การวิเคราะห์อุณหภูมิของหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่สัมผัสกับไฟ

da i h h e bNaeb a a a a e A a ea

ณัฐนุช พูนปาน ปาณัสม์ อุปละ· สพลเชษฐ์ อัตตะการอังกูร และ ชนะชัย ทองโฉม0 *

[1,2,3] สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและการบริหารการก่อสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จ.ปทุมธานี
[4] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จ.ปทุมธานี
**Corresponding author; E-mail address: Tchanach@engr.tu.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้เสนอการวิเคราะห์อุณหภูมิในสภาวะชั่วครู่แบบไร้เชิงเส้น 2 มิติเพื่อศึกษาการกระจายอุณหภูมิของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก การศึกษาเป็นการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม ANSYS ในแบบจำลองใช้คุณสมบัติเชิงความร้อน ประกอบด้วย สภาพการนำความร้อน ความร้อนจำเพาะ และความหนาแน่น อ้างอิงจากมาตรฐาน EN-1992-1-2 งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาอัตราการทนไฟของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่สัมผัสความร้อนตามมาตรฐาน ISO 834 ภายใต้เกณฑ์อุณหภูมิวิกฤติที่ตำแหน่งเหล็กเสริมเป็นเกณฑ์ โครงสร้างที่ศึกษาประกอบด้วย โครงสร้างคาน พื้น และเสา โดยใช้ระยะหุ้มเหล็กตามตามกฎกระทรวงฉบับที่ 60 พ.ศ. 2549 เพื่อตรวจสอบความเหมาะสมระยะหุ้มคอนกรีตต่ออัตราการทนไฟที่กฎกระทรวงกำหนด จากผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองมีผลการกระจายตัวของอุณหภูมิที่สอดคล้องกับผลการทดสอบในอดีต และระยะหุ้มคอนกรีตตามกฎกระทรวงให้ค่าอัตราการทนไฟที่สอดคล้องตามที่กฎกระทรวงกำหนด

คำสำคัญ: การวิเคราะห์อุณหภูมิ, อัตราการทนไฟ, คอนกรีตเสริมเหล็ก, ไฟไหม้

This article proposes the simplified two-dimensional non-linear transient thermal analysis for temperature distribution in the reinforced concrete structure. The finite element method (FEM) is performed using the ANSYS software. In the model, the thermal properties of concrete such as thermal conductivity, specific heat, and density are used according to EN-1992-1-2. The purpose of the research is to investigate the fire resistance time of reinforced concrete structures exposed to the ISO834 standard fire curve under the temperature criteria. The beam, slab, and column with have the concrete covering according to the Thai Building Control Act (B.E. 2549) are considered. Based on the FEM results, the obtained temperature distributions are in agreement with the past experimental results. And, the concrete covering in accordance with the Thai Building Control Act provides the fire resistance rate consistent with the value of fire resistance time proposed by the Thai Building Control Act.

Keywords: Temperature analysis, fire resistance time, reinforced concrete structure, fire.

คำนำ

การเกิดอัคคีภัยมีสาเหตุจากหลายปัจจัย เช่น การตั้งใจส่งผลให้ไฟฟ้าลัดวงจร หรือไม่ตั้งใจก็ตาม สาเหตุต่างๆเหล่านี้ล้วนก่อให้เกิดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินเป็นอย่างมาก รวมถึงส่งผลกระทบต่อโครงสร้างหลัก โครงสร้างรอง หรือวัสดุที่ไม่ใช่ตัวโครงสร้างได้ โดยความเสียหายของโครงสร้างเป็นหนึ่งในปัจจัยที่สำคัญต่อความปลอดภัยของผู้ใช้อาคาร ซึ่งจำเป็นต้องประเมินความเสียหาย เพื่อเป็นแนวทางการตัดสินใจเลือกวิธีการซ่อมแซมโครงสร้าง ในการทดสอบสำหรับโครงสร้างที่เสียหายจากอัคคีภัยอาจมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงและสูญเสียเวลามาก ดังนั้นวิธีการวิเคราะห์เพื่อทำนายอัตราการทนไฟของโครงสร้างอาคารจึงเป็นสิ่งที่จำเป็น

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์อุณหภูมิในสภาวะชั่วครู่แบบไร้เชิงเส้น 2 มิติ (Non-linear transient thermal analysis) จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element model, FEM) ซึ่งจะจำลองอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากกราฟเพลิงไหม้ตามมาตรฐาน ISO 834 [1] ที่เวลาต่าง ๆ โดยใช้คุณสมบัติเชิงความร้อนของคอนกรีตอ้างอิงจากมาตรฐาน EN-1992-1-2 [2] เพื่อวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิภายในหน้าตัดคาน โดยทำการเปรียบเทียบกับผลทดสอบในอดีตเพื่อศึกษาความเหมาะสมของแบบจำลอง จากนั้นได้ทำการตรวจสอบค่าอัตราการทนไฟของชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้ระยะหุ้มคอนกรีตตามกฎหมายควบคุมอาคาร ได้แก่ กฎกระทรวงฉบับที่ 60 (พ.ศ. 2549) ที่ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 [3]

. การวิเคราะห์อุณหภูมิของหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

2.1 คุณสมบัติเชิงความร้อนของคอนกรีต (Thermal properties of concrete)

คุณสมบัติเชิงความร้อนของคอนกรีตปรกติ (Normal weight concrete) ที่มีความหน่าแน่นในช่วง 2000-2600 kg/m^3 จะแปรผันตามอุณหภูมิ [4] และชนิดของมวลรวม (Aggregate Type) โดยสามารถแบ่งมวลรวมออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ มวลรวมเนื้อซิลิกา และมวลรวมเนื้อปูน โดยมวลรวมเนื้อปูนมีองค์ประกอบหลักคือแร่โดโลไมต์ (Dolomite) มีสูตรโครงสร้างเป็น $CaMg(CO_3)_2$ หรือ แร่คาร์บอเนต (Calcite) มีสูตรโครงสร้างเป็น $CaCO_3$ ได้แก่ หินปูน หินโดโลไมต์ หินบะซอลต์ เป็นต้น ส่วนมวลรวมเนื้อซิลิกามีแร่ซิลิกา (Silica) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีสูตรโครงสร้างเป็น SiO_2 ได้แก่ ได้แก่ หินควอตไซต์ หินแกรนิต และกรวดแม่น้ำ เป็นต้น สำหรับการวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิในงานวิจัยนี้อ้างอิงคุณสมบัติเชิงความร้อนของคอนกรีตปรกติตามมาตรฐาน EN 1992-1-2 [2] ได้แก่ การนำความร้อน (Thermal conductivity) ความร้อนจำเพาะ (Specific heat) และความหนาแน่น (Density) ของคอนกรีตภายใต้อุณหภูมิสูง โดยมีรายละเอียดดังนี้

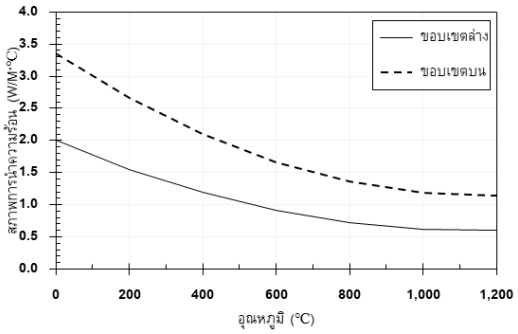
2.1.1 การนำความร้อน (Thermal conductivity)

คุณสมบัติการนำความร้อนของคอนกรีตกำลังปรกติได้มีการนำเสนอให้ใช้ค่าที่อยู่ระหว่างช่วงขีดจำกัดบน (Upper limit) และขีดจำกัดล่าง (Lower limit) ในช่วงอุณหภูมิ 30-1200°C เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุผสม (Composite material) ดังสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ และรูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการนำความร้อนของคอนกรีตและอุณหภูมิ

$$k = 2.0 - 0.2451\left(\frac{T_c}{100}\right) + 0.0107\left(\frac{T_c}{100}\right)^2 \quad (1)$$

$$k = 1.36 - 0.136\left(\frac{T_c}{100}\right) + 0.0057\left(\frac{T_c}{100}\right)^2 \quad (2)$$

โดย k คือ สภาพการนำความร้อนของคอนกรีต (W/m-K); T_c คือ อุณหภูมิของคอนกรีต (°C)



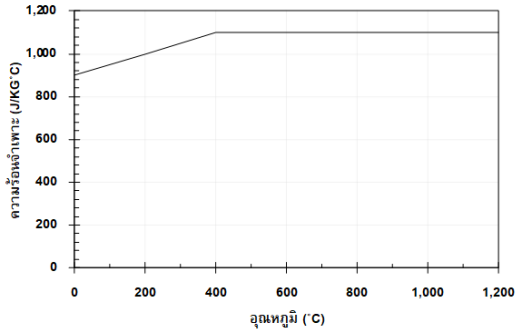
รูปที่ ความสัมพันธ์ระหว่างการนำความร้อนของคอนกรีตและอุณหภูมิ [1]

2.1.2 ความร้อนจำเพาะ (Specific heat)

ความร้อนจำเพาะของคอนกรีตปรกติจะแปรผันตามค่าความชื้นในคอนกรีตและอุณหภูมิ สำหรับคอนกรีตในภาวะแห้ง (ความชื้น 0%) ในช่วงอุณหภูมิ 30-1200°C ได้เสนอดังสมการที่ (3) และแสดงดังรูปที่ 2

$$c_c = \begin{cases} 900 & ; 30°C \le T_c \le 100°C \\ 900 + (T_c - 100) & ; 100°C < T_c \le 200°C \\ 1000 + \frac{(T_c - 200)}{2} & ; 200°C < T_c \le 400°C \\ 1100 & ; 400°C \le T_c \le 1200°C \end{cases} \quad (3)$$

โดย c คือ สภาพการนำความร้อนของคอนกรีต (J/kg.K)



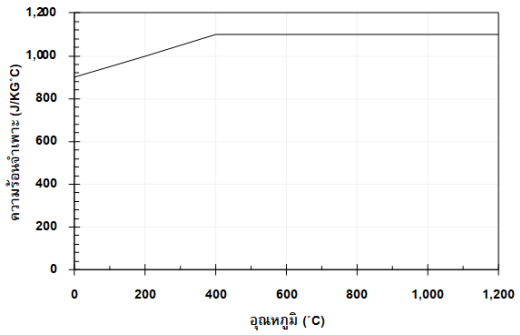
รูปที่ . ความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนจำเพาะของคอนกรีตและอุณหภูมิ [1]

2.1.3 ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่นของคอนกรีตจะมีการแปรผันตามอุณหภูมิโดยมีค่าลดลงเล็กน้อย เนื่องจากการสูญเสียน้ำภายในของคอนกรีตดังแสดงในสมการที่ (4) และรูปที่ 3

$$p_c = \begin{cases} p_{c,30\,C} & ; 30°C \le T_c \le 115°C \\ p_{c,30\,C}\left(1 - 0.02\frac{(T_c - 115)}{85}\right) & ; 115°C < T_c \le 200°C \\ p_{c,30\,C}\left(0.98 - 0.03\frac{(T_c - 200)}{200}\right) & ; 200°C < T_c \le 400°C \\ p_{c,30\,C}\left(0.98 - 0.03\frac{(T_c - 200)}{200}\right) & ; 400°C \le T_c \le 1200°C \end{cases} \quad (4)$$

โดย p_c คือ คือ ความหนาแน่นของคอนกรีตที่อุณหภูมิ (kg/m^3); $p_{c,30^oC}$ คือ คือ ความหนาแน่นของคอนกรีตที่อุณหภูมิ 30 °C โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้ค่าเท่ากับ 2,400 kg/m^3



รูปที่ ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของคอนกรีตและอุณหภูมิ [1]

2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการทดสอบการหาอัตราการทนไฟ เพื่อประเมินค่าความสามารถของชิ้นส่วนโครงสร้างของ

อาคารเรียกว่าเพลิงไหม้มาตรฐาน ซึ่งค่ามาตรฐานของการทดสอบอัตราการทนไฟ ที่มีการอ้างอิงจากการออกแบบโครงสร้างของประเทศไทย ได้แก่ ISO 834 [1] หรือ ASTM E119 [5]

ในการวิจัยนี้จะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิที่ใช้สำหรับการวิเคราห์หาอัตราการทนไฟ ตามมาตรฐาน ISO 834 [1] โดยแสดงในสมการที่ (5) และรูปที่ 4

$$T_t \quad 30 \quad 345\log_{10}(480t \quad 1) \tag{5}$$

รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างการนำความร้อนของคอนกรีตและอุณหภูมิตามมาตรฐาน ISO 834 [1]

2.3 สมการควบคุมสำหรับวิเคราะห์อุณหภูมิ

ในการส่งผ่านความร้อน ความร้อนจะมีการส่งผ่านจากกราฟไฟสู่พื้นผิวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการการแผ่รังสีความร้อน และพาความร้อน จากพื้นที่ผิวของตัวคานคอนกรีตเสริมเหล็กเข้าไปด้านในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ด้วยวิธีการนำความร้อน ซึ่งเป็นการนำความร้อนชั่วครู่ (Transient heat conduction) ในปริภูมิ 2 มิติ (x, y) ของคอนกรีต [6] เป็นไปดังสมการที่ (6)

$$k \; T \quad \frac{^2T}{x^2} \quad \frac{^2T}{y^2} \qquad T \; c \; T \; \frac{T}{t} \tag{6}$$

โดยมีเงื่อนไขขอบเขตของสมการสามารถแสดงในสมการที่ (7)

$$k \; T \quad \frac{T}{x} n_x \quad \frac{T}{y} n_y \quad h \; T_f \quad T_s \quad _{res} \; [\; T_f \quad 273 \; ^4 \quad T_s \quad 273 \; ^4] \tag{7}$$

โดย $k \; T$ คือ สภาพนำความร้อนของตัวคอนกรีตที่แปรผันตามอุณหภูมิ $(W/m \quad C)$, T คือ ความหนาแน่นของตัวคอนกรีตที่แปรผันตามอุณหภูมิ (kg/m^3), $c \; T$ คือ ความร้อนจำเพาะของตัวคอนกรีตที่แปรผันตามอุณหภูมิ $(J/kg \quad C)$, h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน $(W/m^2 \quad C)$, T_f คือ ความร้อนจากกราฟไฟที่ใช้ในการวิเคราะห์โดยแปรผันตามเวลา (℃), T_s คือ ความร้อนที่พื้นผิวของตัวคอนกรีต (℃), $_{res}$ คือ สภาพเปล่งรังสีสัพท์ (ไม่มีหน่วย), คือ ค่าคงที่ของสเตฟาน-โบลต์ซมันน์ $(5.67 \quad 10^8 W/m^2 \; k^4)$, n_x, n_y คือ ทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวของคอนกรีตในทิศทาง *x* และ *y* ตามลำดับ

2.4 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิกำหนดโดยสมการ (6) และ (7) ซึ่งเป็นสมการแบบไร้เชิงเส้นและในสภาวะชั่วขณะ (Nonlinear Transient equation) จะใช้การวิเคราะห์จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS [7] แบบ 2 มิติ โดยใช้เอลิเมนต์ (Element) ของคอนกรีตเป็น PLANE 55 [7] ซึ่งเป็นเอลิเมนต์ที่มี 4 จุดต่อ (nodes) และมีระดับขั้นความเสรีคืออุณหภูมิที่แต่ละจุดต่อดังรูปที่ 5

รูปที่ 5 ลักษณะของเอลิเมนต์ PLANE 55 ที่ใช้ในการวิเคราะห์อุณหภูมิ [7]

การสร้างแบบจำลองนั้นมีสมมุติฐานให้อุณหภูมิของคอนกรีตที่ตำแหน่งเหล็กเสริมเท่ากับอุณหภูมิของเหล็กเสริม เนื่องจากเหล็กเสริมไม่มีผลต่อการกระจายอุณหภูมิในหน้าตัดอย่างมีนัยสำคัญ [8] การให้ความร้อนแก่หน้าตัดคอนกรีตจะกำหนดให้หน้าตัดคอนกรีตมีอุณหภูมิสม่ำเสมอ ซึ่งเป็นอุณหภูมิห้อง ต่อมาได้กำหนดให้มีการส่งผ่านความร้อนสู่เอลิเมนต์ ในรูปแบบของการพาความร้อนที่ขอบพื้นผิว สำหรับพื้นผิวที่ได้รับความร้อนและไม่ได้รับความร้อน มีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเท่ากับ 9 W/m^2 ℃ และ 30 W/m^2 ℃ ตามลำดับ [9,10] แต่ไม่คำนึงถึงผลของการแผ่รังสีความร้อน เนื่องจากโปรแกรม ANSYS สามารถกำหนดรูปแบบการแผ่รังสีได้เฉพาะจากแหล่งกำเนิดความร้อนซึ่งไม่ใช่ความร้อนรอบ ๆ ของตัวคอนกรีต [11]

2.5 ระยะหุ้มเหล็กตามกฎกระทรวงฉบับที่ 60 (พ.ศ. 2540)

อัตราการทนไฟ คือระยะเวลาของชิ้นส่วนโครงสร้างที่สามารถรองรับน้ำหนักบรรทุกได้อย่างปลอดภัยภายใต้อุณหภูมิสูง สำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น อัตราการทนไฟสามารถหาได้โดยใช้เกณฑ์อุณหภูมิวิกฤติ [5] และ เกณฑ์การโก่งตัว [12] สำหรับงานวิจัยนี้จะพิจารณาอัตราการทนไฟภายใต้เกณฑ์อุณหภูมิวิกฤติคือ อุณหภูมิที่ตำแหน่งเหล็กเสริมเป็นเกณฑ์เมื่ออุณหภูมิที่ตำแหน่งเหล็กเสริมถึงค่า 593°C [5]

สำหรับประเทศไทยนั้น กฎกระทรวงฉบับที่ 60 (พ.ศ. 2540) [3] ได้กำหนด

ทนไฟไมนอยกวาที่กำหนดเชนเดียวกัน โดยจะตองมีเอกสารรับรองอัตราการทนไฟจากสถาบันที่เชื่อถือไดประกอบการขออนุญาต

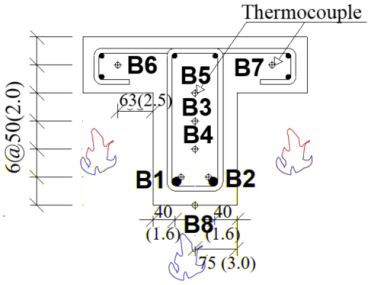
ตารางที่ 1 ความหนาของคอนกรีตหุ้มเหล็ก [ ]

คอนกรีตเสริมเหล็ก	ความหนาน้อยสุดของคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมหรือคอนกรีตหุ้มเหล็ก (มิลลิเมตร)
เสาสี่เหลี่ยมที่มีด้านแคบขนาด 300 มิลลิเมตรขึ้นไป	40
คานและโครงข้อหมุนคอนกรีตขนาดกว้างตั้งแต่ 300 มิลลิเมตรขึ้นไป	40
พื้นหนาไม่น้อยกว่า 115 มิลลิเมตร	20

การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง

3.1 ผลการทดสอบการกระจายอุณหภูมิ

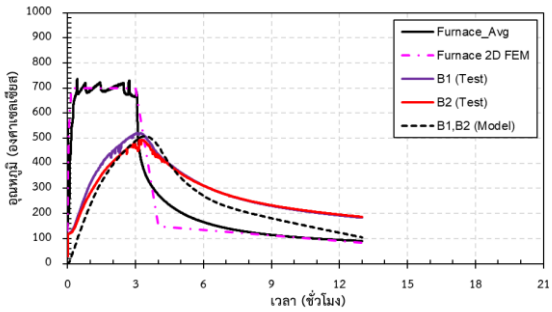
ชนะชัย ทองโฉมและคณะ [13] ได้ศึกษาการเสียรูปของหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กรูปตัวทีขณะเผาไฟ โดยที่หน้าตัดคานมีความกว้างเอว 15 เซนติเมตร ความกว้างปีก 40 เซนติเมตร ความหนาปีก 10 เซนติเมตร ความสูง 30 เซนติเมตร และความหนาปีกเท่ากับ 10 เซนติเมตร รายละเอียดดังรูปที่ 6 โดยทำการเผาไฟบริเวณใต้ปีกคานและเอวโดยตรงที่อุณหภูมิ 700°C และ 900°C เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง ภายในคานได้ติดตั้งตัววัดอุณหภูมิ (Thermocouple) ที่คอนกรีตและเหล็กเสริมดังรูปที่ 6



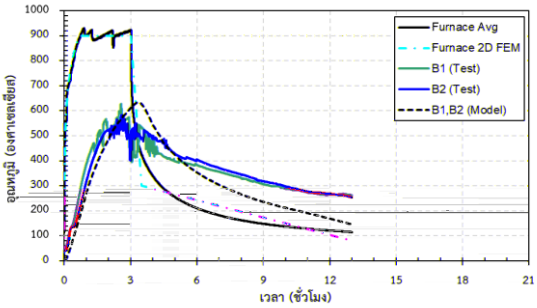
รูปที่ 6 รายละเอียดคานรูปตัวทีและตำแหน่งตัววัดอุณหภูมิ [9]

3.2 ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิ

รูปที่ 7 และรูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิที่ตำแหน่งเหล็กเสริมจากผลการทดสอบและแบบจำลองของคานที่ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 700 และ 900 องศาเซลเซียสตามลำดับ โดยผลที่ได้จากแบบจำลองมีความใกล้เคียงกับผลการทดสอบ โดยมีอัตราส่วนของอุณหภูมิสูงสุดของแบบจำลองต่อผลการทดสอบอยู่ระหว่าง 0.98-1.09 โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.03 ดังนั้นแบบจำลองมีความเหมาะสมต่อการทำนายอุณหภูมิภายในหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็ก



รูปที่ 7 การกระจายอุณหภูมิภายในหน้าตัดภายใต้การเผาไฟที่อุณหภูมิ 700°C



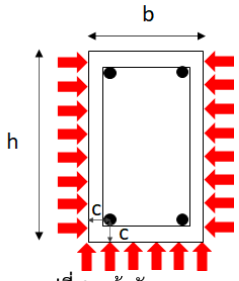
รูปที่ 8 การกระจายอุณหภูมิภายในหน้าตัดภายใต้การเผาไฟที่อุณหภูมิ 900°C

0 ผลการศึกษา

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจสอบอัตราการทนไฟภายใต้เกณฑ์อุณหภูมิวิกฤติของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กประกอบด้วยเสา คาน และพื้น โดยใช้ระยะหุ้มเหล็กกฎกระทรวงฉบับที่ 60 มีรายละเอียดดังนี้

4.1 คานคอนกรีตเสริมเหล็ก

จากการออกแบบโครงสร้างเพื่อความปลอดภัยตามกฎกระทรวงโดยคานและโครงข้อหมุนคอนกรีตขนาดกว้างตั้งแต่ 300 มิลลิเมตรขึ้นไป มีอัตราการทนไฟ 3 ชั่วโมง โดยงานวิจัยนี้สร้างแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีหน้าตัดตามกฎกระทรวง โดยหน้าตัดที่ทำการศึกษามีรายระเอียดดังตารางที่ 2 โดยจะศึกษา 3 หน้าตัด (30x50, 40x60 และ 50x70 เซนติเมตร) โดยใช้ระยะหุ้มเหล็กเท่ากับ 40 เซนติเมตร คานดังกล่าวสัมผัสกับความร้อนสามด้านดังรูปที่ 9

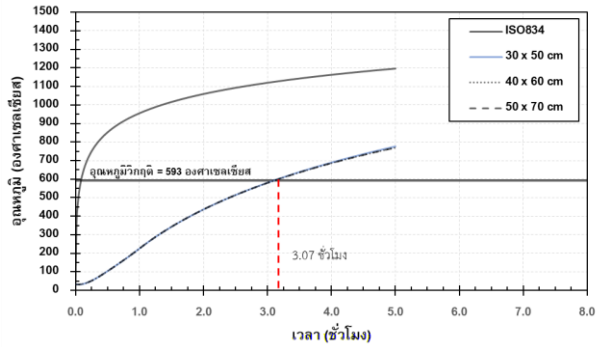


รูปที่ 9 หน้าตัดคาน

ตารางที่ 2 รายละเอียดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

กรณี	ระยะหุ้ม, c (ซม.)	ความหนา, b (ซม.)	ความลึก, h (ซม.)
1	4.0	30	50
2	4.0	40	60
3	4.0	50	70

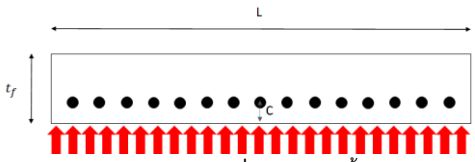
รูปที่ 10 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ตำแหน่งเหล็กเสริมของหน้าตัดคานต่างๆที่ทำการศึกษา โดยอัตราการทนไฟของหน้าตัด 30×50 40×60 และ 50×70 เซนติเมตร มีค่าเท่ากับ 3.07 ชั่วโมง ซึ่งมีค่าอัตราการทนไฟใกล้เคียงกับค่าที่กฎกระทรวงกำหนดคือ 3 ชั่วโมง



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ตำแหน่งเหล็กเสริมกับเวลาของคาน

4.2 พื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

จากการออกแบบโครงสร้างเพื่อความปลอดภัยตามกฎกระทรวง พื้นหนาไม่น้อยกว่า 115 มิลลิเมตร อัตราการทนไฟมากกว่าหรือเท่ากับ 2 ชั่วโมง โดยงานวิจัยนี้สร้างแบบจำลองพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีหน้าตัดตามกฎกระทรวง โดยหน้าตัดที่ทำการศึกษามีรายระเอียดดังตารางที่ 3 โดยจะศึกษา 3 ความหนา (11.5, 12.0 และ 15.0 เซนติเมตร) โดยใช้ระยะหุ้มเหล็กเท่ากับ 2.0 เซนติเมตร พื้นดังกล่าวสัมผัสกับความร้อน ดังรูปที่ 11

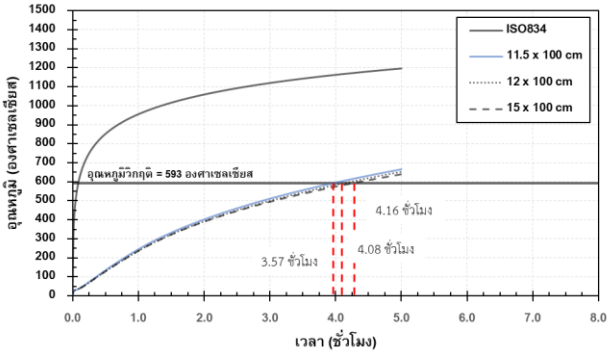


รูปที่ 1 หน้าตัดพื้น

ตารางที่ 3 รายละเอียดของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

กรณี	ระยะหุ้ม, c (ซม.)	ความหนา, t (ซม.)
1	2.0	11.5
2	2.0	12.0
3	2.0	15.0

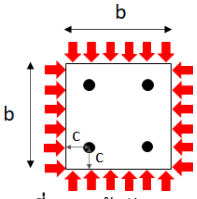
รูปที่ 12 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ตำแหน่งเหล็กเสริมของพื้นที่ความหนาต่างๆที่ทำการศึกษา โดยอัตราการทนไฟพื้นที่มีความหนาเท่ากับ 11.5, 12.0 และ 15.0 เซนติเมตร มีค่าเท่ากับ 3.57 4.08 และ 4.16 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่าอัตราการทนไฟที่กฎกระทรวงกำหนดคือ 2 ชั่วโมง



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์แสดงอุณหภูมิกับเวลาของพื้น

4.3 เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

จากการออกแบบโครงสร้างเพื่อความปลอดภัยตามกฎกระทรวง เสาสี่เหลี่ยมที่มีด้านแคบขนาด 300 มิลลิเมตรขึ้นไป มีอัตราการทนไฟ 3 ชั่วโมง โดยงานวิจัยนี้สร้างแบบจำลองเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีหน้าตัดตามกฎกระทรวง โดยหน้าตัดที่ทำการศึกษามีรายระเอียดดังตารางที่ 4 โดยจะศึกษา 3 หน้าตัด (30x30 40x40 และ 50x50 เซนติเมตร) โดยใช้ระยะหุ้มเหล็กเท่ากับ 4.0 เซนติเมตร โดยเสาสัมผัสกับความร้อนสี่ด้านดังรูปที่ 13

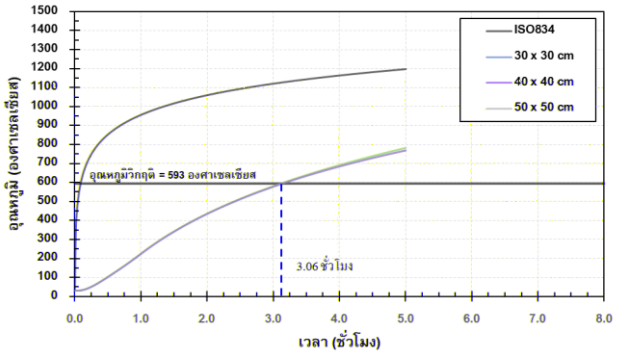


รูปที่ 13 หน้าตัดเสา

ตารางที่ 4 รายละเอียดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

กรณี	ระยะหุ้ม, c (ซม.)	ความหนา, b (ซม.)	ความยาว , b (ซม.)
1	4	30	30
2	4	40	40
3	4	50	50

รูปที่ 14 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ตำแหน่งเหล็กเสริมของเสาที่หน้าตัดต่างๆที่ทำการศึกษา โดยอัตราการทนไฟของเสาขนาด 30x30 40x40 และ 50x50 เซนติเมตร มีค่าอัตราการทนไฟเท่ากับ 3.06 ชั่วโมง ซึ่งมีค่าอัตราการทนไฟใกล้เคียงกับค่าที่กฎกระทรวงกำหนดคือ 3 ชั่วโมง



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์แสดงอุณหภูมิกับเวลาของเสา

1 บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้เสนอการวิเคราะห์อุณหภูมิจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 2 มิติของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้เพลิงไหม้ โดยแบบจำลองใช้คุณสมบัติเชิงความร้อน ประกอบด้วย สภาพการนำความร้อน ความร้อนจำเพาะ และความหนาแน่น อ้างอิงจากมาตรฐาน EN-1992-1-2 จากการศึกษาพบว่า แบบจำลองโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้เพลิงไหม้มีความเหมาะสมเมื่อเทียบกับผลการทดสอบในอดีต และจากการตรวจสอบความเหมาะสมของอัตราการทนไฟของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กประกอบด้วย คาน พื้น และเสา โดยอ้างอิงระยะหุ้มเหล็กตามกฎกระทรวงฉบับที่ 60 พ.ศ. 2549 ภายใต้เกณฑ์อุณหภูมิวิกฤตินั้น ผลการศึกษาพบว่า ระยะหุ้มเหล็กของโครงสร้างคาน พื้น และเสาตามกฎกระทรวงฉบับที่ 60 พ.ศ. 2549 ให้ค่าอัตราการทนไฟสอดคล้องกับค่าที่ระบุในกฎกระทรวง

เอกสารอ้างอิง

[1] ISO 834-1, (1999). *Fire Resistance Tests—Elements of Building Construction. Part 1: General Requirement*, International Standards Organization, Geneva, Switzerland.

[2] Eurocode 2, (2004). *EN 1992-1-2: Design of Concrete Structures, Part 1-2: General Rules—Structural Fire Design.* European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.

[3] กฎกระทรวงฉบับที่ 60. (2549) ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522.

[4] ธัญวัฒน์ โพธิศิริ (2558). *การออกแบบโครงสร้างเพื่อความปลอดภัยด้านอัคคีภัย.* สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 401 หน้า.

[5] ASTM E119-08a, (2008). *Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 31 pp.

[6] Kreith, F., Manglik, R.M. and Bohn M.S., (2011). *Principles of Heat Transfer*. Cengage Learning, Colorado, USA.

[7] ANSYS Inc, (2011) ANSYS: A Finite Element Computer software and User Manualfor Nonlinear Structural Analysis. Canonsburg, Pennsylvania.

[8] Lie, T. T. and Irwin, R. J. (1993). Method to calculate the fire resistance of reinforced concrete columns with rectangular cross section. *ACI Structural Journal*, 90(1), pp. 52-60.

[9] Wade, C. A. (1993). *Summary report on a finite element program for modeling the thermal response of building components exposed to fire.* Building Research Association of New Zealand., BRANZ Study Report No. 51, Judgeford, New Zealand.

[10] Gao, W. Y., Dai, J. G., Teng, J. G., and Chen, G. M. (2013). Finite element modeling of reinforced concrete beams exposed to fire. *Engineering Structures*, 52, pp. 488-501.

[11] Emberley, R. L. (2013). *A study into the behavior of reinforced-concrete columns under fire exposures using spreadsheet-based numerical model*. M.S. Thesis, Worcester Polytechnic Institute, Worcester.

[12] BS 476-20, (1987) Fire Tests on Building Materials and Structures – Part 20: Method for Determination of the Fire Resistance of Elements of Construction (General Principles). British Standards Institute, London, UK.

[13] Thongchom, C. Lenwari, A. and Aboutaha, R. (2019). Effect of Sustained Service Loading on Post-Fire Flexural Response of Reinforced Concrete T-Beams. *ACI Structural Journal,* 116(3), pp. 243-254.