

## Technology for producing microbiologically enriched granular fertilizers using the coating method, along with the determination of process parameters

# Technologia wytwarzania nawozów granulowanych wzbogaconych mikrobiologicznie metodą otoczkowania wraz z określeniem parametrów procesowych



DOI: 10.15199/62.2025.1.5

*A method of introducing bacteria into granulated fertilizers (Polifoska Krzem® and Super Fos Dar® 40) was developed by applying a coating in the form of an external layer of bacteria deposited on an org. carrier (maltodextrin) using polyethylene glycol PEG 4000 with the addn. of glycerine as a binder. Process calcns., as well as technological and apparatus assumptions for the technology of producing microbiologically enriched mineral fertilizers were presented.*

**Keywords:** granular fertilizers, coating method, microbiological enriched

Opracowano sposób wprowadzania bakterii do nawozów granulowanych (Polifoska Krzem® i Super Fos Dar® 40) metodą nakładania otoczki w formie zewnętrznej warstwy bakterii osadzonych na nośniku organicznym (maltodekstryna) za pomocą glikolu polietylenowego PEG 4000 z dodatkiem gliceryny jako lepiszcza. Przedstawiono obliczenia procesowe i założenia technologiczno-aparaturowe technologii wytwarzania nawozów mineralnych wzbogacanych mikrobiologicznie.

**Słowa kluczowe:** nawozy granulowane, otoczkowanie, wzbogacanie mikrobiologiczne

Stosowanie bioproduktów zawierających mikroorganizmy, które wspomagają wzrost roślin jest ugruntowaną rzeczywistością w rolniczych uprawach. Wysoka jakość oferowanych produktów zawierających elitarnie szczepy pozwala na ograniczenie i uzasadnione realnymi potrzebami stosowanie nawożenia mineralnego, przyczyniając się do taniego i zrównoważonego rolnictwa<sup>1-4</sup>). Obecnie badania prowadzone są w kierunku poszukiwania nowych produktów na bazie nawozów, które dodatkowo zwiększają wydajność tych już dostępnych na rynku (nawozów mineralnych) oraz nowych formułacji lub sposobów wzbogacania mikrobiologicznego, które przyczyniają się do większej produktywności i skuteczności nawozów.

Mikrobiologiczne wspomaganie uprawy roślin jest szybko rosnącym segmentem rynku rolniczego, zwłaszcza jako uzupełnienie nawożenia tradycyjnego<sup>5-8</sup>). Wśród metod produkcji nowoczesnych nawozów mineralnych pożądana jest technologia z wykorzystaniem mikroorganizmów w celu łatwej ich aplikacji oraz zapewnienia odpowiedniego dozowania. Znane rozwiązania wytwarzania bionawozów wymagają zastosowania roztworów wodnych, które w końcowym etapie procesu produkcji wymagają suszenia nawozu w podwyższonej temperaturze lub też wymagają zastosowania urządzeń do ciśnieniowego kompaktowania produktu. Ponieważ zarówno wilgoć, jak i wysokie ciśnienie silnie wpływają na zmniejszenie przeżywalności mikroor-



Mgr inż. Łukasz RUSEK (ORCID: 0000-0003-4568-4605) w roku 2020 ukończył studia na Wydziale Chemicznym Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie. Obecnie pracuje w Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytucie Nowych Syntez Chemicznych w Puławach. Specjalność – technologia nieorganiczna, granulacja nawozów.



Dr hab. Piotr RUSEK (ORCID: 0000-0003-2788-6676) w roku 1998 ukończył studia na Wydziale Chemii Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie. Stopień doktora habilitowanego nauk inżynierjno-technicznych otrzymał w 2019 r. Jest liderem obszaru w Grupie Badawczej Nawozy w Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytucie Nowych Syntez Chemicznych w Puławach. Specjalność – technologia, inżynieria chemiczna i ochrona środowiska.

**\* Adres do korespondencji:**

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Nowych Syntez Chemicznych, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 13a, 24-110 Puławy, e-mail: piotr.rusek@ins.lukasiewicz.gov.pl

ganizmów czy to w formie żywej, czy to przetrwalnikowej, stosowanie tych procesów istotnie obniża aktywność nawozów wzbogacanych mikrobiologicznie. Ponadto stosowanie wody lub roztworów i zawiesin wodnych wpływa na uaktywnienie się form przetrwalnikowych bakterii, które następnie obumierają w trakcie przechowywania nawozu. Wyeliminowanie wody w procesie produkcji oraz zastosowanie substancji niskoteplicywnych zapewnia bardzo wysoką przeżywalność mikroorganizmów w procesie produkcji bionawozów oraz istotnie przedłuża trwałość gotowego produktu. Wytworzone nawozy były przedmiotem badań rolniczych prowadzonych w ramach projektu Biofertil<sup>9)</sup>.

Celem pracy było przedstawienie nowo opracowanej technologii wytwarzania nawozów NPK i PK wzbogacanych mikrobiologicznie.

## Część badawcza

### Opis procesu technologicznego

Opracowano technologię wytwarzania nawozów mineralnych wzbogacanych mikrobiologicznie<sup>10, 11)</sup>. Do granulacji stosowano nawozy: Super Fos Dar<sup>®</sup> 40 i Polifoska Krzem<sup>®</sup>. Nawóz podgrzewano strumieniem gorącego powietrza w obracającym się bębnie granulacyjnym do uzyskania temperatury nawozu 70–80°C. Następnie dodawano sproszko-

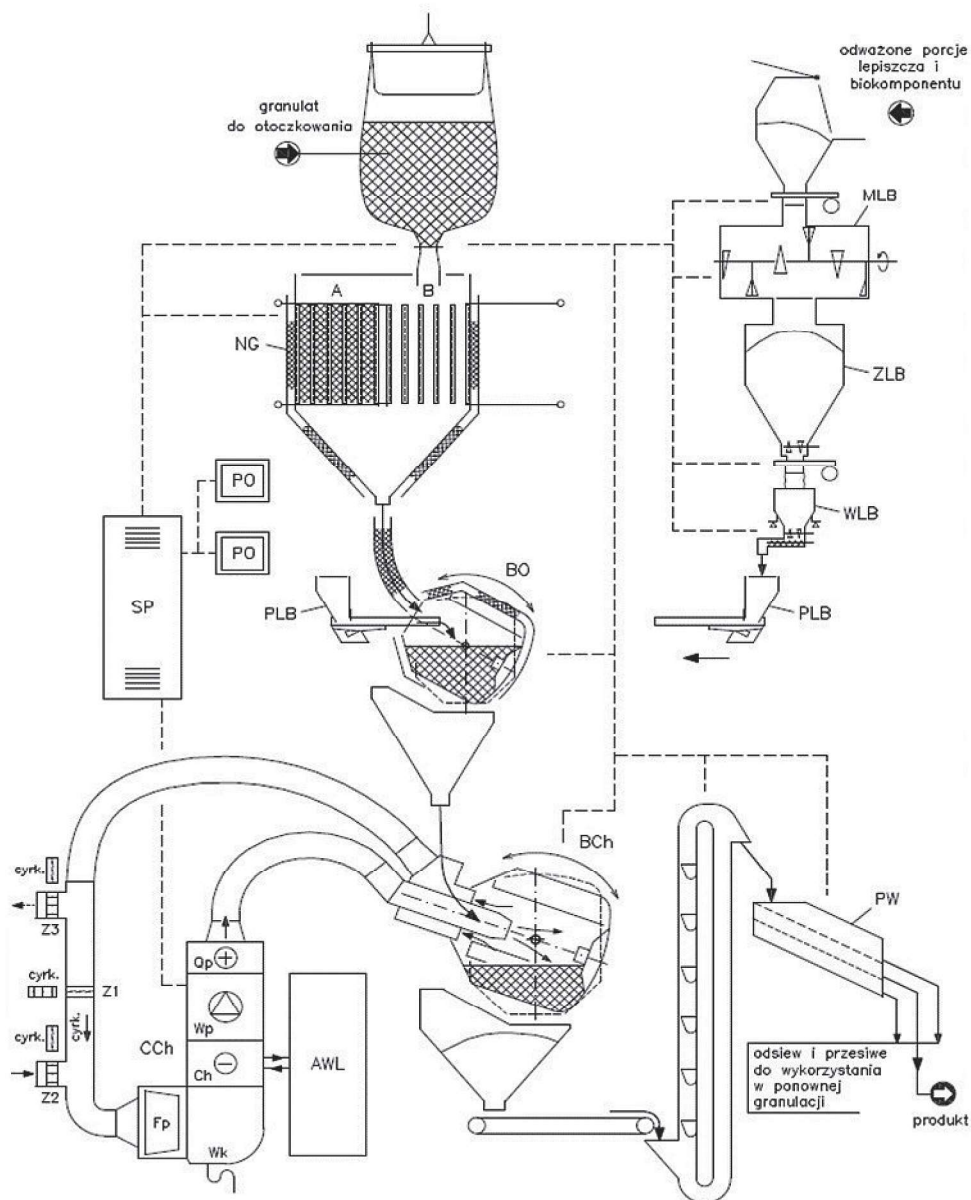


Fig. 1. Diagram of an installation for obtaining microbiologically enriched fertilizers; NG – granulate heater, MLB – binder and biocomponent mixer, ZLB – mixture container, WLB – weighing feeder, PLB – mixture feeder, BO – coating drum, BCh – cooling drum, CCh – air cooling unit, AWL – chilled water unit, PW – vibrating screen, SP – control cabinet, PO – operator panel

Rys. 1. Schemat instalacji do otrzymywania nawozów wzbogacanych mikrobiologicznie; NG – nagrzewacz granulatu, MLB – mieszalnik lepiszcza i biokomponentu, ZLB – zasobnik mieszanki, WLB – dozownik wagowy, PLB – podajnik mieszanki, BO – bęben otoczkowania, BCh – bęben chłodzenia granulatu po otoczkowaniu, CCh – centrala chłodnicza powietrza do BCh, AWL – agregat wody lodowej, PW – przesiewacz wibracyjny, SP – szafa sterownicza, PO – panel operatorski



Mgr inż. Zdzisław ZDEB w roku 1980 ukończył studia na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym Politechniki Wrocławskiej. Do 2022 r. pracował na stanowisku głównego specjalisty w Grupie Badawczej Nawozy w Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytucie Nowych Syntez Chemicznych. Obecnie jest na emeryturze. Specjalność – projektowanie aparatury chemicznej.



Dr inż. Sebastian SCHAB (ORCID: 0000-0002-3894-4475) w roku 2006 ukończył studia na Wydziale Chemicznym Politechniki Rzeszowskiej. W 2017 r. uzyskał stopień doktora na Wydziale Chemicznym Politechniki Wrocławskiej. Obecnie pracuje na stanowisku zastępcy kierownika Grupy Badawczej Nawozy w Łukasiewicz – Instytucie Nowych Syntez Chemicznych w Puławach. Specjalność – technologia nieorganiczna, granulacja nawozów.

Table 1. Characteristics of raw materials for the production of microbiologically enriched fertilizers

Tabela 1. Charakterystyka surowców do produkcji nawozów wzbogacanych mikrobiologicznie

Surowiec	Skład, % mas.	Właściwości	Producent
Polifoska Krzem®	N – 6 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> – 12 K <sub>2</sub> O – 34 S – 10	nawóz o równomiernych jasnoszarych do ciemnoszarych lub jasnoróżowych granulach, klasa ziarnowa 2–5 mm, co najmniej 90%, gęstość nasypowa: 0,94–0,99 kg/dm <sup>3</sup>	Grupa Azoty ZCH Police SA
Super Fos Dar® 40	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> – 40 (fosfor całkowity), co najmniej: P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> – 25 (fosforanów rozpuszczalnych w obojętnym roztworze cytrynianu amonu), w tym minimum 93% fosforanów rozpuszczalnych w wodzie, CaO – 10	nawóz o ciemnoszarych granulach, klasa ziarnowa 2–5 mm stanowi min. 90%, gęstość nasypowa 0,95–1,0 kg/dm <sup>3</sup>	Grupa Azoty GZNF SA
Poliglikol etylenowy PEG 4000	poliglikol etylenowy, średnia masa cząsteczkowa 3800–4800	białoszary proszek; temperatura topnienia 53–58°C; lepkość 50-proc. roztworu wodnego w temp. 25°C 90–120 mPas; liczba hydroksylowa 23–30 mg KOH/g; gęstość w 60°C 1,029 g/cm <sup>3</sup> ; ciepło właściwe 0,51 cal/(g·K); pH 5-proc. roztworu wodnego w 25°C 4,5–7,5	Lotte Chemical Korea
Gliceryna	propano-1,2,3-triol – 99,5%	bezbarna ciecz	Centro-Chem
Konsorcjum mikroorganizmów	liofilizat szczepów bakterii <i>Bacillus</i> sp. Pszenica 4/4, <i>Paenibacillus polymyxa</i> CHT114AB, <i>Bacillus amyloliquefaciens</i> AF75BB	biały sproszkowany liofilizat szczepów bakterii na nośniku maltodekstryny, liczebność min. 1,0·10 <sup>8</sup> jedn./g liofilizatu	Symbiobank – Instytut Ogródnictwa PIB Skierniewice

wany glikol polietylenowy PEG 4000, który w kontakcie z gorącym nawozem ulegał stopieniu, pokrywając nawóz cienkim filmem. Kolejno dozowano mieszaninę bakterii składającą się z konsorcjum liofilizowanych szczepów bakterii *Bacillus* sp. Pszenica 4/4, *Paenibacillus polymyxa* CHT114AB, *Bacillus amyloliquefaciens* AF75BB, które oblepiały dookoła granule nawozów. Wprowadzano dodatek gliceryny pod koniec procesu, który ułatwiał związanie reszty bakterii oraz zmniejszał pylenie. Charakterystykę surowców przedstawiono w tabeli 1.

Otrzymany produkt chłodzono. Na podstawie badań w 1/4 technicznej opracowano założenia do części technologicznej projektu procesowego<sup>11</sup>). Schemat instalacji przedstawiono na rys. 1, a bębna do otoczkowania na rys. 2. Główne operacje jednostkowe procesu, nagrzewanie granulatu, jego otoczkowanie i wychładzanie po otoczkowaniu przebiegały w sposób szarżowy.

Bilans masowy i założenia procesowe stanowiły podstawę do obliczeń operacji nagrzewania i wychładzania granulatu. Bilans ten z obliczeniami cieplnymi procesu otoczkowania przedstawiono w tabeli 2.

## Operacja nagrzewania granulatu

Obliczeniom cieplnym poddano nagrzewacz z pionowymi przedziałami na granulaty ogrzewany elektrycznymi matami grzewczymi, rozpostartymi na styk między przylegającymi ścianami sąsiednich przedziałów oraz po zewnętrznych stronach skrajnych przedziałów. Zaprojektowano zastosowanie mat silikonowych.

Przy nagrzewaniu granulatu, jak i po jego zakończeniu, w czasie oczekiwania na wyrównanie się temperatury w przekroju wsadu, występowało nieustalone przewodzenie ciepła przez granulaty (przewodzenie zmienne w czasie w wyniku zmiennej w czasie temperatury materiału przewodzącego). Obliczenia cieplne wykonano, przyjmując uproszczenia modelowe. Wsad granulatu został potraktowany jako płyta przewodząca ciepło o nieskończonej powierzchni. Założono brak strat ciepła do otoczenia oraz zerową pojemność cieplną i zerowy opór cieplny ścian przedziałów nagrzewacza. Przy takich założeniach ogólne równanie analityczne Fouriera (1) ma zmienny w czasie rozkład temperatury:



Dr Krzysztof BOROWIK (ORCID: 0000-0002-2849-022X) w roku 2001 ukończył studia na Wydziale Chemii Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie. W 2010 r. uzyskał stopień doktora na tym samym wydziale. Obecnie jest zatrudniony na stanowisku głównego specjalisty, pełniąc funkcję kierownika Grupy Badawczej Nawozy w Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytucie Nowych Syntezy Chemicznych. Specjalność – technologia chemiczna nieorganiczna, analityka chemiczna nawozów.



Dr hab. Marzena BRODOWSKA, prof. UP (ORCID: 0000-0002-3049-4975), w roku 1997 ukończyła studia na Wydziale Chemii Uniwersytetu Marii-Curie Skłodowskiej w Lublinie. Obecnie jest profesorem w Katedrze Chemii Rolnej i Środowiskowej Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie. Specjalność – chemia środowiskowa, ochrona środowiska.

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

i upraszcza się je do postaci (2):

$$\frac{dt}{d\tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \quad (2)$$

w którym  $t$  oznacza temperaturę danego punktu przekroju płyty,  $t$  czas,  $x$  odległość danego punktu płyty od jej przekroju środkowego i  $a$  współczynnik wyrównywania temperatury (dyfuzyjność cieplna).

Zastosowano równanie pozwalające obliczyć rozkład temperatury w przekroju płyty obustronnie grzanej stałą mocą w funkcji czasu grzania. Równanie to ma postać trygonometrycznego szeregu Fouriera (3), w którym zależność temperatury od czasu w danym punkcie ciała ma charakter wykładniczy (stan porządkowany wymiany ciepła) (3)–(6):

$$Y(\zeta Fo) = Fo - \frac{1}{6}(1 - 3\zeta^2) + \frac{2}{\pi^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{(-1)^{i-1}}{i^2} \cos(i\pi\zeta) e^{-i^2\pi^2 Fo} \quad (3)$$

$$Y = \frac{(t - t_p)\lambda}{q} \quad (4)$$

$$\zeta = \frac{x}{\delta} \quad (5)$$

$$Fo = \frac{a\tau}{\delta^2} \quad (6)$$

w których  $Y$  oznacza bezwymiarową temperaturę kryterialną,  $\zeta$  bezwymiarową współrzędną położenia,  $-1 \leq \zeta \leq 1$ ,  $F_o$  bezwymiarowy czas (liczba Fouriera),  $F_o \geq 0$ ,  $t$  temperaturę w danym punkcie po czasie  $\tau$  od początku grzania,  $t_p$  temperaturę początkową płyty,  $\lambda$  współczynnik przewodzenia ciepła materiału płyty,  $q$  moc grzania płyty (moc z jednej strony przy grzaniu obustronnym),  $\delta$  połowę grubości płyty, a  $x$  odległość danego punktu od środka płyty w jej przekroju.

Do obliczeń zastosowano metodę elementów skończonych MES. Dla potrzeb projektu opracowano algorytmy, w których obliczono zmianę rozkładu temperatury w przekroju wsadu granulatu jako płyty obliczeniowej, zarówno

w czasie ogrzewania, jak i po jego zakończeniu, w oczekiwaniu na wystarczające wyrównanie się temperatury w przekroju wsadu.

Podział grubości wsadu ustalono na  $2 \times 12 = 24$  warstwy obliczeniowe. Obliczenia wykonywano z krokiem co 1 s. Dokładność obliczeń zależała od precyzyjnej znajomości właściwości granulatu, czyli jego ciepła właściwego, gęstości nasypowej oraz współczynnika przewodzenia ciepła wsadu jako materiału porowatego. Wykonano obliczenia dla założonego czasu cyklu operacji grzania, których celem było określenie maksymalnej szerokości przedziałów na granulatu w nagrzewaczu, a tym samym minimalnej liczby przedziałów w sekcji nagrzewacza oraz optymalnej mocy grzewczej. Potrzeba optymalizacji wynikała z tego, że wraz ze wzrostem mocy grzewczej skracał się czas fazy grzania, ale wydłużał czas wyrównywania się temperatury w przekroju wsadu do założonego  $\Delta t$ , określonego przez temperatury  $t_{\max}$  i  $t_{\min}$  (w obliczeniach przyjęto  $t_{\max} = 358,15$  K i  $t_{\min} = 353,15$  K). W obliczeniach uwzględniono ograniczenie temperatury nagrzewanego nawozu do wartości dopuszczalnej ze względu na jego degradację (przyjęto wartość 398,15 K) oraz straty ciepła do otoczenia nagrzewacza, głównie przez jego izolację cieplną.

Z uwagi na to, że ustalony czas cyklu otoczkowania i chłodzenia granulatu wynosił 30 min, a grzanie granulatu miało być prowadzone w dwóch sekcjach nagrzewacza napełnianych i opróżnianych na przemian, na cykl operacji grzania przewidziano czas 60 min. Cykl ten składał się z następujących faz: (i) napełnienie sekcji nagrzewacza wsadem granulatu (5 min), (ii) grzanie wsadu, oczekiwanie na wyrównanie się temperatury w przekroju wsadu oraz opróżnienie sekcji nagrzewacza (2 min). Czas przeznaczony na grzanie i wyrównywanie temperatury wynosił 53 min. W obliczeniach przyjęto grzanie ze stałą, kontrolowaną, nastawialną mocą. Realizację takiego grzania umożliwił tyrystorowy sterownik mocy zastosowany na zasilaniu mat grzewczych z sieci prądu przemiennego. Sterowniki tyrystorowe mogą pracować w trybie sterowania fazowego lub grupowo-impulsowego. Do przedmiotowego grzania zaleca się zastosować sterowanie grupowo-impulsowe. Na rynku są już dostępne sterowniki programowalne, z wbudowanym panelem obsługowym i wyświetlaczem, które posiadają możliwość nastawy mocy grzewczej na jego panelu. W trybie grupowo-impulsowym umożliwiają one wprowadzenie na panelu wartości sterującej mocą grzewczą w % wielkości zadanej, bez konieczności zadawania tej wartości z zewnętrznego źródła poprzez wejście analogowe lub cyfrowe. Przy sterowaniu grupowo-impulsowym wielkością zadaną jest współczynnik wypełnienia grupy impulsów (cykli sinusoidalnych) cyklami włączonymi na pobór energii. W przypadku gdy elementy grzejne mają dodatni lub zbliżony do zera temperaturowy współczynnik rezystywności  $\alpha$ , producent zaleca pozostawienie aktywnej zamkniętej pętli sterowania podrzędnego w trybie kontroli  $U^2$ . W tym trybie moc grzewcza obniża się w odwrotnej proporcji do wzrostu rezy-

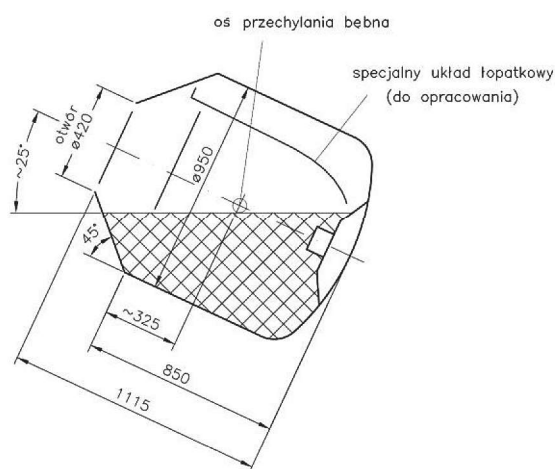


Fig. 2. Installation drawing and main dimensions of the encapsulating drum  
Rys. 2. Rysunek zaościenny i główne wymiary bębna do otoczkowania

Table 2. Mass balance and process calculations of the pellet coating operation

Tabela 2. Bilans masowy i obliczenia procesowe operacji otoczkowania granulatu

Wyszczególnienie		Oznaczenie	Jednostka	Wartość
Wydajność instalacji		$G_N$	kg/h	500
Udziały masowe w gotowym produkcie (a także w sumie materiału wsadowego), % mas.	biokomponent	$u_B$	% mas.	1,0
	lepiszcze (PEG)	$u_L$	% mas.	4,0
	granulat surowego nawozu	$u_G$	% mas.	95,0
Założony uzysk materiału o właściwej wielkości granул z masy wsadowej: masa produktu / masa wsadowa		$u_N$	% mas.	95,0
Liczba szarż na godzinę		$n$	-	2,0
Masa szarży produktu $m_N = G_N/n$		$m_N$	kg	250,0
Suma masy szarży materiałów wsadowych $MW = m_N/u_N$		$m_W$	kg	263,16
Masa szarży składnika	granulat surowego nawozu $m_G = m_W - m_B - m_L$	$m_G$	kg	250,00
	lepiszcze(PEG) $m_L = m_W u_L$	$m_L$	kg	10,53
	biokomponent $m_B = m_W u_B$	$m_B$	kg	2,63
	lepiszcze + biokomponent $m_{LB} = m_W u_B$	$m_{LB}$	kg	13,16
Masa szarży odpadu (nad + podziarno) po klasyfikacji ziarnowej (zawrót do ponownej granulacji) $m_Z = m_W - m_N$		$m_Z$	kg	13,16
Strumień masowy wsadu do komory otoczkowania	granulat surowego nawozu	$G_G$	kg/s	8,0
	lepiszcze + biokomponent T	$G_{LB}$	g/s	110
Czas załadunku/dozowania składników do mieszalnika otoczkowania	granulat surowego nawozu (pełny strumień $m_G/G_G$ )	$t_{G-P}$	s	31
	granulat surowego nawozu (pełny czas operacji)	$t_{G-C}$	min	1,00
	lepiszcze biokomponent (pełny strumień)	$t_{LB-P}$	s	120
	lepiszcze + biokomponent (pełny czas operacji)	$t_{LB-C}$	min	3,00
Ciepło właściwe granulatu		$c_N$	kJ/(kg·K)	1,15
Temperatura granulatu na wysypie z podgrzewacza, maks./min.		$t_{gN}$	K	358,15/361,15
Przewidywany spadek temperatur granulatu w trakcie zsypanywania do bębna otoczkowania, min./maks.		$\Delta t$	K	274,15/275,15
Początkowa temperatura granulatu w bębnie, maks./min.		$t_{gpN}$	K	357,15/351,15
Początkowa temperatura granulatu uwzględniająca jej wyrównanie w trakcie otoczkowania, maks./min.		$t_{pN}$	K	355,15/353,15
Ciepło właściwe lepiszcza PEG 4000	$c_{PEG}$	cal/(g·K)	0,51	
		kJ/(kg·K)	2,14	
Ciepło topnienia lepiszcza PEG4000	$c_{t-PEG}$	cal/g	45,0	
		kJ/kg	188	
Przyjęte ciepło właściwe biokomponentu		$c_B$	kJ/(kg·K)	2,00
Początkowa temperatura lepiszcza z biokomponentem		$t_p$	K	283,15
Temperatura końcowa otoczkowania z bilansu ciepła bez strat $t_{k-teor} = [m_N c_N t_{pN} + (m_L c_L + m_B c_B) t_p - m_L c_L t_L] / (m_N c_N + m_L c_L + m_B c_B)$		$t_{k-teor}$	K	342,55/340,65
Strata ciepła, przyjęta moc		$P_{st}$	kW	2,00
Czas załadunku składników do otoczkowania $\tau_z = \tau_{G-C} - \tau_{LB-C}$		$t_z$	min	4,0
Czas prowadzenia procesu otoczkowania		$t_{ot}$	min	10,0
Łączny czas strat ciepła		$t_{z+ot}$	min	14,0
Strata ciepła $Q_{st} = P_{st} \cdot 60Z + \tau_{ot}$		$Q_{st}$	kJ	1680
Masa materiału tracącego ciepło $m_{st} = m_W$		$m_{st}$	kg	263
Ciepło właściwe materiału tracącego ciepło		$c_{st}$	kJ/(kg·K)	1,20
Spadek temperatury w wyniku strat ciepła $t_{st} = Q_{st} / (m_{st} c_{st})$		$t_{st}$	K	5,3
Temperatura końcowa otoczkowania z uwzględnieniem strat ciepła		$t_k$	K	337,25

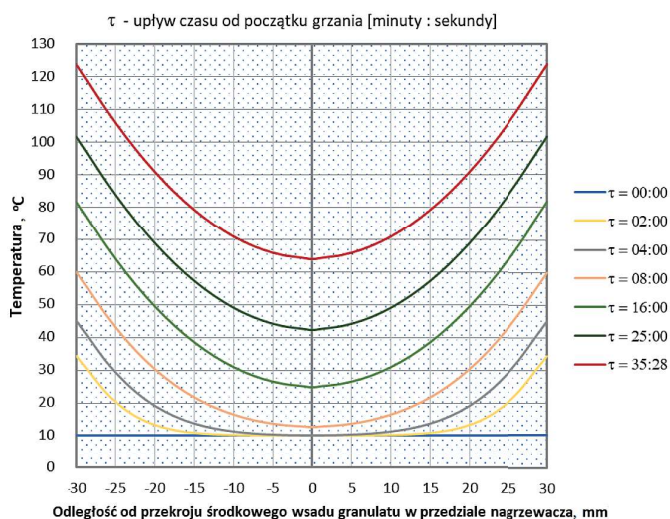


Fig. 3. Temperature distribution and the rate of its increase during heating according to the FEM calculations ( $\tau$  – the time from heating, min:s)

Rys. 3. Rozkład temperatury i tempo jej wzrostu podczas nagrzewania wg obliczeń metodą MES ( $\tau$  – czas od momentu grzania, min:s)

stancji elementu grzejnego (zgodnie z zależnością  $P = U^2/R$ , w której  $P$  oznacza moc,  $U$  stałe napięcie, a  $R$  rezystancję), co m.in. zabezpiecza elementy grzejne przed ewentualnym przegrzaniem. Maty silikonowe zawierają zazwyczaj druty grzejne z kanthalu, materiału o praktycznie stałej, niezmienniej ze wzrostem temperatury rezystancji ( $\alpha = 11,4-17,2 \cdot 10^{-6}$  1/K). Jak obliczono, wzrost rezystancji tego drutu w zakresie temperatur, do jakich rozgrzeje się podczas pracy nagrzewacza nie przekroczył 0,3%. A zatem podczas regulacji mocy grzewczej w trybie  $U^2$  wartość procentowa wielkości zadanej

będzie odpowiadała procentowi mocy nominalnej. Przyjęte do obliczeń dane przedstawiono w tabeli 3, a parametry metody MES w tabeli 4.

Wyniki obliczeń dotyczących nagrzewania i chłodzenia granulatu przedstawiono na rys. 3 i 4 oraz w tabeli 5 (fazę grzania), tabeli 6 (wyrównywanie temperatury) i tabeli 7 (zbiorczo).

Na rys. 5 przedstawiono wymiary i elementy budowy nagrzewacza. Nagrzewacz składał się z dwóch głównych sekcji, oznaczonych jako A i B, w których umieszczono po 6 przedziałów na granulatu. W górnej części nagrzewacza znajdował się element zgarniający nadmiar granulatu, co pozwalało na równomierne rozprowadzenie materiału. Sekcja A i B były wyposażone w górną i dolną zasuwę, które umożliwiały kontrolę przepływu granulatu do i z nagrzewacza. Na bocznych ścianach sekcji umieszczono maty grzewcze osłonięte obustronnie blachą, zapewniające równomierne nagrzewanie wsadu. Czujniki temperatury znajdowały się zarówno na powierzchni mat grzewczych, jak i w środkowym przekroju przedziału, co umożliwiało monitorowanie procesu nagrzewania. W konstrukcji zastosowano kołki dystansowe, które zapewniały odpowiedni odstęp między matami grzewczymi a ścianami nagrzewacza. Na dole nagrzewacza umieszczono ogranicznik dynamiki wysypu, który regulował tempo wydostawania się granulatu. Cała konstrukcja miała szerokość ok. 900 mm, wysokość 1000 mm, a przekrój poprzeczny wynosił 700 mm.

### Przygotowanie i podawanie mieszanki lepiszcza z biokomponentem

Table 3. FEA calculations of heating and post-heating equilibration for granular charge as a plate heated on both sides with equal power

Tabela 3. Obliczenia MES grzania i wyrównywania się temperatury po zakończeniu grzania dla wsadu granulatu jako płyty grzanej obustronnie z jednakową mocą

Wyszczególnienie	Oznaczenie	Jednostka	Wartość
Masa szarzy granulatu	$m$	kg	250
Gęstość usypowa granulatu	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	1000
Ciepło właściwe granulatu	$c$	kJ/(kg·K)	1,15
Współczynnik przewodzenia ciepła granulatu jako masy porowatej	$\lambda$	W/(m·K)	0,30
Temperatura początkowa granulatu	$t_p$	K	283,15
Maksymalna temperatura końcowa w przekroju wsadu granulatu	$t_{max}$	K	358,15
Minimalna temperatura końcowa w przekroju wsadu granulatu	$t_{min}$	K	353,15
Dopuszczalna temperatura granulatu (podczas nagrzewania)	$t_k$	K	398,15
Przyjęty maksymalny spadek temperatury wsadu podczas fazy wyrównywania temperatury w wyniku utraty ciepła do otoczenia (dot. warstw wsadu przy ścianach zewnętrznych sekcji)	$\Delta t_s$	K	275,65
Minimalna obliczeniowa temperatura końcowa w przekroju wsadu granulatu	$t_{min-obl}$	K	355,65
Liczba sekcji nagrzewacza	-	-	2
Dysponowany łączny czas na grzanie i wyrównywanie temperatury	$t_g + t_w$	min	53
Przyjęta wysokość ścian grzewczych	$h$	mm	1000

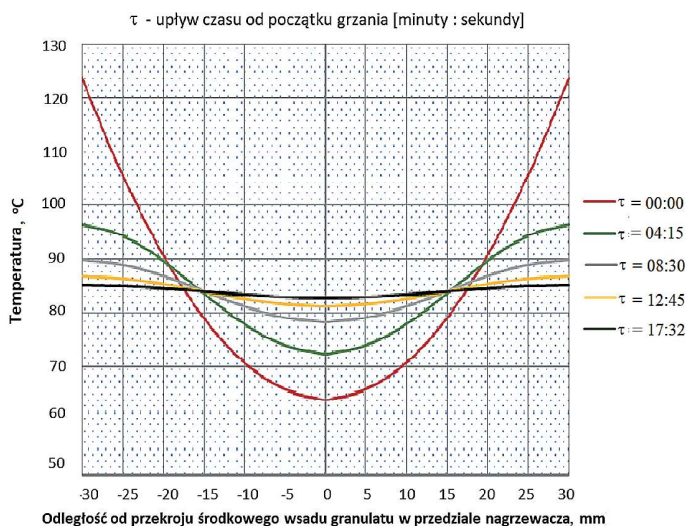


Fig. 4. Temperature distribution and the rate of its equalization after the end of heating according to the FEM calculations ( $\tau$  – the time from the end of heating, min:s)

Rys. 4. Rozkład temperatury i tempo jej wyrównania po zakończeniu nagrzewania wg obliczeń metodą MES ( $\tau$  – czas od momentu zakończenia grzania, min:s)

Przygotowanie mieszanki polegało na odważeniu porcji lepszczka i biokomponentu wg proporcji podanych w tabeli 2 oraz na wymieszaniu obu składników. Do tego celu zastosowano mieszalnik lemieszowy wyposażony w zespół zasypowy i zasobnik mieszanki. Częstotliwość pracy mieszalnika MLB mogła być mniejsza niż częstotliwość prowadzenia głównych operacji. Dla wydajności 500 kg/h dobrano mieszalnik o pojemności roboczej 220 dm<sup>3</sup> (bęben o wymiarach 700 × 1250 mm). Pozwolił on na przygotowanie mieszanki dla 18 szarż. Pojemność zasobnika mieszanki ZLB odpowiadała pojemności mieszalnika. Zasobnik był wyposażony w agitator (poziomy mikromieszalnik) przy króćcu wyspowym. Pod zasobnikiem ZBL zlokalizowano zespół dozownika wagowego WLB, którego zadaniem było odważanie porcji mieszanki do operacji otoczkowania granulatu. Był to zespół osadzony na tensometrach, elastycznie połączony z króćcem wyspowym zasobnika ZBL (rękawem). Zasobnik zespołu mieścił 1,5–3 porcji mieszanki, a jego napełnienie odbywało się automatycznie.

Opracowana technologia przewiduje zastosowanie przestawnego podajnika PLB z zasobnikiem na porcję mieszanki,

do którego trafia dozowana porcja. Podajnik napełniony porcją mieszanki należy przestawić w odpowiednim momencie cyklu pracy w ustawienie robocze aplikacji mieszanki do bębna otoczkowania i włączyć podajnik. W projekcie przewidziano zastosowanie podajnika wibracyjnego.

### Wychładzanie granulatu

Ze względu na potrzebę utrzymania granulatu w ciągłym ruchu do momentu aż jego temperatura obniży się do wartości, przy której granule już nie będą miały tendencji do sklejania się, przyjęto prowadzenie wychładzania w bębnie obrotowym, analogicznie do prowadzenia otoczkowania. Jako czynnik chłodzący przyjęto powietrze wdmuchiwane do bębna. By zmaksymalizować efekt chłodzenia, cała masa granulatu w bębnie powinna być poddawana swobodnemu (rozproszonemu) spadkowi, przy czym udział tego spadku w ruchu granulatu powinien być jak największy. Ma to zapewnić jak najlepszy kontakt granulatu z powietrzem chłodzącym. Założeniowy kształt bębna chłodzącego BCh z określeniem jego głównych wymiarów przedstawiono na rys. 6. Projekt przewiduje możliwość pracy układu chłodniczego w dwóch trybach: z cyrkulacją powietrza chłodzącego pomiędzy centralą chłodniczą CCh a bębniem BCh oraz z otwartym przepływem powietrza czerpanego z atmosfery (z otoczenia). Chłodniczy układ projektowy składa się z bębna BCh, centrali chłodniczej powietrza CCh współpracującej z agregatem wody lodowej AWL, sztywnych kanałów powietrza z układem przepustnic Z1, Z2 i Z3 oraz czerpnią i wyrzutnią dla pracy w trybie otwartym, a także z elastycznych kanałów powietrza (węży) z przestawną kształtką na końcu współpracującą z BCh. Centrala CCh powinna zawierać blok filtra powietrza Fp, blok wanny z syfonem do odprowadzania kondensatu (do kanalizacji) Wk, blok chłodniczy powietrza Ch, przez którego węzownicę cyrkuluje woda lodowa (wodny roztwór glikolu), wentylator wymuszający przepływ (cyrkulację) powietrza Wp i podgrzewacz powietrza Qp. Projekt przewiduje zastosowanie sprężarkowego agregatu wody lodowej AWL, który zawiera układ cyrkulacji bezfreonowego czynnika (płynu) chłodniczego z wentylatorowym skraplaczem i wymiennikowym parownikiem, w którym wychładzana

Table 4. Parameters of the FEM method for calculating the heating and post-heating equalization for granular charge as a plate heated on both sides with equal power

Tabela 4. Parametry metody MES do obliczania grzania i wyrównywania temperatury po zakończeniu grzania dla wsadu granulatu jako płyty grzanej obustronnie z jednakową mocą

Wyszczególnienie	Oznaczenie	Jednostka	Wartość
Przyjęta do obliczeń grubość przedziału grzewczego – wsadu granulatu	$s$	mm	60
Liczba warstw obliczeniowych w przeliczeniu na połowę grubości wsadu granulatu jako płyty obliczeniowej	$n$	-	12
Grubość warstwy obliczeniowej... $s_n = s/2n$	$s_n$	mm	2,5
Opór cieplny przegrody o powierzchni 1 m <sup>2</sup> i grubości warstwy... $R_n = s_n/(1000 \lambda)$	$R_n$	K/W	$8,(3) \cdot 10^{-3}$
Krok obliczeniowy czasu	$\Delta\tau$	s	1

Table 5. Calculations of the heating of the granulate charge as calculation plates using the FEM method

Tabela 5. Obliczenia grzania wsadu granulatu jako płyty obliczeniowej metodą elementów skończonych MES

Oznaczenie	Jednostka	$i$	Powierzchnia płyty	Środek płyty	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$x$	mm		30	0	1,25	3,75	6,25	8,75	11,25	13,75	16,25	18,75	21,25	23,75	26,25	28,75
		$\tau_i$														
$t_{ij}$	K		283,15 $t_{\text{pow=0}}$	10 $t_{\text{sr=0}}$	283,15	283,15	283,15	283,15	283,15	283,15	283,15	283,15	283,15	283,15	283,15	283,15
$P_{ij}$	W	0	$t_{\text{pow=0}}$		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1200
$\Delta U_{ij}$	J/s				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1200
$\Delta t_{ij}$	K				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,417
$t_{ij}$	K	120 s	307,5 $t_{\text{pow=0}}$	10,01 $t_{\text{sr}}$	10,01	10,03	10,09	10,51	10,22	10,51	11,11	12,28	14,36	17,8	23,08	30,6
$P_{ij}$	W		$t_{\text{pow=0}}$		0,8	2,5	6,5	72,7	35	72,7	140	250	413	633	902	1200
$\Delta U_{ij}$	J/s	2 min			0,8	1,7	4	37,7	19,4	37,7	67,3	110	163	220	269	298
$\Delta t_{ij}$	K				0	0,001	0,003	0,013	0,007	0,013	0,023	0,038	0,057	0,077	0,094	0,104
$t_{ij}$	K	240 s	318,22 $t_{\text{pow=0}}$	10,18 $t_{\text{sr}}$	283,39	283,49	284,19	286,12	284,93	286,12	287,93	290,58	294,3	299,32	305,87	314,11
$P_{ij}$	W		$t_{\text{pow=0}}$		12,9	29,4	89,7	217	143	217	318	446	603	786	988	1200
$\Delta U_{ij}$	J/s	4 min			12,9	16,5	36,2	74	53,3	74	101	128	157	183	202	212
$\Delta t_{ij}$	K				0,004	0,006	0,013	0,026	0,018	0,026	0,035	0,045	0,055	0,064	0,07	0,074
$t_{ij}$	K	480 s	303,2 $t_{\text{pow=0}}$	12,72 $t_{\text{sr}}$	286,08	286,51	288,75	293,32	290,7	293,32	296,7	300,97	306,23	312,58	320,09	328,83
$P_{ij}$	W		$t_{\text{pow=0}}$		50,8	105	234	406	314	406	512	631	761	902	1049	1200
$\Delta U_{ij}$	J/s	8 min			50,8	54,2	69	92	80	92	106	119	130	141	147	151
$\Delta t_{ij}$	K				0,018	0,019	0,021	0,032	0,028	0,032	0,037	0,041	0,045	0,049	0,051	0,052
$t_{ij}$	K	960 s	354,75 $t_{\text{pow=0}}$	24,73 $t_{\text{sr}}$	298,24	298,97	302,64	309,39	305,62	309,39	313,97	319,41	325,72	332,93	341,06	350,12
$P_{ij}$	W		$t_{\text{pow=0}}$		87,2	175	357	551	452	551	652	757	865	9758	1087	1200
$\Delta U_{ij}$	J/s	16 min			87,2	87,8	92	99	95	99	101	105	108	8893	-8671	113
$\Delta t_{ij}$	K				0,03	0,031	0,032	0,034	0,033	0,034	0,035	0,036	0,038	0,038	0,039	0,039
$t_{ij}$	K	1500 s	374,75 $t_{\text{pow=0}}$	42,24 $t_{\text{sr}}$	315,8	316,61	320,67	328,01	323,93	328,01	332,92	338,67	345,26	352,69	360,98	370,13
$P_{ij}$	W		$t_{\text{pow=0}}$		87,2	175	357	551	452	551	652	757	865	9758	1087	1200
$\Delta U_{ij}$	J/s	25 min			87,2	87,8	92	99	95	99	101	105	108	8893	-8671	113
$\Delta t_{ij}$	K				0,03	0,031	0,032	0,034	0,033	0,034	0,035	0,036	0,038	0,038	0,039	0,039
$t_{ij}$	K	2128 s	396,85 $t_{\text{pow=0}}$	63,8 $t_{\text{sr}}$	337,36	338,19	342,34	349,81	345,66	349,81	354,8	360,62	367,27	374,75	383,05	392,25
$P_{ij}$	W		$t_{\text{pow=0}}$		99,5	199,1	398,5	598,2	498,3	598,2	698,3	798,5	898,7	999,1	1099,5	1200
$\Delta U_{ij}$	J/s	35,5 min			99,5	99,6	99,8	99,9	99,8	99,9	100,1	100,2	100,2	100,4	100,4	100,5
$\Delta t_{ij}$	K				0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035



Table 6. Temperature equalization in the charge cross-section as a calculation plate after heating-finite element calculations FEM of the temperature equalization rate with a given initial distribution in the charge cross-section in the absence of heat exchange with the environment

Tabela 6. Wyrównanie się temperatury w przekroju wsadu jako płyty obliczeniowej po zakończeniu grzania; obliczenia metodą elementów skończonych MES tempa wyrównania się temperatury o zadanym początkowym rozkładzie w przekroju wsadu przy braku wymiany ciepła z otoczeniem

Oznaczenie	Jednostka	$i$	Środek płyty	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Powierzchnia płyty
$x$	mm		0,00	1,25	3,75	6,25	8,75	11,25	13,75	16,25	18,75	21,25	23,75	26,25	28,75	30,00
$t_{ij}$	s	$\tau_i$														
$P_{ij}$	W	0	336,95	337,36	338,19	339,85	342,34	345,66	349,81	354,80	360,62	367,27	374,75	383,05	392,25	396,85
$\Delta U_{ij}$	J/s		0	99,50	199,10	298,70	398,50	498,30	598,20	698,30	798,50	898,70	999,10	1099,50	0,00	
$\Delta t_{ij}$	K		0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	-0,382
$t_{ij}$	K	255 s	345,54	345,89	346,60	347,98	349,96	352,45	355,31	358,36	361,40	364,20	366,54	368,22	369,10	369,54
$P_{ij}$	W		0	84,60	165,30	238,30	299,10	343,10	366,10	364,30	335,80	280,70	202,10	105,80	0,00	
$\Delta U_{ij}$	J/s	4,25 min		84,60	80,70	73,00	60,80	44,00	23,00	-1,80	-28,50	-55,10	-78,60	-96,30	-105,80	
$\Delta t_{ij}$	K		0,029	0,028	0,025	0,021	0,015	0,008	0,008	-0,001	-0,001	-0,019	-0,027	-0,033	-0,037	
$t_{ij}$	K	510 s	351,39	351,58	351,95	352,68	353,72	354,99	356,41	357,89	359,32	360,61	361,66	362,41	362,80	362,99
$P_{ij}$	W		0	45,30	87,60	124,10	152,50	170,60	177,30	171,80	154,60	126,60	89,70	46,50	0,00	
$\Delta U_{ij}$	J/s	8,5 min		45,30	42,30	36,50	28,40	18,10	6,70	-5,50	-17,20	-28,00	-36,90	-43,20	-46,50	
$\Delta t_{ij}$	K		0,016	0,015	0,013	0,010	0,006	0,002	0,002	-0,002	-0,006	-0,010	-0,013	-0,015	-0,016	
$t_{ij}$	K	7,65 s	354,36	354,45	354,64	355,00	355,50	356,12	356,81	357,52	358,21	358,83	359,34	359,70	359,88	359,97
$P_{ij}$	W		0	22,20	42,80	60,60	74,20	82,80	85,70	82,90	74,30	60,70	42,90	22,20	0,00	
$\Delta U_{ij}$	J/s	12,75 min		22,20	20,60	17,80	13,60	8,60	2,90	-2,80	-8,60	-13,60	-17,80	-20,70	-22,20	
$\Delta t_{ij}$	K		0,008	0,007	0,006	0,005	0,003	0,003	0,001	-0,001	-0,003	-0,005	-0,006	-0,007	-0,008	
$t_{ij}$	K	1052 s	355,93	355,97	356,05	356,21	356,43	356,70	357,01	357,33	357,63	357,90	358,13	358,28	358,37	358,41
$P_{ij}$	W		0	9,80	18,90	26,80	32,80	36,60	37,90	36,60	32,80	26,80	18,90	9,80	0,00	
$\Delta U_{ij}$	J/s	17,53 min		9,80	9,10	7,90	6,00	3,80	1,30	-1,30	-3,80	-6,00	-7,90	-9,10	-9,80	
$\Delta t_{ij}$	K		0,008	0,007	0,006	0,005	0,003	0,003	0,001	-0,001	-0,003	-0,005	-0,006	-0,007	-0,008	

gdzie:  $i$  – numer warstwy obliczeniowej,  $x$  – odległość środka warstwy od środka płyty,  $t_i$  – upływ czasu od początku grzania,  $t_{ij}$  – temperatura w środku warstwy / po czasie  $t_i, \dots, t_{ij} = t_{i+1} + \Delta t_{i+1}^2 / 2, t_{ij}$  – temperatura na powierzchni płyty po czasie  $t_i, \dots, t_{ij} = t_{i+1} + (t_{i+1} - t_{ij}) / 2, t_{ij}$  – temperatura w środku płyty po czasie  $t_i, \dots, t_{ij} = t_{i+1} + \Delta t_{i+1}^2 / 2, t_{ij}$  – temperatura w środku warstwy obliczeniowej  $\Delta U_{ij}$ ;  $j$  – zmiana energii wewnętrznej w warstwie w ciągu sekundy  $\Delta U_{ij} = P_{ij} \cdot \Delta t_{ij}$  – zmiana temperatury w warstwie  $i$  w czasie  $\Delta t_{ij} = t_{i+1} - t_i$ ;  $\rho$  – gęstość nasypowa granulatu,  $s_{ij}$  – grubość warstwy obliczeniowej  $\Delta U_{ij}$ ;  $R_{ij}$  – opór cieplny przegrody o powierzchni  $1 \text{ m}^2$  i o grubości warstwy obliczeniowej  $\Delta U_{ij}$ ;  $j$  – zmiana energii

$$\Delta t_{i,j} = \frac{d_{i,j} \Delta T}{\rho s_{i,j}}$$

w którym  $\Delta T_{ij}$  oznacza przyrost temperatury w punkcie  $(i,j)$ ,  $d_{ij}$  – zmiana energii w punkcie  $(i,j)$ ,  $c$  – ciepło właściwe granulatu,  $\rho$  – gęstość nasypowa granulatu,  $s_{ij}$  – grubość warstwy obliczeniowej definiowaną jako  $s_{ij} = s/2n$ , a  $\Delta t$  przyrost czasu

Table 7. FEM calculations of heating and temperature equalization after the end of heating for the granulate charge as a plate heated on both sides

Tabela 7. Wyniki obliczeń MES nagrzewania i wyrównywania temperatury po zakończeniu nagrzewania dla wsadu granulatu w postaci płyty nagrzewanej grzanej z obu stron

Wyszczególnienie	Oznaczenie	Jednostka	Wartość
Optymalna liczba przedziałów w sekcji nagrzewacza	$k$	-	6
Optymalna grubość przedziałów na granulata	$s$	mm	60
Obliczona szerokość ścian grzewczych	$b$	mm	694
Potrzebna moc grzewcza sekcji nagrzewacza przy grzaniu stałą mocą bez uwzględnienia strat ciepła do otoczenia oraz dodatkowej mocy na podgrzanie ścian przedziałów od temperatury po opróżnieniu sekcji do temperatury na końcu fazy grzania	$P_{nt}$	kW	10,0
Przyjęta projektowa rezerwa mocy grzewczej uwzględniająca straty ciepła do otoczenia	$P_{rez}$	kW	2,0
Potrzebna łączna moc grzewcza mat dla sekcji nagrzewacza – wartość minimalna $P_{nom-S} = P_{nt} + P_{rez}$	$P_{nom-S}$	kW	12,0
Potrzebna nominalna moc grzewcza mat między przedziałowych – wartość minimalna, $P_{nom-m} = P_{nom-s}/k$	$P_{nom-m}$	kW	2,0
Potrzebna nominalna moc grzewcza mat skrajnych sekcji – wartość minimalna, $P_{nom-sk} = P_{nom-m}/2$	$P_{nom-sk}$	kW	1,0
Obciążenie powierzchniowe międzyprzedziałowych mat grzewczych – nominalne obciążenie obustronne	$P_{cm^2-m}$	W/cm <sup>2</sup>	0,144
Obciążenie powierzchniowe skrajnych mat grzewczych w sekcji nagrzewacza – nominalne obciążenie jednostronne	$P_{cm^2-sk}$	W/cm <sup>2</sup>	0,072
Czas fazy grzania	$\tau_g$	gg:mm:ss	00:35:28
Czas wyrównywania się temperatury w przekroju wsadu	$\tau_w$	gg:mm:ss	00:17:32
Łączny czas grzania i wyrównywania się temperatury	$\tau_g + \tau_w$	gg:mm:ss	00:53:00
Maksymalna temperatura podczas nagrzewania	$t_{grz-max}$	K	396,85
Obliczona maksymalna temperatura końcowa w przekroju wsadu bez uwzględnienia strat ciepła do otoczenia	$t_{max}$	K	358,45
Obliczona minimalna temperatura końcowa w przekroju wsadu bez uwzględnienia strat ciepła do otoczenia	$t_{min-nt}$	K	355,95
Oszacowany maksymalny spadek temperatury wsadu podczas fazy wyrównywania temperatury (warstw wsadu przy ścianach zewnętrznych sekcji)	$\Delta t_s$	K	2,5
Obliczona minimalna temperatura końcowa w przekroju wsadu z uwzględnieniem strat ciepła do otoczenia	$t_{min}$	K	353,45
Oszacowany minimalny spadek temperatury wsadu podczas fazy wyrównywania temperatury (warstw wsadu w głębi sekcji)	$\Delta t_s$	K	0,3
Obliczona maksymalna temperatura końcowa w przekroju wsadu z uwzględnieniem strat ciepła do otoczenia	$t_{min}$	K	358,15

jest woda lodowa. Obliczenia procesu wychładzania granulatu wykonano dla trybu pracy z cyrkulacją powietrza chłodzącego pomiędzy centralą chłodniczą CCh a bębniem BCh. Obliczenia przedstawiono w tabeli 8. W obliczeniach nie uwzględniono dodatkowego efektu chłodzenia wynikającego z naturalnego chłodzenia bębna BCh przez niezainstalowane ściany. Obliczenia potwierdziły, że przy przyjętych założeniach, czyli wychładzaniu szarży granulatu z 64°C do 40°C, osiągnięcie tego celu w projektowym układzie technicznym jest możliwe w czasie do 18 min.

W tabeli 9 przedstawiono wyniki obliczeń dla procesu osuszania powietrza przed rozpoczęciem chłodzenia granulatu; tryb pracy systemu przepływu powietrza w obiegu zamkniętym (cyrkulacja) pomiędzy centralą chłodniczą powietrza CCH a bębniem chłodzącym BCH.

W tabeli 10 przedstawiono arkusz kalkulacyjny w skróconej postaci z przykładowymi wynikami obliczeń dla chłodzenia z otwartym przepływem powietrza, w szczególności dla przypadków granicznych. Jako graniczne wartości mogącej wystąpić wilgotności powietrza atmosferycznego przyjęto 30 i 95%. Wartości te określono po prześledzeniu historii pomiarów wilgotności powietrza z ostatnich lat udostępnionej w Internecie ze stacji Meteo Warszawa. Objasnienia wymaga temperatura powietrza na wylocie z wymiennika chłodniczego. Jeśli konieczne jest wykroplenie wilgoci, temperatura powietrza na wylocie powinna mieć wartość punktu rosy, co zapewnia odpowiednią ilość wykroplonej wody (wtedy temperatura powietrza na wylocie, oznaczona jako  $t_{pw1}$ , musi być niższa niż temperatura punktu rosy powietrza czerpanego, czyli  $t_{pa}$ ). Jeśli wykroplenie wilgoci nie

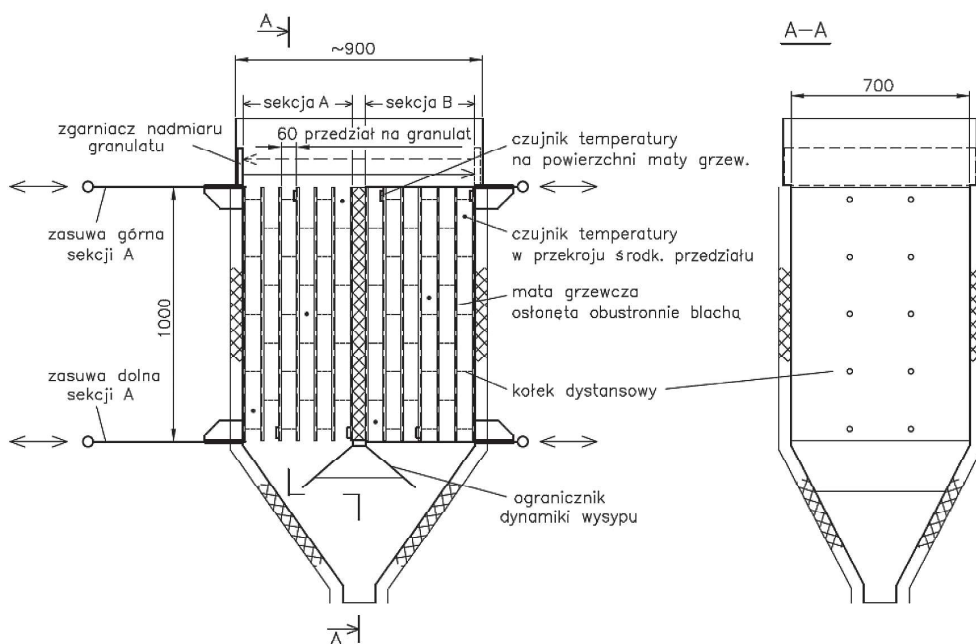


Fig. 5. NG heater design

Rys. 5. Konstrukcja nagrzewacza granulatu NG

jest wymagane, ale temperatura powietrza czerpanego przekracza graniczną wartość temperatury punktu rosy  $t_{p-gr}$  (czyli np.  $16^{\circ}C$ ), to temperatura powietrza na wylocie z wymiennika  $t_{pw1}$  powinna być równa tej granicznej wartości  $t_{pw1} = t_{p-gr}$ . W pozostałych przypadkach, gdy wykroplenie wilgoci nie jest potrzebne, a temperatura powietrza czerpanego jest odpowiednia, temperatura powietrza na wylocie  $t_{pw1}$  będzie równa temperaturze powietrza czerpanego  $t_{pw1} = t_{pa}$ .

Obliczenia wykazały, że wykorzystanie powietrza atmosferycznego o otwartym przepływie do chłodzenia granulatu zamiast powietrza cyrkulującego pomiędzy CCh a BCh będzie rozwiązaniem bardziej opłacalnym, pod pewnymi warunkami. Jeśli wilgotność powietrza nie będzie przekraczała 86%, nie będzie potrzeby wykraplania jego wilgoci (osuszania ziębniczego), a tym samym podgrzewania po wykropleniu, aby obniżyć wilgotność do 86%. W tym

przypadku temperatura powietrza nie powinna być wyższa niż  $16^{\circ}C$ , aby czas chłodzenia granulatu nie przekroczył maksymalnego czasu przyjętego dla tej operacji, czyli 18 min. Takie chłodzenie będzie najbardziej ekonomiczne. Jeśli powietrze atmosferyczne ma temperaturę poniżej  $11,5^{\circ}C$  i wilgotność, która nie przekracza  $8\text{ g/kg}$  powietrza suchego, to nie będzie potrzeby wykraplania wilgoci. W takim przypadku, jeśli konieczne jest podgrzanie powietrza w celu obniżenia wilgotności do poziomu 86%, zużycie energii elektrycznej będzie mniejsze niż w przypadku pracy z cyrkulacją, która wymaga większego zużycia energii przez agregat AWL. Dodatkowo czas chłodzenia szarzy

będzie krótszy, osiągając zaplanowaną granicę 18 min (a w niektórych przypadkach może to być nawet poniżej 10 min, szczególnie przy niskich temperaturach na zewnątrz). Im niższa temperatura powietrza, tym krótszy będzie czas chłodzenia. Jeśli wilgotność powietrza czerpanego przekroczy 86%, oznacza to, że będzie konieczne podjęcie działań, aby obniżyć tę wilgotność do wartości granicznej. Im bardziej wilgotność przekracza wartość 86%, tym więcej energii będzie wymagane do obniżenia tej wilgotności, co wiąże się z większym zużyciem energii i wydłużeniem czasu chłodzenia. Podsumowując, jeśli wilgotność powietrza jest niższa niż 86%, podgrzewanie powietrza będzie bardziej efektywne energetycznie niż alternatywna metoda cyrkulacji. Im wyższa wilgotność powietrza (ponad 86%), tym większe zużycie energii będzie potrzebne do jej obniżenia, co wpływa na czas i efektywność procesu chłodzenia.

Z powietrza o temp.  $11,5\text{--}13,5^{\circ}C$  może być konieczne wykroplenie części wilgoci oraz podgrzanie powietrza po wykropleniu w celu obniżenia wilgotności do 86%. Jednak nawet w takim przypadku zużycie energii elektrycznej będzie mniejsze niż w przypadku alternatywnego trybu pracy z cyrkulacją. Dodatkowo czas chłodzenia będzie krótszy od przyjętej granicy 18 min, osiągając zakres  $16,0\text{--}16,5$  min. Wykorzystanie powietrza o temp.  $13,5\text{--}16,0^{\circ}C$  i wilgotności powyżej 86% znajduje się na granicy opłacalności, a może być nawet powyżej tej granicy. Oznacza to, że proces chłodzenia i podgrzewania powietrza w tym zakresie temperatury i wilgotności staje się mniej efektywny ekonomicznie. Wilgotność powietrza powyżej 86% może wymagać większego zużycia energii do obniżenia wilgotności i osiągnięcia odpowiednich warunków chłodzenia. W takich przypadkach może się okazać, że dalsze podnoszenie temperatury powietrza lub stosowanie cyrkulacji powietrza staje się mniej opłacalne, ponieważ

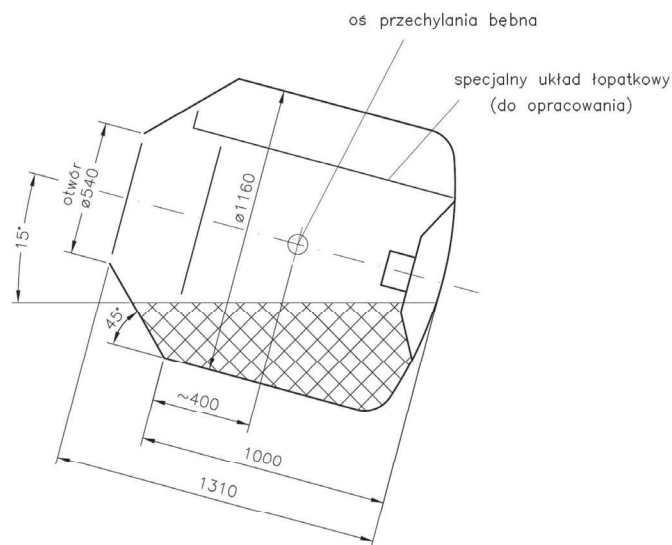


Fig. 6. BCh cooling drum

Rys. 6. Bęben chłodzący BCh

Table 8. Excerpt from the calculation of granulate cooling in the mode with air circulation

Tabela 8. Wyciąg z obliczeń wychładzania granulatu w trybie z obiegiem powietrza

Wyszczególnienie	Oznaczenie	Jednostka	Wartość
Masa szarży granulatu	$m_s$	kg	263,2
Ciepło właściwe granulatu	$C_G$	kJ/(kg·K)	1,15
Początkowa temperatura granulatu	$t_{Gp}$	K	337,15
Założona temperatura końcowa granulatu (na koniec chłodzenia)	$t_{Gk}$	K	313,15
Ilość ciepła do odebrania z granulatu $Q = m_s C_G (t_{Gp} - t_{Gk})$	$Q$	kJ	7264
Przyjęta wydajność wentylatora powietrza – wentylator w centrali CCh za wymiennikiem chłodzącym	$V_{p/h}$	m <sup>3</sup> /h	1400
	$V_{p/s}$	m <sup>3</sup> /s	0,389
Iterowana początkowa temperatura wlotowa powietrza do bębna	$t_{pw}$	K	293,15
Krok obliczeniowy upływu czasu chłodzenia	$\Delta\tau$	s	20

Krok obliczeniowy	$i$		1	8	15	23	32	40	47	54
Czas chłodzenia na koniec kroku – narastająco	$\tau_s$	s	20	160	300	460	640	800	940	1080
	$\tau_m$	min	0,(3)	2,(6)	5	7,(6)	10,(6)	13,(3)	15,(6)	18
Temperatura granulatu na początku „i” $t_{Gp}(i) = t_{Gk}(i-1)$	$t_{Gp}(i)$	K	337,15	333,35	329,75	325,95	321,95	318,65	315,95	313,45
Obliczona temperatura wlotowa powietrza do bębna	$t_{pw}(i)$	K	293,15	292,25	291,35	290,35	289,15	288,15	287,15	286,25
Obliczony przyrost temperatury powietrza w bębnie	$\Delta t_p(i)$	K	18	16,8	15,8	14,6	13,5	12,5	11,8	11,1
Temperatura wylotowa powietrza z bębna	$t_{py}(i)$	K	311,15	309,05	307,15	304,95	302,65	300,65	298,95	297,35
Średnie ciepło właściwe powietrza suchego w zakresie temp. $t_{pw}(i) - t_{py}(i)$	$c_p(i)$	kJ/	1,0053	1,0052	1,0051	1,005	1,0049	1,0049	1,0046	1,0048
Gęstość powietrza w temperaturze $t_{pw}(i)$	$\rho_{pw}(i)$	kg/m <sup>3</sup>	1,204	1,207	1,211	1,215	1,22	1,225	1,229	1,233
Obliczony strumień masowy powietrza $G_p(i) = V_{p/s} \rho_{pw}(i)$	$G_p(i)$	kg/s	0,468	0,469	0,471	0,473	0,475	0,476	0,478	0,479
Ciepło chłodzenia w kroku $i$ $q(i) = G_p \Delta\tau (t_{pw} - t_{py})(i)$	$q(i)$	kJ	168,9	158,9	149	138,6	128,2	119,9	113,2	107,1
Ciepło chłodzenia narastająco $Q(i) = \sum q(j)$ od $j = 1$ do $j = i$	$Q(i)$	kJ	169	1308	2375	3516	4706	5691	6502	7268
Moc chłodzenia w kroku $i$ $P(i) = q(i)/\Delta\tau$	$P(i)$	kW	8,49	7,94	7,45	6,93	6,41	6	5,66	5,36
Temperatura granulatu po kroku $i$ $t_{Gk}(i) = t_{Gp}(i) - q(i)/(m_s c_G)$	$t_{Gk}(i)$	K	336,55	332,85	329,25	325,45	321,55	318,25	315,55	313,05
Średnie zużycie mocy chłodniczej						$P_{ch}$		kW		7,0
Przyjęty współczynnik efektywności energetycznej agregatu chłodniczego						EERc				3,5
Zużycie mocy przez sprężarkę, wentylator i pompę w AWL $P_{AWL} = P_{ch}/EERc$						$P_{AWL}$		kW		2,0

wiąże się to z wyższymi kosztami energetycznymi, a efektywność procesu chłodzenia maleje.

Powietrze o temp. powyżej 16°C trzeba ochłodzić do tej temperatury, aby czas chłodzenia granulatu nie przekroczył 18 min. Nie może ono też zawierać więcej wilgoci niż 9,7 g/kg suchego powietrza, aby wilgotność powietrza ochłodzonego do temp. 16°C nie przekroczyła 86%. Graniczną temperaturą pod względem opłacalności jest tutaj 30°C (na wychładzanie powietrza o temperaturze powyżej 30°C potrzeba powyżej 7 kW mocy chłodniczej).

Przeprowadzone badania dały podstawę do opracowania 2 zgłoszeń patentowych<sup>10, 11</sup>.

## Podsumowanie i wnioski

Wytwarzanie bionawozów metodą otaczania granuli nawozu warstwą zewnętrzną zawierającą neutralny nośnik wydaje się najwłaściwszym kierunkiem wytwarzania tego typu produktów. W trakcie prowadzenia procesu produkcji korzystne jest stosowanie niskich temperatur oraz unikanie



Table 9. Air drying process calculation before pellet cooling begins; air flow system operation mode: closed circuit (circulation) CCh – BCh – start-up phase

Tabela 9. Obliczenia procesu osuszania powietrza przed rozpoczęciem chłodzenia granulatu; tryb pracy systemu przepływu powietrza: obieg zamknięty (cyrkulacja) CCh – BCh – faza rozruchu

Wyszczególnienie	Oznaczenie	Jednostka	Wartość
Obliczeniowa początkowa temperatura powietrza w układzie	$t_{p0}$	K	305,15
Obliczeniowa początkowa wilgotność powietrza w układzie	$\phi_0$	%	95
Obliczeniowa początkowa zawartość wilgoci w powietrzu $y_0 = f(t_{p0}, \phi_0)$	$y_0$	g/kgpow	29,0
Dopuszczalna maksymalna zawartość wilgoci w powietrzu obiegowym	$y_1$	g/kgpow	8,0
Temperatura powietrza, do jakiej trzeba go wychłodzić, aby uzyskać wymagany stopień suchości, $t_{p1} = t_{nasyt}$ przy której $y = 8,0 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{pow}}$	$tp_1$	K	283,85
Objętość powietrza w obiegu	$V_p$	$\text{m}^3$	4,30
Gęstość powietrza w temperaturze $t_{p1}$	$\rho_p$	$\text{kg}/\text{m}^3$	1,204
Masa powietrza w obiegu (pod koniec osuszania)	$m_p$	kg	5,18
Średnie ciepło właściwe powietrza suchego w zakresie temp. $t_{p0} - t_{p1}$	$c_p$	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	1,005
Ciepło wychłodzenia powietrza podczas rozruchu $Q_p = m_p c_p (t_{p0} - t_{p1})$	$Q_p$	kJ	110,8
Masa wilgoci do wykroplenia, $m_{\text{H}_2\text{O}} = m_p (y_0 - y_1)$	$m_{\text{H}_2\text{O}}$	g	108,7
Ciepło wykroplenia wilgoci, $Q_{r-\text{H}_2\text{O}} = r_{\text{H}_2\text{O}} m_p (y_0 - y_1) = 2,5 m_p (y_0 - y_1)$	$Q_{r-\text{H}_2\text{O}}$	kJ	271,8
Ciepło właściwe pary wodnej	$c_{\text{H}_2\text{O}}$	$\text{kJ}/(\text{g} \cdot \text{K})$	0,00184
Ciepło wychłodzenia wilgoci, $Q_{c-\text{H}_2\text{O}} = c_{\text{H}_2\text{O}} m_p y_0 (t_{p0} - t_{p1}) = 0,0042 m_p y_0 (t_{p0} - t_{p1})$	$Q_{c-\text{H}_2\text{O}}$	kJ	5,9
Potrzebne ciepło chłodnicze w fazie osuszania powietrza, $Q_p + Q_{r-\text{H}_2\text{O}} + Q_{c-\text{H}_2\text{O}}$	$Q_{\text{chr}}$	kJ	388,5
Moc chłodnicza wymiennika CCh z agregatem AWL	$P_{\text{ch}}$	kW	10,0

w miarę możliwości stosowania wody, ponieważ w obecności wilgoci, zwłaszcza w podwyższonej temperaturze, jak ma to miejsce w czasie suszenia, następował szybki rozwój żywych bakterii z ich form przetrwalnikowych. Korzystne jest również fizyczne oddzielenie bakterii od granulatu nawozu, tak aby nie były one narażone na wysokie miejscowe stężenie soli mineralnych powstałych w czasie rozpuszczania nawozu w glebie pod wpływem wilgoci. Zróżnicowanie szybkości rozpuszczania się obu tych warstw poprzez wytworzenie łatwo rozpuszczalnej, zewnętrznej otoczki zawierającej mikroorganizmy może korzystnie wpływać na efektywność stosowania bionawozów.

W przeprowadzonych badaniach opracowano sposób wprowadzania bakterii do nawozów granulowanych (Polifoska Krzem® i Super Fos Dar® 40) metodą nakładania otoczki w formie warstwy zewnętrznej bakterii osadzonych na nośniku organicznym (maltodekstryna) za pomocą glikolu polietylenowego PEG 4000 z dodatkiem gliceryny jako lepiszcza.

Minimalna liczebność mikroorganizmów w wytworzonych nawozach nie powinna być mniejsza niż  $1,0 \cdot 10^6$  jedn./g nawozu.

Otrzymano: 24-10-2024

Zrecenzowano: 06-11-2024

Zaakceptowano: 30-12-2024

Opublikowano: 24-01-2025

#### LITERATURA

- [1] A.O. Adesemoye, J.W. Kloepper, *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2009, **85** nr 1, 1, doi: 10.1007/s00253-009-2196-0.
- [2] M. Ahemad, M. Kibret, *J. King Saud Univ. Sci.* 2014, **26**, nr 1, 1, doi: 10.1016/j.jksus.2013.05.001.
- [3] Y. Bashan, L.E. de-Bashan, S.R. Prabhu, J. Hernandez, *Plant Soil* 2014, **378**, nr 1–2, doi: 10.1007/s11104-013-1956-x.
- [4] H. Etesami, D.K. Maheshwari, *Ecotoxicol. Environ. Safety* 2018, **156**, 225, doi: 10.1016/j.ecoenv.2018.03.013.
- [5] FAO, IFAD, UNICEF, WFP, & WHO, 2020, *Transforming Food Systems for Affordable Healthy Diets*, www.scopus.com.
- [6] S. Gouda, R.G. Kerry, G. Das, S. Paramithiotis, H. Shin, J.K. Patra, *Microbiol. Res.* 2018, **206**, 131, doi: 10.1016/j.micres.2017.08.016.
- [7] F.L. Olivares, J.G. Busato, A.M. de Paula, L. da Silva Lima, N.O. Aguiar, L.P. Canellas, *Chem. Biol. Technol. Agric.* 2017, **4**, nr 1, 30, doi: 10.1186/s40538-017-0112-x.
- [8] P. Vejan, R. Abdullah, T. Khadiran, S. Ismail, A. Nasrulhaq Boyce, *Molecules* 2016, **21**, 5, doi: 10.3390/molecules21050573.
- [9] A. Rutkowska, P. Rusek, *Przem. Chem.* 2023, **102**, nr 5, 468, doi: 10.15199/62.2023.5.2.
- [10] *Zgł. pat. pol.* P431350 (2019).
- [11] *Zgł. pat. pol.* P 431354 (2019).