

ROZPRAWY NAUKOWE
505

JERZY MAJKA

**WPŁYW CZYNNIKÓW MATERIAŁOWYCH
I TECHNOLOGICZNYCH NA ZRÓŻNICOWANIE
WILGOTNOŚCI TARCICY PO SUSZENIU
JAKO MIARY JAKOŚCI SUSZENIA**



POZNAŃ 2018

WPLYW CZYNNIKÓW MATERIAŁOWYCH I TECHNOLOGICZNYCH NA ZRÓŻNICOWANIE WILGOTNOŚCI TARCICY PO SUSZENIU JAKO MIARY JAKOŚCI SUSZENIA

ABSTRAKT

Wprowadzenie. Możliwość zastosowania partii wysuszonej tarcicy do produkcji wyrobów z drewna, po spełnieniu innych wymagań, ostatecznie określana jest na podstawie rozrzutu wilgotności. Różnorodność sposobów pozyskiwania i składowania surowca tartaczego, technologii pozyskania tarcicy i jej suszenia oraz sezonowania po suszeniu w połączeniu z wewnątrzgatunkowym zróżnicowaniem właściwości drewna powoduje, że osiągnięcie wymaganej jakości suszenia wymaga odpowiedniej wiedzy. Celem niniejszej pracy jest uzupełnienie i usystematyzowanie dotychczasowej wiedzy na temat czynników, które determinują rozrzut wilgotności tarcicy po suszeniu. Przeprowadzone badania służyły zwiększeniu możliwości zapobiegania niekontrolowanym zmianom wilgotności tarcicy i wyeliminowaniu niepożądanych skutków realizacji etapów procesu produkcyjnego wyrobów z drewna związanych z konwekcyjnym suszeniem tarcicy. Wzrost stopnia integracji konwekcyjnego suszenia tarcicy z innymi etapami procesu produkcyjnego, tj. z pozyskaniem i przygotowaniem tarcicy do suszenia oraz jej sezonowaniem bezpośrednio po suszeniu, decyduje o możliwości zapewnienia odpowiedniej jakości suszenia, określonej m.in. przez dopuszczalny rozrzut wilgotności partii tarcicy po suszeniu.

Metody. Wykonano badania źródeł pierwotnego i wtórnego zróżnicowania wilgotności tarcicy. Przeprowadzono eksperymenty wyznaczania izoterm sorpcji, z uwzględnieniem różnych warunków oddziaływania powietrza na drewno. Analizie poddano różne warianty technologii konwekcyjnego suszenia tarcicy oraz różne warunki sezonowania tarcicy o wadliwej wilgotności bezpośrednio po suszeniu. Szczególną uwagę zwrócono na aspekt zróżnicowania warunków wysychania tarcicy podczas procesu suszenia jako efekt nierównomiernego przepływu powietrza w suszarkach konwekcyjnych. W badaniach wykorzystano świeżo pozyskaną tarcicę sosnową rodzimego pochodzenia o różnym stanie obróbki mechanicznej. Do analizy i interpretacji badanych wielkości, tj. szerokości przyrostów rocznych, gęstości drewna, wilgotności bielu i twardzieli, początkowej i końcowej wilgotności tarcicy, wilgotności tarcicy po zakończeniu sezonowania, a także prędkości powietrza w suszarce zastosowano miary statystyki opisowej oraz metody wnioskowania statystycznego. W celu określenia istotności różnic przeciętnych wartości charakteryzujących badane wielkości wykorzystano analizę wariancji. Przy opisie badanych zależności wykorzystano modele empiryczne w postaci równań wielomianowych drugiego lub trzeciego stopnia.

Wyniki. Wykazano, że duża wewnątrzgatunkowa zmienność gęstości drewna może być czynnikiem, który potęguje zróżnicowanie wilgotności partii tarcicy przed suszeniem. Kluczowym czynnikiem dla rozrzutu wilgotności początkowej tarcicy sosnowej w załadunku suszarki jest zróżnicowany udział twardzieli, zależny od średnicy kłody i położenia tarcicy na przekroju poprzecznym. W analizowanych przypadkach sortymentów

tarcicy obrzynanej o grubości 23 mm i 50 mm udział twardzieli w tarcicy zmieniał się pięciokrotnie. Wykazano, że dopuszczenie zróżnicowania wymiarów tarcicy powoduje dodatkowy wzrost różnic wilgotności między pojedynczymi sztukami tarcicy, które tworzą załadunek suszarki, przy czym zróżnicowanie szerokości tarcicy wywiera większy wpływ na opisywany efekt niż różnice długości. Wyniki eksperymentów sorpcji wskazują, że powodem realizacji procesu suszenia z niekontrolowaną intensywnością w początkowej fazie ($w_b > 30\%$) może być to, że nie uwzględnia się w obliczeniach gradientu suszenia wilgotności równowagowej charakterystycznej dla pierwszej desorpcji wody w drewnie. Wykazano, że powodem różnicowania intensywności wysychania świeżo pozyskanej tarcicy i źródłem wzrostu rozrzutu wilgotności początkowej w załadunku suszarki mogą być klimatyczne uwarunkowania pogody w różnych rejonach Polski. Wyznaczono zakres zmian wilgotności tarcicy podczas niekontrolowanego oddziaływania warunków otoczenia w sytuacji przedłużającego się czasu przygotowania do suszenia partii świeżo pozyskanej tarcicy. Stwierdzono, że istotnymi czynnikami, od których zależy zróżnicowanie warunków suszenia w załadunku suszarki, jest prędkość powietrza, która istotnie zależy od prędkości obrotowej wentylatorów, grubości tarcicy, a także od sposobu konfiguracji pakietów tarcicy w stosie. Rewersyjne zmiany kierunku przepływu powietrza nie pozwalają wyeliminować skutków zróżnicowania warunków suszenia między środkową i skrajną strefą załadunku suszarki. Zwiększenie równomierności przepływu powietrza w załadunku suszarki może być efektem redukcji prędkości obrotowej wentylatorów. Wykazano, że osiągnięcie wilgotności w zakresie dopuszczalnego rozrzutu podczas sezonowania tarcicy wymaga uwzględnienia histerezy sorpcji oraz parametrów uprzednio realizowanego procesu suszenia.

Słowa kluczowe: suszenie konwekcyjne, jakość suszenia, rozrzut wilgotności, prędkość powietrza, wilgotność równowagowa, histereza sorpcji, sosna

THE EFFECT OF MATERIAL AND TECHNOLOGICAL FACTORS ON VARIATIONS IN MOISTURE CONTENT OF SAWN TIMBER AFTER DRYING AS MEASURE OF DRYING QUALITY

ABSTRACT

Introduction. The potential use of a batch of dried sawn timber for the production of wood products, after meeting other requirements, is ultimately determined on the basis of the moisture content variation. The diversity in harvesting and storage of round wood, sawmilling and drying of timber as well as seasoning after drying, combined with variations of wood properties, makes it necessary to have extensive knowledge in this area to obtain required drying quality. That is why this research was carried out. Its main aim was to supplement and systematize the existing knowledge concerning factors that determine moisture content variation in sawn timber after drying. The goal of the research was also to increase the ability to prevent uncontrolled changes in the moisture content of sawn timber and to neutralize undesirable effects of the stages of the production process of wood products with respect to kiln-drying of timber. The increased integration of timber kiln-drying with other stages of the production process, such as sawmilling and preparation of timber for drying, as well as its seasoning immediately following drying, determines the potential to ensure an appropriate drying quality, determined, among other things, by an acceptable moisture content variation in the timber batch after drying.

Methods. Research was conducted on the primary and secondary sources of sawn timber moisture content variation. Experiments were performed to determine the sorption isotherms, taking into account different variants of air conditions. Different variants of timber kiln-drying as well as different seasoning conditions of timber with inappropriate moisture contents were analyzed immediately after drying. Special attention was paid to the aspect of different timber drying conditions during kiln-drying as an effect of uneven airflow in convection dryers. Freshly cut pine timber of indigenous origin in various states of mechanical processing was used in the study. Descriptive statistics as well as statistical analysis methods were used to analyze and interpret the studied values, i.e. the width of annual growth rings, wood density, moisture contents of sapwood and heartwood, initial and final moisture contents of timber after seasoning, as well as air velocity in the dryer. The analysis of variance was used to determine the significance of differences in average values characterizing the studied parameters. Empirical models in the form of second- or third-order polynomial equations were developed to describe the examined relations.

Results. It has been shown that high intra-species variability of wood density may be a factor that increases variability of moisture contents in a batch of timber before drying. The key factor for the variation of initial moisture contents in pine timber in the kiln load is the varied content of heartwood depending on the log diameter and the position of the sawn timber in the cross section. In the analyzed cases of 23- and 50-mm thick edged timber assortments, the share of heartwood in sawn timber changed five times.

It was shown that different dimensions of timber causes an additional increase in moisture differences between individual pieces of sawn timber, which make up the load of the kiln. Hence, the variation in the width of the sawn timber was found to have a greater effect on the effect described than the variation in length. The results of sorption experiments indicate that the reason for the drying process with uncontrolled intensity in the initial phase ($w_b > 30\%$) may result from the fact that the equilibrium moisture content of wood, characteristic to the initial desorption, is not taken into account in the calculations of the drying gradient. It was similarly shown that weather conditions in various regions of Poland may be the reason for the variation in the intensity of drying of freshly cut timber and the source of increased variation in the initial moisture content in the kiln load. The range of changes was determined for the timber moisture content during the uncontrolled influence of environmental conditions at a prolonged preparation time of a batch of freshly cut timber for drying. It was found that air velocity, which significantly depends on the fan speed, timber thickness, as well as the configuration of timber packages in the stack, is an important factor determining the differences in drying conditions in kiln loading. Reversible changes in the direction of airflow do not eliminate the effects of different drying conditions between the inner and outer zones of the kiln load. Increasing the uniformity of airflow in the kiln load may result from a reduced fan speed. It has been shown that in order to obtain timber moisture content within the range of acceptable variation during seasoning sorption hysteresis as well as parameters of the previous drying process need to be taken into account.

Keywords: convection drying, drying quality, moisture content variation, air speed, equilibrium moisture content, sorption hysteresis, pine

KOMITET REDAKCYJNY

**Anna Golcz, Anna Gramza-Michałowska, Stanisław Grześ,
Jolanta Komisarzek, Andrzej Krauss, Andrzej Mazur, Sebastian Nowaczewski,
Julita Reguła, Arkadiusz Sadowski, Jacek Wójtowski (przewodniczący),
Anna Zielińska-Krybus**

Redaktor Działu

dr hab. inż. Andrzej Krauss

Recenzent

dr hab. inż. Paweł Kozakiewicz, prof. nadzw., prof. SGGW

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

©Copyright by Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu

Poznań 2018, Poland



Książka jest dostępna na licencji Creative Commons – Uznanie autorstwa – Użycie niekomercyjne – Bez utworów zależnych 4.0 Międzynarodowe (CC BY-NC-ND 4.0)

ISSN 1896-1894

ISBN 978-83-7160-913-8

e-ISBN 978-83-67112-85-7

<https://doi.org/10.17306/978-83-67112-85-7>

Redakcja

Paulina Kaczmarek

Skład i łamanie

Donata Latusek

WYDAWNICTWO UNIWERSYTETU PRZYRODNICZEGO W POZNANIU

ul. Witosza 45, 60-693 Poznań

tel.: 61 848 7808, e-mail: wydawnictwo@up.poznan.pl

<https://wydawnictwo.up.poznan.pl/>

Ark. wyd. 9,8. Ark. druk. 8,1.

Wersja elektroniczna dostępna na stronie [https://wydawnictwo.up.poznan.pl/](https://wydawnictwo.up.poznan.pl/books.html?dostepnosc=open%20access)

books.html?dostepnosc=open%20access oraz w serwisie <https://www.ibuk.pl/>

SPIS TREŚCI

WYKAZ OZNACZEŃ	9
1. WPROWADZENIE	11
2. CEL I ZAKRES PRACY	18
3. ZAŁOŻENIA METODYCZNE	19
3.1. Założenia wstępne	19
3.2. Wyznaczenie właściwości drewna i suszonych materiałów drzew- nych (tarcicy)	19
3.3. Określenie wpływu konstrukcji suszarki i warunków eksploatacji na proces suszenia tarcicy	21
3.4. Określenie wpływu technologii suszenia na jakość tarcicy po susze- niu	24
3.5. Metody analizy danych doświadczalnych	29
4. WŁAŚCIWOŚCI DREWNA DETERMINUJĄCE PRZEBIEG I JAKOŚĆ SUSZENIA TARCICY	32
4.1. Zróżnicowanie udziału bielu i twardzieli w drewnie okrągłym i tar- cicy	32
4.2. Właściwości fizyczne drewna wpływające na proces suszenia – po- datność na suszenie	38
4.3. Izotermy pierwszej desorpcji wody w drewnie	42
5. WILGOTNOŚĆ TARCICY PRZED SUSZENIEM	51
5.1. Zakres pierwotnego zróżnicowania wilgotności drewna	51
5.1.1. Makrostrukturalne uwarunkowania wilgotności drewna	51
5.1.2. Zmiany wilgotności drewna w ciągu roku	52
5.1.3. Charakterystyka wilgotności drewna z wybranych lokalizacji pozyskania	53
5.2. Zróżnicowanie wilgotności tarcicy bezpośrednio po przetarciu	54
5.3. Zróżnicowanie wilgotności tarcicy bezpośrednio przed suszeniem	57
5.3.1. Oddziaływanie parametrów powietrza na zmiany wilgotno- ści tarcicy	57
5.3.2. Zmiany wilgotności tarcicy podczas składowania przed su- szeniem	60
6. TECHNOLOGIA SUSZENIA TARCICY	65
6.1. Związki technologii suszenia tarcicy z intensywnością suszenia	65

6.2. Zróżnicowanie parametrów i prędkości powietrza w stosie – wyniki badań w warunkach produkcyjnych	72
6.3. Ocena jakości suszenia – modele empiryczne wpływu wybranych czynników technologicznych na wilgotność tarcicy po suszeniu . . .	90
7. MOŻLIWOŚCI ZMNIEJSZENIA ZRÓŻNICOWANIA WILGOTNOŚCI TARCICY W PROCESIE SEZONOWANIA	93
7.1. Wpływ histerezy sorpcji i oczekiwanej wilgotności końcowej tarcicy	93
7.2. Wpływ udziałów tarcicy niedosuszonej i przesuszonej	108
8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI	118
9. LITERATURA	120

WYKAZ OZNACZEŃ

A	– pole powierzchni, m^2
b	– szerokość tarcicy, mm
b_{rz}	– szerokość rzazu, mm
B	– szerokość stosu tarcicy (wymiar stosu w kierunku przepływu powietrza), m
d	– średnica kłody, cm
d_{tw}	– średnica twardzieli, cm
d_{ck}	– średnica kłody w cieńszym końcu bez kory, mm
DZW	– dobowa zmiana wilgotności drewna, %/doba
GS	– gradient suszenia
h	– histereza sorpcji
h_p	– wysokość pakietu tarcicy, m
H	– wysokość stosu tarcicy, m
K, K_1, K_2	– współczynniki empiryczne modelu sorpcji Hailwooda-Horrobina
l	– długość tarcicy, m
l_p	– długość pakietu tarcicy, m
L	– długość stosu tarcicy, m
m_{H_2O}	– masa wody w drewnie, kg
m_0	– masa drewna w stanie absolutnie suchym, kg
m_p	– masa początkowa sztuki tarcicy (przed suszeniem), kg
n	– liczba powtórzeń, szt.
n_w	– prędkość obrotowa wirnika wentylatora, obr./min
p	– grubość przekładek, mm
PNW	– wilgotność punktu nasycenia włókien, %
r	– odległość od rdzenia, mm
s	– grubość tarcicy, mm
s_{pr}	– szerokość przyrostu rocznego, mm
t	– temperatura powietrza, $^{\circ}C$
t_s	– temperatura termometru suchego, $^{\circ}C$
u	– udział, %
u_b	– udział białego, %
u_{tw}	– udział twardzieli, %
w	– wilgotność bezwzględna drewna, %
w_b	– wilgotność bieżąca tarcicy, czynnik wiodący w procesie suszenia, %
w_d	– wilgotność docelowa partii tarcicy, %
w_k	– wilgotność końcowa sztuki tarcicy (po suszeniu), %
w_p	– wilgotność początkowa sztuki tarcicy (przed suszeniem), %

w_r	– wilgotność równowagowa drewna, %
W	– współczynnik empiryczny modelu sorpcji Hailwooda-Horrobina
V_0	– objętość drewna w stanie zupełnie suchym, m ³
V_{\max}	– objętość drewna w stanie maksymalnego spęcznienia, m ³
\dot{V}	– strumień objętości powietrza, wydajność wentylatora, m ³ /s
x_i	– zmienna niezależna zredukowana
X	– wilgotność bezwzględna masowa powietrza, kg/kg
y	– zmienna zależna
Δw_d	– dopuszczalna odchyłka wilgotności docelowej partii tarcicy, %
Δm	– niepewność pomiaru masy, g
δw	– błąd względny wyznaczania wilgotności drewna, %
$\delta \rho_u$	– względne odchylenie gęstości umownej drewna, %
δm_p	– względne odchylenie masy początkowej drewna, %
δw_p	– względne odchylenie wilgotności początkowej drewna, %
δw_k	– względne odchylenie wilgotności końcowej drewna, %
β	– estymowany współczynnik modelu empirycznego
φ	– wilgotność względna powietrza, %
ν	– prędkość powietrza, m/s
ρ	– gęstość drewna, kg/m ³
ρ_0	– gęstość drewna w stanie absolutnie suchym, kg/m ³
ρ_u	– gęstość umowna drewna, kg/m ³
τ	– czas suszenia, h
τ_r	– czas rewersji, h
ξ_i	– zmienna niezależna
\hat{y}	– teoretyczna wartość zmiennej zależnej
α	– poziom istotności
σ	– odchylenie standardowe z próby
df	– stopnie swobody
SS	– suma kwadratów odchyłeń
MS	– średni kwadrat odchyłeń
SE	– błąd standardowy oceny
F	– statystyka testowa analizy wariancji
F_0	– wartość krytyczna rozkładu Fishera
p	– prawdopodobieństwo
R^2	– współczynnik determinacji
R_{adj}^2	– skorygowany współczynnik determinacji
V	– współczynnik zmienności, %

1. WPROWADZENIE

Technologia produkcji oraz przeznaczenie wyrobów z drewna wymagają stosowania tarcicy o jednakowej wilgotności, ściśle określonej w zależności od przeznaczenia. Tymczasem nieuniknionym skutkiem realizacji procesów suszenia jest zróżnicowanie wilgotności końcowej tarcicy. W związku z tym niezbędne staje się zastosowanie ilościowego kryterium, które stanowi podstawę akceptowania wilgotności tarcicy po suszeniu bądź uznania jej za wadliwą. Rolę takiego kryterium pełni dopuszczalny rozrzut wilgotności końcowej w partii wysuszonej tarcicy, będący istotną miarą jakości suszenia (Welling, 1996). Zróżnicowanie wilgotności tarcicy bezpośrednio po zakończeniu procesu suszenia zazwyczaj przekracza granice dopuszczalnego rozrzutu. Z tego powodu konieczne jest wyodrębnienie z partii wysuszonej tarcicy części o wadliwej wilgotności, nieprzydatnej do natychmiastowego zastosowania. Tarcica o wilgotności niższej i wyższej niż dopuszczalna określana jest odpowiednio jako przesuszona i niedosuszona. Tarcicę o wadliwej wilgotności charakteryzuje niestabilność wymiarowa oraz skłonność do niekontrolowanych deformacji kształtu i wypadania sęków (Tarvainen, 2005). Cechy te objawiają się już w trakcie realizacji kolejnych etapów procesu produkcyjnego, tj. wtórnej obróbki mechanicznej, klejenia i uszlachetniania powierzchni, a po zakończeniu procesu produkcyjnego – podczas użytkowania gotowych wyrobów z drewna. Opisywanymi w literaturze skutkami wadliwej wilgotności tarcicy są: zakłócenia i wydłużenie procesu produkcyjnego oraz nieuzasadniony wzrost kosztów suszenia wynikający z konieczności zwiększenia zużycia ciepła i energii elektrycznej, obniżenie wydajności materiałowej spowodowane wzrostem stopnia degradacji tarcicy przesuszonej, a także konieczność długotrwałego sezonowania tarcicy przed kolejnymi etapami procesu produkcyjnego i obniżenie jakości wytwarzanych wyrobów (Milota i Wu, 1997; Elustondo i in., 2010; Wallace i Avramidis, 2016).

Osiągnięcie zakładanej jakości suszenia, której miarą jest zróżnicowanie wilgotności końcowej nieprzekraczające dopuszczalnego rozrzutu, wiąże się ze spełnieniem wielu wymagań, które umożliwiają kontrolowanie przebiegu procesu suszenia. Wymagania te dotyczą ograniczenia zróżnicowania właściwości suszonego drewna, poprawnego doboru wartości parametrów czynnika suszącego w programie suszenia oraz zapewnienia równomiernego oddziaływania czynnika suszącego na drewno w obrębie załadunku suszarki. Nadmierny rozrzut wilgotności końcowej tarcicy jest oczywiście skutkiem realizacji procesu suszenia w sposób odbiegający od zakładanego. Wynika to z niekorzystnego oddziaływania różnych czynników, które mimo pozorów zgodności z założeniami programu suszenia są powodem zakłóceń jego przebiegu przy poprawnym działaniu suszarki oraz spełnieniu kryteriów właściwego przygotowania jej załadunku. Oddziaływanie różnych czynników na przebieg konwekcyjnego suszenia tarcicy w suszarkach komorowych było przedmiotem szcze-

gółowej analizie Widłaka (2001). Jednak w przywołanym opracowaniu, ukierunkowanym na określenie współzależności czynników materiałowych, procesowych i eksploatacyjnych, brak informacji na temat ewentualnego wpływu wymienionych czynników na równomierność oddziaływania czynnika suszącego na drewno w obrębie załadunku suszarki, chociaż autor wskazuje na znaczenie problemu.

Suszenie konwekcyjne pozostaje niekwestionowanym liderem wśród aktualnie stosowanych technologii suszenia tarcicy (Campean, 2010). Według prognoz rozwój stosowanych na świecie technologii suszenia tarcicy jest ukierunkowany na zapewnienie dużej intensywności procesu w suszarkach o coraz większej pojemności, a w perspektywie najbliższych dekad nie należy spodziewać się zmian tego trendu (Usenius i in., 2010). Nieuniknionym tego efektem jest wzrost znaczenia problemu zapewnienia równomiernych warunków suszenia w obrębie załadunku suszarki (Vikberg i in., 2015). Problem ten nabiera szczególnego znaczenia zwłaszcza w procesach suszenia szybkoschnącej tarcicy iglastej, z typowym dla tego rodzaju dużym zróżnicowaniem właściwości decydujących o podatności na suszenie. Z tego względu nieodzowne staje się kompletowanie załadunku suszarki w sposób, który pozwala na neutralizację pierwotnego i wtórnego zróżnicowania właściwości partii suszonej tarcicy.

Do podstawowych właściwości drewna, które określają jego podatność na suszenie, należy m.in. gęstość, orientacja przyrostów rocznych oraz wilgotność początkowa. Gęstość drewna jest czynnikiem, który limituje intensywność suszenia. Gęstość drewna poszczególnych sztuk tarcicy, które stanowią załadunek suszarki, może znacznie się różnić za sprawą jej wewnątrzgatunkowego zróżnicowania, potęgowanego przez zastosowaną technologię mechanicznego przerobu drewna. O zróżnicowaniu gęstości w obrębie gatunku decydują między innymi pochodzenie oraz czynniki siedliskowe i pozycja biosocjalna w drzewostanie (Witkowska, 1997; Hannrup i in., 2000). Technologia konwekcyjnego suszenia przewiduje możliwość realizacji procesu suszenia tarcicy z różnych gatunków drewna o zbliżonej gęstości (grupa rodzajowa tarcicy). Problematykę związaną z procesem równoczesnego suszenia tarcicy np. z grupy północnoamerykańskich gatunków drewna iglastego podejmowano w licznych pracach (Elustondo i Oliveira, 2009; Elustonodo i in., 2010; Shahverdi i in., 2017). Wyniki tych badań wskazują na konieczność spełnienia wielu dodatkowych warunków, których celem jest neutralizacja wpływu niejednorodności właściwości drewna na przebieg i jakość suszenia.

Według ostatnich badań Witkowskiej i Lachowicza (2013) gęstość umowna drewna sosny pospolitej (*Pinus sylvestris* L.) rodzimego pochodzenia zawiera się w przedziale 350–526 kg/m³. Fakt ten wskazuje na potencjalnie duże zróżnicowanie podatności na suszenie tarcicy sosnowej pozyskanej w kraju. Zagadnienie wewnątrzgatunkowego zróżnicowania gęstości i innych właściwości drewna nabiera szczególnego znaczenia w kontekście zapewnienia jakości suszenia. Problemem może być jej osiągnięcie w sytuacji, w której załadunek suszarki stanowi tarcica o różnym pochodzeniu. Brak opublikowanych danych na ten temat. Argumentem za podjęciem tej tematyki jest fakt, że tarcica z drewna sosny ma kluczowe znaczenie dla przemysłu drzewnego w Polsce.

Kolejną, poza gęstością, przyczyną zróżnicowania intensywności suszenia w załadunku suszarki, a w konsekwencji większego rozrzutu wilgotności końcowej może

być równoczesne suszenie sortymentów tarcicy o różnej orientacji przyrostów rocznych, tj. stycznych i promieniowych (Walczak, 2001; Luostarinen i Heikkinen, 2012). Hao i Avramidis (2004) stwierdzili, że w procesach suszenia tarcicy iglastej grupy *hem-fir* intensywność wysychania desek stycznych, które stanowiły część załadunku suszarki, była ponad 11% większa niż desek kontrolnych. Równocześnie deski promieniowe wysychały z intensywnością mniejszą aż o 38% w porównaniu z deskami kontrolnymi.

Sposobem na ograniczenie rozrzutu wilgotności końcowej może być kompletowanie załadunku suszarki na podstawie wyników pomiarów wilgotności tarcicy przed suszeniem (*green sorting*). Wyniki licznych badań wskazują, że zabieg ten poprawia również efektywność suszenia, czego miarą jest skrócenie czasu suszenia (Oliveira, 2003; Stanish, 2008; Milota i in., 2009; Sandland i Gjerdrum, 2010; Elustondo i in., 2013; Shahverdi i in., 2017). Sortowanie wilgotnościowe tarcicy może odbywać się także na podstawie związku wilgotności drewna z jego gęstością i masą (Elustondo i in., 2013; Vikberg i Elustondo, 2016). Wielu autorów wyraża pogląd o większej efektywności wilgotnościowego sortowania tarcicy na podstawie kryterium gęstości niż wilgotności mokrego drewna (Rozema i Schuijl, 2005; Steiner i Øvrum, 2010; Berberović i Milota, 2011). Wyniki badań w skali technicznej potwierdzają przydatność do wilgotnościowego sortowania tarcicy także spektroskopii bliskiej podczerwieni NIR (Watanabe i in., 2011) oraz techniki opartej na promieniowaniu rentgenowskim (Skog i in., 2010; Tanaka i Kawai, 2013). Należy jednak podkreślić, że w praktyce zagadnienie sortowania tarcicy przed suszeniem jest przedmiotem zainteresowania przede wszystkim producentów dużych ilości tarcicy o ściśle określonym sortymencie (tarcica obrzynana), w zakładach produkcyjnych wyposażonych w systemy do automatycznego pomiaru wilgotności (*in-line*). W pozostałych przypadkach spełnienie wymogu ograniczenia zróżnicowania wilgotności początkowej tarcicy w załadunku suszarki zależy od zastosowania innych – pośrednich kryteriów sortowania tarcicy przed suszeniem, np. zgodnie z wiedzą na temat przyczyn pierwotnego i wtórnego zróżnicowania wilgotności tarcicy przed suszeniem. W tym przypadku kryterium oceny wilgotności początkowej może stanowić położenie tarcicy na przekroju poprzecznym kłody czy też udział twardzieli określanej na podstawie szybkiej identyfikacji zróżnicowania barwy drewna na powierzchni czołowej tarcicy (Sugimori i in., 2006).

O przebiegu i efektach procesu konwekcyjnego suszenia tarcicy decyduje przede wszystkim trafny wybór wartości parametrów powietrza suszącego, tj. temperatury i wilgotności względnej, ujęty w ramy programu suszenia, uważanego za najważniejszy element technologii suszenia (Widlak, 2001). Parametry programu suszenia – w tym prędkość powietrza – wpływają na intensywność suszenia drewna, równocześnie determinując czas suszenia i ryzyko wystąpienia wad suszenia – w tym nadmiernego rozrzutu wilgotności końcowej. Dobór prędkości powietrza w procesie konwekcyjnego suszenia tarcicy podlega wielu ograniczeniom i w zasadzie stanowi kompromis między koniecznością dostosowania jej do właściwości suszonego drewna i zagwarantowania prawidłowego przebiegu zjawisk towarzyszących wysychaniu drewna a potrzebą racjonalizacji zużycia ciepła i energii elektrycznej do napędu wentylatorów (Salin, 2001).

Intensywność suszenia powinna być dostosowana do właściwości suszonego drewna, tj. jego rodzaju (gęstości), grubości (deski, bale) i stanu obróbki (tarcica obrzynana, tarcica nieobrzynana, półfabrykaty) oraz powinna uwzględniać wymagania jakości suszenia określone przeznaczeniem tarcicy (Krieczetow, 1953; Rzadkowski, 1967; Krzysik i Sobczak, 1970; Eichler, 1978; Brunner, 1987; Walker, 1993; Denig i in., 2000; Keey i in., 2000; Trübswetter, 2006; Glijer, 2011).

Jednak kontrolowany przebieg procesu suszenia jest w dużej mierze zależny od ograniczenia – nieuniknionego w przypadku suszarek do tarcicy – zróżnicowania wartości parametrów czynnika suszącego w obrębie przestrzeni załadkowej. Zbyt niska prędkość powietrza w suszarce jest powodem zróżnicowania warunków wysychania drewna w stosie na skutek niedostatecznego wyrównania temperatury i wilgotności względnej powietrza. Efektem zbyt niskiej prędkości powietrza w danej strefie załadunku suszarki jest zazwyczaj niższa temperatura i wyższa wilgotność względna powietrza niż uwzględniona w programie suszenia. Natomiast zbyt wysoka prędkość powietrza w początkowej fazie realizacji procesu suszenia powoduje gwałtowny wzrost intensywności suszenia i ogranicza bezpieczeństwo, którego miarą jest utrata kontroli nad rozwojem naprężeń desorpcyjnych i związane z tym ryzyko pęknięcia przypowierzchniowych warstw tarcicy (McMillen, 1958). W tym kontekście szczególnego znaczenia nabiera równomierny i odpowiedni przepływ powietrza w stosie, który zapewni wyrównanie wartości parametrów czynnika suszącego i odpowiednią intensywność suszenia, dostosowaną do właściwości suszonego drewna.

Niekorzystny – z punktu widzenia możliwości powstania wad suszenia – wpływ nierównomiernego przepływu powietrza w załadunku suszarki dotyczy głównie początkowej fazy procesu konwekcyjnego suszenia tarcicy ($w > PNW$), podczas którego intensywność suszenia drewna jest determinowana przez możliwości przejmowania przez powietrze wody odparowanej z powierzchni suszonego drewna. Opiswane właściwości powietrza charakteryzowane są za pomocą współczynnika konwekcyjnej wymiany ciepła i masy. Obliczone wartości tych współczynników, odpowiadające warunkom realizacji początkowej fazy procesu suszenia tarcicy z uwzględnieniem założenia występowania rozrzutu prędkości powietrza przepływającego pomiędzy warstwami tarcicy w zakresie 2–4 m/s, różnią się o $\pm 25\%$ od wartości tych współczynników dla średniej prędkości dla całego stosu (Ledig i in., 2007). Należy oczekiwać, że rzeczywiste zróżnicowanie współczynników konwekcyjnej wymiany ciepła i masy jest większe, obserwacje wskazują bowiem na to, że przepływ powietrza w załadunku suszarki charakteryzuje się znacznie większym rozrzutem prędkości.

Zagadnienie wpływu prędkości powietrza na przebieg procesu suszenia oraz techniczne uwarunkowania równomiernego przepływu powietrza w obrębie załadunku komorowej suszarki do tarcicy były tematem licznych opracowań (Kröll, 1954; Werner, 1972; Horton i Resch, 1976; Arnaud i in., 1991). W obszernej monografii (Krischer i Kröll, 1959) przedstawiono stan wiedzy dotyczącej wpływu różnych czynników materiałowych i eksploatacyjnych na obieg powietrza w typowej suszarce do tarcicy. Współczesne prace koncentrują się na zagadnieniach związanych z modelowaniem obiegu powietrza i jego poprawą w aspekcie szczególnych rozwiązań konstrukcji suszarek (Nijdam i Keey, 2000, 2002; Hua i in., 2001;

Ledig i in., 2001; Langrish, 2002; Langrish i Keey, 2004; Smit i Du Plessis, 2007; Bedelean i Sova, 2010a) czy też na optymalizacji zużycia energii elektrycznej do napędu wentylatorów (Nakajima i in., 1990; Garrahan i in., 1994; Riley i Haslett, 1996; Salin, 2001; Klitzke i Batista, 2008; Bedelean i Sova, 2010b). Stosunkowo niewiele prac dotyczy oceny równomierności przepływu powietrza w załadunku suszarki w kontekście jakości suszenia (Majka i in., 2005; Kolin i in., 2012; Majka, 2012; Bedelean, 2015; Vikberg i in., 2015; Bedelean i in., 2016).

Zapewnienie równomiernego przepływu powietrza między warstwami tarcicy, od którego zależy równomierność suszenia drewna w załadunku suszarki, w przypadku wielkogabarytowych suszarek do tarcicy stanowi duży problem (Vikberg i in., 2015). Do czynników, które poza gabarytami przestrzeni załadowniczej, wydajnością wentylatorów oraz grubością tarcicy i przekładek dodatkowo wpływają na równomierność przepływu powietrza i równomierność wysychania drewna, należy zaliczyć szerokość stosu, tj. wymiar stosu w kierunku przepływu powietrza, stan obróbki tarcicy (tarcica obrzynana i nieobrzynana), sposób ułożenia tarcicy w warstwie, zróżnicowanie długości tarcicy oraz staranność i stopień wypełnienia przestrzeni załadowniczej suszarki (Torgeson, 1940; Rafalski, 1970; Szewczyk 2000; Noworyta, 2006). Przyczyną wzrostu zróżnicowania prędkości powietrza w załadunku suszarki, a zatem ograniczenia równomierności wysychania drewna, może być odstępstwo od zasady suszenia tarcicy o jednakowej grubości (Misiak, 2010).

Wyposażenie większości konwekcyjnych suszarek do tarcicy pozwala na zwiększenie sprawności aerodynamicznej i efektywności oddziaływania powietrza na drewno przy równoczesnej racjonalizacji zużycia energii elektrycznej do napędu wentylatorów. Zastosowanie falowników prądowych do regulacji prędkości obrotowej wentylatorów instalowanych w suszarkach do tarcicy jest niemal powszechnie postrzegane jako rozwiązanie, które gwarantuje ograniczenie kosztów suszenia związanych ze zużyciem energii elektrycznej. Wyniki analizy równomierności przepływu powietrza w załadunku suszarki komorowej do tarcicy dla 13 wariantów prędkości obrotowej wentylatorów (Majka, 2012) wskazują, że redukcja liczby obrotów wirnika wentylatora obok spodziewanych skutków – jakimi są obniżenie zużycia energii elektrycznej i ogólne obniżenie prędkości powietrza przepływającego między warstwami tarcicy w określonym zakresie zmian prędkości obrotowej – wpływa korzystnie również na równomierność przepływu powietrza.

Rewersyjna zmiana obiegu powietrza w komorowych suszarkach do tarcicy jest kolejnym powszechnie stosowanym zabiegiem, który neutralizuje skutki nierównomiernego wysychania tarcicy w stosie, typowe dla jednokierunkowego obiegu powietrza. Badanie wpływu rewersyjnych zmian obiegu powietrza w suszarce komorowej do tarcicy na przebieg i efekty suszenia było tematem licznych publikacji (Nijdam i Keey, 1996; Pang, 2002b; Haque i in., 2007). Brak jest przy tym informacji na temat wpływu rewersyjnych zmian obrotów wentylatorów na równomierność przepływu powietrza w obrębie załadunku suszarki. Istnieje uzasadniona obawa, że niesymetryczne usytuowanie wentylatorów w suszarce oraz niesymetryczne usytuowanie nagrzewnicy (elementu wyposażenia suszarki o największym oporze aerodynamicznym) może stanowić dodatkową przyczynę różnicowania przepływu powietrza przez stos. W dostępnej literaturze brak informacji na temat wpływu konfiguracji pakietów w stosie na zróżnicowanie warunków suszenia w za-

ładunku suszarki. Stosowane w praktyce produkcyjnej różne warianty konfiguracji pakietów tarcicy, które wynikają np. z konieczności realizacji procesu suszenia tarcicy o długości niedostosowanej do wymiarów przestrzeni załadowniczej suszarki, w przypadku rewersyjnych zmian obiegu powietrza mogą potęgować efekt zróżnicowania prędkości powietrza i nierównomierności jego przepływu.

Dla osiągnięcia wymaganej jakości suszenia istotne jest zapewnienie realizacji procesu suszenia z odpowiednią intensywnością. Liczbowym wskaźnikiem, który stosuje się do oceny intensywności suszenia drewna, jest gradient suszenia (Keylwerth, 1950). Zastosowanie technologii mikroprocesorowej w systemach sterowania suszarek do tarcicy pozwoliło na realizację procesów suszenia zgodnie z programami opartymi na stałej wartości gradientu suszenia (Brunner, 1987). Określenie gradientu suszenia wymaga uwzględnienia bieżącej wilgotności tarcicy i wilgotności równowagowej drewna, charakteryzującej właściwości higroskopijne drewna w danych warunkach oddziaływania czynnika suszącego. Ograniczeniem podanej metody kontroli intensywności suszenia są niewystarczające możliwości dokładnego wyznaczenia wartości gradientu; w obliczeniach tych trzeba uwzględnić wilgotność równowagową drewna. Przedstawiona metoda kontroli intensywności suszenia obarczona jest błędami wyznaczania wilgotności równowagowej zarówno w przypadku pomiarów bezpośrednich (za pomocą płytki celulozy) ze względu na histerezę sorpcji, jak i w przypadku powszechnie stosowanych metod wykorzystujących związek wilgotności równowagowej drewna z parametrami powietrza, tj. temperaturą i wilgotnością względną. Wielu autorów wskazuje, że wykorzystywane do tego celu dane referencyjne, opracowane przez Forest Products Laboratory i opublikowane w Wood Handbook (1955; 1999; 2010), z wielu względów należy traktować jako wartości orientacyjne (Simpson, 1991; Walker, 1993; Gjerdrum, 2008; Glass i in., 2014; Redman i in., 2016). Wyniki analizy intensywności suszenia półfabrykatów bukowych w procesach suszenia (Majka i Olek, 2007), w których zastosowano programy oparte na zasadzie suszenia według wartości gradientu suszenia, pozwoliły stwierdzić, że skutkiem nieuwzględnienia w założeniach programu różnicy między referencyjną a faktyczną wartością wilgotności równowagowej drewna był niekontrolowany wzrost intensywności suszenia w początkowej fazie procesu ($w > PNW$). Wynika z tego, że zapewnienie lepszej kontroli intensywności suszenia w początkowej fazie realizacji procesu, której przypisuje się decydujący wpływ na rozrzut wilgotności końcowej, dla wielu – także rodzimych gatunków drewna – wymaga uzupełnienia brakujących danych empirycznych. Stwierdzenie to w kontekście realizacji procesu suszenia tarcicy ze świeżo pozyskanego drewna dotyczy przede wszystkim rzadko uwzględnianej w badaniach wilgotności równowagowej drewna odpowiadającej pierwszej (pierwotnej) desorpcji.

Rozrzut wilgotności w partii wysuszonej tarcicy pozostaje nieuniknionym, ale niekoniecznie trwałym skutkiem realizacji procesów suszenia konwekcyjnego, jeżeli wysuszoną tarcicę podda się procesowi sezonowania. Celem sezonowania tarcicy jest ograniczenie rozrzutu wilgotności powstałego w trakcie realizacji procesu suszenia przez kontrolowane zmiany wilgotności tarcicy w określonych warunkach oddziaływania powietrza wilgotnego. Zmiany wilgotności tarcicy przesuszonej i niedosuszonej podczas sezonowania, ze względu na zjawisko histerezy sorpcji, mają różny charakter (odpowiednio nawilżanie i wysychanie) oraz zakres i przebieg (Sa-

lin, 2011; Majka i in., 2014; Wada i in., 2014). Dlatego zapewnienie właściwych warunków sezonowania wymaga uwzględnienia rzeczywistych – tj. wynikających z histerezy sorpcji – wartości wilgotności równowagowej drewna, odrębnie dla tarcicy przesuszanej i niedosuszonej. Wyniki dotychczasowych badań wskazują na to, że właściwości higroskopijne drewna mogą ulegać zmianie pod wpływem temperatury suszenia, naprężeń desorpcyjnych towarzyszących suszeniu oraz cyklicznej sorpcji, którą wywołują oscylacyjne zmiany parametrów powietrza w efekcie rewersyjnych zmian kierunku przepływu powietrza (Wengert, 1976; Simpson, 1998; Riehl i Welling, 2003; Gjerdrum, 2008; Majka i in., 2014). Dlatego aktualna pozostaje tematyka badań właściwości higroskopijnych drewna z uwzględnieniem jego historii technologicznej oraz zjawiska histerezy sorpcji w celu określenia warunków bardziej efektywnego sezonowania tarcicy o nadmiernym rozrzucie wilgotności końcowej.

Nieliczne publikacje dotyczą analizy wpływu różnych czynników na rozrzut wilgotności końcowej tarcicy z wykorzystaniem metod statystycznych opartych na wieloczynnikowej analizie wariancji (Gu i in., 2004) oraz symulacji za pomocą modeli stochastycznych (Salin, 2002, 2005; Pinchevska i in., 2016). Wyniki wskazują na istotność wpływu na rozrzut wilgotności tarcicy po suszeniu: rodzaju drewna, grubości tarcicy i rodzaju tkanki (biel i twardej), a także pierwotnego zróżnicowania właściwości drewna i usytuowania tarcicy w obrębie załadunku suszarki. Stanowi to dodatkowy argument za kontynuowaniem badań dotyczących uwarunkowań rozrzutu wilgotności tarcicy po suszeniu.

2. CEL I ZAKRES PRACY

Celem pracy jest kompleksowa ocena, na podstawie wyników przeprowadzonych eksperymentów i analiz, pierwotnych oraz wtórnych, przyczyn wadliwej wilgotności tarcicy po suszeniu jako istotnej miary jakości suszenia.

W szczególności ocena ta dotyczy następujących zagadnień:

- pierwotnego zróżnicowania właściwości surowca drzewnego determinujących jego podatność na suszenie, z uwzględnieniem pochodzenia i okresu pozyskania;
- zmian wilgotności przed suszeniem świeżo pozyskanej tarcicy;
- związków między rozrzutem wilgotności w partii suszonej tarcicy a intensywnością suszenia;
- wpływu technologii suszenia na właściwości higroskopijne drewna i histerezę sorpcji;
- wpływu obiegu powietrza na równomierność wysychania tarcicy w załadunku suszarki;
- zmian wilgotności tarcicy podczas jej sezonowania bezpośrednio po suszeniu.

Wyniki przeprowadzonych eksperymentów i analiz zostaną wykorzystane w opracowaniu:

- wieloczynnikowego modelu zmian wilgotności tarcicy przed suszeniem;
- technologicznych kryteriów oceny prawidłowości przepływu powietrza przez stos w celu określenia możliwości neutralizacji czynników, które wpływają na wzrost zróżnicowania intensywności suszenia i rozrzut wilgotności w obrębie załadunku suszarki;
- prognostycznego modelu zmian wilgotności partii tarcicy o wadliwej wilgotności podczas jej sezonowania bezpośrednio po suszeniu z uwzględnieniem zjawiska histerezy sorpcji oraz różnych warunków oddziaływania otoczenia.

Celem użytkowym badań będzie określenie możliwości zapobiegania niekontrolowanym zmianom wilgotności tarcicy, neutralizacja niepożądanych skutków realizacji etapów procesu produkcyjnego wyrobów z drewna związanych z konwekcyjnym suszeniem tarcicy, a w efekcie zwiększenia stopnia integracji konwekcyjnego suszenia tarcicy z innymi etapami procesu produkcyjnego.

3. ZAŁOŻENIA METODYCZNE

3.1. Założenia wstępne

Przyjęto, że przedmiotem badań będą te aspekty realizacji początkowych etapów procesu produkcyjnego wyrobów z drewna, które wpływają na przebieg suszenia i zróżnicowanie wilgotności tarcicy po suszeniu, tj. związane z pozyskaniem tarcicy i jej przygotowaniem do suszenia, z realizacją procesu suszenia oraz sezonowaniem tarcicy bezpośrednio po suszeniu. Zasadniczą część badań przeprowadzono w zakładach pierwiastkowego i dalszego przerobu drewna, wyposażonych w wielkogabarytowe komorowe i tunelowe suszarki konwekcyjne do tarcicy oraz w instalacje grzewczo-nawilżające do sezonowania tarcicy. Badania przeprowadzono, uwzględniając założenia realizowanych etapów procesu produkcyjnego albo aranżując sytuacje, które spełniały warunki zaplanowanych wariantów eksperymentów i umożliwiały ocenę skutków określonych praktyk produkcyjnych. W przypadku ograniczonych możliwości realizacji doświadczeń w warunkach produkcyjnych badania prowadzono w warunkach półtechnicznych, przy wykorzystaniu sterowanej mikroprocesorem typowej komorowej suszarki do tarcicy, której wyposażenie pozwalało na realizację wyspecyfikowanych założeń metodycznych. Niezbędne badania o charakterze podstawowym zrealizowano w warunkach laboratoryjnych.

3.2. Wyznaczenie właściwości drewna i suszonych materiałów drzewnych (tarcicy)

Właściwości suszonego drewna należą do grupy czynników, które w procesie konwekcyjnego suszenia tarcicy określane są jako materiałowe (Widłak, 2001). Właściwości drewna determinują jego podatność na suszenie, która decyduje o przebiegu procesu suszenia. Za podstawowy czynnik określający podatność drewna na suszenie uznawana jest jego gęstość (np. Brunner, 1987). Tarcica pozyskana z gatunków drewna o małej gęstości określana jest mianem łatwo schnącej, w odróżnieniu od tarcicy trudno schnącej, pozyskanej z drewna o dużej gęstości. Jednak w przypadku realizacji procesu suszenia partii tarcicy, która stanowi załadunek suszarki, należy uwzględnić nieuniknione zróżnicowanie właściwości drewna, które zależy od wymiarów tarcicy, tj. grubości (deski, bale), szerokości i długości oraz stopnia obróbki mechanicznej drewna (tarcica obrzynana i nieobrzynana, półfabrykaty). Przyczyną różnej podatności na suszenie tarcicy pozyskanej z tego samego gatunku drewna może być dodatkowo wewnątrzgatunkowe zróżnicowanie

gęstości drewna. W pracy skoncentrowano się na aspektach suszenia tarcicy z jednego rodzaju drewna, przy uwzględnieniu opisanej wyżej grupy czynników.

Do badań wybrano tarcicę z drewna sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) rodzimego pochodzenia. Ze względu na warunki klimatyczne oraz siedliskowe sosna zdołała wytworzyć wiele ekotypów. Drewno sosny charakteryzuje zatem duże zróżnicowanie budowy anatomicznej oraz tych właściwości, które decydują o podatności na suszenie, tj. wilgotności i gęstości (Trendelenburg, 1939; Kollmann, 1951; Bielczyk i Eminowicz, 1954; Zobel i Buijtenen, 1989; Fabisiak, 2005; Witkowska i Lachowicz, 2013; Tomczak i Jelonek, 2014). Tarcica sosnowa ma szczególne znaczenie gospodarcze dla krajowego przemysłu drzewnego za sprawą dominującego udziału w powierzchniowej i miąższościowej strukturze zasobów drzewnych lasów w Polsce (Raport o stanie lasów..., 2017). Ponadto wszechstronne zastosowanie tarcicy z drewna tego rodzaju w takich dziedzinach jak meblarstwo, stolarstwo czy konstrukcje drewniane powoduje bardzo duże zróżnicowanie wymagań dotyczących jakości suszenia – w tym rozrzutu wilgotności końcowej. W tabeli 1 przedstawiono pochodzenie surowca tartaczego, z którego pozyskano tarcicę wykorzystaną do badań. Kryterium wyboru stanowiło duże prawdopodobieństwo zróżnicowania właściwości drewna, tj. gęstości, wilgotności początkowej oraz szerokości przyrostów rocznych ze względu na różne warunki siedliskowe i klimatyczne.

Tabela 1. Pochodzenie sosnowego surowca tartaczego wybranego do badań (podział terytorium Polski na strefy klimatyczne I-V wg PN-EN 12831:2006)

Table 1. Provenance of Scots pine raw material selected for experiments (the territory of Poland divided into climatic zones I-V according to PN-EN 12831:2006)

Pochodzenie Provenance	Symbol	
RDLP Szczecinek	A	
RDLP Poznań	B	
RDLP Radom	C	
RDLP Olsztyn	D	

RDLP – Regionalna Dyrekcja Lasów Państwowych.

RDLP – Regional Directorates of the State Forests.

Ostateczny wpływ na zespół cech, które determinują podatność tarcicy na suszenie, wywiera specyfika technologii mechanicznego przerobu drewna okrągłego (np. linie jednokrotnego i dwukrotnego przetarcia, linie okrawarkowe) oraz kryteria optymalizacji (przetarcie uwzględniające optymalizację wydajności i/lub jakości pozyskanej tarcicy, orientacja przyrostów rocznych względem szerokiej płaszczy-

zny, położenie tarcicy względem rdzenia kłody itp.). Mając na względzie powyższe czynniki, do badań w warunkach produkcyjnych wybrano świeżo pozyskaną tarcicę obrzynaną o dwóch zasadniczo różniących się grubościach, tj. 23 mm i 50 mm, o szerokości 75–210 mm i długości 2,5–4,5 m, oraz tarcicę nieobrzynaną o grubości 42 mm i 58 mm oraz długości 4,5 m. Natomiast do badań przeprowadzonych w warunkach półtechnicznych wykorzystano tarcicę obrzynaną o grubości 25 mm, 50 mm i 75 mm oraz długości 3 m. Jeżeli wymagał tego cel badań, przed pozyskaniem tarcicy przeprowadzano ewidencję cech surowca, uwzględniając: pochodzenie i średnicę kłody w cieńszym końcu oraz udział twardzieli. Ponadto wykonano oznaczenia wilgotności początkowej drewna (wg PN-77/D-04100), gęstości drewna w stanie zupełnie suchym (wg PN-77/D-04101), a także wyznaczono przeciętną szerokość przyrostów rocznych przy użyciu lupy pomiarowej Brinella (Kokociński, 2004). W każdym z badanych przypadków tarcica była formowana w pakiety dwuczołowe. Do ułożenia tarcicy stosowano przekładki o grubości 15–30 mm.

Do pomiaru masy próbek drewna zastosowano elektroniczną wagę laboratoryjną typu PA 213/1 (OHAUS, USA) o niepewności pomiaru $\Delta m = 0,001$ g. Objętość próbek wyznaczono metodą stereometryczną. Wymiary próbek mierzono za pomocą suwmiarki elektronicznej typu CD-15CX (Mitutoyo, Japonia).

3.3. Określenie wpływu konstrukcji suszarki i warunków eksploatacji na proces suszenia tarcicy

Pomimo podobnej koncepcji aktualnie stosowane suszarki komorowe do tarcicy charakteryzuje różnorodność w zakresie szczegółowych rozwiązań konstrukcyjnych i parametrów zastosowanych podzespołów oraz ich rozmieszczenia w suszarce. Stanowi to odzwierciedlenie kierunków działań, jakie podejmują producenci suszarek w celu ograniczenia niekorzystnego wpływu cech konstrukcji suszarki na przebieg i jakość suszenia oraz zwiększenia efektywności oferowanych technologii suszenia.

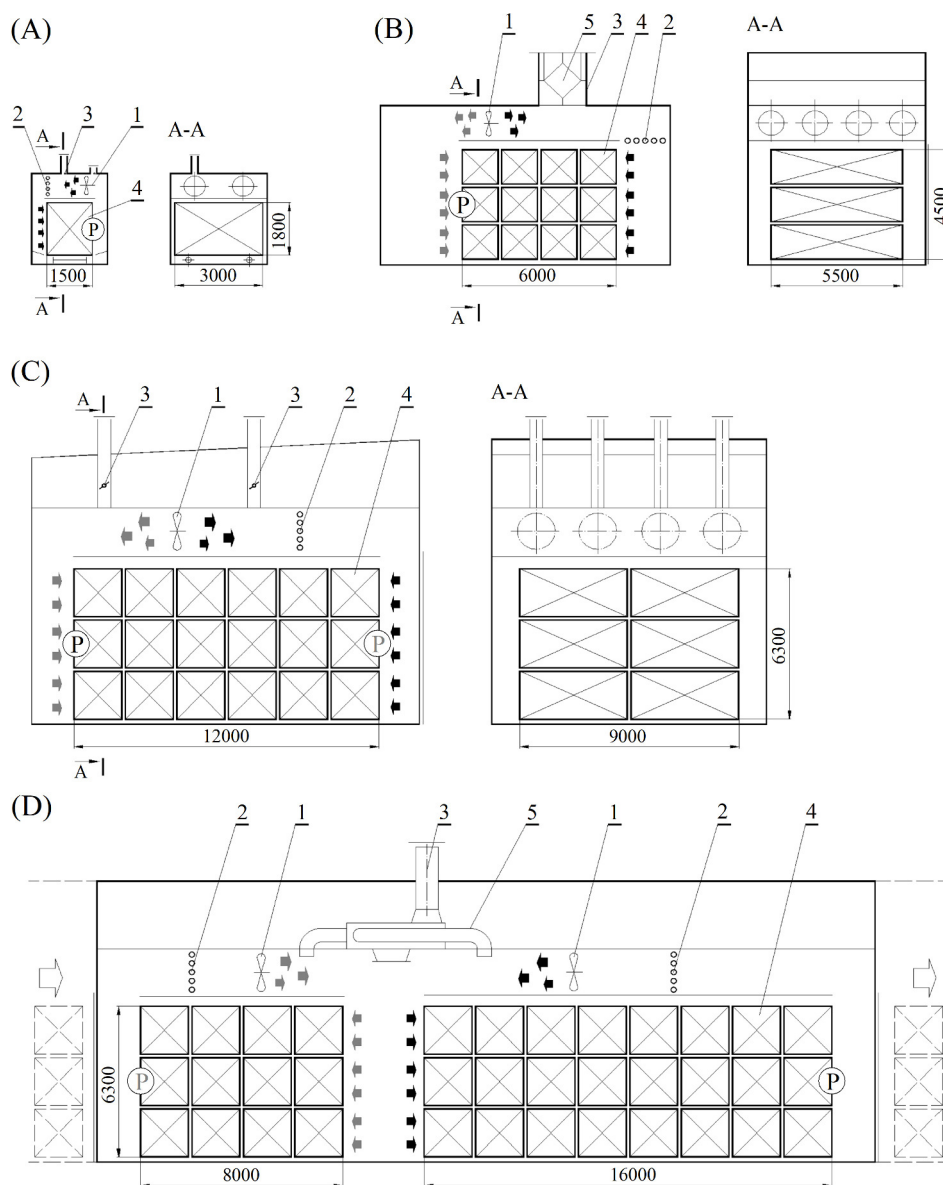
Wybór suszarek do badań uwzględniał te aspekty ich konstrukcji, wyposażenia i eksploatacji, które powodują zakłócenia równomierności wysychania, tj. jednej z głównych przyczyn nadmiernego rozrzutu wilgotności końcowej tarcicy. W tym kontekście szczególną uwagę zwrócono na zagadnienie równomierności przepływu powietrza w załadunku suszarki (stosie tarcicy). Uwzględniono aspekt wymiarów stosu tarcicy (zwłaszcza w kierunku przepływu powietrza), obciążenia suszarki (stopień wypełnienia przestrzeni załadunkowej), regulacji prędkości obrotowej wentylatorów za pomocą falowników prądowych i rewersyjnych zmian kierunku przepływu powietrza oraz zastosowania dodatkowego wyposażenia do wspomaganie sprawności aerodynamicznej suszarki (kierownice powietrza, kurtyny). Dodatkowo uwzględniono problem zakłóceń przepływu powietrza przez załadunek suszarki, wynikający z niecałkowitego wypełnienia przestrzeni załadunkowej pakietami tarcicy. Wyniki wcześniejszych badań Noworyty (2006) i Misiaka (2010) wskazują, że praktyka konfigurowania pakietów tarcicy w stosie, w sposób pozwalający na

pozornie efektywne wykorzystanie przestrzeni załadowniczej suszarki, jest przyczyną niekontrolowanych zmian właściwości obiegu powietrza i zaburzeń równomierności wysychania tarcicy, a w rezultacie wadliwej wilgotności końcowej. Dlatego oprócz wariantu całkowitego wypełnienia przestrzeni załadowniczej suszarki zaaranżowano – nieuniknione w praktyce produkcyjnej – sytuacje niecałkowitego wypełnienia przestrzeni załadowniczej suszarki pakietami tarcicy o długości niedostosowanej do jej wymiarów, a także różne warianty konfiguracji pakietów.

Do badań wytypowano wielkogabarytowe suszarki konwekcyjne do tarcicy iglastej o różnej pojemności, sterowane mikroprocesorowo i wyposażone w falowniki prądowe do bezstopniowej regulacji prędkości obrotowej wentylatorów (ryc. 1). Jednorazowa objętość netto tarcicy w suszarkach, zależna od grubości tarcicy i zastosowanych przekładek oraz stopnia wypełnienia i wariantu konfiguracji pakietów w stosie, wynosiła 20–330 m³. Wybrane suszarki różniły się typem (różni producenci), wymiarami przestrzeni załadowniczej, liczbą wentylatorów (2–8 szt.), zainstalowaną mocą cieplną i elektryczną napędu wentylatorów (3–150 kW) oraz trybem pracy (suszarka cyklicznego i ciągłego działania, odpowiednio komorowa i tunelowa). O wyborze dwustrefowej suszarki tunelowej zdecydował fakt, że porównania aspektów realizacji procesów suszenia w suszarkach tego rodzaju i komorowych w kontekście jakości suszenia stanowiły dotychczas przedmiot nielicznych badań (Hukka, 2001; Salin i Wamming, 2008; Majka i in., 2014).

W badaniach uwzględniono także typową małogabarytową suszarkę komorową do tarcicy o pojemności 5 m³ do realizacji eksperymentów, których wyniki zastosowano do opracowania szczegółowych modeli matematycznych, charakteryzujących związki między różnymi czynnikami eksploatacyjnymi i materiałowymi a równomiernością przepływu powietrza w załadunku suszarki.

W celu wyznaczenia stopnia zróżnicowania warunków wysychania tarcicy w obrębie załadunku suszarki przeprowadzono pomiary prędkości i temperatury powietrza. W warunkach produkcyjnych pomiary prędkości powietrza wykonano za pomocą anemometru skrzydełkowego TESTO-440 (Testo, Austria), a w warunkach półtechnicznych za pomocą mikroprocesorowego termooanemometru MPA-10 (Elektra, Polska) wyposażonego w sondę z czujnikiem cylindrycznym. Punkty pomiarów prędkości były zlokalizowane na skraju stosu tarcicy (w strefie wylotu powietrza) w połowie wysokości każdej szczeliny między warstwami tarcicy oraz w połowie odległości między najbliższymi przekładkami. Punkty pomiaru prędkości tworzyły płaszczyznę określoną wymiarami długości (L) i wysokości (H) stosu, prostopadłą do kierunku przepływu powietrza. Z uwagi na rewersyjny obieg powietrza pomiary prędkości powietrza przeprowadzono po tej stronie załadunku suszarki, która w zależności od kierunku przepływu powietrza stanowiła strefę jego wylotu ze stosu. Dodatkowe pomiary prędkości powietrza prowadzono w obrębie tzw. szkodliwych przestrzeni. Uwzględniono przestrzenie bezpośrednio nad posadzką, pomiędzy sąsiednimi pakietami tarcicy oraz pomiędzy stropem pozornym a górną płaszczyzną stosu tarcicy, a także pomiędzy czołami stosu tarcicy a ścianami bocznymi obudowy suszarki. Pomiary prędkości powietrza w warunkach produkcyjnych (suszarka B-D, ryc. 1) zostały wykonane przed rozpoczęciem procesu suszenia, niezwłocznie po zakończeniu załadunku suszarki pakietami świeżej tarcicy. Temperatura powietrza podczas pomiarów prędkości w przybliżeniu



Ryc. 1. Schematy konwekcyjnych suszarek do tarcicy wybranych do badań: A-C – suszarki komorowe, D – suszarka tunelowa (dwustrefowa), 1 – wentylator, 2 – nagrzewnica, 3 – kominiki wentylacyjne, 4 – stos tarcicy, 5 – rekuperator ciepła, P – strefa pomiarów temperatury i prędkości powietrza, wymiary w mm

Fig. 1. Diagrams of drying kilns selected for experiments: A-C – batch kilns, D – progressive kiln (two-zone), 1 – fan, 2 – heating coil, 3 – vents, 4 – timber stack, 5 – recuperator, P – zones of air velocity and temperature measurements, dimensions in mm

odpowiadała temperaturze powierzchni wilgotnego drewna i wynosiła od kilku do kilkunastu stopni Celsjusza. W przypadku pomiarów prędkości powietrza przeprowadzonych w warunkach półtechnicznych (suszarka A, ryc. 1) temperatura powietrza wynosiła 20°C. Podczas pomiarów prędkości powietrza temperatura wewnątrz suszarek nie zmieniała się. Kominki wentylacyjne suszarek podczas wykonywania pomiarów były zamknięte.

Do pomiarów i rejestracji temperatury powietrza w obrębie załadunku suszarki stosowano zewnętrzny, wielokanałowy system pomiarowy K 1604 (KEST ELECTRONICS, Polska), wyposażony w zestaw rezystancyjnych termometrów elektrycznych Pt 1000 (CZAKI THERMO-PRODUCT, Polska). Bezpośrednio przed rozpoczęciem procesu suszenia termometry zostały umieszczone w środku geometrycznym płaszczyzny prostopadłej do kierunku przepływu powietrza, określonej wymiarami wysokości (h_p) i długości pakietu (l_p). Pomiarów temperatury przeprowadzono w początkowej fazie realizacji procesu ($w > PNW$), dla jednego pełnego cyklu przepływu powietrza obejmującego rewersyjną zmianę kierunku przepływu powietrza. Wyniki pomiarów temperatury były rejestrowane w 30 s interwale czasowym.

3.4. Określenie wpływu technologii suszenia na jakość tarcicy po suszeniu

Tarcica z drewna sosny uznawana jest za łatwo schnącą (Instrukcja..., 1967). Aktualnie stosowane technologie konwekcyjnego suszenia tarcicy sosnowej przewidują możliwość realizacji procesu w sposób łagodny lub intensywny, w temperaturze powietrza 35–90°C (Eichler, 1978; Brunner, 1987; Boone i in., 1988; Cividini, 2000; Trübswetter, 2006; Glijer, 2011). Według analizy przeprowadzonej przez Dobrowolską (2004) programy suszenia tarcicy sosnowej o różnej grubości i wymaganiach jakości, stosowane w warunkach branży drzewnej w Polsce, uwzględniają w fazie początkowej procesu ($w > 30\%$) temperaturę powietrza 50–70°C (a nawet 80°C), natomiast w fazie końcowej suszenia ($w < 30\%$) temperaturę 60–90°C. Duża intensywność procesu suszenia tarcicy iglastej w połączeniu z trudnością zapewnienia równomierności wysychania drewna w powszechnie stosowanych wielkogabarytowych suszarkach do tarcicy stanowią główne przyczyny wadliwej wilgotności końcowej (Vikberg i in., 2015). Procesy suszenia tarcicy iglastej, w tym sosnowej, są realizowane w suszarkach cyklicznego działania (komorowych) oraz ciągłego działania (tunelowych). Cechą charakterystyczną technologii suszenia tarcicy w suszarkach komorowych jest realizacja procesu z założeniem etapu tzw. obróbki wstępnej (poprzedzającej suszenie właściwe) oraz etapu obróbki wyrównawczej (następującym po suszeniu właściwym). Dzięki temu realizacja procesu suszenia w suszarkach komorowych daje większe możliwości kontroli i wpływania na rozrzut wilgotności końcowej niż w przypadku suszarek tunelowych, w których nie przewiduje się etapu obróbki wstępnej i wyrównawczej. Jednak wyniki badań porównawczych Salina i Wamminga (2008) wskazują na to, że najnowsze konstrukcje

suszarek tunelowych (tzw. dwustrefowych) pozwalają na uzyskanie jakości suszenia, w tym rozrzutu wilgotności końcowej, na poziomie charakterystycznym dla realizacji procesu w suszarkach komorowych.

Badania w niniejszej pracy przeprowadzono z uwzględnieniem założeń programów suszenia tarcicy sosnowej, w których przyjęto różne wartości parametrów czynnika suszącego. Zastosowano różne wartości temperatury powietrza i wilgotności równowagowej w początkowej fazie procesu, jako że intensywności suszenia w opisywanej fazie procesu przypisuje się decydujący wpływ na rozrzut wilgotności tarcicy końcowej. W tabeli 2 przedstawiono założenia przeprowadzonych procesów konwekcyjnego suszenia tarcicy sosnowej z wyszczególnieniem parametrów programów suszenia, rodzaju zastosowanej suszarki, wymiarów i pochodzenia tarcicy oraz zastosowania wyników badań.

Wartości parametrów powietrza przewidziane w programie suszenia decydują nie tylko o intensywności suszenia, ale również o rozrzucie wilgotności końcowej. Zastosowanie wysokiej temperatury powietrza może wywołać trwałe zmiany właściwości suszonego drewna (zmiana barwy, wycieki żywicy). Według Gjerdruma (2008) suszenie tarcicy sosnowej w temperaturze 85°C powoduje obniżenie wilgotności równowagowej drewna. Dlatego określenie zakresu zmian właściwości higroskopijnych drewna, który towarzyszy realizacji procesu suszenia, nabiera szczególnego znaczenia dla prawidłowego doboru parametrów powietrza podczas sezonowania tarcicy o wadliwej wilgotności bezpośrednio po suszeniu. Z tego względu przeprowadzono dodatkowe eksperymenty, których celem było wyznaczenie izoterm sorpcji próbek drewna pobranych z bliźniaczych sztuk tarcicy poddanych konwekcyjnemu suszeniu według różnych założeń.

Eksperymenty wyznaczania wilgotności równowagowej przeprowadzono na uprzednio przygotowanym stanowisku badawczym (ryc. 2). Metodę wyznaczania wilgotności równowagowej drewna przedstawiono szczegółowo w publikacji Majki i Olka (2007). Zestawy bliźniaczych próbek drewna o wymiarach 1,5 · 35 · 45 mm, odpowiednio w kierunku stycznym, promieniowym i wzdłużnym, umieszczano w wewnętrznej komorze z wymuszonym przepływem powietrza. Wilgotność względna powietrza była kształtowana przy wykorzystaniu roztworów soli nieorganicznych. W tabeli 3 zestawiono dziewięć roztworów soli i odpowiadające im przeciętne wartości wilgotności względnej powietrza, które uzyskano dla różnych etapów eksperymentu, tj. pierwszej desorpcji, adsorpcji i drugiej desorpcji.

Do oceny jakości suszenia wykorzystano kryterium rozrzutu średnich wilgotności końcowych tarcicy w załadunku suszarki (wg PN-EN 14298:2018-02). Wilgotność końcową mierzono za pomocą elektrycznego wilgotnościomierza oporowego typu FME (Brookhuis, Holandia) wyposażonego w sondy z izolacją, uwzględniając założenia metodyki pomiaru średniej wilgotności sztuki tarcicy stosowanej w praktyce produkcyjnej (wg PN-EN 13183-2:2004). Do określenia rozrzutu średnich wilgotności końcowych wykorzystano także wyniki oznaczeń wilgotności drewna metodą suszarkowo-wagową (wg PN-EN 13183-1:2004). Pomiar wilgotności drewna przeprowadzono po ostygnięciu załadunku suszarki, jednak przed upływem 24 godzin od zakończenia procesu suszenia. Wilgotnościomierz oporowy zastosowano także w celu określenia charakteru i zakresu zmian wilgotności wysuszonej tarcicy podczas jej sezonowania bezpośrednio po suszeniu. W tym przypadku pomiary wil-

Tabela 2. Założenia przeprowadzonych procesów konwekcyjnego suszenia tarcicy sosnowej z wyszczególnieniem parametrów programów suszenia, rodzaju zastosowanej suszarki, wymiarów i pochodzenia tarcicy oraz zastosowania wyników badań

Table 2. Assumptions of pine timber convection drying processes specifying parameters of drying schedules, kiln type, dimensions and provenance of timber and application of test results

Temperatura suszenia Drying temperature	Program suszenia Drying schedule	Wilgotność docelowa Target moisture content	Rodzaj suszarki* Kiln type*	Wymiary tarcicy Dimensions of timber			Pochodzenie tarcicy** Timber provenance**	Grubość przekładek Strickers thickness (mm)	Zastosowanie wyników badań Application of test results
				s (mm)	b (mm)	l (mm)			
1 55°C, 60°C, 65°C	2 łagodny, normalny mild, moderate	3 15 ±2%	4 A	5 25	6 150	7 3000	8 A	9 20	10 analiza wpływu temperatury powietrza i wilgotności równowagowej podczas suszenia na rozrzut wilgotności końcowej tarcicy (pkt. 6.1) analysis of the influence of air temperature and equilibrium moisture content during drying on the final moisture content (point 6.1)
55°C	łagodny mild	12 ±2%	B	42	300	4500	A, B, C, D	25	analiza skutków realizacji procesu suszenia tarcicy o różnym pochodzeniu (pkt. 6.3) analysis of the effects of the drying process of timber of different provenance (point 6.3)
55°C	łagodny mild		B	50	125	4500	D	25	analiza wpływu technologii suszenia na historię sorpcji i właściwości higroskopijne drewna (pkt. 7.1) analysis of the effect of drying technology on sorption hysteresis and hygroscopic properties of wood (point 7.1)

Tabela 2 cd.
Table 2 cont.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
85°C	intensywny intense		C	50	125	2500...4500	D	25	analiza wpływu technologii suszenia na histerzę sorpcji i właściwości higroskopijne drewna (pkt. 7.1) analysis of the effect of drying technology on sorption hysteresis and hygroscopic properties of wood (point 7.1)
85°C	intensywny intense	9 ±2%	C	23	125, 210	2500...4500	D	20	analiza skutków realizacji procesu suszenia tarcicy o różnej wilgotności początkowej (pkt. 7.2) analysis of the effects of the drying process of timber with different initial moisture content (point 7.2)
85°C	intensywny intense	9 ±2%	D	50	125	2500...4500	D	25	analiza wpływu technologii suszenia na histerzę sorpcji i właściwości higroskopijne drewna (pkt. 7.1) analysis of the effect of drying technology on sorption hysteresis and hygroscopic properties of wood (point 7.1)

**Schematy konwekcyjnych suszarek do tarcicy przedstawiono na rycinie 1.

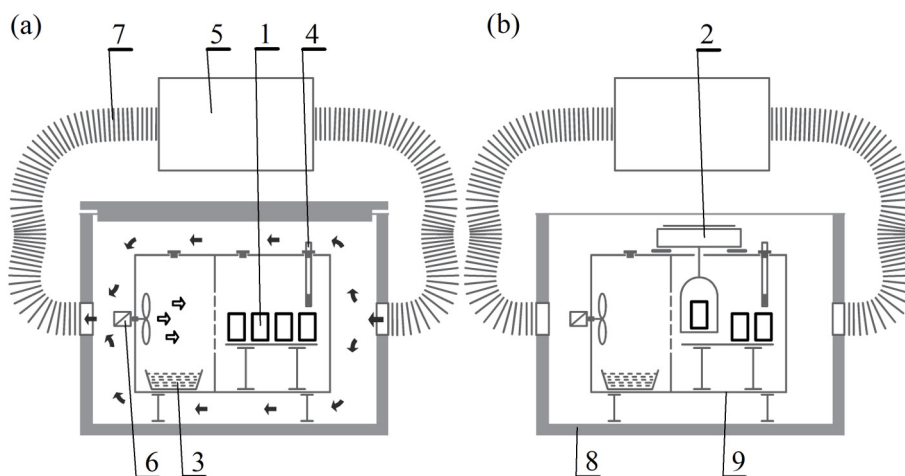
**Pochodzenie surowca tartaczego przedstawiono w tabeli 1.

± dopuszczalny rozrzut wilgotności.

*Diagrams of drying kilns are presented in Figure 1.

**Provenance of raw material are presented in the Table 1.

± allowable range of target moisture content.



Ryc. 2. Schemat stanowiska do badań zjawisk sorpcji: a – faza osiągania równowagi higroskopijnej, b – pomiar masy próbek po uzyskaniu stanu równowagi higroskopijnej (1 – próbka drewna, 2 – waga, 3 – roztwór soli, 4 – termohigrometr, 5 – nagrzewnica, 6 – wentylator, 7 – kanał rurowy, 8 – komora zewnętrzna z izolacją, 9 – komora wewnętrzna) (Majka i Olek, 2007)

Fig. 2. Scheme of the set-up for sorption experiments: a – equilibration of wood samples, b – weighing of equilibrated samples (1 – wood sample, 2 – balance, 3 – salt solution, 4 – thermohygrometer, 5 – heating coil, 6 – fan, 7 – pipe, 8 – outer chamber with isolation, 9 – inner chamber) (Majka and Olek, 2007)

Tabela 3. Roztwory soli nieorganicznych zastosowane w eksperymentach wyznaczania izoterm sorpcji i odpowiadające im przeciętne wartości względnej wilgotności powietrza w temperaturze $22 \pm 1^\circ\text{C}$

Table 3. Inorganic salt solutions applied in sorption experiments and the corresponding average values of air relative humidity at temperature of $22 \pm 1^\circ\text{C}$

Roztwór soli Salt solution	Względna wilgotność powietrza φ (%) Air relative humidity φ (%)		
	1. desorpcja 1st desorption	adsorpcja adsorption	2. desorpcja 2nd desorption
KNO ₃	94 ± 1,5	94 ± 1,3	94 ± 1,3
KCl	88 ± 1,6	86 ± 1,9	87 ± 2,6
NaCl	79 ± 2,3	77 ± 0,9	78 ± 1,3
NaBr	58 ± 0,9	62 ± 2,1	62 ± 1,0
K ₂ CO ₃	47 ± 1,4	47 ± 0,9	47 ± 1,5
CaCl ₂ ·6H ₂ O	33 ± 0,9	35 ± 1,5	36 ± 2,5
CH ₃ COOK	28 ± 1,0	27 ± 2,5	29 ± 1,6
LiCl	13 ± 1,3	14 ± 0,6	13 ± 1,6
P ₂ O ₅	3 ± 1,5	3 ± 1,6	3 ± 1,2

± odchylenie standardowe.

± standard deviation.

gotności przeprowadzono w kilkudniowych odstępach w okresie 4 tygodni, licząc od zakończenia procesu suszenia. Metodę suszarkowo-wagową zastosowano również do określenia zróżnicowania (gradientu) wilgotności na grubości tarcicy. Wymiary próbek drewna do oznaczeń wilgotności zostały określone na podstawie analizy błędów pomiaru opartej na twierdzeniu o różniczce zupełnej (Taylor, 1997). Błąd względny wyznaczania wilgotności δw nie przekraczał 1%. Do pomiaru masy próbek zastosowano elektroniczną wagę laboratoryjną o niepewności pomiaru masy $\Delta m = 0,001$ g.

3.5. Metody analizy danych doświadczalnych

Podstawą oceny wpływu różnych czynników na badane zjawiska i weryfikacji postawionych hipotez badawczych była analiza statystyczna wyników pomiarów badanych wielkości. Do analizy i interpretacji badanych wielkości zastosowano miary statystyki opisowej (wartość średnia, odchylenie standardowe z próby) oraz metody wnioskowania statystycznego (test normalności rozkładu, analiza wariancji). W zależności od specyfiki podejmowanego zagadnienia wyniki poszczególnych eksperymentów przedstawiono też w sposób graficzny za pomocą: histogramu częstości, dwuwymiarowego wykresu rozrzutu lub wykresu typu ramka-wąsy (*box-whisker plot*). W przypadku tego ostatniego ramka wokół wartości średniej obejmuje dwukrotność odchylenia kwartylowego (tj. 50% obserwacji), a wąsy poza jej obrysem reprezentują obszar zmienności odpowiadający jego trzykrotnej wartości (tj. 75% obserwacji). Jeżeli zaistniała taka potrzeba, wartości odstające oraz ekstremalne przedstawiono za pomocą pojedynczych punktów lub ich grup.

Z kolei do określenia istotności różnic przeciętnych wartości charakteryzujących badane wielkości wykorzystano – na podstawie wyników analizy wariancji – test porównawczy *post-hoc* Tukeya. Przejrzystość przedstawiania wyników weryfikacji hipotez o statystycznej istotności różnic przeciętnych wartości badanych wielkości zachowano, uwzględniając symbole w postaci małych liter alfabetu (a, b, c... itp.), w przypadku zestawień tabelarycznych umieszczonych za wartościami wielkości lub powyżej wykresu ramka-wąsy. Przyjęto konwencję, że identyczne symbole oznaczają brak istotnych różnic między przeciętnymi wartościami charakteryzującymi badaną wielkość.

Do zweryfikowania istotności zależności między badanym zjawiskiem (zmienna zależna, zmienna objaśniana) a czynnikami (zmiennie niezależne, zmiennie objaśniające) wykorzystano analizę regresji liniowej. W tym celu zastosowano metodę planowania eksperymentu, określaną także jako *Response Surface Methodology* (Box i Draper, 2007). W zależności od specyfiki podejmowanego zagadnienia w badaniach uwzględniono trzypoziomowy plan eksperymentu dla wariantów dwóch lub trzech badanych czynników. Całkowita liczba zrealizowanych wariantów doświadczeń N w ramach poszczególnych planów eksperymentów została wyznaczona z zależności:

$$N = 3^k \quad (1)$$

gdzie k jest liczbą czynników uwzględnionych w eksperymencie.

Wartości zmiennych niezależnych wyrażone w skali rzeczywistej ξ_i przekształcono do postaci zredukowanej x_i zgodnie z równaniem:

$$x_i = \frac{\xi_i - \xi_{0i}}{\xi_{(\max)i} - \xi_{(\min)i}} \quad (2)$$

gdzie x_i stanowi wartość zredukowaną określonej zmiennej niezależnej, ξ_i stanowi wartość rzeczywistą tej zmiennej, podczas gdy ξ_{0i} jest wartością centralną przedziału zmienności badanego czynnika, a $\xi_{(\min)i}$, $\xi_{(\max)i}$ stanowią odpowiednio jego dolną i górną granicę.

Zastosowana metoda planowania eksperymentu pozwoliła na ocenę efektów głównych, tj. wpływu każdej zmiennej niezależnej (czynnika) na zmienną zależną (badana wielkość) oraz wzajemnych interakcji między uwzględnionymi zmiennymi (czynnikami), a także na określenie ich istotności. Jako funkcję odpowiedzi (model empiryczny), która opisuje badane zależności, wykorzystano równania wielomianu drugiego lub trzeciego stopnia przyjmujące następującą postać:

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_1^2 + \beta_4 x_2^2 + \beta_5 x_1 x_2 \quad (3)$$

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_1^2 + \beta_4 x_2^2 + \beta_5 x_1 x_2 + \beta_6 x_1^3 + \beta_7 x_2^3 + \beta_8 x_1^2 x_2 + \beta_9 x_1 x_2^2 \quad (4)$$

gdzie x_i – badane czynniki, β_i – estymowane współczynniki modelu.

Równanie w postaci wielomianu drugiego stopnia (3) zastosowano w pracy do opracowania modelu:

- udziału twardzieli w pojedynczej sztuce tarcicy,
- dobowych zmian wilgotności sortymentów tarcicy przed suszeniem.

Natomiast równanie wielomianowe trzeciego stopnia (4) zastosowano do opracowania modelu:

- zależności wilgotności równowagowej drewna dla pierwszej desorpcji od wartości parametrów powietrza w programie suszenia,
- zależności średniej prędkości przepływu powietrza w załadunku suszarki od czynników materiałowych i eksploatacyjnych,
- zależności równomierności przepływu powietrza w załadunku suszarki od czynników materiałowych i eksploatacyjnych,
- zmian wilgotności tarcicy podczas sezonowania.

Estymacja wartości parametrów równania (3) i (4) została przeprowadzona metodą najmniejszych kwadratów. Ze względu na dużą liczbę zmiennych w przyjętym modelu wielomianowym i ryzyko wystąpienia efektu współliniowości zmiennych wykorzystano procedurę weryfikacji postaci modelu za pomocą regresji krokowej wstecznej (Chatterjee i Hadi, 2006). Eliminacja nieistotnych zmiennych pozwoliła na zredukowanie modelu do postaci, która uwzględnia wyłącznie parametry istotnie wpływające na zmienną objaśnianą przy zachowaniu możliwie wysokiej jakości dopasowania. W przypadku każdego analizowanego w pracy zagadnienia wyniki estymacji przedstawiono w tabelach, w których obok estymowanych wartości parametrów modelu uwzględniono stopnie swobody, wartość statystyki F oraz prawdopodobieństwa p .

Jakość dopasowania modelu do wyników obserwacji została określona za pomocą współczynnika determinacji (R^2), a po weryfikacji współliniowości wyrazów modelu – za pomocą poprawionego współczynnika determinacji (R_{adj}^2) oraz błędu standardowego oceny (SE). Dodatkowo w każdej z tabel zawierających estymowane wartości parametrów modelu umieszczono wykres empirycznych i odpowiadających im teoretycznych (obliczonych) wartości zmiennej zależnej (objaśnianej). Na podstawie lokalizacji wartości odstających na opisywanym wykresie przeprowadzono analizę źródeł niedokładności modelu.

Udział sztuk tarcicy spełniającej wymagania jakości wyznaczono, aproksymując rozrzut wyników pomiarów wilgotności końcowej tarcicy za pomocą rozkładu normalnego. Hipotezę o normalności rozkładu w każdym analizowanym przypadku weryfikowano na podstawie wyniku testu Shapiro-Wilka.

Analizę statystyczną otrzymanych wyników badań przeprowadzono za pomocą programu DellTM StatisticaTM 13.1. W analizie statystycznej uwzględniono poziom istotności $\alpha = 0,05$.

4. WŁAŚCIWOŚCI DREWNA DETERMINUJĄCE PRZEBIEG I JAKOŚĆ SUSZENIA TARCICY

4.1. Zróżnicowanie udziału bielu i twardzieli w drewnie okrągłym i tarcicy

Wiele gatunków drzew, w tym sosna, wykazuje niejednorodność makrostruktury, wpływającą na zróżnicowanie właściwości drewna, które decydują o przebiegu suszenia. Wymogi związane z przeznaczeniem gotowych wyrobów powodują konieczność ograniczenia występowania niepożądanych elementów strukturalnych budowy materiału, np. drewna młodocianego lub też zapewnienia ich maksymalnego udziału, np. drewna bielu. Spełnienie podanych wymagań umożliwia zastosowanie odpowiedniej technologii pierwiastkowego przerobu drewna (np. Walker, 1993). W przypadku sosny widoczna na przekroju poprzecznym i podłużnym ciemniej zabarwiona, skupiona wokół rdzenia, fizjologicznie nieaktywna strefa drewna, która w drzewie rosnącym spełnia funkcje mechaniczne (twardziel), charakteryzuje się niską wilgotnością. Otaczającą tkankę twardzieli przyobwodową strefę drewna, o jaśniejszym zabarwieniu, która w drzewie rosnącym pełni funkcje fizjologiczne i mechaniczne (biel), charakteryzuje wielokrotnie wyższa wilgotność (Kollmann, 1951). Z punktu widzenia przebiegu suszenia bardzo istotne są rozmieszczenie i udział twardzieli. Duża dysproporcja wilgotności twardzieli i bielu powoduje znaczne, pierwotne zróżnicowanie wilgotności surowca tartaczno-ego oraz pozyskanej tarcicy (Vikberg i Elustondo, 2016). Objętościowy udział twardzieli u_{tw} w kłodzie może być obliczony jako:

$$u_{tw} = \frac{V_{tw}}{V_d} \cdot 100 [\%] \quad (5)$$

Zakładając, że

$$V_{tw} = \frac{\pi \cdot d_{tw}^2 \cdot l}{4}; \quad V_d = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot l}{4}$$

gdzie: l – długość kłody, to objętościowy udział twardzieli może być wyrażony jako:

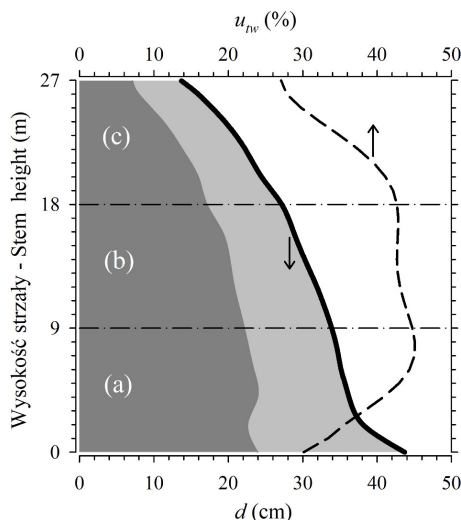
$$u_{tw} = \frac{d_{tw}^2}{d^2} \cdot 100 [\%] \quad (6)$$

Udział twardzieli u sosny ulega dużym wahaniom. Do głównych czynników, które o tym decydują, należą: wiek drzewa, warunki siedliskowe (żywność gleby, specyfika klimatu, naświetlenie), a także stopień redukcji żywej korony drzewa oraz położenie rozpatrywanego przekroju poprzecznego na wysokości drzewa (Taylor i in., 2002). Według Krzysika (1957) objętościowy udział twardzieli w drewnie

rosnowym w wieku ok. 100 lat wynosi 30–50%. Na rycinie 3 zilustrowano rozmieszczenie i udział twardzieli sosny z rejonu Mazur, z uwzględnieniem stosowanego w pierwiastkowym przerobie drewna, umownego podziału surowca tartaczanego (dłużycy) na kłody. Według cytowanego wcześniej Krzysika (1957) średnica twardzieli na przekroju odziomkowym sosny jest mniejsza niż w wyżej położonych przekrojach. Udział twardzieli wzrasta do wysokości ok. 7–10 m od przekroju odziomkowego. Natomiast podobnym udziałem twardzieli charakteryzuje się drewno kłód środkowych (ryc. 3). Związek średnicy twardzieli i średnicy kłody można opisać równaniem liniowym (ryc. 4a).

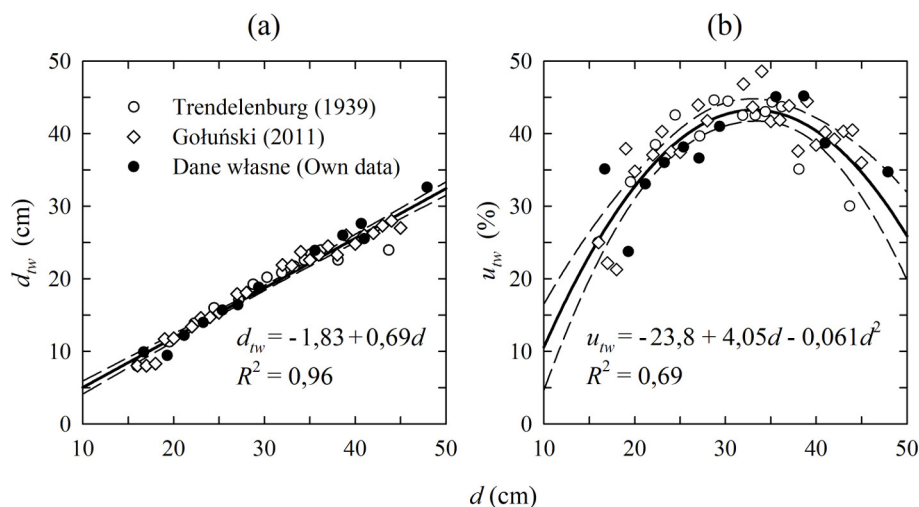
Ryc. 3. Rozmieszczenie drewna twardzieli i bielu oraz udział twardzieli (linia kreskowa) w strzale 159-letniej sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) z rejonu Mazur (opracowano za Trendelenburg, 1939), umowny podział surowca tartaczanego na kłody: a – odziomkowa, b – środkowa, c – wierzchołkowa

Fig. 3. The arrangement of sapwood (light grey) and heartwood (dark grey) and the heartwood content (dash line) in the stem of 159-year-old Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) from the Mazury region (prepared after Trendelenburg, 1939) and conventional division of the raw material: a – butt log, b – second log, c – top end log



Jakubowski (2004) w badaniach dotyczących uwarunkowań zróżnicowania makrostruktury drewna w strzałach sosen zwyczajnych z drzewostanów Puszczy Noteckiej wykazał silną korelację między udziałem drewna twardzielowego a wiekiem drzew. W opisywanym przypadku udział twardzieli w drzewach II, III, IV i V klasy wieku wynosił odpowiednio 10,1%, 17,9%, 21,9% oraz 33,5% miąższości strzały. Natomiast zależność udziału twardzieli od klasy wieku w strzałach sosen wyrosłych w warunkach różnych typów siedliskowych lasu dotyczy wyłącznie drzewostanów V klasy (tj. 81–100 lat). Według cytowanego autora największy udział twardzieli zaobserwowano u sosen z boru świeżego (38,5%), najmniejszy zaś u drzew z boru suchego (26,4%). Gołuński (2011) w badaniach zmierzających do określenia przydatności drewna sosny z Borów Tucholskich do produkcji elementów konstrukcyjnych dla budownictwa szkieletowego stwierdził największy udział twardzieli dla kłód o średnicy 34 cm (49,2%). Natomiast dla kłód o średnicy w przedziale 36–45 cm zaobserwował mniejszy udział strefy twardzielowej, co wpisuje się w ogólnie znaną prawidłowość, charakteryzującą zależność udziału twardzieli od średnicy kłody (ryc. 4b).

Dodatkowym czynnikiem, który wpływa na udział drewna twardzielowego, jest redukcja długości żywej korony drzewa. Drzewa poddane zabiegowi podkrzesania charakteryzuje większy udział twardzieli niż drzewa niepodkrzesane. Z badań,



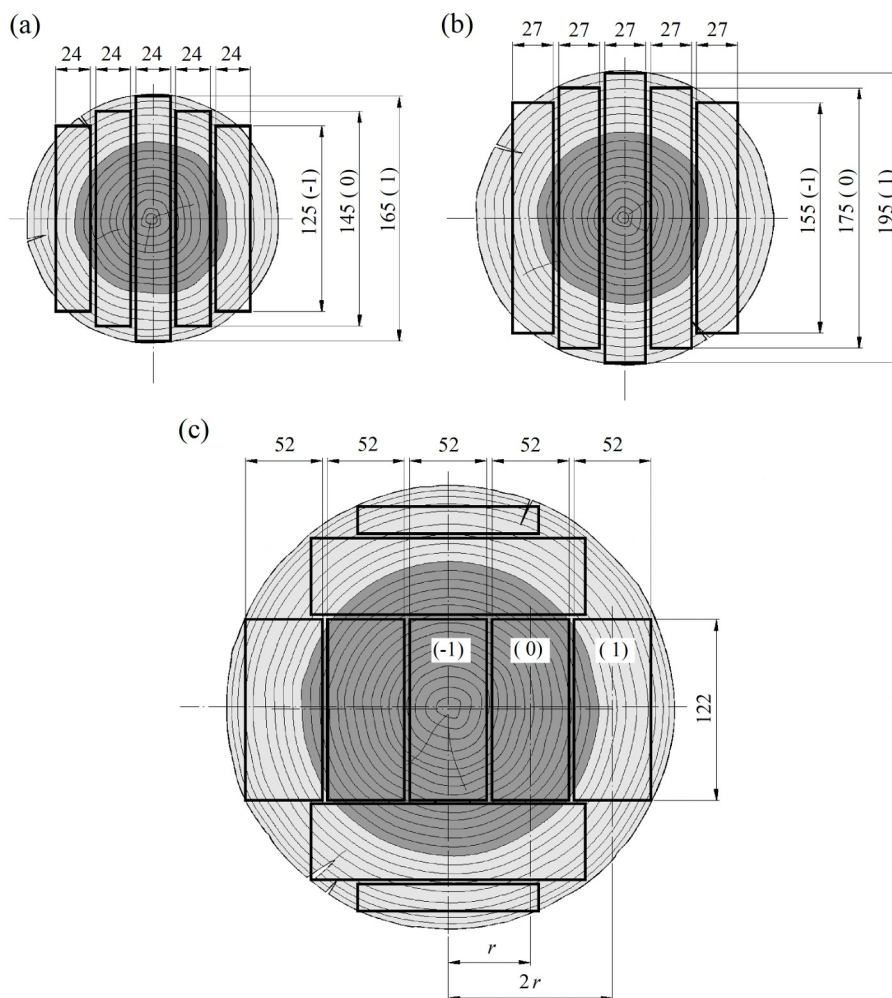
Ryc. 4. Zależność (a) średnicy twardzieli oraz (b) udziału twardzieli w drewnie sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) rodzimego pochodzenia od średnicy kłody (linie kreskowe – 95% przedział ufności)

Fig. 4. Dependence (a) of the heartwood diameter and (b) heartwood content in the Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) timber of native provenance on log diameter (dash lines – 95% confidence interval)

które przeprowadził Pazdrowski (2004), wynika, że udział twardzieli w strzałach sosen podkrzesanych po 24 latach od wykonania zabiegu utrzymywał się w zakresie 12,0–14,4%, a po 51 latach 19,5–33,4%. W drzewach kontrolnych (niepodkrzesanych) udział ten wynosił odpowiednio 9,9% i 23,3%.

Opisywane uwarunkowania niejednorodności makrostruktury drewna w połączeniu z różnorodnością założeń technologii pierwiastkowego przerobu drewna (sposobów przetarcia) oraz różne położenie tarcicy na przekroju poprzecznym drewna okrągłego stanowią główne przyczyny zróżnicowania udziału bieli i twardzieli w partii tarcicy o identycznych wymiarach i stanie obróbki. Na rycinie 5 przedstawiono typowe dla okrawarkowych linii przetarcia schematy rozkroju kłód sosnowych o różnej średnicy w cieńszym końcu d_{ck} na tarcicę obrzynaną o różnej grubości i szerokości. W tym przypadku średnicę twardzieli d_{tw} wyznaczono na podstawie powiązania ze średnicą kłody d , których związek został określony przez Trendelenburga (1939) dla modelowej strzały sosny.

Nieuniknionym efektem pozyskania tarcicy w sposób zilustrowany na rycinie 5 jest zróżnicowanie udziału części twardzielowej w poszczególnych sztukach tarcicy. Decyduje o tym położenie tarcicy względem rdzenia. Tarcicę boczną, o stycznej orientacji przyrostów rocznych, charakteryzuje niewielki udział twardzieli. Natomiast sztuki tarcicy pozyskane ze środkowej strefy kłody (tarcica rdzeniowa), o promieniowej orientacji przyrostów rocznych, charakteryzuje dominujący udział twardzieli. Opisywany efekt, ze względu na dużą różnicę wilgotności drewna twardzieli i bieli sosny, stanowi zasadniczą przyczynę wtórnego zróżnicowania wilgotności w partii świeżo pozyskanej tarcicy. Sztuki tarcicy o dominującym udziale



Ryc. 5. Schematy przetarcia kłód sosnowych o różnej średnicy w cieńszym końcu d_{ck} (a – 167 mm, b – 197 mm, c – 297 mm, $r = s + b_{rz}$)

Fig. 5. Cutting patterns of pine logs with varying top-log diameters d_{ck} (a – 167 mm, b – 197 mm, c – 297 mm, $r = s + b_{rz}$)

drewna twardzieli odznaczają się niską wilgotnością, w przeciwieństwie do sztuk tarcicy o dominującym udziale drewna bielu, które charakteryzuje wysoka wilgotność. W tym przypadku o ich wilgotności decyduje wysoka wilgotność drewna bielu. Zatem dla określenia rozrzutu wilgotności w partii tarcicy przed suszeniem (uważanego za jedną z głównych przyczyn rozrzutu wilgotności końcowej) kluczowe jest wyznaczenie udziału twardzieli/bielu w pojedynczych sztukach tarcicy – uwzględniając zróżnicowanie makrostruktury surowca tartacznego, parametrów technologii mechanicznego przerobu oraz wymiarów przekroju poprzecznego i długości pozyskanej tarcicy. W tabeli 4 przedstawiono założenia dwuczynnikowego modelu, pozwalającego na wyznaczenie udziału twardzieli w pojedynczej sztuce

tarcicy pozyskanej z kłód sosnowych o różnej średnicy w cieńszym końcu dla schematów przetarcia zilustrowanych na rycinie 5. Zaproponowany model ma postać wielomianu drugiego stopnia opisanego równaniem (3). Natomiast w tabeli 5 zestawiono wyznaczone objętościowe udziały twardzieli odpowiadające przyjętym wariantom przetarcia, wymiarom przekroju poprzecznego (ξ_1), odległości od rdzenia (ξ_2) oraz długości tarcicy (ξ_3). Porównanie wartości określających udział twardzieli w poszczególnych sztukach tarcicy (tab. 5) wskazuje na występowanie istotnego zróżnicowania opisywanej cechy dla skrajnych lokalizacji tarcicy na przekroju poprzecznym kłód o wymiarach uwzględnionych w analizie.

Tabela 4. Założenia do modelu określającego udział twardzieli w pojedynczej sztuce tarcicy pozyskanej z kłód sosnowych o różnych średnicach w cieńszym końcu d_{ck}

Table 4. Assumptions for the model determining the heartwood content in a single piece of sawn timber cut from pine logs with different top-log diameters d_{ck}

Zmienna niezależna Independent variable	Symbol Label	Schemat przetarcia Cutting pattern	Poziom zmiennej Level of variable		
			(1)	(0)	(-1)
Szerokość tarcicy b (mm) Timber width b (mm)	ξ_1 (x_1)	(a)	165	145	125
		(b)	195	175	155
Odległość od rdzenia r (mm) Distance from the pith r (mm)	ξ_2 (x_2)	(c)	109,0	54,5	0,0
Długość tarcicy l (m) Timber length l (m)	ξ_3 (x_3)	(a), (b), (c)	4,5	3,5	2,5

W nawiasach zamieszczono zmienne niezależne zredukowane: $x_1 = (\xi_1 - 145)/20$; $x_1 = (\xi_1 - 175)/20$; $x_2 = (\xi_2 - 54,5)/54,5$; $x_3 = \xi_3 - 3,5$.

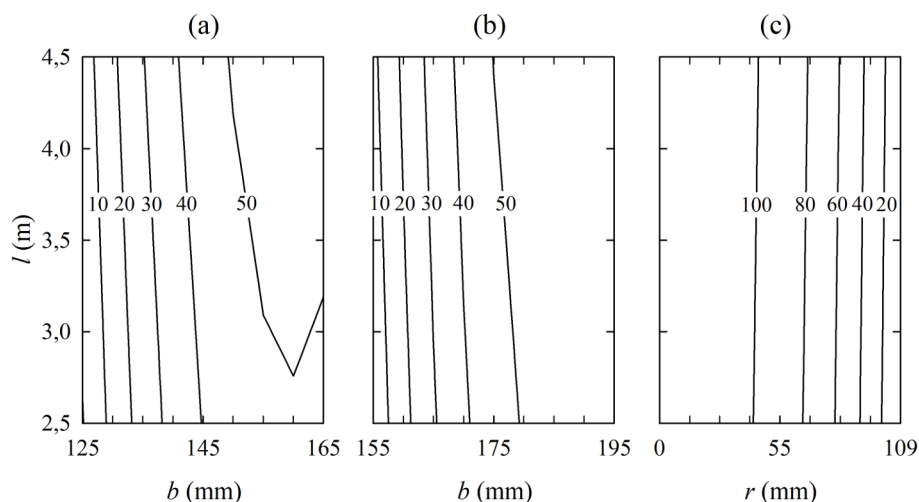
Reduced independent variables in brackets: $x_1 = (\xi_1 - 145)/20$; $x_1 = (\xi_1 - 175)/20$; $x_2 = (\xi_2 - 54,5)/54,5$; $x_3 = \xi_3 - 3,5$.

Tabela 5. Udział twardzieli (%) w pojedynczej sztuce tarcicy dla różnych wariantów szerokości ξ_1 , odległości od rdzenia ξ_2 oraz długości ξ_3 , pozyskanej z kłód sosnowych o średnicy w cieńszym końcu d_{ck} : a – 167 mm, b – 197 mm, c – 297 mm, schematy przetarcia – ryc. 3

Table 5. Heartwood content (%) in a piece of sawn timber for various options of width ξ_1 , distance from the pith ξ_2 and length ξ_3 , cut from pine logs with a top-log diameter d_{ck} : a – 167 mm, b – 197 mm, c – 297 mm, cutting patterns – Fig. 3

Zmienne niezależne Independent variables				Udział twardzieli u_{tw} (%) Heartwood content u_{tw} (%)		
ξ_1 (a)	ξ_1 (b)	ξ_2 (c)	ξ_3 (a, b, c)	(a)	(b)	(c)
165 (1)	195 (1)	109,0 (1)	4,5 (1)	53,0	55,5	100,0
145 (0)	175 (0)	54,5 (0)	4,5 (1)	46,8	50,5	93,8
125 (-1)	155 (-1)	0,0 (-1)	4,5 (1)	4,5	7,9	4,9
165 (1)	195 (1)	109,0 (1)	3,5 (0)	50,9	53,7	100,0
145 (0)	175 (0)	54,5 (0)	3,5 (0)	43,6	48,1	92,4
125 (-1)	155 (-1)	0,0 (-1)	3,5 (0)	2,2	5,3	3,0
165 (1)	195 (1)	109,0 (1)	2,5 (-1)	48,7	52,0	100,0
145 (0)	175 (0)	54,5 (0)	2,5 (-1)	38,9	45,6	90,7
125 (-1)	155 (-1)	0,0 (-1)	2,5 (-1)	0,4	3,2	1,4

Udział twardzieli w pojedynczych sztukach pozyskanej tarcicy zależy od wszystkich uwzględnionych w analizie czynników, tj. szerokości tarcicy, odległości od rdzenia i długości tarcicy, co stanowi funkcję zarówno średnicy kłody,



Ryc. 6. Teoretyczny udział twardzieli w świeżo pozyskanych sortymentach tarcicy sosnowej o grubości (a) 24 mm, (b) 27 mm i (c) 52 mm, w zależności od ich szerokości i długości obliczony za pomocą modelu (3), schematy przetarcia kłód (patrz ryc. 5)

Fig. 6. Theoretical heartwood content in green sawn timber assortments with a thickness of (a) 24 mm, (b) 27 mm and (c) 52 mm, depending on width and length timber calculated with the model (3), cutting patterns of raw material (see Fig. 5)

Tabela 6. Estymowane wartości parametrów modelu (3) określającego udział twardzieli w pojedynczej sztuce tarcicy sosnowej w zależności od jej szerokości i długości dla wybranych schematów przetarcia kłody (patrz ryc. 5)

Table 6. Estimated values of model parameters (3) determining the heartwood content in a piece of pine sawn timber depending on width and length sawn timber for selected cutting patterns of raw material (see Fig. 5)

Symbol	Wartość – Value		
	(a)	(b)	(c)
β_0	43,12	48,05	92,32
β_1	24,26	24,14	48,45
β_2	2,70	2,21	1,09
β_3	-16,53	-18,44	-40,78
β_4	-	-	-
β_5	-	-0,29	-0,86
R^2	0,999	0,999	0,999
R^2_{adj}	0,998	0,999	0,999
SE	1,002	0,252	0,404

jak i położenia tarcicy na przekroju poprzecznym. Dla każdego analizowanego przypadku przetarcia kłody zilustrowany na rycinie 6 udział twardzieli w pozyskanej tarcicy zmienia się ponad pięciokrotnie. Od mniej niż 10% do ponad 50% (wariant przetarcia a i b) oraz od mniej niż 20% do 100% (wariant przetarcia c). Ponadto udział twardzieli w pozyskanej tarcicy zwiększa się wraz z jej długością, zwłaszcza dla sortymentów o większej szerokości. Składa się na to efekt zarówno zbieżności kłody, jak i położenie tarcicy o większej szerokości w środkowej części przekroju kłody.

4.2. Właściwości fizyczne drewna wpływające na proces suszenia – podatność na suszenie

Do podstawowych właściwości drewna, które określają jego podatność na suszenie, a z drugiej strony wpływają na wybór sposobu suszenia, należy gęstość. Stanowi ona zatem jedno z tych kryteriów, które należy uwzględnić przy wyborze parametrów procesu suszenia (programu suszenia). Zapewnienie warunków prawidłowego przebiegu procesu suszenia tarcicy o dużej gęstości, określanej jako trudno schnąca, wymaga ograniczenia intensywności suszenia w celu zmniejszenia gradientu wilgotności na przekroju poprzecznym. Natomiast większa intensywność suszenia i większy gradient wilgotności na przekroju poprzecznym może charakteryzować proces suszenia tarcicy z gatunków drewna o małej gęstości, określanej jako łatwo schnąca.

Gęstość drewna jest właściwością uwarunkowaną genetycznie, przy czym odznacza się znacznym wewnątrzgatunkowym zróżnicowaniem (np. Zobel i Buijtenen, 1989; Wilhelmsson i in., 2002). Zróżnicowanie gęstości drewna zależy od wielu czynników wewnętrznych i zewnętrznych (środowiskowych), decydujących o dynamice przyrostu na grubość w różnych fazach rozwojowych drzewa, np. na przekroju poprzecznym pnia sosny, w strefie przyrdzeniowej przyrosty roczne charakteryzuje większa szerokość niż w strefie przyrostów wykształconych w starszym wieku. Dlatego gęstość drewna sosny przy rdzeniu i w części wierzchołkowej drzewa jest niższa niż gęstość drewna w strefie przyobwodowej czy też w części odziomkowej (Kärenlampi i Riekkinen, 2004; Fabisiak, 2005; Repola, 2006; Ikonen i in., 2008; Tomczak i in., 2010). Opisywana zmienność gęstości drewna związana jest również ze specyfiką funkcjonowania układu biomechanicznego drzewa. W strzałach drzew iglastych wysoka gęstość i wytrzymałość charakteryzuje tkankę poddawaną największym naprężeniom, tj. na przekroju poprzecznym pnia część przyobwodową, a na jego przekroju podłużnym część odziomkową. Przeprowadzona przez Tomczaka i Jelonka (2014) analiza wyników oznaczeń gęstości świeżego drewna z bielastej części pnia sosny zwyczajnej z wybranych drzewostanów północno-zachodniej Polski wykazała, że na przekroju podłużnym maksymalna różnica gęstości drewna z poziomu pierścieniowego i z sekcji wierzchołkowej może przekroczyć 100 kg/m³. Wyniki badań przeprowadzonych przez Repola (2006), dotyczących gęstości drewna sosny pochodzącej z siedlisk w południowej Finlandii

wykazały, że jej zróżnicowanie na przekroju podłużnym pnia jest znacznie większe niż w przypadku pni świerka i brzozy. Analiza zmienności gęstości umownej drewna na wysokości pnia sosny zwyczajnej rodzimego pochodzenia, w zależności od siedliskowego typu lasu, wieku drzewostanu i położenia geograficznego, którą przeprowadzili Witkowska i Lachowicz (2013), potwierdza zmniejszanie się gęstości umownej wraz ze wzrostem odległości od odziomka. Ponadto największą gęstością umowną charakteryzuje się drewno z drzew wyrosłych na siedlisku boru świeżego, najmniejszą zaś z boru mieszanego świeżego. Jednocześnie wspomniani autorzy zaobserwowali zwiększanie się gęstości umownej drewna sosny wraz z wiekiem drzew. Najwyższą gęstość umowną pojedynczej próbki drewna, tj. 596 kg/m^3 , odnotowano w Lasach Zielonogórskich na siedlisku boru świeżego IV klasy wieku na wysokości 0 m, najniższą, tj. 314 kg/m^3 , w Puszczy Knyszyńskiej na siedlisku boru świeżego II klasy wieku na wysokości 16 m. Natomiast rozstęp średnich wartości gęstości umownej charakteryzujący drewno sosny zwyczajnej z Puszczy Noteckiej, wynoszący $441\text{--}515 \text{ kg/m}^3$, został uznany przez Roszyka i in. (2016) za dość znaczny. Wyniki przytoczonych badań potwierdzają zależność gęstości od wieku kambialnego, czyli że tkanki drewna przyrdzeniowego charakteryzują się niższą gęstością niż drewna przyobwodowego.

Ze względu na ścisły związek gęstości drewna z właściwościami określającymi jego podatność na suszenie opisywane wewnątrzgatunkowe zróżnicowanie gęstości drewna należy uznać za dodatkowy czynnik, który niekorzystnie wpływa na równomierność suszenia. Wpływ wewnątrzgatunkowego zróżnicowania właściwości drewna sosny kalifornijskiej (*Pinus radiata* D. Don) na przebieg procesu konwekcyjnego suszenia tarcicy był przedmiotem analiz Panga (2002b). Według wspomnianego autora tarcica o większej gęstości charakteryzuje się lepszym przewodzeniem ciepła, co dynamizuje przebieg ogrzewania podczas realizacji procesu suszenia. Z drugiej strony drewno o większej gęstości gorzej przewodzi wodę, co ogranicza szybkość jej przemieszczania na przekroju poprzecznym i odparowania z powierzchni suszonej tarcicy.

Zobel i Buijtenen (1989) wskazują na występowanie ścisłej korelacji między gęstością a wilgotnością drewna. Giefing i Jabłoński (1989) wykazali, że wzrost gęstości drewna żywych sosen powoduje obniżanie się jego wilgotności w stanie świeżym, niezależnie od wieku badanych drzew, przy czym opisywana zależność ma charakter krzywoliniowy. Z późniejszych badań Helińskiej-Raczkowskiej (1996) nad określeniem związków wilgotności i gęstości drewna wynika, że efektem wzrostu gęstości umownej drewna świeżo ściętych pni brzozy brodawkowatej (*Betula pendula* Roth.) z 400 kg/m^3 do 500 kg/m^3 jest obniżenie jego przeciętnej wilgotności ze 120% do 80%. Autorka podaje, że związek wilgotności i gęstości drewna dobrze opisuje funkcja potęgowa.

Występowanie wewnątrzgatunkowego zróżnicowania gęstości drewna stanowi przyczynę dodatkowego zróżnicowania nie tylko wilgotności surowca tartacznego i pozyskanej z niego tarcicy, ale też zróżnicowania stopnia nasycenia wodą tkanki drewna. Obniżenie gęstości drewna powoduje, że dla stałej zawartości wody przypadającej na jednostkę objętości drewna jego wilgotność jest wyższa niż drewna o większej gęstości.

Do wyznaczenia masy wody w drewnie $m_{\text{H}_2\text{O}}$ przypadającej na jednostkę objętości V można wykorzystać związek między wilgotnością drewna w a jego gęstością umowną ρ_u . W tym celu zastosowano przekształcenia znanych zależności ze względu na masę drewna w stanie zupełnie suchym m_0 , tj. odpowiednio:

$$m_0 = 100 \cdot \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{w} \quad (7)$$

oraz

$$m_0 = \rho_u \cdot V_{\text{max}} \quad (8)$$

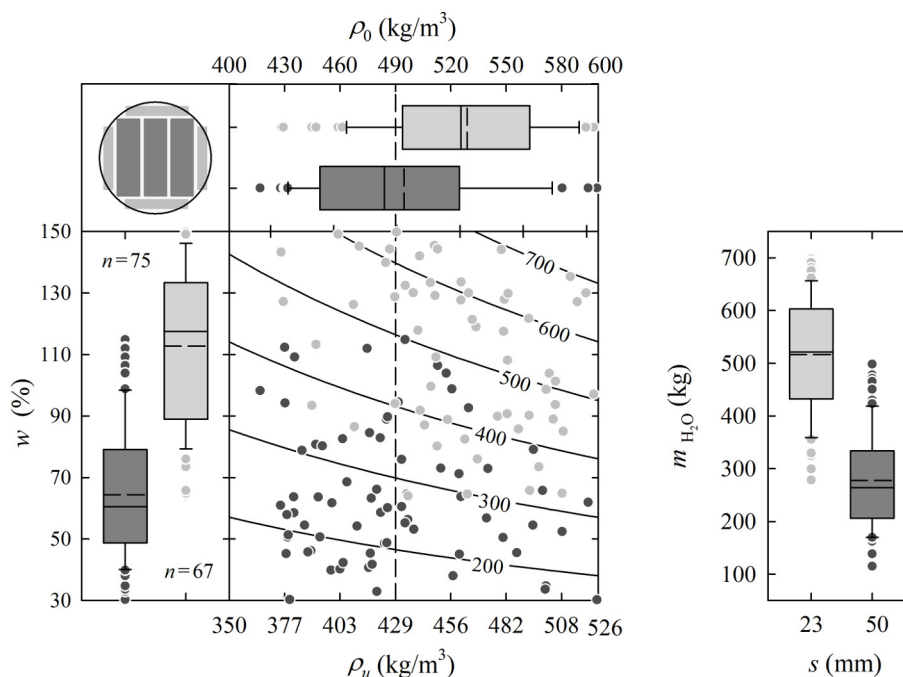
gdzie: V_{max} oznacza objętość drewna [m^3] w stanie maksymalnego spęcznienia ($w > \text{PNW}$).

Po porównaniu stronami równań (7) i (8) oraz przyjęciu założenia o jednostkowej objętości drewna w stanie maksymalnego spęcznienia masę wody przypadającą na 1 m^3 drewna w zależności od jego wilgotności i gęstości umownej wyraża równanie:

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{\rho_u \cdot w}{100} \quad (9)$$

Na rycinie 7 zilustrowano wyniki eksperymentu przeprowadzonego przez autora w warunkach produkcyjnych, który polegał na oznaczeniu gęstości umownej i wilgotności sortymentów świeżo pozyskanej tarcicy sosnowej z różnych stref przekroju poprzecznego drewna okrągłego (wykresy pudełkowe). Tarcica boczna (bielasta), pozyskana z przyobwodowej strefy przekroju kłód, charakteryzuje się istotnie wyższą gęstością umowną i wilgotnością początkową niż tarcica o znacznym udziale drewna twardego pozyskana ze strefy środkowej kłód. Dodatkowo wyniki oznaczeń umieszczono na tle wykresu charakteryzującego zależność jednostkowej masy wody od gęstości i wilgotności drewna opisanej wzorem (9). W obrębie tej samej kategorii sortymentów tarcicy o zbliżonej wilgotności ze względu na dużą zmienność gęstości umownej obserwuje się znaczne zróżnicowanie stopnia uwodnienia. Sztuki tarcicy o podobnej wilgotności, jednak o niższej gęstości, charakteryzuje mniejsza masa wody przypadająca na jednostkę objętości. Zależność ta dotyczy obu badanych sortymentów tarcicy, tj. o grubości 23 mm i 50 mm. Efektem zróżnicowania stopnia uwodnienia sortymentów tarcicy może być nierównomierność jej wysychania podczas procesu suszenia ze względu na różne strumienie masy wody odparowującej z powierzchni tarcicy o tej samej wilgotności.

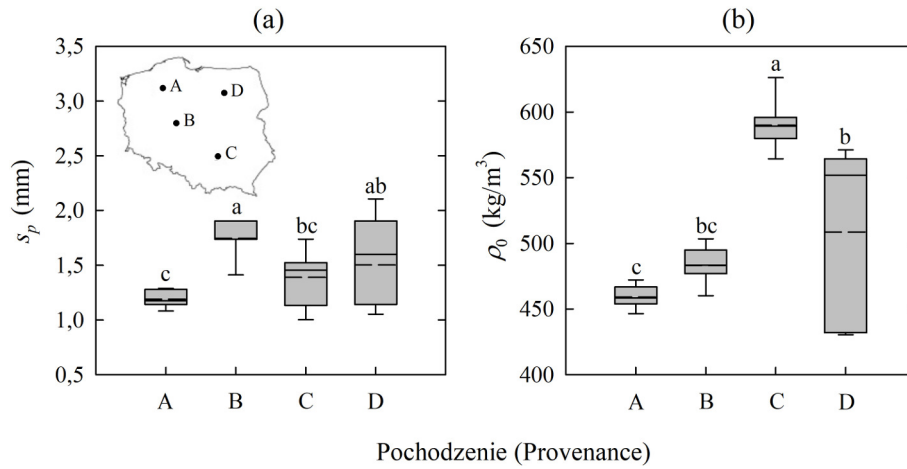
Mechaniczny przerób drewna okrągłego wpływa na stopień zróżnicowania gęstości drewna w pozyskanych sztukach tarcicy. O zróżnicowaniu gęstości i innych właściwości tarcicy decydują: odległość od rdzenia (położenie na przekroju poprzecznym), stan obróbki (tarcica, półfabrykaty) i wymiary tarcicy, a także rodzaj kłody (odziomkowa, wierzchołkowa). Z przedstawionych wcześniej względów zróżnicowanie gęstości jest nieuniknione i dotyczy zarówno pojedynczej sztuki tarcicy, jak i partii stanowiącej załadunek suszarki. Powoduje to dodatkowe zróżnicowanie wilgotności początkowej tarcicy w załadunku suszarki i jej stopnia uwodnienia. Za efektywny sposób ograniczenia rozrzutu wilgotności początkowej tarcicy uznaje się jej sortowanie (*pre-sorting*) zgodnie z kryterium gęstości (np. Steiner i Øvrum, 2010). Vikberg i Elustondo (2016) zaproponowali model zależności gęstości umownej sosny i świerka od średnicy kłody, który zastosowali jako narzędzie pozwalające



Ryc. 7. Zależność wilgotności drewna od gęstości umownej sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) oraz odpowiadająca im jednostkowa masa wody (linia ciągła) świeżo pozyskanych sortymentów 23 mm tarcicy bocznej (jasne punkty) i 50 mm tarcicy głównej (ciemne punkty), linia kreskowa – przeciętna gęstość drewna sosny w stanie zupełnie suchym wg Wagenführ (2007)

Fig. 7. The dependence of moisture content on basic density of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood and the corresponding individual water mass (solid line) of green 23 mm side timber (light grey) and 50 mm heart timber (dark gray), dash line – average Scots pine wood density ρ_0 according to Wagenführ (2007)

na określenie wilgotności świeżo pozyskanej tarcicy. Na rycinie 8 autor przedstawił wyniki własnych oznaczeń przeciętnej szerokości przyrostów rocznych i gęstości próbek drewna sosny pobranych z różnych części partii tarcicy o grubości 42 mm, która stanowiła mieszany załadunek suszarki B (ryc. 1). Celem eksperymentu było określenie zakresu zróżnicowania szerokości przyrostów rocznych i gęstości drewna sosny oraz przedstawienie niepożądanych skutków stosowania – dość powszechnej w przemyśle drzewnym – praktyki kompletowania załadunku suszarki z zewnętrznych dostaw tarcicy, pozyskanej w nadleśnictwach położonych w różnych regionach Polski (A–D). Na rycinie 8a przedstawiono porównanie szerokości przyrostów rocznych poszczególnych partii załadunku suszarki. Szerokość przyrostów rocznych jest uznanym wskaźnikiem gęstości drewna i może stanowić dodatkowe kryterium klasyfikacji tarcicy pod względem podatności na suszenie. Pomimo statystycznie istotnych różnic średnich wartości szerokości przyrostu rocznego tarcicę z nadleśnictw A–D można zakwalifikować jako wąskosłostą ($s_p < 3$ mm), a zatem o podobnej podatności na suszenie. Pomimo identycznych wymiarów i stanu obróbki, a także spełnienia w każdym przypadku kryterium wąskosłosty, par-



Ryc. 8. Porównanie (a) szerokości przyrostów rocznych i (b) gęstości drewna sosny w partii 42 mm tarcicy stanowiącej załadunek suszarki (A–D – miejsce pozyskania tarcicy)
Fig. 8. A comparison of (a) the annual ring width and (b) density of pine wood in a batch of 42 mm sawn timber load in the kiln dryer (A–D – timber provenance)

tia tarcicy stanowiąca mieszany załadunek suszarki charakteryzowała się znaczną zmiennością gęstości. Duża zmienność gęstości drewna jest czynnikiem potęgującym zróżnicowanie wilgotności partii tarcicy przed suszeniem ze względu na opisywane wcześniej związki wilgotności drewna i jego gęstości.

4.3. Izotermy pierwszej desorpcji wody w drewnie

Realizacja procesu suszenia drewna ze ściśle określoną intensywnością zapewnia racjonalne zużycie ciepła i energii elektrycznej oraz ogranicza ryzyko wystąpienia wad suszenia, w tym nadmiernego rozrzutu wilgotności końcowej. Stosowanym w przypadku technologii konwekcyjnego suszenia tarcicy liczbowym wskaźnikiem intensywności suszenia jest iloraz wilgotności bieżącej drewna (parametr wodący procesu suszenia) i wilgotności równowagowej, określane jako gradient suszenia GS (Keylwerth, 1950):

$$GS = \frac{w_b}{w_r} \quad (10)$$

Wilgotność równowagowa – wielkość, która charakteryzuje drewno jako materiał higroskopijny, jest funkcją temperatury (t) i względnej wilgotności powietrza (φ):

$$w_r = f(t, \varphi) \quad (11)$$

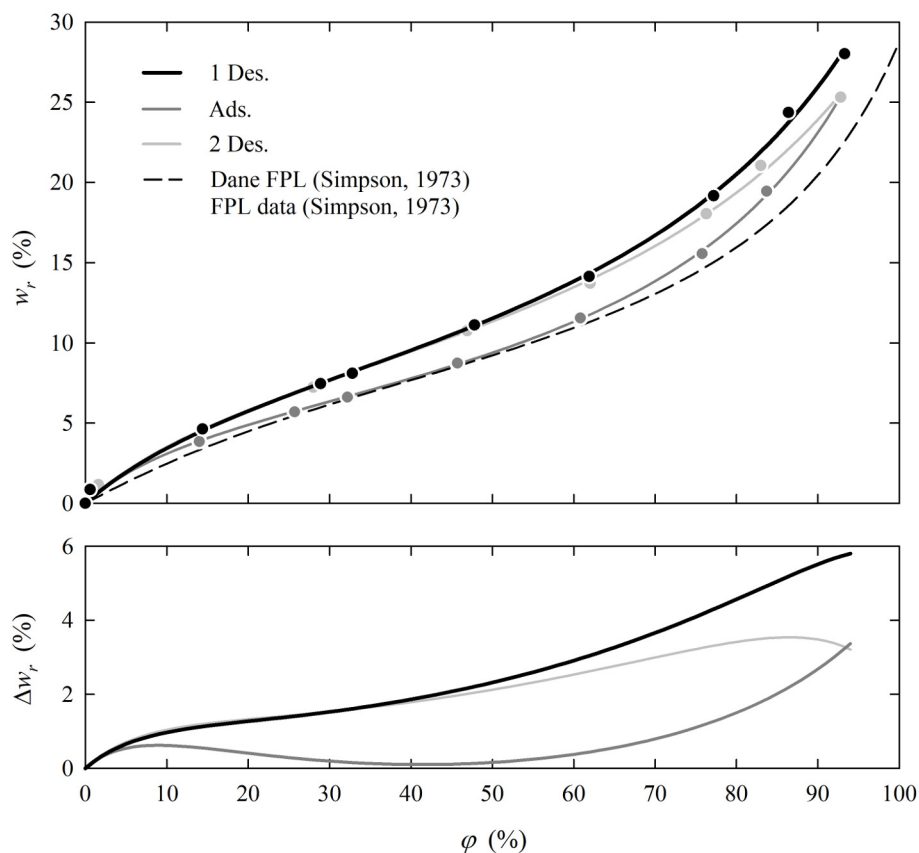
Związek między wilgotnością równowagową i względną wilgotnością powietrza w stałej temperaturze określane jest mianem izotermy sorpcji (Skaar, 1988). Opisane modelami matematycznymi izotermy sorpcji można zastosować do wyzna-

czenia wilgotności równowagowej drewna na podstawie znanych wartości temperatury i wilgotności względnej powietrza. W przypadku suszenia tarcicy świeżej ($w > PNW$) poprawne wyznaczenie gradientu suszenia wymaga uwzględnienia w obliczeniach wartości wilgotności równowagowej charakterystycznej dla tzw. pierwszej (pierwotnej) desorpcji. Izoterma pierwszej desorpcji charakteryzuje się odmiennym przebiegiem niż izoterma drugiej desorpcji (Skaar, 1988). W szczególnych badaniach Matejak (1983) stwierdził, że krzywe pierwszej (pierwotnej) i drugiej desorpcji nie pokrywają się w zakresie zmian wilgotności względnej powietrza od stanu nasycenia do 70–80%. Jednak z uwagi na brak odpowiednich danych eksperymentalnych w praktyce wyznaczania gradientu suszenia wykorzystuje się pośrednie wartości wilgotności równowagowej dla adsorpcji i drugiej desorpcji.

Najczęściej stosowanym sposobem wyznaczania wartości wilgotności równowagowej drewna jest procedura obliczeniowa oparta na modelu sorpcji Hailwooda-Horrobina (1946), dopasowanego przez Simpsona (1973) do danych empirycznych pochodzących z Forest Products Laboratory (Wood Handbook..., 1955). Wspomniane dane empiryczne stanowią zbiór wartości wilgotności równowagowej drewna, które zostały uzyskane w przeważającej mierze dla świerka sitkajskiego (*Picea sitchensis* [Bong.] Carrière) i są wartościami pośrednimi dla procesów adsorpcji oraz desorpcji (Stamm i Loughborough, 1935). Opiswane dane w swym zamierzeniu miały charakteryzować właściwości higroskopijne jedynie północnoamerykańskich gatunków drewna (Wengert, 1976). Pomimo wspomnianych ograniczeń dane te powszechnie wykorzystywane są do ustalania wartości wilgotności równowagowej (przy znanej temperaturze i wilgotności względnej powietrza) w wielu różnych obszarach, takich jak naturalne i techniczne suszenie tarcicy czy też sezonowanie tarcicy po suszeniu. W opinii Simpsona (1998) gatunek drewna i jego historia technologiczna wywierają nieznaczny wpływ na właściwości higroskopijne, dlatego różnice między obliczonymi i rzeczywistymi wartościami wilgotności równowagowej nie są duże. Przytoczone stwierdzenie stanowi jednak zbyt daleko idące uproszczenie. Wartość wilgotności drewna, która charakteryzuje stan równowagi z parametrami powietrza, zależy bowiem – jak wynika z licznych prac – od fazy sorpcji (adsorpcja, desorpcja), stanu drewna (drewno świeże, drewno po suszeniu itp.), a przede wszystkim od jego gatunku. Oznacza to, że stosowanie modelu Hailwooda-Horrobina dopasowanego do wspomnianego zestawu danych empirycznych może być przyczyną znacznej różnicy między obliczonymi i rzeczywistymi wartościami wilgotności równowagowej drewna. Walker (1993), przywołując dane z Wood Handbook w kontekście ich przydatności do zastosowania w procesach konwekcyjnego suszenia tarcicy, określił opisywaną różnicę na poziomie $\pm 3\%$. Z tego powodu wartości wilgotności równowagowej przywoływane w Wood Handbook należy traktować jedynie jako orientacyjne. Gjerdrum (2008) podaje, że wartości wilgotności równowagowej uwzględnione w Wood Handbook (1955) są zawyżone w stosunku do wartości uwzględnianych w aktualnie stosowanych programach do konwekcyjnego suszenia tarcicy. Wspomniany autor wskazuje, że wartość wilgotności równowagowej drewna świerka suszonego w temperaturze 85°C stanowi przeciętnie 95% wartości opublikowanych w Wood Handbook. Salin (2011) wyraża pogląd, że wartości pośrednie wilgotności równowagowej drewna zawarte w opracowaniach FPL mają ograniczoną przydatność

do modelowania zjawisk w procesie konwekcyjnego suszenia tarcicy. Równocześnie uwzględnienie wyników licznych badań właściwości higroskopijnych dla poszczególnych gatunków drewna nie rozwiązuje problemu ich ograniczonej przydatności do wyznaczania gradientu suszenia, ponieważ izotermy sorpcji oraz określające je wartości wilgotności równowagowej zostały wyznaczone po uprzednim wysuszeniu i nawilżeniu próbek drewna (faza 1 adsorpcji i 2 desorpcji), a nie podczas pierwszej desorpcji (np. Spalt, 1958; Böhrer, 1996; Ahmet i in., 1999; Jannot i in., 2006; Popper i Niemz, 2009; Popper i in., 2009; Jankowska, 2018). Wykazano, że już samo uprzednie wysuszenie próbek drewna w temperaturze 103°C powoduje zmniejszenie higroskopijności drewna w zakresie oddziaływania powietrza o wilgotności względnej poniżej 96% (Hoffmeyer i in., 2011). Redman i in. (2016), mając na uwadze ograniczenia danych z Wood Handbook, wyznaczyli izotermy pierwszej (pierwotnej) desorpcji dla świeżych próbek czterech gatunków drewna liściastego występującego w Australii, a następnie zastosowali zebrane dane empiryczne do modelowania zjawisk towarzyszących realizacji procesu suszenia tarcicy z tych gatunków drewna. Rycina 9 zawiera porównanie wyników własnych badań izoterm sorpcji próbek świeżo pozyskanego drewna sosny (*Pinus sylvestris* L.) rodzimego pochodzenia. W badaniach została uwzględniona faza pierwszej desorpcji, adsorpcji i drugiej desorpcji. Dodatkowo na rycinie 9a przedstawiono izotermę sorpcji obliczoną za pomocą procedury Simpsona (1973), która uwzględnia zastosowanie modelu sorpcji Hailwooda-Horrobina do aproksymacji danych opublikowanych przez FPL w Wood Handbook. Największe różnice między wyznaczonymi eksperymentalnie a obliczonymi (pośrednimi) wartościami wilgotności równowagowej występują dla pierwszej desorpcji (ryc. 9b). Pozwala to przypuszczać, że wartości gradientu suszenia uwzględniane w programach konwekcyjnego suszenia tarcicy niewłaściwie charakteryzują intensywność suszenia. Stanowi to uzasadnienie potrzeby wyznaczenia i opracowania danych wilgotności równowagowej dla pierwszej desorpcji, niezbędnych do obliczenia wiarygodnych wartości gradientu suszenia – wyznacznika intensywności suszenia drewna.

Zwiększenie wiarygodności oceny intensywności suszenia na podstawie gradientu suszenia wymagało zatem uwzględnienia równowagi higroskopijnej, jaką osiąga drewno w warunkach odpowiadających założeniom procesów konwekcyjnego suszenia tarcicy. Uzasadnia to przedstawienie wyników badań przeprowadzonych przez autora, których celem było wyznaczenie rzeczywistych wartości wilgotności równowagowej drewna w fazie pierwszej desorpcji i w warunkach odpowiadających założeniom procesu suszenia. W dalszej kolejności uzyskane wyniki wykorzystano do oceny różnic między wartościami gradientu suszenia określanego według obecnych procedur a wartościami wynikającymi z danych dotyczących wilgotności równowagowej drewna dla pierwszej desorpcji. Badania te przeprowadzono na próbkach drewna sosny o wymiarach 80 · 40 · 5 mm odpowiednio w kierunku stycznym, promieniowym i wzdłużnym, ze świeżo pozyskanych bali sosnowych o wilgotności powyżej PWN. Przed rozpoczęciem badań zestawy bliźniaczych próbek (6 szt. dla każdego wariantu eksperymentu) zabezpieczono przed niekontrolowanymi zmianami wilgotności. Wilgotność równowagowa próbek drewna została wyznaczona podczas eksperymentu przeprowadzonego na wcześniej przygotowanym stanowisku badawczym (Guzenda i in., 1998; Raczkowski i in., 2000), który stano-



Ryc. 9. (a) Izotermy sorpcji świeżopozyskanego drewna sosny (*Pinus sylvestris* L.) rodzimego pochodzenia oraz (b) różnica wilgotności równowagowej wyznaczonej eksperymentalnie i na podstawie danych opublikowanych przez FPL (punkty – dane empiryczne, $t = 22^\circ\text{C}$)

Fig. 9. (a) Sorption isotherms of green Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood of native provenance and (b) difference in equilibrium moisture content determined experimentally and according to the data published by FPL (points – empirical data, $t = 22^\circ\text{C}$)

wiła suszarka z możliwością automatycznej regulacji parametrów powietrza oraz zsynchronizowany z nią automatyczny system pomiaru masy suszonych próbek. Eksperyment wstrzymywano w momencie osiągnięcia przez próbki drewna stanu równowagi higroskopijnej, czyli w sytuacji, gdy automatyczny system pomiaru masy rejestrował brak zmian masy suszonej próbki drewna. W tabeli 7 przedstawiono warianty parametrów powietrza przyjęte w eksperymentach wyznaczania wilgotności równowagowej dla pierwszej desorpcji drewna sosny.

Uzyskane wyniki oznaczeń wilgotności równowagowej drewna dla pierwszej desorpcji porównano z wartościami wilgotności równowagowej obliczonymi za pomocą empirycznego modelu Hailwooda-Horrobina (1946), który jest powszechnie wykorzystywany do opisu izoterm sorpcji wody w drewnie (Spalt, 1958; Simpson, 1973; Skaar, 1988; Popper i in., 2009; Deliiski, 2011). Model Hailwooda-Horrobina

Tabela 7. Warianty parametrów powietrza przyjęte w eksperymentach wyznaczania wilgotności równowagowej dla pierwszej desorpcji drewna sosny (*Pinus sylvestris* L.)

Table 7. Variants of air parameters adopted in the experiments for the first desorption of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood

Zmienna niezależna Independent variables	Symbol	Poziom zmiennej Level of variable				
Temperatura powietrza t (°C) Air temperature t (°C)	ξ_1 (x_1)	30 (-2)	40 (-1)	50 (0)	60 (1)	70 (2)
Wilgotność względna powietrza φ (%) Relative humidity φ (%)	ξ_2 (x_2)	35 (-1)	45 (-0,6)	60 (0)	75 (0,6)	85 (1)

W nawiasach podano zmienne niezależne zredukowane: $x_1 = (\xi_1 - 50)/10$; $x_2 = (\xi_2 - 60)/25$.
Reduced independent variables in brackets: $x_1 = (\xi_1 - 50)/10$; $x_2 = (\xi_2 - 60)/25$.

dany jest równaniem:

$$w_r = \frac{1800}{W} \left(\frac{K\varphi}{1 - K\varphi} + \frac{K_1K\varphi + 2K_1K_2K^2\varphi^2}{1 + K_1K\varphi + K_1K_2K^2\varphi^2} \right) \quad (12)$$

gdzie: $w = 349 + 1,29 \cdot t + 0,0135 \cdot t^2$,
 $K = 0,805 + 0,000736 \cdot t - 0,00000273 \cdot t^2$,
 $K_1 = 6,27 - 0,00938 \cdot t - 0,000303 \cdot t^2$,
 $K_2 = 1,91 + 0,0407 \cdot t - 0,000293 \cdot t^2$.

W tabeli 8 przedstawiono wyznaczone eksperymentalnie wartości wilgotności równowagowej dla pierwszej desorpcji drewna sosny oraz różnice między uzyskanymi wynikami a wartościami wilgotności równowagowej obliczonymi za pomocą algorytmu opracowanego przez Simpsona (1973), który uwzględnia pośrednie wartości wilgotności równowagowej opublikowane w Wood Handbook. Należy zaznaczyć, że zaobserwowane różnice mają dodatnie i ujemne wartości. Maksymalne różnice między wynikami oznaczeń a wynikającymi z zastosowania danych FPL wyniosły od $-2,9$ do $+2,3\%$.

Do uogólnienia zależności wilgotności równowagowej dla pierwszej (pierwotnej) desorpcji od parametrów powietrza odpowiadających założeniom początkowej fazy realizacji procesu suszenia zastosowano analizę regresji liniowej (Box i Draper, 2007). Uzyskane wyniki aproksymowano wielomianem trzeciego stopnia (4). W opisywanym przypadku współczynniki równania (4) zostały wyznaczone metodą najmniejszych kwadratów z weryfikacją ich statystycznej istotności za pomocą procedury regresji krokowej wstecznej. W tabeli 9 przedstawiono estymowane wartości współczynników modelu dla analizowanego przypadku.

Na rycinie 10 przedstawiono zależność wilgotności równowagowej od wartości parametrów powietrza dla pierwszej desorpcji świeżo pozyskanego drewna sosny i dla nieokreślonej fazy sorpcji dla drewna świerka sitkajskiego, która reprezentuje wyniki obliczeń wilgotności równowagowej za pomocą procedury proponowanej przez Simpsona (1973). Dziedzina parametrów powietrza, które uwzględniono w analizie, obejmuje zakres wartości stosowanych w początkowej fazie ($w_b > 30\%$) programów suszenia tarcicy sosnowej w suszarkach komorowych. Dla wyższych wartości temperatury powietrza charakter opisywanej różnicy zmienia się z dodatniego na ujemny (tab. 8). Oznacza to, że rzeczywisty gradient suszenia w przy-

Tabela 8. Wilgotność równowagowa (%) drewna sosny (*Pinus sylvestris* L.) dla pierwszej desorpcji i dane FPL aproksymowane przez Simpsona (1973), w zależności od temperatury ξ_1 i wilgotności względnej powietrza ξ_2

Table 8. Average ($n = 6$) equilibrium moisture content (%) of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) of native provenance for the first desorption and the FPL data approximated by Simpson (1973) depending on temperature ξ_1 and air relative humidity ξ_2

Zmienne niezależne Independent variables		Wilgotność równowagowa (%) Equilibrium moisture content (%)			Δw_r
		dane eksperymentalne		Wartość obliczona (12) Calculated value (12)	
		pierwsza desorpcja initial desorption	dane FPL FPL data		
ξ_1	ξ_2				
30 (-2)	35 (-1,0)	7,2 ±0,5	6,7	7,3	+0,5
30 (-2)	45 (-0,6)	8,6 ±0,5	8,2	8,6	+0,4
30 (-2)	60 (0,0)	11,2 ±0,4	10,6	11,0	+0,6
30 (-2)	75 (0,6)	15,2 ±0,3	14,0	15,0	+1,2
30 (-2)	85 (1,0)	18,8 ±0,2	17,5	19,0	+1,3
40 (-1)	35 (-1,0)	6,5 ±0,5	6,4	6,6	+0,1
40 (-1)	45 (-0,6)	8,3 ±0,5	7,9	8,3	+0,4
40 (-1)	60 (0,0)	10,9 ±0,4	10,2	10,9	+0,8
40 (-1)	75 (0,6)	14,6 ±0,3	13,4	14,9	+1,2
40 (-1)	85 (1,0)	19,2 ±0,2	16,8	18,9	+2,3
50 (0)	35 (-1,0)	6,1 ±0,4	6,1	6,0	+0,0
50 (0)	45 (-0,6)	7,6 ±0,4	7,4	7,7	+0,1
50 (0)	60 (0,0)	10,2 ±0,3	9,7	10,3	+0,5
50 (0)	75 (0,6)	13,7 ±0,3	12,8	14,0	+0,9
50 (0)	85 (1,0)	17,6 ±0,3	16,1	17,7	+1,5
60 (1)	35 (-1,0)	5,8 ±0,2	5,7	5,5	+0,1
60 (1)	45 (-0,6)	7,1 ±0,2	7,0	7,0	+0,1
60 (1)	60 (0,0)	8,9 ±0,3	9,1	9,2	-0,2
60 (1)	75 (0,6)	12,5 ±0,3	12,1	12,2	+0,3
60 (1)	85 (1,0)	16,0 ±0,3	15,3	15,4	+0,6
70 (2)	35 (-1,0)	4,8 ±0,1	5,3	5,0	-0,5
70 (2)	45 (-0,6)	5,9 ±0,3	6,5	6,1	-0,6
70 (2)	60 (0,0)	7,8 ±0,2	8,6	7,4	-0,8
70 (2)	75 (0,6)	9,6 ±0,2	11,4	9,6	-1,9
70 (2)	85 (1,0)	11,6 ±0,2	14,5	12,0	-2,9

± odchylenie standardowe.

W nawiasach podano zmienne niezależne zredukowane.

± standard deviation.

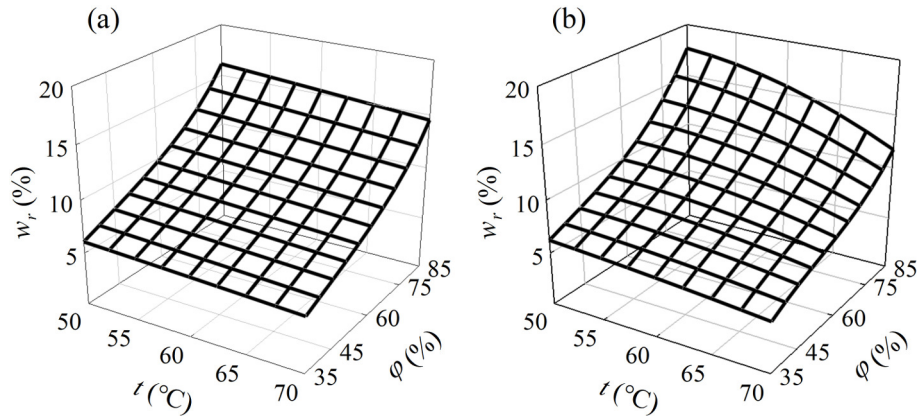
Reduced independent variables in brackets.

padku realizacji procesu suszenia w wyższej temperaturze powietrza będzie wyższy niż wyznaczony z uwzględnieniem wartości wilgotności równowagowej określonej według procedury proponowanej przez Simpsona (1973). Znaczenie tej obserwacji jest niezmiernie istotne z punktu widzenia rozrzutu wilgotności tarcicy w załadunku suszarki. Nadmierną (niekontrolowaną) intensywność suszenia w początkowej fazie realizacji procesu suszenia ($w_b > 30\%$) uznaje się za główną przyczynę nadmiernego rozrzutu wilgotności tarcicy po suszeniu (Widłak, 1991). Zapewnienie odpowiedniej (prawidłowej) intensywności suszenia stanowi podstawowy warunek, którego spełnienie umożliwi ograniczenie rozrzutu wilgotności końcowej tarcicy.

Tabela 9. Estymowane wartości parametrów modelu opisującego zależność wilgotności równowagowej drewna dla pierwszej desorpcji od parametrów powietrza w początkowej fazie realizacji procesu suszenia ($w_b > 30\%$)

Table 9. Estimated values of the model parameters describing the dependence of the equilibrium moisture content for the first desorption on air parameters in the initial phase of the drying process ($w > 30\%$)

Symbol	Wartość Value
β_0	10,316
β_1	-0,896
β_2	4,912
β_3	-0,269
β_4	1,570
β_5	-0,588
β_6	-
β_7	0,943
β_8	-0,290
β_9	-0,269
R^2	0,997
R^2_{adj}	0,995
SE	0,291



Ryc. 10. Empiryczny model zależności wilgotności równowagowej drewna od wartości parametrów powietrza wilgotnego dla (a) nieokreślonej fazy sorpcji (dane FPL) oraz (b) pierwszej desorpcji świeżo pozyskanego drewna sosny (*Pinus sylvestris* L.) rodzimego pochodzenia

Fig. 10. Empirical model of the dependence equilibrium moisture content on the values of humid air parameters for (a) unspecified sorption phase (FPL data) and (b) the first desorption of green Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) of native provenance

Obliczone za pomocą zależności (4), z uwzględnieniem parametrów zestawionych w tabeli 8, wartości wilgotności równowagowej drewna sosny dla pierwszej desorpcji zostały wykorzystane do wyznaczenia gradientu suszenia, który charakteryzuje faktyczną intensywność suszenia. Skorygowany gradient suszenia obliczono jako:

$$GS_{sk} = \frac{w_b}{w_{r(1. des.)}} \quad (13)$$

gdzie: w_b – wilgotność bieżąca drewna ($w_b = 30$, dla $w > 30\%$),
 $w_{r(1. des.)}$ – wilgotność równowagowa dla pierwszej (pierwotnej) desorpcji.

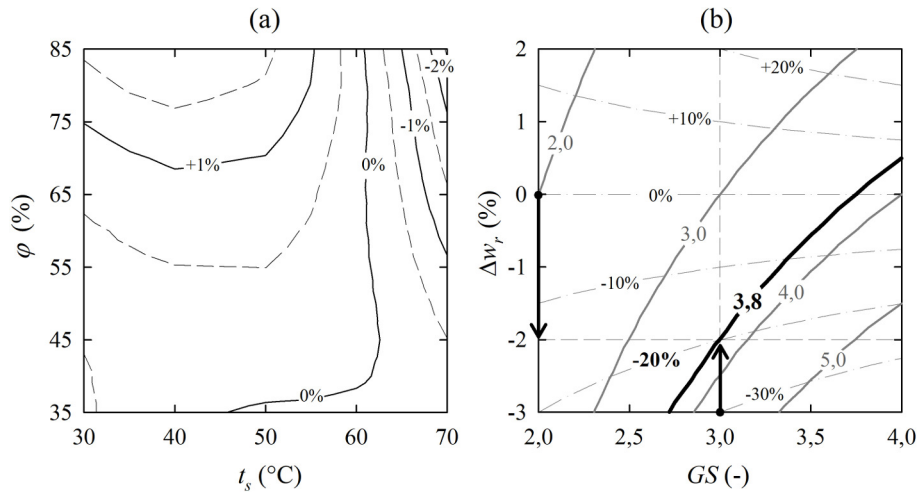
Względne odchylenie gradientu suszenia obliczono z zależności:

$$\delta GS = \frac{GS - GS_{sk}}{GS_{sk}} \cdot 100 [\%] \quad (14)$$

gdzie: GS – gradient suszenia obliczony z zależności (10),

GS_{sk} – skorygowany gradient suszenia obliczony z zależności (14).

Wyniki dotyczące opisywanych różnic wilgotności równowagowej drewna oraz skorygowanych wartości gradientu suszenia zilustrowano graficznie na rycinie 11. Skorygowaną wartość gradientu suszenia (ryc. 11a) przedstawiono w zależności od wartości różnicy, która wystąpiła między faktyczną (dla pierwszej desorpcji) i pośrednią wartością wilgotności równowagowej. Przy założeniu realizacji procesu



Ryc. 11. (a) różnica wilgotności równowagowej dla pierwszej desorpcji świeżo pozyskanego drewna sosny (*Pinus sylvestris* L.) i danych dla nieokreślonej fazy sorpcji, w zależności od wartości parametrów powietrza oraz (b) skorygowana wartość gradientu suszenia, w zależności od wyznaczonej eksperymentalnie różnicy wilgotności równowagowej (linia ciągła – skorygowana wartość gradientu suszenia, linia kreskowa – względne odchylenie gradientu)

Fig. 11. (a) Difference equilibrium moisture content for the first desorption of green Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood and data for unspecified sorption phase, depending on the value of air parameters and (b) corrected drying gradient, depending on the experimentally determined difference in equilibrium moisture content (solid line – corrected drying gradient, dash line – relative gradient deviation)

suszenia przy stałej wartości gradientu suszenia równej 3,0 i przyjmując, że wartość wilgotności równowagowej jest niższa o 2% od uwzględnianej w Wood Handbook, można wykazać, że gradient suszenia wynosi 3,8, co wskazuje na niekontrolowany wzrost intensywności suszenia w porównaniu do zakładanego poziomu.

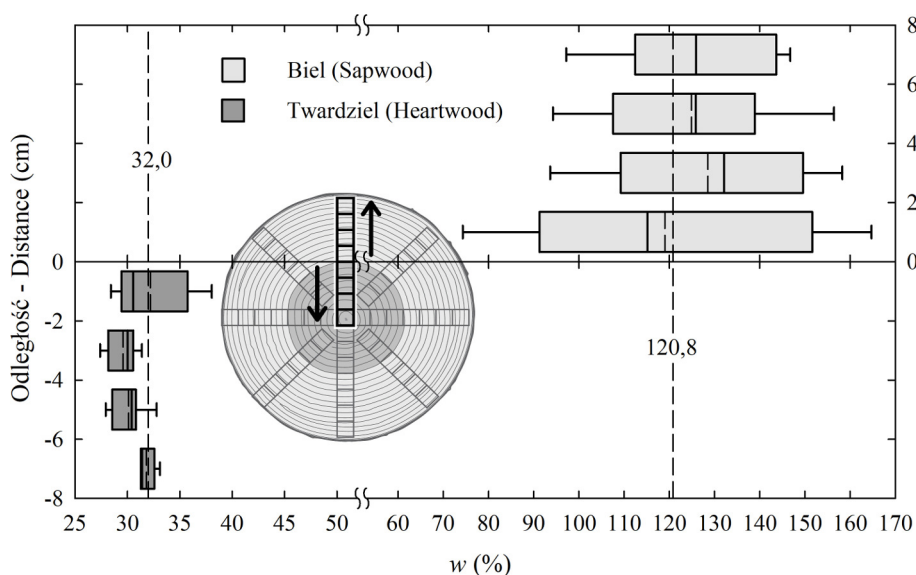
Podsumowanie tej części wyników pracy upoważnia do stwierdzenia, że wyznaczenie izoterm sorpcji świeżo pozyskanego drewna, tj. nigdy niepoddawanego procesom suszenia, pozwala na uściślenie wartości technologicznego wskaźnika intensywności suszenia, tzw. gradientu suszenia. Wyniki przeprowadzonych badań potwierdziły przypuszczenie, że praktyka, która polega na uwzględnianiu pośredniej wartości wilgotności równowagowej dla fazy adsorpcji i drugiej desorpcji w procedurze obliczeniowej zaproponowanej przez Simpsona (1973), jest niewłaściwa w przypadku obliczeń gradientu suszenia określonego równaniem (10). Uwzględnienie w obliczeniach gradientu suszenia wilgotności równowagowej charakterystycznej dla pierwszej desorpcji wody w drewnie, obliczonej za pomocą zależności (4) z uwzględnieniem wartości parametrów zestawionych w tabeli 9 wskazuje, że rzeczywista wartość gradientu suszenia może różnić się od zakładanych nawet do 30% (dla zakresu wartości parametrów powietrza uwzględnionych w badaniach). Jest to podstawa do sformułowania wniosku o istniejących możliwościach racjonalizacji technologii konwekcyjnego suszenia tarcicy w suszarkach komorowych, w których stosuje się suszenie według stałej wartości gradientu. Uściślenie wartości gradientu suszenia powinno zwiększyć bezpieczeństwo suszenia i/lub skrócić czas suszenia do koniecznego minimum.

5. WILGOTNOŚĆ TARCICY PRZED SUSZENIEM

5.1. Zakres pierwotnego zróżnicowania wilgotności drewna

5.1.1. Makrostrukturalne uwarunkowania wilgotności drewna

Stosunkowo dobrze opisane w literaturze zagadnienie pierwotnego zróżnicowania wilgotności na przekroju poprzecznym i podłużnym drewna okrągłego pozostaje w ścisłym związku z rozrzutem wilgotności początkowej partii pozyskanej tarcicy, która ostatecznie stanowi załadunek suszarki. O pierwotnym zróżnicowaniu wilgotności drewna okrągłego na przekroju poprzecznym decyduje fizjologiczna aktywność tkanek drzewa. Według Trendelenburga (za Kubiakiem i Laurowem, 1994) przeciętna wilgotność fizjologicznie czynnej tkanki bielu sosny zawiera się w przedziale 120–150%, natomiast wilgotność nieaktywnej fizjologicznie twardzieli wynosi 30–50%. Według badań Gosa (za Waninem, 1953) wilgotność drewna bielu sosny z rejonu Petersburga wynosi przeciętnie 122%, a twardzieli 33%. Bielezyk i Eminowicz (1954) podają, że średnia roczna wilgotność drewna bielu sosny rodzimego pochodzenia wynosi 100%, a twardzieli 32%. Zróżnicowanie wilgotności tkanki drzewnej występuje również w obrębie pojedynczego przyrostu rocznego. Jak wskazuje Vintila (1939), przeciętna wilgotność drewna wczesnego w przyrostach bielu sosny wynosi 219,9%, a drewna późnego 58,1%. Kubiak i Kosicki (1969) stwierdzili różnice wilgotności drewna sosny w zależności od położenia na przekroju podłużnym pnia. Największą wilgotność wykazuje drewno części odziomkowej, a najmniejszą – część środkowa strzały. Stąd też tarcicę sosnową pozyskaną z kłód odziomkowych charakteryzuje wyższa wilgotność niż pozyskaną z kłód środkowych. Wyniki dalszych badań tego autora wykazały zależność wilgotności drewna również od wieku drzewa. W przypadku sosny najwyższą wilgotność drewna jest domeną drzewostanów I i II klasy wieku. W drzewostanach sosnowych IV–VI klasy wieku wilgotność drewna nie różni się istotnie. Na rycinie 12 przedstawiono wyniki własnych oznaczeń wilgotności drewna bielu i twardzieli sosny rodzimego pochodzenia, przeprowadzonych w 2012 r. na początku okresu wegetacyjnego, tj. w marcu. Wyniki te stanowią odzwierciedlenie znanej prawidłowości występowania skokowej zmiany wilgotności na granicy między opisywanymi strefami przekroju poprzecznego drewna okrągłego. Potwierdzono, że przeciętna wartość wilgotności drewna bielu i twardzieli zawiera się w dziedzinie określonej w cytowanych źródłach. Należy jednak zwrócić uwagę na występowanie zróżnicowania wilgotności drewna w obrębie każdej z opisywanych stref drewna. Znacznie większe zróżnicowanie wilgotności dotyczy przyobwodowej strefy drewna bielu. Z tego powodu partię świeżo pozyskanej, jednorodnej pod względem makro-



Ryc. 12. Wilgotność drewna bielu i twardzieli na przekroju porzecznym kłód sosnowych ($d_{ck} = 30$ cm)

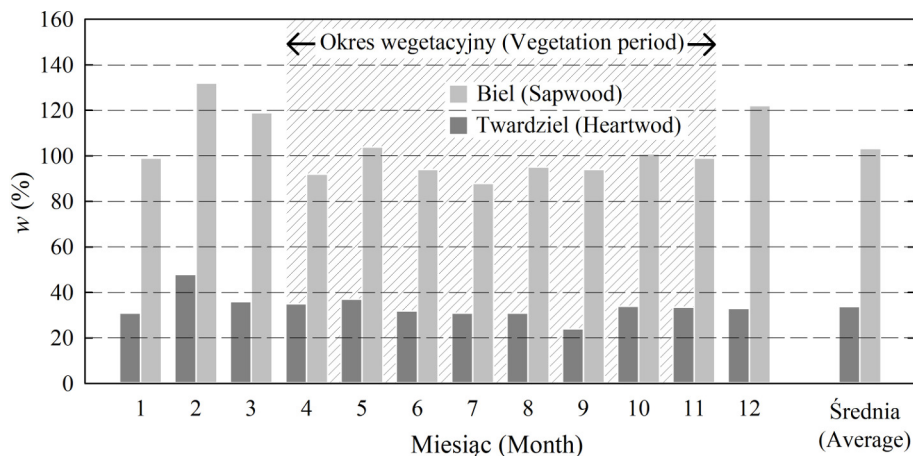
Fig. 12. Moisture content of sapwood and heartwood at the cross-section of Scots pine logs ($d_{ck} = 30$ cm)

struktury i stanu obróbki tarcicy bielastej (tzw. bocznej) przed suszeniem może charakteryzować znaczny rozrzut wilgotności początkowej.

5.1.2. Zmiany wilgotności drewna w ciągu roku

Wilgotność drzew żywych jest ściśle związana z cyklem wegetacyjnym. Moment ścińki decyduje zatem o wilgotności świeżo pozyskanego surowca okrągłego i zasadniczo wpływa na wilgotność pozyskanej tarcicy. Gatunki iglaste, zwłaszcza w strefie bielu, są bardziej wilgotne w okresie spoczynkowym niż w okresie wegetacyjnym. Według Wanina (1953) różnica ta dla bielu sosny wynosi 17%. W strefie twardzielowej opisywana różnica jest znacznie mniejsza. Dla gatunków iglastych wilgotność bielu w skali roku charakteryzuje się znacznymi różnicami w poszczególnych miesiącach, przy czym maksimum przypada w lutym, a minimum na drugą połowę okresu wegetacyjnego (wrzesień). Zmienność wilgotności bielu sosny jest większa niż twardzieli. Z badań wilgotności drzew żywych przeprowadzonych przez Bielczyka i Eminowicza (1954) wynika, że średnia wilgotność bielu waha się w ciągu roku średnio od 90% do 130% (ryc. 13). W okresie spoczynku wegetacyjnego wilgotność bielu jest wyższa (średnia 112%) niż w okresie wegetacyjnym (średnia 94%). Wilgotność twardzieli u rodzimej sosny zależy od pory roku, ale zasadniczo tylko nieznacznie przekracza punkt nasycenia włókien. Przeciętna wilgotność twardzieli sosny zmienia się w ciągu jednego roku od 25% do 45% (Bielczyk i Eminowicz, 1954), przy czym w okresie wegetacji wynosi

średnio 29%, a w okresie spoczynkowym 35%. Maksimum wilgotności twardzieli przypada na koniec lutego, minimum na połowę września. Maksymalna wilgotność drewna bielu przypada na koniec lutego, natomiast minimalna na koniec lipca. Według wspomnianych autorów w żywym drzewie sosny różnica wilgotności drewna bielu i twardzieli wynosi co najmniej 60%.



Ryc. 13. Średnie miesięczne wartości wilgotności drewna twardzieli i bielu u sosny zwyczajnej (opracowano za Bielczyk i Eminowicz, 1954)

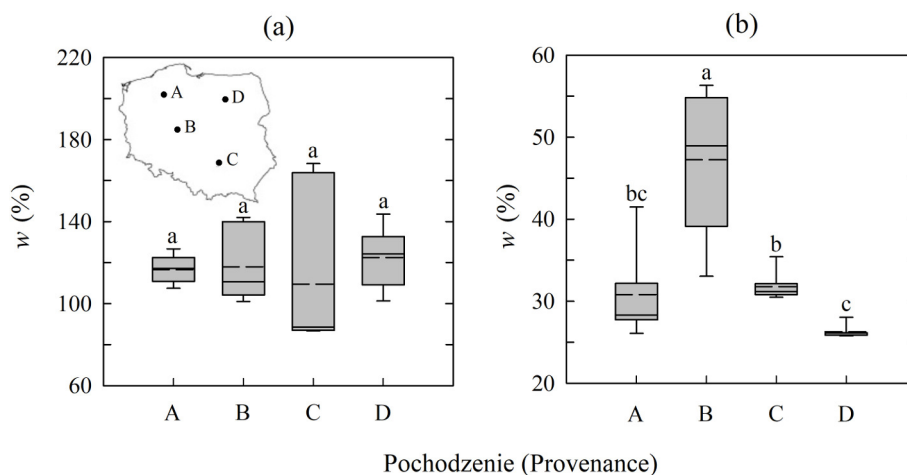
Fig. 13. Average monthly moisture content of sapwood and heartwood in Scots pine (prepared after Bielczyk and Eminowicz, 1954)

Partie tarcicy o identycznym stopniu obróbki i analogicznym położeniu na przekroju poprzecznym surowca okrągłego (kłody), pozyskane w okresach odpowiadających skrajnej, tj. najwyższej i najniższej wilgotności bielu (odpowiednio koniec lutego i lipca), będzie charakteryzowała wilgotność znacznie różniąca się przed suszeniem. Uwzględniając dane przedstawione na rycinie 13, największe różnice wilgotności w skali roku będą dotyczyć – jednorodnej pod względem makrostruktury – partii tarcicy bielastej (bocznej). W opisywanym przypadku przeciętna wilgotność drewna bielu wynosi 132% w lutym i 88% w lipcu. Natomiast znacznie mniejsze różnice wilgotności będą dotyczyć partii tarcicy o dominującym udziale drewna twardzieli, pozyskanej ze środkowych stref przekroju poprzecznego kłód. Przeciętna wilgotność twardzieli dla maksymalnego (w lutym) i minimalnego (w lipcu) jej poziomu wynosi odpowiednio 48% i 31%.

5.1.3. Charakterystyka wilgotności drewna z wybranych lokalizacji pozyskania

Zastosowanie w procesie produkcyjnym wyrobów z drewna surowca o różnym pochodzeniu powoduje ryzyko dodatkowego zróżnicowania właściwości – w tym wilgotności partii pozyskanej tarcicy, która stanowi załadunek suszarki. Opisanymi w punkcie 4.2 skutkami zróżnicowania szerokości przyrostów rocznych w tarcicy pozyskanej w nadleśnictwach położonych w różnych częściach kraju jest

istotne zróżnicowanie gęstości i stopnia uwodnienia tkanki drzewnej, tj. cech, które określają podatność drewna na suszenie. Na rycinie 14 przedstawiono wyniki własnych oznaczeń wilgotności próbek drewna bielu i twardzieli pobranych ze świeżej 42 mm tarcicy sosnowej, pozyskanej z surowca o różnym pochodzeniu i równocześnie stanowiących mieszany załadunek suszarki B. Jednym ze źródeł zaobserwowanych różnic wilgotności drewna bielu i twardzieli jest zróżnicowanie gęstości poszczególnych części załadunku suszarki (patrz ryc. 8). W badanym przypadku stwierdzono brak statystycznie istotnych różnic średnich wartości wilgotności części bielastych tarcicy pozyskanej z surowca o różnym pochodzeniu (dla $\alpha = 0,05$). Wyraźną zależność od pochodzenia surowca wykazuje jednak zakres zmienności wilgotności bielu poszczególnych części załadunku suszarki. W opisywanym przypadku (ryc. 14a) najmniejsze, obejmujące 75% wszystkich obserwacji zróżnicowanie wilgotności bielu wyniosło 20% (lokalizacja A), a największe 90% (lokalizacja C), i to ono decyduje o faktycznym rozrzucie początkowej wilgotności w załadunku suszarki. Poszczególne części załadunku suszarki charakteryzowały również statystycznie istotne różnice średnich wartości wilgotności twardzieli (dla $\alpha = 0,05$). Zróżnicowanie wilgotności twardzieli obejmuje jednak mniejszy zakres wilgotności niż w przypadku bielu.



Ryc. 14. Porównanie wilgotności świeżego drewna (a) bielu i (b) twardzieli sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) rodzimego pochodzenia (A–D – miejsce pozyskania tarcicy)
Fig. 14. A comparison of moisture content (a) of green sapwood and (b) heartwood of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) of native provenance (A–D – timber provenance)

5.2. Zróżnicowanie wilgotności tarcicy bezpośrednio po przetarciu

Zróżnicowanie wilgotności partii świeżo pozyskanej tarcicy zależy od opisanych wcześniej czynników, które decydują o pierwotnym zróżnicowaniu wilgotności drewna okrągłego (kłód tartacznych). Jednak wilgotność pojedynczej sztuki

tarcicy jest ostatecznie determinowana przez parametry zastosowanej technologii mechanicznego przerobu drewna, które określają jej stan obróbki (np. tarcica obrzynana, nieobrzynana), wymiary (tj. grubość, szerokość i długość) oraz położenie na przekroju poprzecznym kłody. Przyjmując założenie, że zróżnicowanie wilgotności drewna okrągłego w przypadku drewna sosny ma charakter strefowy, którego zakres określa wyłącznie różnica przeciętnych wartości wilgotności w przyobwodowej i środkowej strefie drewna – odpowiednio bielastego i twardzielowego, do obliczenia wilgotności początkowej tarcicy wystarczy uwzględnić udziały opisywanych rodzajów tkanki drewna. Wilgotność świeżo pozyskanej sztuki tarcicy może być obliczona jako średnia ważona przeciętnych wartości wilgotności poszczególnych rodzajów tkanek drewna i ich udziałów w objętości sztuki tarcicy:

$$\bar{w}_p = \frac{u_b \cdot \bar{w}_b + u_{tw} \cdot \bar{w}_{tw}}{u_b + u_{tw}} [\%] \quad (15)$$

gdzie: u_b, u_{tw} – udziały objętościowe odpowiednio bielu i twardzieli w sztuce tarcicy, %,

\bar{w}_b, \bar{w}_{tw} – przeciętna wilgotność, odpowiednio bielu i twardzieli, %.

Jeżeli uwzględnimy, że suma udziałów

$$u_b + u_{tw} = 100 [\%]$$

oraz

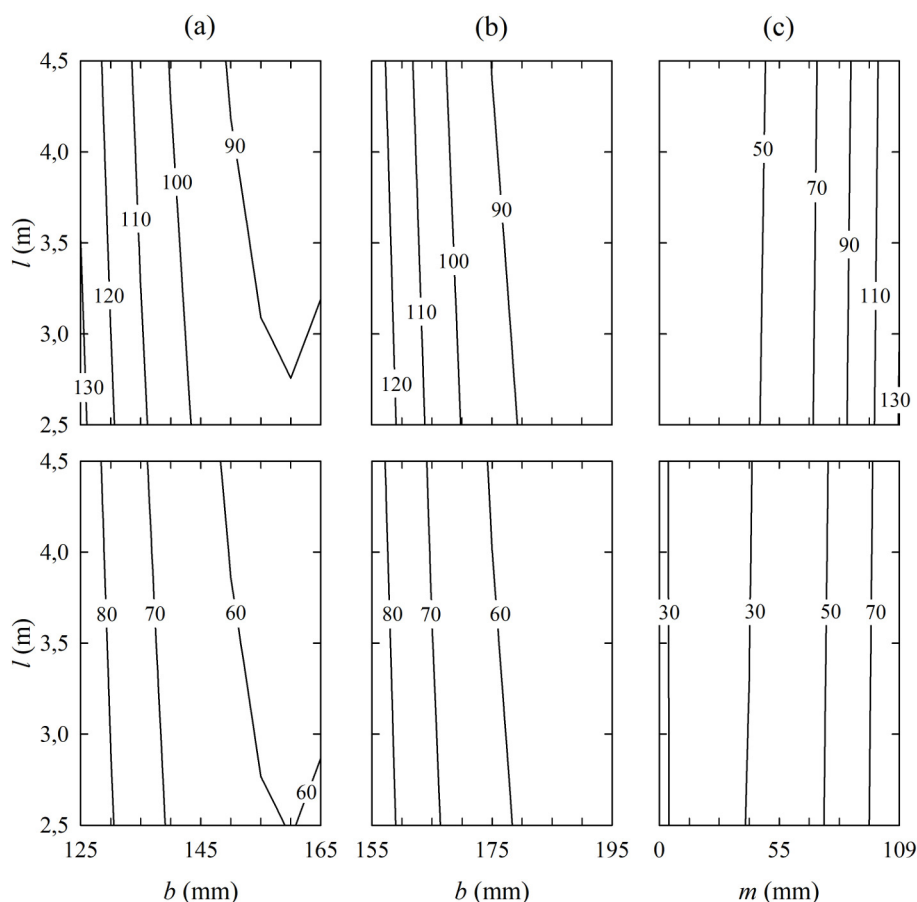
$$u_b = 100 - u_{tw} [\%]$$

to ostatecznie wilgotność początkowa sztuki tarcicy może być obliczana przy uwzględnieniu wyłącznie wartości udziału twardzieli:

$$\bar{w}_p = \frac{100\bar{w}_b - u_{tw}(\bar{w}_b - \bar{w}_{tw})}{100} [\%] \quad (16)$$

Na rycinie 15 przedstawiono wyniki obliczeń wilgotności pojedynczych sortymentów tarcicy sosnowej o grubości 24 mm, 27 mm i 52 mm, pozyskanych z różnych stref przekroju poprzecznego drewna okrągłego. Schemat rozkroju kłód przedstawiono na rycinie 5. Dla każdego wariantu grubości pozostałe wymiary tarcicy, tj. szerokość i długość, były zróżnicowane w zakresie, jaki został dopuszczony w zakładzie produkcyjnym podczas kompletowania załadunku w suszarce C. Udział twardzieli niezbędny do określenia wilgotności początkowej każdego wariantu tarcicy przyjęto na podstawie wyników obliczeń za pomocą zależności (6), która określa związek opisywanej cechy z wymiarami pozyskanej tarcicy i jej położeniem na przekroju poprzecznym kłody. W założeniach do obliczeń uwzględniono także skrajne w skali roku wartości wilgotności drewna bielu. Przerób drewna okrągłego w końcu lutego (koniec okresu spoczynku wegetacyjnego) odbywa się przy maksymalnej wilgotności drewna bielu, natomiast na koniec lipca – przy jej minimalnym poziomie (ryc. 13).

Porównanie wyników obliczeń przeciętnych wartości wilgotności pojedynczych sztuk tarcicy o różnej grubości dla skrajnych wariantów pozostałych wymiarów, tj. szerokości i długości, lub jej położenia na przekroju poprzecznym kłody umożliwia



Ryc. 15. Średnia wilgotność sortymentów obrzynanej tarcicy sosnowej o grubości (a) 24 mm, (b) 27 mm i (c) 52 mm w zależności od jej szerokości b i długości l oraz odległości od rdzenia r , z uwzględnieniem maksymalnej (górne wykresy) i minimalnej (dolne wykresy) wilgotności bielu w ciągu roku

Fig. 15. Average moisture content of edged Scots pine timber assortments with a thickness of (a) 24 mm, (b) 27 mm and (c) 52 mm depending on timber width b and length and distance from the pith r taking into account the maximum (upper plots) and the minimum (lower plots) of sapwood moisture content during the year

określenie wpływu uwzględnionych czynników i określonej praktyki kompletowania tarcicy na rozrzut początkowej wilgotności świeżo pozyskanej tarcicy w obrębie załadunku suszarki. Praktyka kompletowania załadunku suszarki z tarcicy o jednakowej grubości, przy dopuszczeniu zróżnicowania jej pozostałych wymiarów, powoduje znaczne różnice średniej wilgotności dla skrajnych wariantów wymiarów. Bezwzględne różnice przeciętnych wartości wilgotności pojedynczych sztuk tarcicy wynoszą 30–40%. Dominujący wpływ na średnią wartość wilgotności tarcicy wywiera jej położenie na przekroju poprzecznym kłody. W przypadku tarcicy o mniejszej grubości, tj. 24 mm i 27 mm, praktycznym wskaźnikiem przeciętnej

wilgotności początkowej może być jej szerokość. Tarcicę o większej szerokości, pozyskaną ze środkowej strefy przekroju poprzecznego kłody, charakteryzuje mały udział bielu o wysokiej wilgotności. Zróżnicowanie długości tarcicy sosnowej wywiera nieznaczny wpływ na przeciętną wilgotność pojedynczej sztuki tarcicy, przy czym opisywana zależność w przypadku tarcicy o mniejszej grubości, tj. 24 mm i 27 mm, w większym stopniu dotyczy tarcicy o większej szerokości pozyskanej ze środkowej strefy przekroju poprzecznego kłody, a zatem o dużym udziale twardzieli i jest efektem zbieżystości kłody.

Wyniki przeprowadzonej analizy potwierdzają zależność między przeciętną wilgotnością pozyskanej tarcicy a zmianami wilgotności związanej z cyklem wegetacyjnym. Tarcicę pozyskaną z surowca o minimalnej wilgotności bielu w okresie wegetacyjnym (koniec lipca) charakteryzuje nie tylko niższa przeciętna wilgotność, ale również znacznie mniejsze jej zróżnicowanie niż w okresie, w którym wilgotność bielu osiąga maksymalną wartość (koniec lutego). Dotyczy to w szczególności sortymentów tarcicy o większej grubości (ryc. 15c).

5.3. Zróżnicowanie wilgotności tarcicy bezpośrednio przed suszeniem

5.3.1. Oddziaływanie parametrów powietrza na zmiany wilgotności tarcicy

Według Wosia (1999) przez pojęcie klimatu należy rozumieć regularne następstwo zmian atmosferycznych na danym obszarze. Stanowi ono rezultat zespolonego i jednoczesnego działania wszystkich elementów pogody oraz procesów fizycznych zależnych od charakteru podłoża i jego pokrycia. Dlatego podstawą podziału danego obszaru fizykogeograficznego na regiony klimatyczne może być frekwencja występowania poszczególnych typów pogody w ciągu roku, której miarą jest średnia roczna liczba dni z określonymi typami pogody. Proces formowania się stanów pogody obserwowanych w Polsce w ciągu roku i w okresie wieloletnim determinują czynniki geograficzne, radiacyjne (np. usłonecznienie) oraz cyrkulacyjne (np. ciśnienie atmosferyczne, napływ powietrza, front atmosferyczny, kierunek i prędkość wiatru). Wspomniany autor wyodrębnił na obszarze Polski aż 28 jednostek terytorialnych wykazujących pewne odrębne, charakterystyczne cechy klimatu. Klimat Polski charakteryzuje sezonowość częstości występowania różnych typów pogody w cyklu rocznym. Na rycinie 16 przedstawiono zmiany średnich dobowych (punkty) i miesięcznych (linie) wartości parametrów powietrza, tj. jego temperatury i względnej wilgotności, zarejestrowane w latach 2009–2016 przez stacje meteorologiczne zlokalizowane na terenie nadleśnictw A–D oraz odpowiadające im wartości wilgotności równowagowej drewna, obliczone za pomocą procedury zaproponowanej przez Simpsona (1973). Przebieg zmian parametrów powietrza i odpowiadającej im wilgotności równowagowej, analizowany w perspektywie wieloletniej, potwierdza zależne od pory roku zróżnicowanie potencjalnego wpływu klimatu na intensywność zmian wilgotności drewna poddanego

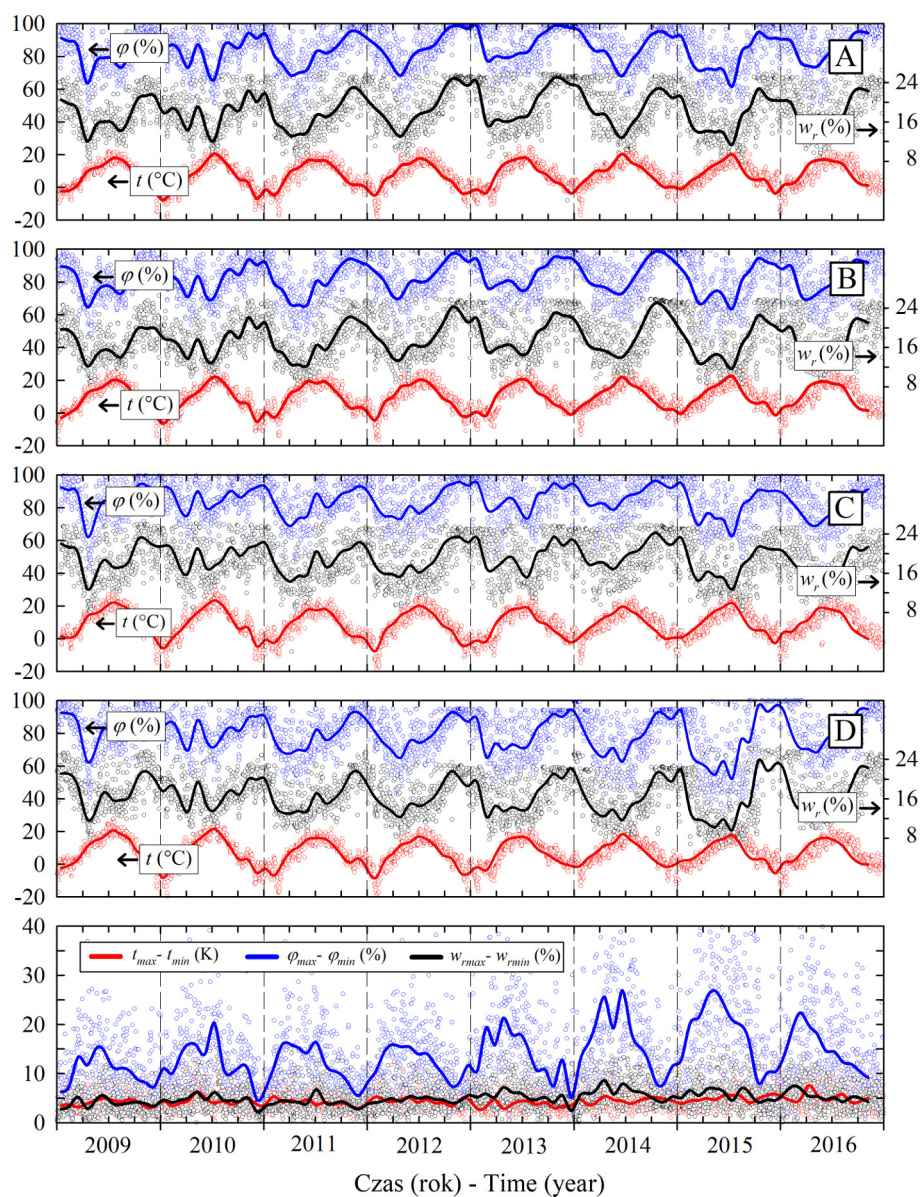
oddziaływaniu powietrza otoczenia. Oddziaływanie powietrza na drewno o wilgotności powyżej PNW w okresie wiosenno-letnim, który charakteryzuje niska wartość wilgotności równowagowej oraz wysoka temperatura powietrza, sprzyja dużej intensywności jego wysychania, w odróżnieniu od okresu jesienno-zimowego, który charakteryzuje relatywnie wyższa wilgotność równowagowa i niższa temperatura powietrza.

Zależność intensywności wysychania drewna od różnych czynników związanych z oddziaływaniem klimatu była szeroko wykorzystywana w kontekście zagadnień związanych z naturalnym suszeniem tarcicy – przede wszystkim poprawą jego efektywności i prognozowaniem czasu (np. Mathewson, 1930; Kydryńska, 1953; Schneider, 1966; Cegiel i in., 1975; Guzenda i in., 1998; Simpson i Hart, 2001; Guzenda i in., 2004). Wyniki badań Gołębiewskiej i Guzendy (2003) nad kinetyką zmian wilgotności tarcicy sosnowej i dębowej podsuszanej w cyklu rocznym w zmiennych warunkach klimatycznych wskazują, że wysychanie tarcicy o wilgotności powyżej PNW ma miejsce niezależnie od lokalnych zakłóceń wynikających ze zmian pogody. Ponadto wyniki opisywanych badań potwierdzają ścisłą zależność szybkości zmian wilgotności tarcicy od pory roku (w zakresie usuwania wody wolnej), zwłaszcza dla cienkich jej sortymentów. Simpson (2004) jest autorem oryginalnej metody obliczania dobowych zmian wilgotności Δw sortymentów tarcicy z północnoamerykańskich gatunków drewna sosny (*Pinus ponderosa* var. *willamettensis*), dębu (*Quercus rubra* L.) oraz klonu (*Acer saccharum* Marsh.) podczas suszenia naturalnego w wybranych miesiącach roku. Metoda uwzględnia wyniki pomiarów zmian wilgotności tarcicy oraz historyczne dane klimatyczne dla wybranych obszarów Stanów Zjednoczonych. Formuła obliczeniowa, do opracowania której zastosowano wieloczynnikową analizę regresji, ma postać:

$$\Delta w = w^a \cdot t^b \cdot \varphi^c \quad (17)$$

gdzie: w – wilgotność tarcicy na początku doby,
 t, φ – przeciętne dobowe wartości odpowiednio temperatury i względnej wilgotności powietrza,
 a, b, c – estymowane wartości parametrów równania regresji.

Zupełnie innego znaczenia nabiera oddziaływanie powietrza na drewno w kontekście zjawiska niekontrolowanego wysychania tarcicy w trakcie czynności związanych z kompletowaniem załadunku suszarki. Zjawisko to może stanowić ryzyko wtórnego różnicowania wilgotności partii tarcicy przed suszeniem. Warunkiem uniknięcia zmian wilgotności tarcicy przed suszeniem może być ograniczenie do minimum czasu między pozyskaniem tarcicy a rozpoczęciem procesu suszenia. Relatywnie krótki czas trwania czynności związanych z kompletowaniem załadunku suszarki, podczas którego w praktyce produkcyjnej nie podejmuje się żadnych czynności zapobiegawczych, bardzo często ulega wydłużeniu np. za sprawą zakłóceń produkcyjnych lub logistycznych, związanych z opóźnieniem realizacji dostaw świeżej tarcicy od zewnętrznych dostawców. Z własnych obserwacji autora wynika, że kompletowanie załadunku wielkogabarytowej komorowej suszarki do tarcicy w warunkach produkcyjnych może trwać od kilku do kilkudziesięciu godzin. Opóźnienie dostaw świeżej tarcicy od zewnętrznych dostawców zwiększa znaczenie wpływu zróżnicowania warunków klimatycznych na zmiany wilgotności



Ryc. 16. Średnie wartości parametrów powietrza i odpowiadającej im wilgotności równowagowej oraz analogicznie ich maksymalne różnice (dolny wykres) w latach 2009–2016 (dane meteorologiczne ze stacji zlokalizowanych w nadleśnictwach A–D)

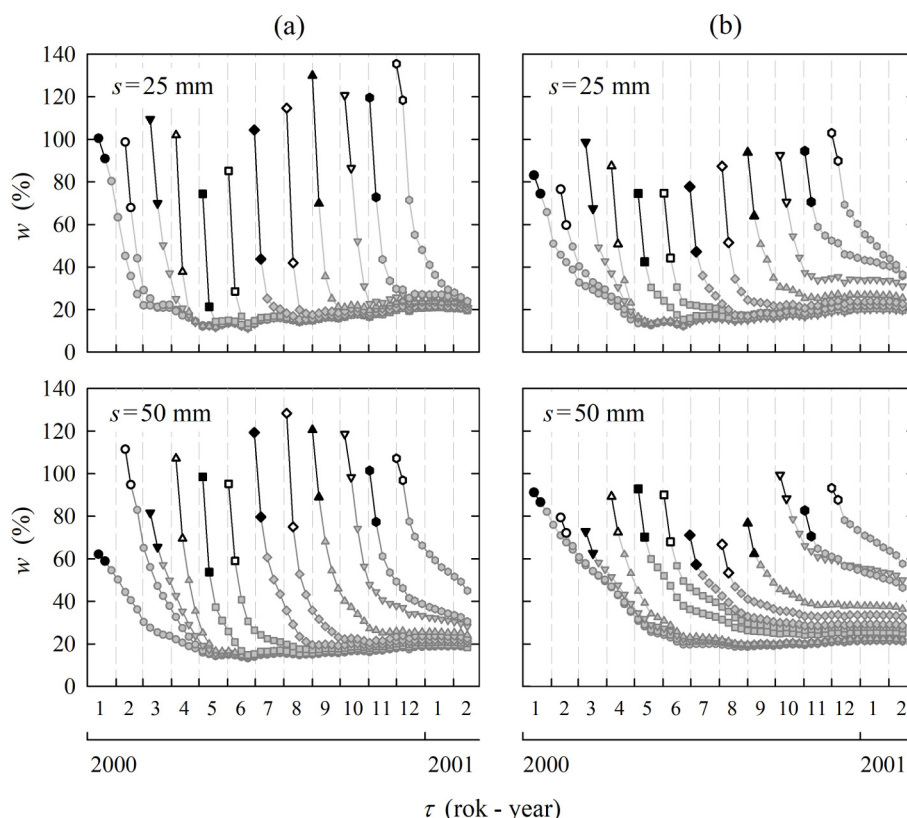
Fig. 16. Average values of air parameters and the corresponding equilibrium moisture content and their maximum differences (bottom graph) in 2009–2016 (meteorological data from stations located in A–D forest districts)

dostarczanej tarcicy. Znajduje to potwierdzenie w maksymalnych różnicach wartości parametrów powietrza i odpowiadającej im wilgotności równowagowej dla analizowanych regionów klimatycznych (ryc. 16), właściwych ze względu na lokalizację czterech tartaków, z których dostarczano świeżą tarcicę do wybranego zakładu wtórnego przerobu drewna. W analizowanym okresie maksymalne różnice dobowych wartości względnej wilgotności powietrza (w okresie lata) osiągały 40%, a odpowiadająca parametrom powietrza różnica dobowych wartości wilgotności równowagowej wynosiła ponad 10%. Wynika z tego, że w przypadku krótkoterminowych dostaw tarcicy nieprzekraczających 1–2 tygodni klimatyczne uwarunkowania pogody w różnych rejonach Polski mogą być powodem różnicowania intensywności wysychania świeżo pozyskanej tarcicy, a w efekcie dodatkowym źródłem rozrzutu wilgotności początkowej w załadunku suszarki.

5.3.2. Zmiany wilgotności tarcicy podczas składowania przed suszeniem

Ograniczenia technologii konwekcyjnego suszenia tarcicy, szczególnie w aspekcie jakości suszenia, wymagają zmniejszenia zróżnicowania wilgotności początkowej tarcicy stanowiącej załadunek suszarki. Ze względów opisanych w poprzednim rozdziale, w fazie przygotowania załadunku suszarki na skutek oddziaływania klimatu dochodzi do niekontrolowanych zmian wilgotności tarcicy. Zjawisko niekontrolowanego wysychania tarcicy podczas kompletowania załadunku suszarki jest słabo opisane i obejmuje ogólne zalecenia o charakterze prewencyjnym (sposoby ograniczenia wysychania tarcicy) lub dotyczące zasad realizacji początkowej fazy procesu suszenia (obróbka wstępna), co powinno zmniejszyć różnicę wilgotności między poszczególnymi pakietami tarcicy w stosie (np. Brunner, 1987; Trübswetter, 2006; Glijer, 2011). Zalecenia dotyczące opisywanego zagadnienia nie uwzględniają jednak szczególnych sytuacji, których skutkiem jest przedłużenie czasu wysychania tarcicy bezpośrednio przed rozpoczęciem procesu suszenia. Ze względu na analogię przebieg i zakres zmian wilgotności pakietów tarcicy przed suszeniem można scharakteryzować na podstawie wyników badań dotyczących naturalnego suszenia tarcicy, zwłaszcza jego fazy początkowej. W obu przypadkach występuje pełne podobieństwo sposobu ułożenia tarcicy w warstwach na przekładkach oraz zależność intensywności wysychania od oddziaływania powietrza na drewno.

Podczas naturalnego suszenia tarcicy najbardziej intensywne zmiany wilgotności dotyczą fazy początkowej, co wiąże się z odparowywaniem wody wolnej ($w > PNW$). Według ustaleń Kydryńskiej (1953) najbardziej intensywne wysychanie sortymentów tarcicy sosnowej przypada na okres od lipca do września, przy czym intensywność zmian wilgotności wyraźnie zależy od grubości tarcicy. Autorka odnotowała, że przeciętna dobową zmianą wilgotności sortymentów świeżej tarcicy sosnowej (w zakresie wilgotności do 30%) w okresie najbardziej korzystnego oddziaływania warunków otoczenia (czerwiec) wynosiła 4,0% i 1,9%, odpowiednio dla tarcicy o grubości 25 mm i 50 mm. Według badań Guzendy i in. (2004), podczas odparowania wody wolnej ($w > PNW$) najwyższą przeciętną wartość dobowej zmiany wilgotności obrzynanej tarcicy sosnowej o grubości 50 mm odnotowano



Ryc. 17. Zmiany wilgotności świeżej obrzynanej tarcicy (a) sosnowej i (b) dębowej (czarne linie i punkty – zmiany wilgotności tarcicy w pierwszym tygodniu po pozyskaniu (opracowano za Gołębiowska, 2002)

Fig. 17. Changes in moisture content of green edged sawn timber (a) pine and (b) oak (black lines and points – changes in timber moisture contents during the first week following harvesting (prepared after Gołębiowska, 2002)

w czerwcu (3,1%), a najniższą w styczniu (0,4%). W przypadku tarcicy o ekstremalnie wysokiej wilgotności początkowej odnotowuje się większe dobowe zmiany wilgotności niż dla tarcicy o mniejszej wilgotności, ale powyżej PNW. Wyniki badań kinetyki zmian wilgotności świeżo pozyskanej tarcicy sosnowej ($w > \text{PNW}$) podczas jej naturalnego suszenia w rejonie klimatycznym Poznania (Cegiel i in., 1975) wskazują na większą intensywność wysychania desek i bali o najwyższej wilgotności początkowej od szybkości wysychania desek i bali o niższej wilgotności. Cytowany autor ostatecznie stwierdza, że zróżnicowanie wilgotności początkowej sortymentów tarcicy nieznacznie wpływa na czas suszenia od stanu świeżego do wilgotności odpowiadającej równowadze higroskopijnej z powietrzem otoczenia. Zagadnienie kinetyki zmian wilgotności bielu w nieobryzanej tarcicy sosnowej o grubości 42 mm, w warunkach suszenia naturalnego w okresie od marca do czerwca i z uwzględnieniem różnych sposobów ułożenia tarcicy w stosie, było przedmiotem badań Huberta (1964). Wspomniany autor zaobserwował istotny wpływ zmian pa-

Tabela 10. Dobowe zmiany wilgotności (DZW) sortymentów obrzynanej tarcicy (a) sosnowej oraz (b) dębowej dla różnych wariantów czasu pozyskania ξ_1 oraz grubości ξ_2

Table 10. Daily changes in moisture content (DZW) of edged timber assortment (a) pine and (b) oak for different options of harvesting time ξ_1 and timber thickness ξ_2

Zmienne niezależne Independent variables		Dobowe zmiany wilgotności DZW (%) Daily changes in moisture content DZW (%)	
ξ_1 (x_1)	ξ_2 (x_2)	(a)	(b)
0 (-6)	25 (-1)	1,44	1,24
4 (-5)	25 (-1)	3,91	1,93
8 (-4)	25 (-1)	4,23	3,53
12 (-3)	25 (-1)	5,93	3,84
16 (-2)	25 (-1)	4,29	3,15
20 (-1)	25 (-1)	4,87	3,16
24 (0)	25 (-1)	5,66	2,99
28 (1)	25 (-1)	6,77	3,78
32 (2)	25 (-1)	6,73	3,08
36 (3)	25 (-1)	4,90	2,72
40 (4)	25 (-1)	5,43	2,54
44 (5)	25 (-1)	4,58	2,41
48 (6)	25 (-1)	1,44	1,24
0 (-6)	50 (1)	0,54	0,65
4 (-5)	50 (1)	2,04	0,96
8 (-4)	50 (1)	1,75	1,04
12 (-3)	50 (1)	4,09	1,95
16 (-2)	50 (1)	4,37	2,36
20 (-1)	50 (1)	3,89	2,38
24 (0)	50 (1)	4,19	1,35
28 (1)	50 (1)	5,40	1,41
32 (2)	50 (1)	3,75	1,41
36 (3)	50 (1)	3,17	1,47
40 (4)	50 (1)	2,87	1,28
44 (5)	50 (1)	2,12	1,07
48 (6)	50 (1)	0,54	0,65

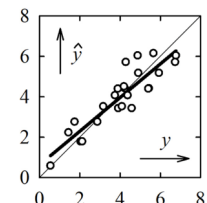
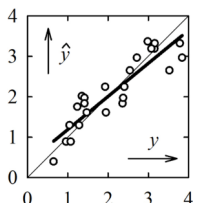
W nawiasach podano zmienne niezależne zredukowane: $x_1 = (\xi_1 - 24)/4$; $x_2 = (\xi_2 - 25)/25$.
Reduced independent variables in brackets: $x_1 = (\xi_1 - 24)/4$; $x_2 = (\xi_2 - 25)/25$.

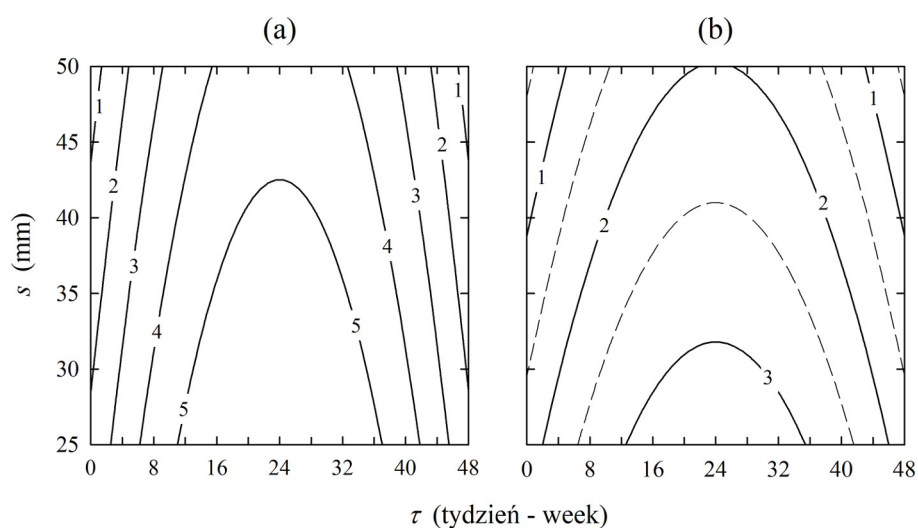
rametrów powietrza w okresie badania oraz sposobu ułożenia tarcicy w stosie na zmiany intensywności wysychania biału. Wpływ tych czynników na badane zjawisko był szczególnie wyraźny w początkowym okresie suszenia (marzec) w zakresie zmian wilgotności biału powyżej PNW. Przy tym dla uwzględnionych w badaniach różnych sposobów ułożenia tarcicy w stosie skrajne wartości dobowych zmian wilgotności biału podczas pierwszych 4 tygodni suszenia wynosiły od 1,1% do 2,5%. Według badań wspomnianej wcześniej Kydryńskiej (1953) podczas naturalnego suszenia tarcicy w okresie bardzo intensywnego oddziaływania warunków otoczenia (czerwiec) występuje niekorzystne zjawisko zróżnicowania intensywności wysychania w obrębie pojedynczego pakietu tarcicy. Największe dobowe zmiany wilgotności dotyczyły tarcicy ułożonej w górnej strefie pakietu (4,0%), a najmniejsze – w strefie środkowej (0,6%). Dobowa zmiana wilgotności tarcicy w strefie dolnej wynosiła 2,0%.

Tabela 11. Estymowane wartości parametrów modelu określającego dobowe zmiany wilgotności (DZW) świeżo pozyskanej tarcicy (a) sosnowej i (b) dębowej o grubości 25–50 mm w pierwszym tygodniu składowania na wolnym powietrzu

Table 11. Estimated values of model parameters determining daily changes in moisture content (DZW) of green timber (a) pine and (b) oak with a thickness of 25–50 mm during the first week of storage

Symbol	Wartość Value	
	(a)	(b)
β_0	5,332	2,691
β_1	–	–
β_2	–0,825	–0,678
β_3	–0,109	–0,045
β_4	–	–
β_5	–	–
R^2	0,835	0,820
R^2_{adj}	0,820	0,805
SE	0,751	0,437



Ryc. 18. Dobowe zmiany wilgotności (DZW) świeżo pozyskanej obrzynanej tarcicy (a) sosnowej i (b) dębowej o grubości 25–50 mm w pierwszym tygodniu składowania na wolnym powietrzu

Fig. 18. Daily changes in moisture content (DZW) of edged green timber (a) pine and (b) oak with a thickness of 25–50 mm during the first week of storage

Na rycinie 17 zilustrowano wyniki badań Gołębiewskiej (2002), których celem było wyznaczenie kinetyki zmian wilgotności świeżo pozyskanej tarcicy sosnowej podsuszanej w zmiennych warunkach klimatycznych Poznania, w zależności od terminu rozpoczęcia procesu. Wyniki tych pomiarów dla obrzynanych sortymentów tarcicy o potencjalnie dużej i małej podatności na oddziaływanie warunków towarzyszących naturalnemu suszeniu, tj. odpowiednio sosnowych i dębowych, zostały zaadaptowane przez autora niniejszego opracowania do wyznaczenia zależności zmian wilgotności tarcicy od różnych czynników podczas kompletowania załadunku suszarki. Przyjęto założenie o uwzględnieniu w analizie zmian wilgotności tarcicy wyłącznie w pierwszym tygodniu pomiarów. W założeniu powinno to pozwolić na wyznaczenie zakresu zmian wilgotności tarcicy podczas niekontrolowanego oddziaływania warunków otoczenia w sytuacji przedłużającego się czasu przygotowania załadunku suszarki, który stanowi partia świeżo pozyskanej tarcicy.

W tabeli 10 przedstawiono założenia uwzględnione w dwuczynnikowym modelu, opracowanym w celu wyznaczenia dobowych zmian wilgotności sortymentów świeżo pozyskanej tarcicy sosnowej i dębowej w okresie poprzedzającym rozpoczęcie procesu suszenia oraz wyznaczone wartości dobowych zmian wilgotności tarcicy w pierwszym tygodniu składowania bezpośrednio po pozyskaniu. Do opracowania modelu zastosowano równanie wielomianowe drugiego stopnia (3).

Estymowane wartości parametrów modelu dobowych zmian wilgotności sortymentów świeżo pozyskanej tarcicy sosnowej i dębowej zestawiono w tabeli 11. Na rycinie 18 przedstawiono w formie graficznej dobowe zmiany wilgotności tarcicy w pierwszym tygodniu składowania na wolnym powietrzu w zależności od terminu pozyskania tarcicy. Do określenia czasu pozyskania tarcicy, który równocześnie wyznacza początek niekontrolowanego oddziaływania powietrza na drewno, przyjęto umowny podział roku kalendarzowego na 12 miesięcy liczących po 4 tygodnie.

6. TECHNOLOGIA SUSZENIA TARCICY

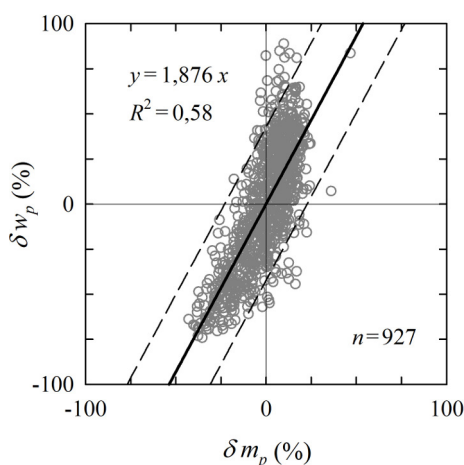
6.1. Związki technologii suszenia tarcicy z intensywnością suszenia

Suszarka do tarcicy to instalacja o określonej konstrukcji i wyposażeniu, która powinna umożliwić realizację procesu suszenia według ściśle określonych założeń. Założenia te, ujęte w ramy programu suszenia, pozwalają na obniżenie wilgotności załadunku suszarki w określonym zakresie, w możliwie krótkim czasie, z uwzględnieniem aspektu racjonalnego zużycia ciepła i energii elektrycznej oraz ograniczenia ryzyka powstania wad suszenia, w tym nadmiernego rozrzutu wilgotności końcowej. Spełnienie wymogów jakości suszenia i bezpieczeństwa jego realizacji wiąże się jednak z nieprzekraczaniem dopuszczalnej intensywności suszenia. Ryzyko nadmiernego rozrzutu wilgotności końcowej jest spowodowane między innymi zbyt dużą intensywnością suszenia w początkowej fazie procesu, tj. w zakresie zmian wilgotności drewna powyżej PNW. Czynnikiem, które determinują kinetykę zmian wilgotności tarcicy w początkowej fazie suszenia, są parametry powietrza, tj. jego temperatura i względna wilgotność oraz obieg powietrza w suszarce charakteryzowany przez jego prędkość. W ostatnich dekadach w dziedzinie konwekcyjnego suszenia tarcicy iglastej obserwuje się trend do zwiększania intensywności suszenia przez stosowanie wyższej temperatury powietrza – nawet do 90°C (Cividini, 2000; Dobrowolska, 2004; Gjerdrum, 2008).

Partia tarcicy, która stanowi załadunek suszarki, charakteryzuje się – jak to przedstawiono szczegółowo w rozdziale 5 – znacznym pierwotnym i wtórnym zróżnicowaniem właściwości określających jej podatność na suszenie – przede wszystkim wilgotności, która jest czynnikiem wiodącym w procesach suszenia realizowanych zgodnie z regulacją nadążną parametrów powietrza. W tych procesach suszenia podstawą kontroli i sterowania przebiegiem suszenia są pomiary zmian wilgotności ograniczonej liczby wybranych sztuk tarcicy. Wartości parametrów powietrza uwzględnione w programie suszenia mogą być zatem niewłaściwe dla tych części załadunku suszarki, które charakteryzują się niższą i wyższą wilgotnością, stanowiąc przyczynę jej wysychania z niekontrolowaną intensywnością. Stanowi to dodatkową przyczynę zróżnicowania intensywności usuwania wody w obrębie załadunku suszarki, nawet w przypadku zapewniania zbliżonych warunków oddziaływania czynnika suszącego.

Sortowanie tarcicy przed suszeniem to działanie, które za sprawą ograniczenia zróżnicowania właściwości drewna – w tym jego wilgotności początkowej – pozwala na skrócenie czasu suszenia i zmniejszenie udziału tarcicy przesuszonej (Sugimori i in., 2006; Elustondo i in., 2010; Sandland i Gjerdrum, 2010; Steiner i Øvrum, 2010; Berberović i Milota, 2011; Watanabe i in., 2011; Elustondo i in., 2013). Mniejsza

zróźnicowanie właściwości drewna, w szczególności jego wilgotności początkowej sprawia, że proces suszenia może odbywać się zgodnie z założoną w programie intensywnością, od której zależy bezpieczeństwo suszenia (ryzyko wystąpienia określonych wad suszenia) oraz spełnienie wymagań jakości. Stosowanymi kryteriami sortowania tarcicy przed suszeniem są wilgotność początkowa oraz gęstość lub masa drewna, pozostające w ścisłej zależności od jego wilgotności (Vikberg i Elustondo, 2016). W przypadku pierwszego z wymienionych kryteriów efektywność sortowania tarcicy jest ograniczona ze względu na dużą niepewność wskazań aktualnie stosowanych do tego celu systemów pojemnościowego pomiaru wilgotności drewna – zwłaszcza w zakresie wilgotności charakterystycznych dla świeżo pozyskanej tarcicy (np. Rozema i Schuijl, 2005). W opinii Berberovića i Miloty (2011) sortowanie tarcicy na podstawie wyników pomiaru jej masy (*weight sorting*) jest bardziej efektywne od sortowania na podstawie pomiaru wilgotności początkowej i/lub gęstości. Z badań dotyczących określenia wpływu metody sortowania na jakość i przebieg suszenia 52 mm tarcicy iglastej z grupy *hem-fir*, które przeprowadzili Elustondo i in. (2013), wynika, że najmniejszy rozrzut wilgotności końcowej i najmniejszy udział tarcicy przesuszonej charakteryzował załadunek suszarki skompletowany po sortowaniu na podstawie pomiarów masy tarcicy przed rozpoczęciem procesu suszenia. Wyodrębnienie tylko trzech kategorii tarcicy na podstawie kryterium ich masy pozwoliło ponadto na skrócenie czasu suszenia o 10% w porównaniu do realizacji procesów suszenia według tych samych programów dla pozostałych wariantów sortowania tarcicy, tj. na podstawie kryterium wilgotności początkowej i gęstości tarcicy. Według Haque i in. (2007) wilgotnościowe sortowanie tarcicy ma większy wpływ na ograniczenie rozrzutu wilgotności końcowej niż modyfikacja programu suszenia, polegająca na zmianie wartości temperatury powietrza oraz prędkości powietrza i częstotliwości rewersyjnych zmian kierunku przepływu powietrza. Na rycinie 19 przedstawiono w układzie współrzędnych zredukowanych wyniki własnych pomiarów masy i odpowiadającej jej wilgotności partii świeżo pozyskanej 25 mm obrzynanej tarcicy sosnowej. Za ich pomocą scharakteryzowano relację między wilgotnością i masą tarcicy, którą można opisać równa-

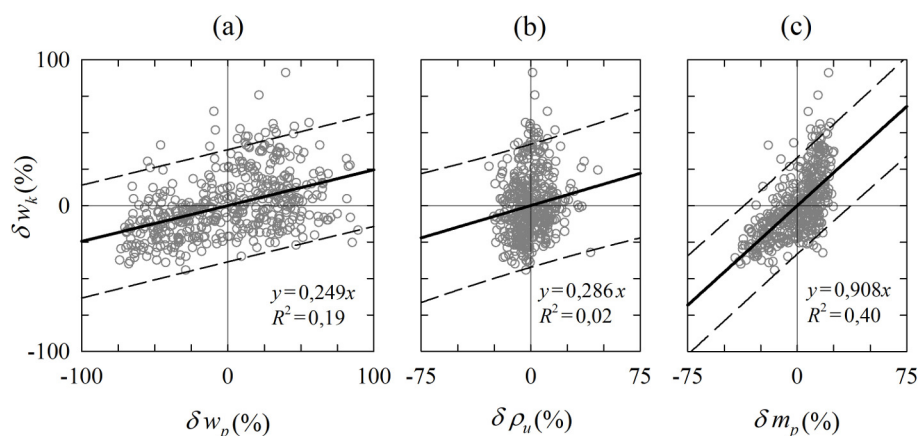


Ryc. 19. Związek wilgotności początkowej tarcicy sosnowej i masy początkowej tarcicy ($s = 25$ mm)

Fig. 19. The relationship between the initial moisture content and initial mass of Scots pine timber ($s = 25$ mm)

niem liniowym o stosunkowo wysokim współczynniku determinacji, co potwierdza dużą przydatność pomiaru masy tarcicy jako kryterium wilgotnościowego sortowania przed suszeniem. Należy dodać, że przy niewątpliwej prostocie pomiaru masy w celu sortowania wilgotnościowego tarcicy poważnym ograniczeniem wykorzystania tej metody jest możliwość zastosowania wyłącznie w przypadku klasyfikacji sortymentów tarcicy obrzynanej o jednakowych wymiarach przekroju poprzecznego.

Na rycinie 20 zilustrowano związek wilgotności końcowej obrzynanej tarcicy sosnowej o grubości 25 mm z tymi jej właściwościami, które wykorzystano jako kryterium klasyfikacji przed suszeniem (założenia procesów suszenia tarcicy przeprowadzonych w suszarce A zestawiono w tabeli 2). W przypadku każdej z badanych właściwości, tj. wilgotności początkowej, gęstości umownej i masy tarcicy przed suszeniem, związek z wilgotnością końcową można opisać równaniem liniowym. Jednak związek wilgotności końcowej i masy tarcicy przed suszeniem charakteryzuje najwyższa wartość współczynnika determinacji i dlatego ten związek został uwzględniony w dalszej analizie wpływu kinetyki suszenia na rozrzut wilgotności końcowej.



Ryc. 20. Związek wilgotności końcowej tarcicy sosnowej z jej: (a) wilgotnością początkową (b) gęstością umowną oraz (c) masą początkową ($s = 25$ mm, $n = 449$)

Fig. 20. The relationship between final moisture content and: (a) initial moisture content (b) basic density and (c) initial mass of Scots pine timber ($s = 25$ mm, $n = 449$)

W analizie wpływu kinetyki suszenia na rozrzut wilgotności końcowej tarcicy uwzględniono realizację procesów suszenia z różną intensywnością w ich początkowej fazie, tj. w zakresie zmian wilgotności tarcicy $w > 30\%$. W tym celu wykorzystano różne, ale typowe dla praktyki produkcyjnej warianty programów konwekcyjnego suszenia tarcicy sosnowej w suszarkach komorowych z regulacją nadążną (założenia procesów suszenia tarcicy przeprowadzonych w suszarce A zestawiono w tabeli 2). Zastosowano programy oparte na zasadzie suszenia według stałej temperatury termometru suchego. W pierwszej części eksperymentu, którego celem była analiza wpływu temperatury suszenia na rozrzut wilgotności końcowej, uwzględniono temperaturę 55°C (charakterystyczną dla programów łagodnego suszenia tarcicy sosnowej) z wymogiem ograniczenia wycieku żywicy oraz 60°C i 65°C

(charakterystyczną dla realizacji procesów z wyższą intensywnością). W każdym wariancie programu suszenia uwzględniono jednakową wartość wilgotności równowagowej w początkowej fazie suszenia, tj. 12,5%. W drugiej części eksperymentu uwzględniono wpływ na intensywność suszenia w początkowej fazie procesu kolejnego czynnika, tj. względnej wilgotności powietrza. Przyjęto do realizacji dwa warianty programu suszenia opartego na zasadzie suszenia w stałej temperaturze termometru suchego (55°C) przy dwóch różnych wartościach wilgotności równowagowej w początkowej fazie suszenia ($w > 30\%$). Dla standardowego wariantu programu przyjęto typową wartość $w_r = 12,5\%$. Natomiast alternatywną wartość $w_r = 10,0\%$ uwzględniono w wariancie o zwiększonej intensywności suszenia.

W analizie wpływu intensywności suszenia na rozrzut wilgotności końcowej postanowiono uwzględnić także czynnik zróżnicowania właściwości suszonego drewna, przyjmując jako czynnik różnicujący wilgotność załadunku suszarki względne odchylenie masy początkowej pojedynczej sztuki tarcicy δm_p :

$$\delta m_{p_i} = \frac{m_{p_i} - \bar{m}_p}{\bar{m}_p} \cdot 100 \quad (18)$$

gdzie: m_{p_i} – masa i -tej sztuki tarcicy w stosie, kg,
 \bar{m}_p – średnia masa sztuki tarcicy w stosie, kg.

Na podstawie wyników pomiarów masy tarcicy bezpośrednio przed suszeniem zostały wyodrębnione trzy kategorie tarcicy: o właściwościach najbardziej zbliżonych do przeciętnych w stosie ($\delta m_p = \pm 10\%$) oraz dwie kategorie o znacznym odchyleniu właściwości ($\delta m_p < -10\%$, $\delta m_p > 10\%$).

Do oceny wpływu kinetyki suszenia na rozrzut wilgotności końcowej przyjęto względne odchylenie wilgotności pojedynczej sztuki tarcicy:

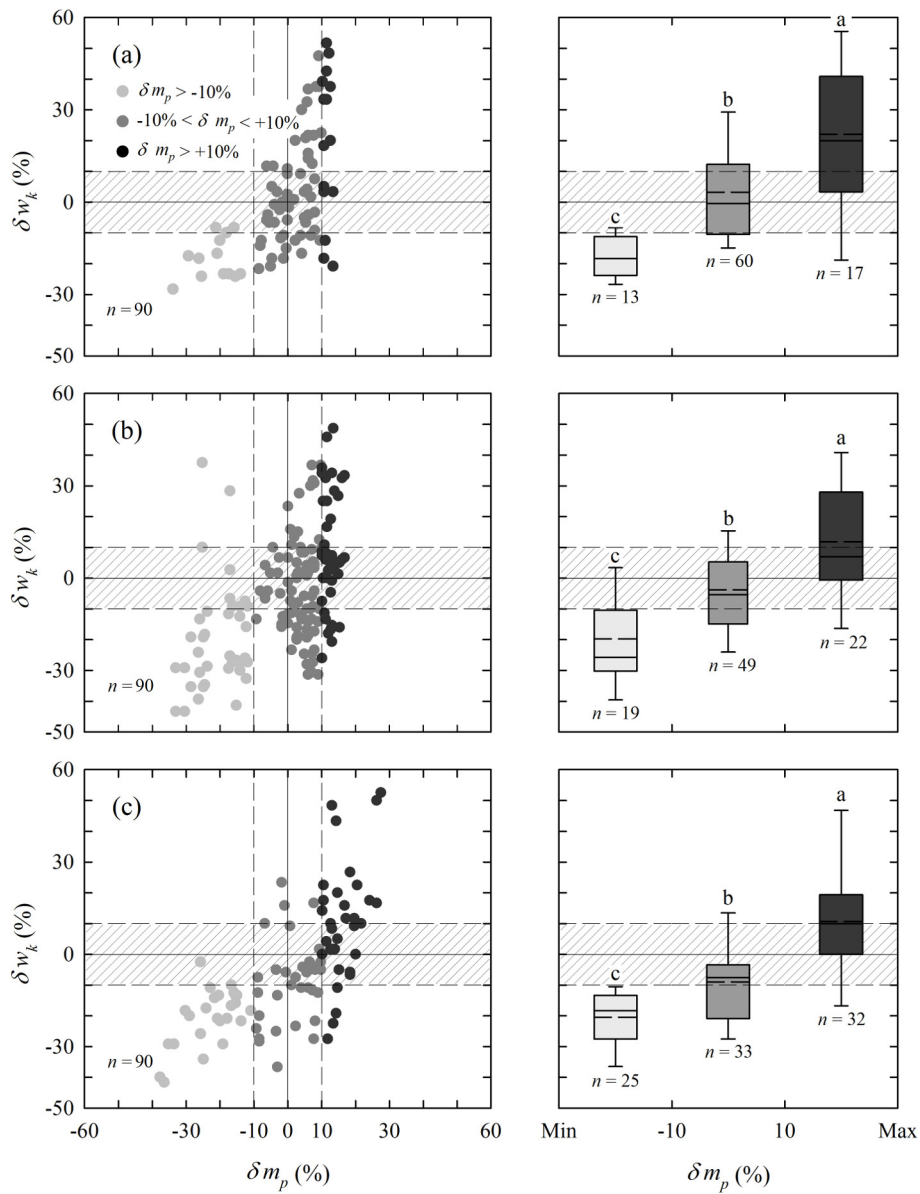
$$\delta w_{k_i} = \frac{w_{k_i} - \bar{w}_k}{\bar{w}_k} \cdot 100 \quad (19)$$

gdzie: w_{k_i} – wilgotność końcowa i -tej sztuki tarcicy w stosie, %,
 \bar{w}_k – średnia wilgotność końcowa tarcicy w stosie, %.

Wyniki rozrzutu wilgotności końcowej w stosie 25 mm obrzynanej tarcicy sosnowej suszonej w temperaturze 55°C, 60°C i 65°C przedstawiono na rycinie 21.

Jednoczynnikowa analiza wariancji (dla poziomu istotności $\alpha = 0,05$) wskazuje, że dla każdego wariantu realizacji procesu suszenia występuje statystycznie istotna różnica średniej wartości wilgotności dla każdej wyodrębnionej części załadunku suszarki. Dla wszystkich uwzględnionych w badaniach wariantów intensywności suszenia zaobserwowano, że tarcica o najmniejszej masie początkowej w stosie charakteryzuje się najniższą wilgotnością końcową i równocześnie najmniejszym jej rozrzutem. W opisywanym przypadku stwierdzono brak zależności przesuszenia tarcicy od wartości zastosowanej temperatury przy wilgotności bezwzględnej większości sztuk tarcicy niższej od wartości dopuszczalnej.

Analogicznie wilgotność końcowa tarcicy o największej masie przed suszeniem (a zatem najwyższej wilgotności początkowej – ryc. 20) była wyższa i charakteryzowała się największym zróżnicowaniem w porównaniu z pozostałymi kategoriami tarcicy. Rozrzut wilgotności tarcicy tej części załadunku suszarki był tym większy,

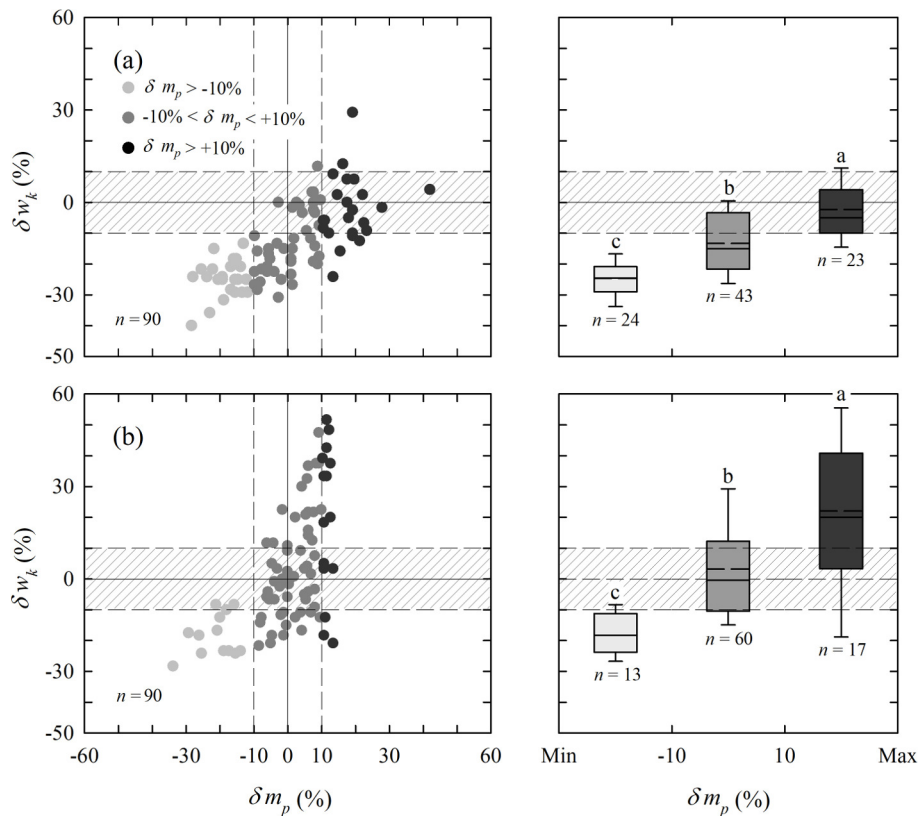


Ryc. 21. Rozrzut wilgotności końcowej obrzynanej tarcicy sosnowej o grubości 25 mm suszonej w suszarce A w zależności od temperatury powietrza: a – 55°C, b – 60°C, c – 65°C, wilgotność równowagowa w początkowej fazie suszenia 12,5% ($w_k = 15 \pm 1,5\%$)

Fig. 21. Variation of final moisture content of 25 mm egged pine timber dried in kiln A depending on air temperature: a – 55°C, b – 60°C, c – 65°C, equilibrium moisture content in the initial phase of drying process 12.5% ($w_k = 15 \pm 1.5\%$)

im wyższa temperatura powietrza (a zatem większa intensywność suszenia). Należy podkreślić, że w przypadku oceny jakości suszenia wyniki pomiarów wilgotności tarcicy z tej części załadunku suszarki, tj. tarcicy o najwyższej wilgotności początkowej, decydują o całkowitym rozrzucie wilgotności końcowej. Dlatego wpływ intensywności suszenia na rozrzut wilgotności końcowej może dotyczyć w rzeczywistości nie całości załadunku suszarki, ale jedynie jego części, która charakteryzuje się odstępstwem określonych właściwości od przeciętnych.

Niezależnie od wyników skrajnych obserwacji najbardziej miarodajną ocenę wpływu temperatury suszenia na rozrzut wilgotności i stopień przesuszania mogą stanowić obserwacje dotyczące części załadunku suszarki o właściwościach najbardziej zbliżonych do przeciętnych w stosie ($\delta m_p = \pm 10\%$). W opisywanym przypadku warunki suszenia określone w programie suszenia w największym stopniu gwarantowały przebieg suszenia z intensywnością dostosowaną do właściwości suszonego drewna. Przy porównywalnym rozrzucie wilgotności końcowej dla wszyst-



Ryc. 22. Rozrzut wilgotności końcowej obrzynanej tarcicy sosnowej o grubości 25 mm suszonej w suszarce A w zależności od wilgotności równowagowej w początkowej fazie realizacji procesu suszenia: a – 10,0%, b – 12,5%, temperatura suszenia 55°C ($w_k = 15 \pm 1,5\%$)

Fig. 22. Variation of final moisture content of 25 mm egged pine timber dried in kiln A depending on the equilibrium moisture content in the initial phase of the drying process: a – 10.0%, b – 12.5%, drying temperature 55°C ($w_k = 15 \pm 1.5\%$)

kich wariantów realizacji procesu suszenia wzrost intensywności suszenia, który był efektem wyższej temperatury powietrza, tj. 60°C i 65°C, powodował wzrost stopnia przesuszenia tarcicy.

Na rycinie 22 przedstawiono wyniki pomiarów wilgotności końcowej tarcicy sosnowej bezpośrednio po zakończeniu suszenia według założeń uwzględniających stosowanie niższej (ryc. 22a) i wyższej (ryc. 22b) wilgotności równowagowej w początkowej fazie realizacji procesu. Dla obu wariantów programów suszenia stwierdzono statystycznie istotne różnice między średnimi wartościami wilgotności końcowej dla poszczególnych kategorii tarcicy oraz wykazano, że efektem bardziej intensywnych warunków suszenia w początkowej fazie procesu ($w_r = 10\%$) jest ogólnie mniejszy rozrzut wilgotności końcowej przy jednoczesnym wzroście stopnia przesuszenia tarcicy. Opisywane zjawisko zaobserwowano również w tej części załadunku suszarki, której właściwości gwarantowały przebieg suszenia z właściwą intensywnością.

W tabelach 12 i 13 zestawiono wyniki analizy wariancji, które potwierdzają statystyczną hipotezę o wpływie obu parametrów powietrza determinujących kinetykę suszenia – tj. temperatury powietrza i wilgotności równowagowej – na rozrzut wilgotności końcowej tarcicy. Analiza potwierdziła również występowanie interakcji między wartością wilgotności równowagowej i stopniem zróżnicowania właściwości drewna przed suszeniem.

Tabela 12. Analiza wariancji rozrzutu wilgotności końcowej w załadunku suszarki A uwzględniająca wpływ temperatury suszenia t oraz masy pojedynczych sztuk tarcicy m_p

Table 12. Analysis of variance of variation of final moisture content in the batch of kiln A taking into account the influence of drying temperature t and individual timber mass m_p

Efekt Effect	SS	df	MS	F	p
Wyraz wolny – Intercept	0,007910	1	0,007910	0,29122	0,589897
m_p	3,818570	2	1,909285	70,29812	0,000000
t	0,619763	2	0,309882	11,40956	0,000018
$m_p \cdot t$	0,068201	4	0,017050	0,62777	0,643091
Błąd – Error	7,088715	261	0,027160		

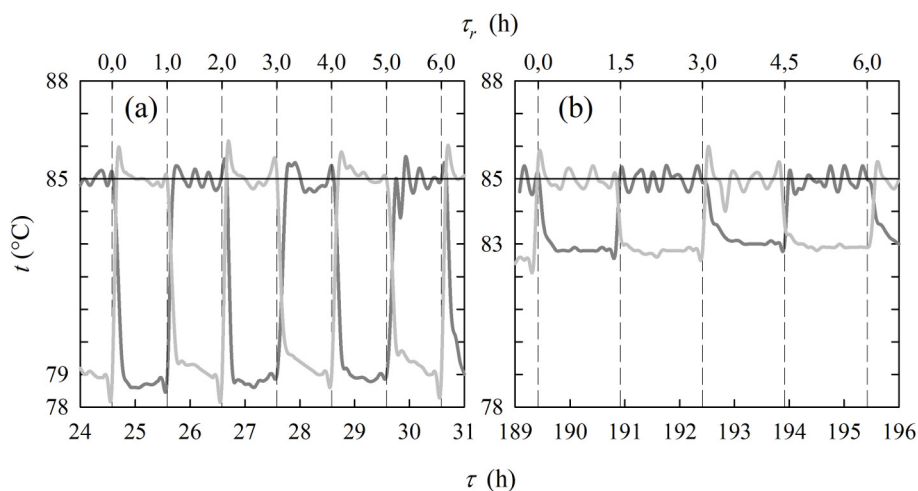
Tabela 13. Analiza wariancji rozrzutu wilgotności końcowej w załadunku suszarki A uwzględniająca wpływ wilgotności równowagowej zastosowanej w początkowej fazie procesu suszenia w_r oraz masy pojedynczych sztuk tarcicy m_p

Table 13. Analysis of variance of final moisture content variation in the batch of kiln A taking into account effect of equilibrium moisture content applied in the initial phase of the drying process w_r and individual timber mass m_p

Efekt Effect	SS	df	MS	F	p
Wyraz wolny – Intercept	0,424581	1	0,424581	21,10825	0,000008
m_p	1,779834	2	0,889917	44,24267	0,000000
w_r	0,852245	1	0,852245	42,36978	0,000000
$m_p \cdot w_r$	0,148405	2	0,074203	3,68902	0,026972
Błąd – Error	3,499914	174	0,020114		

6.2. Zróźnicowanie parametrów i prędkości powietrza w stosie – wyniki badań w warunkach produkcyjnych

Zasadniczym ograniczeniem technologii konwekcyjnego suszenia tarcicy jest nieuniknione zróźnicowanie w przestrzeni załadowniczej suszarki właściwości czynnika suszącego. Wynika ono zarówno ze znacznych wymiarów przestrzeni załadowniczej powszechnie stosowanych wielkogabarytowych suszarek do tarcicy, jak i z zakłóceń obiegu powietrza (Vikberg i in., 2015). Podstawową przyczyną zróźnicowania intensywności suszenia w obrębie załadunku suszarki jest zjawisko obniżania temperatury i wzrostu względnej wilgotności powietrza towarzyszące przepływowi powietrza przez stos. Różnica temperatury powietrza w strefie wlotu i wylotu ze stosu zależy od intensywności odparowania wody z powierzchni suszonego drewna i według Rafalskiego (1970) może osiągnąć wartość nawet 10 K. Na rycinie 23 przedstawiono wyniki własnych pomiarów temperatury powietrza po przeciwległych stronach załadunku suszarki komorowej w dwóch różnych fazach realizacji procesu suszenia tarcicy sosnowej (suszarka C – ryc. 1). Opisywana różnica temperatury powietrza jest znaczna w początkowej fazie procesu (ryc. 23a), którą charakteryzuje duża intensywność suszenia. W tym przypadku efektem intensywnego odparowania wody wolnej z powierzchni drewna jest duży spadek temperatury powietrza w kierunku jego przepływu przez stos. Natomiast mniejsza różnica temperatury powietrza zarejestrowana w obrębie skrajnych (zewnętrznych) pakietów tarcicy w końcowej fazie suszenia (ryc. 23b) jest objawem zmniejszenia intensywności suszenia.



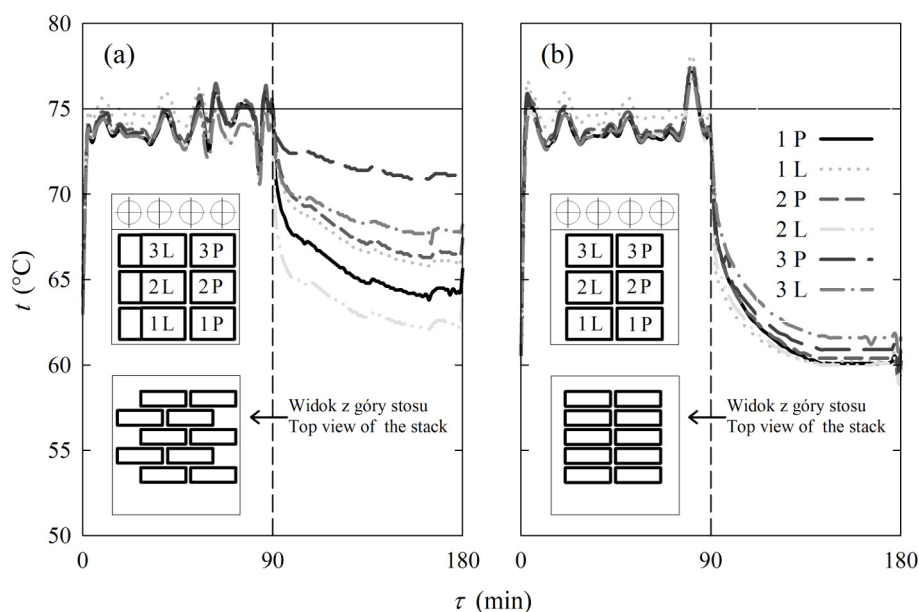
Ryc. 23. Temperatura powietrza po przeciwległych stronach stosu tarcicy sosnowej o grubości 50 mm w suszarce C (faza procesu suszenia: a – początkowa ($w > \text{PNW}$) i b – końcowa ($w < \text{PNW}$), linia ciągła – temperatura zadana, linia kreskowa – rewersyjna zmiana kierunku przepływu powietrza)

Fig. 23. Air temperature on opposite sides of the 50 mm pine timber stack in the kiln C (phase of drying process: a – initial ($w > \text{PNW}$) and b – final ($w < \text{PNW}$), solid line – set temperature, dash line – reversing the air flow direction)

Rewersyjny obieg powietrza pozwala na ograniczenie niekorzystnych skutków zróżnicowania warunków wysychania w obrębie załadunku suszarki. Według Panga (2002b) rewersyjne zmiany kierunku przepływu powietrza w suszarce komorowej do tarcicy neutralizują skutki zróżnicowania warunków wysychania po przeciwnych stronach załadunku suszarki, ale nie rozwiązują problemu zróżnicowania warunków suszenia w jego strefie środkowej i zewnętrznej. Riehl i Welling (2003) na podstawie analizy przypadków realizacji procesu suszenia tarcicy iglastej według założeń charakterystycznych dla intensywnych programów suszenia stwierdzili, że rewersyjny obieg powietrza w komorowej suszarce do tarcicy powoduje oscylacyjne (naprzemienne) zmiany warunków suszenia w skrajnych strefach załadunku suszarki, którym odpowiada różnica wilgotności równowagowej 3%.

Inną przyczyną zróżnicowania parametrów powietrza w suszarce mogą być zaburzenia obiegu powietrza wywołane konfiguracją pakietów tarcicy w stosie. Na rycinie 24 zilustrowano wyniki pomiaru temperatury powietrza w obrębie skrajnie usytuowanych pakietów tarcicy o długości niedostosowanej do wymiarów przestrzeni załadunkowej suszarki dla dwóch różnych przypadków ich konfiguracji w suszarce. W obu przypadkach czujniki wielokanałowego systemu pomiaru temperatury zainstalowano w środku geometrycznym każdego ze skrajnych pakietów w taki sposób, aby wszystkie punkty pomiaru leżały w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku przepływu powietrza. Konfiguracja pakietów, która ze względu na przepływ znacznej części powietrza obiegowego poza załadunkiem suszarki przewiduje naprzemienne ich dosuwanie do ścian bocznych, powoduje zaburzenia przepływu powietrza, a ich efektem jest wzrost zróżnicowania temperatury. W skrajnym przypadku (dla wskazań termometrów umieszczonych w obrębie pakietów 2L i 3P) różnica ta osiągnęła poziom ok. 10 K. Stanowi to przyczynę dodatkowego zróżnicowania warunków wysychania tarcicy oraz utraty kontroli nad kinetyką zmian wilgotności tarcicy. Konfiguracja stosu w sposób przedstawiony na rycinie 24b, abstrahując od oceny innych skutków, ogranicza to niekorzystne zjawisko. Maksymalna różnica między wskazaniami termometrów zlokalizowanymi w środku poszczególnych pakietów nie przekroczyła 2 K. Według cytowanego wcześniej Panga (2002b) podobna temperatura oraz równomierny przepływ powietrza w strefie wlotu powietrza do stosu to czynniki, które zapewniają najbardziej równomierne warunki wysychania tarcicy podczas realizacji procesu suszenia w suszarce komorowej.

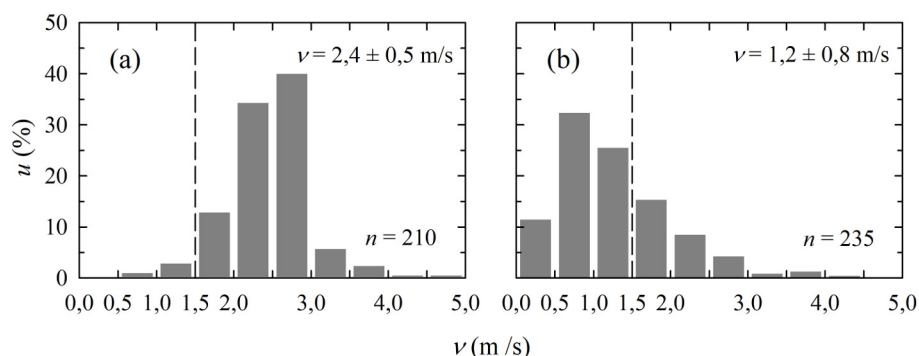
Do wielkości, które obok temperatury i względnej wilgotności powietrza istotnie determinują intensywność suszenia (dla $w > PNW$), należy prędkość powietrza (np. Torgeson, 1940; Simpson, 1997; Steiner i Vestøl, 2011). Obieg powietrza powinien być dostatecznie szybki, jednak dostosowany do właściwości suszonego drewna (Widlak, 1997). Z wielu powodów przepływ powietrza w załadunku suszarki jest nierównomierny. Składa się na to zarówno większy opór przepływu powietrza przez pakiety tarcicy niż w przestrzeniach poza pakietami, jak i wynikający ze spadku temperatury wzrost gęstości powietrza, w efekcie których prędkość powietrza między warstwami tarcicy jest niższa w strefie wylotu niż w strefie wlotu. Wyniki przeprowadzonych przez autora szczegółowych pomiarów prędkości powietrza w suszarkach komorowych do tarcicy różnych typów, w dwóch wybranych zakładach branży drzewnej, to przykłady potwierdzające występowanie dużego zróżnicowania właściwości obiegu powietrza w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku przepływu



Ryc. 24. Zróżnicowanie temperatury powietrza w suszarce C w początkowej fazie procesu suszenia tarcicy sosnowej o grubości 50 mm ($w > PNW$) w zależności od konfiguracji pakietów w stosie i kierunku przepływu powietrza (pakieci: a – dosuwane do ściany bocznej, b – wyśrodkowane, linia ciągła – zadana temperatura powietrza, linia kreskowa – zmiana kierunku przepływu powietrza)

Fig. 24. Air temperature variation in kiln C during the initial phase of the drying process of 50 mm pine timber ($w > PNW$) depending on the stack configuration and the air flow direction (packages: a – moved to the side wall, b – centered, solid line – set air temperature, dash line – reversing the air flow direction)

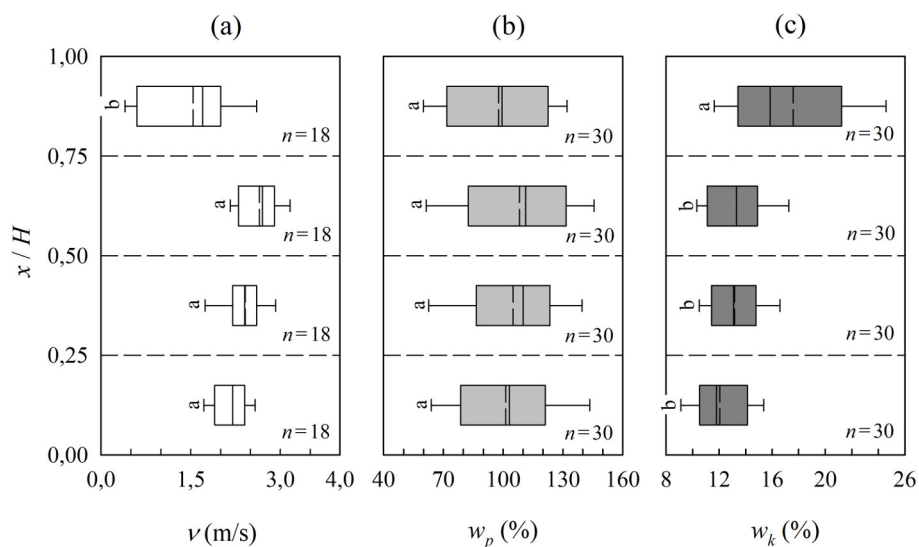
(ryc. 25). W obu przedstawionych przypadkach dotyczących realizacji procesu suszenia sortymentów tarcicy sosnowej o różnej grubości, tj. 23 mm i 58 mm, zarejestrowano prędkość powietrza niższą niż 1,5 m/s. Geometria kanałów, które tworzą przekładki zastosowane do ułożenia tarcicy, sprawia, że warunek turbulentnego przepływu powietrza, konieczny do prawidłowego przebiegu zjawisk konwekcyjnej wymiany ciepła i masy, jest spełniony przy prędkości powietrza wyższej niż 1,5 m/s. W pierwszym przypadku (ryc. 25a) średnia prędkość powietrza w stosie tarcicy przekroczyła wartość krytyczną, ale jej bezwzględny rozrzut (0,5–5,0 m/s) znamionuje duże zróżnicowanie intensywności suszenia w początkowej fazie. Według analiz przeprowadzonych przez Lediga i in. (2007) skutkiem zróżnicowania prędkości powietrza przepływającego między warstwami tarcicy w mniejszym zakresie, 2–4 m/s, jest odchylenie wartości współczynnika konwekcyjnej wymiany ciepła i masy o $\pm 25\%$ od wartości odpowiadającej średniej prędkości. Natomiast w przypadku przedstawionym na rycinie 25b przepływ powietrza charakteryzował dominujący udział obserwacji (ok. 70%) o niewłaściwej (zbyt niskiej) prędkości przy równoczesnym rejestrowaniu prędkości powyżej 3,0 m/s. Potwierdza to znaną opinię, że średnia prędkość przepływu powietrza w stosie nie jest wystarczającym kryterium oceny prawidłowości obiegu powietrza w suszarce (Rafalski, 1970).



Ryc. 25. Wyniki pomiarów prędkości powietrza w stosie tarcicy sosnowej o grubości: a – 23 mm oraz b – 58 mm (linia kreskowa – krytyczna wartość prędkości powietrza spełniająca warunek turbulentnego przepływu)

Fig. 25. Results of air velocity measurements in the stack of Scots pine timber with a thickness of: a – 23 mm and b – 58 mm (dash line – critical value of air velocity for turbulent flow)

Na rycinie 26 przedstawiono wyniki pomiarów prędkości powietrza w komorowej suszarce do tarcicy bez rewersji obiegu powietrza (suszarka A – ryc. 1), z uwzględnieniem początkowej i końcowej wilgotności tarcicy sosnowej, która stanowiła jej załadunek (założenia procesu suszenia tarcicy zestawiono w tabeli 2). Wobec braku statystycznie istotnych różnic średnich wartości wilgotno-



Ryc. 26. Wyniki pomiarów: a – prędkości powietrza, b – wilgotności początkowej oraz c – wilgotności końcowej w stosie 25 mm obrzynanej tarcicy sosnowej w suszarce A z uwzględnieniem położenia na wysokości stosu ($p = 20$ mm)

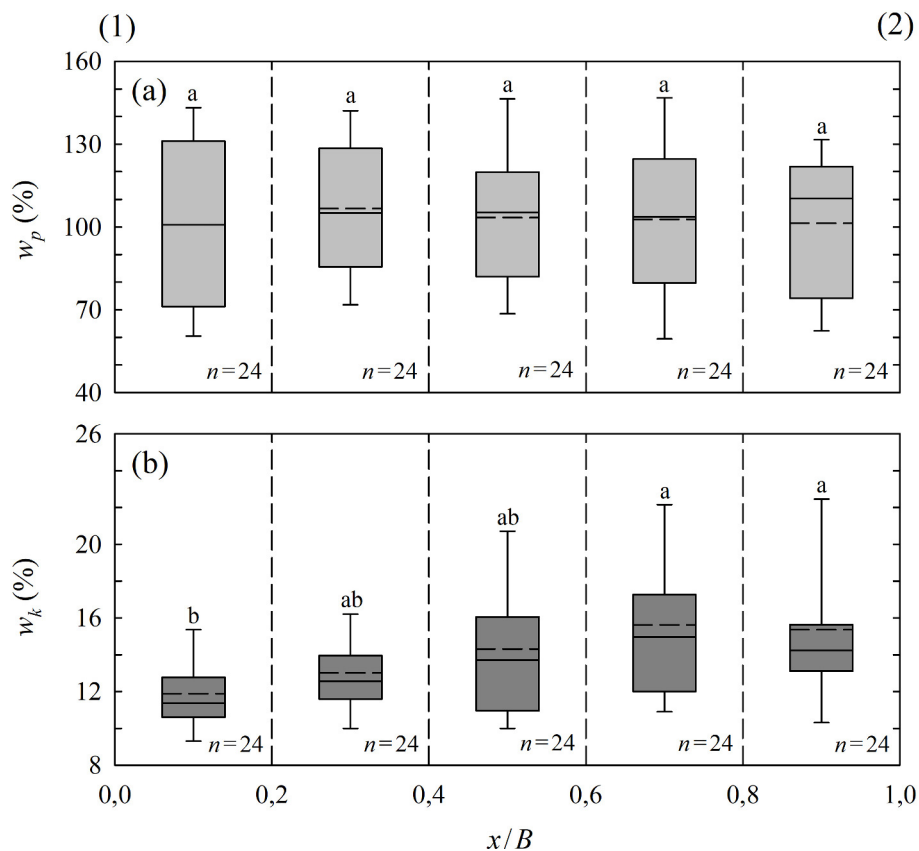
Fig. 26. Results of the measurement: a – air velocity, b – initial moisture content and c – final moisture content of 25 mm edged Scots pine timber stack in kiln A taking into account the position at the stack height ($p = 20$ mm)

ści początkowej i podobnego jej rozrzutu w poszczególnych partiach stosu wyniki pomiarów wykorzystano do oceny skutków zróżnicowania prędkości przepływu powietrza na wilgotność końcową tarcicy. Najwyższą średnią wilgotność i największy rozrzut wilgotności końcowej zarejestrowano w najwyższej usytuowanych partiach tarcicy, w których średnia prędkość powietrza nie przekraczała wartości krytycznej, tj. 1,5 m/s. W tym samym procesie suszenia w strefach stosu, w których średnia prędkość przepływu powietrza kształtowała się na poziomie 2,2–2,6 m/s, wilgotność końcowa tarcicy była bliska oczekiwanej przy 2,5-krotnie mniejszym rozrzucie niż w przypadku przepływu powietrza ze zbyt niską prędkością.

Wyniki analiz procesów suszenia tarcicy iglastej w komorowej suszarce do tarcicy bez rewersyjnego obiegu powietrza, które przeprowadził Milota i Tschernitz (1994), pozwalają scharakteryzować wpływ zróżnicowania warunków wysychania w kierunku przepływu powietrza na jakość suszenia. Wilgotność końcowa tarcicy w pakiecie zlokalizowanym w strefie wylotu powietrza ze stosu charakteryzowała się istotnie wyższym rozrzutem i dużym udziałem sztuk o wilgotności wyższej niż dopuszczalna. Natomiast w przypadku pakietu tarcicy zlokalizowanego po przeciwległej stronie załadunku suszarki zaobserwowano z kolei duży udział sztuk tarcicy o wilgotności znacznie niższej od oczekiwanej (przesuszonej).

Na kolejnej rycinie (ryc. 27) przedstawiono wyniki uzyskane w tym samym procesie suszenia co przedstawiony na rycinie 26, jednak tym razem z uwzględnieniem analizy wilgotności końcowej tarcicy w kierunku przepływu powietrza (szerokość stosu). Pomimo niewielkiego wymiaru stosu w tym kierunku (ryc. 1) potwierdzono wzrost średniej wilgotności końcowej tarcicy i jej większy rozrzut w kierunku przepływu powietrza, tj. na szerokości stosu.

Przedstawione wyniki analiz pomiarów prędkości powietrza w suszarce A ze względu na stosunkowo niewielkie wymiary przestrzeni załadowniczej i brak rewersyjnego obiegu powietrza nie umożliwiają oceny kompleksu czynników wpływających na zróżnicowanie prędkości powietrza w wielkogabarytowych suszarkach stosowanych w warunkach produkcyjnych. Uzasadnia to przedstawienie wyników kolejnej analizy (tabela 14), której celem była weryfikacja hipotezy o występowaniu bardziej złożonych mechanizmów różnicowania właściwości powietrza przepływającego przez stos tarcicy niż w przedstawionym wcześniej przypadku. Wyniki szczegółowych testów porównawczych dowodzą wpływu rewersyjnych zmian obiegu powietrza w wielkogabarytowej suszarce do tarcicy (suszarka C – ryc. 1) na średnią prędkość powietrza w stosie (tab. 14). Stwierdzono, że efektem rewersyjnej zmiany kierunku przepływu powietrza w suszarce jest blisko 10% różnica wartości średniej prędkości powietrza po przeciwległych stronach stosu podczas realizacji tego samego procesu suszenia. Po uwzględnieniu bardziej szczegółowego podziału powierzchni, przez które przepływało powietrze, stwierdzono, że w obrębie pojedynczego pakietu (3L) zmiana kierunku przepływu powietrza towarzyszyła nie tylko istotna zmiana prędkości, ale i dwukrotny wzrost jej rozrzutu. Równocześnie w przypadku pakietu 2L i 2P nie stwierdzono statystycznie istotnych zmian charakterystyki przepływu powietrza. Przedstawione w tabeli 15 wyniki wieloczynnikowej analizy wariancji potwierdzają istotność strefowego zróżnicowania przepływu powietrza, a pośrednio warunków suszenia. Granice strefowego zróżnicowania warunków suszenia wytyczają gabaryty poszczególnych pakietów tarcicy oraz



Ryc. 27. Wyniki pomiarów wilgotności 25 mm obrzynanej tarcicy sosnowej w suszarce A z uwzględnieniem wpływu położenia tarcicy w kierunku przepływu powietrza (1 – strona wlotu powietrza do stosu, 2 – strona wylotowa, $p = 20$ mm)

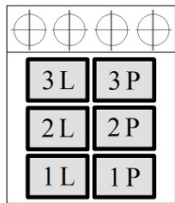
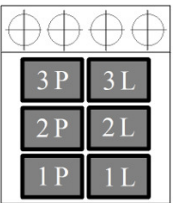
Fig. 27. Results of moisture content measurements of 25 mm edged Scots pine timber in kiln A taking into account the effect of timber position in the air flow direction (1 – inlet side of the stack, 2 – outlet side of the stack, $p = 20$ mm)

ich warstw i rzędów w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku przepływu powietrza. Potwierdzono również występowanie interakcji między badanymi czynnikami, tj. rozmiarem rozpatrywanej powierzchni i rewersyjną zmianą kierunku przepływu powietrza. Jedynie interakcja 3. rzędu nie była statystycznie istotna (dla $\alpha = 0,05$).

W badaniach dotyczących zależności między efektami suszenia (np. rozrzutem wilgotności końcowej) a intensywnością suszenia uwzględnia się przede wszystkim wpływ parametrów procesowych, tj. temperatury i względnej wilgotności powietrza oraz jego prędkości. Jednak intensywność suszenia zależy w dużej mierze także od czynników materiałowych – grubości tarcicy i zastosowanych przekładek. Z badań Haufy (1986) nad właściwościami przepływu powietrza w stosie modelowym wynika, że efekt równomiernego przepływu powietrza jest wzmacniany przez zastosowanie cienkich przekładek do ułożenia tarcicy o większej grubości. Zatem opisywanej sytuacji równomiernego przepływu powietrza powinno towa-

Tabela 14. Średnia prędkość powietrza w suszarce C z uwzględnieniem rewersyjnych zmian kierunku przepływu powietrza i podziału przekroju poprzecznego stosu tarcicy na określone powierzchnie pomiarowe ($s = 50$ mm, $p = 25$ mm)

Table 14. Average air speed in kiln C taking into account reversible air circulation and the division of the timber stack cross-section into specific measuring areas ($s = 50$ mm, $p = 25$ mm)

Powierzchnia pomiarowa Measuring area	Symbol	n	Kierunek przepływu powietrza Airflow direction	
			lewo left	prawo right
				
Pakiet Package	1L 1P 2L 2P 3L 3P	35 35 35 35 35 35	2,4 ^{ab} ± 0,44 2,1 ^b ± 0,62 2,6 ^a ± 0,58 2,4 ^{ab} ± 0,43 2,3 ^{ab} ± 0,37 2,5 ^a ± 0,50	2,1 ^d ± 0,60 2,4 ^{cd} ± 0,52 2,3 ^{cd} ± 0,62 2,6 ^{bc} ± 0,45 2,9 ^b ± 0,70 3,4 ^a ± 0,63
Warstwa Row	1 2 3	70 70 70	2,3 ^b ± 0,55 2,5 ^a ± 0,51 2,4 ^{ab} ± 0,45	2,2 ^b ± 0,57 2,4 ^b ± 0,56 3,1 ^a ± 0,70
Rząd Column	L P	105 105	2,4 ^a ± 0,48 2,4 ^a ± 0,55	2,4 ^b ± 0,73 2,8 ^a ± 0,68
Stos Stack	–	210	2,4 ^b ± 0,51	2,6 ^a ± 0,72

rzyszyć zwiększenie równomierności wysychania drewna w załadunku suszarki. Porównanie symulacyjnych wartości rozrzutu wilgotności końcowej obliczonych za pomocą programu do optymalizacji procesów suszenia (Salin, 2005) wskazuje, że w przypadku procesu suszenia tarcicy o większej grubości grubość przekładek nie wpływa na rozrzut wilgotności końcowej. Natomiast skutkiem zastosowania przekładek o większej grubości do ułożenia tarcicy cienkiej było ograniczenie rozrzutu wilgotności końcowej. Autor obliczeń konkluduje, że stanowi to efekt mniejszego obciążenia suszarki. W odniesieniu do tego stwierdzenia warto zwrócić uwagę na fakt, że zmianie ilości tarcicy w załadunku suszarki towarzyszy proporcjonalna zmiana powierzchni tarcicy stanowiącej powierzchnię wymiany ciepła i masy. Według Widłaka (2001) powierzchnia tarcicy, która bierze udział w procesie suszenia, może być obliczona ze wzoru:

$$A = 2V_t \left(\frac{1}{s} + 1 \right) [m^2] \quad (20)$$

Powierzchnia ta powinna być pomniejszona o powierzchnię tarcicy zakrytą przez przekładki A_p , którą można obliczyć z zależności (Lampelius, 1969, za Widłak, 2001):

Tabela 15. Analiza wariancji dla prędkości powietrza w załadunku suszarki C uwzględniająca wpływ geometrii stosu tarcicy oraz rewersyjnych zmian obiegu powietrza

Table 15. Analysis of variance in air velocity in batch of kiln C taking into account the effect of timber stack geometry and reversal of air circulation

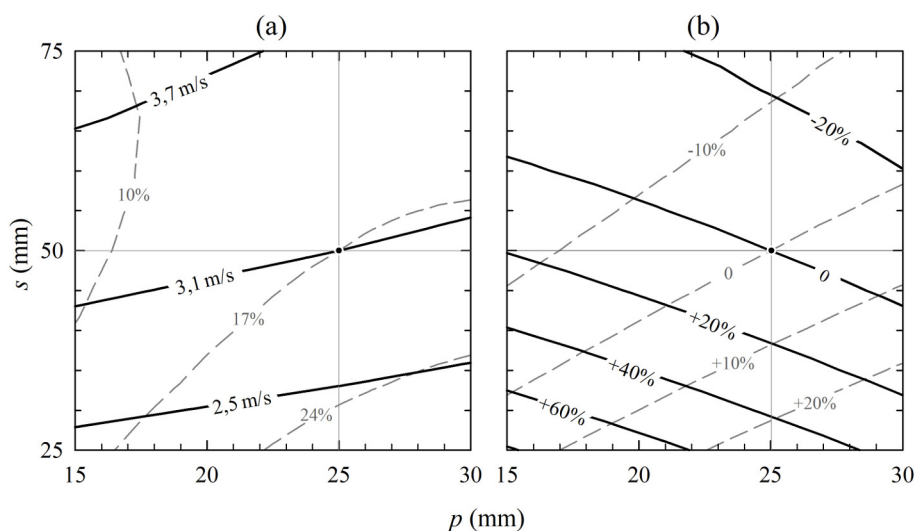
Efekt Effect	SS	df	MS	F	p
Wyraz wolny Intercept	2639,019	1	2639,019	8838,280	0,000000
Warstwa Layer	19,631	2	9,815	32,872	0,000000
Rząd Row	1,814	1	1,814	6,074	0,014128
Rewersja Reversion	4,526	1	4,526	15,158	0,000115
Warstwa · Rząd Layer · Row	2,157	2	1,078	3,612	0,027878
Warstwa · Rewersja Layer · Reversion	13,974	2	6,987	23,400	0,000000
Rząd · Rewersja Row · Reversion	4,362	1	4,362	14,607	0,000153
Warstwa · Rząd · Rewersja Layer · Row · Reversion	0,514	2	0,257	0,861	0,423391
Błąd Error	121,825	408	0,299		

$$A_p = 0,10 \div 0,15 \frac{V_t}{s} [m^2] \quad (21)$$

Na rycinie 28a przedstawiono wyniki własnych pomiarów prędkości powietrza w załadunku suszarki dla różnych wariantów grubości tarcicy i przekładek, na podstawie których wyznaczono zależność średniej prędkości powietrza i współczynnika zmienności charakteryzującego jej rozrzut. Natomiast na rycinie 28b przedstawiono analogicznie względną zmianę powierzchni parowania i objętości tarcicy. Jako odniesienie przyjęto powierzchnię i objętość tarcicy w stosie odpowiadającą wariantowi grubości tarcicy $s = 50$ mm i grubości przekładek $p = 25$ mm.

Wyniki przedstawionych analiz wskazują, że:

- wzrost średniej wartości prędkości powietrza wzmaga efekt równomierności przepływu powietrza przez stos,
- zmiany grubości tarcicy i grubości przekładek powodują zmiany powierzchni wymiany ciepła i masy, przy czym dla tarcicy o grubości 50 mm i standardowej grubości przekładek 25 mm zmniejszenie grubości tarcicy oznacza relatywnie większą zmianę powierzchni parowania niż w przypadku zwiększenia grubości tarcicy o tę samą wartość,
- wzrost powierzchni parowania i ilości tarcicy w stosie powoduje wzrost obciążenia suszarki (w przedstawionej sytuacji należy spodziewać się zwiększenia wpływu równomierności przepływu powietrza na równomierność suszenia i rozrzut wilgotności końcowej).



Ryc. 28. Zależność (a) średniej prędkości powietrza (linia ciągła) i współczynnika zmienności (linia kreskowa) oraz (b) względnej zmiany powierzchni wymiany (linia ciągła) i objętości tarcicy (linia kreskowa) w załadunku suszarki A od grubości tarcicy s i grubości przekładek p
Fig. 28. Relationship between (a) average air velocity (solid line) and coefficient of variation (dash line) and (b) relative change of surface (solid line) and timber volume in the stack in kiln A (dash line) for different options of timber thickness s and sticker thickness p

Tabela 16. Bilans strumienia powietrza przepływającego przez stos tarcicy 23 mm w suszarce C (szkodliwe przestrzenie (a) niezasłonięte (b) zasłonięte)

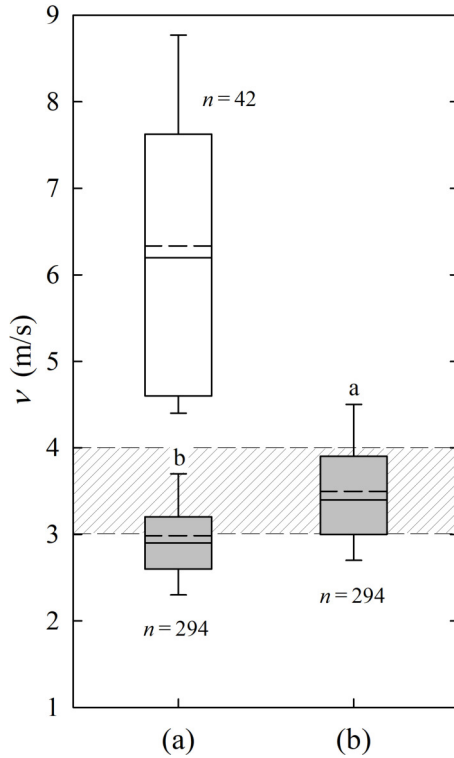
Table 16. Balance of the air stream passing the stack of 23 mm timber in kiln C (passive spaces (a) unrestricted (b) restricted)

Powierzchnia pomiaru Area of measurement	(a)				(b)			
	A (m ²)	n	ν (m/s)	V (m ³ /s)	A (m ²)	n	ν (m/s)	V (m ³ /s)
Pomiędzy przekładkami Fillet spaces	28,4 (85,6%)	294	3,0 ^b ±0,6	84,6 (79,6%)	28,4 (94,0%)	294	3,6 ^a ±0,8	101,0 (97,3%)
Nad stosem Over the stack	1,8 (5,4%)	14	1,6 ±0,7	2,9 (2,7%)	1,8 (6,0%)	14	1,6 ±0,7	2,8 (2,7%)
Pomiędzy pakietami Between packages	2,0 (6,0%)	28	5,4 ±1,0	10,7 (10,0%)	–	–	–	–
Pod stosem Under the stack	1,0 (3,0%)	14	8,2 ±1,0	8,1 (7,7%)	–	–	–	–
Razem Total	33,1 (100,0%)	350		106,3 (100%)	30,2 (100,0%)	308		103,9 (100,0%)

Kolejny analizowany czynnik wpływający na intensywność suszenia to sprawność aerodynamiczna suszarki, od której zależy efektywność oddziaływania czynnika suszącego. Efektywność ta jest ograniczana przez przepływ powietrza poza obrębem pakietów suszonej tarcicy, w kanałach określanych mianem szkodliwych przestrzeni. Są to przestrzenie, które tworzą legary pomiędzy pakietami, niezasłonięte przestrzenie pomiędzy czołem stosu i ścianą boczną suszarki oraz poniżej stropu pozornego. Według Rafalskiego (1970), który przeprowadził analizę sprawności obiegu konwekcyjnej suszarki do tarcicy, znaczna część (tj. 33%) strumienia powietrza wprawianego w ruch przez zainstalowane wentylatory przepływała poza stosem. W późniejszych badaniach uwarunkowań właściwości obiegu powietrza w suszarce, które przeprowadzili Bedelean i Sova (2010b), zaobserwowano podobny poziom strat strumienia powietrza. W tabeli 16 przedstawiono bilans strumienia powietrza oparty na wynikach pomiarów prędkości przeprowadzonych przez autora w wielkogabarytowej suszarce do tarcicy, z uwzględnieniem wariantu całkowitego ograniczenia przepływu powietrza przez szkodliwe przestrzenie. Z analizy pomiarów wynika, że łącznie ponad 20% całkowitej ilości czynnika suszącego nie przepływało bezpośrednio nad powierzchnią suszonego drewna, mimo że szkodliwe przestrzenie stanowiły mniej niż 5% łącznej powierzchni kanałów przepływu. Składa się na to wielokrotnie wyższa prędkość powietrza pomiędzy legarami (w skrajnych przypadkach ok. 10 m/s) niż w szczelinach, które tworzą przekładki (ryc. 29). Warto podkreślić, że w badanym przypadku wyeliminowanie przepływu powietrza przez szkodliwe przestrzenie powoduje nie tylko zwiększenie efektywności oddziaływania powietrza na drewno (wzrasta sprawność aerodynamiczna suszarki), ale też wzrost prędkości do zakresu uznawanego za właściwy w procesach suszenia szybkooschnącej tarcicy sosnowej, tj. 3–4 m/s (ryc. 29). W analizowanym przypadku eliminacja przestrzeni szkodliwych przy spadku łącznej ilości powietrza obiegowego ze 106,3 m³/s do 103,9 m³/s (o 2,8%) spowodowała zwiększenie ilości powietrza przepływającego przez stos z 84,6 m³/s do 101,0 m³/s (o 19,4%).

Zastosowanie statystyki opisowej okazuje się niewystarczające do kompleksowej oceny równomierności obiegu powietrza. Poznanie wpływu i określenie wagi różnych czynników, od których zależy równomierność obiegu powietrza oraz występowanie interakcji (współzależności) między nimi, wykorzystano przy tworzeniu specyfikacji założeń optymalnego przepływu powietrza w kontekście zapewnienia równomierności suszenia. W tabeli 17 przedstawiono założenia eksperymentu, który przeprowadzono przy wykorzystaniu komorowej suszarki do tarcicy (suszarka A – ryc. 1) w celu uzyskania danych do opracowania modelu zależności charakterystyki przepływu powietrza przez załadunek suszarki od grubości tarcicy i przekładek (czynniki materiałowe) oraz prędkości obrotowej wentylatora (czynnik eksploatacyjny).

W opisywanym przypadku właściwości obiegu powietrza określono na podstawie średniej prędkości powietrza w stosie (uwzględniając wyniki pomiarów we wszystkich kanałach przepływu, które tworzyły przekładki) oraz równomierności przepływu w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku przepływu powietrza. Równomierność przepływu scharakteryzowano na podstawie założenia, że całkowita powierzchnia przepływu powietrza A składa się z części, w obrębie których powietrze przepływa z prędkością: mniejszą niż dopuszczalna A_a , w dopuszczalnych



Ryc. 29. Wyniki pomiarów prędkości powietrza między przekładkami (kolor szary) i w obrębie szkodliwych przestrzeni (kolor biały) w suszarce C (szkodliwe przestrzenie: a – niezasłonięte, b – zasłonięte)
Fig. 29. Results of air velocity measurement in dryer C within fillet spaces (grey) and passive spaces (white) (passive spaces: a – unrestricted, b – restricted)

Tabela 17. Założenia eksperymentu wyznaczania charakterystyki obiegu powietrza w komorowej suszarce do tarcicy w zależności od grubości tarcicy i przekładek oraz prędkości obrotowej wentylatora

Table 17. Assumptions of the experiment to determine the characteristics of air circulation in the batch kiln depending on timber thickness, sticker thickness and fan speed

Zmienna niezależna Independent variable	Symbol	Poziom zmiennej Level of variable		
		(-1)	(0)	(1)
Grubość tarcicy s (mm) Timber thickness s (mm)	ξ_1 (x_1)	25	50	75
Grubość przekładek p (mm) Sticker thickness p (mm)	ξ_2 (x_2)	20	25	30
Prędkość obrotowa wentylatora n (1/min) Fan speed n (1/min)	ξ_3 (x_3)	400	800	1 200

W nawiasach podano zmienne niezależne zredukowane: $x_1 = (\xi_1 - 50)/25$; $x_2 = (\xi_2 - 25)/5$; $x_3 = (\xi_3 - 800)/400$.

Reduced independent variables in brackets: $x_1 = (\xi_1 - 50)/25$; $x_2 = (\xi_2 - 25)/5$; $x_3 = (\xi_3 - 800)/400$.

granicach A_b i większą niż dopuszczalna A_c (Majka, 2012):

$$A = \sum A_a + \sum A_b + \sum A_c \text{ [m}^2\text{]} \quad (22)$$

Wyznaczenie udziałów określonych powierzchni w całkowitej powierzchni przepływu stanowiło podstawę określenia równomierności przepływu powietrza:

$$u_a = \frac{\sum A_a}{A} \cdot 100 \text{ [%]} \quad u_b = \frac{\sum A_b}{A} \cdot 100 \text{ [%]} \quad u_c = \frac{\sum A_c}{A} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (23)$$

Do wyznaczenia udziałów powierzchni w całkowitej powierzchni przepływu powietrza wykorzystano wykresy konturowe prędkości, które poddano cyfrowej analizie obrazu. Wyniki 2670 pomiarów prędkości łącznie oraz udziały wyspecyfikowanych kategorii powierzchni dla 27 zaplanowanych wariantów eksperymentu przedstawiono w tabeli 18. Estymowane wartości parametrów modelu zależności prędkości powietrza i równomierności jego przepływu od grubości tarcicy i przekładek oraz prędkości obrotowej wentylatorów (opisanego równaniem (4)) zestawiono w tabeli 19.

Wyniki przeprowadzonej wieloczynnikowej analizy wariancji (tab. 20) potwierdzają hipotezę o istotności wpływu każdego uwzględnionego w eksperymencie czynnika na średnią prędkość przepływu, a także o występowaniu interakcji między grubością tarcicy i przekładek oraz grubością tarcicy i prędkością obrotową wentylatorów.

Na rycinie 30 przedstawiono zależności, które charakteryzują średnią prędkość przepływu powietrza i jego równomierność w załadunku suszarki od wybranych czynników materiałowych (grubość tarcicy i przekładek) i eksploatacyjnych (prędkość obrotowa wentylatora). Wyniki analizy potwierdzają znane w praktyce zjawisko wzrostu średniej prędkości powietrza w stosie tarcicy o większej grubości. Przy tym wpływ równoczesnego zwiększenia grubości tarcicy i grubości przekładek na średnią prędkość powietrza w stosie można określić jako marginalny i dotyczy on skrajnych wariantów grubości tarcicy, tj. 25 mm i 75 mm (ryc. 30a).

Wyniki przedstawione na rycinie 30b wskazują, że obniżenie w pewnym zakresie prędkości obrotowej wentylatora może zostać wykorzystane do wzmocnienia efektu równomierności przepływu powietrza w rozumieniu zwiększenia udziału powierzchni, a tym samym objętości stosu, w obrębie której przepływ powietrza odbywa się z właściwą prędkością. Opisany efekt jest tym większy, im mniejsza grubość tarcicy, dlatego pozytywny wpływ redukcji prędkości obrotowej wentylatorów na równomierność przepływu powietrza, a zatem i równomierność suszenia, będzie widoczny przede wszystkim w przypadku realizacji procesów suszenia cienkich sortymentów tarcicy.

W celu zidentyfikowania i oceny innych źródeł ograniczenia równomierności przepływu powietrza, którym towarzyszy wzrost zróżnicowania warunków wysychania w stosie w warunkach produkcyjnych, zostały zaaranżowane sytuacje, w których istnieje uzasadnione przypuszczenie, że są przyczyną ograniczenia równomierności wysychania podczas realizacji procesów suszenia. Analiza oparta na wynikach łącznie 2360 pomiarów prędkości w wielkogabarytowej komorowej suszarce do tarcicy uwzględniała porównanie następujących źródeł zmian równomierności przepływu powietrza:

Tabela 18. Wyniki pomiarów prędkości powietrza w suszarce A oraz powierzchniowy udział strefy o prędkości: a – niższej niż dopuszczalna, b – w dopuszczalnym zakresie oraz c – wyższej niż dopuszczalna, dla różnych wariantów grubości tarcicy ξ_1 i przekładek ξ_2 oraz prędkości obrotowej wentylatorów ξ_3

Table 18. Results of air velocity measurements in kiln A and surface area of the zone with velocity: a – lower than allowable, b – within the acceptable range and c – higher than allowable for different variants of timber thickness ξ_1 , stickers thickness ξ_2 and fan speed ξ_3

Zmienne niezależne Independent variables			n	\bar{v}	(a)	(b)	(c)
$\xi_1 (x_1)$	$\xi_2 (x_2)$	$\xi_3 (x_3)$		m/s	%	%	%
25 (-1)	20 (-1)	400 (-1)	155	0,03 ^m ±0,12	100,0	0,0	0,0
50 (0)	20 (-1)	400 (-1)	95	0,41 ^l ±0,31	100,0	0,0	0,0
75 (1)	20 (-1)	400 (-1)	70	0,90 ⁱ ±0,17	69,2	30,8	0,0
25 (-1)	25 (0)	400 (-1)	140	0,13 ^{km} ±0,24	100,0	0,0	0,0
50 (0)	25 (0)	400 (-1)	90	0,45 ^{jl} ±0,34	99,5	0,5	0,0
75 (1)	25 (0)	400 (-1)	65	0,85 ⁱ ±0,22	75,4	24,6	0,0
25 (-1)	30 (1)	400 (-1)	125	0,10 ^m ±0,22	100,0	0,0	0,0
50 (0)	30 (1)	400 (-1)	85	0,42 ^{kl} ±0,37	98,3	1,7	0,0
75 (1)	30 (1)	400 (-1)	65	0,71 ^{ij} ±0,32	81,2	18,8	0,0
25 (-1)	20 (-1)	800 (0)	155	1,38 ^h ±0,40	6,8	91,8	1,3
50 (0)	20 (-1)	800 (0)	95	1,97 ^{fg} ±0,37	0,0	48,2	51,8
75 (1)	20 (-1)	800 (0)	70	2,54 ^d ±0,35	0,0	2,2	97,8
25 (-1)	25 (0)	800 (0)	140	1,36 ^h ±0,50	0,0	84,7	5,3
50 (0)	25 (0)	800 (0)	90	1,96 ^g ±0,39	0,0	43,4	56,6
75 (1)	25 (0)	800 (0)	65	2,43 ^{de} ±0,32	0,0	1,2	98,8
25 (-1)	30 (1)	800 (0)	125	1,26 ^h ±0,54	20,0	71,5	8,5
50 (0)	30 (1)	800 (0)	85	1,96 ^g ±0,42	0,3	42,2	57,6
75 (1)	30 (1)	800 (0)	65	2,24 ^{ef} ±0,35	0,0	12,7	87,3
25 (-1)	20 (-1)	1 200 (1)	155	2,35 ^{de} ±0,52	0,0	13,1	86,9
50 (0)	20 (-1)	1 200 (1)	95	3,12 ^c ±0,47	0,0	0,1	99,9
75 (1)	20 (-1)	1 200 (1)	70	3,90 ^a ±0,59	0,0	0,0	100,0
25 (-1)	25 (0)	1 200 (1)	140	2,32 ^{de} ±0,62	1,1	14,8	84,1
50 (0)	25 (0)	1 200 (1)	90	3,17 ^c ±0,57	0,0	0,2	99,8
75 (1)	25 (0)	1 200 (1)	65	3,69 ^{ab} ±0,55	0,0	0,0	100,0
25 (-1)	30 (1)	1 200 (1)	125	2,11 ^{fg} ±0,68	2,3	32,1	65,5
50 (0)	30 (1)	1 200 (1)	85	3,07 ^c ±0,55	0,0	0,7	99,3
75 (1)	30 (1)	1 200 (1)	65	3,60 ^b ±0,52	0,0	0,0	100,0

W nawiasach podano zmienne niezależne zredukowane: $x_1 = (\xi_1 - 50)/25$; $x_2 = (\xi_2 - 25)/5$; $x_3 = (\xi_3 - 800)/400$.

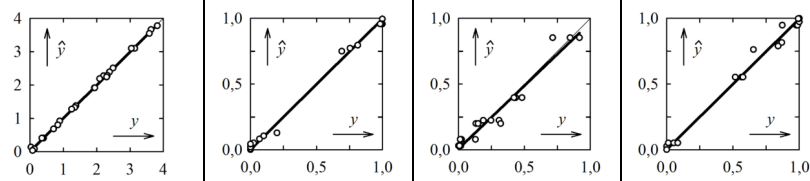
Reduced independence variables in brackets: $x_1 = (\xi_1 - 50)/25$; $x_2 = (\xi_2 - 25)/5$; $x_3 = (\xi_3 - 800)/400$.

- 1) rewersyjną zmianę kierunku przepływu powietrza
 - a) napływ powietrza z przodu suszarki,
 - b) napływ powietrza z tyłu suszarki;
- 2) zmianę szerokości stosu
 - a) 80% szerokości stosu (5 rzędów pakietów),
 - b) 100% szerokości stosu (6 rzędów pakietów);
- 3) zmianę konfiguracji pakietów w kierunku długości stosu
 - a) pakiety wyśrodkowane,
 - b) pakiety dosuwane na przemian do ściany bocznej;

Tabela 19. Wartości parametrów modelu zależności średniej prędkości powietrza i równomierności jego przepływu od grubości tarcicy i przekładek oraz prędkości obrotowej wentylatorów w suszarce A (a – średnia prędkość powietrza, udział w powierzchni przepływu strefy o prędkości: b – niższej niż dopuszczalna, c – w dopuszczalnym zakresie, d – wyższej niż dopuszczalna)

Table 19. Values of parameters in the model of dependence (4) of average air velocity and uniformity of airflow on timber thickness, sticker thickness and fan speed in kiln A (a – average air velocity, share in the flow area of the zone with velocity: b – lower than allowable, c – in the acceptable range, d – higher than allowable)

Symbol	Wartość – Value			
	(a)	(b)	(c)	(d)
β_0	1,9118	0,0413	0,3960	0,5516
β_1	0,5343	-0,0636	-0,3866	0,4480
β_2	-	-	-	-
β_3	1,3470	-0,4963	-	0,4983
β_4	-0,0537	-	0,0691	-0,0524
β_5	-	-	-	-
β_6	-0,1626	0,4182	-0,3657	-0,0525
β_7	-0,0328	-	-	-
β_8	0,1764	0,0589	-0,1118	0,0529
β_9	-	-	-	-
β_{10}	-0,0850	0,0229	-	-
β_{11}	-0,0922	0,0610	-	-0,0512
β_{12}	-	-	-	-
β_{13}	-	-	0,3984	-0,3951
β_{14}	-	-	-	-
β_{15}	-	-	-	-
R^2	0,999	0,994	0,959	0,992
R^2_{adj}	0,998	0,992	0,950	0,990
SE	0,0533	0,0389	0,0615	0,0457



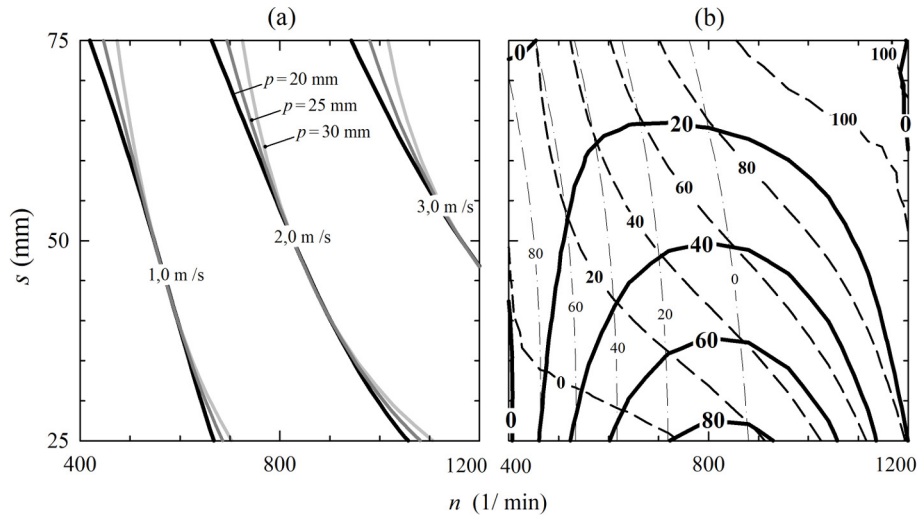
- 4) ograniczenie przepływu powietrza poza stołem
 - a) zasłonięte szkodliwe przestrzenie,
 - b) niezasłonięte szkodliwe przestrzenie;
- 5) zmianę grubości tarcicy
 - a) tarcica o grubości 23 mm,
 - b) tarcica o grubości 50 mm;
- 6) redukcję prędkości obrotowej wentylatora
 - a) zachowanie znamionowej prędkości obrotowej,
 - b) redukcja znamionowej prędkości obrotowej o 20%,
 - c) redukcja znamionowej prędkości obrotowej o 40%.

Wyniki pomiarów prędkości w wielkogabarytowej suszarce do tarcicy (suszarzka C – ryc. 1) dla wszystkich zaaranżowanych wariantów wypełnienia i konfiguracji pakietów w przestrzeni załadowniczej suszarki oraz redukcji prędkości obrotowej

Tabela 20. Analiza wariancji dla klasyfikacji dwukierunkowej, uwzględniająca wpływ grubości tarcicy s , grubości przekładek p i prędkości obrotowej wentylatora n_w na prędkość powietrza w załadunku suszarki A

Table 20. Analysis of variance taking into account the effect of timber thickness s , sticker thickness p and fan speed n_w on air velocity in timber stack in kiln A

Efekt Effect	SS	df	MS	F	p
Wyraz wolny Intercept	7 717,399	1	7 717,399	38 990,93	0,000000
s	506,933	2	253,467	1 280,60	0,000000
p	6,978	2	3,489	17,63	0,000000
n	2 600,266	2	1 300,133	6 568,71	0,000000
$s \cdot p$	3,964	4	0,991	5,01	0,000509
$s \cdot n$	41,736	4	10,434	52,72	0,000000
$p \cdot n$	1,730	4	0,433	2,19	0,068166
$s \cdot p \cdot n$	1,449	8	0,181	0,92	0,502543
Błąd Error	520,551	2 630	0,198		



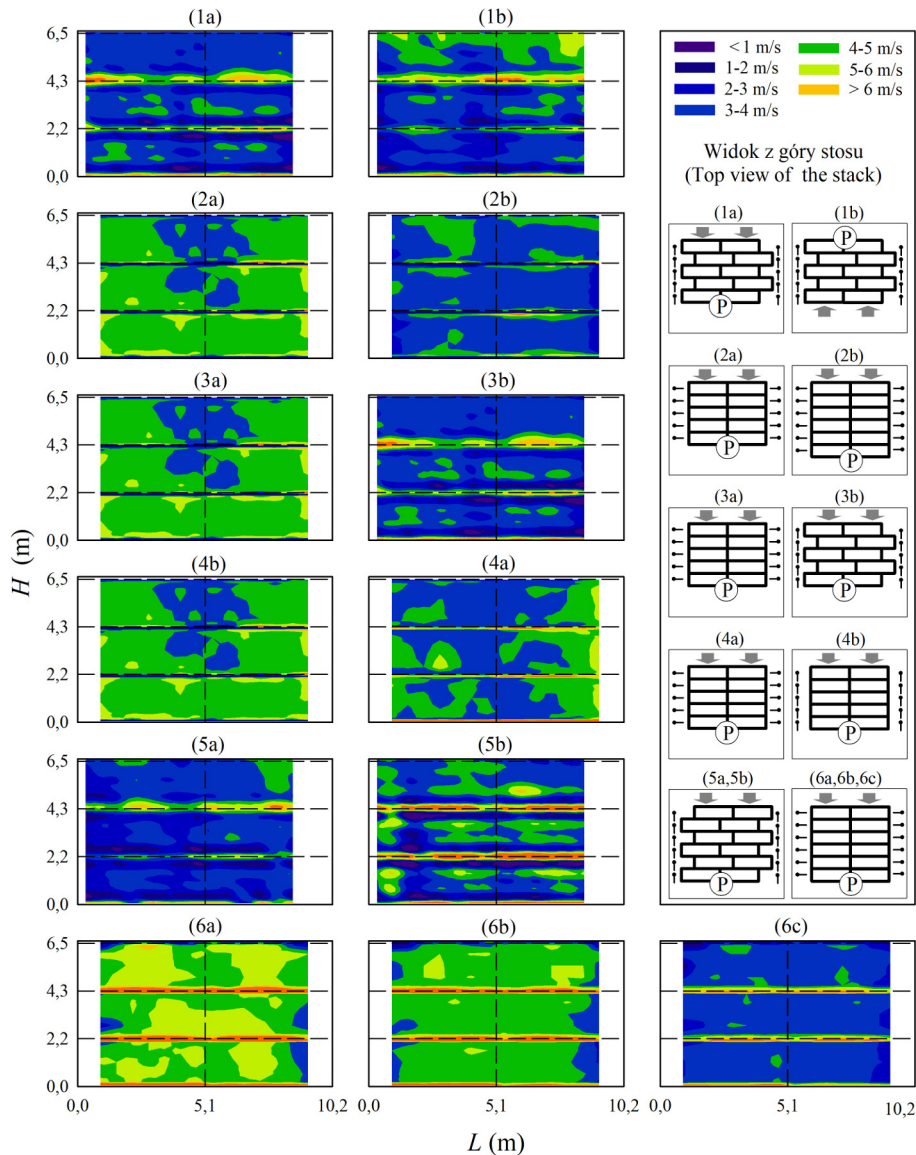
Ryc. 30. Zależność (a) średniej prędkości powietrza oraz (b) nierównomierności przepływu powietrza w suszarce A od grubości tarcicy s i prędkości obrotowej wentylatora n_w (procentowy udział strefy, w której powietrze przepływa z prędkością: w dopuszczalnych granicach – linia ciągła, wyższą i niższą niż dopuszczalna – odpowiednio linia kreskowa i punktowa)

Fig. 30. Dependence of (a) average air velocity and (b) airflow non-uniformity in kiln A for different variants of timber thickness s and fan speed n_w (percentage of the area with air flow: within allowable limits – solid line, higher and lower than allowable – dash and dash-dotted line, respectively)

wentylatora, które mogły stanowić przyczynę zmiany równomierności przepływu powietrza, przedstawiono na rycinie 31. Dla lepszego odwzorowania zróżnicowania przepływu powietrza zastosowano skalę barw z podziałem odpowiadającym interwałowi prędkości równemu 1 m/s. Natomiast na rycinie 32 analogicznie przedstawiono wyniki analizy równomierności przepływu powietrza opartej na podziale powierzchni przepływu przy uwzględnieniu udziału powierzchni określonych zależnościami (23). W tym przypadku zastosowanej skali barw przypisano udziały powierzchni, w obrębie których powietrze przepływa z prędkością 3–4 m/s, tj. gwarantującą przebieg suszenia z odpowiednią intensywnością oraz z prędkością niższą i wyższą niż dopuszczalna.

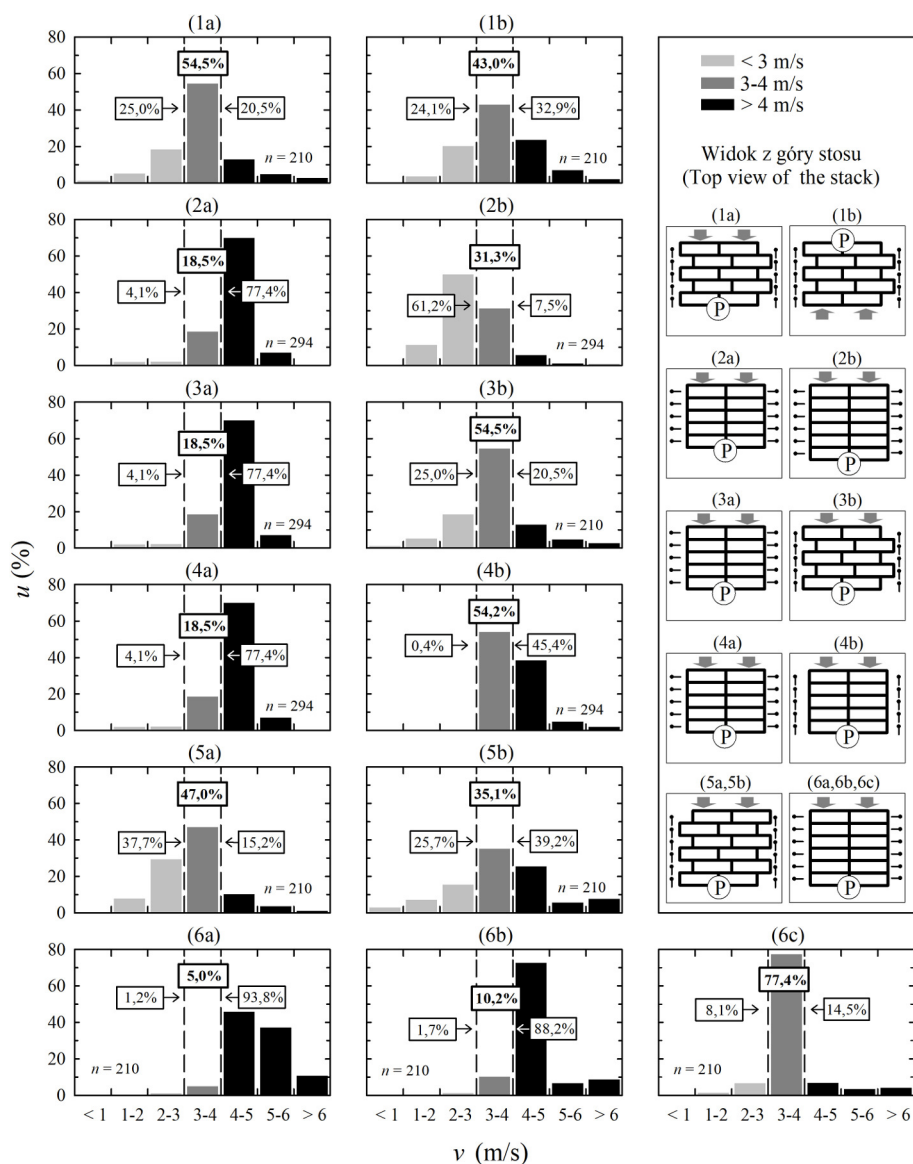
Wyniki zaprezentowanych analiz pozwalają na sformułowanie następujących stwierdzeń:

- rewersyjny obieg powietrza nie gwarantuje zachowania porównywalnej charakterystyki przepływu powietrza przez stos, co może stanowić przyczynę zróżnicowania warunków wysychania w skrajnych strefach załadunku suszarki, a w konsekwencji wzrostu rozrzutu wilgotności końcowej tarcicy;
- zwiększenie szerokości stosu (wymiar w kierunku przepływu powietrza) wpływa na obniżenie prędkości przepływającego powietrza i zwiększenie udziału powierzchni, w obrębie której strumień czynnika suszącego przepływa z prędkością niższą niż ta, która gwarantuje przebieg suszenia z właściwą intensywnością. Należy się spodziewać, że efekt nierównomierności wysychania tarcicy zwiększa się przy przepływie powietrza z prędkością niższą niż 1 m/s;
- efektem ograniczenia przepływu powietrza przez szkodliwe przestrzenie jest nie tylko wzrost jego prędkości, ale też zwiększenie równomierności przepływu w załadunku suszarki. Należy jednak dodać, że zmiany właściwości przepływu powietrza przez stos powodują równocześnie zmianę intensywności suszenia. Z tego względu konieczna jest weryfikacja wartości parametrów powietrza w programie suszenia, tj. jego temperatury i wilgotności względnej w zakresie, który zapewni realizację procesu suszenia z właściwą intensywnością;
- grubość tarcicy wpływa na charakterystykę przepływu powietrza. Wzrostowi prędkości i równomierności przepływu w przypadku tarcicy o większej grubości towarzyszy jednak wzrost przepływu powietrza z nadmierną prędkością, który ogranicza bezpieczeństwo suszenia w efekcie niekontrolowanego wzrostu intensywności suszenia;
- efektem redukcji prędkości obrotowej wentylatorów może być zwiększenie równomierności przepływu powietrza. Objawia się to wzrostem udziału powierzchni, w obrębie której powietrze przepływa z właściwą prędkością, oraz marginalizacją przepływu z niewłaściwą, tj. zbyt niską lub za wysoką prędkością.



Ryc. 31. Wykresy konturowe prędkości powietrza w suszarce C z uwzględnieniem zmian wybranych czynników: 1 – rewersyjny obieg powietrza, 2 – szerokość stosu, 3 – konfiguracja pakietów: a – wysrodkowane, b – dosuwane do ściany bocznej, 4 – zastosowanie kurtyn bocznych, 5 – grubość tarcicy: a – 23 mm, b – 50 mm, 6 – redukcja prędkości obrotowej wentylatorów: a – 0%, b – 20%, c – 40% (P – strefa pomiarów prędkości, strzałki – kierunek przepływu powietrza)

Fig. 31. Contour plots of air velocity in kiln C taking into account changes in selected factors: 1 – reversible air circulation, 2 – stack width, 3 – package configuration: a – centered, b – moved to the side wall, 4 – use of side baffles, 5 – thickness of timber: a – 23 mm, b – 50 mm, 6 – reduction of fan speed: a – 0%, b – 20%, c – 40% (P – measurement zone, arrows – airflow direction)



Ryc. 32. Równomierność przepływu powietrza w suszarce C z uwzględnieniem zmian wybranych czynników: 1 – rewersyjny obieg powietrza, 2 – szerokość stosu, 3 – konfiguracja pakietów: a – wysrodkowane, b – dosuwane do ściany bocznej, 4 – zastosowanie kurtyn bocznych, 5 – grubość tarcicy: a – 23 mm, b – 50 mm, 6 – redukcja prędkości obrotowej wentylatorów: a – 0%, b – 20%, c – 40% (P – strefa pomiarów prędkości, strzałki – kierunek przepływu powietrza)

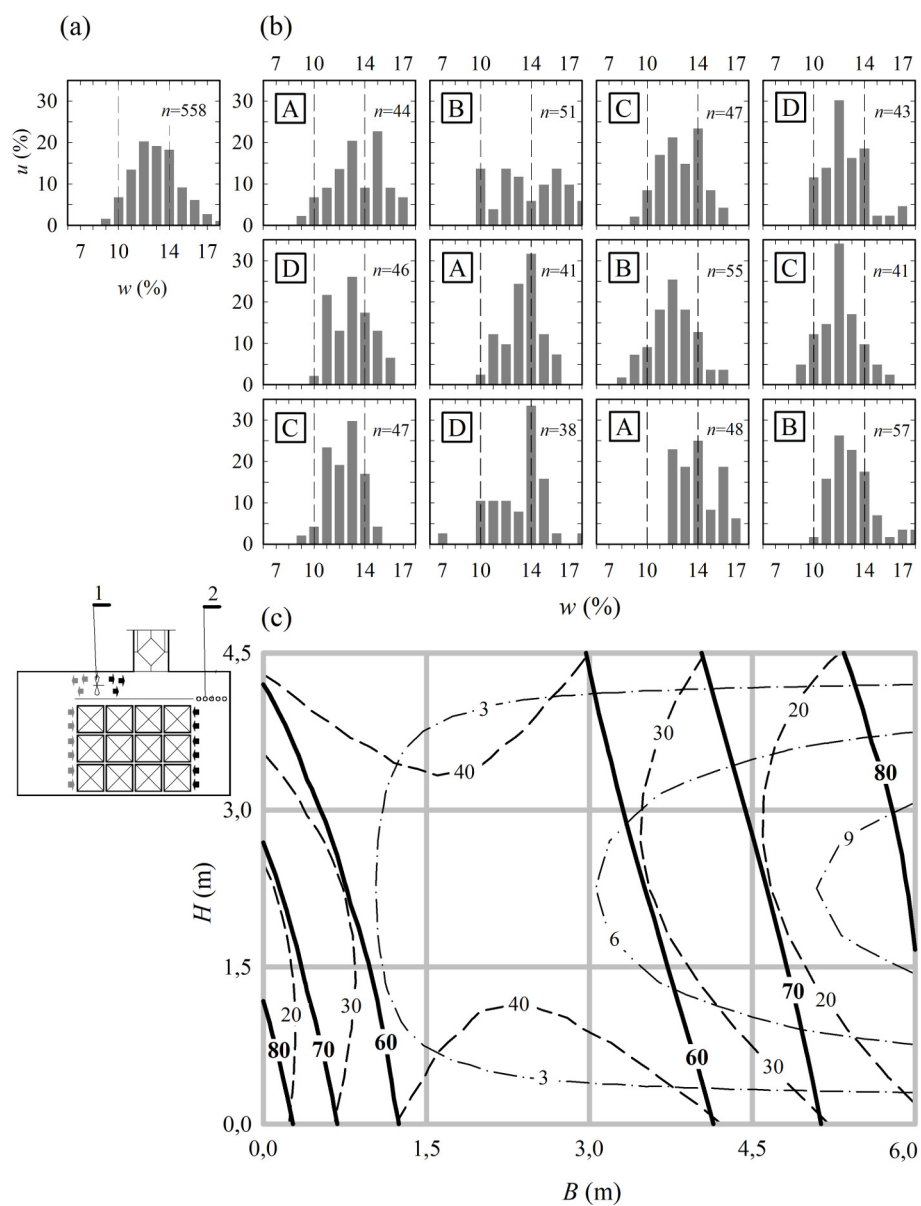
Fig. 32. Air flow uniformity of air velocity in kiln C taking into account changes in selected factors: 1 – reversible air circulation, 2 – stack width, 3 – package configuration: a – centered, b – moved to the side wall, 4 – use of side baffles, 5 – thickness of timber: a – 23 mm, b – 50 mm, 6 – reduction of fan speed: a – 0%, b – 20%, c – 40% (P – measurement zone, arrows – airflow direction)

6.3. Ocena jakości suszenia – modele empiryczne wpływu wybranych czynników technologicznych na wilgotność tarcicy po suszeniu

Rozwiązania konstrukcyjne i wyposażenie stosowanych obecnie suszarek do tarcicy nie pozwalają na eliminację, a jedynie na ograniczenie wpływu czynników powodujących jej nierównomierne wysychanie i w konsekwencji obniżenie jakości suszenia. Jednym z tych czynników może być nagrzewnica – nieodzowny element wyposażenia suszarki, charakteryzująca się bardzo dużym oporem aerodynamicznym. Rewersyjne zmiany kierunku przepływu powietrza powodują, że rozwiązania konstrukcyjne związane z jej niesymetrycznym usytuowaniem w komorze suszarki mogą wzmacniać efekt zróżnicowania właściwości powietrza wprawianego w ruch przez wentylatory, tj. prędkości, temperatury i względnej wilgotności.

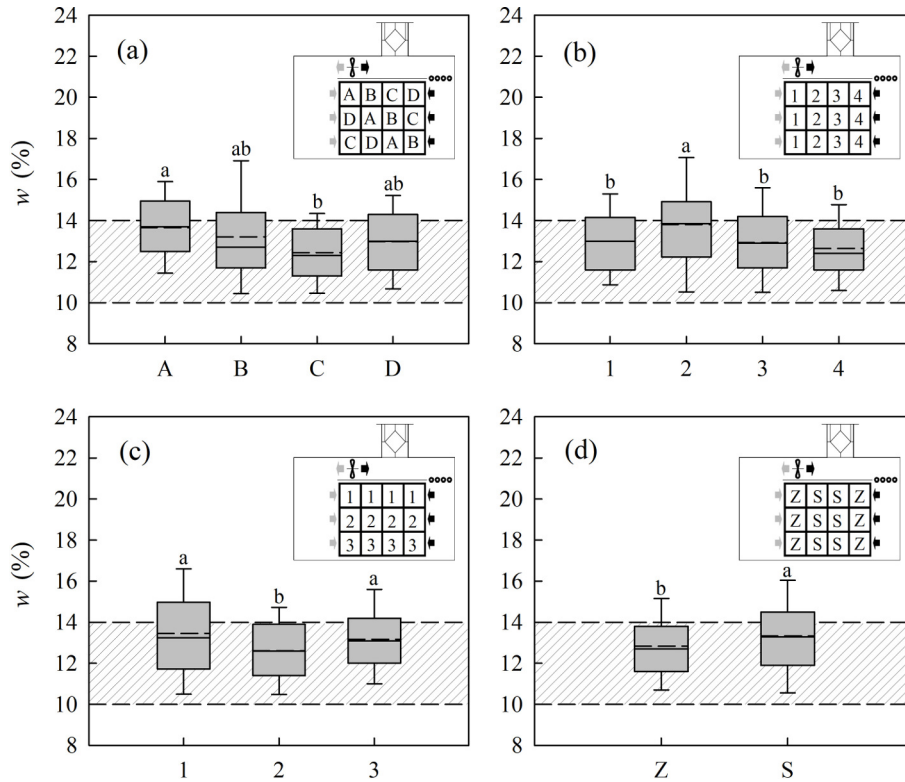
Do oceny wpływu czynników eksploatacyjnych na jakość suszenia wykorzystano wyniki pomiarów wilgotności końcowej wszystkich sztuk tarcicy w załadunku komorowej suszarki do tarcicy z rewersyjnym obiegiem powietrza (ryc. 1 – schemat suszarki B), której konstrukcja przewiduje niesymetryczne położenie nagrzewnicy i wentylatorów. Niekorzystny wpływ zróżnicowania właściwości czynnika suszącego nabiera szczególnego znaczenia, gdy zachodzi konieczność realizacji procesu suszenia tarcicy o potencjalnie różnej podatności na suszenie ze względu na miejsce pozyskania surowca tartaczego. Dlatego w analizie uwzględniono dodatkowe założenie o skompletowaniu mieszanego załadunku suszarki z tarcicy sosnowej o grubości 42 mm pozyskanej w czterech Nadleśnictwach (A–D) zlokalizowanych w różnych Rejonowych Dyrekcjach Lasów Państwowych (RDLP). Lokalizację nadleśnictw przedstawiono w tabeli 1. Porównanie właściwości suszonego drewna, które determinują jego podatność na suszenie, tj. szerokości przyrostów rocznych i gęstości oraz wilgotności początkowej, przedstawiono odpowiednio na rycinie 8 i rycinie 14. Załadunek suszarki składał się z czterech jednorodnych grup pakietów (trzy pakiety w każdej grupie). Każdy z jednorodnych pakietów tarcicy tworzących grupę został ułożony w innej warstwie, tj. dolnej, środkowej i górnej. Szczegółowy schemat ułożenia pakietów w załadunku suszarki został zilustrowany na rycinie 33. Histogramy wilgotności końcowej tarcicy z uwzględnieniem różnego stopnia szczegółowości przedstawiono na rycinach 33a i 32b odpowiednio dla całej partii tarcicy, jak i dla każdego pojedynczego pakietu. Na rycinie 33c przedstawiono zależność udziałów tarcicy o wilgotności spełniającej wymagania jakości oraz o wadliwej wilgotności zależnie od położenia w załadunku suszarki.

Linie, które wyznaczają udziały tarcicy o wilgotności w granicach dopuszczalnego rozrzutu oraz wyższej i niższej niż dopuszczalna, stanowią odzwierciedlenie oddziaływania czynników zaburzeń równomierności wysychania. W odniesieniu do niewielkiego stopnia przesuszenia dla całego załadunku suszarki należy zwrócić uwagę na fakt, że największy udział tarcicy o wilgotności niższej niż dopuszczalna ($w < 10\%$) charakteryzował pakiety zlokalizowane w strefie bezpośredniego oddziaływania nagrzewnicy (ponad 10% ich objętości). Natomiast największy udział tarcicy niedosuszonej ($w > 14\%$) wystąpił w pakietach środkowej części załadunku suszarki (ponad 40% ich objętości) kosztem ograniczenia udziału tarcicy o wilgot-



Ryc. 33. Rozrzut wilgotności końcowej w załadunku suszarki B: a – w całym stosie, b – w pojedynczych pakietach oraz c – procentowe udziały tarcicy o wilgotności: linia ciągła – w granicach dopuszczalnego rozrzutu, linia kreskowa – wyższej niż dopuszczalna, linia punktowa – niższej niż dopuszczalna (1 – wentylator, 2 – nagrzewnica)

Fig. 33. Target moisture content variation: a – in the batch, b – in individual packages, and c – percentages of timber with moisture: solid line – within acceptable range, dash line – higher than allowable, dotted line – lower than allowable (1 – fan, 2 – heating coil)



Ryc. 34. Zróżnicowanie wilgotności końcowej partii tarcicy w załadunku suszarki B z uwzględnieniem: a – pochodzenia tarcicy (A–D – miejsca pozyskania tarcicy) oraz podziału stosu na: b – rzędy pakietów (1–4), c – warstwy pakietów (1–3) oraz d – położenie pakietów w załadunku suszarki (Z – strefy zewnętrzne, S – strefa środkowa)

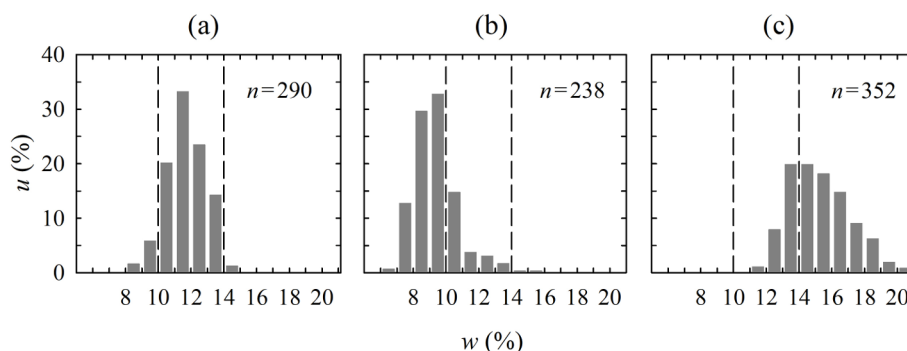
Fig. 34. Variation in final moisture content in batch of kiln B taking into account: a – timber provenance (A–D), division of kiln load into: b – package rows (1–4), c – package layers (1–3) and d – locations packages in kiln load (Z – outer zone, S – inner zone)

ności w granicach dopuszczalnego rozrzutu, tj. 10–14%. W przypadku każdej z opisywanych kategorii tarcicy zwraca uwagę niesymetryczny przebieg linii określających ich udział względem obrysu wytyczonego wymiarem szerokości B i wysokości stosu H . Potwierdza to niekorzystny wpływ na jakość suszenia oddziaływań wynikających z niesymetrycznej lokalizacji nagrzewnicy i wentylatorów w suszarce. Na rycinie 34 przedstawiono wyniki szczegółowych porównań (test Tukeya), na podstawie których stwierdzono statystyczną istotność wpływu badanych czynników na jakość suszenia (dla $\alpha = 0,05$).

7. MOŻLIWOŚCI ZMNIEJSZENIA ZRÓŻNICOWANIA WILGOTNOŚCI TARCICY W PROCESIE SEZONOWANIA

7.1. Wpływ histerezy sorpcji i oczekiwanej wilgotności końcowej tarcicy

Część partii wysuszonej tarcicy może charakteryzować się wilgotnością określaną jako wadliwa, która uniemożliwia jej bezpośrednie wykorzystanie do realizacji dalszych etapów procesu produkcyjnego. Przykładowo na rycinie 34 przedstawiono wyniki własnych pomiarów wilgotności końcowej tarcicy suszonej w suszarce komorowej w wybranym zakładzie produkcyjnym, według założeń tej samej technologii suszenia w temperaturze 55°C, które przy identycznych wymaganiach dotyczących jakości suszenia reprezentują przypadki niskiego i znacznego udziału tarcicy o wadliwej wilgotności w załadunku suszarki.



Ryc. 35. Histogramy wilgotności końcowej w partii 25 mm tarcicy sosnowej, charakterystyczne dla (a) niskiego oraz (b) i (c) znacznego udziału tarcicy o wadliwej wilgotności, odpowiednio przesuszonej i niedosuszonej (linia kreskowa – dopuszczalny rozrzut wilgotności)
Fig. 35. Histograms of final moisture content in the batch of 25 mm pine timber, typical for: a – slight, b, c – significant share of timber with non-allowable range of the moisture content, under-dried and over-dried, respectively (dash line – allowable range of the moisture content)

Konsekwencją nadmiernego rozrzutu końcowej wilgotności tarcicy jest konieczność jej długotrwałego sezonowania bezpośrednio po suszeniu. Warunkiem ograniczenia do niezbędnego minimum czasu sezonowania tarcicy o wadliwej wilgotności jest dobór parametrów powietrza uwzględniający dopuszczalny rozrzut

wilgotności tarcicy oraz zjawisko histerezy sorpcji (Salin, 2011). W przypadku tarcicy, której wilgotność jest niższa niż dopuszczalna (tarcica przesuszona), parametry powietrza podczas sezonowania, tj. temperaturę i względną wilgotność, należy dobierać w taki sposób, aby uwzględnić przebieg zjawiska pierwszej adsorpcji (nawilżanie). Natomiast sezonowanie tarcicy o wilgotności wyższej niż dopuszczalna (tarcica niedosuszona) wymaga uwzględnienia zjawiska drugiej desorpcji (suszenie). Brak szczegółowych danych eksperymentalnych pierwszej adsorpcji i drugiej desorpcji powoduje, że wartości wilgotności równowagowej drewna w praktyce sezonowania tarcicy bezpośrednio po suszeniu są zwykle obliczane na podstawie izoterm sorpcji, uwzględniających wartości pośrednie opublikowane przez Forest Products Laboratory (FPL) (Wood Handbook, 1955; 1999; 2010). Problem ograniczonej przydatności wspomnianego zbioru danych do zastosowania w praktyce suszenia, a także sezonowania tarcicy po suszeniu i późniejszego użytkowania wyrobów z drewna w warunkach zmieniających się parametrów otoczenia był analizowany już wielokrotnie (np. Wengert, 1976; Walker, 1993; Guzenda i in., 2005; Deliński, 2011). Z obszernej krytycznej analizy, którą przeprowadzili Glass i in. (2014), wynika, że zbiór danych FPL ewoluował wraz z pojawianiem się wyników nowych pomiarów (różne gatunki drewna, zwiększony zakres temperatury i względnej wilgotności powietrza) oraz określeniem nowych możliwości ich zastosowania (sezonowanie świeżo pozyskanej tarcicy, suszenie tarcicy w suszarkach, sezonowanie wysuszonej tarcicy oraz prognozowanie zmian wilgotności gotowych wyrobów z drewna). Według wspomnianych autorów zbiór danych FPL był wielokrotnie zredukowany przez selektywne uśrednianie oraz ponowne zastosowanie bez cytowania ich źródła, do opracowania tabel i wykresów w kolejnych wydaniach publikacji. Stąd aktualnie dane FPL charakteryzuje brak możliwości rozróżnienia między wartościami pomiarowymi, ekstrapolowanymi i interpolowanymi. W powszechnej opinii największym ograniczeniem opisywanego zbioru danych jest jednak brak możliwości uwzględnienia zjawiska histerezy sorpcji oraz rodzaju drewna – czynników o kluczowym znaczeniu dla praktyki sezonowania tarcicy o nadmiernym rozrzućie wilgotności po suszeniu. Opis eksperymentu wyznaczania wilgotności równowagowej, do realizacji którego Stamm i Loughborough (1935) zastosowali komorę klimatyczną i którego wyniki stanowią zasadniczą część danych opublikowanych w kolejnych wydaniach Wood Handbook, zawiera wzmiankę o oscylacyjnych zmianach wartości parametrów powietrza, będących nieuniknionym skutkiem uchybu regulacji. W ich opinii efektem naprzemiennej desorpcji i adsorpcji (cyklicznej sorpcji) jest uzyskanie pośrednich wartości wilgotności równowagowej. Wyznaczony na ich podstawie przebieg izoterm sorpcji w zakresie wysokich wartości względnej wilgotności powietrza podobny jest do izoterm desorpcji, natomiast w zakresie niskich wartości względnej wilgotności powietrza – do izoterm adsorpcji. Przebieg tak wyznaczonych izoterm sorpcji mieści się w obrębie pętli histerezy sorpcji.

Wyniki licznych prac wskazują, że wilgotność równowagowa drewna ulega obniżeniu pod wpływem jego uprzedniego ogrzewania (np. Kollmann, 1963; Weichert, 1963; Kubojima i in., 2003; Gjerdrum, 2008; Sik i in., 2010). Skaar (1988) zwrócił uwagę, że drewno suszone konwekcyjnie, a zatem poddane uprzednio oddziaływaniu powietrza o podwyższonej temperaturze, osiąga niższą wilgotność równowagową niż drewno świeżo pozyskane lub suszone w sposób naturalny. Ahmet

i in. (1999) porównali wyniki własnych oznaczeń wilgotności równowagowej próbek dwóch gatunków drewna (tj. buka i świerka), z uwzględnieniem historii suszenia, z danymi opublikowanymi w Wood Handbook, które na potrzeby porównania określono jako referencyjne. W opisywanym przypadku wyznaczone wartości wilgotności równowagowej świeżo pozyskanych próbek drewna oraz uprzednio suszonych naturalnie i w suszarce konwekcyjnej były niższe niż wartości referencyjne. Stwierdzono ponadto, że bezwzględne różnice wilgotności równowagowej wynikające ze sposobu suszenia (tj. suszenie naturalne i techniczne) były nieznaczne i średnio wynosiły ok. 0,5% w zakresie względnej wilgotności powietrza 0–65%. Natomiast najwyższe, tj. ok. 2%, bezwzględne różnice wilgotności równowagowej zaobserwowano dla wilgotności względnej powietrza bliskiej stanu nasycenia. W przypadku próbek drewna świerkowego suszonego konwekcyjnie największa różnica wilgotności równowagowej wystąpiła dla wilgotności względnej powietrza bliskiej stanu nasycenia oraz ok. 65%. Gjerdrum (2008) jest autorem stwierdzenia, że dane referencyjne opublikowane w Wood Handbook nie odzwierciedlają wpływu temperatury suszenia na właściwości higroskopijne drewna i zjawisko histerezy sorpcji po suszeniu. Z badań wspomnianego autora – w których uwzględniono realia współczesnych technologii konwekcyjnego suszenia tarcicy iglastej – wynika, że wartość wilgotności równowagowej drewna świerkowego uprzednio suszonego konwekcyjnie w temperaturze 85°C stanowi średnio 95% wartości referencyjnej. Skłania to do stwierdzenia, że faktyczny zakres zmian wilgotności tarcicy podczas jej sezonowania po suszeniu może różnić się od zakresu, którego granicę wyznacza referencyjna wartość wilgotności równowagowej.

Wyniki licznych badań potwierdzają także wpływ cyklicznej sorpcji na właściwości higroskopijne drewna. Na przykład w badaniach nad stabilnością wymiarową drewna sosny (*Pinus sylvestris* L.) i świerka (*Picea excelsa* L.) po procesie konwekcyjnego suszenia Sehlstedt-Persson (2000) zaobserwowała, że podczas późniejszego klimatyzowania w warunkach cyklicznych zmian względnej wilgotności powietrza próbki uprzednio suszone intensywnie (w wyższej temperaturze) charakteryzuje niższa wilgotność niż próbki bliźniacze suszone łagodnie – w niższej temperaturze. Wyniki badań zjawisk sorpcji drewna sosny (*Pinus sylvestris* L.), które przeprowadził Vahtikari i in. (2017), wskazują, że efektem tylko 10 cykli zmian wilgotności względnej powietrza w zakresie 0–95% jest istotne obniżenie wilgotności równowagowej w porównaniu do próbek bliźniaczych niepoddanych opisywanemu oddziaływaniu powietrza wilgotnego. Powyższe obserwacje nabierają praktycznego znaczenia, jeżeli uwzględnimy, że podobny wpływ na właściwości higroskopijne może mieć rewersyjny obieg powietrza stosowany w procesach konwekcyjnego suszenia tarcicy w suszarkach komorowych. Riehl i Welling (2003) zaobserwowali, że zmiana kierunku przepływu powietrza powoduje oscylacyjne zmiany temperatury i względnej wilgotności powietrza – największe w skrajnych pakietach tarcicy tworzących ładunek suszarki. Z wyników analizy opisywanego zjawiska przeprowadzonej przez wspomnianych autorów wynika, że podczas realizacji procesów suszenia tarcicy świerkowej różnica pomiędzy obliczonymi wartościami wilgotności równowagowej, które odpowiadały wartościom temperatury i wilgotności względnej powietrza zarejestrowanym w strefie wlotu i wylotu powietrza ze stosu, wynosiła aż 3%. Można zatem oczekiwać, że przebieg i zakres zjawisk sorpcji po suszeniu – w tym ich hi-

stereza – w przypadku drewna uprzednio suszonego w suszarkach do tarcicy bez rewersyjnego obiegu powietrza lub w suszarkach ciągłego działania (tzw. tunelowych) z jednokierunkowym obiegiem powietrza mogą być inne niż w przypadku drewna suszonego w komorowych suszarkach do tarcicy z rewersyjnym obiegiem powietrza.

Ustalenie wpływu technologii suszenia na właściwości higroskopijne drewna wymaga zebrania szczegółowych danych do wyznaczenia izoterm sorpcji i histerezy sorpcji dla drewna uprzednio wysuszonego, z uwzględnieniem założeń, od których zależy intensywność suszenia i zakres zmian właściwości suszonego drewna. W tym celu przeprowadzono badania, w których uwzględniono warianty programu suszenia odpowiadającego założeniom łagodnego (temperatura 55°C) i intensywnego (temperatura 85°C) procesu suszenia. Procesy suszenia zrealizowano w suszarkach, w których występuje rewersyjny obieg powietrza lub obieg jest jednokierunkowy, tj. odpowiednio w suszarce komorowej (cyklicznego działania) i tunelowej (ciągłego działania). Założenia procesów suszenia tarcicy przeprowadzonych w suszarce B, C i D zestawiono w tabeli 2.

Badania przeprowadzono, wykorzystując cztery bliźniacze sztuki obrzynanej tarcicy sosnowej o grubości 50 mm, pozyskanej z kłody o długości 4,5 m i wilgotności powyżej PNW. Bezpośrednio po przetarciu trzy sztuki tarcicy zostały umieszczone w załadunkach trzech różnych konwekcyjnych suszarek do tarcicy. Uwzględniono realizację dwóch wariantów procesu suszenia w suszarkach komorowych (cyklicznego działania) z rewersyjnym obiegiem powietrza, zgodnie z założeniami łagodnego i intensywnego programu suszenia (odpowiednio suszarka B i C – ryc. 1). Tarcicę umieszczono w obrębie skrajnych pakietów stosu, które są najbardziej narażone na naprzemienne (oscylacyjne) zmiany wartości parametrów powietrza. Trzeci proces został zrealizowany w suszarce tunelowej (ciągłego działania) z jednokierunkowym obiegiem powietrza, według założeń intensywnego programu suszenia (suszarka D – ryc. 1). We wszystkich procesach suszenia zastosowano programy oparte na zasadzie suszenia według stałej temperatury termometru suchego. Natychmiast po zakończeniu każdego procesu suszenia z każdej uprzednio przygotowanej sztuki tarcicy pozyskano 13 próbek do oznaczeń wilgotności równowagowej o wymiarach 1,5 · 30 · 50 mm, odpowiednio w kierunku stycznym, promieniowym i wzdłużnym. Bliźniacze próbki pozyskano również ze sztuki tarcicy, która nie była suszona. Eksperymenty wyznaczania wilgotności równowagowej przeprowadzono na stanowisku badawczym (ryc. 2), gdzie zestawy przygotowanych próbek drewna były umieszczane nad roztworami soli, zapewniającymi uzyskanie dziewięciu poziomów względnej wilgotności powietrza, w zakresie 0–95% (tab. 2).

Do oceny wpływu parametrów technologii suszenia na zjawiska sorpcji w drewnie bezpośrednio po suszeniu wykorzystano histerezę sorpcji. Za jej miarę przyjęto pole powierzchni (h) wyznaczone przebiegiem izoterm 1. adsorpcji i 2. desorpcji. Pole histerezy zostało obliczone jako (Popper i in., 2009):

$$h = \int_{\varphi=0}^{\varphi=\max} (w_{r_{2,des.}} - w_{r_{1,ads.}}) \cdot d\varphi \quad (24)$$

Na podstawie pola histerezy h wyznaczono również względną zmianę histerezy (δh), dla każdego wariantu suszenia przyjmując jako wartość referencyjną pole histerezy sorpcji dla drewna niesuszonego (h_0):

$$\delta h_i = \frac{h_i - h_0}{h_0} \cdot 100\% \quad (25)$$

gdzie: h_0 – pole histerezy sorpcji drewna niesuszonego, obliczone z zależności (24),
 i – wariant procesu suszenia.

Jako miarę histerezy sorpcji drewna po suszeniu uwzględniono również maksymalną różnicę wilgotności równowagowej dla 2. desorpcji i 1. adsorpcji (Δw_r) oraz odpowiadającą jej wartość względną wilgotności powietrza (φ):

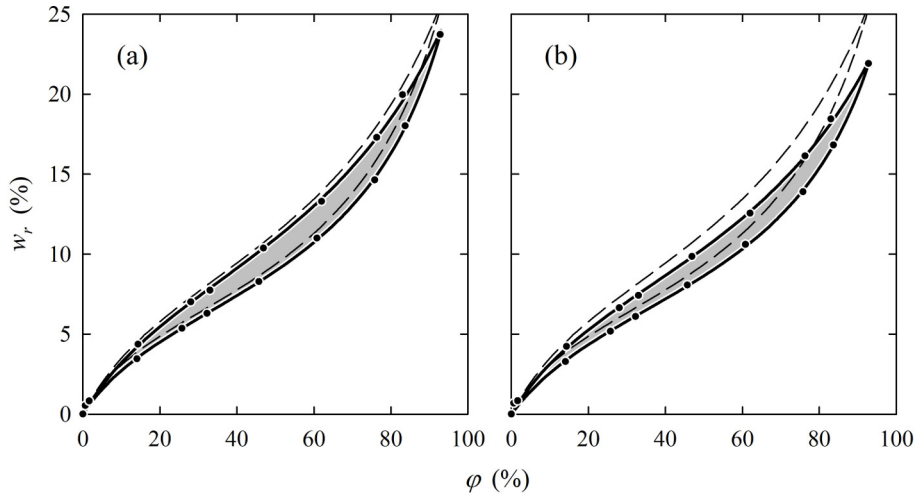
$$\Delta w_r = w_{r2.des.} - w_{r1.ads.} \quad (26)$$

Wyznaczenie histerezy sorpcji określonej jako różnica wilgotności równowagowej dla fazy adsorpcji i desorpcji pozwala na określenie zakresu ograniczeń w praktyce równoczesnego sezonowania tarcicy przesuszonej i niedosuszonej w warunkach oddziaływania powietrza o tych samych wartościach parametrów, tj. temperatury i względnej wilgotności. Eksperymenty wyznaczania wilgotności równowagowej drewna przeprowadzono w temperaturze 22°C z myślą o wykorzystaniu wyników także w praktyce sezonowania tarcicy o wadliwej wilgotności bezpośrednio po suszeniu.

Na rycinach 36 i 37 przedstawiono wyniki oznaczeń wilgotności równowagowej bliźniaczych próbek drewna sosny bezpośrednio po zakończeniu procesu konwekcyjnego suszenia. Jak wspomniano, wyniki oznaczeń wilgotności równowagowej badanych próbek drewna można wykorzystać do określenia zakresu zjawisk sorpcji – w tym histerezy, w warunkach typowych dla oddziaływania powietrza w halach magazynowych wyposażonych w system kontroli parametrów powietrza.

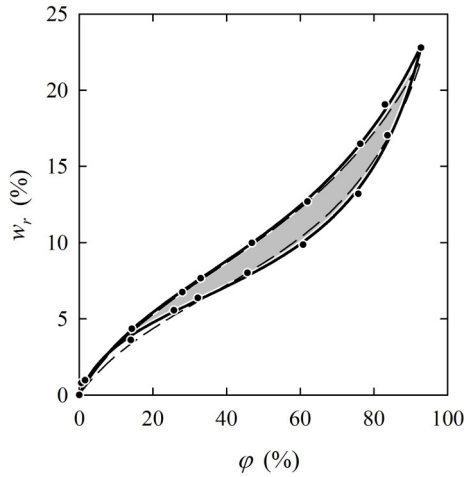
W tabeli 21 zestawiono estymowane wartości parametrów modelu sorpcji Hailwooda-Horrobina, który wykorzystano do aproksymacji danych eksperymentalnych. Choć zastosowany model sorpcji ma charakter empiryczny i charakteryzuje go brak możliwości interpretacji zjawisk sorpcji za pomocą wartości parametrów (Glass i in., 2014), to wartości współczynników modelu wykazują zależność zarówno od fazy sorpcji, jak i temperatury powietrza zastosowanej w procesie suszenia oraz charakteru obiegu powietrza w suszarce.

W tabeli 22 zestawiono obliczone wartości wilgotności równowagowej drewna sosny z uwzględnieniem historii suszenia w zakresie względnej wilgotności powietrza, odpowiadającej praktyce sezonowania tarcicy w halach magazynowych wyposażonych w system regulacji parametrów powietrza. Technologia konwekcyjnego suszenia tarcicy powoduje trwałą zmianę właściwości higroskopijnych drewna. Odpowiadające tym samym warunkom oddziaływania powietrza wilgotnego wartości wilgotności równowagowej próbek drewna uprzednio suszonego konwekcyjnie (dla wszystkich wariantów suszenia) są – jak wynika z uzyskanych danych – niższe niż w przypadku drewna świeżego. Porównanie wartości wilgotności równowagowej dla uprzednio wysuszonego konwekcyjnie drewna sosnowego z analogicznymi wartościami dla drewna świeżego (niesuszonego) wskazuje, że im wyższa temperatura



Ryc. 36. Izotermie sorpcji bliźniaczych próbek drewna sosny (*Pinus sylvestris* L.) w temperaturze 22°C wyznaczone bezpośrednio po procesie konwekcyjnego suszenia w suszarce komorowej do tarcicy w temperaturze (a) 55°C i (b) 85°C (czarne punkty – dane eksperymentalne, popielaty obszar – histereza sorpcji, linia kreskowa – izotermie sorpcji próbek niesuszonych)

Fig. 36. Sorption isotherms of twin samples of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood at 22°C determined following batch kilning at a temperature of (a) 55°C and (b) 85°C (black points – experimental data, grey area – sorption hysteresis loop, dash line – sorption isotherms of nondried samples)



Ryc. 37. Izotermie sorpcji bliźniaczych próbek drewna sosny (*Pinus sylvestris* L.) w temperaturze 22°C wyznaczone bezpośrednio po procesie konwekcyjnego suszenia w temperaturze 85°C w suszarce tunelowej (linie ciągle) i komorowej (linie kreskowe); czarne punkty – dane eksperymentalne, popielaty obszar – pole histerezy

Fig. 37. Sorption isotherms of twin samples of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood at 22°C determined following kilning at 85°C in a progressive kiln (solid lines) and batch kiln (dash lines); black points – experimental data, grey area – sorption hysteresis loop

Tabela 21. Estymowane wartości współczynników modelu sorpcji Hailwooda-Horrobina dla bliźniaczych próbek drewna sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) bezpośrednio po procesie konwekcyjnego suszenia

Table 21. Estimated values of the Hailwood-Horrobin sorption model coefficients for twin samples of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood following the kilning

Tarcica Timber	Rodzaj suszarki Kiln type	Temperatura suszenia Drying temperature	Faza sorpcji Sorption phase	Współczynniki modelu sorpcji Coefficients of sorption model				R^2
				K	K_1	K_2	W	
Suszona Dried	komorowa batch	55°C	1. ads.	0,837	8,17	1,142	367,1	0,9997
			2. des.	0,693	5,46	0,012	194,8	0,9995
	tunelowa progressive	85°C	1. ads.	0,828	7,79	1,591	391,6	0,9994
			2. des.	0,688	6,14	0,106	214,1	0,9997
Świeża Green	–	–	1. ads.	0,875	16,00	2,216	465,9	0,9986
			2. des.	0,709	6,64	0,079	218,3	0,9995
Dane FPL FPL data	–	–	–	0,815	8,10	0,096	286,1	0,9993
				0,723	6,43	0,048	203,4	0,9991
				0,820	5,92	2,664	383,9	–

Tabela 22. Obliczone wartości wilgotności równowagowej drewna sosny (*Pinus sylvestris* L.) odpowiadające warunkom sezonowania tarcicy bezpośrednio po suszeniu ($t = 22^\circ\text{C}$) (Majka i in., 2014)

Table 22. Calculated values of equilibrium moisture contents of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood corresponding to seasoning conditions of timber following the kilning ($t = 22^\circ\text{C}$) (Majka et al., 2014)

Tarcica Timber	Rodzaj suszarki Kiln type	Temperatura suszenia Drying temperature	Faza sorpcji Sorption phase	Wilgotność względna powietrza φ (%) Air relative humidity φ (%)						
				30	35	40	45	50	55	60
Suszona Dried	komorowa batch	55°C	1. ads.	6,0	6,7	7,4	8,2	8,9	9,8	10,7
			2. des.	7,4	8,2	9,1	10,0	11,0	12,0	13,0
	tunelowa progressive	85°C	1. ads.	5,8	6,5	7,2	7,9	8,7	9,5	10,3
			2. des.	7,0	7,9	8,7	9,5	10,4	11,3	12,3
Świeża Green	–	–	1. ads.	6,0	6,5	7,1	7,7	8,4	9,1	9,9
			2. des.	7,2	8,0	8,8	9,6	10,5	11,4	12,4
Dane FPL FPL data	–	–	–	6,4	7,1	7,8	8,6	9,4	10,3	11,3
				7,7	8,6	9,5	10,4	11,3	12,4	13,5
				6,2	6,9	7,7	8,4	9,2	10,0	10,9

suszenia, tym większe obniżenie właściwości higroskopijnych drewna. Najmniejsze różnice wyznaczonych eksperymentalnie wartości wilgotności równowagowych i danych FPL występują przy tym dla 1. adsorpcji – w przypadku próbek drewna suszonych łagodnie w temperaturze 55°C w suszarce komorowej do tarcicy. W pozostałych przypadkach porównywane dane różnią się znacznie – szczególnie w przypadku drugiej desorpcji (do ponad 2%). Obserwacja ta stanowi potwierdzenie ograniczonej przydatności wartości wilgotności równowagowej drewna opublikowanych w Wood Handbook, powszechnie uznawanych za referencyjne do prawidłowego

określania charakteru i zakresu zmian wilgotności tarcicy o nadmiernym rozrzucie wilgotności podczas jej sezonowania po suszeniu.

Porównując zestawione w tabeli 23 wartości wybranych deskryptorów histerezy sorpcji, stwierdzono, że efektem konwekcyjnego suszenia tarcicy jest korzystne zjawisko zmniejszenia histerezy sorpcji. Na opisywany efekt składa się zarówno wpływ temperatury suszenia, jak i rewersyjne zmiany przepływu powietrza, którego skutkiem są oscylacyjne zmiany parametrów powietrza w skrajnych strefach załadunku suszarki. Rewersyjne zmiany obiegu powietrza w procesie suszenia wzbudzają zjawisko cyklicznej sorpcji, które powoduje redukcję histerezy sorpcji. Z tego powodu najmniejszym polem histerezy oraz najmniejszą różnicą wilgotności równowagowej dla fazy adsorpcji i desorpcji w warunkach oddziaływania powietrza typowych dla sezonowania tarcicy po suszeniu, tj. $t = 22^{\circ}\text{C}$ i $\varphi = 55\%$, charakteryzowały się próbki drewna sosny intensywnie suszonej w temperaturze 85°C w suszarce z rewersyjnym obiegiem powietrza.

Tabela 23. Pole histerezy sorpcji h , względna zmiana histerezy sorpcji δh , maksymalna różnica wilgotności równowagowej Δw_r dla 1. adsorpcji i 2. desorpcji oraz odpowiadająca jej względna wilgotność powietrza φ dla warunków sezonowania tarcicy bezpośrednio po procesie suszenia ($t = 22^{\circ}\text{C}$, $\varphi = 55\%$)

Table 23. Sorption hysteresis loop h , hysteresis relative change δh , maximum difference of equilibrium moisture content for 1st adsorption and 2nd desorption Δw_r and corresponding relative humidity φ for timber seasoning conditions immediately after kilning ($t = 22^{\circ}\text{C}$, $\varphi = 55\%$)

Tarcica Timber	Rodzaj suszarki Kiln type	Temperatura suszenia Drying temperature	Deskryptory histerezy sorpcji Descriptors of sorption hysteresis			
			h (-)	δh (%)	Δw_r (%)	φ (%)
Suszona Dried	komorowa batch	55°C	144,0	+8,3	2,4	70
		85°C	125,3	-5,8	2,0	70
	tunelowa progressive	85°C	149,1	+12,1	2,8	73
Świeża Green	-	-	133,0	-	2,2	67

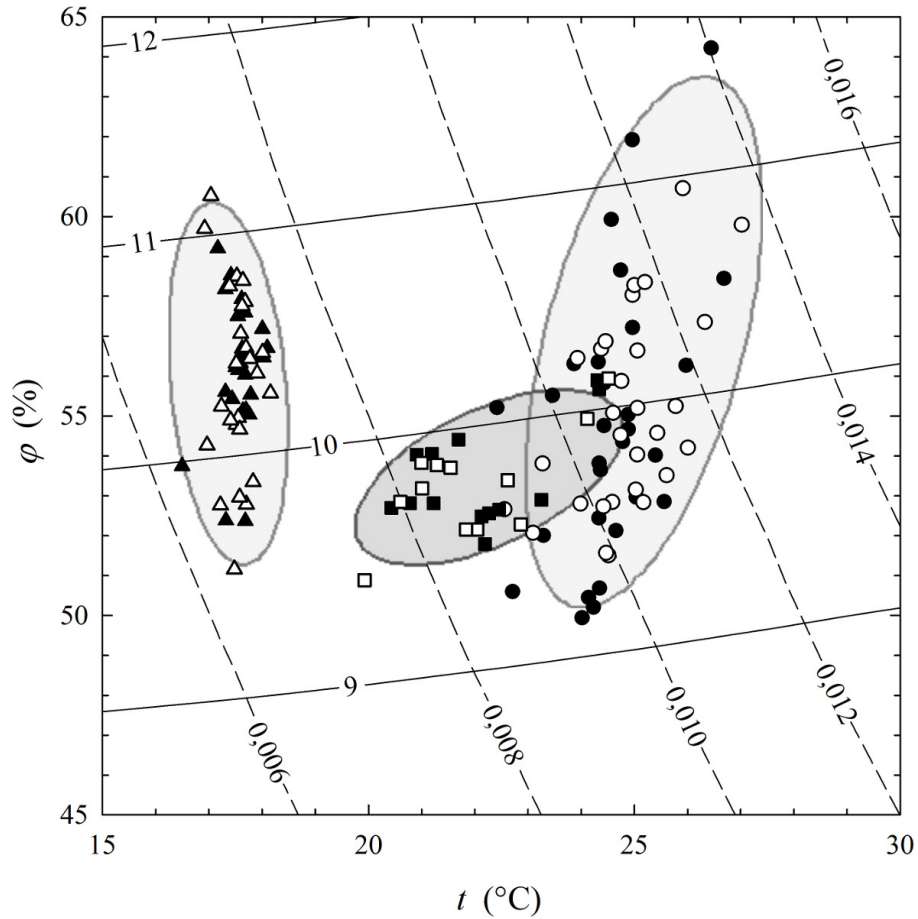
Niezmiernie istotne dla praktyki sezonowania tarcicy o wadliwej wilgotności jest określenie czasu, po upływie którego możliwe jest osiągnięcie przez tarcicę wilgotności w granicach dopuszczalnego rozrzutu. Wśród czynników warunkujących czas sezonowania szczególną rolę należy przypisać efektywności oddziaływania powietrza, która zależy przede wszystkim od wartości jego parametrów, tj. temperatury i względnej wilgotności. Na rycinie 38 przedstawiono wyniki rejestracji parametrów powietrza w hali magazynowania tarcicy w trzech różnych porach roku oraz odpowiadające im obliczone wartości wilgotności bezwzględnej masowej powietrza X (kg/kg) i wilgotności równowagowej drewna w_r (%). Wyniki dotyczą tej samej hali, wyposażonej w automatyczny system regulacji parametrów powietrza ze stałymi wartościami zadanymi $t = 20^{\circ}\text{C}$ i $\varphi = 55\%$. Wyniki wskazują, że oddziaływanie powietrza na drewno w ciągu roku w badanym obiekcie było zróżnicowane. W skrajnym przypadku średnia miesięczna wartość wilgotności bezwzględnej powietrza (X) była w lutym o 60% niższa niż w sierpniu. Różne wartości parametrów powietrza w hali magazynowej są efektem zmian parametrów powietrza na zewnątrz

obiektu przy niedostatecznej w okresie zimowym wydajności systemu ogrzewania oraz – co szczególnie istotne – systemu nawilżania powietrza. Natomiast realizację procesu sezonowania w okresie letnim charakteryzuje brak technicznych możliwości usunięcia nadmiaru ciepła i wilgoci. Przyczyną zmian wartości parametrów powietrza mogą być zakłócenia powodowane przez przemieszczanie w hali kolejnych partii tarcicy. Niezależnie od przyczyn tak dużych różnic zawartości pary w powietrzu w okresie lata i zimy efektem wpływu wymienionych oddziaływań jest różna (niekontrolowana) szybkość zmian wilgotności tarcicy i zróżnicowanie ich zakresu. Utrudnia to w praktyce prognozowanie czasu sezonowania tarcicy, stanowiąc jednocześnie uzasadnienie kolejnych eksperymentów i analiz, zmierzających do wyznaczenia przebiegu zmian wilgotności tarcicy podczas sezonowania bezpośrednio po suszeniu.

W tabeli 24 przedstawiono założenia eksperymentu, który przeprowadzono w celu opracowania prognostycznego modelu zmian wilgotności tarcicy podczas jej sezonowania bezpośrednio po suszeniu, w kontrolowanych warunkach oddziaływania powietrza o temperaturze $t = 20^{\circ}\text{C}$ i wilgotności względnej $\varphi = 55\%$, którym odpowiada wilgotność równowagowa drewna $w_r = 10\%$. W eksperymencie uwzględniono tarcicę o różnej wilgotności po suszeniu (8–16%), która sytuuje ją w kategorii przesuszanej, niedosuszonej i w zakresie dopuszczalnego rozrzutu. Ponadto uwzględniono czas sezonowania wynoszący do 28 dni oraz zróżnicowane warunki oddziaływania powietrza na drewno, charakterystyczne dla lata (sierpień), jesieni (listopad) oraz zimy (luty).

W pomiarach wilgotności tarcicy wykorzystano elektryczny wilgotnościomierz oporowy typu FME (Brookhuis, Holandia), uwzględniając powszechnie stosowaną w praktyce produkcyjnej metodykę pomiaru średniej wilgotności sztuki tarcicy (wg PN-EN 13183-2:2004). Celem wstępnych pomiarów wilgotności drewna, które przeprowadzono po ostygnięciu załadunku suszarki, ale przed upływem 24 godzin od zakończenia procesu suszenia, była selekcja tarcicy do dalszych badań. Wyselekcjonowanym sztukom tarcicy przypisywano odpowiednią kategorię wilgotności przy wskazaniu wilgotnościomierza różniącym się nie więcej niż 5% od założonej wartości (np. $8 \pm 0,2\%$, $10 \pm 0,3\%$, $16 \pm 0,4\%$ itp.). W zaplanowanym eksperymencie całość materiału badawczego tworzyła tarcica o wilgotności w zakresie dopuszczalnego rozrzutu (10–14%) oraz tarcica o wadliwej wilgotności, tj. przesuszona (o wilgotności poniżej 10%) i niedosuszona (o wilgotności powyżej 14%). W każdym zakresie wilgotności uwzględniono próbę o liczebności 20 sztuk tarcicy. Obserwacje zmian wilgotności tarcicy podczas jej sezonowania przeprowadzono w kilkudniowych odstępach w okresie 4 tygodni, licząc od zakończenia procesu suszenia. W trakcie eksperymentów rejestrowano parametry powietrza w bezpośrednim otoczeniu tarcicy, wykorzystując termohigrometr pojemnościowy typu 174H (Testo, Austria). W tabeli 25 zestawiono wyznaczone eksperymentalnie wartości wilgotności 25 mm tarcicy sosnowej dla różnych wariantów realizacji procesu sezonowania.

Do opracowania empirycznego modelu zmian wilgotności tarcicy podczas sezonowania wykorzystano wielomianu trzeciego stopnia danego równaniem (4), natomiast estymowane wartości współczynników omawianego modelu zestawiono w tabeli 26.



Ryc. 38. Rozrzut temperatury i wilgotności względnej powietrza podczas sezonowania tarcicy w hali magazynowej wyposażonej w automatyczny system regulacji parametrów powietrza (trójkąt, koło, kwadrat – dane zarejestrowane, odpowiednio w lutym, sierpniu i listopadzie 2011 r.; białe i czarne symbole – średnie wartości parametrów powietrza, odpowiednio dla dnia i nocy, linia ciągła – krzywe wilgotności równowagowej w_r , %, linia kreskowa – krzywe wilgotności bezwzględnej masowej powietrza X , kg/kg)

Fig. 38. Temperature and relative humidity variation during timber seasoning in a warehouse equipped with an automatic air regulation system (triangle, circle, square – data collected in February, August and November 2011; white and black symbols – average values of air parameters for day and night, respectively; solid line – equilibrium moisture content curves w_r , %, dash line – absolute humidity curves X , kg/kg)

Tabela 24. Warianty wilgotności tarcicy i czasu sezonowania w eksperymencie wyznaczania zmian wilgotności tarcicy sosnowej podczas sezonowania bezpośrednio po suszeniu

Table 24. Variants of timber moisture content and duration of seasoning included in the moisture changes experiment designed for pine timber during seasoning following kilning

Zmienna niezależna Independent variable	Symbol	Poziom zmiennej Level of variable				
Wilgotność tarcicy po suszeniu w (%) Moisture content following kilning w (%)	ξ_1 (x_1)	8 (-2)	10 (-1)	12 (0)	14 (1)	16 (2)
Czas sezonowania τ (doba) Duration of seasoning τ (day)	ξ_2 (x_2)	0 (-2)	7 (-1)	14 (0)	21 (1)	28 (2)

W nawiasach podano zmienne niezależne zredukowane: $x_1 = (\xi_1 - 12)/2$; $x_2 = (\xi_2 - 14)/7$.
Reduced independent variable in bracket: $x_1 = (\xi_1 - 12)/2$; $x_2 = (\xi_2 - 14)/7$.

Tabela 25. Wilgotność tarcicy sosnowej o grubości 25 mm podczas sezonowania bezpośrednio po procesie konwekcyjnego suszenia dla różnych wariantów wilgotności końcowej ξ_1 i czasu sezonowania ξ_2

Table 25. Moisture content of 25 mm Scots pine timber during seasoning following kilning for different variants of final moisture content ξ_1 and seasoning duration ξ_2

Zmienne niezależne Independent variables		Termin sezonowania tarcicy Timber seasoning period		
ξ_1 (x_1)	ξ_2 (x_2)	Luty 2011 r. February 2011	Sierpień 2011 r. August 2011	Listopad 2011 r. November 2011
8 (-4)	0 (-2)	8,1 ± 0,2	-	8,2 ± 0,3
10 (-2)	0 (-2)	10,0 ± 0,2	10,1 ± 0,5	10,2 ± 0,2
12 (0)	0 (-2)	12,1 ± 0,3	12,1 ± 0,3	12,0 ± 0,2
14 (2)	0 (-2)	14,2 ± 0,4	13,9 ± 0,3	14,0 ± 0,3
16 (4)	0 (-2)	16,5 ± 0,4	16,0 ± 0,4	16,1 ± 0,3
8 (-4)	7 (-1)	9,3 ± 0,3	-	8,7 ± 0,3
10 (-2)	7 (-1)	10,4 ± 0,2	10,6 ± 0,6	10,1 ± 0,4
12 (0)	7 (-1)	11,6 ± 0,3	11,7 ± 0,6	11,8 ± 0,5
14 (2)	7 (-1)	13,5 ± 0,3	13,1 ± 0,4	12,6 ± 0,6
16 (4)	7 (-1)	14,3 ± 0,3	13,9 ± 0,6	13,3 ± 0,5
8 (-4)	14 (-0)	9,7 ± 0,3	-	9,0 ± 0,4
10 (-2)	14 (-0)	10,7 ± 0,4	9,9 ± 0,7	10,2 ± 0,5
12 (0)	14 (-0)	11,8 ± 0,5	11,1 ± 0,4	11,7 ± 0,4
14 (2)	14 (-0)	12,9 ± 0,5	12,4 ± 0,5	12,0 ± 0,7
16 (4)	14 (-0)	13,0 ± 0,4	13,2 ± 0,6	12,3 ± 0,4
8 (-4)	21 (1)	9,9 ± 0,3	-	9,1 ± 0,4
10 (-2)	21 (1)	10,6 ± 0,5	10,4 ± 0,6	0,3 ± 0,6
12 (0)	21 (1)	11,6 ± 0,5	11,5 ± 0,6	11,7 ± 0,7
14 (2)	21 (1)	12,7 ± 0,4	12,6 ± 0,7	12,0 ± 0,8
16 (4)	21 (1)	12,4 ± 0,4	13,1 ± 0,5	12,0 ± 0,5
8 (-4)	28 (2)	10,2 ± 0,4	-	9,2 ± 0,5
10 (-2)	28 (2)	10,9 ± 0,6	10,2 ± 0,6	10,3 ± 0,7
12 (0)	28 (2)	11,8 ± 0,7	11,3 ± 0,5	11,6 ± 0,6
14 (2)	28 (2)	13,0 ± 0,5	12,5 ± 0,6	11,8 ± 0,8
16 (4)	28 (2)	12,1 ± 0,5	12,9 ± 0,5	11,9 ± 0,4

± odchylenie standardowe.

W nawiasach podano zmienne niezależne zredukowane: $x_1 = \xi_1 - 12$; $x_2 = (\xi_2 - 14)/7$.

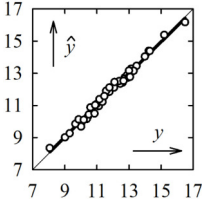
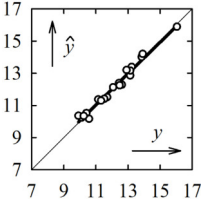
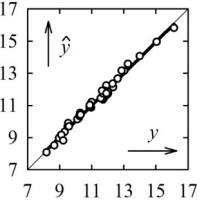
± standard deviation.

Reduced independence variables in bracket: $x_1 = \xi_1 - 12$; $x_2 = (\xi_2 - 14)/7$.

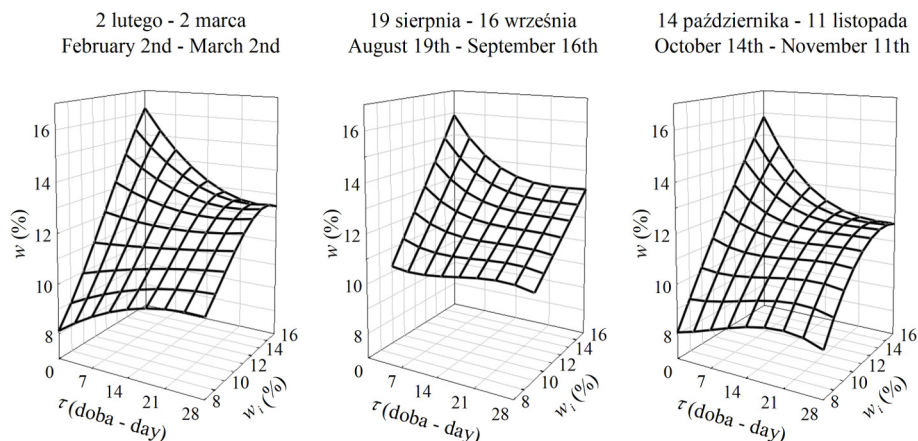
Tabela 26. Estymowane wartości parametrów prognostycznego modelu zmian wilgotności 25 mm tarcicy sosnowej (4) podczas sezonowania w hali magazynowej z system regulacji parametrów powietrza

Table 26. Coefficients of the prognostic model (4) of moisture content variation of 25 mm Scots pine timber during seasoning in the warehouse equipped with the air regulation system

Współczynnik Coefficient	Okres sezonowania tarcicy Timber seasoning period		
	Luty 2011 r. February 2011	Sierpień 2011 r. August 2011	Listopad 2011 r. November 2011
β_0	11,835	11,364	11,356
β_1	0,6090	0,5060	0,423
β_2	–	–	–
β_3	–0,0211	–	–0,044
β_4	0,0658	0,0854	0,115
β_5	–0,1710	–0,1160	–0,150
β_6	–0,0122	–	–
β_7	–	–0,0518	–0,047
β_8	–0,0155	–	–0,014
β_9	0,0555	0,0508	0,061
R^2	0,986	0,978	0,986
R^2_{adj}	0,984	0,970	0,983
SE	0,214	0,268	0,213

Na rycinie 39 przedstawiono wyniki prognozowania zmian wilgotności tarcicy podczas jej sezonowania przeprowadzonego w warunkach produkcyjnych. Rozrzut wilgotności tarcicy w każdym okresie realizacji procesu sezonowania ulega istotnemu zredukowaniu. Kształt płaszczyzny odpowiedzi odzwierciedla wpływ histerezy sorpcji na zmiany wilgotności tarcicy. Ze względu na zjawisko histerezy sorpcji zmiany wilgotności tarcicy podczas sezonowania mają odmienny charakter i zakres. Stwierdzenie to dotyczy w szczególności tarcicy o wilgotności odpowiadającej skrajnym wartościom uwzględnionym w eksperymencie. W analizowanym przypadku odpowiadają one wilgotności poniżej i powyżej uwzględnionego w eksperymencie zakresu wilgotności (10–14%). W odniesieniu do tarcicy o najniższej uwzględnionej w eksperymencie wilgotności bezpośrednio po suszeniu (8%) efektem oddziaływania powietrza podczas sezonowania było nawilżanie drewna (adsorpcja). Analogicznie w przypadku tarcicy o najwyższej wilgotności bezpośrednio po suszeniu (16%) obserwowano obniżenie wilgotności drewna (desorpcja). Z tego względu efektywne sezonowanie partii tarcicy o nadmiernym rozrzucie wilgotności, tj. przesuszonej i niedosuszonej, w jednakowych warunkach (temperatura i względna wilgotność powietrza) może być ograniczone tylko do części o określonej wilgotności.



Ryc. 39. Empiryczny model zmian wilgotności obrzynanej 25 mm tarcicy sosnowej podczas sezonowania bezpośrednio po procesie suszenia w suszarce C

Wilgotność docelowa $w_d = 12 \pm 2\%$. Warunki sezonowania: $t = 20 \pm 2^\circ\text{C}$, $\varphi = 55 \pm 5\%$

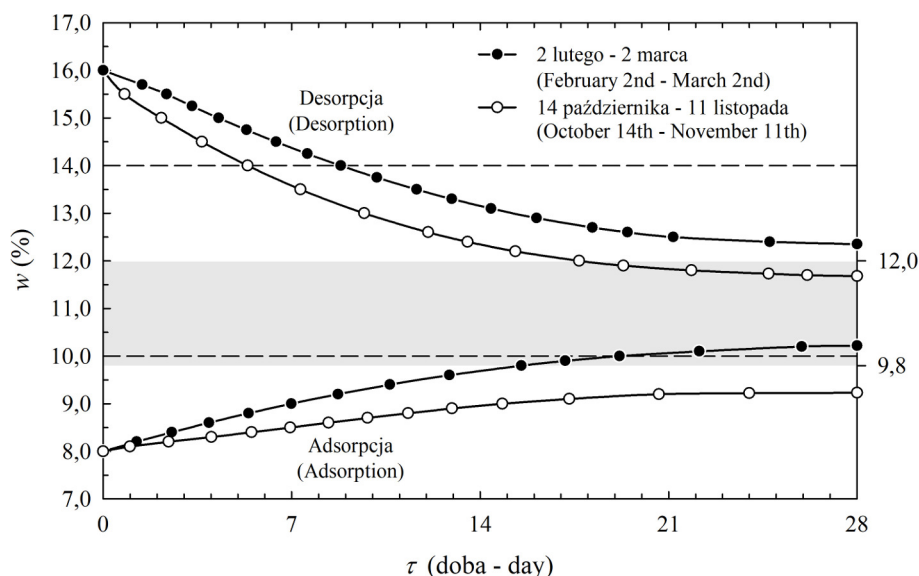
Fig. 39. Empirical model of moisture content variation of 25 mm Scots pine edged timber during seasoning following kilning in kiln C

Target moisture content $w_d = 12 \pm 2\%$. Seasoning conditions: $t = 20 \pm 2^\circ\text{C}$, $\varphi = 55 \pm 5\%$

Na rycinie 40 przedstawiono wyznaczony przy wykorzystaniu modelu (4) przebieg zmian wilgotności tarcicy sosnowej dla dwóch skrajnych wariantów wilgotności tarcicy, tj. 8% i 16%. Wymagania dotyczące jakości (tj. wilgotność końcowa tarcicy w zakresie $12 \pm 2\%$), sytuują analizowane przypadki w kategorii tarcicy przesuszanej i niedosuszonej. W porównaniu uwzględniono skrajne warianty warunków oddziaływania powietrza, w których powietrze charakteryzuje minimalna (luty) i maksymalna (październik/listopad) wilgotność bezwzględna powietrza. Efektem jest zróżnicowany przebieg i zakres zmian wilgotności tarcicy podczas jej sezonowania.

Różnice w przebiegu i zakresie zmian wilgotności tarcicy przesuszanej i niedosuszonej w pierwszej kolejności są skutkiem histerezy sorpcji, przy wyraźnej zależności szybkości zmian wilgotności tarcicy od okresu, w którym był realizowany proces sezonowania. Niezależnie od przedstawionych zależności, ze względu na wyraźnie różny przebieg, zmiany wilgotności tarcicy można podzielić na dwa etapy. Pierwszy z nich, obejmujący początkowy okres sezonowania i trwający ok. 14 dni, charakteryzuje większa dynamika zmian. Stanowi to potwierdzenie wcześniejszych spostrzeżeń Wady i in. (2014), którzy badali wpływ warunków sezonowania na przebieg zmian wilgotności tarcicy z drewna iglastego grupy *hem-fir*, stwierdzając, że po upływie średnio 2 tygodni od rozpoczęcia sezonowania zmiany wilgotności tarcicy ulegają znacznemu spowolnieniu.

Zaobserwowano, że zmniejszenie zróżnicowania wilgotności tarcicy do zakresu dopuszczalnego rozrzutu, tj. $12 \pm 2\%$, było możliwe jedynie w przypadku realizacji procesu sezonowania w lutym. W drugim wariantcie realizacji procesu sezonowania (październik/listopad) wilgotność tarcicy przesuszanej ($w = 8\%$) nie osiągnęła poziomu, który odpowiada wartości dopuszczalnej, tj. 10%. Przedłużenie czasu sezonowania nie zapewnia w tych warunkach uzyskania wilgotności w zakresie do-



Ryc. 40. Zmiany wilgotności tarcicy sosnowej o grubości 25 mm podczas sezonowania bezpośrednio po suszeniu w suszarce komorowej

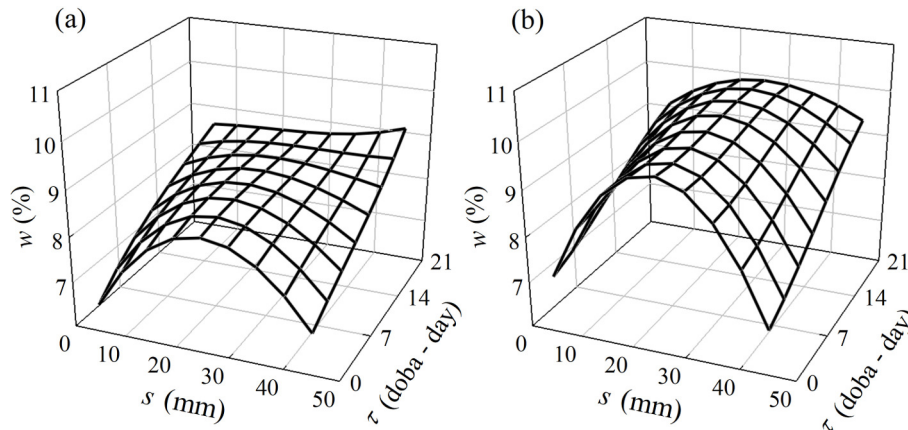
Warunki sezonowania: $t = 20^{\circ}\text{C}$, $\varphi = 55\%$

Linia kreskowa – granice dopuszczalnego rozrzutu wilgotności, szary obszar – histereza sorpcji drewna sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) rodzimego pochodzenia (wg Majka i in., 2014),)

Fig. 40. Moisture content variation in 25 mm Scots pine timber during seasoning following kilning (dash line – limits of allowable moisture content, grey area – sorption hysteresis of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) of native provenance (according to Majka et al., 2014), seasoning conditions: $t = 20^{\circ}\text{C}$, $\varphi = 55\%$)

puszczalnego rozrzutu. Ponadto tarcica o wilgotności wyższej niż dopuszczalna (niedosuszona) szybciej osiągała wilgotność z zakresu dopuszczalnego rozrzutu i przydatność do realizacji kolejnych etapów procesu produkcyjnego niż tarcica przesuszona. W zaistniałej sytuacji dalszego sezonowania wymagała jedynie tarcica przesuszona. Wynika z tego, że w celu ograniczenia czasu sezonowania tarcicy do niezbędnego minimum konieczne staje się wilgotnościowe sortowanie tarcicy o nadmiernym rozrzucie wilgotności. Takie działanie umożliwi sezonowanie tarcicy w warunkach dostosowanych do charakteru zjawisk sorpcji w tarcicy przesuszonej i niedosuszonej, a w efekcie pozwoli uzyskać lepszą kontrolę procesu.

Niekorzystny wpływ zjawiska histerezy sorpcji na zróżnicowanie wilgotności tarcicy po suszeniu i przebieg sezonowania można zaobserwować również na podstawie charakteru i zakresu zmian wilgotności na przekrojach poprzecznych tarcicy, która w trakcie procesu była zlokalizowana w różnych strefach załadunku suszarki. Na rycinie 41 przedstawiono wyniki bardziej szczegółowej analizy zmian wilgotności w poszczególnych warstwach przekroju poprzecznego tarcicy, uprzednio suszonej konwekcyjnie w suszarce komorowej do wilgotności końcowej $9 \pm 2\%$, która została poddana sezonowaniu przez okres 21 dni. W eksperymencie uwzględniono tarcicę o grubości 50 mm pochodzącą ze skrajnych pakietów oraz z pakietów



Ryc. 41. Zmiany wilgotności na przekrojach poprzecznych obrzynanej 50 mm tarcicy sosnowej podczas klimatyzowania bezpośrednio po suszeniu w suszarce komorowej (a – tarcica ze skrajnych i b – środkowych pakietów załadunku suszarki C, parametry powietrza podczas klimatyzowania: $t = 20 \pm 2^\circ\text{C}$, $\varphi = 55 \pm 5\%$, wilgotność docelowa $w_d = 9 \pm 2\%$)

Fig. 41. Moisture content variation within 50 mm edged Scots pine timber cross-sections during seasoning following kilning (a – timber from the outer and b – inner packages of the stack in kiln C, air parameters during seasoning: $t = 20 \pm 2^\circ\text{C}$, $\varphi = 55 \pm 5\%$, target moisture content $w_d = 9 \pm 2\%$)

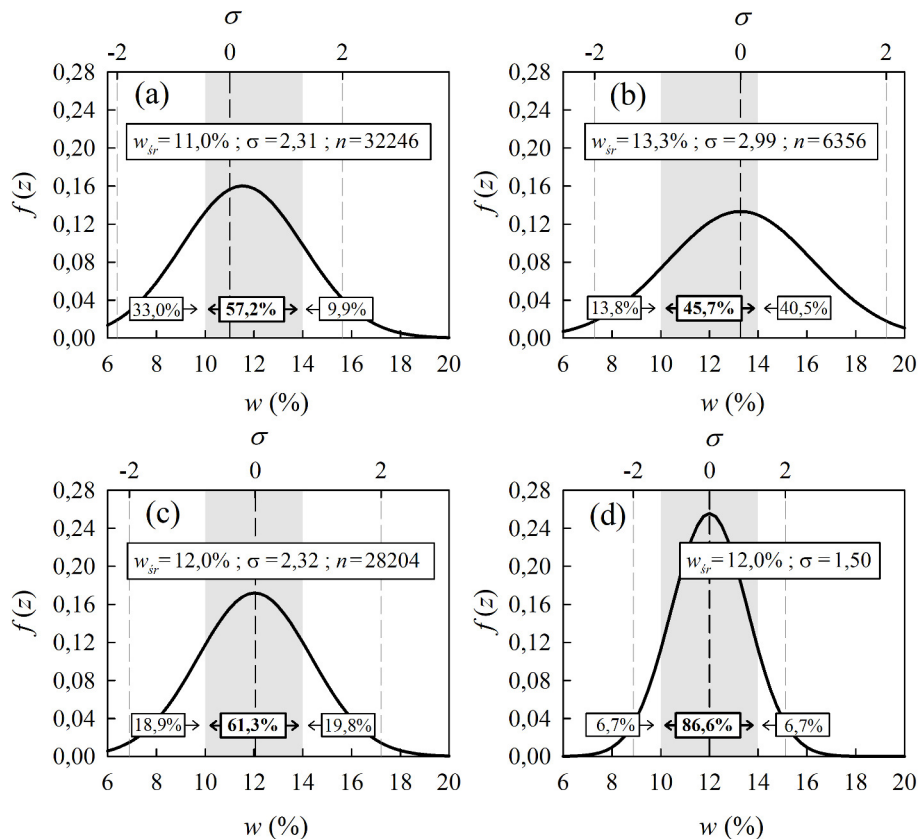
zlokalizowanych w środkowej części załadunku suszarki (założenia procesu suszenia tarcicy przeprowadzonego w suszarce C zestawiono w tabeli 2). W momencie rozpoczęcia sezonowania wilgotność poszczególnych warstw przekroju poprzecznego tarcicy, która podczas suszenia była zlokalizowana w środkowej części załadunku suszarki, była wyraźnie wyższa i charakteryzowała się większym zróżnicowaniem niż w przypadku tarcicy ze skrajnych pakietów. Niższa wilgotność i mniejsze jej zróżnicowanie (gradient) na przekroju poprzecznym tarcicy, która w trakcie suszenia znajdowała się w skrajnych pakietach stosu, jest efektem cyklicznej sorpcji (Vahtikari i in., 2017). Zjawisko to jest wywoływane przez rewersyjny obieg powietrza w suszarce, który powoduje naprzemienne wysychanie i nawilżanie drewna powodowane przez oscylacyjne zmiany wartości parametrów powietrza (Riehl i Welling, 2003). Zjawisko cyklicznej sorpcji powoduje większy zakres zmian (obniżenie) wilgotności równowagowej drewna po suszeniu w obrębie skrajnych pakietów załadunku suszarki niż w przypadku pakietów środkowych, poddawanych takiemu oddziaływaniu w mniejszym stopniu. Wynika stąd, że efektem zakończonego sezonowania przesuszonej i niedosuszonej części partii tarcicy w tych samych warunkach oddziaływania powietrza może być nie tylko analizowana wcześniej różnica średniej wilgotności końcowej, ale także – pomimo długiego okresu sezonowania – różny gradient wilgotności na przekrojach tarcicy.

7.2. Wpływ udziałów tarcicy niedosuszonej i przesuszonej

Z jednej strony wymagania związane z produkcją i późniejszym zastosowaniem wyrobów z drewna powodują konieczność suszenia tarcicy do określonej wilgotności, z drugiej zaś technologia konwekcyjnego suszenia powoduje nieuniknione zróżnicowanie wilgotności końcowej. Na rozrzut wilgotności tarcicy po suszeniu składają się ograniczenia materiałowe (pierwotne i wtórne zróżnicowanie właściwości drewna), procesowe (różna intensywność suszenia determinowana parametrami zastosowanego programu suszenia) oraz eksploatacyjne (nierównomierność warunków suszenia w obrębie załadunku suszarki). Z tego względu konieczne staje się określenie granic dopuszczalnego rozrzutu, który równocześnie gwarantuje możliwość niezakłóconej realizacji następujących etapów procesu produkcyjnego oraz spełnienie wymagań związanych z jakością produktu. Tarcica o wilgotności w granicach dopuszczalnego rozrzutu, tj. klasyfikowana jako spełniająca wymagania technologiczne, po zakończeniu procesu suszenia może zostać skierowana do dalszych etapów procesu produkcyjnego. W przypadku tarcicy o wadliwej wilgotności, tj. o wilgotności niższej niż dopuszczalna (przesuszona) i o wilgotności wyższej niż dopuszczalna, konieczne jest jej okresowe wycofanie z procesu produkcyjnego w celu doprowadzenia (przez sezonowanie) do wymaganej wilgotności końcowej. Zmiany wilgotności tarcicy podczas sezonowania ze względu na wpływ różnych czynników mogą mieć zarówno pożądany, jak i niepożądany charakter i zakres.

Do określenia jakości suszenia na podstawie udziału tarcicy o wadliwej wilgotności, tj. spoza dopuszczalnego rozrzutu, można zastosować funkcję gęstości rozkładu normalnego $f(z)$ (Welling, 2010). Na rycinie 42 przedstawiono wyniki przeprowadzonych przez autora pomiarów wilgotności tarcicy suszonej w warunkach przemysłowych, które charakteryzują typowe dla praktyki produkcyjnej przypadki zróżnicowania wilgotności końcowej partii wysuszonej tarcicy. Dla każdego przypadku rozrzut wilgotności końcowej został aproksymowany funkcją rozkładu normalnego, wykorzystaną do obliczenia udziałów tarcicy o wadliwej wilgotności (przesuszonej i niedosuszonej) oraz udziału tarcicy o wilgotności w zakresie dopuszczalnego rozrzutu.

Średnia wilgotność końcowa tarcicy oraz położenie pola pod krzywą rozkładu normalnego względem dopuszczalnego rozrzutu wilgotności końcowej pozwoliły określić partię tarcicy jako przesuszoną (ryc. 42a) lub niedosuszoną (ryc. 42b). Tarcica o wadliwej wilgotności występuje również wtedy, gdy średnia wartość wilgotności końcowej odpowiada założonej docelowej wartości wilgotności, tj. 12% (ryc. 42c). Ten przypadek charakteryzuje jednak znaczne ograniczenie udziału tarcicy o wadliwej wilgotności. Dodatkowo, do celów porównania, na rycinie 42d przedstawiono aproksymowany rozkładem normalnym rozrzut wilgotności, odpowiadający docelowym wymaganiom jakości uwzględniającym co najmniej 86% ($\pm 1,5 \sigma$) udział tarcicy o wilgotności w zakresie dopuszczalnego rozrzutu. W żadnym z analizowanych przypadków rozrzutu wilgotności końcowej (ryc. 42a–c) udział tarcicy spełniającej wymagania jakości suszenia nie osiągnął założonego

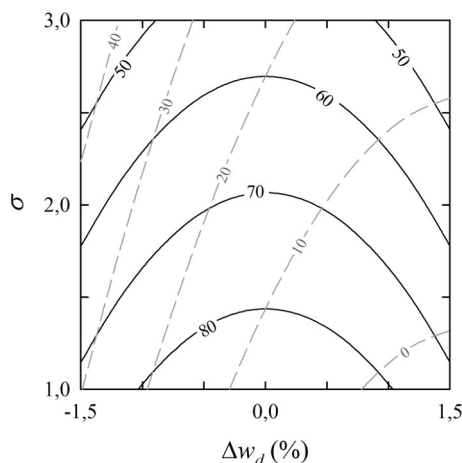


Ryc. 42. Rozrzut wilgotności końcowej partii tarcicy sosnowej o grubości 25 mm aproksymowany funkcją rozkładu normalnego oraz obliczone udziały tarcicy o wadliwej wilgotności i o wilgotności w granicach dopuszczanego rozrzutu (wilgotność docelowa $w_d = 12 \pm 2\%$, linia kreskowa – 95% obserwacji)

Fig. 42. Variation of final moisture content in the batch of 25 mm Scots pine timber approximated by the normal distribution function and calculated shares of timber within non-allowable and allowable range (target moisture content $w_d = 12 \pm 2\%$, dash line – 95% of observations)

celu. Rozrzut wilgotności obejmujący 95% obserwacji (tj. $\pm 2 \sigma$) znacznie przekraczał dopuszczalny rozrzut wilgotności ($12 \pm 2\%$).

Dla analizowanego przypadku suszenia na rycinie 43 przedstawiono teoretyczne, tj. obliczone przy założeniu rozkładu normalnego udziały tarcicy o wilgotności w zakresie dopuszczalnego rozrzutu (czyli $w = 12 \pm 2\%$) oraz tarcicy przesuszonej (o wilgotności $w < 10\%$) dla różnych wariantów odchylenia średniej wartości wilgotności końcowej od wilgotności docelowej Δw_d oraz różnych wartości odchylenia standardowego. W analizie uwzględniono dziedzinę wartości odchylenia standardowego zarejestrowaną przez autora w praktyce realizacji procesów konwekcyjnego suszenia tarcicy sosnowej o grubości 25 mm na potrzeby produkcji elementów stolarki otworowej.

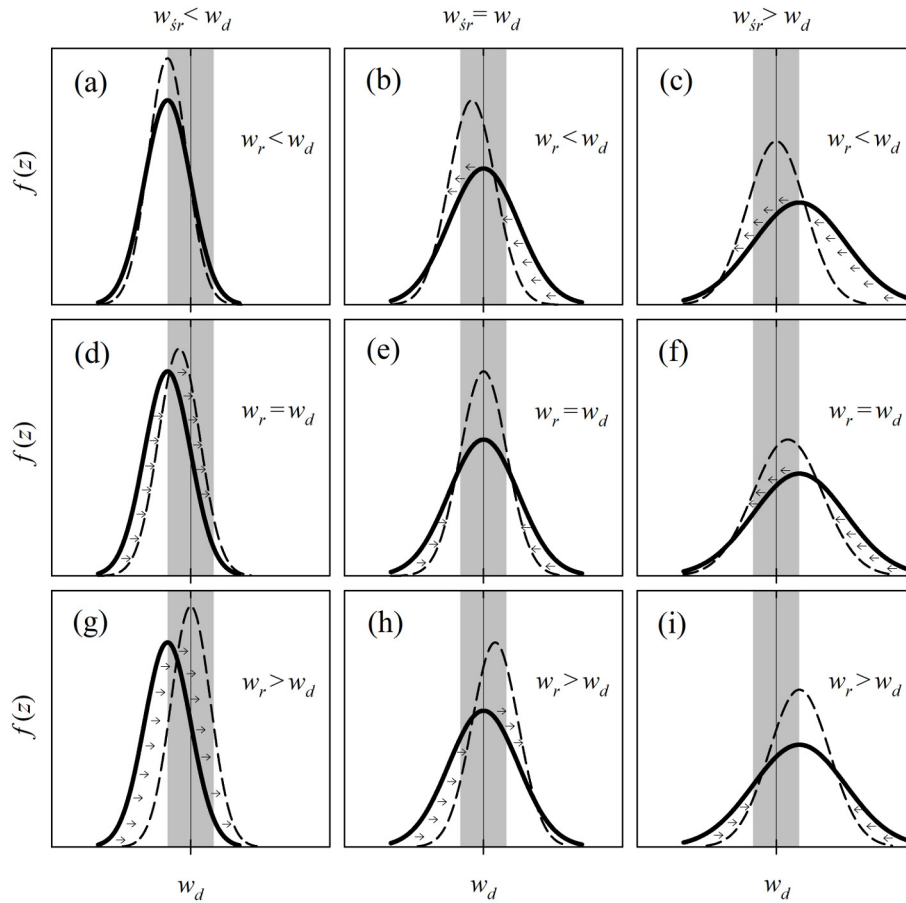


Ryc. 43. Teoretyczne procentowe udziały tarcicy o wilgotności w granicach dopuszczalnego rozrzutu (linia ciągła) i tarcicy przesuszonej (linia kreskowa) w zależności od różnicy średniej wilgotności końcowej i wilgotności docelowej Δw_d oraz wartości odchylenia standardowego σ ($w_d = 12 \pm 2\%$, $s = 25$ mm)

Fig. 43. Theoretical percentages of timber with allowable range of moisture content (solid line) and over-drying timber (dash line) depending on the difference between average final moisture content and target moisture content Δw_d and value of standard deviation σ ($w_d = 12 \pm 2\%$, $s = 25$ mm)

Przywrócenie przydatności tarcicy o wadliwej wilgotności do dalszego przerobu jest możliwe przez jej składowanie po suszeniu w warunkach otoczenia o stabilizowanych parametrach powietrza (tj. temperatury i względnej wilgotności), odpowiadających wilgotności równowagowej z przedziału dopuszczalnej wilgotności końcowej. Efekty oddziaływania powietrza w miejscu składowania zależą przy tym od udziałów tarcicy przesuszonej i niedosuszonej, czasu składowania oraz od relacji między wilgotnością równowagową a wilgotnością końcową tarcicy. Dla stałej wartości wilgotności równowagowej wzrost temperatury powietrza przyspiesza proces nawilżania i dosuszania tarcicy o wadliwej wilgotności. Ze wzrostem temperatury powietrza wzrasta tempo zmian wilgotności i odwrotnie. Ograniczeniem możliwości zmniejszenia rozrzutu wilgotności tarcicy jest opisane w punkcie 7.1 zjawisko histerezy sorpcji. Zjawisko to w przypadku, w którym wilgotność równowagowa odpowiadająca warunkom sezonowania jest równa założonej docelowej wilgotności tarcicy, sprawia, że nawet po upływie dłuższego czasu część tarcicy przesuszonej nie osiąga akceptowanej wilgotności końcowej, a tarcica wymagająca dosuszenia ma wilgotność wyższą niż docelowa. Nieunikniony – ze względu na histerezę sorpcji – zakres zróżnicowania wilgotności tarcicy sosnowej po sezonowaniu zależy od czynników opisanych w punkcie 7.1 i może osiągnąć wartość do ok. 3%.

Na rycinie 44 przedstawiono macierz scenariuszy charakteryzujących teoretyczne zmiany rozrzutu wilgotności tarcicy podczas sezonowania, które aproksymowano za pomocą funkcji rozkładu normalnego. W zestawieniu uwzględniono różne warianty średniej wilgotności końcowej tarcicy, tj. mniejszej (wariant a, d, g), równej (wariant b, e, h) oraz większej niż wartość docelowa (wariant c, f, i). Ponadto uwzględniono różne warianty wilgotności równowagowej odpowiadającej warunkom oddziaływania powietrza na drewno w trakcie jego sezonowania, tj. mniejszej (wariant a, b, c), równej (wariant d, e, f) oraz większej niż wartość wilgotności docelowej tarcicy (wariant g, h, i). Krzywe rozkładu normalnego, które charakteryzują przypadki rozrzutu wilgotności tarcicy przesuszonej i niedosuszonej po zakończeniu sezonowania, uwzględniają również wpływ opisywanego wcześniej zjawiska histerezy sorpcji.



Ryc. 44. Teoretyczne scenariusze zmian wilgotności tarcicy podczas sezonowania aproksymowane za pomocą funkcji rozkładu normalnego w zależności od stopnia przesuszenia oraz wilgotności równowagowej $w_r = f(t, \varphi)$

Wilgotność tarcicy: linia ciągła – po suszeniu, linia kreskowa – po sezonowaniu, w_d – wilgotność docelowa, popielaty obszar – dopuszczalny rozrzut wilgotności.

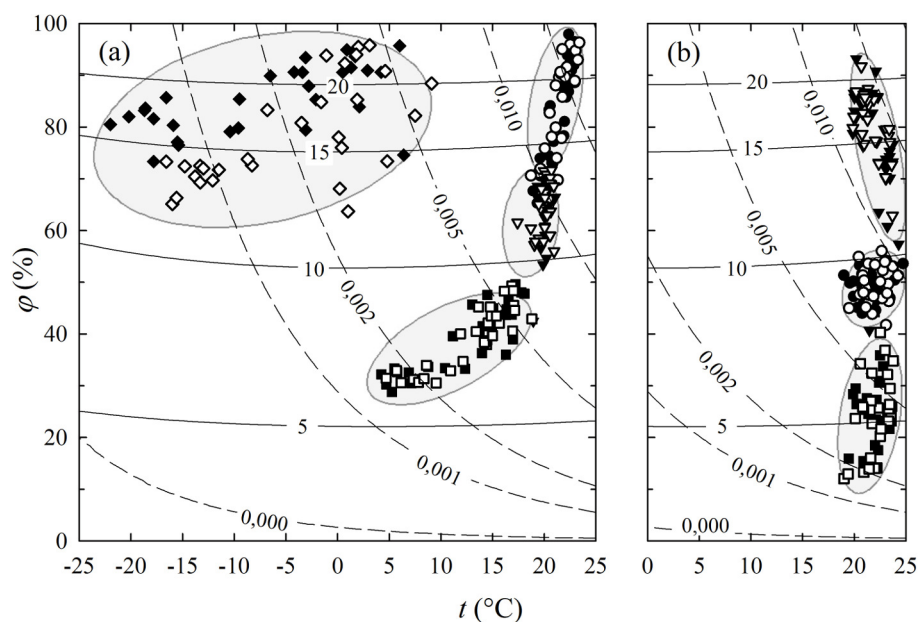
Fig. 44. Theoretical scenarios of timber moisture content variation during seasoning approximated by the normal distribution depending on the over-drying and the equilibrium moisture content $w_r = f(t, \varphi)$

Timber moisture content: solid line – following kilning, dash line – following seasoning, w_d – target moisture content, grey area – allowable range of final moisture content.

Analiza przedstawionych scenariuszy wskazuje, że w przypadku przedstawionym na rycinie 44e rezultatem sezonowania tarcicy o średniej wilgotności końcowej równej wilgotności docelowej (w warunkach odpowiadających wilgotności równowagowej równej wilgotności docelowej) będzie zawsze wzrost wilgotności tarcicy o niższej wilgotności i obniżenie wilgotności tarcicy o wyższej wilgotności. W rezultacie obserwuje się równoczesne zmniejszenie udziału tarcicy przesuszonej i niedosuszonej oraz ogólny wzrost udziału tarcicy o wilgotności w zakresie dopuszczalnego rozrzutu. Efektem sezonowania tarcicy w opisywanych warunkach zawsze będzie zmniejszenie rozrzutu wilgotności tarcicy.

W przypadku tarcicy przesuszonej za najbardziej efektywne należy uznać działanie, którego skutki zilustrowano na rycinie 44g. W tym przypadku poddanie tarcicy oddziaływaniu warunków, którym odpowiada wilgotność równowagowa wyższa niż wilgotność docelowa ($w_r > w_d$), pozwala na istotne ograniczenie udziału tarcicy o wilgotności niższej niż dopuszczalna, przy niewielkim wzroście udziału tarcicy o wilgotności wyższej niż dopuszczalna. Za efektywny sposób nawilżania tarcicy przesuszonej uznaje się przy tym magazynowanie jej w warunkach oddziaływania powietrza o niższej temperaturze. Skuteczność takiego sposobu zmniejszania rozrzutu wilgotności podczas sezonowania tarcicy iglastej z grupy *hem-fir* opisują Wada i in. (2014). Z kolei najbardziej efektywnym działaniem, zmniejszającym udział tarcicy niedosuszonej i zwiększającym udział tarcicy o wilgotności w zakresie dopuszczalnego rozrzutu, jest stworzenie warunków, w których wilgotność równowagowa jest niższa od docelowej ($w_r < w_d$). Scenariusz zmian wilgotności w opisywanym przypadku zilustrowano na rycinie 44c.

Przedstawione teoretyczne scenariusze zmian wilgotności tarcicy przez jej sezonowanie w celu zmniejszenia rozrzutu wilgotności po suszeniu wskazują na konieczność stworzenia warunków kontrolowanego oddziaływania powietrza na drewno. Obecnie do tego celu wykorzystuje się odpowiednio wyposażoną infrastrukturę, określaną mianem magazynów tarcicy suchej, hal magazynowych czy buforowych magazynów tarcicy. Z obserwacji autora wynika, że w przypadku tych ostatnich, organizowanych w obrębie hal produkcyjnych, wilgotność równowagowa w najwyższym stopniu odpowiada wymogom technologicznym. Magazyny i hale mają charakter obiektów zamkniętych, często wyposażonych w instalacje do kontroli i regulacji parametrów powietrza. Z drugiej strony do sezonowania tarcicy po suszeniu wykorzystywane są otwarte wiaty – obiekty nieogrzewane, które pozwalają jedynie na wyeliminowanie oddziaływań promieniowania słonecznego i opadów atmosferycznych, w których parametry powietrza w otoczeniu pakietów tarcicy zmieniają się podobnie jak powietrza zewnętrznego. W skali roku różnice ekstremalnych wartości temperatury dla opisywanej kategorii obiektów mogą być większe niż na otwartej przestrzeni. W tym przypadku na zmiany wilgotności wysuszonej tarcicy wpływa wiele czynników – w tym losowe oddziaływanie warunków klimatycznych, powodujące niekontrolowane zmiany wilgotności wysuszonej tarcicy. W tych sytuacjach charakter i zakres zmian wilgotności sezonowanej tarcicy są zależne od czasu trwania i charakteru zmian parametrów powietrza określających warunki klimatyczne. Parametry powietrza zmieniają się w cyklu dobowym (noc i dzień), w kilku- lub kilkunastodniowym cyklu zmian pogody oraz w cyklu rocznym wynikającym z pór roku (wiosna, lato, jesień, zima). Dodatkowo drewno sezonowane w wiacie narażone jest na okresowy wzrost wilgotności warstw powierzchniowych w dni mgliste i wietrzne w okresie jesiennym. Na rycinie 45 przedstawiono wyniki rejestracji parametrów powietrza w marcu 2011 r. w obrębie przestrzeni magazynowania (sezonowania) tarcicy po suszeniu w wybranym zakładzie produkcyjnym. Wyniki dotyczą jednej wiaty otwartej i trzech hal magazynowych (ryc. 45a) oraz trzech hal produkcyjnych (ryc. 45b). Zwraca uwagę zarejestrowany w ciągu jednego miesiąca ograniczony zakres wilgotności równowagowej w poszczególnych obiektach zamkniętych, przy znacznych różnicach w ramach grup obiektów. Wilgotność równowagowa w grupie ogrzewanych hal produkcyjnych kształtowała się między



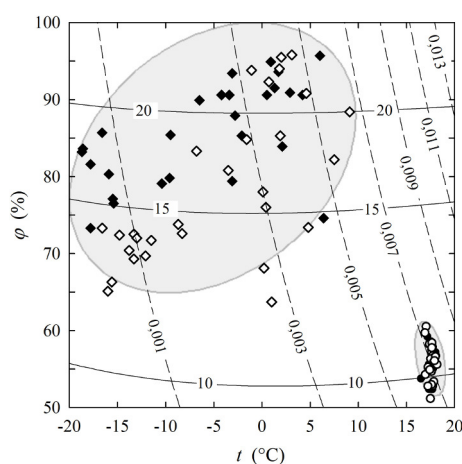
Ryc. 45. Średnie wartości parametrów powietrza w ciągu dnia i nocy – odpowiednio białe i czarne symbole wraz z krzywymi wilgotności równowagowej w_r , % (linia ciągła) i wilgotności bezwzględnej X , kg/kg (linia kreskowa), zarejestrowane w obrębie przestrzeni przeznaczonych na cele sezonowania tarcicy po suszeniu w wybranym zakładzie produkcyjnym w marcu 2011 r.: (a) wiata i nieogrzewane hale magazynowe, (b) ogrzewane hale produkcyjne

Fig. 45. Day and night average values of air parameters – black and white symbols, respectively, with equilibrium moisture content curves w_r , % (solid line) and absolute humidity X , kg/kg (dash line) collected in selected plant in March 2011 within: a – open-sided timber storage shed and unheated warehouses, b – heated shop floors

skrajnymi wartościami 3,5% i 22%. Minimalne wartości wilgotności równowagowej w ogrzewanych halach produkcyjnych mogą być efektem działania instalacji odpylania i odwirowania, które powodują intensywną wymianę powietrza. Z kolei mniejsze zróżnicowanie wilgotności równowagowej w nieogrzewanych halach magazynowych może wynikać z interakcji między powietrzem a drewnem w warunkach ograniczonej wymiany powietrza z otoczeniem, a bywa określone jako buforowanie zmian wilgotności (Teischinger, 1987). Wysoki poziom wilgotności równowagowej w otwartej wiacie wynika z kolei z parametrów powietrza otoczenia charakterystycznych dla tej pory roku.

W celu określenia rzeczywistego wpływu warunków sezonowania na zmiany wilgotności tarcicy przeprowadzono w warunkach produkcyjnych kolejny eksperyment, związany z sezonowaniem tarcicy w otwartej wiacie (ograniczony wpływ na warunki sezonowania) oraz w zamkniętej hali magazynowej, wyposażonej w system ogrzewania i nawilżania powietrza. W tym celu bezpośrednio po zakończeniu procesu suszenia ze strefy środkowej załadunku suszarki wybrano pojedynczy pakiet tarcicy. Z pakietu losowo pobrano próbę, którą stanowiło 78 sztuk nieobryznanej tarcicy sosnowej o grubości 40 mm i długości 4,5 m. Każda sztuka tarcicy

została podzielona na dwie części, z których ostatecznie sformowano dwa bliźniacze pakiety. Przed rozpoczęciem sezonowania zmierzono średnią wilgotność końcową każdej sztuki tarcicy za pomocą wilgotnościomierza oporowego (według założeń PN-EN 13183-2:2004). Założeniem procesu sezonowania w hali magazynowej było zapewnienie przez okres 3 tygodni parametrów powietrza na poziomie $t = 20^{\circ}\text{C}$ i $\varphi = 55\%$, co odpowiada wilgotności równowagowej $w_r = 10\%$. Po zakończeniu sezonowania ponownie zmierzono wilgotność każdej sztuki tarcicy. Wartości parametrów powietrza rejestrowane w procesie sezonowania przedstawiono na rycinie 46. Wskazują one na bardzo dużą różnicę warunków oddziaływania powietrza na tarcicę sezonowaną w otwartej wiacie i hali magazynowej.

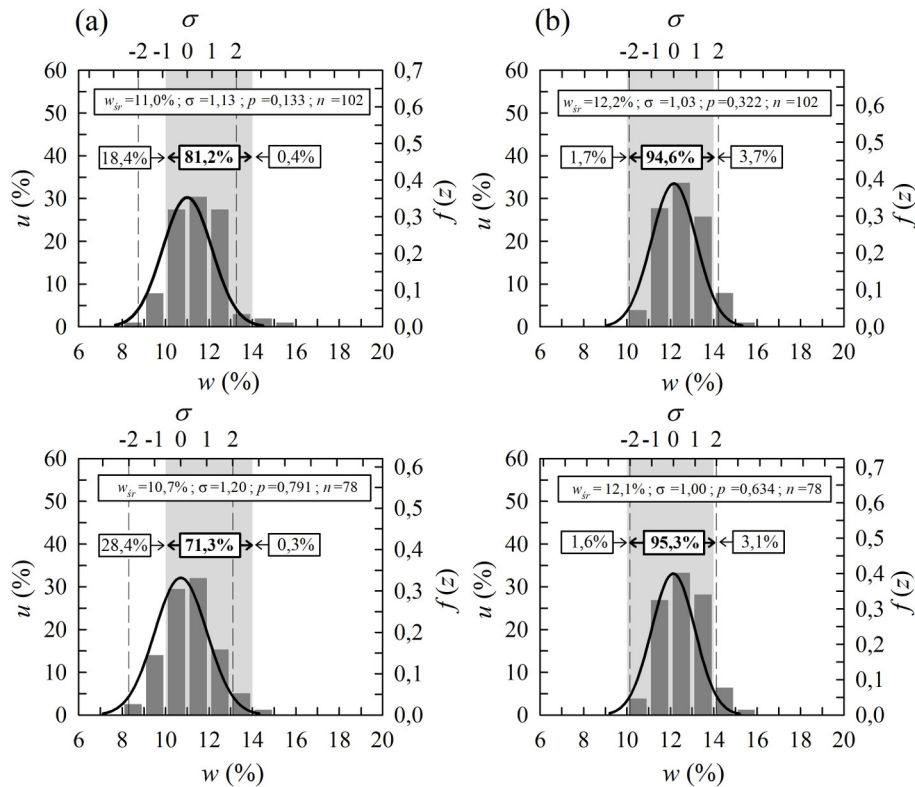


Ryc. 46. Średnie wartości parametrów powietrza w ciągu dnia i nocy – odpowiednio białe i czarne symbole wraz z krzywymi wilgotności równowagowej w_r , % (linia ciągła) i wilgotności bezwzględnej masowej powietrza X , kg/kg (linia kreskowa), zarejestrowane w lutym 2011 r. w wiacie magazynowej bez systemu regulacji parametrów powietrza (romby) oraz w hali magazynowej wyposażonej w system regulacji parametrów powietrza (okręgi)

Fig. 46. Day and night average values of air parameters – black and white symbols, respectively, with the equilibrium moisture content curves w_r , % (solid line) and absolute humidity X , kg/kg (dash line) collected in February 2011 within an open-sided timber storage shed with no air regulation system (diamonds) and in a warehouse equipped with an air regulation system (circles)

Na rycinie 47 zilustrowano rozrzut wilgotności przed rozpoczęciem i po zakończeniu sezonowania tarcicy sosnowej o grubości 40 mm w otwartej wiacie i zamkniętej hali magazynowej. Średnia wilgotność tarcicy bezpośrednio po suszeniu wynosiła odpowiednio 10,7% i 11,0%. W obu przypadkach rozrzut wilgotności miał cechy rozkładu normalnego, przy bardzo małym odchyleniu standardowym wynoszącym 1,20% i 1,13%. Położenie pola pod krzywą rozkładu normalnego względem dopuszczalnego rozrzutu wilgotności końcowej ($w_d = 12 \pm 2\%$) pozwala w obu przypadkach na określenie tarcicy jako ogólnie przesuszonej.

Średnia wilgotność tarcicy po zakończeniu realizacji obu wariantów sezonowania wzrosła, a odchylenie standardowe zmalało, przy równoczesnym wzroście udziału tarcicy o wilgotności w zakresie dopuszczalnego rozrzutu (10–14%). Korzystny efekt sezonowania tarcicy w otwartej wiacie wynika ze sprzyjającego oddziaływania warunków otoczenia na zmiany wilgotności tarcicy przesuszonej. Ponieważ w analizowanym przypadku udział ten wynosił aż 28,4%, wysoka wartość wilgotności względnej powietrza i odpowiadającej jej wilgotności równowagowej drewna w czasie sezonowania sprzyjała efektywnemu nawilżaniu tarcicy przesuszonej. Przez 50% czasu sezonowania średnia dobowa wartość wilgotności równowagowej odpowiadała wilgotności w zakresie dopuszczalnego rozrzutu lub była nieznacznie wyższa. Wyniki eksperymentu wskazują na warunki efektywnego sezonowania tarcicy przesuszonej w okresie jesienno-zimowym w przypadku ogra-

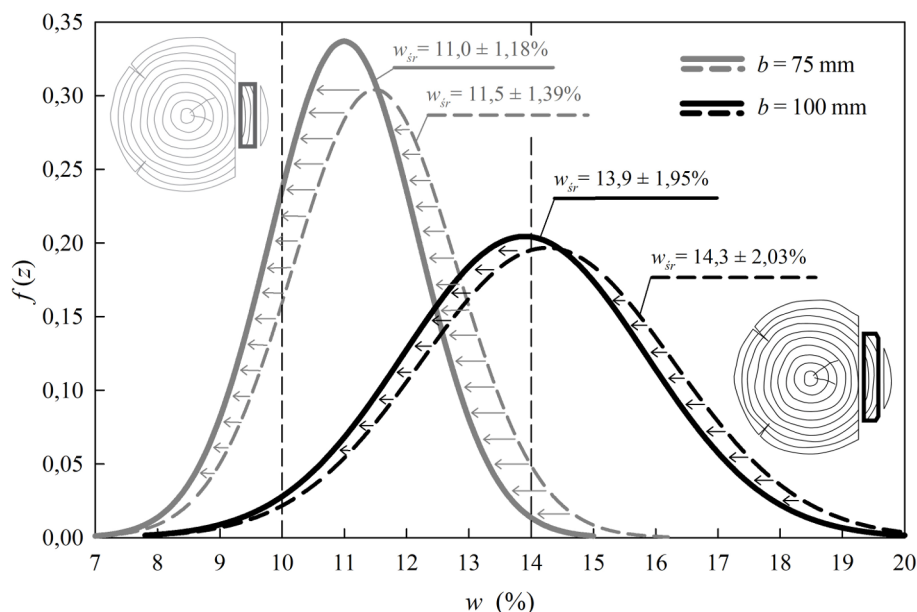


Ryc. 47. Rozrzut wilgotności partii nieobrzynanej tarcicy sosnowej o grubości 40 mm aproksymowany funkcją rozkładu normalnego oraz obliczone udziały tarcicy spełniającej wymagania ($10 < w < 14\%$) i dyskwalifikowanej: a – przed i b – po zakończeniu sezonowania w magazynie wyposażonym w system regulacji parametrów powietrza (górne wykresy) i w otwartej wiacie magazynowej (dolne wykresy), linia kreskowa – rozrzut zaobserwowany (95% obserwacji), popielaty obszar – dopuszczalny rozrzut wilgotności

Fig. 47. Variation of final moisture content in the batch of 40 mm Scots pine timber approximated by the normal distribution and calculated shares of timber within the allowable range of the moisture content ($10 < w < 14\%$) and rejected (a) before and (b) following seasoning in a warehouse equipped with an air regulation system (upper plots) and in an open-sided storage shed (lower plots), dash line – observed variation (95% of observations), grey area – allowable range of moisture content

niczonych (lub braku) możliwości wykorzystania zamkniętych hal magazynowych wyposażonych w środki techniczne do regulacji parametrów powietrza.

Praktyka produkcyjna po spełnieniu innych wymagań dopuszcza możliwość równoczesnego suszenia tarcicy o nieznacznym stopniu zróżnicowania wymiarów przekroju poprzecznego (Glijer, 2011). Na rycinie 48 przedstawiono wyniki dodatkowego eksperymentu, którego celem było określenie skutków równoczesnego sezonowania tarcicy bocznej o grubości 25 mm i różnej szerokości. Tarcica o szerokości 100 mm i 75 mm stanowiła mieszany załadunek suszarki komorowej i została wysuszona w tym samym procesie suszenia do wilgotności końcowej $12 \pm 2\%$. Przedstawione na rycinie 48 wyniki pomiarów wilgotności tarcicy po suszeniu aproksymo-



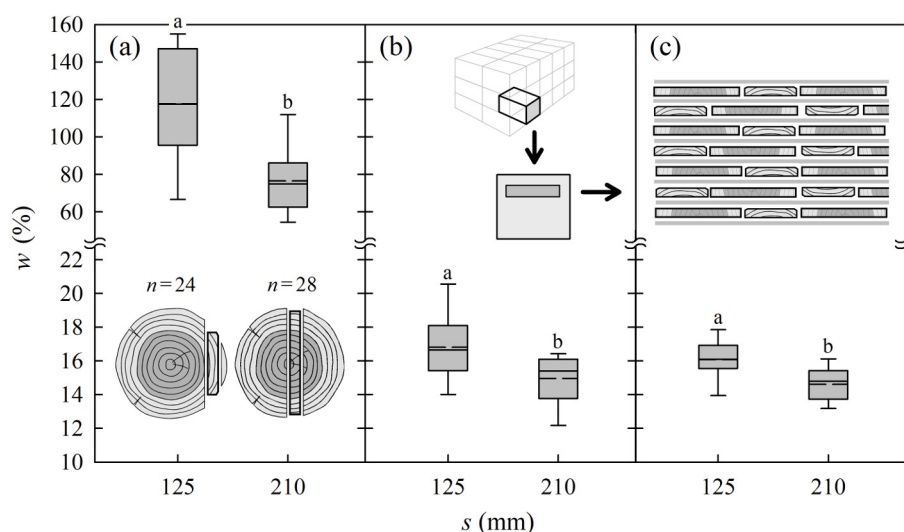
Ryc. 48. Aproxymowane rozkładem normalnym zmiany rozrzutu wilgotności tarcicy sosnowej o grubości 25 mm i różnej szerokości obserwowane po upływie 10 dni sezonowania w hali magazynowej (wilgotność docelowa $w_d = 12 \pm 2\%$, parametry powietrza podczas sezonowania: $t = 20^\circ\text{C}$, $\varphi = 55\%$)

Fig. 48. Changes in moisture content approximated by the normal distribution in the spread of 25 mm Scots pine timber and different width variants observed after 10 days of seasoning in the warehouse (target moisture content $w_d = 12 \pm 2\%$, air parameters during seasoning: $t = 20^\circ\text{C}$, $\varphi = 55\%$)

wane krzywymi rozkładu normalnego wskazują na niekorzystny wpływ zróżnicowania wymiarów przekroju poprzecznego na jakość suszenia (rozrzut wilgotności). Tarcica o większej szerokości (tj. 100 mm) bezpośrednio po suszeniu wykazuje wyższą wilgotność i większy rozrzut niż w przypadku równocześnie suszonej tarcicy o mniejszej szerokości (75 mm). W tej sytuacji sezonowanie tarcicy w tych samych warunkach (zamknięta hala magazynowa), odpowiadających wilgotności równowagowej 10%, nie zapewnia – jak wynika z ryciny 48 – efektywnego sezonowania całej partii tarcicy, która stanowiła załadunek suszarki. W opisanym przypadku niepożądanym skutkiem równoczesnego sezonowania partii tarcicy o identycznej historii technologicznej, jednak o różnej szerokości, jest obniżenie wilgotności tej jej części, która przed sezonowaniem charakteryzowała się znacznym przesuszeniem (tarcica o mniejszej szerokości), czego efektem jest zmniejszenie po sezonowaniu udziału tarcicy o wilgotności w zakresie dopuszczalnego rozrzutu (10–14%).

Jedną z głównych przyczyn wadliwej wilgotności partii tarcicy po suszeniu stanowi opisane w rozdziale 5 nadmierne zróżnicowanie wilgotności początkowej tarcicy w załadunku suszarki. Na rycinie 49 przedstawiono wyniki eksperymentu, który polegał na wyznaczeniu zmian wilgotności tarcicy o różnej wilgotności początkowej w różnych etapach realizacji procesu produkcyjnego wyrobów z drewna. Do pomiarów wytypowano dwie kategorie tarcicy sosnowej, tj. deski boczne – bie-

laste ($b = 125$ mm) oraz deski rdzeniowe – twarde ($b = 210$ mm), które pochodziły z partii świeżo pozyskanych kłód o długości 4,5 m i tej samej średnicy w cieńszym końcu ($d_{ck} = 21$ cm). Tarcica o różnej szerokości i wilgotności początkowej została ułożona naprzemiennie w kilku sąsiadujących warstwach w jednym z pakietów stanowiących załadunek suszarki (założenia procesu suszenia tarcicy przeprowadzonego w suszarce C zestawiono w tabeli 2). Efektem specyficznej dla drewna sosny różnicy wilgotności strefy bielu i twardego oraz zastosowanej technologii rozkroju surowca tartacznego była istotna różnica wilgotności początkowej pozyskanych rodzajów sortymentów tarcicy (ryc. 49a). W przeprowadzonym doświadczeniu deski bielaste charakteryzowała istotnie wyższa wilgotność niż deski twarde (dla $\alpha = 0,05$).



Ryc. 49. Porównanie wilgotności obrzynanej tarcicy sosnowej o grubości 23 mm i różnej szerokości bezpośrednio po (a) przetarciu, (b) suszeniu i (c) sezonowaniu (suszarka C, temperatura suszenia $t = 85^{\circ}\text{C}$, parametry powietrza podczas klimatyzowania: $t = 20 \pm 2^{\circ}\text{C}$, $\varphi = 55 \pm 5\%$, wilgotność docelowa $w_d = 9 \pm 2\%$)

Fig. 49. A comparison of moisture content of edged 25 mm Scots pine timber with different widths immediately after (a) sawmilling, (b) kilning and (c) seasoning (kiln C, drying temperature $t = 85^{\circ}\text{C}$, air parameters during seasoning: $t = 20 \pm 2^{\circ}\text{C}$, $\varphi = 55\%$, target moisture content $w_d = 9 \pm 2\%$)

W kolejnych rozpatrywanych etapach procesu produkcyjnego obserwowano zmniejszanie się zakresu zróżnicowania wilgotności badanej tarcicy przy statystycznie istotnej różnicy średnich wilgotności desek bocznych i rdzeniowych. W tym przypadku sezonowanie tarcicy o różnej wilgotności na początku procesu produkcyjnego (przed suszeniem) w tych samych warunkach nie pozwoliło na całkowite zneutralizowanie skutków zróżnicowania ich wilgotności bezpośrednio po suszeniu.

8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Wszechstronne zastosowanie tarcicy jest powodem dużego zróżnicowania wymagań dotyczących oczekiwanej wilgotności po suszeniu. Równocześnie duża intensywność suszenia w połączeniu z ograniczeniami – jakie stanowią nierównomierność suszenia (typowa dla stosowanych technologii konwekcyjnego suszenia tarcicy) oraz nieuniknione zróżnicowanie właściwości drewna – powoduje trudności z osiągnięciem wymaganej jakości suszenia. Mogą one rosnać, jeżeli proces suszenia przebiega w sposób powodujący dodatkowe zakłócenia. Natomiast możliwości neutralizacji niepożądanych efektów w postaci wadliwej wilgotności, jakie daje zabieg sezonowania tarcicy po suszeniu, mogą być ograniczane przez nieuwzględnienie szczegółowej wiedzy na temat wpływu uprzedniego suszenia na właściwości higroskopijne drewna i zjawisko histerezy sorpcji. Z analizy przeprowadzonej w pracy wynikają następujące wnioski dotyczące wpływu czynników materiałowych i technologicznych na przebieg i efekty suszenia, możliwości zwiększenia równomierności suszenia tarcicy w obrębie załadunku suszarki, jak i na efektywność sezonowania tarcicy o wadliwej wilgotności bezpośrednio po suszeniu:

- kompletowanie mieszanego załadunku suszarki z tarcicy o różnym pochodzeniu – ze względu na uwarunkowania siedliskowe i zróżnicowane warunki klimatyczne – może być powodem dodatkowego zróżnicowania właściwości, tj. gęstości i wilgotności początkowej, które determinują podatność na suszenie,
- kompletowanie załadunku suszarki z tarcicy o danej grubości, z dopuszczeniem zróżnicowania jej pozostałych wymiarów (szerokości i długości), w przypadku sortymentów tarcicy sosnowej stanowi przyczynę dodatkowego wzrostu różnic wilgotności między pojedynczymi sztukami tarcicy, które tworzą załadunek suszarki (przy czym zróżnicowanie szerokości tarcicy wywiera większy wpływ na opisywany efekt niż zróżnicowanie długości),
- oddziaływanie powietrza na drewno w okresie przedłużającego się kompletowania załadunku suszarki może być przyczyną niekontrolowanych zmian wilgotności świeżo pozyskanej tarcicy i dodatkowego zróżnicowania wilgotności pakietów tworzących załadunek suszarki,
- przyczyną niewłaściwego przebiegu suszenia w początkowej fazie procesu ($w_b > 30\%$) może być uwzględnienie pośrednich wartości wilgotności równowagowej drewna do wyznaczenia gradientu suszenia, który charakteryzuje intensywność procesu (zastosowanie do tego celu wartości wilgotności równowagowej, które odpowiadają pierwszej (pierwotnej) desorpcji, pozwala na uściślenie wartości gradientu i w efekcie realizacja procesu suszenia może odbywać się z intensywnością, która zapewnia ograniczenie ryzyka nadmiernego rozrzutu wilgotności końcowej tarcicy),

- głównymi czynnikami, od których zależy charakterystyka przepływu powietrza w załadunku suszarki, tj. średnia prędkość i równomierność przepływu, jest grubość tarcicy i wydajność wentylatorów skorelowana z prędkością obrotową wentylatorów; natomiast grubość zastosowanych przekładek w uwzględnionym zakresie ma marginalny wpływ na opisywane efekty,
- poprawa równomierności przepływu powietrza w załadunku suszarki może być efektem redukcji prędkości obrotowej wentylatorów (stwierdzenie to dotyczy ograniczonego zakresu zmian prędkości obrotowej),
- rewersyjne zmiany kierunku przepływu powietrza zmniejszają rozrzut wilgotności końcowej tarcicy, nie pozwalają jednak na wyeliminowanie skutków zróżnicowania warunków suszenia pomiędzy środkową i skrajną strefą załadunku suszarki,
- równomierność przepływu powietrza, od której zależy ograniczenie zróżnicowania warunków suszenia w załadunku suszarki, zależy od sposobu konfiguracji pakietów tarcicy w stosie; dodatkowo w przypadku niesymetrycznego położenia elementów wyposażenia suszarki o dużym współczynniku oporu aerodynamicznego rewersyjne zmiany obiegu powietrza mogą potęgować efekt nierównomiernego wysychania tarcicy,
- warunkiem efektywnego sezonowania tarcicy o wadliwej wilgotności jest uwzględnienie histerezy sorpcji; ponadto zakres histerezy sorpcji jest zależny od parametrów uprzednio realizowanego procesu suszenia; w przypadku sezonowania tarcicy o nadmiernym rozrzucie wilgotności (przesuszonej i niedosuszonej) uwzględnienie pośrednich wartości wilgotności równowagowej do określenia warunków klimatyzowania nie gwarantuje osiągnięcia wilgotności w zakresie dopuszczalnego rozrzutu.

Spodziewanymi korzyściami zastosowania szczegółowej wiedzy dotyczącej uwarunkowań rozrzutu wilgotności tarcicy suszonej konwekcyjnie jest możliwość zwiększenia stopnia integracji procesu suszenia z początkowymi etapami procesów produkcyjnych wyrobów z drewna.

9. LITERATURA

- Ahmet, K., Dai, G., Jazayeri, S., Tomlin, R. (1999). Experimental procedures for determining the equilibrium moisture content of twenty timber species. *Forest Products Journal*, 49(1), 88–93.
- Arnaud, G., Fohr, J.-P., Gamier, J.-P., Ricolleau, C. (1991). Study of the air flow in a wood drier. *Drying Technology*, 9(1), 183–200.
- Bedelean, B. (2015). Influence of various options to baffles setup on air velocity and its uniformity in a drying kiln. *Pro Ligno*, 11(4), 355–359.
- Bedelean, B., Muntean, S., Campean, M. (2016). Analysis of drying kiln aerodynamics based on a full three-dimensional turbulent numerical computation. *Drvna Industrija*, 67(1), 53–64.
- Bedelean, I. B., Sova, D. (2010a). Investigations concerning the possibility to minimize the stacks aerodynamic resistance. W: Proc. Int. Conf. COST E53 “The Future of Quality Control for Wood and Wood Products”, May 4–7, Edinburgh, United Kingdom (s. 13–21).
- Bedelean, I. B., Sova, D. (2010b). Method of reducing the electric energy consumption during timber drying. *Pro Ligno*, 6(3), 13–20.
- Berberović, A., Milota, M. R. (2011). Impact of wood variability on the drying rate at different moisture content levels. *Forest Products Journal*, 61(6), 435–442.
- Bielczyk, S., Eminowicz, A. (1954). Wilgotność drewna drzew żywych. *Roczniki Nauk Leśnych, Prace Instytutu Technologii Drewna*, 7(1), 5–30.
- Böhner, G. (1996). Überlegungen und Ergänzungen zum „Keylwerth-Diagramm”. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 54(2), 73–79.
- Boone, R. S., Kozlik, C. J., Bois, P. J., Wengert, E. M. (1988). Dry kiln schedules for commercial woods – temperate and tropical. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-57, Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 158 p.
- Box, G. E. P., Draper, N. R. (2007). Response surfaces, mixtures, and ridge analyses. New Jersey: Wiley.
- Brunner, R. (1987). Die Schnittholztrocknung. 5. Auflage. Hannover.
- Campean, M. (2010). Timber drying methods – passing through history into the future. W: T. Morén, L. Antti, M. Sehlstedt-Persson (red.), Proceedings 11th International IUFRO Wood Drying Conference, Recent Advances in the Field of Wood Drying, Skellefteå, Sweden, 18–22 January (s. 3–16).
- Cegiel, E., Buchholz, I., Hruzik, G. (1975). Badania nad dynamiką suszenia tarcicy sosnowej na wolnym powietrzu. *Folia Forestalia Polonica, Seria B*, 12, 117–132.
- Chatterjee, S., Hadi, A. S. (2006). Regression analysis by example (4th ed.). New Jersey: Wiley.

- Cividini, R. (2000). Conventional kiln-drying of lumber. *Compendium*. Milan: Nardi S.p.A.
- Deliński, N. (2011). Evaluation of wood sorption models and creation of precision diagrams for the equilibrium moisture content. *Drwna Industrija*, 62(4), 301–309.
- Denig, J., Wengert, E. M., Simpson, W. T. (2000). Drying hardwood lumber. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-118. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- Dobrowolska, E. (2004). Parametry suszenia tarcicy pozyskanej z drewna średniowymiarowego. *Przemysł Drzewny*, 5, 12–16.
- Eichler, H. (1978). *Praxis der Holz Trocknung*. Leipzig: VEB Fachbuchverlag.
- Elustondo, D. M., Oliveira, L. (2009). A method for optimizing lumber sorting before kiln-drying. *Forest Products Journal*, 59(9), 45–50.
- Elustondo, D. M., Oliveira, L., Avramidis, S. (2010). New methodology to optimize sorting in wood drying. *Maderas. Ciencia Y Tecnología*, 12(2), 79–91.
- Elustondo, D., Oliveira, L., Ananias, R. A. (2013). Visual method to assess lumber sorting before drying. *Drying Technology*, 31(1), 32–39.
- Fabisiak, E. (2005). Zmienność podstawowych elementów anatomicznych i gęstości drewna wybranych gatunków drzew. *Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu. Rozprawy Naukowe* 369.
- Garrahan, P., Fleury, G., Chow, A. (1994). New air flow schedule reduces drying costs at E.B. EDDY. W: *Proceedings of the 45th annual meetings of Western Dry Kiln Association*, Vancouver, B.C. (s. 85–88).
- Giefing, D. F., Jabłoński, K. (1989). Zależność między gęstością a wilgotnością drewna żywych sosen. *Sylwan*, 1–2, 75–82.
- Gjerdrum, P. (2008). Modeling moisture sorption and its dynamics in commercial, kiln-dried softwood boards. *Drying Technology*, 26(9), 1140–1144.
- Glass, S. V., Zelinka, S. L., Johnson, J. A. (2014). Investigation of historic equilibrium moisture content data from the Forest Products Laboratory. General Technical Report FPL-GTR-229. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 34 p.
- Glijer, L. (2011). *Suszenie drewna i nie tylko*. Warszawa: Wieś Jutra.
- Gołębiewska, M. (2002). Dobowe zmiany wilgotności wybranych sortymentów drewna składowanych na wolnym powietrzu. *Maszyn. Praca magisterska Katedra Mechaniki i Techniki Ciepłej*, Akademia Rolnicza w Poznaniu.
- Gołębiewska, M., Guzenda, R. (2003). Kinetyka zmian wilgotności tarcicy podsuszanej w cyklu rocznym w zmiennych warunkach klimatycznych. *Materiały X Sympozjum Suszarnictwa*, 17–19 września, Łódź (s. 729–737).
- Gołuński, G. (2011). Przydatność drewna sosny z Borów Tucholskich do produkcji elementów konstrukcyjnych dla budownictwa szkieletowego. *Maszyn. Rozprawy doktorskiej Katedra Mechanicznej Technologii Drewna*, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu.
- Gu, H., Young, T. M., Moschler, W. W., Bond, B. H. (2004). Potential sources of variation that influence the final moisture content of kiln-dried hardwood lumber. *Forest Products Journal*, 54(11), 65–70.

- Guzenda, R., Grzybowski M., Ludwiczak, L. (1998). Efektywność podsuszania tarcicy w warunkach produkcyjnych przemysłu meblarskiego. Materiały XI Sesji Naukowej „Badania dla meblarstwa”, Poznań listopad 1998, Wyd. AR Poznań, (149–160).
- Guzenda, R., Olek, W., Dudziński, J. (1998). Water evaporation rate from the end faces of beech wood at different temperatures and equilibrium moisture contents. *Folia Forestalia Polonica, Seria B*, 29, 73–81.
- Guzenda, R., Olek, W., Gołębiewska, M. (2004). Computer-aided prediction of timber air pre-drying times and costs. W: Proceedings of the Final COST E15 Conference of Wood Drying “Drying timber for value-added products”, 22–24 April, Athens, Greece (s. 70–78).
- Guzenda, R., Olek, W., Gołębiewska, M. (2005). Modelling moisture content changes in timber due to natural variation of ambient air parameters. *Folia Forestalia Polonica, Seria B*, 36, 85–93.
- Hailwood, A., Horrobin, S. (1946). Absorption of water by polymers: analysis in terms of a simple model. *Transactions of the Faraday Society*, 42, B084–B092.
- Hannrup, B., Ekberg, I., Persson, A. (2000). Genetic correlations among wood, growth capacity and stem traits in *Pinus sylvestris*. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 15(2), 161–170.
- Hao, B., Avramidis, S. (2004). Annual ring orientation effect and slope of grain in hemlock timber drying. *Forest Products Journal*, 54(11), 41–49.
- Haque, M. N., Riley, S. G., Langrish, T. A. G., Pang, S. (2007). Model predicted effect of process variables on kiln drying of *Pinus radiata* boards. *Drying Technology*, 25(3), 455–466.
- Haufa, B. (1986). Wpływ grubości przekładek na prędkość przepływu powietrza w sztaflu modelowym. *Prace Instytutu Technologii drewna*, 33(1–2), 117–118.
- Helińska-Raczkowska, L. (1996). Zmienność wilgotności i gęstości drewna w świeżo ściętych pniach brzozy (*Betula pendula* Roth.). *Folia Forestalia Polonica, Seria B*, 27, 23–30.
- Hoffmeyer, P., Tang, E., Englund, E. T., Thygesen L. G. (2011). Equilibrium moisture content (EMC) in Norway spruce during the first and second desorptions. *Holzfo-schung*, 65(6), 875–882.
- Horton, R. K., Resch, H. (1976). Kiln-stick thickness effect on drying 2-inch Western hemlock lumber. *Forest Products Journal*, 26(3), 35–40.
- Hua, L., Bibeau, E., He, P., Gartshore, I., Salcudean, M., Bian, Z., Chow, S. (2001). Modelling of airflow in wood kilns. *Forest Products Journal*, 51(6), 74–81.
- Hubert, S. (1964). Z badań nad dynamiką zmian wilgotności bielu nieobrzynanej tarcicy sosnowej w warunkach suszenia naturalnego. *Przemysł Drzewny*, 3, 6–7.
- Hukka, A. (2001). Drying costs and quality with different types of drying kilns. W: Proceedings 3rd European COST E15 Workshop on wood drying: Softwood drying to meets needs of further processing and specific end-uses. June 11–13, Helsinki, Finland (s. 1–8).
- Ikonen, V.-P., Peltola, H., Wilhelmsson, L., Kilpeläinen, A., Väisänen, H., Nuutinen, T., Kellomäki, S. (2008). Modelling the distribution of wood properties along the stems of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) as affected by silvicultural management. *Forest Ecology and Management*, 256(6), 1356–1371.

- Instrukcja nr 24 Tp-67 suszenia materiałów tartych w suszarniach komorowych z wymuszonym obiegiem powietrza. 1967. Warszawa: PWRiL.
- Jakubowski, M. (2004). Udział bielu, twardzieli drewna młodocianego i dojrzałego w strzałach sosen zwyczajnych (*Pinus sylvestris* L.) wyrosłych w różnych warunkach siedliskowych. *Sylvan*, 8, 16–24.
- Jankowska A. (2018). Assessment of sorptive properties of selected tropical wood species. *Drvna Industrija*, 69(1), 35–42.
- Jannot, Y., Kanmogne, A., Talla, A., Monkam, L. (2006). Experimental determination and modelling of water desorption isotherms of tropical woods: afzelia, ebony, iroko, moabi and obeche. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 64(2), 121–124.
- Kärenlampi, P. P., Riekkinen, M. (2004). Maturity and growth rate effects on Scots pine basic density. *Wood Science and Technology*, 38(6), 465–473.
- Keey, R. B., Langrish, T. A. G., Walker, J. C. F. (2000). *Kiln-drying of lumber*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Keylwerth, R. (1950). Das Trocknungsgefälle und die Steuerung der Holztrockenanlagen. *Holz-Zentralblatt*, 76, 36.
- Klitzke, R. J., Batista, D. C. (2008). Study of the consumption of electric energy in the kiln drying of wood using a converter of frequency. W: Proc. 51st International Convention of Society of Wood Science and Technology, November 10–12, Concepción, Chile (s. 1–9).
- Kokociński, W. (2004). *Drewno. Pomiary właściwości fizycznych i mechanicznych*. Poznań: Prodruk.
- Kolin, B., Milić, G., Golić, I. (2012). Velocity and uniformity of air circulation in conventional kilns for sawn timber. *Glasnik Šumarskog Fakulteta*, 106, 129–140.
- Kollmann, F. (1951). *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. München: Springer-Verlag.
- Kollmann, F. (1963). Zur Theorie der Sorption. *Forschung im Ingenieurwesen*, 29(2), 33–41.
- Krieczetow, I. (1953). *Suszenie drewna*. Warszawa: PWRiL.
- Krischer, O., Kröll, K. (1959). *Trockner und Trocknungsverfahren*. Berlin: Springer-Verlag.
- Kröll, K. (1954). Stroemungstechnische Massnahmen im Trocknerbau. *Chemie Ingenieur Technik*, 26(3), 132–140.
- Krzysik, F. (1957). *Nauka o drewnie*. Warszawa: PWRiL.
- Krzysik, F., Sobczak, K. (1970). *Suszenie drewna. Wydanie III zmienione*. Warszawa: PWN.
- Kubiak, M., Kosicki, W. (1969). Wilgotność drewna drzewostanów sosnowych różnych klas wieku. *Prace Komisji Nauk Rolniczych i Leśnych PTPN*, 28, 176–183.
- Kubiak, M., Laurow, Z. (1994). *Surowiec drzewny*. Warszawa: Fundacja – Rozwój SGGW.
- Kubojima, Y., Suzuki, Y., Tonosaki, M., Ishikawa, A. (2003). Moisture content of green wood in high temperature water vapor. *Holzforschung*, 57(6), 634–638.
- Kydryńska, M. (1953). Suszenie tarcicy sosnowej na składach tartacznych: Badania wstępne. *Prace Instytutu Badawczego Leśnictwa* (t. 90). Warszawa: PWRiL.

- Langrish, T. A. G. (2002). Progress in the modelling of air flow patterns in timber kilns. *Drying Technology*, 20(9), 1789–1802.
- Langrish, T., Keey, R. (2004). Progress in the Modelling of Air Flow Patterns in Softwood Timber Kilns. *Asia – Pacific Journal of Chemical Engineering*, 12(3–4), 249–261.
- Ledig, S. F., Paarhuis, B., Riepen, M. (2007). Airflow within kilns. W: P. Perre (red.), *Fundamentals of Wood Drying* (s. 291–332). Nancy: A.R.BO.LOR.
- Ledig, S., Nijdam, J., Keey, R. (2001). Airflow distributions in the fillet spaces of a timber stack. *Drying Technology*, 19(8), 1697–1710.
- Luostarinen, K., Heikkonen, S. (2012). Effect of radial origin on final moisture content and gradient, casehardening, cracking and deformations of dried Siberian larch (*Larix sibirica*) timber. *European Journal of Wood and Wood Products*, 70(1–3), 69–77.
- Majka, J. (2012). The influence of fan speed reduction on airflow uniformity in timber stack during kiln drying. *Wood Research*, 57(3), 479–488.
- Majka, J., Olek, W. (2007). Effects of European beech (*Fagus sylvatica* L.) wood steaming on sorption properties and kiln-drying intensity. *Folia Forestalia Polonica, Seria B*, 38, 55–65.
- Majka, J., Olek, W., Kudła-Chwiłowicz, Z. (2014). Determination of moisture content changes in kiln-dried Scots pine timber during storage. *Drewno – Wood*, 57(191), 45–54.
- Majka, J., Widłak, H., Skrobiszewski, W. (2005). The effect of fan speed on the drying of timber in kiln dryers. *Ann. WULS-SGGW, For. Wood Technol.*, 57, 21–26.
- Matejak, M. (1983). Primäre Sorptionsisothermen von Holz. *Holzforschung und Holzverwertung*, 35(2), 1–6.
- Mathewson, J. S. (1930). The air seasoning of wood. U. S. Department of Agriculture. *Technical Bulletin*, 174, 56 p.
- McMillen, J. M. (1958). Stresses in wood during drying. Madison, WI: U.S. Forest Products Laboratory, Rep. 1652, 33p.
- Milota, M. R., Duncan, T., Wagner, E. (2009). In-line moisture content measurement of kiln-dried lumber for process improvement. *Forest Products Journal*, 59(10), 89–97.
- Milota, M. R., Tschernitz, J. L. (1994). Simulation of drying in bath lumber kiln from single-board tests. *Drying Technology*, 12(8), 2028–2055.
- Milota, M., Wu, Q. (1997). Postsorting of hem-fir: a mill study. *Forest Products Journal*, 47(2), 49–56.
- Misiak, P. (2010). Równomierność przepływu powietrza przez stos podczas jednoczesnego suszenia tarcicy o różnej grubości. *Maszyn. Praca inżynierska Katedra Hydrotermicznej Obróbki i Modyfikacji Drewna. Akademii Rolniczej w Poznaniu*.
- Möttönen, V., Heräjärvi, H., Koivunen, H., Lindblad, J. (2004). Influence of felling season, drying method and within-tree location on the Brinell hardness and equilibrium moisture content of wood from 27–35-year-old *Betula pendula*. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19, 241–249.
- Nakajima, A., Kawaguchi, N., Chiba, Y., Nara, N. (1990). Saving electricity needed to operate the ventilator of lumber dry kiln. *Journal Hokkaido Forest Products Research Institute*, 4(1), 4–11.

- Nijdam, J. J., Keey, R. B. (2002). An experimental study of airflow in lumber kilns. *Wood Science and Technology*, 36(1), 19–26.
- Nijdam, J. J., Keey, R. B. (2000). The influence of kiln geometry on flow maldistribution across timber stacks in kilns. *Drying Technology*, 18(8), 1865–1877.
- Nijdam, J. J., and Keey, R. B. (1996). Influence of local variations of air velocity and flow direction reversals on the drying of stacked timber boards in kilns. *Chemical Engineering Research and Design*, 74(8), 882–892.
- Noworyta, J. (2006). Analiza prędkości przepływu powietrza w załadunku suszarek typu ETR firmy NARDI. Maszyn. Praca magisterska Katedra Mechaniki i Techniki Ciepłej. AR, Poznań.
- Oliveira, L. C. (2003). Drying sorted spruce-pine-fir (spf) lumber. W: Proceedings. 8th IUFRO Int. Conf. “Wood Drying”, 24–29 August, Brasov, Romania (s. 178–184).
- Pang, S. (2002a). Effect of sawing pattern on lumber drying: model simulation and experimental investigation. *Drying Technology*, 20(9), 1769–1787.
- Pang, S. (2002b). Investigation of effects of wood variability and rheological properties on lumber drying: application of mathematical models. *Chemical Engineering Journal*, 86(1–2), 103–110.
- Pazdrowski, W. (2004). Udział bielu i twardego w strzałach sosen zwyczajnych (*Pinus sylvestris* L.). *Sylwan*, 3, 21–27.
- Pinchevska, O., Spirochkin, A., Sedliačik, J., Oliynyk, R. (2016). Quality assessment of lumber after low temperature drying from the view of stochastic process characteristics. *Wood Research*, 61(6), 871–884.
- PN-77/D-04100 Drewno. Oznaczanie wilgotności.
- PN-77/D-04101 Drewno. Oznaczanie gęstości.
- PN-EN 12831:2006 – wersja polska. Instalacje ogrzewcze w budynkach – Metoda obliczania projektowego obciążenia cieplnego.
- PN-EN 13183-1: 2004 – wersja polska. Wilgotność sztuki tarcicy. Część 1: Oznaczanie wilgotności metodą suszarkowo-wagową.
- PN-EN 13183-2:2004 – wersja polska. Wilgotność sztuki tarcicy. Część 2: Oznaczanie wilgotności za pomocą elektrycznego wilgotnościomierza oporowego.
- PN-EN 14298:2018-02 – wersja angielska. Tarcica – Ocena jakości suszenia.
- Popper, R., Niemz, P. (2009). Wasserdampfsorptionsverhalten ausgewählter heimischer und überseeischer Holzarten. *Bauphysik*, 31(2), 117–121.
- Popper, R., Niemz, P., Croptier, S. (2009). Adsorption and desorption measurements on selected exotic wood species. Analysis with the Hailwood-Horrobin model to describe the sorption hysteresis. *Wood Research*, 54(4), 43–56.
- Popper, R., Niemz, P., Torres, M. (2006). Einfluss des Extraktstoffanteils ausgewählter fremdländischer Holzarten auf deren Gleichgewichtsfeuchte. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 64(6), 491–496.
- Rackowski, J., Olek, W., Guzenda, R. (2000). Moisture evaporation rate from sapwood and heartwood samples of Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* Franco) green wood. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 58(4), 247–257.
- Rafalski, J. (1970). Technologiczne podstawy projektowania suszarni komorowych. Prace Instytutu Technologii Drewna. Poznań: Wyd. ITD.

- Raport o stanie lasów w Polsce 2016 (2017). Warszawa: Wyd. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych.
- Redman, A. L., Bailleres, H., Turner, I., Perré, P. (2016). Characterisation of wood-water relationships and transverse anatomy and their relationship to drying degrade. *Wood Science and Technology*, 50(4), 739–757.
- Repola, J. (2006). Models for vertical wood density of Scots pine, Norway spruce and birch stems, and their application to determine average wood density. *Silva Fennica*, 40(4), 673–685.
- Riehl, T., Welling, J. (2003). Taking advantage from oscillating climate conditions in industrial timber drying processes. W: *Proceedings. 8th IUFRO Int. Conf. "Wood Drying"*, 24–29 August 2003 Brasov, Romania (s. 171–177).
- Riley, S. R., Haslett, A. N. (1996). Reducing air velocity during timber drying. W: *Proceedings 5th International IUFRO Wood Drying Conference: Proceedings. Quality Wood Drying Through Process Modelling and Novel Technologies*. 13–17 August, Quebec City, Canada, (s. 301–308).
- Roszyk, E., Moliński, W., Kusiak, W., Prądczyński, W., Zborowska, M. (2016). Właściwości fizyczne drewna sosny zwyczajnej z Puszczy Noteckiej. *Sylwan*, 160(7), 547–555.
- Rozema, P., Schuijl, M. (2005). Pre-sorting of timber according to green moisture and density. W: *Tarvainen V. (red.) Measures for improving quality and shape stability of sawn softwood timber during drying and under service conditions. Best practice manual to improve straightness of sawn timber*. VTT Publications (s. 40–43).
- Rzadkowski S. (1967). *Suszenie tarcicy w suszarniach*. Warszawa: PWRiL.
- Salin, J.-G. (2001). Determination of the most economical drying schedule and air velocity in softwoods drying. W: *Proceedings Int. Conf. COST E15 "Advances in Drying of Wood"*, Athens, Greece (s. 1–10).
- Salin, J.-G. (2002). The timber final moisture content variation as a function of the natural variation in wood properties and of the position in the kiln load. An evaluation using simulation models. W: *Proc. 4th COST E15 Workshop on "Methods for improving drying quality of wood"*, 30–31 May, Santiago de Compostela, Spain.
- Salin, J.-G. (2005). The influence of some factors on the timber drying process, analyzed by a global simulation model. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 7(3), 195–204.
- Salin, J.-G. (2011). Inclusion of the sorption hysteresis phenomenon in future drying models. Some basic considerations. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 13(2), 173–182.
- Salin, J.-G., Wamming, T. (2008). Drying of timber in progressive kilns: Simulation, quality, energy consumption and drying cost considerations. *Wood Material Science and Engineering*, 3(1–2), 12–20.
- Sandland, K. M., Gjerdrum, P. (2010). Sorting of logs and planks before drying for improved drying process and panel board quality. W: *Proc. Int. Conf. COST E53 "The Future of Quality Control for Wood and Wood Products"*, May 4–7, 2010, Edinburgh, United Kingdom (s. 213–221).
- Schneider, A. (1966). *Vergleichende Untersuchungen über die natürliche Freilufttrocknung und die beschleunigte Freilufttrocknung mit Gebläsen von Schnittholz unter mitteleuropäischen Wetterverhältnissen*. Köln und Opladen: Westdeutscher Verlag.
- Sehlfstedt-Persson, M. (2000). The effect of drying temperature on subsequent moisture and dimensional changes fir Scots pine and Norway spruce. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 58(5), 353.

- Shahverdi, M., Oliveira, L., Avramidis, S. (2017). Kiln-drying optimization for quality pacific coast hemlock timber. *Drying Technology*, 35(15), 1867–1873.
- Sik, H., Choo, K., Zakaria, S., Ahmad, S., Yusoff, M., Chia, C. (2010). The influence of drying temperature on the hygroscopicity of rubberwood (*Hevea brasiliensis*). *Journal of Agricultural Science*, 2(1), 48–58.
- Simpson, W. T. (1973). Predicting equilibrium moisture content of wood by mathematical models. *Wood and Fiber Science*, 5(1), 41–49.
- Simpson, W. T. (1991). Dry kiln operator's manual. Agricultural handbook AH-188. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- Simpson, W. T. (1997). Effect of air velocity on drying rate of single eastern white pine boards. Research Note FPL-RN-266. Madison WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- Simpson, W. T. (1998). Equilibrium moisture content of wood in outdoor locations in the United States and worldwide. Research Note, FPL-RN-0268. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- Simpson, W. T. (2004). Estimating air drying times of lumber with multiple regression. Research Note, FPL-RN-0293. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- Simpson, W. T., Hart, C. A. (2001). Method for estimating air-drying times of lumber. *Forest Products Journal*, 51(11/12), 56–63.
- Skaar, C. (1988). *Wood-Water Relations*. Berlin: Springer.
- Skog, J., Vikberg, T., Oja, J. (2010). Sapwood moisture-content measurements in *Pinus sylvestris* sawlogs combining X-ray and three-dimensional scanning. *Wood Material Science and Engineering*, 5, 91–96.
- Smit, G. J. F., du Plessis, J. P., du Plessis, J. P. Sr. (2007). Modelling of airflow through a stack in a timber-drying kiln. *Applied Mathematical Modelling*, 31(2), 270–282.
- Spalt, H. (1958). The fundamentals of water vapor sorption by wood. *Forest Products Journal*, 8(10), 288–295.
- Stamm, A. J., Loughborough, W. K. (1935). Thermodynamics of the swelling of wood. *The Journal of Physical Chemistry*, 39(1), 121–132.
- Stanish, M. (2008). Application of wood drying simulation models in commercial lumber manufacturing. *Drying Technology*, 26(9), 1089–1096.
- Steiner, Y., Øvrum, A. (2010). Pre-sorting for density in drying bathes of Norway spruce boards. Proc. Int. Conf. COST E53 “The Future of Quality Control for Wood and Wood Products”, May 4–7, 2010, Edinburgh, United Kingdom (s. 22–29).
- Steiner, Y., Vestøl, G. I. (2011). Impact of various measures to optimize the air velocity in an industrial wood-drying process. *Wood Material Science and Engineering*, 6(1–2), 15–22.
- Strømdahl, K. (2000). *Water sorption in wood and plant fibres*. Kgs. Lyngby, Denmark: Technical University of Denmark (DTU). (Danmarks Tekniske Universitet. Institut for Baerende Konstruktioner og Materiale. Serie R).
- Sugimori, M., Hayashi, K., Takechi, M. (2006). Sorting sugi lumber by criteria determined with cluster analysis to improve drying. *Forest Products Journal*, 56(2), 25–29.

- Szewczyk, G. (2000). Wpływ szerokości stosu na warunki suszenia tarcicy w suszarkach komorowych. Maszyn. Praca magisterska Katedra Hydrotermicznej Obróbki i Modyfikacji Drewna. AR, Poznań.
- Tanaka, T., Kawai, Y. (2013). A new method for nondestructive evaluation of solid wood moisture content based on dual-energy X-ray absorptiometry. *Wood Science and Technology*, 47(6), 1213–1229.
- Tarvainen, V. (2005). Measures for improving quality and shape stability of sawn softwood timber during drying and under service conditions (VTT).
- Taylor, J. R. (1997). An introduction to error analysis: the study of uncertainties in physical measurements. Sausalito: University Science Books.
- Taylor, A. M., Gartner, B. L., Morrell, J. J. (2002). Heartwood formation and natural durability – a review. *Wood and Fiber Science*, 34(4), 587–611.
- Teischinger, A. (1987). Raumklimaregulierung durch Holz. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 45, 1, 36.
- Tomczak, A., Jelonek, T., Zoń, L. (2010). Porównanie wybranych właściwości fizycznych drewna młodocianego i dojrzałego sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) z drzewostanów rębnych. *Sylvan*, 154(12), 809–817.
- Tomczak, A., Jelonek, T. (2014). Green density of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) sapwood coming from selected stands north-western Poland. *Forestry Letters*, 107, 5–7.
- Torgeson, O. W. (1940). The drying rate of sugar maple as affected by relative humidity and air velocity. Research Report FPL 1274. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- Trendelenburg, R. (1939). *Das Holz als Werkstoff*. München: Springer-Verlag.
- Trübswetter, T. (2006). *Holz Trocknung*. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag.
- Usenius, A., Holmila, P., Heikkilä, A., Usenius, T. (2010). Sawmilling and sawing process in the future. W: Proc. Int. Conf. COST E53 “The Future of Quality Control for Wood and Wood Products”, May 4-7, 2010, Edinburgh, United Kingdom (s. 164–172).
- Vahtikari, K., Rautkari, L., Noponen, T., Lillqvist (née Laine), K., Hughes, M. (2017). The influence of extractives on the sorption characteristics of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Journal of Materials Science*, 52(18), 10 840–10 852.
- Vikberg, T., Elustondo, D. (2016). Basic density determination for Swedish softwoods and its influence on average moisture content of wood packages estimated by measuring their mass. *Wood Material Science and Engineering*, 11(4), 248–253.
- Vikberg, T., Hägg, L., Elustondo, D. (2015). Influence of fan speed on airflow distribution in a batch kiln. *Wood Material Science and Engineering*, 10(2), 197–204.
- Vintila, E. (1939). Untersuchungen über Raumgewicht und Schwindmaß von Früh- und Spätholz bei Nadelhölzern. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 2(10), 345–357.
- Wada, N., Avramidis, S., Oliveira, L. C. (2014). Internal moisture evolution in timbers exposed to ambient conditions following kiln drying. *European Journal of Wood and Wood Products*, 72, 377–384.
- Wagenführ, R. (2007). *Holzatlas*. 6., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Mit zahlreichen Abbildungen. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag.

- Walczak, M. (2001). Analiza wpływu intensywności procesu suszenia na dynamikę spadku wilgotności w materiałach stycznych i promieniowych. Maszyn. Praca magisterska Katedra Hydrotermicznej Obróbki i Modyfikacji Drewna, AR, Poznań.
- Walker, J. C. F. (1993). Primary wood processing. London: Chapman & Hall.
- Wallace, J., Avramidis, S. (2016). Impact of airflow on hem-fir kiln drying. *Drying Technology*, 34(11), 1354–1358.
- Wanin, S. (1953). Nauka o drewnie. Warszawa: PWRiL.
- Watanabe, K., Mansfield, S. D., Avramidis, S. (2011). Application of near-infrared spectroscopy for moisture-based sorting of green hem-fir timber. *Journal of Wood Science*, 57(4), 288–294.
- Weichert, L. (1963). Untersuchungen über das Sorption-und Quellungsverhalten von Fichte, Buche und Buchen-Preßvollholz bei Temperaturen zwischen 20° und 100° C. *European Journal of Wood and Wood Products*, 21(8), 290–300.
- Welling, J. (1996). Zur Ermittlung der Trocknungsqualität im Feldversuch. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 54(5), 307–311.
- Welling, J. (2010). Dried timber – how to specify correctly. European Drying Group (EDG) and COST E53, (www.coste53.net).
- Wengert, E. M. (1976). Predicting average moisture content of wood in a changing environment. *Wood and Fiber Science*, 7(4), 264–273.
- Werner, H. (1972). Aufgaben der Luft- und Waermeverleitung in Konvektionstrocknern. *Chemie Ingenieur Technik*, 44(8), 570–576.
- Widłak, H. (1991). Przyczyny i rozmiary strat materiałowych powodowanych wadami suszenia tarcicy. *Przemysł Drzewny*, 6, 19–21.
- Widłak, H. (1997). Dobór przepływu prędkości powietrza w suszarce w zależności od grubości suszonej tarcicy. *Przemysł Drzewny*, 7, 21–23.
- Widłak, H. (2001). Współzależność czynników procesowych i materiałowych w konwekcyjnym suszeniu tarcicy w suszarkach komorowych. *Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu. Rozprawy Naukowe. Zeszyt 312*.
- Wilhelmsson, L., Arlinger, J., Spångberg, K., Lundqvist, S.-O., Grahn, T., Hedenberg, Ö., Olsson, L. (2002). Models for predicting wood properties in stems of *Picea abies* and *Pinus sylvestris* in Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 17(4), 330–350.
- Witkowska, J. (1997). Regionalna zmienność gęstości sosny zwyczajnej. Materiały XI Konferencji Naukowej Wydziału Technologii Drewna SGGW, Drewno – materiał ekologiczny, Warszawa, 18–19 listopada, 49–54.
- Witkowska, J., Lachowicz, H. (2013). Zmienność gęstości umownej drewna sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) w zależności od wybranych czynników. *Sylvan*, 157(5), 336–347.
- Wood Handbook (1955). Basic information on wood as a material of construction with data for its use in design and specification. Agriculture Handbook no. 72. Forest Products Laboratory, Forest Service, U. S. Department of Agriculture, Washington D. C. 528 p.
- Wood Handbook (1999). Wood as an engineering material, General Technical Report FPL-GTR-113. WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.

Wood Handbook (2010). Wood as an engineering material, General Technical Report FPL-GTR-190. WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.

Woś, A. (1999). Klimat Polski. Warszawa: Wyd. Nauk. PWN.

Zobel, B. J., Buijtenen, J. P. (1989). Wood variation. Its causes and control. Berlin: Springer.