

Dr hab. inż. Agnieszka KALETA, prof. SGGW
Dr inż. Krzysztof GÓRNICKI
Wydział Inżynierii Produkcji, SGGW w Warszawie

BEZPIECZNE PRZECHOWYWANIE ZIARNA – ANALIZA NAKŁADÓW ENERGETYCZNYCH®

W artykule przedstawiono analizę nakładów energetycznych podczas przechowywania ziarna. Analizowano zarówno suszenie wysokotemperaturowe, jak i aktywne wietrzenie ziarna. W pracy podano sposoby wyznaczania zużycia energii podczas przechowywania ziarna. Badania przechowywania ziarna prowadzi się od wielu lat, lecz w dalszym ciągu brakuje wytycznych, jakie zabiegi pielęgnacyjne są korzystne dla konkretnych parametrów ziarna i powietrza atmosferycznego.

Słowa kluczowe: bezpieczne przechowywanie, nakłady energetyczne, ziarno zbóż.

WPROWADZENIE

Powszechnie wykorzystywany zbiór ziarna zbóż za pomocą kombajnu umożliwia opóźnienie żniw i zebranie ziarna dojrzałego i suchego, bez ponoszenia większych strat spowodowanych osypywaniem się ziarna. W rzeczywistości średnia wilgotność tak zebranego ziarna może być jednak dużo większa, a w niektórych partiach, bezpośrednio po zbiorze, wilgotność pojedynczych niedojrzałych ziarniaków może wynosić nawet powyżej 30 %. Ta nierównomierność wilgotności poszczególnych ziarniaków może stać się przyczyną procesów samozagrzewania nawet wtedy, gdy ziarno zbóż jest uznawane za suche. Uważa się, iż najmniejsze straty są ponoszone wtedy, gdy ziarno zbóż podczas zbioru ma wilgotność nie większą niż 18% [13].

Ziarno zebrane kombajnem zbożowym ma stosunkowo wysoką temperaturę, często powyżej 30 °C, oraz jest zanieczyszczone zielonymi częściami roślin, słomy i nasionami chwastów, charakteryzującymi się wyższą wilgotnością od samego ziarna.

Podczas przechowywania w ziarnie zbóż przebiegają procesy związane z przemianą materii, których intensywność zależy od wilgotności i temperatury. Prowadzi to do ubytku masy ziarna, rozwoju drobnoustrojów, bakterii i pleśni oraz zmniejszenia siły kiełkowania.

Obniżenie temperatury i wilgotności ziarna wstrzymuje dalsze procesy niszczące jego wartość użytkową, ale straty ilościowe i jakościowe powstałe podczas zagrzewania są już nieodwracalne.

Ziarno może być przechowywane w silosach metalowych z promieniowym i pionowym przepływem powietrza. Są to zbiorniki w kształcie walca lub wieloboku, o wysokości większej od średnicy lub innego wymiaru liniowego, charakteryzującego wielkość podstawy. Zboże jest składowane również w magazynach płaskich.

Procesami stosowanymi w celu ograniczenia strat ziarna podczas jego przechowywania są suszenie i aktywne wietrzenie ziarna. Oba procesy wymagają nakładów energetycznych. Szczególnie proces suszenia, ze względu na wysoką wartość ciepła parowania wody i stosunkowo niską sprawność energetyczną suszarek, jest bardzo energochłonny. O skali problemu świadczy przykład podany w pracy [14]. Otóż szacuje się, że w latach 1980-1981 na świecie wyprodukowano 727

milionów ton ziarna. Oceniając, że wilgotność w zebranych zbiorach wynosiła 20-30 %, a w zbożu przechowywanym 10-13 %, z tych zbiorów należało usunąć 92 miliony ton wody.

Celem pracy jest analiza nakładów energetycznych przechowywania ziarna. Analiza ta może pokazać, że precyzyjnie określone optymalne parametry procesu przechowywania ziarna wymagają sformułowania odpowiedniego matematycznego modelu, który ujmuje możliwie wiele aspektów przebiegu procesu usuwania wilgoci z ziarna. Z literatury przedmiotu [2, 5, 8, 16] wynika, że dotychczas taki wszechstronny model nie został opracowany.

CZAS BEZPIECZNEGO PRZECHOWYWANIA ZIARNA

Czas bezpiecznego przechowywania ziarna, tzn. czas, w którym rozwój niepożądanych procesów nie wywołuje istotnych zmian w jakości ziarna, jest określany na podstawie wilgotności i temperatury ziarna oraz powietrza w przestrzeniach międzyziarnowych. Podstawowymi kryteriami ustalenia długości tego okresu są:

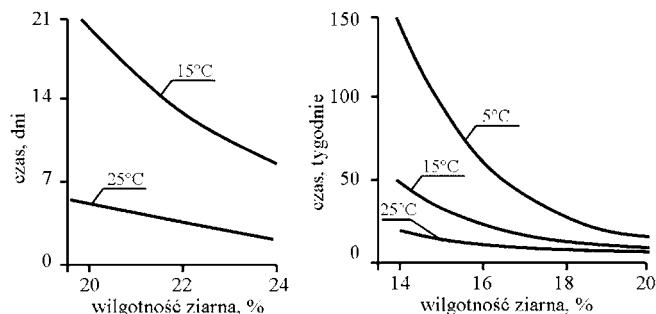
- wydzielanie dwutlenku węgla i związany z tym ubytek suchej masy ziarna,
- rozwój pleśni i mikroorganizmów,
- zdolność kiełkowania.

Zależności czasu bezpiecznego przechowywania ziarna są przedstawiane w postaci tabel, wykresów lub formuł empirycznych [4, 13].

Z badań wynika, że najbardziej rygorystycznym i bezpiecznym dla ziarna zbóż jest kryterium uwzględniające rozwój pleśni i mikroorganizmów [13]. Najgroźniejszym czynnikiem pogarszającym jakość przechowywanego ziarna jest bowiem rozwój grzybów mikroskopowych, zwanych potocznie pleśniami.

W masie zbożowej oprócz ziarna znajduje się duża ilość szkodliwych organizmów, do których należą liczne gatunki mikroflory oraz mikro- i makrofauny. Mikroflora ta składa się głównie z bakterii, promieniowców, grzybów m.in. drożdży, przy czym najliczniejszą grupę stanowią organizmy saprofityczne reprezentowane przez wiele rodzajów grzybów (np. z grupy *Aspergillus*, *Penicillium*, *Fusarium*). Produktami metabolizmu komórkowego grzybów są toksyczne dla ludzi i zwierząt substancje chemiczne – miktotoksyny (np. aflatoksyny, ochratoksyny, trichoteceny, zearalenon), które przemieszczają się w głąb ziarna i kumulują się w nim. Stosowane

procesy przetwarzania porażonego ziarna, jak mielenie czy wypiek, zmniejszają jedynie nieznacznie zagrożenie w przypadku ich spożycia [4]. Rozwój mikroorganizmów przebiega intensywniej przy wyższej temperaturze i wilgotności ziarna, co ilustrują badania przedstawione w pracach [1, 6, 12, 13].



Rys. 1. Czas bezpiecznego przechowywania ziarna zbóż w zależności od temperatury i wilgotności ziarna [13].

Na rysunku 1 przedstawiono wykres czasu bezpiecznego przechowywania ziarna zbóż dla powyższego kryterium. Widać, że czas ten jest silnie uzależniony od temperatury i wilgotności ziarna. Ziarno o wilgotności 14% i temperaturze 15°C można bezpiecznie przechowywać rok, a o wilgotności 24% i temperaturze 15°C tylko około 9 dni. Natomiast ziarno mające wilgotność 24% i temperaturę 25°C zaledwie kilkadziesiąt godzin. Określenie czasu bezpiecznego przechowywania ziarna zbóż stwarza problem, gdyż w czasie przechowywania ziarna zmienia się jego temperatura i/lub wilgotność, a czas ten podawany w tabelach i wykresach dostępnych w literaturze dotyczy stałych wartości temperatury i wilgotności ziarna.

WYZNACZANIE ZUŻYCIA ENERGII PODCZAS PRZECHOWYWANIA ZIARNA

Energię zużywaną podczas suszenia ziarna zbóż można podzielić na dwie grupy. Jest to energia zużywana na przedmuchiwanie warstwy ziarna i na podgrzewanie suszącego powietrza.

Wskaźnik zużycia energii na przedmuchiwanie warstwy ziarna powietrzem jest określany w jednostkach energii na jeden kilogram usuniętej wody [4, 9]:

$$q_w = \frac{(1 + u_0) N_s \cdot 10^{-3} \tau}{M_z (u_0 - u_k) \eta_s \eta_n}, \text{ kJ/kg H}_2\text{O} \quad (1)$$

gdzie: u_0 – początkowa zawartość wody w ziarnie, kg H₂O/kg s.s.;
 N_s – moc silnika napędzającego wentylator, W;
 τ – czas, s;
 M_z – początkowa masa ziarna, kg;
 u_k – końcowa zawartość wody w ziarnie, kg H₂O/kg s.s.;
 η_s – sprawność silnika, -;
 η_n – współczynnik niedopasowania silnika do wentylatora, -.

Wskaźnik zużycia energii cieplnej na podgrzewanie suszącego powietrza określa się w jednostkach energii na jeden

kilogram odparowanej podczas suszenia wody [4, 10]:

$$q_p = \frac{(1 + u_0)(c_p + c_v x_{ot}) \rho_p V_w (t_{po} - t_{pot}) \tau}{M_z (u_0 - u_k) \eta_p \eta_s}, \text{ kJ/kg H}_2\text{O} \quad (2)$$

gdzie: c_p – ciepło właściwe powietrza, kJ/kg;
 c_v – ciepło właściwe pary wodnej, kJ/kg;
 x_{ot} – zawartość wody w powietrzu wchodzącym do warstwy ziarna, kg H₂O/kg s.p.;
 ρ_p – gęstość powietrza, kg/m³;
 V_w – wydatek wentylatora, m³;
 t_{po} – temperatura powietrza na wlocie do silosu, °C;
 t_{pot} – temperatura powietrza atmosferycznego (otoczenia), °C;
 η_p – sprawność podgrzewacza, -;
 η_s – sprawność suszarki, -.

Wyprowadzenie wzorów (1) i (2), schematy instalacji oraz metodyka prowadzenia badań zużycia energii podczas suszenia ziarna zbóż są opisane szczegółowo w pracach [4, 9, 10]. Na podstawie literatury przedmiotu do obliczeń można przyjmując następujące wartości liczbowe: $\eta_s=0,85$, $\eta_n=0,8$, $\eta_p=0,45$ [10, 11, 15].

ZUŻYCIE ENERGII NA USUWANIE WILGOCI Z ZIARNA

Ziarno zbóż bezpośrednio po zbiorze powinno być oczyszczone z zielonych i wilgotnych części roślin. Udział zanieczyszczeń powinien być mniejszy niż 5%. Nakłady energetyczne na oczyszczanie ziarna są nieporównywalnie mniejsze niż na późniejsze zmniejszanie wilgotności ziarna.

Aktywna wentylacja wymaga, by przez warstwę ziarna przepływało powietrze o odpowiednich parametrach. Należy znać temperaturę i wilgotność względną powietrza oraz temperaturę i wilgotność ziarna, do którego to powietrze jest wdmuchiwane. Dane te można zmierzyć przyrządami pomiarowymi. W trakcie przewietrzania parametry wdmuchiwanego powietrza mogą się jednak zmieniać. Tak więc nie zawsze wystarcza jeden pomiar przed włączeniem wentylatora. Aby przewietrzanie było bezpieczne należy stosować urządzenie pomiarowo-kontrolne, które w sposób automatyczny, gdy wystąpi niebezpieczeństwo nawilżania ziarna, wyłączy wentylator. Zastosowanie takiego urządzenia umożliwi również automatyczne załączanie wentylatora, gdy parametry powietrza są odpowiednie. Zgodnie z normą ISO 34/4/2 N 125 dla ziarna o wilgotności mniejszej niż 15% zaleca się wietrzyć 20 m³/(h·t) powietrza na każdą tonę ziarna. W przypadku nieodpowiednich warunków atmosferycznych podgrzewa się powietrze o kilka stopni, aby obniżyć jego wilgotność względną. Podgrzanie powietrza pociąga za sobą kolejne nakłady energetyczne, jednak może to być jedynym sposobem na bezpieczne przechowanie ziarna. Aktywna wentylacja, przy dość niskich nakładach energetycznych jest metodą dość czasochłonną, zależną w dużej mierze od warunków pogodowych. Jest to ciągły wyścig z rozwojem pleśni. Ciągłe podgrzewanie powietrza byłoby zabiegiem dość kosztownym, nie zawsze dającym dobry efekt. Przewietrzanie podgrzaniem powietrzem warstwy ziarna o grubości ponad 2 m może prowadzić do niebezpiecznego wzrostu temperatury tych warstw ziarna, do których strefa suszenia dociera najpóźniej i przyspieszenia rozwoju mikroorganizmów, co prowadzi do zepsucia ziarna.

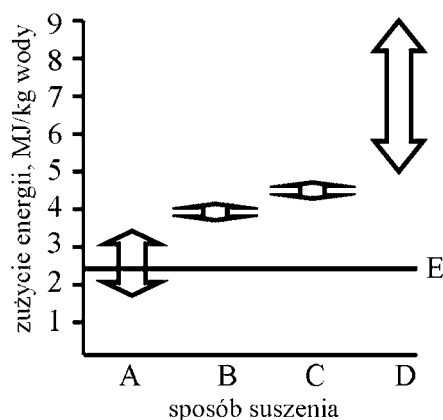
Wspomniany układ pomiarowo-kontrolny może dodatkowo, przy określonych warunkach pogodowych, gdy istnieje niebezpieczeństwo zepsucia ziarna, włączyć podgrzewacz.

Ziarno zbóż, które charakteryzuje się wysoką wilgotnością, należy suszyć bezpośrednio w suszarkach. Suszenie pociąga więc za sobą transport ziarna do urządzenia suszącego, a następnie po wysuszeniu ponowny transport do miejsca składowania. Suszenie wysokotemperaturowe jest metodą szybkiego pozbywania się wilgoci z ziarna, jednak jest to metoda bardzo energochłonna.

Aby ograniczyć zużycie energii na odparowanie wilgoci z ziarna stosuje się suszenie dwuetapowe. Polega ono na suszeniu ziarna do wilgotności o 2-3 % większej niż wilgotność docelowa, po czym umieszcza się je w silosach, gdzie leżakuje. Drugi etap suszenia i chłodzenia ziarna przez wentylację rozpoczyna się z kilkugodzinnym opóźnieniem. W tym czasie wilgoć przemieszcza się ze środka poszczególnych ziaren do warstw zewnętrznych. Oszczędność energii dochodząca nawet 25 % wynika z tego, iż ciepłe jeszcze ziarno podgrzewa wdmuchiwanie powietrze ułatwiając w ten sposób odparowanie wody.

Zużycie energii w suszarkach pracujących w przepływie mieszanym (np. w suszarkach daszkowych) jest niższe w porównaniu z innym rodzajem suszarek wysokotemperaturowych. Spowodowane jest to faktem, iż w tych suszarkach można podgrzewać powietrze do wyższych temperatur, a więc zmniejszyć dawkę powietrza (konstrukcja suszarki zapewnia dodatkowo mniejsze opory pneumatyczne co powoduje zmniejszenie energii na przedmuchiwanie warstwy ziarna), przez co mniej ciepła jest tracone wraz z powietrzem wyłotowym.

Często wykorzystywanym sposobem zmniejszenia nakładów energetycznych na suszenie jest recyrkulacja ciepłego powietrza opuszczającego suszarkę i skierowanie go do podgrzewacza.



Rys. 2. Zużycie energii na odparowanie 1 kg wody z masy ziarna różnymi metodami; A – suszenie niskotemperaturowe nienagrzanym powietrzem (różne warunki pogodowe); B – suszenie niskotemperaturowe w silosach z radialnym (promieniowym) przepływem powietrza; C – suszenie wysokotemperaturowe w suszarkach daszkowych; D – suszenie wysokotemperaturowe w suszarkach o przepływie skrzyżowanym powietrza (różne typy suszarek); E – ciepło parowania wody (dla porównania) [7].

Na rysunku 2 przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych zużycia energii na odparowanie różnymi metodami 1 kg wody z masy ziarna zbóż. Na wykresie tym jest również zaznaczona wartość ciepła parowania wody. Widać, że najmniejsze zużycie energii występuje przy suszeniu niskotemperaturowym – aktywnym wietrzeniu. Energia zużywana na odparowanie wody może być nawet mniejsza niż wartość ciepła parowania wody. Spowodowane jest to wykorzystaniem darmowego potencjału suszącego powietrza otoczenia. Zakres zużycia energii jest dość szeroki, gdyż warunki pogodowe nie zawsze są korzystne dla przeprowadzania aktywnego wietrzenia. Większe zużycie energii występuje przy suszeniu niskotemperaturowym, niewiele większe w suszarkach daszkowych. Największe zużycie energii występuje przy suszeniu wysokotemperaturowym. W zależności od rodzaju suszarek zużycie energii w tej grupie może być nawet dwukrotnie większe.

PODSUMOWANIE

Wskaźniki zużycia energii zależą nie tylko od ilości zużytej energii, a więc od sposobu prowadzenia procesu, ale i od zastosowanego oprzyrządowania. O ile wentylator jest zasilany energią elektryczną, o tyle podgrzewacz może zużywać paliwo stałe (węgiel), ciekłe (olej opałowy), gazowe (gaz ziemny, propan-butan) lub energię elektryczną. Ceny paliw, energii elektrycznej i ziarna, jak i ich wzajemne relacje ciągle zmieniają się. Zmianie ulegają więc, dla tych cen, warunki prowadzenia suszenia ziarna.

Suszenie wysokotemperaturowe pozwala na szybkie pozbycie się wilgoci z ziarna, ale jest to jednak metoda bardzo energochłonna. Z kolei metody wymagające mniejszych nakładów energetycznych są ograniczone parametrami powietrza otoczenia. Niewłaściwe stosowanie aktywnej wentylacji może doprowadzić do nawilżenia ziarna. Dlatego też, mimo że badania w tym zakresie prowadzi się od wielu lat, w dalszym ciągu brakuje wytycznych, jakie zabiegi pielęgnacyjne jest korzystnie stosować dla konkretnych parametrów ziarna zbóż i powietrza atmosferycznego. Odpowiedź na to pytanie można uzyskać stosując bardzo dużo czasochłonnych i kosztownych badań eksperymentalnych lub prowadząc eksperymenty symulacyjne, co jest możliwe gdy dysponuje się odpowiednim matematycznym modelem, który ujmuje możliwe wiele aspektów przebiegu procesu usuwania wilgoci z ziarna. Z literatury przedmiotu wynika, że dotychczas taki wszechstronny model nie został opracowany.

LITERATURA

- [1] Bailey P.H., Smith E.A.: Strategies for control of near - ambient grain driers – simulation using 1968 Turnhouse (Edinburgh) weather, Dept. Note SIN/330, Scot. Inst. Agric. Enging., Penicuik, 1982.
- [2] Cenkowski S., Jayas D.S., Pabis S.: Deep-bed grain drying – a review of particular theories, Drying Technology, 1993, 11(7), s. 1553-1581.
- [3] Feder S., Pawlicki T., Kaźmierczak H., Górecki M.: Kierunki rozwoju suszarń ziarnowych, Część I. Przegląd Techniki Rolniczej i Leśnej, 1994, 2, s. 6-8.
- [4] Kaleta A.: Modelowanie procesu konwekcyjnego suszenia ziarna w silosach. Fundacja Rozwój SGGW, Warszawa, 1996.

- [5] Khatchatourian O.A., de Oliveira F.A.: Mathematical modelling of airflow and thermal state in large aerated grain storage, *Biosystems Engineering*, 2006, 95(2), s. 159-169.
- [6] Kreyger J.: Drying and storing grains, seeds and pulses in temperate climates, *Bulletin 205. Institute for Storage and Processing of Agricultural Products*, Wageningen, The Netherlands, 1972.
- [7] Mc Lean K.A.: Drying and storing combinable crops, *Farming Press*, UK, 1989.
- [8] Navarro S., Noyes R.T.: The mechanics and physics of modern grain aeration management, *CRC Press LLC*, USA, 2002.
- [9] Pabis S.: Badanie nad suszeniem ziarna w warstwie metodą przedmuchiwania nieograniczonym powietrzem, *Roczniki Nauk Rolniczych*, 1954, 66-C-4, s. 61-103.
- [10] Pabis S., Pabis J.: *Technologia suszenia i czyszczenia nasion*, Wyd. II. PWRiL, Warszawa, 1984.
- [11] Ryniecki A.: Drying and cooling grain in bulk, *Handbook, Questions and answers, Part I. Mr INFO*, Poznań, 2006.
- [12] Ryniecki A.: Zastosowanie modelowania i symulacji komputerowej w analizie sterowanego niskotemperaturowego procesu suszenia ziarna pszenicy, *Praca doktorska, Akademia Rolnicza, Poznań*, 1985.
- [13] Ryniecki A., Szymański P. (red.): *Dobrze przechowane zboże, Jak suszyć, chłodzić, przewietrzać, czyścić, przechowywać i dobrze sprzedać ziarno zbóż, nasiona rzepaku i innych roślin, Poradnik, Pytania i odpowiedzi, Wydanie III. Mr INFO Towarzystwo Umiejętności Rolniczych*, Poznań, 2006.
- [14] Strumiłło C., Adamiec J.: Energetyczno – jakościowe aspekty suszenia materiałów spożywczych, *VIII Sympozjum Suszarnictwa, Warszawa, 20-22 czerwca 1994, Materiały konferencyjne, tom I*, s. 52-73.
- [15] Wojdalski J., Domagała A., Kaleta A., Janus P.: *Energia i jej użytkowanie w przemyśle rolno-spożywczym*, Wyd. SGGW, Warszawa, 1998.
- [16] Zare D., Minaei S., Mohamad Zadeh M., Khoshtaghaza M.H.: Computer simulation of rough rice drying in a batch dryer, *Energy Conversion and Management*, 2006, 47, s. 3241-3254.

SAFE GRAIN STORAGE - ANALYSIS OF ENERGY CONSUMPTION

SUMMARY

The method of drying at high temperature allows fast removing of water from grain, but requires a large energy expenditure. Other less energy-consuming methods are limited by parameters of environmental air. Despite of many studies, there are not precised suggestions concerning treating of grain of given temperature and moisture by the air of given temperature and humidity. Solution of this problem requires either experimental studies, which are time-consuming and costly or simulation experiments, which are possible when adequate mathematical model of process of moisture removing from grain is known.

Key words: safe storage, energy consumption, grain.