

การเพิ่มประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิจนฐานรากแพขนานตใหญ่ด้วยคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

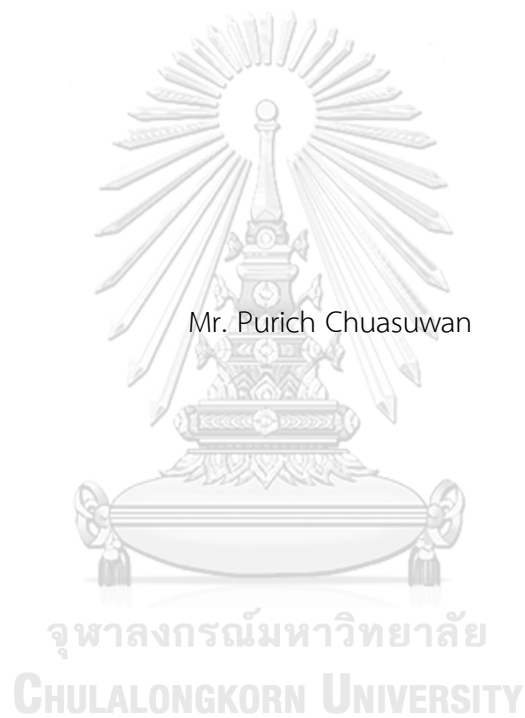
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Thermal improvement of large mat foundation using embedded precast lightweight
concrete



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering
Department of Civil Engineering
FACULTY OF ENGINEERING
Chulalongkorn University
Academic Year 2021
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเพิ่มประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิจากฐานรากแพะขนาดใหญ่ ด้วยคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ
โดย	นายภูริช ฉั่วสุวรรณ
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.พิชชา จงวิวัฒน์สกุล)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ ธีรศรีสถิตย์)	

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภูริช ฉั่วสุวรรณ : การเพิ่มประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิของฐานรากแพขนาดใหญ่ด้วยคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ. (Thermal improvement of large mat foundation using embedded precast lightweight concrete) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว

ฐานรากแพขนาดใหญ่เป็นที่นิยมใช้มากขึ้นในโครงการก่อสร้างอาคารสูง การก่อสร้างฐานรากแพขนาดใหญ่จำเป็นต้องคำนึงถึงปัญหาการแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิ ซึ่งเกิดจากอุณหภูมิบริเวณผิวและแกนภายในคอนกรีตที่แตกต่างกันมากจากความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีตและการระบายความร้อนที่ต่ำกว่าบริเวณผิว ส่งผลให้เกิดความเค้นในคอนกรีตที่อาจสูงกว่ากำลังรับแรงดึงในช่วงแรกที่ยังพัฒนากำลังไม่เต็มที่ จึงมีความเสี่ยงเกิดปัญหาการแตกร้าวซึ่งส่งผลเสียต่อความทนทานของฐานรากแพ งานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาและนำเสนอแนวคิดในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยวิธีการแทนที่คอนกรีตบริเวณแกนกลางด้วยคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ เพื่อช่วยลดปริมาณความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและช่วยลดอุณหภูมิบริเวณแกนกลางของฐานราก การศึกษาอาศัยการสร้างแบบจำลอง 3D finite element เพื่อทำนายอุณหภูมิและความเค้นที่เกิดขึ้นในฐานรากแพจำนวน 2 ฐาน ซึ่งเปรียบเทียบผลกับการตรวจวัดอุณหภูมิของฐานรากแพจริง จากนั้นจึงพิจารณาการใส่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จในฐานรากแพในตำแหน่งที่มีความเค้นน้อยเพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อรับแรงของฐานรากแพ แล้วทำการวิเคราะห์ความแตกต่างของอุณหภูมิและตรวจสอบความเค้นที่เกิดขึ้นในฐานรากแพเปรียบเทียบกับกรณีการก่อสร้างแบบปกติ เพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการลดความเสี่ยงที่จะเกิดการแตกร้าวเนื่องจากความร้อนของคอนกรีตฐานรากแพขนาดใหญ่

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6370440421 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORD: Large mat foundation, Precast lightweight concrete, Hydration heat,
Thermal stress, Thermal crack

Purich Chuasuwan : Thermal improvement of large mat foundation using
embedded precast lightweight concrete. Advisor: Prof. TOSPOL PINKAEW,
Ph.D.

A large mat foundation has become more popular among tall building construction. During construction, its thermal crack problem, due to temperature difference between concrete surface and concrete core generated from hydration reaction, is concerned. Consequently, the induced concrete stresses may higher than tensile strength in early age concrete which has not been fully strength developed. This thermal crack problem negatively affects the durability of a large mat foundation. This research aims to study and present an idea for solving the problem by replacing concrete core with precast lightweight concrete which cannot only reduce the heat from hydration reaction but also absorb the heat at concrete core. This study uses 3D finite element model to predict temperature and stress inside 2 large mat foundations. Actual temperatures of the large mat foundations were also measured, and the results were used to improve the accuracy of the models. Then, the models with precast lightweight concretes partially replaced into mat foundations in small stress region is studied. The thermal stress analysis of the mat foundations with and without precast lightweight concretes is compared in order to demonstrate the efficiency in reducing the risk of thermal crack in large mat foundations.

Field of Study: Civil Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2021

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจากศาสตราจารย์ ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาเสียสละเวลาอันมีค่าเพื่อให้คำปรึกษา คำแนะนำ และแนะแนวทางการแก้ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นของวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.พิชชา จงวงวิวัฒน์สกุล ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐภูมิ ธนศรีสถิตย์ กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่ได้ให้คำแนะนำเพื่อปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ บริษัท เอ็นจีเนียร์ เอ็กซ์เพิร์ท อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด ที่ช่วยให้การสนับสนุนโปรแกรม Midas Civil ทุนและอุปกรณ์การทดสอบในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ บริษัท เอ็ม คอนกรีต จำกัด ที่สนับสนุนข้อมูลของฐานรากแพขนานใหญ่ที่ศึกษา และช่วยอำนวยความสะดวกในการติดตั้งอุปกรณ์

ขอขอบคุณ พี่เอ๋ และรุ่นพี่ ในสาขาวิศวกรรมโครงสร้าง ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อมูลที่จำเป็นเกี่ยวกับการดำเนินการของวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ ทุนอุดหนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาจาก บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อเฉลิมฉลองวโรกาสที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวทรงเจริญพระชนมายุครบ 72 พรรษา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภูริช ฉั่วสุวรรณ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....ค	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... ง	ง
กิตติกรรมประกาศ..... จ	จ
สารบัญ..... ฉ	ฉ
สารบัญตาราง..... ช	ช
สารบัญรูปภาพ..... ฌ	ฌ
บทที่ 1 บทนำ..... 1	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1	1
1.2 วัตถุประสงค์..... 3	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย..... 4	4
1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย..... 4	4
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ..... 5	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 6	6
2.1 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการแตกตัวของฐานรากแพขนาคใหญ่..... 6	6
2.2 คุณสมบัติทางความร้อนของคอนกรีต..... 7	7
2.3 งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง..... 10	10
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย..... 32	32
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย..... 32	32
3.2 ระบบที่ใช้วัดอุณหภูมิภายในคอนกรีต..... 34	34
3.3 การ calibrate เครื่องมือที่ใช้วัดอุณหภูมิคอนกรีต..... 37	37
3.4 การวัดอุณหภูมิฐานรากแพ..... 43	43

3.5 แบบจำลองฐานรากแพ	54
3.6 แนวคิดการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิด้วยคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ.....	57
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	59
4.1 ผลการตรวจวัดอุณหภูมิในภาคสนาม.....	59
4.2 ผลการวิเคราะห์จากแบบจำลอง	64
4.3 การปรับแก้แบบจำลองฐานรากแพ.....	84
4.4 การแทนที่คอนกรีตบางส่วนด้วยคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ	91
4.5 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่จุดวัดระหว่างฐานรากเดิมกับฐานรากที่ใส่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ..	100
4.6 การวิเคราะห์เพื่อหา crack potential ในฐานรากแพที่ใส่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ	101
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย.....	108
5.1 การเปรียบเทียบผลอุณหภูมิจากแบบจำลองและอุณหภูมิที่ตรวจวัดจริง.....	108
5.2 การเพิ่มประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิจากฐานรากแพขนาดใหญ่ด้วยคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ ..	108
บรรณานุกรม	110
ประวัติผู้เขียน	114

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-1 เกณฑ์การควบคุมแนวโน้มการเกิดรอยร้าวในคอนกรีต (Nguyen, Huynh, & Lam, 2019)	7
ตารางที่ 2-2 สรุปคุณสมบัติทางความร้อนของคอนกรีต	9
ตารางที่ 2-3 ขีดจำกัดผลต่างของอุณหภูมิใน mass concrete ที่ lowa DOT กำหนด	15
ตารางที่ 2-4 ผลต่างของอุณหภูมิที่ยอมรับได้อ้างอิงตาม code ของประเทศจีน	18
ตารางที่ 2-5 คุณสมบัติของคอนกรีตความหนาแน่นต่ำ	27
ตารางที่ 3-1 ผลการ calibrate ในน้ำเย็น	41
ตารางที่ 3-2 ผลการ calibrate ในน้ำร้อน	41
ตารางที่ 3-3 ตัวแปรที่ใช้สร้างแบบจำลองฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42) และ (F65)	55
ตารางที่ 4-1 ความคลาดเคลื่อน RMS	73
ตารางที่ 4-2 ตัวแปรที่ปรับแก้แล้วของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42)	85
ตารางที่ 4-3 ค่า RMS ที่ตำแหน่งต่างๆ ของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42)	85
ตารางที่ 4-4 ตัวแปรที่ปรับแก้แล้วของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65)	88
ตารางที่ 4-5 ค่า RMS ที่ตำแหน่งต่างๆ ของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65)	88
ตารางที่ 4-6 คุณสมบัติของคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ	92

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1-1 กลไกการเกิดรอยร้าวใน mass concrete (Nguyen & Bui, 2019).....	1
รูปที่ 1-2 รอยแตกร้าวที่ผิวข้างของคอนกรีต ซึ่งเป็นผลมาจากผลต่างอุณหภูมิของแกนกลางและผิวคอนกรีตมีค่ามาก (Gajda & Nasvik, 2017)	2
รูปที่ 1-3 รอยแตกร้าวที่เกิดจาก delay ettringite formation ซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิที่แกนกลางคอนกรีตมีค่ามาก (Godart & Divet, 2013)	2
รูปที่ 2-1 สมการอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนของ Fourier (Hongthong, Pongtornkulpanich, & Chawna, 2017)	8
รูปที่ 2-2 ตำแหน่ง 5 จุดของคอนกรีต 2 layers ในการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ	11
รูปที่ 2-3 อุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดหน้างาน	12
รูปที่ 2-4 อุณหภูมิที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม b4cast	12
รูปที่ 2-5 อุณหภูมิของแบบจำลองฐานรากแพกิ้งหั่นลมที่มีความหนา 1.65 m.	13
รูปที่ 2-6 อุณหภูมิของแบบจำลองฐานรากแพกิ้งหั่นลมที่มีความหนา 2.5 m.....	13
รูปที่ 2-7 อุณหภูมิของแบบจำลองฐานรากแพกิ้งหั่นลมที่มีความหนา 9.9 m.....	14
รูปที่ 2-8 ตำแหน่ง 7 จุดในการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ	15
รูปที่ 2-9 ผลต่างของอุณหภูมิที่ตรวจวัดหน้างาน	16
รูปที่ 2-10 การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ตรวจวัดหน้างานกับอุณหภูมิจากแบบจำลอง.....	16
รูปที่ 2-11 การวิเคราะห์ผลกระทบเมื่อเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ ด้วยโปรแกรม ConcreteWorks.....	17
รูปที่ 2-12 แบบจำลองเสาคอนกรีต	18
รูปที่ 2-13 stress และ allowable stress ที่จุดกึ่งกลาง (Node 1-10) และที่ผิวคอนกรีต (Node 11-20)	18
รูปที่ 2-14 ตำแหน่งจุด A,B,C,D.....	19

รูปที่ 2-15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา บริเวณจุดแกนกลาง(A) ของคอนกรีตที่มีความร้อนจำเพาะแตกต่างกัน.....	20
รูปที่ 2-16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา บริเวณผิวข้าง(B) ของคอนกรีตที่มีความร้อนจำเพาะแตกต่างกัน.....	20
รูปที่ 2-17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา บริเวณมุมด้านล่าง(D) ของคอนกรีตที่ติดกับดินที่มีความร้อนจำเพาะแตกต่างกัน.....	21
รูปที่ 2-18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Maximum principal tensile stress กับความจุความร้อนจำเพาะที่บริเวณจุด A,B,C,D.....	21
รูปที่ 2-19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา บริเวณจุดแกนกลาง(A) ของคอนกรีตที่มีค่าการนำความร้อนแตกต่างกัน	22
รูปที่ 2-20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา บริเวณผิวข้าง(B) ของคอนกรีตที่มีค่าการนำความร้อนแตกต่างกัน	22
รูปที่ 2-21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา บริเวณมุมด้านล่าง(D) ของคอนกรีตที่ติดกับดินที่มีค่าการนำความร้อนแตกต่างกัน.....	23
รูปที่ 2-22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Maximum principal tensile stress กับค่าการนำความร้อนที่บริเวณจุด A,B,C,D.....	23
รูปที่ 2-23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา บริเวณจุดแกนกลาง(A) ของคอนกรีตที่มีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแตกต่างกัน	24
รูปที่ 2-24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา บริเวณผิวข้าง(B) ของคอนกรีตที่มีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแตกต่างกัน	24
รูปที่ 2-25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา บริเวณมุมด้านล่าง(D) ของคอนกรีตที่ติดกับดินที่มีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแตกต่างกัน.....	25
รูปที่ 2-26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Maximum principal tensile stress กับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่บริเวณจุด A,B,C,D.....	25
รูปที่ 2-27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Maximum principal tensile stress กับค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนที่บริเวณจุด A,B,C,D	26
รูปที่ 2-28 ความหนาแน่นของคอนกรีต $w/cm = 0.45$	28

รูปที่ 2-29 ความหนาแน่นของคอนกรีต $w/cm = 0.38$	28
รูปที่ 2-30 อุณหภูมิและ stress ในคอนกรีต $w/cm = 0.45$	29
รูปที่ 2-31 อุณหภูมิและ stress ในคอนกรีต $w/cm = 0.38$	29
รูปที่ 2-32 อุณหภูมิสูงสุดของคอนกรีต เทียบกับ ความหนาแน่น	30
รูปที่ 2-33 เวลาที่ทำให้เกิดรอยร้าว เทียบกับ ความหนาแน่น	30
รูปที่ 3-1 สรุปขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	33
รูปที่ 3-2 ระบบการตรวจวัดอุณหภูมิภายในคอนกรีต	34
รูปที่ 3-3 LoRaWan Temperature Remote Sensor Node	35
รูปที่ 3-4 แผงวงจรด้านในของ LoRaWan Temperature Remote Sensor Node	35
รูปที่ 3-5 LoRaWan Ambient Sensor Node	36
รูปที่ 3-6 LoRa Gateway	36
รูปที่ 3-7 เทอร์โมมิเตอร์	37
รูปที่ 3-8 การ calibrate อุปกรณ์ในน้ำอุณหภูมิปกติ	38
รูปที่ 3-9 อุณหภูมิของน้ำในโถงและอุณหภูมิสภาพแวดล้อมภายนอก	38
รูปที่ 3-10 กราฟระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของ P1	39
รูปที่ 3-11 กราฟระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของ P2	39
รูปที่ 3-12 กราฟระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของ P3	40
รูปที่ 3-13 การ calibrate อุปกรณ์ในน้ำเย็น	40
รูปที่ 3-14 การ calibrate อุปกรณ์ในน้ำร้อน	41
รูปที่ 3-15 ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่วัดได้ของ P1	42
รูปที่ 3-16 ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่วัดได้ของ P2	42
รูปที่ 3-17 ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่วัดได้ของ P3	43
รูปที่ 3-18 ฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42) ที่หน้างานจริง (1)	44
รูปที่ 3-19 ฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42) ที่หน้างานจริง (2)	44

รูปที่ 3-20 แบบแปลนของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42).....	45
รูปที่ 3-21 ฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65) ที่หน้างานจริง (1).....	45
รูปที่ 3-22 ฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65) ที่หน้างานจริง (2).....	46
รูปที่ 3-23 แบบแปลนของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65).....	46
รูปที่ 3-24 ตำแหน่งจุดวัดอุณหภูมิ 4 จุด ของฐานรากแพที่ Siamese Rama 9 (F42)	47
รูปที่ 3-25 ระดับจุดวัดอุณหภูมิ top, middle และ bottom ของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42).....	48
รูปที่ 3-26 ตำแหน่งจุดวัดอุณหภูมิ 4 จุด ของฐานรากแพที่ Siamese Rama 9 (F65)	48
รูปที่ 3-27 ระดับจุดวัดอุณหภูมิ top, middle และ bottom ของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65).....	49
รูปที่ 3-28 การวัดและติด sensor ตามระดับ top, middle และ bottom	49
รูปที่ 3-29 การติดและคลุม Node ด้วยถุงพลาสติก	50
รูปที่ 3-30 เหล็กข้ออ้อยที่มีการติดตั้ง Node และ temperature sensor เรียบร้อยแล้ว.....	50
รูปที่ 3-31 การวาง Node ตามตำแหน่งที่กำหนดและใช้สวดมัดเหล็กข้ออ้อยกับเหล็กตะแกรงบน ..	51
รูปที่ 3-32 การติดตั้ง Ambient Node.....	51
รูปที่ 3-33 ฐานรากแพขณะเทคอนกรีต	52
รูปที่ 3-34 ฐานรากแพขณะปรับผิวคอนกรีต	52
รูปที่ 3-35 ฐานรากแพที่มีการปิดโฟมและผ้าใบ เพื่อเป็นฉนวนความร้อน.....	53
รูปที่ 3-36 การปลดฉนวนความร้อนออกจากผิวบนของฐานรากแพ.....	53
รูปที่ 3-37 ผิวบนของฐานรากแพซึ่งไม่พบรอยแตกร้าว.....	54
รูปที่ 3-38 Ambient temperature (Summer record)	55
รูปที่ 3-39 แบบจำลองฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42) วางบนพื้นดิน.....	56
รูปที่ 3-40 แบบจำลองฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65) วางบนพื้นดิน.....	56
รูปที่ 3-41 แนวคิดการใส่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จในฐานรากแพขนาดใหญ่.....	57

รูปที่ 3-42 ตัวอย่างโคมที่ใช้ผสมกับซีเมนต์เฟสค์ (วรากร อิมรักษา, 2562)	58
รูปที่ 3-43 การผสมคอนกรีตโคมความหนาแน่นต่ำมาก (วรากร อิมรักษา, 2562)	58
รูปที่ 4-1 อุณหภูมิของจุด P1 ฐานราก Siamese Rama 9 (F42)	59
รูปที่ 4-2 อุณหภูมิของจุด P2 ฐานราก Siamese Rama 9 (F42)	60
รูปที่ 4-3 อุณหภูมิของจุด P3 ฐานราก Siamese Rama 9 (F42)	60
รูปที่ 4-4 อุณหภูมิของจุด P4 ฐานราก Siamese Rama 9 (F42)	61
รูปที่ 4-5 อุณหภูมิของจุด P1 ฐานราก Siamese Rama 9 (F65)	62
รูปที่ 4-6 อุณหภูมิของจุด P2 ฐานราก Siamese Rama 9 (F65)	62
รูปที่ 4-7 อุณหภูมิของจุด P3 ฐานราก Siamese Rama 9 (F65)	63
รูปที่ 4-8 อุณหภูมิของจุด P4 ฐานราก Siamese Rama 9 (F65)	63
รูปที่ 4-9 กราฟระหว่างอุณหภูมิและเวลาจุด P1 ของฐานราก Siamese Rama 9 (F42) ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง	64
รูปที่ 4-10 กราฟระหว่างอุณหภูมิและเวลาจุด P2 ของฐานราก Siamese Rama 9 (F42) ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง	65
รูปที่ 4-11 กราฟระหว่างอุณหภูมิและเวลาจุด P3 ของฐานราก Siamese Rama 9 (F42) ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง	65
รูปที่ 4-12 กราฟระหว่างอุณหภูมิและเวลาจุด P4 ของฐานราก Siamese Rama 9 (F42) ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง	66
รูปที่ 4-13 กราฟระหว่างอุณหภูมิและเวลาจุด P1 ของฐานราก Siamese Rama 9 (F65) ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง	67
รูปที่ 4-14 กราฟระหว่างอุณหภูมิและเวลาจุด P2 ของฐานราก Siamese Rama 9 (F65) ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง	67
รูปที่ 4-15 กราฟระหว่างอุณหภูมิและเวลาจุด P3 ของฐานราก Siamese Rama 9 (F65) ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง	68
รูปที่ 4-16 กราฟระหว่างอุณหภูมิและเวลาจุด P4 ของฐานราก Siamese Rama 9 (F65) ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง	68

รูปที่ 4-17 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42) ที่จุด P1	69
รูปที่ 4-18 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42) ที่จุด P2.....	70
รูปที่ 4-19 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42) ที่จุด P3	70
รูปที่ 4-20 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42) ที่จุด P4	71
รูปที่ 4-21 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65) ที่จุด P1	71
รูปที่ 4-22 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65) ที่จุด P2	72
รูปที่ 4-23 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65) ที่จุด P3	72
รูปที่ 4-24 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65) ที่จุด P4	73
รูปที่ 4-25 กราฟ stress และ allowable tensile strength ที่จุด P1 ของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42)	75
รูปที่ 4-26 กราฟ stress และ allowable tensile strength ที่จุด P2 ของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42)	75
รูปที่ 4-27 กราฟ stress และ allowable tensile strength ที่จุด P3 ของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42)	76
รูปที่ 4-28 กราฟ stress และ allowable tensile strength ที่จุด P4 ของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42)	76
รูปที่ 4-29 กราฟ stress และ allowable tensile strength ที่จุด P1 ของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65)	77
รูปที่ 4-30 กราฟ stress และ allowable tensile strength ที่จุด P2 ของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65)	78
รูปที่ 4-31 กราฟ stress และ allowable tensile strength ที่จุด P3 ของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65)	78
รูปที่ 4-32 กราฟ stress และ allowable tensile strength ที่จุด P4 ของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65)	79
รูปที่ 4-33 crack potential ที่จุด P1 ของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42).....	80
รูปที่ 4-34 crack potential ที่จุด P2 ของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42).....	80

รูปที่ 4-35 crack potential ที่จุด P3 ของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42).....	81
รูปที่ 4-36 crack potential ที่จุด P4 ของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42).....	81
รูปที่ 4-37 crack potential ที่จุด P1 ของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65).....	82
รูปที่ 4-38 crack potential ที่จุด P2 ของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65).....	82
รูปที่ 4-39 crack potential ที่จุด P3 ของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65).....	83
รูปที่ 4-40 crack potential ที่จุด P4 ของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65).....	83
รูปที่ 4-41 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิจุด P1 ของแบบจำลองฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42) ที่ปรับแก้แล้วกับอุณหภูมิที่ตรวจวัดจริง.....	86
รูปที่ 4-42 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิจุด P2 ของแบบจำลองฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42) ที่ปรับแก้แล้วกับอุณหภูมิที่ตรวจวัดจริง.....	86
รูปที่ 4-43 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิจุด P3 ของแบบจำลองฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42) ที่ปรับแก้แล้วกับอุณหภูมิที่ตรวจวัดจริง.....	87
รูปที่ 4-44 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิจุด P4 ของแบบจำลองฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42) ที่ปรับแก้แล้วกับอุณหภูมิที่ตรวจวัดจริง.....	87
รูปที่ 4-45 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิจุด P1 ของแบบจำลองฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65) ที่ปรับแก้แล้วกับอุณหภูมิที่ตรวจวัดจริง.....	89
รูปที่ 4-46 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิจุด P2 ของแบบจำลองฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65) ที่ปรับแก้แล้วกับอุณหภูมิที่ตรวจวัดจริง.....	89
รูปที่ 4-47 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิจุด P3 ของแบบจำลองฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65) ที่ปรับแก้แล้วกับอุณหภูมิที่ตรวจวัดจริง.....	90
รูปที่ 4-48 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิจุด P4 ของแบบจำลองฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65) ที่ปรับแก้แล้วกับอุณหภูมิที่ตรวจวัดจริง.....	90
รูปที่ 4-49 การกระจายตัวของคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จในฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42).....	92
รูปที่ 4-50 ตำแหน่งของคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จในฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42) เทียบกับเสาเข็ม เมื่อมองจาก Top view.....	93

รูปที่ 4-51 ตำแหน่งของคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จในฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42) เทียบกับ ต่อม่อของเสาและผนังรับแรงเฉือน เมื่อมองจาก Top view	93
รูปที่ 4-52 กราฟแสดงค่า stress สูงสุดที่ Top layer เทียบกับปริมาณคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ ฐาน รากแพ Siamese Rama 9 (F42).....	94
รูปที่ 4-53 กราฟระหว่างค่า stress ที่เพิ่มขึ้นของ Top layer คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับ stress ของ ฐานรากที่ไม่มีคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ และปริมาณคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ ฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42)	94
รูปที่ 4-54 กราฟแสดงค่า stress สูงสุดที่ Bottom layer เทียบกับปริมาณคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ ฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42)	95
รูปที่ 4-55 กราฟระหว่างค่า stress ที่เพิ่มขึ้นของ Bottom layer คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับ stress ของฐานรากที่ไม่มีคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ และปริมาณคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ ฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42)	95
รูปที่ 4-56 การกระจายตัวของคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จในฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65).....	96
รูปที่ 4-57 ตำแหน่งของคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จในฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65) เทียบกับ เสาเข็ม เมื่อมองจาก Top view.....	97
รูปที่ 4-58 ตำแหน่งของคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จในฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65) เทียบกับ ต่อม่อของเสาและผนังรับแรงเฉือน เมื่อมองจาก Top view	97
รูปที่ 4-59 กราฟแสดงค่า stress สูงสุดที่ Top layer เทียบกับปริมาณคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ ฐาน รากแพ Siamese Rama 9 (F65).....	98
รูปที่ 4-60 กราฟระหว่างค่า stress ที่เพิ่มขึ้นของ Top layer คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับ stress ของ ฐานรากที่ไม่มีคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ และปริมาณคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ ฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65)	98
รูปที่ 4-61 กราฟแสดงค่า stress สูงสุดที่ Bottom layer เทียบกับปริมาณคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ ฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65)	99
รูปที่ 4-62 กราฟระหว่างค่า stress ที่เพิ่มขึ้นของ Bottom layer คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับ stress ของฐานรากที่ไม่มีคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ และปริมาณคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ ฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65)	99

รูปที่ 4-63 กราฟระหว่างอุณหภูมิกับเวลาฐานราก Siamese Rama 9 (F42) ที่ไม่มีการใส่คอนกรีต เบาหล่อสำเร็จเทียบกับใส่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ 12.34% และ 19.10%	100
รูปที่ 4-64 กราฟระหว่างอุณหภูมิกับเวลาฐานราก Siamese Rama 9 (F65) ที่ไม่มีการใส่คอนกรีต เบาหล่อสำเร็จเทียบกับใส่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ 12.62% และ 20.52%	101
รูปที่ 4-65 การแบ่งพื้นที่ 10 zone ของฐานราก Siamese Rama 9 (F42).....	102
รูปที่ 4-66 Crack potential ที่น้อยที่สุดในแต่ละพื้นที่ของชั้นบนฐานราก Siamese Rama 9 (F42) เมื่อแทนที่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จในปริมาณที่แตกต่างกัน	103
รูปที่ 4-67 Crack potential ที่น้อยที่สุดในแต่ละพื้นที่ของชั้นล่างฐานราก Siamese Rama 9 (F42) เมื่อแทนที่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จในปริมาณที่แตกต่างกัน	103
รูปที่ 4-68 กราฟเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ที่มีค่า crack potential น้อยกว่า 2 ในชั้นบนกับปริมาณ คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ ฐานราก Siamese Rama 9 (F42).....	104
รูปที่ 4-69 การแบ่งพื้นที่ 10 zone ของฐานราก Siamese Rama 9 (F65).....	105
รูปที่ 4-70 Crack potential ที่น้อยที่สุดในแต่ละพื้นที่ของชั้นบนฐานราก Siamese Rama 9 (F65) เมื่อแทนที่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จในปริมาณที่แตกต่างกัน	105
รูปที่ 4-71 Crack potential ที่น้อยที่สุดในแต่ละพื้นที่ของชั้นล่างฐานราก Siamese Rama 9 (F65) เมื่อแทนที่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จในปริมาณที่แตกต่างกัน	106
รูปที่ 4-72 กราฟเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ที่มีค่า crack potential น้อยกว่า 2 กับปริมาณคอนกรีตเบา หล่อสำเร็จ ฐานราก Siamese Rama 9 (F65).....	107

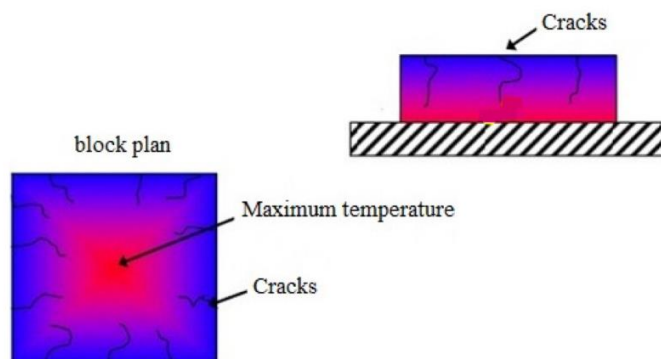
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการสร้างอาคารสูงสามารถพบเห็นได้มากขึ้น เนื่องจากความต้องการพื้นที่ใช้สอยที่มากขึ้น ซึ่งฐานรากของอาคารสูงมีความสำคัญอย่างมากต่อความมั่นคงแข็งแรงของอาคาร โดยทั่วไปฐานรากของอาคารสูงจะใช้ฐานรากแพเป็นหลักเพื่อรองรับเสาเข็มขนาดใหญ่จำนวนมาก ซึ่งการออกแบบและก่อสร้างจำเป็นต้องทำอย่างละเอียดรอบคอบ เพื่อความปลอดภัยของอาคาร

Mass concrete ตามนิยามของ ACI (2005) คือคอนกรีตที่มีขนาดใหญ่ มีปริมาตรมาก จำเป็นต้องมีการพิจารณา heat hydration of cement และปริมาตรที่เปลี่ยนแปลง เพื่อป้องกันการเกิดรอยร้าวในคอนกรีต ดังนั้นฐานรากแพส่วนใหญ่จึงจัดเป็น mass concrete เนื่องจากการก่อสร้างฐานรากแพ จำเป็นต้องใช้คอนกรีตในปริมาณมากและต้องมีการเทอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่เทคอนกรีต จะเกิดความร้อนจากปฏิกิริยา hydration ของซีเมนต์ ทำให้อุณหภูมิภายในฐานรากแพสูงขึ้น บริเวณผิวของคอนกรีตสามารถถ่ายเทความร้อนไปยังสิ่งแวดล้อมภายนอกได้ดีกว่าแกนกลาง ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่แกนกลางและผิวคอนกรีต โดยเมื่ออุณหภูมิที่ผิวของคอนกรีตลดลงทำให้เกิดการหดตัวของคอนกรีต ส่วนแกนกลางของคอนกรีตจะเป็นคอนกรีตที่พัฒนาสมบูรณ์เต็มที่กว่าผิว ซึ่งจะประพุดิตัวเป็นสิ่งจำกัดต่อการหดตัวส่งผลให้เกิดเป็น tensile stress ที่ผิวของคอนกรีต เนื่องจากคอนกรีตยังอยู่ในช่วงแรก ทำให้ tensile strength ยังพัฒนาไม่เต็มที่ และหาก tensile stress ที่เกิดขึ้นมีค่าสูงกว่า tensile strength จะทำให้เกิด thermal crack ขึ้น ซึ่งรอยร้าวเหล่านี้ เป็นสิ่งที่ยอมรับไม่ได้ เนื่องจากฐานรากแพนั้นอยู่ใต้ดิน มีความชื้นที่อาจส่งผลเสียต่อความทนทานของฐานราก ทำให้เป็นอันตรายต่อโครงสร้างของอาคาร (Do, 2013)



รูปที่ 1-1 กลไกการเกิดรอยร้าวใน mass concrete (Nguyen & Bui, 2019)



รูปที่ 1-2 รอยแตกร้าวที่ผิวข้างของคอนกรีต ซึ่งเป็นผลมาจากผลต่างอุณหภูมิของแกนกลางและผิวคอนกรีตมีค่ามาก (Gajda & Nasvik, 2017)



รูปที่ 1-3 รอยแตกร้าวที่เกิดจาก delay ettringite formation ซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิที่แกนกลางคอนกรีตมีค่ามาก (Godart & Divet, 2013)

Florida Department of Transportation Standard Specification for Road and Bridge Construction (FDOT, 2010) ได้กำหนดมาตรฐานเพื่อป้องกันปัญหาการรอยร้าวใน mass concrete คืออุณหภูมิภายในคอนกรีตสูงสุดไม่เกิน 82 °C และความแตกต่างอุณหภูมิของแกนกลางและผิวของคอนกรีตไม่เกิน 20 °C

วิธีการลดผลต่างของอุณหภูมิภายใน mass concrete เพื่อป้องกันรอยร้าว มีหลากหลายวิธี ทั้งช่วงก่อนเทและหลังเทคอนกรีต เช่น การใช้คอนกรีตความร้อนต่ำ (Low heat concrete) , Pre cooling or Post cooling concrete , การแบ่งเทคอนกรีตเป็นหลายชั้น , การปิดฉนวนความร้อนที่ผิวบนของคอนกรีต ซึ่งวัสดุที่นิยมใช้คือ polystyrene foam เนื่องจากสามารถหาได้ง่าย ราคาถูก และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยฉนวนความร้อนเหล่านี้จะถูกวางที่ผิวบนของคอนกรีต ป้องกันความร้อนถ่ายเทสู่อากาศภายนอก ส่วนที่ผิวล่างของคอนกรีตซึ่งอยู่บนดิน เราจะมองว่าดินทำหน้าที่เป็นฉนวนความร้อนแล้ว จึงไม่จำเป็นต้องปิดฉนวนความร้อน

งานวิจัยนี้ จะใช้ 3D model finite element ในการวิเคราะห์เพื่อทำนายอุณหภูมิ , stress ที่เกิดขึ้นในฐานรากแพ และเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่วัดได้จากหน้างาน โดยการวิเคราะห์นี้ จะเป็นประโยชน์กับผู้ก่อสร้างคือช่วยให้ทราบและสามารถวางแผนล่วงหน้าเพื่อควบคุมผลต่างของอุณหภูมิ และป้องกันการเกิดรอยร้าวได้ นอกจากนี้ผู้วิจัยยังเสนอแนวทางแก้ไขปัญหาเพิ่มเติม คือการใส่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จในฐานรากแพและวิเคราะห์หาอุณหภูมิ, stress ด้วยแบบจำลอง 3D finite element ซึ่งผู้วิจัยคาดว่าจะสามารถลดอุณหภูมิภายในแกนกลางและลดผลต่างอุณหภูมิระหว่างแกนกลางกับผิวคอนกรีต นอกจากนั้นข้อดีของวิธีนี้คือปริมาณคอนกรีตที่ใช้จะน้อยลง ทำให้วางแผนการทำงานได้สะดวกขึ้นและประหยัดมากขึ้น เนื่องจากคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จมีราคาถูกกว่า Low heat concrete ที่ใช้เทฐานรากแพ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย CHULALONGKORN UNIVERSITY

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาพฤติกรรมเชิงอุณหภูมิและหน่วยแรงของฐานรากแพขนาดใหญ่ ด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ชนิด 3D finite element
2. ศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจริงในการก่อสร้างฐานรากแพขนาดใหญ่ โดยการตรวจวัดค่าอุณหภูมิต่อเนื่องระยะยาวในสภาพก่อสร้างจริง
3. ศึกษาเปรียบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองคอมพิวเตอร์กับผลการตรวจวัดจริงจากภาคสนาม
4. ศึกษาพฤติกรรมและประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิและหน่วยแรงของฐานรากแพขนาดใหญ่ที่ปรับปรุงด้วยคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาปัจจัยที่มีผลกับอุณหภูมิภายในฐานรากแพ อันได้แก่ ความหนาของฐานราก ชนิดคอนกรีตแบบอุณหภูมิต่ำ การบ่มด้วยแผ่นโฟม อุณหภูมิของอากาศ
2. ไม่พิจารณาผลของระยะเวลาที่ใช้ในการเทคอนกรีต
3. ไม่พิจารณาผลของการหลุดตัวหรือเคลื่อนตัวของแบบหรือฐานรองรับ
4. ศึกษาประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิของก้อนคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จที่มีความหนาแน่น 200-300 kg/m³

1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของ mass concrete ในประเด็นเกี่ยวกับ hydration heat และ thermal stress รวมถึงปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิของ mass concrete
2. ศึกษาการสร้างแบบจำลองฐานรากแพโดยใช้วิธี 3D finite element ซึ่งผู้วิจัยใช้โปรแกรม Midas Civil
3. สร้างแบบจำลองฐานรากแพ เพื่อวิเคราะห์หาอุณหภูมิ, stress, crack potential ที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งและเวลาต่างๆ ระบุตำแหน่งที่มีแนวโน้มเกิดรอยร้าวเนื่องจากความร้อน
4. ติดตั้งอุปกรณ์เพื่อวัดอุณหภูมิของฐานรากแพ ตามจุดที่มีแนวโน้มเกิดรอยร้าว เปรียบเทียบข้อมูลที่วัดได้กับแบบจำลอง
5. จัดทำโครงร่างวิทยานิพนธ์
6. ปรับ parameter ต่างๆที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้แบบจำลองมีความใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่วัดได้จากหน้างาน
7. ทดลองแทนที่คอนกรีตฐานรากแพบางส่วนด้วยคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จในแบบจำลอง และวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้น
8. สรุปผลการวิจัยและจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ทราบถึงพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงและการกระจายอุณหภูมิในฐานรากแพคอนกรีตขนาดใหญ่จากผลการตรวจวัดในสภาพการก่อสร้างจริง
2. ทราบถึงวิธีการสร้างแบบจำลองฐานรากแพขนาดใหญ่ เพื่อให้ได้พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและการกระจายอุณหภูมิที่สอดคล้องความเป็นจริง
3. ทราบถึงประสิทธิภาพในการลดอุณหภูมิสูงสุดและผลต่างอุณหภูมิในฐานรากแพขนาดใหญ่ หากแทนที่แกนภายในด้วยคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ



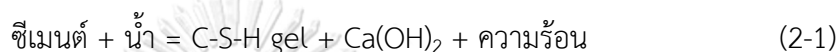
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการแตกร้าวของฐานรากแพขนาคใหญ่

1. Hydration of cement

คือปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ได้ผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นของเหลวหนืด เรียกว่า เพสต์ ซึ่งจะทำหน้าที่ประสานมวลรวมเข้าด้วยกัน เกิดเป็นคอนกรีต โดยปฏิกิริยาเคมีนี้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน เราสามารถเขียนสมการอย่างง่ายได้ดังสมการที่ 2-1



C-S-H gel = Calcium Silicate Hydrate ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ให้งำล้งกับคอนกรีต

2. Strength development

คือค่ากำลังรับแรงของคอนกรีตสดที่พัฒนาเพิ่มขึ้นตามเวลา โดยค่ากำลังของ Low heat concrete จะช้ากว่าคอนกรีตปกติ โดย ACI ได้มีการกำหนดสัมประสิทธิ์ a และ b เพื่อใช้บ่งบอกอัตราการพัฒนากำลังของคอนกรีต สมการของ (ACI, 1997) เพื่อทำนาย compressive strength ของคอนกรีตที่เวลาต่างๆ แสดงในสมการที่ 2-2

$$f_c'(t) = \frac{t}{a+bt} (f_c')_{28} \quad (2-2)$$

โดยที่ a, b = concrete strength development coefficient

$(f_c')_{28}$ = 28-day compressive strength

t = age of concrete (days)

3. Crack potential

คือค่าอัตราส่วนของ tensile strength ทหารด้วย tensile stress แสดงในสมการที่ 2-3 ซึ่งการที่คอนกรีตเกิดรอยร้าว เกิดจาก tensile stress ที่เกิดขึ้นจากความแตกต่างของอุณหภูมิภายในคอนกรีต มีค่ามากกว่า tensile strength ของคอนกรีต มักพบได้ในช่วงแรกของคอนกรีต เพราะ tensile strength ของคอนกรีตในช่วงแรกจะยังมีค่าน้อย เนื่องจากกำลังยังพัฒนาได้ไม่เต็มที่ เกณฑ์

ในการควบคุมรอยร้าว โดยพิจารณาค่า crack potential ซึ่งมาจากประสบการณ์ในอดีตแสดงในตารางที่ 2-1

$$\text{Crack potential } (I_{cr}) = f_{sp}(t) / f_t(t) \quad (2-3)$$

โดยที่ $f_{sp}(t)$ = tensile strength of concrete at day t

$f_t(t)$ = maximum thermal stress at day t

ตารางที่ 2-1 เกณฑ์การควบคุมแนวโน้มการเกิดรอยร้าวในคอนกรีต (Nguyen, Huynh, & Lam, 2019)

เกณฑ์การควบคุมรอยร้าว	Crack potential (I_{cr})
ป้องกันการเกิดรอยร้าว	$I_{cr} \geq 1.5$
จำกัดการเกิดรอยร้าว	$1.2 \leq I_{cr} \leq 1.5$
จำกัดการเกิดรอยร้าวที่อันตราย	$0.7 \leq I_{cr} \leq 1.2$

2.2 คุณสมบัติทางความร้อนของคอนกรีต

1. Specific heat (ความร้อนจำเพาะ) คือ ปริมาณความร้อนที่ทำให้วัสดุมวล 1 กิโลกรัม มีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป 1 องศา ซึ่งปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความร้อนจำเพาะของคอนกรีตคือความพรุน, water content, ปริมาณและคุณสมบัติของมวลรวม

2. Thermal conductivity (ค่าการนำความร้อน) คือ อัตราการส่งผ่านพลังงานความร้อน ด้วยวิธีการนำความร้อน ซึ่งเป็นการส่งผ่านพลังงานความร้อนภายในโมเลกุลของวัสดุที่มีพลังงานความร้อนแตกต่างกัน จากบริเวณที่มีความร้อนมากไปยังบริเวณที่มีความร้อนน้อยกว่า อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยการนำความร้อนสามารถแสดงด้วยสมการของ Fourier ดังรูปที่ 2-1

$$Q = -kA \frac{dT}{dx}$$

where Q = Heat transfer rate, w
 k = Thermal Conductivity, w/m°C
 A = Area, m²
 $\frac{dT}{dx}$ = Temperature gradient, °C/m

รูปที่ 2-1 สมการอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนของ Fourier (Hongthong, Pongtornkulpanich, & Chawna, 2017)

3. Convection coefficient (สัมประสิทธิ์การพาความร้อน) คือ ค่าที่บอกระดับการแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนผ่านอากาศภายนอก ด้วยวิธีการพาความร้อน ซึ่งจะเกิดบริเวณผิวของคอนกรีตที่สัมผัสกับอากาศ ปัจจัยที่ส่งผลต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อนคือความเร็วลม อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยการพาความร้อนมีสมการ (Y. Lee, Choi, Yi, & Kim, 2009) ดังแสดงในสมการที่ 2-4

$$Q = h_a(T_s - T_\infty) \quad (2-4)$$

โดยที่ q = heat transfer due to convection in W/m²

h_a = convective heat transfer coefficient

T_s = temperature at the specimen surface

T_∞ = temperature of ambient air

4. Thermal expansion coefficient (สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน) คือ ค่าความแตกต่างของปริมาตรคอนกรีตที่เปลี่ยนแปลง เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยน 1 °C เทียบกับปริมาตรเริ่มต้น ซึ่งค่านี้จะไม่กระทบโดยตรงกับการถ่ายเทความร้อนในคอนกรีต แต่มีผลกับ thermal stress ที่เกิดขึ้น

5. Adiabatic temperature rising equation คือ สมการที่ใช้ทำนายการเปลี่ยนแปลงของ heat of hydration ที่ระยะเวลาต่างๆ โดยคำว่า adiabatic หมายถึงระบบไม่มีการสูญเสียหรือได้รับความร้อนจากสภาพแวดล้อม สมการนี้ถูกพัฒนาและนำเสนอโดย (T-a Tanabe, 1985) มีสมการดังแสดงในสมการที่ 2-5

$$T(t) = K(1 - e^{-\alpha t}) \quad (2-5)$$

โดย T = อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)

t = เวลา (วัน)

K = ขนาดของ adiabatic temperature rising ในตอนสุดท้าย

α = อัตราเร็วในการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ

ค่า K และ α เป็นค่าคงที่ โดยผู้วิจัยจะใช้แทนด้วยคำว่า heat source function coefficients ซึ่งขึ้นกับปริมาณซีเมนต์, fly ash และ casting temperature ตัวอย่างเช่น ในงานวิจัยของ (Jin Keun Kim & Cha, 2013) เสนอใช้ค่า $K=30.1$ และ $a=0.477$ สำหรับคอนกรีตความร้อนต่ำ เป็นต้น

ตารางที่ 2-2 สรุปคุณสมบัติทางความร้อนของคอนกรีต

Concrete thermal parameter	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]
1. Specific heat (kcal/kg $^{\circ}\text{C}$)	0.25	0.27-0.31	0.241	0.227	0.2008	0.227	0.208
2. Rate of heat conduction (kcal/m hr $^{\circ}\text{C}$)	2.3	2.15-2.51	2.230	2.28	2.495	2.28	2.034
3. convection coefficient (kcal/m ² hr $^{\circ}\text{C}$)	12	12-14	-	10.325	12	10.325	-
4. Thermal expansion coefficient ($^{\circ}\text{C}$)	1.00E-05	-	-	1.00E-05	1.00E-05	1.00E-05	7.00E-06
5. Heat source coefficients	$K=30.1$ $a=0.477$	-	$K=47.9$ $a=0.78$	-	$K=59.6$ $a=1.113$	-	-

โดยที่ [1] = (Jin Keun Kim & Cha, 2013)

[2] = (M. Lee, Chae, Khil, & Yun, 2014)

[3] = (Liu, Cao, Yan, Ye, & Jia, 2016)

[4] = (Aniskin & Nguyen, 2019)

[5] = (Nguyen & Luu, 2019)

[6] = (Nguyen et al., 2019)

[7] = (CONTEC SIIT 2021)

2.3 งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง

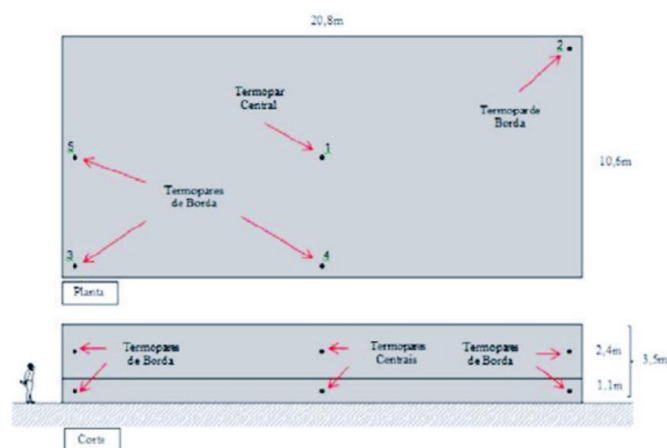
2.3.1 การวิเคราะห์ฐานรากแพแข็งอุณหภูมิด้วยแบบจำลอง

1) Choktaweekarn & Tangtermsirikul (2010) ได้ศึกษาเกี่ยวกับอุณหภูมิและ restrained strain ใน mass concrete โดยเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ ได้แก่ aggregate type, thickness, casting method และ curing condition ด้วยการวิเคราะห์โมเดล finite element ผลที่ได้มีดังนี้

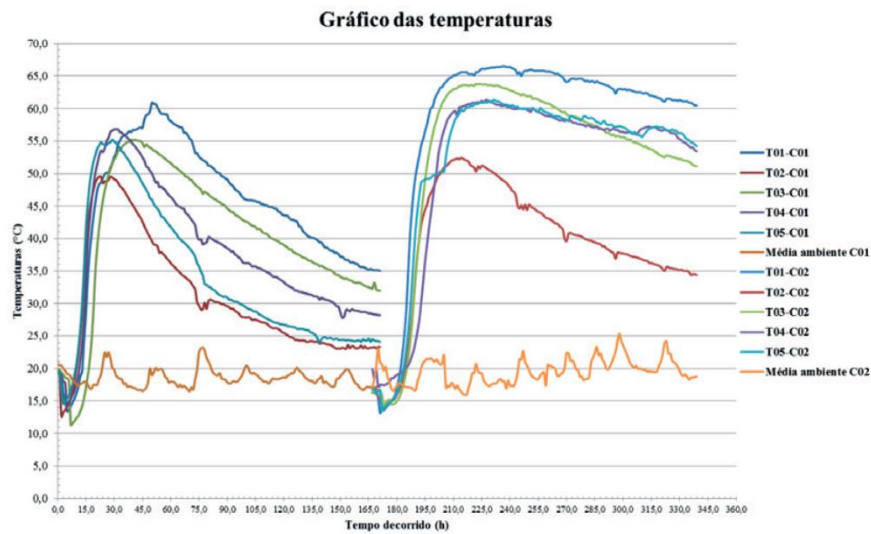
1. Aggregate type พบว่า Quartzite ซึ่งมีค่าการนำความร้อนและสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนมากกว่าหินปูน ส่งผลให้ในช่วง cool down อุณหภูมิของคอนกรีตที่มี quartzite เป็น aggregate มีค่าลดลงเร็วกว่าคอนกรีตที่มีหินปูนเป็น aggregate และ restrained strain มากกว่า ซึ่งหมายถึงมีโอกาสเกิด thermal crack มากกว่า ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าหินปูนมีความเหมาะสมมากกว่า quartzite
2. Thickness พบว่าเมื่อความหนาของ mass concrete มากขึ้น จะทำให้อุณหภูมิที่แกนกลางสูงมากขึ้นและช่วงเวลาที่อุณหภูมิสูงยาวนานขึ้น ดังนั้นผลต่างของอุณหภูมิแกนกลางและที่ผิวจะมากขึ้น ส่งผลให้ restrained strain มากขึ้น
3. Casting method พบว่าอุณหภูมิของ mass concrete ขึ้นกับความหนาของคอนกรีตที่เทในแต่ละชั้นและไม่ขึ้นกับความกว้างหรือความยาวของบล็อกคอนกรีตที่แบ่งเท โดยการแบ่งเทคอนกรีตเป็นหลายชั้นจะทำให้อุณหภูมิต่ำลง อย่างไรก็ตามบริเวณรอยต่อควรมีความระมัดระวังในเรื่องของการถ่ายแรงจากชั้นบนสู่ชั้นล่างและขณะที่คอนกรีตชั้นบนกำลังเกิดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ คอนกรีตชั้นล่างที่เย็นตัวแล้วจะถูกคอนกรีตชั้นบนดึง ทำให้เกิด restrained strain อย่างรวดเร็วที่ผิวรอยต่อของคอนกรีตชั้นล่าง

4. Curing condition พบว่าการใช้ฉนวนความร้อนปิดที่ผิวของ mass concrete จะช่วยทำให้ผลต่างของอุณหภูมิที่แกนกลางและผิวมีค่าน้อยลง ทำให้ restrained strain น้อยลงและลดโอกาสเกิด thermal crack นอกจากนี้การปิดฉนวนความร้อนควรมีช่วงเวลาที่เหมาะสม ไม่ถอดออกเร็วจนเกินไปซึ่งจะทำให้อุณหภูมิที่ผิวลดลงอย่างรวดเร็วและผลต่างของอุณหภูมิจะมากขึ้นเกินค่าที่ยอมรับได้ ดังนั้นจึงต้องมีการวางแผนและตรวจวัดอุณหภูมิใน mass concrete อย่างต่อเนื่อง เพื่อเฝ้าระวังป้องกันการเกิด thermal crack

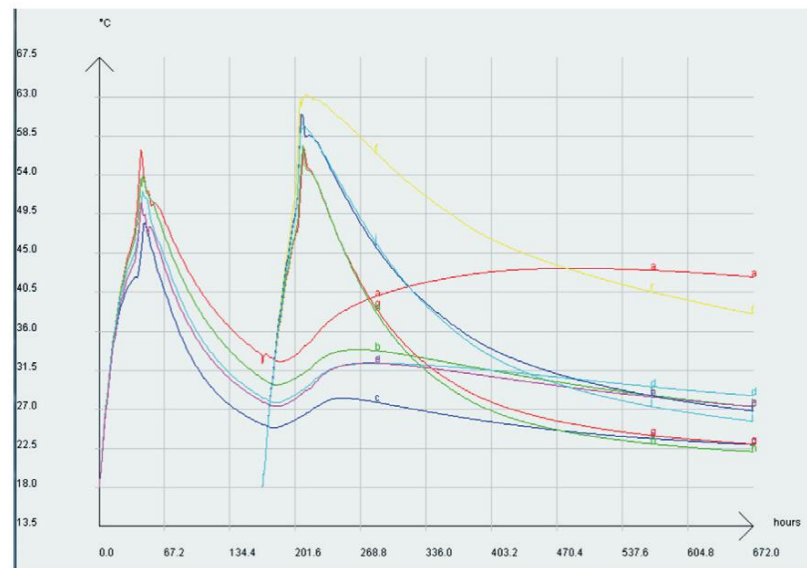
2) Couto, Helene, & Almeida (2016) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการวัดอุณหภูมิฐานรากแผ่ของศูนย์การค้าแห่งหนึ่งในประเทศบราซิล ซึ่งมีขนาด 20.8 m. x 10.6 m. ลึก 3.5 m. (ปริมาตรประมาณ 800 m³) และใช้โปรแกรม b4cast ในการวิเคราะห์หาอุณหภูมิเพื่อเปรียบเทียบกับที่ตรวจวัดจากหน้างานจริง การก่อสร้างจะแบ่งฐานราก 2 layers โดยใน layer แรกหนา 1 m. และ layer ที่สองหนา 2.5 m. เว้นระยะในการเทของแต่ละ layer เท่ากับ 7 วัน ภายในฐานรากจะมีการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ 5 ตำแหน่งดังรูปที่ 2-2 พบว่าอุณหภูมิเป็นไปตามรูปที่ 2-3 และผลอุณหภูมิที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์แสดงในรูปที่ 2-4 ซึ่งจะเห็นได้ว่าแบบจำลองสามารถทำนายค่าของอุณหภูมิได้ค่อนข้างดี โดยที่อุณหภูมิสูงที่สุดที่แบบจำลองทำนายคือ 67.5 °C ที่เวลา 215 ชั่วโมงหลังจากการเทคอนกรีต และอุณหภูมิสูงสุดที่ตรวจวัดจากหน้างานเท่ากับ 66.5 °C ที่เวลา 237 ชั่วโมงหลังจากการเทคอนกรีต ซึ่งถือว่ามีค่าใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามเนื่องจากอุณหภูมิสูงสุดอยู่ในช่วงประมาณ 65 – 70 °C ดังนั้นทำให้มีโอกาสที่ฐานรากจะเกิดรอยร้าวจากปฏิกิริยา Delayed Ettringite Formation ซึ่งจะส่งผลเสียต่อความทนทานของฐานราก



รูปที่ 2-2 ตำแหน่ง 5 จุดของคอนกรีต 2 layers ในการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ



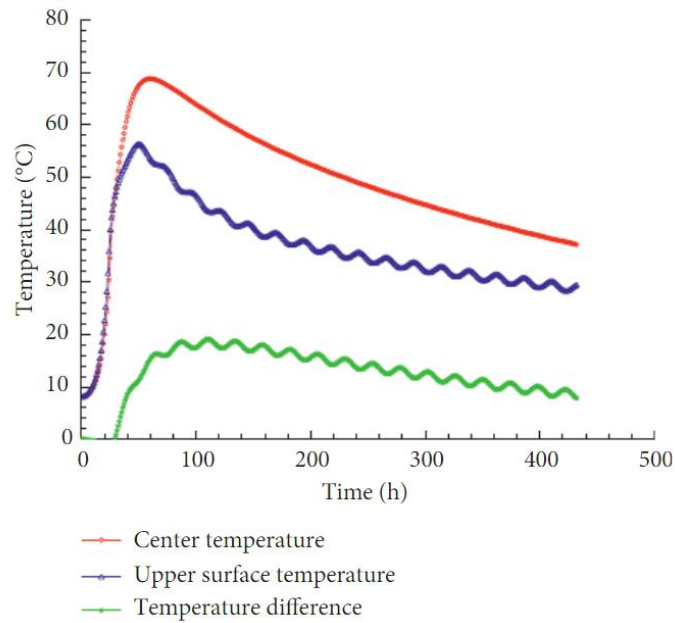
รูปที่ 2-3 อุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดหน้างาน



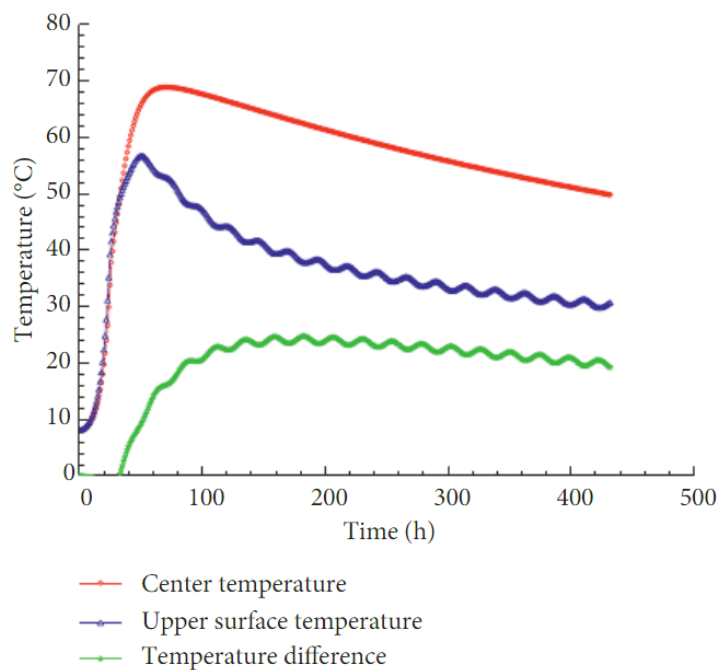
รูปที่ 2-4 อุณหภูมิที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม b4cast

3) Ju & Lei (2019) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการวัดอุณหภูมิฐานรากของกังหันลมในประเทศจีนที่มีความหนา 3.3 m. โดยไม่มีการควบคุมอุณหภูมิ พบว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือ heat accumulation และ heat release ซึ่งผลต่างของอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 35 °C ดังนั้นฐานรากจึงมีโอกาสการเกิดรอยร้าว หลังจากนั้นจึงมีการสร้างแบบจำลองด้วยวิธี finite element ที่มีความหนาแตกต่างกัน และพบว่าฐานรากที่มีความหนามากกว่าจะทำให้เกิดผลต่างของอุณหภูมิในแนวตั้งที่มากกว่า (แสดงในรูปที่ 2-5 ถึง 2-7) นอกจากนี้ยังพบว่าฐานรากแพทที่มีความ

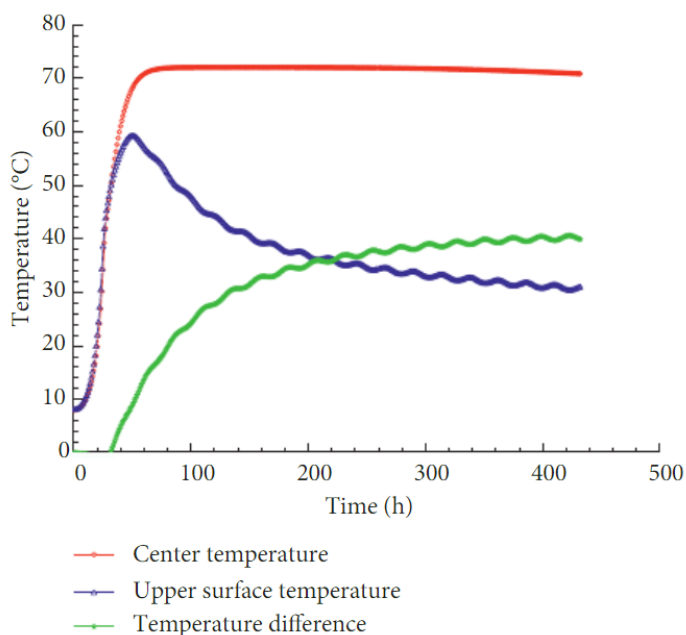
หนามากกว่า 2.5 m. จะทำให้ผลต่างของอุณหภูมิมากกว่า 25 °C ซึ่งมีแนวโน้มที่จะทำให้ฐานรากเกิดรอยร้าว ดังนั้นฐานรากของกึ่งหั่นลมฐานอื่นจึงควรมีการควบคุมอุณหภูมิด้วยวิธีการต่างๆ เช่น การแบ่งเทคอนกรีตเป็นหลายชั้น หรือ การใช้ฉนวนความร้อนคลุมผิวของคอนกรีต เพื่อป้องกันการเกิดรอยร้าวเนื่องจากอุณหภูมิ



รูปที่ 2-5 อุณหภูมิของแบบจำลองฐานรากแพกึ่งหั่นลมที่มีความหนา 1.65 m.



รูปที่ 2-6 อุณหภูมิของแบบจำลองฐานรากแพกึ่งหั่นลมที่มีความหนา 2.5 m.



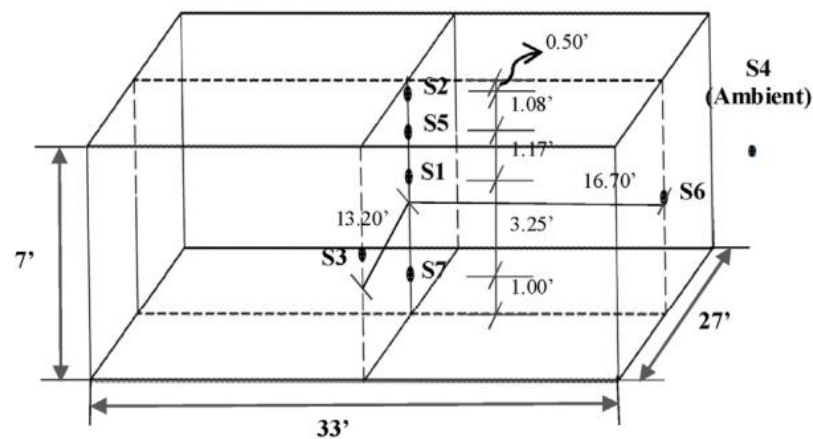
รูปที่ 2-7 อุณหภูมิของแบบจำลองฐานรากแพกิ้งหั่นลมที่มีความหนา 9.9 m.

4) Sargam et al. (2019) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการวัดอุณหภูมิฐานรากของสะพานในประเทศสหรัฐอเมริกา ขนาด 10.06 m. x 8.23 m. x 2.13 m. โดยมีการใช้ฉนวนความร้อนคลุมที่ผิวของฐานรากเป็นเวลา 10 วัน และใช้โปรแกรม ConcreteWorks เพื่อทำนายการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในฐานรากและเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ตรวจวัดจากหน้างานจริง โดยจุดที่วัดอุณหภูมิมี่ 7 จุดแสดงในรูปที่ 2-8 มาตรฐานที่ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิคือ Iowa DOT specification ซึ่งกำหนดให้อุณหภูมิเริ่มต้นของคอนกรีตอยู่ระหว่าง 5 – 21 °C อุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน 71 °C และผลต่างของอุณหภูมิมี่ขีดจำกัดดังแสดงในตารางที่ 2-3 ผลที่ได้จากการวัดอุณหภูมิที่หน้างานคืออุณหภูมิเริ่มต้นของคอนกรีตเท่ากับ 19 °C และอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 65 °C ซึ่งถือว่าผ่านตามมาตรฐานกำหนด ในส่วนของผลต่างอุณหภูมิแสดงในรูปที่ 2-9 เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ตรวจวัดหน้างานกับอุณหภูมิจากแบบจำลองพบว่าได้ผลดังรูปที่ 2-10 หลังจากนั้นจึงมีการวิเคราะห์ผลกระทบเมื่อเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ ด้วยโปรแกรม ConcreteWorks ซึ่งแบ่งตัวแปรออกเป็น 3 หมวด (แสดงในรูปที่ 2-11) คือ

1. Mix proportion พบว่าการเพิ่มปริมาณซีเมนต์จะทำให้อุณหภูมิสูงสุดและผลต่างของอุณหภูมิสูงขึ้น แต่การเพิ่ม fly ash หรือ silica fume จะช่วยลดอุณหภูมิสูงสุดและผลต่างของอุณหภูมิได้

2. Material properties พบว่าอุณหภูมิสูงสุดและผลต่างอุณหภูมิของซีเมนต์ประเภทที่ 1 มากกว่าประเภทที่ 2 นอกจากนี้เมื่อเพิ่มค่าการนำความร้อนของคอนกรีตและความจุความร้อนจำเพาะของมวลรวม จะช่วยลดอุณหภูมิสูงสุดและผลต่างของอุณหภูมิได้

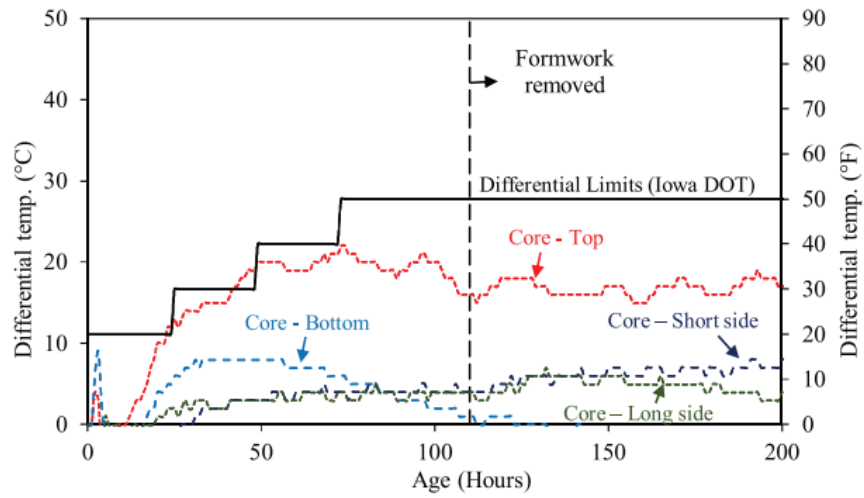
3. Construction parameters พบว่าอุณหภูมิเริ่มต้นของคอนกรีตและชนิดของ subbase ส่งผลกระทบอย่างเห็นได้ชัดกับอุณหภูมิสูงสุดและผลต่างของอุณหภูมิ



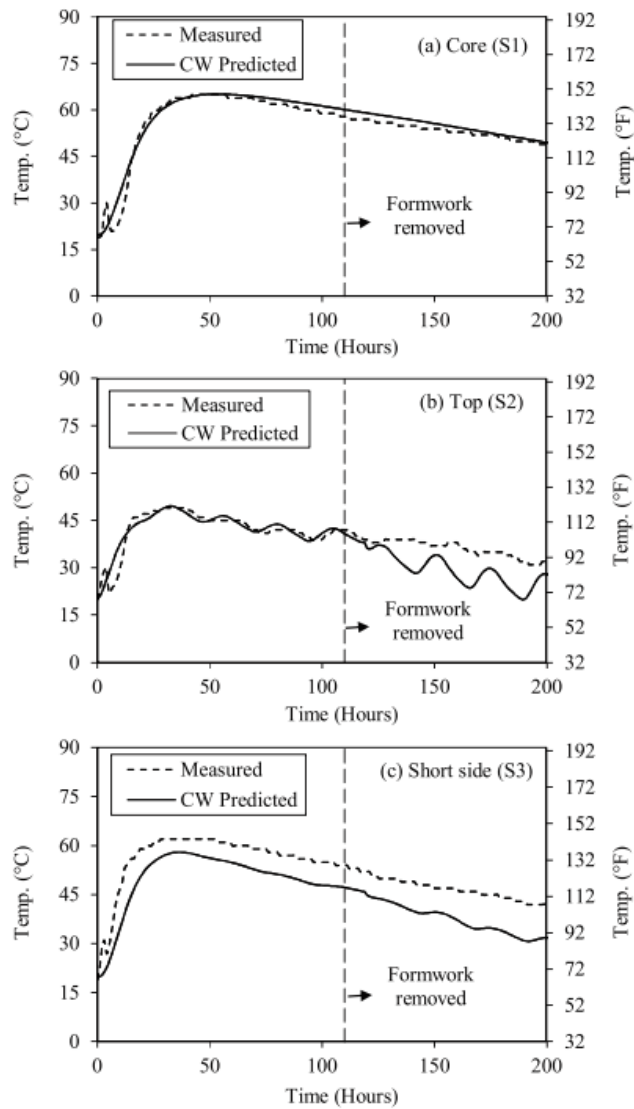
รูปที่ 2-8 ตำแหน่ง 7 จุดในการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

ตารางที่ 2-3 ขีดจำกัดผลต่างของอุณหภูมิใน mass concrete ที่ Iowa DOT กำหนด

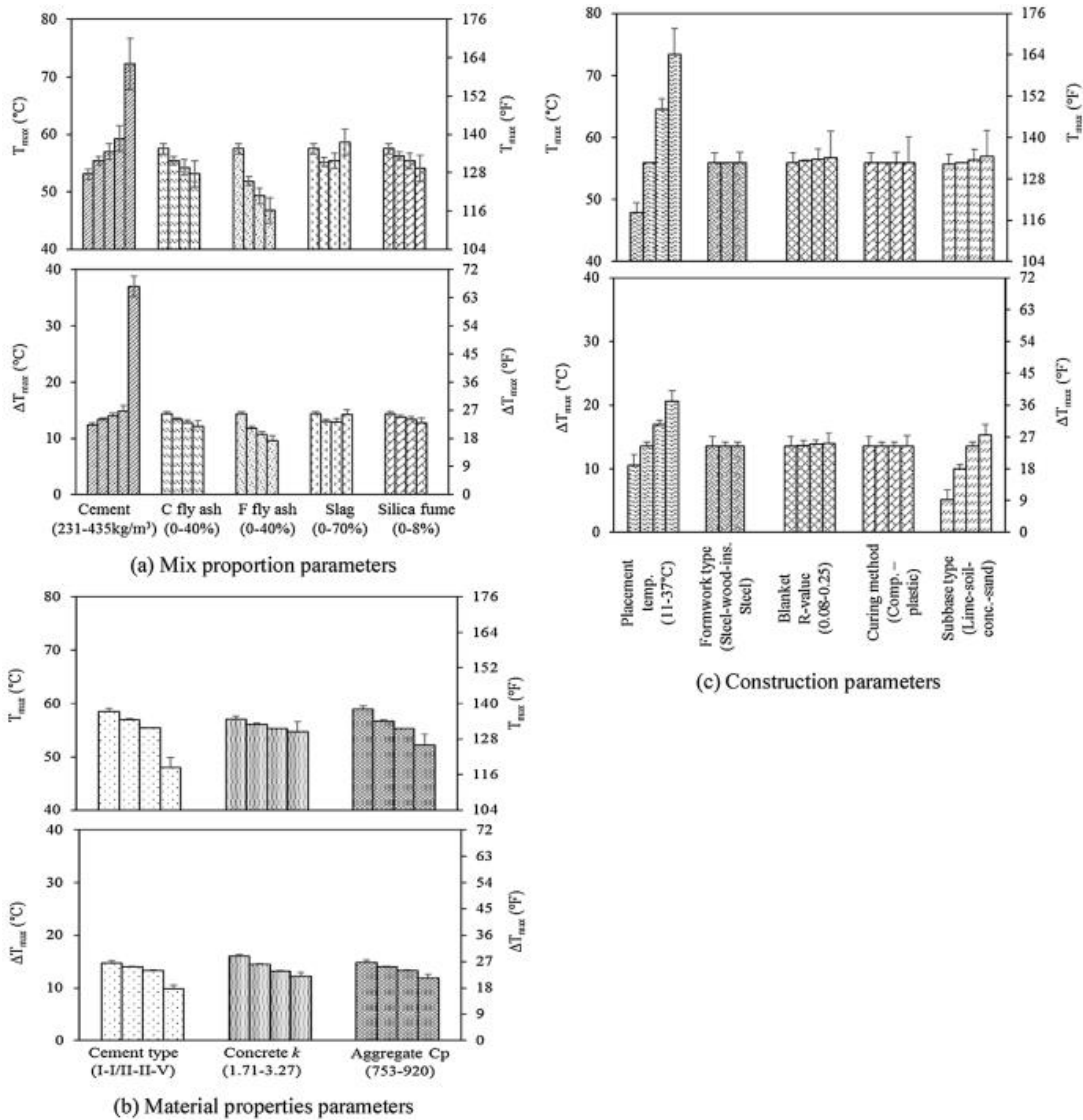
Time (hours)	Maximum temperature differential, °C (°F)
0-24	11 (20)
24-48	17 (30)
48-72	22 (40)
>72	28 (50)



รูปที่ 2-9 ผลต่างของอุณหภูมิที่ตรวจวัดหน้างาน



รูปที่ 2-10 การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ตรวจวัดหน้างานกับอุณหภูมิจากแบบจำลอง



รูปที่ 2-11 การวิเคราะห์ผลกระทบเมื่อเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ ด้วยโปรแกรม ConcreteWorks

5) Aniskin & Nguyen (2020) ได้ศึกษาเกี่ยวกับมาตรฐานต่างๆที่ใช้ในการประเมินโอกาสที่จะเกิดรอยร้าวใน mass concrete และศึกษาอุณหภูมิและ stress ที่เกิดขึ้นในเสาคอนกรีตขนาด 10 m. x 15 m. สูง 30 m. ด้วยโปรแกรม Midas Civil

ในประเทศไทยได้มีการกำหนดให้ผลต่างของอุณหภูมิไม่เกิน 16–18 °C เมื่อเทคอนกรีต long-strip และผลต่างของอุณหภูมิไม่เกิน 20-27 °C เมื่อเทคอนกรีต cutting column

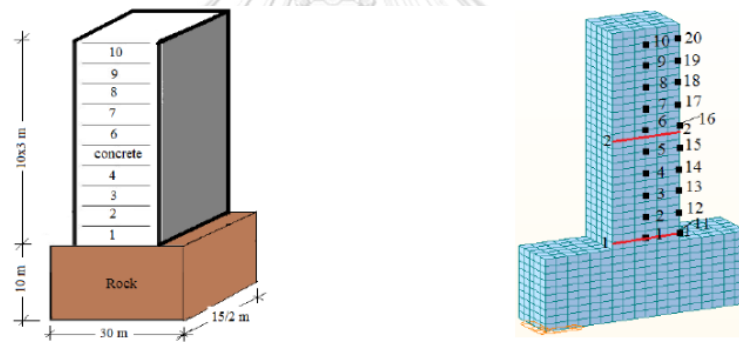
ในประเทศจีนได้มีการกำหนดผลต่างของอุณหภูมิซึ่งขึ้นกับขนาดของ mass concrete ดังแสดงในตารางที่ 2-4

ตารางที่ 2-4 ผลต่างของอุณหภูมิที่ยอมรับได้อย่างอิงตาม code ของประเทศจีน

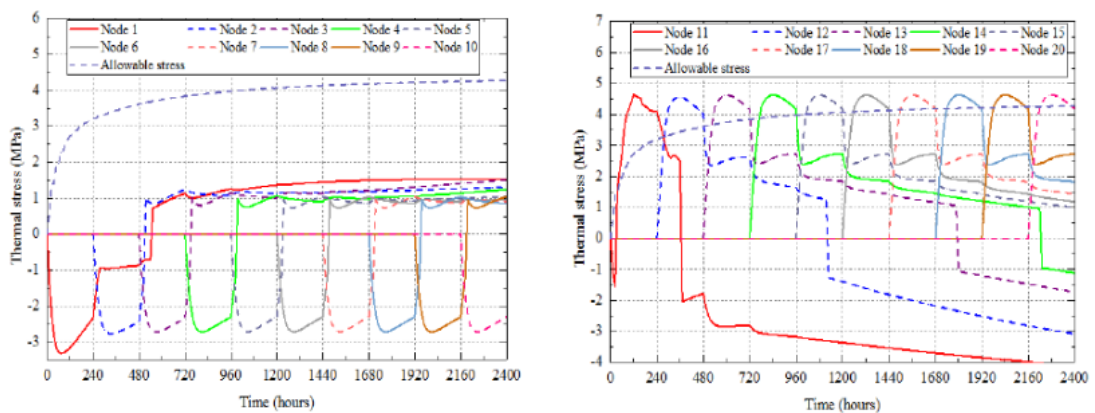
Concrete block height	Concrete block length L, m				
	< 16	17 – 20	21 – 30	31 – 40	> 40
(0 – 0.1)L	26 -25	24 -22	22 - 19	19 - 16	16 - 14
(0.1 – 0.4) L	33 - 31	31 - 28	28 - 26	24 -20	20 - 18

ในประเทศญี่ปุ่นใช้ crack index ที่เป็นความหมายเชิง stress ในการพิจารณาโอกาสในการเกิดรอยร้าว ซึ่งมีความหมายเหมือนกับคำว่า crack potential ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

การวิเคราะห์เสาคอนกรีตจะแบ่งการเทคอนกรีตออกเป็น 10 ชั้น ดังแสดงในรูปที่ 2-12 โดยพบว่าอุณหภูมิสูงสุดประมาณ 64.4 °C ในขณะที่อุณหภูมิที่ผิวประมาณ 27 °C ดังนั้นผลต่างของอุณหภูมิประมาณ 38 °C ซึ่งเป็นค่าที่มากกว่ามาตรฐานต่างๆ และเมื่อพิจารณา stress จะพบว่า stress ที่ผิวมีค่ามากกว่า allowable stress ทำให้มีโอกาสเกิดรอยร้าวได้



รูปที่ 2-12 แบบจำลองเสาคอนกรีต



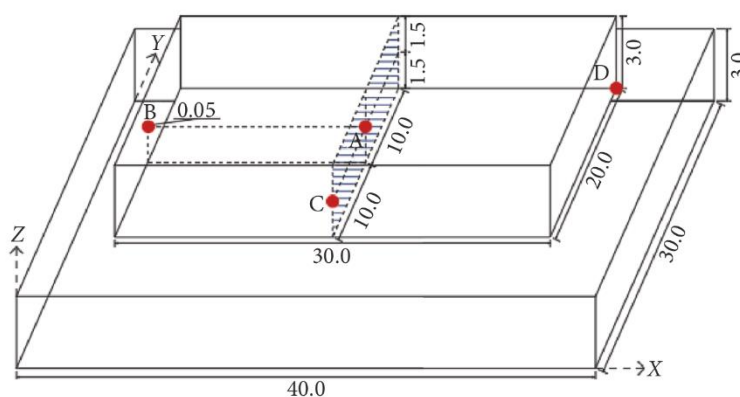
รูปที่ 2-13 stress และ allowable stress ที่จุดกึ่งกลาง (Node 1-10) และที่ผิวคอนกรีต (Node 11-20)

6) Zhao, Li, Fan, Pang, & Wang (2021) ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของตัวแปรทางความร้อนของคอนกรีตต่อ hydration heat และ thermal stress ใน mass concrete โดยใช้ finite element model ซึ่งสนใจอุณหภูมิและ tensile stress ที่จุดต่างๆของฐานรากคอนกรีต ดังนี้

จุด A คือ จุดแกนกลางของคอนกรีต

จุด B,C คือ จุดที่ผิวข้างของคอนกรีต

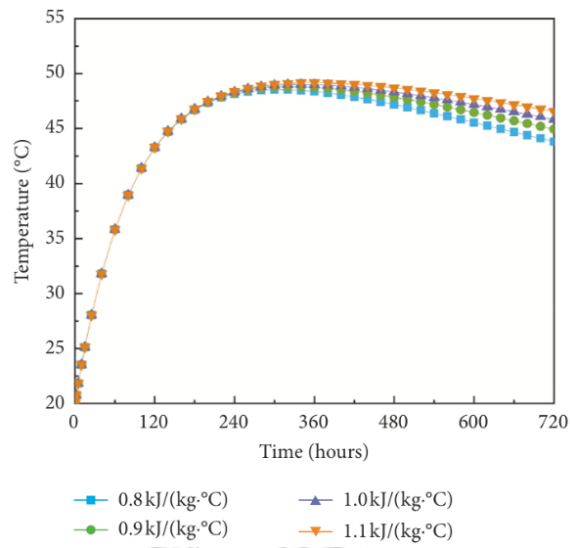
จุด D คือ จุดที่มุมล่างของคอนกรีตที่ติดกับดิน



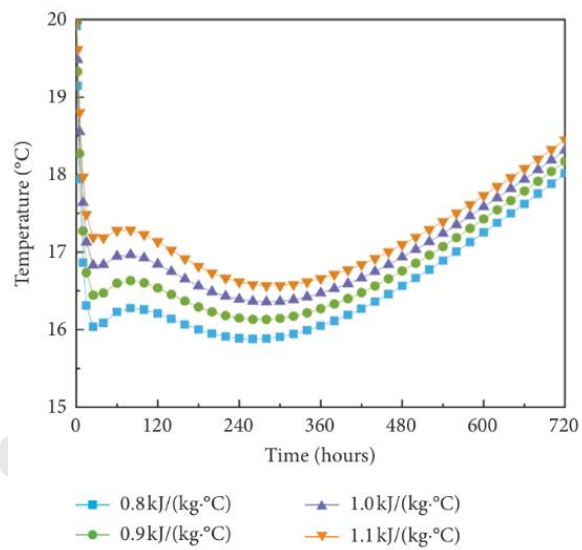
รูปที่ 2-14 ตำแหน่งจุด A,B,C,D

ตัวแปรที่สนใจ ได้แก่

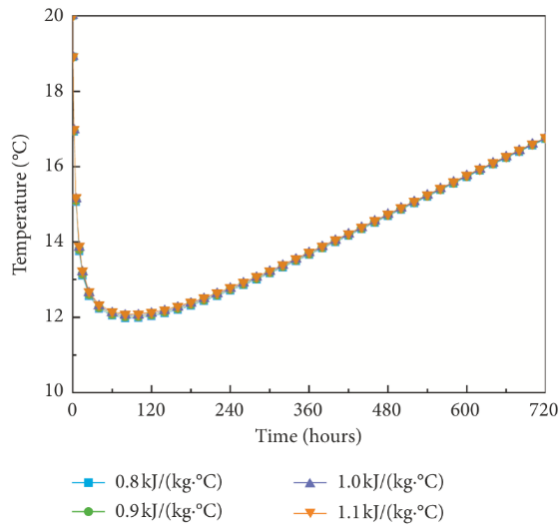
1. Specific heat (ความร้อนจำเพาะ) มีผลต่ออุณหภูมิคือ เมื่อความร้อนจำเพาะของคอนกรีตมากขึ้น จะทำให้อุณหภูมิภายในคอนกรีตมากขึ้น และความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่แกนกลางและผิวคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย นอกจากนี้การเพิ่มความร้อนจำเพาะ ทำให้ tensile stress บริเวณแกนกลางน้อยลงและที่ผิวมีค่าสูงขึ้นโดยความสัมพันธ์เป็นแบบเส้นตรง



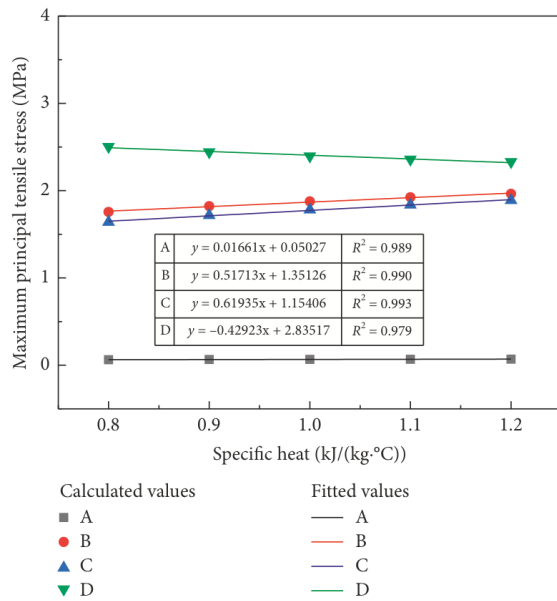
รูปที่ 2-15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา บริเวณจุดแกนกลาง(A) ของคอนกรีตที่มีความร้อนจำเพาะแตกต่างกัน



รูปที่ 2-16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา บริเวณผิวข้าง(B) ของคอนกรีตที่มีความร้อนจำเพาะแตกต่างกัน

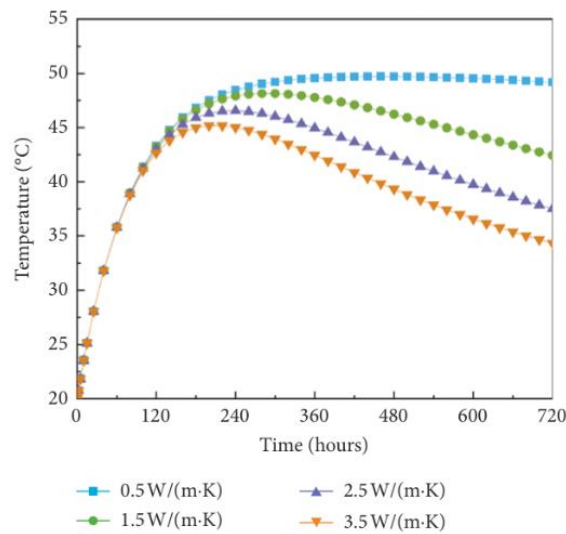


รูปที่ 2-17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา บริเวณมุมด้านล่าง(D) ของคอนกรีตที่ติดกับดินที่มีความร้อนจำเพาะแตกต่างกัน

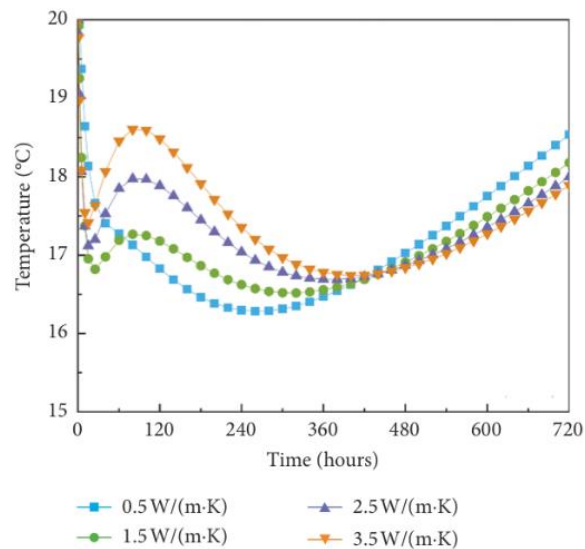


รูปที่ 2-18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Maximum principal tensile stress กับความจุความร้อนจำเพาะที่บริเวณจุด A,B,C,D

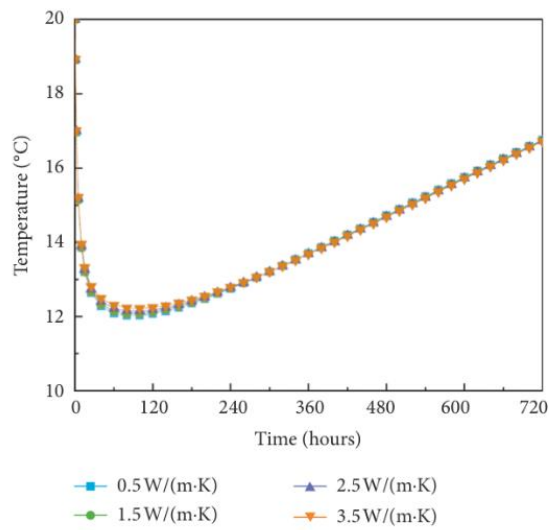
2. Thermal conductivity (ค่าการนำความร้อน) มีผลต่ออุณหภูมิคือ เมื่อค่าการนำความร้อนมากขึ้น จะเกิดผลคือทำให้อุณหภูมิที่แกนกลางน้อยลง และความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่แกนกลางและผิวคอนกรีตลดลง นอกจากนี้การเพิ่มค่าการนำความร้อนของคอนกรีต ส่งผลให้ tensile stress ที่จุดแกนกลางและผิวข้างลดลง แต่ทำให้ tensile stress ที่จุดมุมล่างที่ติดกับดินมีค่าสูงขึ้น ทำให้มีโอกาสเกิดรอยร้าวมากขึ้น



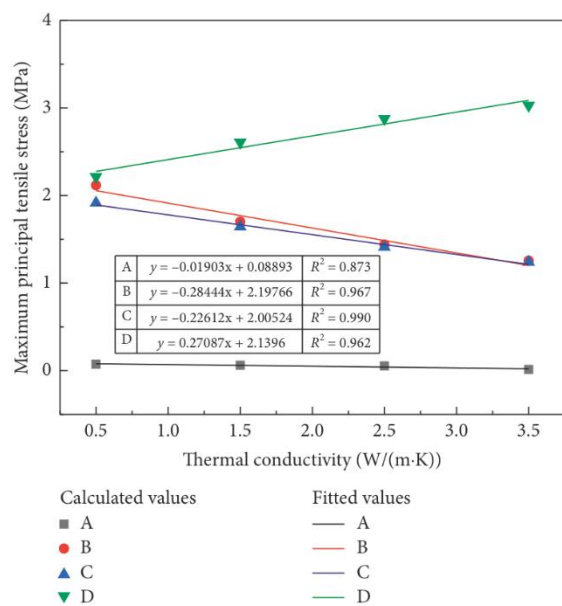
รูปที่ 2-19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา บริเวณจุดแกนกลาง(A) ของคอนกรีตที่มีค่าการนำความร้อนแตกต่างกัน



รูปที่ 2-20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา บริเวณผิวข้าง(B) ของคอนกรีตที่มีค่าการนำความร้อนแตกต่างกัน

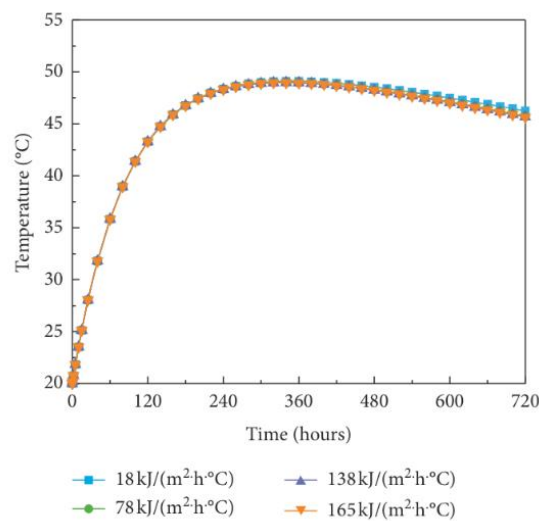


รูปที่ 2-21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา บริเวณมุมด้านล่าง(D) ของคอนกรีตที่ติดกับดินที่มีค่าการนำความร้อนแตกต่างกัน

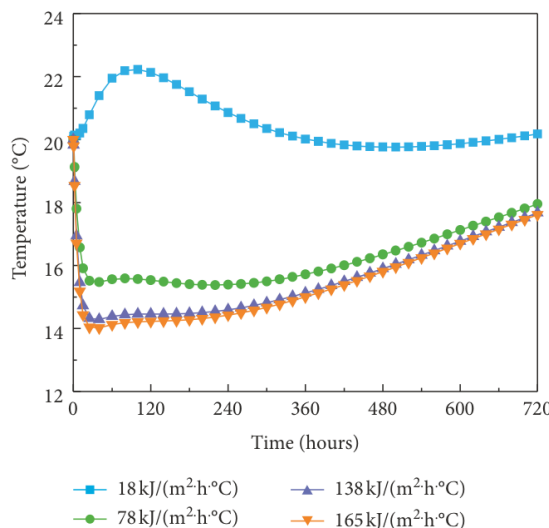


รูปที่ 2-22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Maximum principal tensile stress กับค่าการนำความร้อนที่บริเวณจุด A,B,C,D

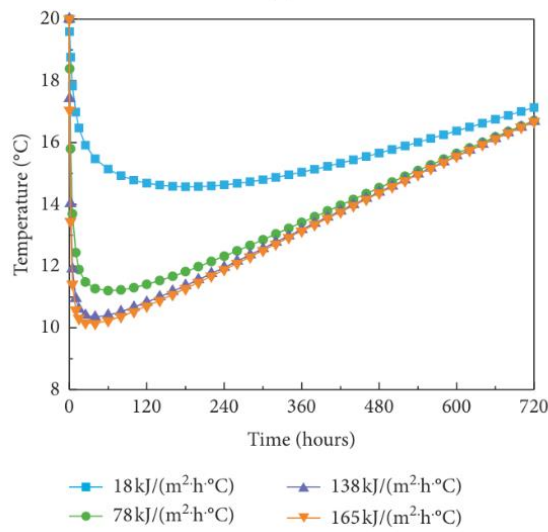
3. Convection coefficient (สัมประสิทธิ์การพาความร้อน) เมื่อเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวของคอนกรีต พบว่าไม่มีผลกระทบต่ออุณหภูมิแกนกลางของคอนกรีต แต่ทำให้อุณหภูมิที่ผิวข้างและมุมด้านล่างลดลงอย่างชัดเจน ดังนั้นความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่แกนกลางและผิวคอนกรีตจึงมากขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนส่งผลให้ tensile stress ที่ผิวข้างลดลง แต่ทำให้อุณหภูมิที่จุดมุมล่างที่ติดกับดินมีค่าสูงขึ้นแบบฟังก์ชันกำลังสอง



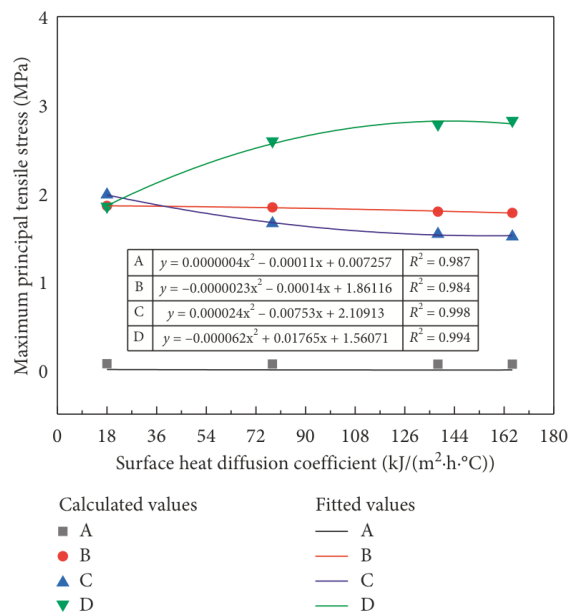
รูปที่ 2-23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา บริเวณจุดแกนกลาง(A) ของคอนกรีตที่มีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแตกต่างกัน



รูปที่ 2-24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา บริเวณผิวข้าง(B) ของคอนกรีตที่มีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแตกต่างกัน

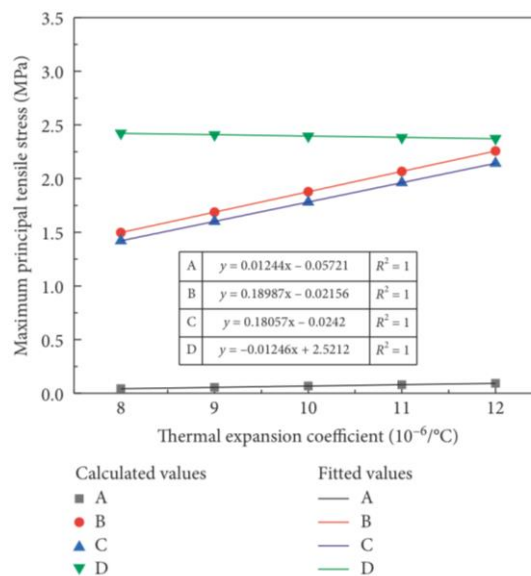


รูปที่ 2-25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา บริเวณมุมด้านล่าง(D) ของคอนกรีตที่ติดกับดินที่มีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแตกต่างกัน



รูปที่ 2-26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Maximum principal tensile stress กับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่บริเวณจุด A,B,C,D

4. Thermal expansion coefficient (สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน) ไม่มีผลกระทบโดยตรงกับการถ่ายเทความร้อนและอุณหภูมิ แต่มีผลต่อ tensile stress คือเมื่อสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของคอนกรีตมากขึ้น จะทำให้ tensile stress ที่จุดแกนกลางและผิวข้างมีค่ามากขึ้น แต่ tensile stress ที่จุดมุมล่างจะลดลง โดยความสัมพันธ์เป็นแบบเส้นตรง



รูปที่ 2-27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Maximum principal tensile stress กับค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนที่บริเวณจุด A,B,C,D

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3.2 คุณสมบัติของคอนกรีตความหนาแน่นต่ำ (light weight concrete)

1) Pan, Li, & Liu (2014) ได้ศึกษาเกี่ยวกับคอนกรีตโฟมมีความหนาแน่นที่ต่ำมากๆ อยู่ระหว่าง 150-300 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร คุณสมบัติทางกายภาพของคอนกรีตโฟมที่แข็งตัวอายุการบ่มที่ 28 วัน จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดระหว่าง 0.33 MPa ถึง 1.1 MPa การดูดซึมน้ำระหว่าง 6.6% ถึง 8.3% และค่าการนำความร้อนระหว่าง 0.05 W/m.K ถึง 0.07 W/m.K

ตารางที่ 2-5 คุณสมบัติของคอนกรีตความหนาแน่นต่ำ

No.	Dry density Kg/m ³	Compressive strength, at 28d (MPa)	Thermal conductivity, at 28d (W/mk)	Water absorption, at 28d (%)
1	303	0.79	0.070	34.4
2	253	0.67	0.062	35.5
3	205	0.56	0.059	36.2
4	153	0.41	0.050	38.2

2) วรากร อิมรักษา (2562) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาผนังฉนวนสำเร็จรูปแกนคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก ซึ่งคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมากผลิตโดยการผสมฟองอากาศที่เตรียมจากสารสร้างฟองอากาศชนิดโปรตีน ผ่านเครื่องผลิตฟองอากาศเข้ากับซีเมนต์เพสต์ที่เตรียมจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ผสมน้ำ ผลการศึกษาพบว่าคอนกรีตมีความหนาแน่นประมาณ 250 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าการนำความร้อนเฉลี่ยประมาณ 0.118 วัตต์ต่อเมตร-องศาเซลเซียส ซึ่งถือได้ว่ามีคุณสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนที่ดีกว่าคอนกรีตปกติ

2.3.3 การแก้ปัญหาแตกร้าวใน mass concrete ด้วยเทคนิคต่างๆ

1) การใช้ lightweight aggregate

Tankasala & Schindler (2020) ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของการใส่ lightweight aggregate ต่อการแตกร้าวในช่วงแรกๆของ mass concrete โดยใช้ water/cement ratio (w/cm) 2 กลุ่ม ได้แก่ 0.38 และ 0.45 ซึ่งในแต่ละกลุ่มจะแบ่งออกเป็น 4 แบบ ได้แก่ reference normalweight concrete, internally cured concrete (ICC), sand-lightweight concrete (SLWC) และ all-lightweight concrete (ALWC) โดยความหนาแน่นของคอนกรีตแสดงในรูปที่ 2-28 และ 2-29 ผลการทดสอบ (รูปที่ 2-30 ถึง 2-33) พบว่า

1. เมื่อเพิ่มปริมาณของ lightweight aggregate จะทำให้อุณหภูมิของคอนกรีตสูงขึ้น ดังนั้นจึงต้องระมัดระวังไม่ให้อุณหภูมิสูงเกิน 185 °F (85 °C) เพื่อป้องกันการเกิด delay ettringite formation

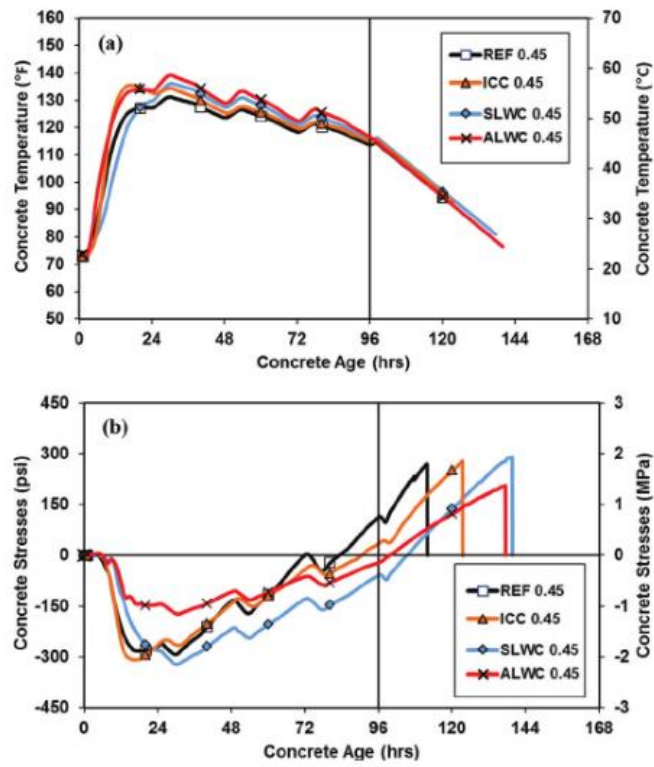
2. เมื่อใช้ w/cm น้อยลง จะทำให้อุณหภูมิสูงสุดของคอนกรีตมากขึ้น
3. การเพิ่ม lightweight aggregate ในคอนกรีตจะทำให้เวลาที่ทำให้เกิดรอยร้าวมากขึ้น โดยที่ SLWC มีความสามารถในการต้านทานการเกิดรอยร้าวที่ดีที่สุด
4. การเพิ่ม lightweight aggregate ในคอนกรีตจะทำให้ modulus of elasticity น้อยลง, coefficient of thermal expansion น้อยลง และกำจัดผลของ autogenous shrinkage ซึ่งทำให้ความสามารถในการต้านทานการเกิดรอยร้าวดีขึ้น

Item	REF 0.45	ICC 0.45	SLWC 0.45	ALWC 0.45
Calculated equilibrium density, lb/ft ³	139.0	135.5	110.6	95.6

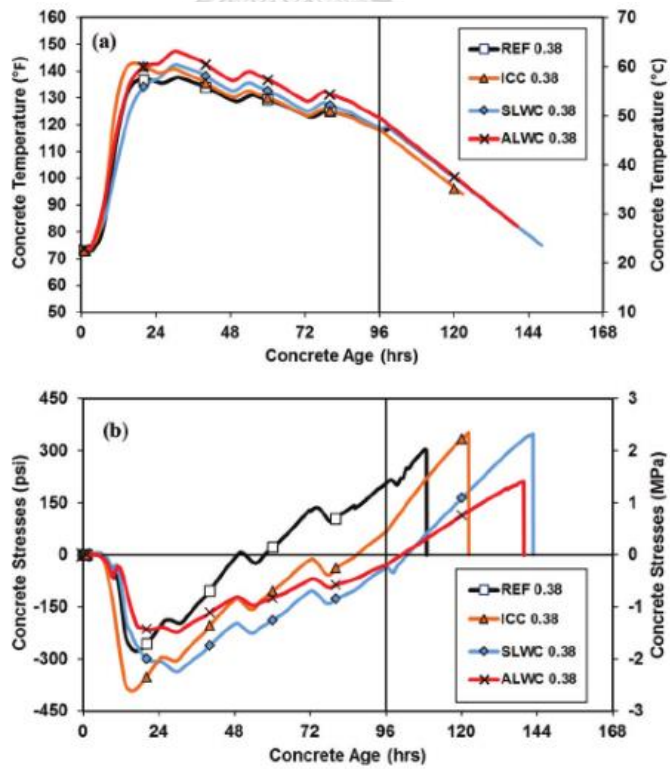
รูปที่ 2-28 ความหนาแน่นของคอนกรีต $w/cm = 0.45$

Item	REF 0.38	ICC 0. 38	SLWC 0.38	ALWC 0.38
Calculated equilibrium density, lb/ft ³	139.2	135.5	110.2	95.2

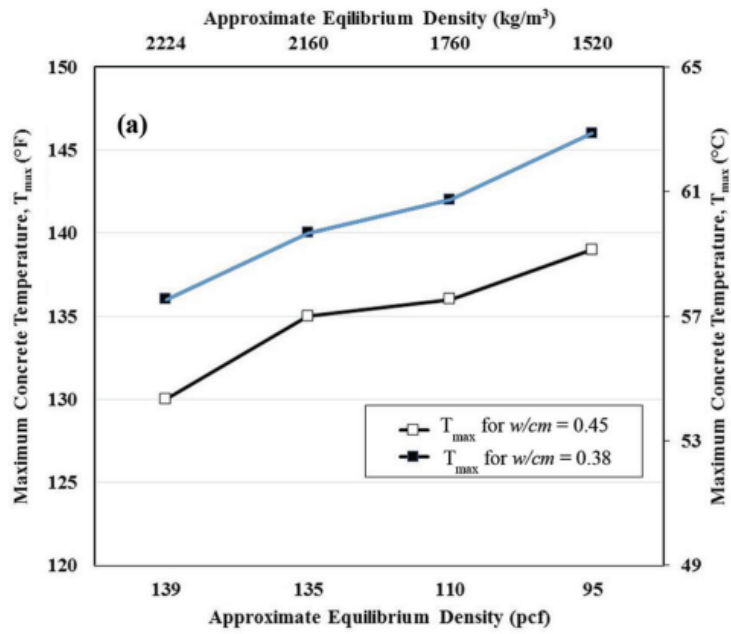
รูปที่ 2-29 ความหนาแน่นของคอนกรีต $w/cm = 0.38$



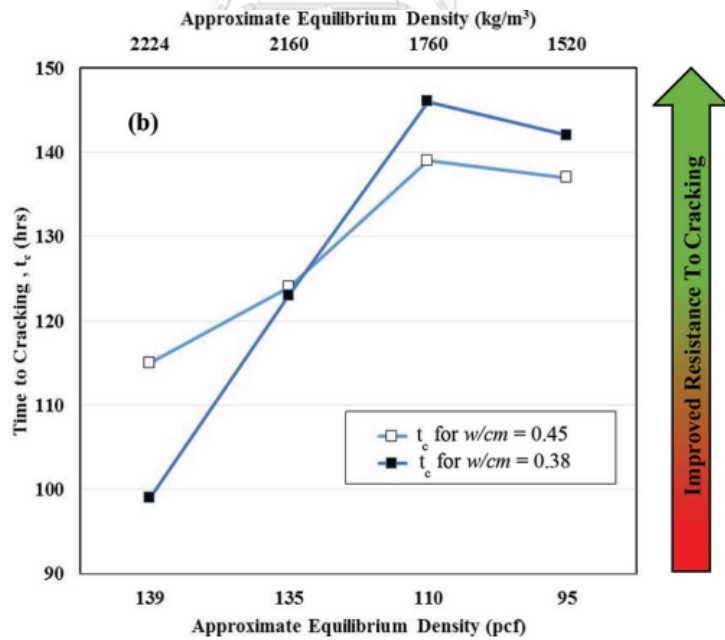
รูปที่ 2-30 อุณหภูมิและ stress ในคอนกรีต w/cm = 0.45



รูปที่ 2-31 อุณหภูมิและ stress ในคอนกรีต w/cm = 0.38



รูปที่ 2-32 อุณหภูมิสูงสุดของคอนกรีต เทียบกับ ความหนาแน่น



รูปที่ 2-33 เวลาที่ทำให้เกิดรอยร้าว เทียบกับ ความหนาแน่น

2) การใส่ super-fine stainless wires

Dong, Wang, Xu, Wang, & Han (2021) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการทดลองใส่ super-fine stainless wires (SSWs) ในคอนกรีตเพื่อให้คอนกรีตมีการนำความร้อนที่ดีขึ้นและมีการสร้างแบบจำลอง finite element เพื่อวิเคราะห์หาอุณหภูมิและ stress โดยพบว่าเมื่อใส่ SSWs เพียง 0.5% สามารถลดอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางของคอนกรีต 1.3 °C และเมื่อใส่ SSWs 1.5% สามารถลดผลต่างของอุณหภูมิใน pavement slab (4.5 m. x 5 m. x 0.4 m.) และ pier cap (3 m. x 2 m. x 1 m.) ได้เท่ากับ 6.9 °C และ 10.7 °C ตามลำดับ และช่วยลด maximum thermal stress 0.90 MPa และ 1.43 MPa ตามลำดับ ซึ่งจะช่วยให้ลดปัญหาการเกิดรอยร้าวในช่วงแรกเนื่องจากความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชันได้อย่างมีประสิทธิภาพ



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1.1 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ศึกษาทำความเข้าใจเกี่ยวกับปัญหาเรื่องของอุณหภูมิใน mass concrete รวมถึงผลกระทบและวิธีการแก้ไขปัญหา

3.1.2 ศึกษาวิธีการสร้างแบบจำลองฐานรากแพ

ศึกษาและทดลองสร้าง 3D finite element model ของฐานรากแพด้วยโปรแกรม Midas Civil โดยมีการเปรียบเทียบกับเอกสารที่มีผู้ศึกษาในอดีต เพื่อให้มั่นใจว่าสามารถสร้างแบบจำลองได้อย่างถูกต้องและพารามิเตอร์ที่ใช้มีความเหมาะสม ทำความเข้าใจพฤติกรรมด้านอุณหภูมิและ stress ที่เกิดขึ้นใน mass concrete

3.1.3 สร้างแบบจำลองฐานรากแพ

สร้าง 3D finite element model ของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42) และ Siamese Rama 9 (F65) วิเคราะห์หาอุณหภูมิ, stress และ crack potential ที่เกิดขึ้นและกำหนดจุดที่จะทำการตรวจวัดอุณหภูมิ

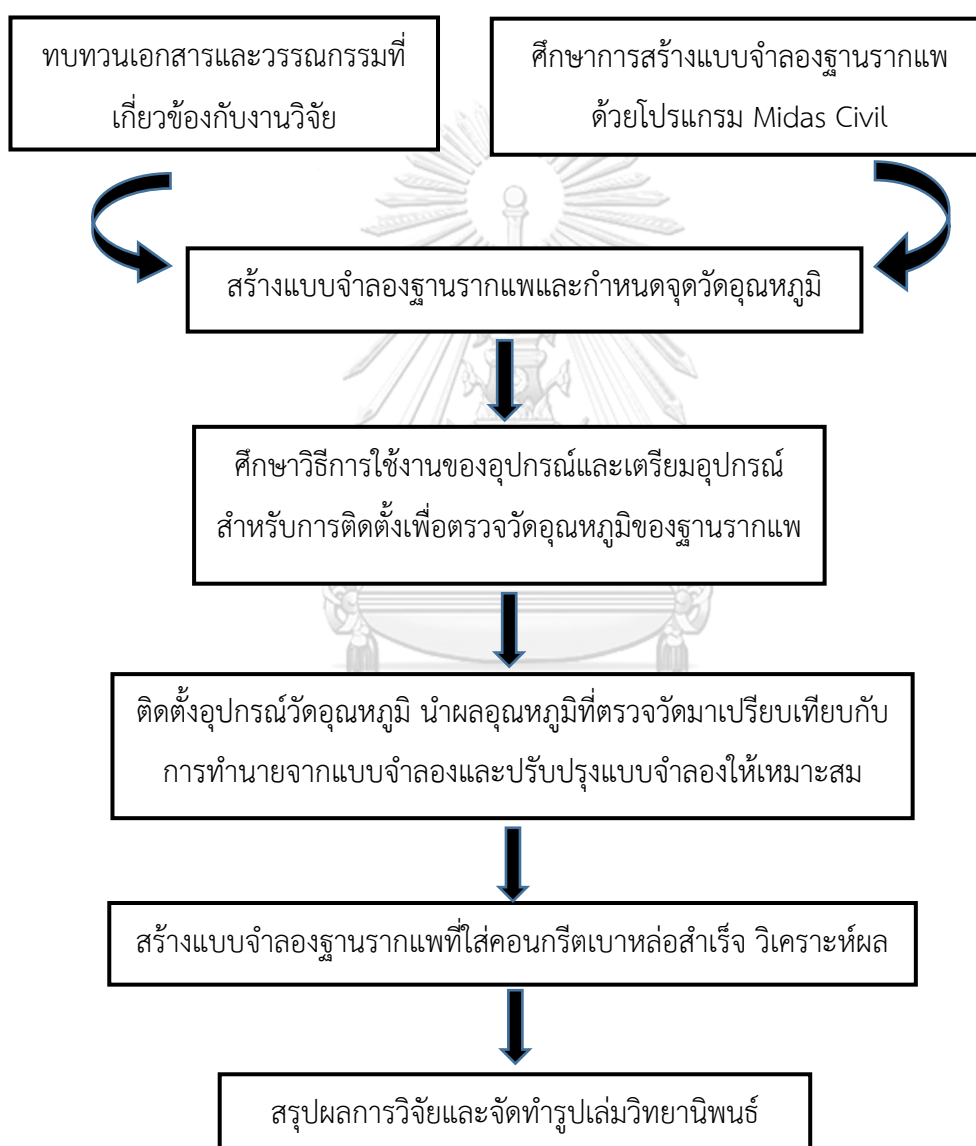
3.1.4 ติดตั้งอุปกรณ์เพื่อตรวจวัดอุณหภูมิของคอนกรีต/เปรียบเทียบข้อมูลกับแบบจำลอง/เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมสอดคล้องกับความจริง

ศึกษาวิธีการใช้งานของอุปกรณ์และขั้นตอนการติดตั้งที่หน้างาน ทำการ calibrate อุปกรณ์เพื่อหาความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่วัดได้จาก sensor จากนั้นจึงดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อตรวจวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจริงในฐานรากแพเป็นเวลา 5 วัน (120 ชั่วโมง) นับตั้งแต่เริ่มเทคอนกรีตจนถึงวันที่ปลดฉนวนความร้อนออก เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและข้อมูลที่วัดได้จากหน้างาน วิเคราะห์ถึงปัจจัยที่มีผลกระทบกับอุณหภูมิและสาเหตุของความแตกต่างของอุณหภูมิจากแบบจำลองและข้อมูลที่วัดได้หน้างาน ปรับปรุงแบบจำลองเพื่อให้ผลที่ได้มีความใกล้เคียงกับข้อมูลจากหน้างาน

3.1.5 สร้างแบบจำลองฐานรากแพที่ใส่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ

ทดลองใส่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จในฐานรากแพเดิมที่เคยศึกษา โดยใช้โปรแกรม Midas Civil วิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้น และเปรียบเทียบอุณหภูมิและ stress ที่เกิดขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นต้องมีการตรวจสอบกำลังในการรับแรงของฐานรากแพเพื่อไม่ให้เกิดการวิบัติ

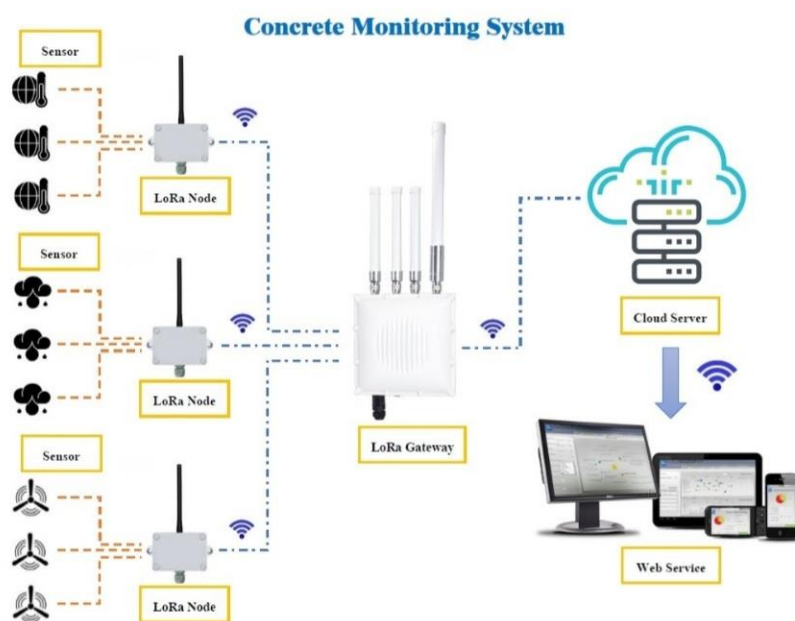
3.1.6 สรุปผลการวิจัยและจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์



รูปที่ 3-1 สรุปขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.2 ระบบที่ใช้วัดอุณหภูมิภายในคอนกรีต

ผู้วิจัยใช้ temperature remote sensor ในการวัดอุณหภูมิภายในคอนกรีต โดยข้อมูลจากแต่ละสาย sensor จะส่งต่อมาที่ LoRa node หลังจากนั้น LoRa node แต่ละตัวจะวัดค่าจาก sensor และส่งสัญญาณ uplink ไปที่ LoRa Gateway หลังจากนั้นข้อมูลจะถูกส่งต่อไปที่ cloud server สำหรับเก็บบันทึกบนฐานข้อมูลและนำมาแสดงผลบนเว็บไซต์ต่อไป



รูปที่ 3-2 ระบบการตรวจวัดอุณหภูมิภายในคอนกรีต

CHULALONGKORN UNIVERSITY

โดยเครื่องมือที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิคอนกรีตมีดังนี้

3.2.1 LoRaWan Temperature Remote Sensor Node

กล่องที่ประกอบไปด้วยสาย temperature sensor และแผงวงจรเพื่อส่งสัญญาณ uplink ทุกๆ 1 นาทีไปยัง LoRa gateway ซึ่งแต่ละกล่องสามารถต่อสาย temperature sensor ได้สูงสุด 6 สาย โดยสาย temperature sensor จะมีความยาวแตกต่างกัน ขึ้นกับระดับที่ต้องการวัดอุณหภูมิในฐานรากแพ สามารถวัดอุณหภูมิในช่วง $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยมีความถูกต้องของการวัดอุณหภูมิคือ $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ในช่วง $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ ข้อดีคือการส่งข้อมูลไปยัง Gateway ไม่จำเป็นต้องใช้สายทำให้สะดวกในการติดตั้งและเทศคอนกรีตหน้างานที่ปกติแต่ละจุดวัดจะมีระยะห่างมาก



รูปที่ 3-3 LoRaWan Temperature Remote Sensor Node



รูปที่ 3-4 แผงวงจรด้านในของ LoRaWan Temperature Remote Sensor Node

3.2.2 LoRaWan Ambient Sensor Node

กล่องที่ใช้วัดอุณหภูมิสภาพแวดล้อมและความชื้นสัมพัทธ์ ในขณะที่วัดอุณหภูมิของฐานราก

แพ



รูปที่ 3-5 LoRaWan Ambient Sensor Node

3.2.3 LoRa Gateway

อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่รับสัญญาณ uplink ที่เป็นข้อมูลอุณหภูมิจาก Node แต่ละตัว และส่งข้อมูลไปเก็บบันทึกไว้ใน cloud server เพื่อนำไปแสดงผลบนเว็บไซต์ ทำให้สามารถเข้าถึงข้อมูลได้สะดวกตลอดเวลาและเข้าใจได้ง่ายเนื่องจากแสดงผลเป็นกราฟระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ระยะห่างที่สามารถรับสัญญาณจาก Node คือ 2 กม. (line of sight)



รูปที่ 3-6 LoRa Gateway

3.3 การ calibrate เครื่องมือที่ใช้วัดอุณหภูมิคอนกรีต

เป็นการทดลองเพื่อหาความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่วัดได้จาก temperature sensor ที่มีความยาว 1 ม. 2 เส้น (temperature sensor 1,2), 3 ม. 2 เส้น (temperature sensor 3,4), 5 ม. 2 เส้น (temperature sensor 5,6) โดยทดลองกับ LoRa Node 3 กล่อง (P1-P3) ซึ่งมีวิธีการทดลองคือนำ temperature sensor แต่ละเส้นจุ่มลงในน้ำที่อยู่ในโอ่ง เพื่อให้อุณหภูมิคงที่ ป้องกันการรบกวนจากอุณหภูมิสภาพแวดล้อมภายนอก อ่านค่าอุณหภูมิของน้ำจากเทอร์โมมิเตอร์ เปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากระบบการตรวจวัดอุณหภูมิคอนกรีต ปรับแก้ค่าอุณหภูมิของแต่ละ sensor จากนั้นจึงทำการทดลองกับน้ำเย็น (น้ำที่ผสมน้ำแข็ง) และน้ำร้อน (น้ำจากกาต้มน้ำ) เพื่อวาดกราฟความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่ระบบการตรวจวัดอุณหภูมิคอนกรีตวัดได้

ขั้นตอนมีดังนี้

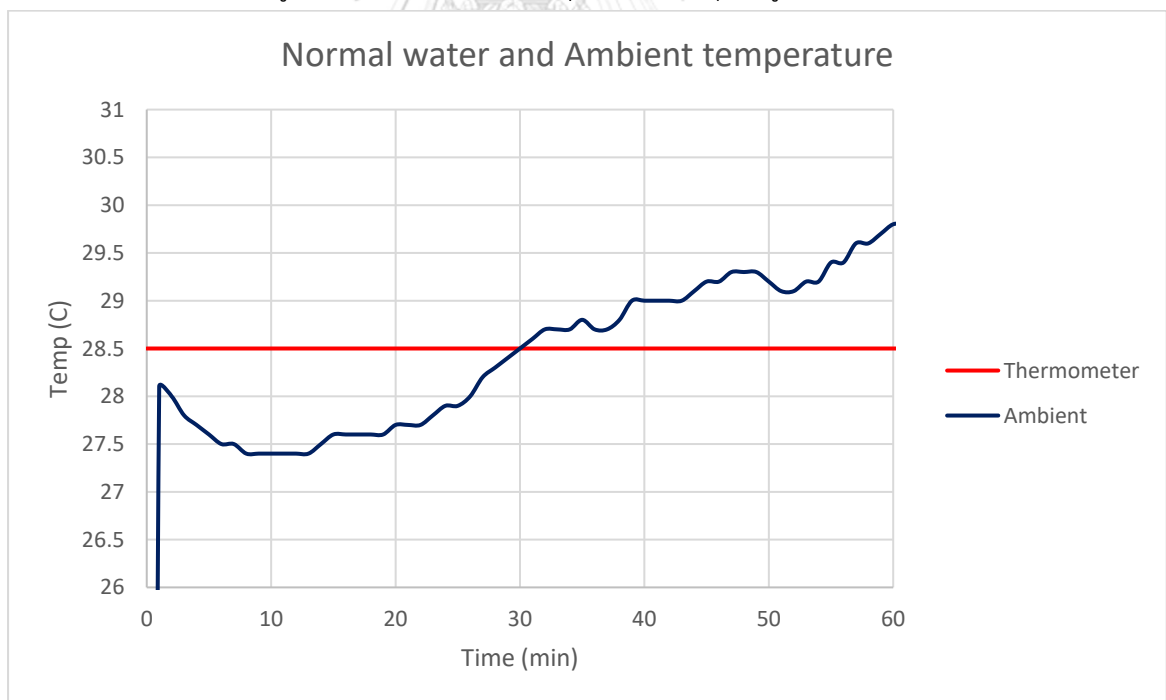
1. ทดลองกับน้ำอุณหภูมิปกติที่อยู่ในโอ่ง มีการวัดอุณหภูมิโดยใช้เทอร์โมมิเตอร์ที่ระดับน้ำต่างๆ ซึ่งพบว่าน้ำในโอ่งมีอุณหภูมิใกล้เคียงกันและค่อนข้างคงที่อยู่ระหว่าง 28.4-28.6 °C โดยผู้วิจัยใช้ค่าเฉลี่ยเพื่อแทนอุณหภูมิของน้ำคือ 28.5 °C ระยะเวลาที่ทดลองคือ 60 นาที ปรับแก้ค่าอุณหภูมิของแต่ละ sensor เพื่อให้อุณหภูมิเฉลี่ยของแต่ละ sensor เท่ากับ 28.5°C โดยผลการทดลองแสดงในรูปที่ 3-10 ถึง รูปที่ 3-12



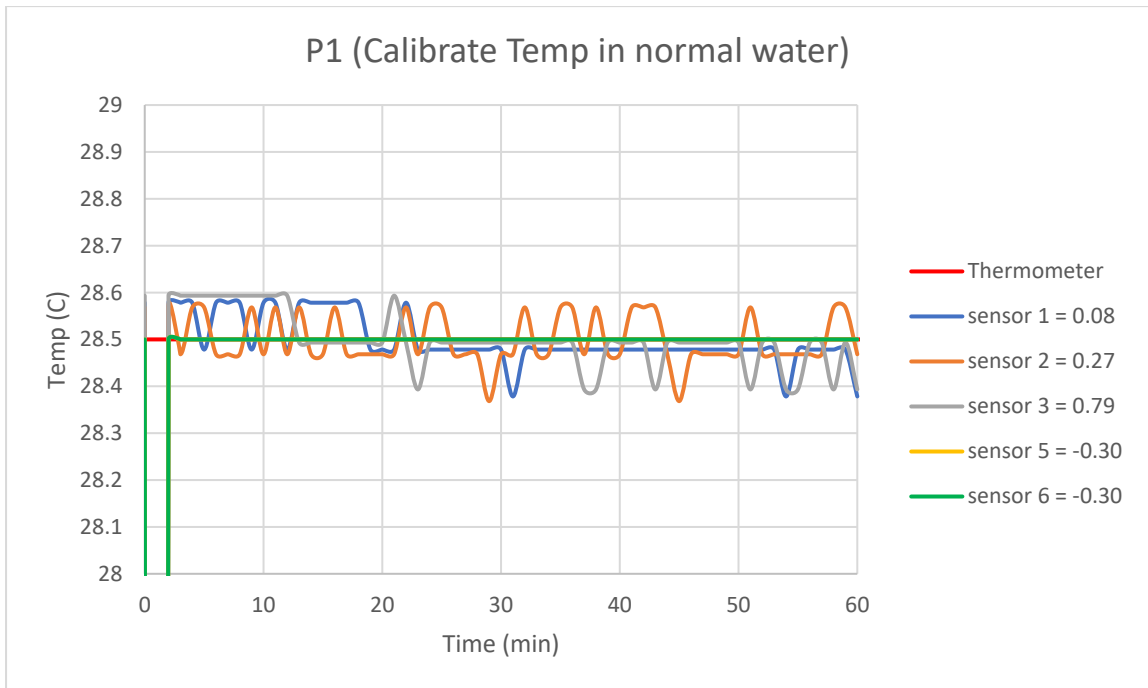
รูปที่ 3-7 เทอร์โมมิเตอร์



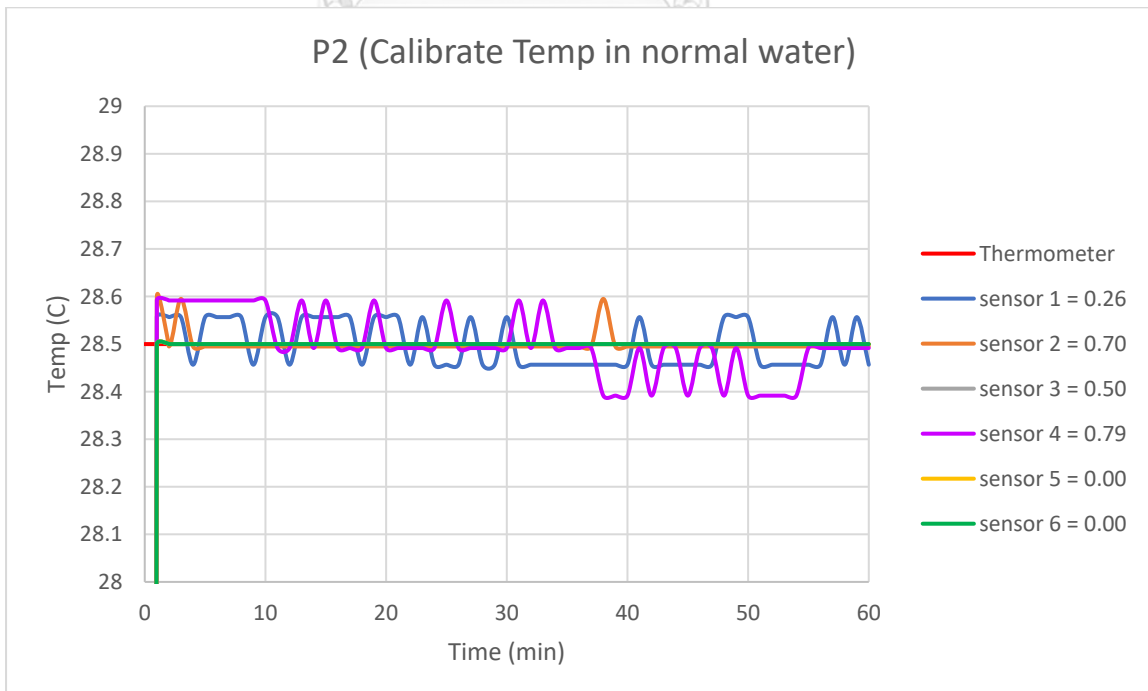
รูปที่ 3-8 การ calibrate อุปกรณ์ในน้ำอุณหภูมิปกติ



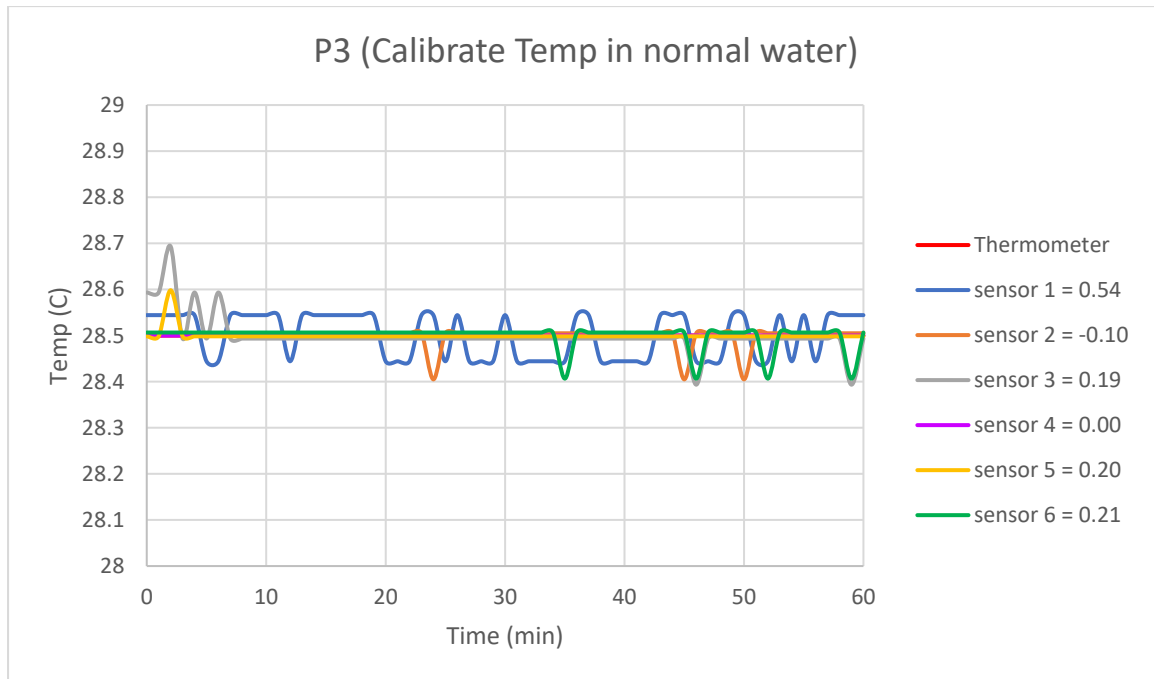
รูปที่ 3-9 อุณหภูมิของน้ำในโอง์และอุณหภูมิสภาพแวดล้อมภายนอก



รูปที่ 3-10 กราฟระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของ P1
 หมายเหตุ sensor 4 พบว่าสายสัญญาณขัดข้องข้อมูลขาดหายไปในช่วงทดลอง จึงใช้ค่าเฉลี่ยของ 5
 sensor ในการปรับแก้อุณหภูมิแทน



รูปที่ 3-11 กราฟระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของ P2



รูปที่ 3-12 กราฟระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของ P3

- ทดลองกับน้ำเย็นซึ่งเป็นน้ำที่ใส่น้ำแข็ง ใช้เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิ พบว่าอุณหภูมิของน้ำเย็นขณะทำการทดลองอยู่ระหว่าง 5.0 - 5.6 °C โดยผู้วิจัยใช้ค่าเฉลี่ยเพื่อแทนอุณหภูมิของน้ำเย็นคือ 5.3 °C (Real Temp) ใช้ระยะเวลาทดลองประมาณ 10 นาที เนื่องจากการทำให้อุณหภูมิของน้ำเย็นคงที่ค่อนข้างยาก ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 3-1



รูปที่ 3-13 การ calibrate อุปกรณ์ในน้ำเย็น

ตารางที่ 3-1 ผลการ calibrate ในน้ำเย็น

Cold Water Temp	P1					P2					P3				
	Real	Measure	ค่าปรับแก้	modify	diff	Real	Measure	ค่าปรับแก้	modify	diff	Real	Measure	ค่าปรับแก้	modify	diff
sensor 1	5.3	5	0.08	5.08	0.22	5.3	5.1	0.26	5.36	-0.06	5.3	4.5	0.54	5.04	0.26
sensor 2	5.3	5	0.27	5.27	0.03	5.3	4.5	0.7	5.2	0.1	5.3	5.2	-0.1	5.1	0.2
sensor 3	5.3	4.1	0.79	4.89	0.41	5.3	4.5	0.5	5	0.3	5.3	5	0.19	5.19	0.11
sensor 4	5.3	5	0.11	5.11	0.19	5.3	4.5	0.79	5.29	0.01	5.3	5	0	5	0.3
sensor 5	5.3	5.2	-0.3	4.9	0.4	5.3	4.9	0	4.9	0.4	5.3	4.9	0.2	5.1	0.2
sensor 6	5.3	5.2	-0.3	4.9	0.4	5.3	5.4	0	5.4	-0.1	5.3	4.9	0.21	5.11	0.19

3. ทดลองกับน้ำร้อนซึ่งเป็นน้ำในกาต้มน้ำร้อน เพื่อให้มั่นใจว่า temperature sensor ทุกตัวสามารถวัดค่าอุณหภูมิสูงๆ ซึ่งเกิดขึ้นในขณะที่เทและบ่มคอนกรีตฐานรากแพในช่วงแรก โดยทดลองทีละ Node เนื่องจากขนาดของกาต้มน้ำร้อนค่อนข้างจำกัด อุณหภูมิของน้ำร้อนอยู่ในช่วง 79.8 - 82.7 °C ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 3-2

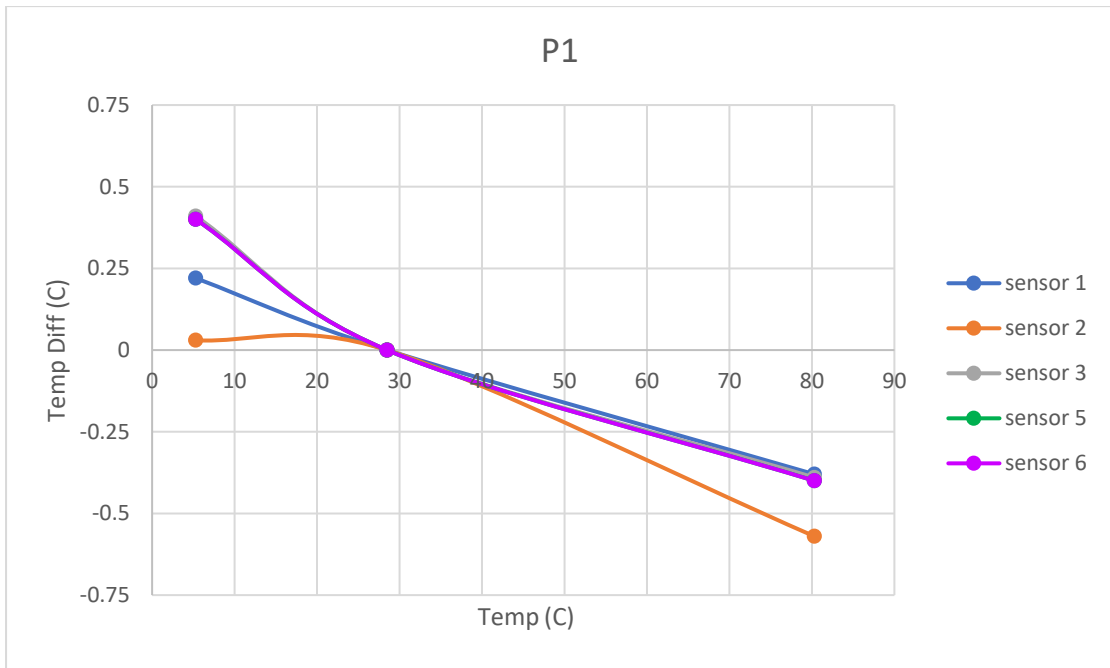


รูปที่ 3-14 การ calibrate อุปกรณ์ในน้ำร้อน

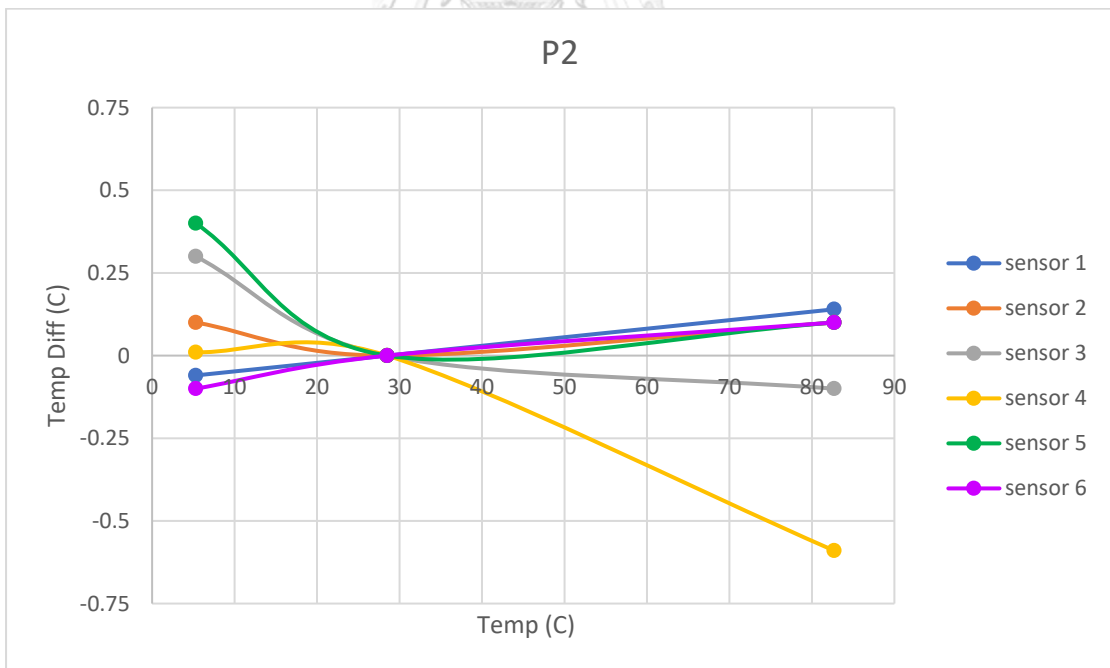
ตารางที่ 3-2 ผลการ calibrate ในน้ำร้อน

Hot Water Temp	P1					P2					P3				
	Real	Measure	ค่าปรับแก้	modify	diff	Real	Measure	ค่าปรับแก้	modify	diff	Real	Measure	ค่าปรับแก้	modify	diff
sensor 1	80.3	80.6	0.08	80.68	-0.38	82.7	82.3	0.26	82.56	0.14	81.3	81.8	0.54	82.34	-1.04
sensor 2	80.3	80.6	0.27	80.87	-0.57	82.7	81.9	0.7	82.6	0.1	81.3	82.3	-0.1	82.2	-0.9
sensor 3	80.3	79.9	0.79	80.69	-0.39	82.7	82.3	0.5	82.8	-0.1	81.3	82.3	0.19	82.49	-1.19
sensor 4	80.3	81	0.11	81.11	-0.81	82.7	82.5	0.79	83.29	-0.59	81.3	82.3	0	82.3	-1
sensor 5	80.3	81	-0.3	80.7	-0.4	82.7	82.6	0	82.6	0.1	81.3	82.3	0.2	82.5	-1.2
sensor 6	80.3	81	-0.3	80.7	-0.4	82.7	82.6	0	82.6	0.1	81.3	81.8	0.21	82.01	-0.71

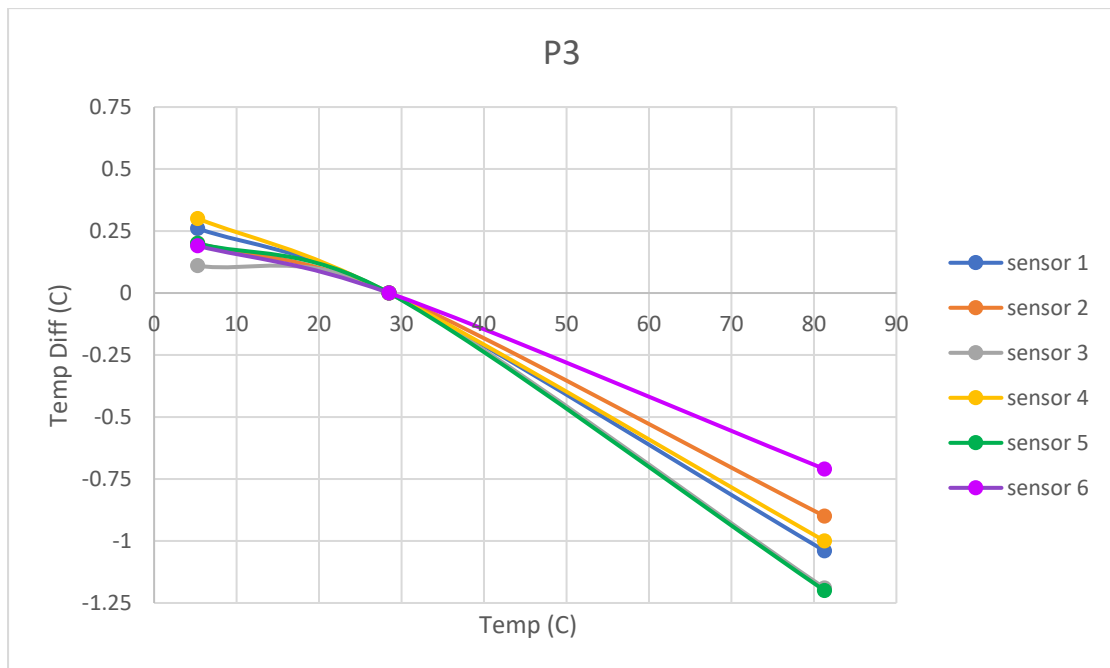
4. นำผลที่ได้มาวาดกราฟ พบว่าความคลาดเคลื่อน ($\text{diff} = \text{Real} - \text{modify}$) ของระบบตรวจวัดอุณหภูมิคอนกรีตอยู่ระหว่าง -1.2 °C ถึง 0.41 °C ซึ่งความคลาดเคลื่อนที่ค่อนข้างมากอาจเกิดจากอุณหภูมิของน้ำเย็นและน้ำร้อนที่ทดลองไม่ได้คงที่ จึงต้องใช้ค่าเฉลี่ยเพื่อเป็นตัวแทน โดยส่วนใหญ่ความคลาดเคลื่อนมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิที่วัดสูงขึ้น (ยกเว้น P2)



รูปที่ 3-15 ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่วัดได้ของ P1



รูปที่ 3-16 ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่วัดได้ของ P2



รูปที่ 3-17 ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่วัดได้ของ P3

3.4 การวัดอุณหภูมิฐานรากแพ

3.4.1 ฐานรากที่ทำการศึกษา

การเทฐานรากแพขนาดใหญ่โดยการเทคอนกรีตแบบต่อเนื่องครั้งเดียว จะทำให้ประหยัดเวลาก่อสร้างและเหล็กตื้อย แต่จะทำให้เกิดความเสี่ยงที่ฐานรากแพจะเกิดการแตกร้าวจากอุณหภูมิ ดังนั้นจึงต้องมีการวัดอุณหภูมิระหว่างการเทฐานรากแพ

ฐานรากแพขนาดใหญ่ที่จะทำการศึกษามีจำนวน 2 ฐาน ได้แก่ Siamese Rama 9 (F42) และ Siamese Rama 9 (F65) รายละเอียดของแต่ละฐานรากมีดังนี้

1) Siamese Rama 9 (F42)

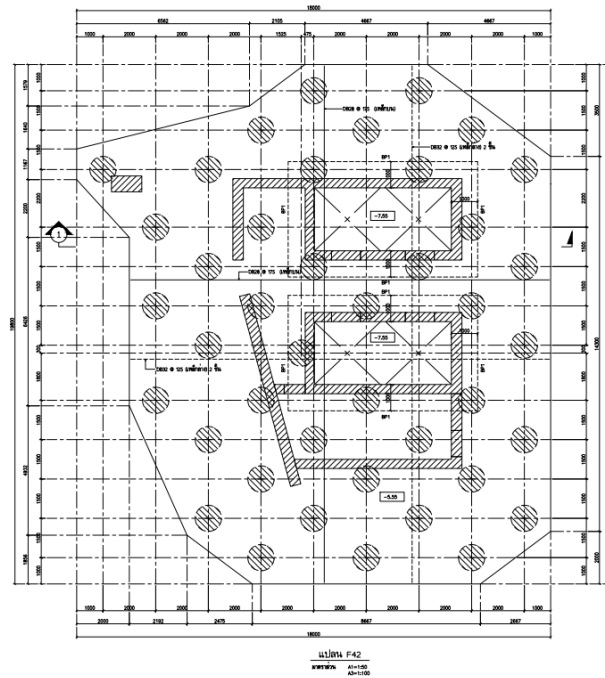
มีขนาดกว้าง 18 เมตร ยาว 19.8 เมตร ความหนา 3 เมตร ปริมาตรคอนกรีต 900 ลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 3-18 ฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42) ที่หน้างานจริง (1)



รูปที่ 3-19 ฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42) ที่หน้างานจริง (2)



รูปที่ 3-20 แบบแปลนของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42)

2) Siamese Rama 9 (F65)

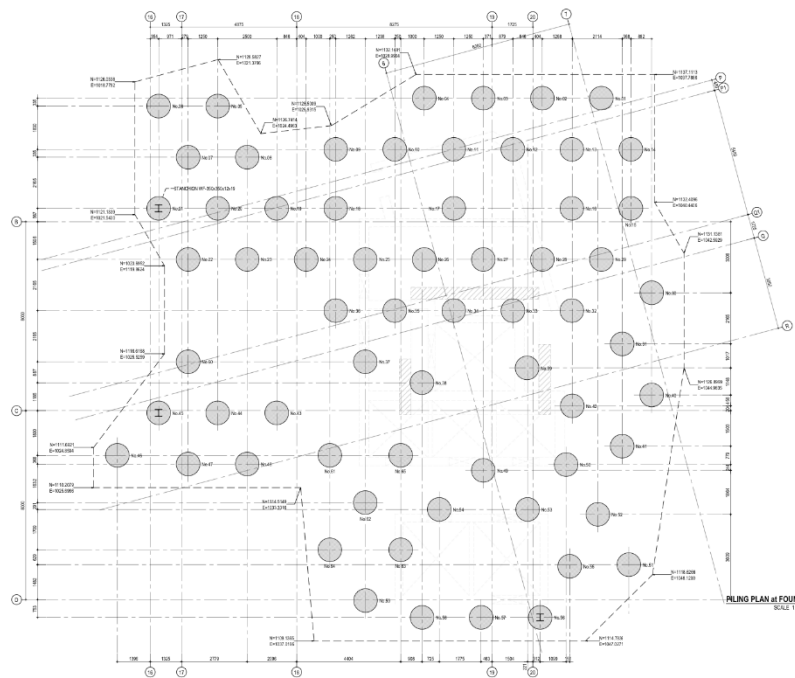
มีขนาดกว้าง 23.2 เมตร ยาว 24.6 เมตร ความหนา 2.8 เมตร ปริมาตรคอนกรีต 1,288 ลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 3-21 ฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65) ที่หน้างานจริง (1)



รูปที่ 3-22 ฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65) ที่หน้างานจริง (2)



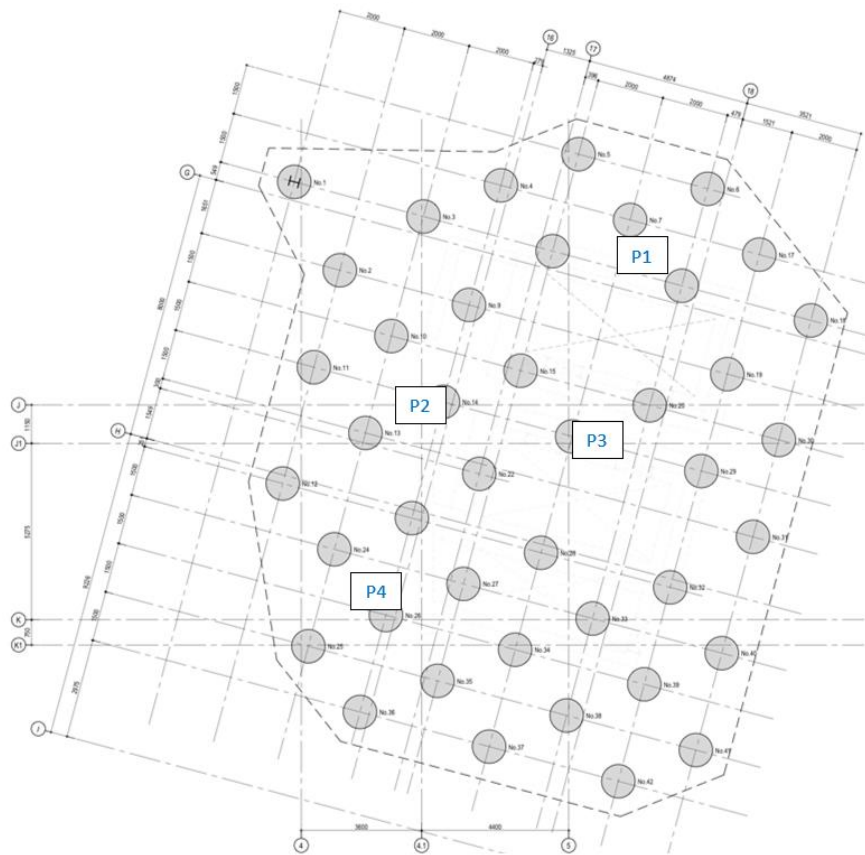
รูปที่ 3-23 แบบแปลนของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65)

3.4.2 การติดตั้งระบบวัดอุณหภูมิคอนกรีต

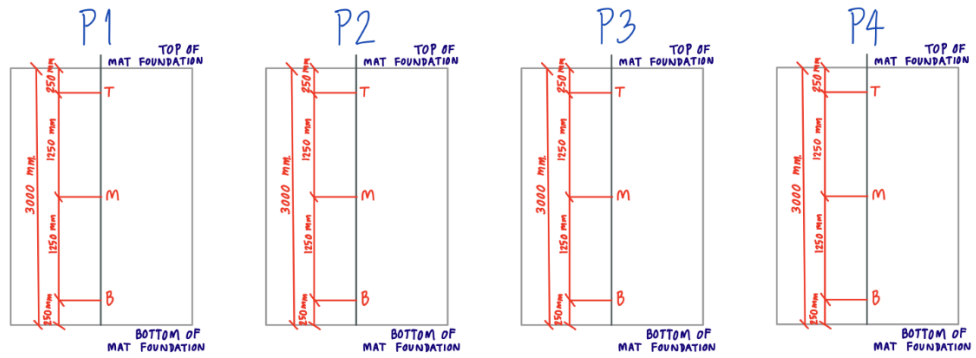
ขั้นตอนในการติดตั้งระบบวัดอุณหภูมิคอนกรีตเพื่อวัดอุณหภูมิภายในฐานรากแพเป็นระยะเวลา 5 วันนับตั้งแต่การเทคอนกรีต โดยมีวัตถุประสงค์คือเพื่อตรวจสอบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายใน

ฐานรากแพและวางแผนในการเปิดโพนที่ผิวบนของคอนกรีตในระยะเวลาที่เหมาะสมเพื่อป้องกันการเกิดปัญหา thermal crack ซึ่งเกิดจากผลต่างของอุณหภูมิภายในฐานรากแพที่มากเกินไป

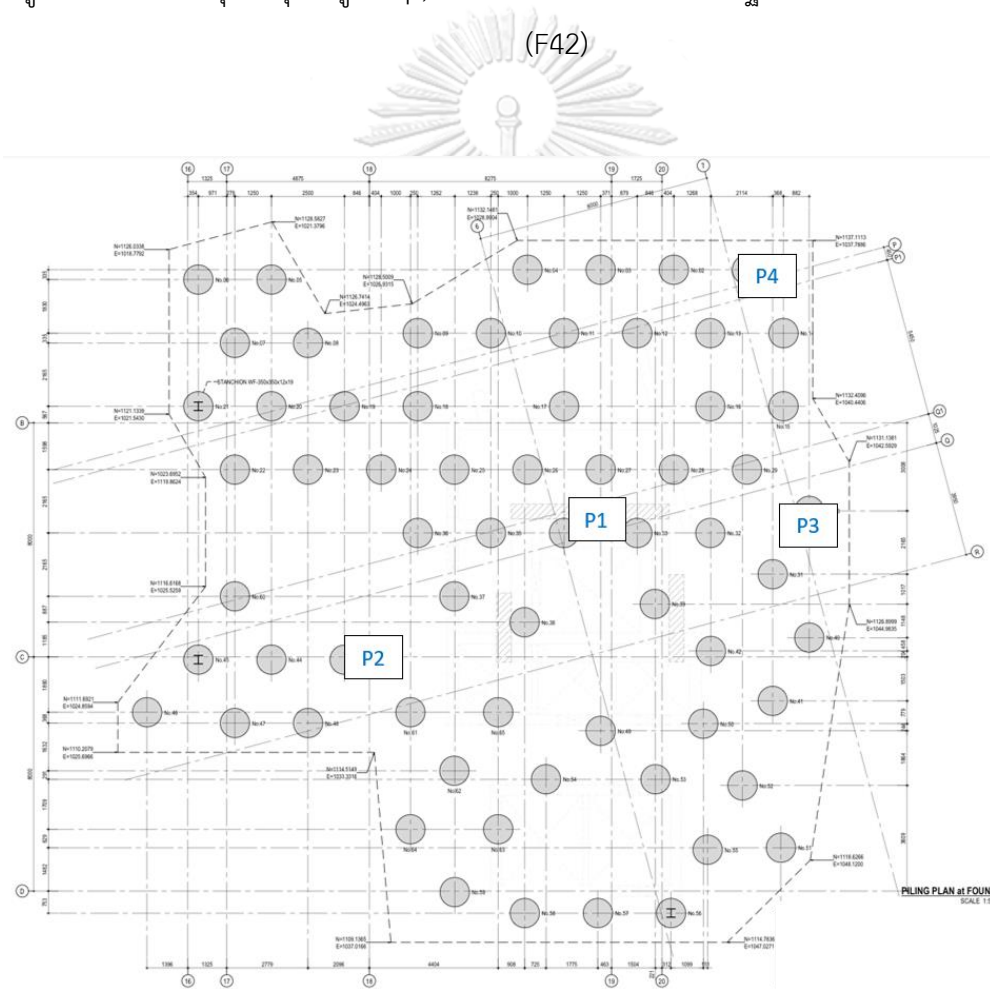
1. กำหนดจุดวัดอุณหภูมิ โดยแต่ละจุดจะมี 3 ระดับคือ top (ห่างจากผิวบน 25 cm), middle และ bottom (ห่างจากผิวล่าง 25 cm) ซึ่งตำแหน่งของจุดวัดอุณหภูมิควรเลือกให้อยู่ในบริเวณที่คิดว่าน่าจะเกิดปัญหา คือบริเวณกลางฐานรากแพเพื่อตรวจสอบอุณหภูมิสูงสุดในแกนกลางของฐานรากแพ และบริเวณขอบฐานรากแพเพื่อตรวจสอบผลต่างของอุณหภูมิภายในฐานรากแพ



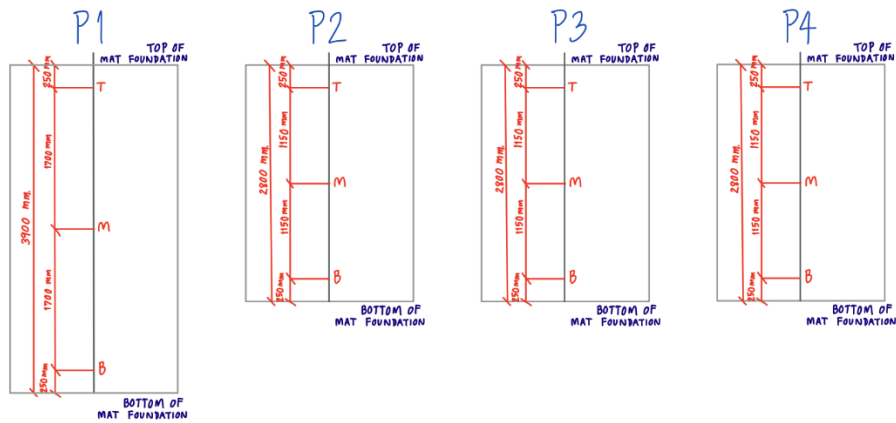
รูปที่ 3-24 ตำแหน่งจุดวัดอุณหภูมิ 4 จุด ของฐานรากแพที่ Siamese Rama 9 (F42)



รูปที่ 3-25 ระดับจุดวัดอุณหภูมิ top, middle และ bottom ของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42)



รูปที่ 3-26 ตำแหน่งจุดวัดอุณหภูมิ 4 จุด ของฐานรากแพที่ Siamese Rama 9 (F65)



รูปที่ 3-27 ระดับจุดวัดอุณหภูมิ top, middle และ bottom ของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65)

- นำเหล็กข้ออ้อยมาวัดระยะและติดตั้ง temperature sensor ตามระดับ top, middle และ bottom ของแต่ละจุด รวบสาย sensor ให้เป็นระเบียบ ผูก Node ติดกับเหล็กข้ออ้อยและนำถุงมาครอบเพื่อป้องกันไม่ให้ Node โดนคอนกรีตหรือน้ำโดยตรง



รูปที่ 3-28 การวัดและติดตั้ง sensor ตามระดับ top, middle และ bottom

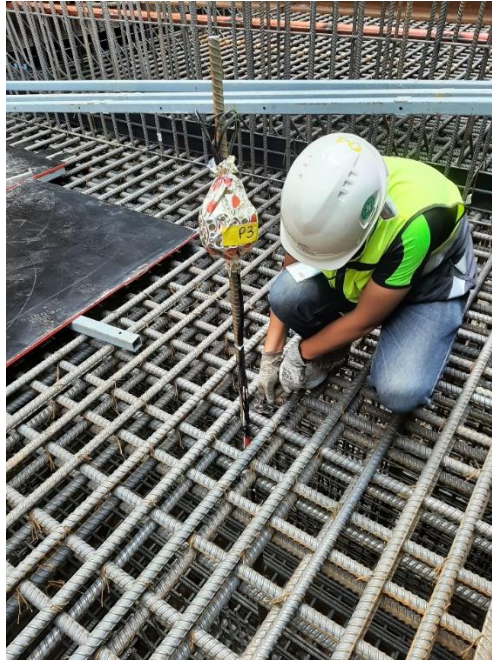


รูปที่ 3-29 การติดและคลุม Node ด้วยถุงพลาสติก



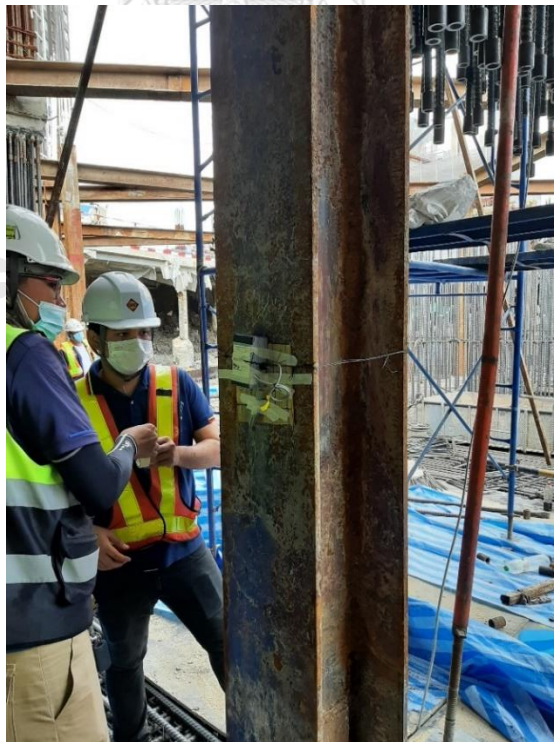
รูปที่ 3-30 เหล็กข้ออ้อยที่มีการติดตั้ง Node และ temperature sensor เรียบร้อยแล้ว

3. นำเหล็กข้ออ้อยที่ติดตั้ง Node เรียบร้อยแล้ว ไปวางตามตำแหน่งของแต่ละจุด ใช้ลวดมัดเหล็กข้ออ้อยกับตะแกรงเหล็กเสริมด้านบนและล่าง เพื่อป้องกัน Node ชัยบขณะเทคอนกรีต



รูปที่ 3-31 การวาง Node ตามตำแหน่งที่กำหนดและใช้ลวดมัดเหล็กข้ออ้อยกับเหล็กตะแกรงบน

4. ติดตั้ง Ambient Node ในบริเวณใกล้เคียงกับฐานราก เพื่อวัดอุณหภูมิของอากาศ

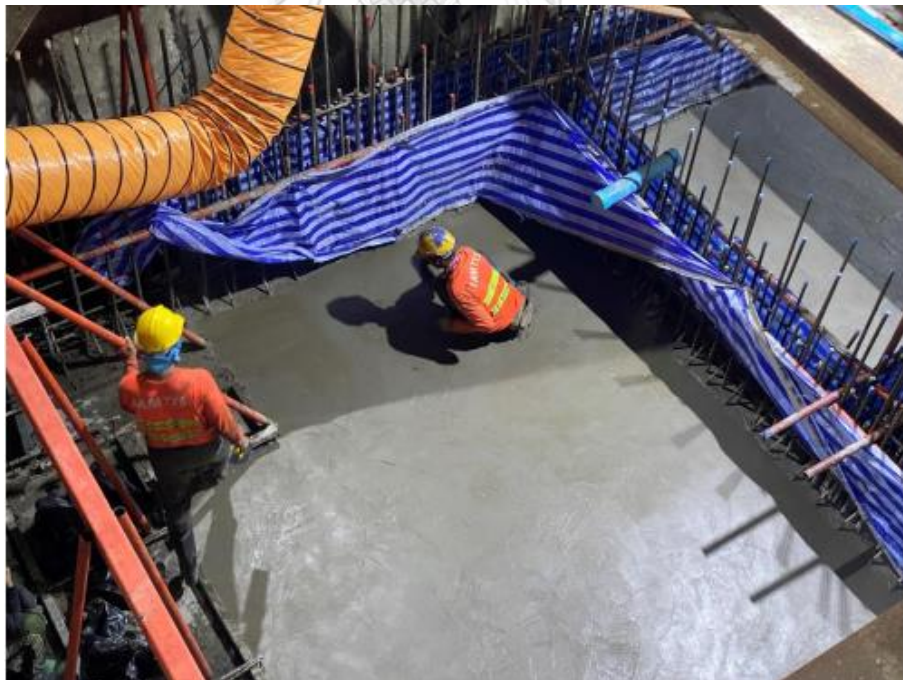


รูปที่ 3-32 การติดตั้ง Ambient Node

3.4.3 ฐานรากแพะหว่างเทคอนกรีตและภายหลังจากการเทคอนกรีต



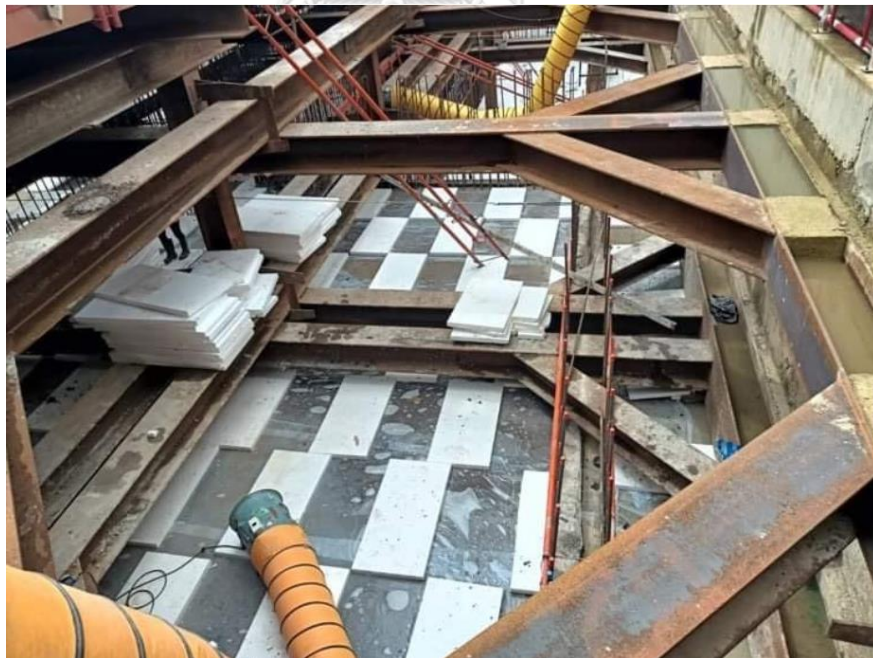
รูปที่ 3-33 ฐานรากแพะขณะเทคอนกรีต



รูปที่ 3-34 ฐานรากแพะขณะปรับผิวคอนกรีต



รูปที่ 3-35 ฐานรากแพที่มีการปิดโฟมและผ้าใบ เพื่อเป็นฉนวนความร้อน



รูปที่ 3-36 การปลดฉนวนความร้อนออกจากผิวบนของฐานรากแพ



รูปที่ 3-37 ผิวบนของฐานรากแพซึ่งไม่พบรอยแตกร้าว

3.5 แบบจำลองฐานรากแพ

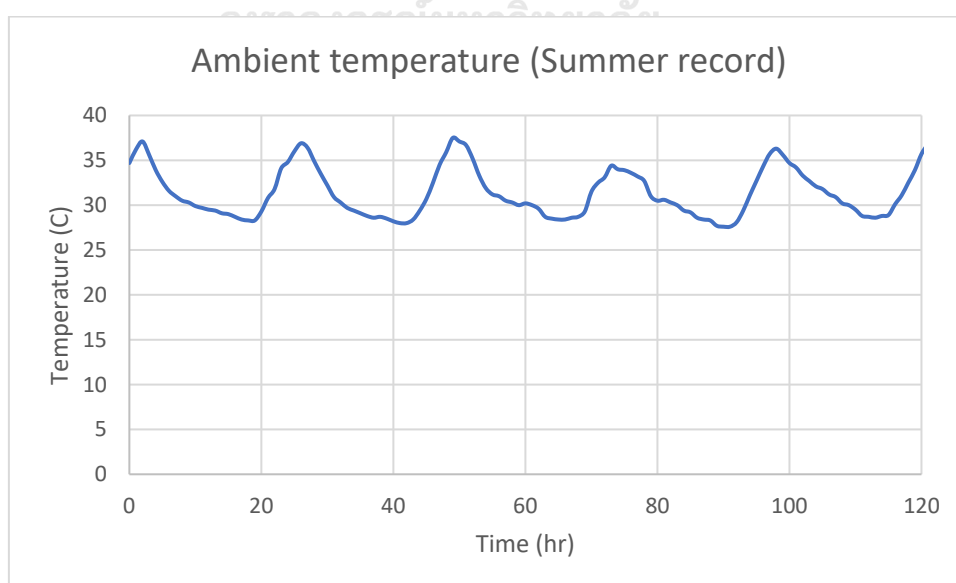
ผู้วิจัยสร้างแบบจำลองฐานรากแพ โดยใช้โปรแกรม Midas Civil ในการสร้าง 3D finite element (element size = $25 \times 25 \times 25 \text{ cm}^3$) เพื่อจำลองพฤติกรรมในด้านอุณหภูมิและ stress ที่เกิดขึ้นในฐานรากแพเนื่องจาก heat of hydration ของซีเมนต์ บริเวณขอบของฐานรากแพใช้เป็น diaphragm wall ล้อมรอบ ค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้สร้างแบบจำลองฐานรากแพแสดงในตารางที่ 3-3 โดย Heat source function coefficients มาจากการทดลองเทคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 1 เมตร และวัดอุณหภูมิแกนกลาง จากนั้นจึงปรับค่า Heat source function coefficients เพื่อให้กราฟอุณหภูมิจากการวิเคราะห์ด้วย Midas Civil ใกล้เคียงกับอุณหภูมิจริงที่วัดได้ นอกจากนี้ยังมีการปิดโฟม (EPS curing) ที่ผิวบนของฐานรากแพตลอดการวิเคราะห์เพื่อให้แบบจำลองมีความใกล้เคียงกับฐานรากแพจริง

Convection coefficient แบบ steel form คือการจำลอง boundary condition ในบริเวณที่เป็น lift pit ซึ่งพบเฉพาะในฐานราก Siamese Rama 9 (F65)

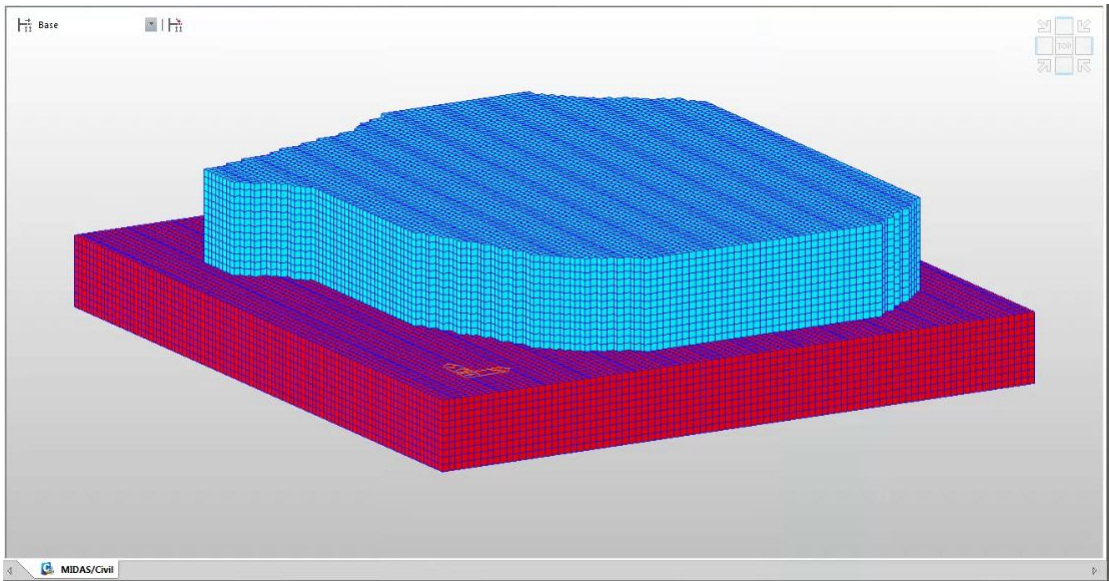
Ambient temperature ที่ใช้คืออุณหภูมิของอากาศที่วัดในบริเวณฐานรากที่ใช้ทดสอบ อุปกรณ์วัดอุณหภูมิคอนกรีต ซึ่งผู้วิจัยแทนด้วยคำว่า Summer record โดยอุณหภูมิเป็นไปตามรูปที่ 3-38

ตารางที่ 3-3 ตัวแปรที่ใช้สร้างแบบจำลองฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42) และ (F65)

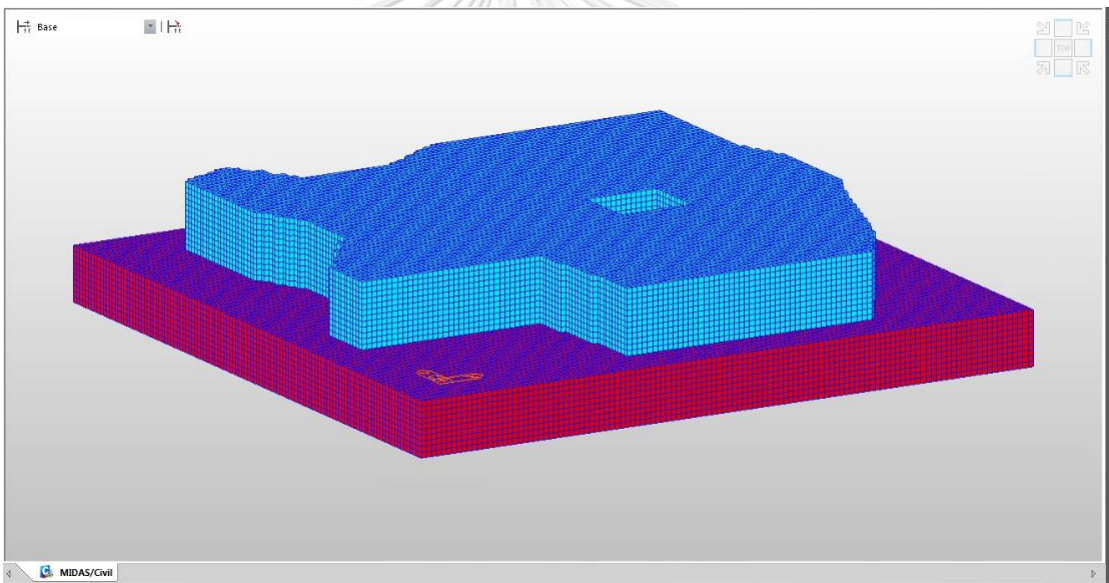
Property		Part	Mat Foundation	Subsoil
Specific heat (kcal/kg °C)			0.208	0.2
Density (kgf/m ³)			2400	1800
Rate of heat conduction (kcal/m hr °C)			2.034	1.7
Convection coefficient (kcal/m ² hr °C)	Surface exposed to atmosphere		12	12
	Steel Form		10	-
Ambient temperature (°C)			Summer record	-
Casting temperature (°C)			35	-
28-day compressive strength (kgf/cm ²)			320	-
Compressive strength gain coefficients			a=13.9 b=0.86	-
Modulus of elasticity (kgf/cm ²)			2.56x10 ⁵	1x10 ⁴
Thermal expansion coefficient			9x10 ⁻⁶	1x10 ⁻⁵
Poisson's ratio			0.2	0.2
Unit cement content (kg/m ³)			225	-
Heat source function coefficients			K=36 a=1.75	-
Soil temperature			-	27



รูปที่ 3-38 Ambient temperature (Summer record)



รูปที่ 3-39 แบบจำลองฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42) วางบนพื้นดิน



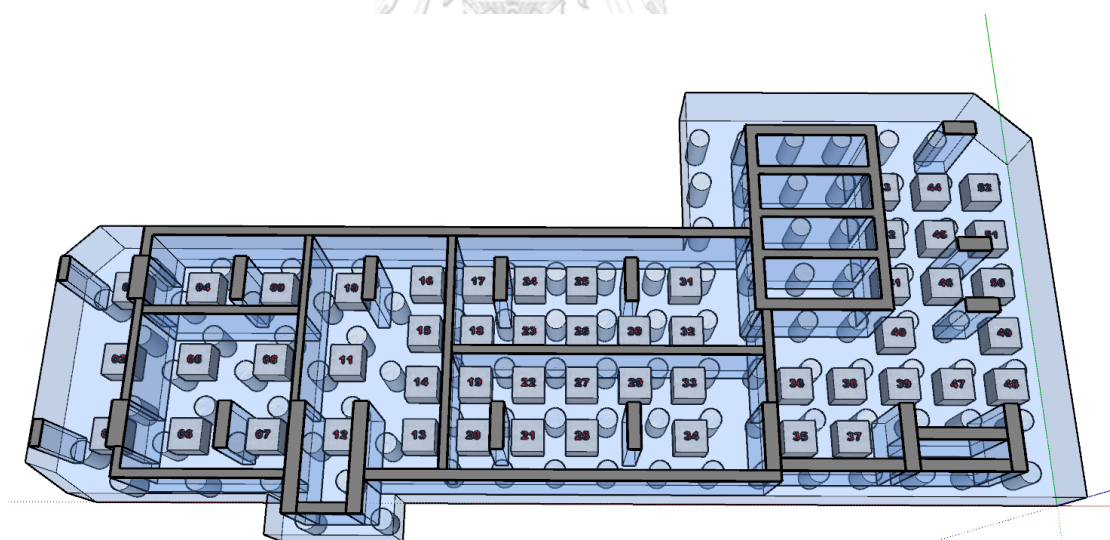
รูปที่ 3-40 แบบจำลองฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65) วางบนพื้นดิน

รูปที่ 3-39 และ 3-40 แสดงแบบจำลองฐานรากแพโดยที่สีฟ้าคือคอนกรีต และสีแดงคือพื้นดิน

3.6 แนวคิดการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิด้วยคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ

การปรับปรุงฐานรากแพเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิด้วยคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ มีแนวคิดคือใส่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จเพื่อลดปริมาณคอนกรีตที่ต้องเท ซึ่งจะช่วยให้ heat of hydration ลดลงและอุณหภูมิของฐานรากแพลดลง ส่งผลให้ความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างผิวกับแกนกลางของคอนกรีตน้อยลง ดังนั้น thermal stress ที่เกิดขึ้นในฐานรากแพมีแนวโน้มที่จะน้อยลง ทำให้สามารถป้องกันการเกิดรอยร้าวจากอุณหภูมิในฐานรากแพได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ น้ำหนักของฐานรากแพจะลดลง จึงทำให้ประหยัดเสาเข็มที่ใช้รองรับฐานรากได้อีกด้วย

ตำแหน่งการใส่ของคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ คือระดับตรงกลางของฐานรากแพ และหลีกเลี่ยงบริเวณที่มีเข็มหรือกำแพงรับแรงเฉือน เพื่อให้โครงสร้างสามารถถ่ายแรงเฉือนได้ตามปกติ การที่ผู้วิจัยเลือกใส่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จที่ระดับตรงกลางของฐานรากแพ เนื่องจากบริเวณตรงกลางมีโมเมนต์ค่อนข้างน้อย ไม่ส่งผลกระทบต่อด้านการรับแรง นอกจากนี้ระดับตรงกลางของฐานรากแพปกติจะเป็นตำแหน่งที่อุณหภูมิสูงที่สุด โดยการแทนที่ด้วยคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จซึ่งไม่มีความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา hydration จะช่วยทำให้อุณหภูมิแกนกลางลดลง ส่งผลเชิงบวกต่อฐานรากแพ



รูปที่ 3-41 แนวคิดการใส่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จในฐานรากแพขนาดใหญ่

คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จที่ใช้ เป็นการผสมของซีเมนต์เพสต์กับโฟม เพื่อให้คอนกรีตมีความหนาแน่นต่ำมาก ซึ่งจะเป็นฉนวนความร้อนโดย วรากร อิมรักษา (2562) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติ

ของคอนกรีตความหนาแน่น 250 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ใช้โฟมที่ผลิตจากสารเกิดฟองอากาศชนิด
โปรตีน พบว่ามีค่าสภาพการนำความร้อนเท่ากับ 0.188 วัตต์ต่อเมตร-องศาเซลเซียส



รูปที่ 3-42 ตัวอย่างโฟมที่ใช้ผสมกับซีเมนต์เพสต์ (วรากร อิมรักษา, 2562)



รูปที่ 3-43 การผสมคอนกรีตโฟมความหนาแน่นต่ำมาก (วรากร อิมรักษา, 2562)

บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

4.1 ผลการตรวจวัดอุณหภูมิในภาคสนาม

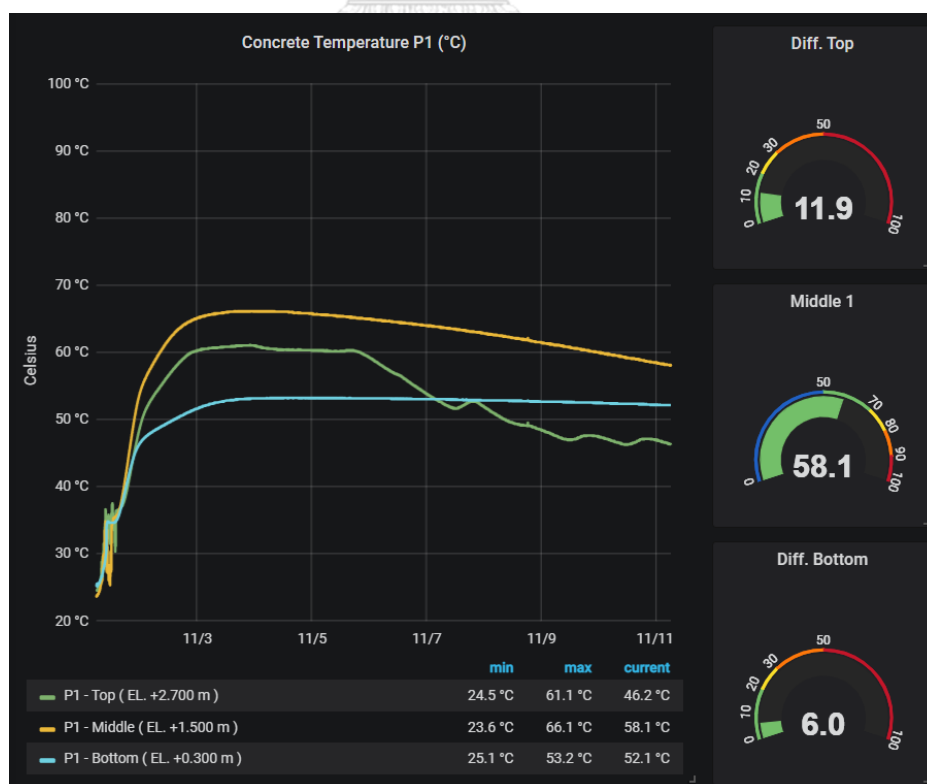
4.1.1 จากการตรวจวัดอุณหภูมิของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42) พบว่า

จุด P1 มีอุณหภูมิที่ middle สูงที่สุดคือ 66.1 °C และผลต่างของอุณหภูมิสูงสุดซึ่งคือผลต่างระหว่างอุณหภูมิที่ top กับ middle เท่ากับ 13.9 °C

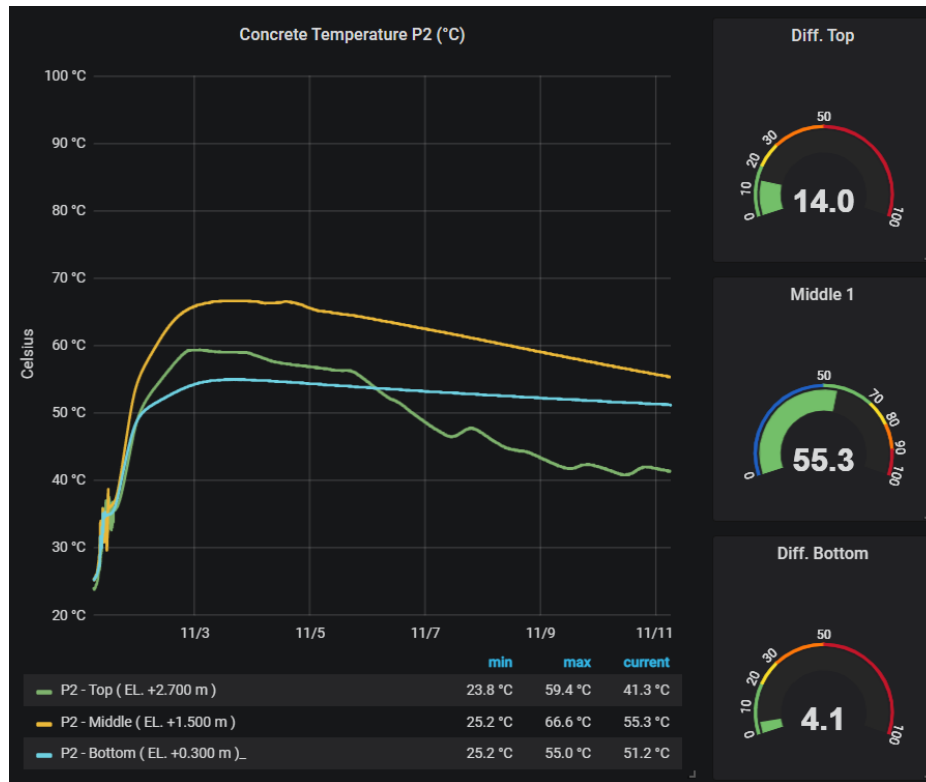
จุด P2 มีอุณหภูมิที่ middle สูงที่สุดคือ 66.6 °C และผลต่างของอุณหภูมิสูงสุดซึ่งคือผลต่างระหว่างอุณหภูมิที่ top กับ middle เท่ากับ 16.5 °C

จุด P3 มีอุณหภูมิที่ middle สูงที่สุดคือ 66.0 °C และผลต่างของอุณหภูมิสูงสุดซึ่งคือผลต่างระหว่างอุณหภูมิที่ top กับ middle และ bottom กับ middle เท่ากับ 14.9 °C

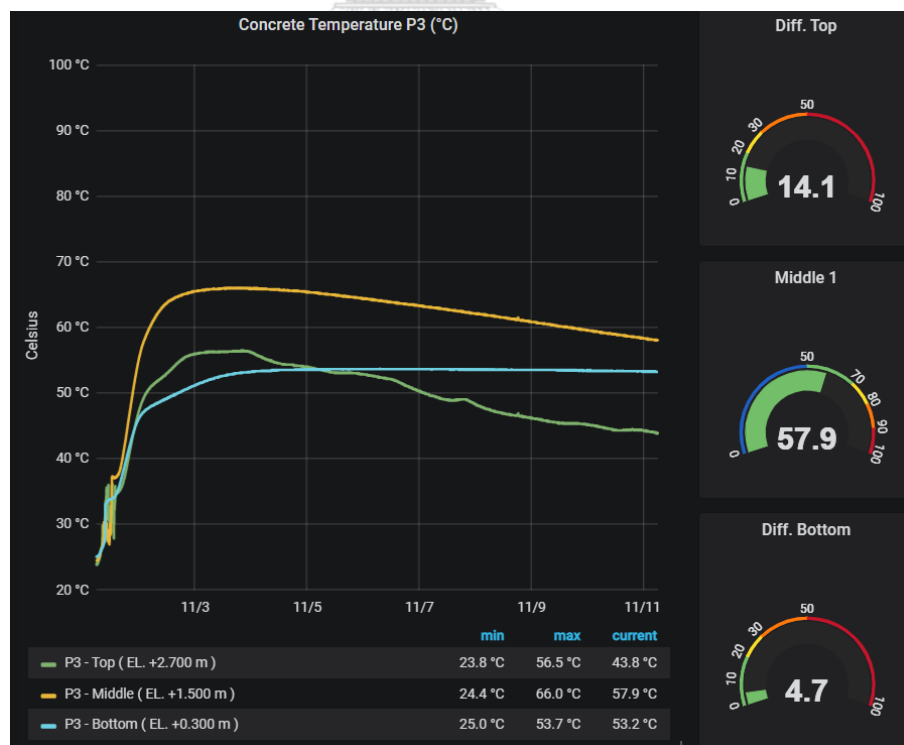
จุด P4 มีอุณหภูมิที่ middle สูงที่สุดคือ 66.1 °C และผลต่างของอุณหภูมิสูงสุดซึ่งคือผลต่างระหว่างอุณหภูมิที่ bottom กับ middle เท่ากับ 15.0 °C



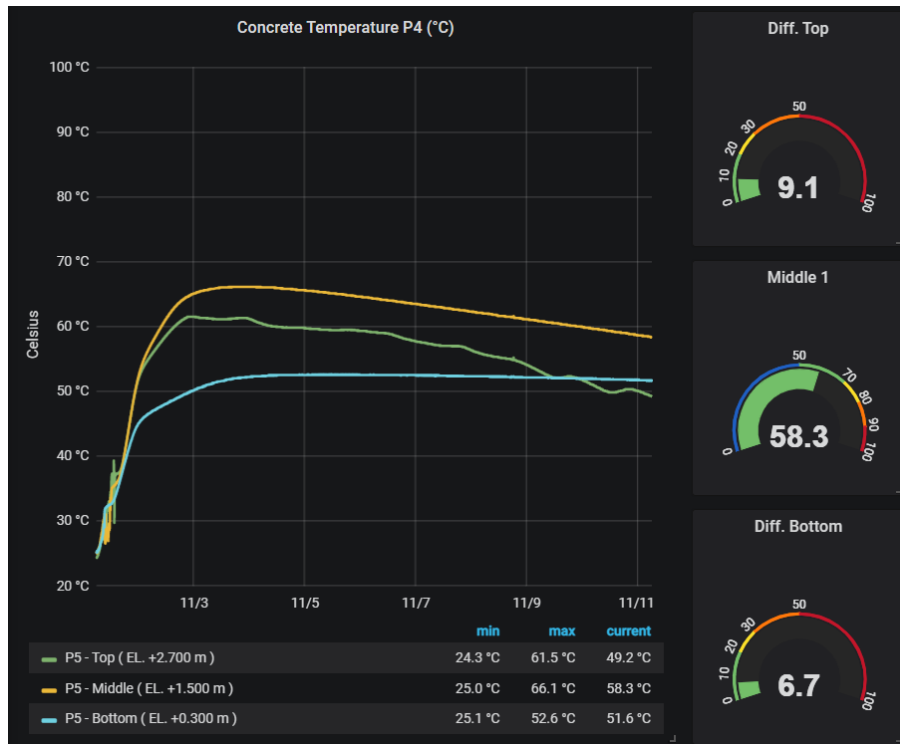
รูปที่ 4-1 อุณหภูมิของจุด P1 ฐานราก Siamese Rama 9 (F42)



รูปที่ 4-2 อุณหภูมิของจุด P2 ฐานราก Siamese Rama 9 (F42)



รูปที่ 4-3 อุณหภูมิของจุด P3 ฐานราก Siamese Rama 9 (F42)



รูปที่ 4-4 อุณหภูมิของจุด P4 ฐานราก Siamese Rama 9 (F42)

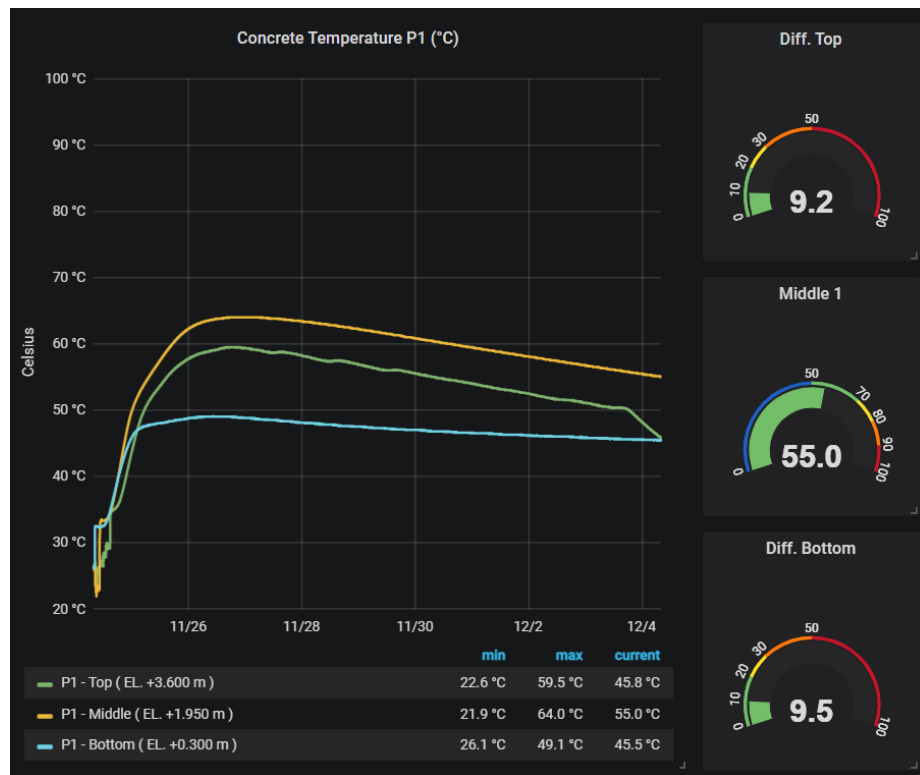
4.1.2 จากการตรวจวัดอุณหภูมิของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65) พบว่า

จุด P1 มีอุณหภูมิที่ middle สูงที่สุดคือ 64.0 °C และผลต่างของอุณหภูมิสูงสุดซึ่งคือผลต่างระหว่างอุณหภูมิที่ bottom กับ middle เท่ากับ 15.4 °C

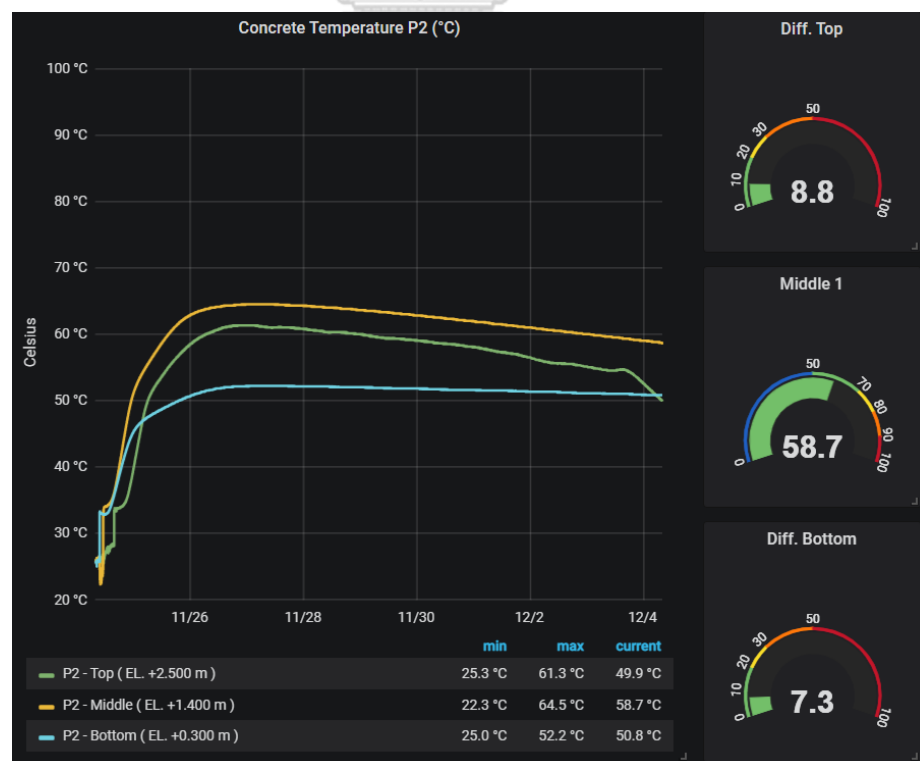
จุด P2 มีอุณหภูมิที่ middle สูงที่สุดคือ 64.5 °C และผลต่างของอุณหภูมิสูงสุดซึ่งคือผลต่างระหว่างอุณหภูมิที่ bottom กับ middle เท่ากับ 12.4 °C

จุด P3 มีอุณหภูมิที่ middle สูงที่สุดคือ 65.3 °C และผลต่างของอุณหภูมิสูงสุดซึ่งคือผลต่างระหว่างอุณหภูมิที่ bottom กับ middle เท่ากับ 12.4 °C

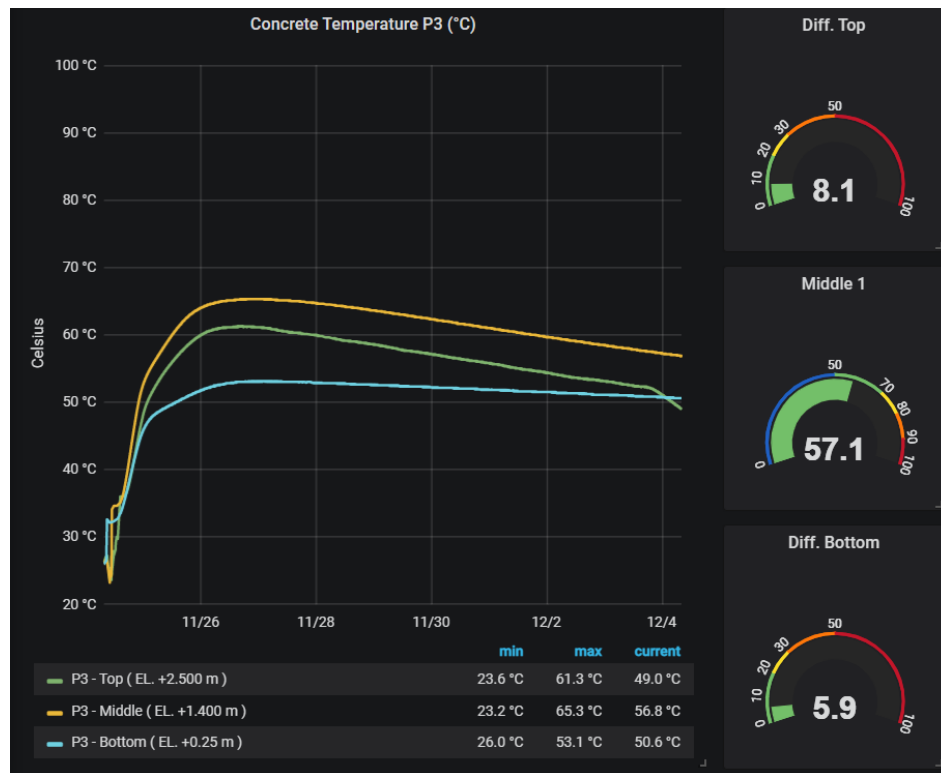
จุด P4 มีอุณหภูมิที่ middle สูงที่สุดคือ 62.9 °C และผลต่างของอุณหภูมิสูงสุดซึ่งคือผลต่างระหว่างอุณหภูมิที่ bottom กับ middle เท่ากับ 12.6 °C



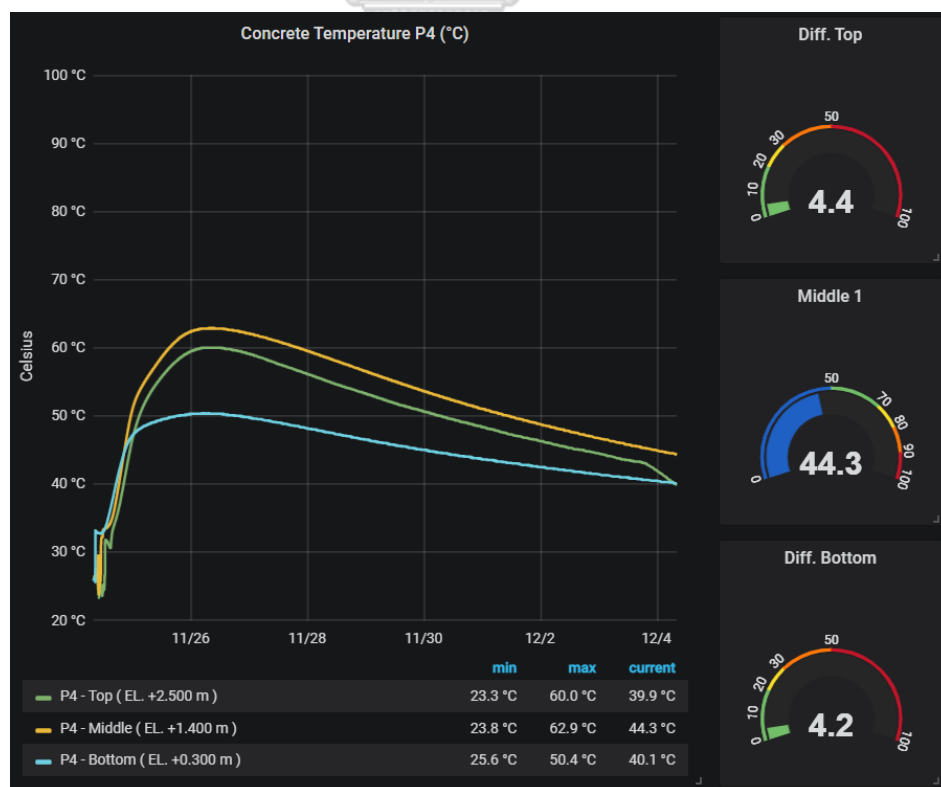
รูปที่ 4-5 อุณหภูมิของจุด P1 ฐานราก Siamese Rama 9 (F65)



รูปที่ 4-6 อุณหภูมิของจุด P2 ฐานราก Siamese Rama 9 (F65)



รูปที่ 4-7 อุณหภูมิของจุด P3 ฐานราก Siamese Rama 9 (F65)



รูปที่ 4-8 อุณหภูมิของจุด P4 ฐานราก Siamese Rama 9 (F65)

4.2 ผลการวิเคราะห์จากแบบจำลอง

4.2.1 ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิ

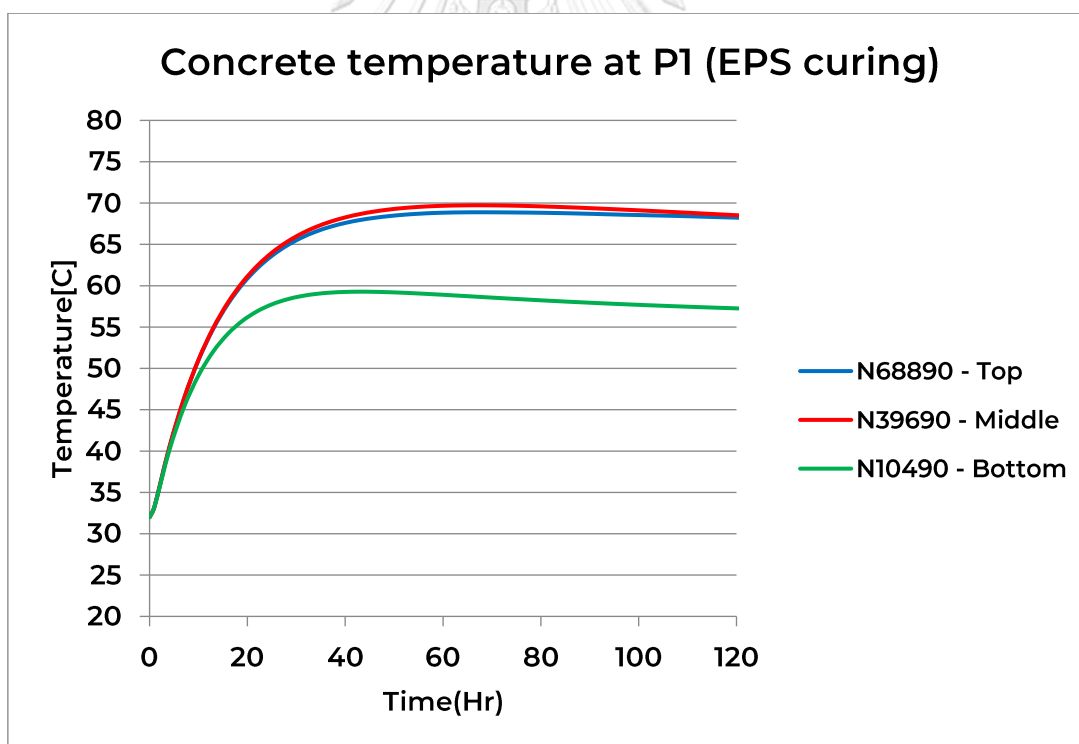
1) Siamese Rama 9 (F42)

จุด P1 มีอุณหภูมิที่ middle สูงที่สุดคือ 69.7 °C และผลต่างของอุณหภูมิสูงสุดซึ่งคือผลต่างระหว่างอุณหภูมิที่ bottom กับ middle เท่ากับ 11.4 °C

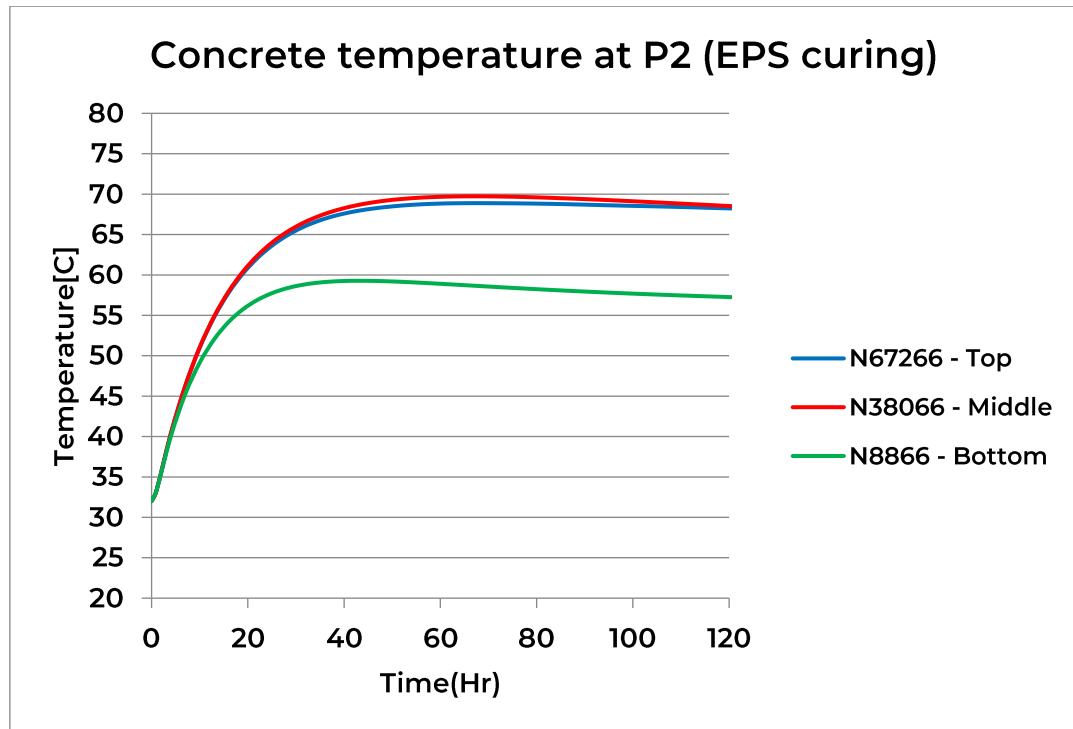
จุด P2 มีอุณหภูมิที่ middle สูงที่สุดคือ 69.7 °C และผลต่างของอุณหภูมิสูงสุดซึ่งคือผลต่างระหว่างอุณหภูมิที่ bottom กับ middle เท่ากับ 11.4 °C

จุด P3 มีอุณหภูมิที่ middle สูงที่สุดคือ 69.7 °C และผลต่างของอุณหภูมิสูงสุดซึ่งคือผลต่างระหว่างอุณหภูมิที่ bottom กับ middle เท่ากับ 11.4 °C

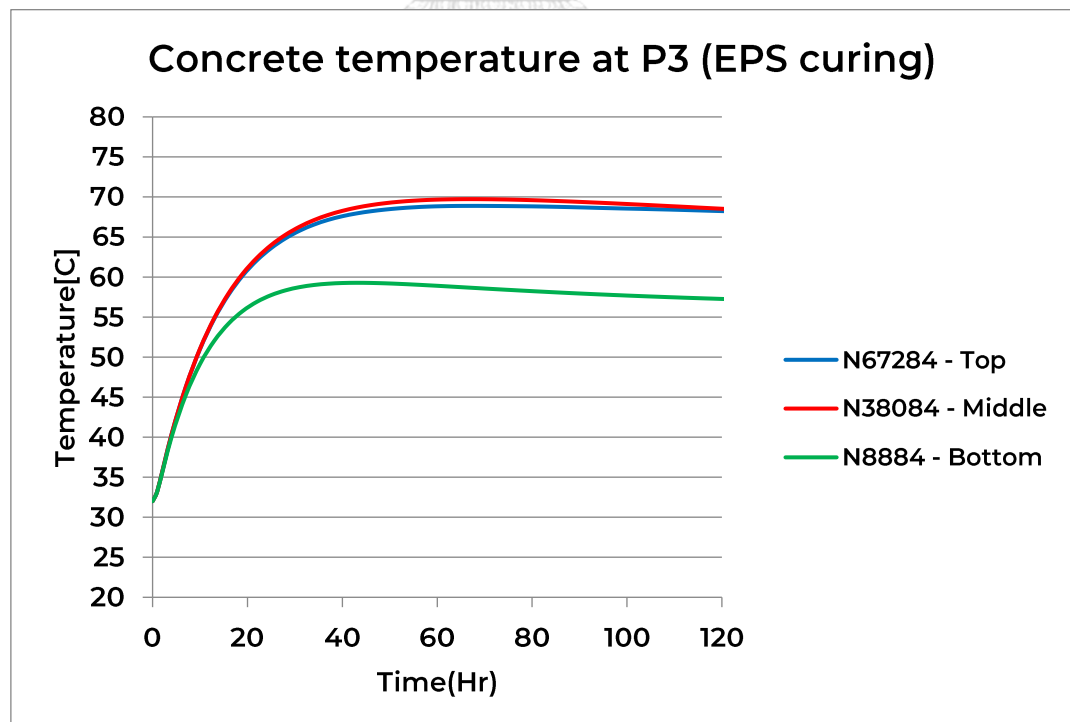
จุด P4 มีอุณหภูมิที่ middle สูงที่สุดคือ 69.7 °C และผลต่างของอุณหภูมิสูงสุดซึ่งคือผลต่างระหว่างอุณหภูมิที่ bottom กับ middle เท่ากับ 11.4 °C



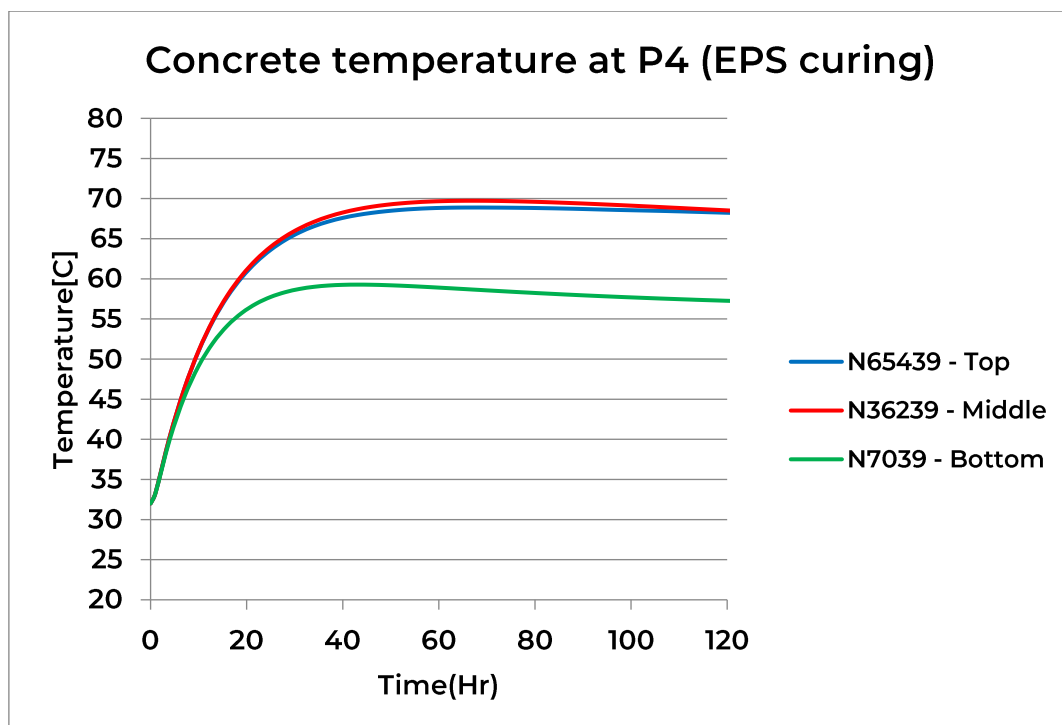
รูปที่ 4-9 กราฟระหว่างอุณหภูมิและเวลาจุด P1 ของฐานราก Siamese Rama 9 (F42) ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง



รูปที่ 4-10 กราฟระหว่างอุณหภูมิและเวลาจุด P2 ของฐานราก Siamese Rama 9 (F42) ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง



รูปที่ 4-11 กราฟระหว่างอุณหภูมิและเวลาจุด P3 ของฐานราก Siamese Rama 9 (F42) ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง



รูปที่ 4-12 กราฟระหว่างอุณหภูมิและเวลาจุด P4 ของฐานราก Siamese Rama 9 (F42) ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง

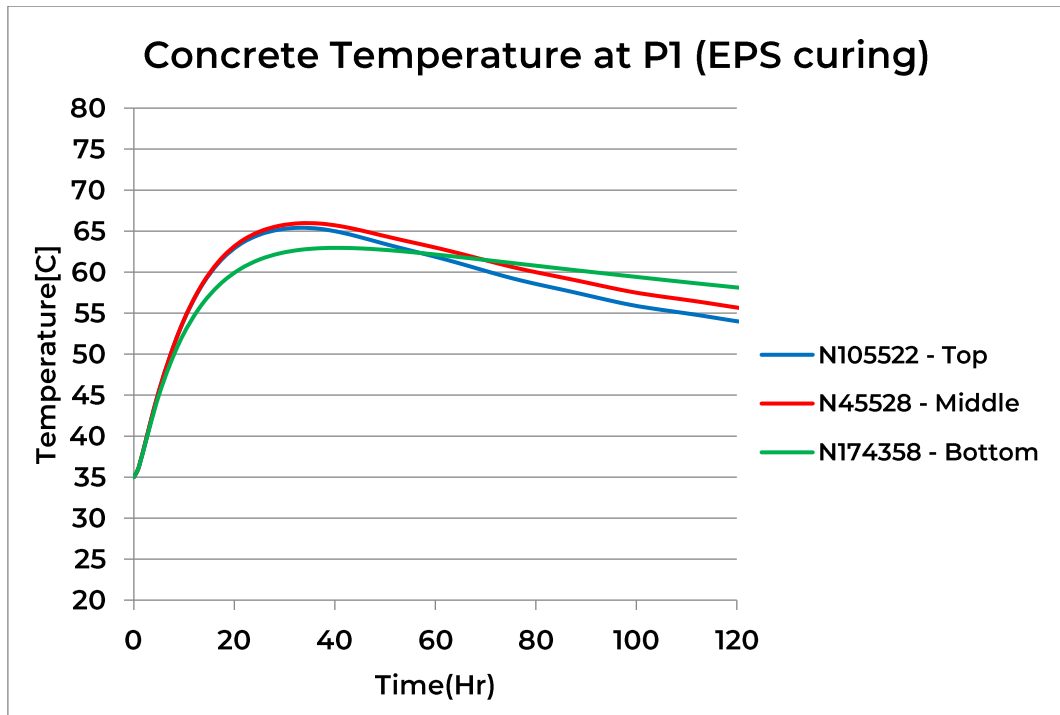
2) Siamese Rama 9 (F65)

จุด P1 มีอุณหภูมิที่ middle สูงที่สุดคือ 66.0 °C และผลต่างของอุณหภูมิสูงสุดซึ่งคือผลต่างระหว่างอุณหภูมิที่ bottom กับ middle เท่ากับ 3.4 °C

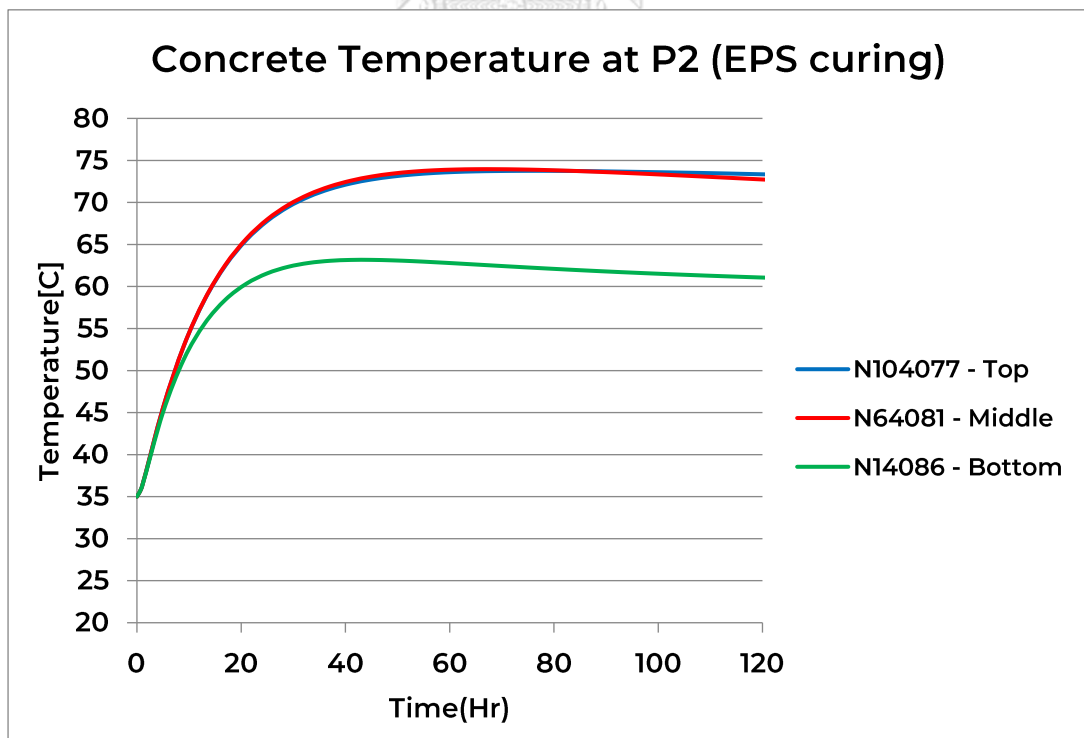
จุด P2 มีอุณหภูมิที่ middle สูงที่สุดคือ 74.0 °C และผลต่างของอุณหภูมิสูงสุดซึ่งคือผลต่างระหว่างอุณหภูมิที่ bottom กับ middle เท่ากับ 11.8 °C

จุด P3 มีอุณหภูมิที่ middle สูงที่สุดคือ 70.8 °C และผลต่างของอุณหภูมิสูงสุดซึ่งคือผลต่างระหว่างอุณหภูมิที่ bottom กับ middle เท่ากับ 10.0 °C

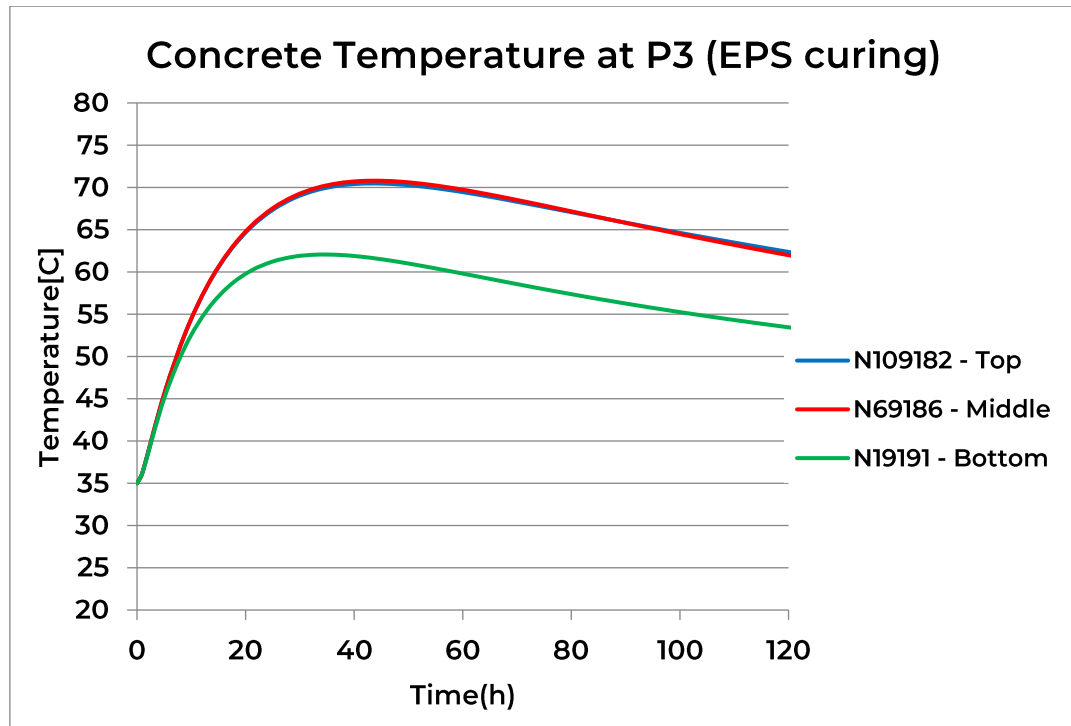
จุด P4 มีอุณหภูมิที่ middle สูงที่สุดคือ 72.0 °C และผลต่างของอุณหภูมิสูงสุดซึ่งคือผลต่างระหว่างอุณหภูมิที่ bottom กับ middle เท่ากับ 10.7 °C



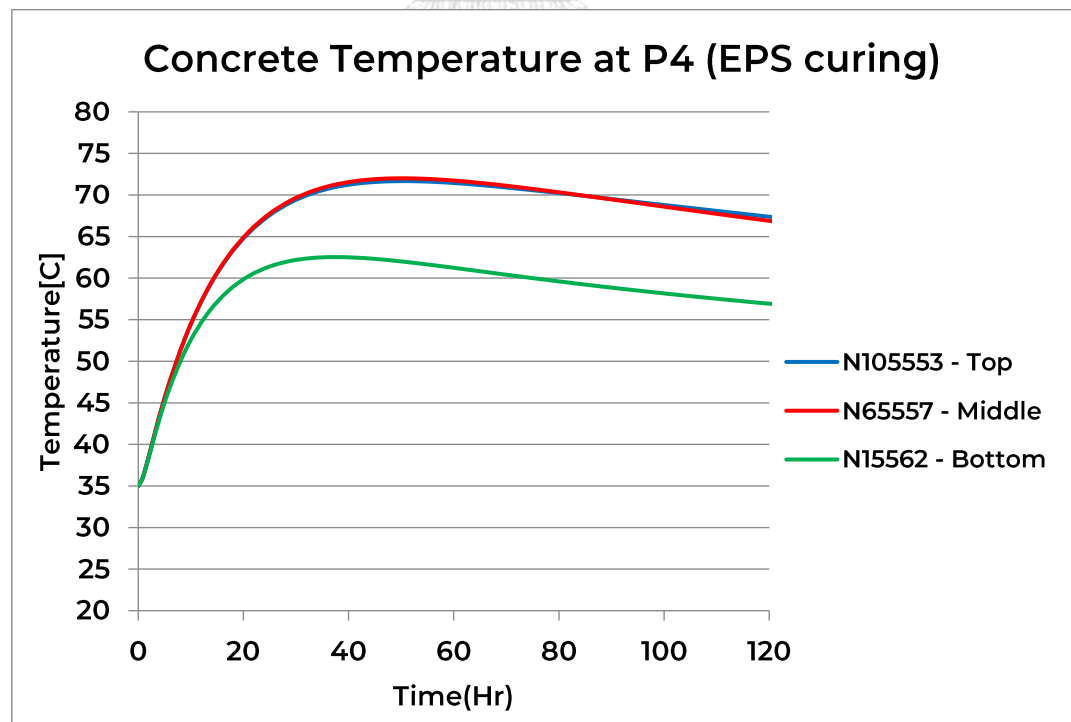
รูปที่ 4-13 กราฟระหว่างอุณหภูมิและเวลาจุด P1 ของฐานราก Siamese Rama 9 (F65) ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง



รูปที่ 4-14 กราฟระหว่างอุณหภูมิและเวลาจุด P2 ของฐานราก Siamese Rama 9 (F65) ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง



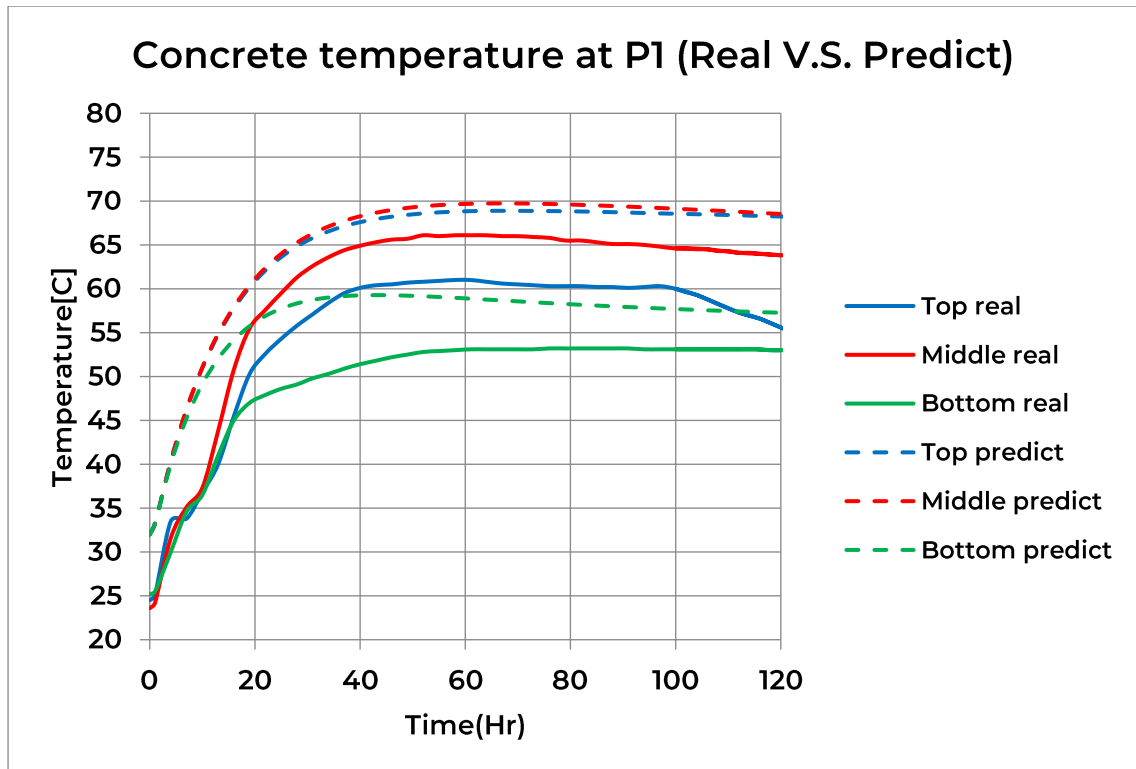
รูปที่ 4-15 กราฟระหว่างอุณหภูมิและเวลาจุด P3 ของฐานราก Siamese Rama 9 (F65) ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง



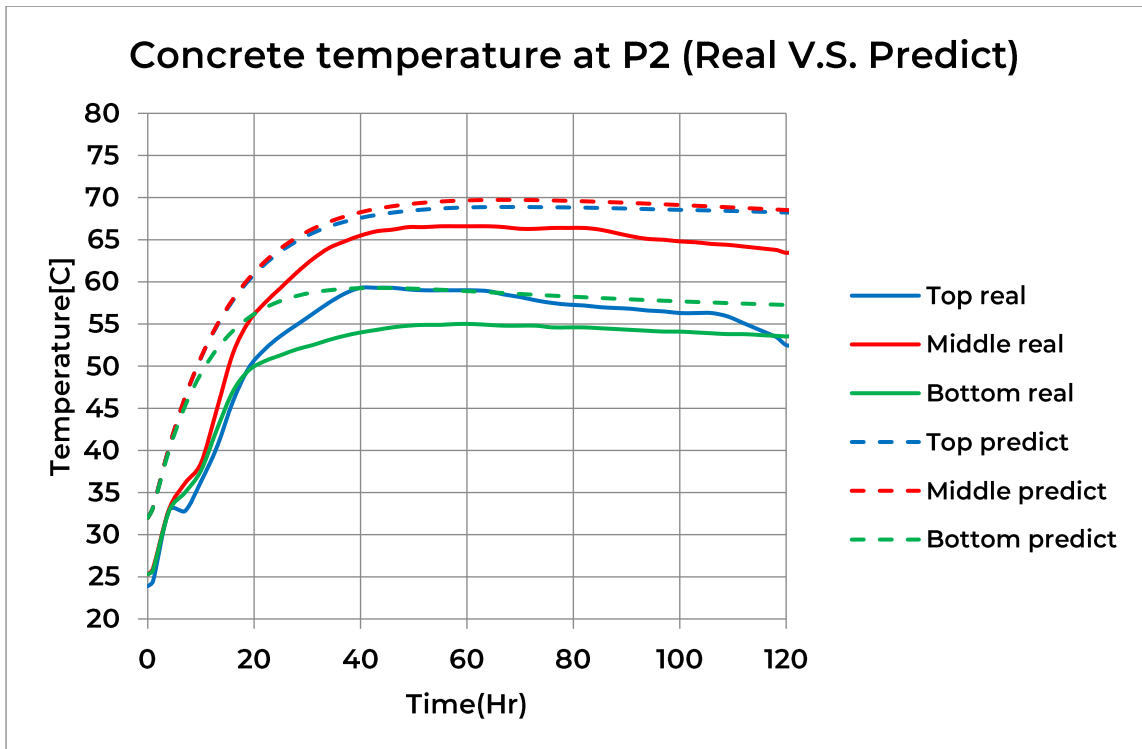
รูปที่ 4-16 กราฟระหว่างอุณหภูมิและเวลาจุด P4 ของฐานราก Siamese Rama 9 (F65) ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง

4.2.2 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่วัดได้และอุณหภูมิจากแบบจำลองของฐานรากแพ

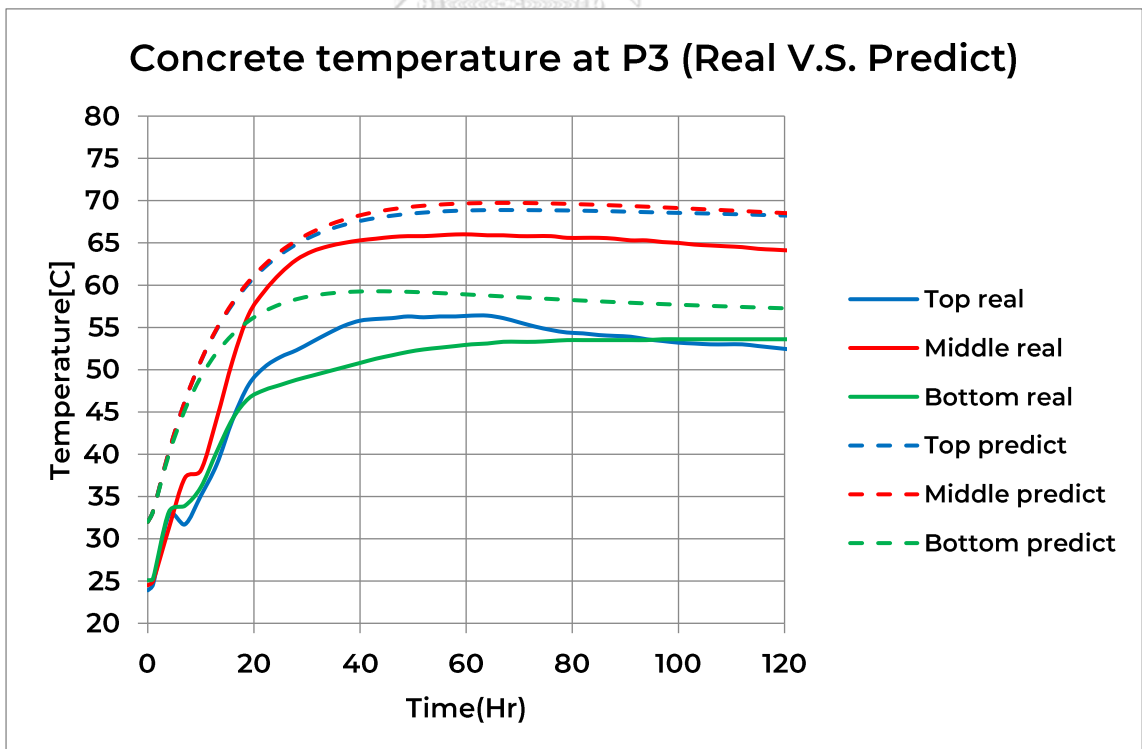
1) Siamese Rama 9 (F42)



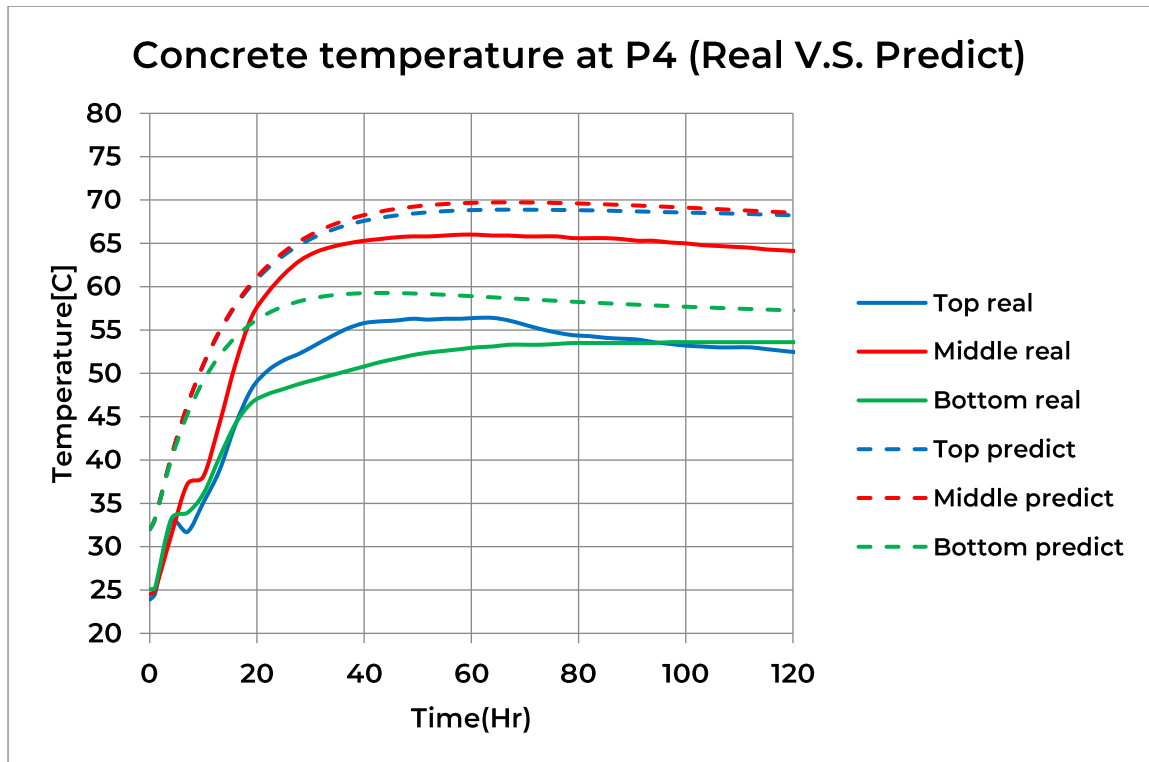
รูปที่ 4-17 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42) ที่จุด P1



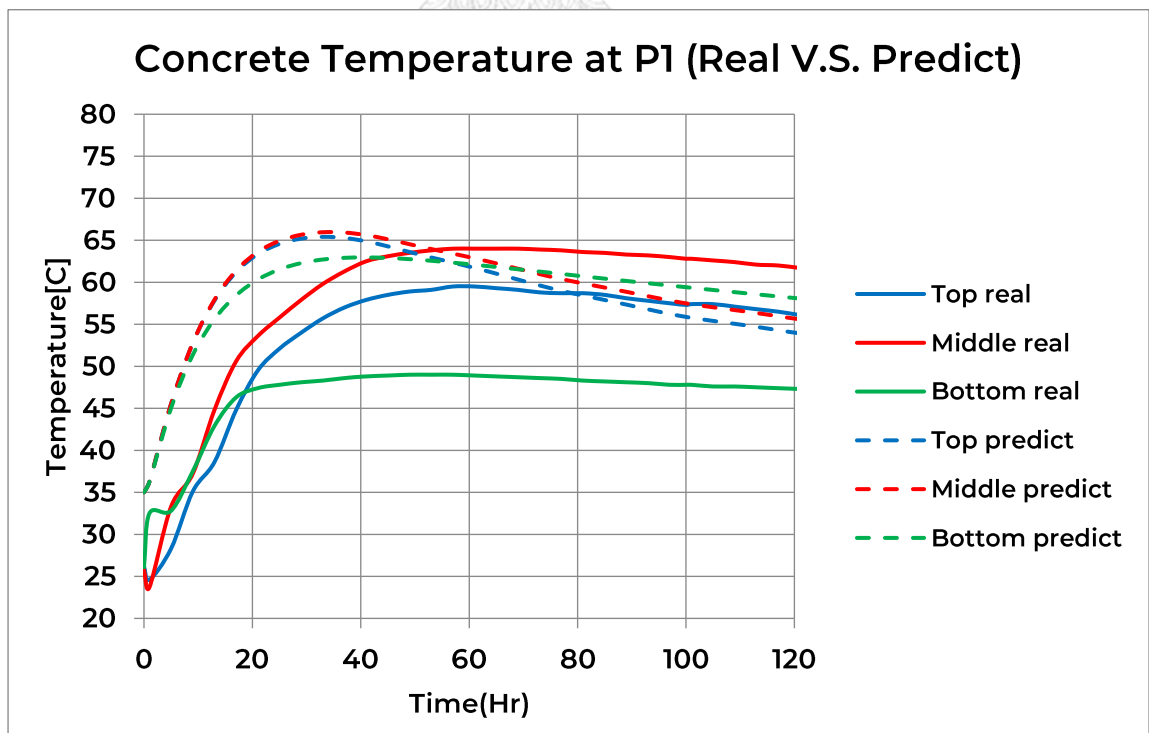
รูปที่ 4-18 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42) ที่จุด P2



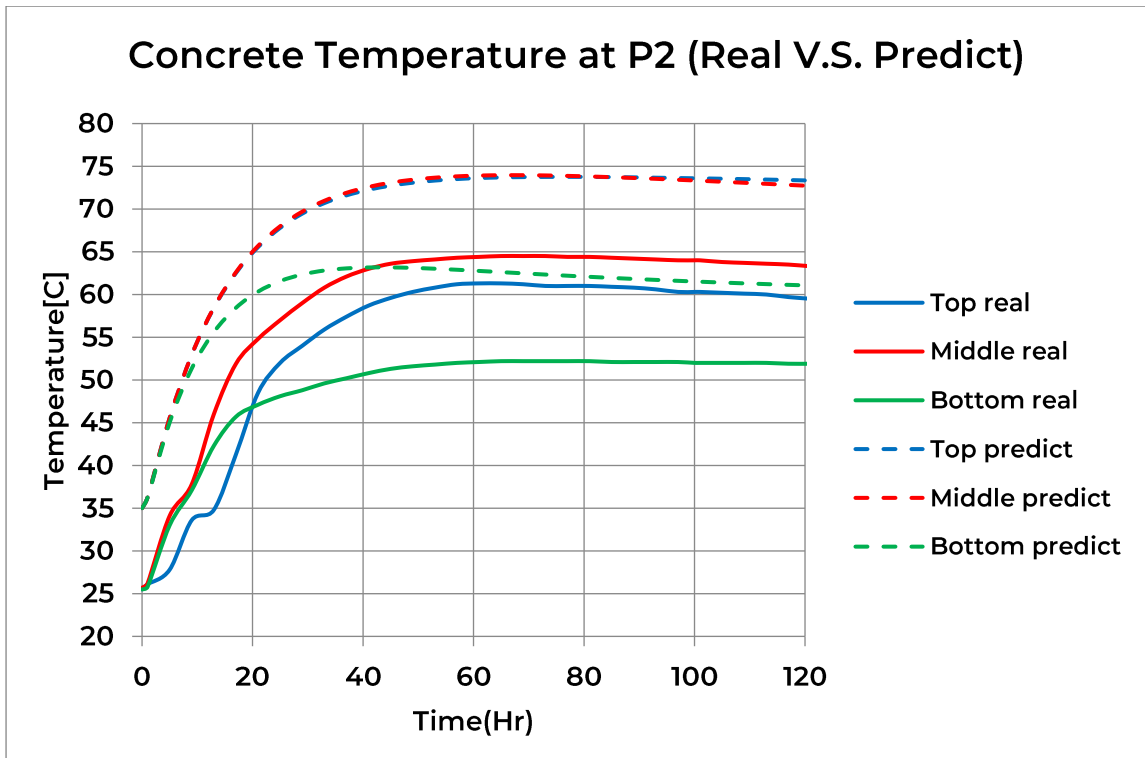
รูปที่ 4-19 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42) ที่จุด P3



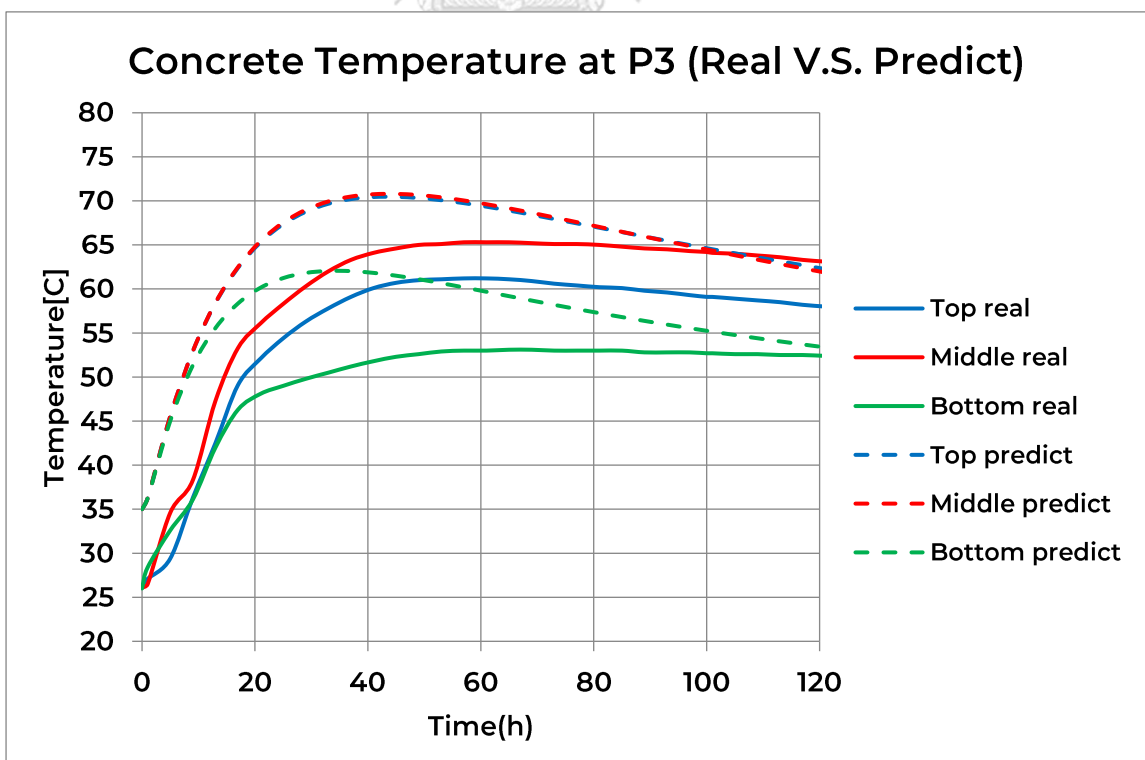
รูปที่ 4-20 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42) ที่จุด P4
2) Siamese Rama 9 (F65)



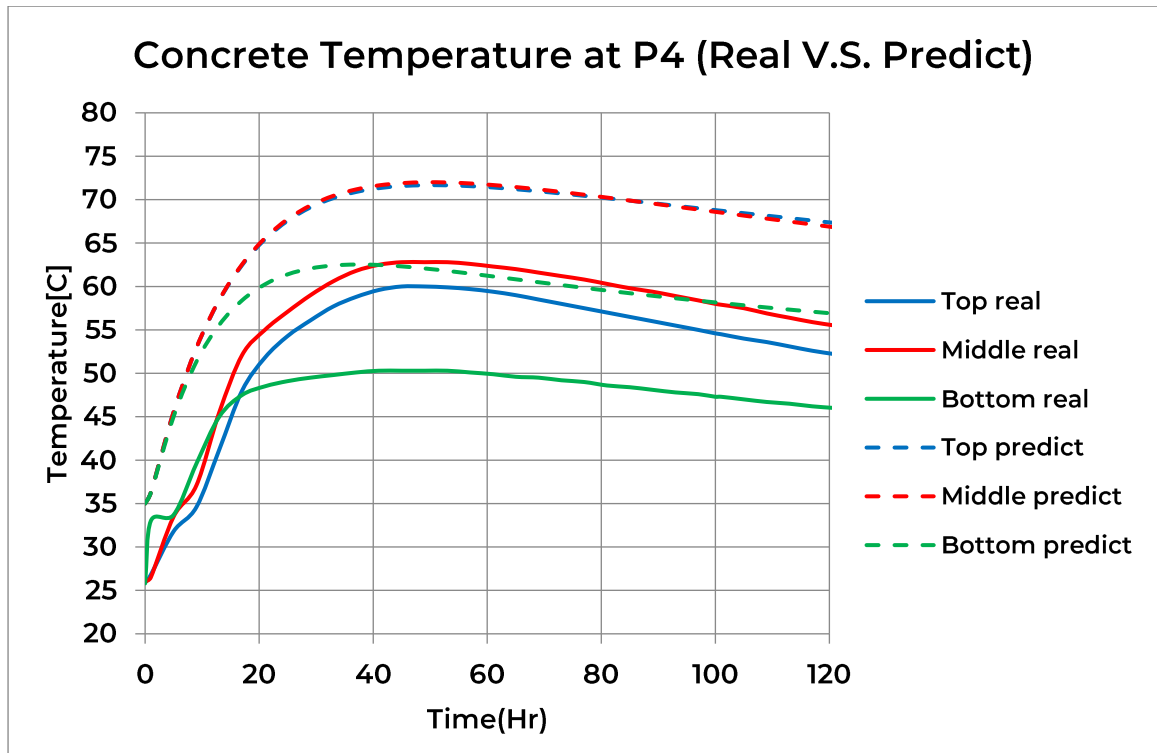
รูปที่ 4-21 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65) ที่จุด P1



รูปที่ 4-22 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65) ที่จุด P2



รูปที่ 4-23 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65) ที่จุด P3



รูปที่ 4-24 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65) ที่จุด P4

ตัวแปรที่ใช้ในการบ่งบอกว่าอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองมีความใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ตรวจวัดจริงคือ Root Mean Square (RMS) ซึ่งถ้าค่าใกล้เคียง 0 หมายความว่าแบบจำลองมีความคลาดเคลื่อนน้อยและมีความแม่นยำในการทำนาย โดยค่า RMS มีสมการดังนี้

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum (y - \hat{y})^2}{N}}$$

โดยที่ y = ค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริง

\hat{y} = ค่าที่ทำนายจากแบบจำลอง

N = จำนวนข้อมูล

ตารางที่ 4-1 ความคลาดเคลื่อน RMS

Siamese (RMS)	P1 [°C]			P2 [°C]			P3 [°C]			P4 [°C]		
	top	middle	bottom	top	middle	bottom	top	middle	bottom	top	middle	bottom
F42	9.437	5.349	7.007	11.357	4.897	5.407	13.822	4.942	7.074	8.472	5.792	7.935
F65	7.049	6.619	12.430	14.309	10.072	11.076	8.869	6.078	8.105	13.417	10.512	11.106

จากรูปที่ 4-17 ถึง 4-24 พบว่าแบบจำลองฐานรากแพมีพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจริงคือ มีอุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยา heat hydration ของซีเมนต์ในช่วงแรก หลังจากนั้นอุณหภูมิจึงเริ่มคงที่และค่อยๆลดลง เนื่องจากความร้อนมีการถ่ายเทสู่สภาพแวดล้อมภายนอก

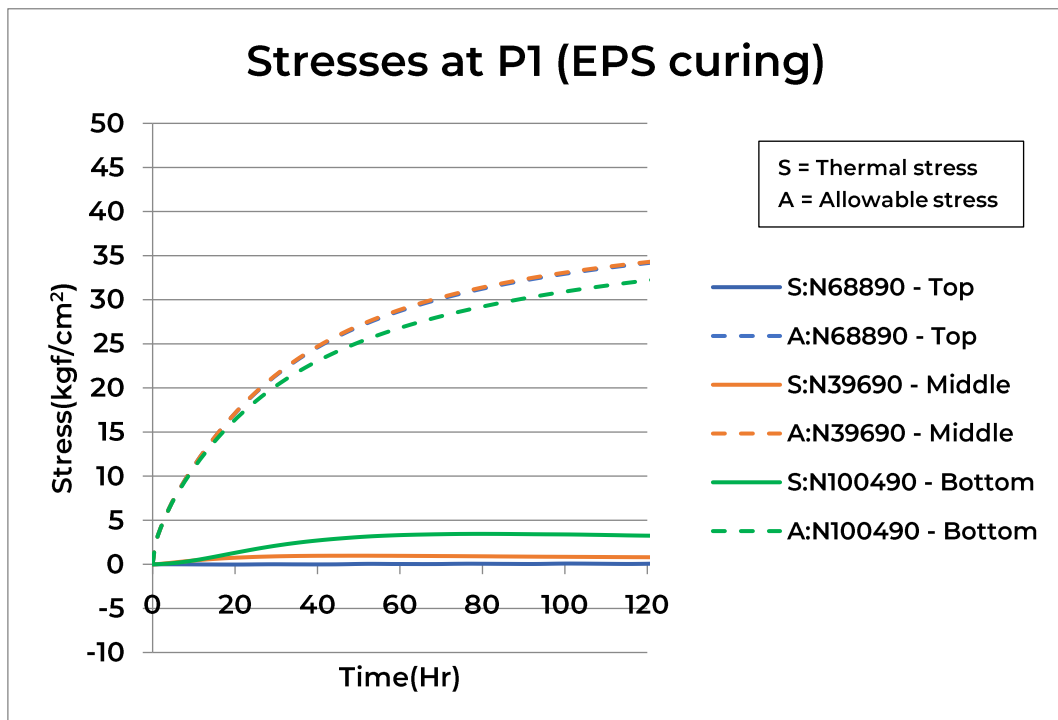
ความแม่นยำถูกต้องของแบบจำลอง สามารถหาความคลาดเคลื่อนของแต่ละจุดด้วยวิธี RMS ดังแสดงในตารางที่ 4-1 พบว่าตำแหน่ง middle มีความใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่วัดได้จากหน้างานจริง ส่วนตำแหน่ง top และ bottom มีความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิมากกว่า เนื่องจากการจำลองสภาพแวดล้อมภายนอก เช่น ฉนวนความร้อนที่ผิวบน คุณสมบัติทางความร้อนของดิน โดยสามารถสรุปปัจจัยที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน ได้แก่

1. การเทฐานรากแพใช้เวลาค่อนข้างนานมาก ซึ่งแตกต่างกับแบบจำลองที่เริ่มด้วยฐานรากแพที่เทเสร็จสมบูรณ์แล้ว ทำให้อุณหภูมิฐานรากแพจริงที่ top, middle และ bottom เริ่มสูงขึ้นไม่พร้อมกันและยังส่งผลให้อุณหภูมิที่ top และ middle ในแบบจำลองใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากความร้อนไม่สามารถถ่ายเทออกสู่สิ่งแวดล้อมในช่วงระยะเวลาของการเทคอนกรีต (ปิดโพนตั้งแต่ชั่วโมงที่ 0)
2. คุณสมบัติทางความร้อนของดินมีช่วงความเป็นไปได้ที่หลากหลาย นอกจากนั้นดินในแต่ละตำแหน่งและระดับความลึก มีค่าคุณสมบัติทางความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอและแตกต่างกัน ทำให้ค่าที่ใช้ในแบบจำลองไม่ตรงกับคุณสมบัติจริง
3. ฉนวนความร้อนที่ใช้หน้างานคือผ้าใบและโพน อาจมีตำแหน่งที่ปิดคลุมที่ไม่สมบูรณ์หรือเกิดความเสียหายเนื่องจากการติดตั้ง ทำให้คุณสมบัติทางความร้อนไม่สม่ำเสมอเหมือนในแบบจำลอง

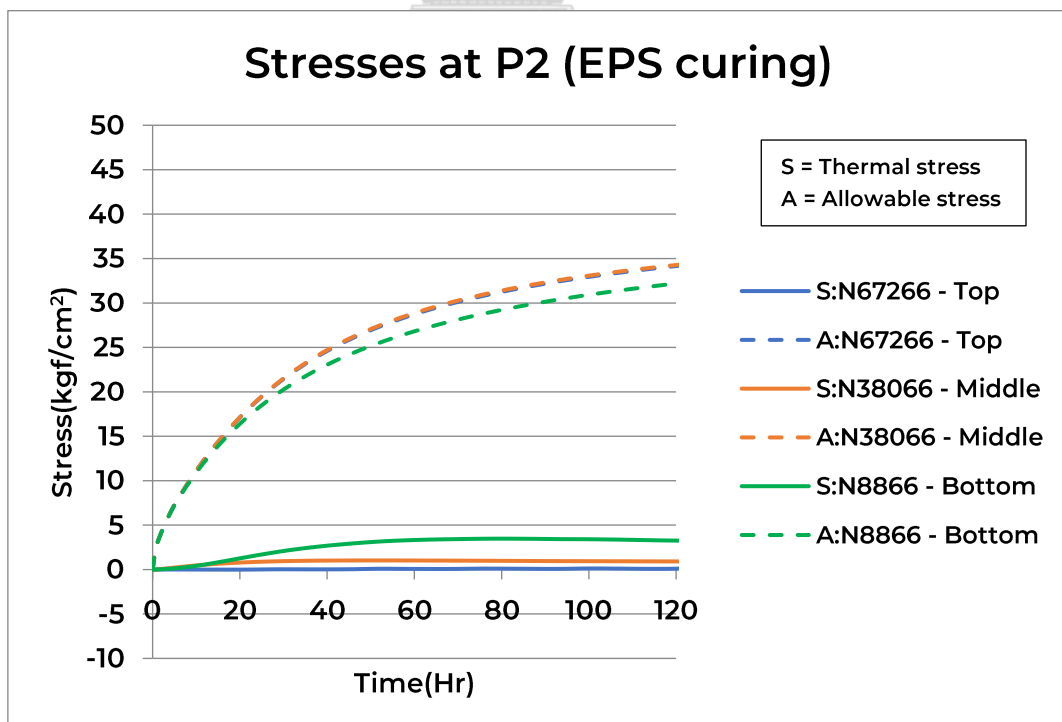
4.2.3 ผลการวิเคราะห์ stress จากแบบจำลองฐานรากแพ

ในกราฟจะแสดงผลของ allowable stress (แทนด้วยเส้นประ) และ thermal stress (แทนด้วยเส้นทึบ) ที่เกิดขึ้นในช่วงหลังจากการเทคอนกรีต โดยจะเน้นไปที่ tensile stress (เครื่องหมายบวก) เนื่องจากรอยร้าวบนฐานรากแพเกิดจากการที่ principal tensile stress มีค่าสูงกว่า allowable tensile stress ของคอนกรีต

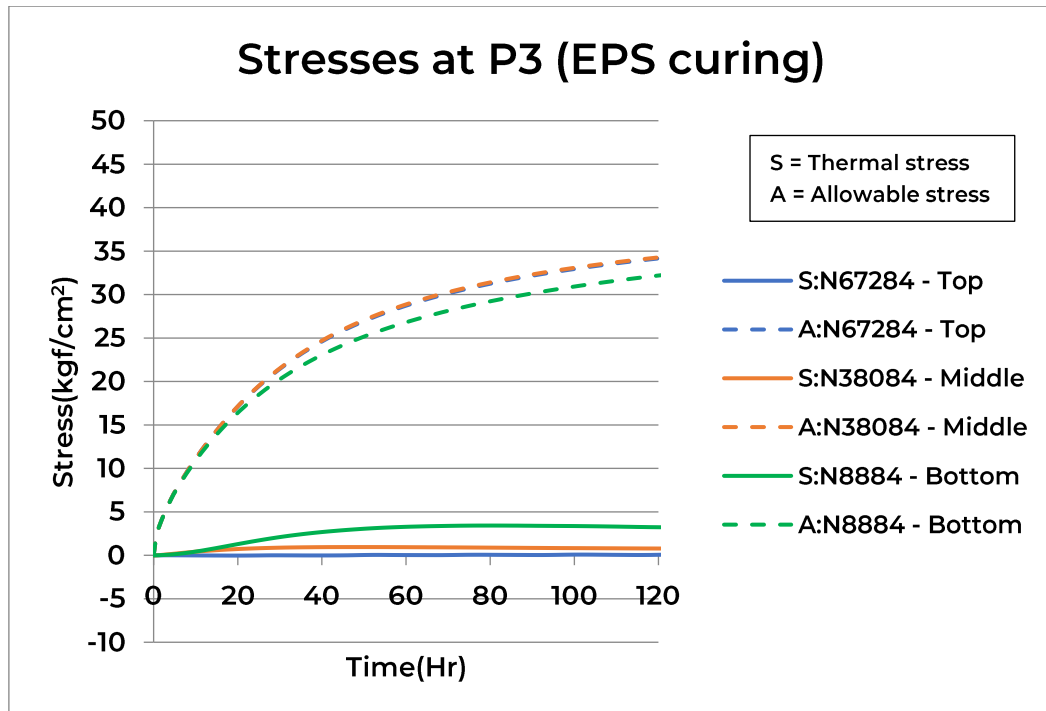
1) Siamese Rama 9 (F42)



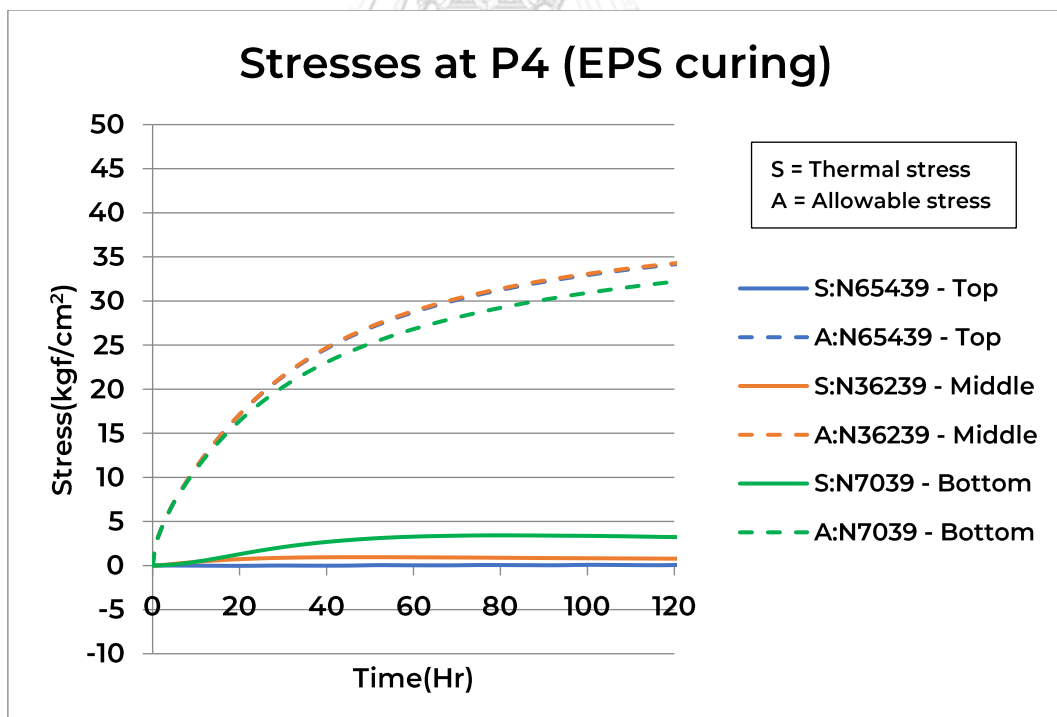
รูปที่ 4-25 กราฟ stress และ allowable tensile strength ที่จุด P1 ของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42)



รูปที่ 4-26 กราฟ stress และ allowable tensile strength ที่จุด P2 ของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42)

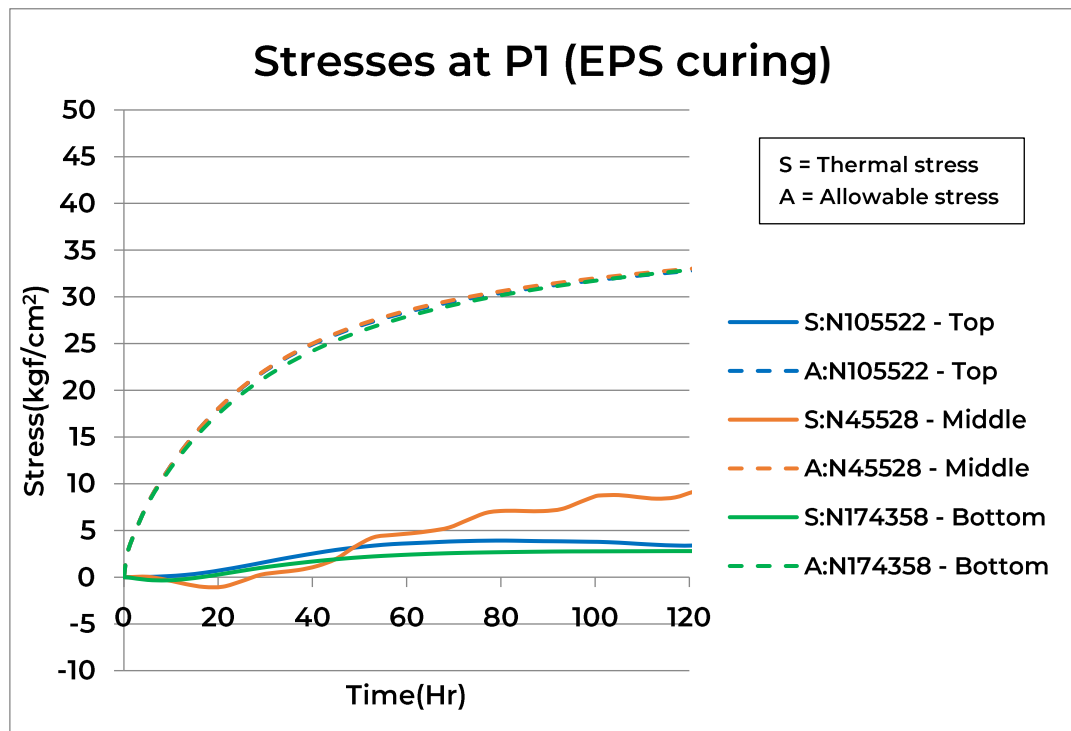


รูปที่ 4-27 กราฟ stress และ allowable tensile strength ที่จุด P3 ของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42)



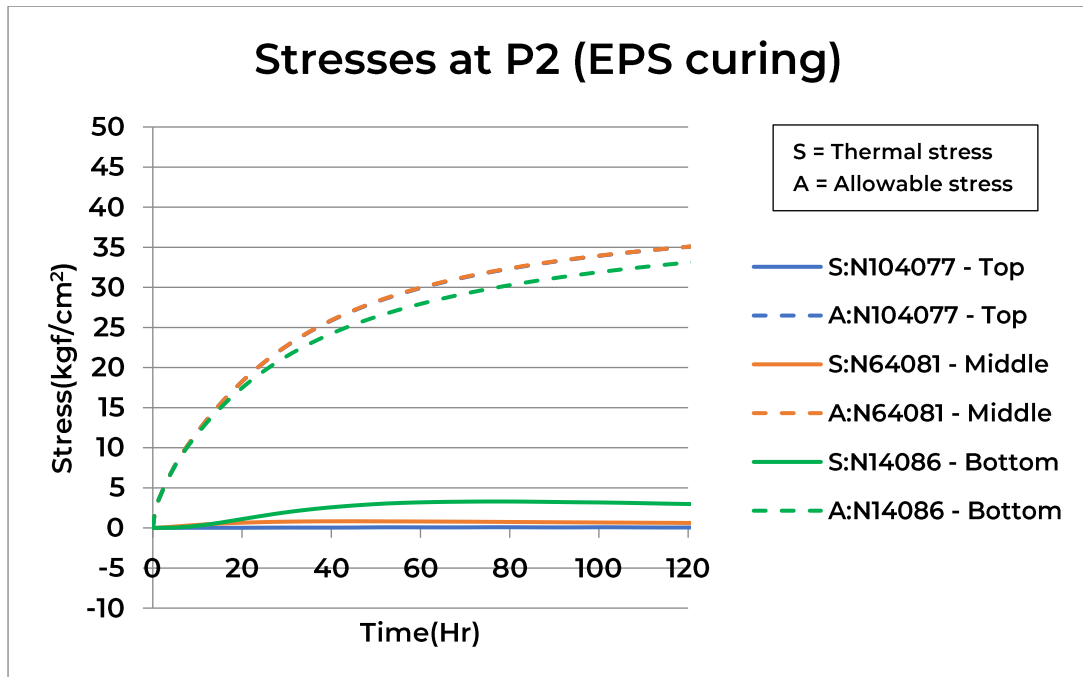
รูปที่ 4-28 กราฟ stress และ allowable tensile strength ที่จุด P4 ของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42)

2) Siamese Rama 9 (F65)

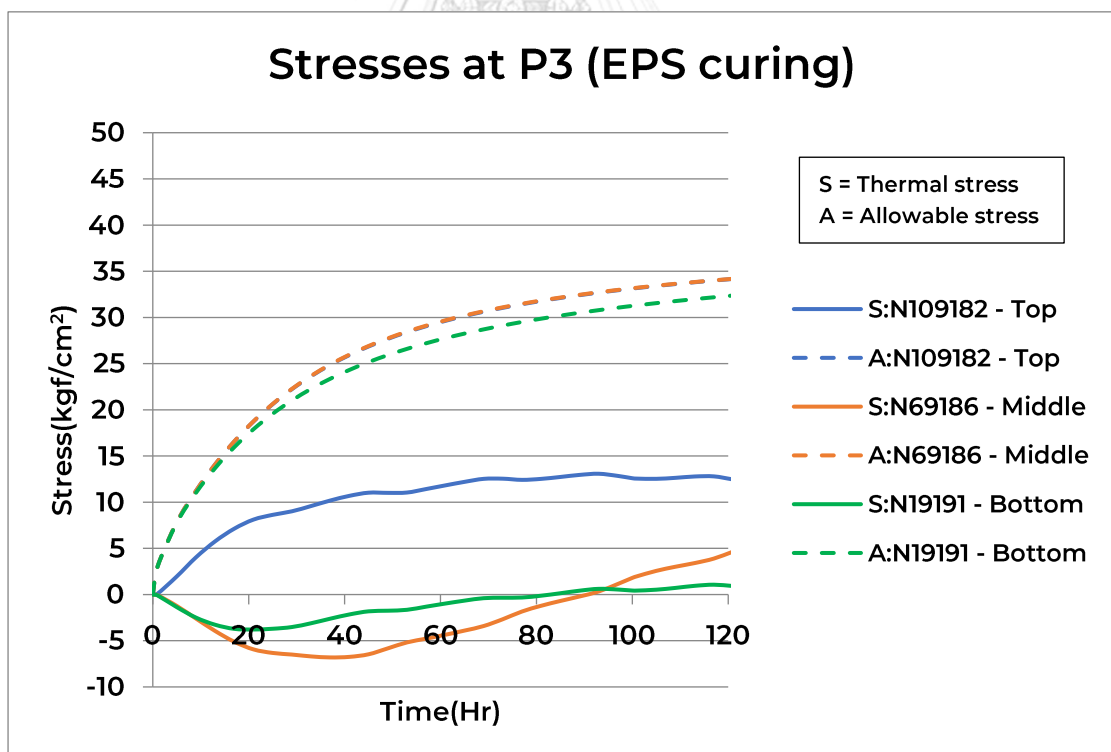


รูปที่ 4-29 กราฟ stress และ allowable tensile strength ที่จุด P1 ของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65)

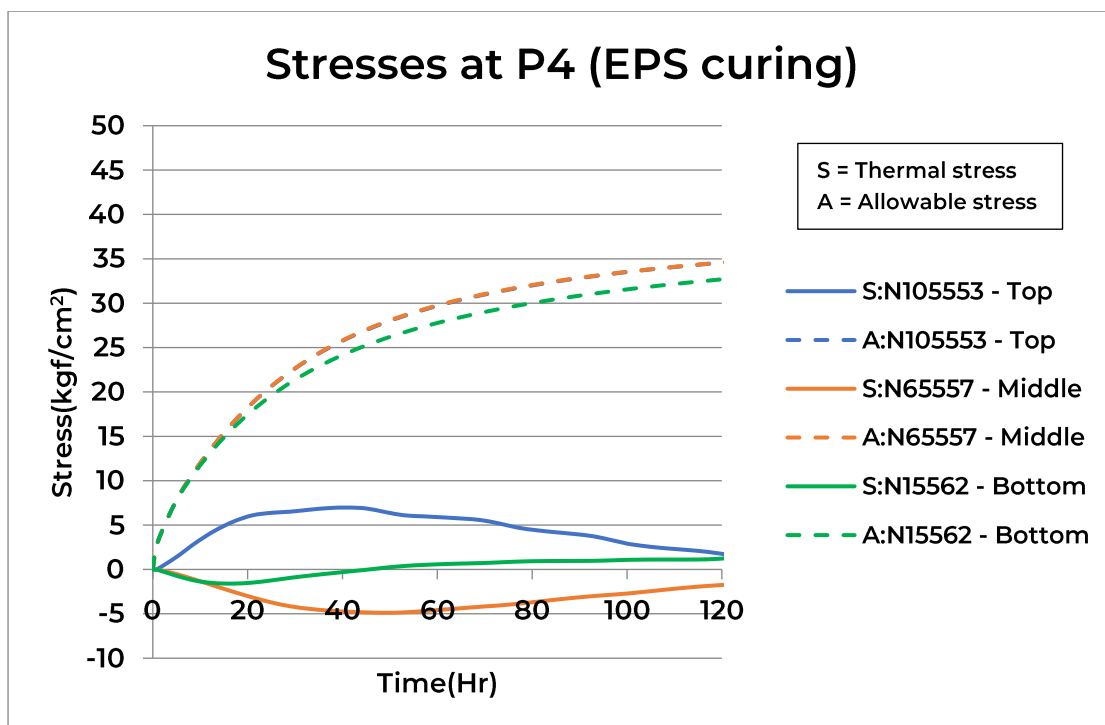
จุด P1 อยู่บริเวณ lift pit ซึ่งมีการใช้ boundary condition ด้านข้างเป็น convection coefficient แบบ steel form แตกต่างจากตำแหน่งขอบนอกของฐานรากที่ใช้เป็น diaphragm wall ทำให้ที่จุด P1 ไม่มี restraint จาก diaphragm wall และมีผลกระทบของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่ระดับกึ่งกลางของจุด P1



รูปที่ 4-30 กราฟ stress และ allowable tensile strength ที่จุด P2 ของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65)



รูปที่ 4-31 กราฟ stress และ allowable tensile strength ที่จุด P3 ของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65)



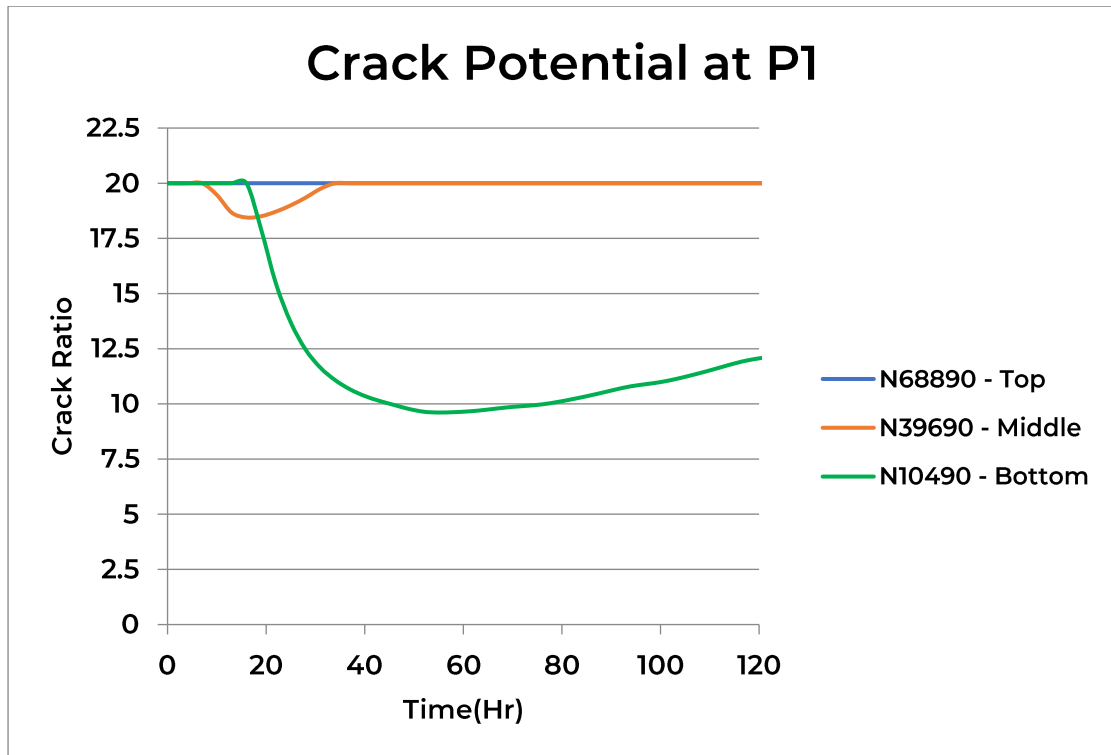
รูปที่ 4-32 กราฟ stress และ allowable tensile strength ที่จุด P4 ของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65)

3.5.5 ผลการวิเคราะห์ crack potential จากแบบจำลองฐานรากแพ

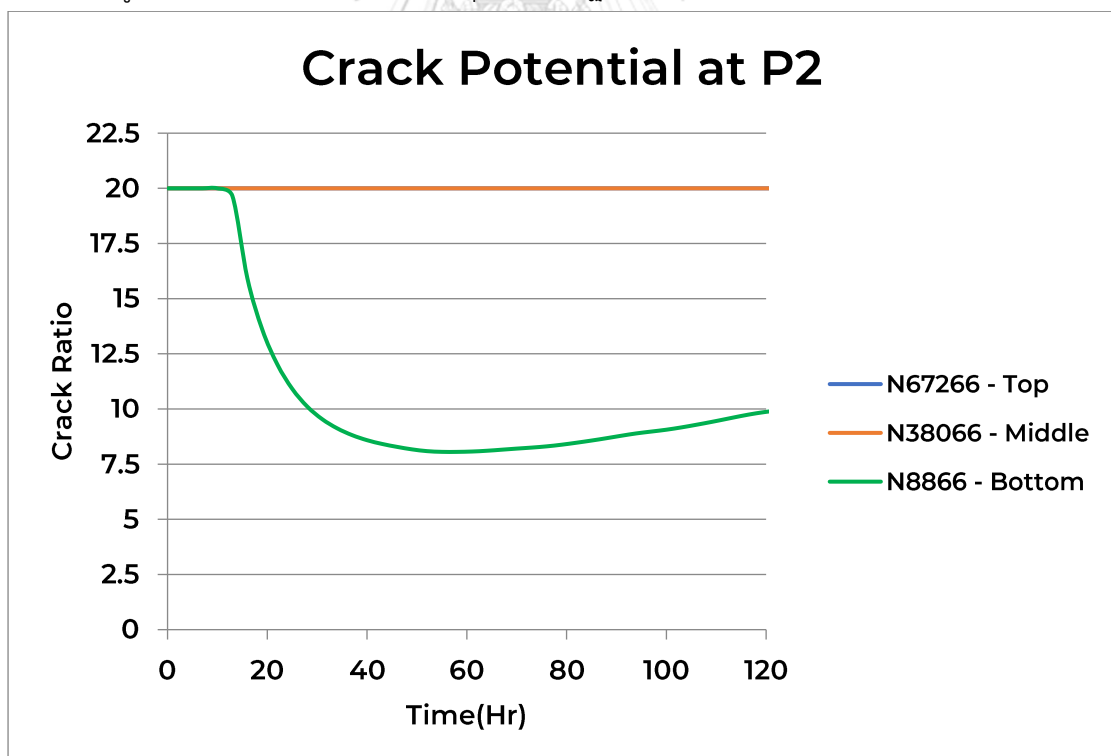
Crack potential คืออัตราส่วนระหว่าง allowable tensile stress กับ thermal tensile stress ซึ่งถ้า crack potential มีค่าใกล้เคียงหรือต่ำกว่า 1 หมายถึงบริเวณนั้นมีโอกาสเกิดรอยร้าวสูง ซึ่งมักเกิดขึ้นที่ top หรือ bottom ในขณะที่ความแตกต่างของอุณหภูมิสูง

- 1) Siamese Rama 9 (F42)

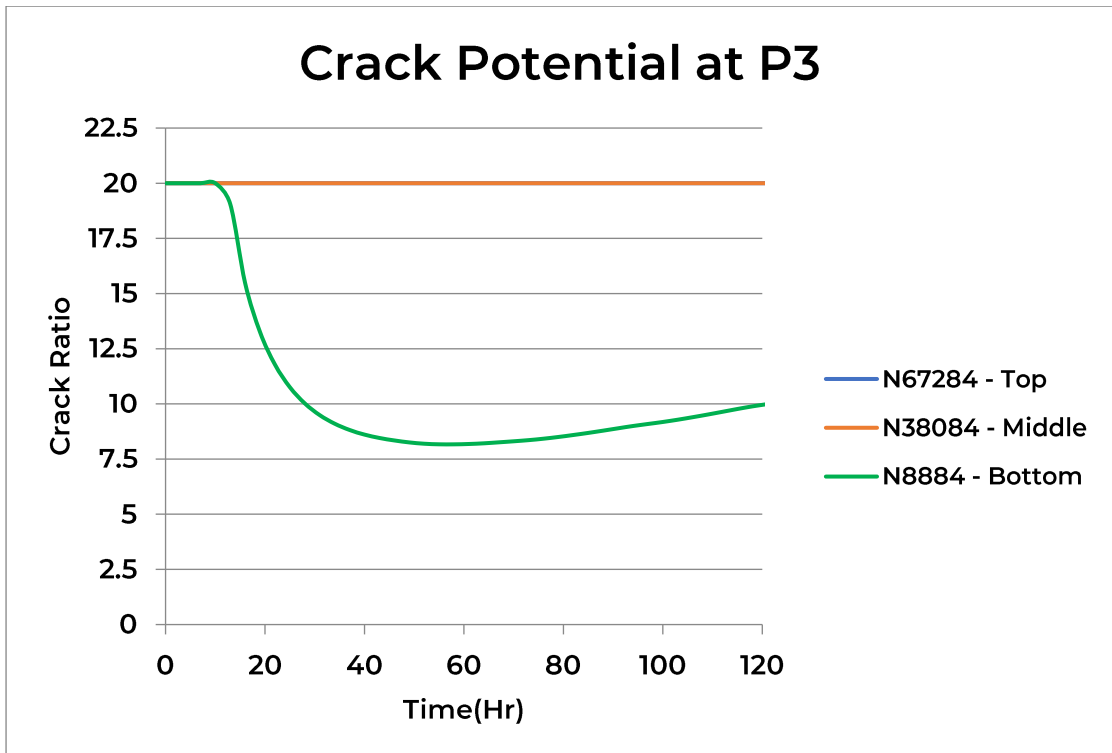
จุด P2 ตำแหน่ง Bottom มี crack potential ต่ำที่สุดเท่ากับ 8.06



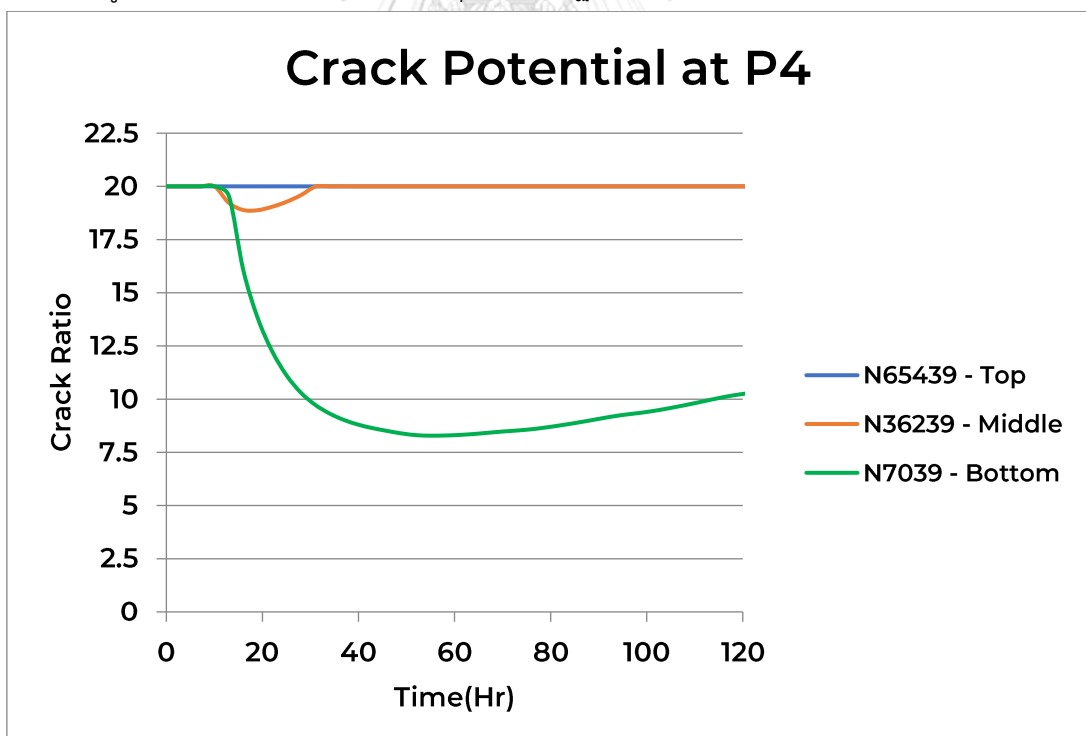
รูปที่ 4-33 crack potential ที่จุด P1 ของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42)



รูปที่ 4-34 crack potential ที่จุด P2 ของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42)



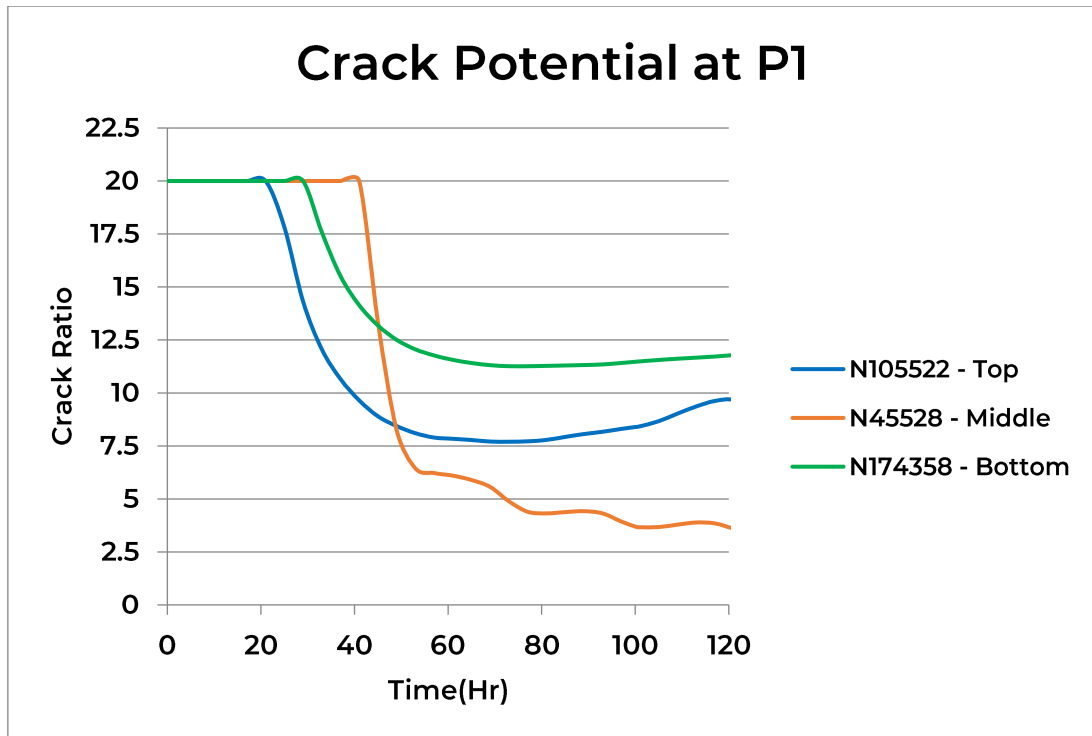
รูปที่ 4-35 crack potential ที่จุด P3 ของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42)



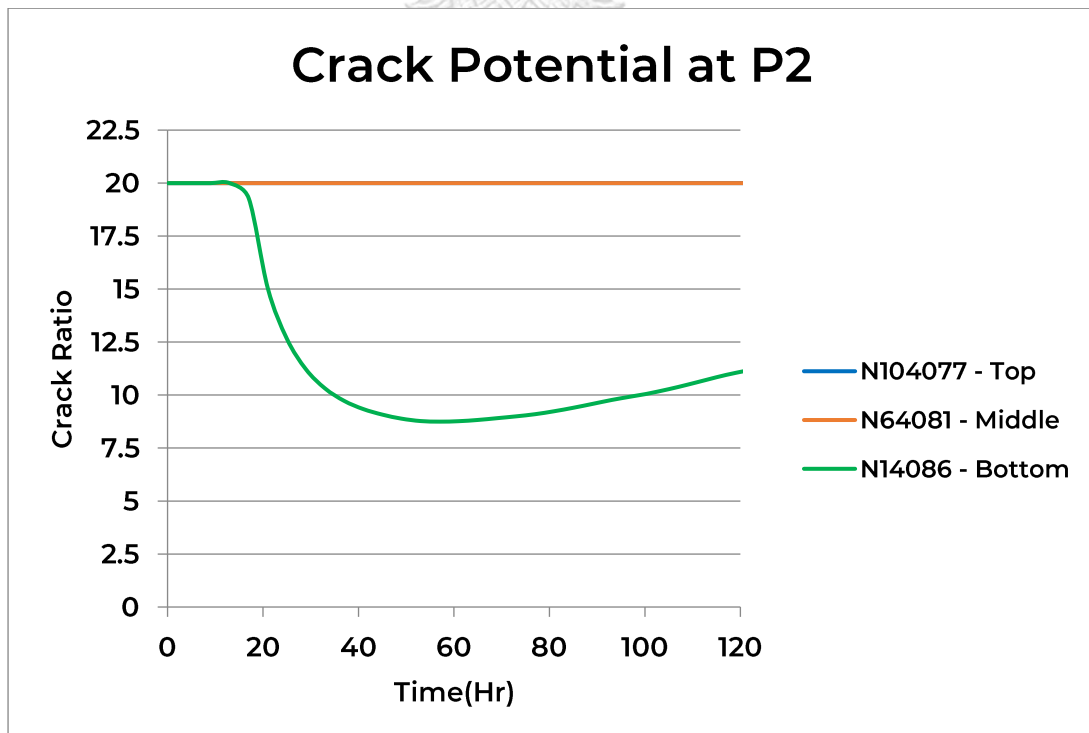
รูปที่ 4-36 crack potential ที่จุด P4 ของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42)

2) Siamese Rama 9 (F65)

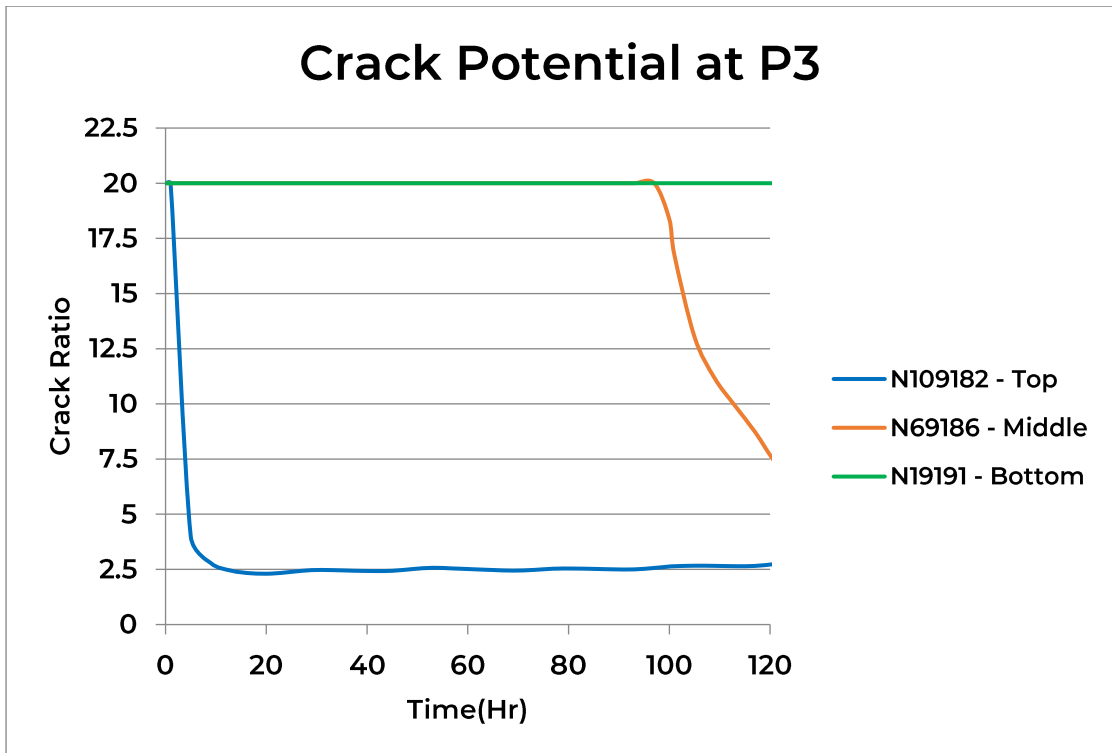
จุด P3 ตำแหน่ง top มี crack potential ต่ำที่สุดเท่ากับ 2.31



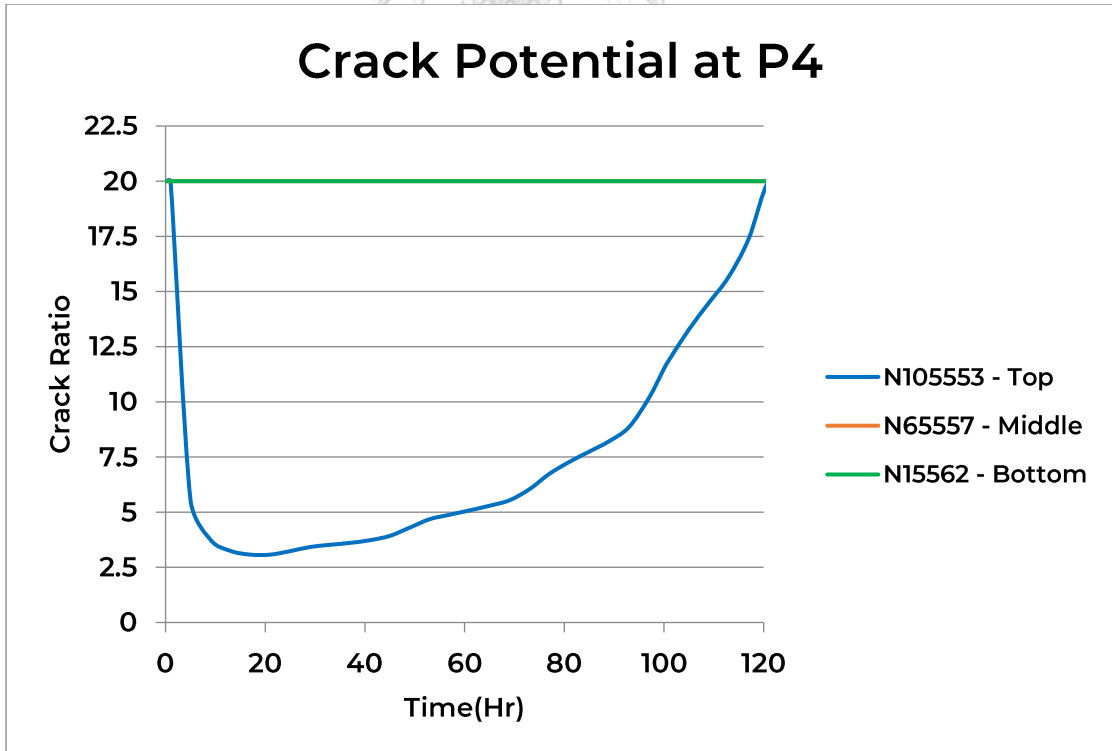
รูปที่ 4-37 crack potential ที่จุด P1 ของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65)



รูปที่ 4-38 crack potential ที่จุด P2 ของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65)



รูปที่ 4-39 crack potential ที่จุด P3 ของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65)



รูปที่ 4-40 crack potential ที่จุด P4 ของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65)

4.3 การปรับแก้แบบจำลองฐานรากแพ

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิจากแบบจำลองและอุณหภูมิที่ตรวจวัดจริงพบว่ายังมีความคลาดเคลื่อนพอสมควร ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เพิ่มขึ้นตอนการก่อสร้างของแบบจำลองโดยค่อยๆใส่คอนกรีตฐานรากแพทีละชั้น เพื่อให้มีความใกล้เคียงกับการเทคอนกรีตฐานรากแพจริงที่มีช่วงระยะเวลาในเทคอนกรีตค่อนข้างนานและปรับแก้แต่ละตัวแปร โดยกำหนดช่วงของค่าแต่ละตัวแปรไม่เกินค่าตัวแปรของคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยในอดีต เพื่อให้อุณหภูมิจากแบบจำลองมีความใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ตรวจวัดจริง ซึ่งจะทำให้แบบจำลองมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น สามารถนำไปใช้ศึกษาผลของการใส่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จได้

ตัวแปรที่ทำให้อุณหภูมิจากแบบจำลองเปลี่ยนแปลงและใกล้เคียงค่าจริงมากขึ้นคือ rate of heat conduction, convection coefficient (steel form), ambient temperature, casting temperature, heat source function และ soil temperature

1. ปรับ thermal conductivity ของคอนกรีตเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และปรับ thermal conductivity ของโฟมเพื่อให้โฟมมีคุณสมบัติในการถ่ายเทความร้อนเทียบเท่ากับโฟมหนา 2.5 cm
2. ปรับลดค่า convection coefficient แบบ steel form เพื่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อนออกจากคอนกรีตน้อยลง สอดคล้องกับอุณหภูมิที่ตรวจวัดจากหน้างาน
3. ปรับ ambient temperature เป็นอุณหภูมิสภาพแวดล้อมที่วัดจากหน้างานจริง
4. ปรับลด casting temperature ซึ่งเป็นอุณหภูมิเริ่มต้นของคอนกรีต เนื่องจากอุณหภูมิเริ่มต้นของคอนกรีตขึ้นกับการออกแบบของบริษัทเทคอนกรีตโดยมีความแตกต่างกันเมื่อใช้เทในแต่ละฐานรากและอุณหภูมิสภาพแวดล้อมขณะเทคอนกรีต
5. ปรับ heat source function และ soil temperature เล็กน้อยเพื่อให้ได้อุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับที่ตรวจวัดจริงมากขึ้น

4.3.1 Siamese Rama 9 (F42)

เมื่อทำการปรับแก้ตัวแปรต่างๆที่ใช้ พบว่าแบบจำลองมีความใกล้เคียงมากขึ้นโดยค่า RMS หลังการปรับแก้ของจุด P1, P2, P3 และ P4 ลดลงเฉลี่ย 5.652 °C, 4.680 °C, 5.400 °C และ 5.503 °C ตามลำดับ โดยที่จุด P3 top มีความแตกต่างจากเดิมมากที่สุดคือลดลง 8.148 °C และพบว่าค่า RMS น้อยที่สุดอยู่ที่จุด P4 middle เท่ากับ 1.198 °C ค่า RMS มากที่สุดอยู่ที่จุด P3 top เท่ากับ 5.674 °C ซึ่งจุด P1 มีอุณหภูมิใกล้เคียงกับค่าจริงมากที่สุด เนื่องจากค่า RMS เฉลี่ยของจุดที่ 1 คือ 1.612 °C

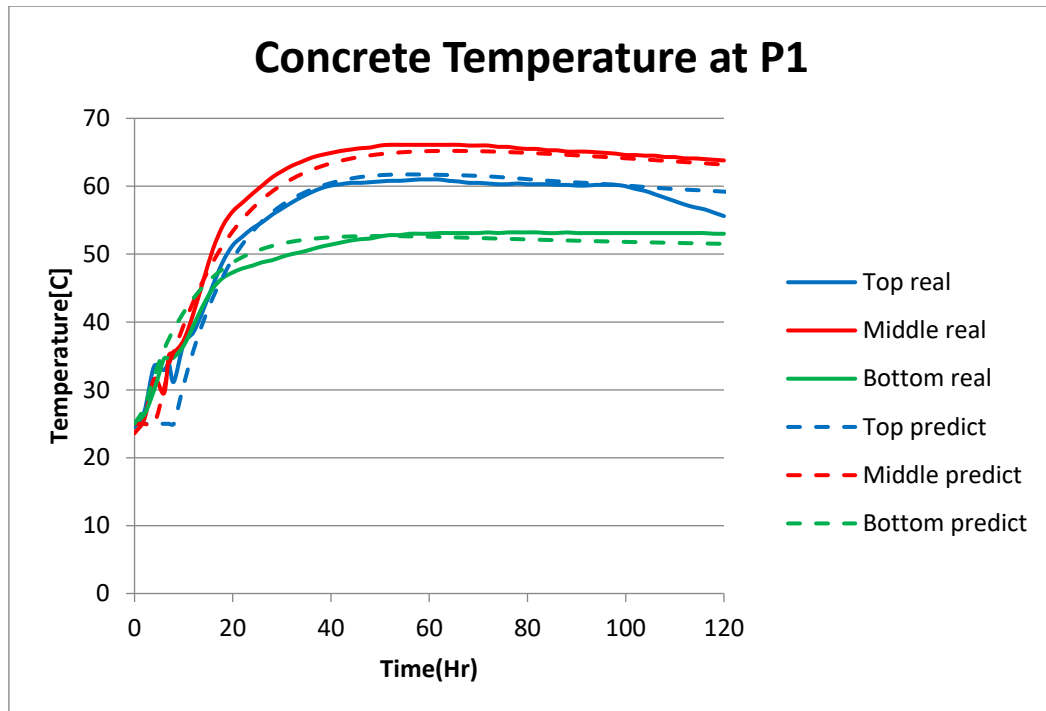
ตัวแปรที่ปรับแก้แล้วของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42) แสดงในตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 ตัวแปรที่ปรับแก้แล้วของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42)

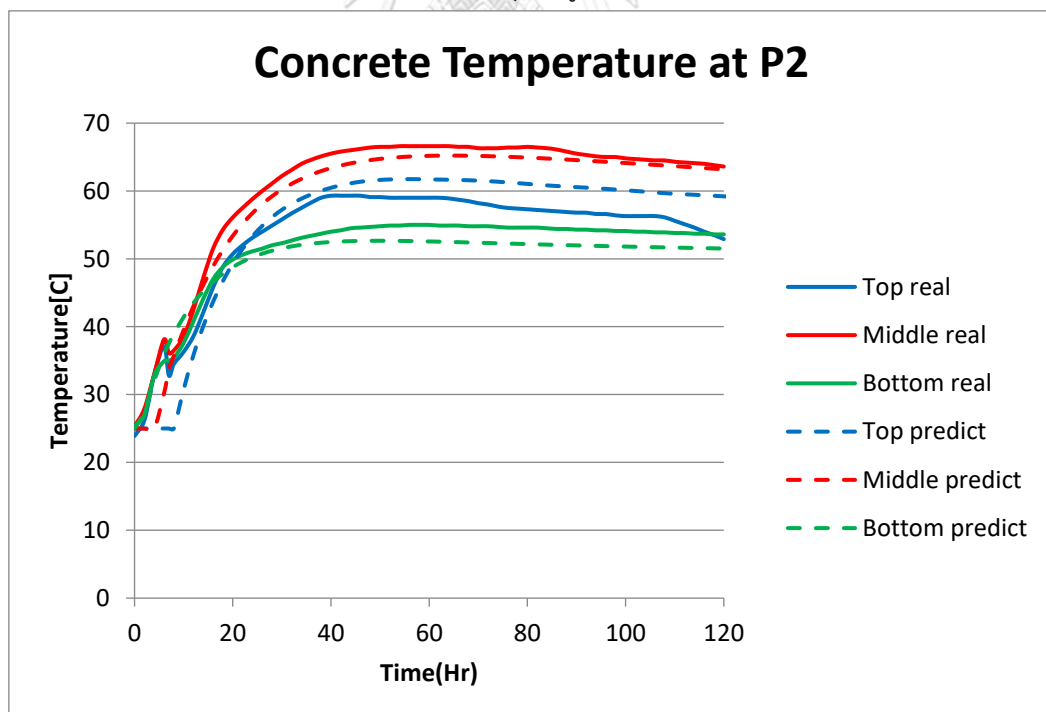
Part		Mat Foundation	Subsoil
Property			
Specific heat (kcal/kg °C)		0.208	0.2
Density (kgf/m ³)		2400	1800
Rate of heat conduction (kcal/m hr °C)		2.3	1.7
Convection coefficient (kcal/m ² hr °C)	Surface exposed to atmosphere	12	12
	Steel Form	-	-
Ambient temperature (°C)		Real ambient	-
Casting temperature (°C)		25	-
28-day compressive strength (kgf/cm ²)		320	-
Compressive strength gain coefficients		a=13.9 b=0.86	-
Modulus of elasticity (kgf/cm ²)		2.56x10 ⁵	1x10 ⁴
Thermal expansion coefficient		9x10 ⁻⁶	1x10 ⁻⁵
Poisson's ratio		0.2	0.2
Unit cement content (kg/m ³)		225	-
Heat source function coefficients		K=37 a=1.75	-
Soil temperature		-	25

ตารางที่ 4-3 ค่า RMS ที่ตำแหน่งต่างๆ ของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42)

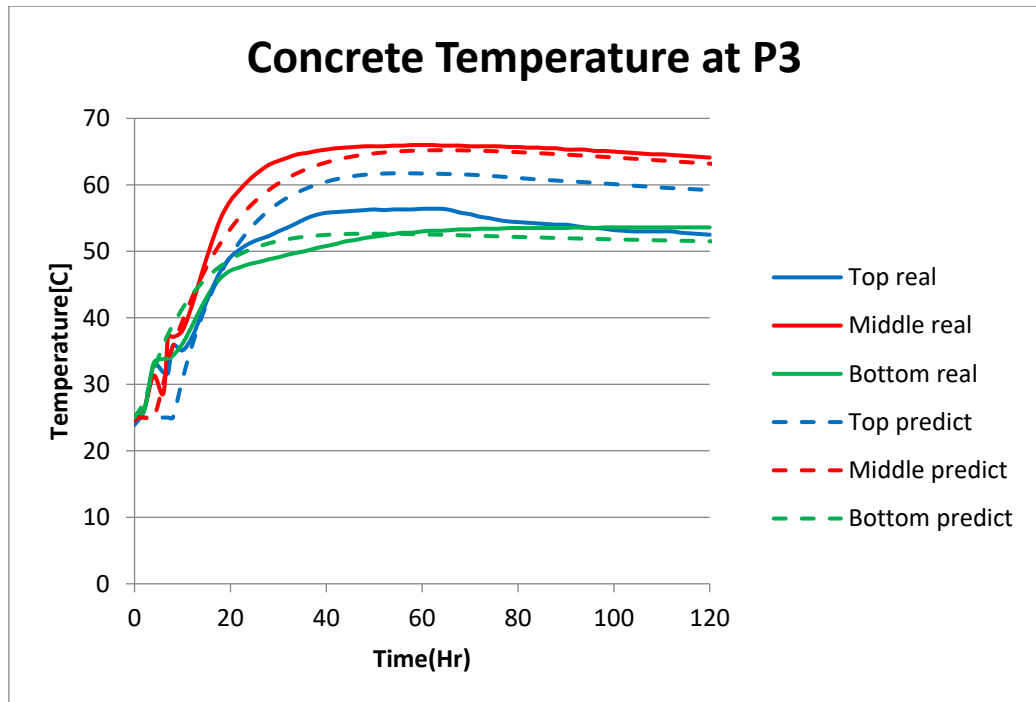
Siamese F42 (RMS)	P1 [°C]			P2 [°C]			P3 [°C]			P4 [°C]		
	top	middle	bottom	top	middle	bottom	top	middle	bottom	top	middle	bottom
original	9.437	5.349	7.007	11.357	4.897	5.407	13.822	4.942	7.074	8.472	5.792	7.935
modify	1.703	1.529	1.604	3.452	2.108	2.061	5.674	1.986	1.979	2.302	1.198	2.190



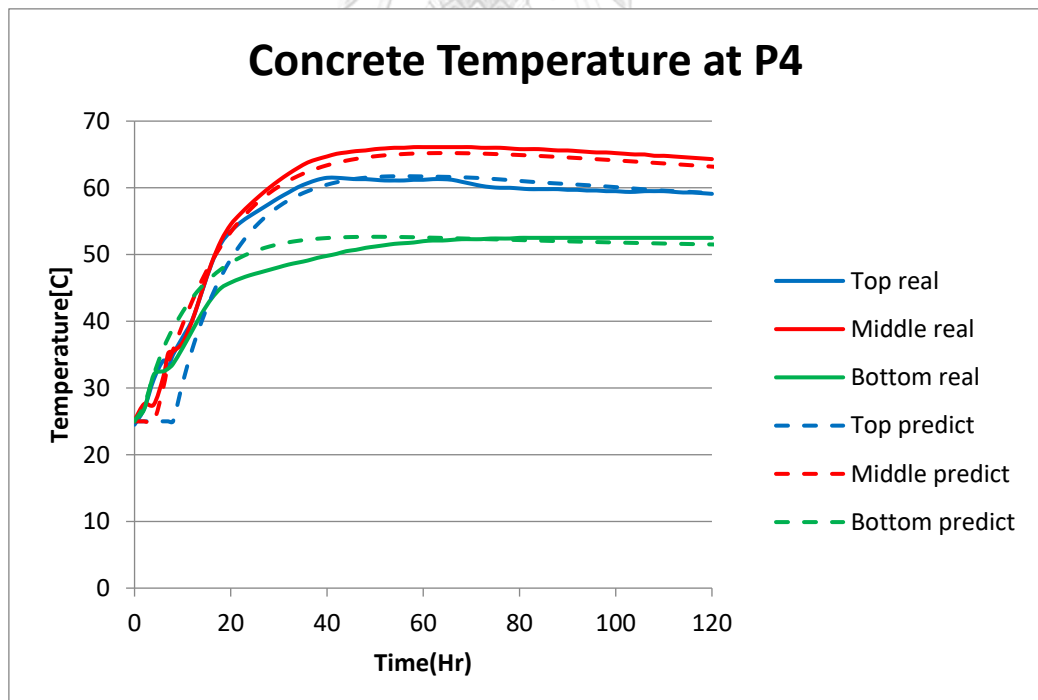
รูปที่ 4-41 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิจุด P1 ของแบบจำลองฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42) ที่ปรับแก้แล้วกับอุณหภูมิที่ตรวจวัดจริง



รูปที่ 4-42 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิจุด P2 ของแบบจำลองฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42) ที่ปรับแก้แล้วกับอุณหภูมิที่ตรวจวัดจริง



รูปที่ 4-43 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิจุด P3 ของแบบจำลองฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42) ที่ปรับแก้แล้วกับอุณหภูมิที่ตรวจวัดจริง



รูปที่ 4-44 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิจุด P4 ของแบบจำลองฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42) ที่ปรับแก้แล้วกับอุณหภูมิที่ตรวจวัดจริง

4.3.2 Siamese Rama 9 (F65)

เมื่อทำการปรับแก้ตัวแปรต่างๆที่ใช้ พบว่าแบบจำลองมีความใกล้เคียงมากขึ้นโดยค่า RMS หลังการปรับแก้ของจุด P1, P2, P3 และ P4 ลดลงเฉลี่ย 6.438 °C, 9.315 °C, 4.647 °C และ 9.880 °C ตามลำดับ โดยที่จุด P2 top มีความแตกต่างจากเดิมมากที่สุดคือลดลง 12.015 °C และพบว่าค่า RMS น้อยที่สุดอยู่ที่จุด P4 middle เท่ากับ 1.576 °C ค่า RMS มากที่สุดอยู่ที่จุด P3 middle เท่ากับ 3.247 °C ซึ่งจุด P4 มีอุณหภูมิใกล้เคียงกับค่าจริงมากที่สุด เนื่องจากค่า RMS เฉลี่ยของจุดที่ 4 คือ 1.798 °C

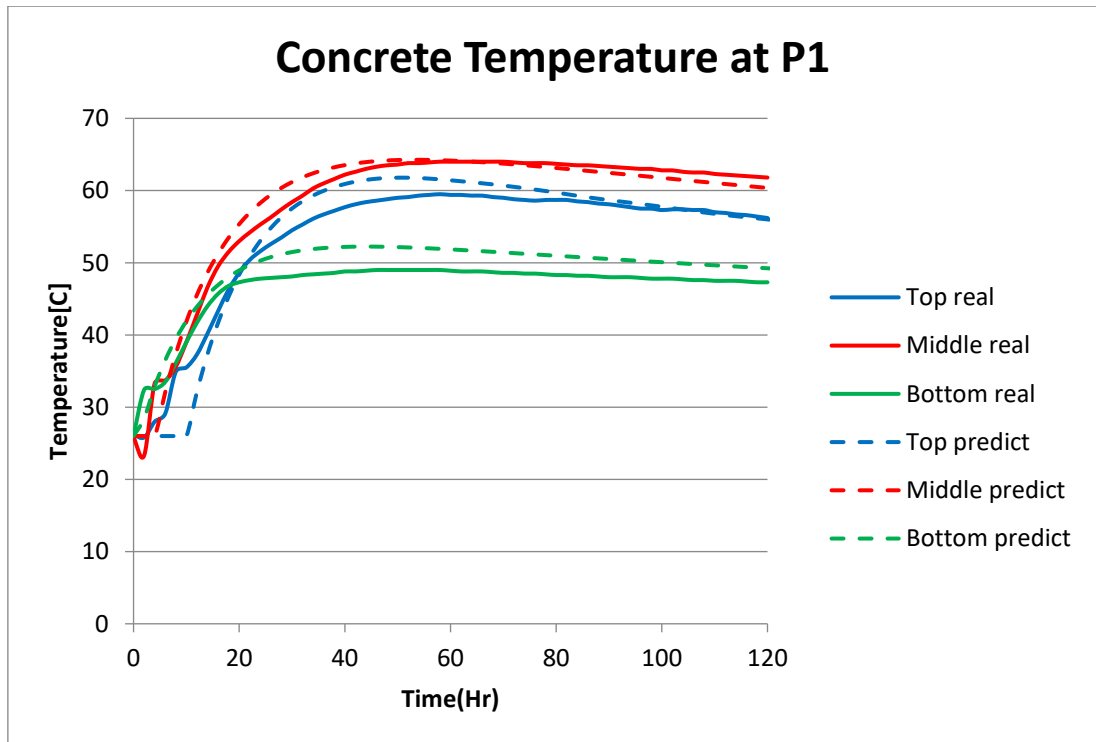
ตัวแปรที่ปรับแก้แล้วของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65) แสดงในตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 ตัวแปรที่ปรับแก้แล้วของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65)

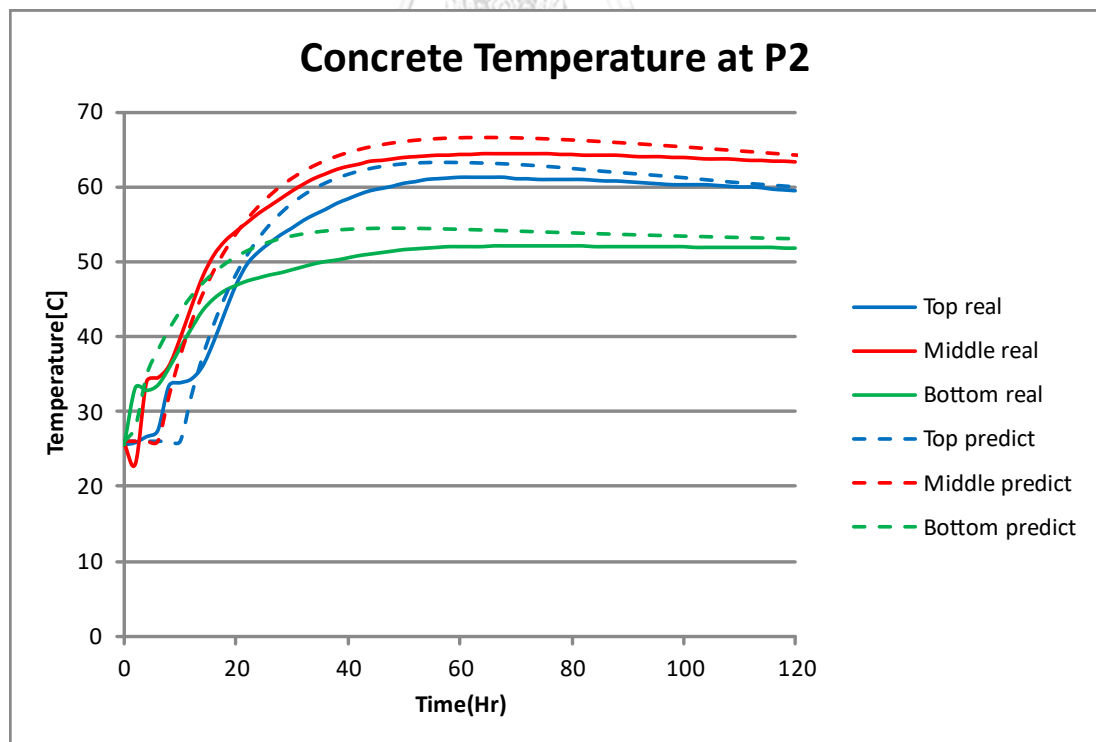
Part		Mat Foundation	Subsoil
Property			
Specific heat (kcal/kg °C)		0.208	0.2
Density (kgf/m ³)		2400	1800
Rate of heat conduction (kcal/m hr °C)		2.3	1.7
Convection coefficient (kcal/m ² hr °C)	Surface exposed to atmosphere	12	12
	Steel Form	1	-
Ambient temperature (°C)		Real ambient	-
Casting temperature (°C)		26	-
28-day compressive strength (kgf/cm ²)		320	-
Compressive strength gain coefficients		a=13.9 b=0.86	-
Modulus of elasticity (kgf/cm ²)		2.56x10 ⁵	1x10 ⁴
Thermal expansion coefficient		9x10 ⁻⁶	1x10 ⁻⁵
Poisson's ratio		0.2	0.2
Unit cement content (kg/m ³)		225	-
Heat source function coefficients		K=37 a=1.75	-
Soil temperature		-	24

ตารางที่ 4-5 ค่า RMS ที่ตำแหน่งต่างๆ ของฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65)

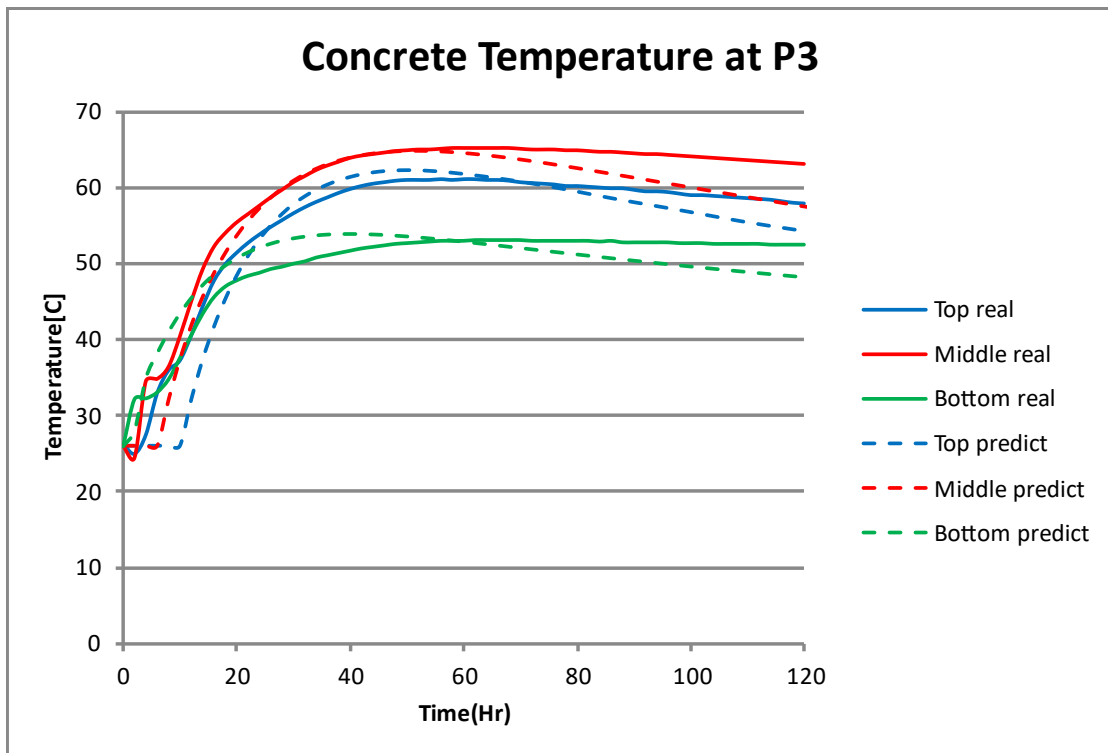
Siamese F65 (RMS)	P1 [°C]			P2 [°C]			P3 [°C]			P4 [°C]		
	top	middle	bottom	top	middle	bottom	top	middle	bottom	top	middle	bottom
original	7.049	6.619	12.430	14.309	10.072	11.076	8.869	6.078	8.105	13.417	10.512	11.106
modify	2.345	1.758	2.682	2.295	2.325	2.891	2.973	3.247	2.891	2.067	1.576	1.750



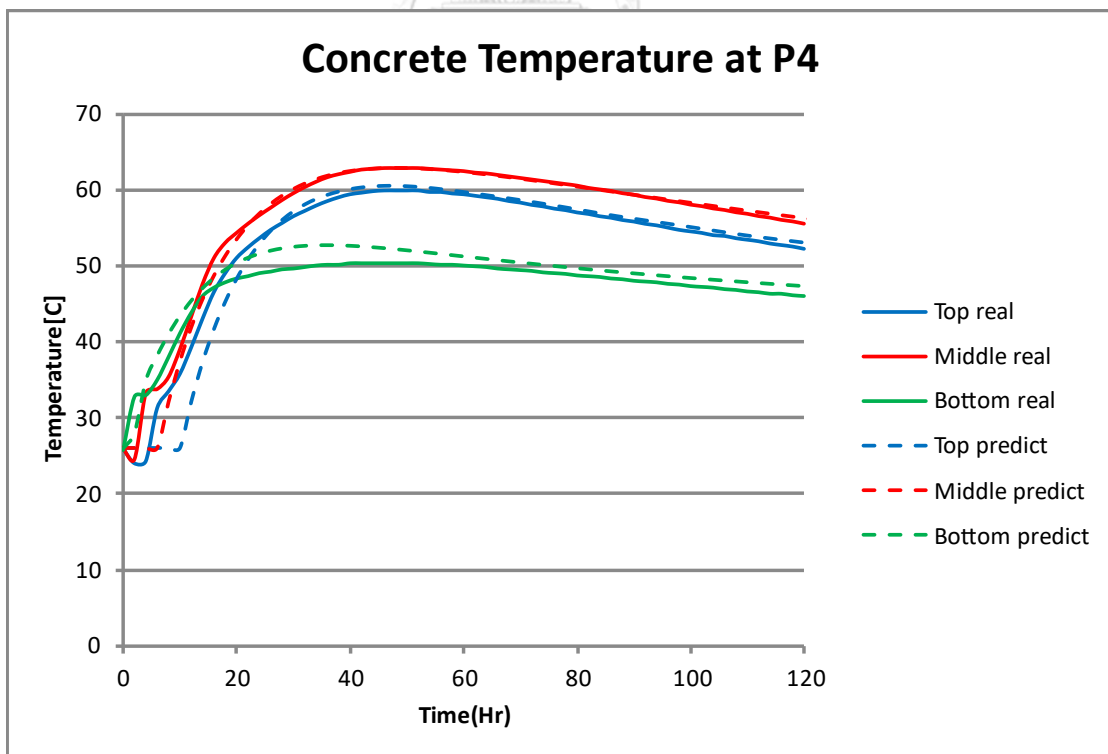
รูปที่ 4-45 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิจุด P1 ของแบบจำลองฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65) ที่ปรับแก้แล้วกับอุณหภูมิที่ตรวจวัดจริง



รูปที่ 4-46 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิจุด P2 ของแบบจำลองฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65) ที่ปรับแก้แล้วกับอุณหภูมิที่ตรวจวัดจริง



รูปที่ 4-47 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิจุด P3 ของแบบจำลองฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65) ที่ปรับแก้แล้วกับอุณหภูมิที่ตรวจวัดจริง



รูปที่ 4-48 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิจุด P4 ของแบบจำลองฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65) ที่ปรับแก้แล้วกับอุณหภูมิที่ตรวจวัดจริง

การปิดโพล์มที่หน้างานอาจมีการถอดโพล์มออกหรือปิดโพล์มที่หน้าไม่เท่ากันในบางพื้นที่ ซึ่งแตกต่างกับแบบจำลองที่มีการปิดโพล์มตลอดระยะเวลาการวิเคราะห์ ทำให้คุณสมบัติที่บางจุดในช่วงท้ายของแบบจำลองไม่ตรงกับหน้างานจริง

4.4 การแทนที่คอนกรีตบางส่วนด้วยคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ

แนวคิดในการใส่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จคือจะแทนที่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จในบริเวณที่มี principal stress (พิจารณา principal stress ในแกนที่มีค่าสูงสุด) ที่เกิดจาก safe load ของเสาเข็ม น้อย (Support คือเสาและผนังรับแรงเฉือน) เพื่อไม่ให้ส่งผลต่อการรับแรงของฐานรากแพ จากนั้นผู้วิจัยจะวิเคราะห์ฐานรากแพที่ใส่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ และตรวจสอบ stress แกน x และ y ที่เพิ่มขึ้นใน Top layer และ Bottom layer (ความหนา 75 ซม.) โดยผู้วิจัยจะกำหนดให้ stress ที่เพิ่มขึ้นมีค่าไม่เกิน 10% ของ stress สูงสุดของแกน x และ y ในฐานรากแพเดิมที่ไม่มีคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ เพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการรับแรงของฐานรากแพและไม่จำเป็นต้องเพิ่มเหล็กเสริมคอนกรีตจากแบบฐานรากที่ออกแบบเรียบร้อยแล้ว

ผู้วิจัยจะวิเคราะห์ฐานรากแพแบบ static load โดยใช้ safe load จากเสาเข็มและ Support คือเสาและผนังรับแรงเฉือน เพื่อกำหนดตำแหน่งของ element ที่มี principal stress น้อยกว่าค่า stress ที่กำหนดเช่น 10 ksc หลังจากนั้นผู้วิจัยจะแทนที่ low heat concrete ด้วยคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จในทุกตำแหน่งของ element ที่มี principal stress น้อยกว่า 10 ksc แต่จะไม่แทนที่คอนกรีต Top layer และ Bottom layer เนื่องจากการรับแรงดัด จะมี stress มากที่ตำแหน่งบนกับล่างและเพื่อให้เป็นชั้นคอนกรีตหุ้มคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ จากนั้นจึงทำการเปลี่ยนคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จบางส่วนกลับเป็น low heat concrete ในตำแหน่งของฐานรากแพที่มี principal stress สูง ซึ่งพบได้บ่อยในบริเวณที่ใกล้เสาเข็มหรือตอม่อของเสาและผนังรับแรงเฉือน วิเคราะห์หา stress สูงสุดในแกน x และ y ของ Top layer และ Bottom layer ต่อมาจึงเปลี่ยนค่า stress ที่กำหนดเช่น 15 ksc และแทนที่ low heat concrete ด้วยคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จในทุกตำแหน่งของ element ที่มี principal stress น้อยกว่า 15 ksc โดยไม่แทนที่คอนกรีต Top layer และ Bottom layer เช่นเดิม ทำการวิเคราะห์หา stress สูงสุดในแกน x และ y ของ Top layer และ Bottom layer เช่นเดิม ดังนั้นเมื่อเปลี่ยนค่า stress ที่กำหนดหลากหลายค่า จะสามารถวาดกราฟเพื่อดูแนวโน้มการเพิ่มขึ้น

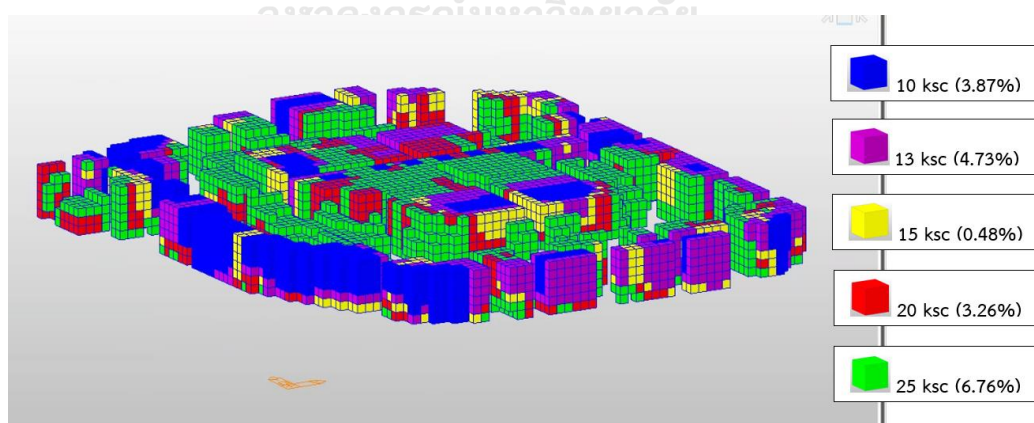
ของ stress ในแกน x และ y เมื่อเพิ่มปริมาณคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จที่คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับ ปริมาณคอนกรีตทั้งหมด

Property	Precast lightweight concrete
Specific heat (kcal/kg °C)	0.294
Density (kgf/m ³)	250
Rate of heat conduction (kcal/m hr °C)	0.1616
28-day compressive strength (kgf/cm ²)	1.2
Modulus of elasticity (kgf/cm ²)	5.72x10 ³

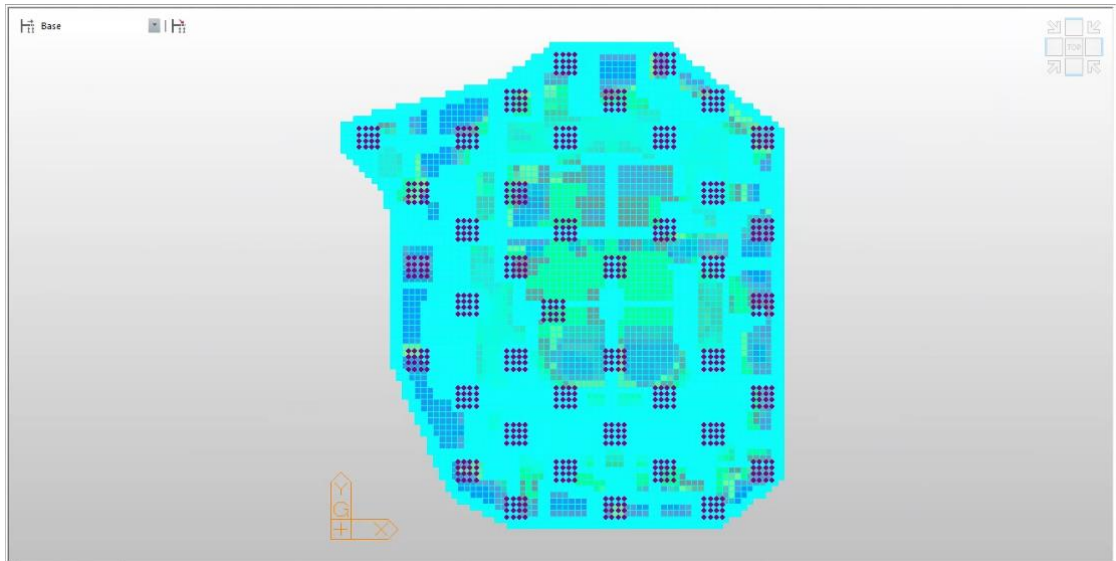
ตารางที่ 4-6 คุณสมบัติของคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ

4.4.1 Siamese Rama 9 (F42)

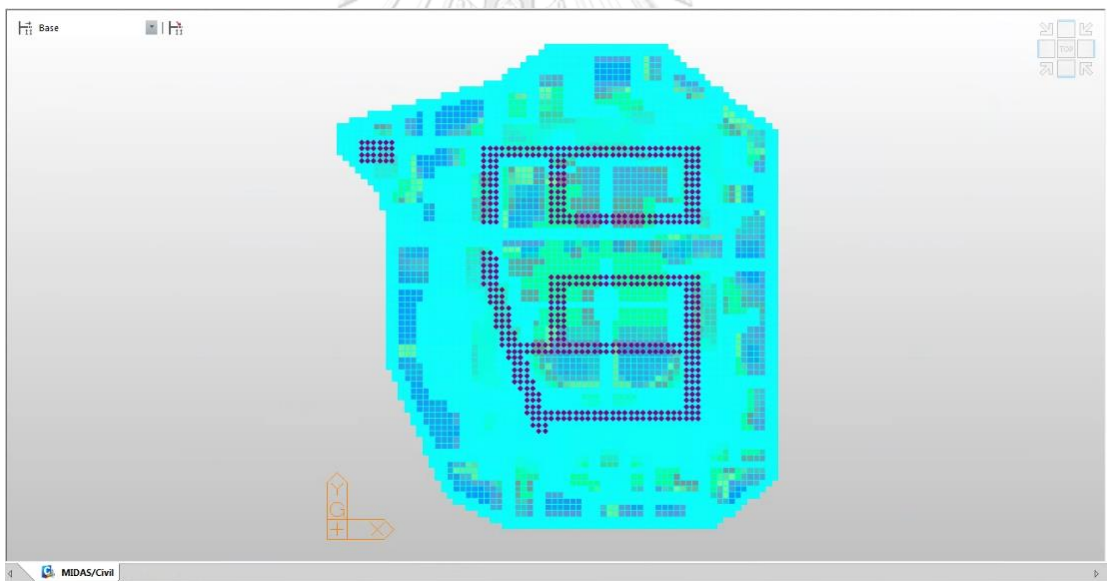
เมื่อใช้เกณฑ์ของ stress ที่กำหนดเท่ากับ 10, 13, 15, 20, 25 ksc พบว่าตำแหน่งของ คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จแสดงในรูปที่ 4-49 โดยเลขเปอร์เซ็นต์คือปริมาณของคอนกรีตเบา หล่อสำเร็จเทียบกับปริมาณคอนกรีตฐานรากทั้งหมด รูปที่ 4-50 และ 4-51 แสดงฐานราก แพที่โปร่งแสงทำให้เห็นคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จด้านในนอกจากนั้นยังแสดงตำแหน่งของ เสาค้ำและผนังรับแรงเฉือนของฐานราก และกราฟของ Stress ที่เพิ่มขึ้นใน Top layer และ Bottom layer เนื่องจากการแทนที่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จแสดงในรูปที่ 4-52 ถึง 4-55



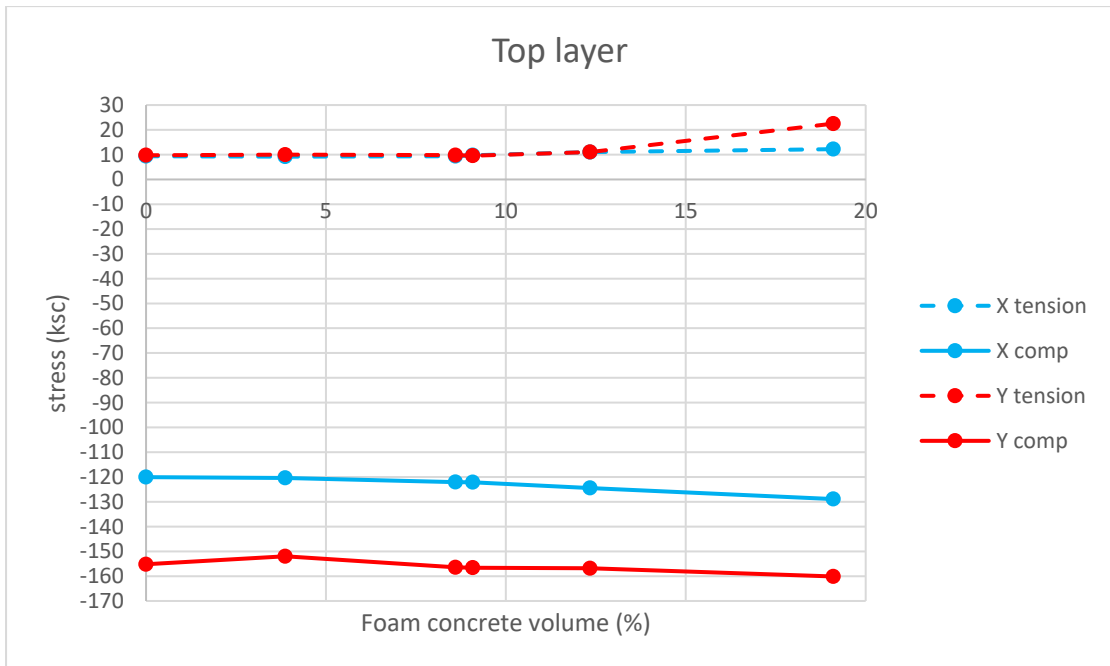
รูปที่ 4-49 การกระจายตัวของคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จในฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42)



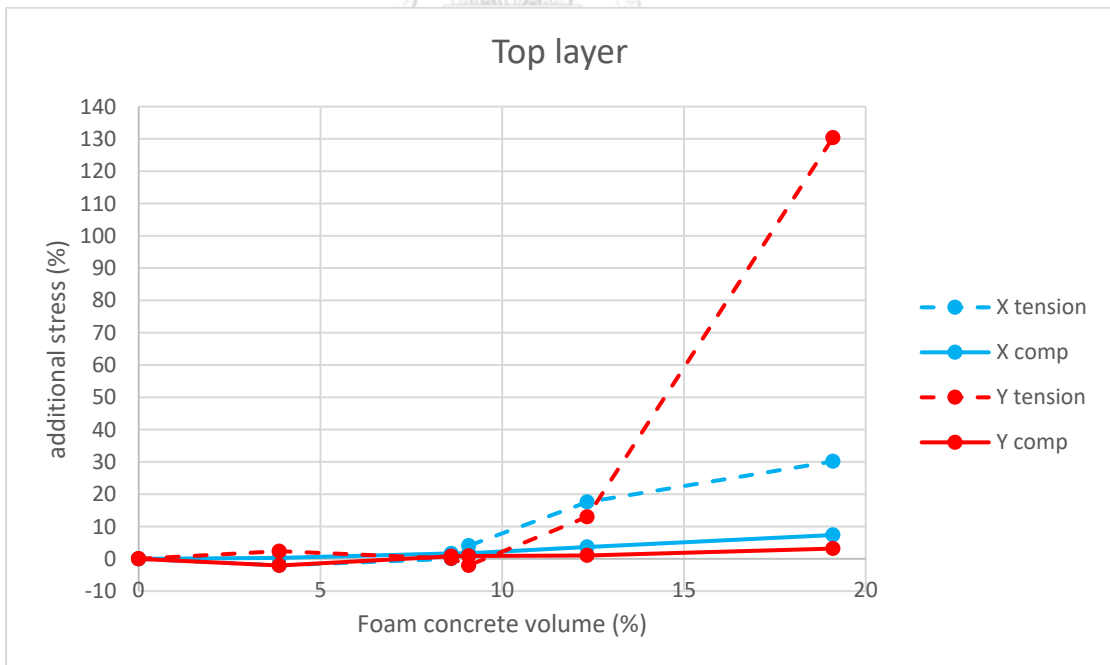
รูปที่ 4-50 ตำแหน่งของคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จในฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42) เทียบกับ
เสาเข็ม เมื่อมองจาก Top view



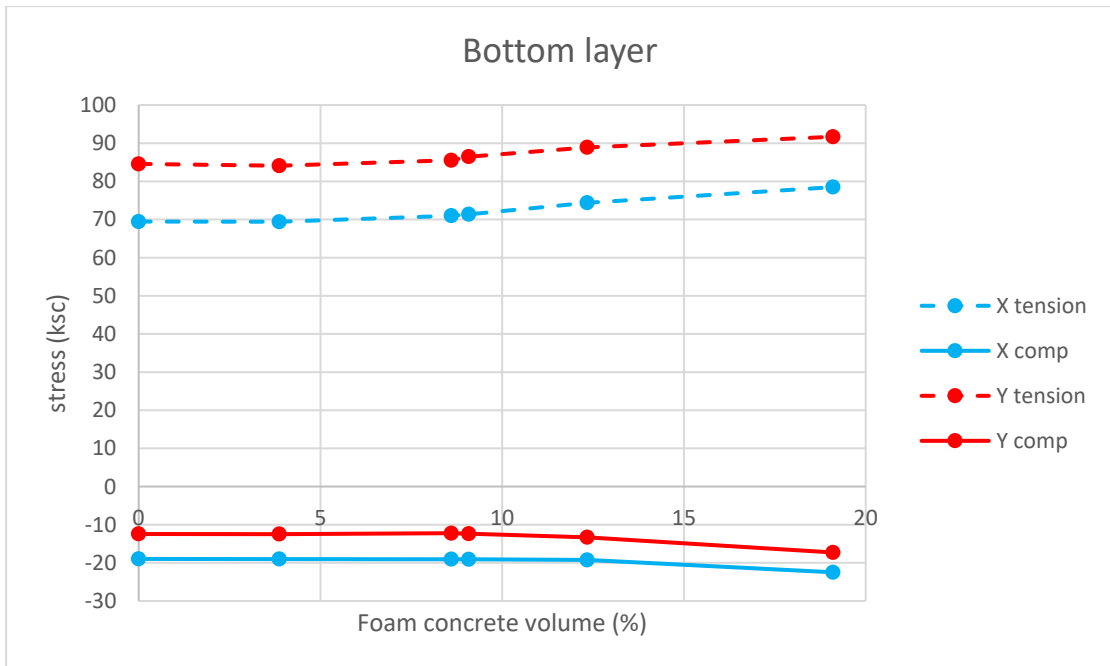
รูปที่ 4-51 ตำแหน่งของคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จในฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42) เทียบกับ
ตอม่อของเสาและผนังรับแรงเฉือน เมื่อมองจาก Top view



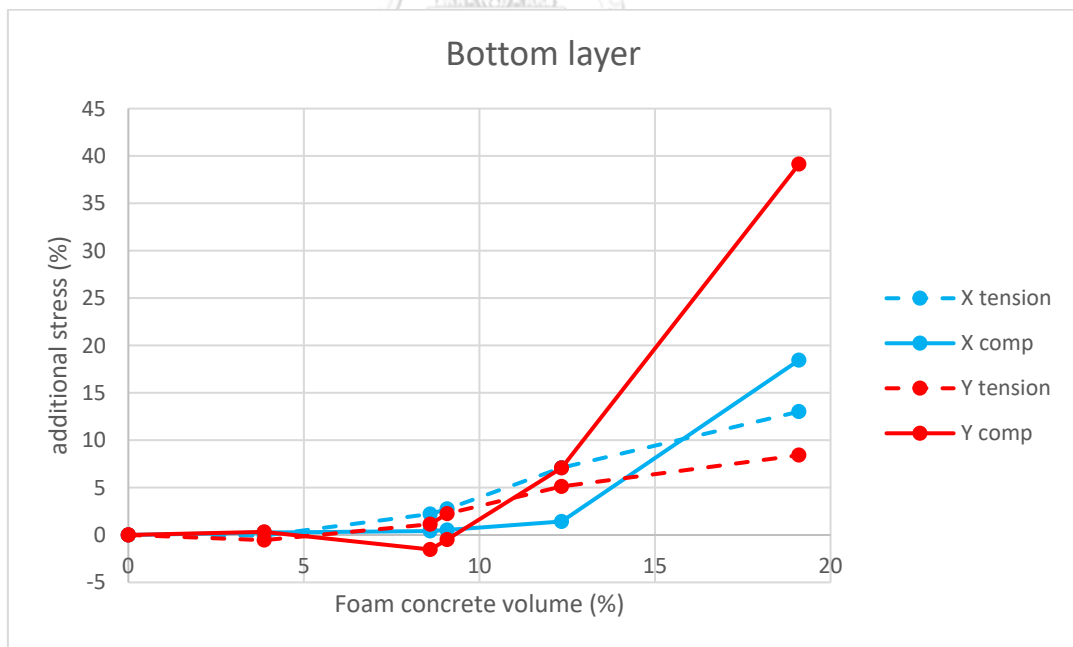
รูปที่ 4-52 กราฟแสดงค่า stress สูงสุดที่ Top layer เทียบกับปริมาณคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ ฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42)



รูปที่ 4-53 กราฟระหว่างค่า stress ที่เพิ่มขึ้นของ Top layer คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับ stress ของฐานรากที่ไม่มีคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ และปริมาณคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ ฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42)



รูปที่ 4-54 กราฟแสดงค่า stress สูงสุดที่ Bottom layer เทียบกับปริมาณคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ
ฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42)

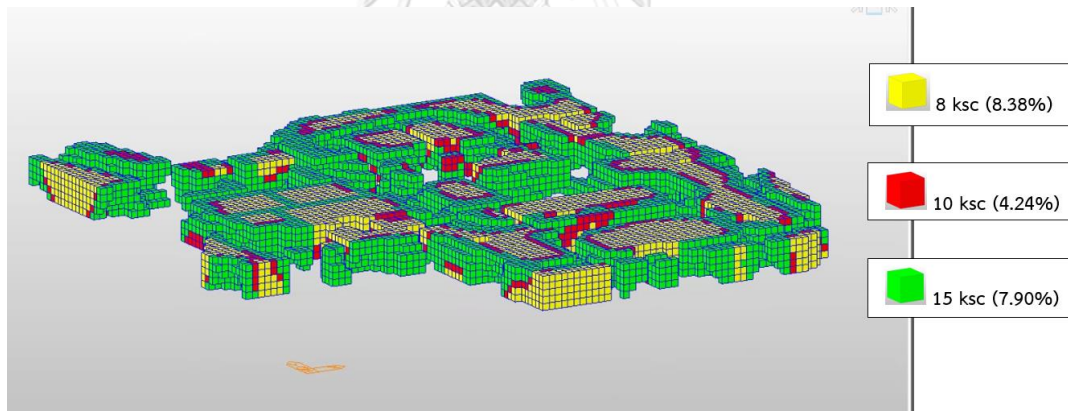


รูปที่ 4-55 กราฟระหว่างค่า stress ที่เพิ่มขึ้นของ Bottom layer คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับ stress
ของฐานรากที่ไม่มีคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ และปริมาณคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ ฐานรากแพ Siamese
Rama 9 (F42)

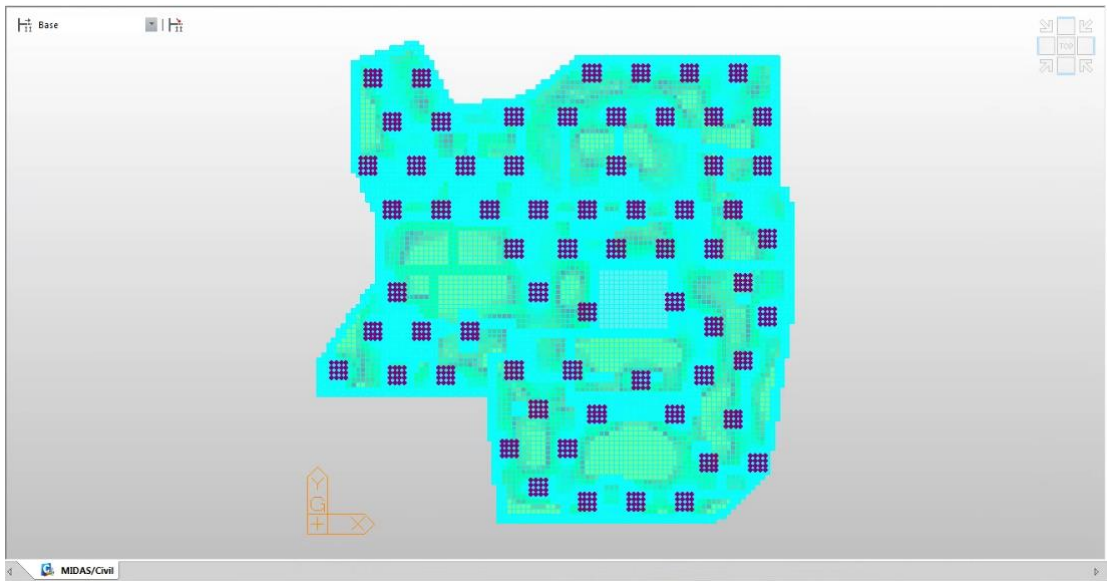
ดังนั้นฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F42) สามารถแทนที่คอนกรีตด้วยคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จเท่ากับ 9.08% ของปริมาตรคอนกรีตทั้งหมด ซึ่งจะทำให้ stress ในแกน x และ y ของชั้นบนและชั้นล่างมีค่าไม่เกิน 10%

4.4.2 Siamese Rama 9 (F65)

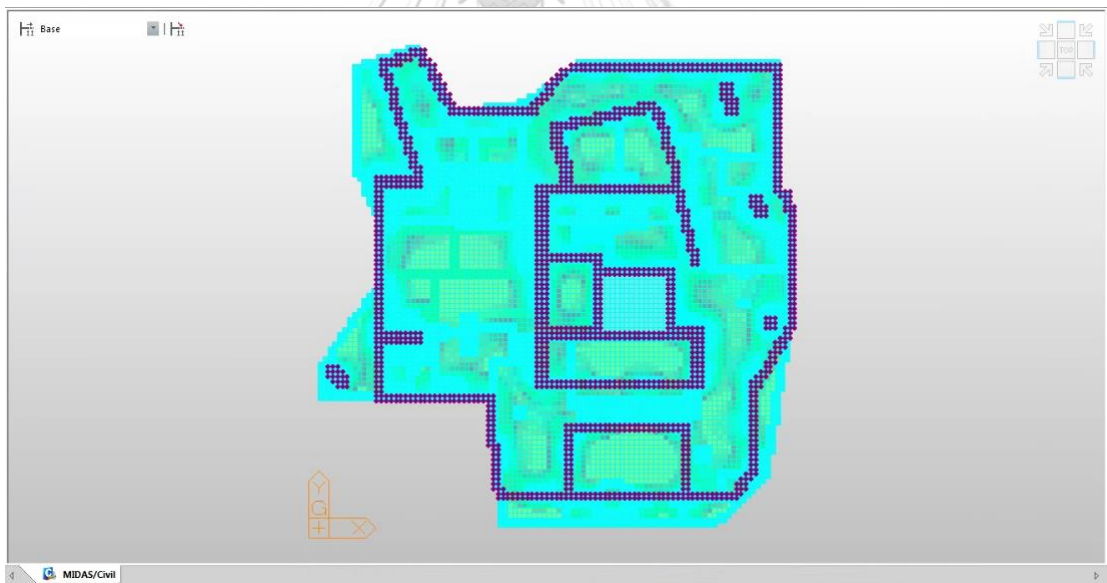
เมื่อใช้เกณฑ์ของ stress ที่กำหนดเท่ากับ 8, 10, 15 ksc พบว่าตำแหน่งของคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จแสดงในรูปที่ 4-56 โดยเลขเปอร์เซ็นต์คือปริมาณของคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จเทียบกับปริมาตรคอนกรีตฐานรากทั้งหมด รูปที่ 4-57 และ 4-58 แสดงฐานรากแพที่โปร่งแสงทำให้เห็นคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จด้านในนอกจากนั้นยังแสดงตำแหน่งของเสาเข็มและผนังรับแรงเฉือนของฐานราก และกราฟของ Stress ที่เพิ่มขึ้นใน Top layer และ Bottom layer เนื่องจากการแทนที่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จแสดงในรูปที่ 4-59 ถึง 4-62



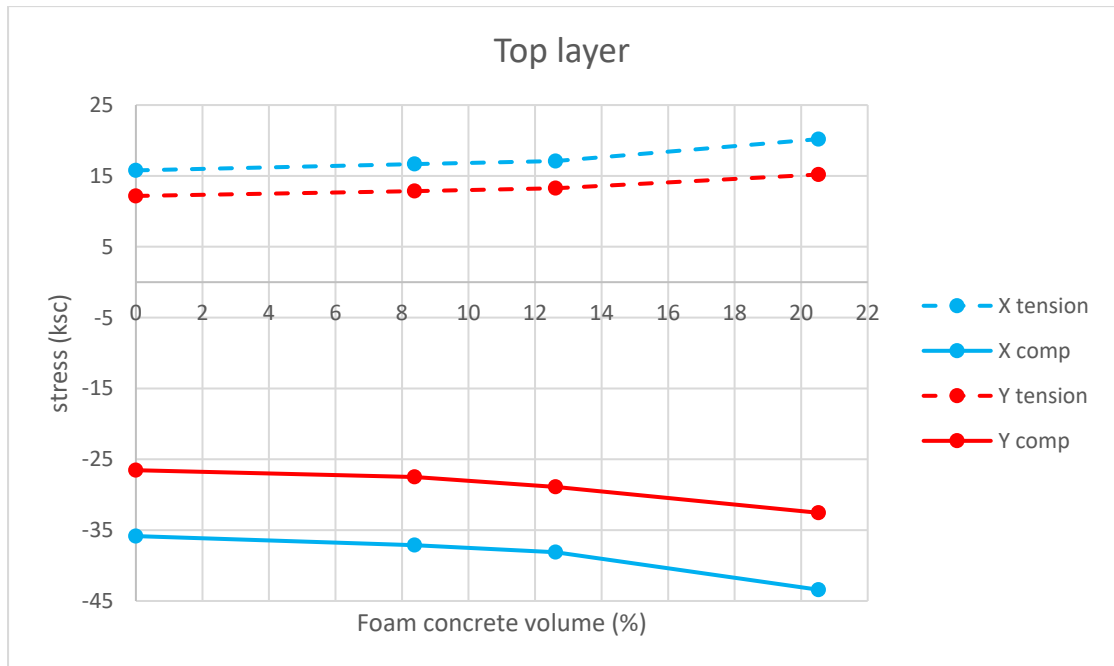
รูปที่ 4-56 การกระจายตัวของคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จในฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65)



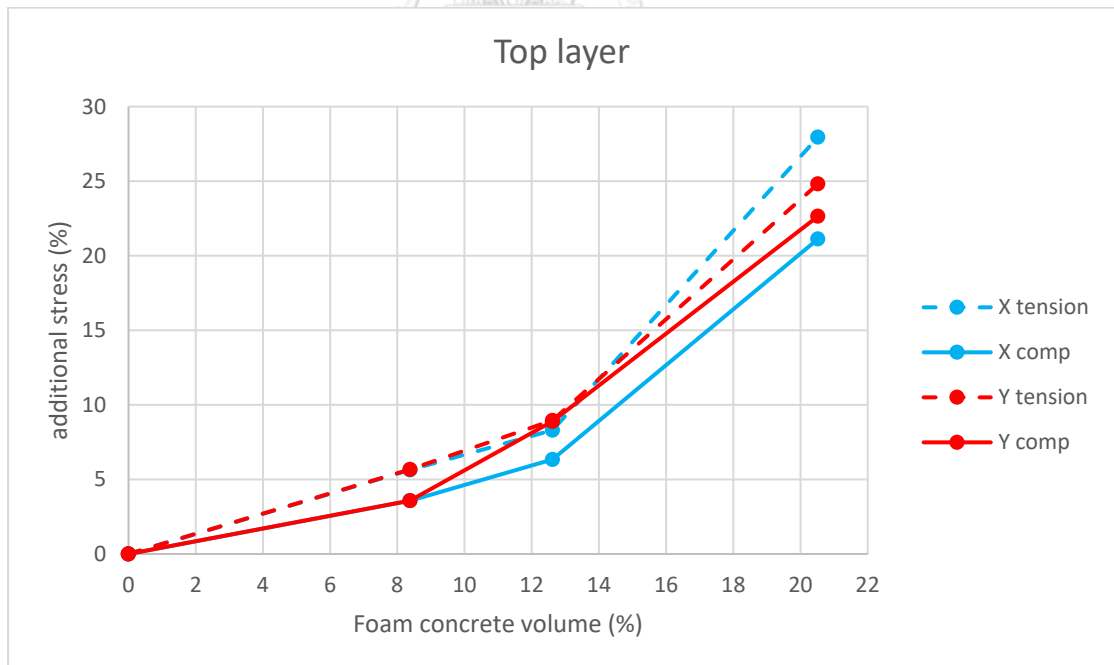
รูปที่ 4-57 ตำแหน่งของคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จในฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65) เทียบกับเสาเข็ม เมื่อมองจาก Top view



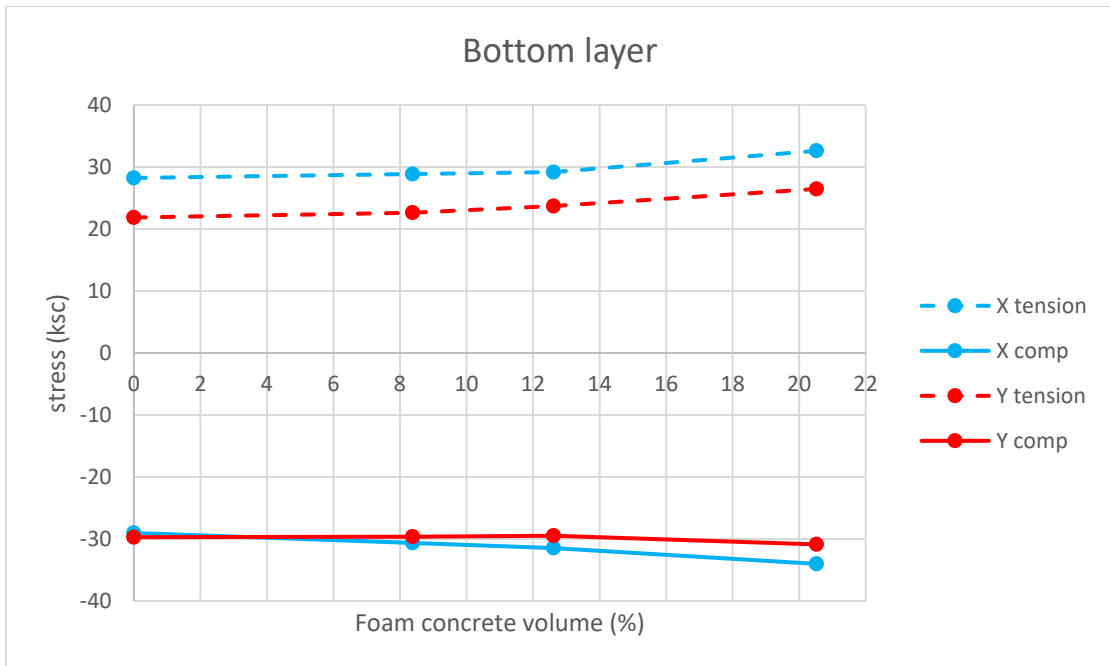
รูปที่ 4-58 ตำแหน่งของคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จในฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65) เทียบกับตอม่อของเสาและผนังรับแรงเฉือน เมื่อมองจาก Top view



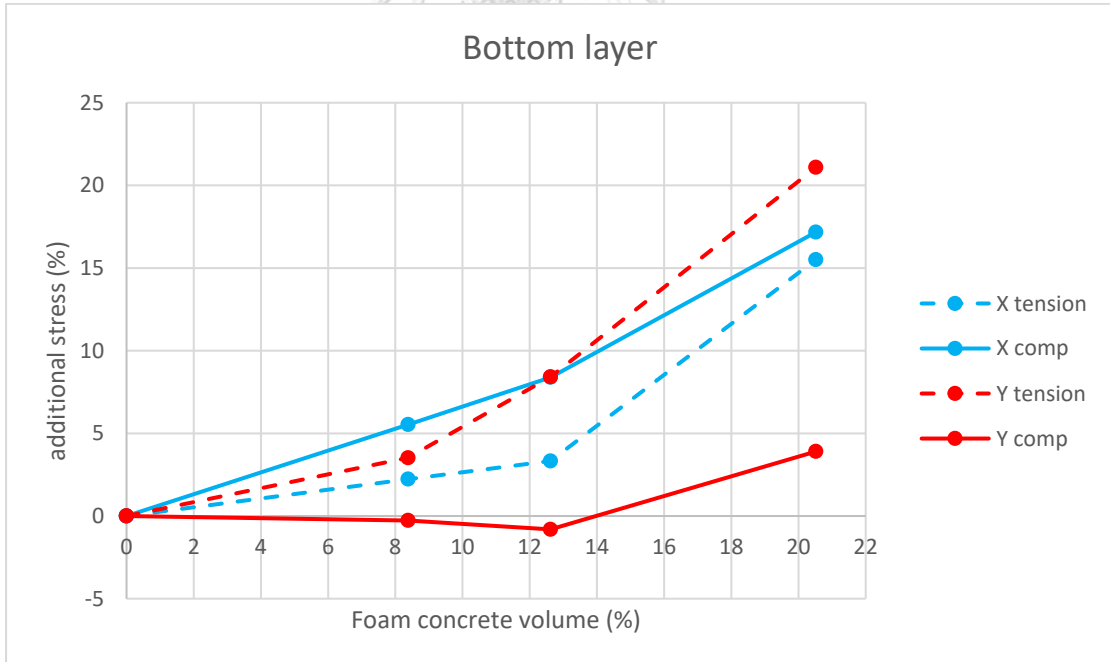
รูปที่ 4-59 กราฟแสดงค่า stress สูงสุดที่ Top layer เทียบกับปริมาณคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ ฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65)



รูปที่ 4-60 กราฟระหว่างค่า stress ที่เพิ่มขึ้นของ Top layer คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับ stress ของฐานรากที่ไม่มีคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ และปริมาณคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ ฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65)



รูปที่ 4-61 กราฟแสดงค่า stress สูงสุดที่ Bottom layer เทียบกับปริมาณคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ
ฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65)



รูปที่ 4-62 กราฟระหว่างค่า stress ที่เพิ่มขึ้นของ Bottom layer คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับ stress
ของฐานรากที่ไม่มีคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ และปริมาณคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ ฐานรากแพ Siamese
Rama 9 (F65)

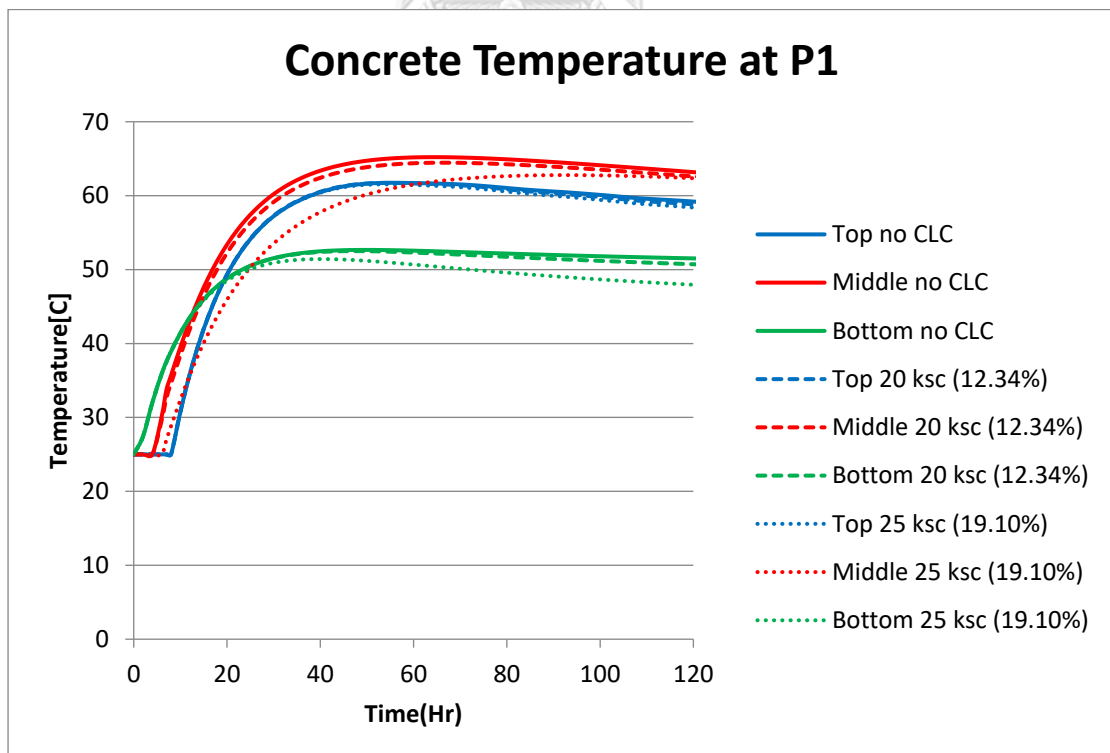
ดังนั้นฐานรากแพ Siamese Rama 9 (F65) สามารถแทนที่คอนกรีตด้วยคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จเท่ากับ 12.62% ของปริมาตรคอนกรีตทั้งหมด ซึ่งจะทำให้ stress ในแกน x และ y ของชั้นบนและชั้นล่างมีค่าไม่เกิน 10%

4.5 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่จุดวัดระหว่างฐานรากเดิมกับฐานรากที่ใส่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ

ผู้วิจัยจะนำเสนออุณหภูมิที่จุด P1 ของทั้งสองฐานราก เพื่อสังเกตอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงและศึกษาพฤติกรรมในด้านอุณหภูมิเมื่อใส่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ ในด้านของ stress และโอกาสในการเกิดรอยร้าวจะพิจารณาทุกตำแหน่งในฐานรากและนำเสนอในหัวข้อถัดไป

4.5.1 Siamese Rama 9 (F42)

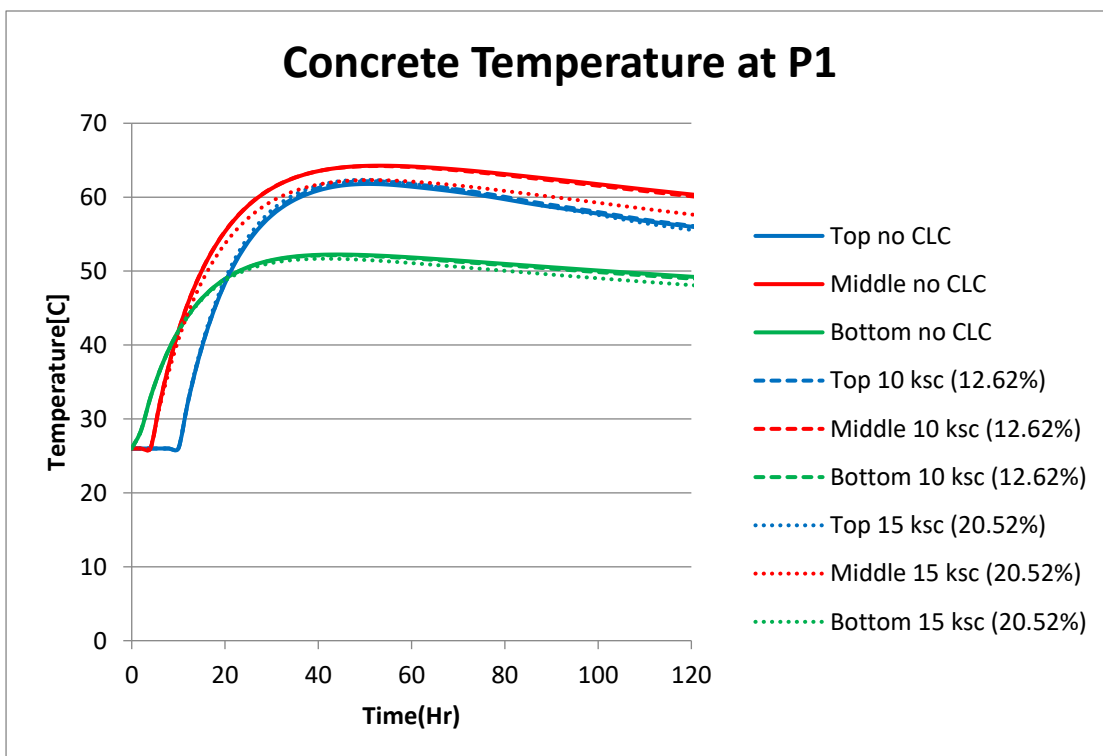
จากรูปที่ 4-63 พบว่าจุด P1 สามารถเห็นความแตกต่างของอุณหภูมิที่ลดลงเนื่องจากการใส่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ เมื่อใส่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จมากกว่า 12.34% และเมื่อใส่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ 19.10% จะสามารถลดอุณหภูมิแกนกลางได้มากที่สุดเท่ากับ 7.5 °C



รูปที่ 4-63 กราฟระหว่างอุณหภูมิกับเวลาฐานราก Siamese Rama 9 (F42) ที่ไม่มีการใส่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จเทียบกับใส่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ 12.34% และ 19.10%

4.3.3 Siamese Rama 9 (F65)

จากรูปที่ 4-64 พบว่าจุด P1 สามารถเห็นความแตกต่างของอุณหภูมิที่ลดลงเนื่องจากการใส่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ เมื่อใส่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จมากกว่า 12.62% และเมื่อใส่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ 20.52% จะสามารถลดอุณหภูมิแกนกลางได้มากที่สุดเท่ากับ 2.7 °C



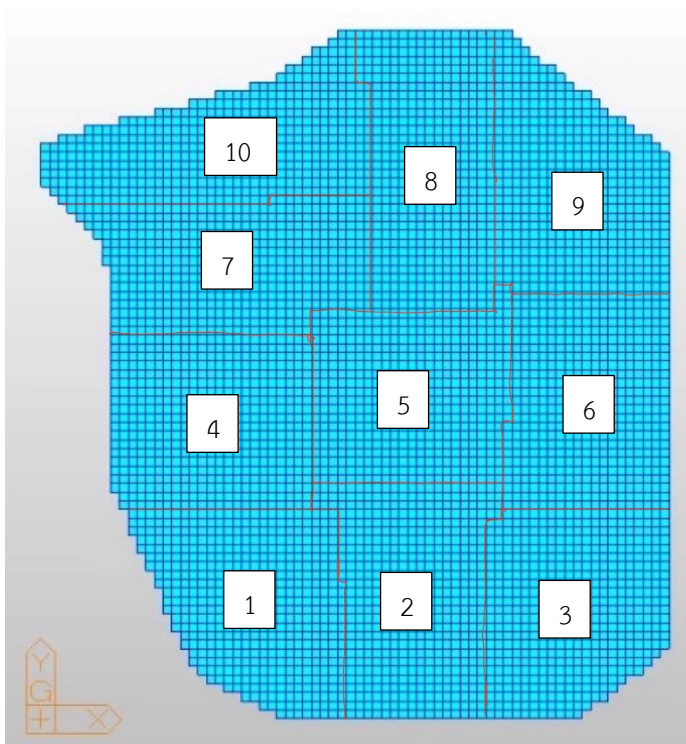
รูปที่ 4-64 กราฟระหว่างอุณหภูมิกับเวลาฐานราก Siamese Rama 9 (F65) ที่ไม่มีการใส่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จเทียบกับใส่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ 12.62% และ 20.52%

4.6 การวิเคราะห์เพื่อหา crack potential ในฐานรากแพทที่ใส่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ

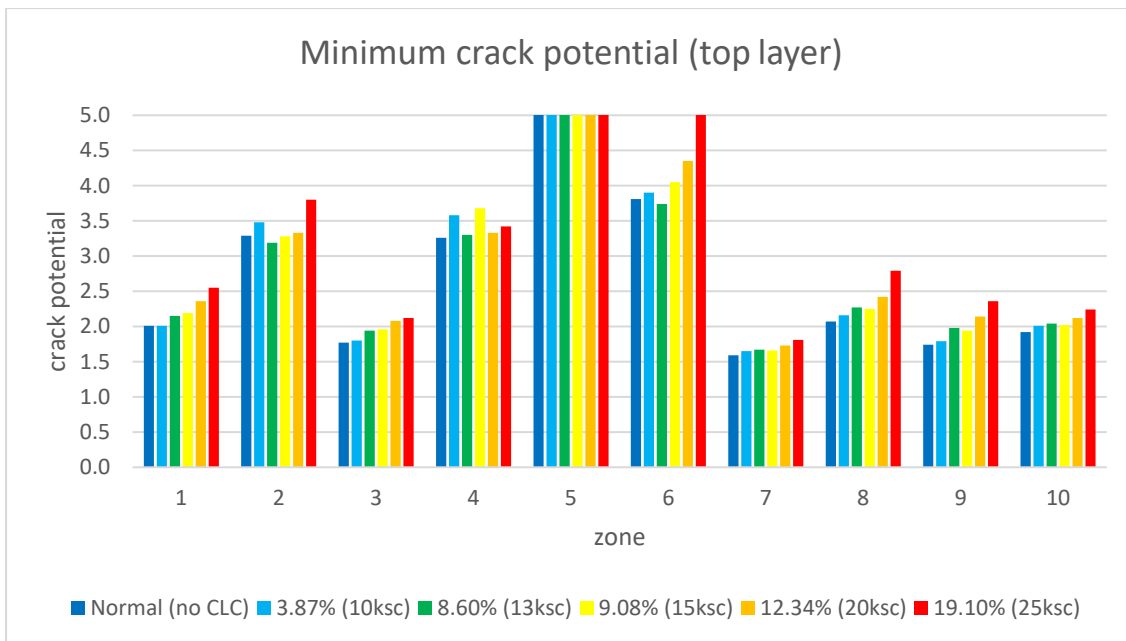
นำแบบจำลองที่ปรับแก้แล้ว มาแทนที่ด้วยคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จในปริมาณที่แตกต่างกัน เพื่อวิเคราะห์หา crack potential ที่น้อยที่สุดในแต่ละพื้นที่ โดยแบ่งพื้นที่ของชั้นบนและชั้นล่างออกเป็น 10 zone ที่มีขนาดใกล้เคียงกัน เพื่อหาว่าจุดภายในพื้นที่บริเวณใดมีโอกาสเกิดรอยร้าวมากที่สุด (crack potential น้อยที่สุด) และศึกษาการเพิ่มปริมาณคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จส่งผลกับค่า crack potential ในแต่ละพื้นที่อย่างไร

Crack potential สูงสุดที่โปรแกรม Midas Civil แสดงคือ 20.0 แต่เพื่อให้สะดวกและเห็นถึงความแตกต่างของกราฟแท่งจึงแสดงค่าสูงสุดเท่ากับ 5.0

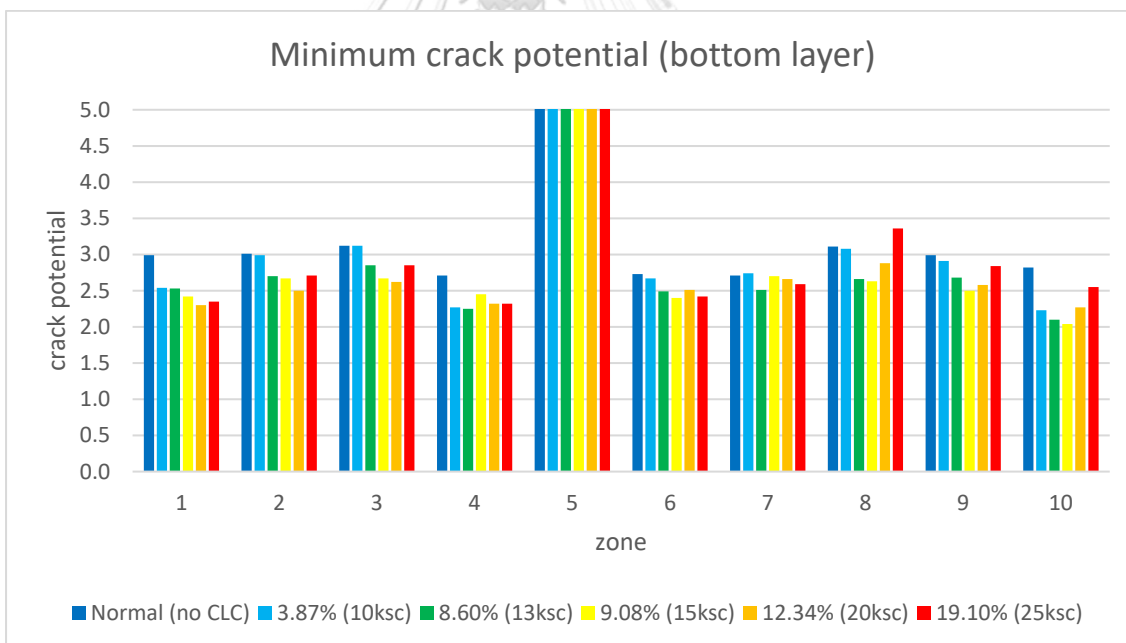
4.6.1 Siamese Rama 9 (F42)



รูปที่ 4-65 การแบ่งพื้นที่ 10 zone ของฐานราก Siamese Rama 9 (F42)



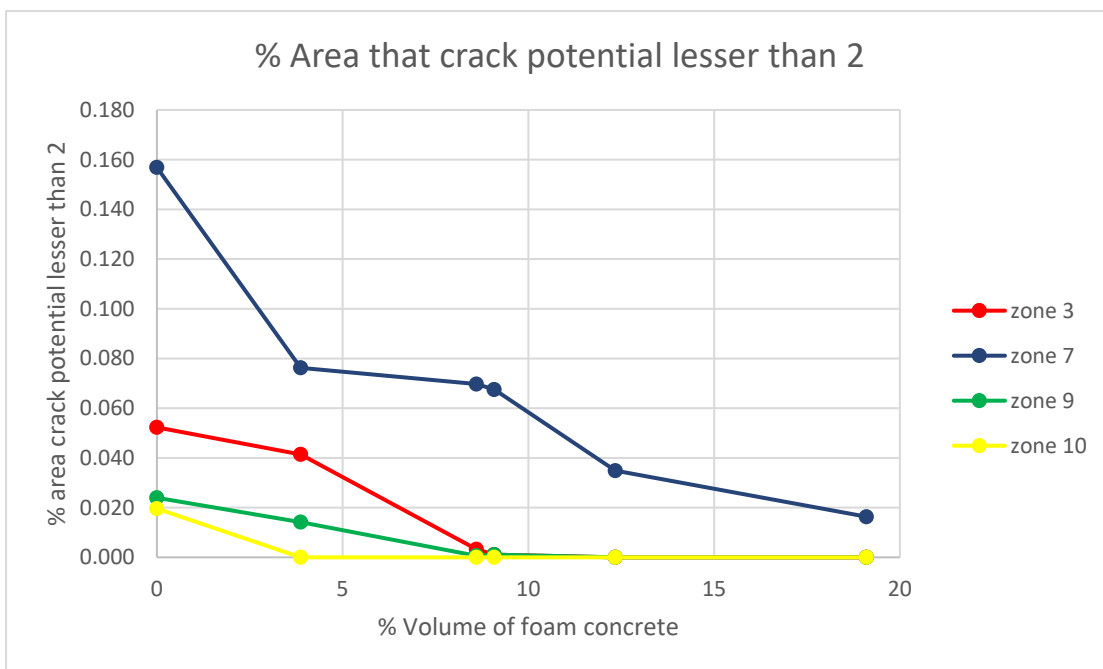
รูปที่ 4-66 Crack potential ที่น้อยที่สุดในแต่ละพื้นที่ของชั้นบนฐานราก Siamese Rama 9 (F42) เมื่อแทนที่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จในปริมาณที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4-67 Crack potential ที่น้อยที่สุดในแต่ละพื้นที่ของชั้นล่างฐานราก Siamese Rama 9 (F42) เมื่อแทนที่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จในปริมาณที่แตกต่างกัน

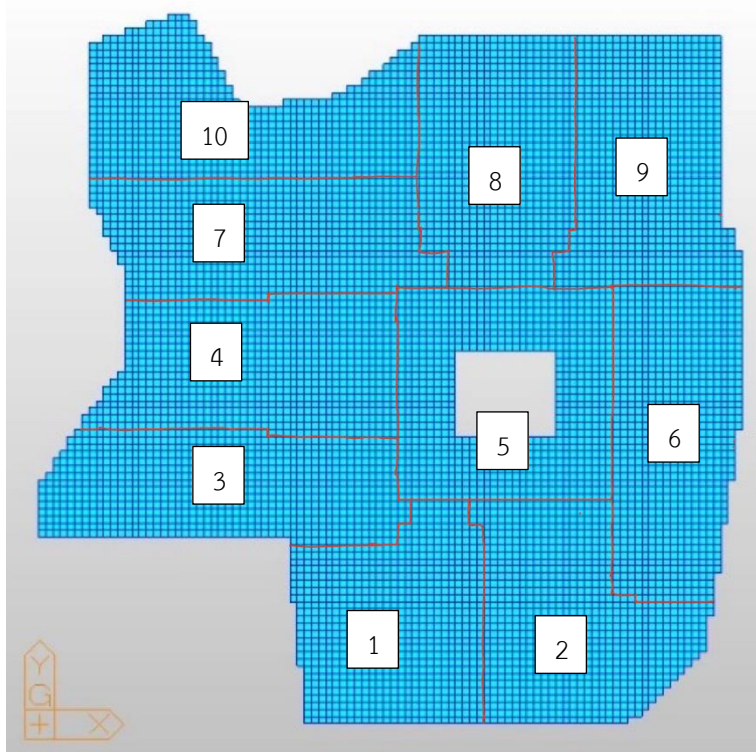
จากรูปที่ 4-65 ถึง 4-67 พบว่าฐานรากเดิมพื้นที่ zone 7 มีค่า crack potential น้อยที่สุดในชั้นบนเท่ากับ 1.59 โดยเมื่อเพิ่มปริมาณคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ crack potential ในชั้นบนมี

แนวโน้มเพิ่มมากขึ้น แต่ชั้นล่างจะมีค่าน้อยลง อย่างไรก็ตาม crack potential ในชั้นล่างทุกพื้นที่ที่มีค่ามากกว่า 2 ดังนั้นโอกาสเกิดรอยร้าวจึงมีน้อยมาก รูปที่ 4-68 แสดงกราฟเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ภายใน zone ที่มีค่า crack potential น้อยกว่า 2 ในชั้นบนกับปริมาณคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ ซึ่งพื้นที่ที่มีค่า crack potential น้อยกว่า 2 (เสี่ยงต่อการเกิดรอยร้าว) มีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ

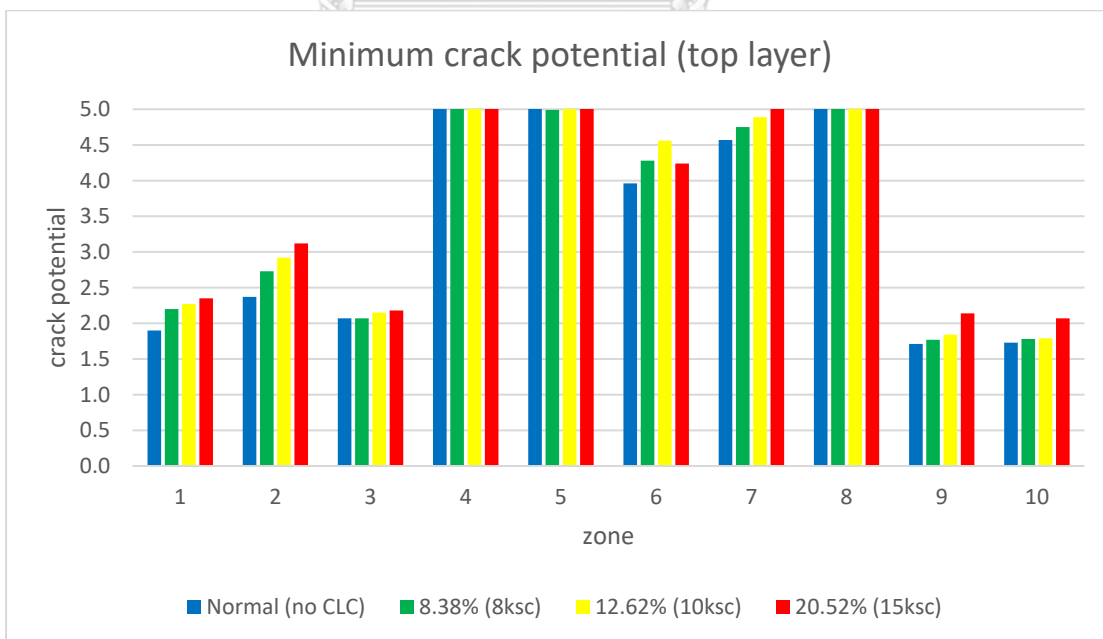


รูปที่ 4-68 กราฟเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ที่มีค่า crack potential น้อยกว่า 2 ในชั้นบนกับปริมาณคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ ฐานราก Siamese Rama 9 (F42)

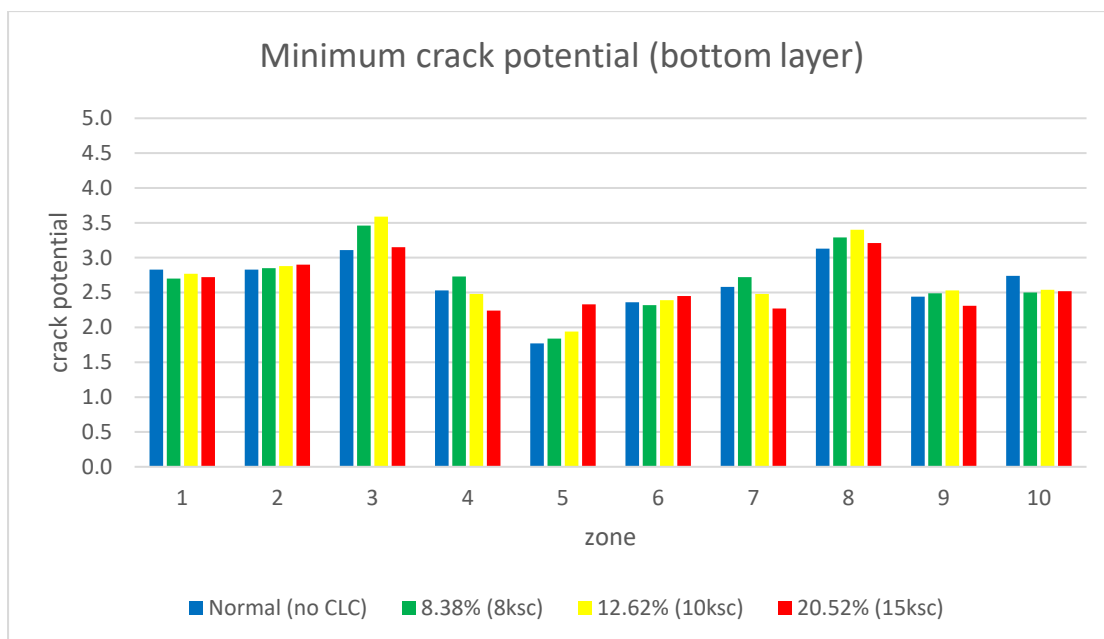
4.6.2 Siamese Rama (F65)



รูปที่ 4-69 การแบ่งพื้นที่ 10 zone ของฐานราก Siamese Rama 9 (F65)

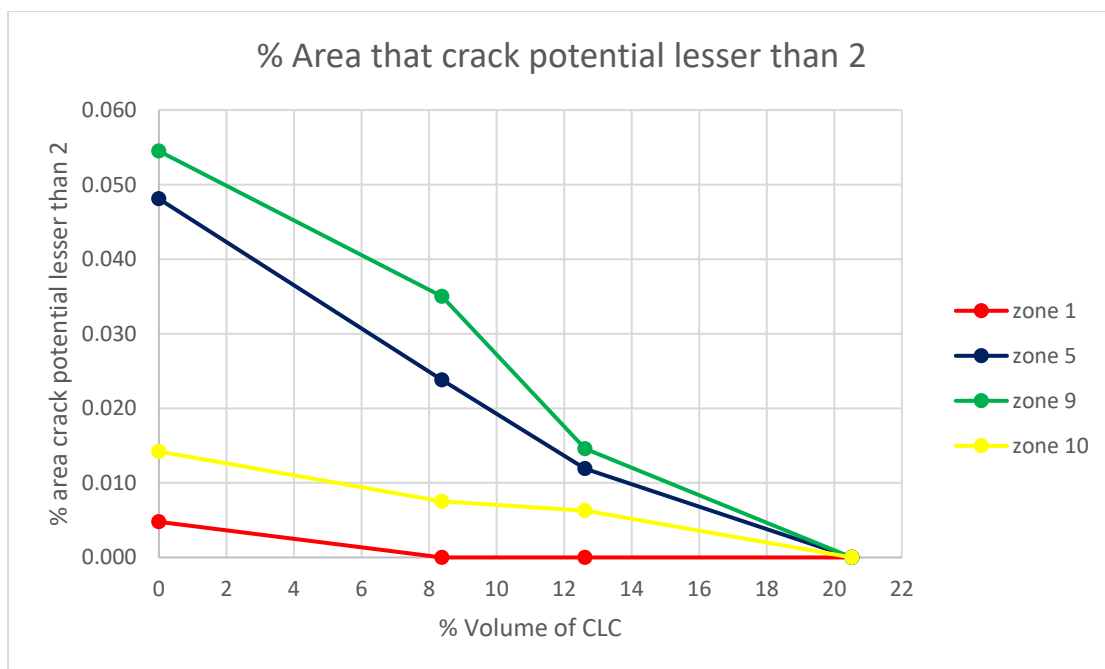


รูปที่ 4-70 Crack potential ที่น้อยที่สุดในแต่ละพื้นที่ของชั้นบนฐานราก Siamese Rama 9 (F65) เมื่อแทนที่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จในปริมาณที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4-71 Crack potential ที่น้อยที่สุดในแต่ละพื้นที่ของชั้นล่างฐานราก Siamese Rama 9 (F65) เมื่อแทนที่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จในปริมาณที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4-69 ถึง 4-71 พบว่าฐานรากเดิมพื้นที่ zone 9 มีค่า crack potential น้อยที่สุดในชั้นบนเท่ากับ 1.71 โดยเมื่อเพิ่มปริมาณคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ crack potential ในชั้นบนมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น แต่ชั้นล่างจะมีทั้งมากขึ้นและน้อยลง อย่างไรก็ตาม crack potential ในชั้นล่างในพื้นที่ 5 ซึ่งมีค่าน้อยที่สุดในตอนแรก แต่เมื่อแทนที่ด้วยคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ ค่า crack potential มีค่ามากขึ้นตามลำดับ รูปที่ 4-72 แสดงกราฟเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ภายใน zone ที่มีค่า crack potential น้อยกว่า 2 กับปริมาณคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ สำเร็จ ซึ่งพื้นที่ที่มีค่า crack potential น้อยกว่า 2 (เสี่ยงต่อการเกิดรอยร้าว) มีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ



รูปที่ 4-72 กราฟเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ที่มีค่า crack potential น้อยกว่า 2 กับปริมาณคอนกรีตเบา
หล่อสำเร็จ ฐานราก Siamese Rama 9 (F65)

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

5.1 การเปรียบเทียบผลอุณหภูมิจากแบบจำลองและอุณหภูมิที่ตรวจวัดจริง

ตัวแปรที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองย่อมมีความแตกต่างกันในแต่ละฐานรากแพ เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้หรือสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน ดังนั้นการสร้างแบบจำลองเพื่อให้สามารถทำนายอุณหภูมิให้มีความใกล้เคียงกับค่าที่ตรวจวัดจริง จำเป็นที่จะต้องเก็บข้อมูลและคุณสมบัติของวัสดุอย่างถูกต้อง และนำมาใช้เป็นตัวแปรที่มีความเหมาะสม โดยตัวแปรสำคัญที่เมื่อปรับแก้แล้วทำให้แบบจำลองทำนายผลได้แม่นยำมากขึ้นคือค่าการนำความร้อนของคอนกรีต, อุณหภูมิตอนเริ่มต้นของคอนกรีต, heat source function ของคอนกรีต และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมในขณะเทคอนกรีต นอกจากนี้การแบ่งการเทเป็นหลายชั้นตอนในแบบจำลองจะทำให้ได้อุณหภูมิที่ใกล้เคียงค่าที่ตรวจวัดจริงมากขึ้น โดยงานวิจัยนี้ทำการปรับแก้แบบจำลองเพื่อให้ใกล้เคียงฐานรากจริง พบว่าสามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในฐานรากแพที่พิจารณาได้ โดยมีความแม่นยำคิดเป็นค่า RMS โดยแบบจำลองฐานรากแพของ Siamese Rama 9 (F42) พบว่าค่า RMS น้อยที่สุดอยู่ที่จุด P4 middle เท่ากับ $1.198\text{ }^{\circ}\text{C}$ ค่า RMS มากที่สุดอยู่ที่จุด P3 top เท่ากับ $5.674\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งจุด P1 มีอุณหภูมิใกล้เคียงกับค่าจริงมากที่สุด เนื่องจากค่า RMS เฉลี่ยของจุด P1 คือ $1.612\text{ }^{\circ}\text{C}$ และแบบจำลองฐานรากแพของ Siamese Rama 9 (F65) พบว่าค่า RMS น้อยที่สุดอยู่ที่จุด P4 middle เท่ากับ $1.576\text{ }^{\circ}\text{C}$ ค่า RMS มากที่สุดอยู่ที่จุด P3 middle เท่ากับ $3.247\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งจุด P4 มีอุณหภูมิใกล้เคียงกับค่าจริงมากที่สุด เนื่องจากค่า RMS เฉลี่ยของจุด P4 คือ $1.798\text{ }^{\circ}\text{C}$ และแบบจำลองสามารถคาดการณ์ผลต่างอุณหภูมิของผิวบนและผิวล่างของฐานรากแพได้ โดยพบความคลาดเคลื่อนสูงสุดของ F42 เท่ากับ $7.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ และของ F65 เท่ากับ $6.5\text{ }^{\circ}\text{C}$

5.2 การเพิ่มประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิของฐานรากแพขนาดใหญ่ด้วยคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ

การหาตำแหน่งของคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จสามารถทำได้โดยการวิเคราะห์แรง safe load จากเสาเข็มในฐานรากแพ และเลือกแทนที่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จในตำแหน่งกลางฐานรากที่มี stress เนื่องจากการตัดน้อยเพื่อให้ไม่ส่งผลกระทบต่อการรับแรงของฐานรากแพ โดยเมื่อสังเกตการกระจายตัวของคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จจะพบว่าคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จจะอยู่ในตำแหน่งที่ห่างจากเสาเข็มและตอม่อของเสาหรือผนังรับแรงเฉือน และเมื่อเพิ่มปริมาณคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จอาจจะทำ

ให้กระทบต่อประสิทธิภาพในการรับแรงเฉือนมากขึ้นจึงต้องมีการแยกคอนกรีตเบาออกจากกันเพื่อให้พฤติกรรมในการรับแรงของฐานรากแพยังคงใกล้เคียงเดิมซึ่งจะทำให้ stress ในฐานรากแพเพิ่มขึ้นในระดับที่ยอมรับได้ (10%) ซึ่งจากการศึกษาฐานรากแพขนาดใหญ่ 2 ฐานพบว่าสามารถแทนที่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จได้ประมาณ 9-13% ของปริมาตรคอนกรีตทั้งหมด โดยถ้าแทนที่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จในปริมาณที่มากขึ้น อาจมีผลต่อพฤติกรรมรับแรงของโครงสร้างฐานรากที่ออกแบบไว้

การแทนที่คอนกรีตของฐานรากแพด้วยคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จสามารถลดอุณหภูมิในบริเวณที่ใกล้เคียงกับคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ (ประมาณ 75 ซม.) ซึ่งจะทำให้ thermal stress น้อยลง โดยใช้ค่า crack potential เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิ ซึ่งพบว่าการใส่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จในฐานรากแพทำให้ crack potential ในด้านบนมีแนวโน้มมากขึ้นและด้านล่างน้อยลงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามบริเวณด้านบนมักพบปัญหาการเกิดรอยร้าวมากกว่าเมื่อสังเกตจากค่า crack potential และยังสามารถมองเห็นรอยร้าวได้ง่าย การใส่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จในปริมาณที่ไม่ทำให้ stress ของฐานรากแพสูงขึ้นเกิน 10% สามารถทำให้ค่า crack potential ของฐานราก Siamese Rama 9 (F42) ในด้านบนมากขึ้นเฉลี่ยทุกพื้นที่เท่ากับ 7.60% และฐานราก Siamese Rama 9 (F65) ในด้านบนมากขึ้นเฉลี่ยทุกพื้นที่เท่ากับ 9.45%

ข้อดีของการใส่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ นอกเหนือจากการช่วยลดโอกาสการเกิดรอยร้าวที่ผิวคอนกรีตเนื่องจากความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีต ยังช่วยให้ฐานรากแพมีน้ำหนักที่เบาลงซึ่งนำไปสู่การลดจำนวนเสาเข็มและทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างฐานรากแพขนาดใหญ่ได้ นอกจากนี้ปริมาณคอนกรีตที่ต้องเทจะน้อยลง ทำให้การบริหารจัดการเทคอนกรีตมีความสะดวกมากขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นในการศึกษานี้ กำหนดขอบเขตในการศึกษาในการแทนที่คอนกรีตบางส่วนด้วยคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ โดยมีเงื่อนไขที่จะไม่ทำให้กระทบต่อพฤติกรรมและกำลังในการรับแรงของฐานรากจนมีนัยสำคัญ เพื่อให้ใช้แบบก่อสร้างเดิมได้โดยไม่ต้องปรับเปลี่ยนแบบก่อสร้างแต่อย่างใด อย่างไรก็ตามหากแนวคิดนี้ได้ถูกผนวกไว้ในกระบวนการออกแบบฐานรากแพตั้งแต่ต้นก็มีความเป็นไปได้ที่จะสามารถเพิ่มปริมาณคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จได้ในปริมาณที่มากยิ่งขึ้น ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิของฐานรากแพดียิ่งขึ้น และยังสามารถประหยัดต้นทุนค่าก่อสร้างได้มากขึ้นด้วย

บรรณานุกรม

- ACI. (1997). Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures; ACI 209R-92. In: American Concrete Institute.
- ACI. (2005). Guide to mass concrete; ACI 207.1R-05. In.
- Aniskin, N., & Nguyen, T.-C. (2019). Influence factors on the temperature field in a mass concrete. *E3S Web Conf.*, 97.
- Aniskin, N., & Nguyen, T. (2020). Evaluation of thermal cracks in mass concrete structures during construction. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 869, 072028.
- Choktaweekarn, P., & Tangtermsirikul, S. (2010). Effect of aggregate type, casting, thickness and curing condition on restrained strain of mass concrete. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 32, 391-402.
- CONTEC SIIT , T. U. (2021). รายงานการวิเคราะห์ทางความร้อนของฐานราก MF1 โครงการงาน Bangkok Mall Phase 2-4
- Couto, D., Helene, P., & Almeida, L. (2016). Temperature monitoring in large volume spread footing foundation: case study " Parque da Cidade " – São Paulo. *Ibracon Structures and Materials Journal*, 9, 953-968.
- Do, T. A. (2013). Finite Element Modeling of Behavior of Mass Concrete Placed on Soil. *Gainesville, Fla. University of Florida*.
- Dong, S., Wang, X., Xu, H., Wang, J., & Han, B. (2021). Incorporating super-fine stainless wires to control thermal cracking of concrete structures caused by heat of hydration. *Construction and Building Materials*, 271, 121896.
- FDOT. (2010). Florida Department of Transportation Standard Specifications for Road and Bridge Construction 2010. In: Florida Department of Transportation, Tallahassee, FL.
- Gajda, J., & Nasvik, J. (2017). Why Thermal Cracking Happens & How to Control It.
- Godart, B., & Divet, L. (2013). Lessons learned from structures damaged by delayed ettringite formation and the French prevention strategy.
- Hongthong, P., Pongtornkulpanich, A., & Chawna, K. (2017). Determination of Properties

- and Heat Transfer Rate through building boundary of Corn Cob Cement Material for Applying to be Construction Material. *Energy Procedia*, 138, 217-222.
- Jin Keun Kim, & Cha, S. L. (2013). Hydration heat and thermal stress in concrete structures. *Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM13)*, 8-12.
- Ju, Y., & Lei, H. (2019). Actual Temperature Evolution of Thick Raft Concrete Foundations and Cracking Risk Analysis. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019, 1-11.
- Lee, M., Chae, Y., Khil, B., & Yun, H.-D. (2014). Influence of Casting Temperature on the Heat of Hydration in Mass Concrete Foundation with Ternary Cements. *Applied Mechanics and Materials*, 525, 478-481.
- Lee, Y., Choi, M.-S., Yi, S.-T., & Kim, J.-K. (2009). Experimental study on the convective heat transfer coefficient of early-age concrete. *Cement and Concrete Composites*, 31(1), 60-71.
- Liu, W., Cao, W., Yan, H., Ye, T., & Jia, W. (2016). Experimental and Numerical Studies of Controlling Thermal Cracks in Mass Concrete Foundation by Circulating Water. *Applied Sciences*, 6, 110.
- Nguyen, T.-C., & Bui, K. (2019). Evaluation of the impact of parameter inputs of concrete mix on the distribution of temperature in the mass concrete structure. *19*, 8-12.
- Nguyen, T.-C., Huynh, T.-P., & Lam, T. (2019). Prevention of crack formation in massive concrete at an early age by cooling pipe system. *Asian Journal of Civil Engineering*, 20.
- Nguyen, T.-C., & Luu, B. (2019). Reducing temperature difference in mass concrete by surface insulation. *Magazine of Civil Engineering*, 88, 70-79.
- Pan, Z., Li, H., & Liu, W. (2014). Preparation and characterization of super low density foamed concrete from Portland cement and admixtures. *Construction and Building Materials*, 72, 256-261.
- Sargam, Y., Faytarouni, M., Riding, K., Wang, K., Jahren, C., & Shen, J. (2019). Predicting thermal performance of a mass concrete foundation – A field monitoring case study. *Case Studies in Construction Materials*, 11, e00289.
- T-a Tanabe, M. K., Y. Yamashita. (1985). Thermal stress analysis of massive concrete. *Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures*, ASCE , pp. 407-421.

Tankasala, A., & Schindler, A. (2020). Early-Age Cracking of Lightweight Mass Concrete. *ACI Materials Journal*, 117.

Zhao, Y., Li, G., Fan, C., Pang, W., & Wang, Y. (2021). Effect of Thermal Parameters on Hydration Heat Temperature and Thermal Stress of Mass Concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021, 5541181.

วรากร อิมรักษา. (2562). การพัฒนาผนังฉนวนสำเร็จรูปด้วยแกนคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประเทศไทย).





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายภูริช ฉั่วสุวรรณ
วัน เดือน ปี เกิด	12 พฤศจิกายน 2541
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	31 ซ.รามอินทรา67 แยก6 ถนนรามอินทรา แขวงรามอินทรา เขตคันนายาว กรุงเทพมหานคร 10230



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY