

Joanna SKONECZNA-ŁUCZKÓW, Włodzimierz CIESIELCZYK, Anita KAMIŃSKA-PĘKALA

e-mail: skoneczna@chemia.pk.edu.pl

Katedra Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Wydział Inżynierii i Technologii Chemicznej, Politechnika Krakowska, Kraków

## Wpływ liczby fluidyzacji na egzergetyczną ocenę procesu suszenia biomasy

### Wstęp

Suszenie zaliczane jest do najbardziej energochłonnych operacji inżynierii procesowej prowadzonych na dużą skalę w przemyśle [Strumillo, 2006]. Ocenia się, że zużycie energii w procesie suszenia to ok. 10÷12% całkowitego zużycia energii w przemyśle. Znaczna energochłonność procesu suszenia spowodowana jest także niską sprawnością cieplną wielu suszarek przemysłowych, których przeciętne wartości oscylują wokół 40÷60% [Witrowa-Rajchert, 2012]. Usprawnienie urządzeń oraz zwiększenie efektywności procesów suszenia może okazać się kluczem do rozwiązania problemu pogodzenia zwiększającego się zapotrzebowania na energię z koniecznością zmniejszenia jej zużycia.

Celem współczesnej teorii i techniki suszenia jest zminimalizowanie zużycia energii przy usunięciu wilgoci do wartości oczekiwanej. Zadanie to wiąże się bezpośrednio z wytycznymi Unii Europejskiej zobowiązującej Polskę do zmniejszenia zużycia energii do roku 2020 o 20%.

Należy stosować takie metody suszenia, które zapewniają realizację procesu przy minimalizacji kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych. Suszenie w złożu fluidalnym jest metodą łatwą w realizacji cechującą się korzystnymi wskaźnikami techniczno-ekonomicznymi [Strumillo, 2006].

Narzędziem do poprawy wydajności procesu suszenia może być analiza egzergetyczna. Definicja egzergii łącząc bilans energii i entropii ukazuje straty egzergii spowodowane nieodwracalnością rzeczywistych procesów i pozwala wskazać te etapy gdzie energia jest degradowana podczas procesu [Szargut, Petela, 1965]. Informacje uzyskane na podstawie analizy egzergetycznej dają możliwość zwiększenia efektywności procesu, a w związku z tym zmniejszenia kosztów eksploatacyjnych. Biorąc pod uwagę ceny paliw, ich dostępność oraz wpływ na środowisko, analiza egzergetyczna stosowana w procesie suszenia staje się interesującym sposobem kontroli przebiegu procesu. Zastosowanie tej metody pozwala na stosunkowo dokładne określenie tych węzłów instalacji suszarniczej, w których istnieje możliwość poprawy wskaźników techniczno-ekonomicznych.

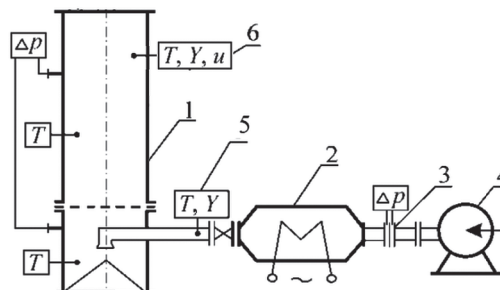
Ostatnio coraz więcej uwagi poświęca się tematyce zastosowania analizy egzergetycznej w procesie suszenia [Syahrul *in. in.*, 2002; 2003; Kavak *in. in.*, 2005]. Analiza egzergetyczna prowadzi do lepszego zrozumienia wpływu zjawisk termodynamicznych na sprawność procesu, porównania znaczenia różnych parametrów termodynamicznych, procesowych i hydrodynamicznych oraz określenia efektywnego sposobu usprawnienia analizowanego procesu.

Celem pracy jest ocena egzergetyczna suszenia fluidalnego wybranego biomateriału (ziarna maku) pod kątem minimalizacji nakładów energetycznych. Analizie poddano wpływ zmian wartości liczby fluidyzacji na sprawność egzergetyczną i jednostkowe zużycie egzergii.

### Badania testowe

#### Stanowisko badawcze i charakterystyka produktu

Badania zostały przeprowadzone w Katedrze Inżynierii Chemicznej i Procesowej Politechniki Krakowskiej, z wykorzystaniem stanowiska badawczego, którego schemat przedstawiono na rys. 1. Powietrze tłoczony jest wentylatorem – 4 poprzez przepływomierz – 3 do nagrzewnicy elektrycznej – 2, a następnie do kolumny fluidyzacyjnej – 1. Średnica wewnętrzna kolumny wynosi  $D = 74$  mm. Wyposażenie stanowiska w odpowiednią aparaturę kontrolno-pomiarową umożliwia uzyskanie danych do sporządzenia charakterystyk procesowych i wykonania bilansu egzergetycznego.



Rys. 1. Schemat stanowiska: 1 – suszarka fluidyzacyjna, 2 – nagrzewnica, 3 – przepływomierz (przyrząd TESTO 452 z odpowiednią przystawką), 4 – wentylator, 5, 6 – przyrządy: TESTO 452 i TESTO 112 (firmy Testoterm GmbH & Co., Hamburg, Germany)

Do badań testowych użyto maku – materiału ziarnistego, pochodzenia naturalnego zaliczanego do grupy B klasyfikacji Geldarta [1973]. Materiał badawczy charakteryzował się następującymi parametrami:

- Średnia średnica ziaren  $d_m = 0,7 \cdot 10^{-3}$  m;
- Gęstość materiału  $\rho_m = 1060$  kg/m<sup>3</sup>;
- Porowatość złoża  $\epsilon_0 = 0,43$ ;
- Krytyczna zawartość wilgoci  $X_{kr} = 0,15$  kg/kg;
- Równowagowa zawartość wilgoci  $X_r = 0,04$  kg/kg.

Przed przystąpieniem do badań przygotowano materiał badawczy o początkowej zawartości wilgotności ok. 40%. Do określenia stopnia nawilżenia oraz oznaczenia zawartości wilgoci w próbkach pobieranych dla określenia krzywej suszenia stosowano termowagę (RADWAG WPS 303, Polska). Wyniki sprawdzano w klasycznej suszarce komorowej susząc pobrane próbki do stałej masy. Prędkość minimum fluidyzacji (krytyczną) wyznaczono sporządzając krzywą fluidyzacji [Ciesielczyk, 2009].

#### Zakres zmienności parametrów

Badania prowadzono przy stałej temperaturze powietrza wlotowego wynoszącej 328 K. Zastosowano wysokość statyczną złoża równą średnicy kolumny fluidyzacyjnej ( $H_{st} = D$ ). Wartość ta została ustalona w ramach badań wstępnych [Ciesielczyk, 2009; Kamińska-Pękala i Ciesielczyk, 2013].

Zakres zmian prędkości czynnika fluidyzacyjno-suszającego pozwolił na osiągnięcie wartości liczby fluidyzacji (stosunek prędkości nastawionej do prędkości krytycznej)  $N = 2,7$ . W trakcie realizacji badań temperatura otoczenia wynosiła 294 K, a wilgotność względna  $\phi = 0,35$ . Proces był prowadzony pod ciśnieniem atmosferycznym.

Dla porównania przeprowadzono także badania dla złoża stacjonarnej ( $N = 0,5$  oraz  $0,6$ ).

### Analiza egzergetyczna

#### Bilans egzergetyczny

Analizę egzergetyczną w prezentowanym opracowaniu ograniczono do objętości kontrolnej stanowiącej kolumnę suszarki fluidyzacyjnej. Ogólna postać równania bilansu egzergii (przy określonym czasie realizacji procesu) dla kolumny suszarniczej ma postać:

$$Ex_{p1} - Ex_{p2} = Ex_{m2} - Ex_{m1} + Ex_{par} + Ex_{str} + Ex_{deg} \quad (1)$$

gdzie:

$Ex_{p1}, Ex_{p2}$  – egzergia powietrza na wlocie, wylocie z kolumny suszarniczej, [kJ];

$Ex_{m1}, Ex_{m2}$  – egzergia materiału suszonego na początku, końcu procesu, [kJ];

$Ex_{par}$  – straty egzergii na parowanie wody z materiału, [kJ];  
 $Ex_{str}$  – straty egzergii do otoczenia, [kJ];  
 $Ex_{deg}$  – pozostałe straty egzergii powstałe z generacji entropii, [kJ].

**Wskaźniki oceny procesu suszenia**

Bazując na bilansie egzergetycznym można obliczyć sprawność rozpatrywanego procesu nazywaną sprawnością egzergetyczną [Bes, 1962]. Użytecznym efektem procesu suszenia jest egzergia odparowania, a nakładem egzergia powietrza suszącego wchodzącego do kolumny suszarniczej. Stąd wyrażenie ma postać [Dincer, Sahin, 2004; Cay i in., 2007]:

$$\eta_{ex} = \frac{Ex_{par}}{Ex_{p1}} \quad (2)$$

Egzergia powietrza jest iloczynem egzergii właściwej i masy przepływającego powietrza.

$$Ex_p = m_p ex_p \quad (3)$$

$$ex_p = ex_{th} + ex_{me} + ex_{ch} \quad (4)$$

Egzergia właściwa powietrza wilgotnego (4), jest sumą termicznej (5), mechanicznej (6) i chemicznej egzergii właściwej powietrza (7), które mogą być obliczone z zależności [Ren i in., 2011]:

$$ex_{th} = (c_p + Yc_v) \left( T - T_0 - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right) \quad (5)$$

$$ex_{me} = (1 + 1,6078Y) R_p T_0 \ln \frac{P}{P_0} \quad (6)$$

$$ex_{ch} = R_p T_0 \left[ (1 + 1,6078Y) \ln \frac{1 + 1,6078Y_0}{1 + 1,6078Y} + 1,6078Y \ln \frac{Y}{Y_0} \right] \quad (7)$$

gdzie:

- $m_p$  – masa przepływającego powietrza suchego, [kg];
- $c_{pv}$  – ciepło właściwe powietrza, pary wodnej, [kJ/kg K];
- $Y$  – wilgotność powietrza, [kg/kg];
- $R_p$  – indywidualna stała gazowa powietrza, [kJ/kg K];
- $T$  – temperatura powietrza, [K];
- $P$  – ciśnienie powietrza, [Pa];

Indeks 0 odnosi się do warunków powietrza w otoczeniu.

Stratę egzergii spowodowaną odparowaniem wody przedstawia wyrażenie:

$$Ex_{par} = T_0 \left( \frac{1}{T_m} - \frac{1}{T} \right) m_w r \quad (8)$$

gdzie:

- $T_m$  – temperatura suszonego materiału, [K];
- $m_w$  – masa odparowanej wody, [kg];
- $r$  – ciepło parowania wody w średniej temperaturze materiału wilgotnego i pod ciśnieniem atmosferycznym, [kJ/kg].

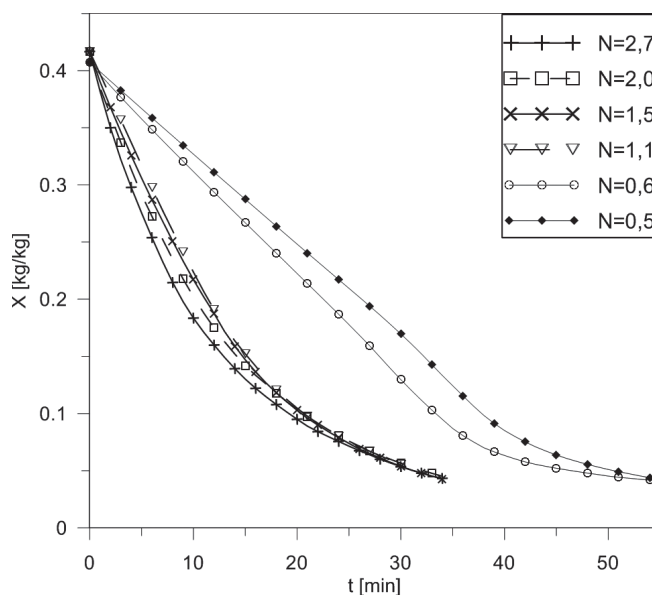
Z analizy wyrażenia (2) wynika, że z każdego materiału można usunąć wilgoć w wystarczającym stopniu pozostawiając go przez odpowiednio długi czas w otoczeniu. Stąd zgodnie z propozycją Szarguta i Peteli [1965], można posłużyć się współczynnikiem jednostkowego zużycia egzergii, który definiuje się jako ilość egzergii potrzebnej do usunięcia 1 kg wody:

$$\mu = \frac{Ex_{p1}}{m_w} \quad (9)$$

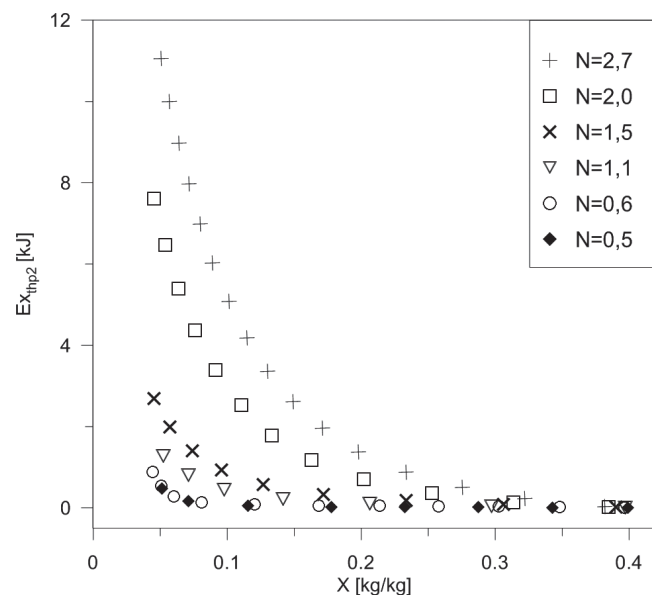
**Wyniki i dyskusja**

W oparciu o wyniki zebrane w trakcie eksperymentu, przeprowadzono ocenę egzergetyczną procesu suszenia ziaren maku dla różnych liczb fluidyzacji: dla złoża fluidalnego 1,1÷2,7 i dla złoża stacjonarnego 0,5÷0,6. Na rys. 2 zaprezentowano krzywe suszenia maku dla badanych liczb fluidyzacji.

W procesie suszenia straty egzergii (w analizowanej objętości kontrolnej) wynikają głównie z nieodwracalnego przepływu ciepła w komorze suszenia oraz z dodatniej wartości egzergii czynnika odpływającego z komory suszenia do otoczenia. W związku z tym, ważne jest maksymalne wykorzystanie egzergii termicznej powietrza przepływającego przez kolumnę suszarniczą. Na rys. 3 przedstawiono ilość całkowitej egzergii termicznej traconej z powietrzem opuszczającym kolumnę przy



Rys. 2. Krzywa suszenia maku przy różnych wartościach liczby fluidyzacji

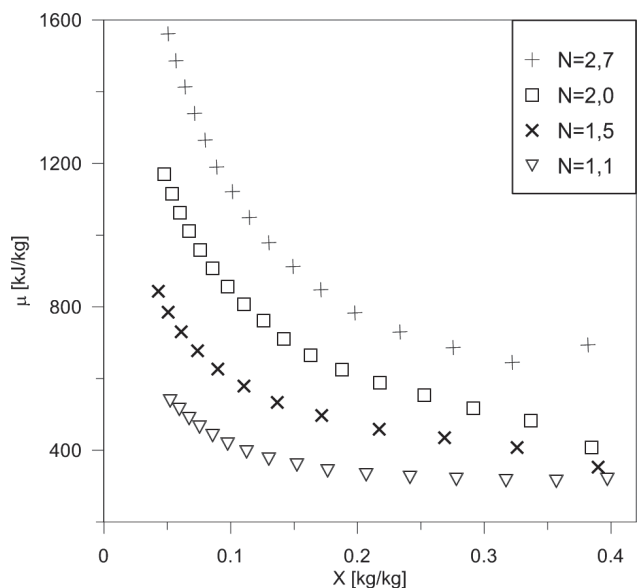


Rys. 3. Zależność całkowitej egzergii termicznej powietrza opuszczającego kolumnę  $Ex_{thp2}$  od zawartości wilgoci materiału

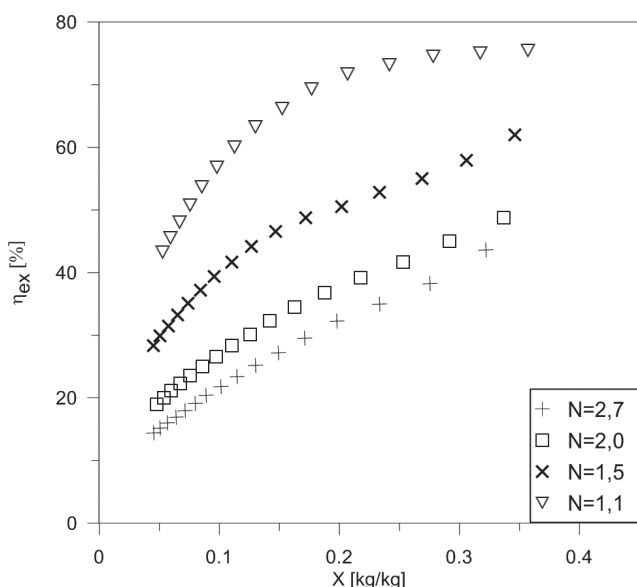
wysuszeniu materiału od wilgotności początkowej do danej wilgotności. Jak można było przewidzieć wartość egzergii rośnie ze wzrostem liczby fluidyzacji  $N$ . Należy jednak podkreślić, że najlepsza efektywność realizacji procesu suszenia w układach fluidalnych zachodzi przy wartości  $N$  równej ok. 2 [Strumillo, 1983; Ciesielczyk, 2009].

Wskaźnikiem służącym do oceny egzergetycznej może być współczynnik jednostkowego zużycia egzergii (9). Zależność tego współczynnika od zawartości wilgoci suszonego materiału przedstawiono na rys. 4. Najmniejsze zużycie egzergii na odparowany 1 kg wody osiągnięto dla liczby fluidyzacji 1,1. Wraz ze wzrostem wartości  $N$  zaobserwować można wzrost wartości tego wskaźnika, czyli zwiększanie liczby fluidyzacji wpływa niekorzystnie na minimalizację zużycia egzergii. Najważniejszym problemem jest jednak zapewnienie odpowiedniej jakości realizacji analizowanego procesu.

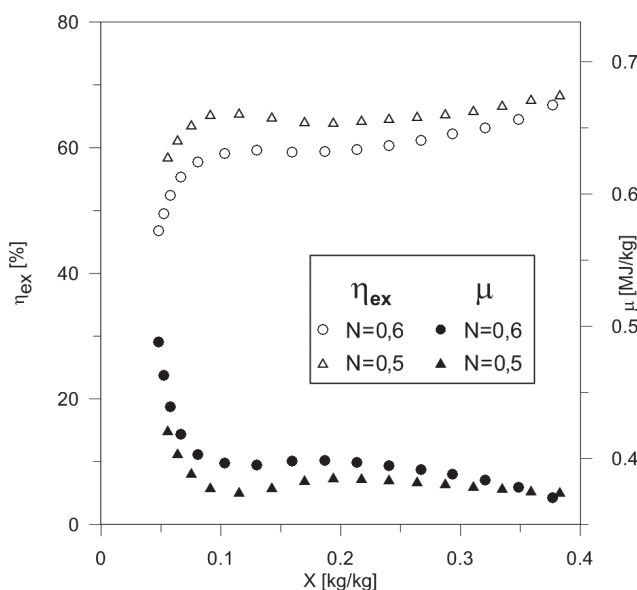
Istotnym wskaźnikiem do oceny egzergetycznej procesu suszenia jest sprawność egzergetyczna (2) (Rys. 5). Sprawność egzergetyczna określa stopień oddalenia procesu rzeczywistego od procesu idealnego przebiegającego odwracalnie. Wzrost liczby fluidyzacji powoduje spadek sprawności procesu. Analiza wyników świadczy o poprawności zastosowanych zależności współczynnika jednostkowego zużycia egzergii i sprawności egzergetycznej oraz o wymienności stosowania tych wskaźników do oceny egzergetycznej procesu suszenia.



Rys. 4. Jednostkowe zużycie egzergii suszenia maku w funkcji zawartości wilgoci materiału



Rys. 5. Zależność sprawności egzergicznej od zawartości wilgoci materiału



Rys. 6. Sprawność egzergiczna i współczynnik jednostkowego zużycia egzergii dla złoża stacjonarnego

Dla porównania na rys. 6 przedstawiono, także wyniki oceny egzergicznej procesu dla złoża stacjonarnego.

Podobnie jak dla fluidyzacji zaobserwować można, że wraz ze spadkiem prędkości rośnie sprawność suszenia oraz maleje zużycie egzergii. Wyniki uzyskane dla złoża stacjonarnego świadczą również o poprawności stosowanych do oceny wskaźników.

Należy podkreślić, że analizę ograniczono do kolumny suszarniczej. Analiza całego węzła suszenia pozwala na uwzględnienie wpływu strat związanych z transportem powietrza i przepływem ciepła w wymienniku [Ciesielczyk i in., 2013].

### Wnioski

Głównym zadaniem współczesnego suszarnictwa jest zminimalizowanie zużycia energii przy usunięciu wilgoci do oczekiwanej wartości. Ocena procesu suszenia oparta na pojęciu egzergii może być skutecznym narzędziem obrazującym zużycie energii podczas praktycznej realizacji procesu fluidalnego suszenia. Egzergia będąca miarą użyteczności energii w sposób efektywny pozwala określić źródła strat energii i po ich eliminacji zredukować cenę wyrobu.

- Do oceny egzergicznej wykorzystano dwa komplementarne wskaźniki: sprawność egzergiczną i współczynnik jednostkowego zużycia egzergii.
- Stosując egzergię termiczną powietrza wylotowego określono straty związane z niewykorzystaniem egzergii powietrza dostarczonego do procesu.
- Otrzymane wyniki są zgodne z oczekiwaniami i poglądami dotyczącymi aktualnych osiągnięć teorii i techniki suszenia fluidalnego.
- Wyniki upoważniają do stwierdzenia, że dla lepszej oceny procesu suszenia należy przeprowadzić badania dla całego węzła suszenia uwzględniając wentylator i wymiennik ciepła. Badania takie są kontynuowane.

### LITERATURA

Bes T., 1962. Egzergia w procesach ogrzewania, klimatyzacji i suszenia. *Energetyka Przem.*, **10**, nr 10, 388-392

Cay A., Tarakçıoğlu I., Hepbaslı A., 2007. Exergetic performance assessment of a stenter system in a textile finishing mill. *Int. J. Energy Res.*, **31**, 1251-1265. DOI: 10.1002/er.1295

Ciesielczyk W., 2009. Novel gas distributor for fluidized bed drying of biomass. *Drying Tech.*, **27** nr 12, 1309-1315. DOI: 10.1080/073739309033833612

Ciesielczyk W., Skoneczna-Luczaków J., Kurtyka J., 2013. Porównanie wyników bilansów energetycznego i egzergicznego wybranego ciągu technologicznego. *Inż. Ap. Chem.*, **52**, nr 6, 525-526

Dincer I., Sahin A. Z., 2004. A new model for thermodynamic analysis of a drying process. *Int. J. Heat Mass Trans.*, **47**, 645-652. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2003.08.013

Geldart D., 1973. Types of gas fluidization. *Powder Tech.*, **7**, 285-292. DOI: 10.1016/0032-5910(73)80037-3

Kamińska-Pękala A., Ciesielczyk W., 2013. Efektywna fluidyzacja materiałów z grupy D klasyfikacji Geldarta. *Inż. Ap. Chem.*, **52**, nr 6, 537-538

Kavak Akpınar E., Midilli A., Bicer Y., 2005. Energy and exergy of potato drying process via cyclone type dryer. *Energy Conv. Manag.*, **46**, 2530-2552. DOI: 10.1016/j.enconman.2004.12.008

Ren C.Q., Tang G.F., Li N.P., Zhang G.F., Yang J., 2001. Analysis of exergy of moist air and energy saving potential in HVAC by evaporative cooling energy recovery. *Int. J. Arch. Sci.*, **2**, nr 4, 113-117

Strumiłło C., 1983. *Podstawy teorii i techniki suszenia*. WNT, Warszawa.

Strumiłło C., 2006. Perspectives on developments in drying. *Drying Technology*, **24** (9), 1059-1068. DOI: 10.1080/07373930600778056

Syahrl S., Dincer I., Hamdullahpur F., 2003. Thermodynamic modeling of fluidized bed drying of moist particles. *Int. J. Therm. Sci.*, **42**, 691-701. DOI: 10.1016/S1290-0729(03)00035-8

Syahrl S., Hamdullahpur F., Dincer I., 2002. Energy analysis in fluidized bed drying of moist particles. *Exergy Int. J.*, **2**, 87-98. DOI: 10.1002/er.799

Szargut J., Petela R., 1965. *Egzergia*. WNT, Warszawa

Witrowa-Rajchert D., 2009. *Nowe perspektywy w suszeniu żywności. Ekspertyza*. (07.2012): <http://www.agengpol.pl/LinkClick.aspx?fileticket=wq81Lx050Uc%3D&tabid=144>