

Kawitacja hydrodynamiczna jako metoda wstępnej obróbki odpadów lignocelulozowych

Hydrodynamic cavitation as a pretreatment method for lignocellulosic waste

Aleksandra Szaja^{*)}

Słowa kluczowe: kawitacja hydrodynamiczna, ścieki komunalne, odcieki składowiskowe, odpady lignocelulozowe

Streszczenie

W ciągu ostatnich lat kawitacja hydrodynamiczna (KH) wykazała potwierdzoną skuteczność w wielu dziedzinach inżynierskich, zarówno w technologii wody, ścieków i odpadów oraz w sektorze przemysłowym. W porównaniu do innych innowacyjnych metod, stosowanych w inżynierii środowiska, KH wykazuje szereg korzyści, charakteryzuje się m.in. prostą konstrukcją urządzeń, łatwą obsługą oraz niskimi kosztami eksploatacyjnymi. Co istotne, KH można łatwo połączyć z konwencjonalnymi i powszechnie stosowanymi technologiami w gospodarce odpadami oraz oczyszczaniu wody i ścieków. W pracy przedstawiono zbiór doświadczeń z zakresu zastosowania kawitacji hydrodynamicznej jako metody wstępnej obróbki odpadów lignocelulozowych, pozwalającej na poprawę ich stopnia biodegradowalności.

Keywords: hydrodynamic cavitation, municipal wastewater, landfill leachate, lignocellulosic waste

Abstract

In recent years, the effectiveness of hydrodynamic cavitation (HC) has been proven in many engineering fields. It has found several application in water, wastewater and waste technology, as well as in the industrial sector. Compared to other innovative methods used in environmental engineering, it presents several advantages, such as simple construction of reactors, easy operation and low operating costs. Importantly, HC can be easily combined with conventional and commonly used technologies in water and wastewater treatment, as well as waste management. The paper presents a set of experiences in the field of application hydrodynamic cavitation as a method of lignocellulosic waste pre-treatment, allowing for improving its biodegradability.

1. Wstęp

Obecnie ludzkość musi się mierzyć z szeregiem wyzwań, do których można zaliczyć postępujące zmiany klimatu, wyczerpywanie się surowców energetycznych oraz postępujący kryzys żywnościowy, wywołany obecną sytuacją geopolityczną. Dodatkowo, ze względu na zwiększającą się liczbę ludności na świecie oraz powiązaną z tym rozwijającą się produkcją, odnotowujemy stale zwiększającą się liczbę generowanych odpadów [25]. Szacuje się, że w ciągu najbliższych 40 lat światowe zużycie surowców, tj. biomasa, paliwa kopalne, metale i minerały podwoi się, natomiast ilość wytwarzanych rocznie odpadów wzrośnie o 70 % do 2050 r [6]. W tym kontekście właściwe zagospodarowanie odpadów może odegrać istotną rolę. Odpady są powszechnie uznawane za źródło zanieczyszczeń. Jednak odpowiednio wykorzystane mogą być cennym źródłem surowców oraz energii. Obecnie potencjał wielu produktów ubocznych, będących wynikiem działalności człowieka, nie jest odpowiednio wykorzystywany [15]. Z tego względu konieczna staje się zmiana podejścia w zakresie gospodarki odpadami. W tym celu Unia Europejska zobligowała Państwa członkowskie, aby do 2030 roku, wszystkie odpady, nadające się do poddania recyklingowi lub innemu procesowi odzysku, nie były deponowane na składowiskach [9]. Wymaga to podjęcia znaczących działań w zakresie zrównoważonej gospodarki odpadami. Spośród produktów ubocznych generowanych przez człowieka, problem zagospodarowania odpadów

lignocelulozowych nadal stanowi wyzwanie technologiczne i jest przedmiotem wielu badań [22, 34, 29]. Do tej grupy zalicza się powszechnie dostępne produkty uboczne generowane przez sektor rolny – spożywczy, leśny oraz celulozowo-papierniczy [34]. Są uznawane za najpowszechniej dostępny surowiec odnawialny. Szacuje się na świecie corocznie generuje się blisko 200 miliardów ton odpadów tego typu [33]. Obecnie znacząca ilość odpadów lignocelulozowych pozostaje niewykorzystana. Wynika to głównie z ich skomplikowanej i hierarchicznej budowy. Składają się one z trzech silnie powiązanych między sobą polimerów: celulozy (38–50%), hemicelulozy (23–32%) i ligniny (15–25%) [14]. W szczególności obecność dwóch ostatnich powoduje, że odpady tego typu wykazują znaczącą oporność na degradację chemiczną i biologiczną. Hemiceluloza jest polimerem tworzącym rozgałęzione łańcuchy ściśle połączone wiązaniami kowalencyjnymi i wodorowymi z celulozą i ligniną. Z kolei, lignina wykazująca największą odporność, stanowi zewnętrzną część komórki, przez co blokuje dostęp do polisacharyd enzymom hydrolitycznym [36]. Z tego względu, dalsze zagospodarowanie tej grupy odpadów wymaga zastosowania wstępnej obróbki. W tym celu wykorzystuje się metody fizyczne, chemiczne, biologiczne oraz ich kombinację [3,32]. Należy jednak zaznaczyć, że wiele z tych technik wymaga znaczących nakładów inwestycyjnych i eksploatacyjnych. Dodatkowo zastosowanie niektórych z nich może prowadzić do powstawania toksycznych produktów ubocznych,

^{*)} Aleksandra Szaja, dr inż., Politechnika Lubelska, Wydział Inżynierii Środowiska, Katedra Konwersji Biomasy i Odpadów w Biopaliwa, Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin, a.szaja@pollub.pl

ograniczając w ten sposób możliwość ich dalszego wykorzystania m.in. w procesach biologicznych. Fakt ten może również uniemożliwić ich zastosowanie jako surowiec w procesach produkcyjnych [13, 29]. Z tego względu ciągle poszukuje się nowych rozwiązań, pozwalających na wykorzystanie potencjału tej grupy odpadów.

W ciągu ostatnich lat kawitacja hydrodynamiczna (KH) wykazała potwierdzoną skuteczność w wielu dziedzinach inżynieryjnych [11, 29]. Jest to zjawisko tworzenia, wzrostu oraz implozji mikropęcherzyków lub kawern, występujące w niewielkich przedziałach czasowych, rzędu milisekund, uwalniające ogromną energię w miejscu transformacji. Występuje w cieczy na skutek zmian pola jej ciśnienia w czasie i przestrzeni. Zmiany te polegają na rozprężaniu się cieczy do poziomu ciśnienia krytycznego, przy którym pojawiają się przestrzenie nasycone parą oraz gazami rozpuszczonymi w cieczy tzw. pęcherzyki i kawerny kawitacyjne, a następnie na gwałtownym sprężaniu do poziomu ciśnienia, przy którym ma miejsce ich implozja, która skutkuje gwałtownym, uderzeniowym wzrostem ciśnienia rzędu 1 GPa oraz skoku temperatury do 10 000 K [2, 23]. Sam mechanizm jest niezwykle złożony i obejmuje szereg zjawisk, do których można zaliczyć rozkład termiczny, oddziaływanie fal uderzeniowych, sił tnących i gradientu ciśnienia oraz utlenianie z udziałem rodników hydroksylowych i reaktywnych atomów wodoru [8, 10].

Zjawisko kawitacji hydrodynamicznej znalazło zastosowanie jako skuteczna metoda dezynfekcji wody i ścieków. Było również wykorzystywane do degradacji złożonych związków organicznych, takich jak farmaceutyki, barwniki, pestycydy, fenole czy związki humusowe [8]. HK znalazła również wiele przemysłowych zastosowań m.in. do wytwarzania biodiesla [31], ekstrakcji substancji czynnych [27] oraz w produkcji żywności [16]. Jako metoda wstępnej obróbki była wykorzystywana do poprawy stopnia biodegradowalności biomasy lignocelulozowej, odpadów chitynowych, alg oraz odcieków składowiskowych [29] oraz dezintegracji osadu czynnego [8]. W porównaniu do innych innowacyjnych technologii stosowanych w inżynierii środowiska KH wykazuje szereg korzyści. Urządzenia do kawitacji charakteryzują się prostą konstrukcją, a co za tym idzie łatwą obsługą. Dodatkowo zastosowanie tej metody wiąże się z niższymi kosztami eksploatacyjnymi ze względu na stosunkowo niskie zużycie energii oraz brak konieczności dozowania reagentów, co ma miejsce np. w metodach chemicznych [16, 36]. Należy również zaznaczyć, że kawitację można łatwo połączyć z konwencjonalnymi i powszechnie stosowanymi technologiami w gospodarce odpadami oraz oczyszczaniu wody i ścieków. Ten ostatni czynnik ma szczególne znaczenie mając na uwadze wdrożenie tej technologii w skali technicznej [11].

Pomimo szeregu zalet zastosowanie kawitacji hydrodynamicznej posiada swoje ograniczenia i wymaga analizy szeregu czynników. Decydujący wpływ na skuteczność tej metody posiada wybór odpowiedniego medium tzw. nośnika. Do tej pory najwięcej doniesień literaturowych dotyczyło zastosowania kawitacji hydrodynamicznej do obróbki samej cieczy [8]. Badania dotyczące mieszanin nadal stanowią rzadkość. Jednak mając na uwadze zrównoważony rozwój oraz założenia gospodarki o obiegu zamkniętym zastosowanie wód zanieczyszczonych jako nośnik dla odpadów lignocelulozowych wydaje się być szczególnie korzystne. Należy jednak zaznaczyć, że kawitacja mieszanin może być problematyczna, ze względu na możliwość wtórnego zanieczyszczenia wywołanego poprzez produkty uboczne wytwarzane w trakcie kawitacji [29].

Kolejnym limitującym czynnikiem może być zawartość suchej masy odpadów (sm) w kawitowanej mieszaninie. W zależności od konstrukcji reaktora oraz przyjętych parametrów operacyjnych zawartość sm może wahać się w szerokim zakresie 1-16% [4, 30]. Jednak należy zaznaczyć, że dotychczas przeprowadzone badania wykazały, że niska zawartość sm poniżej 5% w/w wykazuje wyższą skuteczność w zakresie destrukcji złożonych związków organicznych. Efekt ten był osiągany głównie dzięki zintensyfikowanemu transferowi masy [30]. Z kolei, kawitacja mieszanin o zawartości

sm na poziomie 5-15% jest bardziej opłacalna ze względu na niższe nakłady energetyczne [7, 26, 29]. Pomimo ostatnich postępów w tej dziedzinie oraz licznych badań, wiele mechanizmów zachodzących w trakcie tego zjawiska wciąż nie jest dobrze poznany [29]. Na intensywność kawitacji hydrodynamicznej wpływa szereg czynników, do których można zaliczyć m.in.: wielkość i kształt przegrody/przewężenia (wzбудnika kawitacji) i komory przepływowej, przyjęte parametry operacyjne (prędkość przepływu strumienia, ciśnienie cieczy i ilość cykli kawitacyjnych) oraz charakterystyka medium (temperatura, lepkość, gęstość, napięcie powierzchniowe i zawartość rozpuszczonych gazów) i kawitowanych odpadów. Efektywność technologiczna i energetyczna kawitacji uzależniona jest od wszystkich wspomnianych parametrów. Z tego względu, zastosowanie tej technologii wymaga prowadzenia badań optymalizacyjnych dla każdego z zastosowanych odpadów [11, 21]. Zastosowanie KH jako metody wstępnej obróbki odpadów lignocelulozowych może pozwolić na skuteczne wykorzystanie ich potencjału energetycznego oraz surowcowego [29].

W pracy przedstawiono zbiór doświadczeń z zakresu zastosowania kawitacji hydrodynamicznej jako metody pozwalającej na poprawę stopnia biodegradowalności odpadów lignocelulozowych. Odpady lignocelulozowe w postaci młóta browarniczego (MB) były zawieszane dwóch różnych nośnikach: wstępnie podczyszczonych ściekach komunalnych (ŚK) oraz odciekach składowiskowych (OS).

2. Materiały i metody badań

2.1. Substraty

W przeprowadzonych badaniach jako odpad lignocelulozowy wykorzystano młóto browarnicze, pochodzące z browaru rzemieślniczego zlokalizowanego w Lublinie. Jest to główny odpad stały generowany przez browar, powstaje po odfiltrowaniu brzeczki w procesie warzenia piwa. W trakcie prowadzenia badań do produkcji piwa wykorzystywano sład jęczmienny. Substrat bezpośrednio po pobraniu był transportowany do laboratorium, gdzie był rozdrabniany do uzyskania wielkości frakcji wynoszącej 2 mm. Substrat przygotowany w ten sposób był przechowywany w chłodni laboratoryjnej w temperaturze 4°C nie dłużej niż 24h.

Jako nośniki dla MB zastosowano: ścieki komunalne oraz odcieki składowiskowe. Pierwszy z nich pochodził z oczyszczalni ścieków komunalnych Hajdów (Lublin) o przepływie wynoszącym 120 000 m³/d. Próbką w ilości 35 L była pobierana z kolektora odprowadzającego ścieki po mechanicznym stopniu. Z kolei, odcieki były pobierane ze składowiska odpadów komunalnych zlokalizowanych w Rokitnie o wieku ponad 20 lat i powierzchni wynoszącej ponad 38 ha. Jak poprzednio próbka była pobierana w ilości 35 L i bezpośrednio transportowana do laboratorium. Po każdym pobraniu skład wykorzystanych substratów był oznaczany (tab. 1).

Tabela 1. Charakterystyka substratów wykorzystywanych w badaniach

Table 1. Characteristics of the substrates used in the study

Parametr	Jednostka	ŚK	OS	MB
ChZT	mg/L * g/kg	630±62	6140±83	307.9±9.2
ChZT _{rozp}	mg/L	465±47	4771±37	-
sm	g/kg	-	13.5±0.2	223.9±4.3
smo	g/kg	-	3.7±0.05	217.2±4.2

2.2. Założenia i opis eksperymentów

Założono przeprowadzenie 4 serii pomiarowych. Serie oznaczone jako S1 oraz S3 stanowiły próby kontrolne, w których zaplanowano kawitację samej cieczy, czyli ŚK oraz OS. Z kolei, w seriach S2 oraz S4 prowadzono kawitację mieszanin MB z wybranymi nośnikami (tab.2).

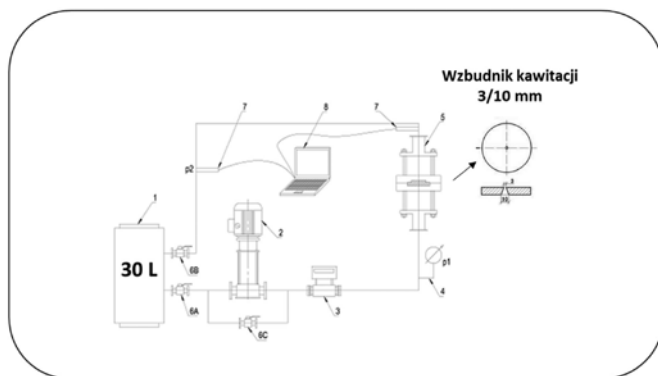
Tabela 2. Warunki operacyjne oraz liczba kawitacji w poszczególnych seriach
Table 2. Operational conditions and the cavitation number in corresponding series

Seria	Substrat	Liczba kawitacji
S1	ŚK	0.031
S2	ŚK + MB	0.032
S3	OS	0.035
S4	OS + MB	0.039

Za każdym razem do 30 L nośnika dodawano 900 g MB, tak aby utrzymać zawartość sm w kawitowanej mieszaninie na poziomie 1%. W każdej serii pomiarowej przyjęto takie same parametry operacyjne, czyli ciśnienie 7 bar, 30 przejść przez strefę kawitacji, jako wzbudnik kawitacji zastosowano przegrodę ze stożkowym, centralnie umieszczonym otworem o średnicy wlotowej 3 mm i średnicy wylotowej 10 mm. Każdą serię powtórzono trzykrotnie, przedstawione wyniki są wartościami średnimi, za każdym razem przygotowywano nową porcję substratów, oznaczano również ich skład.

2.3. Stanowisko badawcze

W przeprowadzonych badaniach wykorzystano stanowisko badawcze do generowania kawitacji hydrodynamicznej, składające się z: reaktora kawitacyjnego wraz ze wzbudnikiem kawitacji, pompy (maksymalne ciśnienie pracy 10 bar i mocy 1,5 kW, sterowanej falownikiem), zbiornika cyrkulacyjnego (pojemność czynna 30 L), manometrów piezoelektrycznych, przepływomierza elektromagnetycznego, manometru sprężynowego, sytemu przewodów wraz z zaworami regulacyjnymi oraz odcinającymi. Dodatkowo stanowisko było wyposażone w komputerowy system zbierania i przetwarzania danych pomiarowych. Układ pracował w tzw. „w pętli”, czyli medium było pobierane ze zbiornika cyrkulacyjnego za pomocą pompy do reaktora kawitacyjnego, po przejściu przez strefę kawitacji powracało z powrotem do zbiornika cyrkulacyjnego, skąd ponownie było pobierane przez pompę. Takie rozwiązanie pozwalało na kilkukrotne przejście danego medium przez strefę kawitacji. Schemat wykorzystanego stanowiska badawczego umieszczono na rys. 1.

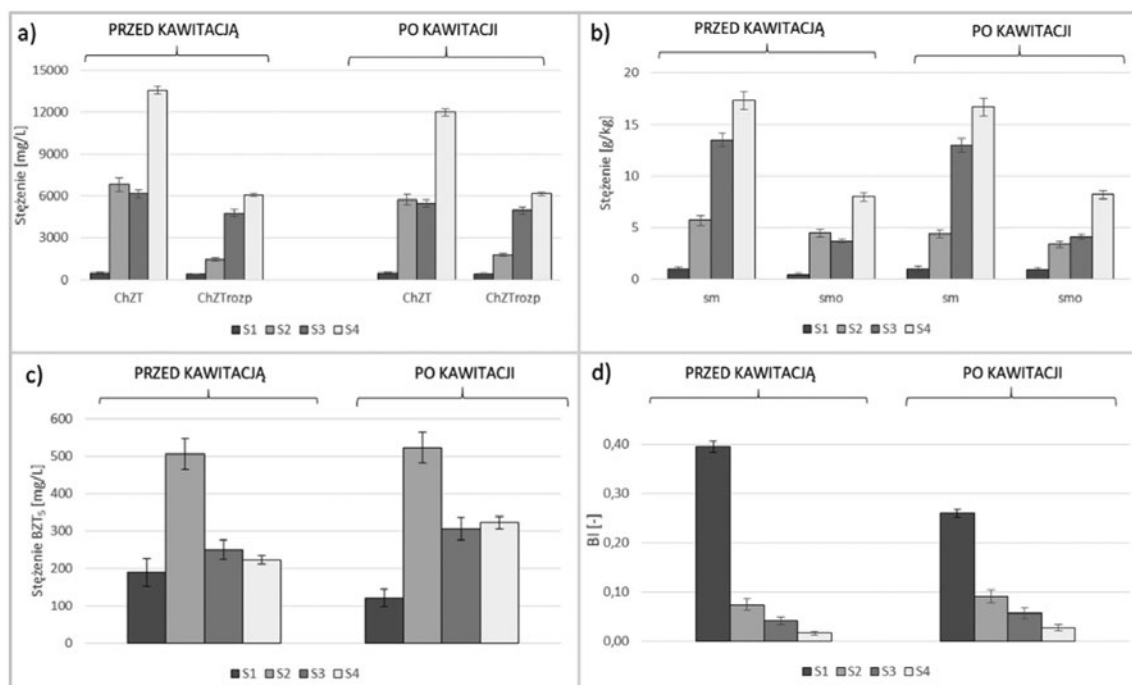


Rys. 1. Schemat stanowiska badawczo-pomiarowego 1 – zbiornik cyrkulacyjny, 2 – pompa, 3 – przepływomierz elektromagnetyczny, 4 – manometr, 5 – reaktor hydrokawitacyjny, 6 – zawory, 7 – manometry piezoelektryczne, 8 – komputerowy system zbierania i przetwarzania danych pomiarowych [21]

Fig. 1. Scheme of experimental set-up 1 – circulation tank, 2 – pump, 3 – electromagnetic flow meter, 4 – manometer, 5 – hydrodynamic cavitation device, 6 – valve, 7 – piezoelectric pressure gauges, 8 – computer unit [21].

2.4. Metody analityczne

W wykorzystanych materiałach oznaczano stężenia związków organicznych wyrażonych jako chemiczne zapotrzebowanie na tlen (ChZT), biologiczne zapotrzebowanie na tlen (BZT₅), sm i sucha masa organiczna (smo). W supernatancie powstałym w wyniku odwirowania próbki oznaczano stężenia rozpuszczonych związków organicznych wyrażonych jako ChZT_{rozp}. Analizy suchej masy oraz suchej masy organicznej wykonywano zgodnie z polską normą PN-EN 12880:2004 (Charakterystyka osadów ściekowych – Oznaczanie suchej pozostałości i zawartości wody). Natomiast pozostałe wskaźniki oznaczono z wykorzystaniem spektrofotometru Hach Lange DR 3900 VIS o zakresie długości fali wynoszącym od 340 do 900 nm, zgodnie z procedurami podanymi przez producenta. Każdy pomiar wykonywano w trzech powtórzeniach, w tabelach prezentowane są wartości średnie wraz z odchyleniami standardowymi. Wszystkie wymienione wskaźniki oznaczano przed rozpoczęciem kawitacji oraz po skończeniu eksperymentu. Do oceny wpływu wykorzystano wskaźnik biodegradowalności (BI) wyznaczany jako stosunek BZT₅ do ChZT.



Rys. 2. Charakterystyka mieszanin przed i po procesie kawitacji hydrodynamicznej. [18,21]

Fig. 2. Characteristics of mixtures before and after the hydrodynamic cavitation process [18,21]

3. Wyniki i ich dyskusja

Charakterystykę substratów zastosowanych w przeprowadzonych eksperymentach przedstawiono w tab. 1. Wykorzystane podczas badań ŚK, wykazywały typową charakterystykę dla ścieków po mechanicznym stopniu oczyszczania [20]. W porównaniu do pozostałych wykorzystywanych materiałów charakteryzowały się najwyższym wskaźnikiem BI oraz niską zawartością ChZT, ChZT_{rozp}, sm oraz smo. Z kolei, odcieki składowiskowe wykazywały wysoką zawartość ChZT oraz ChZT_{rozp}. Natomiast wartość wskaźnika BI poniżej 0.1 potwierdzała fakt, że pochodzą one ze składowisk ustabilizowanych o wieku powyżej 10 lat i stanowią substrat trudno biodegradowalny [1]. Należy zaznaczyć, że efektywne zagospodarowanie tej grupy odcieków nadal stanowi poważny problem i wymaga zastosowania zaawansowanych technologii [5].

Na podstawie uzyskanych danych stwierdzono również, że dodatek MB wpłynął na wzrost wartości ChZT, ChZT_{rozp}, sm oraz smo w obu mieszaninach przed KH, największe zmiany uzyskano dla ChZT. Wynikały one ze składu młóta wykorzystanego w badaniach i wysokiej zawartości tych wskaźników w tym materiale (tab. 1). Tylko w przypadku OS doprowadzenie MB skutkowało niewielkim spadkiem BZT₅ (S4). Na uwagę zasługuje fakt, że zastosowanie MB skutkowało znaczącym pogorszeniem wskaźnika biodegradowalności. W porównaniu do prób kontrolnych odnotowano spadki wynoszące ponad 80 i 60% odpowiednio dla S2 i S4 (rys. 2d). Jest to szczególnie istotne mając na uwadze dalsze wykorzystanie tych mieszanin w procesach biologicznych.

W wyniku kawitacji hydrodynamicznej, we wszystkich analizowanych przypadkach uzyskano spadek wartości ChZT, w porównaniu do mieszanin przed procesem (rys. 2a). Największe stopnie redukcji uzyskano dla mieszanin młóta ze ściekami oraz odciekami, wynoszące odpowiednio 15 i 11% dla S2 oraz S4. Obserwowane zmiany wynikały z destrukcji związków organicznych, zachodzących w trakcie KH. Z kolei, w wyniku solubilizacji odnotowano uwalnianie substancji rozpuszczonych „wyrażonych jako ChZT_{rozp}”. W porównaniu do mieszanin przed KH, największy ponad 20% wzrost ChZT_{rozp} uzyskano dla MB zawieszonych w ŚK (S2). Najmniejszy wpływ kawitacji uzyskano dla sm i smo (rys. 2b). W tym przypadku w większości analizowanych przypadków uzyskano niewielki spadek sm w kwitowanej mieszaninie. Wyjątek stanowiła seria S1, w tym przypadku uzyskano porównywalne wyniki przed i po KH.

Największe zmiany uzyskano w stosunku do indeksu biodegradowalności. W porównaniu do mieszanin przed kawitacją, w prawie wszystkich przypadkach uzyskano poprawę tego wskaźnika, największy blisko 69% dla mieszaniny MB i OS (S4). W pozostałych przypadkach odnotowano wzrost o ponad 22% i 36% odpowiednio w S2 oraz S3 (rys. 2d). Korzystny wpływ kawitacji na wskaźnik BI uzyskano również w przypadku kwitacji ścieków pochodzących z przemysłu farmaceutycznego [17], tekstylnego [28], gorzelnian [24], [5, 12] oraz ścieków komunalnych [11]. Odnotowane zmiany wynikały zarówno z wpływu podwyższonego ciśnienia i temperatury oraz w mniejszym stopniu oddziaływania rodników hydroksylovych i reaktywnych atomów wodoru. Zastosowana w badaniach przegroda powoduje, że podczas kawitacji przeważają mechanizmy fizyczne, natomiast utlenianie rodnikowe jest ograniczone [35]. Na uwagę zasługuje fakt, że w przypadku serii S1, w której zastosowano ścieki komunalne zaobserwowano spadek BI o blisko 40%. Badania przeprowadzone przez Lebiocką (2020) [19] wykazały wzrost tego wskaźnika, jednak był odnotowany przy innych warunkach operacyjnych, czyli ciśnieniu 5 bar i czasie kawitacji wynoszącym 30 min. Co istotne, takie wyniki uzyskano dla takiego samego wzbudnika kawitacji jak ten wykorzystywany w tych badaniach, czyli przegrody ze stożko-

wym, centralnie umieszczonym otworem o średnicach 3/10 mm. Potwierdza to konieczność prowadzenia badań optymalizacyjnych dla danego medium. Obejmują one wpływ m.in. wzbudnika kawitacji oraz parametrów operacyjnych tj. ciśnienie, ilość cykli, prędkość przepływu.

Niemniej istotny jest również czynnik ekonomiczny związany z zużyciem energii na przeprowadzenie kawitacji, na który decydujący wpływ mają zastosowane ciśnienie i czas. Kolejną kwestią jaką należy uwzględnić prowadząc badania KH jest powstawanie toksycznych produktów generowanych w trakcie tego zjawiska. Dotychczas przeprowadzone badania wykazały, że w trakcie kawitacji OS i MB obserwuje się obecność związków aromatycznych [18]. Dlatego też pomimo poprawy biodegradowalności tej mieszaniny generowanie toksycznych produktów w trakcie KH może ograniczyć jej dalsze wykorzystanie np. w procesie fermentacji metanowej.

4. Wnioski

Uzyskane wyniki badań wskazują na możliwość zastosowania KH jako metody wstępnej obróbki odpadów różnego typu, w tym odpadów trudno podatnych na degradację. W kawitowanych mieszaninach z MB odnotowano poprawę wskaźnika biodegradowalności będącą wynikiem destrukcji złożonych związków organicznych zachodzących w skutek oddziaływania podwyższonego ciśnienia, temperatury oraz oddziaływania rodników. Jednak ze względu na generowanie w trakcie kawitacji mieszaniny młóta i odcieków składowiskowych związków aromatycznych, takie rozwiązanie nie jest zalecane. Uzyskane wyniki badań wskazują również na konieczność prowadzenia badań optymalizacyjnych dla każdego zastosowanego odpadu oraz dokładną analizę kawitowanych mieszanin, głównie ze względu na możliwość wtórnego zanieczyszczenia w trakcie tego zjawiska. ■

LITERATURA

- [1] Abuabdou Salahaldin M.A., Waseem Ahmad, Ng Choon Aun, Mohamed J. K. Bashir. 2020. „A review of anaerobic membrane bioreactors (AnMBR) for the treatment of highly contaminated landfill leachate and biogas production: Effectiveness, limitations and future perspectives”. *Journal of Cleaner Production* 255:120215.
- [2] Arrojo, Sara Fernández, Yolanda Benito. 2008. „A theoretical study of hydrodynamic cavitation”. *Ultrasonics sonochemistry* 15 (3): 203-11 .
- [3] Beig, Bilal, Muhammad Riaz, Salman Raza Naqvi, Muhammad Hassan, Zhifeng Zheng, Keikhosro Karimi, Arivalagan Pugazhendhi, Abdulaziz Atabani and Nguyễn Thuy Lan Chi. 2020. „Current challenges and innovative developments in pretreatment of lignocellulosic residues for biofuel production: A review”. *Fuel* 287: 119670.
- [4] Bimestre Thiago Averaldo, José Antonio Mantovani Júnior, César Augusto Botura, Eliana Vieira Canettieri, Celso Eduardo Tuna. 2020. „Theoretical modeling and experimental validation of hydrodynamic cavitation reactor with a Venturi tube for sugarcane bagasse pretreatment”. *Bioresource technology* 311: 123540 .
- [5] Bis Marta, Montusiewicz Agnieszka, Ozonek Janusz, Pasieczna-Patkowska Sylwia. 2015. „Application of hydrodynamic cavitation to improve the biodegradability of mature landfill leachate”. *Ultrasonics Sonochemistry* 26:378-387.
- [6] COM/2020/98 Komunikat Komisji Do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego I Komitetu Regionów. Nowy plan działania UE dotyczący gospodarki o obiegu zamkniętym na rzecz czystszej i bardziej konkurencyjnej Europy.

- [7] Devadasu Sushmitha, Saurabh M. Joshi, Parag Ratnakar Gogate, Shishir Hari Sonawane, Srinath Suranani. 2019. „Intensification of delignification of *Tectona grandis* saw dust as sustainable biomass using acoustic cavitation devices”. *Ultrasonics sonochemistry* 63: 104914
- [8] Dular Matevž, Griessler-Bulc Tjaša, Gutierrez-Aguirre Ion, Heath Ester, Kosjek Tina, Krivograd Klemenčič Aleksandra, Oder Martina, Petkovšek Martin, Rački Nejc, Ravnikar Maja, Šarc Andrej, Širok Brane, Zupanc Mojca, Žitnik Miha, Kompare Boris. 2016. „Use of hydrodynamic cavitation in (waste)water treatment”. *Ultrasonics sonochemistry*, 29: 577–588.
- [9] Dz.U.2021.2151 Ustawa z dnia 17 listopada 2021 r. o zmianie ustawy o odpadach oraz niektórych innych ustaw
- [10] Gągol, Michał, Andrzej Przyjazny, Grzegorz Boczkaj. 2018. „Wastewater treatment by means of advanced oxidation processes based on cavitation – A review”. *Chemical Engineering Journal* 338: 599-627.
- [11] Gogate Parag Ratnakar, Abhijeet M. Kabadi. 2009. „A review of applications of cavitation in biochemical engineering/biotechnology”. *Biochemical Engineering Journal* 44: 60-72.
- [12] Gutiérrez-Mosquera Luis F., Arias-Giraldo Sebastián, and Zuluaga-Meza Alejandro. 2022. „Landfill leachate treatment using hydrodynamic cavitation: exploratory evaluation”. *Heliyon* 8 (3) (2022): e09019.
- [13] Hassan Shady S., Williams Gwilym A., Jaiswa Amit K. 2018. „Emerging technologies for the pretreatment of lignocellulosic biomass”. *Bioresource technology* 262: 310–318.
- [14] Ho Mun Chun, Victor Zhenquan Ong, Ta Yeong Wu. 2019. „Potential use of alkaline hydrogen peroxide in lignocellulosic biomass pretreatment and valorization – A review”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 112: 75-86.
- [15] Kainthola Jyoti, Ajay S. Kalamdhad, Vaibhav V. Goud. 2019. „A review on enhanced biogas production from anaerobic digestion of lignocellulosic biomass by different enhancement techniques” *Process Biochemistry* 84: 81-90.
- [16] Kataraya Prateek, Shalini Subhash Arya, Aniruddha Bhalchandra Pandit. 2020. „Novel, non-thermal hydrodynamic cavitation of orange juice: Effects on physical properties and stability of bioactive compounds”. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 62: 102364.
- [17] Lalwani Jitesh, Ashutosh Gupta, Shashidhar Thatikonda, Ch. Subrahmanyam. 2020. „Oxidative treatment of crude pharmaceutical industry effluent by hydrodynamic cavitation”. *Journal of environmental chemical engineering* 8: 104281.
- [18] Lebiocka Magdalena, Agnieszka Montusiewicz, Sylwia Pasieczna-Patkowska, Sławomir Gułkowski. 2021. „Mature Landfill Leachate as a Medium for Hydrodynamic Cavitation of Brewery Spent Grain”. *Energies* 14(4): 1150.
- [19] Lebiocka Magdalena. 2020. „Application of Hydrodynamic Cavitation to Improve the Biodegradability of Municipal Wastewater”. *Journal of Ecological Engineering* 21: 155-160.
- [20] Metcalf & Eddy Inc., George Tchobanoglous, Franklin L. Burton, Ryujiro Tsuchihashi, H. David Stensel. 2013. *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. 5th ed. New York, NY: McGraw-Hill Professional.
- [21] Montusiewicz Agnieszka, Sylwia Pasieczna-Patkowska, Magdalena Lebiocka, Aleksandra Szaja, Monika Szymańska-Chargot. 2017. „Hydrodynamic cavitation of brewery spent grain diluted by wastewater”. *Chemical Engineering Journal* 313: 946-956.
- [22] Olatunji, O., Akinlabi, S., Madushele, N. 2020. „Application of Lignocellulosic Biomass (LCB). In: Daramola, M., Ayeni, A. (eds) *Valorization of Biomass to Value-Added Commodities*”. *Green Energy and Technology*. Springer, Cham.
- [23] Ozonек Janusz. 2010. „Zastosowanie zjawiska kawitacji hydrodynamicznej w inżynierii środowiska”. Polska Akademia Nauk, Komitet inżynierii środowiska, Monografie nr 87.
- [24] Padoley K. V., Virendra Kumar Saharan, Sandeep Narayan Mudliar, R A Pandey, Aniruddha Bhalchandra Pandit. 2012. „Cavitationally induced biodegradability enhancement of a distillery wastewater”. *Journal of hazardous materials* 219-220: 69-74 .
- [25] Paris Bas, Foteini Vadorou, Dimitrios Tyris, Athanasios T. Balafoutis, Konstantinos Vaiopoulos, George Kyriakarakos, Dimitris Manolagos, George Papadakis. 2022. „Energy Use in the EU Livestock Sector: A Review Recommending Energy Efficiency Measures and Renewable Energy Sources Adoption”. *Applied Sciences* 12 (4): 2142.
- [26] Prado Carina Aline, Felipe Antônio Fernandes Antunes, Thalita Rocha, Salvador Sánchez-Muñoz, Fernanda Gonçalves Barbosa, R. Terán-Hilares, Mónica María Cruz-Santos, Gevanil Lene Arruda, Silvio S. da Silva and J.C. Santos. 2021. „A review on recent developments in hydrodynamic cavitation and advanced oxidative processes for pretreatment of lignocellulosic materials”. *Bioresource technology* 345: 126458
- [27] Roohinejad Shahin, Mohamed Koubaa, Francisco Jose Barba, Ralf Greiner, Vibeke Orlien and Nikolai I. Lebovka. 2016. „Negative pressure cavitation extraction: A novel method for extraction of food bioactive compounds from plant materials”. *Trends in Food Science and Technology* 52: 98-108.
- [28] Singh Sanyukta, Shrikant Bhausaheb Randhavane. 2022. „Hydrodynamic Cavitation: Its optimization and potential application in treatment of Pigment Industry Wastewater”. *Materials Today: Proceedings* 61 (2): 523-529.
- [29] Sun Xun, Shuai Liu, Xinyan Zhang, Yang Tao, Grzegorz Boczkaj, Joon Yong Yoon and Xiaoxu Xuan. 2021. „Recent advances in hydrodynamic cavitation-based pretreatments of lignocellulosic biomass for valorization”. *Bioresource technology* 345, 126251.
- [30] Terán Hilares Ruly, Júlio César dos Santos, Muhammad Ajaz Ahmed, Seok Hwan Jeon, Silvio S. da Silva, Jong-In Han. 2016. „Hydrodynamic cavitation-assisted alkaline pretreatment as a new approach for sugarcane bagasse biorefineries”. *Bioresource technology* 214: 609-614.
- [31] Thakkar Kartik, Surendra Singh Kachhwaha, Pravin V Kodgire. 2022. „Multi-response optimization of transesterification reaction for biodiesel production from castor oil assisted by hydrodynamic cavitation”. *Fuel* 308: 121907
- [32] Thamizhakaran Stanley, Jason, Amudha Thanarasu, P. Senthil Kumar, Karthik Periyasamy, Subramanian Raghunandhakumar, Premkumar Manickam Periyaraman, Kubendran Devaraj, Anuradha Dhanasekaran and Sivanesan Subramanian. 2022. „Potential pre-treatment of lignocellulosic biomass for the enhancement of biomethane production through anaerobic digestion – A review”. *Fuel* 318: 123593.
- [33] Velvizhi G., Balakumar K., Shetti N.P., Ahmad E., Kishore Pant, K., Aminabhavi, T.M. 2021. „Integrated Biorefinery Processes for Conversion of Lignocellulosic Biomass to Value Added Materials: Paving a Path Towards Circular Economy”. *Bioresource technology* 343 126151.
- [34] Wang Fangqi, Denghao Ouyang, Ziyuan Zhou, Samuel J. Page, De-hua Liu, Xuebing Zhao. 2021. „Lignocellulosic biomass as sustainable feedstock and materials for power generation and energy storage”. *Journal of Energy Chemistry* 57: 247-280.
- [35] Wang Xi-kui, Yong Zhang. 2009. „Degradation of alachlor in aqueous solution by using hydrodynamic cavitation”. *Journal of hazardous materials* 161 (1):202-7.
- [36] Wang, Baowei, Huijuan Su, Bojin Zhang. 2021. „Hydrodynamic cavitation as a promising route for wastewater treatment – A review”. *Chemical Engineering Journal* 412: 128685.