

# WYBRANE PROBLEMY JAKOŚCI PRODUKCJI GRANULATÓW NAWOSZOWYCH – WYTRZYMAŁOŚĆ GRANUL

Przemysław MALINOWSKI, Mariusz KOŁOSOWSKI, Andrzej BISKUPSKI

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono metody oceny i pomiarów wytrzymałości mechanicznej granul nawozów mineralnych. Szczegółowo omówiono metody pomiarów granul wytrzymałości na ściskanie. Na przykładach przedstawiono możliwe zastosowania pomiarów wytrzymałości w ocenie jakości granulatów nawozowych. Wskazano także możliwości doskonalenia jakości procesów produkcyjnych granulatów nawozowych z wykorzystaniem kart kontrolnych Shewharta jako głównego narzędzia statystycznego sterowania procesami.

**Słowa kluczowe:** nawóz mineralny, jakość, wytrzymałość mechaniczna, karty kontrolne Shewharta.

## 1. Wstęp

Nawozy mineralne należą do produktów wytwarzanych w przemyśle chemicznym w największych ilościach. Można je klasyfikować według różnych kryteriów, spośród których dwa podstawowe to postać fizyczna oraz liczba składników pokarmowych w nich obecnych [1]. Biorąc pod uwagę postać fizyczną, nawozy można podzielić na stałe i płynne. W przypadku formy stałej zdecydowaną większość stanowią produkty granulowane, wytwarzane różnymi metodami. Według kolejnego kryterium, nawozy można podzielić na proste (zawierające jeden z głównych składników pokarmowych N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O) oraz wieloskładnikowe (zawierające co najmniej dwa główne składniki pokarmowe). Zapotrzebowanie na nawozy stale wzrasta. Szacuje się, że do 2019 r. zapotrzebowanie na nawozy, w przeliczeniu na czyste składniki (N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O), osiągnie poziom 200 mln ton [2]. Oznacza to ponad 8% wzrostu w porównaniu z 2015 r. Na sytuację taką składa się zarówno wzrost produkcji żywności, jak i wzrost przemysłowego przetwórstwa upraw (np. produkcja biopaliw).

## 2. Metody granulacji nawozów

Granulacja jest procesem formowania produktów stosowanym w wielu branżach, między innymi w przemyśle spożywczym, farmaceutycznym, chemicznym. Istnieje wiele sposobów wytwarzania produktów w formie granulowanej, przy czym do wytwarzania nawozów stosuje się takie metody, jak:

- granulacja z wysokoodparowanego stopu – granulacja wieżowa (prilling) lub taśmowa (np. rotoform),
- granulacja mieszarkowa z wykorzystaniem głównego strumienia surowcowego w postaci stopu lub zawiesiny o stężeniu 70-95%,
- granulacja przez otaczanie z wykorzystaniem głównego strumienia surowców w postaci stałej i czynnika granulującego w postaci cieczy, pary lub kombinacji cieczy

i czynnika gazowego (wyróżnia się dwa rodzaje: bębnowa i talerzowa),

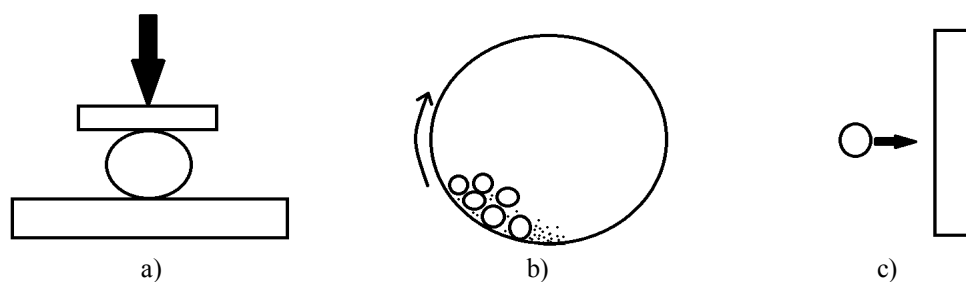
- granulacja ciśnieniowa, w której stosuje się strumienie surowców w postaci stałej (wyróżnia się dwa rodzaje: kompaktowanie i wytłaczanie) [3, 4].

Przedstawiony podział sposobów granulacji nawozów nie jest ścisły, gdyż w wielu wytwórniach stosuje się systemy kombinowane polegające na łączeniu różnych metod, najczęściej granulacji mieszarkowej w połączeniu z bębnową lub talerzową. W zależności od zastosowanego sposobu granulacji, uzyskiwane produkty będą miały różny kształt. Według klasyfikacji kształtu stosowanej do oceny jakości, granule nawozów dzieli się na 6 klas [5]:

- do klasy 1. zalicza się granule o idealnie gładkiej powierzchni i kształcie kulistym (produkty granulacji wieżowej);
- do klasy 2. zalicza się granule o mniejszym stopniu gładkości niż w klasie 1 i o co najwyżej nieznacznej deformacji kuli (produkty granulacji mieszarkowej, najczęściej kombinowanej z bębnową);
- do klasy 3. zalicza się granule o znacznym stopniu deformacji kuli (produkty granulacji mieszarkowej);
- do klasy 4. zalicza się cząstki o nieregularnym kształcie zbliżonym do sześciangu (produkty granulacji mieszarkowej);
- do klasy 5. zalicza się cząstki łamańców i zlepieńców o nieregularnych kształtach i zaokrąglonych krawędziach (produkty wszystkich metod granulacji);
- do klasy 6. zalicza się natomiast łamańce o nieregularnych kształtach i o ostrych krawędziach (produkty granulacji ciśnieniowej).

### 3. Metody pomiaru wytrzymałości granul

Wytrzymałość mechaniczna granul jest miarą zdolności do przeciwstawiania się działającym na granule siłom zewnętrznym [6]. W odniesieniu do granulatów nawozowych wytrzymałość na ściskanie jest głównym elementem oceny wytrzymałości mechanicznej granul. Dodatkowo wykonuje się także pomiary odporności na ścieranie oraz rzadziej, tak zwany, test uderzeniowy. Schematycznie testy te przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Wybrane testy wytrzymałości mechanicznej granulatów nawozowych – a) wytrzymałość na ściskanie, b) odporność na ścieranie, c) test uderzeniowy

Ogólnie przyjętą miarą wytrzymałości granul na ściskanie jest siła niezbędna do rozkruszenia granul. W przypadku oceny odporności na ścieranie mierzy się udział podziarna (najczęściej pyłu) powstałego w wyniku przemieszczania się granul względem

siebie w złożu umieszczonym w bębnie, w określonym czasie i przy określonej prędkości obrotowej. Przy czym takie parametry, jak masa nawozu, czas oraz prędkość obrotowa bębna ustalane są indywidualnie dla konkretnego typu produktu. Warunki prowadzenia testu uderzeniowego są normowane [7]. Polega on na uderzeniu granul nawozu o stalową płytę pod wpływem sprężonego powietrza i oznaczaniu masy granul, które nie uległy rozkruszeniu do ziarna poniżej 1,5 mm.

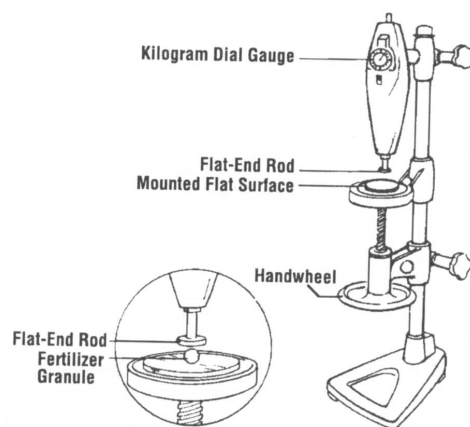
Najpowszechniej stosowanym sposobem oceny wytrzymałości granul jest pomiar wytrzymałości na ściskanie. W miarę postępu technologicznego zmieniały się metody wykonywania takich pomiarów. Najprostszym sposobem oceny tego parametru jest „test palca”, według którego granule dzieli się na słabe, o średniej twardości i twarde [8]. Za słabe uznaje się granule, które można rozkruszyć między kciukiem i palcem wskazującym. Granule o średniej twardości to takie, które ulegają rozkruszeniu umieszczone między palcem wskazującym i twardą powierzchnią. W przypadku braku możliwości rozkruszenia granul w tych warunkach, uznaje się je za twarde. Do testu używa się co najmniej 10 granul, a jego wyniki z przyczyn oczywistych mogą posłużyć jedynie do szacunkowej oceny wytrzymałości granul, zarówno na etapach produkcji, jak i aplikacji nawozu.

Również prostym, ale umożliwiającym uzyskiwanie dokładniejszych wyników, nieobciążonych błędem wynikającym z różnej siły fizycznej i odporności na ból testującego, jest test z użyciem wagi. Granulę umieszcza się na szali wagi i ściska przykładając narzędzie o płaskiej powierzchni (tzw. tłuczek) do momentu rozkruszenia granul. Jako wytrzymałość podaje się średni wynik obciążenia niezbędnego do rozkruszenia partii granul (10-20 szt.) poddanych testowi [3]. Do testów w przeszłości używane były proste wagi kuchenne lub handlowe. W dzisiejszych czasach sporadycznie stosuje się ten sposób pomiaru wykorzystując wagi elektroniczne z funkcją „zatrasku” maksymalnego obciążenia.



Rys. 2. Pomiar wytrzymałości na ściskanie przy pomocy wagi [3]

Obecnie, zarówno w pracach badawczych, jak i w bieżącej kontroli jakości w przemyśle, standardem w pomiarach wytrzymałości granul na ściskanie stały się urządzenia specjalnie do tego celu przeznaczone. W pierwszych urządzeniach tego typu granulę nawozu umieszczano na ruchomym stoliku, który ręcznie poprzez mechanizm śrubowy przesuwano w kierunku szczęki pomiarowej. W trakcie testu mierzono siłę, przy której następowało rozkruszenie granul.

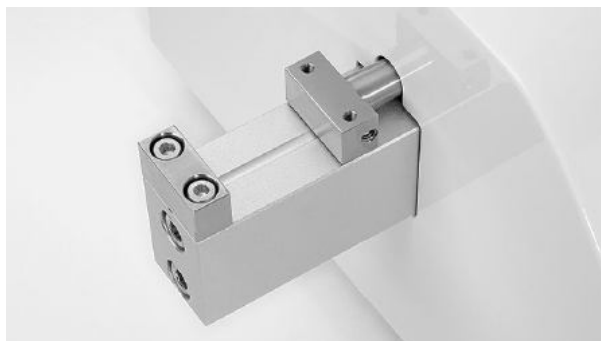


Rys. 3. Tester wytrzymałości na ściskanie [3]

Zasada pomiaru co do swojej istoty nie uległa w ostatnich latach zasadniczym zmianom, udoskonalono natomiast elementy pomiarowe. Na rynku oferowane są specjalistyczne urządzenia do pomiaru wytrzymałości granul na ściskanie, których zastosowanie nie ogranicza się do produktów nawozowych. Głównym odbiorcą tego typu urządzeń jest przemysł farmaceutyczny. Należy tutaj wymienić urządzenia takich firm, jak Erweka GmbH, Copley Scientific Ltd., Kraemer Elektronik GmbH i inne [9, 10, 11].

Nowoczesne testery umożliwiają jednoczesny pomiar siły rozkruszającej oraz rozmiarów granuli poddawanej testowi. Ponadto, producenci oferują urządzenia umożliwiające automatyczne pomiary serii kilkudziesięciu granul, a uzyskane wyniki wraz z obliczeniami statystycznymi mogą być drukowane w postaci arkuszy i/lub archiwizowane w pamięci urządzenia lub podpiętej zewnętrznej pamięci masowej. W Polsce, zarówno w jednostkach naukowych, jak i w przemyśle nawozowym, do pomiarów wytrzymałości granul na ściskanie najczęściej wykorzystywane są urządzenia firmy Erweka GmbH (rys. 4).

W celu zbadania wytrzymałości na ściskanie, granulę nawozu umieszcza się między szczękami pomiarowymi. W momencie, gdy przesuwająca się szczeka napotka na swojej drodze granulę, która stawia opór większy bądź równy zadanemu progowi czułości, dokonywany jest pomiar średnicy granul. W trakcie ściskania granul między szczękami mierzona jest siła, z jaką oddziałują na siebie granul oraz szczeka pomiarowa. W miarę przesuwu szczęki siła wzrasta do wartości, przy której następuje pęknięcie granul. Spadek mierzonej siły jest sygnałem do zakończenia pomiaru. Pomiary wytrzymałości wykonuje się dla określonej odsianej frakcji, która rozmiarom odpowiada średniemu rozmiarowi granul. W przypadku produktów z granulacji wieżowej jest to najczęściej frakcja 2,00 – 3,15 mm. W przypadku pozostałych produktów są to przeważanie frakcje 3,15 – 4,00 mm lub 4,00 – 5,00 mm.



Rys. 4. Szczęki pomiarowe urządzenia Erweka TBH seria 125 [9]

Pomiary wytrzymałości granul na ściskanie wykonywane nowoczesnymi urządzeniami nie są jednak pozbawione wad. Urządzenia takie pozwalają z reguły na prowadzenie pomiarów przy różnych czułościach (od kilku do kilkudziesięciu niutonów). Wykonywanie pomiarów przy wysokiej czułości pozwala na dokładny pomiar średnicy badanych granul, nie gwarantuje jednak prawidłowego wykonania pomiarów wytrzymałości. Z doświadczeń zebranych podczas pracy z kilkoma typami urządzeń wynika, że pomiar wytrzymałości granul może być obarczony błędem spowodowanym niedoskonałościami ich kształtu. Zdarzają się bowiem przypadki, że przy wysokiej czułości aparat mierzył średnicę (w tym momencie siła, z jaką granula oddziałuje na szczękę, jest co najmniej równa czułości), ale w miarę przesuwu szczęki i wzrostu siły następowało niewielkie przesunięcie (obrót) granuli między szczękami, powodujące spadek mierzonej siły traktowany przez układ pomiarowy jako moment rozkruszenia granuli, podczas gdy w rzeczywistości pozostawała ona w stanie praktycznie nienaruszonym. Prowadzenie pomiarów przy niższym poziomie czułości skutecznie eliminuje takie przypadki, jednakże uniemożliwia uzyskanie wiarygodnych wyników w przypadku występowania granul słabych, to znaczy takich, których wytrzymałość jest niższa od ustalonego poziomu czułości. W takich przypadkach może dochodzić do zawyżenia rzeczywistej wytrzymałości, gdyż po pierwszym rozkruszeniu granuli, które nie zostało zarejestrowane przez urządzenie, siła powodująca dalsze rozkruszenie cząstek granuli może być wyższa niż normalnie rejestrowana. Ponadto, w takich przypadkach zaniżony jest pomiar średnicy granuli. Dobór czułości, przy jakiej pracuje urządzenie, musi być swego rodzaju kompromisem i nieunikniona jest obserwacja zachowania się granul podczas testów.

#### **4. Zastosowanie pomiarów wytrzymałości na ściskanie**

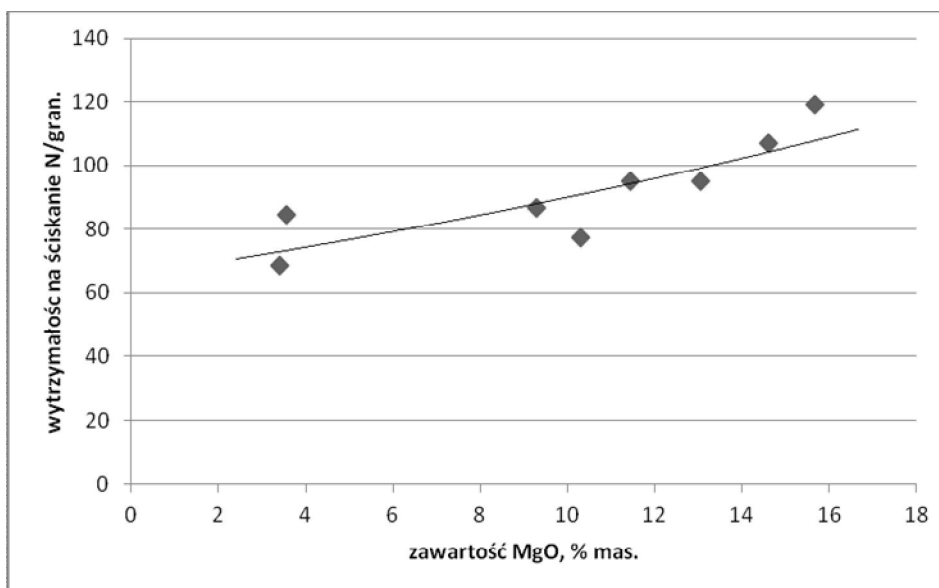
Pomiary wytrzymałości granul na ściskanie wykonywane są w celu oceny jakości nawozu. W zależności od rodzaju nawozu oraz sposobu granulacji, wytrzymałość granul na ściskanie przyjmuje różne wartości (Tab. 1). W przypadku granulatów wytwarzanych metodą wieżową są to z reguły wartości rzędu od kilku do 30 N. Nieznacznie większą wytrzymałością cechują się granule produktów wytwarzanych metodą talerzową i bębnową. W przypadku nawozów wytwarzanych metodą mieszarkową wytrzymałość granul nie przekracza z reguły 100 N. Najwyższą wytrzymałością odznaczają się produkty granulowane ciśnieniowo i w niektórych przypadkach wytrzymałość przekracza 100 N.

Tab. 1. Przykładowe wyniki pomiarów wytrzymałości na ściskanie granul nawozów różnych typów

Lp.	Typ nawozu	Metoda granulacji	Wytrzymałość na ściskanie, N
1.	Mocznik	Wieżowa	20,5
2.	AN 34% N	Wieżowa	18,4
3.	CAN	Wieżowa	20,2
4.	AN 32% N	Mieszarkowa	44,1
5.	AN 32% N	Kombinowana mieszarkowa i bębnowa	53,5
6.	CAN	Mieszarkowa	89,8
7.	CAN	Kombinowana mieszarkowa i bębnowa	95,7
8.	CAN-S	Mieszarkowa	81,9
9.	CAN-S	Kombinowana mieszarkowa i bębnowa	85,7
10.	NP 14-52	Mieszarkowa	67,0
11.	N-P-K 8-24-16	Mieszarkowa	71,0
12.	N-P-K 4-20-20	Mieszarkowa	56,6
13.	N-P-K 8-24-24	Mieszarkowa	62,2
14.	P-K 21-32	Mieszarkowa	79,1
15.	P-K 26-26	Mieszarkowa	85,4
16.	NPK 4-16-18	Mieszarkowa	42,3
17.	NPK 10-9-12	Mieszarkowa	54,0
18.	NPK 3-10-28	Mieszarkowa	52,2
19.	NPK 3-16-18	Mieszarkowa	50,2
20.	NPK 8-8-8	Bębnowa	34,4
21.	PK 13-13	Bębnowa	38,5
22.	NP-USP 21-10	Talerzowa	22,4
23.	NPK (USP)	Talerzowa	38,3
24.	NPK 3-13-25	Ciśnieniowa - kompaktowanie	114,3
25.	NPK 9-12-20	Ciśnieniowa - kompaktowanie	81,7
26.	NS 29-8	Ciśnieniowa - wytłaczanie	118,5
27.	NSMg 27-14-2	Ciśnieniowa - wytłaczanie	88,0
28.	NPK 5-9-18	Kombinowana mieszarkowa i talerzowa	38,8
29.	NPK 3,5-8-18	Kombinowana mieszarkowa i talerzowa	39,9
30.	PK 7-26	Kombinowana mieszarkowa i talerzowa	49,1
31.	PK 8-21	Kombinowana mieszarkowa i talerzowa	25,3

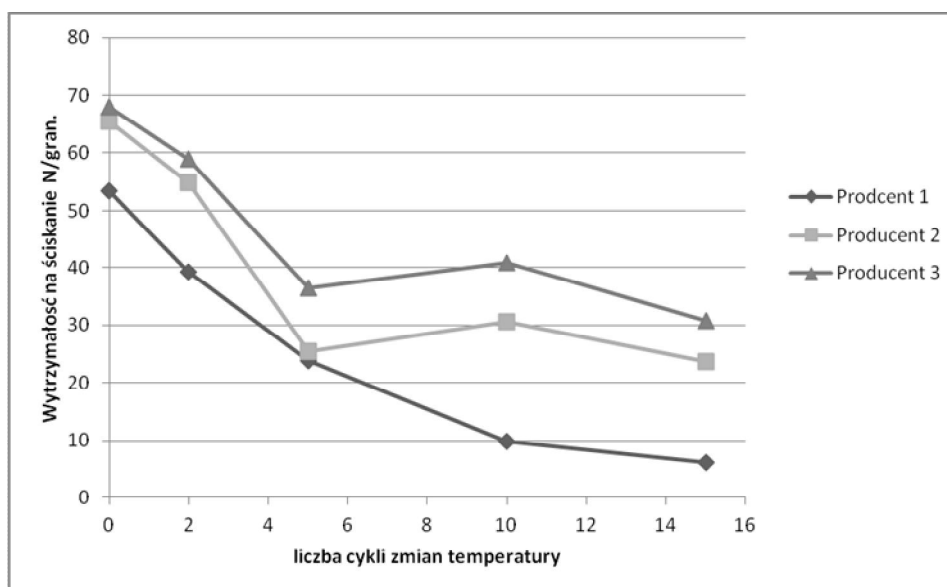
Pomiary wytrzymałości wykonywane w trakcie normalnej produkcji w określonych odstępach czasu (analizy ruchowe) pozwalają na bieżąco kontrolować proces wytwarzania granulatu. Badane są także zmiany wytrzymałości w trakcie przechowywania nawozów w dłuższym czasie, z reguły kilku miesięcy, ale także kilku lat. Pomiary takie pozwalają ocenić, czy w trakcie długotrwałego przechowywania nie zmieniają się własności składników nawozów.

Pomiary wykonywane w trakcie ruchów testowych (prób przemysłowych) umożliwiają ocenę wpływu zmian parametrów procesowych lub stosowanych dodatków na jakość uzyskiwanego nawozu. Na rys. 5. przedstawiono przykładowy wpływ dodatku magnezytu na wytrzymałość granul nawozu saletrzanego otrzymywanego podczas ruchu testowego w przemysłowej instalacji granulacji mechanicznej. W trakcie próby zaobserwowano wyraźny wzrost wytrzymałości granul wraz ze wzrostem zawartości MgO w nawozie.



Rys. 5. Wpływ dodatku magnezytu na wytrzymałość granul nawozu saletrzanego

Od momentu wytworzenia nawozu do jego aplikacji niejednokrotnie mija kilka miesięcy. W tym czasie nawóz może być narażony na działanie zmiennych warunków pogodowych, takich jak wilgotności powietrza i temperatura. W celu określenia wpływu pierwszego z wymienionych czynników wykonuje się pomiary wytrzymałości granul przechowywanych w atmosferze powietrza o określonej wilgotności względnej. Na niekorzystne przemiany wynikające z długiego okresu przechowywania w zmiennych warunkach pogodowych narażone są szczególnie nawozy zawierające  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ . Podczas ogrzewania azotan amonu ulega przemianie fazowej w temperaturze  $32^\circ\text{C}$ , której towarzyszy zwiększenie objętości, co w skrajnych przypadkach może doprowadzić do całkowitej dezintegracji granul. Ocenę zagrożenia tym zjawiskiem przeprowadza się poprzez pomiary wytrzymałości granul poddanych cyklicznym zmianom temperatury (dla nawozów z udziałem azotanu amonu w zakresie  $20^\circ\text{C} - 50^\circ\text{C}$ ). Przykładowo, oceniając wytrzymałość granul saletry amonowej różnych producentów poddanej cyklicznym zmianom temperatury stwierdzono, że najwyższą odpornością na zmiany cechuje się nawóz wytworzony przez producenta 3 (rys. 6). W tym przypadku, po 15 cyklach, wytrzymałość granul na ściskanie spadła do 45 % wartości początkowej, podczas gdy wartości te dla producenta 1 i 2 wynosiły odpowiednio 11 % i 36 %.



Rys. 6. Zmiany wytrzymałości granul saletry amonowej 32% N poddanych cyklicznym zmianom temperatury

Pomiary wytrzymałości granul służą także do oceny możliwości wytwarzania nawozów mieszanych, to znaczy takich, które zawierają granule różnych nawozów, pojedynczych lub dwuskładnikowych. W wyniku mieszania nawozów można uzyskać produkty zawierające poszczególne składniki pokarmowe w proporcjach dostosowanych do konkretnych upraw. Zmiany wytrzymałości granul w czasie przechowywania lub ich brak pozwalają ocenić interakcje między poszczególnymi składnikami nawozu mieszanego. W tabeli 2. przedstawiono przykładowe pomiary wytrzymałości granul poszczególnych składników nawozów mieszanych. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że przy wytwarzaniu nawozów mieszanych z udziałem nawozu NMgS na bazie mocznika i fosforanu jednoamonowego (MAP) oraz nawozu NMgS na bazie mocznika i nawozu typu saletrzaku (CAN) istnieje ryzyko znacznego spadku wytrzymałości granul drugiego składnika w czasie przechowywania nawozu. Nawozy takie powinny być aplikowane bezpośrednio po wytworzeniu mieszanki.

Tab. 2. Zmiana wytrzymałości granul nawozów mieszanych w czasie przechowywania

Lp.	Składnik mieszanki I	Wytrzymałość granul składnika I, N/gran. (kG/gran.)		Składnik mieszanki II	Wytrzymałość granul składnika II, N/gran. (kG/gran.)	
		Początkowa	Po upływie 4 miesięcy		Początkowa	Po upływie 4 miesięcy
1	Nawóz	63,8	64,9	TSP	76,3	104,3
2	NMgS na		65,7	MAP	67,0	18,6
3	bazie		63,5	KCl	110,2	115,2
4	mocznika		63,3	CAN	85,2	62,4



## 5. Sterowanie jakością produkcji

Z punktu widzenia zapewnienia jakości produktu finalnego, jakim są granulowane nawozy mineralne, niezwykle istotną rolę odgrywa kontrola wyrobu i procesu. Sama kontrola wyrobu jest niewystarczająca. Współczesna koncepcja jakości opiera się na zasadzie, że zapobieganie przyczynom powstawania wad jest korzystniejsze od ich wykrywania i korekcy, dlatego też niezbędne staje się stałe monitorowanie realizowanych procesów pod kątem ich stabilności i zdolności jakościowej.

Już w fabrykach Forda na początku XX w. zwrócono uwagę na zmienność parametrów wytwarzanych produktów – zmienność o charakterze losowym, której całkowite wyeliminowanie jest niemożliwe. Jest to tzw. zmienność własna wynikająca z przyczyn, które stale towarzyszą procesowi, są jego integralną częścią. Są one odpowiedzialne za precyzję procesu, dlatego też ich ograniczenie jest możliwe np. przez zmianę technologii, zakup nowych maszyn i urządzeń itp. Przyczyny losowe to nie jedyne przyczyny mogące wpływać na zmienność procesów. W. Shewhart wskazał, że drugim rodzajem zmienności jest zmienność wynikająca z przyczyn specjalnych. I to właśnie przyczyny specjalne powodują, że odchylenia parametrów procesu odbiegają od dotychczasowego wzorca, standardu. Zmienność o charakterze specjalnym może wynikać z wyznaczalnych i niejednokrotnie stosunkowo prostych do usunięcia przyczyn, takich jak: zmiana własności surowców i materiałów, różnice cech wykorzystywanych maszyn i narzędzi, niewłaściwe ustawienie maszyny lub aparatury, niskie kwalifikacje operatorów, zmiany w zakresie organizacji pracy, oddziaływanie czynnika zewnętrznego nieprzewidzianego w procesie itp. Dlatego tak ważna jest umiejętność określenia momentu, w którym proces wykazuje zmienność o charakterze specjalnym oraz właściwego zdiagnozowania, a następnie wyeliminowania przyczyn odpowiedzialnych za taki stan.

Badania prowadzone przez Shewharta w zakresie zmienności procesów oraz ich wyniki spowodowały całkowitą zmianę podejścia w zakresie kontroli i nadzorowania procesów produkcyjnych. Kontrola odbiorcza w żaden sposób nie może przyczynić się do ograniczenia zmienności, a tym samym poprawy jakości, gdyż sprowadza się jedynie do sprawdzenia, czy produkty spełniają przyjęte wymagania jakościowe czy nie. Tak powstała idea statystycznego sterowania procesami SPC, której głównym narzędziem są karty kontrolne Shewharta. Celem stosowania w praktyce kart kontrolnych Shewharta jest wczesne wykrycie i systematyczne zmniejszanie i eliminowanie zakłóceń specjalnych, co przyczynia się do ograniczenia zmienności procesu jedynie do przyczyn naturalnych, losowych [12, 13, 14, 15].

Podjętą decyzję dotyczącą wyboru karty kontrolnej (kart kontrolnych) należy uwzględnić charakter produkcji. W procesach ciągłych najczęściej zalecane jest wykorzystanie karty ze średnią ruchomą [12]. Wynika to z faktu, że nie zawsze, ze względów technicznych i ekonomicznych, możliwe jest pobranie odpowiedniej liczby kilkuelementowych próbek. Co więcej, w przypadku kart  $\bar{x} - R$  czy  $\bar{x} - s$  zakłada się, że właściwości wyrobów w próbce nie są ze sobą skorelowane. Taki warunek może nie być spełniony w przypadku sterowania niektórymi procesami ciągłymi, np. monitorowanie temperatury w piecu hutniczym [16].

W przypadku kontrolowania wytrzymałości granul nawozów na ściskanie takie ograniczenia nie mają miejsca. Badania nie są ani technicznie trudne do zrealizowania ani bardzo kosztowe. Dzięki możliwości pobierania stosunkowo licznych próbek, np. o liczności powyżej 10 sztuk, wskazane wydaje się stosowanie kart  $\bar{x} - s$ , które są

dokładniejsze niż karty  $\bar{x} - R$ . Wyższa dokładność wynika z przyjęcia odchylenia standardowego zamiast rozstępu jako miary zmienności badanego parametru.

W przypadku produkcji nawozów granulowanych uzasadnionym jest także jednocześnie monitorowanie kilku powiązanych ze sobą zmiennych, np. wpływu nowych dodatków na wytrzymałość granul. W takim przypadku zastosowanie znalazłyby wielowymiarowe karty kontrolne (Multivariate SPC), pozwalające na jednym wykresie zawrzeć wiele charakterystyk opisujących badany produkt. Karty te mają jednak dosyć poważną wadę. W przypadku pojawienia się sygnału o rozregulowaniu procesu (np. punkt poza granicą kontrolną na karcie  $T^2$  Hotellinga), nie otrzymujemy jednoznacznej informacji o tym, która mierzona charakterystyka ma niewłaściwą wartość, co utrudnia interpretację przebiegu monitorowanego procesu [16]. Dlatego też, szczególnie w początkowym stadium wdrażania metod statystycznych, uzasadnionym jest stosowanie prostszych i sprawdzonych w praktyce kart, takich jak wspomniane wcześniej karty  $\bar{x} - s$ .

## 6. Podsumowanie

Wytrzymałość mechaniczna granul jest jednym z podstawowych parametrów określających jakość granulatu nawozowego. Jako miarę tego parametru przyjmuje się najczęściej wytrzymałość granul na ściskanie. Nowoczesne urządzenia pomiarowe pozwalają w bardzo precyzyjny sposób mierzyć zarówno rozmiary granul, jak i siłę niezbędną do jej rozkruszenia. Do pełnej oceny jakości nawozu, oprócz bieżących pomiarów ruchowych, wykonuje się także pomiary zmian wytrzymałości granul w symulowanych laboratoryjnie zmiennych warunkach pogodowych (klimatycznych) lub w okresie długotrwałego przechowywania. Pomiary wytrzymałości granul służą także do oceny wpływu zmian parametrów procesowych oraz dodatków w trakcie ruchów testowych na jakość uzyskiwanego produktu. Mierzone zmiany wytrzymałości pozwalają ocenić przydatność poszczególnych komponentów do wytwarzania nawozów mieszanych typu bulk blending.

Zapewnienie oczekiwanej jakości produkcji wymaga stosowania właściwych instrumentów umożliwiających natychmiastową reakcję na jakiegokolwiek odchylenia przebiegu realizowanych procesów od przyjętego standardu. Kontrola jakości powinna mieć charakter czynny, a nie bierny, dlatego istotne jest stałe monitorowanie procesów z punktu widzenia ich zmienności. Umiejętność identyfikacji nielosowych, wyznaczalnych przyczyn zmienności z wykorzystaniem kart kontrolnych Shewharta zapobiega podejmowaniu złych decyzji i działań, będących efektem niewłaściwej diagnozy stanu systemu.

## Literatura

1. Dittmar H., Drach M., Vosskamp R., Trenkel M., Gutser R., Steffens G.: Fertilizers, 2. Types. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, vol. 14, 2012, 199-246.
2. Heffer P., Prud'homme M.: Fertilizer Outlook 2015-2019. 83rd IFA Annual Conference, Istanbul, Turkey, 25-27 May 2015, International Fertilizer Industry Association, 2015.
3. United Nations Industrial Development Organization, International Fertilizer Development Center: Fertilizer Manual. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, 1998.

4. Diettmar H.: Fertilizers, 4. Granulation, Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, vol. 14, 2012, 253-272.
5. Biskupski A., Żak W., Ochał A., Malinowski P.: Physico-chemical and functional properties of magnesium-calcium ammonium nitrate mechanically granulated from Zakłady Azotowe Kędzierzyn S.A., Pollution control in agriculture and fertilizer industry, Chemistry for Agriculture vol. 2, Praha, 2001, s. 312-317.
6. Gluba T.: Granulacja bębnowa surowców drobnopięknych o różnych składach ziarnowych. Zeszyty Naukowe Nr 1116, Rozprawy Naukowe, Z. 423, Politechnika Łódzka, Łódź, 2012.
7. PN-84/C-87012.05, Nawozy sztuczne, Metody badań własności nawozów granulowanych, Oznaczanie wytrzymałości na uderzenie.
8. Fruhstorfer A.: Testing granular fertilizers for hardness. Paper No. LE/61/58, The International Superphosphate Manufacturers Association, Wiesbaden, Germany, 1967.
9. Erweka GmbH, [www.erweka.com/tbh-125.html](http://www.erweka.com/tbh-125.html), dostęp 03.01.2016.
10. Copley Scientific Ltd., [www.copleyscientific.com](http://www.copleyscientific.com), dostęp 03.01.2016
11. Kraemer Elektronik GmbH, [www.kraemer-elektronik.com](http://www.kraemer-elektronik.com), dostęp 03.01.2016.
12. Hamrol A., Mantura W.: Zarządzanie jakością. Teoria i praktyka. PWN, Warszawa, 2015.
13. Koronacki J.: Statystyka w kompleksowym zarządzaniu jakością. [www.statsoft.pl](http://www.statsoft.pl), dostęp 03.01.2016.
14. Oakland J.S.: Statistical Process Control. Routledge, London – New York 2011.
15. Zymonik Z., Hamrol A., Grudowski P.: Zarządzanie jakością i bezpieczeństwem. PWE, Warszawa, 2013.
16. Greber T.: Statystyczne sterowanie procesami – doskonalenie jakości z pakietem STATISTICA. Statsoft Polska Sp. z o.o., Kraków, 2000.

Dr inż. Przemysław MALINOWSKI, prof. nadzw.  
 Studium Nauk Podstawowych  
 Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Nysie  
 48-300 Nysa, ul. Armii Krajowej 7  
 tel.: (77) 409 16 51  
 e-mail: [przemyslaw.malinowski@pwsz.nysa.pl](mailto:przemyslaw.malinowski@pwsz.nysa.pl)

Dr inż. Mariusz KOŁOSOWSKI  
 Instytut Zarządzania  
 Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Nysie  
 48-300 Nysa, ul. Armii Krajowej 7  
 tel.: (0-77) 409 11 55  
 e-mail: [mariusz.kolosowski@pwsz.nysa.pl](mailto:mariusz.kolosowski@pwsz.nysa.pl)

Dr inż. Andrzej BISKUPSKI, prof. nadzw.  
 Zakład Nawozów  
 Instytut Nowych Syntezy Chemicznych  
 24-110 Puławy, Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 13a  
 tel.: (81) 887 53 66, fax.: (81) 473 14 10  
 e-mail: [andrzej.biskupski@ins.pulawy.pl](mailto:andrzej.biskupski@ins.pulawy.pl)