

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

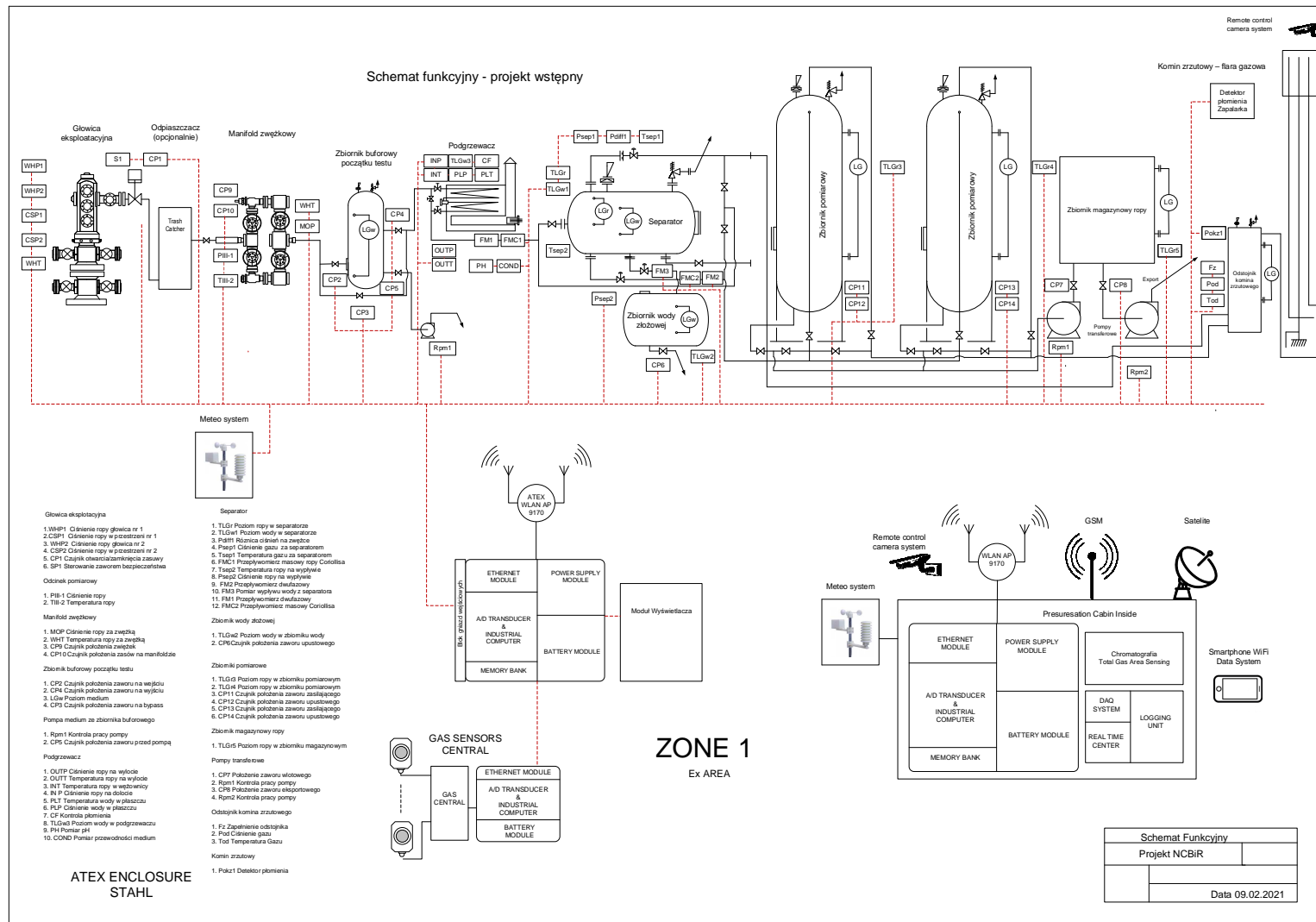
## **Konstrukcja i badania eksperymentalne procesu separacji w separatorze w skali półtechnicznej.**

W tym badania zarówno konstrukcji jak i systemu opomiarowania separatora – częściowo wytworzonego w kluczowych elementach w już zakończonych etapach.

W ramach realizacji etapu założono we wniosku projektowym osiągnięcie następujących efektów:

1. Wyniki pomiarów pracy separatora w warunkach zbliżonych do rzeczywistych (na terenie wnioskodawcy) poszczególnych elementów systemu separatora.
2. Wyniki pomiarów pracy separatora w warunkach testów polowych na rzeczywistym otworze poszukiwawczym.
3. Wnioski optymalizacyjne uzyskane w ramach etapu posłużą do wprowadzenia zmian konstrukcyjnych w konstrukcji komory separatora.
4. Uzyskane wyniki pozwolą na zweryfikowanie pracy urządzeń dodatkowych stanowiących razem z komorą separatora.

W ramach realizacji projektu opracowano kompleksowy system opróbowania złoża składający się z wielu oryginalnie skonstruowanych i przebadanych w ramach projektu urządzeń. Poniżej przedstawiono schematycznie rozmieszczenie głównych elementów systemu na wiertni poszukiwawczej w czasie opróbowania.



Rys.1. Schematyczne przedstawienie systemu opróbowania otworów wiertniczych.

W ramach projektu rozwinięto i rozpoznano zagadnienie w sposób kompleksowy, przeprowadzono również badania w skali półtechnicznej (z wykorzystaniem modelowego układu skonstruowanego w laboratorium – szczególnie w obszarze pomiarów rozkładu pól prędkości w obszarze wlotu i elementów demistera.), dodatkowo przeprowadzono badania w skali technicznej z wykorzystaniem separatora (użyczonego przez Exallo Drilling) oraz w warunkach wiertni (otwór Brońsko 2). Poniżej przedstawiono wybrane wyniki prac badawczych.

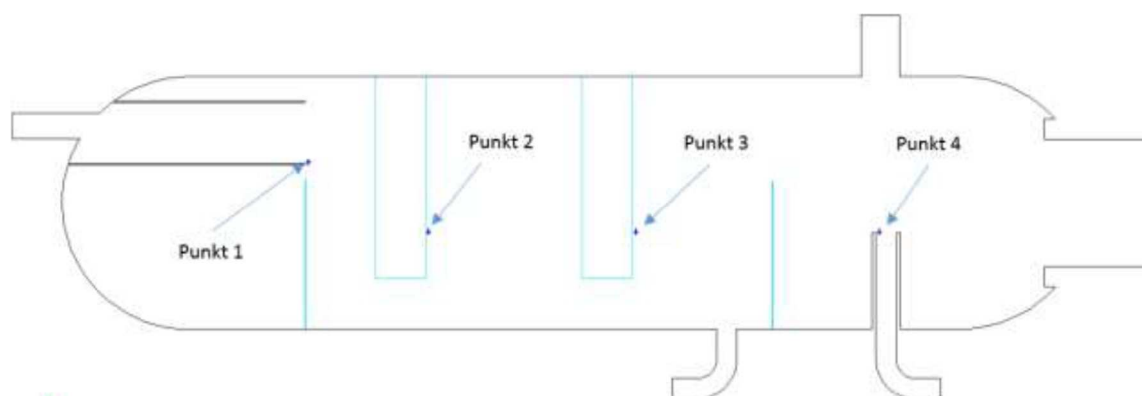
W ramach obliczeń numerycznych prowadzonych w niniejszym etapie wykonano analizę CFD, przepływu przez separator ropy naftowej. W celu zamodelowania przepływu wielofazowego czynnika roboczego mieszaniny ropopochodnej wykorzystano podejście typu Euler-Euler, które cechuje się tym, iż rozwiązuje równania pędu indywidualnie dla każdej fazy. Wadą tego podejścia jest to, że nie uwzględnia on koalescencji poszczególnych frakcji mieszaniny. W związku z tym, aby wyeliminować to ograniczenie użyto do obliczeń wielofazowych submodelu o nazwie *Population Balance Model* (PBM). Submodel ten wykorzystuje podejście typu Euler-Euler, a jednocześnie rozwiązuje równania transportu, które pozwalają na śledzenie zmiany gęstości ośrodka, a tym samym rozkładu wielkości kropeł wewnątrz założonej dziedziny obliczeniowej.

Jako model turbulencji do obliczeń wykorzystano dwu-równaniowy model typu RANS: *k-ε Standard* ze względu na jego silną zbieżność schematu różnicowego. Do modelowania warstwy przyściennej użyto submodelu *Standard Wall Functions*.

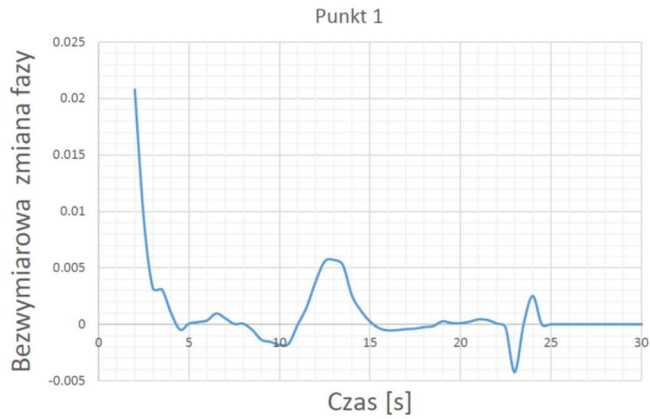
W symulacji przepływu, jako fazę pierwotną zdefiniowano frakcję gazową (udział objętościowy 47%), natomiast frakcjami wtórnymi były pozostałe dwie frakcje cieczowe: ropy (50%) i wody (3%).

Inne użyte warunki brzegowe dla frakcji ropy (oil), wody (wat) i gazu (gas) były następujące. Gęstość frakcji (przepływ nieściśliwy):  $\rho_{oil} = 813.4 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho_{wat} = 999.1 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho_{gas} = 17.6 \text{ kg/m}^3$ , lepkość dynamiczna:  $\mu_{oil} = 0.00227 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ,  $\mu_{wat} = 0.001106 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ,  $\mu_{gas} = 0.000011 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ , temperatura  $60^\circ\text{C}$ , napięcie powierzchniowe pomiędzy frakcjami: woda – gaz:  $0.072 \text{ N/m}$ , ropa – gaz:  $0.034 \text{ N/m}$ , ropa – woda:  $0.05 \text{ N/m}$ . Analizę numeryczną przeprowadzono dla dwóch różnych objętościowych natężeń przepływu mieszaniny, a mianowicie dla natężenia przepływu  $Q = 12.5 \text{ m}^3/\text{h}$  (dla którego użyto prędkości napływu  $v_{oil} = v_{wat} = v_{gas} = 0.442 \text{ m/s}$ ) oraz dla  $Q = 50.0 \text{ m}^3/\text{h}$  (dla którego użyto prędkości napływu  $v_{oil} = v_{wat} = v_{gas} = 1.768 \text{ m/s}$ ).

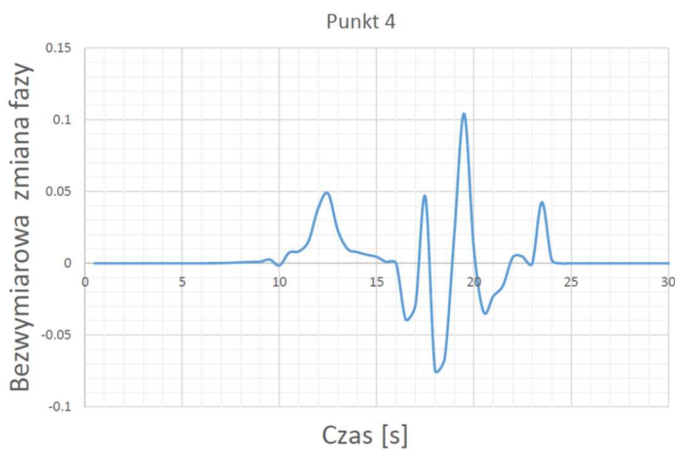
Rys. 2 przedstawia dziedzinę obliczeniową separatora trój-frakcyjnego, która została użyta do wykonania niestacjonarnych dwuwymiarowych symulacji numerycznych. Zaznaczono na nim punkty, w których wyznaczano parametry poszczególnych frakcji mieszaniny. Analizę separacji przepływu wykonano dla procesu odbywającego się w czasie 30 s. Rezultaty obliczeń w postaci zmiany fazy dla punktów 1 oraz 4 pokazano na kolejnych dwóch rysunkach.



Rys.2. Rysunek z oznaczeniami punktów, w których wyznaczono zmianę fazy.



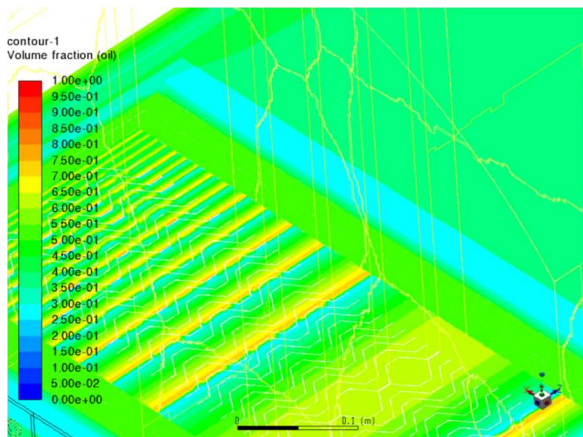
Rys.3. Bezwymiarowa zmiana fazy olejowej dla punktu 1.



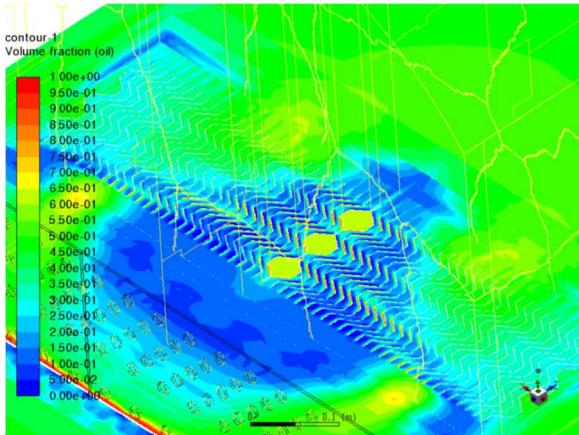
Rys.4 Bezwymiarowa zmiana fazy olejowej dla punktu 4.

Poza obliczeniami dwuwymiarowymi wykonane zostały również analogiczne trójwymiarowe obliczenia CFD z użyciem pełnej trójwymiarowej geometrii separatora mieszanki ropy naftowej, do których użyto podobnych warunków brzegowych i założeń modelowych, jak to zostało przedstawione powyżej (różnicą była zmiana natężenia przepływu z 12.5 na 150 m<sup>3</sup>/h).

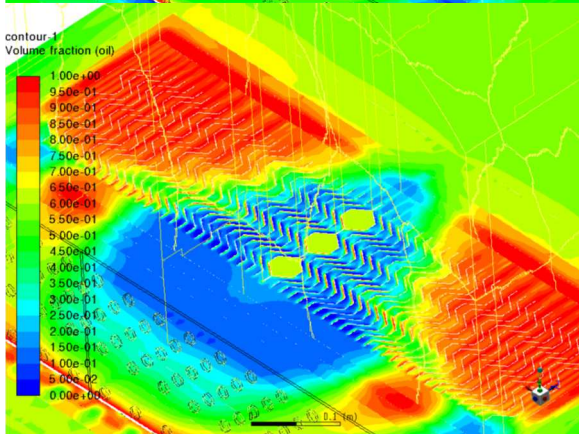
Na kolejnych rysunkach pokazano kontury udziału objętościowego (Volume fraction) frakcji olejowej, w których zobrazowano zachowanie się mieszanki podczas przepływu przez koalescer lamelowy (rysunki dotyczą trzech punktów czasowych: 0 (początek wpływu mieszanki trójfazowej do koalescera), 5 i 10 s).



Rys.5a. Obliczenia niestacjonarne 0 sekunda. Frakcja gazowa.

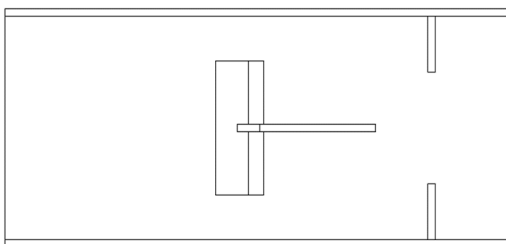


Rys.5b. Obliczenia niestacjonarne 5 sekunda. Frakcja olejowa.

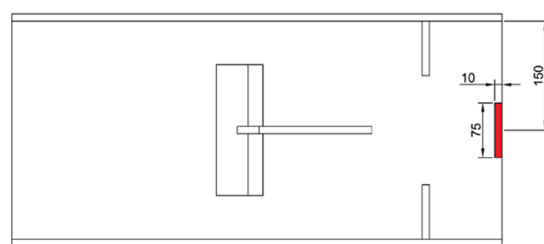


Rys.5c. Obliczenia niestacjonarne 10 sekunda. Frakcja olejowa.

W ramach prowadzonych eksperymentalnych prac badawczych przeprowadzono badania rozkładów pola prędkości w obszarze wlotu do separatora, obszarze demistera oraz innych obszarach kluczowych ze względu na proces separacji, z wykorzystaniem systemu PIV (Particle Image Velocimetry). Miejsca kluczowe dla skuteczności procesu separacji wskazano na podstawie obliczeń numerycznych przeprowadzonych w ramach etapu. Poniżej przedstawiono wybrane wyniki pomiarów rozkładów pól prędkości dla obszaru wlotu do separatora (obszaru ważnego ze względu na proces separacji). Badania wykonano na stanowisku modelowym dla grupy geometrii (kilka z nich przedstawiono poniżej). Poniżej wybrano też kilka wyników pomiarów rozkładów pól prędkości.

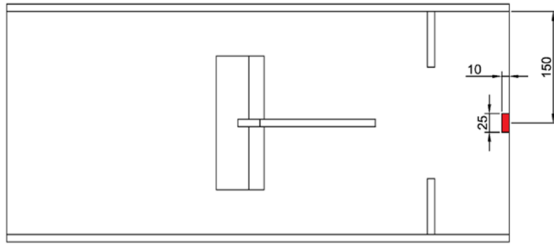


Rys. 6a. Rzut z góry na geometrię wlotu w wersji oryginalnej.

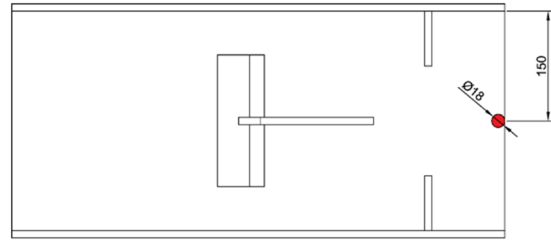


Rys. 6b. Rzut z góry na geometrię wlotu w jednej z wersji prototypu.



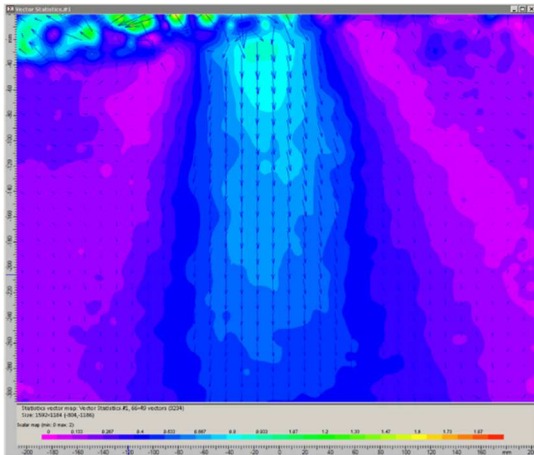


Rys. 6c. Rzut z góry na geometrię wlotu w jednej z wersji prototypu.

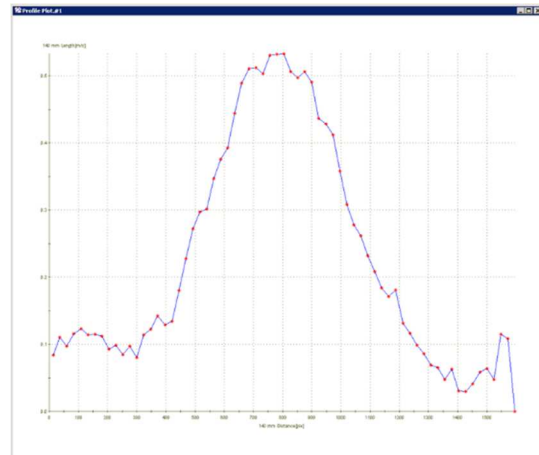


Rys. 6d. Rzut z góry na geometrię wlotu w jednej z wersji prototypu.

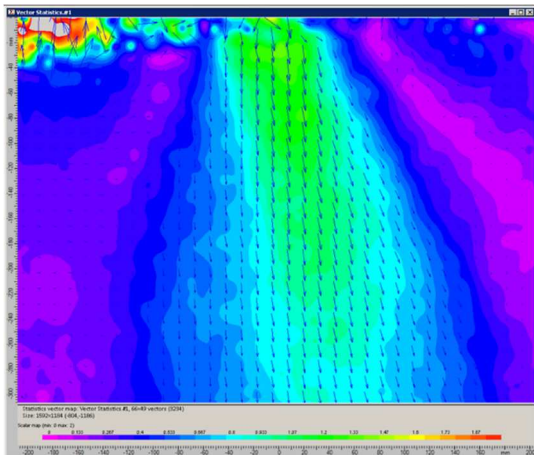
Poniżej przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów rozkładów pól prędkości w obszarze wlotu, wykonanych metodą PIV (Particle Image Velocimetry). Na rys. 7 przedstawiono wyniki pomiarów rozkładów pól prędkości w obszarze wlotu oraz profil prędkości zmierzony w połowie obszaru pomiarowego dla rozwiązania standardowego dla prędkości wlotowej 5,5m/s i 8,5m/s, natomiast na rys. 8 przedstawiono profil prędkości zmierzony w połowie mierzonego obszaru dla prędkości na wlocie 5,5m/s.



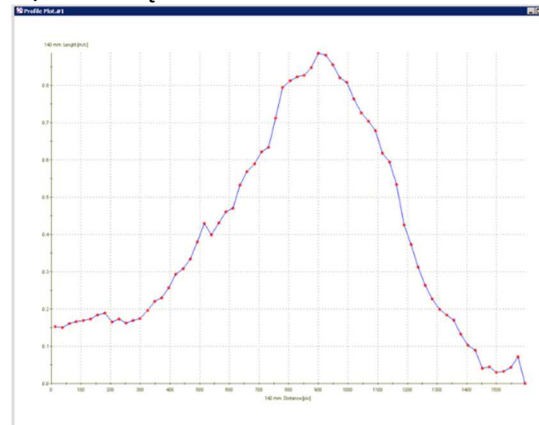
Rys. 7a. Mapa wektorów prędkości dla prędkości na wlocie 5.5 m/s. Rozwiązanie standardowe.



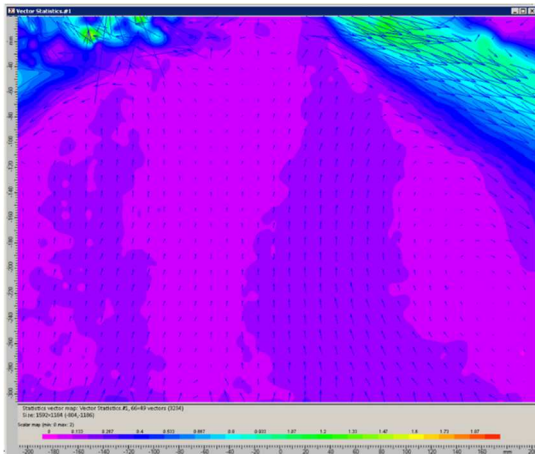
Rys. 7b. Profil prędkości zmierzony w połowie mierzonego obszaru dla prędkości na wlocie 5.5 m/s. Rozwiązanie standardowe.



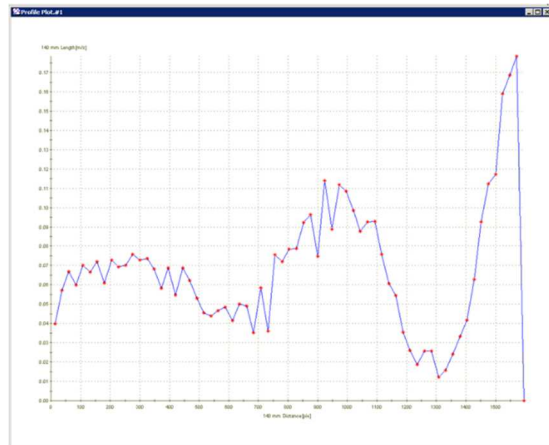
Rys. 7c. Mapa wektorów prędkości dla prędkości na wlocie 8.5 m/s. Rozwiązanie standardowe.



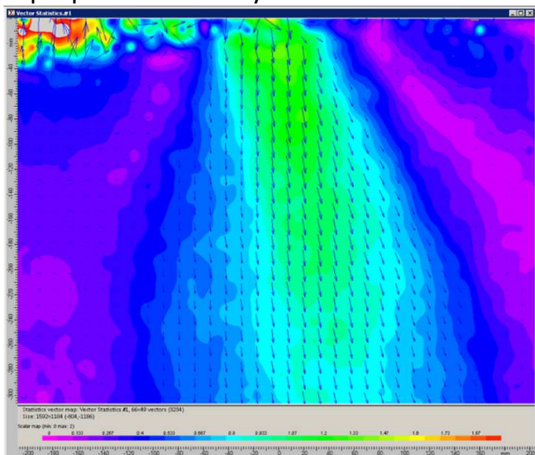
Rys. 7d. Profil prędkości zmierzony w połowie mierzonego obszaru dla prędkości na wlocie 8.5 m/s. Rozwiązanie standardowe.



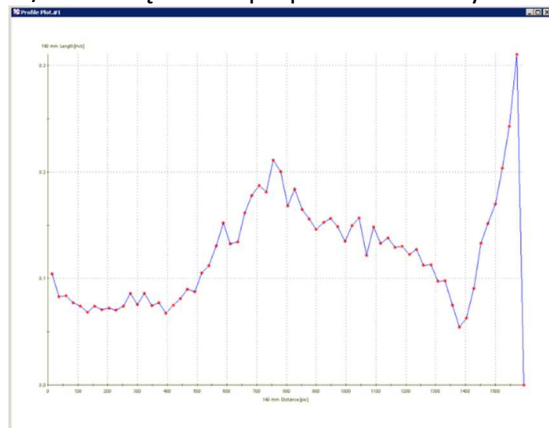
Rys. 8a. Mapa wektorów prędkości dla prędkości na wlocie 5.5 m/s. Rozwiązanie zaproponowane na rys. 6b.



Rys. 8b. Profil prędkości zmierzony w połowie mierzonego obszaru dla prędkości na wlocie 5.5 m/s. Rozwiązanie zaproponowane na rys. 6b.



Rys. 8c. Mapa wektorów prędkości dla prędkości na wlocie 8.5 m/s. Rozwiązanie zaproponowane na rys. 6b.



Rys. 8d. Profil prędkości zmierzony w połowie mierzonego obszaru dla prędkości na wlocie 8.5 m/s. Rozwiązanie zaproponowane na rys. 6b.

Obliczenia i pomiary eksperymentalne umożliwiły dobór optymalnej geometrii pracy elementów wewnętrznych separatora. Dodatkowo przeanalizowano celowość umieszczenia dodatkowych elementów z punktu widzenia remontu już istniejących separatorów. Przeprowadzono również pomiary warunkach rzeczywistego separatora z wykorzystaniem systemów wizualizacji przepływu (rys.9a, 9b).

W ramach realizacji niniejszego etapu przeprowadzono również badania eksperymentalne wpływu zawartości fazy na pracę systemu pomiarowego zawartości faz (opracowanego w ramach niniejszego projektu) w odniesieniu do miejsca umiejscowienia (linia gazowa, linia płynu złożowego, linia cieczy).



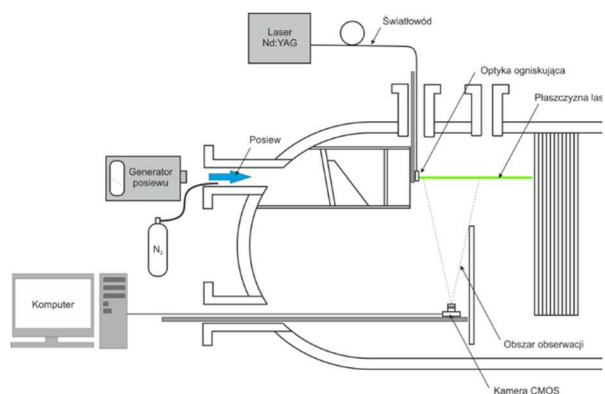
Rys. 9a. Fotografia stanowiska badawczego (użyczonego przez przedsiębiorstwo Exallo Drilling) separatora.

Badania wykonywano korzystając z płynów złożowych pobranych z rzeczywistych otworów poszukiwawczych. Badania te wpisują się w obszar prac zawartych we wniosku jako badania elementów wspomagających pracę separatora, mają one duży wpływ na ostateczny wynik pracy separatora przy opróbowaniu złoża. Wyniki tych badań eksperymentalnych dla systemu pomiaru zawartości fazy (oryginalne skonstruowanego podczas realizacji projektu) zostały zaprezentowane w artykule wysłanym do publikacji w czasopiśmie *Sensors*. Planuje się również wystąpienie konferencyjne na naukowej konferencji w jednym z państw gdzie przemysł poszukiwania ropy naftowej jest dobrze rozwinięty, niestety ograniczenia związane z COVID-19 wpłynęły na zmniejszenie możliwości uczestnictwa w takich konferencjach w trybie stacjonarnym, a jest to ważne ze względu na planowany pokaz opracowanego rozwiązania.

W ramach realizacji etapu przeprowadzono również badania działania wybranych elementów wspomagających system opróbowania złoża opracowanych w ramach realizacji projektu w warunkach wiertni poszukiwawczej. Badania te przeprowadzono podczas opróbowania na otworze **Brońsko-32** obsługiwanym przez przedsiębiorstwo Exallo Drilling S.A. (grupa PGNiG), inwestorem otworu jest PGNiG. Szczególnie ważne były prowadzone prace badawcze nad pomiarowymi elementami wsparcia separatora. W tym szczególnie opracowanymi w ramach projektu takimi urządzeniami jak Total Gas, osuszacz nafionowy próbki gazu, osuszacz i filtr powietrza zasilającego Total Gas i chromatograf jak też system „on-line” przygotowania i rozprowadzenia próbek gazów do analizy. Uzyskane wyniki pozwoliły na optymalizację konstrukcji badanego systemu pomiaru gazów wybuchowych. Równolegle z prowadzonymi badaniami przeprowadzono demonstrację wszystkich systemów jakie zostały zbudowane w ramach projektu. Załączono i zademonstrowano cały skonstruowany sprzęt i oprogramowanie dla systemu zbierania danych i technologicznej wizualizacji procesu opróbowania złoża.

W ramach etapu korzystano z naukowego podwykonawstwa Instytutu Maszyn Przepływowych PAN im. Roberta Szwalskiego PAN w obszarze części prac związanych z przepływem oraz z podwykonawstwa Katedry Chemii Analitycznej w obszarze badań dokładności opracowanych w ramach projektu urządzeń.

W ramach prac realizowanych w etapie wykonano wszystkie przewidziane w projekcie prace, w ich wyniku oraz w wyniku realizacji prac w pozostałych etapach uzyskano rozwiązanie technologiczne jakie zostanie zaoferowane odbiorcom krajowym i zagranicznym. W niniejszym sprawozdaniu zaprezentowano a właściwie zasygnalizowano obszary w których przeprowadzono prace badawcze w ramach etapu.



Rys. 9b. Schemat ustawienia systemów rejestracji obrazu i oświetlenia. Dla separatora przedstawionego na rysunku obok.