 **TERCJA** Systemy Pomiarowe i Komputerowe Stanisław Żwan

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

REALIZACJA Etapu 1

W ramach realizacji niniejszego Etapu 1 przeprowadzono prace, które umożliwiły osiągnięcie założonych wyników etapu. Mianowicie:

1. Zidentyfikowano struktury wirowych wpływające na proces separacji. Efektem końcowym tej identyfikacji jest ocena możliwości zmian układu przepływowego separatora celem poprawy jego efektywności.
2. Zweryfikowano założenia przyjęte do obliczeń numerycznych w dwu obszarach – diwertera i demistera.
3. Zostały eksperymentalnie zidentyfikowane obszary, w których struktury przepływu mają najbardziej niekorzystny obraz (a więc potencjalnie niekorzystny wpływ na pracę urządzenia).
4. Uzyskane wyniki stanowią podstawę do przeprowadzenia wstępnej optymalizacji konstrukcji, opracowanej na podstawie obliczeń numerycznych, która zostanie poddana weryfikacji eksperymentalnej na dalszym etapie.

W ramach etapu zgodnie z wnioskiem projektowym wykonano analizę numeryczną trójwymiarowych struktur przepływu w wybranych obszarach separatora. Jednym z istotnych elementów konstrukcyjnych separatora jest układ przegród, których odpowiednia geometria i położenie wpływa na efektywność separacji. Budowa separatora oparta jest o konstrukcję zbiornika wyposażonego w elementy wlotowe, przegrody, wkłady koalescencyjne, demistery i łamacze wirów. W zależności od charakteru urządzenia mogą one występować osobno lub łącznie w różnych konfiguracjach. Element wlotowy (diverter, inlet device) stanowi pierwszą sekcję rozdziału cieczy i gazu w separatorze. Jego zadanie polega na rozbiciu strugi wpadającej do aparatu oraz redukcji jej pędu. Wyróżnia się diwertery w postaci różnych rodzajów przegród, cyklonów, tzw. półrur, czy dyfuzorów łopatkowych. Najprostszymi urządzeniami wlotowymi stosowanymi w separatorach są przegrody i półrury. Elementy te są stosunkowo mało efektywne do rozdziału gaz/ciecz, lecz dosyć często stosowane ze względu na ich prostą konstrukcję i niską cenę. Z kolei, w króćcach wylotowych cieczy montuje się łamacze wirów, których zadaniem jest zapobieganie powstawania wirów. Tworzący się wir mógłby doprowadzić do przedostania się gazu do króćca odpływowego cieczy. W przedmiotowych elementach konstrukcyjnych szczególnie ważne jest odpowiednie zdefiniowanie struktur w obszarze wkładu koalescencyjnego oraz wpływu do komory separatora. W ramach prowadzonych prac wykonano obliczenia numeryczne z wykorzystaniem techniki CFD (Computing Fluid Dynamics), prace wykonywał Instytut Maszyn Przepływowych PAN im. Roberta Szewalskiego. Zostały one przekazane beneficjentowi w formie opracowań. Efektem prowadzonych prac jest wzór użytkowy chroniący konstrukcję elementu wlotowego, którego autorami są zarówno pracownicy beneficjenta jak i pracownicy Instytutu Maszyn Przepływowych PAN.

W przypadku procesu koalescencji przy przepływie przez struktury labiryntowe istotnym czynnikiem jest zwilżalność powierzchni materiału wkładu. W literaturze spotkać można różne opinie na temat wpływu zwilżalności na proces koalescencji. Efektywność procesu rozdzielania była najwyższa przy zastosowaniu materiałów mających średnie wartości kąta zwilżania. Powierzchnia elementu koalescencyjnego powinna być dostatecznie zwilżalna, aby umożliwić proces osadzania się kropelek na ścianie i ich dalszego łączenia się w większe krople, lecz nie można dopuścić do sytuacji bardzo mocnego zwilżania, aby zapobiec blokowaniu objętości elementu przez akumulującą się ciecz fazy zdyspergowanej.

Zjawisko koalescencji można opisać rozpatrując mechanizm łączenia się kropelek oleju z powierzchnią płaską utworzoną przez tę samą ciecz co krople wyodrębnione. Łączenie kropelek odbywa się w następujących etapach:

1. Kropla podchodzi do powierzchni międzyfazowej, w wyniku czego następuje deformacja zarówno kropli, jak i powierzchni międzyfazowej.
2. Występują drgania kropli w przestrzeni międzyfazowej.
3. Tworzy się ciągły film pomiędzy kroplą a jej fazą ciągłą o dużej masie.
4. Następuje wyciekanie filmu wraz z jego rozerwaniem i usunięciem (początek właściwego procesu koalescencji).
5. Następuje przeniesienie masy kropli do jej fazy ciągłej o dużej masie.

W przeprowadzonym procesie projektowania i stanowiących jego część obliczeniach numerycznych przyjęto metodologię opartą w pierwszym rzędzie na wykorzystaniu modelu 0D, który pozwala na uzyskanie podstawowych parametrów separatora, a w następnej kolejności na wykorzystaniu metod 3D, czyli numerycznej mechaniki płynów (CFD) do optymalizacji kształtu kluczowych elementów.

Podstawowym prawem opisującym grawitacyjny typ separacji jest prawo Newtona. Krople cieczy, oddzielające się od fazy gazowej w wyniku oddziaływania grawitacji, można opisać równaniem powstałym z bilansu sił oporu i ciężenia, wyznaczając tzw. prędkość graniczną opadania cząstek. Krople te opadają, gdy siły grawitacji działające na krople są większe niż siła oporu przepływającego gazu wokół kropli. Prędkość graniczna V_T opadania cząstek lub kropli wynosi

$$V_T = \sqrt{\frac{4g(\rho_l - \rho_g)D}{3\rho_g C}}, \quad (1)$$

gdzie ρ_l i ρ_g to gęstość cieczy i gazu, D – średnica kropli, C – współczynnik oporu, g – przyspieszenie grawitacyjne. W zakresie liczb Reynoldsa powyżej 500 współczynnik oporu C wynosi 0.44. Górną granicę stosowalności prawa Newtona wyznacza rozmiar kropli. Drugim ograniczeniem jest liczba Reynoldsa, która nie może przekroczyć 200000. Dla liczb Reynoldsa w zakresie od 500 do 2 stosuje się zmodyfikowaną zależność i w tym przypadku prędkość graniczną oblicza się z równania:

$$V_T = \frac{3.54g^{0.71}(\rho_l - \rho_g)^{0.71}D^{1.14}}{\rho_g g^{0.29}\mu^{0.43}}. \quad (2)$$

Separatory wyposażone w demister zwymiarowano na podstawie równania do obliczeń prędkości krytycznej z empirycznego równania Soundersa-Browna:

$$V_g = k \sqrt{\frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_g}}, \quad (3)$$

gdzie k jest współczynnikiem eksperymentalnym, zależnym m.in. od ciśnienia roboczego, mieszczącym się w zakresie $0.065 \div 0.107$ m/s.

Opisane powyżej podstawowe zależności posłużyły do określenia zewnętrznych wymiarów separatora oraz umiejscowienia i określenia typu podstawowych elementów wykorzystywanych w procesie separacji.

W dalszym etapie prac skoncentrowano się na analizie CFD kluczowych elementów systemu, w pierwszej kolejności wkładu koalescencyjnego. Na potrzeby obliczeń CFD konstrukcji wewnętrznej całego separatora zaproponowano model, w którym wkład koalescencyjny zostaje zastąpiony materiałem porowatym. Ośrodek porowaty opisany jest poprzez człon źródłowy S dodany do standardowego równania pędu,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{w}) + \nabla \cdot (\rho \vec{w} \vec{w}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + p \vec{g} + \vec{F} + \vec{S}, \quad (4)$$

gdzie

$$\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{w} + \nabla \vec{w}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{w} I \right]. \quad (5)$$

Człon ten składa się z dwóch części: strat lepkościowych na pokonanie oporów przepływu przez ośrodek porowaty (klasyczne prawo Darcy, pierwsza część prawej strony równania (6)) i strat wewnętrznych (druga część prawej strony równania (6)):

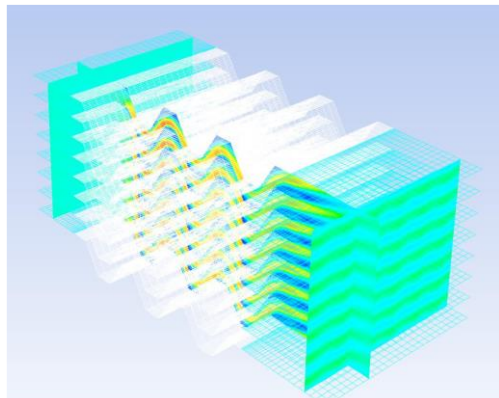
$$S_i = - \left(\sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu w_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho |w| w_j \right), \quad (6)$$

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

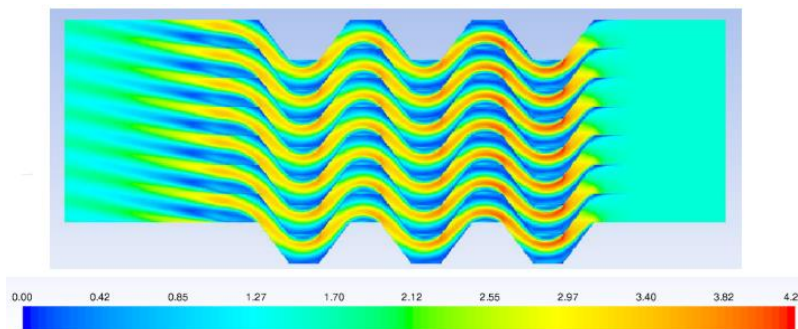
$$S_i = - \left(\frac{\mu}{\alpha} w_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |w| w_i \right), \quad (7)$$

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

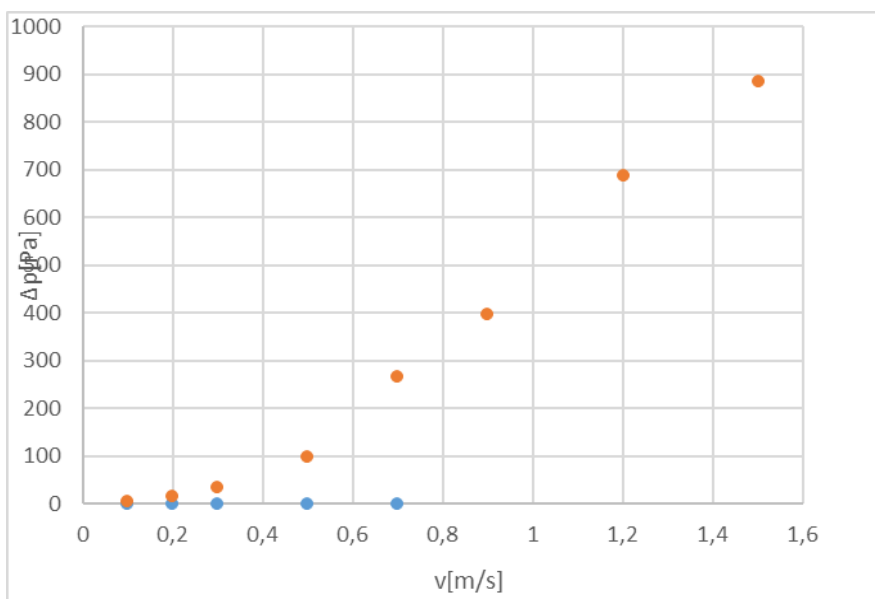
Poniżej przedstawiono wyniki obliczeń struktur przepływu przez wkład koalescencyjny wykonanych w ramach projektu. Na rys. 1 pokazano widok ogólny wkładu z blachami lamelowymi, a na rys. 2 – przykład pola prędkości. Obliczenia te posłużyły do wyznaczenia zależności oporów przepływu od prędkości, rys. 3, które są jedną z charakterystyk wykorzystanych do modelowania wkładu przy pomocy zastępczego materiału porowatego.



Rys. 1. Widok płaszczyzn do wizualizacji .



Rys. 2. Rozkład prędkości przepływu przez wkład lamelowy.



Rys. 3. Zależność spadku ciśnienia na wkładzie lamelowym w funkcji prędkości przepływu przez wkład koalescencyjny.

We wszystkich symulacjach stosowano model turbulencji SST z rodziny modeli $k-\omega$, jednak zastosowanie innych modeli rodziny $k-\omega$ lub $k-\epsilon$ nie powinno skutkować znaczą rozbieżnością wyników. Płyn modelowany był jako nieściśliwy (olej, woda), a intensywność turbulencji ustalona była na poziomie 0.2% i mniej. Średnicę hydrauliczną (dla obliczeń turbulencji) przyjmowano jako równą 10% przekroju lameli wkładu koalescencyjnego. Pozostałe wartości parametrów modelu turbulencji pozostawiono jako domyślne. Symulacje ograniczone były do rozwiązywania równania ciągłości i równania pędu. Rozwiązanie uznano za zbieżne, gdy residua równania ciągłości oraz składowych prędkości osiągnęły poziom 10^{-3} w symulacjach wstępnych oraz 10^{-6} w symulacjach weryfikacyjnych. W przypadkach gdy wyznaczano charakterystyki wkładu lamelowego typu $\Delta p = f(w)$, na wlocie stosowano warunek prędkościowy.

W przypadku nieizotermicznych procesów transportu w ośrodkach porowatych prędkość transportu silnie zależy od pola temperatury. Temperatura wpływa pośrednio na pole prędkości poprzez lepkość, która prawie zawsze maleje wraz ze wzrostem temperatury. Zależność ta jest silnie nieliniowa i określona jest empiryczną korelacją

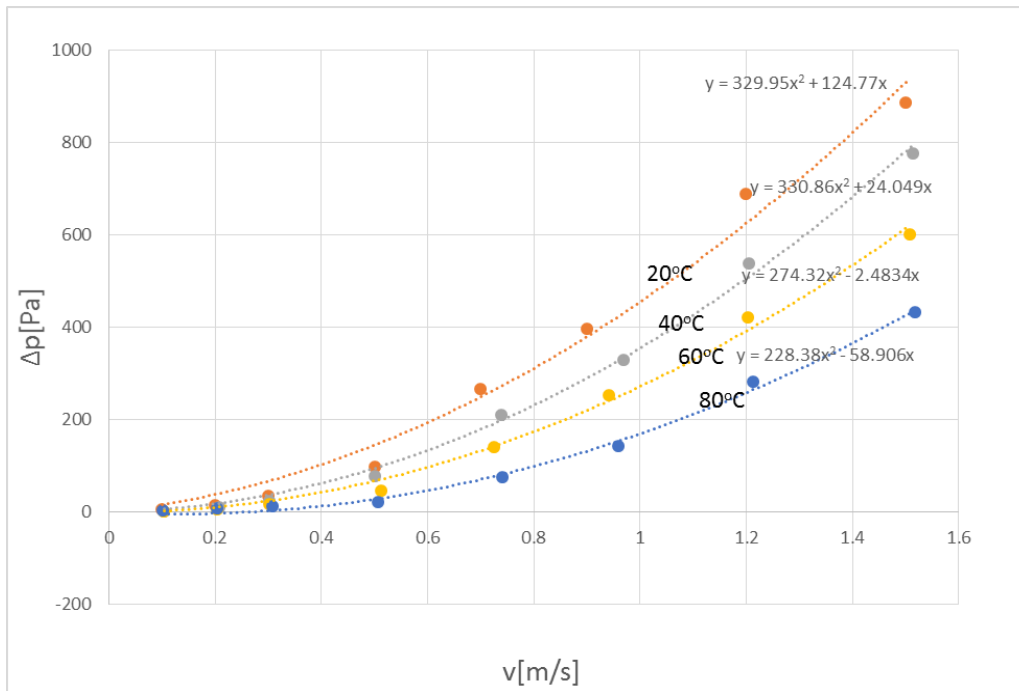
$$\mu = \mu_0 \exp\left(G \frac{283^\circ\text{C}}{273^\circ\text{C} + T} - 1\right) \quad (8)$$

gdzie: μ – lepkość, T – temperatura, μ_0 – lepkość w temperaturze 20 °C, G – parametr eksperymentalny.

Po uwzględnieniu zależności lepkości od temperatury (8), prędkość przepływu w funkcji odległości dana jest zależnością

$$V(r, T) = \frac{Rr_k^2 \Delta p}{8r^2 \mu_0 \exp\left(G \frac{283^\circ\text{C}}{273^\circ\text{C} + T} - 1\right)}. \quad (9)$$

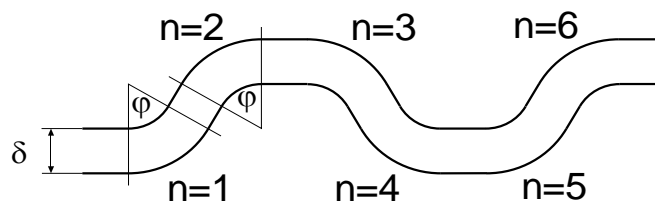
Wynikający stąd spadek ciśnienia Δp na jednostkę długości wkładu koalescencyjnego przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Zależność spadku ciśnienia na wkładzie lamelowym w funkcji prędkości przepływu przez wkład koalescencyjny dla wybranych temperatur przepływu.

W ramach etapu prowadzono również prace polegające na wykorzystaniu modeli numerycznych nie wykorzystujących CFD. Poniżej przedstawiono część wyników uzyskanych podczas analizy pracy wkładu lamelowego separatora.

Istotną częścią separatora trójfazowego gaz-ropa-woda jest wkład lamelowy wykonany z blach falistych. Zachodzi w nim przede wszystkim koalescencja kropli i ich wytrącenie z przepływu fazy ciągłej. W ramach etapu wykonano analizę sprawności separacji kropli w takim wkładzie lamelowym. Rozważono cztery możliwe przypadki separacji: (9) kropli ropy z gazu, (10) kropli wody z gazu, (11) kropli wody z ropy i (12) kropli ropy z wody. Uzyskano charakterystyki określające sprawność separacji w funkcji prędkości napływu w dla wybranych średnic kropli D .



Rys. 5. Geometria jednego kanału przepływowego we wkładzie lamelowym z blach falistych.

W wykorzystanym modelu 0D procesu separacji założono, że spełnione są warunki przepływu Stokesa. Analizę przeprowadzono dla typowego kanału między dwiema blachami falistymi, którego geometria jest określona przez odstęp między blachami d , kąt zmiany kierunku na załamaniu fali j oraz liczbę tych kątów n wzdłuż kanału, rys. 5. Sprawność separacji η zdefiniowana jest jako iloraz strumienia masy cieczy powstałego z odseparowanych kropli do strumienia masy kropli na wlocie do separatora. Dla przepływu Stokesa we wkładzie lamelowym uzyskano następującą zależność na teoretyczną sprawność separacji

$$\eta_r = 1 - \exp(-Stk n \varphi), \quad (9)$$

w której liczba Stokesa Stk jest zdefiniowana jako

$$Stk = \frac{w \Delta \tau_{rel}}{\delta}. \quad (10)$$

Czas relaksacji kropli w przepływie Stokesa wynosi

$$\Delta \tau_{rel} = \frac{\rho_d D^2}{18 \eta_c}, \quad (11)$$

gdzie ρ_d jest gęstością kropli, a η_c – lepkością dynamiczną fazy ciągłej.

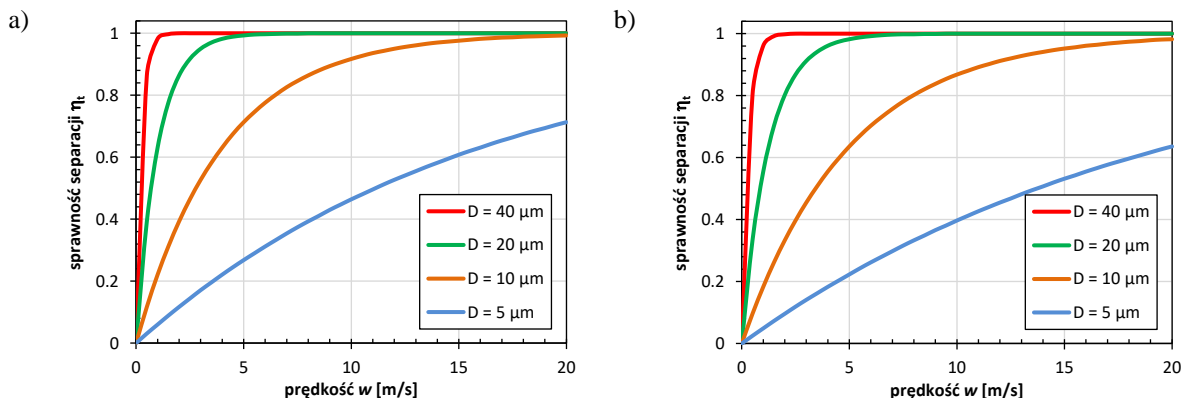
Korzystając z zależności (9), obliczono sprawność separacji dla mieszaniny ropy naftowej, gazu ziemnego i wody, przyjmując, że w separatorze temperatura wynosi 20 °C, a ciśnienie 5 MPa. Własności fizyczne (gęstość, lepkość) przyjęto jak dla ropy ze złoża Dębno/BMB i gazu ziemnego o masie cząsteczkowej 23.2 (gęstość względna 0.8). Przykładowe uzyskane charakterystyki sprawności separacji przedstawiono na rys. 6 dla wkładu o szczelinach $d = 10$ mm i kątach zwrotu $j = 60^\circ$ w liczbie $n = 6$. Wynika z nich, że sprawność rośnie wraz ze wzrostem prędkości fazy ciągłej, w . Dla wybranej prędkości w , sprawność separacji maleje dla kropli o coraz mniejszej średnicy. Przy średniej prędkości w separatorze równej $w = 5$ m/s, badany wkład całkowicie wyeliminuje z gazu krople o średnicach większych od 20 mm. Dla separacji w fazie ciekłej, całkowitej separacji z ropy ulegną krople wody większe od 400 μm lub krople ropy zawieszony w wodzie, jeżeli ich średnica przekracza 200 μm .

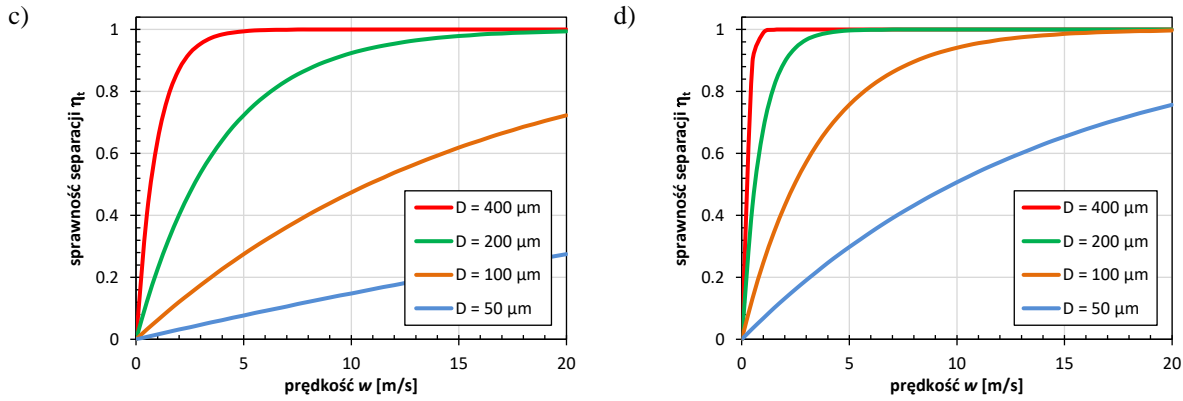
Na sprawność separacji wpływają też parametry geometryczne wkładu lamelowego. Sprawność rośnie wraz ze zmniejszaniem szczeliny d , wzrostem kąta j i zwiększaniem liczby załamań n . Na rys. 7 pokazano wyników analizy wpływu tych parametrów na przykładzie separacji kropli wody o średnicy $D = 200$ mm, zawieszonych w ropy ze złoża Dębno/BMB, przy prędkości napływu $w = 5$ m/s.

W modelu (9) założono, że po każdym zwrocie o kąt j , wszystkie krople zwieszony w fazie ciągłej ulegają przesunięciu w kierunku ścianki kanału. W rzeczywistości mogą one ulegać wtórnemu rozproszeniu w przekroju kanału, zwłaszcza jeżeli poszczególne zwroty są oddzielone odcinkami prostoliniowymi (jak np. we wkładzie z blach trapezowych). Po uwzględnieniu tego rozproszenia w modelu 0D, uzyskuje się następującą zależność na sprawność separacji

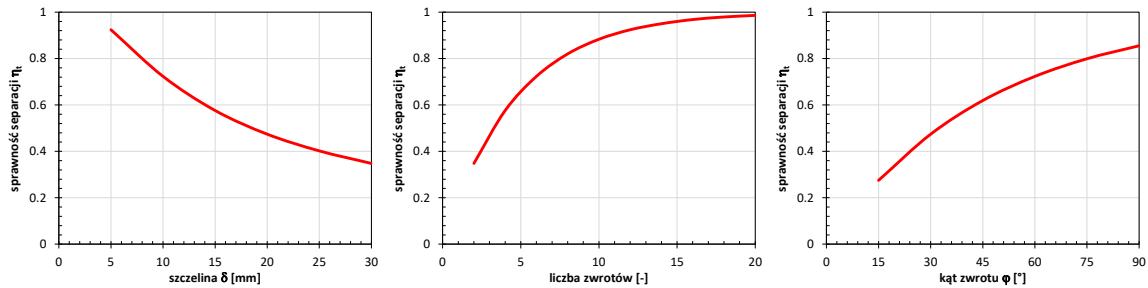
$$\eta_r = 1 - (1 - Stk \varphi)^{mn}, \quad (12)$$

w której wykładnik m określa „siłę” rozpraszania kropli. Jego wartość zawiera się w przedziale od 0.5 do 1.





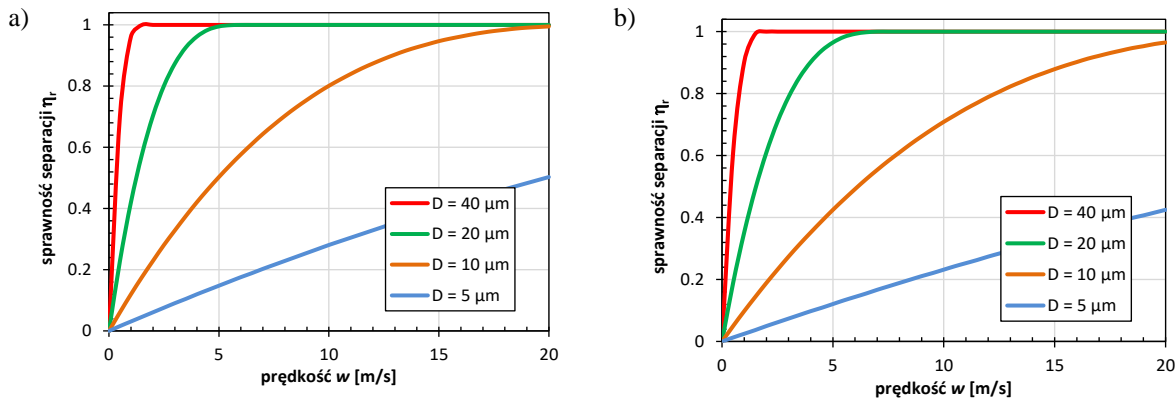
Rys. 6. Teoretyczna sprawność separacji kropeł o średnicy D w funkcji prędkości napływu do wkładu lamelowego dla: a) kropeł wody w gazie ziemnym, b) kropeł ropy w gazie ziemnym, c) kropeł wody w ropie, d) kropeł ropy w wodzie. Parametry wkładu: $d = 10$ mm, $j = 60^\circ$, $n = 6$.

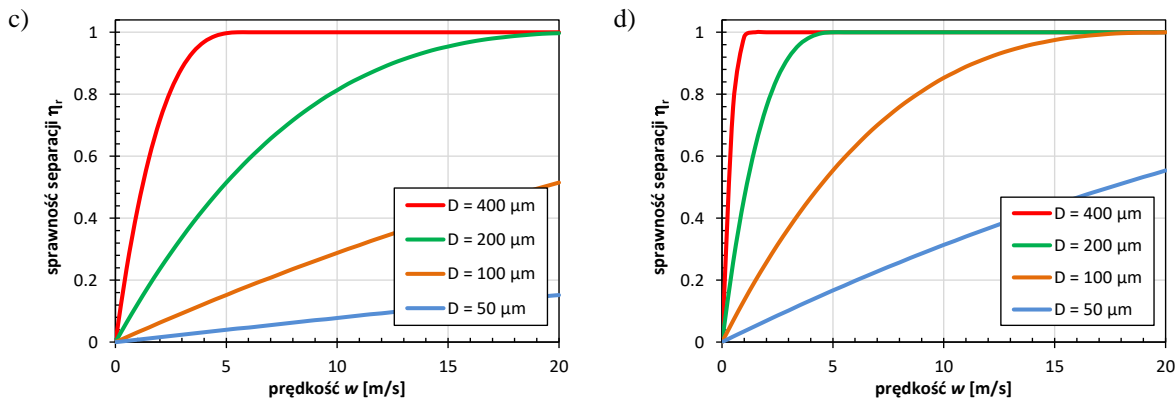


Rys. 7. Zmiany teoretycznej sprawności separacji kropeł wody o średnicy 200 mm, zwieszonych w funkcji szczeliny między blachami falistymi, liczby zwrotów przepływu i kąta zwrotu. Prędkość napływu 5 m/s. Geometria bazowa: $d = 10$ mm, $j = 60^\circ$, $n = 6$.

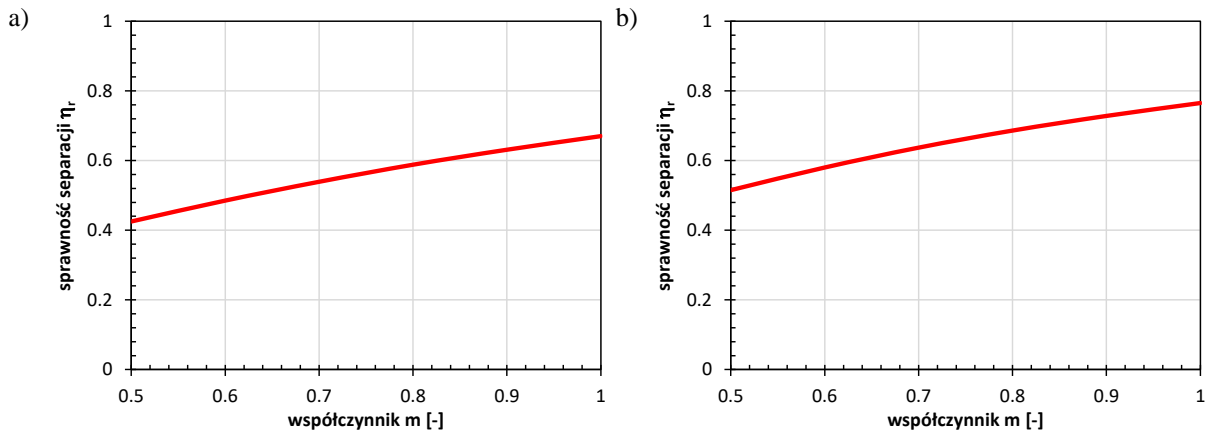
Na rys. 8 przedstawiono przykładowe wyniki obliczeń sprawności separacji η_r (12) dla warunków analogicznych do analizowanych wcześniej dla sprawności η_r (por. rys. 6). Zgodnie z oczekiwaniami, uwzględnienie rozpraszania kropeł skutkuje pogorszeniem sprawności separacji.

Wpływ współczynnika rozpraszania m na sprawność separacji przedstawiono na rys. 8 na przykładzie kropeł ropy w gazie i kropeł wody w ropie. W pierwszym przypadku wybrano krople o średnicy 10 mm, a w drugim 200 mm. Pozostałe parametry modelu były stałe i takie same: $d = 10$ mm, $j = 60^\circ$, $n = 6$, $w = 5$ m/s. Sprawność separacji słabnie gdy współczynnik m maleje. Dla analizowanych przypadków, zmniejszenie m od wartości 1.0 do 0.5 spowodowało spadek sprawności o około 1/3.



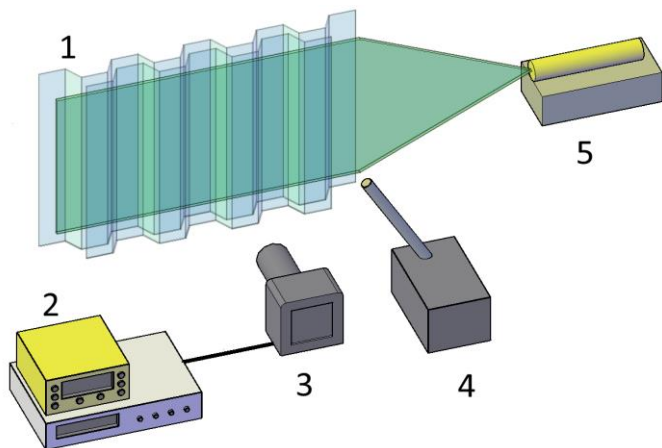


Rys. 8. Sprawność separacji kropeł o średnicy D z uwzględnieniem rozpraszania ($m = 0.5$) w funkcji prędkości napływu do wkładu lamelowego dla: a) kropeł wody w gazie ziemnym, b) kropeł ropy w gazie ziemnym, c) kropeł wody w ropie, d) kropeł ropy w wodzie. Parametry wkładu: $d = 10 \text{ mm}$, $j = 60^\circ$, $n = 6$.

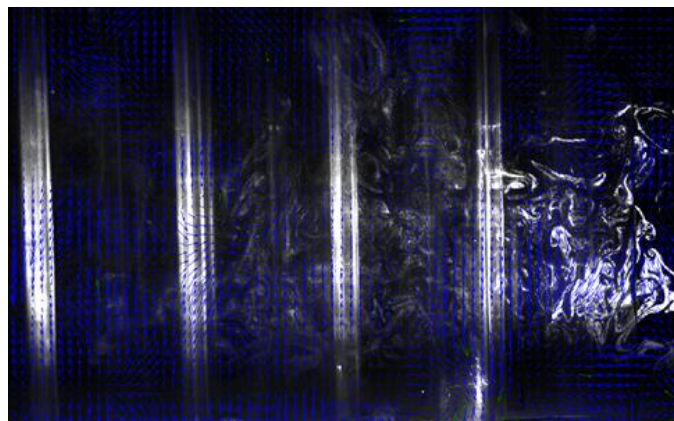


Rys. 9. Wpływ współczynnika rozpraszania kropeł m na sprawność separacji (a) kropeł ropy o średnicy 10 mm w gazie ziemnym i (b) kropeł wody o średnicy 200 mm w ropie surowej. Prędkość napływu 5 m/s, parametry wkładu lamelowego: $d = 10 \text{ mm}$, $j = 60^\circ$, $n = 6$.

W ramach realizacji etapu wykonano również pomiary struktur przepływu z wykorzystaniem techniki PIV (Particle Image Velocimetry). W badaniach wykorzystano system oparty na wykorzystaniu dwuimpulsowego lasera PIV (DualPower 200-15 laser, 2 x 200 mJ 15 Hz, 532 nm) i monochromatycznej kamery (FlowSense EO 4M camera 2048 x 2048 px, 16Hz C-mount). W skład systemu wchodził również system synchronizacji (Timer box, incl. Timer card, cable box, and 4 x 10m BNC). W badaniach eksperymentalnych skupiono się na potwierdzeniu wyników uzyskanych w trakcie obliczeń struktur przepływu wykonanych z wykorzystaniem technik CFD. Szczególnie w obszarze pracy elementów lamelowych, system PIV umożliwił uzyskanie ilościowego rozkładów wektorów prędkości w obszarze pomiędzy lamelami. Pomiary eksperymentalne były wykonywane dla przepływu gazu z rozproszonym posiewem w postaci cząstek stałych.



Rys. 10. Schemat stanowiska wykorzystywanego w badaniach: 1 – badany element, 3 – kamera, 2 – komputerowy system obróbki fotografii oraz system synchronizacji działania elementów systemu, 4 – generator posiewu, 5 – laser



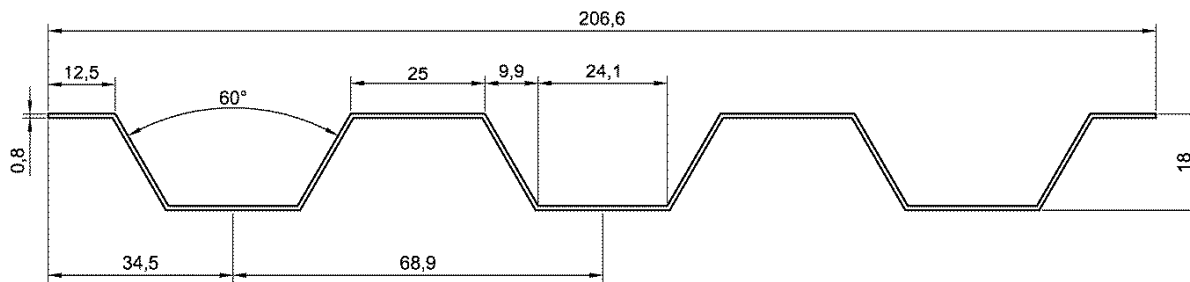
Rys. 11. Przykładowa fotografia struktury przepływu przez wkład lamelowy wraz z naniesionym rozkładem wektorów prędkości.

Wykonane prace eksperymentalne wskazują zgodność z obliczeniami numerycznymi, co potwierdza przyjęte w obliczeniach numerycznych założenia.

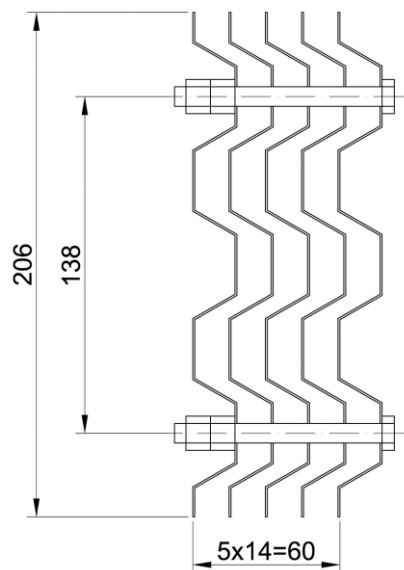
W wyniku prowadzonych prac numerycznych oraz badań eksperymentalnym opracowano założenia projektowe i wykonano wstępne projekty kluczowych elementów systemu. Wyniki prac badawczych o charakterze numerycznym, modelowym oraz badań laboratoryjnych pozwoliły zaproponować konstrukcje przedstawione poniżej, które będą podstawą do dalszych prac badawczych i optymalizacyjnych. Przykładowe rysunki opracowanych wstępnie konstrukcji na podstawie wyników badań numerycznych i laboratoryjnych pomiarów przedstawiono poniżej na rys. 12-14.

Wnioski

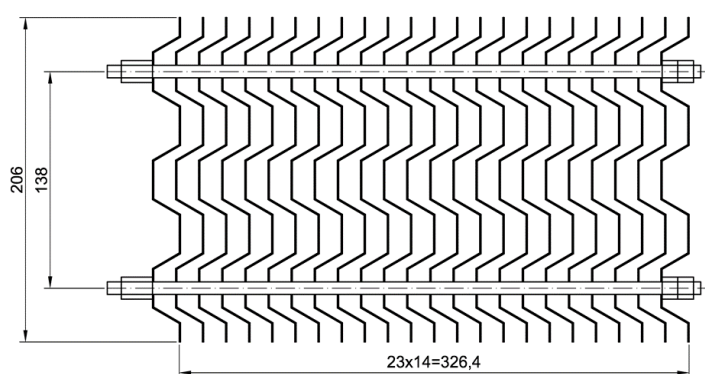
1. Zidentyfikowano struktury wirowe wpływające na proces separacji i oceniono możliwości zmian i optymalizacji układu przepływowego separatora.
2. Zidentyfikowano obszary, w których struktury przepływu mają najbardziej niekorzystny wpływ na pracę urządzenia.
3. Zweryfikowano założenia przyjęte do obliczeń numerycznych .
4. Uzyskano wyniki stanowiące podstawę do przeprowadzenia optymalizacji wybranych elementów konstrukcji.
5. Przygotowano wstępne projekty pojedynczych elementów systemów, które będą poddane zarówno badaniom numerycznym, jak i przede wszystkim badaniom eksperymentalnym w kolejnych etapach.



Rys. 12. Konstrukcja pojedynczej lameli zaproponowanej w wyniku prac badawczych – numerycznych i eksperymentalnych – przeprowadzonych w ramach etapu, która zostanie wykorzystana w następnych etap realizacji projektu.



Rys 13. Przedstawienie podstawowego zestawu lamel zaproponowanego na podstawie wyników prac badawczych zrealizowanych w ramach etapu.



Rys. 14. Przedstawienie modułu wymiennego zaproponowanego na podstawie wcześniej opracowanego pojedynczego lamela i jego zestawu podstawowego

Szczegóły przeprowadzonych prac w ramach Etapu 1 przedstawiają opracowania;

1. Nowy wkład koalescencyjny dla separatorów płynu złożowego.pdf,
2. Raport z przeprowadzonych eksperymentalnych pomiarów rozkładu prędkości i struktur przepływu w obszarze wkładu koalescencyjnego.pdf,