

Michał ARASZKIEWICZ, Antoni KOZIÓŁ

e-mail: [michal.araszkiwicz@pwr.wroc.pl](mailto:michal.araszkiwicz@pwr.wroc.pl)

Zakład Procesów Chemicznych i Biochemicznych, Politechnika Wroclawska, Wrocław

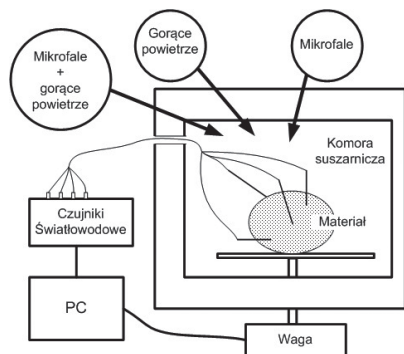
## Rozkład temperatury podczas mikrofalowego ogrzewania materiału biologicznego

### Wstęp

Suszenie mikrofalowe jest alternatywą dla tradycyjnego procesu suszenia gorącym powietrzem, zapewniającą znaczne skrócenie czasu i polepszenie wydajności procesu. Mikrofałe mogą być stosowane, jako jedyne źródło energii lub w połączeniu z gorącym powietrzem, co ułatwia odprowadzanie wilgoci z powierzchni materiału jak i ujednotacza temperaturę ciała stałego [1].

Problemem jest jednak występowanie znacznych różnic temperatury w obrębie suszonego materiału [2]. Mogą pojawić się też mechaniczne zmiany w strukturze materiału, które mogą prowadzić do uszkodzenia lub nawet zniszczenia próbki [3, 4]. Poważne ograniczenia pojawiają się w przypadku suszenia materiałów biologicznych, których czas ekspozycji na promieniowanie mikrofalowe jest ograniczony zwęgleniem, spaleniem materiału, co może być spowodowane zarówno przez niekontrolowany wzrost temperatury (*thermal runaway*) w miejscu o wyższej wilgotności lub obecność tzw. *gorących punktów* (*hot spots*), czyli występowania punktowych maksimum natężenia pola elektrycznego w obrębie materiału, co prowadzi do niekontrolowanego wzrostu temperatury w pojedynczych punktach próbki [5]. Analiza rozkładu temperatury w materiale pochodzenia biologicznego suszonego w środowisku mikrofalowym jest bardzo istotna z punktu widzenia dalszych aplikacji przemysłowych.

Celem pracy jest prezentacja rozkładów temperatury w obrębie modelowego materiału biologicznego podczas suszenia mikrofalowego i hybrydowego (mikrofałe + gorące powietrze). Przedstawiono również rozkłady temperatury w przypadku tradycyjnego ogrzewania gorącym powietrzem jako punkt odniesienia do uzyskanych wyników.



Rys. 1. Schemat aparatury doświadczalnej

### Aparatura i metodyka

Eksperymenty przeprowadzono na aparaturze doświadczalnej przedstawionej na rysunku 1. Główną jej częścią jest reaktor mikrofalowy (*Moulinex*) o nominalnej mocy mikrofał 1100 W. W reaktorze istnieje też możliwość tradycyjnego ogrzewania gorącym powietrzem (do 250°C). Temperatura była mierzona czujnikami światłowodowymi firmy *Luxtron-FOT Lab Kit* z sondami STF (czas odpowiedzi 1,25 s, z dokładnością 0,25°C). Pomiar ubytku masy realizowano z wykorzystaniem wagi *Radwag WLC/A2* (z dokładnością 0,03 g). Zarówno czujniki światłowodowe jak i waga podłączone były do zestawu PC, gdzie dane były zapisywane w sposób ciągły w trakcie eksperymentów.

Do eksperymentów wybrano bulwy ziemniaka (*Solanum tuberosum L.*) o podobnej wielkości i masie (100 ± 20 g) od jednego dostawcy.

W komorze suszarniczej umieszczono próbkę materiału biologicznego (pojedynczą bulwę ziemniaka). Próbka nie poruszała się względem

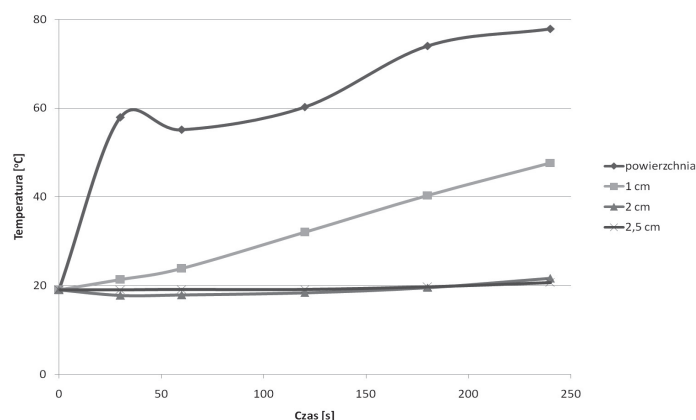
pola mikrofalowego. W materiale umieszczono sondy światłowodowe na głębokości: 0 (powierzchnia), 1, 2 i 2,5 cm. Próbkę umieszczono na wadze podłączonej do komputera PC. Po włączeniu czujników i wagi włączano zasilanie magnetronu i rozpoczynano eksperyment.

Proces prowadzono dla trzech różnych sposobów ogrzewania: gorącego powietrza (150°C), mikrofał (1100 W mocy nominalnej) i hybrydowego (mikrofałe 1100 W + powietrze 150°C). Przeciętnie każdy eksperyment trwał 5 minut.

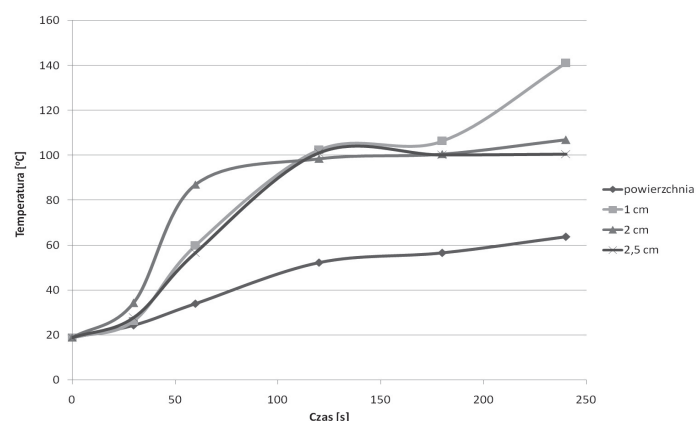
### Wyniki

Wzrost temperatury we wnętrzu materiału przedstawiają rys. 2–4. Proces prowadzony bez użycia mikrofał (Rys. 2) praktycznie nie doprowadził w tak krótkim czasie do znaczącego wzrostu temperatury w centrum próbki. Z kolei zastosowanie mikrofał (Rys. 3) powoduje gwałtowny wzrost temperatury w centrum i w głębszych partiach materiału. Lokalne maksimum na głębokości 1 cm to nic innego jak wspomniany *gorący punkt*, w którym temperatura osiągnęła poziom 140°C, podczas gdy na powierzchni utrzymywała się temperatura 60°C.

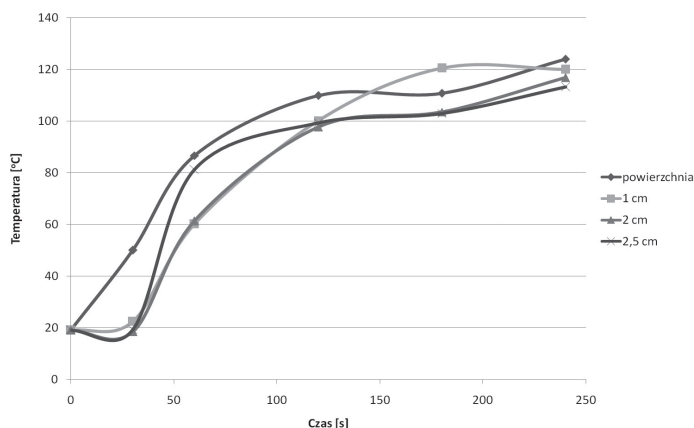
Prowadzenie procesu ogrzewania hybrydowego (mikrofałe + gorące powietrze) daje wzrost temperatury porównywalny z ogrzewaniem mikrofalowym (Rys. 4). Temperatura w materiale jest bardziej wyrównana i stopniowo rośnie do poziomu sięgającego 120°C. Różnicę w przebiegu trzech badanych procesów widać również w szybkości usuwania wilgoci z materiału (Rys. 5). Zgodnie z przewidywaniami połączenie procesów ogrzewania dielektrycznego z tradycyjnym (proces hybrydo-



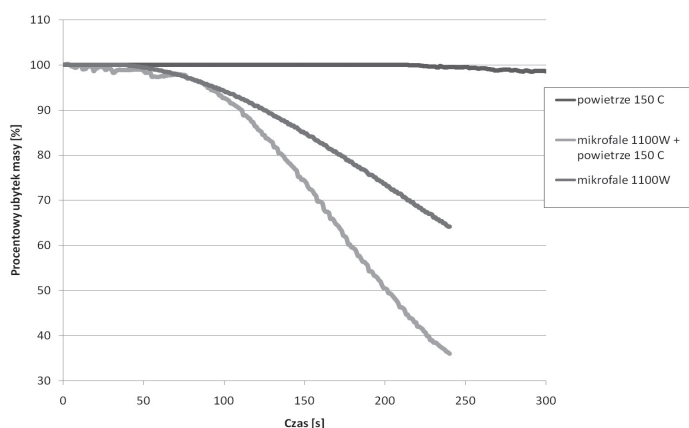
Rys. 2. Wzrost temperatury podczas ogrzewania gorącym powietrzem



Rys. 3. Wzrost temperatury podczas ogrzewania mikrofalowego



Rys. 4. Wzrost temperatury podczas ogrzewania hybrydowego: mikrofałe + gorące powietrze

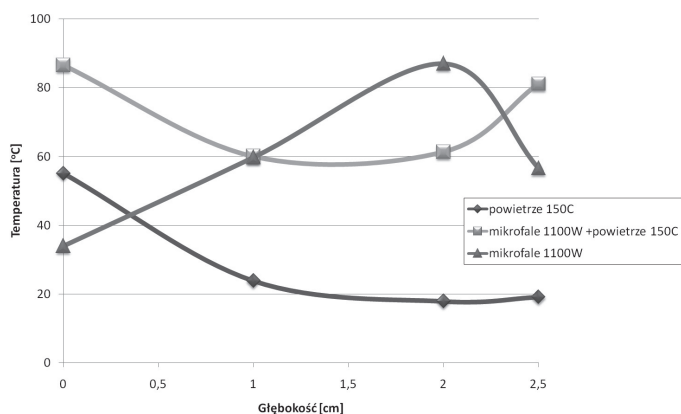


Rys. 5. Ubytek masy w materiale ogrzewanym różnymi sposobami

wy) daje najlepsze rezultaty. Samo ogrzewanie mikrofalowe daje nieco gorsze rezultaty.

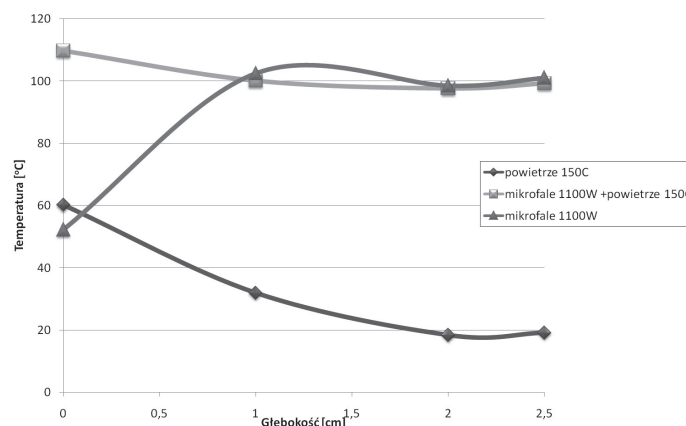
Intensywność usuwania wilgoci jest znacznie większa niż w przypadku tradycyjnego ogrzewania gorącym przebiega łagodniej niż w procesie hybrydowym. Co ciekawe, intensywność usuwania wody zwiększa się w tym samym momencie dla wszystkich trzech procesów po około 40 sekundach ogrzewania.

Porównanie profili temperatury w próbkach materiału biologicznego ogrzewanego trzema różnymi sposobami przedstawiono na rys. 6–8. Silny wzrost temperatury występuje już po 60 sekundach ogrzewania w procesach prowadzonych z wykorzystaniem mikrofał (Rys. 6). Wzrost temperatury na głębokości 2 cm w przypadku procesu mikrofalowego można wytłumaczyć lokalną koncentracją pola elektromagnetycznego w danym punkcie (materiał był nieruchomy względem komory mikrofalowej). W procesie tradycyjnym wzrosła tylko temperatura powierzchni.

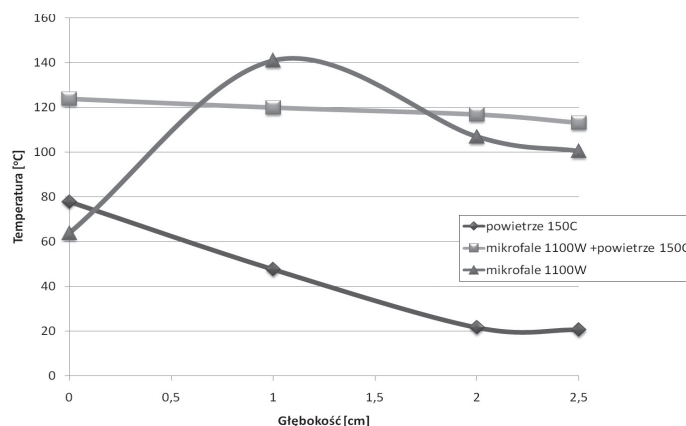


Rys. 6. Profile temperatury w materiale po 60 sekundach ogrzewania

W następnej minucie ogrzewania profile temperatury w procesach mikrofalowych wyrównują się, różnice występują w temperaturze powierzchni materiału (Rys. 7). Rys. 8 przedstawia obraz rozkładu temperatury po 240 sekundach ogrzewania. Najbardziej wyrównana jest temperatura w procesie hybrydowym, w procesie mikrofalowym występuje nadal duża różnica temperatury między wnętrzem a powierzchnią materiału. Rozkład temperatury w procesie tradycyjnym również nie jest wyrównany. Najwyższa temperatura występuje na powierzchni materiału, podczas gdy w jego głębi temperatura utrzymuje się na stałym poziomie.



Rys. 7. Profile temperatury w materiale po 120 sekundach ogrzewania



Rys. 8. Profile temperatury w materiale po 240 sekundach ogrzewania

## Wnioski

Wykorzystanie mikrofał diametralnie zmienia charakter zjawisk termicznych w obrębie ogrzewanego ciała. Najbardziej wyrównany profil temperatury zaobserwowano podczas procesu hybrydowego. W pozostałych przypadkach różnice temperatury sięgały nawet 80°C (Rys. 3). Zaobserwowano również lokalne przegrzania materiału (Rys. 6), które stanowią problem praktycznie w większości zastosowań techniki mikrofalowej.

Istnienie tak dużych różnic temperatury w obrębie materiału biologicznego może doprowadzić do jego uszkodzenia, czyli obniżenia jakości produktu. Mimo tego ryzyka, stosowanie mikrofał w procesach suszarniczych materiałów biologicznych jest bardzo kuszące ze względu na znaczne skrócenie czasu trwania procesu.

## LITERATURA

- [1] L.M. Ahrne, N. R. Pereira, N. Staack, P. Floberg: Dry. Techn., **25**, (2007).
- [2] A. Manickavasagan, D. S. Jayas, N. D. G. White: Dry. Techn., **24**, (2006).
- [3] S.J. Kowalski, K. Rajewska, A. Rybicki: Dry. Techn., **22**, 10 (2004).
- [4] S.J. Kowalski, K. Rajewska, A. Rybicki: Dry. Techn., **23**, 10 (2005).
- [5] E. Holtz, L. Ahrne, M. Rittenauer, A. Rasmuson: J. of Food Eng., **97** (2010).

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego nr NN209149036 Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.