

Załącznik 3

Autoreferat

dr inż. Bernardeta Dębska, prof. PRz

Rzeszów 2021

Spis treści:

1. Imię i nazwisko.....	3
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.....	3
3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych.....	3
4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt 2 Ustawy.....	4
4.1. Przedmiot postępowania habilitacyjnego.....	4
4.2. Wprowadzenie.....	7
4.3. Substraty wykorzystywane podczas opracowywania innowacyjnych materiałów budowlanych [C1–C5]. Ocena budowy strukturalnej kompozytu – rola zmiennych towarzyszących [C5].....	12
4.3.1. Spoiwo żywiczne.....	12
4.3.2. Utwardzacze.....	13
4.3.3. Kruszywo.....	15
4.4. Otrzymywanie nowych materiałów budowlanych - dobór metod planowania doświadczenia [C1–C3].....	20
4.5. Monitorowanie i prognozowanie właściwości nowych materiałów - tworzenie, gromadzenie i pielęgnowanie baz danych laboratoryjnych [C2, C3]. Pozyskiwanie wiedzy z baz danych [C6].....	25
4.6. Jednoczesna optymalizacja kilku wybranych właściwości kompozytów [C7].....	32
4.7. Dostosowanie dostępnych procedur i sprzętu badawczego do specyfiki otrzymanego nowego lub modyfikowanego materiału [C8, C9].....	35
4.8. Nowe kompozyty żywiczne – sposób otrzymywania, właściwości, obszary zastosowań.....	39
4.9. Kontynuacja badań - projekt MINIATURA 5.....	43
4.10. Podsumowanie.....	44
5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej, w szczególności zagranicznej.....	45
6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę.....	46
7. Inne informacje niewymienione w pkt. 1–6.....	48
8. Sumaryczne zestawienie osiągnięć naukowych wykazanych w poszczególnych punktach Wykazu osiągnięć naukowych (Załącznik 4)	51

1. Imię i nazwisko.

Bernardeta Teresa Dębska

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

23.09.2013 Uzyskanie stopnia **doktora** nauk technicznych w zakresie dyscypliny: Budownictwo, specjalność: materiały budowlane
Uchwała Rady Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Rzeszowskiej
Tytuł rozprawy doktorskiej: *Modyfikacja zapraw żywiczych glikolizatami pozyskiwanymi z materiałów odpadowych*
Promotor: prof. dr hab. inż. Lech Lichołai (Politechnika Rzeszowska)
Recenzenci: prof. dr hab. inż. Lech Czarnecki (ITB)
prof. dr hab. inż. Grzegorz Prokopski (Politechnika Rzeszowska)

14.05.2008 Uzyskanie tytułu **inżyniera** na kierunku: Inżynieria materiałowa i specjalności: inżynieria materiałów organicznych na Wydziale Chemicznym Politechniki Rzeszowskiej
Tytuł pracy inżynierskiej: *Otrzymywanie i właściwości zapraw polimerowych na podstawie nienasyconych żywic poliestrowych i epoksydowych modyfikowanych recyklatem poli(tereftalanu etylenowego)*
Promotor: dr Anna Żmihorska-Gotfryd (Politechnika Rzeszowska)

27.06.2005 Uzyskanie tytułu **magistra inżyniera** na kierunku: Budownictwo i specjalności: Konstrukcje budowlane i inżynierskie na Wydziale Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Rzeszowskiej
Tytuł pracy magisterskiej: *Analiza cech chemicznych materiałów budowlanych na wybranych przykładach*
Promotor: prof. dr hab. inż. Lech Lichołai (Politechnika Rzeszowska)

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

01.03.2021 – obecnie – **profesor uczelni** w grupie pracowników badawczo-dydaktycznych, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury, Katedra Budownictwa Ogólnego

01.02.2019 – 28.02.2021 – **adiunkt** w grupie pracowników badawczo-dydaktycznych, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury, Katedra Budownictwa Ogólnego

15.09.2005 – 31.01.2019 – **asystent** w grupie pracowników naukowo-dydaktycznych, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury, Zakład Budownictwa Ogólnego

4. **Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.).** Omówienie to winno dotyczyć merytorycznego ujęcia przedmiotowych osiągnięć, jak i w sposób precyzyjny określać indywidualny wkład w ich powstanie, w przypadku, gdy dane osiągnięcie jest dziełem współautorskim, z uwzględnieniem możliwości wskazywania dorobku z okresu całej kariery zawodowej.

4.1. Przedmiot postępowania habilitacyjnego

Przedmiotem złożonego przeze mnie po raz pierwszy wniosku jest osiągnięcie pt.:

Kształtowanie struktury kompozytów żywicznych modyfikowanych odpadami z wykorzystaniem nowoczesnych metod planowania eksperymentu oraz zasad „dobrej praktyki laboratoryjnej”.

Na osiągnięcie składa się **cykl 9 powiązanych tematycznie artykułów naukowych** (oznaczonych jako pozycje **C1–C9**). Istotnym uzupełnieniem cyklu jest rozdział opublikowany w monografii naukowej: *Modification of Polymer Composites by Polyethylene Terephthalate Waste [w:] Poly(Ethylene Terephthalate) Based Blends, Composites and Nanocomposites [M1]*, która została wydana w 2015 roku przez wydawnictwo Elsevier.

W autoreferacie skupiłam się na poniżej wymienionych 9 publikacjach:

C1. Dębska B., Lichołai L., The effect of the type of curing agent on selected properties of epoxy mortar modified with PET glycolisate, **2016**, *CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS*, t.124, s.11–19, ISBN/ISSN: 0950-0618
40 pkt. wg punktacji MNiSW w 2016 r., IF (w 2016 r.): 3,169, IF (aktualny): 6,141

C2. Dębska B., Lichołai L., Resin composites with high chemical resistance for application in civil engineering, **2016**, *PERIODICA POLYTECHNICA-CIVIL ENGINEERING*, t.60, z.2, s.281–287, ISBN/ISSN: 0553-6626
15 pkt. wg punktacji MNiSW w 2016 r., IF (w 2016 r.): 0,636, IF (aktualny): 1,361

C3. Dębska B., Lichołai L., Long-Term Chemical Resistance of Ecological Epoxy Polymer Composites, **2018**, *JOURNAL OF ECOLOGICAL ENGINEERING*, t.19, z.2, s.204–212, ISBN/ISSN: 2299-8993
12 pkt. wg punktacji MNiSW w 2018 r.

C4. Dębska B., Lichołai L., Miąsik P., Assessment of the Applicability of Sustainable Epoxy Composites Containing Waste Rubber Aggregates in Buildings, **2019**, *BUILDINGS*, t.9, z.2, s.1–16, ISBN/ISSN: 2075-5309
70 pkt. wg punktacji MNiSW w 2019 r., IF (w 2019 r.): brak, IF (aktualny): 2,648

C5. Dębska B., Lichołai L., Brigolini Silva G.J., Effects of waste glass as aggregate on the properties of resin composites, **2020**, *CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS*, t.258, s.1–11, ISBN/ISSN: 0950-0618
140 pkt. wg punktacji MNiSW w 2020 r., IF (w 2020 r.): 6,141, IF (aktualny): 6,141

C6. Dębska B., Dębska B.J., Lichołai L., Evaluation of the Utility of Using Classification Algorithms when Designing New Polymer Composites, **2019**, *JOURNAL OF ECOLOGICAL ENGINEERING*, t.20, z.8, s.212–225, ISBN/ISSN: 2299-8993

40 pkt. wg punktacji MNiSW w 2019 r.

C7. Dębska B.J., Dobrowolski L., **Dębska B.**, Experiment designing methods in innovative polymer material planning, **2018**, *JOURNAL OF APPLIED POLYMER SCIENCE*, t.135, z.46, s.1–10, ISBN/ISSN: 0021-8995

25 pkt. wg punktacji MNiSW w 2018 r., IF (w 2018 r.): 1,901, IF (aktualny): 3,125

C8. Dębska B., Lichołai L., Brigolini Silva G.J., Caetano M., Assessment of the Mechanical Parameters of Resin Composites with the Addition of Various Types of Fibres, **2020**, *MATERIALS*, t.1378, z.13(6), s.1–20, ISBN/ISSN: 1996-1944

140 pkt. wg punktacji MNiSW w 2020 r., IF (w 2020 r.): 3,623, IF (aktualny): 3,623

C9. Dębska B., Brigolini Silva G.J., Mechanical Properties and Microstructure of Epoxy Mortars Made with Polyethylene and Poly(Ethylene Terephthalate) Waste, **2021**, *MATERIALS*, 14(9), 2203, s.1–18, ISBN/ISSN: 1996-1944

140 pkt. wg punktacji MNiSW w 2020 r., IF (w 2020 r.): 3,623, IF (aktualny): 3,623

Wszystkie dziewięć publikacji [C1–C9] łączy **wspólny obiekt badań**, którym są **kompozyty żywiczne**. Podstawowy skład tych kompozytów, to: żywica syntetyczna, utwardzacz i kruszywo. Dodatkowo można stosować różnego typu modyfikatory, które powinny korzystnie wpływać na wybrane właściwości kompozytu. Wprowadzenie materiału odpadowego jako modyfikatora w postaci zamiennika spoiwa lub kruszywa ma uzasadnienie zarówno ekologiczne, jak i ekonomiczne, szczególnie w przypadku substytucji żywicy, która stanowi najdroższy składnik zaprawy. Dobór i odpowiednie połączenie tych substratów ma decydujący wpływ na unikalne właściwości gotowego produktu, m.in. bardzo wysoką wytrzymałość mechaniczną, świetną przyczepność do wielu innych materiałów, niską nasiąkliwość, czy doskonałą odporność chemiczną, co przekłada się na specyficzne możliwości aplikacyjne (Rys. 1).



Rys. 1. Kompozyt żywiczny jako obiekt badań (opracowanie własne)

We wszystkich publikacjach włączonych do omawianego cyklu, spoiwo stanowiła żywica epoksydowa. Dodatkowo dla porównania, w artykule [C6] omówiłam

również przypadek zastosowania żywicy poliestrowej. Analiza wyników badań zapraw utwardzanych z wykorzystaniem różnych utwardzaczy aminowych [C1] stała się podstawą do wyboru utwardzacza Z-1, jako środka sieciującego w kompozytach omawianych w publikacjach [C1–C9]. Kruszywo bazowe we wszystkich przypadkach stanowił normowy piasek kwarcowy.

Wybór **modyfikatorów** kompozytów żywicznych w postaci konkretnych materiałów odpadowych wynikał ze szczegółowych analiz statystyk, raportów, dokumentów prawnych i urzędowych, dotyczących odpadów. Na tej podstawie, jak również w oparciu o wiedzę z zakresu właściwości i możliwości aplikacyjnych projektowanych kompozytów, wśród stosowanych modyfikatorów znalazły się szczególnie trudne w utylizacji odpady, takie jak:

➤ **tworzywa sztuczne – poli(tereftalan etylenu) (PET) [C1–C3, C6, C9], polietylen (PE) [C9].**

Zanieczyszczenie atmosfery i oceanów ogromną ilością odpadów tworzyw sztucznych stało się problemem globalnym. Skalę tego zjawiska dobrze obrazuje fakt, że miliardy plastikowych przedmiotów utworzyły na Pacyfiku sztuczną wyspę. Tworzywa sztuczne nie rozkładają się na substancje naturalne, a poddane długotrwałemu działaniu wody morskiej i słońca ulegają rozpadowi na mikroskopijne fragmenty zwiększając swoją toksyczność. Wśród plastikowych odpadów wytwarzanych na świecie największy udział mają poliolefiny (polietylen (PE) i polipropylen (PP)) oraz poli(tereftalan etylenu) (PET). Znaczna ilość tych odpadów to materiały opakowaniowe m.in. torby i worki z PE, czy butelki i opakowania PET, które są bardzo trudne w utylizacji, a na wysypiskach z racji swej popularności zajmują ogromne objętości. Prowadzenie badań związanych z możliwością zagospodarowania odpadów tworzyw sztucznych ma w tym kontekście ogromne znaczenie. Wyniki badań uwzględniających ponowne użycie tych odpadów do otrzymywania kompozytów żywicznych zawarłam w publikacjach [C1–C3, C6, C9].

➤ **Guma** pochodząca z odpadowych opon samochodowych [C4].

Ze względu na dynamiczny rozwój motoryzacji oraz poprawę komfortu życia lawinowo wzrasta zakup samochodów, przez co problemem globalnym stał się nadmiar odpadów opon. Odpadowa guma z opon nie ulega biodegradacji, a usieciowana struktura i różnego typu dodatki stosowane w procesie produkcyjnym sprawiają, że naturalny rozkład jest bardzo długi, rzędu setek lat. Stosowane sposoby unieszkodliwiania odpadów opon, takie jak spalanie, czy składowanie, powodują powstawanie szkodliwych gazów, a także poważne zanieczyszczenia gleby, wody i atmosfery. Dlatego istnieje potrzeba poszukiwania alternatywnych sposobów recyklingu np. przez ich ponowne wykorzystanie w kompozytach żywicznych [C4].

➤ **Szkło** [C5].

Szkło ze względu na skład i budowę nie stanowi dla środowiska zagrożenia, jedynie obciążenie, gdyż nie ulega rozpadowi i w znacznych ilościach może zalegać na składowiskach. Szkło odpadowe może stać się jednak wartościowym surowcem. Ponowne użycie szkła przez przemysł opakowań szklanych daje możliwość zaoszczędzenia energii i zasobów naturalnych, a tym samym pozwala na zmniejszenie śladu środowiskowego. Opisany w publikacji [C5] sposób wykorzystania odpadów szklanych do otrzymywania zapraw może być także odpowiedzią na problem związany z kurczeniem się zasobów kruszyw naturalnych, które są jednymi z najczęściej stosowanych surowców

w budownictwie. W ten sposób realizowana jest w praktyce idea gospodarki o obiegu zamkniętym.

W kontekście przedstawionego do oceny osiągnięcia naukowego pt. **Kształtowanie struktury kompozytów żywicznych modyfikowanych odpadami z wykorzystaniem nowoczesnych metod planowania eksperymentu oraz zasad „dobrej praktyki laboratoryjnej”** jakim jest cykl publikacji [C1–C9], do głównych efektów naukowych prowadzonych przeze mnie badań, które stanowią istotny wkład w rozwój dyscypliny inżynieria lądowa i transport można zaliczyć:

- Opracowanie metodologii kształtowania struktury kompozytów żywicznych z wykorzystaniem zjawisk fizykochemicznych zachodzących w czasie procesów formowania i utwardzania.
- Opracowanie podstaw technologii wytwarzania i sposobu doboru składu kompozytów żywicznych zawierających materiały odpadowe, w kontekście możliwości aplikacyjnych tego typu materiałów.
- Poszerzenie i pogłębienie wiedzy o budowie morfologicznej i właściwościach kompozytów żywicznych modyfikowanych materiałami odpadowymi z uwzględnieniem aspektów surowcowych (materiałowych), ekologicznych i ekonomicznych.
- Zbadanie i potwierdzenie możliwości adaptacji metod statystycznych do kształtowania struktury kompozytów żywicznych, a także gromadzenia i analizy danych eksperymentalnych w taki sposób, że uzyskane wyniki można będzie wykorzystać do prognozowania składu kompozytów o podobnych właściwościach jak wcześniej przebadane.

4.2. Wprowadzenie

Przedmiotem mojej działalności naukowej są innowacyjne materiały budowlane. Proces ich otrzymywania jest złożony i wymaga asocjacji (kojarzenia) wiedzy z różnych dziedzin. Jest też czasochłonny, a także wiąże się z koniecznością ponoszenia znacznych kosztów.

Rozwój inżynierii materiałowej i promocja nowoczesnych rozwiązań w budownictwie daje wielką nadzieję na rozwój tej dziedziny. Głównym jej założeniem jest przetwarzanie i maksymalne wykorzystanie tego, co już wcześniej udało się stworzyć. Recykling starych materiałów budowlanych i tworzenie z nich nowych, o doskonałych parametrach, to tylko jeden z przykładów. W 2020 roku opublikowano raport Autodesk *„Budownictwo. Innowacje. Wizja liderów branży 2025”*. Wynika z niego, że jednym z kluczowych trendów determinujących budownictwo przyszłości są kwestie związane z ekologią i to nie tylko w kontekście podnoszenia efektywności energetycznej budynków, czy stosowania odnawialnych źródeł energii. Ekologiczne budownictwo przyszłości ma zredukować liczbę odpadów oraz minimalizować zużycie energii związane z produkcją i transportem materiałów budowlanych. Pojęcie „budownictwo zrównoważone” oznacza działalność człowieka związaną z projektowaniem i wznoszeniem obiektów, która powinna odbywać się na równi z dbałością o środowisko naturalne oraz oszczędnym gospodarowaniem surowcami na wszystkich etapach cyklu życia budynku. Należy minimalizować powstawanie odpadów, a jeśli już się pojawią warto traktować je jako surowce wtórne. Takie podejście wpisuje się także w założenia ważnej obecnie koncepcji gospodarczej, jaką jest gospodarka o obiegu zamkniętym (circular economy).

Dodatkowym elementem dołączonym do procesu projektowania innowacyjnych materiałów budowlanych będzie badanie możliwości recyklingu odpadów i ponownego wytworzenia kompozytu o równie dobrych właściwościach. Pozwoli to na wprowadzenie w budownictwie obiegu zamkniętego (LCA – Life Cycle Assessment), który jest procesem oceny efektów, jaki dany wyrób (materiał) wywiera na środowisko podczas całego życia, poprzez wzrost efektywnego zużycia zasobów i zmniejszenie obciążeń środowiska, a jednocześnie umożliwi częściowe rozwiązanie problemu coraz częściej definiowanych niedoborów zasobów naturalnych i wprowadzenia w ich miejsce odpadów. Powszechny konsumpcjonizm powoduje, że dziś oraz w najbliższej przyszłości należy uporać się ze wszechobecnymi odpadami. Kondycja świata w ciągu ostatnich kilku dekad uległa głębokiej przemianie. Podział środowiska na naturalne i przekształcone zaczyna wykazywać galopujące zmniejszanie się rezerw tego pierwszego i dojmująco uciążliwy rozrost drugiego. Eksploatacja naturalnych zasobów przekroczyła wydolność w skali globalnej na tyle, że nie ma już wątpliwości co do perspektywy ich bliskiego i nieuchronnego wyczerpania. Poszukiwanie nowych źródeł i redukcja zapotrzebowania stają się głównymi wytycznymi przemodelowania większości dziedzin życia człowieka. Jednym ze sposobów osiągnięcia nowych jakości, przy jednoczesnym zahamowaniu destrukcyjnych konsekwencji, jest wdrożenie szerokich działań dla ponownego, najlepiej wielokrotnego użycia materiałów odpadowych. Zaczyna brakować tradycyjnych surowców, np. piasku, jednocześnie następuje stały wzrost kosztów ich wydobycia, przetwarzania, transportu i dystrybucji. Jednym z warunków powodzenia może być zwrot myślenia – od globalnego, ku lokalnemu – szersze wykorzystanie materiałów lokalnych, zagospodarowanie odpadów. Podstawową czynnością powinno być mądre dysponowanie surowcami naturalnymi i stosowanie rozwiązań maksymalnie przyjaznych dla środowiska. Jest to szczególnie ważne, gdyż wiadomo, że uzależnienie świata od plastiku wciąż rośnie. Badacze szacują, że łączna ilość odpadów plastikowych na świecie może osiągnąć ponad 25 mld ton do 2050 r.

Podejmując badania, których rezultaty są przedmiotem niniejszego wniosku habilitacyjnego, posiadałam wiedzę bazową pozyskaną zarówno w czasie studiów na kierunku budownictwo i na kierunku inżynieria materiałowa, jak również dzięki doświadczeniu zdobytemu podczas realizacji pracy doktorskiej. Aby móc właściwie korzystać z metod i technik statystycznych wzięłam również czynny udział w licznych kursach, szkoleniach i konferencjach organizowanych przez firmę StatSoft, których celem było zapoznanie pracowników naukowych uczelni z metodami statystycznymi stosowanymi podczas realizacji badań oraz ze sposobem oceny i interpretacji uzyskanych wyników. Takie podejście okazało się szczególnie ważne, gdyż pełna realizacja celów badawczych i rzetelna ocena uzyskanych wyników jest możliwa jedynie dzięki poprawnie zaplanowanym i właściwie przeprowadzonym badaniom. Równie istotna okazała się nabyta przeze mnie umiejętność doboru właściwych metod numerycznej analizy danych zebranych podczas przeprowadzanych eksperymentów laboratoryjnych. Dzięki skojarzeniowej reprezentacji danych eksperymentalnych jesteśmy w stanie wykorzystywać różnorodną wiedzę, a następnie ją uogólniać, przenosić na nowe obiekty badawcze, a dzięki temu weryfikować i szukać optymalnych rozwiązań.

Planując i realizując doświadczenia założyłam, że istotnym ich celem będzie opracowanie takich procedur (algorytmów postępowania) prowadzenia badań naukowych, które mogą być rekomendowane dla procesów poszukiwania innowacyjnych materiałów budowlanych i które są zgodne z „zasadą dobrej praktyki laboratoryjnej” (GLP - Good Laboratory Practice). Analiza dostępnej literatury

wskazuje, że pojęcie „dobrych praktyk laboratoryjnych” związane jest głównie z badaniami prowadzonymi w dziedzinie chemii, a w szczególności wymagane podczas opracowywania nowych leków, kosmetyków, produktów biobójczych itp. Z założenia, „dobre praktyki laboratoryjne” obejmują różne zasady mające zapewnić i wspierać spójność, bezpieczeństwo, niezawodność, jakość i integralność chemikaliów podczas nieklinicznych badań laboratoryjnych. Sądzę jednak, że „dobre praktyki laboratoryjne” nie muszą ograniczać się jedynie do substancji chemicznych, ale powinny objąć także proces projektowania wielu innych produktów czy materiałów. Utrzymanie jakości, ale też bezpieczeństwa, zawsze powinno być priorytetem każdego laboratorium badawczego, dlatego istnieje potrzeba przygotowania standardowych procedur roboczych stosowanych w laboratorium, obejmujących narzędzia i metodologię, które promują opracowywanie wysokiej jakości danych testowych i zapewniają właściwe podejście do zarządzania pracami laboratoryjnymi. Obejmują one proces planowania i prowadzenia badań, a także raportowanie i archiwizowanie wyników badań. Osoba prowadząca badania naukowe powinna mieć świadomość, że jej praca podlega pewnym rygorom, a wśród nich jednym z najważniejszych jest ścisłość rozumiana jako dokładność, szczegółowość, rzetelność, skrupulatność i precyzja. Budowanie wiarygodnego rozumowania w oparciu o uzyskane wyniki zawsze powinno wiązać się ze wcześniejszym sprawdzeniem jednorodności zbioru danych eksperymentalnych, możliwości wystąpienia błędów, a także usunięcia zakłóconych wyników pomiarów. Uzyskane w laboratorium dane powinny zostać maksymalnie wykorzystane w celu wyodrębnienia z nich użytecznej informacji naukowej. Celowym jest więc archiwizowanie danych w taki sposób, aby mogły być ponownie wykorzystane np. przez zastosowanie metod należących do grupy „data mining”. Konwersja tych danych na wiedzę naukową powinna odbywać się z wykorzystaniem uniwersalnych narzędzi obliczeniowych. W obecnych czasach w tym względzie najbliższe ideału wydają się metody statystyczne i służące do ich praktycznej implementacji oprogramowanie komputerowe. Jednocześnie warunkiem wydobywania prawdy naukowej z przeprowadzonych badań i analiz jest dbałość o to, aby zyskana w wyniku eksperymentu statystyczna informacja cechowała się pełną reprezentatywnością. Badania powinny być planowane, prowadzone i opisane w taki sposób, aby inne laboratoria mogły szczegółowo odtworzyć drogę uzyskania rozważanego wyniku naukowego, który mógłby być potwierdzony (lub nie) w doświadczeniach kontrolnych. Dzięki dobrym praktykom laboratoryjnym możliwe byłoby porównanie wyników otrzymanych w jednym laboratorium z wynikami uzyskanymi w innych laboratoriach.

Moim zamysłem było rozszerzenie zasad dobrej praktyki laboratoryjnej na badania w dziedzinie otrzymywania nowych materiałów budowlanych. W związku z tym należało się uporać z następującymi tematami:

I. Określenie w oparciu o jakie substraty będą opracowywane innowacyjne materiały budowlane.

W tym zakresie w badaniach własnych założyłam, że będą to kompozyty żywiczne, które cechują unikalne właściwości, a jednocześnie materiały, które mogą wpisywać się w założenia zrównoważonego rozwoju, recykling, aspekt środowiskowy, umożliwienie zagospodarowania różnego rodzaju odpadów przemysłowych. Taki wybór spowodowany był przez fakt, iż budownictwo przyszłości determinują takie ważne czynniki, jak ekologia oraz rozwój nowoczesnych technik materiałowych. Wiąże się to z jednej strony z intensyfikacją prac badawczo rozwojowych, a z drugiej strony z optymalizacją, poprzez redukcję ilości odpadów i zużycia energii powiązanego z produkcją i transportem materiałów budowlanych. Poszanowanie dla środowiska, na równi

z funkcjonalnością stanowi obecnie wspólny mianownik zmian zachodzących w obszarze inżynierii materiałów budowlanych. Możliwość recyklingu i ponownego wytworzenia produktu o równie dobrych parametrach jest dodatkowym, pożądanym elementem innowacyjności materiałów budowlanych, wychodzącym poza ich właściwości techniczne. Wypracowanie w sektorze budownictwa obiegu zamkniętego może w znacznym stopniu przyczynić się do rozwiązania problemu globalnych niedoborów zasobów naturalnych oraz redukcji ogromnej ilości wytwarzanych przez człowieka odpadów, które zatrują środowisko.

II. Ocena budowy strukturalnej kompozytu - rozpatrzenie możliwości wystąpienia i roli zmiennych towarzyszących.

Zmienna towarzysząca to zmienna zawierająca informację o przebiegu doświadczenia w konkretnych warunkach lub o strukturze analizowanej populacji. Bezpośrednio zmienna ta nie jest przedmiotem badania, lecz może w sposób istotny wpływać na otrzymane wyniki analiz statystycznych.

W prowadzonych badaniach uwzględniłam metody poszukiwania dodatkowych źródeł zmienności w doświadczeniu poprzez analizę zmiennych towarzyszących, których identyfikację umożliwiły m.in. metody dyfrakcji rentgenowskiej i elektronowej mikroskopii skaningowej. Z ich pomocą dokonałam oceny, czy modyfikator wbudowuje się chemicznie w strukturę kompozytu, czy składniki łączą się tylko na zasadzie mieszania. Istotne znaczenie zyskuje w tym kontekście budowa bazy danych typu LIMS (Laboratory Information Management System). Pamiętane są tutaj nie tylko dane uzyskane z eksperymentu, ale także opis przeprowadzenia samego doświadczenia, który może być źródłem pozyskania dodatkowych informacji (danych towarzyszących). Dane te mogą być wykorzystane nie tylko do wyjaśnienia dodatkowych wzajemnych relacji występujących pomiędzy obiektami podczas całościowej analizy wszystkich danych, ale także mogą wykluczać pochopnie wyciągnięte wnioski.

III. Otrzymywanie nowych materiałów budowlanych - dobór metod planowania doświadczenia, przeprowadzenie oceny skuteczności dostępnych metod statystycznych na etapie planowania eksperymentu, dobór właściwego planu doświadczenia.

Założyłam, że celem badań będzie z jednej strony minimalizacja kosztów procesu badawczego, przy jednoczesnym pełnym wykorzystaniu możliwości oceny właściwości otrzymywanych kompozytów i obszarów ich zastosowań oraz wyciągnięcie z otrzymanych wyników jak największej liczby wniosków wartościowych naukowo.

Planowanie doświadczeń odbywać się będzie metodą *in silico*. W nauce przyjęto tak nazywać czynności lub badania wykonane na komputerze lub za pomocą symulacji komputerowej. Modelowanie, a w szczególności metoda *in silico*, są preferowane przez naukowców jako nowy sposób prowadzenia badań, gdyż pozwalają projektować procesy, przyspieszać tempo odkryć, a jednocześnie zmniejszyć zarówno koszty prowadzonych prac laboratoryjnych jak i pozyskiwać wiedzę z baz danych. Dopiero najlepsze wyniki uzyskane metodą *in silico* są weryfikowane eksperymentalnie.

Zaproponowałam, aby metody statystyczne były wykorzystywane zarówno na etapie wykonania badań, jak i analizy wyników badań.

Zarekomendowałam wykorzystanie metody DOE (Design of Experiment – Planowanie eksperymentu), do komputerowego wspomaganie planowania i analizy statystycznych wyników badań laboratoryjnych nad innowacyjnymi materiałami budowlanymi. W badaniach korzystałam zarówno z podstawowych (fundamentalnych) etapów, takich, jak: wybór hipotezy badawczej, identyfikacja celu badań i czynników mających wpływ na jego przebieg, wybór typu planu eksperymentu, randomizacja danych wejściowych, jak i bardziej zaawansowanych (szczegółowych) metod analizy wyników, np. dobór modelu regresyjnego, analiza wariancji ANOVA, optymalizacja. Takie podejście (metoda *in silico*) umożliwia minimalizację kosztów i maksymalizację efektów informacyjnych w badaniach innowacyjnych. Zwróciłam szczególną uwagę na praktyczne aspekty wykorzystania metod DOE.

IV. Prognozowanie właściwości nowych materiałów - tworzenie, gromadzenie i pielęgnowanie baz danych laboratoryjnych, które mogą stanowić podstawę (źródło danych) do przeprowadzenia szerokiego zakresu analiz. Pozyskiwanie wiedzy z baz danych.

Wykazałam zasadność tworzenia baz danych gromadzących wyniki z przeprowadzonych eksperymentów, celem wykorzystania ich przez wybrane techniki eksploracji danych. W przedstawionych publikacjach znajduje się zarówno opis procesu monitorowania zmieniających się właściwości otrzymanych kompozytów w dłuższym okresie czasu (5 lat) i oceny poprawności otrzymanego modelu, a także wykorzystanie innych metod drążenia danych, które można stosować w procesie klasyfikacji próbek i prognozowania właściwości nowych materiałów.

V. Poszukiwanie sposobów przebudowy, dostosowania dostępnych procedur i sprzętu badawczego do specyfiki otrzymanego nowego lub modyfikowanego materiału.

Analizując uzyskane wyniki badań, starałam się znaleźć wytłumaczenie jak na otrzymane zaprawy epoksydowe działa dodatek modyfikatora. Poprawę wybranych właściwości, np. wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu, uzależniałam od struktury fizycznej i chemicznej składników zastosowanych w procesie produkcji zapraw. Identyfikacja wpływu zmian struktury na właściwości mechaniczne badanych kompozytów, jest możliwa poprzez zastosowanie metod jakimi dysponuje obecnie inżynieria materiałowa, w tym metod badawczych związanych z zagadnieniami mechaniki pękania. Powiązanie analityczne parametrów wytrzymałościowych ze strukturą, określaną liczbą i jednostką miary stanowi wyzwanie w badaniach modyfikowanych zapraw żywicznych i może przynieść znaczące rezultaty. Dokonałam adaptacji do założonego celu badań, metod badawczych parametrów kruchej pęknięcia kompozytów które charakteryzowały się kruchą matrycą.

Poniżej przedstawiam rozwinięcie wypracowanych przeze mnie metod dobrych praktyk laboratoryjnych w nawiązaniu do poszczególnych artykułów stanowiących cykl dziewięciu powiązanych tematycznie publikacji [C1–C9], które stanowią spójną całość i pokazują jak rozwijał się obszar prowadzonych przeze mnie badań.

4.3. Substraty wykorzystywane podczas opracowywania innowacyjnych materiałów budowlanych [C1–C5]. Ocena budowy strukturalnej kompozytu – rola zmiennych towarzyszących [C5].

Przeprowadzone i kontynuowane przeze mnie badania wpisują się w nurt ekologicznego budownictwa i wykazały, że standardowy skład kompozytów żywicznych można z powodzeniem modyfikować poprzez częściową substytucję spoiwa lub kruszywa materiałami odpadowymi, w tym poli(tereftalanem etylenu) i innymi odpadami tworzyw sztucznych, gumą, czy szkłem. Takie rozwiązanie materiałowe ma istotny aspekt ekologiczny i wpisuje się w ideę zrównoważonego rozwoju w budownictwie. Warto podkreślić, że przeprowadzona modyfikacja nie dyskwalifikuje tych kompozytów pod kątem ich charakterystycznych zastosowań, np. do wykonywania: posadzek przemysłowych, szybkich napraw, a przede wszystkim produkcji wielu elementów prefabrykowanych, takich jak: deski gzymsowe mostowe, systemy krawężnikowe, systemy odwodnień drogowych, rury, zbiorniki na ciecze agresywne chemicznie.

4.3.1. Spoiwo żywiczne

W nowoczesnym budownictwie ogromną rolę odgrywa chemia budowlana. Obecnie w dużym stopniu jest to chemia polimerów. Inżynieria materiałów polimerowych stała się nieodzowną częścią innowacyjnego budownictwa, gdyż pozwala projektować produkty o pożądanymi właściwościami i obniżać koszty ich wytwarzania i użytkowania. W obszarze zastosowań chemii budowlanej znajdują się nowe tworzywa, nie mające swojego odpowiednika w przyrodzie. Najpopularniejszą na świecie grupę polimerów stanowią jednak polimery termoutwardzalne. Ma to związek z szeroką gamą możliwości aplikacyjnych. Stosowane są do produkcji lakierów i impregnatów oraz kitów, laminatów i lepiszcza do wełny skalnej. Wykorzystuje się je w materiałach powłokowych i montażowych, a kluczowe znaczenie mają również produkowane z nich wyroby izolacyjne. Stanowią popularny komponent farb. Używane są jako główny składnik klejów, a także jako matryca materiałów kompozytowych w skali mikro (nanokompozyty) i makro (zaprawy, betony).

Z kolei wśród polimerów jedną z najważniejszych grup stanowią żywice epoksydowe, których popularność wynika z połączenia doskonałych właściwości mechanicznych i chemicznych. Kompozyty o matrycy epoksydowej cechuje także niska nasiąkliwość i krótki czas potrzebny do osiągnięcia sprawności eksploatacyjnej. Te unikalne cechy kompozytów polimerowych uzyskuje się głównie dzięki odpowiednio dobranemu spoiwu. Jednocześnie składnik ten powoduje wysokie koszty produkcji tych materiałów. Zaproponowane przeze mnie częściowe zastąpienie żywicy glikolizatami otrzymanymi z odpadu poli(tereftalanu etylenu) (PET) pozwala obniżyć cenę zapraw polimerowych przy zachowaniu korzystnych właściwości fizyko-mechanicznych, co potwierdzają badania opisane w trzech pierwszych artykułach cyklu publikacji [C1–C3]. Ta metoda modyfikacji ma również korzystny wpływ na środowisko, ponieważ pozwala na redukcję ilości bardzo powszechnych odpadów, które są trudne w utylizacji.

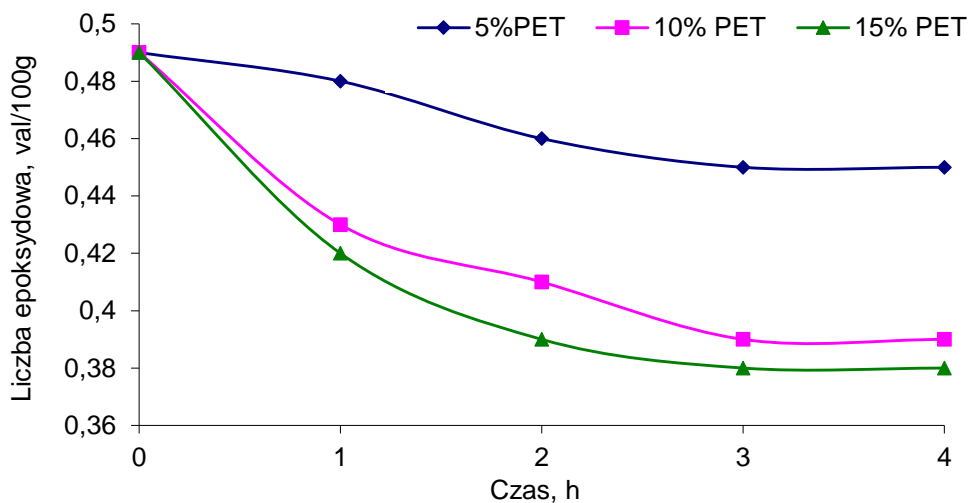
W omawianej serii artykułów [C1–C3] skupiłam się na opisie zapraw epoksydowych otrzymywanych przy częściowej substytucji żywicy glikolizatem powstałym na bazie glikolu propylenowego i poli(tereftalanu etylenu) pochodzącego z odpadów. Do otrzymania zapraw wykorzystałam ten glikolizat, którym częściowo zastąpiłam żywicę. Przeprowadzone badania oraz zastosowane metody statystyczne

pozwołyły dobrać taki udział glikolizatu, który umożliwi uzyskać najkorzystniejszych cech projektowanego kompozytu. Sam proces otrzymywania kompozytów żywicznych w tym przypadku poprzedzony był wykonaniem kompozycji żywica epoksydowa-glikolizat PET, która następnie była wygrzewana przez godzinę w temperaturze 85°C. Takie podejście miało istotny wpływ na dalsze kształtowanie się struktury kompozytu, gdyż dało możliwość zwiększenia liczby grup eterowych w kompozycji na skutek reakcji między grupą epoksydową żywicy a grupą hydroksylową glikolizatu PET wg schematu zaprezentowanego na rysunku 2:



Rys. 2. Reakcja grupy epoksydowej i hydroksylowej glikolizatu PET podczas wygrzewania (opracowanie własne)

Reakcję grupy epoksydowej i hydroksylowej glikolizatu PET podczas wygrzewania śledzono, oznaczając zmianę zawartości grup epoksydowych w czasie, co uwidoczniono na rysunku 3. Największy spadek liczby epoksydowej obserwowano w ciągu pierwszych 60 minut.



Rys. 3. Zależność wartości liczby epoksydowej od czasu wygrzewania w temp. 85 ± 1°C dla kompozycji EP-PET (opracowanie własne)

Taka częściowa substytucja spoiwa pozwala nie tylko poprawić właściwości wytrzymałościowe kompozytu, ale także obniżyć jego cenę (koszt jednostkowy glikolizatu jest ok. 10-cio krotnie niższy niż żywicy), a jednocześnie umożliwia zagospodarowanie popularnego, uciążliwego dla środowiska odpadu.

4.3.2. Utwardzacze

Zmieniałam również jakościowo i ilościowo dodawany utwardzacz, ponieważ cechy żywic epoksydowych są silnie zależne od rodzaju i ilości dodawanego utwardzacza. Ze względu na niezwykle istotny wpływ rodzaju utwardzacza na ostateczne właściwości kompozytu, w artykule [C1] omówiłam wyniki porównania

wybranych cech technicznych zapraw epoksydowych utwardzanych za pomocą trzech różnych utwardzaczy aminowych KT, ET oraz Z-1 dodawanych do zapraw w stosunku wagowym podanym i zalecanym przez producenta. Dwa z tych utwardzaczy (Z-1, ET), oparte były na trietylenotetraminie, natomiast w trzecim (KT) główny składnik stanowiła izoforonodiamina i alkohol benzylový. Dodatkowo utwardzacze różniły się lepkością i liczbą aminową. Dla próbek kompozytu oznaczyłam takie cechy jak: wytrzymałość na zginanie i ściskanie oraz nasiąkliwość.

Otrzymane przeze mnie wyniki potwierdziły, że rodzaj zastosowanego utwardzacza znacznie różnicuje zaprawy epoksydowe pod względem parametrów wytrzymałościowych. Najwyższą wartość wytrzymałości na zginanie wynoszącą 38,85 MPa odnotowano w przypadku utwardzacza ET. Stosunkowo wysoka wytrzymałość na zginanie charakteryzowała także zaprawy utwardzane utwardzaczem Z-1. Wynik maksymalny wynoszący 32,20 MPa był jednak o ponad 17% niższy w porównaniu do rezultatu otrzymanego dla zapraw z utwardzaczem ET. W obydwu przypadkach maksymalne wartości tej wytrzymałości cechowały zaprawy o tym samym składzie, tj. zawierających 7% zawartości glikolizatu PET i stosunku żywicy do kruszywa na poziomie 0,25. Dla takiej samej ilości glikolizatu, zastosowanie utwardzacza KT spowodowało, że wartość tej wytrzymałości była znacznie niższa i wynosiła 25,41 MPa, czyli aż o 34,6% mniej w stosunku do zapraw utwardzanych utwardzaczem ET. Zaobserwowałam, że w próbkach zaprawy z utwardzaczem KT wystąpiła sedymentacja wypełniacza, co przełożyło się na uzyskanie najniższych wartości wytrzymałości na zginanie.

Analizując wyniki obliczeń wytrzymałości na ściskanie zauważono podobny trend jak w przypadku wytrzymałości na zginanie. Wyniki uzyskane dla zapraw utwardzanych utwardzaczem KT są znacznie niższe niż te cechujące zaprawy otrzymane w przypadku użycia utwardzaczy ET i Z-1. Najwyższa wartość wytrzymałości na ściskanie wynosząca 115,73 MPa charakteryzowała zaprawy utwardzane utwardzaczem Z-1. Wytrzymałość na ściskanie próbek zapraw utwardzanych utwardzaczem ET była średnio o kilka megapaskali niższa w porównaniu do zapraw utwardzanych Z-1. W porównaniu z wynikami uzyskanymi dla utwardzacza Z-1, maksymalna wytrzymałość na ściskanie dla zapraw z utwardzaczem KT równa 54,42 MPa, była aż o 53% niższa. Zaobserwowałam także wyraźną tendencję obniżania się wartości wytrzymałości wraz ze wzrostem zawartości żywicy (większe wartości stosunku żywica/kruszywo), a tym samym utwardzacza.

W trakcie wykonywania zaprawy przy użyciu utwardzacza ET, przy 12% zawartości glikolizatu PET i stosunku żywicy do kruszywa równym 0,33, odnotowano szybkie żelowanie kompozycji, co utrudniało dokładne wypełnienie form. Należy zatem, wykonując zaprawy z użyciem tego rodzaju utwardzacza wziąć także pod uwagę krótki czas, w którym można wypełnić formę, a to jest szczególnie istotne gdy trzeba wykonać duże elementy.

Przeprowadzone badanie nasiąkliwości pozwoliło stwierdzić, iż dzięki użyciu utwardzacza ET można otrzymać zaprawy bardziej odporne na niszczące działanie wody, niż dla utwardzaczy Z-1 i KT.

Podsumowując uzyskane wyniki stwierdziłam, że najlepsze właściwości wytrzymałości na zginanie cechują zaprawy otrzymane z wykorzystaniem utwardzacza ET. Ponadto kompozyty te są najbardziej odporne na działanie wody. Najwyższe wartości wytrzymałości na ściskanie charakteryzują zaprawy do których wytworzenia

użyto utwardzacz Z-1, ale wartości tego parametru są tylko nieco niższe w przypadku, gdy użyje się utwardzacza ET.

Jednym z wniosków, które wynikają z tych badań jest **zdecydowanie negatywna ocena utwardzacza KT**. Zaprawy, do przygotowania których użyto tego utwardzacza można uznać za **rozwiązanie zdominowane**, gdyż jego obecność w mieszance powoduje **znaczne pogorszenie wszystkich badanych właściwości otrzymanych kompozytów**.

Moim zdaniem, w badaniach nad nowymi materiałami budowlanymi istotne było nie tylko znaczenie poznawcze, ale też metodyczne i aplikacyjne, dlatego podjęłam próby zwieńczenia tych badań wdrożeniami (Urząd Patentowy RP przyznał patent nr 230398 na wynalazek pt. „*Zaprawa epoksydowa dla budownictwa i sposób jej wytwarzania*”, 2018). W patencie opisany został sposób doboru rodzaju i ilości składników, które gwarantują otrzymanie kompozytu o najlepszych właściwościach użytkowych. Okazało się, że jest to możliwe przy stopniu substytucji żywicy przez glikolizat poli(tereftalanu etylenu) na poziomie od 7,7% do 8,6% wagowych w stosunku do niemodyfikowanej żywicy epoksydowej i zawartości modyfikowanej żywicy epoksydowej od 0,18 do 0,22 części wagowych w stosunku do kruszywa. W patencie podałam także zaprojektowany przeze mnie, szczegółowy sposób przygotowania zaprawy.

Przeprowadzone badania jednoznacznie pokazują, że zawsze należy dokonywać ostatecznej oceny użyteczności kompozytów w ścisłym powiązaniu z założonym obszarem jego stosowalności. Należy również pamiętać o tym, że złożoność nowych rozwiązań materiałowych może znacznie utrudniać przeniesienie koncepcji teoretycznej do praktyki. Wiąże się to m.in. z różnicami występującymi między skalą laboratoryjną, a przemysłową. Prefabrykaty wytwarzane w firmach produkcyjnych mają zazwyczaj istotnie większe wymiary i bardziej skomplikowane kształty w porównaniu do próbek badawczych, co także należy uwzględnić podczas projektowania procesu technologicznego.

4.3.3. Kruszywo

Modyfikacja składu kompozytu poprzez wprowadzenie materiału odpadowego jako zamiennika spoiwa ma uzasadnienie zarówno ekologiczne, jak i ekonomiczne, gdyż żywica stanowi najdroższy składnik zaprawy. Należy jednak wziąć również pod uwagę fakt, że kruszywo stanowi około 90 procent masy kompozytu żywicznego, dlatego ma również ogromny wpływ na jego jakość. Do produkcji zapraw żywicznych stosuje się kruszywo trwałe i czyste. Nie wyjaśniono jeszcze jaki jest mechanizm oddziaływania kruszywo-spoivo w betonach żywicznych, dlatego trudno jest podać szczegółowy opis procesu doboru kruszywa. Jednak, w moich badaniach, przy projektowaniu nowego kompozytu zawsze starałam się wziąć pod uwagę takie cechy kruszywa, jak: rodzaj (właściwości fizyczne i chemiczne), uziarnienie oraz stopień zanieczyszczenia i zawilgocenia. W praktyce, do produkcji betonów żywicznych stosuje się kruszywa naturalne (kruszywa żwirowe, kruszywa mineralne pochodzące ze złóż naturalnych) oraz kruszywa łamane (produkowane ze skał litych takich jak bazalt, granit, piaskowiec, dolomit, wapień itd.).

Kruszywa stanowią obecnie jeden z najbardziej pożądanym materiałów w budownictwie. W 2019 roku ONZ uznał wydobycie kruszywa (w tym piasku i żwiru) za kwestię wymagającą międzynarodowej ochrony. Wskazano na potrzebę poszukiwania wspólnej odpowiedzi na takie powiązane z sobą groźne trendy, jak

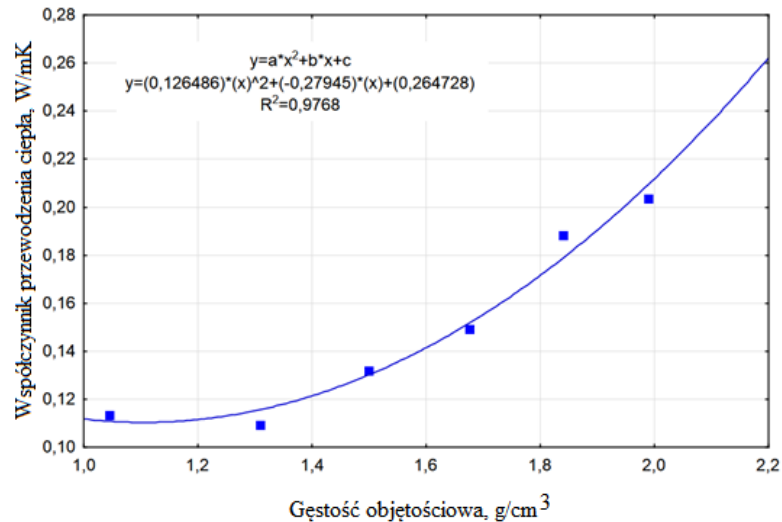
niepohamowany konsumpcjonizm i drastyczne kurczenie się zasobów naturalnych. Stwierdzono, że należy zmniejszyć zapotrzebowanie i znaleźć zamienniki. Niewiele osób ma świadomość, że takiego popularnego surowca jak piasek też może w niedługiej przyszłości zabraknąć, zwłaszcza w kontekście tego, że nie każdy rodzaj piasku nadaje się do celów budowlanych. Najlepiej sprawdza się piasek rzeczny, wyrobiony przez wodę, w przeciwieństwie do piasku z pustyni, którego ziarna ukształtowane zostały przez wiatry i są zbyt okrągłe. Podaż piasku jest więc ograniczona. Surowiec ten, choć niepozorny, stanowi fundament współczesnej cywilizacji, a jego roczne zużycie sięga obecnie miliardów ton. Aby pokryć zapotrzebowanie na ten surowiec eksploatuje się koryta rzeczne i plaże nie zważając na szkody, jakie takie działanie powoduje. Są na świecie miejsca, w kontekście których można mówić o katastrofie ekologicznej. Silna ingerencja w środowisko naturalne spowodowana wydobywaniem piasku przyczyniła się m.in. do zatopienia kilkudziesięciu indonezyjskich wysp, niszczenia lasów namorzynowych, zamulenia wody, co prowadzi do śmierci morskich ryb i ptaków.

To powszechne zużycie kruszyw naturalnych oraz postępująca degradacja środowiska wymusza na wielu państwach podjęcie działań mających na celu zmniejszenie rozproszenia zasobów naturalnych. W niektórych krajach (m.in. kraje arabskie, Singapur, Indie, niektóre regiony Chin) występuje deficyt kruszyw lub napotyka się na duże problemy z zagospodarowaniem nowych złóż. Wydaje się, że ponowne wykorzystanie odpadów jako kruszywa do betonów może dać pozytywne efekty zarówno ze względu na możliwość recyklingu odpadów, jak i ochronę zasobów środowiska naturalnego. Otrzymywanie zapraw polimerowych z wykorzystaniem różnorodnych odpadów, stwarza okazję do zmniejszenia czynnika wpływu zapraw polimerowych na środowisko. Jednocześnie należy pamiętać, że stosowanie odpadów jest możliwe jedynie pod warunkiem, że ich dodatek nie powoduje znacznego obniżenia jakości wyrobów budowlanych pomimo podmiany surowców naturalnych (np. kruszywa) materiałami pochodzącymi z recyklingu.

Wyniki badań opisanych w kolejnych artykułach [C4–C5] należących do wybranego cyklu pokazują, że substytucja kruszywa nie tylko przez tworzywa sztuczne, ale również przez taki materiał jakim jest guma lub odpad szklany nie oznacza godzenia się na gorszą jakość, gdyż i w tych przypadkach można uzyskać kompozyt o pożądanym właściwościach.

Dynamiczny rozwój motoryzacji oraz poprawa komfortu życia powodują znaczny wzrost produkcji opon samochodowych. Niestety, kiedy trwałość użyteczna tych produktów dobiegnie końca, pojawia się problem ich utylizacji. Guma pochodząca ze starych opon samochodowych może jednak znaleźć wykorzystanie jako materiał do ponownego użytku. Jedną z możliwości jest przetworzenie opon na granulację, która może stanowić substytut kruszywa w betonopodobnych kompozytach budowlanych. Korzyści z tego wynikające to zmniejszenie ilości magazynowanych opon - co w znacznym stopniu przekłada się na zmniejszenie zanieczyszczenia środowiska naturalnego. Badania opisane w artykule [C4] pozwoliły stwierdzić, że substytucja kruszywa w zaprawach epoksydowych powoduje wprawdzie obniżenie parametrów wytrzymałościowych, jednak nawet 100% zastąpienie piasku granulatem odpadowej gumy pozwala uzyskać kompozyt mogący w wybranych aplikacjach konkurować z zaprawami cementowymi. Zastosowanie modyfikatora powoduje również znaczne obniżenie masy kompozytów. Gęstość objętościowa próbek zapraw kontrolnych jest prawie dwukrotnie wyższa w stosunku do zapraw, w których odpad całkowicie zastąpił piasek. Jest to korzystne dla elementów prefabrykowanych o znacznych wymiarach.

Analogiczną zależność odnotowano w przypadku, gdy badaną cechą był współczynnik przewodzenia ciepła λ . Wartość współczynnika przewodzenia ciepła λ dla zaprojektowanego kompozytu, uzyskana podczas badań laboratoryjnych, w zależności od proporcji składników, mieściła się w zakresie 0,11–0,20 W/(mK). Kompozyt o 100% zawartości odpadu charakteryzuje się izolacyjnością termiczną porównywalną do zapraw ciepłochronnych. Wykres funkcji opisującej zależność współczynnika przewodzenia ciepła od gęstości objętościowej próbek otrzymanych kompozytów zawierających odpady gumy przedstawiono na rysunku 4.

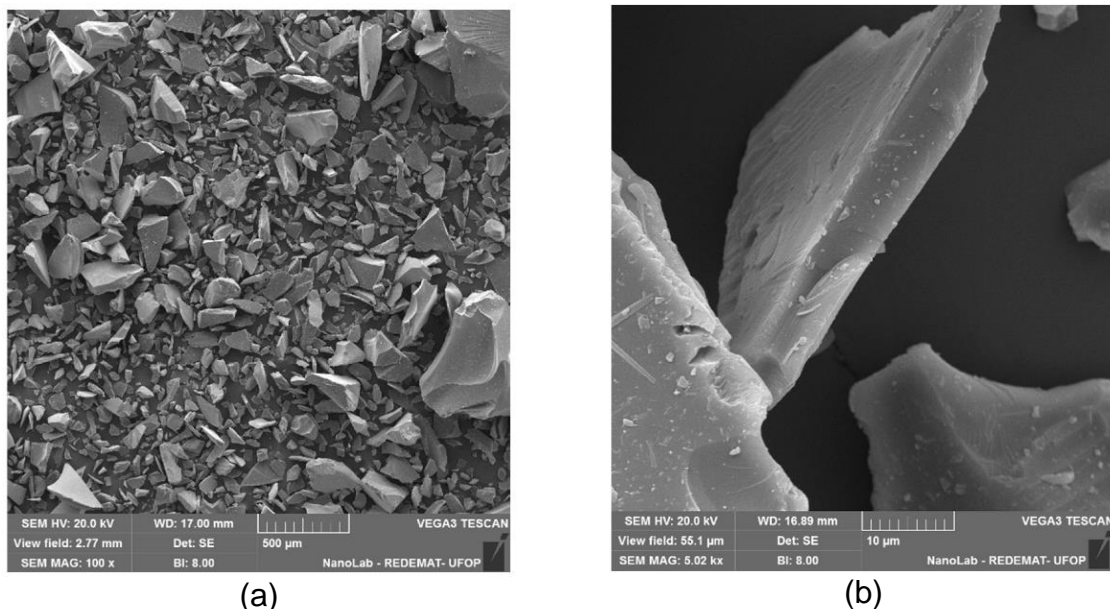


Rys. 4. Wykres funkcji opisującej zależność współczynnika przewodzenia ciepła od gęstości objętościowej próbek otrzymanych kompozytów zawierających odpady gumy [C4]

Otrzymane w wyniku modyfikacji kompozyty cechuje także bardzo niska nasiąkliwość wodą od 0,2% do 1,0% w zależności od stopnia modyfikacji. Połączenie dobrych parametrów termoizolacyjnych z minimalną nasiąkliwością powoduje, że zaprojektowany kompozyt jest materiałem który można dedykować jako alternatywę dla tradycyjnych rozwiązań wykończeń powierzchni, ze szczególnym uwzględnieniem zewnętrznych powierzchni użytkowych (tarasów, balkonów i werand).

Nieliczne i niepełne opracowania opisujące właściwości kompozytów epoksydowych zawierających odpady szklane stały się bodźcem do przeprowadzenia badań opisanych w artykule [C5]. Zastosowanie metod planowania eksperymentu w postaci planu centralnego kompozycyjnego daje gwarancję uzyskania pełnej informacji na temat wpływu udziału odpadu szklanego (0–100% wag.) oraz zawartości żywicy w kompozycie (14–36% wag.), na parametry fizykomechaniczne zapraw epoksydowych. Najczęściej do otrzymywania betonów polimerowych stosuje się kruszywo krzemionkowe, ponieważ jest ono kompatybilne z żywicami stosowanymi w kompozytach żywicznych. Możliwe jest stworzenie dobrego połączenia tego rodzaju kruszywa z żywicą. Biorąc pod uwagę skład chemiczny szkła wydaje się, że jego odpad może stanowić alternatywę dla kruszyw stosowanych do otrzymywania betonów żywicznych i zapraw. Szkło ze względu na swój skład i budowę chemiczną nie stanowi zagrożenia dla środowiska, jest jedynie obciążeniem, ponieważ nie ulega rozkładowi i może być deponowane na składowiskach w znacznych ilościach. Projektowanie materiałów z odpadów szklanych przy jednoczesnym zapewnieniu, by właściwości produktów, materiałów i zasobów były jak najdłużej utrzymywane na jak najwyższym poziomie wartości i użyteczności, spełnia cele gospodarki o obiegu

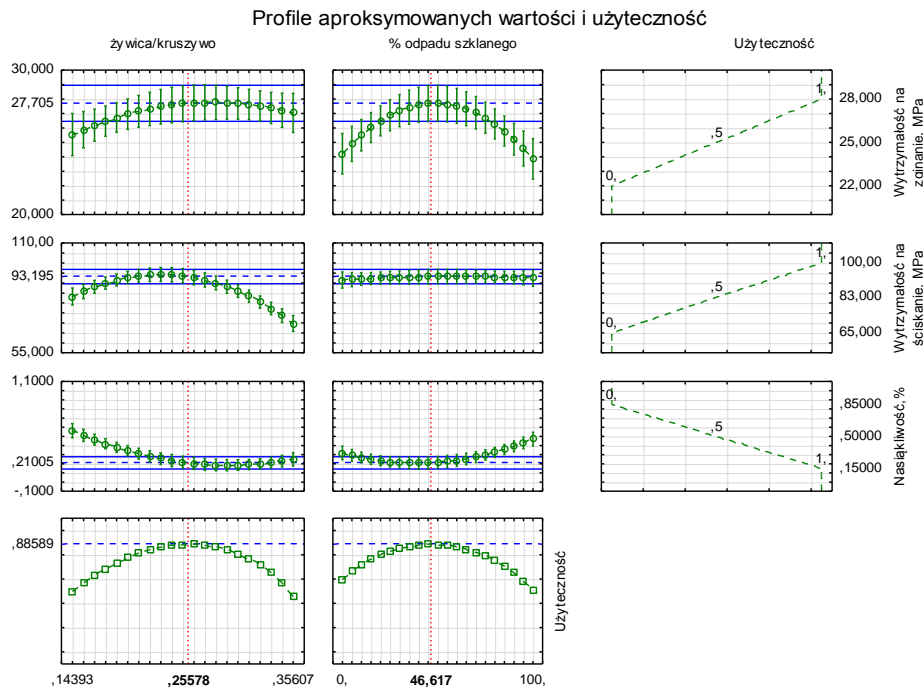
zamkniętym i może być odpowiedzią na problem kurczenia się zasobów kruszywa naturalnych. W badaniach opisanych w publikacji [C5] piasek został zastąpiony w sposób wagowy (frakcja do frakcji) odpadowym szkłem o zbliżonej gęstości, powstałym w wyniku rozdrobnienia szkła budowlanego. Dowodem na skuteczność przeprowadzonej modyfikacji są uzyskane wyniki badań. Najwyższe wartości wytrzymałości na zginanie na poziomie 28 MPa odnotowano dla zapraw zawierających 50% odpadów szklanych. W przypadku wytrzymałości na ściskanie odnotowane wyniki badań potwierdziły, że im więcej żywicy w kompozycie, tym wytrzymałość ta jest niższa, ale jednocześnie rola odpadu jest korzystniejsza. Przy stosunku żywica/kruszywo równym 0,33 i udziale odpadów szklanych na poziomie 85,36% udało się uzyskać bardzo wysoką wartość wytrzymałości na ściskanie, równą 92,37 MPa. Zaprawy epoksydowe zawierające odpady szklane cechuje również bardzo niska nasiąkliwość wodą. Ta właściwość jest w największym stopniu uzależniona od udziału spoiwa, gdyż to właśnie żywica odpowiada za niską nasiąkliwość kompozytów żywicznych. Najniższą wartość nasiąkliwości równą 0,204% uzyskano dla tych próbek, w których stosunek żywicy do kruszywa był najwyższy (0,36), a udział odpadu to 50%. Dla pozostałych kompozycji cechujących się 50% stopniem substytucji piasku odpadem szklanym, ale przy zmniejszającej się ilości żywicy w kompozycie nasiąkliwość nieznacznie wzrasta. Można wnioskować, że uzyskanie bardzo korzystnych (niskich) wartości nasiąkliwości zapraw epoksydowych zawierających znaczną ilość odpadów szkła jest możliwe przy zastosowaniu odpowiedniej zawartości spoiwa w kompozycie. Podczas substytucji piasku, czyli kruszywa o obłych, foremnych ziarnach, przez odpady szklane o mniej regularnym kształcie ziaren i ostrych krawędziach (Rys. 5), pogorszeniu ulega urabialność i wzrost zużycia spoiwa, co przekłada się właśnie na nasiąkliwość.



Rys. 5. Zdjęcia SEM odpadu szklanego w powiększeniu: (a) 100x, (b) 5000x [C5]

Podobnie jak w publikacjach [C1–C3], w procesie planowania tych eksperymentów laboratoryjnych i na etapie analizy wyników badań wykorzystałam program Statistica [Statistica 12]. Dostępny w nim moduł ogólnej optymalizacji funkcji pozwolił na wskazanie dla jakiego składu zaprawy można osiągnąć najkorzystniejsze wartości kilku cech równocześnie charakteryzujących kompozyt, np. wytrzymałość na zginanie i ściskanie oraz nasiąkliwość. Uzyskałam więc model prognostyczny, który

pozwała ustalić takie wartości wielkości wejściowych (skład kompozytu), dla których przewiduje się osiągnięcie optymalnych odpowiedzi (kompozyt o najlepszych właściwościach), ocenianych według wybranych kryteriów (Rys. 6).

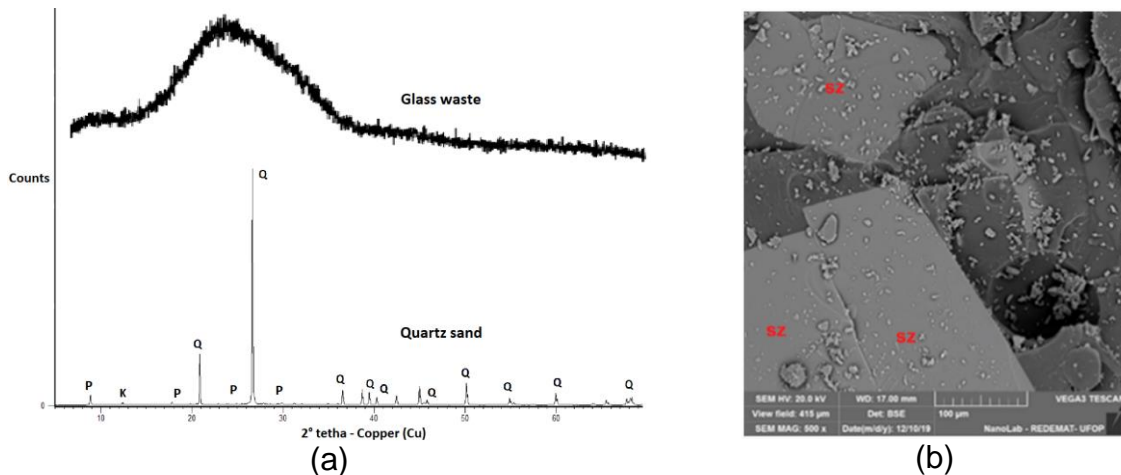


Rys. 6. Wyniki maksymalizacji użyteczności kompozytu zawierającego odpady szklane [C5]

Prowadząc badania zauważyłam, że różnice we właściwościach otrzymanych próbek wynikają nie tylko z różnic w składzie surowców ale mają też związek z wewnętrzną strukturą kompozytów. Mianowicie, w niektórych przypadkach modyfikator wbudowuje się chemicznie w strukturę kompozytu w innych składniki łączą się tylko na zasadzie mieszania. Aby stwierdzić z jakim przypadkiem zmienności mam do czynienia dla konkretnego kompozytu, do badań wprowadziłam m.in. metody dyfrakcji rentgenowskiej (XRD) oraz mikroskopii elektronowej (SEM).

Dzięki wykorzystaniu wymienionych powyżej technik charakteryzacji, mogłam przeprowadzić szczegółową analizę i powiązać skład i właściwości mechaniczne kompozytów z ich mikrostrukturą, (w tym przypadku uznaną za zmienną towarzyszącą). Przykładowe wyniki tych analiz zestawiałam na rysunku 7.

Właściwości szkła dają mu przewagę nad niektórymi kamieniami naturalnymi, a tym samym umożliwiają zastąpienie kruszywa naturalnego w zaprawach. Przedstawione na rysunku 7(a) wyniki analizy XRD odpadu szklanego i piasku kwarcowego potwierdzają tę tezę. Wprawdzie charakterystyczny dla odpadów szklanych amorficzny SiO_2 nie generuje tak dobrych właściwości jak krystaliczny SiO_2 w piasku kwarcowym, jednak amorficzny SiO_2 zachowuje swoją ogólną charakterystykę niskiej rozszerzalności cieplnej, wysokiej temperatury topnienia, średniej twardości i dobrej odporności na ścieranie. Pomiedzy ziarnami kruszywa i otaczającym spoiwem żywicznym zachodzi ściśle współdziałanie. Mniej regularny kształt ziaren (ostre krawędzie) oraz szorstka powierzchnia odpadów szklanych powoduje zwiększenie adhezji do spoiwa, a tym samym przy odpowiednio dobranej ilości żywicy, zapewnia większą wytrzymałość kompozytu.



Rys. 7. Przykładowe wyniki analiz przeprowadzonych z wykorzystaniem metod: (a) XRD, (b) SEM [C5]

Przy znacznej ilości kruszywa może nie być ono wystarczająco otoczone spoiwem, jak widać na rysunku 7(b), gdzie nie ma żywicy pomiędzy dwoma ziarnami szkła (oznaczonymi na rysunku symbolem **SZ**).

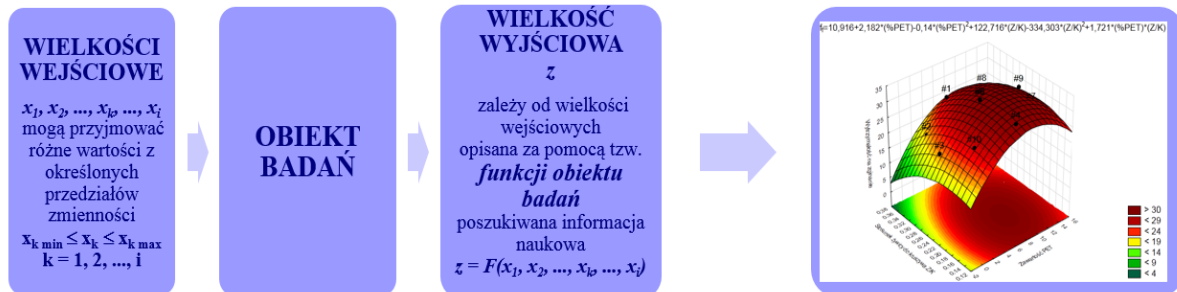
4.4. Otrzymywanie nowych materiałów budowlanych - dobór metod planowania doświadczenia [C1–C3]

Obserwując zmiany zachodzące w otaczającym nas świecie można odnotować coraz dokładniejsze opomiarowanie maszyn i procesów oraz systematyczne obniżanie kosztów gromadzenia i przetwarzania danych. Takie podejście sprawia, że korzyści jakie odnoszą firmy produkcyjne wykorzystujące zaawansowane metody analizy danych, modelowania statystycznego i sztucznej inteligencji (AI, Artificial Intelligence), są ogromne i cały czas rosną. Odpowiednio zbudowane modele matematyczne pomagają zwiększać efektywność produkcji i podnosić jakość, optymalizować procesy produkcyjne, znajdować najlepsze ustawienia dla maszyn i ciągów technologicznych oraz zapobiegać awariom.

Nowe, aktualnie polecane technologie mogą radykalnie zmienić sposób działania firm i etapy realizacji projektów budowlanych. Budownictwo z powodzeniem wykorzystuje te różnorodne zdobycze nauki i nowe techniki, aby poprawić produktywność i efektywność procesów wytwarzania. Pracę naukowców już od kilkudziesięciu lat wspomagają komputery. Potrafią wykonać dla nich wiele zadań – od prostych obliczeń matematycznych aż po skomplikowane wizualizacje, z uwzględnieniem sił oddziałujących na dany obiekt, środowiska naturalnego i wielu innych czynników, w tym również w przypadku występowania zmiennych towarzyszących. Podczas opracowywania nowych technologii materiałowych świetnie sprawdzają się również metody planowania eksperymentu. W swoich pracach połączyłam i wykorzystałam te cenne instrumentaria naukowca prowadzącego badania, jakimi są metody statystyczne i narzędzia informatyczne.

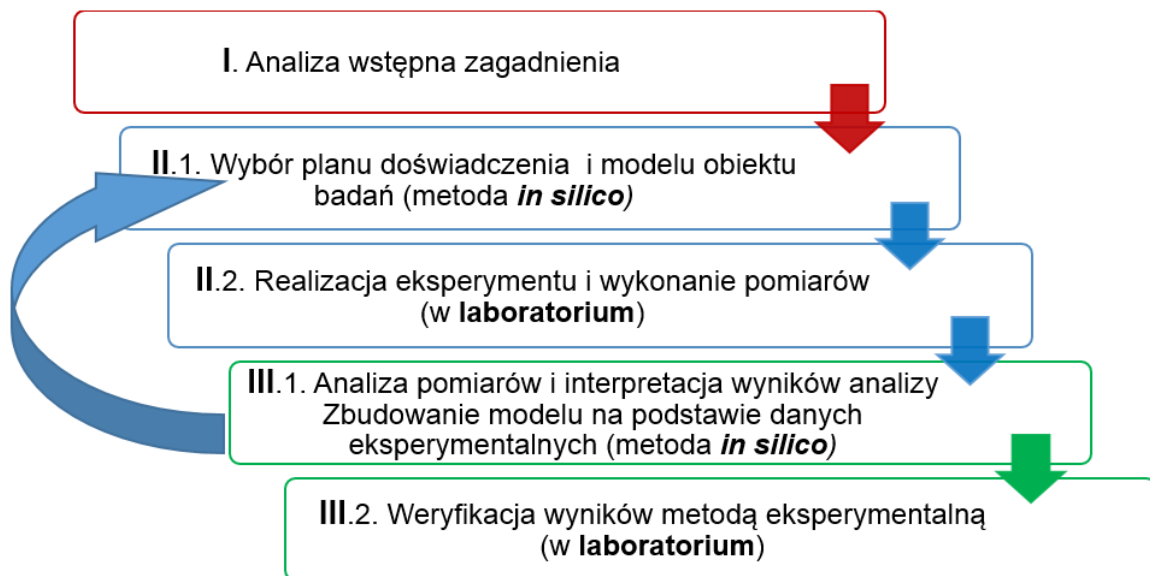
Aby ograniczyć ilość koniecznych do przeprowadzenia eksperymentów, w badaniach posłużyłam się algorytmem statystycznym pozwalającym na znaczną redukcję liczby próbek zapraw, które należało przebadać. Prowadzone wcześniej badania własne oraz analiza dostępnej literatury dały postawę do wyboru odpowiedniego planu eksperymentu. Rozważałam różne plany (plany kompletne,

doświadczenie wg metody Taguchi, plany dla ograniczonych powierzchni i mieszanin), jednakże najczęściej najlepsze wyniki uzyskiwałam po zastosowaniu planu centralnego kompozycyjnego z powtórzeniem doświadczenia w punkcie centralnym. Schemat umieszczenia obiektu badań typowy dla tego planu zaprezentowano na rysunku 8.



Rys. 8. Schemat algorytmu właściwy dla współczesnych badań naukowych typowy dla planu centralnego kompozycyjnego (opracowanie własne)

Do utworzenia planu wykorzystałam pakiet Statistica. Sekwencja czynności planowania i analizy doświadczeń została przedstawiona na rysunku 9.



Rys. 9. Sekwencja czynności planowania i analizy doświadczeń (opracowanie własne)

Na sekwencję czynności związaną z planowaniem, realizacją i analizą doświadczeń składają się trzy główne etapy (Rys. 9):

Etap I. Analiza wstępna

Jest to jeden z najważniejszych etapów planowania eksperymentu, na który składają się prace teoretyczne, a wśród nich wyróżnić można:

- **eksplorację**, czyli rozpoznanie aktualnego stanu wiedzy i postawienie merytorycznej hipotezy badawczej, pozwalającej na ogólne sformułowanie celu badań,

- **eksplikację** - uszczegółowienie, doprecyzowanie problemu badawczego, wybór i uzasadnienie hipotez badawczych z możliwością znalezienia odpowiedzi na pojawiające się na tym etapie pytania, w oparciu o znane badaczowi metody i techniki badawcze,
- **operacjonalizację**, której celem jest wybór obiektu badań, identyfikacja jego cech, zdefiniowanie wielkości wyjściowych, zdefiniowanie typu i wartości wielkości wyjściowych oraz zakresu ich zmienności, wybór metod i technik badawczych, dobór sposobów prowadzenia późniejszej analizy wyników badań.

Etap II.

Etap II złożony jest z dwóch kroków. Najpierw przeprowadzane są obliczenia komputerowe, a następnie wykonuje się prace w laboratorium.

II.1. Wybór planu doświadczenia i modelu obiektu badań - metoda *in silico*

Dobór planu eksperymentu uzależniony jest m.in. od spełnienia kryterium jego realizowalności, w tym uwzględnienia warunków technicznych i ekonomicznych planowanych badań. Istotna jest wielkość dostępnego budżetu, terminowość wykonania badań, liczba dostępnych stanowisk badawczych, czy jednostkowy koszt i czas przeprowadzenia pojedynczego eksperymentu. Należy także rozważyć, czy wielkości wejściowe mają charakter jakościowy – w tym przypadku sprawdzają się plany z grupy czynnikowych (kompletne, frakcyjne lub tablice ortogonalne Taguchi) i modele na bazie efektów, czy ilościowy – odpowiednie będą tutaj np. plany powierzchni odpowiedzi (w tym plany centralne kompozycyjne) i modele funkcyjne. Wielkości wejściowe mogą mieć także charakter mieszany (jakościowy i ilościowy), co wymaga zastosowania indywidualnego rozwiązania. Wykorzystanie metody *in silico* na tym etapie pozwala ograniczyć koszty i czas badań laboratoryjnych (krok II.2.) do niezbędnego minimum.

II.2. Realizacja eksperymentu i wykonanie pomiarów - w laboratorium

W tym kroku następuje wykonanie próbek i realizacja podstawowych badań w laboratorium. Należy uwzględnić także dodatkowe metody badań np. badania spektroskopowe, dyfrakcja rentgenowska, mikrofotografie SEM, których wyniki (liczbowe, graficzne) dają podstawę dodatkowym danym o badanym procesie (są to tzw. zmienne towarzyszące). W wyniku przeprowadzonych eksperymentów uzyskuje się zmierzone wartości wielkości wyjściowych, które są przedmiotem analizy numerycznej w kolejnym kroku (etap III.1).

Etap III.

Etap III także realizowany jest początkowo metodą *in silico* (III.1.), a następnie jego wyniki weryfikowane są eksperymentalnie (III.2.).

III.1. Analiza pomiarów i interpretacja wyników analizy Zbudowanie modelu na podstawie danych eksperymentalnych - metoda *in silico*

Po wykonaniu badań i zebraniu wszystkich wyników budowana jest baza danych doświadczalnych. Na przygotowanych zbiorach danych przeprowadzana jest komputerowa analiza mająca na celu ocenę wyników uzyskanych w etapie II, a na jej podstawie weryfikuje się sam eksperyment. Wstępną ocenę

statystycznej istotności poszczególnych zmiennych umożliwiła tzw. wykres Pareto efektów standaryzowanych. Sposób zaplanowania eksperymentu implikuje procedurę statystycznego opracowania jego wyników. W pierwszej kolejności należy przeprowadzić analizę danych pierwotnych (usunięcie danych odstających, ocenę stabilności wariancji, wstępne przekształcenie danych), a następnie zrealizować wszystkie niezbędne elementy analizy, dedykowane dla danego planu doświadczenia i przyjętego modelu obiektu badań (np. wyznaczenie parametrów, analiza efektów i wariancji). Wszystkie te czynności składają się na tzw. wstępne przetwarzanie danych (preprocessing) i stanowią podstawę do formułowania wniosków końcowych w formie, która umożliwi weryfikację eksperymentalną wyników. Wystąpienie jakiegokolwiek negatywnej oceny wyników w tym kroku powoduje powrót do kroku II.1, co skutkuje poprawą planu i/lub zmianą warunków przeprowadzenia doświadczenia. Dopiero najlepsze wyniki uzyskane metodą *in silico* są weryfikowane eksperymentalnie w kroku III.2.

III.2. Weryfikacja wyników metodą eksperymentalną - w laboratorium

Po wykonaniu próbek i badań przeznaczonych do weryfikacji rezultatów otrzymanych w kroku III.1., konieczne jest dokonanie oceny stopnia dopasowania uzyskanych wyników do przyjętego modelu np. poprzez obliczenie błędu modelu i sprecyzowanie ostatecznych wniosków celem poparcia lub odrzucenia założonej hipotezy merytorycznej.

Specyfika inżynierii materiałów budowlanych to obszar, który w kontekście stosowania narzędzi i metod statystycznych wciąż wymaga prowadzenia badań i opracowania wzorców postępowania, w szczególności modelowania powiązań między technologią, strukturą i właściwościami materiałów. Badania takie warto prowadzić, gdyż systematyczna obserwacja daje możliwość wyznaczenia przybliżonych charakterystyk związku przyczynowo skutkowego między składem a właściwościami materiału. Tym samym staje się podstawą tworzenia spójnych wytycznych łączących metody planowania i analizy eksperymentów i weryfikowania ich sensu praktycznego. Atutem stosowania zaawansowanych technik statystycznych jest możliwość ustalenia i wykrycia faktów naukowych, których nie można byłoby stwierdzić bez zastosowania tych narzędzi lub wnioski wynikające z przeprowadzonych analiz byłyby obciążone dużym stopniem niepewności. Takie działania mogą stanowić znaczne wsparcie naukowców i inżynierów na każdym etapie realizacji badań nad nowymi materiałami. Przykładowo, na podstawie wykonanych badań, a następnie przeprowadzonych analiz statystycznych wyników przeprowadzonych eksperymentów potwierdziłam [C1], że rodzaj zastosowanego utwardzacza znacznie różnicuje zaprawy epoksydowe pod względem parametrów wytrzymałościowych, ma duży wpływ na wybrane właściwości zapraw oraz na czas roboczy mieszanki, który jest ważnym parametrem aplikacyjnym, np. podczas wykonywania szybkich napraw, czy formowania elementów na placu budowy. Szczegółowe omówienie wyników tych badań znajduje się w punkcie 4.3.

We wszystkich badaniach, których opis zawarłam w omawianym cyklu dziewięciu publikacji, stosowałam statystykę jako metodę naukową, a praktyczną jej implementację stanowił dla mnie program Statistica. W przypadku prowadzonych przeze mnie eksperymentów, na podstawie uzyskanych rezultatów badań i zastosowaniu właściwie dobranych metod statystycznych możliwe było znalezienie

zależności modelowych przydatnych do oceny i szacowania odporności chemicznej w dłuższym okresie czasu dla kompozytów żywicznych zawierających odpady [C2, C3]. Modelowanie odwzorowania rzeczywistych związków występujących pomiędzy badanymi procesami sprowadza się najczęściej do przyjęcia określonej formuły matematycznej ujmującej powiązania pomiędzy mierzonymi zmiennymi, a także do poczynienia założeń dotyczących losowych procesów wpływających na wyniki pojedynczych pomiarów. Z kształtu powierzchni odpowiedzi wynika, że najlepiej opisującym będzie wielomian drugiego stopnia zdefiniowany dla dwóch zmiennych wejściowych. Tak powstał statystyczny model obiektu badań. Jeśli taki model jest dopasowany do określonego zbioru danych, to istnieje podstawa do uogólnienia wyników w szerszym kontekście lub do przewidywania wyników w przyszłości. Dzięki temu możliwe jest lepsze wyjaśnienie badanego zjawiska. Przy ocenie stopnia dopasowania modelu do rzeczywistych danych stosowane są różne miary. Weryfikację adekwatności funkcji aproksymującej dane eksperymentalne przeprowadziłam w oparciu o współczynnik determinacji (R^2), którego wartość mówi o tym, w jakim stopniu oszacowany model wyjaśnia oryginalną wariancję wartości zmiennej zależnej. Porównując wartości współczynników determinacji (R^2), można określić siłę związku między wartościami wejściowymi a wartościami wyjściowymi. Wartości współczynnika determinacji z zakresu 0,792–0,985 wskazują, że badane zależności mają charakter ścisły (bardzo dobrze opisują badany związek), natomiast współczynnik determinacji na poziomie 0,537 wskazuje jedynie na znaczącą zależność między wielkościami wejściowymi a wielkościami wyjściowymi.

Pozytywne wyniki adekwatności przyjętych funkcji modelu potwierdza również test dostępny w module służącym do analizy wyników doświadczenia w programie Statistica. Dzięki temu, że plan zawiera jeden dodatkowy układ centralny, możliwe jest obliczenie tzw. czystego błędu i przeprowadzenie testu braku dopasowania. Wykonane, zgodnie z zasadami "dobrej praktyki laboratoryjnej", powtórzenie pomiaru umożliwia oszacowanie losowej zmienności pomiarów (rzetelności) dla wielkości wyjściowej na podstawie zmienności pomiaru w tych układach. Pozwala to na testowanie statystycznej istotności zmienności resztowej (która nie może być przypisana wielkościom wejściowym i ich interakcjom). Ponieważ test w każdym przypadku wykazał statystyczną istotność, można uznać, że uzyskane modele są adekwatne, czyli dobrze dopasowane do danych eksperymentalnych.

Metody planowania eksperymentu zastosowałam projektując badania większości otrzymanych materiałów (wyjątek stanowią kompozyty zawierające odpady gumy, podczas badania których użyłam metody tradycyjnej). Takie podejście powinno być szczególnie polecane w sytuacji, gdy modeluje się jednocześnie wiele parametrów. Z taką sytuacją spotykamy się w przypadku badań nad nowymi materiałami budowlanymi w odniesieniu do których coraz częściej oczekuje się jednocześnie nie tylko dobrych właściwości wytrzymałościowych, ale np. również doskonałej odporności chemicznej. Konieczność uzyskania wysokiej odporności spowodowana jest m.in. coraz wyższym poziomem skażenia środowiska i wynikającą z tego koniecznością zwiększenia trwałości konstrukcji budowlanych. Właśnie trwałość i odporność na korozję materiałów konstrukcyjnych to cechy, które w ostatnich latach uważa się za jeden z głównych celów badań nad procesem modyfikacji istniejących materiałów lub/i wytwarzania nowych kompozytów o ulepszonych właściwościach. Wskazane jest prowadzenie badań nad możliwościami wytwarzania takich nowych

kompozytów żywicznych, które z powodzeniem mogły by być stosowane do ochrony konstrukcji przed szkodliwym wpływem czynników agresywnych.

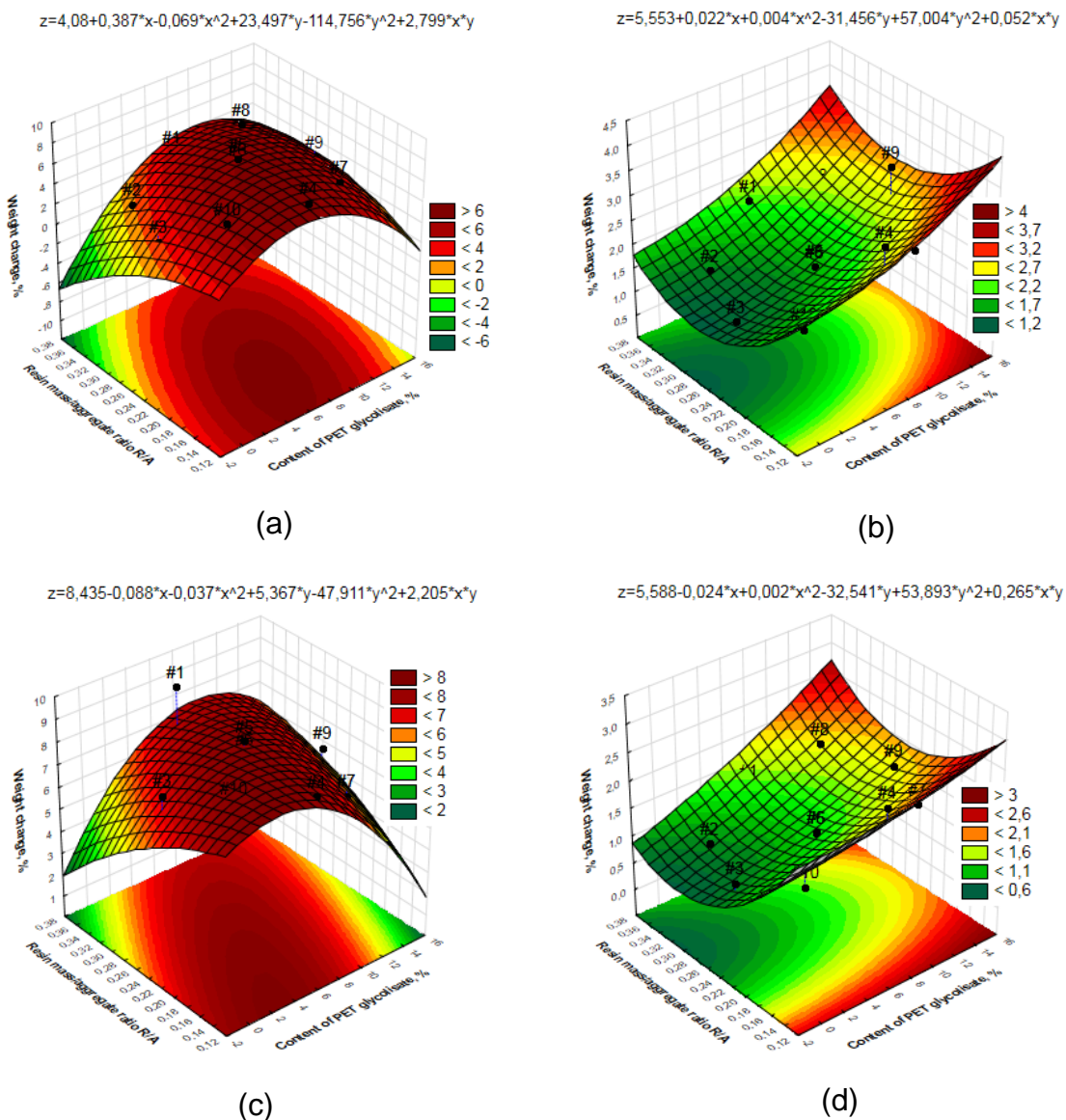
4.5. Monitorowanie i prognozowanie właściwości nowych materiałów - tworzenie, gromadzenie i pielęgnowanie baz danych laboratoryjnych [C2, C3]. Pozyskiwanie wiedzy z baz danych [C6]

Pomimo stosowania od wielu lat kompozytów żywicznych jako ważnych materiałów budowlanych, trudno jest znaleźć w literaturze wyniki badań z monitoringu zmian ich właściwości wywołane długotrwałym działaniem agresywnych mediów. Większość publikowanych wyników dotyczy badań kompozytów zrealizowanych w krótkim okresie czasu, bez uwzględnienia takiej zmiennej towarzyszącej jaką niewątpliwie jest czas. Zazwyczaj autorzy takich publikacji zgodnie stwierdzają, że mechanizmy degradacji chemicznej niekorzystnie wpływają na połączenie między matrycą polimerową a kruszywem. Dyfuzja płynnych roztworów przez materiał może być szybka, szczególnie w przypadkach, gdy w strukturze kompozytów występuje duża ilość pustych przestrzeni. Zmniejszenie sił wiązania na granicy faz prowadzi do obniżenia wartości parametrów definiujących jakość kompozytu. Roztwory kwasów i zasad mogą atakować materiał z pozycji międzyfazowych i degradować samą matrycę polimeru. Biorąc pod uwagę fizyczny mechanizm tego zjawiska, obserwowany w trakcie prowadzonych przeze mnie badań, przyrost masy próbek wynikający z absorpcji roztworu przez zanurzoną w nim próbkę wydaje się być procesem stabilizującym się w dłuższym okresie czasu, co jest bardzo pozytywnym zjawiskiem. Wybór odpowiedniego modelu do przewidywania zmian właściwości kompozytów żywicznych narażonych na działanie roztworów korozyjnych nie jest jednak łatwy, zwłaszcza jeśli chodzi o prognozy długoterminowe, które wymagają gromadzenia danych w dłuższych okresach, w celu monitorowania zmian właściwości.

Modele funkcji regresji opisującej dane zjawisko stanowią bardzo cenną informację z danej dziedziny nauki. Nowoczesne metody obliczeniowe i narzędzia statystyczne pozwalają na wybór funkcji o wielu zmiennych, które dobrze pasują do analizowanych danych. W przypadku badań modelujących zmiany masy próbek zapraw epoksydowych poddanych działaniu roztworów korozyjnych, opisowi danych doświadczalnych mogą odpowiadać dwie różne krzywe regresji: logarytmiczna i wykładnicza. Stwierdziłam, że właściwy wybór może być dokonany w oparciu o graficzną prezentację uzyskanych wyników, która zawsze jest pomocna w takim przypadku, gdyż człowiek jest najlepszym interpreterem obrazów. Ponadto, ostateczny wybór modelu powinien opierać się nie tylko na znajomości reguł wynikających z wyników obliczeń statystycznych (np. ze względu na wysoką wartość obliczonych współczynników korelacji czy determinacji), ale również na znajomości badanego zjawiska. Tam gdzie była taka możliwość wykorzystywałam dodatkową wiedzę o samym procesie otrzymywania kompozytu do formułowania wniosków merytorycznych nt. rodzaju zmian właściwości materiałów w funkcji czasu.

Monitorowanie zmian właściwości zapraw poddanych działaniu roztworów agresywnych chemicznie prowadziłam przez okres 5 lat [C2, C3]. Okazało się, że był to okres wystarczający na dokonanie oceny modeli prognostycznych i porównanie tych wyników z rzeczywistym zachowaniem się zapraw poddanych działaniu roztworów korozyjnych przez okres pięciu lat. Przez cały ten czas tworzona była baza danych w której przechowywane były wszystkie wyniki badania zmian właściwości próbek. W odniesieniu do badań odporności chemicznej założyłam, że zostaną zasymulowane rodzaje środowisk korozyjnych, które w rzeczywistości

mogą mieć potencjalny kontakt z produktami żywicznymi, takie jak: 10% roztwór kwasu siarkowego, 10% roztwór kwasu azotowego, 10% roztwór wodorotlenku sodu i 10% roztworu chlorku sodu. Zmiany właściwości fizycznych (zmiana masy i wyglądu próbek) obserwowane po pierwszym roku ekspozycji kompozytów w agresywnych mediach opisałam w publikacji: „Resin composites with high chemical resistance for application in civil engineering” [C2]. Dzięki zastosowaniu teorii planowania eksperymentu i planu centralnego kompozycyjnego, możliwe było eksperymentalne zdefiniowanie funkcji opisującej wpływ parametrów wejściowych charakteryzujących skład zaprawy (zawartość procentowa glikolizatu PET, stosunek żywica/kruszywo) na jej jakość wyznaczoną wielkościami wyjściowymi, czyli właściwościami poddanymi do badania (procent zmiany wagi). Charakter tego efektu oraz obszary zmienności danych wejściowych, w których wielkości wyjściowe przyjmują ekstremalne wartości, przedstawiają wykresy ilustrujące przestrzenne powierzchnie odpowiedzi, będące wielomianami algebraicznymi drugiego stopnia (Rys. 10).

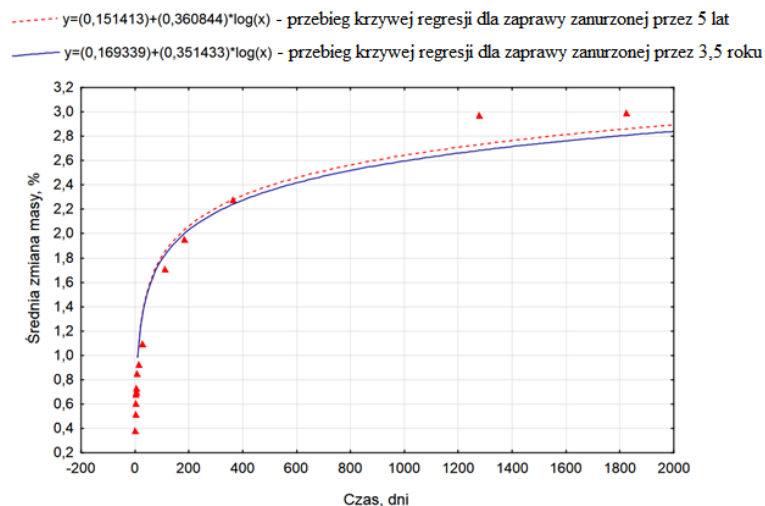


Rys. 10. Wykresy ilustrujące przestrzenne powierzchnie odpowiedzi dla zmiany masy próbek narażonych przez 12 miesięcy na działanie (a) 10% roztworu kwasu siarkowego, (b) 10% roztworu wodorotlenku sodu, (c) 10% roztworu kwasu azotowego, (d) 10% roztworu chlorku sodu [C2]

Uzyskane wyniki dowodzą, że największe zmiany masy miały miejsce w przypadku próbek poddanych działaniu 10% roztworu kwasu azotowego oraz kwasu siarkowego (na wykresach powierzchni odpowiedzi widoczne maksimum funkcji). Roztwory wodorotlenku sodu i chlorku sodu stanowią znacznie mniejsze zagrożenie korozyjne dla kompozytów o osnowie żywicznej (na wykresach powierzchni odpowiedzi widoczne minimum funkcji).

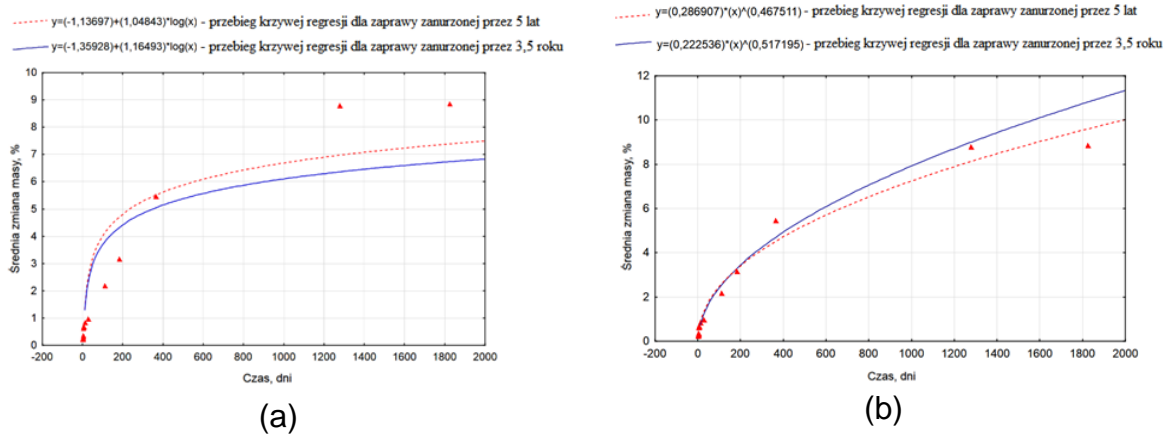
Zdecydowanie największe przyrosty masy, dla prawie wszystkich mediów korozyjnych, odnotowałam w przypadku zaprawy, której skład cechuje najwyższa zawartość kruszywa w kompozycie, co mogło powodować niedostateczne pokrycie ziaren kruszywa przez żywicę, a w konsekwencji przełożyć się na niższą odporność korozyjną kompozytu.

Monitorowanie zmian masy próbek zaprawy epoksydowej modyfikowanej glikolizatami poli (tereftalanu etylenu), zanurzonych w 10% wodnych roztworach kwasu siarkowego i azotowego, wodorotlenku sodu i chlorku sodu kontynuowałam przez kolejne lata. Wyniki badań po pięcioletnim okresie zanurzenia przedstawiłam w artykule: „*Long-Term Chemical Resistance of Ecological Epoxy Polymer Composites*” [C3]. Uzyskane rzeczywiste średnie zmiany masy porównałam z danymi obliczonymi na podstawie funkcji regresji dopasowanych do danych zarejestrowanych po 3,5 roku ekspozycji. Pozwoliło to na weryfikację poprawności doboru modelu i ocenę skuteczności dopasowanej funkcji regresji. W przypadku wodnych roztworów wodorotlenku sodu i chlorku sodu można uznać, że model logarytmiczny dobrze opisuje zmiany masy. Zaobserwowałam, że waga próbek wystawionych na działanie roztworów NaCl i NaOH stabilizuje się w dłuższym czasie monitorowania i osiąga plateau (Rys.11).



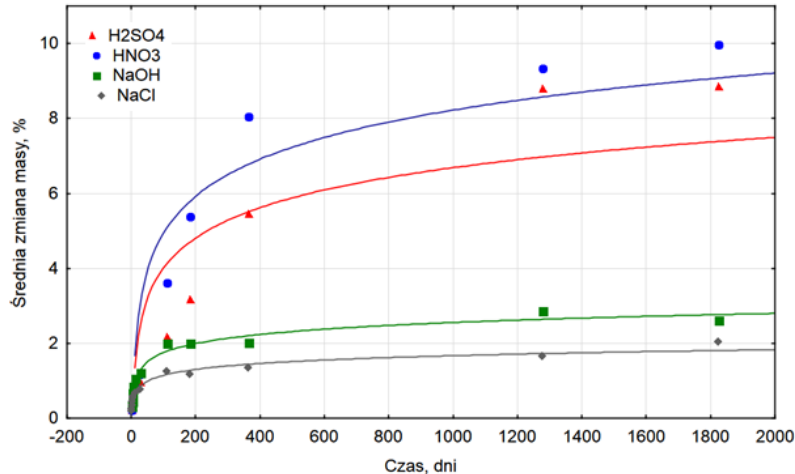
Rys. 11. Przebieg krzywych regresji wyznaczonych dla zapraw modyfikowanych glikolizatem poli(tereftalanu etylenu), zanurzonych przez 3,5 roku i 5lat w 10% roztworze NaOH [C3]

Jednak zmiany masy próbek zaprawy zanurzonej na 5 lat w wodnym roztworze kwasu siarkowego i azotowego dość istotnie różnią się od danych obliczonych na podstawie linii trendu dopasowanej do wyników badań przeprowadzonych po 3,5 roku ekspozycji. Okazało się, że lepszym rozwiązaniem jest tutaj wybór modelu wykładniczego (Rys. 12).



Rys. 12. Krzywe regresji dopasowane do średnich zmian masy próbek zapraw modyfikowanych glikolizatami poli(tereftalanu etylenu) po 3,5 roku i 5 latach zanurzenia w kwasie siarkowym: (a) model logarytmiczny, (b) model wykładniczy [C3]

Dodatkowo umieszczenie logarytmicznych linii trendu dla wszystkich mediów korodujących razem na wykresie (Rys. 13) pozwala wskazać, które z mediów jest najbardziej agresywne. Ponadto stwierdziłam, że po 5 latach zanurzenia w wodnych roztworach kwasów próbki zaprawy stały się kruche, a obserwacja ich pęknięć potwierdziła słabość połączenia na granicy faz żywica/kruszywo. Odnotowałam również zmiany w wyglądzie próbek, a mianowicie powierzchnie próbek przechowywanych w roztworze kwasu azotowego silnie pożółkły, a poddanych działaniu kwasu siarkowego zmatowiały.



Rys. 13. Logarytmiczne linie trendu obrazujące średnie zmiany masy w czasie 5 lat, próbek zapraw epoksydowych modyfikowanych glikolizatami poli(tereftalanu etylenu), zanurzonych w czterech różnych mediach korozyjnych [C3]

Przeprowadzone przeze mnie eksperymenty dały podstawę do budowy laboratoryjnej bazy danych, w której zgromadziłam m.in. dane na temat rodzaju i składu surowców użytych do produkcji kompozytów oraz odpowiadające im właściwości otrzymanych zapraw polimerowych. Zbiór tych danych wzbogacałam o wyniki badań prowadzonych w kolejnych latach pracy. Takie zbiory danych mogą być wykorzystane do poszukiwania ukrytych w nich użytecznych regularności. Przykładowo, podczas projektowania prefabrykowanych elementów budowlanych

poszukuje się odpowiedzi na pytanie: jakiej żywicy (lub jakiego kruszywa) do produkcji polimerowych prefabrykatów betonowych należy użyć, aby element ten przez wiele lat spełniał wymagane właściwości mechaniczne.

Odpowiedzi na te pytania może dostarczyć m.in. uzyskany model prognostyczny w postaci funkcji obiektu badań, którą można przedstawić na przestrzennych lub warstwicznych wykresach powierzchni odpowiedzi. Uzyskanie tego modelu było celem prowadzonych badań opisanych w trzech pierwszych artykułach z zaprezentowanego cyklu. Wizualizacja danych, jaką umożliwia stosowane oprogramowanie, ma znaczną wartość poznawczą. Wykresy trójwymiarowe z możliwością rotowania obrazów pozwalają na jednoczesną analizę wpływu wszystkich zmiennych wejściowych na daną zmienną wyjściową. Typowy model w klasycznej metodyce planowania doświadczeń to model o charakterze aproksymacyjnym. Ma on za zadanie dostarczenie ilościowej prognozy dotyczącej oczekiwanej odpowiedzi badanego obiektu lub rozrzutu tej odpowiedzi aproksymując wyniki badań laboratoryjnych w taki sposób, aby różnica pomiędzy wyznaczoną funkcją regresji a punktami eksperymentalnymi była jak najmniejsza (metoda najmniejszych kwadratów). W przypadku planów powierzchni odpowiedzi wyróżnia się model prognostyczny funkcyjny, który prognozuje odpowiedź probabilistyczną. Znalezienie funkcji obiektu badań, adekwatnej do wyników pomiarów, pozwala na prognozowanie właściwości kompozytu na podstawie zadanego składu, lub odwrotnie oszacowanie dla jakiego składu możliwe jest uzyskanie badanego parametru na założonym poziomie.

Właściwe zaplanowanie eksperymentu umożliwia więc uzyskanie użytecznej i pełnej informacji o badanym obiekcie, a jednocześnie skutkuje ograniczeniem nakładów finansowych, które generują prace badawcze, a które są niewspółmierne z kosztami prac teoretycznych prowadzonych metodą *in silico*. Badania naukowe to wprawdzie połączenie teorii i eksperymentu, ale to właśnie wiedza empirycznie sprawdzona pozwala uzyskać nowe i pewne wiadomości, a tym samym wnieść istotny wkład w rozwój nauki. Z informacji potwierdzonych eksperymentalnie można także czerpać praktyczne korzyści. W tym kontekście warto zwrócić uwagę nie tylko na właściwe zaplanowanie badań, ale także na poszukiwanie takich metod drążenia danych (*data mining*), które umożliwią maksymalnie efektywne wykorzystanie wszystkich wyników prowadzonych badań. Precyzyjne zebranie, zapisanie i zarchiwizowanie wyników prowadzonych eksperymentów pozwala stworzyć bazę danych, która może być rozszerzana o nowe wyniki i w przyszłości stanowić bazę do prowadzenia kolejnych analiz. Nawet „stare” pozornie wyeksploatowane wyniki badań stanowią zasoby, z których można wydobyć nowe prawdy naukowe, pod warunkiem zastosowania odpowiednich narzędzi informatycznych i statystycznych. Dlatego istotne jest, aby naukowiec prowadzący badania posiadał takie instrumentarium. Bez tych narzędzi wykrycie w dużej bazie danych współzależności, które stanowią nową cenną informację, jest bardzo trudne lub wręcz niemożliwe. Do takich narzędzi zaliczyć można techniki eksploracji wiedzy z baz danych, dostępne m.in. w programie Statistica.

Stworzenie laboratoryjnej bazy danych i zastosowanie technik eksploracji wiedzy z tych baz z wykorzystaniem różnych technik (analiza dyskryminacyjna, drzewa decyzyjne, analiza skupień, data mining) pozwala na opracowanie modeli, które w przyszłości pozwolą na predykcję cech, bez konieczności wykonania badań. Fakt ten jest szczególnie istotny w przypadku kompozytów budowlanych, dla których aby

określić ich specyficzne właściwości należy wykonać szereg badań niszczących, co jest pracochłonne i generuje koszty.

Metody eksploracyjne umożliwiają również klasyfikację kompozytów opisanych danym zestawem parametrów (cech, danych wejściowych) do odpowiedniej grupy. Im więcej przebadanych kompozytów z wykorzystaniem różnych typów materiałów odpadowych, a także o zróżnicowanych osnowach, tym większa baza danych, szersze możliwości analityczne i bogatsza wiedza o tych materiałach.

Korzystając z wybranych metod eksploracyjnych przeprowadziłam analizy numeryczne opisane w kolejnym artykule z cyklu [C6]. Obiektem badań nadal pozostawały zaprawy żywiczne modyfikowane glikolizatem otrzymanym na bazie odpadów poli(tereftalanu etylenu). W tym wypadku jednak przebadano trzy typy zapraw różniących się rodzajem zastosowanej żywicy, odpowiednio epoksydowej, poliestrowej i poliestrowej z dodatkiem krzemionki koloidalnej. Żywica w znacznym stopniu decyduje o właściwościach takiego kompozytu, a zwłaszcza o jego odporności chemicznej. Użycie danego rodzaju żywicy powoduje, że otrzymany kompozyt ma różne właściwości. Dlatego niezwykle ważny jest rozsądny dobór rodzaju spoiwa nie tylko do przewidywanych warunków procesu wytwarzania, ale przede wszystkim do założonego obszaru użytkowania wyrobów z betonu żywicznego.

Aby wykazać w jakim stopniu rodzaj żywicy oraz ilość dodanego modyfikatora różnicuje właściwości zapraw żywicznych, zastosowałam dwie techniki eksploracji wiedzy z bazy danych, tj. analizę dyskryminacyjną oraz drzewa klasyfikacyjne. W tym przypadku, w oparciu o dane zgromadzone w bazie poszukuje się zależności postaci:

rodzaj żywicy, modyfikator → właściwości kompozytu.

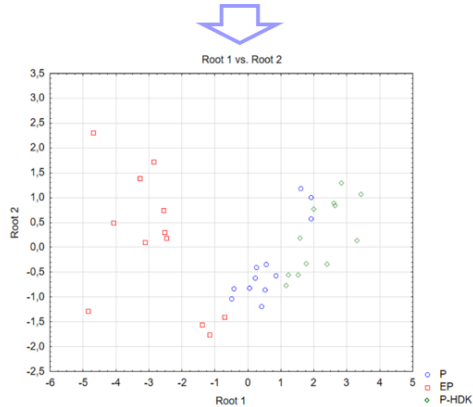
Stwierdziłam, że zbudowane modele pozwalają również na klasyfikowanie nowych przypadków tzn. zapraw o innym składzie, do wyróżnionych skupień obiektów (próbek) o podobnych właściwościach. Ponadto, podczas poszukiwania kompozytu o zadanych właściwościach, zbudowane modele mogą pełnić rolę prognostyczną. W sytuacji, gdy chcemy uzyskać odpowiedź na pytanie jakiej użyć żywicy i jaką ilość modyfikatora zastosować, wnioskowanie będzie przebiegać w przeciwnym kierunku tj.:

właściwości kompozytu → rodzaj żywicy, modyfikator

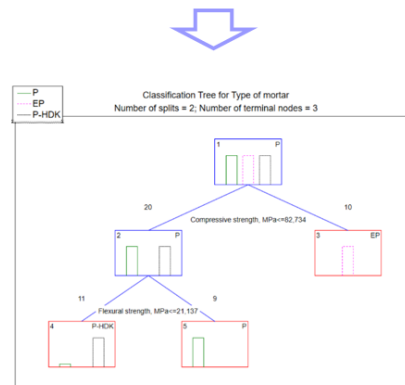
W publikacji [C6], na podstawie uzyskanego zbioru danych oraz wymienionych powyżej dwóch bazodanowych technik eksploracji wiedzy, wykazałam w jakim stopniu rodzaj żywicy oraz obecność dodanego modyfikatora różnicuje właściwości zaprawy. Porównałam wyniki uzyskane obiema metodami i w obu przypadkach stwierdziłam, że techniki te są skuteczne zarówno wtedy, gdy wykorzystuje się je do klasyfikacji próbek, jak i przewidywania (doboru) rodzaju zaprawy podczas projektowania nowych kompozytów. W procesie prognozowania najlepiej sprawdzała się metoda „najbliższego sąsiedztwa”. Graficzne wyniki tych analiz zaprezentowałam na rysunku 14.

TECHNIKI EKSPLOKACJI WIEDZY Z BAZY DANYCH

ANALIZA DYSKRYMINACYJNA



DRZEWA KLASYFIKACYJNE



Rys. 14. Graficzne przedstawienie wyników analizy dyskryminacyjnej i drzew klasyfikacyjnych [C6]

Uzupełnieniem wniosków zaprezentowanych w artykule [C6] oraz potwierdzeniem skuteczności eksploracyjnej metody analizy danych, jaką jest analiza dyskryminacyjna w dziedzinie kompozytów żywicznych, są także wyniki badań opisane w artykule „*The use of discriminant analysis methods for diagnosis of the causes of differences in the properties of resin mortar containing various fillers*” [D13]. Wykazałam tam, że także rodzaj stosowanego wypełniacza może znacznie różnicować wartości parametrów fizyko-mechanicznych zapraw epoksydowych. Opisana w artykule metoda analizy dyskryminacyjnej umożliwia z powodzeniem przeprowadzenie klasyfikacji zapraw budowlanych otrzymanych z wykorzystaniem trzech różnych rodzajów kruszyw, tj. perlitu, keramzytu i granulatu odpadowej gumy, stanowiących częściowy substytut piasku kwarcowego (Rys. 15).

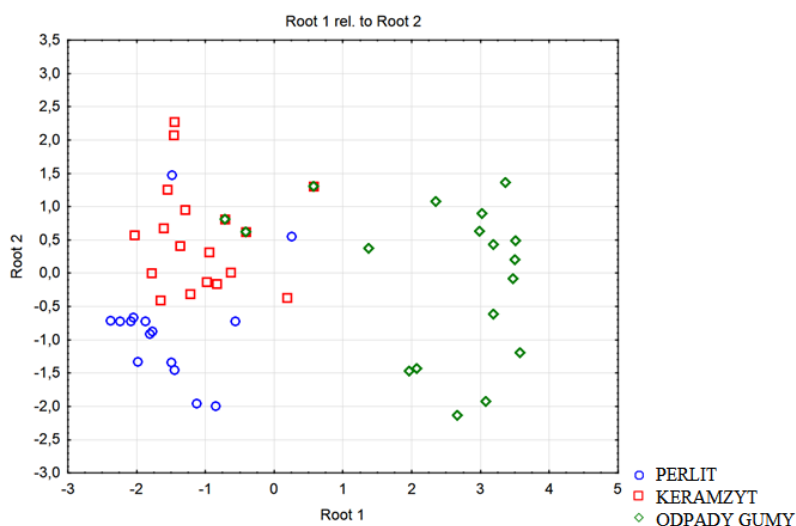


Fig. 15. Wykres rozrzutu dla uzyskanych dwu funkcji dyskryminacyjnych [D13]

Na przedstawionym rysunku wyraźnie widać selektywne możliwości klasyfikacji zapraw (tworzą się 3 różne grupy próbek) po użyciu wybranych algorytmów tworzących skupienia obiektów.

4.6. Jednoczesna optymalizacja kilku wybranych właściwości kompozytów [C7]

Ostatnie trzy artykuły wymienionego cyklu [C7–C9] zawierają wyniki potwierdzające, że badane kompozyty można zaliczyć do materiałów o kruchej matrycy. Wprowadzenie do mieszanki niektórych typów odpadów lub włókien poprawiło tę właściwość, ponieważ makroskopowe cechy kompozytu w wyraźny sposób uzależniły się od jego budowy wewnętrznej.

Kruchość i mała udarność stanowią poważną wadę utwardzonych żywic epoksydowych. Opisane w literaturze badania prowadzone dla zapraw epoksydowych z wykorzystaniem parametrów mechaniki pęknięcia (m.in. wyznaczano energię pęknięcia oraz krytyczny współczynnik intensywności naprężeń) wykazały, że wraz z upływem czasu kruchość zapraw wzrasta, a odporność na pęknięcie maleje. Podczas procesu polimeryzacji matrycy obserwowano wzrost kruchości i siły oddziaływań międzyfazowych, co prowadziło do nagłego jej pęknięcia, powodując pogorszenie parametrów pęknięcia. Niedoskonałości te można wyeliminować poprzez modyfikację chemiczną, która jest możliwa dzięki chemicznej budowie żywic epoksydowych, gdyż w ich strukturze są obecne grupy funkcyjne, które umożliwiają reakcje chemiczne z grupami funkcyjnymi modyfikatorów. Wiele związków, na przykład nienasycone żywice poliestrowe, stosuje się do modyfikacji żywic epoksydowych. Wykorzystywane są również różne elastomery, takie jak kopolimery butadien-akrylonitryl zakończone grupami karboksylowymi czy polibutadien zakończony grupami hydroksylowymi. W artykułach [C1–C3, C6] potwierdzono również pozytywne efekty modyfikacji żywicy epoksydowej przez glikolizaty otrzymane na bazie odpadów z poli(tereftalanu etylenu). Modyfikator ten pozwolił zwiększyć elastyczność kompozytu. Kolejną ważną grupą modyfikatorów żywic epoksydowych stosowanych w celu poprawy ich elastyczności są poliuretany, które cechuje doskonała elastyczność, udarność, odporność na ścieranie, a także bardzo wysoka wytrzymałość mechaniczna.

W artykule „*Experiment designing methods in innovative polymer material planning*” [C7] opisałam wyniki badań nad modyfikacją chemiczną żywicy epoksydowej przez oligomery uretanowe zakończone izocyjanianem otrzymane z polieterotoluenodiizocyjanianu TDI-80 (mieszanka 80/20 izomerów 2, 4 i 2, 6). Modyfikacja polegała na dodaniu modyfikatora uretanowego w ilości zgodnej z przyjętym planem eksperymentu, a następnie wygrzaniu każdej z otrzymanych kompozycji w celu umożliwienia reakcji pomiędzy grupami funkcyjnymi składników. Aby ocenić skuteczność modyfikacji, dla utwardzonych kompozycji wykonano cztery wybrane rodzaje badań fizyko-mechanicznych. Konsekwentnie, również w tych badaniach stosowałam komputerowe planowanie eksperymentu i procedury statystyczne do wszechstronnej analizy statystycznej wyników doświadczeń, zaimplementowane w pakiecie Statistica Ponadto, wykorzystane bardziej zaawansowane techniki statystyczne (algorytmy DoE, w tym metody powierzchni odpowiedzi) świetnie sprawdziły się w przeprowadzonych badaniach empirycznych podczas modelowania i analizy wyników, w których na odpowiedź będącą przedmiotem zainteresowania miało wpływ kilka zmiennych. Uzyskane rezultaty pozwoliły dobrać funkcję modelującą wpływ składu kompozycji żywicznych na ich właściwości fizyko-mechaniczne oraz wskazać optymalny skład tych kompozycji, dobrany pod kątem planowanych praktycznych zastosowań.

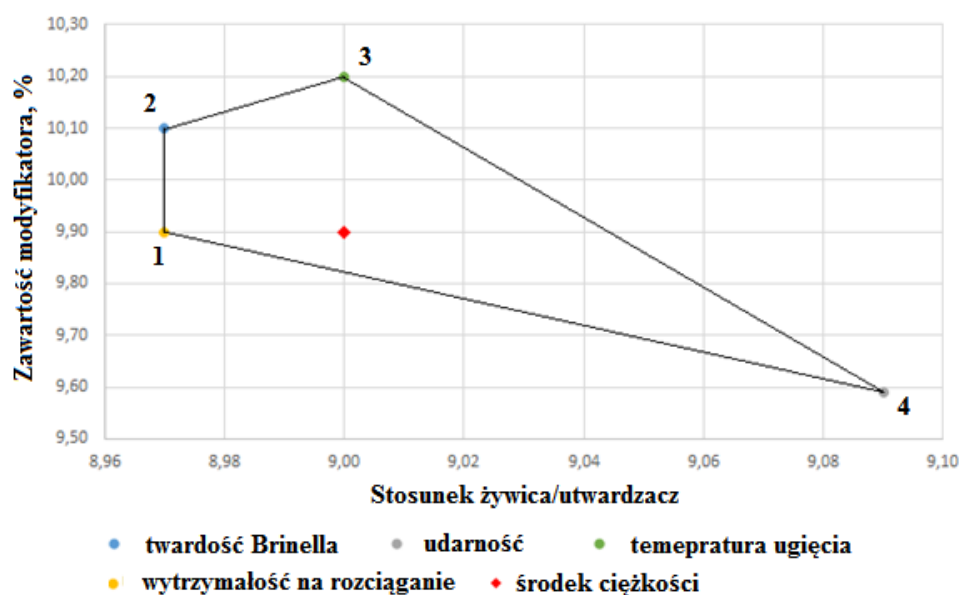
Zaimplementowane w programie Statistica procedury obliczeń wartości krytycznych pozwoliły stwierdzić, dla jakich wartości zmiennych wejściowych: stosunek

żywica/utwardzacz i procentowa zawartość modyfikatora uzyskano maksymalne wartości zmiennych wyjściowych (wytrzymałość na rozciąganie, udarność, twardość Brinella i temperatura ugięcia pod wpływem ciepła). Badając wartości funkcji powierzchni odpowiedzi, ustalono globalne ekstrema badanych parametrów. Zestawiono wartości krytyczne dla wszystkich zmiennych wyjściowych (tabela 1), a następnie wyniki umieszczono na wykresie (Rys.16), którego oś pozioma to stosunek żywica/utwardzacz, a oś pionowa to procentowa zawartość modyfikatora.

Tabela 1. Wartości krytyczne dla zmiennych wyjściowych [C7]

Nr punktu	Właściwości mechaniczne	Stosunek żywica/utwardzacz x_1	Modyfikator, % x_2	Przybliżona wartość w rozwiązaniu	Rodzaj ekstremum globalnego
1	Najwyższa wytrzymałość na rozciąganie, MPa	8,97	9,90	37,94	maksimum
2	Twardość Brinella, MPa	8,97	10,10	15,27	minimum
3	Temperatura ugięcia pod wpływem ciepła, °C	9,00	10,23	48,11	minimum
4	Udarność, kJ/m ²	9,07	9,67	5,60	maksimum

Analizując rozmieszczenie wyróżnionych czterech punktów (Rys. 16) można wskazać, gdzie plasują się punkty odnoszące się do maksimum wartości wytrzymałości na rozciąganie i temperatury ugięcia pod wpływem ciepła oraz punkty minimalnych wartości udarności i twardości Brinella.

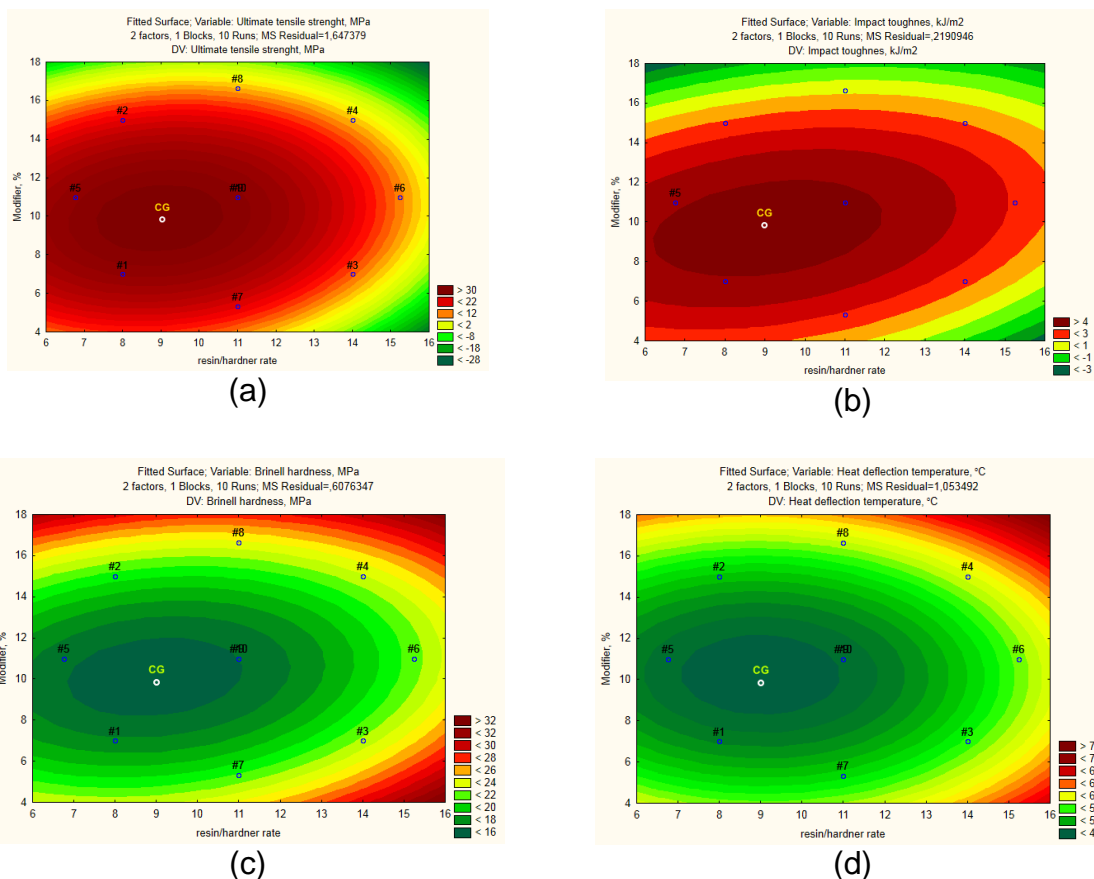


Rys. 16. Ekstrema globalne (wartości krytyczne) właściwości badanych kompozycji żywic epoksydowych i wyliczony środek ciężkości:
Stosunek żywica/utwardzacz = 9,00, Zawartość modyfikatora = 9,9 % [C7]

Powstał czworokąt, dla którego wyznaczono środek ciężkości, posługując się pojęciem i wzorami definiującymi statyczny środek ciężkości czworokątnej figury płaskiej. Odpowiednie wzory zamodelowałam w arkuszu kalkulacyjnym Excel.

Punkt ten został następnie wrysowany na wykresach warstwicowych powierzchni odpowiedzi, przedstawiających rozkłady dla czterech badanych parametrów (Rys. 17). Na rysunku widać, że wyznaczony środek ciężkości znajduje się w niewielkiej odległości od środka najmniejszej elipsy, a więc blisko ekstremum funkcji odpowiedzi (maksimum lub minimum wartości) w przypadku wszystkich czterech zmiennych wyjściowych.

Przeprowadzone analizy umożliwiły wyznaczenie parametrów, a następnie ocenę modelu opisującego zależność właściwości mechanicznych próbek modyfikowanych kompozycji żywicznych od ich składu. Pozwoliło to na dobór optymalnych składów próbek żywic epoksydowych pod kątem ich możliwych zastosowań praktycznych. Wartości wielkości wyjściowych próbek obliczone dla wyznaczonego środka nie różnią się istotnie (założony poziom istotności wynosił 0,05) od maksimum/minimum wyznaczonych dla funkcji powierzchni odpowiedzi. Tym samym wykazałam, że zastosowanie metody DOE pozwoliło na opracowanie modeli matematycznych pozwalających na przewidywanie właściwości kompozytów z błędem nie przekraczającym 5%.



Rys. 17. Wykres warstwicowy powierzchni odpowiedzi dla kompozycji żywicznych wraz ze środkiem ciężkości dla wszystkich czterech wartości krytycznych dla: (a) wytrzymałości na rozciąganie, (b) temperatury ugięcia, (c) twardości Brinella, (d) udamności [C7]

Poprawność wyznaczenia ekstremum potwierdziłam eksperymentalnie wykonując próbkę kompozytu o zaproponowanym składzie i badając jej właściwości. Podkreślić tutaj należy, że również w przypadku innych moich badań starałam się zawsze przeprowadzać walidację eksperymentalną wyników uzyskanych metodą *in silico*, czyli przy pomocy modelowania komputerowego.

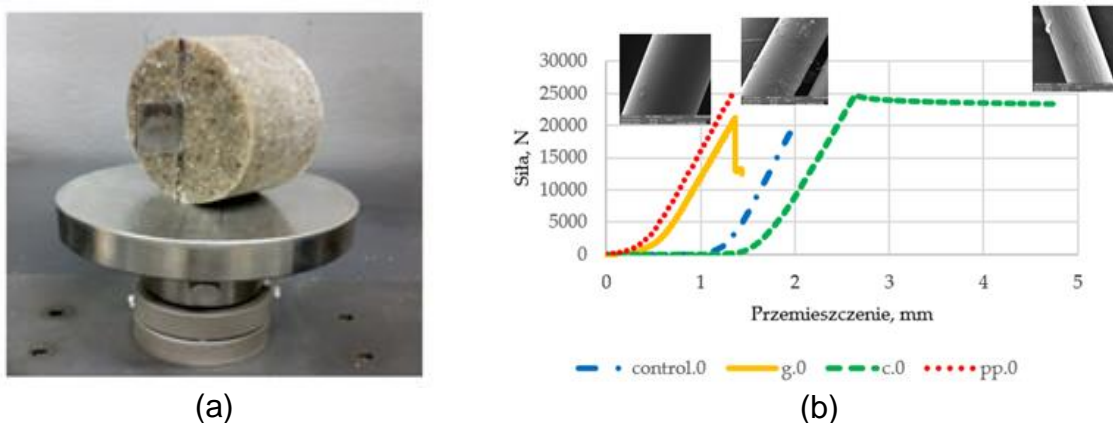
4.7. Dostosowanie dostępnych procedur i sprzętu badawczego do specyfiki otrzymanego nowego lub modyfikowanego materiału [C8, C9]

Planowanie doświadczeń jest często polecane również z tego względu, że jest to metoda znacznego ograniczania kosztów prowadzonych badań. W niektórych badaniach specjalistycznych jest to szczególnie ważne, gdyż wysokie nakłady finansowe generuje wymagana wielkość próbek badawczych oraz konieczność stosowania specjalistycznego, kosztownego sprzętu. Wykorzystanie metody *in silico*, według której właściwy dobór metod badawczych poprzedza eksperymenty laboratoryjne, ogranicza koszty badań do niezbędnego minimum.

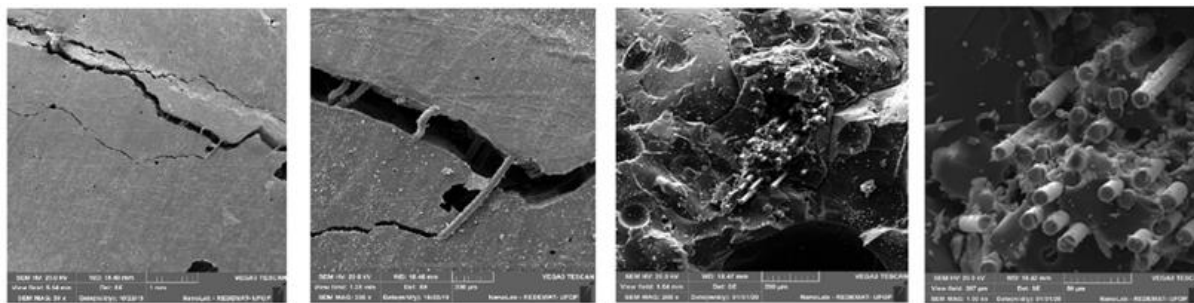
Przypadek ten można odnieść do badań kompozytów żywicznych, które pomimo wielu zalet, wykazują tendencje do kruchego pęknięcia. Zastosowanie metod mechaniki pęknięcia w odniesieniu do składników wydaje się być kluczowe aby efektywnie wykorzystać te materiały, a powszechność występowania tego zjawiska wskazuje na potrzebę prowadzenia badań w celu ustalenia łatwej w realizacji metody określania wartości parametrów mechaniki pęknięcia, do których zalicza się krytyczny współczynnik intensywności naprężeń K_{Ic} , energię pęknięcia G i rozwarcie wierzchołka szczeliny (crack tip opening displacement) CTOD. Doświadczalnie parametry te wyznacza się dla próbek ze szczelinami, których wycięcie lub uformowanie z zachowaniem odpowiedniej długości i orientacji może sprawiać trudności i może być przyczyną niedokładności testu. Najczęściej przeprowadza się badania na elementach belkowych z karbem. Opierają się one na zależności pomiędzy obciążeniem niszczącym, a długością rysy początkowej. Procedury badawcze stosowane do oceny odporności betonu na pęknięcie można odnaleźć w projektach komitetu RILEM (The International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures – fr. Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages). Według tych wytycznych na próbkach kontrolnych w formie belek o wymiarach zależnych od wielkości kruszywa wykonuje się karb i obciąża się je pojedynczą siłą skupioną zgodnie z I modelem pęknięcia (rozciąganie przy zginaniu). Wśród wad metod opisanych przez RILEM można wyróżnić m.in. brak określonego sposobu pomiaru przemieszczenia, konieczność przygotowania elementów belkowych o zróżnicowanych wymiarach, które powinny być badane na tym samym stanowisku badawczym, czy konieczność wykonania próbek o znacznej objętości, np. o wymiarach 80mmx150mmx700mm.

Aby ograniczyć koszty eksperymentów, badania odporności na kruche pęknięcie otrzymywanych kompozytów żywicznych przeprowadziłam metodą dysku brazylijskiego, którą można uznać za alternatywną do powszechnie stosowanych metod, opisanych w zaleceniach RILEM. Polecam tą metodę szczególnie w przypadku kompozytów żywicznych, gdyż właściwości mechaniczne betonów polimerowych umożliwiają jej aplikację w elementach cienkościennych, których grubość wymusza zastosowanie kruszywa o niewielkiej maksymalnej średnicy ziarna. W konsekwencji zaciera się granica pomiędzy betonem a zaprawą polimerową, a zastosowanie kruszywa drobnego pozwala prowadzić badania na stosunkowo niewielkich próbkach. Wyniki badań opisałam w artykule [C8]. Wykonałam próbki

w kształcie walców o średnicy 80 mm i wysokości 38 mm. Pęknięcie było symulowane poprzez wstawienie na środku walca cienkich metalowych podkładek o szerokości 25 mm i grubości 2 mm (rys. 18 (a)). Analizując dane literaturowe doszłam do wniosku, że należy spróbować czy quasi kruche zachowanie matrycy żywicznej nie będzie można poprawić m.in. poprzez włączenie włókien (polipropylenowych, szklanych, węglowych) do mieszanki kompozytowej. W przypadku badań przedstawionych w artykule [C8] modyfikacja polegała więc na dodaniu włókien do mieszanki żywicznej. Wykonałam cztery rodzaje zapraw zróżnicowanych pod względem ilości i rodzaju włókien (w tym zaprawy kontrolne – bez włókien). Takie podejście pozwoliło na porównanie otrzymanych wyników badań. Zaproponowany sposób modyfikacji jest istotny, gdyż pozwala na znaczną poprawę właściwości mechanicznych kompozytów żywicznych, a jednocześnie powoduje, że stają się bardziej odporne na pęknięcie. Zależność siła-przemieszczenie dla zapraw zawierających dany rodzaj włókien przedstawia rysunek 18 (b). Właściwości tego typu kompozytów zależą w dużej mierze od cech ich materiałów składowych i interakcji między nimi. Istotna jest m.in. przyczepność włókno-matryca i długość włókna, średnica i struktura wewnętrzna/zewnętrzna włókien, obróbka włókien oraz ich dyspersja w matrycy. Mechanika pęknięcia w zaprawie polimerowej jest silnie zależna od orientacji włókna, ich rozmieszczenia w przekroju kompozytu i jednorodności właściwości włókna. Potwierdziły to badania strukturalne wykonane metodą SEM (Rys. 19). Wyniki przeprowadzonych badań wytrzymałościowych poddałam analizie statystycznej przy użyciu programu Statistica. Uwzględniłam dwa czynniki tj. rodzaj oraz zawartość włókien. W celu sprawdzenia, czy każdy rozważany niezależnie czynnik ma znaczący wpływ na wartości wytrzymałości na zginanie i ściskanie oraz aby określić główny wkład każdego czynnika w wariancję globalną, posłużyłam się nieparametryczną dwukierunkową statystyką ANOVA rang Kruskala-Wallisa. Biorąc pod uwagę wyniki badań wytrzymałościowych wszystkich zapraw oraz przeprowadzone analizy statystyczne, badania odporności na kruche pęknięcie zrealizowałam dla zapraw, w których piasek zastąpiono przez włókna dodane w ilości 2% wagowych. Zaobserwowałam, że nawet ten niewielki dodatek takiej ilości każdego z trzech rodzajów włókien działa jako istotne wzmocnienie zapraw.



Rys. 18. Próbką walcową wykorzystaną w badaniach kruchego pęknięcia (a), wykresy siła-przemieszczenie uzyskane dla próbek zawierających dany rodzaj włókien (b)[C8]



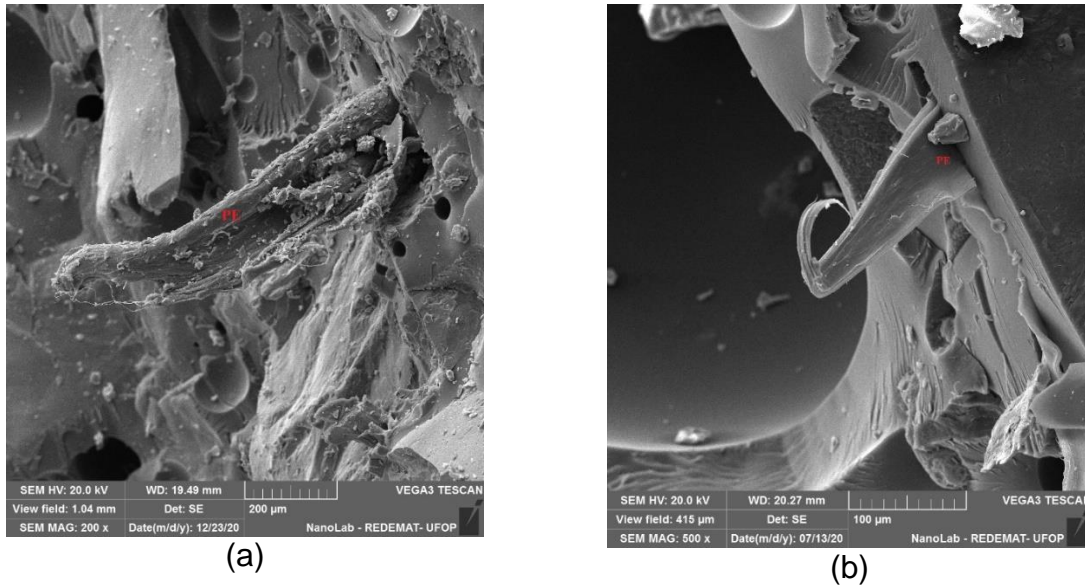
Rys. 19. Zdjęcia mikrostrukturalne zapraw wzmacnianych włóknami [C8]

Okazało się, że zaproponowana metoda spotkała się z dużym zainteresowaniem innych badaczy. Artykuł został zauważony przez zewnętrznych autorów i na platformie Research Gate podano, że uzyskał kilkanaście (17) rekomendacji przez badaczy reprezentujących różne ośrodki naukowe na świecie i chociaż został opublikowany w 2020 roku już zyskał obce cytowania.

Ostatni artykuł cyklu publikacji [C9] łączy problematykę planowania eksperymentu, zagospodarowania odpadów oraz poszukiwania modyfikatorów materiałów o kruchej matrycy.

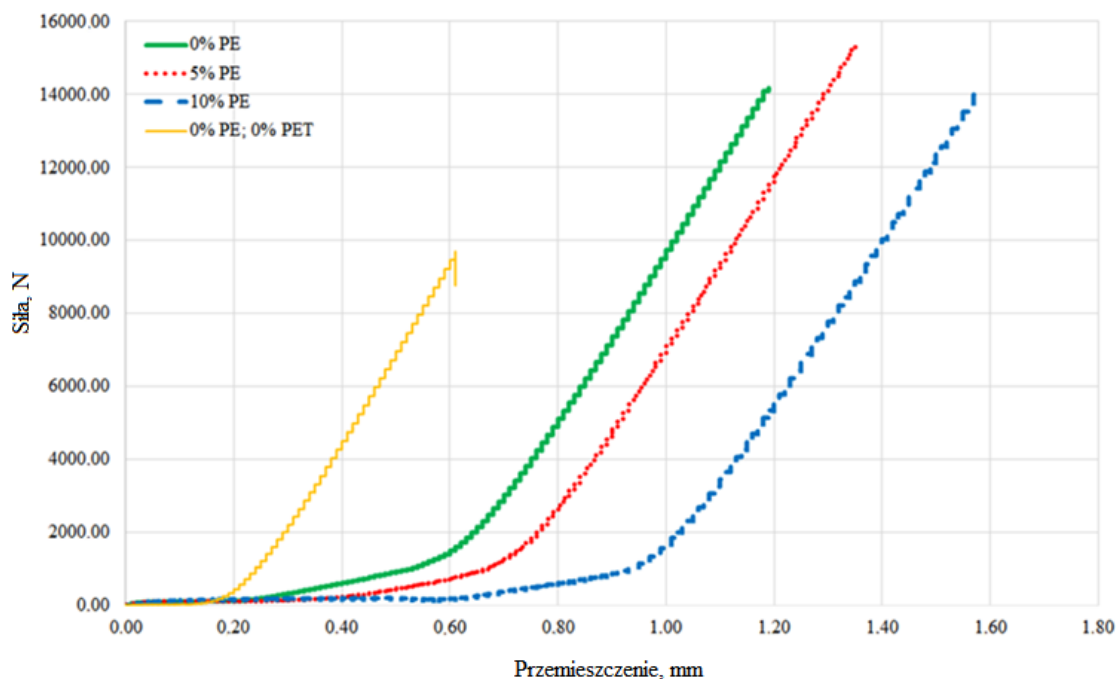
W artykule opisałam wyniki badań mających na celu określenie jednoczesnego wpływu odpadów politereftalanu etylenu (PET) oraz polietylenu (PE) na cechy wytrzymałościowe i gęstość objętościową zapraw epoksydowych. W zaprawach tych przeprowadziłam dwutorową modyfikację, która polegała na zastąpieniu 9% wagowych żywicy glikolizatem otrzymanym na bazie odpadów PET. Dodatkowo odpowiednio 0–10% obj. kruszywa podmieniono aglomeratem PE wytworzonym z odpadowych worków foliowych. Zaproponowana przeze mnie modyfikacja składu zaprawy epoksydowej ma szczególny aspekt środowiskowy i ekonomiczny. Pozwala także na ochronę naturalnych źródeł kruszywa, przy jednoczesnym zmniejszeniu ilości odpadów i redukuje problemy wynikające z konieczności ich magazynowania. Otrzymany kompozyt cechuje się bardzo dobrymi właściwościami wytrzymałościowymi. Przy substytucji 9% wag. żywicy i 5% obj. piasku uzyskano wytrzymałość na zginanie na poziomie 35,7 MPa, a na ściskanie 101,1 MPa. Zarówno dodatek glikolizatu otrzymanego na bazie odpadów PET, jak i aglomerat odpadowego PE znacząco wpłynął na zwiększenie plastyczności otrzymanych zapraw epoksydowych, poprawiając przy tym jednocześnie wartości charakteryzujące wytrzymałość na zginanie. Potwierdzeniem tych spostrzeżeń są wyniki badania mikrostruktury otrzymanych zapraw (Rys. 20) oraz wykresy siła-przemieszczenie (Rys. 21).

Uzyskane wartości wytrzymałości na zginanie mogą być powiązane z interakcją między cząstkami odpadów i matrycą polimerową. Takie interakcje zależą od morfologii zarówno żywicy, jak i cząstek odpadów. Zdjęcia odpadu PE obecnego w zaprawie, wykonane za pomocą mikroskopu skaningowego (Rys. 20) pokazują, że powierzchnia odpadu PE nie jest gładka. Szorstkość powierzchni obserwowana dla cząstek PE ułatwia mechaniczne zakotwiczenie między matrycą polimerową a cząstkami PE i w konsekwencji wzrost wytrzymałości na zginanie.



Rys. 20. Mikrofotografie SEM modyfikowanych zapraw żywicznych w powiększeniu (a) 200x, (b) 500x [C9]

Na mikrofotografii (Rys. 20) widać cząsteczki odpadu, które mogą mieć działanie podobne do włókien. Przy większym udziale odpadu i niższym stosunku żywicy do kruszywa, pokrycie cząstek kruszywa przez żywicę może być utrudnione, w wyniku czego powstają pewne puste przestrzenie, które mogą stanowić miejsce inicjacji pęknięcia podczas badań mechanicznych. Dodanie glikolizatu oraz odpadów PE znacznie poprawia właściwości plastyczne zapraw w porównaniu do próbek kontrolnych. Jednak przy większym stopniu substytucji piasku aglomeratem odpadowego PE (10% obj.) poprawa plastyczności odbywa się już kosztem obniżenia wytrzymałości.



Rys. 21. Wykres zależności siła - przemieszczenie w badaniu wytrzymałości na zginanie przy rozciąganiu [C9]

Ocenę plastyczności wykonano na podstawie przemieszczenia przy maksymalnym obciążeniu, a wyniki pokazano na rysunku 21. Uwidacznia on znaczną poprawę plastyczności przy zginaniu próbek zapraw wraz ze wzrostem stopnia substytucji piasku odpadem PE. Obydwa rodzaje modyfikatorów poprawiają plastyczność i prowadzą do mniej kruchego zniszczenia zapraw. Na rysunku 21 dla próbki kontrolnej krzywa jest wyraźnie zakończona, natomiast pozostałe krzywe zachowują się inaczej, co wynika z faktu, że nawet w momencie pojawienia się zarysowania i odnotowania siły maksymalnej, próbki nie ulegają rozpadowi, ale pozostają niejako połączone cząsteczkami odpadów PE.

4.8. Nowe kompozyty żywiczne – sposób otrzymywania, właściwości, obszary zastosowań

Wykorzystanie dobrych praktyk laboratoryjnych oraz nowoczesnych metod planowania eksperymentu doprowadziło w efekcie do otrzymania nowych materiałów (kompozytów żywicznych) o unikatowych właściwościach, w tym:

- **EP-PET - kompozyty epoksydowe modyfikowane glikolizatem poli(tereftalanu etylenu) (PET) na zasadzie częściowej substytucji spoiwa [C1–C3]**, o poprawionych właściwościach wytrzymałościowych w stosunku do tego samego typu kompozytów nie zawierających glikolizatu. Materiały te cechuje wytrzymałość na zginanie powyżej 30 MPa, wytrzymałość na ściskanie powyżej 100 MPa. Wykazują bardzo dobrą odporność chemiczną. Cechuje je gęstość objętościowa poniżej 2,1 g/cm³ oraz nasiąkliwość mieszcząca się w przedziale 0,2%–0,6%.
- **EP-RUB - kompozyty epoksydowe modyfikowane odpadami gumy pochodzącej z opon samochodowych [C4]**. Odpadowy granulatu gumowy stanowił substytut kruszywa. W zależności od stopnia substytucji (0–100%) wytrzymałość na zginanie otrzymanego kompozytu kształtuje się w zakresie 21–8 MPa, wytrzymałość na ściskanie należy do przedziału 100–25 MPa. Ponadto, materiał cechuje niska nasiąkliwość, nie przekraczająca 0,2%. Przy całkowitym zastąpieniu kruszywa odpadem gumy gęstość objętościowa jest o 50% niższa (1,05 g/cm³) w porównaniu do kompozytów kontrolnych (bez odpadu). W tym przypadku udało się również uzyskać bardzo korzystną wartość współczynnika przewodzenia ciepła $\lambda=0,114$ W/mK, porównywalną do tej przypisywanej zaprawom ciepłochronnym.
- **EP-GLS - kompozyty epoksydowe modyfikowane odpadami szkła okiennego [C5]**. W zależności od stopnia substytucji piasku odpadem (0–100%) wytrzymałość na zginanie kształtuje się w zakresie 27–22 MPa, a wytrzymałość na ściskanie wynosi od 96,65MPa do 68,67 MPa. Kompozyt cechuje także bardzo niska nasiąkliwość, której wartości mieściły się w przedziale 0,2%–0,7%, nawet po siedmiu dniach zanurzenia próbek w wodzie. Większość wyników nasiąkliwości, otrzymanych dla badanych próbek, charakteryzowana była przez wartości należące do dolnej granicy tego przedziału. Stwierdzono, że różnice wynikają głównie z faktu, iż obowiązujące obecnie niejednoznaczne zapisy normowe dotyczące wymiarów próbek poddawanych badaniu nasiąkliwości, wprowadzają duży margines błędu do wyników badania laboratoryjnego. Gęstość objętościowa

zaprojektowanych i przebadanych kompozytów przyjmuje wartości z zakresu 1,78–2,03 g/cm³.

- **EP-PET-PE - kompozyty epoksydowe modyfikowane glikolizatem poli(tereftalanu etylenu) (PET) na zasadzie częściowej substytucji spoiwa, przy jednoczesnej częściowej zamianie piasku aglomeratem otrzymanym z odpadowych worków polietylenowych (PE) [C9].** W zależności od poziomu zawartości odpadu PE, wytrzymałość na zginanie kształtuje się na poziomie od 30,3 MPa do 35,7 MPa, a wytrzymałość na ściskanie przyjmuje wartości z przedziału 86–107,2 MPa. Przeprowadzona analiza zdjęć, uzyskanych podczas badania SEM, pozwoliła w sposób jednoznaczny wykazać, że odpad ma działanie podobne do włókien. Fakt ten potwierdzają także wykresy siła-przemieszczenie, otrzymane podczas badania wytrzymałości na zginanie. Kompozyt cechuje niska nasiąkliwość, nie przekraczająca 0,2%. Odpowiedni dobór ilościowy i jakościowy składników pozwolił na uzyskanie kompozytu cechującego się korzystniejszymi cechami wytrzymałościowymi, pomimo zastosowania „gorszych” substratów w postaci materiałów odpadowych.
- **EP-FRP – kompozyty epoksydowe wzmocnione włóknami [C8].** Do otrzymania kompozytów zastosowano trzy rodzaje włókien o długości 12 mm dostępnych w handlu: polipropylenowe (**EP-PRP**), szklane (**EP-GRP**) i węglowe (**EP-CRP**). Włókna dodawano w ilości 0–5% objętościowych kruszywa. Dodatek każdego z trzech rodzajów włókien w ilości do 4% wag. pozwolił otrzymać kompozyty cechujące się wyższą wytrzymałością na zginanie i ściskanie w porównaniu do materiałów kontrolnych (bez włókien). Najwyższe wartości wytrzymałości na zginanie (25,68 MPa) uzyskano przy 2% substytucji piasku włóknami polipropylenowymi. Najkorzystniejszą wytrzymałość na ściskanie, równą 100,98 MPa, odnotowano także dla kompozytów z włóknami polipropylenowymi (dodatek na poziomie 4%). Badania odporności na kruche pękanie pozwoliły zaobserwować i wyjaśnić, w jaki sposób dodatek różnej ilości każdego z trzech rodzajów włókien działa jako wzmocnienie zapraw. Analizując odporność na rozprzestrzenianie się pęknięć, wykazano jak ważną rolę odgrywają włókna, znacznie poprawiając odporność na pękanie i sztywność.

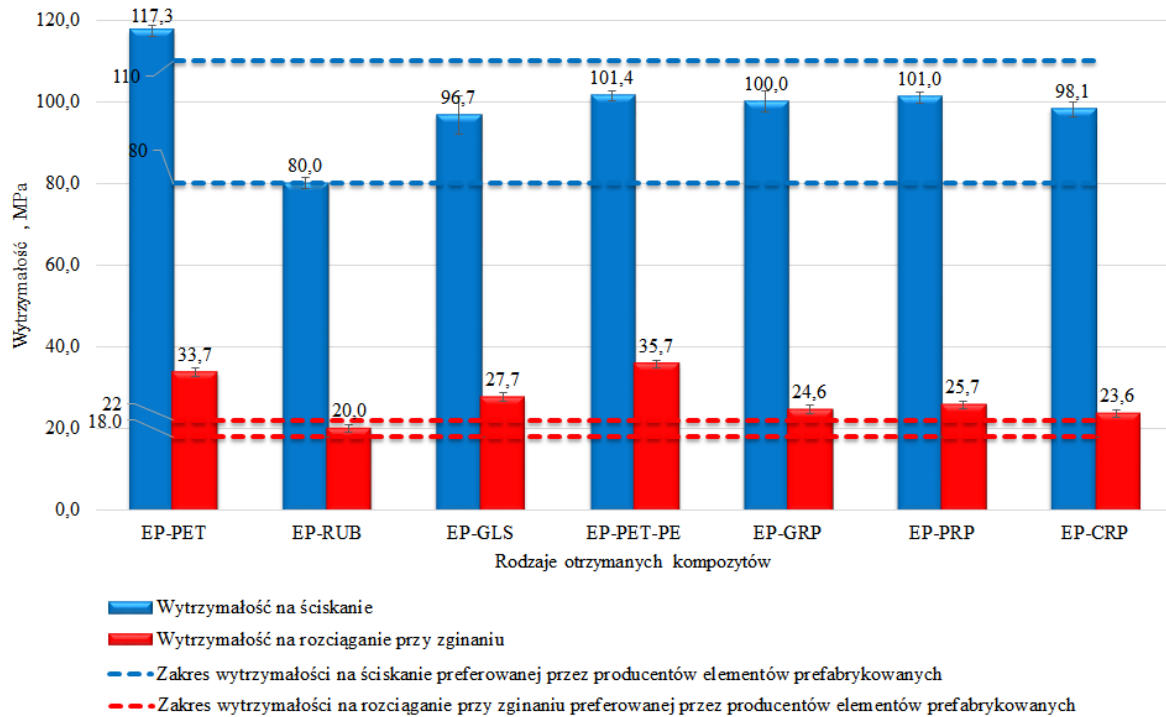
Projektowanie powyższych kompozytów odbywało się w nawiązaniu do wcześniej założonej użyteczności wyrobu, w myśl zasady, że w przestrzeni badawczej powinny znaleźć się materiały o dobrze zdefiniowanych właściwościach dla konkretnego zastosowania (WDPP - Well Defined Performance Products). Przeprowadzone badania w sposób jednoznaczny pokazują, że zawsze należy dokonywać ostatecznej oceny użyteczności kompozytów w ścisłym powiązaniu z założonym obszarem jego stosowalności.

Poniżej w tabeli 2 pokazano związek pomiędzy wybranymi właściwościami otrzymanych materiałów, a wynikającym z nich perspektywicznym zastosowaniem otrzymanych nowych kompozytów żywicznych.

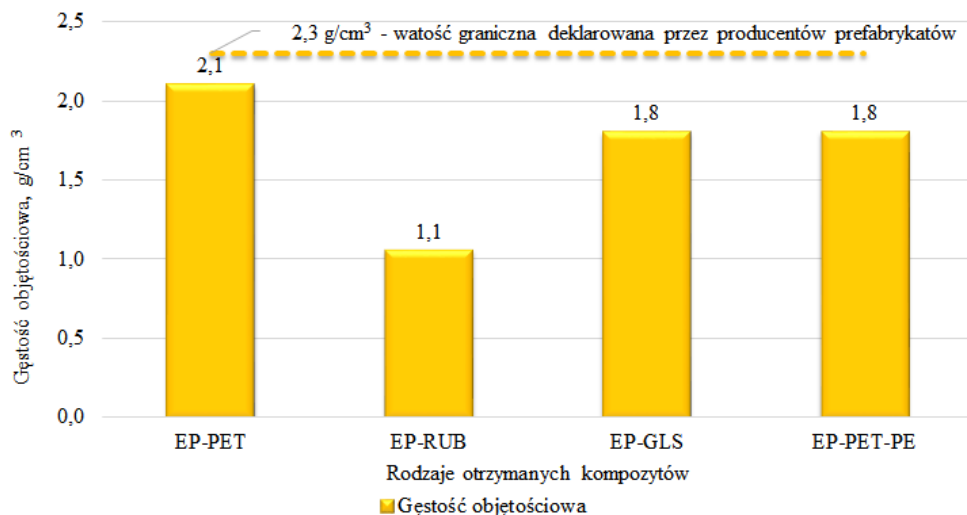
Tabela 2. Obszar zastosowań otrzymanych kompozytów żywicznych ze względu na cechujące je właściwości

Rodzaj otrzymanego kompozytu	Właściwość	Obszar zastosowań kompozytów żywicznych ze względu na badaną cechę
<p style="text-align: center;">EP-PET</p> <p style="text-align: center;">EP-PET-PE</p> <p style="text-align: center;">EP-FRP</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Odporność chemiczna ▪ Szczelność ▪ Duża wytrzymałość mechaniczna. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Osłony antykorozyjne stosowane w niekorzystnych warunkach środowiskowych (budowa obiektów mostowych, drogowych, hydrotechnicznych, morskich, w zabudowie miejskiej). ▪ Elementy rurociągów do transportu mediów silnie korozyjnych (rury, koryta). ▪ Studzienki kanalizacyjne, telekomunikacyjne oraz ich elementy. ▪ Nawierzchnie drogowe silnie obciążone ruchem (skrzyżowania, zatoczki). ▪ Zastosowania specjalne: fundamenty pod maszyny, turbiny wiatrowe, obudowy stacji transformatorowych czy podkłady kolejowe.
<p style="text-align: center;">EP-PET</p> <p style="text-align: center;">EP-PET-PE</p> <p style="text-align: center;">EP-FRP</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Odporność chemiczna ▪ Mała ścieralność ▪ Dobra wytrzymałość 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Posadzki przemysłowe stosowane w przemyśle elektronicznym, spożywczym, farmaceutycznym, w budynkach użyteczności publicznej, takich jak hale sportowe, sale gimnastyczne, bankietowe itp., posadzki w warsztatach, gdzie wymagana jest znaczna odporność na działanie chemikaliów (smary, oleje).
<p style="text-align: center;">EP-PET</p> <p style="text-align: center;">EP-PET-PE</p> <p style="text-align: center;">EP-GLS</p> <p style="text-align: center;">EP- RUB</p> <p style="text-align: center;">EP-FRP</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Możliwość barwienia na różne kolory ▪ Estetyczny wygląd ▪ Trwałość ▪ Dobra wytrzymałość 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Elementy systemów odwodnień mostowych (gzymy mostowe, krawężniki mostowe, wpusty mostowe, ścieki). ▪ Produkcja prefabrykatów do systemu odwodnień liniowych (kanały, korytka odwodnień liniowych, studnie odwodnień liniowych, krawężniki, pokrywy wpustów ulicznych). ▪ Produkcja tzw. marmuru żywicznego wykorzystywanego do wyrobu elementów wykończeniowych (podokienniki, zestawy łazienkowe, płyty dekoracyjne, elementy elewacji, płyty nagrobkowe).

Na poniższych rysunkach zestawiono odpowiednio najkorzystniejsze wartości parametrów wytrzymałościowych (Rys. 22) oraz gęstości objętościowej (Rys. 23) otrzymanych kompozytów na tle zakresów tych cech deklarowanych przez producentów (firmy: Sytec Sp. z o.o. Systemy i Technologie, Ankra Sp. z o.o., "IRMA" Sp. z o.o. S.K.A.) prefabrykatów żywicznych wykorzystywanych w systemach mostowych i drogowych.



Rys. 22. Zestawienie najkorzystniejszych parametrów wytrzymałościowych otrzymanych kompozytów na tle wymagań producentów (opracowanie własne)



Rys. 23. Zestawienie gęstości objętościowej kilku otrzymanych kompozytów na tle wymagań producentów (opracowanie własne)

Otrzymane kompozyty żywiczne osiągają bardzo dobre lub dobre właściwości wytrzymałościowe i mieszczą się w zakresach wytrzymałości wymaganych przez wiodących producentów prefabrykowanych elementów żywicznych lub, tak jak

w przypadku kompozytu EP-PET, znacznie przekraczają te ramy. Dodatkowo, co potwierdzają wykresy zamieszczone na rysunku 23, otrzymane nowe materiały są znacznie lżejsze od tych dostępnych handlowo, co w przypadku wykonywania elementów metodą prefabrykacji ma duże znaczenie. Ponadto, zaprojektowane kompozyty cechuje bardzo dobra odporność chemiczna na wybrane media agresywne i charakteryzuje niewielka nasiąkliwość wodą. Osiągnięcie wspomnianych powyżej właściwości dla omawianych kompozytów ma istotne znaczenie aplikacyjne, ponieważ gwarantują one jednoczesne uzyskanie wielu ważnych cech technicznych tych materiałów. Właściwości te determinują kierunki zastosowania opracowanych nowych kompozycji żywicznych, tj. uzyskania materiałów, które z powodzeniem można będzie wykorzystać w sektorze budowlanym.

4.9. Kontynuacja badań - projekt MINIATURA 5

We wrześniu 2021 roku otrzymałam pozytywną decyzję dyrektora Narodowego Centrum Nauki odnośnie finansowania projektu pt. „*Badanie wpływu przyspieszonego starzenia na właściwości fizyko-mechaniczne kompozytów żywicznych zawierających materiały odpadowe*” (nr rejestracyjny wniosku 2021/05/X/ST5/00325) w ramach konkursu MINIATURA 5.

Przebadane do tej pory właściwości wytrzymałościowe dla modyfikowanych odpadami kompozytów żywicznych są bardzo istotne i kształtują się na zadowalającym poziomie. Naukowcy zajmujący się tą dziedziną zwracają jednak uwagę na inne ważne obszary badawcze dotyczące betonów polimerowych, np. takie jak zachowanie reologiczne. Liczba publikacji poświęconych badaniom reologicznym betonów polimerowych jest niewielka i najczęściej dotyczy tylko wybranych cech. Rozszerzenie badań nad kompozytami żywicznymi i poznanie ich właściwości reologicznych pozwoliłoby na kompleksową ocenę również zapraw żywicznych modyfikowanych odpadami. Czynniki decydujące o reologicznym zachowaniu kompozytów żywicznych to: warunki atmosferyczne i towarzyszące im procesy starzenia oraz temperatura otoczenia. Aktualnie, brak jest dostatecznej wiedzy na temat ich wpływu na zmianę właściwości zapraw w długich okresach czasu. Proponowane w ramach projektu badania uzupełnią tę lukę. W ramach działania naukowego planowana jest realizacja badań kompozytów żywicznych modyfikowanych materiałami pochodzącymi z recyklingu. Planuje się przeprowadzenie badań zapraw w komorze do przyspieszonego starzenia (cykle naświetlania i deszczu) oraz w komorze symulującej cykliczne zmiany temperatury. Eksperymentalne badania próbek zapraw poddanych przyspieszonym procesom starzeniowym pozwolą na przeprowadzenie analizy właściwości fizyko-mechanicznych kompozytów w zależności od stopnia oddziaływania promieniowania słonecznego, deszczu, czy cyklicznych zmian temperatury. Wyniki badań przyspieszonego starzenia można będzie wykorzystać do względnego porównania zachowania się kompozytów o zróżnicowanym składzie. W efekcie tych działań możliwe będzie poszerzenie istniejącej i zdobycie nowej wiedzy o kompozytach żywicznych. Jednocześnie przewiduje się, że przeprowadzone symulacje procesu starzenia wygenerują wiele pytań wtórnych i szczegółowych odnośnie zmian właściwości kompozytów polimerowych i będą mogły stanowić przedmiot wymagający dalszych dokładniejszych badań starzeniowych w warunkach naturalnych. Potwierdzenie metodą symulacji w komorze badawczej, że proces starzenia można modelować jest istotne choćby z uwagi na fakt, że badania w środowisku naturalnym prowadzone metodami monitorowania są długotrwałe i kosztowne. Zazwyczaj, takie wstępne badania symulacyjne pozwalają również na ustalenie właściwego zakresu zmian parametrów dla badań środowiskowych.

Jak widać i w tym przypadku korzyści przyniesie metoda *in silico*. Przewiduje się bowiem, że analiza procesu starzenia w warunkach symulowanych pozwoli sformułować właściwą hipotezę badawczą dla potwierdzenia której konieczne będzie przeprowadzenie eksperymentu w warunkach naturalnych, a jego wyniki powinny pozwolić na sformułowanie wzoru funkcji modelującej zmiany właściwości kompozytów polimerowych w okresie ekspozycji.

4.10. Podsumowanie

Problemy dotyczące środowiska kładą się cieniem na produkcji, stosowaniu i konsumpcji tworzyw sztucznych. Zaproponowana modyfikacja zapraw epoksydowych odpadami tworzyw sztucznych może stanowić sposób na ich rozwiązanie w zgodzie z zasadami nowoczesnej, niskoemisyjnej, zasob- i energooszczędnej gospodarki, oraz prowadzić do realizacji celów przyjętych w planach zrównoważonego rozwoju krajów EU do 2030 roku.

Wymienione powyżej osiągnięcia naukowe potwierdziły możliwość wykorzystania metod dobrej praktyki laboratoryjnej w obszarze inżynierii lądowej i transportu, a także inżynierii materiałowej, w zakresie unowocześnienia procesu projektowania nowych kompozytów budowlanych, w szczególności wskazały na zalety zastosowania w procesie badawczym metody *in silico*.

Najważniejsze elementy omawianego osiągnięcia pt.:

Kształtowanie struktury kompozytów żywicznych modyfikowanych odpadami z wykorzystaniem nowoczesnych metod planowania eksperymentu oraz zasad „dobrej praktyki laboratoryjnej”.

w dyscyplinie inżynieria lądowa i transport w zakresie projektowania innowacyjnych materiałów budowlanych obejmują:

- kształtowanie struktury innowacyjnych materiałów budowlanych (tj. kompozytów żywicznych modyfikowanych materiałami odpadowymi) zgodne z zasadami "dobrej praktyki laboratoryjnej", której reguły powinny być szeroko propagowane, gdyż gwarantują otrzymanie wysokiej jakości danych testowych i zapewniają właściwe podejście do zarządzania pracami laboratoryjnymi (metoda LIMS);
- wykazanie, że kompozyty żywiczne można z powodzeniem modyfikować takimi materiałami odpadowymi jak poli(tereftalanetylenu) i polietylen [C1–C3, C6, C9], guma [C4] i szkło [C5]. Zaproponowanie modyfikatorów: ich rodzaju (tworzywa sztuczne, szkło, guma) i ilości, które można wykorzystać w procesie produkcji materiałów. Uzyskanie kompozytów żywicznych o poprawionych właściwościach wytrzymałościowych i odporności chemicznej w stosunku do zapraw opartych na spoiwie cementowym, które mogą się sprawdzić w zdefiniowanych specjalistycznych zastosowaniach i które stały się podstawą opracowanego i przyznanego patentu [P1];
- dobór metod planowania eksperymentu i wykazanie ich użyteczności podczas projektowania nowych materiałów budowlanych. Użyteczność zastosowania zaproponowanego algorytmu opisującego kolejność wykorzystania statystycznych metod obliczeniowych, zarówno na etapie projektowania badań,

jak i wszechstronnej obróbki wyników eksperymentu, potwierdzono w publikacjach [C1–C3, C5–C7, C9];

- uzasadnienie konieczności tworzenia, gromadzenia i pielęgnowania baz danych laboratoryjnych, w szczególności gdy zaplanowano monitorowanie zmian właściwości kompozytów w dłuższym przedziale czasowym (w przypadku moich badań był to okres 5 lat). Pozyskanie wiedzy z temporalnych baz danych pozwoliło na zweryfikowanie parametrów i potwierdzenie poprawności zbudowanego wcześniej modelu. Zasadność gromadzenia wyników w analitycznych bazach danych została potwierdzona. Wykazano, że pozwoliło to na wykrycie ukrytych w nich regularności, a to skutkowało możliwością klasyfikacji nowych kompozytów i prognozowania ich właściwości z dużym prawdopodobieństwem [C3, C6];
 - wyjaśnienie konieczności uwzględnienia we wnioskach merytorycznych wpływu „zmiennych towarzyszących” na poprawność wnioskowania merytorycznego [C5, C8–C9]. Zmienne te mogą potwierdzać lub wykluczać uzasadnienie otrzymanego rezultatu, a także np. wskazywać na konieczność ponownego wykonania badań. Takie postępowanie jest w pełni zgodne z zasadą „dobrej praktyki laboratoryjnej”;
 - objaśnienie sposobu jednoczesnej optymalizacji kilku wybranych właściwości kompozytów żywicznych. W tym zakresie dokładnie omówiono sposób korzystania z systemu Statistica do wyznaczania profili użyteczności kompozytów oraz metodę statycznego środka ciężkości, której procedurę obliczeniową zaimplementowano w arkuszu kalkulacyjnym Excel [C5, C7, C9];
 - przeprowadzenie badania mechaniki pęknięcia metodą dysku brazylijskiego, którą można uznać za alternatywną do powszechnie stosowanych metod badawczych. W zrealizowanych eksperymentach pęknięcie było symulowane poprzez wstawienie na środku próbki walcowej cienkiej metalowej płytki o odpowiednio dobranej szerokości i grubości. Wykazano zasadność tej metody i korzyści z niej płynące (m.in. zmniejszenie kosztów ze względu na dopuszczenie użycia małych próbek badawczych oraz możliwość skorzystania z tańszego sprzętu do badań procesu pęknięcia) [C8].
5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.

W 2019 roku, w wyniku prowadzonej przez PRz wymiany naukowej z uniwersytetem UFOP w Brazylii i wizyty pracowników UFOP w naszej Uczelni, została nawiązana **współpraca z zespołem naukowym profesora Guilherme Jorge Brigolini Silva z Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)**, która jest obecnie kontynuowana i rozwijana nie tylko przez podejmowanie kolejnych nowych tematów badawczych, ale też przez moje czynne włączenie się w **proces konsultowania badań prowadzonych przez doktorantów**, realizujących swoje prace na uniwersytecie UFOP w Brazylii.

Z założenia, głównym celem tej współpracy było podjęcie wspólnych badań nad możliwością takiej modyfikacji struktury kompozytów żywicznych, aby osiągały

one pożądane właściwości użytkowe. Ze względu na ograniczenia obowiązujące z powodu pandemii Covid 19, współpraca naukowa została zawężona do komunikacji za pośrednictwem internetowych platform komunikacyjnych (Google Meet) i mediów społecznościowych. Próbkę zapraw żywicznych, zostały wykonane w laboratorium Materiałów budowlanych PRz. Po założonym okresie dojrzewania zostały przeprowadzone oznaczenia gęstości objętościowej, nasiąkliwości oraz badania wytrzymałościowe. Po wykonaniu badań mechanicznych, część próbek oraz niewielką ilość modyfikatora, odpowiednio oznaczyłam, zapakowałam i przesałam do badań strukturalnych na UFOP w Brazylii. Po otrzymaniu przesyłki, Profesor Brigolini wykonał mikrofotografie przełamów próbek, wykorzystując metodę skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM), a także dyfrakcji rentgenowskiej (XRD) i energii dyspersyjnej fluorescencji rentgenowskiej (XRF). Wyniki tych oznaczeń były zamieszczane przez stronę brazylijską na dysku Google, dzięki czemu mogłam prowadzić dyskusję z zespołem brazylijskim i na bieżąco konsultować uzyskane wyniki badań. **Rezultatem współpracy są trzy publikacje naukowe [C5, C8 i C9]**, które ukazały się w renomowanych, wysoko punktowanych czasopiśmie naukowych (Construction and Building Materials, wydawnictwo Elsevier – IF = 6,141, 140p; oraz Materials wydawnictwo MDPI – IF = 3,623, 140p). Udział profesora Brigolini w powstaniu artykułów polegał na przedstawieniu metodologii i oprogramowania zastosowanego do wykonania badań SEM, XRD i XRF, oraz na przeprowadzeniu oceny i analizy formalnej uzyskanych w ten sposób wyników badań, a także wykonaniu zdjęć i wykresów związanych z wyżej wymienionymi badaniami strukturalnymi. W przypadku publikacji [C8] Marina Altoé Caetano, doktorantka profesora Brigolini, pomagała w opracowaniu analizy formalnej i wizualizacji części badań związanych z zastosowaniem skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM).

W roku 2020 współpraca została rozszerzona, gdyż zostałam zaproszona przez profesora Brigolinii do **udziału w finansowanym przez stronę brazylijską projekcie**, związanym z otrzymywaniem geopolimerów z dodatkiem odpadu jakim jest *żużel stalowniczy* (potwierdzenie współpracy dołączam do dokumentów – Załącznik W1). Na wrzesień 2020 roku planowany był mój wyjazd do UFOP w ramach programu Erasmus+. Ze względu na pandemię wyjazd do Brazylii został przełożony (projekt trwa do czerwca 2022 roku), a kontakty naszego międzynarodowego zespołu odbywały się metodą "na odległość". **Dotychczas przeprowadzone zostały dwie robocze wideokonferencje (Google Meet), w których wzięli również udział doktoranci profesora Brigolinii. Mamy również stały kontakt przez e-mail. Projekt będzie trwał do 2023 roku.**

Moja mobilność we wcześniejszych latach pracy na Uczelni była ograniczona ze względu na sytuację rodzinną – razem z mężem wychowujemy czwórkę dzieci w wieku od 5 do 14 lat.

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.

W ramach **obowiązków dydaktycznych** prowadzę **wykłady i zajęcia laboratoryjne** z przedmiotu „*Materiały budowlane*”, a także zajęcia laboratoryjne z przedmiotów „*Budownictwo ogólne i materiałoznawstwo*” oraz „*Zaawansowane technologie budowlane*”. Prowadzę także zajęcia dla studentów zagranicznych studiujących w ramach programu Erasmus+. Do zajęć tych przygotowałam materiały dydaktyczne zarówno w formie drukowanej, jak i dostępnej na portalu e-learningowym Politechniki Rzeszowskiej, m.in. w postaci prezentacji wykonanych w programie

IBM Workplace Collaborative Learning Authoring Tool (narzędzie dedykowane dla kształcenia zdalnego) oraz w formie interaktywnych instrukcji laboratoryjnych w których zamieściłam filmy obrazujące przebieg badania. Opracowałam również 6 nowych ćwiczeń laboratoryjnych, do których przygotowałam szczegółowe instrukcje.

Od 2014 roku uczestniczę w pracach **Wydziałowej Komisji ds. Zapewnienia Jakości Kształcenia**, w tym od października 2020 roku jestem **przewodniczącą tej komisji i Wydziałowym koordynatorem ds. Zapewnienia Jakości Kształcenia**. Jestem również członkiem Uczelnianej Komisji ds. Jakości Kształcenia.

Badania nad rozwojem nowoczesnych technik materiałowych zostały przeze mnie również wykorzystane podczas kształtowania profesjonalnej kadry inżynierów budownictwa, co wpisuje się w konieczność zmian w zakresie systemu kształcenia na Uczelniach Wyższych. Zrealizowałam to przez **promotorstwo 57 prac dyplomowych magisterskich (27) i inżynierskich (30)**. Dla dyplomantów **opracowałam poradnik zgodny z metodami dobrej praktyki laboratoryjnej**, w którym umieściłam opis metodologii sprawdzonych przeze mnie metod badawczych ukierunkowanych na projektowanie nowych materiałów budowlanych, wykorzystujących do obliczeń numerycznych pakiet Statistica.

Od kilku lat biorę **udział w pracach Komisji Egzaminu** potwierdzającego uzyskanie efektów kształcenia na studiach stacjonarnych i niestacjonarnych I-stopnia oraz **Komisji Dyplomowych**.

W latach 2019–2020 pełniłam funkcję **Pełnomocnika Dziekana WBIŚiA ds. osób z niepełnosprawnościami**. W tym okresie oraz w 2021 roku odbyłam 6 szkoleń organizowanych na Politechnice Rzeszowskiej w ramach projektu „Politechnika rzeszowska Uczelnią Dostępną” (Nr proj. POWR.03.05.00-00-A091/19-00) (certyfikaty potwierdzające ukończenie kursów stanowi załącznik S4), których celem było podnoszenie świadomości na temat funkcjonowania osób z niepełnosprawnościami w środowisku akademickim oraz wskazanie sposobów na zapewnienie dostępności.

Rada Wydziału Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury PRz na posiedzeniu w dniu 9 marca 2016 roku, powołała mnie na **promotora pomocniczego** w przewodzie doktorskim mgr inż. Joanny Krasoń i tę funkcję pełnię obecnie (zawiadomienie o wszczęciu przewodu doktorskiego stanowi załącznik PP1). Wyniki badań zespołu współautorów, zajmujących się tematyką modelowania właściwości materiałów i przegród budowlanych modyfikowanych materiałami zmiennofazowymi i/lub odpadowymi, zostały opisane w 6 publikacjach [D8, D15–D19], które nie wchodzą do omawianego w punkcie 4 osiągnięcia.

W ramach **wydarzeń promujących naukę** przez Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury oraz Politechnikę Rzeszowską, brałam aktywny udział w **Dniach Otwartych Wydziału** oraz w **Nocnych Spotkaniach z Nauką**. Jako opiekun laboratorium Materiałów budowlanych, prezentowałam jego możliwości badawcze. Promowałam Uczelnię także w ramach **sesji wyjazdowych do uczniów szkół ponadpodstawowych**.

7. Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1–6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.

Projekty, granty

1. Pełniłam funkcję **kierownika** 2 grantów uzyskanych w Programie współfinansowanym ze środków Unii Europejskiej:
 - ✓ W ramach projektu pn. „*Wzmocnienie instytucjonalnego systemu wdrażania Regionalnej Strategii Innowacji w latach 2007–2013 w województwie podkarpackim*”, w ramach Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki, Priorytet VIII, działanie 8.2, poddziałanie 8.2.2, finansowanego z Europejskiego Funduszu Społecznego oraz ze środków Budżetu Państwa i Budżetu Województwa Podkarpackiego, termin realizacji: grudzień 2009 r. – listopad 2010 r., nr umowy: RR.VII.0783/10-55/09,
 - ✓ W ramach Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki 2007–2013 Priorytet VIII Regionalne Kadry Gospodarki, działanie 8.2 Transfer wiedzy, poddziałanie 8.2.2 Regionalne Strategie Innowacji pn. „Podkarpacki fundusz stypendialny dla doktorantów” finansowanego z Europejskiego Funduszu Społecznego oraz ze środków Budżetu Państwa i Budżetu Województwa Podkarpackiego, projekt realizowany w terminie: grudzień 2010 – wrzesień 2012, nr umowy: 8.2.2/III.51/149/10/U/91/11.
2. Byłam **głównym wykonawcą grantu promotorskiego** w ramach konkursu przekazanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego do realizacji w Narodowym Centrum Nauki w grupie Nauk Ścisłych i Technicznych: Id: 75253, Nr rej.: N N506 194338, Typ: Finansowanie projektu badawczego – promotorski, Tytuł projektu: „*Modyfikacja zapraw żywicznych glikolizatami pozyskiwanymi z materiałów odpadowych*”. Projekt otrzymał od recenzentów oceny: 9,5/10 (projekt wyróżniający się) oraz 8/10 (projekt bardzo dobry) i został w całości zrealizowany w latach 2010-2013.
3. Jestem **członkiem zespołu badawczego** w grantzie przyznanym w ramach projektu „INKUBATOR INNOWACYJNOŚCI 4.0”: Tytuł grantu: „*Materiał budowlany wytwarzany z komunalnych osadów ściekowych i odpadów mineralnych*”, okres realizacji: 01.10.2021 – 31.07.2022, lider: Dr. inż. Adam Masłoń, Prof. PRz.
4. Jestem **kierownikiem projektu** finansowanego przez NCN – MINIATURA 5: Id: 525921, Nr rej.: 2021/05/X/ST5/00325, Tytuł projektu: „*Badanie wpływu przyspieszonego starzenia na właściwości fizyko-mechaniczne kompozytów żywicznych zawierających materiały odpadowe*”, okres realizacji: 01.10.2021 – 01.10.2022.
5. W 2013 i 2014 roku uzyskałam **stypendium dla młodych doktorów** w ramach projektu pt. „*Kształcenie innowacyjnych kadr GOW w Politechnice Rzeszowskiej*” realizowanego w zakresie Programu Operacyjnego Kapitał

Ludzki, Priorytet IV. Szkolnictwo wyższe i nauka, Działanie 4.3. Wzmocnienie potencjału dydaktycznego uczelni w obszarach kluczowych w kontekście celów Strategii Europa 2020.

6. Byłam jednym z **wykonawców** umów finansowanych ze środków na działalność statutową, realizowanych przez pracowników Zakładu Budownictwa Ogólnego Politechniki Rzeszowskiej:

- U-8355/DS „*Efektywność cieplna przegród przezroczystych*” realizowanej w latach 2011-2012,
- U-199/DS „*Analiza cieplnego funkcjonowania przegród zewnętrznych w budynkach*” realizowanej w latach 2013-2014,
- U-603/DS „*Wpływ wybranych własności technicznych materiałów budowlanych na ich efektywność energetyczną*” realizowanej w latach 2015-2016,
- DS.BB.17.001 „*Innowacyjne materiały i technologie w budownictwie*” realizowanej w latach 2017-2018.

Recenzje artykułów w czasopismach naukowych

W ramach współpracy z wydawcami czasopism specjalistycznych opracowałam do tej pory **68 recenzji artykułów**, w tym 18 dla czasopism wydawnictwa **Elsevier**, 3 dla wydawnictwa **Wiley**, 1 dla wydawnictwa **Springer**, 33 dla czasopism wydawnictwa **MDPI**, 5 dla czasopisma Budownictwo o Zrównoważonym Potencjale Energetycznym, 1 dla czasopisma Polish Journal for Sustainable Development, 2 w ramach: IOP Conference Series: Environmental and Earth Studies, 1 dla czasopisma Journal of Engineering and Technological Sciences publikowanego przez Institute for Research and Community Services, Institut Teknologi Bandung, 1 dla czasopisma The Open Civil Engineering Journal wydawnictwa Bentham Science, 3 dla czasopisma SSP - Journal of Civil Engineering (kopie wybranych certyfikatów pobranych ze strony wydawnictw, poświadczających wykonanie recenzji umieściłam w załączniku R1).

Jestem **członkiem zespołu recenzentów czasopisma Materials MDPI** (zał. R2).

Członkostwo w organizacjach branżowych

Jestem **członkiem** Polskiego Związku Inżynierów i Techników Budowlanych **PZiTb o/Rzeszów**, a także członkiem **IBPSA POLAND** (Stowarzyszenie Symulacji Procesów Fizycznych w Budynkach) i członkiem Polskiego Towarzystwa Materiałów Kompozytowych (**PTMK**).

Jestem **stałym członkiem Komitetu Organizacyjnego konferencji solińskiej**: "Rozwój zrównoważony, Architektura - Budownictwo - Inżynieria i Ochrona Środowiska, Innowacyjne technologie energoefektywne - źródła energii, racjonalne zużycie energii", organizowanej przez naszą Katedrę. W latach 2006–2018 brałam aktywny udział w przygotowaniu i realizacji kilku jej edycji, a także prezentowałam wyniki własnych badań w ramach sesji poświęconych materiałom budowlanym.

Ponadto, byłam **współredaktorem wydawnictw pokonferencyjnych** (przygotowanych w wersji anglojęzycznej) dla konferencji solińskiej. Obecnie oczekujemy na zaindeksowanie w bazach Web of Science artykułów naukowych związanych z wystąpieniami podczas ostatniej konferencji.

Brałam również czynny udział w innych konferencjach krajowych (10) i międzynarodowych (7) tematycznie związanych z otrzymywaniem innowacyjnych materiałów, ekologią, zrównoważonym rozwojem, a także zastosowaniem metod statystycznych w badaniach naukowych.

Udział w kursach, szkoleniach

Doświadczenie dydaktyczne staram się dodatkowo powiększać o wiedzę zdobywaną na **kursach i szkoleniach specjalistycznych**, dotyczących m.in. zagadnień komputerowego wspomaganie planowania i analizy statystycznej doświadczalnych badań innowacyjnych oraz stosowania nowoczesnych technik kształcenia (e-learning).

Do tej pory uczestniczyłam w następujących kursach zorganizowanych przez firmę StatSoft Polska (świadczenia ukończenia kursów znajdują się w załączniku S1):

- „*Sieci neuronowe*”, 29 grudnia 2006,
- „*Data mining I – kurs podstawowy*”, 8–9 luty 2007,
- „*Komputerowe wspomaganie planowania i analizy statystycznej doświadczalnych badań innowacyjnych*”, 27 czerwca 2007,
- „*Data mining II a – metody bez nauczyciela*”, 4 listopad 2011.

W dniach 8–11 września 2014 roku uczestniczyłam w kursie „*Wykorzystanie nowoczesnych technik kształcenia w edukacji akademickiej*”, zrealizowanym przez Centrum e-Learningu Politechniki Rzeszowskiej (załącznik S2). Certyfikat ukończenia tego kursu pozwala mi na prowadzenie części zajęć zdalnych, m.in. metodą odwróconej klasy.

6 listopada 2018 roku odbyłam także szkolenie „*Elsevier SciVal*”, na którym zapoznałam się z możliwościami systemu analitycznego SciVal, służącego do wizualizacji danych nauko- i bibliometrycznych oraz prowadzenia przekrojowych analiz w różnych obszarach. Znajomość SciVal umożliwia mi śledzenie trendów i najbardziej rozwojowych obszarów badawczych, ale również pozwala na zwiększenie swojej widoczności w sieci poprzez umieszczenie moich danych w bazach systemu, podkreślenie osiągnięć naukowych oraz przeprowadzenie rozpoznania i analizy potencjalnych możliwości współpracy (Załącznik S3).

Nagrody i wyróżnienia

Za osiągnięcia naukowo-badawcze, w latach 2014–2020 otrzymałam **jedną indywidualną oraz cztery zespołowe nagrody Rektora Politechniki Rzeszowskiej**. W 2021 roku otrzymałam nagrodę Rektora Politechniki Rzeszowskiej za współautorstwo dwóch publikacji oraz nagrodę Rektora Politechniki Rzeszowskiej za współautorstwo zgłoszonego i przyznanego patentu (patent nr 236030 na wynalazek pt. *Przegroda budowlana izolacyjno-akumulacyjna i sposób jej wytwarzania*).

W 2021 roku zostałam **odznaczona przez Prezydenta Rzeczypospolitej Polskiej Medalem Brązowym za Długoletnią Służbę** (legitymacja Nr 85-2021-82).

8. Sumaryczne zestawienie osiągnięć naukowych wykazanych w poszczególnych punktach Wykazu osiągnięć naukowych (Załącznik 4)

Wykaz uzyskanego przeze mnie dorobku naukowego przedstawiłam w zaprezentowanej poniżej zbiorczej tabeli (Tabela 3.)

Tabela.3. Wykaz dorobku naukowego i dydaktycznego

Lp.	Rodzaj dorobku	Przed doktoratem	Po doktoracie	Razem
1	Artykuły naukowe <ul style="list-style-type: none"> • o zasięgu międzynarodowym ze współczynnikiem IF • o zasięgu międzynarodowym • o zasięgu krajowym • w recenzowanych wydawnictwach pokonferencyjnych Rozdziały w monografiach	12 3 9	30 11 9 4 6 2	42 11 9 7 15 2
2	Udział w konferencjach <ul style="list-style-type: none"> • międzynarodowych • krajowych 	5 1 4	12 6 6	17 7 10
3	Zgłoszenia patentowe <ul style="list-style-type: none"> • w tym przyznany patent 	1	3 2	4 2
4	Recenzje artykułów <ul style="list-style-type: none"> • w czasopismach międzynarodowych, w tym: Elsevier, Wiley Springer MDPI Inne • w czasopismach krajowych 		68 62 18 3 1 33 7 6	68 62 6
5	Promotorstwo prac dyplomowych <ul style="list-style-type: none"> • magisterskich • inżynierskich 		57 27 30	57 27 30
6	Materiały pomocnicze dla studentów <ul style="list-style-type: none"> • w wersji drukowanej • na portalu e-learningowym PRz 	2 2	3 3	5 2 3
7	Nagrody Rektora PRz za osiągnięcia naukowo-badawcze: <ul style="list-style-type: none"> • indywidualna III st. • zespołowe: II st. III st. • za współautorstwo wysoko punktowanych publikacji • za współautorstwo patentu 		7 1 1 3 1 1	7 1 1 3 1 1

Dokonałam również obliczeń wskaźnika Impact Factor i liczby punktów MNiSW (obecnie MEiN) dla czasopism w których ukazały się artykuły naukowe mojego współautorstwa. Wyniki (Tab. 4.) odnoszą się do roku w którym ukazały się publikacje, a także pokazują aktualnie obowiązujące wartości współczynników IF i punktację zgodną z listą czasopism opublikowaną przez Ministerstwo Edukacji i Nauki w 2021 roku.

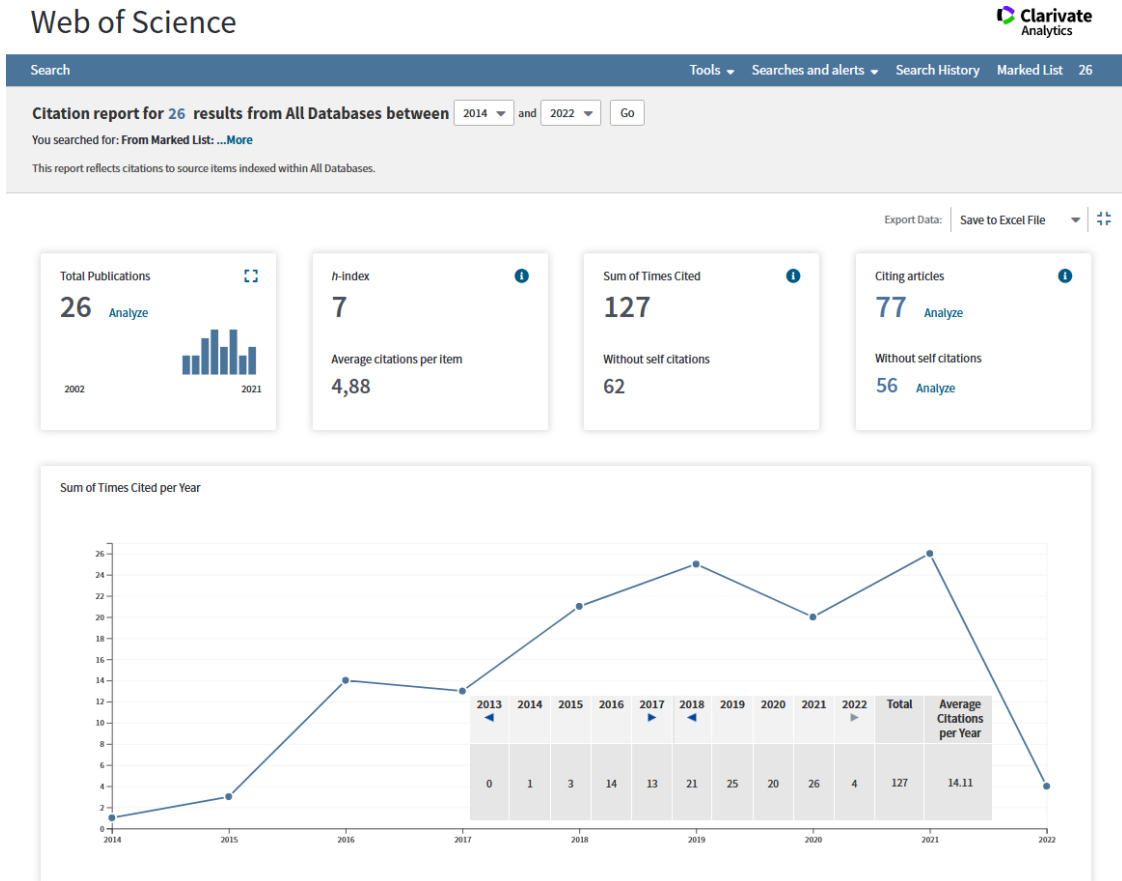
Tabela. 4. Zestawienie czasopism z IF, w których opublikowano artykuły naukowe (lata 2014–2021)

Czasopismo	Liczba publikacji	Sumaryczny IF (w roku opublikowania artykułu)	Sumaryczny IF (aktualny)	Punktacja czasopisma wg MNiSW (2017 r.)	Punktacja czasopisma wg MEiN (2021 r.)
Construction and Building Materials	1	2,296	6,141	40	
Construction and Building Materials	1	2,421	6,141	40	
Construction and Building Materials	1	3,169	6,141	40	
Archives of Civil and Mechanical Engineering	1	2,483	4,369	25	
Periodica Polytechnica-Civil Engineering	1	0,636	1,361	15	
Journal of Applied Polymer Science	1	1,901	3,125	25	
Construction and Building Materials	1	6,141	6,141		140
Materials	1	3,623	3,623		140
Materials	1	3,623	3,623		140
Polymer Testing	1	4,282	4,282		100
Polymer Testing	1	4,282	4,282		100
Suma	11	34,857	49,229	185	620
Średnia/publikację		3,169	4,475	30,83	124

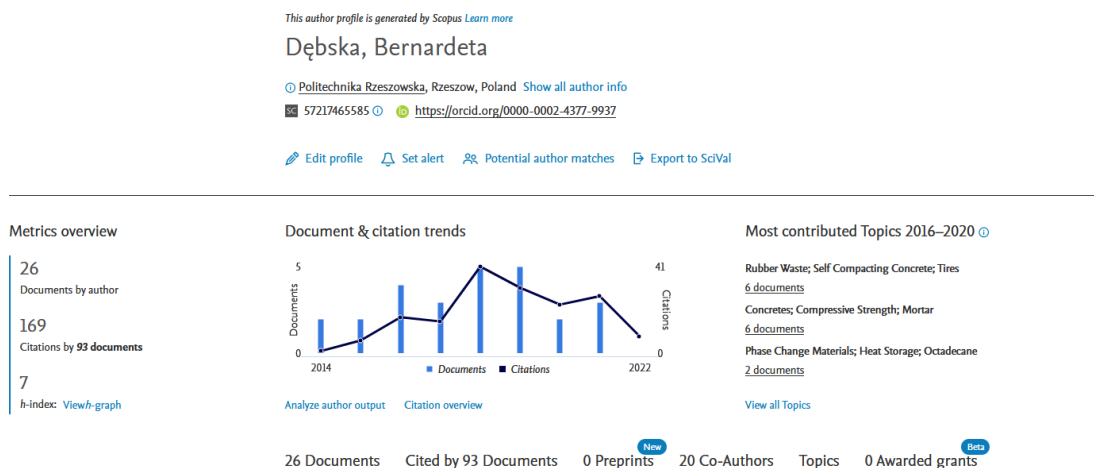
Dane, które znajdują się w trzeciej i czwartej kolumnie powyższej tabeli (Tab. 4.) wskazują na znaczny wzrost zarówno sumarycznej jak i średniej wartości wskaźnika Impact Factor dla wybranych czasopism, które charakteryzowały je w roku ukazania się publikacji ($IF_{sr} = 3,169$) w stosunku do wartości wskaźnika IF jaką wydawnictwo uzyskało w roku 2021 ($IF_{sr} = 4,475$). Porównanie tych wyników wskazuje na istotny wzrost średnich wartości indeksów IF, co można zinterpretować w ten sposób, że czasopisma w których ukazały się artykuły zwiększają swoją renomę (znaczenie, rangę), gdyż IF zależy od średniej miary częstotliwości, z jaką artykuły z danego czasopisma były cytowane w danym roku kalendarzowym.

Poniżej, przedstawiam dane pobrane ze strony Web of Science (Rys. 24.) oraz Scopus (Rys. 25) pokazujące fragment z wyników cytowań mojego dorobku, na podstawie których ustalono podaną poniżej wartość indeksu Hirscha (h-index). Dostęp do bazy WoS i Scopus dotyczył lat 2014–2022, a więc publikacji, które ukazały się już po uzyskaniu stopnia doktora.

Web of Science



Rys. 24. Wyniki cytowania publikacji pobrane ze strony Web of Science (opracowanie własne)



Rys. 25. Wyniki cytowania publikacji pobrane ze strony Scopus (opracowanie własne)

Posiadany przeze mnie **Indeks Hirscha** wynosi odpowiednio:

- wg Web of Science: **7**
- wg Scopus: **7**

Bernardeta Dębska

.....
(podpis wnioskodawcy)