

Wpływ sposobu regulacji natężenia przepływu wody w Recyrkulacyjnych Systemach Akwakulturowych (RAS) na straty energii

The influence of the method of regulating the water flow rate in Recirculating Aquaculture Systems (RAS) on energy losses

Łukasz Józefowicz, Anna Janicka, Maciej Zawisłak, Agnieszka Sobianowska-Turek*

Słowa kluczowe: *recyrkulujący system akwakulturowy (RAS), straty energii, zawór kulowy, zawór gilotynowy*

Streszczenie

Recyrkulacyjne systemy akwakultury (RAS) stają się przyszłością intensywnej hodowli owoców morza i ryb, ponieważ tylko w RAS możliwa jest intensywna hodowla owoców morza i ryb w pełni kontrolowanym środowisku, przy oszczędnej gospodarce zasobami pierwotnymi. Recyrkulacyjny system akwakultury jest hodowlą biodynamiczną, z jednoczesnym zanikiem wpływu na otaczające go ekosystemy, wpisującą się idealnie w gospodarkę o obiegu zamkniętym (GOZ).

W mniejszej pracy zaprezentowano wyniki wpływu sposobu regulacji natężenia przepływu wody w Recyrkulacyjnych Systemach Akwakulturowych (RAS) na straty energii wykazując, że pod kątem strat energii optymalną metodą regulacji natężenia przepływu wśród przebadanych jest wykorzystanie zaworu gilotynowego. Metoda ta charakteryzuje się najmniejszymi stratami energii w całym zakresie regulacji, umożliwia płynne sterowanie natężeniem przepływu, a dzięki sposobowi ustawiania stopnia zamknięcia zaworu za pomocą wysuwania dźwigni daje prosty sposób uzyskaniażądanego stopnia introwersji.

Keywords: *recirculating aquaculture system (RAS), energy loss, ball valve, guillotine valve*

Abstract

Recirculating aquaculture systems (RAS) are becoming the future of intensive seafood and fish farming, because only in RAS is it possible to intensively farm seafood and fish in a fully controlled environment with efficient management of primary resources. The recirculating aquaculture system is biodynamic farming with a minimal impact on the surrounding ecosystems, which fits perfectly into the circular economy (circular economy).

A smaller paper presents the results of the influence of the method of regulating the water flow rate in Recirculating Aquaculture Systems (RAS) on energy losses, showing that in terms of energy losses, the optimal method of regulating the flow rate among those tested is the use of a guillotine valve. This method is characterized by the lowest energy losses over the entire adjustment range, enables smooth control of the flow rate, and thanks to the method of setting the valve closing degree by extending the lever, it provides a simple way to obtain the desired degree of introversion.

1. Wstęp

Hodowla akwakulturowa, w tym hodowla wodnych roślin oraz zwierząt, jest najszybciej rozwijającą się gałęzią sektora produkcji żywności na świecie. W latach 2001-2008 rozwój tego typu hodowli odnotowywał średni wzrost na poziomie 5,3% rocznie. W 2018 roku produkcja akwakulturowa wynosiła 82,1 miliona ton, z czego aż 62% (51,3 milionów ton) to hodowla śródlądowa [6]. Szacuje się, że produkcja żywności z takich hodowli w 2050 r. osiągnie 140 milionów ton [12]. Hodowla akwakulturowa aktualnie stoi przed wyzwaniem związanym ze zmianami środowiskowymi. Podnoszenie się poziomu wód, globalne ocieplenie, powódzie, susza, wpływają negatywnie na warunki hodowli akwakulturowych. Recyrkulacyjne Systemy Akwakulturowe, które rozwijane są od lat 50. XX wieku są elementem koniecznym w hodowlach akwakultury, by doprowadzić do zrównoważonej hodowli roślin i zwierząt wodnych [1].

Recyrkulacyjne Systemy Akwakulturowe (RAS) to sposób hodowli polegający na odwzorowaniu warunków życia organizmów

w zbiornikach na lądzie. W systemach takich woda jest w obiegu zamkniętym (straty wody <10%), wszystkie parametry wody takie jak temperatura, natlenienie czy filtracja są kontrolowane, przez co uzyskiwane efekty są wyższe niż w przypadku hodowli tradycyjnych [11]. Ważnym parametrem, który bezpośrednio i pośrednio wpływa na jakość hodowli w tego typu systemach, jest natężenie przepływu. Przykładowo, w przypadku hodowli ryb, wymuszony wirowy obieg wody w zbiorniku musi być ściśle określony i regulowany. Odpowiednio wysoki ruch wody sprzyja usuwaniu ze zbiornika osadów takich jak resztki pokarmu oraz odchody, a co za tym idzie, prowadzi do bardziej sterylnych warunków w jakim przebywają zwierzęta. Należy mieć na uwadze, że ruch ten nie może być również zbyt duży, aby nie wywołać negatywnych skutków u żyjących w nich osobników. Wpływ na przepływ wody w zbiorniku ma również sam ruch i sposób poruszania się ryb, które w nim hodowane, dlatego ważne jest, by móc kontrolować ten parametr [10]. Woda, która opuszcza zbiorniki hodowlane i trafia do układu filtracji, również musi pokonywać kolejne jego etapy z odpowiednim natężeniem przepływu. Takie elementy układu filtracji jak filtry mechaniczne,

Łukasz Józefowicz ID – 0000-0002-2651-8268, lukasz.jozefowicz@pwr.edu.pl, Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Pojazdów, Wyb. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław; Anna Janicka ID – 0000-0001-6098-2921, anna.janicka@pwr.edu.pl, Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Pojazdów, Wyb. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław; Maciej Zawisłak ID – 0000-0001-9231-8945, maciej.zawislak@pwr.edu.pl, Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Pojazdów, Wyb. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław; Agnieszka Sobianowska-Turek (autor korespondencyjny), ID – 0000-0003-2154-8609, agnieszka.sobianowska-turek@pwr.edu.pl, Politechnika Wroclawska, Wydział Inżynierii Środowiska, Katedra Inżynierii Ochrony Środowiska, Wyb. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

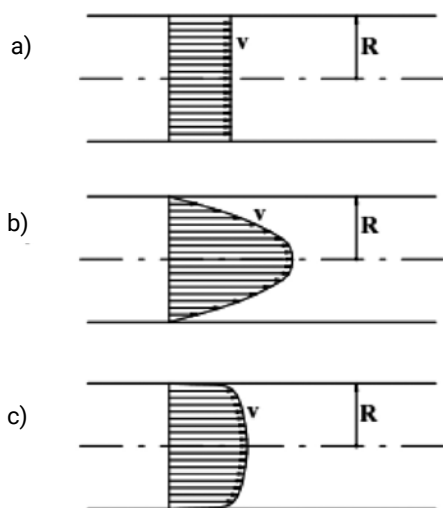
odpniacze białek, separatory piany czy filtry biologiczne (np. reaktory peryfitonowe [3]) wymagają określonego przepływu wody, aby zapewniać odpowiednią pracę [9]. Wysoka prędkość ruchu wirowego wody w zbiornikach, połączona ze zbyt niskim stopniem wymiany wody z układem filtracji oraz natleniania, może powodować spadek ilości tlenu rozpuszczonego w wodzie oraz wzrost trujących dla zwierząt substancji, takich jak np. amoniak, azotyny, azotany, co w konsekwencji może doprowadzić do zaburzenia wzrostu zwierząt, a także do zwiększenia śmiertelności [8].

Bardzo ważnym elementem takich hodowli jest ich energochłonność, którą należy minimalizować w każdym możliwym aspekcie, m.in. wydajność układu kontroli temperatury, wydajność układu filtracji, optymalizacja przepływu wody w układzie. W hodowli typu RAS wyznacza się ilość energii jaka została dostarczona do układu, by zwiększyć wagę zwierząt w nich hodowanych, najczęściej w jednostce [kWh/kg]. Parametr ten decyduje w dużej mierze o tym czy system hodowlany będzie przynosił zyski. Prowadząc badania oraz tworząc odpowiednie modele matematyczne dąży się do zminimalizowania wpływu hodowli zamkniętych na środowisko [2]. Do zrozumienia oraz optymalizacji modeli matematycznych koniecznym jest wyznaczenie strat energii na poszczególnych elementach układu, warto zwrócić uwagę na straty energii związane z przepływem wody przez elementy układu takiej jak zawory czy elementy zmieniające kierunek przepływu cieczy (kolana, trójniki, zwężki).

Jednym z elementów każdego układu obiegu zamkniętego są pompy, które wywołują wymuszony przepływ cieczy, w przypadku Recyrkulacyjnych Systemów Akwakulturowych wody. W przypadku konieczności zmniejszenia lub zatrzymania przepływu wody wykorzystuje się różne metody takie jak:

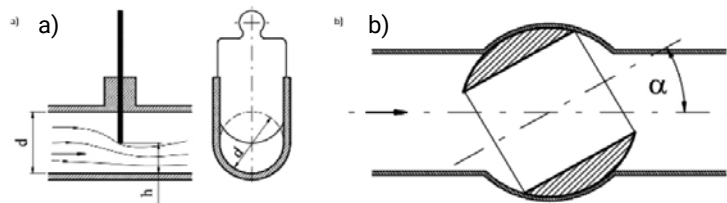
- założenie braku konieczności regulacji natężenia przepływu w układzie na poziomie projektowania systemu, wykonanie obliczeń, wykorzystanie pomp o stałej wydajności;
- wykorzystanie pomp o zmiennej wydajności w danym zakresie;
- regulacja natężenia przepływu za pomocą częściowego dławienia zaworów;
- wykorzystanie układów dodatkowych, by móc regulować wydajność pompy (np. autotransformatory, sterowniki mocy).

W przypadku przepływu cieczy przez długą rurę o stałej średnicy sposób przepływu przybierze charakterystyczną postać przedstawioną graficznie na rys. 1.



Rys. 1. Schematy profili prędkości w przepływie przez przewód kołowy: a) równomierny, b) paraboliczny, c) w pełni turbulentny [7]

Fig. 1. Diagrams of velocity profiles in the flow through a circular pipe: a) uniform, b) parabolic, c) fully turbulent [7]



Rys. 2. a) Przepływ przez zawór gilotynowy – zasuwę, b) przepływy przez zawór kulowy [7]
Fig. 2. a) Flow through the guillotine valve - gate valve, b) flows through the ball valve [7]

W przypadku wystąpienia jakiegokolwiek przeszkody, który wywoła zmianę kierunku przepływu lub jego części, dojdzie do wystąpienia strat energii większych niż w przypadku przepływu przez prostą rurę. Przepływ wody przez zawory i złączki powoduje zaburzenie przepływu powodując spadek ciśnienia, na który składają się [5]:

- spadek ciśnienia na samym zaworze;
- spadek ciśnienia w orurowaniu przed zaworem – większy niż ten występujący w rurze bez przeszkód;
- spadek ciśnienia w rurociągu wylotowym – większy niż ten występujący w rurze bez przeszkód.

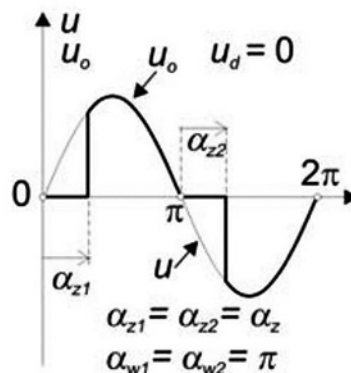
W badaniu pokazane zostały dwa typy zaworów; zawór gilotynowy oraz zawór kulowy, które przedstawiono schematycznie na rys. 2a i rys. 2b.

Drugim sposobem regulacji natężenia przepływu wody w układzie było sterowanie wydajnością pompy za pomocą regulatora mocy. Sterowanie mocą może odbywać się standardowo na trzy sposoby ze względu na sposób wyzwiania tyrystorów w sterownikach [4]:

- sterowanie fazowe (do płynnej regulacji napięcia odbiornika),
- sterowanie integracyjne impulsowe
- terowanie kluczowe.

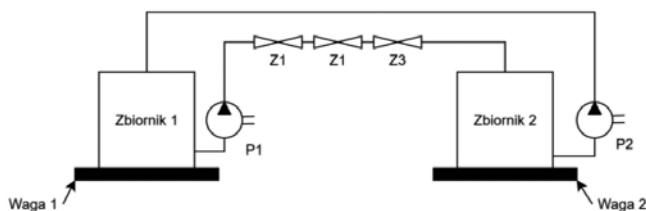
Wykorzystany w badaniu został sposób sterowania fazowego, które polega na zmianie fazy impulsów wyzwających względem napięcia anodowego tyrystora. Symetryczne sterowanie fazowe jest wykorzystywane głównie do regulacji w elektrotermii, w technice oświetlenia oraz napędach elektrycznych do napięciowej regulacji prędkości obrotowej silników komutatorowych prądu przemiennego oraz jako układ łagodnego rozruchu indukcyjnego dużej mocy [4]. Na rys. 3 przedstawiono schematycznie sposób sterowania fazowego symetrycznego.

W dalszej części pracy przedstawiono wyniki pomiarów wraz z ich dyskusją, których celem było wyznaczenie strat energii dla dwóch sposobów regulacji natężenia przepływu w Recyrkulacyjnych Systemach Akwakulturowych tj. regulacja z wykorzystaniem sterownika mocy oraz regulacja za pomocą częściowego dławienia zaworów; gilotynowego oraz kulowego. Wymienione metody mają tą zaletę, że na etapie projektowania systemu nie jest koniecznym całkowite zdefiniowanie natężenia przepływu w danym obiegu, dzięki tym rozwiązaniom możliwa jest regulacja tego parametru w trakcie pracy systemu. Jest to również rozwiązanie tańsze i prostsze niż stosowanie pompy o zmiennej wydajności.



Rys. 3. Sposób sterowanie fazowego symetrycznego [4]

Fig. 3. Phase-symmetric control method [4]



Rys. 4. Schemat stanowiska pomiarowego

Fig. 4. Diagram of the measurement station

2. Metoda badawcza

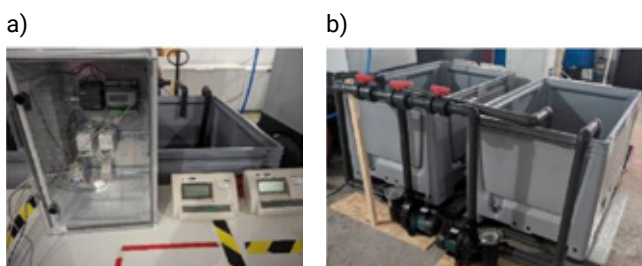
Na rys. 4 przedstawiono schemat stanowiska pomiarowego które zostało zbudowane w formie uproszczonego Recyrkulacyjnego Systemu Akwakulturowego (RAS).

Stanowisko pomiarowe składa się z następujących elementów:

- dwóch zbiorników wykonanych z polipropylenu o wymiarach wewnętrznych 111x71x61 cm i pojemności 535 litrów każdy;
- zbiorniki zostały umieszczone na wagach platformowych o maksymalnym obciążeniu 1500 kg i działce odczytowej 200 g;
- do przepompowywania wody zostały zainstalowane dwie pompy obiegowe Hydro-S SS020 o mocy 280 W;
- zainstalowane zostały dwa zawory kulowe wykonane z PVC-U Profec Safe 600 (średnica 50 mm) Z1 oraz Z3, które pozwalają na sprawną wymianę zaworu Z2;
- zawór Z2 jest zaworem, który był badany;
- zawór kulowy Profec Safe 600 (średnica 50 mm);
- zawór gilotynowy Profec type 8000 (średnica 50 mm);
- połączenie poszczególnych elementów układu zostały wykonane z rur oraz kolan klejonych wykonanych z PVC-U o średnicy 50 mm;
- sterownik mocy do zmiany wydajności pompy Lumel RP7;
- analizator parametrów sieci elektrycznej NR30IoT 1222MQUO.

Na rys. 5a oraz rys. 5b przedstawione zostały zdjęcia rzeczywistego układu zbudowanego na potrzeby eksperymentu.

Sposób przeprowadzania pomiaru przedstawiał się następująco: jeden ze zbiorników został napełniony około 450 litrami wody, wagi były tarowane, a następnie włączana była pompa, która przepompowywała wodę ze zbiornika 1 do zbiornika 2 poprzez rury, na których zamontowany był zawór Z2. W przypadku zaworu kulowego, przy każdej kolejnej serii pomiarów zawór był zamykany o konkretny kąt tj. 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, w przypadku zaworu gilotynowego był on zamykany o konkretną wysokość tj. 0 mm, 11,5 mm, 21,5 mm, 31,5 mm, 36,5 mm. Po przepompowaniu około 300 litrów wody odczytywany był pomiar z wag, a następnie uśredniany, w przypadku pomiaru zużycia energii z wygenerowanego wykresu wybierany był okres pracy pompy, a następnie wykres był całkowany z częstotliwością próbkowania na poziomie 1 sekundy. Dla części eksperymentu związanej ze sterownikiem mocy zawory Z1, Z2, Z3 były w pełni otwarte, regulacja sterownikiem mocy odbywała się za pomocą wygenerowanego sygnału typu PWM (modulacja szerokości impulsów), wykonane zostały pomiary dla wypełnienia 100%, 85%, 75%, 65%, 55%. Przepompowanie jałowe ze zbiornika 2 do zbiornika 1 odby-



Rys. 5. Zdjęcia stanowiska pomiarowego, a) część pomiarowa układu, b) zbiorniki wraz z pompami i orurowaniem oraz zaworami

Fig. 5. Photos of the measuring station, a) measuring part of the system, b) tanks with pumps, piping and valves

wało się bez pomiaru. Każdy pomiar powtórzony został minimum 5-krotnie dla uzyskania odpowiedniej statystyki.

3. Wyniki badań

Wyniki dla zaworu kulowego

W przypadku pomiarów zaworu kulowego, stopień dławienia przepływu nastawiany był poprzez stopniowe zakręcanie go przy pomocy dźwigni. Nastawiane były kolejne odchylenia od kąta prostego przy pomocy kątomierza, do analizy wyników wartości katowe zostały przeliczone na stopień zamknięcia zaworu, zostało to przedstawione w tab.1.

Tabela 1. Wpływ kąta obrotu dźwigni zaworu kulowego na stopień jego zamknięcia
Table 1. The influence of the angle of rotation of the ball valve lever on the degree of its closure

I.p.	Kąt obrotu dźwigni	Stopień zamknięcia zaworu
1.	0°	0%
2.	15°	33%
3.	30°	52%
4.	45°	75%
5.	60°	93%

W tab. 2 umieszczone zostały wyniki dla przedstawienia sposobu realizacji badania, reszta wyników zostanie przedstawiona przy pomocy wykresów dla porównania oraz wskazania korelacji.

Na rys. 6 przedstawiono na stosunek ilości pobranej energii w zależności od stopnia zamknięcia zaworu. Natomiast na rys. 7 przedstawiono stosunek natężenia przepływu w zależności od stopnia zamknięcia zaworu kulowego.

Z przedstawionych powyżej wykresów można wywnioskować, że zużycie energii potrzebnej na przepompowanie 1m³ wody wrasta intensywnie dopiero przy dużym stopniu zdławienia zaworu oraz jest wprost skorelowane ze spadkiem natężenia przepływu. W przypadku zaworu kulowego możliwe jest płynne sterowanie natężeniem przepływu w zakresie od maksymalnego do około 40% maksymalnego, poniżej tej wartości pompa nie mogła rozpocząć prawidłowej pracy.

Wyniki dla zaworu gilotynowego

W przypadku sterownika mocy, regulacja wydajnością pompy odbywa się poprzez podawanie na złącze sterujące sterownika sygnału PWM o danym wypełnieniu. Ważnym elementem w przypadku tej regulacji jest to, że pompa pracowała prawidłowo w przypadku ustawień w zakresie od 100% do 55% wypełnienia, poniżej tej wartości pompa nie była w stanie rozpocząć pracy. Ilość energii pobranej w stosunku do stopnia zamknięcia zaworu przedstawiono na rys. 8, a stosunek natężenia przepływu do stopnia zamknięcia zaworu na rys. 9.

W przypadku wykorzystania sterownika mocy możliwe było sterowanie natężeniem przepływu od maksymalnego do około 75% maksymalnego natężenia, co jest znacznym ograniczeniem w stosunku do stosowania zaworów kulowego lub gilotynowego do sterowania.

W tab. 3 przedstawione zostało porównanie trzech sposobów regulacji natężenia przepływu, najważniejsze dane z tab. 3 zostały zwizualizowane na wykresach na rys. 10, gdzie przedstawiono stosunek strat energii do stopnia zmniejszenia natężenia przepływu, natomiast na rys. 11 porównanie strat energii względem zmniejszenia natężenia przepływu.

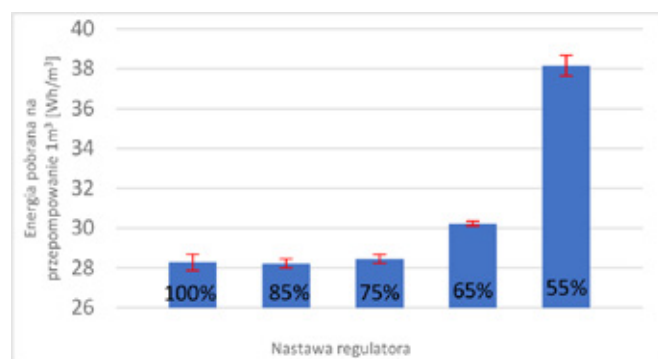
4. Wnioski

- Na podstawie powyższych wyników można jednoznacznie stwierdzić, iż:
1. regulacja natężenia przepływu jest możliwa z wykorzystaniem wszystkich trzech metod z uwzględnieniem faktu, że metoda wykorzystująca sterownik mocy umożliwia regulację jedynie

Tabela 2. Wyniki z pomiarów dla zaworu kulowego, wariant bez dławienia

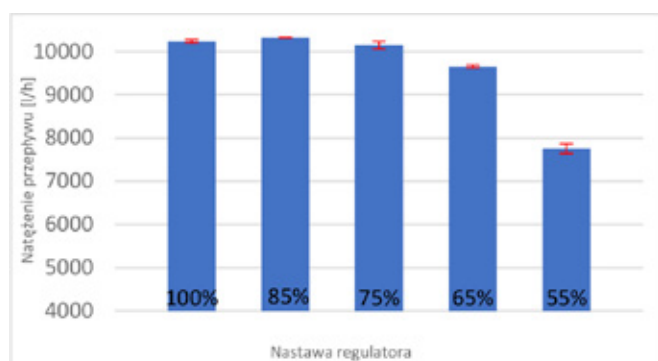
Table 2. Measurement results for a ball valve, non-throttling variant

Stopień zamknięcia zaworu 0%	Próba 1	Próba 2	Próba 3	Próba 4	Próba 5	Średnia	Odch. Standard
Energia pobrana [Ws]	39713,6	39360,0	39022,7	38600,9	39215,1	39182,5	368,4
Energia pobrana [Wh]	11,0	10,9	10,8	10,7	10,9	10,9	0,1
Czas pompowania [s]	133	133	134	132	135	133,4	1,02
Przepompowana woda [l]	385,5	384,4	383,4	384,0	386,3	384,7	1,0
Energia pobrana na przepompowanie 1 m ³ [Wh/m ³]	28,6	28,4	28,3	27,9	28,2	28,3	0,2
Natężenie przepływu [l/s]	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	0,0
Natężenie przepływu [l/h]	10434,6	10404,8	10300,3	10472,7	10301,3	10382,8	70,3



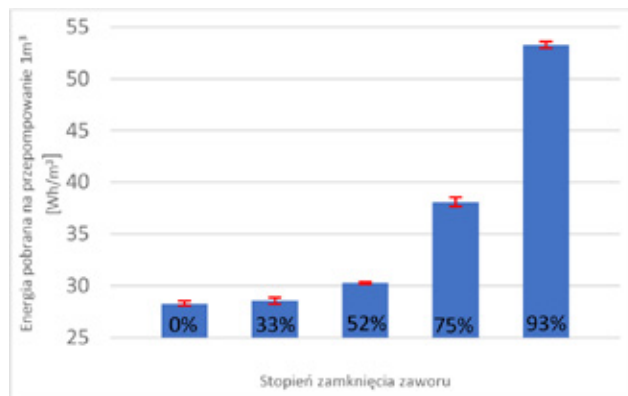
Rys. 6. Ilość pobranej energii na przepompowanie 1m³ wody w zależności od stopnia zamknięcia zaworu - zawór kulowy

Fig. 6. The amount of energy consumed to pump 1m³ of water depending on the degree of valve closure - ball valve



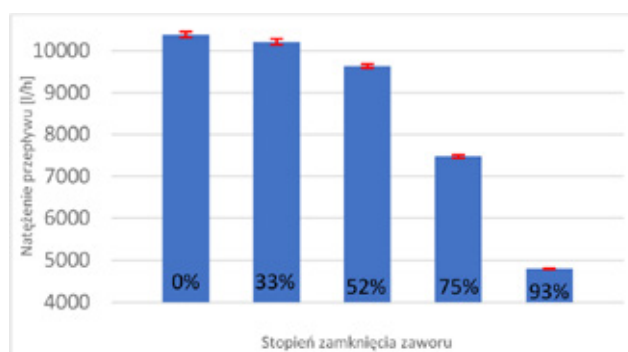
Rys. 7. Natężenie przepływu wody w zależności od stopnia zamknięcia zaworu - zawór kulowy

Fig. 7. Water flow rate depending on the degree of valve closure - ball valve



Rys. 8. Ilość pobranej energii na przepompowanie 1m³ wody w zależności od nastawy regulatora mocy

Fig. 8. The amount of energy consumed to pump 1m³ of water depending on the power regulator setting



Rys. 9. Natężenie przepływu wody w zależności od nastawy regulatora mocy

Fig. 9. Water flow rate depending on the power regulator setting

- w niewielkim stopniu, tj. dla zmniejszenia natężenia przepływu <10% wartości maksymalnej. Regulacja z wykorzystaniem zaworów kulowego oraz gilotynowego pozwala na szeroki zakres regulacji od 100% do 40% maksymalnego przepływu;
- pod kątem strat energii optymalną metodą regulacji natężenia przepływu wśród przebadanych jest wykorzystanie w tym celu zaworu gilotynowego. Metoda ta charakteryzuje się najmniejszymi stratami energii w całym zakresie regulacji, a także umożliwia płynne sterowanie natężeniem przepływu, a dzięki sposobowi ustawiania stopnia zamknięcia zaworu za pomocą wysuwania dźwigni zaworu, umożliwia prosty sposób uzyskaniażądanego stopnia zamknięcia zaworu;
 - wykorzystanie sterownika mocy do regulacji natężenia przepływu charakteryzuje się niskim poziomem strat energii dla operowalnego zakresu, co również jest warte rozważenia ze względu na bezpośrednią możliwość prowadzenia regulacji w sposób automatyczny, to nie jest możliwe w przypadku regulacji za pomocą zaworów, gdzie potrzebne byłoby opracowanie dodatkowego układu automatyki, opartego na siłownikach lub silnikach z enkoderami czy serwomechanizmach;

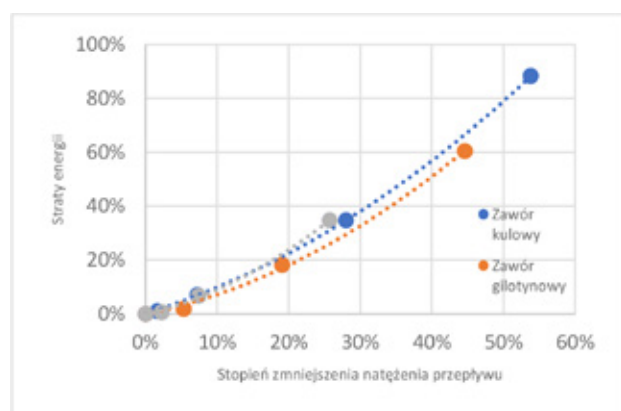
- tematem wartym dalszego rozważenia byłoby sprawdzenie długofalowego wpływu wymienionych sposobów regulacji na nadmierne niszczenie się elementów układu, dławienie zaworów powoduje wzrost ciśnienia w układzie przed zaworem, co może mieć destruktywny wpływ na same zawory, a także na pompy obiegowe, efekt ten nie zachodzi w przypadku regulacji za pomocą sterownika mocy;
- różnice w stratach energii pomiędzy przebadanymi metodami nie są duże (<5%), natomiast wziąć pod uwagę należy to, że w przypadku instalacji Recyrkulacyjnych Systemów Akwakulturowych (RAS) dąży się do minimalizacji zużycia energii, by doprowadzić do jak najbardziej zrównoważonej hodowli zwierząt wodnych. W systemach takich występowanie większej ilości pomp powoduje multiplikację strat energii, przez co zastosowanie odpowiedniej metody regulacji natężenia przepływu może doprowadzić do zauważalnego zysku energetycznego w całym układzie. ■

Artykuł powstał we współpracy z firmą Autocomp Management Sp. z o.o. ze Szczecina, Centrum Badawczo-Rozwojowe – Producent symulatorów na rynek wojskowy i cywilny z Polski.

Tabela 3. Zestawienie wyników dla trzech rodzajów regulacji natężenia przepływu

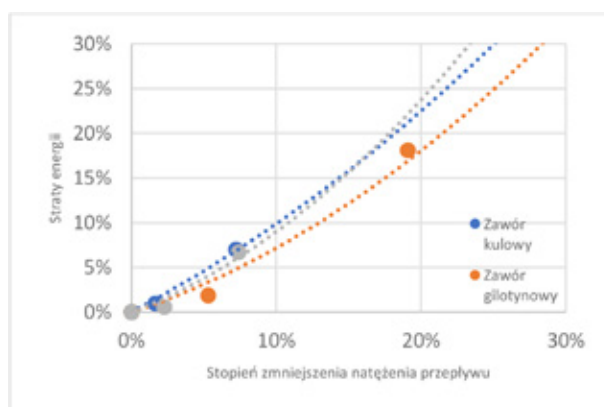
Table 3. Summary of results for three types of flow rate regulation

Zawór kulowy					
Kąt obrotu dźwigni zaworu	Rzeczywisty stopień zamknięcia zaworu	Zużycie energii na przepompowanie 1m ³ wody [Wh/m ³]	Natężenie przepływu [m ³ /h]	Zmniejszenie natężenia przepływu względem maksymalnego	Straty energii
0°	0%	28,3	10382,8	0,0%	0,0%
15°	33%	28,6	10210,4	1,7%	1,0%
30°	52%	30,3	9632,4	7,2%	7,0%
45°	75%	38,1	7476,1	28,0%	34,7%
60°	93%	53,3	4796,3	53,8%	88,3%
Zawór gilotynowy					
Wysunięcie dźwigni zaworu [mm]	Rzeczywisty stopień zamknięcia zaworu	Zużycie energii na przepompowanie 1m ³ wody [Wh/m ³]	Natężenie przepływu [m ³ /h]	Zmniejszenie natężenia przepływu względem maksymalnego	Straty energii
0	0%	27,9	10182,1	0,0%	0,0%
11,5	11%	28,0	10113,1	2,6%	-1,1%
21,5	35%	28,8	9831,3	5,3%	1,9%
31,5	65%	33,4	8402,0	19,1%	18,1%
36,5	83%	45,4	5751,9	44,6%	60,5%
Regulator mocy					
Nastawa wypełnienia PWM	Zużycie energii na przepompowanie 1m ³ wody [Wh/m ³]	Natężenie przepływu [m ³ /h]	Zmniejszenie natężenia przepływu względem maksymalnego	Straty energii	
100%	28,28	10243,49	0,0%	0,0%	
85%	28,18	10265,97	1,1%	-0,4%	
75%	28,45	10147,46	2,3%	0,6%	
65%	30,18	9614,34	7,4%	6,7%	
55%	38,12	7710,93	25,7%	34,7%	



Rys. 10. Porównanie strat energii względem zmniejszenia natężenia przepływu dla trzech sposobów regulacji

Fig. 10. Comparison of energy losses versus flow rate reduction for three control methods



Rys. 11. Porównanie strat energii względem zmniejszenia natężenia przepływu dla trzech sposobów regulacji - powiększenie początkowej części wykresu

Fig. 11. Comparison of energy losses versus flow rate reduction for three control methods - enlargement of the initial part of the graph

LITERATURA

- Ahmed Nesar, Thompson Shirley, Glaser Marion. 2019. "Global Aquaculture Productivity, Environmental Sustainability, and Climate Change Adaptability". Environmental Management 63 : 159–172, doi: 10.1007/s00267-018-1117-3.
- Ayuso-Virgili Gerard, Jafari Leila, Lande-Sudall David, Lümmen Norbert. 2023. "Linear modelling of the mass balance and energy demand for a recirculating aquaculture system". Aquacultural Engineering 101 : 102330, doi:10.1016/j.aquaeng.2023.102330.
- Bell N. Adam, Guttman Lior, Main Kevan, Nystrom Michael, Brennan P. Nathan, Ergas J. Sarina. 2023. Hydrodynamics of an integrated fish and periphyton recirculating aquaculture system, Algal Research 71 : 103028, doi:10.1016/j.algal.2023.103028.
- Borecki Józef, Stosur Mariusz, Szókolka Stanisław. 2008. „Energoelektronika”. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
- CRANE CO. 1982. "Flow of Fluids through valves, fittings and pipe". [Online]. Available: <https://vdocuments.net/crane-flow-of-fluids.html?page=1>
- FAO. 2020. "The State of World Fisheries and Aquaculture". [Online]. Available: <https://www.fao.org/3/ca9229en/CA9229EN.pdf>
- Jeżowiecka-Kabsch Kystyna, Szewczyk Henryk. 2001. „Mechanika płynów”. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
- Kamali Sara, Ward C.A. Valerie, Ricardez-Sandoval Luis. 2023. "Closed-loop operation of a simulated recirculating aquaculture system with an integrated application of nonlinear model predictive control and moving horizon estimation". Computers and Electronics in Agriculture 209 : 107820, doi:10.1016/j.compag.2023.107820
- Li Hao, Cui Zhengguo, Cui Hongwu, Bai Ying, Yin Zhendong, Qu Keming. 2023. "Hazardous substances and their removal in recirculating aquaculture systems: A review". Aquaculture 569 : 739399, doi:10.1016/j.aquaculture.2023.739399.
- Liu Haiibo, Zhou Yinxin, Ren Xiaozhong, Liu Shengshui, Liu Hangfei, Li Meng. 2023. "Numerical modeling and application of the effects of fish movement on flow field in recirculating aquaculture system". Ocean Engineering 285 (2) : 115432, doi:10.1016/j.oceaneng.2023.115432.
- Murray Francis, Bostock John, Fletcher David. 2014. Review of recirculation aquaculture system technologies and their commercial application. Highlands and Islands Enterprise. University of Stirling Aquaculture. [Online]. Available: https://dspace.stir.ac.uk/bitstream/1893/21109/1/HIE_RAS_Study_Final_Updated.pdf
- Waite R., Beveridge M., Brummett R., Castine S., Chaiyawannakam N., Kaushik S., Mungkung R., Nawapakpilai S., Phillips M. 2014. "Improving Productivity and Environmental Performance of Aquaculture". World Resources Institute, WashingtonDC. [Online]. Available: <https://thefishsite.com/articles/improving-productivity-and-environmental-performance-of-aquaculture#:~:text=We%20analyzed%20eight%20case%20studies%20from%20around%20the,publicly%20funded%20research%2C%20extension%2C%20and%20training%29%20Wi%2C4%29%20pozyccji>