

Robert Rusinek, Józef Horabik  
Instytut Agrofizyki PAN w Lublinie

## WYBRANE PARAMETRY MECHANICZNE ZŁOŻA NASION RZEPAKU

### Streszczenie

Badano parametry mechaniczne złoża nasion rzepaku o czterech poziomach wilgotności (6, 9, 12 i 15%). Większość z nich wyznaczano według standardowych procedur zalecanych przez normę Eurocode 1. Współczynnik tarcia zewnętrznego wyznaczano dla trzech materiałów konstrukcyjnych: blachy nierdzewnej, ocynkowanej oraz betonu B 30. W wyniku badań stwierdzono, że wraz ze wzrostem wilgotności złoża, kąt tarcia wewnętrznego, kohezja oraz gęstość rosły, zaś iloraz naporu malał.

**Słowa kluczowe:** rzepak, kąt tarcia wewnętrznego, kohezja, iloraz naporu, gęstość, współczynnik tarcia zewnętrznego

### Wstęp

W ostatnich latach produkcja nasion oleistych wykazuje tendencję wzrostową, która jest odpowiedzią na rosnące zapotrzebowanie na oleje roślinne dla celów spożywczych i technicznych (np. biopaliwa). Nasiona rzepaku w latach 2004/2005 stanowią 11,5% udziału światowej produkcji nasion oleistych [Rosiak 2005]. Przedstawiona skala produkcji rzepaku powoduje, iż niezbędną staje się pełna wiedza na temat zachowania się złoża nasion w czasie zabiegów technologicznych. Długotrwałe magazynowanie rzepaku w zbiornikach i silosach w celu zapewnienia ciągłości produkcji sprawia, iż materiał narażony jest na działanie destrukcyjnych obciążeń mechanicznych, które powodują nieodwracalne odkształcenia i uszkodzenia. W odróżnieniu od ziarna zbóż nasiona rzepaku są bardziej narażone na uszkodzenia i zepsucie, dzieje się to za sprawą wysokiej zawartości tłuszczu, który w uszkodzonych nasionach wzmaga intensywność niekorzystnych procesów biologicznych i chemicznych [Tys i in. 2001; Weres 2000; Szwed 2000]. W uszkodzonych nasionach zwiększa się aktywność drobnoustrojów, co prowadzi

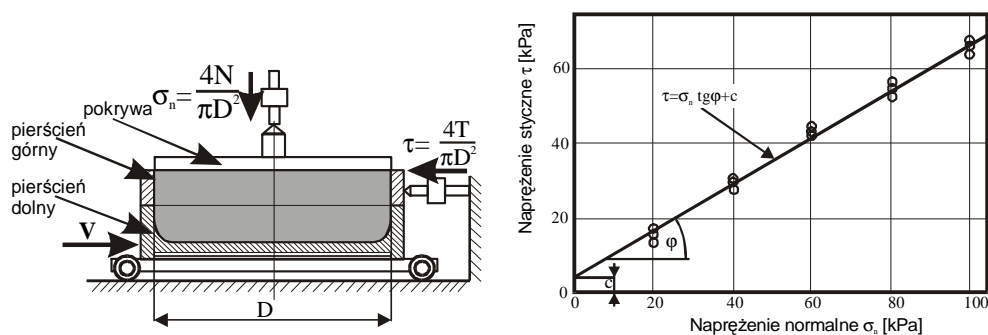
do obniżenia jakości a nawet do zniszczenia surowca. Zjawiska te są szczególnie niebezpieczne w nasionach wilgotnych, nadmiernie obciążonych [Laskowski i in. 1999; Rusinek i in. 2004].

### Cel i zakres pracy

Celem badań było wyznaczenie parametrów mechanicznych ( $\varphi$ ,  $c$ ,  $\mu$ ,  $k$ ,  $\rho$ ) nasion rzepaku w zakresie wilgotności 6 – 15%. Współczynnik tarcia zewnętrznego wyznaczano dodatkowo dla różnej chropowatości powierzchni materiałów konstrukcyjnych, iloraz naporu w modelowym silosie dla dwóch sposobów napełniania.

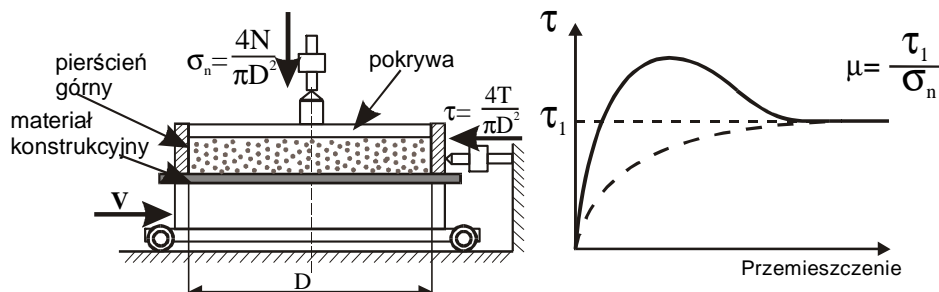
### Materiały i metody

Kąt tarcia wewnętrznego i kohezję obliczano z warunku plastyczności Coulomba-Mohra wyznaczonego na podstawie maksymalnej wartości naprężenia stycznego  $\tau$ , powstającego na drodze ścinania nie większej niż 10% średnicy próbki zgodnie z procedurą zalecaną przez normę Eurocode 1 w aparacie Jenikego [Jenike 1964] (rys. 1). Badania współczynnika tarcia rzepaku o materiał konstrukcyjny wykonano w aparacie bezpośredniego ścinania Jenikego (rys. 2) dla blachy ocynkowanej, nierdzewnej oraz betonu B 30.



Rys. 1. Procedura wyznaczenia kąta tarcia wewnętrznego  $\varphi$  i kohezji  $c$

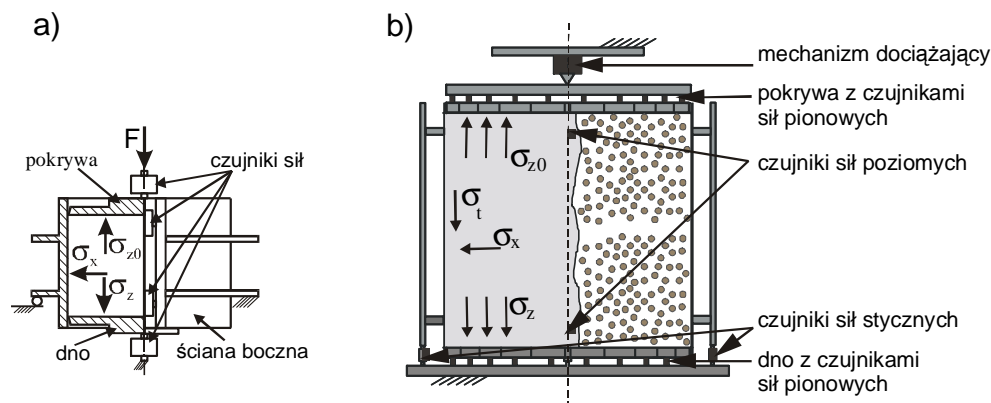
Fig. 1. Procedure of determination of angle of internal friction  $\varphi$  and cohesion  $c$



Rys. 2. Procedura wyznaczania współczynnika tarcia zewnętrznego  $\mu$

Fig. 2. Procedure of determination of coefficient of friction  $\mu$

Zgodnie z zaleceniami normy Eurocode 1 [DD ENV 1991-4, 2003] iloraz naporu oraz gęstość wyznaczano na specjalnie w tym celu skonstruowanym stanowisku pomiarowym, przedstawionym na rysunku 3a. Aparatura pomiarowa umożliwiała wyznaczanie średniego naporu poziomego na ścianę zbiornika –  $\sigma_x$ , średniego naporu normalnego na dno –  $\sigma_z$  oraz średniego naporu normalnego na górną powierzchnię ośrodka –  $\sigma_{z0}$  (Rys. 3 a). Iloraz naporu  $k_s$  dla warunków napełniania i magazynowania wyznaczano na podstawie współczynnika kierunkowego  $k_{s0}$  stycznej do przebiegu zależności  $\sigma_x(\sigma_{zs})$ , gdzie  $\sigma_{zs} = (\sigma_z + \sigma_{z0})/2$ , z zależności:  $k_s = 1,1k_{s0}$ . Dodatkowo iloraz naporu  $k_\phi$  wyliczano w oparciu o uproszczoną zależność opierającą się na znajomości kąta tarcia wewnętrznego, zaproponowaną przez normę Eurocode 1:  $k_\phi = 1,1(1 - \sin \phi)$ .



Rys. 3. Metody wyznaczania: a) ilorazu naporu i gęstości w aparacie jednoosiowego ściskania, b) ilorazu naporu w modelowym zbiorniku

Fig. 3. The methods of determination: a) pressure ratio and bulk density in uniaxial compression tester, b) pressure ratio in model silo

W oparciu o metodykę pomiaru opracowaną w Pracowni Fizyki Roślinnych Materiałów Sypkich iloraz naporu wyznaczano w modelowym zbiorniku o średnicy i wysokości 0,6 m (Rys. 3b). Układ pomiarowy umożliwił wyznaczenie naporu pionowego na dno  $\sigma_z$  i pokrywę  $\sigma_{z0}$  oraz średniego naporu stycznego  $\sigma_t$  i normalnego na ścianę  $\sigma_x$  oraz rzeczywistą wartość współczynnika tarcia materiału sypkiego o ścianę odpowiadającą faktycznemu stanowi mobilizacji sił tarcia. Wyznaczony w ten sposób współczynnik tarcia jest na ogół mniejszy niż współczynnik tarcia kinetycznego materiału sypkiego o powierzchnię ściany ( $\mu^* < \mu$ ), jedynie w przypadku pełnej mobilizacji sił tarcia np.: podczas uporządkowanego ruchu materiału sypkiego względem ściany jest mu równy ( $\mu^* = \mu$ ).

Iloraz naporu wyznaczano rozwiązując numerycznie równanie Janssena [Janssen 1895] względem parametru  $k$  dla eksperymentalnych wartości naporu pionowego na dno  $\sigma_z$ , pokrywę górną  $\sigma_{z0}$  oraz rzeczywistej wartości współczynnika tarcia  $\mu$ :

$$\sigma_z = \frac{\rho g r}{2k\mu} + \left( \sigma_{z0} - \frac{\rho g r}{2k\mu} \right) e^{-\frac{2k\mu}{r}h} \quad (1)$$

gdzie:

- $\rho$  – gęstość ośrodka [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ],
- $g$  – przyspieszenie ziemskie [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ],
- $r$  – promień zbiornika [m],
- $\mu$  – współczynnik tarcia zewnętrznego,
- $h$  – wysokość napełniania [m].

Zastosowano dwie metody napełniania zbiornika – centralną oraz rozproszoną. Badania parametrów mechanicznych realizowane według standardowych procedur wykonano dla nasion rzepaku odmiany Licosmos, zaś w modelowym silosie dla odmiany Lirajet.

## Wyniki badań

Wraz ze wzrostem wilgotności rosły siły tarcia oraz spójności pomiędzy nasionami, co powodowało wzrost oporów ruchu względnego pomiędzy nasionami rzepaku. Kąt tarcia wewnętrznego zmieniał się wraz ze wzrostem wilgotności nasion w zakresie od  $24,7^\circ$  dla nasion o wilgotności 6% do  $34,8^\circ$  dla 15%, zaś kohezja od wartości 1,3 do 7,7 (Tabela 1).

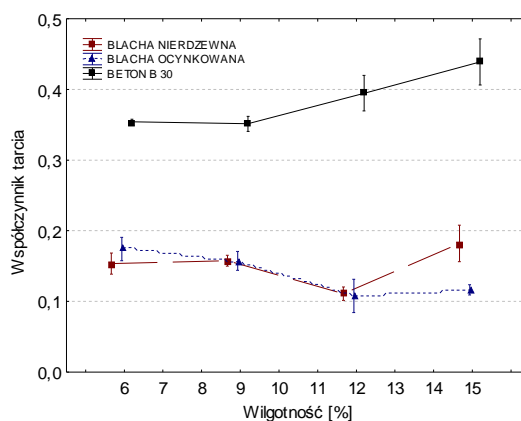
Tabela 1. Średnie wartości ( $\pm$ odch. st.) kąta tarcia wewnętrznego  $\varphi$ , kohezji  $c$  i gęstości  $\rho$  nasion rzepaku o wilgotności w zakresie 6-15%

Table 1. Mean values ( $\pm$ st. dev) of angle of internal friction, cohesion, bulk density of rapeseed at the moisture content of 6-15%

Wilgotność [%]	Kąt tarcia wewnętrznego $\varphi$ [deg]	Kohezja [kPa]	Gęstość wg Eurocode 1 [kg·m <sup>-3</sup> ]
6	24,7 $\pm$ 0,5	1,3 $\pm$ 0,7	712 $\pm$ 5
9	30,6 $\pm$ 0,4	2,1 $\pm$ 0,5	740 $\pm$ 4
12	31,7 $\pm$ 0,7	7,5 $\pm$ 0,9	777 $\pm$ 13
15	34,8 $\pm$ 0,7	7,7 $\pm$ 0,9	800 $\pm$ 5

Gęstość rzepaku wyznaczona według zaleceń normy Eurocode 1 w warunkach jednoosiowego ściskania przy wartości obciążenia zalecanego do określenia parametrów mechanicznych ośrodka sypkiego rosła wraz z wilgotnością. Proponowane w literaturze metody szacowania tonażu silosów na podstawie gęstości usypnej [Janowicz 2005] nie obejmują zmiany odkształcalności złoża ze zmianą wilgotności. Wydaje się, że najlepszym rozwiązaniem jest propozycja normy Eurocode 1 bezpośredniego wyznaczania gęstości złoża dla konkretnych realizacji praktycznych.

Uśrednione wartości współczynnika tarcia w zakresie naporu normalnego od 20 do 60 kPa dla nasion rzepaku otrzymane w aparacie Jenikego były zróżnicowane w zależności od rodzaju materiału konstrukcyjnego (rys. 4).

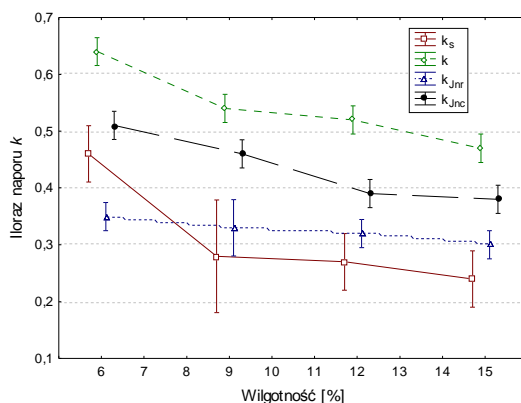


Rys. 4. Współczynnik tarcia o materiały konstrukcyjne  $\mu$  dla blachy nierdzewnej, ocynkowanej i betonu B 30

Fig. 4. Coefficient of friction  $\mu$  against stainless steel, galvanized steel and concrete B 30

Spodziewane wyższe wartości współczynnika tarcia dla betonu od tych otrzymanych dla blachy ocynkowanej i nierdzewnej zawierały się w przedziale od około 0,35 do 0,45 i rosły wraz ze wzrostem wilgotności. Współczynnik tarcia dla blachy ocynkowanej i nierdzewnej przy wilgotności 6, 9 i 12% był zbliżony, przy 15% wilgotności wyższy w przypadku blachy nierdzewnej.

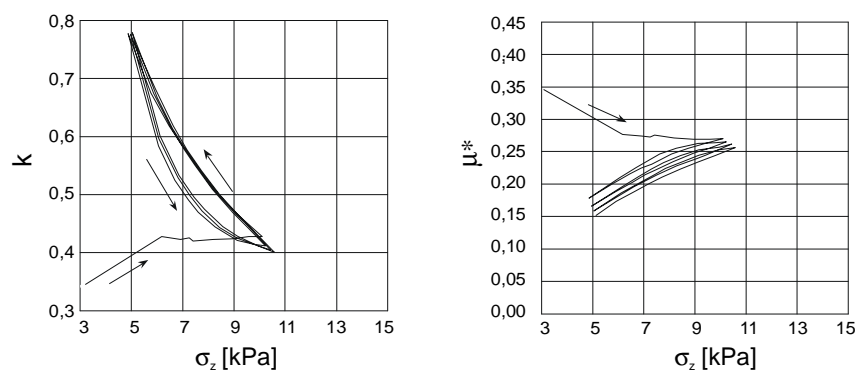
Wraz ze wzrostem wilgotności rosły opory tarcia oraz siły spójności pomiędzy nasionami (wzrastał kąt tarcia wewnętrzny i kohezja). W złożu nasion rzepaku obciążonym siłami zewnętrznymi (napór konsolidujący) wraz ze wzrostem wilgotności naprężenie w kierunku poziomym przyrastało wolniej od naprężenia w kierunku pionowym, wzdłuż którego przyłożona jest siła obciążająca. W wyniku tego wraz ze wzrostem wilgotności malał iloraz naporu. W przypadku wysokich wartości naporu konsolidacji (aparatus jednoosiowego ściskania,  $\sigma_z=100$  kPa) spadek ilorazu naporu był znaczący od wartości 0,45 przy wilgotności 6% do 0,24 przy 15% (rys. 5). Przy wysokich wartościach naporu konsolidacji duży wpływ na iloraz naporu miał niski moduł sprężystości nasion rzepaku. Iloraz naporu wyznaczony w modelowym silosie różnił się ze względu na sposób napełniania zbiornika. W wyniku napełniania rozproszonego powstawała wyższa gęstość materiału w porównaniu z napełnianiem centrycznym, powodując wzrost kąta tarcia wewnętrznego i tym samym spadek ilorazu naporu (rys. 5). Różne wartości ilorazu naporu, w przypadku napełniania centrycznego i rozproszonego, wynikały z różnej gęstości upakowania.



Rys. 5. Iloraz naporu nasion rzepaku wyznaczony w teście jednoosiowego ściskania  $k_s$ , na podstawie kąta tarcia wewnętrznego  $k_\phi$  w modelowym silosie dla napełniania rozproszonego  $k_{Jnr}$  i centralnego  $k_{Jnc}$

Fig. 5. The pressure ratio of rapeseed determined in uniaxial compression test  $k_s$ , calculated from angle of internal friction  $k_\phi$  determined in model silo for sprinkle filling  $k_{Jnr}$  and central filling  $k_{Jnc}$

Pętle histerezy ilorazu naporu powstające w kolejnych cyklach wzrostu i spadku naporu pionowego są wynikiem złożenia plastycznych i sprężystych oddziaływań w materiale (rys. 6). W pierwszym cyklu obciążenia iloraz naporu nie wykazywał istotnych zmian w trakcie wzrostu obciążenia. Następnie podczas odciążania iloraz naporu wzrastał na skutek wolniejszego tempa spadku naporu poziomego niż pionowego. Energia zakumulowana w złożu materiału podczas fazy obciążania, w trakcie odciążania uwalniała się jedynie w kierunku pionowym. Naprężenie w kierunku poziomym, ustalone przez nieodkształcalne ściany boczne zbiornika zmieniało się w niewielkim zakresie. Najwyższe wartości ilorazu naporu odnotowano dla ostatniej fazy odciążania. W wierzchniej warstwie złoża, gdzie uwalnianie energii sprężystej w kierunku pionowym ograniczone było jedynie oporami tarcia przyściennej warstwy ośrodka o ścianę zbiornika, materiał odprężył się najsilniej w sąsiedztwie osi.



Rys. 6. Iloraz naporu i współczynnik tarcia w kolejnych fazach obciążania i odciążania dla napętniania rozproszonego

Fig. 6. The pressure ratio and coefficient of wall friction in loading/unloading cycles for the sprinkle filling

Współczynnik tarcia statycznego materiału o ścianę  $\mu^*$  zmieniał się wraz ze zmianą obciążania pionowego w kolejnych cyklach obciążania i odciążania (rys. 6). Podczas pierwszej fazy obciążania malał od wartości statycznej 0,35 do wartości 0,27 odpowiadającej tarcia kinetycznemu. Podczas odciążania współczynnik tarcia malał do wartości 0,18 odpowiadało to wartości współczynnika tarcia wyznaczonego w aparacie bezpośredniego ścinania dla blachy ocynkowanej i nierdzewnej. Kolejne cykle obciążania i odciążania powodowały systematyczny spadek wartości  $\mu^*$ . Podczas obciążania składowa styczna wektora naprężenia przyrastała wolniej niż składowa normalna, natomiast przy odciążaniu na skutek odprężania materiału

składowa styczna na części powierzchni ściany zanikała lub zmieniała swój zwrot, a w konsekwencji współczynnik tarcia malał. W kolejnych cyklach obciążania materiał ulegał systematycznemu zagęszczaniu, co prowadziło do wzmocnienia struktury materiału.

### **Wnioski**

W większości parametry mechaniczne rzepaku wykazywały zmienność, która wynikała z silnego wpływu wilgotności złoza. Kąt tarcia wewnętrznego, kohezja, gęstość i współczynnik tarcia zewnętrznego dla betonu rosły wraz ze wzrostem wilgotności, zaś iloraz naporu malał. Jedynie współczynnik tarcia zewnętrznego dla blachy ocynkowanej i nierdzewnej nie wykazywał istotnych zmian wraz ze wzrostem wilgotności. Największy wpływ na współczynnik tarcia miała chropowatość powierzchni materiału konstrukcyjnego. Wyznaczony współczynnik tarcia dla betonu B 30 w całym zakresie wilgotności był około dwukrotnie wyższy niż dla blachy ocynkowanej i nierdzewnej. Współczynnik tarcia wyznaczony w modelowym silosie był zbliżony do wyznaczonego w aparacie bezpośredniego ścinania jedynie w końcowej fazie odciążania złoza. Proponowane w literaturze szacowanie pojemności zbiorników na podstawie gęstości usypnej nie obejmuje zmian właściwości plastycznych złoza wraz ze wzrostem wilgotności, które istotnie wpływały na parametr.

### **Bibliografia**

Eurocode 1. 2003. Basis of design and actions on structures. Part 4. Actions in silos and tanks. DD ENV 1991-4.

Janowicz L. 2005. Przechowywanie nasion rzepaku w magazynach silosowych. Rzepak – czerwiec 2005, 47-50, IMBER Warszawa.

Laskowski J., Skonecki S. 1999. Influence of moisture on the physical properties and parameters of the compression process of cereal grains. International Agro-physcis, 13(4), 477-486.

Rosiak Ewa. 2005. Produkcja rzepaku w Polsce i na świecie. Technologia Produkcji Rzepaku. Wieś Jutra, Warszawa.

Rusinek R., Łukaszuk J. 2004. Influence of moisture content on pressure ratio of rape seeds. Res. Agr. Eng., 50, (1):11-14.



Tys J., Rybacki R. 2001. Rzepak – jakość nasion. Procesy zbioru, suszenia, przechowywania. Acta Agrophysica, Lublin, 2001.

Szwed G. 200. Kształtowanie fizycznych i technologicznych cech nasion rzepaku w modelowych warunkach przechowywania. Acta Agrophysica, 27, Monografia.

Weres J. 2000. Technologia suszenia i przechowywania rzepaku a jego jakość. Spotkanie służby agrotechnicznej. Ciechocinek, 9-10. listopada.

## **SELECTED MECHANICAL PARAMETERS OF RAPESEEDS**

### **Summary**

Experimental investigations of mechanical parameters of bedding of rapeseeds were performed at four levels of moisture content (6, 9, 12 and 15%). Most of the parameters were determined according Eurocode 1 standard. The coefficient of friction was determined for galvanized sheet, stainless sheet and for concrete B 30. As a result of research affirmed that with an increase in moisture content of seeds, angle of internal friction, cohesive and bulk density increased but pressure ratio decreased.

**Key words:** rape, angle of internal friction, cohesion, pressure ratio, density, coefficient of friction