

# APARATURA

## BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

### Mikrofalowo-próżniowe suszenie drewna

ANNA SMOCZKIEWICZ–WOJCIECHOWSKA<sup>1</sup>, KINGA RAJEWSKA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>UNIwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Wydział Melioracji i Inżynierii Środowiska, Katedra Mechaniki Budowli i Budownictwa Rolniczego

<sup>2</sup>Politechnika Poznańska, Instytut Technologii i Inżynierii Chemicznej, Zakład Inżynierii Procesowej

**Słowa kluczowe:** drewno, suszenie mikrofalowo-próżniowe, próby wytrzymałościowe

#### STRESZCZENIE

Suszenie mikrofalowo-próżniowe jest kombinacją ciepła mikrofal i próżni. To nowa alternatywna metoda, która pozwala na zastosowanie temperatury pokojowej z szybkim transferem energii, umożliwiając bardziej efektywne suszenie oraz uzyskanie wysokiej jakości produktu. Metodą tą przeprowadzono suszenie w skali laboratoryjnej niewielkich próbek drewna sosny (*Pinus silvestris* L.) i dębu (*Quercus*). Następnie wszystkie wysuszone próbki poddano badaniom wytrzymałościowym w celu określenia zależności pomiędzy różnymi programami suszenia, a jakością wysuszonego materiału.

Mikrofalowo-próżniowa metoda zmniejszania zawartości wilgoci skraca czas suszenia, jednocześnie poprawiając wydajności procesu, dzięki czemu jest obecnie przedmiotem licznych badań w ośrodkach naukowych.

#### Microwave vacuum drying of wood

**Keywords:** wood, microwave vacuum drying, strength tests

#### ABSTRACT

Microwave vacuum drying of wood is new, alternative method that allows drying in room temperature with fast energy transfer. This technique assures a good quality of products in relatively short drying time. The paper demonstrates microwave vacuum drying processes of small pine (*Pinus silvestris* L.) and oak (*Quercus*) samples in laboratory scale. All dried samples were put on strength test in order to find relationship between different drying programs and the quality of dried material.

It is known that vacuum drying processes can offer reduce drying time and higher end-products quality in comparison with conventional drying operations. That is why the vacuum drying of wood is currently receiving worldwide attention.

## 1. WSTĘP

Nadal najczęstszą metodą usuwania wilgoci z drewna jest suszenie konwekcyjne. Jednak w przypadku wielu wrażliwszych gatunków drewna o dużej zawartości wilgoci może powodować znaczny skurcz skutkujący powstaniem wypaczeń, a nawet pęknięć wpływających na obniżenie jakości materiału. Problemem pozostaje również długi czas oraz znaczny nakład energii potrzebny do prawidłowego przeprowadzenia konwekcyjnego procesu suszenia. Dlatego nieustannie poszukuje się i ulepsza wszystkie alternatywne metody, które pozwolą skrócić czas suszenia, ograniczą zużycie energii oraz zapewnią wysoką jakość suszonej tarcicy.

Metoda mikrofalowo-próżniowa jest obecnie przedmiotem licznych badań naukowych, głównie w zakresie materiałów spożywczych. Natomiast suszenie mikrofalowo-próżniowe drewna było analizowane przez Xian-Jun Li, Bi-guang Zhang, Wen-Jun Li, którzy badali kolejno wpływ: wilgotności, rozmiaru próbek oraz mikrofal i próżni na przebieg procesu suszenia [1]. Na podstawie przeprowadzonych doświadczeń stwierdzili, że wielkością determinującą jest w tym przypadku moc zastosowanych fal elektromagnetycznych. Ci sami autorzy podjęli również próbę stworzenia matematycznego modelu opisującego mikrofalowo-próżniowe suszenie drewna [2]. Prezentowaną metodę analizowali też Leiker M., Adamska M.A. [3], którzy mówiąc o znacznym skróceniu czasu suszenia wskazali na wysokie jej koszty w porównaniu do procesu konwekcyjnego. Autorzy zaznaczają jednak dobrą jakość końcową produktów, a zwłaszcza ich kolor. Zredukowanie ilości tlenu w suszeniu próżniowym ogranicza, bowiem powstawanie przebarwień na powierzchni drewna [3, 4].

## 2. SUSZENIE MIKROFALOWO-PRÓŻNIOWE

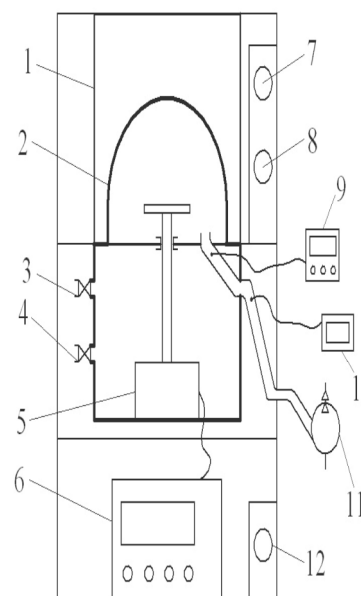
### 2.1 Metodyka badań

Celem niniejszych badań było lepsze poznanie kinetyki mikrofalowo-próżniowego suszenia różnych rodzajów drewna oraz wyznaczenie relacji pomiędzy warunkami suszenia a właściwościami mechanicznymi badanego materiału.

Wspomnianą metodą przeprowadzono suszenie w skali laboratoryjnej niewielkich próbek drewna. W badaniach wykorzystywano prostokątne próbki dębu o wymiarach 1,5x2,0x15 cm i wil-

gotności początkowej 65% oraz drewna sosny o wymiarach 1,5x2,5x15 cm i wilgotności 95%. Następnie wysuszony materiał poddano badaniom wytrzymałościowym w celu określenia zależności pomiędzy jego jakością a różnymi programami suszenia.

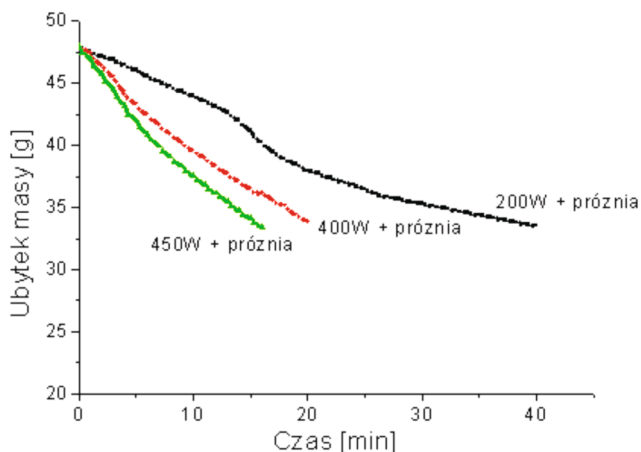
Na Rysunku 1 przedstawiono schemat suszarki mikrofalowo-próżniowej wykorzystywanej w badaniach laboratoryjnych.



Rysunek 1 Stanowisko badawcze  
Figure 1 Measuring set

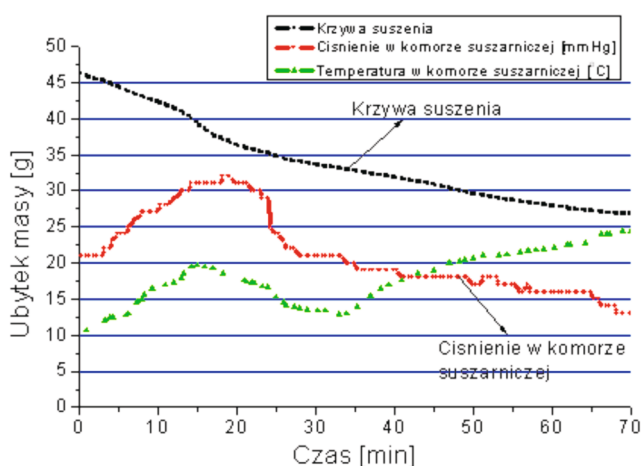
W komorze mikrofalowej zlokalizowana jest komora próżniowa (2) wyposażona w szalkę wagi laboratoryjnej (6), która stanowi integralną część urządzenia suszarniczego. Próżnię wytwarza pompa (11), połączona z komorą suszarniczą odpowiednim przewodem. Ciśnienie w układzie mierzy manometr pojemnościowy MKS BARATRON z urządzeniem odczytującym (10), natomiast temperaturę wylotową powietrza termometr (9). W tylnej części suszarki umieszczono zawór odpowietrzający (3) oraz zawór regulacji ciśnienia (4) – umożliwiające obniżanie ciśnienia oraz dekompresję układu. Na obudowie suszarki znajduje się wyłącznik czasowy mikrofal (8) oraz regulator mocy fal elektromagnetycznych (7). W dolnej części urządzenia jest włącznik pompy próżniowej (12).

Prostokątne próbki drewna suszono w suszarce mikrofalowo-próżniowej do osiągnięcia 10% wilgotności. W oparciu o ciągły pomiar ubytku masy wykreślono krzywe suszenia, które stanowiły podstawę analizy kinetyki procesu.



**Rysunek 2** Krzywe suszenia próbek dębu wysuszonych w suszarce mikrofalowo-próżniowej

**Figure 2** Drying curves of oak samples dried in microwave-vacuum dryer

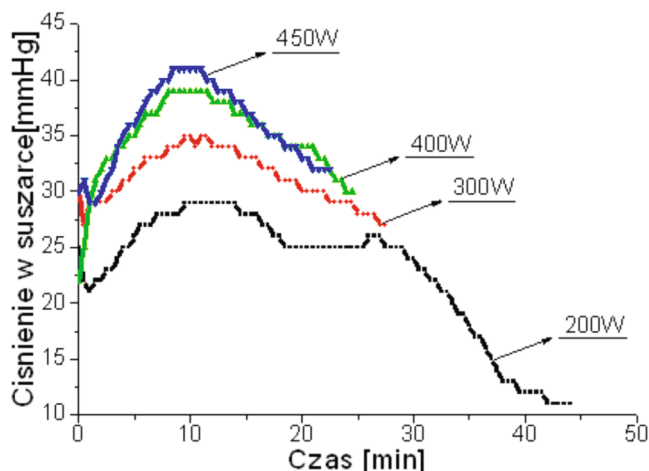


**Rysunek 3** Proces mikrofalowo-próżniowego suszenia drewna dębu (moc mikrofal 200W)

**Figure 3** Microwave vacuum drying of oak sample (microwave power 200W)

Wykorzystywana aparatura (Rys. 1) pozwalała także na ciągły pomiar ciśnienia oraz temperatury powietrza w komorze. Zmiany obu tych wartości są ściśle związane z przebiegiem procesu suszenia. Widoczny na Rysunku 3 wzrost ciśnienia w komorze próżniowej związany jest z intensywnym wyprowadzaniem wilgoci z materiału, co z kolei odzwierciedla nagłe przyspieszenie na krzywej suszenia między 10-20 min procesu. Natomiast zobrazowane na wykresie ciągłe obniżanie ciśnienia po 35 min wskazuje, że ilość wyprowadzanej z materiału wody (pary) nie jest już tak intensywna i maleje wraz ze spadkiem wilgotności drewna. Z kolei na Rysunku 4 zestawiono pomiary ciśnienia mierzonego podczas suszenia drewna sosny przy różnych mocach fal elektromagnetycznych. Obserwowany wzrost ciśnienia w komorze przy mocy 450 W świadczy, że ilość wyprowadzanej

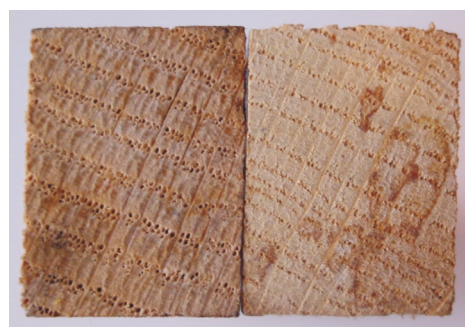
z materiału wody jest wówczas największa, a czas suszenia najkrótszy (Rys. 2, Rys. 4). Na podstawie uzyskanych wyników można więc stwierdzić: im wyższa moc, tym intensywniejszy proces i gwałtowniejsze wyprowadzanie wody.



**Rysunek 4** Zmiany ciśnienia w suszarce mikrofalowo-próżniowej podczas suszenia próbek sosny przy różnej mocy mikrofal

**Figure 4** Pressure in microwave vacuum dryer while drying pine samples in different microwave power

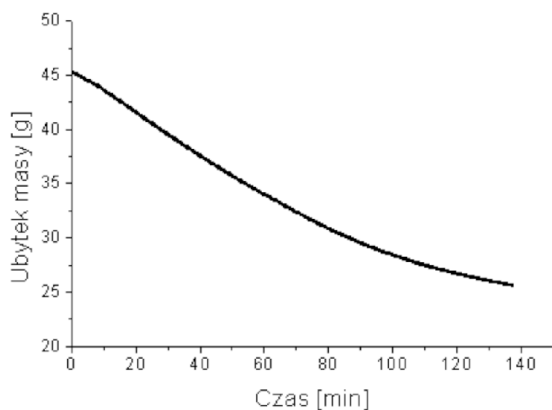
Wykorzystanie próżni pozwala na obniżenie punktu wrzenia wody, co poprawia efektywność energetyczną procesu. Dodanie mikrofal o różnej mocy przyspiesza cały proces, zgodnie z zasadą: im wyższa moc, tym krótszy czas suszenia. Badanie potwierdza również wyniki uzyskane przez Xian-Jun Li, Bi-guang Zhang, Wen-Jun Li [1] wskazujące, że na wydajność procesu suszenia największy wpływ ma moc mikrofal. Natomiast próżnia jest elementem wspomagającym transport wilgoci z materiału. Dodatkowo o znacznej dynamice i efektywności procesu mogą świadczyć widoczne na przekroju poprzecznym próbki otwory, powstałe prawdopodobnie na skutek gwałtownego wyprowadzania wody z materiału przy intensywniejszym działaniu fal elektromagnetycznych.



**Rysunek 5** Próbki dębu wysuszone w suszarce mikrofalowo-próżniowej: a) moc 400W; b) moc 200W  
**Figure 5** Oak samples dried in microwave-vacuum dryer: a) 400W; b) 200W

Należy pamiętać, że dąb należy do trudno schnących rodzajów drewna, skłonnych do wypaczeń i pęknięć w przypadku nieodpowiednich warunków suszenia. Dlatego suszenie mikrofalowo-próżniowe może stanowić pewną alternatywę w stosunku do tradycyjnych metod suszenia ograniczając pękanie związane z niejednorodnym skurczem materiału.

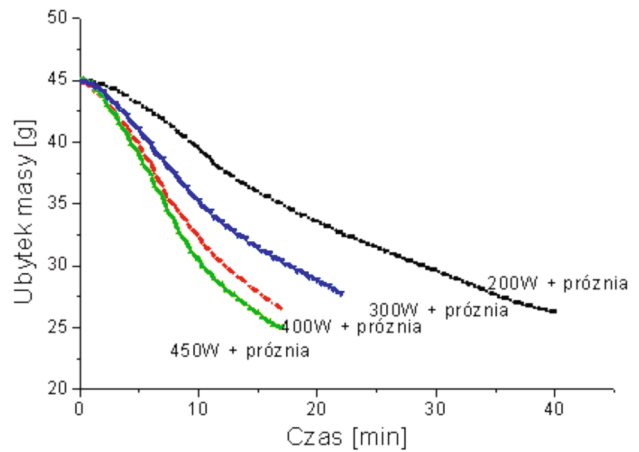
Wykorzystanie fal elektromagnetycznych pozwala na dostarczanie energii cieplnej bezpośrednio do wszystkich warstw drewna. Materiał jest wówczas równomiernie podgrzewany w całej swojej objętości, co ułatwia transport wilgoci z warstw wewnętrznych. Zaletą suszenia próżniowego jest natomiast zwiększony w stosunku do suszenia konwekcyjnego transfer masy, ze względu na różnice ciśnień między wewnętrzną, a zewnętrzną warstwą próbki przy jednocześnie niskiej temperaturze materiału. Dodatkowo próżnia zapewnia szybkie odprowadzanie wody z powierzchni próbki. Takie rozwiązanie zapewnia bardziej równomierny rozkład wilgoci. Występujący skurcz drewna i związane z nim naprężenia desorpcyjne odpowiedzialne za powstanie pęknięć są mniejsze niż w przypadku suszenia konwekcyjnego, co zapewnia dobrą jakość końcową produktu. O efektywności połączenia tych metod w porównaniu z rozwiązaniem tradycyjnym (konwekcyjne suszenie próbki sosny, Rysunek 6) mogą świadczyć prezentowane na Rysunkach 2 i 7 krzywe suszenia drewna dębu i sosny, gdzie czas suszenia został znacznie zredukowany.



**Rysunek 6** Krzywa suszenia próbki sosny wysuszonej konwekcyjnie w temp. 120°C

**Figure 6** Drying curve of pine sample dried in convection dryer in temperature of 120°C

Energia mikrofal podnosi efektywność procesu, lecz niejednorodność pola magnetycznego lub źle dobrana moc może doprowadzić do obniżenia jakości suszonego materiału przez powstanie lokalnych przypaleń (Rys. 8).



**Rysunek 7** Krzywe suszenia próbek sosny wysuszonej w suszarce mikrofalowo-próżniowej

**Figure 7** Drying curves of pine samples dried in microwave-vacuum dryer



**Rysunek 8** Próbka drewna zniszczona na skutek działania niejednorodnego pola magnetycznego

**Figure 8** Wood sample burned by non-homogeneous magnetic field

## 2.2 Badania wytrzymałościowe:

Określenie właściwości mechanicznych suszonego w różnych warunkach drewna polegało na trójpunktowym zginaniu. Badania wytrzymałościowe zostały przeprowadzone na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej COMETECH QC-508A1 wyposażonej w głowicę 5kN. Szerokość podpór wynosiła  $L=140$  mm. Eksperyment przeprowadzono ze stałym przemieszczeniem głowicy wynoszącym 10 mm/min. Belki oparte na dwóch podporach obciążano w ich środkowej części siłą zginającą, aż do zniszczenia materiału (Rys. 9). Uzyskane wyniki umieszczono w Tabeli 1.



**Rysunek 9** Zginanie trzy punktowe próbki drewna dębu

**Figure 9** Three-point bending of oak sample

**Tabela 1** Zestawienie wyników badań wytrzymałościowych na zginanie

**Table 1** Strength test results

Rodzaj drewna	Moc mikrofal [W]	Siła niszcząca [N]
Dąb	200	803
	300	2143
	400	2415
	450	1099
Sosna	200	1645
	300	1611
	400	1843

Wraz ze wzrostem reżimu suszenia spodziewano się pogorszenia właściwości mechanicznych drewna. Jednak na podstawie przeprowadzonych doświadczeń nie udało się uzyskać żadnej zależności pomiędzy warunkami suszenia a właściwościami mechanicznymi materiału suszonego (Tab. 1). Można więc przypuszczać, że szkielet materiału nie został naruszony.

### 3. PODSUMOWANIE

Celem niniejszych badań było lepsze poznanie kinetyki mikrofalowo-próżniowego suszenia różnych rodzajów drewna oraz wyznaczenie relacji pomiędzy warunkami suszenia a właściwościami mechanicznymi badanego materiału.

Wnioski:

- Kombinacja suszenia mikrofalowo-próżniowego znacznie poprawia wydajność procesu, skracając czas suszenia i zapewniając dobrą jakość drewna, nawet w przypadku wrażliwych i skłonnych do pęknięcia rodzajów drewna takich jak dąb.

- Wykorzystanie energii mikrofal pozwala na odpowiednie podgrzanie próbki głównie w strefie wewnętrznej. Taka sytuacja przyspiesza transport wilgoci na zewnątrz, gdzie zastosowanie próżni dodatkowo skraca czas suszenia.

- Na charakter krzywej suszenia oraz jakość suszonego materiału największy wpływ ma moc zastosowanych mikrofal, gdyż wraz ze wzrostem mocy użytych mikrofal suszenie drewna przebiegało coraz szybciej.

- Dotychczasowe badania wytrzymałościowe wykazały brak bezpośrednich zależności pomiędzy programami suszenia a właściwościami mechanicznymi materiału, co może stanowić zaletę. W pracy [5] badano między innymi wpływ sposobu suszenia na właściwości mechaniczne kaolinu ceramicznego, wskazując na obniżenie jego właściwości mechanicznych ze względu na zastosowanie fal elektromagnetycznych w połączeniu z próżnią. Autorzy zaobserwowali, że wartości zarówno modułu Younga, jak również maksymalnej siły, którą próbka jest w stanie przenieść, są niższe w przypadku suszenia mikrofalowo-próżniowego niż w przypadku suszenia wyłącznie z wykorzystaniem mikrofal. Nie udało się jednak potwierdzić tego w przypadku suszenia drewna. W związku z tym możliwość suszenia drewna z wykorzystaniem stosunkowo wysokich wartości mocy mikrofal, skracających czas suszenia, bez konsekwencji pogorszenia jego jakości może okazać się zaletą. Badania te jednak należy kontynuować.

**Badania finansowane z projektu badawczego:  
NN209031638**

### LITERATURA

- [1] Xian-Jun Li, Wen-Jun Li, Bi-guang Zhang. „Microwave vacuum drying characteristics of Pinus massoniana wood“ *Forestry Studies in China*, Vol. 9 (2007), No 1, p. 63-67.
- [2] Xian-Jun Li, Bi-guang Zhang, Wen-Jun Li. „Microwave vacuum drying of wood: Model formulation and verification” *Drying Technology*, Vol. 26 (2008), p. 1382-1387.
- [3] Leiker M., Adamska M. A. „Energy efficiency and drying rates during vacuum microwave drying of wood” *European Journal of Wood and Wood Products*. Vol. 62, No 3 (2004), p. 203-208.
- [4] Sandoval-Torres S., Jomaa W., Marc F., Puiggali J.-R. „Causes of color changes in wood during drying” *For. Stud. China* 12 (4), (2010) p. 167-175.
- [5] Kieca A., Musielak G., Śliwa T. „Wpływ suszenia mikrofalowego oraz próżniowo-mikrofalowego na wytrzymałość materiałów ceramicznych”, *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, 3, (2010) p. 51-52.