โดยลักษณะเด่นของ FRP คือ มีน้ำหนักเบา สะดวกในการติดตั้ง มีความต้านทานการกัดก่อนและทนต่อสารเคมีสูง ไม่นำความร้อนและกระแสไฟฟ้า ต้องการการบำรุงรักษาน้อยและมีความทนทานสูง

การเกิดอัคคีภัยเป็นสิ่งที่ไม่สามารถคาดการณ์ได้เป็นอันตรายสูงต่อการบาดเจ็บทางร่างกายและความเสียหายต่อวัตถุและทรัพย์สิน ดังนั้นในการออกแบบของโครงสร้างที่มีอัตราการทนไฟที่เหมาะสมจะทำให้เมื่อเกิดอัคคีภัยผู้ใช้จะมีเวลาอพยพเพื่อลดการสูญเสียชีวิต ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาอัตราการทนไฟของโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมด้วยแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วที่เป็นวัสดุทางเลือก

2. การทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

*2.1 *Fiber Reinforced Polymer, FRP)*

พอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ใช้ในปัจจุบันมีหลายประเภท ขึ้นอยู่กับเส้นใยที่ใช้ในกระบวณการผลิต เช่น พอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber-reinforced Polymer, CFRP) คือ พอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบโครงสร้างหลัก, พอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (Glass Fiber-reinforced Polymer, GFRP) คือ พอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่มีแก้วเป็นส่วนประกอบโครงสร้างหลัก, พอลิเมอร์เสริมเส้นใยบะซอลท์ (Basalt Fiber-reinforce Polymer, BFRP) คือ พอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่มีเส้นใยบะซอลต์เป็นส่วนประกอบหลัก, พอลิเมอร์เส้นใยอะรามิด (Aramid Fiber-reinforced Polymer, AFRP) คือ พอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่มีเส้นใยอะรามิดเป็นส่วนประกอบหลัก เป็นต้น

คุณสมบัติของ Fiber Reinforced Polymer มีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมและการกัดกร่อนต่อสารเคมี ไม่สามารถนำความร้อนและกระแสไฟฟ้า มีความแข็งแรงสูง น้ำหนักเบา และมอดุลัสความยืดหยุ่นต่ำ

*2.2 ค

2.2.1 ค EN 3 4 34 (2004)

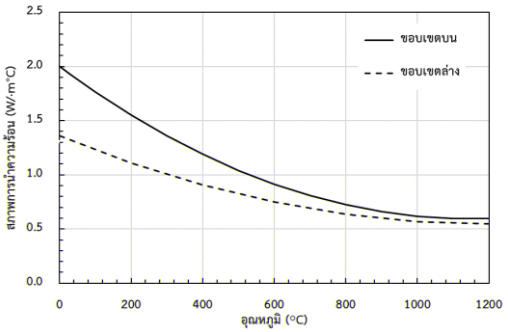
โดยคุณสมบัติเชิงความร้อนของคอนกรีตปรกติ (Normal weight concrete) จะแปรผันตามอุณหภูมิและชนิดของมวลรวม (Aggregate Type) โดยสามารถแบ่งชนิดของมวลรวม 2 กลุ่มได้แก่ มวลรวมเนื้อซิลิกา (Siliceous aggregates) และมวลรวมเนื้อปูน (Carbonate aggregates) โดยมวลรวมเนื้อปูนมีองค์ประกอบหลักคือแร่โดโลไมต์ (Dolomite) มีสูตรโครงสร้างเป็น $CaMg(CO_3)_2$ หรือ แร่คาร์บอเนต (Carbonate) มีสูตรโครงสร้างเป็น $CaCO_3$ ได้แก่ หินปูน หินโดโลไมต์ หินบะซอลต์ เป็นต้น ส่วนมวลรวมเนื้อซิลิกามีแร่ซิลิกา (Silica) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีสูตรโครงสร้างเป็น SiO_2 ได้แก่ หินควอตไซต์ หินแกรนิต และกรวดแม่น้ำ เป็นต้น สำหรับการวิเคราะห์นี้จะอ้างอิงคุณสมบัติเชิงความร้อนของคอนกรีตปรกติจากมาตรฐาน 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

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

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

โดยที่ k = สภาพการนำความร้อนของคอนกรีต (W/m-K)
T_c = อุณหภูมิของตัวคอนกรีต (°C)

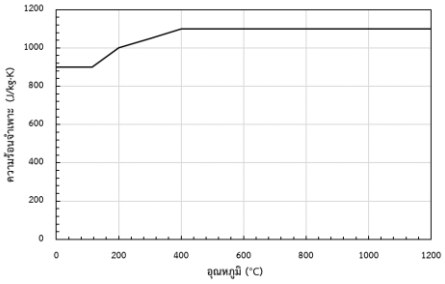


รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างการนำความร้อนของตัวคอนกรีตและอุณหภูมิ [4]

ความร้อนจำเพาะของคอนกรีต EN 1992-1-2 (2004) [4] ปรกติจะแปรผันตามค่าความชื้นในคอนกรีตและอุณหภูมิ สำหรับคอนกรีตในภาวะแห้ง (ความชื้น 0%) ในช่วงอุณหภูมิ 30-1200°C ได้เสนอดังสมการที่ (3) ดังรูปที่2

$$\begin{aligned} c_c &= 900 && ; 30°C \quad T_c \quad 100°C \\ c_c &= 900 + T_c \quad 100 && ; 100°C < T_c \quad 200°C \\ c_c &= 1000 + \frac{T_c \quad 200}{2} && ; 200°C < T_c \quad 400°C \\ c_c &= 1100 && ; 400°C \quad T_c \quad 1200°C \end{aligned} \tag{3}$$

โดยที่ c_c = ความร้อนจำเพาะของตัวคอนกรีต $(J/Kg\ K)$
T_c = อุณหภูมิของตัวคอนกรีต (°C)



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนจำเพาะของตัวคอนกรีตและอุณหภูมิ [4]

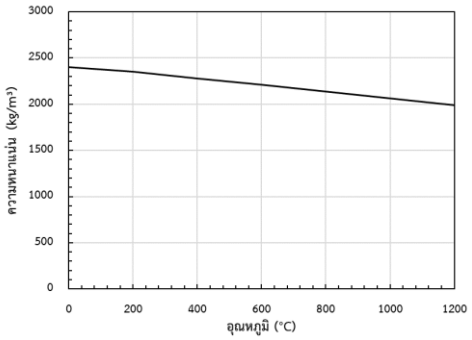
ค่าความหนาแน่นของคอนกรีต EN 1992-1-2 (2004) [4] จะมีการแปรผันตามอุณหภูมิโดยมีค่าลดลงเนื่องจากการสูญเสียน้ำภายในของตัวคอนกรีตดังสมการที่ (4) ดังรูปที่ 3

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

โดยที่ p_c = ความหนาแน่นของตัวคอนกรีตที่อุณหภูมิ $(J/Kg\ K)$

$p_{c,30\,C}$ = ความหนาแน่นของตัวคอนกรีตที่อุณหภูมิห้อง (30°C) โดยมาตรฐานใช้ค่า 2400 kg/m^3

T_c = อุณหภูมิของตัวคอนกรีต (°C)



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของตัวคอนกรีตและอุณหภูมิ [4]

2.2.2 ค ASCE Manual 3 4

คุณสมบัติการนำความร้อน ตามมาตรฐาน ASCE Manual 1992 [2] ดังรูปที่ 4

Siliceous aggregate concrete

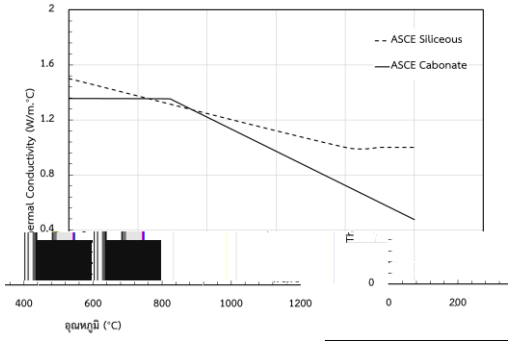
$$k_c = \begin{cases} 0.000625T - 1.5, & 20\ C \le T \le 800\ C \\ 1.0, & 400\ C \le T, \end{cases} \qquad (5)$$

Carbonate aggregate concrete

$$k_c = \begin{cases} 1.335, & 20\ C \le T \le 293\ C \\ 0.001241T - 1.7162, & 293\ C \le T. \end{cases} \qquad (6)$$

โดยที่ k_c = สภาพการนำความร้อนของคอนกรีต $(W/m\ K)$

T = อุณหภูมิของตัวคอนกรีต (°C)



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างการนำความร้อนของตัวคอนกรีตและอุณหภูมิ [2]

ความจุความร้อน ตามมาตรฐาน ASCE Manual 1992 [2] ดังรูปที่ 5

Siliceous aggregate concrete

$$c = \begin{cases} 0.005T - 1.7, & 20\ C \le T \le 200\ C \\ 2.7, & 200\ C \le T \le 400\ C \\ 0.013T - 2.5, & 400\ C \le T \le 500\ C \\ 10.5 - 0.013T, & 500\ C \le T \le 600\ C \\ 2.7, & 600\ C \le T. \end{cases} \qquad (7)$$

Carbonate aggregate concrete

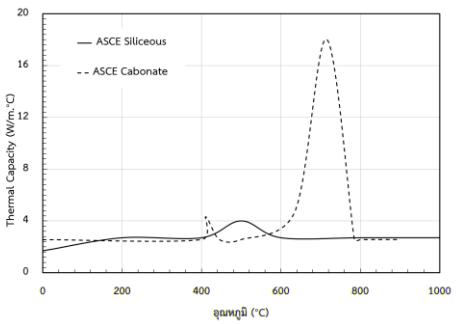
$$c = \begin{cases} 2.566, & 20\ C \le T \le 400\ C \\ 0.1765T - 68.034, & 400\ C \le T \le 410\ C \\ 25.00671 - 0.05043T, & 410\ C \le T \le 445\ C \\ 2.566, & 445\ C \le T \le 500\ C \\ 0.016635T - 5.44881, & 500\ C \le T \le 635\ C \\ 0.16635T - 100.90225, & 635\ C \le T \le 715\ C \\ 176.07343 -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

โดยที่ $c = C_c\ p_c$

p_c = ความหนาแน่นของตัวคอนกรีตที่อุณหภูมิ $(J/Kg\ K)$

C_c = ความร้อนจำเพาะของตัวคอนกรีต $(J/Kg\ K)$

T = อุณหภูมิของตัวคอนกรีต (°C)



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนจำเพาะของตัวคอนกรีตและอุณหภูมิ [2]

2.2.3 ค Kodur and Sultan (2014)

คุณสมบัติการนำความร้อน (Thermal conductivity) ตามมาตรฐาน Kodur and Sultan(2014) [7] ดังรูปที่ 6

Siliceous aggregate concrete

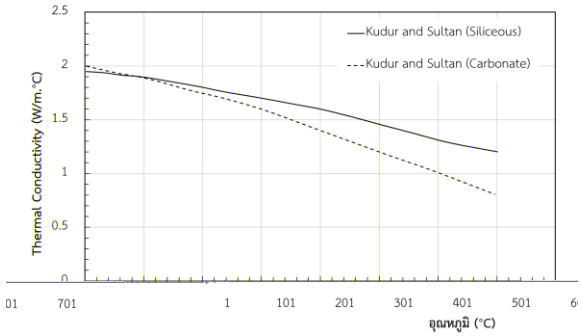
$$k_c \quad 0.85(2 \quad 0.0011T), \qquad 20\ C \quad T \quad 1000\ C \tag{9}$$

Carbonate aggregate concrete

$$k_c \quad \begin{matrix} 0.85(2 \quad 0.0011T), & 20\ C \quad T \quad 300\ C \\ 0.85(2.21 \quad 0.002T), & 300\ C \quad T. \end{matrix} \tag{10}$$

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

$$c \quad \begin{matrix} 0.005T \quad 1.7, & 20\ C \quad T \quad 200\ C \\ 2.7, & 200\ C \quad T \quad 400\ C \\ 0.013T \quad 2.5, & 400\ C \quad T \quad 500\ C \\ 10.5 \quad 0.013T, & 500\ C \quad T \quad 600\ C \\ 2.7, & 600\ C \quad T. \end{matrix} \tag{11}$$

Carbonate aggregate concrete

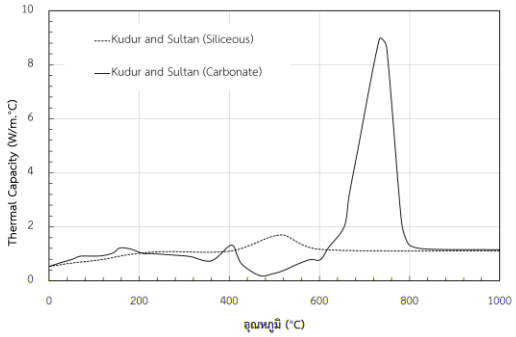
$$c \quad \begin{matrix} 2.45, & 20\ C \quad T \quad 400\ C \\ 0.026T \quad 12.85, & 400\ C \quad T \quad 475\ C \\ 0.0143T \quad 6.295, & 475\ C \quad T \quad 650\ C \\ 0.1894T \quad 120.11, & 650\ C \quad T \quad 735\ C \\ 0.263T \quad 212.4, & 735\ C \quad T \quad 800\ C \\ 2, & 800\ C \quad T \quad 1000\ C. \end{matrix} \tag{12}$$

โดยที่ $c = C_c \quad p_c$

p_c = ความหนาแน่นของตัวคอนกรีตที่อุณหภูมิ $(J / Kg\ K)$

C_c = ความร้อนจำเพาะของตัวคอนกรีต $(J / Kg\ K)$

T = อุณหภูมิของตัวคอนกรีต (°C)



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนจำเพาะของตัวคอนกรีตและอุณหภูมิ [7]

2.3 ค

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 จากการเปรียบเทียบเหล่าน้านวิจัยสรุปว่าคานคอนกรีตที่มีเหล็กเส้น FRP อาจทนต่อไฟได้คล้ายกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป

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

Rafi และคณะ(2007) [8] ดำเนินการทดสอบไฟบนคานคอนกรีตสองคานที่เสริมด้วยเหล็กเส้น CFRP (120 x 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 สามารถทำงานได้ดีภายใต้สะภาวะเพลิงไหม้เมื่อเปรียบเทียบกับคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

Kodur และคณะ (2005) [6] ได้ดำเนินการทดสอบคอนกรีตเสริมด้วยพอลิเมอร์โดยทำการทดสอบผลจากห้องปฏิบัติการและการทดสอบจากโปรแกรม โดยการศึกษาจากห้องปฏิบัติการทำการศึกษาพื้นทั้งหมด 12 ตัวอย่างที่เสริมด้วย เหล็กเสริม, GFRP และ CFRP โดยผลที่ได้จากการศึกษาความหนาของแผ่นพื้นไม่มีผลต่อการทนไฟ ระยะหุ้มเหล็กมีผลอย่างมากต่อการทนไฟ มวลรวมของคอนกรีตมีผลปานกลางต่อการทนไฟ อัตราการทนไฟของเหล็กเสริมมีมากกว่าการเสริมด้วยพอลิเมอร์ โดยการศึกษาจากโปรแกรมทำการศึกษาพื้นทั้งหมด 12 ตัวอย่างที่เสริมด้วยเหล็กเสริม, GFRP และ CFRP ผลที่ได้จากการทดสอบต้องคำนึงถึงอุณหภูมิวิกฤตโดย อุณหภูมิวิกฤตของเหล็กเสริม,CFRP และ GFRP คือ 593ºC 250 ºC 325 ºC ตามลำดับผลที่ได้จากการศึกษาความหนาของแผ่นพื้นไม่มีผลต่อการทนไฟ ระยะหุ้มเหล็กมีผลอย่างมากต่อการทนไฟ มวลรวมของคอนกรีตมีผลปานกลางต่อการทนไฟ อัตราการทนไฟของเหล็กเสริมมีมากกว่าการเสริมด้วยพอลิเมอร์

Kodur และคณะ (2013) [10] ได้ดำเนินการทดสอบด้วยโปรแกรม ANSYS โดยทำการศึกษาคานทั้งหมด 5 กลุ่ม มีหน้าตัด 305×533 มม. ยาว 6.01 ม. ทำการเสริม เหล็กเส้น, GFRP และ CFRP เหล็กรับแรงอัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มม.จำนวน 2 แท่ง การวิเคราะห์คานรับน้ำหนักแบบกระจายตัวสม่ำเสมอ 50% ของอุณหภูมิห้องโดยทำการทดสอบทั้งหมด 5 กลุ่มโดยผลที่ได้จากการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถทนไฟได้มากกว่าคานคอนกรีตเสริมด้วยพอลิเมอร์ ระยะหุ้มเหล็กมีผลต่อการต้านทางไฟโดยระยะหุ้มที่เพิ่มขึ้นทุกๆ 13 มม.จะสามารถต้านทานไฟได้เพิ่มมากขึ้น 5 นาที การยืดเหนี่ยวของคาตตามแนวแกนทำให้ความต้านทานไฟของคานสูงขึ้น 5-30 นาที คานคอนกรีตที่เสริมด้วยพอลิเมอร์ CFRP และ GFRP ที่ติดตั้งฉนวนความร้อนสามารถทนไฟได้ 150 นาที

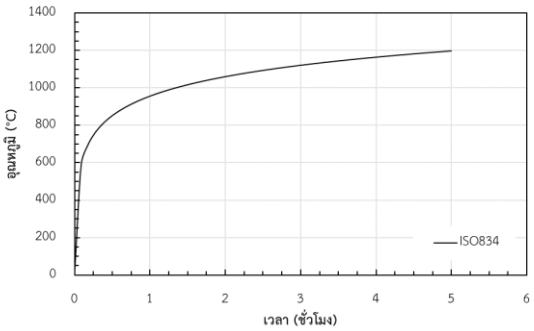
2.4

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการทดสอบการหาอัตราการทนไฟเพื่อประเมินค่าความสามารถของชิ้นส่วนโครงสร้างของอาคารเรียกว่า “เพลิงไหม้มาตรฐาน” ซึ่งค่ามาตรฐานของการทดสอบอัตราการทนไฟได้มีการอ้างอิงจากกราฟไฟมาตรฐาน ได้แก่ ISO 834 (ISO 1999) [10] ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการทดสอบอัตราการทนไฟตามมาตรฐาน ISO 834 [5] สามารถเขียนได้ดังสมการที่13

$$T_t \quad 20 \quad 345\log_{10}(480t \quad 1) \tag{13}$$

โดยที่ t = เวลา (ชั่วโมง)

T_t = อุณหภูมิของตัวคอนกรีต (°C)



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ISO 834 [5]

*2.5 *Fire resistance)*

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

2.6

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

$$k\ T \quad \frac{^2T}{x^2} \quad \frac{^2T}{y^2} \qquad T\ c\ T \quad \frac{T}{t} \tag{14}$$

โดยมีเงื่อนไขขอบเขตของสมการสามารถแสดงในสมการที่ (15)

$$k\ T \quad \frac{T}{x}n_x \quad \frac{T}{y}n_y \quad h\ T_f \quad T_s \quad _{res}\ [\ T_f \quad 273\ ^4 \quad T_s \quad 273\ ^4] \tag{15}$$

โดย $k\ T$ = สภาพนำความร้อนของตัวคอนกรีตที่แปรผันตามอุณหภูมิ $(W/m^2 \quad C)$

T = ความหนาแน่นของตัวคอนกรีตที่แปรผันตามอุณหภูมิ $(kg/m^3 \quad C)$

$c\ T$ = ความร้อนจำเพาะของตัวคอนกรีตที่แปรผันตามอุณหภูมิ $(J/kg \quad C)$

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

T_f = ความร้อนจากกราฟไฟที่ใช้ในการวิเคราะห์โดยแปรผันตามเวลา (°C)

T_s = ความร้อนที่พื้นผิวของตัวคอนกรีต (°C)

$_{res}$ = สภาพเปล่งรังสีสัมพัทธ์ (ไม่มีหน่วย)

= ค่าคงที่ของสเตฟาน-โบลต์ซมันน์

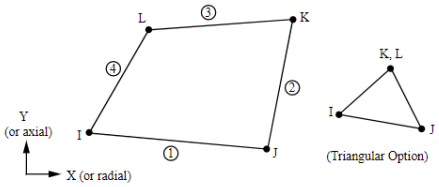
$(5.67 \quad 10^{-8} W/m^2 \quad k^4)$

n_x, n_y = ทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวของคอนกรีตในทิศทาง x และ y ตามลำดับ

3. แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิ

3.1 *4*

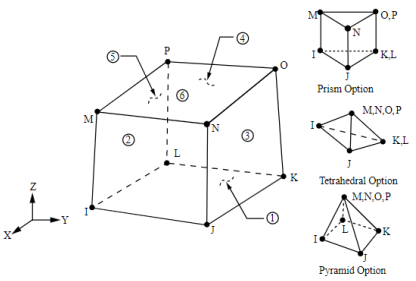
แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิกำหนดโดยใช้การวิเคราะห์จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม ANSYS [3] แบบ 2 มิติ โดยมีการเลือกเอลิเมนต์ของคอนกรีตเป็น PLANE55[3] สามารถใช้เป็นองค์ประกอบระนาบหรือเป็นองค์ประกอบวงแหวนแกนสมมาตรที่มีความสามารถในการนำความร้อนแบบ 2 มิติ องค์ประกอบมี 4 โหนดที่มีระดับความเป็นอิสระ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



รูปที่ 9 ลักษณะของเอลิเมนต์ PLANE55 ที่ใช้ในการวิเคราะห์อุณหภูมิ [3]

3.2

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

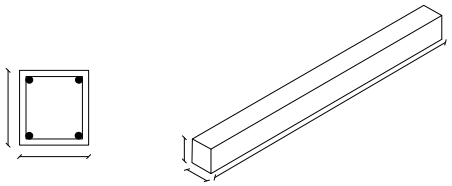


รูปที่ 10 ลักษณะของเอลิเมนต์ SOLID70 ที่ใช้ในการวิเคราะห์อุณหภูมิ [3]

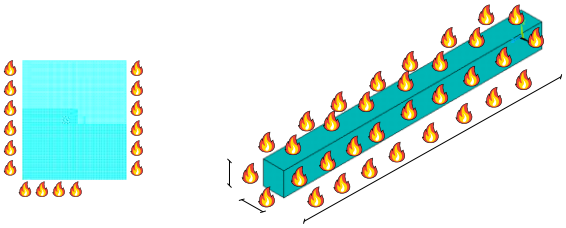
4. การเปรียบแบบจำลองกับผลการทดสอบในอดีต

4.1 *Abbasi Hogg (2006)*

Abbasi และ Hogg (2004) [1] ทำการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เทียบกับแบบจะลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในอดีต 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 และ3มิติ โดยกำหนดไฟเข้าทั้งหมด 4 สำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิในโปรแกรม ANSYS [3] มีการใช้ความหนาแน่นของคอนกรีตตาม EN1992-1-2 (2004) [4] ของคอนกรีตอุณหภูมิห้องเริ่มต้นคือ 20°C ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ISO834 [5]

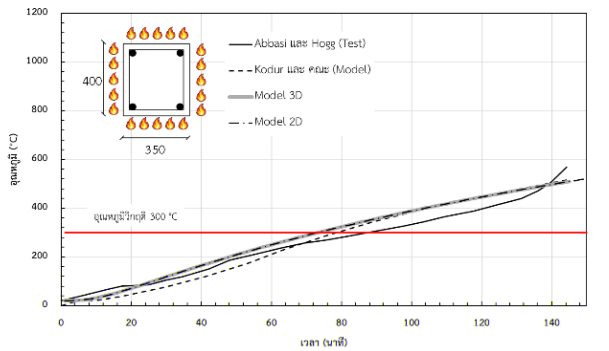


รูปที่ 11 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (หน่วย : มม.)



รูปที่ 12 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (หน่วย : มม.)

ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิที่คอนกรีตแบบ 2 มิติ และ 3 มิติโดยทำการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 2 มิติ และ 3 มิติกับผลการทดสอบและแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในอดีตโดยทำการเปรียบเทียบที่คอนกรีต ณ ตำแหน่งแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วเปรียบเทียบอุณหภูมิกับเวลาที่อุณหภูมิวิกฤติของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วที่อุณหภูมิ 300°C กับแบบจำลองทั้ง 2 มิติ และ3 มิติมีความใกล้เคียงกับผลการทดสอบ Abbasi และ Hogg(2004) [1] และแบบจำลองแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในอดีต Kodur และคณะ(2013) [10] โดยทำการวัดอุณหภูมิที่กลางคานคอนกรีตตำแหน่งระยะหุ้ม 50 มม. ผลที่ได้เมื่อเปรียบเทียบที่ระยะหุ้มค่าที่ระยะหุ้ม 50 มม. มีค่าใกล้เคียงกับผลผลการทดสอบและแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในอดีต ดังภาพที่ 13 และตารางที่ 2



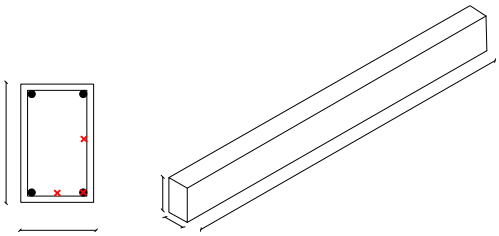
รูปที่ 13 ผลการวิเคราะอุณหภูมิด้วยโปรแกรม ANSYS แบบ 2 มิติ และ 3 มิติ

ตารางที่ 1 รายละเอียดคานที่ใช้ทดสอบ

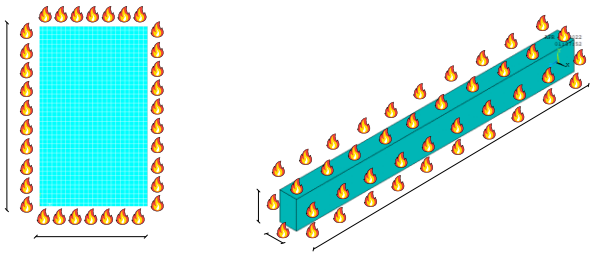
ตัวอย่างคาน	ระยะหุ้ม (มม.)	2มิติ	3มิติ
		(T_{cr} = 300 C) เวลา (นาที)	
Test Abbasi และ Hogg (2004)	50	138.9	-
Model Kodur และ คณะ (2013)	50	56.5	-
Model	50	97	97

*4.2 Rafi *2007)*

ทำการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เทียบกับแบบจะลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในอดีต 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 และ3มิติ โดยกำหนดไฟเข้าทั้งหมด 4 สำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิในโปรแกรม ANSYS [3] มีการใช้ความหนาแน่นของคอนกรีตตาม EN1992-1-2 [4] ของคอนกรีตอุณหภูมิห้องเริ่มต้นคือ 20°C ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ISO834 [5]

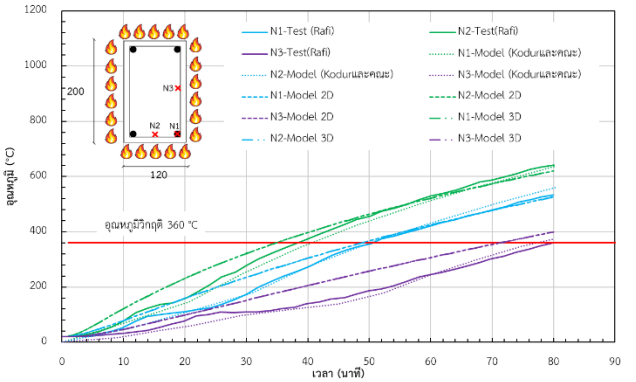


รูปที่ 14 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (หน่วย : มม.)



รูปที่ 15 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (หน่วย : มม.)

ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิที่คอนกรีตแบบ 2 มิติ และ 3 มิติโดยทำการการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 2มิติ และ 3มิติกับผลการทดสอบและแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในอดีตโดยทำการเปรียบเทียบที่คอนกรีต ณ ตำแหน่งแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนเปรียบเทียบอุณหภูมิกับเวลาที่อุณหภูมิวิกฤติของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนที่อุณหภูมิ 360°C กับแบบจำลองทั้ง 2 มิติ และ3มิติมีความใกล้เคียงกับผลการทดสอบ 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) มีค่าใกล้เคียงกับผลผลการทดสอบและแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในอดีตดังรูปที่ 16 และตารางที่ 2



รูปที่ 16 ผลการวิเคราะอุณหภูมิด้วยโปรแกรม ANSYS แบบ 2 มิติ และ 3 มิติ

ตารางที่ 2 รายละเอียดคานที่ใช้ทดสอบ

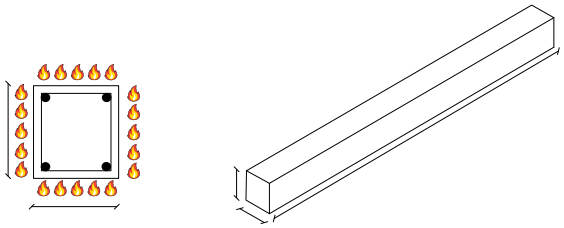
ตัวอย่างคาน	ระยะหุ้ม (มม.)	2มิติ	3มิติ
		(T_{cr} = 360 C) เวลา (นาที)	
Rafi และคณะ(2007)	N1	51.59	-
	N2	65.73	-
	N3	80.03	-
Model Kodur และคณะ (2013)	N1	48.13	-
	N2	50.62	-
	N3	80.18	-
Model	N1	49	49
	N2	35	35
	N3	72	72

5. ผลกระทบของความร้อนตามคุณสมบัติของคอนกรีตที่แตกต่างกัน

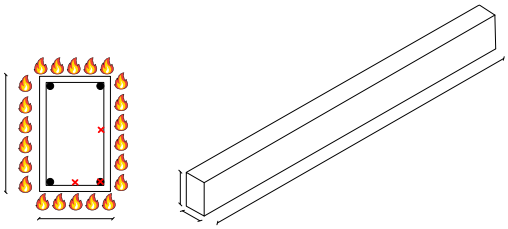
ทำการสร้างแบบจำลอง 2 มิติ และ 3มิติด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม ANSYS เพื่อตรวจสอบอัตราการทนไฟภายใต้เกณฑ์อุณหภูมิวิกฤติของแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วมีความสูง 400 มม. ความกว้าง 350 มม. Abbasi และ Hogg (2004) [1]ดังรูปที่ 17 และแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนสูง 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	✓	✓	✓	✓



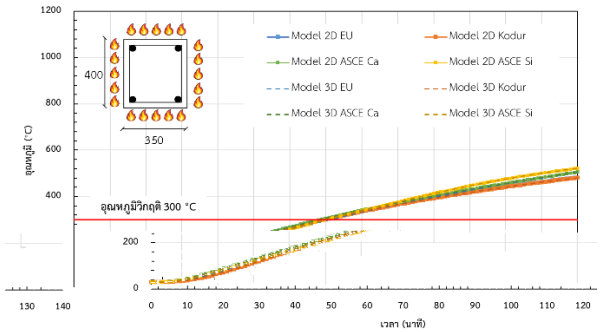
รูปที่ 17 แบบจำลองคาน Abbasi และ Hogg (2004) (หน่วย : มม.)



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

5.1 Abbasi Hogg (200)

ทำการสร้างแบบจำลอง 2 มิติ และ 3มิติด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม ANSYS [3] เพื่อตรวจสอบอัตราการทนไฟภายใต้เกณฑ์อุณหภูมิวิกฤติ 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] ที่อุณหภูมิเริ่มต้น30°C ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาISO834 [5] โดยค่าอัตราการทนไฟที่ได้จากการเปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนกรีต 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 อุณหภูมิวิกฤตของเหล็กเสริมและแท่ง GFRP ของคานตัวอย่าง

คาน	อัตราการทนไฟ (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

จะเห็นได้ว่าที่แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วAbbasi และ Hogg (2004) [1] ที่แบบจำลอง 2 มิติ และ 3 มิติ มีค่าเท่ากันและค่าของผลกระทบของความร้อนตามคุณสมบัติของคอนกรีตที่แตกต่างกันมีค่าใกล้เคียงกันทำให้ผลกระทบของความร้อนจะแตกต่างกันไม่มีผลต่ออัตราการทนไฟ

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

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]