

Badania wpływu minerałów hunterytu/hydromagnezytu oraz kalcytu pod kątem niepalności i właściwości mechanicznych kompozytów drzewnych

Investigation of calcite and huntite/hydromagnesite mineral in co-presence regarding flame retardant and mechanical properties of wood composites

Gül Yilmaz Atay¹, Valentyna Loboichenko^{2,3*}, Jacek Łukasz Wilk-Jakubowski⁴

¹ Department of Material Science and Engineering, Izmir Katip Çelebi University, Izmir, Turkey

² Dpto. de Ingeniería Energética, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, Sevilla, Spain

³ Department of Civil Security, Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

⁴ Department of Information Systems, Kielce University of Technology, Kielce, Poland

*Corresponding author: V. Loboichenko, e-mail: vloboichm@gmail.com

Streszczenie

W pracy zbadano właściwości dodatków mineralnych w kompozytach drzewnych, które wpływają na palność materiału, a jednocześnie są przyjazne dla środowiska. W artykule poddano analizie wyniki pomiarów kompozytów drewnianych, będących naturalnym materiałem budowlanym wielu domów, a także elementów ich wyposażenia. Jako matrycę zastosowano trociny drzewne. W pracy zbadano wpływ współobecności kalcytu i minerału mieszanego huntitu/hydromagnezytu. Kalcyt zastosowano jako minerał pomocniczy oprócz huntitu/hydromagnezytu, w celu uzyskania lepszego środka zmniejszającego palność zgodnie z normą UL94 i właściwości mechanicznych kompozytu drzewnego, takich jak wytrzymałość na zginanie i moduł sprężystości przy zginaniu. Uzyskane wyniki oceniano w zależności od zawartości składników mineralnych w kompozytach. Wyniki wykazały, że próbka 40S/50H/10C jest optymalna pod względem stosunku modułu sprężystości do niepalności. Materiały ognioodporne można stosować w budownictwie, a także w elektrotechnice, np. w gaśnicach akustycznych [np. do budowy falowodu].

Słowa kluczowe: kompozyt drzewny, środek zmniejszający palność, środowisko, właściwości mechaniczne, akustyka, huntit, kalcyt

Summary

This work examines the characteristics of mineral additives in wood composites that affect the fire retardant properties of the material, and at the same time are environmentally friendly. The paper analyzes the results of measurements for wood composites, which is the natural building material of many houses, as well as elements of their furnishings. Sawdust waste was applied as a matrix. In the paper, a co-presence effect of calcite and huntite/hydromagnesite mineral was investigated. The calcite mineral was used as auxiliary minerals in addition to the huntite/hydromagnesite mineral to obtain a better flame retardant according to the UL94 standard and mechanical properties in the wood composite, such as flexural strength and flexural modulus. The results obtained were measured and evaluated depending on the mineral content of the composites. The results indicated that sample 40S/ 50H/ 10C is the most optimal in terms of the ratio of the modulus of flexibility and fire retardant characteristics. Fire retardant materials can be used in the construction industry, as well as in the electrical engineering applications, such as for acoustic fire extinguishers [e.g. for waveguide construction].

Keywords: wood composite, flame retardant, environment, mechanical property, acoustics, huntite, calcite

1. Wprowadzenie

Ludzkość nauczyła się wykorzystywać różnorodne naturalne materiały, zarówno bezpośrednio, jak i poprzez ich przekształcanie. Najprostsze procesy wytwórcze, które miały miejsce na pierwszych etapach rozwoju człowieka, zostały przekształcone w złożone, wieloetapowe procesy, wymagające znacznych inwestycji surowcowych i ekonomicznych. Intensyfikacja postępu naukowo-technicznego przyczyniła się do pojawienia się zarówno produkcji na dużą skalę, jak i nowych materiałów, co z kolei pogłębiło negatywny wpływ antropogeniczny na środowisko. Wystarczy zwrócić uwagę na negatywny wpływ zanieczyszczeń organicznych i nieorganicznych na faunę i florę (1, 2), wodę (3, 4, 5, 6), gleby (7, 8) i powietrze (9, 10).

Jednak nie tylko różne rodzaje działalności gospodarczej mają negatywny wpływ na zanieczyszczenie środowiska. Różne sytuacje awaryjne, mające dużą skalę, mogą w swoim trakcie znacząco wpłynąć na przedostawanie się substancji niebezpiecznych chemicznie do biosfery. Tym samym niedawna pandemia Covid-19 przyczyniła się do przedostania się znacznych ilości mikroplastików oraz zanieczyszczeń organicznych i nieorganicznych do zbiorników wodnych i gleby (11, 12). Działania wojenne na pełną skalę, które można scharakteryzować jako sytuacje kryzysowe o charakterze wojskowym, mają złożony negatywny wpływ na środowisko. W wyniku ostrzału metale ciężkie z eksplodowanych i niewybuchów min, bomb i różnej amunicji przedostają się do wody, powietrza i gleby (13). Zniszczeniu infrastruktury towarzyszą pożary o dużej skali, które emitują zarówno produkty spalania samych obiektów, jak i ze środków gaśniczych (14).

Aby zminimalizować negatywny wpływ antropogeniczny, stosuje się różne podejścia. W ten sposób można zoptymalizować warunki przechowywania substancji niebezpiecznych dla środowiska (15), wprowadzić nowe technologie oszczędzające energię i zasoby (16, 17) oraz zastosować technologie wczesnego ostrzegania (18, 19, 20). Jako jedną z innowacyjnych technologii wspierających bezpieczeństwo można wskazać na przykład przyjazną dla środowiska technikę akustycznego gaszenia płomieni (21, 22, 23, 24). Pomocna w tym zakresie może być także sztuczna inteligencja, jako jeden z elementów zarządzania pożarami (25, 26). Innym podejściem jest znalezienie sposobów oczyszczenia środowiska z substancji zanieczyszczających. Na przykład (27) rozważa możliwości ekstrakcji sulfonianu perfluorooktanu [PFOS] i kwasu perfluorooktanowego [PFOA] z wody, które są trwałymi zanieczyszczeniami organicznymi i do niedawna były obecne w wielu obszarach działalności antropogenicznej [ugaszenie pożarów, lotnictwo, elektronika, itp.] (28) oraz (29) wykorzystują modyfikowaną glinę do usuwania związków aminowych, nitroorganicznych i fenoli ze ścieków.

W zależności od rodzaju palących się substancji, zgodnie z normą ISO 3941, pożary dzieli się na klasy A, B, C, D i F. Spalanie substancji stałych zalicza się do pożarów klasy A [zazwyczaj substancji organicznych, takich jak drewno, tekstylia, papier, itp.]. Pożary klasy B to spalanie substancji ciekłych lub upłynniających

1. Introduction

In the process of his life, a human has learnt to use various natural materials, both directly and by transforming them. The simplest productions that took place at the first stages of human development have been transformed into complex multi-stage processes that require significant resource and economic investments. The intensification of scientific and technological progress contributed to the emergence of both large-scale production and new materials, which, in turn, exacerbated the negative anthropogenic impact on the environment. It suffices to note the negative impact of organic and inorganic pollutants on biota (1, 2), water (3, 4, 5, 6), soils (7, 8), and air (9, 10).

However, not only various types of economic activity make a negative contribution to environmental pollution. Various emergencies, large-scale in their development, can significantly affect the entry of chemically hazardous substances into the biosphere. Thus, the recent COVID-19 pandemic contributed to the entry of significant amounts of microplastics, organic and inorganic pollutants into water bodies and soils (11, 12). Full-scale hostilities, which can be characterized as military emergencies, have a complex negative impact on the environment. As a result of shelling, heavy metals from exploded and unexploded mines, bombs, and various ammunition enter the water, air, and soil (13). And destruction of infrastructure is accompanied by large-scale fires with emissions from combustion products from both the objects themselves and the fire extinguishing agents (14).

Various approaches are used to minimize the negative anthropogenic impact. Thus, the storage conditions of environmentally hazardous substances can be optimized (15), new energy- and resource-saving technologies can be introduced (16, 17), and early warning technologies may be applied (18, 19, 20). For example, the environmentally friendly acoustic flame extinguishing technique can be pointed out as one of the innovative technologies supporting safety (21, 22, 23, 24). Artificial intelligence, as one of the elements of fire management, may also be helpful in this regard (25, 26). Another approach is to find ways to clean up the environment from such pollutants. For example, (27) considers options for extracting perfluorooctane sulfonate [PFOS] and perfluorooctanoic acid [PFOA] from water, which are persistent organic pollutants and, until recently, were present in many areas of anthropogenic activity [fire fighting, aviation, electronics, etc.] (28), and (29) use modified clay to remove amino-, nitro-organic compounds and phenols from wastewater.

Emergencies remain today one of the areas that a human cannot fully control. Their consequences can have long-term negative effects on the environment, both natural and anthropogenic, and on various spheres of human activity (30, 31, 32, 33). Therefore, an important element of their minimization is the elimination or the possibility of preventing such situations. In the context of the desire of many developed countries to develop a circular economy and in the framework of achieving sustainable development goals, an important element of modern technologies and materials is their

cych się ciał stałych. Spalanie gazów należy do pożarów klasy C, spalanie metali należy do pożarów klasy B. Pożary olejów spożywczych zalicza się do pożarów klasy F (34). Klasyfikacja Krajowego Stowarzyszenia Ochrony Przeciwożarowej wyróżnia także pożary ciał stałych [klasa A], cieczy [klasa B], metali [klasa D], olejów i tłuszczów kuchennych [klasa K], ale osobno uwzględnia pożary sprzętu elektrycznego [klasa C] (35). Do gaszenia pożaru można wykorzystać środki gaśnicze za pomocą hydrantów przy zaangażowaniu sprzętu i personelu lub za pomocą systemów zautomatyzowanych, można także zastosować różne gaśnice przenośne (14, 36).

Zgodnie z przyjętą klasyfikacją pożarów do ich gaszenia stosuje się różne środki gaśnicze. Ich działanie może być ukierunkowane na ochłodzenie temperatury układu, ograniczenie dostępu do środowiska utleniającego lub zmniejszenie stężenia utleniacza [powietrza], a także spowolnienie spalania (37). Woda i roztwory wodne, gazy [dwutlenek węgla, freony], ciała stałe [proszki] (38) i aerozole mogą działać jako środki gaśnicze. Dość dużą grupę środków gaśniczych tworzą różnego rodzaju pianki gaśnicze, zarówno pneumatyczne, jak i chemiczne. Te powietrzno-mechaniczne są przygotowywane z białek lub substancji syntetycznych, mogą być również ze związków organicznych [surfaktanty] lub fluorowęglowodorów (28). Woda jest zwykle używana do gaszenia pożarów materiałów stałych i olejów, w przypadku dużych pożarów pomaga ochłodzić konstrukcje, a strumienie wody mogą zgasić płomień [pożary w otworach wiertniczych gazu]. Pianki są najskuteczniejsze przy gaszeniu pożarów cieczy i materiałów stałych palnych, gazów – przy spalaniu materiałów wartościowych w postaci stałej, cieczy, sprzętu elektrycznego i proszków – przy gaszeniu pożarów metali (36, 37).

Wszystkie te substancje gaśnicze przyczyniają się do dodatkowego negatywnego zanieczyszczenia środowiska (38, 14). Ponadto niektóre związki, np. PFOS i PFOA, wchodzące w skład wodnych pianek fluorowanych, wykazują długotrwałe działanie toksyczne na organizmy żywe (28).

Obecnie opracowywane są podejścia wykorzystujące bardziej przyjazne dla środowiska środki gaśnicze (28), następuje przejście na nowe, bardziej przyjazne dla środowiska środki gaśnicze na bazie krzemu (39, 40), badane jest zastosowanie nanotechnologii (41, 42) oraz nowe technologie wykorzystujące efekty akustyczne (43, 44, 45, 46). Innym skutecznym sposobem zapobiegania pożarom jest stosowanie specjalnych substancji utrudniających zapalenie materiałów – tekstyliów (47, 48), żelbetowych materiałów budowlanych (49), polimerów (50), konstrukcji drewnianych (51, 52, 53). Wymienione powyżej substancje określa się ogólnie jako opóźniacze palenia [ang. flame retardants] (54).

Z kolei zastosowanie środków zapobiegawczych pozwala zminimalizować skutki lub zapobiec rozwojowi sytuacji awaryjnej jako takiej. Ponadto, jak wskazano wcześniej, w celu gaszenia płomieni, szczególnie w pomieszczeniach zamkniętych, można zastosować przyjazną dla środowiska technologię akustyczną oraz komunikację bezprzewodową do transmisji danych z terenów otwartych

environmental friendliness. This puts additional requirements on the approaches used today, indicating the need to choose more environmentally friendly means, methods, and substances.

Depending on the type of burning substances, according to ISO 3941, fires are classified into classes A, B, C, D, and F. Solid substance combustion is classified as class A fires [usually organic substances such as wood, textiles, paper, etc.]. Class B fires are the combustion of liquid substances or liquefiable solids. The combustion of gases belongs to fires of class C, the combustion of metals belongs to fires of class B. Fires of cooking oils are classified as fires of class F (34). The classification of the National Fire Protection Association also distinguishes fires of solids [class A], liquids [class B], metals [class D], cooking oils and fats [class K], but separately considers fires of electrical equipment [class C] (35). For firefighting, the supply of fire extinguishing agent can be used using hydrants with the involvement of equipment and personnel or using automated systems, and various portable fire extinguishers can also be used (14, 36).

According to the accepted classification of fires, various fire extinguishing agents are used to extinguish them. Their action can be directed at cooling the system temperature, limiting access to the oxidizing environment or reducing the concentration of the oxidizing agent [air], as well as slowing the combustion (37). Water and aqueous solutions, gases [carbon dioxide, freons], solids [powders] (38), and aerosols can act as fire extinguishing agents. A fairly large group of fire extinguishing compounds is formed by various fire extinguishing foams, either air-mechanical or chemical. Air-mechanical ones are protein-based or synthetic, they can also be carbon-based [surfactants] or fluorocarbon-based (28). Water is usually used to extinguish fires from solid materials and oils, in large fires, it helps cool structures, and jets of water can destroy flames (fires in gas wells). Foams are most effective when extinguishing fires of flammable liquids and solid materials, gases – when burning solid valuable materials, liquids, electrical equipment, and powders – when extinguishing metal fires (36, 37).

It should be understood that all of these fire extinguishing substances contribute additional negative to environmental pollution (38, 14). Moreover, some compounds, for example, PFOS and PFOA, which are part of aqueous fluorinated film foams, have a long-term toxic effect on living organisms (28).

Today approaches using more environmentally friendly fire extinguishing compounds are being developed (28), there is a transition to new, more environmentally friendly, fire extinguishing agents based on silicon (39, 40), the application of nanotechnology is being explored (41, 42) and new technologies using acoustic effects (43, 44, 45, 46). Another effective way to prevent fires is the use of special substances that make it difficult to ignite materials – textiles (47, 48), reinforced concrete building materials (49), polymers (50), wooden structures (51, 52, 53). They combine a set of substances under the general name Flame Retardants (54).

In turn, the use of preventive measures allows minimizing the consequences or preventing the development of an emergency

(55, 56, 57). W tym przypadku kolejnym aspektem jest dobór odpowiednich materiałów np. do budowy falowodów. Jednocześnie w warunkach nowoczesnej, ekologicznej społeczności technologie przyjazne środowisku będą miały oczywiście przewagę (45, 46).

Mając powyższe na uwadze, stosując materiały naturalne – zarówno w dekoracji, jak i bezpośrednio w budownictwie, należy zwrócić szczególną uwagę na ich odporność na ogień. Konstrukcje drewniane są w tym przypadku poddawane większej kontroli niż na przykład konstrukcje z kamienia, granitu czy marmuru. Dlatego też kwestia znalezienia skutecznych i przyjaznych dla środowiska opóźniaczy palenia do kompozytów drewnianych jest obecnie przedmiotem zainteresowania badaczy (58). Jako opóźniacze można stosować zarówno związki organiczne, jak i nieorganiczne, polimery, związki fosforu, boru, halogenów, azotu, krzemu, boru (50, 59, 60, 61), mogą być pochodzenia naturalnego lub być syntetyczne (46, 51, 54), mają różne metody aplikacji (62) lub są wprowadzane do matrycy związku głównego (63).

Zastosowanie opóźniaczy palenia z naturalnych substancji mineralnych w sposób oczywisty spełnia współczesne wymagania dotyczące wymagań, co do wpływu materiałów na środowisko (64, 65). Prowadzi to do zwiększonego zainteresowania minerałami takimi jak huntit i hydromagnezyt (46). Zbadano ich właściwości opóźniające (66), w tym wspólne działanie poprawiające ognioodporność (67), zachowanie z dodatkami czerwonego fosforu w kompozycjach poliuretanowych (68), w biokompozytach z dodatkiem plastyfikowanego poli[kwasu mlekowego] i boru (68, 69, 70), w kompozytach drewna (71).

Kiedy ogólnie bada się mechanizmy zmniejszania palności materiałów nieorganicznych, okazuje się, że minerały te, składające się z wodorotlenków lub uwodnionych węglanów, rozkładają się endotermicznie w temperaturach pomiędzy 200 a 400°C. Para wodna i dwutlenek węgla powstające w wyniku reakcji rozkładu powodują efekt chłodzenia otoczenia. W ten sposób spadek temperatury otoczenia utrudnia kontynuację pożaru. Z drugiej strony, powstały w wyniku reakcji rodzaj warstwy ceramicznej pokrywa powierzchnię i pełni rolę bariery pomiędzy płomieniem a powierzchnią palną. Warstwa ta, która jednocześnie odcina kontakt powierzchni z tlenem, zapobiega rozwojowi pożaru. Chroni to materiały łatwopalne przed dalszym atakiem płomieni i ciepła (72, 73).

Ostatnio badano także możliwość wytwarzania nanostrukturalnych wypełniaczy o zwiększonej przezroczystości i właściwościach ognioodpornych z huntytu i hydromagnezytu (74). Należy zauważyć, że oprócz badania właściwości ognioodpornych tych minerałów ważne jest również zrozumienie procesu ich produkcji (75), przygotowania i zastosowania, w szczególności oczyszczania i stopnia dyspersji (76).

Niniejsza praca poświęcona jest dalszym badaniom nad właściwościami opóźniaczy palenia z minerałów huntytu i hydromagnezytu (71). W szczególności badane było połączone zachowanie minerału hydromagnezytu kalcytu i huntytu. Jako minerał pomocniczy oprócz hydromagnezytu, w celu uzyskania lepszych właściwości zmniejszających palność i właściwości mechanicznych kompozytów drzewnych, zastosowano minerał kalcyt.

as such. Furthermore, as previously indicated for the purpose of extinguishing flames (especially indoors), environmentally friendly acoustic technology can be applied and wireless communications may be used to transmit data from open areas (55, 56, 57). In this case, another aspect is the selection of appropriate materials, for example, for the construction of waveguides. At the same time, under the conditions of a modern eco-friendly community, environmentally friendly technologies will obviously have an advantage (45, 46).

Given the above, when using natural materials – both in decoration and directly in construction, it is necessary to pay considerable attention to their resistance to fire. Wooden structures in this case are under more scrutiny than, for example, structures made of stone, granite, or marble. Thus, the issue of finding effective and environmentally friendly retardants for wood composites is of current interest (58). Both organic and inorganic compounds, polymers, compounds based on phosphorus, boron, halogens, nitrogen, silicon, boron can be used as retardants (50, 59, 60, 61), they can be of natural origin or be synthesized (46, 51, 54), have different methods of application (62) or are introduced into the matrix of the main compound (63).

The use of retardants based on natural mineral compositions obviously meets modern requirements for the environmental friendliness of materials (64, 65). This leads to increased interest in minerals such as huntite and hydromagnesite (46). Their retardant properties were investigated (66), including joint fire retardant effects (67), behavior with red phosphorus additives in polyurethane compositions (68), in biocomposites with plasticized poly [lactic acid] and boron additives (68, 69, 70), in wood composites (71).

When the flame retardancy mechanisms of inorganic minerals are generally examined, it is seen that these minerals, which consist of hydroxides or hydrous carbonates, decompose endothermically at temperatures between 200–400°C. Water vapor and carbon dioxide produced as a result of the decomposition reaction provide a cooling effect on the environment. In this way, the decrease in ambient temperature makes it difficult for the fire to continue. On the other hand, a type of ceramic layer formed as a result of the reaction covers the surface and acts as a barricade between the flame and the flammable surface. This layer, which also cuts off the surface's contact with oxygen, prevents the fire from progressing. This protects flammable materials from further attack by flame and heat (72, 73).

Recently, the possibility of producing nanostructured fillers of increased transparency with fire-retardant properties from huntite and hydromagnesite has also been studied (74). It is noted that in addition to studying the flame-retardant parameters of these minerals, it is also important to understand the features of their production (75), preparation and application, in particular, purification and degree of dispersion (76).

This work is devoted to further research on the flame retardant properties of retardants based on minerals of huntite and hydromagnesite (71). In particular, the combined behavior of calcite

2. Część badawcza

2.1. Materiały

Matrycą kompozytu były trociny. Naturalny minerał huntyt został dostarczony z dystryktu Tirtar w Isparcie w Turcji. Kalcyt zastosowany w celu poprawy właściwości uniepalniających został dostarczony przez firmę Anadolu Mikronize.

2.2. Składy próbek

W celu przygotowania kompozytów drzewnych najpierw określono proporcje proszków mineralnych i trocin. Na podstawie tych szacunków przygotowano różne ilości proszków mieszanin hydromagnezytu i kalcytu [tab. 1].

W tabelicy 1 widać, że we wszystkich analizowanych próbkach obecne są trociny. Proszki mineralne huntitu i hydromagnezytu są obecne we wszystkich próbkach z wyjątkiem pierwszej próbki [tj. 100S]. Kalcyt występuje w próbce trzeciej i czwartej [50S/40H/10C, 50S/30H/20C] oraz szóstej i siódmej [40S/50H/10C, 40S/40H/20C].

Proces produkcyjny przedstawiono na rys. 1. Na samym początku minerały poddano obróbce [kruszenie, mielenie i przesiewanie]. Dokonano charakteryzacji minerałów. Mieszanę trocinowo-mineralną wsypywano do formy mieszając z klejem. Całość poddano procesom prasowania i suszenia. Badano właściwości mechaniczne i ognioodporność kompozytów.

2.3. Metody badań

Do badania ognioodporności kompozytów wykorzystano tester igłowy ZLT-ZY2 Zhilitong ZLT-ZY2 [wszystkie badania przeprowadzono zgodnie z UL 94 (77)]. Próbkę poddano działaniu płomienia pod określonym kątem i w określonej odległości, a czas gaszenia płomienia i zdolność kapania mierzono zgodnie z normą IEC60695-11-5 (78). W tym celu w tabelicy 2 podano wartości referencyjne i definicje UL94. Z kolei stanowisko pomiarowe przedstawiono na rys. 2.

3. Wyniki i dyskusja

Obrazy ze skaningowego mikroskopu elektronowego huntytu/hydromagnezytu i kalcytu pokazano na rys. 3.

Zawartość minerałów w kompozycie wpływa na jego wytrzymałość na zginanie. W praktyce spadek wytrzymałości na zginanie wiąże się z niezgodnością użytego minerału z odpowiednią osnową drzewną, co spowodowane jest zmniejszeniem gęstości międzywłóknowej. Naprężenie rozciągające, moduł sprężystości i wytrzymałość na rozciąganie podano w tabelicy 3.

Jak widać z uzyskanych wyników, dla pierwszej próbki [100S] wytrzymałość na

and huntite/hydromagnesite mineral is investigated. The calcite mineral was used as auxiliary minerals in addition to the huntite/hydromagnesite mineral to obtain better flame retardant and mechanical properties in the wood composites.

2. Experimental section

2.1. Materials

The carrier matrix was sawdust waste. The natural huntite/hydromagnesite mixed mineral was provided from the Tirtar district in Isparta, Turkey. The calcite mineral used to improve the flame retardant properties was supplied by Anadolu Mikronize.

2.2. Compounding

For the preparation of the wood compounds, the ratios of the mineral powders and sawdust were first determined. Based on these estimations, different amounts of powders of huntite/hydromagnesite and calcite mixtures were prepared [Table 1].

In Table 1, it can be seen that sawdust is present in all samples analyzed. Huntite and hydromagnesite mineral powders are present in all samples except the first sample [i.e. 100S]. Calcite is present in the third and fourth samples [50S/ 40H/ 10C, 50S/ 30H/ 20C], as well as the sixth and seventh samples [40S/ 50H/ 10C, 40S/ 40H/ 20C].

The manufacturing process is shown in Figure 1. At the very beginning we have the minerals that are processed [crushing, grinding and screening]. Characterization of the minerals is done, and then, depending on the grain size, composition and sawdust [the product is sawdust], pouring sawdust-mineral powder recipes into the mold by stirring with adhesive. Molds are prepared. The whole is subjected to pressing and drying processes. While the characterization of the minerals was carried out at the beginning, at this stage, the characterization of the composites is carried out, which are then subjected to laboratory evaluation in terms of mechanical and fireproof properties.

Tablica 1 / Table 1

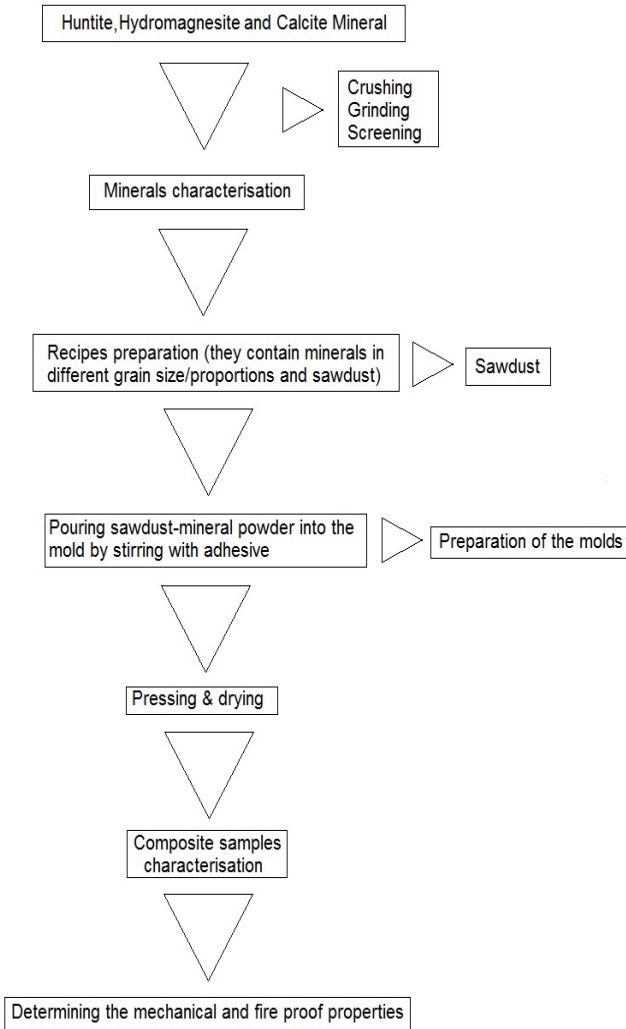
SKŁADY KOMPOZYTÓW DRZEWNYCH
FORMULATIONS OF THE PRODUCED WOOD COMPOSITE SAMPLES

| Próbka / Sample | Trociny / Sawdust, % | Huntyt-hydromagnezyt Hunite-Hydromagnesite, % | Kalcyt / Calcite, % |
|----------------------------|----------------------|--|---------------------|
| 100S ¹ | 100 | - | - |
| 50S/ 50H ² | 50 | 50 | - |
| 50S/ 40H/ 10C ³ | 50 | 40 | 10 |
| 50S/ 30H/ 20C | 50 | 30 | 20 |
| 40S/ 60H | 40 | 60 | - |
| 40S/ 50H/ 10C | 40 | 50 | 10 |
| 40S/ 40H/ 20C | 40 | 40 | 20 |

¹S: Trociny / Sawdust

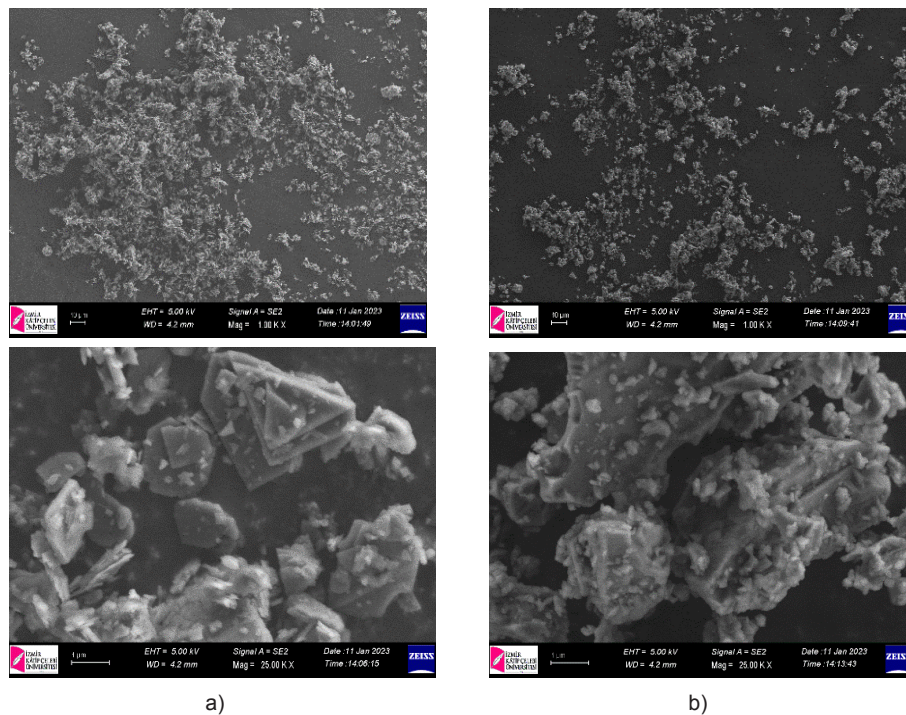
²H: Huntyt-hydromagnezyt / Huntite-Hydromagnesite

³C: Kalcyt / Calcite



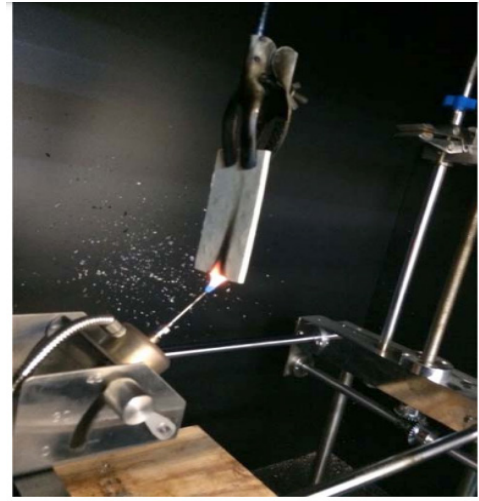
Rys. 1. Etapy produkcji kompozytów drzewnych

Fig. 1. Stages of the production of wood composites



Rys. 3. Morfologia ziaren obserwowana przy pomocy SEM a) huntitu/hydromagnezytu i b) kalcytu

Fig. 3. SEM analysis results of a) huntite/hydromagnesite and b) calcite mineral powders



Rys. 2. Stanowisko do badania ognioodporności wg UL 94

Fig. 2. UL 94 flame-retardant test set-up

2.3. Methods

The Zhilitong ZLT-ZY2 Needle-Flame Tester was used to test the flame retardant properties of the composites [all tests were conducted according to UL 94 (77)]. The samples were subjected to a flame at a specified angle and distance, and the flame extinguishing time and dripping ability were measured according to the IEC60695-11-5 standard (78). For this purpose, the UL94 ratings and definitions are provided in Table 2. In turn, the measuring position is presented in Figure 2.

3. Results and discussion

Scanning electron microscope micrographs of huntite/hydromagnesite and calcite can be seen in Fig. 3.

The mineral content of the composite affects its flexural strength. In practice, the decrease in flexural strength is associated with the incompatibility of the mineral used and the relevant wood matrix, which is caused by a decrease in inter-fiber density. Tensile stress, elastic modulus and tensile strength the sample values are listed in Table 3.

As can be seen from the results obtained, for the first sample [100S], the flexural strength was 48.7 MPa. For the second sample that contains, in addition to sawdust, also huntite and hydromagnesite [in an equal proportion of 50S/ 50H], the flexural strength was 35.9 MPa. Analyzing the third and fourth samples, with a small amount of calcite [50S/ 40H/ 10C], the flexural strength was 34.8 MPa, while its value increased to 36.3 MPa, with an increase in calcite at the expense of a

| Ocena wg. UL 94 UL 94 rating | Definicja oceny / Rating definition |
|---------------------------------|---|
| HB | Powolne palenie na części poziomej / Slow burning on a horizontal part |
| V-2 | Palenie zatrzymuje się w ciągu 30 sekund na próbce pionowej; dozwolone jest skapywanie płonących cząstek Burning stops within 30 seconds on a vertical specimen; drips of flaming particles are allowed. |
| V-1 | Palenie zatrzymuje się w ciągu 30 sekund na próbce pionowej; dozwolone jest skapywanie cząstek, o ile nie palą się Burning stops within 30 seconds on a vertical specimen; drips of particles allowed as long as they are not inflamed |
| V-0 | Palenie zatrzymuje się w ciągu 10 sekund na próbce pionowej; dozwolone jest skapywanie cząstek, o ile nie palą się Burning stops within 10 seconds on a vertical specimen; drips of particles allowed as long as they are not inflamed |
| 5VB | Palenie zatrzymuje się w ciągu 60 sekund na próbce pionowej; niedozwolone skapywanie cząstek; w próbkach może powstać dziura Burning stops within 60 seconds on a vertical specimen; no drips allowed; plaque specimens may develop a hole |
| 5VA | Palenie zatrzymuje się w ciągu 60 sekund na próbce pionowej; niedozwolone skapywanie cząstek; w próbkach nie może powstać dziura Burning stops within 60 seconds on a vertical specimen; no drips allowed; plaque specimens may not develop a hole |

zginanie wyniosła 48,7 MPa. Dla drugiej próbki, która oprócz trocin zawierała także huntyt i hydromagnezyt [w równych proporcjach 50S/50H], wytrzymałość na zginanie wyniosła 35,9 MPa. Analizując próbki trzecią i czwartą, z niewielką ilością kalcytu [50S/40H/10C], wytrzymałość na zginanie wyniosła 34,8 MPa, natomiast jej wartość wzrosła do 36,3 MPa, przy zwiększeniu zawartości kalcytu kosztem jednoczesnego zmniejszenia ilości huntytu/hydromagnezytu [50S/30H/20C]. Najniższą wartość wytrzymałości na zginanie wynoszącą 19,2 MPa odnotowano dla próbki piątej [40S/60H], w której nie występował kalcyt, natomiast procentowo dominował huntyt/hydromagnezyt. Każdy wzrost zawartości huntytu/hydromagnezytu w próbce powodował zmniejszenie wytrzymałości na zginanie. Próbki szósta i siódma [40S/50H/10C, 40S/40H/20C] zawierały taki sam udział trocin, natomiast zawartość huntytu/hydromagnezytu oraz kalcytu uległa zmianie. Podobnie jak ostatnim razem, wraz ze zwiększeniem ilości huntytu/hydromagnezytu, nastąpił spadek wytrzymałości na zginanie [dla próbki 40S/50H/10C uzyskano wytrzymałość na zginanie 19,8 MPa]. Z kolei dodatek kalcytu do próbki kosztem huntytu/hydromagnezytu korzystnie wpłynął na zwiększenie wytrzymałości na zginanie [dla próbki 40S/40H/20C uzyskano wartość 20,6 MPa].

Wyniki analizy mikroskopowej otrzymanych próbek przedstawiono na rys. 4. Można zauważyć, że próbka o kodzie 100S składa się wyłącznie z trocin. W próbkach 50S/50H, 50S/40H/10C, 50S/30H/20C, 40S/60H, 40S/50H/10C i 40S/40H/20C, w porach pomiędzy włóknami znajdują się proszki mineralne. Wypełnianie tych szczelin proszkami mineralnymi ma jeszcze jedną zaletę, poza zwiększeniem ognioodporności lub modułu sprężystości kompozytu, jak zobaczymy później. Zaletą jest to, że wypełnienie porów zapewnia jednocześnie ochronę kompozytu drzewnego przed

Tablica 3 / Table 3

WYNIKI TESTU ZGINANIA: WYTRZYMAŁOŚĆ NA ZGINANIE I MODUŁ SPRĘŻYSTOŚCI
BENDING TEST RESULTS: FLEXURAL STRENGTH AND FLEXURAL MODULUS

| № | Próbka / Sample | Wytrzymałość na ściskanie Flexural strength, MPa | Moduł sprężystości Flexural modulus, MPa |
|---|-----------------|---|---|
| 1 | 100S | 48.7 | 3470 |
| 2 | 50S/ 50H | 35.9 | 3822 |
| 3 | 50S/ 40H/ 10C | 34.8 | 3962 |
| 4 | 50S/ 30H/ 20C | 36.3 | 3853 |
| 5 | 40S/ 60H | 19.2 | 3506 |
| 6 | 40S/ 50H/ 10C | 19.8 | 3678 |
| 7 | 40S/ 40H/ 20C | 20.6 | 3846 |

simultaneous decrease in huntite and hydromagnesite [50S/ 30H/ 20C]. The lowest value of flexural strength of 19.2 MPa was recorded for the fifth sample [40S/ 60H], in which calcite was absent, while huntite and hydromagnesite dominated in percentage terms. As can be observed, each increase in the content of huntite and hydromagnesite in the sample resulted in the decrease in flexural strength. The sixth and seventh samples [40S/ 50H/ 10C, 40S/ 40H/ 20C] contained the same proportion of sawdust, while the content of huntite and hydromagnesite, as well as calcite, was changed. As last time, with the increase in huntite and hydromagnesite, there was a decrease in flexural strength [a flexural strength of 19.8 MPa was obtained for the 40S/ 50H/ 10C sample]. In turn, the addition of calcite to the sample at the expense of huntite and hydromagnesite had a favorable effect in increasing the flexural strength [a value of 20.6 MPa was achieved for the 40S/ 40H/ 20C sample].

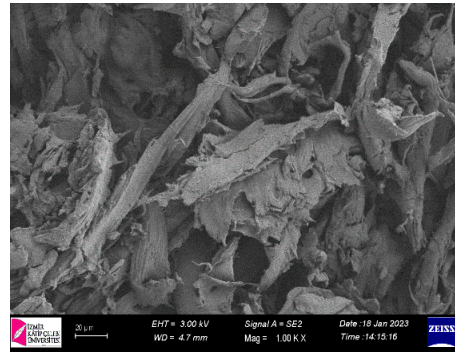
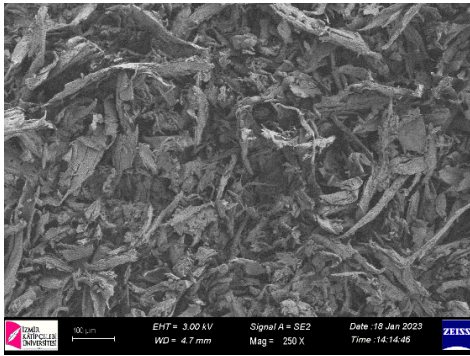
In the course of the study, the flexural modulus for each sample was also analyzed. For sample one [100S], its minimum value was observed, which was equal to 3470 MPa [neat wood sample]. When a comparative analysis of the results obtained for samples with mi-

Sample code

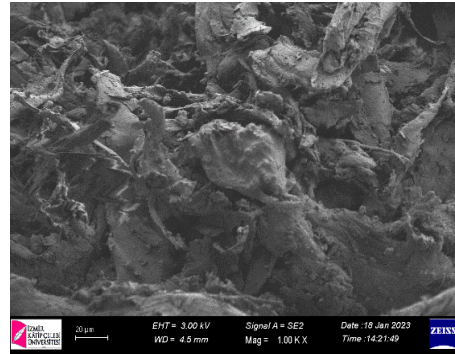
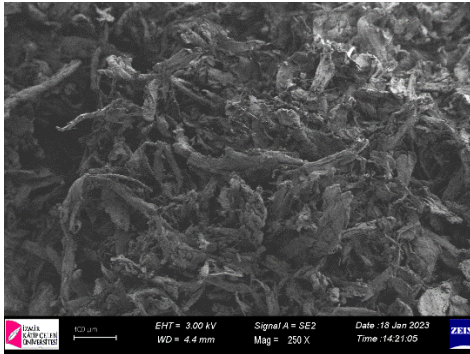
X250

X1000

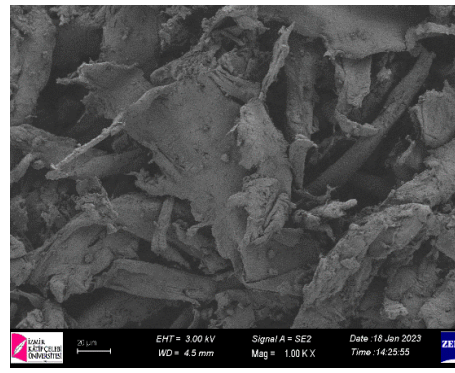
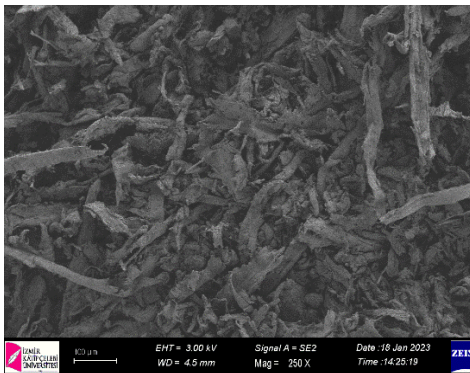
100S



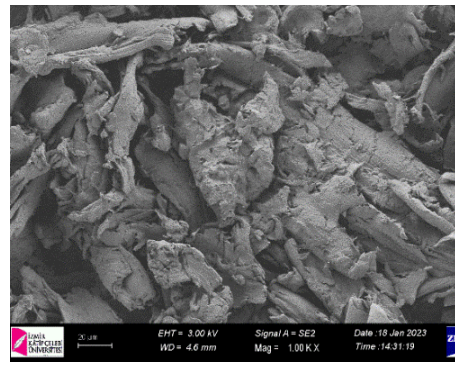
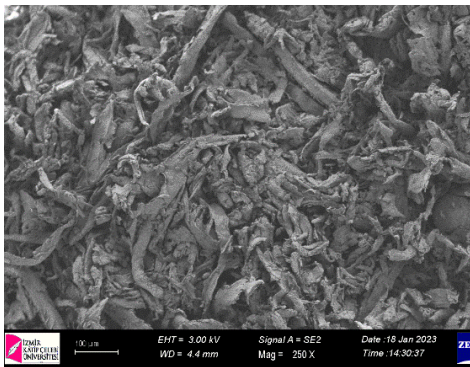
50S/ 50H



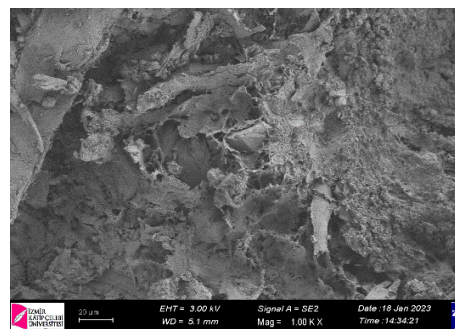
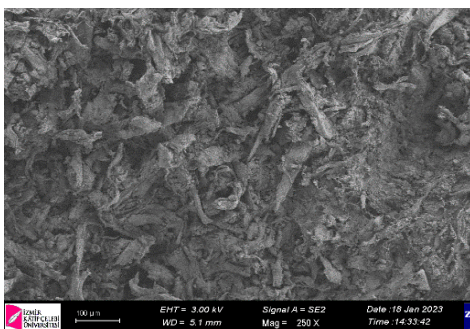
50S/ 40H/ 10C



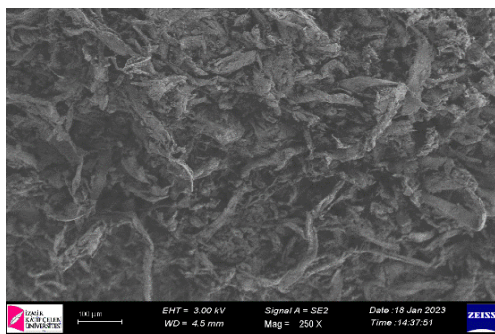
0S/ 30H/ 20C



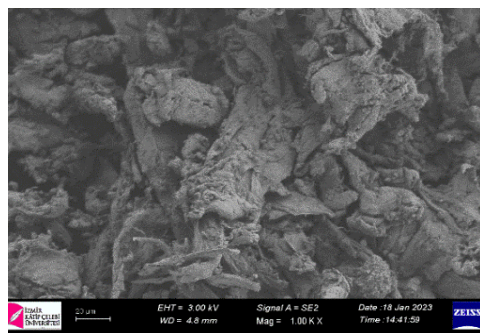
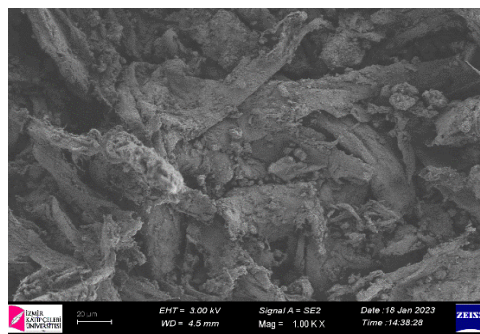
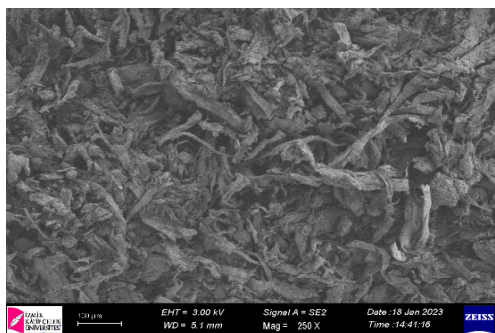
40S/ 60H



40S/ 50H/ 10C



40S/ 40H/ 20C



Rys. 4. Mikrostruktura próbek

Fig. 4. Microstructure of the samples

bakteriami. Pory w drewnie mają możliwość oddziaływania z wodą ze względu na obecność na jego powierzchni grup hydrofilowych. Zapewnia to kanały umożliwiające przepływ cieczy w strukturach porowatych, tworząc w ten sposób wysoką wilgotność w porach. Jak widać na rys. 4, pory pomiędzy cząstkami trocin zostały zamknięte poprzez obecność proszków mineralnych.

W tabelicy 4 przedstawiono wyniki badań właściwości kompozytów. Próbką kontrolna 100S nie zawierała żadnych dodatków mineralnych i nie była ogniodoporna. Ponadto można stwierdzić, że niespełniające wymagań normowych wyniki uzyskano w próbkach, w których ilość huntytu/hydromagnezytu, będącego jednym z dodatków dodawanych do trocin, jest mniejsza niż 30% [50S/30H/20C]. Jak widać na rys. 4, w tych dwóch próbkach wystąpił problem zwany kapieniem ogniowym. W innych próbkach widać, że została osiągnięta klasa V-0, która jest wymaganą wartością palności.

Rys. 5 przedstawia zdjęcia próbek po teście spalania UL94.

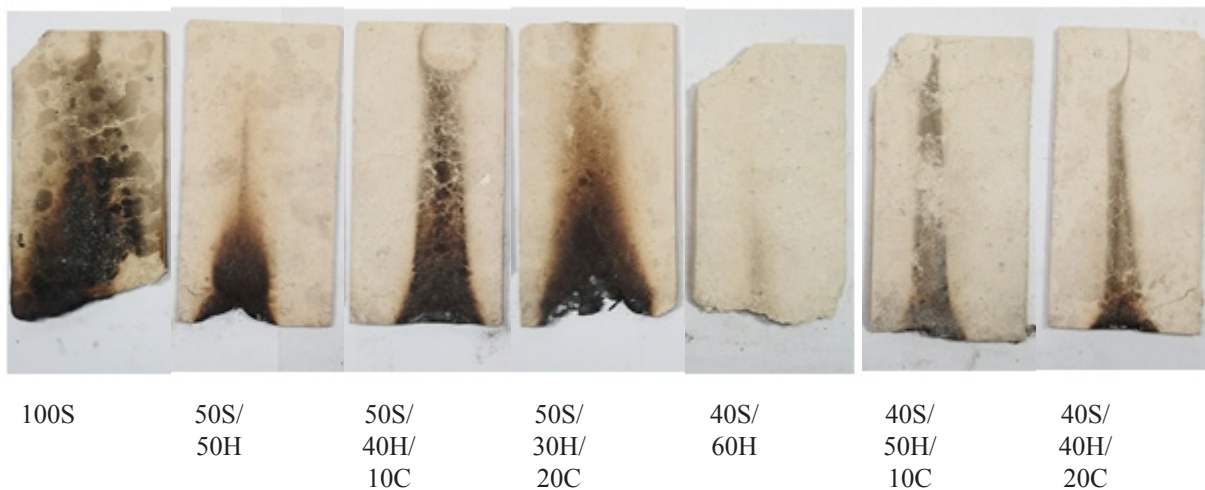
Biorąc pod uwagę czasy spalania, najkrótszy czas palenia uzyskano dla próbki 40S/60H i wyniósł on 4 sekundy. Zbliżoną do tej wartość uzyskano z próbki 40S/50H/10C, do której dodano 10% kalcytu i zmniejszono ilość huntytu/hydromagnezytu do 50%. Pomysłne wyniki uzyskano dla 12 sekund w próbce 40S/40H/20C, w której zawartość huntytu/hydromagnezytu została zmniejszona do 40%. Jak wynika z przedstawionych danych, próbki 5, 6 i 7 mają najlepszą niepalność.

Kiedy wyniki zmniejszania palności ocenia się w odniesieniu do właściwości mechanicznych, wyciągnąć można wniosek, że niektóre właściwości mechaniczne pogorszone przez dodatek huntytu/hydromagnezytu można poprawić poprzez zmniejszenie ilości

nerals, compared to a sample consisting only of neat wood [100S], it can be seen that the addition of minerals has a positive effect on the flexural modulus. However, the impact of agglomeration, the harmony between mineral powders and matrix, is important. Due to the deterioration of surface contact and through the resulting stresses, agglomerates can deteriorate the strength of the sample. Increasing the content of huntite and hydromagnesite at the expense of reducing sawdust resulted in a decrease in the value of the flexural modulus [samples 2 and 5]. In turn, analyzing the other samples [6 and 7], the addition of calcite to the composite has a positive effect on increasing the flexural modulus.

The results of the SEM analysis of the obtained samples are shown in Figure 4. Accordingly, it is seen that the sample with the code 100S consists only of sawdust. In the samples 50S/ 50H, 50S/ 40H/ 10C, 50S/ 30H/ 20C, 40S/ 60H, 40S/ 50H/ 10C and 40S/ 40H/ 20C, mineral powders are located in the pores between the chips. Filling these gaps with mineral powders has another advantage, in addition to increasing the flame retardancy or elastic modulus of the composite, as will be seen later. This advantage is that filling the pores also provides protection of the wood composite against bacteria. We suppose that the pores in the wood have the possibility to interact with water because of the presence of hydrophilic groups on its surface. In addition, channels are provided for the flow of liquids in porous structures, thus creating a high humidity within the pores. As seen in the Figure 4, the pores between the sawdust particles were closed by embedding mineral powders.

Table 4 shows the results of the study of flame retardant properties of the samples. Accordingly, the control sample, 100S, did not contain any additive minerals and was not flame retardant. Furthermore, it can be said that non-standard results were obtained



Rys. 5. Wynik badania palności próbek

Fig. 5. Flame retardant test result of samples

tego minerału i dodanie kalcytu. Podobnie wartości wytrzymałości na zginanie i modułu sprężystości kompozytu 40S/60H, który ma najlepszą ognioodporność, wyniosły odpowiednio 19,2 MPa i 3506 MPa, podczas gdy stwierdzono, że próbka 40S/40H/20C wynosiła 20,6 MPa i 3846 MPa. Natomiast wartości wytrzymałości na zginanie i modułu sprężystości próbki 50S/40H/10C, które otrzymały wartość V0 jako środek zmniejszający palność, wyniosły 34,8 MPa i 3962 MPa. Pokazało to, że możliwe jest uzyskanie zarówno dobrej ognioodporności, jak i lepszych właściwości mechanicznych przy zastosowaniu mniejszej ilości huntytu/hydromagnezytu i pewnej ilości kalcytu. Badając działanie kalcytu, można stwierdzić, że jest ono związane ze strukturą ziarnistą kalcytu. Huntyt/hydromagnezyt ma mikrostrukturę płatkową, podczas gdy kalcyt ma bardziej kulisty pokrój ziaren, co odgrywa rolę w zwiększaniu plastyczności materiału.

Biorąc pod uwagę, że dodatki kalcytu pozytywnie wpływają na moduł sprężystości badanych kompozytów [tab. 3], można stwierdzić, że spośród badanych próbek próbka 6 jest optymalna pod względem stosunku modułu sprężystości do niepalności.

in samples where the amount of huntite/hydromagnesite mineral, which is one of the additives added to sawdust, is less than 30% [50S/ 30H/ 20C]. As can be seen in Figure 4, a problem called fire dripping has occurred in these two samples. In other samples, it is seen that the V-0 class, which is the required value for flammability, has been reached.

Figure 5 demonstrates photographs of the samples after the UL94 burn test.

Considering the burning times, the shortest burning time was obtained from the 40S/ 60H sample with 4 seconds. The value close to this was taken from the 40S/ 50H/ 10C sample, in which 10% calcite was added and the amount of huntite/hydromagnesite was reduced to 50%. Successful results were obtained for 12 seconds in the 40S/ 40H/ 20C sample in which the huntite/hydromagnesite was reduced to 40%. As can be seen from the data presented, samples 5,6, and 7 have the best flame retardant characteristics.

When flame retardant results are evaluated in relation to mechanical properties, it is concluded that some of the mechanical

Tablica 4 / Table 4

WYNIKI TESTU OGNIODPORNOŚCI WEDŁUG UL94

UL94 FLAME RETARDANT TEST RESULTS

| № | Próbka / Sample | Czas działania ognia Flame applying time | Czas palenia / Burning time | Klasa / Class |
|---|-----------------|---|-----------------------------------|----------------------------------|
| 1 | 100S | 10 s | 30 s | Poza specyfikacją / Out of spec. |
| 2 | 50S/50H | 10 s 30 s | Brak zapłonu / No burning 18 s | V0 |
| 3 | 50S/40H/10C | 10 s 30 s | Brak zapłonu / No burning 24 s | V0 |
| 4 | 50S/30H/20C | 10 s | 30 s | Poza specyfikacją / Out of spec. |
| 5 | 40S/60H | 10 s 30 s | Brak zapłonu / No burning 4 s | V0 |
| 6 | 40S/50H/10C | 10 s 30 s | Brak zapłonu / No burning 7 s | V0 |
| 7 | 40S/40H/20C | 10 s 30 s | Brak zapłonu / No burning 12 s | V0 |

4. Wnioski

Obecnie trwają poszukiwania sposobów i środków minimalizacji szkód dla środowiska spowodowanych pożarami, ze szczególnym naciskiem na techniki przyjazne dla środowiska, w tym także materiały i elektrotechnikę. Stosowanie mineralnych środków zmniejszających palność jest jedną z przyjaznych dla środowiska opcji ochrony kompozytów drewnianych przed pożarami.

W artykule zbadano właściwości minerałów huntytu/hydromagnezytu i kalcytu do kompozytów drewnianych. Przygotowano kilka próbek kompozytów drewnianych z wykorzystaniem huntytu/hydromagnezytu i kalcytu, różniących się składem mineralnym, i zbadano ich odporność na płomienie. Na podstawie ich analizy widać, że minerały wpływają na odporność ogniową kompozytów drewnianych, która zależy od ich zawartości w danym kompozycie. W toku badań wykazano, że istnieje związek pomiędzy właściwościami mechanicznymi a palnością kompozytów. Z uzyskanych wyników można stwierdzić, że próbka 40S/50H/10C jest optymalna pod względem stosunku modułu sprężystości do ognioodporności.

Podziękowania

Autorzy dziękują kierownictwu Centralnych Laboratoriów Badawczych Uniwersytetu İzmir Katip Çelebi University oraz Dokuz Eylül University EMUM, Universidad de Sevilla, Politechnice Świętokrzyskiej, firmie „Ekohigiena Aparatura Ryszard Putyra Sp.J.”, firmie „Przedsiębiorstwo Handlowo-Techniczne SUPON Sp.z o.o.”, za wsparcie w realizacji niniejszych badań.

Literatura/ References

1. P. Minias. The effects of urban life on animal immunity: Adaptations and constraints. *Sci. Total Environ.* **895**, 165085 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165085>
2. F.-J. Richard, I. Southern, M. Gigauri, G. Bellini, O. Rojas, A. Runde. Warning on nine pollutants and their effects on avian communities. *Global Ecol. Conserv.* **32**, 01898 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01898>
3. A. Rossatto, M.Z.F. Arlindo, M. Saraiva de Moraes, T. Denardi de Souza, C.S. Ogrodowski. Microplastics in aquatic systems: A review of occurrence, monitoring and potential environmental risks. *Environ. Adv.* **13**, 100396 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100396>
4. R.S. Raj, K.A. Krishnan. A comprehensive review on the impact of emerging organophosphorous pesticides and their remedial measures: Special focus on acephate. *Env. Nanotech. Monit. Manag.* **20**, 100813 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2023.100813>
5. V. Strelets, V. Loboichenko, N. Leonova, R. Shevchenko, V. Telelim, V. Strelets, O. Shevchenko, O. Burmenko. Analysis of the Influence of Anthropogenic Factors of the Urbanized Territory of Poltava Region (Ukraine) on the State of River Water. *Ecological Engineering & Environmental Technology.* **23**(2), 185-192 (2022). <https://doi.org/10.12912/27197050/146019>
6. A. Kuzyk, V. Karabyn, V. Shuryhin, Y. Sushko, K. Stepova, O. Karabyn. The River System Pollutant Migration in the Context of the Sudden One-Time Discharge with Consideration of the Bottom Sediments Influence

properties worsened by the addition of huntite/hydromagnesite can be improved by reducing the amount of huntite/hydromagnesite and adding calcite. Likewise, the flexural strength and flexural modulus values of 40S/ 60H, which has the best flame retardant value, were 19.2 MPa and 3506 MPa, respectively, while the flame retardant 40S/ 40H/ 20C sample was found to be 20.6 MPa and 3846 MPa. On the other hand, the flexural strength and flexural modulus values of 50S/ 40H/ 10C sample, which received V0 value as flame retardant, were obtained as 34.8 MPa and 3962 MPa. This showed that it is possible to obtain both good flame retardancy and better mechanical properties with the use of a lower amount of huntite/hydromagnesite and some calcite. When the effect of calcite is investigated, it can be said that it is related to the grain structure of calcite. Huntite/hydromagnesite has a flaky structure, while calcite has a more spherical grain structure, which plays a role in increasing the ductility of the material.

Taking into account that calcite additives have a positive effect on the flexural modulus of the studied composites [Table 3], we can say that of the studied samples, sample 6 is the most optimal in terms of the ratio of the flexibility modulus and flame retardant characteristics.

4. Conclusions

Today, the search for ways and means to minimize the harm to the environment from fires continues with a particular emphasis on environmentally friendly techniques (including materials and electrical engineering, too). The use of mineral-based fire retardants is one of the environmentally friendly options to protect wood composites from fires.

The article studies the characteristics of calcite and huntite/hydromagnesite minerals for wood composites. Several wood composite samples were prepared, using huntite, hydromagnesite, and calcite, which vary in mineral composition, and their flame resistance was analyzed. On the basis of their analysis, it can be seen that minerals affect the fire resistance of wood composites, which depends on their degree of content in a given composite. In the course of the research, it was proven that there is a relationship between the mechanical properties and flammability of composites. From the results obtained, it can be reported that sample 40S/ 50H/ 10C is the most optimal in terms of the ratio of the modulus of flexibility and fire retardant characteristics.

Acknowledgements

The authors thank the management of the İzmir Katip Çelebi University Central Research Laboratories and Dokuz Eylül University EMUM, Universidad de Sevilla, Kielce University of Technology, the company “Ekohigiena Aparatura Ryszard Putyra Sp.J.”, the company “Przedsiębiorstwo Handlowo-Techniczne SUPON Sp. z o.o.”, for their support in the realization of this research.

- (Case of Benzene Migration in the Stryi River, Ukraine). *Ecol. Eng. Environ. Techn.* **24**(1), 46-54 (2023). <https://doi.org/10.12912/27197050/154909>
7. Y. Hou, Y. Zhao, J. Lu, Q. Wei, L. Zang, X. Zhao. Environmental contamination and health risk assessment of potentially toxic trace metal elements in soils near gold mines – A global meta-analysis. *Environ. Poll.* **330**, 121803 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121803>
8. E.S. Rentier, L.H. Cammeraat. The environmental impacts of river sand mining, *Sci. Total Environ.* **838**(1), 155877 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155877>
9. Z. Jiang, Y. Gao, H. Cao, W. Diao, W. Yao, C. Yuan, Y. Fan, Y. Chen. Characteristics of ambient air quality and its air quality index (AQI) model in Shanghai, China. *Sci. Total Environ.* **896**, 165284 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165284>
10. P. Sicard, E. Agathokleous, S.C. Anenberg, A. De Marco, E. Paoletti, V. Calatayud. Trends in urban air pollution over the last two decades: A global perspective. *Sci. Total Environ.* **858**, 160064 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160064>
11. M.T. Khan, I.A. Shah, M.F. Hossain, N. Akther, Y. Zhou, M.S. Khan, M. Al-Shaeli, M.S. Bacha, I. Ihsanullah. Personal protective equipment (PPE) disposal during COVID-19: An emerging source of microplastic and microfiber pollution in the environment. *Sci. Total Environ.* **860**, 160322 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160322>
12. N. Leonova, V. Loboichenko, M. Divizinyuk, R. Shevchenko. Study of Short-Term Effects on the Soil of Disposable Protective Face Masks Used in the COVID-19 Pandemic. *Key Eng. Mater.* **925**, 197-210 (2022). <https://doi.org/10.4028/p-zjo35h>
13. A. Myroshnychenko, V. Loboichenko, M. Divizinyuk, A. Levterov, N. Rashkevich, O. Shevchenko, R. Shevchenko. Application of Up-to-Date Technologies for Monitoring the State of Surface Water in Populated Areas Affected by Hostilities. *Bull. Georgian Nat. Acad. Sci.* **3**(16), 50-59 (2022).
14. R.I. Shevchenko, V.M. Strelets, V.M. Loboichenko. Review of up-to-date approaches for extinguishing oil and petroleum products. *SOCAR Procc. Spec. Iss.* **1/2021**, 169-174 (2021). <https://doi.org/10.5510/OGP-2021SI100519>
15. O. Sierikova, E. Strelnikova, D. Kriutchenko, V. Gnitko. Reducing Environmental Hazards of Prismatic Storage Tanks under Vibrations. *WSEAS Trans. Circ. Syst.* **21**, 249-257 (2022). <https://doi.org/10.37394/23201.2022.21.27>
16. G.M. Cabello, S.J. Navas, I.M. Vázquez, A. Iranzo, F.J. Pino. Renewable medium-small projects in Spain: Past and present of microgrid development. *Renewable and Sustainable Energy Rev.* **165**, 112622 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112622>
17. D. Pan, Y. Wang, Q. Liang, M. Zhou, X. Li, S. Xu, Z. Li. Recent advances in solar-driven photothermal nanostructured materials for CO₂ reduction: A review. *J. Environ. Chem. Eng.* **4**(11), 110324 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110324>
18. Y. Kozak, Y. Abramov, O. Basmanov. Substantiating the Pulse Method for Determining the Time Parameter of Fire Detectors with a Thermoresistive Sensing Element. *Eastern-Eur. J. Enter. Techn.* **5**(6), 49-55 (2021). <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.244235>
19. J.L. Wilk-Jakubowski, P. Stawczyk, S. Ivanov, S. Stankov. Control of Acoustic Extinguisher with Deep Neural Networks for Fire Detection. *Elektronika i Elektrotechnika.* **28**(1), 52-59 (2022). <https://doi.org/10.5755/j02.eie.24744>
20. L.-Y. Li, C.-F. Cao, Y.-X. Qu, G.-D. Zhang, L. Zhao, K. Cao, P. Song, L.-C. Tang. Smart fire-warning materials and sensors: Design principle, performances, and applications. *Mater. Sci. Eng. R* **150**, 100690 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.mser.2022.100690>
21. J.L. Wilk-Jakubowski, V. Loboichenko, G. Wilk-Jakubowski, H. Yilmaz-Atay, R. Harabin, J. Ciosmak, S. Ivanov, S. Stankov. Acoustic firefighting method on the basis of European research: a review. *Akustika.* **46**(46), 31-45 (2023). <https://doi.org/10.36336/akustika20234631>
22. J. Wilk-Jakubowski. Analysis of Flame Suppression Capabilities Using Low-Frequency Acoustic Waves and Frequency Sweeping Techniques. *Symmetry.* **13**(7), 1299 (2021). <https://doi.org/10.3390/sym13071299>
23. P. Stawczyk, J. Wilk-Jakubowski. Non-invasive attempts to extinguish flames with the use of high-power acoustic extinguisher. *Open Eng.* **11**(1), 349-355 (2021). <https://doi.org/10.1515/eng-2021-0037>
24. S. Ivanov, S. Stankov, J. Wilk-Jakubowski, P. Stawczyk. The using of Deep Neural Networks and acoustic waves modulated by triangular waveform for extinguishing fires. *International Workshop on New Approaches for Multidimensional Signal Processing (NAMSP 2020).* **216**, 207-218 (2021). https://doi.org/10.1007/978-981-33-4676-5_16
25. J. Wilk-Jakubowski, P. Stawczyk, S. Ivanov, S. Stankov. The using of Deep Neural Networks and natural mechanisms of acoustic waves propagation for extinguishing flames. *Int. J. Comp. Vision Rob.* **12**(2), 101-119 (2022). <https://doi.org/10.1504/IJCVR.2021.10037050>
26. J. Wilk-Jakubowski, P. Stawczyk, S. Ivanov, S. Stankov. High-power acoustic fire extinguisher with artificial intelligence platform. *Int. J. Comp. Vision Rob.* **12**(3), 236-249 (2022). <https://doi.org/10.1504/IJCVR.2021.10039861>
27. S.C.E. Leung, P. Shukla, D. Chen, E. Eftekhari, H. An, F. Zare, N. Ghasemi, D. Zhang, N.T. Nguyen, Q. Li. Emerging technologies for PFOS/PFOA degradation and removal: A review. *Sci. Total Environ.* **827**, 153669 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153669>
28. V.V. Strelets, V.M. Loboichenko, N.A. Leonova, R.I. Shevchenko, V.M. Strelets, A.V. Pruskyi, O.V. Avramenko. Comparative assessment of environmental parameters of foaming agents based on synthetic hydrocarbon used for extinguishing the fires of oil and petroleum products. *SOCAR Proceedings. Special Issue 2/2021*, 1-10 (2021).
29. I.A. Farbut, I.A. Kovalchuk, T.A. Khalyavka, M.M. Tsyba, S.V. Camyshan. Organic Pollutants Removal from Wastewater in Rubizhne City, Ukraine. 16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, European Association of Geoscientists & Engineer. **1(2022)**, 1-5 (2022).
30. O. Azarenko, Y. Honcharenko, M. Divizinyuk, V. Mirnenko, V. Strilets, J.L. Wilk-Jakubowski. The influence of air environment properties on the solution of applied problems of capturing speech information in the open terrain. *Soc. Dev. Secur.* **12**(2), 64-77 (2022). <https://doi.org/10.33445/sds.2022.12.2.6>
31. O. Azarenko, Y. Honcharenko, M. Divizinyuk, V. Mirnenko, V. Strilets, J.L. Wilk-Jakubowski. Influence of anthropogenic factors on the solution of applied problems of recording language information in the open area. *Soc. Dev. Secur.* **12**(3), 135-143 (2022). <https://doi.org/10.33445/sds.2022.12.3.12>
32. G. Wilk-Jakubowski, R. Harabin, S. Ivanov. Robotics in crisis management: a review. *Techn. Soc.* **68**, 101935 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2022.101935>
33. G. Wilk-Jakubowski, R. Harabin, T. Skoczek, J. Wilk-Jakubowski. Preparation of the Police in the Field of Counter-terrorism in Opinions of the Independent Counter-terrorist Sub-division of the Regional Police Headquarters in Cracow. *Slovak J. Polit. Sci.* **22**(2), 174-208 (2022).
34. ISO 3941:2007. Classification of fires. ISO. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2007.
35. NFPA 10: Standard for portable fire extinguishers. National Fire Protection Association, Massachusetts, USA, 2022. <https://www.nfpa.org>

org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=10

36. Guidance notes on fire-fighting systems. American Bureau of Shipping. Houston, USA, 2005.

37. V.V. Syrovyyi, Y.M. Senchikhin, A.A. Lisnyak, I.G. Derevyanko. Basics of firefighting tactics: train, manual. NUCD, Kharkiv, Ukraine, 2015 (in Ukr).

38. V. Loboichenko, N. Leonova, V. Strelets, A. Morozov, R. Shevchenko, P. Kovalov, R. Ponomarenko, T. Kovalova. Comparative analysis of the influence of various dry powder fire extinguishing compositions on the aquatic environment. *Water Ener. Int.* **62**(7), 63-68 (2019).

39. Y. Sheng, S. Zhang, D. Hu, L. Ma, Y. Li. Investigation on thermal stability of highly stable fluorine-free foam co-stabilized by silica nanoparticles and multi-component surfactants. *J. Mol. Liq.* **382**, 122039 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.122039>

40. K.M. Hinnant, S.L. Giles, R. Ananth, J.H. Miller. Exploring synergistic fire suppression of siloxane-glycoside firefighting foam using sulfonated hydro-trope additives to alter surfactant aggregation in solution. *Coll. Surf. A* **655**, 130219-130219 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.130219>

41. A. Rabajczyk, M. Zielecka, T. Popielarczyk, T. Sowa. Nanotechnology in Fire Protection-Appl. *Req. Mater.* **14**(24), 7849 (2021). <https://doi.org/10.3390/ma14247849>

42. Q. Wang, Y. Zhang, Y. Li, Y. Pan, X. Geng, X. Zhu, J. Jiang. Study on the effect of nanoparticles combined with silicone surfactant and cationic surfactant on foam and fire extinguishing performance. *Env. Sci. Poll. Res.* **30**(4), 11065-11080 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22969-y>

43. C. Xiong, Y. Liu, C. Xu, X. Huang. Extinguishing the dripping flame by acoustic wave. *Fire Saf. J.* **120**, 103109 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103109>

44. T.S. Vovchuk, J.L. Wilk-Jakubowski, V.M. Telelim, V.M. Loboichenko, R.I. Shevchenko, O.S. Shevchenko, N.Y. Tregub. Investigation of the use of the acoustic effect in extinguishing fires of oil and petroleum products. *SOCAR Proceedings. Spec. Iss.* **2/2021**, 24-31 (2021). <https://doi.org/10.5510/OGP2021SI200602>

45. V. Loboichenko, J. Wilk-Jakubowski, G. Wilk-Jakubowski, R. Harabin, R. Shevchenko, V. Strelets, A. Levterov, A. Soshinskiy, N. Tregub, O. Antoshkin. The use of acoustic effects for the prevention and elimination of fires as an element of modern environmental technologies. *Environ. Clim. Techn.* **26**(1), 319-330 (2022). <https://doi.org/10.2478/rtulect-2022-0024>

46. H. Yılmaz-Atay, J.L. Wilk-Jakubowski. A Review of Environmentally Friendly Approaches in Fire Extinguishing: From Chemical Sciences to Innovations in Electrical Engineering. *Polymers.* **14**(6), 1224 (2022). <https://doi.org/10.3390/polym14061224>

47. O. Skorodumova, O. Tarakhno, O. Chebotaryova, Y. Hapon, F.M. Emen. Formation of Fire Retardant Properties in Elastic Silica Coatings for Textile Materials. *Mater. Sci. For.* **1006**, 25-31 (2020). <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.1006.25>

48. M.S. Özer, S. Gaan. Recent developments in phosphorus based flame retardant coatings for textiles: Synthesis, applications and performance. *Prog. Org. Coat.* **171**, 107027 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2022.107027>

49. A. Kovalov, Y. Otrosh, O. Semkiv, V. Konoval, O. Chernenko. Influence of the Fire Temperature Regime on the Fire-Retardant Ability of Reinforced-Concrete Floors Coating. *Mater. Sci. For.* **1006**, 87-92 (2020). <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.1006.87>

50. O. Wen, M.Z. Mohd Tohir, T. Yeaw, M. Abdul Razak, H.S. Zainuddin, M.R. Abdul Hamid. Fire-resistant and flame-retardant surface finishing of polymers and textiles: A state-of-the-art review. *Prog. Org. Coat.* **175**, 107330 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2022.107330>

51. S. Liodakis, V. Tsapara, I.P. Agiovlasis, D. Vorisis. Thermal analysis of *Pinus sylvestris* L. wood samples treated with a new gel–mineral mixture of short- and long-term fire retardants. *Thermoch. Acta.* **568**, 156-160 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.tca.2013.06.011>

52. L. Zhang, Xu J, Shen H, J. Xu, J. Cao. Montmorillonite-catalyzed furfurylated wood for flame retardancy. *Fire Saf. J.* **121**, 103297 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2021.103297>

53. A. Singh, D. Ramimoghadam, A. Mirabedini. The use of polydopamine coatings for timber protection against the fire: A critical review and feasibility analysis. *Prog. Org. Coat.* **175**, 107359-107359 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2022.107359>

54. F.-F. Li. Comprehensive Review of Recent Research Advances on Flame-Retardant Coatings for Building Materials: Chemical Ingredients, Micromorphology, and Processing Techniques. *Molecules.* **28**, 1842 (2023). <https://doi.org/10.3390/molecules28041842>

55. J. Wilk-Jakubowski. Total Signal Degradation of Polish 26-50 GHz Satellite Systems Due to Rain. *Polish J. Environ. Stud.* **27**(1), 397-402 (2018). <https://doi.org/10.15244/pjoes/75179>

56. J. Wilk-Jakubowski. Predicting Satellite System Signal Degradation due to Rain in the Frequency Range of 1 to 25 GHz. *Polish J. Environ. Stud.* **27**(1), 391-396 (2018). <https://doi.org/10.15244/pjoes/73906>

57. J. Wilk-Jakubowski. Measuring Rain Rates Exceeding the Polish Average by 0.01%. *Polish J. Environ. Stud.* **27**(1), 383-390 (2018). <https://doi.org/10.15244/pjoes/73907>

58. M. Zhang, D. Wang, T. Li, J. Jiang, H. Bai, S. Wang, Y. Wang, W. Dong. Multifunctional Flame-Retardant, Thermal Insulation, and Antimicrobial Wood-Based Composites. *Biomacromolecules.* **24**(2), 957-966 (2023). <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.2c01397>

59. M. Nurul Azman, M. Taib, P. Antov, V. Savov, W. Fatriasari, E.W. Madyaratri, R. Wirawan, L. Makovická Osvaldová, L. Seng Hua, M.A. Abdul Ghani, S.S. Azry Osman Al Edrus, L. Wei Chen, D. Trache, M.H. Hussin. Current progress of biopolymer-based flame retardant. *Polym. Degrad. Stab.* **205**, 110153 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2022.110153>

60. A. Hochół, M. Flejszar, P. Chmielarz. Advances and opportunities in synthesis of flame retardant polymers via reversible deactivation radical polymerization. *Polym. Degrad. Stab.* **214**, 110414 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2023.110414>

61. K. Sykam, S.S. Hussain, S. Sivanandan, R. Narayan, P. Basak. Non-halogenated UV-curable flame retardants for wood coating applications: Review. *Prog. Org. Coat.* **179**, 107549-107549 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.107549>

62. Y. Yan, S. Dong, H. Jiang, B. Hou, Z. Wang, C. Jin. Efficient and Durable Flame-Retardant Coatings on Wood Fabricated by Chitosan, Graphene Oxide, and Ammonium Polyphosphate Ternary Complexes via a Layer-by-Layer Self-Assembly Approach. *ACS Omega.* **7**(33), 29369-29379 (2022). <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c03624>

63. N.A. Rejab, J. Olabode Akindoyo, H. Yılmaz Atay, J. Selvi Binoj, M. Jaafar. Flexural and flame retardance properties of multi-walled carbon nanotubes/glass fibre/epoxy hybrid composites. *Constr. Build. Mater.* **387**, 131677 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131677>

64. T.R. Hull, A. Witkowski, L. Hollingbery. Fire retardant action of mineral fillers. *Polym. Degrad. Stab.* **96**(8), 1462-1469 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2011.05.006>

65. J. Wilk-Jakubowski. Experimental Investigation of Amplitude-Modulated Waves for Flame Extinguishing: A Case of Acoustic Environmentally Friendly Technology. *Environ. Clim. Techn.* **27**(1), 627-638 (2023). <https://doi.org/10.2478/rtulect-2023-0046>

66. L.A. Hollingbery, T.R. Hull. The fire retardant behaviour of huntite and hydromagnesite – A review. *Polym. Degrad. Stab.* **95**(12), 2213-2225 (2010). <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2010.08.019>
67. L.A. Hollingbery, T.R. Hull. The fire retardant effects of huntite in natural mixtures with hydromagnesite. *Polym. Degrad. Stab.* **97**(4), 504-512 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2012.01.024>
68. L.A. Savas, T.K. Deniz, U. Tayfun, M. Dogan. Effect of microcapsulated red phosphorus on flame retardant, thermal and mechanical properties of thermoplastic polyurethane composites filled with huntite & hydromagnesite mineral. *Polym. Degrad. Stab.* **135**, 121-129 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2016.12.001>
69. A. Erdem, M. Dogan. Influence of boron bearing fillers on flame retardancy properties of huntite hydromagnesite filled ductile PLA biocomposites. *J. Boron* **8**(1), 16-24 (2023). <https://doi.org/10.30728/boron.1135702>
70. H. Yilmaz Atay, Ö. İçin, B. Kuru. Investigations of Flame Retardant Properties of Zinc Borate Accompanying with Huntite and Hydromagnesite in Polymer Composites. *Inżynieria Mineralna.* **1**(1), 79-86 (2020). <https://doi.org/10.29227/IM-2020-01-13>
71. H. Yilmaz Atay. Novel eco-friendly flame retardant wood composites reinforced by huntite and hydromagnesite minerals. *Wood Mater. Sci. Eng.* **17**(6), 648-658 (2022). <https://doi.org/10.1080/17480272.2021.1923567>
72. L. Haurie, A.I. Fernández, J.I. Velasco, J.M. Chimenos, J.M. Cuesta, F. Espiell. Thermal stability and flame retardancy of LDPE/EVA blends filled with synthetic hydromagnesite/aluminium hydroxide/montmorillonite and magnesium hydroxide/aluminium hydroxide/montmorillonite mixtures. *Polym. Degrad. Stab.* **92**(6), 082-7 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2007.02.014>
73. H. Yilmaz Atay, Utilising glass fibres to improve mechanical properties of mineral reinforced cable trays. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi.* **6**(1), 265-274 (2017).
74. K.S. Andrikopoulos, G. Bounos, G.C. Lainioti, T. Ioannides, J.K. Kallitisis, G.A. Voyiatzis. Flame Retardant Nano-Structured Fillers from Huntite/Hydromagnesite Minerals. *Nanomaterials.* **12**(14), 2433 (2022). <https://doi.org/10.3390/nano12142433>
75. O. Kangal, O. Kökkılıç, F. Burat. Production of huntite and hydromagnesite with flame retardant featured by flotation. *Min. Metal. Expl.* **26**(2), 109-113 (2009). <https://doi.org/10.1007/bf03403427>
76. H. Yilmaz Atay, M. Çirak. Separation of huntite and hydromagnesite from magnesite in combination of physicochemical treatment and size reduction. *Ain Shams Eng. J.* **10**(1), 113-119 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.asej.2018.05.003>
77. UL 94. Tests for Flammability of Plastic Materials for Parts in Devices and Appliances. UL Standard. Ed.6, 2013.
78. IEC 60695-11-5:2016. Fire hazard testing - Part 11-5: Test flames – Needle-flame test method – Apparatus, confirmatory test arrangement and guidance. International Standard, 2016.