

Prędkość zwęglania wybranych krajowych gatunków drewna

Charring rate of selected domestic types of wood

DOI: 10.15199/33.2022.09.14

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań prędkości zwęglania dziewięciu występujących w Polsce gatunków drewna, obejmujących świerk, sosnę, brzozę, buk, jesion, topolę, dąb, klon i grochodrzew. Odniesiono się do zasobności polskich lasów, z uwzględnieniem podziału na poszczególne gatunki botaniczne, potwierdzając ich przydatność do zastosowania w budownictwie ze względu na prędkość zwęglania. Uwzględniając zasoby leśne Polski oraz zachowanie w trakcie pożaru, najlepiej rokuje wykorzystanie drewna sosny w konstrukcjach typu CLT, czyli z drewna jednego gatunku. W przypadku rozwiązań łączących różne gatunki w elementach CLT, warto rozważyć zastosowanie grochodrzewu lub dębu w warstwach zewnętrznych, ponieważ prędkość ich zwęglania jest najniższa z przebadanych.

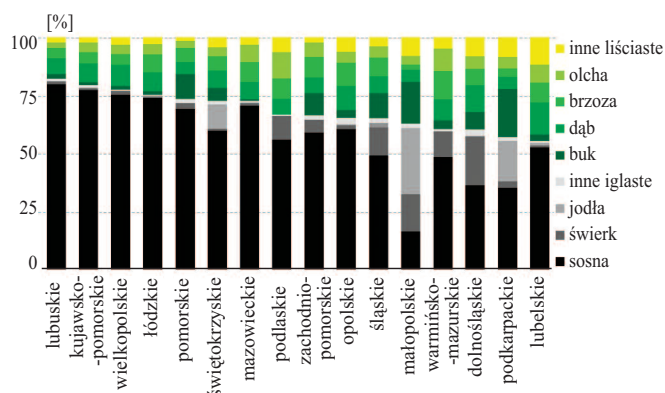
Słowa kluczowe: drewno konstrukcyjne; bezpieczeństwo pożarowe; prędkość zwęglania.

Abstract. The paper presents the results of research on the charring rate of 9 types of wood found in Poland, including spruce, pine, birch, beech, ash, poplar, oak, maple and robinia. Reference was made to the abundance of Polish forests, taking into account the division into individual botanical species, confirming their suitability for use in construction due to the charring rate. Taking into account Poland's forest resources and behaviour during a fire, the best prognosis is the use of pine wood in single-species CLT-type constructions. In the case of solutions combining different species in CLT elements, it is worth considering the use of robinia or oak in the outer layers, the charring rates of which are the lowest among those tested in the work.

Keywords: construction wood; fire safety; charring rate.

Wykorzystanie drewna w budownictwie jest nierozdzielnie związane m.in. z możliwością przemysłowego wytwarzania elementów o odpowiednich gabarytach oraz spełnieniem wymagań dotyczących bezpieczeństwa pożarowego. Pierwsze z zagadnień oznacza potrzebę stosowania m.in. elementów klejonych, w tym rozpowszechnionej technologii CLT (*Cross-laminated timber*), za której prekursora uważany jest pochodzący z Austrii badacz Gerhard Schickhofer [1], natomiast drugie wiąże się z koniecznością stosowania odpowiedniej obróbki drewna lub jego zabezpieczenia ogniochronnego. W przypadku rozwiązań typu CLT zdecydowana większość badań dotyczy wykorzystania świerku jako materiału bazowego, podczas gdy występuje on przede wszystkim w obszarach górzystych, a w wielu innych lokalizacjach występuje jedynie lokalnie lub w ogóle go nie ma (rysunek 1).

Problematyka ta została zauważona w wielu krajach, gdzie często prowadzić szeroko zakrojone badania gatunków drewna występujących lokalnie, np. w Szwajcarii, oprócz świerka pospolitego, badano również sosnę, brzozę, buk, topolę czy jesion pod kątem wykorzystania w konstrukcjach CLT. W USA weryfikowano daglezję czy lokalnie występującą odmianę świerka sitkajskiego. Na świecie prowadzone są również badania surowca pozyskiwanego z palm olejowych, bambusa, modrzewia japońskiego, kryptomerii japońskiej, tulipanowca amerykańskiego, eukaliptusa, akacji wyniosłej, merbau, teaku, sesenduku itp. Są to badania nad optymalnym wykorzystaniem odpowiedniego surowca drzewnego, co oznacza zastosowanie w przekroju CLT drewna o gorszej wytrzymałości wewnątrz (częściowo jako wypełnienie) i bardziej wytrzymałego na zewnątrz.

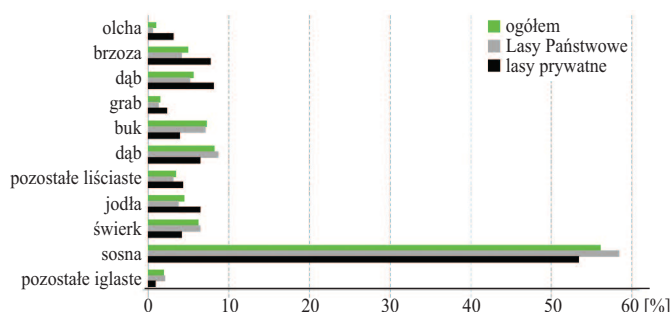


Rys. 1. Przestrzenne rozmieszczenie drzewostanów wg gatunków w poszczególnych województwach (WISL 2016 – 2020) [5]

Fig. 1. Spatial distribution of stands by prevailing species in individual provinces (WISL 2016 – 2020) [5]

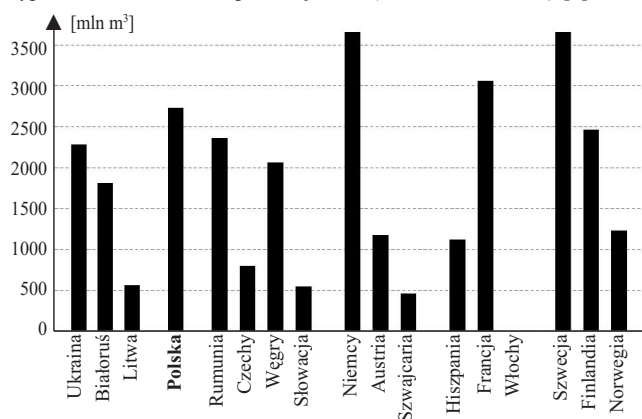
Zgodnie z dostępnymi danymi [5], w Polsce najwięcej mamy drewna sosny, która stanowi ~56% ogólnych zasobów (rysunek 2). Wbrew pozorom świerk czy jodła nie znajdują się na kolejnych miejscach, ale gatunki liściaste: dąb i buk, które łącznie z sosną dają ~70% zasobów polskich lasów. Pomimo że zalesienie w Polsce (31%) jest na średnim europejskim poziomie, porównywalnym do Niemiec (33%), Włoch (33%) i Francji (32%), to uwzględniając wyższą od średniej zasobność polskich lasów (288 m³/ha) oraz powierzchnię Polski, plasuje nas to na czwartym miejscu wśród uwzględnionych w statystyce pod tym względem krajów, za Niemcami, Szwecją i Francją (rysunek 3). Oznacza to, że chcąc w sposób racjonalny i ekonomicznie uzasadniony wykorzystać polskie zasoby leśne, należy skoncentrować się na pozyskaniu najliczniej występujących gatunków rodzimych, przede wszystkim sosny i dla nich przeprowadzić niezbędne badania doty-

¹⁾ Instytut Techniki Budowlanej, Zakład Badań Ogniowych; p.sulik@itb.pl



Rys. 2. Udział miąższościowy gatunków drzew rosnących w lasach państwowych i lasach prywatnych (WISL 2016 – 2020) [5]

Fig. 2. Volume share by dominant species in forests of all ownership types, State Forests and private forests (WISL 2016 – 2020) [5]



Rys. 3. Zasoby drewna w wybranych krajach (SoEF 2020) [5]

Fig. 3. Wood resources in selected countries (SoEF 2020) [5]

często zastosowania do wytwarzania elementów np. CLT. Problematykę tę dostrzegła m.in. spółka Polskie Domy Drewniane, która prowadzi badania tego typu.

Biorąc pod uwagę fakt, że wszystkie gatunki drewna są palne, z punktu widzenia bezpieczeństwa pożarowego bardzo istotnym parametrem jest **prędkość zwęglania**, która ma istotny wpływ na uzyskaną klasę odporności ogniowej elementu. Badania eksperymentalne prędkości zwęglania różnych gatunków drewna prowadzone są od wielu lat. Bardzo trudno jest wymienić wszystkie prace, ale do najbardziej ważnych należą wyniki eksperymentów opublikowane przez: Schaffera (1967); Halla (1970); Wooda (1988); Colliera (1992); White'a i Nordheima (1992); White'a (2000); Frangi i Fontanę (2003); Njankou i in. (2004); Hugi i in. (2007); Frangi i in. (2008); Fonsecę i Barreirę (2009); Yanga i in. (2009), Friquina i in. (2010); Fragiaco i in. (2012). W kilku pracach można znaleźć zestawienie archiwalnych wyników badań, a jednym z najbardziej aktualnych jest opracowanie Bartletta i in. (2019) [2]. Wyniki tych badań stanowią podstawę do wyznaczenia modeli zwęglania drewna w czasie, które z kolei wykorzystywane są w obliczeniach, np. w pracy [13] porównano wyniki prędkości zwęglania drewna sosnowego w czasie. Niezmienianą w czasie prędkość zwęglania, tak jak przyjęto w Eurokodzie [6], zaproponował Schaffer, Cachim oraz White, natomiast zmienną Babrauskas, White oraz Gardner.

Pomimo przyjętego w Eurokodzie [6] uśrednionego poziomu prędkości zwęglania, uzależnionego od rodzaju drewna (iglaste + bukowe i pozostałe liściaste); klejenia (lite lub kle-

jone) oraz gęstości, gdzie wartościami granicznymi są 290 i 450 kg/m³, jak wykazały badania, zebrane m.in. w [7], prędkość zwęglania dużo bardziej zależy od gęstości [3, 4], np. w przypadku gęstości ok. 420 kg/m³ wynosi ~1,04 mm/min [8], a rzędu 860 kg/m³ ~0,38 mm/min [9]. Prędkość zwęglania zależy również od wilgotności oraz sposobu ułożenia słojów [7]. Należy zwrócić również uwagę na dosyć dużą różnicę prędkości zwęglania różnych gatunków botanicznych drewna o porównywalnej gęstości. Dobrym przykładem jest porównanie wspomnianej prędkości zwęglania rzędu ~1,04 mm/min w przypadku drewna o gęstości rzędu 420 kg/m³ otrzymanej przez zespół Frangiego [8], z prędkością zwęglania ~0,49 mm/min przy gęstości rzędu 430 kg/m³, otrzymaną w badaniach Friquina [10].

Wskazuje to, że istotne są badania lokalnych gatunków drewna, pochodzących z konkretnych krajów, różniących się zarówno klimatem, jak i warunkami glebowymi. Ideałem byłoby określenie tych parametrów w przypadku każdej krainy przyrodniczo-leśnej, niemniej już odniesienie do konkretnego kraju daje pewne uśrednienie [11]. W artykule przedstawiono wyniki badań prędkości zwęglania dziewięciu gatunków drewna krajowego wbudowanego w elementy typu CLT.

Badania laboratoryjne

Do badania prędkości zwęglania wytypowano następujące gatunki drewna krajowego: sosna (*Pinus sylvestris* L.); świerk pospolity (*Picea abies* (L.); brzoza (*Betula pendula* Roth); buk (*Fagus sylvatica* L.); jesion (*Fraxinus excelsior* L.); topola (*Populus* spp.); dąb (*Quercus*); klon (*Acer*) oraz grochodrzew (*Robinia pseudoacacia*). Ich parametry przedstawiono w tabeli. Elementy do przygotowania próbek do badań o wymiarach 25 × 100 × 500 mm wycięto z większych fragmentów drewna (rysunek 4). Z tak przygotowanych lameli, z wykorzystaniem jednoskładnikowego kleju konstrukcyjnego klasy D4, przeznaczonego do przemysłowego klejenia drewna konstrukcyjnego, uformowano warstwowo próbki do badań o wymiarach 150 × 500 × 500 mm, sklejając między sobą poszczególne warstwy. Pomiędzy każdą warstwą drewna zainstalowano po dwie termopary typu K, służące do pomiaru temperatury (fotografia).

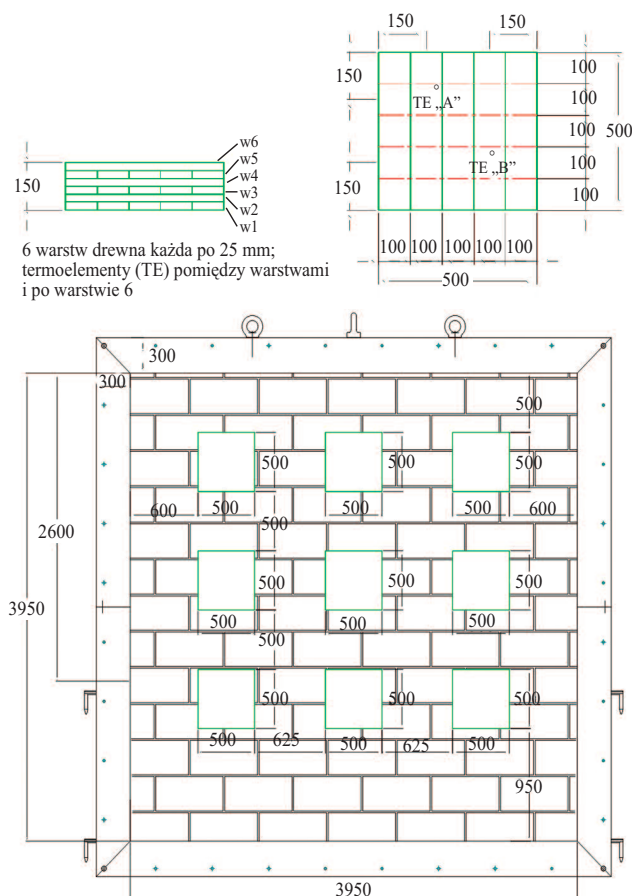
Gęstość drewna określono przez przeliczenie średniej masy lameli, na podstawie pomiarów w sześciu losowo wybranych lameli danego gatunku z wykorzystaniem wzorcowanej wagi laborato-

Parametry drewna wytypowanego do badań

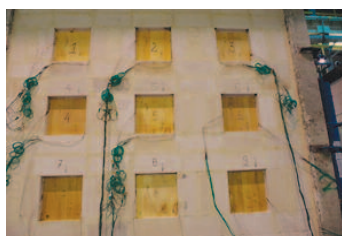
Parameters of the wood selected for the tests

Oznaczenie	Gatunek	Gęstość drewna [kg/m ³]	Gęstość drewna przeliczona do wilgotności 12% ¹⁾ [kg/m ³]	Wilgotność drewna [%]
D1	świerk	468,89	466,78	12,90
D2	sosna	579,90	579,32	12,20
D3	brzoza	641,23	648,92	9,60
D4	buk	721,99	733,90	8,70
D5	jesion	739,82	743,89	10,90
D6	topola	425,47	417,39	15,80
D7	dąb	628,65	623,94	13,50
D8	klon	624,82	631,69	9,80
D9	grochodrzew	777,81	769,64	14,10

¹⁾ przeliczenie wykonano wg wzoru: $q_{ref} = q(u) \cdot (1 - 0,005 \cdot (u - u_{ref}))$, gdzie: q – gęstość drewna przy żądanej wilgotności; u – wilgotność



Rys. 4. Projekt próbek i ściany do badań ogniowych
Fig. 4. Design of samples and walls for fire tests

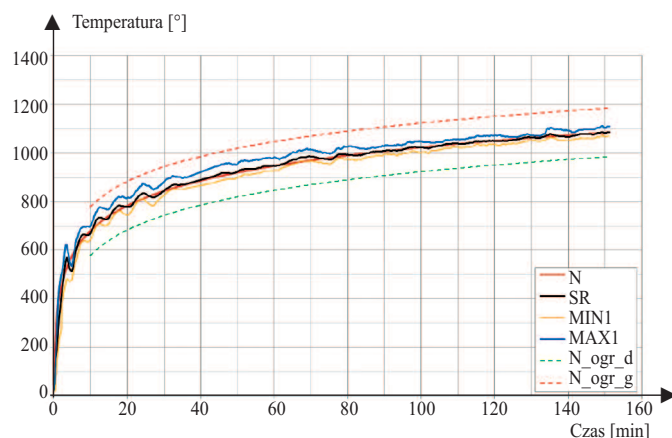


Widok próbek podczas badania ogniowego
View of the samples during the fire test

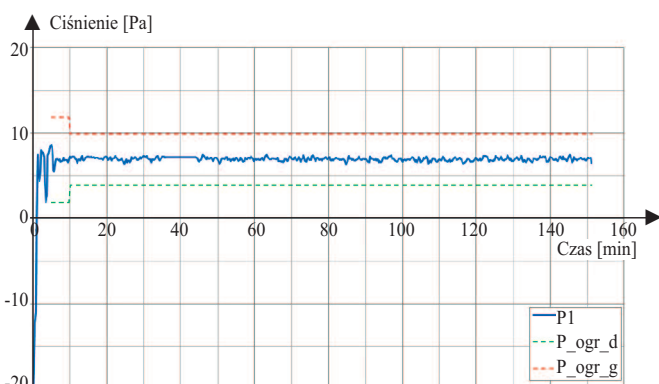
ryjnej z pomiarem do 0,1 g. Wilgotność drewna oszacowano za pomocą wzorcowanego wilgotnościomierza młotkowego do drewna z błędem pomiaru określonym dla drewna sosny, jodły i świerku na poziomie 1%. Przed wykonaniem tych oznaczeń lamele drewna były sezonowane w zadaszonym pomieszczeniu przez ponad 90 dni. Założeniem było odwzorowanie warunków rzeczywistych, w jakich może pracować konstrukcja drewniana.

Jako oddziaływanie ogniowe przyjęto krzywą standardową temperatura-czas, zakładając ciśnienie panujące w piecu o wartości +10 Pa na dolnej krawędzi najniższej położonych próbek 7 – 9, co odpowiadało ciśnieniu o wartości +6,9 Pa w punkcie pomiarowym. Wykresy temperatury nagrzewania badanego elementu oraz ciśnienia w piecu podczas badania przedstawiono na rysunkach 5 i 6.

Prędkość zwęglania drewna można określić różnymi metodami, np. za pomocą kalorymetru stożkowego, czy podczas badania odporności ogniowej. Ta druga metoda jest częściej



Rys. 5. Wykres temperatury nagrzewania badanego elementu
Fig. 5. Graph of the test element heating temperature



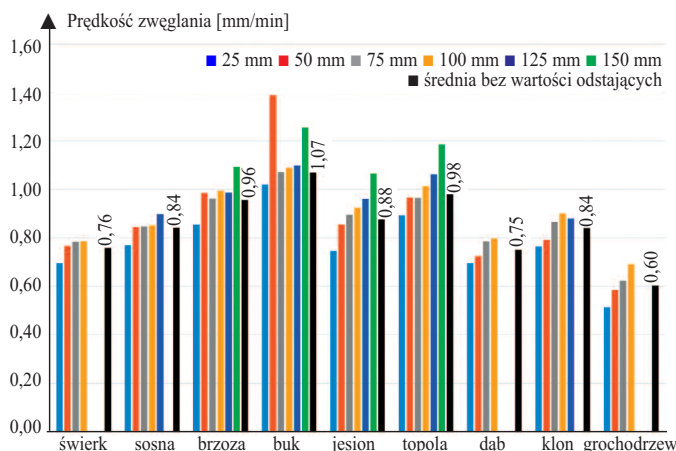
Rys. 6. Wykres ciśnienia w piecu podczas badania
Fig. 6. Graph of the pressure inside the furnace

stosowana, ponieważ można ją wykonać dodatkowo przy okazji badania pełnoskalowego odporności ogniowej. Jako graniczną wartość temperatury, przy której rozpoczyna się proces zwęglania drewna, przyjęto zgodnie z literaturą 300°C [12]. Czas rozpoczęcia zwęglania był określany, kiedy średnia temperatura z dwóch termopar, położonych w tej samej warstwie, osiągnęła wartość 300°C.

Wyniki badań laboratoryjnych i ich analiza

Szczegółowe wyniki badań przedstawiono na rysunku 7. Są to wyliczone wartości prędkości zwęglania każdej z warstw w zależności od gatunku drewna. Dodatkowo kolorem czarnym przedstawiono wartości średnie (bez wartości odstających) wyliczone w przypadku warstw 1 – 5, bez uwzględnienia warstwy ostatniej nr 6, a w przypadku drewna buku pominięto również warstwę 2, która najprawdopodobniej uległa innemu uszkodzeniu niż w przewidywanym scenariuszu. Wartość średnią prędkości zwęglania świerku, dębu i grochodrzewu wyznaczono dla wszystkich warstw, w których osiągnięto temperaturę 300°C, czyli warstw 1 – 4. W tym przypadku pomiary za warstwą 5 nie osiągnęły temperatury uznawanej za początek zwęglania drewna.

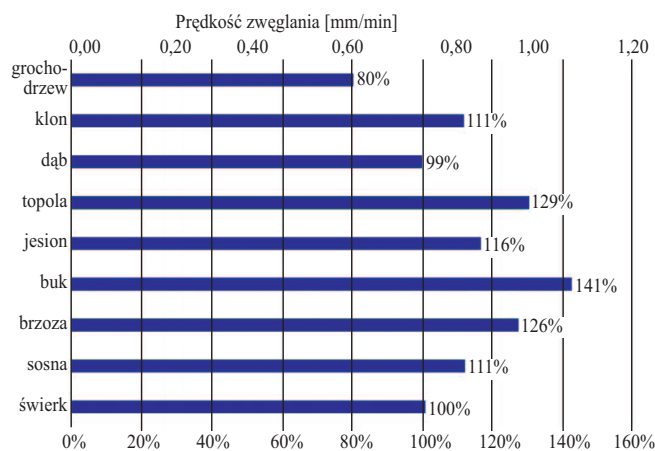
Zakładając jako punkt odniesienia prędkość zwęglania drewna świerkowego, a więc najczęściej wykorzystywanego gatunku w rozwiązaniach CLT, warto zauważyć, że drewno sosnowe, które z uwagi na jego zasoby ma największy potencjał wykorzystania w polskim CLT, charakteryzuje się o 11%



Rys. 7. Prędkość zwęglania w poszczególnych punktach pomiarowych w zależności od rodzaju drewna

Fig. 7. Charring rate for individual measuring points depending on the type of wood

większą prędkością zwęglania (rysunek 8). Różnica ta nie jest duża i oznacza nieznaczny wzrost grubości elementu, np. zakładając granicę nośności ogniowej na poziomie 60 min, w przypadku drewna świerkowego niezbędna była warstwa ochronna grubości nie większej niż 4,56 cm, która mogłaby ulec zwęglaniu, a w przypadku drewna sosny niecałe 5 mm więcej, czyli 5,04 cm. W przypadku dwóch kolejnych, najbardziej rozpowszechnionych w Polsce gatunków drewna, czyli dębu i buku, sytuacja jest odmienna. Prędkość zwęglania drewna dębowego jest o 1% mniejsza niż drewna świerkowego, natomiast drewno buku charakteryzuje się wyraźnie gorszymi parametrami, gdyż o ponad 40% szybciej ulega zwęglaniu. Szybciej od drewna świerku, ale i od drewna sosny zwęglają się drewno jesionowe, brzoza i topolowe, natomiast drewno klonu ma podobną prędkość zwęglania jak



Zmiana % prędkości zwęglania przy założeniu, że prędkość zwęglania świerku to 100%

Rys. 8. Porównanie średniej prędkości zwęglania poszczególnych gatunków drewna

Fig. 8. Comparison of average charring rate for individual types of wood

drewno sosny. Zdecydowanie najlepiej zachowało się drewno grochodrzewu, którego prędkość zwęglania była o 20% mniejsza od prędkości zwęglania drewna świerkowego. Biorąc dodatkowo pod uwagę bardzo dobre parametry mechaniczne drewna grochodrzewu, warto rozważyć umieszczenie go jako warstwy zewnętrznej w przypadku elementów CLT, składających się z różnych gatunków drewna.

Podsumowanie

Wykorzystanie krajowych gatunków drewna do wykonywania konstrukcji CLT, uwzględniając ich prędkość zwęglania, jest zasadne i ekonomicznie uzasadnione. Największy potencjał związany przede wszystkim z dostępnością surowca ma drewno sosny i dębu, które charakteryzują się nieco wyższą (sosna) lub nieznacznie niższą (dąb) prędkością zwęglania od świerku. Należy pamiętać również, że te gatunki drewna są cięższe od drewna świerku, co będzie skutkowało zwiększeniem obciążeń stałych. Pozostałe gatunki drewna, z wyłączeniem grochodrzewu, które charakteryzują się większą prędkością zwęglania, można z powodzeniem wykorzystać w wewnętrznych warstwach elementu CLT.

Literatura

- [1] Schickhofer G. Starrer und nachgiebiger Verbund bei geschichteten, flächenhaften Holzstrukturen. Graz: Graz University of Technology. 2013. DOI:10.3217/978-3-85125-262-0. ISBN 978-3-85125-268-2.
- [2] Bartlett AI, Hadden RM, Bisby LA. A Review of Factors Affecting the Burning Behaviour of Wood for Application to Tall Timber Construction. Fire Technology. 2019. DOI: 10.1007/s10694-018-0787-y.
- [3] Lipinskas D, Maciulaitis R. Further opportunities for development of the method for fire origin prognosis. Journal of Civil Engineering and Management. 2005, XI, 4: 299-307, ISSN 1392-3730.
- [4] White RH, Sumathipala K. Fire Containment in Wood Construction Doesn't Just Happen. Wood Protection 2006 -Session I, Forest Products Society 2801 Marshall Ct. 2007. ISBN 1-892529-48-3.
- [5] Zajęczkowski G, Jabłoński M, Jabłoński T, Szmida H, Kowalska A, Małachowska J, Piwnicki J, Kubica J. Raport o stanie lasów w Polsce 2020, Państwowe Gospodarstwo Leśne Lasy Państwowe. 2021. ISSN 1641-3229.
- [6] PN-EN 1995:2008 + NA/2010 Eurokod 5: Projektowanie konstrukcji drewnianych – Część 1-2: Postanowienia ogólne – Projektowanie konstrukcji z uwagi na warunki pożarowe.
- [7] Hugi E, Wuersch M, Risi W, Wakili KG. Correlation between charring rate and oxygen permeability for 12 different wood species. J Wood Sci. 2007. DOI: 10.1007/s10086-006-0816-1.
- [8] Frangi A, Fontana M, Knobloch M, Boichchio G. Fire behaviour of crosslaminated solid timber panels. Fire Saf Sci. 2008. DOI: 10.3801/IAFSS. FSS. 9-1279.
- [9] Njankouo JM, Dotreppe JC, Franssen JM. Experimental study of the charring rate of tropical hardwoods. Fire Mater. 2004. DOI: 10.1002/fam.831.
- [10] Friquin KL, Grimsbu M, Hovde PJ. Charring rates for cross-laminated timber panels exposed to standard and parametric fires. In: World conference on timber engineering. 2010: 20 – 24.
- [11] Wen L, Han L, Zhou H. Factors Influencing the Charring Rate of Chinese Wood by using the Cone Calorimeter. Bio Resources. 2015. DOI: 10.15376/biores.10.4.7263-7272.
- [12] White RH. Charring rate of composite timber products. Proceedings of Wood and Fire Safety 4th International Conference, the High Tatras. 2000. Slovakia.
- [13] Dębowska A. Prędkość zwęglania drewna w analizie pożarowej konstrukcji drewnianych. Roczniki Inżynierii Budowlanej – zeszyt 16/2016: 95 – 100. KIB Oddział PAN w Katowicach.

Przyjęto do druku: 8.08.2022 r.

Partner działu:

Instytut Techniki Budowlanej

www.itb.pl

