

HUBERT LACHOWICZ, ALEKSANDRA GIEDROWICZ

# Charakterystyka jakości technicznej drewna paulowni COTE-2

Characteristics of the technical properties of Paulownia COTE-2 wood

## ABSTRACT

Lachowicz H., Giedrowicz A. 2020. Charakterystyka jakości technicznej drewna paulowni COTE-2. Sylwan 164 (5): 414-423. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylwan.2020024>.

Seedlings of Paulownia (*Paulownia* sp.) has increasingly appeared in the merchant offers in Poland. However, the knowledge of the technical characteristics of its wood is still insufficient because comprehensive studies of wood properties for this species have not been performed. The main aim of this study was to determine the selected physical and mechanical properties of Paulownia COTE-2 wood. The wood comes from the plantation of Paulownia COTE-2 located in Granada region in Spain. The investigation were carried on 162 samples, according to Polish standards. We analysed the following physical properties: air-dry density, oven-dry density, basic density, proportion of wood substance, wood porosity, total shrinkage of wood in longitudinal, tangential and radial anatomical directions, volumetric shrinkage, coefficients of each of mentioned shrinkage, the anisotropy index of shrinkage and mechanical properties: compression strength, static bending, modulus of elasticity in static bending, including the coefficients of the mechanical properties mentioned before. The results show that Paulownia wood is very light, with the density of 270 kg/m<sup>3</sup> and low shrinking (volumetric shrinkage equaled to 7%). The mechanical properties of Paulownia wood are closely related to its density. Static bending equaled to 38 MPa and compression strength parallel to grain amounted to 24 MPa.

## KEY WORDS

mechanical and physical properties, Paulownia COTE-2, wood of fast growing trees

## ADDRESSES

Hubert Lachowicz – e-mail: [hubert.lachowicz@wl.sggw.pl](mailto:hubert.lachowicz@wl.sggw.pl)

Aleksandra Giedrowicz – e-mail: [aleksandra\\_giedrowicz@sggw.pl](mailto:aleksandra_giedrowicz@sggw.pl)

Katedra Użytkowania Lasu, SGGW w Warszawie; ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa

## Wstęp

Paulownia to zbiorowa nazwa dla kilku szybko rosnących gatunków, których naturalnym zasięgiem występowania jest Azja Wschodnia [FSC... 2019]. Nazwa rodzajowa została nadana ku czci córki cara Pawła I, królowej Holandii Anny Pawłownej Romanow, stąd spolszczenie – pawłownia [Pirc 2006; Russell i in. 2008]. Lista roślin opracowana przez Królewskie Ogrody Botaniczne w Kew i Ogród Botaniczny w Missouri obejmuje 27 naukowych nazw gatunków z rodzaju *Paulownia*, z czego 7 jest zaakceptowanych ([www.theplantlist.org](http://www.theplantlist.org)). Spośród nich najpopularniejsze są *Paulownia fortunei* ((Seemann) Hemsley, Forbes & Hemsley), *Paulownia tomentosa* ((Thunb. ex Murr) Steud. (Kiri)) oraz *Paulownia elongata* (S.Y. Hu) i to z nich najczęściej powstają liczne hybrydy, które mają być odporne na lokalne warunki. Takimi klonami są m.in. COTE-2 ('Cotevisa 2'), 112 ('Oxytree'), L1, X1 i F1 ('Shan Tong') [Kozakiewicz 2018; Smarul i in. 2018].

Paulownia – ze względu na jasne drewno, które według producentów ma szczególne cechy, oraz na szybki przyrost – jest powszechnie uprawiana na plantacjach w północnych Chinach. W ostatnich latach coraz częściej pojawia się także na plantacjach drzew szybko rosnących w Europie, w tym w Polsce. Szacuje się, że przez 3 lata w różnych rejonach Polski samej odmiany ‘Oxytree’ sprzedano ponad 300 tys. sadzonek. Sprzedawane były też odmiany ‘Cotevisa 2’ i ‘Shan Thong’ [Matuszak 2018]. Dodatkowo w europejskich laboratoriach trwają prace nad nowymi lub udoskonalonymi odmianami, np. w hiszpańskim laboratorium Cotevisa w Walencji od 12 lat opatentowana i ulepszana jest hybryda, która dostosowywana jest do wzrostu w umiarkowanym klimacie Europy Środkowej. Odmiana ‘Cotevisa 2’ to krzyżówka *Paulownia elongata* z *Paulownia fortunei* zarejestrowana pod numerem 2007/1679 we Wspólnotowym Urzędzie Ochrony Odmiany Roślin (CPVO) (cpvoextranet.cpvo.europa.eu, www.ipaulownia.co.uk). Mimo to omawiany rodzaj nie został jeszcze ujęty w normie PN-EN 13556:2005 dotyczącej terminologii stosowanej w handlu drewnem w Europie. Dodatkowo Państwowa Rada Ochrony Przyrody i Ministerstwo Środowiska negatywnie zaopiniowały szerokie propagowanie i sadzenie obcego dla flory Polski gatunku drzewa o mało poznanej biologii w warunkach polskich [Odpowiedź... 2016; Opinia... 2016].

Pomimo rosnącej popularności tego gatunku powstałe hybrydy nie są wystarczająco poznane zarówno pod względem środowiskowym, jak i pod względem charakterystyki technicznej i właściwości technologicznych drewna. Poznanie właściwości fizycznych i mechanicznych surowca drzewnego decyduje o późniejszym sposobie jego obróbki oraz zastosowaniu. Z racji konieczności zrównoważonej i racjonalnej gospodarki drewnem wiedza ta nabiera szczególnego znaczenia – zarówno z ekonomicznego, jak i ekologicznego punktu widzenia [Breyer i in. 1999].

Paulownia w warunkach tropikalnych jest gatunkiem zimozielonym. W warunkach klimatu umiarkowanego Europy zrzuca liście na zimę, a pseudodychotomiczne pędy narażone są na przemarzanie. *P. elongata* przyrasta na grubość średnio 3-4 cm/rok, a maksymalnie przyrost może osiągnąć nawet 9 cm/rok. Drzewa paulowni rosną lepiej w Chinach: *P. elongata* w wieku 13 lat osiąga pierśnicę bez kory 73,0 cm i wysokość 17,5 m, co daje miąższość na poziomie 2,5 m<sup>3</sup>, a *P. fortunei* w wieku 11 lat osiąga pierśnicę bez kory 75,1 cm i wysokość 22,0 m, co oznacza miąższość na poziomie 3,7 m<sup>3</sup>. Nisko osadzona korona złożona z dużych liści (większe w młodości) przypomina parasol [Zhu i in. 1986]. Drzewa paulowni dożywają do 80-100 lat. Kwiaty pojawiające się przed liśćmi są nektaro- i miódodajne, a dodatkowo liście, gałązki, kwiaty i owoce są surowcem zielarskim o szerokim spektrum właściwości leczniczych [Różański 2017]. Producent klonu COTE-2 zapewnia, że hybryda ta rośnie najszybciej na świecie. Dojrzałość rębną osiąga w wieku 7 lat, jest odporna na niską temperaturę (nawet do -36°C) i choroby pasożytnicze, wymaga nawodnienia, skała macierzysta nie może znajdować się wyżej niż 5-6 m, a woda gruntowa wyżej niż 1,5 m poniżej gruntu. Dodatkowo może wzrastać nawet na gruntach 5 i 6 klasy (www.ipaulownia.co.uk).

Właściwości fizyczne i mechaniczne decydują o późniejszym przeznaczeniu surowca drzewnego, dlatego ważne jest ich poznanie oraz określenie kierunku zmian. W przedziale higroskopijnym (od 0% do około 30%), ze względu na budowę chemiczną i submikroskopową drewna, jego wilgotność dostosowuje się do panujących warunków w otoczeniu [Krzyśk 1961]. W literaturze można spotkać się ze stwierdzeniem, że drewno paulowni jest wśród drzew odpowiednikiem aluminium – ze względu na niską gęstość i stabilność drewna. W trakcie tworzenia klonu COTE-2 o wyborze cech selekcyjnych decydowała nie tylko wielkość przyrostów, ale przede wszystkim jakość pozyskiwanego drewna. W związku z tym od 2008 roku część drewna paulowni produkowanego w Hiszpanii, w postaci kłód i tarcicy, była bezpłatnie dostarczana kilku producentom w celu zbadania surowca i przeprowadzenia testów produkcyjnych. Drewno pozyskiwane z plantacji paulowni COTE-2 otrzymało certyfikat jakościowy QWF (Quality Wood Forestry), który świad-

czy o jego odpowiednich cechach i jakości ([www.ipaulownia.co.uk](http://www.ipaulownia.co.uk), <https://sites.google.com/site/paulowniasengalia>). Dzięki swym właściwościom drewno paulowni jest wykorzystywane w wielu dziedzinach, np. w meblarstwie (sklejka, okleina, deski), budownictwie (elewacje, okna, drzwi, konstrukcje, więźby), przy produkcji: instrumentów, nart (firma Rossignol), desek surfingowych, skrzynek do owoców, żaluzji okiennych, beczek, wnętrz jachtów, samolotów, samochodów (ciężarówki), łodzi czy kajaków ([www.ipaulownia.co.uk](http://www.ipaulownia.co.uk)). Doskonale nadaje się także na biopaliwo i do przemysłu celulozowo-papierniczego [Ashori, Nourbakhsh 2009; López i in. 2012; Kiaei 2013; Kozakiewicz 2013, 2018; Icka i in. 2016; Woźniak i in. 2018]. W literaturze można często spotkać się z informacją o przeznaczeniu drewna paulowni do produkcji instrumentów muzycznych [Sidan i in. 2010]. Wyjątkowe parametry akustyczne, które nie występują w drewnie świerkowym, przesądzą o zastępowaniu świerka paulownią w niektórych instrumentach, szczególnie w kulturach Dalekiego Wschodu [Jakubowski i in. 2018]. Dawniej uznawano drewno paulowni za potencjalny surowiec do wykorzystania w przemyśle lotniczym [Wanin 1953].

Celem pracy było zbadanie wybranych właściwości fizycznych i mechanicznych drewna paulowni 'Cotevisa 2', które najlepiej charakteryzują jakość techniczną drewna tego gatunku i decydują o możliwościach jego wykorzystania.

## Material i metody

Badane drewno zostało pozyskane na plantacji w rejonie Grenady w Hiszpanii. Po pierwszym roku od założenia plantacji drzewka ścięto, a z pniaków wyrosły drzewa, które wycięto, kiedy miały 5 lat (plantacja miała 6 lat). Badane drewno pochodziło z drzew wyhodowanych w pierwszym cyklu (z jednej sadzonki można pozyskiwać drewno co 5-6 lat przez 4 cykle). Dolna średnica pozyskanych drzew wynosiła 25-30 cm, a ich wysokość około 12 m. Przeznaczone do niniejszych badań deski (5 sztuk) pobrano z 5 drzew z wysokości od około 2 do 3 m i miały wymiary: długość 110 cm, szerokość 12-18 cm i grubość około 6 cm.

Zakres prac obejmował oznaczenie następujących właściwości fizycznych i mechanicznych drewna:

- gęstość drewna określona na próbkach 20×20×300 mm, wilgotność 12% [kg/m<sup>3</sup>],
- gęstość drewna określona na próbkach 20×20×30 mm, wilgotność 12% [kg/m<sup>3</sup>],
- gęstość drewna określona na próbkach 20×20×30 mm, wilgotność 0% [kg/m<sup>3</sup>],
- gęstość umowna drewna określona na próbkach 20×20×30 mm [kg/m<sup>3</sup>],
- udział substancji drzewnej [%],
- porowatość [%],
- skurcz całkowity w kierunku wzdłuż włókien  $\beta_{\max L}$  [%],
- skurcz całkowity w kierunku promieniowym  $\beta_{\max R}$  [%],
- skurcz całkowity w kierunku stycznym  $\beta_{\max T}$  [%],
- objętościowy skurcz całkowity  $\beta_{\max V}$  [%],
- współczynnik skurczu w kierunku wzdłuż włókien  $K_{\beta L}$ ,
- współczynnik skurczu w kierunku promieniowym  $K_{\beta R}$ ,
- współczynnik skurczu w kierunku stycznym  $K_{\beta T}$ ,
- współczynnik objętościowego skurczu całkowitego  $K_{\beta V}$ ,
- wskaźnik anizotropii kurczenia się  $A_{\beta}$ ,
- wytrzymałość na ściskanie wzdłuż włókien  $Rc_{12}$  [MPa],
- wytrzymałość na zginanie statyczne  $Rg_{12}$  [MPa],
- moduł sprężystości przy zginaniu statycznym  $Eg_{12}$  [MPa],
- współczynnik jakości wytrzymałościowej przy ścisaniu wzdłuż włókien  $JRc_{12}$  [km],

- współczynnik jakości wytrzymałościowej przy zginaniu statycznym  $JR_{g_{12}}$  [km],
- współczynnik jakości wytrzymałościowej modułu sprężystości przy zginaniu statycznym  $JE_{g_{12}}$  [km].

Pozyskany materiał sezonowano do osiągnięcia wilgotności bezwzględnej około 15%. Następnie za pomocą odpowiednich urządzeń wyrobiono próbki zgrubne o długości około 40 cm, z których w dalszej kolejności wycinano próbki do badań fizycznych i wytrzymałościowych. Próbki o wymiarach 20×20×30 mm były bliźniacze w stosunku do próbek o wymiarach 20×20×300 mm (przylegały do nich bezpośrednio w próbce zgrubnej).

Gęstość drewna przy wilgotności bezwzględnej 12% zbadano na próbkach o wymiarach 20×20×30 mm (ostatni wymiar wzdłuż włókien) zgodnie z normą PN-77/D-04101. Pomiary stereometryczne (w kierunku stycznym, promieniowym i wzdłuż włókien) wykonano za pomocą elektronicznej suwmiarki z dokładnością do 0,01 mm. Masę określono na wadze technicznej z dokładnością do 0,001 g. Wilgotność próbek oznaczono metodą suszarkowo-wagową [PN-77/D-04100]. Po oznaczeniu gęstości wykonano na tych samych próbkach badania ściskania wzdłuż włókien [PN-79/D-04102]. Moduł sprężystości przy zginaniu statycznym [PN-63/D-04117] i zginanie statyczne [PN-77/D-04103] zbadano na próbkach o wymiarach 20×20×300 mm (ostatni wymiar wzdłuż włókien) na kierunku stycznym (prostopadle do przekroju promieniowego), przy rozstawie podpór 240 mm. Wszystkie badania właściwości mechanicznych wykonano przy wilgotności 12%, zgodnie z obowiązującymi standardami, na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej ZD-10 z ważnym świadectwem legalizacji.

Po badaniach zginania statycznego odcięto z końcówek próbek 20×20×300 mm próbki 20×20×30 mm do określenia gęstości drewna zupełnie suchego, gęstości umownej, udziału substancji drzewnej, porowatości oraz skurczu całkowitego na kierunku promieniowym, stycznym, wzdłuż włókien, objętościowego, współczynników skurczu oraz wskaźnika anizotropii. W pierwszej kolejności próbki zostały zatopione w wodzie destylowanej i w ten sposób nawilżone do wilgotności około 30%, czyli stanu maksymalnego spęcznienia (ten proces trwał 1 rok). Następnie pomierzono je w trzech kierunkach suwmiarką z dokładnością do 0,01 mm. W dalszej kolejności, po uzyskaniu przez próbki wilgotności kilkunastu procent, suszono je w suszarce w temperaturze około 105°C do osiągnięcia wilgotności 0%. Następnie próbki zważono na wadze technicznej z dokładnością do 0,001 g i dokonano powtórnego pomiaru stereometrycznego. Skurcz drewna oznaczono zgodnie z normą [PN-82/D-04111].

Pomiary zostały wykonane na 162 próbkach. Następnie przystąpiono do obliczeń poszczególnych właściwości fizycznych i mechanicznych, stosując odpowiednie wzory zawarte w normach.

Badane parametry scharakteryzowano za pomocą miar statystyki opisowej. Zbadano związek między cechami drewna odmiany 'Cotevisa 2' a jego gęstością. Wyznaczono korelacje z gęstością drewna absolutnie suchego dla cech takich jak: gęstość umowna drewna określona na próbkach 20×20×30 mm, udział substancji drzewnej, porowatość, skurcz całkowity w kierunku wzdłuż włókien, skurcz całkowity w kierunku promieniowym, skurcz całkowity w kierunku stycznym, objętościowy skurcz całkowity, współczynnik skurczu w kierunku wzdłuż włókien, współczynnik skurczu w kierunku promieniowym, współczynnik skurczu w kierunku stycznym, współczynnik objętościowego skurczu całkowitego oraz wskaźnik anizotropii kurczenia się. Z gęstością drewna określoną na próbkach 20×20×30 mm przy wilgotności 12% skorelowano wytrzymałość na ściskanie wzdłuż włókien i współczynnik jakości wytrzymałościowej przy ściskaniu wzdłuż włókien. Natomiast z gęstością drewna określoną na próbkach 20×20×300 mm przy wilgotności 12% skorelowano wytrzymałość na zginanie statyczne, moduł sprężystości przy zginaniu statycznym, współczyn-

nik jakości wytrzymałościowej przy zginaniu statycznym i współczynnik jakości wytrzymałościowej modułu sprężystości przy zginaniu statycznym. Analizę statystyczną przeprowadzono z wykorzystaniem oprogramowania Statistica 13.1 (StatSoft, Inc.).

## Wyniki

Średnia gęstość drewna paulowni w stanie powietrznosuchym wyniosła około  $270 \text{ kg/m}^3$ , przy wartości minimalnej  $206 \text{ kg/m}^3$  i maksymalnej  $360 \text{ kg/m}^3$  (tab. 1). Ta sama cecha przy wilgotności 0% osiągnęła wartość około  $233 \text{ kg/m}^3$ , natomiast gęstość umowna około  $216 \text{ kg/m}^3$ . Udział substancji drzewnej, ze względu na niską gęstość, wyniósł tylko 15,5%. Drewno to osiąga też niską wartość skurczów całkowitych w poszczególnych kierunkach anatomicznych. Średni objętościowy skurcz całkowity kształtował się na poziomie 7,23%, natomiast wskaźnik anizotropii kurczenia osiągnął wysoką wartość: 2,72. Badane drewno paulowni COTE-2 charakteryzuje się średnią wytrzymałością na ściskanie wzdłuż włókien (około 25 MPa), wytrzymałością na zginanie statyczne (około 39 MPa) i modułem sprężystości przy zginaniu statycznym (5153 MPa). Współczynnik zmienności dla wszystkich właściwości, z wyjątkiem skurczu całkowitego wzdłuż włókien i współczynnika skurczu całkowitego wzdłuż włókien, jest mniejszy niż 25%. Większość z badanych właściwości drewna paulowni jest istotnie skorelowana z gęstością drewna (tab. 2), jednak niskie wartości współczynnika determinacji wskazują na słabe dopasowanie liniowych modeli regresji.

## Dyskusja

Według Jakubowskiego i in. [2018] drewno z rodzaju paulownia ma podobne właściwości fizyczne i mechaniczne do rodzimych gatunków wierzby i topól.

Istotnym parametrem, od którego zależy wiele innych właściwości fizycznych i mechanicznych drewna, jest gęstość drewna, czyli stosunek masy drewna do jego objętości [Tomczak i in. 2009]. Gęstość drewna paulowni przy wilgotności 12% wynosi średnio  $300 \text{ kg/m}^3$  [Kaźmierski 2009 za Kozakiewiczem 2018]. Według Akyildiza i Sahin Kola [2010] drewno gatunku *Paulownia tomentosa* osiąga średnią gęstość  $317 \text{ kg/m}^3$ , Koman i Feher [2017] podają średnią wartość  $300 \text{ kg/m}^3$ . Kiaei [2013] odnotowuje, że średnia gęstość drewna *Paulownia fortunei* wynosi  $291 \text{ kg/m}^3$ . Natomiast według Zhu i in. [1986] przy wilgotności 15% drewno *Paulownia elongata* ma średnią gęstość  $264 \text{ kg/m}^3$ , a *Paulownia fortunei*  $309 \text{ kg/m}^3$ . Otrzymana w czasie niniejszych badań gęstość drewna paulownii 'Cotevisa 2' przy wilgotności 12% wyniosła średnio  $270 \text{ kg/m}^3$  i jest niższa od otrzymanych przez innych badaczy. W przypadku gęstości drewna absolutnie suchego było podobnie. Gęstość drewna odmiany 'Cotevisa 2' o wilgotności 0% wyniosła średnio  $233 \text{ kg/m}^3$  i jest to wartość nieznacznie niższa od cytowanych w literaturze. Badacze podają następujące wartości tej cechy: Kaźmierski [2009]  $270 \text{ kg/m}^3$ , Akyildiz i Sahin Kol [2010]  $294 \text{ kg/m}^3$ , Kiaei [2013]  $261 \text{ kg/m}^3$ , Koman i Feher [2017]  $240 \text{ kg/m}^3$ , a Zhu i in. [1986]  $209 \text{ kg/m}^3$  dla *Paulownia elongata* oraz  $258 \text{ kg/m}^3$  dla *Paulownia fortunei*.

W zależności od gatunku porowatość paulowni waha się od 75 do 88% (<https://worldpaulownia.com/technical>). Otrzymana przez Kaźmierskiego [2009] wyższa wartość gęstości pociąga za sobą niższą wartość porowatości – 82%. Kiaei [2013] dla irańskiej *Paulownia fortunei* podaje zakres porowatości 80,2-84,8%, średnio 82,59%. Akyildiz i Sahin Kol [2010] dla tureckiej *Paulownia tomentosa* podają porowatość na poziomie 80,4%, natomiast Li i Oda [2007] – 82%. W niniejszych badaniach obliczono średnią wartość porowatości na poziomie 84,48%, z przedziału 80,44-87,27. Jest ona nieznacznie wyższa od podawanych w literaturze.

Tabela 1.

Średnia (M), minimum (Min), maksimum (Max), odchylenie standardowe (SD) i współczynnik zmienności (CV [%]) wybranych właściwości fizycznych i mechanicznych drewna paulowni COTE-2

Mean (M), minimum (Min), maximum (Max), standard deviation (SD) and coefficient of variation (CV [%]) of selected physical and mechanical properties of Paulownia COTE-2 wood

	M	Min	Max	SD	CV
Gęstość drewna określona na próbkach 20×20×300 mm [kg/m <sup>3</sup> ] Air-dry density determined for samples 20×20×300 mm	269,86	215,06	335,96	26,23	9,72
Gęstość drewna określona na próbkach 20×20×30 mm [kg/m <sup>3</sup> ] Air-dry density determined for samples 20×20×30 mm	269,59	206,18	359,79	31,72	11,77
Gęstość drewna określona na próbkach 20×20×30 mm [kg/m <sup>3</sup> ], wilgotność 0% Oven-dry density determined for samples 20×20×30 mm	232,78	190,89	293,38	22,97	9,87
Gęstość umowna drewna określona na próbkach 20×20×30 mm [kg/m <sup>3</sup> ] Basic density determined for samples 20×20×30 mm	215,65	178,58	270,33	20,68	9,59
Udział substancji drzewnej [%] Proportion of wood substance	15,52	12,73	19,56	1,53	9,87
Porowatość [%] Wood porosity	84,48	80,44	87,27	1,53	1,81
Skurcz całkowity w kierunku wzdłuż włókien $\beta_{\max L}$ [%] Total shrinkage of wood in longitudinal direction	0,172	0,033	0,493	0,118	68,67
Skurcz całkowity w kierunku promieniowym $\beta_{\max R}$ [%] Total shrinkage of wood in radial direction	1,99	1,03	2,93	0,44	22,22
Skurcz całkowity w kierunku stycznym $\beta_{\max T}$ [%] Total shrinkage of wood in tangential direction	5,19	4,00	6,65	0,62	11,90
Objętościowy skurcz całkowity $\beta_{\max V}$ [%] Total volume shrinkage of wood	7,23	5,82	9,09	0,89	12,31
Współczynnik skurczu w kierunku wzdłuż włókien $K_{BL}$ Coefficient of total shrinkage of wood in longitudinal direction	0,006	0,001	0,016	0,004	68,67
Współczynnik skurczu w kierunku promieniowym $K_{BR}$ Coefficient of total shrinkage of wood in radial direction	0,07	0,03	0,10	0,01	22,22
Współczynnik skurczu w kierunku stycznym $K_{BT}$ Coefficient of total shrinkage of wood in tangential direction	0,17	0,13	0,22	0,02	11,90
Współczynnik objętościowego skurczu całkowitego $K_{BV}$ Coefficient of total volume shrinkage of wood	0,24	0,19	0,30	0,03	12,31
Wskaźnik anizotropii kurczenia się $A_B$ Anisotropy index of shrinkage	2,72	1,83	4,90	0,61	22,53
Wytrzymałość na ściskanie wzdłuż włókien $R_{c12}$ [MPa] Compression strength parallel to grain	24,70	16,94	34,24	4,13	16,72
Wytrzymałość na zginanie statyczne $R_{g12}$ [MPa] Static bending	38,63	23,89	53,71	6,93	17,93
Moduł sprężystości przy zginaniu statycznym $E_{g12}$ [MPa] Modulus of elasticity in static bending	5153,28	2785,74	7612,96	1041,00	20,20
Współczynnik jakości wytrzymałościowej przy ściskaniu wzdłuż włókien $JR_{c12}$ [km] Coefficient of compression strength parallel to grain	9,15	5,63	11,30	0,96	10,50

Tabela 1. ciąg dalszy

	M	Min	Max	SD	CV
Współczynnik jakości wytrzymałościowej przy zginaniu statycznym $JR_{g_{12}}$ [km]	14,24	10,45	18,29	1,52	10,67
Coefficient of static bending					
Współczynnik jakości wytrzymałościowej modułu sprężystości przy zginaniu statycznym $J\bar{E}_{g_{12}}$ [km]	1898,75	1167,20	2690,30	271,56	14,30
Coefficient of modulus of elasticity in static bending					

Ważnym parametrem drewna jest również jego kurczenie się. Skurcz drewna charakteryzuje się anizotropią, czyli wykazuje zróżnicowane wartości w zależności od kierunku anatomicznego. Oznaczony w tych badaniach całkowity skurcz drewna paulowni COTE-2 w kierunku wzdłuż włókien zawiera się w przedziale 0,03-0,49% (średnio 0,17%), w kierunku promieniowym 1,03-2,93% (średnio 1,99%), w kierunku stycznym 4,00-6,65% (średnio 5,19%), a objętościowo 5,82-9,09% (średnio 7,23%). W skali Monnina takie wyniki klasyfikują drewno paulowni jako mało kurcziwe [Krzysik 1978; Kozakiewicz 2013, 2018]. W literaturze wartości badanych skurczów są podobne. Według hiszpańskich testów (<https://sites.google.com/site/paulowniasengalicia>) wartości całkowitego skurczu drewna odmiany 'Cotevisa 2' w kierunku promieniowym zawierają się w przedziale 1,00-2,80%, a w kierunku stycznym 2,00-4,90%. Natomiast Kaźmierski [2009] podaje dla kierunku wzdłuż włókien 0,30%, dla kierunku promieniowego 2,3-2,7% (średnio 2,5%), dla kierunku stycznego 3,6-5,5% (średnio 4,1%), a dla skurczu objętościowego 7,3%. Otrzymane współczynniki skurczów w kierunku promieniowym (średnio 0,07), w kierunku stycznym (średnio 0,17) oraz objętościowo (średnio 0,24) są podobne do otrzymanych przez Zhu i in. [1986] dla *Paulownia elongata* (odpowiednio 0,07, 0,18 i 0,29).

Gęstość drewna przekłada się również na jego właściwości wytrzymałościowe. W przypadku paulowni niska gęstość oznacza zaskakująco korzystną wytrzymałość jej drewna [Kozakiewicz 2018]. W przeprowadzonych badaniach otrzymane wartości wytrzymałości na ściskanie wzdłuż włókien wyniosły od 16,9 do 34,2 MPa (średnio 24,7 MPa). Kaźmierski [2009] podaje przedział 27-40 MPa (średnio 33 MPa). Testy tej cechy uzyskane w Hiszpanii pozwoliły na osiągnięcie wartości w przedziale 19,3-24,82 MPa (<https://sites.google.com/site/paulowniasengalicia>). Dla drewna *Paulownia elongata* wytrzymałość na ściskanie wzdłuż włókien wynosi według Zhu i in. [1986] średnio 15,6 MPa, a według Kaymakciego i in. [2013] 35,5 MPa. Natomiast dla drewna *Paulownia fortunei* wartości wynoszą średnio 18,4 MPa [Zhu i in. 1986] lub 14,6 MPa [Kiaei 2013]. Wytrzymałość na zginanie statyczne drewna 'Cotevisa 2' w niniejszych badaniach wyniosła średnio 38,6 MPa (od 23,9 do 53,7 MPa). Wyższe wartości odnotowano w badaniach Kaźmierskiego [2009] – średnio 51 MPa (od 38 do 67 MPa) oraz w badaniach hiszpańskich – od 39,7 do 49,8 MPa (<https://sites.google.com/site/paulowniasengalicia>). Dla modułu sprężystości przy zginaniu statycznym drewna klonu COTE-2 otrzymano wartości w przedziale od 2785,7 do 7613,0 MPa (średnio 5153,3 MPa). Kaźmierski [2009] podaje podobne, chociaż nieco niższe wartości: od 2600 do 7100 MPa, średnio 4100 MPa. W przypadku drewna *Paulownia elongata*, *P. fortunei* i *P. tomentosa* wartości modułu sprężystości przy zginaniu statycznym są niższe [Zhu i in. 1986; Akyildiz, Sahin Kol 2010; Kiaei 2013; Koman, Feher 2017].

Podczas badania wytrzymałości na zginanie statyczne zaobserwowano również, że beleczki nie wydają charakterystycznego dźwięku trzeszczenia (jak niektóre rodzime gatunki), ale w wielu przypadkach w momencie maksymalnego naprężenia pękają (strzelają) i rozpadają się na dwie części. Według normy ASTM D 143-94:2000 w wielu przypadkach po zginaniu powstawał złom krótkowłóknisty.



Tabela 2.

Współczynnik korelacji ( $r$ ) wybranych właściwości fizycznych i mechanicznych drewna paulowni COTE-2 z jego gęstością wraz z oceną istotności statystycznej ( $p$ ) oraz równanie opisujące tę zależność (Y:X) wraz ze współczynnikiem determinacji ( $r^2$ )

Pearson correlation coefficient ( $r$ ) and its significance assessment ( $p$ ) for relationship between selected physical and mechanical properties of Paulownia COTE-2 wood with its density as well as function describing this relationship (Y:X) with coefficient of determination ( $r^2$ )

	$r$	$p$	$r^2$	Y:X
Gęstość umowna drewna określona na próbkach 20×20×30 mm [kg/m <sup>3</sup> ] Basic density determined for samples 20×20×30 mm	0,9953	<0,001	0,9906	$y=-5,0439+1,1022 \cdot x$
Udział substancji drzewnej [%] Proportion of wood substance	1,0000	–	1,0000	$y=1,7053E-13+15 \cdot x$
Porowatość [%] Wood porosity	-1,0000	<0,001	1,0000	$y=1500-15 \cdot x$
Skurcz całkowity w kierunku wzdłuż włókien $\beta_{\max L}$ [%] Total shrinkage of wood in longitudinal direction	-0,0932	0,490	0,0087	$y=230,4307-17,372 \cdot x$
Skurcz całkowity w kierunku promieniowym $\beta_{\max R}$ [%] Total shrinkage of wood in radial direction	0,5157	<0,001	0,2660	$y=176,3553+5,6679 \cdot x$
Skurcz całkowity w kierunku stycznym $\beta_{\max T}$ [%] Total shrinkage of wood in tangential direction	0,1347	0,318	0,0181	$y=202,539+4,799 \cdot x$
Objętościowy skurcz całkowity $\beta_{\max V}$ [%] Total volume shrinkage of wood	0,3224	0,015	0,1039	$y=169,8071+7,9664 \cdot x$
Współczynnik skurczu w kierunku wzdłuż włókien $K_{\beta L}$ Coefficient of total shrinkage of wood in longitudinal direction	-0,0932	0,490	0,0087	$y=230,4307-521,1607 \cdot x$
Współczynnik skurczu w kierunku promieniowym $K_{\beta R}$ Coefficient of total shrinkage of wood in radial direction	0,5157	<0,001	0,2660	$y=176,3553+770,0357 \cdot x$
Współczynnik skurczu w kierunku stycznym $K_{\beta T}$ Coefficient of total shrinkage of wood in tangential direction	0,1347	0,318	0,0181	$y=202,539+143,9712 \cdot x$
Współczynnik objętościowego skurczu całkowitego $K_{\beta V}$ Coefficient of total volume shrinkage of wood	0,3224	0,015	0,1039	$y=169,8071+238,9909 \cdot x$
Wskaźnik anizotropii kurczenia się $A_{\beta}$ Anisotropy index of shrinkage	-0,4821	<0,001	0,2324	$y=274,5404-17,3279 \cdot x$
Wytrzymałość na ściskanie wzdłuż włókien $R_{c12}$ [MPa] Compression strength parallel to grain	0,7371	<0,001	0,5433	$y=129,7337+5,6616 \cdot x$
Wytrzymałość na zginanie statyczne $R_{g12}$ [MPa] Static bending	0,8663	<0,001	0,7504	$y=143,1133+3,2809 \cdot x$
Moduł sprężystości przy zginaniu statycznym $\dot{E}_{g12}$ [MPa] Modulus of elasticity in static bending	0,7620	<0,001	0,5807	$y=170,9249+0,0192 \cdot x$
Współczynnik jakości wytrzymałościowej przy ściskaniu wzdłuż włókien $JR_{c12}$ [km] Coefficient of compression strength parallel to grain	0,1080	0,170	0,0117	$y=236,9699+3,5647 \cdot x$
Współczynnik jakości wytrzymałościowej przy zginaniu statycznym $JR_{g12}$ [km] Coefficient of static bending	0,5468	<0,001	0,2990	$y=135,4561+9,4419 \cdot x$
Współczynnik jakości wytrzymałościowej modułu sprężystości przy zginaniu statycznym $JE_{g12}$ [km] Coefficient of modulus of elasticity in static bending	0,4130	<0,001	0,1706	$y=194,1277+0,0399 \cdot x$



Średnia wartość współczynnika jakości wytrzymałościowej przy ściskaniu wzdłuż włókien drewna paulowni COTE-2 (9,15 km), będącego stosunkiem wytrzymałości do gęstości, jest porównywalna do średniej wartości tego współczynnika dla drewna brzoźowego (9,46 km) [Lachowicz 2011].

Uzyskane współczynniki zmienności poniżej 25% pozwalają uznać badane drewno paulowni 'Cotevisa 2' za materiał jednorodny. Wyjątkiem są wysokie wartości tej miary w przypadku skurczu całkowitego wzdłuż włókien i współczynnika skurczu całkowitego wzdłuż włókien. Wynika to ze średnich bliskich 0, ponieważ wtedy współczynnik zbliża się do nieskończoności, przez co jest wrażliwy na najmniejsze wahania średniej.

Otrzymane i przedstawione informacje dotyczące właściwości drewna paulowni pokazują dość duże ich zróżnicowanie wśród gatunków i klonów, dlatego mówiąc o właściwościach drewna paulowni, należy mieć na uwadze konkretny gatunek, klon, a nawet jego lokalizację geograficzną [Kaymakci i in. 2013; San i in. 2016].

## Wnioski

- ✦ Drewno paulowni COTE-2 osiąga bardzo niskie wartości gęstości, co przekłada się również na bardzo niskie wartości właściwości mechanicznych.
- ✦ W porównaniu do innych gatunków paulowni drewno paulowni COTE-2, pomimo niższej gęstości, osiąga wyższe wartości właściwości mechanicznych.
- ✦ Badane drewno charakteryzuje się bardzo niskim skurczem całkowitym we wszystkich kierunkach anatomicznych i niskim skurczem objętościowym, natomiast bardzo wysokim wskaźnikiem anizotropii.
- ✦ Przy zginaniu statycznym drewno paulowni charakterystycznie pęka i rozpada się.
- ✦ Drewno paulowni cechuje wysoki współczynnik jakości wytrzymałościowej przy ściskaniu wzdłuż włókien, porównywalny do drewna brzoźowego.
- ✦ Ze względu na właściwości fizyczne i mechaniczne drewno paulowni COTE-2 może być wykorzystywane jako surowiec tartaczny, sklejkowy, do wyrobu opakowań, izolacji termicznych i akustycznych, elementów mebli i artykułów gospodarstwa domowego, jednak ze względu na niskie wartości gęstości i wytrzymałości nie nadaje się w formie litej do wykonywania elementów konstrukcyjnych.

## Literatura

- Akyildiz M. H., Sahin Kol H. 2010. Some technological properties and uses of paulownia (*Paulownia tomentosa* Steud.) wood. *Journal of Environmental Biology* 31: 351-355.
- Ashori A., Nourbakhsh A. 2009. Studies on Iranian cultivated paulownia – a potential source of fibrous raw material for paper industry. *Eur. J. Wood Prod.* 67: 323-327.
- ASTM D 143-94:2000. Standard test methods for small clear specimens of timber.
- Breyer D. E., Fridley K. J., Cobeen K. 1999. Design of wood structures ASD. Department of Civil Engineering, California State Polytechnic University, Poma, CA, USA
- FSC Acts on Potential Fraud in Paulownia Wood Supply Chain. 2019. <https://fsc.org/en/news/fsc-acts-potential-fraud-paulownia-wood-supply-chain>
- Icka P., Damo R., Icka E. 2016. *Paulownia tomentosa*, a fast growing timber. The Annals of „Valahia” University of Targoviste.
- Jakubowski M., Tomczak A., Jelonek T. Grzywiński W. 2018. Wykorzystanie drewna i możliwości uprawy drzew z rodzaju *Paulownia*. *Acta Scientiarum Polonorum, Silv. Colendar. Ratio Ind. Lignar.* 17 (4): 291-297.
- Kaymakci A., Bektas I., Bal B. C. 2013. Some Mechanical Properties of Paulownia (*Paulownia elongata*) Wood. International Caucasian Forestry Symposium, 24-26 October, Artvin Turkey. 917-919.
- Każmierski D. 2009. Badanie wybranych właściwości fizycznych i mechanicznych drewna paulowni (*Paulownia* sp.). Praca inżynierska. Wydział Technologii Drewna SGGW w Warszawie.
- Kiaei M. 2013. Technological properties of Iranian cultivated Paulownia wood (*Paulownia fortunei*). *Cellulose Chemistry and Technology* 47 (9-10): 735-743.

- Koman S., Feher S. 2017. Physical and mechanical properties of *Paulownia tomentosa* wood planted in Hungaria. Wood Research 62 (2): 335-340.
- Kozakiewicz P. 2013. Paulownia (*Paulownia* sp.) – drewno z południowej Azji. Przemysł Drzewny Research & Development 2: 80-83.
- Kozakiewicz P. 2018. Ksyloteka. Paulownia. <http://pawelkozakiewicz.waw.pl/materialy>
- Krzysik F. 1961. Wpływ wilgoci i wody na podstawowe własności drewna. Ochrona Zabytków 14/1-2 (52-53): 50-65.
- Krzysik F. 1978. Nauka o drewnie. PWN, Warszawa
- Lachowicz H. 2011. Wpływ położenia i wieku drzew na wartości współczynników jakości wytrzymałościowej drewna brzozy brodawkowatej (*Betula pendula* Roth). Sylwan 155 (8): 535-545. DOI: <https://doi.org/10.26202/sywan.2010094>.
- Li P., Oda J. 2007. Flame retardancy of paulownia wood and its mechanism. Journal of Materials Science 42: 8544-8550.
- López F., Pérez A., Zamudio M. A. M., De Alva H. E., García J. C. 2012. Paulownia as raw material for solid biofuel and cellulose pulp. Biomass and Bioenergy 45: 77-86.
- Matuszak K. 2018. Drzewa Oxytree: zysk według zrównoważonego rozwoju. Puls Biznesu. <https://www.pb.pl/drewna-oxytree-zysk-wedlug-zrownowazonego-rozwoju-911658>
- Odpowiedź na interpelację K8INT4786 posła Ireneusza Zyska w sprawie dopuszczalności tworzenia na terenie Polski plantacji rośliny Oxytree (Paulownia Clon In Vitro 112), jej możliwego wpływu na środowisko naturalne oraz zasadności objęcia kontrolą Ministra Środowiska komercyjnej sprzedaży sadzonek hybrydy paulowni Oxytree. 2016. Ministerstwo Środowiska DLP-V.070.77.2016.DP.
- Opinia dotycząca dopuszczalności tworzenia na terenie Polski plantacji rośliny Oxytree (Paulownia Clon in Vitro 112®), jej możliwego wpływu na środowisko naturalne oraz zasadności obejmowania akcji jej sadzenia patronatem Ministra Środowiska. 2016. Państwowa Rada Ochrony Przyrody. PROP/KOR/2016-01-ws.
- Pirc H. 2006. Drzewa od A do Z. Bauer-Weltbild Media Sp. z o.o., Sp.k. Klub dla Ciebie, Warszawa.
- PN-63/D-04117. Fizyczne i mechaniczne własności drewna. Oznaczanie współczynnika sprężystości przy zginaniu statycznym.
- PN-77/D-04100. Drewno. Oznaczanie wilgotności.
- PN-77/D-04101. Drewno. Oznaczanie gęstości.
- PN-77/D-04103. Drewno. Oznaczanie wytrzymałości na zginanie statyczne.
- PN-79/D-04102. Drewno. Oznaczanie wytrzymałości na ściskanie wzdłuż włókien.
- PN-82/D-04111. Drewno. Oznaczanie skurczu i spęcznienia.
- PN-EN 13556:2005. Terminologia stosowana w handlu drewnem w Europie.
- Różański H. 2017. Paulownia – Paulownia w praktycznej fitoterapii. <https://rozanski.li/4691/pawlownia-paulownia-w-praktycznej-fitoterapii>
- Russell T., Cutler C., Walters M. 2008. Ilustrowana encyklopedia drzewa świata. Towarzystwo Autorów i Wydawców Prac Naukowych Universitas, Kraków.
- San H. P., Long L. K., Zhang Ch. Zh., Hui T. Ch., Seng W. Y., Lin F. Sh., Hun A. T., Fong W. K. 2016. Anatomical Features, Fiber Morphological, Physical and Mechanical Properties of Three Years Old New Hybrid Paulownia: Green Paulownia. Research Journal of Forestry 10 (1): 30-35.
- Sidan L., Zhenbo L., Yixing L., Haipeng Y., Yinglai H. 2010. Acoustic vibration properties of wood for musical instrument based on FFT of adding windows. W: International Conference on Mechanical and Electrical Technology (ICMET 2010). Key Laboratory of Bio-based Material Science and Technology (Ministry of Education) Northeast Forestry University Harbin, China.
- Smarul N., Tomczak K., Tomczak A., Jakubowski M. 2018. Wzrost sadzonek paulowni 'Shan Tong' w Leśnym Zakładzie Doświadczalnym w Murowanej Goślinie w roku 2017. Studia i Materiały CEPL 56: 158-165.
- Tomczak A., Pazdrowski W., Jelonek T., Grzywiński W. 2009. Jakość drewna sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) Część I. Charakterystyka wybranych cech i właściwości drewna wpływających na jego jakość. Sylwan 153 (6): 363-372. DOI: <https://doi.org/10.26202/sywan.2008047>.
- Wanin S. 1953. Nauka o drewnie. Wydanie I. PWRiL, Warszawa.
- Woźniak M., Gałązka A., Frąc M. 2018. Paulownia – szybko rosnące, wielofunkcyjne drzewo bioenergetyczne. Kosmos. Problemy Nauk Biologicznych 67 (4): 781-789.
- Zhu Z.-H., Chao Ch.-J., Lu X.-Y., Xiong Y.-G. 1986. Paulownia in China: Cultivation and utilization. Asian network for biological sciences. International development research centre, Beijing.