

# **Weryfikacja obliczeń numerycznych na podstawie badań fizykalnych płaskiej strugi ograniczonej wykorzystywanej do wydzielenia obszarów niezadymionych**

**Grzegorz Krajewski<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Instituto Techniki Budowlanej, Zakład Badań Ogniowychul. Ksawerów 21, 02-656 Warszawa, e-mail: g.krajewski@itb.pl*

**Streszczenie:** Płaskie strugi ograniczone (pot. Kurtyny powietrzne) są stosowane jako wirtualne płaszczyzny pozwalające na zredukowanie wymiany ciepła i masy pomiędzy dwoma przyległymi do siebie strefami o różnych parametrach środowiska. Wytwarza ona odpowiednio duże ciśnienie dynamiczne na wylocie uniemożliwiając tym samym poprzeczny przepływ poprzez otwór w którym jest zlokalizowana. Kurtyny powietrzne mogą być wykorzystane do ograniczenia rozprzestrzeniania dymu w przypadku pożaru przez co wydzielenie stref niezadymionych. Jednym z kluczowych aspektów jest zapewnienie jak najwyższej szczelności takiej kurtyny. Określenie wymaganych parametrów może być przeprowadzone na podstawie badań modelowych, badań w skali rzeczywistej lub analiz numerycznych CFD.

**Słowa kluczowe:** numeryczna mechanika płynów, CFD, kurtyna powietrzna, bezpieczeństwo pożarowe

## **1. Wprowadzenie**

Kurtyny powietrzne datują swoje powstanie od 1904 r. Jako pierwszy opatentował je w USA T. Van Kennet jako metodę na powstrzymanie przepływu powietrza poprzez sztucznie wytworzony strumień powietrza nawiewanego. Pomysł ten doczekał się pierwszej realizacji ponad 10 lat później.

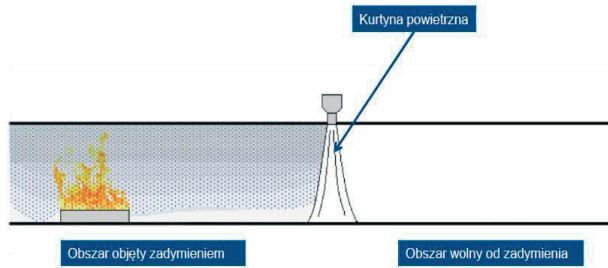
Pierwsza kurtyna powietrzna została zbudowana (pionowa) w 1916 roku przez Caldwell i służyła ona do wydzielenia hipodromu od przestrzeni zewnętrznej trzema kurtynami powietrznymi. Od tego czasu można zauważyć znaczny rozwój kurtyn powietrznych jak i coraz szerszy obszar ich zastosowania [1].

Kurtyny powietrzne znajdują bardzo szerokie zastosowanie przy wejściach do budynków użyteczności publicznej (domy towarowe, kina, biura, restauracje) oraz bramy budynków przemysłowych (magazyny, hale produkcyjne, hangary) co w znaczny sposób ułatwia możliwość przemieszczania się ludzi, transportu towarów jak i poruszanie się pojazdów. Kurtyny powietrzne znalazły także bardzo szerokie zastosowanie w niektórych procesach technologicznych np. do odciążenia przestrzeni o znacznych zyskach ciepła oraz o znacznym wydzieleniu się substancji szkodliwych tj. opary chemiczne, zapachy, bakterie, kurz, insekty jak i cząsteczki radioaktywne. [2,3]

Aktualny stan wiedzy pozwala stwierdzić, iż bezpośrednie oddziaływanie wysokiej temperatury na człowieka nie jest głównym czynnikiem wpływającym na zagrożenie życia ludzkiego. Większość wypadków w czasie pożaru spowodowana jest przez zatrucie toksycznym dymem. W celu ograniczenia ofiar pożarów możliwe jest wydzielenie w przestrzeni objętych zadymieniem, poprzez zastosowanie kurtyn powietrznych w celu kontroli rozprzestrzeniania dymu i toksycznych gazów powstałych w wyniku pożarów poprzez co zapewnienie bezpiecznego dostępu do wyjść ewakuacyjnych dla ludzi znajdujących się w obiekcie, jak i dostęp dla ekip ratowniczo-gaśniczych [4] (Rys. 1).

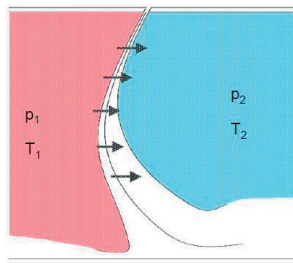
Obecnie niewiele jest dostępnych opracowań, traktujących na temat zastosowania kurtyn do celów wydzielenia stref niezadymionych w czasie pożaru. Na podstawie dotychczas zdobytej wiedzy jedyna zastosowana kurtyna powietrzna w tunelu drogowym znajduje się w Paryżu we Francji na łączeniu trasy A13 i A86. Strumień kurtyny nachylony

jest pod kątem  $35^\circ$ , zaś prędkość na wylocie wynosi 30 m/s. Szczelność kurtyny sięga praktycznie 100% przy różnicy ciśnienia do 80 Pa. [5]



Rys. 1 Schemat zastosowania kurtyn powietrznych w tunelu do celów bezpieczeństwa pożarowego

Prawidłowo zaprojektowana kurtyna powietrzna jest w stanie wytworzyć w przekroju odpowiednie ciśnienie dynamiczne, zapobiegające bądź znacznie ograniczające wymianę masy i ciepła pomiędzy dwoma płynami przez nią rozgraniczonymi (Rys. 2). Zasadniczym kryterium dla kurtyny powietrznej jest jej szczelność.



Rys. 2 Schemat funkcjonowania kurtyny powietrznej w warunkach pożaru

Zaprojektowanie prawidłowo funkcjonującej kurtyny nie jest rzeczą prostą, gdyż na jej parametry ma wpływ wiele czynników min. szerokość szczeliny nawiewnej, wysokość tunelu, stosunek wysokości tunelu do szerokości szczeliny, prędkość nawiewanego powietrza, kąt nachylenia strumienia oraz parametry środowiska po obu stronach kurtyny takie jak ciśnienie i temperatura. Obecne instalacje kurtyn powietrznych są regulowane w oparciu o badania modelowe bądź też bardzo drogie badania w pełnej skali. Jednakże przeskalowanie badań do skali rzeczywistej jest bardzo złożone i bardzo często prowadzi do przeszacowania parametrów kurtyny powietrznej. W celu prowadzenia dokładnych analiz parametrów możliwe jest zastosowanie metody numerycznej mechaniki płynów (CFD) umożliwiającej ocenę efektywności kurtyny w skali rzeczywistej, w tym celu należy wcześniej przeprowadzić szereg badań weryfikujących, które zapewnią prawidłowy dobór warunków brzegowych [6].

## 2. Charakterystyka kurtyny powietrznej

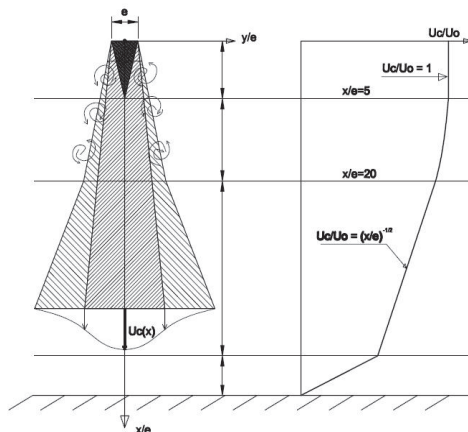
Kurtyna powietrzna jest sztucznie wytworzonym strumieniem powietrza oddziałującym na naturalny przepływ przez otwór, w którym jest zainstalowana. Podstawą teoretyczną do analiz kurtyn powietrznych jest teoria płaskiej strugi ograniczonej.

W bezpieczeństwie pożarowym do wydzielenia stref niezadymionych, istotnym jest by kurtyna funkcjonowała jako odcinająca tzn. zapewniała odpowiednią szczelność.

### 2.1. Parametry fizyczne płaskiej strugi ograniczonej

W kurtynie powietrznej jako płaskim strumieniu ograniczonym możemy wyróżnić cztery podstawowe strefy [2]: potencjalny rdzeń, strefę przejściową, strefę rozwiniętą i strefę rozpraszającą (zamierania strumienia). Znajomość charakterystyki niniejszych stref

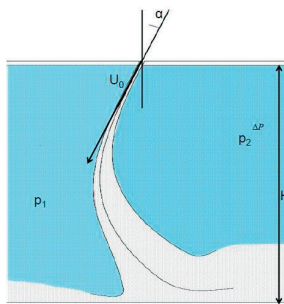
jest niezbędna do prowadzenia analiz dotyczących szczelności kurtyny powietrznej jak i jej zachowań pod wpływem oddziaływania czynników zewnętrznych.



Rys. 3 Rozkład prędkości w strudze swobodnej

## 2.2. Ukształtowanie strugi

Każda kurtyna powietrzna ma swój charakterystyczny kształt zależny od geometrii przestrzeni, w której jest zainstalowana jak i od warunków zewnętrznych panujących w jej otoczeniu. Kurtynę powietrzną zainstalowaną w tunelu o długości nie wpływającej na jej ukształtowanie możemy opisać za pomocą 8 zmiennych:  $\Delta P$ ,  $H$ ,  $e$ ,  $\alpha$ ,  $U_0$ ,  $I_0$ ,  $\nu$ ,  $\rho$  [7,8,9,10,11] (Rys. 4). Zależności między nimi można przedstawić w formie:



Rys. 4 Kurtyna powietrzna

$$\frac{\Delta P}{\frac{1}{2}\rho U_0^2} = f \left[ \frac{H}{e}, \frac{U_0 e}{\nu}, I_0, \alpha \right] \quad (1)$$

$g_c$  - grawitacja [m/s<sup>2</sup>]

$\Delta P$  - różnica ciśnienia [Pa]

$\rho$  - gęstość powietrza [kg/m<sup>3</sup>]

$e$  - szerokość szczeliny nawiewnej [m]

$U_0$  - prędkość na wylocie ze szczeliny [m/s]

$\alpha$  - kąt pod jakim nawiewana jest struga [°]

$\nu$  - lepkość kinematyczna [m<sup>2</sup>/s]

$I$  - intensywność turbulencji [%]

We wzorze (1) umieszczono następujące liczby bezwymiarowe: liczbą Eulera, stosunkiem geometrycznym, liczbą Reynoldsa, intensywnością turbulencji oraz kąt nawiewanego strumienia.

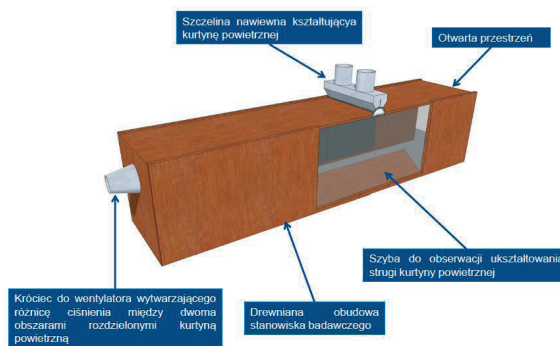
Powyższa funkcja musi zostać rozwiązana w sposób analityczny, eksperymentalny bądź z wykorzystaniem metody CFD.

W celu oceny skuteczności kurtyny powietrznej, koniecznym jest zdefiniowanie minimalnej prędkości nawiewu  $U_0$ , pozwalającą na pokonanie poprzecznej różnicy ciśnienia  $\Delta P$  powstającej między sąsiadującymi przestrzeniami rozdzielonymi kurtyną powietrzną.

### 3. Metodyka prowadzenia analiz

#### 3.1. Eksperyment badawczy

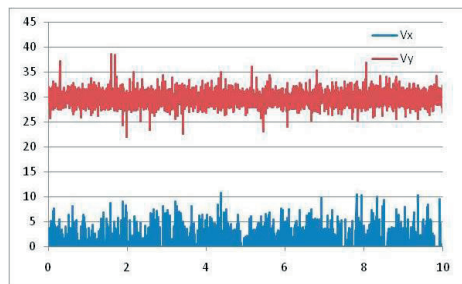
Na bazie wcześniej prowadzonych analiz zaprojektowano i wykonano stanowisko badawcze do badania kurtyn powietrznych będących elementem systemu wentylacji pożarowej (Rys. 5 i Rys. 6), w którym będą prowadzone badania dla różnych konfiguracji kurtyn powietrznych.



Rys. 5. Schemat stanowiska do badania kurtyn powietrznych.



Rys. 6. Tunel do badania kurtyn powietrznych.



Rys. 7 Przykładowy wykres z pomiaru prędkości w sąsiedztwie nawiewu

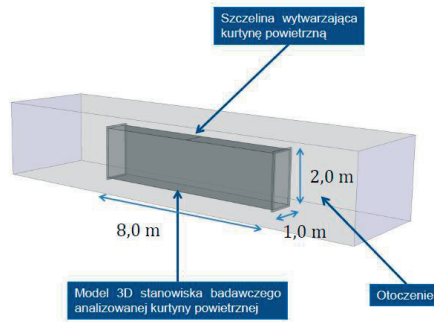
Na początku przeprowadzono podstawowy test weryfikujący prawidłowość przyjętych w analizie numerycznej warunków brzegowych, tzn. porównanie rozkładu prędkości w osi strumienia płaskiej strugi ograniczonej nie poddanej oddziaływaniu różnicy ciśnienia. Pomiar przeprowadzono z wykorzystaniem termoanemometrów trójwłókowych mierzących prędkość przepływającego powietrza w punkcie, rozkładając ją na wektory. Wektor  $Y$  był ustawiony w osi pionowej, zaś  $X$  w poziomej. Pomiar wykonywano z częstotliwością 500 Hz. Przykładowy wynik badań przedstawiono na Rys. 7.



Rys. 8 Wizualizacja strugi nawiewanego po lewej 10,0 m/s, po prawej: 30,0 m/s

### 3.2. Analiza numeryczna

Na potrzeby analiz i w celu oceny zgodności otrzymanych wyników z eksperymentem przeprowadzonym w Zakładzie Badań Ogniwych Instytutu Techniki Budowlanej stworzono trójwymiarowy model numeryczny analizowanej przestrzeni (Rys. 9). Obliczenia numeryczne przeprowadzono przy wykorzystaniu oprogramowania ANSYS Fluent w wersji 13.

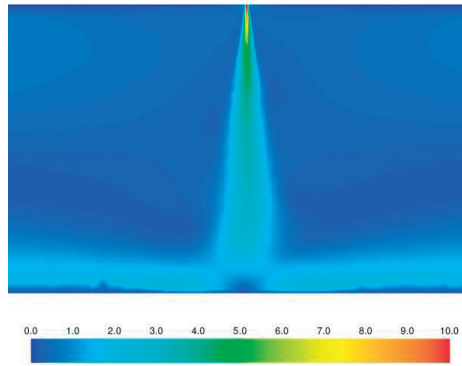


Rys. 9. Model domeny obliczeniowej

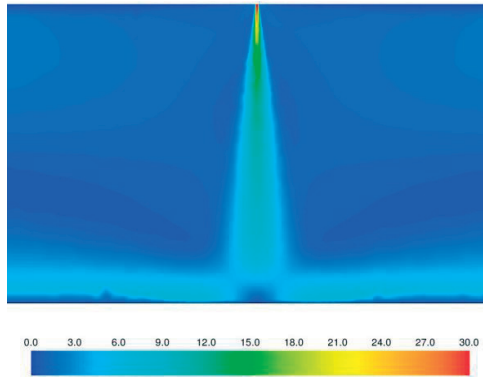
Obszar analizowanej przestrzeni podzielono za pomocą niestrukturalnej siatki hexahedralnej. Dokonano zagęszczenia obszaru, w którym spodziewano się dużych gradientów prędkości tzn. wylot nawiewanego powietrza oraz przestrzeń w której znajdował się strumień wytworzony przez kurtynę. Obliczenia przeprowadzono z wykorzystaniem modelu turbulencji RANS  $k-\epsilon$  dla różnych wartości prędkości nawiewanego strumienia powietrza (3-30m/s).

### 3.3. Weryfikacja wyników obliczeń numerycznych

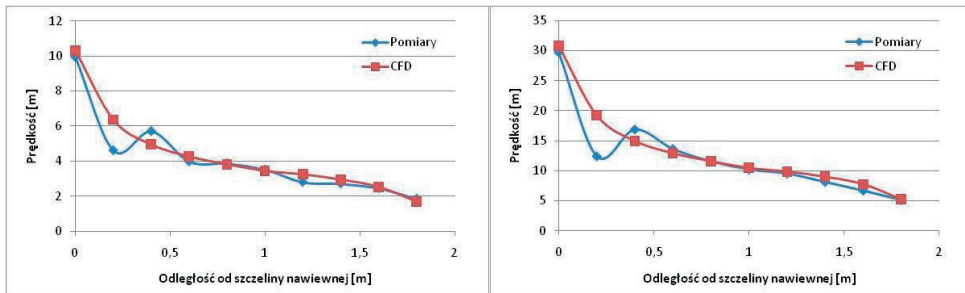
Analiza otrzymanych wyników numerycznych jednoznacznie wykazała bardzo dużą zgodność wyników otrzymanych na drodze numerycznej z wynikami eksperymentalnymi. Poniżej zaprezentowano rozkład prędkości w przekroju przez kurtynę powietrzną dla prędkości nawiewu 10,0 i 30 m/s. (Rys. 10 ÷ 11).



Rys. 10. Przewidywany rozkład prędkości w strudze ograniczonej dla prędkości nawiewu równej 10 m/s



Rys. 11. Przewidywany rozkład prędkości w strudze ograniczonej dla prędkości nawiewu równej 30 m/s



Rys. 12 Spadek prędkości przepływu w osi strumienia

Otrzymane na drodze numerycznej wyniki porównano z wartościami otrzymanymi w czasie eksperymentu w przygotowanym do tego celu stanowisku badawczym. Wyniki zaprezentowano na wykresie przedstawiającym zmianę prędkości średniej w osi nawiewanej płaskiej ograniczonej strugi powietrza (Rys. 12).

#### 4. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych analiz numerycznych wykorzystujących metodę numerycznej mechaniki płynów (CFD), potwierdzono prawidłowość odwzorowania charakteru nawiewanej płaskiej ograniczonej strugi powietrza w obszarze strefy przejścio-

wej i rozwiniętej. Zaobserwowano rozbieżności w strefie rdzenia jak i w początkowej strefie przejściowej.

W kolejnych etapach prowadzonych badań przewiduje się, prowadzenie analiz mających na celu poprawę dokładności otrzymanych wyników obliczeń numerycznych w obszarze strefy rdzenia jak i ocenę możliwości zastosowania kurtyn powietrznych. Kolejnym etapem prowadzonych prac jest ocena możliwości zastosowania kurtyn powietrznych do ograniczenia obszarów objętych zadymieniem na wypadek pożaru.

Na podstawie przeprowadzonych prób wstępnych, istnieje możliwość zastosowania kurtyn powietrznych do wydzielenia obszarów niezadymionych w tunelach i różnego rodzaju pomieszczeniach długich, gdzie niemożliwym jest zastosowanie fizycznych przegród. Rozwiązanie takie umożliwiłoby wydzielenie stref niezadymionych, konieczne jest jednak szczegółowe określenie parametrów kurtyny powietrznej (prędkość, kąt natarcia, szerokość), która zapewniłaby wymagany poziom szczelności.

## Literatura

- 1 Goyonnaud L., Sollicc C.: Mass transfer analysis of an air curtain system, Transactions on Engineering Science vol. 18, 1998 WTT Press
- 2 Gugliermetti F., Santrapia L., Zori G.: Air curtain applied to fire smoke pollution control, Transactions on Ecology and the Environment vol. 66, 2003 WTT Press
- 3 Guyonnaud L., Sollicc C., Dufresene de Virel M., Rey C.: Design of air curtains used for area confinement in tunnels, Experiments in Fluids 28 (2000) 377-384 Springer-Verlag 2000
- 4 Sztarbala G., Krajewski G.: Application of CAE in designing process of fire ventilation system based on jet fan system, EBEC London, UK, 2009
- 5 Gupta S., Pavageau M., Elicer-Cortes J. C.: Cellular confinement of tunnel sections between two air curtains, Building and Environment 42 (2007) 3352-3365
- 6 Krajewski G., Sztarbala G.: Air curtains used for separating smoke free zones in case of fire
- 7 Hayes F. C., Stoecker W. F.: Heat Transfer Characteristics of the Air Curtain, ASHRAE Transactions No. 2120, 1969
- 8 Hayes F. C., Stoecker W. F.: Desig Data For Air Curtains, ASHRAE Transactions No. 2121, 196
- 9 Rajaratnam N.: Turbulent jets. Elsevier, Amsterdam, 1976
- 10 Schlichting: Boundary layer theory. Mc Graw-Hill Book, New York, 1968
- 11 Abramovitch G.N.: The theory of turbulent jets. Massachusetts M.I.T. press, 1963
- 12 ANSYS Fluent 13.0.0. Technical Documentation

## Verification of computational calculations based on physical tests of plane jet used to separate zones full of smoke

Grzegorz Krajewski<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Fire Research Department, Building Research Institute, e-mail: g.krajewski@itb.pl

**Abstract:** The aim of this paper is to take advantage of CFD application in calculating, optimizing, and designing air barriers used to separate smoke free zones in the case of fire. Properly designed air curtain produces a pressure drop which forbids transversal flow through the opening. It is hard to make a good quality CFD calculation of that kind of air curtain because of high velocity and relatively thin nozzle. Most air curtains are tested on scaled down models which are difficult to extrapolate. The author of this article performed tests in a real scale model. Tests results were used to verify chosen turbulence model. The intention of this paper is to present the comparison between CFD calculations and tests results.

**Keywords:** Computational Fluid Dynamics, air barrier, air curtain, fire safety

