

การศึกษาอัตราการทนไฟของเสาเหล็กที่มีคอนกรีตหุ้มโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

A Study on Fire Resistance Rating of Structural Steel Columns with Concrete Encasement Using Finite Element Method

ณภัทร เจริญภักดีพัฒน์¹ ณัฐชัย ชูสกุลระชะชัย² และ อัครวัชร เลื่อนาวารี³

^{1,2,3} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ

บทคัดย่อ

โครงการนี้ได้ทำการศึกษาด้านอัตราการทนไฟของเสาเหล็กที่มีคอนกรีตหุ้มโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS ในการศึกษามีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) วิเคราะห์ผลการถ่ายเทความร้อนในสภาวะไม่สม่ำเสมอและตรวจสอบผลกับผลเฉลยที่ถูกต้อง (2) ศึกษาผลกระทบของตัวแปร ได้แก่ รูปร่าง ขนาดเหล็กและคอนกรีตหุ้ม ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ความชื้น (3) เปรียบเทียบผลจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับวิธีคำนวณตาม ASCE/SEI/SFPE 29-05 [1] ในการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่ออัตราการทนไฟใช้สมบัติทางความร้อนตามมาตรฐาน Eurocodes [3], [4] จากการศึกษาตามวัตถุประสงค์พบว่า (1) ถ้าคอนกรีตมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่สูง จะได้ค่าอัตราการทนไฟที่ต่ำ (2) ความหนาของคอนกรีตหุ้มที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการทนไฟมากกว่าขนาดเหล็ก (3) เสาเหล็กรูปพรรณขนาดกล่องสี่เหลี่ยมจะให้อัตราการทนไฟต่ำกว่ารูปตัว H (4) ความชื้นมากจะให้ค่าความร้อนจำเพาะสูง ส่งผลให้ได้อัตราการทนไฟที่สูง (5) อัตราการทนไฟที่ได้จากวิธีคำนวณตาม ASCE/SEI/SFPE 29-05 [1] ให้ค่าสูงกว่าจาก ANSYS เมื่อใช้ค่าคุณสมบัติทางความร้อนเดียวกัน (6) อัตราการทนไฟจากวิธีการคำนวณตามมาตรฐานมีค่าน้อยกว่าจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เมื่อใช้สมบัติทางความร้อนตาม Eurocodes [3], [4] ซึ่งมีค่ามากกว่า 3 ชั่วโมง (7) อัตราการเพิ่มขึ้นของอัตราการทนไฟเมื่อเพิ่มความชื้นคอนกรีตจากวิธีการคำนวณตามมาตรฐานมีค่ามากกว่าวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เมื่อใช้สมบัติทางความร้อนตาม Eurocodes [3], [4]

คำสำคัญ: การป้องกันไฟด้วยคอนกรีตหุ้ม, วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, วิธีการคำนวณตามมาตรฐาน

Abstract

This research investigates the fire resistance rating of structural steel columns with concrete encasement using the commercial finite element software ANSYS. The main objectives include (1) to implement the transient heat transfer analysis with

the ANSYS and validate the results with benchmark solutions, (2) to investigate the effects of parameters such as the structural steel shape and size, concrete encasement thickness, concrete thermal conductivity, and moisture content, (3) to compare the FE results with the standard fire equation recommended by ASCE/SEI/SFPE 29-05 [1]. The Eurocodes [3], [4] thermal properties are implemented in the ANSYS. From the FE results, it can be concluded that (1) the higher thermal conductivity, the lower fire endurance, (2) concrete encasement thickness has more effects on fire resistance rating than steel size (3) the rectangular hollow section has a lower fire resistance rating than the H section with the same thickness of concrete encasement, (4) the moisture content impacts on the specific heat of concrete: the higher moisture content, the higher specific heat and fire endurance, (5) the fire resistance rating calculated from the equation recommended by ASCE/SEI/SFPE 29-05 [1] is higher than ANSYS results using the same thermal properties, (6) the fire resistance rating calculated from the standard equation is less than ANSYS results using critical properties from Eurocodes [3], [4] which gives fire resistance rating more than 3 hours, (7) increasing rate of fire resistance over percent of moisture content from the standard equation is higher than from ANSYS results using critical properties from Eurocodes [3], [4].

Keywords: concrete protection method, finite element method, standard calculation method

1. บทนำ

1.1 ที่มาของโครงการ

ในปัจจุบันโครงสร้างเหล็กถูกนำมาใช้งานมากขึ้นเนื่องจากมีข้อดีหลายประการ เช่น ก่อสร้างรวดเร็ว น้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับโครงสร้าง

มีอากาศเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนไปยังคอนกรีตที่หุ้มเสาเหล็ก

ตัวแปรสำคัญในการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนคือ ค่าสัมประสิทธิ์ในการพาความร้อน (Film Coefficient) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 25 W/m²K และอุณหภูมิโดยรอบ ซึ่งก็คืออุณหภูมิเตาอ้างอิงตามมาตรฐาน BS476

3.2 คุณสมบัติของคอนกรีต

3.2.1 ความหนาแน่นของคอนกรีต

ค่าความหนาแน่นของคอนกรีตจะแปรผันตามอุณหภูมิตามสมการที่ (1) ถึง (4) โดย ρ_c คือ ความหนาแน่นของคอนกรีต (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร), $\rho_{c,20^\circ C}$ คือ ความหนาแน่นของคอนกรีตที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และ θ คือ อุณหภูมิของคอนกรีต (องศาเซลเซียส)

$$\rho_c = \rho_{c,20^\circ C} \quad ; \quad 20^\circ C \leq \theta \leq 115^\circ C \quad (1)$$

$$\rho_c = \rho_{c,20^\circ C} \left(1 - 0.02 \frac{\theta - 115}{85} \right) \quad ; \quad 115^\circ C < \theta \leq 200^\circ C \quad (2)$$

$$\rho_c = \rho_{c,20^\circ C} \left(0.98 - 0.03 \frac{\theta - 200}{200} \right) \quad ; \quad 200^\circ C < \theta \leq 400^\circ C \quad (3)$$

$$\rho_c = \rho_{c,20^\circ C} \left(0.95 - 0.07 \frac{\theta - 400}{800} \right) \quad ; \quad 400^\circ C < \theta \leq 1200^\circ C \quad (4)$$

3.2.2 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีต

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน คือ ค่าที่แสดงความสามารถในการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อนของวัสดุ โดย EN 1992-1-2 (2004) ได้ระบุค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนโดยแบ่งเป็นขอบเขตบน (Upper bound) ตามสมการที่ (5) ซึ่งใช้กับคอนกรีตมวลรวมคาร์บอนेट และขอบเขตล่าง (Lower bound) ตามสมการที่ (6) ซึ่งใช้กับคอนกรีตมวลรวมซิลิเซียส

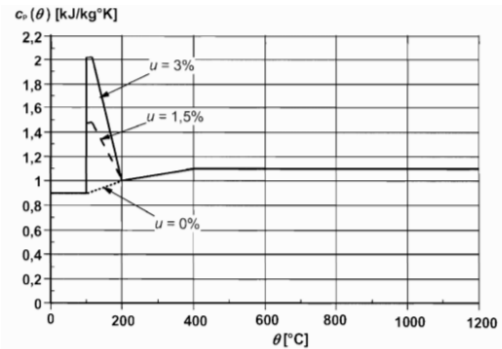
$$\lambda_c = 2 - 0.2451 \left(\frac{\theta}{100} \right) + 0.0107 \left(\frac{\theta}{100} \right)^2 \quad ; \quad 20^\circ C \leq \theta \leq 1200^\circ C \quad (5)$$

$$\lambda_c = 1.36 - 0.136 \left(\frac{\theta}{100} \right) + 0.0057 \left(\frac{\theta}{100} \right)^2 \quad ; \quad 20^\circ C \leq \theta \leq 1200^\circ C \quad (6)$$

λ_c คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/m K)

3.2.3 ความร้อนจำเพาะของคอนกรีต

ความร้อนจำเพาะ คือ ปริมาณความร้อนที่ทำให้วัตถุมวล 1 กรัมมีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป 1 องศาเซลเซียส EN 1992-1-2 (2004) ได้ระบุค่าความร้อนจำเพาะโดยมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามความชื้น (u) และอุณหภูมิ (θ) ของคอนกรีต ถ้าความชื้นคอนกรีตมีค่ามากจะส่งผลให้ค่าความร้อนมีค่ามากขึ้น



รูปที่ 1 ค่าความร้อนจำเพาะ ($C_p(\theta)$)

3.3 คุณสมบัติของเหล็กรูปพรรณ

3.3.1 ความหนาแน่นของเหล็กรูปพรรณ

EN 1993-1-2 (2005) กล่าวว่าความหนาแน่นของเหล็กรูปพรรณมีค่าเท่ากับ 7850 kg/m³

3.3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเหล็กรูปพรรณ

EN 1993-1-2 (2005) ได้ระบุค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเหล็กรูปพรรณ โดยมีค่าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของคอนกรีตดังสมการ (7) และ (8) เมื่อ λ_a คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเหล็กรูปพรรณ (W/mK), θ_a คือ อุณหภูมิของเหล็กรูปพรรณ ($^\circ C$)

$$\lambda_a = 54 - 3.33 \times 10^{-2} \theta_a \quad ; \quad 20^\circ C \leq \theta_a \leq 800^\circ C \quad (7)$$

$$\lambda_a = 27.3 \quad ; \quad 800^\circ C \leq \theta_a \leq 1200^\circ C \quad (8)$$

3.3.3 ความร้อนจำเพาะของเหล็กรูปพรรณ

ความร้อนจำเพาะของเหล็กรูปพรรณหรือ C_a (J/kgK) มีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิตามที่ EN 1993-1-2 (2005) ได้ระบุไว้ ดังแสดงในสมการที่ (9) ถึง (12)

สำหรับ $20^\circ C \leq \theta_a < 600^\circ C$:

$$c_a = 425 + 7.73 \times 10^{-1} \theta_a - 1.69 \times 10^{-3} \theta_a^2 + 2.22 \times 10^{-6} \theta_a^3 \quad (9)$$

สำหรับ $600^\circ C \leq \theta_a < 735^\circ C$:

$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a} \quad (10)$$

สำหรับ $735^\circ C \leq \theta_a < 900^\circ C$:

$$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731} \quad (11)$$

สำหรับ $900^\circ C \leq \theta_a \leq 1200^\circ C$:

$$c_a = 650 \quad (12)$$

3.4 มาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์

มาตรฐานที่เกี่ยวข้องในการทดสอบหาอัตราการทนไฟของโครงสร้างได้แก่ มาตรฐาน ISO 834 หรือ BS 476 และ ASTM E 119 เมื่อทำการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าอัตราการทนไฟที่ได้จากทั้ง 2 มาตรฐานมีค่าต่างกันน้อยดังแสดงในตารางที่ 1 โดยในการวิเคราะห์จะอ้างอิงอุณหภูมิไฟมาตรฐาน ISO 834 หรือ BS 476 ซึ่งแสดงดังสมการ (13) อุณหภูมิวิกฤติของเหล็กคือเมื่ออุณหภูมิ ณ จุด

หนึ่งมีค่า 620 องศาเซลเซียส หรือ อุณหภูมิเฉลี่ยของทั้งหน้าตัดมีค่า 620 องศาเซลเซียส

$$T = 345 \log(8t + 1) + T_0 \quad (13)$$

ตารางที่ 1 ผลต่างอัตราการทนไฟของมาตรฐาน BS 476 และ ASTM E119 3.5 โมเดลในโปรแกรม ANSYS

| ขนาดและรูปร่างหน้าตัดเหล็ก | ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน | ความชื้น (%) | อัตราทนไฟข้างอิงตามมาตรฐาน BS 476 (min) | อัตราทนไฟข้างอิงตามมาตรฐาน ASTM E119 (min) | เปอร์เซ็นต์ผลต่าง (%) | เกณฑ์อุณหภูมิ |
|--|------------------------------|--------------|---|--|-----------------------|--------------------------------|
| หน้าตัดรูปตัว H 300x300 มม. ระยะหุ้ม 2.5 ซม. | Upper bound | 0 | 189 | 199 | 5.15 | อุณหภูมิจุดใดจุดหนึ่ง > 620 °C |
| หน้าตัดรูปตัว H 300x300 มม. ระยะหุ้ม 2.5 ซม. | Upper bound | 1.5 | 195 | 207 | 5.97 | อุณหภูมิจุดใดจุดหนึ่ง > 620 °C |
| หน้าตัดรูปตัว H 300x300 มม. ระยะหุ้ม 2.5 ซม. | Upper bound | 3 | 201 | 214 | 6.26 | อุณหภูมิจุดใดจุดหนึ่ง > 620 °C |

โมเดลของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2 โดยใช้ขนาด Mesh เท่ากับ 5 มิลลิเมตร

ตารางที่ 2 รายละเอียดของโมเดล ANSYS

| รูปทรงของเหล็ก | ขนาดของเหล็ก | ขนาดของเสาเหล็กหุ้มคอนกรีต | ความหนาคอนกรีตหุ้ม |
|---------------------------|------------------|----------------------------|--------------------|
| รูปตัว H | 150x150x7x10 mm | 250x250 mm | 5.00 cm |
| รูปตัว H | 200x200x8x12 mm | 280x280 mm | 4.00 cm |
| รูปตัว H | 300x300x10x15 mm | 350x350 mm | 2.50 cm |
| รูปกล่องสี่เหลี่ยมจัตุรัส | 150x150x9 mm | 250x250 mm | 5.00 cm |
| รูปกล่องสี่เหลี่ยมจัตุรัส | 200x200x9 mm | 280x280 mm | 4.00 cm |

เอลิเมนต์ที่ใช้ประกอบด้วย 4 ชนิด ดังนี้

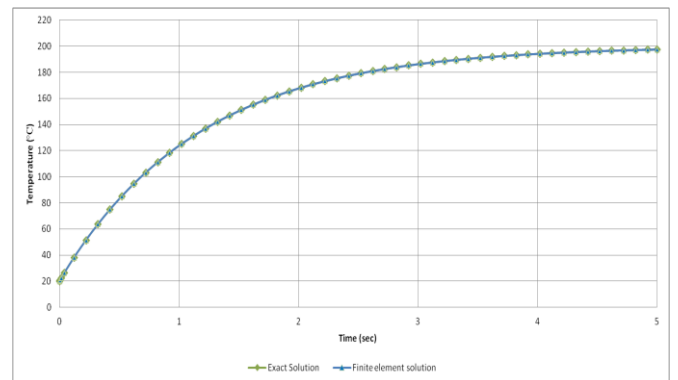
1. PLANE77 เป็นเอลิเมนต์ 8 จุดต่อ (Nodes) ใช้วิเคราะห์อุณหภูมิในรูปแบบ 2 มิติ มี 1 องศาเสรี
2. SURF151 เป็นเอลิเมนต์ใช้วิเคราะห์อุณหภูมิในรูปแบบ 2 มิติ สามารถใช้งานโดยใส่แรงกระทำได้หลากหลาย เช่น การพาความร้อน
3. TARGE169 เป็นตัวแทนของพื้นผิวเป้าหมายที่ใช้คู่กับเอลิเมนต์แบบรอยต่อ ซึ่งในโครงการนี้ใช้บริเวณรอยต่อของคอนกรีตกับเหล็ก

4. CONTAC172 มี 2 องศาเสรี แต่ละจุดต่อเป็นตัวแทนแสดงรอยต่อที่ใช้ร่วมกับเอลิเมนต์ TARGE 169

แนวทางในการสร้างแบบจำลอง ในการโมเดลจะต้องตัดโดยคำสั่ง Cut เพื่อให้หน้าตัดเหล็กแยกออกจากหน้าตัดคอนกรีต และทำการรวมจุดต่อบริเวณรอยต่อระหว่างคอนกรีตกับเหล็กด้วยคำสั่ง Node merged group

3.6 การตรวจสอบผลจาก ANSYS

ในการตรวจสอบว่า ANSYS มีความถูกต้อง นำเชื่อถือ ได้ทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์กับผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact solution) โดยใช้ตัวอย่างของ John, IV และ John, V (2000) ซึ่งจากรูปที่ 2 จะได้ว่าผลลัพธ์ทั้ง 2 มีค่าแตกต่างกันน้อยมาก จึงถือว่า ANSYS มีความถูกต้อง นำเชื่อถือ



รูปที่ 2 ผลลัพธ์จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เทียบกับผลเฉลยแม่นยำตรง

4. การอภิปรายผลการวิเคราะห์

ผลการวิเคราะห์ถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ในส่วนแรกจะพิจารณาผลของ ตัวแปร คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ขนาดของเหล็ก รูปพรรณ รูปร่างของเหล็กรูปพรรณ และความชื้น ด้วยโปรแกรม ANSYS ในส่วนที่ 2 เป็นการเปรียบเทียบผลที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม ANSYS กับ การคำนวณจากสมการที่กำหนดโดย มาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง

4.1 ผลของตัวแปรต่างๆ ต่อ อัตราการทนไฟ

ตัวแปรที่ทำการศึกษา มี 4 ตัวแปร คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ขนาดของเหล็กรูปพรรณ รูปร่างของเหล็กรูปพรรณ และความชื้น โดยทำการวิเคราะห์โดยโปรแกรม ANSYS ซึ่งเป็นโมเดล 2 มิติ ภายใต้สภาวะชั่วคราว (Transient state)

4.1.1 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

ในส่วนของการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ในแต่ละตัวอย่าง จะถูกวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ถูกแบ่งเป็น 2 กรณี คือ Upper bound และ Lower bound ซึ่งจะพบว่าอัตราทนไฟของเสาเหล็กหุ้มคอนกรีตที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนแบบ Upper bound จะมีค่าต่ำกว่าแบบ Lower bound ซึ่งแสดงตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สรุปความสามารถในการทนไฟของเสาเหล็กหุ้มคอนกรีต

| ชนิดและขนาดของเหล็ก รูปพรรณ | ระยะหุ้ม คอนกรีต (ซม) | ความชื้น (%) | อัตราทนไฟ (ชม) | | เปอร์ เซ็นต์ ผลต่าง (%) | เกณฑ์ใน การวิบัติ |
|---|-----------------------------|-----------------|--|--|----------------------------------|--|
| | | | ค่า สัมประสิทธิ์ การนำ ความร้อน Lower bound | ค่า สัมประสิทธิ์ การนำ ความร้อน Upper bound | | |
| หน้าตัดรูป ตัว H 150x150x7x10 (มม) | 5.00 | 0 | 217 | 194 | 11.10 | อุณหภูมิ หน้าตัด เฉลี่ย > 550°C |
| | | 1.5 | 223 | 199 | 11.31 | |
| | | 3 | 229 | 204 | 11.41 | |
| หน้าตัดรูป ตัว H 200x200x8x12 (มม) | 4.00 | 0 | 218 | 197 | 10.13 | อุณหภูมิ ที่จุดหนึ่ง > 620°C |
| | | 1.5 | 224 | 203 | 9.94 | |
| | | 3 | 231 | 208 | 10.48 | |
| หน้าตัดรูป ตัว H 300x300x10x15 (มม) | 2.50 | 0 | 204 | 189 | 7.64 | อุณหภูมิ ที่จุดหนึ่ง > 620°C |
| | | 1.5 | 211 | 195 | 7.51 | |
| | | 3 | 216 | 201 | 7.62 | |
| หน้าตัดรูปกล่อง 150x150x9 (มม) | 5.00 | 0 | 153 | 138 | 10.53 | อุณหภูมิ หน้าตัด เฉลี่ย > 550°C |
| | | 1.5 | 156 | 141 | 10.39 | |
| | | 3 | 160 | 143 | 10.77 | |
| หน้าตัดรูปกล่อง 200x200x9 (มม) | 4.00 | 0 | 128 | 117 | 9.42 | อุณหภูมิ หน้าตัด เฉลี่ย > 550°C |
| | | 1.5 | 130 | 119 | 9.12 | |
| | | 3 | 133 | 121 | 9.39 | |

4.1.2 ผลของขนาดเหล็กต่ออัตราทนไฟ

ในการศึกษาผลของขนาดเหล็กรูปพรรณ ต่อ อัตราทนไฟ โดยตัวอย่างเหล็กรูปตัว H แบ่งออกเป็น 3 ขนาด คือ 150x150 มม. 200x200 มม. และ 300x300 มม ส่วนเหล็กรูปกล่องแบ่งถูกออกเป็น 2 ขนาดคือ 150x150 มม. และ 200x200 มม. ในเหล็กรูปตัว H จะพบว่าเหล็กขนาด 200x200 มม. จะมีค่าอัตราทนไฟสูงที่สุด และ 150x150 มม. มีค่าอัตราทนไฟต่ำสุด และเหล็กรูปกล่อง เหล็กที่มีขนาดเล็กมีอัตราทนไฟที่สูงกว่าซึ่งผลดังกล่าวแสดงในตารางที่ 4 และ 5

ตารางที่ 4 ผลกระทบของขนาดต่ออัตราทนไฟของเหล็กรูปพรรณรูปตัว H

| คุณสมบัติเชิงอุณหภูมิ | | อัตราทนไฟ (นาที) | | | เปอร์เซ็นต์ อัตราทนไฟ ที่เพิ่มขึ้น ของหน้าตัด | เปอร์เซ็นต์ อัตราทนไฟ ที่เพิ่มขึ้น ของหน้าตัด |
|--|------------------|------------------|-----------|-----------|--|--|
| ค่า สัมประสิทธิ์ การนำ ความร้อน | ความ ชื้น (%) | 150 มม | 200 มม | 300 มม | 150x150 มม กับ 200x200 มม (%) | 200x200 มม กับ 300x300 มม (%) |
| Lower bound | 0 | 217 | 218 | 204 | 0.25 | -6.37 |
| | 1.5 | 223 | 224 | 211 | 0.22 | -5.97 |
| | 3 | 229 | 231 | 216 | 0.73 | -6.15 |
| Upper bound | 0 | 194 | 197 | 189 | 1.23 | -4.01 |
| | 1.5 | 199 | 203 | 195 | 1.61 | -3.65 |
| | 3 | 204 | 208 | 201 | 1.67 | -3.43 |

ตารางที่ 5 ผลกระทบของขนาดต่ออัตราทนไฟของเหล็กรูปพรรณรูปกล่อง

| คุณสมบัติเชิงอุณหภูมิ ค่าสัมประสิทธิ์ การนำความร้อน | คุณสมบัติเชิงอุณหภูมิ ความชื้น (%) | อัตราทนไฟ (นาที) | | เปอร์เซ็นต์ที่ลดลง (%) |
|---|---------------------------------------|------------------|---------------|---------------------------|
| | | 150x150 มม | 200x200 มม | |
| Lower bound | 0 | 153 | 128 | -16.28 |
| | 1.5 | 156 | 130 | -16.48 |
| | 3 | 160 | 133 | -16.66 |
| Upper bound | 0 | 138 | 117 | -15.34 |
| | 1.5 | 141 | 119 | -15.40 |
| | 3 | 143 | 121 | -15.50 |

4.1.3 ผลกระทบของรูปร่างเหล็กรูปพรรณต่ออัตราทนไฟ

จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ANSYS จะพบว่าเหล็กรูปตัว H จะมีค่าอัตราทนไฟที่สูงกว่าเหล็กรูปกล่อง โดยเปอร์เซ็นต์ความต่างจะกระจายอยู่ในช่วง 34.09%-53.76% ซึ่งถูกแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลกระทบของขนาดต่อความยาว

| ขนาด ของหน้า ตัดเหล็ก รูปพรรณ | คุณสมบัติเชิงอุณหภูมิ | | Fire resistance rating (min) | | เปอร์เซ็นต์ผลต่าง (%) |
|--|--------------------------------------|-----------------|---------------------------------|---------------------|--------------------------|
| | ค่า สัมประสิทธิ์ การนำความร้อน | ความชื้น (%) | หน้าตัดรูปตัว H | หน้าตัด รูปกล่อง | |
| 150x150 mm | Lower bound | 0 | 217 | 153 | 34.65 |
| | | 1.5 | 223 | 156 | 35.46 |
| | | 3 | 229 | 160 | 35.78 |
| | Upper bound | 0 | 194 | 138 | 34.09 |
| | | 1.5 | 199 | 141 | 34.57 |
| | | 3 | 204 | 143 | 35.16 |
| 200x200 mm | Lower bound | 0 | 218 | 128 | 51.80 |
| | | 1.5 | 224 | 130 | 52.79 |
| | | 3 | 231 | 133 | 53.76 |
| | Upper bound | 0 | 197 | 117 | 51.14 |
| | | 1.5 | 203 | 119 | 52.02 |
| | | 3 | 208 | 121 | 52.75 |

4.1.4 ผลของความชื้นต่ออัตราทนไฟ

จากผลการวิเคราะห์ผลของความชื้น ต่ออัตราทนไฟของตัวอย่างที่มีขนาด รูปร่าง และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเหมือนกัน แต่มีความชื้นต่างกันจะพบว่าเมื่อความชื้นสูงขึ้น การถ่ายโอนความร้อนจะต่ำซึ่งทำให้อัตราทนไฟจะสูงซึ่งผลการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ผลกระทบของความชื้นต่ออัตราทนไฟ

| ชนิดและขนาดของเหล็ก รูปพรรณ | ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน | ความชื้น (%) | | | เปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นจาก 0% เป็น 1.5% (%) | เปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นจาก 1.5% เป็น 3% (%) |
|--------------------------------|------------------------------|--------------|-----|-----|--|--|
| | | 0 | 1.5 | 3 | | |
| 150x150x7x10 mm เหล็กรูปตัว H | Lower bound | 217 | 223 | 229 | 2.80 | 2.52 |
| | Upper bound | 194 | 199 | 204 | 2.58 | 2.42 |
| 200x200x8x12 mm เหล็กรูปตัว H | Lower bound | 218 | 224 | 231 | 2.78 | 3.04 |
| | Upper bound | 197 | 203 | 208 | 2.97 | 2.48 |
| 300x300x10x15 mm เหล็กรูปตัว H | Lower bound | 204 | 211 | 216 | 3.22 | 2.84 |
| | Upper bound | 189 | 195 | 201 | 3.35 | 2.72 |
| 150x150x9 mm เหล็กกล่อง | Lower bound | 153 | 156 | 160 | 1.94 | 2.19 |
| | Upper bound | 138 | 141 | 143 | 2.08 | 1.80 |
| 200x200x9 mm เหล็กกล่อง | Lower bound | 128 | 130 | 133 | 1.69 | 1.96 |
| | Upper bound | 117 | 119 | 121 | 2.00 | 1.68 |

4.2 ผลการวิเคราะห์จาก Finite element กับการคำนวณจากสมการตามมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง 8301-61

สมการที่ มาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง 8301-61 กำหนดให้ใช้ในการคำนวณหาอัตราทนไฟ ถูกแสดงโดยสมการที่ 14, 15 และ 16

$$R_0 = 1.22 \left(\frac{W}{D}\right)^{0.7} + 0.0027 \frac{h^{1.6}}{K_c^{0.2}} \left[1 + 31000 \left(\frac{H}{\rho_c C_c h(L+h)}\right)^{0.8}\right] \quad (14)$$

$$R = R_0(1 + 0.03m) \quad (15)$$

$$H = 0.46W + \frac{\rho_c C_c}{1,000,000} (b_f d - A_s) \quad (16)$$

R = อัตราทนไฟที่สภาวะสมดุล (เซนติเมตร)

R₀ = อัตราทนไฟที่สภาวะไม่มีความชื้น (เซนติเมตร)

m = ปริมาณความชื้นของคอนกรีตหรืออิฐที่สภาวะความชื้นสมดุล (ร้อยละโดยปริมาตร)

W = น้ำหนักเฉลี่ยของเสาเหล็ก (กิโลกรัมต่อเมตร)

D = ระยะเส้นรอบรูปที่ได้รับความร้อน (มิลลิเมตร)

h = ความหนาของคอนกรีต (มิลลิเมตร)

K_c = สภาพการนำความร้อนของคอนกรีต (วัตต์ต่อเมตรต่อองศาเซลเซียส)

H = ความจุความร้อนของเสาเหล็ก (=0.46W)

ρ_c = ความหนาแน่นของคอนกรีต (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

C_c = ความร้อนจำเพาะของคอนกรีต

L = มิติภายในเฉลี่ยของการป้องกันแบบกล่อง (มิลลิเมตร)

โดยคุณสมบัติของคอนกรีตจะใช้ตารางที่ 6

ตารางที่ 8 คุณสมบัติของคอนกรีตตามมาตรฐานมยผ.8301-61 [9]

| | คอนกรีตน้ำหนักปกติ | คอนกรีตมวลเบา |
|-------------------------------------|--------------------|---------------|
| ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/mK) | 1.64 | 0.61 |
| ความร้อนจำเพาะ (kJ/kgK) | 0.84 | 0.84 |
| ความหนาแน่น (kg/m ³) | 2323 | 1762 |
| ความชื้น (%) | 4 | 5 |

โดยอัตราทนไฟของเหล็กรูปตัว H ที่วิเคราะห์จาก ANSYS ตามคุณสมบัติมยผ.8301-61 [9] ซึ่งถูกแสดงในแถวที่ 4 ของตารางที่ 9 จะมีอัตราทนไฟต่ำที่สุด ส่วนอัตราทนไฟที่วิเคราะห์ด้วย ANSYS จากคุณสมบัติของคอนกรีตตาม Eurocode [3], [4] ซึ่งถูกแสดงในแถวที่ 5 ตารางที่ 9 จะมีค่าสูงที่สุด แต่ในกรณีของเหล็กกล่อง การคำนวณจากสมการตามมยผ.8301-61 [9] จะให้ค่าอัตราทนไฟสูงสุดดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 การเปรียบเทียบอัตราทนไฟจากการวิเคราะห์ด้วย ANSYS กับ สมการคำนวณ

| ชนิดและขนาดของเหล็ก รูปพรรณ | ระยะหุ้มคอนกรีต (ซม.) | ความชื้น (%) | อัตราทนไฟ (ซม.) | | เปอร์เซ็นต์ผลต่าง (%) | เกณฑ์ในการวิบัติ |
|---|-----------------------|--------------|--|--|-----------------------|-------------------------------|
| | | | ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน Lower bound | ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน Upper bound | | |
| หน้าตัดรูปตัว H 150x150x7x10 (มม.) ระยะหุ้ม 5 ซม. | 5.00 | 0 | 217 | 194 | 11.10 | อุณหภูมิหน้าตัดเฉลี่ย > 550°C |
| | | 1.5 | 223 | 199 | 11.31 | |
| | | 3 | 229 | 204 | 11.41 | |
| หน้าตัดรูปตัว H 200x200x8x12 (มม.) ระยะหุ้ม 4 ซม. | 4.00 | 0 | 218 | 197 | 10.13 | อุณหภูมิที่จุดหนึ่ง > 620°C |
| | | 1.5 | 224 | 203 | 9.94 | |
| | | 3 | 231 | 208 | 10.48 | |
| หน้าตัดรูปตัว H 300x300x10x15 (มม.) ระยะหุ้ม 2.5 ซม. | 2.50 | 0 | 204 | 189 | 7.64 | อุณหภูมิที่จุดหนึ่ง > 620°C |
| | | 1.5 | 211 | 195 | 7.51 | |
| | | 3 | 216 | 201 | 7.62 | |
| หน้าตัดรูปกล่อง 150x150x9 (มม.) ระยะหุ้ม 5 ซม. | 5.00 | 0 | 153 | 138 | 10.53 | อุณหภูมิหน้าตัดเฉลี่ย > 550°C |
| | | 1.5 | 156 | 141 | 10.39 | |
| | | 3 | 160 | 143 | 10.77 | |
| หน้าตัดรูปกล่อง 200x200x9 (มม.) ระยะหุ้ม 4 ซม. | 4.00 | 0 | 128 | 117 | 9.42 | อุณหภูมิหน้าตัดเฉลี่ย > 550°C |
| | | 1.5 | 130 | 119 | 9.12 | |
| | | 3 | 133 | 121 | 9.39 | |

5. สรุปผล

ในส่วนคือการศึกษาผลของตัวแปร คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ขนาดของเหล็กรูปพรรณ รูปร่างของเหล็กรูปพรรณ และความชื้น

1. เมื่อใช้คอนกรีตที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนแบบ Lower bound จะให้ค่าอัตราการทนไฟที่สูงกว่าแบบ Upper bound เนื่องจากคอนกรีตที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนแบบ Lower bound จะมีความสามารถในการนำความร้อนที่ต่ำ ดังนั้นความร้อนจึงถูกถ่ายโอนได้ช้า โดยเปอร์เซ็นต์ความต่างอัตราการทนไฟของการใช้คอนกรีตทั้งสองแบบมีค่าระหว่าง 7.51% ถึง 11.41%
2. เมื่อพิจารณาผลของขนาดหน้าตัดเหล็กรูปพรรณและระยะหุ้มของคอนกรีตจะพบว่าอัตราการทนไฟจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดหน้าตัดเหล็กรูปพรรณเพิ่มขึ้นหรือระยะหุ้มคอนกรีตเพิ่มขึ้นจากการวิเคราะห์พบว่าผลของระยะหุ้มคอนกรีตมีมากกว่าขนาดของหน้าตัดเหล็ก
3. เมื่อพิจารณาผลของรูปร่างหน้าตัดเหล็ก จะพบว่าหน้าตัดเหล็กรูปกล่องจะมีค่าอัตราการทนไฟที่ต่ำกว่าเหล็กรูปตัว H ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความต่างตกอยู่ในช่วง 34.09% ถึง 53.8% สำหรับเหล็กขนาด 150x150 มม. และ 200x200 มม ตามลำดับ เนื่องจากเหล็กรูปตัว H มีคอนกรีตหุ้มระหว่างปีก ในขณะที่เหล็กรูปกล่องไม่มี
4. ความชื้นที่ต่างกันจะนำมาซึ่งค่าความร้อนจำเพาะที่ต่างกัน เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น ค่าความร้อนจำเพาะก็จะเพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการทนไฟเพิ่มขึ้นด้วย โดยค่าอัตราการทนไฟจะเพิ่มขึ้นเป็นความสัมพันธ์แบบเส้นตรงกับเปอร์เซ็นต์ความชื้น โดยอัตราการเพิ่มขึ้นเฉลี่ยของค่าอัตราการทนไฟต่อเปอร์เซ็นต์ความชื้นมีค่าเท่ากับ 1.74 นาทีต่อเปอร์เซ็นต์ความชื้น สำหรับหน้าตัดเหล็กรูปตัว H และ 3.86 นาทีต่อเปอร์เซ็นต์ความชื้น สำหรับเหล็กรูปกล่อง

ในส่วนสุดท้ายเป็นการเปรียบเทียบผลที่วิเคราะห์ได้จาก ANSYS กับการคำนวณด้วยสมการจากมยผ.8301-61 [9]

1. อัตราการทนไฟที่ได้จากวิธีคำนวณตามมาตรฐานมีค่ามากกว่าจาก ANSYS เมื่อใช้คุณสมบัติของวัสดุตาม มยผ. 8301-61 [9] เนื่องจาก ANSYS ไม่พิจารณาผลของความชื้น
2. อัตราการทนไฟที่ได้จากวิธีคำนวณตามมาตรฐานมีค่าน้อยกว่าจาก ANSYS เมื่อใช้คุณสมบัติของวัสดุตาม Eurocodes [3], [4] ที่ให้ค่าอัตราทนไฟต่ำสุด (ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน = Upper bound, ความชื้น = 0%)
3. อัตราการทนไฟวิกฤตที่สุดที่ได้จากคุณสมบัติ Eurocodes [3], [4] มีค่ามากกว่า 3 ชั่วโมง ซึ่งผ่านเกณฑ์กฎกระทรวงฉบับที่ 60
4. เมื่อเปรียบเทียบอัตราการเพิ่มขึ้นของอัตราทนไฟเมื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์ความชื้น พบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของวิธีคำนวณมาตรฐานมีค่ามากกว่าไฟไนต์เอลิเมนต์

เอกสารอ้างอิง

- [1] American Society of Civil Engineers. (2006). Standard calculation methods for structural fire protection ASCE/SEI/SFPE 29-05. Reston, VA: American Society of Civil Engineer.
- [2] Ansys, Inc. (2018). ANSYS Releases 19.2 Documentation. Canonsburg, PA
- [3] EN 1992-1-2. (2004). Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design. EN 1992.
- [4] EN 1993-1-2. (2005). Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design. EN1993.
- [5] Frank, L. (2005). Lee's loss prevention in the process Industries. Oxford: Butterworth-Heineman
- [6] John, H. L. IV, John, H. L. V. (2000). A heat transfer textbook third edition. Cambridge, Massachusetts, U.S.A.
- [7] Milke, J. A. (2016). Analytical Methods for Determining Fire Resistance of Steel Members.
- [8] Ministry of Interior. (2006). Ministerial regulations No. 60 (B.E. 2549).
- [9] Public Works and Town and Country Planning. (2018). Public Works and Town and Country Planning Standard 8301-61 Standard 8301-61. Bangkok.
- [10] Thunwa C., Witsarud W. (2017). A study on fire resistance rating of concrete-encased steel columns using domestic material. Bangkok: Faculty of Engineering Chulalongkorn university.
- [11] Xiaoyang Mao and V.K.R. Kodur. (2011). Fire resistance of concrete encased steel columns under 3- and 4-side standard heating. Journal of Construction Steel Research 2011, 67:270-080.