Tercja Systemy Pomiarowe i Komputerowe Stanisław Żwan

Tytuł projektu;
Innowacyjne urządzenie do wykonywania testów wydajnościowych naftowych otworów wiertniczych

Raport z prac obliczeniowych wykonanych przez Instytut Maszyn Przepływowych PAN im. Roberta Suwalskiego R_1/1/2017 wraz z uzupełnieniami (pracami) wykonanymi w roku 2018

Obliczenia numeryczne przeplywu przez wklad konlescencyjny.

Opracowanie założeń madelowych obliczeń 20/30 CFD procesów separacji złoża w przepływie przez separator

SPIS TREŚCI

1. PODSTAWA, CEL I ZAKRES PRACY 3
2. WSTĘP 4
3. GEOMETRIA OBLICZENIOWA SEPARATORA 5
4. SIATKA OBLICZENIOWA SEPARATORA 6
5. MODEL MATEMATYCZNY KOALESCERA ZASTĘPCZEGO (OŚRODEK POROWATY) 8
6. OBLICZENIA TRÓJWYMIAROWE KOALESCERA ZASTĘPCZEGO 14
7. OBLICZENIA DWUWYMIAROWE PROCESU SEPARACJI Z UŻYCIEM METODY OBLICZEŃ WIELOFAZOWYCH „POPULATION BALANCE MODEL" 19
7.1. Wstęp 19
7.2. Submodel obliczeń wielofazowych „Population Balance Model" 19
7.3. Warunki brzegowe i ustawienia programu obliczeniowego 20
7.4. Rezultaty dwuwymiarowych obliczeń numerycznych przepływu przez separator 24
8. PODSUMOWANI i WNIOSKI 27
REFERENCJE 28
ZAŁĄCZNIK 1 – RYSUNKI KONTURÓW FRAKCJI OLEJOWEJ W SEPARATORZE W ZALEŻNOŚCI OD KROKU CZASOWEGO DLA NATĘŻENIA PRZEPŁYWU 12.5 m^3/h 29
ZAŁĄCZNIK 2 – RYSUNKI KONTURÓW FRAKCJI OLEJOWEJ W SEPARATORZE W ZALEŻNOŚCI OD KROKU CZASOWEGO DLA NATĘŻENIA PRZEPŁYWU 50 m^3/h 36
ZAŁĄCZNIK 3 – RYSUNKI KONTURÓW FRAKCJI GAZOWEJ W SEPARATORZE W ZALEŻNOŚCI OD KROKU CZASOWEGO DLA NATĘŻENIA PRZEPŁYWU 12.5 m^3/h 42
ZAŁĄCZNIK 4 – RYSUNKI KONTURÓW FRAKCJI GAZOWEJ W SEPARATORZE W ZALEŻNOŚCI OD KROKU CZASOWEGO DLA NATĘŻENIA PRZEPŁYWU 50 m^3/h 49

1. PODSTAWA, CEL I ZAKRES PRACY

Podstawą niniejszej pracy było wykonanie obliczeń numerycznych wkładu koalescencyjnego oraz dwuwymiarowej analizy przepływu mieszaniny ropnej przez separator ropy w ramach projektu badawczo-rozwojowego finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju:

POIR.01.01.01-00-0780/15:
Innowacyjne urządzenie do wykonywania testów wydajnościowych naftowych otworów wiertniczych.

Projekt realizowany jest przez Instytut Maszyn Przepływowych w Gdańsku w formie podwykonawstwa (w latach 2016÷2019) dla firmy **TERCJA SYSTEMY POMIAROWE I KOMPUTEROWE (ul. Dywizjonu 303 5b/24, 80-462 Gdańsk)**.

Celem tej pracy jest:

- przedstawienie opisu modelu matematycznego procesu separacji, zachodzącego w koalescerze separatora frakcyjnego ropy
- wykonanie trójwymiarowych obliczeń CFD przepływającej ropy przez pojedynczy (wyizolowany od reszty układu) koalescer
- wykonanie obliczeń CFD w dwuwymiarowym (płaskim) separatorze z umieszczonymi koalescerami zastąpionymi strukturą porowatą.
- wykazanie CFD jako potencjału obliczeniowego przy analizowaniu przepływu mieszaniny przez separator i procesu samej separacji.

W związku z powyższym zakres pracy objął następujące elementy:

- opis geometrii obliczeniowej dwuwymiarowego separatora frakcji ropno-wodno-gazowej
- opis siatki obliczeniowej separatora użytej w obliczeniach CFD
- przedstawienie szczegółowych opisu modelu matematycznego koalescera
- obliczenia trójwymiarowe CFD pojedynczego (zastępczego) koalescera
- obliczenia dwuwymiarowe separatora dla dwóch natężeń przepływu mieszaniny: 12.5 m^3/h oraz 50 m^3/h.

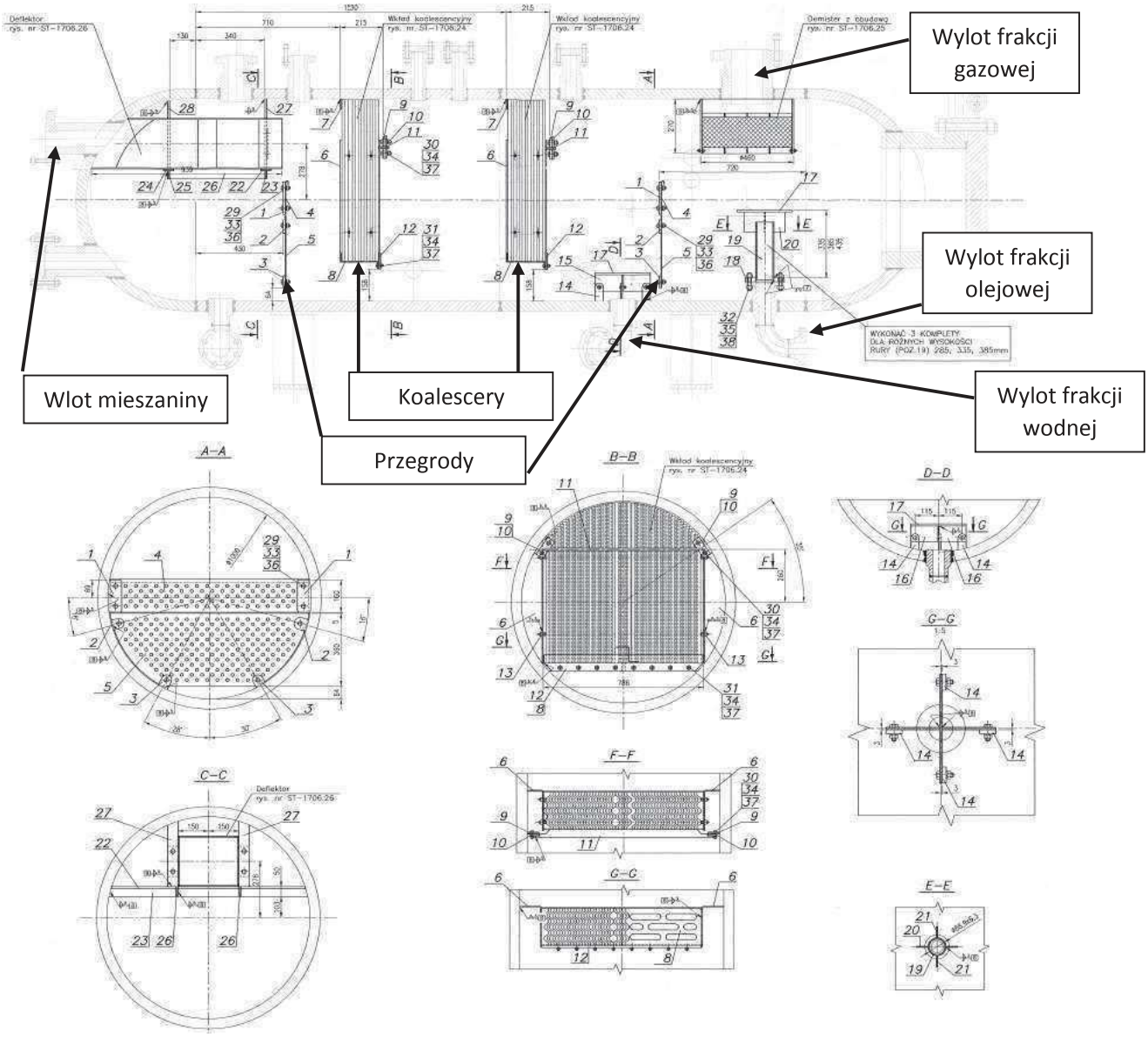
2. WSTĘP

Proces separacji złoża w separatorze jest z punku widzenia modelowania numerycznego procesem dość złożonym. Trudność stanowi nie tylko skomplikowana fizyka zjawiska /przepływy wieloskładnikowe i wielofazowe/ ale też próba modelowania zawiłości geometrycznych wnętrza separatora a szczególnie przepływu przez koalescer. Wobec tego zadanie to musimy rozbić na szereg podzadań analizujących różnymi metodami poszczególne „trudne" elementy procesu separacji. Założenia modelowe możemy podzielić na następujące etapy:

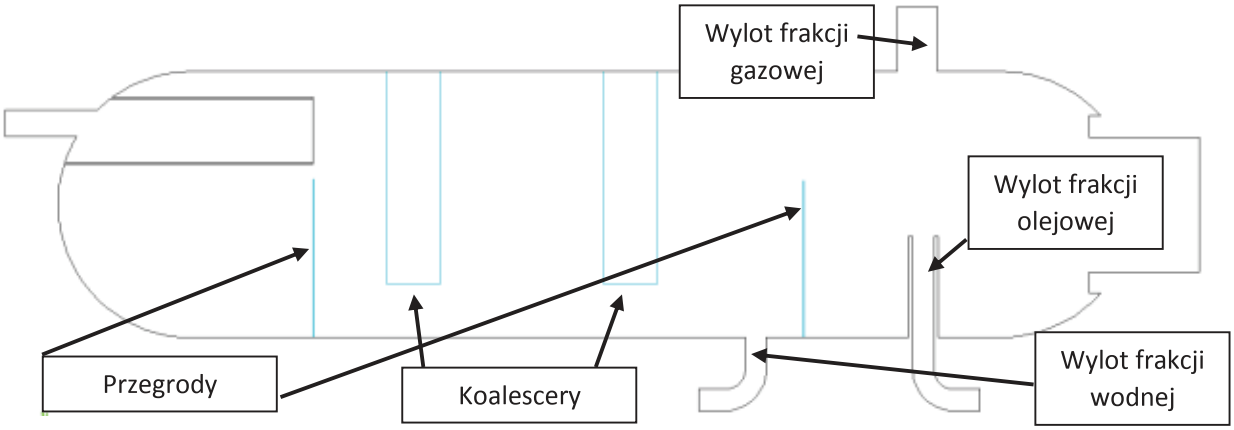
- opracowanie wytycznych co do geometrii obliczeniowej /w formie uproszczonej/ opracowanie siatki obliczeniowej /kompromis pomiędzy dokładnością a realnym czasem obliczeniowym/
- opracowanie ogólnych założeń modelu numerycznego
- zaproponowanie uproszczonego wlotu i sekcji koalescerów w postaci zastępczego materiału porowatego
- walidacja modeli na przepływach dwuskładnikowych
- opracowanie szczegółowych założeń co do modelu numerycznego /krok czasowy, wybór modelu wieloskładnikowego, wielofazowego/
- obliczenia 2D procesu separacji.

3. GEOMETRIA OBLICZENIOWA SEPARATORA

Poniżej przedstawiono rysunek rzeczywisty (przekrój) separatora wraz z wymiarami charakterystycznymi oraz jego odpowiednik numeryczny użyty w obliczeniach CFD – Rys. 3.1 oraz Rys. 3.2. Ze względu na dwuwymiarowe obliczenia w modelu geometrycznym dokonano uproszczeń, aby możliwe zostało wykonanie obliczeń numerycznych, stąd obydwa koalescery oraz obydwie przegrody umieszczone w separatorze zostały zamodelowane jako ośrodki porowate. Oddanie rzeczywistego kształtu koalescerów i przegród w przypadku obliczeń płaskich jest z założenia niemożliwe – możliwe jest to w przypadku obliczeń pełnej trójwymiarowej geometrii.



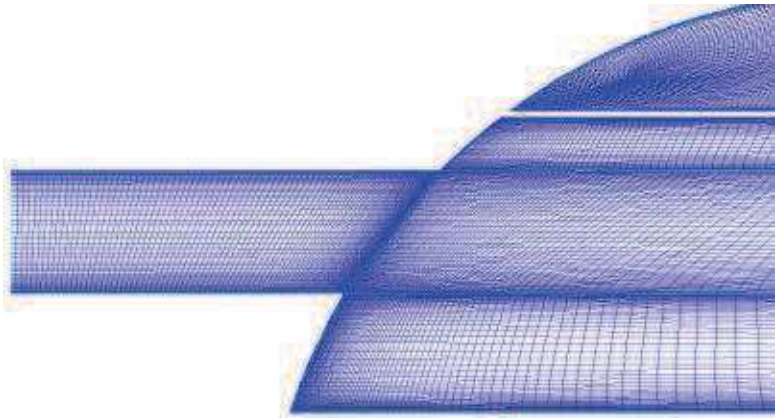
Rys. 3.1. Rysunek złożeniowy separatora, na podstawie którego wykonano obliczenia CFD.



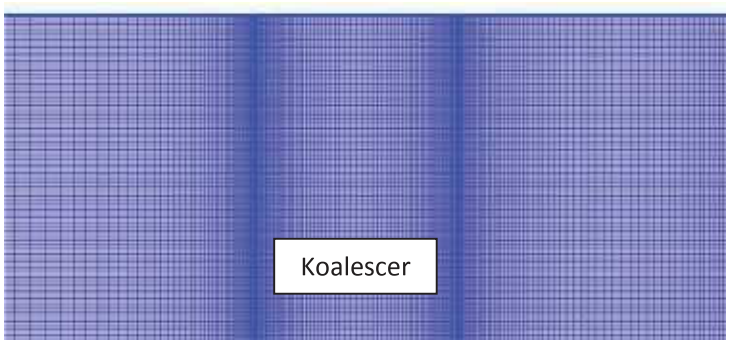
Rys. 3.2. Model geometryczny separatora, na podstawie którego wykonano dwuwymiarowe obliczenia CFD.

4. SIATKA OBLICZENIOWA SEPARATORA

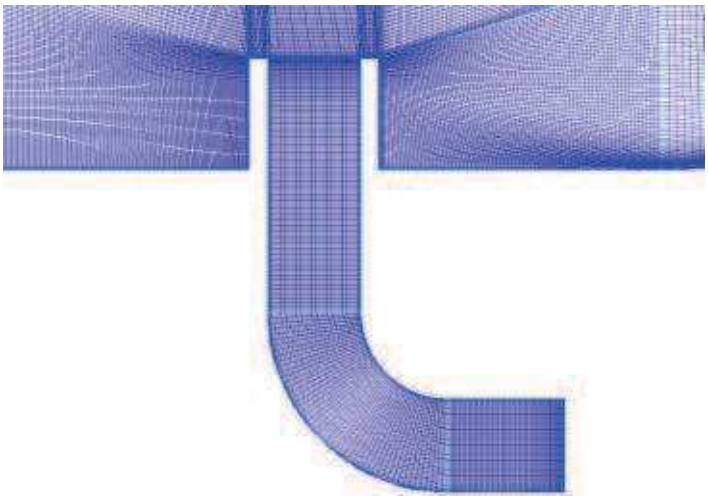
Liczba elementów obliczeniowych siatka dyskretnej separatora wyniosła około 550 tysięcy. W całości składała się z elementów sześciościennych, w większości strukturalnych. Poniżej na rysunkach Rys. 4.1÷4.6 zostały pokazane ważniejsze posiatkowane fragmenty separatora.



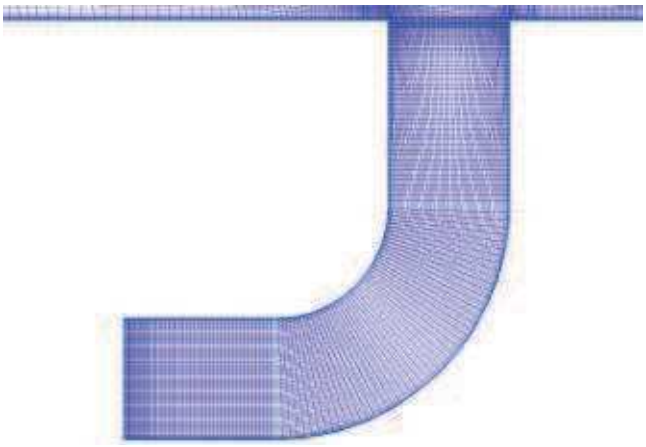
Rys. 4.1. Siatka obliczeniowa separatora w obszarze wlotu mieszaniny (deflektora).



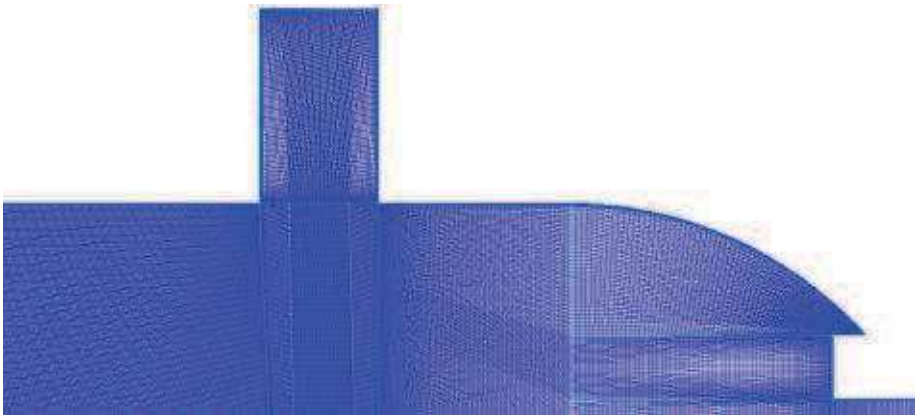
Rys. 4.2. Siatka obliczeniowa separatora w obszarze jednego z koalescerów.



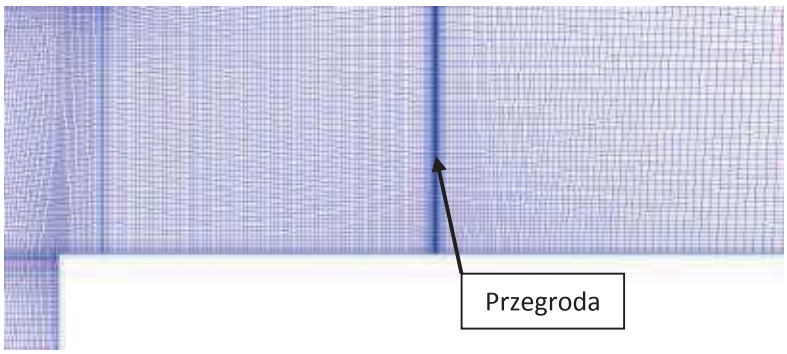
Rys. 4.3. Siatka obliczeniowa separatora w obszarze wylotu frakcji olejowej.



Rys. 4.4. Siatka obliczeniowa separatora w obszarze wylotu frakcji wodnej.



Rys. 4.5. Siatka obliczeniowa separatora w obszarze wylotu frakcji gazowej.

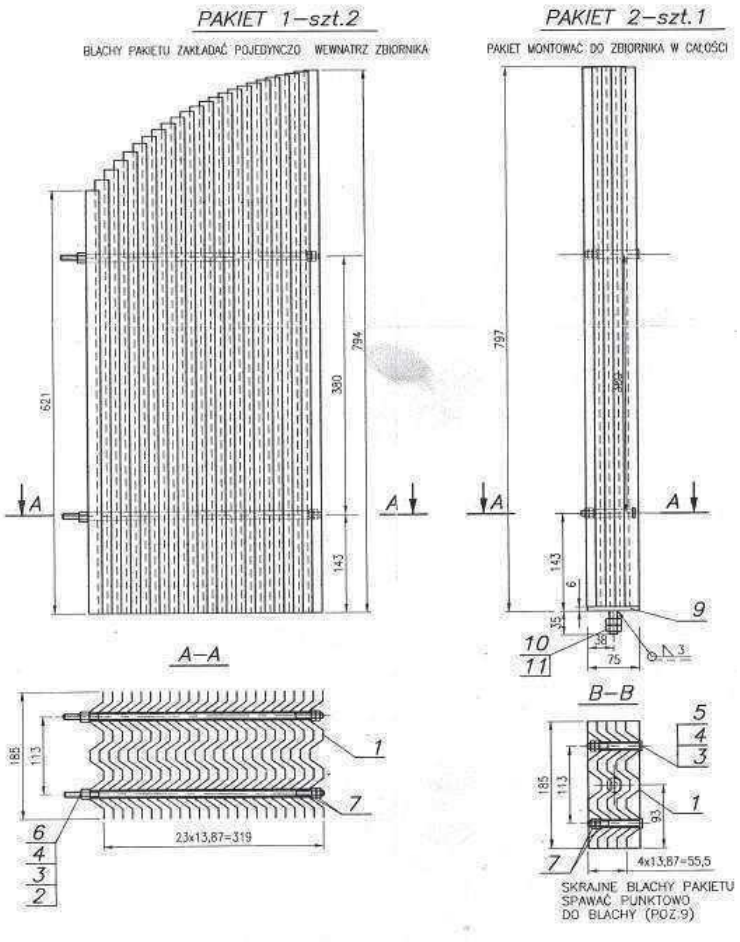


Rys. 4.6. Siatka obliczeniowa separatora w obszarze jednej z przegród.

5. MODEL MATEMATYCZNY KOALESCERA ZASTĘPCZEGO (OŚRODEK POROWATY)

Poniżej przedstawiono model matematyczny obliczeń oporów przepływu powstających w koalescerze (widok koalescera pokazany został na rysunku Rys. 5.1). W sensie modelu fizycznego, do celów dwuwymiarowych obliczeń CFD (ze względu na ograniczenia modelu), koalescer najkorzystniej potraktować jako materiał porowaty.

Projektując separator modelami 0D uzyskuje się podstawowe parametry separatora, które mogą następnie być poddane optymalizacji używając zaawansowanych metod 3D jak numeryczna mechanika płynów CFD. Ze względu na złożoność geometryczną i skalę zjawisk fizycznych przed finalnym cyklem projektowym 3D zasadne jest zbudowanie submodeli obliczeniowych najważniejszych składników separatora jak koalescer, demister czy dywerter.



Rys. 5.1. Ogólny widok koalescera separatora.

Równanie ciągłości można zapisać w postaci

$$\partial_t(\rho) + \mathrm{div}(\rho\vec{v}) = 0, \tag{5.1}$$

z którego wynika, że gęstość $\rho\,[kg/m^3]$ staje się podstawową zmienną modelu numerycznego. Oczywiście nie oznacza to, iż nie będzie można w pewnych sformułowaniach zastąpić gęstość mieszaniny ciśnieniem mieszaniny. Podstawowym wektorem zmiennych zachowawczych będzie wektor

$$\mathsf{U} = \{\rho, \rho\vec{v}, \rho e\} \tag{5.2}$$

określający zachowawcze zmienne - niewiadome modelu.

Zakładamy, że strumień pędu zawiera część odwracalną (sprężystą) w postaci ciśnienia termodynamicznego p oraz szereg części dyssypatywnych, wśród których strumień naprężeń lepkich $\overline{\overline{\tau}}$ i strumień turbulentny Reynoldsa $\overline{\overline{r}}$ należą do najważniejszych:

$$\overline{\overline{t}} = -p\overline{\overline{I}} + \overline{\overline{\tau}} + \overline{\overline{r}} + \overline{\overline{\tau}}^{dyf} + \overline{\overline{\tau}}^{rad} + \overline{\overline{\tau}}^{trans} = -p\overline{\overline{I}} + \overline{\overline{\tau}}^{całkowite}. \tag{5.3}$$

Pozostałe wkłady do strumienia pędu biorą się z: dyfuzji $\overline{\overline{\tau}}^{dyf}$, radiacji $\overline{\overline{\tau}}^{rad}$ i transpiracji $\overline{\overline{\tau}}^{trans}$. Dzieląc strumienie na część konwektywną (pochodne pierwszego rzędu) i część dyfuzyjną (pochodne drugiego rzędu) ewolucję pędu zapisujemy w następującej konserwatywnej postaci:

$$\partial_t(\rho\vec{v}) + \mathrm{div}(\rho\vec{v}\otimes\vec{v} + p\overline{\overline{I}}) = \mathrm{div}\left(\overline{\overline{\tau}}^{całkowite}\right) + \rho\vec{b}, \tag{5.4}$$

lub we współrzędnych kartezjańskich

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho v_i v_j + p\delta_{ij}\right) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\tau_{ij}^{calkowite}\right) + \rho b_i. \tag{5.5}$$

Z powyższych równań bilansu pędu wynika, że "naprężeniowy" warunek brzegowy, stawiany na całkowity strumień pędu może mieć postać

$$\vec{\tau}^{å} = \overline{\overline{t}}\vec{n}, \tag{5.6}$$

gdzie $\vec{\tau}^{å}$ wektor zadanych sił brzegowych, który w szczególnym przypadku może być równy zadanemu ciśnieniu $\vec{\tau}^{å} = p^{å}\vec{n}$, gdzie $\vec{n}$ wektor jednostkowy normalny do powierzchni.

Ponieważ zakładamy, iż wszystkie składniki płynu posiadają tę samą prędkość $\vec{v}$, oraz te same gradienty przestrzenne, to spodziewanym wyrażeniem na tensor naprężeń lepkich jest klasyczna formuła Stokesa

$$\overline{\overline{\tau}} = 2\mu\left[\overline{\overline{d}} - \frac{1}{3}\mathrm{div}(\vec{v})\overline{\overline{I}}\right] + \mu'\mathrm{div}(\vec{v})\overline{\overline{I}}, \tag{5.7}$$

w której prędkość deformacji

$$\overline{\overline{d}} = \frac{1}{2}\left(\nabla\otimes\vec{v} + \vec{v}\otimes\nabla\right) = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i}\right)\vec{e}_i\otimes\vec{e}_j = d_{ij}\vec{e}_i\otimes\vec{e}_j, \tag{5.8}$$

zaś $\mu[kg/m\,s]$ jest lepkością dynamiczną, μ' jest współczynnikiem drugiej lepkości, zwykle równy zeru.

Równania transportu wymagane dla modelu $k-\varepsilon$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\operatorname{div}(\rho k\vec{v})=\operatorname{div}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_t}\nabla k\right)+S_k, \tag{5.9}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon)+\operatorname{div}(\rho \varepsilon\vec{v})=\operatorname{div}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\nabla \varepsilon\right)+S_\varepsilon, \tag{5.10}$$

mają taką samą postać zachowawczą jak i inne równania transportu.

Człony źródłowe S_k, S_ε są jednak nie tylko zależne od wektora zmiennych zachowawczych, lecz również od jego przestrzennych gradientów:

$$S_k=\rho\left(r_{ij}v_{i,j}-\varepsilon\right)-\frac{\mu_t}{\rho^2}\frac{\partial\rho}{\partial x_i}\frac{\partial\rho}{\partial x_i}, \tag{5.11}$$

$$S_\varepsilon=\rho\frac{\varepsilon}{k}\left(C_1 r_{ij}v_{i,j}-C_2\varepsilon\frac{\mu_t}{\rho^2}\frac{\partial\rho}{\partial x_i}\frac{\partial\rho}{\partial x_i}\right). \tag{5.12}$$

Pięć stałych modelu $k-\varepsilon$ tzn. $\sigma_k=1.0, \sigma_\varepsilon=1.3, C_\mu=0.09, C_1=1.44, C_2=1.92$ nie zależą od rodzaju przepływu (stacjonarny, niestacjonarny), rodzaju płynu (ściśliwy, nieściśliwy).

Równania bilansu energii całkowitej (wewnętrznej + kinetycznej) w homogenicznym modelu płynu składa się z czasowych zmian wielkości bilansowanej, strumieni tej wielkości opuszczających (lub wnikających do) obszaru kontrolnego oraz ze źródeł

$$\begin{aligned}\partial_t(\rho e)+\operatorname{div}(\rho e\vec{v})= \quad & \operatorname{div}(\vec{q}+\vec{q}_t+\bar{\bar{t}}\vec{v}+\vec{q}_D+\vec{q}_{rad})+\\ & \rho r+\rho\vec{b}\cdot\vec{v}\end{aligned} \tag{5.13}$$

gdzie: $e=\varepsilon+\vec{v}^2/2$ suma energii wewnętrznej i kinetycznej, $\vec{q}$ i $\vec{q}^{\,t}$ to molekularny i turbulentny strumień ciepła, $\bar{\bar{t}}\vec{v}$ --mechaniczny strumień ciepła, q_D, q_{rad} to dyfuzyjne i radiacyjne strumienie ciepła, zaś

$$h_k=\varepsilon_k+\frac{p_k}{\rho_k}, \tag{5.14}$$

to entalpia składnika odniesiona na jednostkę masy składnika. Ponieważ całkowity strumień pędu $\bar{\bar{t}}=-p\bar{\bar{I}}+\bar{\bar{\tau}}^{c}$ dzieli się na konwekcyjną część odwracalną ($p\bar{\bar{I}}$, pochodne pierwszego rzędu) i mechaniczną część dyfuzyjną, to człon mechanicznego strumienia pędu $-p\bar{\bar{I}}\vec{v}=-p\vec{v}$ przenosi się na lewą stronę

$$\partial_t(\rho e)+\operatorname{div}\left[\left(e+\frac{p}{\rho}\right)\rho\vec{v}\right]=\operatorname{div}\left(\vec{q}+\vec{q}_t+\bar{\bar{\tau}}^{c}\vec{v}+\vec{q}_D+\vec{q}_{rad}\right)+S_e, \tag{5.15}$$

W przypadku entalpowego sformułowania wykorzystuje się związek

$$\rho e = \rho h + \rho \frac{\vec{v}^2}{2} - p. \tag{5.16}$$

Ośrodek porowaty opisany jest poprzez człon źródłowy dodany do standardowego równania pędu

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho \vec{w}\right) + \nabla \cdot \left(\rho \vec{w}\vec{w}\right) = -\nabla p + \nabla \cdot \left(\bar{\bar{\tau}}\right) + p\vec{g} + \vec{F} \tag{5.17}$$

gdzie:

$$\bar{\bar{\tau}} = \mu\left[\left(\nabla \vec{w} + \nabla \vec{w}^T\right) - \frac{2}{3}\nabla \cdot \vec{w} I\right]. \tag{5.18}$$

Człon S_i składa się z dwóch części: straty lepkościowe na pokonanie oporów przepływu przez ośrodek porowaty (klasyczne prawo Darcy'ego, pierwsza część prawej strony równania (5.19)) i straty wewnętrzne (druga część prawej strony równania (5.19)):

$$S_i = -\left(\sum_{j=1}^{3} D_{ij}\mu w_j + \sum_{j=1}^{3} C_{ij}\frac{1}{2}\rho|w|w_j\right) \tag{5.19}$$

gdzie S_i jest członem źródłowym równania pędu ($i = x, y$ lub z), $|w|$ jest modułem prędkości a D i C są danymi macierzami. Ubytek momentu związany jest z gradientem ciśnienia w medium porowatym i generuje spadek ciśnienia proporcjonalny do prędkości przepływu. W przypadku homogenicznych materiałów porowatych mamy:

$$S_i = -\left(\frac{\mu}{\alpha}w_i + C_2\frac{1}{2}\rho|w|w_i\right), \tag{5.20}$$

gdzie α jest przepuszczalnością, a C_2 jest współczynnikiem oporu wewnętrznego, czyli D i C są macierzami diagonalnymi z 1/α i C_2 odpowiednio na przekątnych i zerami dla reszty elementów macierzy

W przepływach laminarnych przez materiały porowate, spadek ciśnienia jest wprost proporcjonalny do prędkości i stała C_2 może być pominięta. Ignorując zjawiska konwekcyjne i dyfuzyjne, model przepływu w materiałach porowatych redukuje się do prawa Darcy'ego:

$$\nabla p = -\frac{\mu}{\alpha}\vec{w}. \tag{5.21}$$

Spadek ciśnienia liczony jest więc dla każdego wymiaru (x, y, z) ośrodka porowatego zależności:

$$\Delta p_x = \sum_{j=1}^{3} \frac{\mu}{\alpha_{xj}} w_j + \Delta n_x \tag{5.22a}$$

$$\Delta p_y = \sum_{j=1}^{3} \frac{\mu}{\alpha_{yj}} w_j + \Delta n_y \tag{5.22b}$$

$$\Delta p_z = \sum_{j=1}^{3} \frac{\mu}{\alpha_{zj}} w_j + \Delta n_z \tag{5.22c}$$

gdzie $1/\alpha_{ij}$ są składnikami macierzy D, w_j są składowymi prędkości w kierunkach x, y, z, $\Delta n_x, \Delta n_y, \Delta n_z$ oznaczają grubość ośrodka porowatego w kierunku x, y i z.

Przy wyższych prędkościach przepływu, stała C_2 wprowadza poprawkę na straty generowane oporem wewnętrznym. Stała ta może być rozumiana jako współczynnik straty odniesiony do długości wzdłuż kierunku przepływu.

W przypadku płytek perforowanych (substytut materiały porowatego) być może będzie można pominąć człon przepuszczalny i użyć tylko członu strat wewnętrznych, co daje nam równania:

$$\nabla p = -\sum_{j=1}^{3} C_{2ij} \left(\frac{1}{2} \rho w_j |w| \right) \tag{5.23}$$

lub pisząc jako spadki ciśnień w kierunku x, y, z:

$$\Delta p_x \approx \sum_{j=1}^{3} C_{2xj} \Delta n_x \frac{1}{2} \rho w_j |w| \tag{5.24a}$$

$$\Delta p_y \approx \sum_{j=1}^{3} C_{2yj} \Delta n_y \frac{1}{2} \rho w_j |w| \tag{5.24b}$$

$$\Delta p_z \approx \sum_{j=1}^{3} C_{2zj} \Delta n_z \frac{1}{2} \rho w_j |w| \tag{5.24c}$$

Istotą zastępowania płyt perforowanych materiałem porowatym jest wyznaczenie charakterystyk zastępczego materiału porowatego. W kodzie *CFD* ośrodek porowaty opisywany jest trzema parametrami – skalarnym i dwoma wektorowymi. Skalarem jest porowatość ośrodka czyli w przypadku płyt perforowanych stosunek powierzchni otworów do całkowitej powierzchni płyty, wektorami są przepuszczalność α i współczynnik oporu wewnętrznego C_2.

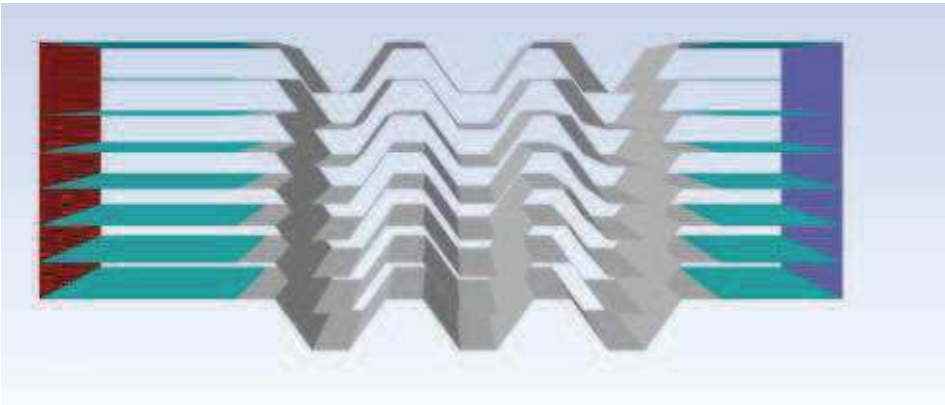
Do wyznaczenia parametrów α i C_2 konieczne jest wyznaczenie tzw. charakterystyki zastępczego ośrodka porowatego, czyli spadku ciśnienia na płycie perforowanej w funkcji prędkości przepływu.

Do tego celu stosuje się równanie (5.20), ponieważ człon źródłowy ma wymiar dodatkowego spadku ciśnienia generowanego przez perforowaną płytę podzielonego przez grubość płyty, czyli

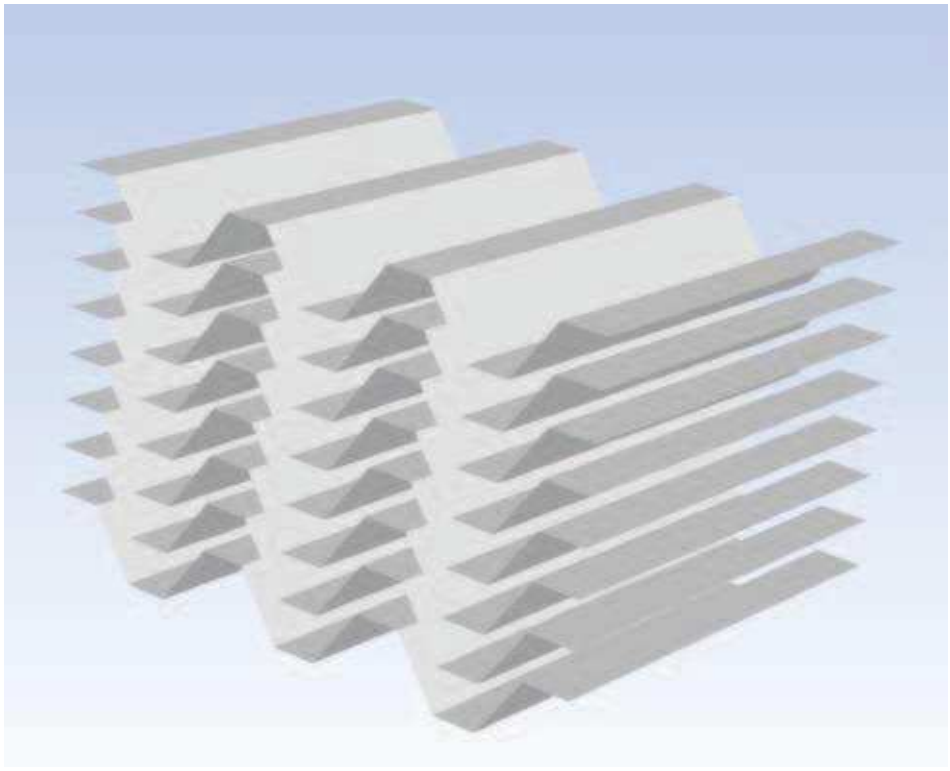
$$\frac{\Delta p}{\Delta l} = \frac{\mu}{\alpha} w + \frac{1}{2} C_2 w^2 \tag{5.25}$$

6. OBLICZENIA TRÓJWYMIAROWE KOALESCERA ZASTĘPCZEGO

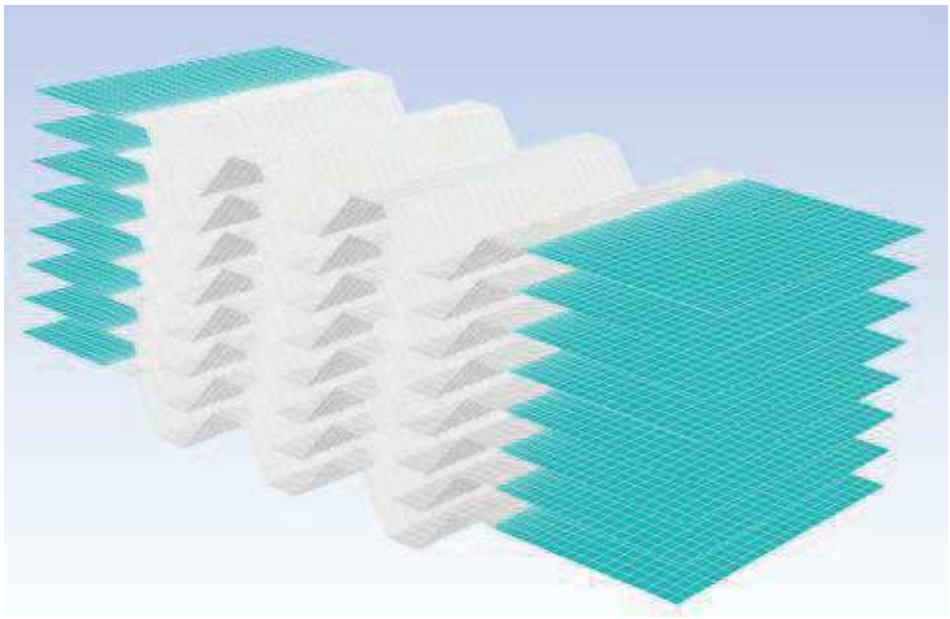
Zgodnie z metodyką założeń upraszczających geometrię, zasadniczym celem jest opracowanie korelacji na wewnętrzny opór materiału porowatego, który można wprowadzić jako zasadniczy parametr do modelowania pośredniego koalescera. Dzięki temu możliwe jest późniejsze zamodelowanie koalescera jako ośrodka porowatego w obliczeniach przepływu dwuwymiarowego przez koalescer. W tym celu zbudowano model obliczeniowy przepływu jednofazowego przez kanały koalescera i przeprowadzono seryjne trójwymiarowe obliczenia przy rożnych prędkościach przepływu celem wyznaczenia spadków ciśnień na koalescerze. Model ten pokazano na poniższych rysunkach Rys. 6.1÷6.2 a z kolei, na rysunkach Rys. 6.3÷6.4 pokazano przykład posiatkowania w różnych widokach. Na rysunku Rys. 6.5 przedstawiono płaszczyzny do wizualizacji pól prędkości i ciśnienia, użyte w kolejnych rysunkach obrazujących wyniki, na których pokazano obliczenia przepływu w postaci konturów ciśnienia i prędkości – Rys. 6.6÷6.8. Ostatni przedstawiony rysunek Rys 6.9 przedstawia uzyskaną w wyniku obliczeń charakterystykę koalescera, obrazującą uśredniony spadek ciśnienia w zależności od średnich prędkości napływu do koalescera.



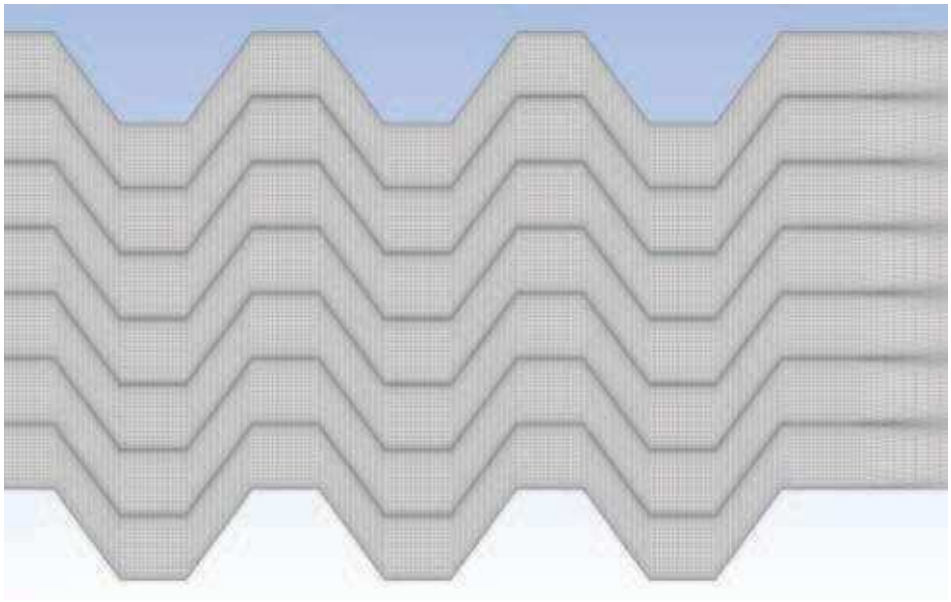
Rys. 6.1. Model geometryczny koalescera – widok z góry.



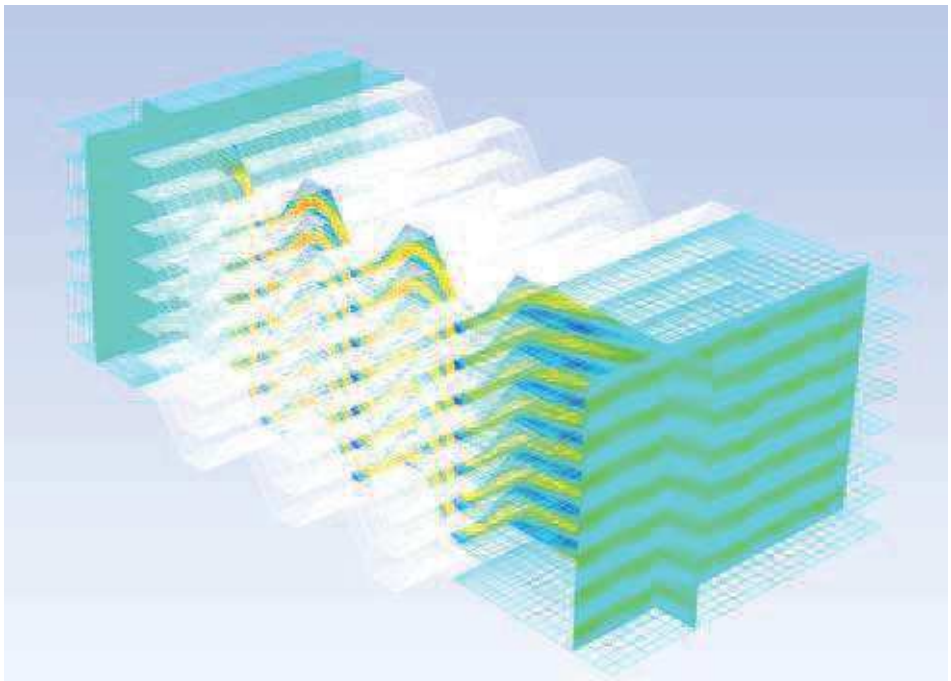
Rys. 6.2. Model geometryczny koalescera – widok izometryczny.



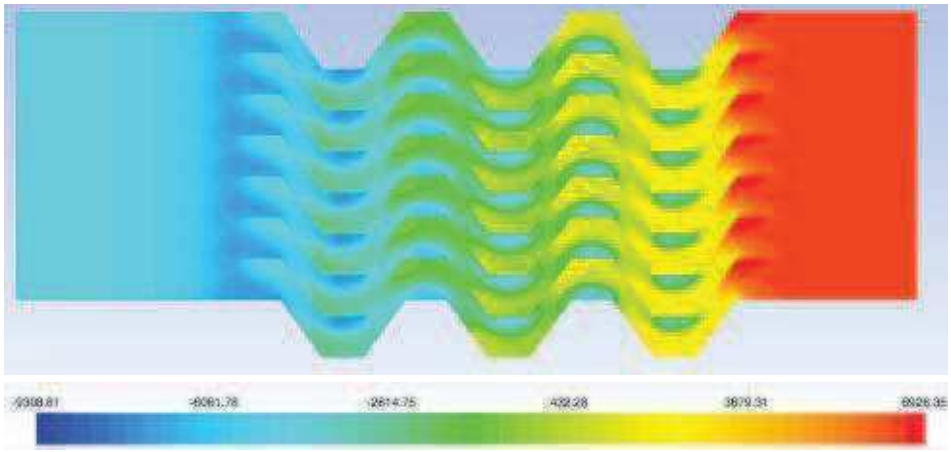
Rys. 6.3. Siatka obliczeniowa koalescera – widok izometryczny siatki powierzchniowej.



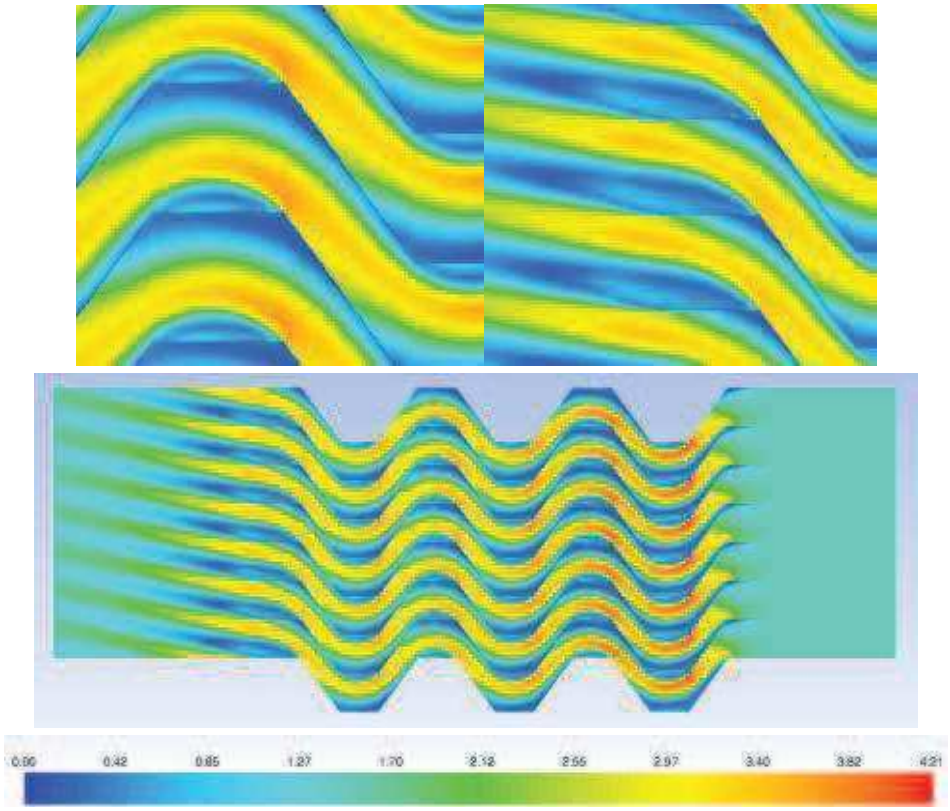
Rys. 6.4. Siatka obliczeniowa koalescera – widok z góry siatki powierzchniowej.



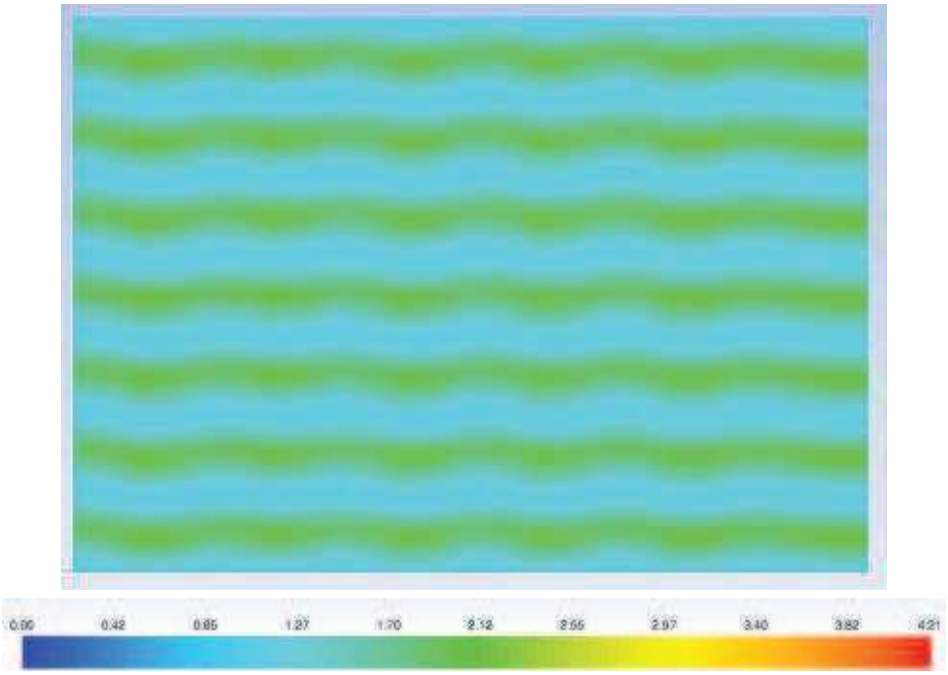
Rys. 6.5. Schemat prezentacji obliczeń numerycznych koalescera – płaszczyzny pomocnicze do wizualizacji pól prędkości i ciśnienia.



Rys. 6.6. Rezultaty obliczeń numerycznych koalescera – rozkład ciśnień w widoku z góry.

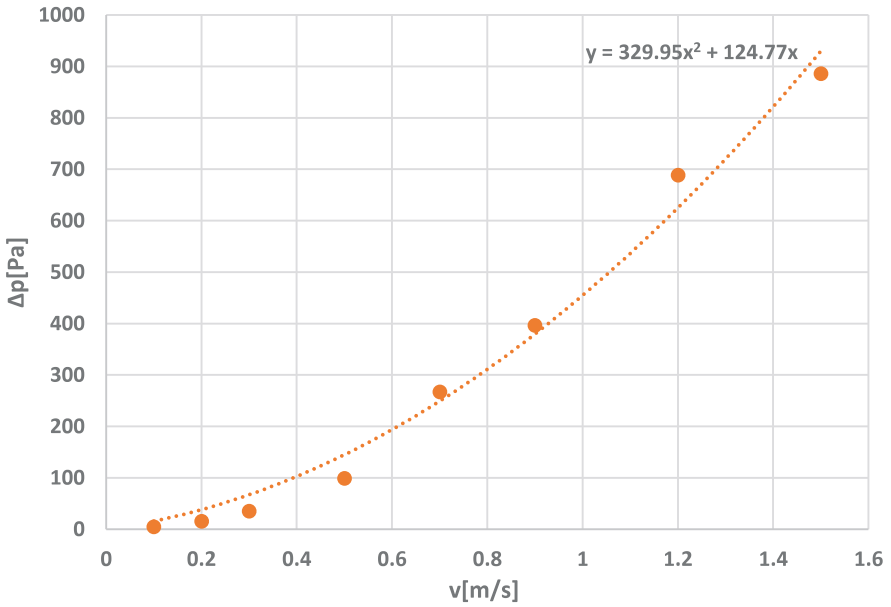


Rys. 6.7. Rezultaty obliczeń numerycznych koalescera – rozkład prędkości wypadkowych w widoku z góry.



Rys. 6.8. Rezultaty obliczeń numerycznych koalescera – rozkład prędkości wypadkowych w widoku z boku.

Na wykresie poniżej przedstawiono wyniki symulacji numerycznej charakterystyki oporowej koalescera, na podstawie której interpolując dane obliczeniowe za pomocą funkcji kwadratowej otrzymuje się poszukiwane parametry ośrodka porowatego: α oraz C_2.



Rys. 6.9. Charakterystyka koalescera (wraz z jej równaniem) uzyskana w wyniku obliczeń numerycznych.

7. OBLICZENIA DWUWYMIAROWE PROCESU SEPARACJI Z UŻYCIEM METODY OBLICZEŃ WIELOFAZOWYCH „POPULATION BALANCE MODEL"

7.1. Wstęp

Program ANSYS/Fluent zawiera kilka modeli, służących do symulacji przepływów wielofazowych. Fizyka tych modeli jest oparta zarówno na podejściu lagranżowskim (*Lagrangian* approach), jak i podejściu eulerowskim (*Eulerian* approach). W pracy zdecydowano się wykorzystać podejście eulerowskie do modelowania rozdziału faz. W podejściu tym dostępne są trzy warianty obliczeń wielofazowych: 1) *Volume of Fluid*, 2) *Mixture* oraz 3) *Eulerian-Eulerian*.

[1] Model wielofazowy modelu płynu *Volume of Fluid* oddziela w sposób dokładny (interfejsy) poszczególne obliczane frakcje (składniki). Jednakże jej stosowanie jest ograniczone ze względu na wysokie wymagania dotyczące siatek numerycznych o wysokiej rozdzielczości, co powoduje konieczność użycia dużych zasobów obliczeniowych. Model *Mixture* zawiera dodatkowe równanie do przewidywania prędkości poślizgu na granicy faz, jednakże jego stosowanie jest limitowane użyciem tylko dla mono-dyspersyjnych faz wtórnych. Modele turbulencji stosowane w połączeniu z ww. modelami wielofazowymi są takie same, jak te stosowane w przepływach jednofazowych. W takim ujęciu trzeci z wymienionych modeli wielofazowych, czyli *Eulerian-Eulerian* różni się znacząco od nich, ponieważ poza tym, że rozwiązuje indywidualne równania pędu dla każdej fazy, to również może być łączony z odpowiednimi wielofazowymi modelami turbulencji, chociaż wciąż jednak ograniczonymi przez tylko mono-dyspersyjne fazy wtórne.

7.2. Submodel obliczeń wielofazowych „Population Balance Model"

Generalnie, modele o podejściu eulerowskim nie uwzględniają koalescencji poszczególnych frakcji ani rozpadu cząstek. Ograniczenie to można pokonać za pomocą dołączenia do programu Fluent submodelu obliczeń wielofazowych tzw. *Population Balance Model* (PBM), wykorzystującego właśnie podejście eulerowskie. PBM rozwiązuje równanie transportowe dla śledzenia funkcji gęstości, a tym samym rozkładu wielkości kropel wewnątrz całej domeny obliczeniowej, jednocześnie uwzględniając skutki koalescencji i rozpadu cząstek. W obecnej

formie model PBM ogranicza się jednak do obliczeń pojedynczej fazy wtórnej. Druga faza wtórna reprezentowana jest przez średnią reprezentatywną średnicę kropel frakcji. Dodać należy, że fazami wtórnymi w prezentowanych obliczeniach były frakcje cieczowe, a mianowicie: frakcja woda (faza wtórna podstawowa wykorzystywana przez PBM) i frakcja ropna (faza wtórna reprezentowana w obliczeniach przez średnią reprezentatywną średnicę kropel).

Model ten został użyty w prezentowanych obliczeniach numerycznych CFD, w celu uwzględnienia efektu rozkładu wielkości kropel w pracy separatora i ich koalescencji w duże struktury.

7.3. Warunki brzegowe i ustawienia programu obliczeniowego

Poniżej przedstawiono warunki brzegowe użyte w przeprowadzonych niestacjonarnych dwuwymiarowych obliczeniach numerycznych. Jako model turbulencji domknięcia układu równań w programie ANSYS/Fluent w wersji 14, przyjęto dwurównaniowy model RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) *k-ε Standard* ze sposobem obliczeń warstwy przyściennej za pomocą submodelu *Standard Wall Functions*. Użycie tego modelu turbulencji wynikało z jego silnej zbieżności, niskich wymagań siatkowych (Y^+) i stosunkowo niskich potrzeb obliczeniowych. Liczba elementów siatki obliczeniowej wyniosła około 272 tysiące i została zbudowana w oparciu o czterokrawędziowe komórki obliczeniowe. Przepływ przez separator potraktowano, jako lepki, co oznaczało założenie na ściankach ograniczających brak poślizgu (zerowa prędkość na ściankach).

Podstawowe parametry użyte w procesie obliczeniowym były następujące:

- Podejście wielofazowe:
  - Typ: *Eulerian*;
  - liczba frakcji: 3.
- Podopcje użytego submodelu wielofazowego *Population Balance Model*:
  - opcja: *Discrete*.
- Frakcje mieszaniny roboczej (indeks: *mix*) i nadrzędność (*primary*/*secondary*):
  - gazowa (indeks: *gas*) – frakcja podstawowa (*primary*);
  - wodna (indeks: *wat*) – frakcja wtórna (*secondary*);
  - ropopochodna (indeks: *oil*) – frakcja wtórna (*secondary*).
- Udziały objętościowe frakcji mieszaniny:

- ropa: V_{oil} = 50%;
- woda: V_{wat} = 3%;
- gaz: V_{gas} = 1 - V_{oil} - V_{wat} = 47%.

- Średnica kropel frakcji cieczowych (ropy i wody): 0.0001 m.
- Przepływ nieściśliwy (stała gęstość poszczególnych frakcji): ρ_{oil} = 813.464 kg/m^3, ρ_{wat} = 999.1 kg/m^3, ρ_{gas} = 17.585 kg/m^3.
- Prędkość normalna frakcji na wlocie (jednakowa dla wszystkich): dla Q = 12.5 m^3/h: v_{oil} = v_{wat} = v_{gas} = 0.442 m/s oraz dla Q = 50.0 m^3/h: v_{oil} = v_{wat} = v_{gas} = 1.768 m/s.
- Lepkość dynamiczna: υ_{oil} = 0.00227 Pa·s, υ_{wat} = 0.001106 Pa·s, υ_{gas} = 0.000011 Pa·s.
- Przyspieszenie ziemskie: g = 9.81 m/s^2 (zwrot wektora działania siły grawitacji był przeciwny do zwrotu osi Y: g_y = -9.81 m/s^2).
- Temperatura: T = 333.15 K (t = 60˚C).
- Napięcie powierzchniowe pomiędzy frakcjami:
  - woda – gaz: 0.072 N/m;
  - ropa – gaz: 0.034 N/m;
  - ropa – woda: 0.05 N/m.
- Wielkości niezbędne do domknięcia modelu turbulencji:
  - średnica hydrauliczna wlotowa: D_h = 0.1 m;
  - średnica hydrauliczna wylotowa: D_h = 0.15 m;
  - intensywność turbulencji wlotowa mieszaniny: I_{mix} = 2%;
  - intensywność turbulencji wylotowa mieszaniny: I_{mix} = 2%.

W obliczeniach, ze względu na przyjęte założenie dwuwymiarowości, niemożliwe było oddanie rzeczywistego kształtu obydwu przegród oraz koalescerów, dlatego też potraktowane zostały, jako ośrodki porowate.

Uwzględnienie porowatości w równaniach zachowania jest poprzez człon źródłowy pędu S_i (gdzie i oznacza kierunki x, y, z), dołączony do równań zachowania, określający odpowiednio opór wiskotyczny (Darcy'ego) i straty wewnętrzne, jak następuje (oznaczenia są zgodne z pomocą programu ANSYS/Fluent):

$$S_i = -\left(\underbrace{\frac{\mu}{\alpha} v_i}_{opór\ wiskotyczny} + \underbrace{C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v_i}_{straty\ wewnętrzne} \right)$$

gdzie: α – przepuszczalność [m^2], C_2 – współczynnik oporu wewnętrznego [m^{-1}], μ – lepkość dynamiczna [Pa·s], v – prędkość wypadkowa [m/s], v_i – prędkość składowa ($i \equiv x, y, z$) [m/s].

Ustawienia porowatości przegród (były jednakowe dla obydwu):

- Porowatość: 0.1;
- Kierunki przepływu:
  - X = 1;
  - $Y = 0$.
- Odwrotność przepuszczalności (1/α) dla frakcji (jednakowy dla wszystkich), związana z oporem wiskotycznym:
  - dla kierunku X: 142857 m^{-2};
  - dla kierunku Y: 0 m^{-2}.
- Współczynnik oporu wewnętrznego (C_2) dla frakcji (jednakowy dla wszystkich), związany ze stratami wewnętrznymi:
  - dla kierunku X: 15000 m^{-1};
  - dla kierunku Y: 0 m^{-1}.

Ustawienia porowatości koalescerów (były jednakowe dla obydwu):

- Porowatość: 0.9;
- Kierunki przepływu:
  - X = 1;
  - $Y = 0$.
- Odwrotność przepuszczalności (1/α) frakcji ropy, związana z oporem wiskotycznym:
  - dla kierunku X: 274823 m^{-2};
  - dla kierunku Y: 0 m^{-2}.
- Współczynnik oporu wewnętrznego dla frakcji ropy (C_2), związany ze stratami wewnętrznymi:
  - dla kierunku X: 4.04 m^{-1};
  - dla kierunku Y: 0 m^{-1}.
- Odwrotność przepuszczalności (1/α) frakcji wody, związana z oporem wiskotycznym:
  - dla kierunku X: 537801 m^{-2};
  - dla kierunku Y: 0 m^{-2}.

- Współczynnik oporu wewnętrznego dla frakcji wody (C_2), związany ze stratami wewnętrznymi:
  - dla kierunku X: 3.29 m^{-1};
  - dla kierunku Y: 0 m^{-1}.
- Odwrotność przepuszczalności ($1/\alpha$) frakcji gazu, związana z oporem wiskotycznym:
  - dla kierunku X: 5.671364e+07 m^{-2};
  - dla kierunku Y: 0 m^{-2}.
- Współczynnik oporu wewnętrznego dla frakcji gazu (C_2), związany ze stratami wewnętrznymi:
  - dla kierunku X: 187 m^{-1};
  - dla kierunku Y: 0 m^{-1}.

Przedstawione liczby dotyczące oporu wiskotycznego i wewnętrznego zostały określone na podstawie badań nad materiałami przepuszczalnymi o określonej porowatości, wykonanymi w IMP PAN.

Ustawienia solwera obliczeniowego:

- Punkt startowy obliczeń (krok czasowy: $t = 0$ s):
  - bezruch frakcji w separatorze;
  - warstwa wody na dnie o wysokości 21.5 mm, powyżej warstwa oleju od granicy z wodą do wysokości krawędzi rurociągu odpływowego frakcji ropnej; pozostała objętość separatora wypełniona frakcją gazową.
- Początek ruchu mieszaniny na wlocie separatora.
- Krok czasowy: 0.005 s.
- Czas przepływu przez separator modelowanej mieszaniny: dla $Q = 12.5$ m^3/h: 60 s oraz dla $Q = 50$ m^3/h: 23.5 s.
- Liczba iteracji wewnętrznych w kroku czasowym: 20.
- Sprzężenie ciśnienia z prędkością: schemat *Coupled*.
- Schemat dyskretyzacji pierwszego rzędu: *First Order Upwind*.
- Liczba Couranta: 0.5.

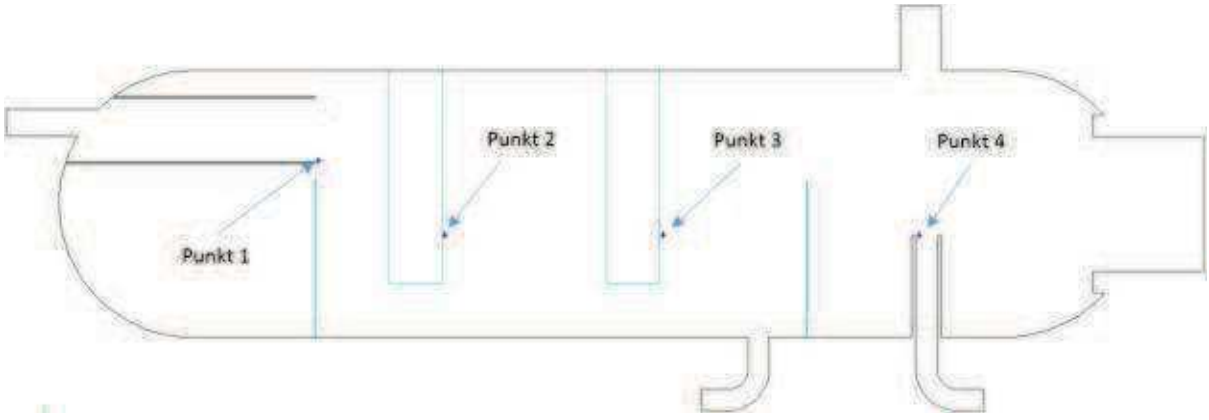
7.4. Rezultaty dwuwymiarowych obliczeń numerycznych przepływu przez separator

Rezultaty w postaci konturów frakcji olejowej i gazowej, w zależności od kroku czasowego, przedstawiono w Załącznikach na końcu opracowania. Obliczenia wykonano dla dwóch objętościowych natężeń przepływu mieszaniny olejowo-wodno-gazowej, a mianowicie 12.5 m^3/h oraz 50 m^3/h, z udziałami objętościowymi poszczególnych frakcji jak następuje: olejowa – 50%, gazowa – 47% i wodna 3%. Koalescery oraz przegrody umieszczone w separatorze zostały zamodelowane, jako ośrodki porowate. Współczynniki porowatości zostały wyznaczone w oparciu o badania przepływu przez koalescer zastępczy, co pokazano w Rozdziale 7. W obliczeniach, w odpowiednich momentach po wypełnieniu się kanału spustowego oleju, był on otwierany a następnie znów napełniany po zamknięciu.

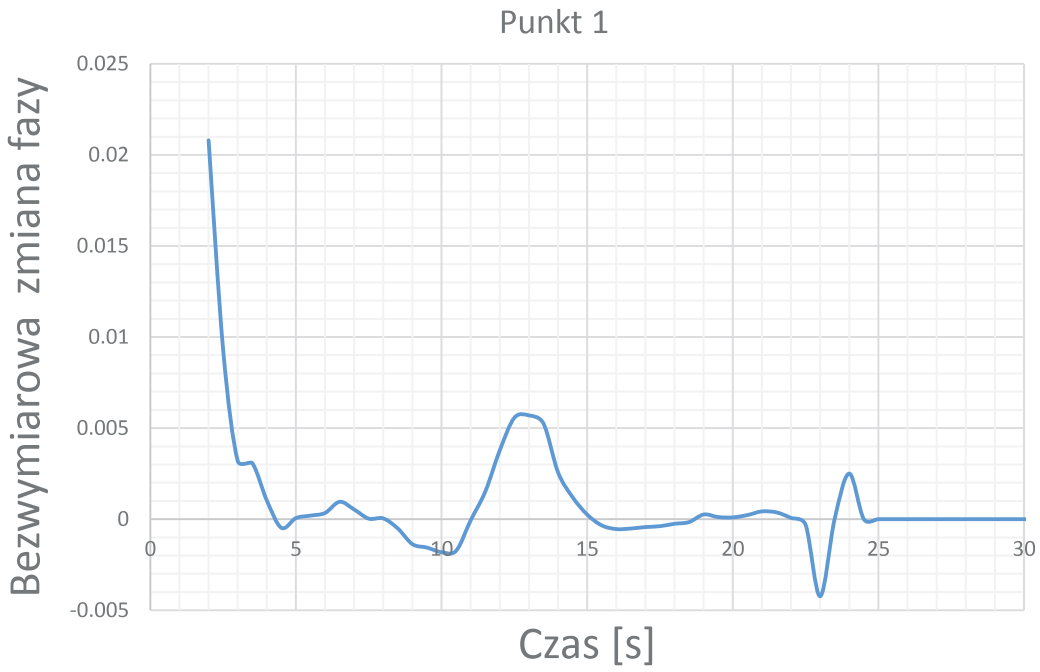
UWAGA: należy dodać, iż integralną częścią sprawozdania są również wykonane filmy, obrazujące zachowanie się frakcji olejowej, frakcji wodnej i frakcji gazowej przy przepływie przez separator dla obydwu objętościowych natężeń przepływu.

W rezultacie obliczeń dla niższego natężenia przepływu uzyskano obraz przepływu, w którym mieszanina wypływająca z części wlotowej (deflektora) spływa od razu do zbiornika z pominięciem koalescera. Inaczej jest w przypadku przepływu z wyższą wartością natężenia przepływu – tam struga wpadająca wchodzi do koalescera. Natomiast charakterystyczne dla obydwu przypadków jest to, iż w obydwu przypadkach drugi koalescer nie wpływa na przepływ w separatorze.

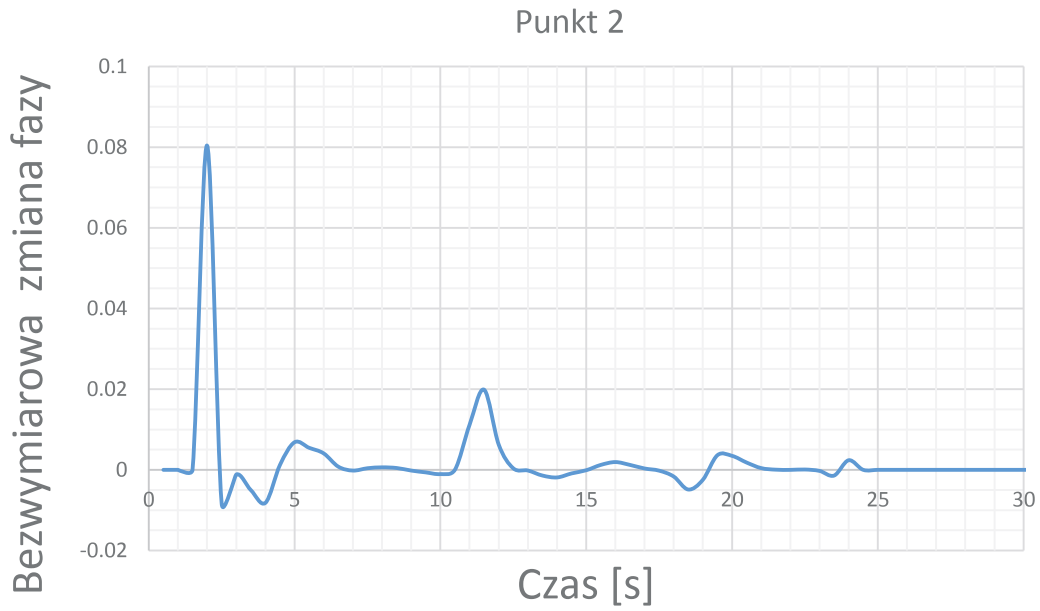
Poniżej przedstawiono wykresy obrazujące zmiany fazy frakcji w 4 punktach charakterystycznych separatora, zgodnie z Rysunkiem 7.1, mianowicie: 1) przy wylocie z deflektora, 2) za kolescerem pierwszym, 3) za koalescerem drugim oraz 4) przy wlocie do spustu olejowego (punkt 2, 3 i 4 są na tej samej wysokości określonej przez punkt 4).



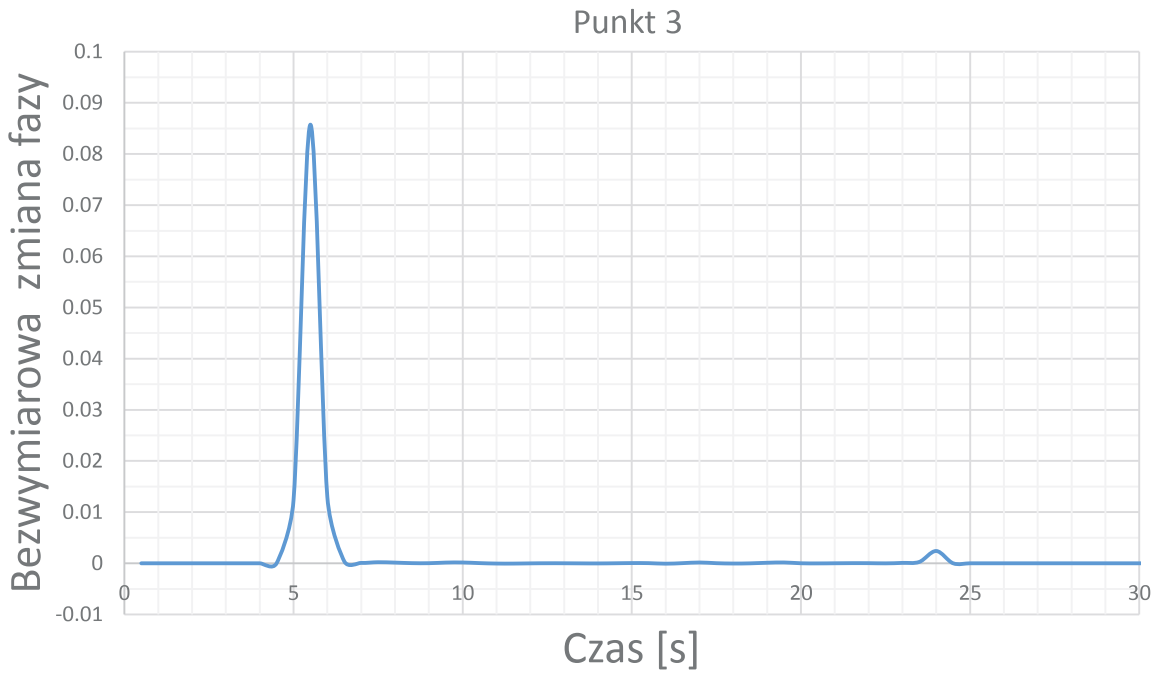
Rys. 7.1. Rysunek z oznaczeniami punktów, w których wyznaczono zmianę fazy.



Rys. 7.2. Bezwymiarowa zmiana fazy olejowej dla punktu 1.



Rys. 7.2. Bezwymiarowa zmiana fazy olejowej dla punktu 2.



Rys. 7.2. Bezwymiarowa zmiana fazy olejowej dla punktu 3.

Rys. 7.2. Bezwymiarowa zmiana fazy olejowej dla punktu 4.

8. PODSUMOWANIE i WNIOSKI

Głównym celem tej pracy było zbadanie potencjału nowoczesnych technik obliczeniowych CFD, ograniczonych tu z powodu ograniczeń czasowych głównie do wieloskładnikowych modeli uRANS, w zastosowaniu do modelowania procesu separacji na przykładzie poziomego separatora trójfazowego. W ramach tej pracy

1. opracowano wstępne wytyczne co do geometrii obliczeniowej /w formie uproszczonej/ dla tej klasy separatorów
2. opracowano najkorzystniejszą topologię siatki obliczeniowej /kompromis pomiędzy dokładnością a realnym czasem obliczeniowym/
3. opracowano ogólne założenia dotyczące modelu numerycznego
4. z uwagi na realny czas obliczeniowy zrezygnowano z modelowania przepływu przez lamele koalescera i w zamian zaproponowano uproszczony model sekcji koalescerów w postaci zastępczego materiału porowatego
5. poddano walidacji modeli na przepływach dwuskładnikowych
6. opracowano szczegółowe założenia co do modelu numerycznego /krok czasowy, wybór modelu wieloskładnikowego, wielofazowego/
7. poddano symulacji proces separacji na przykładzie 2D i sprawdzono jakościowo poprawność wyników z oczekiwaną fizyką zjawiska.

Jakościowa ocena wyników pozwala stwierdzić, iż założone wytyczne co do budowy modelu fizykalnego zjawiska separacji są poprawne. Jakościowe wyniki nie odbiegają od oczekiwań. Zbudowane zostały procedury i wytyczne pozwalające w przyszłych pracach na realne symulacje procesów separacji. Ze względu na złożoność procesu zachodzącego w separatorze, zaleca się by symulacje te miały charakter 3D, a zweryfikowane w niniejszej pracy założenia modelowe pozwolą na sprawne i w miarę bezproblemowe obliczenia. Dzięki temu, można się będzie spodziewać w miarę wiarygodnych wyników. Jest to bardzo istotny wniosek, bowiem przyszłe niestacjonarne obliczenia 3D będą miały charakter długoterminowy i jakakolwiek detekcja i eliminacja błędów w założeniach modelu może spowalniać proces tworzenia wyników o miesiące.

REFERENCJE

[1] N. Kharoua, L. Khezzar, and H. Saadawi: *CFD Modelling of a Horizontal Three-Phase Separator: A Population Balance Model*. American J. of Fluid Dynamics, 3(4), 101-118, 2013, DOI: 10.5923/j.ajfd.20130304.03.

[2] I. E. Idelchik: *Handbook of Hydraulic Resistance*, 3rd ed., CRC Press Inc., 1994.

[3] J. C. Viles: *Predicting liquid re-entrainment in horizontal separators*, Journal of Petroleum Technology, vol. 45, no. 5, pp. 405-409, 1992.

[4] E. W. M. Hansen and G. J. Rørtveit: *Numerical simulation of fluid mechanisms and separation behavior in offshore gravity separators*, ser. Emulsions and Emulsion Stability: Surfactant Science Series/61. Trondheim, Norway: CRC Press, 2006.

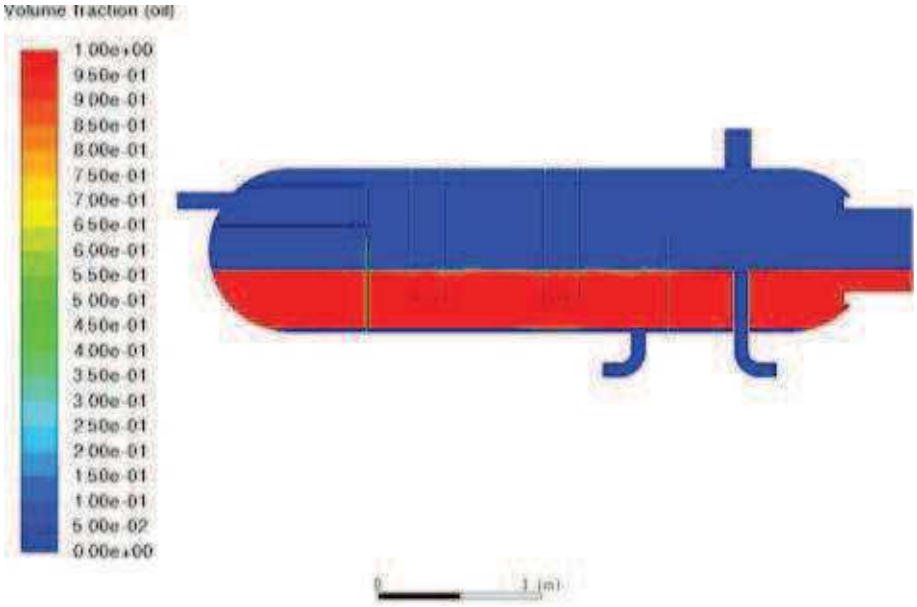
[5] R. Arntzen, and P. A. K. Andresen: *Three-Phase Well-stream Gravity Separation*, In Johan Sjöblom, editor, Emulsion encyclopedia. New York, USA: Marcel Dekker Inc., 2001.

[6] N. Kharoua, L. Khezzar and Z. Nemouchi: *CFD study of the parameters affecting oil-water hydrocyclone performance*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, vol. 224, no. 2, pp. 119-128, 2010.

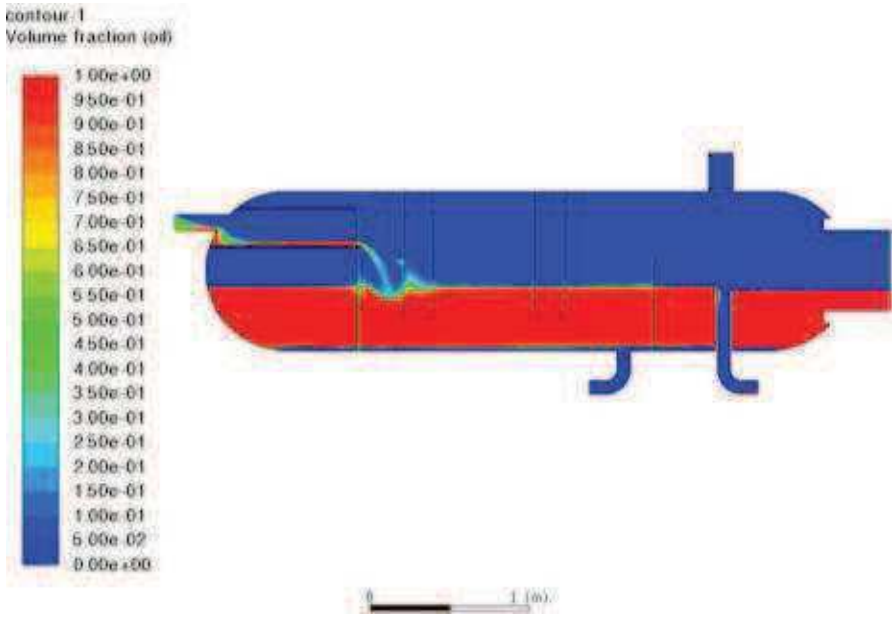
[7] A. Hallanger, F. Soenstaboe and T. Knutsen: *A simulation model for three-phase gravity separators*, In: SPE ATCE 1996, paper 36644-MS.

[8] W. Rommel, E. Blass and W. Meon: *Plate separators for dispersed liquid–liquid systems: multiphase flow, droplet coalescence, separation performance and design,* Chem. Eng. Sci., vol. 47, pp. 555-564, Feb. 1992.

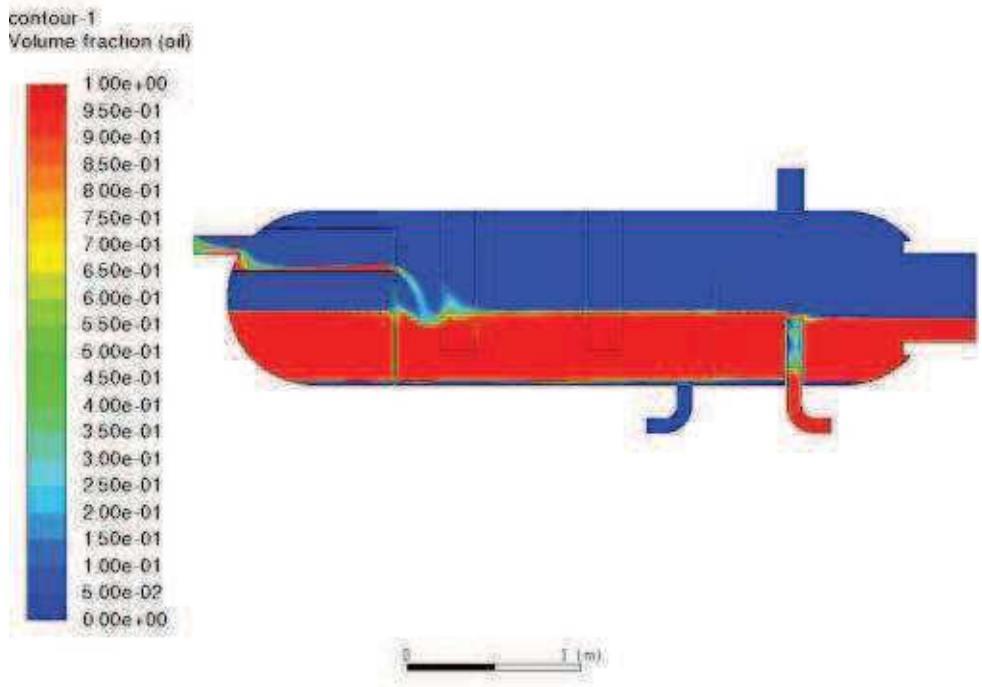
ZAŁĄCZNIK 1 –
RYSUNKI KONTURÓW FRAKCJI OLEJOWEJ W SEPARATORZE W ZALEŻNOŚCI OD KROKU CZASOWEGO DLA NATĘŻENIA PRZEPŁYWU 12.5 m^3/h



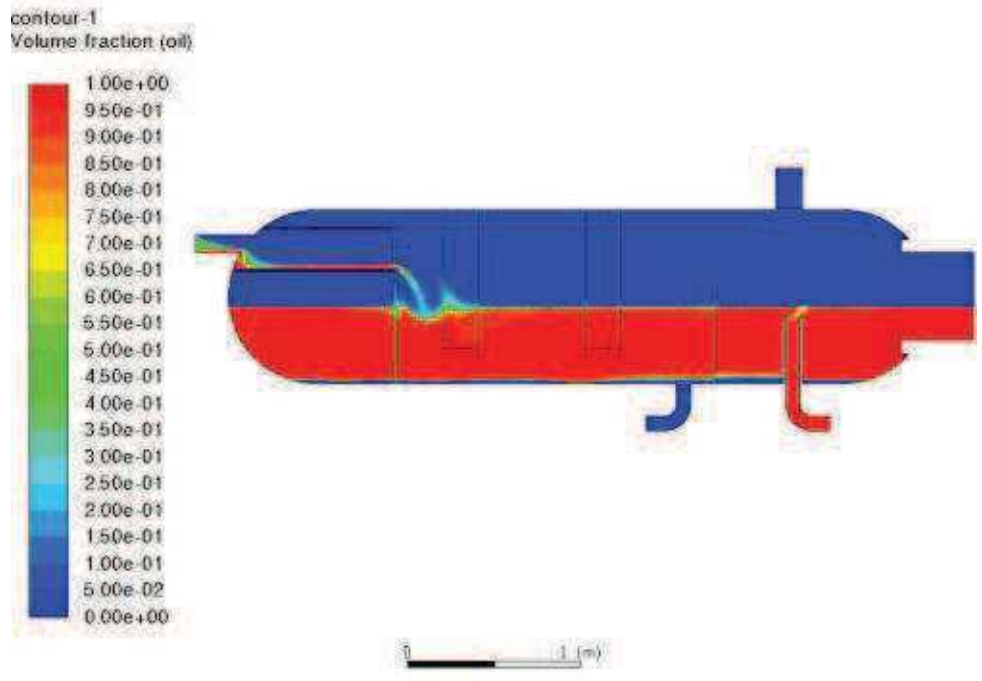
Rys. Z1.1. Natężenie przepływu Q = 12.5 m^3/h – frakcja olejowa, krok czasowy: *t* = 0s (zamknięty upust olejowy).



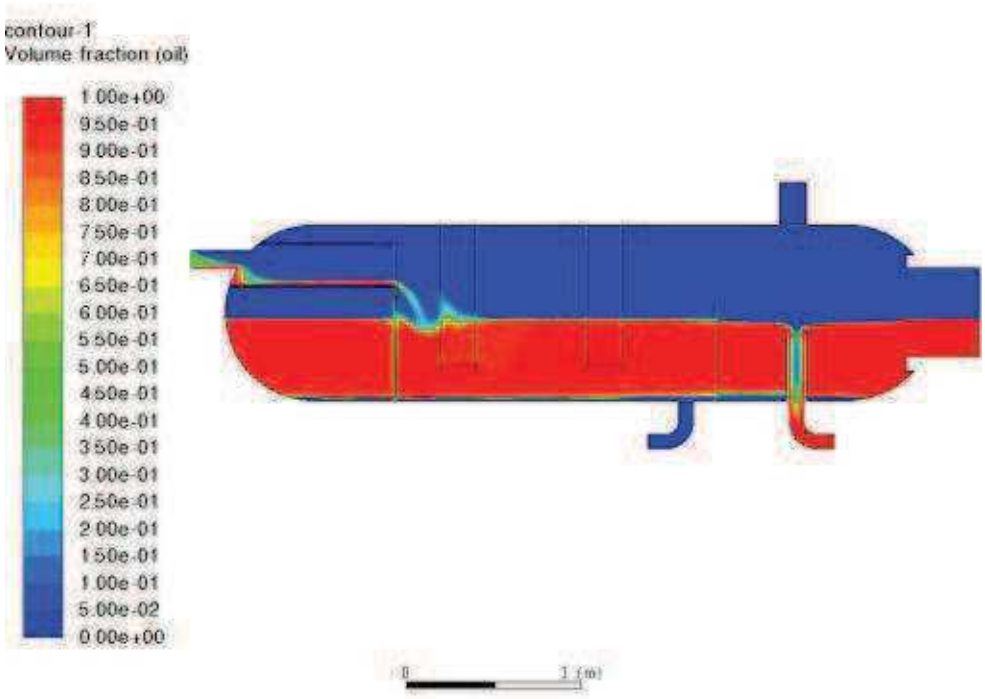
Rys. Z1.2. Natężenie przepływu Q = 12.5 m^3/h – frakcja olejowa, krok czasowy: *t* = 5s (zamknięty upust olejowy).



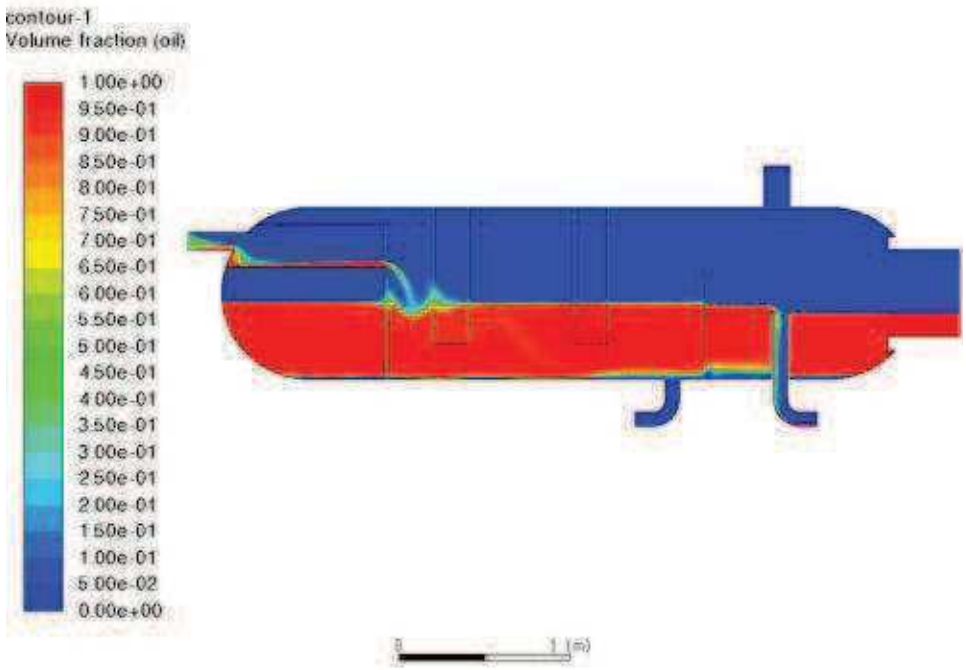
Rys. Z1.3. Natężenie przepływu Q = 12.5 m^3/h – frakcja olejowa, krok czasowy: *t* = 10s (zamknięty upust olejowy).



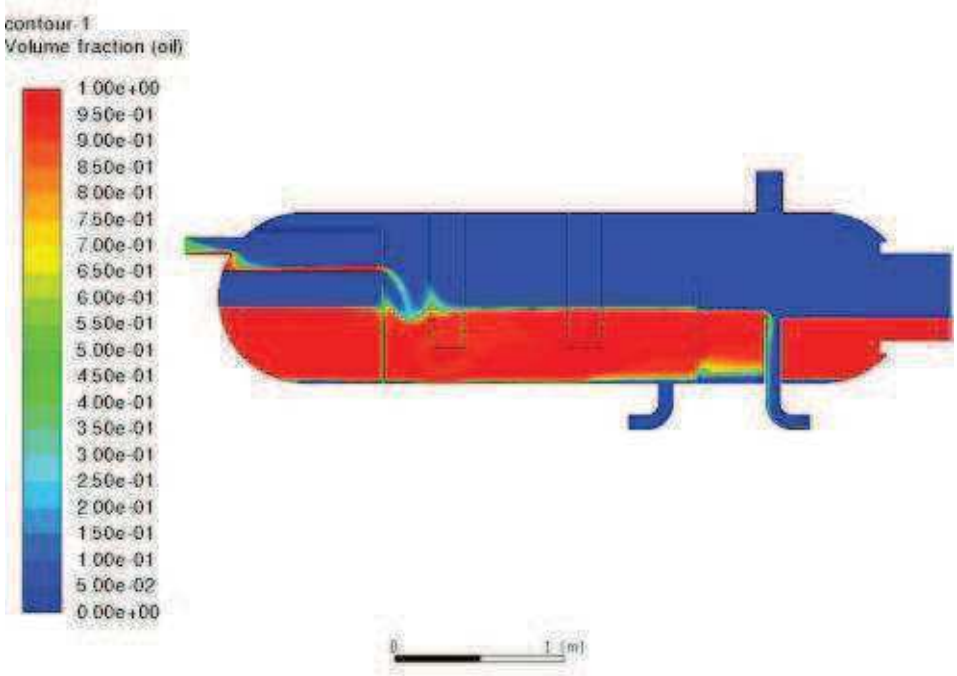
Rys. Z1.4. Natężenie przepływu Q = 12.5 m^3/h – frakcja olejowa, krok czasowy: *t* = 15s (zamknięty upust olejowy).



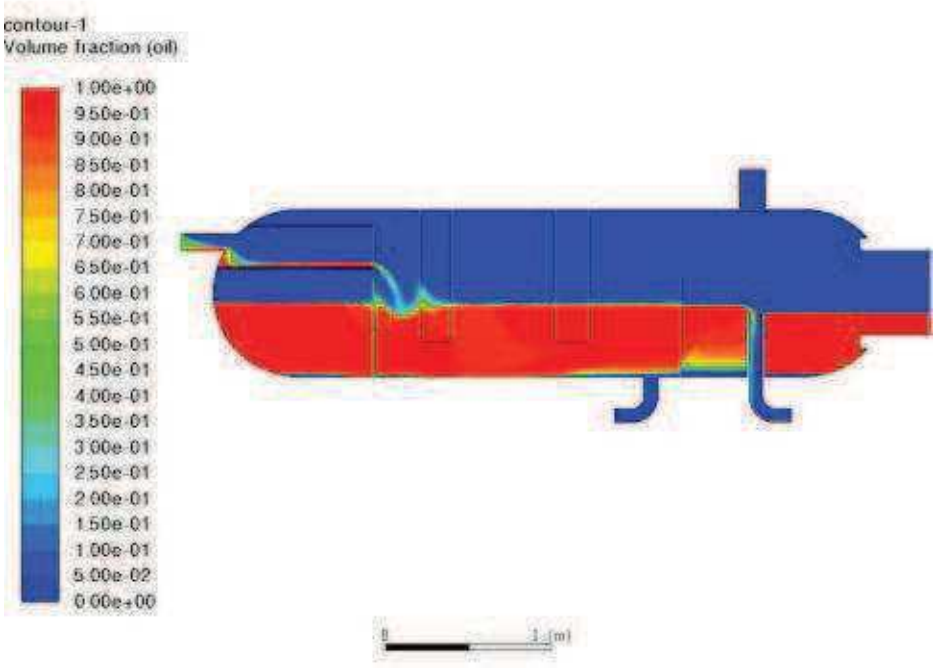
Rys. Z1.5. Natężenie przepływu Q = 12.5 m^3/h – frakcja olejowa, krok czasowy: *t* = 20s (otwarty upust olejowy).



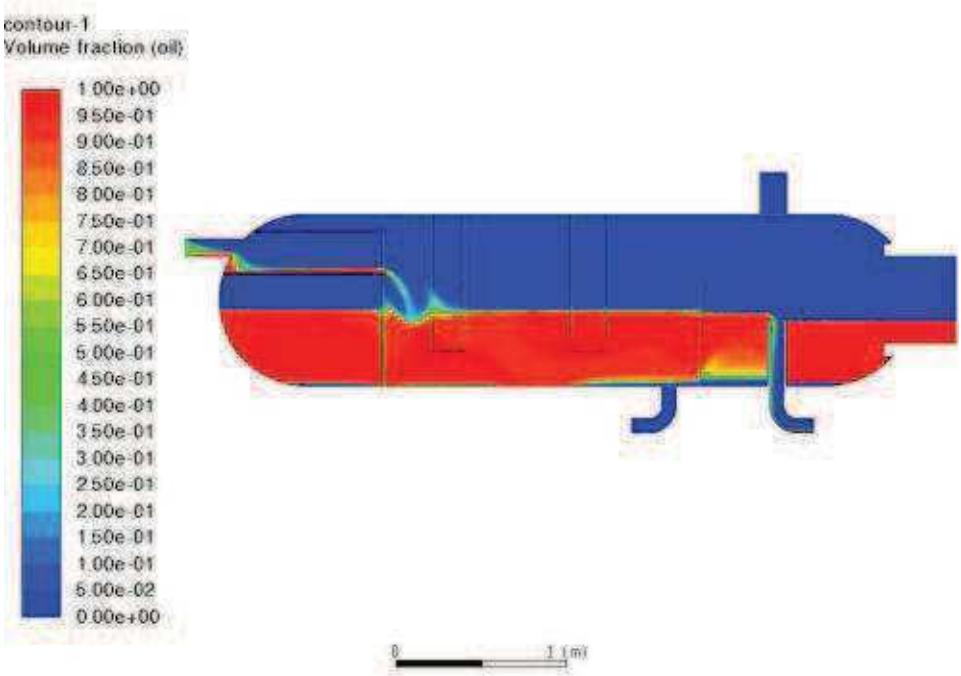
Rys. Z1.6. Natężenie przepływu Q = 12.5 m^3/h – frakcja olejowa, krok czasowy: *t* = 25s (otwarty upust olejowy).



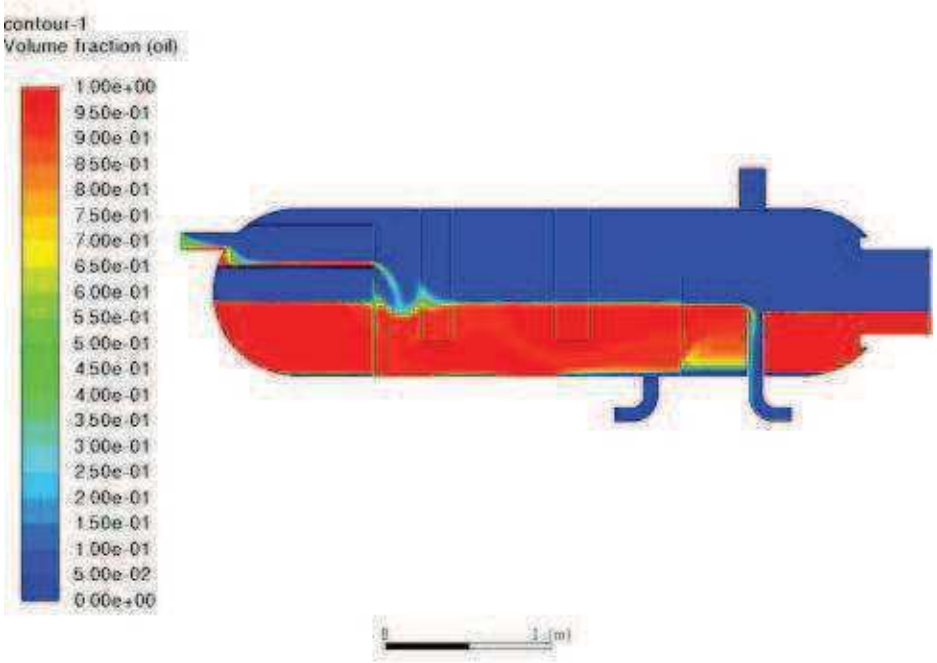
Rys. Z1.7. Natężenie przepływu Q = 12.5 m^3/h – frakcja olejowa, krok czasowy: *t* = 30s (otwarty upust olejowy).



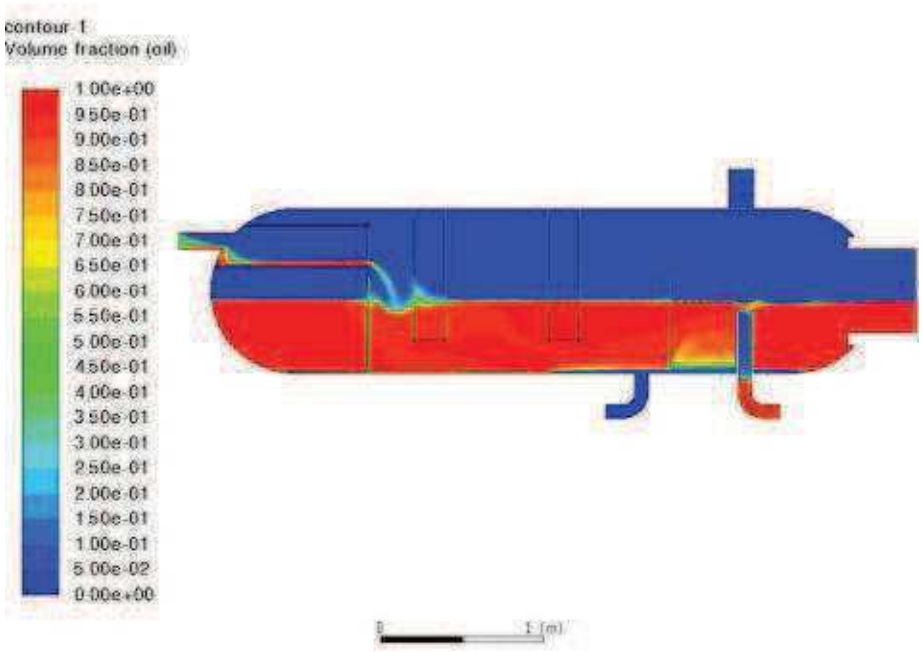
Rys. Z1.8. Natężenie przepływu Q = 12.5 m^3/h – frakcja olejowa, krok czasowy: *t* = 35s (otwarty upust olejowy).



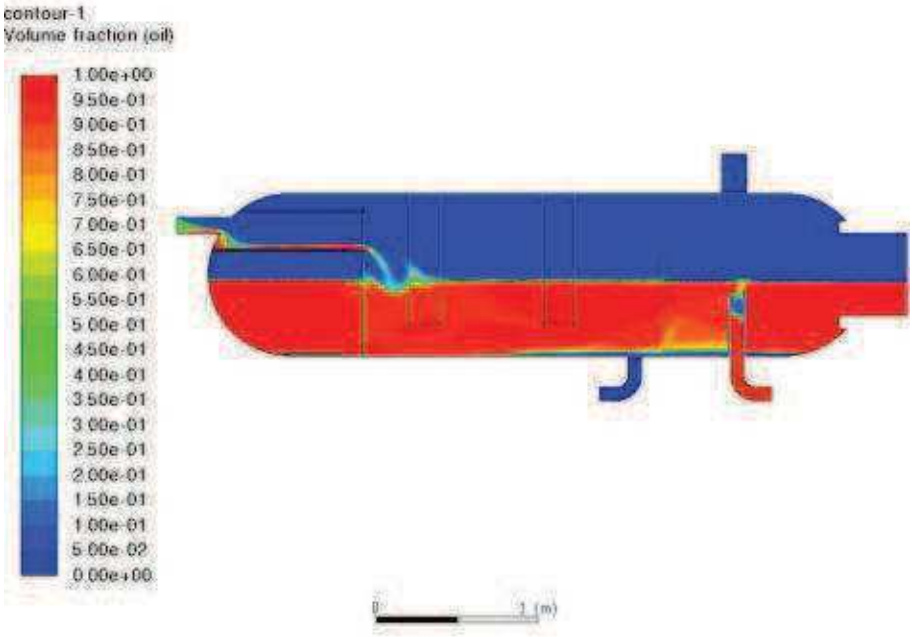
Rys. Z1.9. Natężenie przepływu Q = 12.5 m^3/h – frakcja olejowa, krok czasowy: *t* = 40s (otwarty upust olejowy).



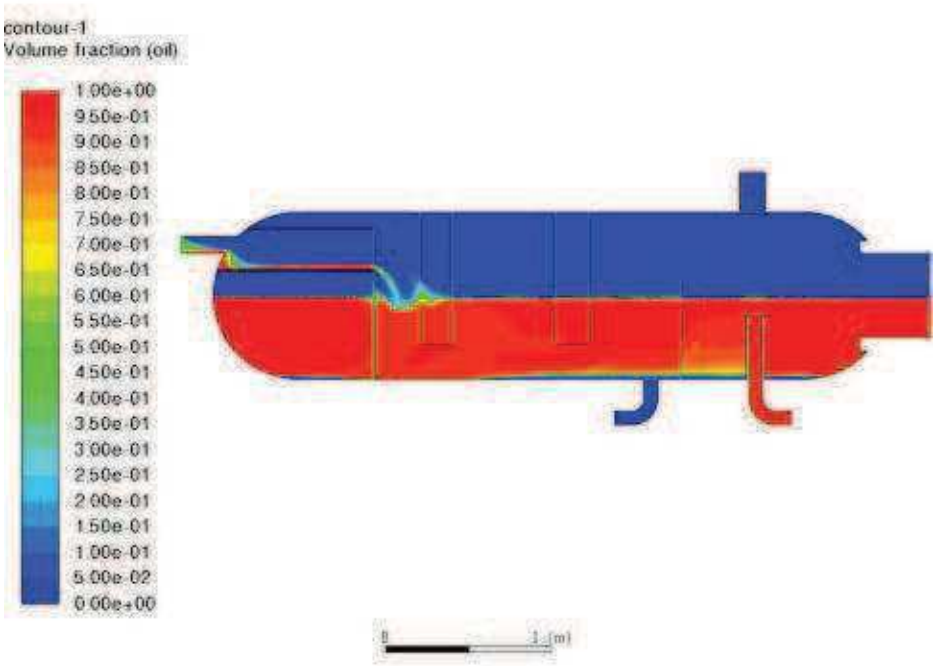
Rys. Z1.10. Natężenie przepływu Q = 12.5 m^3/h – frakcja olejowa, krok czasowy: *t* = 45s (otwarty upust olejowy).



Rys. Z1.11. Natężenie przepływu Q = 12.5 m^3/h – frakcja olejowa, krok czasowy: *t* = 50s (zamknięty upust olejowy).

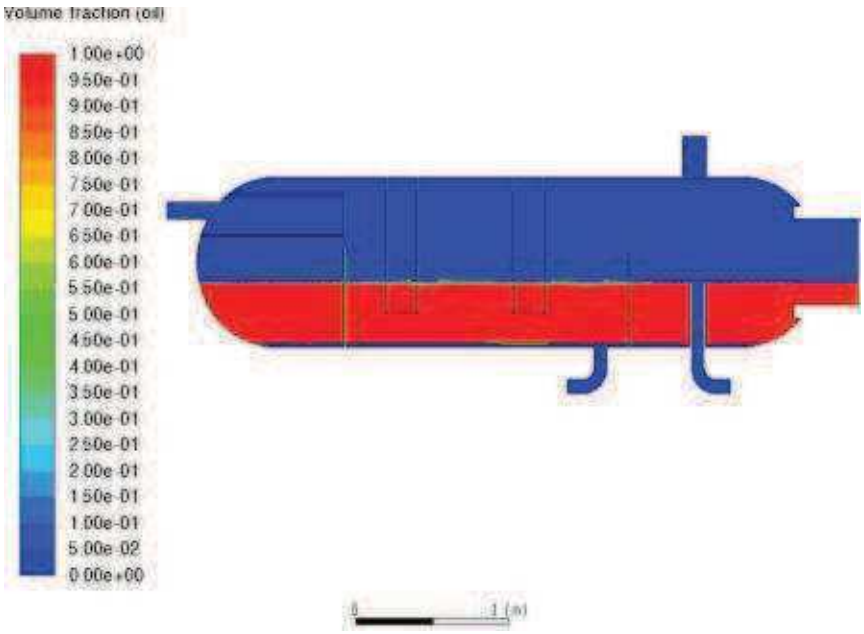


Rys. Z1.12. Natężenie przepływu Q = 12.5 m^3/h – frakcja olejowa, krok czasowy: *t* = 55s (zamknięty upust olejowy).

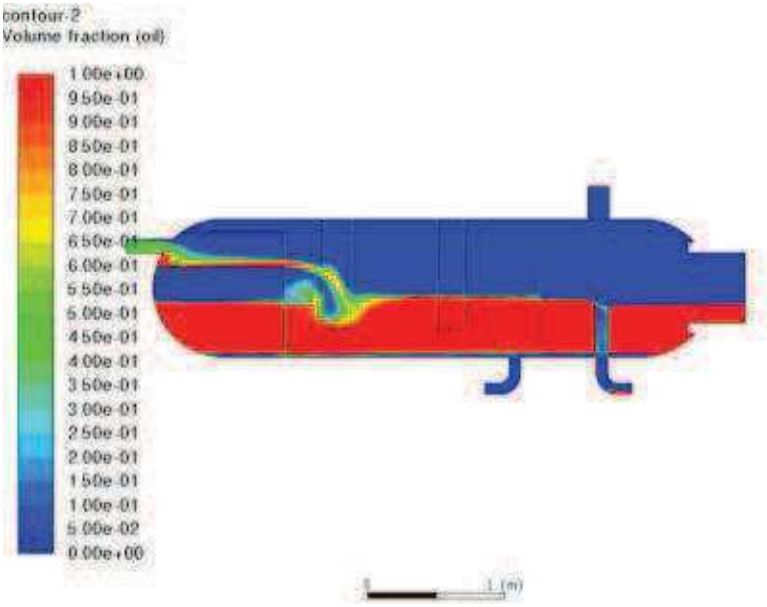


Rys. Z1.13. Natężenie przepływu Q = 12.5 m^3/h – frakcja olejowa, krok czasowy: *t* = 60s (zamknięty upust olejowy).

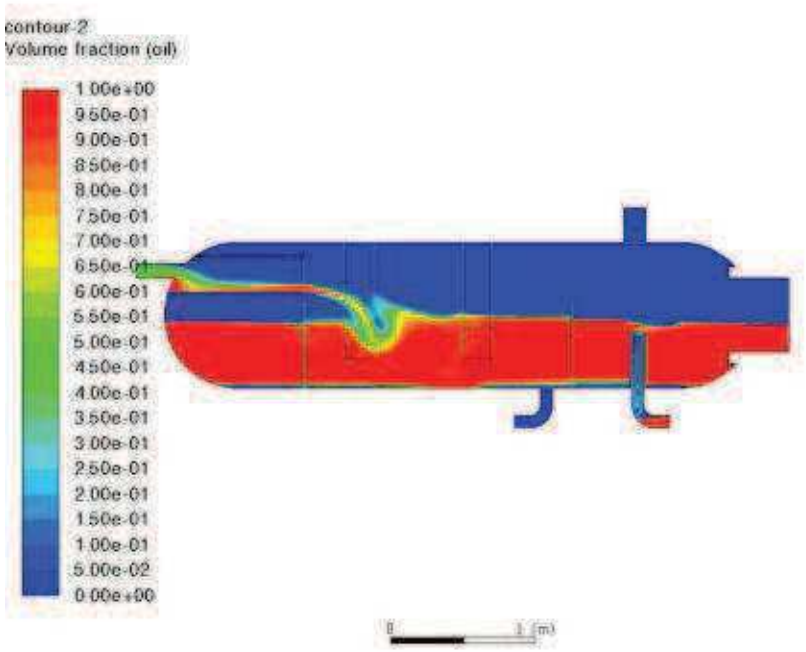
ZAŁĄCZNIK 2 – RYSUNKI KONTURÓW FRAKCJI OLEJOWEJ W SEPARATORZE W ZALEŻNOŚCI OD KROKU CZASOWEGO DLA NATĘŻENIA PRZEPŁYWU 50 m^3/h



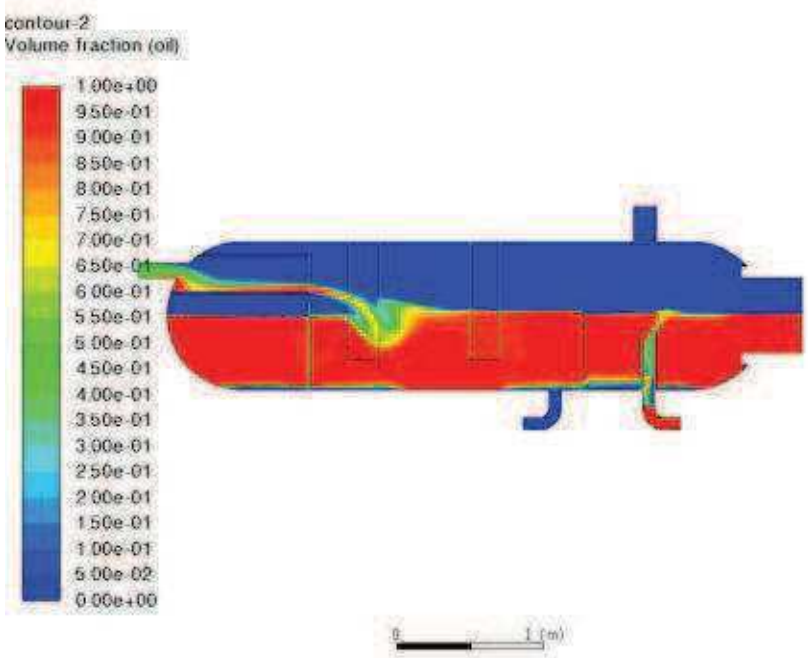
Rys. Z2.1. Natężenie przepływu Q = 50 m^3/h – frakcja olejowa, krok czasowy: t = 0s (zamknięty upust olejowy).



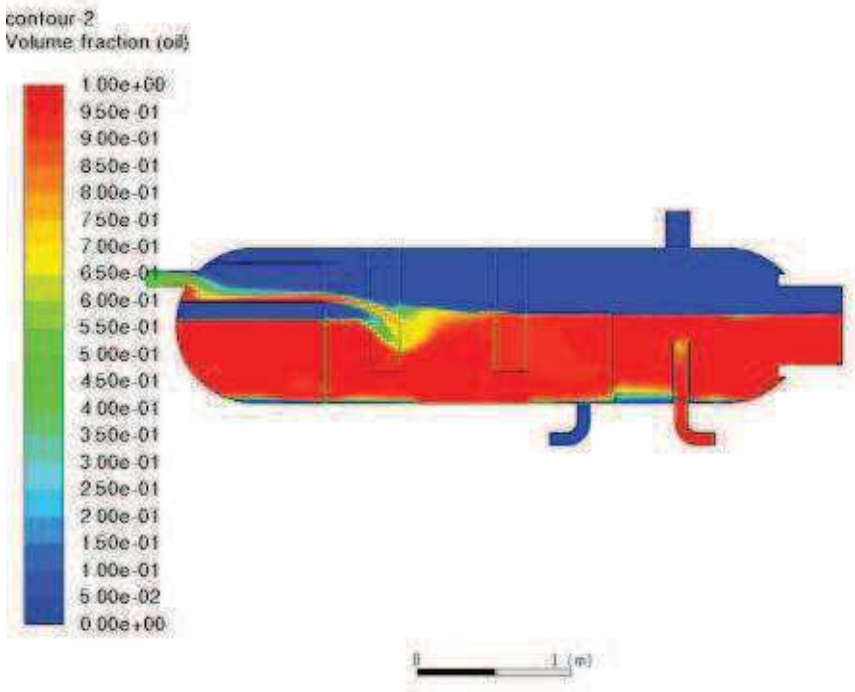
Rys. Z2.2. Natężenie przepływu Q = 50 m^3/h – frakcja olejowa, krok czasowy: t = 2.5s (zamknięty upust olejowy).



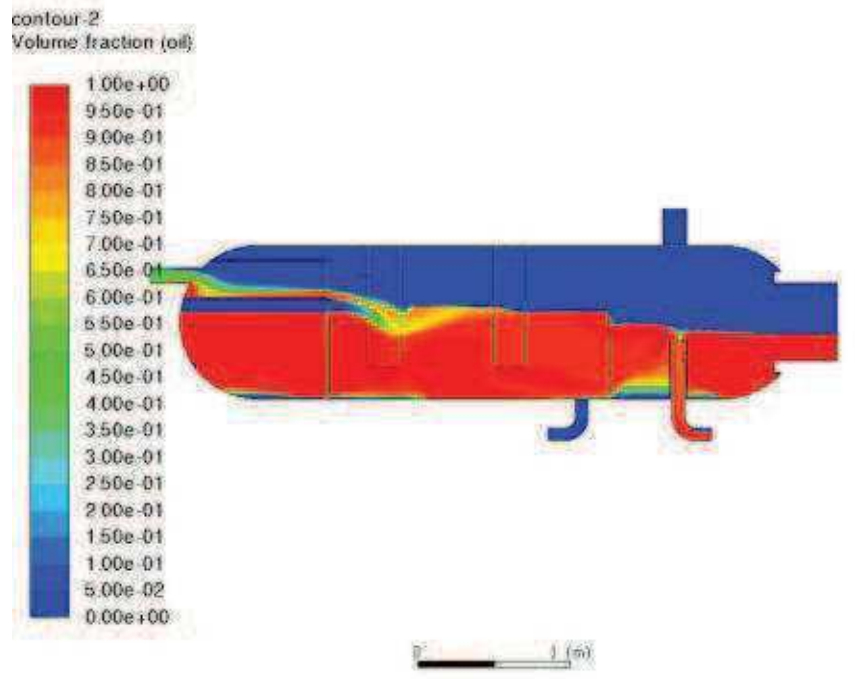
Rys. Z2.3. Natężenie przepływu Q = 50 m^3/h – frakcja olejowa, krok czasowy: *t* = 5s (zamknięty upust olejowy).



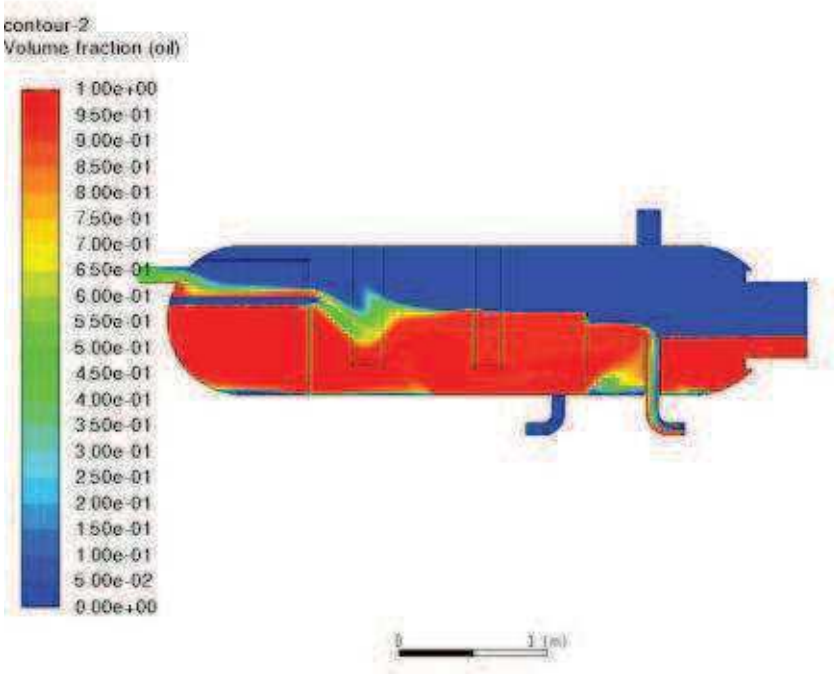
Rys. Z2.4. Natężenie przepływu Q = 50 m^3/h – frakcja olejowa, krok czasowy: *t* = 7.5s (zamknięty upust olejowy).



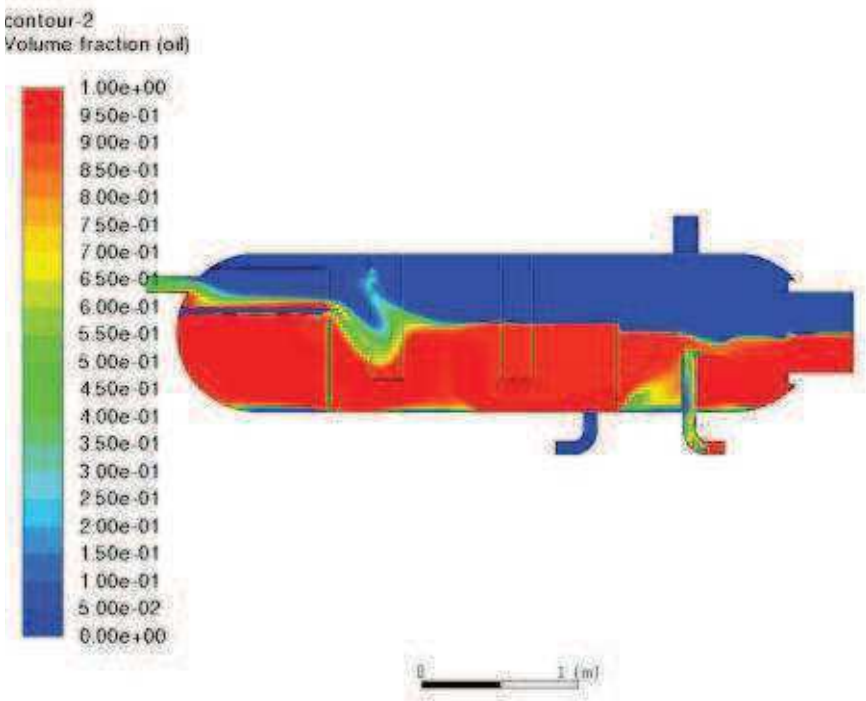
Rys. Z2.5. Natężenie przepływu Q = 50 m^3/h – frakcja olejowa, krok czasowy: *t* = 10s (zamknięty upust olejowy).



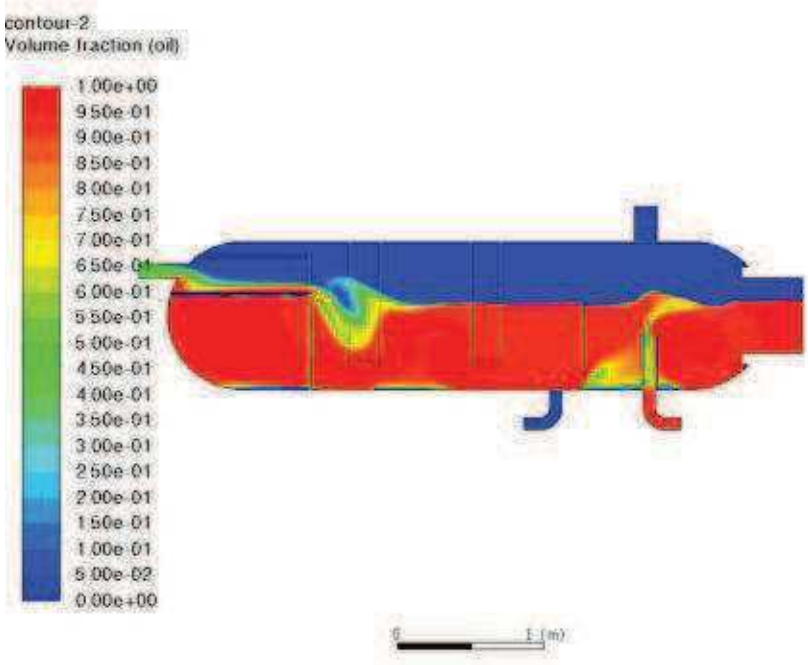
Rys. Z2.6. Natężenie przepływu Q = 50 m^3/h – frakcja olejowa, krok czasowy: *t* = 12.5s (otwarty upust olejowy).



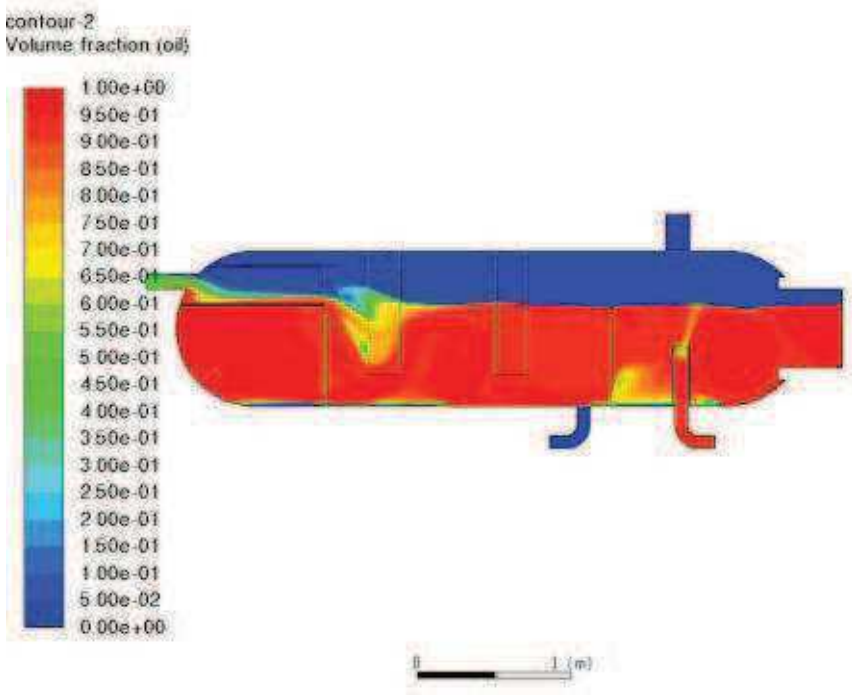
Rys. Z2.7. Natężenie przepływu Q = 50 m^3/h – frakcja olejowa, krok czasowy: *t* = 15s (otwarty upust olejowy).



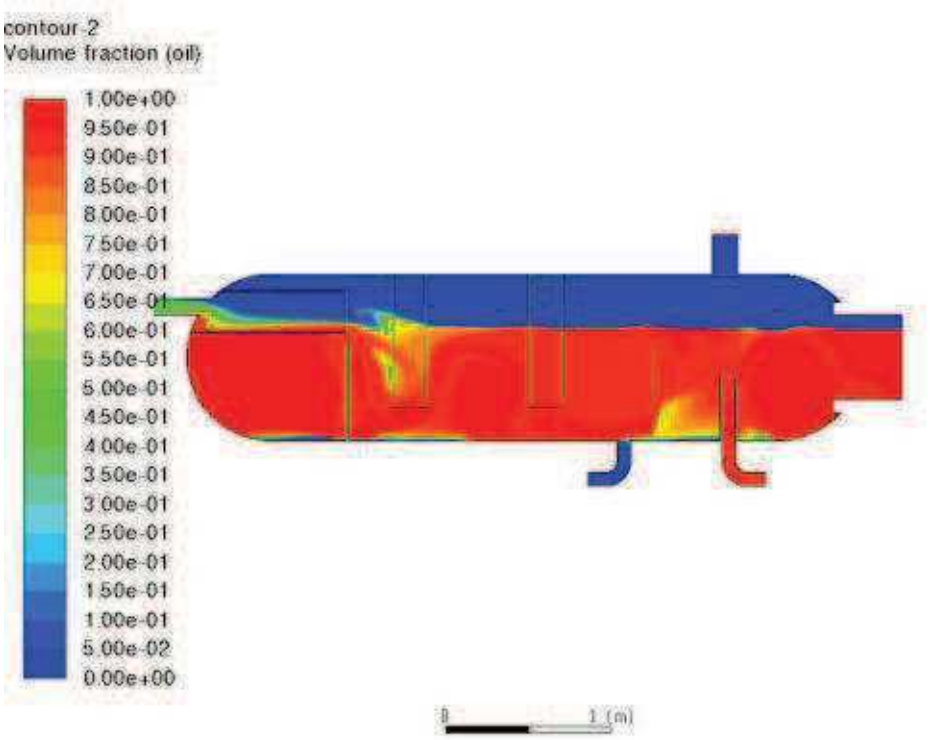
Rys. Z2.8. Natężenie przepływu Q = 50 m^3/h – frakcja olejowa, krok czasowy: *t* = 17.5s (zamknięty upust olejowy).



Rys. Z2.9. Natężenie przepływu Q = 50 m^3/h – frakcja olejowa, krok czasowy: *t* = 20s (zamknięty upust olejowy).

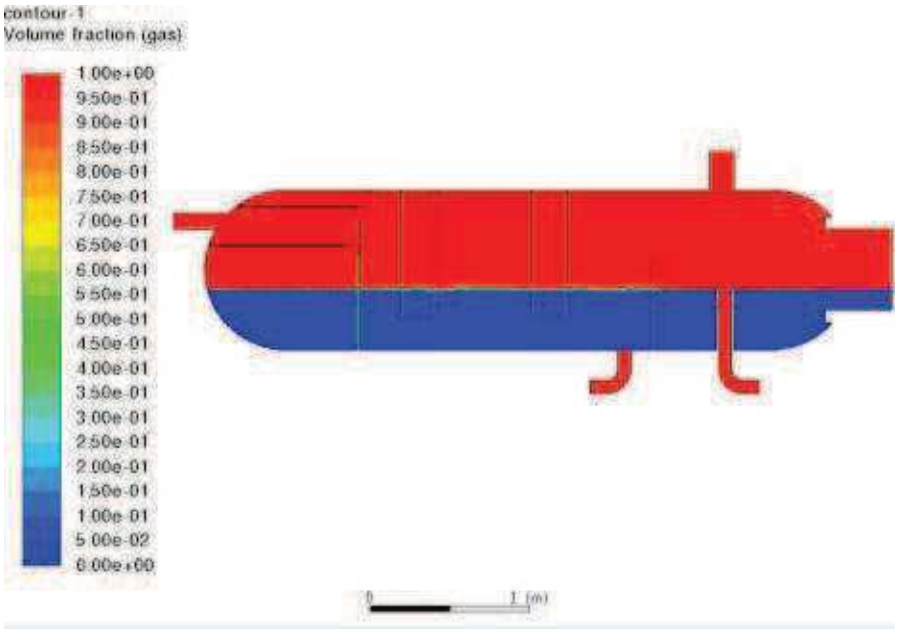


Rys. Z2.10. Natężenie przepływu Q = 50 m^3/h – frakcja olejowa, krok czasowy: *t* = 22.5s (zamknięty upust olejowy).

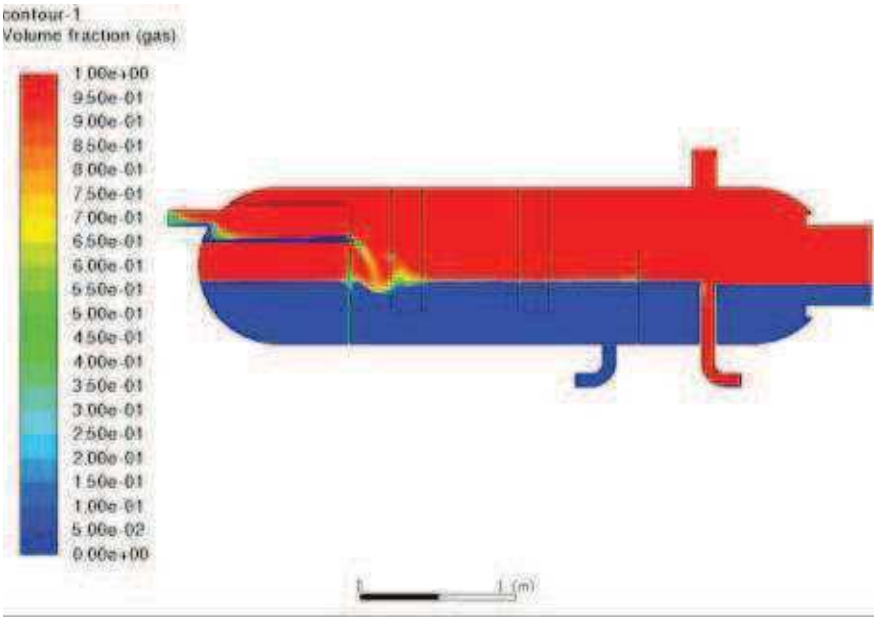


Rys. Z2.11. Natężenie przepływu Q = 50 m^3/h – frakcja olejowa, krok czasowy: *t* = 23.5s (zamknięty upust olejowy).

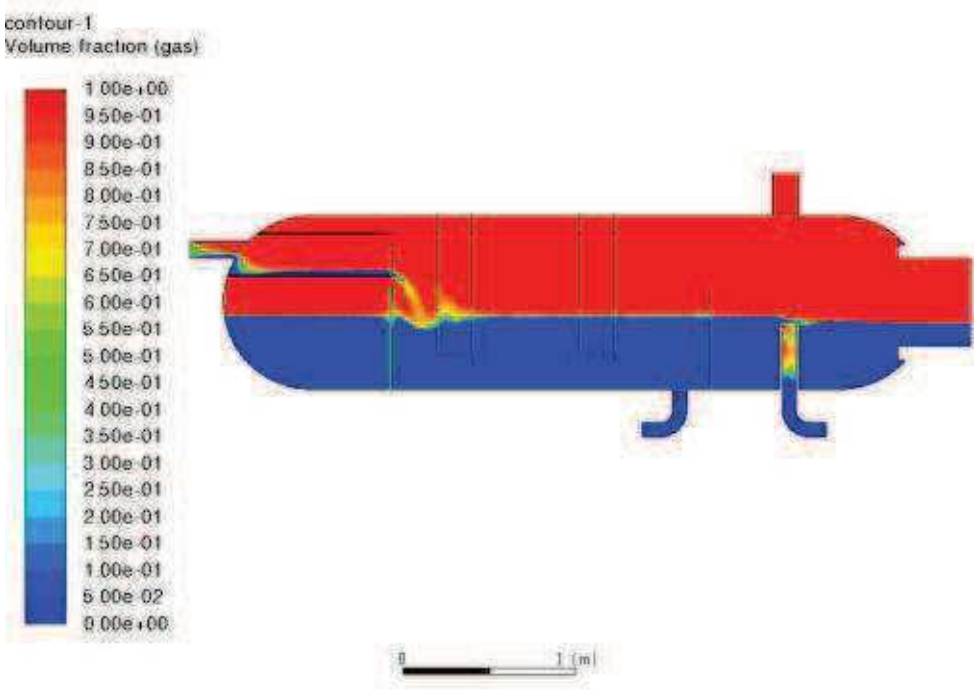
ZAŁĄCZNIK 3 –
RYSUNKI KONTURÓW FRAKCJI GAZOWEJ W SEPARATORZE W ZALEŻNOŚCI OD KROKU CZASOWEGO DLA NATĘŻENIA PRZEPŁYWU 12.5 m^3/h



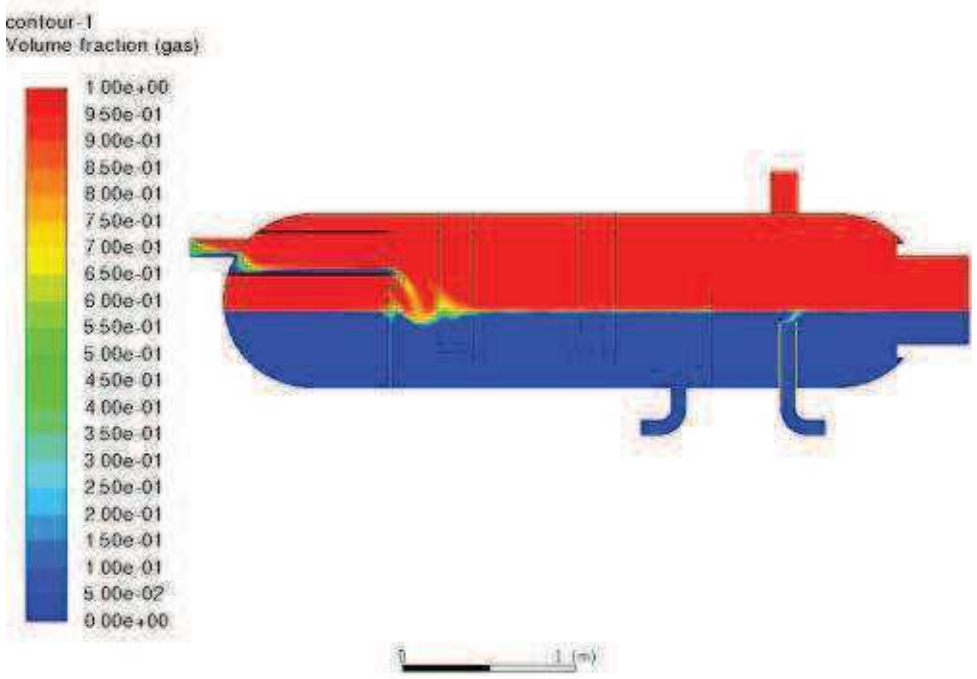
Rys. Z3.1. Natężenie przepływu Q = 12.5 m^3/h – frakcja gazowa, krok czasowy: t = 0s (zamknięty upust olejowy).



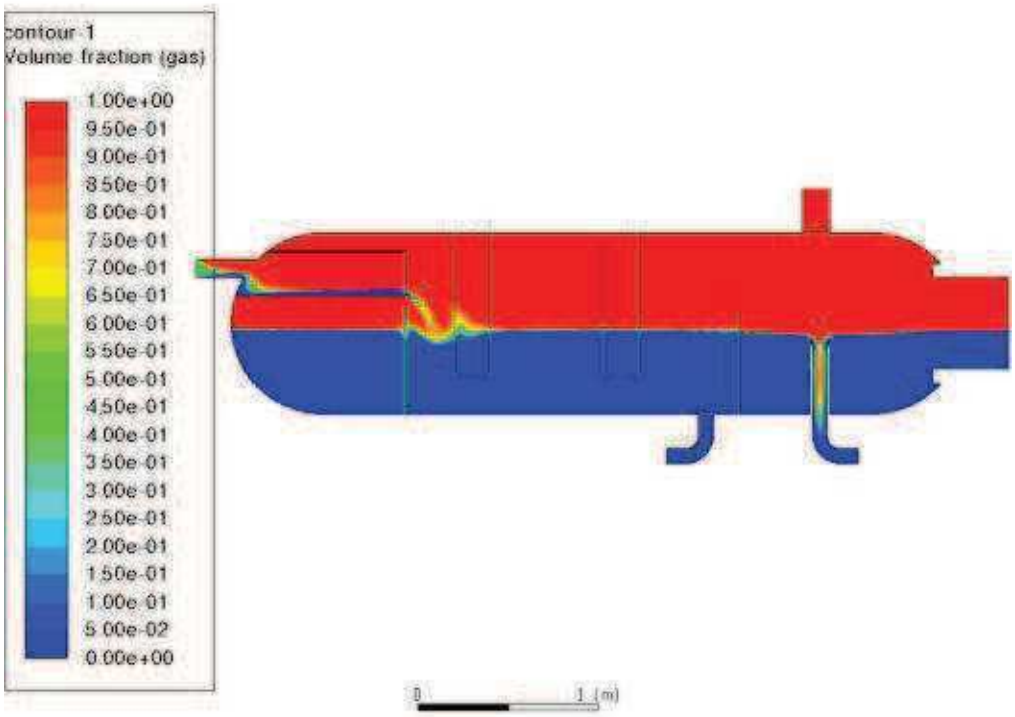
Rys. Z3.2. Natężenie przepływu Q = 12.5 m^3/h – frakcja gazowa, krok czasowy: t = 5s (zamknięty upust olejowy).



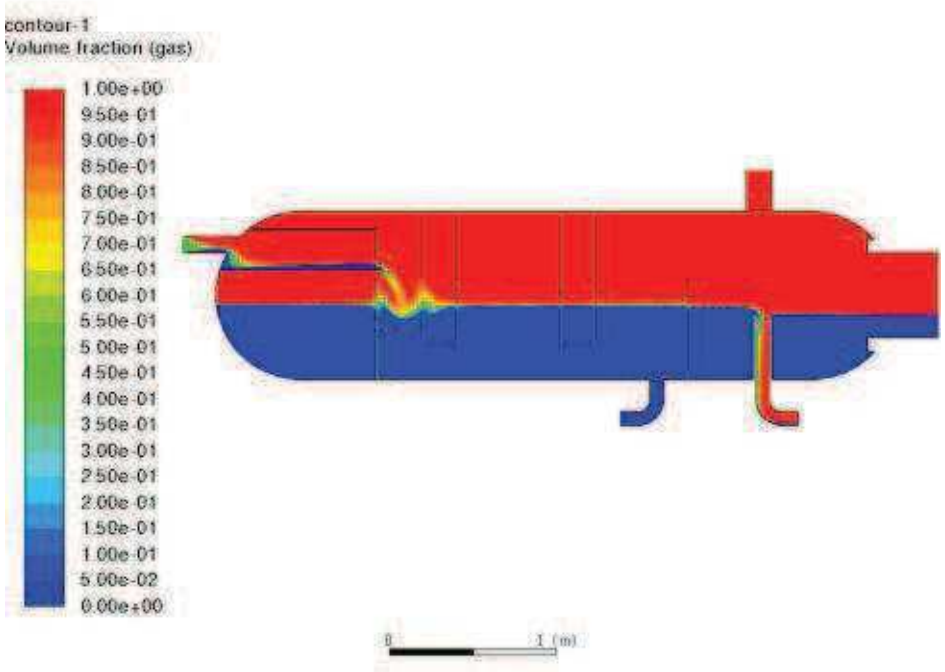
Rys. Z3.3. Natężenie przepływu Q = 12.5 m^3/h – frakcja gazowa, krok czasowy: *t* = 10s (zamknięty upust olejowy).



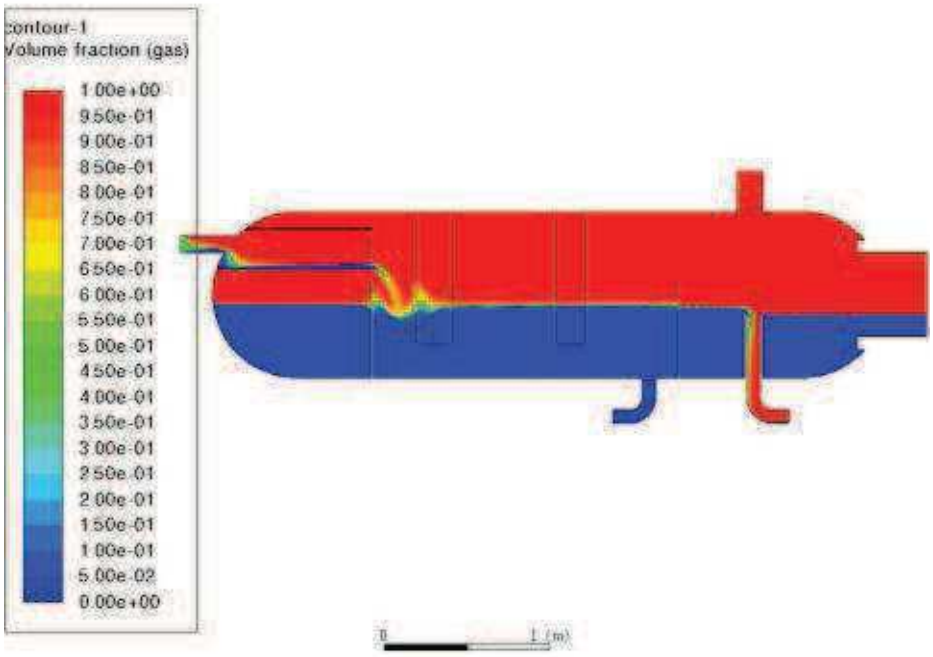
Rys. Z3.4. Natężenie przepływu Q = 12.5 m^3/h – frakcja gazowa, krok czasowy: *t* = 15s (zamknięty upust olejowy).



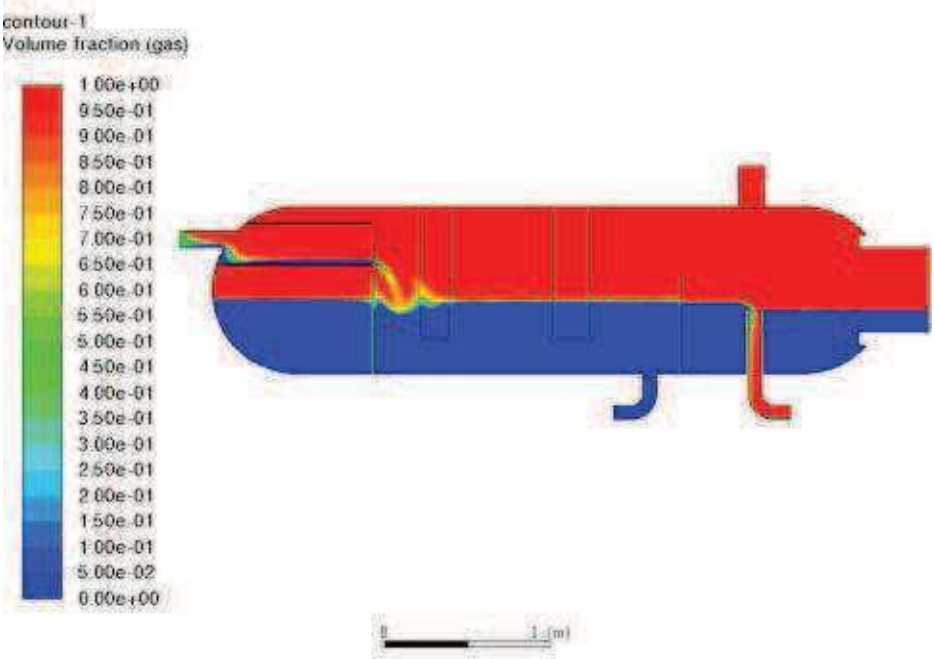
Rys. Z3.5. Natężenie przepływu Q = 12.5 m^3/h – frakcja gazowa, krok czasowy: *t* = 20s (otwarty upust olejowy).



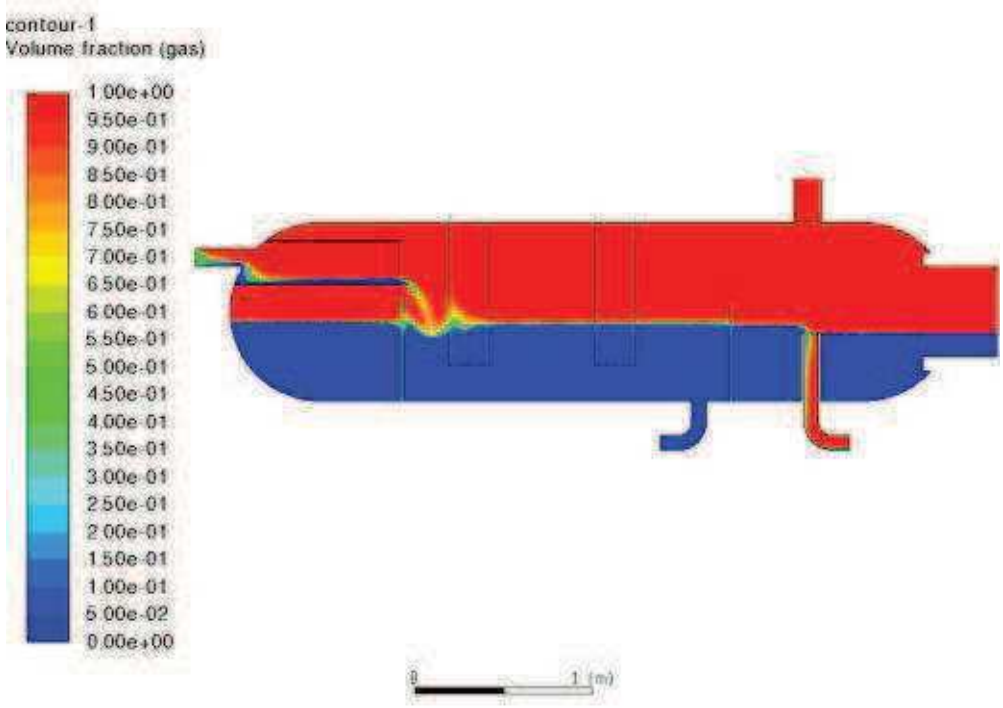
Rys. Z3.6. Natężenie przepływu Q = 12.5 m^3/h – frakcja gazowa, krok czasowy: *t* = 25s (otwarty upust olejowy).



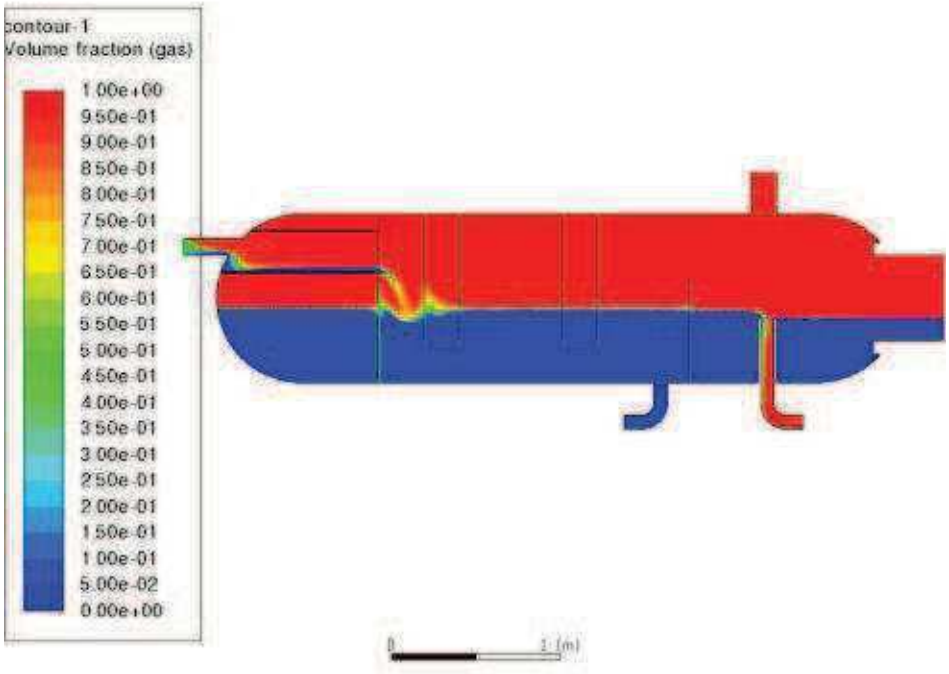
Rys. Z3.7. Natężenie przepływu Q = 12.5 m^3/h – frakcja gazowa, krok czasowy: *t* = 30s (otwarty upust olejowy).



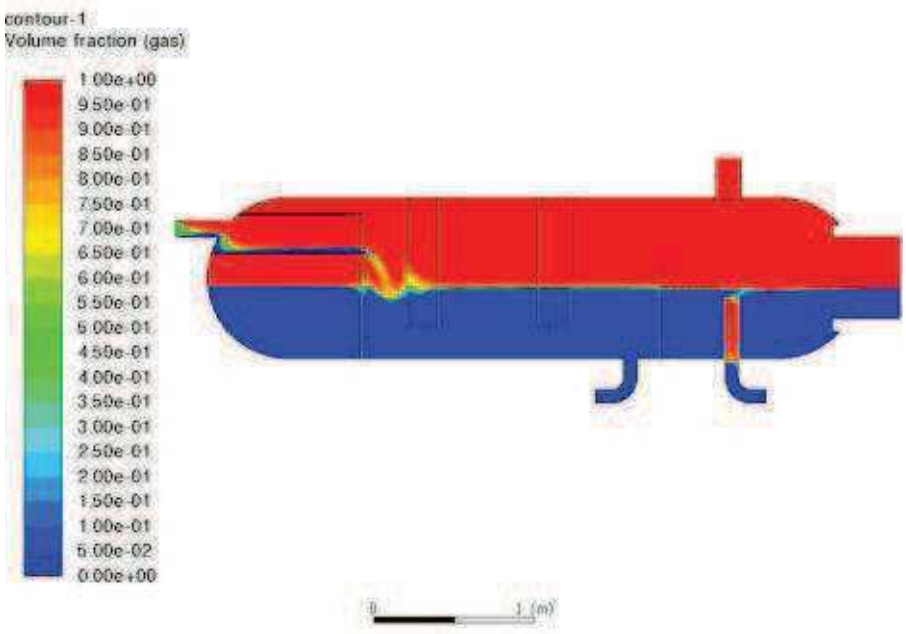
Rys. Z3.8. Natężenie przepływu Q = 12.5 m^3/h – frakcja gazowa, krok czasowy: *t* = 35s (otwarty upust olejowy).



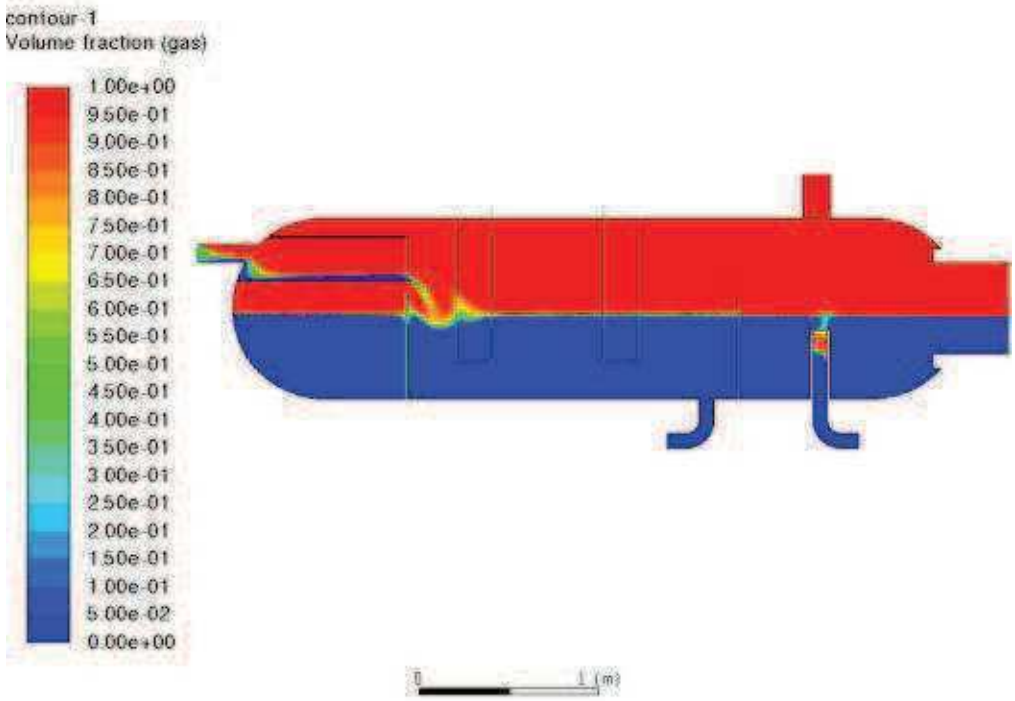
Rys. Z3.9. Natężenie przepływu Q = 12.5 m^3/h – frakcja gazowa, krok czasowy: *t* = 40s (otwarty upust olejowy).



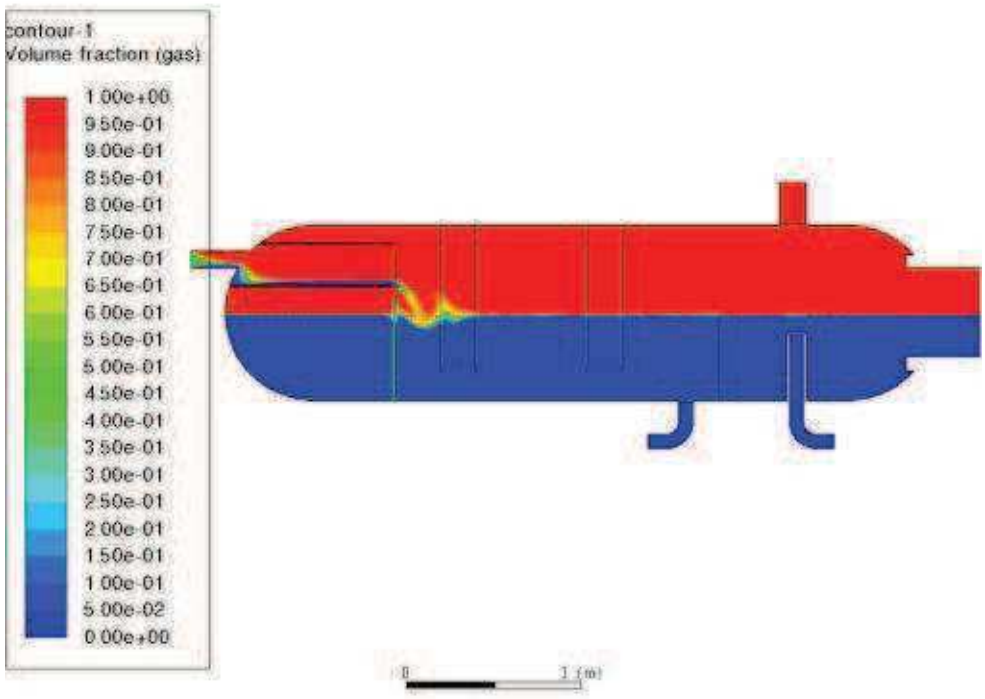
Rys. Z3.10. Natężenie przepływu Q = 12.5 m^3/h – frakcja gazowa, krok czasowy: *t* = 45s (otwarty upust olejowy).



Rys. Z3.11. Natężenie przepływu Q = 12.5 m^3/h – frakcja gazowa, krok czasowy: *t* = 50s (zamknięty upust olejowy).

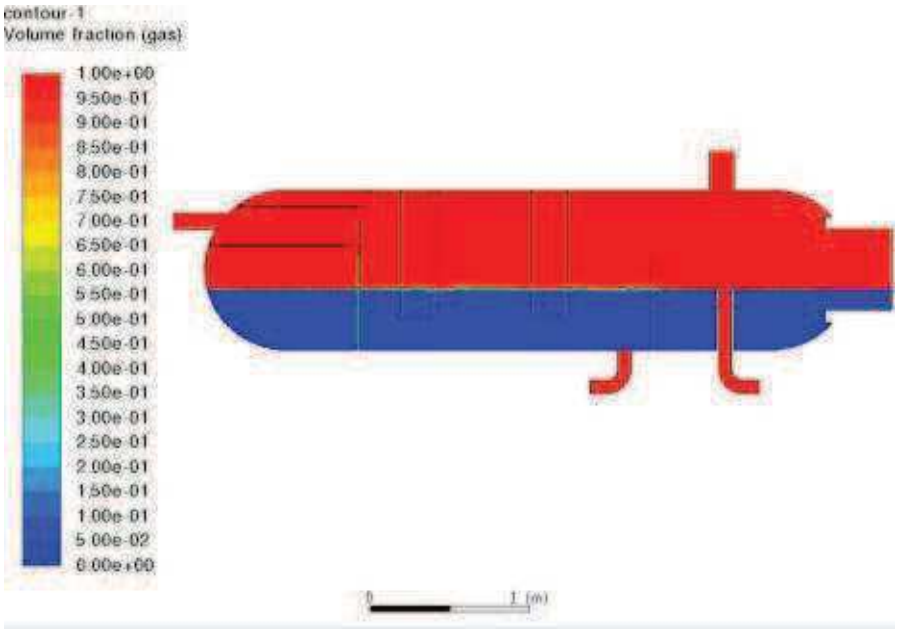


Rys. Z3.12. Natężenie przepływu Q = 12.5 m^3/h – frakcja gazowa, krok czasowy: *t* = 55s (zamknięty upust olejowy).

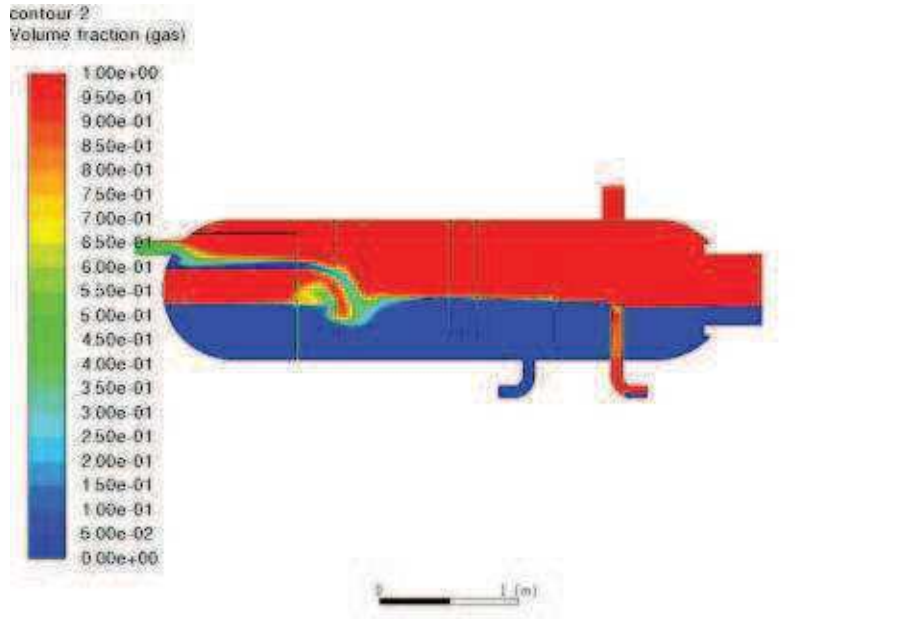


Rys. Z3.13. Natężenie przepływu Q = 12.5 m^3/h – frakcja gazowa, krok czasowy: t = 60s (zamknięty upust olejowy).

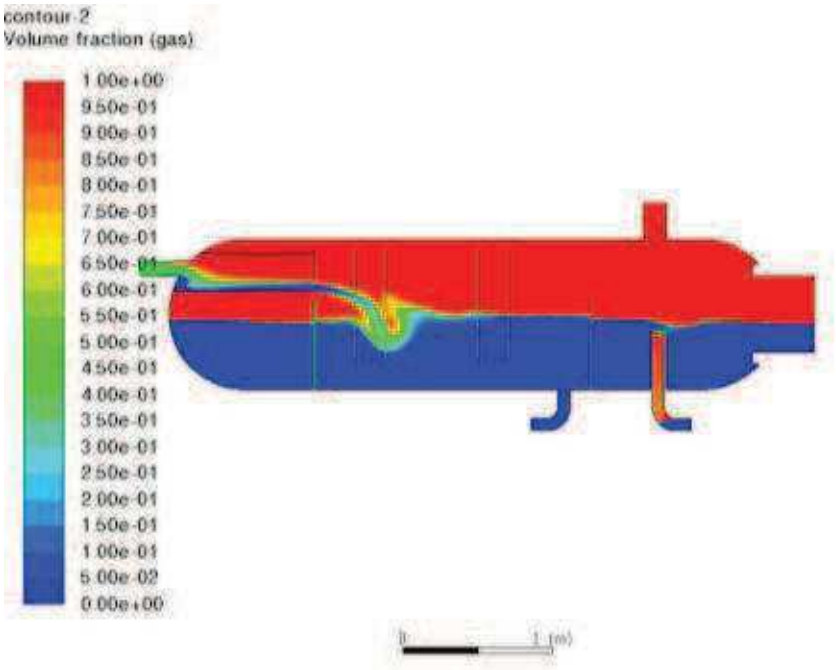
ZAŁĄCZNIK 4 –
RYSUNKI KONTURÓW FRAKCJI GAZOWEJ W SEPARATORZE W ZALEŻNOŚCI OD KROKU CZASOWEGO DLA NATĘŻENIA PRZEPŁYWU 50 m^3/h



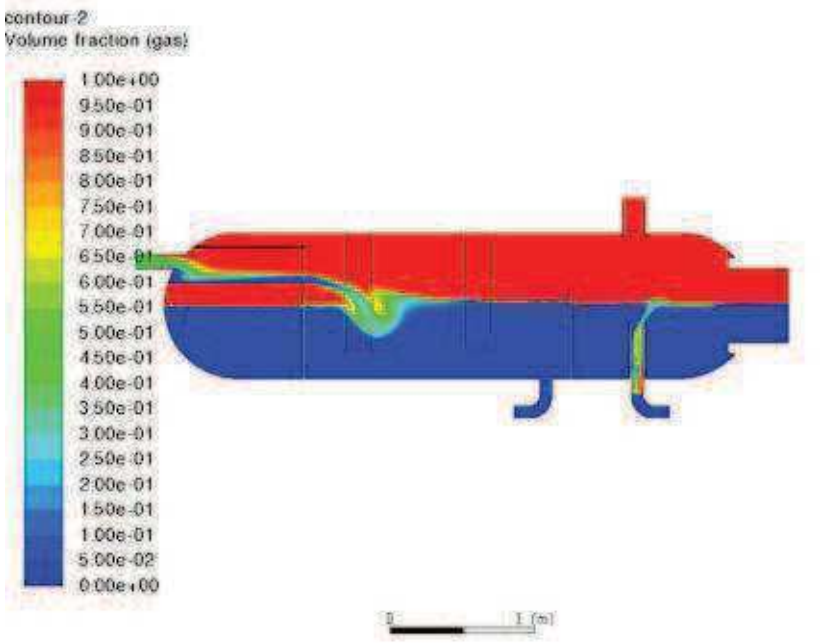
Rys. Z4.1. Natężenie przepływu Q = 50 m^3/h – frakcja gazowa, krok czasowy: t = 0s (zamknięty upust olejowy).



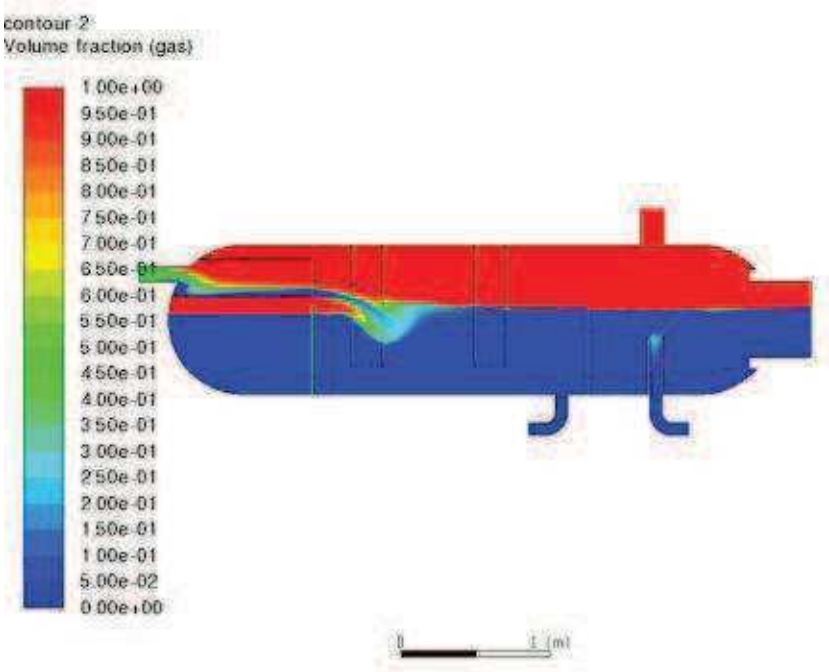
Rys. Z4.2. Natężenie przepływu Q = 50 m^3/h – frakcja gazowa, krok czasowy: t = 2.5s (zamknięty upust olejowy).



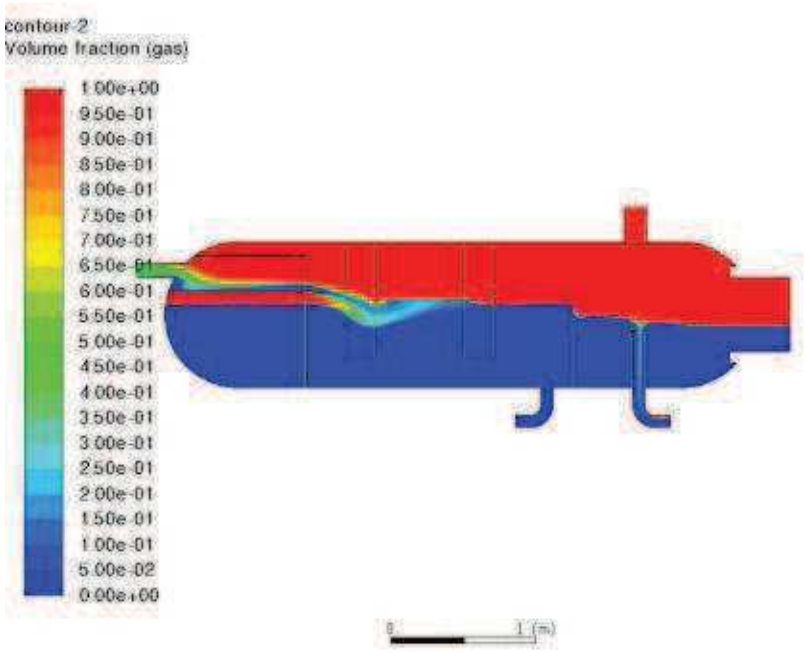
Rys. Z4.3. Natężenie przepływu Q = 50 m^3/h – frakcja gazowa, krok czasowy: *t* = 5s (zamknięty upust olejowy).



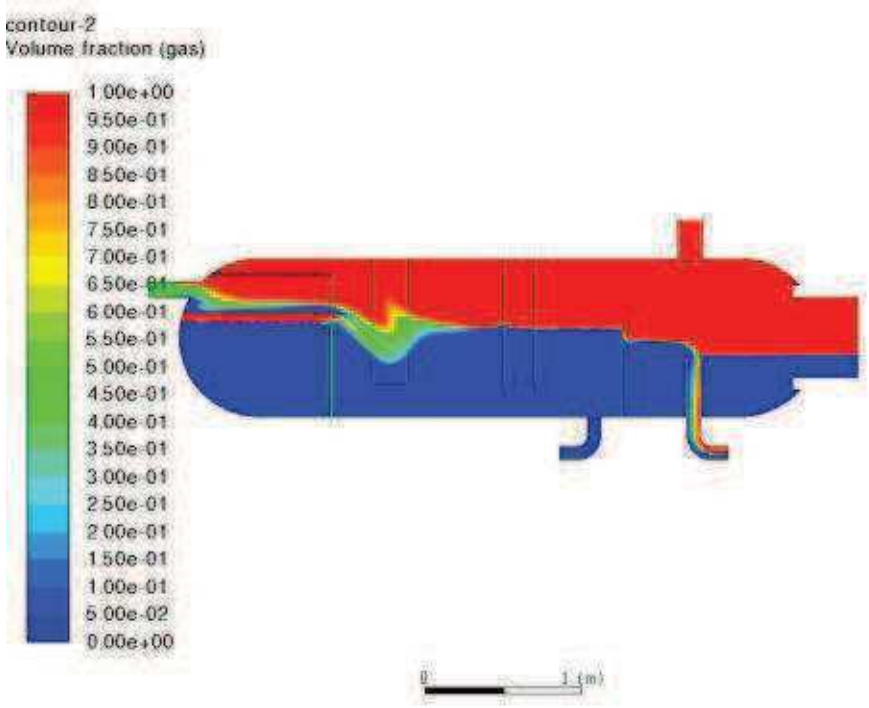
Rys. Z4.4. Natężenie przepływu Q = 50 m^3/h – frakcja gazowa, krok czasowy: *t* = 7.5s (zamknięty upust olejowy).



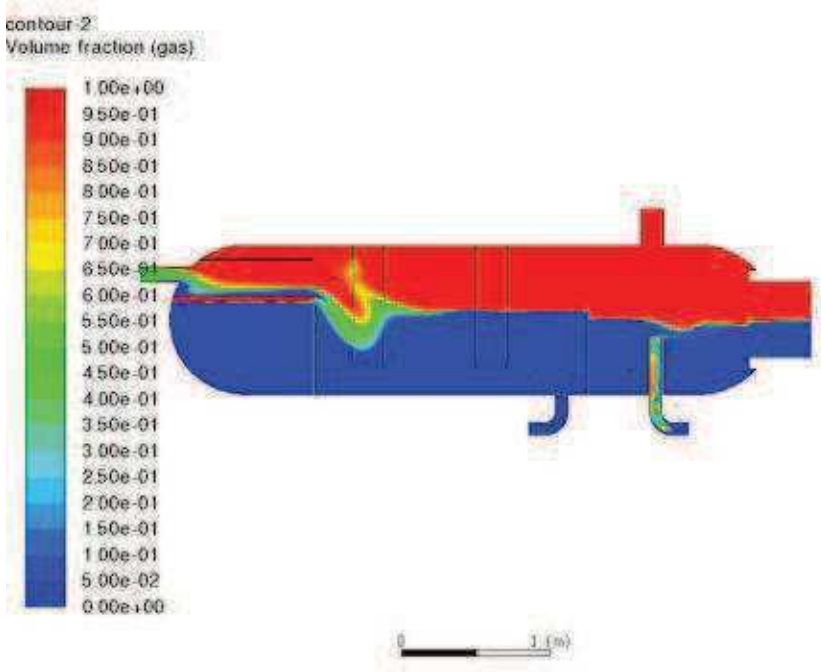
Rys. Z4.5. Natężenie przepływu Q = 50 m^3/h – frakcja gazowa, krok czasowy: *t* = 10s (zamknięty upust olejowy).



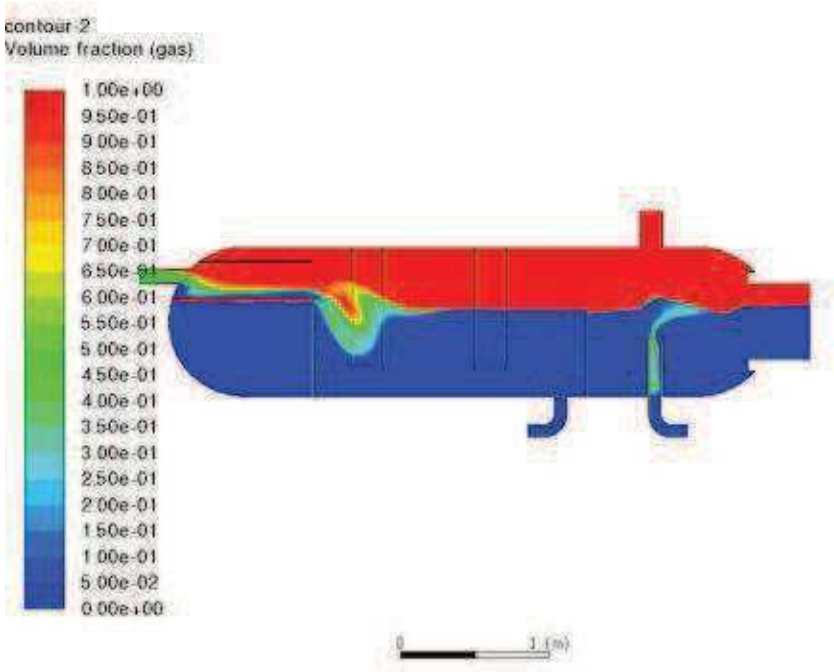
Rys. Z4.6. Natężenie przepływu Q = 50 m^3/h – frakcja gazowa, krok czasowy: *t* = 12.5s (otwarty upust olejowy).



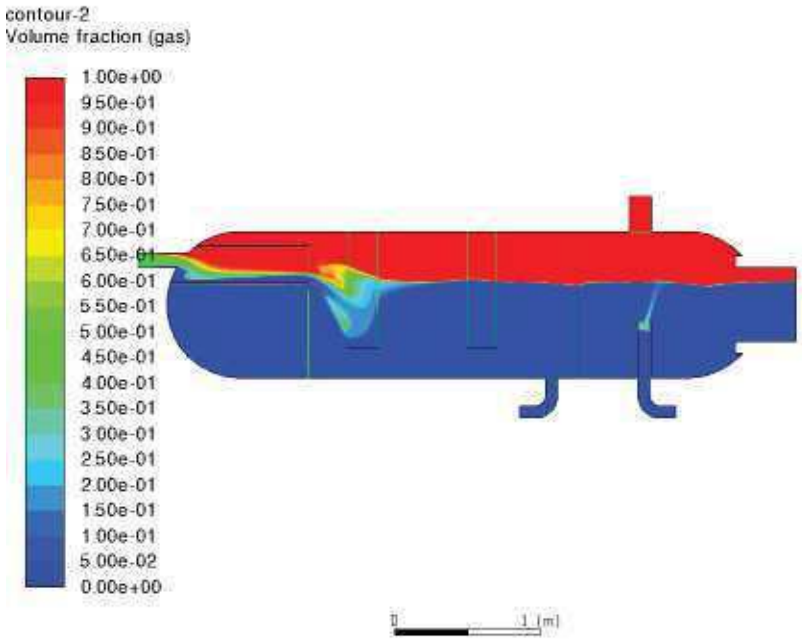
Rys. Z4.7. Natężenie przepływu Q = 50 m^3/h – frakcja gazowa, krok czasowy: t = 15s (otwarty upust olejowy).



Rys. Z4.8. Natężenie przepływu Q = 50 m^3/h – frakcja gazowa, krok czasowy: t = 17.5s (zamknięty upust olejowy).



Rys. Z4.9. Natężenie przepływu Q = 50 m^3/h – frakcja gazowa, krok czasowy: *t* = 20s (zamknięty upust olejowy).



Rys. Z4.10. Natężenie przepływu Q = 50 m^3/h – frakcja gazowa, krok czasowy: *t* = 22.5s (zamknięty upust olejowy).