

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
w Warszawie
Instytut Inżynierii Mechanicznej

mgr inż. Ewa Tulska

Efektywność wyłuszczenia nasion z szyszek
modrzewia europejskiego (*Larix decidua* Mill.)
w wieloetapowym procesie cieplnym

Effectiveness of the seed extraction
from European larch (*Larix decidua* Mill.) cones
in a multistep thermal process

Rozprawa doktorska
Doctoral dissertation

Promotor pracy:
dr hab. inż. Monika Aniszewska
Katedra Inżynierii Biosystemów
Instytut Inżynierii Mechanicznej
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
w Warszawie

Warszawa, 2022 r.

Oświadczenie promotora pracy

Oświadczam, że niniejsza praca została przygotowana pod moim kierunkiem i stwierdzam, że spełnia ona warunki do przedstawienia jej w postępowaniu o nadanie stopnia naukowego.

Data Podpis promotora pracy

Oświadczenie autora pracy

Świadom odpowiedzialności prawnej oświadczam, że niniejsza praca doktorska została napisana przeze mnie samodzielnie i nie zawiera treści uzyskanych w sposób niezgodny z obowiązującymi przepisami.

Oświadczam również, że przedstawiona praca nie była wcześniej przedmiotem procedur związanych z uzyskaniem stopnia naukowego w wyższej uczelni.

Oświadczam ponadto, że niniejsza wersja pracy jest identyczna z załączoną wersją elektroniczną.

Data Podpis autora pracy

Streszczenie

Nasiona z szyszek modrzewia wyłuszcza się trudniej niż nasiona z szyszek innych drzew iglastych, co wynika z budowy morfologicznej łusek szyszek tego gatunku. Ciągłe zmiany zawartości wody w szyszkach modrzewia, już po osiągnięciu stanu tzw. przeschnięcia, powodują nieznaczne naprężanie i rozkurczanie komórek łusek i wysuwanie nasion poza szyszkę. W przemysłowym procesie wyłuszczenia nasion z szyszek modrzewia stosuje się dwa sposoby: ciepło-mechaniczny (z dodatkowym zabiegiem mechanicznego kruszenia łusek szyszek) oraz ciepły (termiczny – polegający na naprzemiennym suszeniu i nawilżaniu szyszek).

Sposób ciepło-mechaniczny jest stosowany częściej, jako znamieny dla tego gatunku, a ciepły – rzadziej. Obie te metody odznaczają się indywidualnymi zaletami oraz wadami, natomiast w danej wyłuszczeniarni proces ten jest prowadzony jednym, wybranym sposobem.

W praktyce, w procesie ciepłym, liczba etapów łuszczenia i czas nawilżania nie są ustalone oraz brak jest jednoznacznych wytycznych do przemysłowego prowadzenia procesu łuszczenia szyszek modrzewia europejskiego.

Badania podzielono na dwa obszary (badania w warunkach przemysłowych oraz laboratoryjnych), których celem było:

- a) opis i porównanie przebiegu procesów: ciepło-mechanicznego i ciepłego łuszczenia szyszek modrzewia w wybranych wyłuszczeniarniach i ocena pozyskanych nasion,
- b) analiza i ocena efektywności przebiegu pięcioetapowego procesu ciepłego łuszczenia szyszek modrzewia z czterema etapami namaczania w warunkach laboratoryjnych, ocena jakości, liczby i masy wyłuszczonych nasion,
- c) analiza zmiany kąta otwarcia łusek szyszek wyłuszczonych sposobem ciepłym (z zanurzeniem) podczas zmiany zawartości wody w szyszkach w procesie suszenia w warunkach laboratoryjnych,
- d) ocena budowy komórkowej i struktury łusek szyszek modrzewia europejskiego w różnych wariantach wilgotności.

Zaprezentowane wyniki, studia przypadków w jednostkach gospodarczych, miały na celu zestawienie dwóch procesów przemysłowego wyłuszczenia nasion i wskazanie cech charakterystycznych dla obydwu procesów. W dalszej części pracy zaproponowano

reorganizację procesu cieplnego wyluszczenia – sposobu, dzięki któremu pozyskuje się lepsze jakościowo nasiona do długookresowego przechowywania.

Analiza procesu cieplnego przeprowadzonego w warunkach laboratoryjnych dla dziewięciu wariantów badań pozwoliła na wskazanie charakterystycznych parametrów procesu i materiału badawczego, które będą pomocne przy napisaniu programu komputerowego sterującego pracą szafy suszarniczej w czasie łuszczenia szyszek modrzewia. Badania efektywności procesu wykazały, że nie ma konieczności prowadzenia procesu łuszczenia przez pięć dni, wystarczające są trzy dni łuszczenia po minimum osiem godzin oraz dwa zabiegi dziesięciominutowego nawilżania szyszek, ponieważ zmiana kąta otwarcia jest mniejsza niż w poprzednich dniach, a wilgotność szyszek nie spada poniżej tej osiągniętej po trzech dniach łuszczenia. Ponadto w pierwszych trzech etapach wariantu ośmiogodzinnego łuszczenia wykazano, że pozyskać można prawie 60% wszystkich nasion zawartych w szyszkach.

Badania laboratoryjne budowy morfologicznej i struktury łusek wykazały znaczne różnice wielkości komórek łusek w zależności od zawartości wody w szyszkach (od 5% do 20%).

Na potrzeby badań laboratoryjnych zaprojektowano urządzenie, które może być wykorzystywane w Stacjach Oceny Nasion (SON) i Stacjach Kontroli Nasion (SKN). Urządzenie zostało opatentowane.

Słowa kluczowe: łuszczenie szyszek, zmiana zawartości wody w szyszkach, kinematyka odchylania łusek, pozyskanie nasion

Summary

Seed extraction from larch cones is more difficult than from the cones of other tree species due to the morphological features of larch cone scales. Repeated changes in the water content of larch cones following a period of drying cause scale cells to slightly contract and relax, thus pushing the seeds out of the cones. Industrial seed extraction from larch cones can be conducted using either a thermomechanical process (with an additional mechanical scale-crushing step) or a thermal one (with alternating steps of cone drying and moistening). The thermomechanical process is applied more widely for the cones of this tree species, while the thermal one is used only sporadically. Both methods have their distinct advantages and disadvantages, with each seed extractory choosing and implementing only one of them.

In practice, in the thermal process the number of cone drying steps and moistening time are not well defined, and there are no clear-cut guidelines about how to extract seeds from European larch cones on an industrial scale.

The study was divided into two areas (laboratory and industrial tests), which were designed to:

- a) describe and comparison the thermomechanical and thermal processes of larch seed extraction in selected extractories, as well as to evaluate the seeds obtained;
- b) analyze a five-step thermal larch seed extraction process involving four water immersion steps conducted under laboratory conditions and to evaluate the quality and quantity of the seeds obtained;
- c) analyze under laboratory conditions changes in scale opening angles in cones subjected to the thermal process (with water immersion) depending on changes in the moisture content of cones treated;
- d) assessment the cellular structure and morphology of European larch cone scales with different moisture content.

The case study results were designed to enable an overview of two industrial seed extraction processes and identify their characteristic features. In a subsequent part of the paper we propose a reorganization of the thermal seed extraction process to obtain higher quality seeds suitable for long-term storage.

An analysis of the thermal process conducted under laboratory conditions for nine extraction variants made it possible to identify the characteristic parameters

of the process and examine the study material, which will be helpful in creating a computer program to be implemented in control cabinets during larch cone extraction. The study showed that it is not necessary to conduct seed extraction for more than four days. An efficient process consists of three days of cone drying with two 10-minute water immersion steps. During a longer process, deflection angle changes are lower than on preceding days, while the moisture content of cones does not decrease below the level obtained during the first three days of cone drying. Moreover, it was shown that 60% of all seeds contained in the cones can be extracted in the first three steps of the 8 h extraction variant.

Laboratory examination of the cellular structure and morphology of scales revealed considerable differences in the cells of scales depending on the moisture content of cones (from 5% to 20%).

The device (a patent-protected prototype) for shaking small batches of cones applied in the study can be used for seed extraction at seed evaluation and testing stations.

Key words: seed extraction from conifer cones, changes in moisture content of cones, kinematics of scale deflection, seed yield

Wykaz elementów stanowiących rozprawę doktorską

Rozprawa doktorska obejmuje trzy publikacje naukowe oraz jeden przyznany wniosek patentowy na wynalazek.

Publikacje naukowe:

1. **Tulska E., Aniszewska M.** 2022. *Comparison of thermal and thermomechanical methods of seed extraction from larch cones based on two case studies.* International Agrophysics 36(3), 197-206.
Doi: 10.31545/intagr/150734
MEN: 70 pkt, IF = 1,627
Udział procentowy doktorantki: 85%.
2. **Tulska E., Aniszewska M., Zychowicz W.** 2022. *Optimization of the process of seed extraction from the Larix decidua Mill. cones including evaluation of seed quantity and quality.* Scientific Reports 12:18227.
Doi: 10.1038/s41598-022-22942-2
MEN: 140 pkt, IF = 4,996
Udział procentowy doktorantki: 80%.
3. **Tulska E., Aniszewska M., Gendek A.** 2021. *The Kinematics of Scale Deflection in the Course of Multi-Step Seed Extraction from European Larch Cones (Larix decidua Mill.) Taking into Account Their Cellular Structure.* Materials 14, 4913.
Doi: 10.3390/ma14174913
MEN: 140 pkt, IF = 3,748
Udział procentowy doktorantki: 80%.

Wniosek patentowy na wynalazek:

4. **Tulska E., Aniszewska M.** 2021. **Urządzenie do wytrząsania nasion z szyszek, oraz zastosowanie urządzenia do wytrząsania nasion, zwłaszcza z rodzaju Larix albo Pinus** P.437143 (znak sprawy PK/8012/AR)
26.02.2021 – potwierdzenie przyjęcia wniosku do Urzędu Patentowego RP
06.10.2022 – pozytywna decyzja dotycząca zgłoszonego wynalazku i przyznanie patentu
Udział procentowy doktorantki: 90%.

Łączny IF publikacji stanowiących pracę doktorską: 10,371; łączna liczba punktów: 350.

Punktacja podana według listy czasopism punktowanych wg. MEN z 2021 r.

Impact Factor (IF) według Journal Citation Reports edycja z 2021 r.

Wykaz stosowanych skrótów i nazw własnych

- b – współczynnik charakteryzujący zmianę wilgotności [h^{-1}],
- b_{1-5} – współczynnik charakteryzujący zmianę wilgotności w danym etapie 1-5 [h^{-1}],
- b_{1c} – współczynnik charakteryzujący zmianę wilgotności w I (pierwszym) dniu łuszczenia szyszek sposobem cieplnym [h^{-1}],
- b_{2c} – współczynnik charakteryzujący zmianę wilgotności w II (drugim) dniu łuszczenia szyszek sposobem cieplnym [h^{-1}],
- $b_{c.m.}$ – współczynnik charakteryzujący zmianę wilgotności podczas łuszczenia sposobem cieplno-mechanicznym [h^{-1}],
- c – proces łuszczenia sposobem cieplnym,
- $c.m.$ – proces łuszczenia sposobem cieplno-mechanicznym,
- d – grubość [mm],
- e – podstawa logarytmu naturalnego,
- h – długość [mm],
- l_n – liczba nasion wyłuszczonych [szt.],
- $l_{\text{łusek}}$ – liczba łusek [szt.],
- l_w – liczba nasion wszystkich [szt.],
- M – masa szyszek o wilgotności 20% [kg],
- m_0 – masa początkowa szyszki [g],
- $M_{1000\text{nasion}}$ – masa 1000 nasion [g],
- max – maksimum,
- min – minimum,
- m_n – masa nasion wyłuszczonych [g],
- $odch. stand.$ – odchylenie standardowe,
- u – chwilowa zawartość wody w szyszce w czasie procesu łuszczenia [$\text{kg}_{\text{wody}} \cdot \text{kg}_{\text{s.s.}}^{-1}$],
- u_{01-05} – zawartość początkowa wody w szyszce w danym etapie 1-5 [$\text{kg}_{\text{wody}} \cdot \text{kg}_{\text{s.s.}}^{-1}$],
- u_{0c} – zawartość początkowa wody w szyszce łuszczonych sposobem cieplnym [$\text{kg}_{\text{water}} \cdot \text{kg}_{\text{d.w.}}^{-1}$],
- $u_{0c.m.}$ – zawartość początkowa wody w szyszce łuszczonych sposobem cieplno-mechanicznym [$\text{kg}_{\text{water}} \cdot \text{kg}_{\text{d.w.}}^{-1}$],
- u_{k1-5} – zawartość końcowa wody w szyszce w danym etapie 1-5 [$\text{kg}_{\text{wody}} \cdot \text{kg}_{\text{s.s.}}^{-1}$],

u_{kc} – zawartość końcowa wody w szyszce łuszczonej sposobem cieplnym
[$\text{kg}_{\text{water}} \cdot \text{kg}_{\text{d.w.}}^{-1}$],

$u_{kc.m}$ – zawartość końcowa wody w szyszce łuszczonej sposobem cieplno-
mechanicznym [$\text{kg}_{\text{water}} \cdot \text{kg}_{\text{d.w.}}^{-1}$],

W – wilgotność szyszki [%],

W_d – wydajność [%],

α – wskaźnik pozyskania nasion,

β – wskaźnik wydajności masowej,

τ_i – czas [h].

BNL – Biuro Nasiennictwa Leśnego,

GDLP – Generalna Dyrekcja Lasów Państwowych,

IBL – Instytut Badawczy Leśnictwa,

ISTA – International Rules for Seed Testing,

LBG – Leśny Bank Genów Kostrzyca,

LMP – Leśny Materiał Podstawowy,

LMR – Leśny Materiał Rozmnożeniowy,

PGL LP – Państwowe Gospodarstwo Leśne Lasy Państwowe,

PN – Plantacje Nasienne,

PUN – Plantacyjne Uprawy Nasienne,

RDLP – Regionalna Dyrekcja Lasów Państwowych,

SKN – Stacja Kontroli Nasion,

SON – Stacja Oceny Nasion.

Spis treści

Streszczenie.....	5
Summary.....	7
Wykaz elementów stanowiących rozprawę doktorską.....	9
Wykaz stosowanych skrótów i nazw własnych.....	10
1. Wstęp.....	15
2. Obecny stan wiedzy o modrzewiu.....	17
3. Przemysłowe pozyskiwanie nasion z szyszek modrzewia.....	22
4. Hipotezy badawcze, cele i zakres pracy.....	25
5. Materiał i metodyka badań.....	27
5.1. Materiał badawczy.....	27
5.2. Metodyka badań.....	27
5.2.1. Metodyka badań przemysłowych.....	28
5.2.1.1. Sposób cieplno-mechaniczny wyłuszczenia nasion.....	28
5.2.1.2. Sposób cieplny wyłuszczenia nasion.....	29
5.2.2. Metodyka badań laboratoryjnych.....	31
5.2.2.1. Wieloetapowy proces łuszczenia szyszek z nawilżaniem.....	31
5.2.2.2. Ocena jakości i żywotności nasion.....	35
5.2.2.3. Analiza zmiany kąta odchylenia łuski od trzpienia szyszki.....	35
5.2.2.4. Budowa komórkowa łusek szyszek o wilgotności 5% i 20%.....	37
5.2.2.5. Zróżnicowanie struktury łusek szyszek o wilgotności 5%, 10% i 20%.....	38
5.2.2.6. Analiza statystyczna.....	39
6. Omówienie wyników badań.....	40
6.1. Przemysłowe wyłuszczenie nasion z szyszek modrzewia w dwóch ośrodkach.....	40
6.2. Pięcioetapowe wyłuszczenie nasion z szyszek modrzewia z nawilżaniem w warunkach laboratoryjnych.....	45
6.3. Zmiana kąta odchylenia łuski od trzpienia szyszki w czasie procesu łuszczenia.....	57
6.4. Budowa komórkowa i struktura łusek szyszek modrzewia.....	61

7.	Podsumowanie i wnioski.....	64
8.	Bibliografia.....	71
9.	Publikacje stanowiące rozprawę doktorską.....	77
10.	Oświadczenia współautorów artykułów naukowych.....	122
11.	Wniosek patentowy na wynalazek.....	127

1. Wstęp

Głównym kierunkiem przemysłu leśnego jest dostarczanie gospodarce odpowiedniej ilości i jakości surowca drzewnego, dbając o odpowiedni stan zalesienia danego państwa (Fonder i in., 2007). Poziom lesistości w Polsce do roku 2050 powinien wzrosnąć do 33%, dlatego procesy odnowy lasu (siew bezpośredni i pozyskanie nasion do produkcji szkółkarskiej) mają ogromne znaczenie (Chałupka i in., 2011). Dodatkowo nasiona modrzewia są niezbędnym źródłem pożywienia dla niektórych ptaków (Song i in., 2015), a odpady wyluszcarskie (puste szyszki) są surowcem, który może być poddawany brykietowaniu (Gendek i in., 2018; Johnson i in., 2003) czy toryfikacji (Aniszewska i in., 2020; Xia i in., 2019) lub może być przeznaczony na inne cele energetyczne (Augusto i in., 2001; Malaťák i in., 2020; Raupp i in., 2020; Zhang i in., 2021).

Zainteresowanie pozyskaniem nasion zwiększa się w przypadku występowania suszy (Hereś i in., 2021), pożarów (Haverkamp i in., 2015), powodzi (Harmer & Morgan, 2009) lub innych działań niszczących np. wojennych (Lacan & McBride, 2009). Z drugiej strony negatywnie zmieniające się warunki środowiskowe (np. ocielenie klimatu), mogą powodować nieodwracalne zmiany pod względem genotypowym i fenotypowym drzew leśnych (Flanigan i in., 2020; Kang & Bilir, 2021; Pluess, 2011). Dlatego najbardziej pożądane są nasiona (Aniszewska, 2008; Załęski, 2002) o najwyższej klasie jakości, przeznaczone do długookresowego przechowywania, co pozwoli uniezależnić ekosystem wielofunkcyjnej gospodarki leśnej w obliczu przyspieszających zmian globalnych (Ammer i in., 2018).

Drzewa iglaste powszechnie występujące w Polsce to sosna zwyczajna, świerk pospolity, modrzew europejski oraz jodła pospolita. Wymienione gatunki iglaste wytwarzają szyszki, które dojrzewają w roku kwitnienia lub w drugim, trzecim roku po kwitnieniu (Załęski, 1995). Szyszki trzech pierwszych gatunków wyluszcza się w wyluszczeniach (Aniszewska, 2012; Miller, 1970). Szyszki jodły pospolitej po osiągnięciu dojrzałości rozpadają się na łuski, a trzpień łuski zazwyczaj pozostaje na drzewie. Wypadające podczas rozpadania nasiona rozsypują się pod drzewami. Szyszki sosny, świerka oraz modrzewia otwierają się na drzewach od 2 do 5 tygodni, a w warunkach sztucznych (w wyluszczeniach) czas pozyskania nasion można znacząco skrócić i kontrolować jakość nasion. Czas wyluszczenia świerka pospolitego w warunkach przemysłowych wynosi do 12 h, sosny zwyczajnej – ok. 30 h, a modrzewia europejskiego,

sposobem cieplnym, do 56 h (Aniszewska, 2008). Wydłużony czas wyłuszczenia nasion z tego gatunku jest związany z inną budową łusek modrzewia i sposobem ich otwarcia w porównaniu do łusek szyszek sosny i świerka (Tyszkiewicz, 1951).

Dzięki wykonywanym naprzemiennym ruchom łusek na szyszce modrzewia, odchyłaniu się i powrotu do trzpienia, nasiona są wypychane na zewnątrz szyszki. W momencie zbyt małego kąta odchylenia łuski nasiono nie zostaje uwolnione. Sposobem wydobywania nasion jest mechaniczne kruszenie szyszek po ich wcześniejszym wielogodzinnym suszeniu do wilgotności kilku procent (nazywane cieplno-mechanicznym). Łuski są wtedy kruche i łatwo się odłamują uwalniając nasiona (Tyszkiewicz, 1949). Z drugiej strony nasiona pozyskane takim sposobem mogą posiadać uszkodzenia (mikropęknięcia) okrywy nasiennej, powstałe po procesie ścierania łusek o elementy maszyn, co dyskwalifikuje nasiona z długookresowego przechowywania (takie nasiona mogą być wykorzystywane jedynie do bieżącego wysiewu) (Aniszewska, 2008; Załęski, 2002).

Obecnie brakuje szczegółowej metodyki przeprowadzania cieplnego procesu wyłuszczenia nasion z szyszek modrzewia europejskiego. W wyłuszczeniach stosuje się zamiennie programy do łuszczenia szyszek sosny i świerka zaimplementowane w zautomatyzowanych szafach suszarniczych (Obstawski, 2014; Sałat i in., 2010), z dwustopniową regulacją temperatury suszenia – aby zapobiec uszkodzeniom termicznym nasion (Tyszkiewicz & Tomanek, 1946).

Dlatego w celu wyłuszczenia nasion z tego gatunku rekomenduje się naprzemienne przeprowadzanie procesu suszenia i nawilżania szyszek (Aniszewska, 2008, 2014). Brakuje szczegółowych informacji dotyczących wyłuszczenia nasion metodą cieplną z nawilżaniem, tak aby uzyskać jak największą ilość nasion bez pogorszenia ich jakości. Ponadto nie badano czasu trwania takich etapów, w celu upewnienia się, że proces jest ekonomicznie i energetycznie uzasadniony.

2. Obecny stan wiedzy o modrzewiu

Modrzew europejski (łac. *Larix decidua* Mill.) jest jednym z sześciu głównych gatunków drzew występujących w Polsce (Kantorowicz, 2000) oraz dominującym gatunkiem występującym w Alpach (Praeg & Illmer, 2020). Jest gatunkiem rodzimym (Jansen & Geburek, 2016), w obrębie którego wydzielono osobno modrzew z Sudetów [var. *sudetica* (Cies.) Domin.] (Dostálek i in., 2018; Firsov i in., 2016; Semerikov i in., 1999) oraz modrzew polski [*L. decidua* subsp. *polonica* (Racib.) Domin.] (Zawadzka, 2008).

Modrzew europejski to gatunek jednopienny, osiągający wysokość w granicach 25 – 45 m, w pierśnicy do 1 m. Drzewa osiągają dojrzałość w otwartych drzewostanach w wieku 15 lat, w zamkniętych 35 – 40 lat (Matras & Pâques, 2008), a długość życia dochodzi do 400 lat (Carrer & Urbinati, 2004). Drzewa obradzają, co 2 – 3 lata (Tyszkiewicz, 1951) lub 4 lata (Rameau i in., 1989). W Polsce występuje w drzewostanach z sosną, co stanowi ok. 70% powierzchniowego udziału w polskich lasach (State Forests, 2019), a wiek modrzewia w obecnych drzewostanach z sosną wynosi 63 lata (Kozioł & Beza, 2020; Zajączkowski i in., 2020).

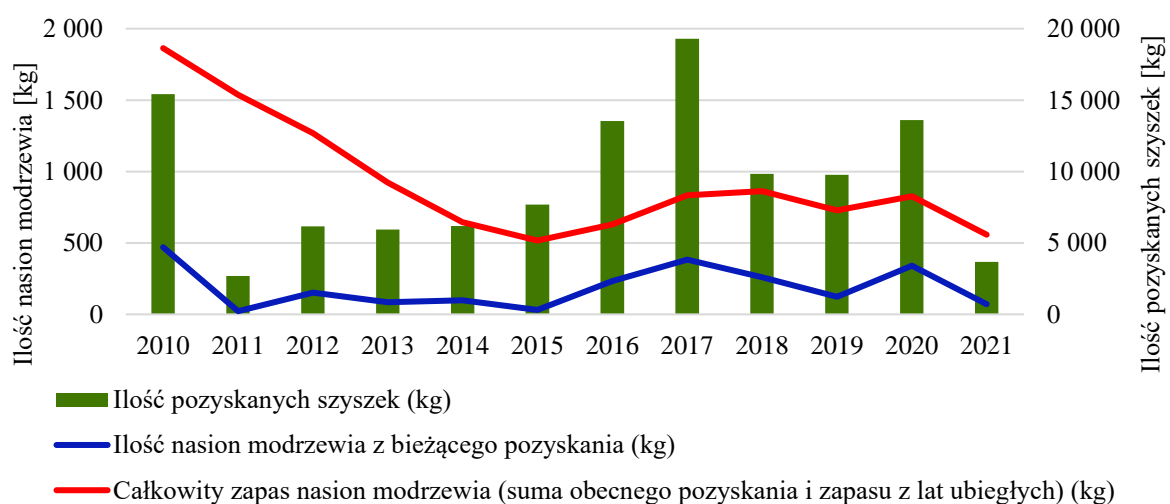
Modrzew ma odpowiednie właściwości użytkowe i hodowlane (Rzeźnik, 1980; Skrzypczyńska & Furgała, 2015; Weisgerber & Sindelar, 1992), charakteryzuje się dobrym wzrostem (Bruchwald & Zasada, 2010), jakością drewna oraz szybkim przyrostem miąższości (K. Zajączkowski & Załęski, 1993). Jest zalecany jako gatunek do upraw na plantacjach drzew szybkorosnących (Klisz, 2011), umożliwiając osiągnięcie większych przyrostów rocznych masy drewna (Bodył, 2009; West, 2006). Może być wprowadzany na nieużytkach i glebach najslabszej jakości (V-VI klasa) i o niskim poziomie wód gruntowych (Załęski, 1995).

Nasiona głównych gatunków drzew lasotwórczych mogą być pozyskiwane wyłącznie z LMP zarejestrowanego w Krajowym Rejestrze Leśnego Materiału Podstawowego udostępnionym przez BNL. Wielkości zbioru szyszek określa się uwzględniając zapasy nasion i ich jakość, zapotrzebowanie na najbliższe lata oraz możliwości zbioru nasion w danym roku (Haze, 2012). Polska pod względem zapotrzebowania na nasiona, części roślin i pyłek (stanowiące LMR) jest krajem samowystarczalnym (Kozioł & Beza, 2020) oraz posiada jedną z największych baz nasiennych spośród krajów europejskich (Haze, 2012). Wyróżnia się 4 kategorie LMR (ze zidentyfikowanego źródła, wyselekcjonowany, kwalifikowany, przetestowany), ale może on należeć tylko do jednej kategorii. LMR może

znajdować się w różnych regionach geograficznych pochodzenia modrzewia europejskiego (Chałupka i in., 2011).

Ponadto w całej Europie w celu zachowania różnorodności genetycznej drzew leśnych stosuje się ochronę *ex situ* (dynamiczną – zakładanie np. PN lub PUN poza obszarem występowania populacji) oraz *in situ* (statyczną – na obszarze występowania populacji) (Alia i in., 2021).

Przeciętnie z 1 ha powierzchni lasu iglastego można pozyskać od 200 do 500 kg szyszek, tym samym 17,5 – 28,0 kg nasion (Chałupka i in., 2011; Fonder i in., 2007). Zapotrzebowanie roczne na nasiona danego gatunku determinowane jest stanem zapasu nasion niewykorzystanych z lat poprzednich. W latach 2011 – 2035 zakłada się utrzymywanie zapasu nasion modrzewia na poziomie 1 000 kg (Chałupka i in., 2011). Według danych Wydziału Hodowli Lasu w Państwowym Gospodarstwie Leśnym Lasy Państwowe (PGL LP, 2021) średnio w latach 2010 - 2021 rocznie pozyskiwano ok. 9,5 tys. kg szyszek modrzewia. Najwięcej szyszek pozyskano w 2017 roku – 19 293 kg oraz w 2010 roku – 15 423 kg, a najmniej w latach 2011 – 2 676 kg oraz 2021 – 3 665 kg. Średni całkowity zapas nasion modrzewia w Polsce w latach 2010 – 2021 wynosił 933 kg. Największy zapas nasion modrzewia odnotowano w 2010 roku – 1 864 kg, a najmniejszy w 2015 roku – 517 kg (rys. 1).



Rys. 1. Całkowita ilość pozyskanych szyszek modrzewia oraz zapas nasion modrzewia w Polsce (kg); źródło: GDLP PGL LP, 2022

Długość szyszek modrzewia europejskiego wynosi od 2 do 5 cm (Wierdak, 1921) jak również od 4 do 5 cm (Spellenberg i in., 2014), a w przekroju wzdłużnym widać kształt podłużnej elipsy. Grubość (szerokość) szyszek wynosi ok. 2 cm, natomiast w przekroju

poprzecznym – posiadają kształt okręgu. Szyszki dojrzałe osiągają barwę brunatną z odcieniem czerwonego, czasami z szarym nalotem. Posiadają włoski na grzbiecie łusek i trzpieniu szyszki (Tyszkiewicz, 1949).

Cechą odróżniającą szyszki modrzewia europejskiego od szyszek innych gatunków pokrewnych jest osiąganie największej szerokości w dolnej połowie (Jedliński, 1922). Gęstość nasypowa szyszek modrzewiowych jest większa niż innych szyszek gatunków iglastych i wynosi $223 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (Aniszewska i in., 2018). Niezależnie od gatunku – po suszeniu szyszek i wyłuszczeniu nasion, następuje ubytek ich masy, a w przypadku szyszek sosny znacząco zwiększa się ich objętość w stosunku do objętości w stanie zamkniętym (Aniszewska, 2013).

Liczne łuski na szyszkach modrzewia pokrywają się jedna na drugiej („dachówkowato”), po zewnętrznej stronie łuski prążkowane o zmiennym kształcie. Na stronie wewnętrznej, od trzpienia łuski, szyszka może wykształcić dwa nasiona (Tyszkiewicz, 1951). Każde nasiono posiada jednostronnie przyrośnięte skrzydełko, które nie są pokarbowane, w odróżnieniu od skrzydełek sosny czy świerka (Aniszewska, 2014). Brzegi łusek szyszek są cienkie oraz zaokrąglone, faliste lub wcięte, po wyschnięciu odginają się na zewnątrz szyszki (Szafer, 1913). Według literatury zbudowane są z warstw komórek o różnej grubości ścianek (Tyszkiewicz, 1951).

Suche łuski są kruche, a po rozerwaniu struktury lignocelulozowej tracą elastyczność i nie odginają się ponownie (Tyszkiewicz, 1949). Specyficzne mechanizmy otwierania i zamykania łusek są związane ze strategią przetrwania i ewolucją drzew, co pozwoliło gatunkom iglastym na uwalnianie nasion i przemieszczanie ich na większe odległości (Johnson i in., 2003; Song i in., 2015). W warunkach naturalnych ziarno pyłku modrzewia może być transportowane na odległość do 300 m (Matras & Pâques, 2008), a czas życia nasion wynosi 3 – 7 lat (Rameau i in., 1989).

Wilgotność szyszek także jest regulowana przez naturę - szyszki są najbardziej wilgotne jesienią, do wiosny stopniowo wysychają pod wpływem słonecznej pogody, mrozu i wiatru. Nasiona zaczynają wypadać w następstwie wysunięcia się części skrzydełka poza łuskę o ok. 2 – 3 mm (Tyszkiewicz, 1951).

Woda jest najłatwiej odparowywana przez komórki znajdujące się po zewnętrznej stronie, przez co łuski odchylają się od trzpienia w środkowej i górnej części szyszki. Jest to tzw. ruch łusek (Bae & Kim, 2020; Bar-On i in., 2014). Zmniejszenie wilgotności szyszek modrzewia prowadzi do skurczu komórek łusek, a zwiększenie wilgotności –

do rozluźnienia komórek łusek, powodując przemieszczenie nasion na zewnątrz (Song i in., 2015). Proces przebiega stopniowo, a nasiona uwalniane są z szyszek nawet po kilkunastokrotnym otwieraniu i zamykaniu łusek (Załęski, 2002). Nasiona częściowo wysunięte na zewnątrz nie cofają się do swojej poprzedniej pozycji, nawet po nawilżeniu szyszek wodą. Jest to spowodowane tym, że przestrzeń pod łuską jest największa w miejscu przy osi szyszki (tzw. pierwotne łożysko nasienia) i rozszerza się na zewnątrz (Tyszkiewicz, 1949).

Gatunki drzew rodzaju *Larix* swobodnie krzyżują się między sobą (Jagielska, 2009). Spośród obcych gatunków modrzewia najczęściej spotykany w Polsce jest modrzew japoński (*L. kaempferi* Sarg.), którego naturalny zasięg obejmuje wyspy Japonii (Scheepers i in., 2000). Najważniejszą krzyżówką, z punktu ekonomicznego (Acheré i in., 2004) jest mieszaniec między modrzewiem europejskim i modrzewiem japońskim tzw. modrzew eurojapoński (*Larix × eurolepis* Henry) (Jagielska, 2009). Mieszaniec ten odznacza się (w pokoleniu F1) szybszym wzrostem niż gatunki rodzicielskie oraz większą odpornością na szkodniki (Tomanek, 1970). Modrzew eurojapoński wykazuje cechy pośrednie między gatunkami rodzicielskimi, np. po *L. kaempferi* względną odporność na raka modrzewiowego i szybki młodociany wzrost, zaś jakość drewna po *L. decidua* (Pâques, 1989).

Szyszki modrzewia są narażone na ponad 20 gatunków owadów (m.in. muchówka, błonkówka), a uszkodzone nasiona mogą stanowić 75% – 90% wyłuszczonego nasion (Skrzypczyńska & Furgała, 2015). Nasiona uszkodzone przez szkodniki w niewielkim procencie wypadają z szyszek podczas ciepłego wyłuszczenia, a w procesie cieplno-mechanicznym można wydobyć je wszystkie, co nie jest zjawiskiem pożądanym (Tyszkiewicz, 1951). Dodatkowo, mimo eliminacji szyszek zdeformowanych czy źle wykształconych (po analizie wizualnej) – nie zauważono znaczącego zmniejszenia się udziału nasion uszkodzonych przez szkodniki (Załęski, 1995).

Dodatkowo u modrzewia nasiona puste mogą stanowić do 70% wszystkich nasion w szyszkach (Kosiński, 1987). W procesie wyłuszczenia najbardziej oczekiwane są nasiona I klasy jakości (Załęski i in., 2000), o wysokiej żywotności (powyżej 40%), bez mikrouszkodzeń, które mogą być przeznaczone do długookresowego przechowywania (do 10 lat) (Aniszewska, 2008; Załęski, 2002).

Problemem badawczym są trudności w łuszczeniu szyszek modrzewia uwarunkowane specyficzną budową ich łusek. W literaturze brak jest badań nad kątami odchylenia łusek od trzpienia szyszki podczas zmiany zawartości wody w szyszkach, wynikających z budowy komórkowej łusek (zmianami grubości ścian komórkowych w czasie otwierania łusek) lub z budowy struktury łusek w czasie łuszczenia szyszek.

3. Przemysłowe pozyskiwanie nasion z szyszek modrzewia

Problem standaryzacji wyłuszczenia nasion z szyszek modrzewia (*Larix*) był badany głównie w okresie zalesiania terenów objętych wojną od lat 50. (Tyszkiewicz & Tomanek, 1946) do 80. (Dawson i in., 1997; Ilmurzyński, 1969; Kosiński, 1987; Rohmeder, 1972; Tyszkiewicz, 1949). Aktualna literatura dotycząca wyłuszczenia nasion z szyszek w dużej mierze koncentruje się na szyszkach sosny ze względu na największe zapotrzebowanie na nasiona tego gatunku (Aniszewska, 2012; Calama & Montero, 2007; Chen i in., 2022; Owens i in., 2008).

Pozyskiwane w Polsce szyszki gatunków iglastych mogą być łuszczone w 16 wyłuszczeniach gospodarczych PGL LP, z tym że niektóre z tych obiektów pełnią jedynie funkcję kulturalno-historyczną (Aniszewska, 2012). Szyszki są pozyskiwane przez odpowiednie nadleśnictwa na zlecenie RDLP z drzew ściętych oraz stojących. Wykorzystuje się w tym celu sprzęt alpinistyczny, wsięgniki koszowe, samojezdne maszyny o podwoziu gąsienicowym (kiedyś stosowano drabiny Drahalá) (Fonder i in., 2007; Haze, 2012; Tyszkiewicz, 1951).

Proces przemysłowego pozyskiwania nasion z szyszek (wyłuszczenia nasion) w wyłuszczeniach składa się z trzech grup czynności (Aniszewska, 2008).

Pierwsza grupa obejmuje czynności takie jak: przyjęcie i ważenie szyszek, oczyszczanie oraz magazynowanie szyszek (Sarnowska & Więsik, 1997). Szyszki są pozyskiwane w IV i I kwartale każdego roku oraz przechowywane w przewiewnych magazynach (Więsik & Aniszewska, 2011).

Druga grupa czynności obejmuje procesy łuszczenia szyszek w szafach łuszczeniowych oraz procesy wytrząsania nasion (lub kruszenia, ścierania łusek szyszek). Procesy te mogą być realizowane na dwa różne sposoby (Aniszewska, 2008):

- a) sposób cieplny (termiczny) z nawilżaniem,
- b) sposób cieplno-mechaniczny.

Łuszczenie szyszek sposobem cieplnym polega na naprzemiennym doprowadzeniu szyszek do stanu o obniżonej zawartości wody, a następnie ich nawilżania (Aniszewska, 2008; Ilmurzyński, 1969). W tym sposobie stosuje się zasadę dwufazowego łuszczenia szyszek o zmiennej temperaturze (na początku 35°C, później 50°C) (Tyszkiewicz & Tomanek, 1946), co zapobiega zaparzeniu nasion i pozwala uzyskać nasiona I klasy jakości (Załęski & Aniśko, 2003).

Stosowane są różne metody nawilżania szyszek: namaczanie (zanurzanie) w wodzie lub spryskiwanie wodą (Aniszewska, 2008). W sposobie cieplnym po każdym etapie suszenia, a przed nawilżaniem, stosuje się dodatkowe wytrząsanie nasion. W tym celu stosuje się maszyny np. do jodły, produkcji OTL Jarocin, Polska (separator SNS-2 lub separator SNS) lub urządzenia firmy BCC, Nomeko, Szwecja (BCC 800) (Suszka, 2000). W praktyce stosuje się dwie metody nawilżania szyszek: zanurzeniowa (np. Wyłuszcarnia Nasion w Lasowicach Małych; Nadleśnictwo Kluczbork) oraz polegająca na spryskiwaniu wodą (np. Wyłuszcarnia Nasion w Czarnej Białostockiej, Nadleśnictwo Czarna Białostocka). Niezalecane jest namaczanie szyszek przez dłuższy czas (ponad godzinę) z powodu pęcznienia nasion i możliwości wykorzystania nasion pozyskanych w ten sposób, tylko do bieżącego wysiewu (Tyszkiewicz, 1951).

Drugi sposób cieplno-mechaniczny, polega na długotrwałym suszeniu, a następnie, po znacznym obniżeniu zawartości wody w szyszkach do 8 – 10% (Suszka, 2000), kruszeniu łusek w celu wydobycia nasion (Tyszkiewicz, 1951; Załęski, 2002). Dodatkowo wprowadzany zabieg kruszenia powoduje pozyskanie wszystkich nasion z szyszek (Antosiewicz & Załęski, 1987), jednak możliwe jest uszkodzenie okrywy nasiennej poprzez elementy ścierające urządzeń do kruszenia szyszek (Aniszewska, 2014; Załęski, 2002). Takimi urządzeniami mogą być prototypy oparte na zasadzie działania wyłuszcarki mechanicznej TD (Tyszkiewicz-Drahal) czy wyłuszcarko-przesiewacza L 113 (OTL Jarocin, Polska) (Suszka, 2000). Po procesie kruszenia należy oddzielić nasiona od mieszaniny pyłu i resztek szyszek, co ze względu na zbliżony wymiar i masę jest utrudnione w prowadzonym na końcu sortowaniu nasion modrzewia pustych i pełnych, w celu uzyskania odpowiedniej czystości nasion (Aniszewska, 2008; Załęski, 2002; Załęski & Aniśko, 2003).

Trzecią grupę czynności procesu przemysłowego wyłuszczenia nasion z szyszek stanowią procesy odskrzydlania (w sposobie cieplnym), czyszczenia i separacji nasion oraz ich magazynowania (w sposobie cieplnym oraz cieplno-mechanicznym). W skład tej grupy wchodzi też procesy utylizacji produktu ubocznego procesu – pustych szyszek (sprzedaż lub spalanie) (Aniszewska, 2008), które potencjalnie mogą być wykorzystane jako biomasa energetyczna (Aniszewska i in., 2017).

W celu odskrzydlania nasion można stosować dwie metody: suchą i mokrą (Suszka, 2000). Sucha polega na mechanicznym oddzieleniu skrzydełek od nasion poprzez

ocieranie się nasion o powierzchnię twardą np. bębna, kołków, szczotek. Mokra polega na nawilżeniu nasion ze skrzydełkami, które pod wpływem wody pęcznieją i odrywają się od skrzydełek (Tylek & Walczyk, 2009). Pozostawienie skrzydełek przy nasionach jest zjawiskiem niepożądanym, gdyż skrzydełka utrudniają zastosowanie siewników punktowych do wysiewu nasion (Aniszewska, 2014).

Nasiona modrzewia (tzw. „orthodox” o wilgotności 7 – 8%) mogą być przechowywane krótkoterminowo (2-3 lata) w temperaturze od (-)3°C do 0°C, lub długoterminowo (do 10 lat) w temperaturze od (-)5°C do (-)10°C. Natomiast w LBG nawet do 30 lat – w temp: (-)20°C do (-)25°C (Fonder i in., 2007; Witowska i in., 2009; Załęski i in., 2006).

Wydajność pozyskania nasion ze 100 kg szyszek modrzewia europejskiego może wynosić 7,5% (Tyszkiewicz, 1951), od 5% do 8% (Kocięcki, 1966) lub zawierać się w granicach 3,2 – 9,0% (średnio 5,8 %) (Rohmeder, 1972). Natomiast możliwości produkcyjne polskich wyłuszcarni oraz uwarunkowania genetyczne i środowiskowe szyszek umożliwiają pozyskanie średnio od 5 do 8 kg nasion ze 100 kg szyszek (Chałupka i in., 2011).

Problemem badawczym są braki w wiedzy dotyczącej efektywności łuszczenia szyszek sposobem cieplnym z nawilżaniem (z namaczaniem) stosowanego do wyłuszczenia nasion z szyszek modrzewia w wyłuszczeniach gospodarczych. Nie jest znane z ilu etapów łuszczenia i nawilżania (namaczania) powinien się składać cały proces, by doprowadzić szyszki do stanu otwarcia w sposób nieinwazyjny tj. nie powodujący obniżenia jakości pozyskanych nasion, ale taki by uzyskać jak najwięcej nasion. Nie jest sprawdzone jakie powinny być czasy trwania tych etapów w celu uzasadnienia całego procesu pod względem ekonomicznym i energetycznym.

4. Hipotezy badawcze, cele i zakres pracy

Hipotezy badawcze:

1. W wyluszczeniu nasion z szyszek modrzewia europejskiego sposobem cieplnym istnieje taka liczba etapów łuszczenia i nawilżania (namaczania) o odpowiednich czasach trwania, które umożliwiają wyluszczenie ponad połowy nasion z tych szyszek.
2. Istnieje zawartość wody (wilgotność) w szyszce i kąt odchylenia łuski od trzpienia szyszki, przy których następuje uwolnienie nasion z szyszek modrzewia.

Cele naukowe:

1. Analiza przebiegu procesu przemysłowego wyluszczenia nasion z szyszek modrzewia dwoma sposobami: cieplnym (termicznym) z nawilżaniem oraz cieplno-mechanicznym oraz określenie jakości, ilości (w kg) i liczby (w szt.) pozyskanych w badanych procesach nasion na podstawie dwóch wyluszczeni gospodarczych.
2. Analiza zmian zawartości wody (wilgotności) w szyszkach podczas pięcioetapowego procesu łuszczenia laboratoryjnego o zmiennym czasie łuszczenia i czasie namaczania, opracowanie modelu procesu wymiany ciepła i masy podczas łuszczenia szyszek, ocena jakości oraz liczby pozyskanych nasion w badanych wariantach w czasie.
3. Badania nad zmianą kąta odchylenia łusek od trzpienia szyszki podczas zmiany zawartości wody w szyszkach w wieloetapowym procesie łuszczenia.
4. Analiza budowy morfologicznej łusek i związanej z nią zmiany grubości ścian komórkowych w czasie otwierania łusek oraz badania struktury łusek przy określonej zawartości wody w czasie łuszczenia szyszek.

Cele utylitarne:

1. Identyfikacja standardów i zmiany w organizacji procesu wyluszczenia nasion z szyszek modrzewia w wyluszczeniach gospodarczych.
2. Zaprojektowanie laboratoryjnego urządzenia do wytrząsania nasion z małych partii szyszek modrzewia do wykorzystania w stacjach oceny i kontroli nasion (SON i SKN).

Zakres pracy:

1. Opis procesów łuszczenia szyszek modrzewia sposobem cieplnym realizowanym w Wyłuszczeni Nasion w Czarnej Białostockiej i ciepłno-mechanicznym w Ośrodku Nasiennym w Równem oraz analiza ilości (w kg), jakości i liczby (w szt.) pozyskanych nasion.
2. Opis procesu pięcioetapowego łuszczenia szyszek modrzewia sposobem cieplnym o czasie pojedynczego etapu - 6, 8 lub 10 godzin, z namaczaniem 5, 10 lub 15 min w warunkach laboratoryjnych.
3. Określenie efektywności procesu, liczby i jakości nasion pozyskanych w każdym z poszczególnych etapów laboratoryjnego pięcioetapowego procesu łuszczenia szyszek.
4. Pomiar i analiza zmiany kąta odchylenia łuski od trzpienia szyszki podczas czteroetapowego procesu łuszczenia szyszek z namaczaniem.
5. Porównanie i opis budowy komórkowej łusek szyszek o wilgotności 5% i 20%.
6. Badanie zróżnicowania struktury łusek szyszek o wilgotności 5%, 10%, 20%.
7. Opracowanie i wykonanie prototypu urządzenia do wytrząsania nasion z małych partii szyszek badanych w warunkach laboratoryjnych (tj. „Urządzenie do wytrząsania nasion z szyszek, oraz zastosowanie urządzenia do wytrząsania nasion, zwłaszcza z rodzaju *Larix* albo *Pinus*”).

5. Materiał i metodyka badań

5.1. Materiał badawczy

Badaniom przemysłowym w wyłuszczeniach gospodarczych poddano szyszki zebrane w dwóch różnych województwach i dostarczone do dwóch jednostek: Wyłuszczeni Nasion w Czarnej Białostockiej (52°41'0 N, 23°60' E) oraz Leśnym Ośrodkiem Nasiennym w Równem (50°10' N, 22°20'0 E) w 2019 roku. Do badań sposobem cieplnym wykorzystano 160 kg szyszek modrzewia europejskiego (LMR MP/3/41001/05) oraz z tego szczegółowej analizie poddano 150 szyszek. Do badań sposobem cieplno-mechanicznym wykorzystano 115 kg szyszek modrzewia europejskiego (LMR MP/3/41061/05), z tego szczegółowej analizie poddano 120 szyszek. Wszystkie badania prowadzono na terenie obu obiektów.

Materiał do badań laboratoryjnych stanowiły szyszki modrzewia europejskiego (LMR MP/3/41001/05) zebrane w grudniu 2019 r. ze Szkołki Grabowiec, oddział 282 k, w gminie Bielsk Podlaski, województwie podlaskim i przetransportowane do Wyłuszczeni Nasion w Czarnej Białostockiej. Pozyskane z wyłuszczeni szyszki przewieziono do laboratorium Katedry Inżynierii Biosystemów, Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, podzielono na partie i przechowywano w chłodziarce laboratoryjnej LKexv 3600 (Liebherr, Bulle, Szwajcaria) w $2\pm 1^{\circ}\text{C}$ do czasu rozpoczęcia badań.

5.2. Metodyka badań

W obu wyłuszczeniach gospodarczych obserwowano przebieg łuszczenia w warunkach rzeczywistych oraz badano pojedyncze szyszki, które zamknięto w woreczkach z agrowłókniny (P17) i położono na sitach. Następnie sita z szyszkami w woreczkach umieszczono również w skrzyniach w szafach łuszcarskich. Podczas łuszczenia, co 2 h, wyjmowano pojedyncze szyszki z sit i ważono za pomocą wagi laboratoryjnej WPS210S (Radwag, Radom, Polska) ($\pm 0,001\text{g}$). Pomiar zajmował ok. 15 minut.

Wszystkie szyszki, zarówno z wyłuszczeni (łącznie 270 szyszek) jak i laboratorium (290 szyszek), poddano badaniom parametrów fizycznych (długość – h i grubość – d) i masy początkowej (m_0). Pomiar wielkości wykonano za pomocą suwmiarki elektronicznej model 677256 (Silverline Tools, Yeovil, Wielka Brytania) ($\pm 0,01\text{mm}$).

Pomiary masy prowadzono za pomocą wagi laboratoryjnej WPS210S (Radwag, Radom, Polska) ($\pm 0,001\text{g}$).

Po zakończeniu każdego z badanych procesów analizie poddano liczbę łusek otwartych w szyszkach zdolnych do wytworzenia dwóch nasion, gdyż są to elementy budowy decydujące o przebiegu procesu wyłuszczenia nasion z szyszek.

5.2.1. Metodyka badań przemysłowych

5.2.1.1. Sposób cieplno-mechaniczny wyłuszczenia nasion

Do wstępnego oczyszczenia szyszek z odpadów wykorzystano urządzenie do dozowania szyszek model 356-01 (BCC AB, Landskrona, Sweden) z separatorem rolkowym model 357-01 (BCC AB, Landskrona, Sweden). Następnie szyszki wsypywano, po 11,5 kg, do dziesięciu szuflad szafy łuszcarskiej DL 1200/38 HL 402-01 (BCC AB, Landskrona, Sweden). Godzinowe zapotrzebowanie energetyczne szafy to 25 kW.

Szyszki poddano zaprogramowanemu procesowi suszenia w szafie łuszcarskiej. Przez blisko 30 h temperatura wzrastała do ok. 45°C (program dla świerka), a wilgotność spadała do ok. 12%. Przez kolejne 10 godzin procesu łuszczenia grzałki w szafie załączały się tylko w przypadku podniesienia wilgotności powietrza, aby utrzymać wilgotność na stałym poziomie. Po 40 godzinach suszenia w szafie łuszcarskiej szyszki przesypano do bębna wyłuszcarskiego 401-SS (BCC AB, Landskrona, Sweden) w celu wydobycia nasion. Prędkość obrotowa bębna wynosiła $40\text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$, a czas wytrząsania 50 kg szyszek – 2 h. Następnie w celu mechanicznego kruszenia łusek, szyszki podzielono na partie po 10 kg, wkładano do bawełnianych worków i umieszczano w wyłuszczarce mechanicznej TD na 20 minut. Pozyskane frakcje nasion wraz z odpadami zasypano do wibracyjnego przesiewacza sitowego 423-SS (BCC AB, Landskrona, Sweden) (grubość sit 4 mm i 1,5 mm) w celu podziału na trzy frakcje (po 10 kg przez 30 min). Pierwsza to odpady grube, druga – nasiona pełne i puste, a trzecia – drobne zanieczyszczenia. Następnie nasiona zasypano do separatora pneumatycznego 422-SS (BCC AB, Landskrona, Sweden) w celu oddzielenia nasion pełnych od pustych. Prędkości strumienia powietrza podczas pracy urządzenia wynosiła $25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Szyszki pojedyncze (120 szt.) w woreczkach nie zostały poddane dodatkowemu wytrząsaniu w bębnie lub kruszeniu łusek w wyłuszczarce mechanicznej. Do badań ręcznie wydobyto z nich wszystkie nasiona.

5.2.1.2. Sposób cieplny wyłuszczenia nasion

Przed procesem łuszczenia szyszki oczyszczono z odpadów grubych (szypułek, igieł, pozostałości gałęzi) na urządzeniu do wstępnego oczyszczania szyszek z podajnikiem rolkowym (Nomeko, Umeå, Sweden). Następnie szyszki wsypywano do 4 skrzyń po 40 kg w komorze łuszcarskiej BW 1600 (Nomeko, Umeå, Sweden). Szyszki poddano suszeniu. Wykorzystano program dedykowany dla sosny, według którego przez pierwsze dwie godziny następował wzrost temperatury do ok. 35°C, a następnie, w kolejnych godzinach - do 50°C. Godzinowe zapotrzebowanie energetyczne szafy to 20 kW. Po 10 godzinach łuszczenia szyszki z poszczególnych skrzyń umieszczono na 7 minut, wewnątrz rotacyjnego bębna wyłuszcarskiego z podajnikiem wysypowym BGL20-01-4000-600 (Nomeko, Umeå, Sweden) o prędkości obrotowej 10 obr·min⁻¹ w celu wytrząsania nasion z szyszek. Następnie szyszki w skrzyniach (posiadające otwory) spryskiwano strumieniem bieżącej wody ok. 10 l na każdą skrzynię. Pozostawiono na 10 godzin w celu nasiąknięcia szyszek. Proces łuszczenia szyszek w szafie i wyłuszczenia nasion w bębnie powtórzono następnego dnia.

Pozyskane nasiona ze skrzydełkami zasypano do odskrzydlacza do nasion (Nomeko, Umeå, Sweden) i odskrzydlano metodą na mokro (metoda stosowana do modrzewia). Po 50 minutach włączono strumień powietrza i zmieniono kąt pochylenia odskrzydlacza z 30° na 90° na 10 minut w celu odseparowania skrzydełek od nasion. Odskrzydłone nasiona zasypano do wibracyjnego przesiewacza sitowego LASOL-F (Damas, Feeborg, Denmark) (grubość sit 4 mm, 4 mm i 3 mm) w celu podziału na trzy frakcje (ok. 10 kg przez 15 minut). Pierwsza to odpady grube, druga – nasiona pełne i puste, a trzecia – drobne zanieczyszczenia. Następnie nasiona z drugiej frakcji umieszczono w suszarce do nasion DC 200/400 (Nomeko, Umeå, Sweden) w celu doprowadzenia do odpowiedniej wilgotności nasion – ok. 5% (60 minut). Po tym nasiona zasypano do separatora pneumatycznego LASTI (Damas, Feeborg, Denmark) w celu oddzielenia nasion pełnych od pustych. Prędkości strumienia powietrza podczas pracy urządzenia wynosiła 10 m·s⁻¹.

Po pierwszym dniu łuszczenia, w pojedynczych 150 szyszkach w woreczkach policzono nasiona, które wypadły podczas procesu, a następnie spryskano szyszki wodą w celu zamknięcia ich łusek i pozostawiono na 10 godzin. W drugim dniu szyszki umieszczono z pozostałym wkładem do szafy łuszcarskiej.

Po procesie łuszczenia sposobem ciepłno-mechanicznym i ciepłnym, pozyskane nasiona policzono (l_n) i określono ich masę (m_n) na wadze WPS210S (Radwag, Radom, Polska) ($\pm 0,001\text{g}$). Następnie puste szyszki suszono w 105°C ($\pm 1^\circ\text{C}$) w suszarce, aż do uzyskania suchej substancji, co pozwoliło na obliczenie początkowej i końcowej zawartości wody oraz ustalenie chwilowych zawartości wody w szyszkach podczas procesu.

Podjęto próbę opisu zmian zawartości wody w szyszkach podczas procesu łuszczenia według modelu empirycznego Lewisa w II okresie suszenia (Aniszewska, 2008; Pabis, 1982, s. 198; Pabis & Henderson, 1961).

Na podstawie masy frakcji nasion pełnych oczyszczonych na separatorze pneumatycznym (m_n) oraz masy szyszek (M) w skrzyniach w szafie wyłuszcarskiej z nasionami przed łuszczeniem obliczono wydajność (W_d) (1) (Załęski i in., 2000), gdzie w przypadku oznaczania wydajności nasion modrzewia, wyrażonej masą nasion uzyskanych z jednostki wagowej szyszek, rzeczywistą masę tych szyszek przeliczono na masę szyszek o wilgotności 20%:

$$W_d = \frac{m_n}{M} \cdot 100\% \quad (1)$$

gdzie:

m_n – masa nasion oczyszczonych po procesie wyłuszczenia [kg],

M – masa szyszek o wilgotności 20% [kg].

Liczba (l_n i l_w) i masa (m_n i m_o) pozyskanych nasion z pojedynczych szyszek (w woreczkach) pozwoliły na ocenę dynamiki pozyskania nasion i obliczenia odpowiednio wskaźnika pozyskania nasion α (2) oraz wskaźnika wydajności masowej szyszek β (3) dla samego procesu łuszczenia w szafie, bez wytrząsania i kruszenia:

$$\alpha = \frac{l_n}{l_w} \quad (2)$$

gdzie:

l_n – liczba nasion wyłuszczonej [szt.],

l_w – liczba nasion wszystkich [szt.].

$$\beta = \frac{m_n}{m_o} \quad (3)$$

gdzie:

m_n – masa nasion wyłuszczonej [g],

m_o – masa początkowa szyszki [g].

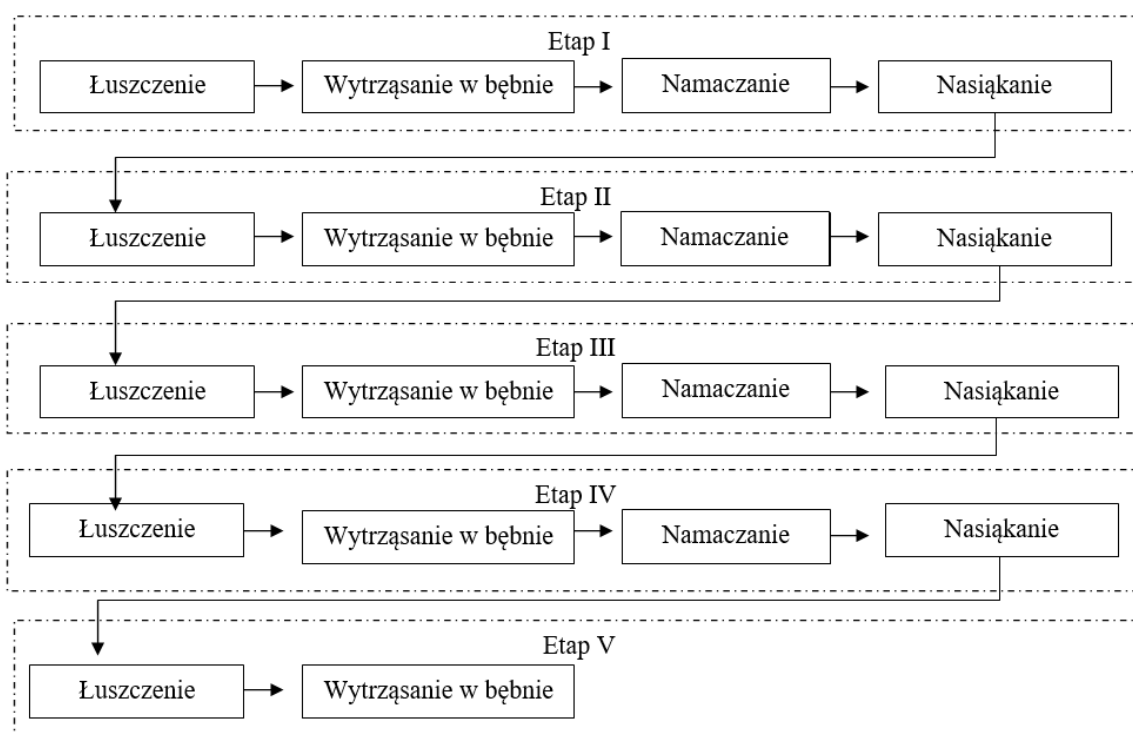
Dodatkowym obliczonym parametrem była $M_{1000nasion}$ pozyskanych dwoma sposobami na podstawie średniej masy z czterech powtórzeń po 100 sztuk.

5.2.2. Metodyka badań laboratoryjnych

5.2.2.1. Wieloetapowy proces łuszczenia szyszek z nawilżaniem

Wykonano dziewięć wariantów procesu wyłuszczenia nasion różniących się czasem łuszczenia i czasem namaczania. Każdy z wariantów składał się z: pięciu etapów łuszczenia o długości 10, 8 lub 6 godzin, pięciu etapów wytrząsania nasion w bębnie przez 30 min, czterech etapów namaczania przez 5, 10 lub 15 minut oraz czterech etapów nasiąkania szyszek o czasie 12, 14 lub 16 godzin (rys. 2).

Czasem efektywnego wyłuszczenia nazwano sumę wszystkich czasów łuszczenia, czasów namaczania oraz czasów wytrząsania nasion w bębnie podczas całego procesu. Z kolei czas całego procesu uwzględniał dodatkowo czas nasiąkania szyszek po I, II, III i IV etapie (rys. 2 i tabela 1).



Rys. 2. Schemat przebiegu procesu laboratoryjnego wyłuszczenia nasion modrzewia; źródło: Tulska i in. 2022

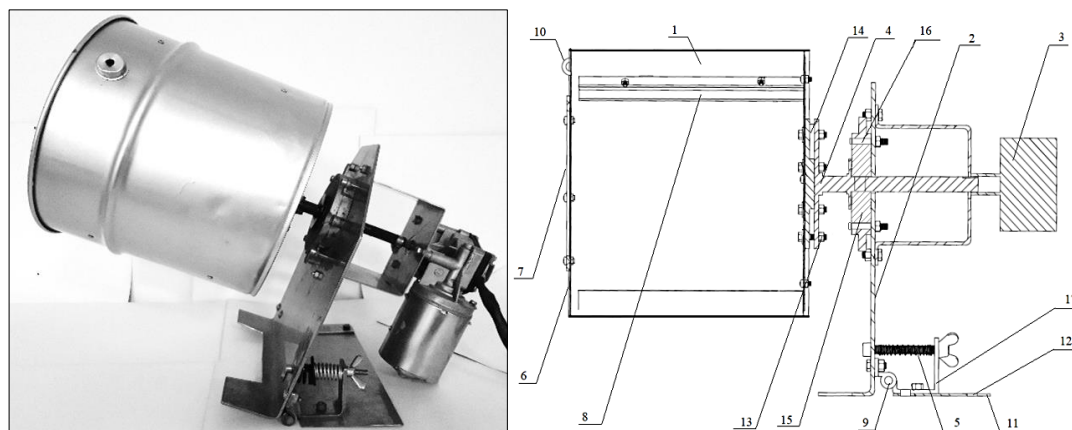
Tabela 1. Zakres badań laboratoryjnych procesu wyłuszczenia nasion; *źródło: Tulska i in., 2022*

Nr	Nazwa wariantu	Łączny czas łuszczenia w komorze [h]	Łączny czas namaczania [min]	Łączny czas wytrząsania nasion w bębnie [min]	Łączny czas nasiąkania [h]	Czas efektywnego łuszczenia	Czas całego procesu [h]
1	10h_5min	50	20	150	~48	50h+20min+150min	~ 101
2	10h_10min	50	40	150		50h+40min+150min	
3	10h_15min	50	60	150		50h+60min+150min	
4	8h_5min	40	20	150	~56	40h+20min+150min	~ 99
5	8h_10min	40	40	150		40h+40min+150min	
6	8h_15min	40	60	150		40h+60min+150min	
7	6h_5min	30	20	150	~64	30h+20min+150min	~ 97
8	6h_10min	30	40	150		30h+40min+150min	
9	6h_15min	30	60	150		30h+60min+150min	

Po wyjęciu z chłodziarki szyszki aklimatyzowano w temperaturze pokojowej (20-22°C) przez około 1 godzinę przy względnej wilgotności powietrza 40%. Następnie, po pomiarze parametrów wielkościowych i masy, 32 szyszki w danej partii układano na perforowanych półkach w konwekcyjnej suszarce Heraeus UT612 (Kendro Laboratory Products GmbH, Hanau, Niemcy) z wewnętrznym obiegiem powietrza. Na początku każdego łuszczenia, przez pierwsze dwie godziny, temperatura w suszarce wynosiła 35°C, a następnie podwyższono ją do 50°C, aż do końca procesu, aby zapobiec zaparzeniu nasion. W trakcie trwania procesu, szyszki wyjmowano, co 2 godziny z suszarki, w celu dokonania pomiaru masy i oddzielenia od nich wypadających nasion. Czas pomiaru wynosił ok. 5 minut.

Po każdym etapie (dniu) łuszczenia pojedyncze szyszki wkładano w szczelnie zamykanych woreczkach z agrowłókniny, a następnie umieszczono w bębnowym urządzeniu do wytrząsania nasion z szyszek i poddano wytrząsaniu przez 30 minut (dotyczy wynalazku: Urządzenie do wytrząsania nasion z szyszek, oraz zastosowanie

urządzenia do wytrząsania nasion, zwłaszcza z rodzaju *Larix* albo *Pinus* P.437143). Bęben urządzenia obracał się z prędkością 30 obr·min⁻¹, a oś obrotu bębna była pochylona pod kątem 30° względem podłoża (rys. 3).



Rys. 3. Urządzenie do wytrząsania nasion z szyszek drzew iglastych, a – widok, b – schemat: 1 – bęben, 2 – rama, 3 – silnik, 4 – wał napędowy, 5 – śruba do regulacji kąta nachylenia, 6 – pokrywa, 7 – wziernik, 8 – listwa zbierająca, 9 – ruchomy przegub, 10 – zaczep pokrywy bębna, 11 – podstawa montażowa, 12 – otwór montażowy, 13 – śruba montażowa bębna z kołnierzem wału, 14 – kołnierz wału, 15 – sprzęgło gumowe, 16 – śruba montażowa sprzęgła gumowego, 17 – profil kątowy; źródło: patent P.437143

Po wytrząsaniu, z każdego woreczka, wyjmowano nasiona oraz zapisywano ich liczbę i masę. Następnie szyszki poddano namaczaniu w plastikowych pojemnikach napełnionych do połowy wodą destylowaną o temperaturze około 24°C ($\pm 1^\circ\text{C}$), w czasie odpowiednim dla badanego wariantu 5, 10 lub 15 minut. Podczas namaczania szyszki były stale zanurzone w wodzie.

Po namaczaniu, szyszki wyjmowano i pozostawiano na bawełnianej tkaninie w kontrolowanej temperaturze 22°C przez 12, 14, 16 godzin przy łuszczeniu w wariantach odpowiednio 10, 8 lub 6 godzin.

W drugim i kolejnym etapie łuszczenia, przed umieszczeniem szyszek w suszarce wykonywano pomiaru masy badanych szyszek. Następnie postępowano dokładnie tak jak w przypadku pierwszego etapu łuszczenia. Po piątym łuszczeniu szyszek, nie wykonywano już zabiegu namaczania ani nasiąkania, tylko wytrząsanie nasion.

Temperaturę i wilgotność w suszarce oraz w laboratorium monitorowano za pomocą miernika FTH 100 (Geo FENNEL, Kassel Germany) z dokładnością odpowiednio do 0,01° C i 0,01%.

Po procesie wyłuszczenia szyszki pozbawione nasion suszono w 105°C ($\pm 1^\circ\text{C}$) w suszarce aż do suchej substancji. Wykonanie pomiaru suchej substancji w szyszkach pozwoliło na obliczenie początkowej i końcowej zawartości wody oraz ustalenie chwilowych zawartości wody w szyszkach podczas procesu. Założono, że zmiany zawartości wody w szyszkach w procesach pięcioetapowego łuszczenia można opisać z wykorzystaniem modelu empirycznego Lewisa w II okresie suszenia (Aniszewska, 2008; Pabis, 1982; Pabis & Henderson, 1961). Przy czym w modelu Lewisa występuje wartość (u_r) jako równowagowa zawartość wody (Szarycz i in., 2006), a w zaproponowanym modelu dla procesu łuszczenia szyszek modrzewia zastosowano wartość (u_k), jako końcową zawartość wody w szyszce, na końcu każdego z etapów po 10, 8 lub 6 godzinach. Dostosowanie modelu do warunków łuszczenia polegało na ustaleniu wartości współczynników dla każdego z pięciu etapów w warunkach zmiennej temperatury w komorze suszenia i czynników mających wpływ na ich wartość.

Ogólne równanie opisujące przebieg zmian zawartości wody w szyszkach u dla jednego etapu ma postać - 4 (Pabis, 1982) :

$$u = (u_0 - u_k) \cdot e^{(-b \cdot \tau_i)} + u_k \quad (4)$$

gdzie:

u – chwilowa zawartość wody w szyszce w czasie procesu łuszczenia [$\text{kg}_{\text{wody}} \cdot \text{kg}_{\text{s.s.}}^{-1}$],

u_0 – zawartość początkowa wody w szyszce w danym etapie [$\text{kg}_{\text{wody}} \cdot \text{kg}_{\text{s.s.}}^{-1}$],

u_k – zawartość końcowa wody w szyszce w danym etapie [$\text{kg}_{\text{wody}} \cdot \text{kg}_{\text{s.s.}}^{-1}$],

b – współczynnik charakteryzujący zmianę wilgotności [h^{-1}],

τ_i – czas [h],

e – podstawa logarytmu naturalnego.

Podawana w literaturze fachowej (Pabis, 1982) wartość współczynnika b jest stała i odwzorowuje zmianę wilgotności szyszek suszonych w stałej temperaturze (Aniszewska, 2012).

Dodatkowo wyznaczono szybkość łuszczenia w danym etapie na podstawie wzoru 5:

$$\frac{du}{d\tau_i} = -b \cdot (u_0 - u_k) \cdot e^{(-b \cdot \tau_i)} \quad (5)$$

Przy użyciu powyższych równań 4 i 5 opisano przebiegi łuszczenia dla pojedynczych szyszek w poszczególnych etapach dziewięciu wariantów.

Do oceny liczby pozyskanych nasion posłużono się metodą kumulacji ich uwalniania podczas procesu. Zbierane w trakcie procesu informacje o liczbie i masie pozyskanych

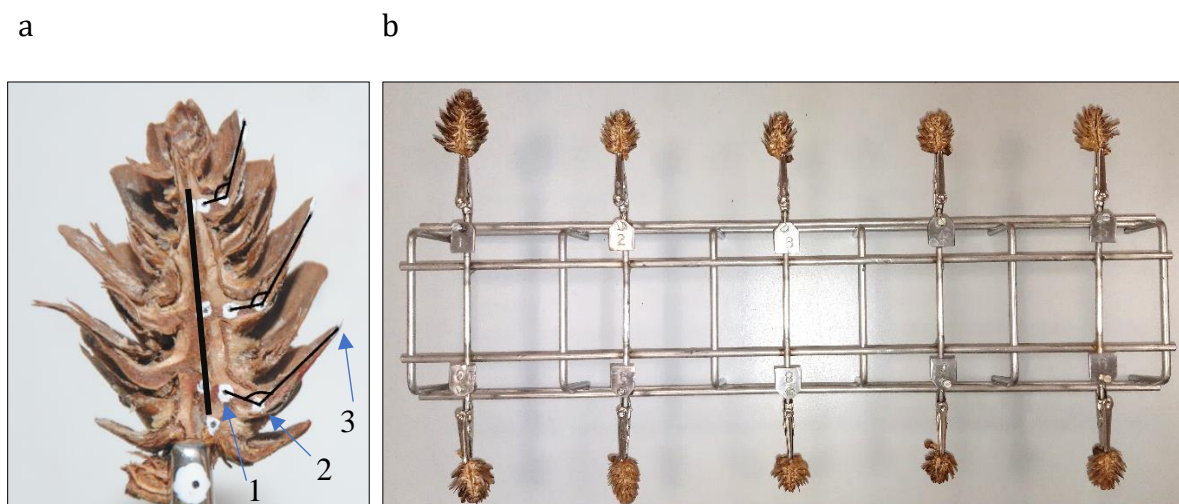
nasion pozwoliły na ocenę efektywności (skuteczności) pozyskania nasion i obliczenia liczbowego wskaźnika pozyskania nasion α (2) oraz wskaźnika wydajności masowej szyszek β (3).

5.2.2.2. Ocena jakości i żywotności nasion

Nasiona pozyskane z każdego etapu badanych procesów, ręcznie odskrzydlono, oczyszczono i wysiano na kiełkowniku Jacobsena (Laborset, Łódź, Polska) w celu oceny żywotności nasion według zasad obowiązujących w SON w Polsce (PN-R-65700, 1998; Załęski i in., 2006). Nasiona modrzewia umieszczono na bibule filtracyjnej na kiełkowniku Jacobsena w trzech powtórzeniach po 100 próbek dla każdej partii nasion. W dwudziestoczterogodzinnym cyklu pracy kiełkownika 8 godzin stanowił czas naświetlania nasion. Temperatura wody w kiełkowniku utrzymywana była na poziomie 24°C. Nastawy temperatury były regulowane przez TERMO-STAB RBS1 sterownik (TERMO-STAB, Warszawa, Polska) z dokładnością $\pm 1^\circ\text{C}$. Zastosowano regulator czasu ekspozycji GRASSLIN Talento 371 (Grässlin GmbH, St. Georgen, Niemcy). Źródłem światła były dwie świetlówki TUNGSRAM 36W-F74 DAYLIGHT. Energię kiełkowania badano po 7 dniach, a zdolność kiełkowania po 28 dniach doświadczenia. Na podstawie tych wyników określono klasę jakości nasion według normy PN-R-65700. Nasiona modrzewia pierwszej klasy powinny kiełkować w 40 – 60 % przypadków.

5.2.2.3. Analiza zmiany kąta odchylenia łuski od trzpienia szyszki

Badanie kąta odchylenia łusek od trzpienia wykonano w laboratorium podczas czteroetapowego procesu łuszczenia szyszek. Pojedyncze, zamknięte szyszki modrzewia cięto na połowę, wzdłuż trzpienia. Do cięcia szyszek wykorzystano autorski nóż z nasadą, mocowany w specjalnie zmodernizowanym uchwycie ręcznej prasy ślimakowej o nacisku 1 tony (Cormak, Siedlce, Polska). Na połówce przeciętej części szyszki wybierano łuski z części podstawy, środkowej i wierzchołkowej oraz rysowano na nich po trzy punkty odniesienia (rys. 4a). Pierwszy (1) w miejscu łączenia się z trzpieniem szyszki, drugi (2) w części zakrzywienia łuski oraz trzeci (3) w części wierzchołkowej łuski, na końcu łuski. Po narysowaniu punktów odniesienia, przygotowane połówki szyszek umieszczono w uchwytach specjalnie skonstruowanego statywu do badania kąta otwarcia szyszek (rys. 4b).



Rys. 4. Widok: a – połówki szyszki z zaznaczonymi punktami odniesienia i osią trzpienia, b – statywu do badania kąta otwarcia szyszki dla 10 szyszek; *źródło: Tulska i in., 2022*

Następnie szyszki umieszczono w konwekcyjnej suszarce Heraeus UT612 (Kendro Laboratory Products GmbH, Hanau, Niemcy) z wewnętrznym obiegiem powietrza. Temperaturę suszącego powietrza w suszarce nastawiono na 35°C przez pierwsze dwie godziny, a następnie podwyższono do 50°C przez kolejne sześć godzin badań. Przez cały czas trwania procesu, co godzinę, wyjmowano statyw z suszarki i wykonywano zdjęcia pojedynczych szyszek. Do zrobienia zdjęć wykorzystano aparat fotograficzny Nikon D3000 (Nikon, Tokio, Japonia) z obiektywem AF-S DX NIKKOR 18–105 mm f/3,5-5,6G ED VR. Szyszki w statywie fotografowano na białym tle, z suwmiarką ręczną (Modeco MN 85-001, Polska), która była wzorcem pomiarowym, używanym później do skalowania. Zastosowano stałą ogniskową 105 mm o przysłonie $f=5,6$. Zdjęcia posiadały rozdzielczość 3872×2592 pikseli, zapisane w formacie JPG. Odległość między soczewką, a szyszkami wynosiła 350 mm.

Druga połówka każdej szyszki była umieszczona na szkiełku laboratoryjnym o średnicy $\phi=90,0$ mm (Chemland, Stargard, Polska) w suszarce obok statywu z szyszkami. Po wykonaniu zdjęć pierwszej z połówek, wyjmowano z suszarki drugą połówkę szyszki znajdującą się na szkiełku laboratoryjnym i ważono na wadze laboratoryjnej WPS 210S (Radwag, Radom, Polska) z dokładnością do 0,001g.

Po ośmiu godzinach łuszczenia szyszek i wykonaniu zdjęć każdej z połówek szyszek co godzinę, namaczano połówki szyszek przez 10 minut w destylowanej wodzie o temperaturze ok. 25°C w zlewkach laboratoryjnych (Chemland, Stargard, Polska),

następnie wyjmowano i pozostawiono na 14 godzin do nasiąknięcia. Cykl powtarzano przez kolejne cztery dni.

Po zakończeniu procesu łuszczenia, drugą połówkę szyszek suszono w 105°C przez 24 godziny, do uzyskania suchej substancji.

Po procesie wykonane zdjęcia analizowano w programie MultiScan Base v. 18.03 (Computer Scanning System, Warszawa, Polska). Na zdjęciach, za pomocą linii, łączono trzy punkty odniesienia na każdej łusce i wyznaczono kąt, zwany kątem otwarcia szyszki α , w każdej godzinie procesu dla trzech łusek na pojedynczej szyszce (rys. 4a). Dokładność pomiaru kąta wynosiła $\pm 0,01^\circ$.

Przyjęto, że wilgotność bezwzględna części tych samych połówek szyszek umieszczonych na statywie w momencie wykonywania zdjęć była taka sama jak tych umieszczonych na szkiełkach laboratoryjnych. Dlatego na podstawie wykonywanych podczas procesu pomiarów masy szyszek na szkiełkach oraz ich zawartości suchej substancji obliczono szacunkową zawartość wody w każdej szyszce, którą zestawiono z odpowiednim w danej chwili kątem otwarcia tej szyszki.

5.2.2.4. Budowa komórkowa łusek szyszek o wilgotności 5% i 20%

Z szyszek, o wilgotności 5 i 20%, pobrano łuski ze środkowej części szyszki. Z łusek wykonano preparaty pobrane z części przekroju poprzecznego przez środkową część łuski (rys. 5a). Do wycięcia fragmentów łusek o wilgotności 5% wykorzystano nóż do cięcia NT Cutter BA-170 (Tokio, Japonia), mocowany w mikrotomie WSL-lab (Zürich, Switzerland) w IBL w Sękocinie Starym. Do wycięcia fragmentów łusek o wilgotności 20% wykorzystano nóż Leica 22 C (Wetzlar, Germany), mocowany w mikrotomie MC 2 u4.2 (Moskwa, Rosja). Przygotowane preparaty obserwowano w przybliżeniu $\times 40$, $\times 100$, $\times 400$. Preparaty z łusek o wilgotności 5% za pomocą mikroskopu biologicznego Olympus BX61 (ZEISS, Oberkochen, Germany) wraz z kamerą Asion 556 (ZEISS, Oberkochen, Germany) i oprogramowaniem ZEN v. 2.3 (ZEISS, Oberkochen, Germany). Preparaty z łusek o wilgotności 20% za pomocą mikroskopu biologicznego Nikon Alphaphot – 2 YS2 (Tokio, Japonia) wraz z kamerą Panasonic GP – KR222E (Kadoma, Japonia) i oprogramowaniem MultiScan Base v. 18.03 (Computer Scanning System, Warszawa, Polska).

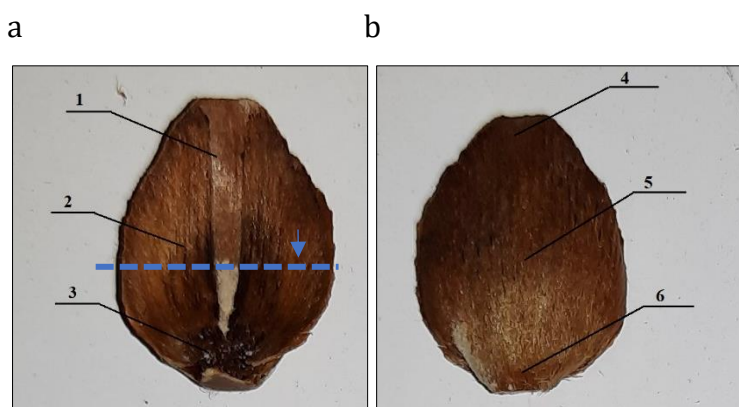
Na wykonanych zdjęciach spod mikroskopu, mierzono długość od brzegu komórki do światła komórkowego, przyjęto dla tej części nazwę - grubość ściany komórkowej.

W celu przygotowania preparatów z szyszek o wilgotności 5%, pobrane łuski namaczano na 15 minut w glicerynie roślinnej w celu zmniejszenia kruchości i umożliwienia cięcia na mikrotomie. W przypadku cięcia łusek o wilgotności 20% nie było takiej konieczności. Dokładność pomiarów grubości ścian komórkowych wynosiła $\pm 0,0001\mu\text{m}$.

5.2.2.5. Zróznicowanie struktury łusek szyszek o wilgotności 5%, 10% i 20%

Badania struktury łusek szyszek modrzewia wykonano na mikroskopie skaningowym SEM 200 (Quanta, FEI, Europe), na łuskach oddzielonych ze środka całych szyszek wykorzystanych do badań komórkowych.

Obserwowano charakterystyczne miejsca na stronie wewnętrznej, na której położone są nasiona ze skrzydełkami (rys. 5a) i zewnętrznej łusek (rys. 5b) w powiększeniu $\times 50$ oraz $\times 500$.



Rys. 5. Widok łuski modrzewia pochodzącej ze środka szyszki: a – wewnętrznej strony z zaznaczonym miejscem przekroju poprzecznego oceny budowy mikroskopowej: 1 - granica położenia skrzydełka w części wierzchołkowej, 2 - miejsce pod skrzydełkiem w części środkowej, 3 - zagłębienie po nasieniu w części przytrzpieniowej, b – zewnętrznej strony: 4 - część wierzchołkowa łuski, 5 - część środkowa, do której przylega kolejna łuska (5), część przytrzpieniowa (6). *źródło Tulska i in., 2022*

Wykonywano zdjęcia fragmentów strony wewnętrznej: granica położenia skrzydełka (1), miejsce pod skrzydełkiem (2), zagłębienie po nasieniu (3) oraz strony zewnętrznej: część wierzchołkowa łuski (4), część środkowa, do której przylega kolejna łuska (5), część przytrzpieniowa (6). Wykonane zdjęcia z mikroskopu skaningowego analizowano w programie MultiScan Base v. 18.03 (Computer Scanning System, Warszawa, Polska) i mierzono wielkość widocznych elementów struktury łusek o wilgotnościach 5%, 10% i 20%.

5.2.2.6. Analiza statystyczna

Do analiz statystycznych wykorzystano program programu Statistica v.13 (*Statistica 13*, 2010) oraz v.13.3 (*TIBCO*, 2017). Oceniono rozkład normalny badanych parametrów wielkościowych i masy szyszek za pomocą testu Shapiro-Wilka. W przypadku pomiarów w warunkach przemysłowych – różnice w średnich parametrach wielkości, masy oraz liczby i masy nasion oceniano za pomocą analizy wariancji (testem T–studenta) oraz test dla grup niezależnych (F ANOVA). W przypadku pomiarów w warunkach laboratoryjnych – różnice w średnich parametrach wielkościowych i masy szyszek oceniano za pomocą testu F ANOVA i testu Duncana. Jednorodność wariancji zbadano również za pomocą testu HSD Tukey’a.

Wszystkie analizy przeprowadzono na poziomie istotności statystycznej 0,05.

6. Omówienie wyników badań

6.1. Przemysłowe wyluszczenie nasion z szyszek modrzewia w dwóch ośrodkach

Na podstawie analizy wariancji ANOVA stwierdzono, że szyszki użyte do badań w dwóch wyluszczeniach, różniły się od siebie istotnie pod względem: długości ($F=37,49$ przy $p=0,00$) oraz grubości ($F=59,77$ przy $p=0,00$) i masy ($F=26,16$ przy $p=0,000$) oraz wilgotności ($F=1231,45$ przy $p=0,000$).

W tabeli 2 przedstawiono: średnie z odchyleniem standardowym, współczynnik zmienności i błąd standardowy parametrów badanych szyszek z dwóch lokalizacji (pochodzeń) łuszczonych sposobem cieplno-mechanicznym (c.-m.) oraz cieplnym (c.) dla pojedynczych partii. Test Shapiro – Wilka wykazał, że badane cechy miały rozkład normalny.

Tabela 2. Parametry wielkościowe, masa i wilgotność szyszek wykorzystanych do badań oraz liczba i masa nasion wyluszczonego w procesie; *źródło: Tulska & Aniszewska, 2022*

Parametr	Średnia (\pm odch. std)		Wsp. zmn., %		Błąd stand.	
	c.-m.	c.	c.-m.	c.	c.-m.	c.
Długość szyszki h [mm]	28,04 \pm 3,93	31,04 \pm 4,05	14,02	13,06	0,36	0,33
Grubość szyszki d [mm]	18,41 \pm 1,76	16,75 \pm 1,76	9,54	10,50	0,16	0,14
Masa początkowa szyszki m_0 [g]	2,976 \pm 1,035	3,663 \pm 1,143	34,769	31,216	0,094	0,093
Wilgotność szyszki W [%]	22,80 \pm 3,71	41,55 \pm 4,82	16,29	11,60	0,34	0,39
Liczba łusek $l_{\text{łusek}}$ [szt.]	49 \pm 8	53 \pm 8	17	16	1	1
Liczba nasion w szyszce l_w [szt.]	60 \pm 16	32 \pm 15	27	45	1	1
Liczba nasion wyluszczonego l_n [szt.]	11 \pm 10	15 \pm 12	99	80	1	1
Masa nasion wyluszczonego $m_{n.wyt.}$ [g]	0,052 \pm 0,055	0,078 \pm 0,060	105,661	76,696	0,005	0,005

c.-m. – proces cieplno-mechaniczny; c. – proces cieplny

Parametry szyszek wykorzystywanych do badań zawierały się w granicach podawanych przez innych badaczy (Więsik & Aniszewska, 2011) h : 30–50 mm,

d : 20– 30 mm, m_0 : 1,0–7,0 g, $l_{\text{łusek}}$: 35–70 szt., oprócz długości szyszek wykorzystanych do badań sposobem ciepłno-mechanicznym, która jest mniejsza. Na jednej szyszce łuszczonej sposobem ciepłno-mechanicznym występowało średnio więcej nasion (l_w), niż na szyszce łuszczonej sposobem ciepłnym.

Całkowity czas ciepłno-mechanicznego procesu wyłuszczenia nasion wynosił 48 godzin, zaś ciepłnego 38 godzin i różnił się czasem przebywania szyszek w szafie łuszcarskiej. Czas łuszczenia w szafie sposobem ciepłno-mechanicznym wynosił łącznie – 40 godzin, zaś ciepłnym – 20 godzin. W sposobie ciepłno-mechanicznym, nie było większych przerw, po łuszczeniu, szyszki przeniesione były do urządzenia do kruszenia łusek. W sposobie ciepłnym, ponad 10 godzin stanowił czas nasiąkania szyszek po nawilżeniu, w którym to czasie szyszki znajdowały się w skrzyniach łuszcarskich.

Poszczególne zawartości wody w szyszkach średnie i odchylenia standardowe ($u \pm$ odch. stand), minimum ($u. \min$) i maksimum ($u. \max$) oraz wartość współczynnika ($b \pm$ odch. stand.), podczas łuszczenia dwoma sposobami dla badanych pojedynczych szyszek przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Podstawowe parametry procesu łuszczenia szyszek dwoma sposobami; *źródło: Tulska & Aniszewska, 2022*

Sposób ciepłno-mechaniczny	Czas [h]	$u \pm$ odch. stand. [kg _{wody} · kg _{s.s.} ⁻¹]	$u. \min$ [kg _{wody} · kg _{s.s.} ⁻¹]	$u. \max$ [kg _{wody} · kg _{s.s.} ⁻¹]	$b \pm$ odch. stand. [1·h ⁻¹]
	0	0,228±0,037	0,130	0,399	-
	2	0,195±0,035	0,102	0,338	0,14±0,04
	4	0,166±0,033	0,073	0,289	0,16±0,06
	6	0,146±0,032	0,055	0,258	0,17±0,07
	8	0,132±0,033	0,042	0,232	0,17±0,03
	10	0,121±0,031	0,032	0,207	0,17±0,02
	18	0,107±0,031	0,021	0,232	0,14±0,02
	20	0,107±0,035	0,023	0,331	0,13±0,02
	22	0,105±0,031	0,023	0,197	0,12±0,02
	24	0,104±0,031	0,021	0,196	0,12±0,02

		26	0,103±0,031	0,020	0,195	0,12±0,01
		28	0,103±0,031	0,020	0,195	0,11±0,02
		30	0,101±0,032	0,018	0,189	0,12±0,02
		32	0,100±0,031	0,017	0,192	0,11±0,02
		40	0,096±0,031	0,015	0,188	0,12±0,02
Sposób cieplny	Dzień 1	0	0,387±0,043	0,288	0,493	-
		2	0,277±0,047	0,154	0,459	0,22±0,08
		4	0,180±0,042	0,095	0,357	0,28±0,09
		6	0,124±0,029	0,058	0,260	0,31±0,07
		8	0,095±0,020	0,050	0,185	0,35±0,09
		10	0,073±0,015	0,036	0,120	0,57±0,02
	Dzień 2	0	0,456±0,048	0,239	0,499	-
		2	0,351±0,066	0,173	0,464	0,20±0,13
		4	0,272±0,067	0,101	0,430	0,21±0,10
		6	0,213±0,053	0,081	0,357	0,23±0,08
		8	0,165±0,042	0,059	0,260	0,28±0,10
		10	0,127±0,024	0,042	0,174	0,58±0,02

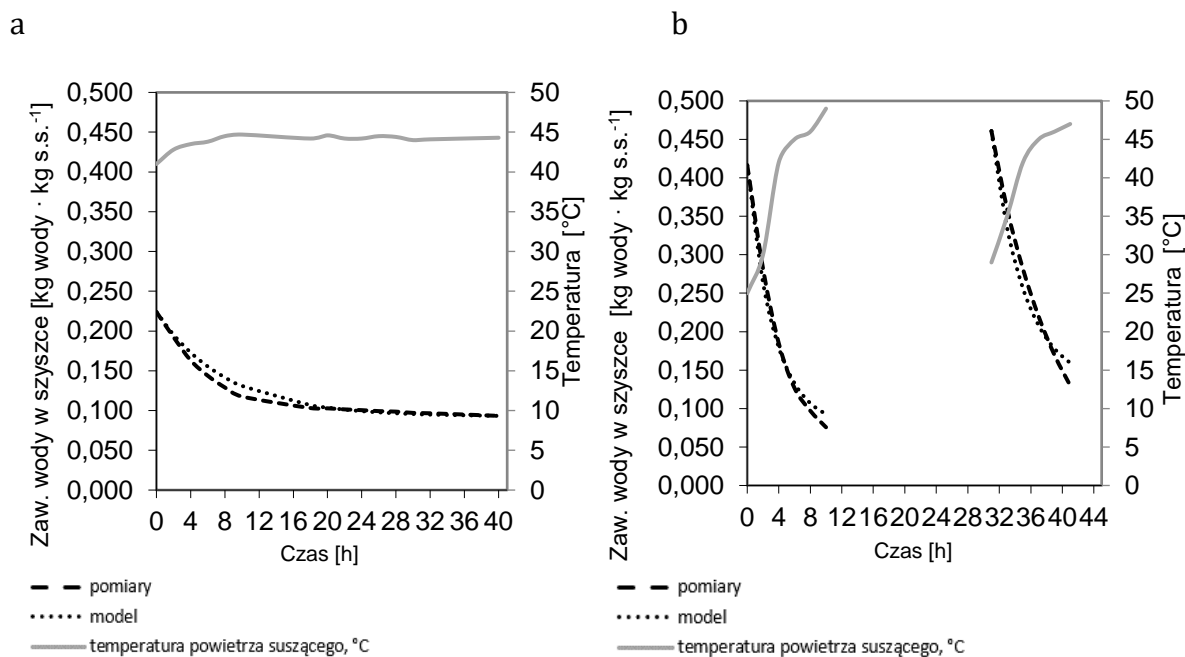
u – zawartość wody w szyszkach, odch. stand. – odchylenie standardowe, min , max – minimum, maksimum, b – współczynnik charakteryzujący zmianę wilgotności

Średnia początkowa zawartość wody w szyszkach ($u_{oc.m.}$) łuszczonych sposobem cieplno-mechanicznym wynosiła $0,228 \text{ kg}_{\text{wody}} \cdot \text{kg}_{\text{s.s.}}^{-1}$. Natomiast średnia początkowa zawartość wody w szyszkach ($u_{oc.}$) łuszczonych sposobem cieplnym wynosiła $0,387 \text{ kg}_{\text{wody}} \cdot \text{kg}_{\text{s.s.}}^{-1}$ pierwszego dnia oraz $0,456 \text{ kg}_{\text{wody}} \cdot \text{kg}_{\text{s.s.}}^{-1}$ drugiego dnia. Średnia końcowa zawartość wody w szyszkach łuszczonych sposobem cieplno - mechanicznym ($u_{kc.m.}$) wynosiła $0,096 \text{ kg}_{\text{wody}} \cdot \text{kg}_{\text{s.s.}}^{-1}$. Natomiast średnia końcowa zawartość wody w szyszkach łuszczonych sposobem cieplnym ($u_{kc.}$) pierwszego dnia wynosiła $0,073 \text{ kg}_{\text{wody}} \cdot \text{kg}_{\text{s.s.}}^{-1}$, a drugiego dnia $0,127 \text{ kg}_{\text{wody}} \cdot \text{kg}_{\text{s.s.}}^{-1}$. Średnia początkowa zawartość wody w szyszkach łuszczonych sposobem cieplnym była wysoka, dlatego konieczne było

zachowanie szczególnej ostrożności poprzez zastosowanie zasady dwufazowego łuszczenia w zmiennej temperaturze.

Średnia wartość współczynnika b w szyszkach podczas łuszczenia sposobem cieplno-mechanicznym wynosiła $b_{c.m.}=0,13 (\pm 0,01)$. Natomiast średnie wartości współczynnika b charakteryzującego zmianę wilgotności w szyszkach podczas łuszczenia sposobem cieplnym odpowiednio dla poszczególnych dni wynosiły $b_{1c}=0,29 (\pm 0,04)$ oraz $b_{2c}=0,26 (\pm 0,06)$. Średni współczynnik $b_{c.m.}$ miał niższą wartość niż b_{1c} lub b_{2c} na co miał wpływ dwukrotnie dłuższy czas ciągły łuszczenia w szafie w przypadku sposobu cieplno-mechanicznego w porównaniu do pojedynczych dni łuszczenia sposobem cieplnym.

Na rysunku 6 przedstawiono przebiegi krzywych rzeczywistych i modelowych zmian średnich zawartości wody dla zbioru szyszek łuszczonych sposobem cieplno-mechanicznym (a) oraz cieplnym (b). Błąd dopasowania modelu wynosił poniżej 5% dla sposobu cieplno-mechanicznego.



Rysunek 6. Wykresy zmian średnich zawartości wody dla przykładowej szyszki - rzeczywisty i z modelu dla: a – podczas łuszczenia sposobem cieplno-mechanicznym, b – podczas łuszczenia sposobem cieplnym oraz zmiana temperatury powietrza wewnątrz szafy w czasie łuszczenia; *źródło: Tulska & Aniszewska, 2022*

Przebiegi łuszczenia szyszek w obu wyłuszczeniach opisano za pomocą równań (4) i (5).

Dla sposobu cieplno-mechanicznego (procesu ciągłego) łuszczenia:

$$u_{c.m.} = 0,131 \cdot e^{(-0,13 \cdot \tau_i)} + 0,093 \quad (6)$$

Dla sposobu cieplnego, dla dwóch etapów łuszczenia:

$$\text{Dzień 1: } u_{1c.} = 0,341 \cdot e^{(-0,29 \cdot \tau_i)} + 0,076 \quad (7)$$

$$\text{Dzień 2: } u_{2c.} = 0,331 \cdot e^{(-0,26 \cdot \tau_i)} + 0,130 \quad (8)$$

Po przeprowadzeniu procesu cieplno-mechanicznego otrzymano 4,46 kg nasion pełnych odskrzydlonych ze 115 kg szyszek o wilgotności początkowej 22,80% ($\pm 3,71$). Po procesie cieplnym otrzymano 1,98 kg nasion pełnych ze 160 kg szyszek o wilgotności początkowej 41,55% ($\pm 4,82$).

W tabeli 4 podano wartości energii i zdolności kiełkowania nasion pozyskanych w badanych procesach łuszczenia w dwóch wyłuszczeniach.

Tabela 4. Porównanie energii i zdolności kiełkowania nasion pozyskanych dwoma sposobami w różnych etapach procesu łuszczenia; *źródło: Tulska & Aniszewska, 2022*

Etap pozyskania nasion	Sposób cieplno-mechaniczne			Sposób cieplny		
	Energia	Zdolność	Klasa jakości	Energia	Zdolność	Klasa jakości
Po wyłuszczeniu w bębnie wyłuszczeniowym	48	48	I	I dzień - 35	I dzień - 35	II
			I	II dzień - 26	II dzień - 26	II
Po kruszenie w wyłuszczarce mechanicznej	41	42	I	-	-	-
Po sortowaniu w przesiewaczu sitowym	49	49	I	39	40	I
Po sortowaniu na separatorze pneumatycznym - nasiona pełne	57	58	I	41	41	I
Bez łuszczenia - próba kontrolna	58	58	I	41	41	I

Energia i zdolność kiełkowania badanych nasion z poszczególnych etapów procesu łuszczenia szyszek sposobem cieplno-mechanicznym była większa w porównaniu ze sposobem cieplnym. Wyniki zdolności próby kontrolnej szyszek przeznaczonych do łuszczenia sposobem cieplnym są niższe w ramach pierwszej klasy jakości nasion, co było spowodowane dużą ilością nasion niezdolnych do kiełkowania - pustych w szyszkach. Szyszki z tej lokalizacji charakteryzują się słabszym potencjałem

genetycznym nasion (po wyłuszczeniu w bębnie i odskrzydlaczu także otrzymano niższą klasę jakości).

Energia i zdolność nasion po kruszeniu w wyłuszczarce mechanicznej w sposobie ciepłno-mechanicznym była mniejsza niż w innych etapach tego sposobu łuszczenia. Dodatkowo badając czystość próbki nasion po kruszeniu zauważono większy udział uszkodzonych połówek lub fragmentów nasion niż w innych etapach.

Wysokie wartości energii i zdolności kiełkowania świadczą o prawidłowym przebiegu procesu sortowania w obu procesach, a docelowo pozyskane nasiona będące produktem końcowym w procesach łuszczenia dwoma sposobami były klasyfikowane jako nasiona I klasy jakości (średnio na 3×100 szt. nasion skiełkowało powyżej 40szt. nasion wszystkich).

Proces łuszczenia w szafie sposobem ciepłno-mechanicznym wymagał zapotrzebowania energetycznego ok. 1000 kWh (40 h · 25 kW), a sposobem ciepłym ok. 400 kWh (20 h · 20 kW).

6.2. Pięcioetapowe wyłuszczenie nasion z szyszek modrzewia z nawilżaniem w warunkach laboratoryjnych

Szyszki ze wszystkich dziewięciu wariantów badań nie różniły się od siebie pod względem długości (gdzie współczynnik wariacji w teście T-studenta – $F=1,33$ przy $p=0,23$), grubości ($F=1,77$ przy $p=0,08$), masy początkowej ($F=0,86$ przy $p=0,55$). Za pomocą analizy wariacji ustalono, że istotna różnica występuje w przypadku wilgotności szyszek (gdzie $F=2,52$ przy $p<0,05$).

Parametry szyszek takie jak długość, grubość i masa początkowa mogą być czynnikami decydującymi o przebiegu procesu łuszczenia. Dlatego zależność między grubością i długością wszystkich szyszek użytych do badania opisano równaniem regresji liniowej (9):

$$y = 0,2794x + 8,3195, R = 0,778 > 0,104 - R_{kr} \quad (9)$$

Można zauważyć, że wraz ze wzrostem długości o 1 mm wzrasta grubość szyszki o 0,28 mm.

Masa początkowa może być związana z terminem zbioru lub warunkami przechowywania. Równaniem regresji liniowej opisano także zależność między długością a masą początkową badanych szyszki, z którego wynika, że wraz ze wzrostem długości o 1 mm, następuje zwiększenie masy początkowej średnio o 0,238 g ($R=0,795>0,104$).

Analiza statystyczna nie wykazała istotnej zależności pomiędzy długością lub masą początkową szyszki oraz liczbą lub masą wyłuszczonej z niej nasion.

Początkowe (u_{0x}) i końcowe (u_{kx}) zawartości wody szyszek (wraz z odchyleniem standardowym) wykorzystanych do badań w poszczególnych wariantach podano w tabeli 5.

Tabela 5. Początkowe i końcowe zawartości wody oraz ich odchylenia standardowe w szyszkach podczas łuszczenia w poszczególnych wariantach; *źródło: Tulska i in., 2022*

Nr	Wariant	Zawartość wody w szyszkach [$\text{kg}_{\text{wody}} \cdot \text{kg}_{\text{s.s.}}^{-1}$]									
		u_{01}	u_{k1}	u_{02}	u_{k2}	u_{03}	u_{k3}	u_{04}	u_{k4}	u_{05}	u_{k5}
1	10h_5 min	0,402 ^{a,b} ±0,036	0,131 ^a ±0,022	0,408 ^a ±0,054	0,108 ^a ±0,022	0,413 ^{a,b} ±0,053	0,085 ^a ±0,013	0,414 ^b ±0,057	0,069 ^a ±0,008	0,415 ^a ±0,053	0,071 ^{a,b} ±0,004
2	10h_10 min	0,415 ^a ±0,043	0,130 ^a ±0,021	0,422 ^a ±0,053	0,108 ^a ±0,018	0,424 ^{a,b} ±0,054	0,087 ^a ±0,013	0,426 ^{a,b} ±0,051	0,070 ^a ±0,008	0,429 ^{a,b} ±0,055	0,070 ^{a,b} ±0,004
3	10h_15 min	0,416 ^a ±0,036	0,129 ^a ±0,024	0,425 ^a ±0,060	0,110 ^a ±0,019	0,450 ^{b±} 0,055	0,086 ^a ±0,012	0,466 ^b ±0,080	0,071 ^a ±0,007	0,468 ^b ±0,066	0,071 ^{a,b} ±0,004
4	8h_5 min	0,410 ^{a,b} ±0,052	0,126 ^a ±0,026	0,406 ^a ±0,061	0,090 ^b ±0,017	0,421 ^{a,b} ±0,061	0,081 ^a ±0,011	0,422 ^{a,b} ±0,081	0,072 ^a ±0,015	0,424 ^{a,b} ±0,084	0,064 ^a ±0,011
5	8h_10 min	0,411 ^{a,b} ±0,054	0,126 ^a ±0,037	0,409 ^a ±0,046	0,090 ^b ±0,024	0,433 ^{a,b} ±0,048	0,080 ^a ±0,010	0,430 ^{a,b} ±0,053	0,071 ^a ±0,010	0,444 ^{a,b} ±0,051	0,065 ^a ±0,009
6	8h_15 min	0,414 ^{a,b} ±0,034	0,132 ^a ±0,027	0,429 ^a ±0,059	0,106 ^a ±0,023	0,438 ^{a,b} ±0,054	0,086 ^a ±0,013	0,449 ^{a,b} ±0,059	0,070 ^a ±0,009	0,452 ^{a,b} ±0,067	0,064 ^a ±0,005
7	6h_5 min	0,380 ^b ±0,052	0,121 ^a ±0,022	0,404 ^a ±0,059	0,106 ^a ±0,022	0,372 ^c ±0,045	0,090 ^{a,b} ±0,018	0,393 ^a ±0,068	0,077 ^b ±0,022	0,398 ^a ±0,076	0,077 ^{b,c} ±0,026
8	6h_10 min	0,390 ^{a,b} ±0,042	0,139 ^a ±0,024	0,405 ^a ±0,035	0,114 ^a ±0,019	0,403 ^{a,c} ±0,038	0,101 ^{b,c} ±0,020	0,403 ^b ±0,058	0,091 ^{b,c} ±0,011	0,411 ^a ±0,046	0,081 ^c ±0,017
9	6h_15 min	0,398 ^{a,b} ±0,044	0,129 ^a ±0,038	0,420 ^a ±0,048	0,117 ^a ±0,018	0,423 ^{a,b} ±0,058	0,105 ^c ±0,016	0,428 ^{a,b} ±0,067	0,100 ^c ±0,015	0,436 ^{a,b} ±0,066	0,093 ^d ±0,018

a, b, c, d - grupy jednorodne

Początkowa zawartość wody w szyszkach (u_{0x}) w większości wariantów zwiększała się wraz z kolejnym etapem łuszczenia z powodu zabiegu namaczania. W większości wariantów końcowa zawartość wody (u_{kx}) była największa dla pierwszego etapu i malała lub była równa wraz z każdym kolejnym etapem łuszczenia.

Średnia początkowa zawartość wody dla trzech wariantów 10 godzin łuszczenia wynosiła $0,411 \text{ kg}_{\text{wody}} \cdot \text{kg}_{\text{s.s.}}^{-1}$. Po 10 godzinach łuszczenia średnia zawartość wody zmniejszyła się do $0,130 \text{ kg}_{\text{wody}} \cdot \text{kg}_{\text{s.s.}}^{-1}$. Średnia początkowa zawartość wody w piątym etapie wynosiła $0,437 \text{ kg}_{\text{wody}} \cdot \text{kg}_{\text{s.s.}}^{-1}$, a końcowa w piątym etapie $0,071 \text{ kg}_{\text{wody}} \cdot \text{kg}_{\text{s.s.}}^{-1}$.

Szyszki łuszczone 10 godzin osiągały średnio 7% wilgotności po czwartym etapie oraz taki sam poziom osiągnęły po kolejnym etapie (u_{k5}).

Średnia początkowa zawartość wody dla trzech wariantów 8 godzin łuszczenia wynosiła $0,412 \text{ kg}_{\text{wody}} \cdot \text{kg}_{\text{s.s.}}^{-1}$. Po 8 godzinach łuszczenia średnia zawartość wody zmniejszyła się do $0,128 \text{ kg}_{\text{wody}} \cdot \text{kg}_{\text{s.s.}}^{-1}$. Średnia początkowa zawartość wody w piątym etapie wynosiła $0,440 \text{ kg}_{\text{wody}} \cdot \text{kg}_{\text{s.s.}}^{-1}$, a końcowa w piątym etapie $0,064 \text{ kg}_{\text{wody}} \cdot \text{kg}_{\text{s.s.}}^{-1}$. Szyszki łuszczone 8 godzin osiągały średnio 7,1% wilgotności po czwartym etapie oraz średnio 6,4% wilgotności po piątym etapie.

Średnia początkowa zawartość wody dla trzech wariantów 6 godzin łuszczenia wynosiła $0,389 \text{ kg}_{\text{wody}} \cdot \text{kg}_{\text{s.s.}}^{-1}$. Po 6 godzinach łuszczenia średnia zawartość wody zmniejszyła się do $0,129 \text{ kg}_{\text{wody}} \cdot \text{kg}_{\text{s.s.}}^{-1}$. Średnia początkowa zawartość wody w piątym etapie wynosiła $0,415 \text{ kg}_{\text{wody}} \cdot \text{kg}_{\text{s.s.}}^{-1}$, a końcowa w piątym etapie $0,084 \text{ kg}_{\text{wody}} \cdot \text{kg}_{\text{s.s.}}^{-1}$. Szyszki łuszczone 6 godzin osiągały średnio 8,9% wilgotności po czwartym etapie oraz średnio 8,4% wilgotności po piątym etapie, czyli więcej niż szyszki łuszczone w wariantach 8 i 10 godzin.

Największą początkową zawartością wody w poszczególnych etapach charakteryzowały się szyszki o najdłuższym czasie namaczania (15 min) w porównaniu z dwoma pozostałymi wariantami o takim samym czasie łuszczenia (namaczanie 5 min i 10 min).

Końcowe zawartości wody w poszczególnych etapach różniły się dla szyszek o różnym czasie namaczania. Wyższą końcową zawartością wody w poszczególnych etapach charakteryzowały się szyszki o czasie namaczania 15 min, najmniejszą o długości 5 min.

Test HSD Tukey'a wyróżnił grupy jednorodne ze względu na zawartość początkową wody na początku każdego z etapów ($u_{01}, u_{02}, u_{03}, u_{04}, u_{05}$) oraz zawartość końcową wody ($u_{k1}, u_{k2}, u_{k3}, u_{k4}, u_{k5}$), co przedstawiono w tabeli 4. Przykładowo, ze względu na zawartość końcową wody po piątym etapie (u_{k5}) wyróżniono cztery grupy jednorodne, pierwszą – obejmującą wszystkie warianty oprócz 7,8,9, drugą – obejmującą warianty: 1,2,3,7, trzecią – obejmującą warianty 7 i 8 oraz czwartą grupę jednorodną, którą stanowi jeden wariant o numerze 9.

Za pomocą równania (4), opisano zmianę zawartości wody dla każdej z badanych szyszek dla kolejnych pięciu etapów, każdego wariantu. W równaniu wpisano wartości początkowej i końcowej zawartości wody oraz współczynnik b dla poszczególnych szyszek.

Średnie wartości współczynnika b i odchylenia standardowe dla każdego z etapów w poszczególnych wariantach przedstawiono w tabeli 6.

Tabela 6. Średnie wartości współczynnika b i odchylenia standardowe dla etapów badanych wariantów; źródło: *Tulska i in., 2022*

Nr	Wariant	Współczynnik b				
		b_1	b_2	b_3	b_4	b_5
1	10h_5min	0,36 ^a ±0,04	0,41 ^a ±0,04	0,48 ^a ±0,05	0,46 ^a ±0,05	0,45 ^a ±0,05
2	10h_10min	0,35 ^a ±0,03	0,43 ^a ±0,04	0,51 ^{a,b} ±0,06	0,48 ^a ±0,05	0,46 ^a ±0,05
3	10h_15min	0,34 ^a ±0,04	0,42 ^a ±0,04	0,50 ^{a,b} ±0,05	0,45 ^a ±0,04	0,50 ^c ±0,05
4	8h_5min	0,45 ^d ±0,07	0,52 ^d ±0,09	0,50 ^{a,b} ±0,05	0,46 ^a ±0,05	0,46 ^a ±0,05
5	8h_10min	0,40 ^c ±0,07	0,46 ^c ±0,08	0,47 ^a ±0,05	0,46 ^a ±0,05	0,46 ^a ±0,04
6	8h_15min	0,43 ^{c,d} ±0,08	0,47 ^c ±0,04	0,53 ^{b,c} ±0,06	0,57 ^b ±0,06	0,60 ^d ±0,07
7	6h_5min	0,53 ^b ±0,05	0,55 ^b ±0,03	0,55 ^{c,d} ±0,03	0,55 ^b ±0,03	0,54 ^{b,c} ±0,03
8	6h_10min	0,55 ^b ±0,06	0,58 ^b ±0,06	0,57 ^d ±0,05	0,58 ^b ±0,06	0,57 ^{b,d} ±0,05
9	6h_15min	0,53 ^b ±0,04	0,55 ^b ±0,04	0,55 ^{c,d} ±0,03	0,57 ^b ±0,04	0,55 ^b ±0,03

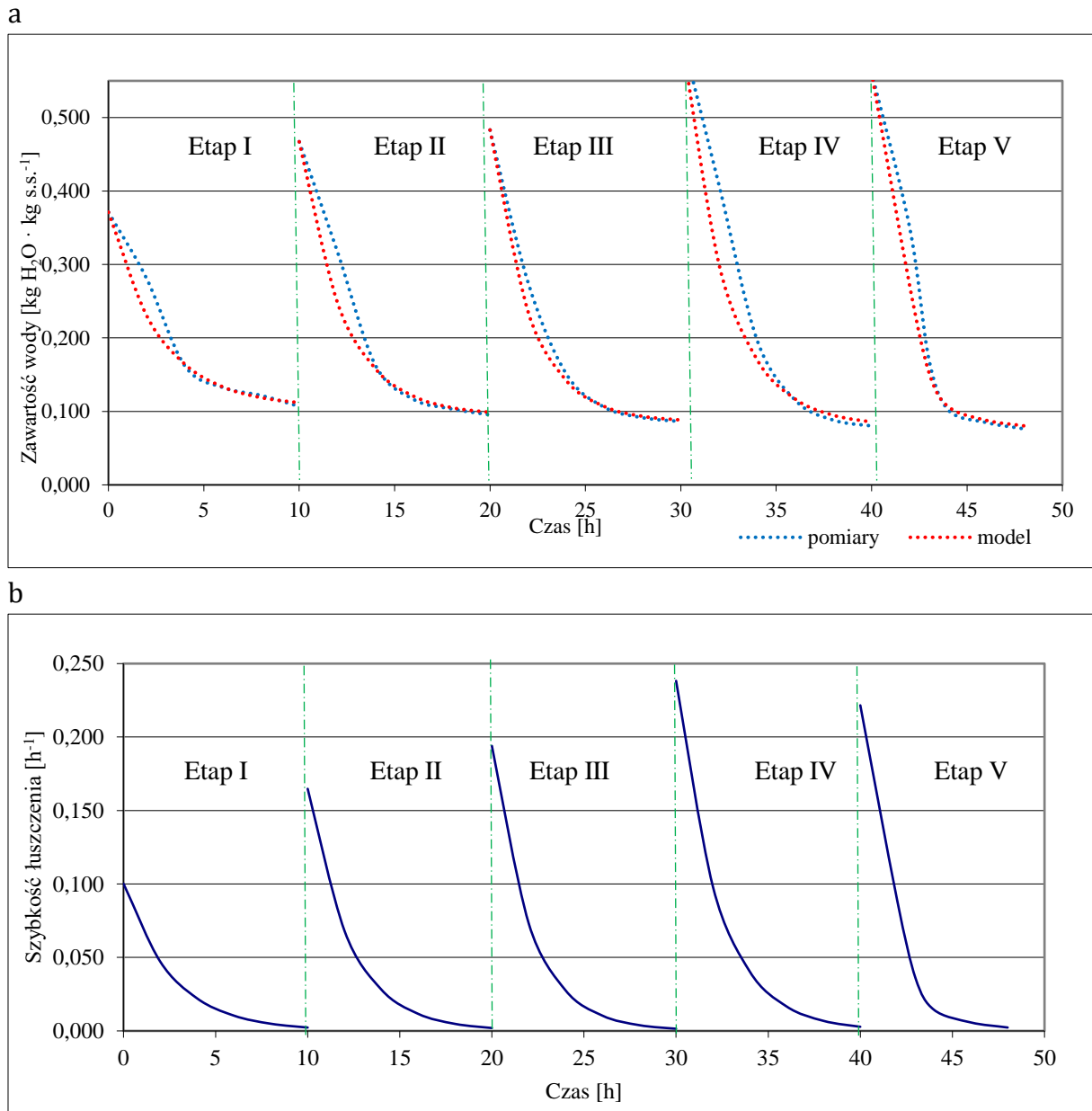
a, b, c, d – grupy jednorodne

Najmniejszą wartość współczynnika otrzymano w pierwszym etapie wariantu 10h_15min, który wynosił $b_1=0,34$. Największą wartość współczynnika b otrzymano w piątym etapie wariantu 8h_15min – $b_5=0,60$.

Dla wariantów 10 i 8 godzin łuszczenia zauważono, że wartość współczynnika b rosła wraz z każdym etapem aż do etapu trzeciego, a później w czwartym etapie nieznacznie malała i w piątym utrzymywała się na stałym poziomie. Dla wariantów 6 godzin łuszczenia zauważono, że prawie maksymalną wartość współczynnika b osiągnięto już w drugim etapie łuszczenia i utrzymywała się ona na podobnym poziomie aż do piątego etapu. W pierwszych etapach wariantów 6 godzin łuszczenia wartość współczynnika b wynosiła średnio 0,54 i nie różniła się znacznie od współczynników osiągniętych podczas innych etapów.

Zauważono, że w wariacie 8h_15min współczynniki b w kolejnych etapach wzrastały.

Na rysunkach 7 i 8 podano przykładowe przebiegi krzywych rzeczywistych i modelowych zmian zawartości wody oraz szybkości łuszczenia dla przykładowych szyszek, po jednej z wariantów 10h_15min, 8h_15min, czyli przy najdłuższym czasie namaczania. Na rysunkach 7 i 8 nie uwzględniono czasów nasiąkania szyszek.



Rys. 7. Wykresy: a - zmian zawartości wody w szyszce rzeczywisty i z modelu, b - szybkości łuszczenia, dla pięciu etapów łuszczenia szyszki modrzewia nr 32 z wariantu 10h_15min podczas efektywnego łuszczenia; źródło: *Tulska i in., 2022*

Dla opisanej graficznie szyszki (nr 32 z wariantu 10h_15min) podano równania zmiany zawartości wody oraz szybkości suszenia w kolejnych etapach:

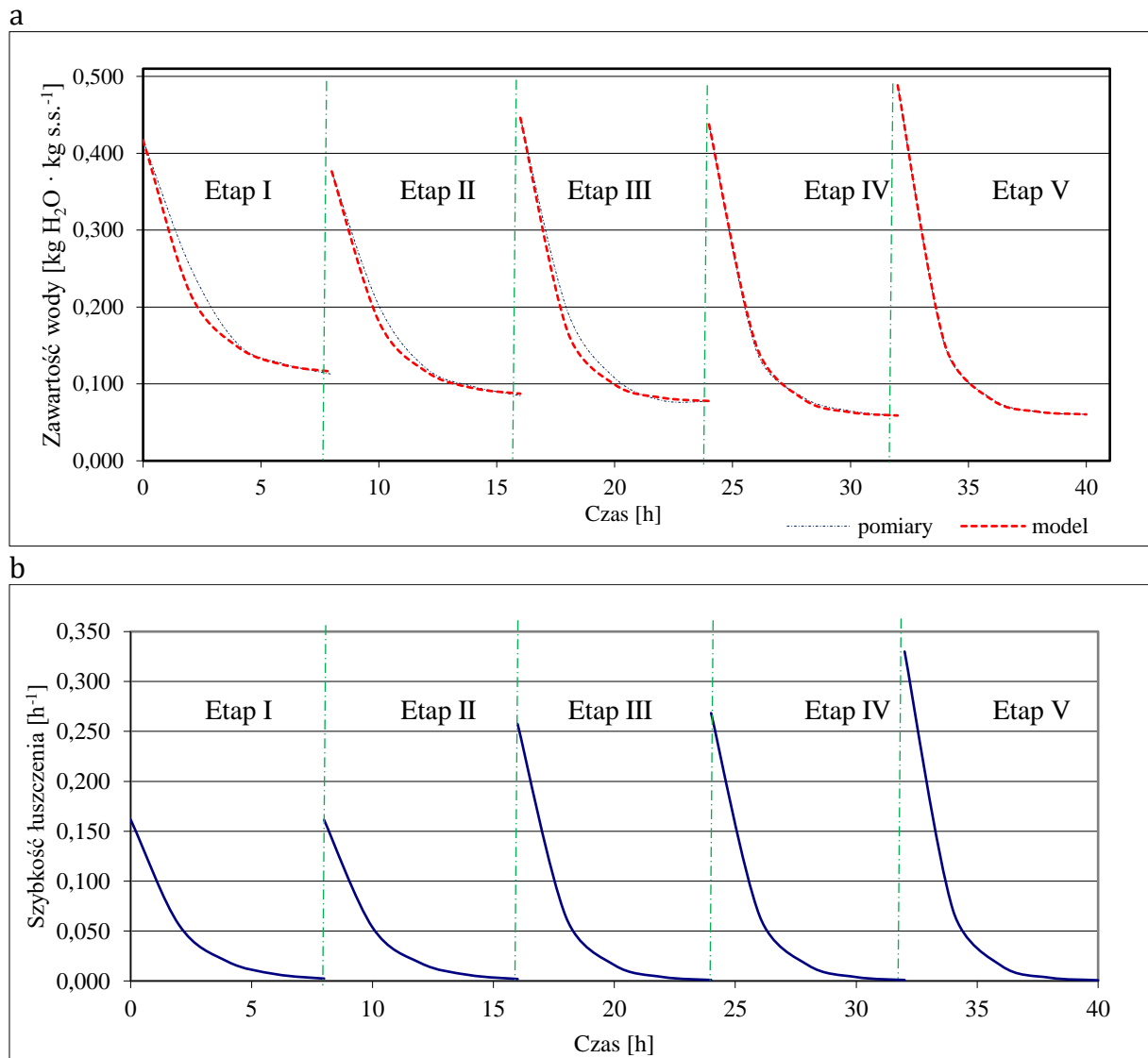
$$\text{Etap I: } u_1 = 0,264 \cdot e^{(-0,38 \cdot \tau_i)} + 0,107, \quad \frac{du_1}{d\tau_1} = -0,100 \cdot e^{(-0,38 \cdot \tau_i)} \quad (10)$$

$$\text{Etap II: } u_2 = 0,372 \cdot e^{(-0,44 \cdot \tau_i)} + 0,095, \quad \frac{du_1}{d\tau_1} = -0,164 \cdot e^{(-0,44 \cdot \tau_i)} \quad (11)$$

$$\text{Etap III: } u_3 = 0,397 \cdot e^{(-0,49 \cdot \tau_i)} + 0,086, \quad \frac{du_1}{d\tau_1} = -0,195 \cdot e^{(-0,49 \cdot \tau_i)} \quad (12)$$

$$\text{Etap IV: } u_4 = 0,536 \cdot e^{(-0,44 \cdot \tau_i)} + 0,080, \quad \frac{du_1}{d\tau_1} = -0,236 \cdot e^{(-0,44 \cdot \tau_i)} \quad (13)$$

$$\text{Etap V: } u_5 = 0,485 \cdot e^{(-0,46 \cdot \tau_i)} + 0,076, \frac{du_1}{d\tau_1} = -0,223 \cdot e^{(-0,46 \cdot \tau_i)} \quad (14)$$



Rys. 8. Wykresy: a - zmian zawartości wody w szyszce rzeczywisty i z modelu, b - szybkość łuszczenia, dla pięciu etapów łuszczenia szyszki modrzewia nr 17 z wariantu 8h_15min podczas efektywnego łuszczenia; *źródło: Tulska i in., 2022*

Dla opisanej szyszki (nr 17 z wariantu 8h_15min) także podano równania zmiany zawartości wody oraz szybkości suszenia w kolejnych etapach:

$$\text{Etap I: } u_1 = 0,304 \cdot e^{(-0,53 \cdot \tau_i)} + 0,113, \frac{du_1}{d\tau_1} = -0,161 \cdot e^{(-0,53 \cdot \tau_i)} \quad (15)$$

$$\text{Etap II: } u_2 = 0,292 \cdot e^{(-0,55 \cdot \tau_i)} + 0,085, \frac{du_1}{d\tau_1} = -0,161 \cdot e^{(-0,55 \cdot \tau_i)} \quad (16)$$

$$\text{Etap III: } u_3 = 0,369 \cdot e^{(-0,70 \cdot \tau_i)} + 0,077, \frac{du_1}{d\tau_1} = -0,258 \cdot e^{(-0,70 \cdot \tau_i)} \quad (17)$$

$$\text{Etap IV: } u_4 = 0,379 \cdot e^{(-0,71 \cdot \tau_i)} + 0,059, \frac{du_1}{d\tau_1} = -0,269 \cdot e^{(-0,71 \cdot \tau_i)} \quad (18)$$

$$\text{Etap V: } u_5 = 0,428 \cdot e^{(-0,77 \cdot \tau_i)} + 0,060, \frac{du_1}{d\tau_1} = -0,330 \cdot e^{(-0,77 \cdot \tau_i)} \quad (19)$$

Na rysunkach 7a–8a przedstawiono dopasowanie krzywych rzeczywistych zmian zawartości wody w trzech przykładowych szyszkach o różnych czasach łuszczenia (10 i 8 godzin) oraz tych samych czasach namaczania (15min) do modelu, który głównie stosuje się w przypadku opisu procesu suszenia w stałej temperaturze (głównie warzyw). W przypadku wykonanych badań zastosowano zmienną temperaturę, co mogło mieć wpływ na dopasowanie modelu oprócz wpływu zmiennych wejściowych (czasu łuszczenia i namaczania). Największe dopasowanie występuje w przypadku szyszki wariantu 8 godzin łuszczenia (rys. 8), gdzie nieznaczne niedopasowanie modelu występuje w przypadku pierwszych trzech etapów łuszczenia, a w czwartym i piątym etapie model charakteryzuje się bardzo dobrym dopasowaniem. Najmniejsze dopasowanie występuje w przypadku szyszki 6 godzin łuszczenia, co może być spowodowane zbyt krótkim czasem łuszczenia (szyszka łuszczyła się w temp. 35°C – 2h, a po podwyższeniu w 50°C tylko 4h). Błąd dopasowania dla wariantu 6 godzin suszenia wynosił powyżej 5%.

Na rysunkach 7b-8b przedstawiono wykresy szybkości łuszczenia szyszek o różnych czasach łuszczenia (10 i 8 godzin) oraz tych samych czasach namaczania (15min). Widać, że szybkość suszenia jest od początku malejąca, co jest charakterystyczne dla tzw. drugiego okresu suszenia ciał stałych (Pabis, 1982).

Na jednej szyszce występowało od 33 do 70 łusek otwartych, średnio na jednej szyszce z badanego zbioru występowało 48 (± 6) łusek. Wyłuszczone od 1 do 76 nasion z szyszek, średnio 36 (± 18) nasion z jednej szyszki. Ponadto na jednej szyszce występowało od 5 do 97 nasion, średnio 52 (± 19) nasion. Masa wyłuszczonych nasion zawierała się w granicach od 0,001 g do 0,651 g, średnio 0,193 ($\pm 0,109$) g. Szyszki ze wszystkich badanych wariantów badań nie różniły się od siebie pod względem liczby wyłuszczonych nasion ($F=0,862$ przy $p=0,55$) oraz masy wyłuszczonych nasion ($F=0,720$ przy $p=0,674$). Za pomocą analizy wariancji ustalono, że istotne różnice występują w przypadku takich parametrów jak liczba łusek ($F=3,561$ przy $p<0,05$) oraz liczba wszystkich nasiona w szyszkach (gdzie $F= 2,93601$ przy $p=0,003645$).

Średnio z szyszek wykorzystanych do wszystkich dziewięciu wariantów łącznie wyłuszczone 70% nasion, a pozostało w nich 30% nasion. W tabeli 7 przedstawiono liczbę nasion wyłuszczonych w poszczególnych wariantach oraz liczbę nasion pozostałych w szyszkach wyrażone w procentach.

Tabela 7. Liczba nasion wyłuszczonej i pozostałych w szyszkach dla każdego z wariantów;
źródło: Tulska i in., 2022

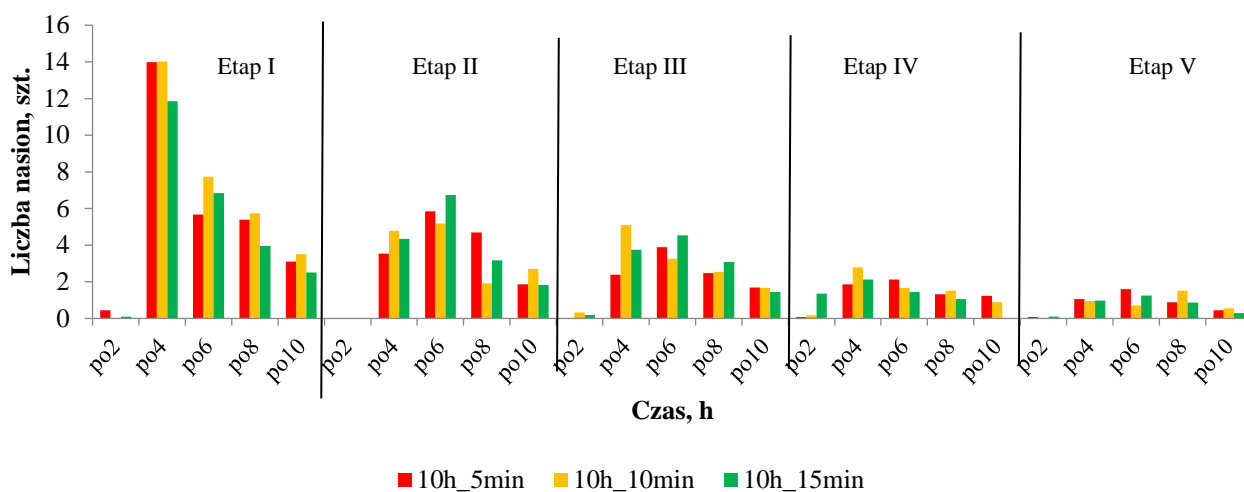
Nr	Wariant	Liczba nasion wyłuszczonej z szyszek w czasie procesu [%]	Liczba nasion pozostałych w szyszkach po procesie [%]	Liczba nasion pozyskanych w procesie łuszczenia w komorze [%]	Liczba nasion pozyskanych w procesie wytrząsania nasion w bębnie [%]
1	10h_5min	72	28	66	34
2	10h_10min	73	27	69	31
3	10h_15min	72	28	64	36
4	8h_5min	65	35	61	39
5	8h_10min	67	33	65	35
6	8h_15min	67	33	58	42
7	6h_5min	71	29	61	39
8	6h_10min	70	30	60	40
9	6h_15min	67	33	56	44

Najwięcej nasion pozyskano w procesach łuszczenia nr 2 (tabela 7) – 73%. Nieznacznie mniej w procesach 3 (72%), 1 (72%), 7(72%) oraz 8 (70%). Najmniej nasion pozyskano w wariacie 4 (65%).

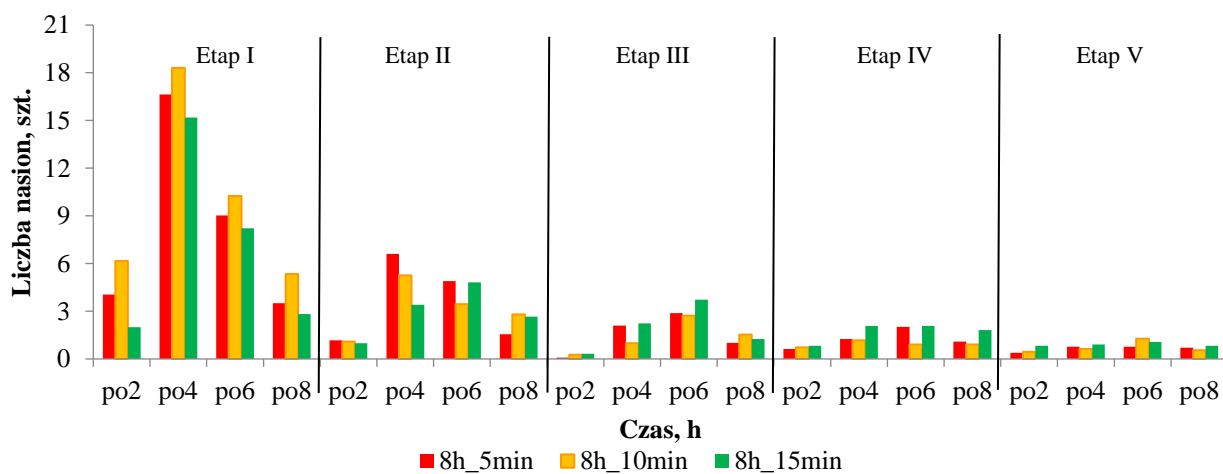
W wykonanych wariantach część nasion została pozyskana w procesie łuszczenia w komorze, a część w procesie wytrząsania w bębnie (tabela 7). Najwięcej nasion w samym procesie łuszczenia w komorze pozyskano w wariacie 2 (69%), a najmniej w wariacie 9 (56%). Średnio najwięcej nasion w przypadku łuszczenia w komorze pozyskano w wariantach łuszczenia 10 godzin, a najmniej w przypadku wariantów 6 godzin. Porównując warianty łuszczenia o takich samych czasach łuszczenia najwięcej nasion podczas łuszczenia w komorze pozyskano z szyszek użytych do wariantów 2, 5, 7 (ale w wariacie 8 – tylko 1%mniej).

Najwięcej nasion wyłuszczonej dzięki wytrząsaniu w bębnie pozyskano w wariacie 9 (44%), a najmniej w wariacie 2 (31%). Średnio we wszystkich wariantach, dzięki wytrząsaniu w bębnie, pozyskano dodatkowo 38% nasion wyłuszczonej w procesach.

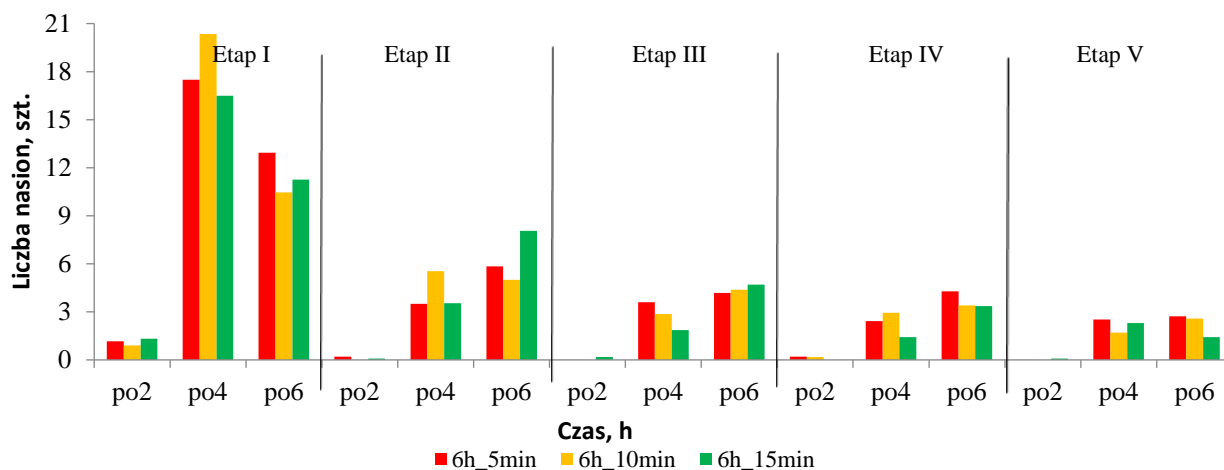
Na rys. 9–11 zaprezentowano liczbę nasion (szt.) pozyskanych w poszczególnych etapach po każdym pomiarze wykonywanym, co 2 godziny. Nasiona pozyskane dzięki wytrząsaniu w bębnie dodano do nasion pozyskanych po ostatniej godzinie procesu.



Rys. 9. Liczba nasion pozyskanych w komorze łuszcarskiej w poszczególnych godzinach w wariantach 10 godzin łuszczenia; *źródło: opracowanie własne*



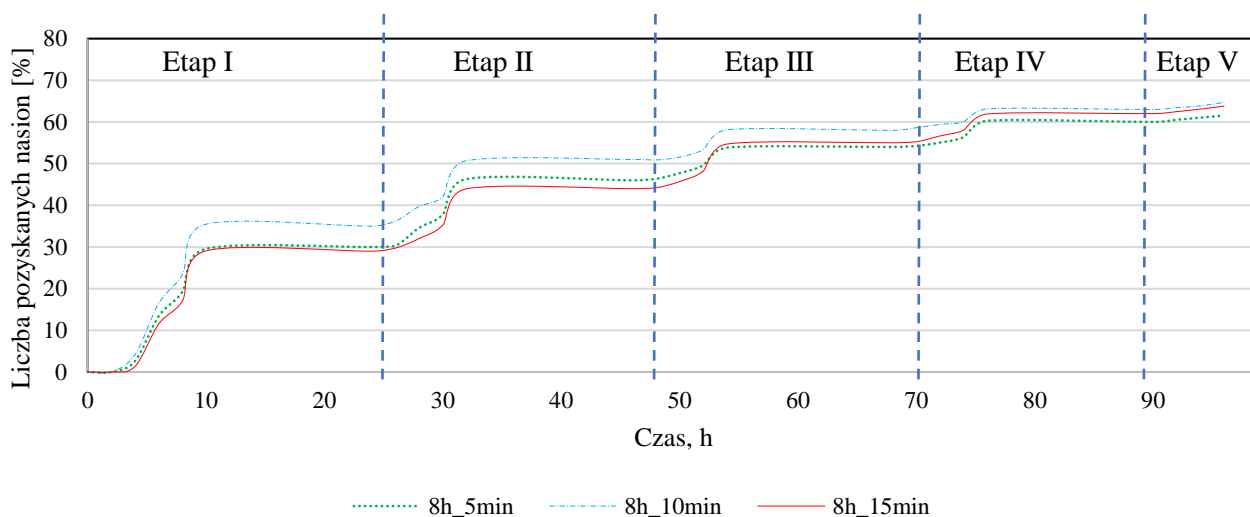
Rys. 10. Liczba nasion pozyskanych w komorze łuszcarskiej w poszczególnych godzinach w wariantach 8 godzin łuszczenia; *źródło: opracowanie własne*



Rys. 11. Liczba nasion pozyskanych w komorze łuszcarskiej w poszczególnych godzinach w procesach 6 godzin łuszczenia; *źródło: opracowanie własne*

Najwięcej nasion w I etapie analizowanych wariantów pozyskano po 4 godzinie. Następnie, w II i III etapie – najwięcej nasion w badanych wariantach pozyskano po 6 godzinie.

Na rysunku 12 zaprezentowano liczbę nasion w procentach pozyskanych podczas efektywnego czasu łuszczenia, gdzie liczbę nasion pozyskanych w danym etapie sumowano z nasionami pozyskanymi od początku procesu.



Rys. 12. Dynamika pozyskania nasion w każdym etapie pięcioetapowego procesu (po 8h suszenia każdy) wyluszczenia nasion; *źródło: Tulska i in., 2022*

Każdy z etapów zawierał czas łuszczenia, czas wytrząsania nasion w bębnie, czas namaczania oraz czas nasiąkania, oprócz etapu piątego – gdzie nie było nasiąkania i namaczania tylko łuszczenie i wytrząsanie. Podczas wariantów 8 godzin łuszczenia (rys.

12) w pierwszym etapie łuszczenia otrzymano średnio 30% nasion w wariantach 8h_5min i 8h_15min, natomiast w wariantach 8h_10min w pierwszym etapie pozyskano 53% wszystkich nasion pozyskanych w pięcioetapowym procesie. W drugim etapie średnio pozyskano 27% nasion, w trzecim średnio 15% nasion, po czwartym ok.11%, a po piątym etapie ok. 5% nasion. Wariant 8h_10min w porównaniu z wariantami 8h_5min i 8h_15min charakteryzuje się wzrostem liczby pozyskanych nasion już od pierwszego etapu.

Wskaźnik pozyskania nasion α (2) oraz wskaźnik wydajności masowej β (3) dla każdego z wariantów zamieszczono w tabeli 8.

Tabela 8. Wskaźniki pozyskania nasion oraz wydajności masowej dla każdego z wariantów

Nr	Wariant	Wskaźnik pozyskania nasion α	Wskaźnik wydajności masowej β
1	10h_5min	0,71	0,050
2	10h_10min	0,73	0,052
3	10h_15min	0,72	0,049
4	8h_5min	0,65	0,045
5	8h_10min	0,68	0,053
6	8h_15min	0,67	0,048
7	6h_5min	0,71	0,041
8	6h_10min	0,69	0,050
9	6h_15min	0,67	0,038

Wskaźnik pozyskania nasion (α) był najwyższy dla wariantu 2 (0,73) oraz 3 (0,72), a najniższy dla wariantów 4 (0,65) oraz 6 i 9 (0,67). Wskaźnik wydajności masowej (β) był najwyższy dla wariantu 5 (0,053), a najniższy dla wariantu 9 (0,038).

W tabeli 9 podano wartości energii (E) i zdolności kiełkowania (Z) nasion pozyskanych z próby kontrolnej oraz z poszczególnych etapów dziewięciu wariantów badań wraz z klasami jakości.

Tabela 9. Energia i zdolność kiełkowania nasion z próby kontrolnej i poszczególnych wariantów w procesie wyluszczenia; *źródło: Tulska i in., 2022*

Nr	Wariant	I etap		II etap		III etap		IV etap		V etap		Średnio cały proces		Klasa jakości
		E	Z	E	Z	E	Z	E	Z	E	Z	E	Z	
K	Kontrolna	-										45	57	I
1	10h_5min	41	43	40	42	41	44	38	44	30	37	38	42	I
2	10h_10min	49	51	45	48	39	41	40	43	34	41	41	45	I
3	10h_15min	40	43	43	44	52	54	43	43	44	49	47	47	I
4	8h_5min	41	45	44	46	47	49	39	42	50	56	44	48	I
5	8h_10min	44	48	46	49	34	35	35	38	42	42	40	42	I
6	8h_15min	47	48	47	50	47	50	47	48	39	48	43	47	I
7	6h_5min	44	44	47	48	51	53	47	49	42	51	46	49	I
8	6h_10min	59	61	45	48	50	56	44	49	39	45	47	52	I
9	6h_15min	51	52	45	46	47	50	35	38	40	46	43	46	I

E-energia, *Z*-zdolność kiełkowania

Energia kiełkowania dla próby kontrolnej wynosiła 45%, a zdolność 57%, co oznacza, że nasiona niepoddane żadnym zabiegom termicznym i mechanicznym z tego pochodzenia klasyfikowane są jako nasiona I klasy jakości (Tyszkiewicz, 1951). Nasiona pozyskane we wszystkich badanych wariantach zostały zakwalifikowane do I klasy jakości. Energia badanych nasion wszystkich z poszczególnych wariantów zawierała się w granicach od 30 do 59%, a zdolność kiełkowania od 35 do 61%. Analizując każdy etap oddzielnie nie widać zależności spadku energii kiełkowania nasion pozyskanych w następujących po sobie etapach wraz z kolejnym etapem łuszczenia. Jednakże, średnio energia kiełkowania dla nasion pozyskanych w I etapach wszystkich dziewięciu wariantów wynosiła 46%, w II etapach – średnio 45%, w III etapach – 45%, w IV etapach – 41%, a w V etapach – 40%. Można zauważyć, że przy każdym kolejnym etapie łuszczenia średnio pozyskiwano nasiona charakteryzujące się równą lub niższą energią kiełkowania niż w etapie wcześniejszym. Co potwierdzono w literaturze, że długotrwałe suszenie może obniżyć jakość nasion (Tyszkiewicz, 1949). Potwierdza to też fakt, że najwyższą energią i zdolnością charakteryzowały się szyszki z wariantów 6 godzin, a najmniejszymi

wskaźnikami jakości – szyszki z wariantów 10 godzin. Najniższą energią i zdolnością kiełkowania charakteryzował się wariant 1, a najwyższymi – wariant 8.

Inną przyczyną wyższej jakości nasion łuszczonych 6 godzin, może być niższa wilgotność początkowa szyszek. Wynikało to z wydłużenia czasu przetrzymywania szyszek w temperaturze pokojowej bezpośrednio przed badaniem. Szyszki z wariantów łuszczonych 6 godzin o wartości $u_{01}=0,391 \text{ kg}_{\text{wody}} \cdot \text{kg}_{\text{s.s.}}^{-1}$ charakteryzowały się niższą zawartością wody, niż te z wariantów 10 i 8 godzin (oba o wartości $u_{01}=0,411 \text{ kg}_{\text{wody}} \cdot \text{kg}_{\text{s.s.}}^{-1}$). Poprawność otrzymanych wyników potwierdzają inne badania, gdzie zauważono, że przy takich samych warunkach temperaturowo-wilgotnościowych nasiona z szyszek o mniejszej zawartości wody nie straciły na wartości i jakości, podczas gdy wartość nasion z szyszek bardziej wilgotnych uległa pogorszeniu (Tyszkiewicz, 1949).

6.3. Zmiana kąta odchylenia łuski od trzpienia szyszki w czasie procesu łuszczenia

W tabeli 10 zamieszczono wyniki średnich zawartości wody u_{1-4} i kątów otwarcia łusek α_{1-4} wraz z odchyleniami standardowymi, zmierzonych w łuskach przy podstawie, środku i u wierzchołka szyszek w każdej godzinie badanego procesu łuszczenia.

Tabela 10. Średnie zawartości wody w szyszkach i odpowiadające im kąty otwarcia łuski przy podstawie, w środku i u wierzchołka szyszki przez cztery kolejne dni badania; *źródło: Tulska i in., 2021*

Czas, h	Łuska	Dzień 1		Dzień 2		Dzień 3		Dzień 4	
		u_1	α_1	u_2	α_2	u_3	α_3	u_4	α_4
0	Z części przy podstawie	0,326± 0,016	100,98± 10,28	0,346± 0,117	104,78± 10,50	0,377± 0,085	106,79± 10,83	0,364± 0,106	111,53± 9,80
1		0,260± 0,016	116,06± 13,35	0,286± 0,088	117,51± 12,59	0,282± 0,111	118,70± 10,68	0,232± 0,091	124,20± 10,07
2		0,197± 0,015	121,46± 12,87	0,242± 0,064	122,84± 10,72	0,232± 0,070	122,91± 11,65	0,174± 0,069	127,73± 10,38
3		0,156± 0,010	126,64± 11,60	0,135± 0,043	129,05± 10,30	0,112± 0,039	129,45± 11,18	0,098± 0,042	131,31± 10,54
4		0,104± 0,014	129,23± 11,01	0,103± 0,024	131,92± 9,52	0,095± 0,024	131,29± 10,18	0,078± 0,023	132,68± 10,56
5		0,090± 0,008	130,53± 10,88	0,091± 0,013	132,90± 9,68	0,080± 0,012	132,55± 10,28	0,070± 0,012	134,42± 10,70
6		0,083± 0,004	131,74± 10,81	0,081± 0,006	133,81± 9,70	0,076± 0,008	133,40± 10,17	0,064± 0,008	135,18± 10,68
7		0,081± 0,004	132,93± 11,09	0,078± 0,005	134,56± 9,89	0,071± 0,011	134,51± 10,44	0,063± 0,008	136,10± 10,89
8		0,077± 0,004	133,88± 10,95	0,075± 0,004	135,13± 9,79	0,069± 0,012	135,42± 10,39	0,062± 0,008	136,88± 10,64

0	Z części środkowej	0,329± 0,018	106,40± 9,86	0,387± 0,091	108,63± 10,72	0,421± 0,069	108,37± 11,73	0,425± 0,113	113,23± 11,15
1		0,265± 0,019	125,93± 9,93	0,306± 0,062	124,81± 10,47	0,301± 0,078	124,52± 11,10	0,270± 0,083	127,76± 11,39
2		0,198± 0,017	131,90± 9,91	0,251± 0,046	129,99± 11,11	0,230± 0,046	129,85± 11,39	0,192± 0,059	130,92± 11,27
3		0,156± 0,013	138,66± 10,06	0,135± 0,035	137,28± 11,53	0,106± 0,030	138,02± 11,46	0,104± 0,034	137,53± 11,78
4		0,103± 0,013	140,87± 10,33	0,101± 0,021	139,80± 11,52	0,093± 0,018	139,66± 12,02	0,078± 0,018	140,14± 11,84
5		0,091± 0,010	141,89± 10,38	0,089± 0,013	140,92± 11,38	0,080± 0,009	141,07± 11,91	0,069± 0,010	141,66± 11,66
6		0,085± 0,008	143,16± 10,58	0,081± 0,009	142,55± 11,55	0,076± 0,006	141,96± 12,06	0,064± 0,007	142,71± 11,60
7		0,082± 0,008	144,03± 10,69	0,078± 0,008	143,48± 11,56	0,073± 0,006	142,88± 11,97	0,063± 0,007	143,47± 11,80
8		0,079± 0,008	144,99± 10,88	0,076± 0,008	144,25± 11,53	0,073± 0,005	143,84± 12,00	0,062± 0,007	144,02± 11,74
0	Z części wierzchołkowej	0,334± 0,018	108,97± 5,81	0,377± 0,113	110,96± 6,15	0,416± 0,104	111,09± 5,97	0,415± 0,118	114,65± 6,95
1		0,267± 0,020	122,41± 7,91	0,296± 0,079	122,40± 8,33	0,291± 0,105	122,19± 6,76	0,263± 0,098	125,28± 7,30
2		0,196± 0,022	127,59± 8,94	0,242± 0,060	126,50± 9,03	0,225± 0,066	128,20± 7,33	0,186± 0,070	129,93± 8,54
3		0,152± 0,014	132,98± 8,06	0,129± 0,043	133,00± 8,69	0,102± 0,039	133,48± 8,01	0,098± 0,040	134,17± 7,80
4		0,101± 0,017	135,03± 8,21	0,099± 0,025	135,56± 8,53	0,091± 0,023	135,86± 7,17	0,075± 0,022	136,16± 7,97
5		0,090± 0,012	136,71± 8,09	0,088± 0,015	136,76± 8,44	0,078± 0,012	136,22± 8,23	0,066± 0,012	137,83± 7,88
6		0,084± 0,010	137,81± 7,75	0,079± 0,010	137,64± 8,38	0,074± 0,008	137,05± 8,23	0,062± 0,008	139,09± 8,25
7		0,082± 0,009	138,67± 7,74	0,077± 0,009	138,79± 8,39	0,070± 0,010	138,35± 8,14	0,061± 0,008	139,89± 8,42
8		0,078± 0,009	139,14± 7,59	0,075± 0,008	139,64± 8,25	0,069± 0,011	139,55± 8,17	0,060± 0,008	140,65± 8,48

$u_1 - u_4$ – średnia zawartość wody ± odchylenie standardowe zawartości wody, $\text{kg}_{\text{wody}} \cdot \text{kg}_{\text{s.s.}}^{-1}$

$\alpha_1 - \alpha_4$ – średni kąt otwarcia łusek ± odchylenie standardowe kąta otwarcia, °

Najmniejszy średni kąt otwarcia łusek przy podstawie szyszek odnotowano na początku procesu $100,98^\circ$, dla którego średnia zawartość wody w szyszkach wynosiła $0,326 \text{ kg}_{\text{wody}} \cdot \text{kg}_{\text{s.s.}}^{-1}$. Największym średnim kątem otwarcia charakteryzowały się łuski dnia czwartego, w ósmej godzinie łuszczenia $136,88^\circ$ dla najmniejszej średniej zawartości wody w szyszkach podczas procesu ($0,062 \text{ kg}_{\text{wody}} \cdot \text{kg}_{\text{s.s.}}^{-1}$).

Średni kąt otwarcia łusek przy podstawie zwiększał się z każdym dniem procesu. Średni kąt otwarcia łusek z części przy podstawie zwiększył się najwięcej podczas pierwszego dnia od $100,98^\circ$ do $133,88^\circ$ czyli o $32,91^\circ$, drugiego dnia od $104,78^\circ$ do $135,13^\circ$,

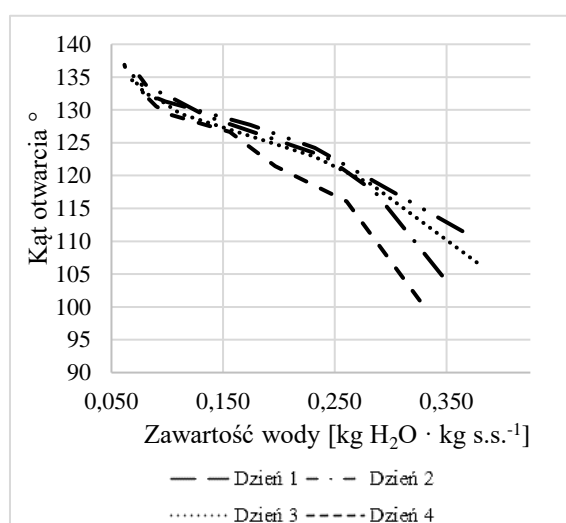
czyli o $30,35^\circ$, trzeciego dnia od $106,79^\circ$ do $135,42^\circ$, czyli o $28,63^\circ$, a czwartego od $111,53^\circ$ do $136,88^\circ$, czyli o $25,35^\circ$.

Najmniejszy średni kąt otwarcia łusek z części środkowej szyszek odnotowano na początku procesu $106,40^\circ$. Najwyższym średnim kątem otwarcia charakteryzowały się łuski w pierwszym dniu, w ósmej godzinie łuszczenia – $144,99^\circ$ dla średniej zawartości wody $0,079 \text{ kg}_{\text{wody}} \cdot \text{kg}_{\text{s.s.}}^{-1}$ oraz w drugim dniu, także w 8 godzinie łuszczenia $144,25^\circ$ dla średniej zawartości wody $0,076 \text{ kg}_{\text{wody}} \cdot \text{kg}_{\text{s.s.}}^{-1}$. Dla najniższej średniej zawartości wody czwartego dnia procesu w 8 godzinie procesu ($0,062 \text{ kg}_{\text{wody}} \cdot \text{kg}_{\text{s.s.}}^{-1}$) kąt otwarcia wynosił $144,02^\circ$.

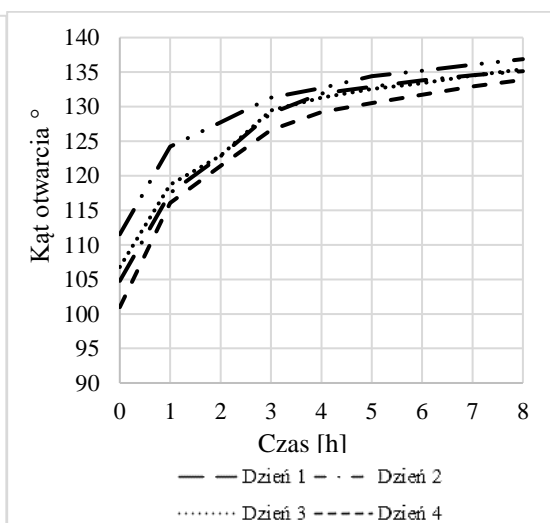
Średni kąt otwarcia łusek z części środkowej szyszek zwiększył się najwięcej podczas pierwszego dnia od $106,40^\circ$ do $144,99^\circ$, czyli o $38,59^\circ$, drugiego dnia od $108,63^\circ$ do $144,25^\circ$, czyli o $35,63^\circ$, trzeciego dnia od $108,37^\circ$ do $143,84^\circ$, czyli o $35,46^\circ$, a czwartego od $113,23^\circ$ do $144,02^\circ$, czyli o $30,80^\circ$.

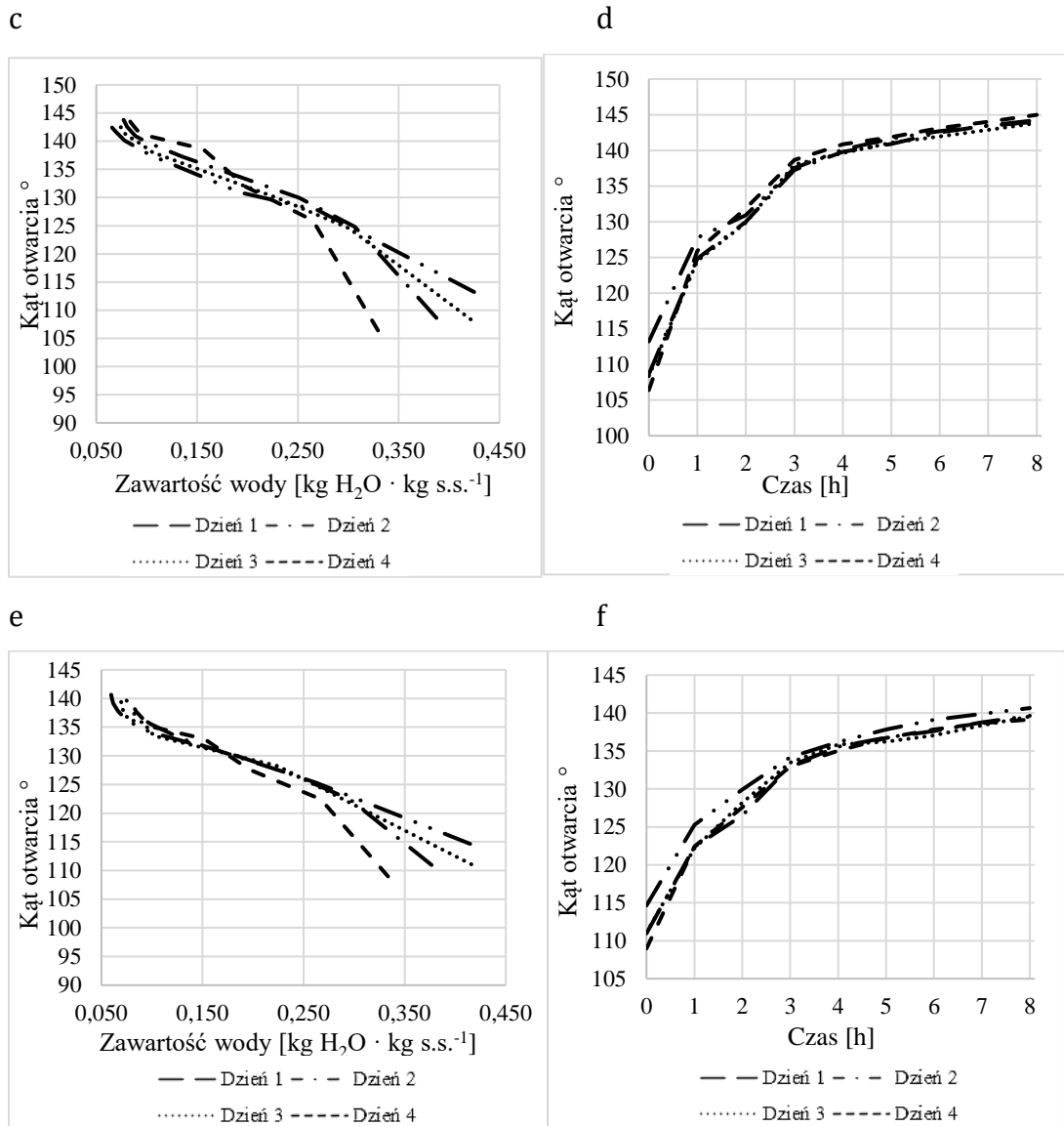
Najmniejszy średni kąt otwarcia łusek w części wierzchołkowej szyszek odnotowano na początku procesu – $108,97^\circ$, a największym średnim kątem otwarcia charakteryzowały się łuski w czwartym dniu, w ósmej godzinie łuszczenia $140,65^\circ$. Początkowy średni kąt otwarcia łusek u wierzchołka szyszki zwiększał się z każdym dniem procesu i wynosił odpowiednio $108,97^\circ$ do $139,14^\circ$, czyli o $30,17^\circ$, drugiego dnia od $110,96^\circ$ do $139,64^\circ$, czyli o $28,68^\circ$, trzeciego dnia od $111,09^\circ$ do $139,55^\circ$, czyli o $28,46^\circ$, a czwartego od $114,65^\circ$ do $144,65^\circ$, czyli o $26,01^\circ$.

a



b





Rys. 13. Kąty otwarcia łusek z poszczególnych części szyszek: a – przy podstawie, c – środkowej, e – wierzchołkowej, oraz b, d, f - odpowiadające im zawartości wody w kolejnych godzinach i dniach łuszczenia; *źródło: Tulska i in., 2022*

Zależność kąta otwarcia od zawartości wody w kolejnych godzinach i dniach pokazano na rysunku 13. Przykładowo dla łusek pochodzących ze środka szyszki zależności opisano równaniem wielomianu dla pierwszego dnia (20) i równaniem liniowym (21) oraz równaniami liniowymi dla kolejnych (22, 23, 24).

$$\text{Dzień 1: } \alpha_1 = -469,53u_1^2 + 50,082u_1 + 142,26 \quad (R = 0,991 > 0,156) \quad (20)$$

$$\alpha_1 = -131,68u_1 + 155,62 \quad (R = 0,965 > 0,125) \quad (21)$$

$$\text{Dzień 2: } \alpha_2 = -97,52u_2 + 150,92 \quad (R = 0,976 > 0,125) \quad (22)$$

$$\text{Dzień 3: } \alpha_3 = -91,31u_3 + 149,21 \quad (R = 0,990 > 0,125) \quad (23)$$

$$\text{Dzień 4: } \alpha_4 = -79,835u_4 + 147,5 \quad (R = 0,992 > 0,125) \quad (24)$$

Dla pierwszego dnia obliczono zależność dla funkcji liniowej (21) i otrzymano kąty otwarcia: $\alpha_{\text{początkowy}} = 112,30^\circ$, $\alpha_{1h} = 120,72^\circ$, $\alpha_{2h} = 129,55^\circ$, $\alpha_{3h} = 135,08^\circ$, $\alpha_{4h} = 142,06^\circ$, $\alpha_{5h} = 143,64^\circ$, $\alpha_{6h} = 143,64^\circ$, $\alpha_{7h} = 144,82^\circ$, $\alpha_{8h} = 145,22^\circ$. Kąt otwarcia zwiększał się znacząco od stanu początkowego do czwartej godziny pierwszego dnia o $29,76^\circ$, a od czwartej do ósmej godziny – średnio o $3,16^\circ$.

Średni kąt otwarcia łusek z części przy podstawie, środkowej i wierzchołkowej zwiększył się najwięcej podczas pierwszego dnia. Wraz ze wzrostem zawartości wody, kąt otwarcia w łuskach z tych trzech części wzrasta średnio o $33,89^\circ$ dla pierwszego dnia, o $31,55^\circ$ dla drugiego, o $30,85^\circ$ dla trzeciego i czwartego dnia.

Początkowa zawartość wody w szyszkach zwiększała się w kolejnych dniach badań, a końcowa zawartość wody w szyszkach malała. Zmiana zawartości wody w łuskach z części środkowej wynosiła $0,251 \text{ kg}_{\text{wody}} \cdot \text{kg}_{\text{s.s.}}^{-1}$ dla pierwszego dnia, $0,312 \text{ kg}_{\text{wody}} \cdot \text{kg}_{\text{s.s.}}^{-1}$ dla drugiego, $0,349 \text{ kg}_{\text{wody}} \cdot \text{kg}_{\text{s.s.}}^{-1}$ dla trzeciego oraz $0,362 \text{ kg}_{\text{wody}} \cdot \text{kg}_{\text{s.s.}}^{-1}$ dla czwartego dnia procesu.

Dla łusek ze środka szyszki zauważono, że średnio wraz ze obniżeniem się zawartości wody o $0,01 \text{ kg}_{\text{wody}} \cdot \text{kg}_{\text{s.s.}}^{-1}$ wzrasta kąt otwarcia o $1,3^\circ$ dla pierwszego dnia, i o $0,90^\circ$ dla drugiego, a dla kolejnych (odpowiednio $0,98^\circ$; $0,91^\circ$ i $0,80^\circ$).

Stan pełnego zamknięcia szyszki widoczny był na początku procesu (dzień 1 – stan początkowy (Tulska i in., 2021)). Po kolejnych godzinach łuszczenia, łuski szyszek stopniowo otwierały się, po 8 godzinach zarejestrowano największe kąty odgięcia się łusek od trzpienia. Po 10 minutowym namaczaniu i 14 godzinnym nasiąkaniu łuski szyszek zamykały się i w kolejnym dniu procesu odchylenie się łusek od trzpienia przebiegało intensywniej. Zmiany kąta otwarcia łusek podczas procesu łuszczenia najbardziej widoczne były przez pierwsze 2-3 godziny podczas łuszczenia w niższej temperaturze i zaraz po podniesieniu do 50°C . W dalszych godzinach procesu (od 4 do 8) zmiany następowały niezauważalnie dla ludzkiego oka, ale wartość kąta otwarcia zwiększała się.

6.4. Budowa komórkowa i struktura łusek szyszek modrzewia

Po przeprowadzeniu badań komórek łusek modrzewia o wilgotności 5 i 20% zauważono trzy rodzaje komórek:

- a) małe o grubych ścianach komórkowych - skupione w wiązki i występujące w warstwie środkowej łuski,
- b) średnie o grubych ścianach – znajdujące się w części zewnętrznej i wewnętrznej epidermy,
- c) duże o cienkich ścianach i dużych światłach komórkowych - występujące w warstwie środkowej.

Porównując średnie grubości ścian komórek pobranych z łusek o wilgotności 5 i 20%, możemy zauważyć, że zmiana grubości komórek średnich wzrosła o 25% (epiderma zewnętrzna) i o ok. 18% (epiderma wewnętrzna) oraz dla komórek dużych o ok. 57%. Analiza wariancji wykazała istotne różnice ($p < 0,05$) między grubościami ścian komórkowych dla komórek dużych ($p = 0,00$) i średnich zarówno w części zewnętrznej ($p = 0,00$) jak i wewnętrznej epidermy ($p = 0,00$) pochodzącej z łusek suchych (5%) i mokrych (20% wilgotności).

Wyniki badania elementów budowy struktury łuski, wykonane dla łusek o wilgotności 5, 10 i 20% różniły się istotnie między sobą. Po stronie wewnętrznej łuski zauważono, że największymi wymiarami oraz grubością ścian charakteryzowały się podłużne komórki o wilgotności 20% (długość 185,57 μm , szerokość 17,69 μm , a grubość ścian 7,82 μm), znajdujące się na krawędzi łuski, na granicy występowania skrzydełka. W kolejnym miejscu po stronie wewnętrznej łuski, w miejscu pod skrzydełkiem znajdują się komórki o wydłużonym kształcie, podobne do poprzednich. Komórki z łuski o wilgotności 20% są wypukłe, walcowate, nakładające się jedna na drugą, o grubości ścian komórek od 4,90 μm do 13,50 μm (średnio 9,60 \pm 1,44 μm). Na nich widnieją zgromadzone w skupiska cząstki prawdopodobnie żywiczne. Komórki z łuski o wilgotności 10% nie są wypukłe, z wklęsłym wnętrzem komórki, o grubości ścian od 4,60 μm do 8,90 μm (średnio 6,50 \pm 1,31 μm). Komórki z łuski o wilgotności 5% charakteryzują się cienkimi, zniszczonymi ścianami o grubości od 3,20 μm do 8,20 μm (średnio 5,17 \pm 2,09 μm) i defragmentacją ich warstwy powierzchniowej. W miejscu na wewnętrznej stronie łuski – zagłębienie po nasieniu widać poszarpane i częściowo zniszczone struktury komórek, występujące po oderwaniu się nasiona.

Na zewnętrznej stronie łuski w części wierzchołkowej znajdują się komórki o wydłużonym kształcie ułożone jedna obok drugiej, różniące się grubością ścian komórkowych. Im niższa wilgotność szyszki tym mniejsza grubość ścian komórek. Komórki z łuski o wilgotności 20% posiadają ściany o grubości od 6,20 μm do 10,90 μm ,

średnio $8,02 \pm 1,29 \mu\text{m}$. Komórki z łuski o wilgotności 10% – od $5,40 \mu\text{m}$ do $9,20 \mu\text{m}$, średnio $6,57 \pm 1,08 \mu\text{m}$, natomiast z łuski o wilgotności 5% – od $4,50 \mu\text{m}$ do $7,60 \mu\text{m}$, średnio $6,13 \pm 0,81 \mu\text{m}$. Grubość ścian komórek z łusek o wilgotności 20% według testu Duncana istotnie różnią się od tych o wilgotności 5 i 10% ($p < 0,001$).

Po stronie zewnętrznej, w części przytrzępieniowej łuski, w każdej z łusek o znanej wilgotności, znajdują się liczne wypustki (w części środkowej głównie u łusek o wilgotności 20%). Średnia długość komórek w części przytrzępieniowej – włosków łusek o wilgotności 20% wynosi $265,88 \pm 116,72 \mu\text{m}$, a szerokość $28,09 \pm 3,39 \mu\text{m}$. Komórki łuski o wilgotności 10% charakteryzują się długością $219,99 \pm 71,56 \mu\text{m}$ oraz szerokością $28,42 \pm 5,50 \mu\text{m}$, a komórki łuski o wilgotności 5% – długością $207,30 \pm 48,74 \mu\text{m}$ oraz szerokością $31,19 \pm 2,82 \mu\text{m}$.

7. Podsumowanie i wnioski

Nasiona pozyskane z szyszek w obu wyłuszczeniach kwalifikują się jako materiał siewny I klasy jakości (ISTA, 2016). Wydajność W_d (obliczona według wzoru 1) procesu łuszczenia sposobem ciepłno-mechanicznym wynosiła 4,42 %, natomiast sposobem cieplnym wynosiła 2,57 %. Znaczny wpływ na wynik W_d miała istotnie większa liczba nasion występujących w szyszkach łuszczonych sposobem ciepłno-mechanicznym (z opisanej lokalizacji o 50%) oraz wprowadzony zabieg kruszenia łusek szyszek, którego brak w metodzie cieplnej. Zabieg ten według literatury niekorzystnie wpływa na jakość nasion przeznaczonych do przechowywania i powinien być stosowany tylko w przypadku gdy nasiona wysiewane są w danym roku pozyskania (Aniszewska, 2008). Nasiona pozyskane metodą z kruszeniem charakteryzują się mniejszą żywotnością podczas przechowywania, odpornością na warunki stresowe oraz większym współczynnikiem wpływu elektrolitu z nasion, co świadczy o znacznej destrukcji struktur komórkowych, która jest spowodowana mechanicznym ścieraniem łusek w wyłuszczeniach mechanicznych (Załęski, 2002). Wykazano, że nasiona pozyskane sposobem cieplnym są łatwiejsze do oczyszczenia i z łatwością można uzyskać poziom czystości zbliżony do 100% (Załęski, 2002). Dodatkowo, w przypadku wyłuszczenia nasion sposobem ciepłno-mechanicznym należy zachować szczególną ostrożność ze względu na wybuchowość pyłu podczas kruszenia szyszek oraz czasochłonne i energochłonne jest uzyskanie wysokiej czystości nasion. Średnia energia i zdolność kiełkowania dla badanych wariantów procesów nie różni się istotnie. Wykonane warianty uzyskały średnio wyniki jakości powyżej 40%, co klasyfikuje nasiona pozyskane w procesach w I klasie jakości. Ze względu na wady procesu łuszczenia szyszek sposobem ciepłno-mechanicznym podjęto badania laboratoryjne nad udoskonaleniem oraz oceną efektywności procesu cieplnego i opracowaniem wskazówek dla wyłuszczeni gospodarczych przy prowadzeniu przemysłowego wyłuszczenia nasion tym sposobem z szyszek modrzewia.

Zaproponowany w badaniach laboratoryjnych czas łuszczenia szyszek modrzewia w jednym etapie wynosił 10, 8, i 6 godzin, namaczania – 15, 10 i 5 minut i wytrząsania – 30 minut.

Namaczanie (nawilżanie) szyszek po łuszczeniu powoduje zwiększanie początkowej zawartości wody w kolejnych etapach całego procesu oraz wysuszenie szyszek do niższej

zawartości końcowej wody w każdym kolejnym etapie. Poprawnie przeprowadzone procesy łuszczenia i nawilżania w badanych wariantach (rehydratacji) umożliwiły intensywne chłonięcie wody przez tkanki wysuszonego materiału, w wyniku czego zwiększyły swoją masę i objętość (Górnicki, 2010). Wysoka zawartość wody wykorzystanych do badań szyszkach na początku procesu mogła być spowodowana brakiem podsuszania szyszek przed łuszczeniem stosowanym w praktyce – w wyłuszczeniach oraz wczesnym terminem zbioru szyszek (przed pierwszymi przymrozkami) (Tyszkiewicz, 1949). Szyszki łuszczone 8 godzin osiągały średnio 7,1% wilgotności po czwartym etapie oraz jeszcze mniej – średnio 6,4% wilgotności po piątym etapie, czyli zachowując tendencję spadkową zawierały mniej wody w kolejnych etapach niż szyszki łuszczone w wariantach 10h, które osiągnęły podobny poziom (ok. 7%) wilgotności w czwartym i piątym etapie łuszczenia. Wynika z tego, że bardziej optymalnym wariantem łuszczenia jest zastosowanie etapów suszenia trwających 8 godzin dziennie.

Najwięcej nasion pozyskano w wariacie 10h_10min oraz 10h_15min, czyli 73% nasion. Podobną liczbę nasion pozyskano również w procesie 6h_5min (72%), co świadczy o możliwości skrócenia procesu łuszczenia przy skróceniu do minimum czasu namaczania nie obniżając znacząco ilości pozyskanych nasion. Najmniej nasion w samym procesie łuszczenia w komorze pozyskano w wariacie 6h_15min (56%) ze względu na zbyt krótki czas suszenia i zbyt długi czas namaczania. Niedoprowadzenie do odpowiednio niskiej zawartości wody w szyszce podczas procesu łuszczenia uniemożliwia przemieszczenie się nasion w obręb łuski (Tyszkiewicz, 1951). Z każdym kolejnym etapem łuszczenia pozyskiwano nasiona charakteryzujące się średnio niewiele niższą energią kiełkowania, ale zdolność kiełkowania utrzymywała się na podobnym poziomie we wszystkich etapach łuszczenia, co stanowi o uzyskaniu nasion I klasy jakości.

Efektywność pozyskania nasion modrzewia, jako miarę uzysku pozyskanych w całym procesie nasion, można zwiększyć wykonując minimum trzyetapowy proces łuszczenia (z minimum dwoma zabiegami nawilżania) szyszek (Aniszewska, 2012).

W pierwszych trzech etapach wariantów 8h łuszczenia pozyskano ok. 59% nasion, natomiast w czwartym etapie średnio 8%, a w piątym etapie ok 4% nasion wyłuszczonych w procesie. Z kolei w pierwszych trzech etapach wariantów 10 godzin łuszczenia pozyskano ok. 57% wszystkich nasion, w czwartym etapie średnio 9%, a w piątym etapie ok. 5% nasion wyłuszczonych w procesie.

W pierwszych trzech etapach wariantów 6h łuszczenia pozyskano ok. 56% nasion, w czwartym etapie średnio 9%, a w piątym etapie ok. 5% nasion wyłuszczone w procesie. Dlatego minimalna liczba etapów warunkująca pozyskanie ok. 50-60% nasion zawartych w szyszkach to trzy (Aniszewska, 2012; Załęski, 2002). Podczas łuszczenia szyszek modrzewia nie prowadzi się na bieżąco oceny wyraźnego odchylenia łusek oraz ilości pozyskanych nasion jak w przypadku sosny czy świerka, bo jest to utrudnione ze względu na wspomnianą wcześniej budowę łusek szyszek modrzewia (Tyszkiewicz, 1949).

Wskaźnik skuteczności łuszczenia szyszek związany z pozyskaniem nasion (α) był największy dla wariantu 10h_10min (0,73), ale wtedy proces łuszczenia trwał 50 godzin, a najmniejszy dla wariantu 8h_5min (0,65). Wskaźnik wydajności masowej (β) był największy dla wariantu 8h_10min (0,053), a najmniejszy dla wariantu 6h_15min (0,038).

Podjęto próbę opisu procesu łuszczenia za pomocą modelu empirycznego Lewisa w II okresie suszenia, przy zmianie równowagowej zawartości wody na zawartość wody w szyszkach pod koniec każdego etapu (u_{k1-5}). W równaniach tych początkowa zawartość wody w szyszkach (u_{01-5}) w większości wariantów zwiększa się wraz z kolejnym etapem łuszczenia z powodu namaczania. Znacznie większą początkową zawartością wody w poszczególnych etapach charakteryzowały się szyszki o dłuższym czasie namaczania (15 min) w porównaniu z dwoma pozostałymi wariantami, podobną zależność potwierdzono dla końcowej zawartości wody. Większą końcową zawartością wody w poszczególnych etapach charakteryzowały się szyszki o długości namaczania 15 min, najmniejszą o długości 5 min. Wartość współczynnika b zawierała się w granicach od 0,34 do 0,60 oraz zauważono, że w wariacie 8h_15min współczynniki b w kolejnych etapach wzrastały.

Ubytek wody podczas procesu suszenia powoduje zmiany w kształcie produktów poddawanych suszeniu (Górnicki & Kaleta, 2007). Podczas łuszczenia występuje skurcz polegający na kurczeniu się ściany komórkowej do przestrzeni poprzednio zajmowanej przez wodę i zmniejszanie objętości materiału suszonego (Wu i in., 2019), co zauważono w badaniach komórek łusek. Największy wzrost wartości kąta otwarcia w czterodniowym procesie zaobserwowano podczas pierwszego dnia procesu łuszczenia – w łuskach z części przy podstawie zmiana kąta wynosiła ok. 33°, z części środkowej szyszki ok. 39°, z części wierzchołkowej ok. 30°. Największy średni wzrost kąta otwarcia

zaobserwowano w łuskach z części środkowej badanych szyszek. Obliczono, że dla zawartości wody w szyszkach pod koniec procesu w zakresie od 5 do 10%, kąt otwarcia łusek wynosił ok. $140 \div 145^\circ$.

Mikroskopowa budowa łusek szyszek zawiera komórki różniące się grubością ścian. Wielkość i grubość ścian komórek w łuskach jest determinowana przez zawartość wody w szyszce. Im wyższa wilgotność szyszki tym grubsze ściany komórkowe (do punktu nasycenia włókien ok. 30%). Im niższa wilgotność tym większe światła komórkowe. Największą grubością ścian charakteryzowały się komórki epidermy wewnętrznej $9,458 \mu\text{m}$, a najmniejszą komórki w wiązkach $3,313 \mu\text{m}$. Natomiast największą zmianą grubości ścian charakteryzowały się komórki duże znajdujące się w środkowej części łusek z szyszek. Różnica w grubości ścian komórkowych między suchą, a wilgotną łuską wyniosła średnio $4,708 \mu\text{m}$. Komórki duże z łusek o wilgotności 5% miały grubości ścian komórkowych stanowiące średnio 42% grubości ścian komórek dużych zmierzonych w łuskach o wilgotności 20%.

Struktura zewnętrzna i wewnętrzna łuski różni się między sobą w zależności od wilgotności łuski. Największe różnice w strukturze powierzchni łusek z szyszek o 5%, 10% i 20% wilgotności widoczne są na stronie zewnętrznej. Na łusce z szyszki o 20% wilgotności, elementy budowy zewnętrznej w postaci włosków są wydłużone i mocno odchylone do zewnątrz szyszki, a w łusce 10% wilgotności jest ich mniej, zawierają przewężenia i przechylają się w kierunku trzpienia szyszki. Włoski w łusce z szyszki o 5% wilgotności są krótkie i przylegają do powierzchni zewnętrznej łuski. Strona wewnętrzna łusek o wilgotności 5, 10 i 20% pod względem struktury różni się istotnie między sobą na krawędzi łuski poza występowaniem skrzydełek. Na obu stronach łusek z szyszek o 20% wilgotności widoczne są cząstki żywiczne, których brak u łusek o wilgotności 5%.

Proces pozyskania nasion z szyszek w komorze łuszczarskiej, dla sposobu cieplnego był krótszy o 20 godzin i wymagał zapotrzebowania energetycznego o 600 kWh mniejszego niż proces łuszczenia szyszek sposobem cieplno – mechanicznym. Krótszy czas łuszczenia mógł wpłynąć na liczbę pozyskanych nasion, co potwierdza relatywnie wysoka zawartość wody w szyszkach po drugim dniu łuszczenia sposobem cieplnym.

W celu poprawy efektywności łuszczenia procesu cieplnego zaleca się przeprowadzanie minimum trzech zabiegów łuszczenia w komorze po 8 godzin dziennie i minimum dwóch zabiegów nawilżania szyszek (do 10 min) w celu pozyskania większej

liczby nasion odpowiednich do przechowywania długookresowego. W przypadku niektórych pochodzeń modrzewia jeden zabieg nawilżania może być niewystarczający, co wykazano w badaniach w wyłuszczeni gospodarczej.

Wnioski główne:

1. Sposób cieplny łuszczenia szyszek modrzewia europejskiego prowadzony w wyłuszczeniach gospodarczych wymaga usprawnienia poprzez wprowadzenie kolejnych etapów łuszczenia i nawilżania, aby pozyskać większą liczbę dobrych jakościowo nasion.
2. Laboratoryjne badania wariantów procesu łuszczenia szyszek (z czterema etapami namaczania) wykazały, że najwięcej nasion po pięciu etapach (dniach) łuszczenia pozyskano w wariacie 10h_10min (73%). Jednak średnio w pierwszym i drugim etapie (dniu łuszczenia) najwięcej nasion pozyskano w wariacie 8h_10min (w pierwszym – 53%, a w drugim – 32%), a w trzecim etapie najwięcej nasion pozyskano w wariacie – 10h_5min (22%). W etapie czwartym pozyskano porównywalną ilość nasion we wszystkich wariantach – ok. 11%. Natomiast w etapie piątym im dłuższe łuszczenie tym więcej nasion pozyskano (dla wariantów 10 godzin łuszczenia – średnio 5%, 8 godzin łuszczenia – 5%, a warianty 6 godzin łuszczenia – 4%).
3. Wskaźniki skuteczności łuszczenia (efektywności): liczbowy wskaźnik pozyskania nasion (α) był największy dla wariantu 10h_10min (0,73), na co wpływ miał długi czas łuszczenia – 50 godzin; natomiast wskaźnik wydajności masowej szyszek (β) był najwyższy dla wariantu 8h_10min (0,053), w którym czas łuszczenia był krótszy o 10 godzin.
4. W wyłuszczeniach gospodarczych należy zastosować conajmniej trzy etapy łuszczenia szyszek modrzewia trwające minimum 8 godzin i dwa etapy nawilżania trwające maksimum 10 minut. Zabieg ten umożliwił wyłuszczenie ponad 50% nasion zawartych w szyszkach. Korzyści z pozyskania nasion w kolejnych dwóch etapach (w przypadku stosowania pięcioetapowego łuszczenia) są nieznaczne (w czwartym etapie średnio pozyskuje się ok. 11% nasion, w piątym średnio ok. 5%). Proces pięcioetapowy może być prowadzony wtedy, gdy szyszki pochodzą z cennego źródła i wskazane jest pozyskanie z nich maksymalnej liczby nasion.
5. Wykazano zależność między zawartością wody w łuskach, a kątem otwarcia, którą opisano równaniami liniowymi. Wartość kąta otwarcia w łuskach szyszek modrzewia wzrastała wraz z ubytkiem wody w szyszkach. Największy przyrost wartości kąta otwarcia zaobserwowano podczas pierwszego dnia procesu

łuszczenia (średnio dla trzech rodzajów łusek o 34°), a w kolejnych mniejszy średnio o ok. 2° .

Średnia wartość kąta otwarcia jest większa dla łusek pochodzących z części środkowej (maksymalnie 145° przy wilgotności 7%), niż dla łusek przy podstawie lub wierzchołku szyszki - średnio o około 5° . Kąt otwarcia łusek wynoszący około 140° oraz wilgotność szyszek poniżej 7% ułatwia pozyskanie nasion z szyszek modrzewia.

8. Bibliografia

- Acheré, V., Faivre Rampant, P., Pâques, L. E., & Prat, D. (2004). Chloroplast and mitochondrial molecular tests identify European x Japanese larch hybrids. *TAG. Theoretical and Applied Genetics. Theoretische Und Angewandte Genetik*, 108(8), 1643–1649. <https://doi.org/10.1007/s00122-004-1595-y>
- Alia, R., Aravanopoulos, F., Bakkebø Fjellstad, K., Bozzano, M., Fady, B., Farsakoglou, A.-M., González-Martínez, S. C., Heinze, B., Kandemir, G., Koziół, C., Kraigher, H., Lefèvre, F., Rusanen, M., Scotti, I., Westergren, M., & Wolter, F. (2021). *Forest genetic resources strategy for Europe*. EUFORGEN. <https://www.euforgen.org/publications/publication/forest-genetic-resources-strategy-for-europe/>
- Ammer, C., Fichtner, A., Fischer, A., Gossner, M. M., Meyer, P., Seidl, R., Thomas, F. M., Annighöfer, P., Kreyling, J., Ohse, B., Berger, U., Feldmann, E., Häberle, K.-H., Heer, K., Heinrichs, S., Huth, F., Krämer-Klement, K., Mölder, A., Müller, J., ... Wagner, S. (2018). Key ecological research questions for Central European forests. *Basic and Applied Ecology*, 32, 3–25. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2018.07.006>
- Aniszewska, M. (2008). Multiphase process of European larch *Larix decidua* Mill. Seed extraction: A case of Czarna Białostocka. *Forest Research Papers*, 69(2), 155–163.
- Aniszewska, M. (2012). *Dynamika procesu pozyskania nasion w jedno- i dwuetapowych procesach łuszczenia szyszek sosny zwyczajnej Pinus sylvestris L.* Rozprawy Naukowe i Monografie (nr 403). Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie.
- Aniszewska, M. (2013). Zmiany wilgotności i temperatury wewnątrz szyszek sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) łuszczonych dwuetapowo. *Leśne Prace Badawcze*, 74(3), 205–214. <https://doi.org/10.2478/frp-2013-0020>
- Aniszewska, M. (2014). Analiza budowy skrzydełek modrzewia europejskiego (*Larix decidua* Mill.) w aspekcie procesu odskrzydlenia. *Studia i Materiały CEPL w Rogowie*, 16(39/2B), 13–19.
- Aniszewska, M., Gendek, A., Hýsek, Š., Malaťák, J., Velebil, J., & Tamelová, B. (2020). Changes in the Composition and Surface Properties of Torrefied Conifer Cones. *Materials*, 13(24), Art. 24. <https://doi.org/10.3390/ma13245660>
- Aniszewska, M., Gendek, A., & Zychowicz, W. (2018). Analysis of Selected Physical Properties of Conifer Cones with Relevance to Energy Production Efficiency. *Forests*, 9(7), Art. 7. <https://doi.org/10.3390/f9070405>
- Aniszewska, M., Stadnik, S., & Gendek, A. (2017). Zmienność budowy szyszek i powierzchni łusek nasiennych modrzewia europejskiego (*Larix decidua* Mill.). *Leśne Prace Badawcze*, 78(3), 198–209. <https://doi.org/10.1515/frp-2017-0022>
- Antosiewicz, Z., & Załęski, A. (1987). Technika i technologia wyluszczenia nasion sosny świerka i modrzewia w Polsce. *Las Polski*, 23, 7–11.
- Augusto, L., Dupouey, J.-L., Picard, J.-F., & Ranger, J. (2001). Potential contribution of the seed bank in coniferous plantations to the restoration of native deciduous forest vegetation. *Acta Oecologica*, 22(2), 87–98. [https://doi.org/10.1016/S1146-609X\(01\)01104-3](https://doi.org/10.1016/S1146-609X(01)01104-3)
- Bae, H., & Kim, J. (2020). Functional Principles of Morphological and Anatomical Structures in Pinecones. *Plants*, 9(10), Art. 10. <https://doi.org/10.3390/plants9101343>

- Bar-On, B., Sui, X., Livanov, K., Achrai, B., Kalfon-Cohen, E., Wiesel, E., & Daniel Wagner, H. (2014). Structural origins of morphing in plant tissues. *Applied Physics Letters*, 105(3), 033703. <https://doi.org/10.1063/1.4891191>
- Bodył, M. (2009). Drewno spoza lasu. *Głos Lasu*, 12, 10–12.
- Bruchwald, A., & Zasada, M. (2010). Model wzrostu modrzewia europejskiego (*Larix decidua* MILL.). *Sylwan*, 154, 615–624.
- Calama, R., & Montero, G. (2007). Cone and seed production from stone pine (*Pinus pinea* L.) stands in Central Range (Spain). *European Journal of Forest Research*, 126(1), 23–35. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s10342-005-0100-8>
- Carrer, M., & Urbinati, C. (2004). Age-Dependent Tree-Ring Growth Responses to Climate in *Larix decidua* and *Pinus cembra*. *Ecology*, 85(3), 730–740.
- Chałupka, W., Władysław, B., Blonkowski, S., Burczyk, J., Fonder, W., Grądzki, T., Gryzło, Z., Kacprzak, P., Kowalczyk, J., Koziół, C., Matras, J., Pytko, T., Rzońca, Z., Sabor, J., Szelağ, Z., & Tarasiuk, S. (2011). *Program zachowania leśnych zasobów genowych i hodowli selekcyjnej drzew w Polsce na lata 2011-2035*. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych.
- Chen, X., Willis, J. L., & Bowman, K. A. (2022). Assessing the influence of climate on cone production of longleaf pine forests. *Trees, Forests and People*, 9, 100297. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2022.100297>
- Dawson, C., Vincent, J. F. V., & Rocca, A.-M. (1997). How pine cones open. *Nature*, 390, Art. 6661. <https://doi.org/10.1038/37745>
- Dostálek, J., Frantík, T., Pospíšková, M., & Křížová, M. (2018). Population genetic structure and delineation of conservation units in European larch (*Larix decidua* Mill.) across its native range. *Flora*, 246–247, 26–32. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2018.06.007>
- Firsov, G. A., Orlova, L. V., & Khmarik, A. G. (2016). The larch genus (*Larix* Mill. Pinaceae) at Peter the Great Botanical Garden. *Вестник Волгоградского государственного университета*, 15(1), 6–14.
- Flanigan, N. P., Bandara, R., Wang, F., Jastrzębowski, S., Hidayati, S. N., & Walck, J. L. (2020). Germination responses to winter warm spells and warming vary widely among woody plants in a temperate forest. *Plant Biology*, 22(6), 1052–1061. <https://doi.org/10.1111/plb.13152>
- Fonder, W., Matras, J., & Załęski, A. (2007). *Leśna baza nasienna w Polsce*. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych.
- Gendek, A., Aniszewska, M., Malaťák, J., & Velebil, J. (2018). Evaluation of selected physical and mechanical properties of briquettes produced from cones of three coniferous tree species. *Biomass and Bioenergy*, 117, 173–179. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.07.025>
- Górnicki, K. (2010). The possibility of using neural networks to predict the size of the change in the volume of dried material during its moistening. *Advances in Food Processing Technology*, 20(1), 63–65.
- Górnicki, K., & Kaleta, A. (2007). Modelling convection drying of blanched parsley root slices. *Biosystems Engineering*, 97(1), 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.02.006>

- Harmer, R., & Morgan, G. (2009). Storm damage and the conversion of conifer plantations to native broadleaved woodland. *Forest Ecology and Management*, 258(5), 879–886. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.03.023>
- Haverkamp, C., Prior, L. D., Fogliani, B., L'Huillier, L., Anquez, M., Hua, Q., & Bowman, D. M. J. S. (2015). Effect of landscape fires on the demography of the endangered New Caledonian conifer *Callitris sulcata*. *Biological Conservation*, 191, 130–138. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.06.012>
- Haze, M. (Red.). (2012). *Zasady hodowli lasu. Załącznik do Zarządzenia nr 53 Dyrektora Generalnego Lasów Państwowych z dnia 21 listopada 2011 r., obowiązujący w jednostkach organizacyjnych Lasów Państwowych od dnia 1 stycznia 2012 r.* Centrum Informacyjne Lasów Państwowych.
- Hereş, A.-M., Petritan, I. C., Bigler, C., Curtu, A. L., Petrea, Ş., Petritan, A. M., Polanco-Martínez, J. M., Rigling, A., & Curiel Yuste, J. (2021). Legacies of past forest management determine current responses to severe drought events of conifer species in the Romanian Carpathians. *Science of The Total Environment*, 751, 141851. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141851>
- Ilmurzyński, E. (1969). *Szczegółowa hodowla lasu*. Powszechne Wydawnictwo Rolnicze i Leśne.
- International Rules for Seed Testing. Polska edycja.* (2016). IHAR-PIB.
- Jagielska, A. (2009). *Identyfikacja mieszkańców modrzewia europejskiego (Larix decidua Mill.) i japońskiego (Larix kaempferi Sarg.) na podstawie markerów genetycznych. Struktura genetyczna drzewostanów i powiązania filogenetyczne* (24.12.15; s. 62). Zakład Genetyki i Fizjologii Drzew Leśnych, Instytut Badawczy Leśnictwa.
- Jansen, S., & Geburek, T. (2016). Historic translocations of European larch (*Larix decidua* Mill.) genetic resources across Europe – A review from the 17th until the mid-20th century. *Forest Ecology and Management*, 379, 114–123. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.08.007>
- Jedliński, W. (1922). *Modrzew Polski (Larix Polonica) jego znaczenie ze stanowiska leśnego oraz analiza pniowa* (Wydanie drugie, wykonano w Warszawie). Zygmunt Pomarański i Spółka.
- Johnson, M., Wall, S. B. V., & Borchert, M. (2003). A Comparative Analysis of Seed and Cone Characteristics and Seed-Dispersal Strategies of Three Pines in the Subsection Sabinianae. *Plant Ecology*, 168(1), 69–84.
- Kang, K.-S., & Bilir, N. (2021). *Seed Orchards: Establishment, Management and Genetics*. The Foundation of Developing Forestry and Supporting Fire Protection Services OGEM-VAK.
- Kantorowicz, W. (2000). Half a century of seed years in major tree species of Poland. *Silvae Genetica*, 49(6), 245–249.
- Klisz, M. (2011). *Genetyczne uwarunkowania właściwości drewna modrzewia europejskiego (Larix decidua Mill.)*. Praca doktorska. Forest Research Institute.
- Kocięcki, S. (1966). *Atlas nasion leśnych*. Powszechne Wydawnictwo Rolnicze i Leśne.
- Kosiński, G. (1987). Empty seed production in European larch (*Larix decidua*). *Forest Ecology and Management*, 19(1–4), 241–246. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(87\)90033-8](https://doi.org/10.1016/0378-1127(87)90033-8)
- Kozioł, C., & Beza, M. (2020). *Drugi raport krajowy o leśnych zasobach genetycznych—Polska* (s. 366). Leśny Bank Genów Kostrzyca.

- Lacan, I., & McBride, J. R. (2009). War and trees: The destruction and replanting of the urban and peri-urban forest of Sarajevo, Bosnia and Herzegovina. *Urban Forestry & Urban Greening*, 8(3), 133–148. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2009.04.001>
- Malat'ák, J., Gendek, A., Aniszewska, M., & Velebil, J. (2020). Emissions from combustion of renewable solid biofuels from coniferous tree cones. *Fuel*, 276, 118001. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118001>
- Matras, J., & Pâques, L. E. (2008). *EUFORGEN Technical Guidelines for genetic conservation of European larch (Larix decidua)*. Bioversity International.
- Miller, S. (1970). Nasiennictwo leśne. *Sylwan*, 114(08–09), 154–157.
- Obstawski, P. (2014). Badanie procedury samostrojzenia cyfrowego regulatora PID. *Pomiary Automatyka Kontrola*, 60(1). <https://bw.sggw.edu.pl/info/article/>
- Owens, J. N., Kittirat, T., & Mahalovich, M. F. (2008). Whitebark pine (*Pinus albicaulis* Engelm.) seed production in natural stands. *Forest Ecology and Management*, 255(3–4), 803–809. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.09.067>
- Pabis, S. (1982). *Teoria konwekcyjnego suszenia produktów rolniczych*. Powszechne Wydawnictwo Rolnicze i Leśne.
- Pabis, S., & Henderson, S. M. (1961). Grain drying theory: II A critical analysis of the drying curve for shelled maize. *J. Agric. Eng. Res.*, 6, 272–277.
- Pâques, L. E. (1989). A critical review of larch hybridization and its incidence on breeding strategies. *Ann. Sci. For.*, 46, 141–153.
- Pluess, A. R. (2011). Pursuing glacier retreat: Genetic structure of a rapidly expanding *Larix decidua* population. *Molecular Ecology*, 20(3), 473–485. <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2010.04972.x>
- PN-R-65700 - *Materiał siewny - Nasiona drzew i krzewów leśnych i zadrzewieniowych* (1998). Polski Komitet Normalizacyjny.
- Praeg, N., & Illmer, P. (2020). Microbial community composition in the rhizosphere of *Larix decidua* under different light regimes with additional focus on methane cycling microorganisms. *Scientific Reports*, 10(1), 22324. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79143-y>
- Rameau, J., Mansion, D., & Dumé, G. (1989). *Francuska flora leśna: Ilustrowany przewodnik ekologiczny 1: Równiny i wzgórza*. Instytut Rozwoju Leśnictwa.
- Raupp, P. P., Ferreira, M. C., Alves, M., Campos-Filho, E. M., Sartorelli, P. A. R., Consolaro, H. N., & Vieira, D. L. M. (2020). Direct seeding reduces the costs of tree planting for forest and savanna restoration. *Ecological Engineering*, 148, 105788. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105788>
- Rohmeder, E. (1972). *Das Saatgut in der Forstwirtschaft*. Paul Parey.
- Rzeźnik, Z. (1980). Przydatność hodowlana krajowych proveniencji modrzewi. *Pr. Komis. Nauk Roln. Leśn. PTPN*, 50, 127–137.
- Sałat, R., Korpysz, K., & Obstawski, P. (2010). *Wstęp do programowania sterowników PLC*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności.

- Sarnowska, G., & Więsik, J. (1997). Wyłuszczeniarnia nasion w Czarnej Białostockiej. Część I. Proces technologiczny i przygotowanie szyszek do łuszczenia. *Przegląd Techniki Rolniczej i Leśnej*, 11, 12–13.
- Scheepers, D., Eloy, M. C., & Briquet, M. (2000). Identification of larch species (*Larix decidua*, *Larix kaempferi* and *Larix X eurolepis*) and estimation of hybrid fraction in seed lots by RAPD fingerprints. *Theoretical and Applied Genetics*, 100(1), 71–74. <https://doi.org/10.1007/s001220050010>
- Semerikov, V. L., Semerikov, L. F., & Lascoux, M. (1999). Intra- and interspecific allozyme variability in Eurasian *Larix* Mill. Species. *Heredity*, 82(2), 193–204. <https://doi.org/10.1038/sj.hdy.6884710>
- Skrzypczyńska, M., & Furgała, E. (2015). Ocena jakościowa owadów zasiedlających szyszki modrzewia europejskiego *Larix Decidua* Mill. pochodzących z Nadleśnictwa Myślenice (RDLP W Krakowie). *Acta Agr. Silv.*, 53, 61–70.
- Song, K., Yeom, E., Seo, S.-J., Kim, K., Kim, H., Lim, J.-H., & Joon Lee, S. (2015). Journey of water in pine cones. *Scientific Reports*, 5(1), Art. 1. <https://doi.org/10.1038/srep09963>
- Spellenberg, R., Earle, C. J., Nelson, G., & More, D. (2014). *Trees of Western North America*. Princeton University Press. <https://www.jstor.org/stable/j.ctt6wq08d>
- Lasy Państwowe. (2019). Raport o stanie lasów w Polsce.
- Statistica, pakiet oprogramowania do zaawansowanych analiz, wersja 13.3*. (2017). TIBCO Software Inc. <https://www.tibco.com/>
- Suszka, B. (2000). *Nowe technologie i techniki w nasiennictwie leśnym*. Bogucki Wydawnictwo Naukowe.
- Szafer, W. (1913). *Przyczynek do znajomości modrzewi eur-azyatyckich ze szczególnem uwzględnieniem modrzewia w Polsce* (Odbitka z czasopisma Polskiego Towarzystwa Przyrodników im. Kopernika-Kosmos., T. 38). Związkowa Drukarnia.
- Szarycz, M., Kamiński, K., & Jałoszyński, K. (2006). Matematyczne modelowanie procesu suszenia w nieruchomym złożu. Część I. Model matematyczny. *Inżynieria Rolnicza*, 12, 491–499.
- Tomanek, J. (1970). *Botanika Leśna*. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne.
- Tylek, P., & Walczyk, J. (2009). Bębnowy odskrzydlacz nasion metodami suchą i mokrą. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 543, 365–370.
- Tyszkiewicz, S. (1949). *Nasiennictwo leśne*. Instytut Badawczy Leśnictwa.
- Tyszkiewicz, S. (1951). *Wyłuszczenie nasion leśnych*. Powszechne Wydawnictwo Rolnicze i Leśne.
- Tyszkiewicz, S., & Tomanek, J. (1946). *Tabele psychrometryczne do zastosowania w wyłuszczeniarniach nasion sosny i świerka*. Instytut Badawczy Leśnictwa.
- Weisgerber, H., & Sindelar, J. (1992). IUFRO's role in coniferous tree improvement. History, results, and future trends of research and international cooperation with European larch (*Larix decidua* Mill.). *Silvae Genetica*, 41(3), 150–160.
- West, P. W. (2006). *Growing plantation forests*. Springer-Verlag.

- Wierdak, S. (1921). Aktualny stan wiedzy o modrzewiu polskim (*Larix polonica* Rac.). *Sylvan*, 39(01–03).
- Więsik, J., & Aniszewska, M. (2011). *Urządzenia techniczne w produkcji leśnej – Urządzenia do hodowli i ochrony lasu*. (I, T. 1). SGGW.
- Witowska, O., Aniśko, E., & Załęski, A. (2009). Wpływ warunków poduszania nasion modrzewia europejskiego, daglezi zielonej i sosny górskiej przeznaczonych do długookresowego przechowywania na ich żywotność. *Leśne Prace Badawcze*, 70(3), 253–269.
- Wu, X.-F., Zhang, M., & Li, Z. (2019). Dehydration modeling of *Cordyceps militaris* in mid-infrared-assisted convection drying system: Using low-field nuclear magnetic resonance with the aid of ELM and PLSR. *Drying Technology*, 37(16), 2072–2086. <https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1555843>
- Xia, Y., Xu, Y., Li, J., Zhang, C., & Fan, S. (2019). Recent advances in emerging techniques for non-destructive detection of seed viability: A review. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 1, 35–47. <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2019.05.001>
- Zajączkowski, K., & Załęski, A. (1993). Możliwości produkcyjne drzew szybko rosnących w plantacyjnej uprawie na gruntach porolnych. *Las - Drewno - Ekologia*, 93, 133–151.
- Zajączkowski, S., Talarczyk, A., Myszkowski, M., & Kucab, M. (2020). *Wyniki aktualizacji stanu powierzchni leśnej i zasobów drzewnych w Lasach Państwowych na dzień 1 stycznia 2019 r.* Biuro Urządzania Lasu i Geodezji Leśnej.
- Załęski, A. (1995). *Nasiennictwo leśnych drzew i krzewów iglastych*. Wydawnictwo Świat.
- Załęski, A. (2002). Porównanie metod termicznego i mechanicznego wyluszczenia nasion modrzewia europejskiego (*Larix decidua* Mill.) *Forest Research Papers*, 3(937), 5–17.
- Załęski, A., & Aniśko, E. (2003). *Suszenie nasion wybranych gatunków drzew (T. 1)*. Zeszyty Naukowe Instytutu Badawczego Leśnictwa.
- Załęski, A., Aniśko, E., & Kantorowicz, W. (2006). *Zasady i metodyka oceny nasion w Lasach Państwowych: „Elementy genetyki i hodowli selekcyjnej drzew leśnych”*. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych.
- Załęski, A., Aniśko, E., Kantorowicz, W., & Sobczak, H. (2000). *Zasady i metodyka oceny nasion w Lasach Państwowych*. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych.
- Zawadzka, A. (2008). Application of genetic markers in species identification of European and Japanese larch and their hybrids. *Forest Research Papers*, 69(1), 21–25.
- Zhang, C., Chen, M., Keten, S., Derome, D., & Carmeliet, J. (2021). Towards unraveling the moisture-induced shape memory effect of wood: The role of interface mechanics revealed by upscaling atomistic to composite modeling. *NPG Asia Materials*, 13(1), Art. 1. <https://doi.org/10.1038/s41427-021-00342-8>

Comparison of thermal and thermomechanical methods of seed extraction from larch cones based on two case studies

Ewa Tulska^{ORCID}* and Monika Aniszewska^{ORCID}

Department of Biosystems Engineering, Institute of Mechanical Engineering, Warsaw University of Life Sciences-SGGW, Nowoursynowska 164, 02-787 Warsaw, Poland

Received February 15, 2022; accepted June 6, 2022

Abstract. The paper analyzes two seed extraction methods used by Polish silvicultural seed extractories. The analysis involves cone batches as well as individual cones processed in extraction cabinets. During thermal extraction, the cones were dried (10 h), moistened with water (10 min), and dried again (10 h). During thermomechanical extraction, the cones were dried for a much longer time (40 h), and then crushed in a mechanical unit (20 min). The two examined cases of seed extraction were compared in terms of the size, weight, and moisture content of the cones involved, the steps in the extraction process, as well as the quantity and quality of the obtained seeds. Each of the extractories made use of cones of a different provenance, which differed significantly from each other. In order to compare the different seed extraction methods, the same batch of cones collected from one geographic locality should be used. The results of a process analysis show that the thermal method was superior in terms of energy efficiency and duration. The seeds extracted using the two methods were of the highest quality (class I), which indicates that in both cases the extraction process was conducted appropriately and did not cause the quality of the seeds to deteriorate.

Keywords: scale kinematics, coniferous cones, seed extraction, quality assessment

INTRODUCTION

The European Larch (*Larix decidua* Mill.) is one of the six main tree species in Poland (Kantorowicz, 2000) and the dominant species in the Alps (Praeg and Illmer, 2020). Together with the pine, it occupies 70% of the area of Polish

forests (State Forests, 2019). It is a native species (Jansen and Geburek, 2016) with two varieties: the Sudeten larch [var. *sudetica* (Cies.) Domin.] (Firsov *et al.*, 2016; Dostálek *et al.*, 2018; Semerikov *et al.*, 1999) and the Polish larch [*L. decidua* subsp. *polonica* (Racib.) Domin.] (Zawadzka, 2008; Jansen and Geburek, 2016). The most widespread among the foreign larch species is the Japanese larch (*L. kaempferi* Sarg.), which is native to the Japanese islands (Scheepers *et al.*, 2000).

200 to 500 kg of cones can be harvested from 1 ha of forest in Poland on average, which translates into 17.5-28.0 kg of seeds (Chalupka *et al.*, 2011; Fonder *et al.*, 2007). In the cones of Western larch (*Larix occidentalis* Nutt.) found in British Columbia, Canada, it was shown that the number of filled seeds produced is generally low, this is presumably due to a lack of pollination (Stoehr, 2000). According to the Department of Silviculture of the State Forests National Forest Holding (ZHL PGL LP, 2021) an average of approx. 10 000 kg of larch cones were harvested annually in the years 2010-2020. The most abundant harvests occurred in the years 2017 and 2020 (19 293 and 13 599 kg, respectively) and the least abundant occurred in the years 2011 and 2013 (2 676 and 5 944 kg, respectively).

The annual demand for the seeds of a given species is determined by the remaining stocks of the seeds from previous years. The plan for 2011-2035 is to maintain larch

*Corresponding author e-mail: ewa_tulska@sggw.edu.pl



seed stocks at 1 000 kg (Chałupka *et al.*, 2011). The average total stocks of larch seeds in Poland in 2010-2020 were 967 kg (ZHL PGL LP, 2021), with the highest level recorded in 2010 (1 864 kg), and the lowest in 2015 (517 kg). The most desirable type of seeds are those with a quality standard of class I, which are characterized by a high degree of viability and the absence of microdefects, therefore they are suitable for long-term storage (up to 10 years) (Aniszewska, 2008; Załęski, 2002).

The process of seed extraction from larch cones takes longer than that for other cones of forest conifers (Aniszewska, 2008) due to their specific structure (Tulska *et al.*, 2021; Tyszkiewicz, 1951; Song *et al.*, 2015), it involves the seeds being ejected gradually in several kinematic cycles of scale opening and closing (Załęski, 2002; Martone *et al.*, 2010; Poppinga *et al.*, 2017). There are three groups of activities for seed extraction from larch cones in extractories. The first group encompasses the receipt, weighing, cleaning, and storage of cones (Sarnowska and Więsik, 1997). The second group of activities consists of the thermal extraction and tumbling of cones. The third group involves seed dewinging, cleaning, separation, and storage as well as the disposal of waste, that is, spent cones, which may be sold or burnt (Aniszewska, 2008) (they can be utilized for energy generation purposes) (Aniszewska *et al.*, 2017).

The objective of the present study was to compare two methods of extracting seeds from larch cones: a thermal process with moistening and a thermomechanical process involving crushing. The processes differed with regard to the second group of activities and in dewinging, which in the thermomechanical method occurs together with the crushing of cones scales. The study was conducted in two seed extractories in Poland. In the thermal method, the cones are alternately dried and moistened (Aniszewska, 2008; Ilmurzyński, 1969). The initial drying temperature of 35°C is gradually ramped up to 50°C (Tyszkiewicz and Tomanek, 1946) to prevent thermal damage to the seeds. The cones can be moistened by soaking or spraying with water. This process yields seeds that meet the criteria of quality class I (Załęski and Aniśko, 2003).

In the thermomechanical process, the cones are dried for an extended period of time, and after the moisture content has been substantially reduced, the scales are crushed to extract the seeds (Suszka, 2000; Tyszkiewicz, 1951; Załęski, 2002). The crushing procedure makes it possible to release all of the seeds from a cone (Antosiewicz and Załęski, 1987). On the other hand, the abrasive elements of the mechanical crusher unit can damage the seed coat (Załęski, 2002; Kowalczyk, 1999; Pecan, 1994). Moreover, the extracted seeds need to be separated from a mixture of dust and scale fragments which are similar in size to the seeds (Załęski, 2002). It is also necessary to separate the

empty seeds, which account for up to 70% of the total (Kosiński, 1987) from the full seeds, which have a similar weight (Aniszewska, 2008; Załęski and Aniśko, 2003).

In addition, it should be noted that while mechanical cone crushing may lead to a high yield, the seeds obtained using this method are characterized by a lower viability upon storage and lower resistance to stress conditions as compared to the seeds obtained through thermal extraction (Załęski, 2002; Antosiewicz and Załęski, 1987). Thermomechanically extracted seeds have been reported to exhibit a higher rate of electrolyte loss, which is a manifestation of substantial damage to their cell structure due to the scale of crushing and abrasion in the crushing units (Załęski, 2002). Such seeds should be sown shortly after extraction as they are not suitable for long-term storage (Aniszewska, 2008). Moreover, another study recommends that larch seeds intended for long-term storage should not be dewinged because the very process of breaking off seed wings while the seed is in a dry state may damage the seed coat (Więsik and Aniszewska, 2011; Aniszewska, 2014).

The production capacity of Polish extraction facilities on average amounts to 5-8 kg of seeds per 100 kg of cones, depending on the genetic and environmental determinants (Chałupka *et al.*, 2011).

To date, no detailed analysis of seed extraction from European larch cones in silvicultural extractories has been published. The objective of the current work was to compare two methods used by the following facilities: the Czarna Białostocka Extractory and the Forest Seed Centre in Równe. The paper analyzes the parameters of the extraction process as well as the quantity and quality of the seeds obtained using the two methods studied.

MATERIALS AND METHODS

The study involved individual cones and batches of cones placed in extraction cabinets in two silvicultural extractories (geographic locations: 52°41'0 N, 23°60' E and 50°10' N, 22°20'0 E). The case study of the thermal extraction method involved 160 kg of European larch cones (LMR MP/3/41001/05), of which 150 cones were examined individually. The case study of the thermomechanical extraction method involved 115 kg of European larch cones (LMR MP/3/41061/05), of which 120 cones were analyzed in detail.

The height (h) and diameter (d) of individual cones were measured using an electronic caliper (model 677256, Silverline Tools, Yeovil, United Kingdom) with an accuracy of ± 0.1 mm, while their initial weight m_0 was taken using a laboratory balance (model WPS210S, Radwag, Radom, Poland) with an accuracy of ± 0.001 g.

In both cases, the drying processes conducted in the extraction cabinet were investigated and the individual cones were examined. The latter were placed in bags made from thin landscape fabric (P-17) and placed on screens,

which were then transferred to the cabinet. In the course of the drying process, the cones were removed from the cabinet every 2 h and weighed using a laboratory balance (model WPS210S Radwag, Radom, Poland) (± 0.001 g). The measurement procedure took approx. 15 min.

Prior to seed extraction, the cones were separated from the coarse debris (stalks, needles, and the remains of branches) in a cone handling unit with a roller feeder (Nomeko, Umeå, Sweden). Subsequently, 40 kg of cones were placed in each of four containers and inserted into a seed extraction cabinet model BW 1600 (Nomeko, Umeå, Sweden). The cones were dried using a program dedicated to processing pine cones, which ramped up the temperature to approx. 35°C over the first two hours, and then gradually to 50°C. The hourly power consumption of the cabinet was 20 kW. After 10 h of drying, the cones from each of the containers were placed in a rotary drum model BGL20-01-4000-600 (Nomeko, Umeå, Sweden) for 7 min, which was set to 10 rpm to release seeds by tumbling. Next, the cones in the containers (with slots) were sprinkled with a stream of running water, approx. 10 L per container. The cones were left for 10 h to absorb moisture. The process of drying the cones in a cabinet and tumbling them in the drum was repeated on the following day.

The obtained seeds were transferred to a dewinger (Nomeko, Umeå, Sweden) for wet dewinging. In Czarna Białostocka, a dewinger is used to dewing larch seeds, it is also used to separate the wings from pine and spruce seeds. The seeds of pine and spruce are sprinkled with water prior to dewinging. In the case of larch seeds, no initial sprinkling is performed, while rubber plugs are poured into the drum of the dewinging machine. During the process the plugs rub against the seeds, which increases the efficiency of the process of breaking off the larch wings. After 50 min, the dewinger was tilted from 30 to 90° for 10 min to separate the wings from the seeds under airflow. The dewinged seeds were placed in a vibration screen separator model LASOL-F (Damas, Feeborg, Denmark) with mesh sizes of 4, 4, and 3 mm in order to obtain three fractions (coarse debris, full and empty seeds, and fine impurities). This step lasted for 15 min for each 10 kg of load. Subsequently, the seed fraction was transferred into a seed dryer model DC 200/400 (Nomeko, Umeå, Sweden) to obtain an appropriate moisture content of approx. 5% (60 min). Finally, the seeds were placed in a pneumatic separator model LASTI (Damas, Feeborg, Denmark) in order to separate the empty seeds from the full ones at an airflow rate of 10 m s⁻¹.

After the first day of drying, the seeds that were released by individual cones into bags were tallied, and the cones were sprinkled with water to close the scales and left for 10 h.

A cone handling model 356-01 unit with a roller separator model 357-01 (BCC AB, Landskrona, Sweden) was used for the preliminary separation of the cones from impurities. Subsequently, 11.5 kg of cones were placed in

each of 10 containers, which were then inserted into a seed extraction cabinet model DL 1200/38 HL 402-01 (BCC AB, Landskrona, Sweden), which requires 25 kW per h.

The cones were subjected to an automatically controlled drying process in the extraction cabinet. Over the course of almost 30 h, the temperature was gradually ramped up to approx. 50°C, and the air humidity was decreased to 12%. Over the next 10 h, the cabinet heaters were turned on only if the air humidity increased, thereby maintaining it at a constant level. After 40 h in the cabinet, the cones were transferred to extraction drum model 401-SS (BCC AB, Landskrona, Sweden) where 50 kg of cones were tumbled for 2 h at 40 rpm to extract the seeds. Subsequently, the cones were divided into 10 kg batches, packed into cotton bags and subsequently placed in mechanical seed extractor model TD (Tyszkiewicz-Drachal) for a 20 min crushing treatment. The obtained seeds with impurities were transferred to a vibrating screen separator model 423-SS (BCC AB, Landskrona, Sweden) with screen meshes of 4 mm and 1.5 mm to obtain three fractions (coarse debris, full and empty seeds, and fine impurities). This step lasted for 30 min for each 10 kg load. Finally, the seeds were transferred to a pneumatic separator model 422-SS (BCC AB, Landskrona, Sweden) to separate the full seeds from the empty seeds at an airflow rate of 25 m s⁻¹.

The individually examined cones in bags were not subjected to tumbling in the drum or crushing in the mechanical seed extractor; instead, all of the seeds were removed from them manually.

Following seed extraction, all of the cones originating from two sources were evaluated in terms of the number and weight of the obtained seeds m_n using a laboratory balance model WPS210S (Radwag, Radom, Poland) with an accuracy of ± 0.001 g. Next, the cones were dried to a dry weight at 105°C (± 2) in an oven dryer, using the dryer-weighing method according to the standard (EN 13183-1:2004, 2004), which made it possible to calculate the initial and final moisture content and determine the instantaneous cone moisture content throughout the process.

In the case of both of the methods studied, changes in cone moisture content during seed extraction were described using Lewis's empirical model for the second stage of drying (Aniszewska, 2008; Pabis, 1982; Pabis and Henderson, 1961).

The seeds obtained using the two methods were compared in terms of viability (germination energy and capacity). The following coefficients were calculated: seed yield (α), cone mass yield (β), $M_{1000 \text{ seeds}}$, and process efficiency W_d .

The seeds obtained using the studied methods were placed in a Jacobsen germinator (Laborset, Łódź, Poland) in four 100-seed replicates, using the same laboratory equipment used in other studies (Tulska *et al.*, 2021). Germination energy was measured on day 7 and germination

capacity on day 21 of the experiment, which was the basis for the seed quality classification (PN-R-65700; ISTA, 2018).

Process efficiency W_d was computed using Eq. (1) based on the weight of the fraction of full seeds cleaned in a pneumatic separator and the weight of cones with seeds that were placed in the extraction cabinet (measured before extraction) (Załęski *et al.*, 2000). In the case of the yield of larch cones expressed in terms of the weight of the obtained seeds per unit of cone mass, the actual weight of the cones was converted to the weight of cones with a 20% moisture content:

$$W_d = \frac{m_n}{M} 100, \quad (1)$$

where: m_n – weight of the obtained seeds after cleaning (kg), M – weight of the cones at a moisture content of 20% (kg).

The dynamics of seed extraction were evaluated based on the number and weight of the seeds obtained from individual cones in bags, these results were used to compute the seed yield coefficient α Eq. (2) and the cone mass yield coefficient β Eq. (3) but only for the step of seed extraction in the cabinet, without tumbling and crushing:

$$\alpha = \frac{l_n}{l_w}, \quad (2)$$

where: l_n – number of extracted seeds, l_w – number of all seeds in the cone,

$$\beta = \frac{m_n}{m_0}, \quad (3)$$

where: m_n – weight of extracted seeds (g), m_0 – initial cone weight (g).

After completing the extraction process, the number of open cone scales was tallied as each scale is capable of releasing two seeds (as a morphological determinant of seed extraction).

Table 1. Parameters of the cones subjected to thermal and thermomechanical extraction methods and parameters of the extracted seeds

Parameter	Mean (\pm SD)		CV		Standard error	
	<i>t.</i>	<i>tm.</i>	<i>t.</i>	<i>tm.</i>	<i>t.</i>	<i>tm.</i>
Height h (mm)	31.04 \pm 4.05	28.04 \pm 3.93	13.06	14.02	0.33	0.36
Diameter d (mm)	16.75 \pm 1.76	18.41 \pm 1.76	10.50	9.54	0.14	0.16
Initial weight m_0 (g)	3.663 \pm 1.143	2.976 \pm 1.035	31.22	34.77	0.093	0.094
Moisture content W (%)	41.55 \pm 4.82	22.80 \pm 3.71	11.60	16.29	0.39	0.34
Number of scales l_{scales}	53 \pm 8	49 \pm 8	16	17	1	1
Number of seeds per cone l_w	32 \pm 15	60 \pm 16	45	27	1	1
Number of extracted seeds l_n	15 \pm 12	11 \pm 10	80	99	1	1
Weight of extracted seeds m_n (g)	0.078 \pm 0.060	0.052 \pm 0.055	76.70	105.7	0.005	0.005

t. – thermal method; *tm.* – thermomechanical method, SD – standard deviation, CV – coefficient of variation.

In addition, the study measured the $M_{1000\ seeds}$ parameters for seed lots obtained using the two methods, this was based on the average weight of four 100-seed replicates.

A statistical analysis was conducted using Statistica v. 13.3 software (Statistica, 2017). The normality of distribution of the cone size and weight parameters was evaluated using the Shapiro-Wilk test. Differences in the mean cone size and weight parameters as well as in the number and weight of the seeds were evaluated by means of an analysis of variance using a Student's *t*-test as well as a test for independent samples (*F* ANOVA). All tests were conducted at a statistical significance level of 0.05.

RESULTS

An analysis of variance (ANOVA) showed that cones from the two extractories differed significantly from each other in terms of: height ($F=37.49$, $p=0.00$), diameter ($F=59.77$, $p=0.00$), weight ($F=26.16$, $p=0.000$), and moisture content ($F=1231.45$, $p=0.000$).

Table 1 presents mean values with standard deviations, coefficients of variation, and standard errors for individual batches of the studied cones from two sources that were subjected to thermal (*t.*) and thermomechanical (*tm.*) extraction. The Shapiro-Wilk's test shows that the parameters are characterized by a normal distribution.

The parameters of the studied cones were within the ranges reported by other researchers (Więsik and Aniszewska, 2011), that is, $h = 30-50$ mm, $d = 20-30$ mm, $m_0 = 1.0-7.0$ g, and $l_{scales} = 35-70$, with the exception of the height of the cones that were subjected to the thermomechanical process (shorter). On average, the cones that were processed with the thermal method contained fewer seeds (l_w), than those processed using the thermomechanical method. Two geographically different locations of seed plantations could be the reason for the varying physical property of the larch cones.

Evaluation covered the number (l_n) and weight (m_n) of the seeds that were obtained from the extraction cabinets. On average, individually examined cones processed with the thermal method were heavier but contained fewer seeds than cones subjected to the thermomechanical method. The yield from the former cones (dried and moistened) was 50% of all seeds as compared to only 20% from the latter cones (without any tumbling or crushing treatments).

The overall time of the thermal process was 38 h and that of the thermomechanical process was 48 h. The steps of the two extraction methods are presented in the form of Gantt charts (Fig. 1).

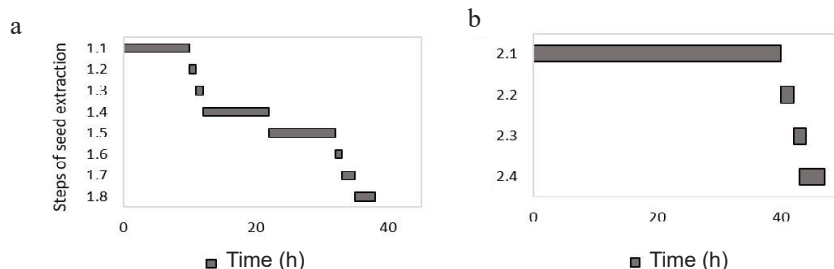


Fig. 1. Gantt charts showing the steps comprising the thermal (a) and thermomechanical (b) seed extraction methods: 1.1, 1.5, 2.1 – extraction in a cabinet; 1.2, 1.6, 2.2 – tumbling in a drum; 1.3 – moistening; 1.4 – moisture absorption; 1.7 – dewinging; 1.8, 2.4 – seed cleaning and separation; 2.3 – crushing in a mechanical extraction unit.

In the case of the thermal method, the time of seed extraction in the cabinet was 10 h on day 1 and 10 h on day 2, and in the case of the thermomechanical method it was 40 h in one cycle. Next, in both extraction methods the cones were tumbled in a drum: for 1 h in the thermal method and for 2 h in the thermomechanical one. In the thermal process the cones were additionally moistened and left to absorb moisture (10 h) and dewinged (2 h). In turn, the thermomechanical process involved crushing the cones in a mechanical extraction unit (2 h). Seed cleaning and separation took 3 h in the thermal method and 4 h in the thermomechanical one.

Table 2 presents changes in the moisture content (mean values with standard deviations $u \pm SD$), minima (u_{min}) and maxima (u_{max}), as well as b coefficient values recorded in the process of seed extraction from individually examined cones subjected to extraction using the two methods studied.

The mean initial moisture content of cones subjected to thermal extraction (u_{0t}) was $0.387 [\text{kg}_{\text{water}} \text{kg}^{-1}_{\text{dw}}]$ on day 1 and $0.456 [\text{kg}_{\text{water}} \text{kg}^{-1}_{\text{dw}}]$ on day 2. In comparison, the mean initial moisture content of the cones subjected to thermomechanical extraction (u_{0m}) was $0.228 [\text{kg}_{\text{water}} \text{kg}^{-1}_{\text{dw}}]$. The mean final moisture content of the cones subjected to thermal extraction (u_{ft}) was $0.073 [\text{kg}_{\text{water}} \text{kg}^{-1}_{\text{dw}}]$ on day 1 and $0.127 [\text{kg}_{\text{water}} \text{kg}^{-1}_{\text{dw}}]$ on day 2. The same parameter for the cones subjected to thermomechanical extraction (u_{fm}) was $0.096 [\text{kg}_{\text{water}} \text{kg}^{-1}_{\text{dw}}]$. Special care had to be taken due to the

high mean initial moisture content of the thermally extracted cones, and therefore a two-step drying process with a variable temperature was applied.

Using a previously verified model (Pabis, 1982; Pabis and Henderson, 1961), changes in moisture content were described for the studied batches of cones. This is of importance with a view to determining the appropriate temperature and moisture conditions, and finally developing a software algorithm to control larch cone processing in extraction cabinets.

The mean b coefficient characterizing changes in the moisture content of cones subjected to thermal extraction

on day 1 and 2 was $b_{1t} = 0.29 \pm 0.04$ and $b_{2t} = 0.26 \pm 0.06$, respectively. In turn, the mean b coefficient for the moisture content of cones subjected to thermomechanical extraction was $b_{m} = 0.13 \pm 0.01$. The mean value of b_m was lower than that of b_{1t} or b_{2t} because in the thermomechanical process the drying step lasted for four times longer as compared to one drying step (on one day) in the case of the thermal process.

Figure 2 shows examples of the model and the actual curves representing changes in the mean moisture content for a cone subjected to thermal extraction (a) and thermomechanical extraction (b).

The drying process was described by equations for changes in moisture content (Aniszewska, 2008) using the dryer-weighing method, where τ is seed extraction time. The following equations were obtained for the thermal method (4 and 5):

$$\text{Day 1: } u_{1t} = 0.314e^{(-0.29 \tau)} + 0.073, \quad (4)$$

$$\text{Day 2: } u_{2t} = 0.329e^{(-0.26 \tau)} + 0.127, \quad (5)$$

and for the thermomechanical method (6):

$$u_{m} = 0.132e^{(-0.13 \tau)} + 0.096. \quad (6)$$

On day 1 of the thermal process 3.55 kg of seeds was obtained after 10 h of drying followed by cone tumbling in a drum. At the end of day 1, the weight of cones decreased

Table 2. Basic parameters of seed extraction with the two studied methods

Day	Time (h)	$u \pm SD$	u min	u max	b	
		[kg _{water} kg ⁻¹ _{dw}]			(h ⁻¹)	
Thermal method						
1	0	0.387±0.043	0.288	0.493	-	
	2	0.277±0.047	0.154	0.459	0.22±0.08	
	4	0.180±0.042	0.095	0.357	0.28±0.09	
	6	0.124±0.029	0.058	0.260	0.31±0.07	
	8	0.095±0.020	0.050	0.185	0.35±0.09	
	10	0.073±0.015	0.036	0.120	0.57±0.02	
2	0	0.456±0.048	0.239	0.499	-	
	2	0.351±0.066	0.173	0.464	0.20±0.13	
	4	0.272±0.067	0.101	0.430	0.21±0.10	
	6	0.213±0.053	0.081	0.357	0.23±0.08	
	8	0.165±0.042	0.059	0.260	0.28±0.10	
	10	0.127±0.024	0.042	0.174	0.58±0.02	
	Thermomechanical method					
		0	0.228±0.037	0.130	0.399	-
	2	0.195±0.035	0.102	0.338	0.14±0.04	
	4	0.166±0.033	0.073	0.289	0.16±0.06	
	6	0.146±0.032	0.055	0.258	0.17±0.07	
	8	0.132±0.033	0.042	0.232	0.17±0.03	
	10	0.121±0.031	0.032	0.207	0.17±0.02	
	18	0.107±0.031	0.021	0.232	0.14±0.02	
	20	0.107±0.035	0.023	0.331	0.13±0.02	
	22	0.105±0.031	0.023	0.197	0.12±0.02	
	24	0.104±0.031	0.021	0.196	0.12±0.02	
	26	0.103±0.031	0.020	0.195	0.12±0.01	
	28	0.103±0.031	0.020	0.195	0.11±0.02	
	30	0.101±0.032	0.018	0.189	0.12±0.02	
	32	0.100±0.031	0.017	0.192	0.11±0.02	
	40	0.096±0.031	0.015	0.188	0.12±0.02	

u – cone moisture content, SD – standard deviation, min, max – minimum, maximum, b – coefficient characterizing moisture content change.

by approx. 25%. On day 2, the same process resulted in the separation of 1.34 kg of seeds (a total of 4.89 kg of seeds with wings were obtained during the two days). After dewinging, the resulting 3.27 kg of seeds was first separated in a screen separator (2.78 kg were obtained), and then in a pneumatic one. Finally, 1.98 kg of full seeds was obtained from 160 kg of larch cones with an initial moisture content of 41.55% (± 4.82).

In the case of the thermomechanical method, 40 h of drying followed by cone tumbling in a drum resulted in 0.60 kg of seeds with impurities as well as 70.40 kg of cones for crushing; this yielded 14.60 kg of seeds with impurities, which were combined with the previous batch (0.60 kg) and separated with screen and pneumatic separa-

tors. This process yielded 4.46 kg of full seeds with wings from 115 kg of cones with an initial moisture content of 22.80% (± 3.71).

Table 3 provides the germination energy and capacity for the seeds obtained from processes carried out using the two studied extraction methods performed at two extractories.

The germination energy and capacity of the studied seeds at various processing steps were lower for the thermal method than for the thermomechanical one. The germination parameters of the control sample for the former method were lower than those for the latter method due to the considerable number of empty seeds in the cones

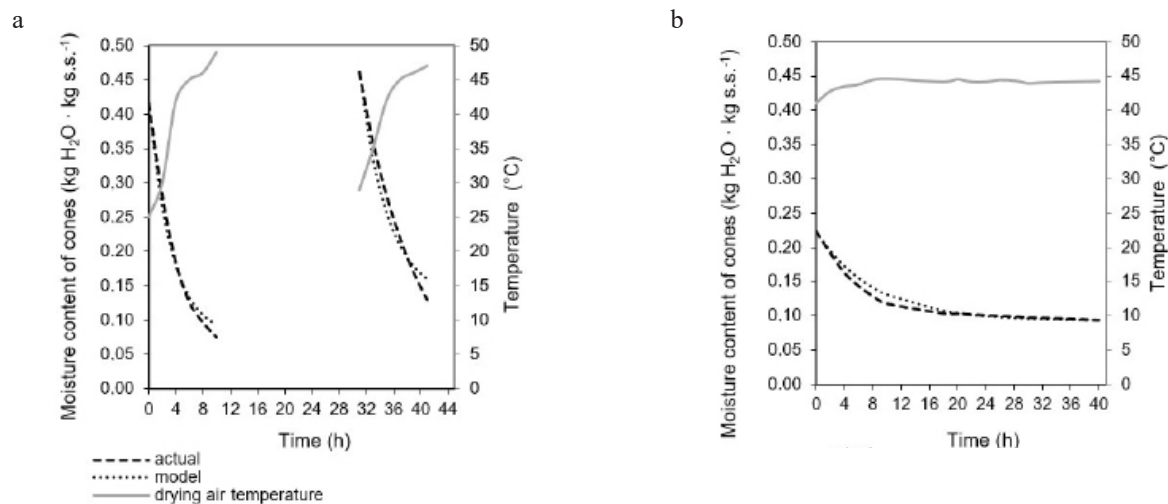


Fig. 2. Drying air temperature and mean moisture content of a sample cone (actual and model) for: a – thermal seed extraction, b – thermomechanical seed extraction.

Table 3. Comparison between the germination energy and the capacity of seeds obtained using the two studied extraction methods at different steps of seed processing

Seed processing stage after	Thermal seed extraction			Thermomechanical extraction		
	Germination		Quality class	Germination		Quality class
	energy	capacity		energy	capacity	
Cone tumbling	Day 1 – 35	Day 1 – 35	II	48	48	I
	Day 2 – 26	Day 2 – 26	II			I
Mechanical crushing	-	-	-	41	42	I
Separation in						
screen separator	39	40	II	49	49	I
pneumatic separator (full seeds)	41	41	I	57	58	I
Control – manually extracted	41	41	I	58	58	I

used. The cones from that source were characterized by a lower genetic potential (they were also assigned to a lower quality class after tumbling and dewing).

In the thermomechanical method, the germination energy and capacity of the seeds after mechanical cone crushing was lower than at the other stages of the process. In addition, an examination of the purity of the seed sample after crushing revealed a higher proportion of halved or fragmented seeds than after the other steps. Seeds that are damaged in this way are not suitable for sowing. On the other hand, even the slightest damage to the seed coat makes long-term storage impossible (similar to that caused by drying the cones at a high temperature of up to 60°C) (Załęski, 2002; Aniszewska, 2014).

The overall high germination energy and capacity values (less than 40%) indicate that the separation step was carried out appropriately using both methods, and the resulting seeds were categorized as quality class I (the highest possible) according to the current standards. In larch, germination energy and capacity values ranging from

40-26% indicate seeds of the II quality class, while 25-10% includes seeds of the III quality class (PN-R-65700, 1998; Załęski, 1995).

The energy consumption for the thermal method of seed extraction in the cabinet was approx. 400 kWh (20 h × 20 kW), while that for the thermomechanical method was approx. 1 000 kWh (40 h × 25 kW).

DISCUSSION

Making a comparison between the thermal and thermomechanical methods in terms of the extraction process steps as well as between the quality and quantity of the obtained seeds is not straightforward.

The process effectiveness W_d which was calculated from Eq. (1) was 2.57 and 4.42% for the thermal and thermomechanical methods, respectively. However, it should be noted that the cones subjected to thermal extraction had been collected from felled trees in a plantation that was being liquidated. Therefore, that batch of cones contained both the current year's cones with seeds and empty

cones from previous years. Moreover, the better developed cones (Tyszkiewicz, 1951) are characterized by greater seed yields. In other studies the yields of seeds from 100 kg of European larch cones have been reported to be 7.5% (Tyszkiewicz, 1951), 5-8% (Kocięcki, 1966) and 3.2-9.0% (on average 5.8%) (Rohmeder, 1972).

It has been reported that the seeds obtained using the thermal method are easier to clean with the aim of achieving almost 100% purity (Załęski, 2002). Special care must be taken while using the thermomechanical method as the dust produced in the crushing step is explosive and the process of obtaining a high degree of seed purity is both time and energy intensive.

The seed yield coefficient α_i (Eq. (2)) was 0.42 ± 0.23 for 150 individually examined cones subjected to thermal extraction (with moistening), while the corresponding coefficient α_m (Eq. (2)) for 120 individually examined cones subjected to thermomechanical extraction (without crushing) was 0.17 ± 0.16 . The mass yield coefficients for the same cones were 0.022 ± 0.018 in the case of thermal extraction and 0.019 ± 0.020 in the case of thermomechanical extraction (β_i and β_m were calculated from Eq. (3), respectively). These results are consistent with the findings of other researchers in that a long period of drying in itself does not increase the rate of ejection of seeds from larch cones (Załęski, 2002; Tyszkiewicz, 1951). On the other hand, the rate of seed extraction is increased by repeated alternating cycles of cone moistening and drying (Aniszewska, 2008).

The weight of 1000 dewinged seeds ($M_{1000 \text{ seeds}}$) was 5.762 g for the thermal method and 4.717 g for the thermomechanical method. The values of $M_{1000 \text{ seeds}}$ that were obtained using both methods were within the range reported by other authors, that is, 2.2-8.8 g (Antosiewicz, 1970) and 2.0-5.5 g (Więsik and Aniszewska, 2011). Yet another study reported mean $M_{1000 \text{ seeds}}$ values of 6.1 g and approx. 5.0 g for larch seeds with and without wings (Aniszewska, 2008).

The greater viability of the larch seeds obtained using the thermal method indicates that despite a lower seed yield this process should be used in situations where the seeds are to remain in long-term storage, e.g., in forest gene banks. In turn, thermomechanical seed extraction can be used to obtain seeds for short-term silvicultural needs (e.g., forest regeneration).

Taking into consideration the energy consumption of the extraction process and the quality requirements of seeds for long-term storage, the thermal extraction method is recommended for silvicultural extraction facilities. A further comparative study of thermal and thermomechanical processes should be conducted using cones from one source to avoid significant differences in size, weight, and initial moisture content parameters.

CONCLUSIONS

1. The process of seed extraction was shorter by 20 h in the case of the thermal method and required less electrical energy (by 600 kWh) as compared to the thermomechanical method. However, the shorter process time may have affected the quantity of the obtained seeds, this is confirmed by the relatively high moisture content in cones after the second day of the thermal process.

2. In order to improve the efficiency of thermal seed extraction, the recommend procedure consists of three drying cycles in the extraction cabinet alternated with two moistening treatments (the duration of the overall process amounts to three days). This method yields a greater number of seeds suitable for long-term storage. In the case of larch cones from some sources one moistening treatment may be insufficient.

3. The seeds obtained from both case studies meet the requirements of quality class I. The yield of seeds from two different sources was higher for the thermomechanical method as compared to the thermal extraction. However, this result was considerably affected by the significantly greater number of seeds found in the cones subjected to thermomechanical extraction (by as much as 50%) and the crushing treatment, which was absent from the thermal method. It should be borne in mind that according to the literature, crushing has an adverse effect on the quality of seeds designated for storage and should be applied only when the seeds are to be sown in the year of the next harvest.

ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to thank Mr. Krzysztof Rostek and Mrs. Jerzyna Kojder of the Department of Silviculture, the Directorate-General of the State Forests for valuable information concerning larch seed stands and extraction facilities: the Czarna Białostocka Extractory and the Forest Seed Centre in Równe in Dukla Forest District for the possibility of conducting scientific research.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Aniszewska M., 2008. Multiphase process of European larch *Larix decidua* Mill. seed extraction: a case of Czarna Białostocka. Forest Research Papers, 69(2), 155-163.
- Aniszewska M., 2014. The analysis of the conformation of the wings of *Larix decidua* Mill. in terms of dewinging (in Polish). Studia i Materiały CEPL w Rogowie, 16(39/2B), 13-19.
- Aniszewska M., Stadnik S., and Gendek A., 2017. Variability of cones and scale surface area of European larch (*Larix decidua* Mill.). Forest Research Papers, 78(3), 198-209. <https://doi.org/10.1515/frp-2017-0022>

- Antosiewicz Z., 1970.** Seed production. Forester's Guide (in Polish). Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Leśnictwa i Drzewnictwa, Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne: Warsaw, Poland.
- Antosiewicz Z. and Załęski A., 1987.** Technique and technology of pine, swede and larch seed extraction in Poland (in Polish). Las Polski, (23), 7-11.
- Chalupka W., Władysław B., Blonkowski S., Burczyk J., Fonder W., Gładziński T., Gryzlo Z., Kacprzak P., Kowalczyk J., Kozioł C., Matras J., Pytko T., Rzońca Z., Sabor J., Szeląg Z., and Tarasiuk S., 2011.** Programme for the conservation of forest genetic resources and selective breeding of trees in Poland for the period 2011-2035 (in Polish). Centrum Informacyjne Lasów Państwowych: Warsaw, Poland.
- Dostálek J., Frantík T., Pospíšková M., and Křížová M., 2018.** Population genetic structure and delineation of conservation units in European larch (*Larix decidua* Mill.) across its native range. *Flora*, 246-247, 26-32. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2018.06.007>
- EN 13183-1:2004, 2004.** Moisture content of a piece of sawn timber – Part 1: Determination by oven dry method. European Committee for Standardization: Brussels.
- Firsov G.A., Orlova L.V., and Khmarik A.G., 2016.** The larch genus (*Larix* Mill. *Pinaceae*) at Peter the Great Botanical Garden (in Russian). *Bulletin of Volgograd Technical University*, 15(1), 6-14. <https://doi.org/10.15688/jvolsu11.2016.1.1>
- Fonder W., Matras J., and Załęski A., 2007.** The forest seed base in Poland (in Polish). Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warsaw, Poland.
- Ilmurzyński E., 1969.** Detailed silviculture (in Polish). Powszechnie Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warsaw, Poland.
- ISTA, 2018.** International Rules for Seed Testing (in Polish). Polish edition. IHAR-PIB: Radzików, Poland.
- Jansen S. and Geburek T., 2016.** Historic translocations of European larch (*Larix decidua* Mill.) genetic resources across Europe - A review from the 17th until the mid-20th century. *Forest Ecology and Management*, 379, 114-123. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.08.007>
- Kantorowicz W., 2000.** Half a century of seed years in major tree species of Poland. *Silvae Genetica*, 49(6), 245-249.
- Kocięcki S., 1966.** Forest seed schedule with seed atlas (in Polish). Powszechnie Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warsaw, Poland.
- Kosiński G., 1987.** Empty seed production in European larch (*Larix decidua*). *Forest Ecology and Management*, 19(1-4), 241-246. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(87\)90033-8](https://doi.org/10.1016/0378-1127(87)90033-8)
- Kowalczyk J., 1999.** Pattern of seed losses and damage during soybean harvest with grain combine harvesters. *Int. Agrophys.*, 13(1), 103-107.
- Martone P.T., Boller M., Burgert I., Dumais J., Edwards J., Mach K., Rowe N., Rueggeberg M., Seidel R., and Speck T., 2010.** Mechanics without Muscle: Biomechanical Inspiration from the Plant World. *Integrative Comparative Biology*, 50(5), 888-907. <https://doi.org/10.1093/icb/icq122>
- Pabis S., 1982.** Theory of convective drying of agricultural products (in Polish). Powszechnie Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warsaw, Poland.
- Pabis S. and Henderson S.M., 1961.** Grain drying theory: II A critical analysis of the drying curve for shelled maize. *J. Agric. Eng. Res.*, (6), 272-277.
- Pecen J., 1994.** Internal damage identification of seeds. *Int. Agrophys.*, 8(2), 289-293.
- PN-R-65700, 1998.** Seed material. Seeds of forest and wooded trees and shrubs. Polish Committee for Standardization: Warsaw, Poland.
- Poppinga S., Nestle N., Šandor A., Reible B., Masselter T., Bruchmann B., and Speck T., 2017.** Hygroscopic motions of fossil conifer cones. *Sci. Rep.*, 7(1), 40302. <https://doi.org/10.1038/srep40302>
- Praeg N. and Illmer P., 2020.** Microbial community composition in the rhizosphere of *Larix decidua* under different light regimes with additional focus on methane cycling microorganisms. *Sci. Rep.*, 10(1), 22324. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79143-y>
- Rohmeder E., 1972.** Das Saatgut in der Forstwirtschaft. Paul Parey: Hamburg, Berlin.
- Sarnowska G. and Więsik J., 1997.** Place for extraction cones in Czarna Białostocka. Part I. Technological process and preparation of cones for extraction (in Polish). *Przegląd Techniki Rolniczej i Leśnej*, (11), 12-13.
- Scheepers D., Eloy M.C., and Briquet M., 2000.** Identification of larch species (*Larix decidua*, *Larix kaempferi* and *Larix X eurolepis*) and estimation of hybrid fraction in seed lots by RAPD fingerprints. *Theor. Appl. Genet.*, 100(1), 71-74. <https://doi.org/10.1007/s001220050010>
- Semerikov V.L., Semerikov L.F., and Lascoux M., 1999.** Intra- and interspecific allozyme variability in Eurasian *Larix* Mill. species. *Heredity*, 82(2), 193-204. <https://doi.org/10.1038/sj.hdy.6884710>
- Song K., Yeom E., Seo S.-J., Kim K., Kim H., Lim J.-H. and Joon Lee S., 2015.** Journey of water in pine cones. *Sci. Rep.*, 5(1), 9963. <https://doi.org/10.1038/srep09963>
- State Forests, 2019.** Report on condition of forests in Poland.
- Statistica, 2017.** An advanced analytics software package, version 13.3. TIBCO Software Inc.: 3307 Hillview Avenue, Palo Alto, CA, USA.
- Stoehr M.U., 2000.** Seed production of western larch in seed-tree systems in the southern interior of British Columbia. *Forest Ecology Manag.*, 130(1-3), 7-15. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00173-5](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00173-5)
- Suszka B., 2000.** New technologies and techniques in forest seed (in Polish). Bogucki Wydawnictwo Naukowe: Poznań - Warszawa.
- Tulska E., Aniszewska M., and Gendek A., 2021.** The kinematics of scale deflection in the course of multi-step seed extraction from European larch cones (*Larix decidua* Mill.) taking into account their cellular structure. *Materials*, 14(17), 4913. <https://doi.org/10.3390/ma14174913>
- Tyszkiewicz S., 1951.** Forest seed extraction (in Polish). Powszechnie Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warsaw, Poland.
- Tyszkiewicz S. and Tomanek J., 1946.** Psychrometric tables for use in pine and spruce seed extraction plants. Forest Research Institute, Sękocin Stary, Poland.
- Więsik J. and Aniszewska M., 2011.** Technical equipment in forest production – Equipment for silviculture and forest protection. SGGW, Warsaw, Poland.
- Załęski A., 1995.** Seeding of forest coniferous trees and shrubs (in Polish). Wydawnictwo Świat, Warsaw, Poland.

- Załęski A., 2002.** Comparison of methods of seed extraction by drying cones and mechanical one of European larch seeds *Larix decidua* Mill. Forest Res. Papers, 3(937), 5-17.
- Załęski A. and Aniśko E., 2003.** Seed drying of selected tree species. Scientific Notebook of the Forest Research Institute, Sękocin Stary, Poland.
- Załęski A., Aniśko E., Kantorowicz W., and Sobczak H., 2000.** Principles and methodology of seed assessment in the State Forests in Poland (in Polish). Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warsaw, Poland.
- Zawadzka A., 2008.** Application of genetic markers in species identification of European and Japanese larch and their hybrids. Forest Res. Papers, 69(1), 21-25.



OPEN

Optimization of the process of seed extraction from the *Larix decidua* Mill. cones including evaluation of seed quantity and quality

Ewa Tulska , Monika Aniszewska & Witold Zychowicz

The objective of this study was to determine the number of stages of cone drying and immersion that yield the maximum number of high quality seeds. Nine variants of the process were conducted; they differed in terms of dwell time in the drying chamber and water immersion time. Each extraction variant consisted of five drying steps (lasting 10, 8 or 6 h) and four immersion steps (5, 10 or 15 min). Each drying step was followed by cone shaking in a purpose-made laboratory drum. The process variants were evaluated and compared in terms of cone moisture content as well as the dynamics of seed yield and the quality of seeds obtained in the various steps. The seed yield coefficient, α , and the cone mass yield coefficient, β , were calculated. The studied process of seed extraction can be described using the Lewis empirical model for the second stage of drying with the b coefficient ranging from 0.34 to 0.60. Relatively higher initial and final moisture content was found for cones immersed for 15 min (more than $0.45 \text{ kg}_{\text{water}} \cdot \text{kg}_{\text{d.w.}}^{-1}$), while the lowest moisture content was found for those immersed for 5 min (less than $0.4 \text{ kg}_{\text{water}} \cdot \text{kg}_{\text{d.w.}}^{-1}$). The highest seed yield at the first and second steps was obtained in the 8 h_10 min variant (53% and 32%, respectively). In all five-step variants, the mean cone yield amounted to 65% of total seeds in the cones; seeds obtained from all variants were classified in quality class I. The procedure recommended for commercial seed extraction facilities consists of three 8 h drying steps and two 10 min immersion steps, with cone shaking in a drum to maximize seed yield. A shorter cone extraction process maintaining an acceptable level of seed extraction may reduce energy consumption by nearly 50%.

List of symbols

u	Instantaneous cone moisture content during seed extraction [$\text{kg}_{\text{water}} \cdot \text{kg}_{\text{d.w.}}^{-1}$]
u_{01-5}	Initial cone moisture content in a given extraction step (1–5) [$\text{kg}_{\text{water}} \cdot \text{kg}_{\text{d.w.}}^{-1}$]
uk_{1-5}	Final cone moisture content in a given extraction step (1–5) [$\text{kg}_{\text{water}} \cdot \text{kg}_{\text{d.w.}}^{-1}$]
b_{1-5}	Coefficient characterizing moisture content change in a given step (1–5) [h ⁻¹]
τ_i	Time [h]
e	The base of the natural logarithm
α	Seed yield coefficient
l_n	Number of extracted seeds
l_w	Total number of seeds
β	Cone mass yield coefficient
m_n	Weight of extracted seeds [g]
m_0	Initial cone weight [g]
h	Height [mm]
d	Diameter [mm]
W	Cone moisture content [%]
l_{scales}	Number of scales
E	Energy
Z	Germination capacity
R_{cr}	Critical value of the correlation coefficient

Department of Biosystems Engineering, Institute of Mechanical Engineering, Warsaw University of Life Sciences–SGGW, Nowoursynowska, 164, 02-787 Warsaw, Poland. ✉email: ewa_tulska@sggw.edu.pl

It is more difficult to extract seeds from the cones of the European and Polish larch^{1,2} than from other conifer species^{3,4}. This is due to the specific anatomical and morphological structure of larch cone scales^{5,6}. As compared to pine and spruce, the scales of larch cones are thinner, smaller, and more rounded⁴. They can be used to determine the exact taxonomic species of larch trees⁷. In a typical European larch, the scales are relatively broad and taper towards the tip; the top margin is oval and sometimes crenate⁴. According to the literature, scales are made of layers of cells with different wall thicknesses. Moisture is evaporated most readily via cells located on the external side, due to which scales are deflected away from the rachis in their middle and top regions. Dry scales are brittle, and upon breaking they lose elasticity and do not deflect again easily⁸. The specific mechanisms of scale opening and closing are associated with tree survival strategy and evolution, which allowed coniferous species to release seeds at greater distances on dry sunny days^{9,10}.

The process of seed extraction is used for controlled seed production in silvicultural extractories¹¹. Seeds obtained in this way are stored short-term (for same-season sowing)¹² or long-term¹³, e.g.,¹⁴ in seed banks or in nurseries (to be sowed in the open or in containers—single-seed sowing)^{15,16}. The right temperature and moisture conditions of seed extraction guarantee the production of high-quality seeds³.

The issue of standardization of seed extraction from larch cones (*Larix*) was predominantly studied at the time of afforestation of war-affected areas from the 1950s¹⁷ to the 1980s^{18–22}. The current literature on seed extraction largely focuses on pine cones due to the high demand for pine seeds^{23–25}. The control of energy use in the process of seed extraction is important to ensure sustainable development while promoting the conservation of natural resources. Energy consumption has become a significant influence on every country's economic progress²⁶. Manufacturers have two basic options of reducing reliance on fossil fuels and at the same time diminishing the environmental impact of their activity: the use of renewable energy systems or a decrease in energy consumption²⁷. The reduction of demand for energy can be further subdivided into three options: a reduction in total activity (e.g.²⁸); improved energy management (e.g.²⁹); and the recovery and reuse of waste energy (e.g.³⁰).

The genus *Larix* is used for fast-growth plantations in Poland³¹, with the species being dominant in China and Mongolia³², as well as Canada³³. Comminuted larch bark is an important source of biomass and can be used to manufacture upcycled products (Tudor et al.³⁴). For example, thin panels made from comminuted bark can replace cork in flooring applications³⁵. Additionally, the pulp and paper industry produces many by-products, some of which are used to produce electricity³⁶. The pursuit of the full and effective use of biological material (larch trees) is the reason why research efforts should continue optimizing the process of extracting seeds from the cones of this species, which has been known in Poland for over a century³⁷. There are gaps in knowledge about the number of sequential drying and immersion steps and their duration to ensure the maximum effectiveness of the seed extraction process.

Given the difficulties associated with seed extraction from larch cones, two methods are predominantly used in practice: thermal and thermo-mechanical³. The former involves cone immersion or spraying in addition to drying, which significantly extends the time of seed extraction, even up to 60 h⁴. The time the cones spend in the dryer can take up to half the time of the entire process of seed extraction, which makes drying the most energy-consuming part of the process.

In the thermo-mechanical method, moisture content in the cones is reduced to about 8–10%³⁸, making the scales so brittle that they break off the rachis and release the seeds more easily⁸. Additionally, mechanical shaking or crushing results in a greater seed yield, but during such a procedure the seed coat may be damaged by abrasive elements³. Following such a process, the seeds should be separated from the mixture of dust and cone remains, which presents a difficulty in terms of sorting empty and full larch seeds, as their weight is similar^{3,4}. It should be noted that the proportion of empty seeds in larch cones may reach up to 70%²¹. Such procedures also cause high levels of dust in the seed extraction facility, which is hazardous and requires additional precautions on the part of the operators.

Polish extraction facilities increasingly use the thermal method which involves cone moistening in multi-step larch seed extraction³. A two-step extraction process in extractor cabinets with variable drying temperature for pine and spruce cones¹⁷ has been adopted for larch cones. This leads to high-quality seeds with high germination energy and capacity^{8,39}. In practice, a three-step process with a significant reduction in moisture content is used most often⁴⁰. To attain maximum extraction yield, larch cones should be alternately dried and moistened¹⁹. However, cones should not be immersed for too long, as it could have an adverse effect on the viability of the obtained seeds. Furthermore, after several hours in water, the seeds swell⁸ and must be sown shortly after extraction. Practitioners use two types of cone moistening: immersion (e.g., seed extractory in Lasowice Małe; Kluczbork Forest District) and spraying (e.g., seed extractory in Czarna Białostocka; Czarna Białostocka Forest District).

The research problem arises from the absence of detailed information concerning the commercial extraction of seeds from larch cones or the efficiency of the thermal method (with immersion) applied for that purpose. It is not known how many drying and immersion steps should be used to ensure the right drying/moisture parameters to obtain the greatest possible quantity of seeds without compromising their quality. Furthermore, the duration of such steps should be investigated to make sure that the process is economically and energetically sound.

It is possible that there exists a certain threshold of cone moisture content at which seeds are released. It is likely that after the cone drying and immersion steps, the next drying step will be facilitated by the phenomenon of drying contraction⁴¹. Thus, it is predicted that during the subsequent immersion step the cones will be able to absorb more water.

Another objective of the paper is to analyze changes in cone moisture content during a five-step extraction process with varied seed drying and immersion times, to develop a mathematical model of heat and mass exchange during extraction, to evaluate the dynamics of extraction in the studied process variants, and to assess the quality of the obtained seeds.

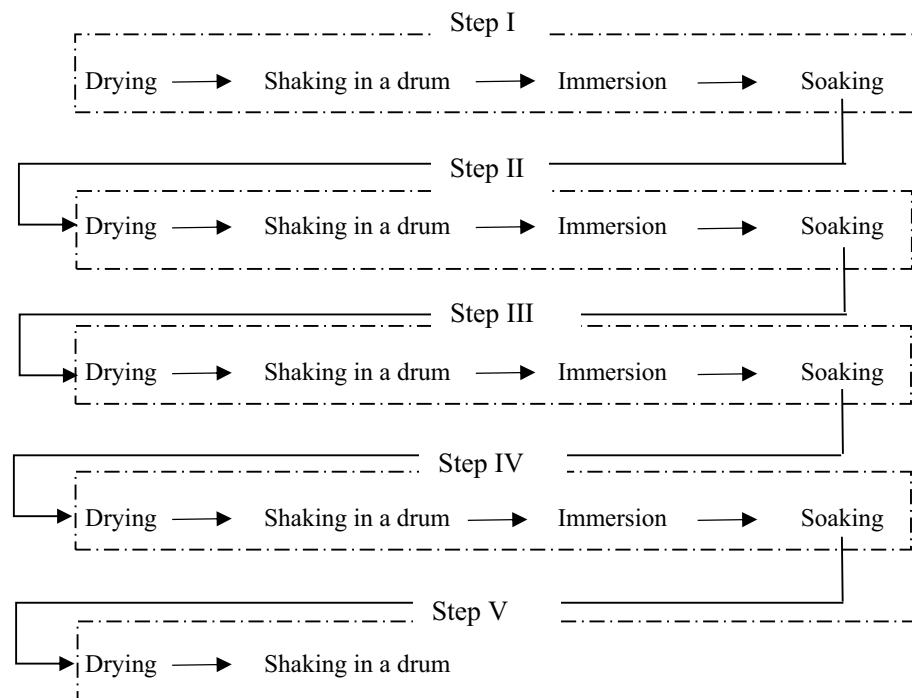


Figure 1. Scheme of the seed extraction process: (a) drying; (b) shaking in a drum; (c) immersion; (d) soaking.

Materials and methods

Material provenance and characteristics. The laboratory study involved European larch cones collected from the seed orchard at the beginning of December 2019 in the Grabowiec Nursery, division 282 k, in Bielsk Podlaski municipality, Podlaskie Province (52° 41' 0 N, 23° 60' E), by the Czarna Białostocka seed extraction facility. Plant study was carried out in accordance with the regulations in force in the State Forests in Poland. Permission was obtained from the municipality of Bielsk Podlaski, Podlaskie province, to use the collected larch cones for research. The national number in the register of suppliers of primary forestry material from which the cones were obtained was MP/3/41001/05, and the certificate of provenance for the cones was MR/60849/20/PL (based on the Polish Act of June 7, 2001 on forest reproductive material (Journal of Laws of 2015, item 1092)). The collected cones were transported to the laboratory of the Department of Biosystems Engineering, Warsaw University of Life Sciences, divided into batches and stored in an LKexv 3600 laboratory refrigerator (Liebherr, Bulle, Switzerland) at $+2 \pm 1$ °C prior to the study. All cones had their height (h) and diameter (d) measured using an electronic sliding caliper (model 677,256 from Silverline Tools, Yeovil, Great Britain) with an accuracy of ± 0.1 mm, and their initial weight was determined using a WPS210S laboratory balance (Radwag, Radom, Poland) with an accuracy of ± 0.001 g.

Seed extraction process: its course and empirical model. The cones were divided into ten batches with 32 cones per batch; nine batches were designated for testing the extraction process and one constituted controls not subjected to any treatment. The controls were placed in individual containers without drying, soaking or shaking. They were kept at room temperature in open containers. The seeds that were naturally released from them were collected and transferred to a germinator.

The nine studied seed extraction variants differed in terms of drying and immersion times. Each variant of the procedure consisted of five drying steps of 10, 8 or 6 h, five steps of shaking in a drum for 30 min, four immersion steps of 5, 10 or 15 min, and four soaking steps of 12, 14 or 16 h. A stage is defined as one single cycle of drying, shaking and optionally immersion and soaking the cones. Variants are the names of entire processes, each of which begins with placing the cones in a dryer and ends with an evaluation of the quality of the seeds obtained in the process.

Effective extraction time was defined as the sum of all drying, immersion and shaking times during the entire procedure. In turn, total process time also included cone soaking after steps 1, 2, 3, and 4 (Fig. 1, Table 1).

After removing from the refrigerator, the cones were acclimatized at room temperature (20–22 °C) for about 1 h at a relative air humidity of 40%. Then, after measuring the size and weight parameters, a batch of 32 cones was placed on perforated shelves in a Heraeus UT612 convection dryer with air circulation (Kendro Laboratory Products GmbH, Hanau, Germany). At the beginning of each drying step, the temperature in the dryer was 35 °C for the first 2 h, and then it was increased to 50 °C until the end of the process to prevent the seeds from thermal damage. During the process, the cones were removed from the dryer every 2 h to weigh them and separate the seeds that had been released. The measurement time was about 5 min.

Nr	Variant	Total drying time in the chamber [h]	Total immersion time [min]	Total shaking time [min]	Total soaking time [h]	Effective extraction time	Total process time [h]
1	10 h_5 min	50	20	150	~ 48	50 h + 20 min + 150 min	~ 101
2	10 h_10 min	50	40	150		50 h + 40 min + 150 min	
3	10 h_15 min	50	60	150		50 h + 60 min + 150 min	
4	8 h_5 min	40	20	150	~ 56	40 h + 20 min + 150 min	~ 99
5	8 h_10 min	40	40	150		40 h + 40 min + 150 min	
6	8 h_15 min	40	60	150		40 h + 60 min + 150 min	
7	6 h_5 min	30	20	150	~ 64	30 h + 20 min + 150 min	~ 97
8	6 h_10 min	30	40	150		30 h + 40 min + 150 min	
9	6 h_15 min	30	60	150		30 h + 60 min + 150 min	

Table 1. Scope of laboratory studies of seed extraction.

After each drying step, individual cones were put in tightly sealed P17 geotextile bags, and then placed in a drum and shaken for 30 min. The drum rotated at 30 rpm and was tilted at 30° from the horizontal (patent claim no. UP P.437143 [WIPO ST 10/C PL437143]).

After shaking, the seeds were removed from each bag, and the number and weight of the seeds were recorded. Subsequently, the cones were immersed in plastic containers half-filled with distilled water at 24 °C (± 1 °C) for 5, 10 or 15 min, depending on the test variant. During immersion time, the cones were covered by water. After immersion, the cones were taken out of the containers and placed on a cotton fabric at a controlled temperature of 22 °C for 12, 14, or 16 h for variants including 10, 8 or 6 h drying steps, respectively. After the appropriate time of drying, shaking, and then soaking and soaking—the first stage of the process is complete.

During the second and subsequent drying steps, the cones were weighed prior to placing them in the dryer; the rest of the procedure was exactly the same as before. In each variant, after the fifth—last step, neither immersion nor soaking was performed (only drying and shaking of cones).

The temperature and humidity in the dryer and in the laboratory were monitored with a FTH 100 m (Geo FENNEL, Kassel Germany) with an accuracy of 0.01 °C and 0.01%, respectively.

Following the extraction process, the cones were dried at 105 °C (± 1 °C) in the dryer to constant weight. Dry weight measurements made it possible to calculate the initial and final moisture content as well as determine instantaneous moisture content in the cones throughout the process.

It was assumed that changes in cone moisture content during the five-step processes can be described according to the Lewis empirical model for the second stage of drying (^{42,43}). The model was adapted to the extraction conditions by determining the values of the coefficients for each of the five drying steps taking into consideration variable temperature in the drying chamber and other determinants. The general equation describing moisture content changes in cones for one step has the following form⁴⁴:

$$u = (u_0 - u_k) \cdot e^{(-b \cdot \tau_i)} + u_k \quad (1)$$

where u —instantaneous cone moisture content during the extraction process [$\text{kg}_{\text{water}} \cdot \text{kg}_{\text{d.w.}}^{-1}$], u_0 —initial cone moisture content in a given step [$\text{kg}_{\text{water}} \cdot \text{kg}_{\text{d.w.}}^{-1}$], u_k —final cone moisture content in a given step [$\text{kg}_{\text{water}} \cdot \text{kg}_{\text{d.w.}}^{-1}$], b —coefficient characterizing moisture content change [h^{-1}], τ_i —time [h], e —the base of the natural logarithm.

The value of coefficient b given in the literature⁴⁴ is constant and reflects changes in the moisture content of cones dried at a constant temperature⁴⁰.

In addition, the seed extraction rate was calculated from the formula below:

$$\frac{du}{d\tau_i} = -b \cdot (u_0 - u_k) \cdot e^{(-b \cdot \tau_i)} \quad (2)$$

Formulas 1 and 2 were used to describe the course of seed extraction in successive steps of the studied nine variants.

Seed extraction dynamics. The dynamics of seed extraction was assessed by calculating the cumulative number and weight of the seeds released in the process using the following formula for the seed yield coefficient, α (3), and the cone mass yield coefficient, β (4):

$$\alpha = \frac{l_n}{l_w} \quad (3)$$

where l_n —number of extracted seeds, l_w —total number of seeds;

$$\beta = \frac{m_n}{m_0} \quad (4)$$

where m_n —weight of extracted seeds [g], m_0 —initial weight of the cone [g].

Parameter	Means (\pm standard deviation)	Min	Max	Range of variance	Coefficient of variation	Standard error
Height h [mm]	33.8 \pm 3.4	21.4	44.1	22.7	10.1	0.2
Diameter d [mm]	17.8 \pm 1.6	12.5	24.3	11.8	8.8	0.1
Initial weight m_0 [g]	4.144 \pm 1.019	2.137	9.111	6.974	24.585	0.060
Initial moisture W [%]	40.4 \pm 4.5	27.6	57.1	29.5	11.2	0.3
Number of scales l_{scales}	48 \pm 6	33	70	37	13	0.36
Number of extracted seeds l_n	36 \pm 18	1	96	95	49	1
Total number of seeds l_w	52 \pm 19	5	97	92	37	1
Weight of extracted seeds m_n [g]	0.193 \pm 0.109	0.000	0.651	0.651	56.541	0.006

Table 2. Cone and seed parameters for the entire study set.

After the extraction process was completed, the number of open scales capable of producing two seeds was analyzed, as they are structural elements determining the course of seed extraction.

Seed viability assessment. The seeds obtained from each step of the studied process variants were manually dewinged, cleaned and transferred to a Jacobsen germinator (Laborset, Łódź, Poland) to assess seed viability according to the Polish Seed Evaluation System^{45,46}. Larch seeds were placed on filter paper in the germinator in three replicates, with 100 samples per seed batch. The 24 h germination cycle included 8 h of illumination, with the water temperature being maintained at 24 °C. Temperature was controlled using a Termo-Stab RBS1 controller (Termo-Stab, Warsaw, Poland) with an accuracy of ± 1 °C. The applied exposure timer was a Grasslin Talento 371 device (Grässlin GmbH, St. Georgen, Germany). The light source consisted of two Tungshram 36 W-F74 Daylight fluorescent tubes. Germination energy was measured after seven days, and germination capacity after 28 days of the experiment. These results were used to determine the seed quality class pursuant to the standard PN-R-65700. First class larch seeds should germinate in 40–60% of the cases.

Statistical analysis. Statistical analyses were performed using the Statistica v. 13 (2010) software. The normal distribution of cone size and weight parameters was assessed using the Shapiro–Wilk test. Differences in mean size and weight parameters were assessed by ANOVA F and Duncan's test. The homogeneity of variance was also tested using the HSD Tukey test. All analyses were performed at a statistical significance level of 0.05.

Results

Cone characteristics: the entire set and individual variants. Cones used in all the test variants did not differ from each other in terms of height (coefficient of variance in the Student t -test $F=1.33$ at $p=0.23$), diameter ($F=1.77$ at $p=0.08$), or initial weight ($F=0.86$ at $p=0.55$). Analysis of variance revealed a significant difference for cone humidity ($F=2.52$ at $p < 0.05$).

Cone parameters such as height, diameter and initial weight are factors that can determine the course of the extraction process. Therefore, the relationship between diameter and height for all cones used in the study was described using a linear regression equation ($y = 0.2794x + 8.3195$), which means that cone diameter increased by 0.28 mm per 1 mm of cone height, ($R = 0.778 > 0.104 - R_{kr}$).

The initial weight of cones may be associated with their harvest time or storage conditions. A linear regression equation was also used to describe the relationship between the height and initial weight of the examined cones ($y = 0.238x - 3.918$), which means that initial weight increased on average by 0.238 g per 1 mm of height, ($R = 0.795 > 0.104$).

Table 2 shows means with standard deviations, the minimum and maximum values of the measured parameters, the range of variance, the coefficient of variation and the standard error for the entire set of studied cones and seeds. The Shapiro–Wilk test showed that the examined characteristics had a normal distribution.

The cones used in the study had a height of 21.4–44.1 mm and a diameter of 12.5–24.3 mm. The mean height of a cone was 33.8 (± 3.4) mm and the mean diameter was 17.8 (± 1.6) mm. The initial weight of cones ranged from 2.137 to 9.111 g, with a mean of 4.144 (± 1.019) g. The initial moisture content of cones was from 27.6 to 57.1%, with a mean of 40.4 (± 4.5)%. Analysis was performed for individual extraction variants. The mean values of cone height h , diameter d , initial weight m_0 , and moisture content W were calculated (Table 3).

The HSD Tukey test revealed one homogeneous group for cone height encompassing all variants and two homogeneous groups for diameter. The first group consisted of all variants except 7, and the second group included all variants except 2. One homogeneous group was obtained for initial weight. Two homogeneous groups were found for moisture content, one consisting of all variants except 7, and the other one containing variants 1, 4, 5, 6, 7, 8, and 9.

Seed extraction results for the studied steps. *Seed extraction conditions and time.* The change in cone weight in each step of the extraction process depended on its duration, temperature and humidity conditions in the extraction cabinet, as well as on the initial moisture content of the cones.

No	Variant	Height h [mm]	Diameter d [mm]	Initial weight m_{0i} [g]	Moisture content W [%]
1	10 h_5 min	33.7 ^a ± 3.3	17.7 ^{ab} ± 1.4	3.945 ^a ± 1.109	40.22 ^{ab} ± 3.57
2	10 h_10 min	32.3 ^a ± 3.5	17.4 ^a ± 1.3	3.949 ^a ± 0.961	41.48 ^a ± 4.33
3	10 h_15 min	33.3 ^a ± 3.6	17.5 ^{ab} ± 1.5	4.073 ^a ± 0.989	41.56 ^a ± 3.64
4	8 h_5 min	33.8 ^a ± 3.2	17.6 ^{ab} ± 1.3	4.134 ^a ± 1.004	41.03 ^{ab} ± 5.18
5	8 h_10 min	34.0 ^a ± 3.7	17.6 ^{ab} ± 1.8	4.320 ^a ± 0.863	41.05 ^{ab} ± 5.38
6	8 h_15 min	34.2 ^a ± 3.2	17.6 ^{ab} ± 1.8	4.459 ^a ± 1.223	41.41 ^{ab} ± 3.37
7	6 h_5 min	34.5 ^a ± 3.1	18.6 ^b ± 1.6	4.152 ^a ± 1.072	38.00 ^b ± 5.21
8	6 h_10 min	33.9 ^a ± 3.7	18.0 ^{ab} ± 1.7	4.208 ^a ± 0.881	38.98 ^{ab} ± 4.22
9	6 h_15 min	34.6 ^a ± 3.3	18.0 ^{ab} ± 1.4	4.144 ^a ± 1.019	39.83 ^{ab} ± 4.41

Table 3. Mean parameter values and standard deviations for the nine process variants. *a, b* – homogeneous groups.

No	Variant	Moisture content of cones [$\text{kg}_{\text{water}} \cdot \text{kg}_{\text{d.w.}}^{-1}$]									
		u_{0i}	u_{k1}	u_{02}	u_{k2}	u_{03}	u_{k3}	u_{04}	u_{k4}	u_{05}	u_{k5}
1	10 h_5 min	0.402 ^{ab} ± 0.036	0.131 ^a ± 0.022	0.408 ^a ± 0.054	0.108 ^a ± 0.022	0.413 ^{ab} ± 0.053	0.085 ^a ± 0.013	0.414 ^b ± 0.057	0.069 ^a ± 0.008	0.415 ^a ± 0.053	0.071 ^{ab} ± 0.004
2	10 h_10 min	0.415 ^a ± 0.043	0.130 ^a ± 0.021	0.422 ^a ± 0.053	0.108 ^a ± 0.018	0.424 ^{ab} ± 0.054	0.087 ^a ± 0.013	0.426 ^{ab} ± 0.051	0.070 ^a ± 0.008	0.429 ^{ab} ± 0.055	0.070 ^{ab} ± 0.004
3	10 h_15 min	0.416 ^a ± 0.036	0.129 ^a ± 0.024	0.425 ^a ± 0.060	0.110 ^a ± 0.019	0.450 ^b ± 0.055	0.086 ^a ± 0.012	0.466 ^b ± 0.080	0.071 ^a ± 0.007	0.468 ^b ± 0.066	0.071 ^{ab} ± 0.004
4	8 h_5 min	0.410 ^{ab} ± 0.052	0.126 ^a ± 0.026	0.406 ^a ± 0.061	0.090 ^b ± 0.017	0.421 ^{ab} ± 0.061	0.081 ^a ± 0.011	0.422 ^{ab} ± 0.081	0.072 ^a ± 0.015	0.424 ^{ab} ± 0.084	0.064 ^a ± 0.011
5	8 h_10 min	0.411 ^{ab} ± 0.054	0.126 ^a ± 0.037	0.409 ^a ± 0.046	0.090 ^b ± 0.024	0.433 ^{ab} ± 0.048	0.080 ^a ± 0.010	0.430 ^{ab} ± 0.053	0.071 ^a ± 0.010	0.444 ^{ab} ± 0.051	0.065 ^a ± 0.009
6	8 h_15 min	0.414 ^{ab} ± 0.034	0.132 ^a ± 0.027	0.429 ^a ± 0.059	0.106 ^a ± 0.023	0.438 ^{ab} ± 0.054	0.086 ^a ± 0.013	0.449 ^{ab} ± 0.059	0.070 ^a ± 0.009	0.452 ^{ab} ± 0.067	0.064 ^a ± 0.005
7	6 h_5 min	0.380 ^b ± 0.052	0.121 ^a ± 0.022	0.404 ^a ± 0.059	0.106 ^a ± 0.022	0.372 ^c ± 0.045	0.090 ^{ab} ± 0.018	0.393 ^a ± 0.068	0.077 ^b ± 0.022	0.398 ^a ± 0.076	0.077 ^{bc} ± 0.026
8	6 h_10 min	0.390 ^{ab} ± 0.042	0.139 ^a ± 0.024	0.405 ^a ± 0.035	0.114 ^a ± 0.019	0.403 ^{ac} ± 0.038	0.101 ^{bc} ± 0.020	0.403 ^b ± 0.058	0.091 ^{bc} ± 0.011	0.411 ^a ± 0.046	0.081 ^a ± 0.017
9	6 h_15 min	0.398 ^{ab} ± 0.044	0.129 ^a ± 0.038	0.420 ^a ± 0.048	0.117 ^a ± 0.018	0.423 ^{ab} ± 0.058	0.105 ^c ± 0.016	0.428 ^{ab} ± 0.067	0.100 ^c ± 0.015	0.436 ^{ab} ± 0.066	0.093 ^d ± 0.018

Table 4. Initial and final moisture content of cones used in each process variant. *a, b, c, d* – homogeneous groups.

Humidity inside the drying chamber decreased to an average of 30% after 2 h of the process in each step as a result of increasing temperature. Over the subsequent 4 h of the process, after increasing the temperature, the humidity inside the chamber declined significantly, and then (over 2 and 4 h) it decreased further only slightly, stabilizing at approx. 5% for the 10 h variants, 6% for the 8 h variants, and 8% for 6 h variants on average.

Moisture content changes in cones during the seed extraction process. The initial moisture content (u_{0i}) of the studied cones was much greater than $0.20 \text{ kg}_{\text{water}} \cdot \text{kg}_{\text{d.w.}}^{-1}$, which means that special care must be taken during seed extraction, which should be conducted at a temperature of up to $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ⁸.

The relatively high moisture content of the cones could be attributed to the absence of preliminary drying in airy storage places prior to seed extraction (which is typically the case in commercial practice) and the early date of cone harvest, at the beginning of the extraction season. The initial (u_{0x}) and final (u_{kx}) moisture content of cones used in each process variant is given with standard deviation in Table 4.

The initial moisture content of cones (u_{0x}) in most variants increased with each extraction step due to immersion. In most variants, the final moisture content (u_{kx}) was the highest in the first extraction step and decreased or remained at the same level with each subsequent step.

The mean initial moisture content for the three process variants with 10 h of drying was $0.411 \text{ kg}_{\text{water}} \cdot \text{kg}_{\text{d.w.}}^{-1}$. After 10 h of drying, the mean moisture content decreased to $0.130 \text{ kg}_{\text{water}} \cdot \text{kg}_{\text{d.w.}}^{-1}$. The mean initial moisture content in the fifth extraction step was $0.437 \text{ kg}_{\text{water}} \cdot \text{kg}_{\text{d.w.}}^{-1}$, and the final moisture content in that step was $0.071 \text{ kg}_{\text{water}} \cdot \text{kg}_{\text{d.w.}}^{-1}$. Cones dried for 10 h reached on average 7% moisture content after extraction steps 4 and 5.

The mean initial moisture content for the three process variants with 8 h of drying was $0.412 \text{ kg}_{\text{water}} \cdot \text{kg}_{\text{d.w.}}^{-1}$. After 8 h of drying, the mean moisture content decreased to $0.128 \text{ kg}_{\text{water}} \cdot \text{kg}_{\text{d.w.}}^{-1}$. The mean initial moisture content in the fifth extraction step was $0.440 \text{ kg}_{\text{water}} \cdot \text{kg}_{\text{d.w.}}^{-1}$, and the final moisture content in that step was $0.064 \text{ kg}_{\text{water}} \cdot \text{kg}_{\text{d.w.}}^{-1}$. Cones dried for 8 h reached on average 7.1% moisture content after extraction step IV and 6.4% after step V.

The mean initial moisture content for the three process variants with 6 h of drying was $0.389 \text{ kg}_{\text{water}} \cdot \text{kg}_{\text{d.w.}}^{-1}$. After 6 h of drying, the mean moisture content decreased to $0.129 \text{ kg}_{\text{water}} \cdot \text{kg}_{\text{d.w.}}^{-1}$. The mean initial moisture content in the fifth extraction step was $0.415 \text{ kg}_{\text{water}} \cdot \text{kg}_{\text{d.w.}}^{-1}$, and the final moisture content in that step was $0.084 \text{ kg}_{\text{water}} \cdot \text{kg}_{\text{d.w.}}^{-1}$. Cones dried for 6 h reached on average 8.9% moisture content after extraction step IV and 8.4%

No	Variant	Values of <i>b</i> coefficient				
		<i>b</i> ₁	<i>b</i> ₂	<i>b</i> ₃	<i>b</i> ₄	<i>b</i> ₅
1	10 h_5 min	0.36 ^a ± 0.04	0.41 ^a ± 0.04	0.48 ^a ± 0.05	0.46 ^a ± 0.05	0.45 ^a ± 0.05
2	10 h_10 min	0.35 ^a ± 0.03	0.43 ^a ± 0.04	0.51 ^{ab} ± 0.06	0.48 ^a ± 0.05	0.46 ^a ± 0.05
3	10 h_15 min	0.34 ^a ± 0.04	0.42 ^a ± 0.04	0.50 ^{ab} ± 0.05	0.45 ^a ± 0.04	0.50 ^c ± 0.05
4	8 h_5 min	0.45 ^d ± 0.07	0.52 ^d ± 0.09	0.50 ^{ab} ± 0.05	0.46 ^a ± 0.05	0.46 ^a ± 0.05
5	8 h_10 min	0.40 ^c ± 0.07	0.46 ^c ± 0.08	0.47 ^a ± 0.05	0.46 ^a ± 0.05	0.46 ^a ± 0.04
6	8 h_15 min	0.43 ^{c,d} ± 0.08	0.47 ^c ± 0.04	0.53 ^{bc} ± 0.06	0.57 ^b ± 0.06	0.60 ^d ± 0.07
7	6 h_5 min	0.53 ^b ± 0.05	0.55 ^b ± 0.03	0.55 ^{c,d} ± 0.03	0.55 ^b ± 0.03	0.54 ^{bc} ± 0.03
8	6 h_10 min	0.55 ^b ± 0.06	0.58 ^b ± 0.06	0.57 ^d ± 0.05	0.58 ^b ± 0.06	0.57 ^{b,d} ± 0.05
9	6 h_15 min	0.53 ^b ± 0.04	0.55 ^b ± 0.04	0.55 ^{c,d} ± 0.03	0.57 ^b ± 0.04	0.55 ^b ± 0.03

Table 5. Mean values of the *b* coefficient and standard deviations for the five steps of the studied process variants. *a, b, c, d* – homogeneous groups.

moisture content after step V, which means that their final moisture content was higher than that of cones dried for 8 h and 10 h.

The cones with the longest immersion time (15 min) were characterized by the highest initial moisture content in each extraction step as compared to the other two variants (immersion of 5 min and 10 min) with the same drying time. The final moisture content in a given extraction step differed between cones with different immersion times. Cones with an immersion time of 15 min were characterized by the highest final moisture content in individual extraction steps, and those with 5 min immersion revealed the lowest final moisture content.

The Tukey HSD test revealed homogeneous groups in terms of initial moisture content ($u_{01}, u_{02}, u_{03}, u_{04}, u_{05}$) and final moisture content ($u_{k1}, u_{k2}, u_{k3}, u_{k4}, u_{k5}$) in each step, as shown in Table 4. For instance, four homogeneous groups were found for the final moisture content after extraction step V (u_{k5}): the first one consisted of all variants except for 7, 8, and 9, the second one included variants 1, 2, 3, and 7, the third one comprised of variants 7 and 8, while the fourth one was constituted by variant 9 alone.

Using Eq. (1), changes in moisture content were described for each of the tested cones over all five steps of each variant. The equation included the initial and final values of moisture content and the *b* coefficient for individual cones. The average values of the *b* coefficient and standard deviations for each extraction step are presented in Table 5 for individual extraction variants.

The lowest value of the *b* coefficient was recorded for the first step of the 10h_15min variant ($b_1 = 0.34$), while the highest value was obtained for the fifth step of the 8 h_15 min variant ($b_5 = 0.60$). In the process variants involving 10 and 8 h of drying, the *b* coefficient increased with each extraction step until the third one; in the fourth step it slightly decreased and in the fifth step it remained constant. In the variants with 6 h of drying the *b* coefficient almost peaked in the second extraction step and remained at a similar level until the fifth step. In the first steps of the variants with 6 h of drying, the mean value of the *b* coefficient was 0.54 and did not differ significantly from the coefficients obtained during the other steps. It was noted that in the 8 h_15 min variant, the *b* coefficients increased over successive steps.

Figures 2–3 show examples of curves of actual and model changes in moisture content and the rate of extraction for sample cones, one each for variants 10 h_15 min and 8 h_15 min.

Equations for changes in moisture content and extraction rate in consecutive extraction steps are given below for the graphically for the cone shown in Fig. 2 (no. 32 in the 10 h_15 min variant):

$$\text{Step I: } u_1 = 0.264 \cdot e^{(-0.38 \cdot \tau_i)} + 0.107, \frac{du_1}{d\tau_1} = -0.100 \cdot e^{(-0.38 \cdot \tau_i)}$$

$$\text{Step II: } u_2 = 0.372 \cdot e^{(-0.44 \cdot \tau_i)} + 0.095, \frac{du_1}{d\tau_1} = -0.164 \cdot e^{(-0.44 \cdot \tau_i)}$$

$$\text{Step III: } u_3 = 0.397 \cdot e^{(-0.49 \cdot \tau_i)} + 0.086, \frac{du_1}{d\tau_1} = -0.195 \cdot e^{(-0.49 \cdot \tau_i)}$$

$$\text{Step IV: } u_4 = 0.536 \cdot e^{(-0.44 \cdot \tau_i)} + 0.080, \frac{du_1}{d\tau_1} = -0.236 \cdot e^{(-0.44 \cdot \tau_i)}$$

$$\text{Step V: } u_5 = 0.485 \cdot e^{(-0.46 \cdot \tau_i)} + 0.076, \frac{du_1}{d\tau_1} = -0.223 \cdot e^{(-0.46 \cdot \tau_i)}$$

Equations for changes (Fig. 3) in moisture content and extraction rate in consecutive extraction steps are also given for this cone (no. 17 in the 8 h_15 min variant):

$$\text{Step I: } u_1 = 0.304 \cdot e^{(-0.53 \cdot \tau_i)} + 0.113, \frac{du_1}{d\tau_1} = -0.161 \cdot e^{(-0.53 \cdot \tau_i)}$$

$$\text{Step II: } u_2 = 0.292 \cdot e^{(-0.55 \cdot \tau_i)} + 0.085, \frac{du_1}{d\tau_1} = -0.161 \cdot e^{(-0.55 \cdot \tau_i)}$$

$$\text{Step III: } u_3 = 0.369 \cdot e^{(-0.70 \cdot \tau_i)} + 0.077, \frac{du_1}{d\tau_1} = -0.258 \cdot e^{(-0.70 \cdot \tau_i)}$$

$$\text{Step IV: } u_4 = 0.379 \cdot e^{(-0.71 \cdot \tau_i)} + 0.059, \frac{du_1}{d\tau_1} = -0.269 \cdot e^{(-0.71 \cdot \tau_i)}$$

$$\text{Step V: } u_5 = 0.428 \cdot e^{(-0.77 \cdot \tau_i)} + 0.060, \frac{du_1}{d\tau_1} = -0.330 \cdot e^{(-0.77 \cdot \tau_i)}$$

Finally, equations for changes in moisture content and extraction rate in consecutive extraction steps are given for cone no. 5 in the 6 h_15 min variant:

$$\text{Step I: } u_1 = 0.308 \cdot e^{(-0.58 \cdot \tau_i)} + 0.0904, \frac{du_1}{d\tau_1} = -0.179 \cdot e^{(-0.58 \cdot \tau_i)}$$

$$\text{Step II: } u_2 = 0.346 \cdot e^{(-0.63 \cdot \tau_i)} + 0.1070, \frac{du_1}{d\tau_1} = -0.218 \cdot e^{(-0.63 \cdot \tau_i)}$$

$$\text{Step III: } u_3 = 0.368 \cdot e^{(-0.63 \cdot \tau_i)} + 0.0837, \frac{du_1}{d\tau_1} = -0.232 \cdot e^{(-0.63 \cdot \tau_i)}$$

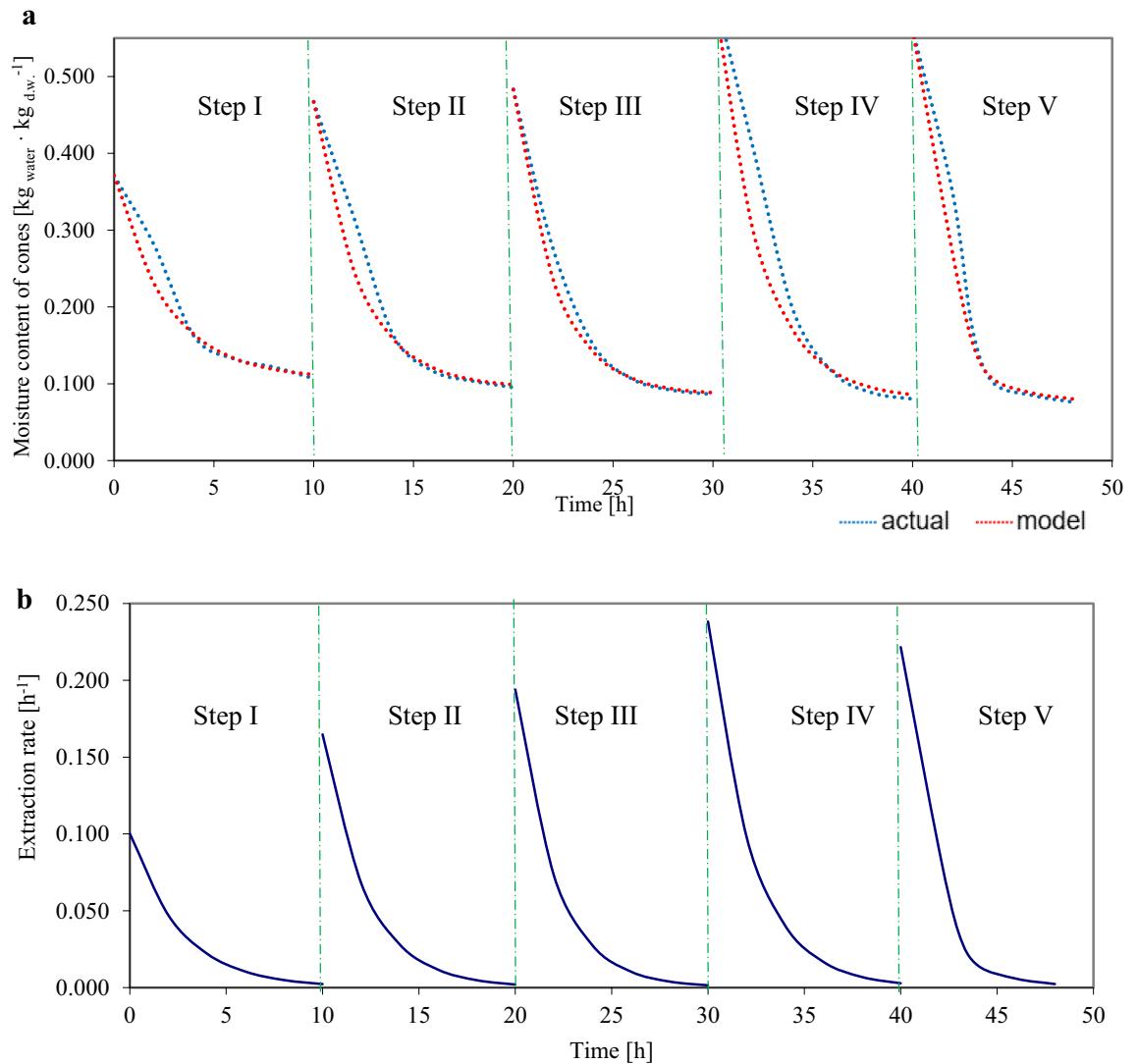


Figure 2. Diagrams: (a) actual and predicted changes in cone moisture content, (b) extraction rate in five extraction steps for larch cone no. 32 in the 10 h_15 min variant throughout effective extraction.

$$\text{Step IV: } u_4 = 0.387 \cdot e^{(-0.68 \cdot \tau_i)} + 0.0838, \frac{du_4}{d\tau_i} = -0.263 \cdot e^{(-0.68 \cdot \tau_i)}$$

$$\text{Step V: } u_5 = 0.396 \cdot e^{(-0.65 \cdot \tau_i)} + 0.0743, \frac{du_5}{d\tau_i} = -0.257 \cdot e^{(-0.65 \cdot \tau_i)}$$

Figures 2a, 3a show the curves of actual changes in the moisture content of three sample cones subjected to different drying times (10 and 8 h) but the same immersion time (15 min); the curves were fitted to a model which is widely used in descriptions of drying at constant temperature (mostly for vegetables). The present study used variable temperature, which may have influenced the fit of the model, in addition to the input variables (drying and immersion times). The best fit was found for the cone subjected to the variant with 8 h of drying (Fig. 3), with a slight deviation in the first three extraction steps, and with a very good fit in the fourth and fifth steps. The lowest fit was found for the cone subjected to 6 h drying, which may be caused by insufficient drying time (the cone was exposed to 35 °C for 2 h, and to 50 °C for only 4 h).

Figures 2b, 3b show diagrams for cone extraction rates at different drying times (10 h and 8 h) at the same immersion times (15 min). As can be seen, extraction rates decreased in the very beginning, which is characteristic of the so-called second period of solid drying (Pabis⁴⁴).

Seed extraction dynamics. Table 2 presents data on the number of scales and seeds for the studied cones. There were from 33 to 70 open scales per cone, with an average of 48 (± 6). From 1 to 76 seeds were extracted per cone, with an average of 36 (± 18). Finally, each cone contained from 5 to 97 seeds, with an average of 52 (± 19). The weight of the extracted seeds ranged from 0.001 g to 0.651 g, on average 0.193 (± 0.109) g.

Cones obtained from different process variants did not differ in terms of the number of seeds extracted ($F=0.862$ at $p=0.55$) or their weight ($F=0.720$ at $p=0.674$). However, ANOVA did reveal significant differences in the number of scales ($F=3.561$ at $p<0.05$) and the total number of seeds per cone ($F=2.93601$ at $p=0.003645$).

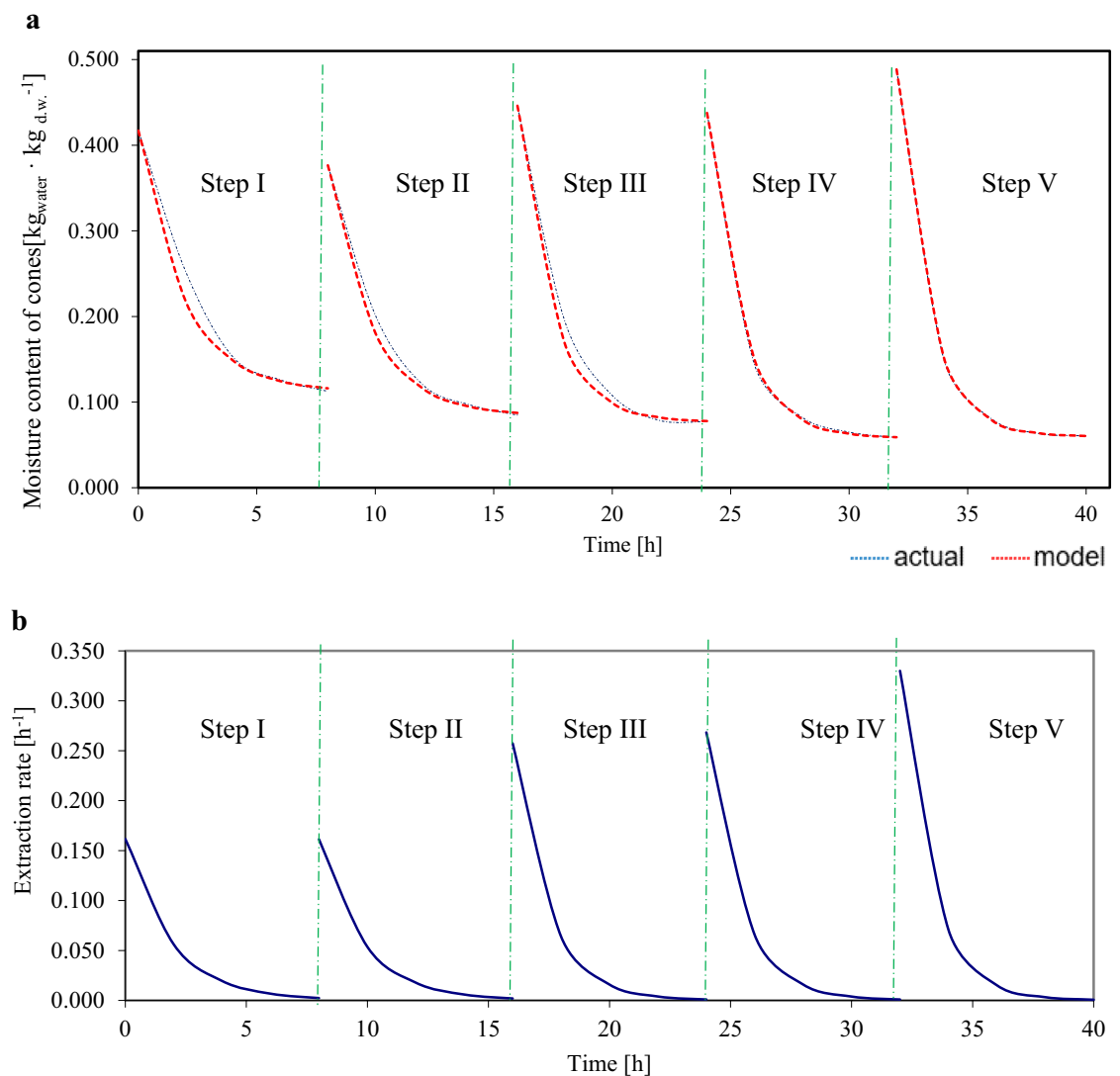


Figure 3. Diagrams: (a) actual and predicted changes in cone moisture content, (b) extraction rate in five extraction steps for larch cone no. 17 in the 8 h₁₅ min variant throughout effective extraction.

No	Variant	Number of scales I_{scales}	Number of extracted seeds I_n	Total number of seeds I_w	Weight of extracted seeds m_n [g]
1	10 h_5 min	49 ^{a,b} ± 5	36 ^a ± 18	51 ^{a,b} ± 18	0.198 ^a ± 0.109
2	10 h_10 min	50 ^a ± 5	38 ^a ± 16	52 ^{a,b} ± 18	0.205 ^a ± 0.097
3	10 h_15 min	47 ^{a,b} ± 7	33 ^a ± 18	46 ^a ± 22	0.186 ^a ± 0.112
4	8 h_5 min	45 ^b ± 6	40 ^a ± 15	62 ^b ± 16	0.196 ^a ± 0.092
5	8 h_10 min	46 ^{a,b} ± 7	36 ^a ± 19	53 ^{a,b} ± 21	0.203 ^a ± 0.144
6	8 h_15 min	46 ^{a,b} ± 6	39 ^a ± 20	58 ^{a,b} ± 20	0.215 ^a ± 0.121
7	6 h_5 min	50 ^a ± 7	32 ^a ± 16	45 ^a ± 19	0.177 ^a ± 0.103
8	6 h_10 min	50 ^{a,b} ± 6	36 ^a ± 17	52 ^{a,b} ± 18	0.199 ^a ± 0.109
9	6 h_15 min	48 ^{a,b} ± 4	32 ^a ± 18	48 ^a ± 16	0.162 ^a ± 0.095

Table 6. Mean numbers of cone scales and seeds for each process variant. *a, b* – homogeneous groups.

Table 6 gives mean scale and seed numbers per larch cone (with standard deviations) for the various extraction variants and homogeneous groups.

On average, 70% of the seeds were extracted from cones used in all nine study variants, with 30% of the seeds remaining in the cones. Table 7 shows the number of seeds extracted in individual variants and the number of seeds remaining in the cones, expressed as a percentage.

No	Variant	Total number of seeds extracted [%]	Number of seeds remaining in the cones [%]	Number of seeds extracted in the chamber [%]	Number of seeds extracted in the drum [%]
1	10 h_5 min	72	28	66	34
2	10 h_10 min	73	27	69	31
3	10 h_15 min	72	28	64	36
4	8 h_5 min	65	35	61	39
5	8 h_10 min	67	33	65	35
6	8 h_15 min	67	33	58	42
7	6 h_5 min	71	29	61	39
8	6 h_10 min	70	30	60	40
9	6 h_15 min	67	33	56	44

Table 7. Number of seeds extracted from and remaining in the cones for each process variant.

The greatest number of seeds was obtained in process variants 2–73%, closely followed by variants 3, 1, and 7 (72%), and 8 (70%). The lowest seed yield was obtained from variant 4 (65%).

In all study variants, some of the seeds were obtained in the process of extraction in the chamber and some in the process of shaking in the drum (Table 7). The highest number of seeds in the chamber was obtained in variant 2 (69%), and the lowest in variant 9 (56%). On average, the largest quantity of seeds was obtained in the chamber in the 10 h variants, and the lowest quantity in the 6 h variants. Comparing different process variants of the same drying duration, the greatest number of seeds in the chamber were obtained in variants 2, 5, and 7 (and also in variant 8—only 1% fewer). The greatest quantity of seeds extracted by shaking in the drum was obtained in variant 9 (44%), and the lowest in variant 2 (31%). On average, 38% of seeds extracted in all variants were obtained by shaking in the drum.

It can be seen that in each of the variants and their individual steps, the highest number of seeds was obtained after 6 h of the process. Figure 4a–c shows the percentage of seeds obtained during the effective extraction time, where the number of seeds extracted at a given step was added cumulatively to those from the previous steps.

The diagrams in Fig. 4 show the percentage of seeds obtained throughout the entire process. Each step consists of drying, shaking, immersion, and soaking, except for step V, which involved only drying and shaking without immersion or soaking. Analysis of seed yield over 10 h of drying (Fig. 4a) shows that on average 37% of all extracted seeds were obtained in the first step, 26% in the second step, approx. 20% in the third step, 11% in the fourth step, and about 6% in the fifth step.

As regards the 8 h process (Fig. 4b), on average 30% of all extracted seeds were obtained in the in the first extraction step in the 8 h_5 min and 8 h_15 min variants, and as much as 53% in the 8 h_10 min variant. An average of 27% of all seeds were extracted in the second step, 15% in the third step, about 11% in the fourth step, and approx. 5% in the fifth step. The 8 h_10 min variant was characterized by the highest seed yield, beginning in the first step of the process (as compared to the 8 h_5 min and 8 h_15 min variants).

As far as the variant with 6 h of drying is concerned (Fig. 4c), on average approx. 46% of all extracted seeds were obtained in the first step, 24% in the second step, 15% in the third step, approx. 11% in the fourth step, about 4% in the fifth step.

When extracting seeds from larch cones, scale deflection and the number of obtained seeds are not assessed during the process, as is the case with pine and spruce cones due to the difficulties caused by the aforementioned morphology of larch cones (Tyszkiewicz, 1949). The presented diagrams show that a satisfactory seed yield (60%) was obtained in variants with 8 and 6 h of drying already after 10 h of effective extraction time.

The seed yield coefficient, α (3), and the cone mass yield coefficient, β (4), for each extraction variant are presented in Table 8.

The seed yield coefficient was the highest for variants 2 (0.73) and 3 (0.72), and the lowest for variants 4 (0.65) and 6 and 9 (0.67). The cone mass yield coefficient was the highest for variant 5, and the lowest for variant 9.

Seed viability. Table 9 presents germination energy (E) and capacity (Z) for the control seeds as well as for seeds obtained from the various steps of the nine process variants, as well as their corresponding quality classes.

Germination energy and capacity for the control sample were 45% and 57%, respectively, meaning that naturally released seeds, not subjected to any thermal or mechanical treatments, were classified in quality class I¹⁸. Importantly, seeds obtained from all the studied process variants were also placed in the same class; their germination energy ranged from 30 to 59%, and their germination capacity from 35 to 61%. When analyzing each extraction step separately, no correlation was found between decreasing germination energy and successive steps. However, the average germination energy was 46% for seeds obtained in the first extraction step of all nine variants, 45% for those from the second and third steps, 41% for seeds from the fourth step and 40% for those from the fifth one. Thus, in each subsequent step the average germination energy of seeds was equal or lower than in the previous step, which is consistent with literature reports that prolonged drying may reduce the quality of seeds⁸. This is also corroborated by the fact that the highest germination energy and capacity was revealed by seeds from variants with 6 h of drying while the lowest germination indicators characterized seeds from the 10 h variants. Furthermore, seeds from variant 1 exhibited the lowest germination energy and capacity and seeds from variant 8—the highest.

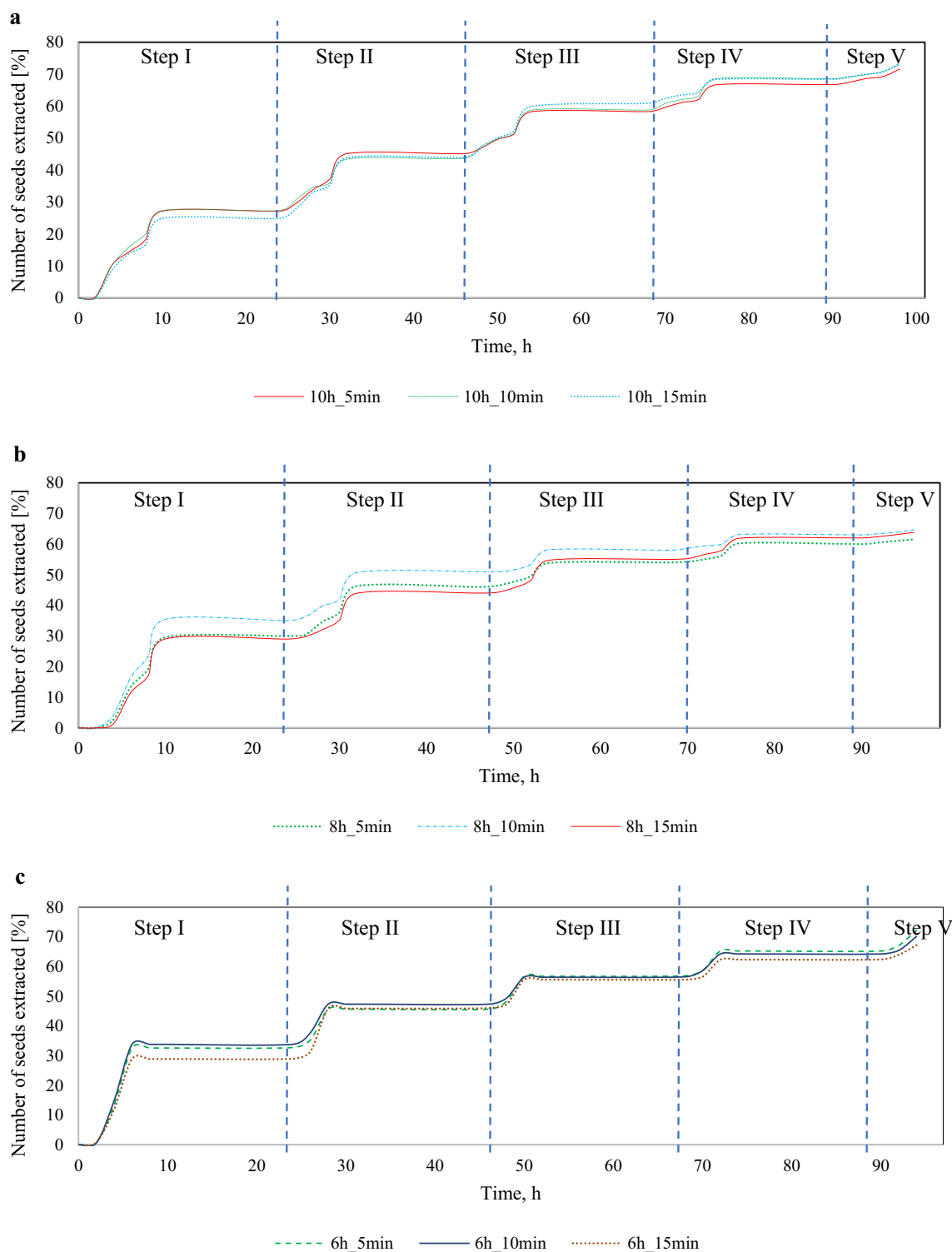


Figure 4. Percentage seed yield dynamics for each step of a five-step extraction process: (a) 10 h of drying, (b) 8 h of drying, (c) 6 h of drying.

Another reason for the higher quality of seeds from variants with 6 h of drying may be the lower initial moisture content of the cones due to the longer time they were kept at room temperature immediately before the test ($u_{01} = 0.391 \text{ kg}_{\text{water}} \cdot \text{kg}_{\text{d.w.}}^{-1}$, as compared to $u_{01} = 0.411 \text{ kg}_{\text{water}} \cdot \text{kg}_{\text{d.w.}}^{-1}$ for seeds from variants with 8 and 10 h of drying). These results are in line with the study of Tyszkiewicz⁸, who noted that under the same temperature and humidity conditions, the quality of seeds from cones with a lower moisture content did not deteriorate, in contrast to the quality of seeds obtained from cones with a higher moisture content.

No	Variant	Seed yield coefficient, α	Cone mass yield coefficient, β
1	10 h_5 min	0.71	0.050
2	10 h_10 min	0.73	0.052
3	10 h_15 min	0.72	0.049
4	8 h_5 min	0.65	0.045
5	8 h_10 min	0.68	0.053
6	8 h_15 min	0.67	0.048
7	6 h_5 min	0.71	0.041
8	6 h_10 min	0.69	0.050
9	6 h_15 min	0.67	0.038

Table 8. Seed yield coefficient and cone mass yield coefficient for each process variants.

No	Variant	Step I		Step II		Step III		Step IV		Step V		Average for the whole process		Quality class
		E	Z	E	Z	E	Z	E	Z	E	Z	E	Z	
		C	Control sample	–										
1	10 h_5 min	41	43	40	42	41	44	38	44	30	37	38	42	I
2	10 h_10 min	49	51	45	48	39	41	40	43	34	41	41	45	I
3	10 h_15 min	40	43	43	44	52	54	43	43	44	49	47	47	I
4	8 h_5 min	41	45	44	46	47	49	39	42	50	56	44	48	I
5	8 h_10 min	44	48	46	49	34	35	35	38	42	42	40	42	I
6	8 h_15 min	47	48	47	50	47	50	47	48	39	48	43	47	I
7	6 h_5 min	44	44	47	48	51	53	47	49	42	51	46	49	I
8	6 h_10 min	59	61	45	48	50	56	44	49	39	45	47	52	I
9	6 h_15 min	51	52	45	46	47	50	35	38	40	46	43	46	I

Table 9. Germination energy and capacity for the control seeds as well as for seeds obtained from the various extraction process variants. *E* – energy, *Z* – germination capacity. Significant values are in bold.

The germination capacity of seeds calculated from the mean capacity of seeds obtained from the same extraction steps of all process variants was similar at 45% for each of the steps.

In summary, in the study the authors investigated a five-step process of extracting seeds from larch cones involving immersion and heat treatment to maximize seed yield. It was found that the two-step process widely used in extractories is insufficient, while a four-step process does not lead to a significantly higher number of obtained seeds. Thus, a three-step process appears to be optimal.

Discussion

The height and diameter of the cones used in the study were within the limits described by other researchers, i.e., a height of 4 cm and a diameter of 2 cm⁸, or a height of 2–5 cm⁴⁷ or 4–5 cm⁴⁸. Since climatic factors (annual air temperature and precipitation) affect the production of, e.g. pine cones to a greater extent than non-climatic ones²⁵, further research on these effects should also be conducted for larch. The high initial moisture content of the studied cones could have been caused by the absence of preliminary drying, as is the case in practice in seed extraction facilities, as well as by the early date of cone harvesting (December)⁸.

Multiple drying and immersion increased the initial moisture content and decrease the final moisture content in each successive extraction step. Appropriate drying and immersion procedures (rehydration) in the studied process variants enabled intensive water absorption by the tissues of the material being dried, leading to greater weight and volume⁴⁹. Some studies have reported the effects of changes in the rheological properties of resin particles between cone scales during extraction. At approx. 50 °C resin is sufficiently “liquefied” (melted) to enable scale opening in pine cones (in the force range of 4.7–10 N). In turn, at constant stress levels, as is the case with the movement of individual scales, resin gradually begins to “flow” (it turns less viscous) as temperature increases over time. Consequently, the forces needed to overcome the adhesive force of resin decrease (1.99 N), and it retreats cohesively. According to the literature, high temperatures (~ 50 °C) facilitate cone opening in *P. sylvestris*, while high moisture content does not affect the rheological properties of resin as it is completely insoluble in water⁵⁰.

Cones subjected to 8 h of drying exhibited an average moisture content of 7.1% after the fourth extraction step and 6.4% after the fifth step. This means that those cones maintained a downward trend in moisture content as opposed to cones subjected to 10 h of drying, which had a similar level (approx. 7%) of moisture in the fourth

and fifth extraction steps of the process. This shows that the optimal duration of drying is 8 h, which is in line with the techniques used in practice³.

Seeds may be extracted from larch cones using either a thermal process with immersion or a thermo-mechanical one. While both processes are used by extractories, they are not standardized or well-studied. The thermal method is less efficient than the one involving scale crushing and abrasion. On the other hand, larch seeds obtained by thermal extraction are characterized by somewhat greater germination capacity, lesser damage of cell membranes, and greater resilience in accelerated ageing tests, as compared to seeds extracted by mechanical crushing; furthermore, the former are easier to clean³.

The highest seed yields were recorded in the 10 h_10 min and 10 h_15 min variants (73%). A similar seed yield was also obtained in the 6 h_5 min process (72%), which shows that the extraction process can be shortened and immersion time can be reduced without significantly compromising the quantity of obtained seeds. The lowest seed yield in the drying chamber was obtained in the 6 h_15 min variant (56%) due to insufficient drying time and excessive immersion time. A failure to sufficiently reduce the moisture content of cones during the extraction process prevents seed movement within the scales¹⁸. For a long time now researchers have been studying phenomena involving wood that can adopt a deformed shape at a certain moisture content and then return to its original shape after absorbing water^{51–53} as well as scale movements in conifer cones caused by their cellular structure^{54–59}. Findings from such research can form the basis for analyzing multi-phase movement by artificial intelligence^{60,61}.

Each successive extraction step resulted in seeds with lower mean germination energy, but germination capacity remained at a similar level in all steps, which means that the obtained seeds belonged in quality class I.

In the first three steps of the extraction variant with 8 h of drying the seed yield was approx. 59%, as compared to an average of 8% in the fourth step, and approx. 4% in the fifth step. Therefore, this variant appears superior among the nine studied. In the first three steps of the extraction variant with 10 h of drying, the seed yield was approx. 57%, in contrast to approx. 9% in the fourth step, and approx. 5% in the fifth one. Finally, in the first three steps of the extraction variant with 6 h of drying, the seed yield was approx. 56%, as compared to an average of 9% in the fourth step and approx. 5% in the fifth step. As can be seen, the minimum number of extraction steps needed to obtain an approx. 60% seed yield is three, which is consistent with reports by other authors^{3,40}.

An analysis of the value of European larch seeds should be based on their origin and the costs of extraction energy. First, attention should be given to the provenance of larch cones and their genetic (e.g., species) purity. Second, if the seeds are extracted for the purpose of long-term storage, the right extraction conditions are critical to avoid compromising seed quality due to excessive drying and immersion time. Third, the economic rationale of seed extraction should be considered given the high energy costs to address the question whether it would be possible to use a shorter drying time (6 h) with immersion (5 min) and a minimum of 30 min of shaking after each step, which was shown to result in a seed yield of 71% in the present study.

The power rating of the laboratory dryer used in this study was 2.2 kW, which means that energy consumption per drying step was 22, 17.6, and 13.2 kWh for variants with 10, 8 and 6 h of drying, respectively. Consequently, energy consumption in a five-step process was 110, 88, and 66 kWh, accordingly. It should be noted that the difference between the longest and the shortest drying time was significant. Energy consumption for an extraction process involving three drying steps of 8 h each would be 52.8 kWh, which is twice as low as for a process with five drying steps of 10 h each.

In the case of dryers used in Polish seed extraction plants, their installed capacity is about 25 kW. The results of the estimations carried out for laboratory tests indicate the scale of possible energy savings if the improved cone extraction processes proposed in this publication is used in industrial settings. For the purposes of technical and economic evaluation involving energy consumption, further research is needed with more detailed measurements not only of the drying step (carried out in dryer - stage (a) on the figure 1), but also of the shaking step in the drum (stage (b) on the figure 1).

Conclusions

1. A comparison of nine variants of five-step seed extraction revealed the highest yield for the 10 h_10 min variant (73%). In the first and second steps, the highest mean yields were obtained for the 8 h_10 min variant (53% and 32%, respectively), while in the third step the highest yield was found for the 10 h_5 min (22%) variant. In the fourth step, all variants exhibited similar yields, of approx. 11%. Finally, in the fifth step, seed yield increased with drying duration (on average 5% for 10 h and 8 h and 4% for 6 h).
2. The recommended process consists of three 8 h drying steps and two (rather than five) 10 min immersion steps, as it led to a yield of 59%, which was greater than in the other variants. The gains from subsequent extraction in the next two steps were very low (approx. 11% and 5% of seeds in the fourth and fifth steps, respectively). A five-step process may be conducted when the cones are derived from a valuable source and it is advisable to extract the highest possible quantity of seeds.
3. The mean germination energy and capacity did not differ significantly between the selected process variants. The mean results exceeded 40%, which places the extracted seeds in quality class I. Extended drying times does not significantly lead to decreased seed quality.
4. The extraction process can be described according to Lewis's empirical model for the second drying stage. In those equations, the initial moisture content of cones (u_{01}) usually increased with each successive process step due to immersion. Furthermore, in each step cones exposed to the longest immersion time (15 min) were characterized by a much higher moisture content than the ones exposed to shorter immersion times. The same was true of the final moisture content, with the highest values found for cones following 15 min of

immersion, and the lowest for cones after 5 min of immersion. The b coefficient ranged from 0.34 to 0.60; it was noted that in the 8 h_15 min variant it increased with each successive step.

Received: 23 November 2021; Accepted: 21 October 2022

Published online: 29 October 2022

References

- Lewandowski, A. Polish larch (*Larix decidua* subsp. *Polonica* (Racib.) Domin) - genetic structure of the population and its origin in the light of isoenzyme studies. (Institute of Dendrology, Polish Academy of Sciences, Plantpress, 1995).
- Wagner, S. Integrating fossil data, vegetation modelling and genetic analyses of modern tree populations to reconstruct the history of Larix in Europe. *Quatern. Int.* **279–280**, 524 (2012).
- Załęski, A. Comparison of methods of seed extraction by drying cones and mechanical one of European larch seeds *Larix decidua* Mill. *For. Res. Pap.* **3**, 5–17 (2002).
- Aniszewska, M. Multiphase process of European larch *Larix decidua* Mill seed extraction: A case of Czarna Białostocka. *For. Res. Papers* 155–163 (2008).
- Bryntsev, V. A., Lavrenov, M. A., Vasiliev, S. B., Savchenkova, V. A. & Nikitin, V. F. Comparative analysis of variability of morphological characteristics of European and Japanese larches with their hybrids. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* **574**, 12007 (2020).
- Harlow, W. M., Côté, W. A. & Day, A. C. The opening mechanism of pine cone scales. *J. Forest.* **62**, 538–540 (1964).
- Ветрова, В. П., Баркалов, В. Ю., Синельникова, Н. В. & Барченков, А. П. О Таксономическом Статусе Лиственниц Камчатки И Курильских Островов На Основе Морфологии Семенных Чешуй Шишек. *Ботанический Журнал* **103**, 1565–1587 (2018).
- Tyszkiewicz, S. Forestry seed. (Forest Research Institute, 1949).
- Song, K. *et al.* Journey of water in pine cones. *Sci. Rep.* **5**, 9963 (2015).
- Johnson, M., Wall, S. B. V. & Borchert, M. A comparative analysis of seed and cone characteristics and seed-dispersal strategies of three pines in the subsection sabinianae. *Plant Ecol.* **168**, 69–84 (2003).
- Xia, Y., Xu, Y., Li, J., Zhang, C. & Fan, S. Recent advances in emerging techniques for non-destructive detection of seed viability: A review. *Artif. Intell. Agric.* **1**, 35–47 (2019).
- Raupp, P. P. *et al.* Direct seeding reduces the costs of tree planting for forest and savanna restoration. *Ecol. Eng.* **148**, 105788 (2020).
- Zhang, K., Zhang, Y., Sun, J., Meng, J. & Tao, J. Deterioration of orthodox seeds during ageing: Influencing factors, physiological alterations and the role of reactive oxygen species. *Plant Physiol. Biochem.* **158**, 475–485 (2021).
- Augusto, L., Dupouey, J.-L., Picard, J.-F. & Ranger, J. Potential contribution of the seed bank in coniferous plantations to the restoration of native deciduous forest vegetation. *Acta Oecologica.* **22**, 87–98 (2001).
- Neto, A. M., Martins, S. V. & de Silva, K. A. Plantlet rescue in a soil seed bank to produce forest species seedlings. *Ecol. Eng.* **132**, 94–101 (2019).
- Aniszewska, M. Multiphase process of European larch *Larix decidua* Mill. Seed extraction: A case of Czarna Białostocka. *For. Res. Papers* **69**(2), 155–163 (2008).
- Tyszkiewicz, S. & Tomanek, J. Psychrometric tables for use in pine and spruce seed extraction plants. (Forest Research Institute, 1946).
- Tyszkiewicz, S. Forest seed extraction. (Powszechnie Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, 1951).
- Ilmurzyński, E. Detailed silviculture. (Powszechnie Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, 1969).
- Rohmeder, E. Seeds in forestry. (Paul Parey, 1972).
- Kosiński, G. Empty seed production in European larch (*Larix decidua*). *For. Ecol. Manage.* **19**, 241–246 (1987).
- Calama, R. & Montero, G. Cone and seed production from stone pine (*Pinus pinea* L.) stands in Central Range (Spain). *Euro. J. For. Res.* **126**, 23–35 (2007).
- Owens, J. N., Kittirat, T. & Mahalovich, M. F. Whitebark pine (*Pinus albicaulis* Engelm.) seed production in natural stands. *For. Ecol. Manage.* **255**, 803–809 (2008).
- Chen, X., Willis, J. L. & Bowman, K. A. Assessing the influence of climate on cone production of longleaf pine forests. *Trees, For. People* **9**, 100297 (2022).
- Raza, M. Y., Wang, X. & Lin, B. Economic progress with better technology, energy security, and ecological sustainability in Pakistan. *Sustain. Energy Technol. Assess.* **44**, 100966 (2021).
- Woolley, E., Luo, Y. & Simeone, A. Industrial waste heat recovery: A systematic approach. *Sustain. Energy Technol. Assess.* **29**, 50–59 (2018).
- Sorrell, S. Reducing energy demand: A review of issues, challenges and approaches. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **47**, 74–82 (2015).
- Seow, Y. & Rahimifard, S. A framework for modelling energy consumption within manufacturing systems. *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.* **4**, 258–264 (2011).
- Vallack, H. *et al.* Technology Innovation for Energy Intensive Industry in the United Kingdom. (2011).
- Klisz, M. Genetic aspects of wood properties of European larch (*Larix decidua* Mill.). (Forest Research Institute, 2011).
- Wu, C., Chen, D., Shen, J., Sun, X. & Zhang, S. Estimating the distribution and productivity characters of *Larix kaempferi* in response to climate change. *J. Environ. Manage.* **280**, 111633 (2021).
- Boisvert-Marsh, L., Royer-Tardif, S., Nolet, P., Doyon, F. & Aubin, I. Using a trait-based approach to compare tree species sensitivity to climate change stressors in eastern Canada and inform adaptation practices. *Forests* **11**, 989 (2020).
- Tudor, E. M., Zwickl, C., Eichinger, C., Petutschnigg, A. & Barbu, M. C. Performance of softwood bark comminution technologies for determination of targeted particle size in further upcycling applications. *J. Clean. Prod.* **269**, 122412 (2020).
- Tudor, E. M., Barbu, M. C., Petutschnigg, A. & Réh, R. Added-value for wood bark as a coating layer for flooring tiles. *J. Clean. Prod.* **170**, 1354–1360 (2018).
- Akbari, M., Oyedun, A. O., Jain, S. & Kumar, A. Options for the conversion of pulp and paper mill by-products in Western Canada. *Sustain. Energy Technol. Assess.* **26**, 83–92 (2018).
- Raciborski, M. A few words about larch in Poland. *Cosmos* 488–497 (1890).
- Suszka, B. New technologies and techniques in forest seed. (Bogucki Wydawnictwo Naukowe, 2000).
- Załęski, A. & Aniśko, E. Seed drying of selected tree species. vol. 1 (Scientific Notebook of the Forest Research Institute, 2003).
- Aniszewska, M. Dynamics of the process of seed extraction from pine cones *Pinus silvestris* L. performed in one or two-steps. (Warsaw University of Life Sciences, 2012).
- Górnicki, K. & Kaleta, A. Modelling convection drying of blanched parsley root slices. *Biosys. Eng.* **97**, 51–59 (2007).
- Henderson, S. M., & Pabis, S. Grain drying theory II. A critical analysis of the drying curve for shelled maize. *J. Agric. Engng. Res.* **6**(3), 272–277 (1961).
- Wesołowski, A. Application of convection drying models to modelling of drying apples with infrared radiation. *Inżynieria Rolnicza* **6**(9), 293–299 (2002).
- Pabis, S. Theory of convective drying of agricultural products. (Powszechnie Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, 1982).

45. Załęski, A., Aniśko, E. & Kantorowicz, W. Principles of seed evaluation in State Forests in Poland: 'Elements of genetics and selection breeding of forest trees'. (Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, 2006).
46. PN-R-65700- Seed material. Seeds of forest and wooded trees and shrubs. (Polish Committee for Standardization, 1998).
47. Wierdak, S. Current state of our knowledge about Polish larch (*Larix polonica* Rac.). *Sylvan* **39**, (1921).
48. Spellenberg, R., Earle, C. J., Nelson, G. & More, D. *Trees of western North America*. (Princeton University Press, 2014).
49. Górnicki, K. The possibility of using neural networks to predict the size of the change in the volume of dried material during its moistening. *Adv. Food Process. Technol.* **20**, 63–65 (2010).
50. Rissanen, K. *et al.* Temporal and spatial variation in scots pine resin pressure and composition. *Front. Forests Global Change* **2**, 23 (2019).
51. Quan, H., Kisailus, D. & Meyers, M. A. Hydration-induced reversible deformation of biological materials. *Nat. Rev. Mater* **6**, 264–283 (2020).
52. Le Duigou, A. & Castro, M. Evaluation of force generation mechanisms in natural, passive hydraulic actuators. *Sci. Rep.* **6**, 18105 (2016).
53. Eger, C. J. *et al.* The structural and mechanical basis for passive-hydraulic pine cone actuation. *Adv. Sci.* **9**, 2200458 (2022).
54. Tulska, E., Aniszewska, M. & Gendek, A. The kinematics of scale deflection in the course of multi-step seed extraction from european larch cones (*Larix decidua* Mill.) taking into account their cellular structure. *Materials* **14**, 4913 (2021).
55. Zhang, C., Chen, M., Keten, S., Derome, D. & Carmeliet, J. Towards unraveling the moisture-induced shape memory effect of wood: The role of interface mechanics revealed by upscaling atomistic to composite modeling. *NPG Asia Mater* **13**, 1–14 (2021).
56. Dawson, C., Vincent, J. F. V. & Rocca, A.-M. How pine cones open. *Nature* **390**, 668–668 (1997).
57. Poppinga, S. *et al.* Hygroscopic motions of fossil conifer cones. *Sci. Rep.* **7**, 40302 (2017).
58. Kossuth, S. V., Biggs, R. H. Role of apophysis and outer scale tissue in pine cone opening [*Pinus serotina*, *Pinus clausa*]. *For. Sci.* (1981).
59. Lin, S., Xie, Y. M., Li, Q., Huang, X. & Zhou, S. On the shape transformation of cone scales. *Soft Matter* **12**, 9797–9802 (2016).
60. Correa, D. *et al.* 4D pine scale: biomimetic 4D printed autonomous scale and flap structures capable of multi-phase movement. *Philos. Trans. Royal Soc. A: Math., Phys. Eng. Sci.* **378**, 20190445 (2020).
61. Schindelin, J. *et al.* Fiji: An open-source platform for biological-image analysis. *Nat. Methods* **9**, 676–682 (2012).

Acknowledgements

The authors express their gratitude to Mr Kazimierz Tulska for his help in the implementation of the construction of the invention—a drum for shaking seeds from cones.

Author contributions

E.T. and M.A. conceptualization: ; methodology: E.T. and M.A.; formal analysis: E.T.; writing—original draft preparation: E.T.; writing—review and editing: M.A. and W.Z.; supervision: M.A. and W.Z. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Competing interests

The authors declare no competing interests.

Additional information

Correspondence and requests for materials should be addressed to E.T.

Reprints and permissions information is available at www.nature.com/reprints.

Publisher's note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

© The Author(s) 2022

Article

The Kinematics of Scale Deflection in the Course of Multi-Step Seed Extraction from European Larch Cones (*Larix decidua* Mill.) Taking into Account Their Cellular Structure

Ewa Tulska, Monika Aniszewska  and Arkadiusz Gendek * 

Department of Biosystems Engineering, Institute of Mechanical Engineering, Warsaw University of Life Sciences, Nowoursynowska 164, 02-787 Warsaw, Poland; ewa_tulska@sggw.edu.pl (E.T.);

monika_aniszewska@sggw.edu.pl (M.A.)

* Correspondence: arkadiusz_gendek@sggw.edu.pl

Abstract: The objective of the study was to elucidate the kinematics of cone opening in the European larch (*Larix decidua* Mill.) during a four-step seed extraction process and to determine optimum process time on that basis. Each step lasted 8 h with 10 min of water immersion between the steps. The study also described the microscopic cellular structure of scales in cones with a moisture content of 5% and 20%, as well as evaluated changes in cell wall thickness. The obtained results were compared with the structural investigations of scales conducted using scanning electron microscopy (SEM) of characteristic sites on the inner and outer sides of the scales. The greatest increment in the scale opening angle was noted on the first day of the process (34°) and in scales from the middle cone segment (39°). In scales with a moisture content of 5% and 20%, the greatest changes in cell wall thickness were recorded for large cells (57%). The inner and outer structure of scales differed in terms of the presence and size of cells depending on the moisture content of the cones (5%, 10%, or 20%). The study demonstrated that the moisture content of cones was the crucial determinant of the cellular structure and opening of scales in larch cones. The scale opening angle increased with decreasing moisture content but did not differ significantly for various segments of cones or various hours of the consecutive days of the process. This finding may lead to reducing the seed extraction time for larch cones. The internal and external structure of scales differed depending on moisture content, which also determined the size and wall thickness of cells.



Citation: Tulska, E.; Aniszewska, M.; Gendek, A. The Kinematics of Scale Deflection in the Course of Multi-Step Seed Extraction from European Larch Cones (*Larix decidua* Mill.) Taking into Account Their Cellular Structure. *Materials* **2021**, *14*, 4913. <https://doi.org/10.3390/ma14174913>

Academic Editors: Michele Bacciocchi and Abbas S. Milani

Received: 16 July 2021

Accepted: 26 August 2021

Published: 29 August 2021

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Keywords: scale opening mechanics; seed extraction; morphological structure

1. Introduction

Seed extraction from the cones of various forest tree species has been described in the research literature since the 1950s [1,2] as a complex process [3] determined by taxonomic characteristics [4]. Most publications on the subject tend to analyze pine seed extraction due to the fact that the seeds of that species are in greatest demand [5–7]. Conifer seeds constitute a valuable propagation material needed for forest regeneration either via natural processes or for the needs of nurseries [8].

On average, between 200 and 500 kg of cones and 17.5 to 28.0 kg of seeds can be harvested per 1 ha of larch stands in Poland [9,10]. In Polish conditions, approximately 10,000 kg of larch cones were harvested annually between 2010 and 2020. In years of low harvest, there is a significant proportion of empty cones, which may be attributed to pests or diseases [11], or even climate change [12,13]. Furthermore, the total area of larch stands in Poland is to be reduced by 20% [9]. In view of these factors, it seems important to add to the understanding of the process of seed extraction from larch cones to maximize the amount and quality of seeds and enable their long-term storage.

Post-extraction cones constitute waste, which can be briquetted [14] or torrefied [15] and used together with damaged seeds for power generation purposes [16–18].

In practice, seeds are obtained from larch cones in two ways: via thermal extraction (involving alternating drying and moistening of cones) or thermal-mechanical extraction (long-term drying with additional mechanical crushing of scales) [19–21]. In the first method, moistening treatments extend the seed extraction time considerably, up to 60 h [22]. In addition, seed shaking in devices manufactured by BCC (Sweden), Nomeko (Sweden), or OTL Jarocin (Poland) is carried out between drying stages, directly before moistening [23–25]. Seeds obtained by thermal extraction are easier to clean, and it is possible to obtain nearly 100% purity. The second method, in turn, carries the risk of damaging the coat of the obtained seeds by the grinding elements of cone crushing equipment [20]. As reported by Suszka [21], mechanical extraction of seeds from larch cones was attempted by Drachal and Tyszkiewicz using a self-developed device, TD Mechanical Seed Extractor. The separation of seeds from a mixture of dust and cone debris makes the method difficult to implement [19].

In Poland, seeds from larch cones are extracted using pine and spruce extraction programs in seed extraction cabinets using two-step extraction programs with variable drying temperature [26] to prevent thermal damage to the seeds [1]. Researchers seek new devices and technological solutions to make the process more effective, for example, by microwave irradiation of cones in the initial stage of seed extraction [27,28].

The structure and properties of cell layers may affect the mechanical movement of scales [29]. The humidity of air surrounding the cones has a significant impact on moisture absorption and transpiration of the water vapor contained in the scale cells, which, due to changes in the temperature of the drying air, expand and contract anisotropically in a direction perpendicular to scale tissue orientation [30,31]. Periodic changes in the moisture content of larch cones after reaching the preliminary dry state lead to the contraction and relaxation of scale cells, causing scale movement and outward displacement of the seeds [20]. The process is gradual, and the seeds are released from the cones only after several instances of cone opening and closing [19]. Under natural conditions, approx. three weeks after the beginning of spring the upper parts of seed wings begin to project by approx. 2–3 mm outside the scales in cones on trees. Subsequently, following a slight decrease in cone moisture the scales are gradually deflected and the seeds fall out. Partially displaced seeds do not slide back to their initial positions, even after cone moistening. This is due to the fact that the space under the scale is the narrowest at the cone rachis (where the seed was originally located) and becomes wider in the outward direction [20]. Specific mechanisms of scale opening and closing are linked to plant evolution and survival strategy, which enables conifers to release seeds to greater distances on sunny and dry days [32].

In addition to a publication by Aniszewska [33,34], the available literature provides some other studies on the cone structure and the scale opening process [29,35–37], but these do not concern European larch cones.

The research problem addressed in this paper concerns difficulties with seed extraction from larch cones associated with their scale structure. Thus, the study evaluates the kinematics of scale deflection caused by changes in moisture content in the cones, the cellular structure of scales, and the resulting changes in cell wall thickness during scale opening. It also examines the scale surface in the process of seed extraction.

2. Materials and Methods

2.1. Provenance and Characterization of the Material

The study involved European larch cones (MP/3/41001/05) collected at the beginning of December 2019 from the seed orchard at the Grabowiec Nursery, division 282 k, Bielsk Podlaski municipality, Podlaskie Province (GPS: 52°41'0 N, 23°60' E). The cones were transferred to the laboratory of the Department of Biosystems Engineering, Warsaw University of Life Sciences; divided into batches; and stored in an LKexv 3600 laboratory refrigerator (Liebherr, Bulle, Switzerland) at 2 ± 1 °C until examination. The length and thickness of all cones were measured (length— h and diameter— d) using a Silverline 677,256 electronic

Vernier caliper (Silverline Tools, Yeovil, UK) with an accuracy of ± 0.1 mm; their initial weight m_0 was determined using a WPS210S laboratory balance (Radwag, Radom, Poland) with an accuracy of ± 0.001 g.

2.2. Provenance and Characterization of the Material

The mechanics of scale deflection from the rachis were examined throughout the process of seed extraction. Individual closed cones were cut in half along the axis using an originally developed blade with holder [38] mounted in a modified 10 T screw press (Cormak, Siedlce, Poland). Each cone was placed on a special base, bottom side to the baffle. Subsequently, the turn of the lever lowered the blade that cut the cone from top to bottom, perpendicularly to its axis.

In the resulting half cones, three reference points were marked on selected scales (Figure 1a): one at the junction of the scale with the cone rachis (1), another one on the curve of the scale (2), and the last one (3) at the distal end of the scale.

After marking the reference points, the prepared cone halves were placed in the holder of the purpose-developed stand to examine the opening angle of the scales (Figure 1b).

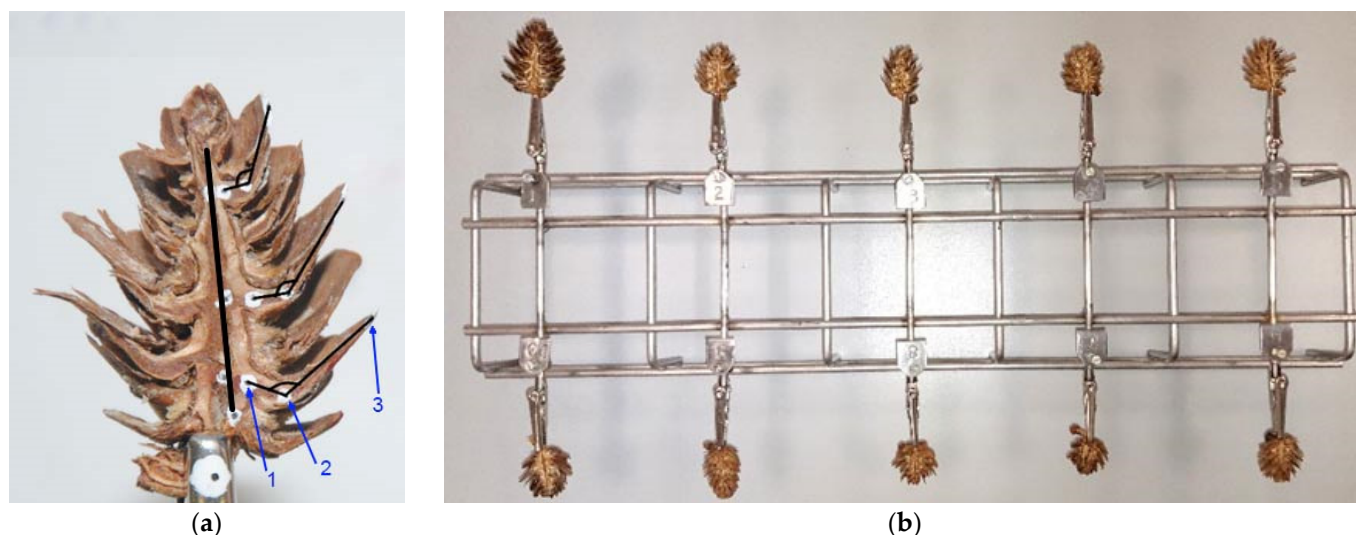


Figure 1. Cone half with marked reference points and axis (a), and stand for examining the scale opening angle in ten cone samples (b), where: 1—junction of the scale with the cone rachis, 2—point on the scale curve, and 3—scale apex.

Subsequently, the cones were placed in a Heraeus UT612 circulating air oven (Kendro Laboratory Products GmbH, Hanau, Germany). The drying air temperature was set to 35 °C for the first two hours and then increased to 50 °C for another six hours. Every hour throughout the process, the stand was taken out of the oven and individual cones were photographed using a Nikon D3000 camera (Nikon, Tokyo, Japan) with an AF-S DX NIKKOR 18–105 mm f/3.5–5.6G ED VR lens. The cones on the stand were photographed against a white background with a Modeco MN 85-001 manual Vernier caliper (Modeco Expert, Wrocław, Poland), which served as a measurement reference for scaling. Images acquired at a focal length of 105 mm and an aperture of $f = 5.6$ were saved in JPG format at a resolution of 3872×2592 pixels. The distance between the cones and the lens was 350 mm.

The other half of each cone was placed on a glass disc with a diameter of $\Phi = 0.90$ mm (Chemland, Stargard, Poland) in the oven next to the cone stand. After acquiring images of the first half, the other half on the glass disc was removed from the oven and weighed on WPS 210S laboratory scales (Radwag, Radom, Poland) with an accuracy of 0.001 g.

After 8 h of seed extraction and taking nine photographs of each cone half, the halves were immersed in distilled water at approx. 25 °C in laboratory beakers (Chemland, Stargard, Poland) for approx. 10 min, after which they were removed and left to soak for 14 h. The cycle was repeated over the next four days.

After the completion of seed extraction, the other halves were dried at 105 °C for 24 h to constant weight.

After the end of examination, the acquired images were analyzed using MultiScan Base v. 18.03 software (Computer Scanning System, Warsaw, Poland). In the images, three reference points on scales were connected by lines to determine the scale opening angle, α , with an accuracy of $\pm 0.01^\circ$ in each hour of the process (Figure 1a). Analysis involved scales from three cone regions: apex, middle, and base.

The methodology for investigating the scale opening angle was described by Dawson et al. [35], who studied *Pinus radiata* cones, and by Aniszewska [34], who studied *Pinus sylvestris*, *Picea abies* and *Larix deciduas* cones. It was also followed by Bae and Kim [29] in their investigation of the scale opening angle in pine cones (*Pinus*).

It was assumed that for each of the halved cones the absolute moisture content of one half mounted in a holder for photographing was the same as that of the other half on the glass disc. Therefore, moisture content in each cone was estimated on the basis of weighing its half on a glass disc and determining its dry matter content; that moisture content was then assigned to the scale opening angle at the time of measurement.

2.3. Cellular Structure of Cone Scales

Scales for cellular structure examination were taken from the middle segment of cones with a moisture content of 5% and 20%. Cross-sections of the middle region of the scales were prepared as microscope slides (Figure 2a).



Figure 2. View of larch scale from the middle part of the cone: (a)—inner side (with the cross-section area marked): 1—wing area margin in the distal part of the scale, 2—wing area in the middle part of the scale, and 3—seed depression in the proximal part of the scale; (b)—outer side: 4—distal part, 5—middle part, and 6—proximal part of the scale.

Samples of scales with a moisture content of 5% were taken using an NT Cutter BA-170 blade (NT Incorporated, Tokyo, Japan) with a WSL-lab microtome (Swiss Federal Research Institute WSL, Zürich, Switzerland). Samples of scales with a moisture content of 20% were taken using a Leica 22 C blade (Leica, Wetzlar, Germany) with a MC 2 u4.2 microtome (Moscow, Russia). The slides were observed at magnifications of $\times 40$, $\times 100$, and $\times 400$. Cross-sections from scales with a moisture content of 5% were examined using an Olympus BX61 (ZEISS, Oberkochen, Germany) biological microscope coupled to an Asion 556 camera (ZEISS, Oberkochen, Germany). Cross-sections of scales with a moisture content of 20% were examined using a Nikon Alphaphot-2 YS2 biological microscope (Nikon, Tokyo, Japan) coupled to a Panasonic GP—KR222E camera (Panasonic, Kadoma, Japan). This

measurement method was used for spruce cones by Aniszewska [34] and for pine cones by Bae and Kim [29].

Prior to the preparation of scale slides from cones with a moisture content of 5%, the collected scales were immersed for 15 min in plant glycerin to decrease their brittleness and enable microtome cutting; in the case of scales with a moisture content of 20%, such a treatment was not necessary.

The acquired microscopic images were analyzed by means of MultiScan Base v.18.03 (Computer Scanning System, Warsaw, Poland) and ZEN v. 2.3 software (ZEISS, Oberkochen, Germany) to measure the distance between the outer cell margin and lumen termed “cell wall thickness”, with an accuracy of $0.0001 \pm \mu\text{m}$.

2.4. Surface Structure of Scales under an Electron Scanning Microscope

The surface structure of scales was examined under a SEM 200 electron scanning microscope (Quanta, FEI, Europe). Scales for examination were taken from the middle region of whole cones used for cellular studies. Characteristic areas were examined both on the inner surfaces (to which seeds with wings are attached, Figure 2a) and outer surfaces of scales (Figure 2b) at magnifications of $\times 50$ and $\times 500$. Photographs of the inner side involved the following regions: wing area margin (1), wing area (2), and seed depression area (3), while the outer areas were the distal part of the scale (4), the middle part, adjoined by a lower scale (5), and the proximal part of the scale (6). The acquired SEM images were analyzed using MultiScan Base v. 18.03 software (Computer Scanning System, Warsaw, Poland) to measure the dimensions of the structural elements of scales with moisture contents of 5%, 10%, and 20%. The SEM-based method for determining the surface structure of scales or other plant materials is part of public domain and was described by, inter alia, Aniszewska et al. [39], Dawson et al. [35], Bae and Kim [29], and Berthlott et al. [40].

2.5. Statistical Analysis

The parameters were analyzed using the Statistica v.13 program (TIBCO Software Inc., Palo Alto, Santa Clara, CA, USA). Analyses of variances (ANOVA) were performed at a significance level of $\alpha = 0.05$. The differences were statistically significant for $p < 0.05$.

3. Study Results

Table 1 presents mean values with standard deviations, as well as minimum and maximum values, ranges, and coefficients of variation for the entire set of studied cones.

Table 1. Characteristic parameters of the studied cones.

Data	Mean \pm SD	Min.	Max.	Range	Coefficient of Variation
Length h , mm	31.2 ± 1.0	30.0	33.1	3.1	3.2
Thickness d , mm	16.3 ± 0.6	15.5	17.1	1.6	3.7
Initial mass m_0 , mm	1.247 ± 0.398	0.725	2.052	1.327	31.9
Mass of dry cone m_s , g	0.946 ± 0.306	0.546	1.568	1.022	32.3
Number of scales l_w , [pcs]	53 ± 5	45	61	16	10

Note: SD is standard deviation.

The studied cones had a length of 30.0 to 33.1 mm with a mean of 31.2 ± 1.0 mm and a diameter of 15.5 to 17.1 mm with a mean of 16.3 ± 0.6 mm. The mean initial weight of the cones was 1.247 ± 0.398 g, while their mean initial dry weight was 0.946 ± 0.306 g. The number of scales per cone ranged from 45 to 61, with a mean of 53 ± 5 .

3.1. Changes in the Scale Opening Angle during Seed Extraction from Larch Cones

Figure 3 presents images of the opening states of an individual cone on the first day of seed extraction, as well as at the beginning and 8 h into the process over the next days of extraction.

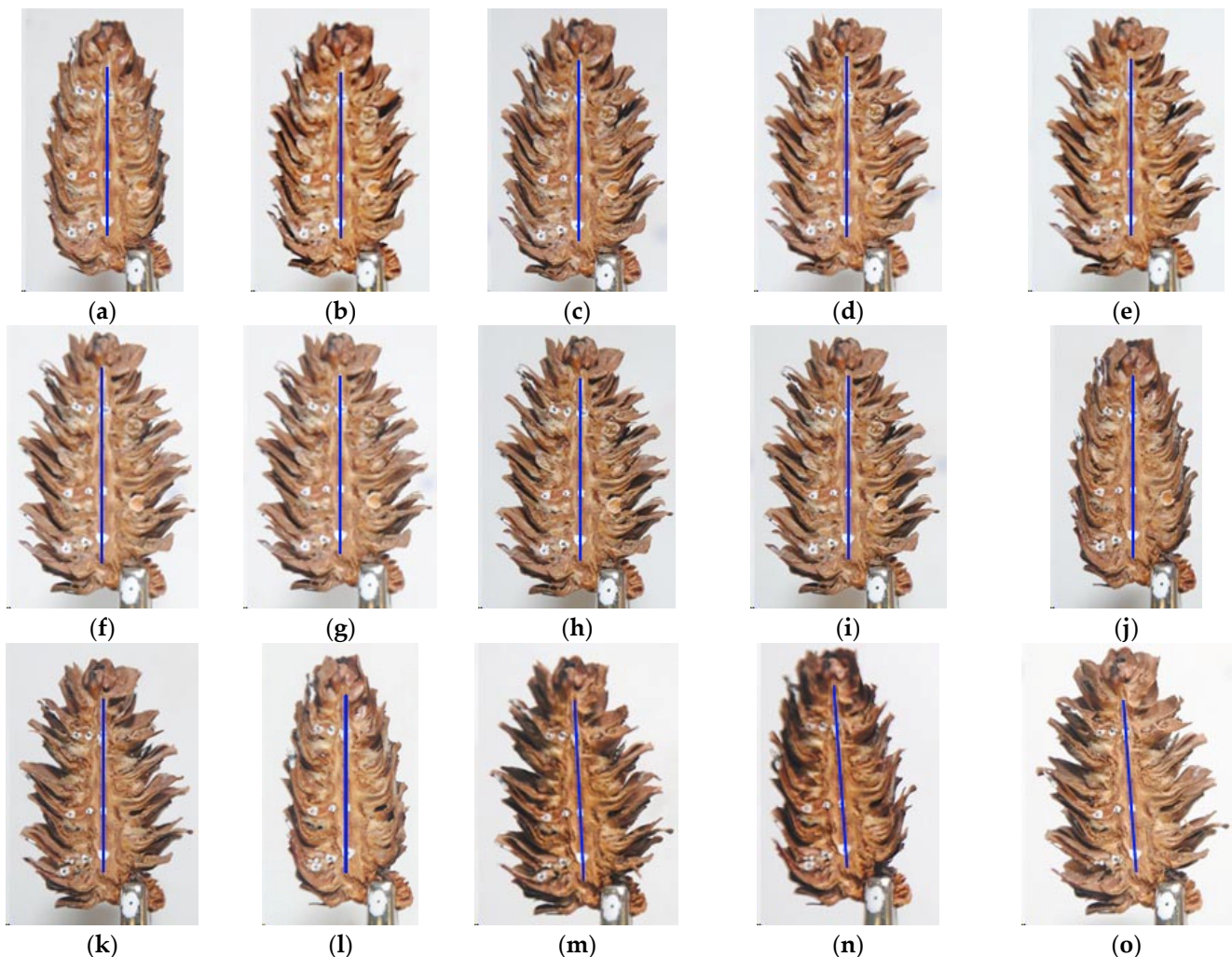


Figure 3. Opening states of an individual cone on the first day of seed extraction as well as at the beginning and 8 h into the process over the following days; day 1: (a)—initial state, (b)—at 1 h, (c)—at 2 h, (d)—at 3 h, (e)—at 4 h, (f)—at 5 h, (g)—at 6 h, (h)—at 7 h, and (i)—at 8 h; day 2: (j)—initial state, (k)—at 8 h; day 3: (l)—initial state, (m)—at 8 h, and day 4: (n)—initial state, and (o)—at 8 h.

At the beginning of the process (day 1 initial state) the cones were fully closed; then, they gradually opened throughout the day with the greatest angles of scale deflection from the rachis being reached after 8 h. Subsequently, the cones were immersed in water for 10 min and left to absorb the moisture for 14 h. As a result, the cones closed, leading to a more intensive opening process the following day. Throughout the seed extraction process, changes in scale deflection angles were most pronounced during the first 2–3 h of extraction at the lower temperature and soon after increasing the temperature setting to 50 °C. In subsequent hours (from 4 to 8 h), the changes were imperceptible to the human eye but the opening angle continued to increase.

Table 2 shows mean moisture content values u_1 – u_4 and scale opening angles α_1 – α_4 together with standard deviations, measured in scales from the bottom, middle, and top cone segments for each hour of the studied seed extraction process.

Table 2. Mean moisture content in cones and the corresponding opening angles of scales in the bottom, middle, and top cone segments over four consecutive days of measurement.

Time [h]	Day 1		Day 2		Day 3		Day 4	
	u_1	α_1	u_2	α_2	u_3	α_3	u_4	α_4
Scale from the bottom of the cone segments								
0	0.326 ± 0.016	100.98 ± 10.28	0.346 ± 0.117	104.78 ± 10.50	0.377 ± 0.085	106.79 ± 10.83	0.364 ± 0.106	111.53 ± 9.80
1	0.260 ± 0.016	116.06 ± 13.35	0.286 ± 0.088	117.51 ± 12.59	0.282 ± 0.111	118.70 ± 10.68	0.232 ± 0.091	124.20 ± 10.07
2	0.197 ± 0.015	121.46 ± 12.87	0.242 ± 0.064	122.84 ± 10.72	0.232 ± 0.070	122.91 ± 11.65	0.174 ± 0.069	127.73 ± 10.38
3	0.156 ± 0.010	126.64 ± 11.60	0.135 ± 0.043	129.05 ± 10.30	0.112 ± 0.039	129.45 ± 11.18	0.098 ± 0.042	131.31 ± 10.54
4	0.104 ± 0.014	129.23 ± 11.01	0.103 ± 0.024	131.92 ± 9.52	0.095 ± 0.024	131.29 ± 10.18	0.078 ± 0.023	132.68 ± 10.56
5	0.090 ± 0.008	130.53 ± 10.88	0.091 ± 0.013	132.90 ± 9.68	0.080 ± 0.012	132.55 ± 10.28	0.070 ± 0.012	134.42 ± 10.70
6	0.083 ± 0.004	131.74 ± 10.81	0.081 ± 0.006	133.81 ± 9.70	0.076 ± 0.008	133.40 ± 10.17	0.064 ± 0.008	135.18 ± 10.68
7	0.081 ± 0.004	132.93 ± 11.09	0.078 ± 0.005	134.56 ± 9.89	0.071 ± 0.011	134.51 ± 10.44	0.063 ± 0.008	136.10 ± 10.89
8	0.077 ± 0.004	133.88 ± 10.95	0.075 ± 0.004	135.13 ± 9.79	0.069 ± 0.012	135.42 ± 10.39	0.062 ± 0.008	136.88 ± 10.64
Scale from the middle of the cone segments								
0	0.329 ± 0.018	106.40 ± 9.86	0.387 ± 0.091	108.63 ± 10.72	0.421 ± 0.069	108.37 ± 11.73	0.425 ± 0.113	113.23 ± 11.15
1	0.265 ± 0.019	125.93 ± 9.93	0.306 ± 0.062	124.81 ± 10.47	0.301 ± 0.078	124.52 ± 11.10	0.270 ± 0.083	127.76 ± 11.39
2	0.198 ± 0.017	131.90 ± 9.91	0.251 ± 0.046	129.99 ± 11.11	0.230 ± 0.046	129.85 ± 11.39	0.192 ± 0.059	130.92 ± 11.27
3	0.156 ± 0.013	138.66 ± 10.06	0.135 ± 0.035	137.28 ± 11.53	0.106 ± 0.030	138.02 ± 11.46	0.104 ± 0.034	137.53 ± 11.78
4	0.103 ± 0.013	140.87 ± 10.33	0.101 ± 0.021	139.80 ± 11.52	0.093 ± 0.018	139.66 ± 12.02	0.078 ± 0.018	140.14 ± 11.84
5	0.091 ± 0.010	141.89 ± 10.38	0.089 ± 0.013	140.92 ± 11.38	0.080 ± 0.009	141.07 ± 11.91	0.069 ± 0.010	141.66 ± 11.66
6	0.085 ± 0.008	143.16 ± 10.58	0.081 ± 0.009	142.55 ± 11.55	0.076 ± 0.006	141.96 ± 12.06	0.064 ± 0.007	142.71 ± 11.60
7	0.082 ± 0.008	144.03 ± 10.69	0.078 ± 0.008	143.48 ± 11.56	0.073 ± 0.006	142.88 ± 11.97	0.063 ± 0.007	143.47 ± 11.80
8	0.079 ± 0.008	144.99 ± 10.88	0.076 ± 0.008	144.25 ± 11.53	0.073 ± 0.005	143.84 ± 12.00	0.062 ± 0.007	144.02 ± 11.74
Scale from the top of the cone segments								
0	0.334 ± 0.018	108.97 ± 5.81	0.377 ± 0.113	110.96 ± 6.15	0.416 ± 0.104	111.09 ± 5.97	0.415 ± 0.118	114.65 ± 6.95
1	0.267 ± 0.020	122.41 ± 7.91	0.296 ± 0.079	122.40 ± 8.33	0.291 ± 0.105	122.19 ± 6.76	0.263 ± 0.098	125.28 ± 7.30
2	0.196 ± 0.022	127.59 ± 8.94	0.242 ± 0.060	126.50 ± 9.03	0.225 ± 0.066	128.20 ± 7.33	0.186 ± 0.070	129.93 ± 8.54
3	0.152 ± 0.014	132.98 ± 8.06	0.129 ± 0.043	133.00 ± 8.69	0.102 ± 0.039	133.48 ± 8.01	0.098 ± 0.040	134.17 ± 7.80
4	0.101 ± 0.017	135.03 ± 8.21	0.099 ± 0.025	135.56 ± 8.53	0.091 ± 0.023	135.86 ± 7.17	0.075 ± 0.022	136.16 ± 7.97
5	0.090 ± 0.012	136.71 ± 8.09	0.088 ± 0.015	136.76 ± 8.44	0.078 ± 0.012	136.22 ± 8.23	0.066 ± 0.012	137.83 ± 7.88
6	0.084 ± 0.010	137.81 ± 7.75	0.079 ± 0.010	137.64 ± 8.38	0.074 ± 0.008	137.05 ± 8.23	0.062 ± 0.008	139.09 ± 8.25
7	0.082 ± 0.009	138.67 ± 7.74	0.077 ± 0.009	138.79 ± 8.39	0.070 ± 0.010	138.35 ± 8.14	0.061 ± 0.008	139.89 ± 8.42
8	0.078 ± 0.009	139.14 ± 7.59	0.075 ± 0.008	139.64 ± 8.25	0.069 ± 0.011	139.55 ± 8.17	0.060 ± 0.008	140.65 ± 8.48

Note: u_1 – u_4 is mean moisture content ± SD [$\text{kg}_{\text{water}} \cdot \text{kg}_{\text{dry weight}}^{-1}$]; α_1 – α_4 is mean angle opening angle ± SD [°].

The smallest mean scale opening angle at the cone base was 100.98°; it was found at the beginning of the process, at a mean cone moisture content of 0.326 $\text{kg}_{\text{water}} \cdot \text{kg}_{\text{dw}}^{-1}$. The greatest opening angle was recorded on the fourth day at 8 h; it was 136.88° at the lowest mean cone moisture content in the process (0.062 $\text{kg}_{\text{water}} \cdot \text{kg}_{\text{dw}}^{-1}$).

The mean scale opening angle at the cone base increased with each day of the process: from 100.98° to 133.88° (by 32.91°) on the first day, from 104.78° to 135.13° (by 30.35°) on the second day, from 106.79° to 135.42° (by 28.63°) on the third day, and from 111.53° to 136.88° (by 25.35°) on the fourth day.

The lowest mean scale opening angle in the middle cone segment was found at the beginning of the process (106.40°). The highest mean opening angles were recorded on the first day at 8 h (144.99°) at a mean moisture content of 0.079 $\text{kg}_{\text{water}} \cdot \text{kg}_{\text{dw}}^{-1}$ and on the second day at 8 h (144.25°) at a mean moisture content of 0.076 $\text{kg}_{\text{water}} \cdot \text{kg}_{\text{dw}}^{-1}$. At the lowest moisture content, on the fourth day at 8 h (0.062 $\text{kg}_{\text{water}} \cdot \text{kg}_{\text{dw}}^{-1}$), the opening angle was 144.02°.

The mean scale opening angles in the middle cone segment increased from 106.40° to 144.99° (by 38.59°, the highest increment) on the first day, from 108.63° to 144.25° (by 35.63°) on the second day, from 108.37° to 143.84° (by 35.46°) on the third day, and from 113.23° to 144.02° (by 30.80°) on the fourth day.

The mean scale opening angle at the cone apex was the lowest at the beginning of the process (108.97°) and the highest on the fourth day at 8 h (140.65°). The mean initial scale opening angle at the cone apex increased with each day of seed extraction: from 108.97° to 139.14° (by 30.17°) on the first day, from 110.96° to 139.64° (by 28.68°) on the second day, from 111.09° to 139.55° (by 28.46°) on the third day, and from 114.65° to 144.65° (by 26.01°) on the fourth day.

The relationships between the opening angle and moisture content over the consecutive days and times are shown in Figure 4. For example, for scales from the middle cone segment the relationship was described with a polynomial Equation (1) and a linear Equation (2) for the first day and linear equations for the remaining days (3)–(5).

$$\text{Day 1 } \alpha_1 = -469.53u_1^2 + 50.082u_1 + 142.26 \quad (R = 0.991; t_{crit} = 0.156), \quad (1)$$

$$\text{Day 1 } \alpha_1 = -131.68u_1 + 155.62 \quad (R = 0.965; t_{crit} = 0.125), \quad (2)$$

$$\text{Day 2 } \alpha_2 = -97.52u_2 + 150.92 \quad (R = 0.976; t_{crit} = 0.125), \quad (3)$$

$$\text{Day 3 } \alpha_3 = -91.31u_3 + 149.21 \quad (R = 0.990; t_{crit} = 0.125), \quad (4)$$

$$\text{Day 4 } \alpha_4 = -79.835u_4 + 147.5 \quad (R = 0.992; t_{crit} = 0.125), \quad (5)$$

where t_{crit} is the critical value of the simple or multiple correlation coefficient at $\alpha = 0.05$.

For the first day, also a linear function was calculated (2) with the following opening angles: $\alpha_{0h} = 112.30^\circ$, $\alpha_{1h} = 120.72^\circ$, $\alpha_{2h} = 129.55^\circ$, $\alpha_{3h} = 135.08^\circ$, $\alpha_{4h} = 142.06^\circ$, $\alpha_{5h} = 143.64^\circ$, $\alpha_{6h} = 143.64^\circ$, $\alpha_{7h} = 144.82^\circ$, and $\alpha_{8h} = 145.22^\circ$. The opening angle increased rapidly from the initial state up to 4 h on the first day (by 29.76°), and then slowly from 4 h to 8 h—on average by 3.16° .

The greatest increments in the mean scale opening angle at the base, middle, and apex were recorded on the first day. With increasing moisture content, the opening angle of scales in those three cone regions increased by 33.89° on the first day, 31.55° on the second day, and 30.85° on the third and fourth days.

The statistical analysis (Tukey HSD (honestly significant difference) test for unequally sized samples), which compared the scale opening angle in different sections of the cone (base, middle, and apex) for different hours on consecutive days of the process, revealed no significant differences ($p < 0.05$). This seems to indicate that the scale position in the cone does not influence the opening angle. Furthermore, the analysis demonstrated that scale opening remained similar on subsequent days, which implies that the process duration (in days) has no statistically significant impact on the scale opening angle ($p < 0.05$).

The initial moisture content of cones increased with each day, while the final moisture content continued to decrease. Moisture content changes in scales from the middle segment were $0.251 \text{ kg}_{\text{water}} \cdot \text{kg}_{\text{dw}}^{-1}$ on the first day, $0.312 \text{ kg}_{\text{water}} \cdot \text{kg}_{\text{dw}}^{-1}$ on the second day, $0.349 \text{ kg}_{\text{water}} \cdot \text{kg}_{\text{dw}}^{-1}$ on the third day, and $0.362 \text{ kg}_{\text{water}} \cdot \text{kg}_{\text{dw}}^{-1}$ on the fourth day of the process.

It was found that in scales from the middle cone segment, a decrease in moisture content of $0.01 \text{ kg}_{\text{water}} \cdot \text{kg}_{\text{dw}}^{-1}$ was associated with a mean increase in the opening angle of 1.3° on the first day and, on average, 0.90° on the following days (0.98° , 0.91° , and 0.80° on days 2, 3, and 4, respectively).

Figure 5 presents the movement of a scale in the middle cone segment throughout the four-day seed extraction process by showing the location of reference points 1, 2, and 3 at consecutive process times.

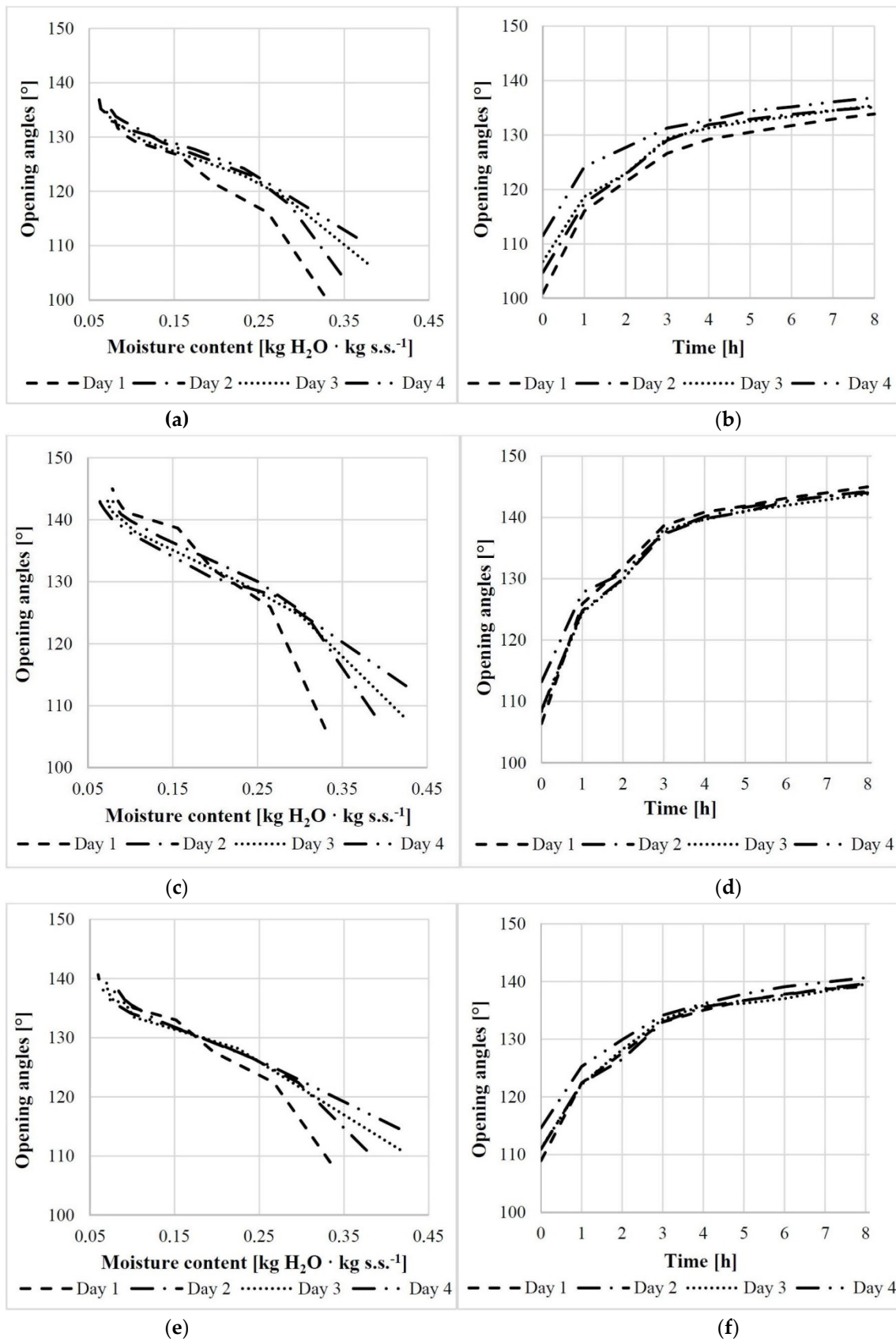


Figure 4. Relationship between the scale opening angle and moisture content/process duration for scales obtained from the base (a,b), middle (c,d), and apex (e,f) of cones.

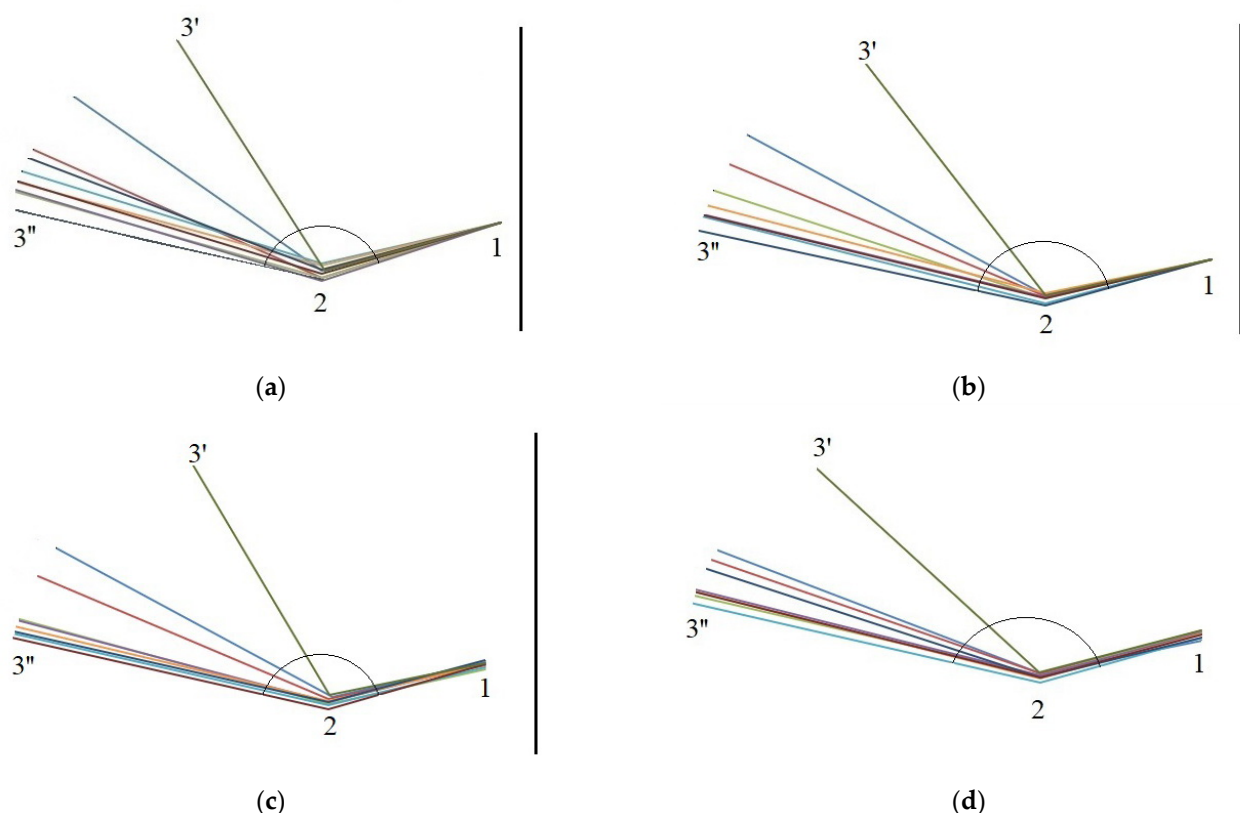


Figure 5. Changes in the opening angle of a scale from the middle cone segment at consecutive measurement times on (a)—day 1, (b)—day 2, (c)—day 3, and (d)—day 4 (3'—start day; 3''—end day).

The mean opening angle of scales in the middle cone segment increased from 102.08° to 150.03° (by 47.95° , the largest increment) on the first day, from 113.30° to 150.22° (by 36.92°) on the second day, from 111.54° to 149.84° (by 38.3°) on the third day, and from 122.23° to 149.82° (by 27.59°) on the fourth day.

3.2. The Cellular Structure of Scales

Larch scales consist of three major cell types:

- Small cells with thick cell walls occur in bundles in the central layer,
- Medium-sized cells with thick walls in the outer and inner epidermal layers,
- Large cells with thin walls and large lumina in the central layer.

Cross-sections of scales with a moisture content of 5% are shown in Figure 6.

Figure 6a show medium cells of the outer epidermis with a mean cell wall thickness of $2.750 \pm 0.530 \mu\text{m}$ as well as inner epidermal cells with a mean wall thickness of $7.007 \pm 1.376 \mu\text{m}$. The darker regions in the large cell layer probably represent bundles of cells.

As can be seen from Figure 6b, the epidermal cells on the outer side of the scale are packed more tightly than those on the inner side. Due to loss of water, the cells on the inner side contract, causing scale deflection from the rachis in larch cones (albeit the deflection is less pronounced than in spruce and pine cones).

Figure 6c presents a cross-section involving a scale margin on which glycerin particles penetrated into empty intercellular spaces that emerged as a result of moisture loss during seed extraction. It should also be noted that loss of moisture led to cell deformation.

Figure 6d shows large cells with a cell wall thickness of $3.497 \pm 0.946 \mu\text{m}$ and epidermal cells on the inner side of the scale; their lumina were larger than those on the outer side.

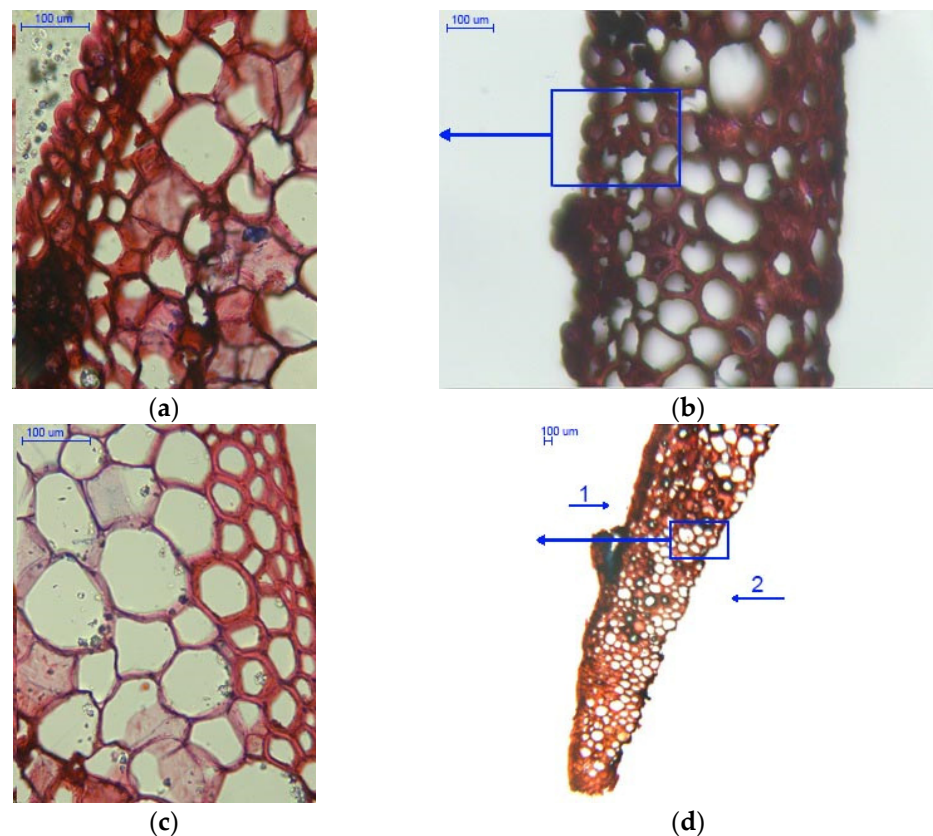


Figure 6. Cross-sections of scales with a moisture content of 5%: (a) outer epidermal cell layer (400×); (b) scale with visible cell layers (100×); (c) scale with visible cell layers on the inner side (400×); and (d) scale with visible cell layers in the marginal region (40×), 1—outer side of the scale, and 2—inner side of the scale.

Figure 7 presents cross-sections of scales with a moisture content of 20%. Figure 7a shows cross-sections of outer and inner epidermal cells, while large cells and cells in bundles are shown in Figure 7c. Outer and inner epidermal cells had mean wall thicknesses of $3.670 \pm 0.561 \mu\text{m}$ and $9.458 \pm 2.335 \mu\text{m}$, respectively. The difference in cell wall thickness between the inner and outer scale sides could be the reason why the opening process of larch cones is slower than that of Scots pine and Norway spruce cones.

In Figure 7b, in the middle of the cross-section one can see large cells and cells in bundles with a mean wall thickness of $8.206 \pm 1.482 \mu\text{m}$ and $3.313 \pm 0.599 \mu\text{m}$, respectively. It was found that the layer of large cells narrows down towards the scale margin (Figure 7d).

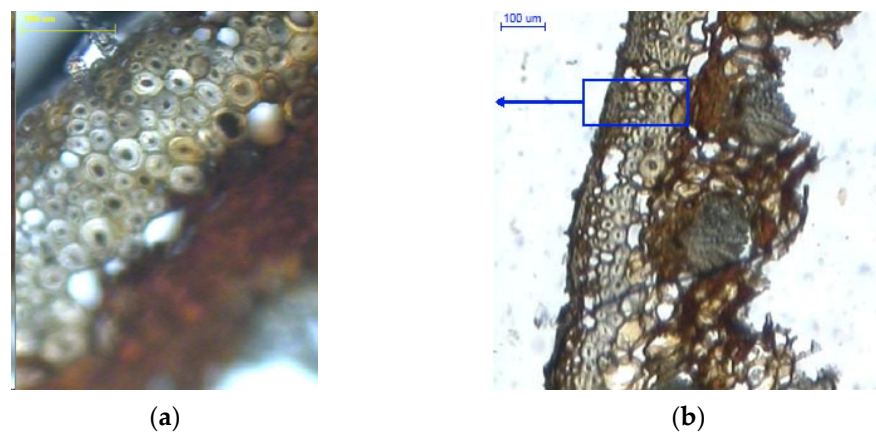


Figure 7. Cont.

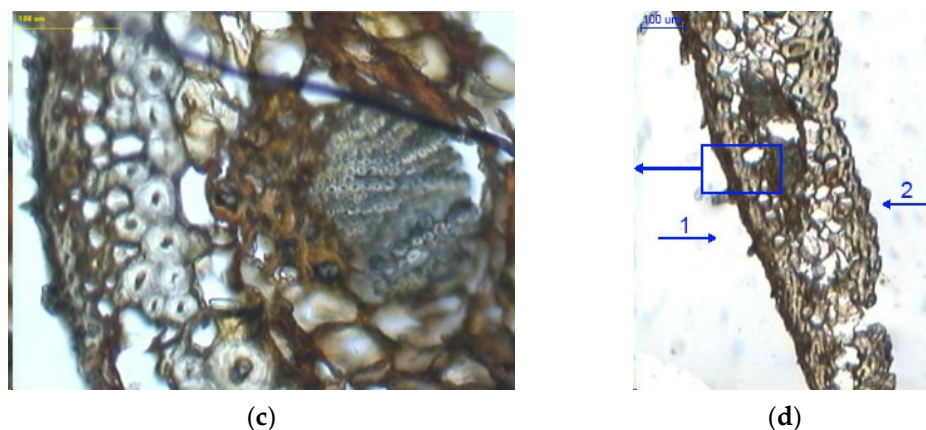


Figure 7. Cross-sections of scales with a moisture content of 20%: (a) outer epidermal cell layer (100×); (b) scale with visible cell layers on the inner side (100×); (c) cell layer in bundles between large cells (100×); (d) scale with visible cell layers in the marginal region (40×), 1–outer side of the scale, and 2–inner side of the scale.

A comparison of mean cell wall thickness in scales with a moisture content of 5% and 20% indicates that in medium-sized cells it increased by 25% (outer side) and by approx. 18% (inner side), as compared to approx. 57% for large cells. Analysis of variance revealed significant wall thickness differences between large cells ($p = 0.00$) and medium-sized cells both on the outer side ($p = 0.00$) and inner side of the epidermis ($p < 0.05$) in dry scales (5% moisture) and wet scales (20% moisture).

3.3. Results of Structural Examinations of Cone Scales

Figures 8–13 present the results of structural examinations of the inner and outer sides of larch cones with moisture contents of 5%, 10%, and 20%.

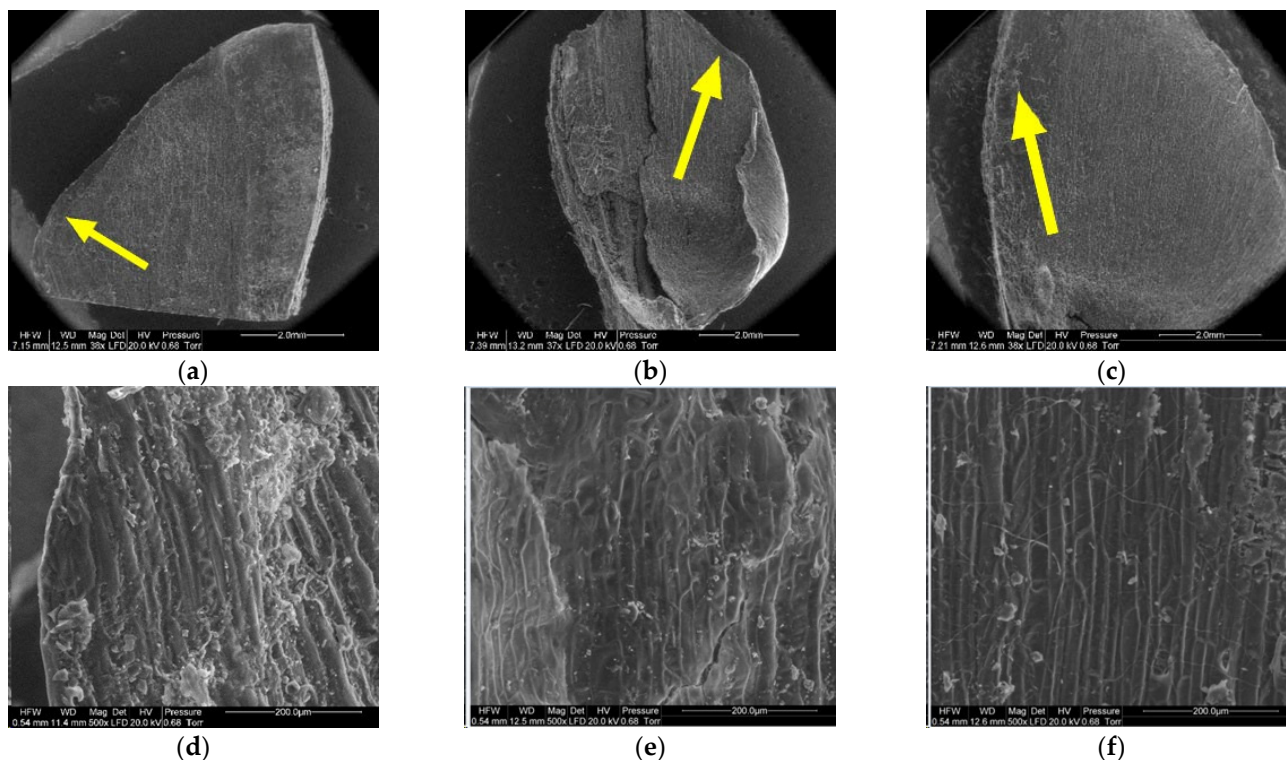


Figure 8. Inner side of larch scale. Scale margin outside of the wing area: (a) MC = 20%, zoom 50×; (b) MC = 10%, zoom 50×; (c) MC = 5%, zoom 50×; (d) MC = 20%, zoom 500×; (e) MC = 10%, zoom 500×; and (f) MC = 5%, zoom 500×.

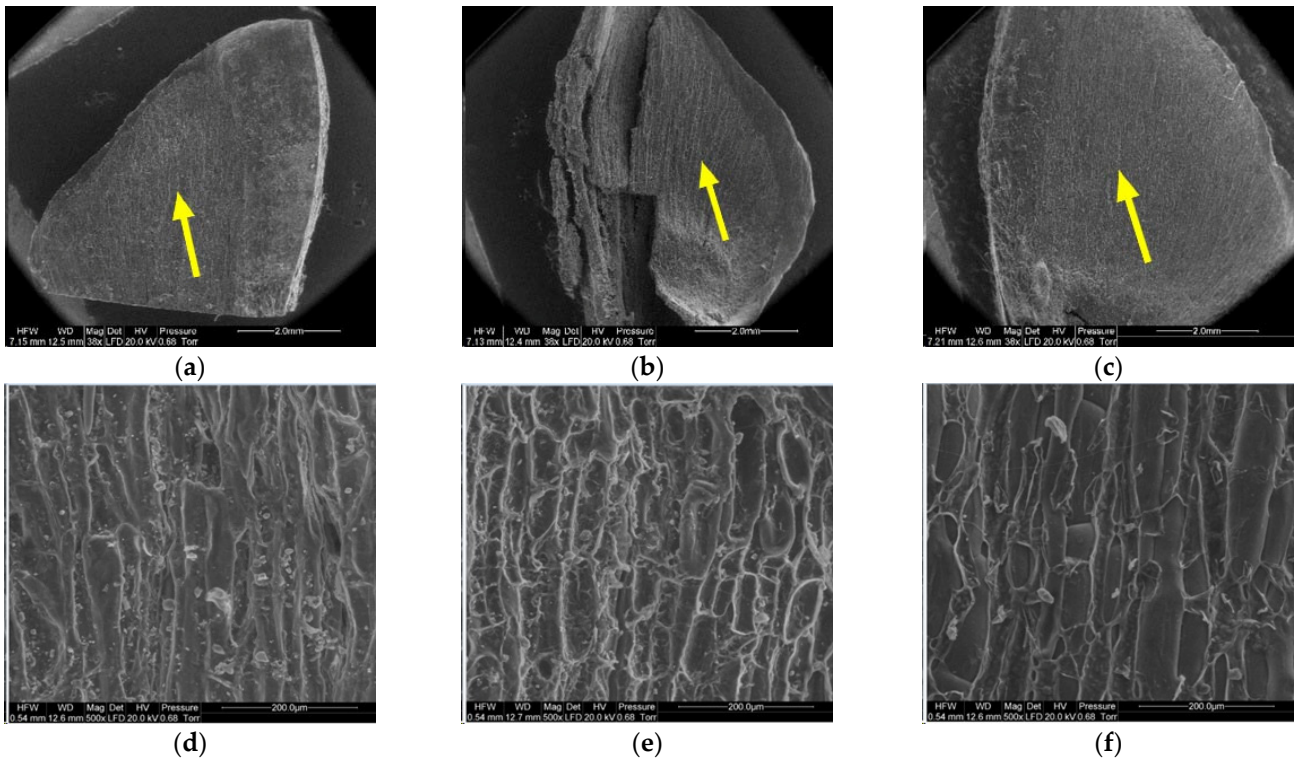


Figure 9. Inner side of larch scale. Wing area: (a) MC = 20%, zoom 50 \times ; (b) MC = 10%, zoom 50 \times ; (c) MC = 5%, zoom 50 \times ; (d) MC = 20%, zoom 500 \times ; (e) MC = 10%, zoom 500 \times ; and (f) MC = 5%, zoom 500 \times .

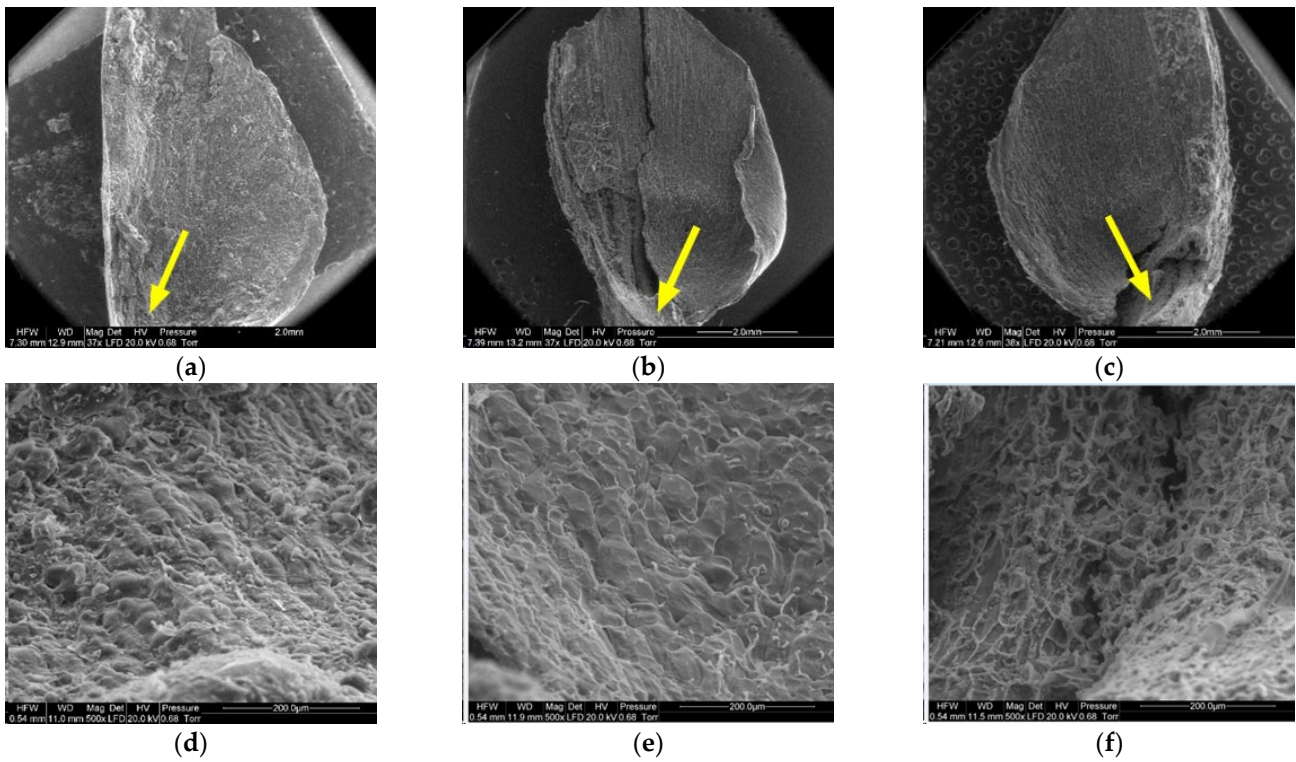


Figure 10. Inner side of larch scale. Seed depression area: (a) MC = 20%, zoom 50 \times ; (b) MC = 10%, zoom 50 \times ; (c) MC = 5%, zoom 50 \times ; (d) MC = 20%, zoom 500 \times ; (e) MC = 10%, zoom 500 \times ; and (f) MC = 5%, zoom 500 \times .

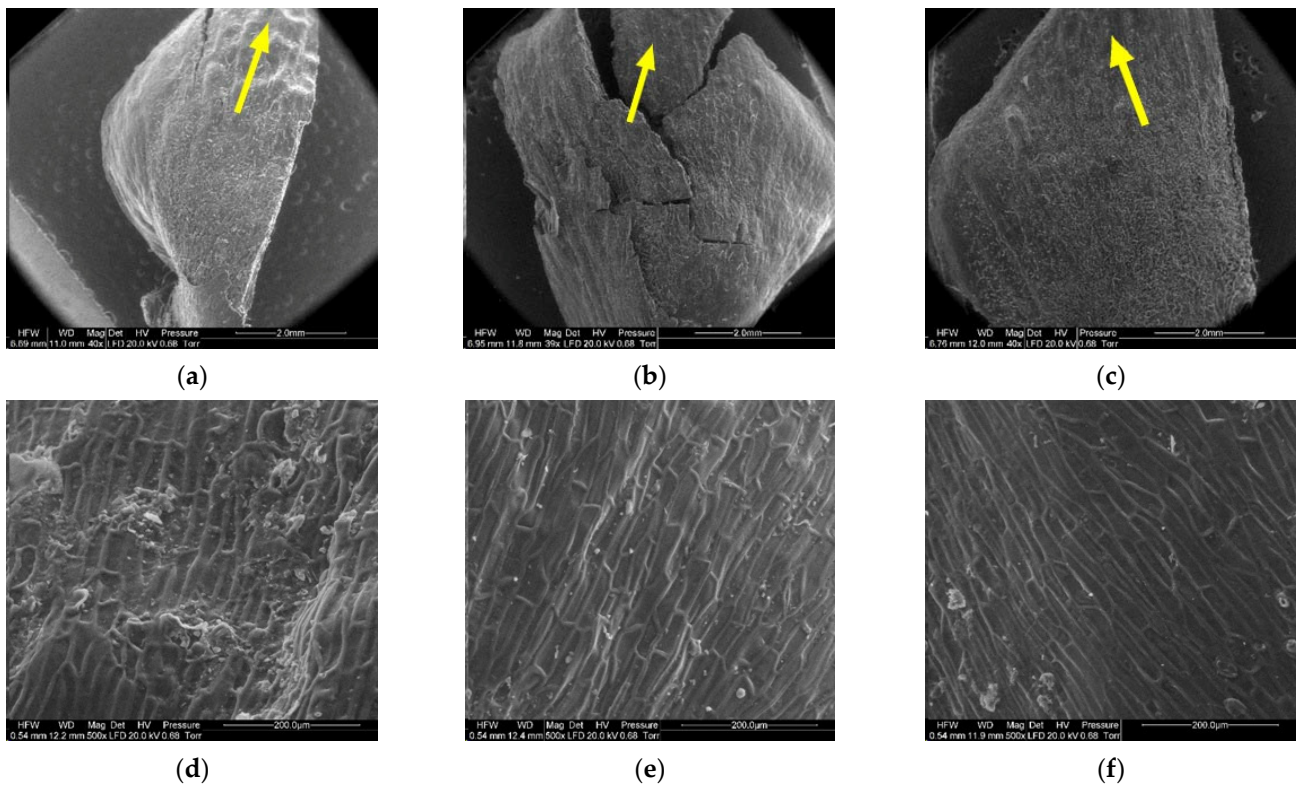


Figure 11. Outer side of larch scale. Distal scale area: (a) MC = 20%, zoom 50 \times ; (b) MC = 10%, zoom 50 \times ; (c) MC = 5%, zoom 50 \times ; (d) MC = 20%, zoom 500 \times ; (e) MC = 10%, zoom 500 \times ; and (f) MC = 5%, zoom 500 \times .

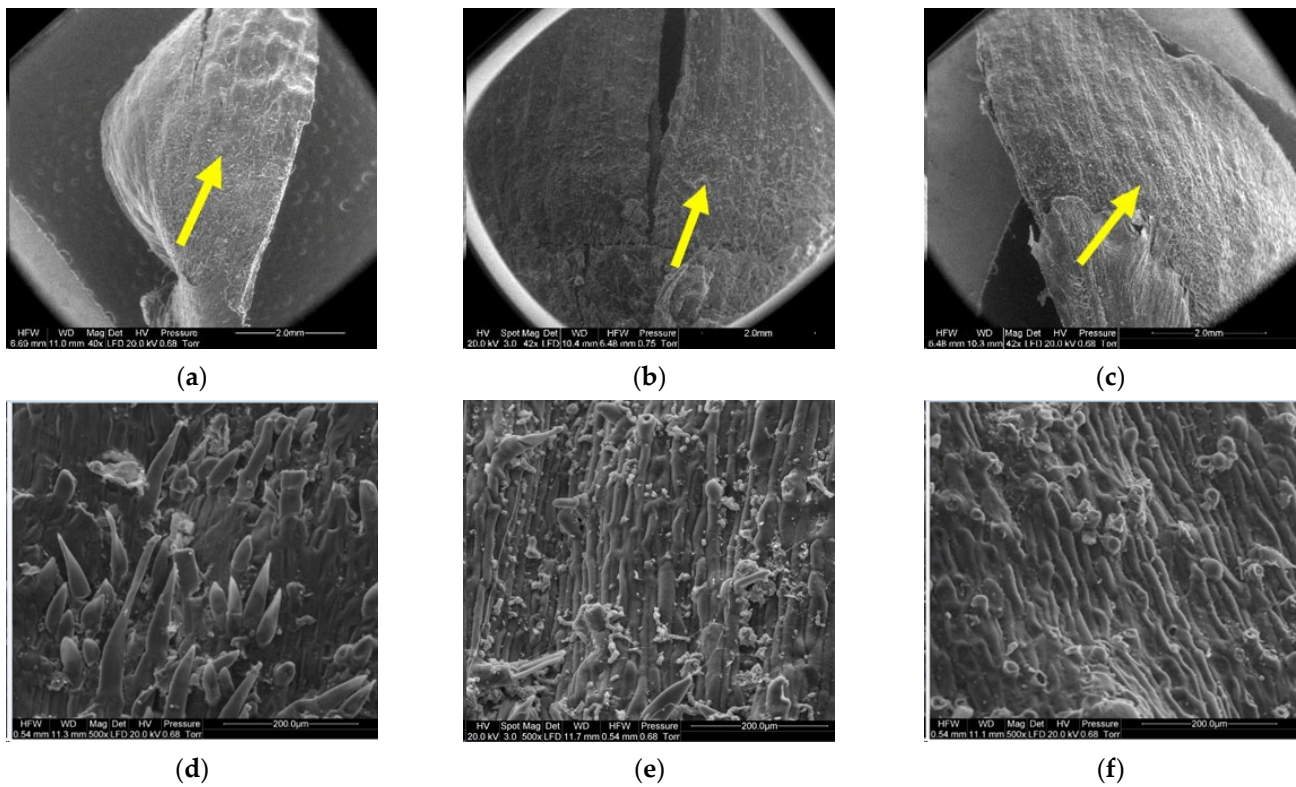


Figure 12. Outer side of larch scale. Middle scale area, adjoin by a lower scale: (a) MC = 20%, zoom 50 \times ; (b) MC = 10%, zoom 50 \times ; (c) MC = 5%, zoom 50 \times ; (d) MC = 20%, zoom 500 \times ; (e) MC = 10%, zoom 500 \times ; and (f) MC = 5%, zoom 500 \times .

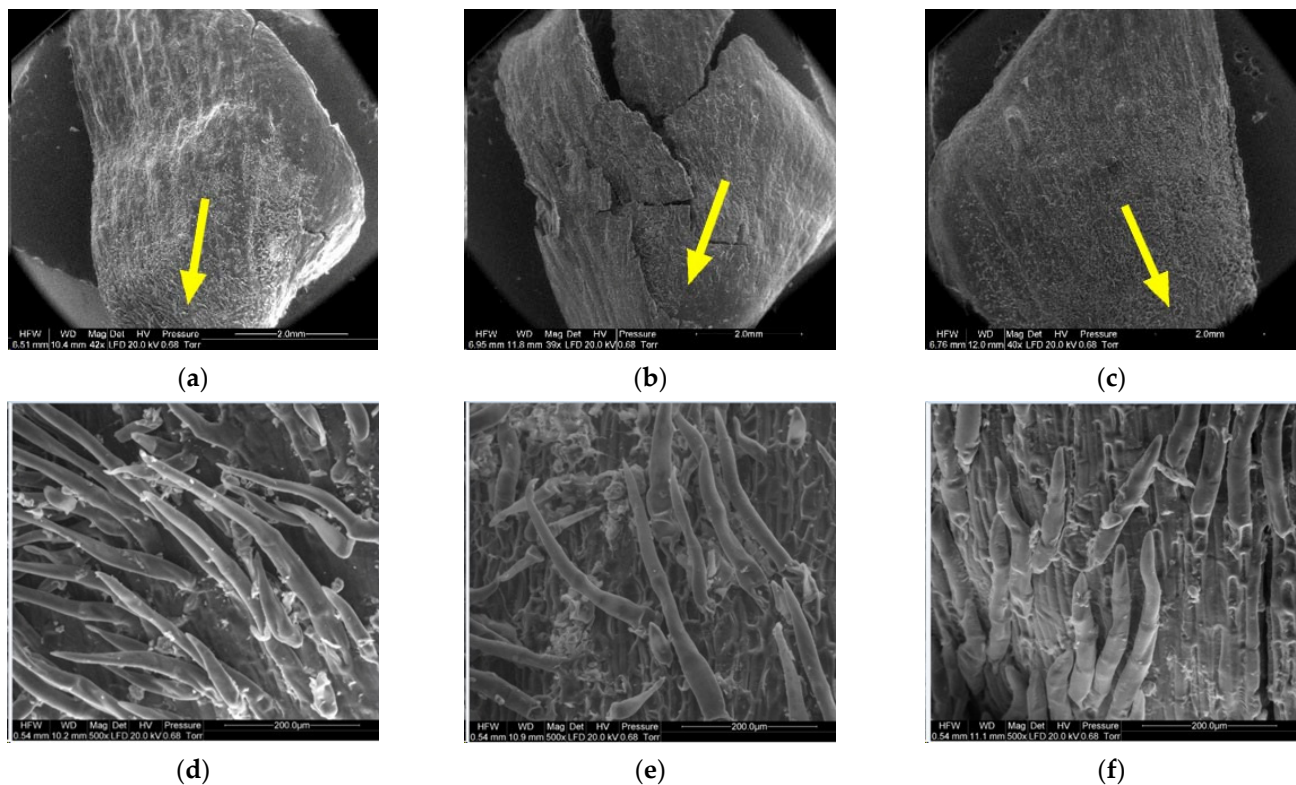


Figure 13. Outer side of larch scale. Proximal scale area: (a) MC = 20%, zoom 50×; (b) MC = 10%, zoom 50×; (c) MC = 5%, zoom 50×; (d) MC = 20%, zoom 500×; (e) MC = 10%, zoom 500×; and (f) MC = 5%, zoom 500×.

On the scale margin, outside of the wing area (1) there are elongated cells differing in their wall thickness. Table 3 shows means with standard deviations as well as minimum and maximum values for the studied cells.

Table 3. Cell sizes at the scale margin outside of the wing area (1) on the inner side of scales with a moisture content of 5%, 10%, and 20%.

Data	Moisture Content of Scales								
	20%			10%			5%		
	Mean ± SD	Min.	Max.	Mean ± SD	Min.	Max.	Mean ± SD	Min.	Max.
Length [μm]	187.57 ^a ± 47.00	105.70	274.40	119.45 ^b ± 37.14	95.40	217.80	119.35 ^b ± 28.18	92.10	208.60
Width [μm]	17.69 ^a ± 3.48	9.80	24.00	15.71 ^a ± 2.40	11.40	20.60	15.67 ^a ± 3.93	10.70	23.80
Wall thickness [μm]	7.82 ^a ± 1.74	5.20	12.10	5.45 ^b ± 0.92	4.10	7.00	4.71 ^b ± 1.22	2.90	7.00

Note: ^{a,b}—homogeneous groups.

The largest dimensions and wall thicknesses were found for elongated cells in scales with a moisture content of 20% (length of 185.57 μm, width of 17.69 μm, and wall thickness of 7.82 μm). Cells in scales with a moisture content of 10% were much smaller and had thinner walls due to loss of moisture (length of 119.45 μm, width of 15.71 μm, and wall thickness of 5.45 μm). Cells in scales with a moisture content of 5% were slightly smaller than those in scales with a moisture content of 10% (length of 119.35 μm, width of 15.67 μm, and wall thickness of 4.71 μm), with the difference not being statistically significant in the Duncan test. Significant differences were found for the length and width of cells in scales with a moisture content of 20% ($p < 0.001$).

Another region on the inner side of the scale, the wing area (2), featured elongated cells similar to those at the wing margin (1).

Cells in scales with a moisture content of 20% were convex, cylindrical, and overlapping, and had the thickest cell walls (from 4.90 μm to 13.50 μm , with a mean of $9.60 \pm 1.44 \mu\text{m}$). Their surface featured clusters of particles, probably consisting of resin. Cells in scales with a moisture content of 10% were not convex, having a concave interior, and a wall thickness ranging from 4.60 μm to 8.90 μm (on average $6.50 \pm 1.31 \mu\text{m}$). Cells in scales with a moisture content of 5% were characterized by thin, damaged walls with a thickness from 3.20 μm to 8.20 μm (on average $5.17 \pm 2.09 \mu\text{m}$); their surface layer revealed defragmentation.

On the inner side of the proximal part of scales, there were usually two seed nests, but they were not necessarily well-defined or developed on all scales. The seed depression on the inner side of the scale (3) consisted of irregularly-shaped cells. Following seed detachment, the cells were irregular in shape and frayed, as can be seen from the figures presenting this region of the scale (3).

The apical part of the outer side of scales (4) contained closely arranged elongated cells differing in cell wall thickness. The lower the moisture content of the cone, the thinner the cell wall. The wall thickness of cells ranged from 6.20 μm to 10.90 μm , with a mean of $8.02 \pm 1.29 \mu\text{m}$ in scales with a moisture content of 20%; from 5.40 μm to 9.20 μm , with a mean of $6.57 \pm 1.08 \mu\text{m}$ in scales with a moisture content of 10%; and from 4.50 μm to 7.60 μm , with a mean of $6.13 \pm 0.81 \mu\text{m}$ in scales with a moisture content of 5%. Cell wall thickness in scales with a moisture content of 20% was significantly different from that in scales with a moisture content of 5% and 10% ($p < 0.001$ in the Duncan test).

In the case of cones with a moisture content of 20%, the middle part of scales, to which lower scales are adjacent (5), revealed elongated cells with projections in the form of hairs with a mean length of $108.12 \pm 54.81 \mu\text{m}$ and a width at the base of $25.84 \pm 3.08 \mu\text{m}$. Scales with a moisture content of 10% featured projections with a mean length of $61.78 \pm 24.42 \mu\text{m}$ and a length at the base of $23.20 \pm 3.40 \mu\text{m}$. No projections were found on scales with a moisture content of 5%; instead, they revealed pores of different diameters—on average $10.76 \pm 2.04 \mu\text{m}$.

Numerous projections were found on the outer side of the proximal part of scales (6) with all the studied moisture content values. The mean length and width of hair cells on scales with a moisture content of 20% was $265.88 \pm 116.72 \mu\text{m}$ and $28.09 \pm 3.39 \mu\text{m}$, respectively. Hairs on scales with a moisture content of 10% were $219.99 \pm 71.56 \mu\text{m}$ long and $28.42 \pm 5.50 \mu\text{m}$ wide, while those on scales with a moisture content of 5% were $207.30 \pm 48.74 \mu\text{m}$ long and $31.19 \pm 2.82 \mu\text{m}$ wide. Projections on scales with a moisture content of 5% were the shortest and widest at the base.

4. Discussion

As reported by Lin et al. [41] for *Pinus pinaster* cones, the cone opening and closing mechanism can be attributed to the self-bending of their scales, which undergo three states of humidity-driven deformation in terms of Föppl–von Kármán plate theory [42]. Based on three other reports [29,33,35], it may be concluded that it is moisture and the shape and size of cells that trigger opening and closing of cones.

Loss of moisture in the course of drying causes changes in the shape of the treated material [43]. The process of seed extraction involves the contraction of cell walls into the space previously occupied by water and a decrease in the volume of the material [44]. In contrast to other conifer species (spruce or pine), larch cones do not open sufficiently to release seeds freely even in very dry air. The scale structure and opening mechanism for *Pinus radiata* cones were described in detail by Dawson et al. [35], who identified two types of scales growing from the main body of the cone, with the larger ones responding to changes in relative humidity. Therefore, the crucial issue in larch seed extraction is to stimulate cone opening by alternating seed drying and moistening [20], which leads to gradual seed displacement from between the scales.

Larch cones may open to a greater or lesser extent or close depending on air humidity [1], but in the literature there is a dearth of information about the opening of *Larix* cones.

In this study, the opening angle of larch scales, defined by the aforementioned three points, increased with decreasing moisture content in the cones.

In the course of four-day seed extraction, the greatest increment in the opening angle was observed on day 1 for scales in the middle cone segment (by approx. 39°), followed by those at the base (by approx. 33°) and at the apex (by approx. 30°). The largest mean increment was found for scales in the middle cone segment. It was calculated that at the end of the extraction process, the scale opening angle ranged from 140° to 145° at a moisture content of 5% to 10%. For larch, the maximum values of the scale opening angle were much higher than those obtained by Bae and Kim [29], who differentiated between the right (120.7°) and left (111.6°) bracts of *Pinus* cones. However, these figures cannot be directly compared due to differences in the angle measurement methodology. The values obtained for larch are close to the maximum angles (approx. 145°) reported by Reyssat and Mahadevan [36] for *Pinus coulteri*.

In view of the finding that neither the scale position in the cone nor the process duration (for various hours on subsequent days) had a significant impact on the scale opening angle, it seems reasonable to shorten the seed extraction process, for example, from four to three days. The yield should be monitored, and if it no longer increases, the extraction process can be terminated.

The initial moisture content in larch scales increased, while the final content decreased, with each day of the process. Cone moistening caused scale closure at the beginning of each day (Figure 3). In the literature there are insufficient data on the number and duration of cone drying and moistening steps needed to maximize seed yield. It is known that an hour-long cone immersion in water is inadvisable due to the swelling of seeds (which must be then promptly sown) [1]. In another study (forthcoming), the authors reported the effects of the number and duration of seed extraction and cone moistening steps on the yield of larch seeds of first class quality. It was found that three 8 h seed extraction steps with two 10 min water immersion treatments in between led to a 59% yield (seeds obtained as compared to the overall number of seeds in the cone).

As reported by, inter alia, Tyszkiewicz [1,20], Bae and Kim [29], Fahn and Werker [30], Bar-On et al. [31], and Reyssat and Mahadevan [36] for cones of *Pinus* or other trees, the structural tissue responds to moisture changes, which trigger the gradual opening of tightly closed cones. The mechanism of cone opening or closing associated with the loss or gain of moisture, respectively, is based on the two-layer structure of cells that transform with changes in moisture content. In the outer layer of the tissue, thick-walled cells respond by expanding in the longitudinal direction when exposed to moisture increase [35,45] and by shrinking in response to drying, while the simultaneous reaction of cells in the inner layer is feebler.

The microscopic structure of scales revealed cells differing in terms of their wall thickness. Larch scales consist of three types of cells: small, medium-sized, and large. During seed extraction, the cells changed their dimensions, due to which they wrinkled and deflected from the cone rachis [4] to release seeds [37]. This is associated with the close adjoining of epidermal cells on the outer side (Figure 6a), where the cell lumen is much smaller than in the case of inner epidermal cells (Figure 6d). This may be related to the wall thickness of medium-sized cells, which was not affected by loss of moisture to the same extent as the wall thickness of large cells (a decrease of approx. 57%). Furthermore, as reported by Aniszewska [34], between three and five layers of cells may be identified on cross-sections of spruce cones, depending on the scale position. Near the stem, the small, medium-sized, and large cells have diameters of $56.7\ \mu\text{m}$, $32.3\ \mu\text{m}$, and $15.3\ \mu\text{m}$, respectively.

Cells in *Pinus* scales with a moisture content of 20% had thicker cell walls and smaller lumina than those in scales with a lower moisture content. A study on the thickness of cell walls in larch wood reported 20–23 μm for wood samples dried to a moisture content of 5%–15% [46], which is consistent with the results obtained in this paper.

The outer and inner structures of cones scales are different. In the middle segment of the outer surface (5), scales with the highest moisture content revealed short projections, which decreased in length and width with the degree of moisture loss from the cone. In this region (5), scales with the lowest moisture content featured pore-like structures, which probably enabled the elimination of excess water from the cones [4]. The projections were situated on the outer side of scales with all studied levels of moisture content. The proximal part of the scale (6) exhibited hairs, whose length increased with the moisture content of the cone. Hairs (6) on scales with a moisture content of 5% had the greatest width at the base and adhered to the scale surface, while hairs (6) on scales with a moisture content of 20% and 10% formed a bristle. *Pseudotsuga menziesii* and *Abies alba* have scales of a similar structure between seeds [47].

Resin particles were found on scales with the highest moisture content, while scales with lower moisture content values did not reveal such particles; in the latter case they tended to come off, which indicates that the first by-product of seed extraction from conifer cones is dried resin (colophony) [1].

Studies show that the seed extraction process does not have to be conducted over four days since three days with two moistening treatments in between is sufficient. On the last day, the change in the opening angle is lower than that on the preceding days, while moisture content does not decrease below the level obtained on day 3.

5. Conclusions

The opening angle of larch scales increased with decreasing moisture content in the cones. The greatest increment in the opening angle was observed on the first day of seed extraction (on average 34° for the three types of scales). The largest mean opening angle increment was found for scales in the middle segments of the studied cones; the largest mean opening angle was 145.99° .

The size and thickness of cell walls in scales is determined by the moisture content of the cones: the higher it is, the thicker the cell walls (up to the fiber saturation point of approx. 30%). Conversely, the lower the moisture content, the larger the cell lumen. The thickest walls were found in the inner epidermal cells ($9.458\ \mu\text{m}$), and the thinnest walls in vascular bundle cells ($3.313\ \mu\text{m}$). In turn, the greatest change in wall thickness was identified in the large cells found in the middle scale segment, with the mean difference between dry and moist states amounting to $4.708\ \mu\text{m}$. The mean wall thickness of large cells in scales with a 5% moisture content amounted to 42% of that in scales with a 20% moisture content.

The outer and inner scale structures differed depending on moisture content. The greatest differences in the surface structure of scales with 5%, 10%, and 20% moisture contents could be observed on the outer side. On scales with a 20% moisture content, the hair-like cells were elongated and strongly deflected outwards; in contrast, on scales with a 10% moisture content, there were fewer such cells, which exhibited constrictions and leant towards the cone rachis. On scales with a 5% moisture content, the hairs were short and adhered to the outer scale surface. The inner sides of scales with moisture contents of 5%, 10%, and 20% differed significantly at the scale margin outside of the wing area. Resin particles were found on both sides of scales with a 20% moisture content but not on scales with a 5% moisture content.

The results of our investigation of the scale opening kinematics and the cellular structure of larch cones depending on the cone moisture content and the duration and stage of seed extraction may contribute to determining the conditions for the automation of this process.

Author Contributions: Conceptualization, E.T. and M.A.; methodology, E.T. and M.A.; formal analysis, E.T.; writing—original draft preparation, E.T.; writing—review and editing, M.A. and A.G.; supervision M.A. and A.G. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Not applicable.

Acknowledgments: The authors would like to express their gratitude to the Department of Silviculture and Genetics of Forest Trees in Sękocin Stary for enabling cellular analysis of scales with a 5% moisture content, as well as to Marcin Klisz, for his valuable comments.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Tyszkiewicz, S. *Wyłuszczenie Nasion Leśnych [Forest Seed Extraction]*; Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne: Warszawa, Poland, 1951.
2. Rohmeder, E. *Das Saatgut in der Forstwirtschaft*; 57 Übersichten, 142 Abb.; Verlag Paul Parey: Berlin, Germany, 1972; ISBN 978-3-490-06916-0.
3. Puritch, G.S. *Cone Production in Conifers. A Review of the Literature and Evaluation of Research Needs*; Pacific Forest Research Centre, Canadian Forestry Service: Victoria, BC, Canada, 1977.
4. Aniszewska, M. *Dynamics of the Process of Seed Extraction from Pine Cones Pinus Silvestris L. Performed in One Two-Steps*; Rozprawy Naukowe i Monografie, Wydawnictwo SGGW: Warszawa, Poland, 2012.
5. Calama, R.; Montero, G. Cone and Seed Production from Stone Pine (*Pinus pinea* L.) Stands in Central Range (Spain). *Eur. J. For. Res.* **2007**, *126*, 23–35. [[CrossRef](#)]
6. Owens, J.N.; Kittirat, T.; Mahalovich, M.F. Whitebark Pine (*Pinus albicaulis* Engelm.) Seed Production in Natural Stands. *For. Ecol. Manag.* **2008**, *255*, 803–809. [[CrossRef](#)]
7. Kantorowicz, W. Half a Century of Seed Years in Major Tree Species of Poland. *Silvae Genet.* **2000**, *49*, 245–249.
8. Broome, A.; Hendry, S.; Peace, A. Annual and Spatial Variation in Coning Shown by the Forest Condition Monitoring Programme Data for Norway Spruce, Sitka Spruce and Scots Pine in Britain. *For. Int. J. For. Res.* **2007**, *80*, 17–28. [[CrossRef](#)]
9. Chałupka, W.; Barzdajn, W.; Blonkowski, S.; Burczyk, J.; Fonder, W.; Gładzki, T.; Gryzłó, Z.; Kacprzak, P.; Kowalczyk, J.; Kozioł, C.; et al. *Program of Conserving Forest Genetic Resources and Breeding of Trees in Poland for the Years 2011–2035*; The State Forests Information Centre: Warszawa, Poland, 2011; ISBN 978-83-61633-61-7.
10. Fonder, W.; Matras, J.; Załęski, A. *Leśna Baza Nasienna w Polsce [The Forest Seed Base in Poland]*; Centrum Informacyjne Lasów Państwowych: Warszawa, Poland, 2007; ISBN 978-83-89744-60-4.
11. Skrzypczyńska, M.; Furgała, E. The Qualitative Estimation of Insects Inhabiting European Larch *Larix decidua* Mill. Cones Originating from the Forest District Myślenice (the Kraków Forest Region). *Acta Agr. Silv.* **2015**, *61*–70. *Acta Agrar. Silvestria Ser. Silvestris* **2015**, *53*, 61–70.
12. Klisz, M.; Ukalska, J.; Koprowski, M.; Tereba, A.; Puchałka, R.; Przybylski, P.; Jastrzębowski, S.; Nabais, C. Effect of Provenance and Climate on Intra-Annual Density Fluctuations of Norway Spruce *Picea abies* (L.) Karst. in Poland. *Agric. For. Meteorol.* **2019**, *269*–270, 145–156. [[CrossRef](#)]
13. Saulnier, M.; Corona, C.; Stoffel, M.; Guibal, F.; Edouard, J.-L. Climate-Growth Relationships in a *Larix decidua* Mill. Network in the French Alps. *Sci. Total Environ.* **2019**, *664*, 554–566. [[CrossRef](#)]
14. Gendek, A.; Aniszewska, M.; Mala'ák, J.; Velebil, J. Evaluation of Selected Physical and Mechanical Properties of Briquettes Produced from Cones of Three Coniferous Tree Species. *Biomass Bioenergy* **2018**, *117*, 173–179. [[CrossRef](#)]
15. Aniszewska, M.; Gendek, A.; Hýsek, Š.; Mala'ák, J.; Velebil, J.; Tamelová, B. Changes in the Composition and Surface Properties of Torrefied Conifer Cones. *Materials* **2020**, *13*, 5660. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
16. Mala'ák, J.; Gendek, A.; Aniszewska, M.; Velebil, J. Emissions from Combustion of Renewable Solid Biofuels from Coniferous Tree Cones. *Fuel* **2020**, *276*, 118001. [[CrossRef](#)]
17. Bożym, M.; Gendek, A.; Siemiątkowski, G.; Aniszewska, M.; Mala'ák, J. Assessment of the Composition of Forest Waste in Terms of Its Further Use. *Materials* **2021**, *14*, 973. [[CrossRef](#)]
18. Aniszewska, M.; Gendek, A.; Drożdżek, M.; Bożym, M.; Wojdalski, J. Physicochemical Properties of Seed Extraction Residues and Their Potential Uses in Energy Production. *Rocz. Ochr. Środowiska* **2017**, *19*, 302–334.
19. Załęski, A. Comparison of Methods of Seed Extraction by Drying Cones and Mechanical One of European Larch Seeds *Larix decidua* Mill. *Pr. Inst. Badaw. Lesn. Ser. A* **2002**, *3*, 5–17.
20. Tyszkiewicz, S. *Nasiennictwo Leśne [Forestry Seed]*; Instytut Badawczy Leśnictwa: Warszawa, Poland, 1949.
21. Suszka, B. *Nowe Technologie i Techniki w Nasiennictwie Leśnym [New Technologies and Techniques in Forest Seed]*; Bogucki Wydawnictwo Naukowe S.C.: Warszawa, Poland, 2000; ISBN 83-88163-14-0.
22. Aniszewska, M. Multiphase Process of European Larch *Larix decidua* Mill. Seed Extraction: A Case of Czarna Białostocka. *For. Res. Pap.* **2008**, *69*, 155–163.

23. Tylek, P.; Walczyk, J. Drum de-winger of the seeds by using dry and wet methods. *Zesz. Probl. Postępów Nauk Rol.* **2009**, *543*, 365–370.
24. Sarnowska, G.; Więsik, J. Wyłuszcarnia w Czarnej Białostockiej. Część II. Proces Wyłuszczenia i Obróbki Nasion [Extraction Plant in Czarna Białostocka. Part II. The Process of Seed Extraction and Treatment]. *Przegląd Tech. Rol. Lesn.* **1997**, *12*, 8–10.
25. Załęski, A. Technologie i Sprzęt Stosowane w Wyłuszczeniu, Oczyszczaniu, Suszeniu i Pakowaniu Nasion [Technologies and Equipment Used in Seed Extraction, Cleaning, Drying and Packing]. *Postępy Tech. W Lesn.* **2002**, *82*, 21–33.
26. Tyszkiewicz, S.; Tomanek, J. *Tablice Psychrometryczne Do Użytku w Wyłuszczeniach Nasion Sosny i Świerka [Psychrometric Tables for Use in Cone Kilns for Pine and Spruce];* Seria B, Nr 9.; Instytut Badawczy Leśnictwa; Wydawnictwa Pomocnicze i Techniczne Gospodarcze: Kraków, Poland, 1946.
27. Aniszewska, M.; Zychowicz, W.; Gendek, A. The Effectiveness of Short-Term Microwave Irradiation on the Process of Seed Extraction from Scots Pine Cones (*Pinus sylvestris* L.). *IForest-Biogeosci. For.* **2020**, *13*, 73. [[CrossRef](#)]
28. Aniszewska, M.; Słowiński, K. Effects of Microwave Irradiation by Means of a Horn Antenna in the Process of Seed Extraction on Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Cone Moisture Content and Seed Germination Energy and Capacity. *Eur. J. For. Res.* **2016**, *135*, 633–642. [[CrossRef](#)]
29. Bae, H.; Kim, J. Functional Principles of Morphological and Anatomical Structures in Pinecones. *Plants* **2020**, *9*, 1343. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
30. Fahn, A.; Werker, E. Chapter 4-Anatomical Mechanisms of seed dispersal. In *Seed Biology*; Kozłowski, T.T., Ed.; Academic Press: New York, NY, USA; London, UK, 1972; pp. 151–221. ISBN 978-0-12-424301-9.
31. Bar-On, B.; Sui, X.; Livanov, K.; Achrai, B.; Kalfon-Cohen, E.; Wiesel, E.; Daniel Wagner, H. Structural Origins of Morphing in Plant Tissues. *Appl. Phys. Lett.* **2014**, *105*, 033703. [[CrossRef](#)]
32. Song, K.; Yeom, E.; Seo, S.-J.; Kim, K.; Kim, H.; Lim, J.-H.; Joon Lee, S. Journey of Water in Pine Cones. *Sci. Rep.* **2015**, *5*, 9963. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
33. Aniszewska, M. Analysis of Opening Cones of Selected Coniferous Trees. *Ann. Wars. Univ. Life Sci.-SGGW Agric.* **2010**, *55*, 57–64.
34. Aniszewska, M. Anatomical structure of spruce cones. *Sylvan* **2002**, *146*, 85–91.
35. Dawson, C.; Vincent, J.F.V.; Rocca, A.-M. How Pine Cones Open. *Nature* **1997**, *390*, 668. [[CrossRef](#)]
36. Reyssat, E.; Mahadevan, L. Hygromorphs: From Pine Cones to Biomimetic Bilayers. *J. R. Soc. Interface* **2009**, *6*, 951–957. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
37. Le Duigou, A.; Castro, M. Evaluation of Force Generation Mechanisms in Natural, Passive Hydraulic Actuators. *Sci. Rep.* **2016**, *6*, 18105. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
38. Aniszewska, M.; Olejnikowski, J. Noż Do Cięcia Szyszek, Podstawa Do Noża, Zestaw Oraz Sposób Cięcia Szyszek [A Knife for Cutting Cones, a Knife Base, a Set and a Method for Cutting Cones]. Patent Application: P.436963 [WIPO ST 10/C PL436966], 15 February 2020.
39. Aniszewska, M.; Stadnik, S.; Gendek, A. Variability of Cones and Scale Surface Area of European Larch (*Larix decidua* Mill.). *For. Res. Pap.* **2017**, *78*, 198–209. [[CrossRef](#)]
40. Barthlott, W.; Mail, M.; Bhushan, B.; Koch, K. Plant Surfaces: Structures and Functions for Biomimetic Innovations. *Nano-Micro Lett.* **2017**, *9*, 23. [[CrossRef](#)]
41. Lin, S.; Min, X.Y.; Li, Q.; Huang, X.; Zhou, S. On the Shape Transformation of Cone Scales. *Soft Matter.* **2016**, *12*, 9797–9802. [[CrossRef](#)]
42. Mansfield, E.H. *The Bending and Stretching of Plates*, 2nd ed.; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 1989; ISBN 978-0-521-33304-7.
43. Górnicki, K.; Kaleta, A. Modelling Convection Drying of Blanched Parsley Root Slices. *Biosyst. Eng.* **2007**, *97*, 51–59. [[CrossRef](#)]
44. Wu, X.-F.; Zhang, M.; Li, Z. Dehydration Modeling of Cordyceps Militaris in Mid-Infrared-Assisted Convection Drying System: Using Low-Field Nuclear Magnetic Resonance with the Aid of ELM and PLSR. *Dry. Technol.* **2019**, *37*, 2072–2086. [[CrossRef](#)]
45. Harlow, W.M.; Côté, W.A.; Day, A.C. The Opening Mechanism of Pine Cone Scales. *J. For.* **1964**, *62*, 538–540. [[CrossRef](#)]
46. Klisz, M. Genetic Aspects of Wood Properties of European Larch (*Larix decidua* Mill.). Ph.D. Thesis, Instytut Badawczy Leśnictwa, Sękocin Stary, Poland, 2011.
47. Aniszewska, M.; Gendek, A.; Śliwińska, J. Variability of Silver Fir (*Abies alba* Mill.) Cones–Variability Structure of Scale Surface Area. *For. Res. Pap.* **2017**, *78*, 5–13. [[CrossRef](#)]

10. Oświadczenia współautorów artykułów naukowych

Warszawa, dn. 8.12.2022

Imię i nazwisko

Monika Aniszewska

Afiliacja

Katedra Inżynierii Biosystemów

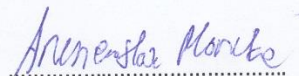
Instytut Inżynierii Mechanicznej

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

**Przewodniczący Rady Dyscypliny
Inżynierii Mechanicznej
Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego
w Warszawie**

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy *Tulska E., Aniszewska M. 2022. Comparison of thermal and thermomechanical methods of seed extraction from larch cones based on two case studies. International Agrophysics 36(3), 197-206, doi: 10.31545/intagr/150734* mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na pomocy w opracowaniu koncepcji badań i wykonaniu korekty artykułu przed i po recenzjach, co stanowi 15 % całej pracy.



Podpis

Warszawa, dn. 08.12.2022

Imię i nazwisko

Monika Aniszewska

Afiliacja

Katedra Inżynierii Biosystemów

Instytut Inżynierii Mechanicznej

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

**Przewodniczący Rady Dyscypliny
Inżynierii Mechanicznej
Szkoły Główny Gospodarstwa Wiejskiego
w Warszawie**

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy *Tulska E., Aniszewska M., Zychowicz W. 2022. Optimization of the process of seed extraction from the Larix decidua Mill. cones including evaluation of seed quantity and quality. Scientific Reports 12:18227, doi: 10.1038/s41598-022-22942-2* mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na pomocy w opracowaniu koncepcji badań, metodyki badań, nadzorowaniu badań oraz edycji całego artykułu przed i po ocenach recenzentów, co stanowi 10 % całej pracy.

Aniszewska Monika

Podpis

Warszawa, dn. 06.12.2022

Imię i nazwisko

Witold Zychowicz

Afiliacja

Katedra Inżynierii Biosystemów

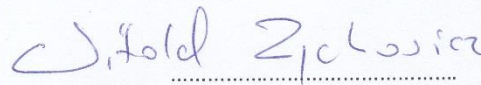
Instytut Inżynierii Mechanicznej

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

**Przewodniczący Rady Dyscypliny
Inżynierii Mechanicznej
Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego
w Warszawie**

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy *Tulska E., Aniszewska M., Zychowicz W. 2022. Optimization of the process of seed extraction from the Larix decidua Mill. cones including evaluation of seed quantity and quality. Scientific Reports 12:18227, doi: 10.1038/s41598-022-22942-2*, mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na recenzji przygotowanego artykułu, edycji przed i po ocenie recenzentów (artykuł wysyłano do kilku czasopism) oraz nadzorowaniu procesu, co stanowiło łącznie 10 % całej pracy.



.....
Podpis

Warszawa, dn. 08.12.2022

Imię i nazwisko

Monika Aniszewska

Afilacja

Katedra Inżynierii Biosystemów

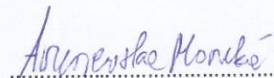
Instytut Inżynierii Mechanicznej

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

**Przewodniczący Rady Dyscypliny
Inżynierii Mechanicznej
Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego
w Warszawie**

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy *Tulska E., Aniszewska M., Gendek A. 2021. The Kinematics of Scale Deflection in the Course of Multi-Step Seed Extraction from European Larch Cones (Larix decidua Mill.) Taking into Account Their Cellular Structure. Materials 14, 491, doi: 10.3390/ma14174913*, mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na pomocy w opracowaniu koncepcji badań, metodyki oraz nadzorze nad wykonywanymi badaniami, co stanowi 10 % całej pracy.



Podpis

Warszawa, dn. 06.12.2022

Imię i nazwisko

Arkadiusz Gendek

Afiliacja

Katedra Inżynierii Biosystemów

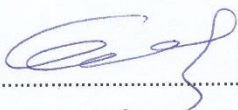
Instytut Inżynierii Mechanicznej

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

**Przewodniczący Rady Dyscypliny
Inżynierii Mechanicznej
Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego
w Warszawie**

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy *Tulska E., Aniszewska M., Gendek A. 2021. The Kinematics of Scale Deflection in the Course of Multi-Step Seed Extraction from European Larch Cones (Larix decidua Mill.) Taking into Account Their Cellular Structure. Materials 14, 491 (doi: 10.3390/ma14174913)* mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na recenzji przygotowanego artykułu, redakcji przed i po ocenie recenzentów oraz bezpośrednim nadzorze procesu publikacyjnego, co stanowiło łącznie 10 % całej pracy.



.....
Podpis

11. Wniosek patentowy na wynalazek



URZĄD PATENTOWY
RZECZYPOSPOLITEJ POLSKIEJ

al. Niepodległości 188/192
00-950 Warszawa, skr. poczt. 203
tel.: (+48) 22 579 05 55 | fax: (+48) 22 579 00 01
e-mail: kontakt@uprp.gov.pl | www.uprp.gov.pl

Departament Biotechnologii i Chemii

Warszawa, 06.10.2022r.

Nasz znak: DB.P.437143.5.echm

Wasz znak: PK/8012/AR

DECYZJA

Na podstawie art. 24 i art. 52 ustawy z dnia 30 czerwca 2000r. Prawo własności przemysłowej (Dz. U. z 2021 r. poz. 324) Urząd Patentowy RP po rozpatrzeniu zgłoszenia oznaczonego numerem **P.437143** dokonanego w dniu **2021-02-26** udziela na rzecz:

SZKOŁA GŁÓWNA GOSPODARSTWA WIEJSKIEGO W WARSZAWIE, Warszawa, Polska

PATENTU

na wynalazek(i) pt.:

Urządzenie do wytrząsania nasion z szyszek, oraz zastosowanie urządzenia do wytrząsania nasion, zwłaszcza z rodzaju *Larix albo Pinus*

pod warunkiem uiszczenia opłaty w wysokości **480zł.** za I okres ochrony wynalazku(ów) rozpoczynający się w dniu **2021-02-26** i obejmujący 1-3 rok ochrony*.

Podstawa prawna: art. 224 ust. 1 ustawy Prawo własności przemysłowej oraz pkt II ppkt 1 tabeli opłat stanowiącej załącznik nr 1 do rozporządzenia Rady Ministrów z 8 września 2016 r. zmieniającego rozporządzenie w sprawie opłat związanych z ochroną wynalazków, wzorów użytkowych, wzorów przemysłowych, znaków towarowych, oznaczeń geograficznych i topografii układów scalonych (Dz. U. z 2001 r. Nr 90, poz. 1000, z 2004 r. Nr 35, poz. 309, z 2008 r. Nr 41, poz. 241 oraz z 2016 r. poz. 1623).

Urząd Patentowy RP wzywa do wniesienia tej opłaty w **ciągu trzech miesięcy od dnia doręczenia decyzji.**

W razie nieuiszczenia wskazanej opłaty w wyznaczonym terminie Urząd Patentowy RP, na podstawie art. 52 ust. 2 ustawy Prawo własności przemysłowej stwierdzi wygaśnięcie decyzji o udzieleniu patentu.

Od niniejszej decyzji stronie przysługuje wniosek o ponowne rozpatrzenie sprawy przez Urząd Patentowy RP w terminie dwóch miesięcy od dnia jej doręczenia. Opłata za wniosek o ponowne rozpatrzenie sprawy wynosi 100 złotych i jest uiszczana na konto Urzędu. Jeżeli strona nie chce skorzystać z prawa do wniesienia wniosku o ponowne rozpatrzenie sprawy, może wnieść za pośrednictwem Urzędu skargę do Wojewódzkiego Sądu Administracyjnego w Warszawie w terminie 30 dni od dnia doręczenia stronie przedmiotowej decyzji. Opłata za wpis od skargi wynosi 1000 złotych i jest uiszczana na konto Sądu. Strona może ubiegać się na podstawie przepisów ustawy Prawo o postępowaniu przed sądami administracyjnymi o zwolnienie od kosztów sądowych albo o przyznanie prawa pomocy.

Na podstawie art. 227 ustawy Prawo własności przemysłowej oraz pkt I ppkt 12 powołanej tabeli opłat Urząd Patentowy RP wzywa do wniesienia w terminie trzech miesięcy opłaty w wysokości **140zł** za publikację o udzieleniu patentu.

Otrzymuje(a):

rzecz. pat. Anna Rożkowicz
WTS RZECZNICZY PATENTOWI - WITEK,
ŚNIEŻKO I PARTNERZY
ul. R. Weigla
12 53-114
Wrocław

Ewa Chmielewska
Ekspert

/podpisano kwalifikowanym podpisem elektronicznym/

Pismo wydane w formie dokumentu elektronicznego

Urządzenie do wytrząsania nasion z szyszek, oraz zastosowanie urządzenia do wytrząsania nasion, zwłaszcza z rodzaju *Larix* albo *Pinus*

5

Przedmiotem wynalazku jest bębnowe urządzenie o małej pojemności służące do wytrząsania nasion z szyszek różnych gatunków drzew leśnych, umożliwiające pozyskanie nasion z małych partii otwierających się szyszek. Przedmiotem wynalazku jest również zastosowanie urządzenia do wytrząsania nasion. Rozwiązanie to znajdzie zastosowanie przede wszystkim w stacjach kontroli (SKN) i stacji oceny nasion (SON), prowadzących badania jakości i żywotności nasion drzew leśnych w całej Polsce oraz w wyluszczeniach po procesie łuszczenia lub leśnictwach w celu wstępnej oceny urodzaju nasion w szyszkach.

10

Urządzenie zostało wytworzone na potrzeby badań laboratoryjnych umożliwiających wytrząsanie nasion z szyszek modrzewia polskiego i europejskiego (*Larix polonica* i *deacidua* Mill.) i trudno otwierających się szyszek sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.), z powodu braku w obecnym stanie urządzeń stosowanych do oddzielania nasion z niewielkich partii szyszek.

15

Szyszki gatunku *Larix* wyluszcza się trudniej niż szyszki innych gatunków drzew iglastych. Jednym ze sposobów łuszczenia jest sposób ciepłno-mechaniczny polegający na suszeniu szyszek, a następnie kruszeniu łusek w celu wydobycia nasion. Ten sposób łuszczenia może powodować uszkodzenie nasion, a przez to uniemożliwiać długookresowe przechowywanie nasion w chłodniach. Drugim sposobem jest łuszczenie cieplne (fazowe) z nawilżaniem. Łuski szyszek pod wpływem zmian wilgotności odchylają się i zamykają, co powoduje tzw. ruch łuski, umożliwiając wypchnięcie nasiona i swobodne wysunięcie się spod łuski. Ze względu na potrzebę sztucznego wytwarzania zmian wilgotności szyszek, poddaje się je działaniu naprzemiennie dwóch zabiegów (etapów): suszenia oraz nawilżania (spryskiwania lub moczenia). Użycie urządzenia stanowiącego przedmiot wynalazku pomiędzy tymi dwoma etapami umożliwia pozyskanie większej liczby nasion, a co za tym idzie zwiększenia wydajności wyluszczenia nasion z szyszek tego gatunku, co w przeszłości było powodem stosowania sposobu ciepłno-mechanicznego do łuszczenia szyszek modrzewia.

25

30

PK/8012/AR

Na rynku znane są urządzenia takie jak wytrząsacze otwartych szyszek składających się z kosza zasypowego oraz perforowanego bębna wytrząsającego z przenośnikami, który posiada możliwość kąta nachylenia położenia bębna względem płaszczyzny, przeznaczone głównie do szyszek jodły (separator SNS-2 lub separator SNS; produkcji OTL Jarocin) lub urządzenia firm BCC, Nomeko przeznaczone do wytrząsania nasion z dużych partii szyszek sosny, świerka czy modrzewia. W przemyśle leśnym znane są urządzenia przemysłowe do wyłuszczenia nasion o pojemności bębna powyżej 60 litrów (BCC Wet Dewinger and Seed Extractor 800). Pozostałe dostępne na rynku urządzenia wyłuszczające przeznaczone są do znacznie większej liczby szyszek 300 l (BCC Wet Dewinger & Seed Extractor 1300).

- 10 W publikacji naukowej „*Analysis of the Sieve Unit Inclination Angle in the Cleaning Process of Oat Grain in a Rotary Cleaning Device*” (Processes 2020, 8, 346), opisano rotacyjne urządzenie do rozdziału i oczyszczania nasion owsa. Urządzenie zawiera nieruchomą ramę, ruchomą ramę, segment drobnych zanieczyszczeń, segment drobnego ziarna, segment grubego ziarna, pojemnik wylotowy, wskaźnik kąta nachylenia bębna sitowego, lej nasypowy, dmuchawę, 15 zawór obrotowy segmentu drobnych zanieczyszczeń, zawór obrotowy ziarna drobnego, zawór obrotowy segmentu pełnego ziarna, zamknięcie zaworu wylotu mieszanki.

Urządzenia zaprojektowane specjalnie do łuszczenia i wytrząsania szyszek modrzewia np. młynek do wyłuszczenia z szyszek niewysuszonych typu Nellco-Liliput (produkcji czeskiej), wyłuszczarka mechaniczna TD (Tyszkiewicz-Drahal) czy wyłuszczarko-przesiewacz L 113 20 stosowany do dziś w wyłuszczarniach w Polsce, mogą powodować mikropęknięcia okrywy nasiennej nasion pełnych i stosowane są do dużych partii szyszek.

Z rosyjskiego zgłoszenia patentowego RU131935U1 znane jest 1. urządzenie do odwadniania, czyszczenia i sortowania nasion leśnych, składające się z ramy, na której jest zainstalowany lej załadowniczy, odwadniacz, kanał pionowy, wentylator, komora osadowa, bęben przesiewający 25 i urządzenie do jego czyszczenia, na zewnątrz bębna przesiewającego równoległe do jego osi podłużnej.

Z polskiego patentu PAT.119590 znane jest urządzenie do wytrząsania szyszek, odskrzydlania i oczyszczania oraz sortowania nasion, przeznaczonego szczególnie do nasion sosny zwyczajnej. Zawiera ono bęben obrotowy oraz zespół sit o różnej wielkości oczek, 30 wprowadzanych w drgania przez mimośrodowy wibrator i zespół wyciągowy. Jego konstrukcja

PK/8012/AR

nośna jest wyposażona w górnej części w obudowę ukształtowaną do grawitacyjnego przemieszczania wytrząśniętych szyszek z bębna do pojemnika zewnętrznego za pomocą przewodu rurowego i zaopatrzona wewnątrz przewodu rurowego w odchylną zastawkę oraz w dolnej części tego przewodu rurowego w lej doprowadzający nasiona do zespołu 5 odskrzydlającego zaopatrzonego w szczotki obrotowe i elementy ściernie i komorę oczyszczonych nasion zakończoną lejem odprowadzającym odskrzydlone i oczyszczone nasiona do zespołu sit sortujących. Zespół wyciągowy stanowi wentylator połączony z silnikiem i rurowy przewód do odprowadzania zanieczyszczeń.

Problemem technicznym stawianym przed wynalazkiem jest dostarczenie urządzenia do 10 wytrząsania szyszek, zwłaszcza szyszek z rodzaju *Larix* albo *Pinus*, które umożliwiłoby wytrząsanie szyszek bez uszkodzenia okrywy nasion, a przy tym możliwe byłoby jego stosowanie do małych partii tychże nasion, przy czym możliwa byłaby także obserwacja procesu wytrząsania bez jego przerywania.

Przedmiotem wynalazku jest urządzenie bębnowe do wytrząsania nasion z szyszek drzew 15 leśnych zawierające podstawę montażową połączoną z ramą nośną, przy czym do ramy nośnej zamontowany jest silnik napędowy, zawierający wał napędowy, do którego zamontowany jest bęben roboczy, charakteryzujące się tym, że podstawa montażowa jest połączona z ramą nośną za pomocą ruchomego przegubu i podstawa montażowa zawiera śrubę regulacyjną do regulacji kąta nachylenia ramy nośnej, i bęben roboczy zawiera układ listew zbierających 20 zamontowanych wewnątrz bębna roboczego równoległe do osi wału napędowego, i bęben roboczy zawiera zaczepy do mocowania pokrywy bębna, przy czym pokrywa zawiera wziernik, skonfigurowany do obserwacji procesu roboczego.

W korzystnej realizacji wynalazku listwy zbierające są zamocowane rozłącznie do bębna.

W następnej korzystnej realizacji wynalazku listwy zbierające rozmieszczone są na 25 wewnętrznej powierzchni bębna roboczego co 120° .

W kolejnej korzystnej realizacji wynalazku wał napędowy zawiera sprzęgło gumowe.

W innej korzystnej realizacji wynalazku śruba regulacyjna jest skonfigurowana do zmiany kąta nachylenia ramy nośnej w zakresie od 0° do 40° .

PK/8012/AR

W jeszcze innej korzystnej realizacji wynalazku silnik napędowy jest skonfigurowany do regulacji prędkości obrotowej osi wału napędowego i bębna roboczego w zakresie od 15 obr·min⁻¹ do 30 obr·min⁻¹.

W następnej korzystnej realizacji wynalazku bęben roboczy zamocowany jest do wału napędowego poprzez połączenie dna bębna z kołnierzem wału ośmioma śrubami.

W innej korzystnej realizacji wynalazku sprzęgło gumowe zamocowane jest czterema śrubami do ramy nośnej.

W następnej korzystnej realizacji wynalazku podstawa montażowa zawiera otwory, skonfigurowane do przyjmowania środków mocujących do podłoża.

Innym przedmiotem wynalazku jest zastosowanie urządzenia, określonego w pierwszym przedmiocie wynalazku do wytrząsania nasion, zwłaszcza nasion z rodzaju *Larix* albo *Pinus*.

Przykład realizacji wynalazku został zobrazowany na figurach, gdzie przedstawiono na: fig. 1.

Urządzenie do wytrząsania nasion z szyszek drzew iglastych (widok z góry z płaszczyzną przekroju A-A), gdzie: 1 – bęben, 2 – rama, 3 – silnik, 4 – wał napędowy, 5 – śruba do regulacji kąta nachylenia, 6 – pokrywa, 7 – wziernik, 10 – zaczep pokrywy bębna, 11 – podstawa montażowa, 12 – otwór montażowy, 13 – śruba montażowa bębna z kołnierzem wału, 14 – kołnierz wału, 15 – sprzęgło gumowe, 16 – śruba montażowa sprzęgła gumowego, 17 – profil kątowy; fig. 2. Urządzenie do wytrząsania nasion z szyszek drzew iglastych (przekrój prosty osiowy wzdłużny (A-A): 1 – bęben, 2 – rama, 3 – silnik, 4 – wał napędowy, 5 – śruba do regulacji kąta nachylenia, 6 – pokrywa, 7 – wziernik, 8 – listwa zbierająca, 9 – ruchomy przegub, 10 – zaczep pokrywy bębna, 11 – podstawa montażowa, 13 – śruba montażowa bębna z kołnierzem wału, 14 – kołnierz wału, 15 – sprzęgło gumowe, 16 – śruba montażowa sprzęgła gumowego, 17 – profil kątowy; fig. 3. Urządzenie do wytrząsania nasion z szyszek drzew iglastych z otwartym bębniem (rzut aksonometryczny): 1 – bęben, 2 – rama, 3 – silnik, 5 – śruba do regulacji kąta nachylenia, 8 – listwa zbierająca, 9 – ruchomy przegub, 10 – zaczep pokrywy bębna, 11 – podstawa montażowa, 12 – otwór montażowy, 13 – śruba montażowa bębna z kołnierzem wału, 17 – profil kątowy; fig. 4. Bęben zamknięty (widok z przodu): 1 – bęben, 2 – rama, 5 – śruba do regulacji kąta nachylenia, 6 – pokrywa, 7 – wziernik, 10 – zaczep pokrywy bębna; fig. 5. Bęben otwarty (widok z przekrojem sprzęgła na wale): 1 – bęben, 2 – rama, 4 – wał napędowy, 5 – śruba do regulacji kąta nachylenia, 8 – listwa zbierająca, 10 – zaczep

PK/8012/AR

pokrywy bębna, 13 – śruba montażowa bębna z kołnierzem wału, 14 – kołnierz wału, 15 – sprzęgło gumowe, 16 – śruba montażowa sprzęgła gumowego; fig. 6. Szyszki *Larix* po wytrząsaniu w urządzeniu wg wynalazku; fig. 7. Szyszki *Pinus* po wytrząsaniu w urządzeniu wg wynalazku; fig. 8. Nasiona *Larix* ze skrzydełkami pozyskanymi w urządzeniu wg wynalazku; fig. 9. Nasiona *Pinus* ze skrzydełkami pozyskanymi w urządzeniu wg wynalazku; fig. 10. Zdjęcie urządzenia do wytrząsania nasion z szyszek drzew iglastych wg wynalazku.

Zaletą urządzenia jest możliwość pracy przy niewielkim wypełnieniu bębna (30 szyszek). Stanowi to ważną cechę urządzenia, ponieważ do stacji kontroli i oceny wysyłane są szyszki w małych ilościach stanowiące często cenny materiał genetyczny. Kolejną zaletą rozwiązania jest dowolne ustalanie czasu wytrząsania, prędkości obrotowej bębna oraz kąta jego pochylenia względem powierzchni poziomej w zależności od cech szyszek (tj. gatunku, parametrów wielkościowych, wilgotności, stopnia otwarcia, dojrzałości czy pochodzenia). Ponadto rozwiązanie wg wynalazku umożliwia pozyskanie nasion bez znacznego mechanicznego niszczenia łusek szyszek (łamania, kruszenia) (fig. 6, fig. 7), przez co uzyskana mieszanina nasion odznacza się większą czystością (fig. 8, fig 9).

Przykład

Urządzenie do wytrząsania nasion z szyszek składa się z podstawy montażowej 11 oraz części roboczej (fig. 1). Część roboczą stanowi dwuelementowa rama nośna 2, do której za pomocą połączeń śrubowych zamocowany jest silnik napędowy 3 (fig. 2). Napęd z silnika 3 na bęben roboczy 1 przekazywany jest poprzez wał napędowy 4 ze sprzęgłem gumowym 15. Bęben roboczy 1, zamocowany na końcu wału napędowego 4 do kołnierza wału 14, ma pojemność 10 litrów, średnicę $\varnothing 265$ mm i wysokość 250 mm oraz ścianki o grubości 1 mm. Podane wymiary są optymalne do przeprowadzenia procesu wytrząsania odpowiedniej objętości szyszek (ok. 150g) i do oceny nasion dla próby kontrolnej w warunkach laboratoryjnych.

Konstrukcja urządzenia umożliwia płynną zmianę kąta nachylenia jego części roboczej (osi obrotu bębna 1) względem poziomej podstawy montażowej 11 urządzenia o maksymalnie 40° do góry (fig. 10), dzięki ruchomemu przegubowi 9 (fig. 3). Regulację wykonuje się ręcznie przez obrót śruby regulacyjnej 5, umieszczonej pomiędzy profilem płaskim ramy 2 (na wylot), a równoległym do niej ramieniem profilu kąтового 17 zamocowanym na podstawie montażowej 11, gdzie rama 2 połączona jest z podstawą montażową 11 ruchomym

PK/8012/AR

przegubem 9. Zmiana kąta nachylenia części roboczej ma na celu intensywniejsze wytrząsanie poprzez opadanie szyszek na dno bębna 1 i ocieranie się jedna o drugą.

Urządzenie można zamocować do podłoża dzięki otworom 12 znajdującym się w podstawie montażowej 11 urządzenia. Dodatkową zaletą urządzenia jest łatwy demontaż i możliwość
5 przenoszenia.

Do napędu urządzenia do wytrząsania wykorzystano silnik 3, który stanowi silnik komutatorowy prądu stałego 24V z przekładnią ślimakową zasilany poprzez zasilacz prostownikowy z płynną regulacją napięcia w zakresie 12-24V i natężeniu prądu do 0-20A. Zastosowany silnik 3 umożliwia płynną regulację prędkości obrotowej bębna 1 w zakresie od
10 15 obr·min⁻¹ do 30 obr·min⁻¹. Umożliwia to przystosowanie prędkości obrotowej do gatunku, stopnia dojrzałości czy poziomu wilgotności wytrząsanych szyszek. Napęd jest przekazywany z silnika 3 do wału 4 przez sprzęgło gumowe 15 przymocowane czterema śrubami montażowymi sprzęgła gumowego do ramy nośnej 2. Na końcu wału 4 znajduje się kołnierz wału 14 przymocowany do bębna 1 za pomocą ośmiu śrub montażowych 13, co umożliwia elastyczne
15 osadzenie bębna 1. Dzięki takiemu osadzeniu wyeliminowane są wibracje podczas pracy urządzenia. Urządzenie posiada pokrywę 6, która zawiera wykonany z tworzywa sztucznego wziernik 7 (okno), umożliwiający obserwację procesu wytrząsania nasion bez jego przerywania (fig. 4). Pokrywa 6 umieszczana jest na otworze nasypowym bębna 1, do umieszczania załadunku szyszek w bębnie 1. Pokrywa 6 z wziernikiem 7 jest wieczkiem wciskany w
20 pobocznicy bębna 1, jednak w celu zabezpieczenia przed otwarciem podczas pracy urządzenia, zainstalowano zaczepy do mocowania pokrywy 10 bębna 1.

Działanie urządzenia polega na podnoszeniu i przemieszczeniu otwierających się szyszek, w trakcie ruchu obrotowego bębna 1, przez trzy wzdłużne listwy zbierające 8 rozmieszczone, co
25 120° wewnątrz bębna 1 (fig. 3). Listwy 8 stanowią profile kątowe o długości 250mm, zamocowane jednym ramieniem profilu do wewnętrznej powierzchni bębna 1. Listwy 8 to elementy wymienne, mocowane za pomocą śrub do bębna 1, mogące różnić się np. wysokością, kształtem krawędzi roboczej oraz możliwością zwiększenia ich liczby w środku bębna 1, co jednak wymaga dodatkowych badań wpływu rodzaju listew 8 na uszkodzenia nasion. Szyszki, pod własnym ciężarem, dzięki obracaniu się bębna 1 wyposażonemu w

PK/8012/AR

wewnętrzne trzy listwy 8, podnoszą się i opadają na dół urządzenia, co powoduje wysuwanie się nasion spomiędzy ich łusek.

W odróżnieniu od urządzeń dostępnych na rynku skonstruowanych w innych celach, ale używanych do wyłuszczenia, bęben 1 nie posiada otworów, a wysunięte spod łusek nasiona obracają się dalej z szyszkami nie ulegając uszkodzeniom, dotyczy to zwłaszcza nasion roślin z rodzaju *Larix* albo *Pinus*. Na figurze 6 przedstawiono szyszki z rodzaju *Larix*, a na figurze 7 szyszki z rodzaju *Pinus*. Natomiast na figurze 8 przedstawiono nasiona *Larix* uzyskane z zastosowaniem urządzenia wg wynalazku, a na figurze 9 nasiona *Pinus* uzyskane z zastosowaniem urządzenia wg wynalazku.

10 Na figurze 10 przedstawiono zdjęcie urządzenia do wytrząsania nasion z szyszek drzew iglastych wg wynalazku.

Lista oznaczeń na figurach:

- 1 – bęben,
- 15 2 – rama,
- 3 – silnik,
- 4 – wał napędowy,
- 5 – śruba do regulacji kąta nachylenia,
- 6 – pokrywa,
- 20 7 – wziernik,
- 8 – listwa zbierająca,
- 9 – ruchomy przegub,
- 10 – zaczep pokrywy bębna,
- 11 – podstawa montażowa,
- 25 12 – otwór montażowy,
- 13 – śruba montażowa bębna z kołnierzem wału,
- 14 – kołnierz wału,
- 15 – sprzęgło gumowe,
- 16 - śruba montażowa sprzęgła gumowego,
- 30 17 – profil kątowy.

Zastrzeżenia patentowe

1. Urządzenie do wytrząsania nasion z szyszek zawierające podstawę montażową połączoną z ramą nośną, przy czym do ramy nośnej zamontowany jest silnik napędowy, zawierający wał napędowy, do którego zamontowany jest bęben roboczy, znamienne tym, że podstawa montażowa (11) jest połączona z ramą nośną (2) za pomocą ruchomego przegubu (9) i podstawa montażowa (11) zawiera śrubę regulacyjną (5) do regulacji kąta nachylenia ramy nośnej (2), i bęben roboczy (1) zawiera układ listew zbierających (8) zamontowanych wewnątrz bębna roboczego (1) równoległe do osi wału napędowego (4), i bęben roboczy (1) zawiera zaczepy (10) do mocowania pokrywy (6) bębna (1), przy czym pokrywa (6) zawiera wziernik (7), skonfigurowany do obserwacji procesu roboczego.
2. Urządzenie wg zastrz. 1, znamienne tym, że listwy zbierające (8) są zamocowane rozłącznie do bębna (1).
3. Urządzenie wg zastrz. 1 albo 2, znamienne tym, że listwy zbierające (8) rozmieszczone są na wewnętrznej powierzchni bębna (1) co 120° .
4. Urządzenie wg zastrz. 1, znamienne tym, że na wale napędowym (4) osadzone jest sprzęgło gumowe (15).
5. Urządzenie wg. zastrz. 1, znamienne tym, że śruba regulacyjna (5) jest skonfigurowana do zmiany kąta nachylenia ramy (2) w zakresie od 0° do 40° .
6. Urządzenie wg zastrz. 1 albo 4, znamienne tym, że silnik napędowy (3) jest skonfigurowany do regulacji prędkości obrotowej osi wału napędowego (4) i bębna (1) w zakresie od $15 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$ do $30 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$.
7. Urządzenie wg zastrz. od 1 do 6, znamienne tym, że bęben (1) jest zamocowany do kołnierza (14) wału napędowego (4) za pomocą ośmiu śrub (13).

8. Urządzenie wg zastrz. od 1 do 7, znamienne tym, że sprzęgło gumowe (15) zamocowane jest do ramy (2) za pomocą czterech śrub (16).
9. Urządzenie wg zastrz. 1, znamienne tym, że podstawa montażowa (11) zawiera otwory (12), skonfigurowane do przyjmowania środków mocujących do podłoża.
10. Zastosowanie urządzenia, określonego w zastrzeżeniu 1., do wytrząsania nasion, zwłaszcza nasion z rodzaju *Larix* albo *Pinus*.

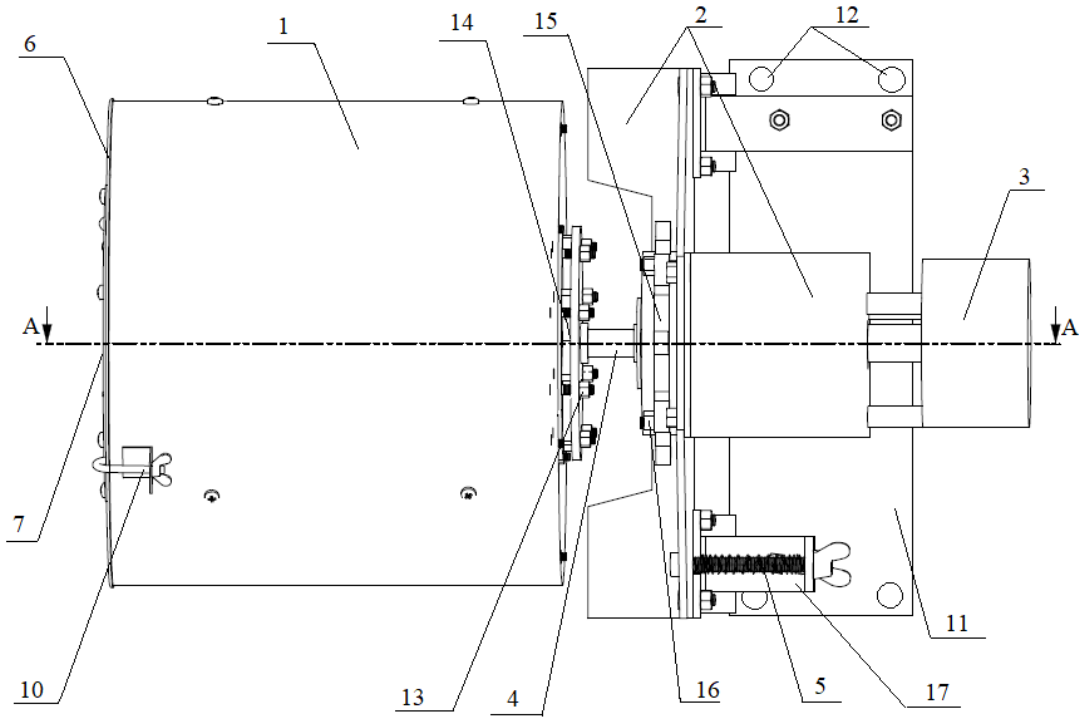


Fig. 1

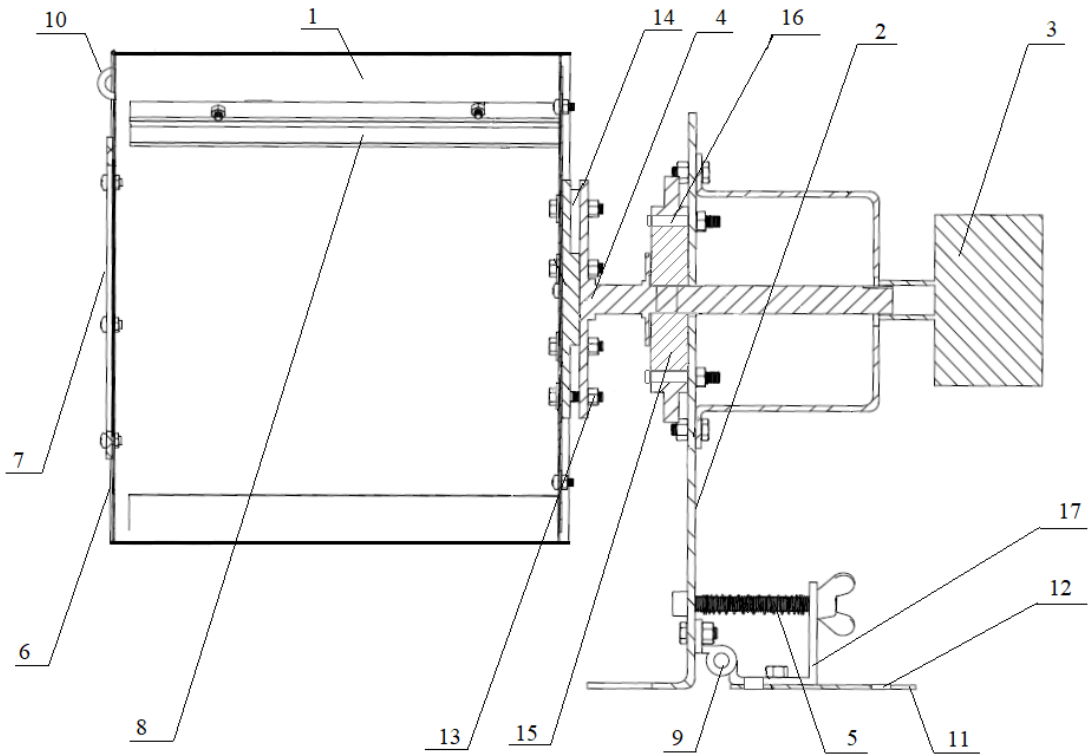


Fig. 2

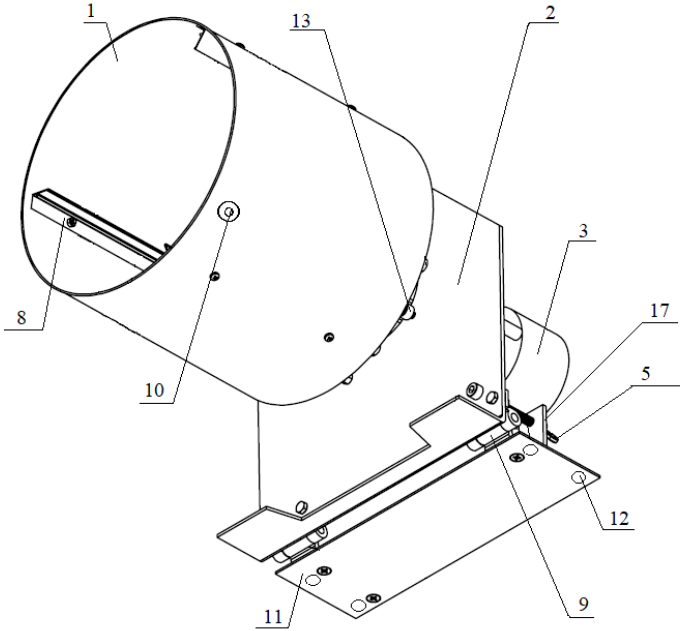


Fig. 3

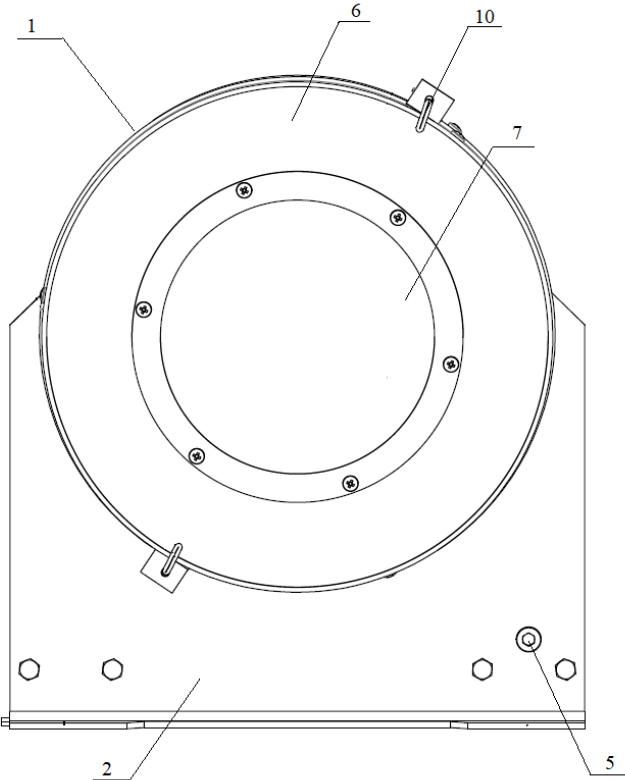


Fig. 4

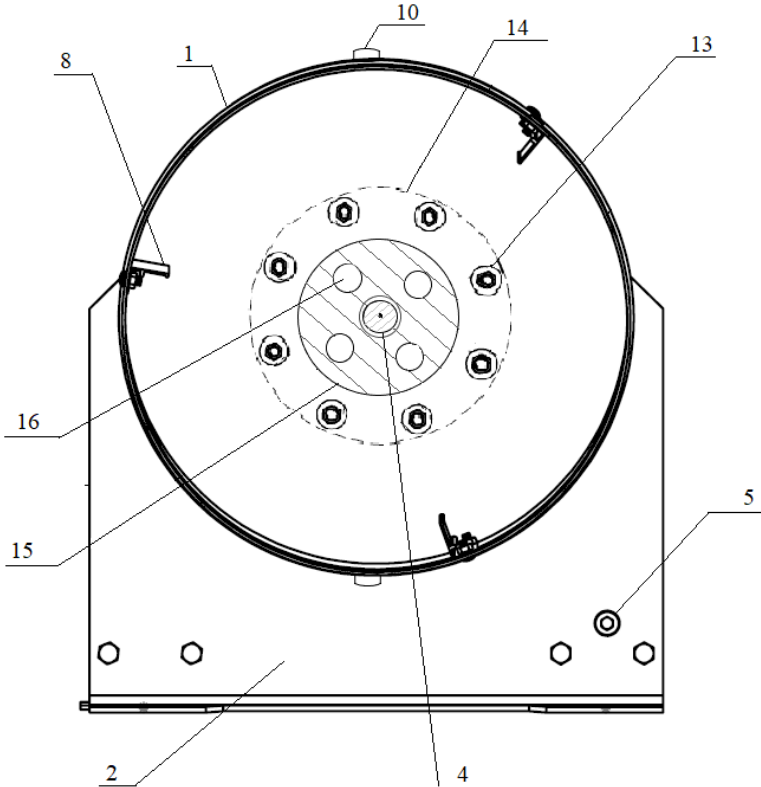


Fig. 5

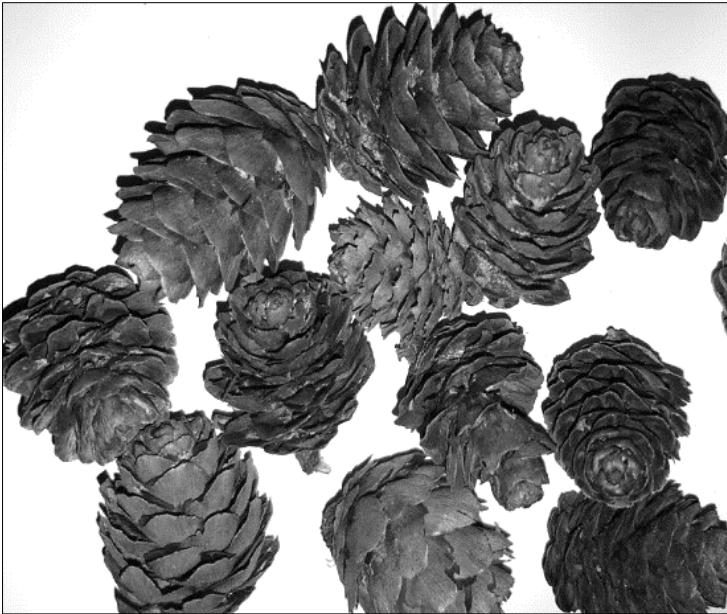


Fig. 6



Fig. 7



Fig. 8



Fig. 9

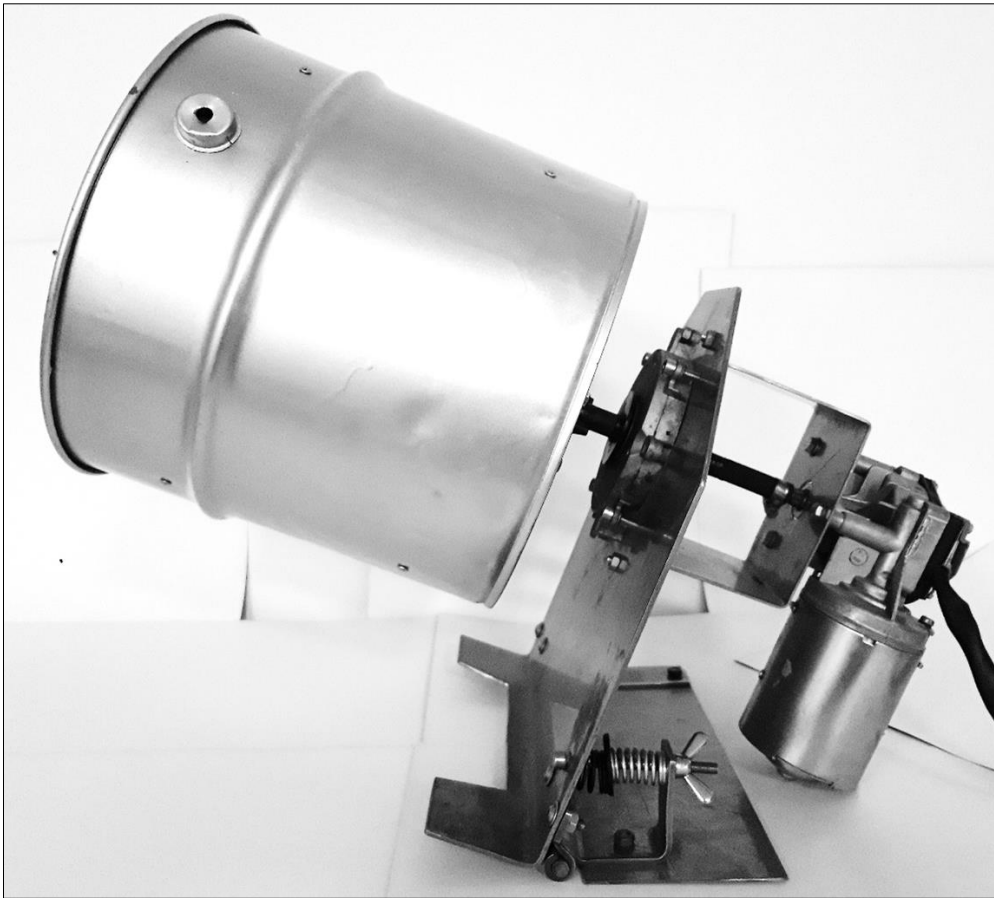


Fig. 10

Skrót opisu

Przedmiotem wynalazku jest urządzenie bębnowe do wytrząsania nasion z szyszek drzew leśnych zawierające podstawę montażową połączoną z ramą nośną, przy czym do ramy nośnej zamontowany jest silnik napędowy, zawierający wał napędowy, do którego zamontowany jest bęben roboczy, charakteryzujące się tym, że podstawa montażowa jest połączona z ramą nośną za pomocą ruchomego przegubu i podstawa montażowa zawiera śrubę regulacyjną do regulacji kąta nachylenia ramy nośnej, i bęben roboczy zawiera układ listew zbierających zamontowanych wewnątrz bębna roboczego równoległe do osi wału napędowego, i bęben roboczy zawiera zaczepy do mocowania pokrywy bębna, przy czym pokrywa zawiera wziernik, skonfigurowany do obserwacji procesu roboczego. Przedmiotem wynalazku jest również zastosowanie urządzenia, do wytrząsania nasion, zwłaszcza nasion z rodzaju *Larix* albo *Pinus*.

Wyrażam zgodę na udostępnianie mojej pracy w czytelniach Biblioteki SGGW.

.....

(czytelny podpis autora)