

prof. dr hab. inż. Tadeusz Tatar¹⁾

ORCID: 0000-0002-4071-2358

dr hab. inż. Alicja Kowalska-Koczwara, prof. PK^{1)*)}

ORCID: 0000-0001-8088-7729

dr inż. Maciej Gruszczyński¹⁾

ORCID: 0000-0002-0445-5745

The influence of rubber granulate on the mechanical and vibration-insulating properties of underlayments in industrial floors

Wpływ granulatu gumowego na właściwości mechaniczne i wibroizolacyjne warstw podkładowych w podłogach przemysłowych

DOI: 10.15199/33.2026.01.01

Abstract. In this article the effectiveness of using rubber granulate in the subbase layers of industrial floors to enhance the vibration insulation properties of these structures is presented. The study was conducted on three floor variants, including one reference model. The laboratory test results of selected concrete mixtures and mortars modified with rubber granulate were presented. The solution aimed to reduce the level of induced vibrations. In the dynamic tests, a Mark IV Vibroseis-type exciter was used as the source of excitation. The comparative analysis of the mechanical properties of both reference and rubber granulate-modified subbase mixtures, along with an evaluation of their vibration reduction performance under real-world conditions is presented in the article. The results indicate that the tested floor systems significantly reduce dynamic interactions compared to the reference floor (without granulate). The highest insulation effectiveness was observed in the vertical (Z) direction.

Keywords: industrial floor; rubber granulate; dynamic tests; insulation properties; vibration

Streszczenie. W artykule omówiono skuteczność zastosowania w warstwach podkładowych podłóg przemysłowych granulatu gumowego w celu zwiększenia izolacyjności drganiowej tych konstrukcji. Przeprowadzono badania trzech wariantów podłogi, w tym jednej referencyjnej. Przedstawiono też wyniki badań laboratoryjnych nad wybranymi zaprawami i betonami modyfikowanymi granulatem gumowym. Rozwiązanie to ma ograniczyć poziom wzbudzanych drgań. W badaniach dynamicznych, jako wymuszenie, wykorzystano wzbudnik typu Mark IV Vibrosejs. W artykule zaprezentowano właściwości wytrzymałościowe podkładowych zapraw i betonów referencyjnych oraz modyfikowanych, a także wyniki badań skuteczności redukcji drgań w warunkach rzeczywistych. Wyniki wskazują, że badane podłogi znacznie redukują oddziaływanie dynamiczne w stosunku do podłogi referencyjnej (bez granulatu). Największą skuteczność izolacyjną zaobserwowano w kierunku pionowym (Z).

Słowa kluczowe: podłoga przemysłowa; granulatu gumowy; testy dynamiczne; właściwości tłumiące; drgania

Industrial floors are a critical structural component of production, warehouse, and public utility facilities. Their resistance to mechanical, chemical, and environmental loads directly determines durability and operational safety. Concrete floors are widely used due to their high load-bearing capacity, substantial compressive strength, and favourable cost-to-performance ratio [1–3]. In aggressive environments, epoxy coatings, resin systems, and other specialised solutions constitute a viable alternative [4–6]. A typical concrete floor consists of the subbase layers, a slip or separation layer, a load-bearing slab, and a finish resistant to abrasion and chemical exposure [2,7]. Despite well-established design principles, damage such as cracking, delamination, scaling, and local settlements remains common and often results from material-related or workmanship errors [8–11].

In recent years, the vibration isolation performance of floors has gained increasing importance. Vibrations generated by machinery and internal transportation systems affect not only

Podłogi przemysłowe są istotnym elementem konstrukcyjnym obiektów produkcyjnych, magazynowych i użyteczności publicznej. Ich odporność na obciążenia mechaniczne, chemiczne i środowiskowe wpływa na trwałość i bezpieczeństwo eksploatacji. Powszechnie stosowane są podłogi betonowe, cechujące się dużą nośnością i wytrzymałością na ścisnienie oraz korzystnym stosunkiem kosztu do parametrów użytkowych [1–3]. Alternatywą w środowiskach agresywnych są żywice, np. epoksydowe oraz inne systemy specjalistyczne [4–6]. Typowa podłoga betonowa składa się z warstw podbudowy, warstwy poślizgowej, płyty nośnej i wykończenia odpornego na ścieranie i chemikalia [2, 7]. Mimo sprawdzonych zasad projektowych, uszkodzenia, takie jak rysy, łuszczenie, odspojenia czy lokalne osiadanie są wciąż powszechne i wynikają m.in. z błędów materiałowych lub wykonawczych [8–11].

W ostatnich latach zwiększa się znaczenie wibroizolacyjności podłóg. Drgania generowane przez maszyny i transport wewnętrzny wpływają nie tylko na komfort użytkowników i precyzję pracy urządzeń, ale również na trwałość konstrukcji [12, 13]. Tradycyjne rozwiązania izolacyjne (maty elastomerowe, płyty pływające) bywają kosztowne i zawodzą [14].

¹⁾ Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej

^{*)} Correspondence address:

alicja.kowalska.koczwara@gmail.com

user comfort and the precision of equipment operation but also the long-term durability of structural elements [12,13]. Traditional isolation solutions—such as elastomeric mats or floating slabs—are often expensive and may exhibit reduced effectiveness over time [14].

Research on industrial floors encompasses both static and dynamic investigations. Dynamic testing includes methods for assessing load-bearing capacity, subgrade compaction, and abrasion resistance, such as dynamic plate load tests, as well as non-destructive and semi-destructive techniques, including rebound hammer testing (e.g., Schmidt hammer) and pull-off strength tests. These analyses are intended to verify the quality of the floor system and the subsoil, particularly under in-service conditions, in order to ensure adequate functionality and safety. Industrial floors are exposed to dynamic effects generated by the wheeled traffic of vehicles and material-handling equipment. Vibration protection of industrial floors can be achieved through the use of concrete additives. One promising approach involves modifying cement mortars and concretes with recycled rubber granules from waste tyres, which reduces stiffness and enhances damping properties [15–17]. Although the incorporation of rubber granulate leads to a reduction in mechanical strength, its application may be justified in layers that do not directly transfer service loads [18,19]. The results of investigations on such mixtures provide a basis for determining the optimal rubber granulate content. In these studies, rheological properties are considered a key execution parameter, both during laboratory mixing processes and under field conditions [20].

Laboratory Investigations

The objective of the laboratory stage was to develop mix designs for vibration-isolating materials. The research program was divided into two phases. In the preliminary phase, base concretes incorporating SBR and EPDM rubber granulates were analysed. In the main phase, dedicated to the development of the primary vibrationisolation layer with a thickness of 5 cm, the focus was placed on mortars modified with EPDM granulate and with a combination of EPDM + SBR. Owing to their more favourable technological properties for placing thin layers, mortars were selected for the execution of the main vibrationisolation layers (variants V2 and V3). The laboratory stage aimed to develop formulations of mortar and concrete mixes intended for use in the subbase layers of industrial floors, ensuring effective vibration isolation. **To verify the technological feasibility of producing a composite system using the “fresh-on-fresh” method and to enable a visual assessment of the interfacial zone**, cube specimens with dimensions of 150 mm were prepared. In these specimens, the lower bonded layer (15 mm) consisted of mortar with rubber granulate, while the upper layer (135 mm) was made of standard structural concrete C35/45 XM2 (Photo 1). For ease of identification, the damping layer was coloured with a red pigment.

In the first stage, a mix design for base concrete was developed using blastfurnace cement CEM III/A 42.5 N and Category A fly ash in accordance with PNEN 4501 (denoted in Figure 1 as lean concrete). Natural sand with a particle size of

Podłogi przemysłowe poddawane są badaniom statycznym i dynamicznym. Dynamiczne obejmują metody oceny nośności, zagęszczenia podłoża oraz ścieralności, np. testy płytą dynamiczną, czy metody nieniszczące i semi-niszczące, takie jak badania sklerometryczne (np. młotkiem Schmidta), czy badanie wytrzymałości na odrywanie (Pull-Off). Analizy te mają na celu weryfikację jakości podłogi i podłoża, zwłaszcza w warunkach eksploatacji, aby zapewnić jej odpowiednią funkcjonalność i bezpieczeństwo. Należy podkreślić, że podłogi przemysłowe narażone są na wpływy dynamiczne generowane przez ruch kołowy samochodów i wózków transportowych. Przed wibracjami można je chronić przez stosowanie dodatków do betonów. Jednym z obiecujących kierunków jest modyfikacja zapraw i betonów cementowych granulatem gumowym z recyklingu opon, co pozwala ograniczyć sztywność i poprawić właściwości tłumiące [15–17]. Wprawdzie obecność granulatu zmniejsza wytrzymałość materiału, jednak jego użycie może być uzasadnione w warstwach nieprzenoszących bezpośrednio obciążeń użytkowych [18, 19]. Wyniki badań takich mieszanek dają podstawę do określenia optymalnej zawartości granulatu gumowego. Uwzględnia się też właściwości reologiczne mieszanek zarówno w trakcie badań na węzle betoniarstwie, jak i badań poligonowych [20].

Badania laboratoryjne

Celem etapu laboratoryjnego było opracowanie receptur materiałów wibroizolacyjnych. Badania podzielono na dwie fazy. W fazie wstępnej analizowano betony podkładowe z dodatkiem granulatu SBR, EPBM. Natomiast w fazie zasadniczej, dedykowanej opracowaniu zasadniczej warstwy wibroizolacji o grubości 5 cm, skupiono się na zaprawach z dodatkiem granulatu EPBM oraz kombinacją EPDM+SBR. To właśnie zaprawy, ze względu na lepsze parametry technologiczne przy układaniu cienkich warstw, zostały wytypowane do wykonania zasadniczych warstw wibroizolacji (warianty V2 i V3). W celu **weryfikacji technologicznej możliwości wykonania układu zespolonego metodą „świeże na świeże” oraz wizualnej oceny strefy styku**, wykonano próbki w postaci sześcianów o boku 150 mm, w których dolną, zespoloną warstwę (15 mm) stanowiła zaprawa z dodatkiem granulatu, natomiast górną (135 mm) – warstwa standardowego betonu konstrukcyjnego C35/45 XM2 (fotografia 1). W celu łatwiejszej identyfikacji warstwa tłumiąca została zabarwiona czerwonym pigmentem.

W pierwszym etapie opracowano recepturę betonu podkładowego na bazie cementu hutniczego CEM III/A 42.5 N i popiołu lotnego kategorii A zgodnie z PN-EN 450-1 (na rysunku 1 oznaczony jako chudy beton). Jako kruszywo wykorzystano naturalny piasek frakcji 0/2 mm oraz żwir frakcji 2/8 mm. Do mieszanek dodano domieszkę upłynniającą na bazie eteru polioksykarboksylanowego (PCE). Mieszanka została zaprojektowana na klasę konsystencji S5, a wykonany z niej beton ma klasę wytrzymałości C25/30, z uwzględnieniem zapasu wytrzymałości na potrzeby przyszłych modyfikacji. W kolejnych seriach badań kruszywo naturalne zastępowano granulatem gumowym EPDM (1/3 mm) oraz SBR

0/2 mm and gravel with a fraction of 2/8 mm were used as aggregates. A polycarboxylate – ether (PCE) – based superplasticiser was incorporated in the mixes. The mixture was designed for consistency class S5 and strength class C25/30, with an additional strength margin to allow for future modifications.

In subsequent test series, the natural aggregate was partially replaced with EPDM rubber granulate (1/3 mm) and SBR rubber granulate (0.8–2 mm) in amounts corresponding to 30%, 60%, and 100% of the volume of the 0–4 mm aggregate fraction. All mixtures exhibited adequate workability and no signs of segregation. Table 1 summarises the average compressive strength values obtained after 7 and 28 days of curing for six variants containing rubber granulate. The principal vibrationisolation layer was assumed to be a mortar layer modified with rubber granulate. Three variants of self-compacting mortars were adopted, in which 100% of the natural aggregate was replaced with rubber granulate: EPDM, SBR, and a combination of the two in a 50/50% volumetric proportion. In the final stage, the execution of vibration-damping mortars containing EPDM granulate or an EPDM + SBR mixture in a 50/50% ratio was verified. Pigmentation of



Photo 1. View of the composite specimen: a damping mortar layer with rubber granulate (15 mm, red) and a structural concrete layer (135 mm, C35/45 XM2).

Fot. 1. Próbkę zespoloną: warstwa zaprawy tłumiącej z dodatkiem granulatu gumowego (15 mm, kolor czerwony) i betonowa warstwa konstrukcyjna (135 mm, C35/45 XM2)

(0,82 mm) w ilości 30, 60 i 100% objętości frakcji 0–4 mm. Wszystkie mieszanki zachowały odpowiednią urabialność i nie wykazywały segregacji składników. W tabeli 1 zestawiono średnie wartości wytrzymałości na ściskanie po 7 ($f_{cm,7}$) i 28 ($f_{cm,28}$) dniach dojrzewania betonu w przypadku sześciu wariantów z dodatkiem granulatu. Zasadniczą wibroizolacją była warstwa zaprawy modyfikowanej dodatkiem granulatu gumowego. Przyjęto trzy warianty zapraw o właściwościach samozagęszczalnych, w których 100% kruszywa naturalnego zastąpiono granulatem gumowym: EPDM, SBR oraz ich kombinacją w proporcji 50/50% objętościowo. Na ostatnim etapie weryfikowano wykonanie zapraw tłumiących drgania, zawierających granulaty EPDM lub mieszaninę EPDM+SBR w proporcji 50/50%. Pigmentacja warstwy (kolor czerwony) pozwalała na jednoznaczny identyfikację warstwy tłumiącej w układzie podłogi.

Ze względu na ograniczenia technologiczne, granulaty gumowy był dozowany bezpośrednio do bębna betonomieszarki, w której prowadzono intensywne mieszanie przez co najmniej 5 min w celu zapewnienia jednorodności zaprawy. Wykonano

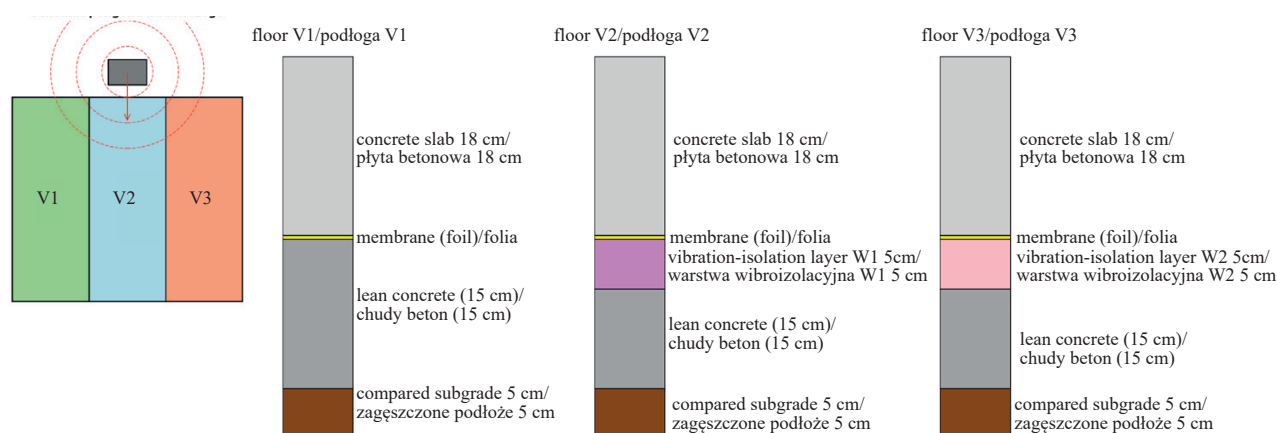


Fig. 1. Diagram of the research site with the arrangement of floor layers

Rys. 1. Schemat poligonu badawczego wraz z układem warstw podłogi

the layer (red colour) enabled clear identification of the damping layer within the floor system. Due to technological constraints, the rubber granulate was dosed directly into the drum of the concrete mixer, where intensive mixing was carried out for a minimum of 5 minutes to ensure homogeneity of the mortar.

Flow tests were performed after 10 and 60 minutes, and specimens were prepared for compressive strength testing (prisms $4 \times 4 \times 16$ cm and cubes $10 \times 10 \times 10$ cm). The results of consistency testing (flow) of the investigated mortars after 10 and 60 minutes (measured from the first contact of cement with water), as well as compressive strength after 7 and 28 days of curing, are presented in Table 2.

Table 1. Average compressive strength of concrete base mixtures with the addition of vibration isolating materials

Tabela 1. Średnia wytrzymałość na ściskanie betonów podkładowych z dodatkiem materiałów izolujących drgania

Additive type/ Typ dodatku	Volume fraction [%]/ Udział [% obj.]	$f_{cm,7}$ [MPa]	$f_{cm,28}$ [MPa]
EPDM (1/3 mm)	30	7.4	20.1
	60	5.8	18.4
	100	4.9	16.4
SBR (0.8/2 mm)	30	6.1	18.7
	60	5.4	15.4
	100	5.0	15.8

Table 2. Density, flow and strength (after 7 and 28 days) of damping mortars with EPDM and EPDM+SBR granules

Tabela 2. Gęstość, rozplływ i wytrzymałość (po 7 i 28 dniach) zapraw tłumiących z granulatem EPDM oraz EPDM+SBR

Mixture/ Typ dodatku	Density [kg/m ³]/ Gęstość [kg/m ³]	Flow diameter [mm] after 10 min/ Rozplływ [mm] po 10 min	Flow diameter [mm] after 60 min/ Rozplływ [mm] po 60 min	f _{cm, 7} [MPa]	f _{cm, 28} [MPa]
EPDM	1680	285	290	4.7	15.0
EPDM+SBR	1485	280	295	5.5	17.9

Full-scale investigations

To verify the effectiveness of the developed concrete and mortar mixtures containing rubber granulate, a full-scale model of an industrial floor structure was constructed. The investigations were carried out at a designated experimental site, where three variants of floor slabs were prepared. Each slab had plan dimensions of 4 × 5 m, was placed on a compacted soil subgrade, and was separated from adjacent slabs by expansion joints.

The layer configurations of the individual variants are presented in Figure 1:

- **Variant V1** – a standard concrete slab without a damping layer,
- **Variant V2** – a slab incorporating a damping layer W1 made of EPDM + SBR mortar (50/50% by volume), with a thickness of 5 cm,
- **Variant V3** – a slab incorporating a damping layer W2 made of EPDM mortar, with a thickness of 5 cm.

Vibration excitation was generated using a Mark IV vibroseis device operating in a sequential excitation mode over a frequency range of 6–100 Hz. Each excitation cycle lasted 60 s, with the excitation force set to 80% of the maximum output of the device. The vibration source was positioned on the soil subgrade between the tested slabs, while acceleration measurements were carried out at the centre of each slab using tri-axial accelerometers. In accordance with the provisions of PN-B-02171:2017, the sensors were installed at the midspan of each floor slab. The positions of the accelerometers are indicated in Photo 2a (yellow elements), and the location of the vibroseis device is shown in Photo 2b. During the investigation, the position of the exciter was varied; it was placed at the midpoint of the shorter edge of the slab. The primary subject of the analysis was the dynamic response of the slabs in the vertical direction (Z-axis), which is the most significant from the standpoint of the impact of vibrations on the human body. Vertical vibrations are transmitted most effectively through structural elements, and their perception is associated with disturbances of postural balance, subjective sensations, and potential effects on internal organs.

Excitation of the V1, V2, and V3 floor slabs was performed in accordance with the operational regime of the vibroseis in sequential excitation mode over the frequency range of 6–100 Hz. The recorded time histories of vibration components in the x, y, and z directions, together with subsequent analyses of peak acceleration values, enabled quantitative assessment of the vibration isolation effect. The interpretation of results was supported by

próby rozplwywu po 10 i 60 min oraz przygotowano próbki do badań wytrzymałości na ściskanie (bełeczki 4 × 4 × 16 cm i kostki 10 × 10 × 10 cm). Wyniki badania konsystencji (rozplływ) zapraw po 10 i 60 min (licząc od pierwszego kontaktu cementu z wodą) oraz wytrzymałości na ściskanie po 7 i 28 dniach dojrzwania przedstawiono w tabeli 2.

Badania w skali rzeczywistej

W celu weryfikacji skuteczności opracowanych mieszanek betonowych i zapraw z dodatkiem granulatu gumowego wykonano modelową konstrukcję podłogi przemysłowej w skali rzeczywistej. Przygotowano trzy warianty płyt podłogowych, z których każdą o wymiarze 4 × 5 m, ułożono na zagęszczonym podłożu gruntowym i oddzielono dylatacjami.

Układ warstw poszczególnych wariantów przedstawiono na rysunku 1:

- wariant V1 – standardowa płyta betonowa bez warstwy tłumiącej;
- wariant V2 – płyta z warstwą tłumiącą W1 wykonaną z zaprawy EPDM+SBR (50/50%), grubość 5 cm;
- wariant V3 – płyta z warstwą tłumiącą W2 z zaprawy EPDM, grubość 5 cm.

Do wzbudzenia drgań zastosowano urządzenie typu Mark IV Vibrosejs, pracujące w trybie wymuszeń sekwencyjnych w zakresie częstotliwości 6–100 Hz, z czasem trwania każdego cyklu 60 s i siłą wymuszenia na poziomie 80% maksymalnej mocy urządzenia. Źródło wzbudzenia umieszczono na podłożu gruntowym pomiędzy badanymi płytami, a pomiary przyspieszeń prowadzono w środku każdej płyty za pomocą trójosiowych akcelerometrów. Zgodnie z zapisami normy PN-B-02171:2017 czujniki zostały usytuowane w środku rozpiętości każdej z podłóg. Położenie akcelerometrów pokazano na fotografii 2a (żółte elementy), a widok wzbudnika (wibrosejsu), którego lokalizację zmieniano podczas badań (położenie odpowiadał środkowi krótszej krawędzi płyty) na fotografii 2b. Głównym przedmiotem analizy była odpowiedź dynamiczna płyt w kierunku pionowym (oś Z), który jest najistotniejszy z punktu widzenia oddziaływania drgań na organizm ludzki. Drgania pionowe przenoszą się najsilniej przez elementy konstrukcyjne, a ich percepcja wiąże się z zakłóceniem równowagi, odczuciami subiektywnymi oraz wpływem na narządy wewnętrzne.

Drgania podłóg V1, V2 i V3 wymuszono zgodnie z reżimem pracy wibrosejsu w trybie wymuszeń sekwencyjnych w zakresie częstotliwości 6–100 Hz. Zarejestrowane przebiegi składowych drgań x, y i z i dalsza analiza szczytowych wartości przyspieszeń

Fast Fourier Transform (FFT) analyses. Figure 2 presents example acceleration timehistory signals in three orthogonal directions (x–perpendicular to the excitation direction, y–parallel to the excitation direction, and z–vertical direction) for the reference slab (Variant V1) over a complete excitation cycle, together with the FFT results derived from the vertical vibration component z. The signal illustrates the dynamic response of the system over the full range of excited frequencies (6–100 Hz).

In the FFT spectrum of the vertical component z, two clearly dominant frequencies can be identified, equal to 21 Hz and approximately 64 Hz. The corresponding FFT amplitudes are 0.63 and 0.96 cm/s², respectively.

Figures 3 and 4 show the dynamic responses of the V2 and V3 floor slabs, respectively, in three orthogonal directions, together with the FFT results of the vertical vibration component z.

In the FFT spectrum of the vertical component z presented in Figure 3, a dominant frequency of 28.7 Hz can be observed, corresponding to a vibration amplitude of 0.62 cm/s².

In the FFT spectrum of the vertical component z presented in Figure 3, a dominant frequency of 28.7 Hz can be observed, corresponding to a vibration amplitude of 0.62 cm/s².



Photo 2. Sensor location (a) and view of the Mark IV exciter (b)
Fot. 2. Lokalizacja czujników (a) oraz widok wzbudnika Mark IV (b)

drgań umożliwiły określenie efektu wibroizolacyjnego. Pomocne były również wyniki analizy FFT. Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe przebiegi sygnału przyspieszenia w trzech ortogonalnych kierunkach (x – prostopadle do wymuszenia, y – równoległe do wymuszenia, z – kierunku wertykalny), w przypadku płyty referencyjnej (wariant V1) podczas pełnego cyklu wzbudzania wraz z wynikami analizy FFT na podstawie przebiegu składowej pionowej z. Sygnał ilustruje dynamiczną odpowiedź układu w zakresie pełnego pasma wzbudzanych częstotliwości (6–100 Hz). Na wykresie FFT składowej pionowej wyróżnić można wyraźne dwie dominujące częstotliwości wynoszące 21 i ok. 64 Hz. Tym częstotliwościom odpowiadają amplitudy FFT wynoszące 0,63 i 0,96 cm/s².

Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono odpowiednio odpowiedzi podłóg V2 i V3 w trzech ortogonalnych kierunkach wraz z wynikami analizy FFT przebiegów drgań składowej pionowej z. W przebiegu FFT składowej pionowej na rysunku 3 dominuje częstotliwość 28,7 Hz, której odpowiada amplituda drgań wynosząca 0,62 cm/s².

Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono odpowiednio odpowiedzi podłóg V2 i V3 w trzech ortogonalnych kierunkach wraz z wynikami analizy FFT przebiegów drgań składowej pionowej z. W przebiegu FFT składowej pionowej na rysunku 3 dominuje częstotliwość 28,7 Hz, której odpowiada amplituda drgań wynosząca 0,62 cm/s².

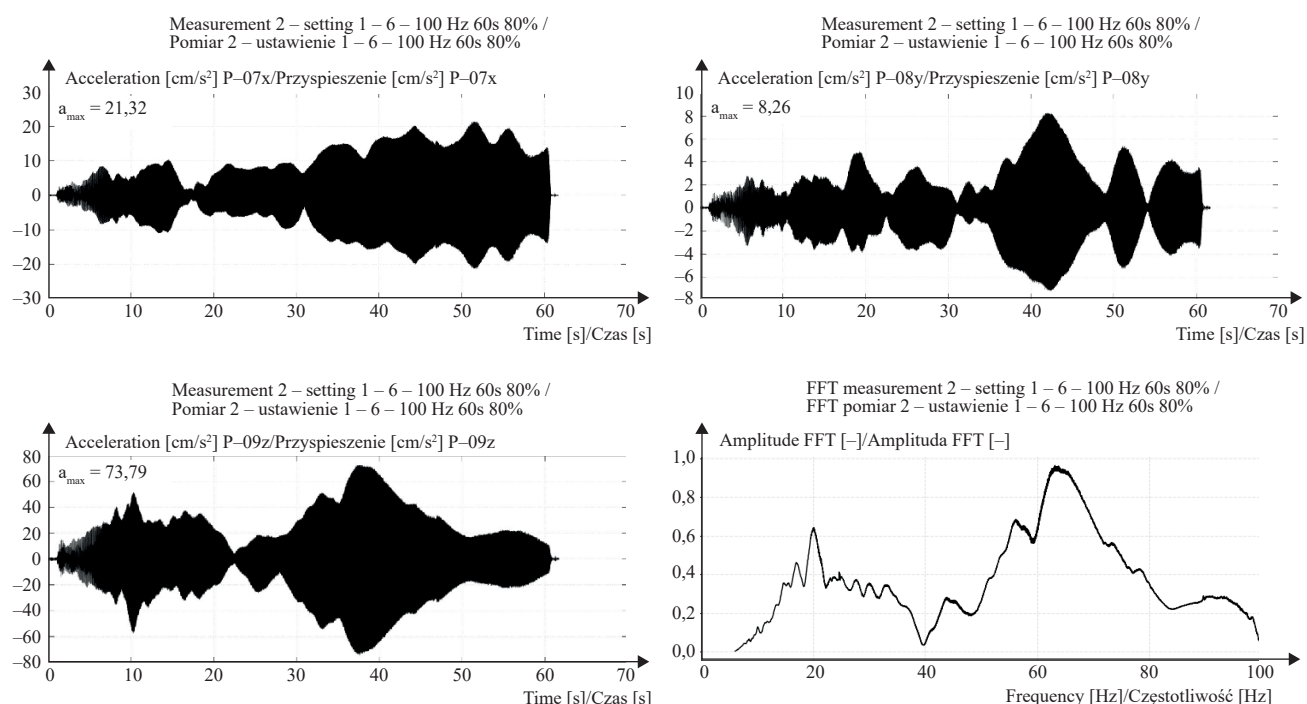


Fig. 2. Example time-history signals in the x, y, and z directions for the V1 (reference) floor, along with the results of an FFT analysis based on the vertical vibration component z

Rys. 2. Przykładowy przebieg czasowy w kierunkach x, y i z w przypadku podłogi referencyjnej (V1) wraz z wynikami analizy FFT na podstawie przebiegu drgań składowej pionowej z

In the FFT spectrum of the vertical component z shown in Figure 4, a frequency band with three dominant frequencies ranging from 21 to 29.3 Hz can be distinguished. Within this band, the frequency of 29.3 Hz is predominant, with a corresponding FFT amplitude of 0.52 cm/s². In addition, a higher

Na wykresie FFT składowej pionowej wg rysunku 4 wyróżnić można pasmo trzech dominujących częstotliwości wynoszące od 21 do 29,3 Hz. W tym paśmie dominuje częstotliwość 29,3, której odpowiada wartość FFT wynosząca 0,52 cm/s². Wyróżnić można także wyższą częstotliwość wy-

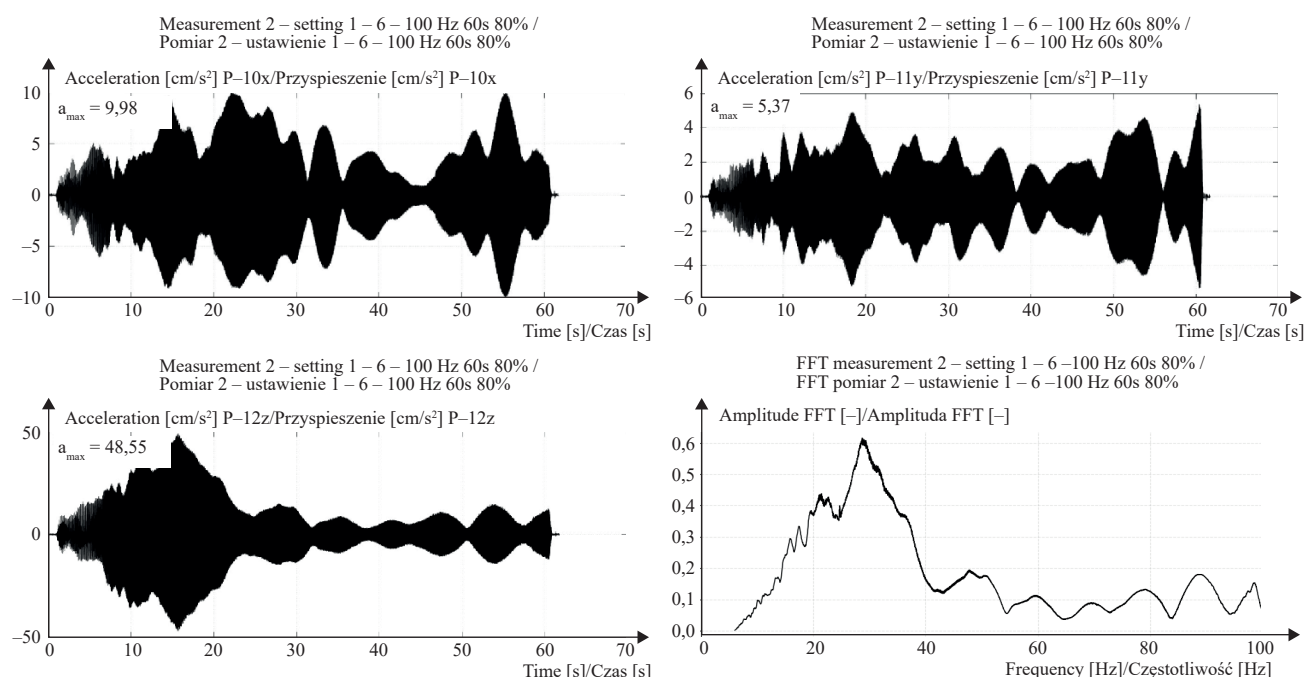


Fig. 3. Example time-history signals in the x, y, and z directions for the V2 floor with EPDM+SBR (50/50%), along with the results of an FFT analysis based on the vertical vibration component z

Rys. 3. Przykładowy przebieg czasowy w kierunkach x, y i z w przypadku podłogi V2 z EPDM+SBR (50/50%) wraz z wynikami analizy FFT na podstawie przebiegu drgań składowej pionowej z

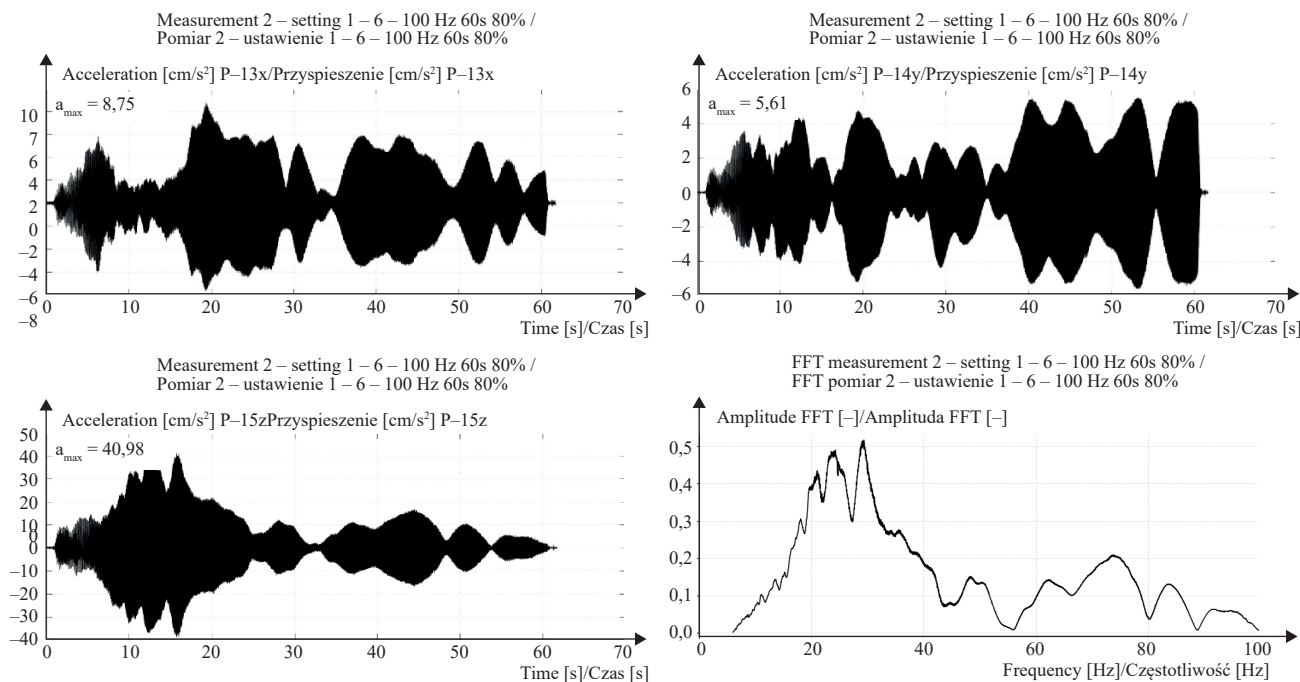


Fig. 4. Example time-history signals in the x, y, and z directions for the V3 floor with EPDM (50/50%), along with the results of an FFT analysis based on the vertical vibration component z

Rys. 4. Przykładowy przebieg czasowy w kierunkach x, y i z w przypadku podłogi V3 z EPDM wraz z wynikami analizy FFT na podstawie przebiegu drgań składowej pionowej z

frequency component of 73.7 Hz is visible in the FFT spectrum, with a corresponding vibration acceleration of 0.21 cm/s^2 .

A comparison of the FFT spectra derived from the vertical vibration components shown in Figures 2÷4 (floor variants V1, V2, and V3) indicate a clear reduction in the amplitudes of vertical vibration accelerations in variants V2 and V3 employing a vibrationisolating layer, compared with the reference floor V1.

For each slab, nine independent measurement series were conducted. The maximum acceleration values recorded in the x, y, and z directions are compiled in Table 3.

The performed measurements indicate the dominance of the vertical (Z) direction, which directly correlates with human perception of vibrations in buildings. The predominance of the vertical direction is illustrated by radar charts of mean and maximum vibration acceleration values presented in Figures 5 and 6.

The mean vibration acceleration values together with the dispersion of results for all three floor variants are shown in Figure 7. The application of a vibration-isolating layer in variants V2 and V3 resulted in a significant reduction of acceleration amplitudes compared with the reference floor V1. The reduction in mean values amounted to 41–52% in the x-direction, 13–15% in the y-direction, and 31–37% in the z-direction. Correspondingly, the maximum values were reduced by 50–59% in the x-direction, 26–35% in the y-direction, and 36–46% in the z-direction. The greatest isolation effect was achieved for vertical vibrations (z-direction), with variant V3 demonstrating the highest effectiveness.

Discussion of Results and Conclusions

The conducted investigations demonstrated that both floor variants, V2 and V3, significantly reduce dynamic effects compared with the reference floor, V1. In both cases, reductions in mean and maximum acceleration values were observed in all vibration directions (x, y, and z), with the highest isolation efficiency noted in the vertical direction (z). Variants V2 and V3 exhibit comparable levels of vibration damping, confirming the effectiveness of the applied vibrationisolating layer. The obtained re-

noszącą 73,7 Hz, której odpowiada wartość przyspieszenia drgań $0,21 \text{ cm/s}^2$. Porównanie wykresów FFT wykonanych na podstawie składowych pionowych drgań z rysunków 2÷4 (warianty podłogi V1, V2 i V3) wskazuje na zmniejszenie poziomu amplitud przyspieszeń drgań pionowych w wariantach V2 i V3 z zastosowaniem warstwy wibroizolacyjnej w stosunku do podłogi referencyjnej V1.

Podczas badań każdej z płyt wykonano dziewięć niezależnych serii pomiarowych. Wartości maksymalnego przyspieszenia w kierunkach x, y i z zestawiono w tabeli 3.

Przeprowadzone pomiary wskazują, że dominujący jest kierunek wertykalny (Z), który ma bezpośrednie przełożenie na odczuwalność drgań przez ludzi w budynkach. Dominację kierunku pionowego pokazano na wykresach radarowych wartości średnich i maksymalnych przyspieszeń drgań (rysunki 5 i 6).

Na rysunku 7 pokazano wartości średnie przyspieszeń drgań wraz z rozrzutem wyników w przypadku wszystkich trzech wariantów podłogi. Zastosowanie warstwy wibroizolacyjnej w wariantach V2 i V3 znacznie zmniejszyło amplitudę przyspieszeń w stosunku do podłogi referencyjnej V1. Redukcja średniej wartości wynosiła odpowiednio 41–52% w kierunku x, 15–13% w kierunku y oraz 31–37% w kierunku z, natomiast wartości maksymalne zostały zmniejszone o 50–59% w kierunku x, o 26–35% w kierunku y i o 36–46% w kierunku z. Najlepszy efekt izolacyjny uzyskano w przypadku drgań pionowych (z), a wariant V3 okazał się najskuteczniejszy.

Dyskusja wyników i wnioski

Przeprowadzone badania wykazały, że podłogi V2 i V3 znacznie redukują oddziaływania dynamiczne w stosunku do podłogi referencyjnej V1. W obu przypadkach odnotowano zmniejszenie średniej i maksymalnej wartości przyspieszenia we wszyst-

Table 3. Maximum acceleration values $[\text{cm/s}^2]$ in x, y, z directions for plates V1, V2 and V3

Tabela 3. Maksymalne wartości przyspieszeń $[\text{cm/s}^2]$ w kierunkach x, y, z w przypadku płyt podłogowych V1, V2 i V3

Direction/ Kierunek	Acceleration $[\text{cm/s}^2]$ /Przyspieszenie $[\text{cm/s}^2]$					
	V1 – mean/ V1 – średnia	V1 – max/ V1 – max	V2 – mean/ V2 – średnia	V2 – max/ V2 – max	V3 – mean/ V3 – średnia	V3 – max/ V3 – max
x	11.85	21.32	6.93	10.65	5.72	8.75
y	4.86	9.00	4.11	6.62	4.21	5.85
z	48.04	75.55	33.30	48.55	30.28	41.04

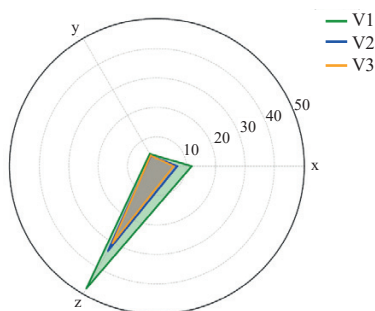


Fig. 5. Radar chart of mean vibration acceleration values $[\text{cm/s}^2]$ for three floor variants

Rys. 5. Wykres radarowy wartości średnich przyspieszeń drgań $[\text{cm/s}^2]$ w przypadku trzech wariantów płyty podłogowej

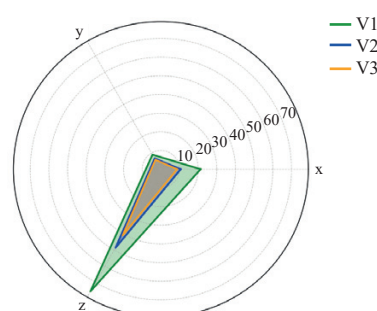


Fig. 6. Radar chart of maximum vibration acceleration values $[\text{cm/s}^2]$ for three floor variants

Rys. 6. Wykres radarowy wartości maksymalnych przyspieszeń drgań $[\text{cm/s}^2]$ w przypadku trzech wariantów płyty podłogowej

sults clearly indicate that the use of vibration-isolating floor systems markedly improves vibration comfort and can constitute an effective solution in engineering practice.

These findings are consistent with previous observations regarding the damping properties of concrete modified with rubber granulate. Skripkiūnas et al. [21] demonstrated that the addition of waste rubber leads to a reduction in the dynamic modulus of elasticity, accompanied by an increase in the damping ratio, thereby enhancing the ability to dissipate vibration energy. Similar conclusions were drawn by Abdel Aleem and Hassan [22], who analysed the application of rubbergranulate cement composites in flexural structural members and observed improved damping properties and a slowdown of wave propagation. In [23] highlighted the potential of composite materials as sustainable solutions that enhance dynamic comfort without a significant loss of stiffness.

The observed increase in isolation effectiveness in variants V2 and V3 can be attributed to changes in the physical parameters of the sublayer. The incorporation of rubber granulate reduces the density of the matrix (Table 2) and decreases the elastic modulus of the material, which is a natural consequence of the reduced compressive strength. These changes affect the modal characteristics of the entire floor system. This interpretation is consistent with literature reports [24, 25], which indicate a correlation between reduced sublayer stiffness and increased vibration-damping efficiency.

The investigations showed that, despite the reduction in compressive strength of mortars modified with rubber granulate (Table 2), these materials retained sufficient performance to function as sublayers in industrial floor systems, effectively transferring loads from the wearing slab.

Future research should focus on assessing the longterm durability of floor variants V2 and V3, with particular consideration of cyclic loading effects typical of transport traffic and the operation of industrial machinery. Analysis of material ageing processes – such as changes in elastic properties or structural degradation – will allow for the determination of the actual service life of vibrationisolating floors and their effectiveness over extended periods of operation. An important issue also concerns the influence of subsoil conditions, as dynamic properties of the ground–soil type, moisture content, degree of compaction, and dynamic compliance may significantly determine isolation efficiency. A further stage of research should involve the development of advanced numerical models based on the finite element method, enabling simulation of floor

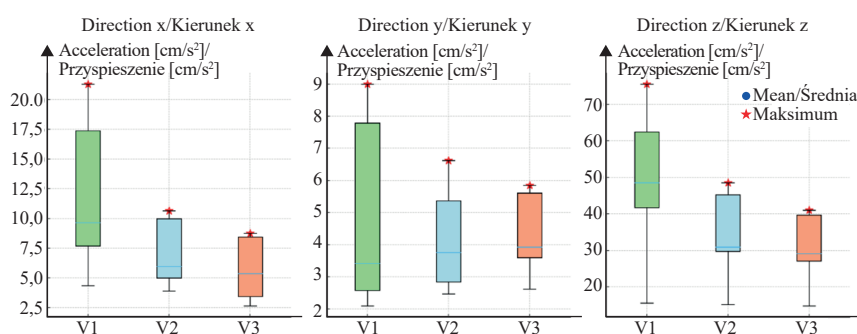


Fig. 7. Box-and-whisker plots of vibration acceleration value in the x, y, and z directions for floor variants V1–V3

Rys. 7. Wykres skrzynkowo-wąsowy wartości przyspieszenia drgań w kierunkach x, y, z w przypadku wariantów V1–V3

kich kierunkach drgań (x, y, z), przy czym największą skuteczność izolacyjną zaobserwowano w kierunku pionowym (z). Warianty V2 i V3 charakteryzują się zbliżonym poziomem tłumienia drgań, co potwierdza efektywność zastosowanej warstwy wibroizolacyjnej.

Uzyskane wyniki

jednoznacznie wskazują, że zastosowanie podłóg wibroizolacyjnych istotnie poprawia komfort vibracyjny i może być skutecznym rozwiązaniem w praktyce inżynierskiej. Wyniki te są zgodne z wcześniejszymi obserwacjami dotyczącymi właściwości tłumiących betonu z dodatkiem granulatu gumowego. Skripkiūnas i in. [21] wykazali, że dodatek odpadowej gumi powoduje spadek dynamicznego modułu sprężystości przy jednoczesnym zwiększeniu współczynnika tłumienia, co zwiększa zdolność do rozpraszania energii drgań. Podobne obserwacje poczynili AbdelAleem i Hassan [22], analizując zastosowanie kompozytów cementowych z granulatem gumowym w zginanych elementach konstrukcyjnych – zauważyli poprawę właściwości tłumiących oraz spowolnienie propagacji fal. W [23] podkreślono natomiast potencjał zastosowania materiałów kompozytowych jako zrównoważonego rozwiązania poprawiającego komfort dynamiczny bez istotnej utraty sztywności.

Zwiększenie skuteczności wibroizolacyjnej w wariantach V2 i V3 należy wiązać ze zmianą parametrów fizycznych warstwy podkładowej. Dodatek granulatu gumowego, zmniejszając gęstość matrycy (tabela 2) oraz moduł sprężystości materiału (co jest naturalną konsekwencją zmniejszenia wytrzymałości na ściskanie), wpłynął na zmianę charakterystyki modalnej całej podłogi. Jest to zgodne z literaturą [24, 25], wskazującą na korelację między zmniejszeniem sztywności warstwy podkładowej a efektywnością tłumienia drgań. Badania wykazały, że mimo zmniejszenia wytrzymałości na ściskanie zapraw z dodatkiem granulatu gumowego (tabela 2), materiały te zachowują parametry wystarczające do pełnienia funkcji warstwy podkładowej w podłogach przemysłowych, przenosząc obciążenia od płyty nawierzchniowej.

Dalsze prace badawcze powinny koncentrować się na ocenie długoterminowej trwałości podłóg V2 i V3, z uwzględnieniem oddziaływania obciążeń cyklicznych typowych dla ruchu transportowego i pracy maszyn przemysłowych. Analiza procesów starzenia materiałów, takich jak zmiana sprężystości czy degradacja strukturalna, pozwoli określić rzeczywistą żywotność podłóg wibroizolacyjnych oraz ich skuteczność w przypadku wieloletniej eksploatacji. Istotnym zagadnieniem jest wpływ warunków gruntowych, gdyż parametry dynamiczne podłoża (rodzaj gruntu, jego wilgotność, stopień zagęszczenia czy podatność dynamiczna) mogą istotnie determinować efektywność

behaviour under various loading and foundation conditions. Such models would facilitate design optimisation, reduce experimental testing costs, and provide predictive tools for engineering applications.

The research was carried out in accredited laboratories of the Department of Building Materials Engineering and the Structural Vibration Laboratory at Cracow University of Technology, as part of the NCBR-funded project POIR.01.01.01-00-1671/20 titled "Anti-vibration system for industrial floors."

Received: 29.10.2025

Revised: 09.12.2025

Published: 26.01.2026

izolacji. Kolejnym etapem powinno być opracowanie zaawansowanych modeli numerycznych, bazujących na metodzie elementów skończonych, które umożliwią symulację zachowania się podłóg w różnych warunkach obciążenia i posadowienia. Modele te pozwolą na optymalizację konstrukcji, ograniczenie kosztów badań eksperymentalnych oraz stworzenie narzędzia prognostycznego do zastosowań inżynierskich.

Badania przeprowadzono w akredytowanych laboratoriach Katedry Inżynierii Materiałów Budowlanych i Laboratorium Drganí Budowli Politechniki Krakowskiej w ramach realizacji projektu NCBR POIR.01.01.01-00-1671/20 „Antywibracyjny system podłóg przemysłowych”.

Artykuł wpłynął do redakcji: 29.10.2025 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 09.12.2025 r.

Opublikowano: 26.01.2026 r.

Literature

- [1] Hajduk P. *Projektowanie i ocena techniczna betonowych podłóg przemysłowych*, PWN, Warszawa, 2018.
- [2] Hajduk P. *Projektowanie podłóg przemysłowych*, PWN, Warszawa, 2013.
- [3] Concrete Society. *Technical Report No. 34: Concrete Industrial Ground Floors. A Guide to Design and Construction*, 3rd ed., 2003.
- [4] Czarnecki L. *Posadzki przemysłowe – temat stale aktualny*, Materiały Budowlane, 2008; 9(0).
- [5] Tejchman J, Małasiewicz A. *Posadzki przemysłowe*, Wydawnictwo PG, Gdańsk, 2006.
- [6] Krauss P, Paret T. Review of Properties of Concrete, 5th Ed., by A. M. Neville, 2014, Journal of Performance of Constructed Facilities, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000595](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000595)
- [7] Musiał M, Styś D. Industrial ground floors with steel rebars or/and fibres, Building Materials, 6 '2014 (no 502)
- [8] Wang X-Y, Lee H-S. Modeling of hydration kinetics in cement based materials considering the effects of curing temperature and applied pressure, Construction and Building Materials, Volume 28, Issue 1, 2012, Pages 1–13, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.037>.
- [9] Pigeon M. (1995). *Durability of Concrete in Cold Climates* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781482271447>.
- [10] Kuchárová D, Lajčáková G. Moving Load Effect on Concrete Slab, Procedia Engineering, Volume 190, 2017, Pages 326-333, ISSN 1877-7058, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.345>.
- [11] Ardian ARR. Handayani, D.; Marzuki, A. A Review: Vibration Caused by Transportation. Eng. Proc. 2025, 84, 42. <https://doi.org/10.3390/engproc2025084042>
- [12] Svinkin Mark R. "Soil and Structure Vibrations from Construction and Industrial Sources" (2008). International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering. 8.
- [13] Geß A. Lorenz, M.; Tolsdorf, A.; Albrecht, S. Environmental Impacts of Renewable Insulation Materials. Sustainability 2021, 13, 8505. <https://doi.org/10.3390/su13158505>
- [14] Gruszczyński M, Kowalska-Koczwara A, Tatara T. Investigation of Materials for Enhanced Vibrational Insulation in Ground Structures Using Concrete Mixtures: A Case Study of Rubber Aggregate Addition. Materials 2024, 17, 3092. <https://doi.org/10.3390/ma17133092>
- [15] Skripkiūnas G, Grinys A, Miškinis K. Damping Properties of Concrete with Rubber Waste Additives, 1320 MATERIALS SCIENCE (MEDŽIAGOTYRA). Vol. 15, No. 3. 2009,
- [16] Fayyaz Bashmal S, Nazir A, Khan S, Alofi A. Damping Optimization and Energy Absorption of Mechanical Metamaterials for Enhanced Vibration Control Applications: A Critical Review. Polymers 2025, 17, 237. <https://doi.org/10.3390/polym17020237>.
- [17] Abdelaleem A, Moawad M, El-Emam H, Salim H, Sallam HEM. Long term behavior of rubberized concrete under static and dynamic loads, Case Studies in Construction Materials, Volume 20, 2024, e03087, ISSN 2214-5095, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03087>.
- [18] Hisbani N, Shafiq N, Shams MA, Farhan SA, Zahid M. Properties of concrete containing crumb rubber as partial replacement of fine Aggregate—A review, Hybrid Advances, Volume 10, 2025, 100481, ISSN 2773-207X, <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2025.100481>.
- [19] PN-EN 206+A2:2021-08
- [20] Lehmann S, Leppla S, Norkus A. Experimental Study of the Modulus of Deformation Determined by Static and Dynamic Plate Load Tests, Baltic Journal of Road and Bridge Engineering 2020, 15(4), 109–124. DOI: 10.7250/bjrbe.2020-15.497.
- [21] Skripkiūnas G, Grinys A, Černius B. Deformation Properties of Concrete with Rubber Waste Additives ISSN 1392–1320 MATERIALS SCIENCE (MEDŽIAGOTYRA). Vol. 13, No. 3. 2007
- [22] Abdel Aleem BH, Hassan AAA. "Use of rubberized engineered cementitious composite in strengthening flexural concrete beams", Engineering Structures, vol. 262, 2022.
- [23] Ramírez-Vargas JR, Zamora-Castro SA, Herrera-May AL, Sandoval-Herazo LC, Salgado-Estrada R, Diaz-Vega ME. A Review of Sustainable Pavement Aggregates. Appl. Sci. 2024, 14, 7113. <https://doi.org/10.3390/app14167113>
- [24] Gruszczyński M, Kowalska-Koczwara A, Tatara T. Effect of Rubber Granulate Content on the Compressive Strength of Concrete for Industrial Vibration-Isolating Floors. Materials. 2025; 18(13):3134. <https://doi.org/10.3390/ma18133134>
- [25] Zajac M, Kuzniar K, Tatara T. Influence of load-bearing wall material properties on building mine-induced dynamic response. Scientific Reports 15, 29562 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-15518-3>