

# การปรับปรุงฐานรากดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ในสนามโดยความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์

## FIELD IMPROVEMENT OF SOFT BANGKOK CLAY FOUNDATION USING SOLAR HEAT ENERGY

สมศักดิ์ เลิศประเสริฐพันธ์ (Somsak Lersprasertpun)<sup>1</sup>

สุทธิศักดิ์ ศรีลัมภ์ (Suttisak Soralump)<sup>2</sup>

<sup>1</sup>นิสิตปริญญาโท สาขาวิศวกรรมปฐพี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

<sup>2</sup>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

**บทคัดย่อ :** การวิจัยในครั้งนี้มุ่งหวังในการนำพลังงานธรรมชาติ คือพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ให้เกิดประโยชน์ ในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนซึ่งมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมด้านกำลังรับน้ำหนักต่ำ และใช้เวลาในการทรุดตัวนาน เพื่อให้มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ดีขึ้น ผลจากการทดสอบในสนาม พบว่าอุณหภูมิ และแรงดันน้ำส่วนเกินในชั้นดิน มีค่าลดลงตามระยะในแนวราบจากแหล่งให้ความร้อน นอกจากนี้การให้ความร้อนอย่างต่อเนื่องในระยะเวลาาน พบว่าอุณหภูมิ และแรงดันน้ำส่วนเกินภายในดินรอบแหล่งให้ความร้อน มีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลา นอกจากนั้นยังพบว่า การเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำส่วนเกินในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ มีปัจจัยหลักเกิดจากการขยายปริมาตรของน้ำในมวลดิน และเกิดการขยายปริมาตรมากกว่าของแข็ง (ดิน) ถึงประมาณ 38 – 52 เท่า สำหรับคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินในสนามหลังจากการปรับปรุงด้วยความร้อน พบว่า แนวโน้มของอัตราส่วนช่องว่างมีค่าลดลง 3 – 9% รวมถึงกำลังรับน้ำหนัก มีแนวโน้มสูงขึ้น ประมาณ 30 – 70%

**ABSTRACT :** This study has intention to use solar energy for soft ground improvement. Full-scale test was done over soft Bangkok clay by installing heat pipe and instrumentations for monitoring. The results show that soil temperature and excess pore pressure decrease in radial distance from heat source. While maintain the heating temperature and excess pore pressure mainly increase because of volume expansion of pore water which increase more than soil solid 38-52 times. Furthermore, after heating, void ratio tend to decrease 3-9 % and undrained shear strength tend to increase 30-70%.

**KEYWORDS :** Soil Improvement, Solar Energy, Solar Heating Thermal Consolidation

### 1. บทนำ

ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (Bangkok Soft Clay) เป็นดินที่เกิดจากการพัดพาของน้ำ หรือดินแขวนลอย ไหลตามน้ำมา ดังนั้นชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ จึงเป็นชั้นดินที่มีเม็ดละเอียดมากมีความหนาประมาณ 10-15 เมตร มีปริมาณในดิน (Water Content) อยู่ระหว่างร้อยละ 60-120 มีค่าพิคกิลิวด (Liquid Limit) อยู่ระหว่างร้อยละ 60-120 มีค่าความซึมได้ตามแนวดิ่งอยู่ระหว่าง

0.2-1.0 เมตรต่อปี มีอัตราส่วนช่องว่าง (Void Ratio) 1.80-3.50 และมีค่า Undrained Shear Strength อยู่ระหว่าง 300-1,500 กิโลเมตรต่อตารางเมตร (Uddin, 1995) จากคุณสมบัติดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ รับน้ำหนักได้น้อย และยุบตัวได้สูง พร้อมจะเลื่อนไหลเมื่อมีน้ำหนักกดทับ และมี ส่วนผสมของแร่ คาโอลิน (Kaolinite) 43%, มอนท์มอริลโลไนท์ (Montmorillonite) 33%, อิลไลต์ (Illite) 19% และควอทซ์

(Quartz) 5% (Uddin, 1995) ในอดีตมีความพยายามในการปรับปรุงฐานรากดินอ่อนระดับลึก โดยใช้ความร้อน วิธีดังกล่าวต้องอาศัยพลังงานความร้อนมากซึ่งไม่เหมาะในประเทศไทย เมื่อบริการมาถึงประเทศไทยซึ่งอยู่ในประเทศเขตร้อนจึงมีแนวโน้มของความเป็นไปได้ที่จะใช้พลังงานแสงอาทิตย์มาช่วยในการปรับปรุงฐานรากดินอ่อน ทั้งนี้เนื่องจากประเทศไทยตั้งอยู่ในพื้นที่ ที่มีแสงแดด ที่ตกกระทบพื้นโลก บนพื้นที่ 1 ตารางเมตร ได้พลังงานประมาณ 1,000 วัตต์ หรือเฉลี่ย 4-5 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อวัน

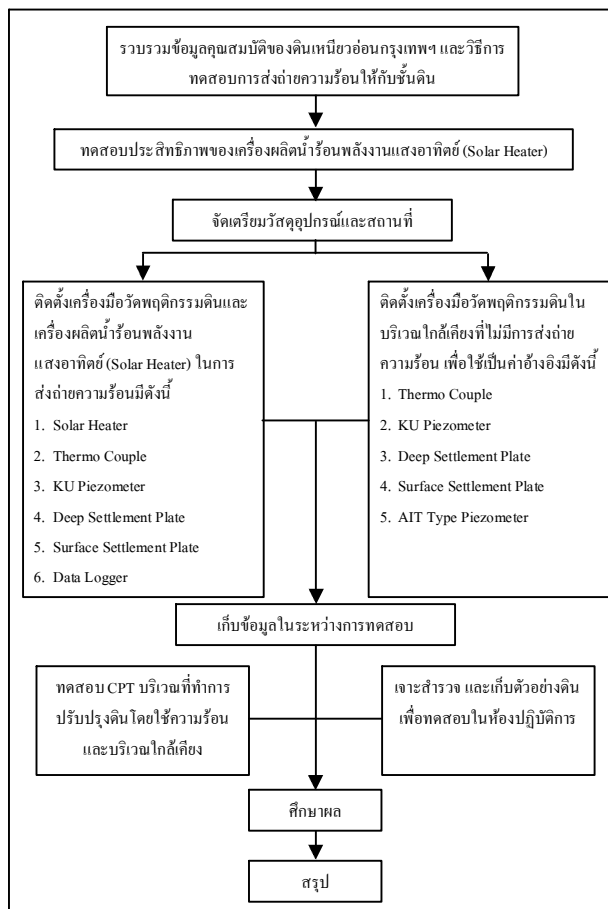
## 2. วัตถุประสงค์

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ ได้ทำการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ รวมไปถึงศึกษาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของ ค่ากำลังรับน้ำหนัก-แรงดันน้ำ-การทรุดตัว กับการเพิ่ม-ลดอุณหภูมิ โดยการส่งถ่ายความร้อนลงไปในพื้นที่ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ซึ่งความร้อนดังกล่าวผลิตจากเครื่องผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ อุณหภูมิสูงสุดในการศึกษากำหนดไว้ที่ประมาณ 90 องศาเซลเซียส โดยทำการติดตั้งเครื่องมือวัดการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำ, อุณหภูมิ และการทรุดตัว รวมทั้งได้ทำการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของดินเหนียวอ่อน ก่อนและหลังการส่งถ่ายความร้อน

## 3. วิธีการวิจัย

ขั้นตอนการทดสอบการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ในสนามแสดงดังรูปที่ 1 การทดสอบเบื้องต้นเป็นการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์พบว่าอุณหภูมิของน้ำร้อนมีการเปลี่ยนแปลงตามสถานะอากาศภายนอก ดังนั้นในการทดสอบครั้งนี้จึงได้ใช้เครื่องผลิตน้ำร้อน (Heater) และเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Thermostat) เป็นตัวควบคุมอุณหภูมิของน้ำร้อนให้มีค่าคงที่ ที่ประมาณ 90 องศาเซลเซียส การทดสอบได้ทำการติดตั้งท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1 นิ้ว ยาว 5 เมตร และภายในท่อทองแดงติดตั้งท่อเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/2 นิ้ว ซึ่งทำหน้าที่ในการหมุนเวียนน้ำร้อนจากเครื่องผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตำแหน่งศูนย์กลางบริเวณที่ทำการทดสอบ การศึกษาพฤติกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ได้ทำการติดตั้งเครื่องมือวัดที่

ตำแหน่งตามที่แสดงในรูปที่ 2 และในตารางที่ 1 และ 2 สำหรับการควบคุมสภาพขอบเขต (Boundary Condition) ของการวิจัย เนื่องจากการวิจัยครั้งนี้มุ่งเน้นการทดสอบในสภาพจริง ดังนั้นสภาพขอบเขตจึงไม่ได้มีการควบคุมหรืออีกนัยหนึ่ง คือ ถูกควบคุมด้วยสภาพธรรมชาติโดยอุณหภูมิและแรงดันน้ำในสภาพธรรมชาติได้ถูกบันทึกไว้ตลอดเพื่อนำมาวิเคราะห์ในภายหลัง



รูปที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินการทดสอบในสนาม



รูปที่ 2 ตำแหน่งการตั้งเครื่องมืออุปกรณ์ที่ทำการทดสอบ และพื้นที่อ้างอิง

**ตารางที่ 1** ตำแหน่งความลึกและระยะในแนวรัศมีที่ติดตั้งเครื่องมือวัดพฤติกรรมดินบริเวณปรับปรุงด้วยความร้อน

ลำดับ ที่	รายการเครื่องมือ	ระยะรัศมีจากผิวท่อ ทองแดง (ซม.)				
		0	10	15	20	30
1.	สายไฟวัดอุณหภูมิ (Thermo Couple)					
	ความลึก 1 เมตร	✓	✓			✓
	ความลึก 3 เมตร	✓	✓		✓	✓
	ความลึก 5 เมตร	✓	✓			✓
2.	อุปกรณ์วัดการทรุดตัวที่ผิวดิน (Surface Settlement Plate)					
	ระดับผิวดินเดิม				✓	
3.	อุปกรณ์วัดการทรุดตัวระดับลึก ของชั้นดิน (Deep Settlement Plate)					
	ความลึก 1 เมตร			✓		✓
	ความลึก 3 เมตร			✓		✓
	ความลึก 5 เมตร			✓		✓
4.	อุปกรณ์วัดแรงดันน้ำด้วยระบบ ไฟฟ้าแบบเกษตรศาสตร์ (KU Piezometer)					
	ความลึก 1 เมตร		✓			✓
	ความลึก 3 เมตร		✓		✓	✓

การเก็บข้อมูลระหว่างการทดสอบดำเนินการโดยใช้เครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติรุ่น DL 2100 (Data Logger DL 2100) ซึ่งมีการทดสอบแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบคือ

1. การให้ความร้อนคงที่โดยการรักษาระดับอุณหภูมิคงที่
2. การให้ความร้อนเป็นวงจรในระยะสั้นโดยเปิด-ปิดปั๊มน้ำในระยะเวลาสั้น
3. การให้ความร้อนเป็นวงจรในระยะเวลายาวโดยเปิด-ปิดปั๊มน้ำในระยะเวลายาว

หลังจากสิ้นสุดการให้ความร้อนแก่ชั้นดินได้ทำการเก็บตัวอย่างดินที่ความลึกตั้งแต่ 1 ถึง 5 เมตร ที่ตำแหน่งที่ให้ความร้อนกับชั้นดิน และที่ตำแหน่งอ้างอิงที่ไม่มีผลเนื่องจากความร้อนนำไปทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาพฤติกรรมของดินเหนียวอ่อนที่เกิดการเปลี่ยนแปลง

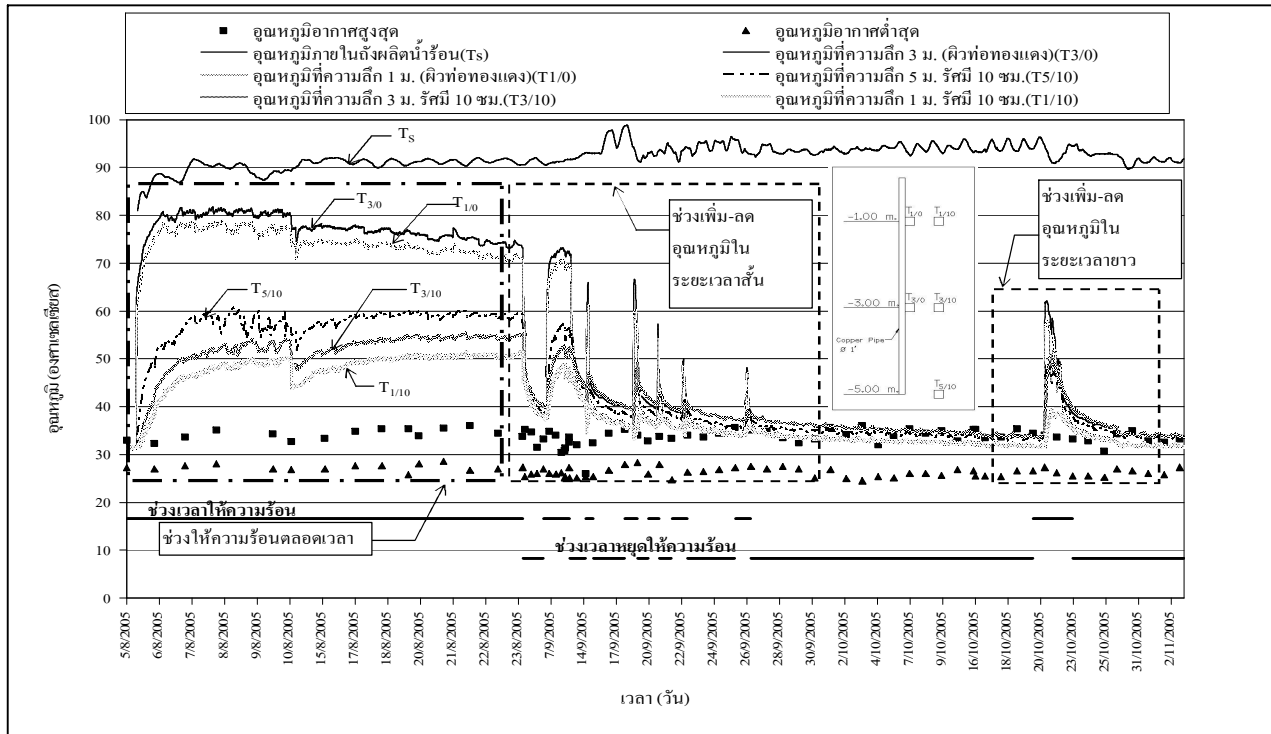
**ตารางที่ 2** ตำแหน่งความลึกที่ติดตั้งเครื่องมือวัดพฤติกรรมดินบริเวณพื้นที่อ้างอิง (Dummy Area)

ลำดับ ที่	รายการ	ความลึกที่ ติดตั้ง (ม.)
1	อุปกรณ์วัดการทรุดตัวระดับลึกของชั้นดิน (Deep Settlement Plate)	1
2	สายไฟวัดอุณหภูมิ (Thermo Couple)	1,5
3	อุปกรณ์วัดแรงดันน้ำด้วยระบบไฟฟ้า แบบเกษตรศาสตร์ (KU Piezometer)	4
4	อุปกรณ์วัดแรงดันน้ำแบบ AIT (AIT Type Piezometer)	3,4,5

#### 4. ผลการวิจัย

##### 4.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเปรียบเทียบกับเวลาตามความลึก

ผลการบันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในดินที่เวลาต่างๆ จากการทดสอบการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ โดยความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ในครั้งนี้ การให้ความร้อนกับชั้นดิน น้ำร้อนจะเริ่มต้นไหลผ่านท่อชั้นในออกสู่ท่อทองแดง (ท่อชั้นนอก) ที่ระดับความลึก 5 เมตร และลดลงเมื่อมีระดับสูงขึ้น จากนั้นจึงไหลย้อนขึ้นด้านบนภายในท่อทองแดง และกลับเข้าเครื่องผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ จึงทำให้อุณหภูมิในดินมีค่ามากที่สุดที่ระดับความลึกที่ 5 เมตร และเมื่อทำการลดอุณหภูมิลง คือหยุดการให้ความร้อน อุณหภูมิทุกจุดภายในชั้นดินจะลดลงตามระยะทางจากจุดศูนย์กลางการให้ความร้อน รูปที่ 3 แสดงผลการบันทึกค่าอุณหภูมิตลอดการทดสอบ ผลการวัดอุณหภูมิที่ระดับความลึกต่างกัน ณ รัศมีเดียวกัน สามารถแยกพิจารณาผลของการเพิ่ม - ลดอุณหภูมิ ออกเป็น 2 กรณีได้ดังนี้



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิตามความลึก กับ เวลา

#### 4.1.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบริเวณผิวท่อทองแดงตามความลึก

ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อบริเวณผิวท่อทองแดงพบว่ามีความผันผวนลดลง ทั้งในช่วงเวลาที่มีการให้ความร้อนตลอดเวลาเป็นระยะเวลานาน ช่วงเวลาการให้ความร้อนเป็นรอบ ในระยะเวลาสั้น และช่วงหยุดให้ความร้อนเป็นเวลานานก่อนให้ความร้อนใหม่ เป็นไปในลักษณะเดียวกันทั้งที่ความลึก 3 และ 1 เมตร อัตราการลดลงของอุณหภูมิมีค่าประมาณ 1.3 องศาเซลเซียส/วัน แนวโน้มอุณหภูมิต่ำลง อาจเป็นเพราะพลังงานความร้อนเกิดการแผ่กระจายส่งผ่านไปยังชั้นดินในบริเวณรอบด้าน ทำให้อุณหภูมิบริเวณรอบท่อทองแดงมีแนวโน้มลดลง และมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอนุภาคดินเหนียวจึงส่งผลทำให้การให้ความร้อนในแต่ละครั้งหลังจากหยุดการให้ความร้อน อุณหภูมิสูงสุดที่เพิ่มขึ้นในแต่ละรอบจึงมีค่าลดลง

#### 4.1.2 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามความลึก ที่ระยะรัศมีเดียวกัน

แนวโน้มนการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตั้ง 3 รูปแบบการทดสอบ คล้ายกับผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบริเวณผิวท่อทองแดงตามความลึก เพียงแต่ค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงมีค่าน้อยกว่า ซึ่งอาจเป็นผลมาจากปัจจัยมาจากแหล่งพลังงานความร้อนสัมพันธ์กับระยะทางที่ความร้อนสามารถแผ่กระจายไปได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าการนำพาความร้อนในดินและน้ำ

#### 4.2 การแผ่กระจายอุณหภูมิตามแนวราบ

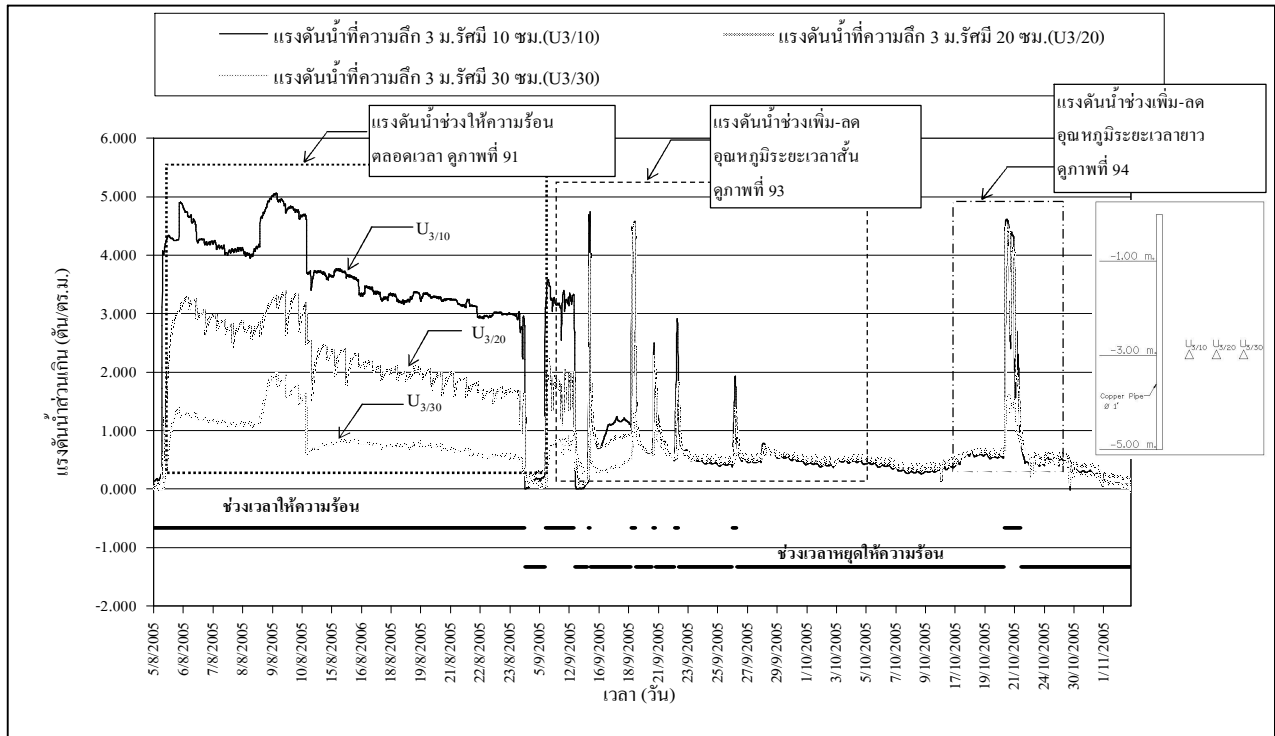
พิจารณาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตั้ง 3 รูปแบบการทดสอบพบว่าบริเวณผิวท่อทองแดงเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมากกว่าที่ระยะรัศมีต่างๆ เนื่องจากจุดที่ใกล้กับท่อทองแดงหลังจากหยุดให้ความร้อนกับชั้นดิน น้ำในท่อทองแดงจะเย็นลงทำให้ความร้อนที่รัศมี 10 ซม. ส่งถ่ายความร้อนผ่านมาทางท่อทองแดง ส่วนบริเวณที่รัศมี 30 ซม. ความร้อนในมวลดิน อาจส่งถ่ายไปยังชั้นดินบริเวณใกล้เคียงมากกว่า และมีบางส่วนส่งถ่ายความร้อนไปทางท่อทองแดง เมื่อพิจารณาการลดอุณหภูมิของทั้งสี่จุด เห็นได้ว่าที่ผิวท่อทองแดงอุณหภูมิมิมีการเพิ่มขึ้น และลดลงอย่างรวดเร็ว มากกว่าที่รัศมี 10 ซม. 20 ซม. และ 30 ซม. ตามลำดับ อาจเนื่องจากท่อทองแดงมีคุณสมบัติเป็นตัวนำที่ดี ทำให้บริเวณใกล้เคียงเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่ออย่างรวดเร็ว โดยที่ระยะ 30 ซม. เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อไม่มาก เพราะค่าการนำความร้อนในดินมีค่าน้อยกว่าท่อทองแดงมาก ดินเหนียวมีค่าการนำความร้อนอยู่ในช่วงประมาณ 0.9-1.3 W/m<sup>2</sup>°C (San San, 2004) ส่วนท่อทองแดงมีค่าการนำความร้อนประมาณ 386 W/m<sup>2</sup>°C เห็นได้ว่าท่อทองแดงมีค่าการนำความร้อนมากกว่าดินเหนียวถึง 297-429 เท่า จึงทำให้ท่อทองแดงเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อเร็วกว่าดินมาก

4.3 การเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำส่วนเกินในดิน เนื่องจากการให้ความร้อน (เปรียบเทียบกับเวลา)

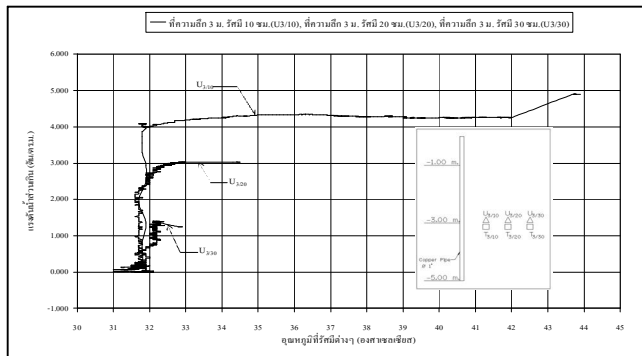
ผลการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำทั้ง 3 รูปแบบการทดสอบดังรูปที่ 4 พบว่าแรงดันน้ำจุดที่ใกล้กับท่อทองแดงจะมีแรงน้ำส่วนเกินเกิดขึ้นสูงกว่า จุดที่อยู่ห่างออกไปตามแนวรัศมี และการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่เกิดขึ้น คือที่อุณหภูมิสูง แรงดันส่วนเกินจะเกิดขึ้นสูง ที่อุณหภูมิต่ำแรงดันน้ำส่วนเกินจะเกิดขึ้นน้อยด้วย

4.4 การเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำส่วนเกินในดิน เนื่องจากการให้ความร้อน (เปรียบเทียบกับอุณหภูมิตามระยะรัศมี)

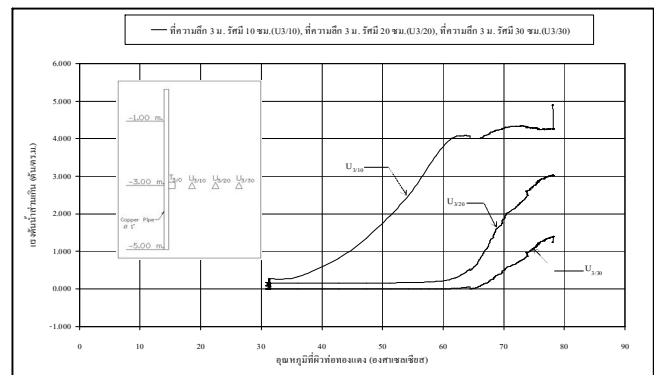
เมื่อพิจารณาผลการวัดแรงดันน้ำที่ได้ดังรูปที่ 5 ถึง 7 เห็นได้ว่าผลการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำส่วนเกินเนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิ เป็นผลมาจากการเพิ่มอุณหภูมิที่ผิวท่อทองแดงในระยะแรกเท่านั้น ถึงแม้ว่าเมื่ออุณหภูมิแผ่มาถึงระยะรัศมีต่างๆ แรงดันน้ำกลับเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลมาจากการขยายปริมาตรของน้ำในมวลดินในช่วงที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นในช่วงแรกของการให้ความร้อน มีค่ามากกว่าการขยายปริมาตรของของแข็ง (ดิน)



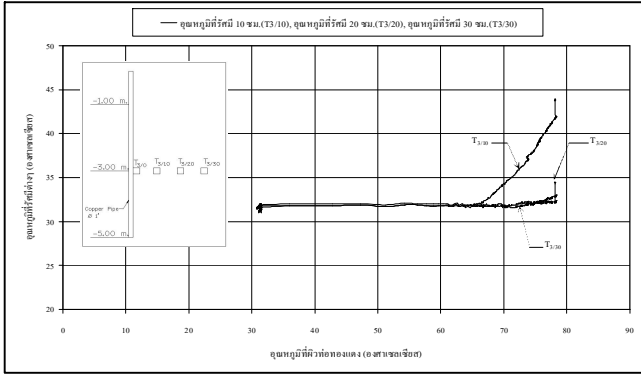
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันส่วนเกินที่ความลึก 3 เมตรที่ระยะรัศมีต่างๆ กับ เวลา



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินที่ความลึก 3 เมตรที่ระยะรัศมีต่างๆ กับ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นที่ตำแหน่งที่ติดตั้งเครื่องมือวัดแรงดันน้ำ (KU Piezometer)



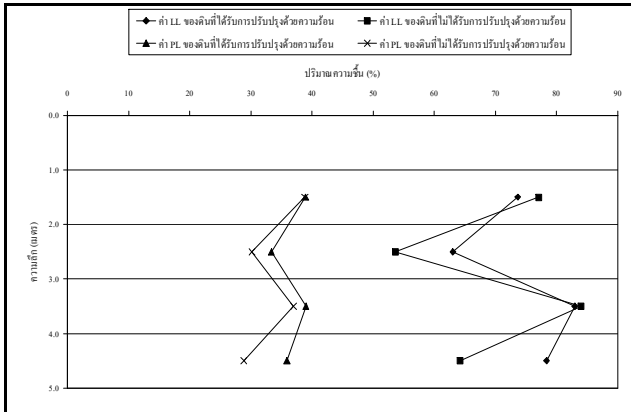
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินที่ความลึก 3 เมตรที่ระยะรัศมีต่างๆ กับ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นที่ผิวท่อทองแดง



รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงระหว่างอุณหภูมิที่ความลึก 3 เมตรที่รศมีต่างๆ กับอุณหภูมิที่ผิวท่อทองแดงเพิ่มขึ้น

#### 4.5 ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ผลการทดสอบค่าคุณสมบัติพื้นฐานของดิน ค่าที่ได้ค่อนข้างคล้ายกันทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยความร้อน แสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินที่ไม่ได้รับการปรับปรุงด้วยความร้อน และดินที่ได้รับการปรับปรุงด้วยความร้อนที่ระยะความลึกต่างๆ

ผลการเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ ที่ระดับความลึกตั้งแต่ 1 ถึง 5 เมตร ที่ได้รับการปรับปรุงด้วยความร้อนกับดินที่ไม่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนในบริเวณใกล้เคียงไปทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ผลการทดสอบ การอัดตัวคายน้ำจากห้องปฏิบัติการ ได้ค่าอัตราส่วนช่องว่างในดินหลังการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยความร้อนมีค่าลดลงประมาณ 3-9 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังรูปที่ 9 เมื่อพิจารณาพร้อมกับผลการทดสอบในสนามพบว่าแรงดันน้ำส่วนเกินมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ จากเป็นผลมาจากในระหว่างการเพิ่มอุณหภูมิ น้ำในช่องว่างระหว่างอนุภาคดินและน้ำรอบอนุภาคดิน (Double Layer) เกิดการขยายปริมาตร ทำให้ขยายความหนาของชั้นน้ำรอบอนุภาคดิน และน้ำมีความหนืดลดลง ส่งผลให้น้ำสามารถไหลออกจากอนุภาคดินได้ง่าย

หลังจากที่น้ำไหลออกไปจากอนุภาคดินแล้วผลต่อเนื่องคือความหนาของน้ำรอบอนุภาคดินมีขนาดลดลง ทำให้อนุภาคดินสามารถเคลื่อนที่เข้าหากันได้ใกล้มากขึ้น และดินเกิดการเรียงตัวขึ้นใหม่ จึงเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ส่งผลทำให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคดินมีขนาดลดลง และ ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่เกิดขึ้นโดยวิธีแรงอัดแบบไม่มีแรงดันด้านข้าง (Unconfined Compression Test) พบว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่ได้รับการปรับปรุงด้วยความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากเดิม 38-70 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังรูปที่ 10

#### 4.6 วิเคราะห์ผลการวิจัย

พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นที่ผิวท่อทองแดงมีผลโดยตรงกับแรงดันน้ำที่เกิดขึ้นที่รศมีต่างๆ เป็นผลมาจากเมื่อน้ำได้รับความร้อน น้ำเกิดการขยายปริมาตรอย่างรวดเร็ว สมการ (1) และ (2) ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงปริมาตรกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Campanella and Mitchell, 1968)

ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเนื่องจากความร้อนของน้ำ แสดงดังสมการที่ (1)

$$\Delta V_w = \alpha_w \cdot V_{w0} \cdot \Delta T \quad (1)$$

และการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเนื่องจากความร้อนของดิน แสดงดังสมการที่ (2)

$$\Delta V_s = \alpha_s \cdot V_{s0} \cdot \Delta T \quad (2)$$

เมื่อ

$\Delta V_w$  = ปริมาตรน้ำที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

$\alpha_w$  = สัมประสิทธิ์การขยายตัวของปริมาตรของน้ำ

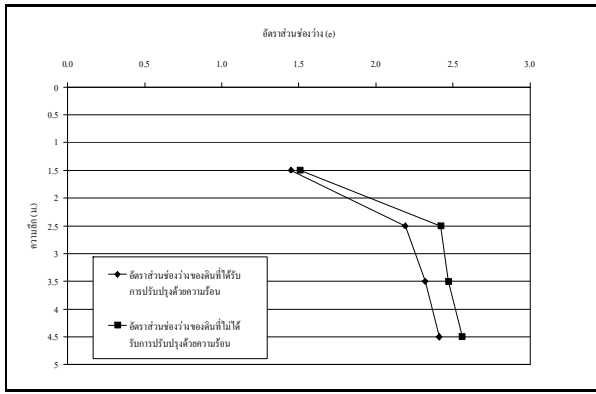
$V_{w0}$  = ปริมาตรเริ่มต้นของน้ำ

$\Delta T$  = อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง

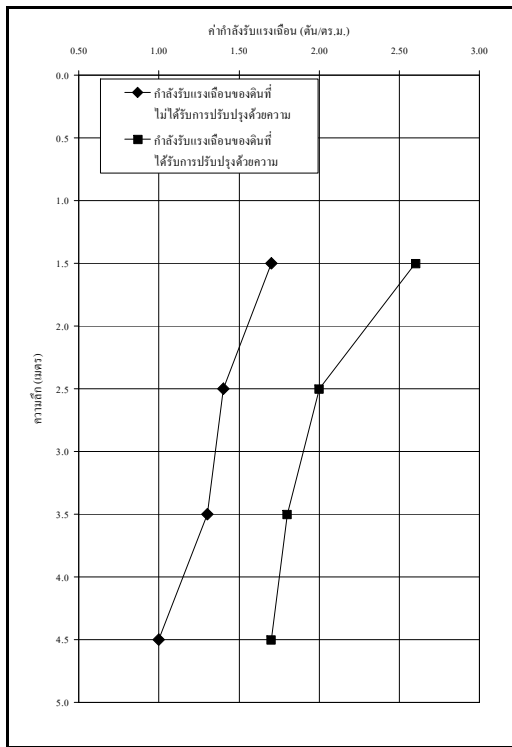
$\Delta V_s$  = ปริมาตรดินที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

$\alpha_s$  = สัมประสิทธิ์การขยายตัวของปริมาตรของดิน

$V_{s0}$  = ปริมาตรเริ่มต้นของดิน



รูปที่ 9 เปรียบเทียบค่าอัตราส่วนช่องว่าง (e) ก่อน และหลังการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยความร้อนที่ระดับความลึกต่างๆ



รูปที่ 10 เปรียบเทียบค่ากำลังรับน้ำหนักของดินก่อน และหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อน จากผลการทดสอบแรงอัดแบบไม่มีแรงดันด้านข้าง (Unconfined Compression Test)

ตารางที่ 3 ผลการคำนวณการเปลี่ยนแปลงปริมาตรจากสมการที่ (1) และ (2)

T (°C)	$\alpha_w^*$	$\alpha_s^*$	$\Delta T$ (°C)	$\Delta V_w$ (unit-°C)	$\Delta V_s$ (unit-°C)	$\Delta V_w / \Delta V_s$
32	0.0003200	0.00001	0	0	0	0
40	0.0003479	0.00001	8	0.0027832	0.00008	34.79
50	0.0003828	0.00001	18	0.0068904	0.00018	38.28
60	0.0004178	0.00001	28	0.0116984	0.00028	41.78
70	0.0004528	0.00001	38	0.0172064	0.00038	45.28
80	0.0004878	0.00001	48	0.0234144	0.00048	48.78
90	0.0005228	0.00001	58	0.0303224	0.00058	52.28

\* ที่มา Grino (2004)

การคำนวณอัตราการไหลของความร้อน (Fourier's Law) อธิบายโดยสมการ (4)

$$Q = kA(\Delta T)/\Delta L \quad (3)$$

Q = อัตราการไหลของความร้อน, (J/sec), (W)

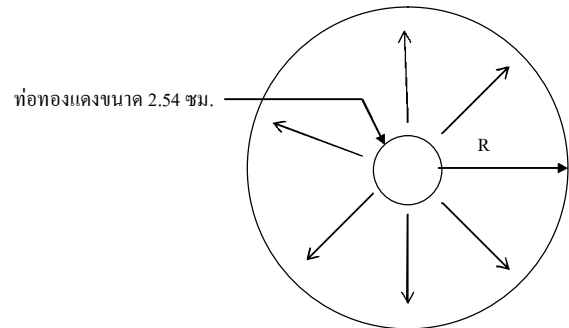
k = ค่าการนำพาความร้อน, (J/(sec-m°C)), (W/m°C)

A = พื้นที่หน้าตัดตั้งฉากกับทิศทางการไหล, (m<sup>2</sup>)

$\Delta T$  = อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงระหว่างสองจุดที่พิจารณา, (°C)

$\Delta L$  = ระยะทางระหว่างสองจุดที่พิจารณา, (m)

ลักษณะการไหลของความร้อนจะกระจายออกไปในแนวรัศมี แสดงดังรูปที่ 11 และ 12 สามารถคำนวณค่าอัตราการไหลของความร้อนที่ความลึก 3 เมตรที่รัศมีต่างๆ ได้ตารางที่ 4



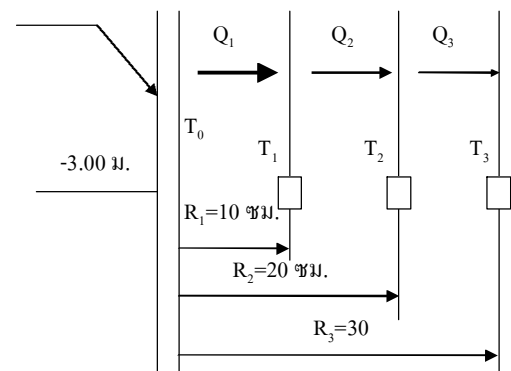
รูปที่ 11 ลักษณะของพลังงานความร้อนแผ่กระจายในแนวรัศมี

ตารางที่ 4 สรุปอัตราการไหลของความร้อนในแนวรัศมี

ที่ความลึก 3 เมตร	ระยะในแนวรัศมีจากผิวท่อทองแดง (ซม.)		
	10	20	30
อัตราการไหลของความร้อน, (วัตต์)	141.51	74.89	55.48

ท่อทองแดง

ขนาด 1 นิ้ว



รูปที่ 12 รูปตัดขวางการกระจายความร้อนในชั้นดินเหนียวอ่อนตามแนวรัศมี

ผลจากตารางที่ 3 การคำนวณการเปลี่ยนแปลงปริมาตร เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของน้ำมีค่าสูงกว่า การเปลี่ยนแปลงปริมาตรดินถึง 38-52 เท่า และเมื่อพิจารณาผลการทดสอบที่ได้ว่า เมื่ออุณหภูมิที่ศูนย์กลางการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นทำให้ค่าแรงดันน้ำที่รัศมีต่างๆ ที่ห่างออกไปจากศูนย์กลางมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทั้งๆ ที่บริเวณที่จุดระยะรัศมีต่างๆ ยังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากอุณหภูมิเริ่มต้น เป็นผลมาจากน้ำได้รับอิทธิพลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นบริเวณผิวท่อทองแดง ทำให้ปริมาตรของน้ำเกิดการขยายตัวอย่างรวดเร็ว และมีผลไปถึงระยะรัศมี 30 ซม. จากผิวท่อทองแดง และเมื่ออุณหภูมิแผ่กระจายไปถึงที่ระยะรัศมีต่างๆ แรงดันน้ำที่เกิดขึ้นที่รัศมี 10 และ 20 ซม. กลับมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับแรงดันน้ำที่เกิดในช่วงแรก ส่วนที่ระยะรัศมี 30 ซม. แรงดันน้ำเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

สาเหตุที่แรงดันน้ำเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยในช่วงหลังอาจเนื่องมาจากอุณหภูมิที่แผ่มาถึงจุดรัศมีต่างๆ หลังจากน้ำมีการขยายตัวในช่วงแรกไปแล้วมีค่าน้อยเกินกว่าที่จะทำให้ น้ำขยายตัวเพิ่มจากช่วงแรก เมื่อพิจารณาค่าอุณหภูมิที่ผิวท่อทองแดงเพิ่มขึ้นไปถึง 82 องศาเซลเซียส และที่แผ่มาถึงระยะรัศมี 10 ซม. 20 ซม. และ 30 ซม. มีค่าอยู่ที่ 54 องศาเซลเซียส 45 องศาเซลเซียส และ 42 องศาเซลเซียสตามลำดับ สามารถคำนวณอัตราการไหลของความชื้นที่รัศมีต่างๆ ได้ดังตารางที่ 4 โดยที่อัตราการไหลจะแปลงผันตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง และแปลผลผันกับระยะที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งค่าการนำพาความร้อนเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้นหลังจากที่อุณหภูมิแผ่กระจายไปถึงรัศมีต่างๆ แล้วการขยายปริมาตรของน้ำจึงเกิดขึ้นน้อยมาก

## 5. สรุป

จากการศึกษาพฤติกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ เมื่อทำการปรับปรุงด้วยความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ พบว่าที่ระดับความลึกเดียวกันบริเวณใกล้แหล่งให้ความร้อนดินจะมีอุณหภูมิสูง และดินจะมีอุณหภูมิลดลงเมื่อมีระยะรัศมีเพิ่มขึ้น แรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากการขยายปริมาตรของน้ำในมวลดิน เมื่อได้รับความร้อน คุณสมบัติพื้นฐานของดินที่ได้รับการปรับปรุงด้วยความร้อน กับดินที่ไม่ได้รับการปรับปรุงด้วยความร้อน พบว่าไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง แต่พบว่าอัตราส่วนช่องว่างของดินที่ได้รับการปรับปรุงด้วยความร้อนมีค่าลดลง 3-9

เปอร์เซ็นต์ รวมถึงค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่มีการระบายน้ำหลังการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นประมาณ 30-70 เปอร์เซ็นต์ เปรียบเทียบกับดินอ้างอิงที่ไม่ได้รับอิทธิพลเนื่องจากความร้อน และยังพบว่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำส่วนเกินในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ มีปัจจัยหลักเกิดจากการขยายปริมาตรของน้ำในมวลดิน เมื่อมวลดินได้รับความร้อน และเริ่มแผ่กระจายความร้อนในแนวราบ น้ำในมวลดินบริเวณแหล่งให้ความร้อนมีอุณหภูมิสูงขึ้น และเกิดการขยายปริมาตรมากกว่าของแข็ง (ดิน) ถึงประมาณ 38-52 เท่า ส่งผลให้เกิดแรงดันแบบไม่ระบายน้ำ ซึ่งทำให้เกิดแรงดันน้ำส่วนเกินในดินที่ระยะรัศมีต่างๆ ถึงแม้ว่าความร้อนจะยังไม่แผ่กระจายมาถึงจุดในแนวราบนั้นก็ตาม และเมื่อความร้อนแผ่กระจายมาถึงจุดนั้นแรงดันน้ำส่วนเกินได้เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้เขียนขอขอบคุณรัฐบาลไทยในการสนับสนุนทุนวิจัย ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย และ Prof.Dennes T.Bergado สำหรับการสนับสนุนด้านสถานที่และการอำนวยความสะดวก

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Campanella, R. G. and Mitchell, J. K. 1986. Influence of temperature variation on soil behavior. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division ASCE*, Vol. 94, No. SM3: 709 – 733.
- [2] Grino, L. 2004. *Effect of heat on the deformation and strength behavior of soft Bangkok clay*. M.S. thesis. Asian Institute of Technology, Thailand.
- [3] Uddin, K. (1995). *Strength and deformation characteristics of cement-treated Bangkok clay*. D. Eng. Dissertation No. GT-94-1, Asian Institute of Technology, Thailand.