

## **Kurtyna powietrzna, jako bariera w przypadku pożaru**

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

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

**Streszczenie:** Bariery powietrzne (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 możliwe jest 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. W celu zapewnienia odpowiedniej szczelności bariery powietrznej należy odpowiednio dobrać: prędkość na wylocie kurtyny, kąt nawiewanego powietrza oraz jej szerokość.

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

### **1. Wprowadzenie**

Pierwsze wzmianki na temat pomysłu zastosowania kurtyn powietrznych pojawiają się 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.

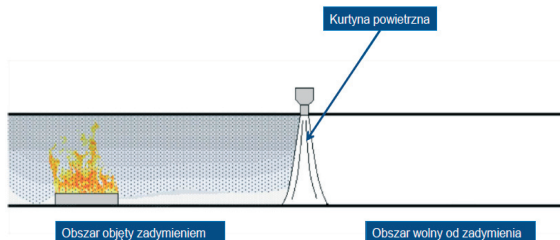
Pierwsza kurtyna powietrzna została zbudowana (pionowa) w 1916 roku przez Caldwellella i służyła do wydzielenia hipodromu od przestrzeni zewnętrznej trzema kurtynami powietrznymi. Od tego czasu można zauważyć znaczny rozwój kurtyn powietrznych jak i coraz szerszy obszar ich zastosowania [1].

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 odcięcia 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

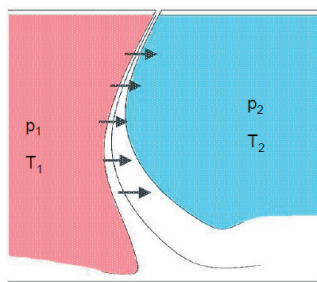
przestrzeni objętych zadymieniem, poprzez zastosowanie kurtyn powietrznych w celu kontroli rozprzestrzeniania dymu i toksycznych gazów powstałych w wyniku pożarów. Umożliwi to zapewnienie bezpiecznego dostępu do wyjść ewakuacyjnych dla ludzi znajdujących się w obiekcie, jak i dostęp dla ekip ratowniczo-gaśniczych [4] (Rys. 1).



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

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 we Francji w Paryżu 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]

Prawidłowo zaprojektowana kurtyna powietrzna jest w stanie wytworzyć w przekroju tunelu odpowiednie ciśnienie dynamiczne, zapobiegające bądź znacznie ograniczające wymianę masy i ciepła pomiędzy dwoma gazami 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). Metoda ta umożliwi ocenę efektywności kurtyny w skali rzeczywistej. Upřednio jednak należy przeprowadzić szereg badań weryfikujących, które zapewnią prawidłowy dobór warunków brzegowych [6].

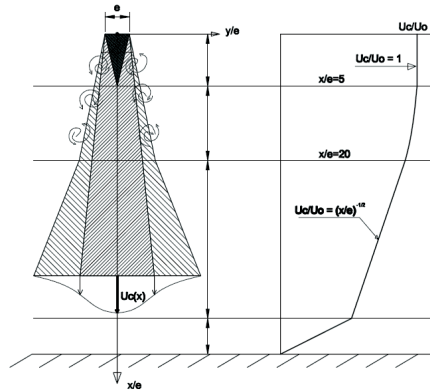
## 2. Charakterystyka kurtyny powietrznej

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

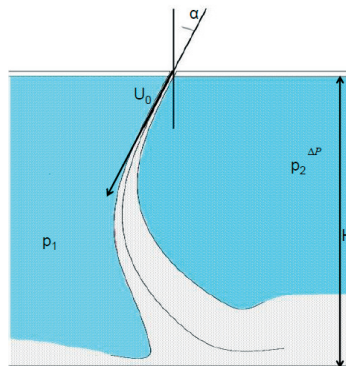
W kurtynie powietrznej jako płaskim strumieniu ograniczonym możemy wyróżnić cztery podstawowe strefy [2]: potencjalny rdzeń, strefę przejściową, strefę rozwiniętą i strefę rozpraszającą (zamierania strumienia). Znajomość charakterystyki niniejszych stref jest niezbędna do prowadzenia analiz dotyczących 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:  $\Delta P$ ,  $H$ ,  $e$ ,  $\alpha$ ,  $U_0$ ,  $I_0$ ,  $v$ ,  $\rho$  [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 podobieństwa: liczbę Eulera, stosunek geometryczny, liczbę Reynoldsa, intensywność 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, w którym będą prowadzone badania dla różnych konfiguracji kurtyn powietrznych.

Na początku przeprowadzono podstawowy test weryfikujący prawidłowość przyjętych w analizie numerycznej warunków brzegowych, tzn. porównanie rozkładu prędkość w osi strumienia płaskiej strugi ograniczonej nie poddanej oddziaływaniu różnicy ciśnienia. Pomiary 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.

#### 3.2. Analiza numeryczna

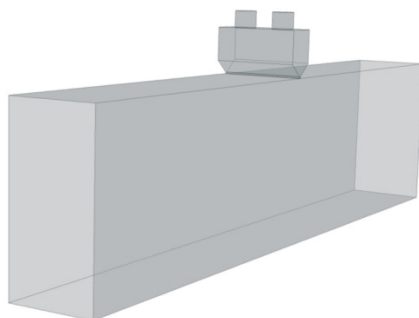
Obliczenia numeryczne przeprowadzono z wykorzystaniem oprogramowania ANSYS Fluent 13.0.0. W celu wybrania właściwego modelu turbulencji do analiz związanych z przepływem powietrza w płaskiej strudze ograniczonej przeprowadzono szereg analiz numerycznych. Przeprowadzono analizy numeryczne z zastosowaniem następujących modeli turbulencji:

- RANS k- $\epsilon$  standard,
- RANS k- $\epsilon$  RNG,
- RANS k- $\epsilon$  realizable,
- RANS k- $\omega$ ,
- SAS (Scale Adoptive Simulation),
- LES (Large Eddy Simulation).

W celu przeprowadzenia analiz z wykorzystaniem metody numerycznej mechaniki płynów (CFD) został zbudowany trójwymiarowy model analizowanej przestrzeni. Dokładnie po środku sufitu, została zamodelowana szczelina nawiewna. Bezpośrednio nad szczeliną znajdowała się skrzynka rozprężna w celu jak najwierniejszego odwzorowania rozkładu prędkości w szczelinie.

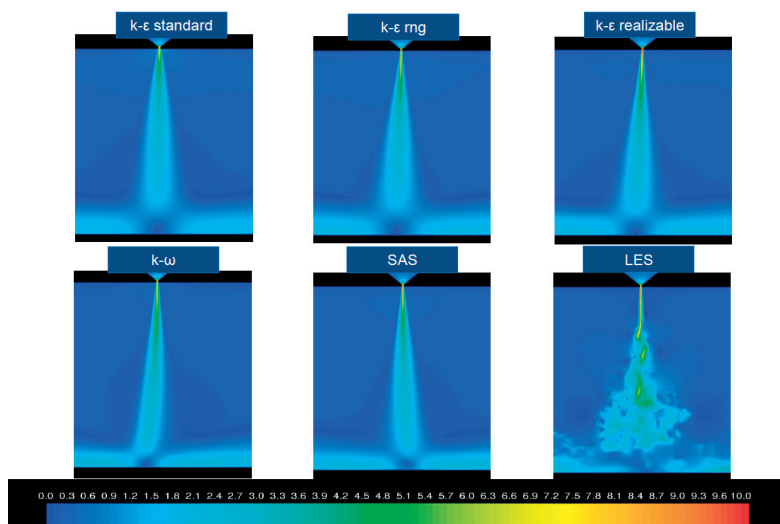
W celu przeprowadzenia obliczeń domena obliczeniowa została poddana dyskretyzacji na skończoną liczbę objętości kontrolnych za pomocą niestrukturalnej siatki sześcienniej (hexahedralnej). Całkowita liczba objętości kontrolnych dla rozważanego modelu wynosiła ok.  $5,5 \times 10^6$ . Rozmiar boku objętości kontrolnych zawierał się w przedziale od 2 mm w sąsiedztwie szczeliny nawiewnej do 40 mm na granicy domeny obliczeniowej. Siatkę numeryczną zagęszczono w miejscu kurtyny ze względu na możliwość występowania dużych gradientów prędkości.

Analizy numeryczne przeprowadzono, jako zmienne w czasie. Wszystkie równania były rozwiązywane na drugim stopniu dokładności.

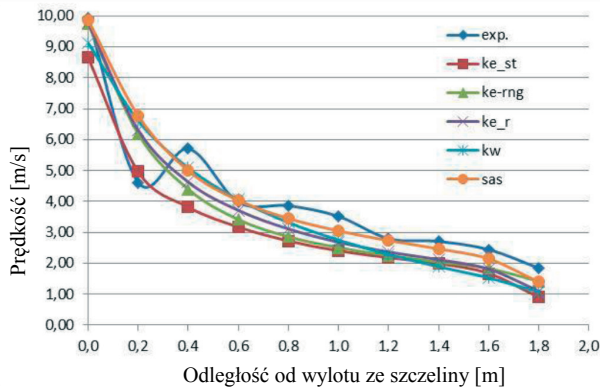


Rys. 5. Model numeryczny analizowanej przestrzeni

Na drodze analiz numerycznych otrzymano rozkłady prędkości w przekroju przez nawiewaną strugę powietrza. Warunki brzegowe w obliczeniach numerycznych zostały przyjęte zgodnie z wartościami pomierzonymi w czasie badań laboratoryjnych. Poniżej przedstawiono wyniki otrzymane na drodze symulacji komputerowych.



Rys. 6. Rozkład prędkości w przekroju przez płaską strugę ograniczoną (0-10 m/s)



Rys. 7. Rozkład prędkości w osi strugi nawiewanego powietrza w zależności od zastosowanego modelu turbulencji.

Z przeprowadzonych analiz jednoznacznie wynika, iż najbardziej zbliżone wyniki do eksperymentu otrzymano przez wykorzystaniu modelu turbulencji typu Realizable k-ε i SAS.

### 3.3. Kurtyna powietrzna jako wydzielenie obszarów na wypadek pożaru

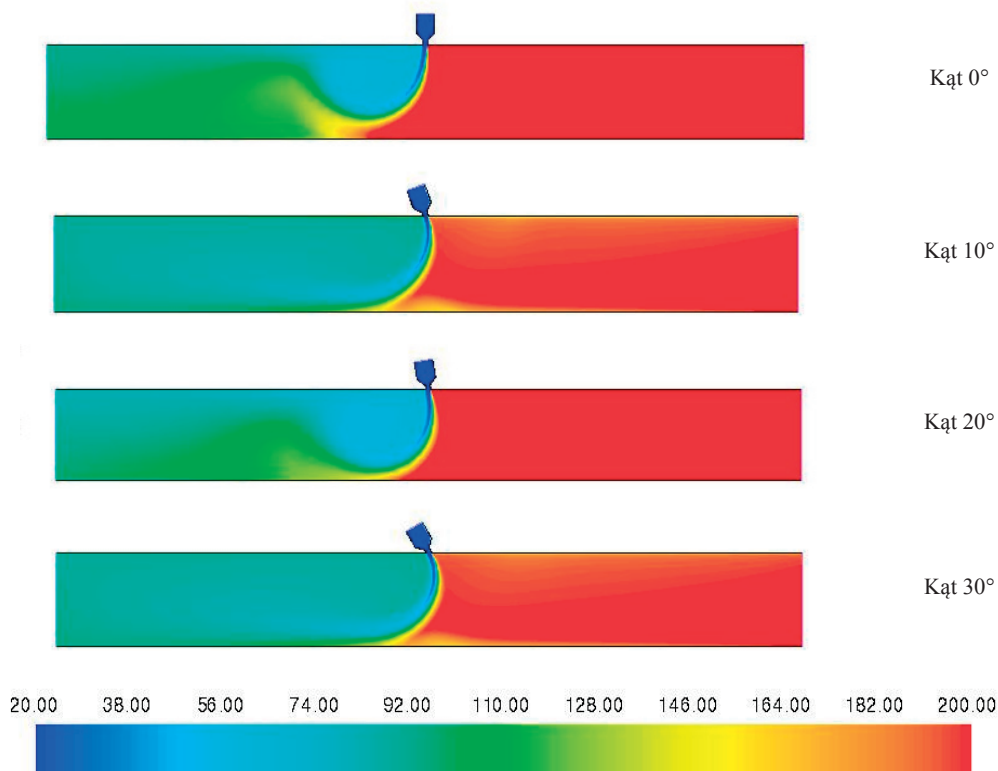
Po przeprowadzeniu analiz numerycznych mających na celu dobór właściwego modelu turbulencji przeprowadzono szereg analiza numerycznych płaskiej strugi ograniczonej mającej służyć wydzieleniu obszarów niezadymionych na wypadek pożaru.

Kurtyna powietrzna jako struga ograniczona wydzielająca obszary niezadymione od zadymionych w czasie pożaru powinna się charakteryzować wysoką efektywnością tzn. szczelnością. O poziomie jej szczelności świadczyć będzie ilość ciepła i masy przetransportowana przez kurtynę powietrzną.

Wpływ na szczelność kurtyny powietrznej będą miały takie parametry jak:

- szerokość szczeliny,
- prędkość nawiewanego powietrza,
- kąt nachylenia strugi.

Analizy numeryczne przeprowadzono dla szczeliny o szerokości 5 i 10 cm. Kąt nachylenia strugi zmieniał się w zakresie od 0 do 30 stopni. Prędkość nawiewanej strugi powietrza wynosiła 10 i 20 m/s.



Rys. 8. Zachowanie się strugi o prędkości 10 m/s dla kątów 0, 10, 20 i 30 i szerokości 10 cm – rozkład temperatury.

#### 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 przejściowej 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.

W kolejnym etapie autor przewiduje przeprowadzenie badań w skali modelowej mających na celu weryfikację otrzymanych na drodze analiz CFD wyników.

## 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, EBECC 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, Building Simulation 2012, Sydney, Australia
- 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

## Air barriers used for separating smoke free zones in case of fire in tunnel

Grzegorz Krajewski<sup>1</sup>

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

**Abstract:** The aim of this paper is to take the advantage of CFD application in calculating, optimising, and designing air curtains used to separate smoke free zones in case of fire in tunnel. Air curtains can be a good solution in case when the usage of solid obstructions is not feasible (for example in a big tunnel). A properly designed air curtain produces a pressure drop which prevents transversal flow through the opening. An accurate CFD calculation of an air curtain is challenging because of the high air velocity and relatively thin nozzle. Most air curtains are tested on scaled down models which are difficult to extrapolate. Tests in a real scale model are performed and the tests results are used to verify the chosen turbulence model. The intention of this paper is to present the comparison between the CFD calculations and tests results.