

WPLYW UPAKOWANIA I KSZTAŁTU NASION NA OPÓR PRZEPLYWU POWIETRZA W ZŁOŻU ŻYTA I RZEPAKU

Józef Łukaszuk, Marek Molenda, Józef Horabik

Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin
e-mail: jlukaszuk@ipan.lublin.pl

Streszczenie. Wyznaczano zależność spadku ciśnienia powietrza Δp od prędkości przepływu V w warstwach nasion żyta i rzepaku formowanych różnymi sposobami. Celem badań było oszacowanie wpływu kształtu nasion i ich upakowania przestrzennego na spadek ciśnienia powietrza przepływającego przez złożę. Sześciennie próbki o boku 0,35 m zawierały około 35 kg oczyszczonego materiału. Zastosowano trzy sposoby napełniania komory aparatu wytwarzające próbki o różnej strukturze i porowatości. Opór przepływu wyznaczano w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach: pionowym (Z) i dwu poziomych (X i Y), dla jedenastu poziomów prędkości przepływu powietrza w zakresie od 0,03 do 0,35 m·s⁻¹. Otrzymane wyniki badań potwierdziły, że wielkość i kształt nasion mają istotny wpływ na spadek ciśnienia powietrza przepływającego przez warstwę materiału. Stwierdzono ponadto, że spadek ciśnienia powietrza zależy od kierunku jego przepływu przez warstwę materiału. Potwierdzono, że spadek porowatości wywołany zagęszczaniem powoduje znaczny wzrost spadku ciśnienia Δp powietrza, przy czym proporcje w poszczególnych kierunkach przepływu nie ulegają istotnym zmianom.

Słowa kluczowe: żyto, rzepak, spadek ciśnienia, struktura upakowania

WSTĘP

Ziarno zbóż i nasiona roślin oleistych są podstawowym surowcem dla wytwarzania żywności i pasz dla zwierząt. Zazwyczaj przechowywane są w ogromnych ilościach w wolnostojących silosach o pojemności do kilku tysięcy ton. Zachowanie dobrej jakości surowca zwykle wymaga jego wysuszenia, a następnie utrzymania warunków zapobiegających rozwojowi owadów i grzybów. Czasem niezbędne jest zatrucie owadów, których rozwój mógłby obniżyć jakość przechowywanego materiału. Bardzo często technologie suszenia i konserwacji korzystają z wymuszonego przepływu powietrza przez złożę, które ogrzewa, ochładza czy też jest nośnikiem substancji chemicznych. Skuteczność i efektywność technologii wykorzystujących przepływ powietrza przez złożę zależy w znacznym stopniu

od równomierności przepływu gazu w złożu, która zapewnia jednakowe warunki przebiegu operacji w całej objętości.

Bartosik i Maier (2006) analizowali koszty suszenia w niskiej temperaturze ziarna kukurydzy w silosach w czterech rejonach USA. Wykazali m.in., że nierównomierny rozkład prędkości przepływu powietrza przez złoże, spowodowany pozostawieniem stożkowej powierzchni swobodnej ziarna, wymuszał wydłużenie czasu suszenia o 48 dni. Autorzy ci szacują, że wyrównanie tej powierzchni pozwala obniżyć koszt suszenia nawet o 33%. Dodatkowe obniżenie kosztu suszenia o 22% można osiągnąć przez zastosowanie urządzeń rozsiewających ziarno równomiernie na powierzchni dna silosu i kolejno usypywanych warstwach, co zapewnia bardziej równomierny przepływ powietrza przez złoże.

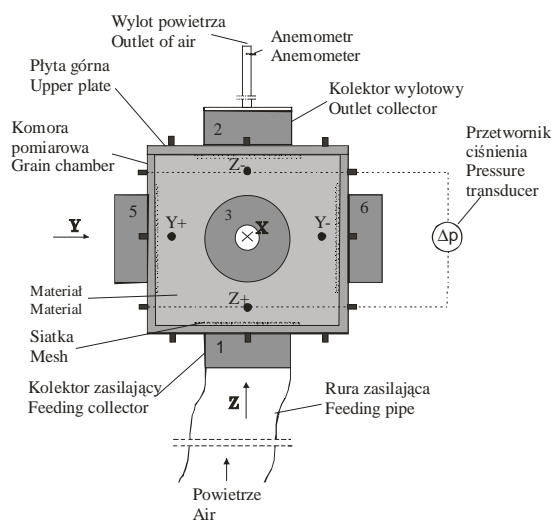
Opór przepływu powietrza wyraża się spadkiem ciśnienia powietrza na jednostkę długości w kierunku przepływu. Najczęściej jego zależność od prędkości przepływu przedstawia się w formie krzywych lub równań Brooker i in. (1992). Ponadto opór przepływu zależy od zawartości zanieczyszczeń w materiale, kształtu i wielkości nasion oraz od ich gęstości upakowania i wilgotności (Łukaszuk 2005). Zazwyczaj dla celów projektowania przyjmowano, że opór przepływu jest stały w objętości złoża. Wyniki najnowszych badań wykazują, że założenie to często nie jest prawdziwe. W różnych regionach złoża mogą wystąpić znaczne zmiany oporu przepływu, które mogą niekorzystnie wpływać na przebieg procesu technologicznego (Molenda i in. 2005). Navarro i Nojes (2002) wskazują, że opór przepływu powietrza, odczytany z publikowanych wykresów lub obliczony z równań, jest właściwy tylko dla czystego, suchego, luźno usypanego materiału dla pionowego kierunku przepływu i na ogół daje zbyt niskie oszacowanie. Autorzy ci wskazują także, że efektywność suszenia czy przewietrzania w zasadniczym stopniu zależy od równomierności przepływu powietrza przez złoże.

Lamond i Smith (1982) zwrócili uwagę na zależność oporu przepływu od kierunku przepływu powietrza. Tendencję taką, dla ziół pszenicy i jęczmienia, potwierdzili Kumar i Muir (1986), a także Łukaszuk i in. (2006) dla złoża ziarna pszenicy. ASAE Standard D272.3 (ASAE 2003) wskazuje, że opór przepływu w kierunku poziomym może stanowić 60% oporu przepływu w kierunku pionowym, ale dla niektórych nasion takie zróżnicowanie nie występuje. Neethirajan i in. (2006) badając różnice oporu przepływu w kierunkach: pionowym i poziomym w złożach różnych nasion stwierdzili, że przestrzenie powietrzne rozłożone są równomiernie tylko w złożach nasion o kształcie zbliżonym do kulistego. Autorzy ci stwierdzili także, że w przypadku nasion o wydłużonym kształcie jak pszenica i jęczmień, powierzchnia i długość porów na kierunku poziomym była o 100% większa niż na kierunku pionowym, podczas gdy w przypadku grochu i gorczycy różnica wynosiła tylko 30%.

Celem prezentowanych badań było oszacowanie stopnia zróżnicowania spadku ciśnienia powietrza w trzech kierunkach przepływu przez formowane w różny sposób złoża kulistych nasion rzepaku i mocno wydłużonych nasion żyta.

MATERIAŁ I METODA

Pomiary przeprowadzono na oczyszczonym ziarnie żyta odmiany Gabo o wilgotności 12% i rzepaku ozimego odmiany Californium o wilgotności 6%. Spadek ciśnienia powietrza przepływającego przez złożę mierzono na stanowisku (rys. 1) umożliwiającym badanie przepływu powietrza przez materiał w trzech kierunkach: poziomych X, Y i pionowym Z (Łukaszuk i in. 2007).

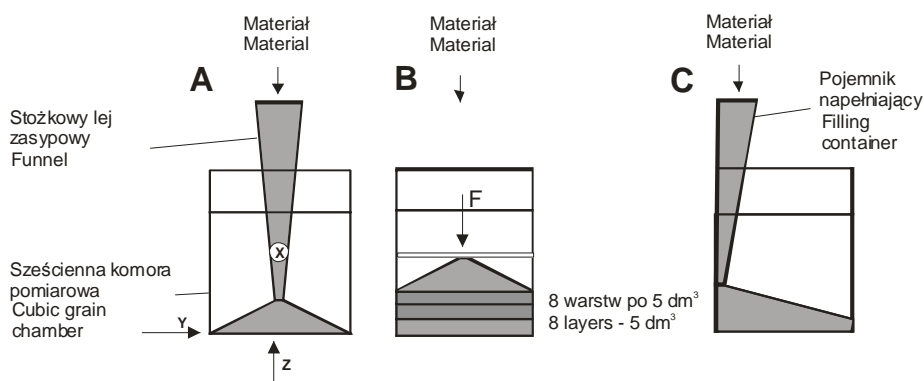


Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego do wyznaczania spadku ciśnienia powietrza przepływającego przez sześcienną próbkę materiału granularnego

Fig. 1. Experimental setup for determination of airflow resistance of cubic ample of granular material

W skład stanowiska wchodzi dwa zespoły. Pierwszy to zespół zasilający wyposażony w wentylator promieniowy o mocy 0,37 kW i zbiornik wyrównawczy o pojemności 0,09 m³. Drugi blok to sześcienna komora pomiarowa o boku 0,35 m i stół pomocniczy. W każdej ścianie komory wykonano otwory o średnicy 0,16 m, które od wewnątrz przesłonięto blachą perforowaną. Otwory perforacji miały średnice 2 mm, a prześwit perforacji stanowił 29,7% pola powierzchni przekroju. Na każdej ścianie komory zamontowano cylindryczne kolektory (zasilające lub wylotowe) o średnicach 0,16 m oraz 4 króćce, do których przyłączano przewody pneumatyczne przetwornika ciśnienia. Aby uniknąć najsilniejszych zaburzeń przepływu, występujących w sąsiedztwie ściany, pomiary spadku ci-

śnienia wykonywano na długości złoża równej 0,25 m. Zastosowano indukcyjny czujnik różnicy ciśnień *Validyne* DP45 o maksymalnym ciśnieniu 2,25 kPa, współpracujący ze wzmacniaczem *Validyne* CD15. Prędkość przepływu powietrza w przewodzie wylotowym mierzono anemometrem ANT 2000 z dokładnością $0,1 \text{ m s}^{-1}$, a następnie przeliczano ją uwzględniając rzeczywisty przekrój pustej komory pomiarowej. Prędkość przepływu powietrza przez komorę pomiarową, w zakresie $0,03 \text{ m s}^{-1}$ do $0,35 \text{ m s}^{-1}$, regulowano przy pomocy uchylnej przysłony umieszczonej na otworze ssącym wentylatora. W zależności od przyjętego kierunku przepływu powietrza przyłączano przewody, zasilający i wylotowy, do odpowiednich kolektorów. Czujnik anemometru i przewody pneumatyczne przetwornika ciśnienia także przenoszono we właściwe miejsca układu. Króćce nieużywane w bieżącym eksperymencie zaślepiano korkami. Kolektory, które nie brały udziału w eksperymencie zamykano elastycznymi przesłonami lateksowymi. Pomiary wykonano kolejno w kierunkach: Z, X i Y, powtarzając cykl trzy razy.



Rys. 2. Sposoby napełniania komory pomiarowej aparatu
Fig. 2. Methods of filling of test chamber of the apparatus

Dla uzyskania różnych struktur upakowania złoża zastosowano trzy sposoby napełniania komory pomiarowej, które przedstawiono na rysunku 2. W pierwszym, sposób A, wykorzystano stożkowy lej zasypowy o wysokości 1 m i średnicach otworów 0,03 i 0,2 m. Drugi sposób B podobnie jak w przypadku A polegał na napełnianiu komory pomiarowej przy pomocy leja zasypowego, ale warstwami ziarna (8 warstw o objętości ok. $5 \cdot \text{dm}^3$ każda), które kolejno zagęszczano uderzając 10 razy obciążnikiem o masie 4 kg w spoczywającą na warstwie ziarna poziomą płytę pomocniczą. W trzecim przypadku, sposób C, komorę napełniano przy pomocy pojemnika, którego szerokość odpowiadała szerokości komory pomiarowej (0,35 m), a szerokości szczeliny zasypowej i wylotowej wynosiły odpowiednio 0,15 m i 0,015 m. We wszystkich przypadkach napełnianie polegało na

powolnym unoszeniu, wcześniej napełnionych pojemników zasypowych, z zachowaniem ciągłego wypływu strumienia ziarna. Komorę napełniano z nadmiarem ziarna, a następnie usuwano jego nadmiar wyrównując poziom do górnej krawędzi komory pomiarowej. Konstrukcja stanowiska badawczego i przyjęta metodyka pomiarów zapewniały przebieg eksperymentów bez drgań i wibracji mogących wpływać na zmianę właściwości fizycznych badanych próbek. Pomiarzy wykonywano w trzech powtórzeniach.

Średnicę zastępczą dla nasion rzepaku i ziarniaków żyta wyznaczono ze wzoru:

$$\varphi_z = 2\sqrt[3]{\frac{3 \cdot V}{4 \cdot \pi}}, \quad (1)$$

gdzie V – średnia objętość jednego nasiona.

Objętość 100 sztuk nasion wyznaczono piknometrycznie.

Dla zobrazowania anizotropii struktury złoża ziarna żyta, nie osiowo uformowaną próbkę (sposób C) zalewano żywicą epoksydową. Po utwardzeniu żywicy próbkę przecinano w kierunkach: pionowym i poziomym oraz w kierunku powierzchni usypywania próbki (zakładając, że jest ona płaszczyzną).

WYNIKI

Charakterystyka próbek

W tabeli 1 zamieszczono wyznaczone wartości: wilgotności, gęstości właściwej i średnicy zastępczej nasion badanych materiałów, a w tabeli 2 gęstości i porowatości próbek dla trzech sposobów formowania: A,B,C, a także wartości spadków ciśnienia Δp dla prędkości przepływu powietrza $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Tabela 1. Właściwości fizyczne badanych materiałów
Table 1. Properties of tested materials

Material Material	Wilgotność Moisture (%)	Gęstość właściwa Specific density ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Średnica zastępcza Equivalent diameter (mm)
Żyto – Rye Gabo	12,0	1330	3,9
Rzepak – Rapeseed Californium	6,0	1000	2,6

Próbki formowane różnymi sposobami miały różną gęstość, która w przypadku żyta zawierała się w przedziale od $720,9$ do $784,9 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, a przypadku rzepaku od $637,8$ do $699,6 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Porowatość próbek żyta zmieniała się w zakresie od 41 do 45,8%, zaś próbek rzepaku od 36,2 do 40,9%. To przede wszystkim ten parametr decyduje o oporze przepływu powietrza przez złożę.

Tabela 2. Spadek ciśnienia powietrza, porowatość i gęstość próbek pszenicy i rzepaku dla trzech metod formowania**Table 2.** Pressure drop, porosity and bulk density of samples of wheat and rapeseed for three filling methods

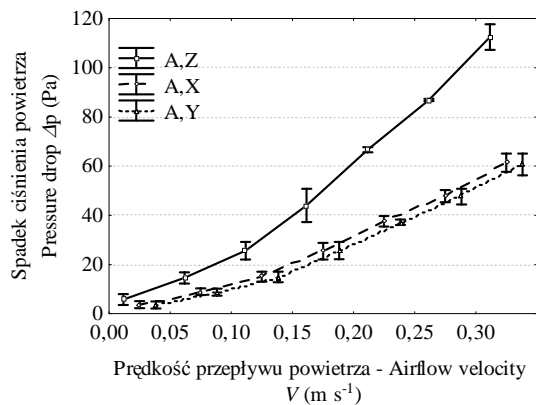
Material Material	Metoda Method	Porowatość Porosity (%)	Gęstość Density (kg·m ⁻³)	Kierunek Direction ¹	Spadek ciśnienia Pressure drop $\Delta p(V=0,3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1})$ (Pa)
Żyto – Rye Gabo	A	45,8±0	720,9±0	Z	86,89±0,2
				X	47,74±1
				Y	47,65±1,3
	B	41,0±0,3	784,9±0,3	Z	147,78±5,5
				X	81,34±1,5
				Y	88,08±0,6
	C	44,7±0	735,6±0,6	Z	102,17±1
				X	79,54±2,6
				Y	45,73±1,3
Rzepak – Rapeseed Californium	A	41,9±0,1	637,6±0,7	Z	135,49±1,7
				X	128,19±2
				Y	136,87±0,4
	B	36,2±0,3	699,6±2,9	Z	254,96±4,7
				X	220,00±3,5
				Y	264,72±3,1
	C	40,9±0,1	648,1±0,6	Z	171,70±5,5
				X	141,28±4,3
				Y	166,03±4,9

¹ Z – pionowy kierunek przepływu, X i Y – poziome kierunki przepływu, Z – Vertical direction, X and Y – horizontal directions.

Spadek ciśnienia w kierunku pionowym - napełnianie wzdłuż osi komory pomiarowej

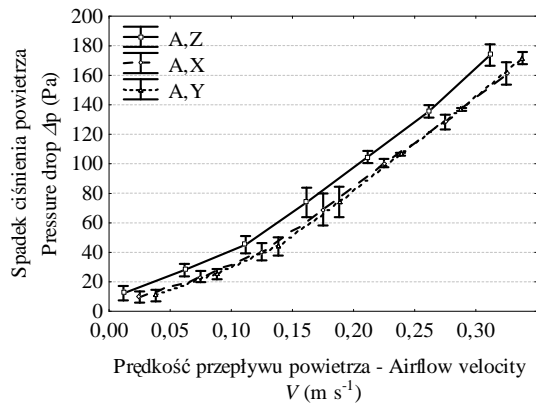
Rysunek 3 przedstawia zależności spadku ciśnienia Δp powietrza od prędkości przepływu w niezagęszczonym złożu ziarna żyta, a rysunek 4 tę samą zależność w niezagęszczonym złożu nasion rzepaku, przy napełnianiu osiowym (sposób A). Złoże rzepaku stawia wyższy opór przepływu powietrza niż złoże żyta. Dla kierunku pionowego Z, przy prędkości przepływu powietrza $0,3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, spadek ciśnienia Δp w złożu żyta wynosił 87 Pa, zaś w złożu rzepaku 135 Pa, tj. 1,55 razy więcej. Jest to przede wszystkim efekt większej porowatości złoża żyta. W obu

materiałach spadek ciśnienia był w kierunku pionowym, zgodnie ze znanymi doniesieniami literatury, wyższy niż w kierunkach poziomych. W odniesieniu do kierunku poziomego X proporcja dla żyta wynosiła 1,81, zaś w przypadku rzepaku była znacznie niższa i równa 1,05. Prawdopodobną przyczyną, zdecydowanie silniejszego zróżnicowania Δp w złożu żyta, jest odległy od kulistego kształt ziaren. Struktury geometryczne silnie wydłużonych ziaren mogą być bardziej zróżnicowane niż ziaren bliskich kształtem kuli.



Rys. 3. Zależność spadku średnich wartości ciśnienia Δp powietrza od prędkości przepływu V powietrza dla trzech kierunków przepływu: Z, X, i Y, sposób napełniania A, materiał żyto Gabo, wilgotność 12%

Fig. 3. Pressure drop Δp versus air velocity V for three airflow directions Z, X and Y for 12% m.c. rye var. Gabo using filling method A



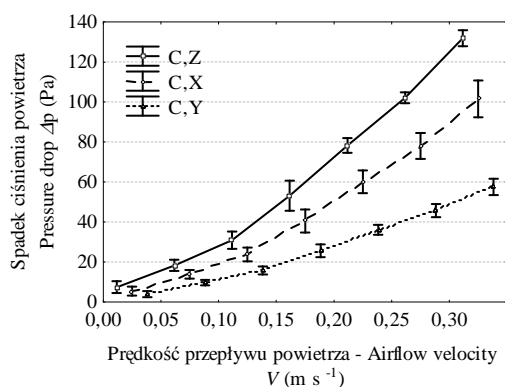
Rys.4. Zależność spadku średnich wartości ciśnienia Δp powietrza od prędkości przepływu V powietrza dla trzech kierunków przepływu: Z, X, i Y, sposób napełniania A, materiał rzepak ozimy odmiana Californium, wilgotność 6%

Fig. 4. Pressure drop Δp versus air velocity V for three airflow directions Z, X and Y for 6% m.c. rapeseed var. Californium using filling method A

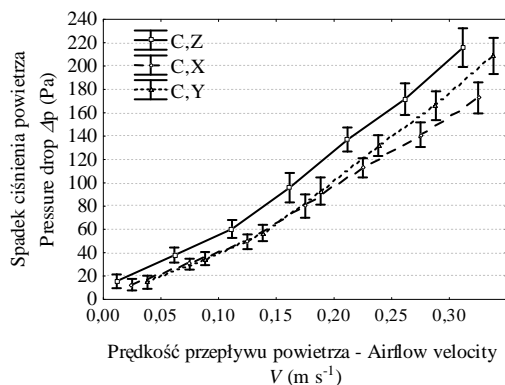
W obu badanych złożach ziaren, formowanych wzdłuż osi (sposób A), różnice spadku ciśnienia w kierunkach poziomych X i Y nie były statystycznie istotne.

Spadki ciśnienia w kierunkach poziomych – napełnianie niesymetryczne

Rysunek 5 przedstawia zależności spadku ciśnienia Δp powietrza od prędkości przepływu V w złożu żyta, a rysunek 6 tę samą zależność w złożu rzepaku, w próbkach niezagęszczonych przy napełnianiu asymetrycznym (metoda C).



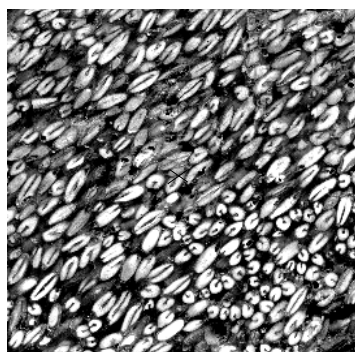
Rys. 5. Zależność spadku średnich wartości ciśnienia Δp powietrza od prędkości przepływu V powietrza dla trzech kierunków przepływu: Z, X, i Y, sposób napełniania C, materiał żyto Gabo, wilgotność 12%
Fig. 5. Pressure drop Δp versus air velocity V for three airflow directions Z, X and Y for 12% in m.c. rye var. Gabo using filling method A



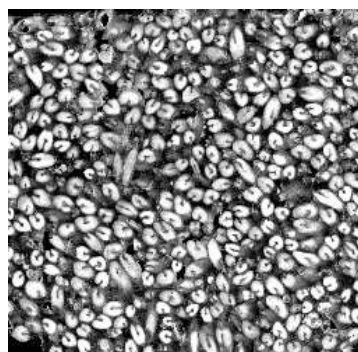
Rys. 6. Zależność spadku ciśnienia Δp powietrza od prędkości przepływu V powietrza dla trzech kierunków przepływu: Z, X, i Y (trzy powtórzenia). Sposób napełniania C, materiał rzepak ozimy odmiana Californium, wilgotność 6%
Fig. 6. Pressure drop Δp versus air velocity V for three airflow directions Z, X and Y for 6% in m.c. rapeseed var. Californium using filling method A

Także dla sposobu napełniania C najwyższe spadki ciśnienia w obu materiałach zaobserwowano w kierunku pionowym Z, jednak ich zróżnicowanie w kierunkach poziomych X i Y było znacznie większe niż przy napełnianiu wzdłuż osi (sposób A). Przy prędkości $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ w przypadku złoża żyta (rys. 5) zanotowano wartości Δp w kierunkach X, Y i Z odpowiednio 79, 46 i 102 Pa, zatem spadek ciśnienia w kierunku pionowym był 1,29 razy wyższy niż w kierunku poziomym X oraz 2,22 razy wyższy niż w kierunku poziomym Y. Wynik ten wskazuje, że w szczególnie niekorzystnej sytuacji iloraz spadków ciśnienia w kierunkach poziomym do spadku ciśnienia w kierunku pionowym, może być znacznie wyższy niż podawana w normie ASAE D272.3 (ASAE 2003) wartość 0,6. Warto także zwrócić uwagę na, rzadko wskazywane w literaturze, silne zróżnicowanie spadków ciśnienia w kierunkach poziomych. Przy prędkości $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ spadek ciśnienia w kierunku poziomym X był 1,79 razy wyższy niż w kierunku poziomym Y. Tak duża anizotropia spadków ciśnienia w kierunkach poziomych, jeśli wystąpi w instalacjach przemysłowych, może zdecydowanie obniżyć efektywność procesu, a nawet spowodować awarię instalacji. Także w przypadku rzepaku zaobserwowano zróżnicowanie spadków ciśnienia w kierunkach poziomych. Przy prędkości $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ spadek ciśnienia w kierunku poziomym Y wynosił 166,0 Pa, podczas gdy w kierunku poziomym X był równy 141,3 Pa, zatem proporcja Δp_X do Δp_Y wynosi 0,85.

Sposób formowania próbek dobrano tak by wytworzyć ich geometryczną anizotropię. Aby ją zobrazować wykonano przekroje próbki ziarniaków żyta utrwalone żywicą epoksydową. Rysunek 7 przedstawia przekrój pionowy V, a rysunek 8 przekrój poziomy H.



Rys. 7. Pionowy przekrój próbki żyta (V)
Fig. 7. Vertical cross-section of rye sample

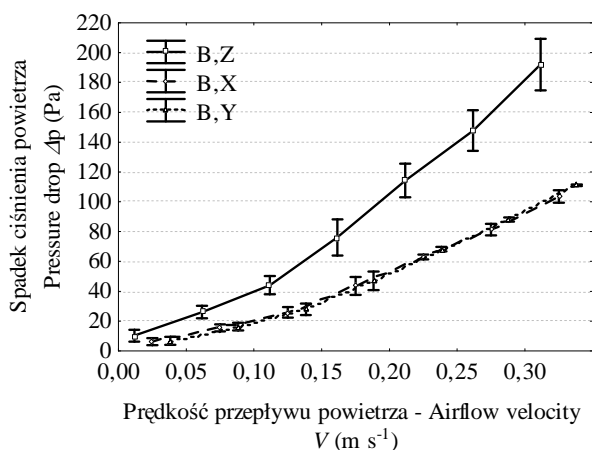


Rys. 8. Poziomy przekrój próbki żyta (H)
Fig. 8. Horizontal cross-section of rye sample

W przekroju pionowym widoczne jest pewne uporządkowanie ziarniaków, większość z nich przecięta jest w położeniu bliskim przekroju osiowego, a ich długie osie nachylone są do poziomu pod kątem bliskim kątowni naturalnego usypu. W przekroju poziomym większość ziarniaków przecięta jest płaszczyzną bliską prostopadłej do długiej osi, zatem powierzchnie przekrojów są mniejsze, co skutkuje mniejszymi rozmiarami porów między ziarniakami i wyższym oporem przepływu – zgodnie z wynikiem eksperymentu. Przedstawiona ilustracja pozwala unaocznić jakościowe różnice struktury porowatości w różnych kierunkach, nie daje jednak możliwości sformułowania związków ilościowych między strukturą porowatości, a spadkiem ciśnienia. Opis taki będzie możliwy dopiero po opracowaniu matematycznych metod charakteryzowania struktury porowatości oraz efektywnych metod analizy struktury wewnętrznej próbki. Jedną z obiecujących metod analizy jest rentgenowska tomografia, którą stosowali Neethirajan i in. (2006).

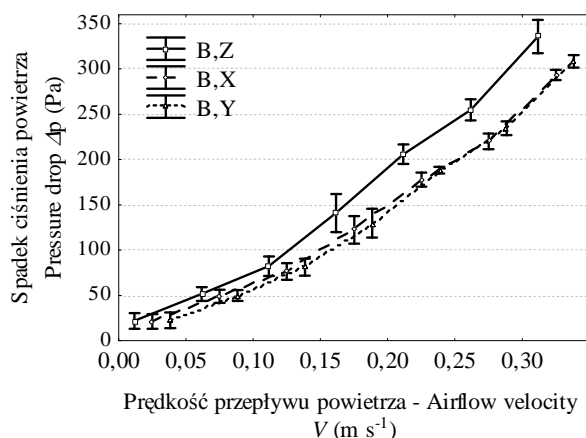
Efekt zagęszczania próbek

Rysunek 9 przedstawia zależność spadku ciśnienia Δp powietrza od prędkości przepływu V w złożu żyta, a rysunek 10 tę samą zależność w złożu rzepaku, w próbkach zagęszczonych, przy napełnianiu symetrycznym (sposób B).



Rys. 9. Zależność spadku średnich wartości ciśnienia Δp powietrza od prędkości przepływu V powietrza dla trzech kierunków przepływu: Z, X, i Y, sposób napełniania B, materiał żyto Gabo, wilgotność 12%

Fig. 9. Pressure drop Δp versus air velocity V for three airflow directions Z, X and Y for 12% in m.c. rye var. Gabo using filling method B



Rys. 10. Zależność spadku średnich wartości ciśnienia Δp powietrza od prędkości przepływu V powietrza dla trzech kierunków przepływu: Z, X, i Y, sposób napełniania B, materiał rzepak ozimy odmiana Californium, wilgotność 6%

Fig. 10. Pressure drop Δp versus air velocity V for three airflow directions Z, X and Y for 6% in m.c. rapeseed var. Californium using filling method B

Zagęszczenie spowodowało przyrost gęstości w stosunku do próbek formowanych metodą A od 721 do $785 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (1,09 razy) w przypadku żyta oraz od 638 do $700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (1,1 razy) w przypadku rzepaku. Przyrost gęstości i towarzyszący mu spadek porowatości (od 46 do 41% – żyto oraz od 42 do 36% – rzepak) pociągnęły za sobą przyrost spadku ciśnienia Δp . Przy prędkości przepływu $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ wystąpiły zmiany Δp w kierunku pionowym z 87 do 148 Pa (1,7 razy) w przypadku żyta oraz ze 136 do 255 Pa (1,9 razy) w przypadku rzepaku. Równocześnie w próbkach formowanych metodami A i B w przybliżeniu zachowana została proporcja wielkości spadku ciśnienia Δp w kierunku pionowym Z w stosunku do Δp zmierzonego w kierunku poziomym X. Przy prędkości przepływu $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ wartości $\Delta p_Z/\Delta p_X$ w próbkach formowanych sposobem A wyniosły dla żyta 1,81, a dla rzepaku 1,05, zaś w próbkach zagęszczanych (sposób B) odpowiednio 1,83 i 1,16. Taki wynik eksperymentu wskazuje, że zagęszczanie wzdłuż osi nie zmienia zasadniczo struktury porowatości próbki.

WNIOSKI

1. W obu badanych materiałach i przy wszystkich metodach formowania próbek spadek ciśnienia powietrza w kierunku pionowym był wyższy niż w kierunkach poziomych. Niewielkie różnice wystąpiły w przypadku nasion rzepaku – najbardziej zbliżonych kształtem do kuli, zaś w przypadku silnie wydłużonych

ziaren żyta różnice były znaczne. Przy prędkości przepływu powietrza $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ spadek ciśnienia w kierunku pionowym był niemal dwukrotnie wyższy niż w kierunkach poziomych.

2. Przy osiowym napełnianiu komory pomiarowej wystąpiły nieznaczne różnice spadków ciśnienia w kierunkach poziomych. Próbkę formowaną asymetrycznie wykazały anizotropię spadku ciśnienia w kierunkach poziomych, szczególnie wyraźną w przypadku ziarna żyta, gdzie przy prędkości przepływu $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ stosunek spadków ciśnienia w kierunkach poziomych (X/Y) wynosił 1,7. W przypadku nasion rzepaku odpowiednia proporcja wynosiła 0,85.

3. Spadek porowatości próbek formowanych wzdłuż osi pionowej komory, związany z zagęszczaniem, powodował znaczny przyrost spadków ciśnienia powietrza, przy czym proporcje wartości w poszczególnych kierunkach nie ulegały znacznym zmianom. W symetrycznie formowanych luźnych i zagęszczanych próbkach żyta, przy prędkości przepływu $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ stosunek spadków ciśnienia w kierunku pionowym Z do tych w kierunku poziomym X w przypadku żyta był równy 1,81 (sposób formowania A) i 1,83 (sposób formowania B) zaś w przypadku rzepaku odpowiednio 1,05 i 1,16.

PIŚMIENNICTWO

- ASAE Standard D272.3 DEC01, 2003. Resistance to airflow of grains, seeds, other agricultural products and perforated metal sheets. ASAE Standards, 569-576.
- Bartosik R.E., Maier D.E., 2006. Effect of airflow distribution on the performance of NA/LT in-bin drying of corn. Transactions of the ASABE, 49(4), 1095-1104.
- Brooker D.B., Baaker-Arkema F.W., Hall C.W., 1992. Drying and storage of grains and oilseeds. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Kumar A., Muir W.E., 1986. Airflow resistance of wheat and barley affected by airflow direction, filling method and dockage. Transactions of the ASAE 29(5), 1423-1426.
- Lamond W.J., Smith E.A., 1982. Modeling low temperature during of grain in anisotropic beds. Third International Drying Symposium, Birmingham, U.K.
- Łukaszuk J., 2005. Wstępna ocena wpływu sposobu formowania złoża ziarna pszenicy na opór przepływu powietrza. Acta Agrophysica, 6(3), 709-714.
- Łukaszuk J., Molenda M., Horabik J., 2006. Wpływ sposobu formowania złoża pszenicy na opór przepływu powietrza. Acta Agrophysica, 8(4), 881-891.
- Łukaszuk J., Molenda M., Horabik J., 2007. Urządzenie do wyznaczania anizotropii oporu przepływu powietrza w złożu materiału ziarnistego. Zgłoszenie patentowe P-382396.
- Molenda M., Łukaszuk J., Horabik J., 2005. Airflow resistance of wheat as affected by grain density and moisture content. Electronic Journal of Polish Agricultural Universities, 8(4).
- Navarro S., Noyes R., 2002. The mechanics and physics of modern grain aeration management. CRC Press.
- Neethirajan S., Karunakaran C., Jaja D.S., White N.D.G., 2006. X-ray computed tomography image analysis to explain the airflow resistance differences in grain bulks. Biosystems Engineering, 94(1), 545-555.

EFFECT OF GRAIN SHAPE AND PACKING ON PRESSURE DROP
IN RYE AND RAPESEED BEDS

Józef Łukaszuk, Marek Molenda, Józef Horabik

Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin
e-mail: jlukaszuk@ipan.lublin.pl

Abstract. Investigations were conducted to estimate the influence of shape and packing structure of seeds on airflow resistance. Relationships between pressure drop Δp and airflow velocity V were determined in cubic samples of rye and rapeseed prepared using different filling methods. Samples of 0.35 m side contained approximately 35 kg of clean material. Three methods of filling the apparatus were applied, one of them producing asymmetric bedding. Pressure drop was measured in three mutually perpendicular directions: vertical (Z) and two horizontal (X) and (Y). Eleven levels of airflow velocity were applied in the range from 0.03 to 0.35 m s⁻¹. Obtained results have shown that shape of seeds and filling method strongly influenced pressure drop. Pressure drop was also found to be dependent on the airflow direction. Compaction of the sample along vertical direction resulted in an increase of pressure drop, but ratios of airflow resistances in three directions were found unchanged.

Keywords: rye, rape, pressure drop, packing structure