

## Zmiana masy i temperatury powierzchni szyszek sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) pod wpływem promieniowania mikrofalowego

The change in weight and surface temperature of pine cones (*Pinus sylvestris* L.)  
as a result of microwave irradiation

**Monika Aniszewska**

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Wydział Inżynierii Produkcji, Katedra Maszyn Rolniczych i Leśnych,  
ul. Nowoursynowska 164, 02-787 Warszawa

Tel. +48 22 5934520, e-mail: monika\_aniszewska@sggw.pl

**Abstract.** In this article the author investigates the change of weight and temperature of pine cones in a microwave oven over the following range of microwave radiation power (PMF): 800, 620, 440, 260 and 130 W.

Cones were divided into groups according to their weight and the author examined the influence of PMF on their water content and drying rate. The process is described with the help of mathematical equations and curves. The cones were irradiated in the microwave until all cones of the given group began to open the first scales. Small cones required longer exposure times to PMF than medium and large cones in order to cause scale opening. The most efficient of the five settings was a radiation power of 620W with an exposure time to microwaves for no longer than 20 seconds.

In the second part of the study, the author analyses the changes of temperature on the cone surface using a thermal imaging camera. The values of surface temperature depended on radiation power and the duration of irradiation.

**Keywords:** seed extraction, microwave oven, water quantity, drying rate

### 1. Wstęp

Aby pozyskać nasiona gatunków iglastych, w tym sosny zwyczajnej, świerka pospolitego, modrzewia europejskiego i jodły pospolitej, należy poddać szyszki procesowi łuszczenia, który jest pracochłonny i długotrwały. Poszukuje się metod, które usprawnią ten proces.

Podjęmowano wiele prób mających na celu skrócenie procesu wyłuszczenia. Podwyższano temperaturę suszenia (Antosiewicz 1979), obniżano ciśnienie (Bogdanow 1966), mechanicznie zmniejszono wielkość szyszek poprzez odcięcie podstawy, segregowano szyszki na grupy różniące się wymiarami (małe, średnie, duże), stosowano moczenie w wodzie podczas etapowego procesu suszenia (Aniszewska 2012a, 2013). Pomimo prowadzonych badań nie udało się znacząco skrócić czasu łuszczenia. Jednym z powodów jest duża wrażliwość nasion na czynniki zewnętrzne. Żle dobrane parametry łuszczenia szyszek powodują uszkodzenie nasion.

W ostatnich latach w Polsce nastąpiła znaczna poprawa w dziale nasiennictwa. Dzięki licznym inwestycjom zbudowano nowe i zmodernizowano stare obiekty infrastruktury

technicznej, m.in. wyłuszczenie, przechowanie, stacje oceny i kontroli nasion, w których wdrożono nowe technologie. Powstałe obiekty charakteryzują się dużą powierzchnią i przeznaczone są do przerobu znacznej masy łuszczonego materiału rozmnożeniowego. Aby koszty łuszczenia w takich obiektach były niższe, należy dysponować dużą liczbą szyszek dostarczanych regularnie, co w roku nienasiennym może być trudne do osiągnięcia. W takich latach koszty łuszczenia są zwykle wysokie i przekraczają nawet 15,00 PLN/kg szyszek (bez uwzględnienia amortyzacji obiektów) (Aniszewska, Zychowicz 2008).

W latach 60. XX wieku rozważano wyposażenie nadleśnictw mających znaczne ilości drzewostanów iglastych w niewielkie łuszcarki, umożliwiające szybkie pozyskanie nasion zebranych przez właścicieli szyszek. W rezultacie wyprodukowano ich niewielką liczbę, ponieważ nie spełniały one wymogów jakościowych. Słabym elementem urządzeń był system sterowania procesem łuszczenia, spowodowany niedostateczną wiedzą z tego zakresu i możliwościami technicznymi przemysłu suszarniczego. Obecnie, dzięki intensywnemu rozwojowi tego działu, konstrukcja tego typu

Wpłynęło: 27.04.2015 r., recenzowano: 18.08.2016 r., zaakceptowano: 21.10.2015 r.

urządzeń nie jest już problemem. Próba opracowania wytucznych do skonstruowania nowych niedużych urządzeń wyluszczańskich wykorzystywanych do maksymalizacji ilości pozyskanych nasion wydaje się być słuszna. W takich to urządzeniach, w których można by było łuszczyć małe partie szyszek, można zastosować udoskonalony proces łuszczenia.

Zaproponowano zastosowanie promieni elektromagnetycznych (mikrofal) w pierwszym etapie procesu jedno- lub dwuetapowego łuszczenia szyszek w celu obniżenia początkowej wilgotności szyszek, a tym samym skrócenia czasu odchylania się łusek od trzpienia. Na początku pierwszego etapu proponowane jest krótkotrwałe napromieniowanie szyszek. Ta faza pierwszego etapu procesu pozwala na szybki ubytek wody z zamkniętych szyszek, który doprowadzi do spadku masy i początku otwarcia się łusek. Przez początek otwarcia łusek uważa się moment rozdzielania się poszczególnych łusek od siebie, bez widocznego odchylenia ich od trzpienia. Ten pierwszy ruch wpłynie na lepsze i intensywniejsze odgięcie się łusek i odsłonięcie nasion w kolejnej fazie łuszczenia pierwszego etapu, tzn. w szafie lub komorze łuszczańskiej.

Jednak, aby można było powszechnie stosować promieniowanie elektromagnetyczne, na początek należy szczegółowo rozpoznać, w jaki sposób mikrofały oddziałują na szyszki i znajdujące się w nich nasiona. Należy ustalić, jak długi powinien być czas oddziaływania promieniowania oraz jaka powinna być maksymalna zastosowana moc.

Celem pracy jest opis zmiany masy szyszek poddanych promieniowaniu mikrofalowemu za pomocą formuł matematycznych: zmiany zawartości wody i szybkości suszenia szyszek do momentu zaobserwowania początku otwarcia pierwszych łusek szyszek oraz charakterystyka stopnia nagrzewania się powierzchni zewnętrznej materiału przy zastosowaniu różnej mocy promieni elektromagnetycznych.

W poniższym artykule nie podjęto tematu związanego z oceną jakości nasion, jedynie badano zmianę masy, wilgotności i temperatury szyszek pod wpływem promieniowania. Ocena jakości pozyskanych nasion w szyszkach po zastosowaniu promieniowania mikrofalowego zostanie przedstawiona w kolejnych publikacjach z tego zakresu badań.

Mikrofały są falami elektromagnetycznymi, o częstotliwości od 0,3 do 300 GHz i długości fali od 0,001 do 1 m. W kuchenkach mikrofalowych stosowane są mikrofały o częstotliwości 2,45 GHz i długość fali około 120 mm. Opisane fale są odbijane przez metal i przepuszczane przez szkło, papier i większość tworzyw sztucznych. Podczas promieniowania zostaje przekazana energia materiałowi, wskutek czego w materiale podnosi się temperatura. Wzrost jej jest wynikiem oddziaływania mikrofal na cząsteczki wody. Te zostają wprawione w ruch i z dużą siłą uderzają o siebie. Zaczynają drgać, przejmując energię zaabsorbowanych mikrofal. Ostateczny efekt działania mikrofal związany jest z wilgotnością materiału, im w materiale znajduje się więcej wody, tym oddziaływanie promieniowania mikrofalowego (PMF) przebiega intensywniej.

Od lat próbowano wykorzystać oddziaływanie pola elektromagnetycznego na organizmy żywe. Fale elektromagne-

tyczne mogą być stosowane do zwiększenia żywotności nasion, poprzez zabicie patogenów znajdujących się na powierzchni okrywy (Adair 2003), eliminacji twardości okrywy nasion, dzięki temu te kiełkują szybciej (Nelson 1985; Thuery, 1992; Warchalewski et al. 2007; Pietruszewski, Kania 2011; Cieśla et al. 2015), przyspieszenia procesu suszenia owoców (np. kiwi) (Maskan 2001), warzyw (np. ziemniaków) (Khraisheh et al. 2004; Jakubowski 2008), ryżu (Pinkrová et al. 2003), niszczenia grzybów pasożytniczych, szkodników w drewnie (Krajeński A, 1990a,b, 2001). Mikrofały stosowano do dezynsekcji gleby zamiast herbicydów (Thuery 1992) czy hamowania kiełkowania nasion na powierzchniach obsiewanych (Velázquez-Martí et al. 2006). Skonstruowano urządzenie do emisji energii promieniowania mikrofalowego do gleby, które wykorzystywane jest obecnie na szklólkach leśnych (Słowiński 2013) i w szklarniach.

Ballad i inni (1976) stwierdzili też niekorzystne oddziaływanie mikrofal na nasiona. Wysuszone miały niższą laboratoryjną zdolność kiełkowania niż suszone konwekcyjnie. Według nich stopień obniżenia zdolności kiełkowania zależał od poziomu zawartości wody w nasionach. Autorzy stwierdzili, że gdy poziom wody był zbyt wysoki, to dochodziło do uszkodzenia nasion.

Zdania na temat oddziaływania fal elektromagnetycznych są podzielone i zależą od wielu czynników, np. częstotliwości czy długości fali, wilgotności, budowy i struktury materiału itd. Na podstawie dostępnej literatury nie można jednoznacznie stwierdzić, że krótkotrwałe oddziaływanie promieniowania na organizmy żywe, w tym szyszki, jest pozytywne czy negatywne.

## 2. Materiał i metody badań

Do badań pobrano szyszki sosny zwyczajnej z gospodarczych drzewostanów nasiennych (GDN) zebrane w styczniu 2015 roku i przechowywane w wyluszczańni w Rucianem Nidzie znajdującej się w Nadleśnictwie Maskulińskie (RDLP Olsztyn). Zamknięte szyszki przewieziono do laboratorium Katedry Maszyn Rolniczych i Leśnych, gdzie podzielono na 5 równych partii. W każdej partii było po 45 sztuk szyszek (w tym 15 małych, średnich i dużych). Małe miały masę do 6,0 g, średnie w granicach od 6,01 do 9,0 g, a duże – ponad 9,01 g.

Pojedyncze szyszki różnej masy kolejno poddano PMF w laboratoryjnej kuchence mikrofalowej SHARP R-200. Zastosowano pięć zakresów mocy: 130, 250, 440, 620 i 800 W. Moc mikrofały zmieniano za pomocą pokrętła regulatora w obudowie urządzenia. Na szyszki oddziaływano promieniami elektromagnetycznymi do czasu zaobserwowania początku rozchylenia się łusek każdej szyszki.

Przed rozpoczęciem badań w kuchence mikrofalowej ważono szyszki i mierzono ich parametry zewnętrzne (długość i grubość). Pomiar masy dokonywano przy pomocy wagi suszarki laboratoryjnej WPS 210S, z dokładnością do 0,001 g, a pomiar parametrów wielkościowych za pomocą suwmiarki elektronicznej z dokładnością do 0,01 mm.

W czasie badań rejestrowano zmianę masy pojedynczej szyszki, z dokładnością do 0,001 g, początkowo co 5 s, a później co 10 lub 20 s w zależności od zastosowanej mocy.

Na podstawie pomiaru masy pojedynczych szyszek obliczano zmianę masy w czasie oddziaływania promieniowania.

Po zakończeniu badań suszono szyszki w temperaturze  $105 \pm 1^\circ\text{C}$  przez 24 godziny w celu wyznaczenia suchej masy. Pozwoliła ona na opis zmiany zawartości wody i ustalenie szybkości suszenia podczas oddziaływania promieniowania mikrofalowego.

Zmiana masy stanowiła różnicę pomiędzy dwoma kolejnymi zmierzonymi masami, natomiast zawartość wody została wyliczona jako różnica masy szyszki mierzonej po określonym czasie promieniowania mikrofalowego a jej masy suchej. Znajomość masy wody w szyszce i jej masy suchej pozwoliła na obliczenie wilgotności bezwzględnej w % według wzoru:

$$W = \frac{m_p - m_s}{m_s} \cdot 100\% \quad (1)$$

gdzie:

$m_p$  – masa początkowa szyszki,

$m_s$  – masa suchej szyszki.

Do opisu zmian zawartości wody w szyszkach zastosowano równanie wykładnicze odpowiadające drugiemu okresowi suszenia ciał stałych (Pabis 1982).

$$u = (u_0 - u_k) \cdot e^{(-b \cdot \tau)} + u_k \quad (2)$$

gdzie:

$u_0$  – zawartość początkowa wody w szyszce,

$u_k$  – zawartość końcowa wody w szyszce,

$e$  – podstawa logarytmu naturalnego,

$\tau$  – czas,

$b$  – współczynnik podatności szyszki na zmianę zawartości wody.

Zawartość początkową wody można regulować przez poddanie szyszek wstępnemu podsuszaniu, natomiast wartość końcowa zależy od czynnika suszącego. Współczynnik  $b$  wyznaczono dla każdej szyszki na podstawie rzeczywistego przebiegu zmian zawartości wody (Aniszewska 2012b). Jest on parametrem charakteryzującym podatność szyszki na zmianę zawartości wody w określonych warunkach.

Szybkość suszenia obliczono jako pochodną względem czasu aktualnej zawartości wody ( $u$ ) według wzoru:

$$\frac{du}{d\tau} = -b \cdot (u_0 - u_k) \cdot e^{(-b \cdot \tau)} \quad (3)$$

Za pomocą równania wykładniczego zmiany zawartości wody i szybkości suszenia opisano etap napromieniowywania mikrofalowego szyszek.

W czasie trwania procesu rejestrowano temperaturę i wilgotność powietrza za pomocą miernika Hygro-Palm.

Podczas badań pojedynczym szyszkom wykonywano zdjęcia kamerą termowizyjną VIGOCAM V50. Za jej pomocą rejestrowano co 5, 10 lub 20 s zmianę temperatury szyszki na zewnętrznej powierzchni do momentu początku rozchylenia się łusek. Podczas zdjęć zamknięte szyszki leżały na boku na talerzu mikrofalowym.

Zdjęcia posłużyły do analizy zmiany temperatury w kolejnych etapach trwania promieniowania mikrofalowego w zależności od mocy mikrofal. Do obróbki zdjęć wykorzystano program Therma. Dokładność rejestracji temperatury wynosiła  $0,1^\circ\text{C}$ .

Do analizy statystycznej wyników wykorzystano program statystyczny Statistica 10 oraz testy dla małej liczebności próbki (Bruchwald 1997).

### 3. Wyniki badań i dyskusja

#### 3.1. Charakterystyka badanych szyszek

Łącznie do badań pobrano 225 szyszek (po 75 małych, średnich i dużych). W zbiorze najmniejsza szyszka miała masę początkową 3,586 g, a największa – 18,041 g. Średnia długość szyszek wynosiła 45,38 mm (od 31,00 do 65,00 mm), a grubość 22,0 mm (od 16,40 do 30,2 mm).

Według innych badaczy (Sokołowski 1931; Staszkiwicz 1968; Białobok 1993) szyszki sosny zwyczajnej pochodzące z terenów Europy mają długość od 19 do 70 mm, a grubość od 12 do 35 mm, zatem badane szyszki mieszczą się w podanych granicach dla obydwu parametrów wielkościowych.

Analiza wykazała istotną zależność między długością szyszki ( $h$ ) i jej grubością ( $d$ ) ( $R=0,9162$ ). Wynika z niej, że zwiększenie grubości szyszki o 1 mm powoduje przyrost długości o około 2,15 mm. Według Staszkiwicza (1968) przyrost ten jest mniejszy i wynosi 1,70 mm.

Wyznaczono zależności między masą początkową ( $m_p$ ) oraz długością ( $h$ ) i grubością ( $d$ ) szyszek, które opisują równania (4) i (5).

$$h = 2,1935 m_p + 27,365 \quad (4)$$

$$d = 0,9475 m_p + 14,214 \quad (5)$$

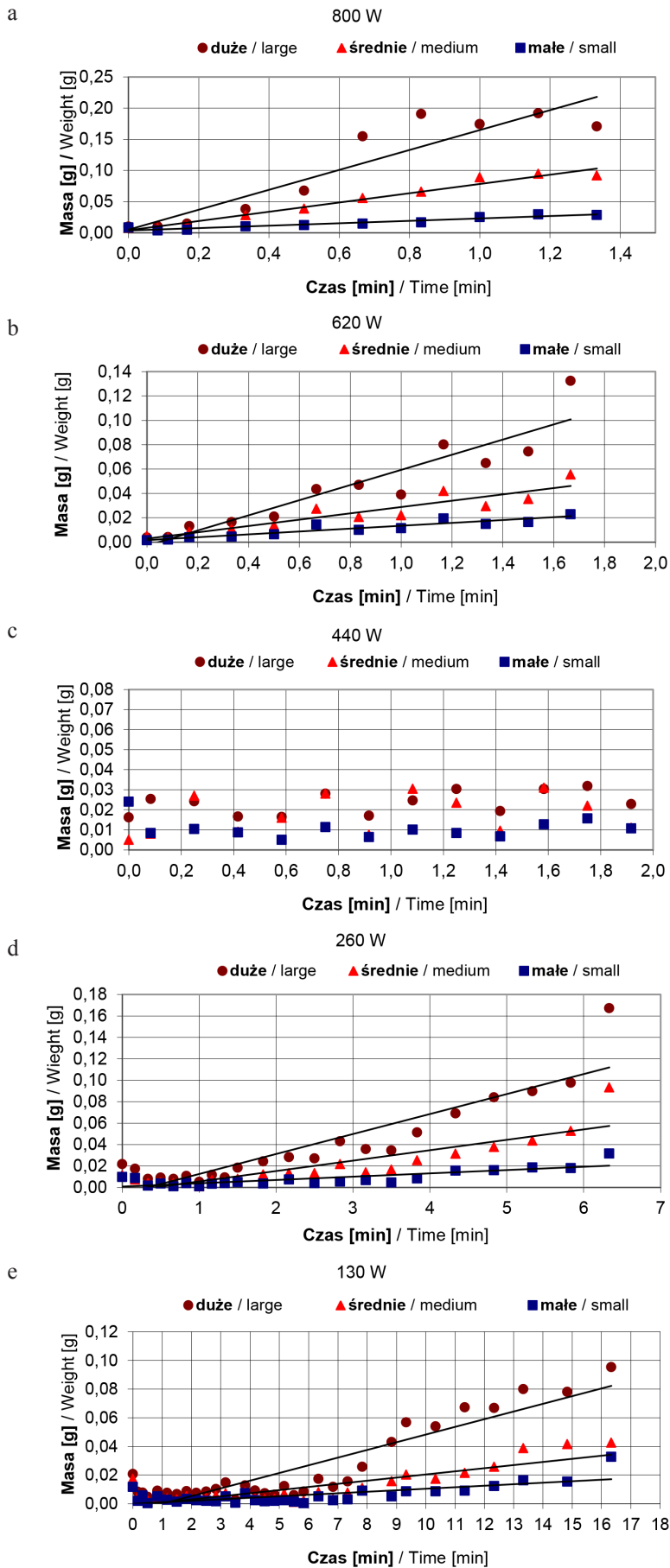
Wzrost masy początkowej szyszki o 1 gram skorelowany jest ze wzrostem długości szyszki o około 2,2 mm ( $R=0,9363$ ), a grubość prawie o 1 mm ( $R=0,9469$ ).

#### 3.2. Zmiana masy, zawartości wody i szybkości suszenia szyszek

Wartości zmiany masy wszystkich szyszek z grupy: małych, średnich i dużych w poszczególnych pięciu partiach uśredniono. Średnią zmianę masy szyszek poddanych promieniowaniu mikrofalowemu dla każdej mocy pokazano na wykresach (ryc. 1 a–e). Dla trzech grup szyszek, różniących się masą, wyznaczono linie trendu i opisano równaniami liniowymi (6), których wartości współczynników  $a$  i  $c$  oraz korelacji podano w tabeli 1.

$$m(\tau) = a\tau + c \quad (6)$$

W tabeli 1 nie podano współczynników równań dla szyszek poddanych działaniu promieniowania mikrofalowego 440 W, ponieważ nie udało się uzyskać statystycznej wartości współczynnika korelacji dla linii trendu, opisanej równaniem pierwszego stopnia.



Rycina 1. Zmiana masy szyszek małych, średnich i dużych pod wpływem promieniowania mikrofalowego o różnej mocy: a – 800 W, b – 620 W, c – 440 W, d – 260 W i e – 130 W

Figure 1. Weight change of small, medium and large cones under the influence of radiation-microwave with different power: a – 800 W, b – 620 W, c – 440 W, d – 260 W, e – 130 W

**Tabela 1. Współczynniki równań liniowych ( $a$  – kierunkowy,  $c$  – stały) opisujących zmianę masy szyszek pod wpływem promieniowania mikrofalowego**Table 1. The coefficients of linear equations ( $a$  – way,  $c$  – constant) describing the change in the weight of the cone under the influence of microwave radiation

Moc Power [W]	Wielkość szyszki Size cones	Współczynnik Coefficient $a$	Współczynnik Coefficient $c$	Współczynnik Coefficient $R$
800	duża / large	0,1598	0,0051	0,9286
	średnia / medium	0,0743	0,0039	0,9857
	mała / small	0,0193	0,0037	0,9613
620	duża / large	0,0622	-0,0029	0,9294
	średnia / medium	0,0258	0,0030	0,9260
	mała / small	0,0117	0,0017	0,9381
260	duża / large	0,0187	-0,0062	0,9073
	średnia / medium	0,0097	-0,0042	0,8769
	mała / small	0,0031	0,0007	0,8069
130	duża / large	0,0054	-0,0053	0,9018
	średnia / medium	0,0022	-0,0013	0,8395
	mała / small	0,001	0,00002	0,7235

W równaniu (6) współczynnik  $c$  jest stałą i wyznacza punkt przecięcia linii regresji z osią Y. Dla pięciu równań ma on wartość ujemną, a dla pozostałych wartość dodatnią. Parametr  $a$  jest współczynnikiem kierunkowym mówiącym o stopniu nachylenia linii regresji względem osi X. Im wyższa wartość, tym większy kąt między osią X a linią regresji. Największy kąt nachylenia zaobserwowano dla szyszek dużych i mocy 800 W.

Czas przebywania szyszek w mikrofalówce przy mocy 800 W wynosił 1,5 min (0,025 s), przy mocy 660 W – 1,8 min (0,030 h), przy 440 W – 4,8 min (0,080 h), 260 W – 7,2 min (0,120 h) i 130 W – 18 min (0,300 h). Krzywe suszenia pokazane na rysunku 2 wskazują, że duży wpływ na czas suszenia ma natężenie promieniowania. Zwiększenie mocy z 130 do 800 W powoduje skrócenie czasu suszenia średnio o 16,5 min (0,275 h).

Ubytek masy związany jest z mocą mikrofal, ale i z czasem oddziaływania na szyszki promieni elektromagnetycznych. Przy mocy 800 W największy był ubytek masy dużych szyszek. W czasie 1,5 min – ponad jeden gram, co stanowi 8% ubytku masy. Z kolei przy mocy 130 W dla dużych szyszek taki ubytek masy osiągnięto dopiero po 18 minutach. W tabeli 2 podano wartości ubytku masy w gramach i procentach pod wpływem promieniowania mikrofalowego.

Średni ubytek masy wyrażony w procentach dla wszystkich dużych szyszek wynosił 8,4%, dla średnich – 6,9%, a dla małych – 5,9%.

Z kolei wilgotność po zakończeniu stosowania promieniowania mikrofalowego promieniowania wynosiła odpowiednio: 16,2%, 17,7% i 18,3%.

W tabeli 2 podano wartości średniej wilgotności odpowiadające początkowi otwierania się łusek, obliczone dla trzech wielkości szyszek i czterech wartości mocy promieniowania mikrofalowego (800, 440, 260 i 130 W). W tabeli 2 brak jest danych dla mocy 620 W.

Badania szyszek do momentu początkowego rozchylenia się łusek wykazały, że niezależnie od zastosowanej mocy, wilgotność początku otwarcia łusek mieściła się w granicach od 18,3% do 24,0%. Zauważono, że im wyższa była wilgotność początkowa szyszek, tym wyższa była wilgotność początku rozchylenia się łusek. Różnica między wartością początkową a wartością początku otwarcia dla wszystkich badanych dużych szyszek była mniejsza niż dla małych. Wynika z tego, że małe szyszki wymagają odparowania większej ilości wody, aby mogły rozchylić swoje łuski niż duże szyszki.

Szczegółowa analiza porównawcza wartości początku otwarcia szyszek w zależności od zastosowanej mocy wykazała, że szyszki poddane promieniowaniu mikrofalowemu przy 800 W miały najwyższą wilgotność początku otwarcia – 22,5%, a przy 130 W – najniższą, około 20%. Różnica pomiędzy tymi wartościami wyniosła średnio dla dużych szyszek – 1,7%, dla średnich – 2,7%, a dla małych – 3,3%. Przy czym różnica w wilgotności początkowej pomiędzy nimi wynosiła odpowiednio 2,3%, 0,2% oraz 1,1%.

Na rysunku 2 (a – c) przedstawiono zmianę zawartości wody w czasie dla pięciu mocy promieniowania mikrofalowego podczas podsuszania szyszek. Zawartość wody zmniejszała się w zależności od mocy mikrofal, najszybciej przy najwyższej mocy, a najwolniej przy najniższej. Suszenie szyszek w kuchence mikrofalowej w porównaniu z suszeniem

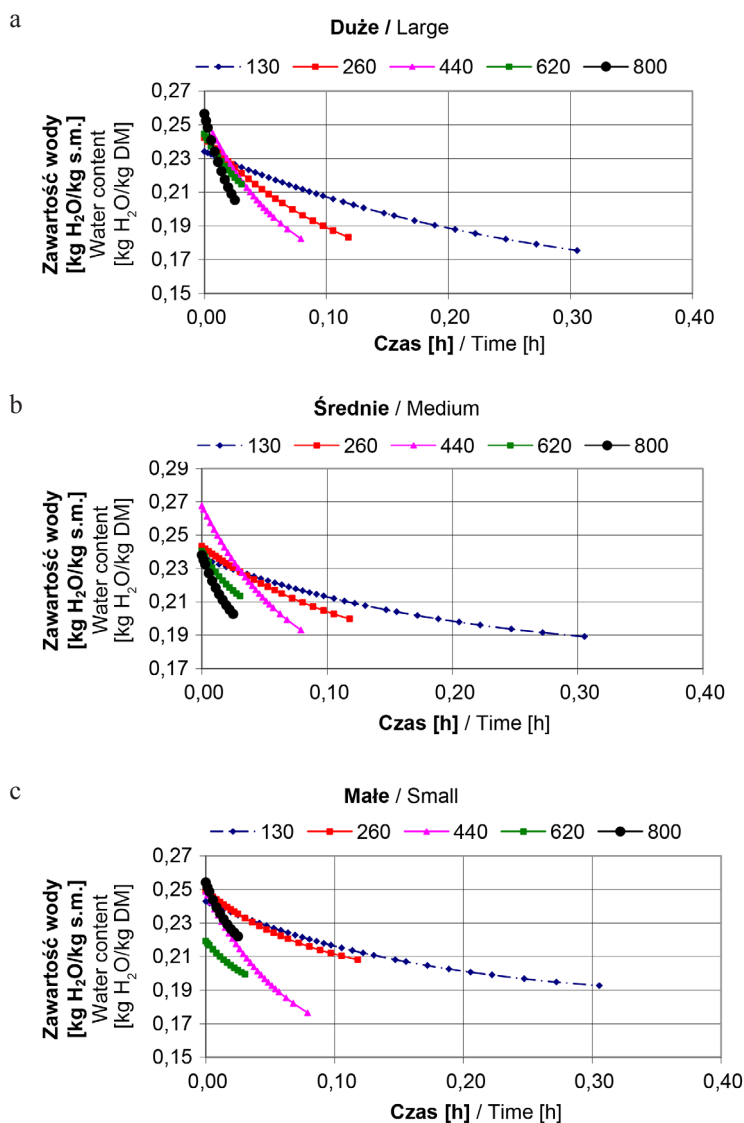
**Tabela 2. Średnie wartości ubytku masy i wilgotności dla pięciu mocy promieniowania i trzech wielkości szyszek**  
 Table 2. The mean values of weight loss and humidity for five radiation output and three sizes of cones

Moc Power [W]	Czas Time [h]	Wielkość Szyszki Size cones	Ubytek masy Weight loss [g]	Ubytek masy względem masy suchej Weight loss weight dry [%]	Wilgotność początkowa Initial humidity [%]	Wilgotność początku otwarcia Initial humidity open [%]	Wilgotność po zakończeniu promieniowania Humidity after the end of radiation [%]
800	0,025	duża large	1,020	8,33	25,66	22,40	17,33
		średnia medium	0,491	5,78	23,80	22,60	18,02
		mała small	0,155	4,72	25,41	22,30	20,69
620	0,030	duża large	0,541	5,35	24,45	b.d.	19,10
		średnia medium	0,275	4,41	24,05	b.d.	19,64
		mała small	0,129	3,26	21,91	b.d.	18,65
440	0,080	duża large	0,836	10,42	25,50	21,90	15,08
		średnia medium	0,624	11,01	26,89	21,60	15,88
		mała small	0,411	10,14	24,75	20,50	14,61
260	0,120	duża large	0,872	9,45	24,21	21,00	14,76
		średnia medium	0,433	7,07	24,32	21,70	17,25
		mała small	0,182	5,46	24,89	20,90	19,43
130	0,300	duża large	0,790	8,46	23,42	20,70	14,96
		średnia medium	0,348	6,04	23,64	19,90	17,60
		mała small	0,188	5,95	24,28	19,00	18,33

w suszarce konwekcyjnej przebiegało znacznie szybciej. Związane jest to z temperaturą suszenia. Fale elektromagnetyczne, działając na materiał (szyszki), powodują jego nagrzewanie do ponad 100°C, zaś podczas tradycyjnego luszczania – do 60°C (Aniszewska, 2013).

Ubytek wody z szyszek od wilgotności początkowej do zaobserwowanego początku otwarcia wynosi średnio ponad 3%. Przy czym czas działania promieni elektromagnetycznych dla poszczególnych mocy jest zmienny i wynosi do 0,3 h, najkrótszy dla mocy 800 W, a najdłuższy dla mocy

130 W (tab. 2). Przy suszeniu metodą konwekcyjną w warunkach laboratoryjnych (Aniszewska 2004, 2012a) początek otwarcia szyszek następuje po 3–4 godzinach, zaś wilgotność szyszek w tym czasie zmniejszała się średnio o 4–5%. Z kolei porównując wartość ubytku wody z szyszek poddanych działaniu fal elektromagnetycznych z suszeniem konwekcyjnym w warunkach produkcyjnych, to początek otwarcia szyszek tych ostatnich następował po około 16 godzinach (czas luszczania zależy od wilgotności szyszek oraz parametrów powietrza suszącego). Porównanie procesu suszenia meto-



**Rycina 2. Zmiana zawartości wody w szyszkach: a – dużych, b – średnich i c – małych, pod wpływem promieniowania mikrofalowego o mocy: 800, 620, 440, 260 i 130 W**

Figure 2. Change of water content in the cones: a – large, b – medium – small under the influence of microwave radiation power: 800, 620, 440, 260 and 130

dą tradycyjną (w suszarce konwekcyjnej) i z zastosowaniem promieniowania mikrofalowego na szyszkach sosny kalifornijskiej (*Pinus radiata* D. Don) wykonał Rukuni (1997). Stwierdził, że najlepiej łuszczyć szyszki w szafie – suszarce w temperaturze do 60°C oraz w mikrofalach przez 30 sekund. W przypadku drugiego sposobu łuszczenia, aby pozyskać dobre jakościowo nasiona, należy szyszki przed umieszczeniem w mikrofalówce moczyć w ciepłej wodzie.

W tabeli 3 zamieszczono parametry modelu zmiany zawartości wody (2) i szybkości suszenia (3), wyznaczone dla badanych partii szyszek dużych, średnich i małych oraz pięciu mocy.

Dla największej mocy współczynnik  $b$  wynosił ponad 30, a dla najmniejszej ponad 4,5 (tab. 3).

Wykresy szybkości suszenia szyszek w zależności od czasu promieniowania mikrofalowego pokazano na rysunku 4.

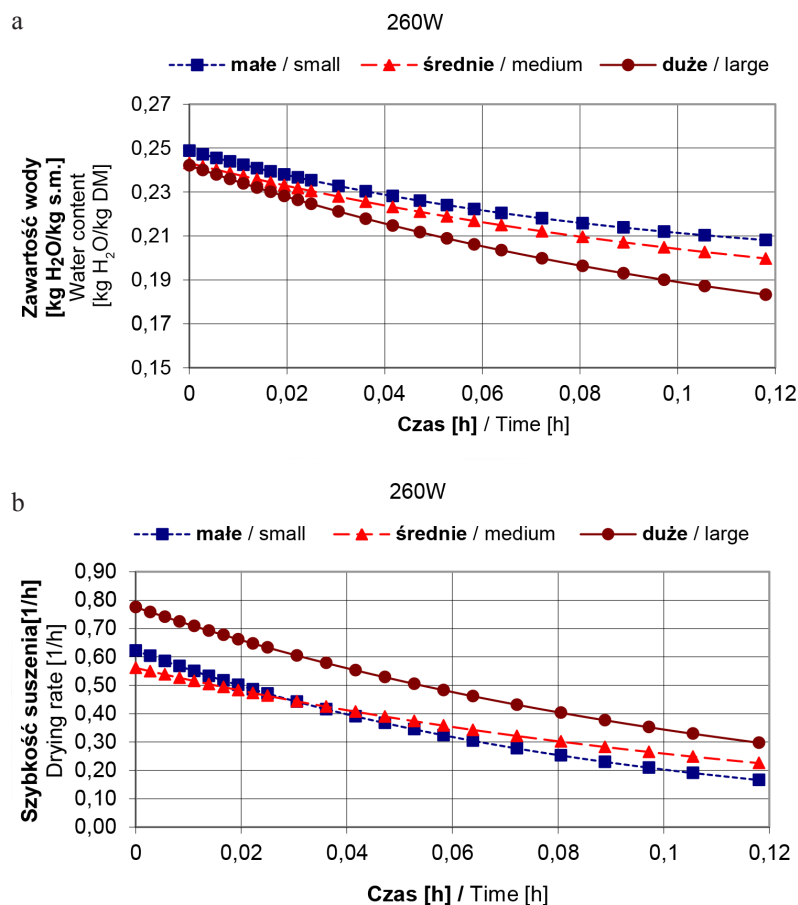
Zaobserwowano, że szybkość suszenia i jej zmiany są tym większe, im większe są szyszki i większa moc promieniowania. Można zauważyć, że szybkość suszenia zmienia się w sposób zbliżony do zależności liniowej.

### 3.3. Zmiana temperatury powierzchni szyszki

Dzięki zarejestrowanym obrazom z kamery termowizyjnej opisano zmianę temperatury powierzchni pojedynczej szyszki podczas promieniowania mikrofalowego. W tabeli 4 podano czas promieniowania, minimalną i maksymalną temperaturę dla poszczególnych mocy.

Temperatura powietrza wewnątrz mikrofalach podczas kolejnych prób wynosiła około 24°C, zaś w pomieszczeniu panowała temperatura około 22°C i wilgotność powietrza 50%.

Początkowo temperatura zewnętrznych warstw łusek zamkniętej szyszki odczytana ze zdjęć wykonanych kamerą termowizyjną wynosiła około 16°C. Na podstawie zdjęć stwierdzono, że w środku jej długości temperatura wynosiła średnio 7°C (szyszki przed badaniem przetrzymywane były w chłodni). Pod wpływem działania fal elektromagnetycznych temperatura na powierzchni szyszki intensywnie wzrosła do 100°C. Wartość temperatury bliską 100 stopni pojedyncza szyszka osiągnęła już po 5 s promieniowania przy 800 W, zaś



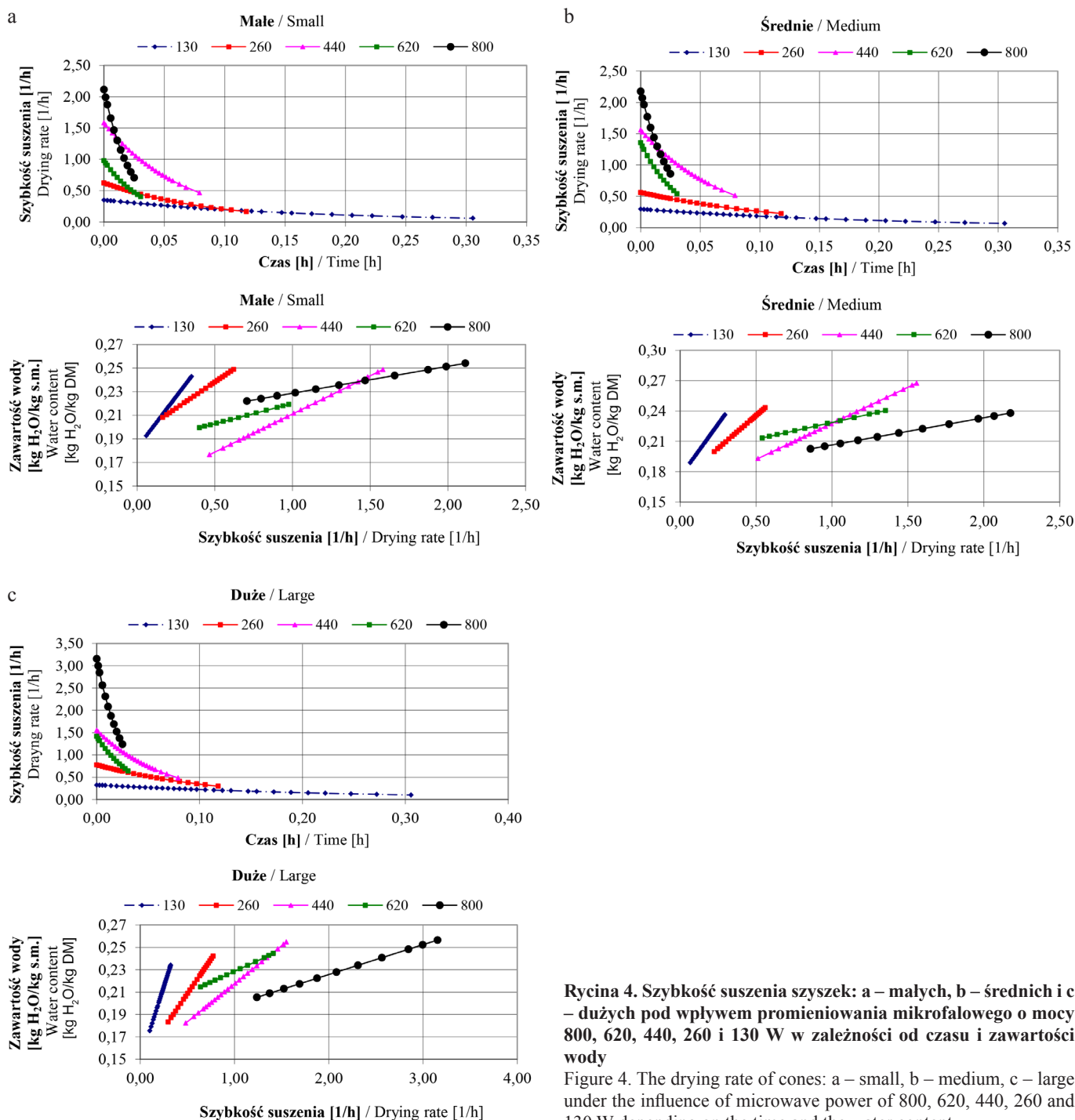
Rycina 3. Zmiany zachodzące w szyszkach małych, średnich i dużych, pod wpływem promieniowania mikrofalowego o mocy 260 W, pod względem: a – zawartości wody, b – szybkości suszenia

Figure 3. The changes in cones of small, medium and large size under the influence of microwave radiation with a power of 260 W, in terms of: a – water content, b – drying rate

Tabela 3. Parametry modelu zmiany zawartości wody i szybkości suszenia w trakcie poddawania promieniowaniu mikrofalowemu dużych, średnich i małych szyszek

Table 3. The model parameters changes in water content and the drying rate when subjected to microwave irradiation of large size, medium and small cones

Moc Power [W]	Wielkość szyszki Size cones	Zawartość początkowa wody [kg H <sub>2</sub> O/kg s.m.] Initial water [kg H <sub>2</sub> O/kg DM]	Zawartość końcowa wody [kg H <sub>2</sub> O/kg s.m.] Final water [kg H <sub>2</sub> O/kg DM]	Współczynnik Coefficient <i>b</i>
		$u_o$	$u_k$	
800	duża / large	0,2565	0,1723	37,464
	średnia / medium	0,2380	0,1796	37,222
	mała / small	0,2540	0,2059	43,846
620	duża / large	0,2445	0,1899	25,920
	średnia / medium	0,2404	0,1950	30,006
	mała / small	0,2191	0,1856	29,113
440	duża / large	0,2547	0,1495	14,736
	średnia / medium	0,2675	0,1565	14,026
	mała / small	0,2487	0,1463	4,055
260	duża / large	0,2421	0,1466	8,0121
	średnia / medium	0,2432	0,1705	7,722
	mała / small	0,2488	0,1933	11,202
130	duża / large	0,2341	0,1485	3,785
	średnia / medium	0,2364	0,1749	5,768
	mała / small	0,2428	0,1822	5,784



Rycina 4. Szybkość suszenia szyszek: a – małych, b – średnich i c – dużych pod wpływem promieniowania mikrofalowego o mocy 800, 620, 440, 260 i 130 W w zależności od czasu i zawartości wody

Figure 4. The drying rate of cones: a – small, b – medium, c – large under the influence of microwave power of 800, 620, 440, 260 and 130 W depending on the time and the water content

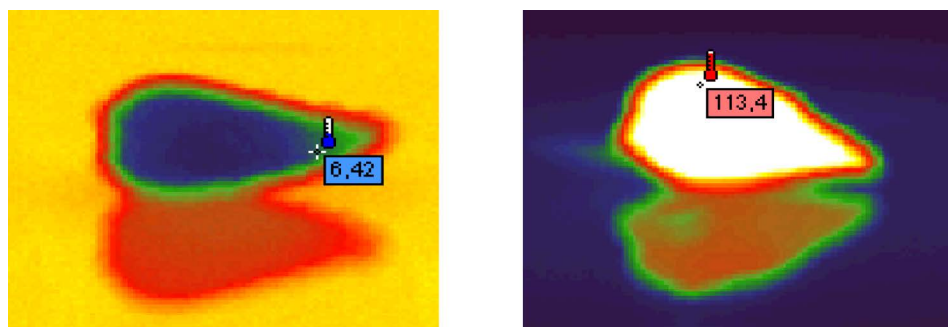
po 20 s – przy 620 W, po 25 s przy 440 W i 260 W, a dopiero po 150 s przy 130 W. W kolejnych etapach temperatura wzrosła do 120°C. Wyjątek stanowiły szyszki poddane promieniowaniu o mocy 130 W. W tym przypadku maksymalna temperatura powierzchni szyszki w badanym czasie wynosiła 100°C. Podaną maksymalną temperaturę powierzchni zewnętrznej zarejestrowano w połowie długości szyszki (tab. 4).

Obszar o temperaturze 100°C w kolejnych sekundach procesu ogrzewania powiększał się, aż objął 100% powierzchni szyszki (ryc. 5).

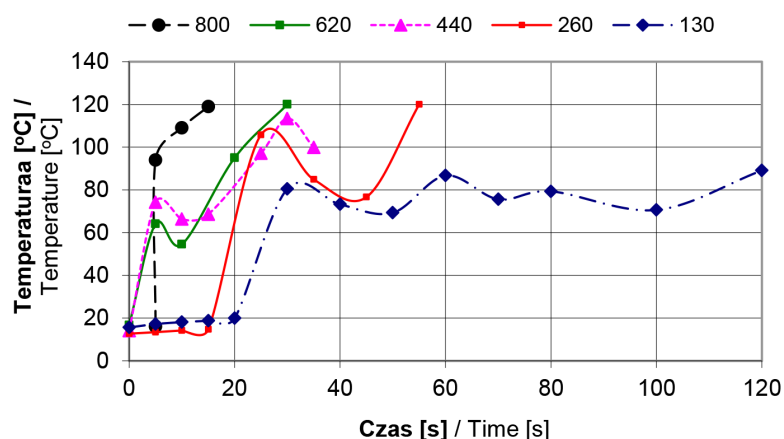
Na rysunku 6 pokazano wartości maksymalnej temperatury osiągniętej w kolejnych sekundach promieniowania PMF na powierzchni pojedynczej szyszki w zależności od zastosowanej mocy. Można zauważyć, że przy mocy od 130 do 620 W temperatura zanim osiągnęła 100°C, ulegała naprzemiennemu wzrostowi i spadkowi. Spowodowane to było pracą magnetronu, który emitował fale elektromagnetyczne zależnie od nastawionej mocy mikrofal. Magnetron w mikrofalówce charakteryzuje się tym, że nie ma możliwości sterowania ilością mikrofal emitowanych przez elektrody. Dlatego aby było

**Tabela 4. Średnie wartości minimalnej i maksymalnej temperatury szyszek w czasie ogrzewania przy mocy 800, 620, 440, 260 i 130W**  
 Table 4. Mean values of the minimum and maximum temperatures of cones during heating at a power of 800, 620, 440, 260 and 130 W

Moc Power [W]	Numer próby Number	Czas Time [s]	Temperatura powierzchni szyszek The surface temperature of cones [°C]	
			minimalna minimum	maksymalna maximum
800	1	0	6,4	16,0
	2	5	52,0	94,0
	3	5	69,0	109,0
	4	5	79,0	119,0
620	1	0	7,0	16,7
	2	5	42,0	64,1
	3	5	40,0	54,5
	4	10	60,0	95,0
	5	10	76,0	120,0
440	1	0	9,0	14,0
	2	5	45,0	74,2
	3	5	42,0	66,3
	4	5	50,0	68,6
	5	10	71,0	97,1
	6	5	75,0	113,4
	7	5	68,0	99,8
260	1	0	18,0	12,7
	2	5	19,5	13,4
	3	5	19,0	14,2
	4	5	20,3	14,7
	5	10	70,0	105,8
	6	10	55,5	84,9
	7	10	48,4	76,6
	8	10	76,0	120,0
130	1	0	23,8	15,6
	2	5	23,3	17,2
	3	5	22,7	18,1
	4	5	22,3	18,8
	5	5	25,3	19,9
	6	10	51,0	80,5
	7	10	45,0	73,2
	8	10	44,0	69,3
	9	10	52,0	86,7
	10	10	47,9	75,6
	11	10	51,0	79,3
	12	20	45,3	70,6
	13	20	60,7	89,1



Rycina 5. Zdjęcie przykładowej szyszki nagrzanej promieniami elektromagnetycznymi 620 W: a – przed , b – po 20 s  
Figure 5. Example of picture cones heated by electromagnetic radiation 620 a – before, b – after 20 s



Rycina 6. Zmiana wartości maksymalnej temperatury powierzchni szyszki pod wpływem promieniowania mikrofalowego

Figure 6. Changes of the maximum surface temperature of cones under the influence of microwave radiation

można sterować czasem nagrzewania, steruje się czasem podawania napięcia na magnetron. Przy najmniejszym poborze mocy lampa pracuje na pełnej mocy, aczkolwiek przez okres kilku sekund, po czym następuje kilkudziesięciosekundowa przerwa. Przy zwiększeniu mocy okres nagrzewania wydłuża się, a czas przerwy skraca, co pokazano na rysunku 5.

#### 4. Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone badania wykazały, że wzrost mocy promieniowania mikrofalowego pozwala na skrócenie czasu odparowania wody z szyszek i ich nagrzania, przez co zostaje przyspieszony moment otwarcia się pierwszych łusek. Przy zastosowaniu mocy 800 W było to 1,5 min, a przy 130 W – 18 minut, przy czym ubytek masy w obu przypadkach wynosi około 3–4% (na początku otwarcia łusek).

Stosowanie zaproponowanego wstępnego etapu promieniowania mikrofalowego w tradycyjnym procesie suszenia może istotnie skrócić czas łuszczenia. Atutem zmodernizowanej metody łuszczenia jest krótki czas osiągnięcia efektu początkowego odchylenia łusek. Aby jednak móc zastosować metodę należy dobrać odpowiednią moc mikrofal i czas napromieniania szyszek, które nie wpłyną negatywnie na jakość nasion.

1. Najlepszym wariantem spośród badanych jest moc promieniowania 620 W i czas oddziaływania mikrofal nie dłuższy niż 20÷30 s, co potwierdzają badania Rukuniego (1997).

2. Do opisu zmiany zawartości wody w szyszkach i szybkości suszenia pod wpływem promieniowania można zastosować równanie wykładnicze odpowiadające drugiemu okresowi suszenia ciał stałych.

3. Stwierdzono, że małe szyszki potrzebują więcej czasu do odparowania wody i początku otwarcia pierwszych łusek niż średnie i duże. Zatem przy ewentualnym stosowaniu tej metody wskazana jest wstępna segregacja szyszek.

4. Zastosowanie kamery termowizyjnej w badaniach pozwala na ocenę stopnia nagrzania powierzchni szyszki. Dla mocy 800 W – nagrzanie pojedynczej szyszki do 100°C następuje po 5–10 s, a dla 130 W po 120 s.

5. Należałoby przeprowadzić badania oceny zmiany temperatury wewnątrz szyszki pod wpływem promieniowania mikrofalowego. Należy też wykonać próby PMF jednorazowo większej liczby szyszek i sprawdzić jak rozkłada się temperatura na powierzchni i wewnątrz w kolejnych sekundach procesu.

#### Konflikt interesów

Autorzy deklarują brak potencjalnych konfliktów.

#### Podziękowania i źródła finansowania

Badania zostały sfinansowane ze środków własnych Wydziału Inżynierii Produkcji SGGW.

## Literatura

- Adair R.K. 2003. Biophysical limits on a thermal effects of RF and microwave radiation. *Bioelectromagnetics* 24, 39–48. DOI: 10.1002/Bem.10061.
- Aniszewska M. 2004. Analiza procesu cieplnego wyluszczenia nasion z szyszek sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.), praca doktorska. Wydział Leśny SGGW, Warszawa.
- Aniszewska M. 2012a. Dynamika procesu pozyskania nasion w jedno- i dwuetapowych procesach luszczania szyszek sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.). Rozprawy naukowe i monografie. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Aniszewska M. 2012b. Porównanie procesu wyluszczenia nasion sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) z szyszek całych i pozbawionych trzpienia. *Leśne Prace Badawcze* 73(1): 65–72. DOI:10.2478/v10111-012-0007-3.
- Aniszewska M. 2013. Zmiany wilgotności i temperatury szyszek sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) luszczonych dwuetapowo. *Leśne Prace Badawcze* 74(3): 205–214. DOI: 10.2478/frp-2013-0020.
- Aniszewska M., Zychowicz W. 2008. Koszty luszczania szyszek w nowoczesnych wyluszczeniach gospodarczych. Monografia, Tendencje i problemy techniki leśnej w warunkach leśnictwa wielofunkcyjnego, Poznań, 177–182.
- Antosiewicz Z. 1979. Wpływ temperatury i wilgotności powietrza na jakość nasion sosny i świerka w czasie luszczania szyszek. *Las Polski* 6: 11–12.
- Ballad L/A.T., Nelson S.O., Bruchwald S.O., Sterson L.E. 1976. Effects of radiofrequency electric field on permeability to water some legume seed. *Seed Science and Technology* 4: 257–274.
- Białobok S., Baratyński A., Bugała W. 1993. Biologia sosny zwyczajnej. Poznań – Kórnik, Polska Akademia Nauk, Instytut Dendrologii, 624 s.
- Bogdanow B. P. 1966. O suszkie szyszek w wakuumie. *Lesnoje chozjajstwo* 3, 57–60.
- Bruchwald A. 1997. Statystyka matematyczna dla leśników. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Cieśla A., Kraszewski W., Skowron M., Syrek P. 2015. Wpływ działania pola magnetycznego na kiełkowanie nasion. *Przegląd Elektrotechniczny* 91(1): 125–128. DOI 10.15199/48.2015.01.25.
- Jakubowski T. 2008. Wpływ napromieniowania mikrofalowego na dynamikę wzrostu kiełków bulwy ziemniaka. *Inżynieria Rolnicza* 5(103): 7–13.
- Khraisheh M.A.M., Mcminn W.A.M., Magee T.R.A. 2004. Quality and structural changes in starchy food during microwave and convective drying. *Food Research International* 37(5): 497–503. DOI: 10.1016/j.foodres.2003.11.010.
- Krajewski A. 1990a. Możliwość zastosowania mikrofal do dezynsekcji iglastego drewna budowlanego. Wydawnictwo PKZ, Warszawa.
- Krajewski A. 1990b. Zwalczanie owadów – szkodników technicznych drewna za pomocą mikrofal. *Ochrona Zabytków* 168(1): 27–34.
- Krajewski A. 2001. Fizyczne metody dezynsekcji drewna dóbr kultury. Rozprawy naukowe i monografie. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Maskan M. 2001. Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwi fruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering* 48(2): 177–182.
- Nelson S.O. 1985. RF and microwave energy for potential agricultural applications. *Journal Microwave Power* 28: 65–70.
- Pabis S. 1982. Teoria konwekcyjnego suszenia produktów rolniczych. Warszawa, PWRiL, 228 s.
- Pietruszewski S., Kania K. 2011. Wpływ promieniowania mikrofalowego na kinetykę kiełkowania nasion łubinu białego i grochu konsumpcyjnego. *Acta Agrophysica* 18(1): 121–129.
- Pinkrová J., Hubáčková B., Kadlec P., Prihoda J., Bubník Z. 2003. Changes of Starch during microwave treatment of rice. *Czech Journal of Food Sciences* 21(5): 176–184.
- Rukuni D. 1997. Seed Extraction Methods and Quality Effects in *Pinus radiata* D. Don. Master thesis of Applied Science in Seed Technology at Massey University, Palmer North, New Zealand, 1–88.
- Słowiński K. 2013. Wpływ promieniowania mikrofalowego wyemitowanego do nieodkazanego podłoża szkółkarskiego na przeżywalność i wybrane cechy jakościowe sadzonek sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.). Zeszyty naukowe Uniwersytetu Rolniczego im. Hugona Kołłątaja w Krakowie 517, Rozprawy 394.
- Sokołowski S. 1931. Prace biometryczne nad rasami sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris*) na ziemiach Polski. Prace Rolniczo-Leśne PAU 5, 1–106.
- Statistica 10. 2011. Start Soft. www.statsoft.com [18.09.2015].
- Staszkiwicz J. 1968. Badania nad sosną zwyczajną z Europy południowo-wschodniej i Kaukazu oraz jej stosunkiem do sosny z innych obszarów Europy, oparte na zmienności morfologicznej szyszek – Investigations on *Pinus sylvestris* L. from south-eastern Europe and from Caucasus and its relation the pine from other territories of Europe. *Fragmenta Floristica et Geobotanica Polonica* 14(3): 259–315.
- Thuery J. 1992. Microwaves: Industrial, Scientific and Medical Applications. Artech Houses Publishers, Norwood. 692.
- Velázquez-Martí B., Gracia-López C., Marzal-Domenech A. 2006. Germination inhibition of undesirable seed in the soil using microwave radiation. *Biosystems Engineering* 93(4): 365–373. DOI:10.1016/j.biosystemseng.2006.01.005.
- Warchalewski J.R., Dolińska R., Błaszczak W. 2007. Analiza mikroskopowa ziarna pszenicy dwu pokoleń wyhodowanych z nasion ogrzanych mikrofalami. *Acta Agrophysica* 10(3): 727–737.

## Zmiana masy i temperatury powierzchni szyszek sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) pod wpływem promieniowania mikrofalowego

The change in weight and surface temperature of pine cones (*Pinus sylvestris* L.)  
as a result of microwave irradiation

Monika Aniszewska 

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Wydział Inżynierii Produkcji, Katedra Maszyn Rolniczych i Leśnych,  
ul. Nowoursynowska 164, 02-787 Warszawa

Tel. +48 22 5934520, e-mail: monika\_aniszewska@sggw.pl

**Abstract.** In this article the author investigates the change of weight and temperature of pine cones in a microwave oven over the following range of microwave radiation power (PMF): 800, 620, 440, 260 and 130 W.

Cones were divided into groups according to their weight and the author examined the influence of PMF on their water content and drying rate. The process is described with the help of mathematical equations and curves. The cones were irradiated in the microwave until all cones of the given group began to open the first scales. Small cones required longer exposure times to PMF than medium and large cones in order to cause scale opening. The most efficient of the five settings was a radiation power of 620W with an exposure time to microwaves for no longer than 20 seconds.

In the second part of the study, the author analyses the changes of temperature on the cone surface using a thermal imaging camera. The values of surface temperature depended on radiation power and the duration of irradiation.

**Keywords:** seed extraction, microwave oven, water quantity, drying rate

### 1. Wstęp

Aby pozyskać nasiona gatunków iglastych, w tym sosny zwyczajnej, świerka pospolitego, modrzewia europejskiego i jodły pospolitej, należy poddać szyszki procesowi łuszczenia, który jest pracochłonny i długotrwały. Poszukuje się metod, które usprawnią ten proces.

Podjęmowano wiele prób mających na celu skrócenie procesu wyłuszczenia. Podwyższano temperaturę suszenia (Antosiewicz 1979), obniżano ciśnienie (Bogdanow 1966), mechanicznie zmniejszono wielkość szyszek poprzez odcięcie podstawy, segregowano szyszki na grupy różniące się wymiarami (małe, średnie, duże), stosowano moczenie w wodzie podczas etapowego procesu suszenia (Aniszewska 2012a, 2013). Pomimo prowadzonych badań nie udało się znacząco skrócić czasu łuszczenia. Jednym z powodów jest duża wrażliwość nasion na czynniki zewnętrzne. Żle dobrane parametry łuszczenia szyszek powodują uszkodzenie nasion.

W ostatnich latach w Polsce nastąpiła znaczna poprawa w dziale nasiennictwa. Dzięki licznym inwestycjom zbudowano nowe i zmodernizowano stare obiekty infrastruktury

technicznej, m.in. wyłuszczenie, przechowanie, stacje oceny i kontroli nasion, w których wdrożono nowe technologie. Powstałe obiekty charakteryzują się dużą powierzchnią i przeznaczone są do przerobu znacznej masy łuszczonego materiału rozmnożeniowego. Aby koszty łuszczenia w takich obiektach były niższe, należy dysponować dużą liczbą szyszek dostarczanych regularnie, co w roku nienasiennym może być trudne do osiągnięcia. W takich latach koszty łuszczenia są zwykle wysokie i przekraczają nawet 15,00 PLN/kg szyszek (bez uwzględnienia amortyzacji obiektów) (Aniszewska, Zychowicz 2008).

W latach 60. XX wieku rozważano wyposażenie nadleśnictw mających znaczne ilości drzewostanów iglastych w niewielkie łuszcarki, umożliwiające szybkie pozyskanie nasion zebranych przez właścicieli szyszek. W rezultacie wyprodukowano ich niewielką liczbę, ponieważ nie spełniały one wymogów jakościowych. Słabym elementem urządzeń był system sterowania procesem łuszczenia, spowodowany niedostateczną wiedzą z tego zakresu i możliwościami technicznymi przemysłu suszarniczego. Obecnie, dzięki intensywnemu rozwojowi tego działu, konstrukcja tego typu

Wpłynęło: 27.04.2015 r., recenzowano: 18.08.2016 r., zaakceptowano: 21.10.2015 r.

urządzeń nie jest już problemem. Próba opracowania wytucznych do skonstruowania nowych niedużych urządzeń wyluszczańskich wykorzystywanych do maksymalizacji ilości pozyskanych nasion wydaje się być słuszna. W takich to urządzeniach, w których można by było łuszczyć małe partie szyszek, można zastosować udoskonalony proces łuszczenia.

Zaproponowano zastosowanie promieni elektromagnetycznych (mikrofal) w pierwszym etapie procesu jedno- lub dwuetapowego łuszczenia szyszek w celu obniżenia początkowej wilgotności szyszek, a tym samym skrócenia czasu odchylania się łusek od trzpienia. Na początku pierwszego etapu proponowane jest krótkotrwałe napromieniowanie szyszek. Ta faza pierwszego etapu procesu pozwala na szybki ubytek wody z zamkniętych szyszek, który doprowadzi do spadku masy i początku otwarcia się łusek. Przez początek otwarcia łusek uważa się moment rozdzielania się poszczególnych łusek od siebie, bez widocznego odchylenia ich od trzpienia. Ten pierwszy ruch wpłynie na lepsze i intensywniejsze odgięcie się łusek i odsłonięcie nasion w kolejnej fazie łuszczenia pierwszego etapu, tzn. w szafie lub komorze łuszczańskiej.

Jednak, aby można było powszechnie stosować promieniowanie elektromagnetyczne, na początek należy szczegółowo rozpoznać, w jaki sposób mikrofały oddziałują na szyszki i znajdujące się w nich nasiona. Należy ustalić, jak długi powinien być czas oddziaływania promieniowania oraz jaka powinna być maksymalna zastosowana moc.

Celem pracy jest opis zmiany masy szyszek poddanych promieniowaniu mikrofalowemu za pomocą formuł matematycznych: zmiany zawartości wody i szybkości suszenia szyszek do momentu zaobserwowania początku otwarcia pierwszych łusek szyszek oraz charakterystyka stopnia nagrzewania się powierzchni zewnętrznej materiału przy zastosowaniu różnej mocy promieni elektromagnetycznych.

W poniższym artykule nie podjęto tematu związanego z oceną jakości nasion, jedynie badano zmianę masy, wilgotności i temperatury szyszek pod wpływem promieniowania. Ocena jakości pozyskanych nasion w szyszkach po zastosowaniu promieniowania mikrofalowego zostanie przedstawiona w kolejnych publikacjach z tego zakresu badań.

Mikrofały są falami elektromagnetycznymi, o częstotliwości od 0,3 do 300 GHz i długości fali od 0,001 do 1 m. W kuchenkach mikrofalowych stosowane są mikrofały o częstotliwości 2,45 GHz i długość fali około 120 mm. Opisane fale są odbijane przez metal i przepuszczane przez szkło, papier i większość tworzyw sztucznych. Podczas promieniowania zostaje przekazana energia materiałowi, wskutek czego w materiale podnosi się temperatura. Wzrost jej jest wynikiem oddziaływania mikrofal na cząsteczki wody. Te zostają wprawione w ruch i z dużą siłą uderzają o siebie. Zaczynają drgać, przejmując energię zaabsorbowanych mikrofal. Ostateczny efekt działania mikrofal związany jest z wilgotnością materiału, im w materiale znajduje się więcej wody, tym oddziaływanie promieniowania mikrofalowego (PMF) przebiega intensywniej.

Od lat próbowano wykorzystać oddziaływanie pola elektromagnetycznego na organizmy żywe. Fale elektromagne-

tyczne mogą być stosowane do zwiększenia żywotności nasion, poprzez zabicie patogenów znajdujących się na powierzchni okrywy (Adair 2003), eliminacji twardości okrywy nasion, dzięki temu te kiełkują szybciej (Nelson 1985; Thuery, 1992; Warchalewski et al. 2007; Pietruszewski, Kania 2011; Cieśla et al. 2015), przyspieszenia procesu suszenia owoców (np. kiwi) (Maskan 2001), warzyw (np. ziemniaków) (Khraisheh et al. 2004; Jakubowski 2008), ryżu (Pinkrová et al. 2003), niszczenia grzybów pasożytniczych, szkodników w drewnie (Krajeński A, 1990a,b, 2001). Mikrofały stosowano do dezynsekcji gleby zamiast herbicydów (Thuery 1992) czy hamowania kiełkowania nasion na powierzchniach obsiewanych (Velázquez-Martí et al. 2006). Skonstruowano urządzenie do emisji energii promieniowania mikrofalowego do gleby, które wykorzystywane jest obecnie na szklólkach leśnych (Słowiński 2013) i w szklarniach.

Ballad i inni (1976) stwierdzili też niekorzystne oddziaływanie mikrofal na nasiona. Wysuszone miały niższą laboratoryjną zdolność kiełkowania niż suszone konwekcyjnie. Według nich stopień obniżenia zdolności kiełkowania zależał od poziomu zawartości wody w nasionach. Autorzy stwierdzili, że gdy poziom wody był zbyt wysoki, to dochodziło do uszkodzenia nasion.

Zdania na temat oddziaływania fal elektromagnetycznych są podzielone i zależą od wielu czynników, np. częstotliwości czy długości fali, wilgotności, budowy i struktury materiału itd. Na podstawie dostępnej literatury nie można jednoznacznie stwierdzić, że krótkotrwałe oddziaływanie promieniowania na organizmy żywe, w tym szyszki, jest pozytywne czy negatywne.

## 2. Materiał i metody badań

Do badań pobrano szyszki sosny zwyczajnej z gospodarczych drzewostanów nasiennych (GDN) zebrane w styczniu 2015 roku i przechowywane w wyluszczańni w Rucianem Nidzie znajdującej się w Nadleśnictwie Maskulińskie (RDLP Olsztyn). Zamknięte szyszki przewieziono do laboratorium Katedry Maszyn Rolniczych i Leśnych, gdzie podzielono na 5 równych partii. W każdej partii było po 45 sztuk szyszek (w tym 15 małych, średnich i dużych). Małe miały masę do 6,0 g, średnie w granicach od 6,01 do 9,0 g, a duże – ponad 9,01 g.

Pojedyncze szyszki różnej masy kolejno poddano PMF w laboratoryjnej kuchence mikrofalowej SHARP R-200. Zastosowano pięć zakresów mocy: 130, 250, 440, 620 i 800 W. Moc mikrofały zmieniano za pomocą pokrętła regulatora w obudowie urządzenia. Na szyszki oddziaływano promieniami elektromagnetycznymi do czasu zaobserwowania początku rozchylenia się łusek każdej szyszki.

Przed rozpoczęciem badań w kuchence mikrofalowej ważono szyszki i mierzono ich parametry zewnętrzne (długość i grubość). Pomiar masy dokonywano przy pomocy wagi-suszarki laboratoryjnej WPS 210S, z dokładnością do 0,001 g, a pomiar parametrów wielkościowych za pomocą suwmiarki elektronicznej z dokładnością do 0,01 mm.

W czasie badań rejestrowano zmianę masy pojedynczej szyszki, z dokładnością do 0,001 g, początkowo co 5 s, a później co 10 lub 20 s w zależności od zastosowanej mocy.

Na podstawie pomiaru masy pojedynczych szyszek obliczano zmianę masy w czasie oddziaływania promieniowania.

Po zakończeniu badań suszono szyszki w temperaturze  $105 \pm 1^\circ\text{C}$  przez 24 godziny w celu wyznaczenia suchej masy. Pozwoliła ona na opis zmiany zawartości wody i ustalenie szybkości suszenia podczas oddziaływania promieniowania mikrofalowego.

Zmiana masy stanowiła różnicę pomiędzy dwoma kolejnymi zmierzonymi masami, natomiast zawartość wody została wyliczona jako różnica masy szyszki mierzonej po określonym czasie promieniowania mikrofalowego a jej masy suchej. Znajomość masy wody w szyszce i jej masy suchej pozwoliła na obliczenie wilgotności bezwzględnej w % według wzoru:

$$W = \frac{m_p - m_s}{m_s} \cdot 100\% \quad (1)$$

gdzie:

$m_p$  – masa początkowa szyszki,

$m_s$  – masa suchej szyszki.

Do opisu zmian zawartości wody w szyszkach zastosowano równanie wykładnicze odpowiadające drugiemu okresowi suszenia ciał stałych (Pabis 1982).

$$u = (u_0 - u_k) \cdot e^{(-b \cdot \tau)} + u_k \quad (2)$$

gdzie:

$u_0$  – zawartość początkowa wody w szyszce,

$u_k$  – zawartość końcowa wody w szyszce,

$e$  – podstawa logarytmu naturalnego,

$\tau$  – czas,

$b$  – współczynnik podatności szyszki na zmianę zawartości wody.

Zawartość początkową wody można regulować przez poddanie szyszek wstępnemu podsuszaniu, natomiast wartość końcowa zależy od czynnika suszącego. Współczynnik  $b$  wyznaczono dla każdej szyszki na podstawie rzeczywistego przebiegu zmian zawartości wody (Aniszewska 2012b). Jest on parametrem charakteryzującym podatność szyszki na zmianę zawartości wody w określonych warunkach.

Szybkość suszenia obliczono jako pochodną względem czasu aktualnej zawartości wody ( $u$ ) według wzoru:

$$\frac{du}{d\tau} = -b \cdot (u_0 - u_k) \cdot e^{(-b \cdot \tau)} \quad (3)$$

Za pomocą równania wykładniczego zmiany zawartości wody i szybkości suszenia opisano etap napromieniowywania mikrofalowego szyszek.

W czasie trwania procesu rejestrowano temperaturę i wilgotność powietrza za pomocą miernika Hygro-Palm.

Podczas badań pojedynczym szyszkom wykonywano zdjęcia kamerą termowizyjną VIGOCAM V50. Za jej pomocą rejestrowano co 5, 10 lub 20 s zmianę temperatury szyszki na zewnętrznej powierzchni do momentu początku rozchylenia się łusek. Podczas zdjęć zamknięte szyszki leżały na boku na talerzu mikrofalowym.

Zdjęcia posłużyły do analizy zmiany temperatury w kolejnych etapach trwania promieniowania mikrofalowego w zależności od mocy mikrofal. Do obróbki zdjęć wykorzystano program Therma. Dokładność rejestracji temperatury wynosiła  $0,1^\circ\text{C}$ .

Do analizy statystycznej wyników wykorzystano program statystyczny Statistica 10 oraz testy dla małej liczebności próbki (Bruchwald 1997).

### 3. Wyniki badań i dyskusja

#### 3.1. Charakterystyka badanych szyszek

Łącznie do badań pobrano 225 szyszek (po 75 małych, średnich i dużych). W zbiorze najmniejsza szyszka miała masę początkową 3,586 g, a największa – 18,041 g. Średnia długość szyszek wynosiła 45,38 mm (od 31,00 do 65,00 mm), a grubość 22,0 mm (od 16,40 do 30,2 mm).

Według innych badaczy (Sokołowski 1931; Staszkiwicz 1968; Białobok 1993) szyszki sosny zwyczajnej pochodzące z terenów Europy mają długość od 19 do 70 mm, a grubość od 12 do 35 mm, zatem badane szyszki mieszczą się w podanych granicach dla obydwu parametrów wielkościowych.

Analiza wykazała istotną zależność między długością szyszki ( $h$ ) i jej grubością ( $d$ ) ( $R=0,9162$ ). Wynika z niej, że zwiększenie grubości szyszki o 1 mm powoduje przyrost długości o około 2,15 mm. Według Staszkiwicza (1968) przyrost ten jest mniejszy i wynosi 1,70 mm.

Wyznaczono zależności między masą początkową ( $m_p$ ) oraz długością ( $h$ ) i grubością ( $d$ ) szyszek, które opisują równania (4) i (5).

$$h = 2,1935 m_p + 27,365 \quad (4)$$

$$d = 0,9475 m_p + 14,214 \quad (5)$$

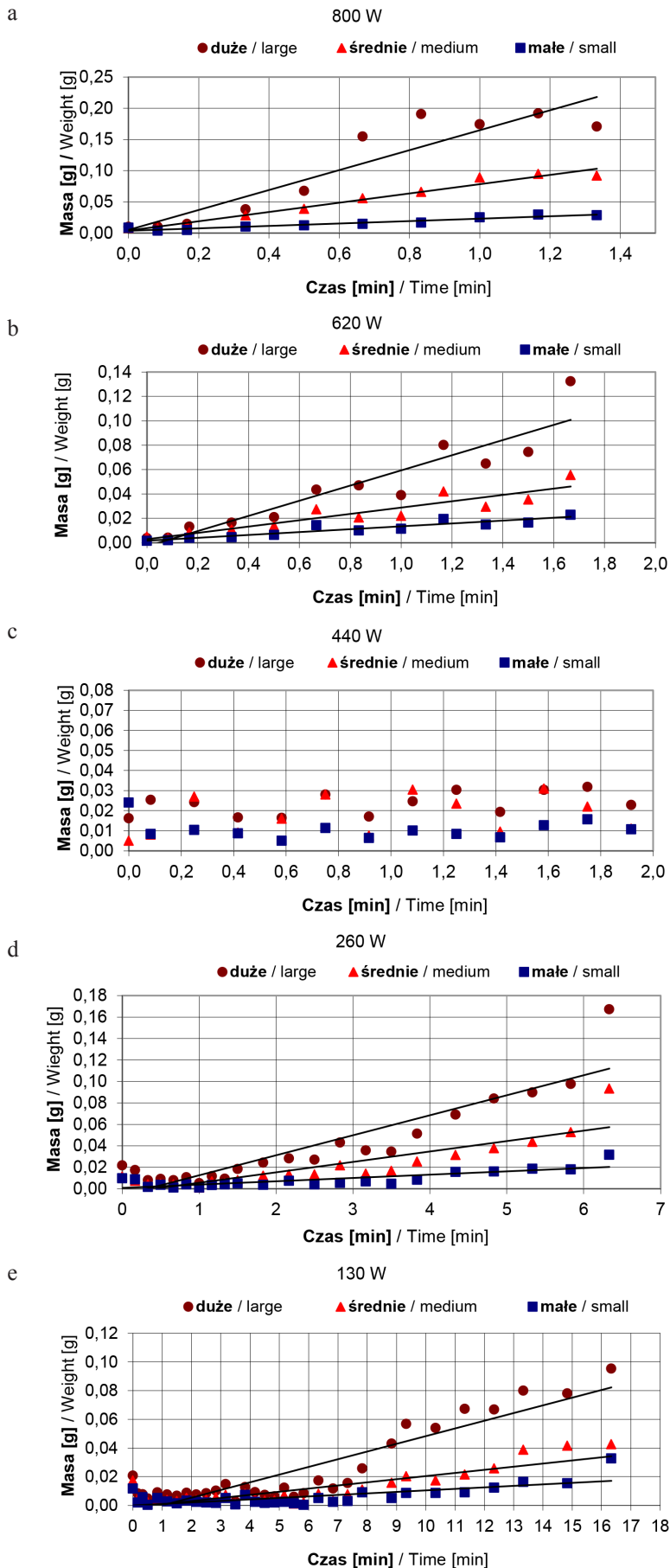
Wzrost masy początkowej szyszki o 1 gram skorelowany jest ze wzrostem długości szyszki o około 2,2 mm ( $R=0,9363$ ), a grubość prawie o 1 mm ( $R=0,9469$ ).

#### 3.2. Zmiana masy, zawartości wody i szybkości suszenia szyszek

Wartości zmiany masy wszystkich szyszek z grupy: małych, średnich i dużych w poszczególnych pięciu partiach uśredniono. Średnią zmianę masy szyszek poddanych promieniowaniu mikrofalowemu dla każdej mocy pokazano na wykresach (ryc. 1 a–e). Dla trzech grup szyszek, różniących się masą, wyznaczono linie trendu i opisano równaniami liniowymi (6), których wartości współczynników  $a$  i  $c$  oraz korelacji podano w tabeli 1.

$$m(\tau) = a\tau + c \quad (6)$$

W tabeli 1 nie podano współczynników równań dla szyszek poddanych działaniu promieniowania mikrofalowego 440 W, ponieważ nie udało się uzyskać statystycznej wartości współczynnika korelacji dla linii trendu, opisanej równaniem pierwszego stopnia.



Rycina 1. Zmiana masy szyszek małych, średnich i dużych pod wpływem promieniowania mikrofalowego o różnej mocy: a – 800 W, b – 620 W, c – 440 W, d – 260 W i e – 130 W

Figure 1. Weight change of small, medium and large cones under the influence of radiation-microwave with different power: a – 800 W, b – 620 W, c – 440 W, d – 260 W, e – 130 W

**Tabela 1. Współczynniki równań liniowych ( $a$  – kierunkowy,  $c$  – stały) opisujących zmianę masy szyszek pod wpływem promieniowania mikrofalowego**Table 1. The coefficients of linear equations ( $a$  – way,  $c$  – constant) describing the change in the weight of the cone under the influence of microwave radiation

Moc Power [W]	Wielkość szyszki Size cones	Współczynnik Coefficient $a$	Współczynnik Coefficient $c$	Współczynnik Coefficient $R$
800	duża / large	0,1598	0,0051	0,9286
	średnia / medium	0,0743	0,0039	0,9857
	mała / small	0,0193	0,0037	0,9613
620	duża / large	0,0622	-0,0029	0,9294
	średnia / medium	0,0258	0,0030	0,9260
	mała / small	0,0117	0,0017	0,9381
260	duża / large	0,0187	-0,0062	0,9073
	średnia / medium	0,0097	-0,0042	0,8769
	mała / small	0,0031	0,0007	0,8069
130	duża / large	0,0054	-0,0053	0,9018
	średnia / medium	0,0022	-0,0013	0,8395
	mała / small	0,001	0,00002	0,7235

W równaniu (6) współczynnik  $c$  jest stałą i wyznacza punkt przecięcia linii regresji z osią Y. Dla pięciu równań ma on wartość ujemną, a dla pozostałych wartość dodatnią. Parametr  $a$  jest współczynnikiem kierunkowym mówiącym o stopniu nachylenia linii regresji względem osi X. Im wyższa wartość, tym większy kąt między osią X a linią regresji. Największy kąt nachylenia zaobserwowano dla szyszek dużych i mocy 800 W.

Czas przebywania szyszek w mikrofalówce przy mocy 800 W wynosił 1,5 min (0,025 s), przy mocy 660 W – 1,8 min (0,030 h), przy 440 W – 4,8 min (0,080 h), 260 W – 7,2 min (0,120 h) i 130 W – 18 min (0,300 h). Krzywe suszenia pokazane na rysunku 2 wskazują, że duży wpływ na czas suszenia ma natężenie promieniowania. Zwiększenie mocy z 130 do 800 W powoduje skrócenie czasu suszenia średnio o 16,5 min (0,275 h).

Ubytek masy związany jest z mocą mikrofal, ale i z czasem oddziaływania na szyszki promieni elektromagnetycznych. Przy mocy 800 W największy był ubytek masy dużych szyszek. W czasie 1,5 min – ponad jeden gram, co stanowi 8% ubytku masy. Z kolei przy mocy 130 W dla dużych szyszek taki ubytek masy osiągnięto dopiero po 18 minutach. W tabeli 2 podano wartości ubytku masy w gramach i procentach pod wpływem promieniowania mikrofalowego.

Średni ubytek masy wyrażony w procentach dla wszystkich dużych szyszek wynosił 8,4%, dla średnich – 6,9%, a dla małych – 5,9%.

Z kolei wilgotność po zakończeniu stosowania promieniowania mikrofalowego promieniowania wynosiła odpowiednio: 16,2%, 17,7% i 18,3%.

W tabeli 2 podano wartości średniej wilgotności odpowiadające początkowi otwierania się łusek, obliczone dla trzech wielkości szyszek i czterech wartości mocy promieniowania mikrofalowego (800, 440, 260 i 130 W). W tabeli 2 brak jest danych dla mocy 620 W.

Badania szyszek do momentu początkowego rozchylenia się łusek wykazały, że niezależnie od zastosowanej mocy, wilgotność początku otwarcia łusek mieściła się w granicach od 18,3% do 24,0%. Zauważono, że im wyższa była wilgotność początkowa szyszek, tym wyższa była wilgotność początku rozchylenia się łusek. Różnica między wartością początkową a wartością początku otwarcia dla wszystkich badanych dużych szyszek była mniejsza niż dla małych. Wynika z tego, że małe szyszki wymagają odparowania większej ilości wody, aby mogły rozchylić swoje łuski niż duże szyszki.

Szczegółowa analiza porównawcza wartości początku otwarcia szyszek w zależności od zastosowanej mocy wykazała, że szyszki poddane promieniowaniu mikrofalowemu przy 800 W miały najwyższą wilgotność początku otwarcia – 22,5%, a przy 130 W – najniższą, około 20%. Różnica pomiędzy tymi wartościami wyniosła średnio dla dużych szyszek – 1,7%, dla średnich – 2,7%, a dla małych – 3,3%. Przy czym różnica w wilgotności początkowej pomiędzy nimi wynosiła odpowiednio 2,3%, 0,2% oraz 1,1%.

Na rysunku 2 (a – c) przedstawiono zmianę zawartości wody w czasie dla pięciu mocy promieniowania mikrofalowego podczas podsuszania szyszek. Zawartość wody zmniejszała się w zależności od mocy mikrofal, najszybciej przy najwyższej mocy, a najwolniej przy najniższej. Suszenie szyszek w kuchence mikrofalowej w porównaniu z suszeniem

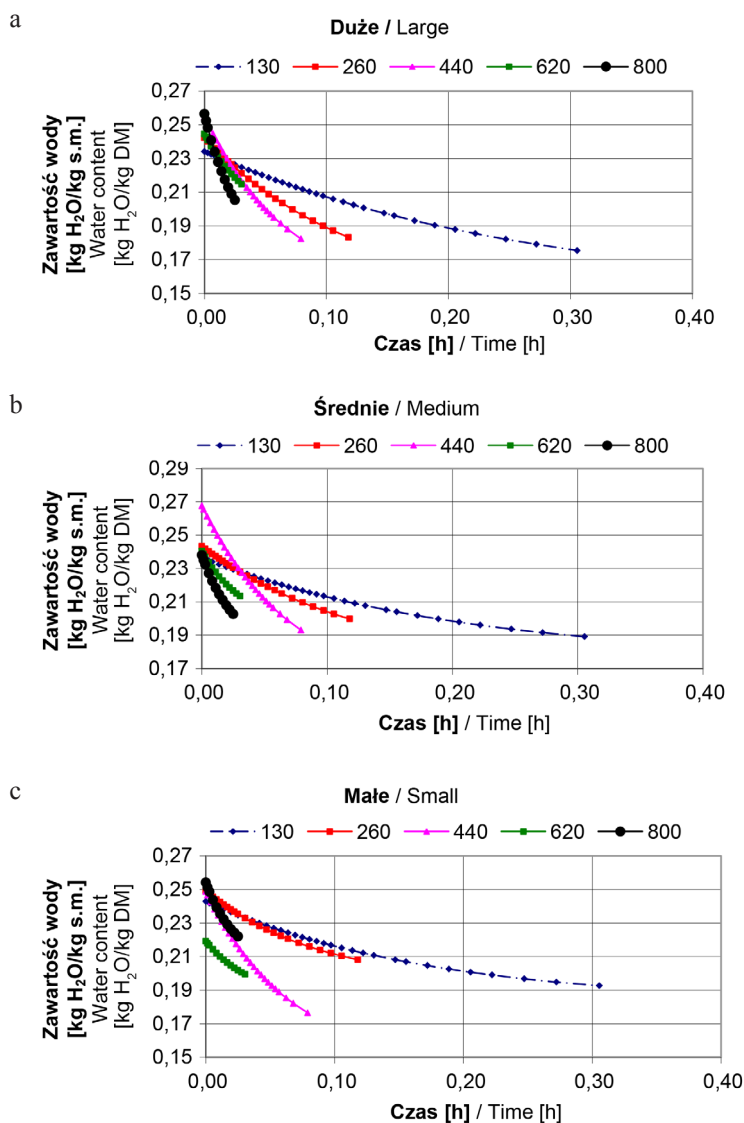
**Tabela 2. Średnie wartości ubytku masy i wilgotności dla pięciu mocy promieniowania i trzech wielkości szyszek**  
 Table 2. The mean values of weight loss and humidity for five radiation output and three sizes of cones

Moc Power [W]	Czas Time [h]	Wielkość Szyszki Size cones	Ubytek masy Weight loss [g]	Ubytek masy względem masy suchej Weight loss weight dry [%]	Wilgotność początkowa Initial humidity [%]	Wilgotność początku otwarcia Initial humidity open [%]	Wilgotność po zakończeniu promieniowania Humidity after the end of radiation [%]
800	0,025	duża large	1,020	8,33	25,66	22,40	17,33
		średnia medium	0,491	5,78	23,80	22,60	18,02
		mała small	0,155	4,72	25,41	22,30	20,69
620	0,030	duża large	0,541	5,35	24,45	b.d.	19,10
		średnia medium	0,275	4,41	24,05	b.d.	19,64
		mała small	0,129	3,26	21,91	b.d.	18,65
440	0,080	duża large	0,836	10,42	25,50	21,90	15,08
		średnia medium	0,624	11,01	26,89	21,60	15,88
		mała small	0,411	10,14	24,75	20,50	14,61
260	0,120	duża large	0,872	9,45	24,21	21,00	14,76
		średnia medium	0,433	7,07	24,32	21,70	17,25
		mała small	0,182	5,46	24,89	20,90	19,43
130	0,300	duża large	0,790	8,46	23,42	20,70	14,96
		średnia medium	0,348	6,04	23,64	19,90	17,60
		mała small	0,188	5,95	24,28	19,00	18,33

w suszarce konwekcyjnej przebiegało znacznie szybciej. Związane jest to z temperaturą suszenia. Fale elektromagnetyczne, działając na materiał (szyszki), powodują jego nagrzewanie do ponad 100°C, zaś podczas tradycyjnego luszczania – do 60°C (Aniszewska, 2013).

Ubytek wody z szyszek od wilgotności początkowej do zaobserwowanego początku otwarcia wynosi średnio ponad 3%. Przy czym czas działania promieni elektromagnetycznych dla poszczególnych mocy jest zmienny i wynosi do 0,3 h, najkrótszy dla mocy 800 W, a najdłuższy dla mocy

130 W (tab. 2). Przy suszeniu metodą konwekcyjną w warunkach laboratoryjnych (Aniszewska 2004, 2012a) początek otwarcia szyszek następuje po 3–4 godzinach, zaś wilgotność szyszek w tym czasie zmniejszała się średnio o 4–5%. Z kolei porównując wartość ubytku wody z szyszek poddanych działaniu fal elektromagnetycznych z suszeniem konwekcyjnym w warunkach produkcyjnych, to początek otwarcia szyszek tych ostatnich następował po około 16 godzinach (czas luszczania zależy od wilgotności szyszek oraz parametrów powietrza suszącego). Porównanie procesu suszenia meto-



**Rycina 2. Zmiana zawartości wody w szyszkach: a – dużych, b – średnich i c – małych, pod wpływem promieniowania mikrofalowego o mocy: 800, 620, 440, 260 i 130 W**

Figure 2. Change of water content in the cones: a – large, b – medium – small under the influence of microwave radiation power: 800, 620, 440, 260 and 130

dą tradycyjną (w suszarce konwekcyjnej) i z zastosowaniem promieniowania mikrofalowego na szyszkach sosny kalifornijskiej (*Pinus radiata* D. Don) wykonał Rukuni (1997). Stwierdził, że najlepiej łuszczyć szyszki w szafie – suszarce w temperaturze do 60°C oraz w mikrofalach przez 30 sekund. W przypadku drugiego sposobu łuszczenia, aby pozyskać dobre jakościowo nasiona, należy szyszki przed umieszczeniem w mikrofalówce moczyć w ciepłej wodzie.

W tabeli 3 zamieszczono parametry modelu zmiany zawartości wody (2) i szybkości suszenia (3), wyznaczone dla badanych partii szyszek dużych, średnich i małych oraz pięciu mocy.

Dla największej mocy współczynnik  $b$  wynosił ponad 30, a dla najmniejszej ponad 4,5 (tab. 3).

Wykresy szybkości suszenia szyszek w zależności od czasu promieniowania mikrofalowego pokazano na rysunku 4.

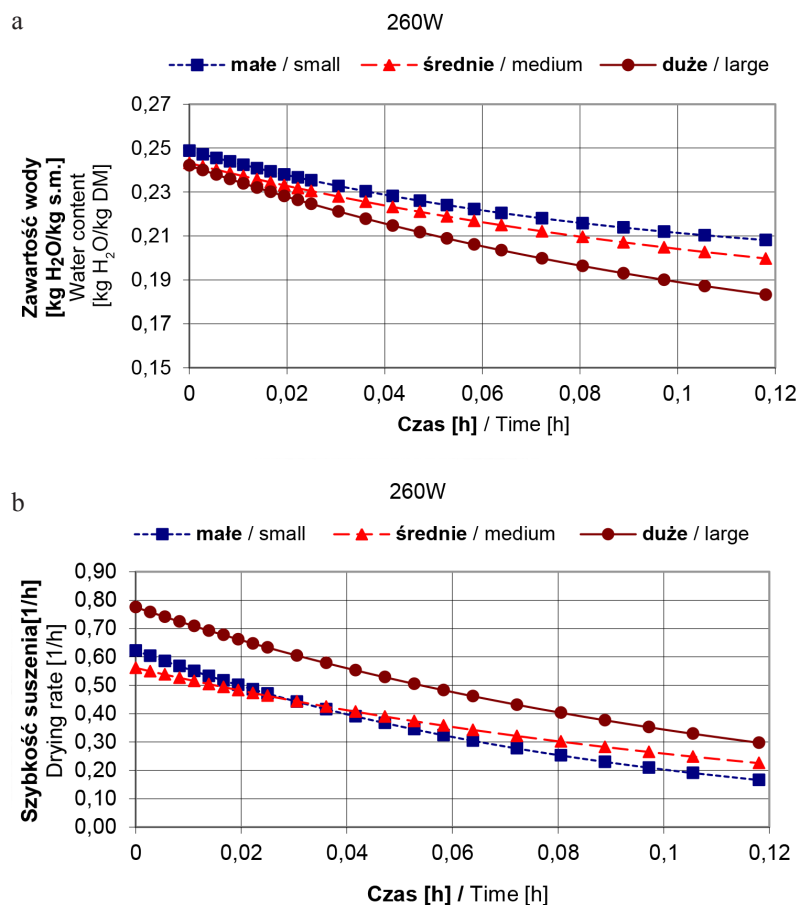
Zaobserwowano, że szybkość suszenia i jej zmiany są tym większe, im większe są szyszki i większa moc promieniowania. Można zauważyć, że szybkość suszenia zmienia się w sposób zbliżony do zależności liniowej.

### 3.3. Zmiana temperatury powierzchni szyszki

Dzięki zarejestrowanym obrazom z kamery termowizyjnej opisano zmianę temperatury powierzchni pojedynczej szyszki podczas promieniowania mikrofalowego. W tabeli 4 podano czas promieniowania, minimalną i maksymalną temperaturę dla poszczególnych mocy.

Temperatura powietrza wewnątrz mikrofalii podczas kolejnych prób wynosiła około 24°C, zaś w pomieszczeniu panowała temperatura około 22°C i wilgotność powietrza 50%.

Początkowo temperatura zewnętrznych warstw łusek zamkniętej szyszki odczytana ze zdjęć wykonanych kamerą termowizyjną wynosiła około 16°C. Na podstawie zdjęć stwierdzono, że w środku jej długości temperatura wynosiła średnio 7°C (szyszki przed badaniem przetrzymywane były w chłodni). Pod wpływem działania fal elektromagnetycznych temperatura na powierzchni szyszki intensywnie wzrosła do 100°C. Wartość temperatury bliską 100 stopni pojedyncza szyszka osiągnęła już po 5 s promieniowania przy 800 W, zaś



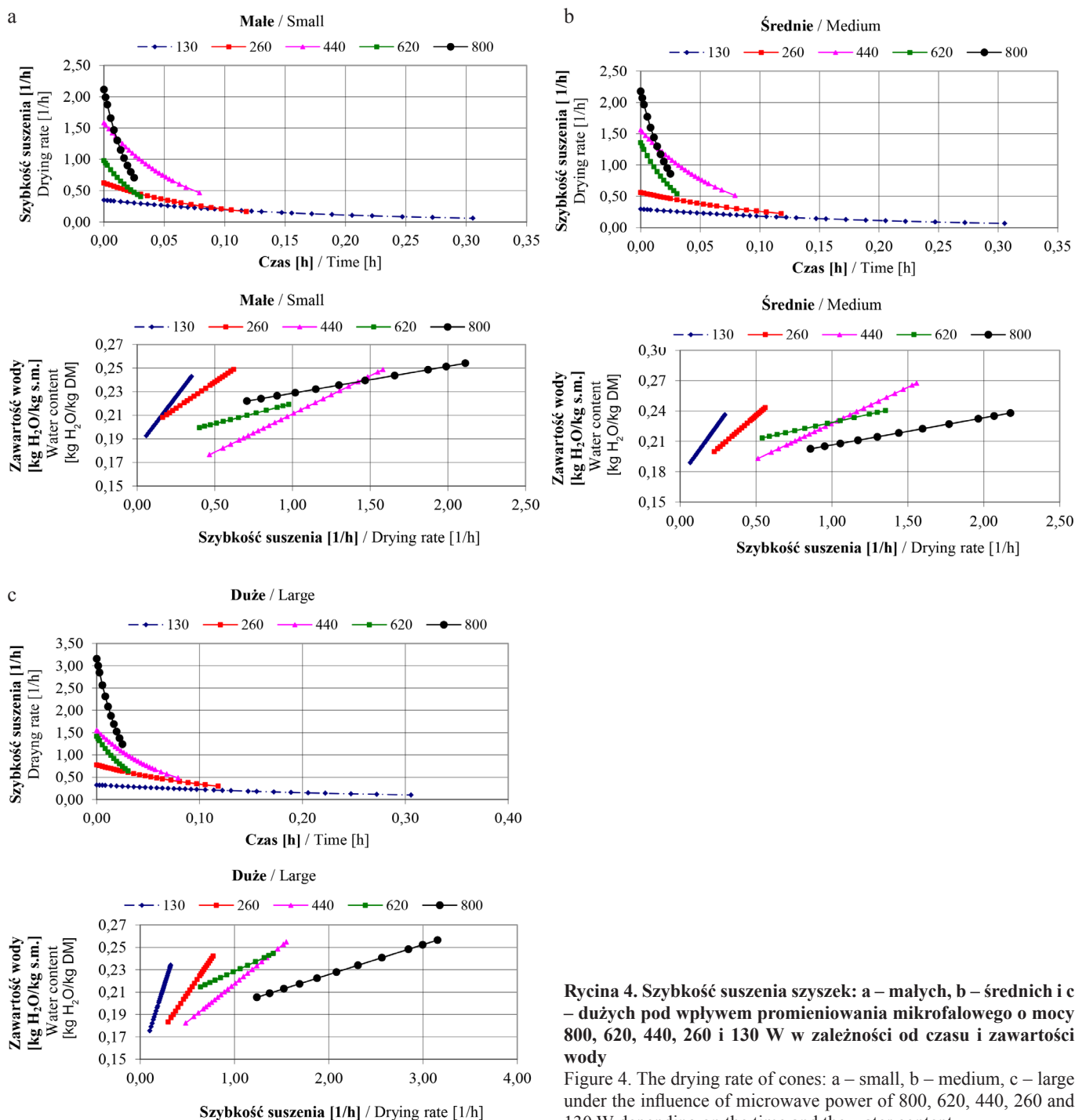
Rycina 3. Zmiany zachodzące w szyszkach małych, średnich i dużych, pod wpływem promieniowania mikrofalowego o mocy 260 W, pod względem: a – zawartości wody, b – szybkości suszenia

Figure 3. The changes in cones of small, medium and large size under the influence of microwave radiation with a power of 260 W, in terms of: a – water content, b – drying rate

Tabela 3. Parametry modelu zmiany zawartości wody i szybkości suszenia w trakcie poddawania promieniowaniu mikrofalowemu dużych, średnich i małych szyszek

Table 3. The model parameters changes in water content and the drying rate when subjected to microwave irradiation of large size, medium and small cones

Moc Power [W]	Wielkość szyszki Size cones	Zawartość początkowa wody [kg H <sub>2</sub> O/kg s.m.] Initial water [kg H <sub>2</sub> O/kg DM]	Zawartość końcowa wody [kg H <sub>2</sub> O/kg s.m.] Final water [kg H <sub>2</sub> O/kg DM]	Współczynnik Coefficient <i>b</i>
		$u_o$	$u_k$	
800	duża / large	0,2565	0,1723	37,464
	średnia / medium	0,2380	0,1796	37,222
	mała / small	0,2540	0,2059	43,846
620	duża / large	0,2445	0,1899	25,920
	średnia / medium	0,2404	0,1950	30,006
	mała / small	0,2191	0,1856	29,113
440	duża / large	0,2547	0,1495	14,736
	średnia / medium	0,2675	0,1565	14,026
	mała / small	0,2487	0,1463	4,055
260	duża / large	0,2421	0,1466	8,0121
	średnia / medium	0,2432	0,1705	7,722
	mała / small	0,2488	0,1933	11,202
130	duża / large	0,2341	0,1485	3,785
	średnia / medium	0,2364	0,1749	5,768
	mała / small	0,2428	0,1822	5,784



Rycina 4. Szybkość suszenia szyszek: a – małych, b – średnich i c – dużych pod wpływem promieniowania mikrofalowego o mocy 800, 620, 440, 260 i 130 W w zależności od czasu i zawartości wody

Figure 4. The drying rate of cones: a – small, b – medium, c – large under the influence of microwave power of 800, 620, 440, 260 and 130 W depending on the time and the water content

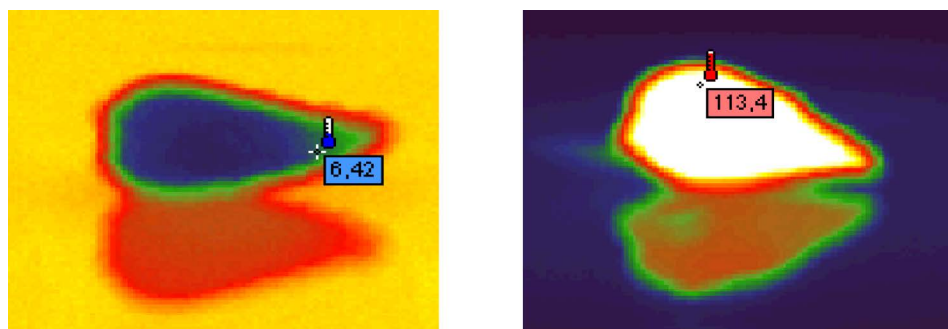
po 20 s – przy 620 W, po 25 s przy 440 W i 260 W, a dopiero po 150 s przy 130 W. W kolejnych etapach temperatura wzrosła do 120°C. Wyjątek stanowiły szyszki poddane promieniowaniu o mocy 130 W. W tym przypadku maksymalna temperatura powierzchni szyszki w badanym czasie wynosiła 100°C. Podaną maksymalną temperaturę powierzchni zewnętrznej zarejestrowano w połowie długości szyszki (tab. 4).

Obszar o temperaturze 100°C w kolejnych sekundach procesu ogrzewania powiększał się, aż objął 100% powierzchni szyszki (ryc. 5).

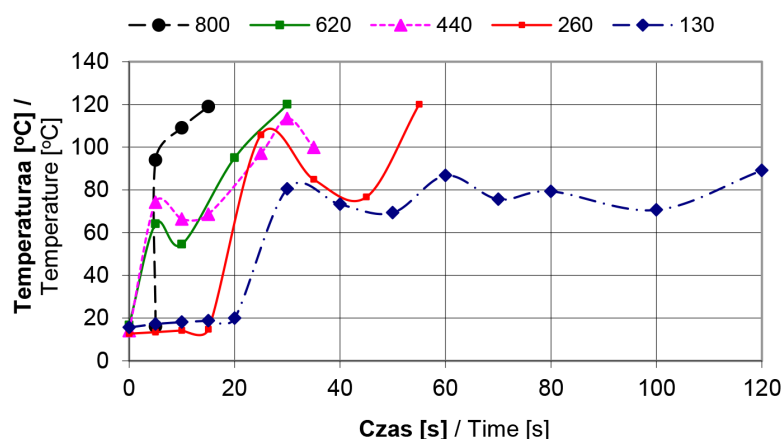
Na rysunku 6 pokazano wartości maksymalnej temperatury osiągniętej w kolejnych sekundach promieniowania PMF na powierzchni pojedynczej szyszki w zależności od zastosowanej mocy. Można zauważyć, że przy mocy od 130 do 620 W temperatura zanim osiągnęła 100°C, ulegała naprzemiennemu wzrostowi i spadkowi. Spowodowane to było pracą magnetronu, który emitował fale elektromagnetyczne zależnie od nastawionej mocy mikrofal. Magnetron w mikrofalówce charakteryzuje się tym, że nie ma możliwości sterowania ilością mikrofal emitowanych przez elektrody. Dlatego aby było

**Tabela 4. Średnie wartości minimalnej i maksymalnej temperatury szyszek w czasie ogrzewania przy mocy 800, 620, 440, 260 i 130W**  
 Table 4. Mean values of the minimum and maximum temperatures of cones during heating at a power of 800, 620, 440, 260 and 130 W

Moc Power [W]	Numer próby Number	Czas Time [s]	Temperatura powierzchni szyszek The surface temperature of cones [°C]	
			minimalna minimum	maksymalna maximum
800	1	0	6,4	16,0
	2	5	52,0	94,0
	3	5	69,0	109,0
	4	5	79,0	119,0
620	1	0	7,0	16,7
	2	5	42,0	64,1
	3	5	40,0	54,5
	4	10	60,0	95,0
	5	10	76,0	120,0
440	1	0	9,0	14,0
	2	5	45,0	74,2
	3	5	42,0	66,3
	4	5	50,0	68,6
	5	10	71,0	97,1
	6	5	75,0	113,4
	7	5	68,0	99,8
260	1	0	18,0	12,7
	2	5	19,5	13,4
	3	5	19,0	14,2
	4	5	20,3	14,7
	5	10	70,0	105,8
	6	10	55,5	84,9
	7	10	48,4	76,6
	8	10	76,0	120,0
130	1	0	23,8	15,6
	2	5	23,3	17,2
	3	5	22,7	18,1
	4	5	22,3	18,8
	5	5	25,3	19,9
	6	10	51,0	80,5
	7	10	45,0	73,2
	8	10	44,0	69,3
	9	10	52,0	86,7
	10	10	47,9	75,6
	11	10	51,0	79,3
	12	20	45,3	70,6
	13	20	60,7	89,1



Rycina 5. Zdjęcie przykładowej szyszki nagrzanej promieniami elektromagnetycznymi 620 W: a – przed , b – po 20 s  
Figure 5. Example of picture cones heated by electromagnetic radiation 620 a – before, b – after 20 s



Rycina 6. Zmiana wartości maksymalnej temperatury powierzchni szyszki pod wpływem promieniowania mikrofalowego

Figure 6. Changes of the maximum surface temperature of cones under the influence of microwave radiation

można sterować czasem nagrzewania, steruje się czasem podawania napięcia na magnetron. Przy najmniejszym poborze mocy lampa pracuje na pełnej mocy, aczkolwiek przez okres kilku sekund, po czym następuje kilkudziesięciosekundowa przerwa. Przy zwiększeniu mocy okres nagrzewania wydłuża się, a czas przerwy skraca, co pokazano na rysunku 5.

#### 4. Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone badania wykazały, że wzrost mocy promieniowania mikrofalowego pozwala na skrócenie czasu odparowania wody z szyszek i ich nagrzania, przez co zostaje przyspieszony moment otwarcia się pierwszych łusek. Przy zastosowaniu mocy 800 W było to 1,5 min, a przy 130 W – 18 minut, przy czym ubytek masy w obu przypadkach wynosi około 3–4% (na początku otwarcia łusek).

Stosowanie zaproponowanego wstępnego etapu promieniowania mikrofalowego w tradycyjnym procesie suszenia może istotnie skrócić czas łuszczenia. Atutem zmodernizowanej metody łuszczenia jest krótki czas osiągnięcia efektu początkowego odchylenia łusek. Aby jednak móc zastosować metodę należy dobrać odpowiednią moc mikrofal i czas napromieniania szyszek, które nie wpłyną negatywnie na jakość nasion.

1. Najlepszym wariantem spośród badanych jest moc promieniowania 620 W i czas oddziaływania mikrofal nie dłuższy niż 20÷30 s, co potwierdzają badania Rukuniego (1997).

2. Do opisu zmiany zawartości wody w szyszkach i szybkości suszenia pod wpływem promieniowania można zastosować równanie wykładnicze odpowiadające drugiemu okresowi suszenia ciał stałych.

3. Stwierdzono, że małe szyszki potrzebują więcej czasu do odparowania wody i początku otwarcia pierwszych łusek niż średnie i duże. Zatem przy ewentualnym stosowaniu tej metody wskazana jest wstępna segregacja szyszek.

4. Zastosowanie kamery termowizyjnej w badaniach pozwala na ocenę stopnia nagrzania powierzchni szyszki. Dla mocy 800 W – nagrzanie pojedynczej szyszki do 100°C następuje po 5–10 s, a dla 130 W po 120 s.

5. Należałoby przeprowadzić badania oceny zmiany temperatury wewnątrz szyszki pod wpływem promieniowania mikrofalowego. Należy też wykonać próby PMF jednorazowo większej liczby szyszek i sprawdzić jak rozkłada się temperatura na powierzchni i wewnątrz w kolejnych sekundach procesu.

#### Konflikt interesów

Autorzy deklarują brak potencjalnych konfliktów.

#### Podziękowania i źródła finansowania

Badania zostały sfinansowane ze środków własnych Wydziału Inżynierii Produkcji SGGW.

## Literatura

- Adair R.K. 2003. Biophysical limits on a thermal effects of RF and microwave radiation. *Bioelectromagnetics* 24, 39–48. DOI: 10.1002/Bem.10061.
- Aniszewska M. 2004. Analiza procesu cieplnego wyluszczenia nasion z szyszek sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.), praca doktorska. Wydział Leśny SGGW, Warszawa.
- Aniszewska M. 2012a. Dynamika procesu pozyskania nasion w jedno- i dwuetapowych procesach luszczania szyszek sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.). Rozprawy naukowe i monografie. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Aniszewska M. 2012b. Porównanie procesu wyluszczenia nasion sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) z szyszek całych i pozbawionych trzpienia. *Leśne Prace Badawcze* 73(1): 65–72. DOI:10.2478/v10111-012-0007-3.
- Aniszewska M. 2013. Zmiany wilgotności i temperatury szyszek sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) luszczonych dwuetapowo. *Leśne Prace Badawcze* 74(3): 205–214. DOI: 10.2478/frp-2013-0020.
- Aniszewska M., Zychowicz W. 2008. Koszty luszczania szyszek w nowoczesnych wyluszczeniach gospodarczych. Monografia, Tendencje i problemy techniki leśnej w warunkach leśnictwa wielofunkcyjnego, Poznań, 177–182.
- Antosiewicz Z. 1979. Wpływ temperatury i wilgotności powietrza na jakość nasion sosny i świerka w czasie luszczania szyszek. *Las Polski* 6: 11–12.
- Ballad L/A.T., Nelson S.O., Bruchwald S.O., Sterson L.E. 1976. Effects of radiofrequency electric field on permeability to water some legume seed. *Seed Science and Technology* 4: 257–274.
- Białobok S., Baratyński A., Bugała W. 1993. Biologia sosny zwyczajnej. Poznań – Kórnik, Polska Akademia Nauk, Instytut Dendrologii, 624 s.
- Bogdanow B. P. 1966. O suszkie szyszek w wakuumie. *Lesnoje chozjajstwo* 3, 57–60.
- Bruchwald A. 1997. Statystyka matematyczna dla leśników. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Cieśla A., Kraszewski W., Skowron M., Syrek P. 2015. Wpływ działania pola magnetycznego na kiełkowanie nasion. *Przegląd Elektrotechniczny* 91(1): 125–128. DOI 10.15199/48.2015.01.25.
- Jakubowski T. 2008. Wpływ napromieniowania mikrofalowego na dynamikę wzrostu kiełków bulwy ziemniaka. *Inżynieria Rolnicza* 5(103): 7–13.
- Khraisheh M.A.M., Mcminn W.A.M., Magee T.R.A. 2004. Quality and structural changes in starchy food during microwave and convective drying. *Food Research International* 37(5): 497–503. DOI: 10.1016/j.foodres.2003.11.010.
- Krajewski A. 1990a. Możliwość zastosowania mikrofal do dezynsekcji iglastego drewna budowlanego. Wydawnictwo PKZ, Warszawa.
- Krajewski A. 1990b. Zwalczanie owadów – szkodników technicznych drewna za pomocą mikrofal. *Ochrona Zabytków* 168(1): 27–34.
- Krajewski A. 2001. Fizyczne metody dezynsekcji drewna dóbr kultury. Rozprawy naukowe i monografie. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Maskan M. 2001. Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwi fruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering* 48(2): 177–182.
- Nelson S.O. 1985. RF and microwave energy for potential agricultural applications. *Journal Microwave Power* 28: 65–70.
- Pabis S. 1982. Teoria konwekcyjnego suszenia produktów rolniczych. Warszawa, PWRiL, 228 s.
- Pietruszewski S., Kania K. 2011. Wpływ promieniowania mikrofalowego na kinetykę kiełkowania nasion łubinu białego i grochu konsumpcyjnego. *Acta Agrophysica* 18(1): 121–129.
- Pinkrová J., Hubáčková B., Kadlec P., Prihoda J., Bubník Z. 2003. Changes of Starch during microwave treatment of rice. *Czech Journal of Food Sciences* 21(5): 176–184.
- Rukuni D. 1997. Seed Extraction Methods and Quality Effects in *Pinus radiata* D. Don. Master thesis of Applied Science in Seed Technology at Massey University, Palmer North, New Zealand, 1–88.
- Słowiński K. 2013. Wpływ promieniowania mikrofalowego wyemitowanego do nieodkazanego podłoża szkółkarskiego na przeżywalność i wybrane cechy jakościowe sadzonek sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.). Zeszyty naukowe Uniwersytetu Rolniczego im. Hugona Kołłątaja w Krakowie 517, Rozprawy 394.
- Sokołowski S. 1931. Prace biometryczne nad rasami sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris*) na ziemiach Polski. *Prace Rolniczo-Leśne PAU* 5, 1–106.
- Statistica 10. 2011. Start Soft. www.statsoft.com [18.09.2015].
- Staszkiwicz J. 1968. Badania nad sosną zwyczajną z Europy południowo-wschodniej i Kaukazu oraz jej stosunkiem do sosny z innych obszarów Europy, oparte na zmienności morfologicznej szyszek – Investigations on *Pinus silvestris* L. from south-eastern Europe and from Caucasus and its relation the pine from other territories of Europe. *Fragmenta Floristica et Geobotanica Polonica* 14(3): 259–315.
- Thuery J. 1992. Microwaves: Industrial, Scientific and Medical Applications. Artech Houses Publishers, Norwood. 692.
- Velázquez-Martí B., Gracia-López C., Marzal-Domenech A. 2006. Germination inhibition of undesirable seed in the soil using microwave radiation. *Biosystems Engineering* 93(4): 365–373. DOI:10.1016/j.biosystemseng.2006.01.005.
- Warchalewski J.R., Dolińska R., Błaszczak W. 2007. Analiza mikroskopowa ziarna pszenicy dwu pokoleń wyhodowanych z nasion ogrzanych mikrofalami. *Acta Agrophysica* 10(3): 727–737.