

Zdzisław Pakowski, Beata Krupińska, Robert Adamski  
Katedra Procesów Ciepłych i Dyfuzyjnych  
Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska  
Politechnika Łódzka

## UOGÓLNIENIE IZOTERM I IZOBAR SORPCJI DLA GATUNKÓW DREWNA STOSOWANYCH JAKO BIOPALIWO

### Streszczenie

W pracy zostały przedstawione równowagi sorpcyjne wybranych gatunków drewna, które są przydatne do projektowania procesu suszenia a także schematy aparatów do badania izobar i izoterm sorpcji. Zbadano próbki wierzy z gatunku *Salix viminalis* (2 i 3 letnie pędy), brzozy, sosny i dębu w temperaturach do 125°C i wyniki porównano z danymi literaturowymi dla różnych gatunków drewna. Głównym celem pracy była próba opisu własnych danych eksperymentalnych i danych literaturowych w szerokim zakresie temperatur i wilgotności za pomocą jednego uogólnionego równania. Dopasowano równanie pozwalające przewidywać równowagę sorpcyjną drewna w szerokim zakresie temperatur i wilgotności. Dopasowane równanie jest uniwersalne zarówno dla procesu suszenia parą przegrzaną jak i gorącym powietrzem. Znajomość tych równowag umożliwia wyznaczenie wilgotności krytycznej, charakteryzującej przejście z I do II okresu suszenia, i równowagowej wilgotnego materiału stwarzając jednocześnie możliwość prawidłowego zamodelowania procesu suszenia.

**Słowa kluczowe:** izobara drewna, izoterma drewna, suszenie biomasy

### Wstęp

Wykorzystanie biopaliw stałych daje możliwość wytwarzania taniej energii odnawialnej oraz zmniejszenia zanieczyszczeń w wyniku redukcji emisji gazów spalinyowych. Biomasa jest surowcem do produkcji biopaliw stałych, które mogą być wykorzystane do wytwarzania energii cieplnej i elektrycznej oraz jako biopaliwo transportowane. Aby biomasa spełniała oczekiwania jako paliwo odnawialne o wysokiej wartości kalorycznej musi być pozbawiona dużej ilości wilgoci przed spalaniem tzn. trzeba ją wysuszyć. Sposobów suszenia jest bardzo wiele, jednakże aby produkcja biopaliw stałych była opłacalna oraz aby biopaliwo spełniało wymagania, normy i oczekiwania klientów, trzeba wybrać optymalny sposób suszenia. W celu doboru odpowiedniego sposobu suszenia i wykonania projektu suszarki niezbędne jest poznanie stanu równowagi suszarniczej.

## Analiza literatury

Pierwsze prace dotyczące wyznaczenia równowagi suszarniczej biomasy drzewnej poddawanej suszeniu parą przegrzaną zostały wykonane przez Björka i Rasmusona [1995]. Wielkość aktywności równowagowej wody w zależności od wilgotności drewna przedstawiono na podstawie eksperymentów dla różnych gatunków drewna (świerk, osika) w stałych temperaturach 140°C i 160°C. Eksperymentalnie wyznaczone izotermy sorpcji porównano następnie z różnymi teoriami sorpcji (model Dent). W pracach Kollmanna [1961] i Hermanssona [1992] wyznaczono izobary sorpcji dla drewna, ale jedynie dla drzew z gatunku buk, świerk i eukaliptus. W pracy Glijera [1995] pokazano izotermy sorpcji ogólnie dla drewna i podobnie w pracy Giglera [2000] wyznaczono izotermy sorpcji dla wierzby energetycznej, ale tylko dla niskich temperatur 20°C – ich przydatność ograniczona jest jedynie do problemu magazynowania zrębków i nie można ich wykorzystać w procesie suszenia parą przegrzaną. W oparciu o wiedzę zawartą w literaturze nie jest więc możliwe określenie szybkości suszenia biomasy parą przegrzaną ze względu na brak danych dla szerokiego zakresu wilgotności i temperatur występujących podczas procesu. W tym celu w tej pracy zostały określone izobary sorpcji dla gatunków energetycznych takich jak wierzba *Salix viminalis* v. *Orm*. Wstępne pomiary wykazały, że aktywność wody nad próbkami drewna można opisać jedną powierzchnią w szerokim zakresie wilgotności i temperatur stosowanych zarówno w suszeniu powietrznym jak i suszeniu parą przegrzaną. Ostatecznym wynikiem tych pomiarów jest równanie tej powierzchni dla badanych rodzajów biomasy będące uogólnioną izotermą-izobarą sorpcji.

## Materiał i metoda badań

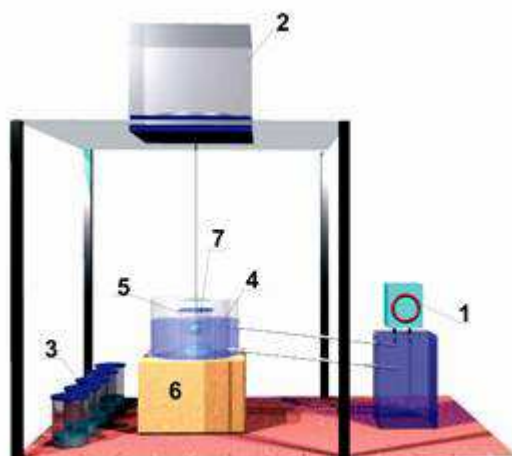
### Materiał

W celu wyznaczenia równowagi suszarniczej przeprowadzono pomiary izoterm i izobar sorpcji wierzby energetycznej *Salix viminalis* v. *Orm*.

Próbki pobrano z pędów wierzby pochodzących z plantacji energetycznej. Badania przeprowadzono dla pędów dwu i trzy-letnich o długości ok. 2 m i średnicy 30 mm (pędy 3-letnie) oraz 25 mm (pędy 2-letnie). Badania dotyczące izobary sorpcji wykonano pod ciśnieniem atmosferycznym dla pięciu temperatur 105°C, 110°C, 115°C, 120°C i 125°C. Do badań pobrano próbkę o masie ok. 7 g w postaci zrębków. Badania dotyczące izoterm sorpcji wykonano w temperaturach 20°C, 30°C i 40°C. Do badań pobrano próbkę o masie ok. 3 g w postaci zrębków, otrzymanych poprzez pocięcie pędów wierzby na cienkie kawałki o nieregularnym kształcie i wymiarach ok. 3 x 5 mm.

### Aparatura do wyznaczenia izoterm sorpcji

W celu wyznaczenia izoterm sorpcji zaprojektowano aparaturę (rys. 1) umożliwiającą pomiar zmiany masy próbek zawieszonych w pojemniku nad roztworem soli.



Rys. 1. Aparatura do wyznaczenia izoterm sorpcji i desorpcji: 1-termostat, 2-waga elektroniczna, 3-zestaw soli, 4-naczynia z wodą o stałej temp., 5-pojemnik z próbką, 6-podstawa, 7-próbka zawieszonej na cięgle  
Fig. 1. The set-up for isotherm sorption and desorption determination: 1-thermostat, 2-electronic balance, 3-set of salts, 4-thermostatic container, 5-container with sample, 6-base, 7-sample dish hanged on a thin wire

Aparatura składa się z termostatu-1, wagi elektronicznej-2, zestawu soli-3, naczynia z wodą o stałej temp.-4, pojemnika z próbką-5, podstawy-6, próbki zawieszonej na cięgle-7. Pomiar polega na umieszczeniu próbki w pojemniku nad nasyconym roztworem soli o znanej aktywności wody. Układ jest termostatowany. Ważenie następuje w niezmiennych warunkach, po ustaleniu się równowagi. Czas ustalenia się równowagi ok. 20 godzin.

### Aparatura do wyznaczenia izobar sorpcji

W celu wyznaczenia równowagi sorpcyjnej w parze przegrzanej zaprojektowano aparat wytwarzający parę przegrzaną pod ciśnieniem atmosferycznym i pozwalający na pomiar ubytku masy próbek zawieszonych w komorze suszarniczej (rys. 2). Aparatura składa się z kotła - 1, w którym zamocowane są grzałki podgrzewające wodę do temperatury wrzenia oraz szkło wodowskazowe. W celu przegrzania

powstałej pary, nad kotłem znajduje się sekcja przegrzewająca - 3 zawierająca dodatkową grzałkę.



Rys. 2. Aparatura do wyznaczenia izobar sorpcji i desorpcji: 1-kocioł, 2-sekcja dodatkowa, 3-przegrzewacz, 4-warstwa uspokajająca, 5-czujnik temperatury, 6-szalka, 7-waga elektroniczna

Fig. 2. The set-up for isobar sorption and desorption determination: 1-boiler, 2- additional section, 3-superheater, 4-calming section, 5- temperature sensor, 6-tray, 7-electronic balance

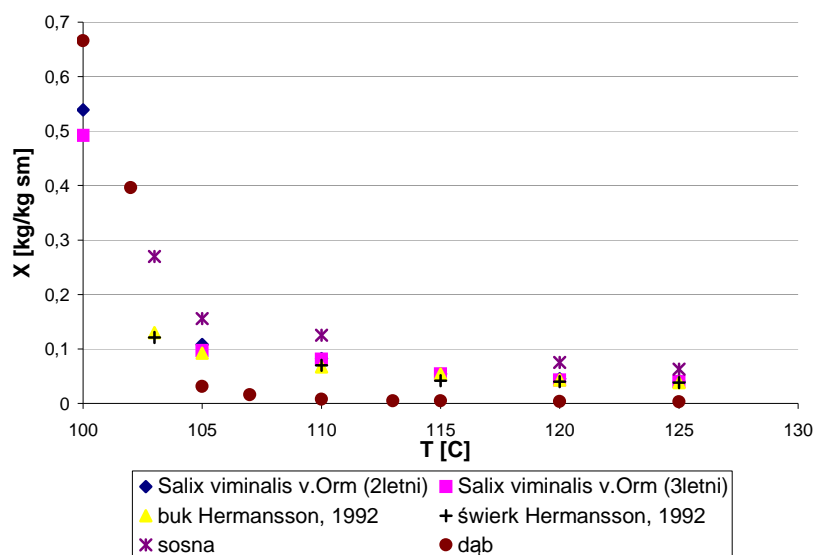
Płynąca ku górze z prędkością ok. 5 cm/s para przechodzi przez warstwę wypełnienia-4, której zadaniem jest uspokojenie i ujednoczenie przepływu. Nad sekcją uspokajającą znajduje się czujnik temperatury - 5, oraz połączona z wagą szalka - 6. Pomiar polega na umieszczeniu próbki biomasy na szalce. Próbkę umieszcza się w komorze po rozgrzaniu aparatu do najniższej ze stosowanych temperatur pary. Po ustaleniu się masy próbki skokowo zwiększa się temperaturę pary i odczytuje masę próbki do chwili ustalenia się nowej równowagi. W obu przypadkach masę próbki odczytywano z dokładnością  $\pm 0,001$  g.

## Analiza wyników

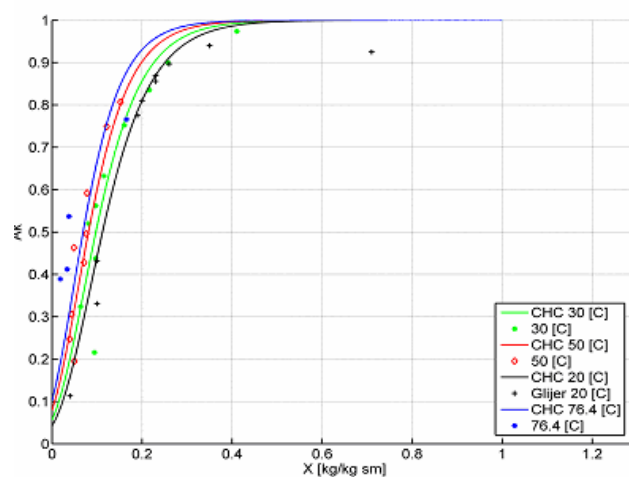
### Izobary i izotermy

Otrzymane wyniki zestawiono w postaci wykresów (rys. 3 i 4), na których otrzymane krzywe pozwalają wyznaczyć wilgotność równowagową materiału dla danej temperatury. Kształty izobar i izoterm sorpcji otrzymanych na podstawie przeprowadzonych badań nie odbiegają od kształtów izobar zamieszczonych w literaturze dla innych gatunków drewna. Właściwość ta skłoniła nas do podjęcia próby opisu

własnych wyników badań i danych literaturowych w szerokim zakresie temperatur (20-160°C) i wilgotności (0-0.5 kg/kg) za pomocą jednego równania (1 i 2).



Rys. 3. Izobary sorpcji dla różnych gatunków drewna (wyniki własne i literaturowe)  
 Fig. 3. Sorption isobars for different wood varieties (our own experimental data and literature data)



Rys. 4. Izotermy sorpcji wierzby Salix viminalis v. Orm, CHC- równanie Chena, Claytona  
 Fig. 4. Sorption isotherms of willow Salix viminalis v. Orm, CHC-Chen, Clayton equation

### Powierzchnie równowagowe

Otrzymane z przeprowadzonych doświadczeń oraz punkty doświadczalne znalezione w literaturze pozwalają na wyznaczenie jednego równania opisującego równowagę suszarniczą w zależności od dwóch zmiennych, jakimi są wilgotność i temperatura. Dopasowane równania Chena – Claytona (1) i Hendersona (2) – [Pakowski 2000] pozwalają opisać aktywność wody we wspomnianych wcześniej zakresach temperatur i wilgotności. Dopasowane równanie pozwala na przewidywanie równowagi sorpcyjnej zarówno w niskich temperaturach odpowiednich dla suszenia gorącym powietrzem jak i w wysokich temperaturach dla niskich i wysokich ciśnień w przypadku procesów prowadzonych z wykorzystaniem pary. Na płaszczyznach zaznaczono numerami punkty doświadczalne w celu ich identyfikacji (tabela 1).

Tabela 1. Numery punktów doświadczalnych umieszczonych na rysunkach 5 i 6  
Table 1. Numbers of data points presented in figures 5 and 6

Literatura	Gatunek drewna	Temp. [C]	Numer punktu
Björk, Rasmuson [1995]	Drewno (ogólnie)	100, 140, 160	1 - 61
Gigler et al. [2000]	Wierzba <i>Salix viminalis</i>	20	78 - 89
Badania własne	Wierzba <i>Salix viminalis</i> (2, 3-letni pęd)	100 - 125	62 - 77
	Sosna	100 - 125	90 - 97
	Dąb	100 - 125	98 - 104
	Brzoza	100 - 125	105 - 109
	Wierzba <i>Salix viminalis</i> (2-letni pęd)	30 50 76.4	110 - 119 114 - 129 130 - 133

Równanie Chena, Claytona [Pakowski 2000]:

$$a_w = \exp(a_1 \cdot T^{a_2} \cdot \exp(a_3 \cdot T^{a_4} \cdot X)) \quad (1)$$

współczynniki w równaniu Chena-Claytona:

$$a_1 = -6,6412 \quad a_2 = -0,2459 \quad a_3 = -7,9150 \quad a_4 = 0,1804$$

zakresy współczynników (95% ufności):

$$a_1 = -15,9940 \div 2,6614 \quad a_2 = -0,5439 \div 0,0521$$

$$a_3 = -14,599 \div -1,2306 \quad a_4 = -0,3643 \div 0,0034$$

współczynnik korelacji:  $R=0,9335$

Zmodyfikowane równanie Hendersona [Pakowski, 2000]:

$$a_w = 1 - \exp[a_1 \cdot (a_2 + T) \cdot X^{a_3}] \quad (2)$$

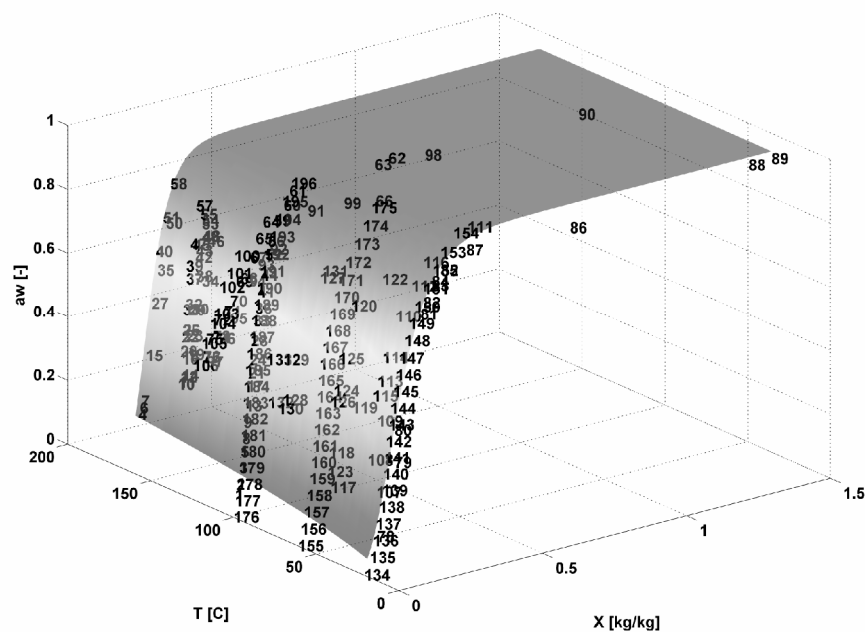
współczynniki w równaniu Hendersona:

$$a_1 = -0,016834 \quad a_2 = 213,19 \quad a_3 = 0,68475$$

zakresy współczynników (95% ufności):

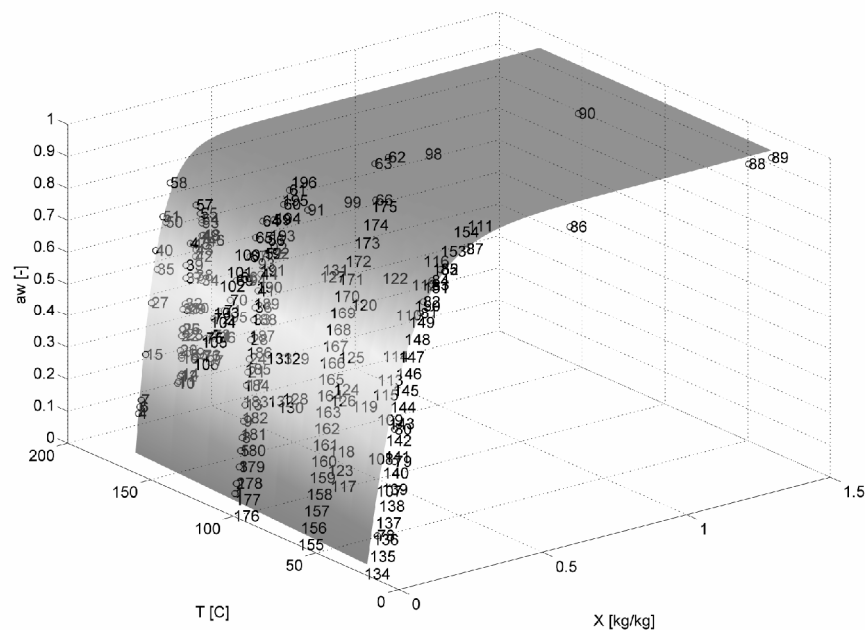
$$a_1 = -0,02922 \div -0,004448 \quad a_2 = 44,902 \div 381,49 \quad a_3 = 0,55875 \div 0,081075$$

współczynnik korelacji:  $R=0,9257$



Rys. 5. Powierzchnia opisująca aktywność wody w funkcji temperatury i wilgotności na podstawie równania Chena, Claytona

Fig. 5. Surface describing water activity as a function of temperature and moisture content on the basis of Chen, Clayton equation



Rys. 6. Powierzchnia opisująca aktywność wody w funkcji temperatury i wilgotności na podstawie równania Hendersona

Fig. 6. Surface describing water activity as a function of temperature and moisture content on the basis of Henderson equation

## Wnioski

1. W pracy wykazano, że możliwe jest opisanie powierzchni zależności równowagowej aktywności wody od wilgotności i temperatury jednym równaniem w zakresie parametrów występujących zarówno w suszeniu powietrzem jak i parą przegrzaną. Dopasowane równania mają charakter uniwersalny i w dalszej kolejności mogą być wykorzystane do procesu projektowania suszarek. Uzyskane równania pozwalają na przewidywanie równowagi sorpcyjnej zarówno w niskich temperaturach odpowiednich dla suszenia gorącym powietrzem jak i w wysokich temperaturach dla niskich i wysokich ciśnień w przypadku procesów prowadzonych z wykorzystaniem pary.



2. Przedstawiono schematy aparatów do wyznaczania izobar i izoterm sorpcji, które mają kluczowe znaczenie w poprawnym zaprojektowaniu technologii suszenia parą przegrzaną.
3. W związku z ciągle narastającym zainteresowaniem badaczy tematyką biomasy, jako odnawialnego źródła energii, istnieje nadzieja na szybkie uzupełnienie brakujących do projektowania własności fizykochemicznych biomasy.

### **Bibliografia**

Björk H., Rasmuson A. 1995. Moisture equilibrium of wood and bark chips in superheated steam, *Fuel*, 74, 12, 1887-1890.

Kollmann F.F.P. 1961. High temperature drying, *Forest Products Journal*, 508-515.

Hermansson M. 1992. Steam drying – an experimental and theoretical study, Licentiate dissertation, Lund Universitet.

Glijer L. 1995. Suszenie drewna w suszarkach, *Rozwój SGGW*, Warszawa.

Gigler J.K., van Loon W.K.P., Seres I., Meerdink G., Coumans W.J. 2000. Drying characteristics of willow chips and stems, *J. Agric. Engng Res.*, 77, 4, 391-400.

Pakowski Z. 2000. Program for psychrometric and drying computations, Omnikon Ltd.

*Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2005-2008 jako projekt badawczy nr 3 T09C 010 28*

## GENERALISATION OF SORPTION ISOTHERMS AND ISOBARS FOR THE TYPES OF WOOD USED AS BIOFUEL

### Summary

This paper presents sorption equilibrium for some wood varieties that is necessary for designing drying processes. In that article set-up for isotherm and isobar sorption determination are shown. Samples of willow *Salix viminalis* (2 and 3-year stems), birch, pine and oak were examined in temperature range up to 125°C. The results were compared with data available in literature for different wood species. The main aim of that paper was an attempt to describe our own experimental data and literature data in a wide range of temperatures and moisture contents by one, generalized equation. The generalized equation describing sorption equilibrium in a wide range of temperatures and moisture content was fitted. The fitted equation is universal and can be used for both air drying and superheated steam drying. The knowledge about sorption equilibrium enables to determine critical (characterizes the transition between I and II drying period) and equilibrium moisture content of wet material. It gives the possibility for proper designing of drying processes.

**Key words:** wood isobar, wood isotherm, biomass drying