

## MODEL NEURONOWY ZMIAN ZAWARTOŚCI WODY W ZRĘBKACH WIERZBY PODCZAS KONWEKCYJNEGO SUSZENIA

Bogusława Łapczyńska-Kordon, Sławomir Francik

*Katedra Inżynierii Mechanicznej i Agrofizyki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie*

**Streszczenie.** Celem pracy było opracowanie modelu zmian zawartości wody w zrębkach wierzby energetycznej w czasie, w postaci sztucznej sieci neuronowej. Model został opracowany w oparciu o wyniki badań procesu konwekcyjnego suszenia zrębków wierzby o długości 2 cm, ale różnej średnicy, w suszarce laboratoryjnej z wymuszonym przepływem powietrza. Materiał był suszony w temperaturach 40, 50, 60 i 70°C. Na podstawie otrzymanych wyników badań został sformułowany, za pomocą SSN, model zmian zawartości wody w zależności od sześciu zmiennych wejściowych: czasu suszenia, temperatury czynnika suszącego, długości i średnicy zrębków oraz początkowej zawartości wody i masy zrębków. Spośród opracowanych modeli wybrano model o architekturze MLP 6:6-15-14-1:1, ponieważ podczas weryfikacji empirycznej stwierdzono, że obliczony błąd średniokwadratowy dla tego modelu był najmniejszy.

**Słowa kluczowe:** model neuronowy, zawartość wody, suszenie konwekcyjne

### Wstęp

Możliwość użycia zdrewniałej biomasy (resztki lasów, przetworzone resztki drewna, plantacje wierzby, topoli i eukaliptusa), jako alternatywy paliw kopalnych, zyskuje szerokie światowe zainteresowanie, żeby zredukować emisję dwutlenku węgla. Główną jej wadą jest wysoka zawartość wilgoci w płonach, zazwyczaj, około 50–60%, która powoduje kilka problemów związanych z:

- procesami zachodzącymi podczas przechowywania (samozagrzewaniem, rozwojem pleśni),
- niską wartością ciepła spalania (energochłonne) i zwiększoną emisją dwutlenku węgla,
- ogromną ilością niepotrzebnej wody w drewnie, która musi być transportowana i przenoszona, dlatego podnoszą się koszty dostarczenia, konsumpcji energii oraz emisji.

Suszenie jest nieodzownym elementem w technologii produkcji biomasy przeznaczonej na bezpośrednie spalanie lub dalsze przetwarzanie (np. na granulaty). Bardzo istotna jest zawartość wody określana przez wilgotność względną, albowiem od niej zależy wartość opałowa biomasy jako surowca energetycznego.

W Polsce najbardziej popularną, uprawianą odmianą biomasy jest wierzba energetyczna, szczególnie z odmian *Salix viminalis*. Wierzba energetyczna po zbiorze jest materiałem o znacznej wilgotności (powyżej 50%). Przed dalszą przeróbką - zrębkowaniem - jest sezonowana, w celu obniżenia wilgotności do około 25%. Do produkcji pelet i brykietów wymagana jest wilgotność wierzby poniżej 15%, dlatego powinna być poddana suszeniu ciepłym powietrzem. Proces suszenia powinien być prowadzony tak, aby zużycie energii w postaci ciepła było nie większe od ilości możliwej do pozyskania energii z wysuszonych zrębków czy granulatów otrzymanych z wierzby. Dobór odpowiednich parametrów suszenia umożliwiając matematyczne modele, za pomocą których można przeprowadzać symulacje komputerowe procesu suszenia dla różnych wejściowych parametrów i analizować stan końcowy suszonego materiału (zawartość wody w materiale, temperaturę materiału, masę końcową, zużycie energii itp.)

W literaturze były prezentowane wyniki badań i modelowania kinetyki suszenia wierzby w różnych postaciach [Bernatowicz, Matejak 1996; Vissers i in. 2000; Holmberg, Ahtila 2004; Van Loon i in. 2004]. Modele były głównie formułowane na podstawie badań w postaci formuł empirycznych, które nie uwzględniały w swojej strukturze wszystkich czynników, które mogłyby mieć wpływ na kinetykę zmian zawartości wody w suszonym materiale.

Jednym z narzędzi służących do modelowania są sztuczne sieci neuronowe. Model otrzymany za pomocą sztucznych sieci neuronowych nie pozwala na wyjaśnienie procesów fizycznych zachodzących wewnątrz materiału podczas transportu masy do powierzchni próbki. Transport ten dzieli się na proces powierzchniowej wymiany masy i następnie dyfuzji wewnątrz materiału. Ich szybkość zależy między innymi od temperatury suszenia. W przypadku tworzenia modeli za pomocą SSN, materiał traktowany jest czarna skrzynka. Modele te, zatem, mają raczej znaczenie praktyczne, np. do sterowania procesów suszenia, ponieważ zmienną wyjściową można uzależnić od kilku zmiennych wejściowych.

Dlatego w pracy podjęto próbę sformułowania modelu kinetyki zmian zawartości wody w suszonych konwekcyjnie zrębkach wierzby energetycznej za pomocą sztucznych sieci neuronowych.

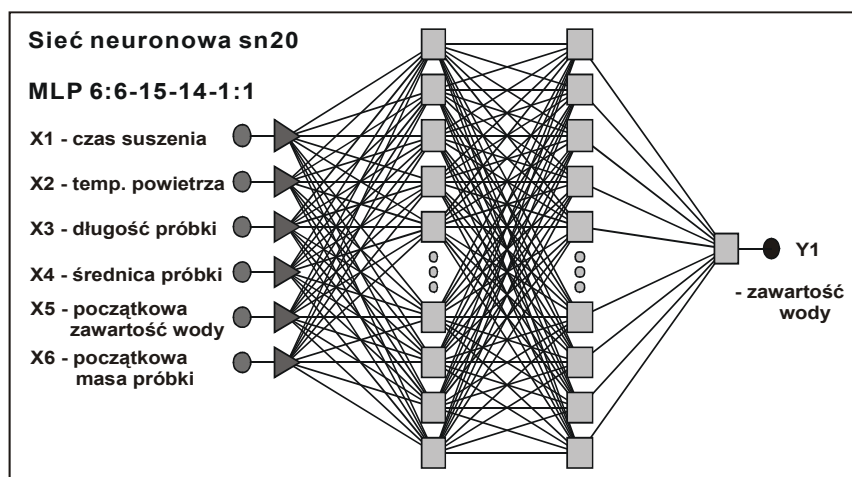
## Metodyka badań

Model zmian zawartości wody za pomocą sztucznych sieci neuronowych został sformułowany na podstawie przeprowadzonych badań, podczas konwekcyjnego suszenia wierzby krzewiastej (wierzba konopiana) – *Salix viminalis*.

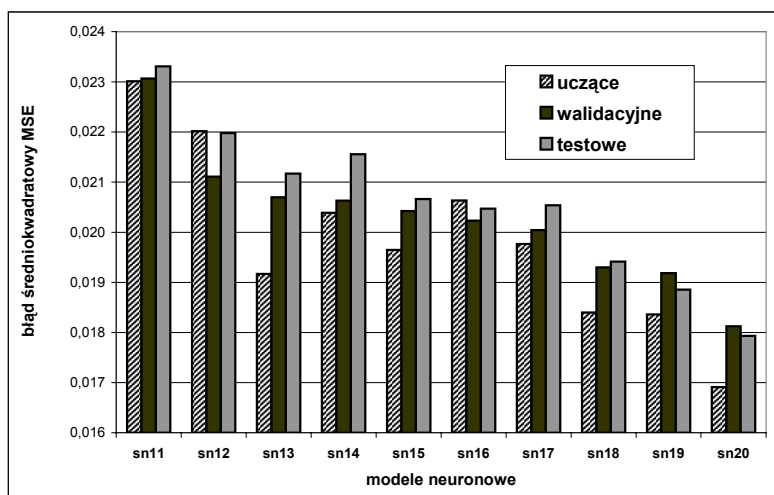
Materiał suszono w postaci zrębków o długości około 2 cm. Próbki były przygotowywane bezpośrednio przed suszeniem i ważone na elektronicznej wadze WPE 300 (dokładność 0,01g), aby nie dopuścić do obsychania materiału. Masa tych próbek była zróżnicowana ze względu na różną średnicę zrębków. Materiał suszono w suszarce konwekcyjnej firmy ELKON KC 100 N z wymuszonym obiegiem czynnika suszącego, w temperaturach 40, 50, 60 i 70°C. W czasie suszenia co 5 minut była rejestrowana masa próbek. Proces suszenia prowadzono do momentu ustalenia się równowagowej zawartości wody. Została również wyznaczona zawartość suchej substancji w materiale zgodnie z obowiązującą normą. Na podstawie uzyskanych z pomiaru mas i zawartości suchej substancji obliczono zawartości wody dla różnych czasów suszenia. Pomiarów wykonano w pięciu powtórzeniach dla każdej temperatury czynnika suszącego.

### Model neuronowy kinetyki zmian zawartości wody w zrębkach

Utworzony model za pomocą sztucznych sieci neuronowych opisuje zmiany zawartości wody w zależności od 6 zmiennych wejściowych (rys. 1).



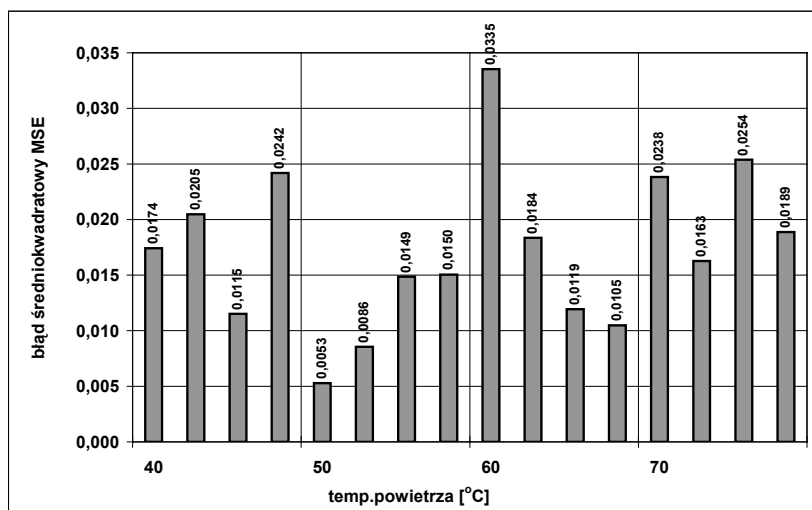
Rys. 1. Schemat sztucznych sieci neuronowych  
Fig. 1. Diagram showing artificial neural networks



Rys. 2. Rozkład błęd średniokwadratowych dla różnych modeli neuronowych  
Fig. 2. Distribution of mean square error for different neural models

Zbiór 6060 danych podzielono na dane: testujące T (1212), uczące U (3636) i weryfikujące W (1212). Przebadane 100 architektur sieci wielowarstwowych perceptronach i sieci o radialnych funkcjach bazowych Na podstawie analizy błędu średniokwadratowego zbioru walidacyjnego przyjęto model 20 o strukturze MLP 6:6-15-14\_1:1, dla którego jego wartość była najniższa (rys. 2).

Została przeprowadzona również analiza rozkładu błędu średniokwadratowego w zależności od temperatury czynnika suszącego i średnicy zrębków (rys. 3). Najniższe wartości błąd osiągnął dla sieci opisującej proces suszenia zrębków w temperaturze 50°C. Analizując wszystkie przypadki suszenia stwierdzono, że błąd zmieniał się od około 0,5% do około 3,4%. Zmienność błędu w zależności od średnic zrębków, jak też temperatury czynnika suszącego, miała charakter stochastyczny.

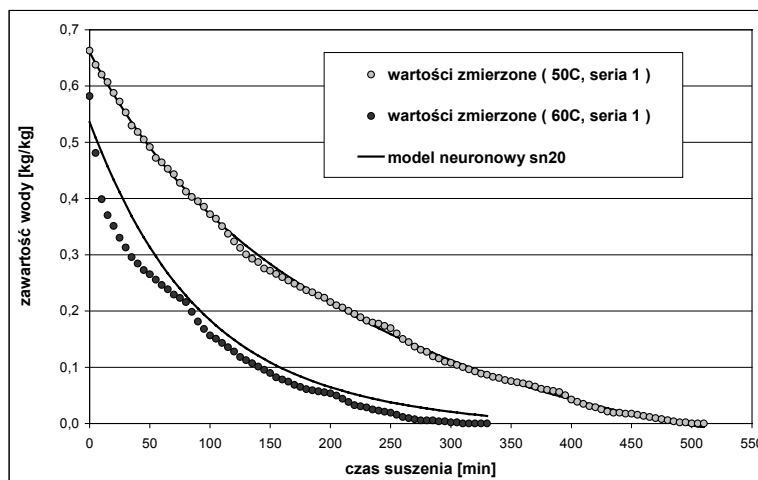


Rys. 3. Zależność błędu średniokwadratowego w zależności od temperatury czynnika suszącego i średnicy zrębków

Fig. 3. Dependence between mean square error and drying medium temperature and the diameter of chips

Otrzymany malejący przebieg zmian zawartości wody od czasu, dążący do wartości równowagowej, pozwala na pozytywne zweryfikowanie logiczne modelu, gdyż jest on zgodny z ogólną teorią suszenia ciał stałych [Pabis 1982]. Model został również pozytywnie zweryfikowany empirycznie, ze względu na małe wartości obliczonych błędów średniokwadratowych.

Na rysunku 4 przedstawiono przykładowe przebiegi zmian zawartości wody w czasie otrzymane doświadczalnie i obliczone z modelu. Na wykresie zilustrowano te zmiany dla dwóch różnych temperatur suszenia. W przypadku suszenia w temperaturze 60°C wyniki otrzymane za pomocą pomiarów wykazują lepszą zgodność, aniżeli dla przypadku suszenia w temperaturze 50°C. Wynika to najprawdopodobniej z błędów pomiarowych. Dla pozostałych temperatur czynnika suszącego (40°C i 70°C) zgodność wyników pomiarowych z otrzymanymi z modelu była podobna jak dla temperatury suszenia 60°C.



Rys. 4. Przykładowe przebiegi zmian zawartości wody w zależności od czasu dla wartości empirycznych i obliczonych z modelu

Fig. 4. Example trajectories of water content changes depending on time for empirical values and values computed using the model

## Podsumowanie

Na podstawie analizy otrzymanych wyników z obliczeń za pomocą modelu stwierdzono, że model sformułowany za pomocą sztucznych sieci neuronowych poprawnie opisuje kinetykę zmian zawartości wody w zależności od czasu, temperatury suszenia, wymiarów suszonych zrębków i prętów, początkowej zawartości wody oraz masy próbek, co potwierdza niska wartość błędu średnio kwadratowego. Jest poprawny również pod względem logicznym, ponieważ jest zgodny z teorią opisującą kinetykę zmian zawartości wody w ciałach stałych.

Jednak ma tylko znaczenie praktyczne, gdyż nie pozwala na wyjaśnienie zjawisk zachodzących podczas procesu suszenia.

## Bibliografia

- Bernatowicz G., Matejak M.** 1996. Stan wiedzy w zakresie modelowania przebiegu procesu suszenia drewna. *Przemysł Drzewny* 9. s. 19-22.
- Holmberg H., Ahtila P.** 2004. Comparison of drying costs in biofuel drying between multi-stage and single-stage drying. *Biomass and Bioenergy* 26(6). s. 515-530.
- Pabis S.** 1982. Teoria konwekcyjnego suszenia produktów rolniczych. PWRiL, Warszawa.
- Vissers M.M., Gigler J.K.** 2000. Forced convective drying of willow chips. *Biomass and Bioenergy* 19(4). s. 259-270.

## NEURAL MODEL OF CHANGES IN WATER CONTENT IN WILLOW CHIPS DURING CONVECTION DRYING

**Abstract.** The purpose of the work was to develop a model of changes in time of water content in energy willow chips using artificial neural networks (ANN). The model was developed on the grounds of examination results obtained for convection process applied for drying of 20mm-long willow chips with different diameters, carried out in a laboratory drier with forced air flow. The material was dried at the temperature of 40, 50, 60 and 70° C. Obtained examination results provided grounds to formulate, using the ANN, the model of changes in water content depending on six input variables: drying time, drying medium temperature, length and diameter of chips, and initial water content and weight of chips. The model with MLP architecture 6:6-15-14-1:1 was chosen from among all developed models because empirical verification proved that computed mean square error for that model was lowest.

**Key words:** neural model, water content, convection drying

**Adres do korespondencji:**

Bogusława Łapczyńska-Kordon; e-mail: kordon@ar.krakow.pl  
Katedra Inżynierii Mechanicznej i Agrofizyki  
Uniwersytet Rolniczy  
ul. Balicka 120  
30-149 Kraków