

Wytwarzanie, badania i analiza płyt pochodzących z odpadu celulozowego – case study



mgr inż.
PATRYK PUCHOWSKI
Politechnika Gdańska
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
ORCID: 0009-0000-6861-5958



dr inż.
MARCIN SZCZEPAŃSKI
Politechnika Gdańska,
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
ORCID: 0000-0001-6049-2391

Niniejszy artykuł zawiera opis procesu wytwarzania oraz badań płyt kompozytowych wykonanych z wykorzystaniem odpadu celulozowego. Jest to innowacyjny nowo powstały materiał wyprodukowany z odpadów pochodzących ze zmielonych gazet. Przeprowadzone badania mają za zadanie określić jego podstawowe właściwości fizykomechaniczne, na podstawie których dokonane zostanie porównanie z innymi płytami drewnopochodnymi dostępnymi na rynku.

Na rynku dostępnych jest wiele wyrobów budowlanych w formie twardej i cienkich płyt pochodzących z materiałów drewnopochodnych, np. płyty OSB powstające z wiórów drzewnych [1] oraz płyty MDF wytwarzane ze zmielonych włókien drzewnych [2]. Ich cechą wspólną jest fakt, że powstają one z surowców pozyskiwanych w konsekwencji ścinania drzew, np. z odpadów tartacznych w formie produktów ubocznych obróbki drewna.

Zgodnie z danymi Głównego Urzędu Statystycznego [3] w 2022 roku zebrano 15 kg odpadów z papieru oraz tektury na mieszkańca w skali kraju. Zasadne wydaje się więc poszukiwanie sposobów racjonalnego ponownego wykorzystania tego typu odpadów. Zgodnie z wiedzą autorów obecnie jedynym dostępnym w Polsce materiałem budowlanym wykorzystującym papier z recyklingu są płyty z wełny celulozowej marki Ekovilla [4]. Nie stanowią one jednak alternatywy dla płyt będących przedmiotem artykułu, z uwagi na ich przeznaczenie do zastosowania w roli izolacji cieplnej. Analizowane płyty z kolei mogą być potencjalne

zaimplementowane, np. do konstrukcji przegród budowlanych, mebli lub obudów głośników. Obecnie żaden materiał z odpadów papierowych do powyższych zastosowań nie jest produkowany.

Celem niniejszych badań jest ocena możliwości wykorzystania takich odpadów do produkcji płyt celulozowych. W toku badań ocenie poddana zostanie ich użyteczność w kontekście uzyskanych wyników, o ile okażą się one obiecujące. Określona zostanie ewentualna przydatność materiału do zastosowań w budownictwie lub przemysle meblarskim jako potencjalnego konkurenta dla płyt drewnopochodnych dostępnych na rynku. Ponadto wyznaczone w toku badań parametry pozwolą w przyszłości na opracowanie numerycznych modeli [6] materiału i wykonanie kompleksowych analiz z ich zastosowaniem w modelach obiektów o konstrukcji szkieletowej drewnianej. Dodatkowym aspektem wyników pochodzących z analiz będzie możliwość przeprowadzenia badań eksperymentalnych materiału zastosowanego w układzie ściennym jak w publikacji [7], aby ocenić i sparametryzować zachowanie się izolacji w ścianie i jej wpływ na sztywność przegrody.

Proces wytwarzania płyt do badań

Przedmiotem badań są kompozytowe płyty poliuretanowo-celulozowe, których głównym składnikiem był wypełniacz celulozowy w postaci zmielonych odpadów gazetowych. Ze względu na ich charakterystykę i proces przygotowania nie jest możliwe uściślenie granulacji. Wyprodukowano próbki o różnym procentowym udziale odpadu w masie materiału (od 10% do 50% z gradacją co 10%). Funkcję lepiszcza pełnił poliuretan składający się z następujących składników:

- polioli petrochemiczny Rokopol® RF551 (LOH = 420 KOH/g) i M6000 (LOH = 20 KOH/g),
- polimeryczny diizocyjanian metylenodifenylu (pMDI, 31% wolne grupy NCO).

Poliuretan w płytach pełni nie tylko funkcję spoiwa, ale także efektywnego izolatora termicznego, zapewniając lekkość i wytrzymałość struktury, a jednocześnie chroniąc przed wilgocią, pleśnią i degradacją biologiczną. Udziały masowe poszczególnych składników przedstawiono w tab. 1.

Proces produkcji

Przed rozpoczęciem wytwarzania kompozytów odpady celulozowe suszono w temperaturze 100°C przez 24 godziny i przesypano następnie do misy mieszalnika planetarnego. Oddzielnie mieszano odmierzone ilości składników tworzących część poliuretanową kompozytu. Całość łączono w mieszalniku przez okres 10 minut. Najpierw masę poddano prasowaniu

Tab. 1. Skład próbek poliuretanowo-celulozowych

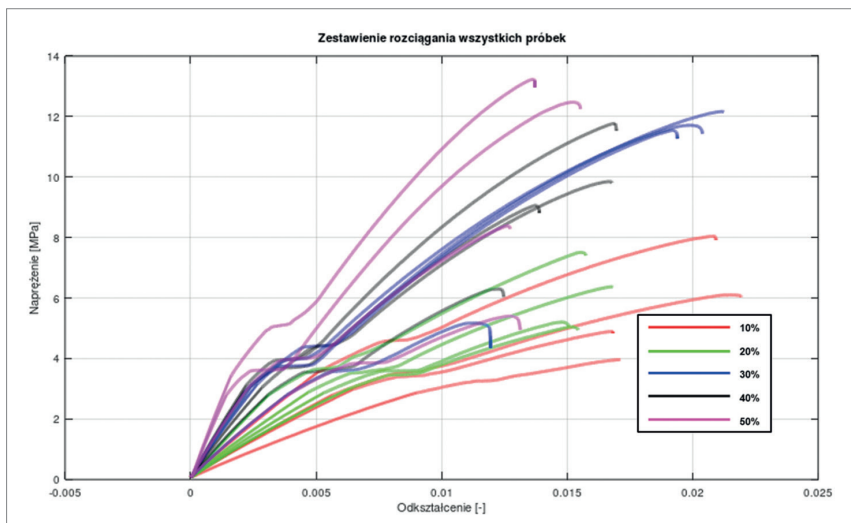
Składnik 10%		Ilość [g] przy % udziale frakcji wypełniacza naturalnego				
		20%	30%	40%	50%	
Lepiszczce	M6000	18,70 g	16,70 g	14,60 g	12,50 g	10,41 g
	RF551	75,00 g	66,80 g	58,35 g	50,00 g	41,75 g
	pMDI	77,20 g	68,70 g	60,00 g	51,50 g	42,90 g
Wypełniacz celulozowy		19,00 g	38,00 g	57,00 g	76,00 g	95,00 g



Rys. 1. Płyta kompozytowa poliuretanowo-celulozowa



Rys. 2. Próbką podczas badania rozciągania



Rys. 3. Zbiorcze zestawienie wykresów zależności naprężenie–odkształcenie dla wszystkich próbek

Tab. 2. Zależność modułu Younga od zawartości celulozy w próbce

Zawartość celulozy	Moduł Younga E	Odchylenie standardowe	Moduł Younga E średni
[%]	[GPa]	[GPa]	[GPa]
10	0,329	0,146	0,483
	0,681		
	0,472		
	0,450		
20	0,904	0,197	0,619
	0,587		
	0,517		
	0,467		
30	1,322	0,079	1,235
	1,217		
	1,167		
	-		
40	1,339	0,198	1,150
	1,288		
	1,057		
	0,916		
50	2,029	0,610	1,480
	1,908		
	1,270		
	0,713		

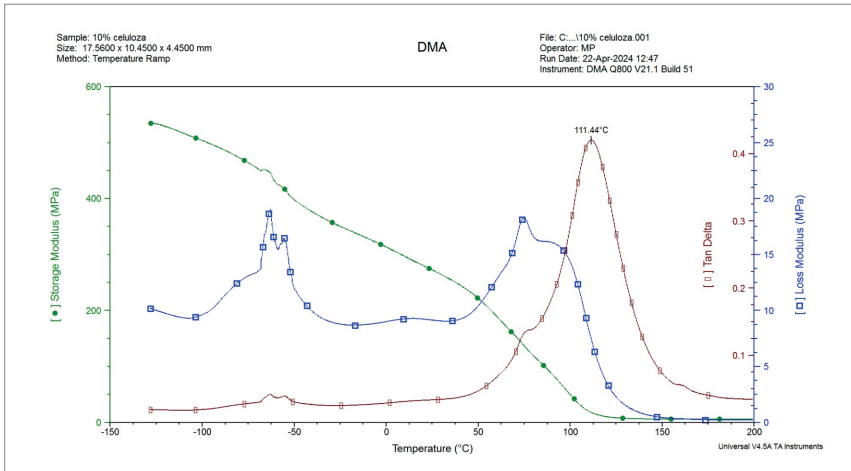
na gorąco przez 10 minut w temperaturze 100°C pod ciśnieniem 5 MPa. W celu schłodzenia i zachowania kształtu próbek materiały prasowano na zimno przez 10 minut w temperaturze pokojowej pod ciśnieniem 5 MPa. W efekcie uzyskano twarde płyty o wymiarach 200 × 100 × 10 mm zaprezentowane na rys. 1.

Badanie wytrzymałości na rozciąganie

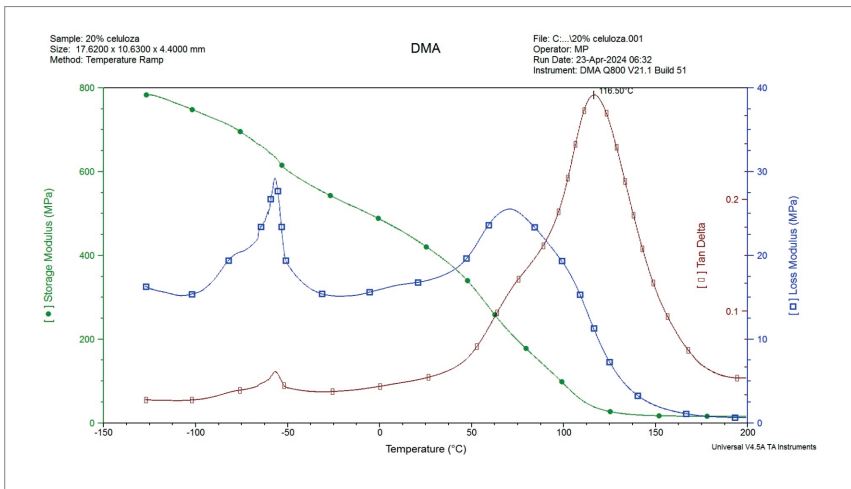
Badanie wytrzymałości na rozciąganie przeprowadzono przy zastosowaniu maszyny wytrzymałościowej ZwickRoell Z400 z wykorzystaniem szczęk zaciskanych ręcznie. Z uwagi na dostępne rozmiary szczęk i możliwości wycinania materiału nie zdecydowano się na wykonanie badań normowych. Zbadano próbki prostopadkościenne o wymiarach 200 × 10 × 10 mm. W celu pewnego ich złapania w szczękach określono odległość między nimi na 120 mm. Do pomiarów odkształceń podłużnych próbek wykorzystany został ekstensometr, którego bazę pomiarową określono na 50 mm. Przykładową próbkę umieszczoną w szczękach maszyny przedstawiono na rys. 2.

Zakres badań obejmował przebadanie po cztery próbki z każdej zawartości wkladu celulozowego. Ich zniszczenie było kruche i niesygnalizowane. Na podstawie uzyskanych wyników sporządzono wykresy zależności naprężenie–odkształcenie (rys. 3). Widoczne na nich jest, że dla jednej z próbek o zawartości 30% celulozy krzywa znacznie odbiega od pozostałych. Ma to miejsce z powodu zerwania próbki w szczękach i wynik ten został odrzucony z dalszych obliczeń. Dla każdej próby wyznaczono moduły sprężystości Younga w początkowym zakresie pracy sprężystej materiału. W tym celu skorzystano z metody obliczeniowej prawa Hooke’a [5]. Wyniki uśredniono dla kolejnych zawartości celulozy i zestawiono w tab. 2.

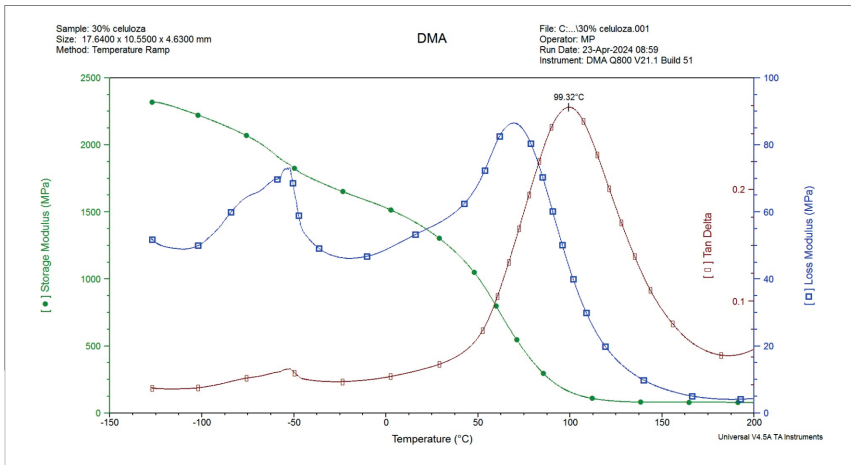
Analizując wyniki, stwierdzono, że wraz ze wzrostem zawartości celulozy w próbkach wzrasta ich sztywność oraz wytrzymałość na rozerwanie. Pięciokrotny wzrost ilości celulozy spowodował około trzykrotny wzrost modułu Younga. Porównując uzyskane wyniki, można stwierdzić, że wartości modułu sprężystości są zbliżonego rzędu wielkości do tego osiąganego przez płyty OSB w kierunku ich osi bocznej, a więc słabszej. Wartość ta wynosi 1,4 GPa [1]. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że włókna płyt wytworzonych ze zmieszanych gazet w żaden sposób nie są orientowane w wybranym kierunku, więc ich parametry będą tożsame zarówno po długości, jak i po szerokości. Podobna charakterystyka występuje w przypadku płyt MDF, których moduł sprężystości cechuje się wyższymi wartościami na poziomie 2,5 GPa [2] dla płyt grubości 10 mm.



Rys. 4. Wyniki badań DMA dla próbki z 10% zawartości celulozy



Rys. 5. Wyniki badań DMA dla próbki z 20% zawartości celulozy



Rys. 6. Wyniki badań DMA dla próbki z 30% zawartości celulozy

Analiza dynamiczna DMA

Metoda dynamicznej analizy mechanicznej DMA (Dynamic Mechanical Analysis) wykorzystywana jest do określenia właściwości lepkosprężystych materiałów polimerowych. Zespół badawczy z Wydziału Chemicznego Politechniki Gdańskiej we współpracy

z Wydziałem Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej przeprowadził badania DMA omawianych próbek celulozowych w aparacie DMA Q800. Podczas badań w próbce wymuszane jest odkształcenie sinusoidalne oraz zmienia się temperatura w komorze aparatu.

Na wykresach od rys. 4. do rys. 8. przedstawiono uzyskane krzywe dla kolejnych zawartości celulozy. Oś odciętych stanowi zmiana temperatury [°C]. Oś rzędnych po lewej stronie wykresu przedstawia moduł zachowawczy Storage Modulus [MPa]. Z kolei po zewnętrznej stronie prawej osi rzędnych znajdują się wartości modułu stratności Loss Modulus [MPa], a po jej wewnętrznej stronie wzajemnego stosunku obu modułów tzw. Tan Delta [-].

Na podstawie analizy wykresów Tan Delta [-] można zauważyć widoczny skok jego wartości w określonej temperaturze (pomiędzy 77 a 115°C). Może być to powiązane z przejściem szklistym amorficznym segmentów polioliu w konkretnej próbce, co stanowi istotny punkt w analizie materiałów polimerowych.

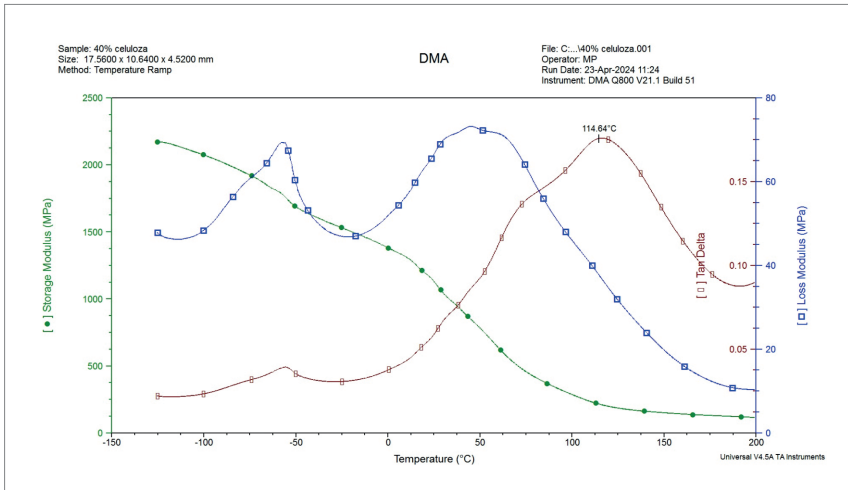
Z kolei analizując moduły uzyskane z badania DMA, można wywnioskować, że większa zawartość celulozy zwiększa parametry wytrzymałościowe materiału. Przede wszystkim widoczny jest wzrost modułów zachowawczego i stratności, co bezpośrednio wpływa na zdolność do pochłaniania energii oraz drgań przez materiał [7]. Dla próbek o 10 i 20% udziale celulozy zmiana ta jest niewielka, natomiast gwałtownie rośnie dla materiału o zawartości 30% i utrzymuje się na zbliżonym poziomie dla dwóch pozostałych zawartości.

Wnioski

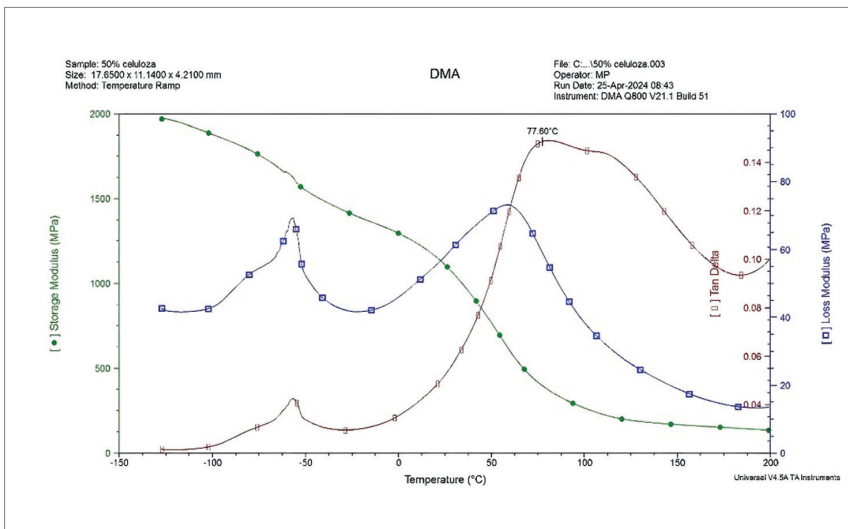
Przeprowadzone do tej pory badania jasno wskazują, że wraz ze wzrostem zawartości wkładu celulozowego w próbkach te cechują się lepszymi właściwościami mechanicznymi (moduł sprężystości) oraz dynamicznymi (moduł zachowawczy i strat). W tym kontekście otwierają się więc pozytywne perspektywy na przyszłość, związane ze skuteczniejszym i bardziej efektywnym ponownym wykorzystaniem jak największej ilości takich odpadów.

Z uwagi na zastosowanie przemysłowe najbardziej znaczące wydają się wyniki badania rozciągania. Wyznaczone wartości modułu sprężystości na poziomie 1,48 GPa dla próbek 50-procentowych są zbliżonego rzędu wielkości co te osiągalne przez płyty OSB (1,4 GPa – względem osi bocznej) lub MDF (2,5 GPa). Pozwoliłoby to na analogiczne zastosowanie tak powstałych płyt np. do konstrukcji przegród budowlanych, mebli lub obudów głośników.

Należy jednak zaznaczyć, że dopiero kompleksowe przebadanie materiału pozwoli dostarczyć jego pełne charakterystyki stanowiące zachętę dla potencjalnych inwestorów zainteresowanych wykorzystaniem go w przemyśle. W dalszym toku planowane jest przeprowadzenie badań ścisłości, zginania, udarności, przepuszczalności pary wodnej, właściwości akustycznych oraz parametrów pożarowych. Rezultaty tych analiz



Rys. 7. Wyniki badań DMA dla próbki z 40% zawartości celulozy



Rys. 8. Wyniki badań DMA dla próbki z 50% zawartości celulozy

będą kluczowe dla pełnej oceny przydatności materiału oraz mogą stanowić podstawę dla przyszłych publikacji.

W perspektywie gospodarczego wykorzystania należałoby również przeprowadzić analizę ekonomicznych i ekologicznych aspektów produkcji. Wskazane byłoby zbadanie wpływu na środowisko podczas całego cyklu życia materiału, ze szczególnym uwzględnieniem okresu po upływie jego eksploatacji. W tym celu pożądane byłoby określenie możliwości potencjalnego recyklingu kompozytu poliuretanowo-celulozowego.

BIBLIOGRAFIA

- [\[1\] https://www.swisskrono.com/pl-pl/produkty/produkty-budowlane/plyty-osb/dane-techniczne/#/](https://www.swisskrono.com/pl-pl/produkty/produkty-budowlane/plyty-osb/dane-techniczne/#/) (data dostępu: 27.07.2024).
- [\[2\] https://www.ekoplyta.com/pl/plyta-MDF.html](https://www.ekoplyta.com/pl/plyta-MDF.html) (data dostępu: 27.07.2024).
- Główny Urząd Statystyczny, Departament Rolnictwa i Środowiska, zespół autorski pod kierunkiem M. Wojciechowskiej, Ochrona Środowiska 2023, Warszawa 2023.
- [\[4\] https://ekovilla-polska.pl/pl/](https://ekovilla-polska.pl/pl/) (data dostępu: 12.11.2024).
- Bielewicz E., Wytrzymałość materiałów, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, wydanie VIII, Gdańsk 2006.
- Szczepeński M., Migda W., Analysis of Validation and Simplification of Timber-Frame Structure Design Stage with PU-Foam Insulation, „Sustainability” 2020, 12, no. 15: 5990, <https://doi.org/10.3390/su12155990>.

[7] Szczepeński M., Migda W., Jankowski R., Timber-frame house resistant to dynamic loads-analysis of wall panel filled with polyurethane foam, „Vibrations in Physical Systems” 2016, 27, s. 347-354.

DOI: 10.5604/01.3001.0054.8466

PRAWIDŁOWY SPOSÓB CYTOWANIA
 Puchowski Patryk, Szczepeński Marcin, 2024, Wytwarzanie, badania i analiza płyt pochodzących z odpadu celulozowego – case study, „Builder” 12 (329).I
 DOI: 10.5604/01.3001.0054.8466

STRESZCZENIE:

Niniejszy artykuł zawiera opis procesu wytwarzania oraz badań płyt kompozytowych wykonanych z wykorzystaniem odpadu celulozowego. Ten nowo powstały materiał wyprodukowany został z odpadów papierowych w postaci zmieszanych gazet w kilku wariantach składu o różnym udziale procentowym wsadu celulozowego. W celu określenia jego właściwości mechanicznych i fizycznych przeprowadzono dwa badania laboratoryjne. Z wykorzystaniem maszyny wytrzymałościowej zbadano zachowanie się materiału podczas próby rozciągania osiowego i na podsta-

wie wyników obliczono moduł sprężystości. Z kolei poprzez dynamiczną analizę mechaniczną DMA (ang. Dynamic Mechanical Analysis) określone zostały właściwości lepko-sprężyste materiału w zależności od zmiany temperatury. Otrzymane wyniki wraz z wynikami przyszłych badań pozwolą wyzycjonować badany materiał wśród podobnych rozwiązań płyt drewnopochodnych dostępnych na rynku. Na tej podstawie możliwe będzie określenie jego potencjalnej przydatności do zastosowania w przemyśle np. budowlanym.

SŁOWA KLUCZOWE:

plyta drewnopochodna, celuloza, właściwości mechaniczne, DMA

ABSTRACT:

PRODUCTION, TESTING AND ANALYSIS OF BOARDS PRODUCED FROM CELLULOSE WASTE – CASE STUDY.

This article describes the manufacturing process and testing of boards made using cellulose waste. This newly created material was produced from paper waste in the form of ground newspapers in several composition variants with different percentages of cellulose input. In order to determine its mechanical and physical properties, two laboratory tests were carried out. The behavior of the material during the axial tensile test was tested using a testing machine and the modulus of elasticity was calculated based on the results. In turn, the viscoelastic properties of the material were determined using Dynamic Mechanical Analysis (DMA) depending on the temperature change. The obtained results, together with the results of future studies, will allow the tested material to be positioned among similar solutions of wood-based boards available on the market. On this basis, it will be possible to determine its potential usefulness for use in industries such as construction.

KEYWORDS:

wood-based board, cellulose, mechanical properties, DMA