

Dariusz DZIKI¹⁾, Renata POLAK¹⁾, Jerzy WÓJCİK¹⁾, Paweł KOZAK¹⁾, Sławomir GAWŁOWSKI²⁾, Zbigniew KRZYŚIAK³⁾

¹⁾Katedra Techniki Ciepłej

²⁾Katedra Eksploatacji Maszyn Przemysłu Spożywczego

³⁾Katedra Inżynierii Mechanicznej i Automatyki

Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

Analiza procesów suszenia i rozdrabniania pieczywa wycofanego z obrotu w aspekcie możliwości wykorzystania do celów energetycznych i przemysłowych

Streszczenie

Omówiono możliwości wykorzystania pieczywa wycofanego z obrotu na cele energetyczne oraz zastosowanie tego rodzaju odpadu, jako surowca w przemyśle chemicznym. Przedstawiono wstępne wyniki badań dotyczące kinetyki suszenia pieczywa oraz analizy procesu jego rozdrabniania. Do opisu przebiegu tego procesu zaproponowano model Wanga i Singha. Wykazano ponadto, że wysuszone pieczywo wymaga niewielkich nakładów energii na rozdrabnianie (od 2 do 3 razy niższych niż w przypadku ziarna zbóż).

Słowa kluczowe: *pieczywo odpadowe, suszenie, rozdrabnianie*

The analysis of drying and grinding processes of bread withdrawn from the market in terms of possible of use the energy to the industrial purposes

Summary

The paper presents the possibility of using waste bread withdrawn for the energy purposes and the use of this type of waste as a raw material in chemical industry. The preliminary results of a drying kinetics of bread and the analysis of waste bread grinding was performed. The Wang and Sing model was proposed to describe the drying kinetics of bread. It was also shown that the dried bread requires low energy for grinding (from 2 to 3 times less than cereal grain).

Key words: *waste bread, drying, grinding*

Wprowadzenie

Produkcja oraz marnowanie żywności generuje szereg odpadów, które mogą być wykorzystane do celów energetycznych i przemysłowych (Bernstad Saraiva Schott i Andersson, 2015; Digman i Kim, 2008). Szczególnie interesującym surowcem w tym kontekście jest pieczywo. Poziom produkcji krajowego pieczywa jest stabilny i wynosi ok. 1,6 mln ton rocznie. Przyjmuje się, że corocznie w Polsce powstaje ok. 170 tys. ton wyrobów piekarskich klasyfikowanych, jako odpad (Kawa-Rygielska i Pietrzak, 2011). Dzieje się tak głównie, ponieważ zgodnie z obowiązującym prawem ze względów sanitarno-epidemiologicznych należy wykluczyć z wtórnego przerobu pieczywo pochodzące ze zwrotów, a więc takie, które opuściło teren piekarni. Jednak zamiast pieczywo poddawać utylizacji, można z powodzeniem je wykorzystać na przykład do celów energetycznych. Jednym z kierunków wykorzystania tego rodzaju odpadu jest produkcja bioetanolu. Kierunek ten wydaje się być perspektywiczny ze względu na rosnące wymagania prawne dotyczące udziału etanolu w paliwie transportowym (Klepacka i in., 2013). Związane jest to jednak z koniecznością inwestycji potrzebnych do wyposażenia gorzelni w dodatkowe urządzenia, takie, jak: rozdrabniacze, wymienniki ciepła, pompy do tłoczenia wywaru, taśmociągi, itp. Produktem ubocznym przetwarzania etanolu jest wywar gorzelniczny. Skład chemiczny wywaru piekarniczego jest zbliżony do wywaru zbożowego. Wywar może być wykorzystany jako surowiec do produkcji biogazu, czy też jako nawóz rolniczy (Manteuffel-Szoega i Wiśniewski,

2013). Badania możliwość wykorzystania odpadowego pieczywa pszenno-żytniego, jako surowca do produkcji bioetanolu wykazały, że proces fermentacji zacierów trwał 68 h niezależnie od udziału pieczywa w zacierze, a optymalna zawartość chleba pszenno-żytniego w zacierze to 32% (Kawa-Rygielska i Pietrzak, 2011). Wykazano, że ogólna wydajność bioetanolu wynosi 350 g na kg suchego pieczywa (Ebrahimi i in., 2008). Ze względu na fakt, że odpady piekarnicze w zależności od ich rodzaju mogą charakteryzować się innymi właściwościami, należy każdorazowo modyfikować warunki fermentacji, żeby osiągnąć maksymalną wydajność bioetanolu (Le Man i in., 2010; Kawa-Rygielska i in., 2012; Pietrzak i Kawa-Rygielska, 2014).

Inną możliwością zagospodarowania pieczywa wycofanego z obrotu jest produkcja biogazu. Ilość i jakość biogazu zależy w głównej mierze od rodzaju surowców wsadowych oraz warunków prowadzenia procesu. Pieczywo wycofane z obrotu jest jednym z wydajniejszych surowców do produkcji tego rodzaju paliwa o wydajności metanu rzędu 400-500 m³ z jednej tony suchej masy odpadu (Bień i Bień, 2010).

Kolejną możliwością wykorzystania odpadowego pieczywa do celów energetycznych, to produkcja biowodoru. Wodór magazynuje dużą ilość energii chemicznej bezpiecznej dla środowiska (w przeliczeniu na jednostkę masy 142 MJ·kg⁻¹), którą można uwolnić bez emisji ubocznych produktów spalania do atmosfery (Suchowska-Kisielewicz i Myszograj, 2011). Pozyskiwanie biowodoru na drodze biologicznej, w porównaniu z innymi metodami, jest najbardziej uzasad-

nione ekonomicznie. Stąd, wiele opracowań dotyczy pozyskiwania tego rodzaju biopaliwa z różnych surowców, w tym także z odpadowego pieczywa (Doi i in., 2009; Fountoulakis i Manios, 2009; Yasin i in., 2013).

Pieczywo wycofane z obrotu może być również cennym surowcem w wielu innych gałęziach przemysłu biochemicznego i chemicznego. Udowodniono, że przy wykorzystaniu odpowiednich mikroorganizmów oraz fermentacji w stałym złożu pieczywo odpadowe to dobry surowiec do produkcji glukoamylazy i proteaz (Melikoglu i in., 2013). Wykazano ponadto możliwość wykorzystania pieczywa wycofanego z obrotu, jako surowca do produkcji α -amylazy (Asghar i in., 2002). W innym opracowaniu stwierdzono możliwość zastosowania odpadów piekarniczych do produkcji kwasu bursztynowego (Leung i in., 2012). Zainteresowanie produkcją kwasu bursztynowego rośnie w ostatnich latach ze względu na możliwość jego wykorzystania do produkcji surfaktantów, detergentów, powłok elektrolitycznych, produktów spożywczych, farmaceutyków, antybiotyków, aminokwasów i witamin (Piotrowska i in., 2012). Pieczywo wycofane z obrotu może być również wykorzystywane do wytwarzania opakowań biodegradowalnych (González-Leyba i Sibila-Lores, 2012). Pozwala to w znacznym stopniu na ograniczenie stosowania do tego rodzaju produkcji surowców żywnościowych. Innym kierunkiem wykorzystania odpadowego pieczywa jest wykorzystanie go jako surowca do wywarzania substancji zapachowych (Daigle i in., 1999).

Podstawowym problemem przy zagospodarowaniu pieczywa odpadowego jest jego stosunkowo wysoka aktywność wody, powodująca w dość krótkim czasie niepożądane zmiany mikrobiologiczne. Ogranicza to potencjał wykorzystania tego surowca do wtórnego przerobu. Niekorzystnym zmianom mikrobiologicznym zapobiega szybkie obniżenie aktywności wody, co najczęściej uzyskuje się poprzez suszenie. Kolejna istotna sprawa decydująca o przebiegu i efektywności szeregu procesów podczas przetwarzania odpadowego pieczywa na różne cele, to wielkość cząstek (Melikoglu i in., 2013). W dotychczasowej literaturze brak jest opracowań odnośnie analizy procesu rozdrabniania pieczywa wycofanego z obrotu.

Cel badań

Celem niniejszej pracy było zbadanie kinetyki suszenia pieczywa wycofanego z obrotu oraz charakterystyka procesu jego rozdrabniania.

Materiał i metoda

Materiał badawczy stanowił chleb mieszany z przewagą mąki pszennej, wycofany z obrotu, pochodzący z piekarni z terenu województwa lubelskiego. Pieczywo nie wykazywało oznak zakażenia mikrobiologicznego. Oznaczono wilgotność chleba (metodą suszarkową w 105°C). Chleb do dalszych badań krojono na kromki o grubości ok. 1,0 cm, a następnie w paski o podobnej grubości, wykorzystując kralnicę do pieczywa Lozamet typ MKP-09.6. Pokrojone pieczywo podawano konwekcyjnemu suszeniu w pojedynczej warstwie, wykorzystując stanowisko laboratoryjne własnej konstrukcji (Krzykowski i in., 2011). Temperatura suszenia wy-

nosiła 60°C, a prędkość powietrza przez warstwę materiału 1,0 m·s⁻¹. Podczas pomiarów rejestrowano zmiany masy pieczywa w funkcji czasu suszenia. Badania prowadzono w trzech powtórzeniach do wilgotności chleba wynoszącej ok. 11%. Kinetykę odwadniania przedstawiono w funkcji czasu, jako spadek zredukowanej zawartości wody (MR):

$$MR = \frac{u_t - u_r}{u_0 - u_r} \quad (1)$$

gdzie:

u_t – zawartość wody w czasie t ;
 u_0 – początkowa zawartość wody;
 u_r – równowagowa zawartość wody.

Podczas wyznaczania wartości MR dokonano uproszczenia polegającego na pominięciu wartości u_r . Takie uproszczenie, powszechnie stosowane, nie ma dużego wpływu na wyniki badań dotyczące kinetyki suszenia (Figiel, 2013). Do opisu krzywych suszenia testowano 7 najczęściej stosowanych w literaturze modeli przedstawionych w tabeli 1.

Tabela 1. Modele wykorzystane do opisanie przebiegu kinetyki procesu suszenia pieczywa

Table 1. Models applied to describe the drying kinetics of waste bread

Nr No	Nazwa modelu Model name	Równanie Equation
1	Newtona (Demir, 2004)	$MR = \exp(-k \cdot \tau)$
2	Pagea (Sarimeseli, 2011)	$MR = \exp(-k \cdot \tau^n)$
3	Hendersona i Pabisa (1961)	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot \tau)$
4	Logarytmiczny (Sarimeseli, 2011)	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot \tau) + b$
5	Wanga i Singha (1978)	$MR = 1 + a \cdot \tau + b \cdot \tau^2$
6	Logistyczny (Soysal i in., 2006)	$MR = b / (1 + a \cdot \exp(k \cdot \tau))$
7	Dwuczynnikowy (Arslan i in., 2010)	$MR = a \cdot \exp(-k_1 \cdot \tau) + b \cdot \exp(-k_2 \cdot \tau)$

k, k_1, k_2 – współczynniki suszarnicze [min^{-1}]; drying coefficients [min^{-1}]

a, b – współczynniki równania; equation coefficients

n – wykładnik; exponent

τ – czas suszenia [min]; drying time [min].

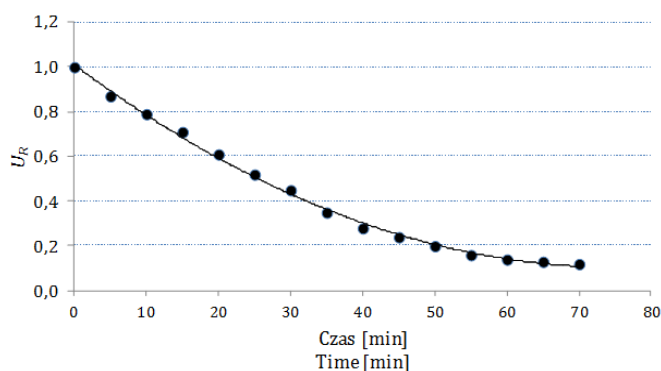
Próbki pieczywa rozdrabniano, wykorzystując rozdrabniacz bijakowy typu POLYMIX-Micro-Hammermill MFC. Urządzenie współpracowało z komputerowym układem rejestracji mocy prądu (Dziki, 2008). Rozdrabniacz wyposażono w wymienne sito. Zastosowano sita o wielkości oczek 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 i 3,0 mm. Skład granulometryczny rozdrobnionego pieczywa określono przy wykorzystaniu odsiewacza Thyr 2 z następującym zestawem sit: 1,6; 1,0; 0,8; 0,63; 0,4; 0,315 i 0,2 mm. Następnie obliczono średni wymiar cząstek. Wyznaczono również energochłonność jednostkową rozdrabniania (iloraz energii rozdrabniania do masy rozdrobnionego pieczywa) oraz wskaźnik rozdrabniania Sokołowskiego. Sposób wyznaczania powyższych parametrów przedstawiony został w opracowaniu przedstawionym przez Dzikiego (2011). Pomiary przeprowadzono w pięciu powtórzeniach.

Analiza statystyczna uzyskanych wyników badań objęła wyznaczenie wartości średnich i odchyłeń standardowych. Przeprowadzono również jednoczynnikową analizę wariancji, a istotność różnic między średnimi przeprowadzone testem Tukey'a. W celu wyboru modelu najlepiej opisującego uzyskane dane podczas suszenia wyznaczono średni

błąd kwadratowy RMSE oraz wartości zredukowanego testu χ^2 (Śledź i in., 2013). Uzyskane zależności opisano równaniami regresji. Wszystkie analizy statystyczne wykonano, przyjmując poziom istotności $\alpha = 0,05$. Do obliczeń wykorzystano program STATISTICA 6.0 firmy Stat Soft.

Wyniki i dyskusja

Wilgotność pieczywa przed suszeniem wynosiła 42,3%. Krzywą suszenia pieczywa przedstawiono na rysunku 1. Można zaobserwować, że pierwszy okres, odpowiadający stałej prędkości suszenia trwał ok. 35 min, a później zaobserwowano spowolnienie procesu. Generalnie czas suszenia pieczywa w przyjętych warunkach (temp. powietrza 60°C, prędkość przepływu 1 m·s⁻¹) od wilgotności 42,3% do 11,0% wynosił ok. 70 min. Jest to czas kilka razy krócej niż w przypadku suszenia innych surowców, jak owoce czy warzywa. Pieczywo, ze względu na porowatą strukturę miększu, ma dobre warunki do wymiany ciepła i masy. Stąd też kromki chleba szybko ulegają wysuszeniu i wówczas przechowywanie takiego surowca staje się znacznie bardziej bezpieczne.



Rys. 1. Krzywa suszenia pieczywa wycofanego z obrotu

Fig. 1. The drying curve of waste bread

Tabela. 2. Analiza statystyczna modeli opisujących kinetykę suszenia odpadowego pieczywa

Table 2. Statistical analysis of models describing kinetics of waste bread

Model	R ²	RMSE	χ^2
Newton	0,986	0,0342	0,00126
Page	0,996	0,0171	0,00034
Henderson and Pabis	0,989	0,0303	0,00106
Logarithmic	0,994	0,0226	0,00064
Wang and Singh	0,997	0,0152	0,00026
Logistyczny	0,913	0,0791	0,00565
Dwuczynnikowy	0,989	0,0303	0,00115

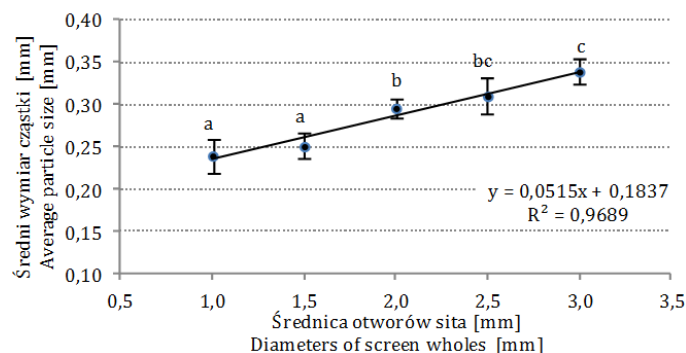
Wyniki analizy regresji dotyczące dopasowania danych eksperymentalnych do rozpatrywanych modeli przedstawiono w tabeli 2. Na podstawie analizy współczynników determinacji można stwierdzić, że większość z zastosowanych równań dobrze opisuje dane doświadczalne. Wartości współczynnika determinacji mieściły się w zakresie od 0,913 do 0,997, przy czym najmniejszą wartość zanotowano w przypadku modelu logistycznego, a najlepsze dopasowanie w odniesieniu do modelu Wang i Singha. Dla tego modelu uzyskano również najmniejszy średni błąd kwadratowy RMSE i najniższe wartości

zredukowanego testu χ^2 . Model ten w zależności od czasu suszenia (τ) przyjmuje postać:

$$U_r = 1 - 0,0235\tau + 0,000154\tau^2 \quad (2)$$

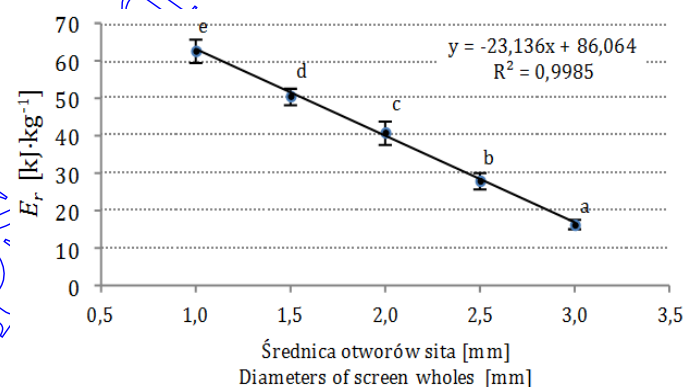
gdzie:

U_r – zredukowana zawartość wody.



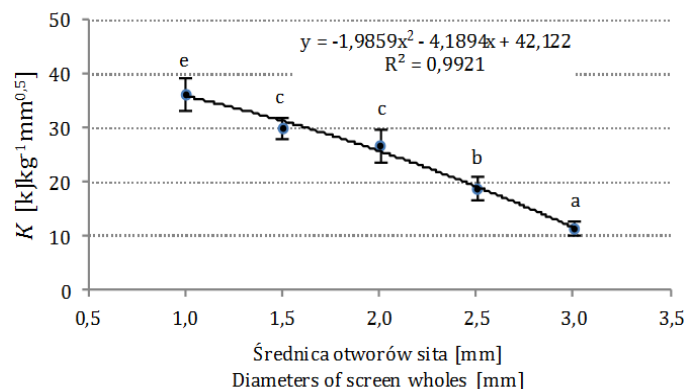
Rys. 2. Zależność między średnicą otworów sita w rozdrabniaczu a średnim wymiarem cząstek rozdrobnionego pieczywa; wartości oznaczone różnymi literami są statystycznie istotnie różne ($\alpha=0,05$)

Fig. 2. Relation between the screen holes diameter in the mill and the average particle size of ground bread; the values designated by the different letters are statistically significantly different ($\alpha=0.05$)



Rys. 3. Zależność między średnicą otworów sita w rozdrabniaczu a energochłonnością jednostkową rozdrabniania wysuszonego pieczywa; wartości oznaczone różnymi literami są statystycznie istotnie różne ($\alpha=0,05$)

Fig. 3. Relation between the screen holes diameter in the mill and the specific grinding energy of dried bread; the values designated by the different letters are statistically significantly different ($\alpha=0.05$)



Rys. 4. Zależność między średnicą otworów sita w rozdrabniaczu a wskaźnikiem rozdrabniania Sokołowskiego; wartości oznaczone różnymi literami są statystycznie istotnie różne ($\alpha=0,05$)

Fig. 4. Relation between the screen holes diameter in the mill and the Sokołowski's grinding index energy; the values designated by the different letters are statistically significantly different ($\alpha=0.05$)

Wskaźniki charakteryzujące proces rozdrabniania odpadowego pieczywa przedstawiono na rysunkach 2-4. Średni wymiar cząstki zawierał się przedziale od 0,239 mm do 0,338 mm i wzrastał liniowo ($r = 0,984$) wraz ze zwiększaniem średnicy otworów (rys. 2). Energochłonność jednostkowa rozdrabniania pieczywa (rys. 3) kształtowała się w zakresie od $16,3 \text{ kJkg}^{-1}$ (sito 3,0 mm) do $62,8 \text{ kJkg}^{-1}$ (sito 1,0 mm), przy czym zwiększenie średnicy otworów sita powodowało liniowy spadek tego parametru ($r = 0,999$). Porównując energochłonność proces rozdrabniania pieczywa odpadowego do rozdrabniania innych surowców, takich jak ziarno zbóż (Dziki, 2008), można stwierdzić, że przy tych samych warunkach prowadzenia procesu energochłonność jednostkowa rozdrabniania pieczywa jest około 2,5 niższa. Potwierdzają to również otrzymane wartości wskaźnika Sokołowskiego (rys. 4), który dodatkowo uwzględnia stopień rozdrobnienia materiału. Wskaźnik ten zawierał się w przedziale od $11,6 \text{ kJkg}^{-1}\text{mm}^{0,5}$ do $36,4 \text{ kJkg}^{-1}\text{mm}^{0,5}$ i zmniejszał się nieliniowo wraz ze wzrostem średnicy otworów sita w rozdrabniaczu. Uzyskane wyniki opisano równaniem regresji o postaci wielomianu drugiego stopnia (rys. 4). Około trzykrotnie niższe wartości tego wskaźnika otrzymano dla roślinnych surowców ziarnistych (Dziki i in., 2013).

Przedstawione wyniki są niewielkim wycinkiem naszych prac nad możliwością zagospodarowania surowców odpadowych z przemysłu spożywczego. Prace te mają na celu zmniejszenie ilości odpadów z tego sektora, głównie poprzez ich przetworzenie na surowce, które mogą być wykorzystane do celów energetycznych i przemysłowych. Działania te bardzo dobrze wpisują się w światowe trendy dotyczące tej problematyki, w których szczegółowo analizowany jest całkowity cykl życia produktów, w celu obniżenia energochłonności produkcji, a tym samym zmniejszenia śladu węglowego (Jensen i Arlbjörn, 2014; Kulak i in., 2015).

Podsumowanie

Suszenie i rozdrabnianie to dwa podstawowe procesy, które znajdują zastosowanie w zagospodarowaniu i przetwarzaniu szeregu surowców odpadowych. Przeprowadzone badania wykazały, że pieczywo wycofane z obrotu jest materiałem, który podczas konwekcyjnego suszenia stosunkowo łatwo ulega odwodnieniu. Spośród testowanych modeli przebieg krzywych suszenia pieczywa najlepiej opisywało równanie Wanga i Singha. Wykazano ponadto, że wysuszone pieczywo wymaga niewielkich nakładów energii na rozdrabnianie (od 2 do 3 razy niższych niż w przypadku ziarna zbóż).

Podsumowując należy stwierdzić, że utylizacja niesprzedanego pieczywa ma swoje negatywne konsekwencje ekonomiczne, ekologiczne i społeczne. Zamiast utylizować pieczywo wycofane z obrotu poprzez spalanie, czy też poddawać go bezużytecznej fermentacji metanowej i denitryfikacji na wysypisku, należy stosować metody pozwalające na przetworzenie go na cele energetyczne bądź wykorzystanie, jako surowca w przemyśle chemicznym czy paszowym.

Bibliografia

- Arslan, D., Özcan, M.M., Okyay Menges, H. (2010). Evaluation of drying methods with respect to drying parameters, somenutritional and colour characteristics of peppermint (*Mentha x piperita* L.). *Energy Conversion and Management*, 51, 2769–2775, DOI: [10.1016/j.enconman.2010.06.019](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.06.019).
- Asghar, M., Rafiq S., Azhar U., Asad, M.J. (2002). Production of α -amylase by *Arachnoidus* sp. using waste bread medium. *International Journal of Agriculture & Biology*, 4, 26–28.
- Bernstad Saraiva Schott A., Andersson, T. (2015). Food waste minimization from a life-cycle perspective. *Journal of Environmental Management*, 147, 219–226, DOI: [10.1016/j.jenvman.2014.07.049](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.07.049).
- Bień J.D., Bień B. (2010). Biogazownia rolnicza elementem programu gospodarki odpadami i wytwarzania zielonej energii w gminie, *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, 13(1), 17–27.
- Daigle, P., Gelinac, P., Leblanc, D., Morin, A. (1999). Production of aroma compounds by *Geotrichum candidum* on waste bread crumb. *Food Microbiology*, 16, 517–522, DOI: [10.1006/fmic.1999.0269](https://doi.org/10.1006/fmic.1999.0269).
- Demir, V., Gunhan, T., Yagcioglu, A.K., Degirmencioglu, A. (2004). Mathematical modeling and the determination of some quality parameters of air-dried bay leaves. *Biosystems Engineering*, 88, 325–335, DOI: [10.1016/j.biosystemseng.2004.04.005](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2004.04.005).
- Digman, B., Kim, D. S. (2008). Review: alternative energy from food processing wastes. *Environmental Progress*, 27(4), 524–537, DOI: [10.1002/ep.10312](https://doi.org/10.1002/ep.10312).
- DOI, T., Matsumoto, H., Abe, J., Morita, S. (2009). Feasibility study on the application of rhizosphere microflora of rice for the biohydrogen production from wasted bread. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34, 1735–1743.
- Dziki, D. (2011). Effect of preliminary grinding of the wheat grain on the pulverizing process. *Journal of Food Engineering*, 104, 585–591, DOI: [10.1016/j.jfoodeng.2008.12.060](https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.12.060).
- Dziki, D. (2008). The crushing of wheat kernels and its consequence on the grinding process. *Powder Technology*, 185, 181–186, DOI: [10.1016/j.powtec.2007.10.012](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2007.10.012).
- Dziki, D., Laskowski, J. (2010). Study to analyze the influence of sprouting of the wheat grain on the grinding process. *Journal of Food Engineering*, 96, 562–567, DOI: [10.1016/j.jfoodeng.2009.09.002](https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.09.002).
- Dziki, D., Miś, A., Gładyszewska, B., Laskowski, J., Kwiatkowski, S., Gawlik-Dziki, U. (2013). Physicochemical and grinding characteristics of dragonhead seeds. *International Agrophysics*, 27, 403–408, DOI: [10.2478/intag-2013-0010](https://doi.org/10.2478/intag-2013-0010).
- Ebrahimi F., Khanahmadi M., Roodpeyma S., Taherzadeh M.J., 2008. Ethanol production from bread residues. *Biomass Bioenerg.* 32, 333–337.
- Figiel, A. (2013). Kinetyka odwadniania osmotycznego plasterków dyni w zagęszczonym soku z owoców pigwowca. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 572, 13–21.
- Fountoulakis, M.S., Manios, T. (2009). Enhanced methane and hydrogen production from municipal solid waste and agro-industrial by-products co-digested with crude glycerol. *Bioresource Technology*, 100(12), 3043–3047, DOI: [10.1016/j.biortech.2009.01.016](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.01.016).

- González-Leyba, R., Sibila-Lores, M.A. (2012). Biodegradable food packaging from bakery industry waste. *Bioplastics Magazine*, 4, 18–19.
- Henderson, S.M., Pabis, S. (1961). Grain drying theory. II. Temperature effects on drying coefficients. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 6, 169–174.
- Jensen, J.K., Arlbjørn, J.S. (2014). Product carbon footprint of rye bread. *Journal of Cleaner Production*, 82, 45–57, DOI: [10.1016/j.jclepro.2014.06.061](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.061).
- Kawa-Rygielska, J., Pietrzak, W. (2011). Zagospodarowanie odpadowego pieczywa do produkcji bioetanolu. *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość*, 6(79), 105–118.
- Kawa-Rygielska, J., Pietrzak, W., Czubaszek, A. (2012). Characterization of fermentation of waste wheat-rye bread mashes with the addition of complex enzymatic preparations. *Biomass and Bioenergy*, 44, 17–22, DOI: [10.1016/j.biombioe.2012.04.016](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.04.016).
- Klepcka, A.M., Osiak, J., Powalka, M., Skudlarski, J. (2013). Krajowe wykorzystanie surowców rolnych do produkcji biopaliw transportowych. *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*, 15(1), 63–66.
- Krzykowski, A., Rudy, S., Kozak, P., Dziki, D., Serwatka, Z. (2011). Influence of blanching and convective drying conditions of parsley on process energy consumption. *Tetka Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture*, V(XIC), 142–148.
- Kulak, M., Nemecek, T., Frossard, E., Chable, V., Gaillard, G. (2015). Life cycle assessment of bread from several alternative food networks in Europe. *Journal of Cleaner Production*, 90, 104–113, DOI: [10.1016/j.jclepro.2014.10.060](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.060).
- Le Man, H., Behera, S.K., Park, H.S. (2010). Optimization of operational parameters for ethanol production from Korean food waste leachate. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 7(1), 157–164, DOI: [10.1007/BF03326127](https://doi.org/10.1007/BF03326127).
- Leung, C.C.J., Cheung, A.S.Y., Zhang, A.Y.Z., Lam, K.F., Lin, C.S.K. (2012). Utilisation of waste bread for fermentative succinic acid production. *Biochemical Engineering Journal*, 65, 10–15; DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.bej.2012.03.010>.
- Manteuffel-Szoega, H., Wiśniewski, M. (2013). Ekonomiczne i ekologiczne aspekty produkcji etanolu energetycznego w małych gorzelniach rolniczych. *Inżynieria Rolnicza*, 143, 215–224.
- Melikoglu, M., Lin, C.S.K., Webb, C. (2013). Stepwise optimisation of enzyme production in solid state fermentation of waste bread pieces. *Food and Bioprocess Processing*, 91, 638–646, DOI: [10.1016/j.fbp.2013.04.008](https://doi.org/10.1016/j.fbp.2013.04.008).
- Pietrzak, W., Kawa-Rygielska, J. (2014). Ethanol fermentation of waste bread using granular starch hydrolyzing enzyme: Effect of raw material pretreatment. *Fuel*, 134, 250–256, DOI: [10.1016/j.fuel.2014.05.081](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.05.081).
- Piotrowska, E., Szewczyk, K.W., Jaworska, M.M., Konieczna-Mordas, E. (2012). Biotechnologiczne wytwarzanie kwasu bursztynowego. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, 51, 171–173.
- Sarimeseli, A. (2011). Microwave drying characteristics of coriander (*Coriandrum sativum* L.) leaves. *Energy Conversion and Management*, 52, 1449–453; DOI: [10.1016/j.enconman.2010.10.007](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.10.007).
- Śledź, M., Nowacka, M., Wiktor, A., Witrowa-Rajchert, D. (2013). Selected chemical and physico-chemical properties of microwave-convective dried herbs. *Food and Bioprocess Processing* 9(1), 421–428, DOI: [10.1016/j.fbp.2013.02.010](https://doi.org/10.1016/j.fbp.2013.02.010).
- Soysal, Y., Öztekin, S., Eren, Ö. (2006). Microwave drying of parsley: modeling, kinetics, and energy aspects. *Biosystems Engineering*, 93, 403–413, DOI: [10.1016/j.biosystemseng.2006.01.017](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.01.017).
- Suchowska-Kisielewicz, M., Myszograj, S. (2011). Produkcja biowodoru w procesach biologicznych. *Inżynieria Środowiska*, 144(24), 18–25.
- Wang, C.Y., Singh, R.P. (1978). Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying. *Transactions of the ASAE*, 11, 668–672.
- Yasin, N.H.M., Mumtaz, T., Hassan, M.A. (2013). Food waste and food processing waste for biohydrogen production: a review. *Journal of Environmental Management*, 130, 375–385; DOI: [10.1016/j.jenvman.2013.09.009](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.09.009).

Dariusz Dziki

Katedra Techniki Ciepłej, Wydział Inżynierii Produkcji,
Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie,
ul. Doświadczalna 44, 20-280 Lublin,
tel. 81 4610061,
dariusz.dziki@up.lublin.pl