บทที่ 1
บททั่วไป

1.1 บทนำ

ขณะที่คอนกรีตกำลังก่อตัวในโครงสร้างคอนกรีตหลา (massive concrete structures) เช่น เขื่อน ฐานรากและตอม่อขนาดใหญ่ จะทำให้อุณหภูมิในคอนกรีตเพิ่มขึ้น เนื่องจากความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (heat of hydration) ระหว่างน้ำกับซีเมนต์ ความร้อนที่เกิดขึ้นถ่ายเทสู่สิ่งแวดล้อมในอัตราที่ค่อนข้างต่ำ ด้วยคอนกรีตเป็นตัวนำความร้อนที่เลวจึงทำให้อุณหภูมิภายในสูงขึ้นเรื่อย ๆ โดยเฉพาะขณะที่คอนกรีตมีอายุยังอ่อน (3-7 วัน) ถ้าอุณหภูมิของบรรยากาศและอุณหภูมิของคอนกรีตแตกต่างกันมากคอนกรีตบริเวณผิวขององค์อาคารจะคายความร้อนได้ดีกว่า ทำให้อุณหภูมิต่ำกว่าส่วนของคอนกรีตที่อยู่ลึกเข้าไปในองค์อาคาร ความแตกต่างของอุณหภูมิเช่นนี้จะทำให้เกิดหน่วยแรงดึงในคอนกรีตบริเวณผิวรอบนอก และเมื่อเวลาผ่านไปอุณหภูมิของคอนกรีตค่อย ๆ ลดลง อาจจะโดยการถ่ายเทความร้อนตามธรรมชาติหรือโดยการถ่ายเทความร้อนโดยเทคนิคต่าง ๆ อย่างไรก็ดี จะทำให้คอนกรีตที่อยู่ลึกเข้าไปหดตัวลงประกอบกับการคืบตัว (creep) และการหดตัวเนื่องจากการสูญเสียน้ำ (shinkage) ของคอนกรีตจึงทำให้เกิดหน่วยแรงดึงขึ้นในบริเวณใจกลางคอนกรีตได้ หน่วยแรงดึงของทั้ง 2 กรณีอาจก่อให้เกิดการแตกร้าว (crack) และการแตกแยก (disintegration) ขึ้น ซึ่งก่อให้เกิดผลเสียต่อ ความทึบน้ำ ความคงทน และอาจมีผลถึงกำลังได้อีกด้วย

การควบคุมคุณภาพของคอนกรีตไม่ให้เกิดความเสียหายเหล่านี้ อาจทำได้โดยศึกษาถึงตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่เกี่ยวกับอุณหภูมิเพิ่มแบบกักกันความร้อนในคอนกรีต (adiabatic temperature rising in concrete) ในอันที่มีอิทธิพลจากประเภทของซีเมนต์ ส่วนผสมของคอนกรีต และอุณหภูมิเริ่มแรกของคอนกรีต นอกจากนี้ยังมีผลจากลำดับและขั้นตอนการก่อสร้าง (construction sequence) ขนาดของมวลคอนกรีตหลา (mass of structure) และอุณหภูมิโดยรอบ (ambient temperatures) แล้วนำมาวิเคราะห์ โดยวิธีไฟไนท์เอเลเมนต์ (finite element method) เพื่อประเมินอุณหภูมิของคอนกรีตตามส่วนต่าง ๆ ขององค์อาคาร ในการวิเคราะห์ทางโครงสร้างเพื่อหาค่าหน่วยแรงต่าง ๆ จากตัวแปรที่เกี่ยวข้องจะสามารถควบคุมส่วนผสมของคอนกรีตหรือวิธีการก่อสร้างไม่ให้ความร้อนที่เกิดขึ้นในเนื้อคอนกรีตมากจนถึงขั้นที่มีผลเสียหายต่อโครงสร้าง

1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา

การแก้ไขปัญหาดังกล่าวต้องหาสาเหตุที่ทำให้ความร้อนในคอนกรีตเปลี่ยนแปลง และเมื่อทราบถึงตัวแปรที่สำคัญต่อความร้อนในคอนกรีตแล้ว จากนั้นจึงหาปริมาณความร้อนในคอนกรีตด้วยวิธีการวัดความร้อนที่เกิดขึ้นในคอนกรีตโดยวิธีการต่าง ๆ และคำนวณความร้อนที่ถูกกักในมวลคอนกรีตซึ่งจะค่อย ๆ ถ่ายเทสู่ภายนอกโดยคำนวณจากคุณสมบัติขององค์อาคารคอนกรีต ทั้งนี้ต้องหามาตรการต่าง ๆ ในการควบคุมอุณหภูมิของคอนกรีตให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมให้ได้ ซึ่งจะได้กล่าวโดยลำดับต่อไป

1.2.1 ความร้อนในคอนกรีต อัตราและปริมาณการเพิ่มอุณหภูมิของคอนกรีตขึ้นอยู่กับสาเหตุใหญ่ ๆ 2 อย่าง ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1.1 คือ การเกิดความร้อน (heat generation) และการถ่ายเทความร้อน (heat dissipation) การเกิดความร้อนสืบเนื่องมาจากผลของปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างซีเมนต์กับน้ำ ดังนั้นปริมาณความร้อนจึงขึ้นอยู่กับชนิดของซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีต สัดส่วนผสมระหว่างซีเมนต์กับน้ำ ชนิดและสัดส่วนคละของมวลรวม สารผสมเพิ่ม สารแปลกปลอมบางอย่างในส่วนผสมคอนกรีต เช่น น้ำหรือหิน-ทราย และอุณหภูมิเริ่มแรกของคอนกรีต สำหรับการถ่ายเทความร้อนนั้นขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายอย่าง เช่น ความสามารถแผ่กระจายความร้อน (heat diffusivity) ของคอนกรีต ขนาดของมวลคอนกรีตหลา สภาพสิ่งแวดล้อม และการควบคุมอุณหภูมิในคอนกรีต รายละเอียดต่าง ๆ จะแยกกล่าวดังนี้คือ :-

1.2.1.1 การเกิดความร้อน

ชนิดของซีเมนต์ ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นอยู่กับปริมาณสารเคมีหลักที่เป็นส่วนประกอบพื้นฐานของซีเมนต์คือ C_3A (ไตรแคลเซียมอลูมิเนต), C_3S (ไตรแคลเซียมซิลิเกต), C_2S (ไดแคลเซียมซิลิเกต), C_4AF (เตตราแคลเซียม อลูมิโนเฟอไรท์)(2) สารเคมีแต่ละชนิดจะให้ปริมาณความร้อนไม่เท่ากัน กล่าวคือ C_3A ให้ความร้อนเร็วและสูงที่สุด รองลงมาเป็น C_3A, C_2S และ C_4AF ให้ความร้อนจากปฏิกิริยาเพียงเล็กน้อย(20) เนื่องจากสารเคมีหลักในซีเมนต์ชนิดต่าง ๆ มีปริมาณไม่เท่ากัน ดังนั้นเพื่อควบคุมคุณสมบัติบางอย่างให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน จึงกำหนดปริมาณสารเคมีหลัก ตามมาตรฐาน มอก. 15(1) โดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ III มีปริมาณ C_3S ถึง 56 % และ C_3A ถึง 12 %(9) จึงทำให้

ตารางที่ 1.1 สาเหตุที่ส่งผลกระทบต่ออัตราและปริมาณของอุณหภูมิเพิ่มในคอนกรีตหลา

สาเหตุหลัก	ตัวแปร	องค์ประกอบของตัวแปร
การเกิดความร้อน	ชนิดของซีเมนต์	1. ชนิดและปริมาณของสารเคมีในซีเมนต์ 2. ความชื้นในซีเมนต์ก่อนผสมคอนกรีต 3. บริษัทที่ผลิตซีเมนต์ 4. แหล่งที่มาของวัตถุดิบ 5. ความละเอียดของซีเมนต์ผง
	สัดส่วนของส่วนผสมคอนกรีต	1. ปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีต 2. อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ 3. ชนิดและสัดส่วนคละของมวลรวม 4. สารผสมเพิ่ม 5. สารที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีต
	อุณหภูมิเริ่มแรกของคอนกรีต	1. ชนิดของซีเมนต์
การถ่ายเทความร้อน	ความสามารถแผ่กระจายความร้อนในคอนกรีต	1. ชนิดและสัดส่วนคละของมวลรวม 2. อุณหภูมิของคอนกรีต 3. ปริมาณอากาศในเนื้อคอนกรีต
	ขนาดขององค์อาคาร	1. พื้นที่ผิวต่อปริมาตร
	อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม	1. อุณหภูมิของอากาศ 2. อุณหภูมิของน้ำ 3. อุณหภูมิของพื้นรองรับโครงสร้าง 4. ความชื้นในบรรยากาศ 5. ความเร็วลม 6. ปริมาณแสงแดด
	การควบคุมอุณหภูมิในคอนกรีต	1. อัตราและความหนาชั้นคอนกรีตที่เทเพิ่มแต่ละชั้น 2. เวลาทิ้งช่วงก่อนการเทเพิ่มแต่ละครั้ง 3. การใช้น้ำหล่อเย็น 4. ชนิดของแบบและการถอดแบบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

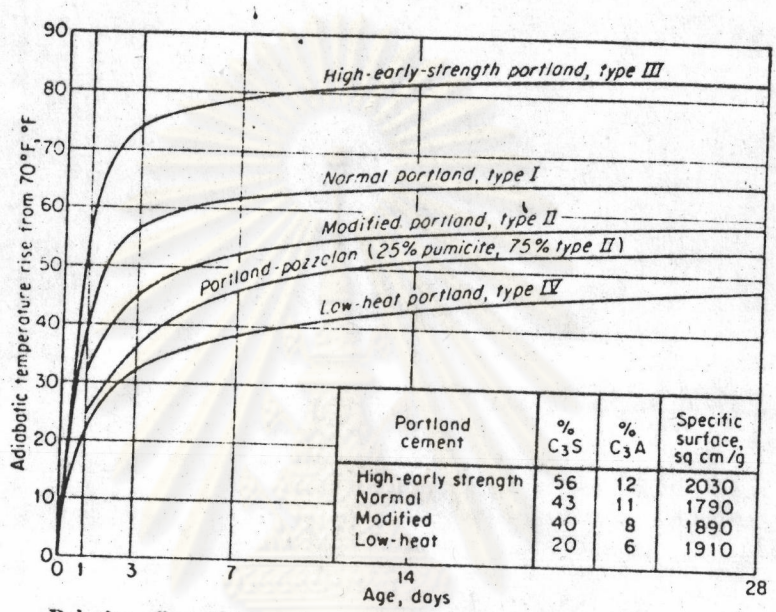
เกิดความร้อนสูงกว่าซีเมนต์ประเภทที่ I และซีเมนต์ชนิดอื่น ๆ ซึ่งมีปริมาณ C_3S และ C_3A น้อยกว่า (9) ดังได้แสดงในรูปที่ 1.1 ถึงรูปที่ 1.5 ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ IV ประเภทให้ความร้อนต่ำจะพบว่ามี C_3S และ C_3A เพียงร้อยละ 20 และ 6 ตามลำดับ

นอกจากนี้อุณหภูมิเพิ่มแบบกักกันความร้อนในคอนกรีตยังขึ้นอยู่กับแหล่งวัตถุดิบที่ใช้ผลิตและความละเอียดของซีเมนต์ผงซึ่งควบคุมตามมาตรฐานการผลิต ตลอดทั้งอุณหภูมิที่เผาซีเมนต์ผง ซีเมนต์ผงที่ละเอียดทำให้ปฏิกิริยาเป็นไปอย่างรวดเร็วมีผลให้เกิดความร้อนและอัตราการเพิ่มอุณหภูมิในระยะแรกสูง(6),(20),(22) แต่อย่างไรก็ดีความละเอียดของซีเมนต์ผงจะไม่มีผลต่อปริมาณอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทั้งหมด(20) รูปที่ 1.6 แสดงถึงอัตราความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยามากน้อยตามความละเอียดของซีเมนต์ผง (6) จากกราฟเห็นได้ว่าอัตราการเกิดความร้อนจะเพิ่มขึ้นตามความละเอียดของซีเมนต์ผง

<u>ปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสมของคอนกรีต</u> เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ปริมาณความร้อนเปลี่ยนแปลงไป ในซีเมนต์ประเภทที่ I, III และ IV เกิดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเมื่ออายุครบ 7 วัน เป็น 87(6), 105(6) และ 42(16) แคลอรี/กรัม ตามลำดับ ดังนั้นปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นในคอนกรีตจึงเป็นสัดส่วนตรงกับปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ในส่วนผสมคอนกรีต (5) จากรูปที่ 1.4 หาได้ว่า เมื่อปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีตเพิ่มขึ้น 10 ก.ก./ม.^{3} ทำให้อุณหภูมิสูงสุดของซีเมนต์ประเภทที่ I, III และ V เพิ่มขึ้นอีก 1.79, 2.05 และ 1.26 °ซ. ตามลำดับ(5)

<u>อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์</u> ในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์สูงกว่าจะมีความร้อนเกิดขึ้นสูงกว่าเล็กน้อย Earl George(20) กล่าวว่า เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เพิ่มขึ้น 0.01 ทำให้คอนกรีตที่มีปริมาณซีเมนต์ 275 ก.ก/ม.^{3} มีอุณหภูมิสูงสุดเพิ่มขึ้นอีก 1 °ฟ. เมื่ออายุ 28 วัน จากการค้นคว้าพบว่ารายละเอียดเกี่ยวกับเรื่องนี้ยังมีให้ทบทวนน้อย อาจจะเนื่องจากว่ามีผลกระทบต่ออุณหภูมิสูงสุดไม่มากนัก

<u>ชนิดและสัดส่วนคละของมวลรวม</u> คอนกรีตที่มีสัดส่วนคละของมวลรวมแตกต่างกันจะมีผลต่อการเกิดความร้อนน้อย แต่สำหรับมวลรวมที่ต่างชนิดกันทำให้ความร้อนจำเพาะไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับชนิดของมวลรวมนั้น(4) ซึ่งรายละเอียดเกี่ยวกับความร้อนจำเพาะจะได้กล่าวในส่วนของการถ่ายเทความร้อนต่อไป นอกจากนี้มวลรวมบางชนิดยังทำปฏิกิริยากับซีเมนต์(21) เช่น สารพวกซิลิกา และหินประเภทคาร์เนต ซึ่งซิลิกาทำปฏิกิริยากับสารประกอบทางเคมีประเภทด่างในซีเมนต์ เช่น โซเดียมและโปร์เตสเซียมไดร์ออกไซด์ซึ่ง ACI Committee 207 (5) กำหนดว่า



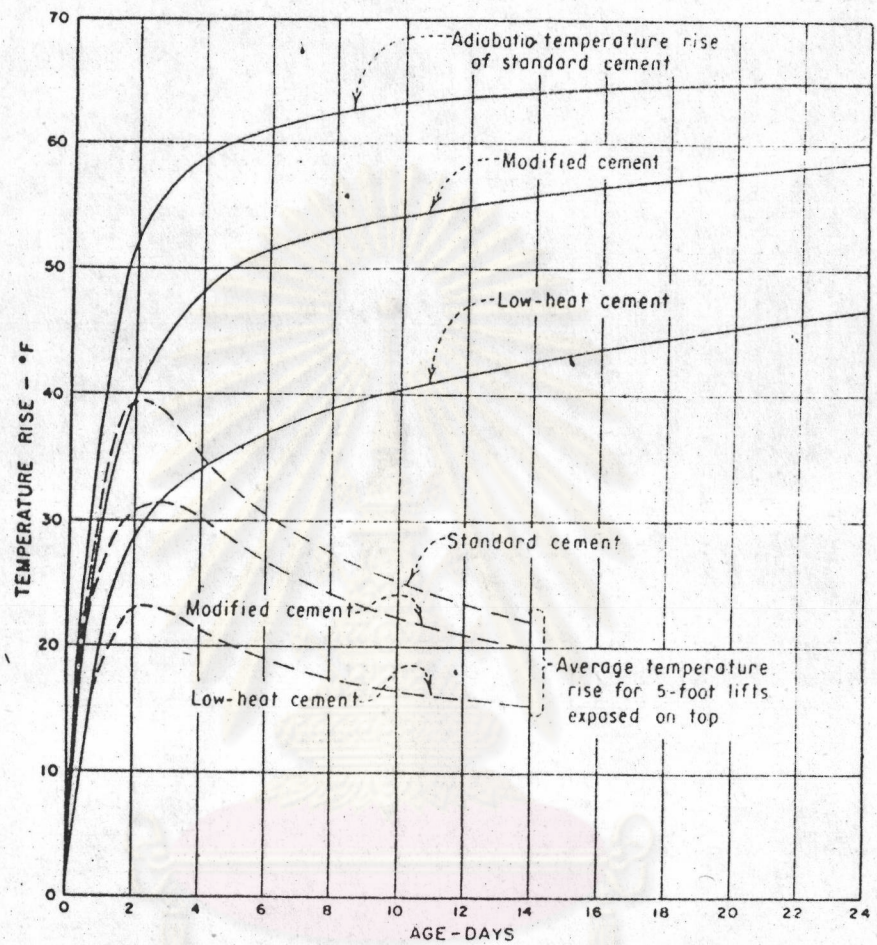
Portland cement	% C_3S	% C_3A	Specific surface, sq cm/g
High-early strength	56	12	2030
Normal	43	11	1790
Modified	40	8	1890
Low-heat	20	6	1910

Relative effect of type of cement on adiabatic temperature rise of concrete. Cement content 1.0 bbl per cu yd; specific surface of cements by Wagner turbidimeter. (*From Kelly* [1361].)

รูปที่ 1.1 การเปรียบเทียบผลของชนิดซีเมนต์ต่อการเพิ่มอุณหภูมิแบบกักกันความร้อน (20) (ปริมาณซีเมนต์ 275 ก.ก./ม.^{3})

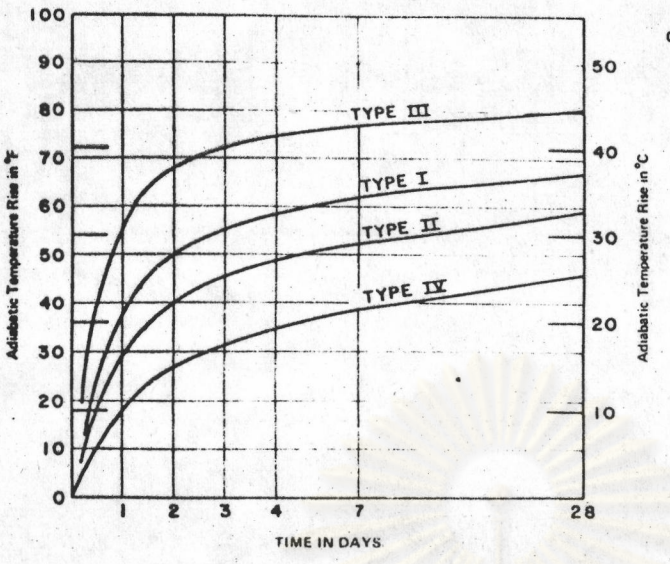
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



Cement content - 1 bbl. per cu. yd.
Diffusivity - 0.050 $ft^2/hr.$

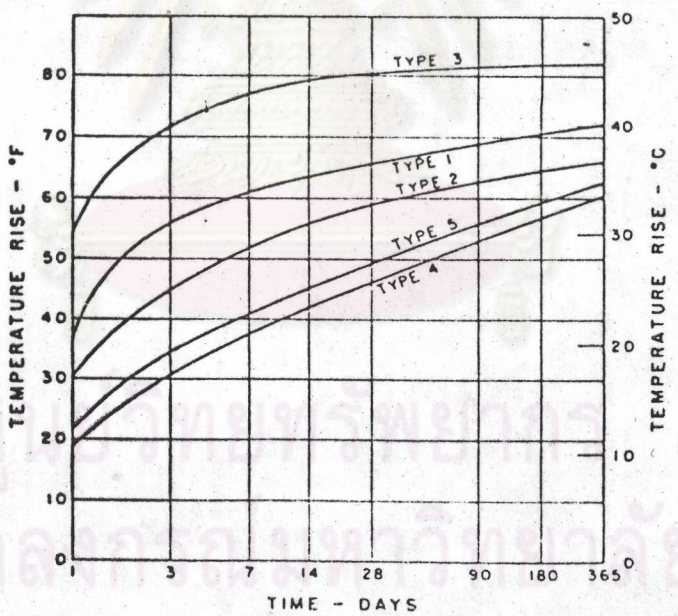
<u>รูปที่ 1.2</u> การเพิ่มอุณหภูมิในองค์อาคารคอนกรีตหลาของซีเมนต์ชนิดต่าง ๆ (19)
(ปริมาณซีเมนต์ 275 ก.ก./ม.^{3})



Cement Type	Fineness ASTM C 115 cm^2/gm	28 Day Heat of Hydration Calories per gm
I	1790	87
II	1890	76
III	2030	105
IV	1910	60

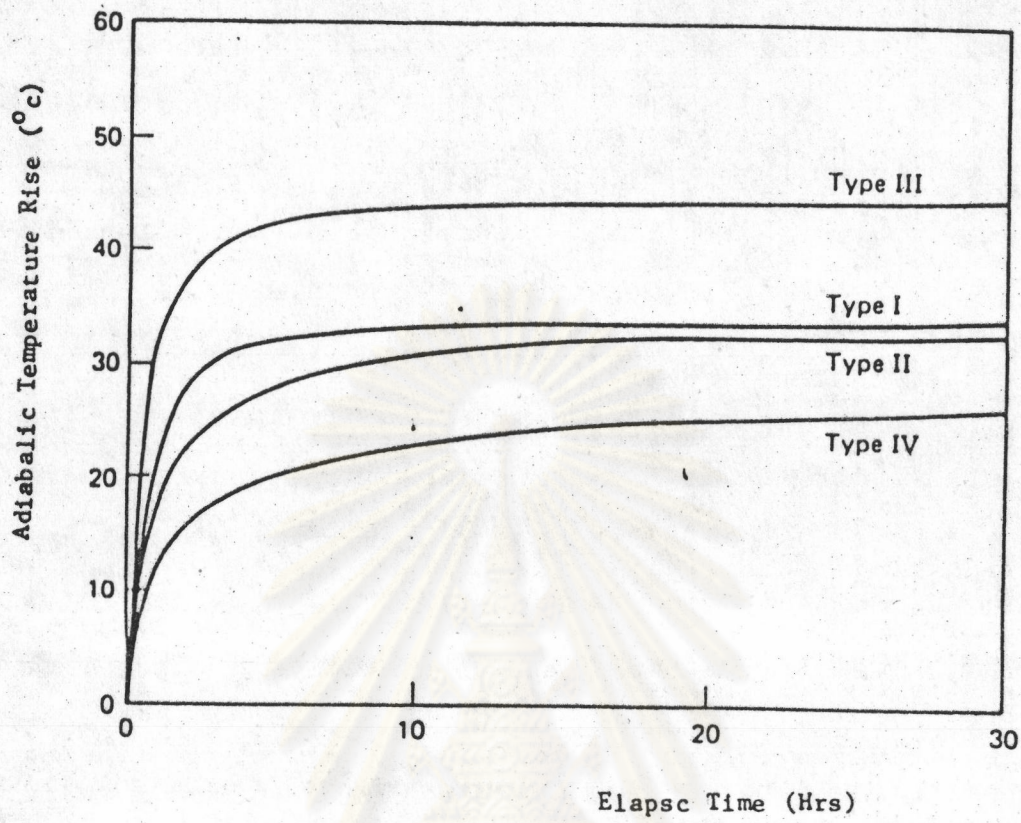
Temperature rise of mass concrete containing 376 pcy (223 kg/m^3) of cement

รูปที่ 1.3 การเพิ่มอุณหภูมิในองค์อาคารคอนกรีตหลา ซึ่งมีปริมาณซีเมนต์ 223 ก.ก./ลบ.ม.(6)



Temperature rise of mass concrete

รูปที่ 1.4 การเพิ่มอุณหภูมิในองค์อาคารคอนกรีตหลาของซีเมนต์ชนิดต่าง ๆ(5) (ปริมาณซีเมนต์ 223 ก.ก./ม.^{3})



รูปที่ 1.5 การเพิ่มอุณหภูมิแบบกักกันความร้อนของซีเมนต์(15)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารประเภทซิลิการวมกับสารอื่น ๆ เช่น เศษดิน เศษไม้ และเศษอิฐมีได้ไม่เกิน 2 % ของส่วนคละของมวลรวมโดยน้ำหนัก ส่วนหินประเภทคาร์บอเนต เช่น โดโรไมต์ (dolomite) และอาจิลลาเซโอลัส (argillaceous limestone) ทำปฏิกิริยากับโซเดียมไดร์ออกไซด์(21) ดังสมการเคมีต่อไปนี้

$$CaMg(CO_3)_2+2NaCO_3 \text{ ------> } Mg(OH)_2+Na_2CO_3 \quad \text{(1.1)}$$

Vuorinen[21] กล่าวว่าหินประเภทคาร์บอร์เนตมีได้ไม่เกิน 15 % ของส่วนคละของมวลรวมโดยน้ำหนัก ปฏิกิริยาเหล่านี้มีผลทำให้คอนกรีตเกิดการบวมและแตก และทำให้อุณหภูมิสูงสุดที่เพิ่มขึ้นเปลี่ยนแปลงไปจากมวลรวมทั่วไป

<u>สารผสมเพิ่ม</u> สารประเภทเร่งและหน่วงปฏิกิริยาจะควบคุมการก่อตัวของคอนกรีต ส่วนสารลดปริมาณน้ำและควบคุมการก่อตัวจะชลอการก่อตัวของคอนกรีต ACI Committee(5) กล่าวไว้ว่า การใช้สารผสมเพิ่มสามารถลดปริมาณน้ำและหน่วงปฏิกิริยาจะมีผลเฉพาะในช่วง 2-3 ชั่วโมงแรกเท่านั้น ซึ่งไม่ต้องนำมาพิจารณาเพื่อการคำนวณออกแบบส่วนผสมคอนกรีตแต่อย่างไร และยังได้เสนอแนะอีกว่า เมื่อมีการก่อสร้างจริงควรจะทดสอบหาอุณหภูมิเพิ่มจากส่วนผสมของคอนกรีตที่นำไปก่อสร้างก่อนการใช้งานเสมอ Water Gate and Penstocks Association in Japan(22) กล่าวว่า การใช้สารหน่วงปฏิกิริยาจะสามารถควบคุมการก่อตัวของคอนกรีตไว้ชั่วคราว แต่หลังจากนั้นปฏิกิริยาจะเป็นไปเช่นเดิม Limsuwan, Ekasit(15) สรุปจากผลการทดสอบว่า การใช้สารประเภทหน่วงปฏิกิริยานี้ทำให้ความร้อนในช่วงแรกเกิดได้ช้า สามารถชลอผลกระทบจากการสะสมความร้อนเหมาะกับงานที่มีการเทคอนกรีตติดต่อกันให้เสร็จสิ้นในครั้งเดียว ช่วงการหน่วงการก่อตัวจะสามารถระบายความร้อนออกจากคอนกรีตได้จำนวนหนึ่งจึงลดปัญหาความรุนแรงจากความร้อนที่เกิดขึ้นได้

<u>สารแปลกปลอมที่อาจเป็นอันตรายต่อคอนกรีต</u> นอกจากมวลรวมบางชนิดที่ทำปฏิกิริยากับซีเมนต์แล้วยังมีสารประเภทอื่น ๆ อีก เช่น กรดบางชนิด น้ำตาล และสารประกอบของซัลเฟต เช่น แมคเนเซียมซัลเฟตและแคลเซียมซัลเฟต ซึ่งอาจปะปนมากับน้ำผสมคอนกรีตและทำปฏิกิริยากับ C_3A(2) เนื่องจากสารประเภทนี้ทำปฏิกิริยากับซีเมนต์และทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความร้อนในคอนกรีต ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้ขึ้นกับปริมาณและชนิดของสารที่แปลกปลอมอยู่ในส่วนผสมคอนกรีต อย่างไรก็ดี รายละเอียดเกี่ยวกับสารเคมีเหล่านี้ยังมีให้ทบทวนน้อย เพราะเป็น

ปัญหาปลีกย่อยและ เกิดขึ้น เฉพาะกรณี เท่านั้น

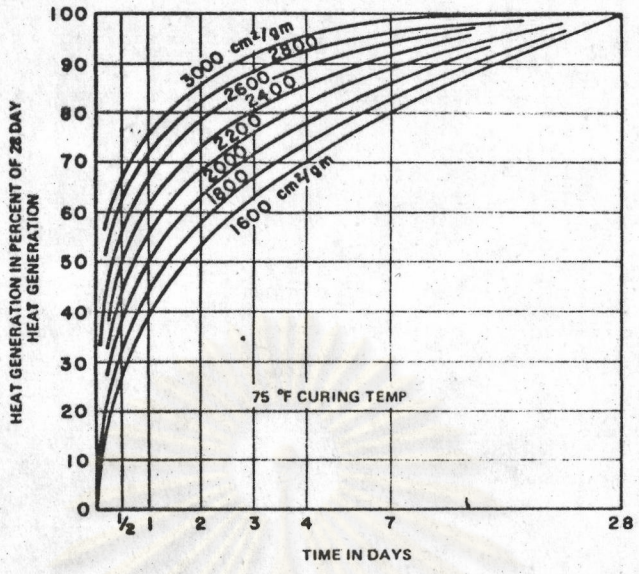
<u>อุณหภูมิ เริ่มแรกของคอนกรีต</u> คอนกรีตที่มีอุณหภูมิสูงจะทำให้อัตราการ เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างน้ำกับปูนซี เมนต์สูงขึ้น(2) Earl George(19) ได้ เสนอรูปที่ 1.7 แสดงถึงอิทธิพลของอุณหภูมิ เริ่มแรกต่ออุณหภูมิ เพิ่มแบบกักกันความร้อนในคอนกรีต เมื่ออุณหภูมิ เริ่มแรกสูงกว่าปูนซี เมนต์ปอร์ตแลนด์ประ เภทที่ IV จะให้อุณหภูมิสูงสุดมีค่าสูงตาม สำหรับปูนซี เมนต์ปอซโซลานจะได้ผลตรงข้ามคืออุณหภูมิ เพิ่มสูงสุดกลับมีค่าต่ำลง อย่างไรก็ดีจะ เห็นว่าในกรณีทั่ว ๆ ไปของการใช้ปูนซี เมนต์ปอร์ตแลนด์ การลดอุณหภูมิ เริ่มแรกของคอนกรีตสามารถลดการ เสี่ยงต่อการ เกิดรอยร้าวและลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างได้ Charles L.(19) เสนอรูปที่ 1.8 เพื่อแสดงอิทธิพลของอุณหภูมิ เริ่มแรกต่อความร้อนจากปฏิกิริยาไฮ เดรชันของซี เมนต์ เมื่ออุณหภูมิ เริ่มแรกสูงกว่าปูนซี เมนต์ปอร์ตแลนด์ประ เภทที่ I จะให้ความร้อนสูงสุดต่ำกว่า ส่วนปูนซี เมนต์ประ เภทที่ IV จะให้ความร้อนสูงตาม แต่ ACI Publication(6) เสนอรูปที่ 1.9 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิ เริ่มแรกต่ออุณหภูมิ เพิ่มแบบกักกันความร้อน ซึ่งให้ผลไม่สอดคล้องกับรูปที่ 1.9

1.2.1.2 การถ่าย เทความร้อน

<u>ความสามารถแผ่กระจายความร้อนของคอนกรีต</u> โดยทั่วไปความร้อนถ่าย เทได้โดยการนำ การพา และการแผ่รังสีความร้อน (13) เนื่องจากคอนกรีต เป็นของแข็งและมีอุณหภูมิไม่มากนัก ดังนั้นการพาและการแผ่รังสีความร้อนจะมีผลต่อความร้อนในคอนกรีตน้อย เมื่อ เทียบกับการนำความร้อน จึงพิจารณาการนำความร้อนในรูปของความสามารถแผ่กระจายความร้อน (h^2) ดังสมการต่อไปนี้(4)

$$h^2 = k/cp_o \qquad (1.2)$$

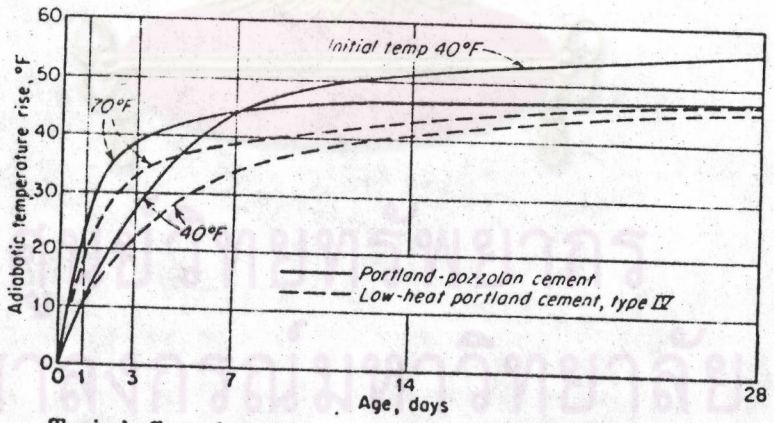
เมื่อ k, c, p_o คือค่าการนำความร้อน, ความร้อนจำ เพาะ, และความหนาแน่นของคอนกรีต ตามลำดับ คุณสมบัติทางความร้อน เหล่านี้แปรผันกับอุณหภูมิคือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ค่าความนำและความสามารถแผ่กระจายความร้อนของคอนกรีตลดลง แต่ในทางตรงข้าม เมื่ออุณหภูมิของคอนกรีตสูงขึ้นจะทำให้ความร้อนจำ เพาะของคอนกรีต เพิ่มตาม(4),(5),(20)
A Water Resources Technical Publication(4) ได้ เสนอคุณสมบัติทางความร้อนของคอนกรีตของ เขื่อนต่าง ๆ และของมวลรวมชนิดต่าง ๆ ดังตารางที่ 1.2 เช่น เขื่อนสวิฟท์ (Swift Dam) ซึ่งใช้หินปูน เป็นส่วนคละของมวลรวมจะมีความร้อนจำ เพาะ เป็น 0.237, 0.242 และ 0.246 กิโลแคลอรี/ก.ก./°ซ. กับความสามารถแผ่กระจายความร้อน เป็น 4.55×10^{-3},



*ASTM C 115

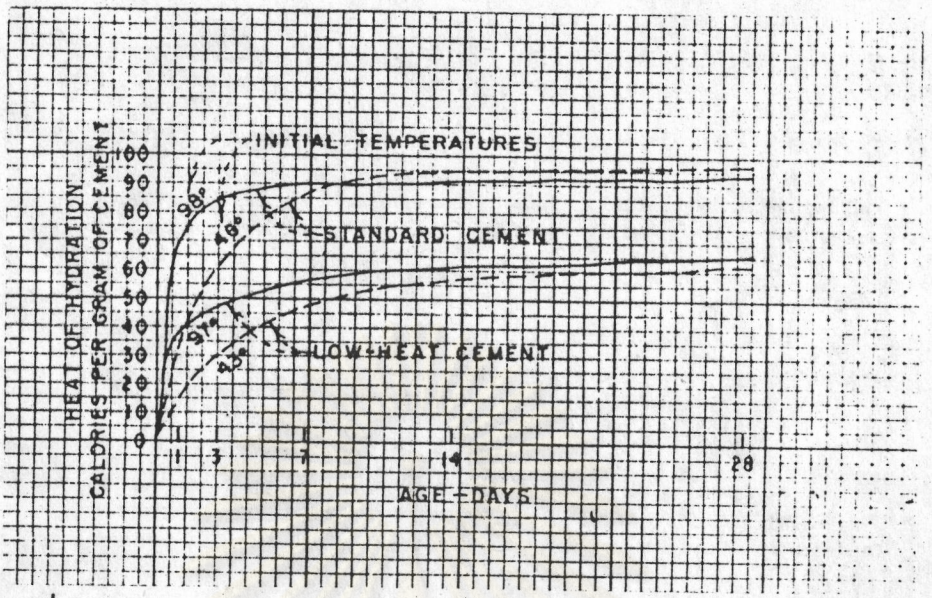
Rate of heat generation as effected by fineness

รูปที่ 1.6 ผลกระทบของอัตราการเกิดความร้อนจากความละเอียดของซีเมนต์ผง สำหรับซีเมนต์เพรสบ่มที่อุณหภูมิ 24 °ซ.(6)

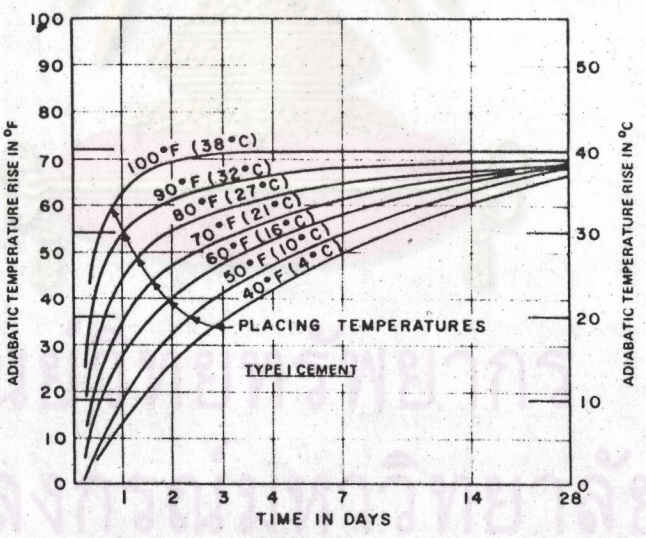


Typical effect of placement temperature on adiabatic temperature rise of concrete. Gravel aggregate 0 to 6 in.; cement content 0.9 bbl per cu yd; $W/C = 0.61$ by weight. (*From Kelly* [1361].)

รูปที่ 1.7 ผลกระทบของการเพิ่มอุณหภูมิแบบทักกันความร้อนจากอุณหภูมิเริ่มแรกของคอนกรีต(20)(ปริมาณซีเมนต์ 248 ก.ก./ม.^{3})



รูปที่ 1.8 ผลกระทบของอุณหภูมิเริ่มแรกต่อความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน(19)



Effect of placing temperature on temperature rise of mass concrete containing 376 pcy (223 kg/m³) of Type I cement

รูปที่ 1.9 ผลของอุณหภูมิเริ่มแรกต่อการเพิ่มอุณหภูมิขององค์อาคารคอนกรีตหลา(6)

ตารางที่ 1.2 คุณสมบัติทางความร้อนของเขื่อนและมวลรวมชนิดต่าง ๆ(4)

Thermal properties of concrete for various dams.

Dam	Density (saturated)	Conductivity K B.t.u./ft.-hr.-^{o}F.			Specific heat C B.t.u./lb.-^{o}F.			Diffusivity h^2 $ft.^2/hr$		
	lb./cu. ft.	50^{o}	70^{o}	90^{o}	50^{o}	70^{o}	90^{o}	50^{o}	70^{o}	90^{o}
East Canyon (predominately quartz and quartzite)	152.9	2.56	2.53	2.50	0.208	0.213	0.217	0.081	0.078	0.075
Glen Canyon	148.4	2.02	2.01	2.01	.211	.216	.222	.065	.063	.061
Seminoe	155.3	1.994	1.972	1.951	.204	.213	.222	.063	.060	.057
Norris	160.6	2.120	2.105	2.087	.234	.239	.247	.056	.055	.053
Wheeler	145.5	1.815	1.800	1.785	.223	.229	.236	.056	.054	.052
Flaming Gorge (limestone and sandstone)	150.4	1.78	1.77	1.76	.221	.226	.232	.054	.052	.050
Kortes mixes:										
1 bbl. cement/cu. yd. and 0.0-percent air	157.6	1.736	1.724	1.711	.210	.215	.221	.052	.051	.049
0.85 bbl. cement/cu. yd. and 0.0-percent air	158.1	1.715	1.710	1.705	.209	.215	.220	.052	.050	.049
Hungry Horse	150.1	1.72	1.72	1.71	.217	.223	.229	.053	.051	.050
Hoover	156.0	1.699	1.688	1.677	.212	.216	.221	.051	.050	.049
Gibson	155.2	1.676	1.667	1.657	.218	.222	.229	.050	.048	.047
Canyon Ferry	151.3	1.63	1.62	1.61	.214	.218	.222	.050	.049	.048
Swift (limestone)	158.2	1.82	1.79	1.76	.237	.242	.246	.049	.047	.041
Altus	149.7	1.578	1.579	1.580	.225	.229	.234	.047	.046	.045
Monticello	153.1	1.57	1.56	1.55	.225	.230	.235	.046	.044	.043
Yellowtail	152.8	1.57	1.56	1.55	.219	.223	.227	.047	.046	.045
Angostura mixes:										
0.9 bbl. cement/cu. yd. and 3.0-percent air	151.2	1.491	1.484	1.478	.221	.228	.234	.045	.043	.042
1.04 bbl. cement/cu. yd. and 0.0-percent air	152.6	1.571	1.554	1.537	.227	.234	.240	.045	.044	.042
Hiwassee	155.7	1.505	1.491	1.478	.218	.225	.233	.044	.042	.041
Parker	155.1	1.409	1.402	1.395	.213	.216	.221	.043	.042	.041
Owyhee	152.1	1.376	1.373	1.369	.208	.214	.222	.044	.042	.041
O'Shaughnessy	152.8	1.316	1.338	1.354	.217	.218	.223	.040	.040	.040
Friant mixes:										
Portland cement	153.6	1.312	1.312	1.312	.214	.214	.217	.040	.040	.039
20-percent pumicite	153.8	1.229	1.232	1.234	.216	.221	.227	.037	.036	.035
Shasta	157.0	1.299	1.309	1.319	.222	.229	.235	.037	.037	.036
Bartlett	156.3	1.293	1.291	1.289	.216	.222	.230	.038	.037	.036
Morris	156.9	1.290	1.291	1.293	.214	.216	.222	.039	.038	.037
Chickamauga	156.5	1.287	1.277	1.266	.225	.229	.233	.037	.036	.035
Morrow Point (andesite-basalt)	145.5	0.99	0.97	0.94	.212	.217	.222	.032	.031	.029
Grand Coulee	158.1	1.075	1.077	1.079	.219	.222	.227	.031	.031	.030
Ariel	146.2	0.842	0.884	0.915	.228	.235	.244	.025	.026	.026
Bull Run	159.1	0.835	0.847	0.860	.215	.225	.234	.024	.024	.023
Thermal Properties of Coarse Aggregate										
Quartzite	151.7	2.052	2.040	2.028	.209	.217	.226	.065	.062	.059
Dolomite	156.2	1.948	1.925	1.903	.225	.231	.238	.055	.053	.051
Limestone	152.8	1.871	1.842	1.815	.221	.224	.230	.055	.054	.052
Granite	150.9	1.515	1.511	1.588	.220	.220	.224	.046	.045	.045
Basalt	157.5	1.213	1.212	1.211	.226	.226	.230	.034	.034	.033
Rhyolite	146.3	1.197	1.203	1.207	.220	.226	.232	.037	.036	.036

$4.37x10^{-3}$ และ $3.81x10^{-3}$ ม.^{2}/ช.ม. ที่อุณหภูมิ 10, 21 และ 32 °ซ. ตามลำดับ ACI Committee 207(5) ก็ได้เสนอคุณสมบัติทางความร้อนของคอนกรีตของเขื่อนต่าง ๆ ที่ใช้ชนิดของมวลรวมต่างกันดังตารางที่ 1.3 เช่น เขื่อนแองโกสทูรา (Angostura Dam) ซึ่งใช้หินปูนเช่นเดียวกันมีความร้อนจำเพาะเป็น 0.221, 0.237 และ 0.252 กิโลแคลอรี/ก.ก./°ซ. กับความสามารถแผ่กระจายความร้อนเป็น $4.2x10^{-3}$, $3.8x10^{-3}$ และ $3.5x10^{-3}$ ม.^{2}/ช.ม. ที่อุณหภูมิ 10, 38 และ 66 °ซ. ตามลำดับ

ขนาดของมวลคอนกรีตหลา ความร้อนในคอนกรีตหลาถ่ายเทสู่ภายนอกได้ช้า เนื่องจากพื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อนต่อปริมาตรมีค่าต่ำ(20) ACI Committee 207(5) กล่าวว่าจากกฎของการถ่ายเทความร้อนซึ่งมีใจความว่า ความร้อนถ่ายเทสู่ภายนอกแปรผกผันกับกำลังสองของด้านที่แคบที่สุด เช่น กำแพงคอนกรีตหนา 0.15, 1.5, 15.0 และ 152.0 ม. เมื่อถ่ายเทความร้อนสู่ภายนอกได้ 95 % ใช้เวลา 1.5 ชั่วโมง, 7 วัน, 2 ปี และ 200 ปี ตามลำดับ ดังนั้นจะเห็นได้ชัดว่าเมื่ออาคารมีความหนาเพิ่มขึ้นความร้อนยิ่งถ่ายเทสู่ภายนอกยากยิ่งขึ้น

อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ในกรณีที่อุณหภูมิรอบ ๆ คอนกรีตมีค่าสูงจะทำให้อุณหภูมิภายในและภายนอกของคอนกรีตมีความแตกต่างกันน้อย เป็นเหตุให้ความร้อนในคอนกรีตถ่ายเทสู่ภายนอกได้ช้า(20) โดยทั่วไปแล้วสิ่งแวดล้อมของคอนกรีตหลาประกอบไปด้วย อากาศ น้ำ และพื้นรองรับคอนกรีต(19) ปัจจัยต่าง ๆ ที่ทำให้อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมของคอนกรีตเปลี่ยนแปลงไป เช่น ความเร็วลม ปริมาณฝน ความชื้นในอากาศ และโดยเฉพาะอย่างยิ่งปริมาณแสงแดด(4) ซึ่งการประมาณอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมล่วงหน้าก่อนการก่อสร้างนั้นต้องปรับแก้ด้วยปริมาณแสงแดดในช่วงการก่อสร้างอาคารนั้น(4)

1.2.2 การหาปริมาณความร้อนในคอนกรีต ขณะที่คอนกรีตกำลังก่อตัวปฏิกิริยาไฮเดรชันจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นและถ้าอุณหภูมิของคอนกรีตและสิ่งแวดล้อมแตกต่างกันจึงจะเกิดการถ่ายเทความร้อน ดังนั้นการเกิดและการถ่ายเทความร้อนจึงเกิดขึ้นพร้อมกันแต่อาจจะมีอัตราไม่เท่ากัน โดยทั่วไปการหาปริมาณความร้อนในคอนกรีตจะแยกพิจารณาเฉพาะปริมาณการเกิดความร้อนก่อนแล้วจึงคำนวณปริมาณในคอนกรีตจากการถ่ายเทความร้อนร่วมกับการเกิดความร้อน ในการหาปริมาณการเกิดความร้อนนั้นมี 3 วิธีคือ วิธีวัดค่าจากโครงสร้างจริง วิธีการคำนวณและวิธีการวัดจากตัวอย่างทดลอง ส่วนการคำนวณหาอุณหภูมิในคอนกรีตทำได้หลายวิธี เช่น การคำนวณโดยอ่านค่าจากแผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ กับอุณหภูมิของคอนกรีต วิธี

ตารางที่ 1.3 คุณสมบัติทางความร้อนของคอนกรีต(5)

THERMAL PROPERTIES OF CONCRETE

Structure	Coarse aggregate type	British units: Temperature, °F	Coefficient of expansion, $\frac{1}{°F} \times 10^{-6}$: 1½ in. (3.8 cm) max	4½ in. (11.4 cm) max	Thermal conductivity, $\frac{Btu}{Ft \times hr \times °F}$	Specific heat, $\frac{Btu}{lb \times °F}$	Density, $\frac{lb}{Ft^3}$	Diffusivity, $\frac{Ft^2}{hr}$	Metric units: Temperature, °C	Coefficient of expansion, $\frac{1}{°C} \times 10^{-6}$: 1½ in. (3.8 cm) max	4½ in. (11.4 cm) max	Thermal conductivity, $\frac{Kcal}{m \times hr \times °C}$	Specific heat, $\frac{Kcal}{kg \times °C}$	Density, $\frac{kg}{m^3}$	Diffusivity, $\frac{m^2}{hr} \times 10^{-3}$
Hoover	Limestone and granite	50	5.3	4.8	1.70	0.212	156.0	0.051	10	9.5	8.6	2.53	0.212	2500	4.7
		100			1.67	0.225		0.047	38			2.48	0.225		4.4
		150			1.65	0.251		0.042	66			2.45	0 251		3.9
Grand Coulee	Basalt	50	4.4	4.6	1.08	0.219	158.1	0.031	10	7.9	8.3	1.61	0.219	2534	2.9
		100			1.08	0.231		0.029	38			1.61	0.231		2.7
		150			1.09	0.257		0.027	66			1.62	0.257		2.5
Friant	Quartzite, granite and rhyolite	50	—	—	1.23	0.216	153.8	0.037	10	—	—	1.83	0.216	2465	3.4
		100			1.23	0.230		0.035	38			1.83	0.230		3.2
		150			1.24	0.243		0.033	66			1.84	0.243		3.1
Shasta	Andesite and slate	50	—	4.8	1.32	0.219	156.6	0.039	10	—	8.6	1.96	0.219	2510	3.6
		100			1.31	0.233		0.036	38			1.95	0.233		3.3
		150			1.31	0.247		0.034	66			1.95	0.247		3.2
Angostura	Limestone	50	4.0	—	1.49	0.221	151.2	0.045	10	7.2	—	2.22	0.221	2423	4.2
		100			1.48	0.237		0.041	38			2.20	0.237		3.8
		150			1.46	0.252		0.038	66			2.17	0.252		3.5
Kortes	Granite, gabbros and quartz	50	5.2	4.5	1.61	0.208	151.8	0.050	10	9.4	8.1	2.40	0.208	2433	4.6
		100			1.60	0.221		0.047	38			2.38	0.221		4.1
		150			1.59	0.234		0.044	66			2.36	0.234		4.1
Hungry Horse	Sandstone	50	6.2	5.7	1.72	0.217	150.1	0.053	10	11.2	10.3	2.56	0.217	2406	4.9
		100			1.71	0.232		0.049	38			2.54	0.232		4.6
		150			1.69	0.247		0.046	66			2.51	0.247		4.3
Canyon Ferry	Sandstone, metasiltstone, quartzite, and rhyolite	50	5.4	5.2	1.63	0.214	151.3	0.050	10	9.7	9.4	2.42	0 214	2425	4.6
		100			1.61	0.224		0.047	38			2.40	0 224		4.4
		150			1.59	0.235		0.045	66			2.36	0 235		4.2
Monticello	Sandstone (graywacke), and quartz	50	5.2	—	1.57	0.225	153.1	0.046	10	9.4	—	2.34	0.225	2454	4.3
		100			1.55	0.237		0.043	38			2.31	0 237		4.0
		150			1.53	0.250		0.040	66			2.28	0.250		3.7
Anchor	Andesite, latite, and limestone	50	5.6	4.5	1.14	0.227	149.0	0 034	10	10.1	8.1	1.70	0 227	2388	3.2
		100			1.14	0.242		0 032	38			1.70	0.242		3.0
		150			1.15	0.258		0.030	66			1.71	0.258		2.8
Glen Canyon	Limestone, chert, and sandstone	50	—	—	2.13	0.217	150.2	0.065	10	—	—	3.17	0 217	2407	6.0
		100			2.05	0.232		0.059	38			3.05	0.232		5.5
		150			1.97	0.247		0.053	66			2.93	0 247		4.9
Flaming Gorge	Limestone and sandstone	50	—	—	1.78	0.221	150.4	0.054	10	—	—	2.65	0 221	2411	5.0
		100			1.75	0.234		0.050	38			2.60	0 234		4.6
		150			1.73	0.248		0.046	66			2.57	0 248		4.3
Yellowtail	Limestone and andesite	50	—	4.3	1.55	0 226	152.5	0 045	10	—	7.7	2.31	0 226	2444	4.2
		100			1.52	0 239		0.042	38			2.26	0 239		3.9
		150			1.46	0.252		0.039	66			2.20	0 252		3.6

*1½ in. (3.8 cm) max and 4½ in. (11.4 cm) max refer to maximum size of aggregate in concrete.

15656

การคำนวณทีละขั้น (step by step method) เช่น วิธีของ Schmidth กับวิธีของ Carlson และวิธีทางไฟไนต์ เอ เล เมนต์ ซึ่งจะกล่าวถึงรายละ เอียดต่อไป

1.2.2.1 การหาปริมาณความร้อนที่ เกิดขึ้นในคอนกรีต

วิธีวัดค่าจากโครงสร้างจริง เป็นวิธีที่ได้ค่าค่อนข้างแม่นยำแต่มีโอกาส เก็บข้อมูลน้อย เพราะโอกาสที่สร้างอาคารคอนกรีตหลามีน้อย นอกจากนี้ยังอาจจะมีผลกระทบจากขั้นตอนการก่อสร้างและการวางท่อระบายความร้อนซึ่งทำให้อุณหภูมิที่วัดได้ เป็นค่า เฉพาะกรณี(15)

วิธีการคำนาณ โดยการทดสอบความร้อนที่ เกิดจากปฏิกิริยาไฮ เดรชันของซี เมนต์กับน้ำในส่วนผสมคอนกรีตที่อายุการบ่มต่าง ๆ ตามมาตรฐาน ASTM C186-78(8) นำมาคำนวณหาอุณหภูมิในคอนกรีต(19) โดยพิจารณาซี เมนต์ในคอนกรีต ปริมาณความร้อนจากปฏิกิริยาไฮ เดรชันของซี เมนต์และความร้อนจำ เพาะของคอนกรีต ซึ่ง เขียน เป็นสมการได้(6),(9),(19) ดังนี้คือ

$$T = C_c Q/c \qquad (1.3)$$

เมื่อ T = การ เพิ่มอุณหภูมิแบบกักกันความร้อนในคอนกรีต (°ซ.)

C_c = ปริมาณซี เมนต์ในคอนกรีต (กรัมของซี เมนต์/กรัมของคอนกรีต)

Q = ปริมาณความร้อนของปฏิกิริยาไฮ เดรชัน (แคลอรี/กรัมของซี เมนต์)

c = ค่าความร้อนจำ เพาะของคอนกรีต (แคลอรี/กรัม/°ซ.)

วิธีนี้ได้อุณหภูมิอย่างคร่าว ๆ เท่านั้น เนื่องจากมีข้อผิดพลาดหลายประการ(9) ACI Publication(6) ได้ประมาณค่าของ c = 0.22 Robert F. และ Henry L.(9) กล่าวว่า ความร้อนที่ เกิดจากปฏิกิริยาไฮ เดรชันของซี เมนต์กับน้ำได้จากปฏิกิริยา 2 อย่างคือ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และปฏิกิริยาไฮ เดรชัน วิธีการวัดความร้อนของซี เมนต์ในส่วนผสมคอนกรีตมีความแม่นยำประมาณ 1 แคลอรี/กรัม ซึ่ง เกิดความคลาด เคลื่อนจากปฏิกิริยาคาร์บอ เนชันและการสูญ เสียน้ำของชิ้นงานทดสอบก่อนการทดสอบ

ข้อดีและข้อ เสียของวิธีการคำนวณนี้ Robert F. และ Henry L.(9) กล่าวว่าข้อดีคือ สิ้น เปลืองวัสดุในการทดสอบน้อยและขนาดของชิ้นงานทดสอบ เล็กซึ่ง เป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายและได้ผลการทดสอบที่ค่อนข้างแม่นยำในช่วง 7 วันแรกของการทดสอบ ส่วนข้อ เสียคือ อาจ เกิดผิดพลาดและความคลาด เคลื่อนจากสา เหตุต่าง ๆ เช่น

- อัตราส่วนน้ำต่อซี เมนต์ที่ใช้สำหรับชิ้นงานทดสอบมีค่าต่ำซึ่งต่ำกว่าในส่วนผสมของคอนกรีต

- ความร้อนจำเพาะของคอนกรีตแปรผันกับอุณหภูมิคอนกรีต

- อุณหภูมิในการบ่มชิ้นงานทดสอบความร้อนต่ำกว่าของคอนกรีต

- ความร้อนที่เกิดขึ้นทันทีจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะรวมเข้ากับความร้อนของซีเมนต์ในส่วนผสม ซึ่งความร้อนส่วนที่เกินมานี้โดยปกติคอนกรีตจะถ่ายเทสู่สิ่งแวดล้อมก่อนการเทในสนาม

- ความร้อนของส่วนผสมโดยปกติหาได้จากการสันดาป (ignited) หรือความเป็นด่างเข้มข้นซึ่งในคอนกรีตไม่มีสภาพที่แห้งเช่นนี้

- เกิดปฏิกิริยาคาร์บอเนชันในชิ้นงานทดสอบ ซึ่งมีผลทำให้ค่าความร้อนที่ได้สูงเกินความเป็นจริง

<u>วิธีการวัดจากตัวอย่างทดสอบ</u> การหาปริมาณความร้อนวิธีนี้จะวัดอุณหภูมิโดยตรงจากคอนกรีตที่หล่อไว้ในระบบกักกันความร้อนซึ่งสร้างขึ้นจากฉนวนความร้อน และปรับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมให้เท่ากับอุณหภูมิคอนกรีต(15) วิธีการนี้เป็นการจำลองสภาวะกักกันความร้อนให้เหมือนกับในคอนกรีตหลาซึ่งสามารถลดข้อผิดพลาดของวิธีการคำนวนได้เกือบทั้งหมด ข้อเสียของวิธีการนี้คือ ชิ้นงานทดสอบมีขนาดใหญ่ ทั้งยังต้องปรับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมตลอดเวลาเพื่อรักษาสภาวะกักกันความร้อน เป็นผลทำให้สิ้นเปลืองทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดสอบมาก(9)

อย่างไรก็ดี การทดสอบวิธีวัดจากตัวอย่างทดสอบยังไม่มีมาตรฐานเหมือนกับการหาปริมาณความร้อนโดยการคำนวณ(15) ดังนั้นแม้จะทดสอบโดยผสมคอนกรีตแบบเดียวกันแต่ข้อมูลที่ได้ก็ยังมีการกระจายอยู่บ้างเนื่องจากรายละเอียดในการทดสอบต่างกัน เช่น ขนาดชิ้นงานทดสอบที่ใหญ่กว่าสามารถรักษาสภาพกักกันความร้อนได้ดีกว่า ชนิดหรือความหนาของฉนวนที่ต่างกันจะรักษาสภาพกักกันความร้อนได้ไม่เท่ากัน และชนิดของตัวกลางที่ใช้เป็นสิ่งแวดล้อมของชิ้นงานต่างกัน เช่น น้ำหรืออากาศเป็นตัวกลางทำให้รักษาสภาพกักกันความร้อนได้ต่างกันเป็นต้น(15) อย่างไรก็ตาม การนำผลที่ได้ไปปรับโดยเทียบกับผลที่ได้จากวิธีวัดค่าจากโครงสร้างจริงก็จะสามารถแก้ไขปัญหาเหล่านี้ได้

1.2.2.2 การหาอุณหภูมิในคอนกรีตหลา

<u>คำนวณจากแผนภาพ</u> วิธีนี้สามารถคำนวณได้ง่ายและใช้เวลาน้อยโดยอ่านค่าอุณหภูมิจากแผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ แต่มีข้อจำกัดคือใช้ได้เฉพาะหลังจากเทคอนกรีตหลายวันแล้วซึ่งเป็นช่วงหลังจากคอนกรีตเกิดความร้อนจนหมดแล้ว(5),(19) A Water Resources Technical Publication(4) และ Charles L.(19) ได้เสนอแผนภาพ

แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกจากผิวองค์อาคารกับอัตราส่วนระหว่างอุณหภูมิของคอนกรีตและผิวองค์อาคารสำหรับอาคารที่มีลักษณะเป็นมวลกึ่งอนันต์ (semi-infinite solid) ดังแสดงในรูปที่ ผ1. ACI Committee 207(5) ได้เสนอแผนภาพที่สามารถหาปริมาณความร้อนซึ่งยังค้างอยู่ในคอนกรีตจากตัวแปรต่าง ๆ และรูปทรงของคอนกรีตชนิดต่าง ๆ ดังรูปที่ ผ2. โดยแผนภาพนี้ยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการฝังท่อระบายความร้อนได้อีกด้วย ส่วนรูปที่ ผ3. ถึง ผ5. เป็นแผนภาพที่ใช้ในการหาอุณหภูมิต่าง ๆ สำหรับกรณีที่มีการฝังท่อระบายความร้อนในคอนกรีต โดยรูปที่ ผ3. ใช้ในการหาอุณหภูมิเฉลี่ยของคอนกรีต รูปที่ ผ4. ใช้หาอุณหภูมิเฉลี่ยของคอนกรีตจากจุดปล่อยน้ำเข้าถึงระยะความยาวท่อใด ๆ ส่วนรูปที่ ผ5. จะใช้หาอุณหภูมิเพิ่มของน้ำในท่อระบายความร้อน จากแผนภาพต่าง ๆ ข้างต้นนี้สามารถหาอุณหภูมิของคอนกรีตได้แม้ในกรณีที่มีท่อระบายความร้อนในคอนกรีต

<u>วิธีการคำนวณทีละขั้น</u> สามารถคำนวณหาอุณหภูมิในคอนกรีตได้ทั้งในกรณีที่คอนกรีตยังเกิดความร้อนเพิ่มและความร้อนเกิดขึ้นจนหมดแล้ว แต่วิธีนี้มีข้อเสียคือเสียเวลาในการคำนวณมาก

- วิธีของ Schmidt(5) ทำได้โดยแบ่งคอนกรีตออกเป็นช่วงเท่า ๆ กันแล้วหาอุณหภูมิเฉลี่ยของจุดรอบจุดที่พิจารณา ค่าเฉลี่ยที่ได้เป็นอุณหภูมิของจุดนั้นเมื่อเวลาผ่านไป t โดยที่

$$t = (X)^2/Mh^2 \qquad (1.4)$$

เมื่อ t, h^2 คือช่วงห่างของเวลาและค่าความสามารถแผ่กระจายความร้อนตามลำดับ และ X คือระยะทางระหว่างจุด ส่วนค่า M จะมีค่าเป็น 2, 4 และ 6 สำหรับกรณีที่ถ่ายเทความร้อนเป็น 1, 2 และ 3 มิติตามลำดับ ในกรณีที่เกิดความร้อนเพิ่มขึ้น อุณหภูมิที่จุดพิจารณามีค่าเท่ากับอุณหภูมิเพิ่มแบบทักกันความร้อนในช่วงเวลานั้นรวมกับอุณหภูมิเฉลี่ยดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

- วิธีของ Carlson(19) คล้ายกับวิธีของ Schmidt คือแบ่งคอนกรีตออกเป็นช่วง ๆ แล้วคำนวณหาอุณหภูมิในคอนกรีตโดยใช้สมการต่าง ๆ ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ก

<u>วิธีทางไฟไนท์เอเลเมนต์</u> ซึ่งอาศัยหลักของการทรงพลังงาน โดยสมการต่าง ๆ ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข.

1.2.3 <u>มาตรการควบคุมความร้อน</u>

การหามาตรการต่าง ๆ มาใช้กับงานประเภทคอนกรีตหลานี้ก็เพื่อป้องกันผลเสียอันเนื่องมาจากอุณหภูมิในคอนกรีต โดยปกติอุณหภูมิที่จะก่อให้เกิดการแตกร้าวได้ 2 ประการคือ

ประการแรกอุณหภูมิเพิ่มทั้งหมดในองค์อาคาร และอีกประการหนึ่งคือความแตกต่างของระดับอุณหภูมิระหว่างคอนกรีตแต่ละแห่งในองค์อาคาร ซึ่งการเลือกใช้มาตรการต่าง ๆ มาควบคุมความร้อนขึ้นอยู่กับลักษณะของงานแต่ละชนิด และตัวแปรที่เป็นตัวควบคุมความร้อนมีหลายอย่าง เช่น ปริมาณความร้อนที่เกิดจากส่วนผสมของคอนกรีต การใช้ปอซโซลานอุณหภูมิเริ่มแรกของคอนกรีต ความหนาชั้นคอนกรีตที่ทำการเทเพิ่มแต่ละชั้น เวลาทิ้งช่วงก่อนเทเพิ่มในแต่ละครั้ง การลดอุณหภูมิหลังเทคอนกรีต และชนิดของแบบและการถอดแบบ ดังจะได้กล่าวถึงรายละเอียดต่าง ๆ ดังนี้

<u>ปริมาณความร้อนจากส่วนผสม</u> ความร้อนที่เกิดขึ้นทั้งหมดในคอนกรีตขึ้นอยู่กับตัวแปรหลัก ๆ คือ ปริมาณซีเมนต์และชนิดของซีเมนต์ที่ใช้เป็นส่วนผสม ซึ่งโดยปกติแล้วในคอนกรีตหลาต้องการปริมาณซีเมนต์ที่ค่อนข้างต่ำ(4) เช่น ในเขื่อนโค้งนั้นปริมาณซีเมนต์ที่ใช้มีค่าประมาณ 3-4 ถุง/ลบ.ม.(4) ยิ่งเมื่อใช้สารผสมเพิ่มแล้วจะทำให้สามารถลดความร้อนที่เกิดขึ้นในคอนกรีตได้อีก เช่น การใช้สารผสมเพิ่มที่ช่วยให้คอนกรีตเหลวได้จะทำให้ลดปริมาณซีเมนต์ได้ไม่เกิน 140 กก./ลบ.ม. ซึ่งเป็นผลให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นไม่เกิน 19 °ซ.(5) หรือใช้สารหน่วงปฏิกิริยาทำให้อุณหภูมิในช่วง 2-3 วันแรกลดลงได้ 1.0-1.7 °ซ.(5) ในการเลือกชนิดของซีเมนต์นั้นจึงพิจารณาลักษณะของงาน เช่น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I จะใช้กับโครงสร้างที่ค่อนข้างเล็ก ประเภทที่ II ใช้กับงานคอนกรีตหลาทั่วไป ส่วนประเภทที่ IV จะใช้เฉพาะในกรณีที่มีการควบคุมเป็นพิเศษ(4)

<u>การใช้ปอซโซลาน</u> ปอซโซลานเป็นซีเมนต์ที่ให้ความร้อนต่ำแต่มีคุณสมบัติทางด้านกำลังและความสามารถทำงานได้ไม่ค่อยดี ดังนั้นการใช้ปอซโซลานต้องใช้ร่วมกับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยปกติแล้วความร้อนที่เกิดขึ้นมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้ปอซโซลานแทนที่ ดังนั้นการใช้ปอซโซลานจึงทำให้สามารถลดทั้งอุณหภูมิสูงสุดและอัตราการเพิ่มอุณหภูมิลงได้ (4)

<u>อุณหภูมิเริ่มแรกของคอนกรีต</u> วิธีลดอุณหภูมิเริ่มแรกสามารถทำได้หลายอย่าง เช่น ใช้น้ำแข็งผสมแทนน้ำ ลดอุณหภูมิของหินโดยใช้น้ำแข็งหรืออากาศเย็น และนอกจากนี้อาจจะลดอุณหภูมิของวัสดุผสมคอนกรีตโดยการเก็บไว้ในที่ร่ม(4) โดยทั่วไปแล้วการลดอุณหภูมิของน้ำที่ผสมคอนกรีตลง 1 °ซ. จะสามารถลดอุณหภูมิเริ่มแรกของคอนกรีตลงได้ประมาณ 0.25 °ซ.(20) เมื่อลดอุณหภูมิเริ่มแรกของคอนกรีตลงจะทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างคอนกรีตบริเวณผิวกับส่วนที่อยู่ลึกเข้าไปลดลง ทั้งยังให้ความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดกับอุณหภูมิคงที่มีค่าน้อยลงอีกด้วย (4) อย่างไรก็ดีการกำหนดอุณหภูมิเริ่มแรกยังต้องคำนึงถึงปัจจัยอื่น ๆ ด้วย เช่น อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม

ค่าใช้จ่าย ขั้นตอนและวิธีการก่อสร้าง และที่สำคัญคือมาตรฐานในการควบคุมงานก่อสร้างของอาคารคอนกรีตหลา

ความหนาชั้นคอนกรีตที่เทเพิ่มแต่ละครั้ง ขณะที่อายุของคอนกรีตยังอ่อนความร้อนจากปฏิกิริยาการก่อตัวเกิดขึ้นมากในช่วง 2-3 วันแรกนี้และความร้อนที่เกิดขึ้นจากชั้นที่เทหลังสุดนี้จะถ่ายเทออกจากมวลคอนกรีตได้มากทางผิวบนสุดของชั้น(4) ซึ่งความหนาของชั้นมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนโดยถ้าชั้นที่เทเพิ่มมีความหนาน้อยจะทำให้ความร้อนหนีออกจากมวลได้มาก(4),(5) ในการออกแบบการก่อสร้างจึงต้องให้ความหนาของชั้นที่เทเพิ่มไม่มากนัก ACI Committee 207(5) กล่าวว่า โดยปกติความหนาของชั้นประมาณ 0.76-1.5 ม. และมากที่สุดไม่เกิน 2.3 ม. ในบางกรณี เช่น เมื่อมีการลดอุณหภูมิเริ่มแรกในช่วงฤดูร้อนซึ่งอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมสูงกว่าคอนกรีตในช่วงแรก ความหนาของชั้นเทเพิ่มต้องหนาขึ้นและคลุมคอนกรีตด้วยฉนวนความร้อนในช่วงแรกนี้(4) ดังนั้นความหนาของชั้นที่เทเพิ่มจึงต้องพิจารณาเป็นกรณีเฉพาะขึ้นอยู่กับสภาพในสนามและการออกแบบแต่ละครั้ง

เวลาทิ้งช่วงก่อนการเทเพิ่มแต่ละครั้ง ถ้าทิ้งช่วงเวลาในการเทคอนกรีตเพิ่มแต่ละครั้งให้นานขึ้นความร้อนในคอนกรีตในชั้นบนสุดมีโอกาสถ่ายเทสู่สิ่งแวดล้อมได้มากขึ้น ในกรณีทั่วไปเวลาทิ้งช่วงประมาณ 72 ชั่วโมง(4) แต่ในกรณีที่เป็นเขื่อนขนาดใหญ่เวลาทิ้งช่วงจะเพิ่มขึ้นเป็น 6-7 วัน(4) ในการตัดสินเลือกเวลาทิ้งช่วงนี้ต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญด้านนี้โดยเฉพาะ

การลดอุณหภูมิหลังเทคอนกรีต ความร้อนที่เกิดขึ้นในคอนกรีตและที่ถ่ายเทออกจากคอนกรีตนั้นทำให้เกิดการขยายตัวและหดตัวขึ้น จึงจำเป็นต้องเว้นช่องสำหรับหดตัว (contraction joint) เพื่อที่ควบคุมรอยร้าวในตัวอาคาร โดยช่องสำหรับการหดตัวนี้ต้องปิดหลังจากอุณหภูมิในคอนกรีตลดลงจนไม่ทำความเสียหายต่อโครงสร้าง(4) นอกจากนี้การลดอุณหภูมิหลังเทคอนกรีตแล้วยังทำให้สภาพหน่วยแรงของคอนกรีตดีขึ้น(4) ดังนั้นหลักการในการลดอุณหภูมิหลังการเทคอนกรีตคือลดอุณหภูมิทั้งโครงสร้างโดยการฝังท่อหล่อเย็นกระจายในเนื้อคอนกรีตและการลดอุณหภูมิบริเวณผิวคอนกรีต(4) ในการใช้ท่อหล่อเย็นนั้นจะกำหนดขนาดของท่อ อัตราการไหลของน้ำในท่อและระยะห่างของท่อทั้งในแนวราบและแนวดิ่ง(4) ส่วนการลดอุณหภูมิบริเวณผิวคอนกรีตนั้นทำได้โดยการพ่นน้ำบริเวณผิวบนยอดชั้นที่เท(4),(5) หรือโดยฉีดน้ำหล่อผิวหน้าและบังแดดผิวบนยอดชั้นที่เท(5) การรักษาผิวด้านข้างของคอนกรีตไม่ให้เกิดรอยร้าวนั้นทำได้โดยการลดอุณหภูมิในบริเวณนี้โดยวิธีการต่าง ๆ เช่น การวางท่อในคอนกรีต การใช้น้ำพ่นแบบที่เป็นตัวนำความร้อนหรือใช้แบบที่ปรับอุณหภูมิได้(4) อย่างไรก็ดีการควบคุมอุณหภูมิต่าง ๆ ต้องอยู่

ภายใต้ข้อกำหนดคือ อัตราที่อุณหภูมิลดลงไม่มากเกินกว่า 0.5-1.0 °ฟ./วัน สำหรับโครงสร้างธรรมดา และประมาณ 3.0-4.0 °ฟ./วัน สำหรับโครงสร้างบาง ความเร็วของน้ำในท่อไม่น้อยกว่า 0.6 ม./วินาที(4)

การเลือกใช้ชนิดของแบบและการถอดแบบ การถอดแบบหล่อที่ทำด้วยไม้ต้องหลีกเลี่ยงไม่ให้คอนกรีตเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยกระทันหัน (thermal shock) จนเป็นเหตุให้เกิดรอยร้าวเพิ่มขึ้นในคอนกรีต ปัญหาเช่นนี้จะเพิ่มความรุนแรงตามอุณหภูมิของคอนกรีตที่สูงกว่าสิ่งแวดล้อมเพิ่มมากขึ้น (4) ส่วนการแก้ไขนั้นกระทำได้หลายวิธี เช่น ถอดแบบแต่เนิ่นก่อนอุณหภูมิคอนกรีตจะสูงมากเกินไป ถอดแบบหลังจากที่ระบายความร้อนจนอุณหภูมิลดลงก่อนหรือใช้แบบหล่อที่ทำจากเหล็กและการฉีดน้ำเพื่อลดอุณหภูมิของคอนกรีตรอบ ๆ แบบหล่อ (4)

1.3 วัตถุประสงค์

การวิจัยนี้ได้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับพฤติกรรมอุณหภูมิเพิ่มแบบกักกันความร้อนในคอนกรีตอันเกิดจากปฏิกิริยาการก่อตัว และศึกษาอิทธิพลของส่วนผสมในคอนกรีตที่มีต่ออุณหภูมิเพิ่มแบบกักกันความร้อน จากนั้นจึงสร้างสมการอุณหภูมิเพิ่มแบบกักกันความร้อนเพื่อนำไปใช้ในการประมาณการขนาดความร้อนในคอนกรีตหลา ทั้งนี้เปรียบเทียบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นที่ได้จากการวัดด้วยระบบกักกันความร้อน จากการคาดคะเนจากความร้อนของปฏิกิริยาของซีเมนต์ และจากการวัดอุณหภูมิในคอนกรีตหลา

1.4 การศึกษาวิจัย

ค้นคว้าและศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับอุณหภูมิเพิ่มในคอนกรีตหลา และเลือกตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อความร้อนในคอนกรีตซึ่งตัวแปรหลักที่ได้ในสภาพการหล่อคอนกรีตในประเทศไทย คือ ชนิดของปูนซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีต อุณหภูมิเริ่มแรกของคอนกรีต และอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์

ทำการสร้างเครื่องมือกักกันความร้อนโดยชั้นงานมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 40 ซ.ม. สูง 40 ซ.ม. ซึ่งมีปริมาตร 0.05 ม.^{3} และมีอุปกรณ์การปรับอุณหภูมิได้ตลอดเวลา แล้วจึงทำการทดสอบความร้อนที่เกิดขึ้นตามตัวแปรที่กำหนดไว้

เมื่อได้ผลจากการทดสอบแล้วนำมาวิเคราะห์หากราฟมาตรฐานตามตัวแปรต่าง ๆ เพื่อใช้สำหรับการคาดคะเนความร้อนที่เกิดขึ้นในสภาพการต่าง ๆ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการ

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก่อสร้างอาคารคอนกรีตหลาได้

วัดความร้อนในโครงสร้างจริงของคอนกรีตหลา แล้วเปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบ ซึ่งนำมาวิเคราะห์การกระจายความร้อนในส่วนต่าง ๆ ของคอนกรีตหลาด้วยคอมพิวเตอร์ การปรับปรุงค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ทางด้านคุณสมบัติการนำ การแผ่กระจายความร้อน หรือประสิทธิภาพในการรักษาความร้อนของเครื่องมือกักกันความร้อน จะได้ปรับปรุงแก้ไขให้สอดคล้องกับผลที่เกิดขึ้นจริงตามความเหมาะสม

1.5 ขอบข่ายของงานวิจัย

ในการศึกษาวิจัยนี้จะมีตัวแปรที่สำคัญต่ออุณหภูมิเพิ่มแบบกักกันความร้อนในคอนกรีตดังนี้ คือ ประเภทของปูนซีเมนต์ พิกัดอยู่เพียง 3 ประเภท คือ ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I, III และ V ปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีตมีสัดส่วนผสมอยู่ระหว่าง 200 ถึง 500 ก.ก./ม.^{3} และควบคุมสัดส่วนผสมของน้ำต่อซีเมนต์อยู่ระหว่าง 0.45 ถึง 0.6 โดยน้ำหนัก ส่วนอุณหภูมิเริ่มแรกของคอนกรีตจะศึกษาเฉพาะที่ 20 °ซ. ถึง 40 °ซ. ทั้งนี้ใช้หินปูนและทรายน้ำจืดเป็นวัสดุผสมคอนกรีตโดยอัตราส่วนของหินต่อทรายเท่ากับ 3:2 โดยน้ำหนัก ในการวิจัยนี้จะไม่ทำการศึกษาถึงผลกระทบของการใช้สารผสมเพิ่มและปริมาณเหล็กเสริม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย