

ZAŁĄCZNIK NR 3a

Autoreferat przedłożony Radzie Doskonałości Naukowej

**Wykorzystanie dodatków mineralnych na bazie
węglanu wapnia w płytach drewnopochodnych i
kompozytach wzmacnianych włóknem drzewnym**

Tomasz Ożyhar

Uitikon, 2022 r.

Spis treści

1. Imię i nazwisko wnioskodawcy	1
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.....	1
3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.	1
4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.)....	1
4.1 Tytuł osiągnięcia naukowego	1
4.2 Wykaz publikacji monotematycznych składających się na osiągnięcie naukowe	2
4.3 Określenie celu naukowego i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.....	4
4.3.1 Wprowadzenie: uzasadnienie podjęcia badań	5
4.3.2 Cel i zakres badań	6
4.3.3 Metodologia badań.....	8
4.3.5 Podsumowanie wyników	15
4.3.6 Wnioski	22
5. Prezentacja znaczącej działalności naukowej lub artystycznej prowadzonej w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub kulturalnej, w szczególności w instytucjach zagranicznych	25
5.1 Podsumowanie osiągnięć naukowych	25
5.2 Przegląd pozostałych prac badawczych stanowiących istotny wkład w naukę.....	26
5.2.1 Badania właściwości materiałowych wybranych gatunków liściastych.....	27
5.2.2 Badania nad wpływem nawożenia na wzrost drzew.....	29
5.3 Współpraca naukowa z międzynarodowymi ośrodkami badawczymi.....	33
6. Prezentacja osiągnięć dydaktycznych i organizacyjnych oraz osiągnięć w zakresie popularyzacji nauki.....	34
6.1 Doświadczenie dydaktyczne.....	34
6.2 Doświadczenie organizacyjne w zarządzaniu projektami naukowo-badawczymi.....	35
7. Informacje uzupełniające o karierze zawodowej	36
7.1 Działalność patentowa.....	36
7.2 Działalność w panelach ekspertów	37
8. Bibliografia	38

1. Imię i nazwisko wnioskodawcy

Tomasz Ożyhar

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

2013 **Dr. sc. ETH Zürich**, Institut für Baustoffe (IfB), Gruppe Holzphysik, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETH Zürich), Zurych, Szwajcaria

Tytuł rozprawy doktorskiej: Zależna od wilgotności i czasu ortotropowa charakterystyka mechaniczna drewna bukowego (tytuł oryginalny: *Moisture- and time-dependent orthotropic mechanical characterization of beech wood*)

2008 **Dipl.-Ing. silv. Univ. (nauki leśne)**, Technische Universität München (TUM), Monachium, Niemcy

Tytuł rozprawy magisterskiej: Analiza chemiczna drewna świerkowego poddanego obróbce termicznej (tytuł oryginalny: *Chemische Untersuchungen an thermisch behandeltem Fichtenholz*)

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.

2013-obecnie Senior Project Manager (*starszy kierownik projektu*), R&D, Omya International AG, Froschackerstrasse 6 CH-4622 Egerkingen, Szwajcaria

2010-2013 Wissenschaftlicher Assistent (*asystent naukowo-badawczy*), Institut für Baustoffe (IfB), Gruppe Holzphysik Wood Physics Group, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETH Zürich), Zurych, Szwajcaria

4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.).

4.1 Tytuł osiągnięcia naukowego

Wykorzystanie dodatków mineralnych na bazie węgla wapnia w płytach drewnopochodnych i kompozytach wzmacnianych włóknem drzewnym

4.2 Wykaz publikacji monotematycznych składających się na osiągnięcie naukowe

Przedłożone osiągnięcie naukowe składa się z sześciu odrębnych, powiązanych ze sobą tematycznie oryginalnych publikacji naukowych, oznaczonych w autoreferacie symbolem **H** i chronologicznie ponumerowanych od 1 do 6.

Wszystkie publikacje znajdują się w indeksowanych biometrycznych bazach naukowych.

Sumaryczny Impact Factor – IF, określony na podstawie roku wydania publikacji, wynosi **15,730**.

Sumaryczna punktacja publikacji zgodna z rokiem edycji, przez Ministerstwo Edukacji i Nauki (poprzednio Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego), list punktowanych czasopism naukowych, równa się **660 pkt**.

We wszystkich prezentowanych publikacjach byłem autorem wiodącym i korespondencyjnym. Wykorzystane zostały w nich opracowane przeze mnie koncepcje oryginalnych metodyk badawczych oraz analiz i interpretacji wyników przeprowadzonych eksperymentów. Będąc autorem wiodącym odpowiadałem za końcowe opracowanie językowe i graficzne manuskryptów.

W dwóch publikacjach, tj. **H1** i **H5** jestem jedynym autorem.

Poniżej został przedstawiony szczegółowy opis mojego udziału w przedłożonych publikacjach.

[H1] Ozyhar T (2021) Short Notes: Application of mineral filler in medium density fiberboard (MDF) and its effect on material properties as a function of particle size. Wood Res 66:891–899. <https://doi.org/10.37763/wr.1336-4561/66.5.891899>

(**IF**₂₀₂₀ = **1,139**; punktacja **MEiN**₂₀₂₁ = **70** pkt)

Mój wkład obejmował opracowanie koncepcji i zaplanowanie doświadczeń a także protokołów pomiarowych, a następnie przeanalizowanie i zinterpretowanie otrzymanych wyników badań, oraz przygotowanie manuskryptu. Wytworzenie materiału badawczego w postaci płyt drewnopochodnych i określenie ich podstawowych właściwości zostało wykonane przez zewnętrznego usługodawcę, pozostałe wymienione powyżej działania zrealizowałem samodzielnie. Jestem jedynym autorem a tym samym autorem korespondencyjnym tej publikacji. Mój procentowy wkład w powstanie publikacji szacuję na 100%.

- [H2] **Ozyhar T**, Tschannen C, Thoemen H, Zoppe JO (2021) Evaluating the use of calcium hydrogen phosphate dihydrate as a mineral-based fire retardant for application in melamine-urea-formaldehyde (MUF)-bonded wood-based composite materials. Fire Mater. <https://doi.org/10.1002/fam.3009>
(IF₂₀₂₀ = **2,407**; punktacja MEiN₂₀₂₁ = **70** pkt)

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu koncepcji, zakresu metodyki badań, zaplanowaniu doświadczeń, interpretacji wyników, sformułowaniu wniosków oraz przygotowaniu manuskryptu. Jestem wiodącym i korespondencyjnym autorem. Mój procentowy wkład w powstanie publikacji oceniam na 55%.

- [H3] **Ozyhar T**, Tschannen C, Hilty F, Thoemen H, Schoelkopf J, Zoppe JO (2021) Mineral-based composition with deliquescent salt as flame retardant for melamine-urea-formaldehyde (MUF)-bonded wood composites. Wood Sci Technol 55:5–32. <https://doi.org/10.1007/s00226-020-01230-0>
(IF₂₀₂₀ = **2,506**; punktacja MEiN₂₀₂₁ = **200** pkt)

Mój wkład w powstanie pracy polegał na opracowaniu koncepcji, zakresu i metodyki badań, zaplanowaniu doświadczeń, interpretacji wyników, sformułowaniu wniosków oraz przygotowaniu końcowej wersji manuskryptu. Jestem autorem korespondencyjnym a mój wkład w powstanie publikacji oceniam na 55%.

- [H4] **Ozyhar T**, Baradel F, Zoppe J (2020) Effect of functional mineral additive on processability and material properties of wood-fiber reinforced poly(lactic acid) (PLA) composites. Compos Part A Appl Sci Manuf 132:.. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.105827>
(IF₂₀₂₀ = **7,664**; punktacja MEiN₂₀₂₀ = **140** pkt)

Mój wkład w powstanie pracy polegał na opracowaniu koncepcji, zakresu i metodyki badań, zaplanowaniu eksperymentów, interpretacji wyników, sformułowaniu wniosków oraz przygotowaniu końcowej wersji manuskryptu. Jestem wiodącym i korespondencyjnym autorem. Mój procentowy wkład w powstanie publikacji oceniam na 70%.

- [H5] **Ozyhar T** (2020) Application of mineral filler in surface layer of three-layer particle board and its effect on material properties as a function of filler content. Int Wood Prod J 11:109–114. <https://doi.org/10.1080/20426445.2020.1735753>
(punktacja MEiN₂₀₂₀ = **40** pkt)

Mój wkład obejmował opracowanie koncepcji, zaplanowanie doświadczeń i opracowanie protokołów pomiarowych, ocenę i interpretację wyników oraz przygotowanie manuskryptu. Wytworzenie materiału badawczego w postaci płyt drewnopochodnych i określenie ich podstawowych właściwości zostało

wykonane przez zewnętrznego usługodawcę, pozostałe działania zrealizowałem samodzielnie. Jestem jedynym autorem i autorem korespondencyjnym. a mój wkład w powstanie publikacji szacuję na 100%.

[H6] **Ozyhar T**, Depnering T, Ridgway C, Welker M, Schoelkopf J, Mayer I, Thoemen H (2020) Utilization of inorganic mineral filler material as partial replacement for wood fiber in medium density fiberboard (MDF) and its effect on material properties. Eur J Wood Wood Prod 78:75–84. <https://doi.org/10.1007/s00107-019-01480-1>
(IF₂₀₂₀ = **2,014**; punktacja MEiN₂₀₂₀ = **140** pkt)

Mój wkład w powstanie pracy polegał na opracowaniu koncepcji, zakresu i metodyki badań, zaplanowaniu doświadczeń, interpretacji wyników i sformułowaniu wniosków oraz napisaniu manuskryptu. Jestem wiodącym i korespondencyjnym autorem a mój procentowy wkład w jej powstanie oceniam na 55%.

Powyższe publikacje są wynikiem prac naukowych prowadzonych przeze mnie w latach 2014-2021, w firmie Omya International AG, w ramach wewnętrznego projektu badawczego. Celem projektu było zidentyfikowanie i opracowanie nowych zastosowań przemysłowych dodatków mineralnych, powstających na bazie węglanu wapnia, do wykorzystania w płytach drewnopochodnych i w kompozytach wzmacnianych włóknem drzewnym.

4.3 Określenie celu naukowego i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

Poniższe omówienie nie zawiera pełnego przeglądu badań prowadzonych w ramach osiągnięcia naukowego. Szczegółowy opis prac eksperymentalnych został zawarty w publikacjach od **H1** do **H6**, znajdujących się w aneksie nr 5.

Celem i głównym motywem przeprowadzonych badań było wykazanie możliwości wykorzystania dodatków mineralnych do wytwarzania kompozytów drewnopochodnych. Zastosowanie oryginalnych metodyk i technik badawczych służyło do rozwiązania konkretnych zagadnień naukowych, potencjalnie związanych z wdrożeniem przemysłowym. Najważniejsze z nich zostały szczegółowo omówione i przedyskutowane w kolejnych punktach autoreferatu.

W podsumowaniu dokonano przeglądu najważniejszych wyników badań, wraz z podkreśleniem ich znaczenia dla bezpośrednich wdrożeń przemysłowych, łączących się z wytyczeniem głównych kierunków przyszłych przedsięwzięć naukowych.

4.3.1 Wprowadzenie: uzasadnienie podjęcia badań

Płyty drewnopochodne, w tym płyty pilśniowe (MDF) i płyty wiórowe, składają się z głównego surowca w postaci cząstek drewna o różnej morfologii, kleju termoutwardzalnego, oraz w zależności od ostatecznej struktury z określonych dodatków, do których należą utwardzacze, środki hydrofobowe, farby itp. [1]. Z wyjątkiem płyt gipsowych i cementowych [2, 3], minerały są rzadko stosowane w kompozytach drewnopochodnych, w związku z tym w literaturze przedmiotu znajduje się na ten temat niewiele informacji.

Przeprowadzone do tej pory badania nad wykorzystaniem minerałów w płytach drewnopochodnych koncentrowały się głównie na poprawie ich właściwości ognioodpornych poprzez włączenie do struktury kompozytów trójwodzianu glinu (ATH), [4, 5] nanoglinka, [6] lub wermikulitu ekspandowanego [7].

Jednocześnie w przemyśle papierniczym w celu obniżenia kosztów produkcji powszechnie stosuje się dodatki mineralne, jako konkurencyjne cenowo wypełniacze, uzupełniające masę włókna celulozowego [8]. Do najważniejszych substytutów włókien celulozowych w produkcji papieru należy mielony węglan wapnia (GCC). Częściowe zastąpienie węglanem wapnia włókien celulozowych pozwala na osiągnięcie wymaganych właściwości wytrzymałościowych papieru i daje możliwość bezpośredniego obniżenia kosztów produkcji np. podczas procesu suszenia.

Generalnie, zastosowanie wypełniacza GCC ze względu na niższy poziom cen w porównaniu z włóknami drzewnymi znacząco wpływa na redukcję surowcowych nakładów finansowych. Biorąc pod uwagę pewne podobieństwa struktury płyt MDF i papieru, staje się interesującym zagadnieniem, zbadanie możliwości wykorzystania wypełniacza GCC, jako częściowego substytutu włókien drzewnych.

Do czasu podjęcia badań prowadzonych w ramach niniejszego osiągnięcia naukowego, potencjał wykorzystania, substytutu włókien w postaci wypełniaczy mineralnych a szczególnie GCC, oraz określenia ich wpływu na właściwości fizyko-mechaniczne płyt MDF był praktycznie nieznanymi i w niewielkim stopniu przeanalizowany [9, 10].

Ważnymi zagadnieniami dotyczącymi możliwości zastosowania wypełniaczy mineralnych, uzupełniających surowiec drzewny, pozostaje określenie wpływu wielkości cząstek i zawartości dodawanych substancji na podstawowe właściwości mechaniczne i fizyczne wytwarzanych płytowych kompozytów drzewnych.

Oprócz węgla wapnia, stosowanego jako wypełniacz, nabierają dużego znaczenia inne związki mineralne zawierające wapń. Wśród nich, fosforan wapnia wykorzystywany w tkaninach bawełnianych [11], podwyższający właściwości ognioodporne, wykazuje obiecujący potencjał do wykorzystania również w płytach drewnopochodnych. Dotychczas prowadzone badania nad podobnym użyciem związków mineralnych w postaci tlenków magnezu, szczawianu wapnia i fosforanu magnezowo-amonowego (struwit) [4, 12, 13], nie wyjaśniły w pełni mechanizmu ich oddziaływania w warunkach pożaru.

Ponadto brakuje wyczerpujących danych doświadczalnych, określających zakres wykorzystania funkcjonalnych związków mineralnych na bazie węgla wapnia, służących np. do poprawy materiałowych właściwości kompozytów drzewnych. Zastosowanie węgla wapnia, jako materiału nośnego dla składników aktywnych, zwiększa obszar jego zastosowania oraz daje możliwość tworzenia nowych funkcjonalnych związków mineralnych.

Ukierunkowane użycie zmodyfikowanego węgla wapnia charakteryzującego się wysoką porowatością pozwala na wprowadzenie w jego strukturę dużej liczby różnych substancji aktywnych przy jednoczesnym równomiernym ich rozmieszczeniu w objętości matrycy materiału kompozytowego. W konsekwencji sposób i rodzaj dokonanych modyfikacji kompozytu ma wpływ np. na opóźnienie procesu palenia.

Węgiel wapnia będący doskonałym materiałem nośnym substancji aktywnych, do których między innymi należy bezwodnik alkenyloburszynowy (ASA), wykazuje ponadto obiecujący potencjał jako środek sprzęgający w produkcji kompozytów na bazie polilaktydu (PLA) wzmacnianych włóknem drzewnym.

4.3.2 Cel i zakres badań

Ogólnym celem pracy było zbadanie sposobów wykorzystania minerałów wapnionośnych w obszarach zastosowań, które nie były wcześniej poddawane kompleksowej analizie.

W szczególności zbadano możliwości:

- i. Zastosowania GCC, jako substytutu surowca drzewnego w wybranych płytach drewnopochodnych;
- ii. Wykorzystania minerałów funkcjonalnych do poprawy właściwości materiałowych płyt drewnopochodnych i kompozytów polimerowych wzmacnianych włóknem drzewnym.

Przeprowadzone badania miały głównie charakter podstawowy, rozszerzający wiedzę naukową na temat wykorzystania GCC, jako substytutu, pełniącego rolę wypełniacza w strukturze drzewnych kompozytów płytowych. Szczegółowo precyzowały granice technologicznego zastosowania GCC w płytach MDF i wiórowych.

W wyniku przeprowadzonych badań zostały sprawdzone możliwości użycia GCC, jako składnika wypełniającego w płytowych kompozytach drewnopochodnych włóknistych i wiórowych. Określono jego wpływ na istotne właściwości fizyko-mechaniczne płyt MDF i wiórowych, które przedstawiono w publikacjach **H1**, **H5** i **H6**.

Przeanalizowano także zależności występujące między cechami morfologicznymi cząstek drzewnych a zawartością wypełniacza, decydujące o przebiegu procesu technologicznego, kształtującego parametry płyt odpowiadające standardom produkcyjnym i materiałowym.

Wpływ minerałów funkcjonalnych wykraczający poza zastępowanie masy drzewnej w płytowych kompozytach drewnopochodnych zbadano poprzez określenie:

- i. Stopnia poprawy właściwości ognioochronnych płyt drewnopochodnych;
- ii. Wzrostu poziomu przyczepności do włókien w kompozytach PLA wzmocnianych włóknami drzewnymi.

Dokonano analizy zdolności ognioochronnej kompozycji uniepalniających: FRC składającej się z nośnika mineralnego w postaci powierzchniowo przereagowanego węglanu wapnia wzbogaconego roztworem chlorku wapnia (**H3**), oraz środka zawierającego fosforan dwuwapniowy dwuwodny (DCPD) (**H2**). Oceniano skuteczność obu struktur na niepalność, odporność ogniową a także zachowanie płyt drewnopochodnych ze spoiwem melaminowo-mocznikowo-formaldehydowym (MUF) w warunkach pożaru.

Kolejne badania dotyczyły wykorzystania, w kompozytach polimerowych wzmocnianych włóknami drzewnymi, funkcjonalnego węglanu wapnia (GCC) otrzymanego poprzez powierzchniowe pokrycie ASA, jako czynnika sprzęgającego, zdolnego do poprawy przyczepności włókien w polimerowej matrycy PLA (**H4**).

4.3.3 Metodologia badań

Badania wykonane w ramach przedstawionego osiągnięcia naukowego obejmowały zastosowanie dodatków mineralnych w dwóch głównych obszarach:

- i. Substytutu włókien lub wiórów drzewnych w płytach drewnopochodnych;
- ii. Funkcjonalizacji poprawiającej wybrane właściwości materiałowe płyt drewnopochodnych i kompozytów wzmacnianych włóknem drzewnym.

W dalszej części rozdziału omówiono zakres głównych badań oraz przeanalizowano pewne ograniczenia, które miały miejsce podczas ich realizacji.

Badania nad zastosowaniem węgla wapnia jako substytutu włókien i wiórów drzewnych

Badania związane z wykorzystaniem surowców mineralnych, jako substytutu włókien i wiórów drzewnych w płytach drewnopochodnych, dotyczyły, oprócz względów naukowych, również wdrożenia tych technologii do przemysłu, przy wykorzystaniu już istniejących procesów produkcyjnych.

Wybór minerału

Wybór rodzaju minerału, w postaci węgla wapnia (GCC) został uznany za najbardziej obiecujący i odpowiedni z kilku powodów, wynikających głównie z jego powszechnego występowania, dostępności i niskiej ceny.

Ponadto w zależności od konkretnego zastosowania produkty wytwarzane na bazie GCC charakteryzują się cząstkami o określonym kształcie i zdefiniowanej granulacji. Węgiel wapnia GCC należy również do grupy związków mineralnych wykorzystywanych, jako materiał nośny dla substancji aktywnych, ulegających łatwej modyfikacji, wykazanej w publikacjach **H3** i **H4**.

Koncepcja użycia GCC, jako substytutu masy drzewnej w płytach drewnopochodnych, wynika również z jego masowego i sprawdzonego stosowania w papiernictwie.

Wykorzystanie minerałów w istniejącym procesie produkcyjnym

W trakcie projektowania doświadczeń uwzględniano formę aplikacji minerałów, mając na uwadze ich przyszłe zastosowanie przemysłowe. Należało odpowiedzieć na pytanie, czy minerał powinien być stosowany w postaci proszku, czy zawiesiny wodnej.

Wstępne próby przeprowadzone w ramach omawianego osiągnięcia naukowego wykazały, że zastosowanie GCC w postaci zawiesiny wodnej jest korzystniejsze w procesie wytwarzania płyt MDF [14]. Na podstawie wstępnych wyników nieopublikowanych badań stwierdzono, że użycie wodnej zawiesiny mineralnej w linii rozdmuchowej jest rozwiązaniem preferowanym. Natomiast w przypadku prób w skali laboratoryjnej i podczas produkcji płyt wiórowych, użycie proszku okazało się korzystniejsze. W związku z tym, wszystkie próby przeprowadzone w ramach niniejszego badania obejmowały zastosowanie minerałów wyłącznie w postaci proszku.

Oprócz formy aplikacji, za istotny czynnik uznano moment dodania minerału w procesie technologicznym. Stwierdzono, że spośród trzech możliwości takich jak: dodanie przed nałożeniem żywicy na włókno, razem z żywicą i po nałożeniu żywicy na włókna, ta ostatnia ma najmniejszy wpływ na właściwości mechaniczne [14]. Dlatego też, we wszystkich badaniach związki mineralne były zawsze dodawane do materiału drzewnego po nałożeniu żywicy na włókna/wióry.

Podczas procesu wytwarzania wpływ dodatku mineralnego na wzrost temperatury w płycie został uznany za krytyczny, ponieważ może oddziaływać na utwardzanie żywicy i końcową wytrzymałość produktu.

Badania obejmowały pomiar temperatury na powierzchni oraz w środku płyt podczas procesu prasowania. Pomiaru zmian temperatury dokonywano w płytach wytwarzanych z dodatkami mineralnymi i bez dodatków podczas prasowania w prasie gorącej, analizując ich wpływ na proces utwardzania żywicy.

Istotną kwestią, która została poruszona w badaniach, było rozmieszczenie minerału w matrycy włókien (**H1**, **H5**, **H6**). Przyjęto, że jednorodny rozkład jest warunkiem koniecznym i niezbędnym, w przeciwieństwie do aglomeratów lub rozkładu warstwowego, które mogą negatywnie oddziaływać na właściwości wytrzymałościowe produktu końcowego, zakłócając strukturę ułożenia włókien. Wpływ niejednorodnego rozkładu minerałów w płycie, oceniono

poprzez analizę jakościową skaningowych mikrografów elektronowych (SEM) wykonanych na przekrojach poprzecznych wytworzonych płyt.

Wpływ wielkości cząstek i zawartości GCC na właściwości materiałowe płyt

Celem badań było poszerzenie wiedzy naukowej w odniesieniu do możliwości zastosowania GCC, jako wypełniacza, w części zastępującej włókna drzewne w płytach MDF i wiórowych, oraz sprawdzenia jego oddziaływania na właściwości materiałowe płyt.

Badania koncentrowały się na określeniu zależności między wielkością cząstek (**H1**) a zawartością GCC (**H5**, **H6**) scharakteryzowaną podstawowymi właściwościami fizyko-mechanicznymi obu rodzajów płyt. Do badanych właściwości należały moduł sprężystości, wytrzymałość na zginanie i rozciąganie, stabilność wymiarowa (TS) oraz przepuszczalność cieczy, dla dwóch wypełniaczy GCC o różniącej się ważonej medianie wielkości cząstek d_{50} równej 2,0 i 30 μm (**H1**).

W badaniach skoncentrowano się na wpływie wypełniacza na właściwości kompozytu w funkcji jego zawartości, który wyniósł do 30% w płytach MDF i do 40% w płytach wiórowych (**H5**, **H6**).

Ze względu na szerokie zastosowanie obu rodzajów płyt dokonano analizy oddziaływania dodatku wypełniacza w płytach MDF o gęstościach od $550 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ do $850 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. W trójwarstwowych płytach wiórowych wypełniacz GCC dodawano nie do całej płyty, ale tylko do warstw zewnętrznych. Rozkład gęstości na przekroju poprzecznym płyty określano poprzez profil gęstości mierzony za pomocą rentgenowskiego skanera gęstości.

Wpływ dodatków mineralnych na proces utwardzania żywicy

Oprócz określenia zależności między morfologią cząstek i zawartością w płycie wypełniacza GCC, zbadano również jego wpływ na proces utwardzania żywicy mocznikowo-formaldehydowej (UF). Korelację między węglanem wapnia i żywicą UF uznano za najważniejszy czynnik kształtujący właściwości wytrzymałościowe i fizyczne płyt. W tym celu zbadano przede wszystkim wpływ pH i zdolność buforowania związaną z zastosowaniem GCC, na proces utwardzania żywicy UF, a w następstwie właściwości mechaniczne płyty MDF i wielkość emisji formaldehydu.

Szczególną uwagę zwrócono na interakcje zachodzące między dodatkiem węgla wapnia a czasem utwardzania żywicy UF (**H6**). Przeprowadzone na próbkach UF eksperymenty reologiczne charakteryzowały oddziaływanie dodatku węgla wapnia na przebieg procesu utwardzania.

Czas utwardzania, będący istotnym parametrem w tym procesie, określono, jako czynnik hipotetycznie negatywny, mający wpływ na utwardzanie żywicy UF. Pomiar czasu utwardzania, metodą reologii rotacyjnej, przeprowadzono na próbkach UF z dodatkiem węgla wapnia do żywicy UF (w przeliczeniu na suchą masę) i porównywano z próbkami kontrolnymi bez dodatku węgla, przy zastosowaniu w obu przypadkach takiej samej ilości katalizatora w przeliczeniu na stałą masę żywicy.

Badania nad zastosowaniem funkcjonalnych dodatków mineralnych w celu poprawy właściwości materiałowych

Zastosowanie minerałów w celu poprawy właściwości uniepalniających

Wyniki wstępnych prób przeprowadzonych przed rozpoczęciem zasadniczych badań (badania niepublikowane) wskazywały, że zastosowanie GCC, jako dodatku do płyt drewnopochodnych o zawartości wypełniacza do 30% masy, nie prowadziło do znaczącej poprawy odporności ogniowej produktu końcowego. W związku z tym, dalsze badania zmierzały do wykorzystania minerałów funkcjonalnych w celu poprawienia ognioodporności wyrobów drewnopochodnych.

Oceniano dwa różne dodatki mineralne pod kątem ich użycia, jako środków obniżających i opóźniających palność (FR) płyt drewnopochodnych. Badano zastosowanie DCPD, uwodnionego minerału, jako potencjalnego uniepalniacza (**H2**). Minerał ten został wybrany, ponieważ oczekuje się, że będzie wykazywał właściwości uniepalniające podobne do innych niehalogenowanych nieorganicznych związków fosforu, takich jak na przykład polifosforan amonu (APP) [15, 16]. Właściwości uniepalniające DCPD zostały wcześniej wykazane w tkaninie bawełnianej [11]. Jego zastosowanie w płytach drewnopochodnych do tej pory jednak nie zostało zbadane. Rozpatrzono również zastosowanie nowego typu FR tj. FRC opartego na nośniku mineralnym o dużej porowatości, wzbogaconego roztworem chlorku wapnia (**H3**).

Oba omawiane powyżej dodatki mineralne, choć różnią się składem, miały działać podobnie poprzez uwalnianie pary wodnej w czasie pożaru. W przypadku FRC, oczekiwano, że zaabsorbowana i zmagazynowana w porowatej strukturze mineralnego nośnika woda, będzie działać, jako środek obniżający palność poprzez uwalnianie pary wodnej.

Podejście to jest unikatowe, ponieważ pozwala na zastosowanie substancji higroskopijnej i magazynowanie wody wolnej bez konieczności impregnacji włókna. Technologia ta opiera się na założeniu, że woda może być magazynowana lokalnie w porowatej strukturze nośnika. W przeciwieństwie do FRC, DCPD zawiera wodę w strukturze krystalicznej uwodnionego minerału. Podobne zjawisko występuje w przypadku innych uwodnionych minerałów, takich jak ATH, tlenki magnezu lub struwit, które są często opisywane, jako środki opóźniające palenie (FR) materiałów drewnopochodnych [4, 5, 17]. W związku z tym, można się spodziewać, że w przypadku DCPD nastąpi uwalnianie pary wodnej w trakcie pożaru, przyczyniające się do poprawy odporności ogniowej poprzez rozcieńczanie gazów palnych.

Szeroko zakrojone badania nad możliwościami zastosowania obu minerałów, jako FR obejmowały zestaw eksperymentów skupionych na ocenie ich potencjału uniepalniającego poprzez:

1. Charakterystykę minerałów w odniesieniu do ich oczekiwanego potencjału uniepalniającego;
2. Badanie wpływu zastosowania minerałów na właściwości materiałowe kompozytów drzewnych i na ich parametry obróbki.

Charakterystyka minerałów obejmowała określenie ilości wody zmagazynowanej w strukturze krystalicznej minerału dla DCPD oraz w strukturze porowatej nośnika FRC. Ponadto, ustalenie stabilności temperaturowej i uwalnianie pary wodnej były istotną częścią badań, przyczyniającą się do zrozumienia mechanizmu procesu gaszenia pożaru.

Do scharakteryzowania środków ogniochronnych wybrano analizę termogravimetryczną (TGA), którą przeprowadzono w zakresie temperatur 30÷800°C w atmosferze powietrza. W dalszej części badań sprawdzono wpływ na proces wytwarzania i skutki niekorzystnego przedwczesnego uwalniania pary wodnej, wywołane przez warunki temperaturowe panujące w gorącej prasie.

Badania skupiające się na pomiarze wpływu dodatku środków zmniejszających palność na właściwości materiałowe płyt drewnopochodnych (z wyjątkiem wpływu na odporność ogniową) obejmowały zasadniczo te same doświadczenia, które wcześniej przeprowadzono dla

GCC. Mierzono właściwości mechaniczne i TS płyt drewnopochodnych wytworzonych z użyciem FR, rozszerzone o pomiar wpływu dodatku FR na zachowanie podczas procesu utwardzania żywicy w płycie.

Oceniano oddziaływanie dodatku FR na poprawę odporności ogniowej płyt drewnopochodnych poprzez badanie wpływu na zachowanie kompozytów drzewnych wytworzonych z dodatkiem FR, podczas samo gaszenia i spalania. Główny nacisk położono na ocenę tego efektu w funkcji zawartości dodatku mineralnego. Pomiar samo gaszenia został przeprowadzony w zaadaptowanym stanowisku badawczym w oparciu o metodę doświadczalną opisana w ISO (2010) [18]. Eksperymenty uzupełniono badaniami kalorymetrii stożkowej, których celem było poznanie mechanizmu reakcji zachodzących podczas spalania mineralnych środków uniepalniających. Pełna charakterystyka przebiegu spalania obejmowała pomiary szybkości wydzielania ciepła (HRR) i wytwarzania dymu (SPR), wyznaczone w oparciu o ISO (2015) [19], uzupełnione analizą ilościową gazów spalinowych, przeprowadzoną za pomocą spektroskopii w podczerwieni z transformacją Fouriera (FTIR).

Badania wpływu funkcjonalnych dodatków mineralnych na właściwości materiałowe kompozytów poli(kwasu mlekowego) (PLA) wzmocnianych włóknami drzewnymi

Dalsze badania nad wykorzystaniem minerałów funkcjonalnych dotyczyły zastosowania GCC powlekanego powierzchniowo ASA, jako funkcjonalnego dodatku mineralnego do kompozytów PLA wzmocnionych włóknem drzewnym.

Korzyści z zastosowania GCC powlekanego powierzchniowo ASA na właściwości PLA zostały wykazane w Rentsch et al. (2018) [20]. Nie zbadano jednak możliwości zastosowania GCC w kompozytach polimerowych wzmocnianych włóknami drzewnymi, chociaż wykazano, że ASA jest perspektywnym środkiem spajającym w kompozytach polimerowych wzmocnianych włóknem drzewnym [21].

Obiecujące wyniki dotyczące zastosowania GCC powlekanego ASA w PLA oraz wpływu ASA na właściwości kompozytów wzmocnianych włóknami drzewnymi, były motywacją do podjęcia dalszych badań. Dotyczyły one uzyskania potencjalnych korzyści wynikających z zastosowania GCC powlekanego ASA, jako funkcjonalnego dodatku w kompozytach PLA wzmocnianych włóknem drzewnym.

Zalety płynące z zastosowania GCC powlekanego powierzchniowo ASA w porównaniu z niepowlekanym GCC, zostały zbadane poprzez porównanie właściwości termomechanicznych PLA, morfologii oraz właściwości mechanicznych kompozytu.

Eksperymentalna analiza właściwości termomechanicznych kompozytu PLA obejmowała analizę termogravimetryczną (TGA) oraz różnicową kalorymetrię skaningową (DSC), umożliwiając charakterystykę wpływu dodatku mineralnego na degradację termiczną kompozytu. W szczególności zbadano lepkość stopu i krystalizację na zimno, określających oddziaływanie dodatku mineralnego na krystalizację PLA i reakcję depolimeryzacji wiązań estrowych PLA, spowodowaną katalitycznym wpływem alkalicznego węgla wapnia. Działanie dodatku mineralnego na parametry procesu i właściwości kompozytu ustalono, uwzględniając lepkość stopu i czas przebywania w wycłaczarce oraz biorąc pod uwagę uzyskaną barwę kompozytu, a także analizę morfologiczną powierzchni poprzez wykonanie pomiarów kąta kontaktowego.

W efekcie końcowym określono wpływ dodatku minerałów funkcjonalnych na ważne właściwości mechaniczne kompozytu, w tym wytrzymałość na rozciąganie, moduł sprężystości i udurowienie, w funkcji zawartości dodatku. Zbadano właściwości materiałowe kompozytów PLA z 40% masy wzmocnienia włóknowego, w których dodatek minerałów wynosił odpowiednio 10% masy, 20% masy i 30% masy.

Ograniczenia

Badania przeprowadzone w ramach osiągnięcia naukowego koncentrowały się wyłącznie na zastosowaniu związków mineralnych, zawierających węgiel wapnia, w płytach drewnopochodnych i kompozytach, wytworzonych wyłącznie w warunkach laboratoryjnych. Wyniki badań są obiecujące, ale nie pozwalają na wyciągnięcie bezpośrednich wniosków związanych z potencjalnym ich wykorzystaniem w procesie przemysłowym.

Badania ograniczono do:

1. Zbadania wpływu wielkości cząstek i zawartości GCC na wybrane właściwości materiałowe płyt drewnopochodnych;
2. Zastosowania minerałów, jako nośników substancji aktywnych i ich wpływu na właściwości materiałowe płyt drewnopochodnych i kompozytów PLA wzmocnionych włóknem drzewnym.

Zastosowanie innych rodzajów minerałów, jako dodatków oraz ich wykorzystanie w pozostałych rodzajach produktów drewnopochodnych i kompozytów nie były przedmiotem niniejszej pracy.

Kolejnym ograniczeniem badań był wpływ dodatków mineralnych na potencjał ścierny oraz wpływ na narzędzia skrawające. Potencjał ścierny może być badany tylko w ograniczonym zakresie w warunkach laboratoryjnych i powinien być przedmiotem dalszych badań w skali przemysłowej.

4.3.5 Podsumowanie wyników

Zastosowanie wypełniacza mineralnego jako substytutu surowca drzewnego

Wdrożenie mineralów do standardowego procesu produkcyjnego

Niezależnie od omówionego poniżej wpływu na właściwości materiałowe płyt, wyniki badań nad zastosowaniem GCC, jako wypełniacza w płytach MDF i zewnętrznych warstwach płyt wiórowych dowodzą, że może być z powodzeniem wykorzystany, jako substytut włókna i wiórów drzewnych (**H1**, **H6**). Węglan wapnia GCC może częściowo zastępować materiał drzewny w płytach MDF i płytach wiórowych w ilościach sięgających 30% masy. Ponadto wykazano, że płyty można produkować przy użyciu standardowego procesu produkcyjnego bez konieczności zmiany parametrów wytwarzania.

Na podstawie wyników osiągniętych w badaniach laboratoryjnych stwierdzono, że GCC może zostać wbudowany w płytę, podobnie, jak materiał drzewny w postaci włókien i wiórów. Wprowadzenie dodatku mineralnego do mieszalnika łopatkowego i wymieszanie z włóknami po uprzednim zaklejeniu żywicą UF, pozwoliło na równomierne rozproszanie wypełniacza na włókna pokryte żywicą UF. Osiągnięto również równomierny rozkład wypełniacza w matrycy włókien, dowodzący, że negatywny wpływ potencjalnych aglomeratów może zostać pominięty.

Mimo wprowadzenia dodatku mineralnego nie uległa zmianie gęstość płyt, ponieważ nastąpiła wymiana części wagowych cząstek drewna z GCC. Ze względu na miejscowe zastosowanie materiału nieorganicznego o gęstości właściwej przekraczającej gęstość drewna, jak to miało miejsce w płycie wiórowej, gęstość warstw powierzchniowych znacząco wzrosła. Wykazały to profile gęstości (**H5**), mające pozytywny wpływ na wytrzymałość, odrywanie warstwy przypowierzchniowych i twardość powierzchni.

Wyniki badań wykazały brak znaczącego wpływu dodatku mineralnego na zmianę temperatury zarejestrowanej wewnątrz płyty podczas procesu wytwarzania, który uznano za nieistotny.

Wpływ dodatku węglanu wapnia na proces utwardzania żywicy

Uzyskane wyniki eksperymentalne potwierdziły przypuszczenie, że węglan wapnia negatywnie wpływa na proces utwardzania żywicy UF (**H6**). Dodatek 10% masy GCC wyraźnie spowolnił reakcję utwardzania żywicy UF w układzie doświadczalnym, w którym prowadzono badania (wprowadzenie samego GCC do żywicy). Wyniki te są zgodne z wynikami innych badań, w których wykazano negatywny wpływ alkalicznego pH na kinetykę utwardzania żywicy UF [22, 23].

Wyniki badań wykazały prawie dwukrotny wzrost czasu potrzebnego do utwardzenia żywicy, co sugeruje, że 10% dodatek GCC jest wystarczający do zbuforowania znacznej części katalizatora. Dodatek GCC i związany z tym wzrost pH nie miał praktycznie żadnego wpływu na końcową wytrzymałości utwardzonej płyty MDF, mimo że wyniki wyraźnie wskazują jego na negatywne oddziaływanie na kinetykę utwardzania żywicy UF. W warunkach laboratoryjnych dodatek wypełniacza nie miał wpływu na przebieg utwardzania żywicy, podczas jego dodawania bezpośrednio do płyty MDF, w przeciwieństwie, gdy był do wprowadzany do żywicy.

Przypuszcza się, że naturalna kwasowość drewna kompensuje zdolności buforowe GCC. Bezpośredni wpływ kwasowości drewna na czas żelowania i utwardzania żywic UF jest znany [23, 24]. Przy wartości pH 5,8, włókna drzewne użyte w tym badaniu miały odczyn lekko kwaśny i prawdopodobnie były w stanie buforować zasadowy odczyn GCC. Ponadto, dodatek GCC do MDF nie miał żadnego zauważalnego oddziaływania na emisję formaldehydu, co dodatkowo wskazuje, brak wpływu na proces utwardzania żywicy.

Wpływ wielkości cząstek

Przeprowadzone badania wykazały, że wielkość cząstek odgrywa kluczową rolę w odniesieniu do prawie wszystkich właściwości materiałowych płyt drewnopochodnych, które zaobserwowano to na przykładzie MDF (**H1**). Wypełniacz o większych rozmiarach cząstek generalnie oddziaływał na właściwości materiałowe płyt w znacznie mniejszym stopniu niż wypełniacz o mniejszych rozmiarach. Wykazano, że GCC o wielkości cząstek $d_{50} = 30 \mu\text{m}$ do 10% masy może być dodawany do płyt MDF bez wpływu na właściwości materiału. Dodatek wypełniacza GCC składającego się z małych cząstek o wielkości $d_{50} \leq 2 \mu\text{m}$ ma znaczące oddziaływanie na wszystkie właściwości materiału, prowadząc do pogorszenia właściwości mechanicznych oraz zwiększenia adsorpcji wody i wzrostu pęcznienia, spowodowane prawdopodobnie zwiększoną przepuszczalnością struktur płyty.

W odniesieniu do wdrożenia przemysłowego, pogorszenie właściwości wytrzymałościowych uważa się za najbardziej krytyczne. Zachowanie wytrzymałości mechanicznej jest bezpośrednio związane z powierzchnią cząstek i tworzeniem wiązań adhezyjnych pomiędzy włóknami drewna. Stwierdzono, że drobniejsze cząstki w znacznie większym stopniu wpływają na tworzenie wiązań adhezyjnych, poprzez zmniejszenie będącej do dyspozycji powierzchni włókien drzewnych niezbędnej do tworzenia wiązań między włóknami, oraz mechaniczne zaburzenie struktury samych włókien. Ponadto, zasugerowano, że drobniejsze cząstki adsorbują i "zużywają" więcej żywicy na jednostkę masy wraz ze wzrostem powierzchni, zmniejszając w ten sposób ilość żywicy dostępnej do tworzenia wiązań między włóknami.

Podsumowując, wyniki badań wyraźnie wskazują, że cząstki o wielkości $d_{50} = 30 \mu\text{m}$ mają przewagę nad cząstkami o wielkości $d_{50} \leq 2 \mu\text{m}$ pod względem zastosowania, jako substytut włókna i wiórów drzewnych.

Wpływ zawartości

Jak wspomniano powyżej, dodatek wypełniacza o wielkości $d_{50} = 30 \mu\text{m}$ do 10% masy nie miał istotnego wpływu na właściwości zarówno płyt MDF, jak i płyt wiórowych produkowanych w warunkach laboratoryjnych (**H5**, **H6**). Jednak, przekroczenie zawartości wypełniacza powyżej 10% masy prowadzi do pogorszenia właściwości mechanicznych z niemal liniową zależnością, zwłaszcza przy zginaniu, co wykazano zarówno dla płyty wiórowej, jak i MDF.

Zasugerowano, że obserwowane pogorszenie wytrzymałości mechanicznej przy ilościach dodatku przekraczających 10% masy wypełniacza ma przyczyny o charakterze strukturalnym. Jedną z nich jest najprawdopodobniej istotne zmniejszenie dostępnej powierzchni dla UF na włóknach drzewnych, potrzebnej do wytworzenia połączeń adhezyjnych pomiędzy poszczególnymi włóknami drzewnymi, spowodowane dodatkiem GCC. Wraz ze wzrostem liczby cząstek GCC oddziałujących na włókna drzewne i zmniejszeniem powierzchni dostępnej do tworzenia połączeń adhezyjnych pomiędzy włóknami, nastąpiło zmniejszenia liczby tworzonych połączeń między żywicą a włóknami. Ponadto, zwiększając ilość wypełniacza, ograniczono ilość włókien drzewnych, dostępnych do tworzenia wiązań adhezyjnych między włóknami.

Podobnie jak w przypadku badań właściwości wytrzymałościowych, absorpcja wody wzrastała niemal liniowo wraz ze wzrostem zawartości wypełniacza, co najprawdopodobniej

związane było ze wzrostem porowatości. Z kolei na stabilność wymiarową (TS) dodatek wypełniacza mineralnego miał mniejszy wpływ. Wyniki uzyskane podczas badania wpływu dodawanego wypełniacza nieorganicznego do MDF nie zmieniły znacząco TS płyt. W rzeczywistości, rezultaty wskazywały, że dodatek wypełniacza może nieznacznie obniżyć TS, co nie było zaskakujące, biorąc pod uwagę fakt, że niektóre części hydrofilowych włókien drzewnych zostały zastąpione przez materiał nieorganiczny.

W wyniku dodatku wypełniacza, wraz ze wzrostem ilości włókien drzewnych substytuowanych przez GCC, podnosiła się przepuszczalność płyt. Podobnie, jak w przypadku innych właściwości, wpływ ten był pomijalny dla zawartości wypełniacza do 10% masy. Jednakże, przenikanie wody przez płytę staje się wyraźne większy przy zawartości wypełniacza na poziomie 20% masy, który prowadzi do ponad dwukrotnie wyższej przepuszczalności. Zostało to wytłumaczone wzrostem porowatości, która powiększa się, ponieważ pewna masa włókien drzewnych została zastąpiona materiałem o wyższej gęstości, zajmującym mniejszą objętość. W tym przypadku objętość i masa płyty pozostają takie same, a więc ulegają zwiększeniu porowatość a tym samym przepuszczalność.

Dodatek GCC nie zmienił charakterystyki emisji formaldehydu oraz innych lotnych związków organicznych (VOC), niezależnie od ilości dodanego węgla wapnia, co uznano za dobry wskaźnik wysokiego stopnia utwardzenia żywicy.

W przeciwieństwie do emisji formaldehydu, w miarę dodawania GCC obserwowano rosnącą emisję aldehydów C4-C9. Wyniki wskazywały, że przekroczenie 10% udziału w masie dodatku GCC może prowadzić do zwiększonej emisji aldehydów C4-C9. Stwierdzono, że połączenie katalitycznego wpływu wapnia, powoduje rozkład kwasów tłuszczowych do VOC i zwiększenie szybkości emisji sumy parametrów TVOC i w konsekwencji wzrostu emisji TVOC na niskim poziomie, spowodowanej wyższą przepuszczalnością płyty MDF zawierającej wypełniacz GCC.

Zastosowanie minerałów funkcjonalnych do poprawy właściwości materiałowych płyt i kompozytów

Zastosowanie minerałów funkcjonalnych, jako środków uniepalniających

Wyniki badań nad wykorzystaniem minerałów funkcjonalnych, jako środków uniepalniających (FR), wyraźnie wskazują na możliwość ich zastosowania w płytach drewnopochodnych zaklejanych żywicą UF. Właściwości uniepalniające wykazały dwa badane

środki, których wykorzystanie w płytach drewnopochodnych potwierdziły ich przydatność do poprawy odporności ogniowej (**H2, H3**).

Wyniki badań pokazują, że FRC i DCPD mogą być włączane w strukturę płyt drewnopochodnych, tak samo, jak GCC. Zarówno GCC i FR mają znikomy wpływ na parametry procesu produkcyjnego. Założenie, że wolna woda znajdująca w porowatej strukturze FRC może mieć negatywny wpływ na proces produkcji w wyniku uwalnianie pary wodnej, nie zostało potwierdzone w przeprowadzonych badaniach. Pomiar zmian temperatury w płycie podczas prasowania w temperaturze powyżej 200°C wykazał, że dodatek FRC nie ma istotnego oddziaływania na proces produkcji i uzyskane właściwości materiałowe płyty.

Zgodnie z oczekiwaniami, skuteczność obu FR różniła się w zależności od zawartości zastosowanego środka, ale była również uwarunkowana rodzajem użytego FR. Nie jest zaskoczeniem, że większa ilość dodanego FR skutkowała lepszym zachowaniem odporności ogniowej. Stwierdzono, że wymagana ilość DCPD była znacznie wyższa do osiągnięcia porównywalnych wyników z użyciem FRC. Do uzyskania odporności ogniowej bliskiej odporności wynikającej z zastosowania 10% masy FRC, konieczne było użycie dawki DCPD przekraczającej 20÷30% masy. Na podstawie otrzymanych wyników badań stwierdzono, że przy tych ilościach zastosowanego DCPD znacznie poprawiła się odporność ogniowa wyrażona skróconym czasem samogaszenia po wystawieniu na działanie płomienia, oraz zachowanie podczas spalania, charakteryzujące się mniejszym wydzielaniem ciepła i dymu.

Różnice w skuteczności FR wynikają z różnych mechanizmów działania tych dwóch środków. W przeciwieństwie do DCPD, dla którego mechanizm reakcji ogniowej jest regulowany głównie przez uwalnianie pary wodnej ze struktury mineralnej, skuteczność FRC wiąże się z synergicznym efektem trzech różnych mechanizmów ogniochronnych, do których należą:

- a) Uwalnianie pary wodnej w temperaturach w zakresie 100÷200°C, przyczyniającej się do pochłaniania ciepła związanego z reakcją endotermiczną, jak również rozcieńczenia gazów palnych;
- b) Rozcieńczenia gazów palnych przez niepalne produkty rozkładu hydroksyapatytu, stanowiącego część mineralnego nośnika FRC i reakcji węglanu wapnia z kwasem chlorowodorowym (HCl) w temperaturach powyżej 600°C;
- c) Tworzenia się warstwy węgla drzewnego związanego z rozkładem hydroksyapatytu.

W przeciwieństwie do tego, potencjał DCPD jest prawdopodobnie ograniczony do mechanizmu reakcji związanej z uwalnianiem pary wodnej i tworzeniem się węgla, a po całkowitym odwodnieniu struktury krystalicznej DCPD, jego dodatkowy wpływ jest niewielki.

Kolejna różnica pomiędzy FRC a DCPD wiąże się z zawartością substancji aktywnej (chlorku wapnia), która może być magazynowana w porowatej strukturze materiału nośnego FRC. Wyniki badań wykazały, że zdolność absorpcji wody i całkowita zdolność zatrzymywania wody przez FRC, skutkuje wyższym potencjałem tłumienia płomieni. Ilość chlorku wapnia, która może być magazynowana w porowatej strukturze materiału nośnego FRC, zależy od porowatości materiału nośnego. W odniesieniu do potencjalnego uwalniania niebezpiecznego chlorowodoru, analiza spektroskopowa FTIR gazów spalinowych przeprowadzona podczas spalania ujawniła unikalną właściwość FRC, polegającą na minimalizowaniu uwalniania chlorowodoru. Zachowanie to tłumaczono potencjałem adsorbującym węglanu wapnia, stanowiącym część materiału nośnego FRC. Zastosowanie węglanu wapnia, jako skutecznego środka do neutralizacji emisji HCl, na przykład podczas spalania PVC, jest dobrze znane [25, 26].

Zgodnie z oczekiwaniami, włączenie FRC do kompozytu drzewnego miało znaczący wpływ na jego właściwości mechaniczne. Stwierdzono, że wpływ ten jest bardziej wyraźny w porównaniu z użyciem GCC, co zostało ustalone w poprzednich badaniach. W wyniku zastosowania FRC o udziale wynoszącym 10%, spadek wytrzymałości równał się o około 30% i wzrastał dalej przy wyższych udziałach FRC, wskazując prawie liniowy trend. Biorąc pod uwagę, że dodatek FRC w ilości 10% był wystarczający do osiągnięcia skutecznych właściwości samogaszących, osiągniętych kosztem spadku wytrzymałości spoiny wewnętrznej uznano, że użycie FRC o 10% udziale, stanowi dobry kompromis między uniepalnianiem, a właściwościami mechanicznymi płyt.

Z kolei dodatek DCPD w ilości do 30% masy nie miał wpływu na wytrzymałość kompozytu. Wyniki te są szczególnie zaskakujące, gdy weźmie się pod uwagę charakter składników mineralnych, których cząstki są niewielkie w porównaniu z wiórami drzewnymi, mogącymi osadzać się na powierzchniach wiórów lub włókien drzewnych, ograniczając ilość połączeń adhezyjnych.

Obserwacje powyższe omówiono w powiązaniu z wynikami badań wpływu dodatku FR na utwardzanie użytej w doświadczeniach żywicy MUF. Stwierdzono, że dodatek DCPD w przeciwieństwie do FRC nie miał wpływu na proces utwardzania żywicy.

Próbki MUF z dodatkiem DCPD charakteryzowały się takim samym czasem utwardzania, jak próbki bez dodatku FR. W eksperymencie z mieszaniną stosunku 50/50 obu środków DCPD/FRC, dodatek DCPD zdawał się kompensować niekorzystny wpływ FRC, o czym świadczył czas utwardzania MUF. Wyniki wskazały, że rozcieńczanie FRC za pomocą DCPD przyspiesza reakcję utwardzania żywicy w porównaniu z samym FRC. Przyczyn takiego zachowania szukano w kwasowym pH DCPD, które w połączeniu z FRC obniżyło ogólne pH i sprzyjało reakcji utwardzania.

Uzyskane wyniki nie pozwoliły na bezpośrednie skorelowanie różnicy w reakcji utwardzania uzyskanej w tym eksperymencie z zastosowaniem DCPD wiążącej się ze zwiększeniem wytrzymałości płyty. Jednakże, na podstawie otrzymanych wyników, użycie DCPD uznano za korzystne pod względem utwardzania żywicy. Wyjątkowo dobre właściwości mechaniczne płyt zawierających DCPD w porównaniu z płytami z FRC podkreślają jego potencjał, jako wypełniacza o właściwościach ogniochronnych do zastosowania w systemach kompozytów drzewnych opartych na UF.

Zastosowanie, jako czynnika sprzęgający poprawiający adhezję włókna drzewnego w kompozytach PLA

Wyniki eksperymentów nad wykorzystaniem GCC powlekanego powierzchniowo ASA w kompozytach PLA, wzmocnionych włóknem drzewnym ujawniły dodatkowy obiecujący obszar zastosowań funkcjonalnego węglanu wapnia, które nie były do tej pory badane. Wyniki pokazują, że dodatek GCC powlekanego powierzchniowo ASA ma wyraźną przewagę nad niepowlekanym GCC pod względem możliwości przetwarzania kompozytów i ich wpływu na właściwości materiału (**H4**).

W odniesieniu do przetwarzania kompozytów, wyniki wykazały, że dodatek GCC poddanego działaniu ASA umożliwia lepszą kontrolę procesu wytłaczania poprzez zmniejszenie płynności matrycy PLA. W porównaniu z niepowlekanym GCC, który zwiększa płynność PLA podczas wytłaczania, stwierdzono, że GCC pokryty ASA znacząco obniża szybkość topnienia polimeru. To z kolei prowadzi do zwiększenia adhezji międzyfazowej pomiędzy wypełniaczem mineralnym a PLA, zwiększając lepkość stopu. W przeciwieństwie do niepowlekanego GCC, pełniącego jedynie rolę wypełniacza w matrycy polimerowej, zastosowanie minerału powlekanego powierzchniowo ASA, pozwala na lepszą kontrolowanie płynności polimeru.

Korzyści z zastosowania minerałów powlekaných powierzchniowo przejawiają się ponadto w zwiększonej adhezji włókien z matrycą PLA, pozwalając na znaczne zmniejszenie zawartości PLA w kompozycie przy zachowaniu właściwości materiału. Uzyskane w badaniach wyniki wykazały, że właściwości kompozytów z 10% udziałem w stosunku do masy dodatku minerałów poddanych obróbce powierzchniowej, okazały się lepsze od właściwości kompozytu wzmocnionego włóknami bez dodatku minerałów. Przyczynę wzrostu wytrzymałości upatruje się w lepszej adhezji włókien do PLA i wiążę z funkcją ASA, który pełni rolę środka sprzęgającego w kompozytach polimerowych wzmocnianych włóknami drzewnymi [21]. W związku z tym, badany w niniejszej pracy minerał można uznać za funkcjonalny dodatek sprzęgający, poprawiający adhezję włókien hydrofilowych do polimerów hydrofobowych.

Zastosowanie nawet niewielkich ilości środka sprzęgającego, tj. 0,8-0,24% masy w ASA na minerale, może być wystarczające w porównaniu z 8,8% masy stosowanej tradycyjnie [27]. W odniesieniu do zawartości minerału w kompozycie stwierdzono, że zwiększenie zawartości minerału do 20% masy nie ma negatywnego wpływu na właściwości wytrzymałościowe przy rozciąganiu w porównaniu z kompozytem bez dodatku minerału. Uznano, że do kompozytu przy stałej zawartości włókien równej 40% masy można dodać do 20% masy minerału powlekanego powierzchniowo ASA bez pogorszenia właściwości wytrzymałościowych płyt.

Zastosowanie GCC powlekanego powierzchniowo ASA w PLA wzmocnionym włóknem drzewnym jest korzystne dla procesu wytwarzania i właściwości materiałowych kompozytu. Funkcjonalny węglan wapnia pozwala na kontrolę procesu wytwarzania kompozytu poprzez kontrolę płynięcia i oddziaływania na czynnik sprzęgający pomiędzy włóknami a matrycą polimerową. W związku z tym, staje się funkcjonalnym dodatkiem a nie tanim wypełniaczem mineralnym masy drzewnej w płytach.

4.3.6 Wnioski

Obszerne wyniki tej pracy, dostarczają ważnych naukowych spostrzeżeń na temat wykorzystania minerałów zawierających wapń (głównie węglan wapnia) w płytach drewnopochodnych i kompozytach drzewnych.

Poszczególne publikacje, mimo, że dotyczą różnych zagadnień, w tym wykorzystania minerałów, jako substytutu włókien, a także, jako środków opóźniających palenie i środków sprzęgających, posiadają wspólny mianownik. Wszystkie one dotyczą innowacyjnych,

nowatorskich i wcześniej niezbadanych zastosowań minerałów zawierających wapń w nieznanymi wcześniej obszarach wykorzystania.

Wyniki zebrane w publikacjach składających się na osiągnięcia naukowe po raz pierwszy wskazują na możliwość zastosowania minerałów, jako substytutu włókien i wiórów drzewnych w płytach drewnopochodnych. Ukazują one potencjał GCC w zakresie optymalizacji kosztów produkcyjnych, wynikających z substytucji włókien i wiórów drzewnych przy jednoczesnym zachowaniu właściwości materiałowych płyt.

Ponadto, otrzymane rezultaty wykazują na możliwość użycia funkcjonalnych minerałów na bazie węglanu wapnia w celu poprawy właściwości ognioodpornych i zwiększenia adhezji włókien drzewnych z matrycą polimerową w kompozytach PLA wzmocnionych włóknami.

Podsumowując, wyniki zebrane w publikacjach składających się na osiągnięcie naukowe stanowią solidną podstawę dla racjonalnego stosowania dodatków mineralnych w materiałach drewnopochodnych.

Perspektywy potencjalnego wdrożenia w przemyśle

Oprócz wiedzy naukowej uzyskanej w tej pracy, stanowi ona również istotny wkład w zakresie racjonalnego planowania zastosowań przemysłowych. Opisany efekt użycia minerałów, jako substytutów włókien i wiórów drzewnych oraz wpływ zawartości dodatków i wielkości cząstek na właściwości materiałowe płyt MDF i wiórowych wyznacza ważne granice technologiczne, które należy uwzględnić podczas wdrażania do procesu przemysłowego.

Ustalone w badaniach limity zawartości dodawanych wypełniaczy oraz wielkości cząstek są informacjami niezbędnymi do wdrożenia technologii w procesie przemysłowym, nawet, jeśli nie jest możliwe bezpośrednie przeniesienie wyników badań laboratoryjnych na proces przemysłowy. Niemniej jednak praca wnosi istotny wkład, dostarczając odpowiedzi na wiele kluczowych pytań związanych z zastosowaniem dodatków mineralnych w płytach drewnopochodnych. Główne wnioski dotyczące możliwości zastosowania uzyskanych wyników do zastosowań przemysłowych związanych z wykorzystaniem GCC, jako substytutu surowca drzewnego oraz zastosowaniem minerałów funkcjonalnych, jako uniepalniaczy, można podsumować w następujący sposób:

- i. GCC może być z powodzeniem stosowany, jako substytut włókien i wiórów drzewnych w produkcji płyt MDF oraz w warstwach zewnętrznych płyt wiórowych, bez konieczności wprowadzania zmian w procesie produkcyjnym;
- ii. Dodatek GCC w ilości 10-15% masy nie ma znaczącego wpływu na podstawowe właściwości materiałowe płyt, w tym właściwości wytrzymałościowe, pęcznienie na grubość i absorpcję wody oraz emisję formaldehydu i lotnych związków organicznych, w warunkach przetwarzania zastosowanych w niniejszych badaniach;
- iii. Dodatek GCC w postaci cząstek o wielkości 30 μm jest preferowany w stosunku do cząstek o wielkości poniżej 2 μm , ze względu na ich mniejszy wpływ na końcowe właściwości produktu;
- iv. Związany z alkalicznym pH niekorzystny wpływ GCC na utwardzanie żywicy UF odgrywa niewielką rolę w tworzeniu właściwości wytrzymałościowych produktu końcowego i jest najprawdopodobniej kompensowany przez kwasowość włókien drzewnych;
- v. Dodatek GCC nie ma znaczącego wpływu na zmiany temperatury w płycie podczas procesu prasowania i dlatego może być oceniany, jako nieistotny w odniesieniu do parametrów produkcyjnych;
- vi. Jednorodne rozmieszczenie dodatków mineralnych w produkcie końcowym może być osiągnięte poprzez wymieszanie ich z surowcem drzewnym, o ile dodanie nastąpi po zaklejeniu surowca drzewnego żywicą;
- vii. Zarówno DCPD, jak i funkcjonalny FRC na bazie węglanu wapnia wykazują działanie przeciwpożarowe, w płytach drewnopochodnych i znacznie zwiększają potencjał samogaszenia, przyczyniając się do ograniczenia ich palności;
- viii. DCPD wykazuje korzystne właściwości w zakresie utwardzania żywicy i dlatego jest uważany za cenny mineralny wypełniacz o właściwościach ogniochronnych do stosowania w systemach kompozytów drzewnych na bazie UF.

Kierunki dalszych badań

Wyniki badań podjętych w tej pracy wskazują możliwość zastosowania minerałów w płytach i kompozytach drewnopochodnych, wykraczających poza dotychczas znane obszary zastosowań. W szczególności, potencjalne wykorzystanie dodatków funkcjonalnych na bazie minerałów wydaje się być interesującym i obiecującym tematem dalszych badań. Opierając się na wynikach niniejszej pracy, sformułowano wskazówki zawierające propozycje dalszych

badan skupiających się na zastosowaniu węgla wapnia i nieorganicznych materiałów mineralnych w produktach drewnopochodnych:

- i. Proponuje się przeprowadzenie dodatkowych badań dotyczących interakcji wypełniacza GCC z innymi rodzajami żywic;
- ii. Po wstępnym stwierdzeniu zwiększonej emisji aldehydów, zależność pomiędzy właściwościami i charakterystyką wypełniacza GCC a emisjami z płyty powinna być przedmiotem dalszych badań;
- iii. Sugeruje się badania koncentrujące się na wykorzystaniu innych minerałów, w szczególności lekkich wypełniaczy, w tym perlitu ekspandowanego i wermikulitu, w celu zaspokojenia obecnej tendencji do tworzenia lekkich materiałów kompozytowych;
- iv. Dodatkowym interesującym tematem badawczym jest wykorzystanie alternatywnych, niehalogenowych substancji czynnych do zastosowania w minerałach funkcjonalnych na bazie węgla wapnia badanych w **H3**;
- v. Sugeruje się badania skoncentrowane nad opracowaniem i zastosowaniem funkcjonalnych cząstek mineralnych o właściwościach oczyszczających do kontroli emisji lotnych związków organicznych i formaldehydu.

5. Prezentacja znaczącej działalności naukowej lub artystycznej prowadzonej w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub kulturalnej, w szczególności w instytucjach zagranicznych

5.1 Podsumowanie osiągnięć naukowych

Po zakończeniu przewodu doktorskiego, moja aktywność publikacyjna w ostatnich latach była zdeterminowana obowiązkami zawodowymi w środowisku przemysłowym. Ze względu na ograniczony czas, moja działalność publikacyjna ogranicza się do prac zamieszczanych w recenzowanych czasopismach naukowych. Wierzę, że jakość mojego wkładu w rozwój nauki odzwierciedla liczba cytowań i sumaryczny impact factor (IF) moich prac opublikowanych w ciągu ostatnich 8 lat.

Ogółem mój **dorobek naukowy** obejmuje **17 prac**, z czego **12** zostało opublikowanych po doktoracie. Wszystkie prace zostały opublikowane w czasopismach recenzowanych. **Łączna liczba punktów** za publikacje według listy **MNiSW/MEiN** dla publikacji zgodnie z rokiem opublikowania wynosi **1045** punktów z czego **845** przypada na okres **po doktoracie**.

Sumaryczny IF dla publikacji, według listy Journal Citation Reports (JCR) zgodnie z rokiem publikacji, wynosi **29,836** (sumaryczny **5-letni IF** wynosi **36,812**). Na dzień 16.01.2022 liczba cytowań publikacji według bazy Web of Science wynosi **242**, a **indeks Hirscha** wynosi **8**.

Oprócz publikowania prac naukowych w czasopismach, przyczyniłem się do upowszechniania wiedzy na międzynarodowych konferencjach naukowych. Działalność ta koncentrowała się głównie na tematyce właściwości drewna liściastego i badaniach prowadzonych w trakcie uzyskiwania stopnia doktora. Ostatnie wystąpienia dotyczyły zastosowania biostymulantów oraz wykorzystania wysoko reaktywnych materiałów wapiennych w leśnictwie. Pełne zestawienie mojego udziału w konferencjach znajduje się w załączniku nr 4a.

Strategia mojego pracodawcy dotycząca komercjalizacji i ochrony własności intelektualnej związanej z prezentowaną pracą nie pozwalała na udostępnianie wyników badań naukowych dotyczących wykorzystania minerałów w produktach drewnopochodnych do czasu zabezpieczenia własności intelektualnej. Dlatego wyniki opisane w tej pracy nie były prezentowane szerszej publiczności. Zamiast tego, skupiono się na zabezpieczeniu własności intelektualnej i zgłoszeniu serii patentów chroniących zastrzeżenia firmy.

5.2 Przegląd pozostałych prac badawczych stanowiących istotny wkład w naukę

Oprócz badań nad zastosowaniem dodatków mineralnych w płytach drewnopochodnych i kompozytach moje zainteresowania naukowe można podzielić na dwa główne obszary badawcze. Pierwszy z nich dotyczy badań związanych z określeniem właściwości materiałowych wybranych gatunków drewna liściastego. Drugi obszar badawczy koncentruje się na badaniach wpływu nawożenia na wzrost szybko rosnących gatunków drzew. Mój wkład naukowy w ramach tych dwóch obszarów badawczych po uzyskaniu stopnia doktora obejmuje następujące publikacje:

- (P1) Niemz P, **Ozyhar T**, Hering S, Sonderegger W (2015) Zur Orthotropie der physikalisch-mechanischen Eigenschaften von rotbuchenholz. Bautechnik 92:3–8. <https://doi.org/10.1002/bate.201400079>
- (P2) Niemz P, **Ozyhar T**, Hering S, Sonderegger W (2015) Moisture dependent physical-mechanical properties from beech wood in the main directions. Pro Ligno 11:37–42.
- (P3) Sonderegger W, Martiensen A, Nitsche C, **Ozyhar T**, Kaliske M, Niemz P (2013) Investigations on the physical and mechanical behaviour of sycamore maple (Acer

pseudoplatanus L.). Eur J Wood Wood Prod 71:91–99.
<https://doi.org/10.1007/s00107-012-0641-8>

(P4) Ozyhar T, Mohl L, Hering S, Hass P, Zeindler L, Ackermann R, Niemz P (2016) Orthotropic hygric and mechanical material properties of oak wood. Wood Mater Sci Eng 11:36–45. <https://doi.org/10.1080/17480272.2014.941930>

(P5) Grover ZS, Cook R, Zapata M, Urrego JB, Albaugh T, Zelaya A, Ozyhar T, Rubilar R, Carter D, Campoe O (2021) Eucalyptus grandis Response to Calcium Fertilization in Colombia. For Sci 67:701-710.
<https://doi.org/10.1093/forsci/xfab042>

(P6) Ozyhar T, Mughini G, Marchi M (2019) Influence of biostimulant application in containerized eucalyptus globulus labill. seedlings after transplanting. Dendrobiology 82:17–23. <https://doi.org/10.12657/denbio.082.003>

Poniższy rozdział zawiera krótkie podsumowanie wyników prac przeprowadzonych w ramach tych dwóch obszarów badawczych.

5.2.1 Badania właściwości materiałowych wybranych gatunków liściastych

Ze względu na doskonałe właściwości mechaniczne, drewno liściaste zyskuje coraz większe znaczenie, jako budowlany materiał konstrukcyjny stając się potencjalną alternatywą dla drewna gatunków miękkich. Zwiększenie zastosowania drewna, jako materiału budowlanego, wymaga gruntownej wiedzy na temat właściwości materiałowych drewna liściastego. Obliczenia i symulacje zachowania materiału są coraz częściej przeprowadzane przy użyciu metody elementów skończonych (MES) i obejmują symulacje naprężeń i odkształceń w deskach i drewnie klejonym oraz przewidywania potencjalnego rozwarstwienia i starzenia się połączeń klejonych. Konieczna jest tutaj znajomość kierunkowych, specyficznych parametrów materiałowych drewna we wszystkich jego kierunkach anatomicznych tj. wzdłużnym, promieniowym i stycznym. Dotyczy to wartości charakteryzujących sprężystość (moduł Younga, moduł ścinania, współczynnik Poissona), wytrzymałość (rozciąganie, ściskanie, zginanie, ścinanie) mechanizmów przemieszczania się masy i strumienia ciepła (współczynnik dyfuzji, przewodnictwo cieplne).

Podczas, gdy wymagane dane są szeroko dostępne dla drewna świerkowego (najbardziej powszechny gatunek drewna stosowany w budownictwie), to dla drewna większości gatunków liściastych są czasami nieznane. Badania przeprowadzone w czasie moich studiów doktoranckich, koncentrowały się na badaniu właściwości materiałowych drewna bukowego. Należą do najbardziej kompleksowych charakteryzujących właściwości

fizyko-mechaniczne zależne od wilgoci materiału we wszystkich kierunkach anatomicznych drewna.

Obszerny zbiór danych opublikowany w mojej pracy doktorskiej został uzupełniony o dodatkowe dane materiałowe i zestawiony w szerszym kontekście w dwóch opracowaniach przeglądowych opublikowanych po studiach doktoranckich (**P1**, **P2**). Właściwości mechaniczne zostały rozszerzone o dodatkowe parametry, w tym strumień masy i ciepła (współczynnik dyfuzji, przewodnictwo cieplne), w funkcji wilgotności w trzech kierunkach anatomicznych (podłużnym, promieniowym i stycznym). Ponadto, pracę uzupełniono zbiorem danych doświadczalnych, dotyczących właściwości pełzających w kierunku podłużnym wyznaczone podczas adsorpcji i desorpcji przy zmiennej wilgotności równowagowej.

Opis właściwości drewna liściastego został w dalszych badaniach poszerzony o dane dla dwóch kolejnych gatunków drewna liściastego, w tym jaworu (*Acer pseudoplatanus* L.) (**P3**) i dębu (*Quercus robur*) (**P4**). Jawor należy do najbardziej rozpowszechnionych drzew liściastych w Europie Środkowej. Jednakże, podobnie, jak w przypadku drewna bukowego, jego właściwości materiałowe, szczególnie te mierzone prostopadłe do kierunku słoików (R i T), nie są szeroko znane. Dotyczy to również dębu, innego gatunku drewna, który jest wykorzystywany jako materiał budowlany i którego początki zastosowania sięgają średniowiecza.

Celem badań przeprowadzonych na jaworze i dębie było dostarczenie danych pomiarowych, które mogą być wykorzystane w symulacjach, podobnie jak dane wyznaczone wcześniej dla drewna bukowego. Wspólnym mianownikiem prac była charakterystyka szeregu właściwości we wszystkich trzech kierunkach anatomicznych drewna oraz w funkcji wilgotności. Eksperymenty przeprowadzone na jaworze obejmowały pomiar właściwości fizycznych (pęcznienia, absorpcji wody, oporu pary wodnej i przewodności cieplnej) oraz właściwości mechanicznych, w tym wytrzymałości na rozciąganie, zginanie i ściskanie oraz modułu Younga (statycznego i dynamicznego), a także współczynnika Poissona, wytrzymałości na ścinanie, modułu sprężystości przy ścinaniu i odporności na pękanie (**P3**). Badania przeprowadzono dla większości cech w zależności od wilgotności oraz we wszystkich trzech głównych kierunkach anatomicznych: podłużnym, promieniowym i stycznym. Eksperymenty przeprowadzone na dębie obejmowały charakterystykę zachowania sorpcyjnego uzyskaną z pomiarów wykonanych podczas adsorpcji i desorpcji i analizowanych za pomocą teorii Denta oraz odpowiadające im zachowanie pęczniące i kurczliwe scharakteryzowane parametrami ekspansji wilgoci dla wszystkich kierunków anatomicznych (**P4**). Ponadto

przeprowadzono pomiary ortotropowego zachowania mechanicznego materiału, charakteryzowanego przez moduły Younga, ścinania i współczynniki Poissona oraz parametry materiałowe wytrzymałości na zginanie, ściskanie i ścinanie wyznaczone w funkcji wilgotności.

Opublikowane dane dostarczają wyczerpującego opisu zachowania się dwóch badanych gatunków drewna w zależności od wilgotności. Najważniejsze wyniki obu badań wskazują na wyraźną zależność parametrów mechanicznych obu badanych gatunków drewna od wilgotności. Łączne wyniki obu badań wykazały, że, ogólnie rzecz biorąc, moduł Younga, wytrzymałość na zginanie, ściskanie i wytrzymałość na ścinanie malały wraz ze wzrostem wilgotności drewna we wszystkich ortotropowych kierunkach, ale nie potwierdziły wpływu wilgotności na współczynniki Poissona. Wykazana w niniejszej pracy prawie liniowa zależność wytrzymałości na zginanie od gęstości podkreśla potrzebę uwzględnienia gęstości. Wyniki badań wskazują, że pęcznienie i kurczenie nie wykazują zależności od cyklu adsorpcji/desorpcji.

Oprócz opisu zmian właściwości mechanicznych zależnych od wilgotności w kierunkach anatomicznych, dostarczenie danych doświadczalnych do wykorzystania w analizach symulacyjnych jest uważane za najważniejszy wkład badań związanych z określeniem właściwości materiałowych drewna liściastego. Do tej pory takie kompleksowe zestawy danych dla drewna liściastego były prawie niedostępne, ale stają się coraz ważniejsze wraz z rosnącą dostępnością tych gatunków w gospodarce leśnej. Zestaw danych umożliwia obliczanie i symulację wielowarstwowych i trójwymiarowych struktur drewna w zakresie sprężystości za pomocą metod elementów skończonych. O wartości i potrzebie udostępniania tego typu zbiorów danych świadczy fakt, że publikacje dotyczące eksperymentalnej charakterystyki właściwości materiałowych drewna liściastego (w tym publikacje będące wynikiem moich studiów doktoranckich) były w ostatnich latach **cytowane 214 razy**. Szerokie uznanie naukowe potwierdza również znaczący wkład moich badań w dziedzinie fizyki drewna.

5.2.2 Badania nad wpływem nawożenia na wzrost drzew

Drugim obszarem moich zainteresowań badawczych jest ustalenie wpływu nawożenia na wzrost szybko rosnących gatunków drzew, zwiększających produktywność plantacji leśnych. Badania te koncentrują się na zastosowaniu nawozów mineralnych, w tym wysoko reaktywnego węgla wapnia, jako źródła wapnia spełniającego równocześnie funkcję regulatora pH (**P5**). Poddano też analizie potencjał zastosowania biostymulantów w szkółkach

leśnych, jako odpowiedniej metody wczesnego zwiększania wzrostu sadzonek drzew po przesadzeniu w stałe miejsce wegetacji (P6).

Wpływ zastosowania węgla wapnia na odżywianie i wzrost drzew

Ważną częścią moich badań związanych z nowymi obszarami zastosowania węgla wapnia dotyczy wykorzystania wysoko reaktywnego granulowanego węgla wapnia, jako nawozu w leśnictwie. Prowadzone badania mają na celu zrozumienie roli nawożenia wapnem i wpływem pH w odniesieniu do intensywności wzrostu drzew. Nadrzędne pytanie badawcze jest związane z potencjalnymi korzyściami wynikającymi z zastosowania wapnia na plantacjach leśnych w celu podwyższenia ich produktywności.

Wapń jest krytycznym makroelementem wymaganym do wzrostu roślin i formowania struktur drzewa, wspomagającym wytrzymałość ścian komórkowych i innych tkanek roślin drzewiastych. Niedobór wapnia może prowadzić do rozpadu ścian komórkowych i zapadania się tkanek w wierzchołkowych i górnych częściach łodyg lub wpływać na rozwój nowych liści.

W celu rozwiązania problemu niedoborów, środowisko glebowe może zostać zmodyfikowane poprzez dodanie wapnia, powodującego powstanie odpowiedniego roztworu glebowego, bogatszego w składniki odżywcze i poprawiającego wchłanianie minerałów. Wapń pod postacią węgla wapnia stał się regularnym dodatkiem w większości tropikalnych plantacji charakteryzujących się krótką rotacją wynoszącą 7÷10 lat w Ameryce Południowej. Wynikają one z obawy związanej z potencjalnie niezrównoważonym usuwaniem składników odżywczych podczas zbiorów, oraz zapobieganiem spadku poziomu pH. Krytyczne stężenia wapnia w glebie i wymagana dawka nie są jednak jeszcze dobrze zdefiniowane dla plantacji leśnych. Pomimo kluczowego znaczenia i szerokiego zastosowania w leśnictwie plantacyjnym, literatura nie zawiera zbyt wielu informacji na temat wpływu stężenia wapnia na wzrost drzew.

Brakuje szczególnie badań dotyczących skutków stosowania węgla wapnia w warunkach polowych. Dlatego dużego znaczenia nabrało kompleksowe opracowanie tego zagadnienia w warunkach polowych. W ciągu ostatnich 3 lat przeprowadzono szeroko zakrojone badania, których celem było zbadanie wpływu granulowanego, wysoce reaktywnego węgla wapnia zastosowanego na komercyjnej plantacji eukaliptusa w Kolumbii (P5). Określono wpływ węgla wapnia w funkcji dawki, wzrostu i plonu, odniesionych do obecnie stosowanych praktyk. Zbadano dawki węgla wapnia z dodatkiem azotu, fosforu, potasu, siarki i boru (NPKSB) na plantacji eukaliptusa (*Eucalyptus grandis*). Oceny efektywności dokonano poprzez pomiar wysokości, średnicy i wielkość przyrostu. Szczególną cechą tego

badania było określenie wpływu dodatku węgla wapnia w odniesieniu do wydajności poprzez porównanie wyników z prób polowych przeprowadzonych na dwóch stanowiskach różniących się produktywnością.

Wyniki badań wykazały, że efekt zastosowania węgla wapnia zależy w dużej mierze od lokalizacji plantacji, a w szczególności od wyjściowych właściwości gleby. Użycie jednakowych dawek wapnia może być w niektórych miejscach nie celowe, ponieważ nie zapewnia pozytywnego krótkoterminowego zwrotu kosztów podjętej inwestycji. W innych miejscach wysokość, średnica i wielkość przyrostu drzew okazywała się znacząca przy nawożeniu podłoża dawkami wapnia równymi 200 i 400 kg ha⁻¹. W tym przypadku połączenie właściwości gleb z nawożeniem, spowodowały wzrost objętości o 22% w stosunku do populacji kontrolnej. Różne reakcje na jednakowe zabiegi, które były związane z różnicami w jakości gleby, podkreślają znaczenie identyfikacji niedoborów składników odżywczych specyficznych dla danego stanowiska i podłoża. Od nich zależy skuteczność efektu reakcji nawozowej.

Poza naukowymi efektami tego badania, uzyskane podczas prób polowych osiągnięcia mają ważne implikacje w odniesieniu do stosowania węgla wapnia w praktyce. Rutynowe nawożenie bez uwzględnienia uwarunkowań glebowych może skutkować nadmierną lub niedostateczną ilością wapnia w podłożu plantacji. Jak wykazano, niektóre miejsca z większą ilością materii organicznej, występującej na określonej głębokości, mogą nie wymagać dodawania wapnia, podczas, gdy inne wykazują zapotrzebowanie powyżej obecnego poziomu jego stosowania, w celu optymalizacji wydajności produkcyjnej plantacji. Uzyskane wyniki podkreślają potrzebę dalszych badań nad wysokością dawek wapnia, które będą miały na celu uściślenie zaleceń, dotyczących ustalania ich wielkości, odpowiadających cechom nawożonych stanowisk glebowych.

Należy podkreślić, że badania zostały przeprowadzone we współpracy z partnerem przemysłowym z Kolumbii i znalazły bezpośrednie zastosowanie przemysłowe. Wnioski z tego badania stanowią ważną podstawę decyzji operacyjnych wdrażanych przez firmę na plantacjach komercyjnych.

Wpływ stosowania biostymulantów w sadzonkach drzew

Innym obszarem moich zainteresowań badawczych jest badanie oddziaływanie biostymulantów na wzrost eukaliptusa (P6).

Wykorzystywanie substancji określanych mianem "biostymulantów" było omawiane i proponowane w literaturze, jako alternatywne i zrównoważone rozwiązanie w celu zwiększenia wydajności w rolnictwie.

Biostymulanty stosuje się głównie w szkółkarstwie w celu aktywacji wzrostu siewek poprzez bezpośrednie aplikowanie mieszaniny polipeptydów, oligopeptydów i aminokwasów do systemu korzeniowego poprzez wysiew glebowy lub natrysk dolistny. Największe korzyści wynikające z wykorzystania biostymulantów związane są z uprawnymi gatunkami roślin. Do pozytywnych skutków oddziaływania biostymulantów na rośliny należy poprawa w utrzymaniu owoców, zwiększenie wrażliwości na stesy abiotyczne np. zasolenie, suszę i wysokie temperatury, a wzrost i rozwój systemu korzeniowego roślin.

W przeciwieństwie do licznych badań prowadzonych na roślinach uprawnych, potencjalne korzyści związane z zastosowaniem biostymulantów w hodowli drzewostanów są słabo poznane. Opisane w literaturze korzyści oddziaływania biostymulantów uważa się za istotne w przypadku upraw prowadzonych w szkółkach drzewnych. Szczególną uwagę przywiązuje się do wpływu biostymulatorów na rozwój systemu korzeniowego w początkowym stadium rozkrzewiania młodych drzew, determinujących później właściwą ich adaptację do warunków stałego miejsca wzrostu.

Celem badań nad zastosowaniem biostymulantów była ocena wpływu hydrolizatu białka zwierzęcego na wzrost kontenerowych sadzonek eukaliptusa (*Eucalyptus globulus*). Wpływ biostymulatorów analizowano poprzez wprowadzenie różnych schematów zabiegowych polegających na aplikacji dolistnej versus doglebowej oraz wielkości dawek. Oceny dokonywano poprzez pomiar parametrów, do których należały wielkość siewek, liczba aplikacji wierzchołkowych, powstała biomasa itp. na roślinach po 120 dniach po przesadzeniu.

Wyniki badań dostarczają ważnych informacji na temat wpływu metody aplikacji i dawki biostymulantu na wzrost sadzonek eukaliptusa. Ujawniają istotne różnice między wpływem sposobu aplikacji na ich gromadzenie się w biomacie nadziemnej i podziemnej. Okazało się, że zarówno dolistne, jak i doglebowe dostarczenie biostymulantów nie wiązało się z akumulacją w biomacie podziemnej.

Wpływ na biomase nadziemną tłumaczono wyższym tempem wzrostu wywołanym powstaniem większej masy liści. Biostymulacja nie miała wpływu na wzrost korzeni, która wynikała ze sposobu działania zastosowanego w badaniach biostymulanta, poprawiającego głównie mechanizm pobierania i wykorzystania azotu. Wykazano, że zastosowanie

biostymulantów miało pobudzające oddziaływanie na tworzenie się pędów wierzchołkowych i liści, wynikające ze zwiększonej ilości azotu przyswajanego przez roślinę.

W przeciwieństwie do oczywistych różnic w akumulacji biomasy nadziemnej i podziemnej, nie miały istotnego wpływu na efekt działania biostymulatora metody aplikacji dolistnie i doglebowo a także dawka aplikacyjna. Analiza statystyczna pomiędzy aplikacją doglebową i dolistną o różnych stężeniach nie wykazała istotnych różnic. Mimo to zaobserwowana, w tym badaniu została podkreślona przewaga aplikacji dolistnej nad doglebową. Wyniki wykazały, że generalnie dla uzyskania porównywalnych efektów konieczne było zastosowanie niższych dawek biostymulantu w przypadku aplikacji dolistnej niż w przypadku aplikacji doglebowej.

Przeprowadzone badania potwierdzają istnienie znacznego potencjału w zastosowaniu biostymulantów w szkółkach leśnych. Zabiegi na sadzonkach drzew podczas fazy hartowania wydają się być obiecującą techniką dla potencjalnej poprawy ich wzrostu po przesadzeniu. Zakłada się, że zabiegi te zwiększają przeżywalność sadzonek w miejscu docelowym poprzez zmniejszenie stresu związanego z przesadzaniem.

Uzyskane wyniki badań zwracają uwagę na dalszą potrzebę ich rozwijania w obszarze praktycznym bezpośrednio na uprawach leśnych. Przyszłe badania powinny skupić się na określeniu efektywnej dawki dla zastosowań komercyjnych, obejmujące częstotliwość i termin stosowania przed przesadzaniem w miejsce uprawy. Długoterminowy wpływ na wzrost, wykraczający poza 120 dni testowane, jest niezbędny do ustalenia prawdziwych korzyści wynikających z zastosowania biostymulantów.

5.3 Współpraca naukowa z międzynarodowymi ośrodkami badawczymi

Dzięki mojej pracy udało mi się stworzyć zawodową i osobistą sieć kontaktów z wiodącymi międzynarodowymi instytucjami badawczymi w Stanach Zjednoczonych Ameryki, Chile, Niemczech, Włoszech, Hiszpanii i Szwajcarii. Utrzymuję bliskie relacje naukowe z następującymi instytucjami:

1. Department of Forestry and Environmental Resources, North Carolina State University, Raleigh, NC, 27695-8008, USA (Prof. R. Cook)
2. Crop and Soil Sciences Department, North Carolina State University, Raleigh, NC, 27695 USA (Prof. A. Woodley)

3. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Concepción, Victoria 631, Casilla 160-C, Concepción, Chile (Prof. R. Rubilar)
4. CNR – Institute of Biosciences and BioResources (IBBR), Florence division, Via Madonna del Piano 10, I-50019 Sesto Fiorentino (FI), Italy (Dr. M. Marchi)
5. CREA – Research Centre for Forestry and Wood, Strada Frassineto Po 35, I-15033 Casale Monferrato (AL), Italy (Dr. S. Bergante and Dr. G. Facciotto)
6. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research WSL, Forest Soils and Biogeochemistry, Zuercherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf, Switzerland (Dr. J. Luster)
7. Barcelona East School of Engineering (EEBE), Department of Materials Science and Engineering, Av. Eduard Maristany, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain (Prof. J. Zoppe)
8. Institute for Materials and Wood Technology, Bern University of Applied Sciences BFH, Biel, Switzerland (Prof. H. Thömen)
9. Chair of Wood Materials Science, Institute for Building Materials, ETH Zürich, Switzerland
10. Institute for Wood Research, Technical University of Munich, Munich, Germany
11. Institut für Holztechnologie Dresden gemeinnützige GmbH (IHD), Dresden, Germany.

Współpraca z wyżej wymienionymi instytucjami za wyjątkiem wymienionej w punktach 6 i 9-11 zaowocowała wieloma wspólnymi przedsięwzięciami, które znalazły odzwierciedlenie w publikacjach **H1-H6** oraz **P5, P6**.

6. Prezentacja osiągnięć dydaktycznych i organizacyjnych oraz osiągnięć w zakresie popularyzacji nauki

6.1 Doświadczenie dydaktyczne

Ze względu na moją aktywność zawodową, jako pracownika w przedsiębiorstwie przemysłowym, moje doświadczenie i działalność dydaktyczna ograniczają się do opieki nad kilkoma indywidualnymi pracami studenckimi wymienionymi poniżej.

Depnering, T “*The influence of inorganic fiber substitutes on the mechanical, combustion and emission properties of Medium Density Fiberboard (MDF) panels.* ” Praca magisterska

2016, Institute for Materials and Wood Technology, 125 p. Bern University of Applied Sciences BFH, Biel, Switzerland (promotorzy: Thömen H, Ozyhar T)

Jüstrich, S “*Elastische Eigenschaften von Buchenholz oberhalb des Fasersättigungsbereiches.*” Bachelorarbeit 2012, Institut für Baustoffe, Holzphysik, 31 S., ETH Zürich, Switzerland (promotorzy: Niemz P, Ozyhar T)

Martienßen, A “*Ermittlung physikalischer Kennwerte von Ahorn (Acer pseudoplatanus L.).*” Projekt badawczy 2011, Fakultät Maschinenwesen, Institut für Holz- und Papiertechnik, Professur für Holz- und Faserwerkstofftechnik, 113 S., Technische Universität Dresden, Germany (konsultanci: Kröppelin U, Ozyhar T)

Do moich obowiązków należało zarówno wstępne opracowanie wytycznych do tematów badawczych, jak i późniejsza opieka nad studentami w trakcie prac oraz ich końcowa ocena.

Oprócz mojej aktywnej roli, jako opiekun i doradca w wyżej wymienionych studenckich pracach i projekcie badawczych, byłem również zaangażowany w ustalenie tematu badawczego i planu eksperymentów do pracy magisterskiej, która była realizowana w ramach współpracy z North Carolina State University w Stanach Zjednoczonych Ameryki i nadzorowana przez prof. R. Cook`a.

Zelaya, AS “*Highly Reactive Calcium Fertilizer Response on the Growth and Nutrient Availability of Eucalyptus grandis.*” Praca magisterska, 2019. Department of Forestry and Environmental Resources, North Carolina State University, NCSU, United States of America (promotorzy: Prof. R. Cook, Prof. B. Goldfarb, Prof. A. Woodley)

Moja rola podczas realizacji tego przedsięwzięcia dydaktycznego obejmowała ekspertyzę techniczną, dotyczącą zagadnień związanych ze stosowaniem wysoko reaktywnych mikronizowanych nawozów na bazie węglanu wapnia, które były istotnym elementem części eksperymentalnej pracy magisterskiej.

6.2 Doświadczenie organizacyjne w zarządzaniu projektami naukowo-badawczymi

Ważną częścią mojej obecnej pracy zawodowej na stanowisku kierownika projektu w dziale badawczo-rozwojowym jest zarządzanie wspólnymi projektami badawczymi realizowanymi z zewnętrznymi partnerami z różnych gałęzi przemysłu i jednostek naukowych.

Brałem czynny udział w pozyskiwaniu zewnętrznego finansowania przez Szwajcarską Agencję Innowacji (Innosuisse) dwóch projektów, których łączny budżet wynosił 1,27 mln

CHF. Wymienione projekty, w których pełniłem rolę eksperta naukowego z ramienia partnera przemysłowego, to:

- 1) „Opracowanie technologii wykorzystującej wielofunkcyjne dodatki mineralne w płytach drewnopochodnych w celu zwiększenia jej opłacalności ekonomicznej oraz poprawy właściwości ognioodpornych i emisyjnych” (tytuł oryginalny: *Development of a technology using multifunctional mineral additives in wood-based panels to increase its economic viability and to improve its fire resistance and emission characteristics*), 2014-2017 (finansowany przez Innosuisse, projekt nr 17026.2 PFIW-IW)
- 2) „Opracowanie uniepalniacza na bazie funkcjonalizowanych minerałów” (tytuł oryginalny: *Development of a fire retardant based on functionalized minerals*), 2019-2022 (finansowany przez Innosuisse, projekt nr 34008.1)

Oba projekty były realizowane w ścisłej współpracy z Instytutem Materiałów i Technologii Drewna (*Institut for Materials and Wood Technology, Bern University of Applied Sciences BFH*) w Szwajcarii.

Jestem również aktywnym członkiem Forest Productivity Cooperative (FPC), międzynarodowego partnerstwa zaangażowanego w tworzenie innowacyjnych rozwiązań mających na celu zwiększenie produktywności i wartości lasów poprzez zrównoważone zarządzanie zasobami terenu (prowadzonego przez wydziały leśnictwa z North Carolina State University, Virginia Polytechnic Institute oraz Universidad de Concepción). Jako przedstawiciel firmy, byłem odpowiedzialny za zarządzanie specjalnym projektem, realizowanym w latach 2017-2021 z łącznym budżetem 215.000 USD, którego celem było zbadanie wpływu wysoko reaktywnego nawozu wapniowego na wzrost szybko rosnących gatunków drzew w celu zwiększenia produktywności plantacji leśnych.

7. Informacje uzupełniające o karierze zawodowej

7.1 Działalność patentowa

Do jednego z głównych obszarów mojej działalności zawodowej w środowisku przemysłowym należy rozwój nowych obszarów i poszerzenie możliwości wykorzystania surowców mineralnych. Pracuję nad postępowymi technologiami i metodami zastosowania minerałów, które zasadniczo można przyporządkować do dwóch obszarów obejmujących wykorzystanie minerałów w produktach drewnopochodnych oraz jako nawozów w leśnictwie.

Istotną częścią mojej pracy związanej z rozwojem nowych technologii/aplikacji jest ochrona powstałej własności intelektualnej. Zgłoszenia patentowe dokonane w wyniku prac rozwojowych ochronione prawem dotyczącym własności intelektualnej są ważnym osiągnięciem mojego dorobku. Pełna lista moich zgłoszeń patentowych znajduje się w załączniku nr 4a.

7.2 Działalność w panelach ekspertów

Inną ważną częścią mojej działalności zawodowej jest praca ekspercka w Szwajcarskiej Agencji Innowacji (Innosuisse), federalnej jednostki finansującej innowacje naukowe realizowane na rzecz przemysłu i społeczeństwa szwajcarskiego. Moja działalność ekspercka w dziedzinie materiałów i kompozytów drewnopochodnych jest związana z oceną i wnioskowaniem o akceptację lub odrzucenie finansowania innowacyjnych projektów. W ciągu ostatnich 4 lat, począwszy od roku 2018, dokonałem przeglądu projektów o łącznym budżecie przekraczającym 10 mln CHF. Decyzje podejmowane przez mnie w znacznym stopniu przyczyniły się do rozwoju kierunków i kształtowania nowoczesnego materiałowznawstwa drzewnego w Szwajcarii i miały wymierny wpływ na promocję w tym zakresie licznych innowacyjnych przedsięwzięć o charakterze naukowych i przemysłowym.

W latach 2018-2020 pełniłem funkcję eksperta towarzyszącego w Swiss Wood Innovation Network (S-WIN), należącego do wiodących organizacji w zakresie promowania innowacyjnych technologii drzewnych, wpływających na dekarbonizację, wiążącą się z polityką ochrony środowiska i społeczeństwa w Szwajcarii.

W 2021 roku zostałem wybrany na eksperta towarzyszącego Krajowej Sieci Tematycznej (NTN) Innovation Booster "Applied Circular Sustainability". Program NTN Innovation Booster jest instrumentem finansowania Innosuisse. Jako ekspert towarzyszący jestem odpowiedzialny w imieniu Innosuisse za ocenę wyników i finansowanie projektów.

8. Bibliografia

1. Andersone I, Andersons B, Avramidis G, et al (2012) Handbook of wood chemistry and wood composites, second edition
2. Dobrowolska E (2002) Stosowanie drzewnych wiórów wtórnych i gipsu z odsiarczania w półsuchej technologii wytwarzania płyt gipsowo-wiórowych, 244th ed. Wydawn. SGGW, Rozprawy naukowe i monografie
3. Olorunnisola AO, Adefisan OO (2002) Trial production and testing of cement-bonded particleboard from rattan furniture waste. *Wood Fiber Sci* 34:
4. Selamat ME, Yun Hui T, Hashim R, et al (2018) Properties of Particleboard Made from Oil Palm Trunks Added Magnesium Oxide as Fire Retardant. *J Phys Sci* 29:59–75. <https://doi.org/10.21315/jps2018.29.1.5>
5. Musbah Redwan A, Haji Badri K, Tarawneh MA (2015) The Effect of Aluminium Hydroxide (ATH) on the Mechanical Properties and Fire Resistivity of Palm-Based Fibreboard Prepared by Pre-Polymerization Method. *Adv Mater Res* 1087:. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.1087.287>
6. Zahedsheijani R, Faezipour M, Tarmian A, et al (2012) The effect of Na⁺ montmorillonite (NaMMT) nanoclay on thermal properties of medium density fiberboard (MDF). *Eur J Wood Wood Prod* 70:565–571. <https://doi.org/10.1007/s00107-011-0583-6>
7. Wang J, Wang F, Gao Z, et al (2016) Flame Retardant Medium-Density Fiberboard with Expanded Vermiculite. *BioResources* 11:. <https://doi.org/10.15376/biores.11.3.6940-6947>
8. Hubbe MA, Gill RA (2016) Fillers for Papermaking: A Review of their Properties, Usage Practices, and their Mechanistic Role. *BioResources* 11:. <https://doi.org/10.15376/BIORES.11.1.2886-2963>
9. Camlibel O, Akgul M (2020) MECHANICAL AND PHYSICAL PROPERTIES OF MEDIUM DENSITY FIBREBOARD WITH CALCITE ADDITIVE. *Wood Res* 65:231–244. <https://doi.org/10.37763/wr.1336-4561/65.2.231244>
10. Camlibel O (2020) Mechanical and formaldehyde-related properties of medium density fiberboard with zeolite additive. *BioResources* 15:. <https://doi.org/10.15376/biores.15.4.7918-7932>
11. Mostashari SM, Haddadi H, Hashempoor Z (2006) Effect of deposited calcium hydrogen phosphate dihydrate on the flame-retardancy imparted to cotton fabric. *Asian J Chem* 18:
12. Guo H, Luković M, Mendoza M, et al (2019) Bioinspired Struvite Mineralization for Fire-Resistant Wood. *ACS Appl Mater Interfaces* 11:5427–5434.

<https://doi.org/10.1021/acsami.8b19967>

13. Franke T, Volkmer T (2019) Treatment of European beech with a new wood fire retardant agent based on *in situ* deposition of calcium oxalate. *Holzforschung* 73:.. <https://doi.org/10.1515/hf-2019-0043>
14. Ozyhar T, Kritzinger J, Hunziker P (2017) Fiber board product comprising a calcium carbonate-containing material. EP2944621B1 (patent europejski, przyznany 2017-04-12)
15. Khalili P, Tshai KY, Hui D, Kong I (2017) Synergistic of ammonium polyphosphate and alumina trihydrate as fire retardants for natural fiber reinforced epoxy composite. *Compos Part B Eng* 114:101–110. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.01.049>
16. van der Veen I, de Boer J (2012) Phosphorus flame retardants: Properties, production, environmental occurrence, toxicity and analysis. *Chemosphere* 88:.. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.03.067>
17. Guo H, Luković M, Mendoza M, et al (2019) Bioinspired Struvite Mineralization for Fire-Resistant Wood. *ACS Appl Mater Interfaces* 11:.. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b19967>
18. International Organization for Standardization. (2010) Reaction to fire tests—ignitability of products subjected to direct impingement of flame—Part 2: single-flame source test.
19. International Organization for Standardization (2015) Reaction-to-fire tests—heat release, smoke production and mass loss rate—Part 1: heat release rate (cone calorimeter method) and smoke production rate (dynamic measurement)
20. Rentsch S, Welker M, Pichler C, et al (2018) Use of mono-substituted succinic anhydride. EP3272799A1 (patent europejski, opublikowany 2018-01-24)
21. Gatenholm P, Felix J, Klason C, Kubát J (1992) Cellulose-Polymer Composites with Improved Properties. In: *Advances in New Materials*. Springer US, Boston, MA, pp 75–82
22. Johns WE, Niazi KA (1980) Effect of pH and Buffering Capacity of Wood on The Gelation Time of Urea-Formaldehyde Resin. *Wood Fiber Sci* 12:255–263
23. Xing C, Zhang SY, Deng J, et al (2006) Medium-density fiberboard performance as affected by wood fiber acidity, bulk density, and size distribution. *Wood Sci Technol* 40:637–646. <https://doi.org/10.1007/s00226-006-0076-7>
24. Xing C, Zhang SY, Deng J (2004) Effect of wood acidity and catalyst on UF resin gel time. *Holzforschung* 58:408–412. <https://doi.org/10.1515/HF.2004.061>
25. Matthews G, Plemper GS (1981) Effects of calcium carbonate fillers on the behaviour of PVC in fires. *Br Polym J* 13:.. <https://doi.org/10.1002/pi.4980130105>

26. Tian C, Wang H, Liu X, et al (2003) Flame retardant flexible poly(vinyl chloride) compound for cable application. *J Appl Polym Sci* 89:3137–3142. <https://doi.org/10.1002/app.12507>
27. Sato A, Kabusaki D, Okumura H, et al (2016) Surface modification of cellulose nanofibers with alkenyl succinic anhydride for high-density polyethylene reinforcement. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 83:72–79. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.11.009>

.....
(podpis wnioskodawcy)