

## WPŁYW STOPNIA ROZDROBNIENIA ORAZ DODATKU INERTU NA KINETYKĘ SUSZENIA FONTANNOWO-MIKROFALOWEGO TRAWY CYTRYNOWEJ

Marta Paślawska<sup>✉</sup>, Klaudiusz Jałoszyński, Mariusz Surma,  
Bogdan Stępień

Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

**Streszczenie.** Celem przeprowadzonych badań była ocena wpływu stopnia rozdrobnienia trawy cytrynowej na kinetykę suszenia w złożu fontannowym z wykorzystaniem mikrofal. Suszenie prowadzono przy zastosowaniu prędkości powietrza suszącego  $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , temperatury  $50^\circ\text{C}$  oraz mocy mikrofal 250 W, wykorzystując łądygi pocięte na plastry o grubości 1 cm oraz cząstki uzyskane po podzieleniu plastrów o grubości 1 cm na cztery części. Dla poprawy hydrodynamiki złoża zastosowano również szklane kule o średnicy 3 mm. Kinetykę suszenia oznaczono na podstawie ubytku masy złoża, a następnie opisano odpowiednim modelem matematycznym. Stwierdzono, że podzielenie plastrów na drobniejsze cząstki spowodowało zwiększenie tempa odwadniania materiału i skrócenie czasu trwania procesu o 20%. Zarówno w przypadku plastrów, jak i cząstek obserwowano chwilowe zakłócenia fontannowania złoża, których przyczyną było zbijanie się sztywnych cząstek trawy cytrynowej w porowatą, nieruchomą warstwę, a zastosowanie kul inerty pozwoliło wyeliminować ten efekt.

**Słowa kluczowe:** trawa cytrynowa, suszenie fontannowo-mikrofalowe, kinetyka

### WSTĘP

Trawa cytrynowa *Cymbopogon citratus* – gatunek trawy z rodziny wielichowatych – jest rośliną przyprawową, której łądygi i liście mają czysty cytrynowy zapach, pochodzący głównie od cytralu, jednego z sześćdziesięciu składników olejku cytronelowego [Ajayi i in. 2016]. Trawa cytrynowa jest uprawiana na dużą skalę w krajach o klimacie tropikalnym i subtropikalnym [Akhila 2010] jako roślina kulinarna – do przyrządzania

---

<sup>✉</sup>marta.paslawska@upwr.edu.pl

napojów, zup i potraw warzywnych, mięsnych, a także rybnych. Jest charakterystyczna dla kuchni Indonezji, Malezji, Sri Lanki, Tajlandii oraz Indii, nadaje potrawom aromat cytrynowy z nutą imbiru, jednak bez kwaśnego posmaku. W postaci ekstraktu ma zastosowanie również w przemyśle perfumeryjnym, kosmetycznym oraz w medycynie. Ma udowodnione właściwości przeciwgorączkowe, moczopędne, tonizujące, pobudzające metabolizm, obniżające poziom cholesterolu, antyoksydacyjne, antibakteryjne, przeciwgrzybiczne oraz potencjalne właściwości przeciwnowotworowe [Oloyede 2009, Pereira i in. 2009, Santin i in. 2009, Costa i in. 2011, Matasyoh i in. 2011, Ekpenyong i in. 2015, Costa i in. 2016]. Dostępna jest w handlu detalicznym w postaci świeżej i wysuszonej (głównie metodą tradycyjną – na słońcu), jednak susz ma znacznie mniej intensywny aromat, a co się z tym wiąże ma mniejszą zawartość związków aromatycznych niż materiał świeży [Hanaa i in. 2012]. Zawartość związków aromatycznych w suszonych przyprawach zależy od temperatury suszenia oraz czasu trwania procesu [Shanjani i in. 2010], dlatego też zasadne wydaje się poszukiwanie metod suszenia zapewniających intensywne odwadnianie trawy cytrynowej w niskiej temperaturze.

Metodą suszenia umożliwiającą uzyskanie suszu w krótkim czasie przy łagodnych warunkach procesu jest suszenie fontannowo-mikrofalowe. Wysychanie następuje w złożu fontannującym pod wpływem przepływającego przez komorę suszarniczą powietrza, a zastosowanie dodatkowego nagrzewania złoża mikrofalami małej mocy umożliwia skrócenie czasu procesu. Pozytywne efekty stosowania tej techniki opisywane były w literaturze w przypadku suszenia jabłek [Paślawska i in. 2013], pszenicy [Jumah i Raghavan 2001] oraz krajanki ziemniaczanej [Yan i in. 2010]. Aby technika ta mogła stać się bardziej powszechna w suszarnictwie ziół i roślin przyprawowych, konieczne jest precyzyjne określenie wpływu wszystkich parametrów procesu na szybkość suszenia oraz jakość suszu.

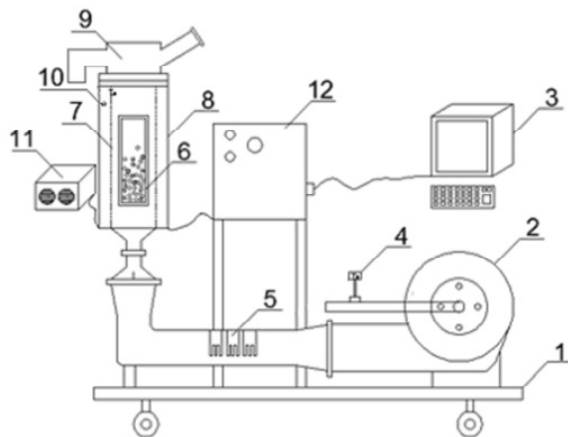
Celem przeprowadzonych badań była ocena efektów wstępnego rozdrabniania trawy cytrynowej oraz dodatku inerty na kinetykę suszenia w złożu fontannowym nagrzewanym mikrofalami.

## MATERIAŁ I METODY

Materiał do badań stanowiły świeże łądzy trawy cytrynowej zakupione w firmie „Swedeponic. Polskie świeże zioła” (zioła certyfikowane zgodnie z Globalg.GAP GGN: 40503734339194), a następnie pocięte na plastry o grubości 1 cm (rozdrobienie 1) oraz plastry o grubości 1 cm, które zostały podzielone na ćwiartki (rozdrobienie 2).

Suszenie prowadzono na stanowisku suszarniczym MP20 (rys. 1) przy zastosowaniu prędkości powietrza suszącego  $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , temperatury  $50^\circ\text{C}$  oraz mocy mikrofal 250 W. Wilgotność względna powietrza w pomieszczeniu wahała się w przedziale 55–60%. Dla poprawy hydrodynamiki złoża zastosowano opcjonalnie szklane kule o średnicy 3 mm.

Kinetykę suszenia analizowano na podstawie ubytku masy złoża (waga WLC 3/6/A2, dokładność pomiaru  $\pm 0,5 \text{ g}$ ), oznaczanego co 2 min przez pierwszych 10 min trwania procesu, następnie co 5 min do 100 min oraz co 10 min do zakończenia procesu, oraz zawartości wody w materiale na podstawie metody termogravimetrycznej (waga AS/160/C/2, dokładność pomiaru  $\pm 0,0001 \text{ g}$ ). Suszenie prowadzono do momentu, gdy trzy



Rys. 1. Stanowisko laboratoryjne do suszenia fontannowo-mikrofalowego (MP20): 1 – stelaż, 2 – wentylator, 3 – komputer, 4 – czujnik temperatury, 5 – grzałki elektryczne, 6 – fontannujące złożo, 7 – komora suszarnicza, 8 – zewnętrzna osłona zatrzymująca mikrofałe, 9 – pokrywa, 10 – czujnik temperatury oraz ciśnienia, 11 – magnetrony

Fig. 1. Laboratory stand for spouted bed-microwave drying (MP20): 1 – rack, 2 – fan, 3 – computer, 4 – temperature sensor, 5 – electric heaters, 6 – spouted bed, 7 – drying chamber, 8 – outside shield stopping microwaves, 9 – cover, 10 – temperature and pressure sensor, 11 – magnetrons

kolejne pomiary ubytku masy złoża wynosiły zero. Wszystkie doświadczenia powtarzano trzykrotnie, a do obliczeń brano średnią z powtórzeń.

Oznaczenie zawartości suchej substancji dla wszystkich doświadczeń przeprowadzono zgodnie z normą ASAE [1986]. W celu przedstawienia kinetyki procesu suszenia obliczono względną zawartość wody, korzystając ze wzoru:

$$MR = \frac{U_{\tau} - U_r}{U_0 - U_r}$$

gdzie:  $MR$  – względna zawartość wody [-],

$U_{\tau}$  – zawartość wody po czasie  $\tau$  [ $\text{kg H}_2\text{O} \cdot \text{kg}^{-1}$  s.s.],

$U_0$  – początkowa zawartość wody [ $\text{kg H}_2\text{O} \cdot \text{kg}^{-1}$  s.s.],

$U_r$  – równowagowa zawartość wody [ $\text{kg H}_2\text{O} \cdot \text{kg}^{-1}$  s.s.].

Równowagową zawartość wody w materiale ustalano po zakończeniu suszenia.

Do matematycznego opisu krzywych suszenia zastosowano modele przedstawione w tabeli 1. W celu wyboru modelu najlepiej opisującego uzyskane dane wyznaczono średni błąd kwadratowy (RMSE), błąd standardowy (SE) oraz współczynnik determinacji ( $R^2$ ). Analizę regresji krzywych suszenia przeprowadzono przy wykorzystaniu programu Table Curve 3D oraz arkusza Microsoft Excel 2007.

Tabela 1. Modele matematyczne wykorzystywane do opisu przebiegu suszenia

Table 1. The mathematical formulas used to evaluate the drying process

Nazwa modelu Name of model	Formuła matematyczna Mathematical formula	Literatura References
Lewisa–Newtona	$MR = \exp(-k \cdot \tau)$	Minn i in. 2007
Page'a	$MR = \exp(-k \cdot \tau^n)$	Ghazanfari i in. 2006
Hendersona–Pabisa	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot \tau)$	Minn i in. 2007
Zmodyfikowany Hendersona–Pabisa	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot \tau) + b \cdot \exp(-g \cdot \tau) + c \cdot \exp(-h \cdot \tau)$	Minn i in. 2007
Dwuczynnikowy	$MR = a \cdot \exp(-b \cdot \tau) + c \cdot \exp(-d \cdot \tau)$	Yaldı i Ertekin 2001
Logarytmiczny	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot \tau) + b$	Kiranoudis i in. 1997
Wanga–Singha	$MR = 1 + a \cdot \tau + b \cdot \tau^2$	Minn i in. 2007
Midilliego–Kucuka	$MR = a \cdot \exp(k \cdot \tau^n) + b \cdot \tau$	Midilli i in. 2007

$k$  – współczynnik suszarniczy [ $\text{min}^{-1}$ ];  $a, b, c, d, g, h, n$  – parametry modelu;  $\tau$  – czas [s].

$k$  – drying factor [ $\text{min}^{-1}$ ];  $a, b, c, d, g, h, n$  – model coefficients;  $\tau$  – time [s].

## WYNIKI I DISKUSJA

Czas suszenia trawy cytrynowej metodą fontannowo-mikrofalową zmieniał się w zależności od stopnia rozdrobnienia oraz dodatku inerty. Zawierał się w przedziale 120–150 min, przy czym najdłuższy czas procesu odnotowano przy zastosowaniu rozdrobnienia 1 bez dodatku kul szklanych (równowagowa wilgotność wynosiła 3,2%), a najkrótszy w próbach suszonych z dodatkiem inerty przy obu stopniach rozdrobnienia (uzyskano równowagową wilgotność na poziomie 2%). Podzielenie plastrów (rozdrobnienie 1) na ćwiartki (rozdrobnienie 2) było zabiegiem korzystnym ze względu na skrócenie czasu suszenia z 150 do 130 min, ale w obu wariantach doświadczenia obserwowano chwilowe zakłócenia fontannowania złoża, których przyczyną było zbijanie się sztywnych cząstek trawy cytrynowej w porowatą, nieruchomą warstwę. Wprowadzenie szklanych kul w funkcji inerty zapewniło równomierne rozproszenie złoża oraz spowodowało skrócenie czasu suszenia.

Na podstawie porównania wyliczonych współczynników statystycznych  $R^2$ , RMSE oraz SE (tab. 2) oceniono przydatność wybranych modeli matematycznych do opisu procesu odwadniania trawy cytrynowej (rozdrobnienie 1 lub 2), bez dodatku i z dodatkiem kul szklanych w funkcji inerty.

Stwierdzono, że w każdym z analizowanych wariantów doświadczenia kinetykę suszenia trawy cytrynowej w złożu fontannowym z nagrzewaniem mikrofalowym najlepiej opisywał model stworzony przez Midilliego i Kucuka. Po dobraniu współczynników  $a, b, k$  i  $n$  (tab. 3), kinetykę suszenia (rys. 2) można przedstawić jako zależność  $MR = f(\tau)$ . Model zaproponowany przez Midilliego i Kucuka został wykorzystany do opisu odwadniania trawy cytrynowej także przez Simha i innych [2016],

Tabela 2. Współczynniki dopasowania modeli do przebiegu procesu suszenia trawy cytrynowej  
 Table 2. The formula's matching coefficients to the description the lemongrass drying process

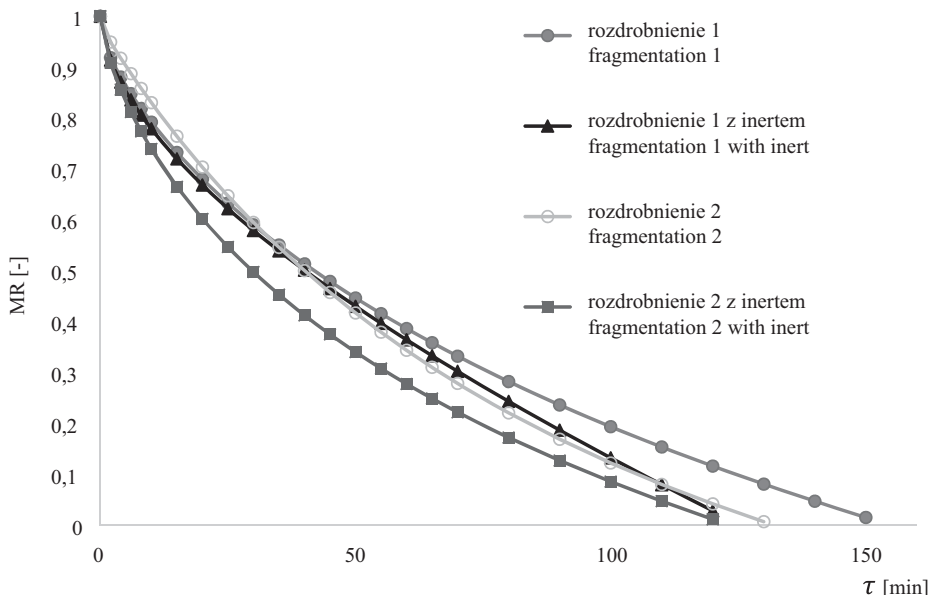
Nazwa modelu Name of model	Rozdrobnienie Fragmentation	Materiał Material			Materiał z inertem Material with inert		
		R <sup>2</sup>	RMSE	SE	R <sup>2</sup>	RMSE	SE
Lewisa–Newtona	1	0,988	0,036	0,032	0,989	0,037	0,032
	2	0,990	0,032	0,031	0,983	0,040	0,037
Page'a	1	0,987	0,034	0,034	0,989	0,031	0,032
	2	0,992	0,028	0,028	0,982	0,038	0,039
Hendersona–Pabisa	1	0,988	0,036	0,032	0,989	0,037	0,032
	2	0,990	0,032	0,031	0,983	0,040	0,037
Zmodyfikowany Hendersona–Pabisa	1	0,995	0,020	0,020	0,991	0,028	0,029
	2	0,998	0,013	0,013	0,988	0,031	0,032
Dwuczynnikowy	1	0,993	0,028	0,025	0,993	0,025	0,026
	2	0,995	0,014	0,022	0,988	0,031	0,032
Logarytmiczny	1	0,995	0,036	0,032	0,992	0,025	0,027
	2	0,998	0,023	0,014	0,993	0,024	0,025
Wanga–Singha	1	0,989	0,256	0,126	0,985	0,054	0,038
	2	0,997	0,032	0,017	0,986	0,048	0,034
Midilliego–Kucuka	1	0,997	0,016	0,016	0,997	0,017	0,018
	2	0,998	0,014	0,014	0,999	0,010	0,010

którzy analizowali mikrofalowe suszenie materiału rozdrobnionego na cienkie podłużne włókna, przy mocy mikrofal z zakresu 100–300 W. Model ten stosowano również do opisu mikrofalowo-konwekcyjnego suszenia innych roślin przyprawowych, takich jak oregano [Wiktor i in. 2013] i bazylia [Wiktor i in. 2012].

Tabela 3. Współczynniki funkcji w modelu Midilliego i Kucuka opisującym przebiegu procesu suszenia trawy cytrynowej

Table 3. The coefficients in Midilli–Kucuk model describing the lemongrass drying process

Materiał Material	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>k</i>	<i>n</i>
Rozdrobnienie 1 Fragmentation 1	0,9767	–0,0015	0,0347	0,7417
Rozdrobnienie 1 z inertem Fragmentation 1 with inert	0,9970	–0,0016	0,0545	0,7076
Rozdrobnienie 2 Fragmentation 2	0,9842	–0,0012	0,0173	0,9553
Rozdrobnienie 2 z inertem Fragmentation 2 with inert	1,0031	–0,0034	0,0058	0,5570



Rys. 2. Kinetyka suszenia trawy cytrynowej o różnym stopniu rozdrobnienia z dodatkiem lub bez dodatku inertu

Fig. 2. The drying rates of lemongrass about different fragmentation and dried with or without an inert

Na uwagę zasługuje fakt, że szybkość suszenia cząstek trawy cytrynowej o rozdrobnieniu 2 była w początkowych 40 min procesu mniejsza niż w przypadku trawy o rozdrobnieniu 1 (rys. 2), a dopiero od tego momentu zaobserwowano zgodne z przewidywaniami znaczące zwiększenie tempa oddawania wody z materiału o większym stopniu rozdrobnienia. Największą szybkością suszenia przez cały czas trwania procesu charakteryzowała się trawa cytrynowa o stopniu rozdrobnienia 2, suszona z dodatkiem szklanych kul. Dodatek inertnych kulek szklanych wpłynął pozytywnie na dynamikę procesu odwadniania oraz zapobiegał zbrylaniu się cząstek trawy cytrynowej wewnątrz komory suszarniczej zarówno przy rozdrobnieniu 1, jak i rozdrobnieniu 2.

## WNIOSKI

1. Zwiększenie stopnia rozdrobnienia trawy cytrynowej oraz wprowadzenie inertu poprawiło dynamikę suszenia fontannowo-mikrofalowego oraz skróciło czas trwania procesu.

2. Ze względu na dopasowanie współczynników równania kinetykę procesu suszenia mikrofalowo-fontannowego trawy cytrynowej najlepiej opisywał model matematyczny stworzony przez Midilliego i Kucuka.

## LITERATURA

- Ajayi E.O., Sadimenko A.P., Afolayan A.J., 2016. GC-MS evaluation of *Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf oil obtained using modified hydrodistillation and microwave extraction methods. *Food Chem.* 2009, 262–266.
- Akhila A., 2010. Essential oil-bearing grasses: the genus *Cymbopogon*. CRC Press, Taylor and Francis Group, Routledge.
- ASAE Standard, 1986. American Society of Agricultural Engineers, St. Josephs, MI.
- Costa C.A.R.A., Bidinotto L.T., Takahira R.K., Salvadori D.M.F., Barbisan L.F., Costa M., 2011. Cholesterol reduction and lack of genotoxic or toxic effects in mice after repeated 21-day oral intake of lemongrass (*Cymbopogon citratus*) essential oil. *Food Chem. Toxicol.* 49(9), 2268–2272.
- Costa G., Ferreira J.P., Vitorino C., Pina M.E., Sousa J.J., Figueiredo I.V., Batista M.T., 2016. Polyphenols from *Cymbopogon citratus* leaves as tropical anti-inflammatory agents. *J. Ethnopharmacol.* 178, 222–228.
- Ekpenyong C.E., Akpan E., Nyoh A., 2015. Ethnopharmacology, phytochemistry and biological activities of *Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf extracts. *Chin. J. Nat. Med.* 13(5), 321–337.
- Ghazanfari A., Emami S., Tabil L.G., Panigrahi S., 2006. Thin-layer drying of flax fiber: II. Modeling drying process using semi-theoretical and empirical models. *Dry. Technol.* 24, 1637–1642.
- Hanaa M.A.R., Sallam Y.I., El-Leithy A.S., Aly E.S., 2012. Lemongrass (*Cymbopogon citratus*) essential oil as affected by drying methods. *Ann. Agricultural Sci.* 57(2), 113–116.
- Jumah R.Y., Raghavan G.S.V., 2001. Analysis of heat and mass transfer during combined microwave-convective spouted-bed drying. *Dry. Technol.* 19(3–4), 485–506.
- Kiranoudis C.T., Tsami E., Maroulis Z.B., 1997. Microwave vacuum drying kinetics of some fruits. *Dry. Technol.* 15, 2421–2440.
- Matasyoh J.C., Wagara I.N., Nakavuma J.L., Kibural A.M., 2011. Chemical composition of *Cymbopogon citratus* essential oil and its effect on mycotoxigenic *Aspergillus* species. *Afr. J. Food Sci.* 5(3), 138–142.
- Midilli A., Kucuk H., Yapar Z., 2007. A new model for single-layer drying. *Dry. Technol.* 20(7), 1503–1513.
- Minn W.A.M., Loughlin C.M., Magee T.R.A., 2007. Thin-layer modeling of microwave, microwave-convective, and microwave-vacuum drying of pharmaceutical powders. *Dry. Technol.* 23, 513–532.
- Oloyede O.I., 2009. Chemical profile and antimicrobial activity of *Cymbopogon citratus* leaves. *J. Nat. Prod.* 2, 98–103.
- Pasławska M., Stepień B., Jałoszyński K., Surma M., Magganos G., 2013. Assessment of possibility of using microwaves for heating spouted bed during drying apples [in Polish]. *Agric. Eng.* 3(146), 285–294.
- Pereira P.P., Puntel R.L., Boschetti T.K., Morel A.F., 2009. Antioxidant effects of different extracts from *Mellisa officinalis*, *Matricaria recutita* and *Cymbopogon citratus*. *Neurochem. Res.* J. 34, 973–983.
- Santin M.R., Dos Santos A.O., Nakamura C.V., Filho B.P.D., Ferreira I.C.P., Ueda-Nakamura T., 2009. In vitro activity of the essential oil of *Cymbopogon citratus* and its major component (citral) on *Leishmania amazonensis*. *Parasitol. Res. J.* 105, 1489–1496.
- Shanjani P.S., Mirza M., Calagari M., Adams R.P., 2010. Effects of drying and harvest season on the essential oil composition from foliage and berries of *Juniperus excels.* *Ind. Crop. Prod. J.* 32, 83–87.

- Simha P., Mathew M., Ganesapillai M., 2016. Empirical modeling of drying kinetics and microwave assisted extraction of bioactive compounds from *Adathoda vasica* and *Cymbopogon citratus*. *Alexandria Eng. J.* 55, 141–150.
- Wiktor A., Luczywek K., Witrowa-Rajchert D., 2012. Modelowanie matematyczne kinetyki suszenia mikrofalowo-konwekcyjnego liści bazylii. *ZPPNR* 570, 127–141.
- Wiktor A., Luczywek K., Witrowa-Rajchert D., Hankus M., Królikowski K., 2013. Aproksymacja krzywych kinetycznych suszenia mikrofalowo-konwekcyjnego liści oregano wybranymi równaniami. *ZPPNR* 573, 61–73.
- Yaldl O., Ertekin C., 2001. Thin layer solar drying of some different vegetables. *Dry. Technol.* 19(3), 583–596.
- Yan W., Zhang M., Huang L., Tang J., Mujumdar A.S., Sun J., 2010. Study of the optimization of puffing characteristics of potato cubes by spouted bed drying enhanced with microwave. *J. Sci. Food Agric.* 90, 1300–1307.

## EFFECT OF FRAGMENTATION AND INERT ADDITION ON KINETICS OF MICROWAVE-ASSISTED FLUIDIZED BED DRYING OF LEMONGRASS

**Summary.** The aim of this study was to determine the effect of lemongrass fragmentation on kinetics of fluidized bed drying combined with microwave heating. Lemongrass leaves were cut on 1 cm bright slices (fragmentation 1) or 1 cm bright slices divided into quartets (fragmentation 2) and dried by microwave assisted fluidized bed drying method. The drying was performed at inlet air velocity  $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  and temperature  $50^\circ\text{C}$ , and at 250 W of microwaves input power. For improving the fluidization process, glass balls about diameter of 3 mm were tested as inert. Kinetics of drying was analyzed on the base of moisture ratio changings and described with appropriate mathematical model. Eight common used mathematical models were selected and tested in order to describe the experimental data. It was found that usage of fragmentation 2 caused improving of drying rate just after 40 min of drying, and shortening of drying process up 150 min to 130 min. During lemongrass drying in form of slices (fragmentation 1) and slice's quarters as well (fragmentation 2), temporary fluidization inhibition was observed. The reason of this effect was clumping of rigid and curled lemongrass pieces in stationary layer. The application of glass balls as inert let to eliminate this negative result and restore fluidization. Solvation of this technical problem entailed the increase of drying rate during microwave assisted fluidized bed of lemongrass and induced also further shortening of drying time. On the basis of the comparison of the coefficient of determination ( $R^2$ ), root mean square error (RMSE), and standard error (SE), the usefulness of selected mathematical formulas to describe the dehydration process was assessed. It was found that the drying kinetics of lemongrass was best described by the Midilli–Kucuk model, regardless of the material's fragmentation and inert. For this formula, a high coefficient  $R^2$  (0.997–0.999) was reported, while at the same time the low values of the SE (0.010–0.018) and the RSME coefficient (0.010–0.017) were calculated. In conclusion: the fragmentation of lemongrass to smaller pieces (fragmentation 2) gives improvement of microwave assisted fluidized-bed drying rate and process time only when synchronize together with of inert usage.

**Key words:** lemongrass, microwave-assisted fluidized-bed drying, kinetics