.19)$$

จากภาพที่ 3-19 ความชื้นดินที่ตำแหน่ง  $(i+1, j, k-1)$  สามารถหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \omega_{i+1,j,k-1}^{t+1} = & \omega_{i+1,j,k-1}^t + \frac{\Delta t}{(r\Delta\theta\Delta r\Delta z)} \left[ D_m(r\Delta\theta\Delta r) \left( \frac{\omega_{i+1,j,k} - \omega_{i+1,j,k-1}}{\Delta z} \right) \right. \\ & - D_m(r\Delta\theta\Delta r) \left( \frac{\omega_{i+1,j,k-1} - \omega_{i+1,j,k-2}}{\Delta z} \right) + D_m(r\Delta\theta\Delta z) \left( \frac{\omega_{i,j,k-1} - \omega_{i+1,j,k-1}}{\Delta r} \right) \\ & - D_m(r\Delta\theta\Delta z) \left( \frac{\omega_{i+1,j,k-1} - \omega_{i+2,j,k-1}}{\Delta r} \right) + D_m(\Delta r\Delta z) \left( \frac{\omega_{i,j-1,k-1} - \omega_{i+1,j,k-1}}{r\Delta\theta} \right) \\ & \left. - D_m(\Delta r\Delta z) \left( \frac{\omega_{i+1,j,k-1} - \omega_{i,j+1,k-1}}{r\Delta\theta} \right) \right] \quad (3.20) \end{aligned}$$

2.1.4 สมการสมดุลพลังงานอันเนื่องมาจากผลการถ่ายเทความร้อนและมวลสารของดินที่ผิวด้านข้าง  $r = r, t > 0$

เมื่อกำหนดให้  $L$  คือความหนาของวงบ่อซีเมนต์ บริเวณผิวด้านนอกของวงบ่อซีเมนต์ (ตำแหน่งที่  $r + L$ ) จะมีการถ่ายเทความร้อน โดยการพากับสภาพแวดล้อม และมีการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนจากผิวด้านนอกไปยังผิวในของวงบ่อซีเมนต์ ดังภาพที่ 3-20 หากพิจารณาให้  $\theta$  ตำแหน่งเดียวกันอุณหภูมิบริเวณผิวด้านในของวงบ่อซีเมนต์ ( $r = r$ ) ถือว่ามีค่าเท่ากับอุณหภูมิดิน สมการสมดุลพลังงานที่ผิววงบ่อซีเมนต์เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่ง  $(i+3, j, k-1)$  สามารถเขียนได้ดังนี้



ภาพที่ 3-20 สมดุลพลังงานอันเนื่องมาจากการถ่ายเทความร้อนและมวลสารของดินที่ผิวด้านข้าง

$$Q_{ST,cm} = Q_{CV,cm} - Q_{CD,cm} \quad (3.21)$$

ดังนั้นอุณหภูมิดินที่ตำแหน่ง  $(i+3, j, k-1)$  สามารถหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} T_{i+3,j,k-1}^{t+1} = & T_{i+3,j,k-1}^t + \frac{\Delta t}{\rho_{cm} C_{p,cm} (r \Delta \theta \Delta r \Delta z)} \left[ h_c ((r + L) \Delta \theta \Delta z) (T_{i+3,j,k-1} - T_{amb}) \right. \\ & + k_{cm} (r \Delta \theta \Delta r) \left( \frac{T_{i+3,j,k} - T_{i+3,j,k-1}}{\Delta z} \right) - k_{cm} (r \Delta \theta \Delta r) \left( \frac{T_{i+3,j,k-1} - T_{i+3,j,k-2}}{\Delta z} \right) \\ & + k_{cm} (r \Delta \theta \Delta z) \left( \frac{T_{i+2,j,k-1} - T_{i+3,j,k-1}}{\Delta r} \right) + k_{cm} (\Delta r \Delta z) \left( \frac{T_{i,j-3,k-1} - T_{i+3,j,k-1}}{r \Delta \theta} \right) \\ & \left. - k_{cm} (\Delta r \Delta z) \left( \frac{T_{i+3,j,k-1} - T_{i,j+3,k-1}}{r \Delta \theta} \right) \right] \quad (3.22) \end{aligned}$$

เมื่อ  $Q_{ST,cm}$  คือความร้อนที่สะสมอยู่ในวงบ่อซีเมนต์ (W)

$k_{cm}$  คือค่าการนำความร้อนของวงบ่อซีเมนต์ (W/m-K)

ตำแหน่งนี้จะมีการถ่ายเทความร้อน โดยการนำความร้อนระหว่างดินภายใน  
วงบ่อซีเมนต์กับวงบ่อซีเมนต์ที่ตำแหน่งดังกล่าว หากพิจารณาว่าวงบ่อซีเมนต์ไม่มีการถ่ายเทมวล  
สมการสมดุลความร้อนของดินที่  $r = r$  ที่ตำแหน่ง  $(i+2, j, k-1)$  จะมีสมการ

$$Q_{ST} = Q_{CD,cm} - Q_{CD} - Q_{MD} \quad (3.23)$$

ดังนั้นอุณหภูมิดินที่ตำแหน่ง  $(i+2, j, k-1)$  สามารถหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} T_{i+2,j,k-1}^{t+1} = & T_{i+2,j,k-1}^t + \frac{\Delta t}{\rho_s C_{p,s} (r\Delta\theta\Delta r\Delta z)} \left[ k_{cm}(r\Delta\theta\Delta r) \left( \frac{T_{i+2,j,k} - T_{i+2,j,k-1}}{\Delta z} \right) \right. \\ & - k_{cm}(r\Delta\theta\Delta r) \left( \frac{T_{i+2,j,k-1} - T_{i+2,j,k-2}}{\Delta z} \right) + k_{cm}(r\Delta\theta\Delta z) \left( \frac{T_{i+3,j,k-1} - T_{i+2,j,k-1}}{\Delta r} \right) \\ & - k_{cm}(r\Delta\theta\Delta z) \left( \frac{T_{i+2,j,k-1} - T_{i+1,j,k-1}}{\Delta r} \right) + k_{cm}(\Delta r\Delta z) \left( \frac{T_{i,j-2,k-1} - T_{i+2,j,k-1}}{r\Delta\theta} \right) \\ & - k_{cm}(\Delta r\Delta z) \left( \frac{T_{i+2,j,k-1} - T_{i,j+2,k-1}}{r\Delta\theta} \right) + k_s(r\Delta\theta\Delta r) \left( \frac{T_{i+2,j,k} - T_{i+2,j,k-1}}{\Delta z} \right) \\ & - k_s(r\Delta\theta\Delta r) \left( \frac{T_{i+2,j,k-1} - T_{i+2,j,k-2}}{\Delta z} \right) + k_s(r\Delta\theta\Delta z) \left( \frac{T_{i+3,j,k-1} - T_{i+2,j,k-1}}{\Delta r} \right) \\ & - k_s(r\Delta\theta\Delta z) \left( \frac{T_{i+2,j,k-1} - T_{i+1,j,k-1}}{\Delta r} \right) + k_s(\Delta r\Delta z) \left( \frac{T_{i,j-2,k-1} - T_{i+2,j,k-1}}{r\Delta\theta} \right) \\ & \left. - k_s(\Delta r\Delta z) \left( \frac{T_{i+2,j,k-1} - T_{i,j+2,k-1}}{r\Delta\theta} \right) - \rho_s H_s (r\Delta\theta\Delta r\Delta z) \left( \frac{\omega_{i+2,j,k-1}^{t+1} - \omega_{i+2,j,k-1}^t}{\Delta t} \right) \right] \end{aligned} \quad (3.24)$$

สมการสมดุลการถ่ายเทมวลภายในชั้นดิน สามารถเขียนสมการได้เป็น

$$M_{ST} = M_{CD} \quad (3.25)$$

ดังนั้นความชื้นดินที่ตำแหน่ง  $(i+2, j, k-1)$  สามารถหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
\omega_{i+2,j,k-1}^{t+1} = & \omega_{i+2,j,k-1}^t + \frac{\Delta t}{(r\Delta\theta\Delta r\Delta z)} \left[ D_m(r\Delta\theta\Delta r) \left( \frac{\omega_{i+2,j,k} - \omega_{i+2,j,k-1}}{\Delta z} \right) \right. \\
& - D_m(r\Delta\theta\Delta r) \left( \frac{\omega_{i+2,j,k-1} - \omega_{i+2,j,k-2}}{\Delta z} \right) + D_m(r\Delta\theta\Delta z) \left( \frac{\omega_{i+1,j,k-1} - \omega_{i+2,j,k-1}}{\Delta r} \right) \\
& \left. + D_m(\Delta r\Delta z) \left( \frac{\omega_{i,j-2,k-1} - \omega_{i+2,j,k-1}}{r\Delta\theta} \right) - D_m(\Delta r\Delta z) \left( \frac{\omega_{i+2,j,k-1} - \omega_{i,j+2,k-1}}{r\Delta\theta} \right) \right]
\end{aligned} \tag{3.26}$$

2.1.5 สมการสมดุลสมดุลพลังงานอันเนื่องมาจากผลการถ่ายเทความร้อนและมวลสารของดินที่ผิวด้านล่าง  $z = z, t > 0$

ที่บริเวณผิวด้านล่างของวงบ่อซีเมนต์จะวางทับฝาวงบ่อซีเมนต์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวงบ่อซีเมนต์ เพื่อควบคุมความชื้นจากพื้นดิน ดังภาพที่ 3-21 ดังนั้นบริเวณที่ด้านล่างของดินจะมีการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนระหว่างดินและฝาปิดวงบ่อซีเมนต์เท่านั้น ส่วนการถ่ายเทมวลจะเกิดขึ้นเฉพาะดินในแนวรัศมีและความสูงที่อยู่เหนือขึ้นไปจากดินด้านล่างเท่านั้น เมื่อพิจารณาอุณหภูมิพื้นดินด้านใต้ฝาปิดวงบ่อซีเมนต์ทุกวันที่ตลอดวัน สมการสมดุลการถ่ายเทความร้อนที่ตำแหน่ง  $(i+1, j, k-4)$  เขียนได้เป็น

$$Q_{ST} = Q_{CD,cm} - Q_{CD} - Q_{MD} \tag{3.27}$$

ดังนั้นอุณหภูมิดินที่ตำแหน่ง  $(i+1, j, k-4)$  สามารถหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
T_{i+1,j,k-4}^{t+1} = & T_{i+1,j,k-4}^t + \frac{\Delta t}{\rho_s C_{p,s}(r\Delta\theta\Delta r\Delta z)} \left[ k_{cm}(r\Delta\theta\Delta r) \left( \frac{T_b - T_{i+1,j,k-4}}{\Delta z} \right) \right. \\
& + k_{cm}(r\Delta\theta\Delta L) \left( \frac{T_{i,j,k-4} - T_{i+1,j,k-4}}{\Delta r} \right) - k_{cm}(r\Delta\theta\Delta L) \left( \frac{T_{i+1,j,k-4} - T_{i+2,j,k-4}}{\Delta r} \right) \\
& + k_{cm}(\Delta r\Delta L) \left( \frac{T_{i,j-1,k-4} - T_{i+1,j,k-4}}{r\Delta\theta} \right) - k_{cm}(\Delta r\Delta L) \left( \frac{T_{i+1,j,k-4} - T_{i,j+1,k-4}}{r\Delta\theta} \right) \\
& \left. + k_s(r\Delta\theta\Delta r) \left( \frac{T_{i+1,j,k-3} - T_{i+1,j,k-4}}{\Delta z} \right) + k_s(r\Delta\theta\Delta z) \left( \frac{T_{i,j,k-4} - T_{i+1,j,k-4}}{\Delta r} \right) \right]
\end{aligned}$$

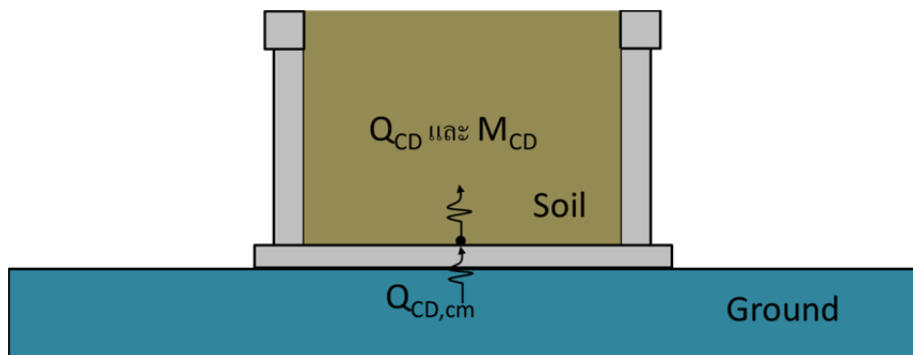
$$\begin{aligned}
& -k_s(r\Delta\theta\Delta z) \left( \frac{T_{i+1,j,k-4} - T_{i+2,j,k-4}}{\Delta r} \right) + k_s(\Delta r\Delta z) \left( \frac{T_{i,j-1,k-4} - T_{i+1,j,k-4}}{r\Delta\theta} \right) \\
& - k_s(\Delta r\Delta z) \left( \frac{T_{i+1,j,k-4} - T_{i,j+1,k-4}}{r\Delta\theta} \right) - \rho_s H_s (r\Delta\theta\Delta r\Delta z) \left( \frac{\omega_{i+1,j,k-4}^{t+1} - \omega_{i+1,j,k-4}^t}{\Delta t} \right) \Big]
\end{aligned}
\tag{3.28}$$

สมการสมดุลการถ่ายเทมวลภายในดินชั้นล่าง สามารถเขียนสมการได้เป็น

$$M_{ST} = M_{CD} \tag{3.29}$$

ดังนั้นความชื้นดินที่ตำแหน่ง  $(i+1, j, k-4)$  สามารถหาได้ดังนี้

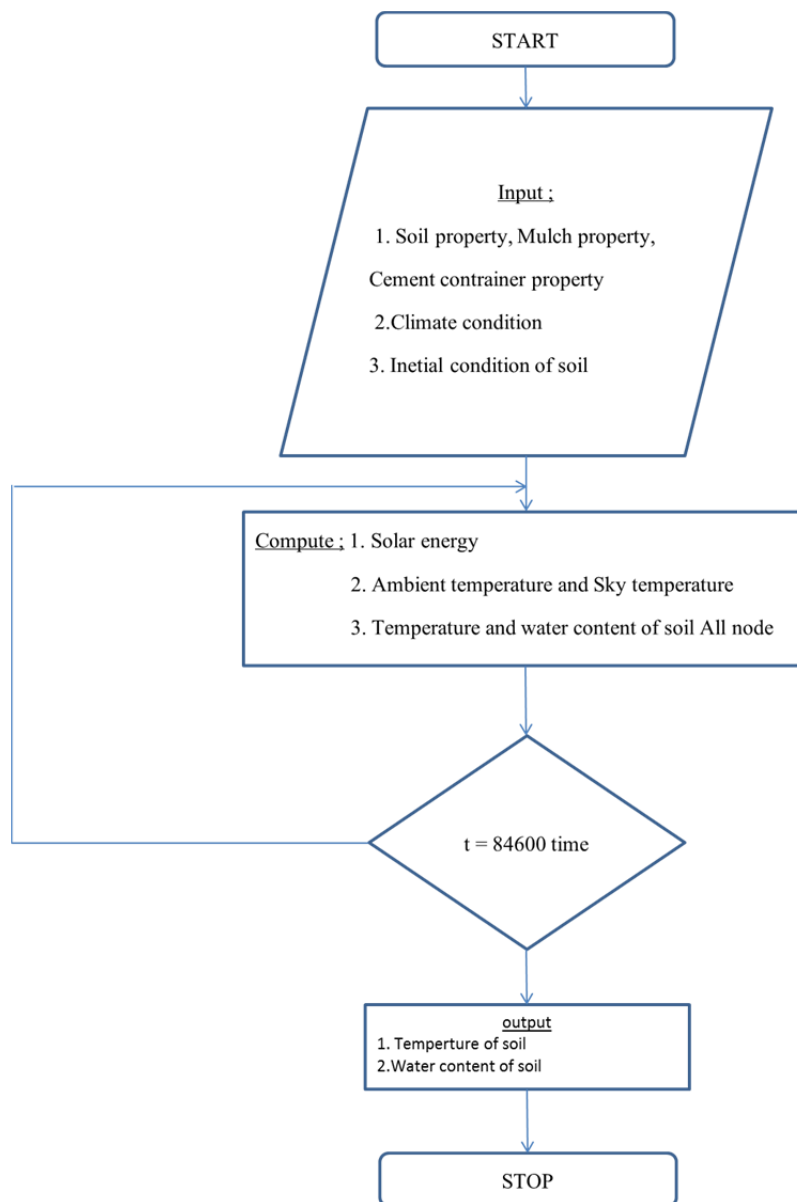
$$\begin{aligned}
\omega_{i+1,j,k-4}^{t+1} &= \omega_{i+1,j,k-4}^t + \frac{\Delta t}{(r\Delta\theta\Delta r\Delta z)} \left[ D_m(r\Delta\theta\Delta r) \left( \frac{\omega_{i+1,j,k-3} - \omega_{i+1,j,k-4}}{\Delta z} \right) \right. \\
&+ D_m(r\Delta\theta\Delta z) \left( \frac{\omega_{i,j,k-4} - \omega_{i+1,j,k-4}}{\Delta r} \right) - D_m(r\Delta\theta\Delta z) \left( \frac{\omega_{i+1,j,k-4} - \omega_{i+2,j,k-4}}{\Delta r} \right) \\
&\left. + D_m(\Delta r\Delta z) \left( \frac{\omega_{i,j-1,k-4} - \omega_{i+1,j,k-4}}{r\Delta\theta} \right) - D_m(\Delta r\Delta z) \left( \frac{\omega_{i+1,j,k-4} - \omega_{i,j+1,k-4}}{r\Delta\theta} \right) \right]
\end{aligned}
\tag{3.30}$$



ภาพที่ 3-21 สมดุลพลังงานอันเนื่องมาจากการถ่ายเทความร้อนและมวลสารของดินที่ผิวด้านล่าง

### แผนผังการคำนวณในแบบจำลอง

ขั้นตอนการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะใช้โปรแกรม MATLAB ช่วยในการคำนวณ ดังภาพที่ 3-22 โดยในโปรแกรมได้สร้างส่วนการคำนวณต่าง ๆ (ภาคผนวก ข) ดังนี้



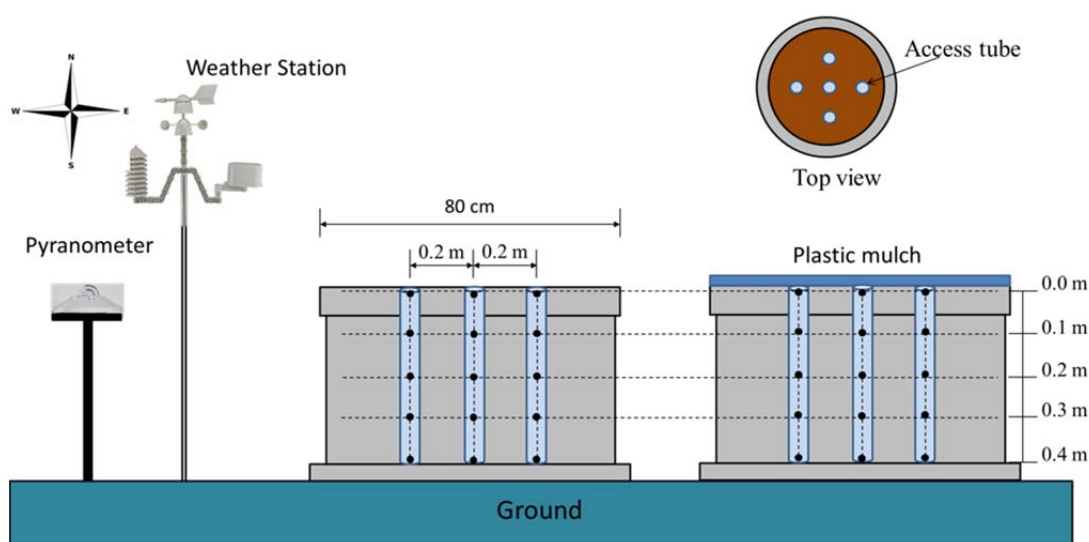
ภาพที่ 3-22 แผนภาพแสดงการทำงานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



1. การรับค่าเริ่มต้นในการคำนวณ ได้แก่ สมบัติทางกายภาพของดินละวงบ่อซีเมนต์ สมบัติทางแสงและทางความร้อนของวัสดุคลุมดิน ขนาดของวงบ่อซีเมนต์ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมเริ่มต้น อุณหภูมิและความชื้นดินเริ่มต้น
2. การคำนวณค่ารังสีอาทิตย์
3. การคำนวณอุณหภูมิอากาศแวดล้อม ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิท้องฟ้า
4. การคำนวณอุณหภูมิและความชื้นดินทุก 3,600 วินาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

### การทดลองเปรียบเทียบเพื่อตรวจสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะทำการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิและความชื้นภายในดินที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นภายในดินที่ได้จากการทดลองโดยใช้เครื่องมือวัดอุณหภูมิและความชื้นดังภาพที่ 3-23 การทดลองนี้ได้ดำเนินการที่ สวนภูมะนาว อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี และคณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา วงบ่อซีเมนต์ที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 cm ความสูง 40 cm และความหนา 5 cm มีฝาปิดวงบ่อด้านล่าง จำนวน 2 วงบ่อ แบ่งเป็นวงบ่อที่ไม่มีการคลุมดินและวงบ่อที่มีการคลุมดิน ภายในวงบ่อซีเมนต์บรรจุดินเต็มวงบ่อพอดีโดยยังไม่มีปลูกมะนาวลงในวงบ่อ ดินที่นำมาใช้ในการทดลองเป็นดินพื้นที่จากสวนภูมะนาว ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินการทดลองดังนี้



ภาพที่ 3-23 การติดตั้งเครื่องมือสภาพอากาศแวดล้อม เครื่องมือวัดค่ารังสีอาทิตย์ และเครื่องมือวัดอุณหภูมิและความชื้น

### 1. การเตรียมดินและพลาสติกคลุมดิน

1.1 ดินทั้งหมดจะถูกนำมาทำบดให้มีความละเอียด และผสมน้ำสะอาด ในอัตราส่วน 1:15 จากนั้นคลุกเคล้าให้เข้ากันก่อนนำไปใส่ในวงบ่อซีเมนต์เพื่อให้มีอุณหภูมิและความชื้นเริ่มต้นใกล้เคียงกัน

1.2 นำดินใส่ลงในบ่อซีเมนต์จนเต็มระดับความสูงเสมอปากวงบ่อซีเมนต์พอดี พร้อมกับติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิและความชื้นภายในดิน ดังภาพที่ 3-24

1.3 วัสดุคลุมดินที่ใช้ในการปลูกพืชโดยทั่วไปมี 3 ชนิด ได้แก่ พลาสติกแบบสีดำ พลาสติกแบบขาวขุ่น และพลาสติกสะท้อนแสง โดยมีความหนา 150 ไมครอน



(ก)



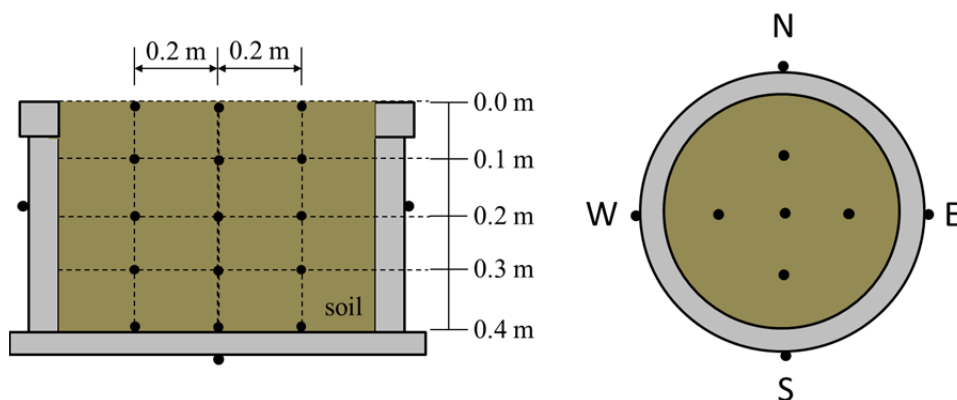
(ข)

ภาพที่ 3-24 การเตรียมดินและพลาสติกคลุมดิน (ก) ไม่มีพลาสติกคลุมดิน (ข) มีพลาสติกคลุมดิน

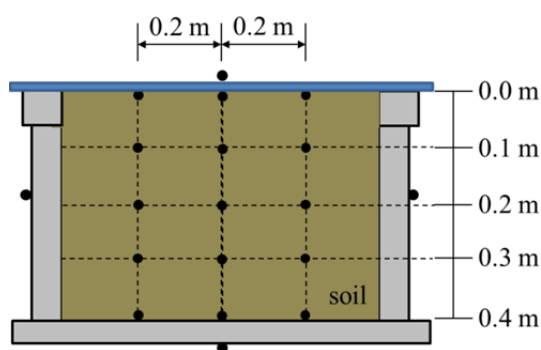
### 2. การติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิ

การวัดอุณหภูมิในการทดลองนี้ถูกแบ่งออกเป็น การวัดอุณหภูมิดินและการวัดอุณหภูมิของวัสดุต่าง ๆ ซึ่งประกอบด้วยอุณหภูมิที่ผิววงบ่อซีเมนต์ และอุณหภูมิของพลาสติกคลุมดิน โดยใช้เครื่องบันทึกอุณหภูมิรุ่น Thermometer Data Logger BTM-4208SD (Lutron) มีช่องบันทึกข้อมูล 12 ช่อง พร้อมสายเทอร์โมคัปเปิล ชนิด K ในการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ทั้งหมด ดังภาพที่ 3-25 ซึ่งมีช่วงวัดอุณหภูมิภายในห้อง -50 ถึง 250 °C มีความถูกต้อง 0.1 °C ต่อ 1 องศา การติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิดินที่อยู่ภายในบ่อซีเมนต์ จะแบ่งออกเป็น 5 ระดับความลึกเท่าๆ กัน ตามความสูงของวงบ่อซีเมนต์ ประกอบด้วยที่ระดับความลึก 0 (ที่ผิวดิน), 10, 20, 30 และ 40 cm ตามลำดับ และระยะตามแนวรัศมีซึ่งห่างจากจุดศูนย์กลาง 20 cm ในทิศเหนือ ทิศใต้ ทิศตะวันออก และทิศตะวันตก รวมเป็นจำนวน 25 จุด ส่วนที่วงบ่อซีเมนต์จะติดตั้งที่ผิวด้านนอกของวงบ่อซีเมนต์ 5 จุด ได้แก่บริเวณผิวด้านทิศเหนือ ทิศใต้ ทิศตะวันออก ทิศตะวันตก และได้สำรองสำหรับกรณี

ที่มีการคลุมด้วยพลาสติกคลุมดินจะมีการเพิ่มตำแหน่งการวัดอุณหภูมิอีก 2 ตำแหน่ง ได้แก่ ตำแหน่งผิวพลาสติกด้านบน (สัมผัสอากาศ) และผิวพลาสติกด้านล่าง (สัมผัสดิน) ดังภาพที่ 3-26



ภาพที่ 3-25 การติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิดินและที่ผิวของวงบ่อซีเมนต์ที่ไม่มีวัสดุคลุมดิน

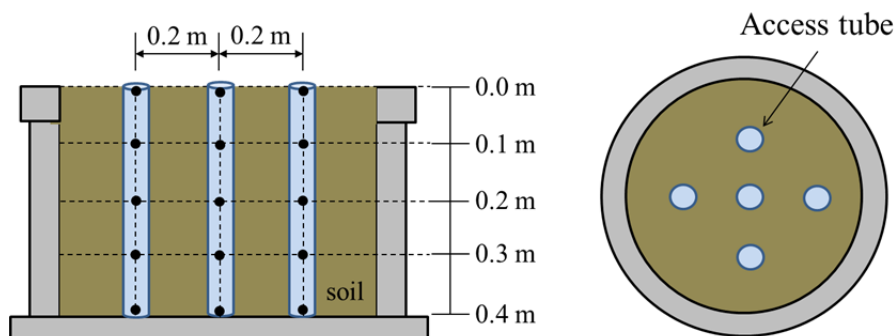


ภาพที่ 3-26 การติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิภายในดิน พลาสติกคลุมดิน และที่ผิววงบ่อซีเมนต์ที่มีวัสดุคลุมดิน

### 3. การติดตั้งเครื่องมือวัดความชื้นภายในดิน

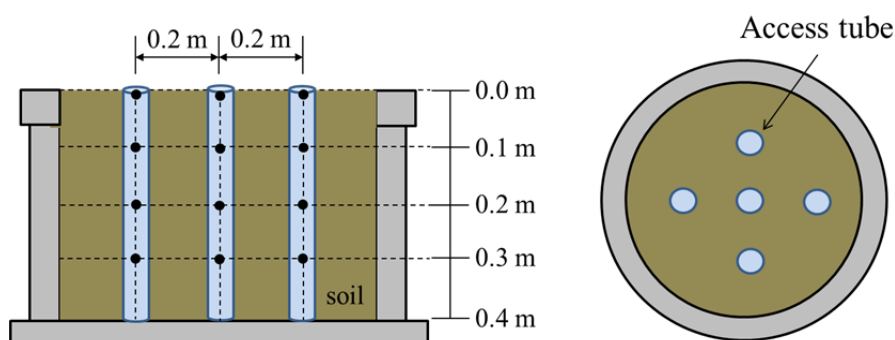
การวัดความชื้นดินจะใช้หัววัดความชื้นดินรุ่น PR2/4 (Delta-T device) เชื่อมต่อกับเครื่องบันทึกข้อมูลรุ่น HH2 Moisture Meter (Delta-T device) ในการวัดค่าความชื้นที่ถูกต้องนั้นไม่สามารถนำหัววัดความชื้นเสียบลงไปโดยตรงในดินเพื่อวัดความชื้นได้โดยตรง แต่จะต้องใช้ท่อพลาสติก (access tube) ที่มีลักษณะเฉพาะสำหรับหัววัดชนิดดังกล่าว โดยท่อนี้มีความยาว 56 cm จะถูกฝังลงในดินด้วยการเจาะดินจากเครื่องมือขุดดินเฉพาะ (auger) หลังจากนั้นนำค้อนยางตอกท่อลงไป

หลุมที่จะเจาะเพื่อให้ดินสัมผัสกับผนังของท่อพอดิและท่อนี้ก็สัมผัสได้พอดีกับเซนเซอร์ที่ทำกรวัดข้อมูล ซึ่งการวัดความชื้นดินจะมีหน่วยการวัดอยู่ในรูปของสัดส่วนความชื้นเชิงปริมาตร (Volumetric soil moisture content) ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  or %vol) โดยมีตำแหน่งการวัดเหมือนกับการวัดอุณหภูมิดิน ดังภาพที่ 3-27



ภาพที่ 3-27 การติดตั้งเครื่องมือวัดความชื้นของดินภายในวงบ่อซีเมนต์ที่สวนภูมะนาว

สำหรับการทดลองที่คาบฟ้าอาคารภาควิชาฟิสิกส์ เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านสถานที่และลักษณะการใช้งานของเครื่องมือ ในการทดลองจึงจะทำการวัดที่ระดับความลึก 0, 10, 20 และ 30 cm ดังภาพที่ 3-28



ภาพที่ 3-28 การติดตั้งเครื่องมือวัดความชื้นของดินอยู่ในวงบ่อซีเมนต์ที่คาบฟ้าอาคารภาควิชาฟิสิกส์

#### 4. การติดตั้งเครื่องมือวัดสภาพอากาศและรังสีอาทิตย์

เครื่องมือวัดสภาพอากาศที่ใช้ในการทดลองคือรุ่น Professional Wireless Weather Station Touch Panel model WA1091 ซึ่งประกอบด้วยเครื่องมือวัดอุณหภูมิอากาศ เครื่องมือวัด

ปริมาณน้ำฝน เครื่องมือวัดความเร็วลม และ เครื่องมือวัดความชื้นสัมพัทธ์ โดยมีช่วงอุณหภูมิภายในห้อง 0 ถึง +50 °C อุณหภูมิภายนอก -40 ถึง +60 °C ซึ่งมีความถูกต้อง  $\pm 1.0$  °C และมีช่วงวัดความชื้นสัมพัทธ์อากาศ 20 ถึง 90 °C ซึ่งมีความถูกต้อง  $\pm 5$  °C เครื่องมือวัดสภาพอากาศ แวดล้อม จะถูกติดตั้งที่ระดับความสูงห่างจากพื้น 2.0 m และเครื่องมือวัดรังสีอาทิตย์รวมแบบเคลื่อนย้ายได้ Pyranometer รุ่น CMP 3 (Kipp & Zonen) มีช่วงวัดรังสีอาทิตย์รวม 0 ถึง 1000 W/m<sup>2</sup> ที่ช่วงความยาวคลื่น 300 ถึง 2800 nm ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 20 W/m<sup>2</sup> เวลาตอบสนองน้อยกว่า 18 s พร้อมเครื่องบันทึกข้อมูล (Logger) รุ่น METEON โดยเครื่องมือทั้งสองจะติดตั้งอยู่ใกล้กับบริเวณที่ทำการทดลอง ดังภาพที่ 3.29



ภาพที่ 3-29 การติดตั้งเครื่องมือวัดสภาพอากาศ

#### 5. การเก็บข้อมูล

ในการทดลอง ข้อมูลสภาพอากาศแวดล้อมบริเวณวงบ่อซีเมนต์ ข้อมูลรังสีอาทิตย์ ข้อมูลอุณหภูมิดินและความชื้นภายในดินที่ตำแหน่งต่าง ๆ ข้อมูลอุณหภูมิที่ผิวของวงบ่อซีเมนต์ จะทำการเก็บข้อมูลทุก 3 ชั่วโมง เป็นระยะเวลา 3 วัน ต่อพลาสติกตัวอย่าง 1 ชนิด

#### 6. การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจะกับการทดลองที่วัดจริง ในงานวิจัยนี้จะใช้ค่าทางสถิติ ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดลอง

ประกอบด้วย ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ แลสัมประสิทธิ์ความแปรผัน และความแตกต่างระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดลองประกอบด้วยค่ากลางของความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์ ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย และค่ากลางของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient: r) ใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยมีค่าอยู่ที่ -1 ถึง 1 โดยค่า r สามารถ เกิดขึ้นได้ 3 ทิศทาง โดย สหสัมพันธ์ทางบวก (Positive Correlations) ซึ่งหมายความว่าเมื่อตัวแปรตัวหนึ่งเพิ่มหรือลดลงอีกตัวแปรหนึ่งก็จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงไปด้วย สหสัมพันธ์ทางลบ (Negative Correlations) หมายถึงเมื่อตัวแปรตัวหนึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงอีกตัวหนึ่งจะมีค่าเพิ่มหรือลดลงตรงข้ามเสมอ และ สหสัมพันธ์เป็นศูนย์ (Zero Correlations) หมายถึงตัวแปรสองตัวไม่มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน ซึ่งมีสมการดังต่อไปนี้ (อิสรภรณ์ รินไชสง, 2559)

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3.31)$$

เมื่อ x คือค่าจากการวัด  
 y คือค่าจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์  
 $\bar{x}, \bar{y}$  คือค่าเฉลี่ยจากการวัดและจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ตามลำดับ  
 i คือจำนวนครั้งของข้อมูล จากข้อมูลทั้งหมด N ครั้ง

โดยค่า r เมื่อมีค่าเข้าใกล้ 0.7 - 1.0 แสดงว่าตัวแปรทั้ง 2 มีความสัมพันธ์กันมาก ถ้าอยู่ระหว่าง 0.30 - 0.70 จะหมายความว่า ตัวแปรทั้ง 2 มีความสัมพันธ์กันปานกลาง และ 0.0 - 0.3 จะมีความสัมพันธ์กันน้อย และเมื่อยกกำลังสองค่า r และคูณด้วย 100 จะเป็นสัมประสิทธิ์ความแปรผัน (Coefficient of Determination: R<sup>2</sup>) ซึ่งหมายถึงความแปรผันร่วมกันของตัวแปร 2 ตัว ที่บ่งบอกถึงความสัมพันธ์ว่าความแปรปรวนของตัวแปร x อธิบายถึงความแปรปรวน y ได้ร้อยละเท่าใด (บุญธรรม กิจปรีดาวิสุทธิ, 2553)

ค่ากลางของความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์ (Mean absolute error: MAE) เป็นการตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนของการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งมีสมการดังต่อไปนี้

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N (x - y)}{N} \quad (3.32)$$

ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root-mean-square error : RMSE) เป็นการตรวจสอบค่าความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เช่นกัน ซึ่งมีสมการดังต่อไปนี้

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x - y)^2}{N}} \quad (3.33)$$

ค่ากลางของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (Mean absolute percentage error; MAPE)

$$\text{MAPE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|x - y|}{x} \quad (3.34)$$

โดยแบบจำลองที่ดีจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่สูงสุด ให้ค่า MAE MAPE และค่า RMSE น้อยที่สุด (บุญคง คำกรุฑลาวงษ์, อุษาวดี ตันติวรานุกฤษ์ และ มาริณา มะหนิ 2552)

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้การดำเนินในหลายส่วน ประกอบด้วยการสำรวจลักษณะการปลูก และ อุณหภูมิและความชื้นดินที่เหมาะสมสำหรับการปลูกมะนาวในวงบ่อซีเมนต์ของผู้ปลูกมะนาวใน เขตภาคตะวันออกเฉียงใต้ด้วยวิธีการสัมภาษณ์เชิงลึก เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในออกแบบและวางแผนการ ทดลอง การสร้างชุดทดลองเพื่อทดลองหาสมบัติทางกายภาพของดินและสมบัติทางแสงของวัสดุ คลุมดินเพื่อใช้ในการคำนวณในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ทำนายอุณหภูมิและความชื้นดินและการวัดค่าอุณหภูมิและความชื้นดินภายในวงบ่อซีเมนต์ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ซึ่งมีรายละเอียดของวิธีการวิจัยดังต่อไปนี้

#### การปลูกมะนาวในวงบ่อซีเมนต์

จากการลงพื้นที่สำรวจข้อมูลจากผู้ปลูกมะนาวในวงบ่อซีเมนต์ในเขตภาคตะวันออกเฉียงใต้ด้วย วิธีการเลือกแบบบังเอิญและสัมภาษณ์เชิงลึก ในอำเภอเมือง อำเภอศรีราชา และ อำเภอเกาะจันทร์ จังหวัดชลบุรี และ อำเภอเมือง จังหวัดระยอง (ภาพที่ ก) พบว่าผู้ปลูกมะนาวเป็นเพศชายมีอายุ 35 - 62 ปี ประกอบอาชีพเกษตรกรรมและปศุสัตว์ตั้งแต่ 5 ปี ขึ้นไป โดยมีระดับการศึกษาตั้งแต่ชั้น ประถมถึงระดับอนุปริญญา โดยผู้ปลูกส่วนใหญ่จะปลูกมะนาวเพราะมีราคาสูง และเป็นพืชที่กำลัง ได้รับความนิยมในการปลูกเสริมรายได้ ซึ่งมีรายละเอียดในส่วนต่าง ๆ ดังนี้

1. สภาพโดยทั่วไปของการปลูกมะนาวพบว่ามีตั้งแต่ผู้เริ่มปลูกจนถึงการปลูกมาแล้วเป็น ระยะเวลาานาน 5 ปี และนิยมปลูกมะนาวพันธุ์แป้น ได้แก่ แป้นพิจิตร 1 และ แป้นรำไพ โดยผู้ที่ปลูก มีจำนวนวงบ่อประมาณ 20 วงบ่อ ส่วนผู้ที่ปลูกมานาน มีวงบ่อมากถึง 400 วงบ่อ และทำการปลูก มะนาวด้วยตนเอง ผู้ปลูกจะใช้วงบ่อซีเมนต์ที่ใช้ในการปลูกมีแบบที่ประยุกต์จากบ่อส้วมซึมหรือ บ่อเกรอะ และแบบที่ทำขึ้นเพื่อปลูกมะนาว โดยเฉพาะ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 และ 100 cm และมีความสูง 40 และ 60 cm ซึ่งมีทั้งแบบที่มีและไม่มีฝาปิดใด้วงบ่อ โดยมีวิธีการเลือกขนาดของ วงบ่อซีเมนต์จากคำแนะนำและศึกษาจากผู้ปลูกที่มีประสบการณ์ รวมทั้งยังหาข้อมูลทางสื่อ ออนไลน์และในหนังสือคู่มือการปลูกมะนาวในวงบ่อซีเมนต์ประกอบกัน และจากการสัมภาษณ์ผู้ ปลูกพบว่าขนาดของวงบ่อและการใช้ฝารองบ่อไม่มีผลต่อการเจริญเติบโต แต่การใช้ฝารองบ่อจะ ทำให้สามารถปลูกต้นมะนาวได้อายุสั้นกว่าการปลูกโดยไม่ใช้ฝารองใด้บ่อ



2. ลักษณะการปลูกพบว่าวัสดุปลูกที่ใช้มีส่วนประกอบด้วยดินท้องถิ่น ปุ๋ยคอก และ แกลบ มะพร้าวสับ หรือบางรายจะใช้มูลสัตว์ที่ได้จากการเลี้ยงสัตว์ซึ่งเป็นอาชีพหลักของเกษตรกร ผู้ปลูกมะนาว ในอัตราส่วน 3:1:1 และต้องมีการระบายน้ำได้ดี ผู้ปลูกจะไม่ใช้พลาสติกหรือวัสดุคลุมดินเพื่อควบคุมการให้น้ำแก่ต้นมะนาวเพื่อให้ต้นมะนาวออกผลผลิตในช่วงนอกฤดูปลูก แต่จะใช้วิธีการรดให้น้ำแก่ต้นมะนาวเท่านั้น และบางสวนให้ออกผลผลิตตามภูมิอากาศแต่ละท้องที่ ผู้ปลูกมีการให้น้ำไม่เท่ากันและเวลาแตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของผู้ปลูก เช่นการกำจัด การจับตัวเป็นก้อนเพื่อคาดการณ์ความชื้นในดิน เป็นต้น การพิจารณาสภาพอากาศในรอบวันหรือในรอบสัปดาห์ ความสะดวกสบายของเกษตรกรเอง และคำแนะนำจากผู้ปลูกก่อนหน้า ซึ่งจากการสำรวจพบว่าผู้ปลูกบางส่วนจะมีการรดน้ำในช่วงเวลา 9.00 น. หรือ 14.00 - 15.00 น. ผลผลิตที่ได้มีประมาณ 200 – 1,000 ผล ต่อต้น โดยจะมีอายุการให้ผลผลิตประมาณ 8 ปี และเมื่อเทียบกับการปลูกในวงบ่อซีเมนต์ผู้ปลูกให้ความเห็นว่า การปลูกในวงบ่อจะมีข้อดีคือสามารถควบคุมการให้ผลผลิตได้ สะดวกในการรดน้ำใส่ปุ๋ย ง่ายในการดูแลรักษาและมีความเป็นระเบียบเรียบร้อย แต่ก็มีข้อเสียคือต้นมะนาวจะมีอายุต้นไม่มากเนื่องจากเมื่อต้นมีอายุมากขึ้นปริมาณรากภายในวงบ่อซีเมนต์จะมากขึ้น ไม่มีดินหรือธาตุอาหารเพียงพอต่อความต้องการของดินรวมทั้งทำให้วงบ่อซีเมนต์แตกเสียหาย

3. ความคิดเห็นเกี่ยวกับอุณหภูมิและความชื้นดินพบว่า ผู้ปลูกทุกรายไม่ทราบค่าอุณหภูมิและความชื้นในดินที่เหมาะสมในการปลูกมะนาว และคิดว่าอุณหภูมิดินไม่มีผลหรือมีผลน้อยมากๆ ต่อการเจริญเติบโตของต้นมะนาว ในขณะที่ความชื้นของดิน ผู้ปลูกคิดว่าน่าจะมีส่วนในการเจริญเติบโตของพืช รวมถึงไม่มีเครื่องมือในการควบคุมและตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นในดิน

4. ข้อเสนอแนะและสิ่งที่ต้องการของผู้ปลูกคืออยากมีเครื่องมือที่สามารถบอกถึงช่วงเวลาการใช้น้ำหรือควบคุมสภาพแวดล้อมภายในดินได้อย่างสะดวกและง่ายต่อการใช้งาน และอยากทราบค่าอุณหภูมิและความชื้นในดินที่เหมาะสมเพื่อสามารถบริหารจัดการการควบคุมปัจจัยแวดล้อมในดินที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของต้นมะนาว รวมทั้งอยากให้มามีวิธีการปลูกโดยปราศจากการใช้สารเคมี และปราศจากโรคต่าง ๆ

จากข้อมูลการลงพื้นที่สัมภาษณ์ได้เลือกแบบการทดลองสำหรับใช้ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากสวนภูมะนาว อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี ในการใช้สถานที่ วัสดุปลูกและวงบ่อซีเมนต์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 cm และสูง 40 cm โดยมีฝาปิดไว้วงบ่อ ในการดำเนินการทดลอง

## สมบัติทางกายภาพของดินและสมบัติทางแสงของวัสดุคลุมดิน

จากการทดลองหาค่าสมบัติทางกายภาพของดิน ประกอบด้วย ความหนาแน่น การนำความร้อน ความจุความร้อน ค่าการแพร่ไอน้ำของดิน และสมบัติทางแสงของวัสดุคลุมดิน ประกอบด้วย ค่าการส่งผ่าน การดูดกลืนและการสะท้อน เพื่อใช้สำหรับการคำนวณในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

### 1. ความหนาแน่นของดิน

จากการทดลองหาน้ำหนักและปริมาตรของดินแล้วนำมาคำนวณหาค่าความหนาแน่นอนุภาคของดินจากสมการ (2.23) พบว่ามีค่าประมาณ  $2,222.22 \text{ kg/m}^3$  และจากการวิเคราะห์เนื้อดินโดยใช้ไฮโกรมิเตอร์พบว่า ดินที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยดินทราย 82% ดินทรายแป้ง 12% และดินเหนียว 6% ซึ่งอยู่ในช่วงของดินแบบดินทรายแป้ง (Loamy sand) ตามภาพที่ 3.7 ซึ่งมีความพรุนรวม (Total porosity)  $0.437 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  (Rawls, Brakensiek, & Saxton 1982) เมื่อคำนวณความหนาแน่นรวมของดินจากความหนาแน่นของอนุภาคดินและความพรุนของดินพบว่ามีค่าประมาณ  $1,251.11 \text{ kg/m}^3$  (ภาคผนวก ก.1 – ก.3)

### 2. ความจุความร้อนและการแพร่ไอน้ำของดิน

ดินที่ได้จากการวิเคราะห์เนื้อดินเป็นดินทรายแป้งเมื่ออ้างอิงจากงานวิจัยของ Beringer, Lynch, Chapin, Mack, and Bonan (2001) พบว่าความจุความร้อนมีค่าประมาณ  $2,145.52 \text{ KJ/m}^3\text{-K}$  เมื่อนำค่าความหนาแน่นของดินมาหารจะได้ค่าความจุความร้อนของดินคือ  $965.48 \text{ J/kg K}$  ส่วนค่าการแพร่ไอน้ำของดินพบว่าดินทรายแป้งมีความพรุนที่ของไหลที่ไหลได้อย่างอิสระ (Effective porosity)  $0.401 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  และความพรุนรวม (Total porosity)  $0.4347 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  (Rawls et al., 1982) เมื่อนำไปคำนวณตามสมการ (2.25) จะได้ค่าการแพร่ไอน้ำของดินอยู่ที่ประมาณ  $6.73 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  (ภาคผนวก ก.4)

### 3. การนำความร้อนของดิน

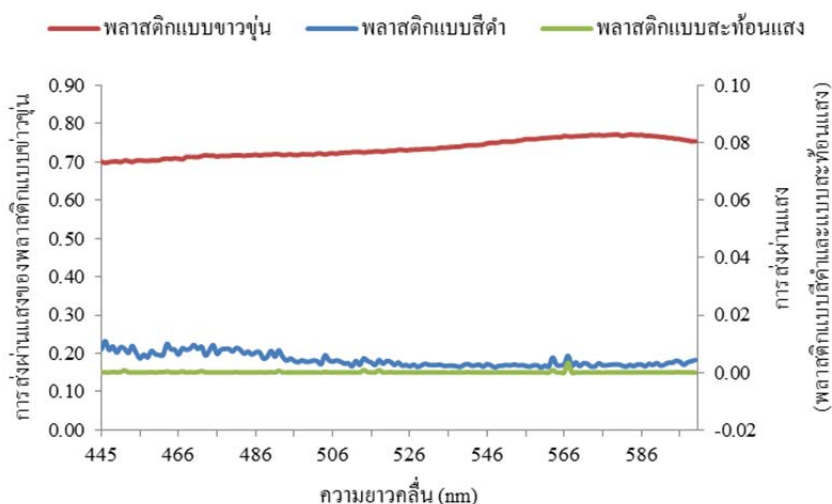
การทดลองหาค่าการนำความร้อนของดินด้วยวิธีการวัดความแตกต่างระหว่างผิวทั้งสองด้านของดิน โดยทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าเพื่อนำมาคำนวณพลังงานไฟฟ้า และวัดอุณหภูมิที่ผิวดินทั้งด้านร้อนและด้านเย็น แล้วนำข้อมูลทั้งหมดมาทำการคำนวณค่าการนำความร้อนตามสมการ (3.4) (ภาคผนวก ง-1) ซึ่งผลการทดลองพบว่าค่าการนำความร้อนของดินเฉลี่ยมีค่าประมาณ  $0.043 \text{ W/m-K}$  แสดงดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 การนำความร้อนของดิน

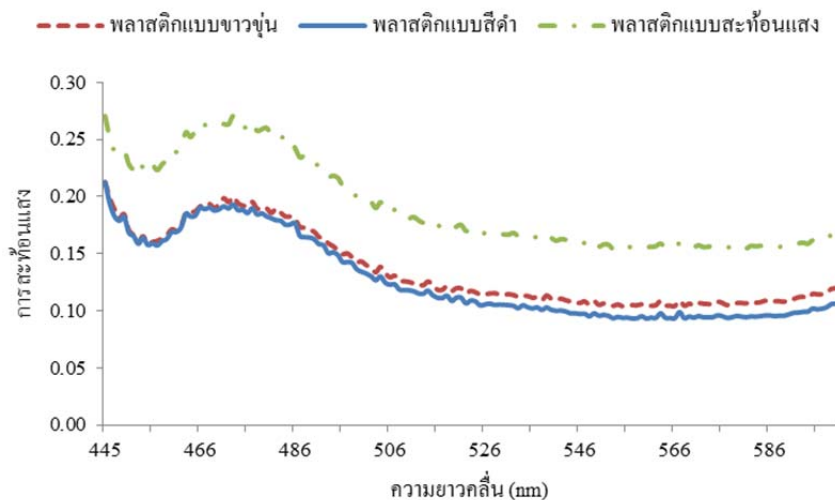
ครั้งที่	ผลต่างอุณหภูมิ (K)	ค่าการนำความร้อน (W/m-K)
1	10.500	0.045
2	10.300	0.046
3	12.300	0.040
เฉลี่ย		0.043

#### 4. สมบัติทางแสงของวัสดุคลุมดิน

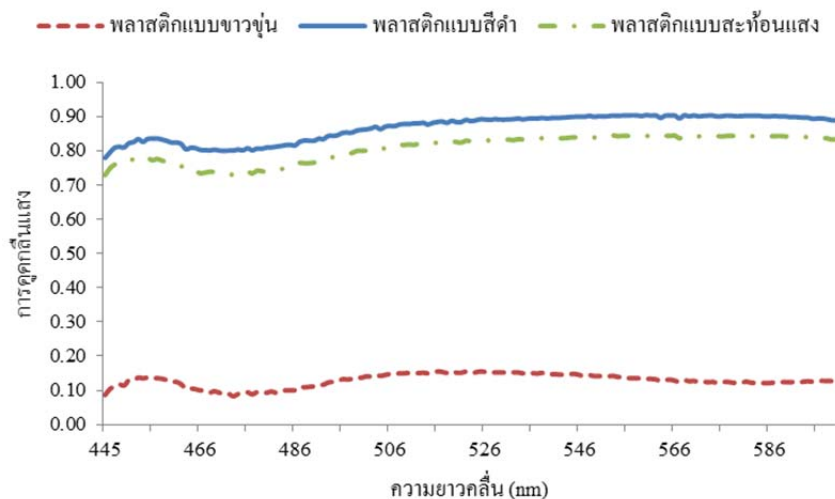
การวัดค่าการส่งผ่านและค่าการสะท้อนด้วยชุดทดลองอย่างง่ายที่สร้างขึ้นในช่วงความยาวคลื่น 410 - 640 nm (ภาคผนวก ง-2) ของพลาสติกคลุมดิน 3 ชนิด ได้แก่ แบบขาวขุ่น แบบสีดำ และแบบสะท้อนแสงแสดงดังภาพที่ 4-1 - 4-2 จากภาพที่ 4-1 แสดงสมบัติการส่งผ่านของแสงพบว่าค่าการส่งผ่านแสงของพลาสติกแบบสีดำและแบบสะท้อนแสงมีค่าเข้าใกล้ศูนย์หรืออาจกล่าวได้ว่าพลาสติกทั้ง 2 ชนิดไม่มีการส่งผ่านแสง ส่วนพลาสติกแบบขาวขุ่นมีการส่งผ่านมากที่สุด จากภาพที่ 4-2 แสดงสมบัติการสะท้อนของแสงพบว่าพลาสติกแบบสะท้อนแสง (โดยให้ด้านสีขาวเป็นตัวรับแสง) มีค่าการสะท้อนสูงที่สุดรองลงมาคือแบบขาวขุ่นและแบบสีดำตามลำดับ โดยที่พลาสติกแบบขาวขุ่นและแบบสีดำนั้นมีค่าการสะท้อนแสงใกล้เคียงกัน เมื่อนำค่าการส่งผ่านแสงและการสะท้อนแสงมาคำนวณหาค่าการดูดกลืนแสงพบว่าพลาสติกแบบสีดำมากที่สุดรองลงมาเป็นแบบสะท้อนแสง และแบบขาวขุ่นตามลำดับ (ภาพที่ 4-3) โดยผลการทดลองแสดงค่าการส่งผ่านของ การสะท้อนแสงและการดูดกลืนแสงดังตารางที่ 4-2



ภาพที่ 4-1 ค่าการส่งผ่านของวัสดุคลุมดิน



ภาพที่ 4-2 ค่าการสะท้อนของวัสดุคลุมดิน



ภาพที่ 4-3 ค่าการดูดกลืนของวัสดุคลุมดิน

ตารางที่ 4-2 ผลการทดลองค่าการส่งผ่าน การสะท้อน และการดูดกลืนแสง

พลาสติก	ค่าการส่งผ่านของแสง			ค่าการสะท้อนแสง			ค่าการดูดกลืนแสง		
	สูงสุด	ต่ำสุด	เฉลี่ย	สูงสุด	ต่ำสุด	เฉลี่ย	สูงสุด	ต่ำสุด	เฉลี่ย
ดำ	0.01	0.00	0.00	0.21	0.09	0.13	0.90	0.78	0.87
ขาวขุ่น	0.77	0.70	0.74	0.21	0.10	0.14	0.16	0.08	0.13
สะท้อนแสง	0.00	0.00	0.00	0.27	0.15	0.19	0.85	0.73	0.81

## แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายอุณหภูมิและความชื้นดินที่มีและไม่มีวัสดุคลุมดิน

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นนี้ได้มีการคำนวณตัวแปรต่าง ๆ เพื่อใช้ทำนายอุณหภูมิและความชื้นของดินที่มีและไม่มีวัสดุคลุมดิน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

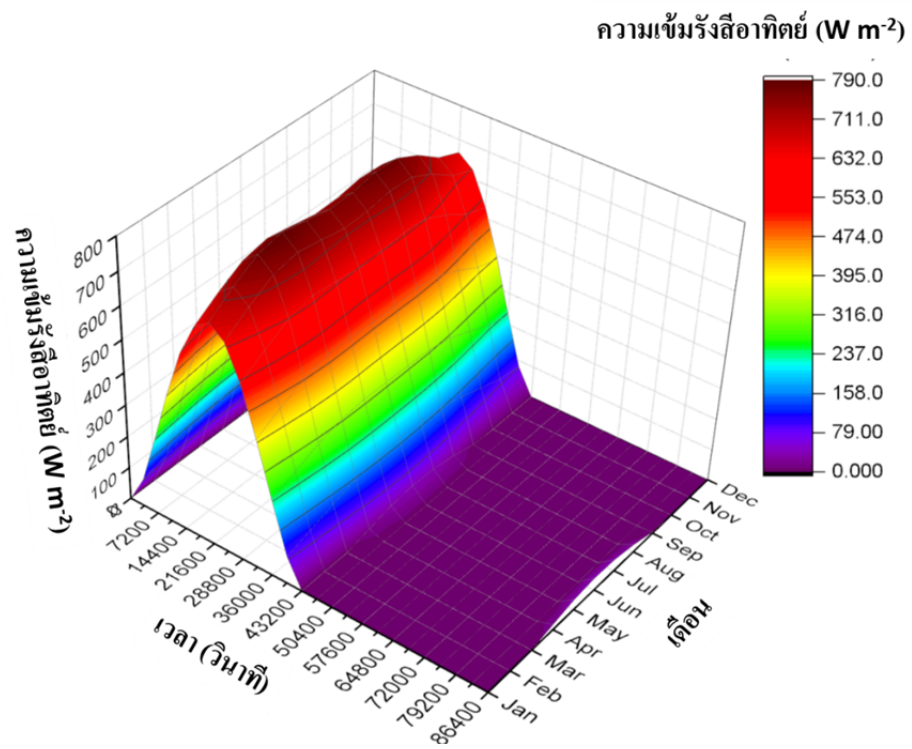
### 1. ลักษณะสภาพอากาศระหว่างวันที่ได้จากแบบจำลอง

สภาพภูมิอากาศอันประกอบด้วยปริมาณรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม และความชื้นสัมพัทธ์ ตัวแปรทั้ง 3 ล้วนเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นภายในดิน โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นได้นำทฤษฎีพื้นฐานมาทำการทำนายปริมาณรังสีอาทิตย์ และใช้ข้อมูลมาตรฐานภูมิอากาศและแสงอาทิตย์ (กรมพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ร่วมกับภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร 2548) มาใช้คำนวณอุณหภูมิอากาศแวดล้อม และความชื้นสัมพัทธ์ตลอดปีของประเทศไทย (จังหวัดชลบุรี) ซึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 4-4 - 4-6

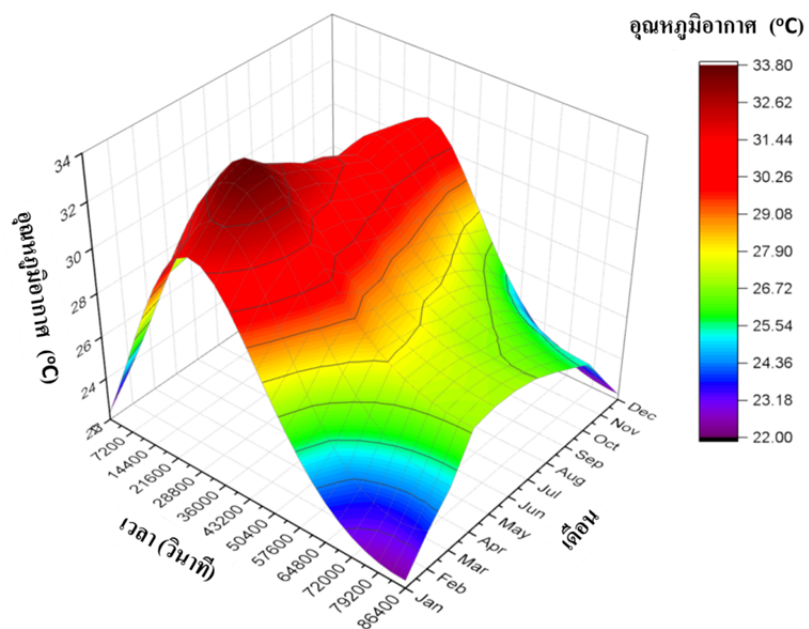
ผลการทำนายปริมาณรังสีอาทิตย์รายเดือนตลอดปีดังภาพที่ 4-4 พบว่าปริมาณรังสีอาทิตย์มีค่าสูงในช่วงเดือนเมษายน - กรกฎาคม และค่าต่ำสุดในช่วงเดือนพฤศจิกายน - กุมภาพันธ์ โดยในรอบวันจะมีค่าปริมาณรังสีอาทิตย์ในช่วงเวลาประมาณ 06.00 - 18.00 น. จากภาพที่ 4-5 แสดงข้อมูลอุณหภูมิอากาศรายปีพบว่าอุณหภูมิสูงสุดจะอยู่ในช่วงเวลา 11.00 - 15.00 น. และต่ำสุดในช่วงเวลาประมาณ 04.00 - 06.00 น. ของแต่ละวัน อุณหภูมิอากาศมีค่าสูงในช่วงเดือนมีนาคม - พฤษภาคม และอุณหภูมิต่ำ ในช่วงเดือนพฤศจิกายน - กุมภาพันธ์ ส่วนอัตราส่วนความชื้นในอากาศจะมีค่าสูงในช่วงเดือนพฤษภาคม - ตุลาคม โดยในรอบวันจะมีค่าสูงในช่วงเช้าของแต่ละวันดังภาพที่ 4-6

### 2. สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางแสงของวัสดุคลุมดิน

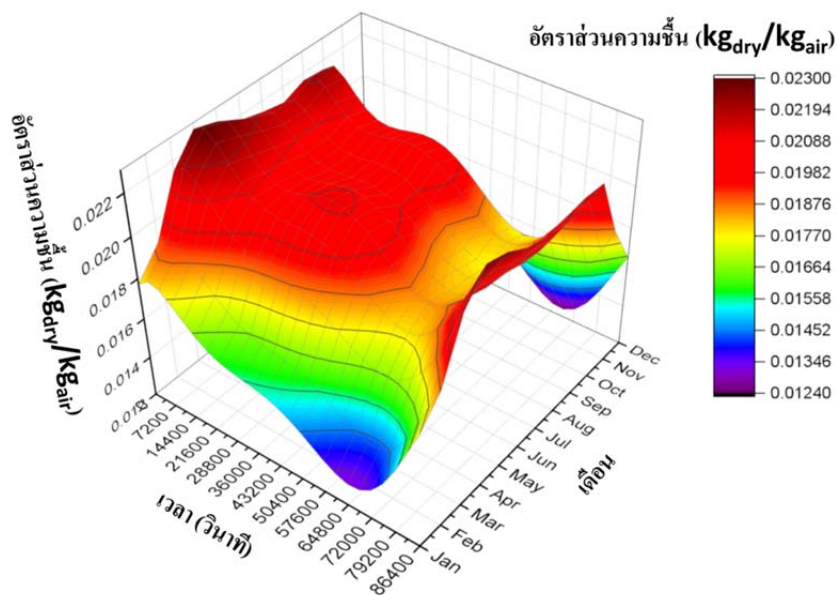
สมบัติทางกายภาพของดินที่ใช้ในการคำนวณในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ประกอบด้วย ความหนาแน่น การนำความร้อน ความจุความร้อน ค่าการแพร่ไอน้ำของดิน ซึ่งมีค่า  $1,251.11 \text{ kg/m}^3$ ,  $0.043 \text{ W/m-K}$   $965.48 \text{ J/kg K}$  และ  $6.73 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  ตามลำดับ ส่วนสมบัติทางแสงของวัสดุคลุมดินประกอบด้วยค่าการส่งผ่านแสง ค่าการสะท้อนแสง ค่าการดูดกลืนแสง จะได้ว่าพลาสติกแบบสีดำมีค่า 0.00, 0.13 และ 0.87 ตามลำดับ พลาสติกแบบขาวขุ่น มีค่า 0.74, 0.14 และ 0.13 ตามลำดับ



ภาพที่ 4-4 ปริมาณรังสีอาทิตย์รายเดือนตลอดปี



ภาพที่ 4-5 อุณหภูมิอากาศรายเดือนตลอดปี



ภาพที่ 4-6 อัตราส่วนความชื้นอากาศรายเดือนตลอดปี

### 3. การทำนายอุณหภูมิและความชื้นดินภายในวงบ่อซีเมนต์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้การทำนายอุณหภูมิและความชื้นดินภายในวงบ่อซีเมนต์ตลอดปีจะพิจารณาเวลา 06.00 น. ถึง 05.00 น. ของวันถัดไป รวมระยะเวลา 24 ชั่วโมง โดยค่าอุณหภูมิดินเริ่มต้นที่ใช้ในการคำนวณในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะกำหนดให้อุณหภูมิดินที่ผิวดิน มีค่าเท่ากับอุณหภูมิอากาศที่เวลา 06.00 น. ของเดือนนั้น ๆ ตามข้อมูลมาตรฐานภูมิอากาศ (กรมพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ร่วมกับภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2548) และที่ระดับความลึก 10, 20, 30 และ 40 cm จะใช้ข้อมูลจากการวัดด้วยเครื่องมือวัดอุณหภูมิดินมีค่าเฉลี่ย 30.14 °C, 31.64 °C, 32.30 °C และ 32.22 °C ตามลำดับ (ตารางที่ จ-1) ส่วนความชื้นดินใช้ข้อมูลจากการวัดด้วยเครื่องมือวัดความชื้นดินในพื้นที่จริงตั้งที่ระดับความลึก 0, 10, 20, 30 และ 40 cm มีค่าเฉลี่ย 3.52 %vol, 4.64 %vol, 4.58 %vol, 4.12%vol และ 4.50 %vol ตามลำดับ (ตารางที่ จ-2) และกำหนดให้มีค่าเท่ากันทุกเดือนจากสมมติฐานที่กำหนดให้อุณหภูมิและความชื้นดินมีค่าคงที่ขณะเริ่มคำนวณ การวิเคราะห์อุณหภูมิและความชื้นดินที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะนำผลลัพธ์ของแต่ละโหนด ที่ระดับความลึกต่าง ๆ มาคำนวณเป็นค่าเฉลี่ยเพื่อเป็นตัวแทนของอุณหภูมิและความชื้นดินในแต่ละระดับชั้นความลึก จากนั้นจะนำอุณหภูมิและความชื้นดินเฉลี่ยในแต่ละระดับชั้นความลึกมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นดินเทียบกับเวลา โดยมีผลลัพธ์ดังต่อไปนี้

### 1. อุณหภูมิดินภายในวงบ่อซีเมนต์ที่มีและไม่มีวัสดุคลุมดิน

อุณหภูมิดินภายในวงบ่อซีเมนต์ที่มีและไม่มีวัสดุคลุมดินในแต่ละระดับความลึกตลอดปีที่ทำนายจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับกรณีไม่มีวัสดุคลุมดินแสดงดังภาพที่ 4-7 เผยให้เห็นว่าอุณหภูมิดินเฉลี่ยที่ระดับความลึก 0 - 10 cm ในช่วงเวลากลางวัน (ช่วงที่มีรังสีอาทิตย์) มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและลดลงสอดคล้องตามปริมาณรังสีอาทิตย์ระหว่างวันอย่างชัดเจน ส่วนที่ระดับความลึก 20 - 40 cm อุณหภูมิดินมีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก ซึ่งลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดินนี้มีความคล้ายคลึงกันในทุกเดือน เมื่อแยกพิจารณาเป็นช่วงเวลาระหว่างวันพบว่าที่บริเวณผิวดิน ในช่วงเวลา 06.00 - 13.00 น. อุณหภูมิดินจะมีการปรับตัวสูงขึ้นจนกระทั่งมีค่าสูงสุดในรอบวันที่เวลาประมาณ 13.00 น. หลังจากนั้น อุณหภูมิดินจะเริ่มปรับตัวลดลงจนถึงเวลา 19.00 น. และยังคงมีการปรับตัวลดลงเพียงเล็กน้อยจนถึงเวลา 6.00 น. ของวันถัดไป ขณะที่ระดับความลึก 10 cm อุณหภูมิดินจะมีการปรับตัวสูงขึ้นจากเวลา 06.00 น. จนกระทั่งมีค่าสูงสุดอยู่ที่เวลาประมาณ 15.30 น. และจะค่อย ๆ ลดลงจนถึง 6.00 น. ของวันถัดไป สำหรับที่ระดับความลึก 20 - 40 cm พบว่าอุณหภูมิดินมีการเปลี่ยนแปลงคล้ายกับบริเวณผิวดิน โดยอุณหภูมิดินจะเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยในช่วง 06.00 - 12.00 น. และปรับตัวสูงขึ้นจนกระทั่งมีค่าสูงสุดเวลาประมาณ 19.00 - 20.00 น. ต่อจากนั้นจะมีการปรับตัวลดลงเพียงเล็กน้อยจนถึงเวลา 6.00 น. ของวันถัดไป ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่ความลึก 20 - 40 cm การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดินแทบจะไม่มี ความแตกต่างกันในแต่ละระดับความลึก นอกจากนี้อุณหภูมิดินสูงสุดของแต่ละระดับความลึกจะใช้เวลาในการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกัน โดยที่ระดับความลึกของดินมากจะใช้เวลามากกว่าในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดินจนมีค่าสูงสุดในรอบวัน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาในเดือนต่าง ๆ พบว่าที่ผิวดินอุณหภูมิดินจะมีค่าสูงมากกว่า 40 °C เกือบตลอดทั้งปี ยกเว้นเดือนพฤศจิกายน ธันวาคม และมกราคมเท่านั้น จากภาพยังแสดงให้เห็นว่าในช่วงเวลากลางวันอุณหภูมิที่ผิวดินจะมีค่าสูง แต่ในช่วงเวลากลางคืนดินในระดับความลึก 20 - 40 cm จะมีอุณหภูมิสูงกว่าที่ผิวดิน สำหรับกรณีการคลุมด้วยวัสดุคลุมดินก็มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดินคล้ายคลึงกับกรณีไม่มีวัสดุคลุมดินแสดงดังภาพที่ 4-8

เมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดินภายในวงบ่อซีเมนต์ที่มีการใช้วัสดุคลุมดินแตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ แบบสีดำ แบบขาวขุ่น และแบบสะท้อนแสง (โดยให้ด้านสีขาวอยู่ข้างบนหันหน้าออกสู่ท้องฟ้า) ตลอดปี โดยจะแสดงเฉพาะเดือนเมษายนดังภาพที่ 4-8 เนื่องจากเป็นเดือนที่มีปริมาณรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศสูงที่สุดในรอบปี ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิดินที่มีการใช้วัสดุคลุมดินแตกต่างกันจะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงเหมือนกัน จากภาพแสดงให้เห็นว่าพลาสติกแบบขาวขุ่นจะทำให้อุณหภูมิดินภายในวงบ่อซีเมนต์มีค่าสูงที่สุดในช่วงเวลากลางวันรองลงมาคือแบบสีดำ และแบบสะท้อนแสง ตามลำดับ ซึ่งจะอยู่ผิวดินในช่วงเวลา

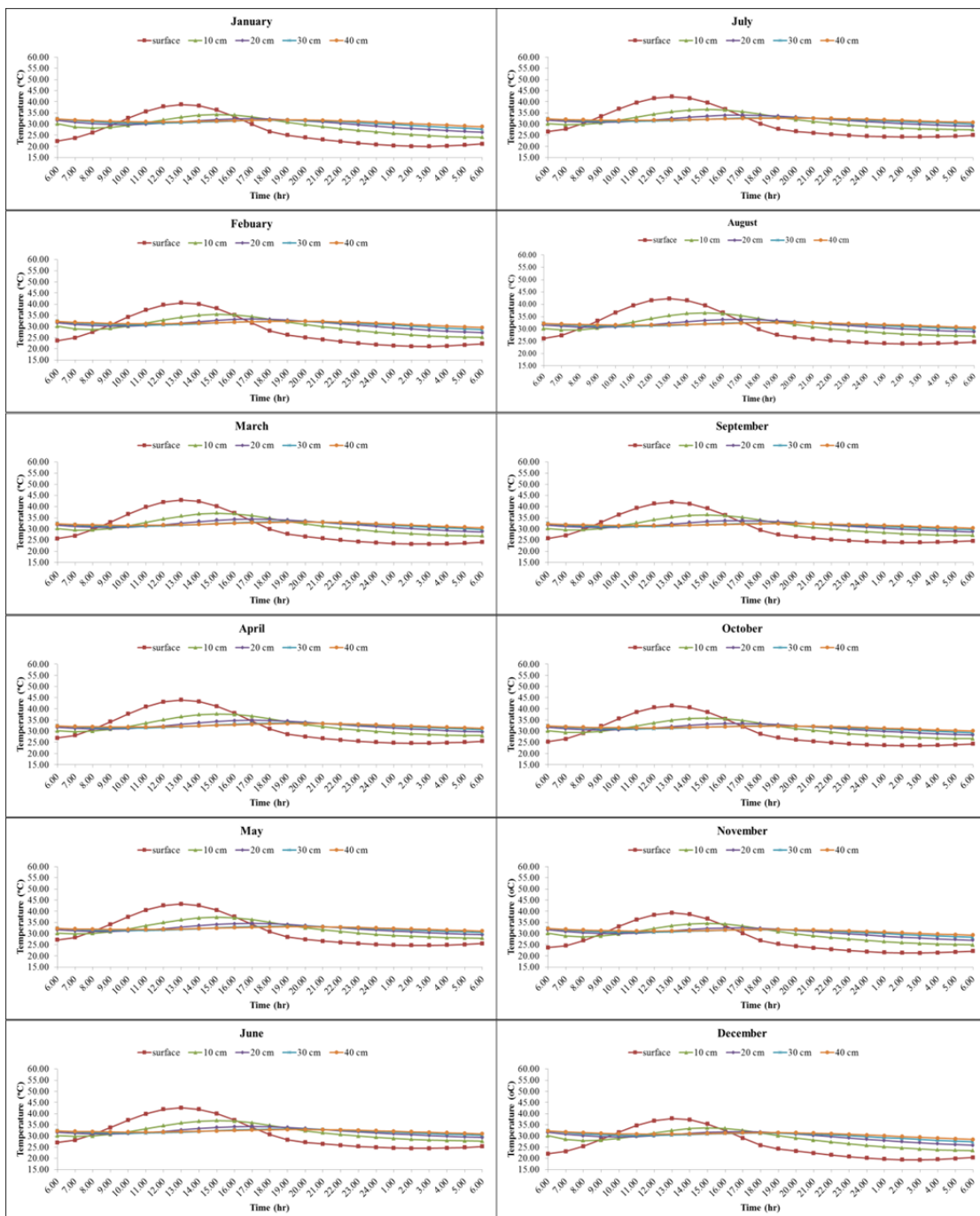


13.00 – 14.00 น. ประมาณ  $53.21^{\circ}\text{C}$  ของพลาสติกแบบขาวขุ่น ประมาณ  $49.03^{\circ}\text{C}$  ของพลาสติกแบบสีดำ และประมาณ  $47.73^{\circ}\text{C}$  ของพลาสติกแบบสะท้อนแสง ซึ่งจากข้อมูลชี้ให้เห็นว่าการคลุมด้วยพลาสติกคลุมดินจะทำให้อุณหภูมิดินภายในวงบ่อซีเมนต์มีค่าสูงกว่าการไม่คลุมดินทั้งในช่วงเวลากลางวันและกลางคืน โดยผลลัพธ์ของอุณหภูมิดินสูงสุดและต่ำสุดระหว่างวัน รวมทั้งภาพเปรียบเทียบอุณหภูมิดินภายในวงบ่อซีเมนต์ที่มีและไม่มีวัสดุคลุมดินที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตลอดปี ที่ระดับความลึก 0, 10, 20, 30 และ 40 cm แสดงได้ในภาคผนวก จ (ตารางที่ จ-3) และภาคผนวก ฉ (ภาพที่ ฉ-1 ถึง ฉ-6) ตามลำดับ

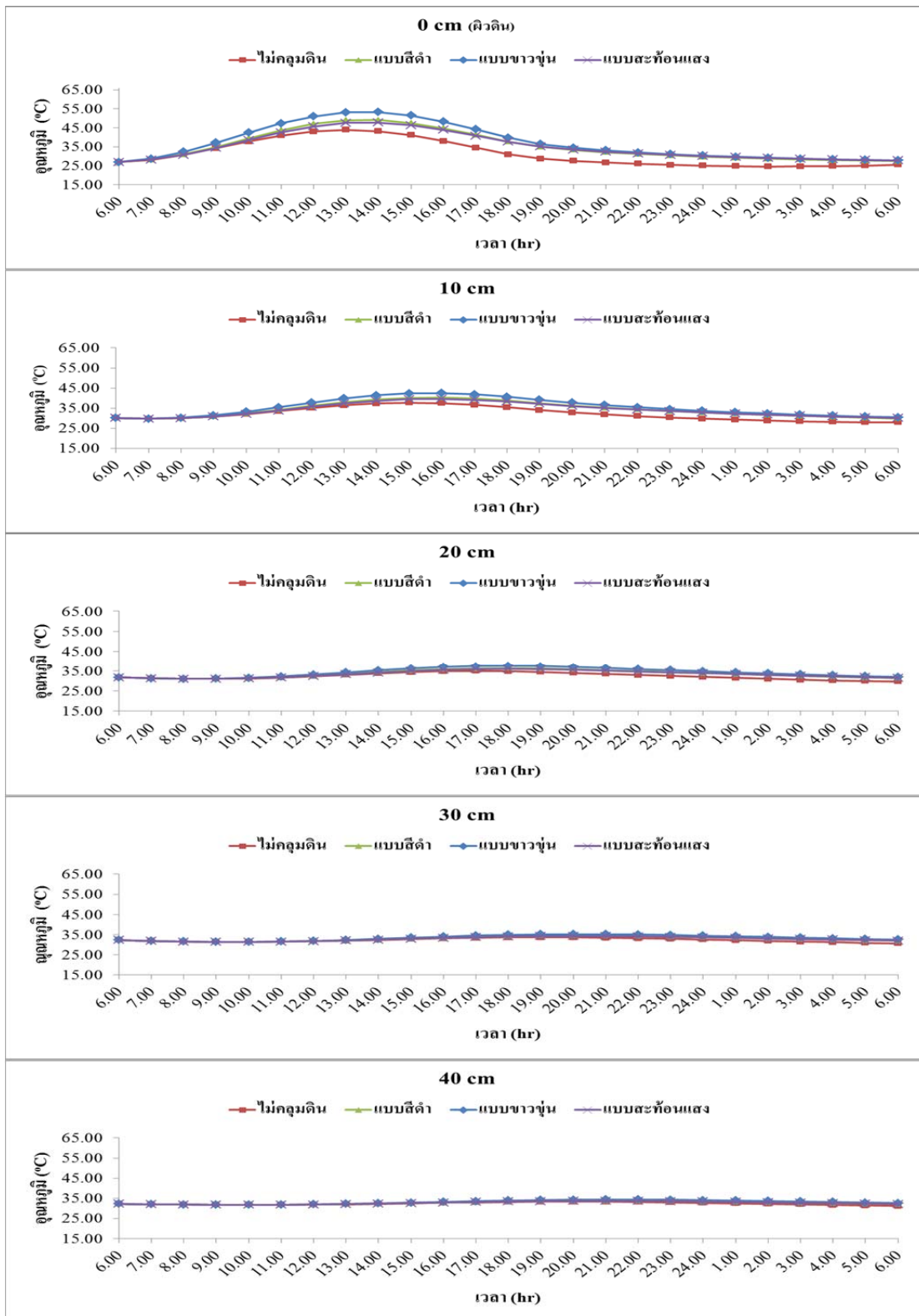
## 2. ความชื้นดินภายในวงบ่อซีเมนต์ที่มีและไม่มีวัสดุคลุมดิน

ภาพที่ 4-9 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นดินในวงบ่อซีเมนต์ที่ไม่มีวัสดุคลุมดินระหว่างวันที่ระดับความลึกต่าง ๆ จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จากภาพเผยให้เห็นว่าตลอดปีความชื้นดินที่บริเวณผิวดินมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่ลดลงมากที่สุด โดยในช่วงเวลา 06.00 - 09.00 น. ความชื้นดินยังไม่มีเปลี่ยนแปลงใด ๆ ในขณะที่เวลา 10.00 น. ความชื้นดินเริ่มมีการปรับตัวลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงเวลา 17.00 น. และเริ่มคงตัวจนถึงเวลา 05.00 น. ของวันถัดไป ส่วนระดับความลึก 10 - 40 cm ความชื้นดินมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยหรือค่อนข้างคงตัวตลอดทั้งวัน

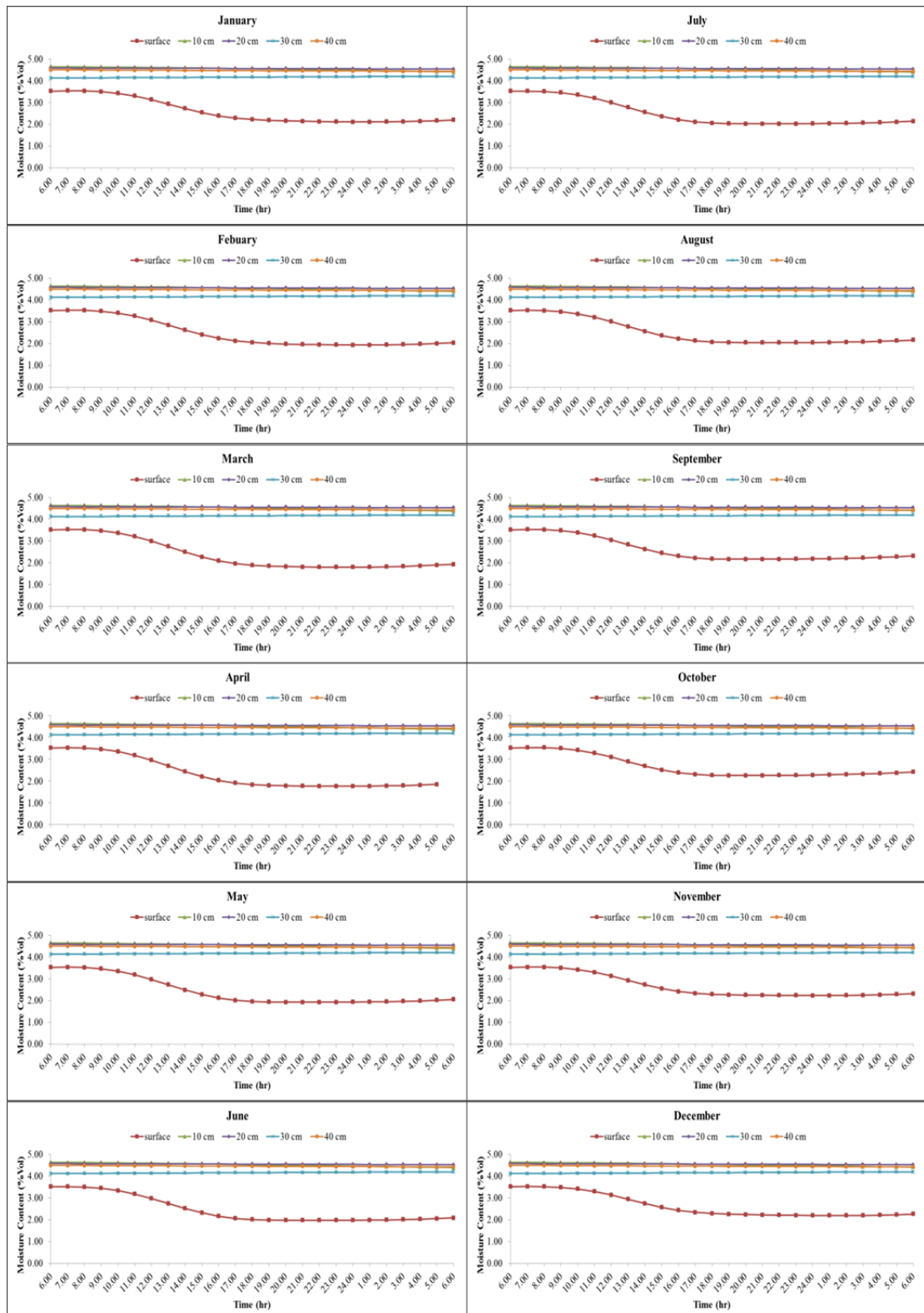
ในทำนองเดียวกันการเปลี่ยนแปลงความชื้นดินภายในวงบ่อซีเมนต์ที่คลุมด้วยวัสดุคลุมดินทั้ง 3 ชนิด ดังภาพที่ 4-10 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงความชื้นดินในวงบ่อซีเมนต์ตลอดปีคล้ายกับกรณีที่ไม่มีการคลุมดิน ยกเว้นตำแหน่งบริเวณผิวดินซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงความชื้นดินเพียงเล็กน้อย แสดงว่าการคลุมดินด้วยวัสดุทั้ง 3 ชนิดมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นน้อยมากหรือแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดปี สำหรับในเดือนอื่น ๆ จะแสดงในภาคผนวก ฉ (ภาพที่ ฉ-7 ถึง ฉ-12) และผลลัพธ์ของความชื้นดินสูงสุดและต่ำสุดระหว่างวันที่มีและไม่มีวัสดุคลุมดินที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตลอดปี ที่ระดับความลึก 0, 10, 20, 30 และ 40 cm จะแสดงในตารางที่ จ-3 และ จ-4



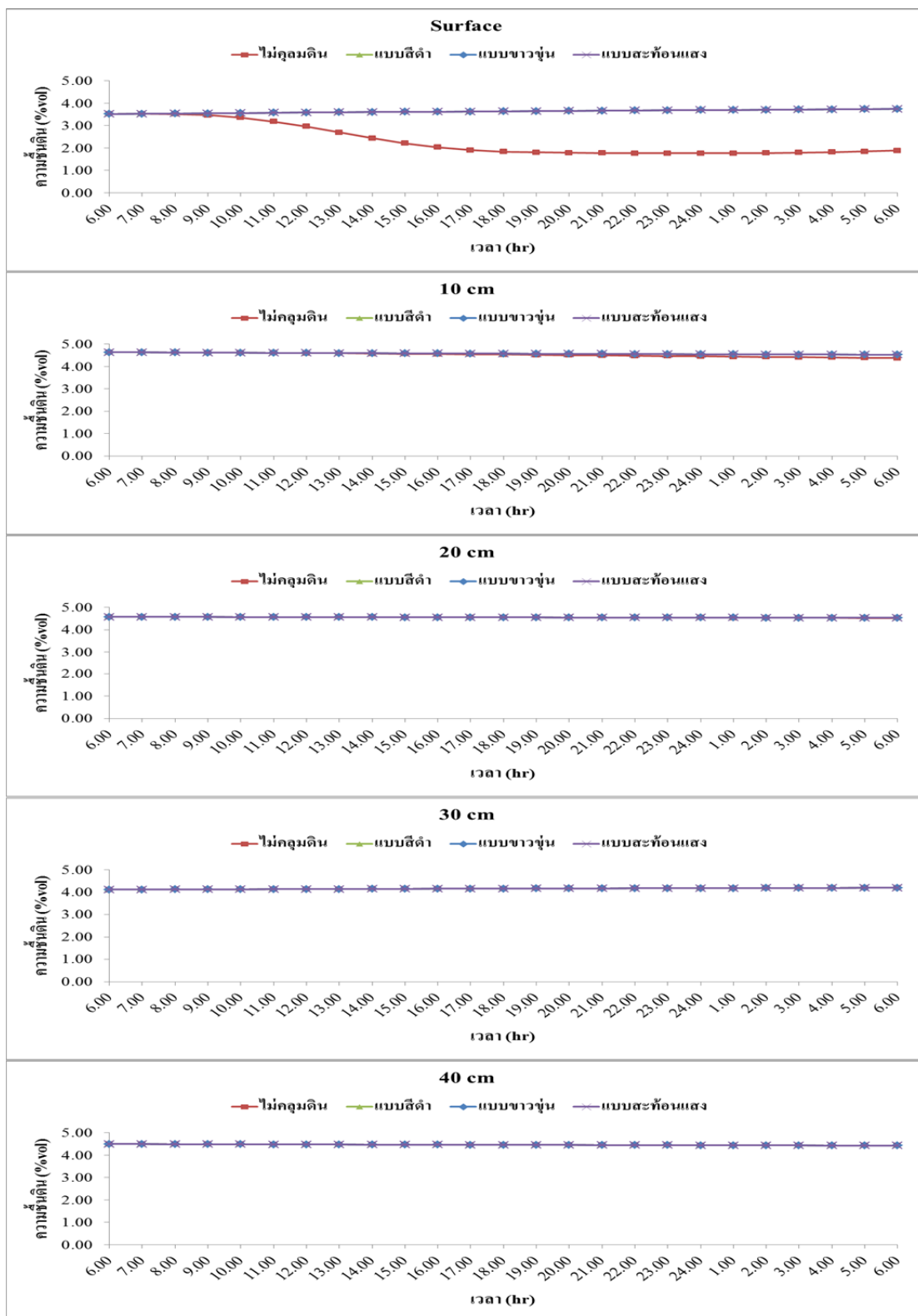
ภาพที่ 4-7 อุณหภูมิดินในวงบ่อซีเมนต์ของทุกระดับความลึกที่เปลี่ยนแปลงระหว่างวันจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



ภาพที่ 4-8 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดินภายในวงบ่อซีเมนต์ทุกระดับความลึกที่มีวัสดุคลุมดิน แบบ สีด้า แบบขาวขุ่น และแบบสะท้อนแสง ของเดือนเมษายน



ภาพที่ 4-9 ความชื้นดินในวงบ่อซีเมนต์ของทุกระดับความลึกที่เปลี่ยนแปลงระหว่างวันจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



ภาพที่ 4-10 การเปลี่ยนแปลงความชื้นดินภายในวงบ่อซีเมนต์ทุกระดับความลึกที่มีวัสดุคลุมดิน แบบสีดำ แบบขาวขุ่น และแบบสะท้อนแสงของเดือนเมษายน

## การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การทดลองวัดอุณหภูมิและความชื้นของดินภายในวงบ่อซีเมนต์ที่ระดับความลึกต่าง ๆ มีการดำเนินการแบ่งเป็น กรณีที่ไม่มีการคลุมดินและมีการใช้วัสดุคลุมดิน ได้แก่ แบบสีดำ แบบขาว ขุ่น และชนิดขาวดำ ซึ่งในแต่ละการทดลองทำจำนวน 3 ครั้ง (ภาคผนวก ข) ประกอบด้วย กรณีไม่มี การคลุมดินและมีการคลุมดินด้วยพลาสติกแบบสีดำ ทดลองครั้งที่ 1 วันที่ 3 – 4 กรกฎาคม 2559, ครั้งที่ 2 วันที่ 9 – 10 กรกฎาคม 2559 และ ครั้งที่ 3 วันที่ 16 - 17 กรกฎาคม 2559 กรณีคลุมดินด้วย พลาสติกแบบขาวขุ่น ครั้งที่ 1 วันที่ 30 - 31 ตุลาคม 2560 ครั้งที่ 2 วันที่ 31 ตุลาคม - 1 พฤศจิกายน 2560 และครั้งที่ 3 วันที่ 1 - 2 พฤศจิกายน 2560 และกรณีคลุมดินด้วยสะท้อนแสง ทดลองครั้งที่ 1 วันที่ 6 - 7 พฤศจิกายน 2560 ครั้งที่ 2 วันที่ 7- 8 พฤศจิกายน 2560 และครั้งที่ 3 วันที่ 8 - 9 พฤศจิกายน 2560 เพื่อนำค่าอุณหภูมิและความชื้นดินที่ทุกระดับความลึกที่วัดได้มาวิเคราะห์เปรียบเทียบความ ถูกต้องกับผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้สร้างขึ้น ทุก 3 ชั่วโมง (ภาคผนวก ข) โดยเกณฑ์การพิจารณาความถูกต้องจะใช้การวิเคราะห์ทางสถิติ ซึ่งตัวแปรทางสถิติที่นำมาวิเคราะห์ แบ่งเป็นการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดลองประกอบด้วย ค่า สหสัมพันธ์ (Correlation : r) และสัมประสิทธิ์ความแปรผัน (Coefficient of Determination:  $R^2$ ) และการหาความคลาดเคลื่อนประกอบด้วย ค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean Squared Error : RMSE) ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์ (Mean Absolute Error: MAE) ค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์ (Mean Absolute Percentage Error : MAPE) และ การทดสอบที (t-test) เป็นเทคนิคการทดสอบสมมติฐานที่นิยมใช้การทดสอบกรณี ข้อมูลมีจำนวนน้อย ( $n < 30$ ) การตรวจสอบความถูกต้องได้แสดงให้เห็นโดยแบ่งออกเป็นช่วงเวลา กลางวัน (06.00 - 18.00 น.) และ ช่วงเวลากลางคืน (18.00 - 06.00 น.) โดยในส่วนนี้จะนำเสนอการ เปรียบเทียบอุณหภูมิและความชื้นดินที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดลองใน ช่วงเวลากลางวันและเวลากลางคืนที่ไม่มีวัสดุคลุมดินและมีวัสดุคลุมดินแบบสีดำของการทดลอง ครั้งที่ 1 เท่านั้น

### 1. อุณหภูมิดินภายในวงบ่อซีเมนต์ที่มีและไม่มีการคลุมดิน

การเปรียบเทียบอุณหภูมิดินที่มีและไม่มีการคลุมดินในช่วงเวลากลางวันได้จาก แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.11 ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าการ ทดลองกับแบบจำลองมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดินเป็นไปในทิศทางเดียวกันและมีความ สอดคล้องใกล้เคียงกันตลอดช่วงเวลา จากตารางที่ 4-3 เมื่อพิจารณาค่าสหสัมพันธ์ r จะเห็นว่ามีความ มากกว่า 0.90 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าข้อมูลที่ได้การทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความ สอดคล้องสัมพันธ์กันมาก ส่วนสัมประสิทธิ์ความแปรผัน  $R^2$  มีค่ามากกว่า 0.85 แสดงว่าข้อมูล

อุณหภูมิดินที่ได้จากการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แปรผันร่วมกันมากกว่าร้อยละ 85 หรืออธิบายได้ว่าหากทราบอุณหภูมิดินที่ได้จากแบบจำลองก็สามารถทำนายอุณหภูมิดินเมื่อทำการทดลองได้มากกว่าร้อยละ 85 พิจารณาค่าความคลาดเคลื่อน RMSE, MAE และ MAPE พบว่าทั้งกรณีที่มีและไม่มีการคลุมดินค่าทางสถิติทั้ง 3 ชนิดนี้มีค่าค่อนข้างต่ำ โดยกรณีที่มีการคลุมดินค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 2.068, 1.188 และ 0.032 ตามลำดับ และกรณีที่มีการคลุมดินด้วยพลาสติกแบบสีค่าค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 2.749, 2.358 และ 0.065 ตามลำดับ แสดงว่าข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน

เมื่อพิจารณาช่วงเวลากลางคืนแสดงดังภาพที่ 4-12 เผยให้เห็นว่าอุณหภูมิดินที่ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดลองยังคงมีความสอดคล้องใกล้เคียงทั้งกรณีที่มีและไม่มีการคลุมดิน จากตารางที่ 4-4 ซึ่งแสดงข้อมูลการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนทางสถิติ พบว่าค่าสหสัมพันธ์  $r$  มีค่ามากกว่า 0.70 ทุกการทดลอง แสดงว่าข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดลองมีความสอดคล้องสัมพันธ์กันมาก และมีบางการทดลองที่มีการคลุมดินซึ่งมีความสัมพันธ์กันอยู่ในระดับปานกลาง ( $r = 0.376$ ) โดยพบอยู่ที่ระดับความลึก 30 – 40 cm ส่วนสัมประสิทธิ์ความแปรผัน  $R^2$  จะมีค่ามากกว่า 0.90 เกือบทุกการทดลอง แสดงว่าข้อมูลอุณหภูมิดินที่ได้จากการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แปรผันร่วมกันมากกว่าร้อยละ 90 หรือหากทราบอุณหภูมิดินที่ได้จากแบบจำลองก็สามารถทำนายอุณหภูมิดินเมื่อทำการทดลองได้มากกว่าร้อยละ 90 เมื่อวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนพบว่าค่า RMSE, MAE และ MAPE มีค่าไม่สูงมาก โดยกรณีที่ไม่มีการคลุมดินค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 2.228, 2.159 และ 0.078 ตามลำดับ และกรณีที่มีการคลุมดินด้วยพลาสติกแบบสีค่าค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 1.256, 1.094 และ 0.034 ตามลำดับ แสดงว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าใกล้เคียงกัน

เมื่อวิเคราะห์ค่า  $t$  ในช่วงเวลากลางวันและกลางคืนทั้งกรณีที่มีและไม่มีการคลุมดินพบว่า มีค่า 0.001 - 0.605 องศาแห่งความเป็นอิสระ (degree of freedom) เท่ากับ 3 เปรียบเทียบกับค่าวิกฤติจากตารางการแจกแจง  $t$  แบบ two-tail ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 (ความเชื่อมั่น 95%) ที่มีค่า 2.353 พบว่าค่า  $t$  ที่ได้มีค่าน้อยกว่า ค่า  $t$  ที่ได้จากภาคผนวก ฉ ซึ่งแสดงว่าความแตกต่างระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดลองทั้งกรณีที่มีและไม่มีการคลุมดินไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ

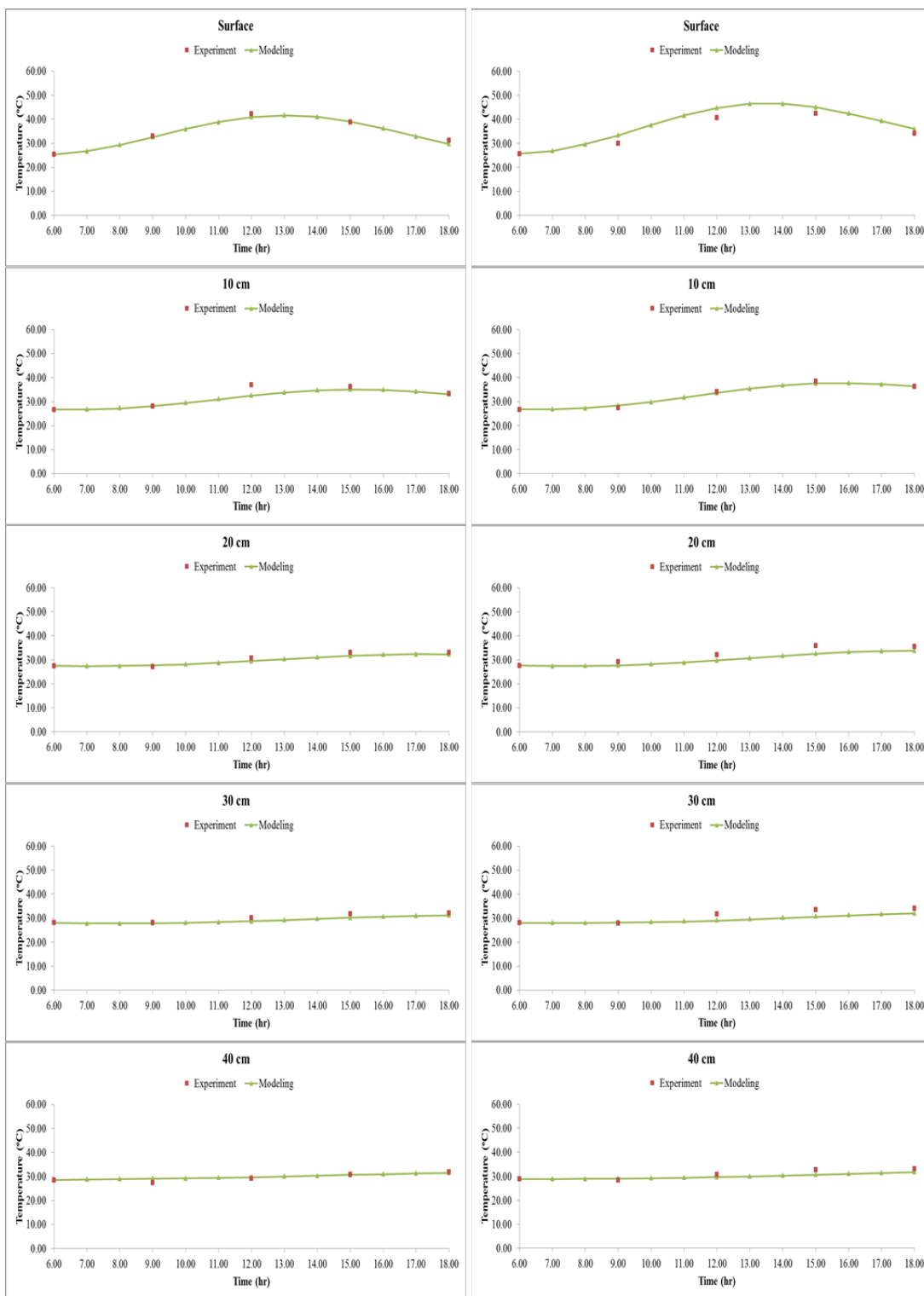
ตารางที่ 4-3 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนทางสถิติของอุณหภูมิที่มีและไม่มีการคลุมดินในช่วงเวลากลางวัน

การทดลอง	ความลึก (cm)	กลางวัน (06.00 - 18.00 น.)					
		RMSE	MAE	MAPE	r	R <sup>2</sup>	t-test
ไม่มีการคลุมดิน	0	0.937	0.682	0.019	0.993	0.986	0.152
	10	2.068	1.188	0.032	0.930	0.864	0.233
	20	0.980	0.837	0.027	0.980	0.961	0.219
	30	0.999	0.789	0.025	0.958	0.918	0.062
	40	0.777	0.507	0.018	0.925	0.856	0.395
แบบสีดำ	0	2.749	2.358	0.065	0.989	0.978	0.029
	10	0.576	0.469	0.014	0.995	0.990	0.861
	20	2.077	1.761	0.053	0.963	0.927	0.033
	30	2.050	1.621	0.049	0.930	0.866	0.089
	40	1.233	1.017	0.032	0.951	0.905	0.190

ตารางที่ 4-4 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนทางสถิติของอุณหภูมิที่มีและไม่มีการคลุมดินในช่วงเวลากลางคืน

การทดลอง	ความลึก (cm)	กลางคืน (18.00 - 06.00 น.)					
		RMSE	MAE	MAPE	r	R <sup>2</sup>	t-test
ไม่มีการคลุมดิน	0	2.228	2.159	0.078	0.967	0.936	0.005
	10	0.707	0.676	0.023	0.999	0.999	0.001
	20	0.424	0.345	0.011	0.985	0.970	0.605
	30	0.616	0.547	0.018	0.926	0.858	0.051
	40	1.059	0.963	0.032	0.803	0.644	0.011
แบบสีดำ	0	0.936	0.654	0.021	0.999	0.998	0.194
	10	0.580	0.543	0.018	0.998	0.997	0.004
	20	0.982	0.854	0.027	0.974	0.949	0.045
	30	1.256	1.094	0.034	0.756	0.571	0.170
	40	1.115	1.008	0.032	0.376	0.141	0.069

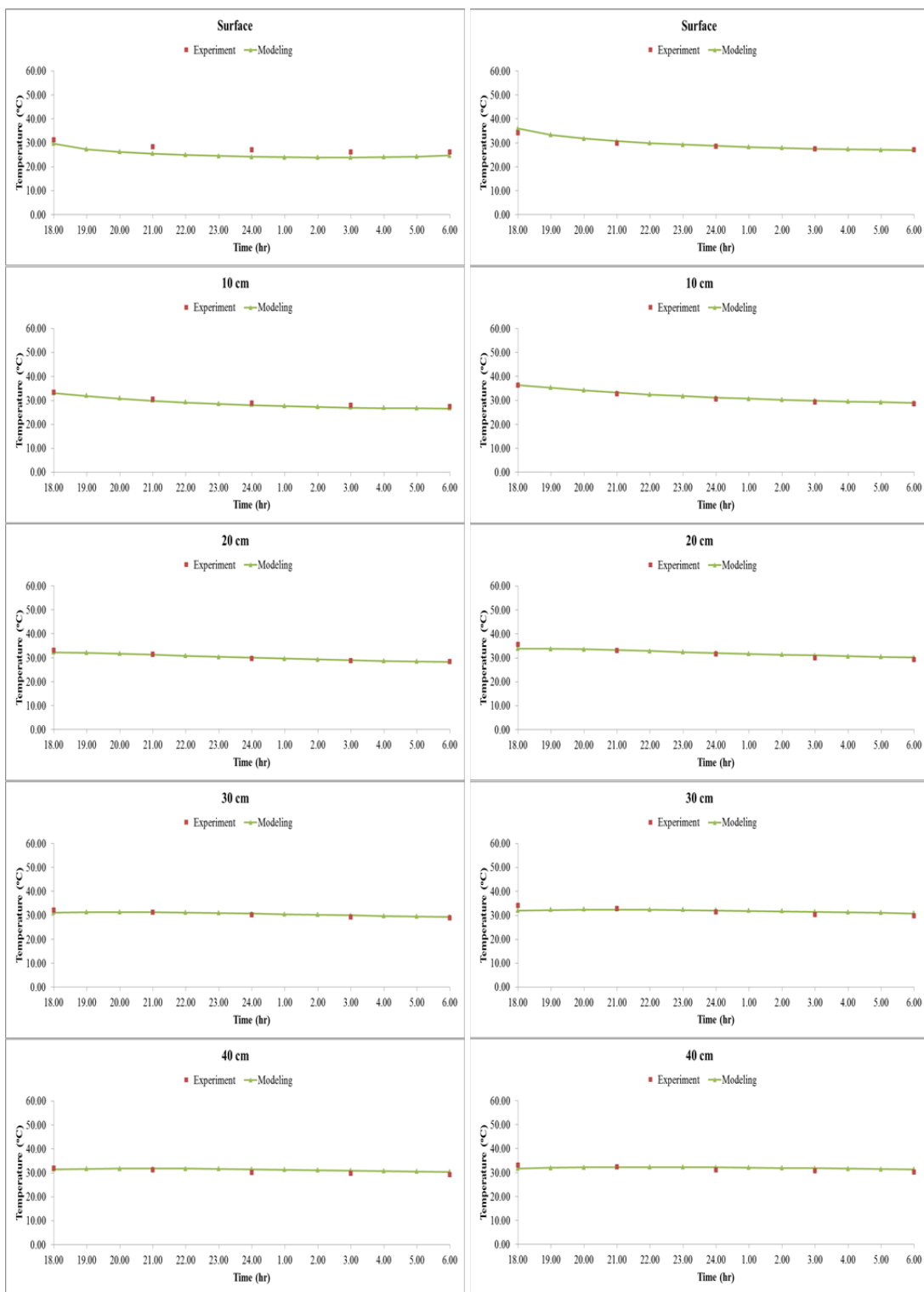




(ก)

(ข)

ภาพที่ 4-11 การเปรียบเทียบอุณหภูมิดินภายในวงบ่อซีเมนต์ทุกระดับความลึกที่ได้จากแบบจำลองกับการทดลองในเวลากลางวันที่มีและไม่มีการคลุมดิน (ก) ไม่มีการคลุมดิน, (ข) แบบสีดำ



(ก)

(ข)

ภาพที่ 4-12 การเปรียบเทียบอุณหภูมิดินภายในวงบ่อซีเมนต์ทุกระดับความลึกที่ได้จากแบบจำลองกับการทดลองในเวลากลางคืนที่มีและไม่มีการคลุมดิน (ก) ไม่มีการคลุมดิน, (ข) แบบสีดำ

## 2. ความชันดินภายในวงบ่อซีเมนต์ที่มีและไม่มีการคลุมดิน

การเปรียบเทียบความชันดินที่มีและไม่มีการคลุมดินในช่วงเวลากลางวันได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดลองแสดงภาพที่ 4-13 จากภาพจะเห็นว่าข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดลองมีความใกล้เคียงและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน จากตารางที่ 4-5 เมื่อพิจารณาค่าสหสัมพันธ์  $r$  จะเห็นมีค่ามากกว่า 0.3 ในกรณีที่ไม่มีวัสดุคลุมดิน แสดงว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดลองมีความสัมพันธ์กันระดับปานกลางถึงดี แต่กรณีที่มีการคลุมดินความชันดินจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดลองจะมีความสัมพันธ์ทั้งทางบวกและทางลบซึ่งแสดงว่าข้อมูลทั้งสองยังไม่ค่อยมีความสัมพันธ์กัน เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์ความแปรผัน  $R^2$  พบว่าข้อมูลอุณหภูมิดินจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดลองยังไม่ค่อยมีความแปรผันร่วมกันที่ดีซักเท่าใด โดยบางระดับความลึกและบางการทดลองให้ความแปรผันร่วมที่ดี แต่บางการทดลองมีความแปรผันร่วมกันที่ต่ำ แต่เมื่อพิจารณา RMSE, MAE และ MAPE พบว่ากรณีที่ไม่มีการคลุมดินค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 0.332, 0.285 และ 0.112 ตามลำดับ และกรณีมีการคลุมดินด้วยพลาสติกแบบสีดำค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 0.308, 0.204 และ 0.078 ตามลำดับ แสดงว่าความชันดินจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน

ภาพที่ 4-14 แสดงการเปรียบเทียบความชันดินที่มีและไม่มีการคลุมดินในช่วงเวลากลางคืน เผยให้เห็นว่าข้อมูลที่ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดลองมีความใกล้เคียงและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน จากตารางที่ 4-6 เมื่อพิจารณาค่าสหสัมพันธ์  $r$  และสัมประสิทธิ์ความแปรผัน  $R^2$  แสดงให้เห็นว่าข้อมูลอุณหภูมิดินจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดลองยังไม่ค่อยมีความแปรผันร่วมกัน คล้ายกับการเปลี่ยนแปลงความชื้นในเวลากลางวัน เมื่อพิจารณา RMSE, MAE และ MAPE พบว่ากรณีที่ไม่มีการคลุมดินค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 0.442, 0.439 และ 0.157 ตามลำดับ และกรณีมีการคลุมดินด้วยพลาสติกแบบสีดำค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 0.411, 0.400 และ 0.176 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาตลอดการทดลองพบว่าความคลาดเคลื่อนมีค่าไม่สูงมาก แสดงว่าข้อมูลจากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความใกล้เคียงกัน

เมื่อวิเคราะห์ค่า  $t$  ทั้งในช่วงเวลากลางวันและกลางคืนพบว่า มีค่า 0.000 - 0.478 องศาแห่งความเป็นอิสระ เท่ากับ 3 เปรียบเทียบกับค่าวิกฤติจากตารางการแจกแจง  $t$  ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าค่า  $t$  ที่ได้มีค่าน้อยกว่า ค่า  $t$  ที่ได้จากภาคผนวก ฉ แสดงว่าความแตกต่างระหว่างการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ

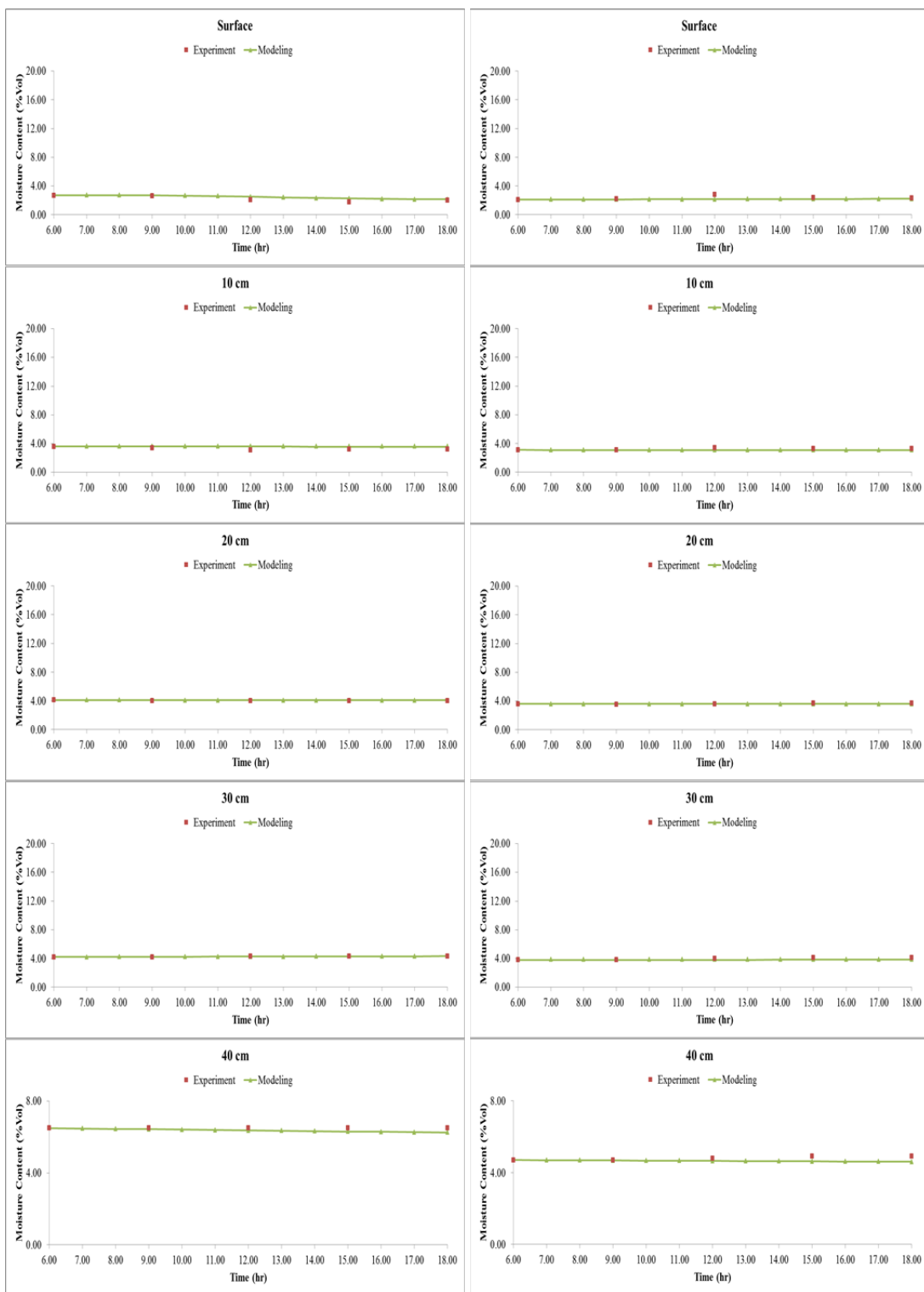
สำหรับการทดลองครั้งที่ 2 และ 3 ของกรณีที่ไม่มีการคลุมดินและมีการคลุมดินด้วยพลาสติกแบบสีดำ รวมทั้งการคลุมดินด้วยพลาสติกแบบขาวขุ่นและแบบสะท้อนแสงซึ่งมีลักษณะการเปลี่ยนที่คล้ายคลึงกันจะแสดงในภาคผนวก ซ

ตารางที่ 4-5 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนทางสถิติของความชื้นที่มีและไม่มีการคลุมดินในช่วงเวลากลางวัน

การทดลอง	ความลึก (cm)	กลางวัน (06.00 – 18.00 น.)					
		RMSE	MAE	MAPE	r	R <sup>2</sup>	t-test
ไม่มีการคลุมดิน	0	0.287	0.222	0.112	0.885	0.784	0.071
	10	0.332	0.285	0.089	0.687	0.472	0.029
	20	0.078	0.070	0.017	0.739	0.545	0.017
	30	0.024	0.019	0.005	0.874	0.765	0.931
	40	0.154	0.127	0.020	N/A	N/A	0.045
แบบสีดำ	0	0.308	0.204	0.078	0.366	0.134	0.151
	10	0.199	0.153	0.046	-0.726	0.527	0.073
	20	0.084	0.067	0.018	-0.748	0.560	0.514
	30	0.188	0.146	0.036	0.941	0.886	0.084
	40	0.194	0.150	0.031	-0.948	0.899	0.071

ตารางที่ 4-6 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนทางสถิติของความชื้นที่มีและไม่มีการคลุมดินในช่วงเวลากลางคืน

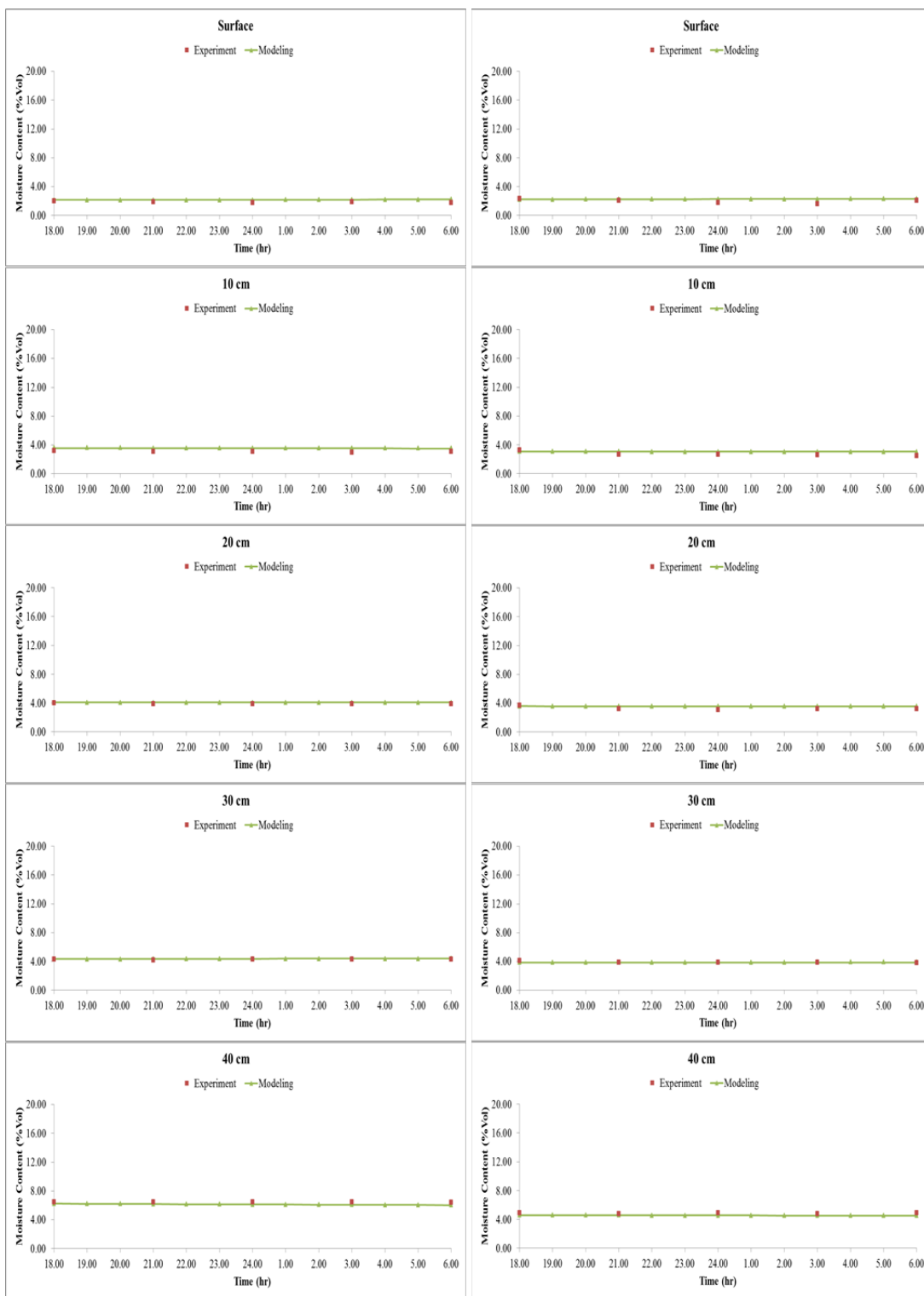
การทดลอง	ความลึก (cm)	กลางคืน (18.00 – 06.00 น.)					
		RMSE	MAE	MAPE	r	R <sup>2</sup>	t-test
ไม่มีการคลุมดิน	0	0.308	0.291	0.157	-0.599	0.359	0.004
	10	0.442	0.439	0.142	0.689	0.475	0.000
	20	0.171	0.171	0.044	0.731	0.534	0.000
	30	0.090	0.080	0.019	0.341	0.116	0.010
	40	0.340	0.335	0.052	0.692	0.479	0.000
แบบสีดำ	0	0.385	0.314	0.176	-0.527	0.278	0.060
	10	0.411	0.396	0.148	0.880	0.774	0.002
	20	0.402	0.400	0.126	0.677	0.459	0.001
	30	0.128	0.096	0.024	-0.878	0.770	0.478
	40	0.306	0.300	0.062	0.011	0.000	0.004



(ก)

(ข)

ภาพที่ 4-13 การเปรียบเทียบความชื้นดินภายในวงบ่อซีเมนต์ทุกระดับความลึกที่ได้จากแบบจำลองกับการทดลองในเวลากลางวันที่มีและไม่มีการคลุมดิน (ก) ไม่มีการคลุมดิน, (ข) แบบสีดำ



(ก)

(ข)

ภาพที่ 4-14 การเปรียบเทียบความชื้นดินภายในวงบ่อซีเมนต์ทุกระดับความลึกที่ได้จากแบบจำลองกับการทดลองในเวลากลางคืนที่มีและไม่มีการคลุมดิน (ก) ไม่มีการคลุมดิน, (ข) แบบสีดำ

## บทที่ 5

### อภิปรายและสรุปผล

#### อภิปรายผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนาย อุณหภูมิและความชื้นดินสำหรับการปลูกมะนาวในวงบ่อซีเมนต์ที่มีและไม่มีการคลุมดิน โดยแบบจำลองที่ใช้ในการทำนายได้พัฒนาจากสมการการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในระบบปิดที่ทรงกระบอก 3 มิติ และทำการวัดค่าอุณหภูมิและความชื้นดินภายในวงบ่อซีเมนต์ที่มีและไม่มี การคลุมดิน เพื่อเปรียบเทียบค่าความถูกต้องของแบบจำลอง ซึ่งการสร้างและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองนั้นจำเป็นต้องมีข้อมูลที่พื้นฐานจากผู้ปลูก สมบัติทางกายภาพของดินและสมบัติทางแสงของวัสดุคลุมดิน ซึ่งจากการลงพื้นที่สัมภาษณ์เชิงลึกสรุปว่าวงบ่อซีเมนต์นิยมใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 และ 100 cm และสูง 40 และ 60 cm มีทั้งแบบที่มีและไม่มีฝาปิด ใต้วงบ่อ วัสดุปลูกที่ใช้จะมีส่วนประกอบของดินท้องถิ่นผสมอยู่ในวงบ่อและต้องมีการระบายน้ำได้ดี และจากการสุ่มเลือกสวนมะนาวพบว่าผู้ปลูกเลือกใช้วิธีการรดให้น้ำแก่ต้นมะนาวเพื่อควบคุมการให้น้ำแก่ต้นมะนาว เพื่อให้ต้นมะนาวออกผลผลิตในช่วงนอกฤดูปลูก และจากข้อมูลสัมภาษณ์ชี้ให้เห็นว่าผู้ปลูกยังไม่ทราบอุณหภูมิและความชื้นของดินที่เหมาะสมสำหรับการปลูกมะนาว และไม่ให้ความสนใจในการควบคุมดูแลอุณหภูมิและความชื้นของดินที่ซึ่งถือเป็นปัจจัยที่สำคัญในการเจริญเติบโตของพืช ซึ่งเมื่ออ้างอิงจากงานวิจัย อาทิ Carry (1981) ได้รายงานโดยอ้างงานวิจัยของ Wutscher (1973) อุณหภูมิดินที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตอยู่ในช่วง 23.9 - 26.7 °C นอกจากนี้พบว่าอุณหภูมิดินที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตรากสำหรับพืชตระกูลส้มอยู่ในช่วง 12.0 - 35.0 °C และเจริญเติบโตดีที่สุดในช่วง 25.0 - 30.0 °C (Yara Us, n.d.) ดังนั้นจึงเป็นการสนับสนุนงานวิจัยนี้เป็นอย่างดีในการวิจัยเพื่อศึกษาอุณหภูมิและความชื้นของดินสำหรับการปลูกมะนาวในวงบ่อซีเมนต์รวมทั้งยังมีประโยชน์ในการพิจารณาสำหรับการปลูกพืชชนิดอื่นในวงบ่อซีเมนต์

สำหรับสมบัติทางกายภาพของดินที่ใช้การคำนวณในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่าดินทรายแป้ง (Loamy sand) มีความหนาแน่นรวมพบว่ามีค่าอยู่ที่ 1,251.11 kg/m<sup>3</sup> การนำความร้อน 0.043 W/m-K ความจุความร้อน 965.48 J/kg K และการแพร่ไอน้ำ 6.73 x 10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s ส่วนสมบัติทางแสงของวัสดุคลุมดินประกอบด้วยค่าการส่งผ่านแสง ค่าการสะท้อนแสง ค่าการดูดกลืนแสง จะได้ว่าพลาสติกแบบสีดำมีค่า 0.00, 0.13 และ 0.87 ตามลำดับ พลาสติกแบบขาวขุ่น มีค่า 0.74, 0.14 และ 0.13 ตามลำดับ และพลาสติกแบบสะท้อนแสง มีค่า 0.00, 0.19 และ 0.81 ตามลำดับ โดยพลาสติก

แบบสีดำและแบบสะท้อนไม่มีการส่งผ่านแสง การสะท้อนของพลาสติกแบบสะท้อนแสงมีค่าสูงสุด ถัดมาคือแบบขาวขุ่นและแบบสีดำตามลำดับ และการดูดกลืนแสงของพลาสติกแบบสีดำมากที่สุดรองลงมาเป็นแบบสะท้อนแสง และแบบขาวขุ่นตามลำดับ

การคำนวณอุณหภูมิและความชื้นดินที่มีและไม่มีวัสดุคลุมดินด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในวงบ่อซีเมนต์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 cm สูง 40 cm และมีฝาปิดได้วงบ่อ พบว่า อุณหภูมิดินที่มีและไม่มีวัสดุคลุมดินในระหว่างวันที่ระดับความลึก 0 – 10 cm จากผิวดิน มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดินเพิ่มขึ้นและลดลงตามปริมาณรังสีอาทิตย์ ขณะที่ระดับความลึก 20 -40 cm จากผิวดิน อุณหภูมิดินจะเปลี่ยนแปลงไม่มาก โดยคล้ายคลึงกันตลอดทั้งปี และยังคงแสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิดินสูงสุดในรอบวันของแต่ละระดับความลึกมีเวลาที่แตกต่างกัน โดยที่ระดับความลึกของดินมากจะใช้เวลานานกว่าในการมีอุณหภูมิสูงสุดในรอบวัน และเมื่อพิจารณาในช่วงกลางวันกับกลางคืน อุณหภูมิที่ผิวดินจะมีค่ามากในช่วงเวลากลางวัน แต่มีค่าต่ำในช่วงเวลากลางคืนเมื่อเทียบกับดินที่ระดับลึกลงไป ทั้งนี้เป็นผลอันเนื่องมาจากคุณสมบัติทางความร้อนของดินต่าง ๆ ซึ่งส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนภายในดิน โดยความร้อนจากรังสีอาทิตย์นั้นเมื่อตกกระทบมาที่บริเวณผิวดินความร้อนส่วนใหญ่จะถูกสะสมไว้ที่บริเวณผิวดินเนื่องจากความร้อนจำเพาะและค่าการดูดกลืนรังสีของดิน อีกทั้งการถ่ายเทความร้อนจากผิวดินไปสู่ดินที่ระดับลึกลงไปซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่ายังทำได้อย่างยากลำบากเนื่องจากค่าการนำความร้อนของดินนั้นมีค่าค่อนข้างต่ำ จึงทำให้ อุณหภูมิดินที่ผิวดินมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณรังสีอาทิตย์ ส่วนชั้นดินที่ลึกลงไปจากผิวดินมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดินเพียงเล็กน้อย ขณะที่อุณหภูมิดินที่มีการใช้วัสดุคลุมดินที่แตกต่างกัน 3 ชนิด พบว่าพลาสติกแบบขาวขุ่นจะทำให้อุณหภูมิดินภายในวงบ่อซีเมนต์มีค่าสูงในช่วงเวลากลางวันมากที่สุด รองลงมาคือแบบสีดำ และแบบสะท้อนแสงตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุคลุมดินที่ทำจากพลาสติกแบบขาวขุ่นจะมีค่าการส่งผ่านของแสงมากที่สุดจึงทำให้พลังงานความร้อนจากรังสีอาทิตย์สามารถกระทบที่บริเวณผิวดินได้มาก ส่วนสีดำนั้นไม่สามารถส่งผ่านรังสีอาทิตย์มายังที่ผิวดินได้แต่คุณสมบัติของวัสดุสีดำจะมีค่าการดูดกลืนและแผ่รังสีความร้อนได้ดีจึงทำให้เกิดการแผ่รังสีความร้อนจากพลาสติกสีดำลงสู่ผิวดิน สำหรับพลาสติกคลุมดินแบบสะท้อนแสง นั้นมีคุณสมบัติที่ไม่สามารถส่งผ่านความร้อนได้เหมือนกับพลาสติกสีดำอีกทั้งด้านสีขาวยังช่วยสะท้อนแสงจึงทำให้สามารถลดอุณหภูมิในดินได้ดีกว่า นอกจากนี้ยังพบอีกว่าการคลุมด้วยพลาสติกคลุมดินทั้ง 3 ชนิด จะทำให้อุณหภูมิดินภายในวงบ่อซีเมนต์มีค่าสูงกว่าการไม่คลุมดินทั้งในช่วงเวลากลางวันและกลางคืน เพราะว่าที่ผิวดินจะไม่มีกระบวนการพาความร้อนและปลดปล่อยความร้อนไปสู่บรรยากาศซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่า ทำให้เกิดการสะสมความร้อนที่ผิวดินสูงกว่าแบบไม่คลุมดิน



เมื่อพิจารณาช่วงอุณหภูมิดินที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของรากในพืชตระกูลส้มของ Yara Us (n.d.) พบว่าเมื่อไม่มีการคลุมดิน ระดับความลึก 0 - 10 cm จะมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิดินที่เหมาะสมในช่วงเวลาประมาณ 10.00 - 16.00 น. ตลอดปี ขณะที่มีการคลุมดินด้วยวัสดุคลุมดินทั้ง 3 ชนิด ที่ระดับความลึก 0 - 20 cm จะมีค่าอุณหภูมิเกินกว่าอุณหภูมิดินที่เหมาะสมในช่วงเวลาประมาณ 09.00 - 19.00 น. ส่วนที่ระดับลึกลงไปอุณหภูมิดินอยู่ในช่วงที่สามารถเจริญเติบโตได้ ดังนั้นเพื่อควบคุมอุณหภูมิดินให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมอาจจะทำได้โดยใช้วิธีการรดน้ำก่อนเวลา 10.00 น. เพื่อลดอุณหภูมิดิน และหากพิจารณามีการปลูกจริงต้นมะนาวโดยปกติจะมีทรงพุ่มซึ่งสามารถช่วยลดปริมาณรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบผิวดินทำให้อุณหภูมิดินภายในวงบ่อซีเมนต์มีค่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตได้

ผลลัพธ์จากการทำนายความชื้นดินที่มีและไม่มีวัสดุคลุมดินในวงบ่อซีเมนต์ที่ระดับความลึกต่าง ๆ ตลอดปี พบว่าความชื้นดินที่บริเวณผิวดินมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด ส่วนในระดับชั้นความลึกของดิน 10 - 40 cm การเปลี่ยนแปลงความชื้นดินมีเพียงเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลมาจากสมมติฐานในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิจารณาว่าบริเวณผิวดินจะมีการสูญเสียความชื้นกระบวนการระเหยอันเนื่องมาจากความร้อนของปริมาณรังสีอาทิตย์ และความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่มีมวลน้ำน้อยกว่าความชื้นดินจึงส่งผลให้เกิดการถ่ายเทมวลน้ำออกจากผิวดินสู่อากาศแวดล้อม และการถ่ายเทมวลภายในดินมีลักษณะการแพร่ไอน้ำเท่านั้นอีกทั้งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ไอน้ำของดินมีค่าต่ำจึงทำให้การเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในดินมีค่าน้อย เมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความชื้นดินที่มีการคลุมดินทั้ง 3 ชนิด พบว่าความชื้นดินมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากตลอดวันในทุก ๆ ระดับชั้นความลึก แสดงให้เห็นว่าการคลุมด้วยวัสดุคลุมดินแทบไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นดิน ทั้งนี้เป็นผลมาจากสมมติฐานในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พิจารณาว่าที่ผิวไม่มีกระบวนการถ่ายเทมวลและมีการถ่ายเทมวลด้วยกระบวนการแพร่ไอน้ำภายในดินเท่านั้นจึงทำให้การเปลี่ยนแปลงความชื้นดินในทุกระดับความลึกมีค่าเพียงเล็กน้อยตลอดวัน

ความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เมื่อทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิดินที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดลองพบว่ามีลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดินเป็นไปในทิศทางเดียวกันและมีความสอดคล้องใกล้เคียงกันตลอดวันทั้งกรณีมีและไม่มีวัสดุคลุมดิน เมื่อพิจารณาค่าสหสัมพันธ์ (r) พบว่ามีค่ามากกว่า 0.70 เกือบทุกการทดลอง แสดงว่าข้อมูลทั้งสองมีความสัมพันธ์แปรผันกันค่อนข้างดี ส่วนสัมประสิทธิ์ความแปรผัน ( $R^2$ ) ส่วนใหญ่มีค่ามากกว่า 0.80 อธิบายได้ว่าข้อมูลอุณหภูมิดินที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดลองแปรผันร่วมกันมากกว่าร้อยละ 80 เมื่อพิจารณาค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE), ค่ากลางของความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (MAE) และค่ากลางของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์

(MAPE) พบว่าส่วนใหญ่มีค่าต่ำ โดยตำแหน่งผิวดินจะที่มีความคลาดเคลื่อนมากที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นสามารถทำนายอุณหภูมิผิวดินภายในวงบ่อซีเมนต์ได้อย่างแม่นยำ

สำหรับการเปรียบเทียบความขึ้นดินที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดลอง จากข้อมูลแสดงให้เห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงเป็นไปในทิศทางเดียวกันและมีความสอดคล้องใกล้เคียงกันตลอดช่วงเวลาที่ไม่มีและไม่มีวัสดุคลุมดิน เมื่อพิจารณาค่าสหสัมพันธ์ ( $r$ ) และสัมประสิทธิ์ความแปรผัน ( $R^2$ ) พบว่าส่วนใหญ่มีค่าเข้าใกล้ศูนย์และมีค่าทั้งบวกและลบ ซึ่งอธิบายว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดลองมีความสัมพันธ์กันค่อนข้างต่ำ ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าสมมติฐานในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ยังมีปัจจัยอื่นที่มีผลต่อการเปลี่ยนความขึ้นดินในวงบ่อซีเมนต์ เมื่อพิจารณาค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE), ค่ากลางของความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์ (MAE) และค่ากลางของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์ (MAPE) พบว่าส่วนใหญ่มีค่าไม่สูงมากนัก ซึ่งโดยรวมถือว่าข้อมูลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดลองมีค่าไม่ต่างกัน เมื่อพิจารณาอย่างละเอียดยังมีบางข้อมูลอาจที่มีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูง โดยเฉพาะการทดลองในดินที่มีความขึ้นสูง เพราะว่าการเคลื่อนที่ของความขึ้นในดินอาจมีลักษณะการเคลื่อนที่ในสองสถานะ คือสถานะที่เป็นของเหลวและสถานะที่เป็นไอ ซึ่งจะไม่สอดคล้องกับสมมติฐานของแบบจำลองซึ่งได้พิจารณาการถ่ายเทความขึ้นเป็นแบบการแพร่เท่านั้น และการทดลองที่มีวัสดุคลุมดินเพราะในการทดลองจริงจะมีการสูญเสียความขึ้นบางส่วนที่ระเหยจากผิวดินมาอยู่ที่บริเวณผิวด้านล่างของวัสดุคลุมดิน โดยสมมติฐานในการสร้างแบบจำลองจะถือว่าที่ผิวดินไม่มีการระเหยมาสู่วัสดุคลุมดิน ทั้งนี้ยังรวมไปถึงปัจจัยเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกที่กระทำต่อมวลของน้ำในดินจึงทำให้ผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดลองไม่ค่อยมีความสัมพันธ์กัน

เมื่อวิเคราะห์ค่า  $t$  ที่ได้ เปรียบเทียบกับค่าวิกฤติจากตารางการแจกแจง  $t$  ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 หรือที่ความเชื่อมั่น 95% ในทุกการทดลองทั้งอุณหภูมิและความขึ้นดิน พบว่าค่า  $t$  ที่ได้จากการเปรียบเทียบของทุกกรณีมีค่าน้อยกว่า ค่า  $t$  ที่ได้จากตารางการแจกแจงในภาคผนวก ฅ ซึ่งแสดงว่าความแตกต่างระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การทดลองไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ

### สรุปผลการทดลอง

ดังนั้นจากการเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นนี้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้สามารถทำนายอุณหภูมิผิวดินที่มีและไม่มีพลาสติกคลุมดินในวงบ่อซีเมนต์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 cm สูง 40 cm และมีฝาปิดได้วงบ่อได้ในทุกระดับความลึก และสอดคล้องใกล้เคียงเป็นไปใน

ทิศทางเดียวกันกับการทดลอง ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าอุณหภูมิดินมีความสอดคล้องสัมพันธ์กับการทดลองตลอดทั้งวัน เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $r$ ) และ สัมประสิทธิ์ความแปรผัน ( $R^2$ ) มีค่าค่ามากกว่า 0.70 และ 0.80 ตามลำดับ อีกทั้งค่าอุณหภูมิและความชื้นดินระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดลองมีความใกล้เคียงกัน เนื่องจากค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE), ค่ากลางของความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์ (MAE) และค่ากลางของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์ (MAPE) มีค่าค่อนข้างต่ำ และเมื่อวิเคราะห์ค่าการกระจายแบบ  $t$  ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าความแตกต่างระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดลองไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นนี้สามารถทำนายอุณหภูมิและความชื้นดินได้และให้ผลลัพธ์เป็นที่น่าพอใจ

### ข้อเสนอแนะ

1. ควรเพิ่มการวิเคราะห์ในส่วนของการถ่ายเทมวลในสถานะของเหลว การพิจารณาในส่วน of แรงโน้มถ่วงของโลก และความหนืดเนื่องจากการไหล รวมถึงควรใช้ข้อมูลปริมาณรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิแวดล้อม ความชื้นสัมพันธ์ ในสถานที่ทำการทดลอง ซึ่งจะช่วยให้แบบจำลองมีความถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น
2. ควรพัฒนาแบบจำลองให้สามารถทำนายอุณหภูมิและความชื้นดินของการปลูกพืชจริงในวงบ่อซีเมนต์เพื่อจะได้ข้อมูลที่มีความชัดเจนในการนำไปใช้ประโยชน์ได้จริง

## รายการอ้างอิง

- กรมวิชาการเกษตร. (สิงหาคม 2558). เทคโนโลยีการผลิตมะนาวนอกฤดู ระบบการเรียนรู้ทางอิเล็กทรอนิกส์เว็บไซต์ สืบค้นจาก [http://it.doa.go.th/learn/index.php?mod=Courses&op=lesson\\_show&uid=&cid=16&eid=&sid=&lid=205](http://it.doa.go.th/learn/index.php?mod=Courses&op=lesson_show&uid=&cid=16&eid=&sid=&lid=205).
- กรมประชาสัมพันธ์. (มีนาคม 2558). ลักษณะภูมิอากาศประเทศไทย. สืบค้นจาก [http://thailand.prd.go.th/1700/ewt/asean thai/ewt\\_news.php?nid=2962&filename=inde](http://thailand.prd.go.th/1700/ewt/asean thai/ewt_news.php?nid=2962&filename=inde)
- กรมพัฒนาที่ดิน. (มีนาคม 2558). ข้อมูลบางประการของประเทศไทย. สืบค้นจาก <https://www.ldd.go.th/ofsw eb/thaisoil/p1.htm>
- กรมพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ร่วมกับภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร. (2548). รายงานวิจัย โครงการ การจัดทำคู่มือข้อมูลมาตรฐานภูมิอากาศและแสงอาทิตย์สำหรับใช้ในงานด้านพลังงานทดแทน.
- จักรพงษ์ จันทวงศ์, ธีรญา โพธารักษ์, และ อรวรรณ ฉัตรสีรุ่ง. (2553). ผลของฤดูกาลต่อความหลากหลายของราเอนโคไฟท์ในรากกล้วยไม้สกุลว่านจูงนาง. *วารสารเกษตร*, 26(1), 35-42.
- จักรวาล บุญหวาน. (2547). *การควบคุมอุณหภูมิดินเพื่อการเพาะกล้าไม้เบญจมาศ*. (ปริญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, คณะพลังงานและวัสดุ, สาขาเทคโนโลยีพลังงาน.
- มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2541) *ปฐพีวิทยาเบื้องต้น* (พิมพ์ครั้งที่ ๘). ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- บุญคง คำครุฑทาลวงษ์, อุษาวดี ต้นติวานุรักษ์, และ มาริษา มะหนิ. (2552). แบบจำลองการอบแห้งชั้นบางของเมล็ดกาแฟสายพันธุ์คาร์ติมอร์. *วารสารวิทยาศาสตร์ ม.บูรพา*, 14(2), 70-77.
- บุญธรรม กิจปริดาบริสุทธิ. (2553). *สถิติวิเคราะห์เพื่อการวิจัย*. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ : เรือนแก้วการพิมพ์.
- บัณฑิต นุชนิยม. (2544). *การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการฆ่าเชื้อโรคในดินด้วยพลังงานแสงอาทิตย์*. (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, คณะพลังงานและวัสดุ, สาขาเทคโนโลยีพลังงาน.
- เปี่ยมสุข สุวรรณภู. (2542). *การถ่ายเทความร้อนและมวลสารขณะเดียวกันในกระบวนการลดอุณหภูมิไก่*. (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สาขาวิศวกรรมอาหาร.

- ปนัดดา นนทนา. (2546). การเพิ่มความเข้มข้นของน้ำมะนาวด้วยวิธีแช่แข็ง. (วิทยานิพนธ์ปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, คณะ  
วิศวกรรมศาสตร์, สาขาวิศวกรรมอาหาร.
- ชนเทพ พิทยราชศักดิ์. (2551). การพัฒนาตัวรับรังสีอาทิตย์รูปประกอบพาราโบลแบบไม่สมมาตร  
เพื่อประยุกต์ใช้ในการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในดิน. (วิทยานิพนธ์ปริญญา  
ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, คณะพลังงานและ  
วัสดุ, สาขาเทคโนโลยีพลังงาน.
- ธรรมรัตน์ รุ่งสังข์. (2551). ผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการลวกต่อปริมาณลิโมนินและวิตามิน  
ซีในมะนาวพันธุ์แป้น. (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต).  
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, บัณฑิตวิทยาลัย, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการ  
อาหาร.
- นิติกร วิทยานุภาพกร. (2551). การพัฒนาท่อแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อประยุกต์ใช้ในการยับยั้งการ  
เจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในดิน. (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต).  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, คณะพลังงานและวัสดุ, สาขาเทคโนโลยี  
พลังงาน.
- นิพนธ์ กิตติดี, โสระยา ร่วมรังษี, และ ฉัฐา โพธาราณณ์. (2556). ผลของอุณหภูมิอากาศและสภาพดิน  
ต่อวงจรชีวิตกล้วยไม้ดินนางกราบ (*Habenaria lindleyana* Steud.). *วารสารเกษตร*,  
29(3), 221-229.
- นฤทธิ์ กล่อมพงษ์ (2551) การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนในดิน.  
(วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยทักษิณ, คณะวิทยาศาสตร์,  
สาขาฟิสิกส์.
- นรินทร์ พูลเพิ่ม. (14 พ.ค. 2559). เทคนิคการผลิตมะนาวนอกฤดู ในวงบ่อซีเมนต์. สืบค้นจาก:  
[http://www.doa.go.th/pibai/pibai/n11/v\\_11-aug/kayaipon.html](http://www.doa.go.th/pibai/pibai/n11/v_11-aug/kayaipon.html)
- มาหะมะพาเดร์ आयु. (2554). การประมาณค่าอุณหภูมิโดยใช้ตัวแบบเชิงตัวเลขและตัวแบบ  
วิเคราะห์. (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยทักษิณ, คณะ  
วิทยาศาสตร์, สาขาคณิตศาสตร์.
- พิชัย สมบูรณ์วงศ์. (1 ก.ค. 2558). เทคนิคการผลิตมะนาวนอกฤดูในภาชนะ. สืบค้นจาก:  
<http://www.e-manage.mju.ac.th/openFile.aspx?id=MzQ1MjM=>

- สำนักโรคจากการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อม กรมควบคุมโรค. (ธันวาคม 2560). ข้อมูลการประกอบอาชีพเกษตรกรรมในประเทศไทย. สืบค้นจาก <http://envocc.ddc.moph.go.th/contents/view/210>
- สุกัญญา พัวพันธ์. (2552). การปลูกมะนาวในบ่อซีเมนต์ ทางแก้ปัญหาผลผลิตขาดแคลนในช่วงฤดูแล้ง. *วารสารส่งเสริมการเกษตร*, 39 (215), 19-20.
- องอาจ ยมนา. (2545). *การวิเคราะห์ทางการเงินของการลงทุนทำสวนมะนาวในอำเภอสามพราน จังหวัดนครปฐม*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เศรษฐศาสตร์เกษตร) สาขาเศรษฐศาสตร์เกษตร ภาควิชาเศรษฐศาสตร์และทรัพยากร บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- อภิชาติ ศรีสะอาด และ พัชรี สำโรงเย็น. (2557). *แนวทางและแบบอย่างการลงทุนเพาะปลูก มะนาว วงบ่อซีเมนต์ & ในกระถาง 5 ภาค*. พิมพ์ครั้งที่ 1 – กรุงเทพฯ : นาคาอินเตอร์มีเดีย.
- อิศรัฎฐ์ รินไธสง. (1 ธันวาคม 2559). การวิจัยทางการศึกษา สืบค้นจาก <http://www.edu.tsu.ac.th/major/administration/data/FE511/>
- อัญชุลี รัตนภินันท์ชัย. (2554). *ผลของการนำความร้อนของดินที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความชื้น ดินต่อปริมาณการใช้น้ำของยางพารา*. (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิจัยและพัฒนาการเกษตร)). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, ภาควิชาโครงการสหวิทยาการ ระดับบัณฑิตศึกษา, สาขาวิจัยและพัฒนาการเกษตร.
- Adak, T., & Chakravarty, N. V. K. (2012). Relation between soil temperature and biophysical parameters in Indian mustard seeds. *International Agrophysics*, 27(4), 359-367.
- Allaire, S. E., Lafond, J. A., Cabral, A. R., & Lange, S. F. (2008). Measurement of gas diffusion through soils: comparison of laboratory methods. *Journal of Environmental Monitoring*, 10, 1326-1336.
- Banimahd, S. A., & Zand-Parsa, S. H. (2013). Simulation of Evaporation, Coupled Liquid Water, Water Vapor and Heat Transport through the Soil Medium. *Agricultural Water Management*, 130, 168-177.
- Beringer J., Lynch A. H., Chapin F. S., Mack M., & Bonan G. B. (2001). The representation of arctic soils in the land surface model: the importance of mosses. *Journal of Climate*, 14(15), 3324-3335.
- Bird, R. B., Stewart, W. E., & Lightfoot, E. N. (2005). *Transport Phenomena*. John Wiley and Sons, New York.

- Bittelli, M., Ventura, F., Campbell, G. S., Snyder, R. L., Gallegati, F., & Pisa, P. R. (2008). Coupling of heat, water vapor, and liquid water fluxes to compute evaporation in bare soils. *Journal of Hydrology*, 362(3), 191-205.
- De Castro, C., & Rey, O. (2011). Numerical study on transient heat transfer under soil with plastic mulch in agriculture applications using a nonlinear finite element model. *Open access <http://arXiv.org> > math > arXiv:1110.1690*, Cornell University Library.
- Cary, P. R. (1981). Soil Management Factors Affecting Growth And Yield Of Citrus Trees Vol-2.
- Cengel Yunus A. (2003). *Heat Transfer: A practical approach*. Mc.Graw – Hill.
- Chunlaratthanaphorn, S., Lertprasertsuke, N., Srisawat, U., Thuppia, A., Ngamjariyawat, A., Suwanlikhid, N., & Jaijoy, K. (2007). Acute and subchronic toxicity study of the water extract from root of Citrus aurantifolia (Christm. et Panz.) Swingle in rats. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 29(Suppl. 1), 125-139.
- Collares-Pereira, M., & Rabl, A. (1979). The Average Distribution of Solar Radiation- Correlations between Diffuse and Hemispherical and between Daily and Hourly Insolation Values. *Solar Energy*, 22, 155-164.
- Hillel, D. (1998). *Environmental soil physics*. ACADEMIC PRESS.
- Hillel, D. (2004). *Introduction to Environment al Soil Physics*. Elsevier Academic Press. Oxford.
- FAO (2007) *Selected indicators of food and agricultural development in the Asia-Pacific region 1996-2006*. RAP Publication 2007/15, FAO, Bangkok.
- Fares, A., & Ashok K. Alva. (2000). Evaluation of capacitance probes for optimal irrigation of citrus through soil moisture monitoring in an entisol profile. *Irrigation Science*, 19, 57-64.
- Fonteno, W. C. (1993). Problems & considerations in determining physical properties of horticultural substrates. *In International Symposium on Horticultural Substrates other than Soil in situ* 342 (pp. 197-204).
- Jahangir, M. H., & Sadrnejad, S. A. (2012). A new coupled heat, moisture and air transfer model in unsaturated soil. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26 (11), 3661-3672.

- Jittanit, W., Suriyapornchaikul, N., & Nithisopha, S. (2013). The comparison between the quality of lime juices produced by different preservation techniques. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, *91*, 691-696.
- Jun Zhang, Qun Chen, & Changfu You. (2015). Numerical simulation of mass and heat transfer between biochar and sandy soil. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *91*, 119–126.
- Kaewsuksaeng, S., Tatmala, N., Srilaong, V., & Pongprasert, N. (2015). Postharvest heat treatment delays chlorophyll degradation and maintains quality in Thai lime (*Citrus aurantifolia* Swingle cv. Paan) fruit. *Postharvest Biology and Technology*, *100*, 1-7.
- Kunkel, V., Wells, T., & Hancock, G. R. (2016). Soil temperature dynamics at the catchment scale. *Geoderma*, *273*, 32-44.
- Leybold Didactic, *Physics Experiments*, [https://www.ld-didactic.de/documents/en-US/EXP/P/P2/P2211\\_e.pdf](https://www.ld-didactic.de/documents/en-US/EXP/P/P2/P2211_e.pdf)
- Liu, B. C., Liu, W., & Peng, S. W. (2005). Study of heat and moisture transfer in soil with a dry surface layer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *48*, 4579–4589.
- Ma, Y. Y., Qu, L. Q., Wang, W. , Yang, X. S., & Lei, T. W. (2016). Measuring soil water content through volume/ mass replacement using a constant volume container. *Geoderma*, *271*, 42-49.
- Meyer, M. H., & Cunliffe, B. A. (2004). Effects of media porosity and container size on overwintering and growth of ornamental grasses. *HortScience*, *39*(2), 248-250.
- Nonthanum, P., & Tansakul, A. (2008). Freeze concentration of lime juice. *Maejo International Journal of Science and Technology*, *1*(Special Issue), 27-37.
- Paul, K. I., Polglase, P. J., Smethurst, P. J., O'Connell, A. M., Carlyle, C. J., & Khanna, P. K. (2004). Soil temperature under forests: a simple model for predicting soil temperature under a range of forest types. *Agricultural and Forest Meteorology*, *121*(3), 167-182.
- Penjor, T., Mimura, T., Matsumoto, R., Yamamoto, M., & Nagano, Y. (2014). Characterization of limes (*Citrus aurantifolia*) grown in Bhutan and Indonesia using high-throughput sequencing. *Scientific Reports*, doi: 10.1038/srep04853.
- Penman, H. L. (1940). Gas and vapour movements in the soil. I. The diffusion of vapours through porous solids. *The Journal of Agricultural Science*, *30*, 437-462.



- Ramesh Yadav, A., Chauhan, A. S., Rekha, M. N., Rao, L. J. M., & Ramteke, R. S. (2014). Flavour quality of dehydrated lime [*Citrus aurantifolia* (Christm.) Swingle]. *Food Chemistry*, 85(1), 59-62.
- Rawls, W. J., Brakensiek, D. L., & Saxton, K. E. (1982). Estimation of soil water properties. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 1316-1320.
- Rouse, R. E., & Sherrod, J. B. (1996). Optimum temperature for citrus seed germination. *Florida State Horticultural Society*, 109, 132-135.
- Sharma, R. R., Room Singh, & Saxena, S. K. (2006) . Characteristics of citrus fruits in relation to granulation. *Scientia Horticulturaem*, 111(1), 91-96.
- Sethpakdee, R. (1997). Citrus production in Thailand. Extension Bulletin No. 437. Food and Fertilizer Technology Center. Taipei. March 1997. Available at: <http://swfrec.ifas.ufl.edu/hlb/database/pdf/00001303.pdf> accessed October 2015.
- Spomer, L. A. (1976). Container soils are different. Illinois State Florists' Association Bulletin, 365.
- Tiwari, G. N. (2013). *Solar Energy*. Alpha Science International LTD.
- Vishu Shah. (2007). *Handbook of plastics testing and failure analysis*. John Wiley & Sons, Inc.
- Wu, C. L., Chau, K. W., & Huang, J. S. (2007). Modelling coupled water and heat transport in a soil–mulch–plant–atmosphere continuum (SMPAC) system. *Applied Mathematical Modelling*, 31, 152–169.
- Wutscher, H. K. (1973). Interrelationship of root and shoot growth and seasonal growth pattern of citrus seedlings. *Journal of the Rio Grande Valley Horticultural Society*, 27, 34-39.
- Yara US. (n.d). Crop Nutrition “citrus” (Online), Available at: <http://www.yara.us/agriculture/crops/citrus/key-facts/> agronomic-principles accessed November 2015.
- Yuge, K., Shigematsu, K., Anan, M., & Yoshiyuki, S. (2012). Effect of Crop Root on Soil Water Retentivity and Movement. *American Journal of Plant Sciences*, 3, 3, 1782-1787.
- Xu, X., Nieber, J. L., & Gupta, S. C. (1992). Compaction effect on the gas diffusion coefficient insoils. *Soil Science Society of America Journal*, 56, 1743–1750.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การสำรวจการปลูกมะนาวในวงบ่อซีเมนต์

## แบบสัมภาษณ์เชิงลึก

### เรื่องการปลูกมะนาวในวงบ่อซีเมนต์

#### คำชี้แจง

1. แบบสอบถามที่จัดทำขึ้นนี้ เป็นแบบสอบถามที่จะนำไปใช้ประโยชน์ในการทำงานวิจัยของลิตระดับปริญญาเอก หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ขอความกรุณาโปรดตอบแบบสอบถาม และขอขอบพระคุณล่วงหน้าเป็นอย่างสูง ในความร่วมมือตอบแบบสอบถามทุกท่าน

2. แบบสอบถามแบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

ตอนที่ 1 คำถามทั่วไป

ตอนที่ 2 การปลูกมะนาวในวงบ่อซีเมนต์

ตอนที่ 3 ความคิดเห็นเกี่ยวกับสภาพแวดล้อมภายในดิน

#### คำถามทั่วไป

1. ชื่อผู้ให้สัมภาษณ์ .....

2. ที่อยู่ .....

โทรศัพท์ .....

3. อายุ

ต่ำกว่า 15 ปี       15 – 30 ปี       31 – 40 ปี

41 – 50 ปี     51 – 60 ปี       มากกว่า 60 ปี

4. เพศ

ชาย       หญิง

5. ระดับการศึกษา

ต่ำกว่ามัธยมปลาย     อนุปริญญา       ปริญญาตรี       สูงกว่า

ปริญญาตรี

6. ทำอาชีพเกษตรกรรมมาแล้วกี่ปี

ต่ำกว่า 1 ปี       1 – 3 ปี       3 – 5 ปี

5 – 10 ปี     มากกว่า 10 ปี

ตอนที่ 1 สภาพโดยทั่วไปของการปลูกมะนาว

7. ท่านปลูกมะนาวในวงบ่อซีเมนต์มาแล้วกี่ปี และปลูกในหรือนอกฤดูกาล .....

.....

8. ท่านเลือกใช้มะนาวพันธุ์ใดและเริ่มปลูกตั้งแต่อายุต้นเท่าใด เพราะเหตุใด .....

.....

9. การปลูกมะนาวในวงบ่อซีเมนต์ ต้นมะนาวจะมีอายุอยู่ได้กี่ปี.....

10. ท่านมีจำนวนทั้งหมดกี่วงบ่อ และมีขนาดเท่าใด.....

11. ท่านคิดว่าขนาดของวงบ่อซีเมนต์มีผลต่อการปลูกมะนาวหรือไม่ เพราะเหตุใด.....

### ตอนที่ 2 ลักษณะการปลูก

12. ชนิดของดินหรือวัสดุปลูกที่ใช้มีส่วนผสมใดบ้าง และมีวัสดุคลุมดินมาใช้ร่วมด้วยหรือไม่.....

13. ท่านมีเทคนิคในการปลูกมะนาวออกผลนอกฤดูกาลด้วยวิธีการใด (ถ้ามี).....

14. ท่านวิธีการดำเนินการปลูก รดน้ำ ดูแลรักษา และป้องกันโรค ให้มะนาวออกนอกฤดูอย่างไร.....

15. ต้นมะนาวมีการให้ผลผลิตประมาณเท่าใด ระยะเวลานานเท่าใด.....

16. ท่านคิดว่าข้อดีและข้อเสียของการปลูกในและนอกวงบ่อซีเมนต์ คือ.....

17. ท่านคิดว่าปัจจัยใดที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของมะนาวในวงบ่อซีเมนต์ เพราะเหตุใด.....

### ตอนที่ 3 ความคิดเห็นเกี่ยวกับอุณหภูมิและความชื้นภายในดิน

18. ท่านคิดว่าอุณหภูมิและความชื้นภายในดินมีผลต่อการเจริญเติบโตของต้นมะนาวหรือไม่เพราะเหตุใด.....

19. ท่านมีเครื่องมือวัด อุณหภูมิและความชื้นในดินหรือไม่ ถ้ามีมีจำนวนกี่ชุด.....

20. ถ้าท่านทราบข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการปลูกมะนาวในวงบ่อซีเมนต์ จะทำให้ท่านสามารถปลูกมะนาวอย่างสะดวกและได้ผลผลิตมากยิ่งขึ้นหรือไม่ เพราะเหตุใด.....

ข้อเสนอแนะ ท่านมีข้อเสนออื่นๆ หรือต้องการองค์ความรู้ รวมถึงอุปกรณ์ต่างๆที่จำเป็นในการปลูกมะนาวในวงบ่อซีเมนต์หรือไม่ ถ้ามีโปรดระบุเหตุผล.....

จบการสัมภาษณ์

ผู้สัมภาษณ์.....

วันที่.....

สวนมะนาวอำเภอเกาะจันทร์ จ.ชลบุรี



สวนมะนาว อำเภอเมือง จ.ชลบุรี



สวนมะนาว อำเภอศรีราชา จ.ชลบุรี



สวนมะนาว อ.เมือง จ.ระยอง



ภาพที่ ก การลงพื้นที่สำรวจ

ภาคผนวก ข  
ตัวอย่างโปรแกรมคำนวณ

## ตัวอย่างโปรแกรมการคำนวณ

```

global Tbt P r z
global T W he_array TC
global Qem1 Qms1 Qir1 Qcv1 Qem_Soil1 Mcv1
Dt=1; %% step time      r=0.2; %% Element in x axis (m)      z=0.1; %% Element in y axis (dept) (m)
P=86400;Tb= CalTUnder; SelectTb= SelectData2(Tb);Tbt = transpose(Tb);

Month = input('Please input a Month [1-12] = ');
T=zeros(65,P); W=T;
[Rho_soil,Cp_soil,k_soil,H_soil,alpha_soil,emit_soil,B_m,D_m,ref_soil,k_cem,Rho_cem,Cp_cem,alpha_cem,emit_cem,lk_PE,Rho_PE,Cp_PE,alpha_PE,emit_PE,Tr_PE,l_PE,ref_PE] =
LoadParameter;
I = CalSolar1(Month);
[W_a,Tamb] = CalParameters(Month);
InitialTandW (Tamb,Rho_soil)
[v_air,hconv_air,h_m,T_sky] = CalHeatParameter(Tamb);
TC=zeros(1,P);

Mulch=input('Please input (1)for unmulching, (2) for mulching = ');
Poly=input('Please input (1)Black, (2)White , (3)Black & White = ');
MainCal(I,W_a,Tamb,hconv_air,h_m,T_sky,Dt,Mulch)
SelectI= SelectData2(I);
SelectTamb= SelectData(Tamb)-273;
SelectW_a= SelectData(W_a);
SelectT= SelectData(T);
SelectW= SelectData(W);
[Tavg5,Wavg5]=TempAndMoisAvg(SelectT,SelectW);
TT=Tavg5;WW=Wavg5;

Month1=['January'];Month2=['February'];Month3=['March'];Month4=['April'];
Month5=['May'];Month6=['June'];Month7=['July'];Month8=['August'];
Month9=['September'];Month10=['October'];Month11=['November'];Month12=['December'];
texttitle=['mo = Month' num2str(Month)'];
eval(texttitle)

figure (1);
Time=0:3600:P;
Time=transpose(Time);
symb = ['-+b';'-or';'-vg';'-*k';'-sm'];

for N=1:5
    textP = ['plot(Time,Tavg5(:, ' num2str(N) '),',' symb{N,:} '')];
    eval(textP)
    hold on
end

textaxisTx = ['ylabel("Temperature(^oC)");xlabel("Time(sec)");title("Soil Temperature of ' mo "')];
eval(textaxisTx)
legend('T(0 cm)',T(10 cm);T(20 cm);T(30 cm);T(40 cm))

figure (2);
for N=1:5
    textP = ['plot(Time,Wavg5(:, ' num2str(N) '),',' symb{N,:} '')];
    eval(textP)
    hold on
end

textaxisMx = ['ylabel("Moisture(%)")';xlabel("Time(sec)")';title("Soil Moisture at center of ' mo "')];
eval(textaxisMx)
legend1 = legend('M(0 cm)',M(10 cm);M(20 cm);M(30 cm);M(40 cm));
end

```



**ภาคผนวก ค**

การวิเคราะห์ชนิดเนื้อดินและสมบัติทางฟิสิกส์ของดิน

**ค.1 การคำนวณความหนาแน่นของอนุภาค (Dp)**

$$\begin{aligned}
 \text{น้ำหนักของดิน} &= 0.5 \quad \text{kg} \\
 \text{ปริมาตรของดิน} &= 0.15 \times 0.15 \times 0.01 \quad \text{m}^3 \\
 \text{ดังนั้นความหนาแน่นของอนุภาค (Dp)} &= 0.5 / (0.15 \times 0.15 \times 0.01) \\
 &= 2,222.22 \text{ kg/m}^3
 \end{aligned}$$

**ค.2 การคำนวณปริมาณ Sand Silt Clay**

$$\begin{aligned}
 \text{น้ำหนักดิน (ws)} &= 50 \quad \text{g} \\
 \text{ผลการวัดครั้งที่ 1 (ช่วง 40 นาที แรก)} & \\
 \text{ค่าที่อ่านได้จากไฮโกรมิเตอร์ของดินตัวอย่าง (Rs)} &= 10 \\
 \text{ค่าที่อ่านได้จากไฮโกรมิเตอร์ของ Blank (Rb)} &= 1 \\
 \text{อุณหภูมิของดินตัวอย่าง (Ts)} &= 30 \quad ^\circ\text{C} \\
 \text{อุณหภูมิของ Blank (Tb)} &= 30 \quad ^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

จากสมการที่ 3.5

$$\begin{aligned}
 \% (\text{Silt} + \text{Clay}) &= \left[ \frac{(Rs - Rb) + 0.36(Ts - Tb)}{ws} \right] \times 100 \\
 &= \left[ \frac{(10 - 1) + 0.36(30 - 30)}{50} \right] \times 100 \\
 &= 18 \%
 \end{aligned}$$

ผลการวัดครั้งที่ 2 (2 ชั่วโมง)

$$\begin{aligned}
 \text{ค่าที่อ่านได้จากไฮโกรมิเตอร์ของดินตัวอย่าง (Rs)} &= 4 \\
 \text{ค่าที่อ่านได้จากไฮโกรมิเตอร์ของ Blank (Rb)} &= 1 \\
 \text{อุณหภูมิของดินตัวอย่าง (Ts)} &= 30 \quad ^\circ\text{C} \\
 \text{อุณหภูมิของ Blank (Tb)} &= 30 \quad ^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned}
 \% \text{ Clay} &= \left[ \frac{(4 - 1) + 0.36(30 - 30)}{50} \right] \times 100 \\
 &= 6 \%
 \end{aligned}$$

$$\% \text{ Silt} = 12 \%$$

จึงสามารถคำนวณปริมาณ Sand ได้เป็น

$$\begin{aligned}
 \% (\text{Sand}) &= 100 - (\text{Silt} + \text{clay}) \\
 &= 82 \%
 \end{aligned}$$

### ค.3 การคำนวณความหนาแน่นรวม (Db)

จากสมการความพรุน (Daniel Hillel, 2004) และ จากการศึกษาของ W.J. Rawls และคณะ (1982) พบว่าค่าความพรุนของดิน ทรายแป้ง (Loamy sand) มีค่าเท่ากับ 0.437 ดังนั้น

$$\text{Porosity} = 1 - \frac{D_b}{D_p}$$

$$D_b = D_p \times (1 - \text{Porosity})$$

$$D_b = 2,222.22 \times (1 - 0.437)$$

$$= 1,251.11 \text{ kg/m}^3$$

### ค.4 การแพร่ไอน้ำของดิน

จากสมการที่ (2.26)

$$D_o(T, P) = D_o(273.15 \text{ K}, 101.3 \text{ kpa}) \left( \frac{T}{273.15} \right)^{1.75} \left( \frac{101.3}{P} \right)$$

โดยที่  $D_o(273.15 \text{ K}, 101.3 \text{ kpa}) = 2.12 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  (Bittelli et al., 2008)

เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิอากาศ 303 K , ความดัน 101.3 kPa จะได้ว่า

$$D_o(T, P) = 2.12 \times 10^{-5} \left( \frac{303}{273.15} \right)^{1.75} \left( \frac{101.3}{101.3} \right)$$

$$D_o(T, P) = 2.54 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

ดังนั้นจากสมการ (2.25)

$$D = 0.66 \times 0.401 \times 2.54 \times 10^{-5}$$

$$= 6.73 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

## ภาคผนวก ง

การหาค่าการนำความร้อนของดินและสมบัติทางแสงของพลาสติกคลุมดิน

ตารางที่ ง-1 ผลการทดลองค่าการนำความร้อนของดินขนาดพื้นที่ (A) = 0.0219 m<sup>2</sup>,  
ความหนา (x) = 0.01 m

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1*			ครั้งที่ 2**			ครั้งที่ 3***		
	T <sub>Top</sub>	T <sub>bottom</sub>	ΔT	T <sub>Top</sub>	T <sub>bottom</sub>	ΔT	T <sub>Top</sub>	T <sub>bottom</sub>	ΔT
	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
0	7.50	17.90	10.40	12.20	22.20	10.00	10.50	23.20	12.70
1	7.20	17.60	10.40	11.50	21.60	10.10	10.30	22.40	12.10
2	6.90	17.40	10.50	10.90	21.10	10.20	9.90	21.80	11.90
3	6.70	17.20	10.50	10.50	20.60	10.10	9.60	21.30	11.70
4	6.60	17.00	10.40	10.10	20.20	10.10	9.20	20.90	11.70
5	6.40	16.90	10.50	9.80	19.90	10.10	8.80	20.50	11.70
6	6.30	16.70	10.40	9.50	19.60	10.10	8.40	20.20	11.80
7	6.20	16.60	10.40	9.20	19.40	10.20	8.20	19.90	11.70
8	6.00	16.50	10.50	9.00	19.20	10.20	7.60	19.70	12.10
9	5.90	16.30	10.40	8.80	19.00	10.20	7.30	19.50	12.20
10	5.80	16.30	10.50	8.60	18.80	10.20	7.00	19.20	12.20
11	5.80	16.20	10.50	8.40	18.70	10.30	6.70	19.00	12.30
12	5.70	16.10	10.50	8.30	18.60	10.30	6.50	18.80	12.30
13	5.60	16.10	10.60	8.10	18.50	10.40	6.10	18.70	12.60
14	5.50	16.00	10.60	8.10	18.40	10.30	5.90	18.60	12.70
15	5.40	15.90	10.60	7.90	18.30	10.40	5.80	18.40	12.60
16	5.30	15.90	10.60	7.90	18.20	10.30	5.70	18.30	12.60
17	5.30	15.80	10.50	7.80	18.10	10.30	5.70	18.20	12.50
18	5.30	15.80	10.60	7.80	18.10	10.30	5.50	18.10	12.60
19	5.20	15.70	10.60	7.80	18.00	10.20	5.60	18.00	12.40
20	5.10	15.70	10.60	7.70	18.00	10.30	5.60	17.90	12.30
21	5.10	15.70	10.60	7.60	18.00	10.40	5.60	17.90	12.30
22	5.10	15.60	10.50	7.60	17.90	10.30	5.50	17.80	12.30
23	5.10	15.60	10.50	7.50	17.90	10.40	5.40	17.80	12.40
24	5.10	15.60	10.60	7.50	17.90	10.40	5.30	17.70	12.40
25	5.00	15.60	10.60	7.50	17.80	10.30	5.30	17.70	12.40
26	5.00	15.60	10.60	7.50	17.80	10.30	5.30	17.60	12.30
27	5.00	15.60	10.60	7.50	17.80	10.30	5.20	17.60	12.40
28	5.00	15.50	10.50	7.50	17.80	10.30	5.20	17.50	12.30
29	5.00	15.50	10.50	7.40	17.70	10.30	5.20	17.50	12.30
30	5.00	15.50	10.50	7.40	17.70	10.30	5.20	17.50	12.30

\* กำลังไฟฟ้า (P) = 1.05 W (ครั้งที่ 1), \*\* 1.03 W (ครั้งที่ 2) และ\*\*\* 1.06 W (ครั้งที่ 3)

ตัวอย่างการคำนวณ ในการทดลองครั้งที่ 1 จากสมการ (3.4) จะได้

$$k = \frac{Px}{A(T_{\text{bottom}} - T_{\text{top}})}$$

$$k = \frac{1.05 \times 0.01}{0.0219(15.50 - 5)}$$

$$k = 0.0448 \quad \text{Wm}^{-1}\text{-K}^{-1}$$

ตารางที่ ง-2 ผลการทดลองหาค่าคุณสมบัติทางแสงของพลาสติกคลุมดิน

ความยาวคลื่น (nm)	การส่งผ่านแสง			การสะท้อนแสง			การดูดกลืนแสง		
	สีด้า	ขาวขุ่น	สะท้อนแสง	สีด้า	ขาวขุ่น	สะท้อนแสง	สีด้า	ขาวขุ่น	สะท้อนแสง
445	0.01	0.70	0.00	0.21	0.21	0.27	0.78	0.09	0.73
446	0.01	0.70	0.00	0.19	0.20	0.25	0.80	0.10	0.75
447	0.01	0.70	0.00	0.18	0.19	0.24	0.81	0.11	0.76
448	0.01	0.70	0.00	0.18	0.18	0.24	0.81	0.12	0.76
449	0.01	0.70	0.00	0.18	0.18	0.24	0.81	0.11	0.76
450	0.01	0.70	0.00	0.17	0.17	0.23	0.82	0.13	0.77
451	0.01	0.70	0.00	0.17	0.17	0.22	0.83	0.13	0.78
452	0.01	0.70	0.00	0.16	0.16	0.22	0.83	0.14	0.78
453	0.01	0.70	0.00	0.16	0.17	0.23	0.83	0.13	0.77
454	0.01	0.70	0.00	0.16	0.16	0.22	0.84	0.14	0.78
455	0.00	0.70	0.00	0.16	0.16	0.23	0.84	0.14	0.77
456	0.01	0.70	0.00	0.16	0.16	0.22	0.84	0.14	0.78
457	0.01	0.70	0.00	0.16	0.16	0.23	0.83	0.13	0.77
458	0.01	0.70	0.00	0.16	0.17	0.23	0.83	0.13	0.77
459	0.01	0.70	0.00	0.17	0.17	0.24	0.82	0.12	0.76
460	0.01	0.70	0.00	0.17	0.17	0.24	0.82	0.13	0.76
461	0.01	0.71	0.00	0.17	0.17	0.24	0.82	0.12	0.76
463	0.01	0.71	0.00	0.19	0.19	0.26	0.80	0.11	0.74
464	0.01	0.71	0.00	0.18	0.19	0.25	0.81	0.11	0.75
465	0.01	0.71	0.00	0.18	0.19	0.26	0.81	0.10	0.74
466	0.01	0.71	0.00	0.19	0.19	0.26	0.80	0.10	0.73
467	0.01	0.71	0.00	0.19	0.19	0.26	0.80	0.10	0.74
468	0.01	0.71	0.00	0.19	0.19	0.26	0.80	0.09	0.74
469	0.01	0.71	0.00	0.19	0.19	0.26	0.80	0.10	0.74
470	0.01	0.71	0.00	0.19	0.19	0.26	0.80	0.09	0.74
471	0.01	0.71	0.00	0.19	0.20	0.26	0.80	0.09	0.74
472	0.01	0.71	0.00	0.19	0.20	0.26	0.80	0.09	0.74
473	0.01	0.72	0.00	0.19	0.20	0.27	0.80	0.08	0.73
474	0.01	0.72	0.00	0.19	0.19	0.26	0.80	0.09	0.74
475	0.01	0.72	0.00	0.19	0.19	0.26	0.80	0.09	0.74
476	0.01	0.71	0.00	0.19	0.19	0.26	0.81	0.09	0.74
477	0.01	0.72	0.00	0.19	0.20	0.27	0.80	0.09	0.73
478	0.01	0.72	0.00	0.18	0.19	0.26	0.81	0.09	0.74
479	0.01	0.72	0.00	0.19	0.19	0.26	0.81	0.09	0.74
480	0.01	0.72	0.00	0.18	0.19	0.26	0.81	0.09	0.74
481	0.01	0.72	0.00	0.18	0.19	0.25	0.81	0.10	0.75
482	0.01	0.72	0.00	0.18	0.19	0.25	0.81	0.09	0.75
483	0.01	0.72	0.00	0.18	0.19	0.25	0.81	0.10	0.75
484	0.01	0.72	0.00	0.18	0.18	0.25	0.82	0.10	0.75
485	0.01	0.72	0.00	0.18	0.18	0.25	0.82	0.10	0.75
486	0.01	0.72	0.00	0.18	0.18	0.27	0.82	0.10	0.73

ตารางที่ ง-2 (ต่อ)

ความยาวคลื่น (nm)	การส่งผ่านแสง			การสะท้อนแสง			การดูดกลืนแสง		
	สีดำ	ขาวขุ่น	สะท้อนแสง	สีดำ	ขาวขุ่น	สะท้อนแสง	สีดำ	ขาวขุ่น	สะท้อนแสง
487	0.01	0.72	0.00	0.17	0.17	0.24	0.83	0.11	0.76
488	0.00	0.72	0.00	0.16	0.17	0.23	0.83	0.11	0.77
489	0.01	0.72	0.00	0.16	0.17	0.24	0.83	0.11	0.76
490	0.01	0.72	0.00	0.16	0.17	0.24	0.83	0.11	0.76
491	0.01	0.72	0.00	0.16	0.16	0.23	0.84	0.11	0.77
492	0.01	0.72	0.00	0.16	0.16	0.23	0.83	0.12	0.77
493	0.01	0.72	0.00	0.15	0.16	0.22	0.84	0.12	0.78
494	0.00	0.72	0.00	0.15	0.16	0.22	0.84	0.12	0.78
495	0.00	0.72	0.00	0.15	0.15	0.22	0.85	0.13	0.78
496	0.00	0.72	0.00	0.14	0.15	0.22	0.85	0.13	0.78
497	0.00	0.72	0.00	0.14	0.15	0.21	0.85	0.13	0.79
498	0.00	0.72	0.00	0.14	0.15	0.21	0.85	0.13	0.79
499	0.00	0.72	0.00	0.14	0.14	0.21	0.86	0.14	0.79
500	0.00	0.72	0.00	0.13	0.14	0.20	0.86	0.14	0.80
501	0.00	0.72	0.00	0.13	0.14	0.20	0.86	0.14	0.80
502	0.00	0.72	0.00	0.13	0.14	0.20	0.87	0.14	0.80
503	0.00	0.72	0.00	0.13	0.13	0.20	0.87	0.14	0.80
504	0.01	0.72	0.00	0.13	0.14	0.19	0.86	0.14	0.81
505	0.00	0.72	0.00	0.12	0.13	0.20	0.87	0.15	0.80
506	0.00	0.72	0.00	0.12	0.13	0.19	0.87	0.15	0.81
507	0.00	0.72	0.00	0.12	0.13	0.19	0.87	0.15	0.81
508	0.00	0.72	0.00	0.12	0.13	0.19	0.88	0.15	0.81
509	0.00	0.72	0.00	0.12	0.13	0.18	0.88	0.15	0.82
510	0.00	0.72	0.00	0.12	0.13	0.18	0.88	0.15	0.82
511	0.00	0.73	0.00	0.12	0.12	0.18	0.88	0.15	0.82
512	0.00	0.73	0.00	0.12	0.12	0.18	0.88	0.15	0.82
513	0.00	0.73	0.00	0.11	0.12	0.18	0.88	0.15	0.82
514	0.00	0.72	0.00	0.12	0.13	0.18	0.88	0.15	0.82
515	0.00	0.73	0.00	0.11	0.12	0.18	0.88	0.15	0.82
516	0.00	0.73	0.00	0.11	0.12	0.18	0.89	0.16	0.82
517	0.00	0.73	0.00	0.11	0.12	0.17	0.89	0.15	0.83
518	0.00	0.73	0.00	0.11	0.12	0.17	0.88	0.15	0.83
519	0.00	0.73	0.00	0.11	0.12	0.18	0.89	0.16	0.82
520	0.00	0.73	0.00	0.11	0.12	0.17	0.88	0.15	0.83
521	0.00	0.73	0.00	0.11	0.12	0.17	0.88	0.15	0.83
522	0.00	0.73	0.00	0.11	0.12	0.18	0.89	0.16	0.82
523	0.00	0.73	0.00	0.11	0.12	0.17	0.89	0.15	0.83
524	0.00	0.73	0.00	0.11	0.12	0.17	0.89	0.15	0.83
525	0.00	0.73	0.00	0.10	0.11	0.17	0.89	0.16	0.83
526	0.00	0.73	0.00	0.11	0.11	0.17	0.89	0.15	0.83
527	0.00	0.73	0.00	0.11	0.12	0.17	0.89	0.15	0.83
528	0.00	0.73	0.00	0.11	0.12	0.17	0.89	0.15	0.83

ตารางที่ ง-2 (ต่อ)

ความยาวคลื่น (nm)	การส่งผ่านแสง			การสะท้อนแสง			การดูดกลืนแสง		
	สีดำ	ขาวขุ่น	สะท้อนแสง	สีดำ	ขาวขุ่น	สะท้อนแสง	สีดำ	ขาวขุ่น	สะท้อนแสง
529	0.00	0.73	0.00	0.11	0.11	0.17	0.89	0.15	0.83
530	0.00	0.73	0.00	0.11	0.11	0.17	0.89	0.15	0.83
531	0.00	0.73	0.00	0.10	0.11	0.17	0.89	0.15	0.83
532	0.00	0.73	0.00	0.10	0.11	0.17	0.89	0.15	0.83
533	0.00	0.74	0.00	0.10	0.11	0.17	0.89	0.15	0.83
534	0.00	0.74	0.00	0.10	0.11	0.17	0.89	0.15	0.83
535	0.00	0.74	0.00	0.10	0.11	0.17	0.89	0.15	0.83
536	0.00	0.74	0.00	0.10	0.11	0.16	0.90	0.15	0.84
537	0.00	0.74	0.00	0.10	0.11	0.16	0.89	0.15	0.84
538	0.00	0.74	0.00	0.10	0.11	0.16	0.90	0.15	0.84
539	0.00	0.74	0.00	0.10	0.11	0.17	0.90	0.15	0.83
540	0.00	0.74	0.00	0.10	0.11	0.16	0.90	0.15	0.84
541	0.00	0.74	0.00	0.10	0.11	0.16	0.90	0.15	0.84
542	0.00	0.74	0.00	0.10	0.11	0.16	0.90	0.15	0.84
543	0.00	0.74	0.00	0.10	0.11	0.16	0.90	0.15	0.84
544	0.00	0.74	0.00	0.10	0.11	0.16	0.90	0.15	0.84
545	0.00	0.74	0.00	0.10	0.11	0.16	0.90	0.15	0.84
546	0.00	0.75	0.00	0.10	0.11	0.16	0.90	0.14	0.84
547	0.00	0.75	0.00	0.10	0.11	0.16	0.90	0.14	0.84
548	0.00	0.75	0.00	0.10	0.11	0.16	0.90	0.15	0.84
549	0.00	0.75	0.00	0.10	0.11	0.16	0.90	0.14	0.84
550	0.00	0.75	0.00	0.10	0.11	0.16	0.90	0.14	0.84
551	0.00	0.75	0.00	0.10	0.11	0.16	0.90	0.14	0.84
552	0.00	0.75	0.00	0.10	0.11	0.16	0.90	0.14	0.84
553	0.00	0.75	0.00	0.09	0.10	0.15	0.90	0.14	0.85
554	0.00	0.76	0.00	0.09	0.11	0.16	0.90	0.14	0.84
555	0.00	0.76	0.00	0.09	0.10	0.16	0.90	0.14	0.84
556	0.00	0.76	0.00	0.09	0.10	0.16	0.90	0.14	0.84
557	0.00	0.76	0.00	0.09	0.11	0.16	0.90	0.14	0.84
558	0.00	0.76	0.00	0.09	0.10	0.15	0.90	0.14	0.85
559	0.00	0.76	0.00	0.10	0.11	0.16	0.90	0.13	0.84
560	0.00	0.76	0.00	0.09	0.10	0.16	0.90	0.13	0.84
561	0.00	0.76	0.00	0.09	0.10	0.16	0.90	0.13	0.84
562	0.00	0.76	0.00	0.09	0.10	0.16	0.90	0.13	0.84
563	0.01	0.76	0.00	0.10	0.11	0.16	0.90	0.13	0.84
564	0.00	0.76	0.00	0.09	0.10	0.16	0.90	0.13	0.84
565	0.00	0.76	0.00	0.09	0.10	0.16	0.90	0.13	0.84
566	0.00	0.77	0.00	0.09	0.10	0.16	0.90	0.13	0.84
567	0.01	0.77	0.00	0.10	0.11	0.16	0.90	0.12	0.84
568	0.00	0.77	0.00	0.09	0.10	0.16	0.90	0.13	0.84
569	0.00	0.77	0.00	0.10	0.11	0.16	0.90	0.13	0.84
570	0.00	0.77	0.00	0.09	0.10	0.16	0.90	0.13	0.84



ตารางที่ ง-2 (ต่อ)

ความยาวคลื่น (nm)	การส่งผ่านแสง			การสะท้อนแสง			การดูดกลืนแสง		
	สีด้า	ขาวขุ่น	สะท้อนแสง	สีด้า	ขาวขุ่น	สะท้อนแสง	สีด้า	ขาวขุ่น	สะท้อนแสง
571	0.00	0.77	0.00	0.10	0.11	0.16	0.90	0.13	0.84
572	0.00	0.77	0.00	0.09	0.11	0.16	0.90	0.13	0.84
573	0.00	0.77	0.00	0.09	0.11	0.16	0.90	0.12	0.84
574	0.00	0.77	0.00	0.09	0.11	0.16	0.90	0.12	0.84
575	0.00	0.77	0.00	0.10	0.11	0.16	0.90	0.12	0.84
576	0.00	0.77	0.00	0.10	0.11	0.16	0.90	0.12	0.84
577	0.00	0.77	0.00	0.09	0.11	0.16	0.90	0.13	0.84
578	0.00	0.77	0.00	0.09	0.11	0.16	0.90	0.12	0.84
579	0.00	0.77	0.00	0.10	0.11	0.16	0.90	0.12	0.84
580	0.00	0.77	0.00	0.10	0.11	0.16	0.90	0.12	0.84
581	0.00	0.77	0.00	0.09	0.11	0.15	0.90	0.13	0.85
582	0.00	0.77	0.00	0.10	0.11	0.16	0.90	0.12	0.84
583	0.00	0.77	0.00	0.09	0.11	0.16	0.90	0.12	0.84
584	0.00	0.77	0.00	0.10	0.11	0.16	0.90	0.12	0.84
585	0.00	0.77	0.00	0.10	0.11	0.16	0.90	0.12	0.84
586	0.00	0.77	0.00	0.10	0.11	0.16	0.90	0.12	0.84
587	0.00	0.77	0.00	0.10	0.11	0.16	0.90	0.12	0.84
588	0.00	0.77	0.00	0.10	0.11	0.16	0.90	0.12	0.84
589	0.00	0.77	0.00	0.10	0.11	0.16	0.90	0.12	0.84
590	0.00	0.77	0.00	0.10	0.11	0.16	0.90	0.12	0.84
591	0.00	0.77	0.00	0.10	0.11	0.16	0.90	0.12	0.84
592	0.00	0.76	0.00	0.10	0.11	0.16	0.90	0.12	0.84
593	0.00	0.76	0.00	0.10	0.11	0.16	0.90	0.13	0.84
594	0.00	0.76	0.00	0.10	0.11	0.16	0.90	0.13	0.84
595	0.00	0.76	0.00	0.10	0.11	0.16	0.89	0.13	0.84
596	0.00	0.76	0.00	0.10	0.11	0.16	0.89	0.13	0.84
597	0.00	0.76	0.00	0.10	0.11	0.16	0.90	0.13	0.84
598	0.00	0.76	0.00	0.10	0.12	0.16	0.89	0.13	0.84
599	0.00	0.75	0.00	0.11	0.12	0.17	0.89	0.13	0.83
600	0.00	0.75	0.00	0.11	0.12	0.17	0.89	0.13	0.83

**ภาคผนวก จ**

อุณหภูมิและความชื้นดินสูงสุดและต่ำสุดระหว่างวันที่มีวัชชุกชุมดิน  
จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ตารางที่ จ-1 การทดลองเบื้องต้นในเดือนเมษายนของอุณหภูมิดินสำหรับเป็นข้อมูลเริ่มต้นคำนวณในแบบจำลอง

เวลา (hr)	ทิศเหนือ					ทิศใต้					ทิศตะวันออก					ทิศตะวันตก					จุดกึ่งกลาง					ค่าเฉลี่ย				
	0 cm	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	0 cm	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	0 cm	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	0 cm	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	0 cm	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	0 cm	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm
6.00	29.2	28.1	31.7	32.6	32.8	28.9	30.2	30.5	31.2	31.2	29.1	30.5	31.8	32.0	31.9	29.3	30.6	32.0	32.8	33.1	29.7	31.3	32.2	32.9	32.1	29.2	30.1	31.6	32.3	32.2
9.00	32.0	31.8	30.3	31.1	31.7	32.8	30.9	30.8	30.0	30.2	32.4	30.2	30.6	31.6	31.2	32.2	30.0	30.1	30.8	31.4	32.3	31.7	31.1	30.5	31.7	32.4	31.2	30.7	30.8	31.2
12.00	43.1	38.4	38.4	37.0	36.5	44.6	35.2	37.7	37.2	36.8	39.1	39.6	38.7	38.3	37.9	42.1	39.6	37.7	37.8	36.7	42.5	36.8	36.3	36.1	36.3	42.3	37.9	37.8	37.3	36.8
15.00	44.8	42.9	38.6	38.5	37.3	46.3	42.6	39.7	38.1	37.6	40.8	38.6	37.8	37.3	36.1	44.0	41.4	38.4	37.9	37.3	44.3	40.4	37.6	36.4	36.3	44.1	41.1	38.4	37.6	36.9
18.00	39.1	39.0	39.7	38.5	37.9	38.5	41.1	41.0	37.6	36.0	39.5	40.9	39.1	37.2	37.1	40.3	42.8	39.7	38.5	38.5	39.1	40.7	39.4	38.2	38.6	39.1	40.4	39.8	38.0	37.6
21.00	33.7	35.1	36.7	35.8	35.9	33.0	36.0	37.7	37.7	36.1	33.6	35.8	36.9	36.9	36.1	34.5	37.3	37.7	36.5	37.6	34.8	36.6	36.9	36.4	36.6	33.8	35.9	37.2	36.7	36.5
24.00	31.1	32.1	34.5	34.0	34.6	30.6	33.1	34.7	35.4	35.0	31.0	33.0	34.4	34.3	34.2	31.4	33.6	33.3	34.9	35.5	32.3	34.9	35.8	35.3	34.7	31.3	33.3	34.5	34.8	34.8
3.00	30.0	31.0	32.8	32.6	32.3	29.5	31.3	32.7	33.3	34.4	30.0	31.4	32.7	32.4	33.4	30.2	31.8	32.4	33.1	33.9	30.9	32.9	33.9	33.7	33.6	30.1	31.7	32.9	33.0	33.5
6.00	28.6	28.7	31.2	31.1	31.9	28.1	29.7	30.9	31.6	32.1	29.0	30.0	31.3	31.8	32.1	28.7	30.0	31.4	32.1	32.5	29.2	30.0	32.7	32.6	32.4	28.7	29.6	31.5	31.8	33.9

ตารางที่ จ-2 การทดลองเบื้องต้นในเดือนเมษายนของความชื้นดินสำหรับเป็นข้อมูลเริ่มต้นคำนวณในแบบจำลอง

เวลา (hr)	ทิศเหนือ					ทิศใต้					ทิศตะวันออก					ทิศตะวันตก					จุดกึ่งกลาง					ค่าเฉลี่ย				
	0 cm	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	0 cm	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	0 cm	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	0 cm	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	0 cm	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	0 cm	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm
6.00	3.0	4.5	4.6	4.9	5.0	2.8	4.3	4.3	4.1	4.6	3.7	3.0	3.5	4.1	4.4	3.3	5.4	4.2	3.5	4.2	4.8	6.0	6.3	4.0	4.3	3.5	4.6	4.6	4.1	4.5
9.00	3.1	4.6	3.6	4.8	4.9	3.0	4.3	4.1	4.1	4.6	3.9	3.3	3.7	4.1	4.4	3.8	5.1	4.1	3.5	4.2	5.1	6.1	5.3	3.9	4.3	3.7	4.7	4.2	4.1	4.5
12.00	2.7	4.8	4.4	4.7	4.8	2.8	4.7	4.0	4.0	4.5	3.2	3.4	4.0	4.1	4.3	3.6	5.3	4.2	3.0	4.1	5.1	6.7	5.4	4.0	4.2	3.5	5.0	4.4	4.0	4.4
15.00	2.9	4.8	4.4	4.8	4.8	2.3	4.9	4.0	4.0	4.4	3.3	3.6	4.2	5.5	4.4	3.6	5.9	4.5	3.6	4.2	4.9	6.4	5.6	4.0	4.2	3.4	5.1	4.5	4.4	4.4
18.00	2.9	4.5	4.7	5.2	4.9	2.7	4.5	4.2	4.2	4.5	2.9	3.5	4.4	4.3	4.5	3.2	5.9	4.5	3.4	4.2	4.3	5.9	5.3	4.2	4.2	3.2	4.9	4.6	4.3	4.5
21.00	2.7	5.1	4.9	5.0	4.8	2.1	4.6	3.7	3.7	4.6	3.4	3.6	4.2	4.2	4.5	2.7	6.7	4.8	3.3	4.2	4.7	6.2	5.4	4.0	4.1	3.1	5.2	4.6	4.0	4.4
24.00	3.0	4.4	4.7	4.9	4.8	2.6	4.2	3.9	3.9	4.5	2.8	3.7	4.2	3.9	4.5	3.6	5.4	4.8	3.3	4.3	4.5	6.0	5.7	4.3	4.3	3.3	4.7	4.7	4.1	4.5
3.00	3.0	4.5	4.6	4.5	4.9	2.3	4.1	3.9	3.9	4.4	2.7	3.8	4.1	3.9	4.4	3.4	5.2	4.2	3.2	4.2	4.4	5.9	5.5	4.1	4.1	3.2	4.7	4.5	3.9	4.4
6.00	3.2	4.4	4.6	4.6	4.8	2.4	3.9	4.0	4.0	4.5	3.4	4	4.2	4.3	4.3	3.2	5.0	4.1	3.2	4.1	4.5	5.8	5.5	4.0	4.2	3.3	4.6	4.5	4.0	4.4

ตารางที่ จ-3 อุณหภูมิดินภายในวงบ่อซีเมนต์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

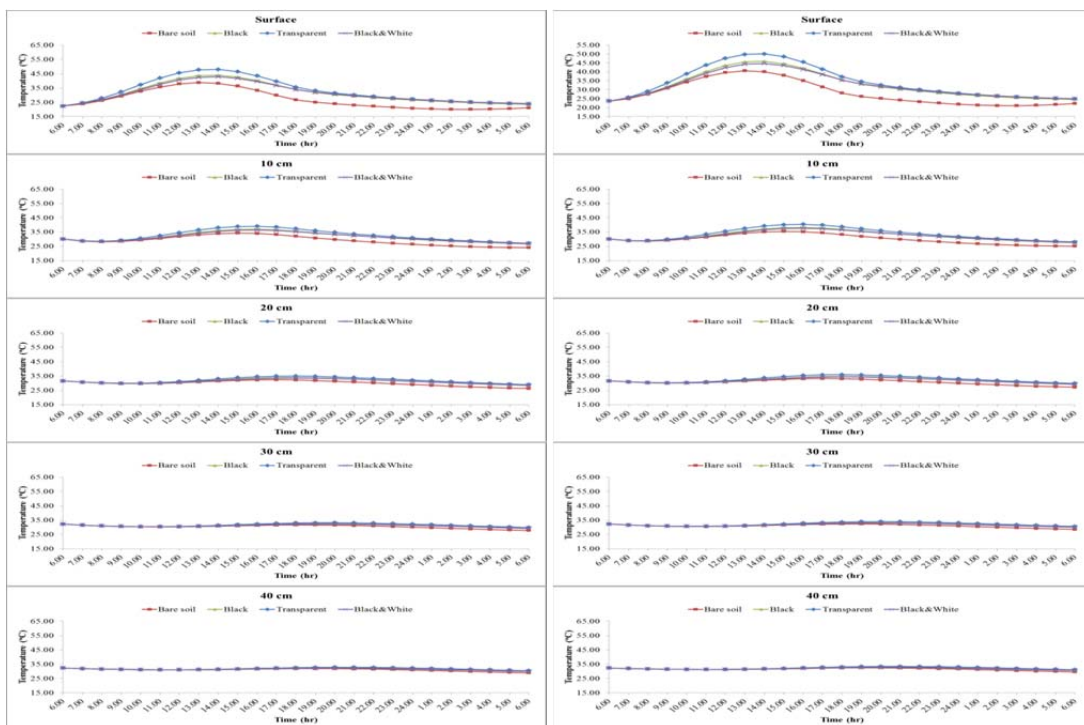
เดือน	อุณหภูมิ	พลาสติกคลุมดินแบบสีดำ					พลาสติกคลุมดินแบบขาวขุ่น					พลาสติกคลุมดินแบบสะท้อนแสง					ไม่มีการคลุมดิน				
		0 cm	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	0 cm	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	0 cm	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	0 cm	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm
มกราคม	สูงสุด (°C)	43.85	36.86	33.88	32.52	32.27	47.94	39.01	35.05	33.21	32.74	42.79	36.38	33.64	32.37	32.22	38.73	34.25	32.44	32.30	32.22
	ต่ำสุด (°C)	22.32	26.64	28.46	29.35	29.95	22.32	27.11	28.99	29.85	30.37	22.32	26.88	28.55	29.36	29.93	19.98	24.09	26.33	27.79	28.84
กุมภาพันธ์	สูงสุด (°C)	45.85	38.13	34.79	33.23	32.86	50.03	40.35	36.00	33.97	33.36	44.68	37.58	34.51	33.07	32.74	40.58	35.44	33.29	32.39	32.37
	ต่ำสุด (°C)	23.65	27.54	29.29	30.11	30.61	23.65	28.03	29.84	30.63	31.06	23.65	27.76	29.37	30.11	30.59	21.07	25.13	27.24	28.58	29.52
มีนาคม	สูงสุด (°C)	48.13	39.63	35.85	34.07	33.56	52.30	41.87	37.08	34.82	34.09	46.86	39.03	35.54	33.89	33.42	42.94	37.03	34.40	33.24	33.06
	ต่ำสุด (°C)	25.70	28.84	30.48	31.11	31.54	25.70	29.34	30.75	31.15	31.62	25.70	29.05	30.54	31.11	31.50	23.21	26.80	28.66	29.77	30.52
เมษายน	สูงสุด (°C)	49.03	40.27	36.30	34.43	33.86	53.21	42.52	37.55	35.18	34.39	47.73	39.65	35.98	34.23	33.72	43.91	37.71	34.88	33.60	33.35
	ต่ำสุด (°C)	26.90	29.79	30.93	31.33	31.78	26.90	29.84	30.97	31.37	31.79	26.90	29.80	30.92	31.32	31.78	24.56	27.97	29.63	30.60	31.23
พฤษภาคม	สูงสุด (°C)	48.23	39.74	35.89	34.05	33.52	52.42	42.03	37.15	34.83	34.07	46.93	39.14	35.57	33.87	33.39	43.29	37.31	34.54	33.26	33.03
	ต่ำสุด (°C)	27.15	29.79	30.97	31.34	31.79	27.15	29.92	31.01	31.38	31.80	27.15	29.87	30.96	31.33	31.79	24.72	27.92	29.53	30.46	31.10
มิถุนายน	สูงสุด (°C)	47.49	39.34	35.63	33.86	33.37	51.75	41.64	36.90	34.64	33.92	46.27	38.76	35.32	33.68	33.24	42.65	36.93	34.28	33.07	32.88
	ต่ำสุด (°C)	27.05	29.65	30.94	31.29	31.75	27.05	29.91	30.99	31.34	31.76	27.05	29.83	30.93	31.29	31.75	24.50	27.71	29.35	30.31	30.97
กรกฎาคม	สูงสุด (°C)	47.09	39.00	35.34	33.61	33.14	51.39	41.34	36.63	34.39	33.70	45.85	38.43	35.04	33.43	33.01	42.26	36.61	34.00	32.82	32.65
	ต่ำสุด (°C)	26.60	29.33	30.70	31.20	31.64	26.60	29.80	30.92	31.25	31.68	26.60	29.51	30.75	31.20	31.60	24.22	27.42	29.06	30.03	30.72
สิงหาคม	สูงสุด (°C)	47.15	38.90	35.21	33.48	33.03	51.48	41.26	36.51	34.27	33.59	45.88	38.32	34.91	33.30	32.90	42.35	36.55	33.90	32.71	32.55
	ต่ำสุด (°C)	26.13	29.13	30.53	31.11	31.51	26.13	29.66	30.83	31.16	31.60	26.13	29.31	30.58	31.11	31.47	23.99	27.20	28.88	29.88	30.59
กันยายน	สูงสุด (°C)	46.62	38.50	34.89	33.22	32.81	50.98	40.84	36.19	34.01	33.36	45.34	37.92	34.60	33.05	32.68	42.05	36.28	33.67	32.51	32.37
	ต่ำสุด (°C)	25.74	28.73	30.18	30.82	31.23	25.74	29.25	30.71	31.07	31.51	25.74	28.92	30.23	30.81	31.20	23.97	27.04	28.68	29.66	30.37
ตุลาคม	สูงสุด (°C)	45.77	38.02	34.59	33.00	32.63	49.99	40.27	35.82	33.74	33.14	44.57	37.47	34.31	32.84	32.52	41.35	35.87	33.42	32.34	32.25
	ต่ำสุด (°C)	25.23	28.24	29.74	30.44	30.90	25.23	28.74	30.30	30.97	31.35	25.23	28.44	29.81	30.43	30.87	23.47	26.61	28.26	29.29	30.06
พฤศจิกายน	สูงสุด (°C)	44.07	36.96	33.88	32.48	32.22	48.21	39.14	35.06	33.16	32.68	43.00	36.48	33.63	32.33	32.22	39.25	34.55	32.55	32.30	32.22
	ต่ำสุด (°C)	23.68	27.28	28.90	29.70	30.25	23.68	27.76	29.44	30.20	30.69	23.68	27.50	28.98	29.70	30.24	21.30	24.95	26.99	28.29	29.24
ธันวาคม	สูงสุด (°C)	42.96	36.26	33.41	32.30	32.22	47.03	38.40	34.56	32.79	32.38	41.94	35.80	33.18	32.30	32.22	37.81	33.64	31.97	32.30	32.22
	ต่ำสุด (°C)	22.01	26.24	28.03	28.95	29.60	22.01	26.71	28.55	29.44	30.02	22.01	26.48	28.13	28.96	29.59	19.30	23.50	25.84	27.36	28.48

ตารางที่ จ-4 ความชื้นดินภายในวงบ่อซีเมนต์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เดือน	ความชื้น	พลาสติกคลุมดินแบบสีดำ					พลาสติกคลุมดินแบบขาวขุ่น					พลาสติกคลุมดินแบบสะท้อนแสง					ไม่มีการคลุมดิน				
		0 cm	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	0 cm	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	0 cm	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	0 cm	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm
มกราคม	สูงสุด (%vol)	4.64	4.58	4.20	4.50	3.74	4.64	4.58	4.20	4.50	3.74	4.64	4.58	4.20	4.50	3.53	4.64	4.58	4.20	4.50	4.64
	ต่ำสุด (%vol)	4.53	4.54	4.12	4.43	3.52	4.53	4.54	4.12	4.43	3.52	4.53	4.54	4.12	4.43	2.11	4.41	4.53	4.12	4.43	4.53
กุมภาพันธ์	สูงสุด (%vol)	4.64	4.58	4.20	4.50	3.74	4.64	4.58	4.20	4.50	3.74	4.64	4.58	4.20	4.50	3.53	4.64	4.58	4.20	4.50	4.64
	ต่ำสุด (%vol)	4.53	4.54	4.12	4.43	3.52	4.53	4.54	4.12	4.43	3.52	4.53	4.54	4.12	4.43	1.94	4.40	4.53	4.12	4.43	4.53
มีนาคม	สูงสุด (%vol)	4.64	4.58	4.20	4.50	3.74	4.64	4.58	4.20	4.50	3.74	4.64	4.58	4.20	4.50	3.53	4.64	4.58	4.20	4.50	4.64
	ต่ำสุด (%vol)	4.53	4.54	4.12	4.43	3.52	4.53	4.54	4.12	4.43	3.52	4.53	4.54	4.12	4.43	1.80	4.39	4.53	4.12	4.43	4.53
เมษายน	สูงสุด (%vol)	4.64	4.58	4.20	4.50	3.74	4.64	4.58	4.20	4.50	3.74	4.64	4.58	4.20	4.50	3.53	4.64	4.58	4.20	4.50	4.64
	ต่ำสุด (%vol)	4.53	4.54	4.12	4.43	3.52	4.53	4.54	4.12	4.43	3.52	4.53	4.54	4.12	4.43	1.76	4.38	4.53	4.12	4.43	4.53
พฤษภาคม	สูงสุด (%vol)	4.64	4.58	4.20	4.50	3.74	4.64	4.58	4.20	4.50	3.74	4.64	4.58	4.20	4.50	3.53	4.64	4.58	4.20	4.50	4.64
	ต่ำสุด (%vol)	4.53	4.54	4.12	4.43	3.52	4.53	4.54	4.12	4.43	3.52	4.53	4.54	4.12	4.43	1.92	4.39	4.53	4.12	4.43	4.53
มิถุนายน	สูงสุด (%vol)	4.64	4.58	4.20	4.50	3.74	4.64	4.58	4.20	4.50	3.74	4.64	4.58	4.20	4.50	3.52	4.64	4.58	4.20	4.50	4.64
	ต่ำสุด (%vol)	4.53	4.54	4.12	4.43	3.52	4.53	4.54	4.12	4.43	3.52	4.53	4.54	4.12	4.43	1.97	4.40	4.53	4.12	4.43	4.53
กรกฎาคม	สูงสุด (%vol)	4.64	4.58	4.20	4.50	3.74	4.64	4.58	4.20	4.50	3.74	4.64	4.58	4.20	4.50	3.52	4.64	4.58	4.20	4.50	4.64
	ต่ำสุด (%vol)	4.53	4.54	4.12	4.43	3.52	4.53	4.54	4.12	4.43	3.52	4.53	4.54	4.12	4.43	2.02	4.40	4.53	4.12	4.43	4.53
สิงหาคม	สูงสุด (%vol)	4.64	4.58	4.20	4.50	3.74	4.64	4.58	4.20	4.50	3.74	4.64	4.58	4.20	4.50	3.53	4.64	4.58	4.20	4.50	4.64
	ต่ำสุด (%vol)	4.53	4.54	4.12	4.43	3.52	4.53	4.54	4.12	4.43	3.52	4.53	4.54	4.12	4.43	2.04	4.40	4.53	4.12	4.43	4.53
กันยายน	สูงสุด (%vol)	4.64	4.58	4.20	4.50	3.74	4.64	4.58	4.20	4.50	3.74	4.64	4.58	4.20	4.50	3.53	4.64	4.58	4.20	4.50	4.64
	ต่ำสุด (%vol)	4.53	4.54	4.12	4.43	3.52	4.53	4.54	4.12	4.43	3.52	4.53	4.54	4.12	4.43	2.17	4.41	4.53	4.12	4.43	4.53
ตุลาคม	สูงสุด (%vol)	4.64	4.58	4.20	4.50	3.74	4.64	4.58	4.20	4.50	3.74	4.64	4.58	4.20	4.50	3.54	4.64	4.58	4.20	4.50	4.64
	ต่ำสุด (%vol)	4.53	4.54	4.12	4.43	3.52	4.53	4.54	4.12	4.43	3.52	4.53	4.54	4.12	4.43	2.26	4.42	4.53	4.12	4.43	4.53
พฤศจิกายน	สูงสุด (%vol)	4.64	4.58	4.20	4.50	3.74	4.64	4.58	4.20	4.50	3.74	4.64	4.58	4.20	4.50	3.53	4.64	4.58	4.20	4.50	4.64
	ต่ำสุด (%vol)	4.53	4.54	4.12	4.43	3.52	4.53	4.54	4.12	4.43	3.52	4.53	4.54	4.12	4.43	2.23	4.42	4.53	4.12	4.43	4.53
ธันวาคม	สูงสุด (%vol)	4.64	4.58	4.20	4.50	3.74	4.64	4.58	4.20	4.50	3.74	4.64	4.58	4.20	4.50	3.53	4.64	4.58	4.20	4.50	4.64
	ต่ำสุด (%vol)	4.53	4.54	4.12	4.43	3.52	4.53	4.54	4.12	4.43	3.52	4.53	4.54	4.12	4.43	2.19	4.42	4.53	4.12	4.43	4.53

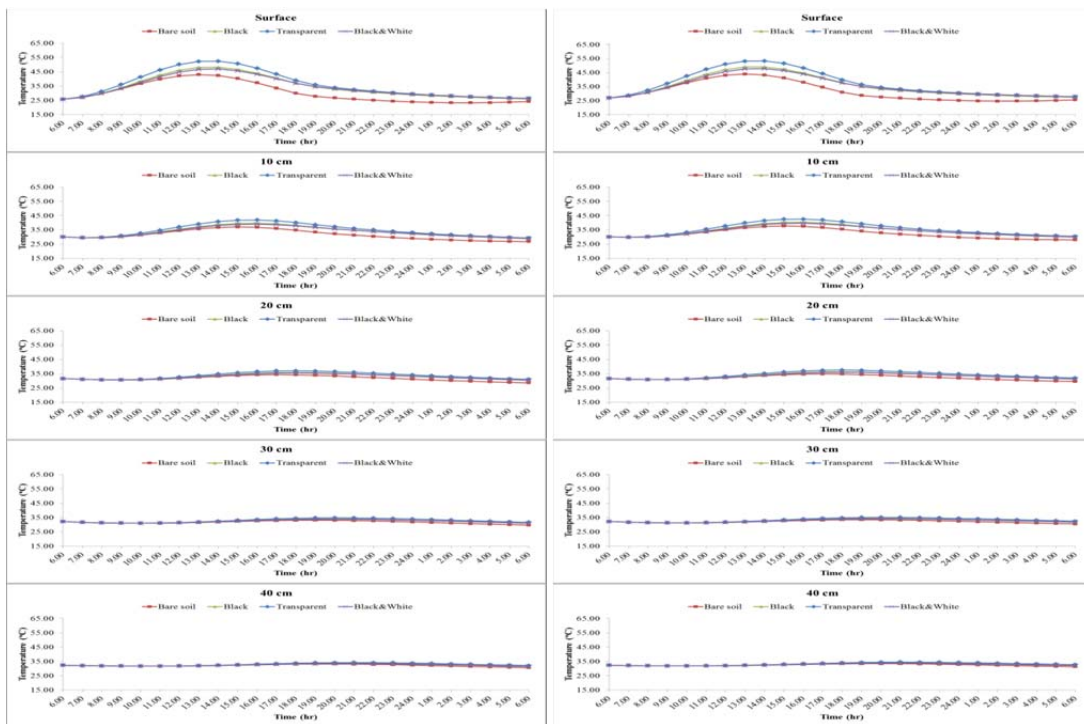
## ภาคผนวก จ

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นดินภายในวงบ่อซีเมนต์ที่มีวัสดุคลุมดิน



(ก)

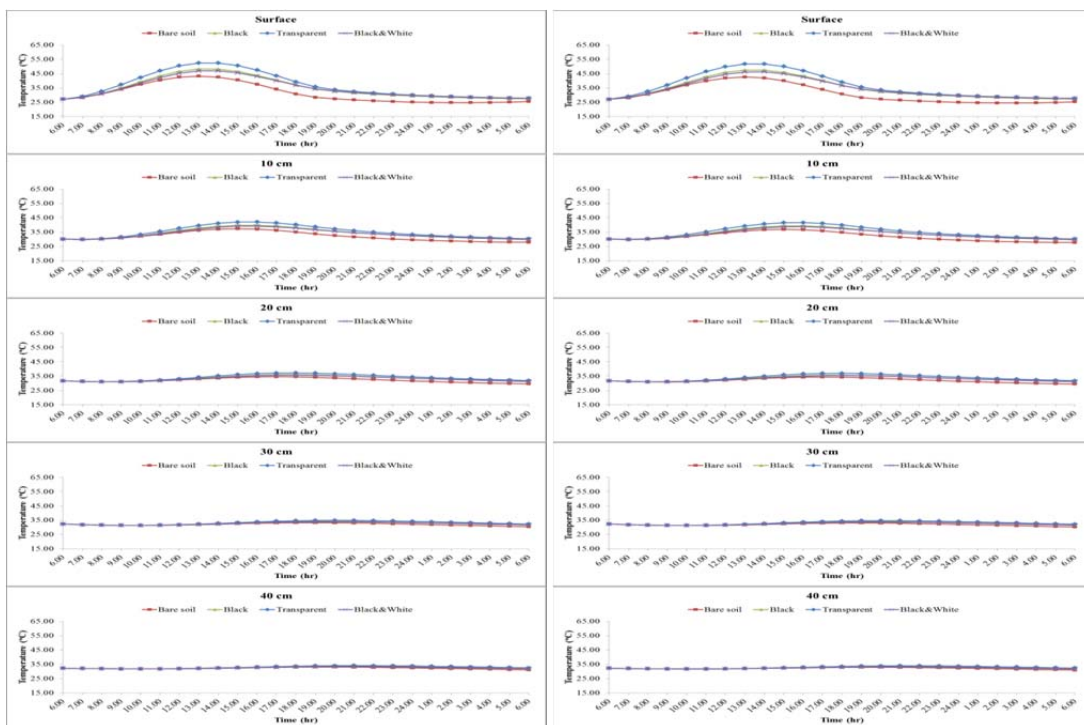
(ข)



(ค)

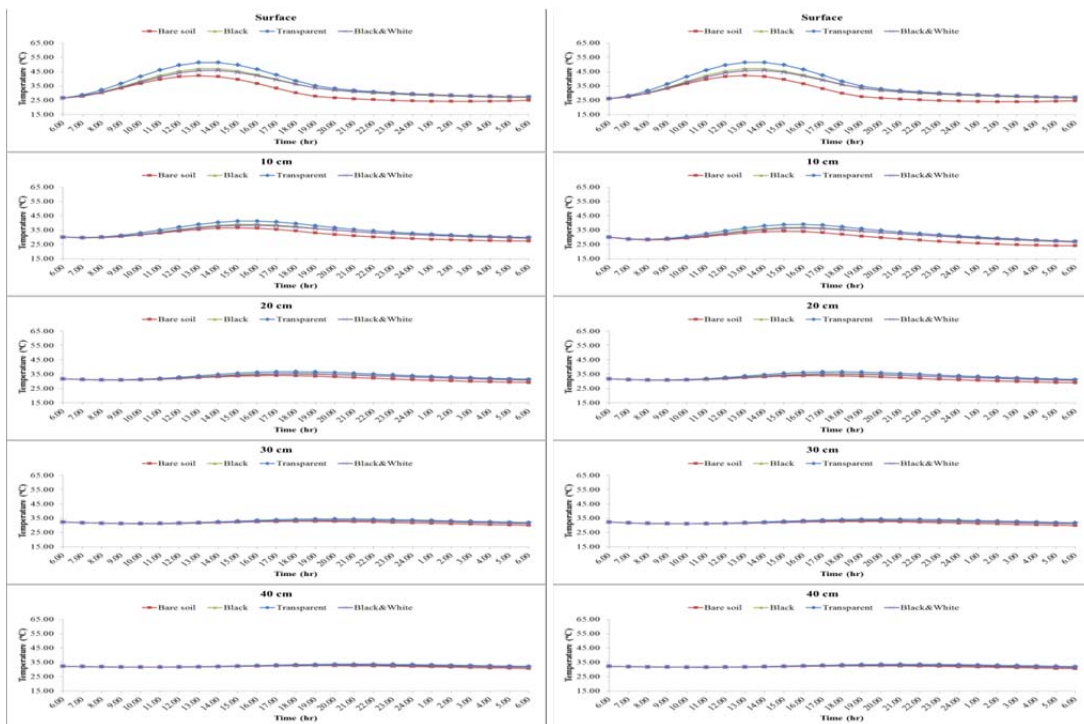
(ง)

ภาพที่ ๑-1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดินภายในวงบ่อซีเมนต์ที่มีวัสดุคลุมดิน (ก) มกราคม, (ข) กุมภาพันธ์, (ค) มีนาคม, (ง) เมษายน



(ก)

(ข)

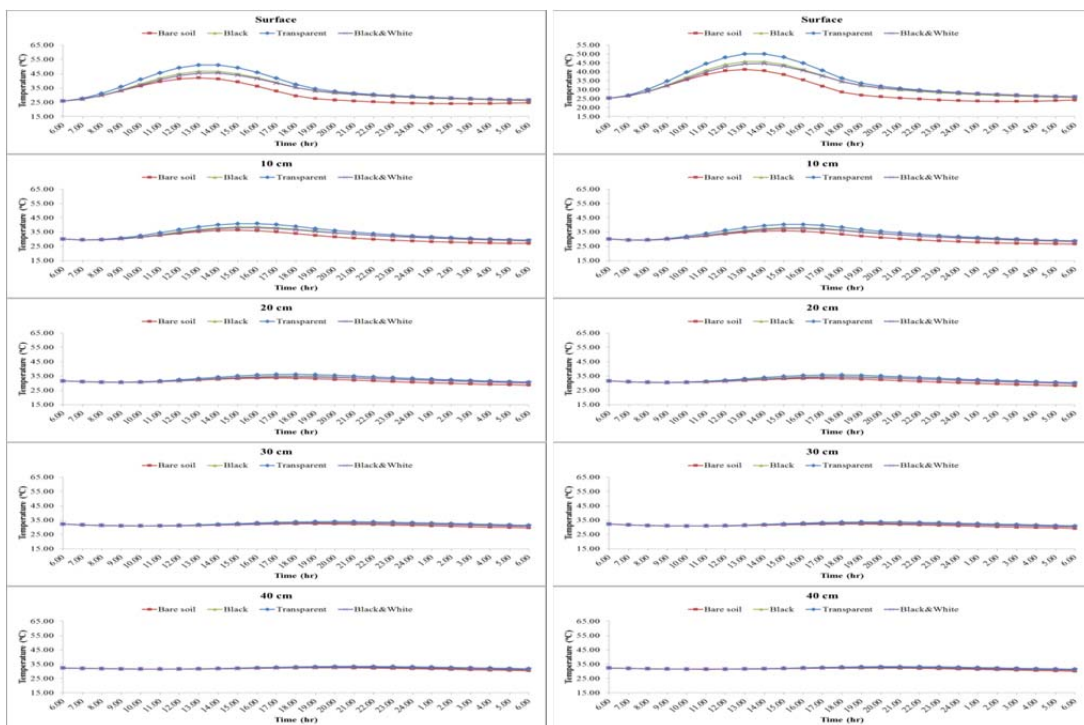


(ค)

(ง)

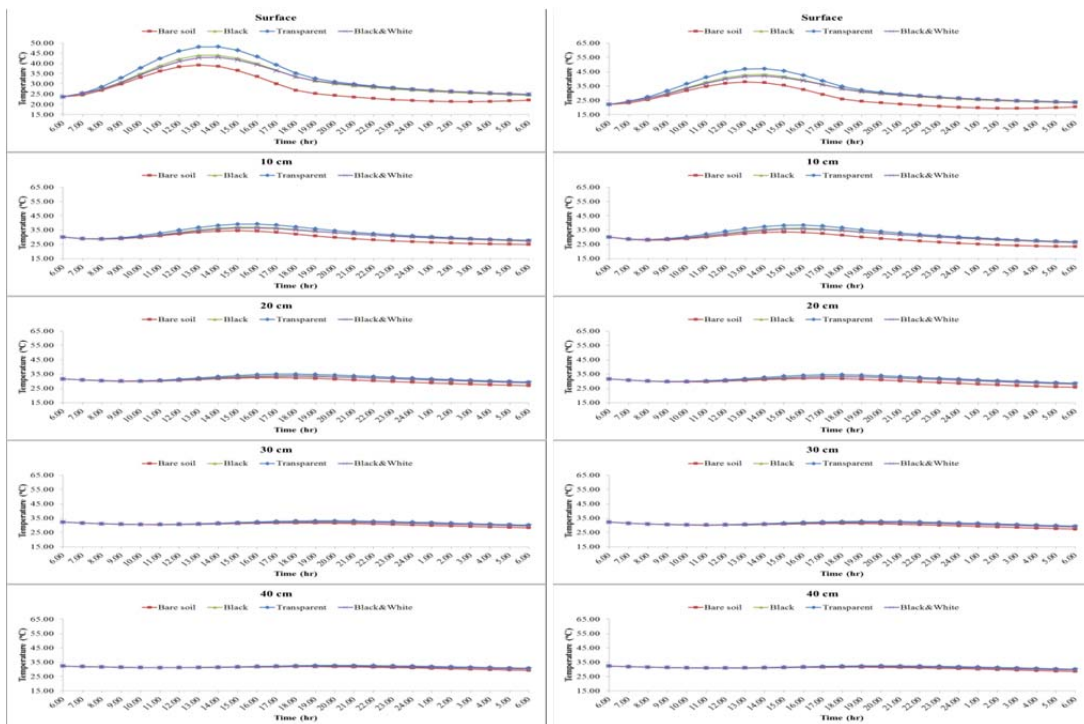
ภาพที่ ๒-2 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดินภายในวงบ่อซีเมนต์ที่มีวัสดุคลุมดิน (ก) พฤษภาคม, (ข) มิถุนายน, (ค) กรกฎาคม, (ง) สิงหาคม





(ก)

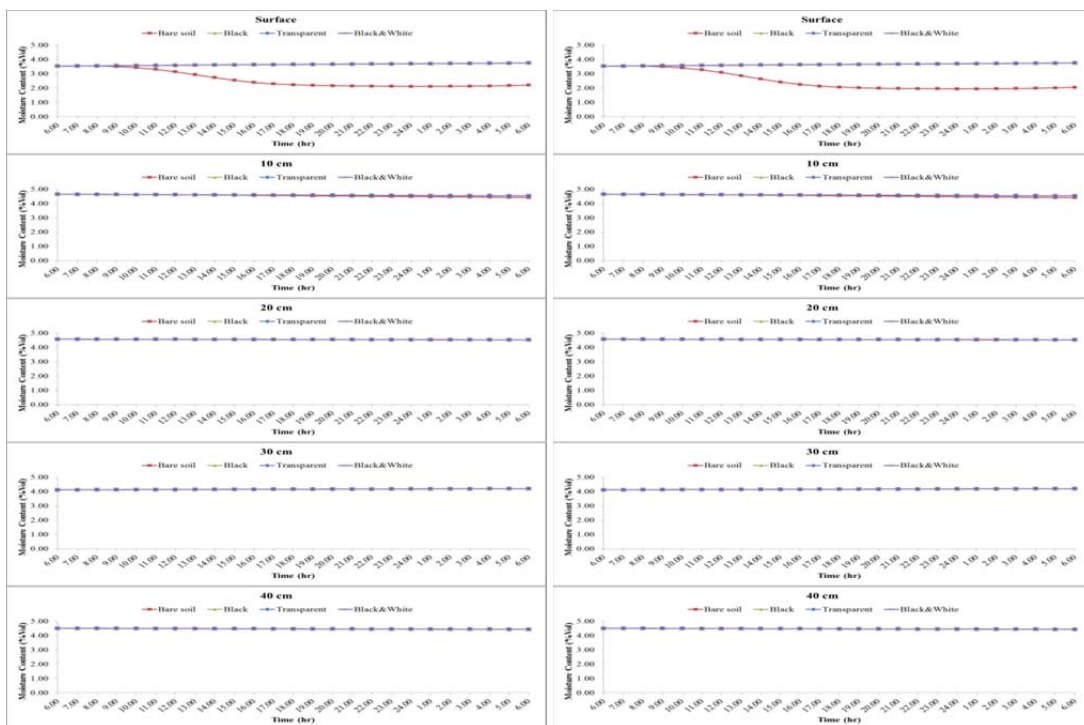
(ข)



(ค)

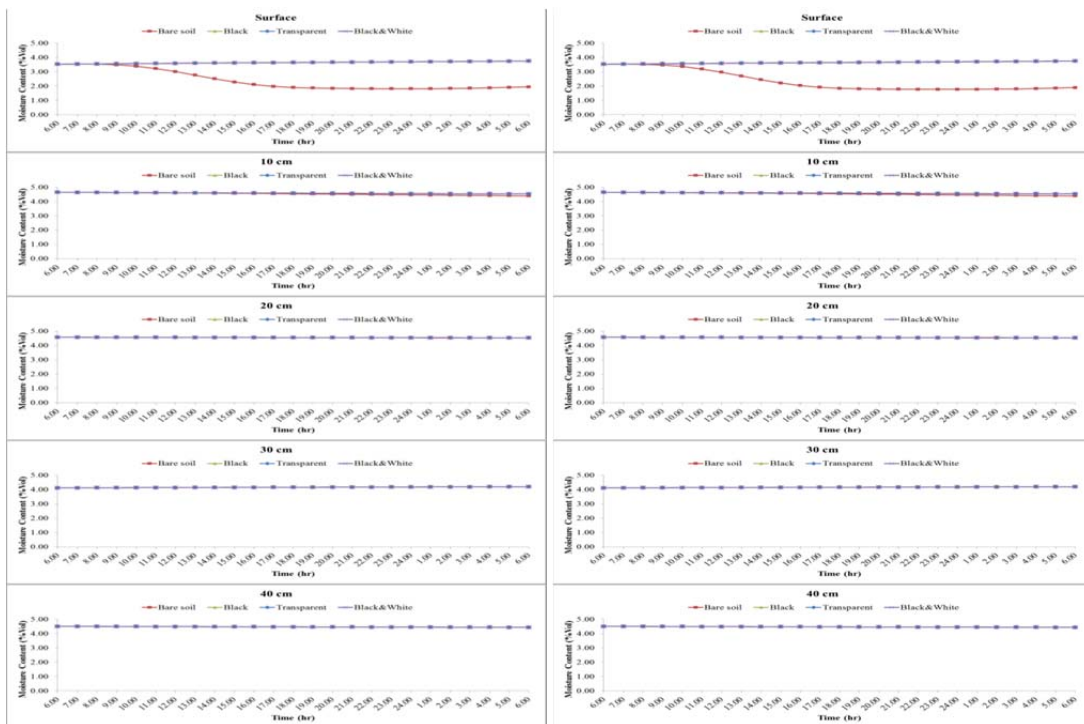
(ง)

ภาพที่ ๓-3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดินภายในวงบ่อซีเมนต์ที่มีวัสดุคลุมดิน (ก) กันยายน, (ข) ตุลาคม, (ค) พฤศจิกายน, (ง) ธันวาคม



(ก)

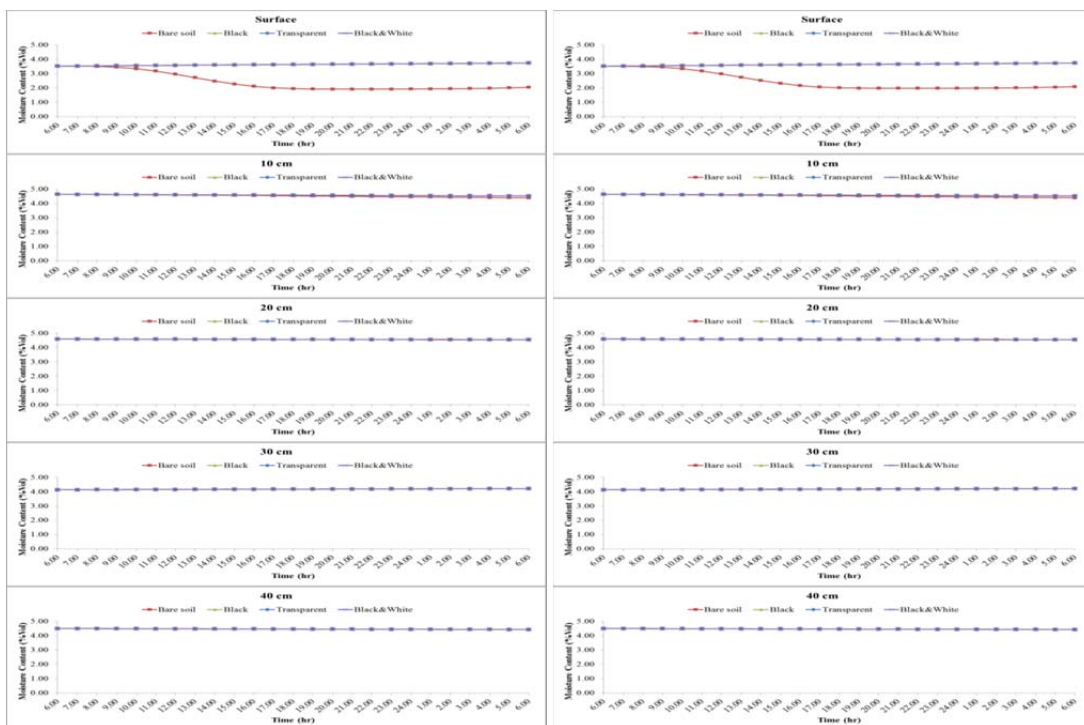
(ข)



(ค)

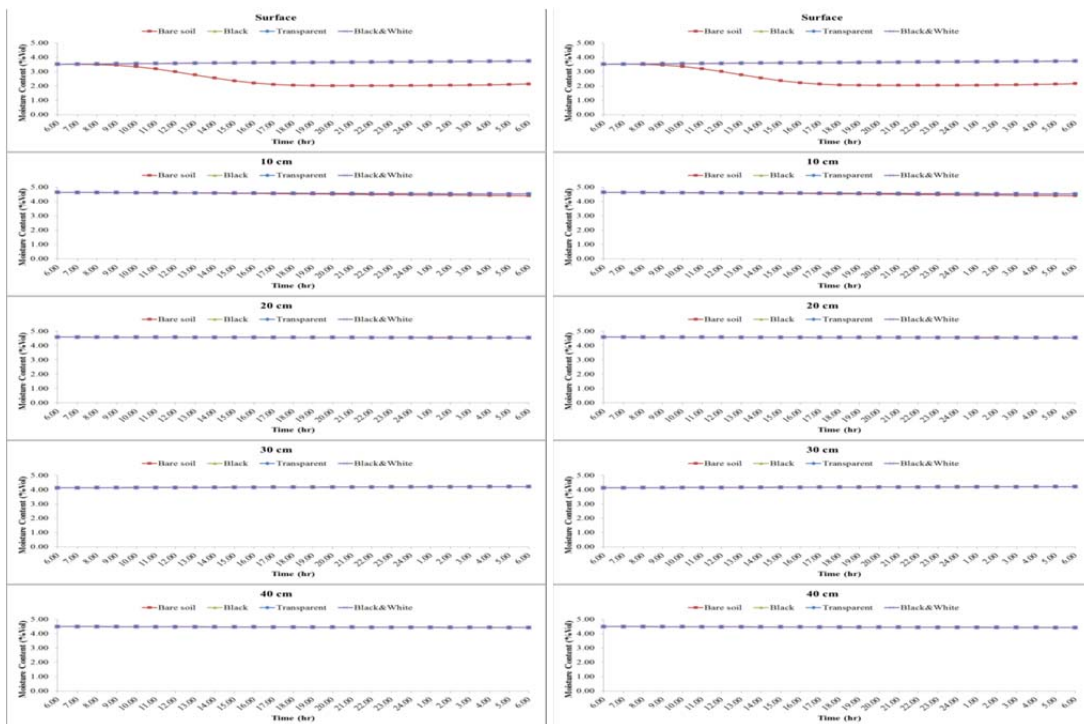
(ง)

ภาพที่ ๔-4 การเปลี่ยนแปลงความชื้นดินภายในวงบ่อซีเมนต์ที่มีวัสดุคลุมดิน (ก) มกราคม, (ข) กุมภาพันธ์ (ค) มีนาคม, (ง) เมษายน



(ก)

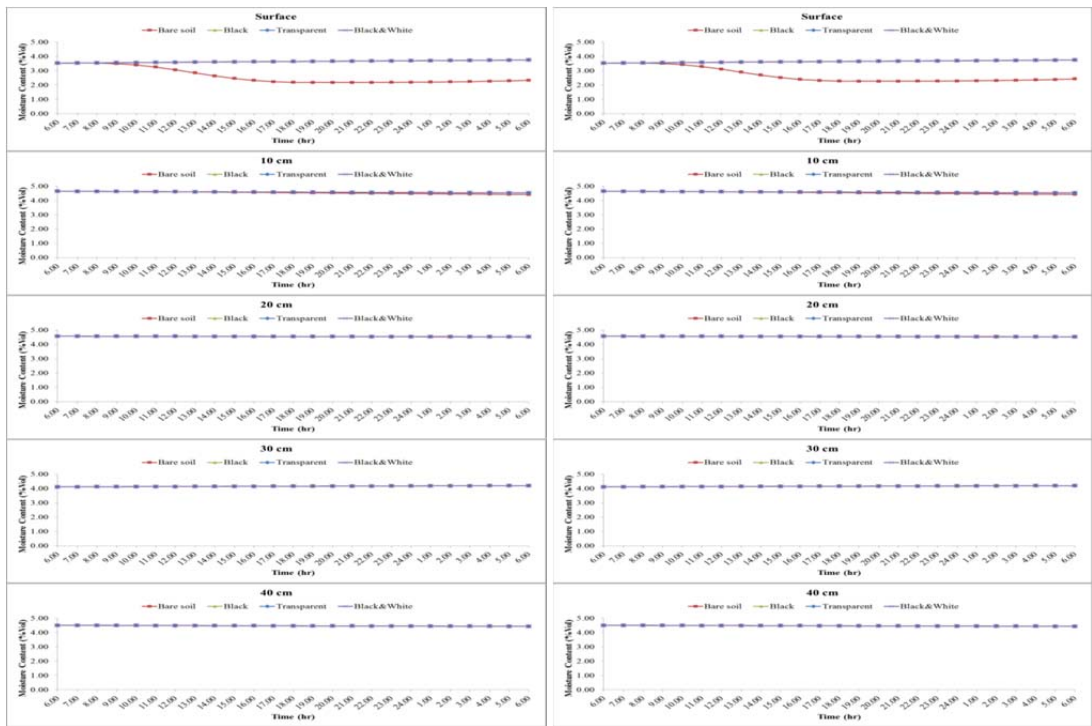
(ข)



(ค)

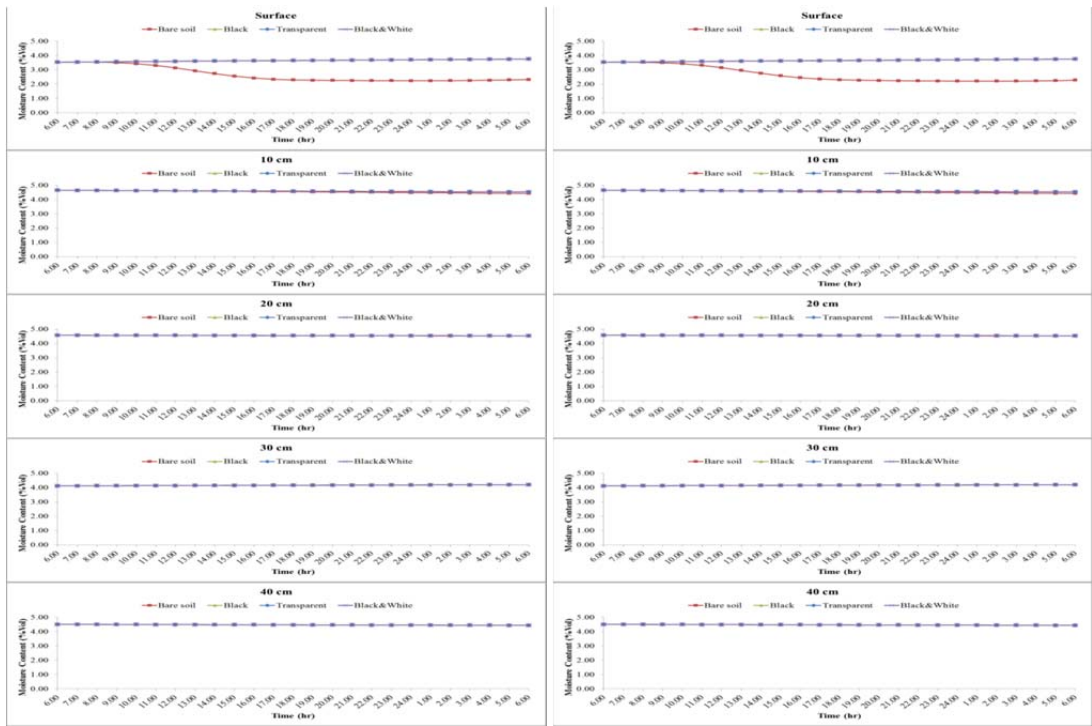
(ง)

ภาพที่ ๕-5 การเปลี่ยนแปลงความชื้นดินภายในวงบ่อซีเมนต์ที่มีวัสดุคลุมดิน (ก) พฤษภาคม, (ข) มิถุนายน, (ค) กรกฎาคม, (ง) สิงหาคม



(ก)

(ข)



(ค)

(ง)

ภาพที่ ๖-6 การเปลี่ยนแปลงความชื้นดินภายในวงบ่อซีเมนต์ที่มีวัสดุคลุมดิน (ก) กันยายน, (ข) ตุลาคม, (ค) พฤศจิกายน, (ง) ธันวาคม

**ภาคผนวก ข**

ข้อมูลการทดลองวัดอุณหภูมิและความชื้นดิน

ตารางที่ ข-1 การทดลองครั้งที่ 1 ของอุณหภูมิดินที่ไม่มีวัสดุคลุมดิน

เวลา (hr)	0 cm					10 cm					20 cm					30 cm					40 cm				
	W	E	S	N	C	W	E	S	N	C	W	E	S	N	C	W	E	S	N	C	W	E	S	N	C
6.00	26.00	25.40	25.50	25.60	26.60	26.60	26.70	26.30	26.60	27.50	27.30	27.50	26.90	27.30	28.70	27.70	28.10	27.10	27.70	28.90	28.60	28.50	28.20	28.40	29.40
9.00	32.60	33.00	34.40	35.50	31.60	28.60	28.20	28.30	28.20	28.10	27.50	27.00	27.20	27.30	26.90	28.40	28.10	27.90	27.70	28.00	28.50	27.50	28.30	27.80	27.90
12.00	36.60	42.20	42.70	41.50	36.50	32.30	39.90	33.40	33.20	32.90	29.50	30.70	30.60	30.00	28.70	29.10	30.10	30.50	29.30	28.30	28.50	29.30	30.10	29.20	27.90
15.00	36.70	38.90	38.40	37.50	38.10	34.70	36.20	35.80	36.40	36.70	31.90	33.10	32.70	33.40	32.70	30.90	31.70	31.70	32.10	30.70	30.20	30.80	31.40	31.70	29.90
18.00	31.70	31.30	31.50	31.50	33.30	32.40	33.40	32.50	32.90	34.40	32.00	33.10	32.20	32.70	33.70	31.10	32.10	31.20	31.70	32.20	30.90	31.90	31.50	31.30	31.20
21.00	29.10	28.30	28.20	28.60	30.20	30.10	30.50	29.80	30.40	31.70	30.70	31.40	30.30	31.20	32.60	30.70	31.20	30.10	30.70	31.80	30.90	31.30	30.60	30.80	31.70
24.00	27.80	27.00	27.20	27.20	28.50	28.70	28.90	28.50	28.70	29.90	29.40	29.60	29.40	29.70	31.20	29.80	30.20	29.40	29.70	30.90	30.30	30.10	30.30	29.90	31.10
3.00	26.90	26.20	26.50	26.70	27.60	27.70	27.90	27.30	27.90	28.80	28.30	28.70	28.20	28.90	30.10	28.40	29.20	28.20	28.80	29.90	29.40	29.70	29.30	28.90	30.30
6.00	26.60	26.30	26.30	26.50	27.20	27.20	27.50	27.10	27.60	28.20	28.00	28.40	27.90	28.50	29.50	28.60	28.90	28.10	28.60	29.50	29.50	29.30	29.10	29.10	30.20

\* W= ทิศตะวันตก, E = ทิศตะวันออก, S = ทิศใต้, N = ทิศเหนือ และ C = จุดศูนย์กลาง

ตารางที่ ข-2 การทดลองครั้งที่ 2 ของอุณหภูมิดินที่ไม่มีวัสดุคลุมดิน

เวลา	0 cm					10 cm					20 cm					30 cm					40 cm				
	W	E	S	N	C	W	E	S	N	C	W	E	S	N	C	W	E	S	N	C	W	E	S	N	C
6.00	27.10	26.60	26.70	26.60	27.80	28.20	27.30	27.50	28.10	28.70	28.20	28.00	27.70	28.70	29.20	28.60	28.60	27.90	28.80	29.20	29.30	29.00	29.00	29.20	29.60
9.00	31.60	32.30	32.80	32.00	32.20	29.10	29.50	29.10	29.40	29.00	28.40	28.50	28.90	28.10	27.50	27.50	29.00	28.60	27.90	27.10	28.40	28.00	29.20	28.70	27.50
12.00	35.80	35.70	39.60	36.00	36.50	32.90	34.30	34.90	33.80	33.40	31.40	31.80	33.20	31.40	30.40	29.50	31.80	32.50	30.40	29.60	29.10	30.20	31.60	29.70	29.10
15.00	37.30	37.30	31.50	38.50	38.60	37.30	36.80	38.20	38.90	37.20	35.30	32.40	36.20	36.90	34.40	33.40	35.10	34.40	35.00	32.70	31.60	33.40	32.70	33.40	31.20
18.00	30.70	29.70	29.60	33.70	31.00	32.20	32.10	31.60	32.40	32.60	32.80	32.40	32.40	33.00	34.00	32.10	32.40	32.10	32.20	33.50	31.60	31.80	31.70	31.30	32.50
21.00	28.00	27.30	27.20	27.40	28.60	29.40	29.30	29.00	29.00	29.80	30.20	30.10	30.00	30.40	32.00	30.60	30.90	30.20	30.40	32.00	30.80	30.90	30.70	30.30	32.00
24.00	27.30	26.40	26.60	26.60	27.40	28.30	28.10	27.90	28.00	28.50	29.30	29.00	28.90	28.90	30.40	29.40	29.70	29.10	29.30	30.50	30.00	29.90	30.00	29.50	30.80
3.00	27.10	26.30	26.40	26.50	27.60	27.50	27.60	27.40	27.60	27.30	28.30	28.20	28.10	28.10	29.40	28.70	28.90	28.30	28.60	29.40	29.40	29.10	29.30	29.20	29.80
6.00	26.30	25.70	25.50	25.90	26.80	27.20	26.90	26.70	27.20	27.30	27.70	27.70	27.40	27.50	29.40	28.10	28.40	27.60	28.10	28.90	28.90	28.70	28.70	28.70	29.40

ตารางที่ ช-3 การทดลองครั้งที่ 3 ของอนุกรมดินที่ไม่มีวัสดุคลุมดิน

เวลา	0 cm					10 cm					20 cm					30 cm					40 cm				
	W	E	S	N	C	W	E	S	N	C	W	E	S	N	C	W	E	S	N	C	W	E	S	N	C
6.00	26.20	25.50	25.50	25.60	27.30	26.80	27.50	26.90	26.50	27.70	27.60	28.00	27.10	27.50	28.40	26.80	28.10	28.10	27.20	29.40	28.50	28.30	28.20	28.20	29.10
9.00	30.70	31.20	32.00	31.60	32.30	27.40	29.70	29.10	28.20	29.20	26.90	27.90	27.90	26.90	26.80	27.80	27.90	28.10	28.00	29.40	27.60	27.70	28.30	27.30	27.10
12.00	34.10	33.30	34.30	33.30	34.40	32.00	33.20	33.60	22.40	33.60	30.20	31.80	32.10	30.30	29.60	29.40	31.70	29.90	30.50	29.00	29.20	30.40	31.40	29.60	29.10
15.00	36.90	37.10	36.80	38.10	31.80	33.40	34.30	34.70	34.80	35.80	31.30	32.10	32.70	32.30	31.40	31.20	33.60	32.50	34.80	31.00	30.20	30.40	31.30	30.30	29.80
18.00	31.20	30.90	30.90	31.40	31.60	32.30	32.60	32.40	33.30	33.10	32.30	32.40	32.10	33.50	32.70	32.90	34.20	32.80	33.80	33.80	31.40	31.70	31.60	32.10	31.20
21.00	29.10	28.10	28.50	28.50	29.40	30.00	30.10	30.00	30.20	30.60	30.70	30.60	30.60	31.00	31.40	31.60	32.80	32.50	31.30	33.40	30.90	30.00	30.90	30.90	31.50
24.00	27.90	27.20	27.20	27.40	28.10	28.70	28.60	28.60	28.80	29.10	29.90	29.50	29.10	29.70	29.90	30.10	31.40	31.20	30.70	32.70	30.30	30.30	30.00	30.20	30.70
3.00	27.40	26.70	26.80	26.90	27.60	27.90	27.80	27.90	28.10	28.30	28.90	28.40	28.50	28.90	29.20	29.30	30.30	30.20	29.70	31.80	29.80	29.50	29.50	29.70	30.20
6.00	27.10	26.30	26.70	26.50	27.30	27.70	27.20	27.60	27.60	28.00	28.50	28.00	28.30	28.30	28.50	28.90	29.80	29.70	29.10	31.00	29.40	29.30	29.30	29.30	29.90

ตารางที่ ช-4 การทดลองครั้งที่ 1 ของอนุกรมดินที่คลุมด้วยพลาสติกแบบสีดำ

เวลา	0 cm					10 cm					20 cm					30 cm					40 cm				
	W	E	S	N	C	W	E	S	N	C	W	E	S	N	C	W	E	S	N	C	W	E	S	N	C
6.00	24.90	25.60	25.60	25.40	25.90	25.70	26.70	26.40	26.40	27.60	26.60	27.60	27.40	27.10	28.90	26.80	28.10	28.10	27.20	29.40	28.20	28.80	28.70	28.40	29.90
9.00	31.10	30.00	30.30	32.20	32.40	27.70	27.50	27.60	27.70	28.20	27.10	29.30	27.10	27.50	29.20	27.80	27.90	28.10	28.00	29.40	28.50	28.40	28.40	28.60	29.30
12.00	41.00	40.60	37.60	37.90	40.70	33.90	34.10	34.40	34.40	33.30	29.80	32.10	31.10	31.20	29.40	29.40	31.70	29.90	30.50	29.00	29.70	30.60	29.60	29.70	29.20
15.00	40.50	42.50	39.50	39.10	41.50	37.10	38.40	38.00	38.20	37.70	33.20	36.00	34.90	36.10	33.10	31.20	33.60	32.50	34.80	31.00	32.00	32.70	31.60	32.60	30.20
18.00	32.30	34.20	34.50	32.80	34.90	34.60	36.20	35.70	35.00	36.20	33.50	35.50	31.80	34.70	34.80	32.90	34.20	32.80	33.80	33.80	31.90	33.10	32.00	32.20	31.80
21.00	28.80	29.70	30.80	30.90	31.10	31.30	32.70	32.40	31.90	33.80	31.80	33.10	32.50	32.20	34.20	31.60	32.80	32.50	31.30	33.40	31.40	32.30	31.90	31.50	32.30
24.00	27.50	28.50	28.70	28.70	29.30	29.40	30.40	30.20	30.10	30.80	30.30	31.50	31.20	30.60	32.70	30.10	31.40	31.20	30.70	32.70	30.60	31.00	31.20	30.60	32.00
3.00	26.60	27.40	27.70	27.60	28.30	28.20	29.20	28.80	28.70	30.40	29.10	30.00	29.70	29.40	31.50	29.30	30.30	30.20	29.70	31.80	30.10	30.60	30.40	30.20	31.70
6.00	26.30	27.00	27.10	26.90	27.60	27.60	28.50	28.20	28.00	29.60	28.50	29.30	29.10	28.60	30.60	28.90	29.80	29.70	29.10	31.00	29.70	30.10	30.00	29.30	31.00

ตารางที่ ช-5 การทดลองครั้งที่ 2 ของอนุกรมดินที่คลุมด้วยพลาสติกแบบสีดำ

เวลา	0 cm					10 cm					20 cm					30 cm					40 cm				
	W	E	S	N	C	W	E	S	N	C	W	E	S	N	C	W	E	S	N	C	W	E	S	N	C
6.00	26.90	27.30	26.90	27.40	27.60	27.40	27.50	27.00	27.70	28.50	27.80	27.90	27.70	27.90	29.00	27.70	28.20	27.50	28.10	29.50	28.30	28.80	28.10	29.00	29.90
9.00	31.20	31.60	30.30	31.60	32.60	28.90	29.00	28.70	28.60	28.90	28.40	28.10	28.20	28.20	28.60	28.30	27.60	28.00	28.40	29.10	28.70	29.00	28.20	29.00	29.70
12.00	37.50	41.00	36.20	36.60	40.70	34.70	34.80	34.20	33.00	33.70	32.20	30.90	32.50	31.10	29.60	31.50	29.80	30.70	28.90	28.70	31.70	29.80	30.20	29.10	29.00
15.00	38.20	39.60	37.70	39.50	41.00	38.50	39.00	37.40	38.90	38.40	36.60	35.70	35.90	36.20	33.80	34.60	34.80	33.00	35.70	31.70	35.50	32.80	31.80	33.40	30.50
18.00	31.10	29.10	30.50	31.10	30.90	33.20	31.40	31.80	32.30	33.40	33.60	32.30	32.80	32.60	34.20	32.10	32.00	31.90	32.20	33.60	31.70	31.70	31.40	31.50	32.20
21.00	28.10	27.30	28.00	28.20	28.20	29.90	28.70	29.10	29.50	31.10	30.80	29.50	30.20	30.00	32.20	30.10	29.80	30.00	29.80	32.50	30.50	30.40	30.10	30.20	31.70
24.00	27.60	26.70	27.20	27.60	27.90	28.80	27.80	28.00	28.30	29.60	29.50	28.60	28.90	28.80	30.80	28.70	28.80	28.90	28.80	31.20	29.30	29.70	29.40	29.70	31.20
3.00	27.00	25.80	26.70	26.70	27.00	28.00	27.20	27.40	27.50	28.50	28.50	27.80	28.00	28.00	29.50	28.00	28.50	28.30	28.30	30.00	28.30	29.00	28.80	29.10	30.40
6.00	26.40	25.60	26.10	26.40	26.50	27.40	26.60	26.60	27.00	28.10	27.90	27.40	27.60	27.60	29.00	27.30	27.70	27.60	27.80	29.50	27.80	27.60	28.30	28.80	29.90

ตารางที่ ช-6 การทดลองครั้งที่ 3 ของอนุกรมดินที่คลุมด้วยพลาสติกแบบสีดำ

เวลา	0 cm					10 cm					20 cm					30 cm					40 cm				
	W	E	S	N	C	W	E	S	N	C	W	E	S	N	C	W	E	S	N	C	W	E	S	N	C
6.00	26.30	26.10	25.70	26.40	27.00	26.40	26.90	26.80	26.90	28.10	27.30	27.10	28.20	27.50	28.60	26.80	27.20	27.50	27.30	28.90	27.60	27.50	28.20	28.20	28.30
9.00	28.40	30.40	30.10	31.50	30.80	27.30	27.70	27.50	27.80	27.30	27.50	27.70	27.10	27.50	27.80	27.30	27.70	27.30	27.50	28.40	27.60	27.90	27.80	28.00	28.70
12.00	36.00	39.10	36.50	37.50	37.30	33.70	33.90	32.90	33.60	32.80	32.10	31.30	30.30	30.40	29.30	30.40	30.20	29.80	29.30	28.90	28.90	25.80	29.40	29.20	28.90
15.00	38.80	43.20	45.30	44.80	40.20	35.00	35.60	35.50	37.70	36.80	33.00	33.90	33.40	35.50	31.80	31.90	31.50	31.60	31.90	30.80	30.30	30.70	30.50	30.50	33.00
18.00	33.60	35.70	33.00	32.50	34.20	34.20	35.40	34.80	37.40	36.70	34.30	32.90	32.20	34.00	33.90	31.40	32.20	32.40	32.90	32.30	31.40	31.20	31.80	31.90	31.20
21.00	30.20	31.20	29.90	31.80	36.50	31.30	32.40	31.20	32.90	34.00	32.00	31.30	31.70	31.70	33.70	31.10	31.00	31.50	31.40	32.90	31.30	30.60	31.40	31.40	32.00
24.00	28.20	29.10	28.20	29.30	29.80	29.40	30.30	30.00	30.40	31.80	30.30	30.00	30.40	30.40	32.40	29.10	30.00	30.80	30.40	32.20	30.40	30.00	30.80	30.90	31.80
3.00	27.30	28.00	27.50	28.20	28.60	28.50	29.10	29.00	29.10	30.30	29.40	28.90	29.60	29.40	31.10	28.90	29.30	29.90	29.40	31.30	29.90	29.20	30.20	30.20	31.20
6.00	27.30	27.60	27.20	27.90	28.00	28.00	28.70	28.50	28.50	29.60	28.90	28.90	29.10	28.90	30.40	28.70	28.10	29.40	26.00	30.70	29.50	29.10	29.90	29.90	30.80



ตารางที่ ช-7 การทดลองครั้งที่ 1 ของความชื้นดินที่ไม่มีวัสดุคลุมดิน

เวลา	0 cm					10 cm					20 cm					30 cm					40 cm				
	W	E	S	N	C	W	E	S	N	C	W	E	S	N	C	W	E	S	N	C	W	E	S	N	C
6.00	1.90	2.70	2.80	2.50	2.80	2.80	3.60	1.60	3.50	4.00	4.30	4.10	3.10	4.40	4.60	4.40	4.20	3.80	5.30	4.20	6.10	6.50	4.50	6.80	7.50
9.00	2.60	2.60	3.20	2.30	3.00	3.20	3.40	3.90	3.40	3.90	4.00	4.00	4.20	4.30	4.50	5.60	4.20	4.50	5.30	4.20	7.80	6.50	7.10	7.20	7.40
12.00	1.70	2.10	3.40	2.70	3.20	3.10	3.10	4.00	3.30	3.90	4.00	4.00	4.30	4.40	4.60	5.70	4.30	4.60	5.30	3.90	7.90	6.50	7.30	6.90	7.90
15.00	1.70	1.80	3.30	2.00	3.10	3.10	3.20	4.30	3.40	3.80	4.00	4.00	4.30	4.40	4.60	5.70	4.30	4.50	5.30	4.00	7.70	6.50	7.30	7.00	7.90
18.00	1.70	2.00	3.30	2.20	2.60	3.10	3.20	4.00	3.20	3.80	4.10	4.00	4.30	4.40	4.60	5.70	4.30	4.60	5.20	4.20	7.60	6.50	7.20	6.70	7.70
21.00	2.00	1.90	3.10	2.30	2.70	3.10	3.10	4.00	3.10	3.60	4.00	3.90	4.20	4.30	4.60	5.70	4.20	4.60	5.20	4.20	7.70	6.50	7.20	7.00	7.70
24.00	1.90	1.80	3.10	2.10	2.60	3.00	3.10	3.90	3.10	3.60	4.10	3.90	4.20	4.40	4.40	5.70	4.30	4.60	5.10	4.40	7.60	6.50	7.10	6.60	7.60
3.00	1.80	1.90	3.00	1.90	2.30	2.70	3.00	3.70	2.80	3.40	3.90	3.90	4.30	4.20	4.40	5.70	4.30	4.60	5.20	4.30	7.70	6.50	7.20	6.90	7.80
6.00	1.30	1.80	3.40	1.90	2.40	2.50	3.10	4.20	2.80	3.30	3.80	3.90	4.50	4.10	4.50	5.60	4.30	4.70	5.10	4.30	7.70	6.40	7.20	7.10	7.80

ตารางที่ ช-8 การทดลองครั้งที่ 2 ของความชื้นดินที่ไม่มีวัสดุคลุมดิน

เวลา	0 cm					10 cm					20 cm					30 cm					40 cm				
	W	E	S	N	C	W	E	S	N	C	W	E	S	N	C	W	E	S	N	C	W	E	S	N	C
6.00	7.60	7.80	7.50	6.00	6.30	10.00	8.20	9.80	5.30	5.70	12.30	9.40	13.30	8.70	10.90	10.20	9.30	10.50	6.30	8.50	7.60	8.40	9.20	6.50	8.50
9.00	7.80	7.30	7.50	5.10	5.20	10.80	7.90	9.00	5.90	5.40	11.80	9.80	12.90	8.40	10.40	9.60	9.20	10.00	6.30	8.50	7.50	8.70	9.10	6.70	8.50
12.00	6.70	6.60	6.30	5.50	4.50	10.00	7.80	8.60	6.00	4.90	11.70	9.30	12.60	8.20	10.00	9.70	9.10	9.90	6.30	8.40	7.70	8.50	9.00	6.90	8.70
15.00	5.00	5.60	5.80	4.00	4.20	8.80	7.20	8.90	4.80	6.40	11.60	9.30	12.80	8.10	10.40	10.00	9.10	10.20	6.60	8.90	7.70	8.50	9.20	7.00	9.00
18.00	4.40	5.30	5.90	3.90	4.20	8.90	7.30	9.50	5.10	6.80	11.30	9.60	14.20	7.90	10.50	9.90	8.90	10.90	6.40	8.90	7.80	8.50	9.20	7.10	9.70
21.00	4.30	4.30	5.10	3.70	3.30	8.90	6.70	9.20	4.90	6.50	11.50	9.50	14.00	8.10	10.50	9.90	9.10	11.30	6.60	9.00	7.80	8.60	10.00	6.90	9.50
24.00	4.40	4.40	5.30	3.80	3.90	8.70	6.80	8.70	4.70	6.30	11.40	9.10	13.50	7.90	10.60	9.90	8.90	11.40	6.50	9.10	7.80	8.50	10.50	7.10	9.50
3.00	4.70	4.70	4.70	4.00	3.70	8.90	7.00	8.60	4.70	6.30	11.40	9.50	13.40	7.90	10.50	9.70	9.00	11.30	6.60	9.30	8.20	8.70	11.20	6.70	9.90
6.00	4.50	4.70	4.60	4.50	3.80	8.90	6.70	7.90	4.70	6.40	11.40	9.10	13.00	7.80	10.50	9.90	9.10	11.10	6.60	9.30	8.30	8.80	11.50	7.00	10.00

ตารางที่ ช-9 การทดลองครั้งที่ 3 ของความชื้นดินที่ไม่มีวัสดุคลุมดิน

เวลา	0 cm					10 cm					20 cm					30 cm					40 cm				
	W	E	S	N	C	W	E	S	N	C	W	E	S	N	C	W	E	S	N	C	W	E	S	N	C
6.00	8.50	9.50	9.80	6.30	11.60	8.60	10.70	11.90	7.50	11.20	14.50	17.70	16.40	12.30	12.90	14.00	18.00	16.10	12.60	12.40	13.50	15.80	16.70	13.90	18.30
9.00	7.30	8.00	8.60	5.30	9.10	7.70	9.40	11.20	6.00	10.20	13.50	17.10	15.50	11.70	12.80	13.70	17.40	15.60	12.30	12.70	13.40	15.40	16.20	14.30	17.80
12.00	6.70	7.40	7.30	4.40	7.70	7.30	8.70	10.00	5.20	9.40	12.90	16.20	15.30	10.80	12.50	13.50	16.70	15.70	12.00	12.60	13.30	15.10	16.30	14.40	17.60
15.00	5.70	6.40	6.80	3.90	7.00	7.00	8.00	8.90	4.90	8.80	12.50	15.40	15.20	10.30	12.30	13.40	16.30	15.50	11.70	12.50	13.30	14.90	16.10	13.80	17.70
18.00	5.60	6.00	6.60	3.70	6.80	7.00	7.90	8.70	4.70	8.50	11.90	14.80	14.80	9.90	12.10	13.40	16.00	15.20	11.30	12.40	13.20	14.70	16.00	13.20	17.50
21.00	6.00	5.90	7.10	3.30	7.00	6.80	7.80	9.30	4.60	8.50	11.90	14.60	14.40	9.60	11.80	13.20	15.70	15.00	11.00	12.00	13.00	14.60	15.90	13.20	18.20
24.00	5.80	6.10	7.10	3.20	7.10	6.80	8.20	9.20	4.70	8.50	11.80	14.50	14.50	9.60	11.60	13.00	15.70	14.90	10.90	11.90	13.00	14.70	15.80	13.40	17.90
3.00	5.80	5.90	7.00	3.90	6.80	7.00	8.00	9.50	4.50	8.20	11.70	14.10	14.60	9.30	11.50	12.80	15.60	14.70	10.80	12.00	12.90	14.40	15.40	13.00	17.20
6.00	5.70	6.00	7.00	3.70	6.70	6.70	7.50	9.30	4.50	8.20	11.50	14.10	13.70	9.30	11.70	12.70	15.00	14.20	10.70	12.10	12.90	14.20	15.00	13.40	17.20

ตารางที่ ช-10 การทดลองครั้งที่ 1 ของความชื้นดินที่คลุมด้วยพลาสติกแบบสีดำ

เวลา	0 cm					10 cm					20 cm					30 cm					40 cm				
	W	E	S	N	C	W	E	S	N	C	W	E	S	N	C	W	E	S	N	C	W	E	S	N	C
6.00	1.70	2.10	1.50	1.60	3.70	3.10	3.10	3.90	3.30	4.20	3.60	3.60	4.00	3.00	4.20	5.30	3.80	4.20	4.10	4.70	5.60	4.70	6.30	5.00	7.60
9.00	1.50	2.20	1.70	1.80	3.80	2.20	3.10	2.70	3.00	3.70	3.50	3.50	3.50	2.90	3.70	4.40	3.80	3.80	4.00	4.50	5.40	4.70	5.20	5.10	6.30
12.00	1.60	2.80	1.60	2.60	3.60	2.40	3.40	3.00	3.10	4.00	3.50	3.60	3.60	2.90	3.80	4.40	4.00	4.00	4.10	4.50	5.30	4.80	5.30	5.10	6.30
15.00	1.60	2.40	2.20	2.00	3.80	2.60	3.30	3.00	3.20	3.80	3.60	3.70	3.60	3.00	3.70	4.50	4.10	4.00	4.20	4.50	5.40	4.90	5.20	5.20	5.90
18.00	1.80	2.30	1.70	2.30	3.50	2.60	3.30	3.00	3.20	3.70	3.60	3.70	3.70	3.20	3.40	4.60	4.10	4.00	4.40	4.40	5.30	4.90	5.30	5.30	6.00
21.00	2.10	2.10	2.00	1.90	3.50	2.60	2.70	3.00	3.10	3.70	3.70	3.20	3.60	3.20	3.70	4.60	3.90	4.00	4.30	4.50	5.40	4.80	5.40	5.20	5.80
24.00	2.10	1.80	1.90	2.20	3.70	2.70	2.70	3.00	3.00	3.50	3.70	3.10	3.50	3.10	3.70	4.60	3.90	4.00	4.40	4.50	5.40	4.90	5.20	5.20	5.70
3.00	2.10	1.60	1.80	1.80	3.60	2.80	2.60	2.70	2.80	3.50	3.60	3.20	3.40	3.00	3.60	4.60	3.90	4.00	4.40	4.50	5.50	4.80	5.30	5.20	5.70
6.00	2.30	2.10	1.50	1.80	3.20	2.70	2.50	2.60	2.90	3.30	3.70	3.20	3.40	2.90	3.40	4.70	3.80	4.20	4.20	4.40	5.50	4.90	5.30	5.20	5.50

ตารางที่ ช-11 การทดลองครั้งที่ 2 ของความชื้นดินที่คลุมด้วยพลาสติกแบบสีดำ

เวลา	0 cm					10 cm					20 cm					30 cm					40 cm				
	W	E	S	N	C	W	E	S	N	C	W	E	S	N	C	W	E	S	N	C	W	E	S	N	C
6.00	5.20	6.00	6.50	4.40	6.10	6.20	11.30	9.80	11.30	8.00	8.10	10.00	9.80	10.00	8.90	5.70	7.40	9.50	7.40	6.30	5.40	5.30	6.20	5.30	5.80
9.00	4.60	6.70	6.60	4.90	5.70	5.10	11.40	9.70	11.40	7.50	7.80	10.00	9.70	10.00	8.30	5.80	7.30	9.50	7.30	6.30	5.20	5.30	6.10	5.30	5.90
12.00	4.00	6.50	5.60	4.20	5.40	5.00	11.40	9.70	11.40	7.70	7.80	9.70	9.70	8.30	5.80	7.30	9.60	7.40	6.40	5.20	5.50	6.20	5.50	6.10	
15.00	3.50	4.10	4.50	3.20	4.90	5.40	10.50	8.70	10.50	8.40	7.50	9.70	9.30	9.60	8.20	5.90	7.40	9.40	7.50	7.00	5.10	5.40	6.30	5.40	6.20
18.00	3.20	4.20	4.70	3.90	4.30	6.70	10.60	9.30	10.80	8.90	7.40	10.20	10.80	10.20	9.50	6.10	7.60	9.50	7.60	8.40	5.20	5.30	6.70	5.30	6.90
21.00	2.60	4.20	4.60	3.60	5.10	6.60	10.80	9.00	10.70	7.70	8.00	10.80	11.00	10.60	10.00	6.30	7.90	10.40	7.90	8.80	5.10	5.40	6.30	5.40	8.40
24.00	1.70	3.50	4.40	3.30	5.00	6.70	10.50	8.50	10.60	7.90	8.30	10.80	10.70	10.80	9.40	6.40	8.30	10.70	8.30	11.10	5.00	5.40	6.20	5.40	9.20
3.00	1.70	3.80	4.40	3.40	4.60	6.60	10.50	8.80	10.40	7.60	8.20	10.70	10.60	10.60	9.90	6.40	8.50	10.60	8.50	11.70	5.10	5.60	6.50	5.50	10.50
6.00	1.40	3.30	4.30	2.80	4.50	6.10	10.10	8.20	10.10	7.80	8.00	10.70	10.60	10.70	10.10	6.40	8.50	10.50	8.50	11.70	5.20	5.50	6.60	5.50	10.40

ตารางที่ ช-12 การทดลองครั้งที่ 3 ของความชื้นดินที่คลุมด้วยพลาสติกแบบสีดำ

เวลา	0 cm					10 cm					20 cm					30 cm					40 cm				
	W	E	S	N	C	W	E	S	N	C	W	E	S	N	C	W	E	S	N	C	W	E	S	N	C
6.00	9.30	9.40	10.20	8.50	7.00	10.30	10.50	8.00	10.50	9.30	18.60	16.70	13.30	17.70	7.60	29.40	22.40	30.20	15.70	14.20	27.70	21.70	23.10	21.10	24.20
9.00	8.10	8.60	8.90	7.10	6.40	9.30	9.80	7.20	9.40	8.60	17.90	15.70	12.40	17.00	7.80	29.70	22.10	29.60	15.70	14.00	27.50	21.20	23.50	20.60	24.10
12.00	7.40	7.70	7.50	6.50	5.80	8.40	8.90	6.40	8.80	8.20	17.00	16.60	12.00	16.40	7.70	29.10	21.00	29.10	16.00	13.80	27.50	21.10	23.10	20.60	23.90
15.00	6.70	6.60	6.70	6.10	5.10	8.30	8.50	5.60	8.60	7.60	16.60	14.10	10.90	16.10	7.30	28.30	21.40	27.90	15.50	12.40	26.90	20.80	22.60	20.00	21.00
18.00	6.30	6.60	5.90	5.80	4.80	7.90	8.00	5.80	8.60	6.90	16.00	13.80	12.50	15.70	7.10	27.70	20.90	27.70	15.80	11.00	26.20	20.90	22.10	9.80	20.30
21.00	6.80	7.10	6.00	6.20	5.00	8.00	8.30	5.50	8.60	6.20	16.40	13.30	10.90	15.80	7.10	27.60	20.40	26.40	15.30	10.40	26.60	20.40	22.10	20.00	20.30
24.00	6.60	7.10	6.20	6.30	5.00	8.00	8.20	5.50	8.60	6.10	16.40	13.40	10.70	16.20	5.90	27.00	20.70	25.90	15.20	9.90	26.40	20.20	21.60	19.70	19.60
3.00	6.50	6.70	6.10	6.00	4.40	8.00	8.10	5.70	8.40	5.70	16.30	13.20	10.50	15.80	5.30	27.10	20.20	25.90	15.10	9.30	26.60	20.20	21.40	19.50	19.40
6.00	6.50	6.40	5.90	6.00	4.40	7.80	8.00	5.50	8.30	5.40	16.10	13.10	10.50	15.80	5.30	27.30	20.60	25.60	15.10	9.00	26.70	20.50	21.70	19.60	19.20

ตารางที่ ข-13 การทดลองครั้งที่ 1 ของอนุกรมิตินที่คลุมด้วยพลาสติกแบบขาวุ่น

เวลา	อุณหภูมิ															ความชื้น												
	0 cm			10 cm			20 cm			30 cm			40 cm			0 cm			10 cm			20 cm			30 cm			
	W	E	C	W	E	W	E	C	W	E	C	W	E	C	W	E	C	E	C	C	W	E	C	W	E	C	W	E
6.00	27.40	27.40	27.80	29.00	28.60	29.70	29.80	29.50	30.90	30.40	30.50	31.50	30.80	30.90	31.80	1.70	0.90	3.90	8.90	7.70	8.20	12.10	10.10	12.10	12.00	9.90	12.30	
9.00	33.00	32.30	33.90	29.50	29.00	29.50	28.90	28.30	29.10	29.10	28.50	29.20	28.90	28.50	29.80	1.80	1.00	3.80	8.90	7.80	8.30	12.10	10.00	12.20	12.10	9.90	12.40	
12.00	44.80	44.40	47.40	38.10	38.00	37.90	34.90	34.70	32.70	33.10	30.60	30.70	31.00	28.90	29.80	1.50	0.90	3.10	8.90	7.90	8.40	11.90	10.00	12.10	11.90	9.70	12.30	
15.00	48.50	47.50	50.80	43.30	43.70	43.70	40.40	41.00	38.80	37.30	35.70	34.60	34.40	32.50	32.80	1.50	0.70	3.10	8.90	8.00	8.60	12.00	10.10	12.40	11.80	9.90	12.40	
18.00	39.50	40.40	39.50	40.30	42.00	40.90	39.60	41.70	39.50	37.60	39.20	37.40	35.20	36.20	34.80	1.30	1.20	2.50	9.10	8.10	8.50	12.00	10.20	12.30	12.00	10.00	12.30	
21.00	34.50	35.10	35.00	35.60	36.60	36.80	35.80	37.10	37.30	35.40	36.80	36.70	34.40	35.60	35.40	1.00	0.70	2.70	9.50	7.90	8.30	12.00	10.10	12.00	11.80	9.90	12.40	
24.00	31.50	31.80	31.90	33.00	33.10	34.00	33.60	34.10	35.00	33.80	34.70	35.13	33.50	34.10	34.60	0.70	0.70	2.80	8.90	8.00	8.30	12.10	10.10	12.20	12.30	9.90	12.30	
3.00	29.00	29.00	29.50	30.70	30.60	31.40	31.40	30.80	32.70	31.90	32.30	33.00	32.00	32.40	32.20	1.00	0.90	2.80	9.00	7.90	8.50	12.10	10.00	12.20	12.10	9.80	12.50	
6.00	27.40	27.40	27.80	29.00	28.60	29.70	29.80	29.50	30.90	30.40	30.50	31.50	30.80	30.90	31.80	1.70	0.90	3.90	8.90	7.70	8.20	12.10	10.10	12.10	12.00	9.90	12.30	

ตารางที่ ข-14 การทดลองครั้งที่ 2 ของอนุกรมิตินที่คลุมด้วยพลาสติกแบบขาวุ่น

เวลา	อุณหภูมิ															ความชื้น												
	0 cm			10 cm			20 cm			30 cm			40 cm			0 cm			10 cm			20 cm			30 cm			
	W	E	C	W	E	W	E	C	W	E	C	W	E	C	W	E	C	E	C	C	W	E	C	W	E	C	W	E
6.00	26.70	26.70	27.00	28.30	27.90	29.10	29.10	28.90	30.30	29.70	29.90	31.00	30.00	30.30	29.80	1.00	1.00	2.20	8.90	7.90	8.10	12.10	9.90	12.20	11.50	9.70	12.10	
9.00	33.20	33.10	35.10	29.30	29.90	29.10	28.60	28.90	28.70	28.90	28.80	28.60	28.70	28.70	32.60	0.50	1.10	3.00	8.90	8.20	8.60	12.10	9.70	12.30	11.90	9.60	12.30	
12.00	44.20	42.60	45.00	36.30	35.10	36.50	33.90	32.10	31.90	31.70	28.70	29.20	30.20	28.30	33.50	0.50	1.00	2.80	8.90	7.90	8.40	11.90	9.90	12.10	11.90	9.70	12.20	
15.00	47.10	46.60	48.10	42.50	42.90	42.20	39.20	40.70	37.10	35.90	35.10	33.80	33.30	31.90	34.30	0.70	0.70	1.80	9.00	8.00	8.60	12.10	10.10	12.80	12.00	9.90	12.20	
18.00	37.80	38.20	37.50	38.80	39.60	39.30	38.10	39.70	38.20	36.50	37.60	34.00	30.30	35.10	38.20	0.30	0.60	2.40	8.90	8.10	8.50	12.00	10.10	12.20	11.90	9.80	12.20	
21.00	32.90	33.20	33.00	27.60	34.90	35.40	34.60	35.40	36.00	34.30	35.30	28.10	33.40	34.50	33.20	1.10	1.00	1.80	8.80	8.00	8.40	12.00	9.60	12.10	12.00	9.50	12.10	
24.00	30.60	30.30	32.70	25.80	31.70	32.00	32.40	32.60	33.20	32.70	33.10	33.30	32.40	32.90	30.40	1.10	0.80	2.20	8.70	7.90	8.20	12.00	9.70	12.00	11.90	9.50	12.10	
3.00	28.90	28.70	29.00	25.40	29.60	30.40	30.40	30.40	31.50	30.80	31.10	31.80	30.90	31.20	31.80	0.80	0.50	1.90	8.70	7.90	8.20	12.00	9.20	12.10	12.00	9.20	12.20	
6.00	26.70	26.70	27.00	28.30	27.90	29.10	29.10	28.90	30.30	29.70	29.90	31.00	30.00	30.30	29.80	1.00	1.00	2.20	8.90	7.90	8.10	12.10	9.90	12.20	11.50	9.70	12.10	

ตารางที่ ช-15 การทดลองครั้งที่ 3 ของอนุกรมอิสระความชื้นดินที่คลุมด้วยพลาสติกแบบขาวปูน

เวลา	อนุกรม															ความชื้น												
	0 cm			10 cm			20 cm			30 cm			40 cm			0 cm			10 cm			20 cm			30 cm			
	W	E	C	W	E	W	E	C	W	E	C	W	E	C	W	E	C	E	C	C	W	E	C	W	E	C	W	E
6.00	27.30	27.20	27.50	27.00	28.40	29.00	29.10	29.00	29.80	29.60	29.80	30.20	28.50	29.00	29.40	0.90	0.60	2.20	8.80	7.80	8.40	12.00	9.90	12.10	12.00	9.80	12.20	
9.00	31.80	31.50	33.20	30.70	29.00	29.30	28.20	28.30	28.80	28.30	28.30	28.60	28.30	28.10	29.10	1.30	0.70	2.90	8.70	7.80	8.20	11.90	9.10	12.10	11.90	9.00	12.20	
12.00	35.10	35.10	36.30	33.00	31.90	31.60	30.80	30.60	30.20	29.90	29.20	28.90	29.10	28.30	33.00	1.10	0.70	2.70	8.60	7.80	8.40	11.90	9.70	12.10	11.90	9.60	12.20	
15.00	34.20	34.00	34.30	28.80	33.10	33.00	32.00	32.40	31.40	31.00	30.80	30.40	29.90	29.40	29.30	0.60	1.20	2.30	8.70	7.70	8.30	12.00	8.30	12.30	12.00	9.20	12.30	
18.00	31.20	31.20	30.90	28.00	31.60	31.80	31.40	31.70	31.40	30.60	30.80	31.00	30.00	30.00	28.60	0.50	1.20	2.70	8.60	7.90	8.50	12.00	9.80	12.10	11.90	9.80	12.20	
21.00	29.10	29.00	28.80	27.30	29.70	30.30	30.40	30.30	30.60	30.00	30.10	30.60	29.90	29.80	27.20	0.70	1.30	2.20	8.60	7.70	8.30	11.90	9.80	12.20	12.10	9.70	12.20	
24.00	27.40	27.30	27.50	26.00	28.30	28.80	29.00	28.90	29.30	29.00	29.20	29.60	29.00	29.00	26.20	0.80	0.70	1.30	8.50	7.80	8.20	11.90	10.00	12.20	11.90	9.80	12.30	
3.00	26.40	26.30	26.60	25.00	27.00	27.70	27.80	27.60	28.30	28.00	28.10	28.60	28.00	28.10	25.10	1.00	0.70	1.70	8.50	7.80	8.00	12.10	9.90	12.00	12.10	9.80	12.20	
6.00	27.30	27.20	27.50	27.00	28.40	29.00	29.10	29.00	29.80	29.60	29.80	30.20	28.50	29.00	29.40	0.90	0.60	2.20	8.80	7.80	8.40	12.00	9.90	12.10	12.00	9.80	12.20	

ตารางที่ ช-16 การทดลองครั้งที่ 1 ของอนุกรมอิสระความชื้นดินที่คลุมด้วยพลาสติกแบบสะท้อนแสง

เวลา	อนุกรม															ความชื้น												
	0 cm			10 cm			20 cm			30 cm			40 cm			0 cm			10 cm			20 cm			30 cm			
	W	E	C	W	E	W	E	C	W	E	C	W	E	C	W	E	C	E	C	C	W	E	C	W	E	C	W	E
6.00	23.70	23.10	23.50	22.70	23.70	23.60	24.10	23.70	23.90	24.10	23.80	24.30	24.10	24.00	24.50	4.20	4.80	5.50	7.50	7.60	7.70	8.60	8.40	9.20	8.40	8.60	9.40	
9.00	25.40	24.60	24.80	26.50	23.60	23.70	23.10	23.20	23.40	23.10	23.00	23.10	22.90	22.90	23.30	3.90	4.80	5.90	7.50	7.50	7.70	8.70	8.40	9.20	8.30	8.60	9.40	
12.00	31.30	30.60	30.50	33.30	27.80	27.60	25.20	26.30	25.00	24.50	24.80	24.10	24.00	24.30	23.80	3.90	5.10	5.90	7.60	7.60	7.70	8.70	8.40	9.10	8.40	8.60	9.40	
15.00	31.40	31.60	30.20	29.80	29.40	29.60	27.80	28.70	27.20	26.70	27.00	25.70	30.60	25.90	25.10	3.80	4.90	5.40	7.60	7.80	7.90	8.70	8.50	9.10	8.30	8.60	9.50	
18.00	28.90	28.20	28.90	27.30	28.70	28.90	29.00	29.60	28.70	28.30	28.60	28.10	27.80	28.00	27.40	3.60	4.90	5.70	7.50	7.80	7.80	8.70	8.40	9.40	8.40	8.60	9.40	
21.00	27.10	27.40	27.20	26.10	28.20	27.80	28.20	28.40	28.00	27.80	28.20	28.00	27.30	27.70	27.50	3.70	4.80	5.70	7.60	7.60	7.80	8.90	8.40	9.30	8.40	8.70	9.50	
24.00	26.70	27.30	27.10	25.70	27.50	27.30	27.90	27.90	27.80	27.90	28.90	28.10	27.60	27.80	27.40	3.60	4.80	5.40	7.50	7.60	7.70	8.70	8.50	9.30	8.50	8.70	9.50	
3.00	25.90	28.80	26.30	25.10	28.20	26.60	27.20	27.00	27.20	27.30	27.90	27.50	27.20	27.20	27.30	3.50	4.70	5.60	7.80	7.50	7.90	8.70	8.40	9.30	8.30	8.50	9.40	
6.00	23.70	23.10	23.50	22.70	23.70	23.60	24.10	23.70	23.90	24.10	23.80	24.30	24.10	24.00	24.50	4.20	4.80	5.50	7.50	7.60	7.70	8.60	8.40	9.20	8.40	8.60	9.40	

ตารางที่ ข-17 การทดลองครั้งที่ 2 ของอนุหภูมิและความชื้นดินที่คลุมด้วยพลาสติกแบบสะท้อนแสง

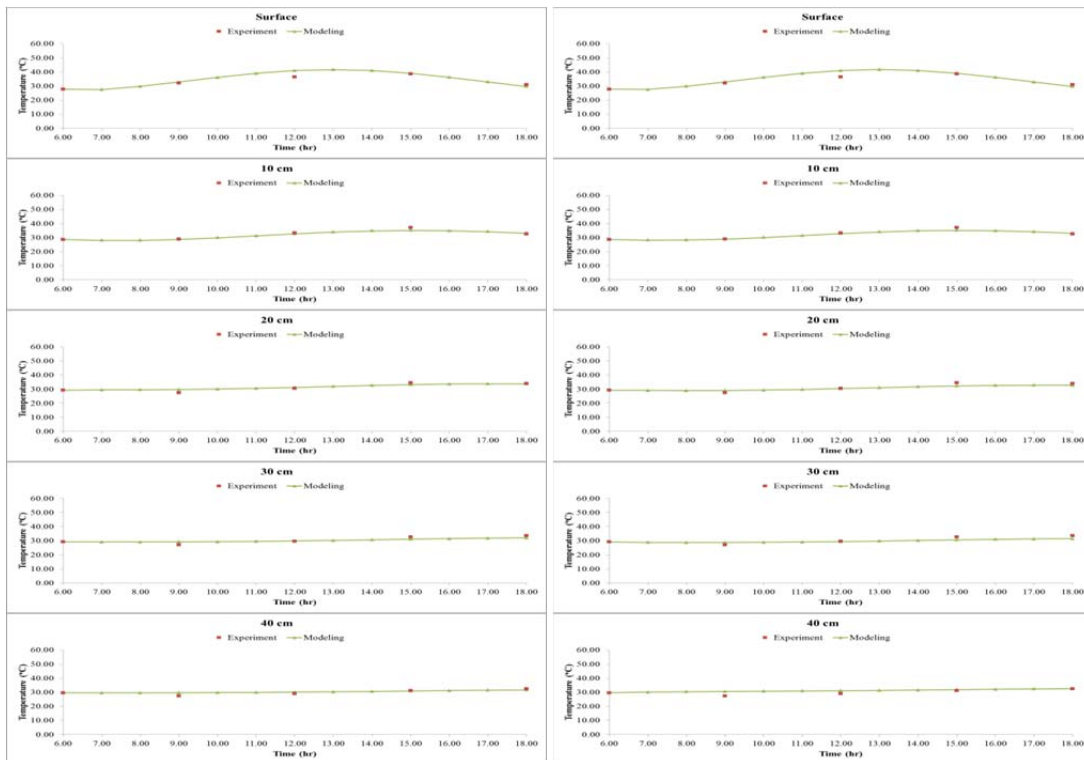
เวลา	อนุหภูมิ															ความชื้น											
	0 cm			10 cm			20 cm			30 cm			40 cm			0 cm			10 cm			20 cm			30 cm		
	W	E	C	W	E	W	E	C	W	E	C	W	E	C	W	E	C	C	W	E	C	W	E	C	W	E	C
6.00	24.50	24.40	24.10	25.00	24.50	24.80	26.10	25.20	25.00	25.00	25.60	25.20	25.50	25.40	25.80	3.30	4.70	5.50	7.50	7.60	7.70	8.60	8.40	9.30	8.50	8.60	9.40
9.00	27.50	27.50	27.30	30.10	25.30	26.20	25.10	25.20	25.70	25.30	25.40	25.70	25.00	25.10	25.80	2.60	4.40	5.70	7.60	7.50	7.70	8.40	8.50	9.20	8.40	8.60	9.50
12.00	30.50	30.80	30.20	34.60	27.60	28.80	26.80	26.90	27.00	25.90	26.10	26.30	25.60	25.40	26.20	3.90	4.50	5.50	7.10	7.30	7.70	8.50	8.60	9.20	8.30	8.60	9.20
15.00	32.60	32.40	32.00	31.70	31.80	31.40	29.20	30.80	29.40	28.70	29.30	28.30	28.00	28.10	27.40	3.80	4.30	5.30	7.60	7.50	7.80	8.70	8.40	9.30	8.40	8.70	9.40
18.00	30.90	31.40	30.80	29.40	31.30	31.10	31.60	30.60	30.60	30.20	30.60	29.90	29.50	29.80	29.00	3.40	4.70	5.40	7.60	7.60	7.80	8.50	8.50	9.30	8.50	8.60	9.50
21.00	29.10	29.40	29.40	28.30	30.40	29.90	30.50	30.60	30.30	30.20	30.50	30.10	29.80	30.20	29.70	3.60	4.70	5.30	7.50	7.50	7.80	8.70	8.50	9.30	8.40	8.60	9.40
24.00	28.10	28.60	28.40	27.50	29.00	28.90	29.70	29.60	29.60	29.80	29.70	29.90	29.60	29.70	29.60	3.70	4.80	5.30	7.50	7.50	7.70	8.70	8.50	9.20	8.30	8.70	9.40
1.00	27.70	28.00	28.00	27.30	28.50	28.50	29.30	29.10	29.10	29.20	29.30	29.60	29.20	29.40	29.30	3.60	4.50	5.50	7.50	7.50	7.70	8.70	8.40	9.20	8.40	8.60	9.40
6.00	24.50	24.40	24.10	25.00	24.50	24.80	26.10	25.20	25.00	25.00	25.60	25.20	25.50	25.40	25.80	3.30	4.70	5.50	7.50	7.60	7.70	8.60	8.40	9.30	8.50	8.60	9.40

ตารางที่ ข-18 การทดลองครั้งที่ 3 ของอนุหภูมิและความชื้นดินที่คลุมด้วยพลาสติกแบบสะท้อนแสง

เวลา	อนุหภูมิ															ความชื้น											
	0 cm			10 cm			20 cm			30 cm			40 cm			0 cm			10 cm			20 cm			30 cm		
	W	E	C	W	E	W	E	C	W	E	C	W	E	C	W	E	C	C	W	E	C	W	E	C	W	E	C
6.00	27.50	27.50	27.90	26.40	27.50	1.70	0.90	3.90	8.90	7.70	8.20	12.10	10.10	12.10	12.00	3.20	4.70	5.30	7.50	7.60	7.80	8.70	8.40	9.30	8.40	8.70	9.40
9.00	28.00	27.90	28.00	27.60	27.50	1.80	1.00	3.80	8.90	7.80	8.30	12.10	10.00	12.20	12.10	3.60	4.40	5.20	7.50	7.60	7.80	8.70	8.40	9.20	8.40	8.70	9.40
12.00	31.00	30.40	30.70	31.40	29.40	1.50	0.90	3.10	8.90	7.90	8.40	11.90	10.00	12.10	11.90	3.20	4.50	5.20	7.50	7.20	7.80	8.80	8.40	9.30	8.30	8.70	9.40
15.00	33.30	33.40	32.90	33.50	31.40	1.50	0.70	3.10	8.90	8.00	8.60	12.00	10.10	12.40	11.80	3.60	4.30	5.80	7.60	7.70	7.90	8.70	8.40	9.40	8.50	8.60	9.40
18.00	31.00	31.60	31.20	29.50	32.20	1.30	1.20	2.50	9.10	8.10	8.50	12.00	10.20	12.30	12.00	3.40	4.60	5.40	7.60	7.60	7.80	8.80	8.50	9.30	8.50	8.70	9.50
21.00	29.10	29.50	29.20	28.00	30.40	1.00	0.70	2.70	9.50	7.90	8.30	12.00	10.10	12.00	11.80	3.50	4.40	5.20	7.60	7.50	7.80	8.70	8.40	9.30	8.40	8.70	9.60
24.00	28.00	28.20	28.20	27.20	28.80	0.70	0.70	2.80	8.90	8.00	8.30	12.10	10.10	12.20	12.30	3.70	4.70	5.00	7.50	7.50	7.70	8.80	8.40	9.30	8.40	8.60	9.40
3.00	26.70	27.10	27.20	25.60	27.40	1.00	0.90	2.80	9.00	7.90	8.50	12.10	10.00	12.20	12.10	3.50	5.10	5.40	7.60	7.40	7.80	8.90	8.50	9.20	8.40	8.60	9.40
6.00	27.50	27.50	27.90	26.40	27.50	1.70	0.90	3.90	8.90	7.70	8.20	12.10	10.10	12.10	12.00	3.20	4.70	5.30	7.50	7.60	7.80	8.70	8.40	9.30	8.40	8.70	9.40

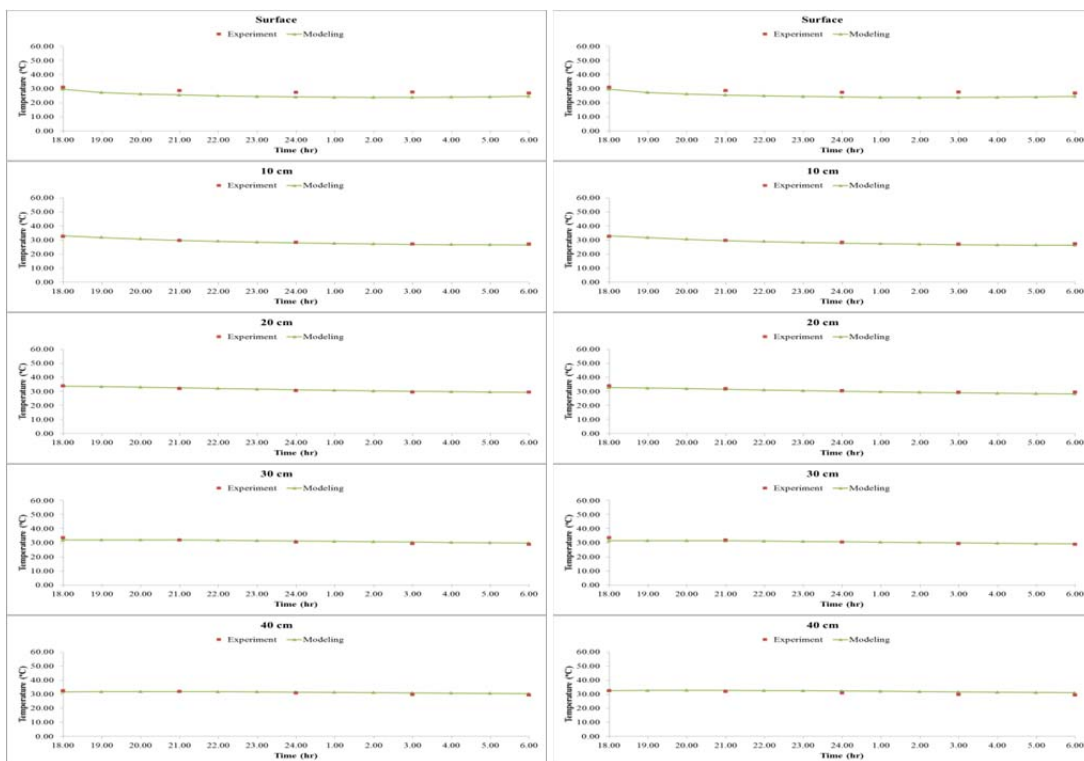
**ภาคผนวก ข**

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



(กลางวัน ครั้งที่ 2)

(กลางวัน ครั้งที่ 3)

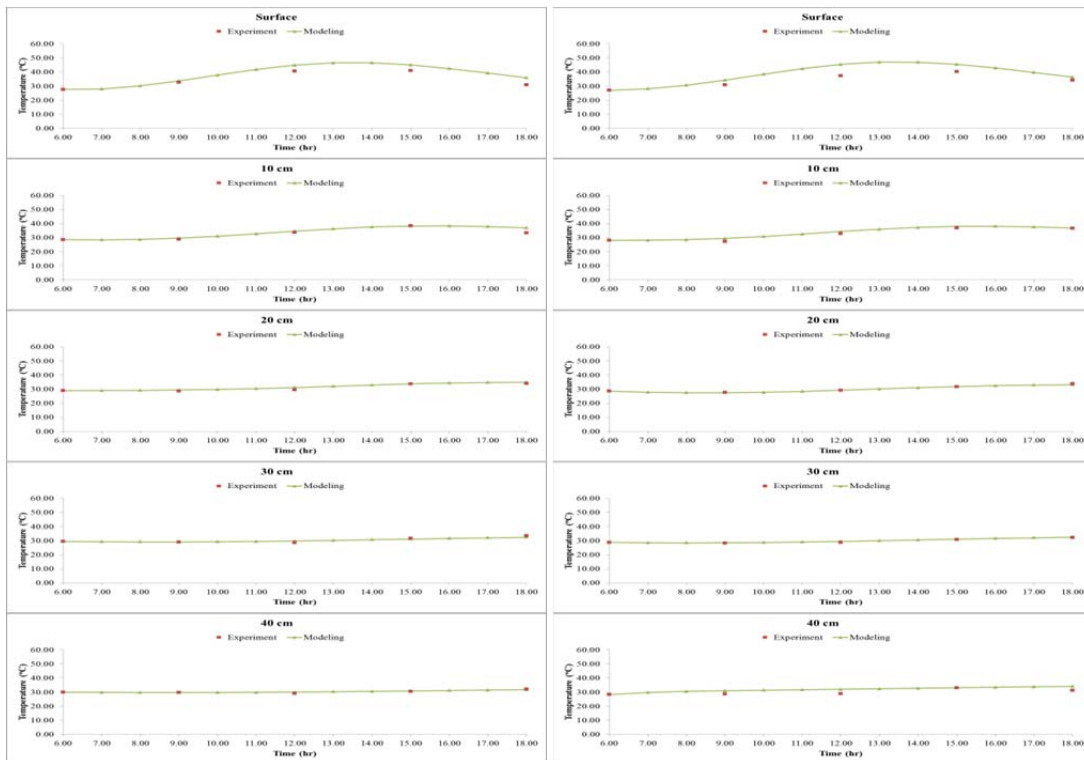


(กลางคืน ครั้งที่ 2)

(กลางคืน ครั้งที่ 3)

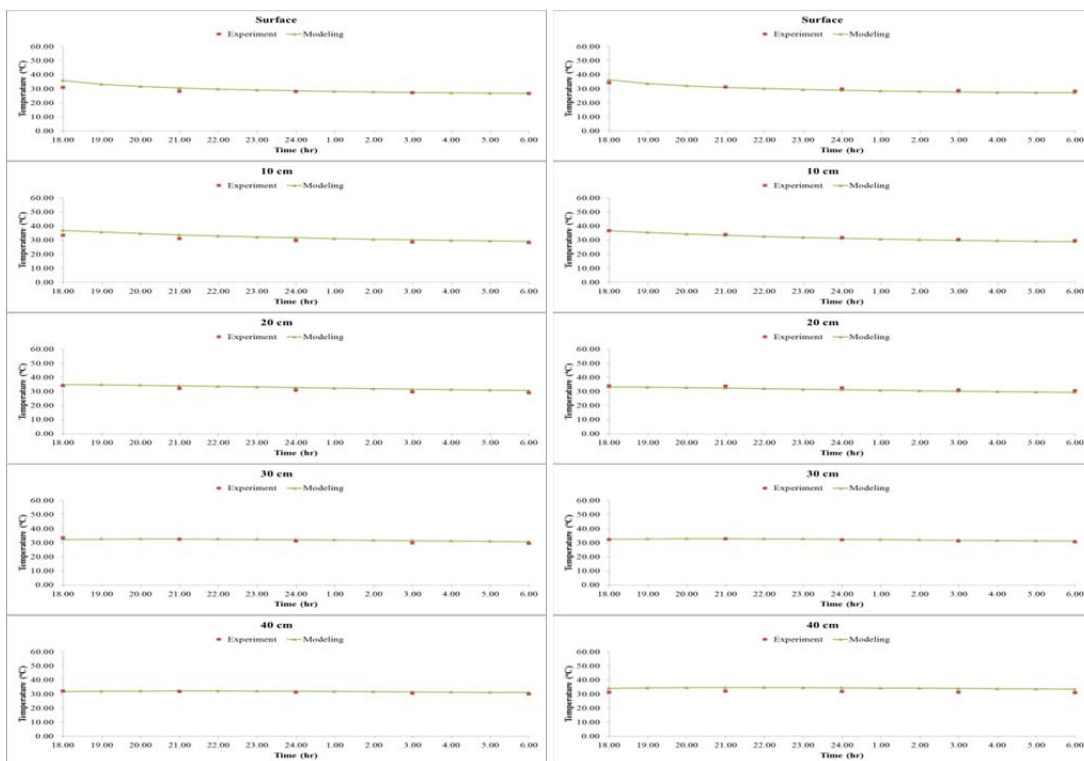
ภาพที่ ซ-1 การเปรียบเทียบอุณหภูมิดินภายในวงบ่อซีเมนต์ที่ได้จากแบบจำลองกับการทดลองในเวลากลางวันและกลางคืนที่ไม่มีการคลุมดิน





(กลางวัน ครั้งที่ 2)

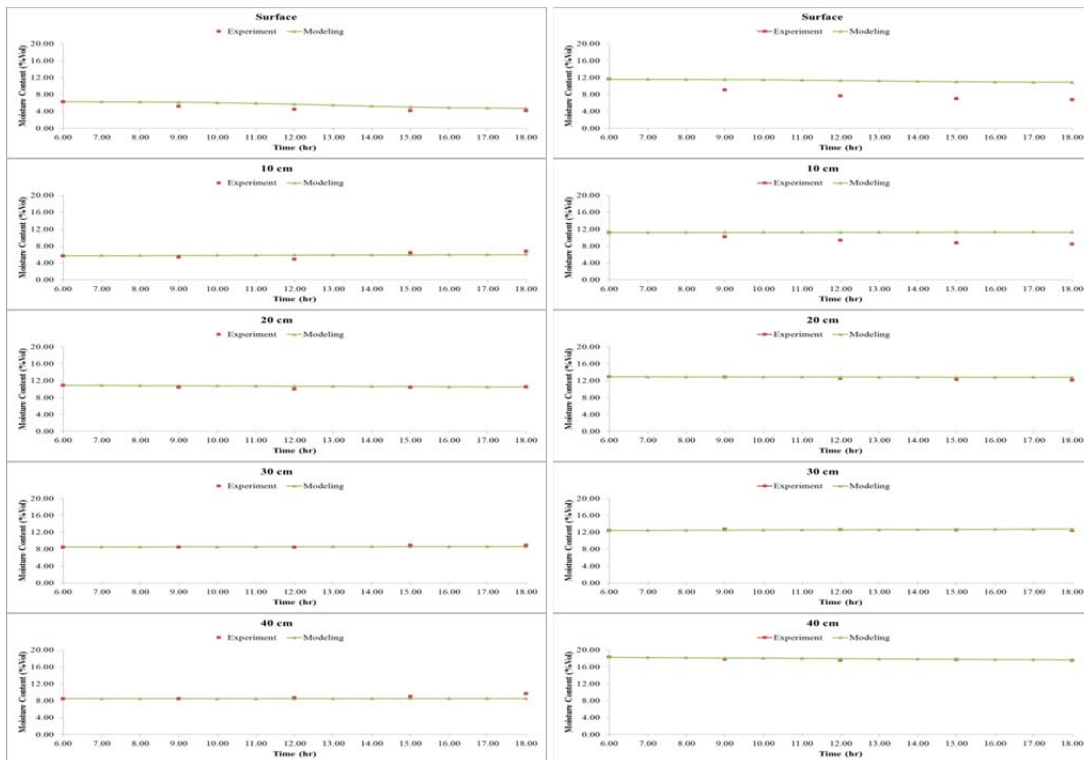
(กลางวัน ครั้งที่ 3)



(กลางคืน ครั้งที่ 2)

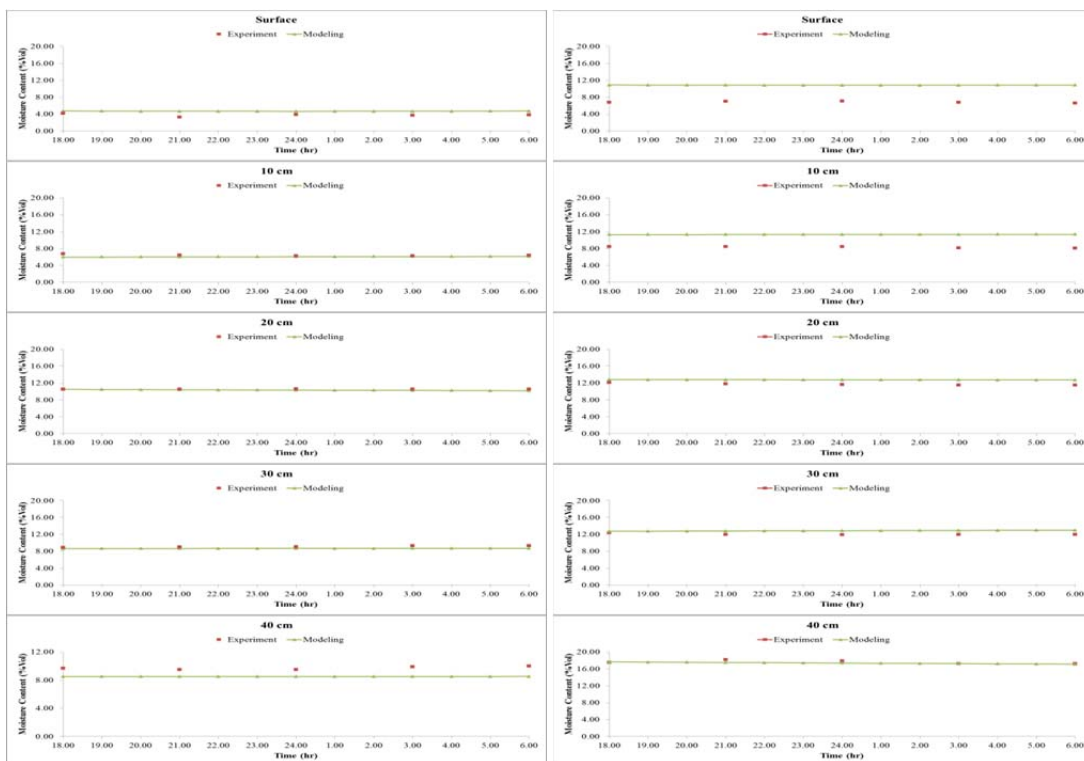
(กลางคืน ครั้งที่ 3)

ภาพที่ ซ-2 การเปรียบเทียบอุณหภูมิดินภายในวงบ่อซีเมนต์ที่ได้จากแบบจำลองกับการทดลองในเวลากลางวันและกลางคืนที่มีการคลุมดินด้วยพลาสติกแบบสีดำ



(กลางวัน ครั้งที่ 2)

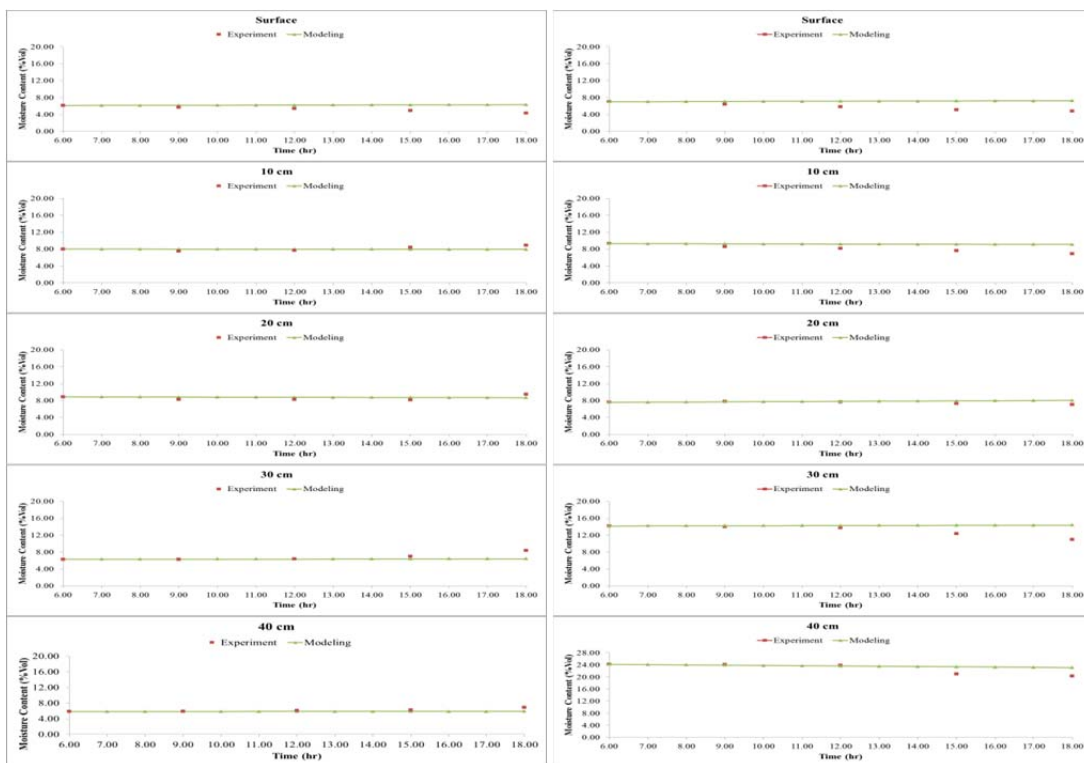
(กลางคืน ครั้งที่ 3)



(กลางวัน ครั้งที่ 2)

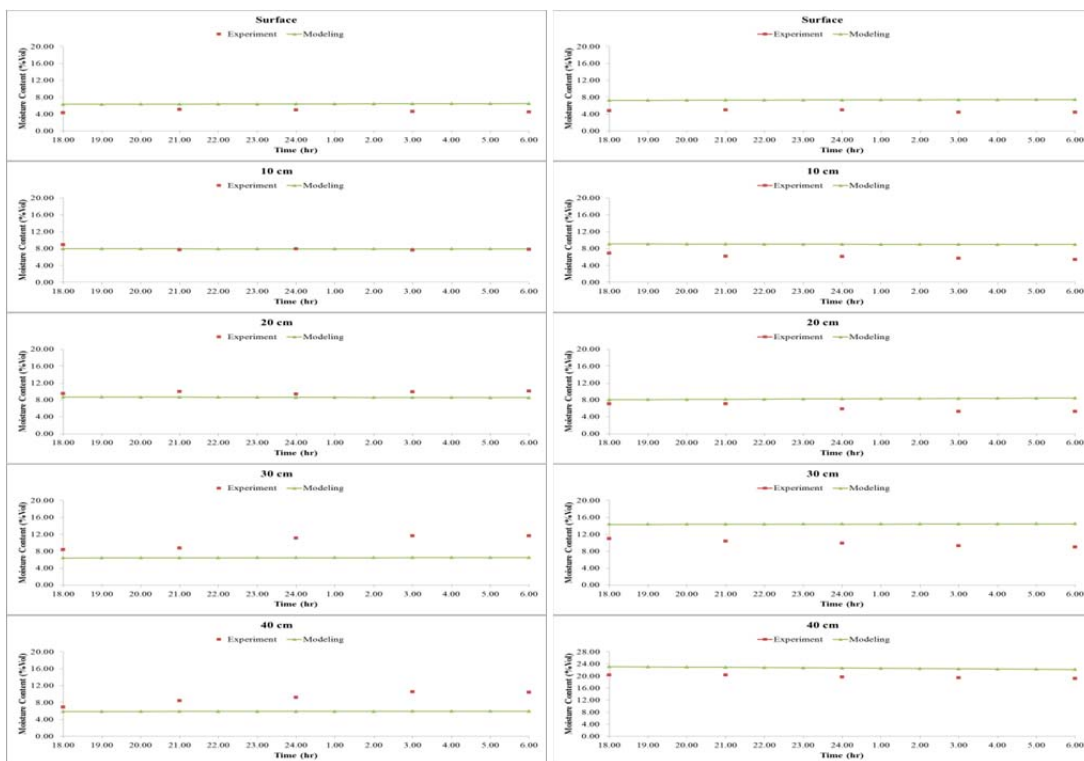
(กลางคืน ครั้งที่ 3)

ภาพที่ ซ-3 การเปรียบเทียบความชื้นดินภายในวงบ่อซีเมนต์ที่ได้จากแบบจำลองกับการทดลองในเวลากลางวันและกลางคืนที่ไม่มีการคลุมดิน



(กลางวัน ครั้งที่ 2)

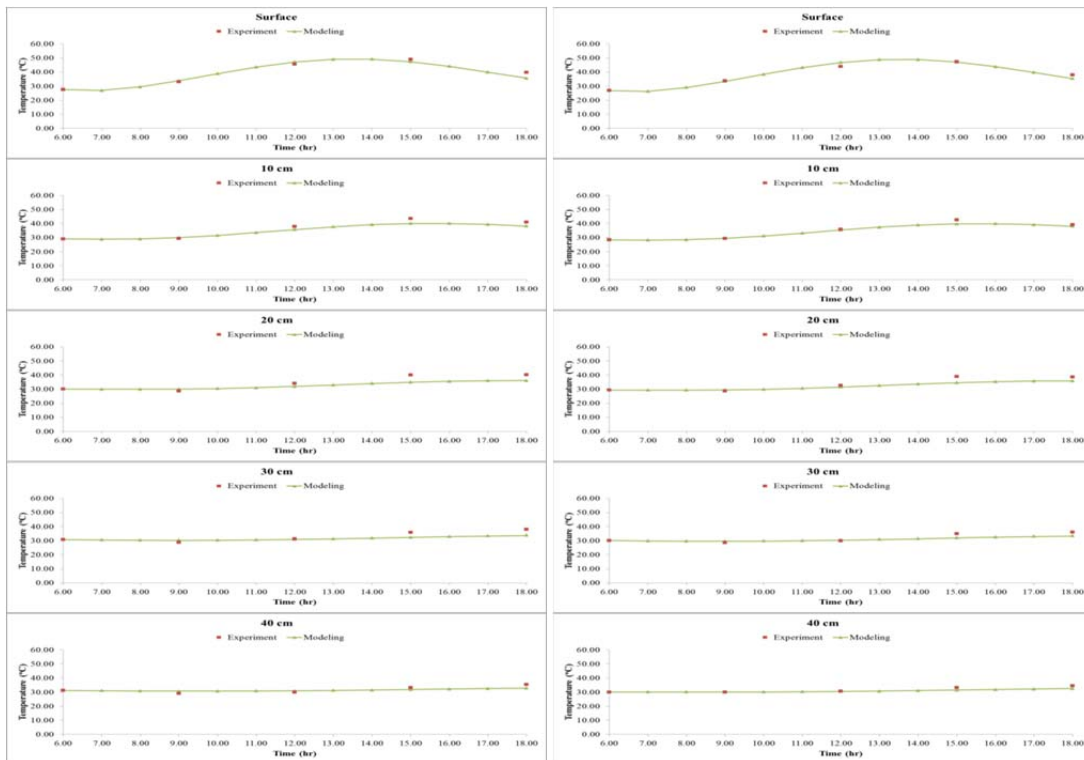
(กลางวัน ครั้งที่ 3)



(กลางคืน ครั้งที่ 2)

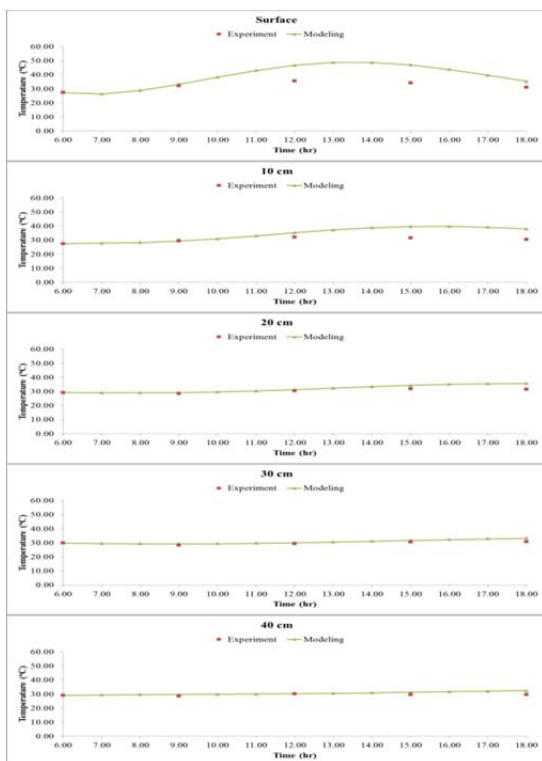
(กลางคืน ครั้งที่ 3)

ภาพที่ ๗-4 การเปรียบเทียบความชื้นดินภายในวงบ่อซีเมนต์ที่ได้จากแบบจำลองกับการทดลองในเวลากลางวันและกลางคืนที่มีการคลุมดินด้วยพลาสติกแบบสีดำ



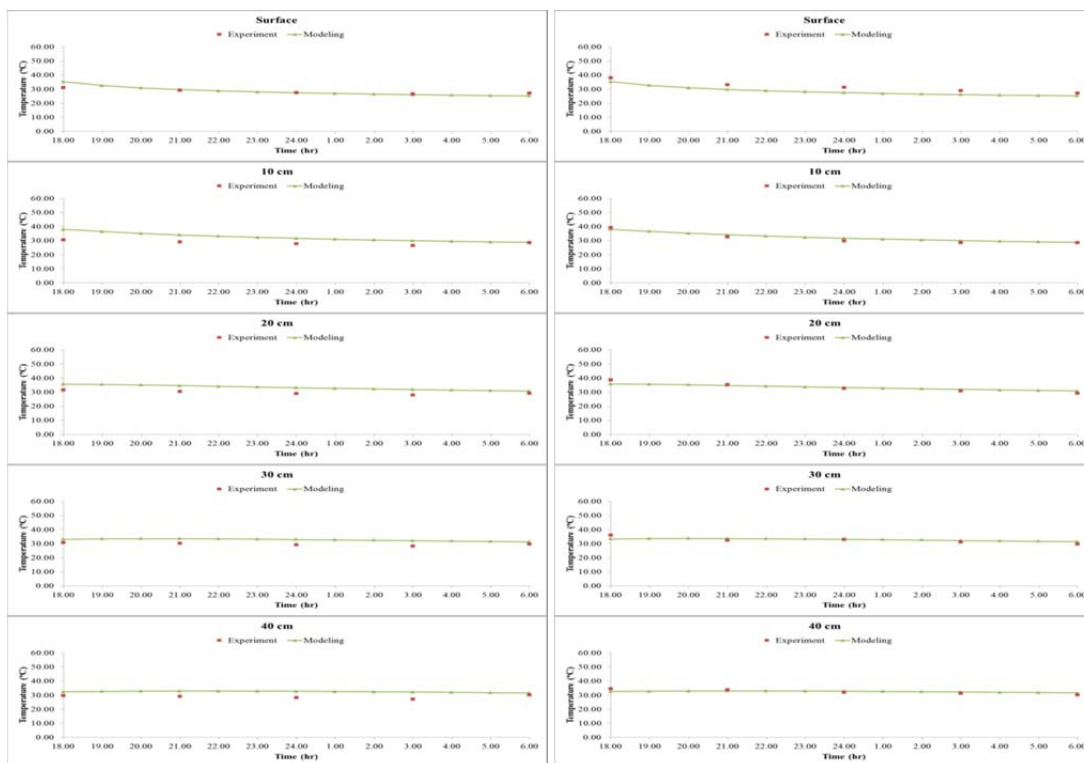
(ครั้งที่ 1)

(ครั้งที่ 2)



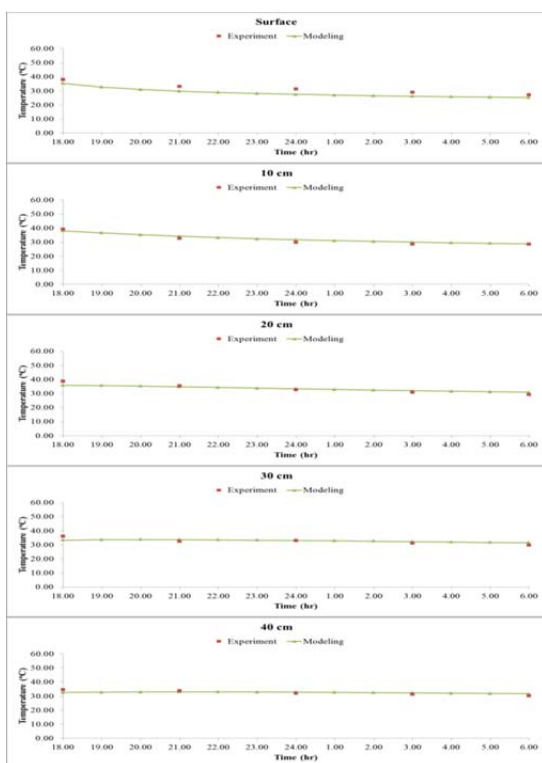
(ครั้งที่ 3)

ภาพที่ ๕-5 การเปรียบเทียบอุณหภูมิดินภายในวงบ่อซีเมนต์ที่ได้จากแบบจำลองกับการทดลอง ในช่วงกลางวันที่มีการคลุมดินด้วยพลาสติกแบบขาวขุ่น



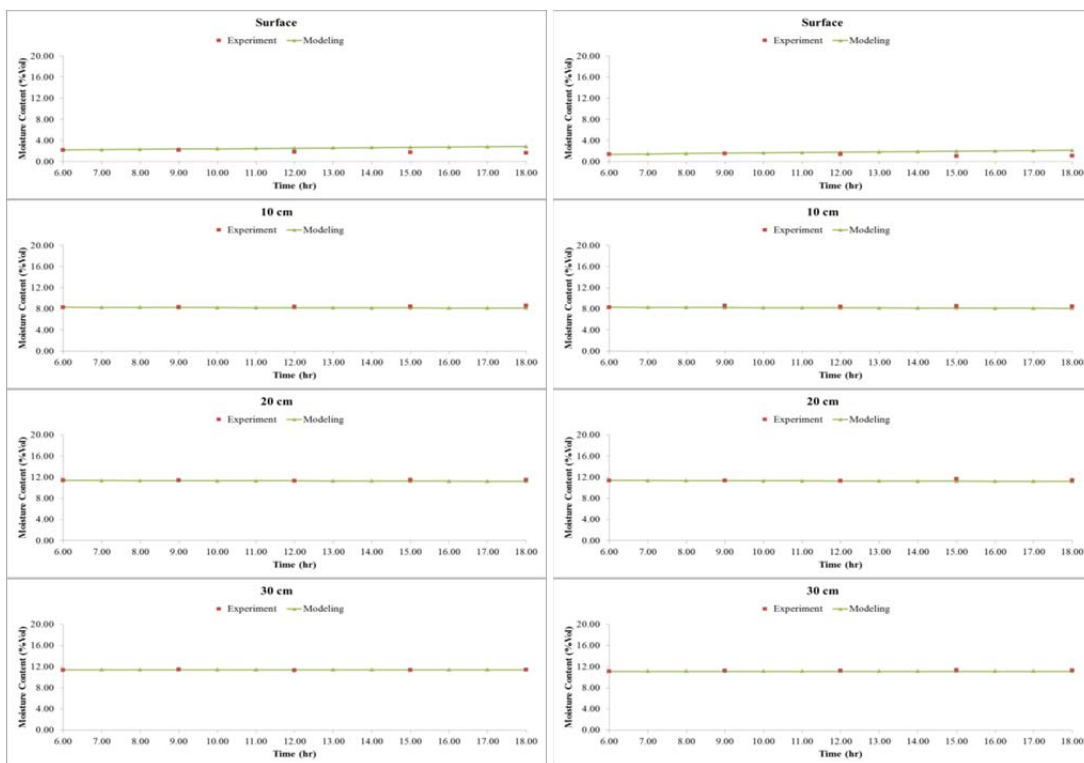
(ครั้งที่ 1)

(ครั้งที่ 2)



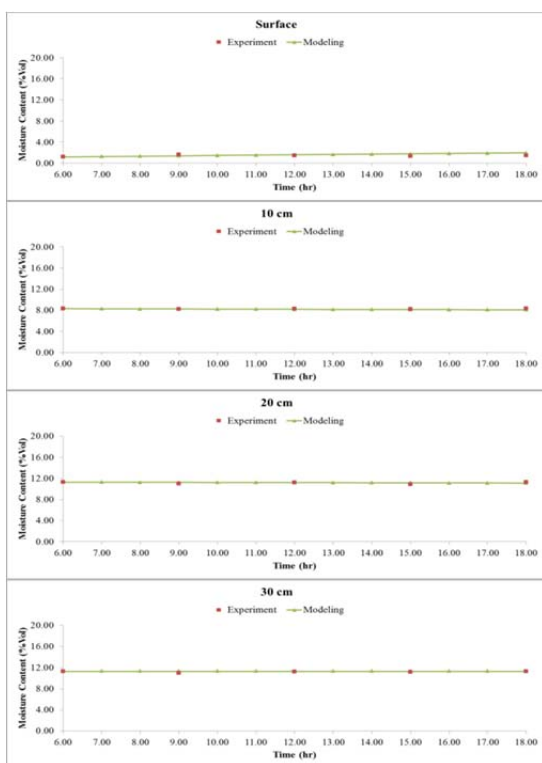
(ครั้งที่ 3)

ภาพที่ ซ-6 การเปรียบเทียบอุณหภูมิดินภายในวงบ่อซีเมนต์ที่ได้จากแบบจำลองกับการทดลอง ในช่วงกลางคืนที่มีการคลุมดินด้วยพลาสติกแบบขาวขุ่น



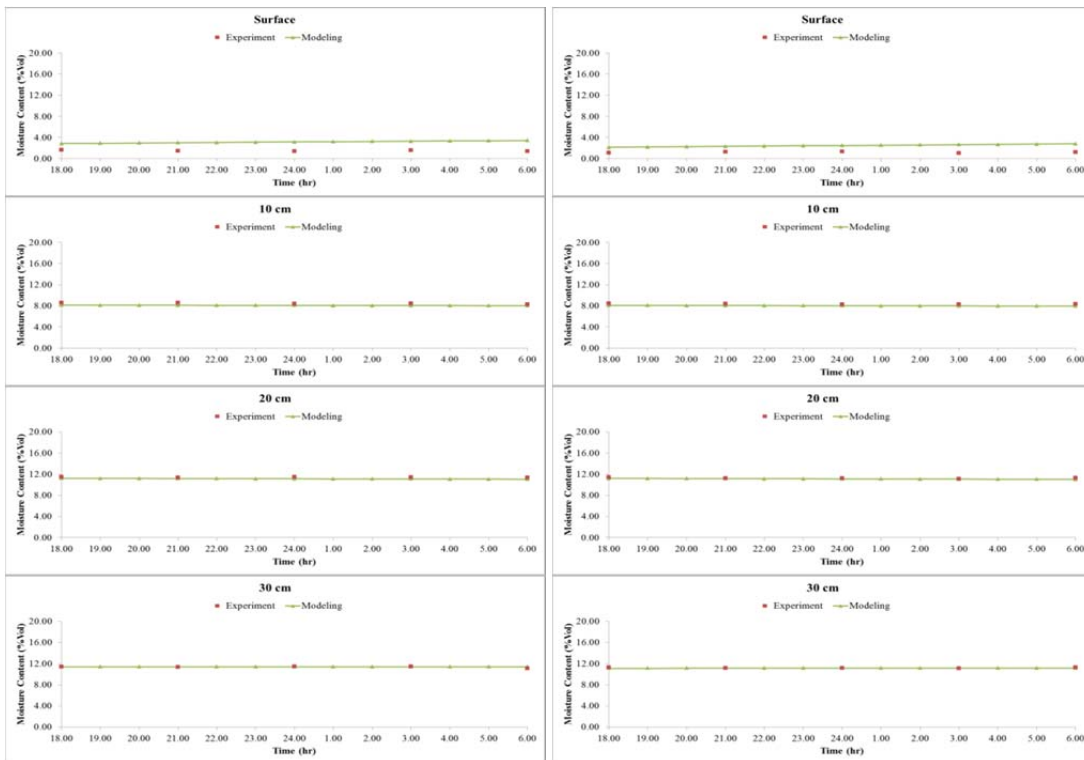
(ครั้งที่ 1)

(ครั้งที่ 2)



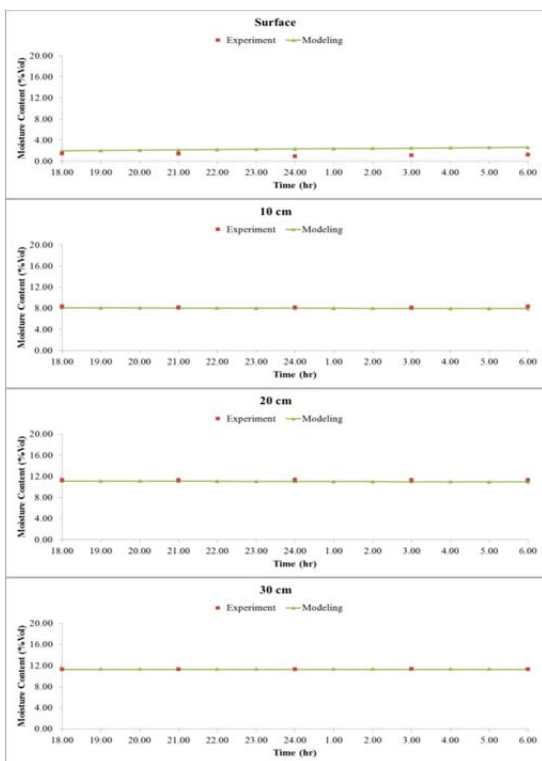
(ครั้งที่ 3)

ภาพที่ ๗-7 การเปรียบเทียบความชื้นดินภายในวงบ่อซีเมนต์ที่ได้จากแบบจำลองกับการทดลองในช่วงเวลากลางวันที่มีการคลุมดินด้วยพลาสติกแบบขาวขุ่น



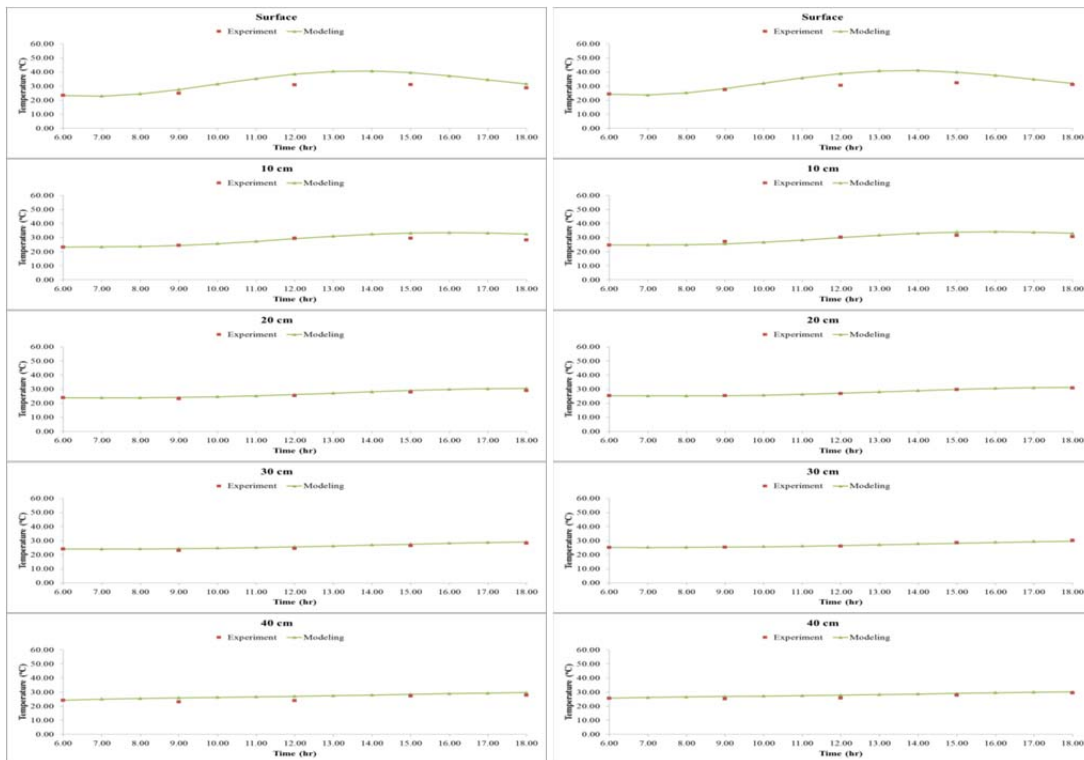
(ครั้งที่ 1)

(ครั้งที่ 2)



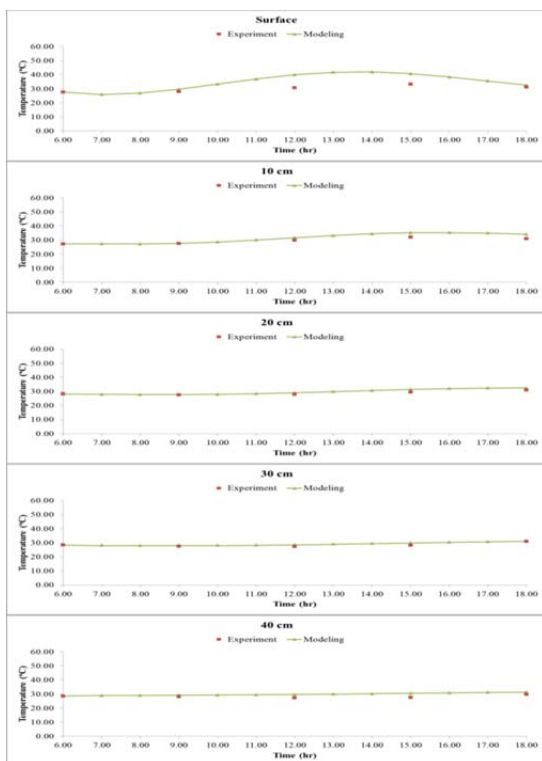
(ครั้งที่ 3)

ภาพที่ ๗-๘ การเปรียบเทียบความชื้นดินภายในวงบ่อซีเมนต์ที่ได้จากแบบจำลองกับการทดลองในช่วงเวลากลางคืนที่มีการคลุมดินด้วยพลาสติกแบบขาวขุ่น



(ครั้งที่ 1)

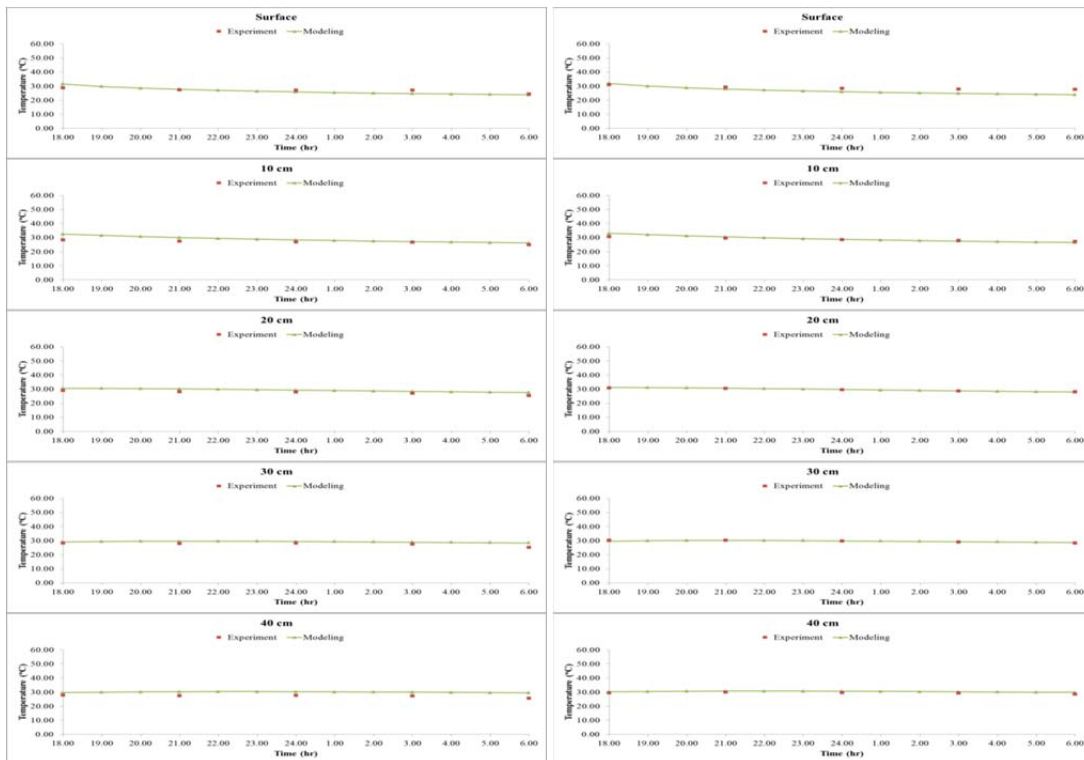
(ครั้งที่ 2)



(ครั้งที่ 3)

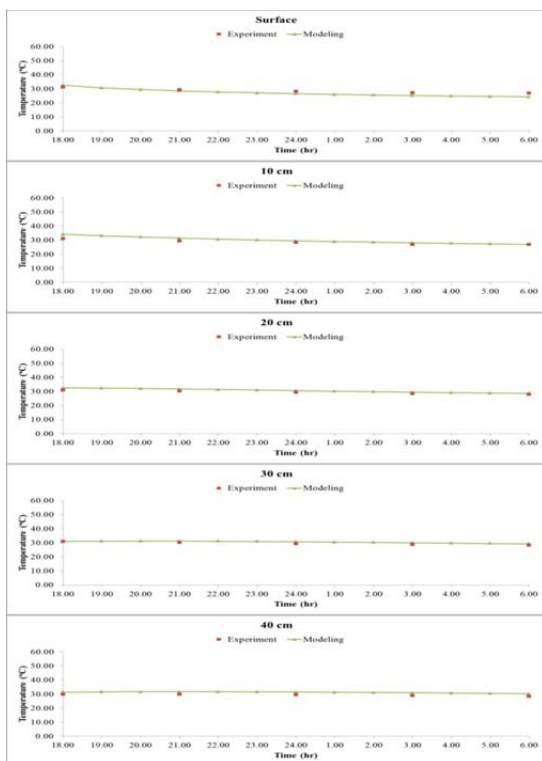
ภาพที่ ซ-9 การเปรียบเทียบอุณหภูมิดินภายในวงบ่อซีเมนต์ที่ได้จากแบบจำลองกับการทดลอง ในช่วงกลางวันที่มีการคลุมดินด้วยพลาสติกแบบสะท้อนแสง





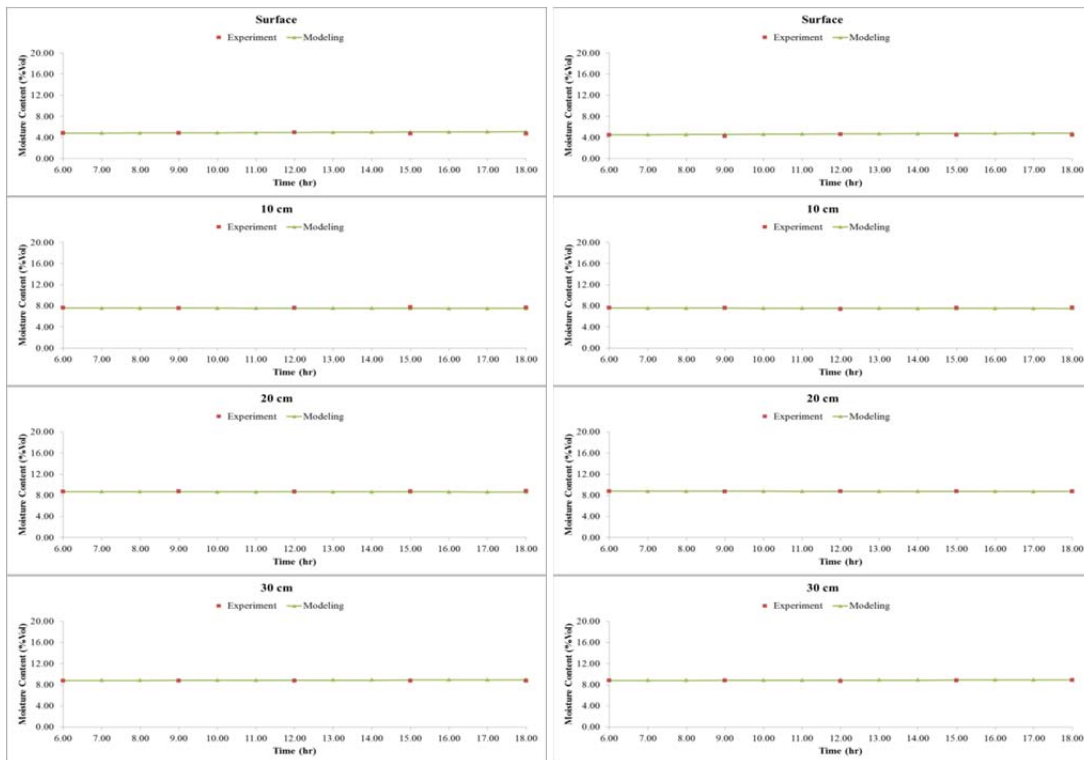
(ครั้งที่ 1)

(ครั้งที่ 2)



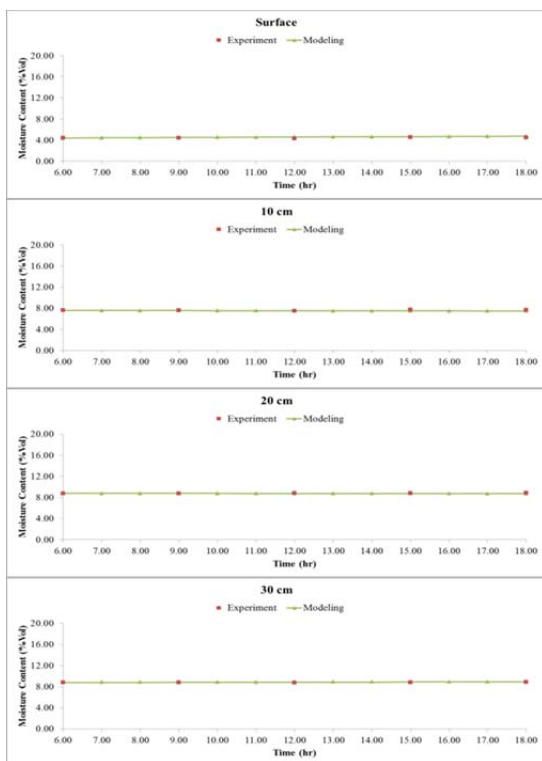
(ครั้งที่ 3)

ภาพที่ ซ-10 การเปรียบเทียบอุณหภูมิดินภายในวงบ่อซีเมนต์ที่ได้จากแบบจำลองกับการทดลอง ในช่วงกลางคืน ที่มีการคลุมดินด้วยพลาสติกแบบสะท้อนแสง



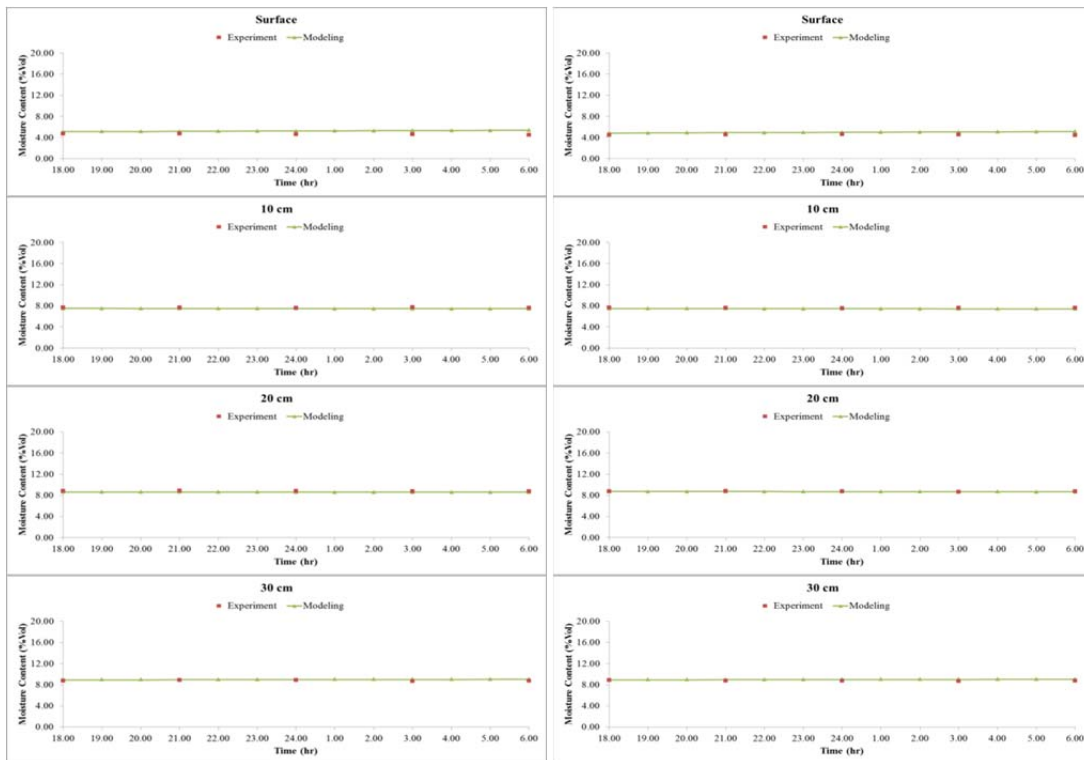
(ครั้งที่ 1)

(ครั้งที่ 2)



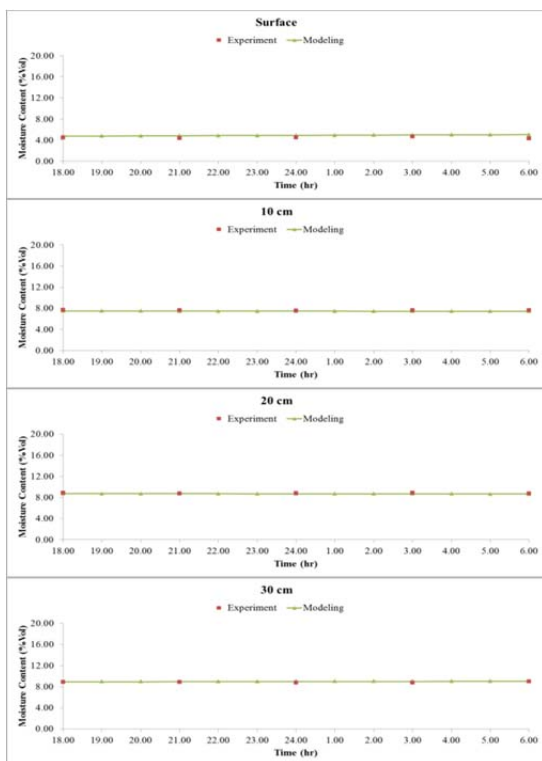
(ครั้งที่ 3)

ภาพที่ ซ-11 การเปรียบเทียบความชื้นดินภายในวงบ่อซีเมนต์ที่ได้จากแบบจำลองกับการทดลองในช่วงเวลากลางวันที่มีการคลุมดินด้วยพลาสติกแบบสะท้อนแสง



(ครั้งที่ 1)

(ครั้งที่ 2)



(ครั้งที่ 2)

ภาพที่ ซ-12 การเปรียบเทียบความชื้นดินภายในวงบ่อซีเมนต์ที่ได้จากแบบจำลองกับการทดลองในช่วงเวลากลางคืนที่มีการคลุมดินด้วยพลาสติกแบบสะท้อนแสง

ตารางที่ ซ-1 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนทางสถิติของอุณหภูมิดินที่ไม่มีการคลุมดินในช่วงเวลา  
กลางวันและกลางคืน

การทดลอง	ความลึก (cm)	กลางวัน (06.00 - 18.00 น.)						กลางคืน (18.00 - 06.00 น.)					
		RMSE	MAE	MAPE	r	R <sup>2</sup>	t-test	RMSE	MAE	MAPE	r	R <sup>2</sup>	t-test
ครั้งที่ 2	0	2.127	1.394	0.040	0.947	0.897	0.416	2.765	2.631	0.094	0.947	0.897	0.003
	10	1.005	0.702	0.020	0.973	0.947	0.324	0.440	0.399	0.014	0.998	0.996	0.148
	20	1.179	0.901	0.030	0.948	0.899	0.652	0.529	0.468	0.015	0.972	0.946	0.087
	30	1.359	1.087	0.036	0.953	0.908	0.807	1.020	0.896	0.029	0.924	0.854	0.070
	40	1.140	0.852	0.029	0.906	0.821	0.461	0.856	0.771	0.025	0.906	0.822	0.086
ครั้งที่ 3	0	2.162	1.431	0.041	0.946	0.895	0.409	2.847	2.716	0.097	0.955	0.912	0.002
	10	0.961	0.607	0.017	0.978	0.956	0.385	0.623	0.538	0.019	0.997	0.994	0.067
	20	1.312	1.009	0.032	0.979	0.958	0.539	0.846	0.737	0.023	0.974	0.948	0.053
	30	1.509	1.203	0.039	0.973	0.947	0.481	0.999	0.758	0.024	0.930	0.864	0.598
	40	1.703	1.203	0.042	0.727	0.528	0.117	1.367	1.194	0.039	0.931	0.867	0.010

ตารางที่ ซ-2 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนทางสถิติของอุณหภูมิดินที่มีการคลุมดินด้วยพลาสติก  
แบบสีดำในช่วงเวลากลางวันและกลางคืน

การทดลอง	ความลึก (cm)	กลางวัน (06.00 - 18.00 น.)						กลางคืน (18.00 - 06.00 น.)					
		RMSE	MAE	MAPE	r	R <sup>2</sup>	t-test	RMSE	MAE	MAPE	r	R <sup>2</sup>	t-test
ครั้งที่ 2	0	3.442	2.845	0.079	0.972	0.945	0.043	2.504	1.733	0.059	0.989	0.978	0.158
	10	1.679	1.058	0.032	0.939	0.881	0.209	2.351	2.192	0.071	0.999	0.998	0.010
	20	0.856	0.618	0.020	0.970	0.941	0.107	1.763	1.684	0.055	0.977	0.954	0.000
	30	0.763	0.575	0.018	0.967	0.935	0.770	1.152	1.053	0.034	0.869	0.756	0.042
	40	0.519	0.362	0.012	0.918	0.843	0.503	0.857	0.802	0.026	0.765	0.586	0.012
ครั้งที่ 3	0	4.660	3.775	0.104	0.971	0.943	0.051	1.200	1.024	0.033	0.994	0.989	0.025
	10	1.281	0.970	0.031	0.978	0.956	0.090	0.503	0.452	0.014	0.999	0.997	0.002
	20	0.371	0.244	0.008	0.992	0.984	0.276	1.047	1.032	0.032	0.992	0.984	0.001
	30	0.313	0.243	0.008	0.991	0.982	0.069	0.385	0.323	0.010	0.989	0.978	0.081
	40	2.158	1.676	0.057	0.747	0.557	0.069	2.690	2.687	0.086	0.964	0.929	0.000

ตารางที่ ซ-3 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนทางสถิติของความชื้นดินไม่มีการคลุมดินในช่วงเวลา  
กลางวันและกลางคืน

การทดลอง	ความลึก (cm)	กลางวัน (06.00 - 18.00 น.)						กลางคืน (18.00 - 06.00 น.)					
		RMSE	MAE	MAPE	r	R <sup>2</sup>	t-test	RMSE	MAE	MAPE	r	R <sup>2</sup>	t-test
ครั้งที่ 2	0	0.837	0.722	0.159	0.853	0.727	0.027	0.964	0.923	0.252	0.516	0.266	0.004
	10	0.629	0.530	0.093	0.604	0.365	0.985	0.465	0.402	0.061	-0.784	0.615	0.019
	20	0.363	0.255	0.025	0.416	0.173	0.128	0.243	0.206	0.020	-0.014	0.000	0.018
	30	0.200	0.157	0.018	0.771	0.595	0.451	0.471	0.453	0.049	0.975	0.950	0.004
	40	0.584	0.377	0.040	0.986	0.972	0.166	1.221	1.204	0.124	0.732	0.536	0.003
ครั้งที่ 3	0	3.230	2.840	0.384	0.866	0.750	0.021	4.009	4.004	0.585	-0.619	0.383	0.000
	10	1.922	1.632	0.182	-0.996	0.992	0.032	2.971	2.964	0.355	-0.881	0.776	0.000
	20	0.415	0.323	0.026	0.989	0.977	0.069	1.070	1.051	0.090	0.948	0.899	0.000
	30	0.190	0.144	0.012	-0.212	0.045	0.601	0.843	0.807	0.067	-0.675	0.455	0.000
	40	0.239	0.196	0.011	0.873	0.762	0.046	0.388	0.296	0.016	0.558	0.312	0.187

ตารางที่ ซ-4 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนทางสถิติของความชื้นดินที่มีการคลุมดินด้วยพลาสติก  
แบบสีดำในช่วงเวลากลางวันและกลางคืน

การทดลอง	ความลึก (cm)	กลางวัน (06.00 - 18.00 น.)						กลางคืน (18.00 - 06.00 น.)					
		RMSE	MAE	MAPE	r	R <sup>2</sup>	t-test	RMSE	MAE	MAPE	r	R <sup>2</sup>	t-test
ครั้งที่ 2	0	1.161	0.926	0.195	-0.989	0.978	0.057	1.727	1.699	0.367	-0.028	0.001	0.003
	10	0.532	0.431	0.052	-0.749	0.561	0.646	0.463	0.323	0.039	0.702	0.493	0.085
	20	0.545	0.479	0.055	-0.296	0.087	0.567	1.200	1.158	0.118	-0.554	0.307	0.005
	30	0.930	0.534	0.067	0.849	0.720	0.246	4.129	3.880	0.363	0.936	0.876	0.008
	40	0.507	0.349	0.053	0.919	0.844	0.129	3.447	3.185	0.335	0.958	0.918	0.005
ครั้งที่ 3	0	1.583	1.305	0.250	-0.996	0.992	0.044	2.644	2.624	0.562	-0.716	0.513	0.001
	10	1.312	1.075	0.143	0.994	0.988	0.046	2.999	2.964	0.499	0.979	0.958	0.000
	20	0.523	0.365	0.050	-0.804	0.647	0.174	2.328	2.126	0.373	-0.940	0.883	0.015
	30	1.755	1.209	0.103	-0.911	0.829	0.130	4.577	4.512	0.463	-0.998	0.996	0.001
	40	1.645	1.124	0.054	0.906	0.820	0.235	2.879	2.873	0.146	0.963	0.928	0.000

ตารางที่ ๕-5 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนทางสถิติของอุณหภูมิดินที่มีการคลุมดินด้วยพลาสติกแบบขาวขุ่นในช่วงเวลากลางวันและกลางคืน

การทดลอง	ความลึก (cm)	กลางวัน (06.00 - 18.00 น.)						กลางคืน (18.00 - 06.00 น.)					
		RMSE	MAE	MAPE	r	R <sup>2</sup>	t-test	RMSE	MAE	MAPE	r	R <sup>2</sup>	t-test
ครั้งที่ 1	0	2.169	1.639	0.039	0.966	0.933	0.515	3.727	3.526	0.106	0.979	0.959	0.021
	10	2.294	1.865	0.047	0.998	0.997	0.122	1.784	1.557	0.043	0.996	0.992	0.155
	20	3.144	2.543	0.068	0.984	0.969	0.175	2.155	1.719	0.048	0.994	0.987	0.864
	30	2.594	1.970	0.056	0.987	0.974	0.259	2.371	1.869	0.052	0.947	0.897	0.531
	40	1.598	1.357	0.042	0.989	0.978	0.752	1.710	1.496	0.044	0.934	0.873	0.722
ครั้งที่ 2	0	1.697	1.202	0.030	0.978	0.957	0.938	2.888	2.811	0.089	0.984	0.969	0.006
	10	1.360	0.924	0.023	0.996	0.992	0.159	1.388	1.285	0.041	0.974	0.948	0.031
	20	2.407	1.821	0.049	0.983	0.966	0.182	1.580	1.342	0.040	0.986	0.972	0.214
	30	1.835	1.395	0.041	0.975	0.950	0.353	1.555	1.315	0.040	0.778	0.605	0.055
	40	1.202	0.816	0.024	0.991	0.982	0.155	1.312	1.217	0.038	0.717	0.514	0.262
ครั้งที่ 3	0	7.798	5.807	0.170	0.930	0.865	0.091	2.068	1.425	0.048	0.978	0.956	0.524
	10	5.086	3.793	0.122	0.808	0.652	0.111	4.628	4.000	0.139	0.807	0.652	0.053
	20	2.214	1.622	0.052	0.926	0.857	0.098	3.759	3.608	0.122	0.812	0.660	0.013
	30	1.257	0.993	0.033	0.880	0.775	0.061	3.117	2.986	0.101	0.422	0.178	0.010
	40	1.553	1.141	0.039	0.450	0.202	0.096	3.810	3.575	0.126	-0.366	0.134	0.019

ตารางที่ ๕-6 แสดงการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนทางสถิติของความชื้นดินที่มีการคลุมดินด้วยพลาสติกแบบขาวขุ่นในช่วงเวลากลางวันและกลางคืน

การทดลอง	ความลึก (cm)	กลางวัน (06.00 - 18.00 น.)						กลางคืน (18.00 - 06.00 น.)					
		RMSE	MAE	MAPE	r	R <sup>2</sup>	t-test	RMSE	MAE	MAPE	r	R <sup>2</sup>	t-test
ครั้งที่ 1	0	0.758	0.613	0.348	-0.937	0.877	0.051	1.685	1.662	1.123	-0.601	0.361	0.000
	10	0.252	0.206	0.024	-0.994	0.989	0.077	0.376	0.369	0.044	0.871	0.759	0.004
	20	0.167	0.129	0.011	-0.458	0.210	0.071	0.299	0.293	0.026	0.402	0.161	0.004
	30	0.058	0.047	0.004	-0.052	0.003	0.877	0.141	0.107	0.010	0.610	0.372	0.770
ครั้งที่ 2	0	0.643	0.477	0.420	-0.796	0.634	0.091	1.296	1.272	1.066	0.051	0.003	0.003
	10	0.299	0.261	0.031	-0.547	0.299	0.024	0.328	0.323	0.039	0.774	0.599	0.002
	20	0.211	0.132	0.011	-0.415	0.173	0.189	0.182	0.151	0.013	0.431	0.186	0.119
ครั้งที่ 3	0	0.317	0.259	0.178	0.223	0.050	0.327	1.146	1.082	0.941	-0.556	0.310	0.005
	10	0.123	0.092	0.011	0.037	0.001	0.107	0.239	0.217	0.026	0.193	0.037	0.044
	20	0.186	0.150	0.014	0.190	0.036	0.533	0.291	0.282	0.025	-0.571	0.326	0.003
	30	0.138	0.101	0.009	-0.649	0.421	0.177	0.044	0.037	0.003	-0.586	0.344	0.013

ตารางที่ ซ-7 ตารางแสดงการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนทางสถิติของอุณหภูมิดินที่มีการคลุมดิน  
ด้วยพลาสติกแบบสะท้อนแสงในช่วงเวลากลางวันและกลางคืน

การทดลอง	ความลึก (cm)	กลางวัน (06.00 - 18.00 น.)						กลางคืน (18.00 - 06.00 น.)					
		RMSE	MAE	MAPE	r	R <sup>2</sup>	t-test	RMSE	MAE	MAPE	r	R <sup>2</sup>	t-test
ครั้งที่ 1	0	5.404	4.345	0.146	0.980	0.961	0.055	1.773	1.469	0.054	0.827	0.683	0.232
	10	2.518	1.680	0.058	0.906	0.821	0.215	2.475	2.128	0.078	0.913	0.834	0.037
	20	1.014	0.874	0.033	0.991	0.983	0.027	1.770	1.732	0.063	0.960	0.922	0.004
	30	0.973	0.864	0.034	0.972	0.945	0.018	1.831	1.643	0.061	0.843	0.711	0.024
	40	2.107	1.794	0.072	0.828	0.686	0.031	2.872	2.798	0.104	0.611	0.373	0.002
ครั้งที่ 2	0	5.083	3.522	0.113	0.895	0.801	0.129	2.712	2.579	0.092	0.999	0.997	0.013
	10	1.681	1.345	0.045	0.945	0.893	0.509	0.682	0.617	0.022	0.998	0.996	0.901
	20	0.184	0.150	0.005	0.999	0.999	0.090	0.196	0.182	0.006	0.999	0.997	0.438
	30	0.373	0.298	0.011	0.992	0.985	0.613	0.243	0.214	0.007	0.935	0.875	0.192
	40	1.349	1.147	0.043	0.903	0.815	0.032	1.064	1.051	0.036	0.951	0.904	0.002
ครั้งที่ 3	0	5.388	3.930	0.125	0.853	0.728	0.102	1.836	1.716	0.062	0.995	0.989	0.020
	10	2.061	1.567	0.050	0.996	0.993	0.079	1.315	1.156	0.041	0.992	0.985	0.050
	20	1.173	0.946	0.032	0.959	0.919	0.059	1.125	1.081	0.037	0.995	0.990	0.009
	30	0.913	0.652	0.023	0.863	0.744	0.122	1.182	1.172	0.040	0.895	0.801	0.001
	40	1.884	1.592	0.057	0.430	0.185	0.037	1.963	1.962	0.067	0.949	0.900	0.000

ตารางที่ ซ-8 ตารางแสดงการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนทางสถิติของความชื้นดินที่มีการคลุมดิน  
ด้วยพลาสติกแบบสะท้อนแสงในช่วงเวลากลางวันและกลางคืน

การทดลอง	ความลึก (cm)	กลางวัน (06.00 - 18.00 น.)						กลางคืน (18.00 - 06.00 น.)					
		RMSE	MAE	MAPE	r	R <sup>2</sup>	t-test	RMSE	MAE	MAPE	r	R <sup>2</sup>	t-test
ครั้งที่ 1	0	0.224	0.152	0.032	-0.531	0.282	0.203	0.632	0.606	0.132	-0.947	0.896	0.005
	10	0.139	0.102	0.013	-0.787	0.619	0.115	0.187	0.180	0.024	0.354	0.125	0.012
	20	0.108	0.094	0.011	-0.764	0.584	0.023	0.205	0.204	0.023	0.748	0.559	0.000
	30	0.085	0.073	0.008	0.341	0.116	0.027	0.177	0.159	0.018	-0.306	0.094	0.040
ครั้งที่ 2	0	0.256	0.205	0.047	0.253	0.064	0.055	0.526	0.507	0.113	-0.414	0.172	0.008
	10	0.120	0.096	0.013	-0.195	0.038	0.708	0.149	0.145	0.019	0.443	0.196	0.006
	20	0.048	0.040	0.005	-0.430	0.185	0.793	0.097	0.089	0.010	0.248	0.061	0.112
	30	0.090	0.069	0.008	0.135	0.018	0.185	0.221	0.217	0.025	-0.694	0.482	0.004
ครั้งที่ 3	0	0.188	0.151	0.034	0.477	0.228	0.055	0.503	0.481	0.109	0.048	0.002	0.011
	10	0.127	0.104	0.014	-0.294	0.087	0.138	0.155	0.152	0.020	0.719	0.517	0.002
	20	0.076	0.060	0.007	-0.827	0.683	0.123	0.124	0.118	0.013	0.481	0.231	0.012
	30	0.050	0.043	0.005	0.548	0.300	0.219	0.147	0.125	0.014	0.155	0.024	0.067

ภาคผนวก ฅ  
ตารางการแจกแจงแบบ t



Table entry for  $p$  and  $C$  is the critical value  $t^*$  with probability  $p$  lying to its right and probability  $C$  lying between  $-t^*$  and  $t^*$ .

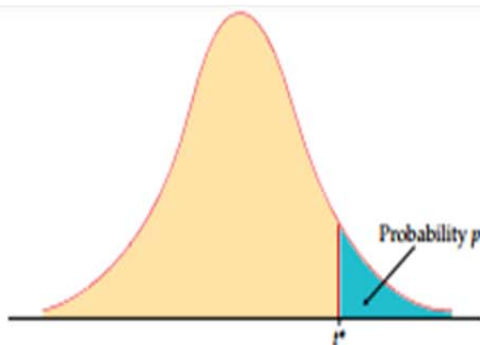


TABLE D												
t distribution critical values												
df	Upper-tail probability $p$											
	.25	.20	.15	.10	.05	.025	.02	.01	.005	.0025	.001	.0005
1	1.000	1.376	1.963	3.078	6.314	12.71	15.89	31.82	63.66	127.3	318.3	636.6
2	0.816	1.061	1.386	1.886	2.920	4.303	4.849	6.965	9.925	14.09	22.33	31.60
3	0.765	0.978	1.250	1.638	2.353	3.182	3.482	4.541	5.841	7.453	10.21	12.92
4	0.741	0.941	1.190	1.533	2.132	2.776	2.999	3.747	4.604	5.598	7.173	8.610
5	0.727	0.920	1.156	1.476	2.015	2.571	2.757	3.365	4.032	4.773	5.893	6.869
6	0.718	0.906	1.134	1.440	1.943	2.447	2.612	3.143	3.707	4.317	5.208	5.959
7	0.711	0.896	1.119	1.415	1.895	2.365	2.517	2.998	3.499	4.029	4.785	5.408
8	0.706	0.889	1.108	1.397	1.860	2.306	2.449	2.896	3.355	3.833	4.501	5.041
9	0.703	0.883	1.100	1.383	1.833	2.262	2.398	2.821	3.250	3.690	4.297	4.781
10	0.700	0.879	1.093	1.372	1.812	2.228	2.359	2.764	3.169	3.581	4.144	4.587
11	0.697	0.876	1.088	1.363	1.796	2.201	2.328	2.718	3.106	3.497	4.025	4.437
12	0.695	0.873	1.083	1.356	1.782	2.179	2.303	2.681	3.055	3.428	3.930	4.318
13	0.694	0.870	1.079	1.350	1.771	2.160	2.282	2.650	3.012	3.372	3.852	4.221
14	0.692	0.868	1.076	1.345	1.761	2.145	2.264	2.624	2.977	3.326	3.787	4.140
15	0.691	0.866	1.074	1.341	1.753	2.131	2.249	2.602	2.947	3.286	3.733	4.073
16	0.690	0.865	1.071	1.337	1.746	2.120	2.235	2.583	2.921	3.252	3.686	4.015
17	0.689	0.863	1.069	1.333	1.740	2.110	2.224	2.567	2.898	3.222	3.646	3.965
18	0.688	0.862	1.067	1.330	1.734	2.101	2.214	2.552	2.878	3.197	3.611	3.922
19	0.688	0.861	1.066	1.328	1.729	2.093	2.205	2.539	2.861	3.174	3.579	3.883
20	0.687	0.860	1.064	1.325	1.725	2.086	2.197	2.528	2.845	3.153	3.552	3.850
21	0.686	0.859	1.063	1.323	1.721	2.080	2.189	2.518	2.831	3.135	3.527	3.819
22	0.686	0.858	1.061	1.321	1.717	2.074	2.183	2.508	2.819	3.119	3.505	3.792
23	0.685	0.858	1.060	1.319	1.714	2.069	2.177	2.500	2.807	3.104	3.485	3.768
24	0.685	0.857	1.059	1.318	1.711	2.064	2.172	2.492	2.797	3.091	3.467	3.745
25	0.684	0.856	1.058	1.316	1.708	2.060	2.167	2.485	2.787	3.078	3.450	3.725
26	0.684	0.856	1.058	1.315	1.706	2.056	2.162	2.479	2.779	3.067	3.435	3.707
27	0.684	0.855	1.057	1.314	1.703	2.052	2.158	2.473	2.771	3.057	3.421	3.690
28	0.683	0.855	1.056	1.313	1.701	2.048	2.154	2.467	2.763	3.047	3.408	3.674
29	0.683	0.854	1.055	1.311	1.699	2.045	2.150	2.462	2.756	3.038	3.396	3.659
30	0.683	0.854	1.055	1.310	1.697	2.042	2.147	2.457	2.750	3.030	3.385	3.646
40	0.681	0.851	1.050	1.303	1.684	2.021	2.123	2.423	2.704	2.971	3.307	3.551
50	0.679	0.849	1.047	1.299	1.676	2.009	2.109	2.403	2.678	2.937	3.261	3.496
60	0.679	0.848	1.045	1.296	1.671	2.000	2.099	2.390	2.660	2.915	3.232	3.460
80	0.678	0.846	1.043	1.292	1.664	1.990	2.088	2.374	2.639	2.887	3.195	3.416
100	0.677	0.845	1.042	1.290	1.660	1.984	2.081	2.364	2.626	2.871	3.174	3.390
1000	0.675	0.842	1.037	1.282	1.646	1.962	2.056	2.330	2.581	2.813	3.098	3.300
$z^*$	0.674	0.841	1.036	1.282	1.645	1.960	2.054	2.326	2.576	2.807	3.091	3.291
	50%	60%	70%	80%	90%	95%	96%	98%	99%	99.5%	99.8%	99.9%
	Confidence level $C$											

<https://www.stat.tamu.edu/~lzhou/stat302/T-Table.pdf>

ภาพที่ ๓ การเปลี่ยนแปลงความชื้นดินภายในวงบ่อซีเมนต์ของเดือนธันวาคมที่มีวัชคุลุ่มดิน