

Właściwości betonu zawierającego przetworzone maseczki ochronne wykorzystywane podczas pandemii koronawirusa SARS-CoV-2

Performance of concrete containing recycled masks used for personal protection during SARS-CoV-2 coronavirus pandemic

Marcin Koniorczyk^{1*}, Dalia Bednarska¹, Iman Abbasi Nattaj Omrani¹, Anna Masek², Stefan Cichosz²

¹Lodz University of Technology, Department of Building Materials Physics and Sustainable Design, al. Politechniki 6, 90-537 Lodz, Poland

²Lodz University of Technology, Institute of Polymer and Dye Technology, Faculty of Chemistry, ul. Stefanowskiego 12/16, 90-924 Lodz, Poland

*Corresponding author: M. Koniorczyk, e-mail: marcin.koniorczyk@p.lodz.pl

Streszczenie

Wybuch pandemii COVID-19 spowodował tragiczne konsekwencje dla zdrowia publicznego oraz zwiększył produkcję odpadów medycznych, które mogą przyczynić się do dalszego rozprzestrzeniania wirusa, zagrażać zdrowiu obywateli oraz środowisku naturalnemu. W celu ograniczenia tych problemów zaproponowano metodę przetwarzania maseczek ochronnych, w sposób umożliwiającą ich powtórne użycie podczas produkcji betonu. W artykule przedstawiono wyniki badań opisujące wpływ dodatku przetworzonego odpadu medycznego na właściwości zawierającego go betonu. Wyznaczono wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie betonu sporządzonego z dodatkiem przetworzonych maseczek oraz betonu referencyjnego. Wykonano badania przepuszczalności właściwej przed i po ekspozycji na wysoką temperaturę w celu sprawdzenia, czy materiał otrzymany z recyklingu charakteryzuje się podobnymi właściwościami co stosowane włókna polipropylenowe. Dodatkowo wykonano badanie wpływu przetworzonych maseczek na ciepło hydratacji.

Słowa kluczowe: beton, ciepło hydratacji cementu, odpady medyczne, pandemia COVID-19, przepuszczalność

Summary

Alongside with all its difficulties and tragic consequences, the outbreak of the COVID-19 pandemic has also caused a drastic increase in the amount of the generated healthcare wastes. Healthcare wastes can accelerate the further spread of the virus and threaten the health of citizens and the environment. In order to deal with this lateral problem of the on-going pandemic, facemask wastes were processed and recycled in concrete materials. The objective of this research was to investigate the influences of recycled facemask products on the performance of concrete. To do so, the compressive and splitting tensile strength tests were performed to assess the mechanical behaviour of concrete with and without of the recycled facemask products. Moreover, gas permeability test was conducted on the designed samples before and after exposure to fire temperature, to verify whether the proposed addition provides a similar effect like conventional polypropylene fibres, or not. The results were supplemented with the heat of cement hydration measurements.

Keywords: Healthcare Waste Recycling, COVID-19 Pandemic, Concrete, Heat of Hydration, Gas Permeability

1. Wprowadzenie

Nowa postać koronawirusa, znana jako SARS-CoV-2, pojawiła się w Chinach w mieście Wuhan w roku 2019 skąd rozprzestrzeniła się na różne części świata i opanowała 217 państw (1), stając się globalnym zagrożeniem dla zdrowia publicznego (2). Samoizolacja,

1. Introduction

The new form of coronavirus, known as SARS-CoV-2, first emerged in Wuhan, China, in 2019 and soon reached various parts of the globe and conquered around 217 countries (1), thus, it has been recognized as a Public Health Emergency of International Concern

przechodzenie na zdalny tryb pracy, czy konieczność utrzymywania dystansu społecznego były tylko niektórymi z efektów globalnej pandemii, która pozbawiła życia już prawie 5 milionów osób (3). Wpłynęła ona niemal na każdą dziedzinę życia w ostatnich dwóch latach, wliczając zwyczaje i zachowania ludzi na poziomie relacji międzyludzkich jak i funkcjonowania całego społeczeństwa oraz metod pracy.

Wybuch pandemii COVID-19 spowodował wiele innych problemów, takich jak zwiększenie produkcji niebezpiecznych, zainfekowanych wirusem odpadów medycznych (4). Nie są one tak spektakularne jak walka o życie obywateli i dlatego nie trafiają do wyobraźni społeczeństwa. W prowincji Hubei w Chinach (2) produkcja odpadów medycznych związana z walką z koronawirusem wzrosła o 600%. Podobną tendencję zaobserwowano w wielu innych krajach jak Holandia (5), Polska (6) czy Iran (7).

Maski, rękawiczki oraz gogle, zwane dalej również środkami ochrony osobistej, są elementami najczęściej używanymi do ochrony przed transmisją różnych mutacji koronawirusa, który przedostaje się do organizmu drogą kropelkową przez górne drogi oddechowe, oczy i bezpośredni kontakt ze skażoną powierzchnią (8). Dlatego, aby ograniczyć możliwość transmisji wirusa podczas kontaktów z osobami zakażonymi, personel medyczny oraz zwykli obywatele zostali zobowiązani, przez wprowadzenie odpowiednich przepisów prawnych, do używania środków ochrony osobistej w miejscach publicznych (9).

Mając na uwadze między innymi powyższą argumentację, codziennie, na niespotykaną dotychczas skalę, produkowane są na całym świecie środki ochrony osobistej. Większość z nich jest przeznaczona do jedнокrotnego użytku, co powoduje powstawanie ogromnej ilości odpadów medycznych. Na podstawie studiów (10) można oszacować, że dziennie światowe zużycie maseczek ochronnych wynosi ok. 7 miliardów. Z uwagi na to, że wirus COVID-19 może pozostawać aktywny na powierzchni przez ok. 7 dni (11), niewłaściwe zarządzanie i przetwarzanie odpadów medycznych może spowodować powstanie nowych lokalnych ognisk wirusa lub przyspieszyć jego rozprzestrzenianie (10, 12). Dlatego, właściwe przetwarzanie odpadów jest niezwykle ważnym zagadnieniem, mogącym spowolnić rozprzestrzenianie się epidemii.

Szacuje się, że wirus SARS-CoV-2 może przetrwać poza organizmem człowieka ok. 7 dni (11), co oznacza, iż odpady medyczne przechowywane przez 7 dni nie stanowią potencjalnego zagrożenia. Właściwy recykling środków ochrony osobistej może przyczynić się do ograniczenia pandemii. Zagadnieniu temu dotychczas poświęcono stosunkowo mało uwagi, zwłaszcza w kontekście technologii materiałów budowlanych. Przedstawione badania mają na celu sprawdzenie możliwości stosowania przetworzonych odpadów medycznych, w szczególności maseczek ochronnych, w technologii betonu. Beton jest materiałem umożliwiającym łatwe powtórne wykorzystanie niektórych odpadów, np.: niedopałki papierosów (13), farby lateksowej (14), muszli (15), szkła (16) odpadów z przemysłu ciężkiego (17).

(PHEIC) (2). Self-isolation at home, closure of public workplaces, physical distancing between the citizens and so on, are only some of the effects of this global pandemic which has tragically took the lives of over 5 million humans by the time of writing this manuscript (3) and altered almost every aspect of our lives over the past two years, including our behaviour on the personal and social level, working methods and consumption routines.

The outbreak of COVID-19 also brought up another important problem which has been more or less overshadowed by the other complexities caused by the pandemic, i.e. the drastic increase in the volume of the generated healthcare waste which is categorised as one of the top hazardous wastes in the globe (4). It was reported that the volume of the generated healthcare waste has increased by 600% in the province of Hubei in China (2). This increase was also observed and studied in different countries such as France and Netherlands (5), Poland (6) and Iran (7).

Personal protective equipment [PPE], like facemasks and gloves, is one of the most common healthcare wastes during the on-going pandemic, because it has been indicated that the highly-transmissible COVID-19 can spread easily through respiration, touching one's eyes or nose with the hands that had touched an infected surface before and so on (8). Therefore, to lessen the chance of human-to-human virus transmission, not only healthcare workers who are directly in contact with the infected patients, but also all the citizens are encouraged to utilize the mentioned PPE in public places (9).

Based on the mentioned reasoning, a vast number of facemasks and gloves are being produced around the world on a daily basis and since such protective equipment are mainly single-use, we have an extreme amount of healthcare wastes every day, around the globe. According to the estimations of a study, more than 7 billion facemasks are produced every day in the world (10). Since COVID-19 can survive on the surface of these protective equipment for a noticeable amount of time (11), they are extremely hazardous for both environment and health of the citizens, because unsuitable management of them can increase the chance of COVID-19, spread throughout local communities (10, 12). Hence, it is of great importance to figure out efficient methods to deal with this secondary hazard of the COVID pandemic.

Recycling the PPE wastes is one of the most promising and sustainable ways of managing the mentioned problem, which has rarely been studied yet, especially in the field of concrete technology. Over the past years, concrete has been recognised as a proper medium which can re-utilize various contaminants and wastes such as cigarette butts (13), waste latex paint (14), seashell wastes (15), waste glass (16), foundry wastes (17), inside its mixture. Ideally, the waste substances that are included inside the concrete matrix can serve as alternative binder precursors, aggregates, or fillers and replace its conventional ingredients such as ordinary Portland cement and natural aggregates.

The first application of protective facemasks in concrete was reported by Lynch et al. (18). In the mentioned paper (18) un-used

Recykling maseczek ochronnych w betonie po raz pierwszy opisał Lynch i współpracownicy (18). W pracy (18) nieużywane i nieprzetworzone maseczki ochronne zostały pocięte na kawałki o długości ok. 2 cm i dodane do mieszanki betonowej. Na podstawie wyników (18) dodanie 0.1%, 0.15%, 0.2% i 0.25% nieprzetworzonych maseczek ochronnych polepszyło 28-dniową wytrzymałość na ścislenie oraz wytrzymałość na rozciąganie, natomiast nie wpłynęło w znaczący sposób na wartość modułu sprężystości. Stąd można wnioskować, że dodanie nieprzetworzonych maseczek do mieszanki nie pogorszyło właściwości betonów. We wcześniejszych badaniach autorów, opisanych w pracy (19), maseczki ochronne zostały przetworzone w podwyższonej temperaturze i ciśnieniu i dodane do mieszanki betonowej. Scharakteryzowano i opisano dokładnie własności otrzymanego polipropylenu. Proces przetwarzania maseczek pozwala na modyfikację własności otrzymanych włókien polipropylenowych.

W poniższej pracy szczegółowo opisano własności betonu otrzymanego po dodaniu przetworzonych włókien polipropylenowych. Własności modyfikowanego betonu porównano z betonem wzorcowym. W przedstawionych badaniach przetworzone maseczki zostały dodane do mieszanki betonowej w postaci włókien oraz granulek, o nieregularnym kształcie – rys. 1. Przedstawione wstępne badania mające na celu odpowiedzieć na pytanie czy i w jaki sposób przetworzone maseczki ochronne wpływają na właściwości fizyczne stwardniałego betonu. Głównym produktem procesu recyklingu są włókna polipropylenowe. Wyznaczono wytrzymałość na ścislenie oraz wytrzymałość na rozciąganie betonu zawierającego przetworzone maseczki i betonu wzorcowego. Przeanalizowano wpływ włókien uzyskanych w procesie recyklingu na hydratację cementu. Drobne włókna polipropylenowe (20-24) są stosowane w technologii betonu i mają na celu poprawę zachowania się betonu w czasie pożaru. W wysokiej temperaturze ulegają stopieniu, a następnie parują, co powoduje wzrost przepuszczalności gazu. Sprawdzone, czy otrzymane włókna polipropylenowe mają podobne działanie.

2. Materiały i metody

2.1. Badane materiały

Głównym składnikiem masek zastosowanych w niniejszych badaniach był polipropylen. Proces recyklingu przebiegał następująco: najpierw usunięto uchwyty na uszy oraz stalowe elementy, z części maseczki przylegającej do nosa. Następnie, materiał został pocięty na paski o mniejszej wielkości. W kolejnym kroku porcja materiału została umieszczona pomiędzy płytami stalowej formy rozgrzanej do 190°C. Wypełniona forma została umieszczona pomiędzy dwiema płytami prasy hydraulicznej, ogrzewanej elektrycznie. Próbkę formowano w temperaturze 190°C pod ciśnieniem ok. 130 barów, w czasie 10 min. Otrzymany materiał przetworzono w wylączarce jednoślismakowej o średnicy $\varnothing 25$. Proces odbywał się w temperaturze 200°C przy szybkości obrotów ślimaka 50 min⁻¹. Średnica wykorzystanego ustnika wynosiła $\varnothing = 1$ mm. Produkt końcowy procesu stanowiła żyłka o średnicy ok. 1 mm. Wylączczyna została

and un-processed facemask pieces with the length of 2 cm, were added into the concrete mixtures. Based on the reported results of (18), the inclusion of 0.1%, 0.15%, 0.2% and 0.25% of unused facemask cut-ups improved the 28-day compressive strength, indirect tensile strength, and ultrasonic pulse velocity of concrete, and did not apply a noticeable effect on the modulus of elasticity of the material. Hence, it was stated that the designed concretes containing the unused facemask cut-ups revealed a satisfactory performance. In our previous related study (19), the protective facemask wastes were processed under elevated temperature and pressure and recycled for the first time in concrete. The physical properties of the recycled material were investigated in detail. The processing of protective masks allows for the modification of the properties of the obtained polypropylene fibre.

In the presented manuscript, the focus was placed on the properties of modified concrete. The properties of the modified concrete were compared with those obtained from the reference concrete. In this research, actual facemask waste was sterilized, processed, and added into the concrete mix in the form of fibres and granules, see Fig. 1. It is the objective of this study to investigate how this novel addition will affect different properties of concrete. In the experimental analysis, the evolution of the heat of cement hydration and the basic mechanical properties of concrete, i.e. compressive and splitting tensile strength, with the addition of recycled facemask products were assessed and compared with the reference material. Furthermore, the main ingredient of the utilized recycled facemask is polypropylene [PP fibre], which is used in concrete to prevent the spalling of material under fire temperature (20-24). In order to verify whether the added fibres from the recycled facemasks can also improve the properties of concrete under elevated temperature or not, the transport properties, i.e., gas permeability, of the samples were evaluated before and after thermal treatment.



Rys. 1. Maska ochronna oraz włókna i granulki uzyskane w procesie recyklingu

Fig. 1. Processed fibers and granules obtained from recycling facemask wastes

następnie pocięta na włókna o długości ok. 5 mm. Połowa gotowej porcji materiału została rozdrobniona w młynie do tworzyw sztucznych do postaci granulatu, rys. 1. Podsumowując, do modyfikacji betonu wykorzystano dwie różne formy gotowego produktu, tzn. włókna o średnicy 1 mm i długości ok. 5 mm oraz granulaty, którego krzywą uziarnienia przedstawiono na rys. 4.

W celu potwierdzenia, iż głównym składnikiem przetworzonego materiału jest polipropylen, próbka została poddana analizie metodą spektrometrii w podczerwieni IR. Spektrogramy zostały zarejestrowane w zakresie 4000–400 cm^{-1} . Badanie przeprowadzono w urządzeniu Thermo Scientific Nicolet 6700 FT-IR, wyposażonym w przystawkę diamentową Smart Orbit ATR.

Zarejestrowane widmo przedstawiono na Rys. 2. Widoczne są sygnały pochodzące od trzech grup funkcyjnych typowych dla polipropylenu, tzn. pasma przy 2950 cm^{-1} , 2917 cm^{-1} , 2866 cm^{-1} i 2837 cm^{-1} pochodzące odpowiednio od grupy metylowej $-\text{CH}_3$, grupy metylenowej $-\text{CH}_2$, symetrycznego wiązania C-H oraz symetrycznych drgań rozciągających grupy metylenowej C-H (25). Pasma absorpcyjne o wartościach 1458 cm^{-1} i 1370 cm^{-1} wskazują na obecność asymetrycznych drgań grupy $-\text{CH}_3$ oraz symetrycznych drgań rotacyjnych (26). Względnie niewielki sygnał w paśmie 841 cm^{-1} jest charakterystyczny dla izomerycznego polipropylenu (27). Analiza widma w podczerwieni wyraźnie potwierdza, iż polipropylen stanowi główny składnik analizowanego materiału. Dodatkowo, przetworzony materiał poddano analizie termogravimetrycznej. Badanie przeprowadzono za pomocą urządzenia NETZSCH STA 449F1 w zakresie od 25 do 800°C, przy zmianie temperatury równej 1.0°C/min. Wyniki przedstawiono na rys. 3. Uwzględniono jedynie zakres temperatur, w którym zarejestrowano jakąkolwiek przemianę, tj. 100–500°C.

Początek rozkładu termicznego materiału następuje w temperaturze 190°C. Ta obserwacja jest zgodna z wartościami przedstawionymi w literaturze dla polipropylenu (20). W przypadku zależności opisującej różnicową zmianę masy widoczne jest zakłócenie występujące w temperaturze 210°C, które może wynikać z obecności składników pobocznych, np. barwników, lub zanieczyszczeń zawartych w badanej próbce. Niemniej jednak, generalny przebieg różniczkowej krzywej termogravimetrycznej wyraźnie przypomina zależności dla polipropylenu, opisane wcześniej w literaturze (20).

Materiały cementowe wykorzystane w niniejszych badaniach, tj. betony oraz zaczyny zostały sporządzone z cementu CEM I 42.5R wyprodukowanego przez Górażdże HeidelbergCement. W tablicy 1 przedstawiono skład chemiczny zastosowanego spoiwa.

Do betonów zastosowano kruszywo łamane granitowe, o frakcjach 8-16 mm oraz 2-8 mm. Jako kruszywo drobne wykorzystano piasek o uziarnieniu do 2 mm. W celu zapewnienia odpowiedniej konsystencji wykorzystano domieszkę uplastyczniającą Chryso Premia 253.

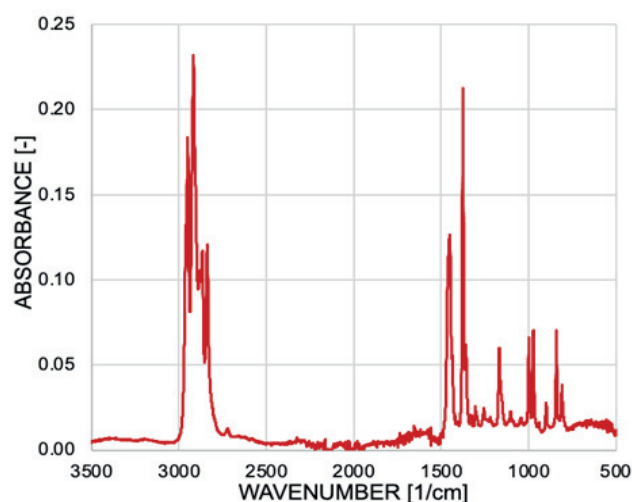
W niniejszych badaniach przygotowano trzy mieszanki betonowe. Dwie z nich zawierały różne formy przetworzonych maseczek ochronnych, tzn. pierwsza mieszanka, oznaczona jako GC została

2. Materials and methods

2.1. Investigated materials

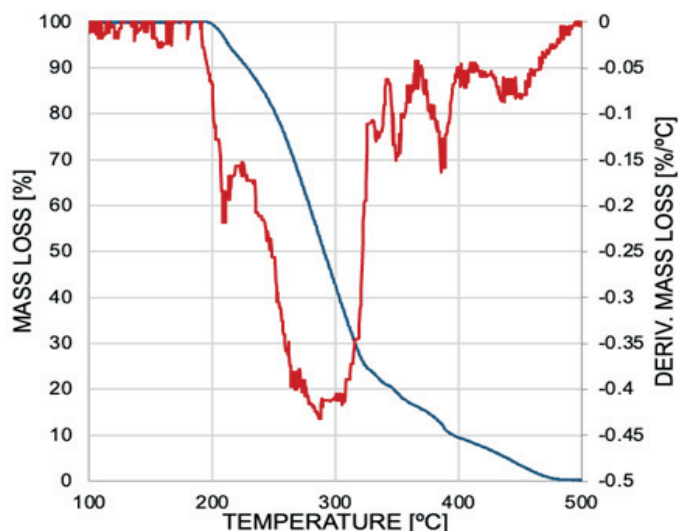
The facemasks that used in this research were mainly made of polypropylene. First, the metal parts and ear straps of the masks were detached. Then, the facemasks were cut into small strips and processed in a $\varnothing 25$ extruder at 200°C with the screw speed of 50 rpm. After this stage, the strips were put between the plates of a steel mould and were formed at 190°C under 130 bar of pressure, for 10 minutes. Subsequently, the mask materials were placed in an extruder once more at 200°C with the screw speed of 50 rpm. The diameter of an outlet nozzle was $\varnothing = 1$ mm. Hence, the final product was string with the approximate diameter of 1 mm, which was subsequently cut into 5-mm fibres. Further, half of the obtained portion was crumbled in a grinding mill, dedicated for polymers. Finally, the processed strips were included inside the concrete mixture in two forms; half of them were added as polypropylene fibres with the length of 5 mm, and half were used as granulated polypropylene products, see Fig. 1. After processing, fibres were investigated by means of Fourier-transform infrared spectroscopy [FT-IR], to confirm that polypropylene is their major component. The absorbance spectra were recorded within the 4000–400 cm^{-1} range [64 scans, resolution of 4 cm^{-1} , absorption mode]. The analysis was conducted on the Thermo Scientific Nicolet 6700 FT-IR device equipped with diamond Smart Orbit ATR sampling accessory.

The recorded spectrum is presented in Fig. 2. There are visible signals chemical groups typical for polypropylene, i.e. the bands at 2950 cm^{-1} , 2917 cm^{-1} , 2866 cm^{-1} and 2837 cm^{-1} reflect CH_3 asymmetric, CH_2 asymmetric, CH symmetric and C-H symmetric, stretching vibrations respectively (25). The absorption bands at 1458 cm^{-1} and 1370 cm^{-1} confirm the presence of CH_3 asymmetric and symmetric angle-changing vibrations (26). The relatively small band at 841 cm^{-1} is distinctive for isomeric polypropylene (27). The analysis of the FT-IR spectrum clearly confirms that polypropylene is the major component of the analysed material. Additionally, the thermal degradation of the processed material was investigated by means of thermogravimetric analysis TGA. The experiment



Rys. 2. Spektrogram FTIR zarejestrowany dla przetworzonego materiału

Fig. 2. FT-IR spectrum recorded for recycled fibres



Rys. 3. Wyniki analizy termicznej przeprowadzonej dla przetworzonego materiału

Fig. 3. Thermal degradation recorded for the processed material

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD CEMENTU UŻYTEGO W BADANIACH

COMPOSITION OF CEMENT USED

Compound / Składnik	Content / Zawartość, %
Loss on ignition / Straty prażenia	2.8
Insoluble residue / Części nierozpuszczalne	0.46
SO ₃	2.76
Chloride Content / Chlorki	0.066
Na ₂ O	0.18
MgO	1.45
CaO	63.89
SiO ₂	19.96
Al ₂ O ₃	5.21
Fe ₂ O ₃	2.68
CaO _{uncombined} / CaO _{wolne}	1.87

sporządzona z dodatkiem granulek polipropylenowych, natomiast druga, oznaczona jako FC – z dodatkiem włókien. W celu zweryfikowania wpływu dodatku na właściwości stwardniałego materiału sporządzono również mieszankę wzorcową, RC, niezawierającą przetworzonych maseczek ochronnych. Szczegółowe składy betonów zestawiono w tablicy 2. Rysunek 4 przedstawia krzywą przesiewu zastosowanych granulek polipropylenowych.

W celu przeprowadzenia analizy wpływu dodatku na szybkość hydratacji, zmierzono ilość i szybkość wydzielania ciepła hydratacji cementu. Sporządzono dwa rodzaje próbek z zaczynu cementowego. Pierwszy materiał, oznaczony jako FP, zawierał przetworzone włókna polipropylenowe. Druga mieszanka [RP] stanowiła materiał referencyjny – bez udziału dodatku. Szczegółowe składy zaczynów cementowych przedstawiono w tablicy 3.

Intencją autorów było zastosowanie analogicznego dodatku w obu badanych materiałach: betonie i zaczynie cementowym, w celu

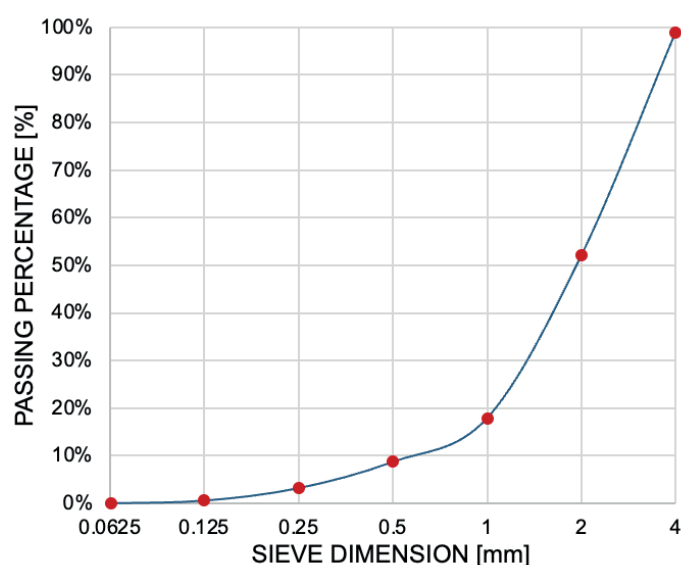
was conducted in the NETZSCH STA 449F1 device within the temperature range from 25 to 800°C, with heating rate 1.0°C/min. The presented results, see Fig. 3, include solely the temperature range, within which a transition was observed [100-500°C].

The onset temperature is usually identified with the initial temperature of the transition. Hence, the thermal degradation of the analysed material begins at approx. 190°C, which is consistent with values reported for PP fibres in the literature (20). In the derivative mass loss curve, a deviation was observed around 210°C, which may result from the secondary components, such as dye, or contamination. Nevertheless, the general curves of TGA strongly resembles the relations reported in the literature, for PP materials (20).

CEM I 42.5R, provided by Góraźdze Heidelberg Cement, was used in this research to create the cement pastes and concrete mixtures. Table 1 gives the compositions of the used cement.

The utilized aggregates were divided in two classes, including coarse aggregates with a diameter ranging from 8 to 16 mm and medium aggregates with a diameter ranging from 2 to 8 mm. Also, natural sand with the maximum diameter of 2 mm was provided from a local river and used in this research. In order to enhance the fluidity of the mixtures, Chryso Premia 253 plasticizer was utilized. Tap water was used as a mixing water.

Three types of concrete mixtures were designed in this research. Two types of these mixtures contain the different forms of the processed facemasks, including concretes containing granulated polypropylene products, expressed as GC and concretes containing polypropylene fibres expressed as FC. In order to analyse the influences of the processed facemask addition on the performance of concrete, a plain concrete mixture was also prepared as a reference concrete, shown as RC. The compositions of the designed concrete mixes are given in Table 2. Also, Fig. 4 demonstrates the grain size distribution curve of polypropylene granules.



Rys. 4. Krzywa przesiewu zastosowanych granulek polipropylenowych.

Fig. 4. Grain size distribution curve of polypropylene granules

Tablica 2 / Table 2

SKŁADY MIESZANEK BETONOWCH [kg/m³]COMPOSITIONS OF THE ANALYSED CONCRETES [kg/m³]

	GC	FC	RC
CEM I 42.5R	425	425	425
Water	157	157	157
Coarse aggregate / Kruszywo grube [8-16 mm]	524	524	524
Medium aggregate / Kruszywo średnie [2-8 mm]	647	647	647
Sand / Piasek [0-2 mm]	577	577	577
Plasticizer / Plastyfikator	2.76	2.76	2.76
Processed facemasks / Przetworzone maseczki	2	2	-
W/C	0.37	0.37	0.37

zapewnienia możliwości rzetelnego porównania ich właściwości. Zaczyny cementowe przygotowano za pomocą mieszarki laboratoryjnej. Po połączeniu spoiwa z wodą, materiał mieszano przez 2 minuty. W połowie tego czasu dodano włókna polipropylenowe równomiernie rozsypując je na powierzchni mieszanki. Po zakończeniu procesu mieszania zaczyny cementowe umieszczono w plastikowych cylindrycznych formach o średnicy 15 mm i wysokości 30 mm, które następnie szczelnie zamknięto.

2.2. Metody badawcze

Oznaczono wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie przy rozluźnianiu zgodnie z normami, odpowiednio EN 12390-3 oraz EN 12390-6. Wykonano badania betonu zawierającego przetworzone maseczki oraz betonu wzorcowego. Dla każdego materiału wykonano sześć oznaczeń na próbkach sześciennych o wymiarze 100 mm, po 28 dniach.

Badanie przepuszczalności gazu wykonano na próbkach cylindrycznych dla betonów zawierających włókna z przetworzonych maseczek oraz dla betonu wzorcowego. próbka cylindryczna o wysokości 300 mm została pocięta na pięć części. Każda część przeznaczona do badań miała kształt cylindra o wysokości ok. 50 mm oraz średnicę 150 mm. Próbki skrajne nie zostały uwzględnione w badaniach. Następnie, były suszone przez 28 dni w temperaturze 40°C. W kolejnym kroku boczne powierzchnie próbek zostały pokryte silikonem, po czym materiał został ponownie umieszczony w suszarce na 24 godziny. Po osiągnięciu przez próbki temperatury pokojowej, wykonano oznaczenie

Tablica 3 / Table 3

SKŁADY ZACZYNÓW CEMENTOWYCH [g/50cm³]COMPOSITIONS OF THE ANALYSED CEMENT PASTES [g/50 cm³]

	FP	RP
CEM I 42.5R	90	90
Water / Woda	33.3	33.3
Plasticizer / Plastyfikator	0.63	0.63
Fibers from processed facemasks Włókna z przetworzonych maseczek	0.42	-
W/C	0.37	0.37

Moreover, to assess the effect of the processed facemask addition on the cement hydration, two types of cement pastes were designed; one containing processed facemasks in the form of polypropylene fibres, expressed as FP, and the other without this innovative addition, expressed as reference cement paste RP. Table 3 gives the compositions of the designed cement pastes.

As can be seen from Tables 2 and 3, except for the reference mixtures which do not contain the processed facemask products, the amount of ingredients was kept similar for all mixtures in order to provide the more precise comparison between their performances.

A laboratory mixer was used for mixing the concrete ingredients and the whole stirring time was 4 minutes. The processed facemask fibres and granules were added into the concrete mix gradually, after 2 minutes of mixing. Immediately after the completion of the mixing process, the prepared mixtures were cast in cubic moulds with the dimension of 100 mm and standard cylindrical moulds.

2.2. Methods

The mechanical properties of the designed concretes were evaluated by measuring of their compressive and splitting tensile strength. The compressive and splitting tensile strength tests were conducted on the cubic samples after 28 days of curing in a water tank, conforming to the EN 12390-3 and EN 12390-6 standards, respectively.

Also, the gas permeability test was conducted on the cylindrical concrete specimens according to the Cembureau method, with and without the presence of the processed mask fibres. The prepared cylindrical specimens were cut and divided into 5 disks with the height of 50 mm and diameter approx. 150 mm. Then, the top and the bottom disks were removed from the experiment and the gas permeability of three layers from the middle section of the cylinders was measured. First, the cylindrical specimens were stored in a water tank at room temperature, for 1 month. Afterwards, the samples were dried at 40°C for 1 month, using oven drying method. Then, the experiment was conducted on all the samples, before calcination. Subsequently, the specimens were subjected to the calcination process. They were placed in a muffle furnace at 300°C for 3 hours. Then, samples were cooled at ambient temperature, and the experiment was carried out to assess their gas permeability, after calcination. Maximum applied temperature responds to the one, at which 70% of mask-based polypropylene becomes disintegrated – Figure 3.

Based on the Cembureau method, the apparent permeability of concrete is measured as the steady transfer of the air atmosphere, across the sealed disks, under constant inlet and outlet pressures as follows (28):

przepuszczalności gazu. Następnie próbki poddano ekspozycji na temperaturę wynoszącą 300°C przez 3 godziny, od osiągnięcia docelowych warunków, w piecu muflowym. W kolejnym kroku próbki ochłodzono i ponownie oznaczono przepuszczalność gazu. Maksymalna temperatura, do której były ogrzewane próbki betonu odpowiada warunkom, w których 70% polipropylenu uzyskanego z przetworzenia maseczek, ulega rozkładowi – rys. 3.

Badanie metodą Cembureau pozwala na oznaczenie pozornej przepuszczalności gazu betonu, K_A , podczas stacjonarnego przepływu gazu przez próbkę cylindryczną, przy ciśnieniu wejściowym równym P_1 , a wyjściowym równym P_2 , zgodnie ze wzorem (28):

$$K_A = 2\mu L \frac{P_2}{P_1^2 - P_2^2} \frac{Q}{A} \quad [1]$$

gdzie:

K_A – pozorna przepuszczalność

μ – lepkość powietrza

L – grubość próbki

P_1 – ustalone ciśnienie na wejściu

P_2 – ustalone ciśnienie na wyjściu

Q – ustalony przepływ gazu

A – pole przekroju próbki

Na podstawie równania [1] właściwą przepuszczalność gazu, oraz stałą Klinkenberga, wyznaczono na podstawie regresji liniowej, zgodnie z następującym wzorem (28):

$$K_A = K_V \left(1 + \frac{b}{P_m} \right) \quad [2]$$

gdzie:

K_V – właściwa przepuszczalność gazu

b – współczynnik Klinkenberga

P_m – średnia z ciśnienia na wejściu i wyjściu

Oszacowano również wpływ dodatku przetworzonych włókien polipropylenowych na szybkość hydratacji cementu. Oznaczenie wykonano w kalorymetrze izotermicznym, zgodnie z metodą opisaną w ASTM C1679-17. W oparciu o pomiar ciepła hydratacji cementu można oznaczyć zaawansowanie procesu hydratacji. Oznaczenie wykonano na zaczynie cementowym, który umieszczono w ampułkach, pomiar rozpoczęto 30 min po zmieszaniu cementu z wodą. Pomiar trwał 7 dni, a temperatura w kalorymetrze wynosiła $20 \pm 1^\circ\text{C}$.

Tablica 4 / Table 4

CIEPŁO HYDRATAcji CEMENTU DLA ZACZYNÓW FP I RP

HEAT OF HYDRATION OBTAINED FOR FP AND RP CEMENT PASTES

Mixtures Mieszanka	Sample No. Nr próbki	Normalized Heat Release Ciepło hydratacji, J/g
FP	1	216
	2	214
RP	1	220
	2	218

$$K_A = 2\mu L \frac{P_2}{P_1^2 - P_2^2} \frac{Q}{A} \quad [1]$$

where:

K_A – apparent permeability

μ – penetrating air viscosity

L – thickness of specimen

P_1 – constant inlet pressure

P_2 – constant outlet pressure

Q – steady air flow

A – area of specimen cross-section

Following the equation [1], the intrinsic coefficient of permeability and the Klinkenberg parameter are obtained through the regression analysis of the below equation (28):

$$K_A = K_V \left(1 + \frac{b}{P_m} \right) \quad [2]$$

where:

K_V – intrinsic coefficient of permeability

b – Klinkenberg parameter

P_m – mean value of the inlet and outlet pressures

Furthermore, in order to observe whether the inclusion of the processed mask fibres will affect the cement hydration or not, isothermal calorimetry experiment was conducted on the designed cement pastes, according to the ASTM C1679-17 standard. This experiment focuses on the exothermic nature of the physical-chemical reactions between the water and cement and via analysing the heat releases throughout these reactions, evaluates the cement hydration process. To conduct this test, the freshly prepared cement pastes were stored in ampoules and after 30 minutes, they were placed inside the isothermal calorimetry device, at the temperature of $20 \pm 1^\circ\text{C}$ for the period of 7 days.

3. Results

3.1. Cement hydration

Table 4 presents the mean values of the heat evolved due to the cement hydration for FP and RP pastes after 7 days. These values are normalized by the mass of the samples. Two samples were tested for each mixture. Fig 5. illustrates the normalized heat flow and normalized heat release curves of FP and RP cement pastes in time, respectively.

As can be observed from Fig. 5, the heat flow of the reference cement paste and the cement paste with the processed mask fibres, are nearly the same. Fig. 5 also shows that the heat release curves of the RP and FP cement pastes are very similar, during the time of the experiment. Since the cement hydration process can be directly assessed from the mentioned heat flow and heat release curves (29-31), it can be concluded from the obtained results that the inclusion of 0.42 g of the processed mask fibres 50 cm^3 of the cement pastes, did not affect the hydration process of cement.

3. Wyniki i dyskusja

3.1. Hydratacja cementu

W tabelicy 4 przedstawiono znormalizowane ciepło hydratacji, wyznaczone po 7 dniach dla referencyjnego zaczynu cementowego oraz zaczynu z dodatkiem przetworzonego polipropylenu, odpowiednio RP i FP. Rysunek 5 przedstawia szybkość wydzielania ciepła oraz ciepło hydratacji w czasie dla dwóch wyżej wspomnianych materiałów.

Na rysunku 5 można zauważyć, że szybkość wydzielania ciepła będącego wynikiem hydratacji cementu, oznaczona dla zaczynu referencyjnego i zaczynu z dodatkiem przetworzonego polipropylenu, są niemal identyczne. W konsekwencji, wykresy całkowitego ciepła hydratacji otrzymane dla dwóch analizowanych zaczynów nie różnią się od siebie. Postęp hydratacji cementu może być jednoznacznie opisany na podstawie krzywej źródeł ciepła [29-31], zatem można stwierdzić, że dodatek 0,42 g przetworzonych maseczek ochronnych do 50 cm³ zaczynu, nie wpływa na proces hydratacji cementu.

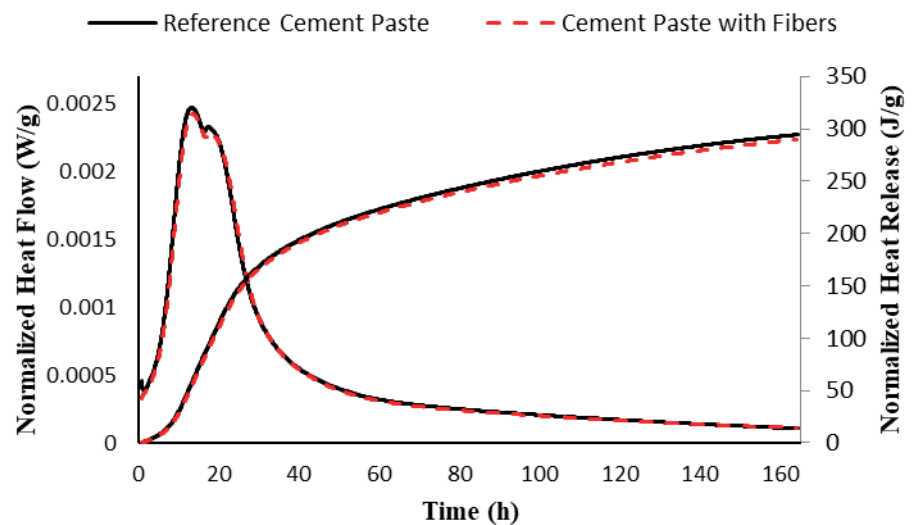
3.2. Wytrzymałość

Dla każdego z betonów wykonano sześć pomiarów wytrzymałości na ściskanie. Wyznaczone wartości średnie oraz odchylenia standardowe zawarto w tabelicy 5.

Beton zawierający włókna uzyskane z przetworzonych maseczek osiągnął wytrzymałość na ściskanie większą o 5,3% od betonu wzorcowego. Podobne wyniki otrzymano dla betonu zawierającego granulki: zwiększenie wytrzymałości o 3,5% w porównaniu do betonu wzorcowego. Można stąd wnioskować, że polipropylen uzyskany z przetworzonych maseczek ochronnych nie wpływa negatywnie na wytrzymałość na ściskanie, powodując nawet jej niewielki wzrost.

W tabelicy 6 przedstawiono wyniki badania wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu. Ponownie zbadano sześć próbek każdego betonu. W tabelicy 6 przedstawiono wartości średnie i odchylenia standardowe.

Na podstawie danych zawartych w tabelicy 6 można zauważyć, że wytrzymałość na rozciąganie betonów zawierających przetworzone maseczki ochronne jest nieznacznie mniejsza od wytrzymałości betonów referencyjnych. Wartość średnia wyznaczona dla betonów FC i GC jest mniejsza o odpowiednio 6,27% i 4,79% od średniej wytrzymałości, otrzymanej dla próbek referencyjnych. Można stąd wnioskować, że dodatek przetworzonych maseczek w ilości 2 kg/m³ tylko w niewielkim



Rys. 5. Szybkość wydzielania ciepła i ciepło hydratacji oznaczone dla badanych zaczynów cementowych

Fig. 5. Normalized heat flow and heat release curves of the cement pastes

3.2. Mechanical properties

The results of the compressive strength test for concretes are shown in Table 5. Six samples were tested for each concrete mixture and the mean compressive strength, together with the standard deviation of the data set, are included in this table.

Concretes with the processed mask fibres obtained the highest mean compressive strength. The mean compressive strength of this type of concrete is 5.3% higher, than the reference concrete. Also, the mean compressive strength of GC concrete is 3.5% higher, than the reference concrete. Based on the mentioned results, it can be concluded that the addition of 2 kg of the recycled mask products per 1 m³ of the designed concrete mixtures, did not impose a negative impact on the compressive strength of the materials, one can even notice its slight increase.

Table 6 presents the results of the splitting tensile strength test. Like the compressive strength test, six samples from each mixture were

Tablica 5 / Table 5

WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE BETONÓW GC, FC I RC
COMPRESSIVE STRENGTH OF GC, FC AND RC CONCRETE

Sample No. / Nr próbki	Compressive strength / Wytrzymałość na ściskanie, MPa		
	GC	FC	RC
1	68.64	68.75	65.13
2	70.51	70.24	67.25
3	67.22	72.74	65.11
4	69.69	69.55	66.15
5	71.35	71.37	70.06
6	70.19	72.26	69.79
Mean value Średnia	69.60	70.82	67.25
Standard deviation Odchylenie standardowe	1.47	1.57	2.22

stopniu negatywnie wpływa na wytrzymałość na rozciąganie. Podsumowując, dodatek polipropylenowy wytworzony z przetworzonych maseczek ochronnych, nie powoduje znacznego pogorszenia właściwości mechanicznych betonów.

3.3. Przepuszczalność gazu

Zastosowanie włókien w betonie ma na celu ograniczenie skurczu oraz poprawienie odporności betonu na eksplozyjne odłupywanie fragmentów materiału (20-23). W warunkach pożarowych dochodzi do eksplozyjnego pęknięcia fragmentów betonu, które jest skutkiem gwałtownego zwiększenia ciśnienia cząstkowego pary wodnej w porach materiału. W takich warunkach dochodzi do stopienia oraz wyparowywania włókien polipropylenowych, co skutkuje pojawieniem się nowego połączonego systemu porów. Zwiększa to przepuszczalność betonu, stwarzając nowe korytarze dla przemieszczającej się pary wodnej, co w konsekwencji zmniejsza jej ciśnienie. Zjawisko to zmniejsza niebezpieczeństwo eksplozyjnego odpryskiwania betonu (20-23). Wykonano badania przepuszczalności gazu próbek przed oraz po ekspozycji na warunki pożarowe, tj. 300°C przez 3 godziny. W tabelicy 7 przedstawiono wyniki badań przepuszczalności metodą Cembuerau próbek z betonu zawierającego włókna z przetworzonych maseczek oraz betonu referencyjnego. Wyniki stanowią wartość średnią z trzech próbek dla betonu RC oraz sześciu próbek dla betonu FC.

Na podstawie wyników przedstawionych w tabelicy 7, można stwierdzić, że dodatek 2 kg/m³ polipropylenu z przetworzonych maseczek w znaczący sposób zwiększa współczynnik przepuszczalności właściwej betonu przed jak i po ekspozycji w warunkach pożarowych. Wzrost współczynnika przepuszczalności próbek zawierających przetworzone maseczki w porównaniu do próbek referencyjnych, może być skutkiem hydrofobowości ich powierzchni. Powierzchnia włókien odpycha cząsteczki wody. Niedobór wody powoduje hydratację tylko części objętości cementu, w warstwie położonej przy powierzchni polipropylenowych żyłek, co zwiększa porowatość otwartą, a w konsekwencji przepuszczalność betonu. Podobna zależność jest widoczna również dla betonu poddanego działaniu temperatury. Wzrost przepuszczalności spowodowanej ekspozycją w środowisku w temperaturze 300°C skutkuje rozpadem części produktów hydratacji cementu, odparowaniem wody, a w konsekwencji wzrostem ciśnienia pary wodnej. Zjawisko to powoduje otwarcie części porów, ich połączenie, powstanie nowych mikrorys i pęknięć, w wyniku czego powstaje sieć nowych korytarzy ułatwiających migrację gazu (32). W betonach zawierających włókna polipropylenowe przepuszczalność ulega dalszemu wzrostowi, dzięki ich stopieniu i odparowaniu. Wyniki badań termogravimetrycznych wykazują, że proces rozkładu włókien powstałych z przetworzonych maseczek ochronnych, rozpoczyna się w temperaturze 190°C. Rozpad części produktów hydratacji cementu razem z rozkładem włókien polipropylenowych są głównymi zjawiskami odpowiedzialnymi za znaczący wzrost przepuszczalności betonów z polipropylenem, eksponowanych w warunkach pożarowych (32). Przemiana fazowa włókien polipropylenowych pozostawia puste przestrzenie w matrycy cementowej, co powoduje utworzeniem sieci połączeń między pustkami,

Tablica 6 / Table 6

WYTRZYMAŁOŚĆ NA ROZCIĄGANIE PRZY ROZŁUPYWANIU BETONÓW GC, FC I RC

SPLITTING TENSILE STRENGTH OF GC, FC AND RC CONCRETE

Sample No. / Nr próbki	Splitting tensile strength Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu, MPa		
	GC	FC	RC
1	7.49	7.43	8.48
2	8.19	7.66	7.66
3	7.6	7.12	7.64
4	7.37	7.73	8.19
5	7.51	7.81	8.79
6	8.32	7.99	8.07
Mean value / Średnia	7.74	7.62	8.13
Standard deviation Odchylenie standardowe	0.40	0.30	0.45

tested and the mean splitting tensile strength, plus the standard deviation of the data set, are provided.

According to the results presented in Table 6, the splitting tensile strength of the concretes containing the recycled mask products, is slightly lower than the reference concrete. The mean splitting tensile strengths of the FC and GC concretes are 6.3% and 4.8% lower than the reference concrete, respectively. As can be seen, the effect of the presence of 2 kg/m³ of the recycled facemask products on the compressive and splitting tensile strength of concrete, is lower than 10% and negligible. Hence, it can be said that concretes containing facemask fibres and granules, exhibited satisfactory mechanical performance.

3.3. Gas permeability

The conventional non-recycled PP fibres are commonly added to concrete mixtures, mainly to limit the material's deformation and improve its performance under fire conditions (20, 22, 23). At elevated temperature, concrete can undergo spalling, i.e. explosive damage, which results from rapid increase in water vapour pressure, within the pore system of cement matrix. Under such conditions, the decomposition of PP fibres leads to the creation of new pores, located within zones previously occupied by fibres. This mechanism improves the transport properties of cement matrix

Tablica 7 / Table 7

WYNIKI PRZEPUSZCZALNOŚCI DLA GAZU BETONÓW RC ORAZ FC

THE RESULTS OF GAS PERMEABILITY TEST FOR RC AND FC CONCRETE

Concrete Beton	The intrinsic coefficient of permeability Współczynnik przepuszczalności właściwej, kv, 10 ⁻¹⁸ m ²	
	Before thermal treatment Przed ekspozycją na pożar	After thermal treatment Po ekspozycji na pożar
RC	0.49	34.65
FC	3.96	167.60

a w konsekwencji wzrostem przepuszczalności materiału. Przyczynia się to do zmniejszenia ciśnienia pary wodnej w betonie w warunkach pożarowych. Można stąd wnioskować, że zastosowanie polipropylenu, powstałego w wyniku recyklingu maseczek ochronnych w mieszance betonowej, wpływa, podobnie jak powszechnie stosowane włókna, na polepszenie odporności na eksplozyjne odpryskiwanie w warunkach pożarowych.

Wnioski

W niniejszym artykule przedstawiono technologię pozwalającą na recykling maseczek ochronnych, których produkcja znacznie wzrosła wskutek wybuchu pandemii koronawirusa, w technologii betonu. Maseczki ochronne w środowisku podwyższonej temperatury i ciśnienia, zostały przetworzone do postaci bezpiecznej dla użytkownika i dającej się wykorzystać jako składnik mieszanki betonowej. Podczas przeprowadzonych badań uzyskano następujące informacje.

1. Wpływ obecności przetworzonych maseczek ochronnych na szybkość hydratacji cementu został zbadany za pomocą kalometrii izotermicznej. Wyniki analiz wykazują, że dodatek 0,42 g włókien na 50 cm³ cementu, nie wpłynął na szybkość hydratacji cementu.
2. Wykonano badania wytrzymałości na ściskanie oraz na rozciąganie przy rozłupywaniu po 28 dniach betonów zawierających przetworzone maseczki i betonów wzorcowych. Dodatek przetworzonych maseczek w postaci włókien oraz granulek, spowodował wzrost wytrzymałości na ściskanie odpowiednio o 5,3% oraz 3,5%, natomiast spadek wytrzymałości na rozciąganie odpowiednio o 6,3% oraz 4,8%, w porównaniu do betonów wzorcowych. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że dodatek przetworzonych maseczek w ilości 2 kg/m³, nie spowodował znacznego pogorszenia wytrzymałości.
3. Wykonano badanie przepuszczalności gazu próbek betonów zawierających przetworzone maseczki oraz betonów wzorcowych kondycjonowanych w temperaturze 20°C, a także betonów w warunkach pożarowych, t.j. eksponowanych w środowisku w temperaturze równej 300°C. Zauważono, że dodatek przetworzonego polipropylenu powoduje wzrost przepuszczalności gazu zarówno w betonie przed, jak i po pożarze. Prowadzi to do ograniczenia intensywności odłupywania eksplozyjnego powierzchniowych warstw betonu, zwiększając bezpieczeństwo osób ewakuowanych.
4. Podsumowując, dodatek przetworzonych maseczek ochronnych do mieszanki betonowej, nie pogorszył znacznie żadnych badanych właściwości stwardniałego betonu. Jednocześnie znaczny potencjał recyklingu odpadów medycznych przedstawiony w pracy, może przyczynić się do znacznego zwiększenia bezpieczeństwa ludzi i środowiska naturalnego.

and leads to relaxation of the increasing water vapour pressure. Hence, spalling is significantly constricted in fibre-concretes (20, 22, 23). Our intention was to verify whether the PP fibres, obtained from disposable masks, can serve in a similar manner. To that end, the gas permeability was monitored on samples before and after exposure to elevated temperature [300°C]. Table 7 presents the determined intrinsic coefficients of gas permeability according to the Cembureau method for concretes, with and without processed mask fibres. The results constitute an average value of three and six samples, for RC and FC concrete respectively.

Based on the results reported in Table 7, the inclusion of 2 kg/m³ of the recycled PP fibres, caused a noticeable increase in the intrinsic coefficient of gas permeability of concrete, in both pre- and post-calcined states. The increase of gas permeability at the pre-calcined state, can be induced by the hydrophobic nature of the recycled PP fibres. Due to their hydrophobicity, the presence of the processed facemask fibres is assumed to repel the inner free water of the matrix and therefore, form more open pores, i.e. pores without moisture content, within the material, which as a consequence, can create more pathways for the transfer of gaseous matter throughout the sample. The mentioned trend is also visible after exposure of the samples to fire temperature. The increase in the gas permeability coefficient of the plain reference concrete, after exposure to 300°C can be caused by the decomposition of the cement hydrated products and transformation of the internal liquid water to water vapour. These phenomena tend to deform the microstructure of concrete and initiate extra microcracks, which result in the increase of the number of open pores and connected pathways, for the movement of gaseous matter (32). This increase in the gas permeability of the post-calcined concrete was intensified by the addition of the recycled PP fibres. According to the results of the conducted thermogravimetric analysis, the thermal degradation of the processed facemask fibres initiated at 190°C and the added fibres began to decompose at this state. The flow of melted recycled fibres within the gaps of the matrix, which ruptures the bond between the cement hydrated products, plus the later evaporation of these melted recycled fibres at the fire temperature, are assumed to be the primary reasons for increasing the gas permeability of concrete, after thermal treatment (32). The mentioned phase changes of the recycled PP fibres likely left behind empty spaces within the matrix, also known as fibre channels, and thus, intensified the interconnectivity of the porous network of the material, which results in the formation of more open pathways for the transport of the released water vapour, after subjection to the fire temperature and reduction of the vapour pressure on the porous network of concrete. Hence, it is concluded that the processed facemask fibres applied, almost a similar influence on the permeability properties of concrete, compared to the conventional non-recycled PP fibres and improved the resistance of the material against fire spalling.

Literatura / References

1. Worldometers, Reported Cases and Deaths by Country or Territory. <https://www.worldometers.info/coronavirus>, December 2021.
2. A.K. Das, M.N. Islam, M.M. Billah, A Sarker, COVID 19 pandemic and health care solid waste management strategy – A mini-review. *Sci. Total Environ.* **778**, 146220 (2021).
3. WHO, Coronavirus disease (COVID-19) pandemic, <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019>, December 2021.
4. N. Singh, Y. Tang, Z. Zhang, C. Zheng, COVID-19 waste management: Effective and successful measures in Wuhan, China. *Resour. Conserv. Recycl.* **163**, 105071 (2020).
5. G. Wei, L. Manyu, The Hidden Risks of Medical Waste and the COVID-19 Pandemic. <https://www.waste360.com/medical-waste/hidden-risks-medical-waste-and-covid-19-pan-demic>, (2020).
6. P. Nowakowski, S. Kusnierz, P. Sosna, J. Mauer, D. Maj, Disposal of Personal Protective Equipment during the COVID-19 Pandemic Is a Challenge for Waste Collection Companies and Society: A Case Study in Poland. *Resources*, **9**, 116 (2020); <https://doi:10.3390/resources9100116>
7. A.D. Zand, A.V. Heir, Environmental impacts of new Coronavirus outbreak in Iran with an emphasis on waste management sector. *J. Mater. Cycles Waste Manag.* **23**, 240–247 (2020).
8. ISWA - Netherlands Country Specific Waste Management Responses, COVID-19 Response International knowledge sharing on Waste Management. https://www.iswa.org/fileadmin/galleries/0001_COVID/Netherlands_Waste_Management_during_Covid19.pdf: <https://www.iswa.org/iswa/covid-19/>, 2020.
9. C. Nzediegwu, S.X. Chang, Improper solid waste management increases potential for COVID-19 spread in developing countries. *Resour. Conserv. Recycl.* **161**, 104947 (2020) http://www.xinhuanet.com/english/2020-03/02/c_138835152.html.
10. D. Hantoko, X. Li, A. Pariatamby, K. Yoshikawa, M. Horttanainen, M. Yan, Challenges and practices on waste management and disposal during COVID-19 pandemic. *J. Environ. Manage.* **286**, 112140 (2021).
11. N. Van Doremalen, T. Bushmaker, D.H. Morris, M.G. Holbrook, A. Gamble, B.N. Williamson, A. Tamin, J.L. Harcourt, N.J. Thornburg, S.I. Gerber, J.O. Lloyd-Smith, E. de Wit, V.J. Munster, Aerosol and surface stability of SARS-CoV-2 as compared with SARS-CoV-1. *NEJM.* **382**, 1564–1567 (2020).
12. K.R. Vanapalli, H.B. Sharma, V.P. Ranjan, B. Samal, J. Bhattacharya, B.K. Dubey, S. Goel, Challenges and strategies for effective plastic waste management during and post COVID-19 pandemic. *Sci. Total Environ.* **750**, 141514 (2021).
13. A. Mohajerani, Y. Tanriverdi, B.T. Nguyen, K.K. Wong, H.N. Dissanayake, L. Johnson, D. Whitfield, G. Thomson, E. Alqattan, A. Rezaei, Physico-mechanical properties of asphalt concrete incorporated with encapsulated cigarette butts. *Constr. Build. Mater.* **153**, 69–80 (2017).
14. M. Nehdi, J. Sumner, Recycling waste latex paint in concrete. *Cem. Concr. Res.* **33**, 857–863 (2003).
15. K.H. Mo, U.J. Alengaram, M.Z. Jumaat, S.C. Lee, W.I. Goh, C.W. Yuen, Recycling of seashell waste in concrete: A review. *Constr. Build. Mater.* **162** (2018) 751–764.
16. P. Guo, W. Meng, H. Nassif, H. Gou, Y. Bao, New perspectives on recycling waste glass in manufacturing concrete for sustainable civil infrastructure. *Constr. Build. Mater.* **257**, 119579 (2020).
17. S. Fiore, M.C. Zanetti, Foundry Wastes Reuse and Recycling in Concrete Production. *Am. J. Environ. Sci.* **3**(3), 135-142 (2007).

Conclusion

In this research, in order to deal with the increase of the generated healthcare wastes during the on-going COVID-19 pandemic, the sustainable method of recycling was put into practice. To realise this, facemask waste, which is one of the major healthcare wastes currently, was processed and recycled in concrete materials; the following points were noted.

1. To investigate whether the addition of the recycled masks products affect the cement hydration process or not, calorimetry test was conducted on the designed cement pastes. Based on the obtained heat release and heat flow curves of the samples, it was noted that the inclusion of 0.42 g of the processed mask fibres in 50 cm³ of cement paste, did not affect the hydration process of cement.
2. Compressive and splitting tensile strength tests were conducted on the concrete samples after 28 days of curing, to assess the influence of the recycled facemask products on the mechanical properties of material. According to the results, the 28-day compressive strengths of recycled PP fibre-incorporating [FC] and recycled PP granules-incorporating concrete [GC] were 5.3% and 3.49% higher than the reference concrete [RC], respectively. The 28-day splitting tensile strength of FC and GC concrete were found to be 6.3% and 4.8% lower than the reference concrete, respectively. As can be seen, the measured differences were less than 10%. Hence, it can be concluded that the inclusion of 2 kg/m³ of the recycled facemask products did not cause a significant change of the mechanical properties of concrete.
3. To analyse whether the addition of the processed facemask fibres can give a similar effect like the conventional PP fibres, on the resistance of concrete against fire spalling, the intrinsic coefficient of gas permeability of the cylindrical samples was evaluated, before and after subjecting them to the fire temperature, that is, 300°C. It was found that the presence of the recycled PP fibres increased the gas permeability of concrete at both pre- and post-calcined states, lessened the pressure of water vapour on the porous network of concrete and thus, improved the resistance of the material under fire exposure.
4. In conclusion, the addition of processed PP safety masks into the concrete mixture, did not deteriorate any analysed properties of hardened concrete. Therefore, the significant recycling capacity of the proposed technology can significantly improve the safety of the citizens and the environment.

18. S.K. Lynch, M. Saberian, J. Li, R. Roychand, G. Zhang, Preliminary evaluation of the feasibility of using polypropylene fibres from COVID-19 single-use face masks to improve the mechanical properties of concrete. *J. Clean. Prod.* **296**, 126460 (2021).
19. M. Koniorczyk, D. Bednarska, A. Masek, S. Cichosz, Performance of concrete containing recycled masks used for personal protection during coronavirus pandemic. *Constr. Build. Mater.* **324** (21), 26712 (2022).
20. M. Zeim, D. Leithner, R. Lackner, H.A. Mang, How do polypropylene fibers improve the spalling behavior of in-situ concrete? *Cem. Concr. Res.* **36**(5), 929-942 (2006).
21. Y.S. Heo, J.G. Sanjayan, C.G. Han, M.C. Han, Synergistic effect of combined fibers for spalling protection of concrete in fire. *Cem. Concr. Res.* **40**(10), 1547-1554 (2010).
22. I. Hager, P. Pimienta, Influence of the addition of polypropylene fibers on the mechanical properties of high-performance concretes exposed to high temperature. *Cem. Wapno Beton* **8**(5), 263-266, (2003).
23. I. Hager, T. Tracz, Influence of elevated temperature on selected properties of high performance concrete modified with the addition of polypropylene fibres. *Cem. Wapno Beton* **14**(1) 3-10 (2009).
24. T. Tracz, J. Śliwiński, Homogeneity of permeability test results of high-performance concrete. *Cem. Wapno Beton* **10**(1), 48-53 (2005).
25. S. Fávoro, A. Rubira, E. Muniz, E. Radovanovic, Surface modification of HDPE, PP, and PET films with $KMnO_4/HCl$ solutions. *Polym. Degrad. Stab.* **92**(7), 1219-1226 (2007).
26. M. Sclavons, et al., Quantification of the maleic anhydride grafted onto polypropylene by chemical and viscosimetric titrations, and FTIR spectroscopy. *Polymer* **41**(6), 1989-1999 (2000).
27. M. Chylińska, H. Kaczmarek, D. Moszyński, B. Królikowski, J. Kowalonek, Surface studies of UV irradiated polypropylene films modified with mineral fillers designed as piezoelectric materials. *Polymers* **12**(3), 562 (2020).
28. D. Zhang, K. Li, Concrete gas permeability from different methods: Correlation analysis. *Cem. Concr. Compos.* **104**, 103379 (2019).
29. American Society for Testing and Materials, ASTM C1679 - 2017. Standard Practice for Measuring Hydration Kinetics of Hydraulic Cementitious Mixtures Using Isothermal Calorimetry (2017).
30. C.M. Martín, N.B. Scarponi, Y.A. Villagran, D.G. Manzanal, T.M. Pique, Pozzolanic activity quantification of hollow glass microspheres. *Cem. Concr. Compos.* **118**, 103981 (2021).
31. A. Younis, U. Ebead, P. Suraneni, A. Nanni, Fresh and hardened properties of seawater-mixed concrete. *Constr. Build. Mater.* **190**, 276–286 (2018).
32. X. Liu, G. Ye, G. De Schutter, Y. Yuan, L. Taerwe, On the mechanism of polypropylene fibres in preventing fire spalling in self-compacting and high-performance cement paste. *Cem. Concr. Res.* **38**, 487–499 (2008).