



**AGH**

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA  
IM. STANISŁAWA STASZICA  
W KRAKOWIE

**Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki**

**Praca przejściowa**

**Elżbieta Rekus**  
**Mechanika i Budowa Maszyn**

**Analiza konstrukcji dyfuzora naziemnego akumulatora ciepła**

# 1. Wstęp

Celem pracy jest przeprowadzenie analizy przepływu przez różne warianty konstrukcji dyfuzorów wlotowych naziemnego akumulatora ciepła, którego czynnikiem roboczym jest woda. Praca ma za zadanie pokazać jak różne rozwiązania konstrukcji dyfuzorów wpływają na przepływ wody w ich najbliższym otoczeniu oraz w jakiej odległości od nich wpływający strumień przestaje intensywnie burzyć warstwę płynu znajdującego się w akumulatorze.

## 2. Podstawy teoretyczne

### 2.1. Naziemne akumulatory ciepła

Magazynowanie ciepła jest koniecznością wynikającą z procesu jego wytwarzania, zapotrzebowanie na nie jest w większości chwilowe, przez co istnieje potrzeba akumulacji nadwyżki energii oraz dowolnego jej dysponowania w odpowiednich momentach. Rozróżnić możemy trzy mechanizmy akumulacji energii cieplnej:

- Wykorzystujący pojemność cieplną
- Wykorzystujący ciepło przemian fazowych (PCM)
- Wykorzystujący ciepło przemian chemicznych/i fotochemicznych

Wśród powyższego podziału można wyróżnić również rodzaje akumulacji zależące od zastosowanego czynnika. W przypadku w stosowana jest woda lub skała, natomiast w przypadku zmiany fazy : woda, parafina, sól uwodniona, wodorek litu czy fluorek litu. Dane sposoby magazynowania energii cieplnej posiadają charakterystyczne dla siebie poziomy temperatury w których przebiega magazynowanie oraz charakteryzują się różną sprawnością

W danej pracy analizie poddany zostanie naziemny akumulator ciepła którego czynnikiem roboczym jest woda ( rozróżniany pod nazwą TES- Thermal Energy Storage). Zasobniki te wykonywane są głównie w postaci pionowych cylindrycznych zbiorników o płaskim dnie wypełnionych wodą. W akumulatorach TES wykorzystywany jest naturalny efekt wypierania wody o wysokiej temperaturze wyżej i osiadania warstwy zimnej w dolnej części zbiornika. Niezbędne do poprawnej pracy naziemnego akumulatora jest by w zbiorniku utworzone zostały trzy warstwy czynnika:

- warstwa zimna
- termoklina
- warstwa gorąca

Stratyfikacja wody jest charakterystyczna dla danego typu akumulatorów, zimną i ciepłą warstwę oddziela strefa termokliny gdzie występuje wysoki gradient temperatur i intensywna wymiana ciepła między dwoma warstwami cieczy, dąży się do tego by była ona jak najcieńsza w celu efektywnego wykorzystania zbiornika.

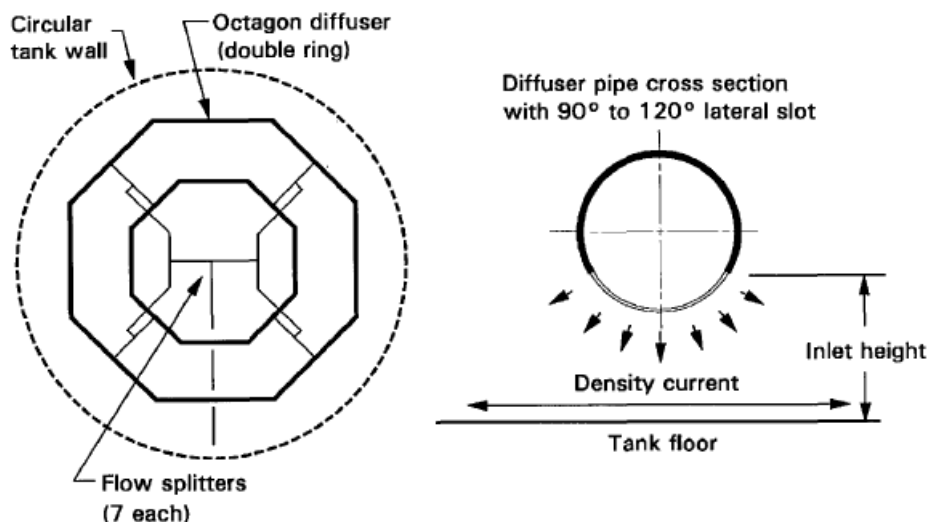
Ładowanie akumulatora jest procesem polegającym na doprowadzeniu podgrzanego czynnika do zbiornika przy jednoczesnym odprowadzeniu równoważnej części zimnej wody. Projektowanie tego procesu uwzględnia uzyskanie założonej prędkości ładowania przy jednoczesnym nie zaburzeniu stratyfikacji czynnika.

Wpływ na stratyfikację płynu w zbiorniku może mieć parę czynników: uwarunkowania wymiany ciepła między warstwami, materiał ścian akumulatora i jego izolacja od odtoczenia oraz mieszanie się wód podczas ładowania i rozładowywania zbiornika. Zaburzenia wywoływane podczas doprowadzania i odprowadzania wody zależne są od parametrów przepływu w czasie ładowania/rozładowywania oraz konstrukcji dyfuzorów i rozmieszczenia ich w objętości zbiornika.

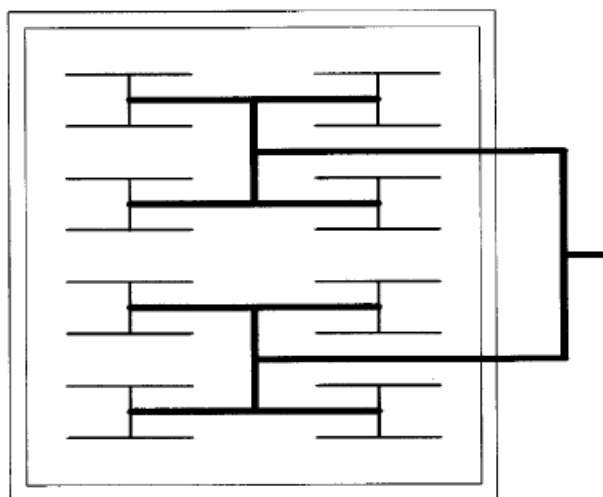
## 2.2. Konstrukcja dyfuzorów

Dyfuzory są bardzo istotnymi elementami w zbiornikach wykorzystujących stratyfikację płynu z powodu potrzeby możliwie nieburzliwego doprowadzenia wody, pozwalającego na utrzymanie wyraźnego podziału warstw zimnej wody, termokliny i wody gorącej. Odpowiednia konstrukcja dyfuzorów ma zapobiec mieszanii się płynu w czasie ładowania i rozładowywania akumulatora.

Podstawowe rozwiązania konstrukcji dyfuzorów według American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) to kształt ośmiokąta, dysku oraz rozmieszczenie na planie litery H.

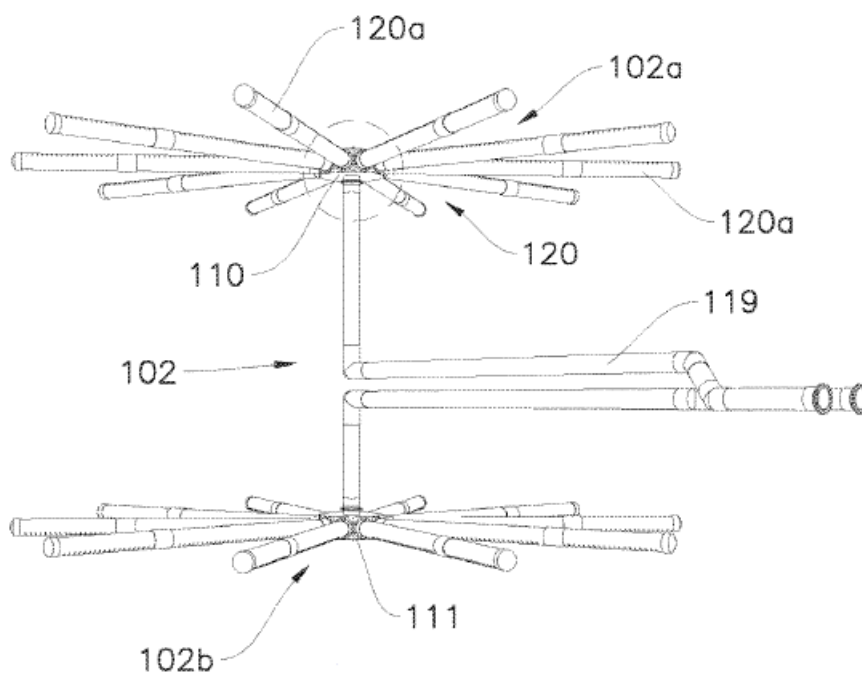


Rys2.1 Dyfuzor w kształcie ośmiokąta wg publikacji ASHRAE



*Rys.2.2 Dyfuzory rozplanowane w kształcie litery H wg publikacji ASHRAE*

Można spotkać również inne rozwiązania takie jak Spider Diffuser System opatentowany przez Christohera Talmadge Mincey'a. Daną konstrukcję charakteryzuje umiejscowienie przyłączy doprowadzenia wody w jednym miejscu pośrodku wysokości zbiornika, następnie poprowadzenie w osi akumulatora rur zakończonych rozgałęzieniem przy dnach. Rozgałęzienia tworzą rury z rozłożonymi na całej długości poprzecznymi szczelinami.



*Rys.2.3 Schemat Spider Diffuser System*

Wszystkie powyższe rozwiązania charakteryzują się gęsto rozmieszczonymi niewielkimi szczelinowymi otworami wylotowymi dyfuzorów. Rozwiązanie to bazuje głównie na dużym rozproszeniu strumienia wlotowego wpływającego do zbiornika, i odpowiednim wykonaniu szczelin pozwalającym na kształtowaniu każdego z tych jednostkowych strumieni w sposób eliminujący jednokierunkowy ich przepływ w kierunku prostopadłym do utworzonych w zbiorniku warstw.

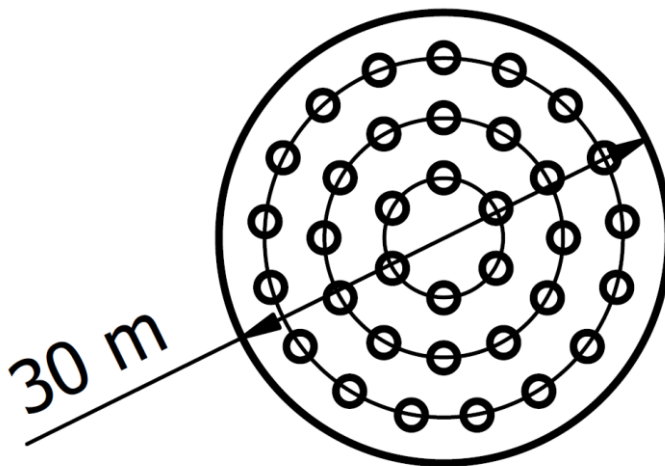
### 3. Analiza przykładowych konstrukcji dyfuzorów

#### 3.1. Założenia przeprowadzanych analiz

Przeprowadzane analizy mają na celu pokazanie wpływu konstrukcji dyfuzora na kierunek i rozkład prędkości strumienia wpływającego czynnika do akumulatora. Wykorzystana zostanie analiza 2D wykonana za pomocą programu ANSYS CFX. Na potrzeby danej pracy założymy jednakowe dla wszystkich przykładów konstrukcji parametry opisujące akumulator:

- Średnica akumulatora  $D = 30\text{ m}$
- Prędkość ładowania  $v = 4500\frac{\text{t}}{\text{h}}$

Założono zastosowanie 35 dyfuzorów rozmieszczonych na przekroju zbiornika na planie kołowym



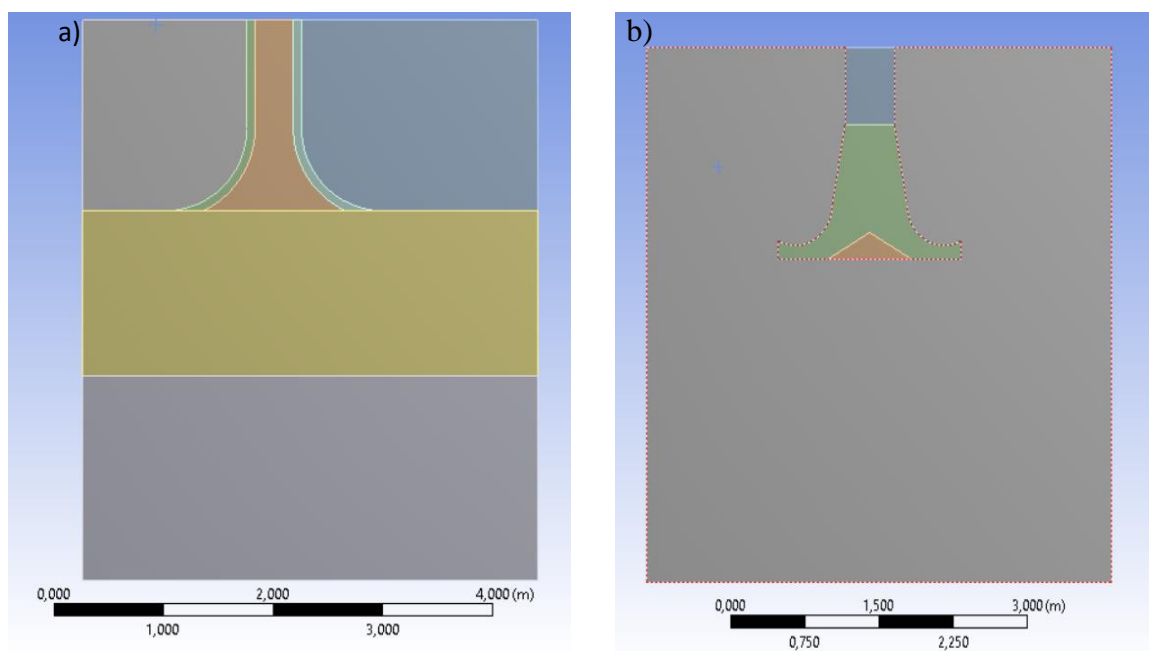
Rys. 3.1 Zaplanowany rozstaw dyfuzorów na przekroju zbiornika

W celu ułatwienia późniejszego porównania uzyskanych wyników warunków brzegowy wpływu (inlet) został nałożony na identyczną powierzchnię w każdym modelu, stanowiącą jednostkowy wycinek powierzchni przekroju rury doprowadzającej wodę. W związku z metodą przyłożenia danego warunku obliczono strumień masy odpowiadający powierzchni przyłożenia warunku brzegowego dla założonej

prędkości ładowania wynoszący  $0,24 \frac{kg}{s}$ . Przeprowadzono cztery analizy różnych konstrukcji dyfuzorów, każda skupia się na bezpośrednim otoczeniu dyfuzora.

### 3.2. Analizy przepływu przez dyfuzory o konstrukcji nie uwzględniającej przeszkód na torze strumienia.

Pierwsze dwie analizy wykonane zostały na modelach nie posiadających przeszkód na drodze wody wypływającej z dyfuzora. Pierwszy model (1) wykonany został jako rura rozszerzająca się od pewnego momentu i wywinięta na końcu, drugi (2) został wykonany jako jego modyfikacja- wprowadzono dodatkowy segment w miejscu rozszerzania strumienia przed ujściem z dyfuzora.



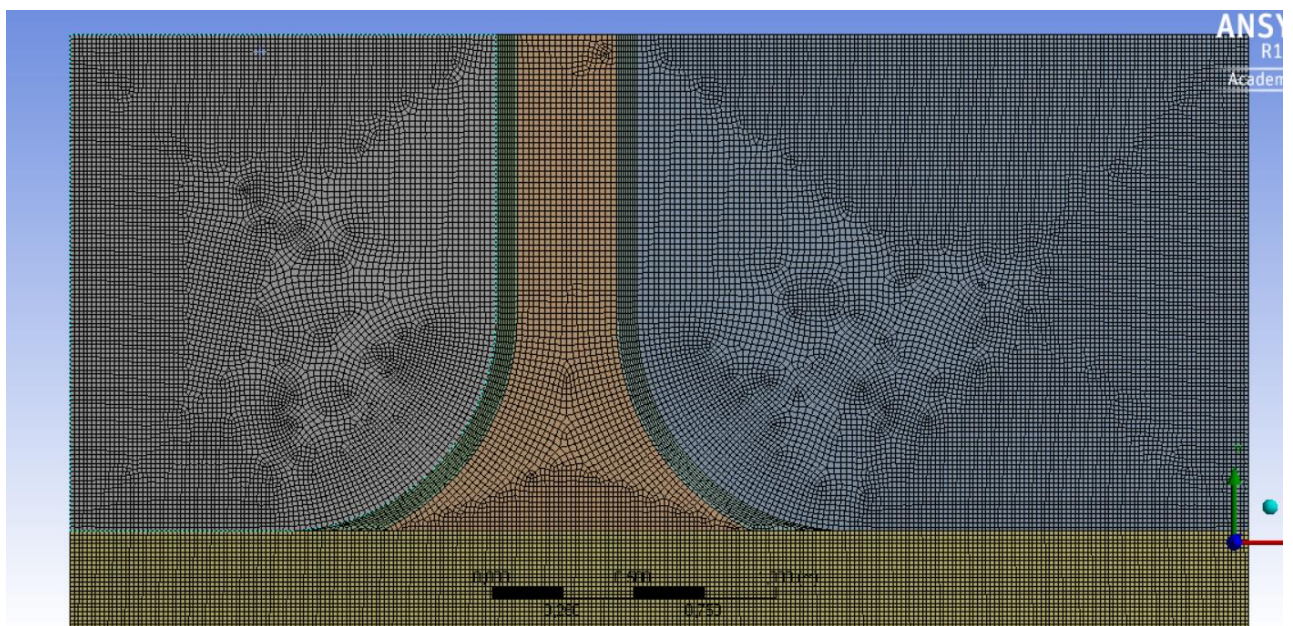
Rys. 3.2.1 modele geometryczne wykonane dla a) pierwszej b) drugiej analizy

Na każdy model nałożono siatkę elementów skończonych dopasowaną do każdego modelu indywidualnie, uzyskując siatki o jakości którą opisują średnie wartości parametrów zebranych w tabeli 3.2

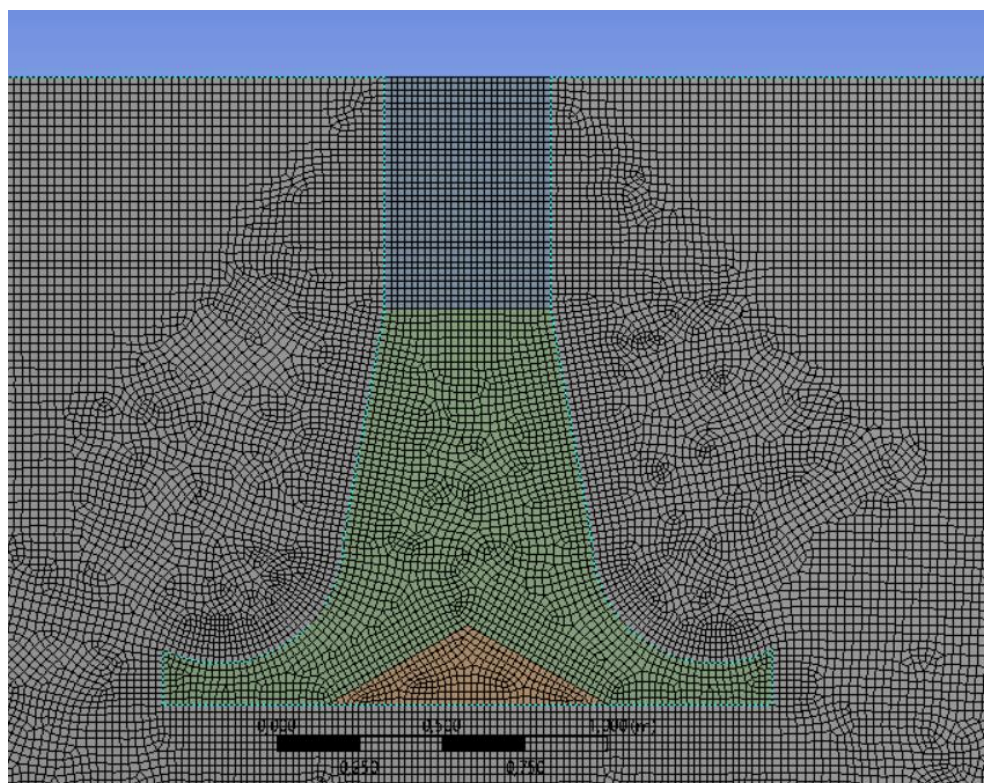
tab.3.2

Model	Aspect Ratio	Jacobian Ratio (MAPDL)	Element Quality
1	1,5909	1,0200	0,88699
2	2,5105	1,0919	0,66526





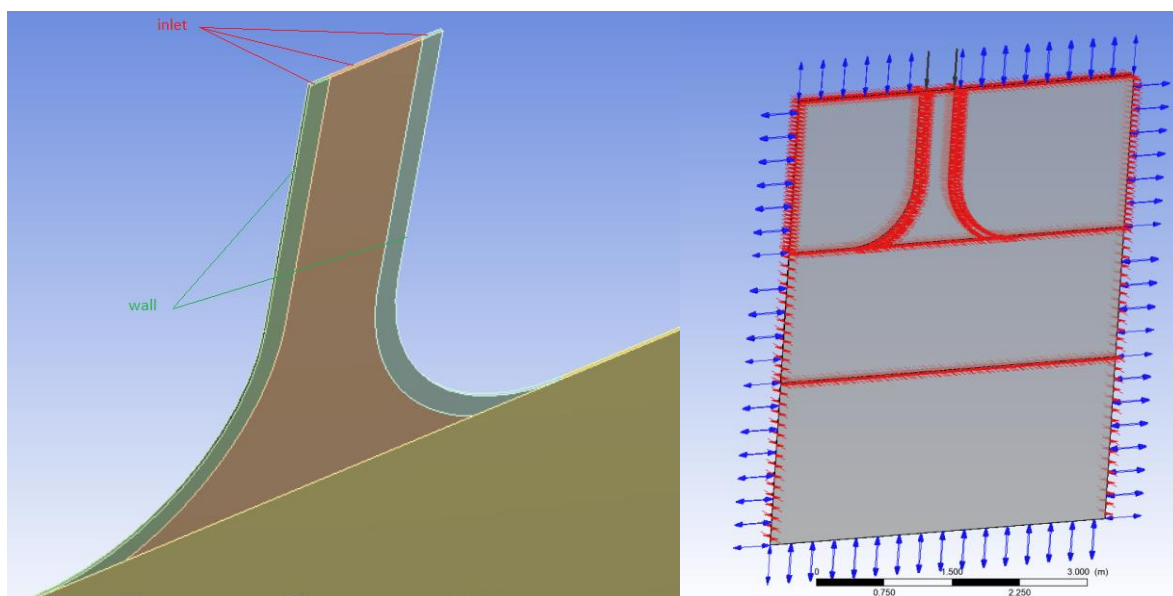
*Rys. 3.2.2 Model 1 z nałożoną siatką elementów*



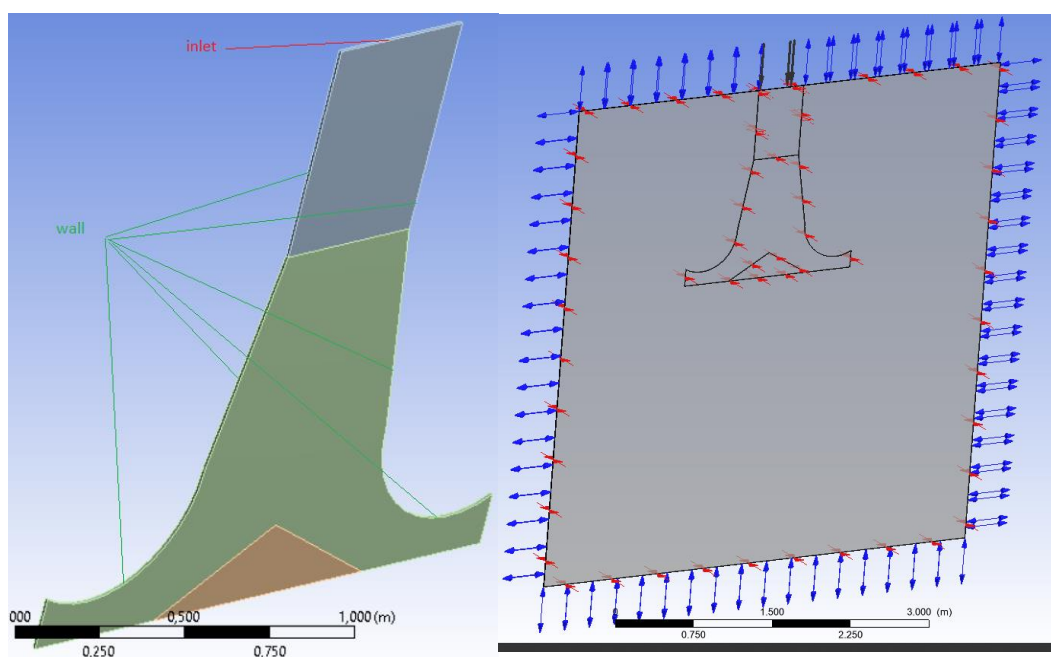
*Rys. 3.2.3 Model 2 z nałożoną siatką elementów*

Na tak przygotowane modele nałożono warunki brzegowe:

- Inlet(wpływ)- prędkość określono jako strumień masy-0,25kg/s
- Wall- ściana gładka,
- Opening- warunek nałożony na krańcowe brzegi modelu niebędące określone przez inlet, pozwala na swobodny dalszy wypływ cieczy
- Symmetry- warunek nałożony na pozostałe powierzchnie modelu nieuwzględnione w innych warunkach brzegowych



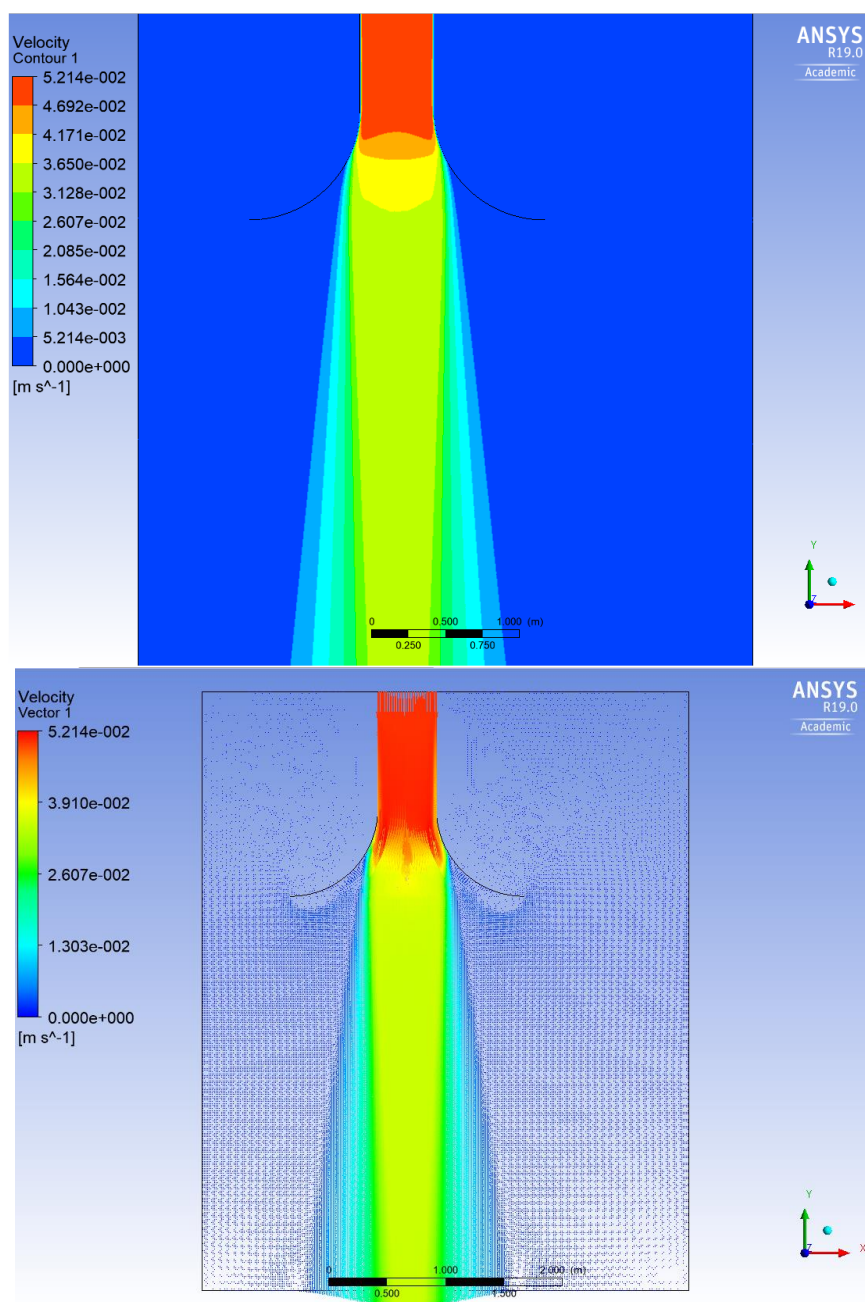
*Rys. 3.2.4 Umieszczenie powierzchni przyłożenia warunków brzegowych dla modelu 1*



*Rys. 3.2.5 Umieszczenie powierzchni przyłożenia warunków brzegowych dla modelu 2*

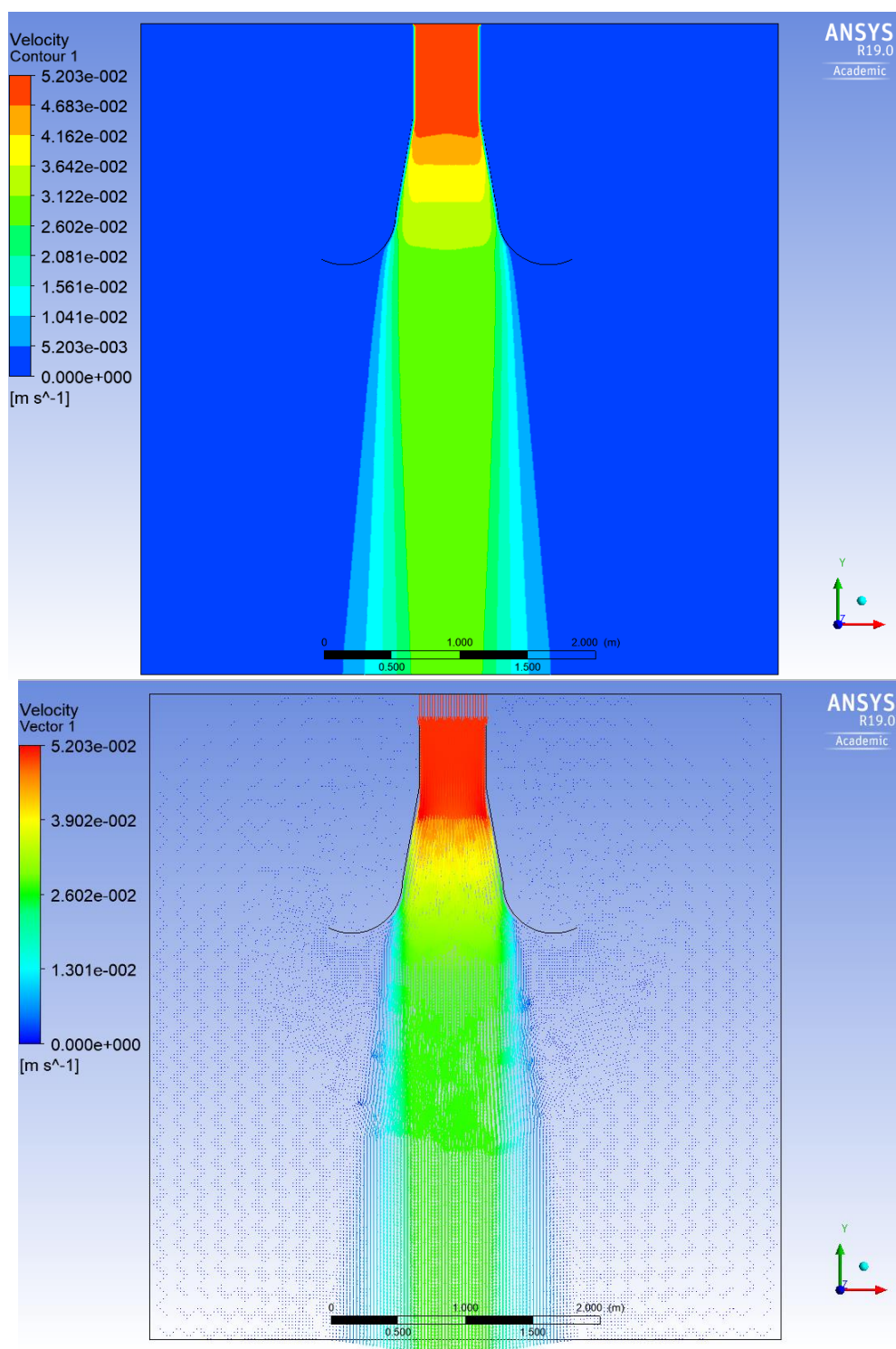


Domena w obu analizach została zdefiniowana jako woda o temperaturze 80 °C, materiał izotermiczny, ciśnienie odniesienia dla danego modelu to 1 atmosfera, wybrany model turbulencji: Shear Stress Transport. Dla obu analiz wykorzystano obliczenia o podwójnej precyzji przeprowadzane na 2 rdzeniach procesora. Warunkiem zakończenia obliczeń było osiągnięcie wartości RMS na poziomie  $10^{-6}$ . Dla danych założeń przeprowadzono analizy zakończone po osiągnięciu ustalonego poziomu RMS. W wyniku analizy 1 (Rys.3.2.6) uzyskano strumień skierowany jest prawie całkowicie równoległe do ścian rury doprowadzającej wodę, zaokrąglenia w końcowej części dyfuzora nie wykazują dużego wpływu na kierunek doprowadzanej wody.



Rys. 3.2.6 Wykresy rozkładu prędkości strumienia dla modelu 1

Druga analiza przeprowadzona została w celu wykazania czy modyfikacja konstrukcji dyfuzora, w miejscu gdzie następuje stopniowe rozszerzenie rury doprowadzającej wodę, spowoduje skierowanie strumienia w sposób bardziej rozproszony.

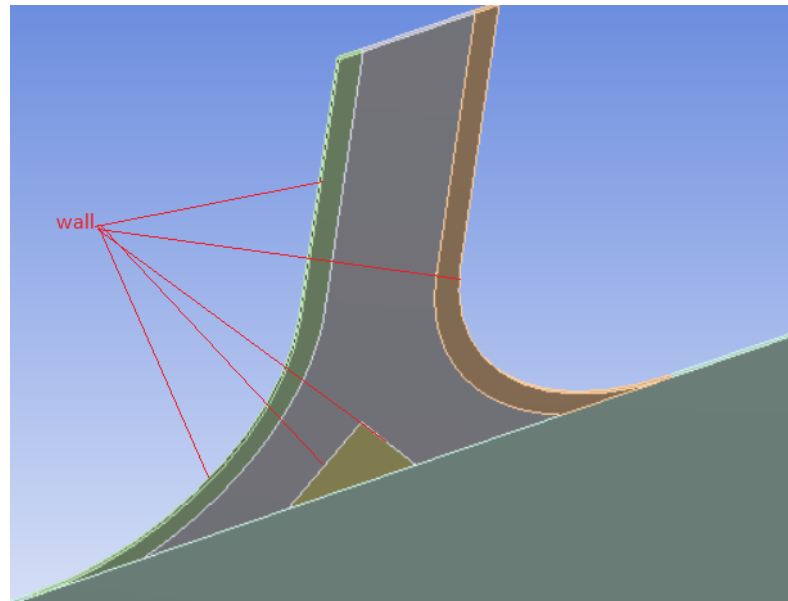


*Rys. 3.2.6 Wykresy rozkładu prędkości strumienia dla modelu 2*

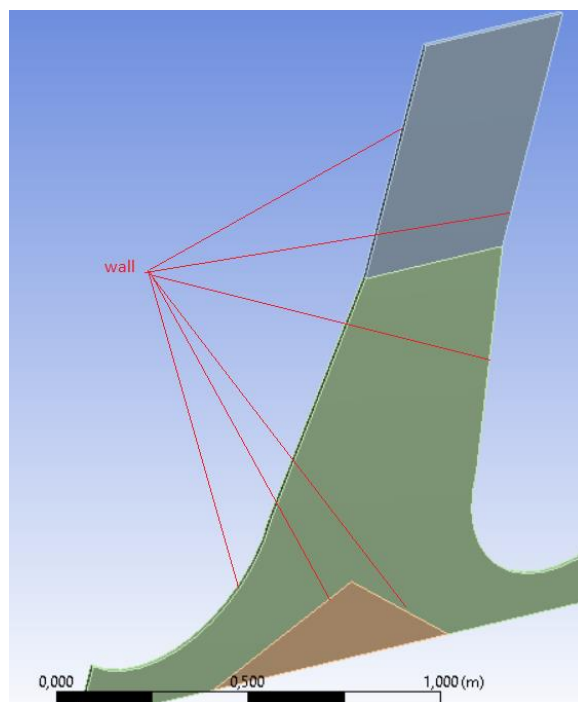
Model drugi wykazuje zwiększone rozproszenie prędkości strumienia wypływającego z dyfuzora, jednak kierunek prędkości oraz jej wartość wskazuje na możliwość silnego burzenia uwarstwienia cieczy w zbiorniku.

### 3.3. Analizy przepływu przez dyfuzory o konstrukcji uwzględniającej przeszkodę na torze strumienia.

Modele 1 i 2 wykazują możliwość silnego zaburzenia stratyfikacji czynnika akumulatora w otoczeniu dyfuzora. W celu zmiany kierunku prędkości strumienia poprzednio użyte modele zmodyfikowano uwzględniając przeszkodę na torze wpływającej wody. Założenia analiz pozostały niezmienione, dodatkowo wprowadzono warunek brzegowy Wall nałożony w miejscach gdzie mają wystąpić przeszkody zmieniające kierunek strumienia.



Rys. 3.3.1 Umiejscowienie warunku brzegowego Wall w modelu 3



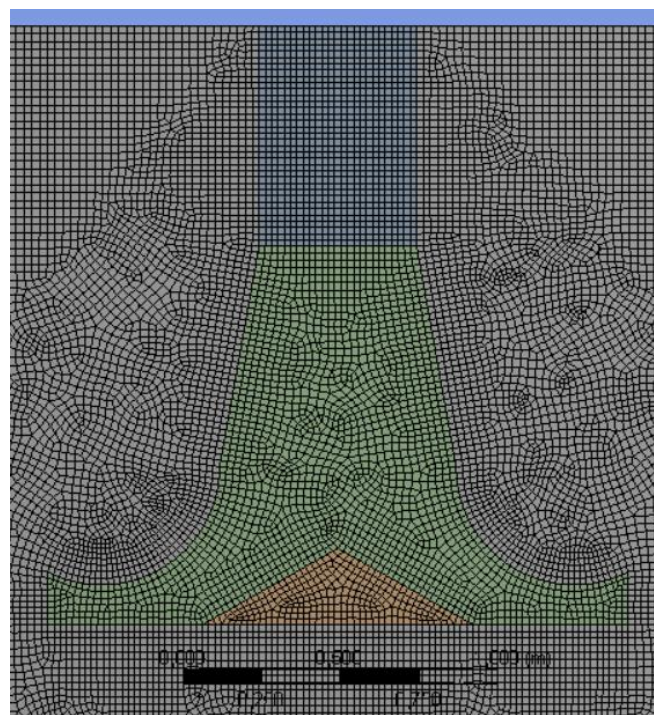
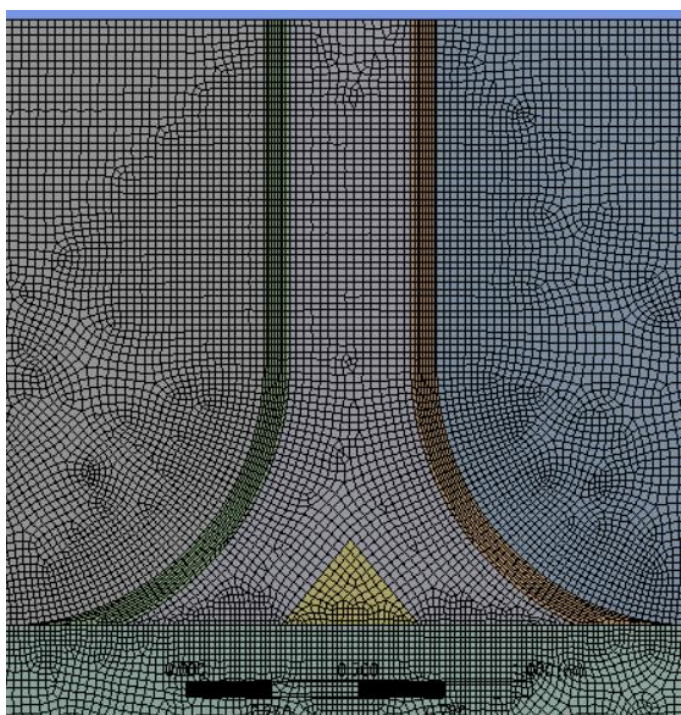
Rys. 3.3.2 Umiejscowienie warunku brzegowego Wall w modelu 4



Na oba modele została nałożona siatka (Rys 3.3.3), dla której uzyskano średnie wartości dotyczące jakości zebrane w tabeli 3.3.1.

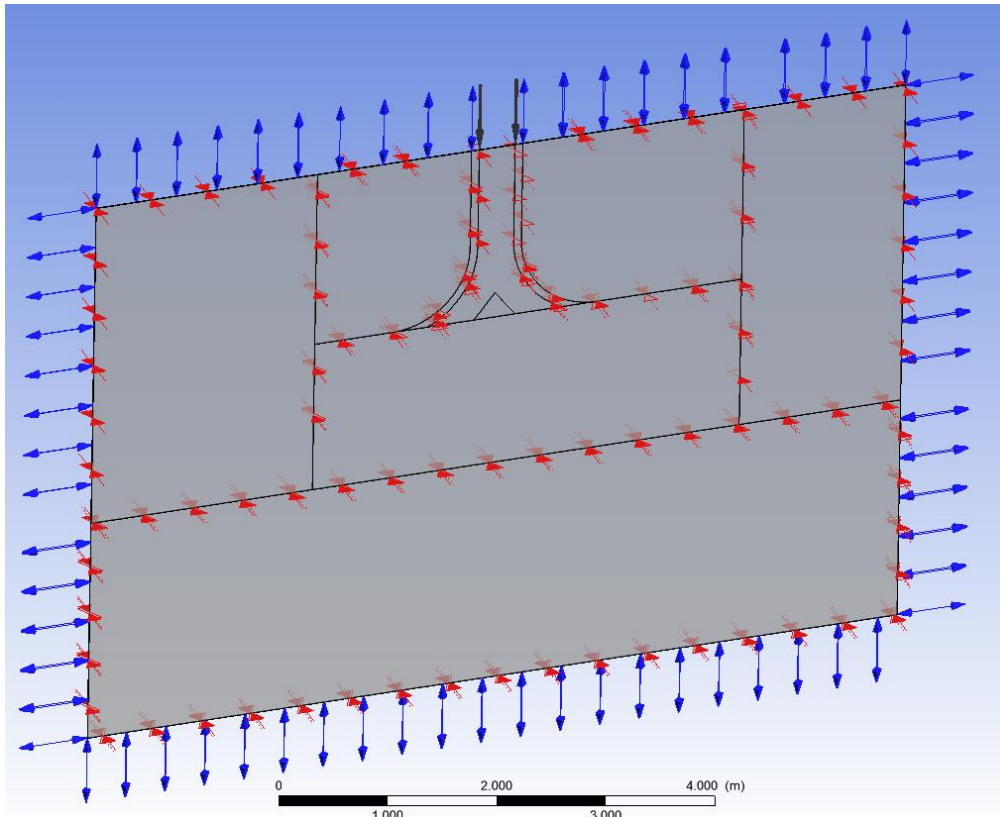
*Tab.3.3.1*

Model	Aspect Ratio	Jacobian Ratio (MAPDL)	Element Quality
3	2,4320	1,0345	0,67878
4	2,5105	1,0919	0,66526

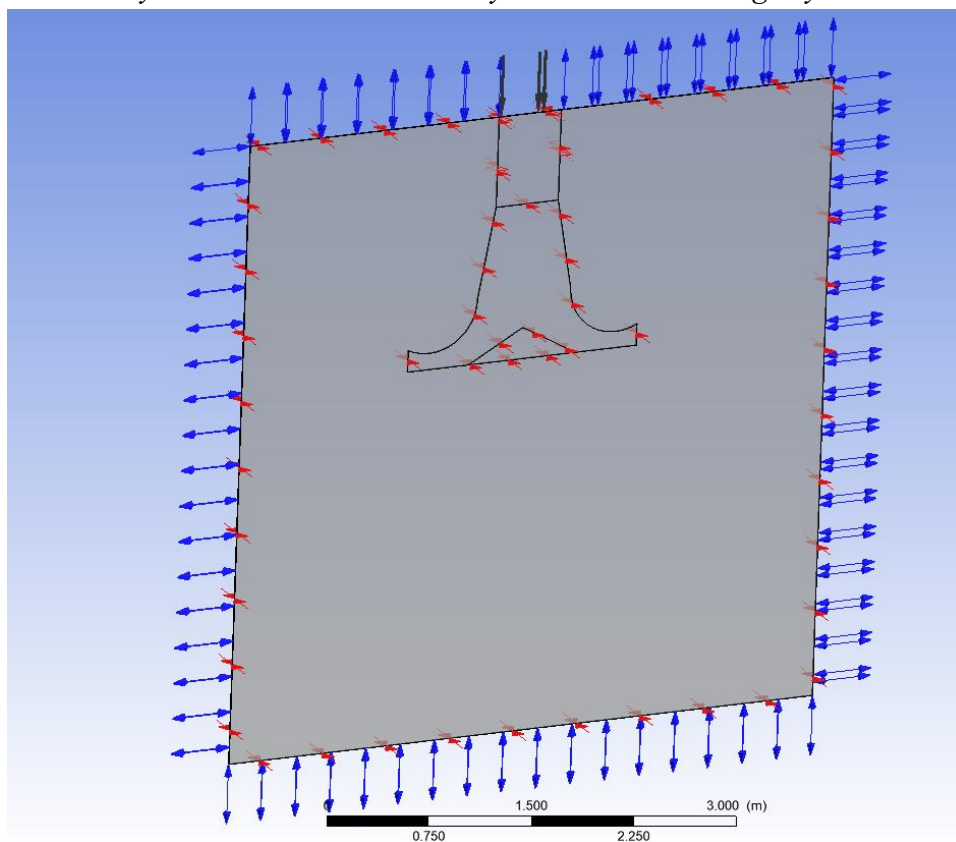


*Rys. 3.3.3 Siatki elementów skończonych nałożone na modele 3 i 4*

Na powyższe modele nałożono warunki brzegowe identyczne jak dla modeli 1 i 2 modyfikując warunek Wall przez nałożenie na dodatkową powierzchnię przeszkody oraz widoczne rozszerzenie powierzchni z nałożonym warunkiem Symmetry oraz przesunięcie warunku Openning, obie te zmiany są skutkiem wprowadzenia dodatkowych powierzchni do modelu w celu zaobserwowania zachowania czynnika w miejscach w otoczeniu dyfuzora gdzie oczekiwane są największe zaburzenia przepływu. Domena i ustawienia analizy zostały zdefiniowane bliźniaczo do analiz 1 i 3

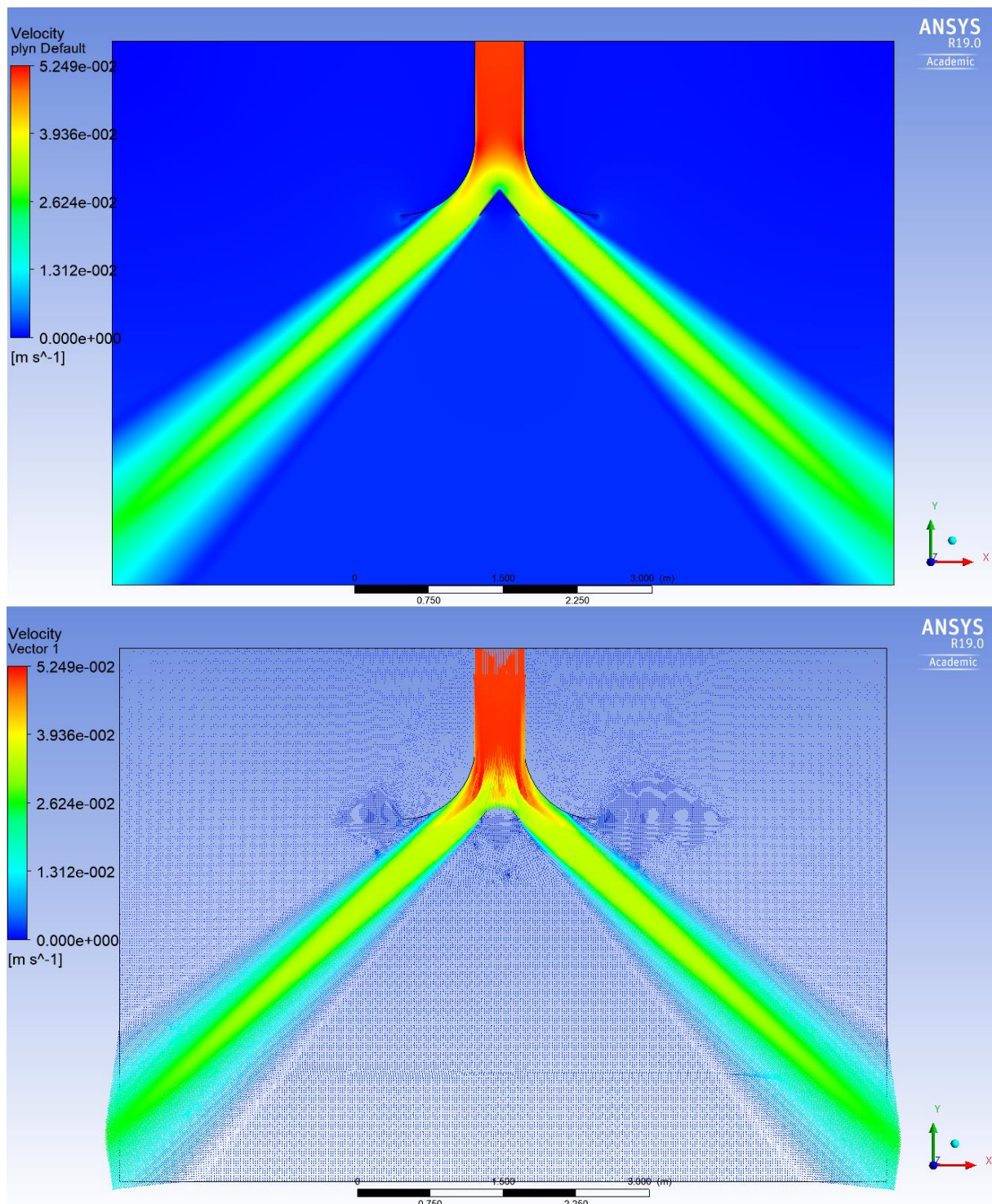


*Rys. 3.3.4 Model 3 z nałożonymi warunkami brzegowymi*

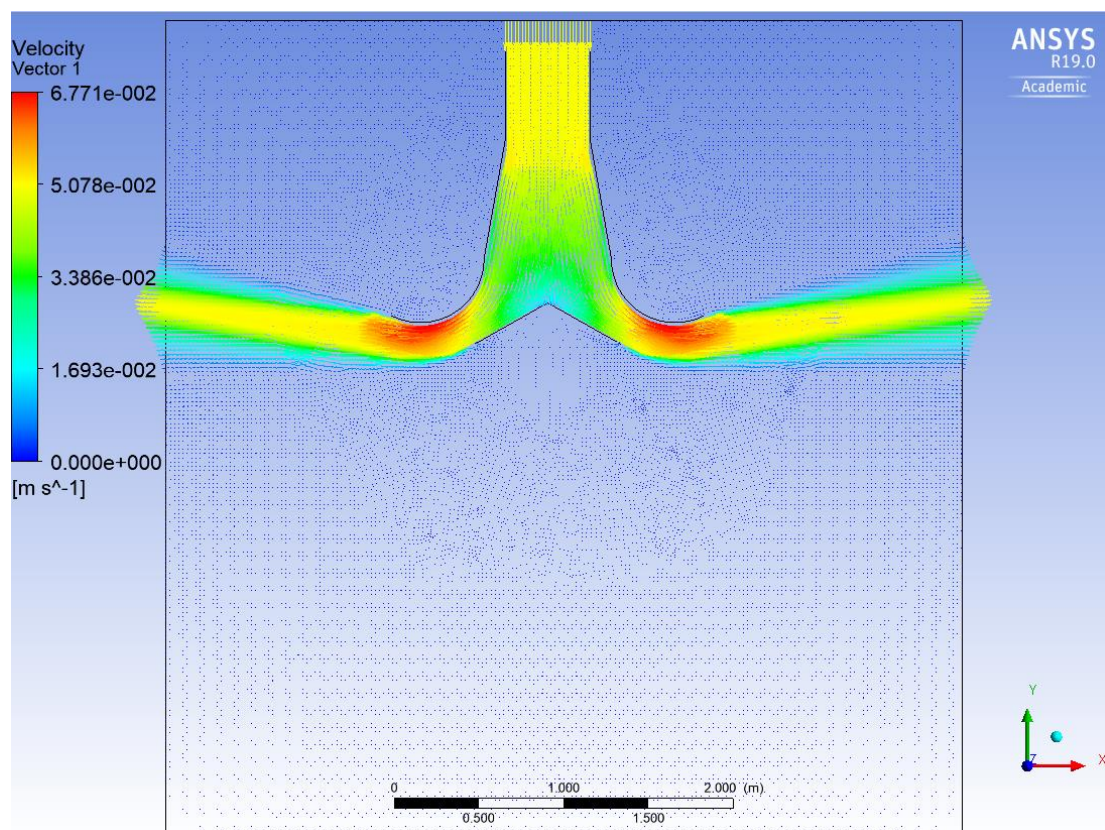
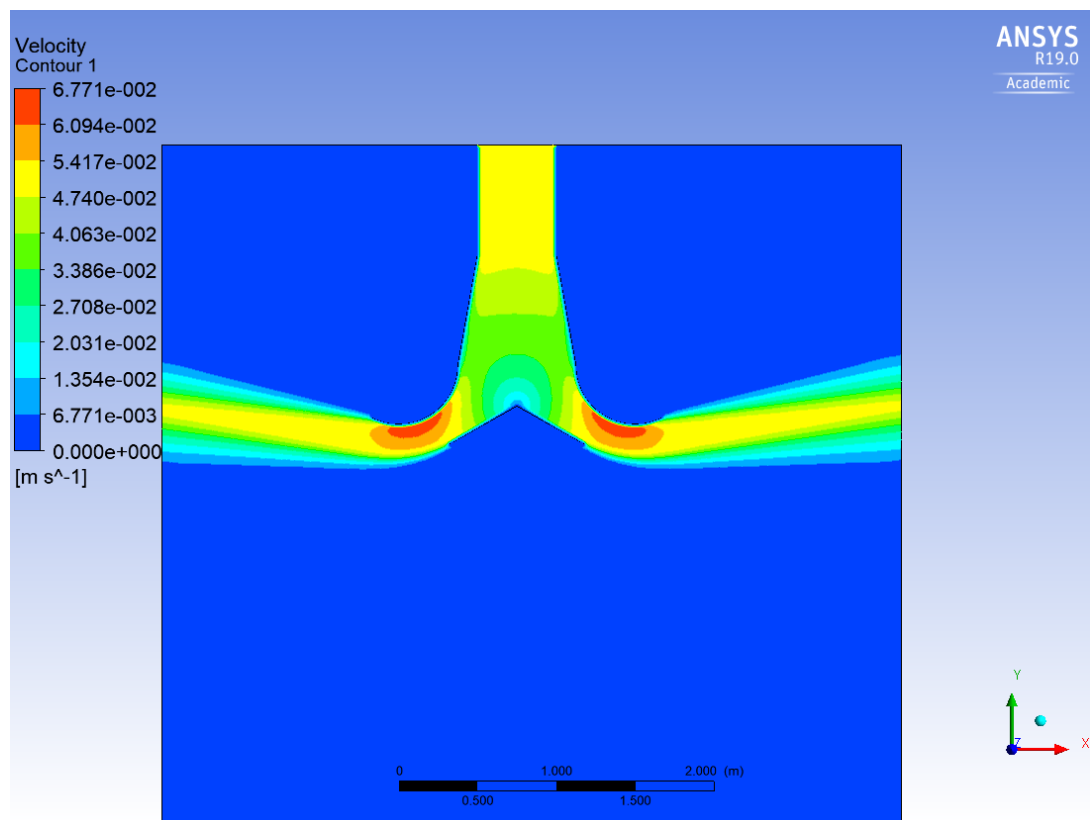


*Rys. 3.3.5 Model 4 z nałożonymi warunkami brzegowymi*





Rys. 3.3.6 Wykresy prędkości uzyskane dla modelu 3



Rys. 3.3.7 Wykresy prędkości uzyskane dla modelu 4

Analizy 3 i 4 przeprowadzone zostały również wykorzystując podwójną precyzję obliczeń i przeprowadzenie ich na dwóch rdzeniach procesora, proces obliczeniowy zakończony został przy osiągnięciu granicznej wartości RMS ustalonej na poziomie  $10^{-6}$ . W wyniku przeprowadzonych analiz uzyskano wykresy prędkości przedstawione na Rys. 3.3.6 i Rys. 3.3.7 przedstawione w formie mapy na powierzchni modelu oraz wektorów prędkości. Oba modele pozwalają na zaobserwowanie znacząco innego skierowania czynnika. Model 3 pokazuje skośne ukierunkowanie strumienia względem rury doprowadzającej wodę natomiast model 4 przedstawia konstrukcję kierującą strumień w górę.

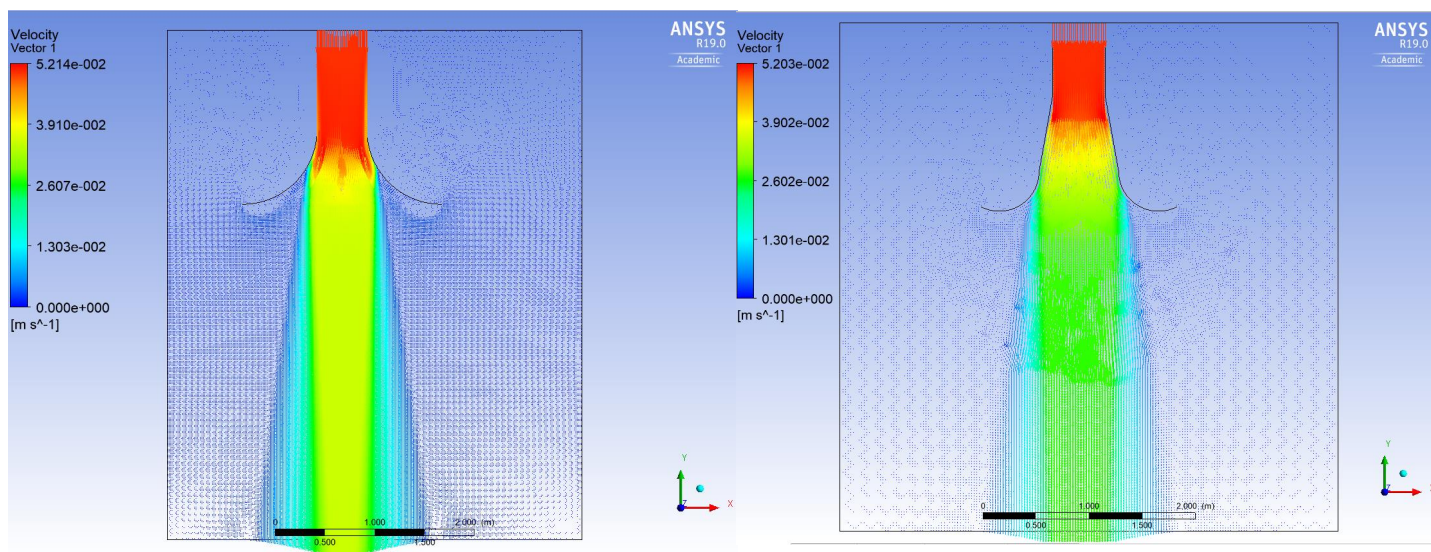
## 4. Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone analizy skupiły się na najbliższym otoczeniu konstrukcji dyfuzorów, wykonane zostały jako modele 2D pojedynczych elementów całego systemu doprowadzania wody do zbiornika. Celem zamodelowania odpowiedniej konstrukcji jest wskazanie rozwiązania zapewniającego możliwie nieburzliwe i niewpływające na stratyfikację ładowanie i rozładowywanie akumulatora. Przedstawione w danej pracy cztery modele dyfuzora zostały wykonane w prostej formie, mającej na celu zobrazowanie wpływu podstawowych elementów konstrukcji możliwych do zastosowania w dyfuzorze na kierunek i prędkość strumienia wpływającego i mieszającego z statycznym czynnikiem znajdującym się już w zbiorniku.

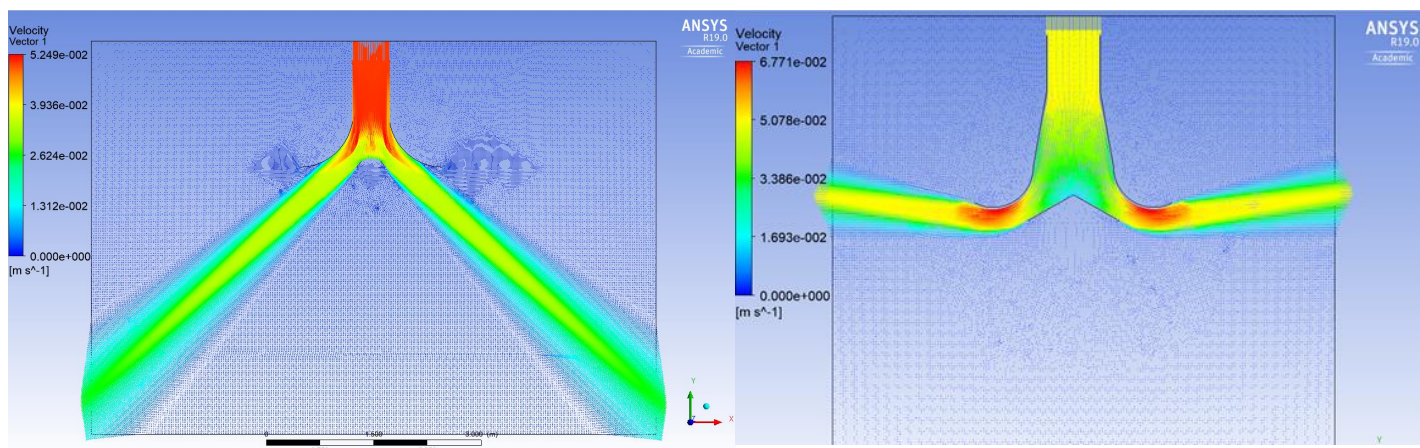
Modele 1 i 2 przedstawiają możliwość doprowadzenia wody przez dyfuzor w kształcie rury o wywiniętym końcu, różnią się od siebie jednak długością strefy przejściowej między prostym odcinkiem a wywiniętym. W obu przypadkach zawinięty do zewnątrz element dyfuzorów mający za zadanie skierowanie strumienia w wyższe części zbiornika nie spełnia swojej funkcji ze względu na zbyt wysoką prędkość wody na wejściu do konstrukcji. Prędkość ta ustalona została na tym poziomie ze względu na wielkość danego typu dyfuzora gdzie potrzeba przestrzeni w jego okolicy do wytracenia prędkości wody i uniknięcia mieszania się ze sobą strumieni z dwóch sąsiednich. Modele 1 i 2 nie spełniają wymagań stawianym tego typu konstrukcjom z powodu skierowania strumienia z dużą prędkością w dół zbiornika, pomimo tego iż model 2 zapewnia większe rozproszenie prędkości efekt nie jest wystarczający. Modele 3 i 4 pokazują wpływ przeszkody na ukształtowanie strumieni i ich kierunek. W modelu 3 będącym modyfikacją modelu 1 przeszkoda jest położona stosunkowo wysoko i ukształtowana została jako ostry trójkąt położony pośrodku wylotu z dyfuzora. Budowa dyfuzora oraz położenie i kształt przeszkody powodują że kierunek strumienia staje się bardziej korzystne ze względu na stratyfikację czynnika w akumulatorze, jednak wciąż przy bliskim położeniu strefy termokliny prędkość uzyskana w dalszym otoczeniu poniżej dyfuzora może powodować niepożądane zmieszanie się warstw wody. Model 4 zachowuje zewnętrzną konstrukcję modelu 2 wprowadzono jednak przeszkodę położoną symetrycznie pośrodku konstrukcji, jednak w porównaniu do modelu 3 przeszkoda została wykonana jako trójkąt położony niżej o bardziej rozwartym kącie. W przypadku ostatniej analizy wykresy prędkości pokazują pożądany efekt kierowania strumienia prędkości powyżej poziomu dolnej części dyfuzora. Widoczny jest efekt przyspieszenia strumienia w miejscu zaokrąglenia dyfuzora do prędkości wyższej niż założona na jego wlocie (co powoduje mylący układ kolorów wykresu w porównaniu z pozostałymi modelami), efekt ten uzyskiwany jest dzięki



skierowaniu go w sposób nie pozwalając na „odklejenie” strumienia od ściany konstrukcji, co można obserwować w modelu 3 gdzie prędkość i wysokość umiejscowienia przeszkody



powoduje znacząco inny kierunek wody.



Rys. 4.1 Zestawienie wykresów wektorowych prędkości wszystkich modeli

Podsumowując pożądany efekt doprowadzenia czynnika do zbiornika przez dyfuzor uzyskany został w przypadku modelu 4 gdzie strumień kierowany jest w wyższe poziomy akumulatora co eliminuje możliwość mieszania wody poniżej dyfuzorów oraz zaburzenia stratyfikacji czynnika.

## **Bibliografia:**

- AKUMULATORY CIEPŁA –ZJAWISKO STRATYFIKACJI TERMICZNEJ,  
Henryk G.Sabiniak, Paulina Drożdż
- Magazynowanie ciepła (aspekty technologiczne), Dr inż. Małgorzata Kwestarz