

## Koncepcja wykorzystania surowców pochodzących z recyklingu do wykonania kompozytowych materiałów ekranujących pole elektromagnetyczne

**Streszczenie.** Współczesny przemysł poszukuje nowych materiałów funkcjonalnych o takich samych lub lepszych właściwościach użytkowych przy jednoczesnym zmniejszeniu obciążenia środowiska naturalnego. Grupa innowacyjnych materiałów, takich jak kompozyty oraz odpowiednia technologia ich produkcji spełnia te oczekiwania. Przeprowadzone badania wstępne wskazują na możliwość zastosowania opracowanej metody do wytwarzania kompozytu metalowo-polimerowego na konstrukcyjne panele i obudowy ekranujące pole elektromagnetyczne.

**Abstract.** Modern industry is looking for new functional materials with the same or better functional properties while reducing the burden on the natural environment. A group of innovative materials such as composites, which are a combination of components with different and complementary properties and the appropriate technology of their production meets these expectations. The preliminary studies carried out indicate the possibility of using a developed method of producing a metal / polymer composite for the construction panels and casings covering the electromagnetic field. (**Concept of Using Recycled Raw Materials for the Production of Composite Soft Magnetic for shielding of electromagnetic field**).

**Słowa kluczowe:** materiały magnetyczne, ekrany, proszki metali, odpady metalowe  
**Keywords:** magnetic materials, shields, metal powder, metal waste

### Wstęp

Tematem badań jest analiza funkcjonalności i możliwości wykonania kompozytów metalowo - polimerowych wykonanych ze sproszkowanych materiałów recyklingowych i odpadowych jako kompozytowych materiałów ekranujących pole elektromagnetyczne. Ten obszar jest rozwinięciem zagadnienia jakim jest zagospodarowanie wysokojakościowych, poprodukcyjnych materiałów odpadowych dostępnych w postaci metalowych pyłów, proszków, wiórów i płatków oraz wszelkiego rodzaju odpadów z polimerów termoplastycznych oraz termoutwardzalnych. Celem badań jest opracowanie ekonomicznego kompozytu konstrukcyjnego do zastosowania w obudowach i przesłonach układów, obwodów i urządzeń elektronicznych.

Materiały kompozytowe o osnowie polimerowej są często stosowane w różnych gałęziach przemysłu. Jednocześnie w dalszym ciągu prowadzone są badania naukowe mające na celu opracowanie nowych kompozytów o określonych właściwościach termicznych, mechanicznych, chemicznych oraz elektrycznych [1]. Ważnym aspektem jest również możliwość obniżenia ceny finalnego produktu poprzez zastosowanie materiałów odpadowych. Kompozyty ze składników pochodzących z recyklingu najczęściej wytwarzane są poprzez mechaniczne wymieszanie komponentów mające na celu uzyskanie materiału łączącego zalety osnowy oraz napelnacza. W przypadku kompozytów polimerowych funkcję osnowy najczęściej pełni tworzywo. Jego zadaniem jest m.in.: połączenie składników kompozytu, zachowanie kształtu i wymiarów produktu. Osnowa zapewnia również odpowiednie właściwości termiczne oraz chemiczne. Napelniacz najczęściej występuje w postaci płyt, tkanin, włókien, proszków, wiór, itp. Zadaniem napelnacza jest przede wszystkim zwiększenie odporności mechanicznej tworzywa. Może wpływać również na właściwości termiczne oraz elektryczne [2-6].

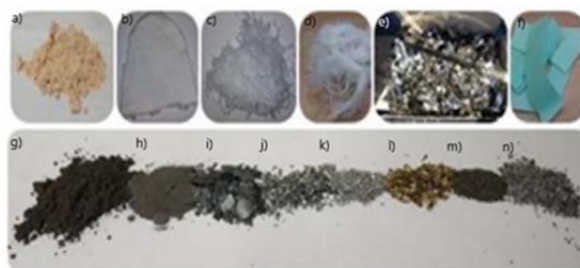
Praca ta jest częścią szerszych badań nad możliwością wytwarzania różnego rodzaju kompozytów polimerowych z domieszkami różnych wypełniaczy do ekranowania pól

elektromagnetycznych w zakresie wysokich częstotliwości [7-8].

### Materiał i przygotowanie próbek

Koncepcja zakłada opracowanie kompozytu konstrukcyjnego o właściwościach ekranujących pole magnetyczne zarówno dla niskich częstotliwości sieci energetycznej i jej wyższych harmonicznych (50-2000 Hz), jak i popularnych częstotliwości komunikacyjnych w zakresie mega i giga hercowym. W tym celu prowadzone są badania, które pozwolą na wyznaczenie istotnych parametrów materiałów, takich jak: rezystancja, przenikalność względna magnetyczna i elektryczna, gęstość, twardość, wytrzymałość kompozytów (DMTA).

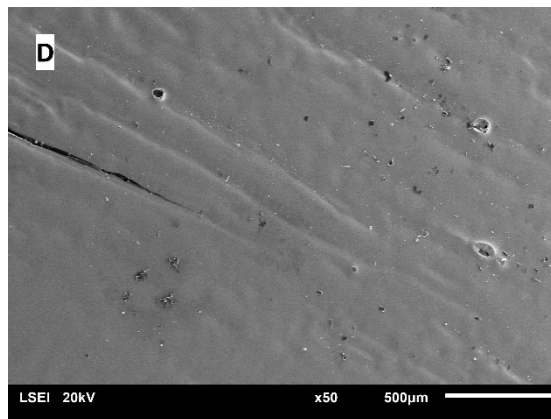
Do wstępnych badań pozyskano materiały odpadowe z różnych zakładów przemysłowych. Przykładowymi materiałami wykorzystanymi w badaniach były: pyły złomowiskowe, wióry aluminiowe, mosiężne, włókna miedziane, zendra w płatkach o średnicy około 5 mm oraz blacha nanokrystaliczna w postaci wstęg o szerokości 10 mm. Przykłady różnego typu materiałów, które wykorzystano podczas badań wstępnych przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Potencjalne surowce do konstrukcji kompozytów A, B – pyły złomowiskowe, C – zgorzelina walcownicza, D, E – wióry aluminiowe, F – wióry mosiężne, G, włókna miedziane, H – odpady rudy cyny, I – taśmy nanokrystaliczne, J – żywica fenylowa, K – N odpady włókiennicze.

Materiałami wykorzystanymi do wytworzenia kompozytów ze względu na właściwości przetwórcze były tworzywa polimerowe termoutwardzalne oraz termoplastyczne. Tworzywa termoplastyczne podczas ogrzewania przechodzą w stan plastyczny, po ostygnięciu twardnieją i mogą być wielokrotnie przetwarzane. Polimery termoutwardzalne w podwyższonych temperaturach początkowo miękną, a przy utrzymaniu wyższej temperatury utwardzają się nieodwracalnie.

Przykładowe zdjęcia materiałów, pyłów i fragmentów przed mieleniem, wykorzystanych do produkcji kompozytów, wykonane przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM, JEOL model JSM-6610LV) zamieszczono na rysunku 2. Oszacowane składy chemiczne tych materiałów, określone metodą dyspersji energii promieniowania rentgenowskiego (SEM-EDS, moduł X-MAX 80 firmy Oxford Instruments) zawarte zostały w tabeli 1.



Rys. 2. Zdjęcia SEM ukazujące aluminiowe wióry (a) pył złomowiskowy (b), płatki zendry (c) oraz powierzchnię blachy monokrystalicznej (d).

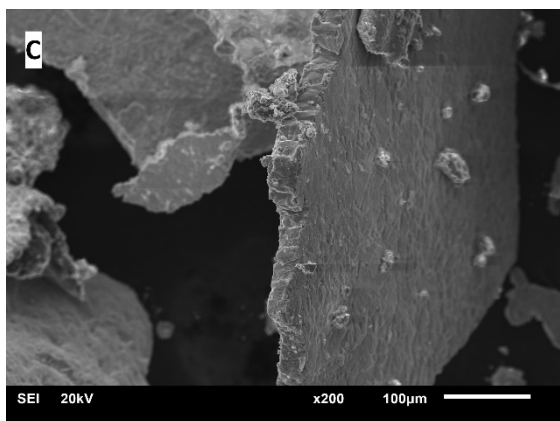
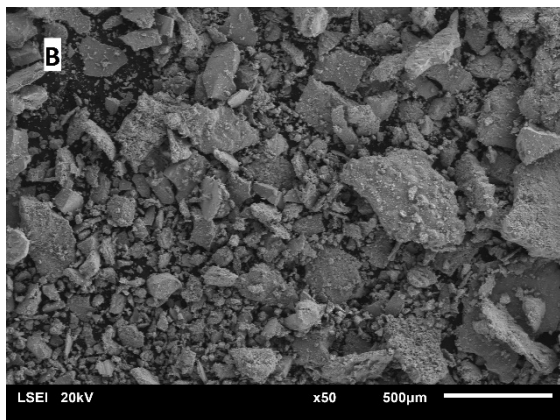
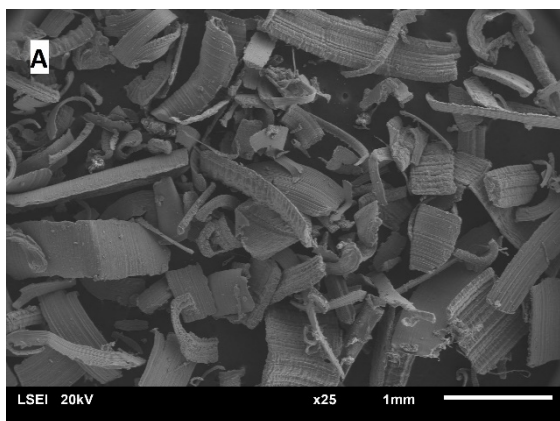


Tabela 1. Oszacowany skład chemiczny badanych materiałów:

	Pierwiastek	Udział masowy [%]
Pył złomowiskowy	Fe	18,2
	C	13
	Ca	13
	Mg	3,6
	Si	5,7
	Al	1,5
	Mn	4,4
	O	38,9
	Zn, Cr, P, S, Na	razem <2
Blacha monokrystaliczna	Fe	reszta
	O	0,1
	Co	7,1
	Cu	1
	Nb	5,3
Wiór Al	Al	97,1
	O	2,9
Zendra	Fe	reszta
	O	25,7
	Al	0,2
	Si	0,1
	C	<0,5

Materiały wypełnienia poddano wstępnemu rozdrobnieniu. Następnie materiał przetworzono w laboratoryjnym młynku szybkoobrotowym IKA® A11 basic, który mieli materiał na drobne frakcje. Po zmieleniu w młynku dany materiał przesypywano na sitach wibracyjnych przy użyciu wstrząsarki laboratoryjnej Morek MULTISIEW LpzE-2e, aby oddzielić od siebie dane frakcje materiału.

Do wytworzenia kompozytów z wykorzystaniem materiałów z recyklingu jako osnowę wykorzystano tworzywa: PVC, żywicę fenylową oraz żywicę fenylo-akrylową. Za pomocą kalymetrii skaningowej DSC określono charakterystyczne parametry przetwórstwa (tabela 2).

Tabela 2. Charakterystyczne parametry przetwórstwa wybranych polimerów

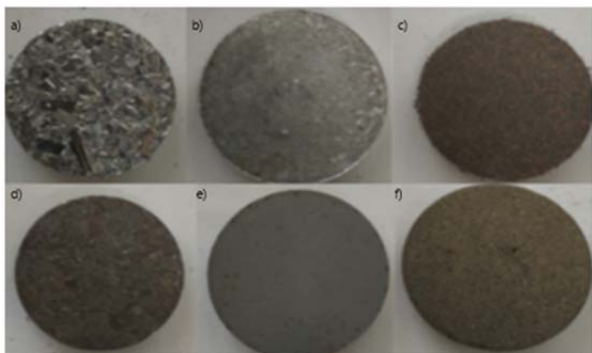
Wstępne badania nad właściwościami ekranującymi

	Temperatura mięknienia	Temperatura sieciowani	Czas sieciowania
polichlorek winylu	150°C	nd	nd
żywica fenolowa	nd	130°C	12 min
żywica fenolowo akrylowa	nd	150°C	12 min



Tabela 3. Skład ilościowy próbek kompozytowych

Lp	skład	siła nacisku
1	pył złomowiskowy włóknisty + żywica fenolowa 3%	22 (t)
2	zendra + żywica fenolowa 3%	22 (t)
3	żelazo pył 100-150 + żywica fenolowa 3%	43 (t)
4	żelazo pył 50-100 + żywica fenolowa 3%	43 (t)
5	żelazo pył 150-250 + żywica fenolowa 3%	43 (t)
6	zendra + 5% PVC	43 (t)
7	nanokrystalik, żywica fenolowo-akrylowa 3%	43 (t)
8	nanokrystalik 59,5%, żelazo 39,5%, żywica fenolowo-akrylowa 1%	43 (t)
9	nanokrystalik 57,5%, żelazo 37,5%, 5% PVC	43 (t) (5 tstygnięcie)



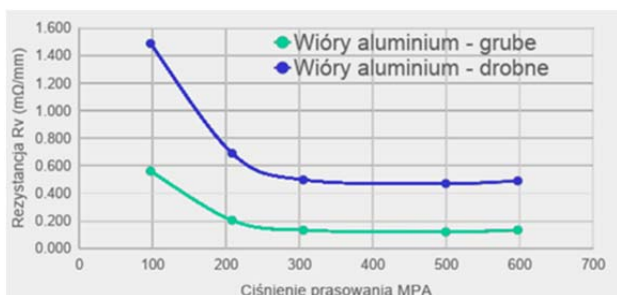
Rys. 3. Próbkę do badań właściwości elektrycznych, wióry: a) aluminium (grube), b) aluminium (drobne), c) miedź, d) Fe (grube), e) Fe (pył); g) nanokrystalik+żywica 1%

Wyznaczenie właściwości opracowanych kompozycji pozwoli na budowę kompozytów wielowarstwowych, które będą dopasowane do ekranowania różnych zakresów częstotliwości. Przykładowe wyniki zależności wartości rezystancji od wagowej zawartości spoiwa oraz ciśnienia prasowania przedstawiono na rysunkach 5 i 6.

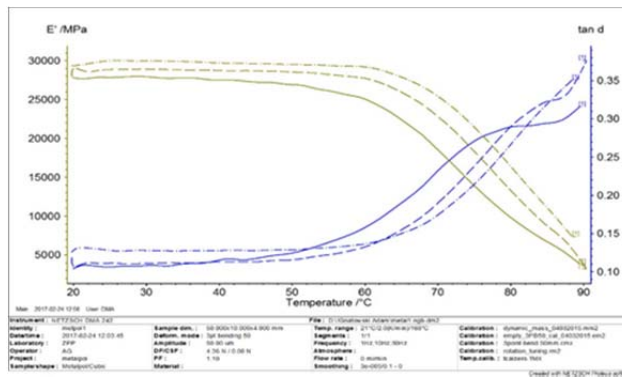
Wyniki badań wstępnych właściwości mechanicznych przykładowego kompozytu obrazuje wykres na rysunku 7.



Rys. 5. Zmiana rezystancji przy różnym udziale spoiwa



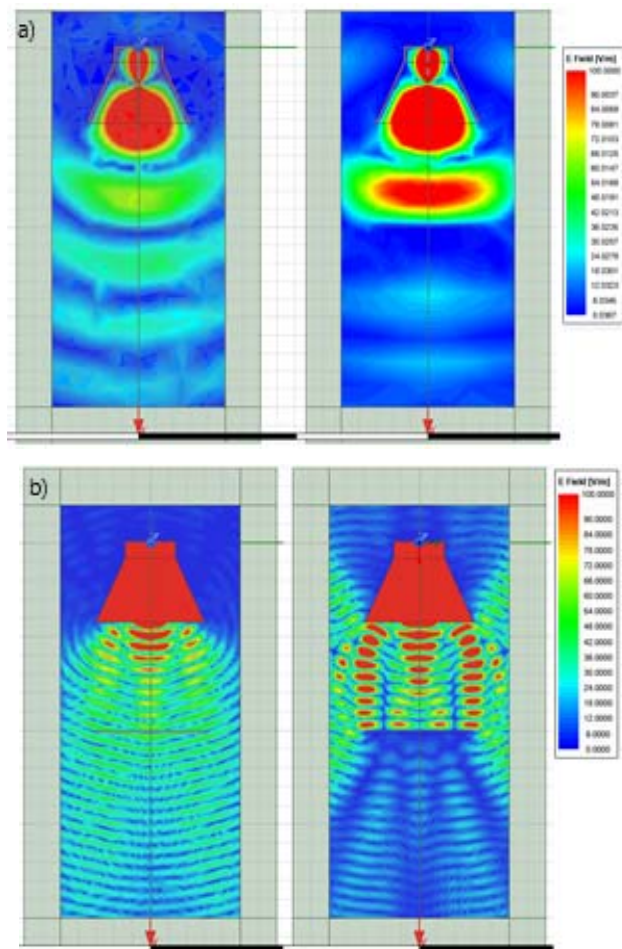
Rys. 6. Zmiana rezystancji pod wpływem ciśnienia prasowania



Rys. 7. Wyniki badań wstępnych właściwości mechanicznych kompozytu metal-polimer (Fe-PVC)

**Symulacje**

Równoległe do badań eksperymentalnych wykonywane są symulacje w pakiecie ANSYS HFFS. Zebrane dane pomiarowe służą do symulacji charakterystyki ekranowania opracowanych kompozytów. Źródło pola w symulacji stanowi antena typu Horn. Na rysunku 8 została przedstawiona propagacja fali o częstotliwości 900 MHz i 2,4 GHz dla modelu bez przesłony, oraz przesłoną z kompozytu.



Rys. 8. Efekty symulacji w ANSYS HFFS, antena typu HORN, a) propagacja fali bez przesłony i z przesłoną – 900 MHz, b) propagacja fali bez i z przesłoną z przesłoną z kompozytu – 2,4 GHz

Przeprowadzone dotychczas badania wskazują na duży potencjał opracowanych kompozytów jako alternatywy dla przesłon i obudów wykonanych z polimerów i materiałów

włókienniczych powlekanych warstwą elektroprowadzącą lub wykonanych z pełnych blach metalowych [9-10].

*Badania zostały sfinansowane z grantu NCBR LIDER X, pt. Eko-innowacyjne materiały kompozytowe wykorzystujące surowce pochodzące z recyklingu do zastosowań elektrotechnicznych. Nr LIDER/11/0049/L-10/18/NCBR/2019*

*Autorzy są wdzięczni prof. dr hab. inż. Romanowi Wyrzykowskiemu za przyznanie dostępu do infrastruktury obliczeniowej zbudowanej w ramach projektów PLATON nr. POIG.02.03.00-00-028/08 - usługa obliczeń kampusowych U3 oraz MAN-HA nr. POIG.02.03.00-00-110/13 - "Realizacja w MAN-ach usług krytycznych o wysokim poziomie niezawodności".*

**Autorzy:** dr inż. Adam Jakubas, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, e-mail: [adam.jakubas@pcz.pl](mailto:adam.jakubas@pcz.pl), dr inż. Ewa Łada-Tondyra, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, e-mail: [e.lada-tondyra@el.pcz.czest.pl](mailto:e.lada-tondyra@el.pcz.czest.pl); dr inż. Marcin MAKÓWKA, e-mail: [marcin.makowka@p.lodz.pl](mailto:marcin.makowka@p.lodz.pl), dr inż. Mateusz CHYRA, e-mail: [mateuszchyra@wp.pl](mailto:mateuszchyra@wp.pl), mgr inż. Olga Sochacka, e-mail: [o.sochacka@el.pcz.czest.pl](mailto:o.sochacka@el.pcz.czest.pl), mgr inż. Łukasz SUCHECKI Politechnika Częstochowska Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki, Al. Armii Krajowej 21, 42-200 Częstochowa, e-mail: [sucheki@itm.pcz.pl](mailto:sucheki@itm.pcz.pl)

## LITERATURA

- [1] Miśkiewicz, P., Frydrych, I., Makówka, M. Examination of selected thermal properties of basalt composites. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*. 28 (2020), nr 2, 109-109.
- [2] Bambynek D., Jabłoński P., Jakubas A., Attenuation of High Frequency Electromagnetic Waves by Polymer Composites with Waste Materials. In *2018 Applications of Electromagnetics in Modern Techniques and Medicine, IEEE*, (2018), 1-4.
- [3] Gnatowski A. Physical properties of polyoxymethylene composite with quartz sand after uv ageing, *Composites Theory and Practise*, 13 (2013), nr, 147-15.
- [4] German J. *Podstawy mechaniki kompozytów włóknistych*, Wydaw. Politechniki Krakowskiej im. T. Kościuszki, Kraków, 2001.
- [5] Sterzyński T. Śledź I., Jednopolimerowe kompozyty polipropylenowe— wytwarzanie, struktura, właściwości, *Polimery*, 52 (2007), nr 6, 443-452.
- [6] Jakubas, A., Chyra, M., Gnatowski, A. (2019). The Influence of Reinforcement Fibers on Mechanical and Electrical Properties of the Electrical Engineering Composites. *Acta Physica Polonica A*, 135 (2018), nr 2, 193-195.
- [7] Bambynek, D., Jakubas, A., Jablonski, P. Badanie możliwości ekranowania pola elektromagnetycznego przez wybrane kompozyty polimerowe. *Przegląd Elektrotechniczny*, 93 (2017), nr 1, 121-124.
- [8] Bambynek, D., Jakubas, A., Jabłoński, P. Wpływ składu kompozytu żelazo-polimer na właściwości ekranujące fale elektromagnetyczne wielkiej częstotliwości. *Przegląd Elektrotechniczny*, 93 (2017), nr 12, 55-58.
- [9] Kolcunová, I., I inni, Shielding Effectiveness of Electromagnetic Field by Specially Developed Shielding Coating. *Acta Physica Polonica, A*, 137 (2020), nr 5, 711-713.
- [10] Dolník, B., Rajňák, M., Cimbalá, R., Kolcunová, I., Kurimský, J., Džmura, J., Valtera, J. Radio Frequency Response of Magnetic Nanoparticle-Doped Yarn. *Acta Physica Polonica A*, 137(2020), nr 5, 687-689.