

POLITECHNIKA CZĘSTOCHOWSKA

WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ

KATEDRA TECHNOLOGII i AUTOMATYZACJI

mgr inż. Łukasz Suchecki

*„Analiza wpływu zastosowania surowców z recyklingu na właściwości kompozytów polimerowych ekranujących pole elektromagnetyczne”*

Praca doktorska

Promotorzy:

dr hab. inż. Adam Gnatowski, prof. PCz

dr hab. inż. Adam Jakubas, prof. PCz

Częstochowa 2024 r.

## *Podziękowanie*

*Składam serdeczne podziękowanie Promotorom, bez których niniejsza praca by nie powstała:*

*dr hab. inż. Adam Gnatowski, prof. PCz*

*dr hab. inż. Adam Jakubas, prof. PCz*

*Za ukierunkowanie rozprawy, pomoc oraz życzliwość podczas prowadzenia badań.*

*Chciałbym również podziękować wszystkim osobom, które przyczyniły się do powstania tej dysertacji, w szczególności Rodzicom Ewie i Andrzejowi i całej Rodzinie, która mnie wspierała.*

## Streszczenie

W pracy przedstawiono badania z zakresu skuteczności ekranowania pola elektromagnetycznego i właściwości termomechanicznych kompozytów wytwarzanych metodą prasowania. Szczególny nacisk położono zbadaniu parametrów ekranujących pole elektromagnetyczne.

W pierwszym etapie badań wstępnych wytworzono kompozyty do badań rezystancji skrośnej i powierzchniowej oraz przenikalności magnetycznej. Do wytworzenia kompozytów zastosowano napełniacze: pył złomowiskowy aluminium po obróbce skrawaniem, mosiądz po obróbce skrawaniem, zendrę walcowniczą, taśmy nanokrystaliczne oraz polimery: HDPE, POM, PVC. Analizując wyniki badań rezystancji, przenikalności magnetycznej oraz badanie stabilności kompozytu wytworzono próbki do wstępnych badań skuteczności ekranowania. W wyniku przeprowadzonej analizy wstępnej do badań zasadniczych wykorzystano zgorzelinę walcowniczą i blachę nanokrystaliczną jako napełniacz, a jako osnowę kompozytu polimer HDPE. Napełniacze zastosowane do kompozytów przygotowano przez rozdrobnienie materiału i przesianie na różne frakcje. Zgorzelinę walcowniczą przesiano uzyskując frakcję 0,250  $\mu\text{m}$ , oraz blachę nanokrystaliczną uzyskując frakcję 1 mm. Kompozyty wytworzono metodą prasowania tłoczego w podgrzewanej formie.

Wykonano kompozyty o różnym składzie procentowym osnowy i napełniacza w stosunku masowym. Wytworzone kompozyty poddano badaniom skuteczności ekranowania pola elektromagnetycznego. Analizując wyniki badań kompozytów z jednym rodzajem napełniacza stwierdzono, że najkorzystniejsze parametry kompozytu uzyskuje się przy 70% zawartości napełniacza proporcja w stosunku masowym wynosi 70% napełniacza do osnowy.

Na podstawie analizy badań wstępnych, w celu poprawy właściwości elektromagnetycznych, mechanicznych i termomechanicznych, wytworzono kompozyt z zastosowaniem dwóch rodzajów napełniaczy oraz wybrano skład kompozytu o najkorzystniejszych właściwościach.

W wyniku analizy skuteczności ekranowania wykonano kompozyty warstwowe oraz mieszane w celu weryfikacji ich właściwości mechanicznych, wykonano również badanie skuteczności ekranowania w komorze bezodbićowej dla różnych częstotliwości. W oparciu o badania mechaniczne oraz badania ekranowania pola elektromagnetycznego wykazano, że kompozyt mieszany o zawartości 55% zendry walcowniczej, 30% HDPE, 15% rozdrobnionej blachy nanokrystalicznej charakteryzuje się korzystnymi właściwościami termomechanicznymi oraz ekranującymi pole elektromagnetyczne.

## **Abstract**

The paper presents research on the effectiveness of electromagnetic field shielding and thermomechanical properties of composites manufactured by pressing. Particular emphasis was placed on examining the parameters that determine electromagnetic field shielding.

In the first stage of preliminary research, composites were produced for testing volume and surface resistance as well as magnetic permeability. The following fillers were used to produce the composites: aluminium scrap dust from the machining, brass after machining, mill scale, nanocrystalline tapes and polymers: HDPE, POM and PVC. By analysing the results of resistance, magnetic permeability and composite stability tests, samples were produced for preliminary screening effectiveness tests. As a result of the preliminary analysis, mill scale and nanocrystalline sheet were used as filler for the main tests, and HDPE polymer was used as the composite matrix. The fillers used for composites were prepared by grinding the material and sieving it into different fractions. The composites were produced by compression pressing in a heated mould.

The composites were made with different percentages of matrix and filler in mass ratio. The manufactured composites were tested for their electromagnetic field shielding effectiveness. After analysing the test results for composites with one type of filler, it was found that the most favourable composite parameters were obtained with 70% filler content - the proportion by mass is 70% filler to matrix.

Based on the analysis of preliminary tests, in order to improve the electromagnetic, mechanical and thermomechanical properties, a composite was produced using two types of fillers and the composition of the composite with the most favourable properties was selected.

As a result of the analysis of the shielding effectiveness, layered and mixed composites were made to verify their mechanical properties and the shielding effectiveness was tested in an anechoic chamber for various frequencies. Based on mechanical tests and electromagnetic field shielding tests, it has been shown that that a mixed composite containing 55% mill scale, 30% HDPE, 15% crushed nanocrystalline sheet is characterised by favourable thermomechanical and electromagnetic field shielding properties.

## Spis treści

Streszczenie .....	3
Wykaz ważniejszych oznaczeń .....	7
1. Wprowadzenie.....	10
1.1. Przegląd literatury dotyczącej kompozytów i ich zastosowania .....	11
1.2. Zagadnienia związane z polem elektromagnetycznym .....	14
1.3. Nowoczesne materiały ekranujące pole EM .....	17
2. Cele, tezy oraz zakres pracy .....	19
3. Właściwości termomechaniczne kompozytów polimerowych.....	22
3.1. Metodyka badań wytrzymałości na rozciąganie kompozytów .....	22
3.2. Metodyka pomiaru modułu Young'a na podstawie prawa Hooke'a.....	24
3.3. Metodyka badań udarności wg Charpy'ego .....	26
3.4. Pomiar twardości materiałów .....	28
3.5. Właściwości termomechaniczne kompozytów.....	31
3.6. Metoda badań termomechanicznych DMTA .....	32
4.1. Wybrane właściwości elektryczne i magnetyczne materiałów .....	36
4.1.2. Przenikalność magnetyczna.....	40
4.1.3. Rezystywność i konduktywność.....	43
4.1.4. Zjawisko indukcji elektromagnetycznej.....	46
4.2. Wybrane rodzaje materiałów.....	49
4.2.1. Materiały dielektryczne .....	50
4.2.2. Materiały diamagnetyczne.....	54
4.2.3. Materiały paramagnetyczne.....	54
4.2.4. Materiały ferromagnetyczne.....	55
4.3. Skuteczność ekranowania pola elektromagnetycznego.....	58
5. Technologie wytwarzania kompozytów .....	67
5.1. Wytwarzane kompozyty technologiami prasowania.....	68
5.1.1. Wytwarzanie kompozytów technologią prasowania tłocznego.....	69
5.1.2. Wytwarzanie kompozytów technologią prasowania przedtłocznego.....	70
6. Materiały i surowce .....	72
6.1. Materiały polimerowe wykorzystywane do wytwarzania kompozytów .....	72
6.2. Materiały wykorzystywane w ekranowaniu pola elektromagnetycznego .....	75
6.3. Kompozyty wykorzystywane do ekranowania pola elektromagnetycznego.....	79
6.4. Recykling materiałów.....	80
6.4.1. Recykling materiałów polimerowych.....	81

6.4.2. Recykling materiałów ekranujących pole elektromagnetyczne .....	81
7. Wytworzenie próbek i metodyka badawcza.....	83
7.1. Wybór materiałów .....	83
7.2. Przygotowanie kompozytu i wytworzenie próbek metodą prasownia tłoczego.....	85
7.3. Wyniki badań wstępnych .....	86
7.3.1. Pomiar rezystancji .....	86
7.3.2. Badania przenikalności magnetycznej.....	89
7.3.3. Analiza obliczeniowa skuteczności ekranowania pola elektromagnetycznego.....	91
7.3.4. Badanie ekranowania pola elektromagnetycznego.....	97
7.3.5. Podsumowanie badań wstępnych.....	102
7.4. Wyniki badań zasadniczych .....	102
7.4.1. Wyniki badań DMTA.....	102
7.4.2. Wyniki badań statycznego rozciągania .....	107
7.4.3. Wyniki badań Twardości HB .....	109
7.4.4. Wyniki badań udarności Charpy'ego .....	110
7.4.5. Podsumowanie badań termomechanicznych .....	111
7.4.6. Badania skuteczności ekranowania pola elektromagnetycznego w komorze bezodbiowej .....	112
7.4.7. Badania skuteczności ekranowania pola elektromagnetycznego z użyciem komory zbudowanej z przesłon .....	114
8. Wnioski końcowe .....	117
Bibliografia.....	119
Spis rysunków .....	129
Spis tabel .....	132

## Wykaz ważniejszych oznaczeń

Na potrzeby pracy niektóre oznaczenia zostały zmodyfikowane przez dodanie indeksu, w celu rozróżnienia symboli wielkości mechanicznych i elektrotechnicznych.

### Mechanika

$a_{cU}$  - udarność próbek bez karbu [ $\text{kJ}/\text{mm}^2$ ],

$S_0$  - powierzchnia początkowego przekroju poprzecznego [ $\text{mm}^2$ ],

$b$  - szerokość kształtki do badań [mm],

$b_N$  - pozostała szerokość kształtki do badań (w miejscu karbu) [mm],

$E_Y$  - moduł Younga [MPa],

$E_{Y'}$  - moduł zachowawczy [MPa],

$E_{Y''}$  - moduł stratności [MPa],

$E_c$  - skorygowana energia pochłonięta przy złamaniu kształtki [J],

$E_x$  - zespolony moduł Younga [MPa],

$F$  - siła odkształcająca, [N],

$h$  - grubość kształtki [mm],

$k$  - jest stałą sprężystości, zwanej również współczynnikiem sprężystości [ $\text{N}/\text{mm}$ ],

$l_0$  - początkowa długość próbki [mm],

$l_x$  - długość próbki po rozciągnięciu [mm],

$\text{tg}\delta$  - tangens kąta stratności mechanicznej [-],

$x$  - reprezentuje odkształcenie sprężyny [mm],

$\Delta l_x$  - przyrost długości próbki [mm],

$\varepsilon$  - odkształcenie, zmienna niezależna [%],

$\varepsilon_b$  - wydłużenie względne [%],

$\sigma$  - naprężenie zależne od przyłożonego odkształcenia [MPa],

$\sigma_m$  - maksymalne naprężenie [MPa].

## **Elektrotechnika**

$A_{SE}$  - absorbcja [dB],

$B$  - indukcja magnetyczna [T],

$B_m$  - szczytowa wartość przebiegu indukcji magnetycznej [T],

$d$  - grubość [mm],

$D$  - indukcja elektryczna [C/m<sup>2</sup>],

$dl$  - nieskończenie krótki odcinek skierowany pętli [m],

$E$  - natężenie pola elektrycznego [V/mm],

$E_1$  - natężenie transmitowanego pola elektrycznego [V/m; N/C],

$E_2$  - natężenie transmitowanego pola elektrycznego przez ekran [V/m; N/C],

$E_m$  - natężenie indukowanego pola elektrycznego [V/m],

$G$  - konduktancja (przewodność elektryczna) [1/Ω],

$H$  - natężenie pola magnetycznego [A],

$H_m$  - szczytowa wartość przebiegu natężenia pola magnetycznego [A],

$I$  - natężenie prądu [A],

$I_p$  - prąd przesunięcia [A],

$J$  - gęstość prądu [A/m<sup>2</sup>]

$l$  - długość [m],

$M_{SE}$  - wielokrotne odbicie [dB],



$P_1$  - moc generowana przez źródło zakłócające [W],

$P_2$  - moc przechodząca przez ekran [W],

$P_r$  - rezystywność [ $\Omega\text{m}$ ],

$R$  - rezystancja [ $\Omega$ ],

$R_{SE}$  - odbicie [dB],

$S_0$  - pole przekroju [ $\text{mm}^2$ ],

$S_l$  - powierzchnia zamknięta pętlą o długości  $l$  [ $\text{m}^2$ ],

$SE$  - skuteczność ekranowania [dB],

$\text{tg}\delta_d$  - tangens kąta strat dielektrycznych [-],

$V_{in}$  - wygenerowane napięcie wejściowe [V],

$V_{out}$  - odczytane napięcie po przejściu przez przesłonę [V],

$Z_0$  - impedancja falowa [ $\Omega$ ],

$\gamma$  - konduktywność [S/m],

$\delta$  - zastępcza głębokość wnikania pola elektromagnetycznego, [dB],

$\varepsilon$  - siła elektromotoryczna powstająca w pętli [V],

$\varepsilon_e$  - przenikalność elektryczna [F/m],

$\mu$  - przenikalność magnetyczna materiału ekranującego [H/m],

$\mu_0$  - przenikalność magnetyczna w próżni [H/m],

$\mu_r$  - względna przenikalność magnetyczna ośrodka [-],

$\Phi$  - strumień indukcji magnetycznej [Wb;  $\text{T}\cdot\text{m}^2$ ],

$\omega$  - pulsacja, częstość kołowa fali elektromagnetycznej [rad/s],

# 1. Wprowadzenie

W ostatnich latach nastąpił wzrost zainteresowania recyklingiem materiałowym, polegający na użyciu elementów odpadowych wykorzystanych do przetworzenia w surowce [1]. Odpady te ponownie przetwarzają się w produktów o wysokich parametrach mechanicznych i użytkowych. Kompozyty o osnowie polimerowej zbrojone m.in. cząstkami metalicznymi i niemetalicznymi znajdują coraz większe zastosowanie w nowoczesnych konstrukcjach wypierając tradycyjne materiały w różnych gałęziach przemysłu [2]. Kompozyty składają się przynajmniej z dwóch faz osnowy i napełniacza. Zadaniem osnowy jest związanie fazy zbrojącej w określonym miejscu w strukturze materiału oraz przeciwdziałanie deformacji pod wpływem obciążeń, przenosząc naprężenia na składniki fazy zbrojonej. Wybór odpowiedniego napełniacza powoduje zmiany określonych właściwości fizycznych, cieplnych, elektrycznych kompozytu. Powoduje to obniżenie ceny danego produktu o podobnych właściwościach. W zależności od wybranego rodzaju zbrojenia możemy teoretycznie przewidzieć właściwości danego kompozytu. Dodanie napełniacza zmniejsza koszty wytworzenia danego wyrobu [3]. W zależności od doboru technologii wytwarzania wykorzystywane są kompozyty o różnej zawartości napełniacza w stosunku do osnowy.

W pracy przedstawiono analizę wpływu napełniacza na zmiany własności elektromagnetycznych, mechanicznych i termicznych kompozytów polimerowych. Wykonano kompozyty o osnowie z polimeru HDPE i napełniaczy na bazie metalowych materiałów odpadowych, np. zgorzeliny walcowniczej (zendry) i taśm nanokrystalicznych (odpadów powstałych przy produkcji rdzeni transformatorów) w celu określenia ich właściwości fizycznych. Możliwość wykorzystania wybranych kompozytów pozwoliła na zastosowanie ich jako materiałów ekranujących zakłócenia (EMI) i niepożądane promieniowanie elektromagnetyczne (EM). Tego typu materiały są wykorzystywane w medycynie, lotnictwie, wojsku i telekomunikacji [4-6]. W otoczeniu człowieka występuje coraz więcej źródeł promieniowania elektromagnetycznego o wysokiej częstotliwości. W powszechnym użyciu znajduje się coraz więcej urządzeń takich, jak: telefony komórkowe, smartfony, tablety, komputery przenośne. Znacząco wzrasta liczba obiektów telekomunikacyjnych opartych na technologiach Wi-Fi, GSM, LTE itp. Wymienione urządzenia i obiekty emitują jednostkowo niski, aczkolwiek permanentny poziom promieniowania elektromagnetycznego. W związku z tym pojawiło się zwiększone zapotrzebowanie na ekrany elektromagnetyczne w urządzeniach codziennego użytku. Nowo opracowane kompozyty polimerowe o właściwościach ekranujących mogą przyczynić się do zmniejszenia promieniowania EM [6].

Koncepcja pracy zakłada opracowanie, wykonanie i zastosowanie kompozytu o dobrych właściwościach ekranujących pole magnetyczne zarówno dla niskich częstotliwości sieci energetycznej (50-2000 Hz) oraz telekomunikacyjnych w zakresie mega oraz giga hercowym. W tym celu przeprowadzono badania, które pozwoliły na wyznaczenie istotnych parametrów kompozytów.

## **1.1. Przegląd literatury dotyczącej kompozytów i ich zastosowania**

Kompozyty to materiały złożone z co najmniej dwóch różnych składników połączonych razem w celu wytworzenia materiału o nowych unikalnych właściwościach. Definicja kompozytu obejmuje zarówno mikrostrukturę, jak i makrostrukturę materiału. Kompozyty można opisać jako materiały składające się z osnowy i napelnacza pełniącego rolę wzmocnienia. Można wyróżnić różne rodzaje kompozytów np. kompozyty włókniste, cząstkowe, lamelarne i hybrydowe. Kompozyty włókniste składają się najczęściej z matrycy polimerowej, a jako wzmocnienia używa się różnorodnych włókien, natomiast kompozyty cząstkowe składają się z cząstek takich jak włókna, kuleczki lub proszki rozproszonych nieregularnie w osnowie. Kompozyty lamelarne składają się z warstw lub płyt wzmocnienia zanurzonych w matrycy, a kompozyty hybrydowe łączą różne rodzaje zbrojeń [7]. Kompozyty posiadają wiele zalet. Wśród głównych korzyści wynikających z zastosowania kompozytów w porównaniu do materiałów takich jak metale, nienapełnione materiały polimerowe, itp. wykazują lepsze właściwości takie jak:

- wysoka wytrzymałość,
- lekkość,
- odporność na korozję,
- dobra odporność termiczna,
- wysoka sztywność.

Dzięki kombinacji różnych materiałów w jednym kompozycie, możliwe jest uzyskanie optymalnego zestawu właściwości, które trudno byłoby osiągnąć w pojedynczych materiałach [8]. Kompozyty są materiałami o różnorodnych właściwościach termicznych, które wynikają

z kombinacji składników osnowy i zbrojeń. Poniżej przedstawiono kilka istotnych aspektów dotyczących właściwości termicznych kompozytów:

- Przewodzenie ciepła – włókna lub cząstki wzmocnień w kompozytach mogą wpływać na przewodzenie ciepła w materiale. Zbrojenia metaliczne, takie jak włókna miedziane, powodują zwiększenie przewodzenia ciepła w kompozycie w porównaniu do samej osnowy polimerowej [9].
- Izolacja termiczna – kompozyty polimerowe wykonane z żywic epoksydowych lub poliestrowych, mogą być stosowane jako materiały izolacyjne ze względu na swoje dobre właściwości izolacyjne. Napełniacze, które używane są do wzmocnienia kompozytu mogą również wpływać na jego izolację termiczną [10].
- Stabilność termiczna – kompozyty mogą wykazywać różne poziomy stabilności termicznej w zależności od wyboru rodzaju osnowy i napełniacza. Rodzaj napełniacza zastosowany w kompozycie może wpływać na temperaturę topnienia lub poprawiać odporność na utlenianie kompozytu [11].
- Rozszerzalność termiczna – kompozyty składające się z różnych komponentów mogą wykazywać różnice w rozszerzalności termicznej, co może prowadzić do wewnętrznych naprężeń termicznych materiału podczas zmiany temperatury. Z tego powodu, odpowiednie dopasowanie właściwości termicznych składników kompozytu jest ważne dla jego wytrzymałości i trwałości [12].

Właściwości termiczne kompozytów charakteryzują się istotnymi parametrami warunkującymi zastosowanie w przemyśle, np. lotniczym, motoryzacyjnym, elektronicznym, energetycznym oraz wojskowym. Odpowiedni dobór składników kompozytu może przyczynić się do optymalizacji wydajności termicznej materiału. Przykładami zastosowania kompozytów w przemyśle są;

- Przemysł lotniczy wykorzystuje przeważnie kompozyty włókniste, głównie laminaty o osnowie z żywic utwardzalnych, o zbrojeniach wykonanych z włókien szklanych i węglowych. Mają one doskonałą wytrzymałość przy niskiej masie, co przyczynia się do redukcji masy samolotów i zwiększenie ich nośności [5].
- Przemysł motoryzacyjny coraz częściej wykorzystuje kompozyty w produkcji samochodów ze względu na swoją lekkość i wytrzymałość oraz absorpcję energii w czasie zderzenia. Podczas wypadków samochodowych kompozyty użyte do budowy pojazdów zwiększają absorpcję energii kinetycznej w czasie kolizji poprawiają poziom

bezpieczeństwa samochodów. Zmniejszenie masy pojazdu powoduje także zmniejszenie zużycia paliwa przez współczesne samochody [13].

- W przemyśle budowlanym wykorzystuje się kompozyty do wzmocnienia struktur, takich jak mosty, elementy konstrukcyjne i panele ściennie. Kompozyty wykazują wysoką wytrzymałość i odporność na korozję co przyczynia się to do dłuższej trwałości i bezpieczeństwa konstrukcji [14].
- W wojsku kompozyty są wykorzystywane do budowy nowoczesnych panczerzy czołgów pojazdów militarnych i elementów ich uzbrojenia oraz wykonuje się elementy ochrony żołnierzy tj. hełmy, kamizelki kuloodporne [4].
- W dyscyplinach sportowych występuje coraz częstsze zainteresowanie kompozytami. Najczęściej stosuje się kompozyty w dyscyplinach sportowych takich jak sporty wodne, rowerowe, lotnicze i narciarstwo. Zastosowanie kompozytów przy wytwarzaniu sprzętu sportowego powoduje zmniejszenie ich masy przy jednoczesnym zwiększeniu wytrzymałości [15].

Kompozyty znajdują szerokie zastosowanie w przemyśle elektrotechnicznym, dzięki swoim unikalnym właściwościom elektrycznym, termicznym i mechanicznym. Poniżej przedstawiono kilka obszarów, w których kompozyty są wykorzystywane:

- Izolatory elektryczne – kompozyty wykonane z żywic epoksydowych lub poliestrowych wzmocnionych włóknami szklanymi, znalazły zastosowanie przy produkcji izolatorów elektrycznych. Posiadają one doskonałe właściwości izolacyjne, co pozwala na bezpieczny przepływ prądu elektrycznego [16].
- Obudowy elektroniczne – kompozyty z matrycą polimerową wzmocnione włóknem węglowym lub szklanym są wykorzystywane do produkcji obudów elektronicznych. Dzięki swojej lekkości, wytrzymałości i odporności na korozję, kompozytowe obudowy zapewniają ochronę dla urządzeń elektronicznych [17].
- Płytki drukowane – kompozytowe płytki drukowane (PCB) są wykorzystywane do produkcji układów elektronicznych. PCB składają się z laminowanej warstwy kompozytowej z naniesionymi ścieżkami przewodzącymi. Kompozyty tego typu oferują dobre właściwości izolacyjne i umożliwiają precyzyjne prowadzenie sygnałów elektrycznych [18].

- Anteny – do produkcji anten stosowane są kompozyty węglowe lub szklane z uwagi na ich lekkość, wytrzymałość i możliwość dostosowania kształtu anteny do wymagań projektowych [19].

Kompozyty ekranujące pole elektromagnetyczne to specjalne materiały, które łączą w sobie właściwości elektromagnetyczne kilku różnych napełniaczy, w celu uzyskania lepszej ochrony przed niepożądanym promieniowaniem EM. Kompozyty te można stosować w budynkach i w urządzeniach elektronicznych, zwiększających skuteczność ekranowania pola elektromagnetycznego. Jednym z przykładów kompozytów ekranujących pole elektromagnetyczne jest połączenie polimeru z metalem. Metale skutecznie pochłaniają fale elektromagnetyczne, ale wadą jest ich duża masa. Zastosowanie polimeru nieekranującego pole EM, który jest lżejszy i elastyczniejszy w połączeniu z metalem daje kompozyt skuteczny w pochłanianiu fal elektromagnetycznych [20]. Innym przykładem kompozytów jest połączenie metalu z ceramiką. Kompozyty ekranujące pole elektromagnetyczne pozwalają na dostosowanie SE do różnych potrzeb, poprzez łączenie właściwości cech napełniaczy. Ważne jest jednak, aby pamiętać, że skuteczność ekranowania zależy od wielu czynników, takich jak rodzaj fal elektromagnetycznych, które chcemy ekranować, oraz od rodzaju budynku lub sprzętu, który chcemy chronić. W związku z tym ważne jest, aby dobierać kompozyty ekranujące odpowiednio do konkretnego zastosowania. W tym celu należy przeprowadzać testy ekranowania, aby upewnić się, że kompozyt jest skuteczny.

## **1.2. Zagadnienia związane z polem elektromagnetycznym**

Promieniowanie elektromagnetyczne jest jednym z głównych sposobów przekazywania energii w przestrzeni. Fala elektromagnetyczna jest w stanie przetranszować energię bez potrzeby obecności materii [21]. Promieniowanie elektromagnetyczne jest szeroko stosowane w wielu dziedzinach, takich jak medycyna, komunikacja, astronomia i energetyka. W medycynie, promieniowanie elektromagnetyczne jest wykorzystywane do wytwarzania obrazów medycznych, takich jak RTG lub tomografia komputerowa [22]. W komunikacji, promieniowanie elektromagnetyczne jest wykorzystywane do przesyłania sygnałów radiowych i telewizyjnych oraz do łączności bezprzewodowej, takiej jak Wifi [6]. W astronomii, promieniowanie elektromagnetyczne jest wykorzystywane do badania obiektów astronomicznych, takich jak gromady gwiazd, galaktyki i czarne dziury. Promieniowanie elektromagnetyczne jest również ważne dla zrozumienia zjawisk zachodzących w naszym wszechświecie, takich jak energia słoneczna,

która dociera do Ziemi za pośrednictwem promieniowania elektromagnetycznego [23]. W energetyce, promieniowanie elektromagnetyczne jest wykorzystywane do produkcji energii elektrycznej, np. w elektrowniach słonecznych. W przypadku elektrowni słonecznych, promieniowanie słoneczne jest przekształcane na energię elektryczną przy pomocy paneli słonecznych, co pozwala na produkcję czystej energii bez emisji szkodliwych substancji [24]. Promieniowanie elektromagnetyczne i zakłócenia elektromagnetyczne są pojęciami pokrewnymi, często używanymi w zbliżonym znaczeniu. Istnieją jednak istotne różnice między nimi. EM jest pojęciem ogólnym odnoszącym się do wszystkich fal elektromagnetycznych o różnych długościach i częstotliwościach fali. Promieniowanie elektromagnetyczne występuje w warunkach naturalnych w postaci np. światła słonecznego, ciepła, fal radiowych i mikrofal. Promieniowanie elektromagnetyczne znajduje zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu, takich jak komunikacja, medycyna itp. Z drugiej strony, zakłócenia elektromagnetyczne oznaczają niepożądane lub szkodliwe skutki wywołane przez promieniowanie elektromagnetyczne, które powstaje w różnych źródłach, takich jak sprzęt elektroniczny, urządzenia elektryczne, linie energetyczne itp. EMI może prowadzić do problemów z działaniem urządzeń lub systemów elektronicznych, takich jak telewizory, radia, telefony komórkowe, aparaty cyfrowe, komputery itp. zakłócenia elektromagnetyczne mogą mieć negatywny wpływ na zdrowie ludzi. EMI może być kontrolowane poprzez ekranowanie pola elektromagnetycznego, które polega na ochronie przed niepożądanymi falami elektromagnetycznymi poprzez zastosowanie specjalnych materiałów lub konstrukcji, które pochłaniają lub odbijają fale elektromagnetyczne [25]. Innym sposobem ograniczenia wpływu zakłóceń elektromagnetycznych jest stosowanie specjalnych urządzeń tłumiących, które pochłaniają lub rozpraszają niepożądane fale elektromagnetyczne [26]. Ważne jest, aby pamiętać, że promieniowanie EM i EMI nie zawsze są negatywne - promieniowanie EM jest niezbędne do życia, a EMI może być pozytywnie wykorzystane w wielu zastosowaniach, takich jak medycyna czy przemysł. Nadmierne poziomy zakłóceń elektromagnetycznych mogą mieć negatywny wpływ na sprzęt elektroniczny, dlatego ważne jest, aby kontrolować poziom zakłóceń elektromagnetycznych i stosować odpowiednie metody ekranowania. Rosnąca złożoność urządzeń/systemów elektronicznych w postaci większej gęstości upakowania zapewnia szybką reakcję powodującą zakłócenia elektromagnetyczne. EMI składa się z wielu niechcianych sygnałów promieniowanych, które mogą powodować niedopuszczalne pogorszenie wydajności systemu lub sprzętu. Problemy te pozostawione bez nadzoru mogą spowodować poważne uszkodzenie systemu komunikacyjnego i bezpiecznego działania wielu urządzeń elektronicznych.

Najczęstszą przyczyną zakłóceń elektromagnetycznych są wyładowania elektrostatyczne (ESD) [23]. To powszechnie występujące zjawisko, które jest łatwo rozpoznawalne w postaci zakłóceń radiowych, zniekształconego odbioru telewizji w postaci błysków na ekranie i klikania słyszanego w systemach audio po włączeniu światła. Sygnały o wysokiej częstotliwości są wykorzystywane w działaniu urządzeń sterowanych mikroprocesorem i mogą być przesyłane z urządzenia do otaczającego środowiska, powodując nieprawidłowe działanie sprzętu znajdującego się w pobliżu. W celu zapobieżenia nieprawidłowemu działaniu, urządzenia elektroniczne stosuje się ekrany w taki sposób, aby zarówno przychodzące, jak i wychodzące zakłócenia były filtrowane [27]. Przy zastosowaniu w przemysłowych systemach Internetu rzeczy (IIoT) inteligentne urządzenia nazywane są również czujnikami, które składają się głównie z modułu zasilania, modułu percepcji, modułu jednostki mikrokontrolera (MCU) i modułu komunikacji bezprzewodowej mogą przekształcać w wielkości fizyczne, takie jak wilgotność, temperatura i natężenie światła, na wielkości cyfrowe. Obecnie branża przemysłowa integruje czujniki o dużej gęstości do wykrywania stanu sprzętu produkcyjnego, jakości produktu i inne użyteczne informacje. Nowoczesna produkcja przemysłowa na wysokim poziomie jest nierozdzielnie związana z obsługą systemów IIoT (Industrial Internet of Things). Ponadto dane w systemach Internetu rzeczy mają wyjątkowo wysokie wymagania dotyczące niezawodności i bezpieczeństwa. Jeśli dane w systemach IIoT zostaną naruszone to wpłynie to na kontrolę jakości produkcji, a nawet spowoduje poważny wypadek. W inteligentnym urządzeniu moduł percepcji przekształca wielkość fizyczną na sygnał analogowy i wysyła go do MCU przez przewód sygnałowy. Mikrokontroler odbiera dane i wykonuje operacje bezpieczeństwa, takie jak szyfrowanie i weryfikacja. Na koniec bezpiecznie przetwarzane dane są przesyłane przez bramę na serwer w chmurze. Obecnie proces od MCU do serwera w chmurze posiada kompletne mechanizmy zapewniające bezpieczeństwo danych. W przeciwieństwie do tego, proces od modułu percepcji do mikrokontrolera prawie nie ma metod weryfikacji bezpieczeństwa. W zakładzie przemysłowym falowniki, silniki elektryczne i inne urządzenia które wytwarzają silne fale elektromagnetyczne, które są wprowadzane do przewodu sygnałowego między odbiornikiem a MCU, zakłócając dane. W podobny sposób można zmienić napięcie w przewodzie sygnałowym za pomocą określonego urządzenia do wywoływania zakłóceń elektromagnetycznych, aby osiągnąć manipulację danymi [28-32].



### 1.3. Nowoczesne materiały ekranujące pole EM

Nowoczesne materiały ekranujące pole elektromagnetyczne znacznie poprawiły skuteczność ekranowania w porównaniu z tradycyjnymi metodami. W ciągu ostatnich kilku lat pojawiło się wiele nowych materiałów, które zwiększają SE i umożliwiają lepsze dostosowanie do różnych potrzeb. Jednym z najważniejszych nowoczesnych materiałów ekranujących jest grafen. Grafen jest jednym z najbardziej wytrzymałych i najlżejszych materiałów znanych w przyrodzie, a jego właściwości elektryczne i elektromagnetyczne pozwalają na skuteczne pochłanianie fal elektromagnetycznych [33]. Innym ważnym materiałem jest metamateriał. Metamateriały to specjalne struktury, które są projektowane tak, aby posiadały właściwości elektromagnetyczne, które są niedostępne w naturalnych materiałach. Mogą one być projektowane tak, aby pochłaniać lub odbijać określone zakresy fal elektromagnetycznych, co pozwala na bardziej precyzyjne ekranowanie EM [34]. Kolejnymi materiałami ekranującymi pole elektromagnetyczne są tkaniny ekranujące. Tkaniny te są specjalnie projektowane zawierające metalowe lub metaliczne włókna. Są one skuteczne w pochłanianiu fal EM i często stosowane do produkcji odzieży ochronnej, pokrowców na urządzenia elektroniczne i w innych sytuacjach, gdzie konieczna jest ochrona przed promieniowaniem elektromagnetycznym [35]. Należy pamiętać, że skuteczność ekranowania zależy od wielu czynników, takich jak rodzaj fal EM, które chcemy ekranować, oraz od rodzaju budynku lub sprzętu. W związku z tym ważne jest, aby dobierać materiały ekranujące odpowiednio do konkretnej potrzeby. Nowoczesne materiały ekranujące pola elektromagnetyczne (EM) z wykorzystaniem grafenu, metamateriałów i tkanin ekranujących projektowane, aby skutecznie ograniczać lub blokować rozchodzenie się fal elektromagnetycznych w określonym zakresie częstotliwości. Materiały te są szeroko stosowane w różnych dziedzinach, takich jak elektronika, telekomunikacja, medycyna czy przemysł obronny [36]. Poniżej przedstawiono kilka rodzajów nowoczesnych materiałów ekranujących pole elektromagnetyczne:

- Ekran metaliczny – wykonane są z metali, zwłaszcza miedzi i aluminium, powszechnie używane do ekranowania pól elektromagnetycznych. Materiały te posiadają wysoką przewodność elektryczną, co pozwala im absorbować i rozpraszać fale elektromagnetyczne. Stosuje się je w elektronicznych obudowach, osłonach przewodów i ekranów wokół urządzeń [37].
- Materiały przewodzące polimerowe – polietylen z domieszką grafenu lub nanorurki węglowe, mogą być używane jako materiały ekranujące. Polimery te łączą właściwości

mechaniczne polimerów z przewodnością elektryczną materiałów przewodzących. Wykorzystuje się je do osłon elektromagnetycznych w elastycznych urządzeniach elektronicznych, odzieży ochronnej przed promieniowaniem elektromagnetycznym. [38].

- Folie metaliczne – cienkie folie metaliczne, takie jak folie miedziane lub aluminiowe, są stosowane do pokrywania powierzchni, aby stworzyć warstwę ekranującą. Mogą być elastyczne i dostosowywać się do różnych kształtów. Stosowane są do ekranowania obwodów drukowanych, warstw ochronnych w oknach przeciw falowych w elektromagnetycznych pomieszczeniach czystości [39].
- Materiały kompozytowe związane z grafenem – materiały kompozytowe, które zawierają grafen lub inne nanomateriały, wykazujące doskonałe właściwości ekranujące. Grafen sam w sobie jest doskonałym przewodnikiem elektrycznym. Wykorzystuje się je do osłon ekranujących w urządzeniach elektronicznych, elementach ochronnych w kompozytach strukturalnych [40].
- Materiały ceramiczne – ceramiki zawierające cząstki przewodzące, takie jak tlenki żelaza, mogą być używane do ekranowania pól elektromagnetycznych. Materiały te stosuje się w osłonach w mikrofalowych urządzeniach komunikacyjnych, elementach strukturalnych w ochronie przed falami elektromagnetycznymi [41].
- Materiały metamateriałowe - to sztucznie stworzone struktury, które posiadają niezwykle właściwości elektromagnetyczne. Mogą być zaprojektowane tak, aby działały jako doskonałe ekrany w określonym zakresie częstotliwości. Stosowane są w nowoczesnych, zaawansowanych ekranach specjalistycznych, takich jak anteny mikrofalowe [42].

Nowoczesne materiały ekranujące pola elektromagnetyczne są często dostosowywane do specyficznych potrzeb projektowych uwzględniając zarówno właściwości mechaniczne, jak i elektryczne.

## 2. Cele, tezy oraz zakres pracy

Celem pracy jest określenie jakościowego i ilościowego składu kompozytów, o zadowalających właściwościach ekranujących pole elektromagnetyczne, przy jednoczesnym wyznaczeniu optymalnych parametrów niezbędnych do wytwarzania ich metodą prasowania na gorąco. Wyzwaniem jest dobór zarówno rodzaju napełniacza, jego kształtu, uziarnienia, właściwości elektromagnetycznych oraz sposób jego połączenia w stabilną termomechanicznie strukturę kompozytową, która umożliwi budowę przesłon ekranujących pole elektromagnetyczne w szerokim zakresie częstotliwości.

Materiałem wytworzonym w technologii prasowania jest kompozyt składający się z dwóch składników. Są nimi proszek i płatki o cechach magnetycznie miękkich lub półmiękkich oraz termoplastyczny polimer, w którym napełniacz jest równomiernie rozprowadzony. Proszki i płatki stanowią fazę aktywną natomiast polimer zapewnia możliwość formowania i pozwala utrzymać wyprasce nadany kształt. O właściwościach ekranujących pole elektromagnetyczne decyduje ilość napełniacza magnetycznego zawartego w kompozycie. Najwyższe właściwości ekranujące uzyskuje się przy największej ilości proszku lub płatków, gdyż podstawowe wielkości takie jak przenikalność magnetyczna, konduktywność, straty magnetyczne kompozytu zależą od ilości materiału magnetycznego zawartego w całej objętości wypraski. Jednak proszki lub płatki napełniacza powodują zwiększenie kruchości kompozytu. Przekroczenie granicznej wartości napełnienia prowadzi do powstania naprężeń wewnętrznych, pęknięć i odkształceń co skutkuje obniżaniem parametrów mechanicznych. Konieczne jest więc ograniczenie ilości napełniacza w kompozycie, aby otrzymać stabilną wypraskę przeznaczoną na elementy konstrukcyjne, np. obudowy.

Teza 1. Istnieje możliwość doboru rodzaju, ilości i wielkości cząstek napełniacza magnetycznego, pochodzącego z recyklingu, wprowadzonego do polimerowej osnowy dla uzyskania podatnego do prasowania na gorąco kompozytu przeznaczonego na wyroby o optymalnych właściwościach termomechanicznych.

Teza 2. Istnieje możliwość wytworzenia kompozytów o zadowalających, dla określonych zastosowań, właściwościach ekranujących pole elektromagnetyczne, zależnych od rodzaju polimeru stanowiącego osnowę kompozytu oraz od rodzaju, ilości, ułożenia i kształtu napełniacza.

Udowodnienie powyższych tez jest możliwe, dzięki wykonaniu próbek materiałów kompozytowych, następnie wykonaniu badań ich właściwości oraz analizie wpływu wybranych parametrów technologicznych na *SE*.

W pracy przeprowadzono analizę właściwości ekranujących pole EM w szerokim zakresie częstotliwości i właściwości termomechanicznych na potrzeby określenia warunków niezbędnych do wytworzenia kompozytów polimerowych z materiałami pochodzącymi z recyklingu w postaci proszków i płatków wytworzonych z zendry i taśm nanokrystalicznych zastosowanych jako napełniacze. Do badań wstępnych użyto także odpadów poprodukcyjnych w postaci metalowych pyłów, wiórów i proszków oraz polimerów.

W celu analizy przydatności danych materiałów w ekranowaniu pola zastosowano różne materiały odpadowe z zakładów przemysłowych:

- pyły złomowiskowe
- wióry aluminiowe i mosiężne
- włókna miedziane
- płatki i pyły zendry
- wstęgi taśmy nanokrystalicznej

W badaniach wstępnych weryfikowano parametry wybranych materiałów takich jak przenikalność magnetyczna, rezystancja skrośna i powierzchniowa. Na podstawie przeprowadzonych badań wykonano symulacje obliczeniowe w środowisku Matlab, celem dokładnego sprawdzenia kryteriów spełniających założenia skuteczności ekranowania pola elektromagnetycznego. W wyniku przeprowadzonych badań wstępnych wytypowano dwa materiały spełniające kryteria założone w tezach pracy, które poddano badaniom szczegółowym. Do badań wybrano zgorzelinę walcowniczą oraz taśmy nanokrystaliczne. Wykazywały one bardzo dobre właściwości ekranujące pole elektromagnetyczne. Do wytworzenia kompozytów przy wykorzystaniu technologii prasowania tłocznego zastosowano tworzywo polimerowe HDPE, które zostało zhomogenizowane z napełniaczami o różnej zawartości wagowo. Podjęto próby opracowania kompozytu o najkorzystniejszym składzie. Bazując na wstępnych wynikach pomiarów ekranowania pola EM opracowano optymalny skład kompozytu. Dodatkowo sprawdzono wpływ struktury kompozytu na właściwości *SE*. W tym celu wykonano próbki o tym samym składzie, lecz różnej strukturze. Materiały te poddano dalszym badaniom w zakresie właściwości termomechanicznych.

Do badań termomechanicznych wykonano próbki o zawartości masowej napelniaaczy: 55% zgorzeliny walcowniczej, 15% taśmy nanokrystalicznej i 30% zawartości polimerowej. Wykonano kompozyty o strukturze warstwowej i homogenicznej. W wyniku przeprowadzonych badań termomechanicznych wytypowano finalny kompozyt do wykonania komór zgodnych z normą do badań efektywności ekranowania pola elektromagnetycznego.

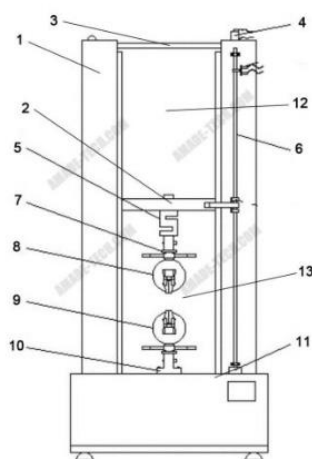
Finalne kompozyty przetestowano w warunkach zbliżonych do rzeczywistych na skonstruowanych komorach pomiarowych do badania skuteczności ekranowania pola elektromagnetycznego (*SE*) w zakresie częstotliwości od 50 Hz do 15 GHz.

### 3. Właściwości termomechaniczne kompozytów polimerowych

Podstawowymi parametrami służącymi do doboru danego materiału przy projektowaniu i doborze elementów w zastosowaniach inżynierskich są właściwości termomechaniczne. Metodami określającymi właściwości materiału są: próba statycznego rozciągania, która pozwala określić graniczne statyczne obciążenie i wydłużenie materiału, aż do całkowitego zerwania badanej próbki, próba udarności, która pozwala określić odporność elementu na pęknięcie przy dynamicznym jej odkształceniu, badania DMTA które pozwalają określić sztywność materiału w danej temperaturze.

#### 3.1. Metodyka badań wytrzymałości na rozciąganie kompozytów

Badanie statycznego rozciągania materiałów zgodnie z normą ISO 527-1:2020-01 jest powszechnie stosowaną metodą oceny właściwości mechanicznych materiałów polimerowych, takich jak tworzywa sztuczne i kompozyty. Norma ISO 527-1 określa ogólne zasady i warunki wykonania testów rozciągania na próbkach jednoosiowo obciążanych. Podczas badania statycznego rozciągania według normy ISO 527-1:2020-01, próbka materiału jest poddawana jednoosiowemu rozciąganiu z kontrolowaną prędkością odkształcenia. Rysunek 3.1. ukazuje przykładowy schemat maszyny, na rysunku 3.2 pokazano próbkę do badań zgodnych z normą.



Rys. 3.1. Schemat maszyny do próby statycznego rozciągania [43]: 1 - rama maszyny, 2 - ruchoma głowica krzyżowa, 3 - górną głowicę krzyżową, 4 - enkoder przemieszczenia, 5 - czujnik pomiaru siły, 6 - śruba kulowa, 7 - sprzęgło wrzecionowe, 8 - zacisk górny, 9 - zacisk dolny, 10 - podstawa kołnierza, 11 - blat, 12 - przestrzeń do maksymalnego rozciągania, 13 - przestrzeń pomiarowa

Początkowa długość próbki jest dokładnie mierzona, a następnie próbka jest obciążana w urządzeniu do badania wytrzymałości, które stopniowo zwiększa siłę rozciągania, powodując wydłużenie próbki. W trakcie testu rejestruje się siłę stosowaną na próbkę i mierzy się jej przemieszczenie lub odkształcenie. Na podstawie uzyskanych danych z testu rozciągania można określić wiele istotnych parametrów mechanicznych materiału, takich jak:

- Wytrzymałość na rozciąganie (ang. tensile strength): maksymalna siła, jaką materiał może wytrzymać przed zerwaniem, wyrażona jest w jednostkach siły na powierzchnię w megapaskalach (MPa)
- Moduł Younga (moduł sprężystości): współczynnik określający sztywność materiału, czyli jego zdolność do odkształcania pod wpływem naprężenia

Badanie zgodne z normą ISO 527-1:2020-01 obejmuje wytyczne dotyczące przygotowania próbek, warunków testowych, oraz precyzyjnego pomiaru wyników. Standaryzacja procedur pomiarowych zapewnia spójność wyników między różnymi laboratoriami oraz umożliwia porównywanie właściwości mechanicznych różnych materiałów. Pomiar wytrzymałości na rozciąganie zgodnie z normą ISO 527-1:2020-01 jest kluczowym etapem w procesie oceny jakości materiałów polimerowych i kompozytów, zarówno w kontekście kontroli jakości produktów, jak i w badaniach naukowych mających na celu zrozumienie zmian właściwości materiałów podczas obciążeń mechanicznych [44].



Rys. 3.2. Widok próbki do statycznego rozciągania wykonanej z napełniaczem z zendry 70% i HDPE 30%, zgodnie z normą ISO 527-2

$$\sigma = f(\varepsilon) \text{ [MPa]} \quad (1)$$

gdzie:

$\varepsilon$  - Odkształcenie [%],

$\sigma$  - Naprężenie [MPa].

Z otrzymanych wyników można obliczyć podstawowe własności fizyczne tworzyw:

- wytrzymałość na rozciąganie
- wydłużenie względne przy zerwaniu

- naprężenie przy określonym wydłużeniu

Badanie polega na przyłożeniu wzrastającej siły rozciągającej  $F$ , powodującej zwiększenie długości próbki od stanu początkowego  $l_0$  do wartości  $l_x$ . Przyrost długości próbki (*wydłużenie bezwzględne*) równe jest:

$$\Delta l_x = l_x - l_0 \text{ [mm]} \quad (2)$$

gdzie:

$l_0$  – to początkowa długość próbki [mm],

$l_x$  – to długość próbki po rozciągnięciu [mm].

Stosunek wydłużenia bezwzględnego do początkowej długości próbki wyrażono wzorem  $\varepsilon_b$

$$\varepsilon_b = \frac{l_x - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l_x}{l_0} \text{ lub } \varepsilon_b = \frac{\Delta l_x}{l_0} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (3)$$

Naprężenie  $\sigma$  wyrażono wzorem.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \text{ [MPa]} \quad (4)$$

gdzie:

$F$  - to siła odkształcająca [N],

$A_0$  - to powierzchnia początkowego przekroju poprzecznego [mm<sup>2</sup>] [44-46].

## **3.2. Metodyka pomiaru modułu Young'a na podstawie prawa Hooke'a**

Prawo Hooke'a jest szeroko stosowane w różnych dziedzinach nauki i inżynierii, szczególnie w mechanice i budowie maszyn. Wykorzystywane jest do opisu zachowania sprężyn, drutów, metalowych prętów i innych elementów sprężystych [47-50]. Prawo Hooke'a można wyrazić matematycznie równaniem:



$$F = -kx \text{ [N]} \quad (5)$$

Gdzie:

$F$  - to siła działająca na sprężynę [N],

$k$  - to stała sprężystości [N/mm],

$x$  - to odkształcenie sprężyny [mm].

Moduł Younga, nazywany także modułem sprężystości lub współczynnikiem sprężystości podłużnej jest jednym z podstawowych parametrów charakteryzujących właściwości mechaniczne materiałów. Moduł Younga definiuje się jako stosunek naprężenia (naprężenia podłużnego) do odkształcenia względnego (zmiany długości materiału w stosunku do jego pierwotnej długości) i oznaczony literą  $E_Y$ . Matematycznie można to wyrazić jako:

$$E_Y = \frac{\sigma}{\varepsilon_b} \text{ [MPa]} \quad (6)$$

Gdzie:

$E_Y$  - oznacza moduł Younga [MPa],

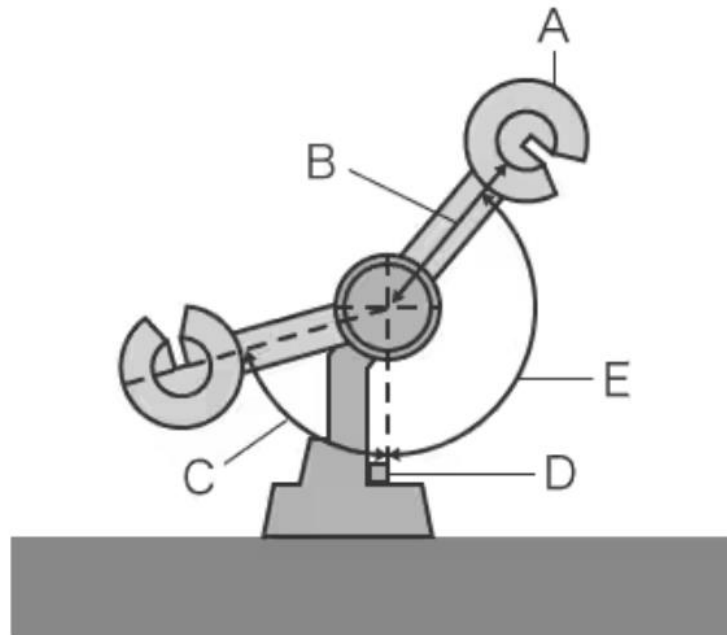
$\sigma$  - to naprężenie podłużne [MPa],

$\varepsilon_b$  - to odkształcenie względne [%].

Moduł Younga jest charakterystyczną właściwością danego materiału i zależy od jego struktury i składu chemicznego. Materiały o wyższym module Younga są sztywne i trudniej odkształcające się podczas gdy materiały o niższym module Younga są bardziej elastyczne i łatwiej ulegają odkształceniu. Przykładami materiałów o wysokim module Younga są stal, beton i ceramika, podczas gdy gumy i tworzywa sztuczne mają znacznie niższe wartości modułu Younga. Moduł Younga jest powszechnie wykorzystywany w inżynierii i naukach materiałowych do projektowania konstrukcji, obliczania odkształceń, analizy naprężeń i prognozowania zachowania materiałów w odpowiedzi na zewnętrzne obciążenia [51-54].

### **3.3. Metodyka badań udarności wg Charpy'ego**

Badanie udarności materiałów zgodnie z normą ISO 179-1:2020 jest powszechnie stosowaną metodą oceny odporności materiałów termoplastycznych na uderzenia udarowe. Badanie to umożliwia określenie zachowania materiału w warunkach dynamicznych, takich jak nagłe obciążenia udarowe, które mogą wystąpić w trakcie użytkowania. Podczas badania udarności zgodnie z normą ISO 179-1:2020, próbka materiału jest poddawana uderzeniu wahadła lub młotka z określoną energią. Schemat stanowiska badania ukazano na rysunku nr. 3.3. Energia uderzenia jest precyzyjnie kontrolowana i może być dostosowana do rodzaju materiału oraz oczekiwanych warunków eksploatacyjnych. Po uderzeniu, ocenia się stopień uszkodzenia próbki lub zmianę jej kształtu, co umożliwia określenie jej wytrzymałości na uderzenia. Norma ISO 179-1 precyzuje warunki testowe, w tym energię uderzenia, kształt i wymiary próbki, oraz sposób analizy wyników. Wyniki określone są jako wartość energii absorbowanej przez próbkę podczas uderzenia, wyrażonej w dżulach na jednostkę przekroju poprzecznego ( $J/m^2$  lub  $kJ/m^2$ ). Badanie udarności stanowi istotną ocenę zachowania materiałów w różnych warunkach eksploatacyjnych, zwłaszcza tam, gdzie istnieje ryzyko wystąpienia nagłych obciążeń udarowych, na przykład podczas transportu, użytkowania czy wypadków. Wyniki testu udarności mogą być kluczowe dla projektowania bezpiecznych i trwałych produktów wykonanych z materiałów termoplastycznych, takich jak elementy konstrukcyjne, obudowy czy opakowania. Badanie udarności zgodnie z normą ISO 179-1:2020 pozwala na porównywanie właściwości udarnościowych różnych materiałów oraz ocenę ich przydatności w konkretnych zastosowaniach, co przyczynia się do doskonalenia projektów i zapewnienia bezpieczeństwa użytkowania wyrobów z tworzyw sztucznych [55].



Rys. 3.3. Schemat młota do pomiaru udarności z zamocowaną próbką [56]. A – Młot, B - Odległość od środka obrotu młota do środka ciężkości młota (R), C - Kąt wychylenia młota po pęknięciu badanego elementu ( $\theta\beta$ ), D - Próbką testowa (b: szerokość, h: grubość) E - Kąt podniesienia młota ( $\theta\alpha$ )

Udarność próbek bez karbu ( $a_{cU}$ ) należy obliczyć w  $\text{kJ/m}^2$  według wzoru:

$$a_{cU} = \frac{E_c}{h \cdot b} \cdot 10^3 \quad [\text{kJ/m}^2] \quad (7)$$

w którym:

$E_c$  - to skorygowana energia pochłonięta przy złamaniu kształtki [J],

$h$  - to grubość kształtki [mm],

$b$  - to szerokość kształtki do badań [mm].

Udarność próbki z karbem ( $a_{cN}$ ) należy obliczyć w  $\text{kJ/m}^2$  według wzoru:

$$a_{cN} = \frac{E_c}{h \cdot b_N} \cdot 10^3 \quad [\text{kJ/m}^2] \quad (8)$$

w którym:

$E_c$  - oznacza skorygowaną energię pochłoniętą przy złamaniu kształtki [J],

$h$  - grubość kształtki [mm],

$b_N$  - szerokość kształtki do badań (w miejscu karbu) [mm][57-59].

### 3.4. Pomiar twardości materiałów

Twardość kompozytów polimerowych zależy od wielu czynników, takich jak rodzaj polimeru, rodzaj wzmocnienia, stopień napełnienia, struktury kompozytu itp. W przypadku kompozytów polimerowych, twardość jest zwykle mierzona za pomocą metody twardości Rockwella lub twardości Vickersa.

Twardość Rockwella (HR) jest popularną metodą pomiaru twardości kompozytów polimerowych. Polega ona na wciskaniu stożkowego penetratora o określonym kształcie i obciążeniu określoną wartością siły powierzchni. Po odjęciu obciążenia i wycofaniu wgłębnika, mierzy się głębokość wniknięcia penetratora i odczytuje twardość Rockwella z odpowiedniej skali.

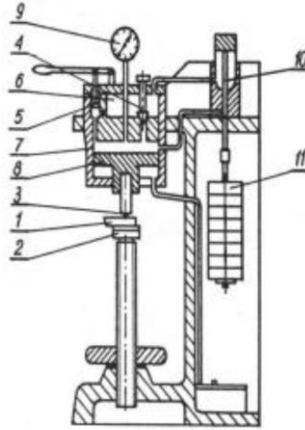
Twardość Vickersa (HV) jest inną popularną metodą pomiaru twardości kompozytów polimerowych. Polega ona na wciskaniu czworokątnego piramidalnego penetratora w powierzchnię kompozytu z kontrolowaną siłą. Po usunięciu obciążenia, mierzy się długości przekątnych odcisku powstałego na powierzchni.

W przypadku materiałów polimerowych, twardość może być również mierzona za pomocą innych metod, takich jak twardość Shore'a (A lub D) lub twardość Knoop. Wybór odpowiedniej metody zależy od rodzaju polimeru [60-61].

Metoda Shore'a jest stosowana do pomiaru twardości plastomerów, elastomerów, gum i innych jednorodnych materiałów polimerowych. Twardość Shore'a jest oznaczana za pomocą trzech różnych skal: twardości Shore'a A, Shore'a C i Shore'a D z czego najczęściej używa się skali A i D. Twardość Shore'a A jest używana głównie do pomiaru materiałów o niskiej twardości tj. elastomery, gumy itp. W tej metodzie, penetrator w kształcie stożka wciskany jest w powierzchnię materiału z określonym obciążeniem. Odczyt twardości jest dokonywany na podstawie głębokości wniknięcia penetrometru. Twardość Shore'a D jest stosowana do pomiaru twardości tworzyw sztucznych o wyższej twardości. Metoda ta jest podobna do badania twardości Shore'a A, ale stosuje się inny penetrator, który ma kształt stożka o większym kącie. Metody badania twardości Shore'a stosują się do tworzyw jednorodnych nie do kompozytów [62].

Metoda twardości kulki HB jest najczęściej stosowana do oceny twardości polimerów i kompozytów polimerowych. W tej metodzie stosuje się do penetracji materiału stalową kulę o określonej średnicy. Badanie polega na zmierzeniu śladu odcisku stalowej kuli przy pomocy mikroskopu optycznego lub specjalnych urządzeń pomiarowych.

Metoda twardości HB jest stosowana dla porównywania różnych materiałów w badaniach naukowych i normach branżowych. Jednak ze względu na miękkość i elastyczność polimerów, stosowanie standardowych kulek stalowych może być trudne. W związku z tym, dla polimerów często stosuje się zmodyfikowaną metodę Brinella, która uwzględnia modyfikacje parametrów pomiarowych, takich jak obciążenie, czas trwania obciążenia i średnica kuli [63-64]. Badanie twardości HB (twardości Brinella) zgodnie z normą ISO 2039-1 jest powszechnie stosowaną metodą oceny twardości materiałów termoplastycznych. Twardość Brinella jest miarą odporności materiału na penetrację pod wpływem ustalonego obciążenia, zgodnie z normą ISO 2039-1 określającą szczegółowe zasady i warunki przeprowadzania tego badania. Podczas testu twardości HB zgodnie z normą ISO 2039-1 kula ze stali węglowej o określonym średnicy (najczęściej 10 mm) jest wciskana pod określonym obciążeniem (najczęściej od 1 do 120 kg) w powierzchnię materiału przez określony czas. Obciążenie to powoduje charakterystyczne wgniecenie kuli w materiał. Po usunięciu obciążenia mierzy się średnicę pozostawionego śladu z zastosowaniem mikroskopu. Twardość Brinella (HB) jest obliczana jako stosunek obciążenia do powierzchni wgniecenia, wyrażony w jednostkach MPa (megapaskalach). Przykładowy schemat urządzenia ukazano na rysunku nr 3.4. Norma ISO 2039-1 precyzuje warunki testowe, w tym rodzaj i wymiary kulki, wartość obciążenia, czas obciążenia oraz sposób wyznaczania średnicy wgniecenia. Standaryzacja procedur pomiarowych zapewnia spójność wyników między różnymi laboratoriami oraz umożliwia porównywanie twardości różnych materiałów termoplastycznych. Badanie twardości HB jest przydatne do porównywania twardości różnych materiałów, kontroli jakości produkcji oraz oceny właściwości materiałów termoplastycznych pod kątem zastosowań. Ważnym parametrem stosowanym w przemyśle tworzyw polimerowych jest twardość materiału, która ma istotne znaczenie dla jego wytrzymałości użytkowania. Twardość Brinella może być również użyteczna w procesie oceny starzenia się materiałów oraz wpływu warunków środowiskowych na ich właściwości mechaniczne [65].



Rys. 3.4. Schemat twardościomierza HB [66]. 1 - próbka, 2 - stolik, 3 - wgłębnik, 4 - zawór cylindra, 5 - pompka, 6 - zbiornik oleju, 7 - cylinder, 8 - tłok, 9 - manometr, 10 - tłoczek podnoszący obciążenie, 11 - obciążenie

Twardość HB wyznaczona jest wzorem:

$$H = \frac{1}{5\pi} \cdot \frac{F_r}{h_r} \quad [\text{MPa}] \quad (9)$$

w którym:

$H$  - twardość oznaczona metodą wciskania kulki [MPa],

$F_r$  - zredukowane obciążenie pomiarowe w newtonach [N],

$h_r$  - zredukowana głębokość odcisku w milimetrach [mm].

Zredukowane obciążenie  $F_r$  wyznacza się według wzoru:

$$F_r = F_m \cdot \frac{\alpha}{(h-h_r)+\alpha} = F_m \cdot \frac{0,21}{h-0,25+0,21} \quad [\text{N}] \quad (10)$$

w którym:

$F_m$  - obciążenie pomiarowe na wgłębnik [N],

$h_r$  - zredukowana głębokość odcisku (= 0,25 mm) [mm],

$h = h_1 - h_2$  - głębokość odcisku, w milimetrach, po wprowadzeniu poprawki na odkształcenie ramy [mm].

$h_1$  - głębokość odcisku wgłębnika pod obciążeniem badania [mm],

$h_2$  - odkształcenie przyrządu pod obciążeniem pomiarowym [mm],

$\alpha$  - współczynnik zredukowanego obciążenia do zagłębienia  $h_r$ .

Po podstawieniu do wzoru otrzymujemy [46] [67]:

$$H = \frac{1}{5\pi} \cdot \frac{F_m}{h_r} \cdot \frac{0,21}{(h-h_r)+0,21} \text{ [MPa]} \quad (11)$$

### 3.5. Właściwości termomechaniczne kompozytów

Właściwości termomechaniczne kompozytów są kluczowymi parametrami służącymi do oceny ich wytrzymałości i zachowania się ich w czasie zmiennych warunków termicznych i mechanicznych. Poniżej przedstawiono kilka istotnych aspektów dotyczących właściwości termomechanicznych kompozytów:

Wytrzymałość termiczna:

- Wytrzymałość termiczna kompozytów określa ich zdolność do utrzymania swoich właściwości mechanicznych w wysokich temperaturach. Dodanie napelniaczy włóknistych do kompozytów, takich jak włókna węglowe lub ceramiczne które charakteryzują się wysoką odpornością na temperaturę  $\infty$  pozwala dla danego materiału zachować wytrzymałość nawet w ekstremalnych warunkach [68].

Rozszerzalność cieplna:

- Rozszerzalność termiczna kompozytów odzwierciedla ich zdolność do absorpcji naprężeń własnych, które mogą występować podczas zmiany temperatury. Kompozyty o dopasowanej rozszerzalności cieplnej między wzmocnieniem, a matrycą mogą minimalizować naprężenia własne jednocześnie zapewniające im lepszą stabilność materiału [69].

Odporność na cykle termiczne:

- Kompozyty są narażone na zmienne cykle termiczne. Odpowiednio zaprojektowane kompozyty mogą wykazywać dobrą wytrzymałość zmęczeniową wywołanymi zmiennymi warunkami termicznymi co zapobiega degradacji właściwości mechanicznych materiału w wyniku cyklicznego nagrzewania i chłodzenia [70].

Zachowanie pod obciążeniem termomechanicznym:

- Właściwości termomechaniczne kompozytów odzwierciedlają ich reakcję na obciążenia termiczne i mechaniczne jednocześnie. Właściwości takie jak wytrzymałość, sztywność i odporność na pękanie określane są, dzięki poddawaniu ich testom w różnych warunkach termomechanicznych, w celu oceny zachowania się kompozytu w realnych warunkach eksploatacji. [71].

Właściwości termomechaniczne kompozytów są istotne w wielu dziedzinach, takich jak przemysł lotniczy, samochodowy, energetyczny czy przemysł morski. Dokładne poznanie tych właściwości pozwala na optymalizację składu kompozytu w celu zapewnienia jego trwałości w różnych warunkach.

### 3.6. Metoda badań termomechanicznych DMTA

Dynamiczna analiza termomechaniczna (DMTA) lub Dynamic Mechanical Thermal Analysis to technika laboratoryjna stosowana do badania właściwości mechanicznych materiałów w zależności od temperatury i częstotliwości. Narzędzie to jest przydatne w analizie wyników badań wykorzystywanych w dziedzinach nauki o materiałach, inżynierii, przemysłowych i badawczych. Badania te pozwalają na analizę reologiczną i charakterystykę mechaniczną materiałów w szerokim zakresie temperatur. W DMTA materiał jest poddawany naprzemiennym obciążeniom mechanicznym (np. drganiom, odkształceniom, naprężeniom) przy jednoczesnym kontrolowaniu temperatury. W trakcie testu mierzy się zachowanie materiału na zmienne warunki obciążenia. Podczas badania mierzy się wartości takie jak moduł zachowawczy, tłumienie, kruchość czy stopień relaksacji w zależności od temperatury. W badaniach DMTA wykorzystuje się specjalne urządzenie zwane reometrem dynamicznym, które generuje sinusoidalne siły lub odkształcenia i jednocześnie monitoruje reakcję materiału. W trakcie testu mierzy się  $E_Y'$  (moduł zachowawczy),  $E_Y''$  (moduł stratności), oraz  $\text{tg}\delta$  (tangens kąta stratności mechanicznej) w zależności od temperatury lub czasu, częstotliwości i amplitudy. DMTA jest szczególnie przydatne w badaniach polimerów, elastomerów, kompozytów, klejów i gum oraz innych materiałów o właściwościach termomechanicznych. Pozwala to na określenie temperatury przejścia ze stanu szklistego w stan wysoko elastyczny i zachowanie materiału w zakresie kruchości i elastyczności, identyfikację faz reakcji chemicznych, oraz ocenę stabilności termicznej i odkształcalności materiałów [72-75].

Badanie DMTA umożliwia analizę właściwości mechanicznych badanego ciała w krótkim okresie czasu obciążenia w zmiennych wartościach temperatury. Analiza przeprowadzana jest w pełnym zakresie temperatury dla danego materiału (poniżej temperatury zeszklenia, do temperatury płynięcia). Rezultatem przeprowadzonych badań są wykresy krzywych zależności  $E_Y'$ ,  $E_Y''$ , oraz  $\text{tg}\delta$  w zależności od temperatury lub czasu badania. Moduł zachowawczy oraz moduł stratności są składowymi zespolonego modułu Younga, zapisanego poniższym równaniem:



$$E_Y^x = E_Y' + i \cdot E_Y'' \text{ [MPa]} \quad (12)$$

Gdzie:

$E_Y^x$  - zespolony moduł Younga [MPa],

$E_Y'$  - moduł zachowawczy [MPa],

$E_Y''$  - moduł stratności [MPa].

Moduł zachowawczy jest częścią rzeczywistą równania. Związany jest on z zachowaniem i oddawaniem energii podczas odkształceń, dla ciał doskonale lepkich jego wartość jest równa zero. Z kolei moduł stratności jest miarą rozproszenia energii przez próbkę (np. w postaci ciepła). Dla ciała doskonale sprężystego zarówno wartość modułu stratności oraz tangensa kąta stratności jest równa zero. Tangens kąta stratności można zapisać poniższym równaniem:

$$\text{tg} \delta = \frac{E_Y'}{E_Y''} [-] \quad (13)$$

Gdzie:

$\text{tg} \delta$  - tangens kąta stratności mechanicznej,

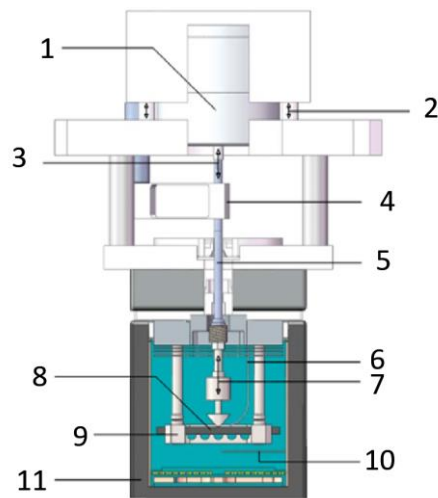
$E_Y'$  - moduł zachowawczy [MPa],

$E_Y''$  - moduł stratności [MPa].

Dla materiałów lepko-sprężystych wartość kąta przesunięcia fazowego ( $\delta$ ) przyjmuje wartość pomiędzy  $0^\circ$  a  $90^\circ$ . spowodowane jest to tym, iż odkształcenie jest przesunięte o wartość kąta  $\delta$  względem naprężenia [76-79].

Badania DMTA wykorzystuje się do określenia wartości takich jak wytrzymałość na obciążenia dynamiczne materiału oraz jego zdolność do nieodwracalnego rozpraszania i zachowania energii mechanicznej w trakcie dynamicznego obciążenia w różnym zakresie temperatury. DMA jest metodą służącą do badania dynamicznych odkształceń materiału przy określonej częstotliwości uderzeń i zmiennej temperaturze. Dynamiczna analiza mechaniczna (w skrócie DMA, znana jest również jako dynamiczna spektroskopia mechaniczna). Technika ta stosowana jest do badania i charakteryzowania materiałów. Metoda

ta jest najbardziej przydatna do badania lepkośćprężystych właściwości polimerów. Urządzenie pomiarowe zostało przedstawiono na rysunku nr. 3.6



Rys. 3.6. Schemat DMTA [80]. 1 - oscylator, 2 - regulacja za pomocą silnika krokowego, 3 - regulacja siły, 4 - czujnik przemieszczenia, 5 - popychacz, 6 - termopara próbki, 7 - przemieszczenie, 8 - próbka, 9 - mocowanie próbki, 10 - termopara pieca, 11 - piec

## 4. Ekranowanie pola elektromagnetycznego

Ekranowanie pola elektromagnetycznego to proces lub technika używana do ograniczenia lub blokowania rozchodzenia się pól elektromagnetycznych w danym obszarze [81]. Pola elektromagnetyczne mogą być generowane przez różne źródła, takie jak urządzenia elektryczne, sieci bezprzewodowe, czy nawet naturalne źródła, takie jak błyskawice. Celem ekranowania pola elektromagnetycznego jest zazwyczaj zminimalizowanie wpływu tych pól na otaczające środowisko lub chronienie konkretnych urządzeń przed wpływem zewnętrznych i wewnętrznych pól elektromagnetycznych. Może to być istotne w przypadku różnych zastosowań, takich jak ochrona sprzętu elektronicznego przed zakłóceniami elektromagnetycznymi, czy zapobieganie wyciekom informacji zabezpieczonych przed zakłóceniami elektromagnetycznymi. Z jednej strony chroni się takie obszary przed wpływem pola do wewnątrz a z drugiej strony zabezpieczamy przed niepożądanym polem wychodzącym na zewnątrz.

Z praktycznego punktu widzenia do ekranowania pól elektrycznych należy stosować materiały o dużej przewodności elektrycznej, natomiast do ekranowania pól magnetycznych materiały o dużej przenikalności magnetycznej. Ze wzrostem częstotliwości pola elektromagnetycznego maleje rola przenikalności magnetycznej w efektach tłumienia, a rośnie wpływ przewodności elektrycznej. Przy dużych częstotliwościach własności magnetyczne materiału odgrywają drugorzędną rolę; eksponowane jest przewodnictwo elektryczne materiału. Z kolei przy dużych natężeniach pól i dla średnich częstotliwości należy stosować ekrany warstwowe zbudowane z ekranów o malejącej przenikalności i rosnącej przewodności w kierunku wnętrza ekranu. Na podstawie wiedzy teoretycznej i praktycznej stwierdza się, że najtrudniejszym problemem jest ekranowanie pól magnetycznych i elektromagnetycznych o małej częstotliwości, gdyż w tym przypadku potrzebne są materiały o dużej przenikalności magnetycznej, małej pozostałości magnetycznej i koercji oraz małej magnetostrykcji, wymagana jest również duża grubość ekranu. Do ekranowania pól elektromagnetycznych o średniej częstotliwości potrzebne są materiały ferromagnetyczne o dużej konduktywności, a dla wysokich częstotliwości i pól elektrycznych wystarczy, by materiał na ekrany był przewodnikiem elektrycznym [82].

## 4.1. Wybrane właściwości elektryczne i magnetyczne materiałów

Efektywne ekranowanie pola elektromagnetycznego jest istotne dla ochrony przed promieniowaniem elektromagnetycznym generowanym przez różne urządzenia elektryczne. Wybór materiałów do ekranowania zależy od ich właściwości, takich jak przewodność, przenikalność magnetyczna i elektryczna.

- Przenikalność elektryczna jest parametrem, który opisuje zdolność reagowania materiału na pole elektryczne. Określa ona zdolność materiału do polaryzacji elektrycznej pod wpływem zewnętrznego pola elektrycznego.
- Przenikalność magnetyczna to zdolność do reagowania na pole magnetyczne. Materiały ferromagnetyczne, takie jak żelazo, nikiel lub chrom, cechują się wysoką wartością przenikalności magnetycznej. Sprawia to, że są one skuteczne w ekranowaniu pola magnetycznego, poprzez absorbowanie lub rozpraszanie pola, tym samym zmniejszając jego siłę oddziaływanie. [83].
- Rezystywność elektryczna (lub jej odwrotność – konduktywność) jest kluczową właściwością, która dotyczy materiału w ekranowaniu elektromagnetycznym. Materiały o małej rezystywności, takich jak miedź, aluminium czy srebro, są stosowane do ekranowania ze względu na zdolność przewodzenia prądu elektrycznego. Gdy materiał przewodzi prąd, elektrony w jego składzie mogą łatwo reagować na zewnętrzne pola elektryczne, absorbując energię elektryczną przekształcając ją w ciepło. [84]
- Wielkością wtórną wynikającą z powyższych wielkości oraz częstotliwości fali EM jest impedancja falowa. Określa ona współczynniki odbicia i przejścia fali EM na granicy ośrodków o odmiennych właściwościach materiałowych. Odpowiednio dobrana impedancja może być szczególnie istotna w przypadku ekranu elektromagnetycznego, gdzie zastosowanie ekranowania zależy od dostosowanej impedancji materiału do parametrów fal elektromagnetycznych [85].

Wybór materiałów do ekranowania pola elektromagnetycznego obejmuje zrozumienie ich właściwości elektrycznych i zdolności absorpcji, odbicia lub rozpraszania energii elektromagnetycznej.

### 4.1.1. Przenikalność elektryczna

Przenikalność elektryczna opisuje wpływ materiału na określenie pola elektrycznego w odpowiedzi na ładunek elektryczny. Materiał o wysokiej przenikalności elektrycznej polaryzuje się bardziej w odpowiedzi na przyłożone pole elektryczne niż materiał o niskiej przenikalności elektrycznej, gromadząc w ten sposób więcej energii w materiale. Przenikalność elektryczna oznaczana jest symbolem  $\epsilon_e$  (epsilon), jednostką przenikalności elektrycznej jest farad na metr (F/m) lub jego pochodne.

$$\epsilon_e = \frac{D}{E_e} \text{ [F/m]} \quad (14)$$

Gdzie:

$\epsilon_e$  - przenikalność elektryczna, [F/m]

$D$  - indukcja elektryczna (przesunięcie elektryczne), [C/m<sup>2</sup>]

$E_e$  - natężenie pola elektrycznego, [V/m].

Gdy materiał izolacyjny zostanie umieszczony w polu elektrycznym, ulega polaryzacji albo przez obrót cząsteczek z istniejącymi już momentami dipolowymi, albo poprzez indukcję momentów dipolowych w poszczególnych cząsteczkach. Przenikalność elektryczna materiałów odgrywa istotną rolę w wielu dziedzinach np. elektronice, telekomunikacji i inżynierii materiałowej. Oznacza ona zdolność materiału do magazynowania energii elektrycznej i reakcji na przyłożone do niej pole elektryczne. Przenikalność elektryczna jest zależna od struktury atomowej i cząsteczkowej materiału i innych czynników, takich jak wilgotność, temperatura i częstotliwość pola elektrycznego. Materiały o dużej przenikalności elektrycznej mają zdolność do łatwej polaryzacji elektrycznej pod wpływem pola elektrycznego. Oznacza to, że mogą przenosić i gromadzić ładunek elektryczny w większym stopniu niż materiały o niskiej przenikalności. Przykładami dielektryków o wysokiej przenikalności elektrycznej są ceramika, kwarc, szkło oraz wiele tworzyw polimerowych [86]. Z kolei materiały o niskiej przenikalności elektrycznej mają ograniczoną zdolność do polaryzacji elektrycznej. Wyróżniamy wśród nich materiały, które wykazują wysoką przewodność elektryczną np. metale. Przenikalność elektryczna metali jest zazwyczaj bliska przenikalności próżni, która jest równa około  $8,85 \cdot 10^{-12}$  F/m [87]. W praktyce, wybór odpowiednich materiałów o odpowiedniej przenikalności elektrycznej jest kluczowy dla

skutecznego ekranowania pola elektrycznego. Optymalne ekranowanie pola elektromagnetycznego wymaga zrozumienia i uwzględnienia tych różnych czynników oraz odpowiedniego doboru materiałów i struktur ekranujących [88]. Przenikalność elektryczną wybranych materiałów przedstawiono w tabeli nr 4.2. Materiały metaliczne o niskiej przenikalności elektrycznej są wykorzystywane w ekranowaniu refleksyjnym, gdzie ważna jest ich zdolność do odbijania pola elektrycznego [89]. Z kolei materiały dielektryczne o wysokiej przenikalności elektrycznej stosowane są w budowie ekranów, obudów i osłon, które mają na celu absorpcję i tłumienie pola elektrycznego.

W przeciwieństwie do odpowiedzi próżni, odpowiedź normalnych materiałów na pola zewnętrzne zależy na ogół od częstotliwości pola. Ta zależność częstotliwości odzwierciedla fakt, że polaryzacja materiału nie zmienia się natychmiastowo, gdy przyłożone jest pole elektryczne. Odpowiedź musi być zawsze przyczynowa (powstająca po przyłożonym polu), co można przedstawić za pomocą różnicy faz [90]. Z tego powodu przenikalność elektryczna jest często traktowana jako złożona funkcja (kątovej) częstotliwości  $\omega$  przyłożonego pola:

$$\varepsilon \rightarrow \hat{\varepsilon}(\omega) \quad (15)$$

ponieważ liczby zespolone pozwalają na określenie wielkości i fazy, definicję przenikalności elektrycznej można opisać jako:

$$D_0 e^{-i\omega t} = \hat{\varepsilon}(\omega) E_0 e^{-i\omega t} \quad (16)$$

gdzie  $D_0$  i  $E_0$  to amplitudy odpowiednio przemieszczenia i pola elektrycznego, natomiast  $i$  jest jednostką urojoną,  $i^2 = -1$ .

Wraz ze wzrostem częstotliwości pojawia się mierzalna różnica faz  $\delta$  między  $D$  i  $E$ . Ponieważ odpowiedź materiałów na pola przemienne charakteryzuje się zespoloną przenikalnością elektryczną, naturalnym jest rozdzielenie jej części rzeczywistej i urojonej, co odbywa się umownie w następujący sposób:

$$\hat{\varepsilon}(\omega) = \varepsilon'(\omega) - i\varepsilon''(\omega) = \left| \frac{D_0}{E_0} \right| (\cos \delta - i \sin \delta) \quad (17)$$

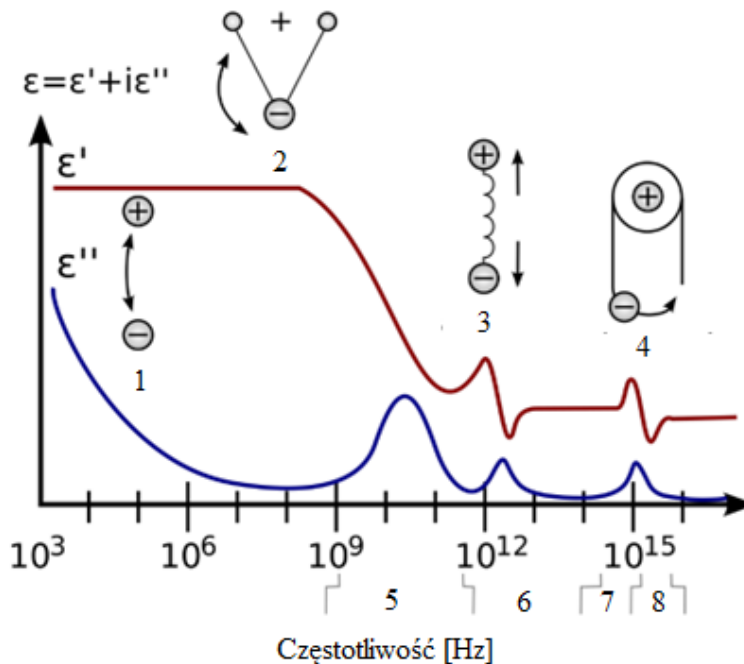
Gdzie:

$\varepsilon'$  - jest rzeczywistą częścią przenikalności elektrycznej;

$\epsilon''$  - jest częścią urojoną przenikalności elektrycznej;

$\delta$  - jest kątem strat.

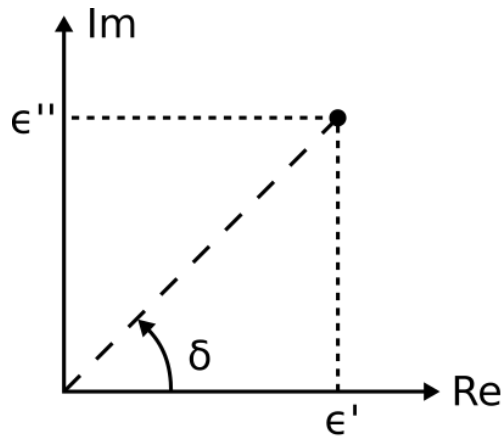
W kontekście omawiania mechanizmów absorpcji i rozpraszania energii w ekranach EM istotne jest, że część urojona przenikalności elektrycznej odpowiada za rozpraszanie energii. Przykład złożonej przenikalności elektrycznej typowego materiału dielektrycznego (w tym przypadku polimeru) pokazano na rysunku 4.1.



Rys. 4.1 Widmo przenikalności dielektrycznej w szerokim zakresie częstotliwości.  $\epsilon'$  i  $\epsilon''$  oznaczają odpowiednio rzeczywistą i urojoną część przenikalności. Na rysunku oznaczono różne procesy: relaksację jonową i dipolową oraz rezonanse atomowe i elektroniczne przy wyższych energiach 1 - jonowy, 2 - dipolowy, 3 - atomowy, 4 - elektroniczny, 5 – mikrofalowy zakres częstotliwości, 6 – podczerwony zakres częstotliwości, 7 -VIS zakres częstotliwości, 8 - UV zakres częstotliwości, [91]

Należy zauważyć, że zależność częstotliwości jest dość prosta i zmienia się powoli przy częstotliwościach poniżej 1 GHz lub w przybliżeniu, ale staje się stosunkowo złożona przy wyższych częstotliwościach. Kiedy zespoloną przenikalność elektryczną rysuje się w postaci prostego diagramu wektorowego (rysunek 4.2), składowe rzeczywiste i urojone są przesunięte w fazie o  $90^\circ$ . Suma wektorów tworzy kąt  $\delta$  z osią rzeczywistą ( $\epsilon'$ ). Względna „stratność” materiału to stosunek energii utraconej do energii zmagazynowanej (18).

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} = \frac{\text{energia tracona na okres}}{\text{energia gromadzona na okres}} \quad (18)$$



Rys. 4.2. Wykres wektora tangensa strat w kategoriach rzeczywistych i urojonych składników zespolonej przenikalności elektrycznej [90]

### 4.1.2. Przenikalność magnetyczna

Przenikalność magnetyczna jest parametrem charakteryzującym właściwości magnetyczne materiałów. Określa ona reakcję materiału na pole magnetyczne i zdolność materiału do tworzenia pola magnetycznego w odpowiedzi na zewnętrzne pole magnetyczne. Przenikalność magnetyczna jest zależna od rodzaju i struktury materiału oraz częstotliwości pola magnetycznego. Przyjmuje się, że przenikalność magnetyczna jest związana z magnetyzacją materiału, czyli zdolnością do wytworzenia momentu magnetycznego ( $M$ ) oraz w odpowiedzi na zewnętrzne pole magnetyczne, a także podatnością magnetyczną (oznaczaną  $\chi_m$ ), która określa zdolność substancji do zmian jej polaryzacji magnetycznej w zewnętrznym polu magnetycznym [92]

Materiały mogą mieć różne wartości przenikalności magnetycznej, co wpływa na ich zachowanie w polu magnetycznym. W oznaczeniach naukowych stosuje się symbol  $\mu$ , a jednostką przenikalności magnetycznej jest henr na metr (H/m) [93]. Przenikalność magnetyczna próżni, z uwagi na redefinicję jednostek układu SI z 2019 r, w przybliżeniu wynosi [94]:

$$\mu_0 \approx 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m} = 12,566370612 \dots \cdot 10^{-7} [T \cdot A/m] \quad (19)$$

W próżni spełnione jest równanie wiążące przenikalność magnetyczną z indukcją magnetyczną i natężeniem pola magnetycznego:

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (20)$$



Gdzie:

$\mu_0$  - przenikalność magnetyczna w próżni [T·A/m],

$B$  - indukcja magnetyczna [T].

$H$  - natężenie pola magnetycznego [A/m],

$M$  - magnetyzacja.

W przypadku rozpatrywania zależności w diamagnetykach i paramagnetykach relacja ta jest liniowa. Stosunek magnetyzacji  $M$  („wynik”) do  $H$  („przyczyna”) jest miarą podatności materiału na namagnesowanie i jest nazywany podatnością magnetyczną materiału  $\chi_m$ :

$$M = \chi_m H \quad (21)$$

Materiały diamagnetyczne mają przenikalność magnetyczną nieznacznie mniejszą od przenikalności w próżni  $\mu < \mu_0$ , natomiast ich względna przenikalność magnetyczna  $\mu_r < 1$ . Materiały o takiej przenikalności magnetycznej słabo reagują na zadane zewnętrzne pole magnetyczne. Doskonałym przykładem materiału diamagnetycznego jest woda. W obecności zadawanego zewnętrznie pola magnetycznego, materiały diamagnetyczne wykazują słabą reakcję na to pole. Materiały paramagnetyczne posiadają przenikalność magnetyczną większą od przenikalności próżni  $\mu > \mu_0$ , natomiast ich względna przenikalność magnetyczna  $\mu_r > 1$ . Pod wpływem pola magnetycznego, materiały paramagnetyczne wykazują niewielką reakcję na zadane zewnętrznie pole magnetyczne. Przykładem takiego materiału paramagnetycznego jest aluminium. Jeśli ośrodkiem jest paramagnetyk lub diamagnetyk przenikalność magnetyczna jest wartością skalarną i można ją zapisać w postaci:

$$\mu = \frac{B}{H} [\text{T}] \quad (22)$$

$$\mu_r = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{B}{H} [\text{T}]$$

Gdzie:

$\mu_r$  - Względna przenikalność magnetyczna ośrodka.

Łącząc równania 15 i 16 można zauważyć, że podatność magnetyczna (która jest bezwymiarowa) jest związana ze względną przenikalnością magnetyczną  $\mu_r = \mu/\mu_0$  przez

$$\mu_r = 1 + \chi_m \quad (23)$$

Materiały ferromagnetyczne, takie jak żelazo, mają znacznie wyższą przenikalność magnetyczną w porównaniu do materiałów diamagnetycznych i paramagnetycznych. Ferromagnetyki charakteryzują się zdolnością do długotrwałego utrzymania momentu magnetycznego po usunięciu pola zewnętrznego. Przykładami materiałów ferromagnetycznych są stal, nikiel i żelazo. W przypadku materiałów ferromagnetycznych przenikalność magnetyczna  $\mu_r \gg 1$ . W obecności pola magnetycznego, materiały ferromagnetyczne wykazują silną magnetyzację i tworzą trwałe magnesy [95]. Przenikalność magnetyczna może również być zależna od częstotliwości pola magnetycznego. W takim przypadku wprowadza się pojęcie przenikalności zespolonej. Przenikalność zespolona składa się z dwóch składowych: rzeczywistej (odpowiadającej części magnetycznej i związanej z gromadzeniem energii) i urojonej (odpowiadającej części rezystywnej i związanej ze stratami energii wskutek opóźnienia fazowego magnetyzacji). [96].

Badania naukowe nad przenikalnością magnetyczną materiałów koncentrują się na charakteryzacji i pomiarze tej właściwości w różnych zakresach częstotliwości i temperatur. Techniki eksperymentalne, takie jak badania zmiany impedancji elektrycznej materiału w reakcji na zmieniające się pole magnetyczne (magnetoimpedancja) czy spektroskopia magnetyczna, są wykorzystywane do analizy przenikalności magnetycznej materiałów w zależności od różnych czynników [97]. Wnioski dotyczące przenikalności magnetycznej materiałów mają istotne znaczenie dla projektowania i analizy układów magnetycznych, takich jak transformatory, induktry i magnesy, a także w dziedzinach nauki o materiałach, elektroniki i technologii.

Przenikalność magnetyczna jest kluczowym parametrem wpływającym na proces ekranowania pola elektromagnetycznego. Oznacza ona zdolność materiału do oddziaływania na pole magnetyczne. Materiały o wysokiej przenikalności magnetycznej skutecznie absorbują pole magnetyczne, co prowadzi do zmniejszenia jego zasięgu i intensywności wewnątrz materiału ekranującego. Wysoka przenikalność magnetyczna umożliwia również efektywne prowadzenie linii pola magnetycznego, tworzą tzw. magnetowody, które kierują linie pola magnetycznego z dala od chronionego obszaru, co przyczynia się do tłumienia pola elektromagnetycznego [98]. W praktyce stosuje się różne materiały o zróżnicowanych wartościach przenikalności magnetycznej, aby osiągnąć optymalne ekranowanie. Na przykład, materiały ferromagnetyczne, takie jak żelazo lub nikiel, o wysokiej przenikalności magnetycznej, mogą znacznie poprawić efektywność ekranowania, kierując i koncentrując linie pola magnetycznego, co skutecznie tłumie pole elektromagnetyczne. [99] [89]. Należy jednak pamiętać, że przenikalność magnetyczna to tylko jeden z wielu czynników

wpływających na ekranowanie pola elektromagnetycznego. Przenikalność elektryczna, przewodnictwo elektryczne i inne właściwości materiałów również odgrywają istotną rolę. Efektywne ekranowanie wymaga zrozumienia i uwzględnienia wzajemnego oddziaływania tych różnych właściwości materiałów. [99]. Badania nad ekranowaniem pola elektromagnetycznego koncentrują się na opracowywaniu zaawansowanych materiałów i struktur, które zapewniają wysoką skuteczność ekranowania. Symulacje komputerowe, eksperymenty laboratoryjne i analizy teoretyczne są wykorzystywane do badania i oceny właściwości przenikalności magnetycznej materiałów ekranujących oraz ich wpływu na pole elektromagnetyczne. [88]. Projektanci układów elektronicznych oraz konstruktorzy obudów i ekranów stosują różne strategie ekranowania, dostosowane do specyficznych wymagań i kontekstu zastosowania, w celu minimalizacji wpływu pól elektromagnetycznych na sąsiadujące elementy oraz zapewnienia poprawnego funkcjonowania systemów.

Wyróżnia się dwa rodzaje ekranowania: magnetyczne i elektromagnetyczne. Ekranowanie magnetyczne opiera się na wykorzystaniu materiałów magnetycznych do koncentracji pola magnetycznego, co osłabia pole w chronionym obszarze. Z kolei ekranowanie elektromagnetyczne bazuje na indukcji elektromagnetycznej, gdzie pole jest osłabiane przez straty energii w prądach wirowych. W tym przypadku ważna jest również przenikalność elektryczna i konduktywność elektryczna.

Podsumowując, właściwy dobór materiałów o odpowiednich właściwościach przenikalności magnetycznej jest kluczowy dla skutecznego ekranowania pola elektromagnetycznego i minimalizacji jego wpływu na otoczenie.

### **4.1.3. Rezystywność i konduktywność**

Rezystywność i konduktywność są wzajemnymi odwrotnościami opisującymi kluczowy parametr określający właściwości materiału, który odgrywa istotną rolę w oddziaływaniu materiałów z polem elektromagnetycznym. Oba te parametry mają zasadnicze znaczenie dla wielu dziedzin nauki technologii, takich jak elektrotechnika, elektronika, telekomunikacja i wiele innych. Rezystywność jest miarą oporu, jaki materiał stawia przepływowi prądu elektrycznego. Oznacza ona zdolność materiału do oporu wobec przepływu elektronów i definiuje się jako iloraz natężenia stałego pola elektrycznego  $E$  i gęstości prądu ustalonego  $J$  płynącego wewnątrz materiału

$$\rho_v = \frac{E}{J} [\Omega\text{m}] \quad (24)$$

W praktyce rezystywność skrośna jest to rezystancja skrośna odniesiona do jednostki objętości próbki

$$\rho = \frac{RS}{l} [\Omega\text{m}] \quad (25)$$

Gdzie:

$R$  - rezystancja [ $\Omega$ ],

$\rho$  - rezystywność [ $\Omega\text{m}$ ],

$S$  - pole przekroju [ $\text{mm}^2$ ],

$l$  - długość lub grubość ( $d$ ) [m].

Natomiast rezystancja wyrażana jest jako stosunek napięcia do prądu w materiale.

$$R = U/I [\Omega] \quad (26)$$

Gdzie:

$I$  - Natężenie prądu

Obiekty wykonane z materiału o wysokiej rezystywności mają wysoką rezystancję, oznacza to, że słabo przewodzą prąd elektryczny. Przykładem grupy materiałów o wysokiej rezystywności są izolatory, takie jak ceramika, szkło i tworzywa polimerowe. Materiały o niskiej rezystywności, nazywane są przewodnikami i mają niską rezystancję oraz dobrze przewodzą prąd. Przykładami przewodników są metale, takie jak miedź i aluminium [95]

Materiały o niskiej rezystywności mają zdolność do swobodnego przewodzenia prądu elektrycznego. Elektrony, które pełnią rolę nośników ładunku w większości materiałów, mogą swobodnie się poruszać w materiałach. Przykładami takich materiałów są metale, które posiadają duże ilości swobodnych elektronów [98]. Wpływ rezystywności i konduktywności na pole elektromagnetyczne jest związany z prądem elektrycznym, który generuje to pole. Przepływ prądu przez materiał powoduje powstawanie wirowego pola magnetycznego wokół niego. Generalnie im większa rezystywność materiału, tym większe straty energii w postaci ciepła i większe tłumienie pola elektromagnetycznego. Wyjątkowym przykładem jest środowisko dielektryczne o nieskończenie wielkiej rezystywności. W nim straty będą mniejsze niż w środowisku o mniejszej rezystywności, ponieważ prąd wcale nie popłynie W materiałach

o wysokiej konduktywności, prąd może swobodnie płynąć, jednocześnie zwiększając tłumienie pola elektromagnetycznego [100]. Wpływ rezystywności i konduktywności jest szczególnie istotny w projektowaniu układów elektrycznych, anten, optymalizacji wydajności energetycznej i wielu innych dziedzinach związanych z przetwarzaniem sygnałów i energii elektrycznej. Przykładowe wartości rezystywności i konduktywności przedstawiono w tabelach nr. 4.1 i 4.2.

Tabela 4.1. Opór właściwy  $\rho_r$  [ $\mu\Omega\text{m}$ ] przewodników w temperaturze 20 °C

Substancja	$\rho_r$ [ $\mu\Omega\text{m}$ ]	Substancja	$\rho_r$ [ $\mu\Omega\text{m}$ ]
Aluminium	0,028	Stal	0,10-0,14
Bizmut	1,06	Miedź	0,017
Cyna	0,12	Wolfram	0,055
Cynk	0,059	Molibden	0,057
Ołów	0,21	Złoto	0,024
Magnez	0,047	Nikiel	0,073
HDPE	$1,6 \cdot 10^{16}$	Żelazo	0,098
Grafit	8,0-20,0	Zendra	0,001
Platyna	0,105	blacha nanokrystaliczna	0,000013
Rtęć	0,958	blacha amorficzna	0,000013

Tabela 4.2. Konduktywność wybranych materiałów

Substancja	Przewodność właściwa 1/ $\Omega\text{m}$	Substancja	Przewodność właściwa 1/ $\Omega\text{m}$
srebro	$61,39 \cdot 10^6$	krzem	$2,52 \cdot 10^{-4}$
miedź	$58,6 \cdot 10^6$	tellur	200
złoto	$44,0 \cdot 10^6$	woda pitna	$1-5 \cdot 10^{-2}$
glin	$36,59 \cdot 10^6$	woda deszczowa	$1-3 \cdot 10^{-3}$
wolfram	$18,38 \cdot 10^6$	woda destylowana	ok. $1,7 \cdot 10^{-3}$
żelazo	$10,02 \cdot 10^6$	czysta woda	$4,3 \cdot 10^{-6}$
cyna (czysta)	$9,17 \cdot 10^6$	czysta woda	$3,8 \cdot 10^{-6}$
Sn 63% Pb 37%	ok. $6,9 \cdot 10^6$	zendra	1000
Sn 62% Pb 36% Ag 2%	ok. $6,8 \cdot 10^6$	blacha nanokrystaliczna	7690
chrom	$8,74 \cdot 10^6$	blacha amorficzna	7690
ołów	$4,69 \cdot 10^6$	gadolin	$0,74 \cdot 10^6$
tytan	$2,56 \cdot 10^6$	german	2,17

#### 4.1.4. Zjawisko indukcji elektromagnetycznej

Indukcja elektromagnetyczna opisuje zjawisko powstawania sił elektromotorycznych (SEM) i prądu elektrycznego w obwodzie w wyniku zmiany pola magnetycznego. Indukcja elektromagnetyczna została opisana po raz pierwszy przez Michaela Faradaya w XIX wieku i jest jednym z fundamentalnych zjawisk elektromagnetycznych. W swojej serii eksperymentów z lat 30. XIX wieku Faraday odkrył, że zmieniające się pole magnetyczne wokół przewodnika wywołuje przepływ prądu elektrycznego w przewodniku. W efekcie tego odkrycia Faraday sformułował prawo indukcji elektromagnetycznej, które mówi, że siła elektromotoryczna (napięcie) w przewodniku jest proporcjonalna do szybkości zmian strumienia magnetycznego przechodzącego przez przewodnik [101], co wyraża się wzorem:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} [\text{V}] \quad (27)$$

Gdzie:

$\Phi$  - strumień indukcji magnetycznej [Wb; T/m<sup>2</sup>],

$\frac{d\Phi}{dt}$  - szybkość zmiany strumienia indukcji magnetycznej [Wb].

Jeżeli w miejscu pętli umieści się zamknięty przewodnik o rezystancji  $R$  wówczas w obwodzie tego przewodnika popłynie prąd:

$$I = \frac{1}{R} \frac{d\Phi_B}{dt} [\text{A}] \quad (28)$$

Strumień indukcji magnetycznej w tym wzorze jest całkowitym strumieniem magnetycznym, zarówno wywołanym przez źródła zewnętrzne, jak i wywołany prądem płynącym w przewodniku. W przypadku zwojnicy o  $N$  zwojach, wzór na siłę elektromotoryczną indukcji można zapisać:

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi}{dt} [\text{V}] \quad (29)$$

Wzór wynikający z prawa Faradaya można przedstawić w postaci całkowej:

$$\varepsilon = \oint_l E_m \cdot dl = - \frac{d}{dt} \int_S B \cdot dS \text{ [V]} \quad (30)$$

Gdzie:

$\varepsilon$ - siła elektromotoryczna powstająca w pętli [V],

$E_m$  - natężenie indukowanego pola elektrycznego [V/m],

$l$  - długość pętli [m],

$dl$  - nieskończenie krótki odcinek skierowany pętli [m],

$S$  - powierzchnia zamknięta pętlą o długości  $l$  [m<sup>2</sup>],

$B$  - indukcja magnetyczna. [T] [102].

Zależności te stanowią podstawę dla zrozumienia procesu indukcji elektromagnetycznej. Indukcja elektromagnetyczna ma szerokie zastosowanie w praktyce i jest podstawą działania generatorów elektrycznych, w których ruchome magnesy generują zmieniające się pola magnetyczne, indukując prąd w uzwojeniach. Istnieją również prawa matematyczne opisujące indukcję elektromagnetyczną, takie jak prawo Faradaya oraz prawo Lenza. Prawo Lenza mówi, że kierunek indukowanej siły elektromotorycznej jest taki, że przeciwdziała zmianie pola magnetycznego, zgodnie z zasadą zachowania energii. [95] [98] [103]. Indukcja elektromagnetyczna ma istotny wpływ na pole elektromagnetyczne, zarówno wokół przewodnika, w którym zachodzi indukcja, jak i na otaczające je środowisko. Ten wpływ można zaobserwować w różnych aspektach pola elektromagnetycznego. Jednym z kluczowych wpływów indukcji magnetycznej na pole elektromagnetyczne jest generowanie pola magnetycznego wokół przewodnika, w którym zachodzi przepływ prądu elektrycznego. Prawo Ampère'a uwzględnia zmieniające się pole elektryczne, które wpływa na pole magnetyczne i przyjmują postać równania (20). W zależności od kształtu i układu przewodnika, pole magnetyczne może mieć różne cechy, takie jak kierunek, rozkład i intensywność [95]. Ten wpływ indukcji na pole magnetyczne ma znaczenie w dziedzinach elektrotechniki, takich jak projektowanie transformatorów, silników elektrycznych i innych urządzeń magnetycznych. Kolejnym istotnym wpływem indukcji na pole elektromagnetyczne jest generowanie pola elektrycznego wokół przewodnika, gdy w nim zachodzi zmiana pola magnetycznego. Prawo Ampère'a zostało rozszerzone przez Maxwella i zostało wyrażone wzorami:

$$\oint_c \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{A} + \frac{\partial}{\partial t} \int_S D \cdot d\vec{A} \quad (31)$$

Gdzie:

$J$  - Gęstość prądu [ $A/m^2$ ].

Prąd przesunięcia wyrażono wzorem:

$$I_p = \frac{\partial}{\partial t} \int_S \vec{D} \cdot d\vec{A} \quad (32)$$

$I_p$  - Prąd przesunięcia [A].

Wstawiając prąd przesunięcia do wzoru można prawo Ampère'a zapisać postaci:

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = I + I_p \quad (33)$$

W ośrodkach liniowych można zastąpić indukcję natężeniem pola elektrycznego wykorzystując zależność:

$$\vec{D} = \epsilon_e \vec{E} \quad (34)$$

W wersji różniczkowej prawo to zapisane jest w postaci:

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (35)$$

Prawo Faradaya mówi, że zmieniające się pole magnetyczne przechodzące przez przewodnik wywołuje siłę elektromotoryczną (napięcie) w przewodniku, co prowadzi do generowania pola elektrycznego wokół niego [104]. Ten wpływ indukcji na pole elektryczne jest wykorzystywany w technologii, takiej jak transformatory, gdzie zmiany pola magnetycznego w jednej cewce indukują napięcie w drugiej cewce, co prowadzi do generowania pola elektrycznego. Indukcja elektromagnetyczna może również wpływać na propagację fali elektromagnetycznej. Zmiany pola magnetycznego wokół przewodnika indukują prądy wirowe, znane jako prądy wirowe Foucaulta, które wytwarzają swoje własne pole magnetyczne. Może oddziaływać z zewnętrznym polem elektromagnetycznym, prowadząc do zjawisk takich jak tłumienie, zmiana fazy i innych efektów związanych z propagacją fali



[105]. Ten wpływ indukcji na propagację fali elektromagnetycznej jest ważny w dziedzinie telekomunikacji, radiotechniki i innych dziedzinach związanych z przesyłem sygnałów. Badania naukowe nad wpływem indukcji elektromagnetycznej na pole elektromagnetyczne skupiają się na analizie zależności cechami indukowanego pola elektromagnetycznego. Prace naukowe wykonane przez Maxwella, Faradaya i innych badaczy przyczyniły się do rozwoju teorii elektromagnetyzmu i matematycznego opisu tego zjawiska. Wniosek jest taki, że indukcja elektromagnetyczna ma istotny wpływ na pole elektromagnetyczne. Wielkość tego wpływu zależy od parametrów indukcji, takich jak prąd, zmiana pola magnetycznego i geometria przewodnika. Zrozumienie wpływu indukcji na pole elektromagnetyczne jest niezbędne do projektowania układów elektromagnetycznych, analizy propagacji fal i opracowywania nowych technologii. Indukcja elektromagnetyczna wywiera zauważalny wpływ na pole elektromagnetyczne, wprowadzając różnorodne zmiany w jego charakterystykach i parametrach. Wpływ ten jest szczególnie istotny w kontekście wielu zastosowań i dziedzin, takich jak elektronika, telekomunikacja, energetyka, a także nauka materiałów. Pole magnetyczne generowane jest w wyniku przepływu prądu charakter tego pola zależy od kształtu i układu przewodnika. Może to prowadzić do wytworzenia skupisk pola magnetycznego w określonych obszarach przestrzeni, co może mieć znaczenie w projektowaniu układów magnetycznych [21]. Wpływ indukcji na pole elektromagnetyczne może również uwydatniać się poprzez generowanie pola elektrycznego, gdy zmienia się pole magnetyczne wokół przewodnika, dochodzi do indukcji napięcia w przewodniku, co skutkuje pojawieniem się pola elektrycznego. Ten wpływ jest wykorzystywany w różnych technologiach, takich jak transformatory, gdzie zmiany pola magnetycznego w jednej cewce indukują napięcie w drugiej cewce, co prowadzi do generowania pola elektrycznego [98].

## 4.2. Wybrane rodzaje materiałów

Materiały elektryczne i magnetyczne odgrywają kluczową rolę w rozwoju technologii, umożliwiając szerokie zastosowanie w energetyce, elektronice, telekomunikacji oraz wielu innych dziedzinach. Właściwości tych materiałów wynikają z ich wewnętrznej struktury atomowej oraz sposobu, w jaki reagują na pola elektryczne i magnetyczne. Zrozumienie tych właściwości jest niezbędne do projektowania i optymalizacji urządzeń, które wykorzystują te materiały do przesyłu energii, informacji oraz w przetwarzaniu danych.

Materiały elektryczne można podzielić na trzy główne kategorie: przewodniki, półprzewodniki i izolatory, w zależności od ich zdolności do przewodzenia prądu elektrycznego. Przewodniki charakteryzują się wysoką przewodnością elektryczną, dzięki czemu prąd przepływa przez nie z minimalnymi stratami energii. Półprzewodniki, takie jak krzem czy german, mają pośrednie właściwości, co czyni je podstawą w konstrukcji elementów elektronicznych, takich jak diody i tranzystory. Izolatory, z kolei, mają bardzo niską przewodność, co sprawia, że są idealne do stosowania w miejscach, gdzie konieczne jest zapobieganie przepływowi prądu elektrycznego [106]

Właściwości magnetyczne materiałów są ściśle związane z ich strukturą atomową oraz zjawiskiem momentu magnetycznego. Materiały magnetyczne można klasyfikować jako diamagnetyki, paramagnetyki i ferromagnetyki, w zależności od ich reakcji na zewnętrzne pole magnetyczne. Diamagnetyki wykazują słabe przeciwdziałanie polu magnetycznemu, podczas gdy paramagnetyki wzmacniają pole magnetyczne, ale tylko w niewielkim stopniu. Ferromagnetyki, takie jak żelazo, wykazują silne namagnesowanie w obecności pola magnetycznego, co czyni je podstawowymi materiałami w budowie magnesów trwałych oraz rdzeni elektromagnesów [107].

### 4.2.1. Materiały dielektryczne

Materiały dielektryczne są niezwykle ważne w dziedzinie elektrotechniki, elektroniki, telekomunikacji i innych obszarach, gdzie zachodzi konieczność izolacji elektrycznej, przechowywania energii lub przenoszenia sygnałów. Charakteryzują się one bardzo małą przewodnością elektryczną, co oznacza, że nie przewodzą prądu elektrycznego, natomiast wykazują zdolność do przechowywania energii elektrycznej w postaci pola elektrycznego oraz do polaryzacji. Zdolność materiału do rozpraszania energii w obecności pola elektrycznego można wyrazić współczynnikiem strat dielektrycznych, nazywanym także tangensem kąta strat dielektrycznych ( $\text{tg}\delta_d$ ). Jest to parametr charakteryzujący straty energii w materiale dielektrycznym podczas cyklu zmiany pola elektrycznego. Określa on jak dużo energii jest tracone w postaci ciepła w dielektryku pod wpływem zmiennego sinusoidalnie się pola elektrycznego. W matematyczny sposób współczynnik strat dielektrycznych można wyrazić za pomocą wzoru (19):

$$\text{tg}\delta_d = \frac{\gamma}{\omega\epsilon_e} \quad (36)$$

Gdzie

$\operatorname{tg}\delta_d$  - tangens kąta strat dielektrycznych,

$\gamma$  - konduktywność, [S/m]

$\omega$  - pulsacja, [rad/s]

$\epsilon_e$  - przenikalność elektryczna. [F/m]

W praktyce straty mocy przyjmują się średnie straty energii w postaci wydzielania ciepła w jednym okresie drgania. W dielektrykach idealnych (bez strat dielektrycznych), tangens kąta strat dielektrycznych wynosiłby 0, co oznaczałoby brak strat energii. Jednak w rzeczywistych dielektrykach występują różne procesy, takie jak przeskok ładunku, rotacje dipoli czy przemieszczanie się nośników ładunku, które mogą powodować straty energii w postaci ciepła. Im wyższy współczynnik strat dielektrycznych, tym więcej energii tracone jest w postaci ciepła, co może być istotne w wielu zastosowaniach, takich jak kondensatory, izolatory elektryczne, czy też materiały dielektryczne w elektronice. W praktyce, niska wartość współczynnika strat dielektrycznych jest często pożądana, zwłaszcza w zastosowaniach, gdzie istotne jest minimalizowanie strat energii. Przykładem takiego materiału jest ceramika dielektryczna, która posiada wysoką przenikalność dielektryczną i niską stratność dielektryczną. Właściwości te czynią ją doskonałym materiałem dielektrycznym do budowy kondensatorów ceramicznych [108]. Wytrzymałość dielektryczna to zdolność materiału do wytrzymywania wysokich napiężeń elektrycznych bez jego przebicia, co jest kluczową cechą materiałów dielektrycznych stosowanych w izolatorach wysokiego napięcia, kondensatorach wysokiego napięcia i innych wymagających wysokiej wytrzymałości dielektrycznej wyrobów. Wytrzymałość dielektryczna jest często podawana w jednostce napięcia przebicia w kilowoltach na milimetr lub woltach na milimetr (kV/mm lub V/mm) [109]. Badania nad materiałami dielektrycznymi się na poszukiwaniu nowych materiałów o doskonałych właściwościach dielektrycznych i poprawie właściwości istniejących materiałów. Zwiększenie przenikalności dielektrycznej i zmniejszenie stratności dielektrycznej to główne cele badań. Wykorzystuje się różne techniki, takie jak modyfikacja struktury, procesy nanotechnologiczne itp., aby uzyskać pożądane właściwości dielektryczne w materiałach. Ważnym obszarem badań jest również badanie zachowania materiałów dielektrycznych w różnych warunkach, takich jak wysokie temperatury, wysokie częstotliwości i ekstremalne warunki środowiskowe. Analiza wpływu tych czynników na właściwości dielektryczne ma kluczowe znaczenie w projektowaniu materiałów dielektrycznych dla różnych zastosowań np. w przemyśle motoryzacyjnym,

telekomunikacji, energetyce czy medycynie. Materiały dielektryczne wykorzystują się w budowie np. kondensatorów, izolatorów, dielektrykach w układach drukowanych i światłowodowych, izolacji elektrycznej, mikrosystemach elektromechanicznych (SEM) [110-111]. Materiały dielektryczne odgrywają istotną rolę w dziedzinie ekranowania pola elektromagnetycznego, zarówno w celach ochronnych, jak i w kontekście zastosowań technicznych. Właściwości dielektryczne tych materiałów wpływają na przenikanie, absorpcję i rozpraszanie pola elektromagnetycznego. W rezultacie, wybór odpowiednich materiałów dielektrycznych może mieć duże znaczenie dla skuteczności ekranowania pola elektromagnetycznego. Tego rodzaju materiały dielektryczne mogą skutecznie ekranować pole elektromagnetyczne [108]. Wpływ stratności dielektrycznej ( $tg\delta_d$ ) na ekranowanie pola elektromagnetycznego jest również istotny. Dlatego materiały dielektryczne o niskiej stratności dielektrycznej są bardziej efektywne w ekranowaniu pola elektromagnetycznego [109]. Struktura materiału dielektrycznego również wpływa na jego zdolność do ekranowania pola elektromagnetycznego. Materiały dielektryczne o porowatej strukturze mogą wykazywać różnice w ekranowaniu w zależności od stopnia porowatości, rozmiaru porów i układu cząsteczek [112]. Badania nad materiałami dielektrycznymi w kontekście ekranowania pola elektromagnetycznego obejmują analizę różnych parametrów, takich jak przenikalność dielektryczna, stratność dielektryczna, struktura materiału, rodzaj pola elektromagnetycznego i inne. Przykładowo, w artykule [113] prace skupiają się na badaniu zdolności ekranowania materiałów dielektrycznych w zakresie radiowym i mikrofalowym. W analizie uwzględnia się przenikalność dielektryczną, stratność dielektryczną, absorpcję i odbicie pola elektromagnetycznego w różnych materiałach dielektrycznych. W praktyce inżynierskiej wykorzystuje się różne materiały dielektryczne do konstrukcji ekranów elektromagnetycznych np.:

- *Polietylen (PE)* jest szeroko stosowanym materiałem dielektrycznym w ekranowaniu pola elektromagnetycznego. Ma on niską przewodność elektryczną i wysoką odporność dielektryczną. Polietylen może być stosowany jako powłoka lub izolator w ekranach elektromagnetycznych [114].
- *Polipropylen (PP)* to inny popularny materiał dielektryczny wykorzystywany w ekranowaniu pola elektromagnetycznego. Podobnie jak polietylen, ma niską przewodność elektryczną i wysoką odporność dielektryczną. Polipropylen jest lekki, trwały i łatwy do formowania, co czyni go atrakcyjnym materiałem w stosowanym do ekranowania pola elektromagnetycznego [115].

- Materiały ceramiczne, takie jak tlenki metalu, węgliki i borokrzemiany, są również wykorzystywane jako materiały dielektryczne w ekranowaniu pola elektromagnetycznego. Mają one wysoką wytrzymałość termiczną i wysoką odporność dielektryczną oraz dobre właściwości izolacyjne. Ceramika jest często stosowana w postaci powłok lub elementów strukturalnych w ekranach elektromagnetycznych [116].
- Tkaniny z włókien szklanych są stosowane jako materiały dielektryczne do ekranowania pola elektromagnetycznego. Mają one wysoką wytrzymałość mechaniczną i dobre właściwości dielektryczne. Tkaniny z włókien szklanych są stosowane jako elementy ekranujące w obudowach elektronicznych i osłonach kabli [117].
- Kompozyty dielektryczne składają się z matrycy dielektrycznej wzmocnionej materiałami przewodzącymi. Przykładami takiego rozwiązania jest kombinacja właściwości dielektrycznych i przewodzących umożliwiająca efektywne ekranowanie pola elektromagnetycznego [118]. W tabeli 4.3 przedstawiono przenikalność elektryczną wybranych materiałów.

Tabela 4.3. Przenikalność elektryczna względna (stała dielektryczna) [119]

Nazwa ciała	$\epsilon_r$	Nazwa ciała	$\epsilon_r$
Ciała stałe		Siarka	3,5
Bakelit	4,8-5,3	Kauczuk	2,2-3
Papier kondens.	4-5,8	Sól kamienna	5,6
Bursztyn	2,8	Kwarc	4,5
Papier suchy	2,0-2,5	Szkło	5,0-10,0
Celuloza	5,9	Marmur	8,3
Papier wosk.	2,7	Tytanian baru	1200
Drewno	2,2-3,7	Mika	7,4-7,85
Parafina	1,9-2,2	Wosk pszczeli	2,8-2,9
Ebonit	2,5-3,5	Ciecze	
Plexi	3,0-3,6	Alkohol etylowy	24,3
Granit	7-9	Chloroform	4,8
Guma	2,6-3,0	Benzen	2,3
Polietylen	2,2-2,4	Nafta	2,0
Porcelana	6,0-8,0	Benzyna	1,9-2,0
Igelit	4,7	Nitrobenzen	35,7

## 4.2.2. Materiały diamagnetyczne

Materiały diamagnetyczne, charakteryzują się zdolnością do odpychania pól magnetycznych. Główny mechanizm ich reakcji na zewnętrzne pole magnetyczne polega na indukowaniu prądów wirowych na poziomie atomowym. Gdy zewnętrzny biegun magnetyczny jest przykładany, elektrony w atomach materiału generują lokalne prądy wirowe, które tworzą własne pola magnetyczne. Te pola są skierowane przeciwnie do zewnętrznego pola, co prowadzi do odpychania materiału diamagnetycznego od źródła pola [95]. W kontekście ekranowania pola elektromagnetycznego, materiały diamagnetyczne są wykorzystywane w konstrukcjach osłonowych. Dzięki swojej zdolności do odpychania pola magnetycznego, mogą one wpływać na kształt i intensywność pola elektromagnetycznego w ich otoczeniu. W niektórych zastosowaniach inżynierskich, takich jak konstrukcje osłon z miedzi, materiały te pomagają zmniejszyć wpływ pól elektromagnetycznych na urządzenia pracujące w określonych częstotliwościach. Badania nad materiałami diamagnetycznymi koncentrują się na lepszym zrozumieniu ich właściwości oraz na rozwijaniu nowych zastosowań w ekranowaniu pola elektromagnetycznego. Symulacje numeryczne, eksperymenty laboratoryjne oraz modele teoretyczne są kluczowe dla zgłębiania ich wpływu na pole elektromagnetyczne i opracowywania nowych technologii ekranowania. [120].

## 4.2.3. Materiały paramagnetyczne

Charakterystyczną cechą tych materiałów jest mniejsza reakcja na pole elektromagnetyczne w stosunku do materiałów ferromagnetycznych. W przypadku materiałów paramagnetycznych magnetyzacja indukowana przez pole magnetyczne jest chwilowa i ma charakter tymczasowy oraz występuje tylko w obecności zewnętrznego pola magnetycznego. Materiały paramagnetyczne zawierają atomy lub cząsteczki niesparowane, tzn. istnieją orbitale z tylko jednym elektronem. paramagnetyzm polega na wykazywaniu dodatniej podatności magnetycznej. Pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego niesparowane elektrony mogą zmienić spin na zgodny z kierunkiem pola. To wytwarza pole magnetyczne skierowane zgodnie z polem zewnętrznym. Zmiana tego spinu może nastąpić tylko na orbitalu z niesparowanym elektronem, gdyż dwa elektrony na tym samym orbitalu muszą mieć przeciwny spin (zasada Pauliego) [121]. Przykładem materiału paramagnetycznego jest tlenek miedzi (CuO). W warunkach normalnych jest on paramagnetyczny, co oznacza, że nie można z niego wytworzyć magnesu stałego.

Umieszczenie materiału pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego powoduje uporządkowanie spinów niesparowanych elektronów i lokalne wytwarzanie magnetyzacji. [122]. W naukach przyrodniczych materiały paramagnetyczne często wykorzystuje się w badaniach struktury atomowej i molekularnej, oraz w badaniach reakcji chemicznych. W zastosowaniach technik takich jak spektroskopia magnetyczna jądrowego rezonansu (NMR) wykorzystuje się właściwości materiałów paramagnetycznych w celu uzyskania informacji o ich składzie. [123]. Materiały paramagnetyczne są przede wszystkim znane ze swoich reakcji na pole magnetyczne, posiadają również pewne zdolności w ekranowaniu pola elektromagnetycznego. W procesie ekranowania pola elektromagnetycznego, materiały paramagnetyczne mogą być tak ustawione, aby stworzyć osłonę lub ekran w celu absorpcji części energii fali elektromagnetycznej, zmniejszając w ten sposób jej energię w określonym obszarze. Przykładem praktycznego wykorzystania materiałów paramagnetycznych w ekranowaniu pola elektromagnetycznego jest ich zastosowanie w konstrukcjach mikrofalowych. W tych przypadkach materiały paramagnetyczne mogą działać jako pomoc "pochłaniacze" fal elektromagnetycznych. Zastosowanie w konstrukcjach mikrofalowych, gdzie ich zdolność do absorpcji energii fal elektromagnetycznych powoduje, ich rozproszenie oraz minimalizuje możliwość działania w otoczeniu [124].

#### **4.2.4. Materiały ferromagnetyczne**

Materiały ferromagnetyczne należą do grupy materiałów charakteryzujących się silnymi właściwościami magnetycznymi. Podstawową cechą tych materiałów jest zdolność do trwałej magnetyzacji. Oznacza to, że utrzymują one swoją własną magnetyzację nawet po wyjściu z pola magnetycznego. Istnienie struktur domen magnetycznych, w których spiny atomów są zsynchronizowane w jednym kierunku powoduje powstawanie silnych biegunów magnetycznych. Jednym z celów stosowania materiałów ferromagnetycznych jest produkcja magnesów trwałych wykorzystujących właściwości tych materiałów do tworzenia trwałych pól magnetycznych. Wykorzystuje się te materiały w technologii przechowywania danych, takie jak dyski twarde. W tym przypadku uwzględnia się zjawisko magnetycznej zmienności w materiałach ferromagnetycznych do zapisywania informacji. W przypadku ekranowania pola elektromagnetycznego, materiały ferromagnetyczne mogą być stosowane w konstrukcjach osłonowych. Ich zdolność do generowania własnego pola magnetycznego może być wykorzystane do niwelowania wpływu pola magnetycznego pochodzącego z otoczenia. Główną cechą materiałów ferromagnetycznych służących do EM jest przyciąganie i absorpcja

fal elektromagnetycznej przez te materiały. [125]. Przykładowymi materiałami ferromagnetycznymi są:

- Materiały ferrytowe takie jak ferryty niklowo-cynkowe (NiZn) i ferryty manganowe (MnZn). Ferryty mają wysoką przewodność magnetyczną i elektryczną, co pozwala im na absorpcję i rozpraszanie energii elektromagnetycznej. Materiały ferrytowe są stosowane w postaci płyt, pierścieni, wkładek lub proszków, które mogą być używane do budowy rdzeni indukcyjnych, filtrów i ekranów elektromagnetycznych. [126]
- Ferrofluidy to płyny, które zawierają nanocząstki magnetyczne. Zazwyczaj z ferromagnetycznych lub ferrimagnetycznych materiałów, które rozproszone są w ciekłym nośniku. Te nanocząstki są zwykle na tyle małe, że płyn zachowuje swoją płynność, co oznacza, że ferrofluidy zachowują się jak zwykłe ciecze w warunkach normalnych. Jednak pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego nanocząstki magnetyczne w ferrofluidach mogą reagować, co nadaje płynowi interesujące właściwości.

Do charakterystycznych cech ferrofluidów należą:

- Reakcja na pole magnetyczne: Ferrofluidy wykazują zdolność do reagowania na pole magnetyczne. Pod wpływem zewnętrznego pola, nanocząstki magnetyczne zaczynają się porządkować, co prowadzi do różnych efektów w płynie, takich jak tworzenie struktur falowanych.
- Stabilność koloidalna: Ferrofluidy charakteryzują się stabilnością koloidalną, co oznacza, że nanocząstki są równomiernie rozproszone w płynie i z czasem nie opadają na dno. Umożliwia to długotrwałe utrzymanie równomiernego rozkładu nanocząstek w płynie.
- Zastosowania w technologii: Ferrofluidy mają różnorodne zastosowanie np. w systemach chłodzenia, w aktywnych amortyzatorach, w silnikach elektromagnetycznych oraz wykorzystane są w urządzeniach medycznych (np. w obrazowaniu medycznym), a także w sztucznych oczach i głośnikach.
- Efekty wizualne: Ze względu na zdolność ferrofluidów do reagowania na pole magnetyczne, można zaobserwować efekty wizualne, takie jak zmiany w kształcie i strukturze płynu w obecności magnesów. To sprawia, że ferrofluidy są popularne w doświadczeniach naukowych i sztuce.



Warto zauważyć, że ferrofluidy są materiałami otrzymanymi w wyniku inżynierii (materiałowej), a ich skład zależy od konkretnego zastosowania. Nanocząstki mogą być wykonane z różnych materiałów:

- Ferromagnetyczne ceramiki: tlenki żelaza ( $Fe_3O_4$ ,  $Fe_2O_3$ ): Te tlenki żelaza są znane jako magnetyty i hematyty. Są to naturalne minerały również stosowane w formie ceramicznych magnetytów w różnych zastosowaniach technologicznych.
- Ferromagnetyczne polimery: materiały magnetyczne zawierające cząstki magnetyczne w osadzonej matrycy polimerowej mogą być wzbogacane cząstkami ferromagnetycznymi, tworzącymi elastyczne i lekkie materiały ferromagnetyczne. Materiały te znalazły zastosowanie m.in. w elastycznych antenach i elementach pamięci magnetycznej.
- Ferromagnetyczne związki chemiczne, ich stopy oraz związki magnetyczne. Oprócz klasycznych metalicznych ferromagnetyków istnieją również różne stopy i związki chemiczne, które wykazują własności ferromagnetyczne. Takim przykładem jest gadolin, który jest jako środek kontrastowy w obrazowaniu rezonansem magnetycznym (MRI) [127], pamięciach magnetycznych i urządzeniach magneto-optycznych [128-129].

Wartości przenikalności magnetycznej dla przykładowych materiałów diamagnetycznych, paramagnetycznych i ferromagnetycznych przedstawiono w tabeli nr. 4.4. W przypadku materiałów ferromagnetycznych wartości  $\mu_r$  są szacunkowe gdy mamy do czynienia ze zjawiskiem histerezy.

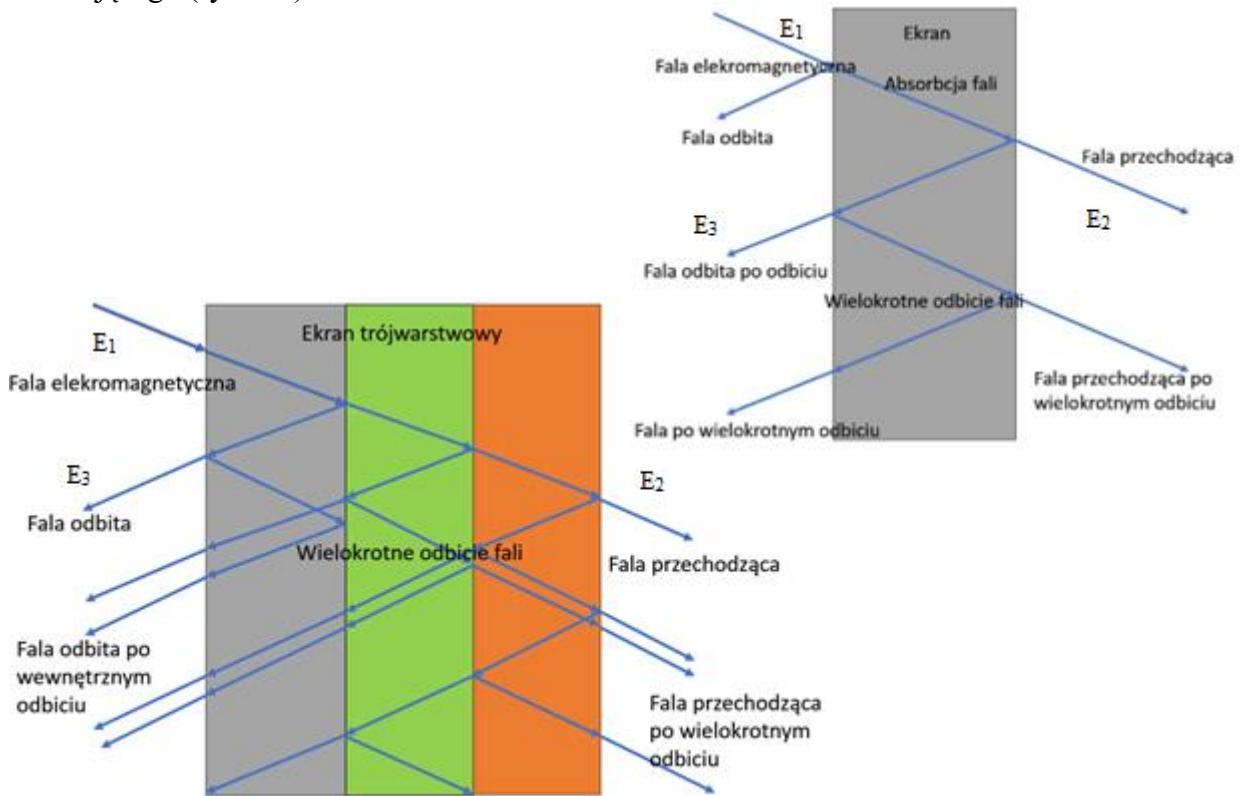
Tabela 4.4. Przenikalność magnetyczna względna  $\mu_r$  [119]

Diamagnetyki	$\mu_r$	Ferromagnetyki	
Bizmut	0,999824	(przenikalność maksymalna) $\mu_r$	
Miedź	0,999990	Permaloj (78% Ni, 22% Fe)	80000
Szkło	0,999987	Żelazo miękkie	8000
Woda	0,999991	Żelazo transformatorowe	15000
Wodór	0,999999937	Blacha nanokrystaliczna	350000
Paramagnetyki		Zendra	10
Aluminium	1,000023	Blacha amorficzna	200000
Powietrze	1,00000038		
Tlen	1,0000019		
Wolfram	1,000176		

### 4.3. Skuteczność ekranowania pola elektromagnetycznego

Skuteczność ekranowania pola elektromagnetycznego jest wskaźnikiem w zakresie ochrony przed niepożądanym promieniowaniem elektromagnetycznym. Współczesne technologie są przyczyną powstawania różnych fal elektromagnetycznych, które mogą zakłócać działanie urządzeń elektronicznych oraz kolidować z innymi systemami komunikacyjnymi. Skuteczność ekranowania jest określana jako zdolność materiałów lub produktów (po uwzględnieniu ich grubości oraz geometrii) do przepuszczania fali elektromagnetycznej. Wyrażana jest często współczynnikiem tłumienia fali elektromagnetycznej (*SE* - Shielding Effectiveness), który mierzy powierzchniowa gęstość mocy fali EM przed i za osłoną. Na rysunkach 4.3 i 4.4 przedstawiono teoretyczne przechodzenie fali EM przez materiał. Rozróżniamy trzy główne metody stosowane przez społeczność inżynierów elektronicznych/elektroników w celu przybliżenia parametrów ekranowania materiałów metalowych, które można również zastosować do materiałów kompozytowych [130]. Metodami tymi są prawa i równania Maxwella; Prawa Maxwella (analogię pomiędzy falami przewodzonymi i falami wypromieniowanymi) wykorzystujących przybliżenia Schelkunoffa [131] oraz prawa Kirchhoffa. Każda z trzech metod przyjmuje określone założenia oraz zawiera ograniczenia i warunki. Istnieje 13 równań i 4 warunki brzegowe związane z wykorzystaniem praw Maxwella do wyznaczenia przybliżonej skuteczności ekranowania przewodzących materiałów metalowych. Używanie tych równań do zrozumienia przenikania pola elektromagnetycznego do i przez materiał metaliczny jest niezwykle trudne do zrozumienia i wykorzystania. Schelkunoff zaproponował zastosowanie analogii pomiędzy falami przewodzącymi w linii transmisyjnej a falami promieniowanymi. Zastosowanie analogii doprowadziło do powstania zestawu równań, które podają wartość skuteczności ekranowania dla materiałów metalowych. Przybliżenie pola dalekiego jest stosunkowo bliskie przybliżeniu uzyskanemu za pomocą równań Maxwella. W związku z tym analogia i następujące po niej równania służące przybliżeniu skuteczności ekranowania materiałów metalicznych zostały powszechnie przyjęte. Zastosowane równania mają to ograniczenie, że wymagają odniesienia skuteczności ekranowania barier metalowych do odległość  $\lambda/2\pi$  od bariery oraz warunku brzegowego impedancji fali płaskiej równej 377 Ohmów. Zastosowanie praw Kirchhoffa do przybliżenia skuteczności ekranowania bariery metalicznej opiera się na teorii obwodów. W związku z tym teoria jest łatwiejsza do zrozumienia i wykorzystania przez przeciętnego inżyniera. Warunki brzegowe zgodne z prawami Kirchhoffa różnią się od tych opracowanych przy użyciu teorii fal, gdzie kolejne

równania dają wartość pól  $E$  i  $H$ . Mechanizm, dzięki któremu materiał kompozytowy chroni przed promieniowaniem elektromagnetycznym, wykorzystany w odniesieniu do materiałów kompozytowych opisano przy pomocy modelu Schelkunoffa. Zakłada on, że fala elektromagnetyczna, w wolnej przestrzeni pada na nieskończoną płaską warstwę ośrodka ekranującego (rys. 4.3).



Rys. 4.3. Schemat zjawiska padającej fali elektromagnetycznej przez materiał, na podstawie modelu ekranowania Shelkunoffa

Na rysunku 4.3 zaznaczono  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$  zgodnie z opisem przedstawionym poniżej. Część fali padającej  $E_1$ , która staje się falą odbitą  $E_3$ , zależy od współczynnika odbicia powierzchni ekranu. Pozostała część przedostaje się do materiału, tłumiona przez współczynnik  $e^{-\frac{d}{\delta}}$ , gdzie  $\delta$  jest głębokością wnikania ekranu, a  $d$  jest jego grubością, aż dotrze do drugiej strony. Po wyjściu z ekranu (prawa strona ekranu na rysunku 4.3) następuje kolejne odbicie/transmisja; w tym przypadku fala odbita powraca z powrotem przez materiał, a przepuszczana część pomaga uzupełnić  $E_2$ . Wewnątrz materiału występuje wiele odbić, sumujących się do całkowitego  $E_2$  i  $E_3$ , chociaż ze względu na tłumienie wewnątrz ekranu późniejsze odbicia i transmisje są znacznie zmniejszone. Wprowadzenie kolejnych warstw ekranu o innych parametrach impedancji falowej powoduje multiplikację powyższych zjawisk. Skuteczność ekranowania określa się wzorami:

$$SE = 10 \cdot \log \frac{P_1}{P_2} [\text{dB}] \quad (37)$$

Gdzie:

$SE$  - skuteczność ekranowania [dB] ,

$P_1$  - moc niesiona przez falę EM, padająca na ekran [W],

$P_2$  - moc przechodząca przez ekran [W],

Modyfikując wzór z mocy na transmisję pola otrzymujemy:

$$SE = 20 \frac{|E_1|}{|E_2|} [\text{dB}] \quad (38)$$

Gdzie:

$E_1$  - wielkość transmitowanego pola elektrycznego [V/m],

$E_2$  - wielkość transmitowanego pola elektrycznego przez ekran [V/m].

Uwzględniając poszczególne składowe skuteczności ekranowania otrzymujemy:

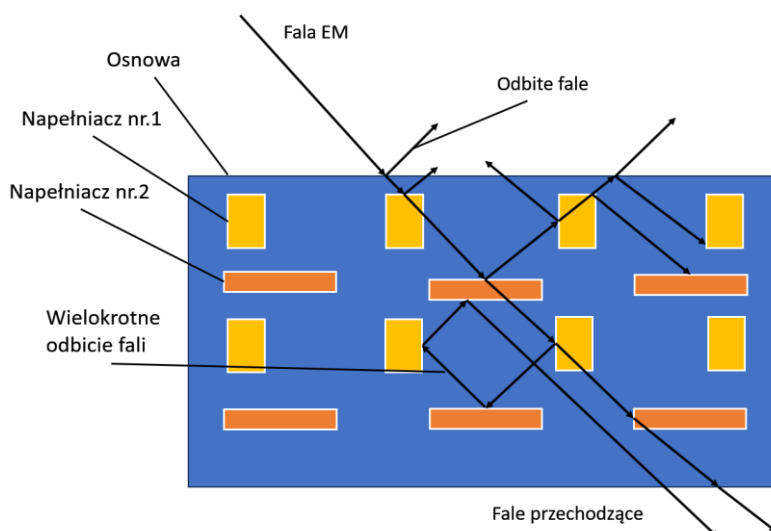
$$SE(\text{dB}) = R_{SE}(\text{dB}) + A_{SE}(\text{dB}) + M_{SE}(\text{dB}) [\text{dB}] \quad (39)$$

Gdzie:

$R_{SE}$  - tłumienie odbiciowe [dB],

$A_{SE}$  - tłumienie od absorbcji [dB],

$M_{SE}$  - tłumienie od wielokrotnego odbicia fali [dB].



Rys. 4.4. Schemat zjawiska przechodzącej fali elektromagnetycznej przez materiał niejednorodny

Na rysunku nr 4.2 przedstawiono teoretyczny schemat ekranowania fali EM w kompozycie, który składa się z dwóch napełniaczy (zaznaczone różnymi kolorami). Na rysunku zwizualizowano przechodzenie fali i wielokrotne odbicia wewnątrz. W takich kompozytach poprzez zmianę składu napełniaczy, w tym przypadku takiego ułożenia cząstek w materiale zwiększają się wielokrotne odbicia fali EM wewnątrz materiału. Poprzez dobór materiałów o różnych właściwościach elektrycznych i magnetycznych, można rozszerzyć spectrum działania danych ekranów.

Skuteczność ekranowania zależy od kilku czynników:

- Rodzaj materiału ekranu – materiały ekranujące mogą mieć właściwości przewodzące lub magnetyczne. Przewodzące materiały, takie jak miedź (Cu) czy aluminium (Al) tłumią fale elektromagnetyczne poprzez absorpcję.
- Częstotliwość fali elektromagnetycznej – skuteczność ekranowania może być różna w zależności od częstotliwości fali elektromagnetycznej. Materiały, które są wykorzystywane przy częstotliwościach radiowych, mogą nie działać równie dobrze w zakresie częstotliwości fal mikrofalowych lub promieniowaniu wysokoenergetycznym. Częstotliwość fali EM ma wpływ na głębokość wnikania pola EM.
- Grubość i geometria konstrukcji mają wpływ na jej zdolność do absorpcji fali elektromagnetycznej. Optymalna grubość może się różnić od rodzaju materiału i częstotliwości.

- Połączenia i szczeliny - wszelkie połączenia i szczeliny w konstrukcji osłony mogące tworzyć miejsca, w których fala elektromagnetyczna może się przedostawać. W związku z tym ważne jest, aby projektować ekrany niwelując efekt przenikania fali.
- Właściwości dielektryczne (przenikalność elektryczna) i magnetyczne (przenikalność magnetyczna) materiału charakterystycznego dla jego zdolności do absorpcji i odbicia fali elektromagnetycznej [132-133].

Absorpcja i odbicie fali elektromagnetycznej są fundamentalnymi zjawiskami związanymi z interakcją fal z materiałami. Zrozumienie tych procesów jest kluczowe w wielu dziedzinach, takich jak optyka, optoelektronika, komunikacja, fotowoltaika i wiele innych. Absorpcja fali elektromagnetycznej występuje, gdy energia fali jest przekazywana do materiału i zamieniana na inną formę energii zgodnie z zasadą zachowania energii np. w ciepło, światło, falę mechaniczną lub inne promieniowanie. Proces absorpcji jest związany z rezonansem i właściwościami materiału. Materiały mają różne zdolności do absorpcji energii fali elektromagnetycznej, wynika to z ich struktury atomowej, składu chemicznego i innych czynników [134]. Absorpcja fali elektromagnetycznej ma zastosowanie w wielu dziedzinach. W spektroskopii, analizuje się absorpcję fal elektromagnetycznych o różnych częstotliwościach w celu identyfikacji i charakteryzacji substancji. W fotowoltaice proces absorpcji światła w materiałach półprzewodnikowych prowadzi do generowania ładunku i wytwarzania energii elektrycznej [132]. Absorpcja fali elektromagnetycznej jest również wykorzystywana w technologiach ogrzewania indukcyjnego, absorberach mikrofalowych oraz wielu innych. Absorbencję fali elektromagnetycznej można związać z grubością materiału i zastępczą głębokością wnikania pola EM:

$$A_{SE}(dB) = 20 \cdot \log \log e^{\frac{d}{\delta}} \quad [dB] \quad (40)$$

Gdzie:

$A_{SE}$  - absorbcja [dB],

$D$  - grubość [mm],

$\delta$  - głębokość wnikania [mm].

Odbicie fali elektromagnetycznej jest związane z odbiciem fali przez powierzchnię materiału. Odbicie może mieć różne charakterystyki, w zależności od właściwości materiału i struktury powierzchni. Odbicie regularne (zwierciadlane)

występuje, gdy fala elektromagnetyczna odbija się zgodnie z prawem odbicia, a kąt padania jest równy kątowi odbicia. Zjawisko to jest powszechnie obserwowane na gładkich i jednorodnych powierzchniach, takich jak lustro. Odbicia nieregularne (rozproszone) występują, gdy fala zostaje rozproszona w różnych kierunkach z powodu nieregularności powierzchni lub różnych właściwości materiału. W praktyce inżynierskiej kontrolowanie absorpcji i odbicia fali elektromagnetycznej wykorzystywane jest w projektowaniu anten i urządzeń optycznych. Kontrola absorpcji i odbicia może być wykorzystywana do określenia efektywności i wydajności układów. W materiałach odbłaskowych i powierzchniach o niskiej absorpcji fali minimalizacja odbicia jest ważna dla minimalizacji odbłasków i zwiększenia skuteczności w zastosowaniach takich jak oświetlenie czy obserwacje astronomiczne. W panelach fotowoltaicznych kontrola absorpcji światła jest najważniejszą własnością dla zmaksymalizowania generowania energii elektrycznej [133]. Badania naukowe i inżynierskie dotyczące absorpcji i odbicia fali elektromagnetycznej są prowadzone w celach rozwoju technologii o zaawansowanych materiałach i ich strukturach. Symulacje numeryczne, eksperymenty laboratoryjne i analiza teoretyczna są wykorzystywane do badania i modelowania absorpcji i odbicia w różnych materiałach i konfiguracjach. Współczesne techniki, takie jak nanomateriały, metamateriały i struktury fotoniki, pozwalają na badania absorpcji i odbicia fali elektromagnetycznej na poziomie mikro- i nanoskalowym, otwierając nowe możliwości w zakresie zastosowań w technologii. Odbicie fali elektromagnetycznej wyraża się wzorem:

$$R_{SE}(dB) = 20 \log \log \left( 1 + \frac{Z_0 \sqrt{\frac{\sigma_p}{f\mu}}}{10} \right) [dB] \quad (41)$$

gdzie:

$Z_0$  - impedancja falowa [ $\Omega$ ].

$\sigma_p$  - przewodność elektryczna materiału ekranującego [F/m],

Impedancję falową w wolnej przestrzeni została opracowana w [112] i wynika z rozwiązania fali płaskiej równań Maxwella:

$$Z_0 = \frac{|E|}{|H|} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \cong 377 \text{ } [\Omega] \quad (42)$$

gdzie  $E$  i  $H$  są wielkościami składowych pola elektrycznego i magnetycznego. Są one względem siebie prostopadłe i normalne do kierunku rozchodzenia się fali. Amplitudy dwóch fal (elektrycznej i magnetycznej) są ze sobą powiązane poprzez wewnętrzną impedancję wolnej przestrzeni, która przyjmuje tutaj wartość  $377 \text{ } \Omega$ .

Wielokrotne odbicie fali wyrażono wzorem:

$$M_{SE}(dB) = 20 \log \log \left( \frac{1 + \frac{Z_0 \sigma d}{2}}{1 + \frac{Z_0 \sqrt{f \mu}}{10}} \right) \text{ [dB]} \quad (43)$$

Zastępcza głębokość wnikania pola [103] jest ważnym parametrem fizycznym, który opisuje jak głęboko pole elektromagnetyczne może przenikać w danym materiale. Oznaczana jest symbolem  $\delta$ . Głębokość wnikania określa odległość, na której amplituda pola elektromagnetycznego maleje o  $1/e$ , jest to około 37% w stosunku do wartości na powierzchni materiału. Wartość głębokości wnikania zależy od właściwości elektrycznych i magnetycznych materiału oraz od częstotliwości pola elektromagnetycznego. Głębokość wnikania jest istotna w wielu dziedzinach, takich jak projektowanie anten, technologia indukcyjnego ogrzewania, badania materiałów, czy projektowanie osłon elektromagnetycznych. Potraktowanie tej wielkości jako wskaźnika pozwala na optymalne dostosowanie konstrukcji do wymagań pola elektromagnetycznego. W praktyce, głębokość wnikania może być obliczana na podstawie równań Maxwella i właściwości materiałów. Istnieją również tabele i narzędzia dostępne w literaturze [95] [135][3]. Głębokość wnikania wyrażona jest wzorem:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma_p \mu}} \text{ [dB]} \quad (44)$$

gdzie:

$\delta$  - głębokość wnikania [dB],

$\mu$  - przenikalność magnetyczna materiału ekranującego [H/m],

$\omega$  - częstość kołowa fali elektromagnetycznej [rad/s].



W przypadku materiałów dielektrycznych, takich jak tworzywa sztuczne, ceramika czy drewno, głębokość wnikania jest większa niż w przypadku metali. Materiały dielektryczne charakteryzują się zwykle niższą przewodnością elektryczną i przenikalnością magnetyczną, co pozwala falom elektromagnetycznym przenikać na większą odległość [136]. Różnice w głębokości wnikania dla różnych materiałów są szczególnie istotne przy projektowaniu osłon elektromagnetycznych. Często stosuje się laminowane struktury, w których kombinacja warstw metalowych i dielektrycznych zapewnia efektywne ekranowanie na różnych głębokościach. Wpływ takich struktur na głębokość wnikania został szeroko opisany w literaturze naukowej. W książce Saleh, B. E., & Teich, M. C. [137] są napisane rozdziały poświęcone propagacji fal elektromagnetycznych w różnych mediach i omawia się w niej wpływ struktury materiałów na głębokość wnikania. Dodatkowo, warto wspomnieć o zastosowaniu technik numerycznych, takich jak metoda elementów skończonych (MES) w badaniu głębokości wnikania. Dzięki nim można dokładnie modelować i symulować przenikanie fal elektromagnetycznych w różnych materiałach. Przykładowo, prace naukowe prowadzone przez Chen et al. [138] prezentują numeryczne analizy głębokości wnikania w celu optymalizacji osłon elektromagnetycznych. Właściwości dotyczące głębokości wnikania mają również duże znaczenie w medycynie, szczególnie w zastosowaniach terapeutycznych związanych z promieniowaniem elektromagnetycznym, takimi jak terapia głębokościowa z zastosowaniem mikrofal czy terapia oparta na laserochirurgii. W tych dziedzinach badań prowadzonych jest wiele eksperymentów i symulacji numerycznych, które uwzględniają głębokość wnikania fal elektromagnetycznych w tkankach biologicznych [133]. Głębokość wnikania stanowi ważny aspekt związany z ekranowaniem pola elektromagnetycznego. W zależności od materiału i częstotliwości fali, może się znacząco różnić, co ma zasadnicze znaczenie w projektowaniu osłon i ocenie skuteczności ekranowania. Dalsze badania i rozwój technologii w tej dziedzinie przyczynią się do lepszego zrozumienia i wykorzystania głębokości wnikania w różnych aplikacjach. Ostatecznie wzór (34) można przedstawić jako sumę poszczególnych składowych [139-140].

- absorpcję fali wyrażono wzorem:

$$A_{SE} = 8.66 \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\delta_i} \text{ [dB]} \quad (45)$$

- odbicie fali wyrażono wzorem:

$$R_{SE} = 20 \log \left( 1 + \frac{Z_0}{2^{n+\frac{2}{3}}} \sum_{i=1}^n \sigma_i \delta_i \right) \text{ [dB]} \quad (46)$$

- wielokrotne odbicie wyrażono wzorem:

$$M_{SE} = 20 \log \left( \frac{1 + \frac{Z_0}{2} \sum_{i=1}^n \sigma_i d_i}{1 + \frac{Z_0}{2^{n+\frac{2}{3}}} \sum_{i=1}^n \sigma_i \delta_i} \right) \text{ [dB]} \quad (47)$$

gdzie  $n$  jest liczbą warstw kompozytu,

Powyższe równania zostały wykorzystane do analizy symulacyjnej skuteczności ekranowania opracowywanych kompozytów.

## 5. Technologie wytwarzania kompozytów

Wytwarzanie kompozytów to proces, w którym różne materiały są połączone w celu uzyskania nowych właściwości i zastosowań. Istnieje kilka głównych technologii stosowanych do produkcji kompozytów takie jak wtryskiwanie, wytłaczanie, laminowanie i prasowanie. Poniżej przedstawiono informacje na temat tych technologii oraz ich znaczenia w produkcji kompozytów:

- Wtryskiwanie (injection molding) jest jedną z najpopularniejszych technologii wytwarzania kompozytów. Proces wtryskiwania jest procesem cyklicznym polegającym na uplastycznieniu materiału polimerowego w postaci najczęściej granulatu przez układ uplastyczniający i wtrysnięciu go do formy. Granulat polimerowy może być wzbogacony dodatkami takimi jak włókna szklane, węglowe lub aramidowe, które poprawiają wytrzymałość i sztywność kompozytu. Wtryskiwanie umożliwia produkcję złożonych kształtów i detali o precyzyjnych wymiarach [141].
- Wytłaczanie (extrusion) jest powszechnie stosowaną technologią wytwarzania kompozytów. Proces ten jest procesem ciągłym i polega na uplastycznieniu materiału polimerowego w układzie uplastyczniającym i wytłoczeniu przez głowicę w kształcie profili, rur, folii lub innych elementów o stałym przekroju poprzecznym. Wytłaczanie może być stosowane do produkcji kompozytów z dodatkami włókien lub proszków i poprawiającym właściwości mechaniczne i termiczne materiału [142].
- Laminowanie (laminating) jest procesem, w którym warstwy różnych materiałów, takich jak tkaniny, włókna lub folie, są połączone za pomocą żywicy lub kleju. Proces ten może być wykorzystywany do produkcji kompozytów z włóknami szklanymi, węglowymi, aramidowymi lub innymi włóknami. Laminowanie umożliwia uzyskanie kompozytów o wysokiej wytrzymałości, odporności na ścieranie i odporności chemicznej. [143].
- Prasowanie (pressing) jest technologią, która polega na uformowaniu kompozytu przez zastosowanie wysokiego ciśnienia i temperatury. Proces ten może być stosowany do produkcji kompozytów z włóknami, takimi jak włókna węglowe lub aramidowe. Prasowanie umożliwia uzyskanie kompozytów o wysokiej zawartości procentowej napelnacza. [144].

## 5.1. Wytwarzane kompozyty technologiami prasowania

Technologia prasowania kompozytów, znana jest również jako technologia laminowania na gorąco. Proces prasowania jest procesem, w którym, warstwy kompozytowe są poddawane wysokiemu ciśnieniu i temperaturze w celu uzyskania jednolitej struktury. W technologii prasowania kompozytów, najczęściej stosowane są kompozyty termoutwardzalne, składające się z osnowy polimeru termoutwardzalnego i włókien napelniaczy takich jak włókna szklane, węglowe lub aramidowe [145]. Proces prasowania kompozytów składa się z kilku etapów, takich jak przygotowanie materiałów, układanie warstw, prasowanie i utwardzanie. Pierwszym krokiem w procesie prasowania kompozytów jest przygotowanie materiałów. Warstwy kompozytowe, składające się z osnowy termoutwardzalnej i włókien napelniaczy są cięte na odpowiednią długość i przygotowywane do ułożenia. Mogą być stosowane różne układy włókien w zależności od wymagań projektowych [146]. Następnie warstwy kompozytowe układane są w odpowiedniej kolejności w formie. Warstwy mogą być wcześniej nasączone żywicą termoutwardzalną lub żywica może być przesączana w miejscu układania warstw [147]. Ważne jest, aby warstwy były równo rozłożone i pozbawione pęcherzyków powietrza, co zapewnia jednolite połączenie między warstwami. Po ułożeniu warstw, forma z ułożonymi warstwami kompozytowymi jest umieszczana w prasie. Wywiera ona wysokie ciśnienie na warstwy kompozytowe jednocześnie podgrzewając je do odpowiedniej temperatury. Wysokie ciśnienie i temperatura powodują stopniowe usieciowanie osnowy termoutwardzalnej [148]. Czas prasowania różni się w zależności od rodzaju użytej osnowy termoutwardzalnej i grubości kompozytu. Po zakończeniu prasowania, kompozyt jest pozostawiany do schłodzenia i utwardzenia. Technologia prasowania kompozytów szeroko stosowana jest w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym, sportowym i wielu innych branżach, gdzie wymagane są komponenty o wytrzymałości stali, ale dużo lżejsze. Zapewnia ona doskonałą jakość wykończenia, jednorodność struktury oraz możliwość produkcji elementów o złożonych kształtach. Metody prasowania kompozytów są szeroko stosowane w przemyśle do produkcji różnorodnych wyrobów o zadanych kształtach i właściwościach. Poniżej przedstawiono kilka popularnych metod prasowania kompozytów:

- Metoda prasowania w formie – polega na umieszczeniu w niej materiału kompozytowego o odpowiednim kształcie, a następnie zastosowaniu odpowiedniego ciśnienia

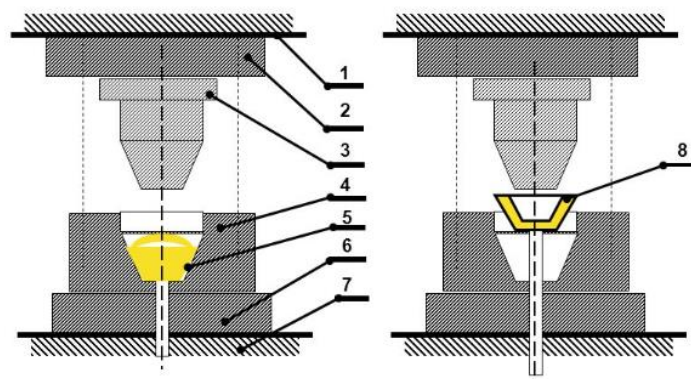
i temperatury w celu uformowania kompozytu. Proces ten może być realizowany przy użyciu pras hydraulicznych, pras mechanicznych lub pras próżniowych [149].

- Metoda prasowania na gorąco – polega na podgrzaniu kompozytu do odpowiedniej temperatury i zastosowaniu ciśnienia w celu formowania. Wysoka temperatura uplatycznia osnowę lub aktywuje żywicę, co ułatwia formowanie kompozytu. Ta metoda jest szczególnie skuteczna przy produkcji kompozytów termoplastycznych [150].
- Metoda prasowania w formie zamkniętej polega na umieszczeniu kompozytu pomiędzy dwiema formami i zastosowaniu ciśnienia w celu formowania. Formy są zazwyczaj wykonane z metalu i mają odpowiednio wyprofilowane wnętrza, aby nadać kompozytowi pożądany kształt. Ta metoda jest często stosowana do produkcji elementów o złożonych kształtach [68].

### **5.1.1. Wytwarzanie kompozytów technologią prasowania tłoczego**

Technologia prasowania tłoczego kompozytów, znana również jako technologia tłoczenia na gorąco, jest jedną z metod wytwarzania kompozytów. Materiały w postaci proszków lub granulatów wykorzystywane są w procesie technologicznym. W procesie tym wysokie ciśnienie jest przez wywierane przez prasę na materiał i zewnętrznie dostarczana jest odpowiednią temperaturę. W celu uzyskania pożądanego kształtu osnowę polimerową doprowadza się do mięknienia zestalając kompozyt. Na rysunku 5.1- przedstawiono informacje na temat technologii prasowania tłoczego kompozytów, aby zrozumieć bardziej szczegółowo ten proces produkcyjny pokazano schemat i zasadę działania maszyny i narzędzia. W technologii tej, najczęściej stosowane są jako osnowa tworzywa termoplastyczne i termoutwardzalne oraz napełniacze w postaci włókien takich jak włókna szklane, węglowe lub aramidowe [151]. Proces prasowania tłoczego kompozytów obejmuje kilka kroków tj. przygotowanie materiałów, podgrzewanie, formowanie i chłodzenie. Pierwszym krokiem w procesie prasowania tłoczego kompozytów jest przygotowanie materiałów. Granulaty kompozytowe, składające się z matrycy termoplastycznej i włókien napełniacza, są odpowiednio dobrane i zhomogenizowane, aby uzyskać jednorodny materiał [147]. Ważne jest, aby składniki były równomiernie rozłożone w materiale kompozytowym. Wpływa to na jakość i wytrzymałość finalnego wyrobu. W następnym etapie przygotowany materiał kompozytowy podgrzewany jest do odpowiedniej temperatury, która umożliwia

uplastycznienie osnowy termoplastycznej. Podgrzewanie może odbywać przy pomocy grzałek elektrycznych lub indukcyjnych, w zależności od wymagań procesu technologicznego [148]. Ważne jest, aby utrzymywać temperaturę pozwalającą na uzyskanie odpowiedniej plastyczności i nie doprowadzić materiału do degradacji termicznej. Po osiągnięciu odpowiedniej temperatury materiał kompozytowy umieszczany jest w formie, na którą wywierane jest wysokie ciśnienie. Siła nacisku generowana jest przez tłok, który wpycha materiał do wnętrza formy. Narzędzie jest odpowiednio ukształtowane, aby nadać kompozytowi pożądany kształt [146]. Wysokie ciśnienie zapewnia równomierne rozłożenie materiału w formie oraz eliminuje puste przestrzenie i pęcherzyki powietrza. Po formowaniu, kompozyt jest chłodzony. Schłodzenie formy może odbywać przy pomocy wody lub innych środków chłodzących. Kontrolowanie procesu chłodzenia jest istotne dla uzyskania optymalnej jakości i wytrzymałości kompozytu [152].

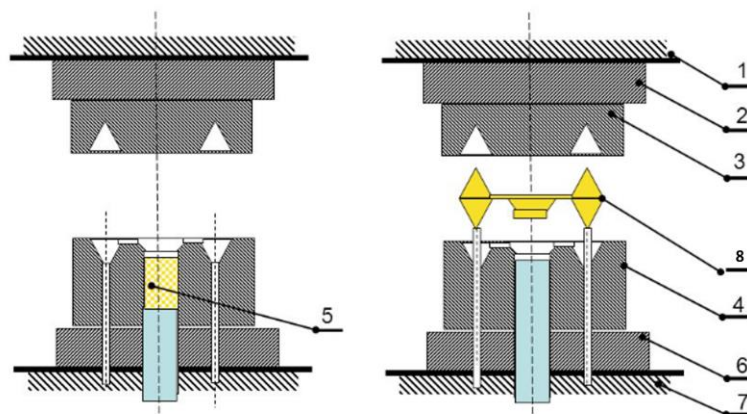


Rys. 5.1. Schemat prasowania z formą do prasowania tłoczno-matrycowego [153] 1 - stół ruchomy, 2 - płyta mocująca formę do stołu ruchomego, 3 - stempel, 4 - matryca, 5 - zasypane tworzywo, 6 - płyta mocująca stała, 7 - stół stały, 8 - wypraska

## 5.1.2. Wytwarzanie kompozytów technologią prasowania przedtłoczno-matrycowego

Technologia prasowania przedtłoczno-matrycowego kompozytów, znana jest również pod nazwą technologia preformowania kompozytów. Jest to proces wytwarzania kompozytów, w którym materiał kompozytowy jest poddawany działaniu wysokiego ciśnienia i temperatury przed głównym procesem formowania. Na rysunku 5.2. przedstawiono informacje na temat technologii prasowania przedtłoczno-matrycowego kompozytów i schemat maszyny i narzędzia.

W technologii prasowania przetłocznego kompozytów, najczęściej stosowane są kompozyty termoplastyczne i termoutwardzalne. Zbudowane są one z matrycy termoplastycznej lub termoutwardzalnej napelnianej włóknami, takimi jak włókna szklane, węglowe lub aramidowe [146]. Proces prasowania przetłocznego przebiega w kilku etapach, takich jak przygotowanie materiałów, formowanie przed tłoczne i główne oraz chłodzenie. Pierwszym etapem w procesie prasowania przetłocznego kompozytów jest przygotowanie materiałów. Osnowa i włókna są odpowiednio dobrane i przygotowane [148]. W następnym etapie materiał kompozytowy jest formowany przetłocznie, czyli jest poddawany działaniu wysokiego ciśnienia i temperatury, aby uzyskać preformę o odpowiednim kształcie i właściwościach. Preforma jest częściowo uformowana i może mieć uproszczony kształt w porównaniu do ostatecznego produktu. Ten etap pozwala na rozłożenie włókien i wstępne ukształtowanie materiału [154]. Po formowaniu przetłocznym, preforma jest poddawana głównemu procesowi formowania, w którym uzyskuje ona ostateczny kształt i właściwości. Etap kolejny obejmuje dalsze formowanie, wytłaczanie lub inne procesy, w zależności od zastosowania i projektu [148]. Główne formowanie może być przeprowadzane przy pomocy prasy hydraulicznej, wtryskarki lub innej maszyny. Po formowaniu głównym, kompozyt jest chłodzony, aby utrwalić jego kształt i właściwości. Chłodzenie może odbywać się przy użyciu wody lub innych środków chłodzących [152].



Rys. 5.2. Schemat prasy z formą do prasowania tłocznego [153] 1 - stół ruchomy, 2 - płyta mocująca formę do stołu ruchomego, 3 - stempel, 4 - matryca, 5 - zasypane tworzywo, 6 - płyta mocująca stała, 7 - stół stały, 8 - wypraska

## 6. Materiały i surowce

Materiały polimerowe są szeroko wykorzystywane do wytwarzania kompozytów ze względu na swoje korzystne właściwości, takie jak lekkość, wytrzymałość, elastyczność i odporność na korozję. Istnieje wiele różnych materiałów polimerowych używanych do produkcji kompozytów. Stosowane są także różne materiały do ekranowania pola elektromagnetycznego. W obecnych czasach badacze i inżynierowie eksplorują materiały i surowce pod kątem ich możliwości do ekranowania pola elektromagnetycznego. Celem tych badań jest opracowanie nowych materiałów do wytwarzania ekranów, które mogą być zawarte w wielu elementach wyposażenia, od elektroniki po medycynę. Zaawansowane informacje mogą dotyczyć wydajności i wszechstronności ekranowania w różnych zastosowaniach technicznych [155-157].

### 6.1. Materiały polimerowe wykorzystywane do wytwarzania kompozytów

#### - Termoplasty

Materiały termoplastyczne są szeroko wykorzystywane do produkcji kompozytów ze względu na swoje korzystne właściwości, takie jak elastyczność, łatwość przetwarzania:

- Polipropylen (PP) jest popularnym materiałem termoplastycznym stosowanym do produkcji kompozytów. Posiada on dobrą odporność na działanie środków chemicznych, wysoką sztywność, niską gęstość i odporność na działanie promieniowania UV. Kompozyty z polipropylenem są wykorzystywane w różnych branżach, takich jak motoryzacja, budownictwo i przemysł spożywczy – do opakowań [159].

- *Polietylen (PE)* jest powszechnie stosowanym materiałem termoplastycznym do produkcji kompozytów. Cechuje się wysoką wytrzymałością, elastycznością i odpornością na korozję i odpornością na środki chemiczne. Kompozyty z polietylenu znajdują zastosowanie w przemyśle meblowym, a także w wytwarzaniu rur i kabli oraz różnych opakowań [160].

- *Poliwęglan (PC)* jest materiałem termoplastycznym o wysokiej wytrzymałości, przejrzystości i odporności na uderzenia. Kompozyty z poliwęglanem są stosowane do produkcji osłon ochronnych, elementów optycznych oraz w przemyśle elektronicznym i motoryzacyjnym [161].



- Poliamid (PA): znany również jako nylon, jest materiałem termoplastycznym charakteryzującym się wysoką wytrzymałością mechaniczną, odpornością na ścieranie i właściwościami termicznymi. Kompozyty z poliamidem znajdują zastosowanie do produkcji przewodów, obudów maszyn, elementów samochodowych i sportowych.
- *Polieteroeteroketon (PEEK)* jest materiałem termoplastycznym o wyjątkowych właściwościach termicznych, chemicznych i mechanicznych. Odporny jest także na działanie środków chemicznych i wysoką temperaturę oraz zużycie mechaniczne. Kompozyty z PEEK są wykorzystywane w przemyśle lotniczym, medycznym, motoryzacyjnym i naftowym [162].

- Elastomery.

Materiały elastomerowe wykorzystywane są do produkcji kompozytów ze względu na swoje unikalne właściwości tj. elastyczność, odporność na odkształcenia i doskonałą redukcję drgań:

- *Kauczuk naturalny (NR)*: jest jednym z najstarszych i najbardziej popularnych materiałów elastomerowych stosowanych do produkcji kompozytów. Posiada on wysoką odporność na ścieranie i dobrą wytrzymałość na rozciąganie. Kompozyty z kauczukiem naturalnym znajdują zastosowanie w przemyśle motoryzacyjnym, budownictwie, przemyśle obuwniczym [163].
- *Kauczuki syntetyczne* - jest wiele rodzajów kauczuków syntetycznych takich jak *kauczuk butadienowo-styrenowy (SBR)*, *kauczuk nitrilowy (NBR)* i *kauczuk etylenowo-propylenowy-dienowy (EPDM)*. Kauczuki syntetyczne charakteryzują się różnymi właściwościami, takimi jak odporność na oleje i smary, wysoką temperaturę oraz posiadają doskonałą elastyczność. Kompozyty z kauczukiem syntetycznym są stosowane w przemyśle motoryzacyjnym, budowlanym, medycznym [164].
- *Elastomery termoplastyczne (TPE)* to grupa materiałów łączących właściwości elastomerów i termoplastów. W temperaturze pokojowej są elastyczne. Materiały te przetwarzane są jak termoplasty. Elastomery termoplastyczne, takie jak *elastomery styrenowo-butadienowe (SBS)* i *termoplastyczne elastomery olefinowe (TPO)*, znajdują zastosowanie do produkcji kompozytów o dużej elastyczności i odporności na rozciąganie [165].

- *Kauczuki fluorowane (FKM)* takie jak fluorokauczuk (FKM) lub Viton, są znane ze swojej doskonałej odporności na działanie olejów, rozpuszczalników i wysokich temperatur. Kompozyty z kauczukami fluorowanymi są wykorzystywane w przemyśle chemicznym, naftowym, lotniczym [166].
- *Materiały proszkowe i włókniste.* - materiały proszkowe są szeroko stosowane do produkcji kompozytów, umożliwiające uzyskanie różnorodnych właściwości mechanicznych, termicznych i chemicznych.
- Włókna węglowe są popularnymi materiałami wykorzystywanymi do produkcji kompozytów o wysokiej wytrzymałości i sztywności. Składają się one z cienkich włókien węglowych o średnicy kilku mikrometrów. Włókna węglowe są stosowane w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym [167].
- Włókna szklane są powszechnie stosowane do produkcji kompozytów. Składają się z cienkich włókien szklanych o średnicy kilku mikrometrów. Włókna szklane stosuje się do wytwarzania laminatów termoutwardzalnych i chemoutwardzalnych, takich jak laminaty poliestrowo-szklane, w przemyśle motoryzacyjnym, budowlanym [168].
- Włókna ceramiczne takie jak włókna krzemionkowe, węglkowe czy tlenkowe, są wykorzystywane do produkcji kompozytów o wysokiej odporności na temperaturę i korozję. Wykorzystywane są w przemyśle lotniczym, kosmicznym, energetyce jądrowej [169].
- Proszki metalowe np. proszki aluminiowe, miedziane i ze stali nierdzewnej, są wykorzystywane do produkcji kompozytów. Mieszane są one z innymi materiałami proszkowymi, żywicami oraz termoplastami. Poddawane są różnym procesom przemysłowym np. prasowanie, wytłaczanie lub wtryskiwanie [170].
- Proszki ceramiki technicznej takie jak tlenek glinu, tlenek cyrkonu czy węgiel krzemu, są stosowane jako materiały proszkowe do produkcji kompozytów ceramiki technicznej. Posiadają one wysoką twardość, odporność na temperaturę i korozję. Kompozyty z ceramiki technicznej są używane w przemyśle chemicznym, obróbce metali, elektronice i innych [171].

## 6.2. Materiały wykorzystywane w ekranowaniu pola elektromagnetycznego

W metalowych ekranach wykorzystuje się materiały, takie jak stal, miedź, aluminium i cynk, są powszechnie stosowane do ekranowania pola elektromagnetycznego. Materiały te stosuje się w formie siatek, folii, blach lub elementów o odpowiedniej geometrii [172] np.

- Miedź (Cu) jest jednym z najczęściej stosowanych materiałów do ekranowania pola elektromagnetycznego, jako dobry przewodnik elektryczny, który efektywnie przewodzi prąd elektryczny i skutecznie odprowadza energię elektromagnetyczną. Miedź jest stosowana w postaci cienkich folii, siatek, warstw lub drutów w różnych zastosowaniach ekranujących pole elektromagnetyczne, takich jak obudowy elektroniczne, kable ekranowane i płytki drukowane [173].
- Aluminium (Al) jest kolejnym popularnym metalowym materiałem stosowanym do ekranowania pola elektromagnetycznego. Wykorzystuje się jego właściwości takie jak niska masa i dobra przewodność elektryczna. Aluminium jest stosowane w postaci folii, warstw lub powłok w wielu wyrobach np. w obudowach elektronicznych, pokrywach kabli, a także w przemysłowych ekranach elektromagnetycznych [174].
- Stal nierdzewna jest materiałem, który łączy właściwości mechaniczne i przewodzące. Posiada ona dobrą odporność na korozję oraz wystarczającą przewodność elektryczną do efektywnego ekranowania pola elektromagnetycznego. Stal nierdzewna jest szeroko stosowana w przemyśle telekomunikacyjnym, elektromedycznym i energetycznym, w postaci obudów, osłon, płyt czy siatek [175].
- Złoto (Au) jest doskonałym przewodnikiem, charakteryzującym się również odpornością na korozję. Wykorzystywane w jest branży elektroniki, szczególnie w produkcji elementów o wysokim priorytecie przewodzenia, takich jak złącza i przewody [176].
- Srebro (Ag) jest materiałem o bardzo wysokiej przewodności elektrycznej i ma doskonałe właściwości ekranowania do pola elektromagnetycznego. Najczęściej stosowane jest w postaci cienkich warstw lub nanoszenia powłoki na różnych podłożach, takich jak tworzywa sztuczne, metale, ceramikę. Srebro jest często wykorzystywane w środowisku wysokich częstotliwości, takich jak anteny, układy mikrofalowe i komponenty elektroniczne [177].

- Mosiądz (Cu-Zn) to stop miedzi i cynku. Wykorzystywany jest on do ekranowania pola elektromagnetycznego ze względu na swoją dobrą przewodność elektryczną i wytrzymałość mechaniczną. Może być stosowany w postaci folii, siatek, drutów lub płyt w różnych elementach, takich jak obudowy elektroniki, systemy kablowe czy elementy konstrukcyjne [178].
- Materiały kompozytowe, takie jak kompozyty metalowo-polimerowe, składające się z metalu (np. miedź) i osnowy polimerowej używane są do ekranowania pola elektromagnetycznego [179]. Mogą także występować w formie folii, laminatów, powłok lub elementów o specjalnej strukturze. Materiały kompozytowe zawierają kombinację właściwości metalu i polimeru, takich jak dobre przewodnictwo elektryczne oraz elastyczność.
- Polimery przewodzące, takie jak polipirrol, polianilina i polietylenoindol, są stosowane jako materiały ekranujące pola elektromagnetyczne [180]. Stosowane są one w formie folii, powłok lub elementów o specjalnej strukturze. Polimery przewodzące mają zdolność do przewodzenia elektrycznego oraz absorbują część energii fal elektromagnetycznych.
- Włókna węglowe (CF) wykonane są z węgla w postaci bardzo cienkich włókien o wysokiej przewodności elektrycznej są stosowane w postaci tkanin, mat, folii lub kompozytów. Używane są także w konstrukcjach ekranów elektromagnetycznych o wysokiej skuteczności [173].
- Nanorurki węglowe mają zdolność do absorpcji fali elektromagnetycznej, co czyni je skutecznymi materiałami do ekranowania. Kompozyty z nanorurkami węglowymi i polimerami są stosowane ze względu na ich lekkość i wydajność w EM [181]. Te kompozyty są lekkie, co sprawia, że są idealne do zastosowań w branży lotniczej, a także w ochronie elektroniki przed interferencją elektromagnetyczną [182].
- Włókna grafitowe podobne są do włókien węglowych, posiadają nieco mniejszą przewodność elektryczną i są stosowane do ekranowania pola elektromagnetycznego, szczególnie tam, gdzie wymagana jest potrzeba dobrego przewodnictwa elektrycznego oraz niskiej masy materiału. Włókna grafitowe są używane w postaci tkanin, mat lub kompozytów [183].
- Włókna metalowo-nylonowe są rodzajem włókien przewodzących, w których cienkie druty metalowe są powleczone nylonową powłoką. Kombinacja ta zapewnia zarówno

przewodność elektryczną oraz elastyczność materiału. Włókna metalowo-nylonowe są stosowane w produkcji odzieży ochronnej, w szczególności do ekranowania pola elektromagnetycznego generowanego przez pola radiowe i mikrofalowe [184].

- Włókna srebrne wykonane są z drobnych nitek srebra. Srebro ma bardzo wysoką przewodność elektryczną, co czyni je skutecznym w ekranowaniu EM. Włókna srebrne są stosowane do produkcji tkanin ekranujących, odzieży ochronnej i innych produktów, które mają zapewniać ochronę przed polami elektromagnetycznymi. [185].
- Materiały nadprzewodzące utrzymują zerowy opór elektryczny w określonych warunkach temperatury i ciśnienia. Stosowane w produkcji magnesów superprzewodzących, cewek magnetycznych i w zaawansowanych zastosowaniach elektromagnetycznych [186].
- Materiały ferromagnetyczne charakteryzują się zdolnością do absorbowania i rozpraszania fali EM dzięki magnetyzacji w obecności pola elektromagnetycznego. [187].
- Ferroperowskity to grupa ferromagnetycznych materiałów ceramicznych, charakteryzujących się wysoką przenikalnością magnetyczną w pewnym zakresie temperatury. Stosowane są w produkcji transformatorów, cewek indukcyjnych i elementów magnetycznych w urządzeniach elektronicznych [188].
- Ferrytyczne stopy metaliczne zawierające ferryt, posiadają wysoką przenikalność magnetyczną. Wykorzystywane są one w rdzeniach transformatorów, filtrach elektromagnetycznych i magnetycznych elementach przenośników energii [189].
- Miękka stal, zwana też stalą elektrotechniczną, jest stopem żelaza z dodatkiem krzemu, co zapewnia jej doskonałe właściwości magnetyczne. Wykorzystywana jest ona w rdzeniach transformatorów, silnikach elektrycznych, cewkach i innych urządzeniach elektromagnetycznych [190].
- Nanokrystaliczne materiały ferromagnetyczne charakteryzują się małymi rozmiarami krystalitów, co wpływa na ich unikalne właściwości magnetyczne. Stosowane są one w nowoczesnych technologiach pamięci magnetycznej, sensorach i urządzeniach mikroelektronicznych [191].
- Ferrytyczne elastomery magnetyczne są materiałami polimerowymi nasyconymi ferrytem, co sprawia, że posiadają elastyczność oraz zdolność do absorpcji fal elektromagnetycznych.

Stosowane są one w produkcji elastycznych osłon elektromagnetycznych w elektronice i telekomunikacji [192].

- Niektóre materiały ceramiczne, takie jak tlenki metali (np. tlenek cynku, tlenek żelaza) i węgliki, mogą być stosowane w ekranowaniu pola elektromagnetycznego [193]. występują w formie proszków, past, płyt lub powłok. Materiały ceramiczne mają zdolność do absorpcji i tłumienia fal elektromagnetycznych. Ferroelektryki i ferromagnetyki z dodatkami, są stosowane do efektywnego ekranowania EM w niektórych częstotliwościach. Bariumtitanian ( $\text{BaTiO}_3$ ) to przykład ceramicznego materiału ekranującego EM [41]. Ceramiki zawierające cząstki przewodzące, takie jak tlenki żelaza, mogą być używane do ekranowania pól elektromagnetycznych. Te materiały są często stosowane w wyższych częstotliwościach jako osłony w mikrofalowych urządzeniach komunikacyjnych, elementy strukturalne w ochronie przed falami elektromagnetycznymi.
- Ceramiki ferroelektryczne, takie jak bariumtitanian ( $\text{BaTiO}_3$ ), posiadają zdolność zmiany swojej dielektryczności w odpowiedzi na pole elektromagnetyczne. Wykorzystywane są w produkcji kondensatorów i elementów o zmiennej pojemności w urządzeniach elektronicznych, a także w ekranowaniu elektromagnetycznym [181].
- Kompozyty ceramiczne z nanomateriałami, takimi jak nanorurki węglowe, mają zdolność do efektywnego absorbowania i rozpraszania fal elektromagnetycznych. Stosowane są w produkcji osłon elektromagnetycznych w elektronice, telekomunikacji i przemyśle [194].
- Warstwy ceramiczne, często zawierające ferromagnetyki lub ferroelektryki, są stosowane do odbijania i absorbowania fal elektromagnetycznych. Wykorzystywane są w produkcji obudów elektronicznych, urządzeń medycznych i systemów komunikacji do zabezpieczania przed interferencją elektromagnetyczną [181].
- Ceramiczne powłoki antyrefleksyjne z domieszkami:
  - Ceramiczne powłoki antyrefleksyjne z dodatkami, takimi jak tlenki metali, posiadają zdolność do absorpcji i rozpraszania fal elektromagnetycznych. Stosowane są w optyce, na przykład w produkcji soczewek, aby zmniejszyć odbłaski i poprawić jakość obrazu [195].
  - Kompozyty ceramiczne z dodatkiem włókien przewodzących, takich jak włókna węglowe, łączą właściwości ceramiczne z przewodzącymi właściwościami tych włókien.

Wykorzystywane są w produkcji osłon elektromagnetycznych, w których potrzebna jest zarówno wytrzymałość mechaniczna, jak i skuteczność ekranowania EM [196].

Nowoczesne materiały do ekranowania EM odgrywają kluczową rolę w utrzymaniu integralności sygnałów elektronicznych oraz zabezpieczeniu urządzeń przed interferencją elektromagnetyczną, co jest szczególnie istotne w dzisiejszym środowisku zdominowanym przez technologie.

### **6.3. Kompozyty wykorzystywane do ekranowania pola elektromagnetycznego**

Najczęściej wykorzystywane kompozyty w ekranowaniu pola elektromagnetycznego:

- Kompozyty z domieszką grafenu. Grafen jest to jednowarstwowy materiał złożony z atomów węgla posiadający bardzo wysoką przewodność elektryczną. Dodanie grafenu do osnowy kompozytowej może znacznie zwiększyć właściwości ekranujące materiału. Kompozyty z grafenem są badane jako potencjalne materiały do ekranowania elektromagnetycznego w różnych dziedzinach, takich jak elektronika, telekomunikacja i obronność [197].
- Kompozyty z dodatkiem cząstek metalowych powstają poprzez dodanie cząstek metalowych, takich jak miedź, srebro lub aluminium, do osnowy kompozytowej. Poprawia to znacznie przewodność elektryczną i właściwości ekranujące materiału kompozytowego.
- Kompozyty z dodatkiem przewodzących cząstek metalowych są szeroko stosowane w przemyśle elektronicznym i telekomunikacyjnym [198].
- Kompozyty z dodatkiem węglików metalu. Węgliki metali, takie jak węgiel krzemu i węgiel boru, posiadają właściwości przewodzące. Dodanie węglików metalu do osnowy kompozytowej może poprawić przewodność elektryczną i skuteczność ekranowania materiału. Kompozyty z dodatkiem węglików metalu są wykorzystywane w różnych zastosowaniach, takich jak obudowy elektroniczne, osłony kabli i panele ekranujące [199].
- Kompozyty z włókien węglowych są często stosowane do ekranowania pola elektromagnetycznego ze względu na swoją wysoką przewodność elektryczną. Włókna węglowe są wplecione lub wzmocnione w osnowie polimerowej, tworząc kompozyt

o doskonałych właściwościach ekranujących. Kompozyty z włókien węglowych są lekkie, wytrzymałe i skutecznie redukują przenikanie pól elektromagnetycznych [200].

- Kompozyty z włókien grafitowych podobnie jak kompozyty z włókien węglowych, posiadają wysoką przewodność elektryczną i są skutecznym materiałem do ekranowania pola elektromagnetycznego. Włókna grafitowe są zazwyczaj zastosowane jako wzmocnienie w matrycy polimerowej. Kompozyty z włókien grafitowych są wykorzystywane w produkcji osłon elektronicznych, tkanin ekranujących i innych elementów, które mają chronić przed polami elektromagnetycznymi [201].
- Kompozyty z włókien szklanych są stosowane jako materiały ekranujące pola elektromagnetyczne, szczególnie w niższych częstotliwościach. Włókna szklane są zintegrowane z matrycą polimerową, tworząc kompozyt o dobrych właściwościach izolacyjnych i ekranujących. Kompozyty z włókien szklanych są stosowane w budowie obudów elektronicznych, paneli ekranujących i innych aplikacjach, gdzie wymagane jest ekranowanie elektromagnetyczne [202].

## 6.4. Recykling materiałów

Recykling materiałów odgrywa kluczową rolę w globalnych wysiłkach na rzecz ochrony środowiska i rozwoju. Proces ten polega na wykorzystaniu zużytych materiałów, takich jak szkło, papier, metale i tworzywa sztuczne, zamiast ich wyrzucania [203]. Istnieje wiele korzyści płynących z praktykowania recyklingu materiałów. Po pierwsze, recykling pomaga w wykorzystaniu zużytych odpadów trafiających do składowiska i zmniejsza zużycie na nowe surowce, co przyczynia się do ochrony zasobów naturalnych [204]. Dodatkowo, recykling może również spowodować zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych związanych z produkcją nowych materiałów, co przyczynia się do wpływu na zmiany klimatyczne [205]. Proces różni się w zależności od materiałów. Na przykład, szkło jest często przetwarzane poprzez topienie i formowanie na nowo, podczas gdy polimery są rozdrabniane i przetwarzane na granulaty, który może być wykorzystany do produkcji nowych produktów [206]. Współczesne technologie włączają coraz bardziej wydajne systemy recyklingu różnych materiałów. Ważne jest również, aby pamiętać o konieczności korzystania z edukacji i zaangażowania społecznego w promowaniu stosowania. Sortowanie odpadów z regularnego użytkowania może mieć wpływ na ich ilość odpadów oraz ochronę środowiska [207].



## 6.4.1. Recykling materiałów polimerowych

Recykling materiałów polimerowych jest ważnym procesem w kontekście ochrony środowiska, redukcji odpadów i zrównoważonego rozwoju. Pozwala to na ponowne wykorzystanie materiałów polimerowych, zmniejszenie zużycia surowców naturalnych oraz ograniczenie emisji gazów cieplarnianych i zanieczyszczeń. Recykling materiałów polimerowych dzieli się na:

- Recykling mechaniczny - jest to najczęściej stosowany proces recyklingu, który polega na fizycznym rozdrobieniu odpadów polimerowych bez zmiany składu chemicznego. Przykładowymi tworzywami polimerowymi przetwarzanymi w ten sposób są polietyleny (PE), polipropyleny (PP) i politetrafluoroetyleny (PET)
- Recykling chemiczny - to proces obejmujący przekształcanie materiałów polimerowych w monomery lub inne substancje chemiczne, które można wykorzystać ponownie do produkcji. Przykładem tych procesów jest depolimeryzacja i rozkład termiczny polimerów termoplastycznych
- Energia odzyskiwana z odpadów (Waste-to-Energy, WtE). Niektóre z odpadów polimerowych, które nie mogą zostać poddane recyklingowi mechanicznemu lub chemicznemu poddawane są procesom spalania, w wyniku czego odzyskuje się energię elektryczną.

## 6.4.2. Recykling materiałów ekranujących pole elektromagnetyczne

Recykling materiałów wykorzystywanych do ekranowania pola elektromagnetycznego jest ważnym aspektem zrównoważonego rozwoju i ochrony środowiska. Pozwala on na ponowne wykorzystanie tych materiałów, zmniejszenie zużycia surowców i redukcję odpadów. Materiały wykorzystywane do ekranowania pola elektromagnetycznego obejmują różnorodne substancje, takie jak metalowe folie, siatki, kompozyty ekranujące czy materiały ceramiczne. Recykling tych materiałów może być skomplikowany ze względu na ich specyficzne właściwości, strukturę i połączenie różnych składników. Recykling metalowych folii i siatek może być realizowany poprzez zbieranie i przetapianie metalu w celu produkcji nowych wyrobów. Proces ten może wymagać odpowiedniego sortowania, segregacji różnych

rodzajów metali i oczyszczania z zanieczyszczeń. W przypadku kompozytów ekranujących, recykling może być bardziej skomplikowany. Kompozyty często składają się z różnych materiałów, takich jak metal i polimer. Proces recyklingu kompozytów może obejmować rozdzielanie składników w celu odzyskania poszczególnych materiałów, które można ponownie wykorzystać. Istnieją badania nad nowymi technologiami, takimi jak rozpuszczanie i odzyskiwanie polimerów z kompozytów ekranujących. W przypadku materiałów ceramicznych wykorzystywanych do ekranowania pola elektromagnetycznego, recykling może być bardziej skomplikowany ze względu na ich trudności w procesach przetwarzania. Jednak istnieją badania nad technologiami recyklingu ceramiki, które obejmują odzyskiwanie i przekształcanie tych materiałów w nowe wyroby [208-210].

## 7. Wytworzenie próbek i metodyka badawcza

W pierwszym etapie podjętych badań przeprowadzono selekcję materiałów odpadowych, które posiadają potencjalnie właściwości ekranujące pole elektromagnetyczne. W celu weryfikacji ich właściwości elektromagnetycznych wykonano kompozyty metodą prasowania i poddano je badaniom wstępnym. Analizując wyniki badań wstępnych przystąpiono do badań zasadniczych wybranych kompozytów.

### 7.1. Wybór materiałów



Rys. 7.1. Selekcjonowane materiały do badań wstępnych A) Pył złomowiskowy włóknisty, B) Pył złomowiskowy, C) zendra, D) wióry aluminium, E) nanokrystalik, F) wióry mosiężne, G) rozdrobnione kable miedziane, H) amorfik

W badaniach wstępnych wykorzystano materiały do zbrojenia kompozytu tj: pył złomowiskowy, aluminium po obróbce skrawaniem, mosiądz po obróbce skrawaniem, zendrę walcowniczą, taśmy nanokrystaliczne po produkcji rdzeni transformatorów. Polimery: HDPE, POM, PVC wykorzystano do wykonania osnowy kompozytów. Wykonano próbki z powyższych materiałów.

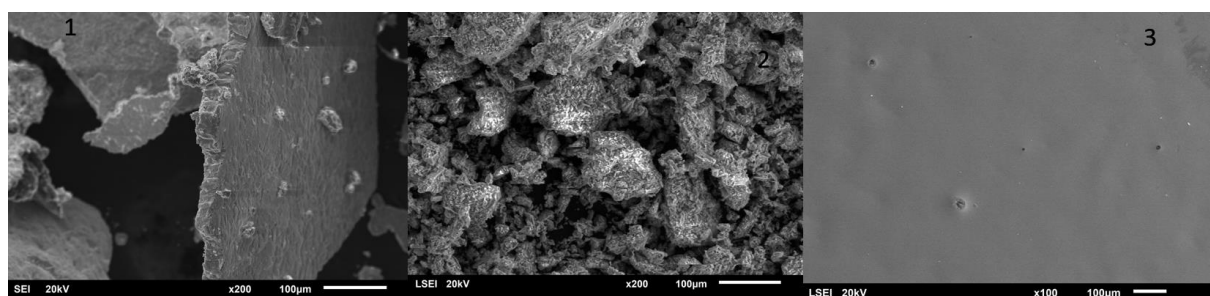


Rys. 7.2. Wypraski kompozytowe wytworzone do badań wstępnych. 1 - POM z zendrą i nanokrystalikiem, 2 - PVC z żelazem i nanokrystalikiem, 3 - PVC z nanokrystalikiem, 4 - PVC z pyłem złomowiskowym, 5 - PVC z zendrą, 6 - HDPE z zendrą, 7 - PVC z pyłem z złomowiskowym włóknistym, 8 - PVC z żelazem, 9 - PVC z aluminium, 10 - HDPE z ceramiką, 11 - PVC z mosiądzem, 12 - POM z zendra i ceramiką

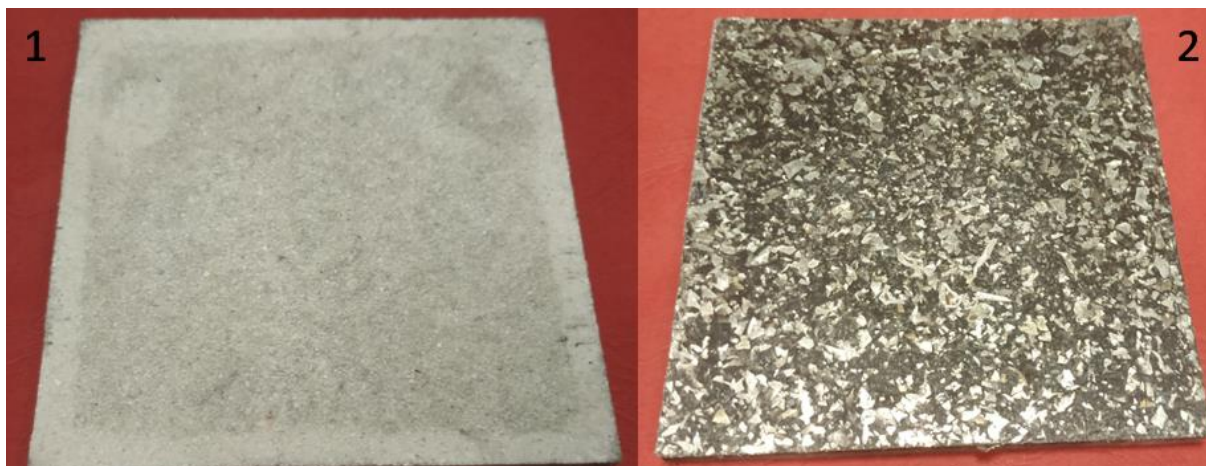
W wyniku przeprowadzenia analizy badań wstępnych oraz optymalizacji procesu technologicznego dokonano selekcji materiałów do wytwarzania kompozytów. Ostatecznie do wytworzenia docelowego kompozytu wytypowano jako osnowę proszek z HDPE pochodzący z recyklingu. W wyniku analizy właściwości elektrycznych wybrano wypełniacze: zgorzelinę walcowniczą (zendre), wyżarzaną blachę nanokrystaliczną. Wypełniacze przedstawiono na rys. 7.3. W celu analizy struktury wypełnienia kompozytu przeprowadzono badanie mikroskopowe przedstawione na rys. 7.4. Finalny kompozyt do zbudowania prototypu komory przedstawiono na rys. 7.5. W celu poprawy homogenizacji materiału do kompozytu dodano olej transformatorowy.



Rys.7.3. Nieprzetworzone materiały 1 - zendra, 2 – blacha nanokrystaliczna



Rys.7.4. Zdjęcia z mikroskopu 1 - zendra, 2 - ceramika, 3 - blacha nanokrystaliczna



Rys.7.5. Zdjęcia finalnego kompozytu 1 - warstwa ceramiki, 2 - warstwa kompozytu zendry z nanokrystalikiem

## 7.2. Przygotowanie kompozytu i wytworzenie próbek metodą prasownia tłoczego

W celu przygotowania napełniacza o odpowiedniej wielkości ziarna zastosowano młynki szybko obrotowe IKA A11 oraz blender kielichowy. W procesie prasowania tłoczego zastosowano prasę HolzMann Werkstattprasse WP 75H (rys. 7.6) z zewnętrznie ogrzewaną formą o matrycy gnieździe w kształcie prostopadłościanu o boku 100 mm, 80 mm oraz w kształcie walca o średnicy gniazda 50 mm z możliwością wytworzenia toroidów. Wykorzystując technologię prasowania wytworzono kompozyty do badań wstępnych.



Rys. 7.6. Schemat stanowiska do wytwarzania próbek 1 - prasa hydrauliczna, 2 - tłok i stół prasy, 3 - forma prasownicza, 4 - sonda pomiaru temperatury, 5 – grzałka

W przypadku zastosowania tworzywa POM po obróbce mechanicznej następowała degradacja poobróbczego chłodziwa i wypływanie z formy tworzywa, co nie pozwalało na ustabilizowanie procesu. Ze względu na niską wytrzymałość termiczną materiału w stałej temperaturze i różnicę w narzewanu formy w matrycy 100 mm wykonywanie kompozytów z PVC stwarzało zagrożenie degradacji. Wytwarzanie kompozytów o osnowie HDPE nie wykazywało problemów technologicznych w czasie prasowania w czasie prasowania. Wytworzenie próbek wykonano metodą prasowania przetłocznego z parametrami procesu przedstawionymi w tabeli nr 7.1 dla formy o matrycy 100 mm:

Tabela 7.1. Parametry prasowania dla wybranych tworzyw

	HDPE	POM	PVC
Temperatura prasowania $T_p$	165 °C	165 °C	160 °C
Ciśnienie prasowania $P_1$	10T= 9810 MPa	10T= 9810 MPa	10T= 9810 MPa
Ciśnienie przy stygnięciu $P_2$	5T= 4805 MPa	5T= 4805 MPa	5T= 4805 MPa

Analizując wyniki badań wstępnych stwierdzono, że najlepsze właściwości elektryczne posiadają materiały podzielone na określone frakcje 250  $\mu\text{m}$  i 1 mm. W czasie dalszych badań wstępnych określono jaki ma wpływ na ekranowanie pola elektromagnetycznego wielkość ziarna napelnacza i jak to wpływa na stabilność wytwarzanego kompozytu. Parametry prasowania dla próbek wykonanych do badań rezystancji i przenikalności magnetycznej przedstawiono w tabeli nr 7.2. W czasie wytwarzania kompozytów z zendry stwierdzono, że ze względu na właściwości użytkowe graniczna wartość w proporcji masowej osnowy stanowi 80% napelnacza.

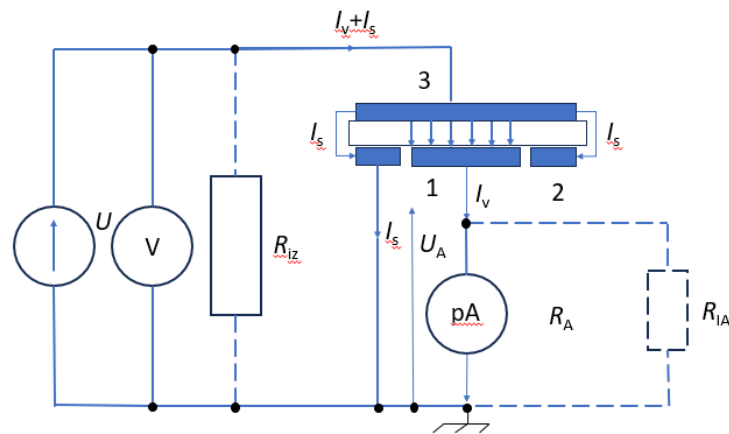
## 7.3. Wyniki badań wstępnych

W poniższych podrozdziałach przedstawiono ważniejsze wyniki wykonanych badań wstępnych obejmujących badania rezystancji skrośnej, powierzchniowej oraz przenikalności magnetycznej i pomiar skuteczności ekranowania pojedynczej płytki kompozytowej o wymiarach 100x100 mających zasadniczy wpływ na skład finalnego kompozytu.

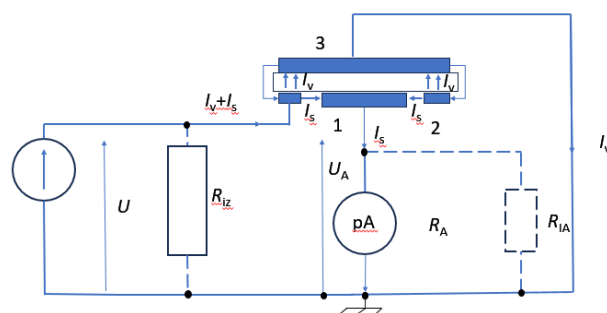
### 7.3.1. Pomiary rezystancji

Pomiary rezystancji skrośnej i powierzchniowej mają znaczący wpływ w zakresie zagadnień z elektroniki, elektrotechniki i materiałoznawstwa. Rezystancja skrośna odnosi się

do oporu elektrycznego między dwoma punktami w przekroju materiału [211]. Istotne jest to w przypadku materiałów takich jak płytki drukowane, gdzie ważne jest zapewnienie właściwego przepływu prądu przez materiał. Z kolei rezystancja powierzchniowa odnosi się do oporu wzdłuż powierzchni materiału, na przykład na cienkiej warstwie metalu [212]. Pomiar rezystancji powierzchniowej jest ważny dla oceny wydajności przewodzenia materiału na jego zewnętrznej warstwie. Precyzyjne pomiary tych rodzajów rezystancji wymagają zaawansowanych technik, takich jak metoda czteropunktowa, która minimalizuje wpływ oporu złącz oraz kontaminacji powierzchni [213]. Pomiar rezystancji powierzchniowej i skośnej przeprowadzono metodą trójelektrodową. Schemat działania tych metod przedstawiono na rys. 7.7 i 7.8. Badania wykonano na próbkach walcowych o średnicy 25mm. Przykładowe próbki do badań przedstawiono na rys. 7.9. Wyniki badań, które były wyselekcjonowane.



Rys.7.7. Schemat układu pomiarowego do rezystancji skośnej trójelektrodowy [214]

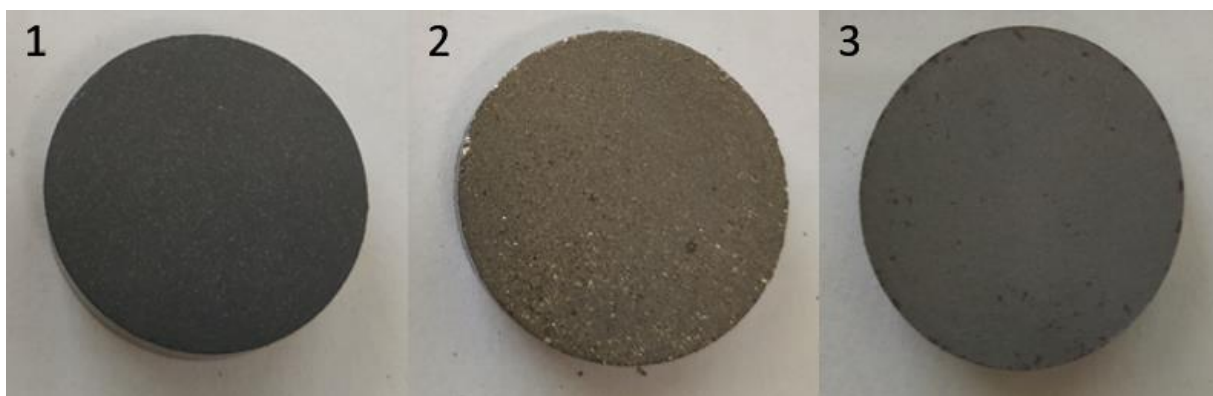


Rys. 7.8. Schemat układu pomiarowego do rezystancji powierzchniowej trójelektrodowy [214]

Tabela 7.2 Pomiary rezystancji powierzchniowej i skrośnej wybranych materiałów

nazwa próbki	Nacisk [t]	Ciśnienie [MPa]	Temperatura grzania [°C]	Rezystancja [ $\Omega$ ]	Rezystancja skrośna próbki	Rezystancja skrośna [ $\Omega$ /mm]	Rezystancja powierzchniowa
Zendra + 5% PVC	43	860	165	53,04	53,04 $\Omega$	5,89	brak ciągłości
Nk żyw 1% fenol akryl	43	860	165	18,56	18,00 m $\Omega$	2,65	2,62 m $\Omega$
Nk żyw 3% fenol akryl	43	860	15	18,53	17,96 m $\Omega$	2,79	1,49 m $\Omega$
Nk 5% żyw. Fenokr.	43	860	165	12,045	11,48 m $\Omega$	1,85	2,69 m $\Omega$
Nk 60%, Fe 40% 63 um, żyw. Akryl fenol 1%	43	860	165	12,77	12,21 m $\Omega$	2,13	2,26 m $\Omega$
Nk 60%, Fe 40% 63 um, 5% PVC	43/ 5	860/ 100	150	44,89	44,33 m $\Omega$	7,78	16,94 m $\Omega$
Aluminium 90%, PVC 10%	43/5	860/ 100	130	6,41	5,85 m $\Omega$	0,84	139,04 u $\Omega$
Aluminium 80%, PVC 20%	43/5	860/ 100	130	7,92	7,36 m $\Omega$	1,06	387,95 u $\Omega$
Aluminium 70%, PVC 30%	43/5	860/ 100	130	13,20	12,64 m $\Omega$	1,81	1,55 m $\Omega$
pył złomowisko wy włóknisty 90%, PVC 10%	43/5	860/ 100	130	14,91	14,35 m $\Omega$	2,30	11,964 m $\Omega$
pył złomowisko wy włóknisty 80%, PVC 20%	43/5	860/ 100	130	32,17	31,61 m $\Omega$	5,27	10,09 m $\Omega$
pył złomowisko wy włóknisty 70%, PVC 30%	43/ 5	860/ 100	130	33,59	33,02 m $\Omega$	4,96	7,22 m $\Omega$
Nanokrystalik 90%, żywica fenolowa 10%	43T	860	150 PRZEZ 12 MINUT	601,28	600,71 m $\Omega$	91,85	23,54 m $\Omega$
Nanokrystalik 95%, żywica fenolowa 5%	43T	860	150 PRZEZ 12 MINUT	60,583	60,58 m $\Omega$	10,18	23,35 m $\Omega$

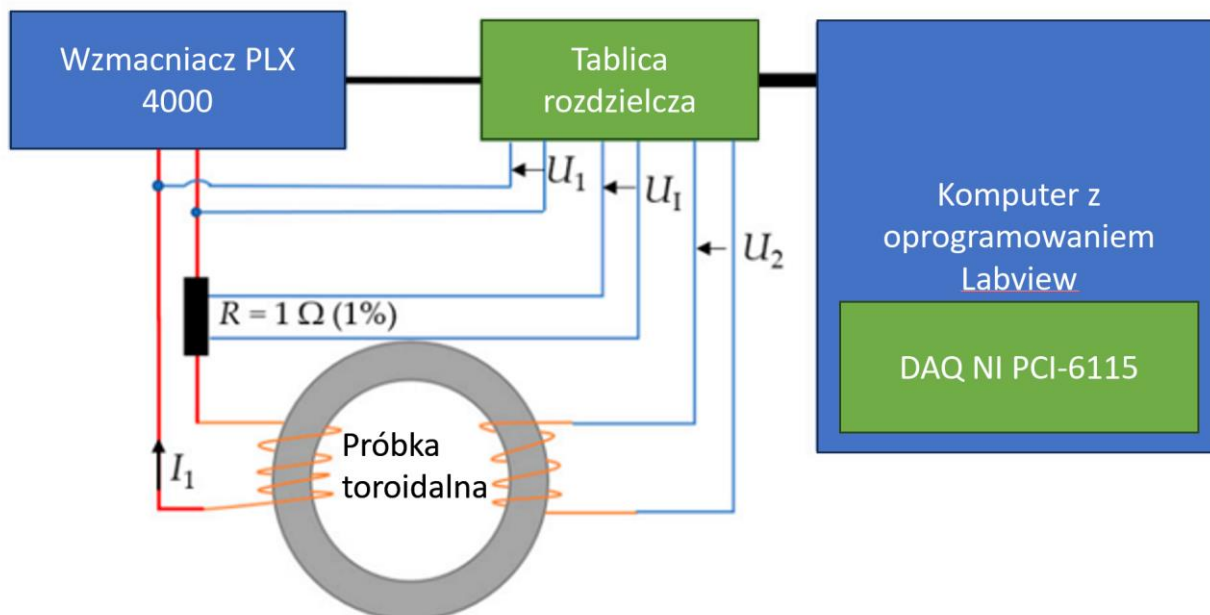




Rys. 7.9. Przykładowe próbki wykonane do badań rezystancji skrośnej i powierzchniowej 1 – zendra 5% PVC, 2 – blacha nanokrystaliczna 1% żywica fenolowo akrylowa, 3 – Fe prasowane

### 7.3.2. Badania przenikalności magnetycznej

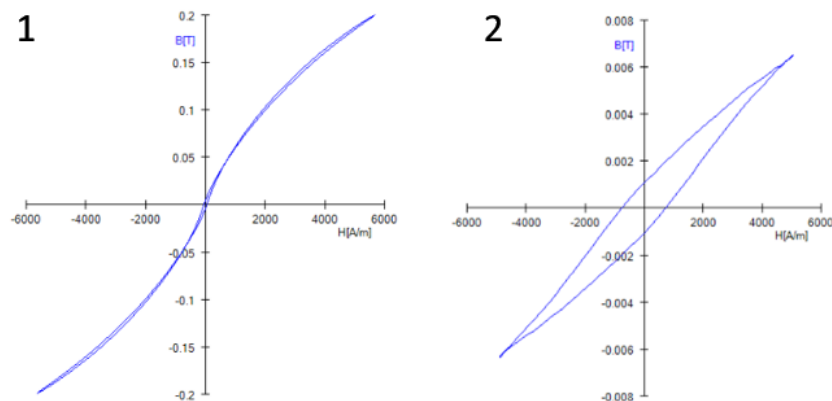
Pomiar przenikalności magnetycznej jest ważny dla wyznaczenia charakterystyki właściwości magnetycznych materiałów. Przenikalność magnetyczna  $\mu_r$  określa zdolność materiału do reagowania na pole magnetyczne poprzez namagnesowanie [215]. Istotne jest to w projektowaniu transformatorów, cewek indukcyjnych oraz innych urządzeń magnetycznych. Pomiar przenikalności magnetycznej można przeprowadzić za pomocą różnych metod, takich jak metoda prądu zwartego, metoda próbki w kształcie litery „I” lub metodą cewki Helmholtza [216]. Techniki te pozwalają na określenie przenikalności magnetycznej w różnych warunkach i częstotliwościach. Dane uzyskane z pomiarów przenikalności magnetycznej są ważne przy projektowaniu wyrobów z materiałów ferromagnetycznych w zastosowaniach elektromagnetycznych w elektrotechnice. Do badań przenikalności magnetycznej przygotowano próbki toroidalne o średnicach 50 x 25 mm z zendry i 1 % żywicy fenolowo-akrylowej oraz rozdrobnionej blachy nanokrystalicznej w którym zawarto 1 % żywicy fenolowo-akrylowej w zawartości masowej, które odizolowano taśmą izolacyjną i nawinięto na nią drut miedziany o średnicy 0,25 mm. Przykładowe próbki pokazano na rys 7.3.2.2, badanie przeprowadzono dla częstotliwości 10 Hz.



Rys. 7.10. Schemat pomiarowy urządzenia do badania przenikalności magnetycznej



Rys. 7.11. Próbki do badań przenikalności magnetycznej zastosowano wyselekcjonowane kompozyty o zawartości 1 - kompozyt NK 99% żywica z fenolowo-arylową 1%, 2 – zendra 99% żywica z fenolowo-arylową 1%

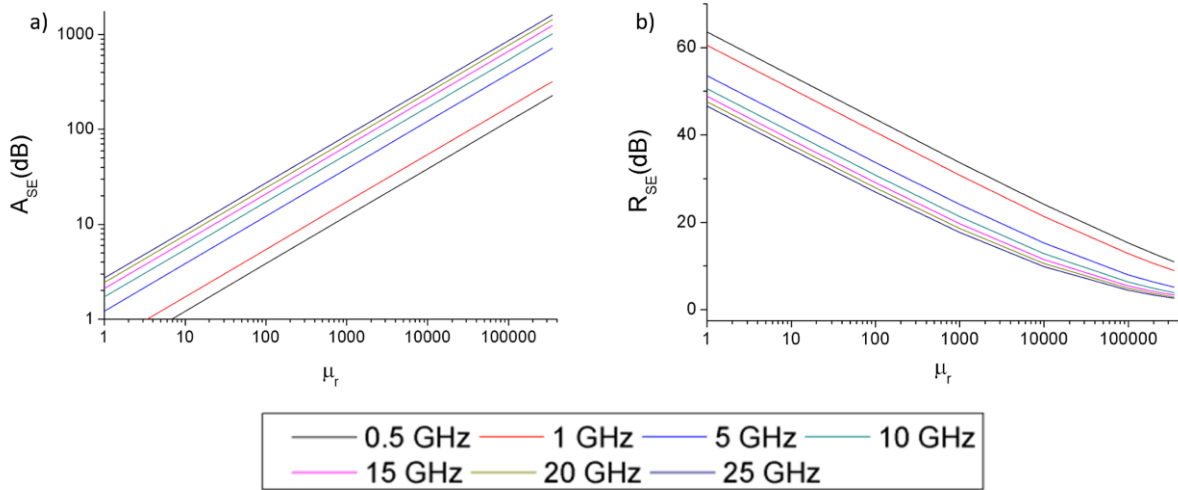


Rys. 7.12. Badania przenikalności magnetycznej  $\mu_r$  dla 1 - kompozyt NK 99% żywica z fenolowo-arylową 1%, 2 - zendra 99% żywica z fenolowo-arylową 1%

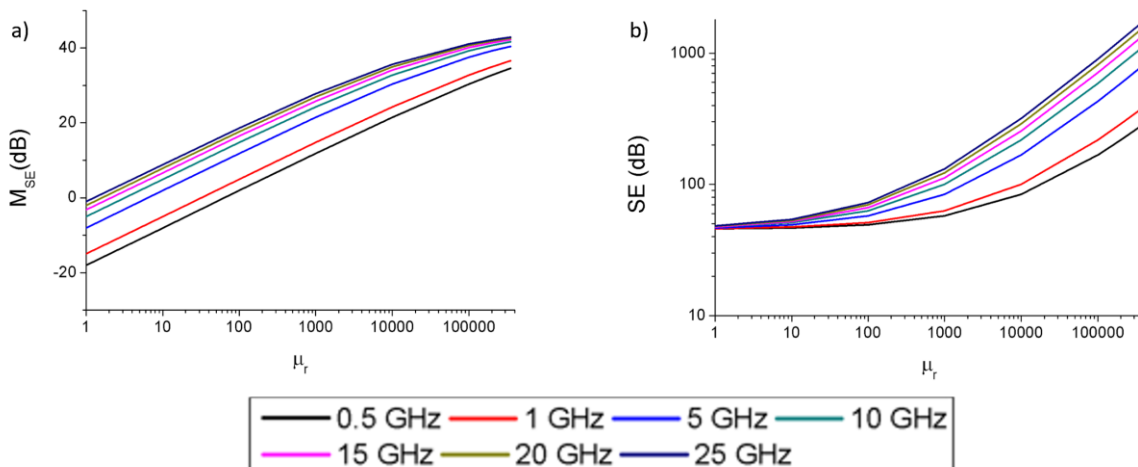
Na rysunku 7.3.2.3 przedstawiono przebiegi pętli histerezy dla 1 - kompozyt NK 99% żywica z fenolowo-arylową 1%, 2 - zendra 99% żywica z fenolowo-arylową 1%. Analizując przebiegi pętli histerezy stwierdzono, że koercja magnetyczna  $H_c$  wyniosła 742 A/m w przypadku zendry walcowniczej dla blachy nanokrystalicznej 49,4 A/m. Retencja magnetyczna  $B_r$  wyniosła  $106 \cdot 10^{-6}$  T w przypadku zendry walcowniczej dla blachy nanokrystalicznej  $45 \cdot 10^{-5}$  T. Przenikalność magnetyczna  $\mu_r$  wyniosła 1,03 w przypadku zendry walcowniczej dla blachy nanokrystalicznej 28,1. Kształt pętli histerezy wskazuje że blacha nanokrystaliczna łatwiej ulega namagnesowaniu i rozmagnesowaniu od zendry walcowniczej.

### 7.3.3. Analiza obliczeniowa skuteczności ekranowania pola elektromagnetycznego

Analizując wyniki badań wstępnych przeprowadzono obliczeniową symulację komputerową skuteczności ekranowania  $SE$  w celu znalezienia najbardziej korzystnego składu kompozytów do etapu finalnego. Obliczenia wykonano w środowisku Matlab. Uwzględniając parametry materiałów wyznaczone w trakcie badań wstępnych i wiedzę teoretyczną dokonano pomiarów rezystancji i przenikalności magnetycznej. Na podstawie tych danych dokonano symulacji obliczeniowej jak zmienia się  $SE$  oraz jego składowe  $A_{SE}$ ,  $R_{SE}$  i  $M_{SE}$  przy zmiennych częstotliwościach fali elektromagnetycznej  $f$  w zakresie od 0,5 GHz do 25 GHz, przenikalności magnetycznej  $\mu_r$  w zakresach od 1 do 100 000, zmianie konduktywności  $\sigma$  o wartościach od 0,01 do 100000 [S/m] i grubości ścianki materiału  $d$  od 0,5 do 4 mm. Obliczenia podano w formie wykresów na rys. 7.13 – 7.19. Następnie na podstawie powyższych założeń i danych rzeczywistych obliczono  $SE$ ,  $A_{SE}$ ,  $R_{SE}$ ,  $M_{SE}$  wykonano symulację teoretyczną wybranych materiałów i analizę powyższych danych przedstawiono rys 7.20 i 7.21. Część wyników symulacji zamieszczono w publikacji [217].

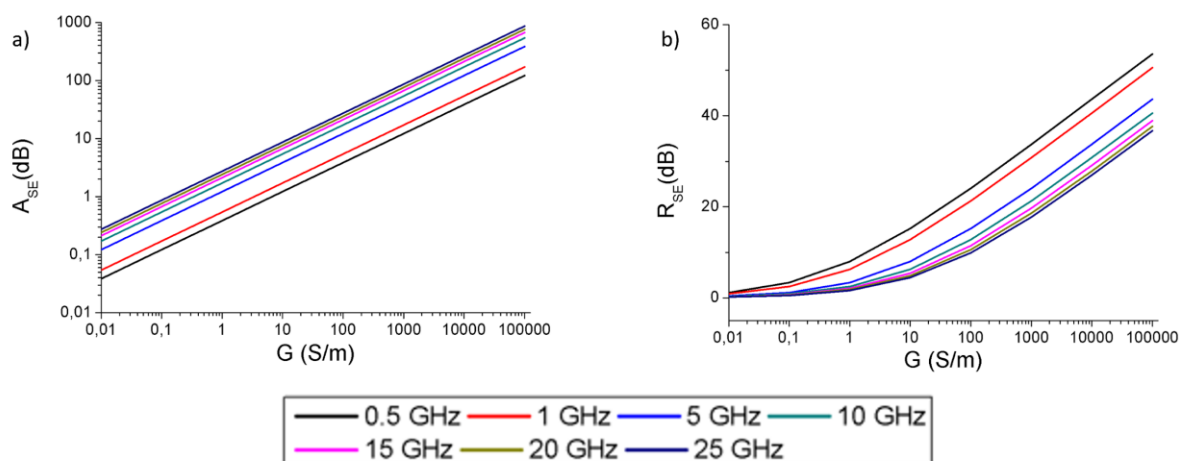


Rys. 7.13. Wyliczone wartości a) absorpcji, b) odbicia fali elektromagnetycznej w funkcji przenikalności rzeczywistej  $\mu_r$  w zakresach od 1 do 100 000 dla wybranych częstotliwości

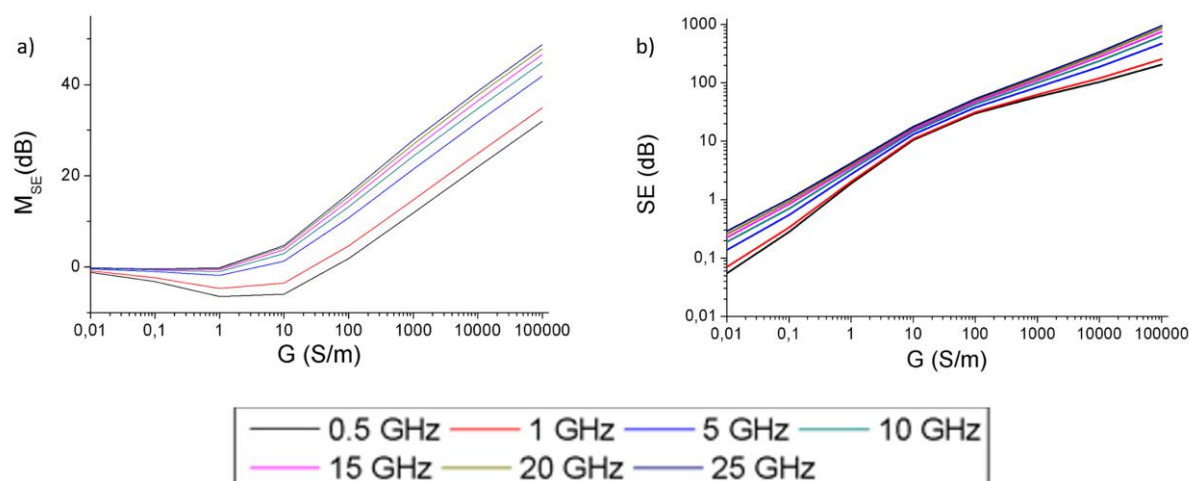


Rys. 7.14. Wyliczone wartości a) wielokrotnego odbicia fali elektromagnetycznej, b) Skuteczności ekranowania w funkcji przenikalności rzeczywistej  $\mu_r$  w zakresach od 1 do 100 000 dla wybranych częstotliwości

Zmiana wartości  $\mu_r$  zaczyna znacząco wpływać na całkowity poziom skuteczności ekranowania dopiero po przekroczeniu wartości 100. Wartość ta odpowiada względnej przenikalności stali węglowej. Grubość przesłony w obliczeniach wynosiła  $d = 1$  mm. Wraz ze wzrostem przenikalności względnej zwiększają się straty absorpcji i poziom wewnętrznych odbić. Z drugiej strony zmniejsza się poziom strat odbicia. Należy zauważyć, że wewnętrzna strata odbicia  $M_{SE}$  jest ujemna przy niskim  $\mu_r$  i zmniejsza ogólną skuteczność ekranowania. Oznacza to, że słabsze ekranowanie uzyskuje się z powodu wielu odbić, które nie są wystarczająco dobrze absorbowane, w wyniku czego fala EM rozciąga się poza obszar osłony.

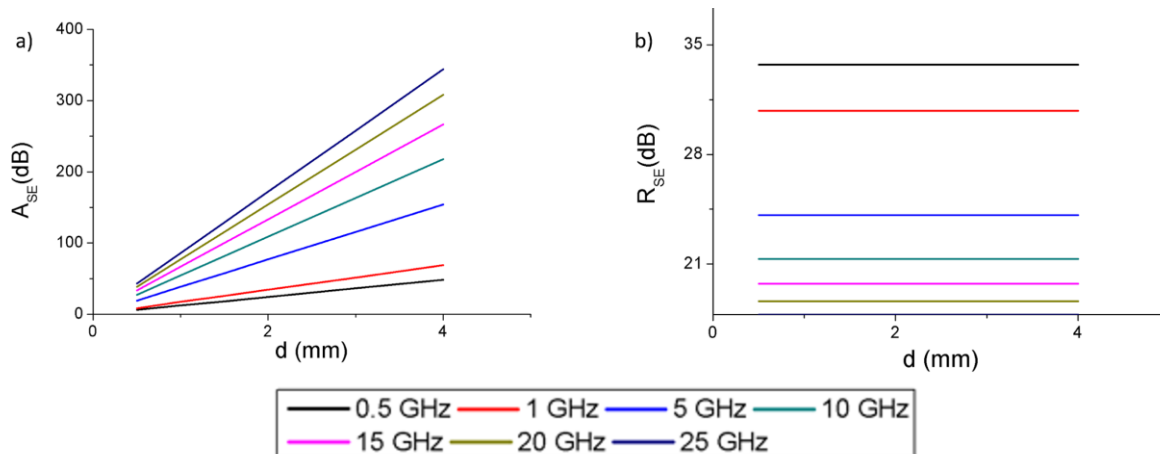


Rys. 7.15 Wyliczone wartości a) absorpcji, b) odbicia fali elektromagnetycznej w funkcji konduktywności  $G$  o wartościach od 0,01 do 100000 [S/m] dla wybranych częstotliwości

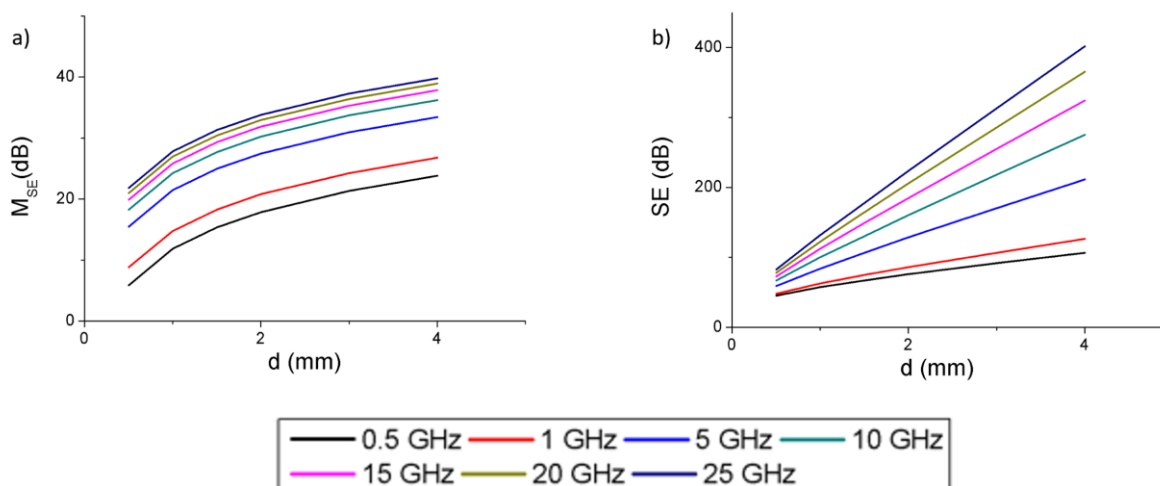


Rys. 7.16. Wyliczone wartości wielokrotnego odbicia fali elektromagnetycznej oraz skuteczności ekranowania w funkcji konduktywności  $G$  o wartościach od 0,01 do 100000 [S/m] dla wybranych częstotliwości

Następnie wyznaczono wpływ zmiany konduktywności dla wybranych częstotliwości przy stałej grubości przesłony  $d = 1\text{mm}$  przy różnych wartościach częstotliwości od 0,5 GHz do 25 GHz. Zmienna wartość  $\sigma$  powoduje zmianę absorpcji fali w sposób liniowy, którą zwizualizowano w postaci wykresów 7.18 i 7.19 Odbicie fali w funkcji zmiennej konduktywności oraz wielokrotne odbicie fali zmieniają się wykładniczo w zależności od wartości konduktywności, które przedstawiono na wykresach.



Rys. 7.17. Wyliczone wartości a) absorpcji, b) odbicia fali elektromagnetycznej w funkcji grubości ścianki  $d$  od 0,5 do 4 mm i dla wybranych częstotliwości



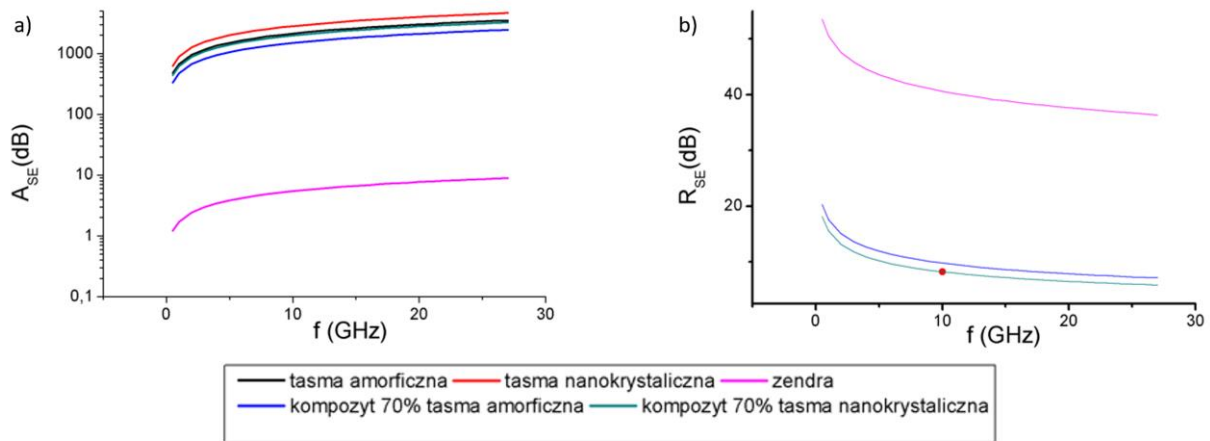
Rys. 7.18. Wyliczone wartości a) wielokrotnego odbicia fali elektromagnetycznej, b) skuteczności ekranowania w funkcji grubości ścianki  $d$  od 0,5 do 4 mm dla wybranych częstotliwości

Po analizie wyników symulacyjnych wartości absorpcji  $A_{SE}$ , odbicia,  $R_{SE}$  oraz wielokrotnego odbicia fali  $M_{SE}$  EM dla założonych parametrów  $\mu_r$ ,  $\sigma$ ,  $d$  przeprowadzono ponowną obliczenia, tym razem bazując na wartościach parametrów odpowiadających rzeczywistym materiałom, z których zbudowane są opracowywane kompozyty. Wartości parametrów wykorzystanych w obliczeniach przedstawiono w tabeli 7.3, natomiast wyniki symulacji przedstawiono na rys 7.20 i 7.21.

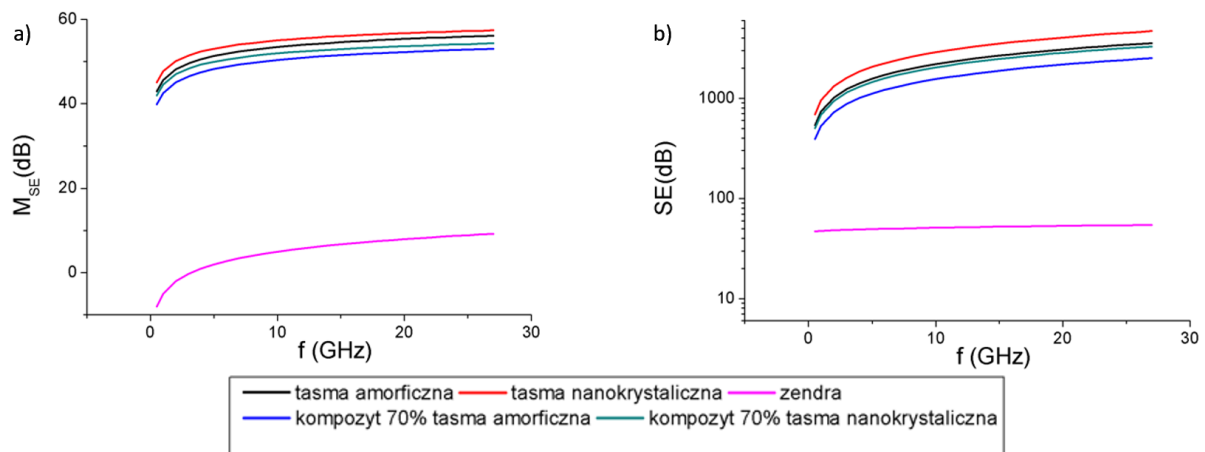
Tabela 7.3. Parametry materiałów zastosowanych do przeprowadzenia obliczeń

	Grubość próbki [m]	Konduktywność [S/m]	Impedancja zastępcza	Przenikalność magnetyczna [T·A/m]	Przenikalność magnetyczna rzeczywista [T·A/m]
	$d$	$\sigma$	$Z_0$ [Ω]	$\mu$	$\mu_r$
Taśma amorficzna	0,001	7692,308	377	0,251327	200000
Taśma nanokrystaliczna	0,001	7692,308	377	0,439823	350000
zendra	0,001	1000	377	1,26E-05	10
Taśma amorficzna kompozyt	0,001	5384,615	377	0,175929	140000
Taśma nanokrystaliczna kompozyt 70%	0,001	5384,615	377	0,307876	245000

W pierwszym etapie zweryfikowano zależność skuteczności ekranowania od zmiany względnej przenikalności magnetycznej w zakresie  $\mu_r$  od 1 do 350 000 (rys. 7.13). Odpowiada to wartościom przyjętym od HDPE do taśmy nanokrystalicznej



Rys. 7.19. Wyliczone wartości a) absorpcji, b) odbicia fali elektromagnetycznej w funkcji zakresie  $\mu_r$  od 1 do 350 000 dla wybranych częstotliwości



Rys. 7.20. Wyliczone wartości a) wielokrotnego odbicia fali elektromagnetycznej, b) skuteczności ekranowania zakresie  $\mu_r$  od 1 do 350 000 dla wybranych częstotliwości

Analizując wyniki symulacji stwierdzono, że taśma amorficzna i nanokrystaliczna mają porównywalne parametry ekranowania pola EM. Porównując ich parametry absorpcji  $A_{SE}$ , stwierdzono wysokie wartości, które są znacznie wyższe niż dla zendry. Parametr  $R_{SE}$  dla zendry w porównaniu do taśmy amorficznej i nanokrystalicznej jest o 40 dB większy. Wartość strat spowodowanych wielokrotnymi odbiciami  $M_{SE}$  dla zendry jest mniejsze od taśmy amorficznej i nanokrystalicznej o około 40 dB. Wyniki pomiarów użytych do wykonania symulacji przedstawiono w tabeli 7.2 i rys 7.12 dowiedziono, że dodanie do kompozytu z blach nanokrystalicznych lub amorficznych do zendry zwiększa odbicie fali EM polepszając tym samym wypadkowe  $SE$ .



### 7.3.4. Badanie ekranowania pola elektromagnetycznego.

Pomiar ekranowania pola elektromagnetycznego (EM) jest kluczowy w ocenie skuteczności materiałów ekranujących, które mają na celu redukcję przenikania pól EM. Wskaźnik tłumienia ekranowania ( $SE$ ) jest wyrażany w decybelach (dB) i określany według wzoru [218] i bezpośrednio odnosi się do wzoru nr. 33 w miejsce pola elektromagnetycznego podstawiono wygenerowane napięcie przez generator i odczytane napięcie za przesłoną.

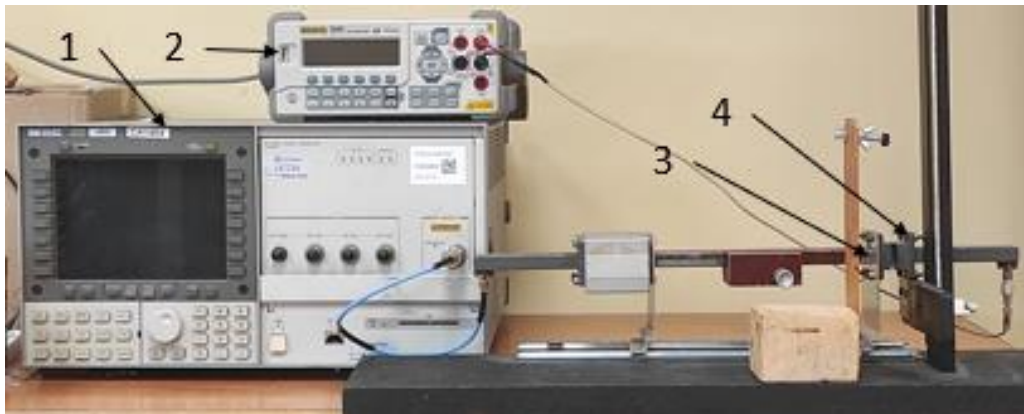
$$SE = 20 \log \cdot \frac{V_{in}}{V_{out}} \quad 48$$

Gdzie:

$V_{in}$  - wygenerowane napięcie wejściowe,

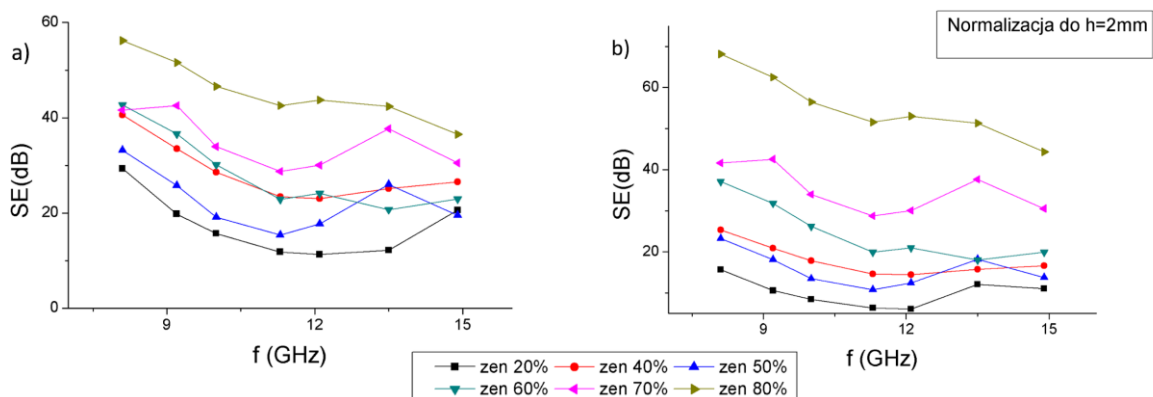
$V_{out}$  - odczytane napięcie po przejściu przez przesłonę.

Metodyka pomiaru opiera się na pomiarze wartości napięcia generowanego na detektorze  $V_{in}$  w sytuacji braku ekranowania oraz pomiarze wartości napięcia  $V_{out}$  po wstawieniu ekranu.  $V_{in}$  i  $V_{out}$  są napięciami proporcjonalnymi do amplitudy składowej elektrycznej pola EM. Schemat urządzenia i podłączenia przedstawiono na rysunku 7.22 [219]. Pomiary  $SE$  są przeprowadzane za pomocą układów pomiarowych, które umożliwiają określenie skuteczności ekranu w zależności od częstotliwości fali elektromagnetycznej. Im wyższa wartość  $SE$ , tym lepsza zdolność ekranowania materiału. Dokładne pomiary  $SE$  są istotne przy projektowaniu i testowaniu urządzeń elektromagnetycznych, w celu zapewnienia niezakłóconej pracy i zgodności z normami dotyczącymi emisji elektromagnetycznej. Szczegółowe badania obudów przeprowadza się w komorach bez odbiciowych przedstawionych w następnym rozdziale. W badaniach wstępnych do pomiaru skuteczności ekranowania pola elektromagnetycznego posłużono się urządzeniami pomiarowymi w postaci generatora częstotliwości fali HP fali HP 70340A signal generator 1-20 GHz, detektora (dioda germanowa B473), miernikiem Rigol DM3068 oraz falowodem typu horn Polfer typ IX 34 nr 3488. W próbkach o wymiarach 100 mm x 100 mm wykonano pomiary w 10 punktach. Analizując wyniki symulacji komputerowych w wykonanych w środowisku Mathlab ukazanych na rysunku nr 7.18. i 7.19 od grubości przesłony 2 mm skuteczność ekranowania zmienia się w sposób liniowy. Dlatego dokonano przeliczenia grubości ścianki kompozytu do 2 mm.



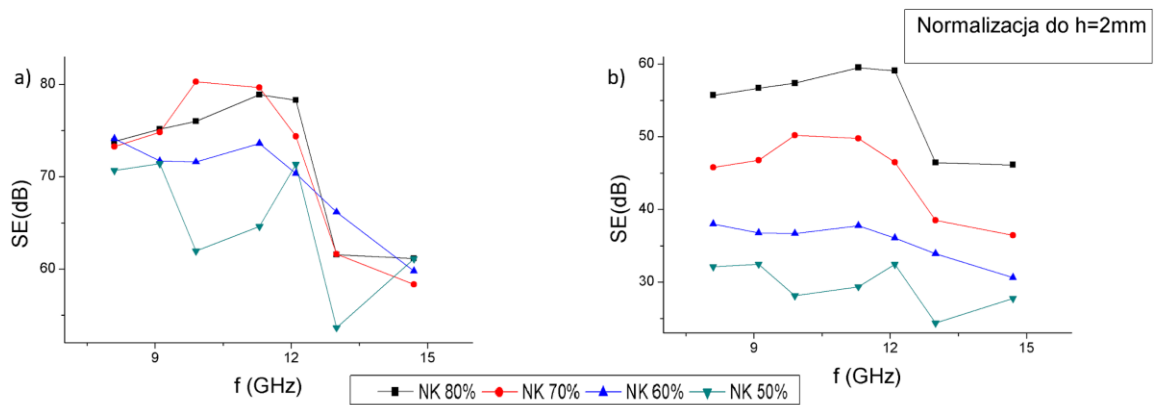
Rys. 7.21. Układ do pomiaru skuteczności ekranowania płytek kompozytów ekranowania  
 1 - generator, 2 - miernik, 3 – antena nadawcza typu horn, 4 – antena odbiorcza typu horn

Na wykresach od 7.23 - 7.25 przedstawiono wyniki badań ekranowania pola dla kompozytów z napełnieniem zendrą walcowniczą oraz rozdrobnioną taśmą nanokrystaliczną. Wykonane próby pozwoliły na dobór optymalnego składu i formy finalnego kompozytu.



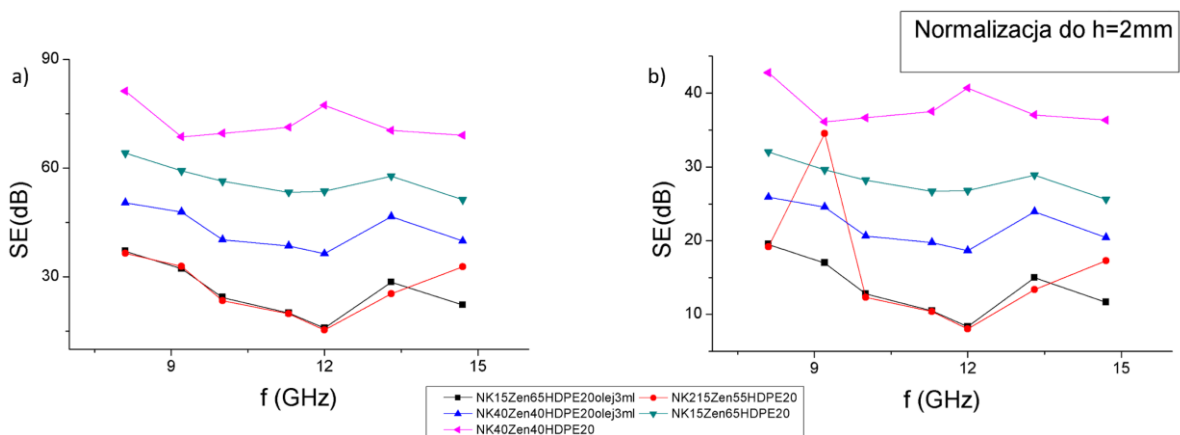
Rys. 7.22. Wykres skuteczności ekranowania: a) kompozytu zendry, b) kompozyt zendry z normalizacją grubości ścianki do 2 mm

Najlepszą skuteczność ekranowania wykazywała kompozytu zendry walcowniczej o zawartości napełniacza 80% wagowo. Przy 8 GHz wartość SE wynosiła 70 dB a przy wzroście częstotliwości do 15 GHz zanotowano spadek SE o około 10 dB. Zmniejszając poziom napełnienia kompozytu zanotowano znaczny spadek skuteczności ekranowania wynoszący dla kompozytu o napełnieniu 70% około 40 dB dla częstotliwości 8 GHz, przy 15 GHz różnica wynosiła 5 dB. Kompozyty poniżej 50% napełnienia wykazywały przebieg skuteczności ekranowania baze znacznych spadków SE, w częstotliwościach od 8-15 GHz różnica pomiędzy napełnieniem 80% wynosiła ponad 30 dB.



Rys. 7.23. Wykresy skuteczności ekranowania kompozytu a) blachy nanokrystalicznej b) blachy nanokrystalicznej z normalizacją grubości ścianki do 2 mm

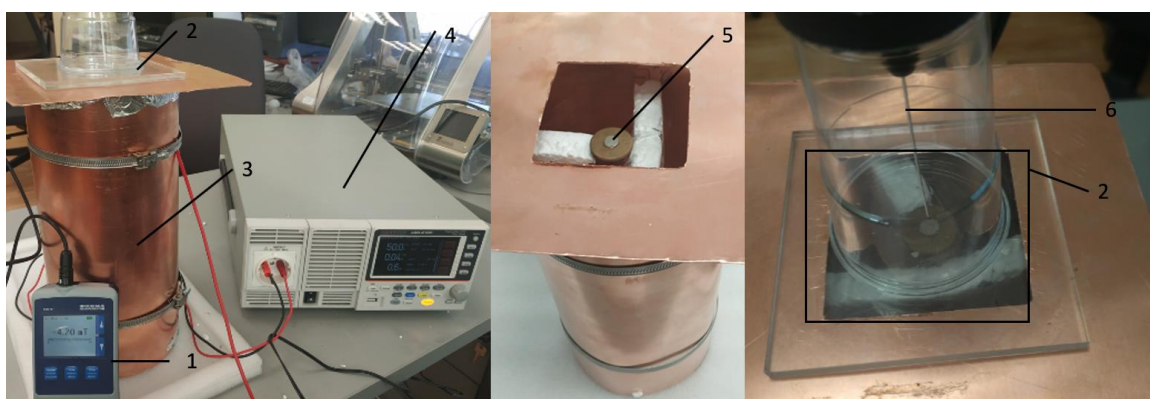
Największą skuteczność ekranowania wykazywała próbka z zawartością rozdrobnionej blachy nanokrystalicznej o 80% w zawartości wagowej w kompozycie. Zmierzono przy 8 GHz 55 dB, natomiast przy wzroście częstotliwości do 12 GHz zanotowano wzrost SE o około 5 dB. Powyżej 12 GHz zanotowano znaczny spadek o około 15 dB. Zmniejszając poziom napełnienia kompozytu zanotowano znaczny spadek skuteczności ekranowania, który dla kompozytu o napełnieniu 70% wynosił około 10 dB w całym zakresie częstotliwości. Kompozyty o zawartości napełnienia 50% i 60% wykazały znaczny spadek skuteczności ekranowania w stosunku do próbek wypełnionych 80%. Kompozyty o napełnieniu 60% wykazywały SE na poziomie około 20 dB w całym zakresie częstotliwości. W próbkach o zawartości 50% wypełnienia zanotowano znaczny spadek SE w stosunku do kompozytów o 80% zawartości w częstotliwościach od 8-15 GHz różnica pomiędzy SE wynosiła ponad 30 dB.



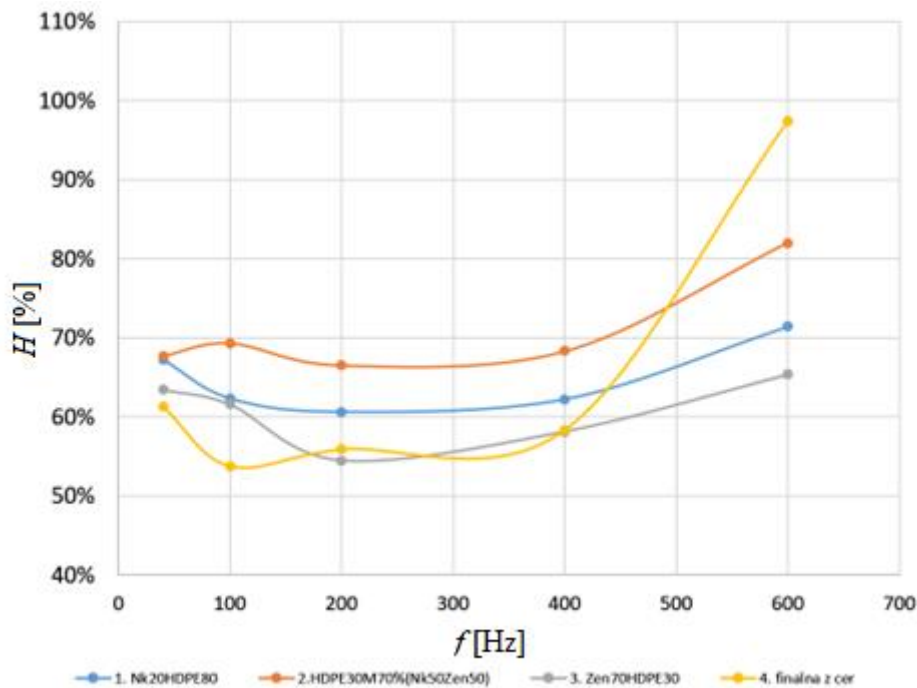
Rys. 7.24. Wykresy skuteczności ekranowania kompozytu zendry i taśmy nanokrystalicznej: a) kompozyt warstwowy o oznaczeniu NK215zen55HDPE20, b) kompozyt z normalizacją grubości ścianki do 2 mm

Najlepszą skuteczność ekranowania wykazywały próbki z zawartością zendry walcowniczej 40% i 40% blachy nanokrystalicznej. Próbki te wykazywały SE na poziomie wartości powyżej 40 dB przy 8 GHz. W całym zakresie częstotliwości odchylenie ekranowania pola elektromagnetycznego wynosiło około 5 dB. Zmieniając skład kompozytu zanotowano spadek skuteczności ekranowania wynoszący około 10 dB dla kompozytu o składzie 15 % blachy nanokrystalicznej i 65% zendry. W przypadku pozostałych składów kompozytów zauważono znaczne spadki SE w stosunku do dwóch wyżej omawianych próbek. Na wykresach przedstawiono zależność skuteczności ekranowania (SE) od częstotliwości ( $f$ ) w zakresie od 8 do 15 GHz dla różnych zawartości napełniacza w kompozytach. Skuteczność ekranowania jest mierzona w decybelach (dB). Kompozyty z dodatkiem oleju mają niższą skuteczność ekranowania w porównaniu do materiałów bez oleju. Olej może wpływać na właściwości dielektryczne materiału obniżając jego zdolność do tłumienia pola elektromagnetycznego mimo lepszej homogeniczności kompozytu.

W wyniku przeprowadzonej analizy skuteczności ekranowania pola dla wyższych częstotliwości przystąpiono do badania SE w zakresie niskich częstotliwości od 50 Hz do 600 Hz. W tym celu zbudowano układ pomiarowy wykorzystujący miernik pola magnetycznego (gausmierz) oraz komorę zbudowaną z miedzi, w której centrycznie ustawiono cewkę podłączoną do generatora. Schemat budowy stanowiska przedstawiono na rys. 7.17. Sprawdzono zmianę natężenia indukcji magnetycznej przy zmiennej częstotliwości. Do badań użyto kompozyty o trzech niepełnieniach (nanokrystalik 20%, HDPE 80%; nanokrystalik 35%, zendra 35%, HDPE 30%; zendra 70%, HDPE 30%) i porównano je do wyników finalnej próbki w zbudowanej komorze przedstawionej na rys. 7.40.



Rys. 7.25. Fotografia urządzenia pomiarowego do badania skuteczności ekranowania 1 - miernik pola magnetycznego, 2 - przestrzeń pomiarowa, 3 - rura miedziana, 4 - generator, 5 - cewka, 6 - odbiornik



Rys. 7.26. Wykres względnej zmiany wartości  $H$  w funkcji częstotliwości

Na podstawie danych zebranych w zmiany określono natężenia pola magnetycznego w częstotliwościach od 50 Hz do 600 Hz. Przeprowadzono badania dla czterech kompozytów materiałów nanokrystalicznych 20%, HDPE 80%; materiał nanokrystaliczny 35%, zendra 35%, HDPE 30%; zendra 70%, HDPE 30% oraz finalnego kompozytu z ceramiką. Trzy materiały (materiał nanokrystaliczny 20%, HDPE 80%; materiał nanokrystaliczny 35%, zendra 35%, HDPE 30%; zendra 70%, HDPE 30%) zostały zbadane wykorzystując schemat pomiarowy przedstawiony na rysunku 7.17 i porównano je z wynikiem badania, w którym wykorzystano zbudowaną komorę ukazaną na rys. 7.32. Analizując wyniki pomiarów stwierdzono, że najwyższe tłumienie natężenia pola magnetycznego w zakresie tych częstotliwości z nieznacznymi spadkami zauważono dla kompozytu HDPE30M70%(NK50Zen50). Zmiana natężenia pola magnetycznego utrzymują się w granicach 70% utrzymując tą wartość do 400 Hz. Wraz ze wzrostem częstotliwości do 600 Hz stwierdzono znaczny wzrost  $H$  o około 15%. Porównując zależności natężenia pola magnetycznego HDPE30M70%(NK30Zen70) w częstotliwości 50 Hz zauważono różnicę około 5% względem HDPE30M70%(NK50Zen50). Zwiększając częstotliwość o 50 Hz stwierdzono spadek  $H$  o 15%. Natężenie pola magnetycznego w częstotliwościach od 100 Hz do 400 Hz utrzymywało się na podobnym poziomie około 55% z niewielkimi fluktuacjami. W częstotliwościach od 400 Hz do 600 Hz zarejestrowano znaczący wzrost  $H$  wynoszący 40%, który jest większy o około 15% względem HDPE30M70%(NK50Zen50). Analizę wyników badań pozostałych dwóch próbek

(nanokrystalik 20%, HDPE 80%; zendra 70%, HDPE 30%) odrzucono z powodu niespełnienia kryteriów SE dla wysokich częstotliwości.

### **7.3.5. Podsumowanie badań wstępnych**

Pierwsze próby badań skuteczności ekranowania przeprowadzono dla kompozytów zawierających zendrę walcowniczą. Wytworzono kompozyty o składach od 20 - 80% napelnienia. Zauważono, iż wykonywanie badań dla kompozytów poniżej zawartości 50% napelnienia daje niezadowalające wyniki, dlatego dla próbek wykonanych z rozdrobnionej blachy nanokrystalicznej nie uwzględniono ich na wykresach. Ze względu na zawartość chłodziwa używanego do obróbki skrawaniem, które zwiększa właściwości dielektryczne napelniacze takie jak mosiądz i aluminium wykazywały niską skuteczność ekranowania. Wyniki SE pyłów złomowiskowych były znacznie niższe niż od zendry i blachy nanokrystalicznej. W celu zwiększenia skuteczności ekranowania wykonano kompozyty, w których wykorzystano dwa napelniacze. W wyniku analizy SE kompozytów dwuskładnikowych przeprowadzono badanie zmiany natężenia pola magnetycznego w niskich częstotliwościach. Wyniki doraźnego sprawdzenia skuteczności ekranowania pozwoliły dokonać wyboru składu kompozytu przeznaczonego do dalszych badań.

## **7.4. Wyniki badań zasadniczych**

W wyniku przeprowadzenia badań wstępnych kompozytów opierających się na analizie parametrów elektrycznych i ekranujących pole EM wytypowano skład kompozytów do zasadniczych badań zmieniając strukturę wewnętrzną kompozytów na nieuporządkowaną mieszaną oraz warstwową. Badania termomechaniczne pozwoliły na wytypowanie konkretnego ułożenia napelniacza w kompozycie. Następnym krokiem było zbudowanie prototypu komór.

### **7.4.1. Wyniki badań DMTA**

Dynamiczna analiza mechaniczna (DMTA) jest zaawansowaną techniką stosowaną do badania właściwości mechanicznych materiałów, zwłaszcza ich modułu, w funkcji częstotliwości, temperatury i amplitudy deformacji. Norma ISO 6721-1:2019 określa ogólne zasady dotyczące przeprowadzania pomiarów DMTA dla materiałów polimerowych. Pomiar DMTA zgodny z normą ISO 6721-1:2019 polega na poddawaniu próbki materiału

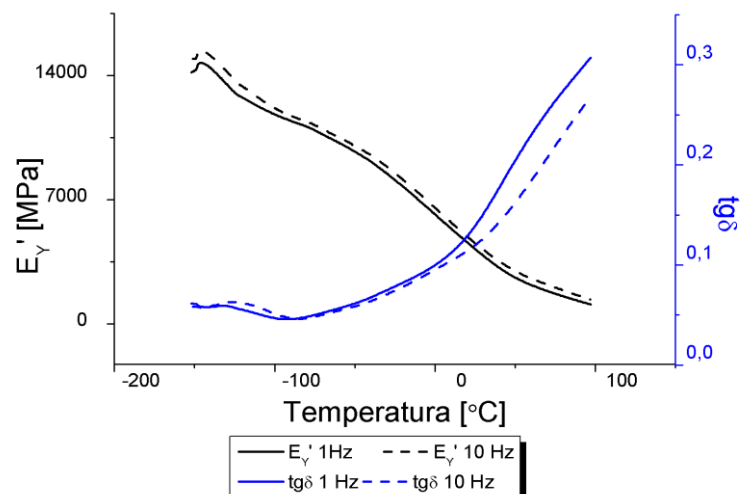
cyklicznym obciążeniom mechanicznym o zmiennej częstotliwości. Podczas badania rejestruje się odpowiedź materiału na te obciążenia, mierząc parametry takie jak amplituda deformacji, fazowy kąt przesunięcia i siła wymuszona [220].

Próbki do badań wykonano w formie belek według normy PN-EN ISO 527-2 o wymiarach 150x10x4mm, które przycięto na wymiar 55 mm.

Parametry, przy których przeprowadzono badania trójpunktowe zginanie z belką ułożoną swobodnie bez mocowania: temperatura zakończenia testu  $t_z = 100\text{ }^\circ\text{C}$ , temperatura rozpoczęcia testu  $t_r = -150\text{ }^\circ\text{C}$ , prędkość nagrzewania  $v_g = 3\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ , długość uchwytu  $l_s = 50\text{ mm}$ , długość próbki  $l_p = 55\text{ mm}$ , wysokość próbki  $h = 4\text{ mm}$ .

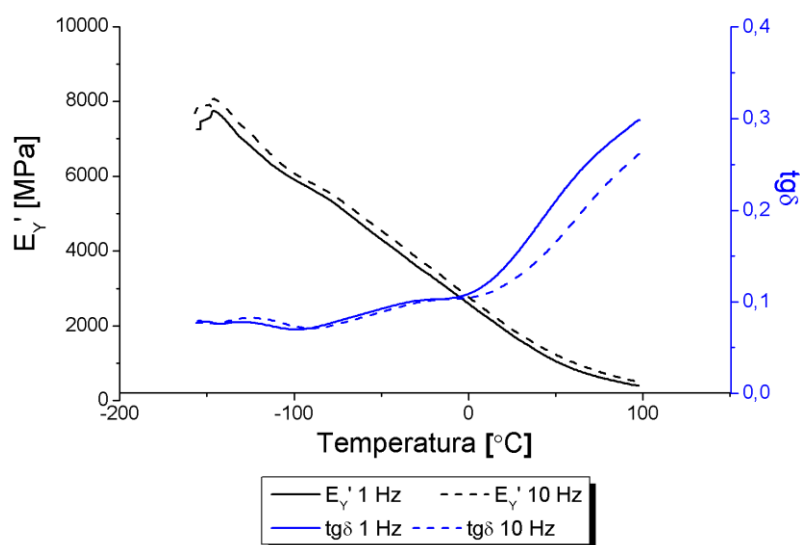


7.27. Urządzenie Netzsch DMA 242C



Rys.7.28. Wartości modułu zachowawczego i tangensa kąta stratności mechanicznej kompozytu wykonanego z zendry walcowniczej i blachy nanokrystalicznej zhomogenizowanej z tworzywem HDPE postaci płatków

Dla próbek zawierających napełniacz w postaci płatków zendry walcowniczej i blachy nanokrystalicznej zhomogenizowanej z tworzywem HDPE zarejestrowano przebieg zależności tangensa kąta stratności oraz modułu zachowawczego od temperatury  $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Zarejestrowano najwyższą wartość  $E_Y'$ , równą  $14320\text{ MPa}$  dla  $1\text{ Hz}$  oraz  $14760\text{ MPa}$  dla  $10\text{ Hz}$ . W całym zakresie fazy szklistej odnotowano w różnicę wynoszącą około  $500\text{ MPa}$  w temperaturze od  $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . W stanie wysokoelastycznym w temperaturze  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  różnica pomiędzy modułem zachowawczym wyniosła około  $200\text{ MPa}$ . Dla  $\text{tg}\delta$  od temperatury  $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  zarejestrowano podobny przebieg krzywych termograficznych, różnica w wartościach modułu stratności mechanicznej pomiędzy częstotliwościami wzbudzenia  $1\text{ Hz}$  i  $10\text{ Hz}$  jest nieznaczna. W temperaturze około  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  wynosiła  $\text{tg}\delta$   $0,05$ , a wraz z wzrostem temperatury do  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  zarejestrowano nieznaczny wzrost wartości modułu stratności mechanicznej. Największe różnice pomiędzy wartościami modułu stratności mechanicznej zarejestrowano powyżej temperatury  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  do końca badania. Zarejestrowano maksymalną różnicę wartości tangensa kąta stratności wynoszącą  $\text{tg}\delta$   $0,05$  pomiędzy częstotliwościami oddziaływania siły

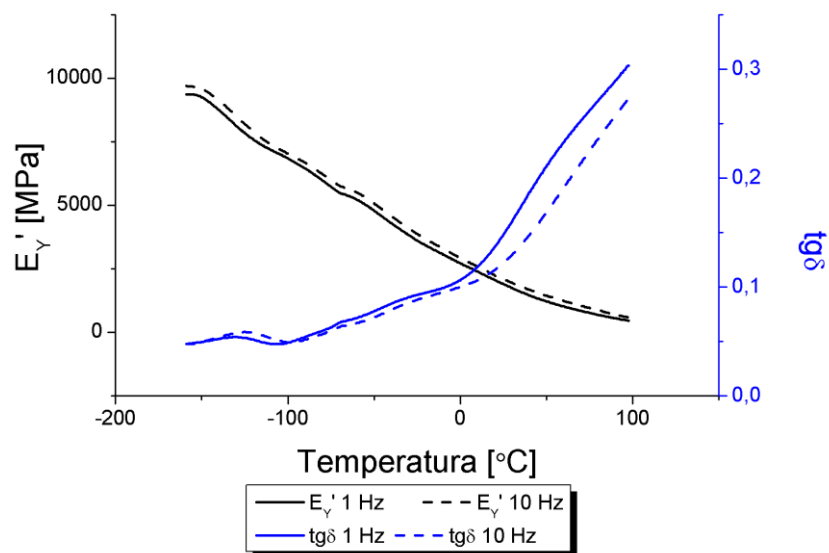


Rys. 7.29. Wartości modułu zachowawczego i tangensa kąta stratności mechanicznej kompozytu wykonanego z zendry walcowniczej i blachy nanokrystalicznej zhomogenizowanej z tworzywem HDPE postaci płatków z warstwą ceramiki

Pomiar wykonano orientując warstwę ceramiki na dole stołu pomiarowego dla próbki zawierającej napełniacz w postaci płatków zendry walcowniczej i blachy nanokrystalicznej zhomogenizowanej z tworzywem HDPE oraz warstwą ceramiki. Zarejestrowano przebieg zależności tangensa kąta stratności oraz modułu zachowawczego. Zarejestrowano najwyższą



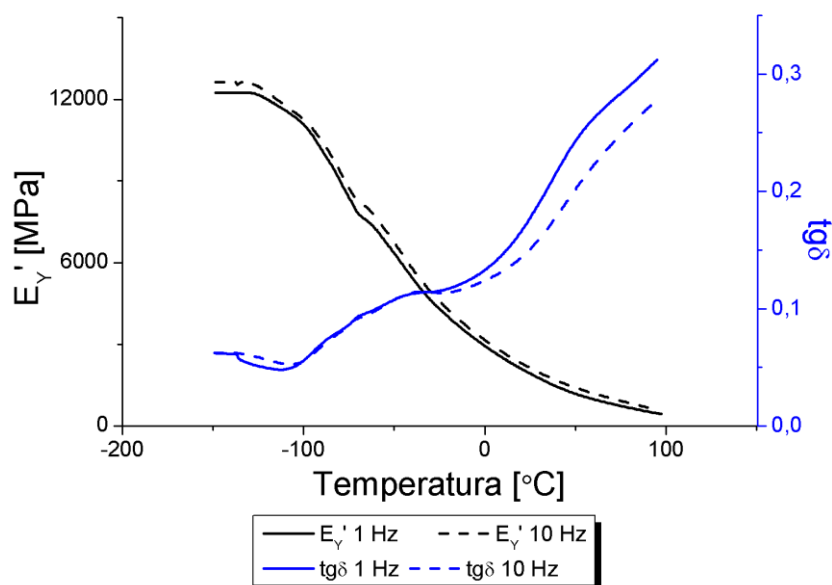
wartość  $E_Y'$ , równą 7920 MPa dla 1 Hz oraz 8260 MPa dla 10 Hz. Odnotowano w całym zakresie fazy szklistej i wysokoelastycznej różnicę wynoszącą około 200MPa. Dla  $\text{tg}\delta$  od temperatury  $-150\text{ }^\circ\text{C}$  do  $0\text{ }^\circ\text{C}$  zarejestrowano podobny przebieg krzywych termograficznych w których różnica modułu stratności mechanicznej pomiędzy częstotliwościami wzbudzenia 1 Hz i 10Hz jest nieznaczna. W temperaturze około  $-100\text{ }^\circ\text{C}$  zarejestrowano wartość  $\text{tg}\delta$  0,05, a wraz ze wzrostem temperatury do  $0\text{ }^\circ\text{C}$  zarejestrowano nieznaczny wzrost wartości modułu stratności mechanicznej. Największe różnice pomiędzy wartościami modułu stratności mechanicznej zauważono powyżej temperatury  $0\text{ }^\circ\text{C}$  do końca badania w temperaturze  $100\text{ }^\circ\text{C}$ . Zarejestrowano maksymalną różnicę wartości tangensa kąta stratności wynoszącą  $\text{tg}\delta$  0,05 pomiędzy częstotliwościami oddziaływania siły.



Rys. 7.30 Wartości modułu zachowawczego i tangensa kąta stratności mechanicznej kompozytu wykonanego z zendry walcowniczej i blachy nanokrystalicznej zhomogenizowanej z tworzywem HDPE postaci płatków z warstwą ceramiki

Pomiar wykonano orientując warstwę ceramiki na górze stołu pomiarowego dla próbki zawierającej napelniacz w postaci płatków zendry walcowniczej i blachy nanokrystalicznej zhomogenizowanej z tworzywem HDPE oraz warstwą ceramiki. Zarejestrowano przebieg zależności tangensa kąta stratności oraz modułu zachowawczego. Zarejestrowano najwyższą wartość  $E_Y'$ , równą 9320 MPa dla 1 Hz oraz 9760 MPa dla 10 Hz. W całym zakresie fazy szklistej odnotowano różnicę wynoszącą około 200MPa w temperaturze od  $-150\text{ }^\circ\text{C}$  do  $-100\text{ }^\circ\text{C}$ . W temperaturze około  $-100\text{ }^\circ\text{C}$   $\text{tg}\delta$  wynosił 0,05, a wraz z wzrostem temperatury do  $0\text{ }^\circ\text{C}$  zarejestrowano nieznaczny wzrost wartości modułu stratności mechanicznej. Największe różnice pomiędzy wartościami modułu stratności mechanicznej zauważono

powyżej temperatury 0 °C do końca badania. Zarejestrowano maksymalną różnicę wartości tangensa kąta stratności wynoszącą  $\text{tg}\delta$  pomiędzy częstotliwościami oddziaływania siły.



Rys. 7.31. Wartości modułu zachowawczego i tangensa kąta stratności mechanicznej kompozytu trójwarstwowego. Warstwy wykonane z płatków zendry walcowniczej, blachy nanokrystalicznej i ceramiki

Dla próbek zawierających wypełniacz w postaci płatków zendry walcowniczej, blachy nanokrystalicznej i ceramiki połączonych z tworzywem HDPE warstwowo zarejestrowano przebieg zależności tangensa kąta stratności oraz modułu zachowawczego. Najwyższą wartość  $E_Y'$ , równą 12320 MPa odnotowano dla 1 Hz oraz 12760 MPa dla 10 Hz. Zarejestrowano w całym zakresie fazy szklistej różnicę wynoszącą około 500 MPa w temperaturze od  $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . W stanie wysokoelastycznym w temperaturze  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  różnica pomiędzy modułem zachowawczym wynosiła około 200 MPa. Dla  $\text{tg}\delta$  od temperatury  $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  zarejestrowano podobny przebieg krzywych, których różnica w module stratności mechanicznej pomiędzy częstotliwościami wzbudzenia 1 Hz i 10 Hz jest nieznaczna. Zauważono nieznaczny wzrost modułu stratności mechanicznej w temperaturze powyżej  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Największe różnice pomiędzy wartościami modułu stratności mechanicznej zauważono powyżej temperatury  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  do końca badania. maksymalną różnicę wartości tangensa kąta stratności wynoszącą  $\text{tg}\delta$  0,05 pomiędzy częstotliwościami oddziaływania siły.

Pomiar metodą DMTA badanych kompozytów został przeprowadzony w temperaturze fazy szklistej i użytkowej nie doprowadzając kompozytu do temperatury płynięcia.

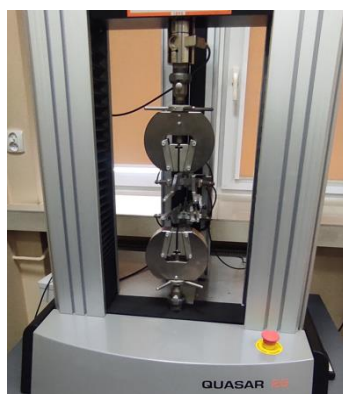
Z obserwacji przebiegu krzywych termograficznych przedstawiających wyniki badań właściwości mechanicznych w funkcji temperatury określonych przy użyciu metody DMTA

zauważono, iż dodanie warstwy ceramiki spowodowało zmniejszenie modułu zachowawczego kompozytu i dowiedziono, że umiejscowienie danej warstwy w kompozycie jest istotne. Porównując wyniki badania dla jednego kompozytu różniące się orientacją warstwy ceramicznej podczas wykonywania próby DMTA różnica wyniosła około 2000 MPa w fazie szklistej. Analizując wpływ warstwy ceramiki na różnice w module zachowawczym stwierdzono, że korzystniej wpływa ściskanie warstwy ceramiki niż jej rozciąganie podczas badania. Korzystając z wyników wcześniejszych badań DMTA ustalono najkorzystniejsze ułożenie warstw podczas badania. Kompozyt trójwarstwowy podczas próby ułożony był tak aby warstwa ceramiki podczas badania była ściskana a nie rozciągana. Pozwoliło to na przedstawienie wyników w porównywalny sposób.

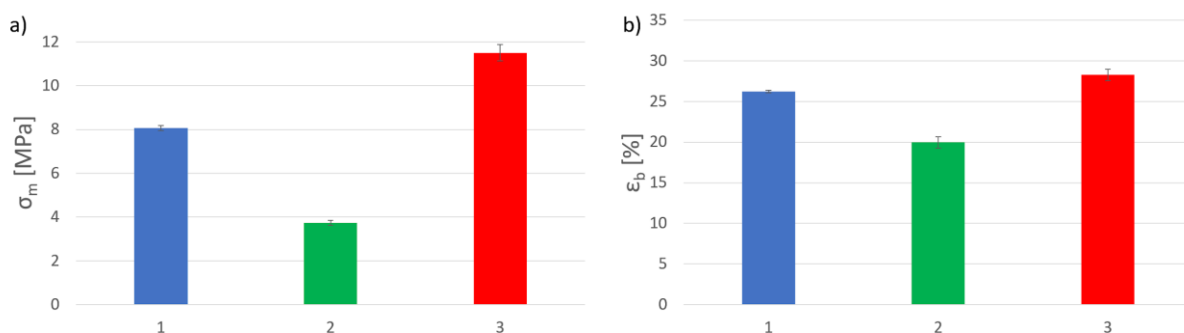
Analizując wszystkie termogramy kompozytów stwierdzono, że najwyższą wartość modułu zachowawczego w fazie szklistej zaobserwowano w kompozycie bez warstwy ceramiki, gdzie  $E_Y'$  wyniósł ponad 14000 MPa. Dodając do składu mieszanki warstwę ceramiki wartość modułu zachowawczego w fazie szklistej była niższa około 4000 MPa. Porównując termogramy DMTA wartości  $E_Y'$  kompozytu składającego się z trzech warstw do kompozytu zhomogenizowanego bez warstwy ceramiki w fazie szklistej była mniejsza około 2000 MPa.

## 7.4.2. Wyniki badań statycznego rozciągania

Próbie statycznego rozciągania zastosowano do wyznaczenia parametrów takich jak wytrzymałość na rozciąganie modułu Younga. Badania przeprowadzono na próbkach zgodnych z normą PN-EN ISO 527-2 o wymiarach 150 x 10 x 4 mm wykorzystując urządzenie Galdabini Quasar 25 przedstawione na rys. 7.24, wyposażone w ekstensometr. Próbkę znormalizowaną przedstawioną na rys. 3.2 poddano statycznemu rozciąganiu z prędkością  $v = 50\text{mm/min}$  i  $1\text{ mm/min}$  przy badaniu z użyciem ekstensometru.

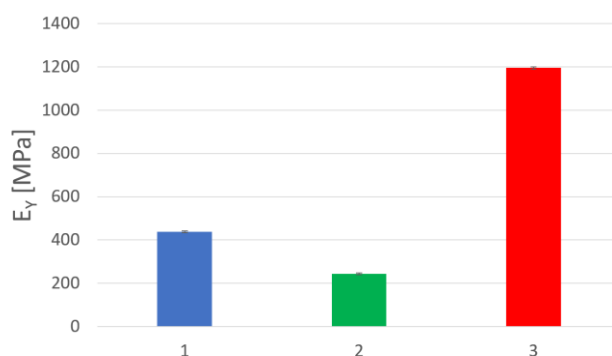


Rys. 7.32. Maszyna do statycznego rozciągania z ekstensometrem Galdabini Quasar 25



Rys.7.33. Wyniki badań a) naprężenia maksymalnego  $\sigma_m$ , b) wydłużenia względnego  $\epsilon_b$ ; 1 - próbka mieszana z warstwą ceramiki, 2 - próbka warstwowa z ceramiką, 3 - próbka mieszana

Wydłużenie względne  $\epsilon_b$  dla próbek mieszanych bez ceramiki wyniosło około 28% i w porównaniu do kompozytów mieszanych z ceramiką wydłużenie względne nieznacznie spada o około 2%. Dla kompozytu warstwowego z warstwą ceramiki zauważono spadek wydłużenia względnego  $\epsilon_b$ , względem wzorcowego kompozytu mieszanego bez ceramiki różnica stanowiła około 7%. Naprężenia maksymalne  $\sigma_m$  dla wzorcowych kompozytów mieszanych bez ceramiki wyniosło 11,8 MPa, w porównaniu do kompozytów mieszanych z ceramiką zauważono spadek naprężenia maksymalnego  $\sigma_m$  o 3,7 MPa. Dla do kompozytów warstwowch z ceramiką naprężenie maksymalne  $\sigma_m$  wyniosło 3,8 MPa. Porównując do wzorcowych kompozytów mieszanych wartość naprężenia była znacznie niższa i wynosiła 8 MPa.



Rys.7.34. Wyniki badań modułu Younga  $E_Y$  1 - próbka mieszana z warstwą ceramiki, 2 - próbka warstwowa z ceramiką, 3 - próbka mieszana

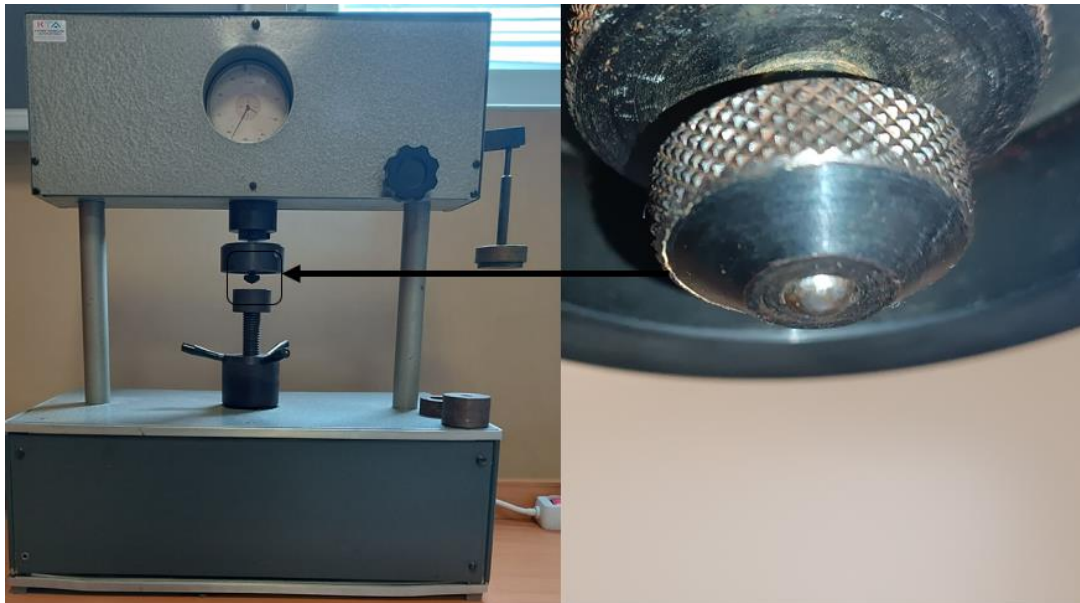
Moduł Younga  $E_Y$  dla próbek wzorcowych kompozytów mieszanych bez ceramiki wyniósł około 1200 MPa. Znaczny spadek modułu Younga zarejestrowano dla próbek

mieszanych z warstwą ceramiki, wynoszący 420 MPa. Próbki warstwowe w porównaniu do kompozytu mieszanego z warstwą ceramiki wykazały spadek wartości modułu Younga o około 180 MPa.

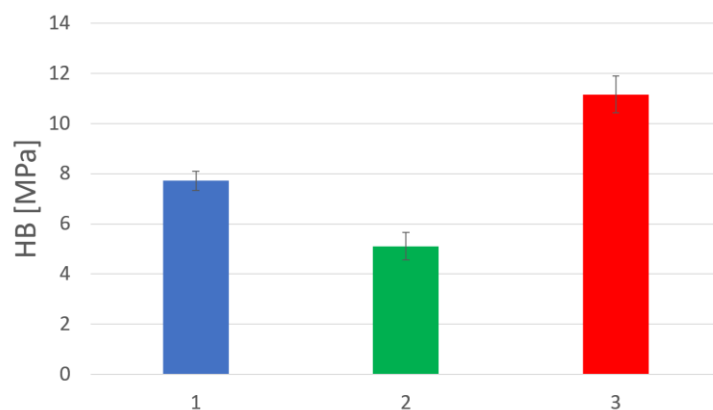
Dodanie do kompozytu warstwy ceramiki znacząco zmniejsza wytrzymałość na rozciąganie.

### 7.4.3. Wyniki badań Twardości HB

Badanie twardości HB zgodnie z normą ISO 2039-1 jest powszechnie stosowaną metodą oceny twardości materiałów termoplastycznych. Twardość metodą wciskania jest miarą odporności materiału na penetrację pod wpływem ustalonego obciążenia, a norma ISO 2039-1 określa szczegółowe zasady i warunki przeprowadzania tego testu. Podczas badania twardości HB zgodnie z normą ISO 2039-1, kula ze stali węglowej o określonej średnicy (najczęściej 10 mm) jest wciskana pod określonym obciążeniem (najczęściej od 1 do 120 kg) w powierzchnię materiału przez określony czas. Obciążenie to powoduje wgniecenie kuli w materiał, tworząc charakterystyczny odcisk. Po usunięciu obciążenia mierzy się średnicę pozostawionego wgniecenia przy pomocy mikroskopu [65].



Rys. 7.35. Twardościomierz HB



Rys.7.36. Wyniki badań twardości HB 1 - próbka mieszana z warstwą ceramiki, 2 - próbka warstwowa ceramika, 3 - próbka mieszana

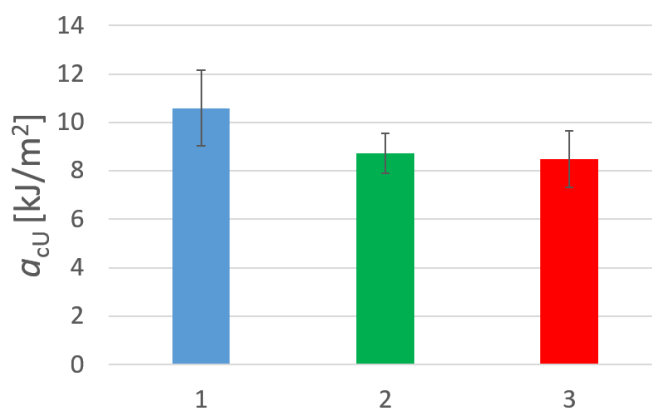
Twardości HB dla próbek wzorcowych kompozytów mieszanych bez ceramiki wynosiła około 11 MPa. Porównując wyniki stwierdzono spadek twardości HB dla kompozytów z ceramiką. Spadek twardości HB zarejestrowano dla próbek mieszanych z warstwą ceramiki, wynoszący około 3,2 MPa. Próbki warstwowe wykazały twardość HB wynoszącą około 5 MPa.

#### 7.4.4. Wyniki badań udarności Charpy'ego

Udarność jest miarą zdolności materiału do pochłaniania energii podczas uderzenia lub zderzenia. Określa ona stopień, w jakim materiał może wytrzymać siły dynamiczne i nagłe obciążenia. Wytrzymałość udarowa jest zwykle mierzona za pomocą testu udarności Charpy'ego. W teście Charpy'ego prostokątna próbka jest uderzana przez wahadło o określonej wartości energii. Pochłonięta energia przez próbkę przy złamaniu jest mierzona przez urządzenie. Rys. 7.29 przedstawia młot do badania udarności marki Zwick Roell HIT5.5P z założonym młotem 2 J.



Rys. 7.37. Zdjęcie młota do pomiaru udarności Zwick Roel HIT5.5P



Rys. 7.38. Wyniki badań udarności 1 - próbka mieszana, 2 - próbka mieszana z warstwą ceramiki, 3 - próbka warstwowa ceramika

Największą udarność zarejestrowano w przypadku próbki mieszanej, wynosiła ona około 10,5 KJ/m<sup>2</sup>. Próbkę warstwową z ceramiką wykazały znaczny spadek udarności o około 2 KJ/m<sup>2</sup>. Najmniejszą udarność wykazywały próbki warstwowe, w których udarność wyniosła około 8,5 KJ/m<sup>2</sup>. Dla próbki mieszanej z ceramiką zarejestrowano nieznaczny wzrost udarności.

### 7.4.5. Podsumowanie badań termomechanicznych

Analizując wyniki badań stwierdzono, że najkorzystniejsze właściwości termomechaniczne wykazują próbki kompozytowe o strukturze mieszanej bez ceramiki. Dodanie do kompozytu proszku ceramicznego pogarszało ich właściwości termomechaniczne. Próbkę warstwową w porównaniu do kompozytu mieszanego posiadały mniejsze wartości właściwości termomechanicznych. Mogło to być spowodowane różnicami adhezji między

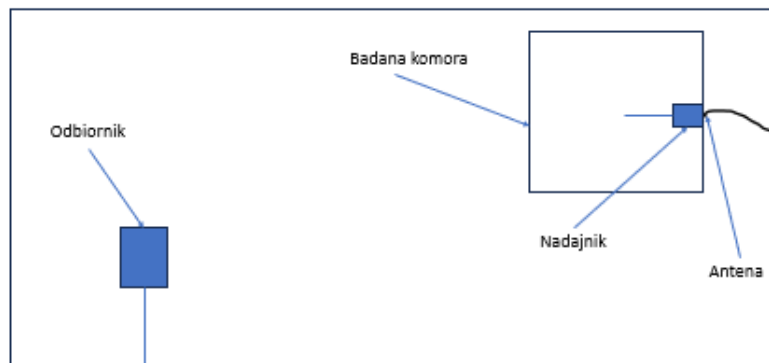
warstwami napelniaczy. Do budowy komór do pomiaru skuteczności ekranowania wybrano kompozyty mieszane ze względu na lepsze właściwości termomechaniczne.

## **7.4.6. Badania skuteczności ekranowania pola elektromagnetycznego w komorze bezodbiciowej**

Pomiar SE panelu falowodowego oparty jest na standardzie IEEE 299.1, który określa standardową metodę pomiaru SE obudów i skrzynek o wymiarach od 0,1 m do 2 m. Badanie opiera się na zagnieżdżonej komorze pogłosowej. Podejście komory pogłosowej z mieszanem częstotliwości zakłada, że obudowa jest fizycznie mała (mniej niż 0,75 m w wymiarze liniowym), ale duża elektrycznie. Schemat proponowanego podejścia przedstawiono na rysunku 7.38. Podstawowym podejściem jest umieszczenie małej obudowy w komorze pogłosowej. Ten typ konfiguracji jest zasadniczo zagnieżdżoną komorą pogłosową, jak omówiono w IEC 61000-5-7. W tej konfiguracji źródło jest umieszczane wewnątrz dużej komory pogłosowej, a komora pogłosowa jest uszczelniona. Źródło (np. klakson podłączony do generatora sygnału RF) jest następnie przesuwane o częstotliwość w danym zakresie częstotliwości. Ponieważ część energii RF w zewnętrznej komorze połączy się w małą obudowę, powoduje to mieszanie częstotliwości energii RF w małej obudowie. W rezultacie wszystkie punkty w małej obudowie statystycznie mają te same poziomy pola dla danych uśrednionych w pewnym paśmie częstotliwości. Poziomy mocy w małej obudowie są monitorowane przez małą sondę monopolową (lub antenę) umieszczoną na jednej ze ścian wewnętrznych małej obudowy. Tak długo, jak mała obudowa jest dobrze wymieszana (tj. poprzez mieszanie częstotliwości), mała sonda monopolowa umieszczona na wewnętrznej ścianie da taki sam średni poziom mocy wewnątrz małej obudowy, jak antena umieszczona w środku małej obudowy. To mieszanie częstotliwości w komorze zewnętrznej może być wykonane z konwencjonalnym mieszanem mechanicznym lub bez niego [221]. Komorę wykonano z kompozytów HDPE 25% ceramika 25% M50% (NK30Zen70).



Komora bez odbiciowa



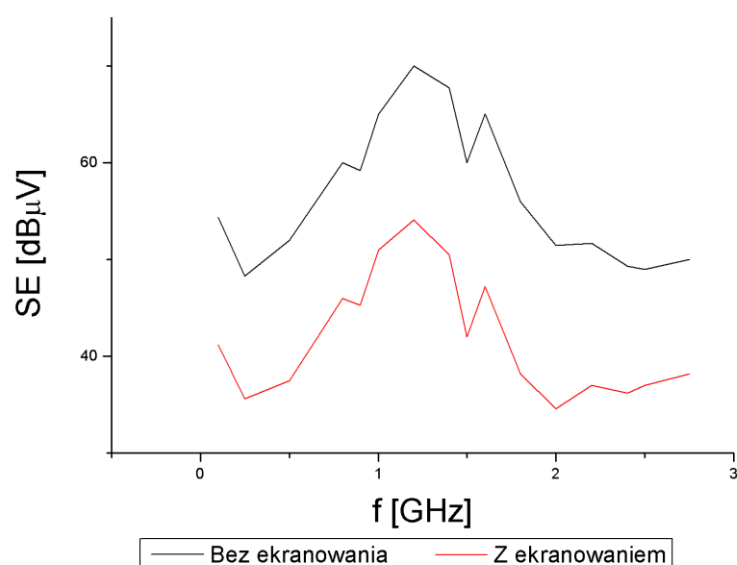
Rys. 7.39. Schemat komory do badania GTEM



Rys. 7.40. Zdjęcie małej komory przed włożeniem do komory bez odbiciowej wraz z odbiornikiem do częstotliwości 2,7 GHz



Rys. 7.41. Zdjęcie małej komory w komorze bez odbiciowej wraz z odbiornikiem do częstotliwości 2,7 GHz



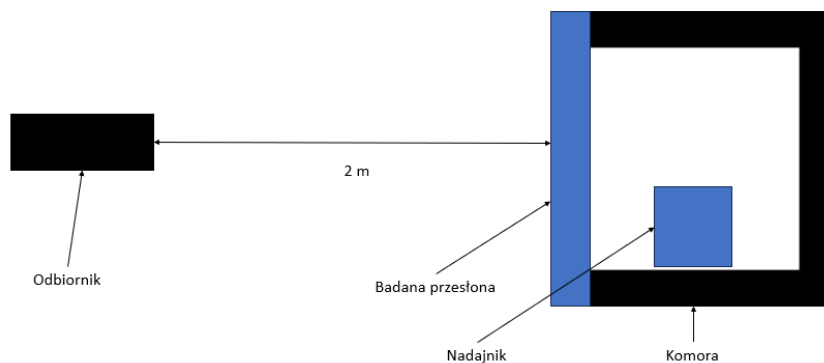
Rys. 7.42. Wykres ekranowania pola w komorze bezodbiciowej

Analizując przebieg wykresu ekranowania przy zamkniętej komorze zarejestrowano najwyższą wartość ekranowania przy 1,25 GHz wynoszącą 70 dB. Po przeprowadzeniu badania w komorze bez odbiciowej z otwartą badaną komorą oraz zamkniętą zauważono, że w całym zakresie badanym od 50 Hz do 2,7 GHz różnica SE wynosiła około 10 dB. Różnica ta spowodowana jest materiałami wykorzystanymi do budowy samej komory, które przyciągają fale EM. W niskich częstotliwościach uzyskano wartości ekranowania pola EM wyższe niż zakładano w symulacjach skuteczności ekranowania (SE). Oznacza to, że wytworzony kompozyt skutecznie wpływa na redukcję pola elektromagnetycznego.

### 7.4.7. Badania skuteczności ekranowania pola elektromagnetycznego z użyciem komory zbudowanej z przesłon

Pomiar skuteczności ekranowania pola elektromagnetycznego jest istotnym procesem w ocenie efektywności materiałów i konstrukcji ekranujących przed działaniem pola elektromagnetycznego. Do przeprowadzenia takich pomiarów często wykorzystuje się specjalnie zaprojektowane komory ekranujące, zgodnie z normą IEEE 299. Komora ekranująca składa się z metalowych przesłon lub klatek, które zapewniają izolację od zewnętrznego pola elektromagnetycznego. Proces pomiaru skuteczności ekranowania polega na generowaniu kontrolowanego pola elektromagnetycznego wewnątrz komory

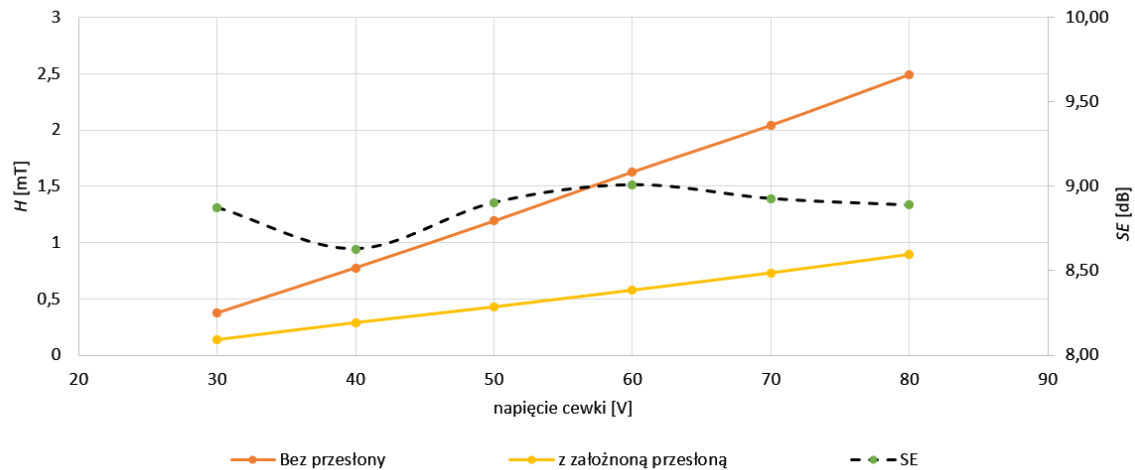
i pomiarze poziomu tego pola zarówno wewnątrz, jak i na zewnątrz ekranu. Różnica w poziomie pola pomiędzy wewnątrz a zewnątrz komory pozwala określić skuteczność ekranowania dla danej częstotliwości. Norma IEEE 299 definiuje szczegółowe procedury pomiarowe oraz kryteria oceny stosowane podczas tego procesu, aby zapewnić spójność i wiarygodność wyników. Standard ten określa m.in. parametry takie jak skuteczność ekranowania w decybelach (dB) oraz sposób przeprowadzania testów w różnych zakresach częstotliwości. Wymogi dotyczące ekranowania mogą się różnić w zależności od zastosowania, dlatego ważne jest przestrzeganie odpowiednich norm podczas przeprowadzania pomiarów skuteczności ekranowania pola elektromagnetycznego [221]. Przeprowadzenie pomiarów zgodnie z normą IEEE 299 umożliwia obiektywną ocenę skuteczności ekranowania i zapewnia pewność co do spełnienia wymagań dotyczących ochrony przed polami elektromagnetycznymi w różnych zastosowaniach. Komorę wykonano z kompozytów HDPE30M70%(NK30Zen70)



Rys. 7.43. Schemat dużej komory



7.44. Zdjęcie komory do badania prądu stałego DC



Rys. 7.45. Wykres natężenia pola magnetycznego dla prądu stałego DC

Analizując przebiegi krzywych dla badania ekranowania pola magnetycznego dla prądu stałego DC w funkcji zmiany od napięcia cewki i wzrostu natężenia pola magnetycznego zauważono nieznaczne spadki SE. W całym zakresie napięcia cewki odnotowano średnie SE w okolicach 9 dB. Skuteczność ekranowania na poziomie oscylującym około 9 dB dla prądu stałego jest zadowalającym wynikiem ze względu na stałe natężenie pola magnetycznego. Właściwości ekranujące kompozytu są zależne od przenikalności magnetycznej rzeczywistej i przebiegu pętli histerezy jak szybko dany materiał się namagnesuje i rozmagnesuje. Możliwe jest, że przy dwóch różnych materiałach pod wpływem przyłożenia z zewnątrz pola magnetycznego tworzy się lokalna magnetyzacja napełniaczy. Różne przenikalności napełniaczy powodują nierównomierną dystrybucję pola magnetycznego, lokalne wzmocnienia i osłabienia, oraz straty magnetyczne, które mogą zwiększać SE.

## 8. Wnioski końcowe

Celem pracy doktorskiej było określenie optymalnego składu kompozytów, o zadowalających właściwościach ekranujących pole elektromagnetyczne, wytworzonych metodą prasowania na gorąco. Celem było również ustalenie odpowiedniego rodzaju napełniacza, jego kształtu, uziarnienia, stopnia napełnienia oraz sposobu jego połączenia w stabilny kompozyt o zadowalających właściwościach termomechanicznych, co umożliwi budowę przesłon ekranujących pole elektromagnetyczne w szerokim zakresie częstotliwości.

Zrealizowane badania potwierdziły następujące tezy:

- W toku przeprowadzonych badań potwierdzono, że istnieje możliwość doboru rodzaju, ilości i wielkości cząstek napełniacza magnetycznego wprowadzonego do polimerowej osnowy dla uzyskania podatnego do prasowania na gorąco kompozytu, co umożliwi otrzymanie wyrobu o zadowalających właściwościach termomechanicznych.
- Analizując badania SE stwierdzono, że istnieje możliwość wytworzenia kompozytów o zadowalających, dla określonych zastosowań właściwościach ekranujących pole elektromagnetyczne, zależnych od rodzaju polimeru stanowiącego osnowę kompozytu oraz od rodzaju, ilości, ułożenia i kształtu napełniacza.

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury wykazano, że większość kompozytów polimerowych coraz częściej znajduje zastosowanie w elektrotechnice do budowy ekranów w zależności od potrzeb. W pracy przedstawiono metodologię postępowania w celu wytypowania najlepszych jakościowo surowców odpadowych ekranujących pole elektromagnetyczne. Wytworzono kompozyt na osnowie termoplastycznego polimeru. Dokonano wyboru tworzyw pochodzących z recyklingu: HDPE, POM oraz jedno pierwotne z PVC.

W pierwszej kolejności wykonano badania rezystancji skrośnej i powierzchniowej oraz sprawdzono skuteczność ekranowania pola elektromagnetycznego dla kompozytów zawierających zendrę walcowniczą o składzie od 20 - 80% napełnienia. W wyniku przeprowadzonej analizy badań stwierdzono, iż wykonane próby SE kompozytów poniżej zawartości 50% napełnienia dają niezadowalające wyniki, co spowodowało ich wyeliminowanie. Napełniacze takie jak mosiądz i aluminium wykazywały niską skuteczność ekranowania co spowodowało wycofanie ich z dalszych badań. Wyniki SE pyłów

złomowiskowych wskazywały na znacznie niższe parametry ekranowania od zendry i blachy nanokrystalicznej, co było przyczyną eliminacji ich z dalszych badań. W celu zwiększenia skuteczności ekranowania wykonano kompozyty wykorzystując dwa napełniacze. W wyniku analizy SE kompozytów dwuskładnikowych przeprowadzono badanie zmiany natężenia pola magnetycznego w niskich częstotliwościach. Wyniki doraźnego sprawdzenia skuteczności ekranowania pozwoliły dokonać wyboru składu kompozytu do badań termomechanicznych.

Analizując termogramy dla jednego kompozytu różniącego się orientacją warstwy ceramicznej w badaniach metodą DMTA, w fazie szklistej zarejestrowano różnicę wartości około 2000MPa. Porównując wpływ warstwy ceramiki na różnice w module zachowawczym stwierdzono, że korzystniejsze jest ściskanie warstwy ceramiki niż rozciąganie. Wykorzystując doświadczenie z poprzedniego badania dla kompozytu składającego się z trzech warstw wykonano próbę metodą DMTA. Analizując wszystkie termogramy kompozytów stwierdzono, że najwyższe wartości modułu zachowawczego w funkcji temperatury w fazie szklistej zaobserwowano w kompozycie bez warstwy ceramiki, gdzie zarejestrowano wartość  $E_Y'$  ponad 14000 MPa. Dodanie do powyższego składu kompozytu warstwę ceramiki znacznie pogorszyło wartość modułu zachowawczego w fazie szklistej, różnica wynosiła około 4000 MPa. Porównując termogramy DMTA, wartości  $E_Y'$  kompozytu składającego się z trzech warstw, do zhomogenizowanego bez warstwy ceramiki różnica wynosiła około 2000 MPa. Dodanie do kompozytu warstwy ceramiki powoduje zmniejszenie wytrzymałości na rozciąganie, twardości oraz udarności. Porównując wyniki badań stwierdzono, że najkorzystniejsze właściwości termomechaniczne wykazywały próbki kompozytowe o strukturze mieszanej bez ceramiki natomiast dodanie proszku ceramicznego pogarszało właściwości termomechaniczne. Wykonanie próbek warstwowych wpływało negatywnie na zachowywanie się kompozytu podczas badań termomechanicznych mogło być to spowodowane różnicami adhezji między warstwami napełniaczy. W wyniku analizy badań na prototypach komór ostatecznie potwierdzono tezę pracy.

## Bibliografia

- [1] <https://www.europarl.europa.eu/topics/pl/article/20210128STO96607/jak-ue-chce-osiagnac-gospodarke-o-obiegu-zamknietych-do-2050-r>.
- [2] Diwedi, R. K., Pandey, P., & Kumar, S. "Characterization of non-metallic waste material reinforced polymer composites. *Materials Today*" Proceedings, 4(4), 5361-5369, 2017.
- [3] Asmatulu, E., Twomey, J., & Overcash, M. "Recycling of fiber-reinforced composites and direct structural composite recycling concept", *Journal of Composite Materials*, 48(5), 593-608, 2014.
- [4] Rojek, M., Szymiczek, M., Stabik, J., Mężyk, A., Jamroziak, K., Krzystała, E., & Kurowski, J. "Materiały kompozytowe z osnową polimerową stosowane na osłony balistyczne," *Archives of Materials Science and Engineering*, 63 (1), 2013, 26-35.
- [5] Miravete A., "Composite Materials in Aerospace Engineering." In: *High Performance Composites for Aerospace Applications*. Elsevier, 2017., Elsevier.
- [6] Rappaport, T S. "Wireless communications: Principal and practice," Prentice hall, 2002.
- [7] Królikowski, W. "Polimerowe kompozyty konstrukcyjne" (pp. 6-17). Warszawa, Poland: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2012.
- [8] Kelly, A. (Ed.). *Concise encyclopedia of composite materials*. Elsevier, 2012.
- [9] Friedrich, K. "thermal conductivity of polymer composites," *Polymer composites* Wiley, 2019.
- [10] Tummalapalli, M. P. "Thermal properties of polymer matrix composites," *Hand book of polymer for engineers* Elsevier, 2017.
- [11] Binns, C. "Thermal stability and oxidation resistance," *Advanced materials for integrated optical waveguides* Springer 2014.
- [12] Bose, R. K. Mahapatra, S. S. "Thermal expansion and stresses," *Mechanics of composite structures* Cambridge university press, 2021.
- [13] Elmarakbi, M. "Automotive Composite Materials," *Advanced Composite Materials for Automotive Applications*, 2013.
- [14] Kumar, M. S. Natarajan, M. "Applications of Composites in Construction," *Advanced Composite Materials*, 2018.
- [15] Crip, S. S. "Composite Materials in Sports and Recreation," *Composite Materials*, 2018.
- [16] Jayaram, M. Seerkumar, K. P. "Electrical insulation materials and systems," *Handbook of materials for nanomedicine*, 2020.
- [17] Zhang, R. "Composite enclosures for electronic devices," *Comprehensive composite materials II* Elsevier, 2018.
- [18] Tummala, R. Rymaszewski, E. J. "Printed circuit boards," *Fundamentals of microsystems packaging* McGraw-Hill, 2001.
- [19] Razali, S.M.A. Elhefnawi, M.A. "Carbon fiber reinforced polymer composites for antenna applications," *Carbon-based polymer nanocomposites for environmental and energy applications* Springer, 2018.
- [20] Zhang, Y. "A review of recent developments in electromagnetic interference shielding materials," *Journal of alloys and compounds* vol.801, 1-14, 2019.
- [21] Jackson, J. D. "Classical electrodynamics," 3rd Edition Wiley, 1999.
- [22] Cox, B. Mitchell, S. "Diagnostic radiology," *Textbook of medical imaging*, Churchill Livingstone, 2005.

- [23] Schneider, S. E. "Astrophysics for scientist and engineers," Cambridge university press, 2010.
- [24] Green, M. A. Emry, K. Hishikawa, Y. Warta, W. Dunlop, E. D. "Solar efficiency tables," Progress in photovoltaics: Research and applications vol, 22,1-9, 2014.
- [25] Feynman, R. Leighton, R. Sands, M. "The feynman lectures on physics," Addison-Wasley, 1964.
- [26] Polak, J. "Promieniowanie elektromagnetyczne a zdrowie człowieka," Przegląd epidemiologiczny, vol 68 no. 4, 521-529, 2014.
- [27] Webster, J G "Electromagnetic compatibility engineering," John Wiley & sons 2009.
- [28] Geetha, S., Satheesh Kumar, K. K., Rao, C. R., Vijayan, M., & Trivedi, D. C. "EMI shielding: Methods and materials—A review," Journal of applied polymer science, 112(4), 2009, 2073-2086.
- [29] Radasky, A. Baum, E. Wik W. "Introduction to the special issue on high-power electromagnetics (HPEM) and intentional electromagnetic interference (IEMI)", IEEE Trans. Electromagn. Compat. 46 (3) (2004) 314–321, <http://dx.doi.org/10.1109/TEMPC.2004.831899>.
- [30] Giri, V. Hoad, R. Sabath, F. "Implications of high-power electromagnetic (HPEM) environments on electronics," IEEE Electromagn. Compat. Mag. 10.1109/MEMC.2020.9133238 (2), 2020, 37–44, <http://dx.doi.org/10.1109/MEMC.2020.9133238>.
- [31] Fazion, M. "Dynamical networks modelling applied to low voltage lines with nonlinear filters," Appl. Syst. Innov. 3 (2) 2020 18, <http://dx.doi.org/10.3390/asi3020018>.
- [32] Pahlavandust, M. Yazdani, R. "Single-switch boost DC-DC converter with zero-current-switching, high power density and low electromagnetic interference," AEU-Int. J. Electron. Commun. 121 2020 153229, <http://dx.doi.org/10.1016/j.aeue.2020.153229>.
- [33] Liu, Z. et al, "Recent advances in graphene-based electromagnetic interference shielding," Carbon, vol. 140, pp. 607-622, 2018.
- [34] Engheta, N. "Metamaterials: Physics and Engineering Explorations," John Wiley & Sons, 2006.
- [35] Bhatnagar, A. K. "Metals for electromagnetic interference shielding," Journal of Applied Physics, vol. 91, no. 8, pp. 4757-4763, 2002.
- [36] Eom, H. J. "Electromagnetic wave theory for boundary-value problems," An Advanced Course on Analytical Methods. 2004.
- [37] Brown, J. Willard. "The Signal Corps, USA ve válce povstání.", 1974.
- [38] Tang, L. C., Zhao, L., & Guan, L. Z. "Graphene/polymer composite materials: processing, properties and applications," Advanced composite materials: properties and applications, 349-419, 2017.
- [39] Kavehei, O. et al "The fourth element: characteristics, modelling and electromagnetic theory of the memristor". Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 466.2120 2010 2175-2202.
- [40] Siregar, S. "Application of Carbon Nanotubes for Photoacoustic Imaging Contrast Agent" Doctoral dissertation, Tohoku University, 2018.
- [41] Zhao, Biao, et al. "Morphology-control synthesis of a core-shell structured NiCu alloy with tunable electromagnetic-wave absorption capabilities." ACS applied materials & interfaces 7.23 (2015): 12951-12960.
- [42] Shelby, R. A., Smith, D. R., & Schultz, S. "Experimental verification of a negative index of refraction," science, 292(5514), 77-79, 2001.
- [43] <https://www.amade-tech.com/pl/universal-testing-machine-utm/>.



- [44] ISO 527-1:2020-01 Plastics - Determination of tensile properties - Part 1: General principles. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [45] PN-EN ISO 527-2; Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu.
- [46] Broniewski T., Kapko J., Płaczek W., Thomalla J., „Metody Badań i ocena właściwości tworzyw sztucznych”, WNT Warszawa, 2000.
- [47] Young, H. D., & Freedman, R. A. "University Physics with Modern Physics," Addison-Wesley, 2012.
- [48] Serway, R. A., Jewett Jr, J. W., & Vuille, C. "College Physics: Hybrid Edition," Cengage Learning 2018.
- [49] Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. "Fundamentals of Physics," Wiley, 2013.
- [50] Tipler, P. A., Mosca, G. "Physics for Scientists and Engineers," WH Freeman, 2012.
- [51] Beer, F. P., Johnston, E. R., DeWolf, J. T., & Mazurek, D. F.. Mechanics of Materials., McGraw-Hill Education. 2017.
- [52] Hibbeler, R. C. "Mechanics of Materials," Pearson 2017.
- [53] Gere, J. M., & Goodno, B. J. "Mechanics of Materials," Cengage Learning, 2013.
- [54] Popov, E. P. "Engineering Mechanics of Solids," 2018. Pearson.
- [55] ISO 179-1:2020 Plastics - Determination of Charpy impact strength - Part 1: Non-instrumented impact test. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [56] <https://www.keyence.eu/plpl/ss/products/microscope/measurement-solutions/charpy-impact-test.jsp>.
- [57] Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. Materials Science and Engineering: An Introduction. 2018. Wiley.
- [58] Dieter, G. E. "Mechanical Metallurgy," McGraw-Hill Education, 2017.
- [59] Ashby, M. F., & Jones, D. R. H. Engineering Materials 1: An Introduction to Properties, Applications, and Design. 2018. Elsevier.
- [60] ASTM International, "Standard Test Method for Vickers Hardness of Plastics," ASTM D2240-05, 2010.
- [61] ASTM International, "Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Plastics and Electrical Insulating Materials," ASTM D785-08, 2013.
- [62] ASTM International, "Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness," ASTM D2240-05, 2010.
- [63] ISO 2039-1:2019, Plastics - Determination of hardness - Part 1: Ball indentation method (Brinell).
- [64] ASTM International, "Standard Test Method for Indentation Hardness of Rigid Plastics by Means of a Barcol Impressor," ASTM D2583-07, 2013.
- [65] ISO 2039-1:2020 Plastics - Determination of hardness - Part 1: Introduction and general principles. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [66] [http://www.kgbig.agh.edu.pl/materialy/Materialoznawstwo/Pomiary\\_twardosci.pdf](http://www.kgbig.agh.edu.pl/materialy/Materialoznawstwo/Pomiary_twardosci.pdf).
- [67] PN-EN ISO 2039-1. Tworzywa sztuczne. Oznaczanie twardości. Metoda wciskania kulki.
- [68] Chou, T. W. "Thermal Properties of Fiber-Reinforced Composites." In: Handbook of Composites. Springer, 2018.
- [69] Wisnom, M. R. "Thermal Expansion of Fibre-Reinforced Polymer Composites," In: Handbook of Polymer Composites for Engineers. Elsevier, 2017.

- [70] Bunsell, A. "Thermal Fatigue of Fibre-Reinforced Composites." In: Fatigue of Fiber-reinforced Composites. Woodhead Publishing, 2011.
- [71] Nairn, J. A. "Thermal-Mechanical Behavior." In: Introduction to Composite Materials Design. CRC Press, 2010.
- [72] Visco, D. P., Richard, H. R. "Thermal Analysis of Polymeric Materials," CRC Press. 2010.
- [73] Shashoua, V. E. "Conservation of Plastics: Materials Science," Degradation and Preservation, Elsevier, 2008.
- [74] Reading, M., & Hourston, D. J. "Dynamic mechanical analysis: a practical introduction," CRC Press, 2002.
- [75] Rubinstein, M., Colby, R. H. "Polymer Physics," Oxford University Press. 2003.
- [76] Gnatowski A., Chyra M., Baranowski W. "Badania właściwości termomechanicznych i morfologii rur z polietyenu poddanych procesowi starzenia za pomocą promieniowania UV," POLIMERY tom LIX z. 4, 2014, s.308-313.
- [77] Florczak B., Miszczak M., Borkowski J. "Badania dynamiczno-mechaniczno-termiczne stałych, homogenicznych-dwubazowych paliw raketowych," Problemy Techniki Uzbrojenia, tom 38, z. 111, 2009, s. 91-95.
- [78] Jones, D. S. "Dynamic mechanical analysis of polymeric systems of pharmaceutical and biomedical significance," International journal of pharmaceutics, 179(2), 167-178, 1999.
- [79] Ward I. M.: Mechaniczne własności polimerów jako tworzyw konstrukcyjnych. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1975.
- [80] [https://analyzing-testing.netzsch.com/\\_Resources/Persistent/2/1/b/b/21bb1b0383e162585bda03bfe901bde4c25b3a24/DMA\\_242\\_E\\_Artemis\\_en\\_web\\_01.pdf](https://analyzing-testing.netzsch.com/_Resources/Persistent/2/1/b/b/21bb1b0383e162585bda03bfe901bde4c25b3a24/DMA_242_E_Artemis_en_web_01.pdf).
- [81] Jaroszewski, M., Thomas, S., & Rane, A. V. (Eds.). "Advanced materials for electromagnetic shielding" fundamentals, properties, and applications 2018.
- [82] J. Marciniak, Zagrożenie naturalnego środowiska elektromagnetycznego, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2000.
- [83] Uniwersytet w Surrey. (nd). Przepuszczalność ( $\mu$ ) i przenikalność ( $\epsilon$ ). <https://www.ee.surrey.ac.uk/Projects/CAL/dielectrics/magnetic.html>.
- [84] Narodowy Instytut Normalizacji i Technologii, "Przewodnictwo elektryczne," 2021 <https://www.nist.gov/pml/electricity-magnetism/electrical-conductivity>.
- [85] Technologie Keysight. "Dopasowanie impedancji i wykres Smitha," 2021, <https://www.keysight.com/us/en/education-events/techtips/Impedance-Matching-and-the-Smith-Chart.html>.
- [86] Sadiku, M. N. O. "Elements of Electromagnetics," Oxford University Press, 2014.
- [87] Cheng, D. K. "Field and Wave Electromagnetics," Pearson Education, 2005.
- [88] Sihvola, A. "Electromagnetic Shielding," in Handbook of Electromagnetic Compatibility, Academic Press, 2018, pp. 475-491.
- [89] Archambeault, B. Brench, C. Hubing, T. and Tan, C. L. S. "Shielding Materials and Designs," in Electromagnetic Compatibility Engineering, John Wiley & Sons, Inc., 2009, pp. 623-654.
- [90] Ellingson, S. W. (2020). Electromagnetics, Volume 2. VT Publishing.
- [91] Keysight. Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials - Application Note.
- [92] Coey, J. M. (2010). Magnetism and magnetic materials. Cambridge university press.
- [93] Nayfeh, M. H., & Brussel, M. K. Electricity and magnetism. Courier Dover Publications. 2015.

- [94] Wikipedia contributors. (2024, August 9). 2019 redefinition of the SI base units. In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 06:50, August 14, 2024, [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=2019\\_redefinition\\_of\\_the\\_SI\\_base\\_units&oldid=1239452789](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=2019_redefinition_of_the_SI_base_units&oldid=1239452789)
- [95] Griffiths, D. J. "Introduction to Electrodynamics," Cambridge University Press, 2017.
- [96] Jiles, D. C. "Introduction to Magnetism and Magnetic Materials," CRC Press, 1991.
- [97] Tadic, M., Jagodic, M., & Djordjevic, G. "Measurement and characterization of magnetic materials," IEEE Magnetics Letters, 10, 1-4, 2019.
- [98] Purcell, E. M. and Morin, D. J. "Electricity and Magnetism," Cambridge University Press, 2013.
- [99] Drazin, P. G. Whyte, R. W. "The Effects of Magnetic Permeability and Conductivity on Shielding," in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 16, no. 2, pp. 55-60, May 1974.
- [100] Balanis, C. A. "Antenna Theory: Analysis and Design.," John Wiley & Sons., 2016.
- [101] Faraday, M. "Experimental Researches in Electricity," Royal Society of London, 1832.
- [102] Wac-Włodarczyk, A. "Materiały magnetyczne: modelowanie i zastosowanie," Politechnika Lubelska. 2012.
- [103] Jordan, E. C. "Electromagnetic waves and radiating systems," Prentice-Hall, 1958.
- [104] Purcell, E. M., & Morin, D. J. "Electricity and Magnetism," Cambridge University Press, 2013.
- [105] Collin, R. E. "Field Theory of Guided Waves," IEEE Press, 2012.
- [106] W. D. Callister, "Materials Science and Engineering: An Introduction", John Wiley & Sons, 2014.
- [107] C. Kittel, "Introduction to Solid State Physics", John Wiley & Sons, 2005.
- [108] Maier, R. "Dielectric Materials for Electrical Engineering," Wiley-VCH, 2010.
- [109] Sessler, G. M., & Tang, W. C. "Capacitor Dielectrics and Dielectric Materials," CRC Press 2004.
- [110] Heidebrecht, A., et al. "Investigation of dielectric properties of ceramics for multilayer capacitors by impedance spectroscopy." Journal of the American Ceramic Society, 97(5), 2014,1351-1357.
- [111] Kao, K. C., & Szermer, M. "Dielectric Phenomena in Solids," Elsevier Science, 2004.
- [112] Knöchel, R., & Hermann, R. (2010). Electromagnetic Compatibility in Power Electronics. Springer Science & Business Media.
- [113] Wang, W., et al. "Electromagnetic Wave Absorption Properties of Dielectric Materials in the Radio and Microwave Range," Journal of Nanomaterials, 2017, 1-10.
- [114] Jou, W. S., Cheng, H. Z., & Hsu, C. F. "The electromagnetic shielding effectiveness of carbon nanotubes polymer composites," Journal of Alloys and Compounds, 434, 641-645, 2007.
- [115] Moustafa-Breitner, S. E. "Dielectric Polymer Nanocomposites for Electromagnetic Interference Shielding Applications," Materials Science and Engineering: R: Reports, 2014.
- [116] Li, J. et al., "Electromagnetic Interference Shielding of Ceramics and Their Composites: A Review," Journal of the European Ceramic Society, 2018.
- [117] Liu L. et al., "Electromagnetic Interference Shielding Properties of Woven Fabrics Containing Carbon Nanotube Coated Glass Fibers," Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2017.

- [118] Uchida, S., et al. "Electromagnetic Shielding Effectiveness of Dielectric Composites Containing Ceramic Particles," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 55(1), 22-29, 2013.
- [119] Szymczyk T., Rabiej S., Pielesz A., Desselberger J. "Tablice matematyczne fizyczne chemiczne astronomiczne," *Środek dydaktyczny zlecany przez MEN nr 0770*, 1999.
- [120] Bravo, R. "Reakcje diamagnetyczne i paramagnetyczne. W ekranowaniu elektromagnetycznym i ochronie przed korozją pojazdów lotniczych", Wydawnictwo Woodhead., str. 53-72, 2017 [Źródło: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100927-7.00003-9>].
- [121] Piątek, Z. P., & Jabłoński, P. (2010). *Podstawy teorii pola elektromagnetycznego*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
- [122] Poole, C. P. "Electron Spin Resonance: A Comprehensive Treatise on Experimental Techniques," John Wiley & Sons, 1983.
- [123] Callan, J.A. "Magnetic Resonance Contrast Agents," w *Magnetic Resonance Imaging: Zasady fizyczne i biologiczne*, John Wiley & Sons, 2014, s. 407-424.
- [124] BI Wu i Xi, S. „Teoria i postęp metamateriałów”, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, tom. 20, nie. 14, s. 1973-1982, 2006.
- [125] Zhang, B., Gazdzinski, C., Chronik, B. A., Xu, H., Conolly, S. M., & Rutt, B. K. "Simple design guidelines for short MRI systems," *Concepts in Magnetic Resonance Part B: Magnetic Resonance Engineering: An Educational Journal*, 25(1), 53-59, 2005.
- [126] Sun, X. et al., "Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness of NiZn Ferrite Composite Films Containing Silver Nanoparticles," *Journal of Materials Science*, 2012.
- [127] Milic, N., Preradovic, N., Milosevic, N., Vucaj Cirilovic, V., & Till, V. (2014). Gadolinium-based imaging contrast agents. *Current Medical Imaging*, 10(2), 140-150.
- [128] Hazarika, S., & Mohanta, D. (2013). Production and optoelectronic response of Tb<sup>3+</sup> activated gadolinium oxide nanocrystalline phosphors. *The European Physical Journal-Applied Physics*, 62(3), 30401.
- [129] Zeng, M. J. et al., "Electromagnetic Interference Shielding Properties of Ferrofluid-Filled Polymers," *Journal of Applied Polymer Science*, 2008.
- [130] Kunkel, G. M. (1992, November). Shielding theory and practice. In [Proceedings] 1992 Regional Symposium on Electromagnetic Compatibility (pp. 4-2). IEEE.
- [131] Schelkunoff S. A. The Impedance Concept and Its Application to Problems of Reflection, Shielding and Power Absorption. *Bell System Technical Journal*, 17:17–31, 1938.
- [132] Maas, S.A. "Electromagnetic Shielding: Principles and Applications”, w *Proceedings of the IEEE*, tom. 76, nr. 12, s. 1720-1731, 1988. [Źródło: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/23970>].
- [133] Galdi, G.P. "Electromagnetic Shielding and Antenna Engineering”, w: *Encyclopedia of RF and Microwave Engineering*, John Wiley & Sons, 2005. [Źródło: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/0471654507>].
- [134] Gandhi, O. P., & Chen, C. T. "Numerical calculation of the specific absorption rate in biological cells exposed to ELF and RF fields," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 36(9), 1989, 912-918.
- [135] Ulaby, F. T. "Electromagnetics for engineers," (No Title), 2005.
- [136] Morrison, F. A. "Understanding Solids: The Science of Materials," John Wiley & Sons 2008.
- [137] Saleh, B. E., & Teich, M. C. *Fundamentals of Photonics* Wiley. Hoboken, New Jersey. 2007.

- [138] Chen, C., et al. "Numerical Analysis on Shielding Effectiveness and Penetration Depth of EMI Shielding Materials," *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 4(12), 28-33, 2016.
- [139] Benhamou, S. M., Hamouni, M., & Guerrero, A. J. L. (2015, December). Modeling of Electromagnetic Shielding Properties of Conductive sheet using the matrix formalism. In 2015 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE) (pp. 1-4). IEEE.
- [140] Benhamou, S. M., Hamouni, M., & Khaldi, S. (2015). Theoretical approach of electromagnetic shielding of multilayer conductive sheets. *Progress In Electromagnetics Research M*, 41, 167-175.
- [141] Sharma, M. P. "Principles of Injection Molding of Polymer Composites," CRC Press, 2018.
- [142] Davies, P. "Extrusion: The Definitive Processing Guide and Handbook," William Andrew, 2013.
- [143] Poursartip, A., Hinton, M. D. "Introduction to Composite Materials Design," CRC Press, 2010.
- [144] Brent Strong, A. "Plastics: Materials and Processing," Pearson, 2013.
- [145] Hocking, M. G. "Handbook of Injection Molding," Elsevier, 2000.
- [146] Kelly, A. "Composite Materials: Design and Applications," CRC Press, 2005.
- [147] Bhosle, S. V. Nayak, S. K. "Composite Materials: Processing, Applications, Characterizations," CRC Press, 2017.
- [148] Gay, D. Bainbridge, V. "Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering," CRC Press, 2001.
- [149] Simmons, M. J. "Compression Molding." In: *Composite Manufacturing*. CRC Press, 2016.
- [150] Laha, S. C. "Hot Press Molding." In: *Handbook of Thermoset Plastics*. Elsevier, 2013.
- [151] Davim, J. P. "Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering," CRC Press, 2015.
- [152] Morgan, R. J. "Thermoplastic Composite Materials: An Introduction," Woodhead Publishing, 2017.
- [153] <https://produkcjatorzyw.wordpress.com/2014/10/15/prasowanie/>.
- [154] Simon, G. P. "Processing of Composites," Elsevier, 2018.
- [155] Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D. E., Zhang, Y., Dubonos, S. V., ... & Firsov, A. A. "Electric field effect in atomically thin carbon films," *science*, 306(5696), 2004, 666-669.
- [156] Sheng, Z., & Varadan, V. V. "Effect of substrate dielectric properties and tunable metamaterials," In 2006 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (pp. 4497-4500). IEEE.
- [157] Zhai, W. i in. (2018). Ekranowanie zakłóceń elektromagnetycznych nanokompozytów polimerowych - przegląd. *Kompozyty Część B: Inżynieria*, 152, 199-213..
- [158] Xiao, D., Liu, G. B., Feng, W., Xu, X., & Yao, W. "Coupled spin and valley physics in monolayers of MoS<sub>2</sub> and other group-VI dichalcogenides," *Physical review letters*, 108(19), 196802, 2012.
- [159] Chryssanthopoulos, M. Langley, P. "Thermoplastic Materials: Properties, Manufacturing Methods, and Applications," CRC Press, 2011.
- [160] G. Pritchard, "Thermoplastics and Thermoplastic Composites," William Andrew, 2012.
- [161] Ogin, S. L. Mouritz, A. P. "Thermoplastic Composites: Properties and Applications," Woodhead Publishing, 2012.

- [162] Utracki, L. A. "Thermoplastic Materials: Properties, Manufacturing Methods, and Applications," CRC Press, 2017.
- [163] Lindsay, J. "Rubber Technology: Introduction and Industrial Applications," CRC Press, 2019.
- [164] Morton, M. "Rubber Technology: Compounding and Testing for Performance," Hanser Publications, 2018.
- [165] Heinrich, G., & Klüppel, M. "Recent advances in the theory of filler networking in elastomers," Filled elastomers drug delivery systems, 2002 1-44.
- [166] Ibos, S. Rivaton, A. "Fluorinated Elastomers: Properties, Processing, and Applications," William Andrew, 2017.
- [167] Mohanty, A. K. Misra, M. and Drzal, L. T. "Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites," CRC Press, 2005.
- [168] Nicolais, L. Carotenuto, G. "Composite Materials: Science and Engineering," Springer, 2012.
- [169] Wang, Y. "Advanced Ceramic Materials," Wiley, 2016.
- [170] Nutt, S. R. "Introduction to Composite Materials Design," CRC Press, 2018.
- [171] Kriven W. M. Lin, H.-T. "Modern Ceramic Engineering: Properties, Processing, and Use in Design," CRC Press, 2019.
- [172] Gilchrist, P. J. Grant, P. L. "Electromagnetic Shielding," Cambridge University Press, 2009..
- [173] Luo, J. R. et al., "Carbon Fiber Composites for Electromagnetic Shielding: A Review," Journal of Composite Materials, 2017.
- [174] Li, X. et al., "Electromagnetic Shielding Properties of Metal Composite Materials," Materials, 2018.
- [175] Islam M. R. et al., "Dielectric Polymer Composite Materials for Electromagnetic Interference Shielding: A Review," Polymers, 2018.
- [176] Monk, S. Practical Electronics for Inventors. McGraw-Hill Education, 2013.
- [177] Teo, K. L. et al., "Ferrite Materials for Electromagnetic Interference Shielding Applications: A Review," Materials, 2019.
- [178] Gumnitsky, L. N. "Electromagnetic Field Shielding and Conductive Materials: A Review," Journal of Electronic Materials, 2015.
- [179] Fortuny, C. M. "Electromagnetic Shielding: Principles and Applications," CRC Press, 2018.
- [180] Zhang, C. "Polymer-based Conducting Composites: Materials, Properties, and Applications," CRC Press, 2019.
- [181] Liu, L. et al. "Characterization of single-and multiwalled carbon nanotube composites for electromagnetic shielding and tunable applications." IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility 53.4, 2011: 943-949.
- [182] Liu, Qinglei, et al. "Biomorphic porous graphitic carbon for electromagnetic interference shielding." Journal of Materials Chemistry 22.39 (2012): 21183-21188.
- [183] Wu, H. et al., "Graphite Fiber Reinforced Polymer Composites for Electromagnetic Interference Shielding: A Review," Composites Science and Technology, 2019.
- [184] Ganguly A. K. et al., "Metal-Coated Fiber-Reinforced Polymer Composites for Electromagnetic Interference Shielding: A Review," Composites Part B: Engineering, 2018.
- [185] Liu, Y. et al., "Silver Nanowire Networks for Electromagnetic Interference Shielding: Structure, Properties, and Applications," ACS Applied Materials & Interfaces, 2017.

- [186] Portugall, O., Krämer, S., & Skourski, Y. "Magnetic fields and measurements," In Handbook of Magnetism and Magnetic Materials, 2021, (pp. 1-70). Cham: Springer International Publishing.
- [187] Cheeke, J. David N. "Podstawy i zastosowania fal ultradźwiękowych," Prasa CRC, 2010.
- [188] O'handley, R. C. "Modern magnetic materials: principles and applications" (p. 768), 1999.
- [189] Amiri, M., Salavati-Niasari, M., & Akbari, A. "Magnetic nanocarriers: evolution of spinel ferrites for medical applications," Advances in colloid and interface science, 2019, 265: 29-44.
- [190] Fiorillo, F., Bertotti, G., Appino, C., & Pasquale, M. "Soft magnetic materials," In Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering (pp. 1-42). John Wiley & Sons, Inc, 2016.
- [191] Chitsazan, B. et al "Characterization and magnetic coercivity of nanostructured (Fe<sub>50</sub>Co<sub>50</sub>)<sub>100-2xVx</sub> = 0, 2, 4 powders containing a small amount of Co<sub>3</sub>V intermetallic obtained by mechanical alloying," Powder Technology, 2011, 214.1: 105-110.
- [192] Kolpakov, A. A., & Kolpakov, A. G. "Capacity and transport in contrast composite structures: asymptotic analysis and applications," CRC Press, 2009.
- [193] Hao, Y. Liu, X. "Ceramic Materials for Energy Applications: Ceramic Engineering and Science Proceedings," John Wiley & Sons, 2017.
- [194] LIU, L. et al. Characterization of single-and multiwalled carbon nanotube composites for electromagnetic shielding and tunable applications. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2011, 53.4: 943-949.
- [195] Dainty, J. C. (Ed.). "Laser speckle and related phenomena," Vol. 9. Springer science & business Media, 2013.
- [196] Osswald, T. A., & Menges, G. "Materials science of polymers for engineers," Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2012.
- [197] Jalili R. et al., "Graphene-based Composites for Electromagnetic Shielding," Progress in Materials Science, 2019.
- [198] Zhang L. et al., "Metal Particle-Filled Polymer Composites for Electromagnetic Interference Shielding," Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2017.
- [199] Huang, Y. et al., "Metal Carbide Reinforced Polymer Composites for Electromagnetic Interference Shielding," Materials & Design, 2020.
- [200] Wang, H. et al., "Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites for Electromagnetic Shielding: A Review," Composite Structures, 2018.
- [201] Sainz S. et al., "Graphite Fiber Reinforced Polymer Composites for Electromagnetic Shielding Applications," Composite Interfaces, 2017.
- [202] Zhang C. et al., "Glass Fiber Reinforced Polymer Composites for Electromagnetic Shielding: A Review," Polymer Composites, 2019.
- [203] Program Środowiskowy Organizacji Narodów Zjednoczonych. "Recykling," 2020 <https://www.unenvironment.org/explore-topics/resource-efficiency/what-we-do/reducing-waste/recycling>.
- [204] Europejska Agencja Środowiska, "Gospodarka o obiegu zamkniętym w Europie: spostrzeżenia z poszczególnych państw członkowskich," 2021, <https://www.eea.europa.eu/themes/waste/resource-efficiency-and-circular-economy/circular-economy/circular-economy-in-eu>.
- [205] Fundacja Ellen MacArthur. "Nowa gospodarka tworzywami sztucznymi: ponowne przemyślenie przyszłości tworzyw sztucznych," 2017,

<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications/the-new-plastics-economy-rethinking-the-future-of-plastics>.

- [206] Parlament Europejski. "Jak poddawany jest recyklingowi plastik?" 2020 <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20200626STO82160/how-is-plastic-recycled>.
- [207] National Geographic, "Recykling" 2021 <https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/recycling/>.
- [208] Albertsson, A. Varma, I. K. "Green Polymer Chemistry: Biocatalysis and Biomaterials," CRC Press, 2018.
- [209] Pathak, S. "Polymer Recycling: A Sustainable Approach," CRC Press, 2020..
- [210] Bastioli, C. "Handbook of Biodegradable Polymers," William Andrew, 2005.
- [211] Smith, J. "Measurement of Cross-sectional Resistance in Semiconductor Materials," Journal of Applied Physics, vol. 80, no. 3, pp. 1502-1507, 1996.
- [212] Brown, A. „Surface Resistance Measurements on Thin Metallic Films,” Materials Science Review, vol. 25, no. 2, pp. 45-52, 2008.
- [213] Johnson, K. et al., „Advanced Techniques for Four-Point Resistivity Measurements,” IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 65, no. 4, pp. 1200-1210, 2019.
- [214] Lisowski, M. "Pomiary rezystywności i przenikalności elektrycznej dielektryków stałych," Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2004.
- [215] Zhang, S. "Fundamentals of Magnetic Permeability Measurement," Journal of Applied Physics, vol. 88, no. 6, pp. 3201-3205, 2000.
- [216] Smith, A. „Comparison of Methods for Measuring Magnetic Permeability,” IEEE Transactions on Magnetics, vol. 45, no. 2, pp. 789-795, 2011.
- [217] Jakubas, A., Łada-Tondyra, E., Suchecki, Ł., & Makówka, M. "Simulations and tests of the effectiveness of electromagnetic field shielding by shields made of recycled materials," Przegląd Elektrotechniczny, 98, 2022, 152-155.
- [218] Ott, H. W. "Electromagnetic compatibility engineering," John Wiley & Sons. 2011.
- [219] Brown, A. "Fundamentals of Electromagnetic Shielding Measurements," IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 60, no. 4, pp. 1100-1110, 2018.
- [220] ISO 6721-1:2019 Plastics - Determination of dynamic mechanical properties - Part 1: General principles. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [221] IEEE Standard for Measuring the Effectiveness of Electromagnetic Shielding Enclosures, IEEE Std 299-2006.
- [222] Kshetrimayum, R. S. Ningthoujam, K. S. Singh, K. V "Dielectric Materials and Their Applications," in Progress in Electromagnetic Research B, vol. 42, pp. 269-293, 2012.



## Spis rysunków

- Rys. 3.1. Schemat maszyny do próby statycznego rozciągania [43]: 1 - rama maszyny, 2 - ruchoma głowica krzyżowa, 3 - górna głowica krzyżowa, 4 - enkoder przemieszczenia, 5 - czujnik pomiaru siły, 6 - śruba kulowa, 7 - sprzęgło wrzeczona, 8 - zacisk górny, 9 - zacisk dolny, 10 - podstawa kołnierza, 11 - blat, 12 - przestrzeń do maksymalnego rozciągania, 13 - przestrzeń pomiarowa Str. 22
- Rys. 3.2. Widok próbki do statycznego rozciągania wykonanej z napełniaczem z zendry 70% i HDPE 30%, zgodnie z normą ISO 527-2 Str. 23
- Rys. 3.3. Schemat młota do pomiaru udarności z zamocowaną próbką [56]. A – Młot, B - Odległość od środka obrotu młota do środka ciężkości młota (R), C - Kąt wychylenia młota po pęknięciu badanego elementu ( $\theta\beta$ ), D - Próbkę testowa (b: szerokość, h: grubość) E - Kąt podniesienia młota ( $\theta\alpha$ ) Str. 27
- Rys. 3.4. Schemat twardościomierza HB [66]. 1 - próbka, 2 - stolik, 3 - wgłębnik, 4 - zawór cylindra, 5 - pompka, 6 - zbiornik oleju, 7 - cylinder, 8 - tłok, 9 - manometr, 10 - tłoczek podnoszący obciążenie 11 - obciążenie Str. 30
- Rys. 3.5. Schemat DMTA [80]. 1 - oscylator, 2 - regulacja za pomocą silnika krokowego, 3 - regulacja siły, 4 - czujnik przemieszczenia, 5 - popychacz, 6 - termopara próbki, 7 - przemieszczenie, 8 - próbka, 9 - mocowanie próbki, 10 - termopara pieca, 11 - piec Str. 34
- Rys. 4.1 Widmo przenikalności dielektrycznej w szerokim zakresie częstotliwości.  $\epsilon'$  i  $\epsilon''$  oznacza odpowiednio rzeczywistą i urojoną część przenikalności. Na rysunku oznaczono różne procesy: relaksację jonową i dipolową oraz rezonanse atomowe i elektronowe przy wyższych energiach 1 - jonowy, 2 - dipolowy, 3 - atomowy, 4 - elektroniczny, 5 - mikrofalowy zakres częstotliwości, 6 - podczerwony zakres częstotliwości, 7 - VIS zakres częstotliwości, 8 - UV zakres częstotliwości Str. 39
- Rys. 4.2. Wykres wektora tangensa strat w kategoriach rzeczywistych i urojonych składników zespolonej przenikalności elektrycznej Str. 40
- Rys. 4.3. Schemat zjawiska padającej fali elektromagnetycznej przez materiał, na podstawie modelu ekranowania Shelkunoffa Str. 59
- Rys. 4.4. Schemat zjawiska przechodzącej fali elektromagnetycznej przez materiał niejednorodny Str. 61
- Rys. 5.1. Schemat prasy z formą do prasowania tłoczego [153] 1 - stół ruchomy, 2 - płyta mocująca formę do stołu ruchomego, 3 - stempel, 4 - matryca, 5 - zasypane tworzywo, 6 - płyta mocująca stała, 7 - stół stały, 8 - wypraska Str. 70
- Rys. 5.2. Schemat prasy z formą do prasowania tłoczego [153] 1 - stół ruchomy, 2 - płyta mocująca formę do stołu ruchomego, 3 - stempel, 4 - matryca, 5 - zasypane tworzywo, 6 - płyta mocująca stała, 7 - stół stały, 8 wypraska Str. 71
- Rys. 7.1. Selekcjonowane materiały do badań wstępnych A) Pył złomowiskowy włóknisty, B) Pył złomowiskowy, C) zendra, D) wióry aluminium, E) nanokrystalik, F) wióry mosiężne, G) rozdrobnione kable miedziane, H) amorfik Str. 83
- Rys. 7.2. Wypraski kompozytowe wytworzone do badań wstępnych. 1 - POM z zendrą i nanokrystalikiem, 2 - PVC z żelazem i nanokrystalikiem, 3 - PVC z nanokrystalikiem, 4 - PVC z pyłem złomowiskowym, 5 - PVC z zendrą, 6 - HDPE z zendrą, 7 - PVC z pyłem z złomowiskowym włóknistym, Str. 83

	8 - PVC z żelazem, 9 - PVC z aluminium, 10 - HDPE z ceramiką, 11 - PVC z mosiądzem, 12 - POM z zendra i ceramiką	
Rys.7.3.	Nieprzetworzone materiały 1 - zendra, 2 – blacha nanokrystaliczna	Str. 84
Rys.7.4.	Zdjęcia z mikroskopu 1 - zendra, 2 - ceramika, 3 - blacha nanokrystaliczna	Str. 84
Rys.7.5.	Zdjęcia finalnego kompozytu 1 - warstwa ceramiki, 2 - warstwa kompozytu zendry z nanokrystalikiem	Str. 85
Rys. 7.6	Schemat stanowiska do wytwarzania próbek 1 - prasa hydrauliczna, 2 - tłok i stół prasy, 3 - forma prasownicza, 4 - sonda pomiaru temperatury, 5 – grzałka	Str. 85
Rys.7.7.	Schemat układu pomiarowego do rezystancji skrośnej trójelektrodowy	Str. 87
Rys. 7.8.	Schemat układu pomiarowego do rezystancji powierzchniowej	Str. 87
Rys. 7.9.	Przykładowe próbki wykonane do badań rezystancji skrośnej i powierzchniowej 1 – zendra 5% PVC, 2 – blacha nanokrystaliczna 1% żywica fenolowo akrylowa, 3 – Fe prasowane	Str. 89
Rys. 7.10.	Schemat pomiarowy urządzenia do badania przenikalności magnetycznej	Str. 90
Rys. 7.11.	Próbki do badań przenikalności magnmetycznej zastosowano wyselekcjonowane kompozyty o zawartości 1 - kompozyt NK 99% żywica z fenolowo-arylową 1%, 2 – zendra 99% żywica z fenolowo-arylową 1%	Str. 90
Rys. 7.12.	Badania przenikalności magnetycznej $\mu_r$ dla 1 - kompozyt NK 99% żywica z fenolowo-arylową 1%, 2 - zendra 99% żywica z fenolowo-arylową 1%	Str. 91
Rys. 7.13.	Wyliczone wartości a) absorpcji, b) odbicia fali elektromagnetycznej w funkcji przenikalności rzeczywistej $\mu_r$ w zakresach od 1 do 100 000 dla wybranych częstotliwości	Str. 92
Rys. 7.14.	Wyliczone wartości a) wielokrotnego odbicia fali elektromagnetycznej, b) Skuteczności ekranowania w funkcji przenikalności rzeczywistej $\mu_r$ w zakresach od 1 do 100 000 dla wybranych częstotliwości	Str. 92
Rys. 7.15	Wyliczone wartości a) absorpcji, b) odbicia fali elektromagnetycznej w funkcji konduktywności $G$ o wartościach od 0,01 do 100000 [S/m] dla wybranych częstotliwości	Str. 93
Rys. 7.16.	Wyliczone wartości wielokrotnego odbicia fali elektromagnetycznej oraz skuteczności ekranowania w funkcji konduktywności $G$ o wartościach od 0,01 do 100000 [S/m] dla wybranych częstotliwości	Str. 93
Rys. 7.17.	Wyliczone wartości a) absorpcji, b) odbicia fali elektromagnetycznej w funkcji grubości ścianki $d$ od 0,5 do 4 mm i dla wybranych częstotliwości	Str. 94
Rys. 7.18.	Wyliczone wartości a) wielokrotnego odbicia fali elektromagnetycznej, b) skuteczności ekranowania w funkcji grubości ścianki $d$ od 0,5 do 4 mm dla wybranych częstotliwości	Str. 94
Rys. 7.19.	Wyliczone wartości a) absorpcji, b) odbicia fali elektromagnetycznej w funkcji zakresie $\mu_r$ od 1 do 350 000 dla wybranych częstotliwości	Str. 96
Rys. 7.20.	Wyliczone wartości a) wielokrotnego odbicia fali elektromagnetycznej, b) skuteczności ekranowania zakresie $\mu_r$ od 1 do 350 000 dla wybranych częstotliwości	Str. 96
Rys. 7.21.	Układ do pomiaru skuteczności ekranowania płytek kompozytów ekranowania 1 - generator, 2 - miernik, 3 – antena nadawcza typu horn, 4 – antena odbiorcza typu horn	Str. 98
Rys. 7.22.	Wykres skuteczności ekranowania: a) kompozytu zendry, b kompozyt zendry z normalizacją grubości ścianki do 2 mm	Str. 98

Rys. 7.23.	Wykresy skuteczności ekranowania kompozytu a) blachy nanokrystalicznej b) blachy nanokrystalicznej z normalizacją grubości ścianki do 2 mm	Str. 99
Rys. 7.24.	Wykresy skuteczności ekranowania kompozytu zendry i taśmy nanokrystalicznej: a) kompozyt warstwowy o oznaczeniu NK215zen55HDPE20, b) kompozyt z normalizacją grubości ścianki do 2 mm	Str. 99
Rys. 7.25.	Fotografia urządzenia pomiarowego do badania skuteczności ekranowania 1 - miernik pola magnetycznego, 2 - przestrzeń pomiarowa, 3 - rura miedziana, 4 - generator, 5 - cewka, 6 - odbiornik	Str. 100
Rys.7.26.	Wykres względnej zmiany wartości $H$ w funkcji częstotliwości	Str. 101
Rys.7.27.	Urządzenie Netzsch DMA 242C	Str. 103
Rys.7.28.	Wartości modułu zachowawczego i tangensa kąta stratności mechanicznej kompozytu wykonanego z zendry walcowniczej i blachy nanokrystalicznej zhomogenizowanej z tworzywem HDPE postaci płatków	Str. 103
Rys. 7.29.	Wartości modułu zachowawczego i tangensa kąta stratności mechanicznej kompozytu wykonanego z zendry walcowniczej i blachy nanokrystalicznej zhomogenizowanej z tworzywem HDPE postaci płatków z warstwą ceramiki	Str. 104
Rys. 7.30	Wartości modułu zachowawczego i tangensa kąta stratności mechanicznej kompozytu wykonanego z zendry walcowniczej i blachy nanokrystalicznej zhomogenizowanej z tworzywem HDPE postaci płatków z warstwą ceramiki	Str. 105
Rys. 7.31.	Wartości modułu zachowawczego i tangensa kąta stratności mechanicznej kompozytu trójwarstwowego. Warstwy wykonane z płatków zendry walcowniczej, blachy nanokrystalicznej i ceramiki	Str. 106
Rys. 7.32.	Maszyna do statycznego rozciągania z ekstensometrem Galdabini Quasar 25	Str. 107
Rys.7.33.	Wyniki badań a) naprężenia maksymalnego $\sigma_m$ , b) wydłużenia względnego $\epsilon_b$ ; 1 - próbka mieszana z warstwą ceramiki, 2 - próbka warstwowa z ceramiką, 3 - próbka mieszana	Str. 108
Rys.7.34.	Wyniki badań modułu Younga $E_Y$ 1 - próbka mieszana z warstwą ceramiki, 2 - próbka warstwowa z ceramiką, 3 - próbka mieszana	Str. 108
Rys. 7.35.	Twardościomierz HB	Str. 109
Rys.7.36.	Wyniki badań twardości HB 1 - próbka mieszana z warstwą ceramiki, 2 - próbka warstwowa ceramiką, 3 - próbka mieszana	Str. 110
Rys. 7.37.	Zdjęcie młota do pomiaru udarności Zwick Roel HIT5.5P	Str. 111
Rys. 7.38.	Wyniki badań udarności 1 - próbka mieszana, 2 - próbka mieszana z warstwą ceramiki, 3 - próbka warstwowa ceramiką	Str. 111
Rys. 7.39.	Schemat komory do badania GTEM	Str. 113
Rys. 7.40	Zdjęcie małej komory przed włożeniem do komory bez odbiciowej wraz z odbiornikiem do częstotliwości 2,7 GHz	Str. 113
Rys. 7.41.	Zdjęcie małej komory w komorze bez odbiciowej wraz z odbiornikiem do częstotliwości 2,7 GHz	Str. 113
Rys. 7.42.	Wykres ekranowania pola w komorze bezodbiciowej	Str. 114
Rys. 7.43.	Schemat dużej komory	Str. 115
Rys. 7.44.	Zdjęcie komory do badania prądu stałego DC	Str. 115
Rys. 7.45.	Wykres natężenia pola magnetycznego dla prądu stałego DC	Str. 116

## Spis tabel

Tabela 4.1. Opór właściwy $\rho_r$ [ $\mu\Omega\text{m}$ ] przewodników w temperaturze 20 °C	Str. 45
Tabela 4.2. Konduktywność wybranych materiałów	Str. 45
Tabela 4.3. Przenikalność elektryczna względna (stała dielektryczna) [119]	Str. 53
Tabela 4.4. Przenikalność magnetyczna względna $\mu_r$ [119]	Str. 57
Tabela 7.1. Parametry prasowania dla wybranych tworzyw	Str. 86
Tabela 7.2. Pomiary rezystancji powierzchniowej i skrośnej wybranych materiałów	Str. 88
Tabela 7.3. Parametry materiałów zastosowanych do przeprowadzenia obliczeń	Str. 95