

## การทำนายอุณหภูมิภายในหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมด้วยแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

### Prediction of thermal response of FRP-reinforced beam section

ณัฐนุช พูนปาน<sup>1,\*</sup>, ชนะชัย ทองโฉม<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จ.ปทุมธานี

\*Corresponding author; E-mail address: natthanuch.poon@dome.tu.ac.th

#### บทคัดย่อ

บทความนี้ได้ประยุกต์หลักการวิเคราะห์อุณหภูมิในสภาวะชั่วคราวแบบไร้เชิงเส้น 2 มิติ และ 3 มิติ เพื่อศึกษาการกระจายอุณหภูมิของคานคอนกรีตเสริมด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย โดยการศึกษาเป็นการศึกษาผ่านแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม ANSYS โดยสร้างแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ เปรียบเทียบกับผลการทดสอบในอดีตของ Abbasi และ Hogg (2004) และ Rafi และคณะ(2007) และ แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในอดีตของ Kodur และคณะ (2013) ผลการวิเคราะห์จะเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา และอุณหภูมิวิกฤติ โดยค่าของอุณหภูมิวิกฤติที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะใช้ค่าอุณหภูมิวิกฤติของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนเท่ากับ 300°C และ 360°C ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์พบว่า ค่าการวิเคราะห์การกระจายตัวอุณหภูมิใกล้เคียงกับผลการทดสอบและแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในอดีต และทำการศึกษาผลกระทบของความร้อนตามคุณสมบัติของคอนกรีตที่แตกต่างกัน การสร้างแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแบบ 2 มิติ และ 3 มิติมีค่าใกล้เคียงกัน

คำสำคัญ: การวิเคราะห์อุณหภูมิ, อัตราการทนไฟ, คาน, แท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว, ไฟไหม้

#### Abstract

This paper applied 2D and 3D non-linear transient temperature analysis to predict the temperature distribution of fiber-reinforced polymer (FRP) reinforced concrete beams using a commercial finite element program. Using ANSYS software, a 2D and 3D models of fiber-reinforced polymer reinforced concrete beams are constructed. The analytical results are verified with the testing result obtained by Abbasi and Hogg (2004) and Rafi และคณะ (2007) and the experimental results obtained by Kodur et al. (2013). In this research, the temperature distributions at fiber-reinforced polymer is observed. Also, the critical temperature at fiber-reinforced polymer is used in this work. From literature, the value of critical temperature of carbon

and glass fiber-reinforced polymer are 300°C and 360°C, respectively. Based on the results, the obtained temperature distribution of fiber-reinforced polymer reinforced concrete beams agree well with the obtained result from literature. The thermal properties of concrete are studied. The obtained results from 2D and 3D models are similar.

Keywords: Temperature analysis, Fire resistance time, Beam, GFRP, Fire.

#### 1. คำนำ

การใช้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นไปอย่างแพร่หลายในประเทศไทยเพราะการใช้คอนกรีตเสริมเหล็กทำให้โครงสร้างมีความมั่นคงแข็งแรง รวมถึงราคาถูก หาซื้อง่ายตามท้องตลาดแต่เมื่อเวลาผ่านไปโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอาจเกิดการเสื่อมสภาพโดยมีปัจจัยประกอบไปด้วย การออกแบบที่ไม่เหมาะสม การควบคุมการก่อสร้างที่ขาดประสิทธิภาพ การเสื่อมสภาพของโครงสร้างตามอายุการใช้งาน การเสื่อมสภาพเนื่องจากสิ่งแวดล้อม รวมถึงการใช้วัสดุที่ไม่ได้คุณภาพ เป็นต้น โดยปัจจัยดังกล่าวที่เกิดขึ้นส่งผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตทำให้เกิดการซึมผ่านของอากาศและความชื้นจากสภาพแวดล้อม ซึ่งก่อให้เกิดสนิมในเหล็กเสริมได้ เมื่อเหล็กเสริมในคอนกรีตได้เริ่มเกิดสนิมขึ้นแล้ว จะทำให้เพิ่มปริมาตรมากขึ้น กำลังหน้าตัดของเหล็กเสริมลดลง เกิดการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีต และเกิดรอยแตกร้าวหลุดล่อนออกของคอนกรีตที่หุ้มผิวเหล็กเสริมโดยส่งผลให้โครงสร้างขาดความมั่นคงแข็งแรงและมีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกลดลง อัตราการพัฒนารูปการเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีตจะมีปริมาตรมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความรุนแรงของสภาวะแวดล้อมรอบอาคาร ซึ่งทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหายได้

ในปัจจุบันได้มีการใช้วัสดุทางเลือกเพื่อทดแทนเหล็กเสริมที่อาจป้องกันการเกิดสนิมได้ โดยวัสดุที่นำมาใช้คือแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยหรือ Fiber Reinforced Polymer (FRP) โดยทั่วไปนิยมใช้เส้นใย (Fiber) ที่กำลังแรงดึงและค่าโมดูลัสสูงเป็นวัสดุหลักในการรับแรง ตัวอย่างเส้นใยที่นำมาใช้ได้แก่ เส้นใยแก้ว (Glass Fiber) เส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber) เส้นใยอะซอลท์ (Basalt Fiber) และเส้นใยอะรามิด (Aramid Fiber) จึงทำให้วัสดุ FRP มีคุณสมบัติเด่นหลายประการสามารถนำมาใช้ในงานได้หลากหลาย ทั้งในงานอุตสาหกรรมโยธา งานตกแต่ง อุตสาหกรรมเคมี และ สิ่งแวดล้อม เป็นต้น

โดยลักษณะเด่นของ FRP คือ มีน้ำหนักเบา สะดวกในการติดตั้ง มีความต้านทานการกัดกร่อนและทนต่อสารเคมีสูง ไม่นำความร้อนและกระแสไฟฟ้า ต้องการการบำรุงรักษาน้อยและมีความทนทานสูง

การเกิดอัคคีภัยเป็นสิ่งที่ไม่สามารถคาดการณ์ได้เป็นอันตรายสูงต่อการบาดเจ็บทางร่างกายและความเสียหายต่อวัตถุและทรัพย์สิน ดังนั้นในการออกแบบของโครงสร้างที่มีอัตราการทนไฟที่เหมาะสมจะทำให้เมื่อเกิดอัคคีภัยผู้ใช้จะมีเวลาอพยพเพื่อลดการสูญเสียชีวิต ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาอัตราการทนไฟของโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมด้วยแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วที่เป็นวัสดุทางเลือก

## 2. การทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 พอลิเมอร์เสริมเส้นใย (Fiber Reinforced Polymer, FRP)

พอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ใช้ในปัจจุบันมีหลายประเภท ขึ้นอยู่กับเส้นใยที่ใช้ในกระบวนการผลิต เช่น พอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber-reinforced Polymer, CFRP) คือ พอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบโครงสร้างหลัก, พอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (Glass Fiber-reinforced Polymer, GFRP) คือ พอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่มีแก้วเป็นส่วนประกอบโครงสร้างหลัก, พอลิเมอร์เสริมเส้นใยบะซอลต์ (Basalt Fiber-reinforced Polymer, BFRP) คือ พอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่มีเส้นใยบะซอลต์เป็นส่วนประกอบหลัก, พอลิเมอร์เสริมเส้นใยอะรามิด (Aramid Fiber-reinforced Polymer, AFRP) คือ พอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่มีเส้นใยอะรามิดเป็นส่วนประกอบหลัก เป็นต้น

คุณสมบัติของ Fiber Reinforced Polymer มีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมและการกัดกร่อนต่อสารเคมี ไม่สามารถนำความร้อนและกระแสไฟฟ้า มีความแข็งแรงสูง น้ำหนักเบา และมอดูลัสความยืดหยุ่นต่ำ

### 2.2 คุณสมบัติเชิงความร้อนของคอนกรีต

#### 2.2.1 คุณสมบัติเชิงความร้อนของคอนกรีต EN 1992-1-2 (2004)

โดยคุณสมบัติเชิงความร้อนของคอนกรีตปกติ (Normal weight concrete) จะแปรผันตามอุณหภูมิและชนิดของมวลรวม (Aggregate Type) โดยสามารถแบ่งชนิดของมวลรวม 2 กลุ่มได้แก่ มวลรวมเนื้อซิลิกา (Siliceous aggregates) และมวลรวมเนื้อปูน (Carbonate aggregates) โดยมวลรวมเนื้อปูนมีองค์ประกอบหลักคือแร่โดโลไมต์ (Dolomite) มีสูตรโครงสร้างเป็น  $CaMg(CO_3)_2$  หรือ แร่คาร์บอเนต (Carbonate) มีสูตรโครงสร้างเป็น  $CaCO_3$  ได้แก่ หินปูน หินโดโลไมต์ หินบะซอลต์ เป็นต้น ส่วนมวลรวมเนื้อซิลิกามีแร่ซิลิกา (Silica) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีสูตรโครงสร้างเป็น  $SiO_2$  ได้แก่ หินควอตซ์ หินแกรนิต และกรวดแม่น้ำ เป็นต้น สำหรับการวิเคราะห์นี้จะอ้างอิงคุณสมบัติเชิงความร้อนของคอนกรีตปกติ จากมาตรฐาน EN 1992-1-2 (2004) [4] ได้แก่ คุณสมบัติการนำความร้อน (Thermal conductivity) ความร้อนจำเพาะ (Specific heat) และความหนาแน่น (Density) ของคอนกรีตที่อยู่ภายใต้อุณหภูมิสูง

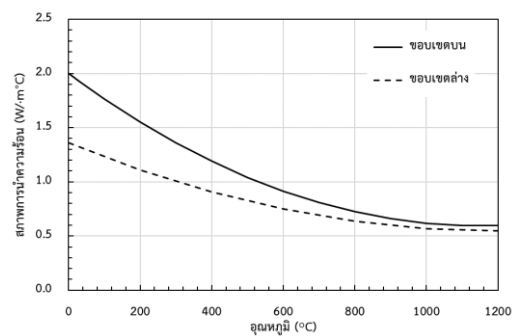
คุณสมบัติการนำความร้อนของคอนกรีต EN 1992-1-2 (2004) [4] กำลังปรกติได้มีการนำเสนอให้ใช้ค่าที่อยู่ระหว่างช่วงขีดจำกัดบน (Upper limit) และขีดจำกัดล่าง (Lower limit) ในช่วงอุณหภูมิ 30-1200°C เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุผสม (Composite material) ดังสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ ดังรูปที่ 1

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

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

โดยที่  $k$  = สภาพการนำความร้อนของคอนกรีต (W/m·K)

$T_c$  = อุณหภูมิของตัวคอนกรีต (°C)



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างการนำความร้อนของตัวคอนกรีตและอุณหภูมิ [4]

ความร้อนจำเพาะของคอนกรีต EN 1992-1-2 (2004) [4] ปรกติจะแปรผันตามค่าความชื้นในคอนกรีตและอุณหภูมิ สำหรับคอนกรีตในภาวะแห้ง (ความชื้น 0%) ในช่วงอุณหภูมิ 30-1200°C ได้เสนอดังสมการที่ (3) ดังรูปที่ 2

$$c_c = 900 \quad ; \quad 30^\circ\text{C} \leq T_c \leq 100^\circ\text{C}$$

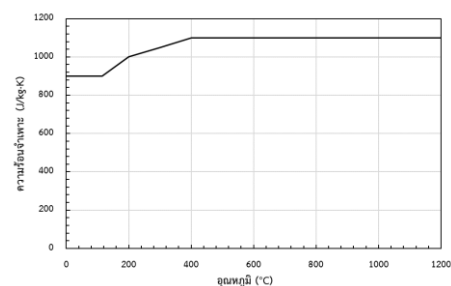
$$c_c = 900 + (T_c - 100) \quad ; \quad 100^\circ\text{C} < T_c \leq 200^\circ\text{C} \quad (3)$$

$$c_c = 1000 + \frac{(T_c - 200)}{2} \quad ; \quad 200^\circ\text{C} < T_c \leq 400^\circ\text{C}$$

$$c_c = 1100 \quad ; \quad 400^\circ\text{C} < T_c \leq 1200^\circ\text{C}$$

โดยที่  $c_c$  = ความร้อนจำเพาะของตัวคอนกรีต ( $J / Kg \cdot K$ )

$T_c$  = อุณหภูมิของตัวคอนกรีต (°C)



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนจำเพาะของตัวคอนกรีตและอุณหภูมิ [4]

ค่าความหนาแน่นของคอนกรีต EN 1992-1-2 (2004) [4] จะมีการแปรผันตามอุณหภูมิโดยมีค่าลดลงเนื่องจากการสูญเสียน้ำภายในของตัวคอนกรีตดังสมการที่ (4) ดังรูปที่ 3

$$p_c = p_{c,30^\circ C} \quad ; \quad 30^\circ C \leq T_c \leq 115^\circ C$$

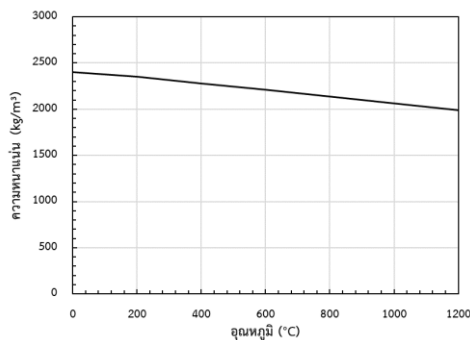
$$p_c = p_{c,30^\circ C} \left( 1 - 0.02 \frac{T_c - 115}{85} \right) \quad ; \quad 115^\circ C < T_c \leq 200^\circ C \quad (4)$$

$$p_c = p_{c,30^\circ C} \left( 0.98 - 0.03 \frac{T_c - 200}{200} \right) \quad ; \quad 200^\circ C < T_c \leq 400^\circ C$$

$$p_c = p_{c,30^\circ C} \left( 0.98 - 0.03 \frac{T_c - 200}{200} \right) \quad ; \quad 400^\circ C < T_c \leq 1200^\circ C$$

โดยที่  $p_c$  = ความหนาแน่นของตัวคอนกรีตที่อุณหภูมิ ( $J / Kg \cdot K$ )  
 $p_{c,30^\circ C}$  = ความหนาแน่นของตัวคอนกรีตที่อุณหภูมิห้อง ( $30^\circ C$ )  
 โดยมาตรฐานใช้ค่า  $2400 \text{ kg/m}^3$

$$T_c = \text{อุณหภูมิของตัวคอนกรีต } (^\circ C)$$



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของตัวคอนกรีตและอุณหภูมิ [4]

### 2.2.2 คุณสมบัติเชิงความร้อนของคอนกรีต ASCE Manual 1992

คุณสมบัติการนำความร้อน ตามมาตรฐาน ASCE Manual 1992 [2]

ดังรูปที่ 4

Siliceous aggregate concrete

$$k_c = \begin{cases} -0.000625T + 1.5, & 20^\circ C \leq T \leq 800^\circ C \\ 1.0, & 400^\circ C < T, \end{cases} \quad (5)$$

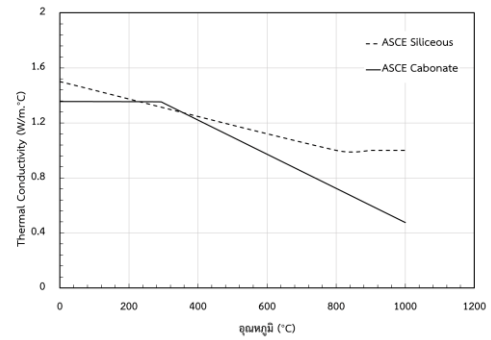
Carbonate aggregate concrete

$$k_c = \begin{cases} 1.335, & 20^\circ C \leq T \leq 293^\circ C \\ -0.001241T + 1.7162, & 293^\circ C < T. \end{cases} \quad (6)$$

โดยที่  $k_c$  = สภาพการนำความร้อนของคอนกรีต

( $W / m \cdot K$ )

$$T = \text{อุณหภูมิของตัวคอนกรีต } (^\circ C)$$



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างการนำความร้อนของตัวคอนกรีตและอุณหภูมิ [2]

ความจุความร้อน ตามมาตรฐาน ASCE Manual 1992 [2] ดังรูปที่ 5

Siliceous aggregate concrete

$$\rho c = \begin{cases} 0.005T + 1.7, & 20^\circ C \leq T \leq 200^\circ C \\ 2.7, & 200^\circ C < T \leq 400^\circ C \\ 0.013T - 2.5, & 400^\circ C < T \leq 500^\circ C \\ 10.5 - 0.013T, & 500^\circ C < T \leq 600^\circ C \\ 2.7, & 600^\circ C < T. \end{cases} \quad (7)$$

Carbonate aggregate concrete

$$\rho c = \begin{cases} 2.566, & 20^\circ C \leq T \leq 400^\circ C \\ 0.1765T - 68.034, & 400^\circ C < T \leq 410^\circ C \\ 25.00671 - 0.05043T, & 410^\circ C < T \leq 445^\circ C \\ 2.566, & 445^\circ C \leq T \leq 500^\circ C \\ 0.016635T - 5.44881, & 500^\circ C < T \leq 635^\circ C \\ 0.16635T - 100.90225, & 635^\circ C < T \leq 715^\circ C \\ 176.07343 - 0.22103T, & 715^\circ C < T \leq 785^\circ C \\ 2.566, & 785^\circ C < T. \end{cases} \quad (8)$$

โดยที่

$$\rho c = C_c \times p_c$$

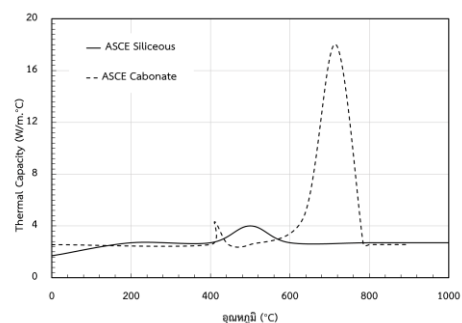
$p_c$  = ความหนาแน่นของตัวคอนกรีตที่อุณหภูมิ

( $J / Kg \cdot K$ )

$C_c$  = ความร้อนจำเพาะของตัวคอนกรีต

( $J / Kg \cdot K$ )

$T$  = อุณหภูมิของตัวคอนกรีต ( $^\circ C$ )



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนจำเพาะของตัวคอนกรีตและอุณหภูมิ [2]

2.2.3 คุณสมบัติเชิงความร้อนของคอนกรีต Kodur and Sultan (2014)

คุณสมบัติการนำความร้อน (Thermal conductivity) ตามมาตรฐาน

Kodur and Sultan(2014) [7] ดังรูปที่ 6

Siliceous aggregate concrete

$$k_c = \{0.85(2 - 0.0011T), \quad 20^\circ\text{C} \leq T \leq 1000^\circ\text{C} \quad (9)$$

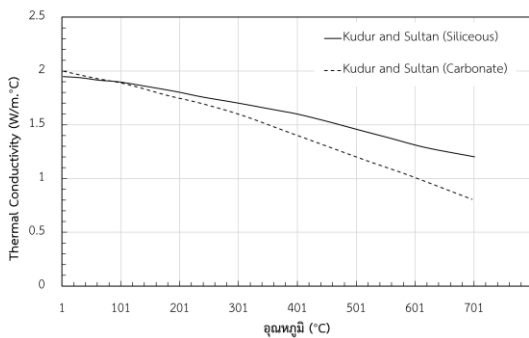
Carbonate aggregate concrete

$$k_c = \begin{cases} 0.85(2 - 0.0011T), & 20^\circ\text{C} \leq T \leq 300^\circ\text{C} \\ 0.85(2.21 - 0.002T), & 300^\circ\text{C} < T. \end{cases} \quad (10)$$

โดยที่  $k_c$  = สภาพการนำความร้อนของคอนกรีต

(W / m · K)

$T$  = อุณหภูมิของตัวคอนกรีต (°C)



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างการนำความร้อนของตัวคอนกรีตและอุณหภูมิ [7]

ความจุความร้อน (Thermal Capacity) Kodur and Sultan(2014)

[7] ดังรูปที่ 7

Siliceous aggregate concrete

$$\rho c = \begin{cases} 0.005T + 1.7, & 20^\circ\text{C} \leq T \leq 200^\circ\text{C} \\ 2.7, & 200^\circ\text{C} < T \leq 400^\circ\text{C} \\ 0.013T - 2.5, & 400^\circ\text{C} < T \leq 500^\circ\text{C} \\ 10.5 - 0.013T, & 500^\circ\text{C} < T \leq 600^\circ\text{C} \\ 2.7, & 600^\circ\text{C} < T. \end{cases} \quad (11)$$

Carbonate aggregate concrete

$$\rho c = \begin{cases} 2.45, & 20^\circ\text{C} \leq T \leq 400^\circ\text{C} \\ 0.026T - 12.85, & 400^\circ\text{C} < T \leq 475^\circ\text{C} \\ 0.0143T - 6.295, & 475^\circ\text{C} < T \leq 650^\circ\text{C} \\ 0.1894T - 120.11, & 650^\circ\text{C} \leq T \leq 735^\circ\text{C} \\ -0.263T + 212.4, & 735^\circ\text{C} < T \leq 800^\circ\text{C} \\ 2, & 800^\circ\text{C} < T \leq 1000^\circ\text{C}. \end{cases} \quad (12)$$

โดยที่  $\rho c = C_c \times p_c$

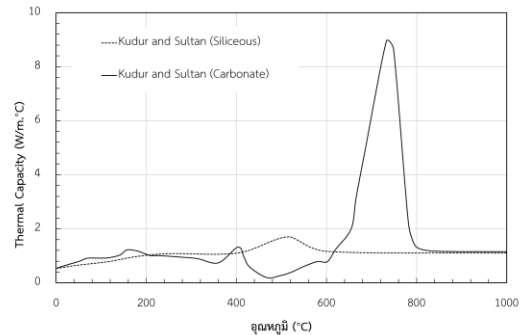
$p_c$  = ความหนาแน่นของตัวคอนกรีตที่อุณหภูมิ

(J / Kg · K)

$C_c$  = ความร้อนจำเพาะของตัวคอนกรีต

(J / Kg · K)

$T$  = อุณหภูมิของตัวคอนกรีต (°C)



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนจำเพาะของตัวคอนกรีตและอุณหภูมิ [7]

2.3 พฤติกรรมของคอนกรีตเสริมด้วยแท่งพอลิเมอร์ภายใต้สภาวะเพลิงไหม้

Sakashita และคณะ(1997) [9] ดำเนินการทดสอบไฟบนคานคอนกรีต 11 คานเสริมด้วยเหล็กเส้น FRP ประเภทต่างๆ คานทดสอบได้ทำการจัดหมวดหมู่ตามประเภทเส้นใย (Aramid ,Glass และ Carbon) และประเภทของเส้นใย (เส้นใยเกลียว,เส้นใยตรงและ เส้นใยถัก) ของเหล็กเส้น FRP จากผลการทดสอบระบุว่าคานเสริมด้วยเหล็กเส้น CFRP สามารถทนไฟได้มากที่สุดตามด้วยคานเสริมด้วยเหล็กเส้น GFRP และคานเสริมด้วยเหล็กเส้น AFRP นอกจากนี้คานที่มีเหล็กเส้นเส้นใยเกลียวหรือตรงให้ความต้านทานไฟนานกว่าคานที่มีเหล็กเส้นเส้นใยถัก จากการเปรียบเทียบเหล่านี้วิจัยสรุปว่าคานคอนกรีตที่มีเหล็กเส้น FRP อาจทนต่อไฟได้คล้ายกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป

Abbasi และ Hogg(2004) [1] ดำเนินการทดสอบไฟบนคานคอนกรีตสองคานขนาด (350 × 400 มม.) เสริมด้วยเหล็กเส้น GFRP ประเภทต่างๆ พาราเมเตอร์ที่พิจารณาในการทดสอบรวมถึงประเภทเรซิน (เทอร์โมเซตและเทอร์โมพลาสติก) ขนาดเหล็กเส้น และแรงเฉือน (GFRP และ เหล็กปลอก) ในการทดสอบไฟบนคานคอนกรีตทั้งสองแสดงการตอบสนองการโค้งตัวของน้ำหนักบรรทุกและคานทั้งสองเกิดการวิบัติเนื่องจากการ หลุดร่อนของเหล็กเส้น FRP รอบๆคอนกรีต โดยคานที่เสริมด้วยเหล็ก เทอร์โมเซต FRP สามารถทนไฟได้ 128 นาทีในขณะที่ คานที่เสริมด้วยเหล็กเทอร์โมพลาสติก FRP สามารถทนไฟได้ 94 นาที ดังนั้นงานวิจัยนี้สรุปว่าระยะหุ้มคอนกรีตที่เพียงพอมีผลต่อความสามารถทนไฟของคานคอนกรีตที่มีเหล็กเส้นเสริม GFRP

Rafi และคณะ(2007) [8] ดำเนินการทดสอบไฟบนคานคอนกรีตสองคานที่เสริมด้วยเหล็กเส้น CFRP (120 × 200 มม.) ภายใต้สภาวะไฟมาตรฐาน ISO 834 คานทั้งสองถูกทดสอบภายใต้แรงกระทำเท่ากับ 40% ของอุณหภูมิห้อง ในการทดสอบไฟอุณหภูมิในเหล็กเส้น CFRP เกิน 500 °C ที่ประมาณ 50 นาที และเรซินของเหล็กเส้น CFRP ประเมินได้จากรอยแตกที่โดยคานทั้งสองมีอัตราการทนไฟได้ 51 และ 63 นาทีตามลำดับ ดังนั้นจาก

ผลการทดสอบพบว่าสรุปว่าคานคอนกรีตเสริมด้วยเหล็กเส้น CFRP สามารถทำงานได้ดีภายใต้สภาวะเพลิงไหม้เมื่อเปรียบเทียบกับคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

Kodur และคณะ (2005) [6] ได้ดำเนินการทดสอบคานคอนกรีตเสริมด้วยพอลิเมอร์โดยทำการทดสอบผลจากห้องปฏิบัติการและการทดสอบจากโปรแกรม โดยการศึกษาจากห้องปฏิบัติการทำการศึกษาพื้นที่ทั้งหมด 12 ตัวอย่างที่เสริมด้วย เหล็กเสริม, GFRP และ CFRP โดยผลที่ได้จากการศึกษาความหนาของแผ่นพื้นไม่มีผลต่อการทนไฟ ระยะหุ้มเหล็กมีผลอย่างมากต่อการทนไฟ มวลรวมของคอนกรีตมีผลปานกลางต่อการทนไฟ อัตราการทนไฟของเหล็กเสริมมีมากกว่าการเสริมด้วยพอลิเมอร์ โดยการศึกษาจากโปรแกรมทำการศึกษาพื้นที่ทั้งหมด 12 ตัวอย่างที่เสริมด้วยเหล็กเสริม, GFRP และ CFRP ผลที่ได้จากการทดสอบต้องคำนึงถึงอุณหภูมิวิกฤตโดย อุณหภูมิวิกฤตของเหล็กเสริม, CFRP และ GFRP คือ 593°C 250 °C 325 °C ตามลำดับผลที่ได้จากการศึกษาความหนาของแผ่นพื้นไม่มีผลต่อการทนไฟ ระยะหุ้มเหล็กมีผลอย่างมากต่อการทนไฟ มวลรวมของคอนกรีตมีผลปานกลางต่อการทนไฟ อัตราการทนไฟของเหล็กเสริมมีมากกว่าการเสริมด้วยพอลิเมอร์

Kodur และคณะ (2013) [10] ได้ดำเนินการทดสอบด้วยโปรแกรม ANSYS โดยทำการศึกษาคานทั้งหมด 5 กลุ่ม มีหน้าตัด 305x533 มม. ยาว 6.01 ม. ทำการเสริม เหล็กเส้น, GFRP และ CFRP เหล็กรับแรงอัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มม. จำนวน 2 แท่ง การวิเคราะห์คานรับน้ำหนักแบบกระจายตัวสมมาเสมอ 50% ของอุณหภูมิห้องโดยทำการทดสอบทั้งหมด 5 กลุ่มโดยผลที่ได้จากการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถทนไฟได้มากกว่าคานคอนกรีตเสริมด้วยพอลิเมอร์ ระยะหุ้มเหล็กมีผลต่อการต้านทานไฟโดยระยะหุ้มที่เพิ่มขึ้นทุกๆ 13 มม. จะสามารถต้านทานไฟได้เพิ่มมากขึ้น 5 นาที การยึดเหนี่ยวของคานตามแนวแกนทำให้ความต้านทานไฟของคานสูงขึ้น 5-30 นาที คานคอนกรีตที่เสริมด้วยพอลิเมอร์ CFRP และ GFRP ที่ติดตั้งฉนวนความร้อนสามารถทนไฟได้ 150 นาที

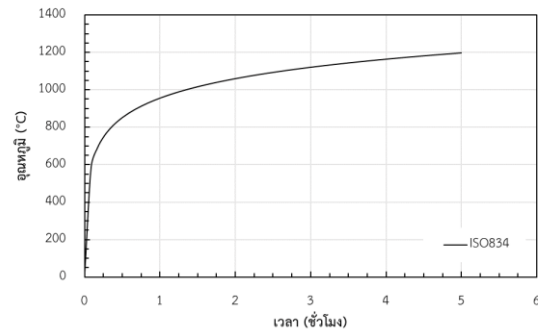
#### 2.4 กราฟไฟสำหรับวิเคราะห์อุณหภูมิ

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการทดสอบการหาอัตราการทนไฟเพื่อประเมินค่าความสามารถของชิ้นส่วนโครงสร้างของอาคารเรียกว่า “เพลิงไหม้มาตรฐาน” ซึ่งค่ามาตรฐานของการทดสอบอัตราการทนไฟได้มีการอ้างอิงจากกราฟไฟมาตรฐาน ได้แก่ ISO 834 (ISO 1999) [10] ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการทดสอบอัตราการทนไฟตามมาตรฐาน ISO 834 [5] สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 13

$$T_f = 20 + 345 \log_{10}(480t + 1) \quad (13)$$

โดยที่  $t$  = เวลา (ชั่วโมง)

$T_f$  = อุณหภูมิของตัวคอนกรีต (°C)



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ISO 834 [5]

#### 2.5 อัตราการทนไฟ (Fire resistance)

โดยในการทดสอบอัตราการทนไฟมาตรฐานนั้นจะต้องคำนึงถึงเกณฑ์การเสียรูป 2 ข้อ ในเกณฑ์แรก เวลาที่ใช้ในการทนไฟเป็นเวลาที่อยู่ของเหล็กเสริมถึงค่าวิกฤต 593 °C [12] ในเกณฑ์ที่สอง การเสียรูปจะเกิดขึ้นเมื่อการโก่งตัวของคานเกิน  $\frac{L}{20}$  (โดยที่ L คือ ความยาวของคาน) และ อัตราการโก่งตัวเกินอัตราการโก่งตัวที่จำกัด  $\frac{L^2}{9000d}$  (มม./นาที) d คือความลึกของคานและเกณฑ์การทนไฟของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (GERP) กับเกณฑ์การทนไฟของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (CERP) มีอุณหภูมิวิกฤต คือ 300°C 360°C [10] ตามลำดับ

#### 2.6 สมการควบคุมสำหรับวิเคราะห์อุณหภูมิ

ในการส่งผ่านความร้อนความร้อนจะมีการส่งผ่านจากกราฟไฟสู่พื้นผิวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการการแผ่รังสีความร้อน และพาความร้อนจากพื้นที่ผิวของตัวคานคอนกรีตเสริมเหล็กเข้าไปด้านในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ด้วยวิธีการนำความร้อน ซึ่งเป็นการนำความร้อนชั่วคราว (Transient heat conduction) ในปริภูมิ 2 มิติ (x,y) ของคอนกรีต เป็นไปดังสมการที่ (14) [12]

$$k(T) \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] = \rho(T)c(T) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (14)$$

โดยมีเงื่อนไขขอบเขตของสมการสามารถแสดงในสมการที่ (15)

$$-k(T) \left[ \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \frac{\partial T}{\partial y} n_y \right] = h[T_f - T_s] + \epsilon_{res} \sigma (T_f + 273)^4 - (T_s + 273)^4 \quad (15)$$

โดย  $k(T)$  = สภาพนำความร้อนของตัวคอนกรีตที่แปรผันตามอุณหภูมิ

( $W / m^2 \cdot ^\circ C$ )

$\rho(T)$  = ความหนาแน่นของตัวคอนกรีตที่แปรผันตามอุณหภูมิ

( $kg / m^3 \cdot ^\circ C$ )

$c(T)$  = ความร้อนจำเพาะของตัวคอนกรีตที่แปรผันตามอุณหภูมิ

( $J / kg \cdot ^\circ C$ )

$h$  = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $W / m^2 \cdot ^\circ C$ )



$T_f$  = ความร้อนจากกราฟไฟที่ใช้ในการวิเคราะห์โดยแปรผันตามเวลา (°C)

$T_s$  = ความร้อนที่พื้นผิวของตัวคอนกรีต (°C)

$\epsilon_{res}$  = สภาพเปล่งรังสีลัทธิ (ไม่มีหน่วย)

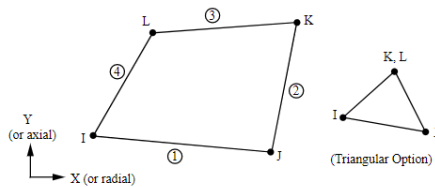
$\sigma$  = ค่าคงที่ของสแตฟาน-โบลต์ซมันน์  
( $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{k}^4$ )

$n_x, n_y$  = ทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวของคอนกรีตในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ

### 3. แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิ

#### 3.1 การวิเคราะห์อุณหภูมิคอนกรีต 2 มิติ

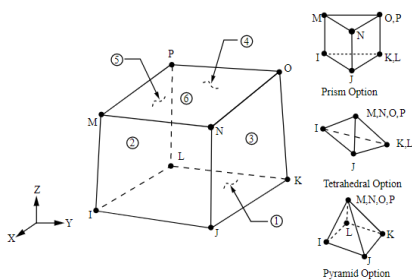
แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิกำหนดโดยใช้การวิเคราะห์จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม ANSYS [3] แบบ 2 มิติ โดยมีการเลือกเอลิเมนต์ของคอนกรีตเป็น PLANE55[3] สามารถใช้เป็นองค์ประกอบระนาบหรือเป็นองค์ประกอบวงแหวนแกนสมมาตรที่มีความสามารถในการนำความร้อนแบบ 2 มิติ องค์ประกอบมี 4 โหนดที่มีระดับความเป็นอิสระ อุณหภูมิ ที่แต่ละโหนดองค์ประกอบนี้ใช้ได้กับการวิเคราะห์เชิงความร้อนแบบ 2 มิติ สภาวะคงตัว หรือชั่วคราว



รูปที่ 9 ลักษณะของเอลิเมนต์ PLANE55 ที่ใช้ในการวิเคราะห์อุณหภูมิ [3]

#### 3.2 การวิเคราะห์อุณหภูมิคอนกรีต 3 มิติ

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิกำหนดโดยใช้การวิเคราะห์จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม ANSYS [3] แบบ 2 มิติ โดยมีการเลือกเอลิเมนต์ของคอนกรีตเป็น SOLID70[3] มีความสามารถในการนำความร้อนแบบ 3 มิติ องค์ประกอบมีแปดโหนดที่มีระดับความเป็นอิสระ อุณหภูมิ ที่แต่ละโหนด องค์ประกอบนี้ใช้ได้กับการวิเคราะห์เชิงความร้อนแบบสามมิติ สภาวะคงตัว หรือชั่วคราว

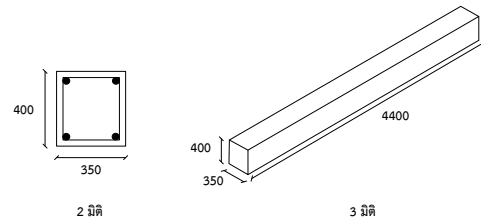


รูปที่ 10 ลักษณะของเอลิเมนต์ SOLID70 ที่ใช้ในการวิเคราะห์อุณหภูมิ [3]

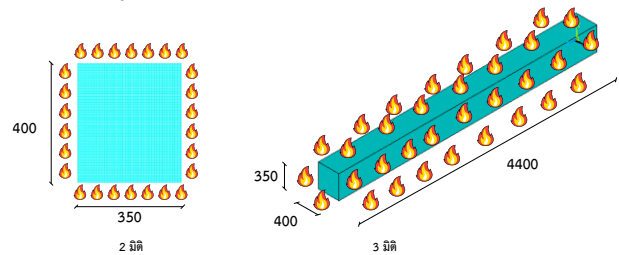
### 4. การเปรียบเทียบจำลองกับผลการทดสอบในอดีต

#### 4.1 แบบจำลอง Abbasi และ Hogg (2004)

Abbasi และ Hogg (2004) [1] ทำการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เทียบกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในอดีต Kodur และคณะ(2013) [10] ที่มีคุณสมบัติของวัสดุขนาดของคานเช่นเดียวกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ตาม Abbasi และ Hogg (2004) [1] โดยคานคอนกรีตที่เสริมด้วยแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วมีความสูง 400 มม. ความกว้าง 350 มม. ความยาว 4400 มม. โดยทำการเปรียบเทียบที่แท่ง GFRP ของคานคอนกรีตที่ตำแหน่งระยะหุ้ม 50 มม. เปรียบเทียบอุณหภูมิวิกฤติของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วที่อุณหภูมิ 300°C โดยทำการสร้างแบบจำลองแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ โดยกำหนดไฟเข้าทั้งหมด 4 สำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิในโปรแกรม ANSYS [3] มีการใช้ความหนาแน่นของคอนกรีตตาม EN1992-1-2 (2004) [4] ของคอนกรีตอุณหภูมิห้องเริ่มต้นคือ 20°C ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ISO834 [5]

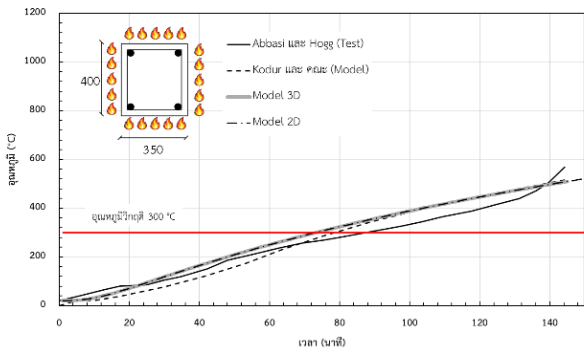


รูปที่ 11 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (หน่วย : มม.)



รูปที่ 12 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (หน่วย : มม.)

ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิที่คอนกรีตแบบ 2 มิติ และ 3 มิติโดยทำการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 2 มิติ และ 3 มิติกับผลการทดสอบและแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในอดีตโดยทำการเปรียบเทียบที่คอนกรีต ณ ตำแหน่งแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วเปรียบเทียบกับอุณหภูมิกับเวลาที่อุณหภูมิวิกฤติของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วที่อุณหภูมิ 300°C กับแบบจำลองทั้ง 2 มิติ และ 3 มิติที่มีความใกล้เคียงกับผลการทดสอบ Abbasi และ Hogg(2004) [1] และแบบจำลองแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในอดีต Kodur และคณะ(2013) [10] โดยทำการวัดอุณหภูมิที่กลางคานคอนกรีต ตำแหน่งระยะหุ้ม 50 มม. ผลที่ได้เมื่อเปรียบเทียบที่ระยะหุ้มค่าที่ระยะหุ้ม 50 มม. มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบและแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในอดีต ดังภาพที่ 13 และตารางที่ 2



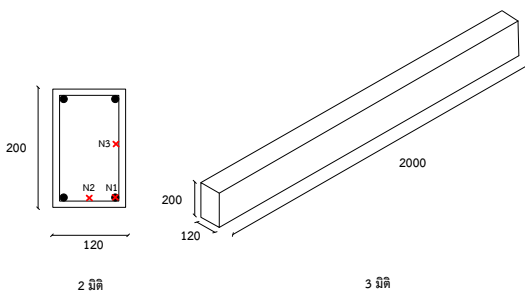
รูปที่ 13 ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิด้วยโปรแกรม ANSYS แบบ 2 มิติ และ 3 มิติ

ตารางที่ 1 รายละเอียดคานที่ใช้ทดสอบ

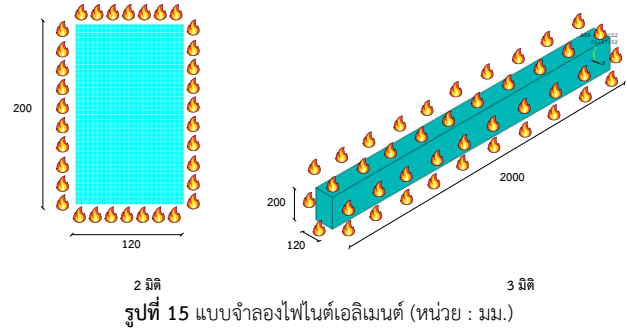
ตัวอย่างคาน	ระยะหุ้ม (มม.)	2มิติ	3มิติ
		$(T_{cr} = 300^{\circ}C)$ เวลา (นาที)	
Test Abbasi และ Hogg (2004)	50	138.9	-
Model Kodur และ คณะ (2013)	50	56.5	-
Model	50	97	97

#### 4.2 แบบจำลอง Rofi และคณะ(2007)

ทำการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เทียบกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในอดีต Kodur และคณะ(2013) [10] ที่มีคุณสมบัติของวัสดุขนาดของคานเช่นเดียวกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ตาม Rafi และคณะ(2007) [8] โดยคานคอนกรีตที่เสริมด้วยแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนมีความสูง 200 มม. ความกว้าง 120 มม. ความยาว 2000 มม. โดยทำการเปรียบเทียบที่แท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนของคานคอนกรีตที่ตำแหน่งระยะหุ้ม 20 มม.(N1) ตำแหน่งเหล็กตรงกึ่งกลางคานด้านกว้าง (N2) และด้านสูง (N3) โดยเปรียบเทียบอุณหภูมิวิกฤติของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนที่อุณหภูมิ 360°C โดยทำการสร้างแบบจำลองแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ โดยกำหนดไฟเข้าทั้งหมด 4 สำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิในโปรแกรม ANSYS [3] มีการใช้ความหนาแน่นของคอนกรีตตาม EN1992-1-2 [4] ของคอนกรีตอุณหภูมิห้องเริ่มต้นคือ 20°C ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ISO834 [5]

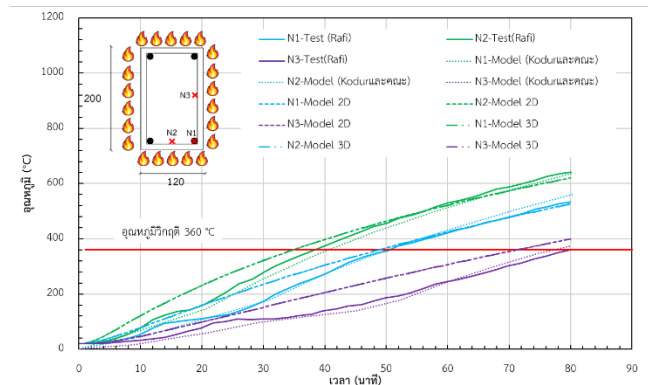


รูปที่ 14 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (หน่วย : มม.)



รูปที่ 15 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (หน่วย : มม.)

ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิที่คอนกรีตแบบ 2 มิติ และ 3 มิติโดยทำการการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 2 มิติ และ 3 มิติกับการทดสอบและแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในอดีตโดยทำการเปรียบเทียบที่คอนกรีต ณ ตำแหน่งแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนเปรียบเทียบอุณหภูมิกับเวลาที่อุณหภูมิวิกฤติของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนที่อุณหภูมิ 360°C กับแบบจำลองทั้ง 2 มิติ และ 3 มิติที่มีความใกล้เคียงกับการทดสอบ Rafi และคณะ(2007) [8] และแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในอดีต Kodur และคณะ (2013) [10] โดยทำการวัดอุณหภูมิที่กลางคานคอนกรีตตำแหน่งระยะหุ้ม 20 มม. (N1) ตำแหน่งเหล็กตรงกึ่งกลางคานด้านกว้าง(N2) และด้านสูง (N3) ผลที่ได้เมื่อเปรียบเทียบที่ตำแหน่งระยะหุ้ม 20 มม. (N1) ตำแหน่งเหล็กตรงกึ่งกลางคานด้านกว้าง (N2) และด้านสูง (N3) มีค่าใกล้เคียงกับการทดสอบและแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในอดีตดังรูปที่ 16 และตารางที่ 2



รูปที่ 16 ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิด้วยโปรแกรม ANSYS แบบ 2 มิติ และ 3 มิติ

ตารางที่ 2 รายละเอียดคานที่ใช้ทดสอบ

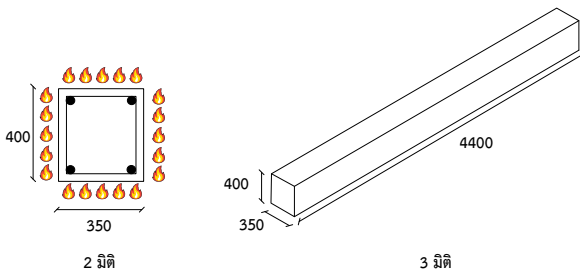
ตัวอย่างคาน	ระยะหุ้ม (มม.)	2มิติ	3มิติ
		$(T_{cr} = 360^{\circ}C)$ เวลา (นาที)	
Rafi และคณะ(2007)	N1	51.59	-
	N2	65.73	-
	N3	80.03	-
Model Kodur และคณะ (2013)	N1	48.13	-
	N2	50.62	-
	N3	80.18	-
Model	N1	49	49
	N2	35	35
	N3	72	72

## 5. ผลกระทบของความร้อนตามคุณสมบัติของคอนกรีตที่แตกต่างกัน

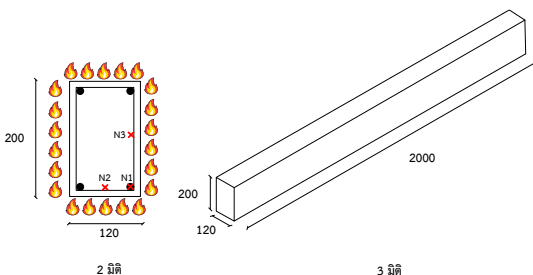
ทำการสร้างแบบจำลอง 2 มิติ และ 3 มิติด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม ANSYS เพื่อตรวจสอบอัตราการทรนไฟภายใต้เกณฑ์อุณหภูมิวิกฤติของแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วมีความสูง 400 มม. ความกว้าง 350 มม. Abbasi และ Hogg (2004) [1] ดังรูปที่ 17 และแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนสูง 200 มม. ความกว้าง 120 มม. Rafi และคณะ(2007) [8] ดังรูปที่ 18 โดยมีไฟเข้าทั้งหมด 4 ด้าน ใช้คุณสมบัติของคอนกรีตตาม EN-1992-1-2 (2004) [4] ASCE Manual 1992 [2] และ Kodur and Sultan (2014) [7] ที่อุณหภูมิเริ่มต้น 30 °C ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ISO834 [5] ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 รายละเอียดคานที่ใช้ทดสอบ

คาน	EN-1992-1-2 (2004)	ASCE Manual 1992 (Si)	ASCE Manual 1992 (Ca)	Kodur and Sultan (2014)
Abbasi และ Hogg (2004)	✓	✓	✓	✓
Rafi และคณะ (2007) N1	✓	✓	✓	✓
Rafi และคณะ (2007) N2	✓	✓	✓	✓
Rafi และคณะ (2007) N3	✓	✓	✓	✓



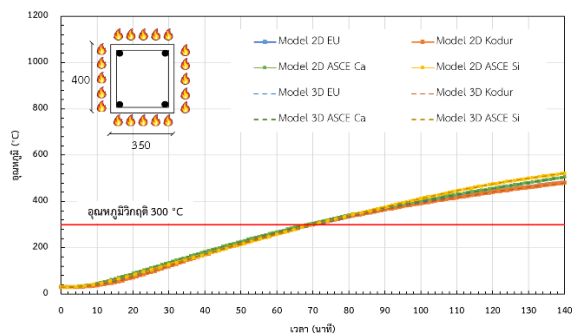
รูปที่ 17 แบบจำลองคาน Abbasi และ Hogg (2004) (หน่วย : มม.)



รูปที่ 18 แบบจำลองคาน Rafi และคณะ(2007) (หน่วย : มม.)

### 5.1 แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว Abbasi และ Hogg (2006)

ทำการสร้างแบบจำลอง 2 มิติ และ 3 มิติด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม ANSYS [3] เพื่อตรวจสอบอัตราการทรนไฟภายใต้เกณฑ์อุณหภูมิวิกฤติ 300 °C ของคานคอนกรีตเสริมแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วมีความสูง 400 มม. ความกว้าง 350 มม. โดยมีไฟเข้าทั้งหมด 4 ด้าน ใช้คุณสมบัติของคอนกรีตตาม EN-1992-1-2 (2004) [4] ASCE Manual 1992 [2] และ Kodur and Sultan (2014) [7] ที่อุณหภูมิเริ่มต้น 30°C ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ISO834 [5] โดยค่าอัตราการทรนไฟที่ได้จากการเปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนกรีต EN-1992-1-2 (2004) [4] ASCE Manual 1992 (Si) ASCE Manual 1992 (Ca) [2] และ Kodur and Sultan (2014) [7] คือ 72 นาที 70 นาที 69 นาที และ 71 นาที ตามลำดับ ดังรูปที่ 19 และ ตารางที่ 4



รูปที่ 19 ความสัมพันธ์แสดงอุณหภูมิกับเวลาที่อุณหภูมิ Abbasi และ Hogg (2006)

ตารางที่ 4 อุณหภูมิวิกฤติของเหล็กเสริมและแท่ง GFRP ของคานตัวอย่าง

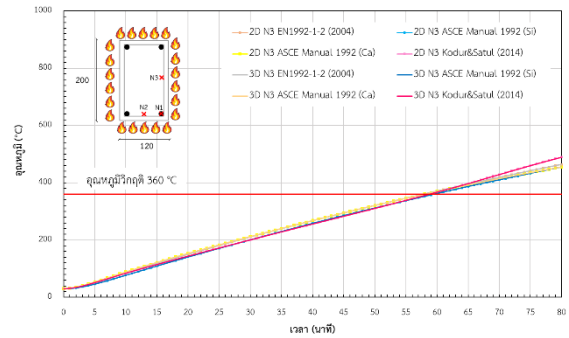
คาน	อัตราการทรนไฟ (นาที) 2 มิติ และ 3 มิติ			
	EN-1992-1-2 (2004)	ASCE Manual 1992 (Si)	ASCE Manual 1992 (Ca)	Kodur and Sultan (2014)
Abbasi และ Hogg (2004)	72	70	69	71

จะเห็นได้ว่าที่แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว Abbasi และ Hogg (2004) [1] ที่แบบจำลอง 2 มิติ และ 3 มิติ มีค่าเท่ากันและค่าของผลกระทบของความร้อนตามคุณสมบัติของคอนกรีตที่แตกต่างกันมีค่าใกล้เคียงกันทำให้ผลกระทบของความร้อนจะแตกต่างกันไม่มีผลต่ออัตราการทรนไฟ



### 5.2 แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน Rafi และคณะ(2007)

ทำการสร้างแบบจำลอง 2 มิติ และ 3 มิติด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม ANSYS เพื่อตรวจสอบอัตราการทรนไฟภายใต้เกณฑ์อุณหภูมิวิกฤติ 360 °C ของแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน Rafi และคณะ(2007) [8] มีความสูง 200 มม. ความกว้าง 120 มม. โดยมีไฟเข้าทั้งหมด 4 ด้าน ใช้คุณสมบัติของคอนกรีตตาม EN-1992-1-2 (2004) [4] ASCE Manual 1992 [2] และ Kodur and Sultan (2014) [7] ที่อุณหภูมิเริ่มต้น 30°C ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ISO834 [5] โดยทำการวัดอุณหภูมิที่กลางคานคอนกรีตตำแหน่งระยะหุ้ม 20 มม. (N1) ตำแหน่งเหล็กตรงกึ่งกลางคานด้านกว้าง(N2) และด้านสูง (N3) ค่าที่ได้จากการเปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนกรีต EN-1992-1-2 (2004) [4] ASCE Manual 1992 (Si) ASCE Manual 1992 (Ca) [2] และ Kodur and Sultan (2014) [7] ของ N1 คือ 27 นาที 28 นาที 27 นาที และ 28 นาที ตามลำดับรูปที่ 20 N2 คือ 39 นาที 39 นาที 38 นาที และ 40 นาที ตามลำดับรูปที่ 21 และ N3 คือ 47 นาที 48 นาที 46 นาที และ 49 นาที ตามลำดับ รูปที่ 22 และ ตารางที่ 5



รูปที่ 22 ความสัมพันธ์แสดงอุณหภูมิกับเวลาที่อุณหภูมิที่ตำแหน่ง N3

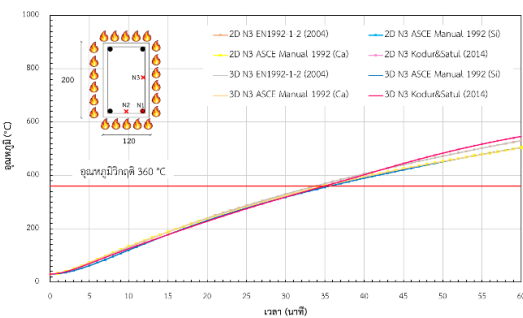
ตารางที่ 5 อุณหภูมิวิกฤติของเหล็กเสริมและแท่ง GFRP ของคานตัวอย่าง

คาน	อัตราการทรนไฟ (นาที) 2 มิติ และ 3 มิติ			
	EN-1992-1-2 (2004)	ASCE Manual 1992 (Si)	ASCE Manual 1992 (Ca)	Kodur and Sultan (2014)
Rafi และคณะ(2007) N1	27	28	27	28
Rafi และคณะ(2007) N2	39	39	38	40
Rafi และคณะ(2007) N3	47	48	46	49

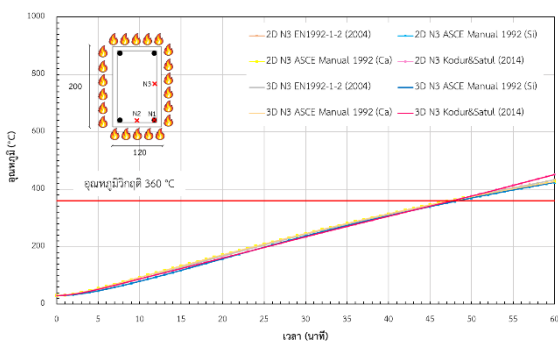
จะเห็นได้ว่าที่แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน Rafi และคณะ(2007) ที่แบบจำลอง 2 มิติ และ 3 มิติ มีค่าเท่ากันและค่าของผลกระทบของความ [8] ร้อนตามคุณสมบัติของคอนกรีตที่แตกต่างกันมีค่าใกล้เคียงกันทำให้ผลกระทบของความร้อนจะแตกต่างกันไม่มีผลต่ออัตราการทรนไฟ

### 6. บทสรุป

ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิที่แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว และแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ เปรียบเทียบกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของ Kodur และคณะ (2013) และ ผลการทดสอบในอดีตของ Abbasi และ Hogg (2004) และ Rafi และคณะ(2007) ณ ตำแหน่งแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเปรียบเทียบกับเวลาที่อุณหภูมิวิกฤติของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วที่อุณหภูมิ 300°C และ ที่อุณหภูมิวิกฤติของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนที่อุณหภูมิ 360°C โดยแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วทำเปรียบเทียบกับ ผลการทดสอบ Abbasi และ Hogg (2004) และแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของ Kodur และคณะ (2013) ผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับผลผลการทดสอบและแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในอดีต และ แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนทำเปรียบเทียบกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของ Kodur และคณะ (2013) และ ผลการทดสอบ Rafi และคณะ (2007) ผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับผลผลการทดสอบและแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในอดีต



รูปที่ 20 ความสัมพันธ์แสดงอุณหภูมิกับเวลาที่อุณหภูมิที่ตำแหน่ง N1



รูปที่ 21 ความสัมพันธ์แสดงอุณหภูมิกับเวลาที่อุณหภูมิที่ตำแหน่ง N2

ผลกระทบของความร้อนตามคุณสมบัติของกรีตที่แตกต่างกันที่แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว Abbasi และ Hogg (2004) และแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน Rafi และคณะ(2007) ที่แบบจำลอง 2 มิติ และ 3 มิติ มีค่าเท่ากันและค่าของผลกระทบของความร้อนตามคุณสมบัติของคอนกรีตที่แตกต่างกันมีค่าใกล้เคียงกันดังนั้นผลกระทบของความร้อนตามคุณสมบัติของกรีตที่แตกต่างกันไม่มีผลต่ออัตราการทรุดไฟ

### กิตติกรรมประกาศ

ในงานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Abbasi, A., and Hogg, P. J. (2004). Fire testing of concrete beams with fibre reinforced plastic rebar. In *Advanced Polymer Composites for Structural Applications in Construction* (pp. 445-456). Woodhead Publishing.
- [2] ASCE, "Structural fire protection: manual of practice no. 78," Committee on Fire Protection, Structural Division, American Society of Civil Engineers, New York, 1992.
- [3] ANSYS Inc, (2011) ANSYS: A Finite Element Computer software and User Manual for Nonlinear Structural Analysis. Canonsburg, Pennsylvania.
- [4] 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.
- [5] ISO 834-1, (1999). Fire Resistance Tests—Elements of Building Construction. Part 1: General Requirement, International Standards Organization, Geneva, Switzerland.
- [6] Kodur, V. K. R., and Bisby, L. A. (2005). Evaluation of fire endurance of concrete slabs reinforced with fiber-reinforced polymer bars. *Journal of structural engineering*, 131(1), 34-43.
- [7] Kodur, V. (2014). Properties of concrete at elevated temperatures. *International Scholarly Research Notices*, 2014.
- [8] Rafi, M. M., Nadjai, A., and Ali, F. (2007). Fire resistance of carbon FRP reinforced-concrete beams. *Magazine of Concrete Research*, 59(4), 245-255.
- [9] Sakashita, M., Masuda, Y., Nakamura, K., Tanano, H., Nishida, I., and Hashimoto, T. (1997). Deflection of continuous fiber reinforced concrete beams subjected to loaded heating. In *Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (Vol. 2, pp. 51-58)*.
- [10] Yu, B., and Kodur, V. K. R. (2013). Factors governing the fire response of concrete beams reinforced with FRP rebars. *Composite Structures*, 100, 257-269.
- [11] กฎกระทรวงฉบับที่ 60(พ.ศ. 2549) ที่ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522
- [12] ฉัญวัฒน์ โพธิศิริ (2558). การออกแบบโครงสร้างเพื่อความปลอดภัยด้านอัคคีภัย. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. หน้า 1-401.