

การออกแบบอาคารสำหรับลำดับความ ปลอดภัยจากไฟ

สงวน วงษ์สวัสดิกุล

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล จังหวัดนครราชสีมา

บทคัดย่อ

การออกแบบชั้นส่วนอาคารเพื่อให้ปลอดภัยเมื่อเกิดเพลิงไหม้ หรือให้อาคารสามารถทนต่อเพลิงที่ไหม้ ที่ผ่านมาความทนต่อการเผาไหม้ของอาคารจะถูกทดสอบด้วยกรรมวิธีมาตรฐานของ ASTM E119-83 แต่การทดสอบทำได้ไม่สะดวกนัก ดังนั้นการใช้ความรู้ในเรื่องการส่งผ่านความร้อน พฤติกรรมของคอนกรีตและเหล็กที่ระดับความร้อนที่อุณหภูมิกำหนด มาใช้ในการคำนวณหาความทนต่อการเผาไหม้ จึงเป็นวิธีที่ดีกว่าการที่จะใช้การทดสอบตามกรรมวิธีมาตรฐานของ ASTM E119-83

Design of Building For Prescribed of Fire Safety

Sa-guan Vongchavalitkul

Faculty of Engineering, Vongchavalitkul University, Nakornrachasima, Thailand 30000

Abstract

The fire endurance of building elements is the length of time that the elements are capable of functioning satisfactorily as structural members and as thermal barriers, as judged from fire test conducted according to the ASTM E119-83 standard. To performing such tests is not necessary for a large number of concrete elements. Information on their fire endurance can be derived by the application of calculation, rather than by fire tests.

บทนำ

ความทนต่อการเผาไหม้ของชิ้นส่วนอาคาร (เช่น พื้น คาน ผนัง และเสา) เป็นช่วงเวลาที่มากที่สุดที่ชิ้นส่วนสามารถยังทำงานได้ตามหน้าที่ เมื่อถูกทดสอบตามกรรมวิธีมาตรฐานของ ASTM E119-83 แต่การทดสอบนี้จะทำได้ไม่สะดวกเมื่อจำนวนของชิ้นส่วนมีจำนวนมาก ดังนั้น การใช้ความรู้ในเรื่องของการส่งผ่านความร้อน พฤติกรรมของคอนกรีตและเหล็กที่ระดับความร้อนที่อุณหภูมิกำหนด มาใช้ในการคำนวณหาความทนต่อการเผาไหม้ จึงเป็นวิธีที่ดีกว่าการที่จะต้องทดสอบตามวิธีมาตรฐานของ ASTM E119-83

การทำให้อาคารปลอดภัยเมื่อเกิดเพลิงไหม้ทำได้หลายวิธี หรือการออกแบบอาคารให้ทนต่อเพลิงไหม้ ความทนทานต่อการเกิดเพลิงไหม้ถูกระบุอยู่ในมาตรฐานการออกแบบ ซึ่งมาตรฐานการออกแบบขึ้นอยู่กับความเคยชิน หรือการประมาณอย่างหยาบของการทนไฟไหม้ได้ โดยสมมุติให้มีความสัมพันธ์ผกผันกับการเผาไหม้ไฟได้ของจำนวนวัสดุที่ไหม้ได้ในอาคาร

ปี 1950 เชื่อว่าจำนวนของวัสดุที่ไหม้ไฟได้ในอาคารนั้นเป็นเพียงหนึ่งในแฟกเตอร์หลายตัวที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้อาคาร เป็นที่ชัดเจนว่า ความต้องการทนไฟได้ของอาคารกับการทดสอบด้วยไฟจะสอดคล้องถ้า (1) ไฟสามารถระบุเป็นฟังก์ชันที่รวมพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง (2) ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถของอาคารที่ถูกเพลิงไหม้จริงๆ และการทดสอบในห้องปฏิบัติการมีความเข้าใจจริงจัง

วิธีการต่างๆ หลายวิธีได้ถูกพัฒนาขึ้นในทุกปี เพื่อคำนวณหาความสัมพันธ์ดังกล่าว และวิธีที่รู้จักกันดีคือ Ingber's Method (Ingber, 1928) Law's Method (Law, 1971) Pettersson's Method (Pettersson, 1975) Din Method (Din 18230, 1978) และหลักการแปลงภาระความร้อน (normalized heat load) โดย Harmathy (1981) และต่อมา Harmathy และ Mehaffey (1987) ได้ทำการปรับปรุง ซึ่งวิธีการเหล่านี้ได้ถูกทบทวนและประเมินผลเพื่อหาข้อมูลจากการทดลองจริง (Harmathy, 1987)

ความถูกต้องของหลักการแปลงภาระความร้อน ถูกกำหนดโดยขนาดของทดสอบการเผาไหม้ในห้องขนาดใหญ่ (Mehaffey and Hamathy, 1985) ซึ่งหลักการนี้ถูกศึกษาอย่างดี จนได้ความสามารถของชิ้นส่วนอาคารในการเกิดเพลิงไหม้จริง และทดสอบมาตรฐาน การแปลงภาระความร้อนคือ จำนวนความร้อนที่ส่งเข้าพื้นที่หนึ่งหน่วยของขอบเขตที่ปิดระหว่างเกิดการเผาไหม้ (การเกิดไฟไหม้จริงหรือการทดสอบ)หารด้วยค่าการรับความร้อน (thermal absorptivity) ของขอบเขต ซึ่งสามารถแสดงได้ว่าอาคารทดสอบหนึ่งถูกกระทำด้วยภาระความร้อนแปลงที่มีค่าเท่ากัน จะเกิดความเสียหายจากไฟเท่ากัน อย่างไรก็ตามความที่ไม่เหมือนกันคือ ประวัติของอุณหภูมิที่เกิดขึ้น ภาระความร้อนแปลงจึงสามารถที่จะละทิ้งปริมาณของโอกาสที่จะไม่เสียหายจากไฟได้

แนวทางการหาความคงทนไฟของอาคาร

ภายในห้องที่ถูกไฟไหม้ ค่าภาระความร้อนแปลงจะขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัวแปร (Harmathy, 1983) อาทิเช่น ขนาดของพื้น พื้นผิว และความสูงของห้องปิด การระบายอากาศของอัตราของการไหลเข้าของอากาศสู่ห้องปิดระหว่างเกิดไฟไหม้ เป็นต้น

ภาระความร้อนแปลงสามารถหาค่าได้จากแต่ละห้องปิด ถ้าหากว่ามีแบบพิมพ์เขียวของอาคารอยู่แล้ว แต่ถ้าอาคารอยู่ในช่วงของการออกแบบ การหาความทนไฟได้ของอาคารอาจจะหาจากพื้นที่ทั้งหมด จำนวนห้องปิด ความสูงของห้องปิด และวัสดุบุผนังของห้อง หลังจากนั้นนำข้อมูลที่ได้อาจไปใช้หาภาระความร้อนแปลง

โดยปกติแล้ว พื้นที่ของห้องปิดมักจะคิดให้เป็นพื้นที่เหลี่ยม ส่วนช่องเปิดบนผนังเช่น หน้าต่าง หรือประตู มักจะตัดทิ้ง ดังนั้น A_F จะหมายถึง ค่าเฉลี่ยของพื้นที่แต่ละชั้นของอาคารหารด้วยจำนวนห้องปิด และค่าเฉลี่ยพื้นที่ผิวของห้องปิดสามารถคำนวณได้จากการประมาณ ดังสมการที่ (1)

$$A_i = 2 A_F + 4 h_c \sqrt{A_F}$$

(1)

A_F = พื้นของชั้นของห้องปิดกั้นโดยผนัง พื้น และฝ้าเพดาน (m^2)

A_i = พื้นผิวของห้องปิด (m^2)

h_c = ความสูงของห้องปิด (m)

$\sqrt{k\rho c}$ = ค่าการรับความร้อนของขอบเขตของห้องปิด, $Jm^{-2} s^{-1/2} K^{-1}$

(k คือ ค่าการนำความร้อน ρ คือ ค่าความหนาแน่น c คือ ค่าความร้อนเฉพาะ)

ϕ = แฟลคเตอร์การระบายอากาศของอัตราของการไหลเข้าของอากาศสู่ห้องปิดระหว่างเกิดไฟไหม้ (kg/s)

L = ค่าเฉพาะของน้ำหนักไฟ (specific fire load) หรือมวลของการเผาไหม้ต่อหน่วยพื้นที่ (kg/m^2)

ถ้าขอบเขตของห้องปิดถูกบุด้วยวัสดุที่แตกต่างกัน ค่าการรับความร้อนสามารถหาค่าพื้นที่ผิวเฉลี่ย โดยการคำนวณจาก

$$\sqrt{k\rho c} = \frac{1}{A_t} (A_1 \sqrt{k_1 \rho_1 c_1} + A_2 \sqrt{k_2 \rho_2 c_2} + \dots)$$

(2)

ที่ซึ่งค่าตัวเลขที่ห้อยอยู่ท้ายจะระบุถึงชนิดของวัสดุ และพื้นที่ผิวที่บุผนังของห้องใน แต่ละชนิด

ค่าการรับความร้อนของวัสดุแต่ละชนิดที่บุผนัง แสดงไว้ในตารางที่ 1

(Harmathy and Mehaffey, 1985)

ตารางที่ 1 ค่าการรับความร้อนของวัสดุแต่ละอย่างของอาคารทั่วไป

วัสดุ	$Jm^{-2} s^{-1/2} K^{-1}$
หินอ่อน	2,270
คอนกรีตทั่วไป	2,190
อิฐ	1,520
คอนกรีตน้ำหนักเบา (1450 Kg/m ³)	930
ยิปซัมบอร์ด	740
ปูฉาบ	670
ไม้	440

ในกรณีของโครงสร้างที่ทำด้วยวัสดุประกอบ (Composite Structures) การใช้ค่าการรับความร้อน จะเป็นค่าสะสมของพื้นที่ผิวที่บุผนัง ในแต่ละชั้นที่หนาอย่างน้อย 13 mm. (Harmathy and Mehaffey 1987) (ข้อสังเกต น้ำหนักความร้อนแปลงนี้จะไม่ใช้กับโครงสร้างเหล็กซึ่งไม่สามารถป้องกันการไหม้ไฟ)

แฟคเตอร์การระบายอากาศ และค่าน้ำหนักไฟเฉพาะ (The Specific Fire Load) เป็นตัวแปรสําคัญ ในส่วนการคำนวณจะนำค่าแฟคเตอร์การระบายอากาศมาพิจารณาเป็นค่าที่น้อยที่สุดที่ห้องปิดเกิดการเผาไหม้ เช่น อาคารไหลเข้าไม่เพียงพอต่อการช่วยเผาไหม้ ค่าน้อยที่สุดคือ

$$\phi_{min} = \rho_a A_v \sqrt{ghv}$$

(3)

โดยที่

ρ_a = ความหนาแน่นของอากาศในบรรยากาศ (Density of Atmospheric air , $\cong 1.21 \text{ kg. M}^{-3}$ ที่ 20°C)

A_v = พื้นที่ของช่องเปิดของห้องปิดที่มีอากาศระบายได้ในระหว่างเผาไหม้, m^2
เช่น หน้าต่างที่แตก หรือ ประตูที่เปิดไม่บ่อยครั้ง

h_v = ความสูงของช่องเปิดระบายอากาศ (m)
 g = ค่าคงที่ความเร่งโน้มถ่วงของโลก ($\cong 9.81 \text{ m/s}^2$)

ข้อมูลของค่าเฉพาะน้ำหนักไฟถูกพัฒนาขึ้นจากข้อมูลสวีเดน (Pettersson และคณะ 1976) แสดงไว้ในตารางที่ 2 L_m คือค่ากลาง (Mean) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน คือ σ_L

ตารางที่ 2 ข้อมูลของค่าเฉพาะน้ำหนักไฟตามลักษณะการใช้ที่ประมาณจากข้อมูล

สวีเดน

การใช้งานไฟ	ค่าเฉพาะของน้ำหนัก	
	ค่ากลาง $L_m, \text{Kg/m}^2$	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ฐาน σ_L		

พักอาศัย	30.1	
	4.4	
ที่ทำงาน	24.8	8.6
โรงเรียน	17.5	5.1
โรงพยาบาล	25.1	7.8
โรงแรม	14.6	4.2

ค่าน้ำหนักบรรทุกไฟแปลง ของขอบเขตห้องปิด (ทั้งห้อง) สามารถเขียนเป็นสมการในลักษณะสมการแบบ Semi - Empirical (Mehaffey and Hurmathy 1981)

$$H'' = C_1 \frac{(11.0\delta + 1.6) A_F L_m}{A_1 \sqrt{k\rho c} + C_2 \sqrt{\phi_{min} A_F L_m}} \tag{4}$$

โดยที่

$$C_1 = 1.06 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}$$
$$C_2 = 935 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

และ

$$H' = \text{น้ำหนักบรรทุกไฟแปลงสำหรับห้องปิด (โดยที่ } L = L_m \text{ และ } \phi = \phi_{min}),$$
$$\text{s}^{-1/2} \text{ K}$$

$$\delta = \text{แฟคเตอร์ Semi - Empirical ไม่มีหน่วย ถูกกำหนดโดยสมการ (5) โดยที่}$$

$$\delta = \begin{cases} C_3 \sqrt{hc^3 / \phi_{\min}} \\ 1 \end{cases} \quad \text{ใช้ค่าน้อย}$$

สุด (5)

$$C_3 = 0.79 \quad \text{kg}^{1/2} \text{ m}^{-1/2} \text{ s}^{-1/2}$$

การทดสอบไฟมาตรฐานแบบไม่ทำลายยังคงต้องใช้ค่าน้ำหนักบรรทุกไฟแปลง

เนื่องจากการทดสอบในช่วงอุณหภูมิเป็นไปตามขั้นตอน น้ำหนักบรรทุกไฟแปลงที่ใช้เผาไหม้ ชิ้นส่วนอาคารจะใช้เหมือนกันตลอดช่วงที่ทดสอบ ถ้าการทดสอบดำเนินการไปจนถึงจุดวิกฤติของชิ้นส่วน ก็จะเรียกช่วงเวลานั้นคือการทนไฟได้ของชิ้นส่วนอาคาร ความสัมพันธ์ของการ ทนไฟ และน้ำหนักบรรทุกไฟแปลง คือ

$$\tau = 0.11 + C_4 H'' + C_5 (H'')^2 \quad (6)$$

โดยที่

$$C_4 = 0.16 \times 10^4 \quad \text{hr.s}^{-1/2} \text{ k}^{-1}$$

$$C_5 = 0.13 \times 10^{-9} \quad \text{hr.s}^{-1} \text{ k}^{-2}$$

และ

$$\tau = \text{ค่าความต้านทานไฟ (หรือระยะเวลาของการทดสอบ), hr.}$$

$$H'' = \text{น้ำหนักบรรทุกไฟแปลงในการทำการทดสอบไฟ, s}^{-1/2} \text{ k}$$

ค่าความต้านทานไฟในสมการ (6) จะเขียนในรูปของน้ำหนักบรรทุกไฟแปลง (มากกว่าเขียนในรูปน้ำหนักบรรทุกแปลงในรูปของการต้านทานไฟ)

เพื่อให้สะดวกในการหาความต้องการในการต้านทานไฟ ค่าความต้องการในการต้านทานไฟ τ ที่ซึ่ง $H'' \geq H'$ หรือพูดอีกนัยหนึ่งคือค่าของ τ คือค่าความสามารถของชิ้นส่วนอาคารที่จะรับความร้อนในการทดสอบไฟ (โดยไม่มีการเสียหาย) คำนำนั้ความร้อนแปลงเท่ากับ หรือมากกว่าค่าของไฟที่ไหม้จริง

ความต้านทานไฟ เช่นผลที่เกิดจากการทดสอบ เป็นปริมาณเชิงสุ่ม ค่าสัมประสิทธิ์ของความเบี่ยงเบน (Coefficient of Variation) V_T ของ τ อยู่ระหว่าง 0.01 ถึง 0.15 (1 หรือ 15 เปอร์เซ็นต์, ASTM E5 1982) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของการทำการทดสอบ $V_T = 0.1$ มักถูกนำมาใช้ในกรณีทั่วไป

พิจารณากรณีของการเกิดเหตุการณ์สุ่ม ค่าเฉพาะของน้ำหนักบรรทุกไฟ L และผลของการทดสอบไฟ τ เป็นค่าไม่แน่นอนที่ปรากฏในสมการ (4) โดยอาศัยขบวนการความน่าเชื่อถือ (Reliability - Base Design Procedures) ที่ถูกรู้จักกันดี (Cornell 1969 ; Zahn 1977) สูตรถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้คำนวณค่าความต้องการทนไฟ (Harmathy and Mehaffey 1985)

$$\tau_d = 0.11 + C_4 H_d'' + C_5 (H_d'')^2 \quad (7)$$

โดยที่

$$H_d'' = H'' \exp \left(\beta \sqrt{\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + 0.101^2} \right) \quad (8)$$

และในสมการ (8)

$$\Omega_1 = \frac{\sigma_L}{L_m} = \frac{A_t \sqrt{k\rho c} + \frac{C_2}{2} \sqrt{\phi_{\min} A_F L_m}}{A_t \sqrt{k\rho c} + C_2 \sqrt{\phi_{\min} A_F L_m}}$$

(9)

และ $\Omega_2 = 0.9 V_T$

(10)

ในสมการต่าง ๆ เหล่านี้ ตัวห้อย d ที่ปรากฏบ่งบอกถึงค่าออกแบบ และ β คือ ค่าแฟคเตอร์ (ไม่มีหน่วย) เป็นฟังก์ชันของค่าความน่าจะเป็น P_f ที่ยอมให้

ตัวอย่างการคำนวณ

กำหนดให้ตึกทำงาน (Office Building) สูง 10 ชั้น พื้นที่ต่อชั้น 454 m^2 มีห้องปิดจำนวน 16 ห้องในแต่ละชั้น ซึ่งแต่ละห้องปิดมีความสูง 2.5 m และมีพื้นที่ชั้นเฉลี่ย 26 m^2 ห้องปิดถูกบุด้วยวัสดุ : ผนัง และเพดานเป็นยิปซัม พื้นเป็นไม้ปาเก้ ห้องปิดมีหน้าต่าง 2 บาน (1.52 m) และกว้าง (1.02 m)

เพื่อหาความต้องการทนไฟที่อยู่บนพื้นฐานของความน่าจะเป็นน้อยกว่า 0.05 ซึ่ง

$\beta = 1.64$ (5 เปอร์เซนต์)

ขั้นตอนที่ 1 จัดทำรายการตัวแปรที่จะนำมาใช้คำนวณ

พื้นที่เฉลี่ย $A_F = 26 \text{ m}^2$

ความสูงของห้องปิด $hc = 2.5 \text{ m}$

พื้นที่ผิวเฉลี่ยของห้องปิด (สมการ (1))

$$A_1 = 2 \times 26 + 4 \times 2.5 \times \sqrt{26}$$

$$= 52 + 51 = 103 \text{ m}^2$$

$$\text{ค่ารับความร้อนขอบเขตเฉลี่ย} \sqrt{k\rho c} = \frac{1}{103} [(26+51) \times 740 + 26 \times 440]$$

ตารางที่ 1

$$= 1,665 \text{ J m}^{-2} \text{ S}^{-1/2}$$

 K^{-1}

ค่าน้อยที่สุดในการระบายอากาศ สมการ (3)

$$\phi_{\min} = 1.21 \times 2 \times 1.52 \times 1.02$$

$$\sqrt{9.8 \times 1.52}$$

$$= 14.5 \text{ kg S}^{-1}$$

ค่าเฉพาะน้ำหนักรรทุกไฟของสำนักงาน

$$L_m = 24.8$$

$$\text{kg / m}^2$$

$$\sigma_L = 8.6$$

$$\text{kg / m}^{-2}$$

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณหาค่าน้ำหนักรรทุกไฟแปลงสำหรับการไหม้จริง

$$\delta = 0.79 \sqrt{2.53 / 14.5} = 0.82$$

$$H' = 1.06 \times 10^6$$

$$\frac{(11.0 \times 0.82 + 1.6) 26 \times 24.8}{103 \times 665 + 935 \sqrt{14.5 \times 26 \times 24.8}} = 45.680 \text{ S}^{1/2} \text{ K}$$

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณหาความต้องการความสามารถต้านทานไฟ

$$\beta^* = 1.64$$

$$V_T = 0.1$$

$$\Omega_1 = \frac{8.6}{24.8} \times \frac{103 \times 665 + 468 \sqrt{14.5 \times 26 \times 24.8}}{103 \times 665 + 935 \sqrt{14.5 \times 26 \times 24.8}}$$

$$= 0.248$$

$$\Omega_2 = 0.9 \times 0.1 = 0.09$$

$$H''_d = 45.680 \times 2 \times p$$

$$\left(1.64 \sqrt{0.248^2 + 0.09^2 + 0.101^2}\right)$$

$$= 72.600 \text{ S}^{1/2} \text{ k}$$

$$\tau_d = 0.11 + 0.16 \times 10^{-4} \times 72.600 + 0.13 \times 10^{-8} \times$$

$$72.600^2$$

$$= 1.96 \text{ hr.}$$

* ค่าความน่าจะเป็น 5%

สรุป

การหาความคงทนของอาคารเมื่อถูกไฟเผาไหม้ ไม่จำเป็นต้องทำการทดสอบ แต่สามารถทำได้โดยการใช้ค่าหน้ากบรทุกไฟแปลง ตัวอย่างการหาคำนวณหาความคงทนไฟของอาคารได้แสดงไว้เพื่อเป็นแนวทางบนพื้นฐานของการกำหนดลำดับความสำคัญของอาคารบรรณานุกรม

1. ACI 216 R, "Fire Endurance of Concrete Elements", 1994
2. Harmathy, T.Z., and Mehaffey, J.R., "Design of Buildings for Prescribed Levels of Structural Fire Safety, "Fire Safety : Science and Engineering, STP - 882, ASTM,

Philadelphia, 1985

3. Harmathy, T.Z., and Mehaffey, J.R., “The Normalized Heat Load Concept and Its Use,
“Fire Safety Journal (Lausanne), V.12, No.1, 1987
4. Pettersson, O., Manusson, S.E. and Thor. J., “Fire Engineering Design of Steel Structures,
“Publication No. 50 , Swedish Institute of Steel Construction, Stockholm, 1976