

## ***Evaluation of emissivity and environmental safety of biomass grinders drive***

# **Ocena emisyjności i środowiskowego bezpieczeństwa napędu rozdrabniaczy biomasy**

DOI: 10.15199/62.2019.9.34

*Maize and rice seeds were grinded in a five-disc mill for various angular speed configurations of grinding discs to develop a math. model of the emissivity of the grinder drive for biomass grinding for further energy use. The sustainable emissivity depended on the parameters controlling the drive of the mill and increased with the increase of the angular velocity gradient of the grinding discs.*

**Opracowano model matematyczny emisyjności napędu rozdrabniania biomasy wykorzystywanej energetycznie. Wykazano, że możliwe jest utworzenie modelu uwzględniającego środowiskowe bezpieczeństwo eksploatacji i zastosowanie go do analizy, oceny i rozwoju napędu rozdrabniaczy biomasy energetycznej. Określono też jak zmienne sterujące maszyny rozdrabniającej wpływają na bilans i ocenę ekologiczną procesu. Opracowano również autorski wskaźnik emisyjności zrównoważonej. Model zweryfikowano, prowadząc ocenę i poprawiając nieszkodliwość procesu rozdrabniania ryżu i kukurydzy na obiekcie rzeczywistym, jakim był napęd młyna pięciotarczowego, dla różnych konfiguracji prędkości kątowych tarcz rozdrabniających. Stwierdzono także, że wartości wskaźnika emisji zależą od parametrów**

**sterujących napędem młyna. Wykazano, że emisyjność zrównoważona wzrastała wraz ze wzrostem gradientu prędkości kątowych tarcz rozdrabniacza.**

Rozdrabnianie rozumiane jako zmniejszanie wymiarów materiału znalazło zastosowanie w wielu branżach przemysłu chemicznego, spożywczego i energetycznego. Stanowi ono etap niezbędny dla przygotowania materiałów do ich dalszego wykorzystania<sup>1-3</sup>). Zmniejszenie wymiarów materiału jest szczególnie ważne dla przemysłu chemiczno-energetycznego, np. w przygotowaniu węgla i biomasy do ich spalania/współspalania w ciepłowniach i elektrociepłowniach<sup>4</sup>).

Do głównych problemów procesów rozdrabniania należy wysokie zużycie energii i niska sprawność maszyn przetwórczych, a także otrzymanie produktu, który nie spełnia wymagań odbiorców. Obecnie obserwuje się znaczący dynamizm w zakresie badań i działań zmierzających do poprawy jakości procesu, a także produktu rozdrabniania, o czym świadczą duża liczba pojawiających się publikacji na temat rozdrabniania<sup>5-10</sup>).

W myśl idei zrównoważonego rozwoju mówiącego o projektowaniu systemów, urządzeń i procesów z poszanowaniem środowiska, społeczeństwa i ekonomii, linie rozdrabniania biomasy powinny charakteryzować się jak najniższą energochłonnością i szkodliwością środowiskową<sup>11-13</sup>). Ma to na celu także poprawę konkurencyjności paliw z biomasy w stosunku do tradycyjnych paliw kopalnych<sup>14, 15</sup>). Spełnienie tych wymagań wymusza poszukiwanie nowych konstrukcyjnych rozwiązań rozdrabniaczy oraz prowadzenie kompleksowych ocen ich napędów. Od pracy układu napędowego rozdrabniacza zależy m.in. pobór mocy, zużycie energii, sprawność całego procesu i spraw-



Dr inż. Weronika KRUSZELNICKA w roku 2017 ukończyła studia na kierunku mechanika i budowa maszyn na Uniwersytecie Technologiczno-Przyrodniczym im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszczy. Jest asystentką w Instytucie Techniki Wytwarzania na Wydziale Inżynierii Mechanicznej UTP w Bydgoszczy. W 2019 r. uzyskała stopień doktora nauk inżynierijno-technicznych. Specjalność – inżynieria mechaniczna, konstrukcja maszyn i urządzeń.

\* Autor do korespondencji:

Instytut Techniki Wytwarzania, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. J. J. Śniadeckich w Bydgoszczy, al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, tel.: (52) 340-82-55, e-mail: weronika.kruszelnicka@utp.edu.pl



Mgr inż. Patrycja BAŁDOWSKA-WITOS w roku 2016 ukończyła studia na Wydziale Przedsiębiorczości i Towaroznawstwa Uniwersytetu Morskiego w Gdyni. W 2016 r. rozpoczęła studia doktoranckie na Wydziale Inżynierii Mechanicznej Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszczy. Jest też doktorantką Wydziału Inżynierii Transportu Politechniki Poznańskiej. Obecnie pracuje na stanowisku asystenta w Zakładzie Inżynierii Systemów Technicznych Instytutu Techniki Wytwarzania UTP w Bydgoszczy. Specjalność – badania i analiza oceny cyklu życia produktów i procesów wytwórczych z wykorzystaniem technik LCA.

ność przemiału. Kluczowym elementem jest wprowadzanie i wdrażanie ekoinnowacyjnych systemów, ocenianych już na etapie projektu z wykorzystaniem np. analizy wielokryterialnej<sup>16, 17)</sup>. Kryteria doboru technologii rozdrabniania i oceny jej działania powinny jednoznacznie wskazywać na rozwiązania spełniające założenia zrównoważonego rozwoju<sup>18, 19)</sup>. Mnogość zagadnień i zjawisk zachodzących podczas rozdrabniania materiałów biologicznych, w tym ziaren biomasy przeznaczonych dla przemysłu energetycznego, wymaga rozważenia i określenia wielu kryteriów dostosowanych do specyfiki przedsiębiorstwa, systemu, konstrukcji rozdrabniacza i właściwości materiału<sup>20-22)</sup>.

W literaturze poświęcono niewiele uwagi kompleksowej (energetyczno-środowiskowej) ocenie systemów rozdrabniania dla procesów spalania. W wielu pracach jako dwa podstawowe kryteria oceny tego procesu wskazuje się jednostkowe zużycie energii oraz stopień rozdrobnienia<sup>23, 24)</sup>.

W świetle tych stwierdzeń za cel pracy przyjęto opracowanie matematycznego modelu emisyjności napędu rozdrabniacza biomasy przeznaczonej do energetycznego wykorzystania. Problem badawczy sformułowano w postaci pytań: czy możliwe jest utworzenie modelu uwzględniającego środowiskowe bezpieczeństwo eksploatacji i zastosowanie go do analizy, oceny i rozwoju napędu rozdrabniacza biomasy energetycznej? oraz jak zmienne sterujące maszyną rozdrabniającej wpływają na bilans i ocenę ekologiczną procesu?

## Ocena wpływów środowiskowych napędów rozdrabniaczy

Konieczność prowadzenia ocen wpływów środowiskowych działania napędów rozdrabniaczy biomasy wynika bezpośrednio z przedstawianych przez Komisję Europejską idei zrównoważonego i inteligentnego rozwoju. W związku z tym oceny takie nie powinny być pomijane przez inżynierów mechaników podczas projektowania elementów napędowych maszyn rozdrabniających<sup>25-27)</sup>.

Kryteria oceny środowiskowej odnoszą się zasadniczo do pojęcia efektywności ekologicznej, w dwojakiej interpretacji dotyczącej zarówno efektywności podejmowanych działań proinnowacyjnych, próśrodkowych, jak i efektywności odnoszącej się do oddziaływań środowiskowych maszyn, urządzeń, technologii<sup>25, 28-30)</sup>.

Podstawowym założeniem ekoefektywności jest znalezienie rozwiązań technologicznych (produktowych) o najlepszej relacji uzyskiwanych korzyści do ponoszonych nakładów przy równoczesnym ograniczaniu środowiskowych oddziaływań<sup>31)</sup>. Najczęściej oddziaływania środowiskowe technologii przemysłowych mierzone są za pomocą wskaźników emisji CO<sub>2</sub> ekwiwalentnego i w zależności od poziomu emisji pobierane są opłaty<sup>32-34)</sup>.

Emisja CO<sub>2</sub> ekwiwalentnego w procesie rozdrabniania powiązana jest ściśle z jego energochłonnością warunkowaną cechami napędu rozdrabniacza. Rozważając układ maszyny/napędu rozdrabniacza, dla którego celem jest poprawa środowiskowego oddziaływania procesu, produktu (np. poprzez eliminację CO<sub>2</sub>), przy zachowaniu innych celów, takich jak zwiększenie wydajności oraz uzyskanie produktu o pożądanej jakości i efektywności energetycznej, można zidentyfikować zintegrowany energetycznym przeznaczeniem (spaleniem) produktu rozdrabniania zrównoważony wskaźnik emisyjności  $e_{zrów}$  w postaci funkcji poboru mocy w procesie rozdrabniania  $P_R$ , przyrostu korzyści ekologicznych  $\Delta E_{eco}$  oraz czasu  $t_R$ <sup>35)</sup>, opisanej zależnością (1):

$$e_{zrów} = f(P_R, \Delta E_{eco}, t_R) \quad (1)$$

Zależność na emisyjność zrównoważoną przedstawia równanie<sup>35)</sup> (2):

$$e_{zrów} = P_R \cdot \frac{1}{\Delta E_{eco}} \cdot t_R \quad (2)$$

W takim ujęciu emisyjność zrównoważona zależy wprost proporcjonalnie od mocy pobranej na rozdrabnianie i czasu rozdrabniania oraz odwrotnie proporcjonalnie od korzyści ekologicznych. Jeżeli zgodnie z postulowanymi stanami rozdrabniania  $P_R \rightarrow 0$ ,  $\Delta E_{eco} \rightarrow \infty$  oraz  $t_R \rightarrow 0$ , to wówczas  $e_{zrów} \rightarrow 0$ . Wynika stąd, że przy postulowanym zmniejszaniu zapotrzebowania na moc i czasu procesu oraz zwiększaniu korzyści ekologicznych zmniejsza się wartość emisyjności. Przy porównywaniu procesów rozdrabniania pod względem emisyjności lepszy będzie ten o niższej wartości emisyjności zrównoważonej<sup>35)</sup>.

Za korzyści ekologiczne przyjęto emisję równoważną energii elektrycznej wytworzonej ze spalania rozdrobnionej biomasy energetycznej, która mogłaby zasilać proces rozdrabniania, pomniejszoną o zużycie energii na rozdrobnienie zgodnie z zależnością<sup>35)</sup> (3):

$$\Delta E_{eco} = E_{es} - E_{Rt} \quad (3)$$

w której  $E_{es}$  oznacza energię elektryczną wytworzoną ze spalania rozdrobnionej biomasy, kWh, a  $E_{Rt}$  energię elektryczną zużytą w procesie rozdrabniania, kWh.

Energia elektryczna ze spalania biomasy określona jest zależnością<sup>35)</sup> (4):

$$E_{es} = E_s \cdot k_e = W_i \cdot m_b \cdot k_e \quad (4)$$

w której  $E_s$  oznacza energię ze spalania biomasy, kWh,  $W_i$  wartość opałową rozdrobnionej biomasy, kWh/kg,  $m_b$  masę rozdrobnionej spalanej biomasy, kg, a  $k_e$  współczynnik kogeneracji,  $k_e = 0,4$ <sup>36)</sup>. Uwzględniając, że masa rozdrobnionej spalanej biomasy uzależniona jest od wydajności rozdrabniania, można ostatecznie podać równanie<sup>35)</sup> (5):

$$E_{es} = W_i \cdot Q_r \cdot t_R \cdot k_e \quad (5)$$

W badaniach wykorzystano ziarna kukurydzy, która jest szeroko stosowana w sektorze energetycznym, zwłaszcza w produkcji biogazu, i ryżu, będącego rośliną o największej powierzchni uprawnej na świecie i mającą duży potencjał do wykorzystania w produkcji energii. Oba te ziarna mogą być dobrym substytutem węgla, biorąc pod uwagę ich stosunkowo wysokie wartości opałowe<sup>37)</sup>.

## Część doświadczalna

### Surowce

W badaniach napędu rozdrabniacza pięciotarczowego wykorzystano ziarna ryżu i kukurydzy o znanej wilgotności, wartości opałowej i średnim wymiarze cząstki (tabela 1).

Table 1. Properties of grains accepted for grinding in the experiment

Tabela 1. Właściwości ziaren przyjętych do rozdrabniania na potrzeby eksperymentu

Surowiec	Wilgotność, %	Wartość opałowa, $W_i$ , kWh/kg	Średni wymiar ziarna, mm
Ryż	13,47	4,55	2,14
Kukurydza	12,68	4,50	8,15

Dr inż. Robert KASNER w roku 1987 ukończył studia na Wydziale Elektroniki Politechniki Gdańskiej. Pracę doktorską obronił w 2016 r. na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej. Obecnie jest zatrudniony na stanowisku adiunkta na Wydziale Inżynierii Mechanicznej Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszczy. Specjalność – sprawność i efektywność elektrowni wiatrowych.

Prof. dr hab. inż. Józef FLIZIKOWSKI – notkę biograficzną i fotografię Autora wydrukowaliśmy w nr. 4/2019, str. 595.

## Stanowisko badawcze

Badania przeprowadzono dla napędu rozdrabniacza młyna pięciotarczowego. Stanowisko badawcze składało się z jednostki rozdrabniającej (rozdrabniacza pięciotarczowego) wyposażonej w moduły sterowania i monitorowania charakterystyk użytkowych rozdrabniania, jednostki sterującej oraz układu dozowania. Widok stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 1. Głównymi elementami rozdrabniacza były obudowa, korpus rozdrabniacza, komora robocza, kosz zasypowy, kosz odbiorczy produktu i zespół rozdrabniający. Zespół rozdrabniający składał się z pięciu tarcz roboczych, zasilanych niezależnie z pięciu silników elektrycznych, co umożliwiało sterowanie i monitorowanie charakterystyk oddzielnie dla każdej tarczy.

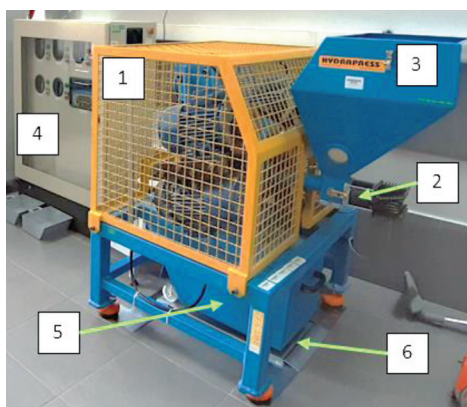


Fig. 1. Test stand; 1 – RWT-5KZ five-disc mill, 2 – screw feeder, 3 – hopper, 4 – control unit, 5 – product basket, 6 – scale for grinding product weight measurement

Rys. 1. Stanowisko badawcze; 1 – rozdrabniacz pięciotarczowy RWT-5KZ, 2 – podajnik ślimakowy, 3 – kosz zasypowy, 4 – szafa sterownicza, 5 – kosz odbiorczy produktu, 6 – waga do pomiaru masy produktu rozdrabniania

## Metodyka badań

Ocenę emisyjności przeprowadzono dla napędu rozdrabniacza pięciotarczowego podczas rozdrabniania materiałów ziarnistych. W każdym przypadku rozdrabniano 1 kg wsadu, rejestrowano pobór mocy i momenty obrotowe na poszczególnych tarczach rozdrabniacza oraz wymiar średni produktu rozdrabniania. Wsad podawano za pomocą podajnika ślimakowego ze stałym wydatkiem równym 112 kg/h. Za zmienne w procesie rozdrabniania przyjęto prędkości kątowe tarcz w celu określenia, jaki wpływ wywierały one na energochłonność oraz emisję CO<sub>2</sub> (zrównoważoną emisyjność) w ogólnym bilansie procesu. Nastawy prędkości zmieniano z pewnym określonym gradientem. W planie badawczym uwzględniono pięć różnych programów badań (PB) i nastaw prędkości kątowych w zależności od sposobu przyrostu prędkości (tabela 2). Następnie dla każdej konfiguracji wyznaczono wartości zaproponowanego wskaźnika zrównoważonej emisyjności.

W opracowaniu wyników posłużono się narzędziami do analizy statystycznej dostępnymi w programach MS Excel oraz Statistica. Wyznaczono podstawowe statystyki opisowe zrównoważonej emisyjności. Zbadano związki pomiędzy prędkościami kątowymi tarcz rozdrabniacza a emisyjnością, wykorzystując analizę korelacji metodą

Table 2. Configurations of the discs speed settings in five research programs

Tabela 2. Konfiguracje ustawień prędkości tarcz roboczych w pięciu programach badawczych

PB	Konfiguracja	$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_3$	$\omega_4$	$\omega_5$	$\Delta\omega$
I	1	20	25	30	35	40	5
	2	20	30	40	50	60	10
	3	20	35	50	65	80	15
	4	20	40	60	80	100	20
II	1	100	80	60	40	20	20
	2	80	65	50	35	20	15
	3	60	50	40	30	20	10
	4	40	35	30	25	20	5
III	1	20	40	20	40	20	20
	2	45	25	45	25	45	20
	3	75	50	75	50	75	25
	4	100	80	100	80	100	20
IV	1	20	40	20	40	20	20
	2	20	60	20	60	20	40
	3	20	80	20	80	20	60
	4	20	100	20	100	20	80
V	1	100	20	100	20	100	80
	2	100	40	100	40	100	60
	3	100	60	100	60	100	40
	4	100	80	100	80	100	20

PB – program badawczy,  $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5$  – prędkości kątowe tarcz, rad/s,  $\Delta\omega$  – przyrost prędkości kątowych, rad/s

Spearmana oraz analizę regresji i adekwatności otrzymanych modeli. Przyjęto poziom istotności  $p < 0,05$ .

Na podstawie charakterystyk rozdrabniania wyznaczono wartości zrównoważonej emisyjności dla każdej konfiguracji z pięciu programów badawczych. Wartości zrównoważonej emisyjności napędu rozdrabniacza obliczono na podstawie zależności (2), podstawiając odpowiednie dane z tabeli 3. Do obliczeń przyjęto czas rozdrabniania  $t_R = 1$  h, współczynnik kogeneracji  $k_e = 0,4$  oraz wartości opałowe ziaren podane w tabeli 1. Kolejny krok analiz stanowiło wyznaczenie podstawowych statystyk emisyjności zrównoważonej. Po ustaleniu korelacji pomiędzy zmiennymi przeprowadzono analizę regresji liniowej w celu wyznaczenia modeli matematycznych opisujących zrównoważoną emisyjność w funkcji prędkości kątowych tarcz.

## Omówienie wyników

Otrzymane wartości wskaźnika emisyjności zrównoważonej napędu rozdrabniacza pięciotarczowego pozwoliły na wyznaczenie ustawień prędkości kątowych tarcz roboczych, które powodowały najniższą i najwyższą emisyjność. Najniższą emisyjność zrównoważoną podczas rozdrabniania kukurydzy zapewniało ustawienie nr 4 z PB II



Dr hab. inż. Andrzej TOMPOROWSKI, prof. UTP – notkę biograficzną i fotografię Autora wydrukowaliśmy w nr. 4/2019, str. 594.

Dr inż. Jacek RUDNICKI w roku 1990 ukończył studia na Wydziale Mechaniczno-Elektrycznym Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni. W 2000 r. uzyskał stopień doktora nauk technicznych na Wydziale Techniki Morskiej Politechniki Szczecińskiej. Od 2003 r. jest adiunktem na Wydziale Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej. Specjalność – diagnostyka i niezawodność systemów technicznych ze szczególnym uwzględnieniem okrętowych systemów energetycznych.



Table 3. Variables of the sustainable emissivity model

Tabela 3. Zmienne modelu zrównoważonej emisyjności

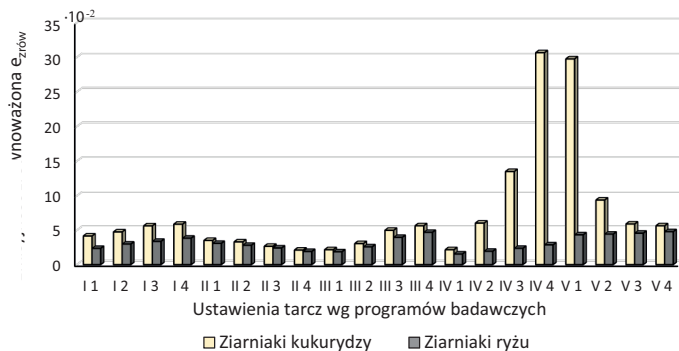
		Kukurydza					Ryż				
PB	Konfiguracja	$P_R$ , kW	$Q_r$ , kg/h	$E_{rt}$ , kWh	$E_s$ , kWh	$\Delta e_{eco}$ , kWh	$P_R$ , kW	$Q_r$ , kg/h	$E_{rt}$ , kWh	$E_s$ , kWh	$\Delta e_{eco}$ , kWh
I	1	1,09	15,20	1,09	27,34	26,25	1,09	26,10	1,09	47,50	46,41
	2	1,51	18,60	1,51	33,46	31,95	1,43	27,10	1,43	49,32	47,89
	3	1,89	19,80	1,89	35,62	33,72	1,73	29,20	1,73	53,14	51,41
	4	2,27	22,80	2,27	41,01	38,74	2,06	30,60	2,06	55,69	53,63
II	1	1,86	30,60	1,86	55,04	53,19	1,62	29,80	1,62	54,23	52,61
	2	1,70	29,70	1,70	53,43	51,73	1,42	28,70	1,42	52,23	50,81
	3	1,31	28,20	1,31	50,73	49,42	1,16	27,20	1,16	49,50	48,34
	4	0,97	26,30	0,97	47,31	46,34	0,88	26,10	0,88	47,50	46,62
III	1	0,91	24,00	0,91	43,17	42,26	0,84	25,20	0,84	45,86	45,02
	2	1,41	26,40	1,41	47,49	46,08	1,23	27,00	1,23	49,14	47,91
	3	2,52	29,60	2,52	53,25	50,73	1,99	28,80	1,99	52,41	50,43
	4	3,11	32,40	3,11	58,28	55,18	2,48	30,50	2,48	55,51	53,03
IV	1	0,91	24,00	0,91	43,17	42,26	0,84	30,60	0,84	55,69	54,85
	2	1,35	13,20	1,35	23,74	22,40	1,02	29,60	1,02	53,87	52,85
	3	1,54	7,20	1,54	12,95	11,41	1,21	28,80	1,21	52,41	51,21
	4	1,81	4,30	1,81	7,74	5,92	1,37	27,00	1,37	49,14	47,77
V	1	2,31	5,60	2,31	10,07	7,76	1,97	26,20	1,97	47,68	45,71
	2	2,65	17,20	2,65	30,94	28,29	2,08	27,00	2,08	49,14	47,06
	3	2,70	27,00	2,70	48,57	45,87	2,21	27,90	2,21	50,78	48,57
	4	3,11	32,40	3,11	58,28	55,18	2,48	29,90	2,48	54,42	51,93

PB – program badawczy,  $P_R$  – pobór mocy na rozdrabnianie,  $Q_r$  – wydajność,  $E_{rt}$  – energia elektryczna zużyta w procesie rozdrabniania,  $E_s$  – energia elektryczna wytworzona ze spalania rozdrobnionej biomasy

( $2,10 \cdot 10^{-2}$ ), następnie ustawienie nr 1 z PB III ( $2,10 \cdot 10^{-2}$ ), a podczas rozdrabniania ryżu ustawienie nr 1 z PB IV ( $1,53 \cdot 10^{-2}$ ) i ustawienie nr 1 z PB III ( $1,86 \cdot 10^{-2}$ ) (rys. 2).

Najgorszy wynik pod względem emisyjności (najwyższe wartości wskaźnika emisyjności) otrzymano dla ustawienia nr 4 z PB IV ( $30,65 \cdot 10^{-2}$ ) oraz nr 1 z PB V ( $29,75 \cdot 10^{-2}$ ) w przypadku rozdrabniania kukurydzy. W przypadku rozdrabniania ryżu najwyższą emisyjność zrównoważoną dawały ustawienia nr 4 z PB V ( $4,78 \cdot 10^{-2}$ ) oraz nr 4 z PB III ( $4,68 \cdot 10^{-2}$ ) (rys. 2).

W tabeli 4 zestawiono wyniki podstawowej analizy statystycznej badanej zmiennej. Na podstawie wartości skośności i kurtozy rozkładu wyników stwierdzono, że rozkład wyników zrównoważonej emisyjności



g. 2. Results of the assessment of the sustainable emissivity of the biomass 'inder drive'

ys. 2. Wyniki oceny zrównoważonej emisyjności napędu rozdrabniacza biomasy

ści kukurydzy odbiega od normalnego, dlatego w analizie korelacji posłużono się współczynnikiem Spearmana dla opisu monotonicznych związków między zmiennymi. Dla ryżu przyjęto, że rozkład jest w przybliżeniu normalny.

Analiza korelacji wykazała, że zrównoważona emisyjność w przypadku rozdrabniania kukurydzy jest dodatnio skorelowana z przyrostem prędkości  $\Delta\omega$ . W przypadku rozdrabniania ryżu korelacje dodatnie wystąpiły pomiędzy zrównoważoną emisyjnością a prędkościami kątowymi na tarczy pierwszej, trzeciej i piątej (tabela 5).

W przypadku rozdrabniania kukurydzy model liniowy w funkcji przyrostu prędkości  $\Delta\omega$  (zależność 6):

$$e_{zrów} = 0,003\Delta\omega - 0,016 \quad (6)$$

tylko w niewielkim stopniu wyjaśniał zmienność zrównoważonej emisyjności ( $R^2 = 0,783$ ), a ponieważ rozkład wyników odbiegał od normalnego sprawdzono inne modele monotoniczne nieliniowe.

Modelem nieliniowym najlepiej opisującym zmiany zrównoważonej emisyjności rozdrabniania kukurydzy w rozdrabniaczu pięciotarczowym w zależności od przyrostu prędkości kątowej na tarczach  $\Delta\omega$  okazał się model wykładniczy (rys. 3). Zaobserwowano, że emisyjność zrównoważona rosła wraz ze zwiększaniem się wartości  $\Delta\omega$ .

W przypadku ryżu zmienność zrównoważonej emisyjności bardzo dobrze opisywał model liniowy jednej zmiennej, jaką była prędkość kątowa tarczy 3,  $\omega_3$  ( $R^2 = 0,894$ ).

Testowane modele nieliniowe wyjaśniały mniejszy odsetek zmienności, dlatego do opisu w przypadku ryżu przyjęto modele liniowe.

Dodatkowo sprawdzono jak będzie zachowywał się model liniowy po dodaniu do niego drugiej zmiennej. Za pomocą analizy regresji metodą krokową wsteczną wyznaczono model uwzględniający dwie zmienne. Model ten przedstawia się zależnością (7):

$$e_{zrów} = 0,000212\omega_3 + 0,000106\omega_5 + 0,014091 \quad (7)$$

Table 4. Results of statistical analysis of the value of sustainable emissivity

Tabela 4. Wyniki analizy statystycznej wartości zrównoważonej emisyjności

	$R_p$	M	S	K	V	$\bar{x}$	s	Min.	Maks.
Kukurydza	0,29	0,05	2,4	5,01	1,08	0,08	0,08	0,02	0,31
Ryż	0,03	0,03	0,24	-1,29	0,33	0,03	0,01	0,02	0,05

$\bar{x}$  – wartość średnia, s – odchylenie standardowe, M – mediana, maks. – wartość maksymalna, min. – wartość minimalna,  $R_p$  – rozstęp, V – współczynnik zmienności, S – skośność, K – kurtoza

Table 5. Analysis of the correlation of sustainable emissivity with independent variables

Tabela 5. Analiza korelacji zrównoważonej emisyjności ze zmiennymi niezależnymi

		$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_3$	$\omega_4$	$\omega_5$	$\Delta\omega$
Kukurydza	Rho Spearmana	0,032	0,302	0,243	0,559	0,350	0,772
	istotność	0,894	0,195	0,302	0,010	0,130	0,000
Ryż	Rho Spearmana	0,618	0,223	0,908	0,363	0,805	0,326
	istotność	0,004	0,344	0,000	0,116	0,000	0,161

$\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5$  – prędkości kątowe tarcz, rad/s,  $\Delta\omega$  – przyrost prędkości kątowych, rad/s

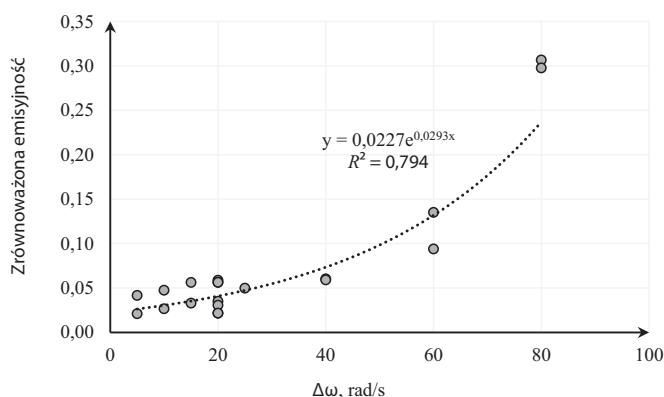


Fig. 3. Sustainable emissivity of corn crushing as a function of angular velocity increase

**Rys. 3. Zrównoważona emisyjność rozdrabniania kukurydzy w funkcji przyrostu prędkości kątowej**

Zależność ta uwzględniała dwie zmienne  $\omega_3$  oraz  $\omega_5$  i charakteryzowała się dopasowaniem na poziomie 0,926. Najlepiej opisywała ona zmienność emisyjności zrównoważonej ( $p < 0,05$  dla współczynników,  $F = 106,42$ , istotność  $F < 0,0001$ ). Dołączenie trzeciej zmiennej,  $\omega_1$ , spowodowało, że współczynniki modelu nie były istotne statystycznie, dlatego nie uwzględniono modelu z trzema zmiennymi. Uzyskane zależności wskazały, że emisyjność zrównoważona rozdrabniania ziaren ryżu rosła wraz ze wzrostem prędkości kątowych na tarczach rozdrabniacza.

**Podsumowanie**

Wykonane analizy dokonane zgodnie z przyjętymi programami badań napędu wielotarczowego rozdrabniacza pozwalają na stwierdzenie, że możliwe jest wykonanie badań studialnych, opisów emisyjności zrównoważonej i jej celowego sterowania za pomocą parametrów pracy rozdrabniacza.

Modelem najlepiej opisującym zmiany zrównoważonej emisyjności rozdrabniania kukurydzy w rozdrabniaczu pięciotarczowym w zależności od przyrostu prędkości kątowej na tarczach  $\Delta\omega$  okazał się model wykładniczy (rys. 3). Zaobserwowano, że emisyjność zrównoważona rośnie wraz ze zwiększaniem się wartości  $\Delta\omega$ . W przypadku rozdrabniania ryżu model uwzględniający dwie zmienne  $\omega_3$  i  $\omega_5$  charakteryzuje się dopasowaniem na poziomie 0,926 i najlepiej opisuje zmienność emisyjności zrównoważonej (zależność (7)). Uzyskana zależność (7) wskazuje, że emisyjność zrównoważona rozdrabniania ziaren ryżu rośnie wraz ze wzrostem prędkości kątowych na tarczach rozdrabniacza.

Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2017–2021, jako projekt naukowo-badawczy w ramach programu „Diamantowy Grant”.

Otrzymano: 13-08-2019

LITERATURA

[1] Z.H. Loh, A.K. Samanta, P.W. Sia Heng, *Asian J. Pharm. Sci.* 2015, **10**, 255.  
 [2] Z. Miao, T.E. Grift, A.C. Hansen, K.C. Ting, *Ind. Crops Products* 2011, **33**, 504.  
 [3] A. Tomporowski, J. Flizikowski, W. Kruszelnicka, *Przem. Chem.* 2017, **96**, nr 8, 1750.  
 [4] M. Chitoiu, G. Voicu, G. Moiceanu, G. Paraschiv, M. Dincă, V. Vladut, P. Tudor, *UPB Sci. Bull., Series D: Mech. Eng.* 2018, **80**, 117  
 [5] X. Liu, M. Zhang, N. Hu, H. Yang, J. Lu, *Minerals Eng.* 2016, **92**, 21.  
 [6] X. Liu, S. Liu, P. Tang, *Powder Technol.* 2015, **272**, 282.  
 [7] M.V. Gil, R. Garcia, C. Pevida, F. Rubiera, *Bioresour. Technol.* 2015, **191**, 205.  
 [8] J.B. Flizikowski, W. Kruszelnicka, A. Tomporowski, A. Mrozinski, *AIP Conf. Proc.* 2019, **2077**, 020018.  
 [9] M. Tamura, S. Watanabe, N. Kotake, M. Hasegawa, *Fuel* 2014, **134**, 544.  
 [10] A. Tomporowski, J. Flizikowski, J. Wełnowski, Z. Najzarek, T. Topoliński, W. Kruszelnicka, I. Piasecka, S. Śmigiel, *Przem. Chem.* 2018, **97**, nr 10, 1659.  
 [11] Z. Al-Hamamre, M. Saidan, M. Hararah, K. Rawajfeh, H.E. Alkhasawneh, M. Al-Shannag, *Renew. Sustainable Energy Rev.* 2017, **67**, 295.  
 [12] V. Buytaert, B. Muys, N. Devriendt, L. Pelkmans, J.G. Kretzschmar, R. Samson, *Renew. Sustainable Energy Rev.* 2011, **15**, 3918.  
 [13] J. Rudnicki, R. Zadrag, *Pol. Marit. Res.* 2017, **24**, 203.  
 [14] J.Y. Zhu, X. Pan, R.S. Zalesny, *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2010, **87**, 847.  
 [15] P. Adapa, L. Tabil, G. Schoenau, *Biosystems Eng.* 2009, **104**, 335.  
 [16] J. Sadkiewicz, A. Tomporowski, J. Flizikowski, W. Kruszelnicka, *Przem. Chem.* 2019, **98**, nr 4, 594.  
 [17] K. Jozwiakowski, M. Marzec, J. Fiedurek, A. Kaminska, M. Gajewska, E. Wojciechowska, S. Wu, J. Dach, A. Marczuk, A. Kowalczyk-Jusko, *Sep. Purif. Technol.* 2017, **173**, 357.  
 [18] W. Kruszelnicka, A. Tomporowski, J. Flizikowski, R. Kasner, J. Cyganiuk, *System Safety: Human - Tech. Facility - Environ.* 2019, **1**, 542.  
 [19] J. Flizikowski, A. Tomporowski, R. Kasner, A. Mroziński, W. Kruszelnicka, *System Safety: Human - Tech. Facility - Environ.* 2019, **1**, 363.  
 [20] M. Wotosiewicz-Głąb, D. Foszcz, D. Saramak, T. Gawenda, D. Krawczykowski, *E3S Web Conf.* (EDP Sciences, 2017), p. 01012.  
 [21] M. Eisenlauer, U. Teipel, *Can. J. Chem. Eng.* 2017, **95**, 1236.  
 [22] W. Kruszelnicka, J. Flizikowski, A. Tomporowski, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2018, **393**, 012076.  
 [23] S.K. Kawatra, *Advances in comminution*, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Littleton, Colorado 2006.  
 [24] D.W. Fuerstenau, A.-Z.M. Abouzeid, *Int. J. Mineral Process.* 2002, **67**, 161.  
 [25] E. Szymańska, *Roczn. Nauk Rolniczych* 2010, **97**, 152.  
 [26] Z. Kłos, K. Koper, *Izv. J. Varna Univ. Economics* 2017, **61**, 36.  
 [27] Z. Korczewski, J. Rudnicki, *Mat. VI Intern. Conf. Computational Methods in Marine Engineering*, (red. F. Salvatore, R. Broglia i R. Muscari), Int. Center Numerical Methods Engineering, 08034 Barcelona, 2015, 490.  
 [28] A. Tomporowski, J. Flizikowski, R. Kasner, W. Kruszelnicka, *Roczn. Ochr. Środ.* 2017, **19**, 694.  
 [29] I. Piasecka, A. Tomporowski, J. Flizikowski, W. Kruszelnicka, R. Kasner, A. Mroziński, *Appl. Sci.* 2019, **9**, 231.  
 [30] V. Mannheim, *Annals Faculty Eng. Hunedoara, Intern. J. Eng.* 2014, **12**, 225.  
 [31] A. Tomporowski, J. Flizikowski, W. Kruszelnicka, I. Piasecka, R. Kasner, A. Mroziński, S. Kovalyshyn, *Pol. Marit. Res.* 2018, **25**, 132.  
 [32] D. Burchart-Korol, M. Kruczek, K. Czaplicka-Kolarz, *Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji*, Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole 2013.  
 [33] J. Szyszlak-Bargłowicz, G. Zając, T. Słowik, *Polish J. Environ. Studies* 2015, **24**, 1349.  
 [34] R. Jachimowski, E. Szczepański, M. Kłodawski, K. Markowska, J. Dąbrowski, *Roczn. Ochr. Środ.* 2018, **20**, 965.  
 [35] W. Kruszelnicka, *Analiza procesu wielotarczowego rozdrabniania biomasy w ujęciu energochłonności i emisji CO<sub>2</sub>*, rozprawa doktorska, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. J. J. Śniadeckich w Bydgoszczy, Bydgoszcz 2019.  
 [36] R. Dańko, K. Szymała, M. Holtzer, G. Holtzer, *Arch. Foundry Eng.* 2012, **12**, 6.  
 [37] W. Kruszelnicka, [w:] *Renewable energy sources. Engineering, technology, innovation*, (red. M. Wróbel, M. Jewiarz i A. Szlępek), Springer International Publishing, 2020, 149.

Do członków

**Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Przemysłu Chemicznego!**

Członkowie Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Przemysłu Chemicznego mają prawo do ulgowej prenumeraty czasopisma „Przemysł Chemiczny” w 2019 r. z 50% rabatem, tj. w cenie 333,- zł brutto.

Zamówienia na prenumeratę na 2019 r. proszę kierować na adres:

[przemyslchemiczny@sigma-not.pl](mailto:przemyslchemiczny@sigma-not.pl) lub [prenumerata@sigma-not.pl](mailto:prenumerata@sigma-not.pl)