

**ARKADIUSZ TOMCZAK, TOMASZ JELONEK, NORBERT LESZCZYŃSKI, ROBERT KORZENIEWICZ**

## Naturalne suszenie surowca drzewnego w miejscu pozyskania\*

Natural drying of wood in the cutting area

### ABSTRACT

Tomczak A., Jelonek T., Leszczyński N., Korzeniewicz R. 2017. Naturalne suszenie surowca drzewnego w miejscu pozyskania. Sylwan 161 (11): 898-908.

Wood obtained from freshly cut trees has a high moisture content and therefore its mass per volume unit is higher than the mass of dry wood. The natural drying is a simple and effective method of weight (moisture content) reduction, making a better use of the vehicle's payload, and thus reducing costs, including environmental costs. The conclusion is based on simulations and analyzes attempting to evaluate different solutions. As evidenced, the drying process of logs depends on numerous factors, which entails attempts at development of an optimal logging method, especially concerning energy wood, allowing for maximum value growth in as little time as possible. The suggestions cover various forms of logging (of whole trees, long timber), arranging (in piles, bundles), storing (in stands, by the roadside near cutting areas), and protection. Combined methods such as storing under canvas for winter only or storing in cutting areas and later in piles at the exit road also work in practice, but require more funds because their cost is determined by the number of stages composing the whole process. In case of wood, development of an optimal and simultaneously universal method used to prepare the lumber for transport and its delivery with consideration of as little environmental impact as possible is complicated. The numerous variables, some of which cannot be controlled or affected, create a considerable scientific problem as well. The authors covered in the presented literature review often stress the role of specific weather conditions accompanying an experiment or its location, the storage method, or lumber dimensions in the drying process. Storage time is perceived as equally important, but it is a derivative more or less determined by the previous variables. Previous studies of drying at the cutting area have been focused mainly on energy wood and less on industrial wood. They analysed the results of long-term storage and did not stress the potential advantages of short-term drying. Furthermore, we do not have sufficient information on species, including forest trees, which have a lower share in the volume of the logged wood. Advanced research can help establish the minimum mass (moisture content) with considerable impact on supply chain effectiveness improvement or evaluated various storing and drying methods. We reviewed reports explaining the impact of various factors on natural drying of wood, models and storage effects, and analyzing potential economic and environmental benefits.

### KEY WORDS

biomass, energy wood, industrial wood, storage, moisture content

---

\*Pracę zrealizowano w ramach badań finansowanych ze środków na utrzymanie potencjału badawczego Wydziału Leśnego UP w Poznaniu, przyznanych przez MNiSW.

## ADDRESSES

Arkadiusz Tomczak <sup>(1)</sup> – e-mail: arkadiusz.tomczak@up.poznan.pl

Tomasz Jelonek <sup>(1)</sup> – e-mail: tomasz.jelonek@up.poznan.pl

Norbert Leszczyński <sup>(2)</sup> – e-mail: norbert.leszczynski@up.lublin.pl

Robert Korzeniewicz <sup>(3)</sup> – e-mail: korzon@up.poznan.pl

<sup>(1)</sup> Katedra Użytkowania Lasu, Uniwersytet Przyrodniczy; ul. Wojska Polskiego 71A, 60-625 Poznań

<sup>(2)</sup> Katedra Maszyn Ogrodniczych i Leśnych, Uniwersytet Przyrodniczy; ul. Głębocka 28, 20-612 Lublin

<sup>(3)</sup> Katedra Hodowli Lasu, Uniwersytet Przyrodniczy; ul. Wojska Polskiego 71A, 60-625 Poznań

## Wstęp

Źródła surowca drzewnego są mocno rozproszone, dlatego przy jego pozyskaniu oraz gromadzeniu zużywa się pewną ilość paliw kopalnych, powodując emisję gazów cieplarnianych [Rafael i in. 2015]. W wielu krajach, aby realizować cele klimatyczne, bada się i wprowadza rozwiązania mające na celu optymalizację transportu drewna [Jäppinen i in. 2014]. Jednym z nich jest na przykład wyznaczanie najkrótszej trasy przejazdu. Biorąc pod uwagę kryterium odległości, do systemu sprzedaży surowca drzewnego w Państwowym Gospodarstwie Leśnym Lasy Państwowe wprowadzono tzw. geografie zakupów. Przedsiębiorcy odbierają zakupione sortymenty w miejscach, które położone są możliwie najbliżej ich zakładów produkcyjnych.

Kluczową rolę w bilansie energetycznym dostaw odgrywa też wilgotność drewna, która dotychczas była brana pod uwagę głównie w przypadku biomasy [van Dyken i in. 2009; Acuna i in. 2012; Sosa i in. 2015; Vasković i in. 2015]. Drewno w stanie świeżym charakteryzuje się bardzo wysoką wilgotnością, a tym samym dużo wyższą masą jednostki objętości niż drewno suche. Dlatego naturalne suszenie jest jedną z prostszych i bardzo skutecznych metod obniżania wilgotności, a tym samym masy drewna, co pozwala na bardziej efektywne wykorzystanie ładowności pojazdu. Do takiego wniosku skłaniają symulacje oraz analizy będące próbą oceny różnych rozwiązań pod kątem ewentualnych korzyści – zarówno ekonomicznych, jak i środowiskowych [Erber i in. 2012; Kanzian i in. 2016].

Mając na uwadze konieczność poszukiwania różnorodnych rozwiązań, których celem jest ograniczanie negatywnego wpływu człowieka na środowisko, w pracy scharakteryzowano czynniki wpływające na naturalne suszenie drewna, a także modele oraz efekty magazynowania wraz z analizą potencjalnych korzyści ekonomicznych i środowiskowych.

## Wilgotność i masa drewna w stanie świeżym

Określenie „drewno w stanie świeżym” dotyczy surowca bezpośrednio po pozyskaniu. Wtedy masa wody w jednostce objętości jest dużo wyższa niż masa drewna. Stosunek ten nie jest stały, ponieważ wilgotność drewna drzew rosnących zmienia się dobowo [Kubiak, Kosicki 1969; Kubiak 1972] i sezonowo. Ponadto zależy od gatunku, warunków siedliskowych [Tomczak, Jelonek 2015] czy też gęstości drewna w stanie suchym [Helińska-Raczkowska 1996; Fromm i in. 2001].

Zmiany wilgotności w ciągu doby pojawiają się niezależnie od zmian sezonowych i obejmują mniejszy zakres wartości. Różnice pomiędzy sezonami wahają się od kilku do kilkudziesięciu procent [Beedlow i in. 2007]. Millers i Magaznieks [2012] badali wilgotność bielu sosen lotewskich i stwierdzili, że w okresie zimowym była ona o około 17% wyższa niż latem. Według Kubiaka i Kosickiego [1969] różnica jest większa, w granicach 50-60%. U buka różnica wynosi około 20% [Janiczek, Bobrowicz 1952]. Ujmując ogólnie, wilgotność drewna drzew rosnących jest wysoka w miesiącach zimowych i niska w miesiącach letnich. Ze względu na ścisły związek

z wilgotnością analogiczne wahania dotyczą także gęstości drewna w stanie świeżym [Hultnäs i in. 2013].

Wyższą wilgotnością charakteryzuje się drewno drzew iglastych oraz liściastych o miękkim drewnie. Biel i twarde biel różnią się wilgotnością. U sosny i świerka biel ma wilgotność blisko trzykrotnie wyższą niż twarde biel [Millers 2013], natomiast u dębu dużych różnic pomiędzy drewnem bielastym i twarde bielowym się nie stwierdza [Cinotti 1989]. Na przekroju podłużnym pnia występują dwa maksima wilgotności – jedno u podstawy, drugie w części wierzchołkowej. Różnice występują także pomiędzy poszczególnymi częściami drzewa: pniem, gałęziami i korzeniami [Cermak i in. 2007; Kraszkiewicz, Szpryngiel 2008].

U niektórych gatunków, w związku z procesem wykształcania twarde biel, duży wpływ na wilgotność drewna ma wiek [Clark, Daniels 2000], ponieważ jej obecność wpływa na całkowitą zdolność magazynowania wody. Na przykład u sosny wzrost udziału twarde biel z 18% w wieku 37 lat do 39% w wieku 143 lat wpływa na zmniejszenie wilgotności bezwzględnej pnia ze 108 do 86%, natomiast u świerka wzrost udziału twarde biel z 30 (37 lat) do 49% (143 lata) wiąże się ze spadkiem wilgotności ze 107 do 81% [Millers 2013]. Niższej wilgotności u starszych drzew iglastych nie można wiązać jedynie ze zmianami udziału drewna twarde bielowego. Cechą charakterystyczną tej grupy jest promieniowa zmienność gęstości drewna [Jelonek i in. 2009; Tomczak, Jelonek 2012; Wąsik i in. 2015]. Drewno o niższej gęstości jest bardziej porowate, ma więc wyższą pojemność wodną. U większości drzew drewno w górnej części pnia charakteryzuje się w porównaniu do odziomka niższą gęstością w stanie suchym. Zależność ta wyjaśniać może wyższą wilgotność [Kubiak, Grodecki 1977] lub wysoką gęstość surowca w stanie świeżym, który pozyskany był z wierzchołkowej części pnia [Tomczak i in. 2015a, b, 2016]. Oczywiście taki surowiec charakteryzuje się niewielką średnicą, co według wielu autorów jest jednym z kluczowych czynników wpływających na tempo wysychania [Visser i in. 2014; Anisimov i in. 2017]. Saralecos i in. [2014] wykazali, że w trakcie miesięcznego magazynowania wilgotność pni dąglęzjowych o średnicy 20 cm zmniejszyła się o 58%, a grubszych, o średnicy 44,7 cm, o około 34%. Z kolei Manzone [2015] nie stwierdził związku między dynamiką wysychania i średnicą pnia w przypadku surowca robinowego i topolowego.

## Naturalne suszenie drewna

Surowiec w miejscu pozyskania suszy się najczęściej w przypadku, gdy jest on przeznaczony na cele energetyczne. Niska wilgotność drewna energetycznego jest kluczową cechą dla wydajności produkcji zrębków, ich transportu, magazynowania i efektywności spalania [van Dyken i in. 2009; Cutshall i in. 2011; Spinelli i in. 2011; Acuna i in. 2012; van der Merwe i in. 2016].

Przygotowanie surowca energetycznego do przerobu wymaga długotrwałego, kilku- lub kilkunastomiesięcznego magazynowania. Cutshall i in. [2013] magazynowali surowiec energetyczny przez 4 i 8 tygodni – jego masa obniżyła się odpowiednio o 16 i 24%. Brand i in. [2011] stwierdzili, że optymalny czas magazynowania surowca pozyskanego pod koniec zimy i wiosną wynosi 4 miesiące. W późniejszym okresie zmiany wilgotności są nieistotne, istotnie wzrasta natomiast ryzyko deprecjacji surowca. Kubiak [1978] analizował zmiany wilgotności drewna bukowego przez 12 miesięcy. W pierwszym półroczu wilgotność bezwzględna gałęziówki spadła o około 12%, tyczek o około 28%, a w drugim odpowiednio o około 2 i 3%. Autor zaobserwował ponadto silne przebarwienia po 3 miesiącach i silny rozkład drewna po 6 miesiącach magazynowania. Biologiczny rozkład drewna jest zjawiskiem o różnej dynamice, zależnej od warunków przechowywania surowca. Erber i in. [2012] ocenili, że drewno sosnowe składowane w różnych porach roku traci średnio 0,35% suchej masy na miesiąc. Filbakk i in. [2011] podają wartości

wyższe, rzędu 1-3% na miesiąc. Routa i in. [2015a] dla świerkowych pozostałości zrębowych stwierdzili podobną – do 3% – utratę suchej masy na miesiąc magazynowania.

Zadawalające wyniki naturalnego suszenia można osiągnąć też w krótszym czasie. Garret [1985] ocenił, że u różnych gatunków drewna liściastego i iglastego magazynowanego latem przez okres dwóch tygodni przeciętna utrata wilgotności wynosiła około 4%. Tomczak i in. [2016] badali przez 14 dni od dnia pozyskania utratę masy i zmiany gęstości średniowymiarowego surowca sosnowego (drzewostan 67-letni). Doświadczenie przeprowadzono w okresie letnim, kiedy występowała stosunkowo wysoka temperatura oraz niska wilgotność. Jedynie w okresie opadów odnotowywano wyższą wilgotność, przy której surowiec wysychał wolniej. W trakcie badania masa 1 m<sup>3</sup> surowca spadła z 844 do 814 kg. Uzyskany wynik nie był statystycznie istotny. Istotną utratę masy w takim samym czasie magazynowania stwierdzono natomiast dla surowca bukowego, pozyskanego i magazynowanego również w okresie letnim. Gęstość wałków w dniu pozyskania wynosiła 942 kg/m<sup>3</sup>, a po 14 dniach magazynowania spadła do 890, czyli o 5,5%. Podobnie jak w przypadku sosny, podczas intensywnych opadów wilgotność surowca obniżała się w niewielkim stopniu lub nawet wzrastała [Tomczak i in. 2018]. Sytuacje, w których wilgotność surowca magazynowanego w miejscu pozyskania wzrasta, są obserwowane często, szczególnie jesienią i zimą [Nurmi, Hillebrand 2001, 2007; Laurila, Louhanen 2010; Filbakk i in. 2011; Routa i in. 2015a, b].

Warunki atmosferyczne, a w szczególności opady, są więc kluczowym czynnikiem wpływającym na zmiany wilgotności [Ciganas, Raila 2010], dlatego magazynując drewno w warunkach naturalnych, możemy osiągnąć różne efekty w tym samym czasie lub takie same efekty w różnym czasie. Wykorzystując dane meteorologiczne, można dość dokładnie monitorować cały proces suszenia [He i in. 2015]. Modele pozwalają na określenie parametrów składowanego surowca w różnych interwałach czasowych, często jednodniowych.

W Austrii na bazie rzeczywistych doświadczeń opracowane zostały modele dla sosny, buka i dębu. Drewno sosnowe o długości około 4,7 m i przeciętnej średnicy 15 cm zmagazynowano w stosie, przy czym dystans pomiędzy pierwszą warstwą drewna a gruntem wynosił 30 cm. Surowiec magazynowany był przez 14 miesięcy. W tym czasie jego wilgotność względna zmniejszyła się z początkowych 50,1 do 32,2% [Erber i in. 2012]. Bukowe drewno okrągłe przeznaczone na cele energetyczne, o długości około 4 m i przeciętnej średnicy 14-15 cm, także magazynowane było w stosach. Pomiary prowadzono w sposób ciągły przez 262 dni (I etap) i 454 dni (II etap). Wilgotność drewna badanego w I etapie zmniejszyła się o 21 punktów procentowych – z 43,5 do 22,5%, a w trakcie dłuższego magazynowania – z 41,3 do 20,2% [Erber i in. 2016]. Podobną analizę przeprowadzono dla drewna dębowego (długość około 4 m, przeciętna średnica około 16 cm, czas magazynowania 262 dni) i stwierdzono spadek wilgotności z 38,9 do 24,8%, czyli o 14,1 punktu procentowego [Erber i in. 2017].

Gatunki iglaste i liściaste o miękkim drewnie tracą wilgoć szybciej niż gatunki liściaste o drewnie twardym [Garret 1985]. Z przedstawionej przez Erbera i in. [2017] literatury wynika, że może to być skutkiem budowy drewna. Gatunki o pierścieniowo-naczyniowej budowie drewna, w tym dąb, charakteryzują się proporcjonalnie małą powierzchnią bielu w stosunku do twardzieli, dlatego w tym samym czasie zmiany wilgotności są w ich przypadku mniejsze niż na przykład u gatunków iglastych, charakteryzujących się znacznie szerszą strefą drewna bielastego. Można również założyć, że część bielasta pnia, z uwagi na swobodny przepływ wody, będzie wysychać szybciej niż twardziel, w której przepływ wody jest znikomy lub całkowicie zablokowany. Twardziel dębowa jest specyficzna, ze względu na wilgotność porównywalną do bielu [Cinotti 1989], ponadto wysycha znacznie wolniej niż u innych gatunków. Rogers [1981]

magazynował drewno *Pinus taeda* L. i *Quercus alba* L. przez 3 miesiące. W tym czasie wilgotność twardzieli sosnowej zmniejszyła się o około 50%, a dębowej o około 7%.

Golser i in. [2005] uważają, że przyczyną wolniejszego wysychania surowca dębowego jest gruba kora. Niestety, brakuje empirycznych dowodów na potwierdzenie tej tezy. Wiadomo natomiast, że sama obecność kory, niezależnie od jej grubości i struktury, wpływa znacznie na zmiany i tempo utraty wilgotności drewna. Röser i in. [2011] przeprowadzili doświadczenia w różnych częściach Europy, porównując naturalne wysychanie drewna dla bioenergii. Badania objęły kilka gatunków drzew iglastych i liściastych. Wykazano między innymi, że okorowane pnie drzew liściastych schły szybciej, a różnica w porównaniu do pni nieokorowanych wynosiła około 30 g/kg na miesiąc.

Drzewa pozostawione w całości, nieokrzeseane, przez pewien czas od momentu ścięcia zachowują zdolność do transpiracji. Przy braku pobierania względna zawartość wody w pniu małeje [Barrs 1968]. Suszenie przez transpirację (transpirational drying) to metoda tradycyjna i jak wykazują badania skuteczna, ponieważ surowiec pozyskany i magazynowany w postaci całych drzew traci wilgoć szybciej niż surowiec okrzeseany i zmagazynowany w stosie [Gislerud 1990; Stokes i in. 1993; Nurmi, Hillebrand 2007; Civitarese i in. 2015; Krigstin, Wetzel 2016; Tomczak i in. 2018]. Efekty uzyskiwane za pomocą tej metody uzależnione są oczywiście od warunków atmosferycznych, jednak nie mniejszy wpływ ma też gatunek drewna. Saralecos i in. [2014] dla daglezi uzyskali różnicę 6%. Patterson i Post [1980] stwierdzili, że przez 3 tygodnie magazynowania wilgotność drewna brzozy (*Betula papyifera* Marsh) zmniejszyła się o 20%, natomiast nie odnotowali istotnej różnicy w przypadku dębu (*Quercus rubra* L.). W metodzie transpiracyjnej ubytki masy są szczególnie wyraźne na początku okresu magazynowania, przez około 2 tygodnie [Stokes i in. 1993]. W pewnym momencie ilość wody w pniu staje się niewystarczająca do podtrzymania procesów fizjologicznych, co prowadzi do utraty turgoru, więdnienia liści i prawdopodobnie do zmniejszenia tempa wysychania. Nie wiadomo, czy od tego momentu okresowe różnice wilgotności będą podobne, czy surowiec zmagazynowany w postaci całych drzew w dalszym ciągu będzie wysychał szybciej, a w postaci gotowych sortymentów wolniej, czy też może sytuacja będzie odwrotna.

Z oczywistych względów zastosowanie metody transpiracyjnej ogranicza się do okresu letniego. Latem drewno schnie zdecydowanie szybciej niż zimą [Stokes i in. 1987; Klepac i in. 2008; Visser i in. 2014]. Zdarzają się jednak sytuacje, w których wilgotność magazynowanego surowca wzrasta – latem podczas intensywnych opadów i w okresach po ich ustaniu, a jesienią i zimą ze względu na częste opady oraz generalnie wysoką wilgotność powietrza.

Zmiany wilgotności są bardzo dynamiczne na początku okresu magazynowania [Sinclair i in. 1984; Garret 1985]. Latem 1 m<sup>3</sup> surowca bukowego zmagazynowanego w stosie traci w ciągu 24 godzin około 10 kg masy, w trakcie następnej doby około 8 kg. W kolejnych dniach zmiany są mniejsze [Tomczak i in. 2018]. W podobnym doświadczeniu przeprowadzonym dla surowca sosnowego dobowy spadek masy przez pierwszych dziewięć dni magazynowania był wyższy niż w okresie późniejszym [Tomczak i in. 2016]. Kubiak [1977], badając tyczki sosnowe, stwierdził, że wilgotność w ciągu 10 dni spadła o 18%. Po okresie dynamicznych zmian, zachodzących przez około 40-50 dni, wilgotność surowca stabilizuje się.

Ostateczne efekty w znacznej mierze zależą też od przyjętej metody suszenia lub zabezpieczenia przed opadami. Erber i in. [2012] badali wysychanie okrągłego surowca sosnowego zmagazynowanego w stosie. Zimą zmiany wilgotności drewna były niewielkie. Ich znaczący wzrost zaobserwowano w marcu i miesiącach następnych (1,9%). W czerwcu i lipcu wilgotność malała o około 4,5% na miesiąc, w kolejnych miesiącach o 1%, a w listopadzie wzrosła o 1,6%. Przedsta-

wione wartości to średnie dla całego stosu, natomiast w jego poszczególnych częściach ostateczne efekty mogą się różnić. W doświadczeniu Erbera i in. [2012] szybciej schły pnie z górnej i dolnej części stosu. Natomiast Kubiak [1977], który analizował zmiany wilgotności tyczek sosnowych ułożonych w stosie, podaje, że po 180 dniach wilgotność bezwzględna dolnej warstwy stosu wynosiła 131,06%, środkowej 88,27%, a górnej 41,57%. Przedstawionych zależności nie można jednak odnieść do wszystkich rodzajów drewna [Manzone 2015]. W przypadku spakietowanych pozostałości pozrębowych (sosna, świerk) ułożonych w stosach sytuacja jest odwrotna. Niższą wilgotnością charakteryzował się surowiec zmagazynowany w centralnej części stosu [Filbakk i in. 2011]. Filbakk i in. [2011] stwierdzili również, że pozostałości pozrębowe ułożone w luźne stosy wysychały nieco szybciej niż pozostałości spakietowane. Dodatkowo w doświadczeniu badano wpływ zabezpieczenia przed opadami, przykrywając część surowca specjalnym rodzajem papieru.

Przykrywanie (np. plandekami) chroni surowiec przed opadami. Zabezpieczone w ten sposób drewno wcześniej osiąga założony poziom wilgotności, co skraca czas magazynowania. Jego wilgotność w porównaniu do stosów niezabezpieczonych będzie niższa, gdy czas magazynowania będzie identyczny [Nurmi, Hillebrand 2007; Röser i in. 2011; Erber i in. 2012]. Różnice, w zależności od warunków atmosferycznych, rodzaju i sposobów przygotowania surowca, wahają się od kilku do kilkunastu procent [Jirjis 1995; Nurmi, Hillebrand 2001]. Jednak efekty zabezpieczania nie zawsze są zgodne z oczekiwaniami, co oznaczać może, że na proces utraty wilgotności wpływają inne, bardziej istotne czynniki. Visser i in. [2014] porównywali latem i zimą zmiany wilgotności surowca sosnowego (*Pinus radiata* D. Don), który podzielili według grubości na pnie o średnicy mniejszej i większej niż 35 cm. Następnie część pni została połupana. Ułożony w stosach surowiec przykryto plastikowymi plandekami albo pozostawiono bez zabezpieczenia. Latem najlepiej wysychało drewno cieńsze magazynowane w stosach niezabezpieczonych, najgorzej drewno grube i zabezpieczone. Zimą istotnych różnic nie stwierdzono. Generalnie drewno o mniejszej średnicy wysycha szybciej, natomiast odwrotny efekt zabezpieczenia wynikać może z rodzaju materiału użytego do przykrycia, ewentualnie ze specyficznych warunków atmosferycznych panujących w czasie doświadczenia.

Wysychanie surowca zależy od wielu czynników [Erber, Küchmaier 2017], dlatego podejmowane są próby opracowania optymalnego modelu pozyskania, szczególnie drewna energetycznego, pozwalające uzyskać maksymalny wzrost wartości w jak najkrótszym czasie [Brand i in. 2011; Acuna i in. 2012; Vasković i in. 2015]. Proponowane są różne sposoby pozyskania (całych drzew, drewna długiego, łupanego), przygotowania (w stosach, pakietach), magazynowania (w drzewostanie, na składnicach przyrębowych) i zabezpieczania [Visser i in. 2014]. W praktyce sprawdzają się również metody kombinowane, na przykład przykrywanie plandekami tylko na okres zimowy czy też magazynowanie na powierzchni zrębowej, a później w stosach przy drodze wywozowej. Ich stosowanie wymaga jednak większych nakładów finansowych [Nurmi, Hillebrand 2007; Acuna i in. 2012], ponieważ koszt zależy od liczby etapów, z których składa się proces produkcyjny.

## Transport i środowisko

Rzeczywista masa surowca drzewnego jest ściśle powiązana z wilgotnością. Wymiernym efektem naturalnego suszenia jest więc jej spadek, co z kolei może istotnie wpływać na koszt transportu [Bennamont i in. 2017]. Kanzian i in. [2016] obliczyli, że przez obniżenie wilgotności drewna energetycznego z 40 do 30% zysk wzrasta o 4 euro za tonę, natomiast emisja GHG na tonę suchej masy spada o około 4%. W analizie wzięto pod uwagę warianty różniące się kolej-

nością lub liczbą etapów, z których składał się łańcuch dostaw. Badania obejmowały obszar, na którym zlokalizowane było 356 miejsc magazynowania, 119 składnic i 228 odbiorców. Liczba transportów wzrasta wraz ze wzrostem wilgotności drewna, lecz nieliniowo. Na przykład zmiana wilgotności z 30 do 37,5% spowoduje, że liczba transportów wzrośnie o około 7%, a przy drewnie świeżym wzrost wilgotności o 5% (z 45 do 50%) będzie wiązał się z 10-procentowym wzrostem liczby transportów.

Kanzian i in. [2013], analizując różne warianty pozyskania, przygotowania i magazynowania surowca energetycznego, zwrócili uwagę na relację między maksymalną objętością ładunku i dopuszczalną masą całkowitą (DMC) pojazdu. Masa surowca w stanie świeżym jest na tyle wysoka, że przy ograniczonej DMC ładowność pojazdu nie będzie wykorzystana maksymalnie. Erber i in. [2016] przeprowadzili symulację korzyści rocznego magazynowania surowca bukowego. W tym czasie wartość energetyczna drewna wzrosła z 2,65 do 3,57 kWh/kg, a cena, ze względu na niższą wilgotność, o kilka euro za tonę. W dalszej części symulacji autorzy przyjęli, że przy takiej samej ładowności pojazdów (23,8 t) w całym okresie magazynowania miąższość zrębków przypadająca na jeden transport wzrosła z 55,8 m<sup>3</sup> (65,3% możliwości ładunkowych) do 77,3 m<sup>3</sup> (90,4% możliwości ładunkowych). Tym samym liczbę transportów zredukowano z 9 do 7. Busenius i in. [2015] proponują inne rozwiązanie – zwiększenie DMC. W ten sposób, przy określonej miąższości drewna, można wpłynąć na całkowitą liczbę przejazdów z ładunkami i bez nich, a tym samym zredukować zużycie energii oraz ograniczyć emisję gazów cieplarnianych. Paradoksalnie, ponieważ wraz ze wzrostem masy ładunku wzrasta zużycie paliwa. W skali globalnej korzyści są jednak większe, gdy zwiększymy masę ładunku i DMC oraz ograniczymy liczbę przejazdów. Istotnym elementem prezentowanej symulacji jest przyjęta przez autorów wilgotność drewna. Pod uwagę wzięto bowiem masę w stanie powietrzno-suchym. Przy takim założeniu proponowane rozwiązanie ma pewne ograniczenia, przede wszystkim związane z czasem potrzebnym na osiągnięcie odpowiednio niskiej wilgotności i masy ładunku. W przypadku wilgotności wyższej niż w stanie powietrzno-suchym, a taką ma zazwyczaj drewno przemysłowe w momencie załadunku i w czasie transportu, objętość ze względu na masę będzie niższa. Nie wiadomo więc, jaki jest minimalny ubytek masy mogący istotnie wpłynąć na liczbę ładunków i znaczące ograniczenie kosztów transportu.

Każda analiza łańcucha dostaw opiera się na realnych danych, specyficznych dla danego obszaru. Stampfer i Kanzian [2006] oraz Erber i in. [2016] badali warunki gospodarowania biomasą w Austrii, natomiast Busenius i in. [2015] zaprezentowali model dla Bawarii. Acuna i in. [2012] analizowali wpływ wilgotności na różne warianty przechowywania, rozdrabniania i transportu drewna energetycznego w Finlandii, Rafael i in. [2015] w Portugalii, a Bennamoun i in. [2017] w Kanadzie. Z kolei w pracy Sosy i in. [2015] znaleźć można studium przypadku dla wybranego obszaru Irlandii. W każdym kraju warunki gospodarcze, prawne (DMC) i pozostałe uwarunkowania są nieco inne, dlatego model łańcucha dostaw musi być każdorazowo modyfikowany i dostosowany do specyfiki regionu.

## Podsumowanie

W procesie naturalnego suszenia nadrzędną rolę odgrywają warunki atmosferyczne, specyficzne w czasie doświadczenia lub dla jego lokalizacji. Istotne są także czas i sposób magazynowania oraz wymiary i rodzaj surowca. Dynamiczny spadek wilgotności obserwuje się na początku okresu magazynowania, później zmiany obejmują niewielki zakres i co istotne – przy dużej ilości opadów może pojawić się jej okresowy wzrost. Dobrym rozwiązaniem zapobiegającym wzrostowi wilgotności jest przykrywanie surowca plandekami lub innymi specjalistycznymi materiałami.

Wiąże się to jednak ze wzrostem kosztów pozyskania i jest czasami stosowane jedynie w przypadku surowca energetycznego. Generalnie dotychczasowe badania nad procesami suszenia skupiały się głównie na surowcu energetycznym, w małym zakresie na przemysłowym. W ostatnim czasie można jednak dostrzec zmianę tego trendu. W przypadku drewna okrągłego przeznaczonego na przerób przemysłowy (tarcica, płyty itd.) potencjalne korzyści z naturalnego suszenia można uzyskać tylko w krótkim czasie, ponieważ magazynowanie długoterminowe nie jest wskazane ze względu na wysokie ryzyko deprecjacji. Brak jest dostatecznej wiedzy z tego zakresu, szczególnie w odniesieniu do liściastych gatunków lasotwórczych. Istniejące modele mają charakter ogólny, a jak dowodzą badania, powinny mieć charakter regionalny. Uzyskana wiedza mogłaby być wykorzystana do optymalizacji kolejnego elementu łańcucha dostaw. Po regionalizacji zakupów i skróceniu odległości transportowych celowe wydaje się określenie minimalnego ubytku masy (wilgotności), istotnie wpływającego na tzw. liczbę ładunków (transportów). Masa surowca zmniejsza się wraz ze spadkiem wilgotności drewna. W tej sytuacji przy stałej dopuszczalnej masie całkowitej pojazdu miąższość transportowanego surowca powinna być różna, zależnie od czasu i warunków magazynowania. Nie jest to jednak możliwe przy stosowaniu uniwersalnych wskaźników (jak to ma miejsce obecnie), tym bardziej dla surowca o różnych wymiarach. Wielu autorów podkreśla, że na tempo wysychania wpływa średnica drewna. Wiąże się to nie tylko z powierzchnią parowania, ale przede wszystkim z gęstością – wyższą wilgotnością charakteryzuje się drewno o mniejszej gęstości. Jest to zależność szczególnie wyraźna w przypadku gatunków iglastych, mających w Polsce największy udział w miąższości pozyskiwanego drewna. Dlatego drewno o mniejszej średnicy charakteryzuje się wyższą masą, szczególnie w stanie świeżym, w przeliczeniu na m<sup>3</sup> (gęstością), a tempo jego wysychania jest zdecydowanie wyższe niż w przypadku drewna o średnicy większej. Przy bardzo wielu czynnikach wpływających na gęstość surowca uzasadnione jest uwzględnienie w przelicznikach przynajmniej jego przeciętnej średnicy.

## Literatura

- Acuna M., Anttila P., Sikanen L., Prinz R., Asikainen A. 2012. Predicting and controlling moisture content to optimise forest biomass logistics. *Croatian Journal of Forest Engineering* 33 (2): 225-238.
- Anisimov P., Onuchin E., Vishnievskaja M. 2017. Modeling pine and birch whole tree drying in bunches in the cutting area. *Croatian Journal of Forest Engineering* 38 (1): 11-17.
- Barrs H. D. 1968. Determination of water deficits in plant tissue. W: Kozłowski T. T. [red.]. *Water deficits and plant growth*. V. 1. New York, Academic Press. 235-368.
- Beedlow P. A., Tingey D. T., Waschmann R. S., Phillips D. L., Johnson M. G. 2007. Bole water content shows little seasonal variation in century-old Douglas-fir trees. *Tree Physiology* 27: 737-747.
- Bennamoun L., Afzal M. T., Chauhan S. 2017. Assessment of moisture effect in simulating forest biomass supply chain strategy: case study on New Brunswick, Canada. *Croatian Journal of Forest Engineering* 38 (1): 19-31.
- Brand M. A., Bolzon de Muñiz G. I., Ferreira W., Brito J. O. 2011. Storage as a tool improve wood fuel quality. *Biomass and Bioenergy* 35 (7): 2581-2588.
- Busenius M., Engler B., Smaltschinski T., Opferkuch M. 2015. Consequences of increasing payloads on carbon emissions – an example from the Bavaria State Forest Enterprise (BaySF). *Forestry Letters* 108: 7-14.
- Cermak J., Kucera J., Bauerle W. L., Phillips N., Hinckley T. M. 2007. Tree water storage and its diurnal dynamics related to sap flow and changes in stem volume in old-growth Douglas-fir trees. *Tree Physiology* 27: 181-198.
- Ciganas N., Raila A. 2010. Analysis of heating value variations in stored wood. *Proceedings of the Conference 'Engineering for rural development'*. 27-28 May 2010, Jelgava.
- Cinotti B. 1989. Winter moisture content and frost-crack occurrence in oak trees (*Quercus petraea* Liebl. and *Q. robur* L.). *Annales des sciences forestières, INRA/EDP Sciences* 46 (Suppl): 614-616.
- Civitarese V., Spinelli R., Barontini M., Gallucci F., Santangelo E., Acampora A., Scarfone A., Del Giudice A., Pari L. 2015. Open-air drying of cut and windrowed short-rotation poplar stems. *Bioenergy Research* 8 (4): 1614-1620.
- Clark A. III, Daniels R. F. 2000. Estimating moisture content of tree-length roundwood. *Pulping/Process and Product Quality Conference*, Sheraton Boston.

- Cutshall J., Greene D., Baker S., Mitchell D. 2011. Transpirational drying effects on energy and ash content from whole-tree chipping operations in a southern pine plantation. Proceedings of the 34<sup>th</sup> Council on Forest Engineering annual meeting, June 2011. Quebec City, Canada.
- Cutshall J., Greene J. B., Dale W., Baker S. A. 2013. Transpirational drying effects on energy and ash content from whole-tree southern pine plantation chipping operations. *Southern Journal of Applied Forestry* 37 (3): 133-139.
- van Dyken S., Bakken B. H., Skjelberd H. I., 2009. Linear mixed-integer models for biomass supply chains with transport, storage and processing. *Energy* 35 (3): 1338-1350.
- Erber G., Holzleitner F., Kastner M., Stampfer K. 2017. Impact of different time interval bases on the accuracy of meteorological data based drying models for oak (*Quercus* L.) logs stored in piles for energy purposes. *Croatian Journal of Forest Engineering* 38 (1): 1-9.
- Erber G., Kanzian C., Stampfer K. 2012. Predicting moisture content in a pine logwood pile for energy purposes. *Silva Fennica* 46 (4): 555-567.
- Erber G., Kanzian C., Stampfer K. 2016. Modelling natural drying of European beech (*Fagus sylvatica* L.) logs for energy based on meteorological data. *Scandinavian Journal of Forest Research* 31 (3): 294-301. DOI: 10.1080/02827581.2015.1080294.
- Erber G., Küchmaier M. 2017. Research trends in European forest fuel supply chains: a review of the last ten years (2007-2017). Part one: harvesting and storage. *Croatian Journal of Forest Engineering* 38 (2): 269-278.
- Filbakk T., Høibø O. A., Dibdiakova J., Nurmi J. 2011. Modelling moisture content and dry matter loss during storage of logging residues for energy. *Scandinavian Journal of Forest Research* 26 (3): 267-277. DOI: 10.1080/02827581.2011.553199.
- Fromm J. H., Sautter I., Matthies D., Kremer J., Schumacher P., Ganter C. 2001. Xylem water content and wood density in spruce and oak trees detected by high-resolution computed tomography. *Plant Physiology* 127 (2): 416-425.
- Garret L. D. 1985. Delayed processing of felled trees to reduce moisture content. *Forest Products Journal* 35 (3): 55-59.
- Gislerud O. 1990. Drying and storing of comminuted wood fuels. *Biomass* 22: 229-244.
- Golser M., Pichler W., Hader F. 2005. *Energieholztrocknung*. *Holzforschung*, Wien.
- He X., Lau A., Sokhansanj S., Lim J., Bi X. 2015. Application of a model to simulate the wetting and drying processes of woody biomass in the field. *Drying Technology* 33 (4): 434-442.
- Helińska-Raczowska L. 1996. Zmienność wilgotności i gęstości drewna w świeżo ściętych pniach brzozy (*Betula pendula* Roth.). *Folia Forestalia Polonica Series B* 27: 23-30.
- Hultnäs M., Nylander M., Ågren A. 2013. Predicting the green density as a means to achieve the volume of Norway spruce. *Scandinavian Journal of Forest Research* 28 (3): 257-265. DOI: 10.1080/02827581.2012.735697.
- Janiczek M., Bobrowicz E. 1952. Wilgotność drewna świeżego buków pomorskich i karpaccich. *Prace IBL* 78: 44.
- Jäppinen E., Korpinen O. J., Ranta T. 2014. GHG emissions of forest-biomass supply chains to commercial-scale liquid-biofuel production plants in Finland. *GCB Bioenergy* 6 (3): 290-299.
- Jelonek T., Pazdrowski W., Tomczak A. 2009. The effect of biological class and age on physical and mechanical properties of European larch (*Larix decidua* MILL.) in Poland. *Wood Research* 54 (1): 1-14.
- Jirjis R. 1995. Storage and drying of wood fuels. *Biomass and Bioenergy* 9: 181-190.
- Kanzian C., Kühmaier M., Erber G. 2016. Effects of moisture content on supply costs and CO<sub>2</sub> emission for an optimized energy wood supply network. *Croatian Journal of Forest Engineering* 37 (1): 51-60.
- Kanzian C., Kühmaier M., Zazgornik J., Stampfer K. 2013. Design of forest energy supply networks using multi-objective optimization. *Biomass and Bioenergy* 58: 294-302.
- Klepac J., Rummer B., Seixas F. 2008. Seasonal effect on moisture loss of loblolly pine. Proceedings of the 31<sup>st</sup> Council on Forest Engineering Annual Meeting at Charleston, South Carolina.
- Kraszkiewicz A., Szpryngiel M. 2008. Wilgotność drewna robinii akacjowej w aspekcie wykorzystania na cele energetyczne. *Inżynieria Rolnicza* 9 (107): 159-164.
- Krigstin S., Wetzel S. 2016. A review of mechanisms responsible for changes to stored woody biomass fuels. *Fuel* 175: 75-86.
- Kubiak M. 1972. Dobowe wahania wilgotności drewna drzew na pniu w młodniku. *Sylwan* 116 (1): 23-28.
- Kubiak M. 1977. Zmiany wilgotności drewna tyczek sosnowych składowanych w stosie na wolnym powietrzu. *Sylwan* 121 (4): 55-59.
- Kubiak M. 1978. Zmiany wilgotności małowymiarowego drewna bukowego składowanego w stosach na wolnym powietrzu. *Sylwan* 122 (12): 57-62.
- Kubiak M., Grodecki J. 1977. Zmiany wilgotności drewna drzew na pniu w zależności od miejsca pobrania próbek na strzale. *Sylwan* 121 (5): 27-30.
- Kubiak M., Kosicki W. 1969. Wilgotność drewna drzewostanów sosnowych różnych klas wieku. *Prace Komisji Nauk Rolniczych i Leśnych PTPN* 28: 176-183.
- Laurila J., Lauhanen R. 2010. Moisture content of Norway spruce stump wood at clear cutting areas and roadside storage sites. *Silva Fennica* 44 (3): 427-434.

- Manzone M.** 2015. Energy and moisture losses during poplar and black locust logwood storage. *Fuel Processing Technology* 138: 194-201. DOI: 10.1016/j.fuproc.2015.05.026.
- van der Merwe J.-P., Ackerman P., Pulkki R., Längin D.** 2016. The impact of log moisture content on chip size distribution when processing eucalyptus pulpwood. *Croatian Journal of Forest Engineering* 37 (2): 297-307.
- Millers M.** 2013. The proportion of heartwood in conifer (*Pinus sylvestris* L., *Picea abies* [L.] Karst.) trunks and its influence on trunk wood moisture. *Journal of Forest Science* 59 (8): 295-300.
- Millers M., Magaznieks J.** 2012. Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stem wood and bark moisture and density influencing factors. W: Gaile Z. [red.]. Annual 18<sup>th</sup> International Scientific Conference Proceedings. Research for Rural Development 2012. Jelgava, 16-18. May 2012. Latvia University of Agriculture. 91-96.
- Nurmi J., Hillebrand K.** 2001. Storage alternatives affect fuelwood properties of Norway spruce logging residues. *New Zealand Journal of Forestry Science* 31 (3): 289-297.
- Nurmi J., Hillebrand K.** 2007. The characteristics of whole-tree fuel stocks from silvicultural cleanings and thinnings. *Biomass and Bioenergy* 31 (6): 381-392.
- Patterson W. A., Post I. L.** 1980. Delayed bucking and bolewood moisture content. *Journal of Forestry* 78 (7): 407-408.
- Rafael S., Tarelho L., Monteiro A., Monteiro T., Gonçalves C., Freitas S., Lopes M.** 2015. Atmospheric emissions from forest biomass residues to energy supply chain: A case study in Portugal. *Environmental Engineering Science* 32 (6): 505-515.
- Rogers K. E.** 1981. Preharvest drying of logging residues. *Forest Products Journal* 31 (12): 32-36.
- Routa J., Kolström M., Ruotsalainen J., Sikanen L.** 2015a. Precision measurement of forest harvesting residue moisture change and dry matter losses by constant weight monitoring. *International Journal of Forest Engineering* 26 (1): 71-83. DOI: 10.1080/14942119.2015.1012900.
- Routa J., Kolström M., Ruotsalainen J., Sikanen L.** 2015b. Validation of prediction models for estimating the moisture content of small diameter stem wood. *Croatian Journal of Forest Engineering* 36 (2): 283-291.
- Röser D., Mola-Yudego B., Sikanen L., Prinz R., Gritten D., Emer B., Väättäinen K., Erkkilä A.** 2011. Natural drying treatments during seasonal storage of wood for bioenergy in different European locations. *Biomass and Bioenergy* 35 (10): 4238-4247.
- Saralecos J. D., Keefe R. F., Tinkham W. T., Brooks R. H., Smith A., Johnson L. R.** 2014. Effects of harvesting systems and bole moisture loss on weight scaling of Douglas-fir sawlogs (*Pseudotsuga menziesii* var. *glauca* Franco). *Forests* 5 (9): 2289-2306.
- Sinclair S. A., Hassler C. C., Bolstad K.** 1984. Moisture loss in aspen logging residue. *Wood and Fiber Science* 16 (1): 93-96.
- Sosa A., Acuna M., McDonnell K., Devlin G.** 2015. Managing the moisture content of wood biomass for the optimisation of Ireland's transport supply strategy to bioenergy markets and competing industries. *Energy* 86: 354-368.
- Spinelli R., Magagnotti N., Paletto G., Preti C.** 2011. Determining the impact of some wood characteristics on the performance of a mobile chipper. *Silva Fennica* 45 (1): 85-95.
- Stampfer K., Kanzian C.** 2006. Current state and development possibilities of wood chip supply chains in Austria. *Croatian Journal of Forest Engineering* 27 (2): 135-145.
- Stokes B. J., McDonald T. P., Kelley T.** 1993. Transpirational drying and costs for transporting woody biomass – a preliminary review. W: Proceedings of IEA/BA Task IX, Activity 6: Transport and Handling. 1994 May 16-25. New Brunswick, Aberdeen University: 76-91.lid.
- Stokes S. A., Watson W. F., Miller D. E.** 1987. Transpirational drying of energywood. *American Society of Agricultural Engineers Paper* 87-1530: 1-14.
- Tomeczak A., Grodziński G., Jakubowski M., Jelonek T., Grzywiński W.** 2018. Effects of the short-term storage method on moisture loss and weight change in beech timber. *Croatian Journal of Forest Engineering* 39 (1) [w druku].
- Tomeczak A., Jakubowski M., Jelonek T., Wąsik R., Grzywiński W.** 2016. Mass and density of pine pulpwood harvested in selected stands from the Forest Experimental Station in Murowana Goślina. *Acta Sci. Pol. Silv. Colendar. Ratio Ind. Lignar.* 15 (2): 105-112. DOI: 10.17306/J.AFW.2016.2.13.
- Tomeczak A., Jelonek T.** 2012. Parametry techniczne młodocianego i dojrzałego drewna sosny zwyczajnej. *Sylvan* 156 (9): 695-702.
- Tomeczak A., Jelonek T.** 2015. Mass and density of birch pulpwood harvested from stands in different types of forest habitats. *Forestry Letters* 108: 27-31.
- Tomeczak A., Jelonek T., Jakubowski M., Grzywiński W., Kryger G.** 2015a. Weight and green density of birch pulpwood harvested from the selected stands of Kaczory Forest Inspectorate. *Ann. WULS – SGGW, For. And Wood Technol.* 91: 165-171.
- Tomeczak A., Jelonek T., Jakubowski M., Wąsik R., Jaszczak A.** 2015b. Weight and green density of oak pulpwood harvested from the selected stands of Łąck Forest Inspectorate. *Ann. WULS – SGGW, For. And Wood Technol.* 91: 172-178.
- Tomeczak A., Wesołowski P., Jelonek T., Jakubowski M.** 2016. Utrata masy i zmiany gęstości średniowymiarowego surowca sosnowego pozyskanego i magazynowanego w okresie letnim. *Sylvan* 160 (8): 619-626.

- Vasković S., Halilović V., Gvero P., Medaković V., Musić J. 2015. Multi-criteria optimization concept for the selection of optimal solid fuels supply chain from wooden biomass. *Croatian Journal of Forest Engineering* 36 (1): 109-123.
- Visser R., Berkett H., Spinelli R. 2014. Determining the effect of storage conditions on the natural drying of radiata pine logs for use energy. *New Zealand Journal of Forest Science* 44 (3): 1-8. DOI: 10.1186/1179-5395-44-3.
- Wąsik R., Michalec K., Barszcz A. 2015. The variability of certain macrostructural features and the density of grand fir (*Abies grandis* Lindl.) wood from selected stands in southern Poland. *Drewno. Prace Naukowe. Doniesienia. Komunikaty* 58 (195): 45-58.