

Andrzej Załęski¹, Ewa Aniśko¹, Władysław Kantorowicz¹ ✉

Zawartość wody w podsuszanych nasionach drzew leśnych a wilgotność względna suszącego powietrza

Moisture content in dried forest tree seeds versus relative humidity of drying air

Abstract. Research was carried out on drying of seeds of 15 orthodox forest tree species (Douglas fir, silver fir, European larch, mountain pine, Scots pine, Norway spruce, common birch, European beech, common ash, Norway maple, small-leaved lime, common alder, and elms: mountain elm, common elm and European white elm) in a temperature gradually growing from 20 to 60°C, which corresponded to the relative humidity of drying air ranging between ca 35% and ca 0.5%. The purpose of the research was to determine a mathematical relationship between relative humidity of the drying air and seed equilibrium moisture content which becomes stabilized after longer drying of seeds under constant temperature-humidity conditions. The relationship between dried seed equilibrium moisture content for most of the species (except fir) and relative humidity of the drying air can be described using regression equations (determination coefficient R^2 oscillated between 0.71-0.96). Due to these equations, the level of drying air humidity needed for obtaining the required seed moisture content and planning the drying process can be calculated for the needs of forest management practice.

Key words: seeds moisture content, orthodox seeds, air humidity

1. Wstęp

Proces oddawania wody przez nasiona zależy od dwóch podstawowych czynników: temperatury tych nasion i niedosytu wilgotności otoczenia (ciśnienia pary wodnej na zewnątrz nasion). Podwyższona temperatura zwiększa migrację pary wodnej z wnętrza nasion na powierzchnię, a suche otoczenie odbiera tę parę od nasion (Lityński 1982). W przypadku podsuszania nasion, najczęściej rolę dawcy ciepła i rezerwuaru chwyającego wyparowaną wodę spełnia otaczające je powietrze. Niedosyt pary wodnej powietrza otaczającego nasiona można zwiększyć przez jego ogrzanie i osuszenie, a szybkość odbioru wilgoci od nasion – przez jego stałą wymianę (odbiór powietrza wilgotnego i napływ suchego).

Wymiana gazów pomiędzy nasionami a otaczającym je powietrzem prowadzi do równowagi względnej, gdyż wilgotność nasion nie jest cechą stałą, ale zależy od wilgotności środowiska (Grzesiuk et Kulka 1981). Zawartość wody w nasionach jest skorelowana z nasyceniem

powietrza (w określonej temperaturze) parą wodną, jednak nie jest mu równa. Wilgotność równoważna nasion zależy bowiem od ich właściwości sorpcyjnych, uwarunkowanych budową i składem chemicznym. Dlatego nasiona różnych gatunków osiągają różną wilgotność równoważną, ustabilizowaną w otoczeniu powietrza o tej samej wilgotności względnej. W otoczeniu powietrza o tych samych parametrach nasiona poddane procesowi suszenia osiągają niższą wilgotność równoważną niż te same nasiona niepodsuszane. Jeśli nasiona oddadzą w określonej temperaturze parę wodną, to ponownie mogą ją pobrać dopiero w temperaturze odpowiednio podwyższonej (Grzesiuk et Kulka 1981).

Stan równowagi pomiędzy wilgotnością nasion a względną wilgotnością otaczającego je powietrza, na danym poziomie temperatury (np. 20°C), określono już dla wielu gatunków roślin rolnych i ogrodowych (Grzesiuk et Kulka 1981; Suszka et al. 1994). Dla nasion gatunków leśnych dopiero zapoczątkowano określanie tych zależności, sporządzane na ogół w formie wykresów (Suszka et al. 1994).

¹ Instytut Badawczy Leśnictwa, Zakład Genetyki i Fizjologii Drzew Leśnych, Sękocin Stary, ul. Braci Leśnej 3, 05–090 Raszyn, ✉ Fax +48 22 7200397, e-mail: w.kantorowicz@ibles.waw.pl

W latach 1999–2006 Zakład Genetyki i Fizjologii Drzew Leśnych IBL prowadził na zlecenie Dyrekcji Generalnej Lasów Państwowych badania nad dokładnym określeniem poziomów (wartości granicznych) wilgotności, do których można podsuszyć nasiona 18 wybranych gatunków drzew bez obniżenia ich żywotności. Badania były prowadzone przede wszystkim dla potrzeb długoterminowego przechowywania. Dodatkowe obserwacje zebrane w trakcie tych badań dają możliwość wyznaczenia orientacyjnych parametrów suszącego powietrza, przy których można w przybliżeniu uzyskać pożądaną wilgotność nasion. W leśnictwie powszechnie stosowane jest suszenie metodą konwekcyjną w wymuszonym obiegu powietrza częściowo odwodnionego o umiarkowanej temperaturze (Suszka 2000). Częściowe odwadnianie powietrza odbywa się na ogół metodą jego schładzania i wykrapłania pary wodnej przed ponownym podgrzaniem.

2. Cel i zakres badań

Celem badań było określenie matematycznej zależności pomiędzy wilgotnością względną suszącego powietrza a równoważną wilgotnością nasion różnych gatunków drzew, która stabilizuje się po dłuższym czasie suszenia ich w stałych warunkach termiczno-wilgotnościowych. Poznanie tej zależności może pomóc w planowaniu przebiegu suszenia i odpowiednim doborze parametrów suszącego powietrza, doprowadzanego w trakcie konwekcyjnego podsuszania nasion określonych gatunków. Analizą objęto nasiona 15 gatunków drzew (z grupy ortodox): jedlicy Douglasa (*Pseudotsuga menziesii* Franco), jodły pospolitej (*Abies alba* Mill.), modrzewia europejskiego (*Larix decidua* Mill.), sosny górskiej (*Pinus mugo* Turra), sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.), świerka pospolitego (*Picea abies* L.), brzozy brodawkowatej (*Betula pendula* Roth), buka zwyczajnego (*Fagus sylvatica* L.), jesionu wyniosłego (*Fraxinus excelsior* L.), klonu zwyczajnego (*Acer platanoides* L.), lipy drobnolistnej (*Tilia cordata* Mill.), olszy czarnej (*Alnus glutinosa* L.), wiązu górskiego (*Ulmus glabra* Huds.), wiązu pospolitego (*Ulmus minor* Mill.) i wiązu szypułkowego (*Ulmus laevis* Pall.).

3. Materiał i metody

3.1. Materiał siewny

Badania przeprowadzono w 2 etapach, na materiale siewnym zebranym w różnych latach (tab. 1). Nasiona każdego gatunku pozyskiwano co najmniej w 2 sezo-

nach, a w każdym sezonie z co najmniej 2 proveniencji (razem co najmniej 4 partie). Ze względu na zwiększone możliwości zbioru materiału siewnego ilość podsuszanych partii nasion dla większości gatunków przekraczała założone minimum, bo wynosiła: 4 – jodła, lipa, olsza, 5 – brzoza, jedlica, jesion, świerk, wiąz górski i pospolity, 6 – wiąz szypułkowy, 9 – buk i klon, 11 – sosna zwyczajna, 13 – sosna górska, 16 – modrzew.

Podsuszanie nasion i określanie ich wilgotności prowadzono osobno dla każdej partii w celu uchwycenia zmienności materiału siewnego, związanej ze zróżnicowaniem warunków dojrzewania w różnych latach i miejscach, oraz w celu uwzględnienia różnorodności warunków (wilgotności powietrza atmosferycznego) w różnych okresach suszenia. Zależność matematyczną pomiędzy wilgotnością suszącego powietrza a wilgotnością równoważną nasion każdego gatunku ustalono natomiast na drodze łącznej analizy wyników uzyskanych dla wszystkich partii, aby zależność ta mogła znaleźć zastosowanie praktyczne w gospodarce leśnej.

3.2. Podsuszanie nasion

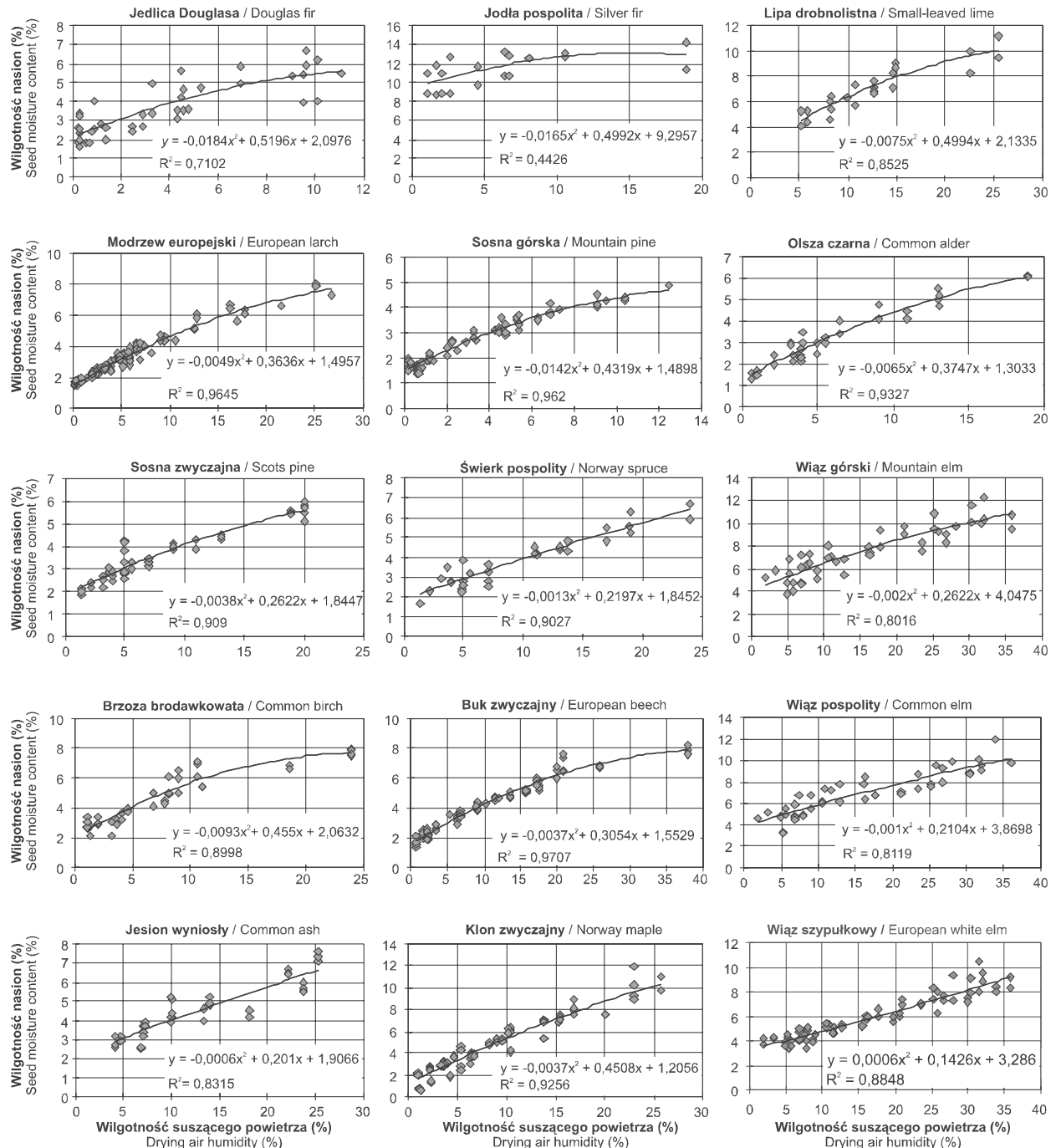
Do badania pobierano próbki materiału siewnego, wstępnie podsuszonego podczas pozyskania. Nasiona gatunków iglastych podlegały wstępnemu suszeniu w procesie łuszczenia szyszek. Szyszki większości gatunków w końcowym etapie łuszczenia poddawane były temperaturze dochodzącej do 30–40°C (jedlica, modrzew, sosna górska), lub nawet do 50–60°C (sosna zwyczajna, świerk), i dlatego wytrząśnięte z nich dość drobne nasiona (masa 1000 szt. niższa od 15 g) odznaczały się niską wilgotnością, wahającą się zazwyczaj w granicach 6–12%. Rozpadanie szyszek jodły uzyskuje się w stosunkowo niskiej temperaturze (25–35°C) i dlatego oddzielone od łusek, dość grube, nasiona (masa 1000 szt. ok. 50 g) zawierały znacznie więcej wody (15–20%), niż nasiona poprzednio wymienionych gatunków. Nasiona gatunków liściastych pozyskiwane były do badań w stadium pełnej dojrzałości. Po wstępnym osuszeniu nasion, rozłożonych cienką warstwą w przewiewnym pomieszczeniu (o temp. 17–20°C), ich wilgotność wahała się od 8–15% (brzoza, jesion, olsza, wiązy) do 18–35% (buk, klon).

Wilgotność równoważną ustalano po każdym etapie suszenia nasion metodą konwekcyjną w szafie firmy BCC. Niedosyt wilgotności suszącego powietrza, doprowadzanego do komory suszarniczej tej szafy, uzyskiwany jest w pierw przez wykrapłanie z niego części wody na parowniku, a następnie przez ogrzanie do określonej temperatury. W komorze suszarniczej umieszczone są w specjalnych przewodnicach powietrza 4 szuflady o perforowanym dnie. Spod każdej z nich osobno usuwane (wysysane) jest powietrze zawilgocone

wodą odebraną od nasion. Podczas podsuszania nasion reguluje się temperaturę doprowadzanego powietrza suszącego, które osiąga wilgotność względną zależną w dużej mierze od wilgotności powietrza atmosferycznego. Zakres temperatury suszenia wynosił od 20 do 60°C, co odpowiadało maksymalnemu zakresowi

wilgotności względnej suszącego powietrza od ok. 35% do ok. 0,5% (ryc. 1), w zależności od pory roku podsuszania nasion i warunków atmosferycznych.

Suszenie intensywne prowadzono etapowo, podwyższając co 24 godziny temperaturę powietrza suszącego o 5 lub 10°C, w zależności od gatunku drzewa,



Rycina 1. Zależność pomiędzy wilgotnością suszącego powietrza w szafie BCC a wilgotnością nasion różnych gatunków uzyskaną po ich wysuszeniu

Figure 1. Relationship between the humidity of the drying air in a BCC cabinet drier and moisture content in seeds of different tree species obtained after drying

Tabela 1. Zestawienie badanych partii nasion, pozyskanych w latach 1998–2006 w różnych nadleśnictwach
 Table 1. Specification of tested seedlots harvested in 1998–2006 in different forest districts

Gatunek drzewa Tree species	Miejsce i rok pozyskania nasion Locality and year of seed collection							
	1998	1999	2000	2002	2003	2004	2005	2006
Jedlica Douglassa Douglas fir	-	-	-	-	1. Łopuchówko 2. Ujsoły	1. Drawsko 2. Gotąbki	1. Miradz	-
Jodla pospolita Silver fir	-	1. Dukla 2. Sucha Besk.	1. Daleszyce 2. Zwierzyniec	-	-	-	-	-
Modrzew europejski* European larch*	-	-	-	1. Kaczory I 2. Kaczory II 3. Lidzbark 4. Łuków I 5. Łuków II	1. Leżajsk 2. Lidzbark 3. Łuków 4. Zaporowo	1. Kaczory 2. Lidzbark 3. Łuków 4. Syców I 5. Syców II	1. Grójec 2. Lidzbark	-
Sosna górską* Mountain pine	-	-	-	1. Słowiński P. N.	1. Karkonoski P.N. 2. Piłsko 3. Słowiński P.N. 4. Tatrzański P.N.	1. Choczewo 2. Karkonoski P.N. 3. Piłsko 4. Tatrzański P.N.	1. Choczewo 2. Karkonoski P.N. 3. Piłsko 4. Tatrzański P.N.	-
Sosna zwyczajna* Scots pine	1. Janowice Wilk. (Śnieżka) 2. Jarocin 3. Kaliska 4. Łąck 5. Nowa Sól	1. Jedwabno 2. Łąck 3. Nowa Sól	1. Kaliska 2. Kolumna 3. Ryteł	-	-	-	-	-
Świerk pospolity* Norway spruce	1. Goldap 2. Sudety (Szklarska Por., Śnieżka, Jugów)	1. Augustów	1. Augustów 2. Czarna Białostocka	-	-	-	-	-
Brzoza brodawkowata Common birch	-	1. Augustów 2. Chojnów	1. Augustów 2. Chojnów 3. Siedlce	-	-	-	-	-
Buk zwyczajny European beech	-	-	-	-	1. Jeleśnia 2. Krosno 3. Łągów 4. Zdroje	1. Choczewo 2. Drawsko 3. Gryfice 4. Gryfino	1. Zwierzyniec	-
Jesion wyniosły Common ash,	-	1. Chojnów 2. Wichrowo	1. Chojnów 2. Dukla 3. Wirry (Kaliska)	-	-	-	-	-
Klon zwyczajny Norway maple	-	-	-	-	1. Jabłonna 2. Kwidziń	1. Choczewo 2. Chojnów 3. Jabłonna 4. Kaliska	1. Dukla 2. Grójec 3. Jabłonna	-
Lipa drobnolistna Small-leaved lime	-	1. Kutno 2. Łochów	1. Chojnów 2. Wirry (Kaliska)	-	-	-	-	-

Olsza czarna Common alder	-	1. Augustów 2. Chojnów	1. Augustów 2. Włoszczowa	-	-	-	-
Wiąz górski Mountain elm	-	-	-	1. Dukla	1. Dukla 2. Zwierzyniec	1. Dukla 2. Zwierzyniec I	1. Dukla 2. Zwierzyniec I
Wiąz pospolity Common elm	-	-	-	1. Jamy	1. Skiermiewice 2. Tomaszów	1. Skiermiewice 2. Tomaszów	1. Grójec 2. Jamy I
Wiąz szypulkowy European white elm	-	-	-	1. Chojnów 2. Jabłonna	1. Grójec 2. Jabłonna	1. Grójec 2. Jabłonna	1. Jamy II 2. Zwierzyniec II

* nasiona pozyskano w sezonie zimowym danego roku i następnego
seeds were collected in winter of the current and next years

z którego zebrane zostały nasiona. Szuflady suszarki wypełniane były niewielkimi porcjami nasion, które zajmowały znikomy procent ich całkowitej pojemności. Dla upewnienia się, że zastosowany 24-godzinny czas zabiegu był wystarczający do ustabilizowania się wilgotności materiału siewnego, w początkowych etapach suszenia w niskiej temperaturze (20–30°C) stosowano wrywkowo warianty z przedłużonym suszeniem nasion przez 48 lub nawet 72 godziny. Dotyczyło to głównie gatunków liściastych, takich jak brzoza, buk, jesion, klon, lipa i wiąz. Po zakończeniu każdego etapu suszenia pobrano próbki nasion do określenia ich wilgotności i żywotności, jak również do przechowania przez 1, 2 lub 3 zimy.

Ze względu na to, że w komorze szafy suszarniczej suszono przeważnie bardzo małe porcje nasion przez wykraplanie nadmiaru wilgoci na parowniku, wilgotność względna suszącego powietrza stabilizowała się w dość krótkim czasie, a zawartość wody w nasionach osiągała również ustabilizowany poziom (wilgotność równoważną) w czasie przeważnie krótszym od jednej doby. Potwierdziły to badania wrywkowe z dłuższym od 24 godzin suszeniem nasion na tym samym etapie (Aniśko et al. 2001, Aniśko et al. 2006 b). Okres stabilizowania się wilgotności był tym krótszy, im wyższa była temperatura suszenia. Wyjątek stanowiła bukiew, w przypadku której, ze względu na dużą masę nasion (masa 1000 szt. – ok. 235 g) i związaną z tym zwiększoną kilkakrotnie w porównaniu z innymi gatunkami masą suszonych próbek, proces stabilizowania się wilgotności materiału siewnego w pierwszym etapie podsuszania (w 20°C) trwał prawie 3 doby.

3.3. Oznaczanie wilgotności nasion

Wilgotność nasion większości gatunków (z wyjątkiem jodły) określano metodą suszarkowo-wagową (wago-suszarka Mettler PM 480), jako procentowy udział wody w świeżej masie próbki. Zawartość wody mierzona była ubytkiem masy próbki powstałym po jej wysuszeniu w 105°C. Nasiona przed pomiarem wilgotności rozdrabniane były w młynku. Wilgotność nasion ustalano w dwóch powtórzeniach (dla 2 podpróbek), przed rozpoczęciem suszenia w szafie BCC, a następnie, po każdym etapie suszenia – przed zwiększeniem temperatury o kolejne 5 lub 10°C. Za ostateczny wynik pomiaru wilgotności przyjęto średnią z dwóch powtórzeń. Pomiarowi wilgotności poddawano: odskrzydłone nasiona jedlicy, modrzewia, sosni i świerka, nasiona brzozy oczyszczone z łusek, nasiona buka i lipy (pozbawione skrzydełek) w owocni, oraz nasiona jesionu, klonu i wiązu w postaci całych skrzydłaków.

O ile w przypadku nasion większości gatunków ubytek masy po suszeniu odpowiada masie zawartej w nich wody, to u nasion jodły w czasie suszenia paruje

zarówno woda, jak i liczne olejki eteryczne zawarte w pęczerykach żywicznych. Z tego względu precyzyjne określenie zawartości wody w nasionach jodły możliwe jest tylko przy zastosowaniu metody destylacji ich z ksylenem lub toluenem. Jest to jednak metoda żmudna, czasochłonna i mało przydatna dla praktyki, dlatego też w tym doświadczeniu zastosowano metodę uproszczoną opartą na opracowanym przez doświadczalników włoskich (Magini et Cappelli 1962) równaniu regresji, które pozwala przeliczyć wielkość ubytku masy nasion jodły po suszeniu na ich wilgotność. Równanie to obliczyli oni na podstawie porównania wyników badania wilgotności tych samych próbek nasion jodły dwiema metodami: suszarkowo-wagową i toluenową, między którymi stwierdzono bardzo silną korelację ($R = 0,99$). Przybrało ono następującą postać:

$$Y = 0,839X - 2,22$$

gdzie:

Y – wilgotność określona metodą toluenową,

X – wilgotność (ubytek masy) określona metodą suszarkowo-wagową.

3.4. Określenie zależności pomiędzy wilgotnością nasion a wilgotnością suszającego powietrza – statystyczne opracowanie wyników

W szafie BCC istnieje możliwość pomiaru wilgotności suszającego powietrza, wdmuchiwanego do komory suszarniczej po wytrąceniu wilgoci i ponownym jego podgrzaniu do wyznaczonej temperatury. Wszystkie parametry (wilgotność i temperatura) suszającego powietrza były rejestrowane na każdym etapie różnych serii doświadczenia, prowadzonego w różnych okresach. Pozwoliło to po zakończeniu doświadczenia określić matematyczną zależność pomiędzy wilgotnością suszającego powietrza a minimalną zawartością wody w nasionach, jaką można było uzyskać po ich całkowitym wysuszeniu w strumieniu tego powietrza.

Wilgotność suszającego powietrza w szafie BCC w dużej mierze zależy od wilgotności powietrza atmosferycznego, które przed schłodzeniem zasysane jest z zewnątrz. Im większa jest wilgotność powietrza atmosferycznego, tym mniejsza możliwość osuszenia go w urządzeniach chłodniczych szafy BCC. Aby wyznaczyć matematyczną zależność pomiędzy wilgotnością suszającego powietrza w szafie BCC a wilgotnością powietrza atmosferycznego, pomierzono parametry powietrza wdmuchiwanego do komory suszarniczej przy 5 poziomach wilgotności otoczenia, uchwyconych w różnym czasie w odmiennych układach warunków zewnętrznych. Odczytywano więc wilgotność wdmuchiwanego do komory powietrza o temperaturze: 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 i 60°C, w różnych warunkach pogodowych, czyli dniach charakteryzujących się odmiennymi

poziomymi wilgotnościami powietrza: 25, 38, 52, 67, i 80%. Te poziomy wilgotności zostały określone w pomieszczeniu o dość stałej temperaturze pokojowej (21–23°C).

Powyższe pomiary i obserwacje posłużyły do wyliczenia równań regresji krzywoliniowej pomiędzy temperaturą i wilgotnością suszającego powietrza w szafie BCC a wilgotnością wysuszonych w jego strumieniu nasion każdego gatunku osobno oraz pomiędzy wilgotnością powietrza atmosferycznego zasysanego przez szafę BCC a wilgotnością suszającego powietrza, osiąganą przy różnych poziomach temperatur. Dokonano wyboru równania regresji najlepiej opisującego zależność – o najwyższym współczynniku determinacji (R^2). Współczynnik korelacji krzywoliniowej (R) wyliczono jako $\sqrt{R^2}$.

4. Wyniki badań i ich dyskusja

Obniżenie wilgotności względnej, czyli zwiększenie właściwości suszących powietrza krążącego w szafie BCC, uzyskuje się głównie przez zwiększenie jego pojemności względem pary wodnej podczas podwyższania temperatury. Usuwanie z niego wilgoci poprzez wymrażanie pary wodnej odgrywa tutaj rolę drugorzędą (pomocniczą). Dlatego ustabilizowana wilgotność (równoważna) nasion większości gatunków wysuszonych w tego rodzaju suszarce jest silnie skorelowana ($R = \text{ok. } 0,90$) zarówno ze względną wilgotnością suszającego powietrza, jak i z temperaturą podsuszania (tab. 2). Działanie obu tych czynników jest ściśle ze sobą związane, a ich wpływu nie da się oddzielić, ponieważ w miarę stopniowego podwyższania temperatury maleje odpowiednio wilgotność względna suszającego powietrza. Korelacja między wilgotnością nasion a wilgotnością suszającego powietrza była większa niż korelacja między wilgotnością nasion a temperaturą suszenia w przypadku nasion modrzewia, sosny, buka, klonu, lipy, olszy i wiązu górskiego (tab. 2). Wilgotność wysuszonych nasion takich gatunków jak: świerk, brzoza, jesion, wiąz szypułkowy i polny, była skorelowana nieco silniej z temperaturą powietrza niż z wilgotnością powietrza lub współczynniki korelacji były zbliżone. Powyższe zależności wskazują na to, że w odniesieniu do gatunków drzew leśnych, przy określaniu warunków stabilizowania się wilgotności równoważnej nasion, lepiej jest posługiwać się wilgotnością względną suszającego powietrza niż jego temperaturą.

O słuszności tego założenia świadczą liczne przykłady, z jakimi spotkano się w tym doświadczeniu, podczas suszenia różnych partii nasion tego samego gatunku prowadzonego w takiej samej temperaturze, ale w różnych porach roku (Aniśko et al. 2006 b). Zjawisko

ściściej zależności wilgotności równoważnej nasion od wilgotności względnej suszącego powietrza – silniejszej niż od jego temperatury – można prześledzić na przykładzie nasion modrzewia.

W pierwszej serii badań, z szyszkami modrzewia zebranymi zimą 2002/2003, podsuszanie nasion prowadzono w 2 terminach. We wcześniejszym terminie (początek lutego) podsuszano nasiona 3 partii: Łuków I, Kaczory I i Kaczory II, a w późniejszym terminie (koniec marca) – 2 partii: Łuków II i Lidzbark. Nasiona suszone we wcześniejszym terminie miały przed suszeniem dwukrotnie większą wilgotność (10–12%) niż nasiona suszone w drugim terminie (ok. 5,5%). Natomiast w pierwszym terminie panowały znacznie lepsze warunki do suszenia i nasiona dużo szybciej oddawały wodę. Wilgotność suszącego powietrza szafy BCC w temp. 30°C wynosiła w pierwszym terminie ok. 7%, a w drugim ok. 13%. Dlatego już w pierwszym etapie

suszenia (30°C) we wcześniejszym terminie nasiona modrzewia miały niższą zawartość wody (3,9–4,2%) niż nasiona suszone w późniejszym terminie (5,1–5,2%).

Suszenie nasion modrzewia w trzeciej serii badań w sezonie 2004/2005 prowadzono również w dwóch terminach. W marcu suszono nasiona 4 partii: Kaczory, Lidzbark, Syców I i Syców II, a w kwietniu 1 partii – Łuków. W pierwszym terminie nasiona charakteryzowały się niższą wilgotnością początkową (5,7–6,0%) i suszone były powietrzem o niskiej wilgotności (w 30°C – ok. 7%), natomiast w drugim terminie miały tylko nieco większą zawartość wody (ok. 9%), ale suszone były na wstępie prawie 4-krotnie wilgotniejszym powietrzem (w 30°C – ok. 27%). Nasiona suszone w marcu osiągnęły wilgotność zbliżoną do 3% już w temp. 35°C, a nasiona suszone w kwietniu – dopiero w temp. 55°C.

Tylko w przypadku jodły pospolitej i jedlicy Douglasa, ubytek świeżej masy nasion w znacznie silniejszym

Tabela 2. Korelacje krzywoliniowe pomiędzy wilgotnością nasion po wysuszeniu a temperaturą i wilgotnością suszącego powietrza w szafie BCC

Table 2. Square correlations between seed moisture content after drying and temperature and humidity of the drying air in a BCC cabinet dryer

Gatunek Species	Współczynnik korelacji <i>R</i> Correlation coefficient <i>R</i>	
	pomiędzy wilgotnością nasion a temperaturą suszącego powietrza between seed moisture and temperature of the drying air	pomiędzy wilgotnością nasion a wilgotnością suszącego powietrza between seed moisture and humidity of the drying air
Jedlica Douglasa Douglas fir	- 0,903	0,843
Jodła pospolita silver fir	-0,646	0,589
Modrzew europejski European larch	- 0,797	0,982
Sosna górską Mountain pine	- 0,936	0,981
Sosna zwyczajna Scots pine	-0,926	0,948
Świerk pospolity Norway spruce	-0,950	0,949
Brzoza brodawkowata Common birch	-0,947	0,912
Buk zwyczajny European beech	- 0,959	0,985
Jesion wyniosły common ash	-0,940	0,912
Klon zwyczajny Norway maple	- 0,932	0,962
Lipa drobnolistna Small-leaved lime	-0,854	0,910
Olsza czarna Common alder	-0,848	0,958
Wiąz górski Mountain elm	- 0,862	0,895
Wiąz pospolity Common elm	- 0,929	0,901
Wiąz szypułkowy European white elm	- 0,940	0,941

stopniu skorelowany był ze wzrostem temperatury suszącego powietrza niż ze spadkiem jego wilgotności (tab. 2). Wpłynęła na to prawdopodobnie duża zawartość substancji żywicznych i olejków eterycznych w nasionach tych gatunków – szczególnie jodły. Ubytek świeżej masy nasion w takim wypadku spowodowany jest nie tylko ubytkiem wody, ale również parowaniem substancji eterycznych, a przy ich parowaniu większe znaczenie może mieć podwyższona temperatura niż obniżona wilgotność powietrza. Należy przy tym zaznaczyć, że wilgotność nasion jodły wyliczona na podstawie skorygowanego ubytku świeżej masy (Magini et Cappelli 1962), w znacznie słabszym niż u innych gatunków stopniu skorelowana była zarówno z temperaturą ($R = -0,64$), jak i wilgotnością ($R = 0,59$) powietrza wdmuchiwanego do komory suszarniczej.

Doświadczenie wykazało, że zależność pomiędzy wilgotnością suszącego powietrza i wilgotnością wysuszonych w jego strumieniu nasion może być opisana z dużą dokładnością za pomocą równań regresji dla większości gatunków, poza jodłą (rys. 1). Najniższym współczynnikiem determinacji (R^2), poza jodłą, odznaczało się równanie dla jedlicy ($R^2 = 0,71$), a dla pozostałych gatunków współczynnik ten wahał się od 0,80 (wiąz górski) do 0,96 (buk, modrzew, sosna górska). Równania te pozwalają na wyliczenie orien-

tacyjnych poziomów wilgotności równoważnej nasion, które można dla badanych w tym doświadczeniu gatunków uzyskać przy różnych wartościach względnej wilgotności suszącego powietrza (tab. 3). Mogą one być wykorzystane tylko w takich zakresach wilgotności suszącego powietrza, jakie stosowano w doświadczeniu, ponieważ są oparte na obserwacjach empirycznych i w innych przedziałach mogłyby być obarczone błędem. Przedstawione na rycinach (ryc. 1) wycinki krzywych funkcyjnych dopasowane są tylko do ściśle określonych warunków wilgotnościowych, z jakimi mamy najczęściej do czynienia w czasie gospodarczego suszenia nasion wymienionych gatunków drzew. Przedziały wilgotności względnej suszącego powietrza, dla których można stosować wymienione poprzednio wzory, wynoszą więc w przypadku nasion: jedlicy – od 1 do 13%; modrzewia, sosny zwyczajnej i górskiej, świerka, brzozy i olszy czarnej – od 1 do 25%; wiązów górskiego, pospolitego i szypułkowego – od 1 do 31%; oraz buka, jesionu, klonu zwyczajnego i lipy drobnolistnej – od 13 do 31%.

Jak wykazały badania przeprowadzone w różnych warunkach atmosferycznych, względna wilgotność suszącego powietrza w szafie BCC w dużym stopniu zależała od względnej wilgotności otaczającego ją powietrza. Przy wilgotności powietrza atmosferycznego

Tabela 3. Równoważna wilgotność nasion możliwa do uzyskania przy różnej wilgotności względnej suszącego powietrza

Table 3. Seed equilibrium moisture content that can be obtained at different levels of relative humidity of the drying air

Wilgotność suszącego powietrza (%) Drying air humidity (%)	Wilgotność nasion po wysuszeniu (%) Seed moisture content after drying (%)													
	Jedlica Douglasa Douglas fir	Modrzew europejski European larch	Sosna górska Mountain pine	Sosna zwyczajna Scots pine	Świerk pospolity Norway spruce	Brzoza brodawkowata Common birch	Buk zwyczajny European beech	Jesion wyniosły Common ash	Klon zwyczajny Norway maple	Lipa drobnolistna Small-leaved lime	Olsza czarna common alder	Wiąz górski Mountain elm	Wiąz pospolity Common elm	Wiąz szypułkowy European white elm
1	2,6	1,9	1,9	2,1	2,1	2,5	-	-	-	-	1,7	4,3	4,1	3,4
3	3,5	2,5	2,7	2,6	2,5	3,3	-	-	-	-	2,4	4,8	4,5	3,7
5	4,2	3,2	3,3	3,1	2,9	4,1	-	-	-	-	3,0	5,3	4,9	4,0
7	4,8	3,8	3,8	3,5	3,3	4,8	-	-	-	-	3,6	5,8	5,3	4,3
9	5,3	4,4	4,2	3,9	3,7	5,4	-	-	-	-	4,1	6,2	5,7	4,6
11	5,6	4,9	4,5	4,3	4,1	5,9	-	-	-	-	4,6	6,7	6,1	4,9
13	5,7	5,4	4,8	4,6	4,5	6,4	4,9	4,4	6,4	7,4	5,1	7,1	6,4	5,2
15	-	5,8	5,1	4,9	4,8	6,8	5,3	4,8	7,1	7,9	5,5	7,5	6,8	5,6
17	-	6,3	5,4	5,2	5,2	7,1	5,7	5,2	7,8	8,5	5,8	7,9	7,2	5,9
19	-	6,6	5,7	5,5	5,6	7,4	6,0	5,5	8,4	8,9	6,1	8,3	7,5	6,2
21	-	7,0	6,2	5,7	5,9	7,5	6,3	5,9	9,0	9,3	6,3	8,7	7,8	6,5
23	-	7,3	6,7	5,9	6,2	7,6	6,6	6,2	9,6	9,7	6,5	9,0	8,2	6,9
25	-	7,5	7,4	6,0	6,5	7,6	6,9	6,6	10,2	9,9	6,6	9,4	8,5	7,2
27	-	-	-	-	-	-	7,1	6,9	10,7	10,1	-	9,7	8,8	7,6
29	-	-	-	-	-	-	7,3	7,2	11,2	10,3	-	10,0	9,1	7,9
31	-	-	-	-	-	-	7,5	7,6	11,6	10,4	-	10,3	9,4	8,3

Tabela 4. Wilgotność powietrza suszącego w szafie BCC przy różnej wilgotności powietrza atmosferycznego i różnej temperaturze suszenia (temperatura pomieszczenia, w którym była zainstalowana szafa – 21–23°C)

Table 4. Drying air humidity in a BCC cabinet drier with different atmospheric air humidity and drying temperature (temperature of a room in which the drier was installed 21–23°C)

Temperatura suszenia Drying temperature	Wilgotność suszącego powietrza w szafie BCC (w %) przy wilgotności powietrza atmosferycznego: Drying air humidity in a BCC cabinet drier (in %) with the atmospheric air humidity of:						
	15%	25%	35%	45%	55%	65%	75%
20	8	18	27	31	33	33	34
25	7	13	21	25	27	27	28
30	5	11	17	20	21	21	22
35	4	8	13	16	17	17	18
40	3	7	11	13	14	15	15
45	2	5	9	11	12	12	13
50	1,5	4	7	9	10	10	11
55	1	3	5	7	8	9	9
60	0,5	2	4	5	6	7	8

ok. 25% wilgotność powietrza suszącego w szafie BCC była 2–3-krotnie mniejsza niż przy wilgotności powietrza atmosferycznego ok. 80%. Zależności te można opisać z dużą dokładnością dla różnych temperatur suszenia, za pomocą równań regresji ($R^2 =$ od 0,975 do 0,998). Za pomocą tych równań można również wyliczyć orientacyjne poziomy wilgotności suszącego powietrza w szafie BCC, jakie można uzyskać przy określonych wilgotnościach otaczającego ją powietrza atmosferycznego (tab. 4).

Taką samą wilgotność suszącego powietrza (np. 13%) w komorze szafy BCC można uzyskać zarówno na poziomie temperatury 25°C, jeśli wilgotność otaczającego ją powietrza wynosi 25%, jak też dopiero w temperaturze 45°C, jeśli wilgotność otoczenia wynosi 75% (tab. 4). Wilgotność względna powietrza zasysanego do komory suszarniczej najmniejsza jest w chłodne i słoneczne dni zimowe, a największa w ciepłe i deszczowe dni letnie, późnowiosenne i wczesnojesienne. Zjawisko to było wykorzystywane przez wyluszczarzy w czasach, kiedy nie stosowano jeszcze urządzeń suszarniczych z wykraplaniem nadmiaru wody z powietrza w urządzeniach chłodniczych (Załęski et Antosiewicz, 1995). Wielozmianowe kampanie wyluszczenia i podsuszania nasion drzew iglastych ograniczały się zazwyczaj do okresu zimowego.

5. Podsumowanie i wnioski

Tabela równoważnej wilgotności nasion przy różnej wilgotności suszącego powietrza (tab. 3) ma charakter uniwersalny, pozwalający na wykorzystanie jej niezależnie od typu urządzeń suszarniczych, pod warunkiem że istnieje możliwość pomiaru wilgotności powietrza doprowadzanego do komór suszarniczych. Równoważną wilgotność nasion można traktować jako wartość progową maksymalnego wysuszenia nasion, która nie zostanie przekroczona przy zastosowaniu powietrza suszącego o określonych parametrach wilgotnościowych. Wobec tego można nie obawiać się nadmiernego wysuszenia. Samo osiągnięcie progu maksymalnego wysuszenia nasion możliwe będzie tylko przy wystarczająco długim czasie suszenia, który zależy z kolei od wielkości porcji podsuszanego materiału siewnego i od stopnia wentylacji komory suszarniczej.

W praktyce gospodarczej suszenie metodą konwekcyjną (podgrzewanym powietrzem) nasion przeznaczonych do długookresowego przechowywania, oparte na powyższych wskazówkach, powinno przebiegać według następującego schematu. Najpierw, posługując się danymi zawartymi w tabeli 3, należy określić, jaką wilgotność powietrza musimy utrzymać w urządzeniu suszarniczym, aby uzyskać wilgotność nasion na poziomie nieco wyższym niż próg tolerancji na wysuszenie (Aniśko et al. 2001; 2006 a i b). Następnie należy tak dobrać temperaturę suszenia, aby powietrze suszące miało odpowiednią wilgotność. Temperaturę suszącego powietrza należy korygować, kierując się wskazaniem czujników wilgotności w urządzeniu suszarniczym. Trzeba przy tym pamiętać, żeby nie przekroczyć progu tolerancji nasion na działanie wysokich temperatur (Aniśko et al. 2001; 2006 a i b).

Wartości odnoszące się do warunków suszenia zależnych od wilgotności względnej powietrza atmosferycznego (tab. 4) mają tylko charakter ogólnych informacji. Ich ścisłe wykorzystanie może mieć miejsce tylko w przypadku stosowania takiego samego typu szafy suszarniczej BCC z wykraplaczem nadmiaru wilgoci z powietrza, jaki testowano w opisywanym doświadczeniu. Na podstawie zależności podanych w tabeli 4. można ustalić, do jakiej temperatury należy podgrzać powietrze o określonej wilgotności, pobierane z zewnątrz przez szafę BCC, aby powietrze wdmuchiwane do komory suszarniczej miało pożądaną wilgotność względną. Względna wilgotność i temperaturę powietrza można obecnie określić w bardzo prosty sposób, za pomocą nieskomplikowanych i tanich aparatów elektronicznych.

Literatura

- Aniśko E., Witowska O., Załęski A. 2001: Ustalenie wilgotności nasion przeznaczonych do przechowywania (wartości graniczne), szczególnie jodły, jawora, brzozy, olszy czarnej, lipy, jesionu i innych. Sprawozdanie naukowe IBL. 39 ss.
- Aniśko E., Witowska O., Załęski A. 2006 a: Wpływ warunków suszenia nasion brzozy brodawkowatej, olszy czarnej, sosny zwyczajnej i świerka pospolitego na ich żywotność. *Leśne Prace Badawcze*, 2: 91-113.
- Aniśko E., Witowska O., Załęski A. 2006 b: Wartości graniczne wilgotności nasion modrzewia, jedlicy, buka, dębu, wiązu, klonu zwyczajnego i sosny górskiej przeznaczonych do długookresowego przechowywania. Sprawozdanie naukowe IBL. 43 ss.
- Grzesiuk S., Kulka K. 1981. Fizjologia i biochemia nasion. PWRiL, Warszawa. 605 ss.
- Lityński M. 1982. Biologiczne podstawy nasiennictwa. PWN, Warszawa. 487 ss.
- Magini E., Cappeli M. 1962. Nota preliminare su alcuni metodi d'analisi dell'umidità del seme di abete bianco (*Abies alba* Mill.). *L'Italia Forestale e Montana*, 4: 138-143.
- Suszka B., Muller C., Bonnet-Masimbert M. 1994: Nasiona leśnych drzew liściastych. PWN. Warszawa – Poznań. 299 ss.
- Suszka B. 2000. Nowe technologie i techniki w nasiennictwie leśnym. Bogucki Wydawnictwo Naukowe S.C., Warszawa. 269 ss.
- Załęski A., Antosiewicz Z. 1995: Pozyskanie nasion. [W:] Nasiennictwo leśnych drzew i krzewów iglastych. Załęski A., Antosiewicz Z., Gunia S., Janson L., Kantorowicz W., Matras J., Stocki J. Wydawnictwo „Świat”. Warszawa: 66–97.