dr inż. Krzysztof Adam Ostrowski[1)*)]
ORCID: 0000-0001-5047-5862
dr inż. Paulina Romańska[2)]
ORCID: 0000-0002-7133-8522
mgr inż. Radosław Piech[3)]
dr inż. Natalia Nosidlak[2)]
ORCID: 0000-0003-4174-6645

Glow-in-the-dark PET/GF composites for fastening and safety components in civil engineering

Świecące w ciemności kompozyty PET/GF do elementów mocujących i asekuracyjnych w inżynierii lądowej

DOI: 10.15199/33.2026.08.03

Abstract. Polyethylene terephthalate (PET) composites reinforced with glass fiber (30 wt.%) and containing a phosphorescent powder (2–20 wt.%) and a lubricant (0.3 wt.%) were evaluated as glow-in-the-dark materials for construction applications. The addition of the luminophore increased the elastic modulus and significantly reduced impact strength (from approx. 47 to 21 kJ/m²). Both the intensity and duration of afterglow increased markedly with increasing pigment content. Microscopic observations revealed fragmentation of the luminophore particles while maintaining a favorable luminescence effect. The developed composites may be applied in high-stiffness structural elements capable of carrying substantial static loads while retaining functional visibility in darkness for approximately 2 hours after excitation.
Keywords: thermoplastic composites; $SrAl_2O_4$:Eu,Dy; luminescence; emergency lighting; injection molding

Streszczenie. Kompozyty politereftalanu etylenu (PET) z włóknem szklanym (30% mas.) i proszkiem fosforyzującym (2–20% mas.) oraz środkiem smarnym (0,3% mas.) oceniono w kontekście ich zastosowania w budownictwie jako materiały świecące w ciemności. Dodatek luminoforu zwiększał moduł sprężystości oraz zmniejszał w znacznym stopniu udarność (z ok. 47 do 21 kJ/m²). Zarówno intensywność, jak i czas świecenia zwiększały się istotnie wraz ze zwiększaniem udziału pigmentu. Obserwacje mikroskopowe wykazały rozdrobnienie cząstek luminoforu przy zachowaniu korzystnego efektu luminescencji. Wytworzone kompozyty mogą znaleźć zastosowanie w elementach o szczególnie dużej sztywności, przenoszących duże obciążenia statyczne, zachowujących funkcjonalną widoczność w ciemności przez około 2 h po naświetleniu.
Słowa kluczowe: kompozyty termoplastyczne; $SrAl_2O_4$:Eu,Dy; luminescencja; oświetlenie awaryjne; wtryskiwanie

Poly(ethylene terephthalate) (PET) is one of the five most widely produced thermoplastic polymers worldwide [1]. It dominates particularly in the packaging and textile industries due to its broad availability, relatively low production cost, and well-developed recycling processes that enable the manufacture of new products incorporating PET flakes and regranulate. This constitutes a significant advantage in view of the increasing emphasis on the Circular Economy (CE). PET also holds a strong position among engineering plastics reinforced with short glass fibers, where it competes with polyamides and poly (butylene terephthalate) (PBT) [2]. In structural applications, highly crystalline PET exhibits good dimensional stability and favorable mechanical performance, including resistance to creep and wear. Its advantageous processing and service properties, combined with its recyclability and potential for reducing carbon footprint, align with the principles of sustainable construction. The use of PET and PET recyclates in construction materials–such as

Politereftalan etylenu (PET) jest jednym z pięciu najczęściej wytwarzanych tworzyw termoplastycznych na świecie [1]. PET zajmuje też bardzo silną pozycję w grupie tworzyw technicznych wzmocnionych krótkim włóknem szklanym, gdzie stanowi konkurencję dla poliamidów i politereftalanu butylenu (PBT) [2]. Tworzywo to o dużym stopniu krystaliczności odznacza się dobrą stabilnością wymiarową, dużą wytrzymałością, w tym odpornością na pełzanie i zużycie. Jego korzystne cechy użytkowe i przetwórcze oraz potencjał do recyklingu i obniżenia śladu węglowego jest zgodny z ideą zrównoważonego budownictwa. Zastosowanie PET i jego recyklatów w materiałach budowlanych, m.in. w betonie, cegłach, płytach kompozytowych i materiałach izolacyjnych, od wielu lat jest analizowane w literaturze naukowej, w tym w licznych najnowszych publikacjach [3÷9]. W artykule omówiono elementy mocujące i asekuracyjne z dodatkiem fosforyzującym, zapewniające bezpieczeństwo użytkowania w warunkach braku oświetlenia, np. w schronach, pomieszczeniach technicznych oraz w elementach infrastruktury drogowej, takich jak łańcuchy odgradzające chodniki od jezdni, elementy barier, czy też tunelach (drogowych, górniczych), które mogłyby emitować światło w sytuacjach awaryjnych lub w wypadku blackoutu.

[1)] Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Wydział Inżynierii Lądowej
[2)] Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Wydział Inżynierii Materiałowej i Fizyki
[3)] Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Wydział Inżynierii i Technologii Chemicznej
[*)] Adres do korespondencji: krzysztof.ostrowski.1@pk.edu.pl

concrete, bricks, composite boards, and insulation materials– has been extensively analyzed in scientific literature for many years, including numerous recent publications [3–9].

Reinforcing PET with glass fiber and incorporating functional additives opens pathways to new application areas. The applications proposed in the present study include fastening and safety components with a phosphorescent additive, enabling visibility under lowlight or nolight conditions – for instance, in shelters, technical rooms, and elements of road infrastructure such as chains separating walkways from roadways, barrier components, or in tunnels (road or mining), where such elements could emit light in emergency situations or during blackouts.

Achieving structural products with a durable glowinthedark effect requires modification of the polymer matrix by incorporating phosphorescent pigments directly into the melt during compounding. The polymer matrix protects phosphors from hydrolysis in humid environments, which otherwise leads to reduced emission intensity and afterglow duration [10]. Phosphorescent pigments, owing to the presence of energy traps in their crystalline structure, can emit light for many hours after excitation – unlike fluorescence, where emission ceases almost immediately once the excitation source is removed. A key challenge is ensuring homogeneous distribution and dispersion of phosphors within the PET matrix and preserving their functionality after melt processing, which requires temperatures higher than those for many other commodity thermoplastics (typically 260–280°C). Among phosphorescent pigments characterized by high thermal stability and multihour afterglow are strontium aluminate–based materials activated with rareearth ions, particularly $SrAl_2O_4$:Eu, Dy, which emit green light [10–12]. The green emission spectrum arises from Eu^{2+} activator ions, whereas the afterglow duration depends on the number and type of traps formed in the $SrAl_2O_4$ crystal lattice due to Dy^{3+} doping [13, 14].

To date, research on modifying thermoplastics with luminescent additives includes only a limited number of studies focusing on polyolefins [11, 12, 15], polylactide (PLA) [16], and poly(methyl methacrylate) (PMMA) [17]. Publications addressing PET modification with phosphorescent pigments exist primarily in the context of luminescent fibers [18–20]. However, according to available literature, there are no reports on incorporating phosphorescent pigments into structural PET composites, or more broadly, into thermoplastic composites reinforced with short glass fibers.

This article presents the results of research conducted within the project LIDER14/0270/2023, aimed at developing a mechanically robust, glow-in-the-dark PET-based composite reinforced with glass fiber for injectionmolded fastening and safety components – such as chain links or anchors – designed to remain visible under emergency conditions. The paper focuses on evaluating the functional properties of the newly developed composites.

Materials and methods

The composite matrix consisted of a blend containing 95 wt% poly(ethylene terephthalate) (NeoPET 80, Neo Group, Lithuania) and 5 wt.% rPET flakes obtained from bottle recy-

Uzyskanie wyrobów konstrukcyjnych o trwałym efekcie świecenia w ciemności wymaga modyfikacji osnowy polimerowej przez wprowadzenie luminoforów bezpośrednio do masy podczas procesu kompandowania. Osnowa polimerowa chroni luminofory przed hydrolizą, na którą narażone są w wilgotnym środowisku, co prowadzi do pogorszenia intensywności i czasu emisji światła [10]. Luminofory fosforyzujące, dzięki obecności pułapek energetycznych w strukturze krystalicznej, mogą emitować światło nawet przez wiele godzin po zakończeniu wzbudzenia, w odróżnieniu od fluorescencji, gdzie emisja zanika niemal natychmiast po wyłączeniu źródła promieniowania. Kluczowym wyzwaniem pozostaje zapewnienie jednorodnej dystrybucji i dyspersji luminoforów w matrycy PET oraz zachowanie ich funkcjonalności po procesie przetwórstwa, które wymaga stosowania temperatury wyższej niż w przypadku wielu innych klastycznych termoplastów (260–280°C). Do luminoforów fosforyzujących, które charakteryzują się bardzo dużą stabilnością termiczną i nawet kilkunastogodzinnym świeceniem, należy glinian strontu aktywowany jonami pierwiastków ziem rzadkich, szczególnie $SrAl_2O_4$:Eu,Dy, emitujący zielone światło [10÷12]. Zielone widmo emisji wynika z obecności aktywatora – jonów Eu^{2+}, natomiast długość poświaty zależy od ilości i rodzaju pułapek tworzonych w sieci krystalicznej $SrAl_2O_4$ pod wpływem domieszki Dy^{3+} [13, 14]. Dotychczasowe badania nad modyfikacją termoplastów z użyciem dodatków luminescencyjnych to ograniczona liczba prac dotyczących poliolefin [11, 12, 15], polilaktydu (PLA) [16], poli(metakrylanu metylu) (PMMA) [17]. Istnieją publikacje dotyczące modyfikacji PET luminoforami fosforyzującymi w kontekście włókien luminescencyjnych [18÷20], jednak brak jest doniesień o wprowadzeniu luminoforów fosforyzujących do kompozytów konstrukcyjnych PET, a szerzej – do termoplastycznych kompozytów wzmocnionych krótkimi włóknami szklanymi.

W artykule przedstawiono wyniki badań realizowanych w ramach projektu LIDER14/0270/2023, mających na celu opracowanie wytrzymałego kompozytu świecącego w ciemności na osnowie PET wzmocnionego włóknem szklanym, przeznaczonego do wtryskiwanych elementów mocujących i asekuracyjnych, takich jak ogniwa łańcuchów czy kotwy, widocznych w warunkach awaryjnych.

Materiały i metoda badań

Osnowę kompozytów stanowiła mieszanina 95% mas. politereftalanu etylenu (NeoPET 80) oraz 5% mas. płatków rPET pochodzących z recyklingu butelek, których dostępność na rynku europejskim jest ograniczona. W przypadku potencjalnego wdrożenia produktów projektu LIDER14/0270/2023 należy wziąć pod uwagę te ograniczenia. Wszystkie materiały do badań zawierały 30% mas. ciętych włókien szklanych (średnica 13 µm, długość 4,5 mm). Zastosowano pigment fosforyzujący $SrAl_2O_4$:Eu,Dy. Analiza wykazała, że ok. 80% objętości luminoforu stanowią cząstki o średnicy 8–42 µm, z dominującą frakcją 20–35 µm i stosunkowo wąskim rozkładem. W kompozycjach z luminoforem zastosowano 0,3% mas. stearynianu pentaerytrytolu (PETS). Stanowił on dodatek procesowy (smar

cling (Aloxe, Poland). The use of rPET flakes in the above-mentioned quantities in this study is primarily due to the very limited availability of this raw material on the european market. These significant and long-standing limitations should be taken into account when considering the potential commercialization of the LIDER14/0270/2023 project products. All materials contained 30 wt.% short glass fibers (Fysol 27213P, diameter 13 µm, length 4.5 mm; FYService OY, Finland). A phosphorescent pigment based on $SrAl_2O_4$:Eu, Dy (SZZ300, Chaos Trade, Poland) was used. Particle size analysis (PSA 1190, Anton Paar GmbH, Austria) indicated that approximately 80% of the pigment volume consisted of particles with diameters between 8 and 42 µm, with a dominant fraction of 20–35 µm and a relatively narrow distribution. For the composites containing the phosphor, 0.3 wt.% pentaerythritol stearate (PETS) was used as a processing aid (internal and external lubricant), due to the abrasive nature and high filler content.

A reference material containing PET and glass fiber (designation: REF), as well as composites with phosphor additions of 2, 4, 6, and 20 wt.% (designations: LUM2, LUM4, LUM6, LUM20, respectively), were produced via melt compounding using a twin-screw extruder (FEDDEM FED 26 MTS, Germany; L = 910 mm, L/D = 35) at 265°C. Test dumbbell-shaped specimens (cross-section 4 × 10 mm) were injectionmolded from the resulting granulates at a mold temperature of 130 °C and cylinder temperatures of 250–270 °C (KraussMaffei KM 200 CX380, Germany). The quality of molded parts was assessed visually for deformation and tendency to adhere during demolding.

Mechanical testing of the composites included a tensile test according to ISO 5271:2019, performed on an AGSX testing machine (Shimadzu, Poland), as well as unnotched Charpy impact strength testing in accordance with EN ISO 1791:2023 using a pendulum impact tester (HIT 5.5P, ZwickRoell Sp. z o.o., Poland).

Glow-in-the-dark performance was evaluated after irradiating the samples with a Spectroline UV lamp (λ = 254 nm, 5 min). Photoluminescence spectra were recorded using an HR4000CGUVNIR spectrophotometer (Ocean Optics, USA) in the range of 200–1100 nm. Photographs of phosphorescent samples were taken immediately after irradiation and after 4, 10, and 30 minutes, in darkness, using a Canon EOS 5D Mark III camera (tripod, ISO 100, f/9, 30 s exposure).

Morphological analysis of tensile-fractured surfaces, gold-sputtered prior to observation, was conducted using a JSMIT200 scanning electron microscope (Jeol, Japan). Composite samples containing phosphor powder were calcined in a muffle furnace at 600 °C for 1 h to remove the polymer matrix and to assess particle size via microscopic examination.

Results and discussion

Based on visual inspection of the molded parts, it can be concluded that the combined addition of the phosphorescent pigment and the lubricant had a beneficial effect on the demolding process. Reference samples removed from the hot mold (130 °C) exhibited considerable flexibility, a strong tendency to adhere to the mold surfaces, and pronounced susceptibil-

wewnętrzny i zewnętrzny) ze względu na abrazyjność i dużą zawartość napełniaczy.

Materiał odniesienia zawierający PET i włókno szklane (oznaczenie: REF), a także kompozyty z dodatkiem luminoforu w ilości 2, 4, 6 i 20% mas. (odpowiednio: LUM2, LUM4, LUM6, LUM20), wytwarzano metodą kompandowania przy użyciu wytłaczarki dwuślimakowej, w temperaturze 265°C. Z otrzymanych granulatów formowano metodą wtrysku próbki wiosełkowe (przekrój 4 × 10 mm). Temperatura formy wynosiła 130°C oraz cylindra 250–270°C. Jakość wyprasek oceniano wizualnie pod kątem deformacji oraz skłonności do przywierania podczas rozformowania.

Wytworzone kompozyty poddano badaniom mechanicznym, obejmującym statyczną próbę rozciągania wg ISO 527-1:2019, przeprowadzoną na maszynie AGS-X oraz próbę udarności Charpy'ego bez karbu wg EN ISO 179-1:2023, przy użyciu młota udarowego. Zdolność świecenia w ciemności oceniano po naświetleniu próbek lampą UV Spectroline (λ = 254 nm, 5 min). Widma fotoluminescencji rejestrowano spektrofotometrem w zakresie 200–1100 nm. Wykonano również zdjęcia próbek fosforyzujących bezpośrednio po naświetleniu oraz po 4, 10 i 30 min w ciemni. Analizę morfologiczną przełomów po próbie rozciągania, napylonych złotem, przeprowadzono za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego. Próbki kompozytów zawierających proszek luminoforu wypalano w muflowym piecu w 600°C przez 1 h w celu usunięcia osnowy i oceny mikroskopowej wielkości cząstek proszku.

Wyniki badań i dyskusja

Na podstawie obserwacji wizualnych można stwierdzić, że jednoczesny dodatek luminoforu i smaru wywierał korzystny wpływ na proces rozformowania wyprasek. Próbki referencyjne usuwane z gorącej formy (130°C) wykazywały znaczną giętkość, skłonność do przywierania do ścianek formy oraz podatność na deformacje, co wskazuje na ograniczoną funkcjonalność technologiczną materiału referencyjnego i może istotnie utrudniać jego praktyczne zastosowanie. W pozostałych kompozycjach smar działał jako środek rozdzielający, ograniczając przywieranie wyprasek, a wraz ze zwiększeniem zawartości luminoforu obserwowano zwiększenie sztywności próbek w trakcie rozformowania i tym samym zmniejszenie ich podatności na deformacje. W przypadku kompozytu zawierającego 20% mas. luminoforu możliwe było zastosowanie najkrótszego czasu cyklu wtrysku, a wypraski usuwano z formy płynnie, bez objawów przywierania i konieczności stosowania dodatkowych środków rozdzielających.

Kompozyty wytworzone na osnowie PET charakteryzowały się dużą wytrzymałością oraz modułem sprężystości. Dodatek luminoforu, jak również smaru pełniącego funkcję środka poślizgowego i rozdzielającego, wpływał na wszystkie parametry wyznaczane w próbach rozciągania i udarności (tabela). W przypadku bardzo niewielkiej zawartości pigmentu fosforyzującego (2–4% mas.) obecność smaru powodowała zmniejszenie modułu sprężystości. Jednak wraz ze zwiększeniem zawartości luminoforu obserwowano zwiększenie modułu sprężystości, co było szczególnie wyraźne, gdy jego zawartość wynosiła 20% mas., w tym przypadku jego moduł sprężystości osiąg-

ity to deformation. This indicates limited processing robustness of the reference material and may significantly hinder its practical applicability. In the remaining composites, the lubricant acted as an effective release agent, reducing adhesion, while increasing phosphor content resulted in higher stiffness of the samples during demolding and, consequently, reduced susceptibility to deformation. For the composite containing 20 wt.% phosphor, the shortest injection-molding cycle time could be applied, and the molded parts were removed smoothly, without signs of sticking and without the need for external release agents.

Mechanical properties of the tested composites
Właściwości mechaniczne badanych kompozytów

Material/ Material	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	Moduł sprężystości przy rozciąganiu [MPa]	Wydłużenie względne przy zerwaniu [%]	Udarność Charpy'ego bez karbu [kJ/m^2]
REF	143.4 ± 2.6	13734 ± 1361	6.19 ± 0.80	47.1 ± 5.7
LUM2	134.1 ± 2.1	13175 ± 334	4.79 ± 0.14	33.0 ± 0.6
LUM4	129.9 ± 3.5	13400 ± 1013	4.52 ± 0.28	29.0 ± 4.2
LUM6	130.8 ± 1.7	14704 ± 479	4.64 ± 0.33	24.0 ± 3.2
LUM20	118.6 ± 4.2	17323 ± 304	3.60 ± 0.07	21.1 ± 1.7

The PET-based composites manufactured in this study exhibited high strength and a high elastic modulus. The addition of the phosphor, as well as the lubricant acting as a slip and release agent, influenced all parameters measured in the tensile and impact tests (Table). At very low phosphor contents (2–4 wt.%), the presence of PETS led to a reduction in the elastic modulus. However, with increasing phosphor content, a corresponding increase in tensile modulus was observed. This effect was particularly pronounced at a phosphor loading of 20 wt.%, for which a modulus of approximately 17 GPa was obtained, representing an increase of about 25% compared to the reference composite and approaching values typically reported for commercial PET grades containing 45–50 wt.% glass fibers [21, 22]. This enhancement may indicate the occurrence of a beneficial hybrid reinforcement effect between the glass fibers and phosphor particles, which has previously been reported for composites containing different types of fillers [23]. In addition, the phosphor may influence fiber orientation during processing or affect the degree of crystallinity of the PET matrix; however, confirmation of these mechanisms requires further investigation. At the same time, tensile strength and strain at break decreased with increasing pigment content – an effect typical for polymers containing particulate fillers. Nevertheless, the fracture energy (understood as the area under the stress–strain curve in the tensile test) remained relatively high, and the tested specimens did not exhibit brittle behavior. However, the unnotched Charpy impact strength (Table) showed a significant reduction – a distinct decrease in both impact resistance and strain at break was observed even at the low phosphor content of 2 wt.%.

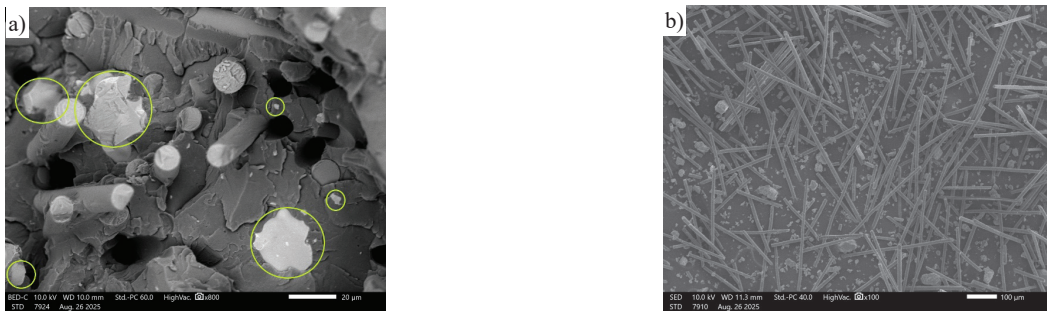
As a result of the compounding process, the luminescent pigment powder underwent partial fragmentation. On the tensile-fractured surfaces (Photo a), individual phosphor particles can be observed with sizes ranging from a few micrometers up to approximately 25 µm. Pigment particles were examined on the fracture surfaces of mechanically tested specimens using scanning electron microscopy in backscattered electron (BSE) mode. Contrast in BSE imaging arises from differences in the average atomic number (Z): strontium

nął ok. 17 GPa, tj. o około 25% więcej niż dla kompozytu referencyjnego i miał zbliżoną wartość typową dla gatunków komercyjnych PET zawierających 45–50% mas. włókien szklanych [21, 22]. Zwiększenie to może wskazywać na korzystny efekt hybrydowy pomiędzy włóknami szklanymi i cząstkami luminoforu, wcześniej obserwowane w kompozytach zawierających różne rodzaje napełniaczy [23]. Możliwy jest wpływ luminoforu na orientację włókien podczas przetwórstwa lub na stopień krystaliczności osnowy PET, jednak potwierdzenie tych mechanizmów wymaga przeprowadzenia dodatkowych badań.

Jednocześnie zaobserwowano zmniejszenie wytrzymałości na rozciąganie oraz odkształcenia przy zerwaniu wraz ze zwiększeniem zawartości luminoforu, co stanowi typowy efekt w przypadku tworzyw zawierających napełniacze proszkowe. Mimo to energia łamania (rozumiana jako pole pod krzywą naprężenie–odkształcenie w próbie statycznej) pozostawała stosunkowo duża, a otrzymane próbki nie wykazywały charakteru łamliwego. Udarność bez karbu (tabela) istotnie zmniejszyła się jednak – wyraźny spadek zarówno udarności, jak i odkształceń przy zerwaniu obserwowano już przy bardzo niewielkiej zawartości luminoforu (2% mas.).

W wyniku procesu kompandowania proszek pigmentu luminescencyjnego uległ częściowemu rozdrobnieniu. Na przełomach z prób rozciągania (fotografia a) widoczne są pojedyncze cząstki luminoforu o wielkości od kilku do ok. 25 µm. Cząstki pigmentu obserwowano na przełomach próbek po badaniach mechanicznych przy użyciu mikroskopii skaningowej w trybie detekcji elektronów wstecznie rozproszonych (BSE). Kontrast w obrazach BSE wynika z różnicy średniej liczby atomowej Z – glinian strontu (zawierający Sr, Z = 38) wykazuje większą wartość Z niż osnowa PET zbudowana z pierwiastków lekkich, dlatego cząstki pigmentu widoczne są jako jasne obszary na tle ciemniejszej osnowy polimerowej. Dalsza ilościowa przybliżona analiza dokonana na podstawie obserwacji mikroskopowych popiołu po wypaleniu próbek kompozytowych zawierających luminofor wskazuje, że po procesie kompandowania i wtrysku rozkład wielkości cząstek uległ przesunięciu w kierunku mniejszej średnicy, zwiększył się udział cząstek poniżej ok. 20 µm z przeważającą frakcją 5–15 µm. Przykładowy obraz popiołu po wypaleniu kompozycji LUM6 przedstawiono na fotografii b.

Na rysunku a przedstawiono widma fotoluminescencji badanych kompozytów. W przypadku wszystkich próbek obserwowano jedno szerokie pasmo emisyjne z maksimum przy długości fali ok. 522 nm, odpowiadające zielonej barwie widzialnej. Intensywność emisji zwiększała się wraz ze zwiększeniem zawartości pigmentu, natomiast pozycja maksimum pozostawała zasadniczo niezmieniona. Rysunek b przedstawia



Representative SEM images of the tensile-fractured surface of the composite containing 6 wt% phosphor (a), and SEM images of the inorganic residue (ash) obtained after calcination of the same composite – showing glass fibers and $SrAl_2O_4$:Eu,Dy particles (b)
Poglądowy obraz SEM przełomu po próbie rozciągania kompozytu zawierającego 6% mas. luminoforu (a) oraz obraz pozostałości nieorganicznej (popiołu) po wypaleniu tego kompozytu – widoczne włókna szklane i cząstki $SrAl_2O_4$:Eu,Dy (b)

aluminate (containing Sr, Z = 38) exhibits a higher Z value than the PET matrix composed of light elements, and therefore the pigment particles appear as bright regions against the darker polymer background.

Further approximate, semi-quantitative analysis of particle sizes, performed on the basis of microscopic observations of the ash obtained after calcination of composite samples containing the phosphor, indicates that the particle-size distribution shifted toward smaller diameters following compounding and injection molding. The proportion of particles below approximately 20 µm increased, with a dominant fraction in the 5–15 µm range. A representative image of the ash obtained from the LUM6 composite is shown in Photo b.

Photoluminescence spectra of the investigated composites are presented in Figure a. For all samples, a single broad emission band with a maximum at approximately 522 nm was observed, corresponding to green visible light. The emission intensity increased with rising pigment content, while the position of the maximum remained essentially unchanged. Figure b shows photographs of the samples taken immediately after UV irradiation and after 4, 10, and 30 minutes. Directly after exposure, all samples exhibited intense green luminescence, with brightness increasing alongside the phosphor content. Over time, a gradual decrease in emission intensity was observed, characteristic of phosphorescent materials. Samples containing low phosphor levels (LUM2 and LUM4) showed rapid luminescence decay, whereas composites with higher pigment contents – particularly LUM20 – retained visible emission even 30 minutes after excitation.

It should be noted that the apparent duration of glow observed from the photographs is limited by the imaging parameters and the detection threshold of the camera; in darkness, low-intensity light can be perceptible to the human eye for considerably longer. The functional visibility time of elements containing 20 wt.% phosphor may reach approximately 2 hours after excitation. In order to extend the time of functional visibility in the dark, it is planned to carry out material and technological optimization of the proposed solution.

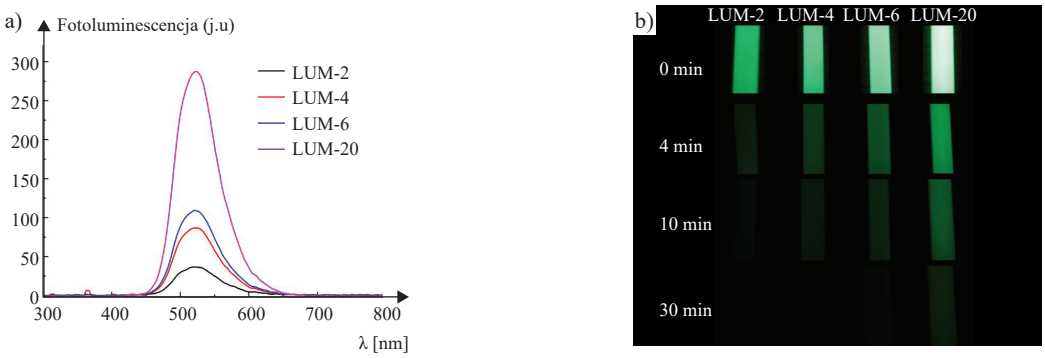
As reported by Havasi et al., who investigated the influence of milling $SrAl_2O_4$: Eu, Dy powders on luminescence intensity and persistence, significant degradation of the phosphorescent properties was observed only after the mean particle diameter was reduced to approximately 2 µm [24]. In the composites developed in the present study, the resulting particle sizes re-

próbki bezpośrednio po naświetleniu promieniowaniem UV oraz po 4, 10 i 30 min. Bezpośrednio po ekspozycji wszystkie z nich wykazywały intensywne zielone świecenie, którego jasność zwiększała się wraz ze zwiększeniem zawartości luminoforu. Z czasem obserwowano stopniowe zmniejszenie intensywności emisji, charakterystyczne w przypadku fosforescencji. Próbki o małej zawartości luminoforu (LUM2 i LUM4) wykazywały szybki zanik świecenia, natomiast kompozycje z dużym udziałem pigmentu, w szczególności LUM20, zachowywały widoczną emisję nawet po 30 min od naświetlenia. Należy zaznaczyć, że czas widoczności świecenia oceniany na podstawie fotografii jest ograniczony parametrami rejestracji obrazu oraz progiem detekcji aparatu; w ciemności światło o małej intensywności może być postrzegalne dla ludzkiego oka znacznie dłużej. Czas funkcjonalnej widoczności elementów zawierających 20% mas. luminoforu może sięgać około 2 godzin po naświetleniu. Aby wydłużyć czas funkcjonalnej widoczności w ciemności planowane jest przeprowadzenie optymalizacji materiałowo-technologicznej proponowanego rozwiązania.

Jak wskazano w [24], gdzie analizowano wpływ mielenia proszków $SrAl_2O_4$:Eu,Dy na intensywność i trwałość luminescencji, istotna degradacja właściwości świecących obserwowana była dopiero po redukcji średniej średnicy cząstek do ok. 2 µm. W kompozytach uzyskano cząstki o rozmiarze pozwalającym na zachowanie intensywnego świecenia, a jednocześnie mieszczącym się w typowym zakresie stosowanym w przypadku mineralnych napełniaczy termoplastów.

Wnioski

Otrzymane kompozyty PET wzmocnione włóknem szklanym (30% mas.) z dodatkiem 2–20% mas. pigmentu fosforyzującego oraz 0,3% mas. środka smarnego, w porównaniu z układem bez luminoforu, charakteryzują się korzystniejszymi parametrami przetwórczymi (skrócenie czasu cyklu wtrysku, ułatwione rozformowanie), z zachowaniem bardzo dobrych właściwości mechanicznych (wytrzymałość na rozciąganie 115–135 MPa, moduł sprężystości: 13–17,5 GPa). Uzyskane kompozyty mogą być stosowane w elementach konstrukcyjnych o dużej sztywności i przenoszących duże obciążenia statyczne – szczególnie w przypadku wzmocnionych elementów z insertami metalowymi wytwarzanych w technologii wtrysku.



Photoluminescence spectra of the composites containing 2–20 wt% phosphor (a) and a qualitative comparison of luminescence intensity and decay over time after excitation (b)
Widma fotoluminescencyjne kompozytów zawierających 2–20% mas. luminoforu (a) oraz jakościowe porównanie intensywności i zaniku luminescencji w czasie po wzbudzeniu (b)

mained sufficiently large to preserve strong luminescent performance, while still falling within the typical size range used for mineral fillers in thermoplastics.

Conclusions and Future Perspectives

The PETbased composites reinforced with 30 wt.% glass fibers and containing 2–20 wt.% phosphorescent pigment together with 0.3 wt.% lubricant exhibited improved processing characteristics compared to the pigmentfree system. These improvements included reduced injectionmolding cycle time and facilitated demolding, while maintaining very good mechanical performance (tensile strength in the range of 115–135 MPa and elastic modulus of 13–17.5 GPa). The obtained composites can be used in structural components requiring high stiffness and capable of carrying significant static loads–particularly in reinforced elements featuring metal inserts manufactured by injection molding. Importantly, they retain functional visibility in darkness for approximately 2 hours after excitation. Such elements may ultimately form part of broadly defined land-based infrastructure and facility equipment requiring visibility under emergency conditions or during blackout scenarios. Due to the fact that in the research the luminescence was caused by irradiation of the composite with a UV lamp, it is planned to carry out tests on the final details in natural conditions, for radiation emitted by the sun.

Within the LIDER14/0270/2023 project carried out at the Faculty of Civil Engineering of Cracow University of Technology, the production of an injection-molded chain and anchor, aging tests of the products, and certification performed by independent external bodies are planned. Furthermore, the forthcoming material research will include the incorporation of a minimum of 25 wt.% PET recyclate in the composites. This aligns directly with industrial needs and EU circular-economy regulations aimed at reducing the consumption of primary raw materials.

This research was funded by a project supported by the National Centre for Research and Development [Grant no. LIDER14/0270/2023 "Composite non-conductive chain with an anchoring system (COMPCHAIN) ".

Received: 02.02.2026
Revised: 14.04.2026
Published: 19.08.2026

Co istotne, zachowują one funkcjonalną widoczność w ciemności przez ok. 2 h po naświetleniu. Elementy te docelowo mogą stanowić część szeroko pojętej infrastruktury lądowej i wyposażenia obiektów, wymagających zachowania widoczności w sytuacjach awaryjnych lub podczas blackoutu. Z uwagi na to, że w badaniach luminescencja była wywołana przez naświetlanie kompozytu lampą UV, planuje się przeprowadzenie badań na finalnych detalach w warunkach naturalnych – promieniowania emitowanego przez słońce. W ramach realizowanego na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej projektu LIDER14/0270/2023 przewidziano wykonanie łańcucha i kotwy w technologii formowania wtryskowego, badania starzeniowe produktów oraz certyfikację wyrobów w niezależnych jednostkach zewnętrznych. Ponadto, zaplanowane badania materiałowe będą obejmować zastosowanie min. 25% recyklatu PET w kompozytach, co wynika bezpośrednio z potrzeb przemysłu i regulacji unijnych dotyczących gospodarki w obiegu zamkniętym.

Badania zostały sfinansowane w ramach projektu wspieranego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju [nr projektu LIDER14/0270/2023 „Łańcuch kompozytowy nieprzewodzący ładunku elektrycznego wraz z systemem kotwienia (COMPCHAIN)"].

Artykuł wpłynął do redakcji: 02.02.2026 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 14.04.2026 r.
Opublikowano: 19.08.2026 r.

Literature

[1] PlasticsEurope, 'Plastics – the fast Facts 2024', 2024. [Online]. Available: https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2023

[2] Mordor Intelligence, 'Glass Fiber Reinforced Polymer Market Size & Share – Industry Report, 2025-2030', 2025. [Online]. Available: https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/glass-fiber-reinforced-polymer-gfrp-market

[3] Albatayneh O, Akhtar MN. 'Evaluating Recycled PET as an Alternative Material for the Construction Sector Towards Sustainability', *Civ Eng J*, vol. 10, no. 4, pp. 1336–1353, Apr. 2024, DOI: 10.28991/CEJ-2024-010-04-020.

[4] Sakr N, AbouZeid M. 'Recycling of Plastic Waste in the Construction Industry', *Polymers*, vol. 17, no. 9, p. 1282, May 2025, DOI: 10.3390/polym17091282.

[5] Farah E, Yaacoub S, Dgheim J, El Hajj N. 'Assessing the Impact of Shredded Polyethylene Terephthalate (PET) Post-Consumer Plastic as a Partial Replacement for Coarse Aggregates in Unreinforced Concrete', *Materials*, vol. 17, no. 21, p. 5208, Oct. 2024, DOI: 10.3390/ma17215208.

[6] Díaz-García G, Diaz-Miranda P, Tineo-Villón C. 'Utilizing Recycled PET and Mining Waste to Produce Non-Traditional Bricks for Sustainable Construction', *Sustainability*, vol. 17, no. 19, p. 8841, Oct. 2025, DOI: 10.3390/su17198841.

[7] Major I. „Beton modyfikowany granulatem gumowym SBR i płatkami politereftalanu etylenu PET", *Construction Materials*, vol. 1, no. 8, pp. 4–8, Aug. 2023, DOI: 10.15199/33.2023.08.01.

[8] Xie H *et al.*, 'Flexural behavior evaluation of PET foam core curved sandwich beam: Experimental study and numerical simulation', *Construction and Building Materials*, vol. 414, p. 135000, Feb. 2024, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135000.

[9] Muringayil Joseph T *et al.*, 'Polyethylene terephthalate (PET) recycling: A review', *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 9, p. 100673, Jun. 2024, DOI: 10.1016/j.cscee.2024.100673.

[10] Wang L, Shang Z, Shi M, Cao P, Yang B, Zou J. 'Preparing and testing the reliability of long-afterglow $SrAl_2O_4:Eu^{2+},Dy^{3+}$ phosphor flexible films for temperature sensing', *RSC Adv.*, vol. 10, no. 19, pp. 11418–11425, 2020, DOI: 10.1039/D0RA00628A.

[11] Poulose AM *et al.*, 'Effect of Compatibilizer on the Persistent Luminescence of Polypropylene/Strontium Aluminate Composites', *Polymers*, vol. 14, no. 9, p. 1711, Apr. 2022, DOI: 10.3390/polym14091711.

[12] Poulose AM *et al.*, 'Strontium Aluminate-Based Long Afterglow PP Composites: Phosphorescence, Thermal, and Mechanical Characteristics', *Polymers*, vol. 13, no. 9, p. 1373, Apr. 2021, DOI: 10.3390/polym13091373.

[13] Chen I-C, Chen T-M. 'Effect of host compositions on the afterglow properties of phosphorescent strontium aluminate phosphors derived from the sol-gel method', *J. Mater. Res.*, vol. 16, no. 5, pp. 1293–1300, May 2001, DOI: 10.1557/JMR.2001.0181.

[14] Bierwagen J *et al.*, 'Probing traps in the persistent phosphor SrAl2O4:Eu2+,Dy3+,B3+ – A wavelength, temperature and sample dependent thermoluminescence investigation', *Journal of Luminescence*, vol. 222, p. 117113, Jun. 2020, DOI: 10.1016/j.jlumin.2020.117113.

[15] Poulose AM *et al.*, 'Long Persistent Luminescent HDPE Composites with Strontium Aluminate and Their Phosphorescence, Thermal, Mechanical, and Rheological Characteristics', *Materials*, vol. 15, no. 3, p. 1142, Feb. 2022, DOI: 10.3390/ma15031142.

[16] Ni Z *et al.*, 'Effect of the Concentration of SrAl2O4: Eu2+and Dy3+ (SAO) on Characteristics and Properties of Environment-Friendly Long-Persistent Luminescence Composites from Polylactic Acid and SAO', *Scanning*, vol. 2021, pp. 1–9, Sep. 2021, DOI: 10.1155/2021/6337768.

[17] Khursheed S, Ahmad Sheergojri G, Sharma J. 'Phosphor Polymer Nanocomposite: SrAl2O4:Eu2+, Dy3+ Embedded PMMA for Solid-State Applications', *Materials Today: Proceedings*, vol. 21, pp. 2096–2104, 2020, DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.329.

[18] Xue H, He Z, Shen X, Zhu Y, Ge M. 'Luminous properties of skin–core structure new luminous fiber: SrAl2O4:Eu2+,Dy3+-PET/light conversion agent-PET', *J Mater Sci: Mater Electron*, vol. 29, no. 21, pp. 18045–18050, Nov. 2018, DOI: 10.1007/s10854-018-9913-3.

[19] Pang Z, Zhu Y, Ge M, 'Study on the structural and luminous properties of two kinds self-luminous fibers', *The Journal of The Textile Institute*, vol. 111, no. 3, pp. 345–351, Mar. 2020, DOI: 10.1080/00405000.2019.1633846.

[20] Jin Y, Long X, Zhu Y, Ge M. 'Optical performance study of Sr2ZnSi2O7:Eu2+,Dy3+, SrAl2O4:Eu2+,Dy3+ and Y2O2S:Eu3+,Mg2+,Ti4+ ternary luminous fiber', *Journal of Rare Earths*, vol. 34, no. 12, pp. 1206–1212, Dec. 2016, DOI: 10.1016/S1002-0721(16)60155-2.

[21] 'Celanese Rynite® 545 BK504 PET-GF45'. Accessed: Jun. 02, 2026. [Online]. Available: https://matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=407de5169eb5418a9c51f7d03b6eef6f

[22] 'Celanese Rynite® 550HTE BK503 PET-GF50'. Accessed: Jun. 02, 2026. [Online]. Available: https://matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=06b36b94831541ebad94e4986d484c2d

[23] Fu S-Y, Xu G, Mai Y-W. 'On the elastic modulus of hybrid particle/short-fiber/polymer composites', *Composites Part B: Engineering*, vol. 33, no. 4, pp. 291–299, Jun. 2002, DOI: 10.1016/S1359-8368(02)00013-6.

[24] Havasi V *et al.*, 'On the effects of milling and thermal regeneration on the luminescence properties of Eu2+ and Dy3+ doped strontium aluminate phosphors', *Journal of Luminescence*, vol. 219, p. 116917, Mar. 2020, DOI: 10.1016/j.jlumin.2019.116917.