



# Badanie reakcji fasady w warunkach oddziaływania pożaru wewnętrznego

mł. bryg. mgr inż. poż. Andrzej Krauze  
mł. ogn. pchor. inż. poż. Michał Mikke



## AKADEMIA POŻARNICZA

Miejsce zatrudnienia: Instytut Inżynierii Bezpieczeństwa

Prowadzone zajęcia m.in.:

- Modelowanie Pożarów
- Teoria Pożarów
- Metodyka Badań Przyczyn Pożarów
- Stosowanie Narzędzi Inżynierii Bezpieczeństwa

## STOWARZYSZENIE INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW POŻARNICTWA

Członek Zarządu Oddziału Stołecznego SITP

Kierownik Zespołu ds. Komputerowego Modelowania Zagrożeń przy SITP



Akademia Pożarnicza

## Dane historyczne

Požary ścian zewnętrznych stanowią  
od **1,3%** do **3%**  
wszystkich pożarów budynków

Źródło:

White, N., Delichatsios, M., Ahrens, M., Kimball, A., 2013. *Fire hazards of exterior wall assemblies containing combustible components*. MATEC Web of Conferences, Nr 9, s. 02005



**Akademia Pożarnicza**

## **Konsekwencje pożaru elewacji**

**26-piętrowy budynek biurowy „Xintiandi”  
Tiencin, Chiny, 22 sierpnia 2023 roku**

**W działaniach brało udział:  
~ 300 strażaków  
~ 60 samochodów pożarniczych**

**Na szczęście nie odnotowano  
ofiar śmiertelnych !!!**





Akademia Pożarnicza

## Szeroki zakres metod badawczych

**BS 8414 (Wielka Brytania)**



**NFPA 285 (USA)**





## Metody stosowane w Europie

### Akademia Pożarnicza

Nazwa	Państwo	Skala	Ustawienie fasady	Ekspozycja termiczna	Paliwo
DIN 4102-20	Niemcy	Średnia	Dwie narożne ściany	Przez otwór	Palnik gazowy (propan) lub stos z drewnianych belek (30±1,5 kg)
LEPIR 2	Francja	Duża	Pojedyncza ściana	Przez otwór	Stosy drewnianych belek (całkowita masa dwóch stosów: 600 kg)
BS 8414	Wielka Brytania	Duża	Dwie ściany narożne	Przez otwór	Stos z drewnianych belek (400 kg)
Prüfbestimmung Für Aussenwandbekleidungs systeme	Szwajcaria	Duża	Pojedyncza ściana	Przez otwór	Stos z drewnianych belek (50 kg)
ÖNORM B 3800-5	Austria	Średnia	Dwie ściany narożne	Przez otwór	Stos z drewnianych belek (25 kg)
MSZ 14800-6	Węgry	Duża	Pojedyncza ściana	Przez otwór	Stos z drewnianych belek (650 kg)
SP Fire 105	Szwecja	Duża	Pojedyncza ściana	Przez otwór	Heptan (60 l)
ISO 13785	Czechy / Słowacja	Średnia / Duża	Dwie narożne ściany	Przez otwór	Propan lub heptan lub stos z drewnianych belek
Technical regulation A 2.2.1.5	Niemcy	Duża	Dwie narożne ściany	Przez otwór	Stos z drewnianych belek (200 kg)
Tekniikka opastaa 16	Finlandia	Duża	Pojedyncza ściana	Przez otwór	Stos z drewnianych belek

Źródło: opracowanie własne na podstawie Anderson, J., Boström, L., Chiva, R., Guillaume, E., Colwell, S., Hofmann, A., Tóth, P., 2020. *European approach to assess the fire performance of façades*. Fire and Materials, Nr 45(5), ss. 598-608



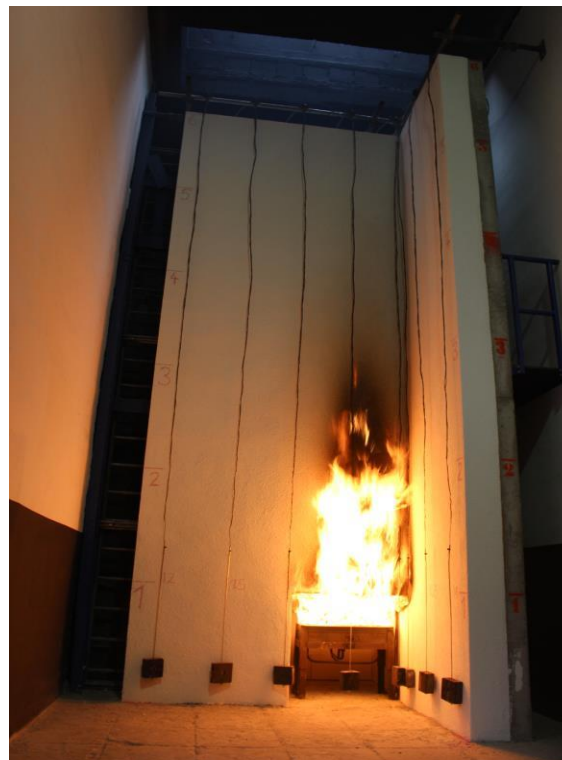
## Prace nad europejską procedurą badawczą

Akademia Pożarnicza

### BS 8414 (Wielka Brytania)



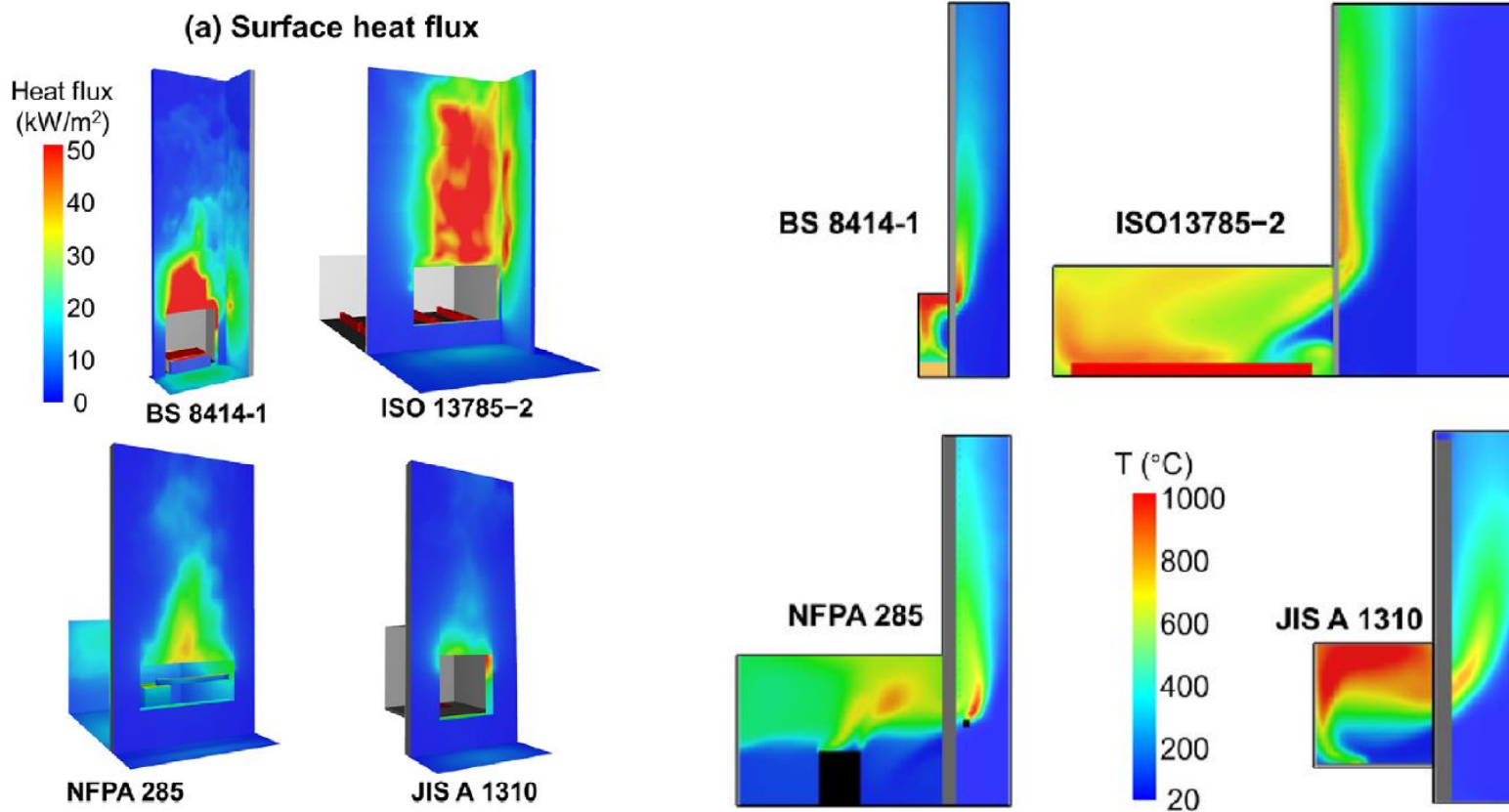
### DIN 4102-20 (Niemcy)





## Modelowanie procedur badania elewacji

Akademia Pożarnicza







**Akademia Pożarnicza**

**Modele komputerowe w projektowaniu**

**Główne obszary zastosowania  
modeli komputerowych  
w inżynierii bezpieczeństwa pożarowego...**



# Modelowanie działania wentylacji pożarowej

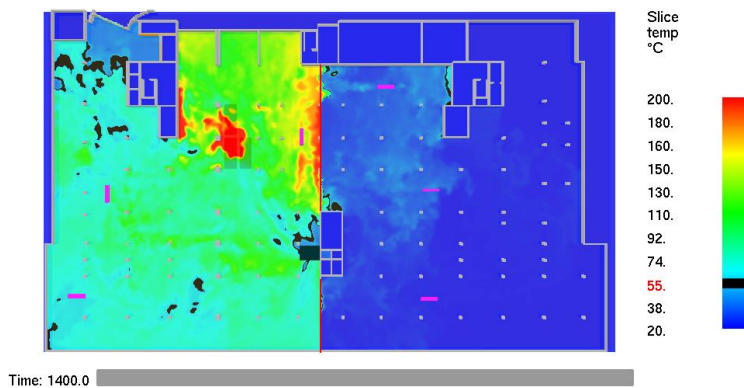
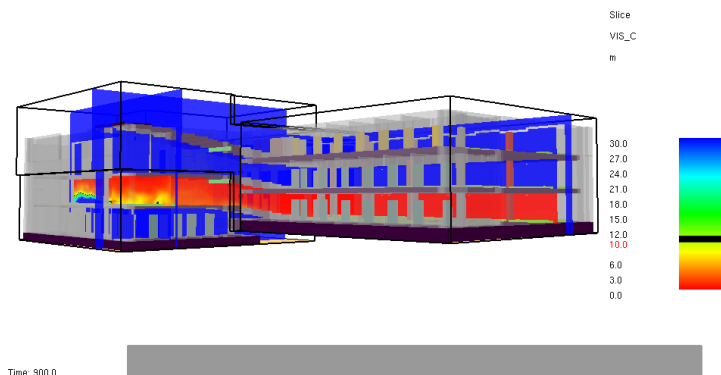
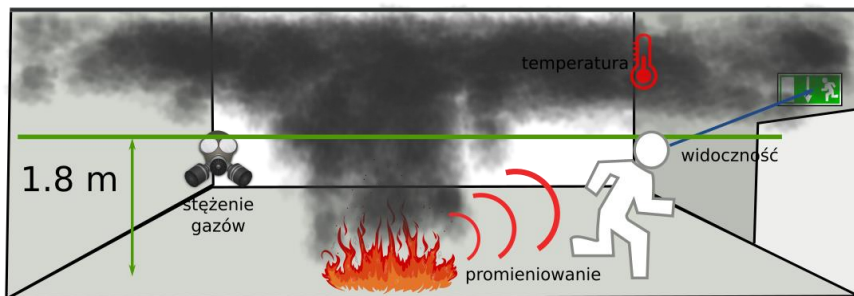
## Akademia Pożarnicza

§ 270. Wymogi dotyczące instalacji wentylacji oddymiającej

1. Instalacja wentylacji oddymiającej powinna:

1) usuwać dym z intensywnością zapewniającą, że w czasie potrzebnym do ewakuacji ludzi na chronionych przejściach i drogach ewakuacyjnych nie wystąpi zadymienie lub temperatura uniemożliwiająca bezpieczną ewakuację;

Źródło: rozporządzenie Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. 2002 nr 75 poz. 690, późn. zm.)

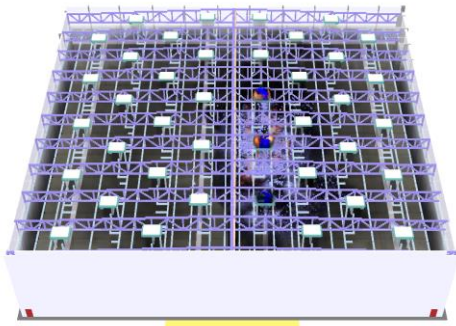




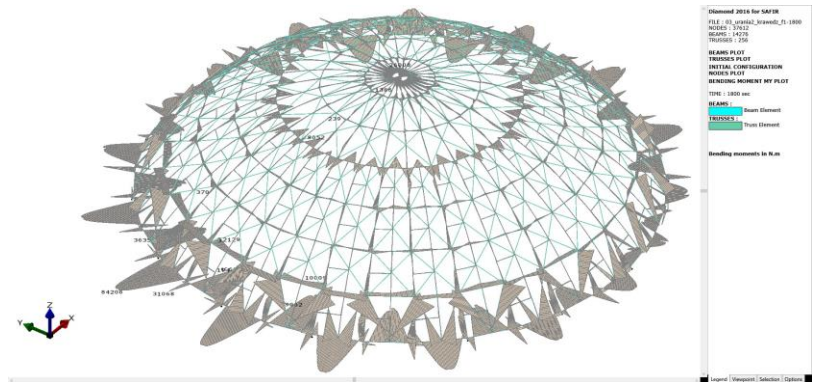
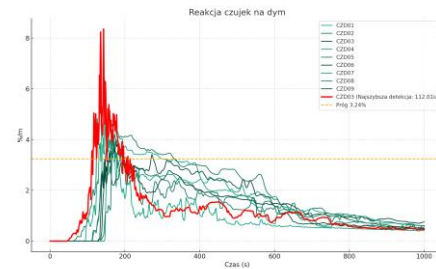
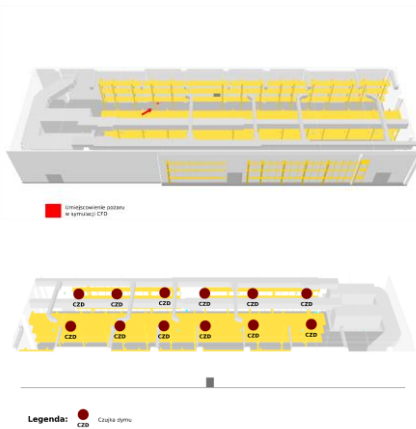
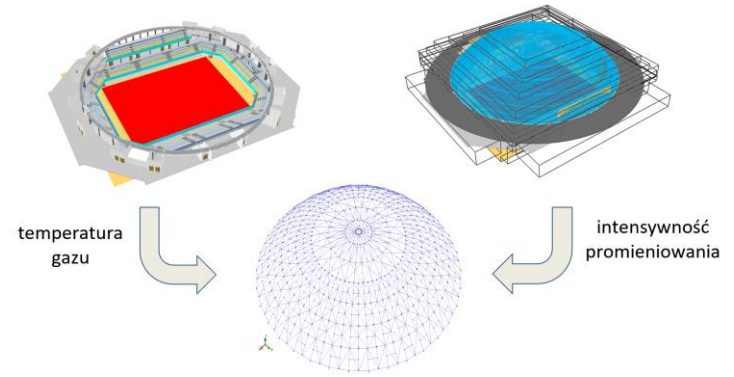
# Obszary zastosowania modeli komputerowych

Akademia Pożarnicza

## Urządzenia przeciwpożarowe



## Wytrzymałość konstrukcji

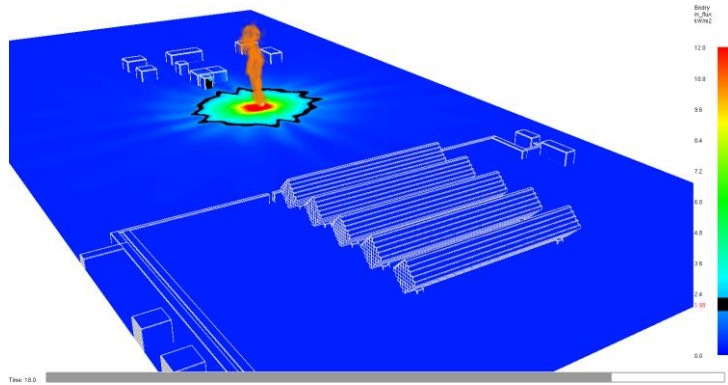




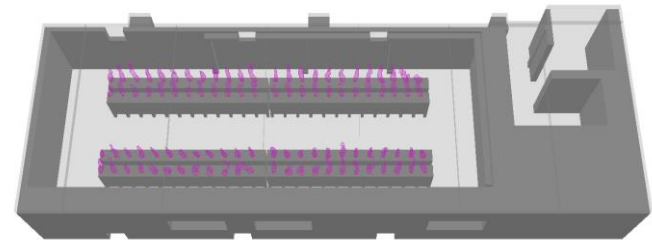
# Obszary zastosowania modeli komputerowych

Akademia Pożarnicza

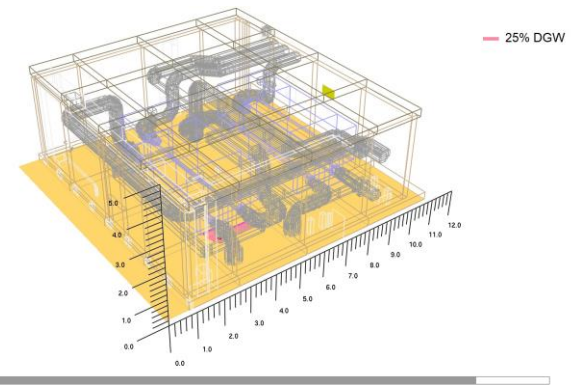
## Modelowanie awarii przemysłowych



## Atmosfery wybuchowe



Time: 50.03

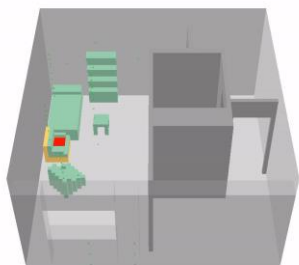




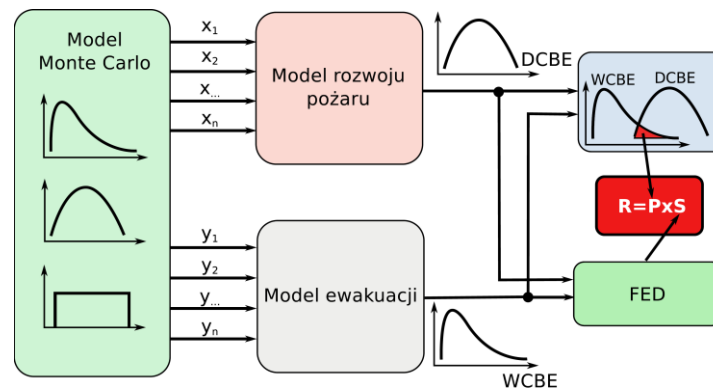
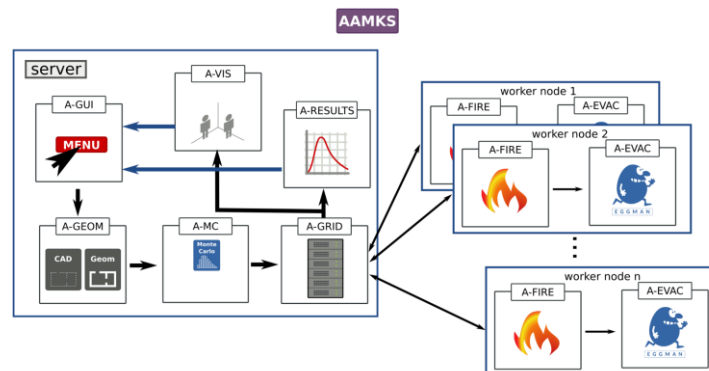
# Obszary zastosowania modeli komputerowych

Akademia Pożarnicza

## Analizy popożarowe



## Modelowanie probabilistyczne

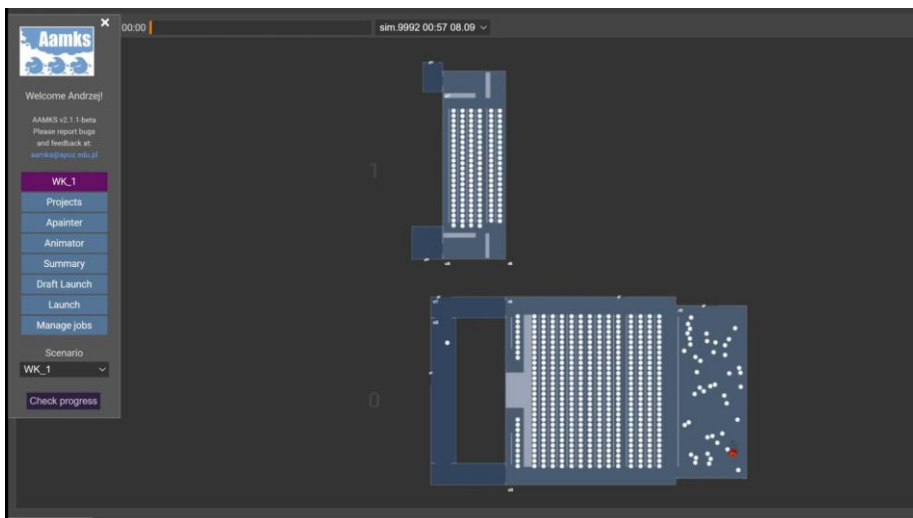
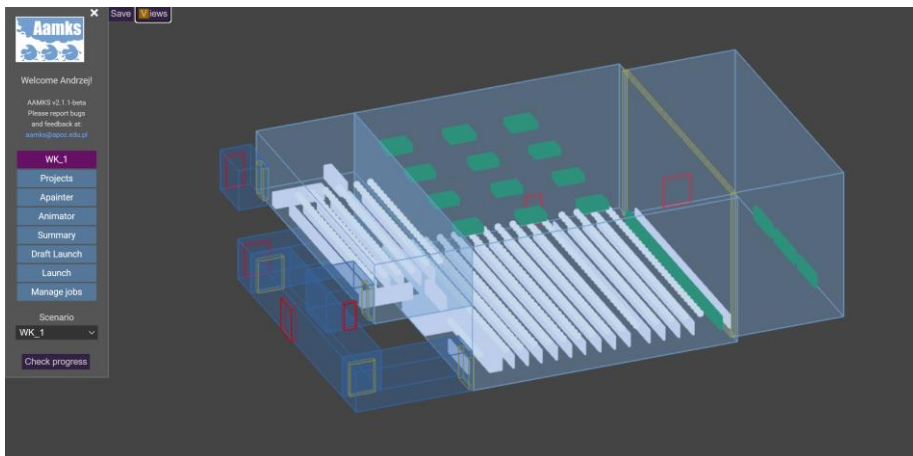






# Modelowanie probabilistyczne pożaru i ewakuacji AAMKS – narzędzie rozwijane przez IIB APOż

Akademia Pożarnicza



Analiza ryzyka również jako narzędzie audytu obiektu w rękach inspektora ochrony przeciwpożarowej ?

Tak !! Powołujemy  
Komitet Techniczny SITP  
w sprawie opracowania  
Poradnika Eksperta  
Systemu Zarządzania  
Ochroną Przeciwpożarową.

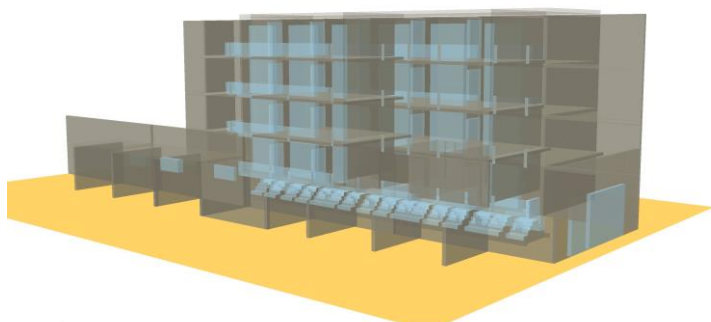




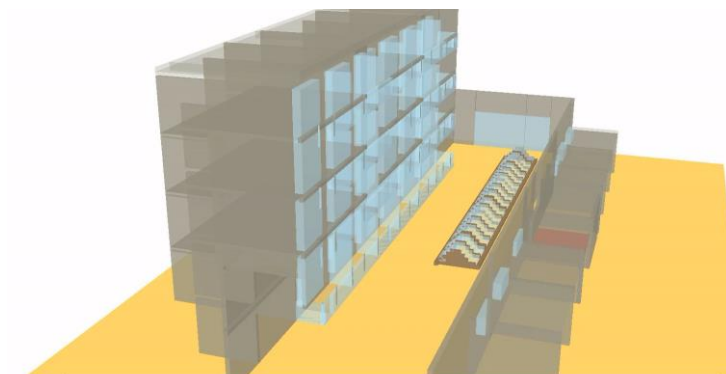
## Modelowanie bezpiecznych odległości budynków

Akademia Pożarnicza

### Oddziaływanie pożaru przez okno

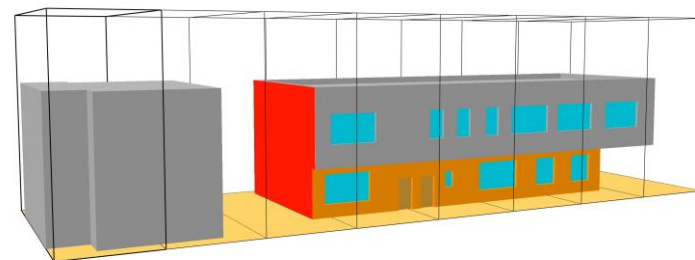


Time: 0.0

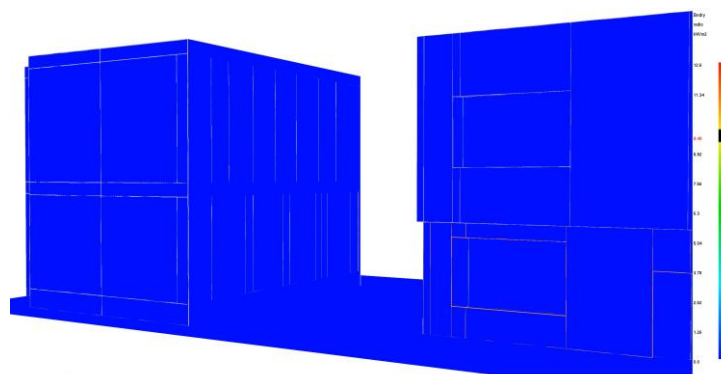


Time: 0.0

### A co w przypadku pożaru elewacji ?



Time: 0.0



Time: 0.0



Akademia Pożarnicza

**Następne wyzwanie inżynierskie i naukowe !**

**Wykorzystanie modeli komputerowych na potrzeby procesu związanego z klasyfikacją ogniową elementów budynku...**





## Modele komputerowe w badaniach ogniowych ?

Akademia Pożarnicza

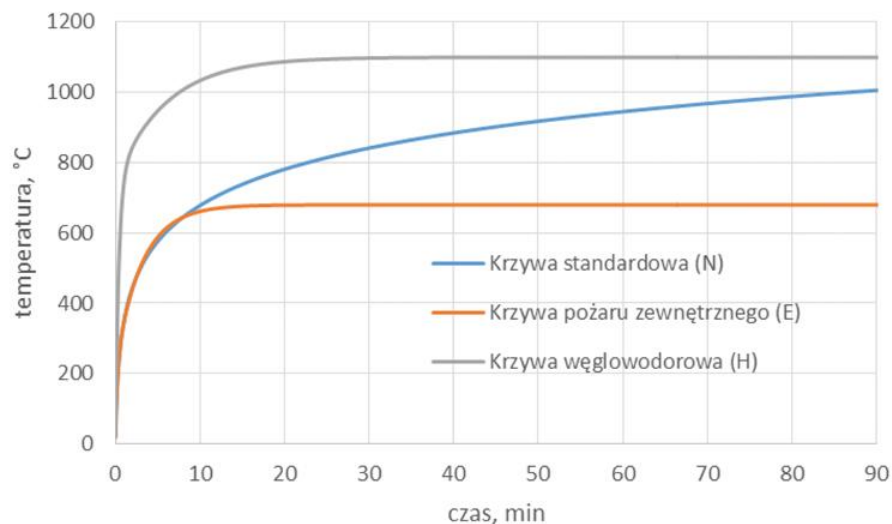
### Wymagania narzucone przepisami

#### § 225. Odpowiednie mocowanie okładzin elewacyjnych

Elementy okładzin elewacyjnych powinny być mocowane do konstrukcji budynku w sposób uniemożliwiający ich odpadanie w przypadku pożaru w czasie krótszym niż wynikający z wymaganej klasy odporności ogniowej dla ściany zewnętrznej, określonej w § 216 ust. 1, odpowiednio do klasy odporności pożarowej budynku, w którym są one zamocowane.

Źródło: rozporządzenie Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. 2002 nr 75 poz. 690, późn. zm.)

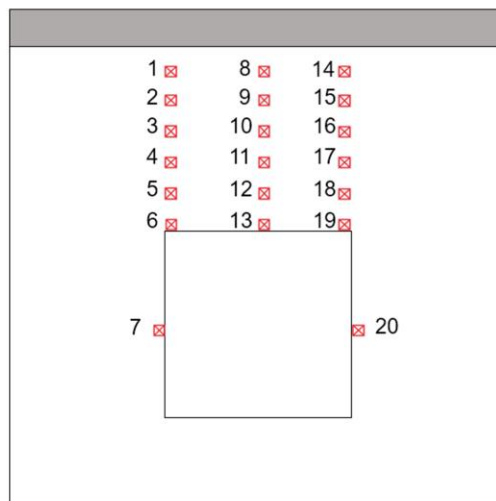
### Scenariusze „pożaru umownego” – krzywe nominalne





Akademia Pożnicza

## Piec do badań ogniowych ogrzewany według krzywej ISO 834

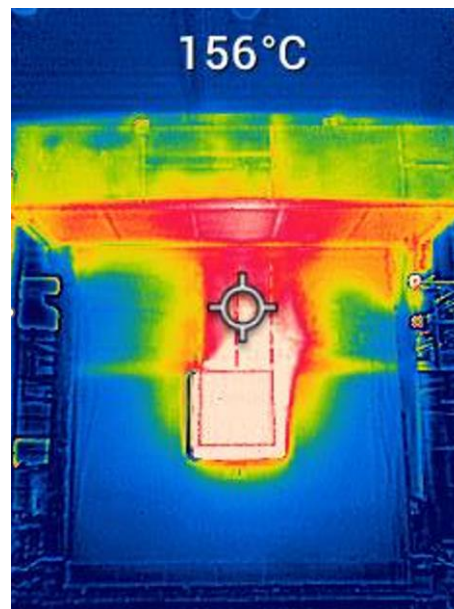
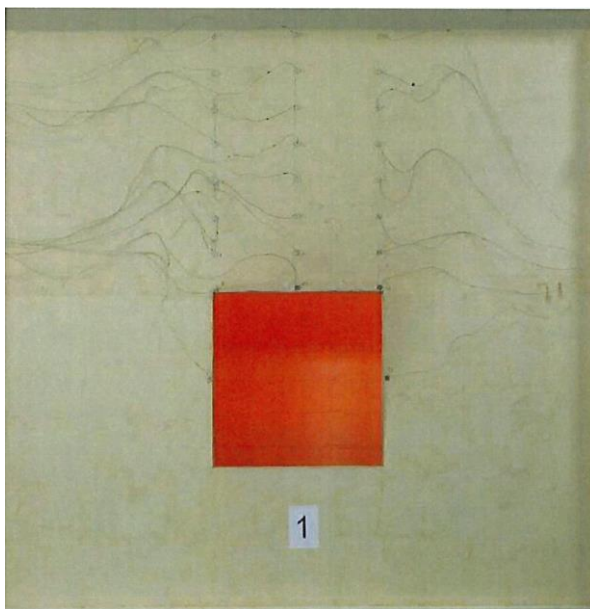


**120 badań w piecu do badań ogniowych, w celu określenia ostatecznej grubości ściany elewacyjnej i wymiarów otworu**



Akademia Pożarnicza

## Wybór próby badawczej

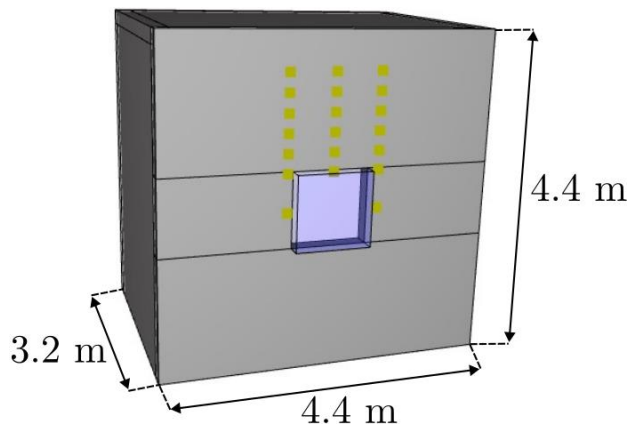


**Wybrana próba ze ścianą o grubości 110 mm oraz wymiarem otworu 1 m x 1 m, posłużyła do walidacji komputerowego modelu CFD stanowiska badawczego**

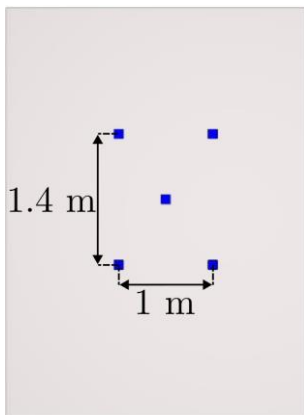


Akademia Pożarnicza

## Model pieca ISO - model



Wymiary zewnętrzne pieca: 4,4 m x 4,4 m x 3,2 m  
Rozmiar elementarnej komórki sieci obliczeniowej: 0,1 m  
Odległość termopar od badanej ściany: 10 cm  
Grubość ściany: 110 mm  
Wymiary otworu: 1 m x 1 m

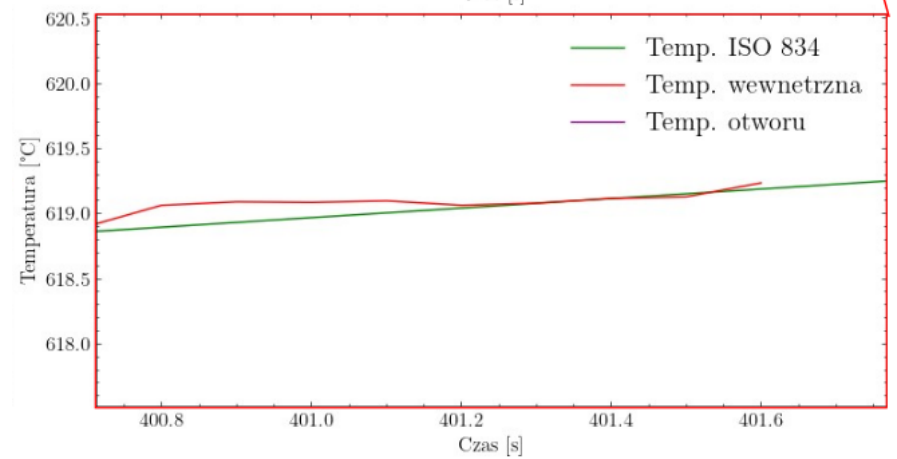
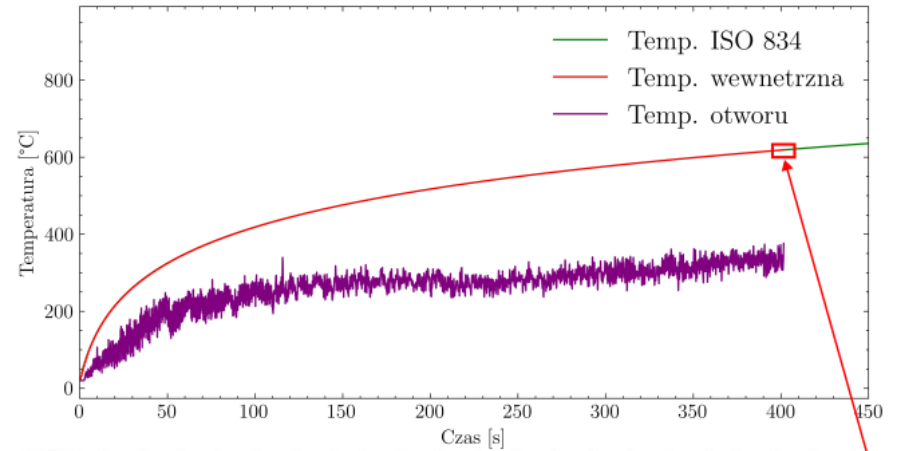
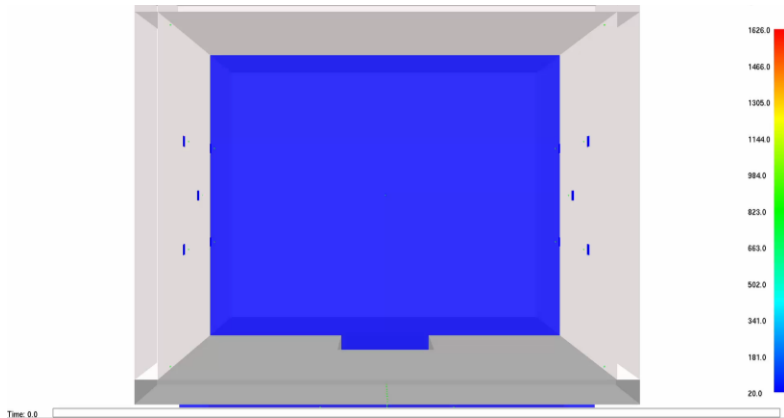
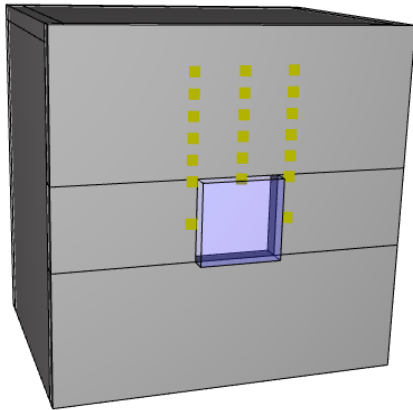


Liczba palników: 10  
Wymiary geometryczne palnika: 0,1 m x 0,1 m  
Średnica palnika: 0,09 m



# Model pieca ISO – funkcja PID

Akademia Pożarnicza





## Model pieca ISO – funkcja PID

Akademia Pożarnicza

W przyjętym modelu ilość substratów jest ustalana iteracyjnie w każdym kroku czasowym, przez regulator Proporcjonalno-Całkująco-Różniczkujący (PID, ang. Proportional-Integral-Derivative controller), zgodnie ze wzorem:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{d_e(t)}{dt}$$

gdzie:

$u(t)$  – odpowiedź regulatora, [°C];

$e(t)$  – niedokładność regulacji, [°C];

$K_p$  - wzmacnienie części proporcjonalnej, [-];

$K_i$  - wzmacnienie części całkującej, [-];

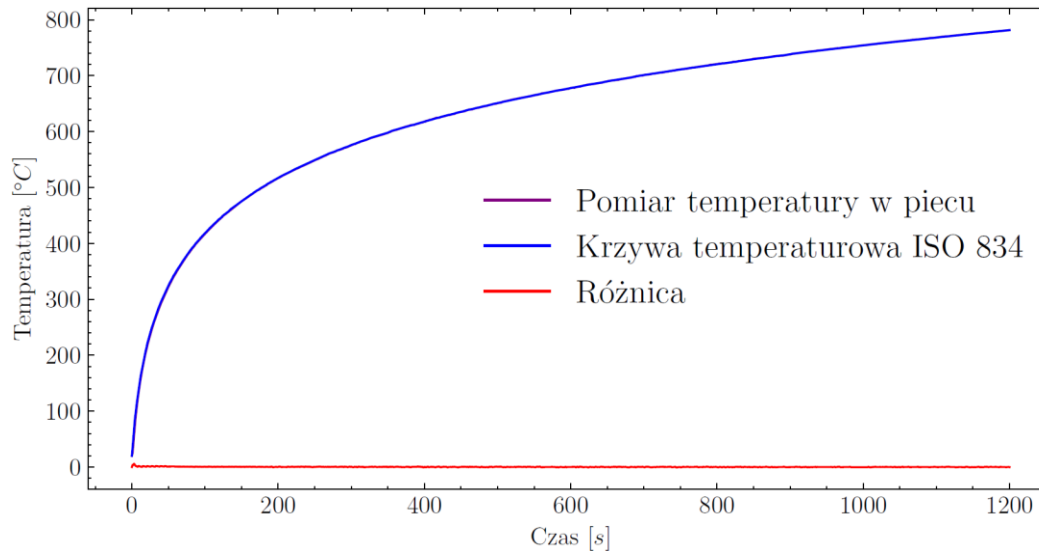
$K_d$  - wzmacnienie części różniczkującej, [-].



## Model pieca ISO – funkcja PID

Akademia Pożarnicza

Sprężenie zwrotne jest podstawą krzywej ISO 834 oraz objętościowego pomiaru temperatury wewnątrz pieca. W symulacji CFD zastosowano następujące nastawy:  $K_p = 0.008$ ,  $K_i = 0.008$ ,  $K_d = 0.002$ . Wartości nastaw ustalone zostały w sposób empiryczny.

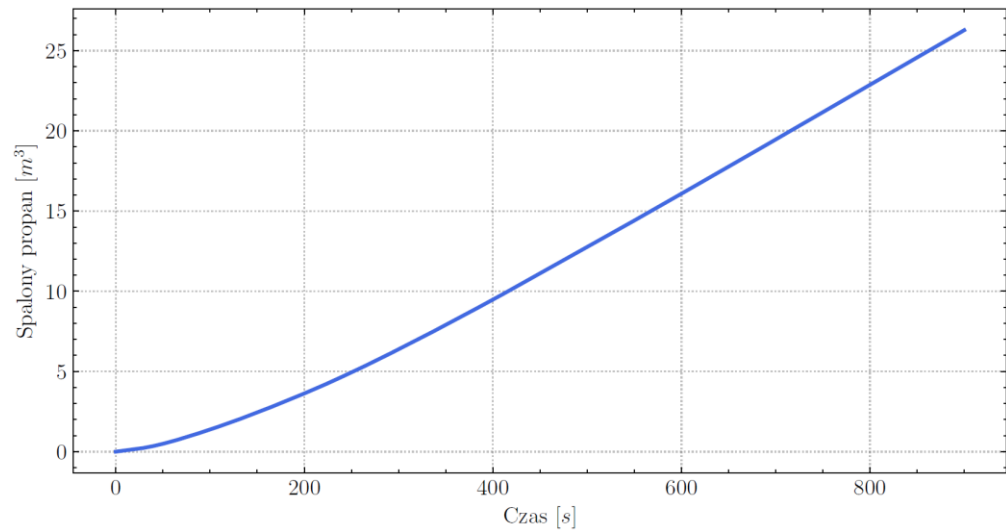
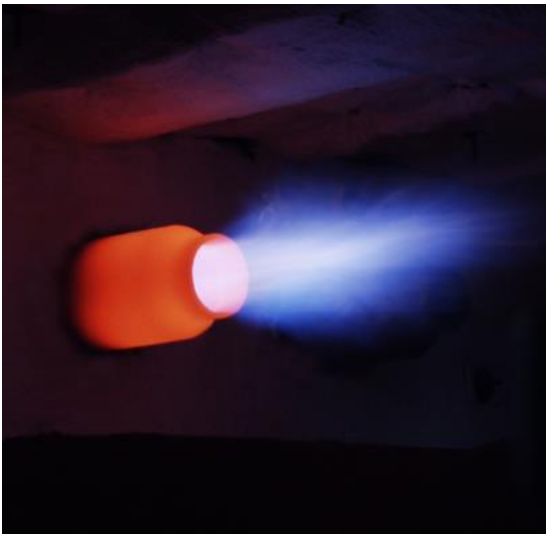




## Model pieca ISO – ilość spalonego paliwa

Akademia Pożarnicza

Podczas trwania 20 minutowej symulacji CFD, spaleni uległo około  $27 \text{ m}^3$  propanu, co było zgodne z pomiarem w badaniu.







# Model pieca ISO – rozkład ciśnienia wewnątrz pieca

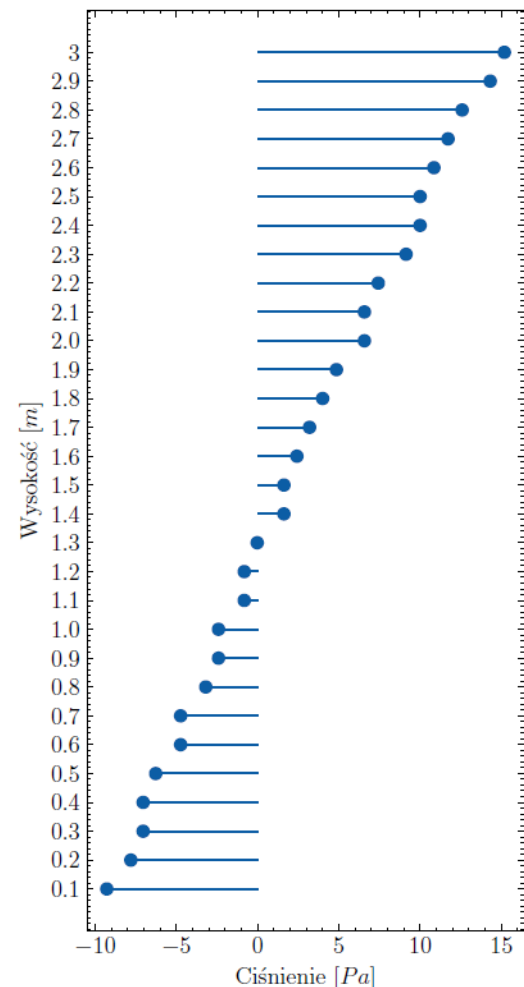
## Akademia Pożaricza

W celu dokładnego zbadania rozkładu ciśnienia, wewnątrz badanego pieca umieszczono sieć czujników. Rozmieszczenia czujników wykonano z rozdzielczością 0,1 m.

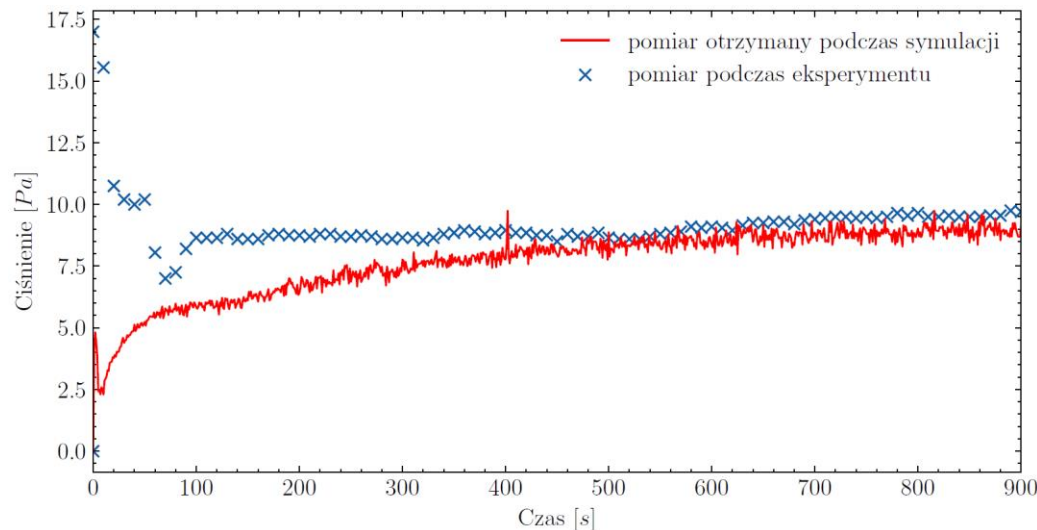
Rysunek A przedstawia profil ciśnienia wewnątrz pieca badawczego po 15 minutach symulacji CFD.

Rysunek B przedstawia porównanie wartości ciśnienia przy krawędzi otworu, zmierzonego w symulacji CFD oraz w badaniu fizycznym.

### Rysunek A:



### Rysunek B:





## Model pieca ISO – adiabatyczna temperatura powierzchni

### Akademia Pożarnicza

Porównania temperatur dokonano za pomocą adiabatycznej temperatury powierzchni (ang. adiabatic surface temperature). Wielkość ta reprezentuje strumień ciepła na powierzchni i analitycznie wyznaczona może zostać ze wzoru:

$$\varepsilon_p \left( \dot{q}''_{icn,rad} - \sigma_{sb} \cdot T_{AST}^4 \right) + h(T_{gas} - T_{AST}) = 0$$

gdzie:

$T_{AST}$  - adiabatyczna temperatura powierzchni, [K];

$\dot{q}''_{icn,rad}$  - strumień ciepła padający na powierzchnię, [W/m<sup>2</sup>];

$\varepsilon_p$  - współczynnik emisyjności powierzchni, [-];

$h$  - współczynnik konwekcji, [W/(m<sup>2</sup>·K)];

$T_{gas}$  - temperatura gazu otaczającego powierzchnię, [K];

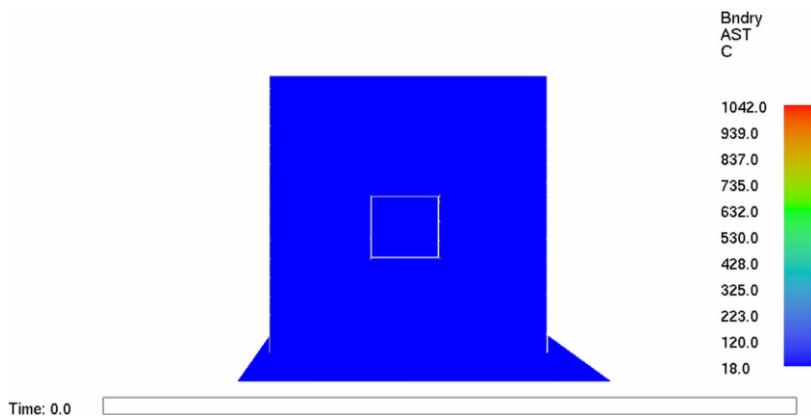
$\sigma_{sb}$  - stała Stefana-Boltzmana, [W/(m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>)].



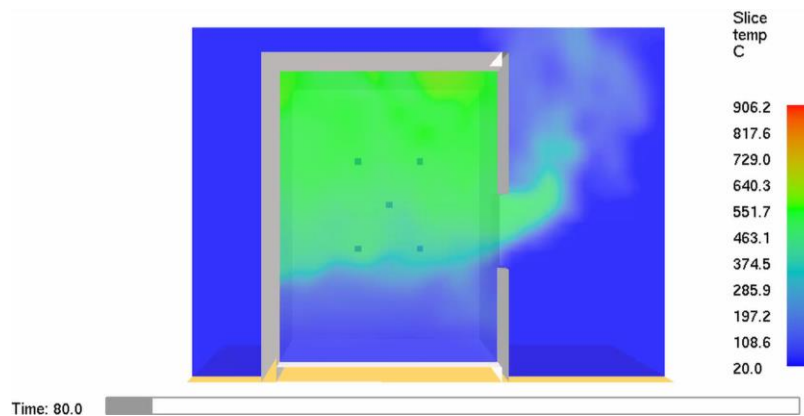
# Model pieca ISO – wyniki oddziaływania temperaturowego

Akademia Pożarnicza

## Widok frontu modelu pieca



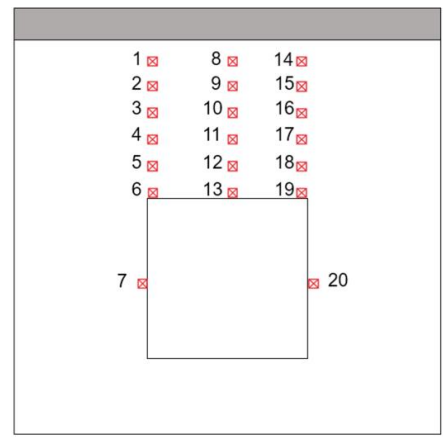
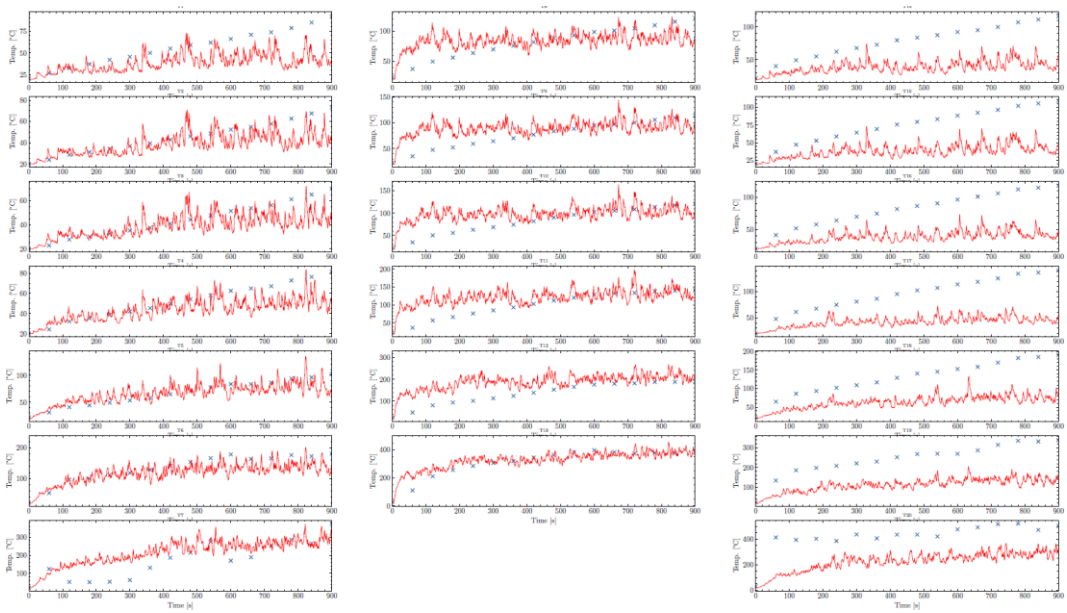
## Widok profilu modelu pieca





# Model pieca ISO – wyniki oddziaływania temperaturowego

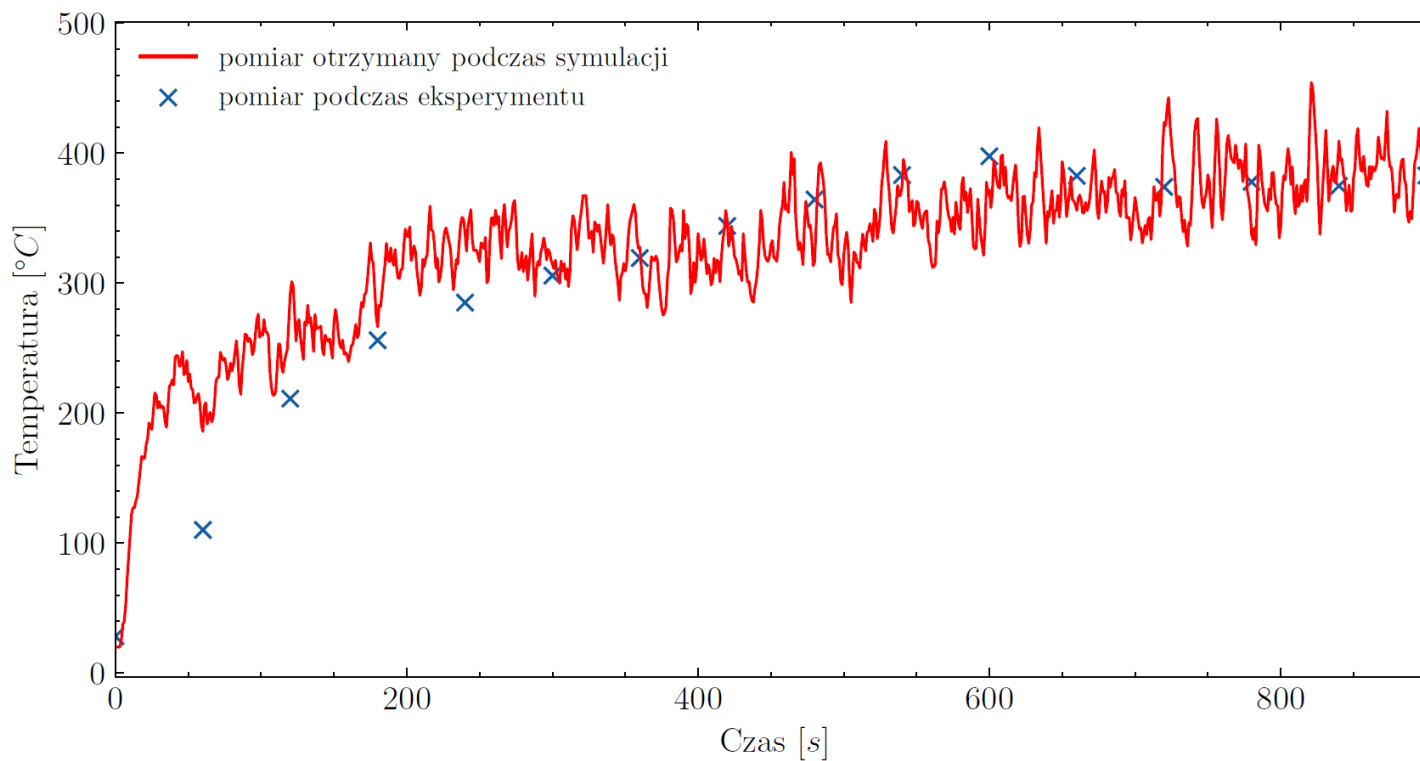
Akademia Pożnicza





## Model pieca ISO – temperatura nad krawędzią otworu

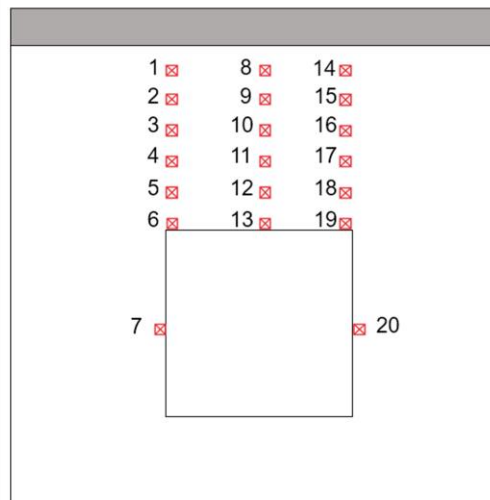
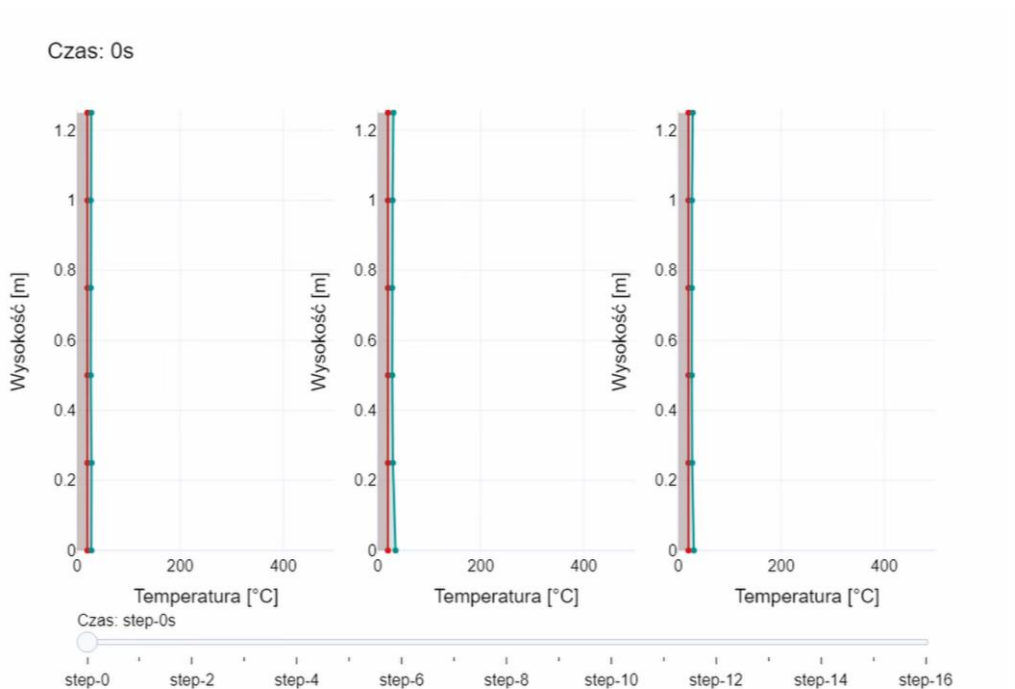
Akademia Pożarnicza





# Model pieca ISO – wyniki oddziaływania temperaturowego

Akademia Pożarnicza





Akademia Pożarnicza

## Model pieca ISO – błąd modelu

$$E_{max} = \frac{|t_c^{max} - t_e^{max}|}{t_e^{max}} \cdot 100\%$$

$$E_{mean} = \frac{\sum_{i=1}^{100} |\Delta t_c(i) - \Delta t_e(i)|}{\sum_{i=1}^{100} t_e(i)} \cdot 100\%$$

gdzie:

$E_{max}$  - błąd maksymalny, [%];

$E_{mean}$  - błąd średni, [%];

$\Delta t_c(i) = t_c(i) - t_c(0)$ , [°C];

$\Delta t_e(i) = t_e(i) - t_e(0)$ , [°C];

$t_c^{max}$  - maksymalna temperatura w symulacji, [°C];

$t_e^{max}$  - maksymalna temperatura zmierzona w trakcie eksperymentu, [°C];

$t_c(0)$  - początkowa wartość temperatury użyta w symulacji, [°C];

$t_e(0)$  - początkowa wartość temperatury użyta w symulacji, [°C];

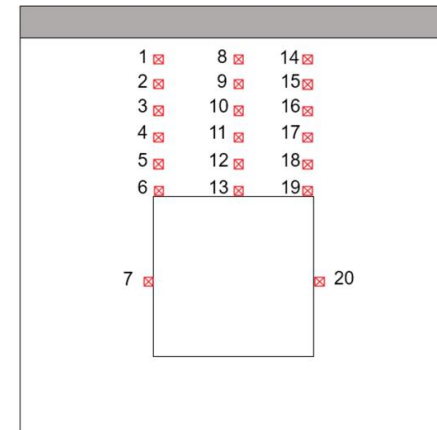
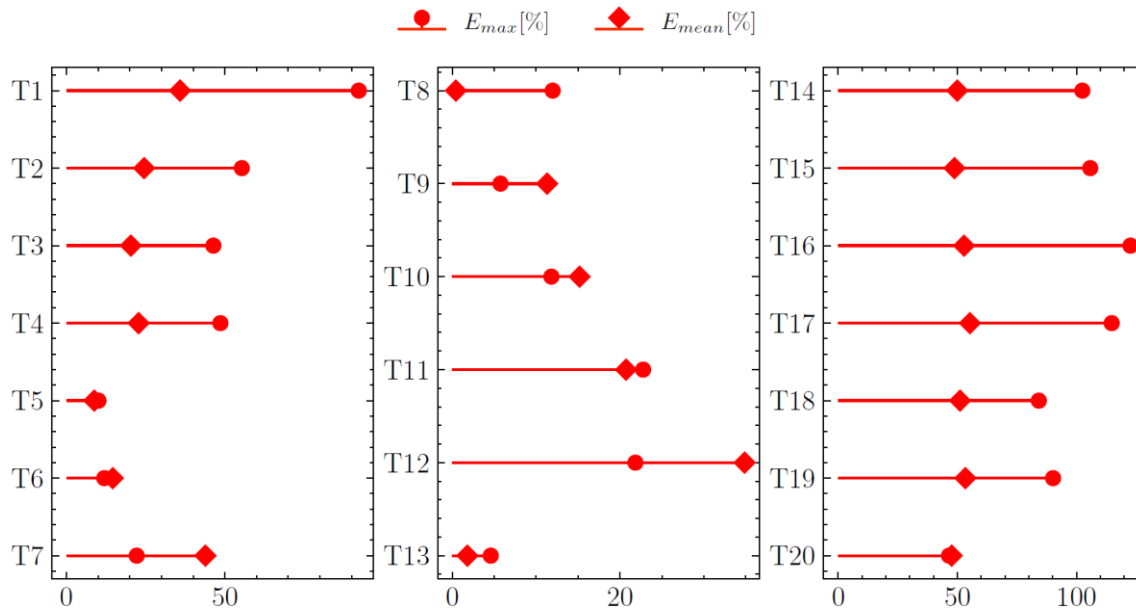
$t_c(i)$  - bieżąca wartość temperatury zmierzona w i-tym kroku symulacji, [°C];

$t_e(i)$  - bieżąca wartość temperatury zmierzona w i-tym kroku eksperymentu, [°C].



# Model pieca ISO – błąd modelu

Akademia Pożarnicza







**Akademia Pożarnicza**

## **Podsumowanie i wnioski**

**Przeprowadzone badania dowiodły, że zaproponowana metoda symulacji CFD jest skuteczna w przewidywaniu oddziaływań termicznych na elewacje budynków, co potwierdzają wyniki uzyskane w analizach porównawczych.**

**Opracowane symulacje komputerowe mogą stanowić cenne narzędzie wspomagające proces projektowania i analizy elementów konstrukcyjnych w warunkach pożaru, a także mogą być podstawą do dalszego rozwoju w tym obszarze.**



## Potrzeba kolejnych badań...

Akademia Pożarnicza





## Badania eksperymentalne cech pożarowych paneli fotowoltaicznych w montażu fasadowym

Akademia Pożarnicza



### Wyniki badań opublikowane w:

Krauze, A., Kowalski, W., Łukaszczuk, P., Szarycki, A. Experimental Study on Fire Behaviour of PV Panels as an Element of Façade. [w:] McNamee, R., Anderson, J. (red.), Proceedings of FSF 2024, 4th International Symposium on Fire Safety of Facades, 10-12 June 2024, Lund, Sweden, ss. 137-147.

Źródło: opracowanie własne na podstawie badań przeprowadzonych w laboratorium GryfitLab.



**DZIĘKUJĘ ZA WYSŁUCHANIE**



**mł. bryg. mgr inż. Andrzej Krauze**

Instytut Inżynierii Bezpieczeństwa Akademii Pożarniczej

[mail: akrauze@apoz.edu.pl](mailto:akrauze@apoz.edu.pl)



# ZAPRASZAMY DO AKADEMII POŻARNICZEJ !



VII WARSZTATY SZKOLENIOWE  
„PROJEKTOWANIE WENTYLACJI POŻAROWEJ”  
oraz Szkolenie Rzecznawców do Spraw Zabezpieczeń Przeciwożarowych

źródło: Oficjalny Profil Facebook Akademii Pożarniczej

**23-24 października, [www.24-5.sem.sitp.org.pl](http://www.24-5.sem.sitp.org.pl)**