

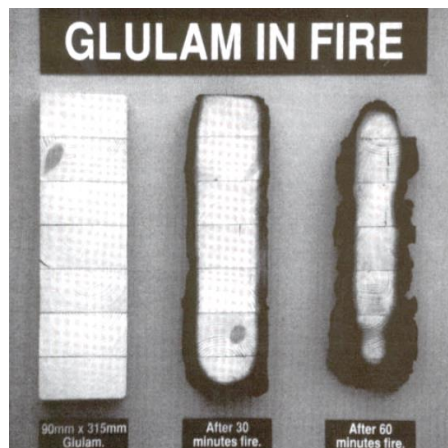
Marlena Rajczyk, Damian Jończyk

## ANALIZA NUMERYCZNA BELKI DREWNIANEJ PODDANEJ DZIAŁANIU OGNI

### Wprowadzenie

Drewno jest materiałem powszechnie stosowanym w budownictwie. Jako materiał budowlany ma ono szereg zalet, do których można zaliczyć: wysoką estetykę, mały ciężar własny, wysoką odporność na działanie agresywnych związków chemicznych. Wadą drewna jako materiału budowlanego jest jego palność.

W przypadku wystawienia drewnianych elementów konstrukcyjnych na działanie ognia wraz ze wzrostem temperatury następuje spadek właściwości wytrzymałościowych oraz zmniejszenie wymiarów przekroju poprzecznego elementu poprzez jego spalanie - zjawisko to jest nazywane pirolizą. Zastosowanie środków impregnujących może znacząco podnieść odporność drewna na destrukcyjne działanie ognia, lecz nie zabezpieczy to w pełni elementu. Na podstawie rysunku 1, zaczerpniętego z [1], można zauważyć, że jest to zagadnienie bardzo istotne, gdyż bezpośrednio wpływa na bezpieczeństwo konstrukcji.



Rys. 1. Przekroje poprzeczne elementów wykonanych z drewna klejonego warstwowo niewystawionych na działanie ognia oraz poddanych działaniu ognia przez 30 i 60 minut [1]

Badań eksperymentalnych analizujących wpływ ognia na elementy konstrukcyjne przeprowadza się stosunkowo niewiele, gdyż są to badania drogie, a także nie w pełni odwzorowujące rzeczywistą sytuację pożaru. Ważnym elementem badań ogniowych jest analiza numeryczna z wykorzystaniem programów bazujących na metodzie elementów skończonych (MES).

W artykule przedstawiono analizę numeryczną belki drewnianej z drewna klejonego warstwowo, wystawionej na działanie ognia.

## **1. Badania konstrukcji drewnianych obciążonych działaniem ognia**

W literaturze światowej można znaleźć coraz więcej opracowań opisujących badania eksperymentalne i numeryczne elementów drewnianych poddanych działaniu ognia. Jednak jest ich jeszcze stosunkowo mało, pomimo tego, iż jest to bardzo ważne zagadnienie, które dotyczy bezpieczeństwa użytkownika konstrukcji. Ważnym elementem analizy zachowania się konstrukcji w warunkach pożaru są metody numeryczne, dzięki którym możemy oszacować wyniki bez prowadzenia kosztownych badań eksperymentalnych.

Badaniom wpływu ognia często poddawane są miejsca łączeń, gdyż są one jednymi z najbardziej newralgicznych miejsc w całej konstrukcji. Obszerne badania eksperymentalne i numeryczne w zakresie analizy pracy w warunkach pożaru połączeń elementów drewnianych za pomocą metalowych sworzni prowadzili Audebert i inni [2-5], Racher i inni [6] oraz Laplanche i inni [7], proponując także metodykę obliczeń analizowanych połączeń.

Badania miejsc połączeń wykonanych za pomocą metalowych płaskowników prowadzili Erchinger i inni [8, 9], przedstawiając także metodykę obliczeń analitycznych w przypadku wystawienia na działanie ognia.

Inne opracowania dotyczące wytrzymałości konstrukcji w warunkach pożaru dotyczą: fornirowego drewna warstwowego (LVL) [10], kompozytowych belek drewniano-betonowych [11] oraz poprzecznie laminowanych podłóg drewnianych [12].

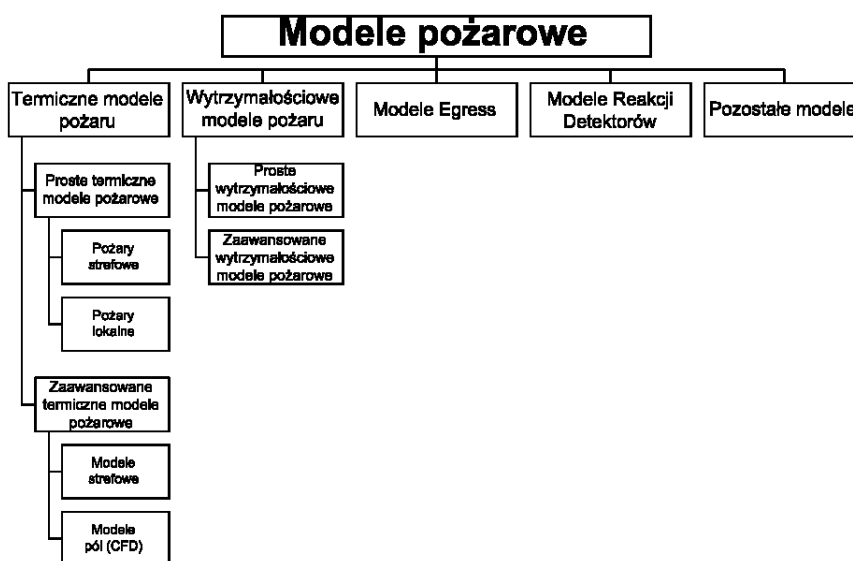
## **2. Programy komputerowe a zakres analizy obciążenia ogniem**

Zakres prowadzonej analizy obciążenia ogniem konstrukcji budowlanych może być bardzo różny od obliczeń pojedynczego elementu do modelowania rozprzestrzeniania się ognia w całym budynku. Przegląd możliwości związanych z wykorzystaniem metod numerycznych do badań odporności ogniowej przedstawiono w pracy [13]. W zależności od zakresu prowadzonej analizy obliczenia możemy wykonywać z wykorzystaniem różnych programów komputerowych. Jeden z pierwszych podziałów oprogramowania komputerowego stworzyli Olenick i Carpenter [14], który zakłada podział programów na sześć grup:

- modele strefowe,

- modele pól (związane z Komputerową Mechaniką Płynów),
- wytrzymałościowe modele pożaru,
- modele Egress,
- modele reakcji detektorów,
- pozostałe modele.

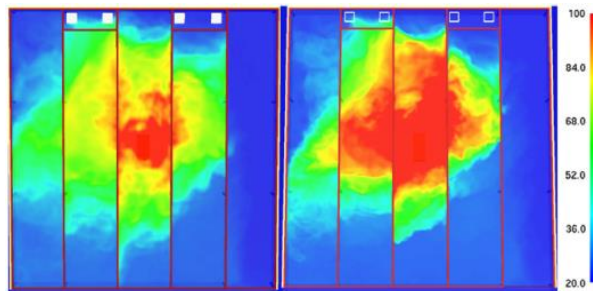
W opracowaniu [15] zaproponowano podział programów komputerowych na pięć grup, które zostały przedstawione na rysunku 2. W podziale tym zaproponowano zastąpienie dwóch pierwszych modeli bardziej ogólną nazwą termiczne modele pożaru, dzięki czemu pominięto rozróżnienie ze względu na rodzaj matematycznej metody obliczeń.



Rys. 2. Podział modeli pożarowych - na podstawie [15]

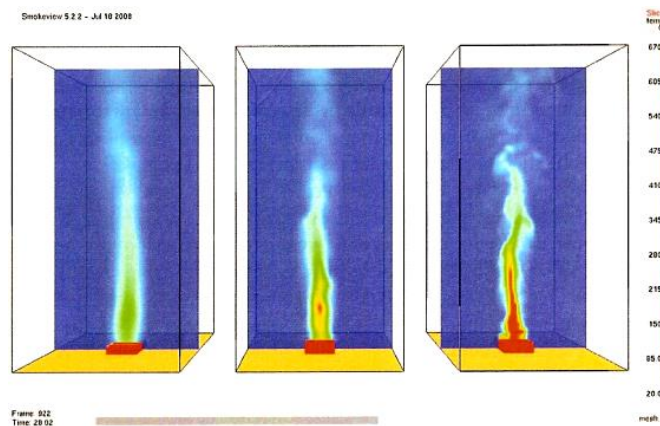
Termiczne modele pożaru różnią się pomiędzy sobą głównie metodą rozwiązywania pól temperatur, a służą do określenia rozkładu temperatur oraz przemieszczania się dymu w pomieszczeniach, a nawet całych obiektach. W przypadku prostych termicznych modeli pożarowych liczba analizowanych parametrów jest niewielka, lecz również zakres analizy jest dosyć ograniczony. Zaawansowane termiczne modele pożarowe pozwalają na bardziej dokładną analizę w zależności od zastosowanej metody. Analiza modeli strefowych polega na podziale pomieszczenia na określone obszary. Najczęściej są to dwie strefy: górna (gorąca) oraz dolna (zimna). W pewnych przypadkach ilość stref redukuje się do jednej. Pożar ma charakter bardziej skomplikowany niż dwustrefowy i wykorzystanie tego modelu jest oparte na szeregu uproszczeń. Modelami bardziej dokładnymi są modele pól oparte na Komputerowej Dynamice Płynów (CFD). W tym modelu pomieszczenie dzieli się na wiele małych elementów analogicznych jak w przypadku modeli strefowych, lecz elementów tych jest bardzo wiele. Z użyciem modeli CFD można otrzymać najdo-

kładniejsze wyniki, m.in.: prędkości przemieszczania się dymu, rozkłady temperatur, które najczęściej są przedstawiane w formie wizualizacji (rys. 3).



Rys. 3. Wizualizacja wyników otrzymanych na podstawie obliczeń z wykorzystaniem CFD [16]

Ważnym czynnikiem wpływającym na dokładność analizy jest zagęszczenie siatki elementów objętościowych. W ogólnym ujęciu można sformułować stwierdzenie, że im gęstsza siatka, tym dokładniejsze wyniki obliczeń, lecz, jak zostało to udowodnione w pracy [17], jest to prawda tylko do określonej wartości. Jeżeli siatka będzie zbyt gęsta, wyniki również mogą być zafałszowane. Porównanie dokładności rozwiązań w zależności od stopnia zagęszczenia siatki przedstawiono na rysunku 4. W przypadku prowadzenia analiz z wykorzystaniem CFD niezbędna jest obszerna wiedza na temat klasycznej mechaniki płynów w celu weryfikacji obliczeń komputerowych.



Rys. 4. Porównanie rozwiązań CFD z zastosowaniem różnych stopni zagęszczenia siatki elementów objętościowych [17]

Wytrzymałościowe modele pożarowe pozwalają określić odpowiedź mechaniczną oraz termiczną pojedynczych elementów konstrukcyjnych lub całych obiektów. Wytrzymałościowe modele pożaru można również podzielić na proste i zaawanso-

wane, lecz te pierwsze mają bardzo wąskie zastosowanie. Najczęściej modele te są rozwiązywane z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES). Z zastosowaniem tego typu modeli została przeprowadzona analiza w niniejszym artykule.

Pozostałe modele nie mają już tak dużego zastosowania w przypadku analizy elementów konstrukcyjnych. Modele Egress służą do oszacowania czasu potrzebnego na ewakuację budynku z uwzględnieniem różnych czynników (również psychologicznych). Modele reakcji detektorów służą do analizy czasu potrzebnego do uruchomienia się wszelkiego rodzaju czujników pożarowych, m.in.: detektorów dymu, czujników ciepła, tryskaczy. Istnieją również modele, których nie można zaliczyć do żadnej z powyższych grup ze względu na różne przyczyny, zaś niektóre z nich można zaliczyć do kilku grup jednocześnie.

### 3. Analiza numeryczna

W pracy analizowany jest rozkład temperatury w belce z drewna klejonego wystawionej na działanie ognia. Przekrój analizowanej belki przyjęto o wymiarach  $260 \times 520$  mm.

#### 3.1. Termiczne właściwości materiałowe

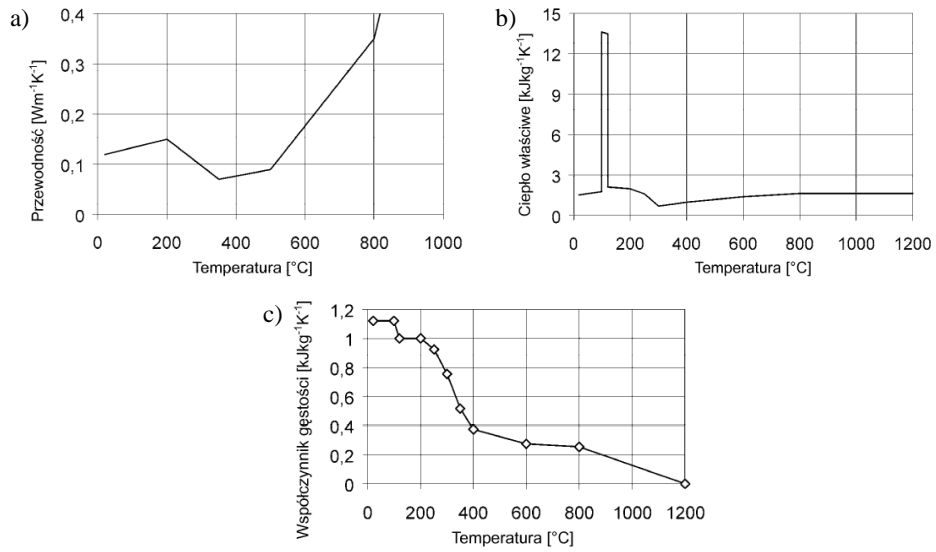
W celu przeprowadzenia analizy przepływu ciepła niezbędne jest podanie właściwości termicznych materiałów, do których zaliczamy: przewodność cieplną, ciepło właściwe oraz gęstość. W przypadku drewna istotne jest to, że wartości tych parametrów zależne są od temperatury. W programie ANSYS istnieje możliwość zadeklarowania powyższych parametrów w funkcji temperatury. Do obliczeń przyjęto wartości przewodności, ciepła właściwego i współczynnika gęstości dla drewna na podstawie Eurokodu 5 [18] (rys. 5). Gęstość drewna przyjęto o wartości  $410 \text{ kg/m}^3$ , przy założeniu, że belka jest wykonana z drewna klejonego warstwowo klasy GL28h [19].

Dokładna analiza termiczna powinna uwzględniać transport masy w drewnie, lecz uwzględnienie tego typu zależności w modelu numerycznym jest trudne. Dlatego ze względu na uproszczony charakter obliczeń zostało to w niniejszym opracowaniu pominięte.

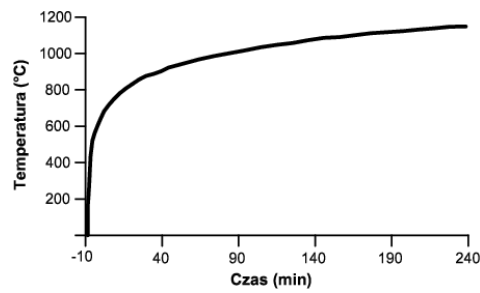
#### 3.2. Model termiczny

Model numeryczny został zaimplementowany w programie ANSYS. Analiza opiera się na przepływie ciepła określanym przez zjawiska fizyczne radiacji miejsc wystawionych na działanie ognia i konwekcji w pozostałych miejscach. Symulacja działania ognia została dokonana za pomocą zadeklarowania odpowiedniej temperatury przyjętej na podstawie krzywej pożarowej ISO R834 (rys. 6). Do zamodelowania belek obciążonych działaniem ognia użyto 4-węzłowych elementów skończonych przeznaczonych do analizy termicznej, tworząc model 2D, przedstawiony na rysunku 7. Do obliczeń przyjęto wartość emisyjności powierzchni równą 0,8

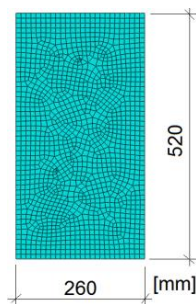
oraz współczynnik przejmowania ciepła przez konwekcję równy  $25 \text{ W/m}^2\text{K}$  [20]. Wymiar oka siatki elementów skończonych wynosił 10 mm.



Rys. 5. Zależności właściwości termicznych drewna od temperatury drewna: a) przewodności, b) ciepła właściwego, c) współczynnika gęstości [18]



Rys. 6. Krzywa pożarowa ISO R834

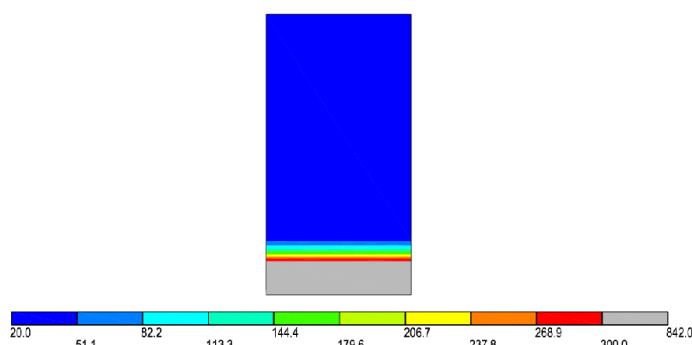


Rys. 7. Model numeryczny 2D konstrukcji obciążonej ogniem

#### 4. Wyniki obliczeń

Dla wstępnych obliczeń założono czysto teoretyczny, jednokierunkowy przepływ ciepła 1D od dołu belki ku górze.

Na rysunku 8 przedstawiono rozkład temperatur po 10 minutach działania ognia, otrzymany w drodze obliczeń numerycznych. Głębokość zwęglenia jest oznaczona kolorem szarym i jest określona przez położenie izotermy o wartości 300°C [18].



Rys. 8. Rozkład temperatur po 10 minutach działania ognia

#### Podsumowanie

W artykule przedstawiono analizę numeryczną z zastosowaniem modelu wytrzymałościowego belki drewnianej wystawionej na działanie ognia. Dokładne wytyczne do przeprowadzenia takiej analizy można znaleźć w Eurokodzie 5 [18]. Obliczenia takie dają obraz, jak będzie przebiegał proces pirolizy projektowanego elementu w odniesieniu do czasu działania ognia.

Tego typu analizy są bardzo ważnym elementem procesu projektowego, szczególnie w przypadku elementów drewnianych, które wystawione na działanie ognia podlegają procesowi spalania. Na podstawie przeglądu literaturowego można jednak stwierdzić, że numeryczne obliczenia ogniowe są prowadzone rzadko, pomimo tego, że jest to istotny etap projektowania konstrukcji.

#### Literatura

- [1] Glued Laminated Timber Association, Technical Data Sheet No. 1 Glulam in Sports Hall, Guide to Fire Requirements.
- [2] Audebert M., Dhima D., Taazount M., Bouchaïr A., Numerical investigations on the thermo-mechanical behavior of steel-to-timber joints exposed to fire, *Engineering Structures* 2011, 33, 3257-3268.
- [3] Audebert M., Dhima D., Taazount M., Bouchaïr A., Behavior of dowelled and bolted steel-to-timber connections exposed to fire, *Engineering Structures* 2012, 39, 116-125.
- [4] Audebert M., Dhima D., Taazount M., Bouchaïr A., Thermo-mechanical behavior of timber-to-timber connections exposed to fire, *Fire Safety Journal* 2013, 56, 52-64.

- [5] Audebert M., Dhima D., Taazount M., Bouchaïr A., Experimental and numerical analysis of timber connections in tension perpendicular to grain in fire, *Fire Safety Journal* 2014, 63, 125-137.
- [6] Racher P., Laplanche K., Dhimab D., Bouchaïr A., Thermo-mechanical analysis of the fire performance of dowelled timber connection, *Engineering Structures* 2010, 32, 1148-1157.
- [7] Laplanche K., Dhima D., Racher P., Thermo-mechanical analysis of the timber connection under fire using 3D finite element model, *Proceedings of the 9th World Conference on Timber Engineering*, Portland, Oregon, USA, August 6-10, 2006.
- [8] Erchinger C., Frangi A., Fontana M., Fire design of steel-to-timber dowelled connections, *Engineering Structures* 2010, 32, 580-589.
- [9] Erchinger C., Frangi A., Mischler A., Thermal investigations on multiple shear steel-to-timber connections, *Proceedings of the 9th World Conference on Timber Engineering*, Portland, Oregon, USA, August 6-10, 2006.
- [10] Fragiacommo M., Menis A., Moss P.J., Clemente I., Buchanan A.H., Numerical and experimental thermal-structural behaviour of laminated veneer lumber (LVL) exposed to fire, *Proceedings of the 10th World Conference on Timber Engineering*, Riva del Garda, Trentino, Italy, June 20-24, 2010.
- [11] Molina J.C., Calil C. Junior, Numerical analysis of composite structure wood concrete in fire, *Proceedings of the 11th World Conference on Timber Engineering*, Auckland, USA, July 16-19, 2012.
- [12] Fragiacommo M., Menis A., Clemente I., Bochicchio G., Tessadri B., Experimental and numerical behaviour of crosslaminated timber floors in fire conditions, *Proceedings of the 11th World Conference on Timber Engineering*, Auckland, USA, July 16-19, 2012.
- [13] Rajczyk M., Jończyk D., Modeling of fire-resistant timber structures using the finite element method, *Vestnik grazdanskikh inzenerov* 2013, 4, 104-109.
- [14] Olenick S.M., Carpenter D. J., An updated international survey of computer models for fire and smoke, *Journal of Fire Protection Engineering* 2003, 13, 2, 87-110.
- [15] Morente E., de la Quintana J., Part 4: Software for fire design, [w:] *Dissemination of Fire Safety Engineering Knowledge*, Bilbao 2008, 4-1- 4.39.
- [16] Deckers X., Haga S., Tilley N., Merci B., Smoke control in case of fire in a large car park: CFD simulations of full-scale configurations, *Fire Safety Journal* 2013, 57, 22-34.
- [17] Smardz P., Paliszek-Saładyna J., Zalecenia dotyczące prawidłowego stosowania modelu CFD w symulacjach pożarowych dla programu Fire Dynamics Simulator, VI Międzynarodowa Konferencja Bezpieczeństwo Pożarowe Budowli, Warszawa-Wesoła, 18-19 listopada 2008, 139-149.
- [18] PN-EN 1995-1-2: 2004 Eurokod 5: Projektowanie konstrukcji drewnianych. Część 1-2: Postanowienia ogólne. Projektowanie konstrukcji z uwagi na warunki pożarowe.
- [19] PN-EN 1194: 2000 Konstrukcje drewniane. Drewno klejone warstwowo. Klasy wytrzymałości i określenie wartości charakterystycznych.
- [20] PN-EN 1991-1-2: 2004 Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcję. Część 1-2: Oddziaływania ogólne - Oddziaływania na konstrukcję w warunkach pożaru.

### Streszczenie

W artykule przedstawiono analizę numeryczną belki drewnianej z drewna klejonego warstwowo. Podczas analizy założono, że belka została poddana działaniu ognia. Wartość wzrostu temperatury w czasie obciążenia ogniem przyjęto na podstawie krzywej pożaru ISO R834. Analizy dokonano na podstawie modelu numerycznego. Ze względu na zmianę właściwości fizycznych drewna wraz ze zwiększającą się temperaturą do obliczeń przyjęto współczynniki redukcyjne przedstawione w Eurokodzie 5.



---

## **Numerical analysis of wooden beam exposed to fire**

### **Abstract**

The article presents the numerical analysis of the beam made of glulam. In the analysis it was assumed that the beams were exposed to fire. The value of temperature of the beams while being exposed to fire was based on a fire curve ISO R834. The analysis was made on the basis of numerical models. Because of the changes in mechanical-physical properties of wood together with the increasing temperature, for the calculations there were used reduction factors included in Eurocode 5.