



Dziedzina nauk inżynieryjno-technicznych
Dyscyplina: inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka

mgr Kamil Artur Majewski

**Opracowanie metody badawczej do oceny degradacji
mikroplastiku z pasa nadbrzeżnego Morza Bałtyckiego**

*Development of a research method for the assessment of microplastic
degradation from the coastal belt of the Baltic Sea*

Opieka naukowa nad przygotowaniem rozprawy
doktorskiej:

Promotor: dr hab. inż. Sylwia Myszograj, prof. UZ

Promotor pomocniczy: dr inż. Ewelina

Płuciennik-Koropczuk

Rozprawę akceptuję:

.....

Zielona Góra 2024

Spis treści

Wykaz stosowanych skrótów	5
1. Wstęp	7
2. Kryteria charakteryzujące mikroplastik	9
2.1. Skład chemiczny	9
2.2. Rozmiar	10
2.3. Stan skupienia	13
2.4. Rozpuszczalność	16
2.5. Kształt.....	18
2.6. Kolor	18
2.7. Pochodzenie	19
3. Charakterystyka wybranych tworzyw sztucznych z uwzględnieniem ich podatności na degradację	21
4. Monitoring próbek mikroplastiku na plażach referencyjnych.....	33
5. Cel, tezy i zakres pracy	38
6. Metodyka poboru próbek środowiskowych	40
7. Metody badań analitycznych	42
7.1. Metody mikroskopowe	42
7.2. Spektroskopia FTIR	44
7.3. Spektroskopia Ramana	46
8. Wyniki badań i dyskusja	48
8.1. Algorytm drzew decyzyjnych w badaniu degradacji powierzchni mikroplastiku jako element metody badawczej	48
8.2. Opis narzędzia badawczego	50
8.2.1. Plik: 1. Arkusz danych oceny wizualnej.xlsx – opis zawartości arkusza	51
8.2.2. Plik BIOFILM – opis zawartości arkusza	57
8.2.3. Plik DATA_attributes_1 – opis zawartości arkusza	58
8.2.4. Plik KSZTAŁT – opis zawartości arkusza	59
8.2.5. Plik NASYCENIE_KOLORU – opis zawartości arkusza	62
8.2.6. Plik ODPORNOŚĆ – opis zawartości arkusza	64
8.2.7. SIŁY_MECHANICZNE – opis zawartości arkusza	65
8.2.8. SUMY_CZĘŚCIOWE – opis zawartości arkusza	67

8.2.9. Arkusz wyników – opis zawartości arkusza	68
8.3. Walidacja narzędzia badawczego.....	68
8.4. Analiza statystyczna badanych próbek mikroplastiku pod względem dopasowania widma FTIR.....	73
8.5. Ocena degradacji badanych próbek mikroplastiku	74
9. Wnioski	85
Bibliografia	88
Załączniki	

Wykaz stosowanych skrótów

ABS	Terpolimer akrylonitrylo-butadieno-styrenowy
ASA	Akrylonitryl-styren-akrylan
ATR	tłumione całkowite odbicie (Attenuated Total Reflectance)
B-44-4X	Tygon polymer®
BfR	Niemiecki Federalny Instytut Oceny Ryzyka (Bundesinstitut für Risikobewertung)
BPIB	Bromowany poliizobuten
BR	Kauczuk akrylonitrylo-butadienowy
CR	Neopren
CSPE	Polietylen chlorosulfonowany
ECTFE	Poli(etylen-co-chlorotrifluoroeten), chlorotrifluoroetylen etylenu
EFSA	Europejski Urząd ds. Bezpieczeństwa Żywności (European Food Safety Authority)
EPR/EPDM/EPM	Kauczuk etylenowo-propylenowy
ETFE	Fluorek etylenowy-tetrafluoroetylen
EVA	Etylen-co-octan winylu
EVOH	Alkohol etylowinyłowy
FAR-IR	Far-Infrared – daleka podczerwień, zakres długości fal powyżej 25000 nm
FEP	Fluorowany etyleno-propylen
GESAMP	Grupa Ekspertów ds. Naukowych Aspektów Ochrony Środowiska Morskiego (Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection)
HDPE/PE-HD	Polietylen o dużej gęstości
HFP	Tetrafluoroetylen
HSI	parametr rozpuszczalności Hildebranda
HSP	parametr rozpuszczalności Hansena
LDPE	Polietylen niskiej gęstości
M _g	graniczny ciężar cząsteczkowy
MID-IR	Mid-Infrared – środkowa podczerwień, zakres długości fal od około 2500 nm do 25000 nm
MSFD	Morska Dyrektywa Ramowa Unii Europejskiej dotycząca ochrony i zarządzania morskimi ekosystemami (Marine Strategy Framework Directive)
NBR	Kauczuk butadienowo-akrylonitrylowy
NIR	Near-Infrared – bliska podczerwień, zakres długości fal od około 780 nm do 2500 nm
NOAA	Narodowa Agencja Oceaniczna i Atmosferyczna (National Oceanic and Atmospheric Administration)
PAE	estry kwasu ftalanowego
PA6	Nylon 6
PVC	Poli(chlorek winylu)

PEG	Glikol polietylenowy, Poli(tlenek etylenu)
PET	Poli(tereftalan etylenu)
PMMA	Polimetakrylan metylu
PPA	Polipropylen ataktyczny
PSA	Polistyren ataktyczny
PTFE	Politetrafluoroetylen
PUR	Poliuretan poliestrowy
PVA	Poli(alkohol winylowy)
PVC	Poli(chlorek winylu)
SBC	Kopolimer blokowy styrenowo-butadienowy
T_d	temperatura degradacji
T_f	temperatura płynięcia
TFE	Tetrafluoroetylen
T_g	temperatura zeszklenia
T_k	temperatura kruchości
T_m	temperatura topnienia
T_p	temperatura płynięcia

1. Wstęp

Tworzywa sztuczne stosowane w przemyśle i w gospodarstwach domowych można uznać za materiał strategiczny globalnej gospodarki, o czym świadczy wzrost jego produkcji w latach 2016–2021 z 335 mln ton do 391 mln ton [1,2]. Produkcja tworzyw sztucznych w Europie stanowi 15% produkcji światowej, a największym udziałowcem są Chiny (32%) [2]. 90% tworzyw sztucznych produkowanych jest z surowców nieodnawialnych. Według Conversio Market & Strategy GmbH [2,3], produkcja tworzyw sztucznych w 2021 r. wg rodzajów polimerów była następująca: 19,3% PP, 14,4% LDPE i LLDPE, 12,9% PVC, 12,5% HDPE i MDPE, 6,2% PET, 5,5% PUR, 5,3% PS i EPS, 7,1% inne tworzywa z surowców nieodnawialnych (w tym PBT, PEEK, PEI, POM, PPA, PSU/PES/PPSU, PTFE, PVDF i inne tworzywa termoplastyczne, nie wymienione osobno), 7,1% tworzywa termoutwardzalne z surowców nieodnawialnych (z wyłączeniem PUR). W tym zestawieniu 8,3% stanowiły recyklaty, a tylko 1,5% tworzywa biopochodne (z biosurowców lub bioodpadów). Tworzywa cyrkularne (dwa ostatnie z wymienionych) stanowiły 9,8% produkcji tworzyw na świecie [2,3].

Powszechnie wykorzystanie produktów z tworzyw sztucznych sprawia, że są one jednymi z głównych zanieczyszczeń występujących w środowisku na skalę światową, w tym również w strefach przybrzeżnych i morskich [4–7]. Niska masa tworzyw sztucznych sprawia, że mogą być łatwo przenoszone przez wiatr lub wodę [8], a opady, spływ powierzchniowy i transport rzeczny stają się głównymi drogami przenoszenia tworzyw sztucznych z lądu do wód [9,10]. Tworzywa sztuczne, które trafiły do środowiska ulegają rozbiciu na mniejsze fragmenty. Za duże uznaje się cząstki powyżej 2,5 cm, średnie to fragmenty o wielkości cząstek między 0,5 a 2,5 cm, mikroplastiki o rozmiarze cząstek między 1 μm a 5 mm oraz nanoplastiki o rozmiarze cząstek poniżej 1 μm . Przekształcenie tworzyw sztucznych następuje w wyniku procesów fizycznych, chemicznych i biologicznych oraz działalności człowieka [11]. Problem obecności mikroplastiku oraz konieczność monitoringu środowiska zostały zauważone po 2004 r., kiedy to dzięki obserwacjom badacza morza Richarda Thompsona, opublikowany został w czasopiśmie „Science” artykuł *Lost at Sea: Where is All the Plastic?* [12], w którym autor po raz pierwszy użył terminu „mikroplastik”. Od tamtej pory termin mikroplastik stał się powszechnie stosowany [13–15]. Natomiast pierwsze doniesienia dotyczące obecności tworzyw sztucznych w środowisku wodnym pojawiły się w 1972 r. i dotyczyły Morza Sargassowego [6,7,16].

W ciągu dwóch dekad XXI wieku powstało wiele definicji mikroplastiku zwykle odnoszących się do rozmiaru cząstek. W innym ujęciu mikroplastik jest definiowany jako odpad z tworzywa sztucznego, który został uwolniony do środowiska w sposób kontrolowany lub niekontrolowany, lub też znajduje się w organizmach żywych (także w organizmie człowieka) [17]. Obecnie mikroplastik jest charakteryzowany przez siedem podstawowych kryteriów tj.: skład chemiczny, wielkość (rozmiar) cząstek, stan skupienia, rozpuszczalność, kształt, kolor oraz pochodzenie [18], a każde z tych kryteriów wpływa na zakres dopiero formującej się definicji mikroplastiku.

Proces całkowitego rozkładu tworzyw sztucznych w środowisku trwa od dziesięcioleci do stuleci, dlatego uznawane są za materiały odporne na degradację [19].

Degradacja jest wynikiem zmian w strukturze polimeru, co prowadzi do zmniejszenia masy cząsteczkowej i osłabienia mechanicznej integralności materiału [20]. W przypadku ekspozycji tworzyw sztucznych na działanie promieni słonecznych, dochodzi do fotoutleniania, które wynika z absorpcji promieniowania ultrafioletowego (UV) przez polimery [20]. Po rozpoczęciu procesu fotodegradacji, może on postępować poprzez reakcje termoutleniające zależne od temperatury, nawet bez dalszego narażania na promieniowanie UV, pod warunkiem dostępności tlenu. Inne mechanizmy degradacji, takie jak hydroliza i biodegradacja, zachodzą w środowisku zdecydowanie wolniej, niż mechanizmy utleniające [21]. Wskazuje się, że silnie zdegradowane tworzywa sztuczne stają się kruche i ulegają rozpadowi, dając coraz mniejsze cząstki, znane jako mikroplastiki [19,22].

Ze względu na rozpowszechnienie mikroplastiku w środowisku, w tym w wodach powierzchniowych, glebie i organizmach żywych, jak również przenikanie tych cząstek przez łańcuch pokarmowy, niezmiernie ważne jest badanie degradacji mikroplastików.

W związku z tym podjęto badania, które miały na celu rozszerzenie wiedzy dotyczącej degradacji mikroplastików w środowisku, w szczególności z morskiego pasa nadbrzeżnego. Dokonano analizy uwzględniającej wpływ podstawowych czynników środowiskowych takich jak promieniowanie UV, temperatura, czynniki biologiczne i chemiczne oraz działanie sił mechanicznych na degradację mikroplastików. Identyfikacja czynników i znajomość procesów degradacji pozwala określić szybkość i sposób rozpadania się cząstek, co może mieć wpływ na opracowanie skutecznych metod ich usuwania, a także strategii i technologii mających na celu ograniczenie przedostawania się mikrocząstek do środowiska oraz zmniejszenie produkcji i użycia tworzyw sztucznych, które łatwo ulegają rozpadowi.

2. Kryteria charakteryzujące mikroplastik

2.1. Skład chemiczny

Wszystkie tworzywa sztuczne składają się z polimerów, ale nie wszystkie polimery są tworzywami sztucznymi. Polimery stanowią podstawowy materiał konstrukcyjny dla tworzyw sztucznych i kauczków oraz dla naturalnych biopolimerów [23]. Międzynarodowa Organizacja Normalizacyjna (ISO) zdefiniowała pojęcie tworzywa sztucznego jako materiału składającego się z wysoko usieciowanego polimeru, który na etapie przetwarzania w produkty gotowe może być kształtowany przez przepływ [24]. Pomimo że tworzywa elastomerowe nie są ujęte w tej normie jako tworzywa sztuczne, to z punktu widzenia obecności w środowisku, zarówno plastik jak i guma są istotne, ponieważ mogą wytwarzać cząstki stałe o wysokiej zawartości polimerów, a zatem stanowią potencjalne źródło mikroplastików [23].

Klasyczne tworzywa sztuczne są polimerami organicznymi produkowanymi z ropy naftowej i chociaż powstała ona w wyniku procesów naturalnych, to tworzywa sztuczne powstające z jej pochodnych mają wyraźnie syntetyczny charakter. Podobnie tworzywa biologiczne pochodzące ze źródeł takich jak olej roślinny, skrobia kukurydziana lub mikrobiota, należy uznać za polimery syntetyczne. Biopolimer, którego właściwości są podobne do polimeru pochodzenia petrochemicznego, może być również źródłem mikroplastiku [25]. Jego mniejszy, negatywny wpływ na środowisko można rozpatrywać jedynie w ocenie cyklu życia produktu [26].

Naturalne polimery, do których zaliczyć można białka np. DNA, materiały polimerowe takie jak wełna, jedwab, bursztyn, celuloza, kauczuk naturalny, a także ich nienaturalne odpowiedniki wytwarzane za pomocą inżynierii genetycznej (sztuczne biopolimery) np. sztuczne białko, nie będą zatem kategoryzowane pod względem składu chemicznego jako potencjalne źródło mikroplastików [23]. Inaczej wygląda sytuacja w przypadku mocnej modyfikacji naturalnie występujących polimerów, jak np. acetyloceluloza, którą otrzymuje się w wyniku estryfikacji grup alkoholowych bezwodnikiem octowym w chlorku metylenu [27,28] lub kauczuk naturalny, wulkanizowany w obecności siarki.

Tworzywa sztuczne nie muszą składać się tylko z polimerów. W zależności od ich zastosowania mogą być modyfikowane za pomocą dodatkowych składników, które wpływają na wytrzymałość, trwałość lub barwę [27].

Zgodnie z Rozporządzeniem (WE) nr 1907/2006 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 18 grudnia 2006 r. w sprawie rejestracji, oceny, udzielania zezwoleń i stosowanych ograniczeń w zakresie chemikaliów i utworzenia Europejskiej Agencji Chemikaliów, zwane w skrócie rozporządzeniem REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals) [29,30], materiał definiowany jako materiał polimerowy musi spełniać następujące kryteria: ponad 50% masy tej substancji musi składać się z cząsteczek polimeru, a ilość cząsteczek polimeru o tej samej masie cząsteczkowej musi być mniejsza niż 50% wagowych tej substancji.

Dodatki mogą być sklasyfikowane jako: włókna wzmacniające, wypełniacze i środki łączące, plastyfikatory, barwniki, stabilizatory (stabilizatory halogenowe, przeciwutleniacze, pochłaniacze ultrafioletu i konserwanty biologiczne), środki pomocnicze (smary, regulatory przepływu i inne), środki zmniejszające palność i antystatki [31].

Dodatkami do tworzyw sztucznych mogą być zarówno substancje nietoksyczne, w tym naturalne, a także substancje niebezpieczne np. zmniejszające palność. Ich ilość wynosi od 1 do 50% wagowych produktu [29]. W przypadku zastosowania włókien wzmacniających lub dużych ilości wypełniaczy, materiał taki określa się mianem materiału kompozytowego. Kompozyty (tworzywa kompozytowe, tworzywa wzmocnione) to materiały polimerowe składające się z co najmniej dwóch odrębnych materiałów, z którego jeden stanowi matrycę, a drugi – zbrojenie lub napelniacz (np. włókna, nanorurki, tkaniny, maty itp.) [23,27,32].

Mając na uwadze skład chemiczny jako jedno z kryteriów definiujących mikroplastik, to polimery naturalne zmodyfikowane w niewielkim stopniu nie powinny być zaliczane do tej grupy, natomiast polimery syntetyczne i półsyntetyczne, kopolimery oraz kompozyty z polimerem syntetycznym jako podstawowym składnikiem zdecydowanie będą charakteryzować mikroplastik [18].

2.2. Rozmiar

Kluczowym parametrem, który najczęściej stanowi punkt wyjścia w badaniach nad problematyką mikroplastiku jest rozmiar cząstek. Analizom tej właśnie zmiennej uwagę poświęcają badacze z całego świata oraz organizacje zajmujące się problemami wynikającymi z zanieczyszczeń mikroplastikiem, przez co próba klasyfikacji rozmiaru otwiera niemal każdą dotyczącą drobin plastiku debatę naukową oraz dyskusję w przestrzeni publicznej [17]. Mikroplastik ma różne rozmiary, od drobin o wielkości kilku mikrometrów, aż do tych, które można zobaczyć gołym okiem, dlatego trudno jest ustalić dokładną ilość mikroplastiku w środowisku. Rozmiar ma zatem istotne znaczenie zarówno w aspekcie rozważań teoretycznych, jak i analiz o podłożu eksperymentalnym. Wszystko to z kolei sprawia, że rozmiar mikroplastiku jest główną cechą, którą należy uwzględnić podczas budowania założeń pracy naukowej nad problemem zanieczyszczenia mikroplastikiem, bez względu na charakter planowanego procesu badawczego.

Gregory Murray i Anthony Andrady w 2004 r. opracowali pierwszą szczegółową klasyfikację mikroplastiku pod względem wielkości cząstek. Zaproponowali podział na mikroplastik (od 0,076 do 0,5 mm), mezoplastik (od 5 do 10 mm) i makroplastik (od 10 do 150 mm). Co istotne, w swojej klasyfikacji badacze nie wyróżnili kategorii dla mniejszych części, takich jak nanoplastiki. Dolna granica wielkości mikroplastiku została określona przez rozmiar oczek najmniejszego sita, którego używano w badaniach [33].

Kolejna propozycja sklasyfikowania wielkości mikroplastiku pojawiła się w 2006 r. Wtedy to Kongres Stanów Zjednoczonych upoważnił National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) do rozwiązywania w imieniu rządu USA problemów związanych z odpadami morskimi. NOAA to agencja rządowa Stanów Zjednoczonych, która zajmuje się badaniami naukowymi i zarządzaniem zasobami oceanicznymi i atmosferycznymi. Jest odpowiedzialna za monitorowanie zmian klimatu, prognozowanie pogody i stanu oceanów, a także za ochronę i zachowanie różnorodności biologicznej w środowisku morskim. Dzięki działaniom NOAA powstał rozbudowany zestaw narzędzi badawczych, opisany jako: *Laboratory Methods for the Analysis of Microplastics in the Marine Environment: Recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments* [34]. W ramach tego opracowania ustalono, że graniczna wielkość cząsteczek mikroplastiku wynosi maksymalnie 5 mm.

W 2007 r. badacze ekosystemów morskich Mark A. Browne, Tamara Galloway, i Richard Thompson zaproponowali podział mikroplastiku na trzy kategorie: nanoplastik o wielkości mniejszej niż 0,001 mm, mikroplastik o wielkości od 0,001 do 1 mm oraz makroplastik o wielkości większej niż 5 mm [35]. W tym podziale pominięto mezoplastik. Rok później Charles Moore, założyciel Algalita Marine Research Foundation [36], uprościł tę klasyfikację, za mikroplastik uznając cząstki o wielkości poniżej 5 mm, a za makroplastik – cząstki o wielkości powyżej tej wartości [37].

W 2010 r. Monika Costa z zespołem badawczym zaproponowała, aby mikroplastikiem były określane cząstki o wielkości poniżej 1 mm, uzasadniając ten podział możliwościami badawczymi. Zgodnie z proponowanym ujęciem, cząstki tworzyw sztucznych możliwe do zidentyfikowania gołym okiem w terenie miałyby być określane jako „małe”, natomiast mikroplastik stanowiłyby cząstki, do których identyfikacji potrzebna jest aparatura, przez co mogą być rozpoznawane i analizowane jedynie w laboratorium [38].

W 2011 r. Komisja Europejska uchwaliła zalecenie dotyczące definicji nanomateriału (2011/696/UE) (Commission Recommendation of 18 October 2011 on the Definition of Nanomaterial, 2011) [39], które pośrednio dotyczyło problematyki definiowania mikroplastiku. Zgodnie z tym dokumentem, nanomateriał to cząstka o wielkości od 0,001 do 1 mm. W konsekwencji, następną kategorię wielkości cząstek, czyli mikroplastiki, ulokowano powyżej 1 mm.

Kolejne wytyczne określono za sprawą unijnej podgrupy technicznej ds. odpadów morskich dla dyrektywy ramowej w sprawie strategii morskiej (Marine Strategy Framework Directive – MSFD – Technical Subgroup on Marine Litter), funkcjonującej w ramach Komisji Europejskiej. W 2013 r. opracowała ona dokument przewodni pt. *Guidance on Monitoring of Marine Litter in European Seas* [40], w którym zostały określone zakresy wielkości cząstek mikroplastiku. Wskazano je w dwóch granicach: od 0,02 do 1 mm (który w badaniach wyodrębnia się w laboratorium z osadów) oraz od 1 do 5 mm (zalecany do pobierania jako próbka dodatkowa z każdej lokalizacji). W dokumencie podkreślono, że monitorowanie cząstek o rozmiarach mniejszych niż te,

które można pobierać za pomocą wskazanych metod, wykracza poza zakres opracowania [40].

W 2014 r. Jean-Pierre Desforges wraz z zespołem przeprowadził badania dotyczące liczebności, składu oraz rozmieszczenia mikroplastików w wodach północno-wschodniego Pacyfiku i wzdłuż wybrzeży Kolumbii Brytyjskiej. W badaniu przyjęto, że dolna granica rozmiaru mikroplastików wynosi 0,062 mm, natomiast górna 5 mm [41]. W tym samym roku pojawił się też podział Martina Wagnera, który wraz z zespołem wyznaczył cztery kategorie wielkości cząstek, wyróżniając: nanoplastik (poniżej 0,02 mm), mikroplastik (od 0,02 do 5 mm), mezoplastik (od 5 do 20 mm) oraz makroplastik (powyżej 25 mm) [42]. Zauważyć warto, że zaproponowane przez M. Wagnera granice wielkości dla mikroplastiku wpisały się w wytyczne MSFD z 2013 r. dotyczące monitorowania odpadów morskich w morzach europejskich. Dokument ten stał się jednym z najważniejszych instrumentów Unii Europejskiej obejmujących ochronę i zarządzanie ekosystemami morskimi [40].

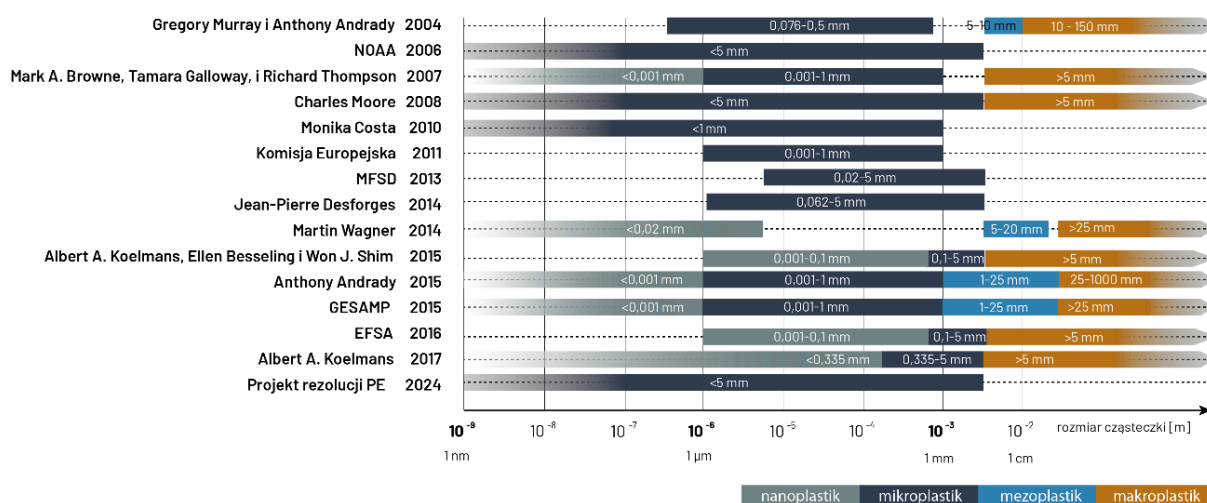
W 2015 r. przedstawiono trzy propozycje klasyfikacji wielkości mikroplastiku. Pierwsza, zbudowana przez ekologów morskich: Alberta A. Koelmansa, Ellen Besseling i Won J. Shim, obejmowała trzy kategorie: nanoplastik o wielkości od 0,001 do 0,1 mm, mikroplastik o wielkości od 0,1 do 5 mm oraz makroplastik o wielkości powyżej 5 mm [43]. Autorem drugiej propozycji był Anthony Andrady. Obejmowała ona cztery kategorie: nanoplastik poniżej 0,001 mm, mikroplastik o wielkości od 0,001 do 1 mm, mezoplastik o wielkości od 1 do 25 mm oraz makroplastik, stanowiący cząsteczki o wielkości od 25 do 1000 mm. Należy zaznaczyć, że górna granica wielkości cząstek na takim poziomie została wskazana po raz pierwszy. [44]. W 2015 r. opublikowano też raport, opracowany przy udziale grupy niezależnych ekspertów, którzy doradzali ONZ w sprawach dotyczących naukowych aspektów ochrony środowiska morskiego [45]. Grupa działała pod nazwą GESAMP (Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection). W opracowanym dokumencie przedstawiono czterostopniową skalę wielkości cząstek (nano-, mikro-, mezo- i makroplastiki), która odpowiadała skali zaproponowanej przez A. Andrady'ego [44].

Dodatkowo warto zauważyć, że w 2016 r. niemiecki Federalny Instytut Oceny Ryzyka (BfR – Bundesinstitut für Risikobewertung) zwrócił się do Europejskiego Urzędu ds. Bezpieczeństwa Żywności (EFSA – European Food Safety Authority) [46] z prośbą o wydanie oświadczenia na temat obecności drobin plastiku w żywności, ze szczególnym uwzględnieniem owoców morza. Przyjęto skalę rozmiaru cząstek odpowiadającą tej opisanej w badaniach A. Koelmansa z 2015 r. [47], z tą różnicą, że pominięto w niej makroplastiki.

W 2017 r. Albert Koelmans i jego zespół zaproponowali nowe podejście do określania wielkości cząstek. Według ich propozycji, mikroplastiki to cząsteczki o wielkości powyżej 0,335 mm, natomiast wszystkie cząstki mniejsze powinny być uznawane za nanoplastiki. Makroplastiki z kolei to cząsteczki o wielkości powyżej 5 mm. Coraz częściej dolna granica mikroplastików na poziomie 335 µm uznawana jest za praktyczne

rozwiązanie, ponieważ odpowiada ona minimalnemu rozmiarowi oczek w siatce neustonowej, używanej do wylławiania różnorodnych zanieczyszczeń, w tym tych pochodzących z tworzyw sztucznych [47,48]. W projekcie rezolucji ustawodawczej Parlamentu Europejskiego z 2024 r. (w sprawie wniosku dotyczącego rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie zapobiegania stratom granulatu z tworzyw sztucznych w celu ograniczenia zanieczyszczenia mikrodrobinami plastiku), pojawiło się jednak tylko wskazanie, że mikroplastiki (występujące w wersji polskiej dokumentu jako mikrodrobiny plastiku) są cząstkami nie większymi niż 5 mm [49,50].

Brak jednoznacznej i powszechnie akceptowalnej skali rozmiaru cząstek mikroplastiku utrudnia porównywanie wyników badań między różnymi grupami naukowymi. Zakresy podziału wielkości cząstek tworzyw sztucznych zestawiono na rys. 1.



Rys. 1 Kategoryzacja drobin tworzyw sztucznych według rozmiaru stosowana (i/lub zdefiniowana) w literaturze naukowej oraz w raportach instytucjonalnych. Opracowanie własne na podstawie [33-50]

2.3. Stan skupienia

Tworzywa sztuczne mogą występować w różnych stanach skupienia. Czynnikiem decydującym jest temperatura, w zależności od której tworzywa mogą się znajdować w pięciu stanach fizycznych [51,52]:

- Stan szklisty kruchy – charakterystyczne dla polimerów w tym stanie jest to, że w niskich temperaturach energia kinetyczna cząsteczek je tworzących jest niewielka, co uniemożliwia zmianę ich wzajemnego położenia. W stanie szklistym kruchym, pod wpływem siły zewnętrznej, polimer charakteryzuje się niewielkimi i sprężystymi odkształceniami, które wynoszą zwykle do kilku procent, a to powoduje, że ich zachowanie przypomina zachowanie szkła. Polimer spełnia więc zasadę równania Hooke’a, czyli odkształcenie jest wprost proporcjonalne do siły, która na niego działa. Moduł sprężystości Younga

materiału jest również stosunkowo duży, a granicą, powyżej której polimer przestaje zachowywać sprężystość, jest wartość $E = 10^9$ Pa [52,53]. Warto ponadto zauważyć, że w stanie szklistym kruchym materiał ma tendencję do pękania bez jakichkolwiek oznak zmęczenia materiału.

- Stan szklisty o wymuszonej elastyczności – stan ten charakteryzuje się dużą wytrzymałością i dużym modułem sprężystości Younga oraz występowaniem znacznych odkształceń wzdłuż kierunku działającej siły (ok. 20% wydłużenia). Przy podwyższeniu temperatury i zmniejszeniu oddziaływań międzycząsteczkowych, silne oddziaływanie makrocząsteczek występuje tylko w określonych węzłach. W takim stanie makrocząsteczki mają większą zdolność do przegrupowań, ale nadal pozostają nieruchliwe jako całość. Większość liniowych polimerów termoplastycznych, takich jak polistyren, poli(chlorek winylu), poli(metakrylan metylu) i poliwęglany, zachowuje się w ten sposób, gdy ich zakres temperatur użytkowania znajduje się w obszarze szklistym. Podczas odkształcania polimer wydłuża się w wyniku wewnętrznych przesunięć łańcuchów, które przyjmują położenie zgodne z kierunkiem deformacji [52,54].
- Stan lepkosprężysty – w zależności od tego, czy materiał polimerowy jest powyżej czy poniżej temperatury zeszklenia T_g i temperatury topnienia T_m , jego zachowanie można określić jako:
 - kruche, elastyczne szkło: poniżej T_g ,
 - zachowanie podobne do gumy: powyżej T_g i poniżej T_m ,
 - lepka ciecz (topnienie): powyżej T_m .

W sytuacji, gdy polimer znajduje się w temperaturze powyżej temperatury zeszklenia i powyżej temperatury topnienia (czyli jest w temperaturze pośredniej), to zasadniczo zachowuje się jak gumowate ciało stałe, w warunkach znanych jako lepkosprężystość. Ten stan charakteryzuje gwałtowna zmiana właściwości, np. zmniejszenie się modułu elastyczności wraz z temperaturą. Stan lepkosprężysty to stan pośredni pomiędzy stanem szklistym, w którym materiał jest nieruchomy, a stanem wysokoelastycznym, w którym materiał wykazuje zdolność do dużych odkształceń przy zachowaniu sprężystości [52,55,56].

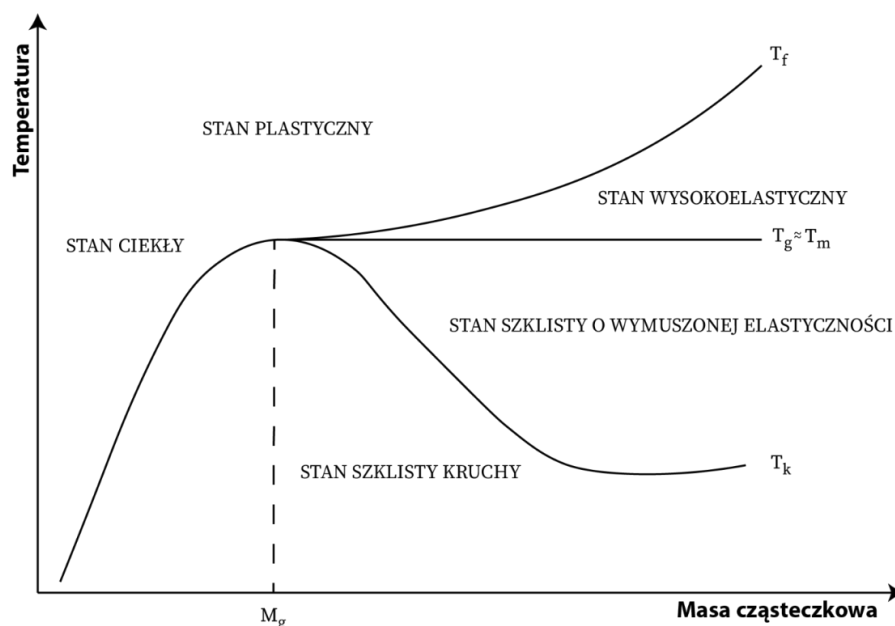
- Stan wysokoelastyczny – charakteryzuje się odkształceniami sprężystymi zgodnie z prawem Hooke’a, co oznacza, że materiał powraca do swojego pierwotnego kształtu po usunięciu siły zewnętrznej. W tym stanie moduł sprężystości Younga ma niewielką wartość, wynoszącą około 10^7 Pa, a to umożliwia duże odkształcenia, bez trwałego uszkodzenia struktury. W temperaturach mięknięcia dla tworzyw amorficznych i temperaturach topnienia dla materiałów częściowokrystalicznych, energia ruchu jest zbliżona do energii oddziaływania międzycząsteczkowego, co prowadzi do wyprostowania się skręconych segmentów makrocząsteczek pod wpływem niewielkich sił zewnętrznych. W tym stanie makrocząsteczki nadal nie mogą się jednak przesuwać względem siebie [52,54].

- Stan plastycznopłynny – to stan, w którym po przekroczeniu temperatury płynięcia, siły międzycząsteczkowe w polimerze zostają znacznie zmniejszone, co skutkuje brakiem naprężenia przy odkształceniu polimeru przez siły zewnętrzne. W konsekwencji odkształcenie nie znika po ustaniu siły, a to oznacza, że łańcuchy polimeru pozostają przemieszczone trwale wobec siebie nawzajem nawet przy niewielkim obciążeniu. Podczas odkształceń makrocząsteczki przemieszczają się względem siebie, co prowadzi do płynięcia polimeru [52,54].

Polimer przechodzi z jednego stanu do drugiego w określonej temperaturze, której wartość jest charakterystyczna dla danego rodzaju polimeru. Te właściwości termiczne zostały opisane jako [52]:

- temperatura kruchości T_k – temperatura przejścia ze stanu szklistego kruchego w stan szklisty z wymuszoną elastycznością;
- temperatura zeszklenia T_g – temperatura, w której następuje przejście ze stanu ciekłego lub plastycznego w stan szklisty, czego objawem jest skokowy wzrost lepkości substancji, obserwowana zazwyczaj podczas ochładzania substancji;
- temperatura topnienia (mięknienia) T_m – temperatura, w której materiał zaczyna zmieniać się z ciała stałego w plastyczną masę, następuje wyraźna widoczna zmiana twardości polimeru;
- temperatura płynięcia T_p , T_f – temperatura przejścia ze stanu elastycznego do ciekłego;
- temperatura degradacji T_d – temperatura, w której następuje rozkład polimeru.

Warto zauważyć, że im większa masa cząsteczkowa polimeru, tym wyższa jest temperatura płynięcia, co z kolei zwiększa zakres temperatur, w których polimer pozostaje w stanie wysokoelastycznym [27]. Na rys. 2 przedstawiono zależności między masą cząsteczkową, a zakresem temperatury zeszklenia i płynięcia dla polimerów amorficznych.



Rys. 2 Zależność masy cząsteczkowej polimerów amorficznych od temperatury zeszklenia i temperatury płynięcia (M_g – masa graniczna) [52]

Hartmann i in. [18] zaproponowali, żeby do źródeł mikroplastiku zaliczać tworzywa, których temperatura topnienia T_m i temperatura zeszklenia T_g są wyższe niż 20°C , co oznacza, że w środowisku materiał powinien występować w formie ciała stałego. W ten sposób wykluczone zostały takie polimery jak: poli(alkohol winylowy) PVA, oraz poli(tlenek etylenu) PEG.

2.4. Rozpuszczalność

Rozpuszczalność jest ważną właściwością chemiczną polimerów, która określa zdolność do rozpuszczania za pomocą rozpuszczalnika [57]. Początkowo parametr rozpuszczalności był analizowany wyłącznie przy doborze rozpuszczalnika w przemyśle farb i powłok, ale obecnie jego wykorzystanie jest znacznie szersze i obejmuje wiele innych aspektów technologicznych, takich jak przewidywanie mieszalności i rozpuszczalności polimerów, odporności chemicznej oraz szybkości przenikania.

Przewidywanie rozpuszczalności polimerów w różnych rozpuszczalnikach jest jednym z kluczowych zastosowań oceny parametru rozpuszczalności. Im bardziej podobne są wartości parametrów rozpuszczalności dla rozpuszczalnika i substancji rozpuszczonej, tym większe jest prawdopodobieństwo, że substancja rozpuszczona rozpuści się w danym rozpuszczalniku [58].

Polimery charakteryzują się rozpuszczalnością, która zwykle przebiega powoli i obejmuje fazę pęcznienia. Rozpuszczalność danego polimeru w określonym rozpuszczalniku ulega zmianie w zależności od jego masy cząsteczkowej, stopnia krystaliczności i rozgałęzień. Wzrost masy cząsteczkowej i stopnia krystaliczności

proceeds to a decrease in solubility, whereas a greater number of branches of particles favors its growth. Crosslinked polymers can only be cured, without the complete dissolution [59].

There are several practical rules, which can be applied when choosing appropriate solvents for polymers:

- **Parametr rozpuszczalności Hildebranda** (HSI – Hildebrand solubility index) is used to determine the strength of attraction between particles of the solvent, which must be overcome during the dissolution of the polymer or other substance. It can be calculated on the basis of the heat of evaporation of the solvent. HSI is useful in predicting the ability of the solvent to mix with the substance being dissolved. Usually, it is used together with other parameters of solubility (such as the hydrogen bonding index and polarity of particles), to develop solubility maps for polymers. Additionally, HSI is used to evaluate the usefulness of solvents for the extraction of oils from plants. The tool of high utility is also the developed solubility scale according to Hildebrand. The values of the solubility parameter of Hildebrand are expressed in units of $\text{MPa}^{0.5}$ or $(\text{kcal/cm}^3)^{0.5}$. In a situation, when using the solubility parameters of Hildebrand for a polymer (p) and a solvent (s) having similar polarity and hydrogen bonding parameters, the following rule applies: $|\delta_s - \delta_p| \leq 3,6 \text{ MPa}^{0.5}$, where $|\delta_s - \delta_p|$ denotes the absolute difference between the surface energies of two materials [58,60,61].
- **Parametr rozpuszczalności Hansena** (HSP – Hansen solubility parameter) is one of the parameters used to evaluate the ability of solvents to dissolve various substances. The value of HSP is calculated on the basis of the physical properties of the solvent, such as molecular mass, density, and boiling temperature. This indicator finds application in the evaluation of the ability of solvents to dissolve various types of solvents, in particular non-polar solvents, carbon-based solvents, and petroleum solvents. The ability of dissolution increases proportionally to the value of HSP. The Hansen solubility scale is used to evaluate the solubility of chemical compounds [58,61].

The value of the HSP parameter has a strictly technical and industrial character. In the case of the evaluation of the solubility of microplastic, the key solvent is water. This is a natural solvent present in the environment, in which microplastic is usually present and may ultimately remain. Water can influence the degradation process of microplastics depending on the environmental conditions such as temperature, pH, and the presence of other substances [17].

The solubility of microplastic is an element resulting directly from the state of aggregation and chemical properties, so many researchers propose it as a criterion for defining microplastic [18].

Rozpuszczalność mikroplastiku ustalono jako $<1\text{mg L}^{-1}$ w temperaturze 20°C , czyli na poziomie właściwym dla materiałów słabo rozpuszczalnych.

2.5. Kształt

Podział mikroplastiku ze względu na kształt może wynikać z wielu czynników, takich jak różnice w procesach produkcji i przetwarzania tworzyw sztucznych oraz z różnorodności źródeł, z których pochodzi mikroplastik.

Podział mikroplastiku na podstawie kształtu jest mniej skomplikowany i bardziej jednoznaczny niż podział ze względu na wielkość cząstek. Wyróżnia się sześć podstawowych kształtów cząstek mikroplastiku [62,63]:

- listek: płaski, cienki element, często z rąbkiem na zewnątrz;
- folia: cienka, elastyczna i płaska cząstka;
- włókno: długie, wąskie, przypominające nić, którego długość jest równa lub mniejsza niż 15 mm i którego stosunek długości do szerokości jest większy niż 3;
- fragment: cząstka o nieregularnym kształcie, powstała z rozbicia większych cząstek;
- granulka: kształt kulisty, każdy punkt na powierzchni znajduje się w tej samej odległości od środka;
- pianka: cząstka o strukturze porowatej.

We wskazanej klasyfikacji można wyróżnić próby dalszego uszczegóławiania, na przykład w kategorii granulek, która może być podzielona na kulki, sferoidy i granulki cylindryczne [18].

2.6. Kolor

Kolor tworzyw sztucznych zależy od rodzaju użytych barwników i pigmentów oraz innych dodatków, takich jak rozjaśniacze optyczne – heliofory, czyli substancje zwiększające biel [27]. Barwniki są substancjami organicznymi, które zawierają grupy chromoforowe odpowiedzialne za ich zabarwienie [64] i rozpuszczają się w tworzywie sztucznym nadając mu barwę. Pigmenty natomiast to drobne cząstki nierozpuszczalne w tworzywie, które w nim rozproszone nadają mu kolor. Ostateczny kolor zależy od ilości i rodzaju użytych barwników oraz pigmentów, a także od rodzaju i przeźroczystości użytego tworzywa.

Mikroplastiki mogą mieć różne kolory, od intensywnie zabarwionych i nieprzezroczystych cząsteczek po przezroczyste [65–70]. W wyniku degradacji, kolor pierwotny ulega zmianie na wtórny [71]. Pomimo że określenie koloru nie jest uważane za kluczowe (ze względu na ryzyko pomyłek podczas kontroli wzrokowej, szczególnie

w przypadku materiałów transparentnych), to włączenie tej kategorii do charakteryzacji mikroplastików może okazać się pomocne. Sugeruje się stosowanie systemu dopasowania kolorów Pantone Color Matching System [18].

W opracowanej metodzie badawczej przyjęto, że informacja o kolorze nie jest znacząca w kontekście postrzegania zmian degradacyjnych zwłaszcza na powierzchni mikroplastiku. Zastosowano dwa inne parametry związane z kolorem a dokładnie z jego nasyceniem:

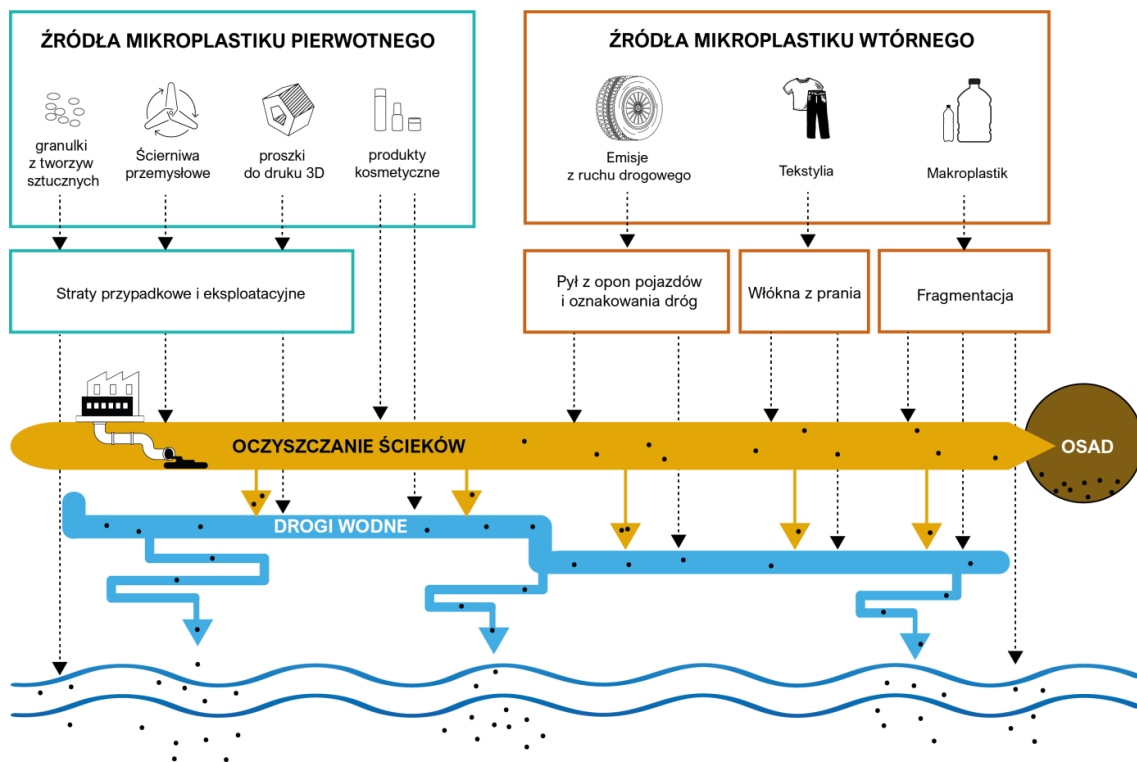
Kolor słaby i blade – w obserwacji wydaje się przygaszony, wypłowiły, z tendencją do szarości lub bieli. Powierzchnia może wyglądać bardziej matowo, posiadać chropowatą teksturę z widocznymi mikropęknięciami, zniszczeniami lub fragmentacją.

Kolor mocny i głęboki – jest wyrazisty, intensywny i nasycony. Powierzchnia jest bardziej gładka i lśniąca. Barwy są czyste, bez widocznych zmian w kierunku szarości czy blednięcia. Powierzchnia jest gładka i spójna bez widocznych pęknięć czy ubytków. Wzory, jeśli występują, są wyraźnie widoczne.

2.7. Pochodzenie

W kontekście pochodzenia mikroplastików wyróżnia się mikroplastiki pierwotne oraz wtórne. Mikroplastiki pierwotne to te, które zostały celowo wyprodukowane w określonym zakresie wielkości oraz będące ubocznymi produktami użytkowania [18,72]. Mikroplastiki powstają na skutek rozpadu produktów, takich jak butelki, opakowania czy elementy sprzętu elektronicznego, a także na skutek abrazyjnego zużycia gumy samochodowej czy podczas prania tkanin syntetycznych [45].

Z perspektywy przepisów wprowadzanych w poszczególnych państwach przez podmioty zajmujące się ograniczeniem przedostawania się mikroplastiku do środowiska (jak na przykład decyzja Komisji UE 2021/1870 z dnia 22 października 2021 r., ustanawiająca kryteria oznakowania ekologicznego UE dla produktów kosmetycznych i produktów do pielęgnacji zwierząt [73]) jak i z biologicznego punktu widzenia, nie ma znaczenia, czy przedmiot z tworzywa sztucznego, z którym styka się organizm, został wyprodukowany celowo [74]. Oznacza to, że takie przedmioty, niezależnie od swojego pierwotnego przeznaczenia, mogą stanowić zagrożenie dla środowiska, a w szczególności dla organizmów żywych. W związku z tym podejmuje się wiele działań mających na celu ograniczenie wprowadzania mikroplastików do środowiska, w tym ograniczenie produkcji i stosowania tworzyw sztucznych oraz wprowadzenie regulacji dotyczących sposobów ich utylizacji i recyklingu. Źródła przedostawania się mikroplastiku do środowiska z podziałem na jego pochodzenie przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3 Źródła przedostawania się mikroplastiku do środowiska z podziałem na jego pochodzenie.
Opracowanie własne na podstawie [72]

3. Charakterystyka wybranych tworzyw sztucznych z uwzględnieniem ich podatności na degradację

Scharakteryzowano właściwości tworzyw sztucznych na podstawie literatury przedmiotu oraz danych pozyskanych od firm wytwarzających te materiały. Szczególną uwagę poświęcono kwestii podatności na degradację pod wpływem różnorodnych czynników. Analizie poddano poziom odporność poszczególnych materiałów m.in. na wpływ uderzeń i ścierania, działania temperatury, kwasów, zasad, olejów, rozpuszczalników organicznych, promieniowania UV oraz innych czynników atmosferycznych (temperatura powietrza, wilgotność, ruch powietrza i ciśnienie atmosferyczne). Pozyskane w ten sposób informacje wykorzystano podczas tworzenia bazy danych każdego materiału, która stanowi jeden z głównych elementów opracowanego narzędzia badawczego.

Akrylonitryl-styren-akrylan (Acrylate-styrene-acrylonitrile), ASA

ASA jest strukturalnie bardzo podobny do ABS (Terpolimer akrylonitrylo-butadieno-styrenowy). Sferyczne cząstki kauczuku akrylowego (zamiast kauczuku butadienowego) nieco usieciowanego, pełniące funkcję modyfikatora udarności, są chemicznie szczepione łańcuchami kopolimeru styrenowo-akrylonitrylowego i osadzone w matrycy styrenowo-akrylonitrylowej. Kauczuk akrylowy różni się od kauczuku na bazie butadienu brakiem podwójnych wiązań, co zapewnia materiałowi około dziesięciokrotnie większą odporność na warunki atmosferyczne i promieniowanie ultrafioletowe niż ABS, wyższą długotrwałą odporność na ciepło i lepszą odporność chemiczną. ASA jest o wiele bardziej odporny na pękanie wynikające z naprężeń w środowisku niż ABS, a także na alkohole i wiele środków czyszczących. Zwykle stosuje się kauczuk akrylan n-butyłu, ale można spotkać także inne estry, np. akrylan etyloheksylu. ASA ma niższą temperaturę zeszklenia niż ABS, odpowiednio 100°C i 105°C, zapewniając materiałowi lepsze właściwości w niskich temperaturach [75]. ASA ma wysoką odporność na zewnętrzne warunki atmosferyczne; zachowuje połysk, kolor i właściwości mechaniczne. Ma dobrą odporność chemiczną i termiczną, wysoki połysk, dobre właściwości antystatyczne, jest wytrzymały i sztywny. Jest wykorzystywany w zastosowaniach wymagających odporności na warunki atmosferyczne [76].

Alkohol etylenowy (Ethylene vinyl alcohol), EVOH

Alkohol etylenowy jest formalnym kopolimerem etylenu i alkoholu winylowego. Ponieważ ten ostatni monomer występuje głównie w postaci tautomeru aldehydu octowego, kopolimer wytwarza się przez polimeryzację etylenu i octanu winylu z wytworzeniem kopolimeru etylen-octan winylu (EVA), po którym następuje hydroliza. Kopolimer EVOH jest określony przez zawartość molową etylenu: formy o niższej zawartości etylenu mają lepsze właściwości barierowe; formy o wyższej zawartości etylenu mają niższe temperatury wytłaczania. Żywica z tworzywa sztucznego jest powszechnie stosowana jako bariera tlenowa w opakowaniach żywności. EVOH jest

lepszy niż inne tworzywa sztuczne w zatrzymywaniu powietrza i aromatów, będąc jednocześnie wysoce przezroczysty, odporny na warunki atmosferyczne, olej i rozpuszczalniki. Jest też elastyczny, formowalny, nadający się do recyklingu i drukowania. Jego wadą jest to, że jest trudny do wykonania, a przez to droższy, niż inne opakowania do żywności. Ze względu na koszty, producenci opakowań współwytłaczają lub laminują jako cienką warstwę EVOH między kartonem, folią lub innymi tworzywami sztucznymi [77,78].

Bromowany poliizobuten (Brominated polyisobutene, Butyl rubber), BPIB

Bromowany poliizobuten, nazywany również bromowanym poliizobutylenem, jest pochodną poliizobutyleny (PIB), który uzyskuje się poprzez proces polimeryzacji izobutyleny w stosunku około 98% z niewielką ilością izoprenu ok. 2%. W wyniku tego procesu powstaje poliizobutylen, na którym opiera się kauczuk butylowy. Bromowanie, czyli wprowadzenie atomów bromu do struktury polimeru, ma na celu poprawę niektórych właściwości fizycznych i chemicznych poliizobutyleny, takich jak zwiększona odporność na starzenie termiczne, działanie ozonu, promieniowanie UV [79,80].

Kauczuk butylowy ze względu na swoje właściwości, tj. niska przepuszczalność gazów, dobra odporność chemiczna, stabilność termiczna oraz elastyczność w niskich temperaturach, znajduje szerokie zastosowanie w różnych dziedzinach przemysłu. Bromowany poliizobuten, dzięki dodatkowym właściwościom uzyskanym w procesie bromowania, może być stosowany w aplikacjach wymagających jeszcze wyższej odporności chemicznej i termicznej. Znajduje zastosowanie m.in. w produkcji wewnętrznych wykładzin opon, gdzie jego niska przepuszczalność dla gazów pomaga utrzymać ciśnienie w oponach na stabilnym poziomie. Jest również używany w przemyśle samochodowym i aeronautycznym, produkcji uszczelek, membran, rur odpornych na działanie chemikaliów, a także jako dodatek poprawiający właściwości przeciwstarzeniowe materiałów polimerowych [79,81].

Dodatkowo, dzięki swojej odporności na promieniowanie UV i działanie ozonu, bromowany poliizobuten znajduje zastosowanie w pokryciach dachowych oraz izolacjach przeciwwilgociowych i przeciwwodnych, gdzie wymagana jest długotrwała ochrona przed czynnikami atmosferycznymi. Może być również stosowany w przemyśle elektrycznym jako materiał izolacyjny, a także do produkcji specjalistycznych klejów i uszczelnaczy charakteryzujących się wysoką adhezją i odpornością na środowiska agresywne chemicznie [80].

Etylen-co-octan winylu (Ethylene vinyl acetate), EVA

EVA to elastomerowy polimer, z którego wytwarza się materiały przypominające gumę pod względem miękkości i elastyczności. Materiał ma dobrą przejrzystość i połysk, wytrzymałość w niskich temperaturach do -20°C, odporność na pękanie naprężeniowe, wodoodporne właściwości kleju topliwego i odporność na promieniowanie UV. EVA ma charakterystyczny zapach podobny do octu. Jest konkurencyjny w stosunku do

produktów z gumy i polimerów winylowych w wielu zastosowaniach elektrycznych. EVA stał się ostatnio popularną alternatywą dla poli(chlorku winylu), ponieważ nie zawiera chloru [82]. Kopolimery EVA mają zastosowanie w przemyśle klejów hot melts (HMA). Ich właściwości zależą głównie od zawartości octanu winylu i MFI, gdzie MFI oznacza szybkość płynięcia materiałów polimerowych przy danym ciśnieniu i temperaturze [83].

Fluorowany etyleno-propylen (Fluorinated ethylene propylene), FEP

Fluorowany etyleno-propylen jest obojętnym, przezroczystym i półkryształicznym fluorokopolimerem składającym się z powtarzalnych jednostek heksafluoropropylenu (TFE) i tetrafluoroetylen (HFP), który otrzymuje się przez kopolimeryzację wolnorodnikową dwóch monomerów w wodnej dyspersji. Wprowadzenie około 5% molowych HFP do szkieletu polimeru zmniejsza krystaliczność kopolimerów FEP w porównaniu z homopolimerami TFE, co skutkuje niższą lepkością stopu i lepszą przetwarzalnością [84]. FEP charakteryzuje się dużą odpornością chemiczną, dużą odpornością na korozję naprężeniową, odpornością na działanie czynników atmosferycznych i światła, jak również jest wysoce odporny na działanie otwartego płomienia [85]. Łączy ze sobą unikalne właściwości mechaniczne i chemiczne PTFE (Polytetrafluoroetylen) z możliwością przetwarzania w stanie stopionym bardziej konwencjonalnych polimerów. FEP ma maksymalną temperaturę pracy 204°C i nieco wyższy współczynnik tarcia niż PTFE. Jest stosowany w urządzeniach biomedycznych zamiast PTFE [86].

Kauczuk akrylonitrylo-butadienowy (Butadiene rubber), BR

Polibutadien ma wysoką odporność na zużycie i jest stosowany zwłaszcza do wytwarzania opon (70% zapotrzebowania). Kolejne 25% stosuje się jako dodatek poprawiający wytrzymałość (odporność na uderzenia) tworzyw sztucznych, takich jak polistyren i akrylonitryl-butadienstyren (ABS). W 2012 r. kauczuk polibutadienowy odpowiadał za około jedną czwartą całkowitego światowego zużycia kauczków syntetycznych [87]. Ma niską odporność na czynniki atmosferyczne i działanie ozonu, wyjątkiem jest jego mieszanka z PVC. Jest bardzo wytrzymały na zerwanie, odporny termicznie w zakresie od -50 do 105°C. Wykazuje odporność na działanie olejów, benzyny oraz węglowodorów alifatycznych, charakteryzuje się także trwałością wobec lekkich olejów opałowych, paliw do silników wysokoprężnych oraz wysoką odpornością na niepalne ciecze hydrauliczne (typu HSA, HSB: emulsje olejowo – wodne, HSC: mieszaniny poliglikolu z wodą). Nie reaguje z kwasami i zasadami w temperaturach od -60 do +100°C, nie jest trwały wobec węglowodorów aromatycznych i chlorowanych, a także wykazuje brak odporności na płyny hamulcowe zawierające glikole [88,89].

Kauczuk butadienowo-akrylonitrylowy, NBR

Kauczuk butadienowo-akrylonitrylowy, zwany również kauczukiem nitrylowym bądź syntetycznym lub kopolimerem butadienu i akrylonitrylu. Cechuje się właściwościami pozwalającymi na zastosowanie w wielu branżach. Jest odporny na działanie licznych substancji, takich jak oleje (mineralne, roślinne, zwierzęce, oleje opałowe, paliwa do silników wysokoprężnych), smary, tłuszcze oraz węglowodory alifatyczne (propan, czysta benzyna), a także rozcieńczone kwasy i zasady, zwłaszcza w niższych temperaturach. Odporność kauczuku na wodę utrzymuje się do 60°C, jednak jego wytrzymałość zmniejsza się w miarę spadku temperatury. Typowy zakres pracy NBR wynosi od -30°C do +120°C, z możliwością krótkotrwałego działania w temperaturze do 130°C. Dodanie żywicy fenolowej poprawia jego elastyczność oraz odporność na gorącą wodę, a połączenie z PVC zwiększa odporność na działanie ozonu. NBR bez dodatków charakteryzuje się wysoką wytrzymałością na zerwanie, ale mniejszą odpornością na warunki atmosferyczne takie jak działanie ozonu, obecność wilgoci oraz ścieranie mogące prowadzić do pęknięć, kruszenia się i utraty elastyczności [90].

Kauczuk etylenowo-propylenowy (Ethylene-propylene rubber), EPR/EPDM/EPM

Kauczuki i elastomery etylenowo-propylenowe EPR (zwane także EPDM i EPM) nadal są jednymi z najczęściej stosowanych kauczków syntetycznych, mających zarówno zastosowania specjalistyczne, jak i ogólnego przeznaczenia. Są bardzo cenne ze względu na ich doskonałą odporność na ciepło, utlenianie, działanie ozonu i czynniki atmosferyczne dzięki stabilnej, nasyconej polimerowej strukturze szkieletu. Odpowiednio napigmentowane związki czarne i nieczarne są trwałe w kolorze. Jako elastomery niepolarne mają dobrą rezystywność elektryczną, a także odporność na rozpuszczalniki polarne, takie jak woda, kwasy, zasady, estry fosforanowe oraz wiele ketonów i alkoholi [91]. Kauczuk etylenowo-propylenowy (EPR) to polimer o doskonałych właściwościach izolacyjnych, który był początkowo stosowany jako dielektryk w produkcji przewodów i kabli [92]. Są to miękkie poliolefiny, które są zwykle stosowane pojedynczo, jako elastomery termoplastyczne, lub w mieszankach z żywicami polimerowymi, jako modyfikatory. Łatwo pęcznieją pod wpływem oleju parafinowego [93]. EPR jest wykorzystywany głównie w przemyśle motoryzacyjnym. Typowe zastosowania obejmuje produkcję opon, dętek, uszczelek, pierścieni o-ring, pęcherzy akumulatorów hydraulicznych, złączy przewodów i kabli oraz różnych części samochodowych [94].

Kopolimer blokowy styrenowo-butadienowy (Styrene butadiene block polimer), SBC

Styrene-Butadiene Block Copolymer (SBC) jest kopolimerem blokowym, który wytwarzany jest głównie z monomerów styrenu i butadienu. Proces produkcji SBC opiera się na polimeryzacji sekwencyjnej, gdzie najpierw polimeryzuje się blok polistyrenowy, a następnie w obecności polistyrenu dodaje się butadien, co prowadzi do powstania kopolimeru blokowego o strukturze A-B-A (styren-butadien-styren). Charakterystyczną

cechą SBC jest zdolność do tworzenia termoplastycznych elastomerów, które łączą właściwości gumy z łatwością przetwarzania tworzyw sztucznych [95]. Kopolimer jest ceniony za elastyczność, wytrzymałość oraz zdolność do poprawy właściwości innych materiałów, z którymi jest mieszany. Ze względu na jego termoplastyczny charakter SBC można łatwo formować w kleje topliwe lub roztwory rozpuszczalników. W temperaturze otoczenia SBC posiadają charakterystykę gumy, a w wyższych temperaturach stają się płynne. Można je utwardzać poprzez np. wulkanizację [96]. SBC jest materiałem stosowanym w wielu aplikacjach przemysłowych, m.in. w produkcji obuwia, dachów, uszczeltek, oraz jako modyfikator asfaltu. Cechuje się dobrą odpornością na działanie kwasów, zasad, promieniowania UV oraz czynników atmosferycznych, słabą natomiast na oleje i rozpuszczalniki organiczne [97].

Neopren (Polychloroprene, neoprene), CR

Neopren wykazuje dobrą stabilność chemiczną i zachowuje elastyczność w szerokim zakresie temperatur. Jest sprzedawany w postaci pełnej gumy lub lateksu i jest używany w wielu różnych zastosowaniach, takich jak rękawy na laptopy, ortezy ortopedyczne (nadgarstek, kolano itp.), izolacja elektryczna, membrany elastomerowe stosowane w płynie i arkuszach, obróbki blacharskie oraz paski klinowe do samochodów [98]. Neopren jest bardziej odporny na degradację, niż kauczuk naturalny lub syntetyczny. Ta względna obojętność sprawia, że neopren doskonale nadaje się do wymagających zastosowań, takich jak uszczelki, węże i powłoki odporne na korozję [99]. Może być stosowany jako baza do klejów, izolacja akustyczna w instalacjach transformatorów mocy oraz jako wyściółka w zewnętrznych metalowych obudowach w celu ochrony zawartości, umożliwiając jednocześnie dokładne dopasowanie. Jest bardziej odporny na spalanie, niż kauczuki produkowane wyłącznie na bazie węglowodorów [100], dlatego jest wykorzystywany jako materiał w drzwiach przeciwpożarowych oraz w strojach ochronnych związanych z walką z ogniem, takich jak rękawiczki i maski na twarz. Ze względu na tolerancję na ekstremalne warunki, neopren jest używany do izolacji podłoża składowisk odpadów. Punkt spalania neoprenu wynosi około 260°C. Dzięki odporności na kontakty z chemikaliami i elastyczność, neopren jest doskonałym polimerem uniwersalnym. Zapewnia dobrą odporność chemiczną przed kwasami, zasadami, olejami, tłuszczami, alkoholami, produktami naftowymi, ketonami, rozpuszczalnikami alifatycznymi oraz licznymi gazami i oparami przemysłowymi. Dodatkowo, jest to elastyczny materiał zapewniający sprawność manualną i komfort. Posiada również doskonałe właściwości termiczne: izolację podczas kontaktu (z czynnikami zimnym lub gorącymi), odporność na ogień (materiał dostosowany do użytkowania w pobliżu ognia). Jego następną zaletą jest trwałość, gdyż nie ulega degradacji wskutek przedłużonej ekspozycji na działanie światła, UV lub ozonu. Natomiast, należy zwrócić uwagę na fakt, że neopren posiada niski stopień odporności mechanicznej w przypadku intensywnego stosowania w środowisku chemicznym. Zaleca się więc używanie grubych rękawic z bawełnianą wkładką, co wzmacnia właściwości mechaniczne rękawic, a tym samym, ich trwałość. Nie zaleca się stosowania neoprenu w przypadku dłuższego kontaktu z silnie

stężonymi kwasami, rozpuszczalnikami aromatycznymi lub rozpuszczalnikami na bazie chloru, ponieważ doprowadzają one do jego szybkiej degradacji [101].

Poli(chlorek winylu) (Poli Vinyl Chloride), PVC

Poli(chlorek winylu) jest syntetycznym polimerem należącym do grupy termoplastów o strukturze amorficznej. PVC powstaje w wyniku polimeryzacji chlorku winylu, co oznacza stopniową przemianę monomerów w polimer [102,103]. Cechami charakterystycznymi PVC są: wysoka odporność chemiczna i mechaniczna, a także na działanie czynników atmosferycznych. Dzięki tym właściwościom znajduje szerokie zastosowanie w wielu dziedzinach. PVC jest powszechnie używany do produkcji rur, okien, drzwi, paneli podłogowych, elementów izolacyjnych, a także w przemyśle samochodowym i medycznym [102,104]. Jest materiałem uniwersalnym, ponieważ po zastosowaniu różnorodnych dodatków, zmieniają się jego właściwości fizyczne i chemiczne, umożliwiając dostosowanie do konkretnych wymagań.

Poli(etylen-co-chlorotrifluoroeten), chlorotrifluoroetylen etylenu (Ethylene chlorotrifluoroethylene), ECTFE

Poli(etylen-co-chlorotrifluoroeten), znany również jako chlorotrifluoroetylen etylenu jest półkryształicznym, przezroczystym kopolimerem etylenu i chlorotrifluoroetylen. Jego właściwości są bardzo podobne do właściwości ETFE (fluorek etylenowy-tetrafluoroetylen). Wysoka udarność, doskonała odporność na chemikalia, bardzo dobre właściwości elektryczne oraz odporność na promieniowanie UV i ciepło, sprawiają, że idealnie nadaje się do wielu wymagających zastosowań. Temperatura pracy ciągłej ECTFE jest nieco niższa ze względu na obecność słabszego wiązania węgiel-chlor. W przeciwieństwie do PTFE (Polytetrafluoroetylen), ten fluorowany polimer jest w pełni przetwarzalny w stanie stopionym w większości konwencjonalnych metod, w tym przez wytłaczanie z rozdmuchem, prasowanie, wtryskiwanie i formowanie transferowe. Polimer ten posiada niską palność oraz długoterminową odporność na czynniki atmosferyczne i bardzo dobrą odporność na warunki środowiskowe. Jego temperatura pracy ciągłej mieści się w zakresie od -76 do +150°C. Ma wysoką rezystywność i niską stałą dielektryczną [105,106]. ECTFE może występować pod nazwą Halar®. Ma wyjątkowo gładkie powierzchnie w porównaniu z innymi fluoropolimerami, co czyni go idealnym materiałem do zastosowań wymagających wysokiej czystości w przemyśle farmaceutycznym i półprzewodnikowym [107].

Poli(tereftalan etylenu) (Polyethylene terephthalate), PET

Poli(tereftalan etylenu), inaczej znany jako PET, jest poliestrem chemicznie stabilnym, który powstaje z procesu polikondensacji kwasu tereftalowego i glikolu etylenowego. Ten polimer ma strukturę semikryształiczną, jest termoplastyczny, co oznacza, że jest łatwy do formowania przy użyciu różnych metod przetwórczych, topi się i płynie, często rozpuszcza się w rozpuszczalnikach organicznych, oraz potrafi zmieniać swoją płynność

i plastyczność pod wpływem ogrzewania (poniżej temperatury termodegradacji) i chłodzenia [108–110]. Tworzywa z grupy PET są wytrzymałe na działanie wielu substancji, takich jak oleje, smary, benzyna i rozcieńczone kwasy i zasady, a także rozpuszczalniki typu alifatycznego. Jednakże, ich odporność na pewne inne związki, takie jak chlorowcowęgłowodory, aminy aromatyczne i stężone roztwory kwasów i zasad, jest ograniczona. Nieodpowiednie warunki, takie jak wysokie temperatury w wyniku oddziaływania przegrzanej pary wodnej, powodują rozkład tych tworzyw (hydrolizę). Warto zaznaczyć, że politereftalany cechują się brakiem niebezpiecznych substancji, nawet w niewielkich ilościach [52].

Formowanie wtryskowe jest główną metodą stosowaną w przetwórstwie poli(tereftalanu etylenu). Ważnym czynnikiem wpływającym na jakość produktu jest dobór odpowiednich parametrów procesu, które decydują o stopniu krystaliczności, co bezpośrednio wpływa na właściwości mechaniczne wyrobu. Aby uzyskać strukturę krystaliczną na poziomie od 30 do 40%, temperatura formy powinna wynosić 140°C, co pozwala na uzyskanie produktu o wysokiej wytrzymałości, sztywności oraz odporności na ścieranie. Drugą metodą stosowaną przy przetwórstwie PET jest wytłaczanie, dzięki któremu można uzyskać folie, płyty, oraz różnego rodzaju większe kształtki profilowe [109].

Pierwszymi zastosowaniami poli(tereftalanu etylenu) była produkcja włókien i folii. Jednak z biegiem czasu, zaczęto masowo wykorzystywać PET jako główny materiał do produkcji butelek oraz pojemników na produkty żywnościowe. Poza tym, produkty z tego tworzywa spotykane są również w innych branżach, takich jak przemysł elektroniczny, motoryzacyjny czy maszynowy. Co więcej PET jest tworzywem przyjaznym dla środowiska, ponieważ jest recyklowalny, po odpowiedniej obróbce może być ponownie wykorzystany do produkcji butelek lub odzieży [108,109].

Nylon 6, PA6

Nylon 6 jest poliamidem charakteryzującym się wysoką wytrzymałością mechaniczną, odpornością na uderzenia oraz ścieranie, co czyni go popularnym materiałem w aplikacjach inżynierskich i mechanicznych. Jego odporność na temperatury, mieszcząca się w zakresie od -40 do +80°C, pozwala na zastosowanie w różnych warunkach środowiskowych. PA6 wykazuje dobrą odporność na oleje i większość chemikaliów, jednak jego odporność na silne kwasy i zasady jest ograniczona. Nylon 6 jest również rozpuszczalny w niektórych organicznych rozpuszczalnikach, co należy brać pod uwagę przy jego zastosowaniu. Materiał ten jest mniej odporny na działanie promieni UV oraz czynników atmosferycznych, co może prowadzić do degradacji i zmiany właściwości z czasem [111,112]. Nylon 6 produkowany jest w procesie polimeryzacji otwartej z kaprolaktamu. Ze względu na swoje właściwości, PA6 znajduje zastosowanie w produkcji części maszyn, elementów konstrukcyjnych w motoryzacji, sprzętu sportowego, tkanin technicznych oraz w przemyśle elektronicznym i opakowaniowym. Jego zastosowanie w biomedycynie, m.in. do produkcji implantów i narzędzi chirurgicznych, jest również zalecane ze względu na biokompatybilność i możliwość sterylizacji [113].

Polietylen chlorosulfonowany (Chlorosulfonated polyethylene), CSPE

Chlorosulfonowany polietylen to rodzina chlorowanych elastomerów. Materiały powstają w wyniku reakcji polietylenu z chlorem i ditlenkiem siarki. Reakcja zmienia termoplastyczny polietylen w syntetyczny elastomer, który można łączyć i wulkanizować. Polietylen chlorosulfonowany jest znany jako Hypalon®. [114]. Podstawowy polietylen jest obojętny chemicznie, odporny na uszkodzenia spowodowane wilgocią i ma dobrą wytrzymałość dielektryczną. Zawarty w polimerze chlor zwiększa jego odporność na ogień (samogasnący), olej, działanie mikroorganizmów oraz wykazuje dobrą przyczepność do różnych powierzchni. Główne zastosowanie znajduje w budownictwie. Ze względu na odporność na warunki atmosferyczne, promieniowanie UV i przyczepność jest to bardzo popularny materiał dachowy. Inne zastosowania obejmują m.in.: osłony i farby do przewodów oraz kabli, a także produkcję rur, okładzin zbiorników, powłok ochronnych kwasoodpornych i odpornych na ozon oraz uszczelki gumowych i innych wyrobów. Tworzy twarde i błyszczące powłoki [114–116].

Polietylen niskiej gęstości (Poly(ethylene), low density), LDPE

Polietylen niskiej gęstości jest powszechnie stosowanym tworzywem sztucznym, charakteryzującym się niską gęstością oraz dobrą elastycznością. LDPE jest szczególnie ceniony za wytrzymałość na uderzenia oraz odporność na korozję. Materiał ten nie jest jednak odpowiedni do zastosowań, gdzie wymagana jest sztywność czy wytrzymałość na wysokie temperatury [117].

LDPE produkowany jest głównie w procesie pękania parowego ropy (steam cracking, który polega na podgrzewaniu węglowodorów, takich jak ropa, do bardzo wysokich temperatur, zwykle między 800 a 900°C w obecności pary wodnej, co prowadzi do rozpadu większych cząsteczek na mniejsze). Materiał następnie jest polimeryzowany. Cechuje się doskonałymi właściwościami izolacyjnymi, zarówno elektrycznymi, jak i termicznymi, a to sprawia, że jest często wykorzystywany w przemyśle elektrycznym i elektronicznym. LDPE znajduje zastosowanie również w produkcji opakowań, takich jak torby na zakupy, butelki, kontenery oraz folie rolniczych i budowlanych [118,119].

Polietylen o dużej gęstości (PE-HD High-density polyethylene), HDPE/PE-HD

Polietylen o dużej gęstości (PE-HD, HDPE) należy do miękkich i elastycznych termoplastów o wysokim stosunku wytrzymałości do gęstości [120]. Gęstość HDPE wynosi od 942 do 965 kg/m³ [121]. HDPE może być otrzymywany na dwa sposoby: średniociśnieniową metodą Philipasa przy ciśnieniu od 30 do 40 bar oraz w zakresie temperatur od 85 do 180°C z tlenkiem chromu jako katalizatorem oraz niskociśnieniową metodą Zieglera przy ciśnieniu od 1 do 50 bar w zakresie temperatur od 20 do 150°C, gdzie katalizatorami są chlorowcotytany, estry tytanowe i alkiły glinu. Do głównych właściwości HDPE zaliczyć należy odporność na działanie wody, roztworów soli, kwasów (jednakże nie silnie utleniających, jak np. kwas azotowy, kwas siarkowy), ługów, alkoholi oraz benzyny i środków czyszczących [121]. Mimo, że gęstość HDPE jest tylko nieznacznie wyższa niż gęstość polietylenu o niskiej gęstości, HDPE ma mało

rozgałęzień, co daje mu silniejsze siły międzymolekularne i wytrzymałość na rozciąganie (38 MPa w porównaniu do 21 MPa dla LDPE) [122]. Różnica w wytrzymałości przewyższa różnicę w gęstości, co daje HDPE wyższą wytrzymałość właściwą [123]. HDPE jest mlecznobiały, ale może być barwiony na dowolny kolor, jest również obojętny fizjologicznie, bez smaku i zapachu co znajduje zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu. Jest powszechnie wykorzystywany do produkcji kanistrów, zbiorników paliwa i pojemników na olej opałowy w branży motoryzacyjnej, w produkcji rur i armatury do wody pitnej, beczek i aparatur chemicznych. HDPE spotykamy najczęściej w postaci worków na odpady i folii do przechowywania żywności [121,124].

Polimetakrylan metylu (Acrylic), PMMA

Polimetakrylan metylu znany także jako szkło akrylowe lub plexi. Jest to przezroczyste tworzywo sztuczne o szerokim zastosowaniu. PMMA uzyskuje się poprzez polimeryzację rodnikową metakrylanu metylu. Polimeryzacja prowadzi do powstania polimeru ataktycznego (bezpostaciowego) lub, w przypadku polimeryzacji anionowej, polimerów krystalicznych [125]. PMMA jest tworzywem twardym, odpornym na zarysowania, o wysokim połysku i gładkości powierzchni. Charakteryzuje się doskonałymi właściwościami optycznymi, przezroczystością do 92% i odpornością na promieniowanie UV (nie żółknie) [126,127]. Zastosowanie PMMA ma miejsce w produkcji przedmiotów, gdzie ważna jest przejrzystość i odporność na warunki atmosferyczne, na przykład w szklarniach, oknach, zadaszeniach i oświetleniu LED. Wykorzystuje się go również w medycynie, na przykład w protetyce ocznej oraz jako materiał na soczewki kontaktowe. PMMA znajduje zastosowanie w branży reklamowej do produkcji ekranów, szyldów i tablic reklamowych. Jest także wykorzystywany w branży motoryzacyjnej, na przykład do produkcji reflektorów samochodowych i lamp [128,129]. PMMA daje się łatwo formować i obrabiać, co pozwala na tworzenie różnorodnych kształtów i produktów a dzięki swojej przezroczystości, trwałości i odporności na warunki atmosferyczne, jest powszechnie stosowany w wielu sektorach przemysłu.

PMMA cechuje się wytrzymałością, stabilnością, odpornością na warunki atmosferyczne oraz możliwością termoformowania. Jest materiałem o wysokiej twardości, odpornym na zarysowania. PMMA sprawdza się w szerokim zakresie temperatur i charakteryzuje się dobrą odpornością na długotrwałe działanie promieniowania UV, nie tracąc przy tym barwy ani jakości. W kontakcie z różnymi substancjami chemicznymi, PMMA generalnie wykazuje dobrą odporność, jednak nie jest odporny na alkohole, benzen, aceton, silne kwasy, rozpuszczalniki oraz chlorowane węglowodory [130].

Polipropylen ataktyczny (Poly(propylene), atactic), PPA

Polipropylen ataktyczny to polimer o nieregularnej strukturze bocznych łańcuchów, co sprawia, że nie znajduje zastosowania jako samodzielny składnik w komercyjnych zastosowaniach. PPA charakteryzuje się niską odpornością na uderzenia i jest stosunkowo łatwy do zarysowania, co oznacza, że jego odporność na ścieranie jest

ograniczona. W zakresie temperatur od -40 do +80°C wykazuje umiarkowaną stabilność. Odporność chemiczna na kwasy i zasady jest zazwyczaj wysoka w przypadku większości typów polipropylenu, jednak ataktyczna forma może mieć obniżoną odporność. Jest odporny na wiele olejów, w przeciwieństwie do rozpuszczalników organicznych. Podobnie jak inne polimery, jest podatny na degradację pod wpływem promieniowania UV oraz innych czynników atmosferycznych [131,132].

Proces produkcji PPA rozpoczyna się od polimeryzacji propylenu. Polipropylen ataktyczny powstaje, gdy monomery propylenu łączą się w sposób nieregularny, co skutkuje nieregularną strukturą polimeru [133].

Polistyren ataktyczny (Poly(styrene), atactic), PSA

Polistyren ataktyczny jest odmianą polistyrenu (PS), polimeru syntetycznego powstającego w wyniku polimeryzacji styrenu w obecności inicjatorów nadtlenkowych. Styren, będący monomerem, poddawany jest reakcji polimeryzacji łańcuchowej, w której inicjator rozpoczyna proces łączenia kolejnych cząsteczek styrenu w długie łańcuchy polimerowe. Proces ten prowadzi do powstania polistyrenu, którego struktura może być ataktyczna, izotaktyczna lub syndiotaktyczna, w zależności od rozmieszczenia podstawników fenyłowych względem głównego łańcucha polimeru.

W polistyrenie ataktycznym konfiguracja absolutna wszystkich merów nie jest jednakowa i charakteryzuje się przypadkowym rozmieszczeniem grup fenyłowych, co nadaje mu amorficzną strukturę z nieregularnym upakowaniem łańcuchów polimerowych [27,130]. Zastosowanie polistyrenu, w tym jego ataktycznej formy, jest szerokie i obejmuje produkcję różnorodnych produktów, od opakowań po elementy izolacyjne. Dzięki swoim właściwościom, takim jak lekkość, łatwość formowania, a także dobra izolacyjność termiczna i elektryczna, polistyren znajduje zastosowanie w produkcji opakowań żywności, leków, kosmetyków, kubków, tacek, pojemników oraz pudełek na płyty CD/DVD. Dodatkowo, wykorzystuje się go do wytwarzania folii izolacyjnych oraz w izolacjach elektrycznych [134,135].

Poliuretan poliestrowy (Polyether urethane), PUR

Poliuretan poliestrowy to rodzaj poliuretanu, który jest polimerem uzyskiwanym przez poliadycję, czyli reakcję chemiczną, będącą formą polimeryzacji, podczas której monomery łączą się w długie łańcuchy polimerowe bez wydzielania produktów ubocznych [136]. Charakteryzuje się dobrymi właściwościami mechanicznymi, elastycznością oraz odpornością na ścieranie i rozdarcie. Dzięki tym cechom znajduje szerokie zastosowanie w różnych dziedzinach przemysłu, w tym przy produkcji gumy, uszczeltek, elementów amortyzujących, a także w branży motoryzacyjnej i medycznej. Jego specyficzna struktura chemiczna zapewnia również dobrą odporność na działanie kwasów i zasad, hydrolizę i mikroorganizmy, dzięki czemu jest materiałem odpowiednim do zastosowania tam, gdzie te właściwości są kluczowe [137–139].

Polytetrafluoroetylen (Polytetrafluoroethylene), PTFE

Politetrafluoroetylen, znany też jako Teflon[®], otrzymuje się w procesie polimeryzacji wolnorodnikowej z wykorzystaniem nadtlenu jako inicjatorów [140–151]. W produkcji politetrafluoroetylen (PTFE) stosowane są dwie metody: blokowa i emulsyjna. Metoda blokowa jest trudna do kontrolowania ze względu na dużą egzotermiczność reakcji polimeryzacji. Metoda emulsyjna polega na reakcji tetrafluoroetylen (TFE) z nadsiaczanem potasu w wodzie w zakresie temperatur od 70 do 80°C i pod ciśnieniem 10 MPa. W efekcie powstaje proszek PTFE o średnicy ziaren ok. 0,2 µm. Monomer, tetrafluoroetylen (TFE) ($\text{CF}_2=\text{CF}_2$, temperatura wrzenia: 77°C) jest bardzo reaktywny i jego przegrzanie może prowadzić do gwałtownego rozpadu na węgiel i tetrafluorek węgla. TFE posiada bardzo silne właściwości korodujące, dlatego aparatura do polimeryzacji musi być wykonana z platynowanego niklu. Masa molowa PTFE wynosi od 10^6 do 10^8 g·mol⁻¹. PTFE jest termicznie i chemicznie odporny na kwasy, zasady, rozpuszczalniki organiczne i środki utleniające. Ma również wysoką krystaliczność i nie ulega rozpuszczeniu ani nie pęcznieje w rozpuszczalnikach, z wyjątkiem fluorowanej nafty. PTFE ma słabą odporność mechaniczną i niską twardość, jest podatny na pełzanie, ma niski współczynnik tarcia i słabą odporność na ścieranie. Posiada jednak doskonałe właściwości hydrofobowe, bardzo dobre właściwości elektroizolacyjne i elektryczne niezależne od temperatury, a także jest niepalny. Właściwości te pozwalają na zastosowanie PTFE jako powłoki zmniejszające tarcie w protezach medycznych, elementy konstrukcji lotniczych, a także w produkcji naczyń teflonowych [148].

Terpolimer akrylonitrylo-butadieno-styrenowy (Acrylonitrile-butadiene-styrene), ABS

ABS charakteryzuje się dużym połyskiem, odpornością na uderzenia, wytrzymałością i sztywnością oraz odpornością na zarysowania [52,152,153]. Polimery ABS są odporne na działanie kwasów, zasad, jak również olejów zwierzęcych, roślinnych i mineralnych. Jednak pod wpływem lodowatego kwasu octowego, tetrachlorku węgla, węglowodorów aromatycznych i stężonych kwasów siarkowych i azotowych, ulegają pęcznieniu. Są rozpuszczalne w estrach, ketonach, chloroformie i dichlorku etylenu [154]. Polimery ABS mają również słabą odporność na chlorowane rozpuszczalniki, alkohole i aldehydy [152]. Terpolimer ABS otrzymuje się w dwóch etapach metodą polimeryzacji emulsyjnej: etap I – wytwarzanie emulsji polibutadienu; etap II – kopolimeryzacja akrylonitrylu i styrenu z jednoczesnym szczepieniem kopolimeru na polibutadienie. Każdy ze składników terpolimeru ma wpływ na jego ogólne właściwości. Akrylonitryl wpływa na poprawę odporności chemicznej i zwiększenie twardości, zmniejszając jednocześnie odporność na działanie promieniowania UV. Dodatek butadienu wpływa na większą elastyczność i udarność, styren natomiast zwiększa plastyczność i polepsza właściwości termiczne [52]. ABS wykorzystywany jest do produkcji profili i płyt, także metalizowanych (kopolimery ABS można stosować w procesie metalizacji elektrolitycznej), części maszyn oraz mebli, urządzeń sanitarnych, artykułów

gospodarstwa domowego, materiałów konstrukcyjnych dla lotnictwa oraz motoryzacji oraz obudów dla różnego rodzaju urządzeń elektrycznych [27,52].

Tygon polymer B-44-4X

Tygon polymer B-44-4X (nazwa handlowa Tygon® S3™ B-44-4X) to tworzywo przeznaczone do kontaktu z żywnością, charakteryzujące się wyjątkową przejrzystością, elastycznością oraz łatwością instalacji. Jest to materiał nietoksyczny, bez smaku i zapachu, co sprawia, że jest idealny do zastosowań wymagających wysokiej higieny. Jest materiałem wytrzymałym na różnego rodzaju uszkodzenia mechaniczne. Posiada gładką, nieporowatą strukturę, nie zatrzymuje cząsteczek, a to ułatwia utrzymanie czystości. Ponadto, Tygon® S3™ B-44-4X jest odporny na agresywne środki czyszczące i dezynfekujące, co dodatkowo podnosi jego wartość w przemyśle spożywczym i mleczarskim [155–157]. Posiada doskonałą odporność na działanie kwasów, zasad, olejów i rozpuszczalników organicznych [158].

Żywica alkidowa (Alkyd Resin)

Żywice alkidowe są polimerami syntetycznymi uzyskiwanymi w reakcji polikondensacji trzech rodzajów składników, w tym alkoholu wielowodorotlenowego, kwasu wielozasadowego i ich bezwodników, a także kwasów tłuszczowych oraz olejów trójglicerydowych [159]. Posiadają dobrą odporność na czynniki atmosferyczne, głównie dzięki elastyczności przy działaniu sił mechanicznych [160,161]. Dodatkowo żywice alkidowe są odporne na korozję chemiczną oraz promieniowanie UV [161–163], ale wrażliwe na działanie rozpuszczalników organicznych [161]. Żywice alkidowe są szeroko stosowane w produkcji farb, lakierów i powłok ochronnych, gdzie pełnią funkcję spoiwa. Chociaż zawierają naturalne oleje, są wytwarzane syntetycznie i są klasyfikowane jako tworzywa sztuczne [160,161].

4. Monitoring próbek mikroplastiku na plażach referencyjnych

Brak standardów w zakresie metod pobierania mikroplastiku w środowisku sprawia, że stosowane są różne metody badania rozdrobnionych cząstek tworzyw sztucznych w środowisku, w tym w środowisku morskim. Obszerny ich przegląd dokonany został w publikacji zatytułowanej *Microplastics in the Marine Environment: a Review of the Methods Used for Identification and Quantification* [164], lecz metody tam opisane nie zostały zweryfikowane w badaniach naukowych. Popularne jest badanie próbek zgodnie z wytycznymi zawartymi w *Guidelines for sampling microplastics on sandy beaches* [165] i *Guideline for Monitoring Marine Litter on the Beaches in the OSPAR Maritime Area* [166] oraz w dokumencie opracowanym w ramach projektu JPI-Oceans BASEMAN pod nazwą *Standardised protocol for monitoring microplastics in seawater* [167] z 2019 r., a także innych publikacjach naukowych o tej tematyce. Wybór metody pobierania próbek zależy w dużej mierze od celu badań [168].

Stosowane w badaniu procedury pobierania próbek wydają się zasadne gdyż powstały w wyniku praktycznych działań i raportów końcowych z projektów naukowych mających na celu badanie odpadów z tworzyw sztucznych zwanych mikroplastikiem. Innym czynnikiem potwierdzającym funkcjonalne podejście do tematu wspomnianych dokumentów jest to, że w generalnym zarysie zaproponowane rozwiązania i wiedza zawarta w metodyce pobierania próbek ze stref przybrzeżnych są spójne we wszystkich opracowaniach. Każdy z dokumentów uwzględnia elementy, które przyczyniają się do tego, że badacze będą mogli pobrać próbki do badań w sposób bezpieczny dla własnego zdrowia [166], opisują wybór tak zwanych „plaż referencyjnych” i jednostek pobierania próbek [166,169], określają szczegółowe terminy, w których badania należy przeprowadzać oraz narzędzia, jakie powinny być używane do pobierania próbek [34,169], a także konceptualizują sposób postępowania z próbkami tworzyw sztucznych, które nie nadają się do dalszych badań w laboratorium, albo mikroplastikiem po prostu nie są [166].

Istotnym jest, że określono trzy główne strategie pobierania próbek z osadów w strefach przybrzeżnych. Obejmują one selektywne pobieranie próbek, pobieranie próbek zbiorczych oraz pobieranie próbek o zmniejszonej objętości. Różne strategie pobierania próbek mogą być wybrane po uwzględnieniu rodzaju matrycy, która ma być badana na obecność mikroplastików (woda, osady lub fauna i flora) [170]. Selektywne pobieranie próbek w terenie polega na bezpośredniej ekstrakcji z otoczenia elementów, które są rozpoznawalne gołym okiem [164]. Metoda ta jest zwykle stosowana na powierzchni osadów brzegowych i jest bardziej praktyczna dla dużych drobin mikroplastików (od 1 do 5 mm). Pobieranie próbek plastikowych granulek jest często selektywne, ponieważ ich zakres wielkości (średnica od 1 do 5 mm) sprawia, że są one łatwo rozpoznawalne w osadach flotacyjnych piaszczystych plaż. Jednakże, gdy mikroplastiki są wymieszane z innymi szczątkami lub nie mają charakterystycznych kształtów (tj. są nieregularne, chropowate, kanciaste), to istnieje duże ryzyko ich przeoczenia [171]. Próbki zbiorcze są to takie próbki, które są pobierane w całej objętości bez zmniejszania ich w trakcie

procesu pobierania. Ten sposób pobierania próbek jest najbardziej odpowiedni, gdy mikroplastiki nie mogą być łatwo zidentyfikowane wizualnie, ponieważ są przykryte cząstkami osadów, ich ilość jest niewielka i wymaga sortowania/filtrowania dużych objętości osadów/wody, lub są zbyt małe, by można je było zidentyfikować wizualnie. Próbkę o zmniejszonej objętości, stosowaną zarówno w próbkach osadów, jak i wody morskiej, odnoszą się do próbek, w których objętość próbki zbiorczej jest zmniejszana podczas pobierania. Zachowana zostaje tylko ta część próbki, która jest interesująca dla dalszego przetwarzania [164].

Najważniejsze techniki pobierania mikroplastiku ze stref przybrzeżnych ujęte w instrukcjach technicznych, które były podstawą wyboru metodyki poboru próbek środowiskowych, to:

1. OSPAR Commission: *Guideline for Monitoring Marine Litter on the Beaches in the OSPAR Maritime Area* [166]

Komisja OSPAR rozpoczęła działalność w 1972 r. podczas Konwencji w Oslo. Zakres ochrony wyznaczony powyższym dokumentem został rozszerzony o lądowe źródła zanieczyszczeń morskich oraz te występujące w wyniku przemysłu morskiego, co nastąpiło na mocy Konwencji Paryskiej z 1974 r. W 1998 r. przyjęto nowy załącznik dotyczący różnorodności biologicznej i ekosystemów.

W 2010 r. jako wynik prac OSPAR ukazał się *Guideline for Monitoring Marine Litter on the Beaches in the OSPAR Maritime Area*, czyli narzędzie do generowania danych o odpadach morskich. W założeniu jednolity sposób monitorowania miał pozwolić na regionalną interpretację stanu środowiska w obszarze OSPAR oraz zapewniać odpowiednią jakość generowanych danych. Jako, że dokument nie stanowi informacji o zbieraniu i monitorowaniu próbek mikroplastiku, ale odpadów ogólnie znajdujących, to zawiera on niezwykle istotne podstawy sposobu przeprowadzania prac terenowych, które należy brać pod uwagę podczas monitorowania cząstek mikroplastiku.

Główne elementy zawarte w narzędziu opracowanym przez OSPAR to: wybór plaż referencyjnych oraz wyznaczanie miejsca pomiarów, sposób wyznaczania jednostek próbkowania, metoda pobierania próbek, terminy przeprowadzania monitoringu plaż, zasady dotyczące bezpieczeństwa podczas przeprowadzania prac w terenie oraz sposób postępowania z próbkami, które nie będą przydatne do dalszych badań.

2. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability: *Guidance on Monitoring of Marine Litter in European Seas. a guidance document within the Common Implementation Strategy for the Marine Strategy Framework Directive* [172].

W wyniku prac prowadzonych w latach 2012-2013 przez Technical Subgroup on Marine Litter (TSG-ML), czyli grupy ekspertów składających się z delegatów państw członkowskich Unii Europejskiej (UE) pod kierownictwem Dyrekcji Generalnej ds.

Środowiska (DG ENV) oraz przewodnictwem Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER), a także the EC Joint Research Centre and the German Environment Agency, został opracowany raport pod nazwą: *Guidance on Monitoring of Marine Litter in European Seas*. Opisano w nim konkretne protokoły i rozważania dotyczące gromadzenia, zgłaszania i oceny danych dotyczących odpadów morskich, w szczególności odpadów na plażach, odpadów pływających, odpadów z dna morza, odpadów znajdujących się w faunie i florze oraz mikrozanieczyszczeń, w tym mikroplastików [40].

3. A Rocha International: *Guidelines for sampling microplastics on sandy beaches* [165]

A Rocha to globalna organizacja, która angażuje się w badania naukowe, edukację ekologiczną i społeczne projekty ochrony przyrody w ponad 20 krajach i na sześciu kontynentach. A Rocha zajmuje się zanieczyszczeniem plastikiem na całym świecie, współpracując z lokalnymi grupami obywatelskimi w celu oczyszczenia plaż oraz prowadząc badania nad mikroplastikiem [173]. W wyniku tej działalności opracowany został podręcznik: *Guidelines for sampling microplastics on sandy beaches*, który wydano w 2018 r. W przewodniku można znaleźć szczegółowe wytyczne dotyczące procesu pobierania próbek.

4. U.S. Environmental Protection Agency: *EPA's Microplastic Beach Protocol a Community Science Protocol for Sampling Microplastic Pollution* [169]

Protokół EPA dotyczy zbierania danych dotyczących zanieczyszczenia mikroplastikami z plaż zarówno wzdłuż słodkowodnych, jak i morskich linii brzegowych. Protokół standaryzuje proces zbierania danych poprzez zastosowanie narzędzi i wytycznych, takich jak użycie sit o rozmiarze oczek 1 mm do wyłapywania mikroplastików, które są definiowane jako cząstki o wielkości od 1 do 5 mm. Analiza próbek polega na oddzieleniu potencjalnych mikroplastików od piasku i materiałów organicznych za pomocą przesiewania. Aby zwiększyć powtarzalność, protokół sugeruje użycie aplikacji *Marine Debris Tracker*, umożliwiającej rejestrowanie danych połączonych z geolokalizacją oraz ich przechowywanie w chmurze. W ten sposób protokół przyczynia się monitorowania środowiska i analizy trendów [169].

W tabeli 1. zestawiono wszystkie opisane metody pobierania próbek.

Tabela 1. Zestawienie metod pobierania próbek na plażach referencyjnych

	WYBÓR PLAŻ	JEDNOSTKA PRÓBKOWANIA	METODA POBIERANIA PRÓBEK	TERMINY POBIERANIA PRÓBEK
OSPAR Commission	Charakterystyka terenu: – piaszczysty lub żwirowy, – wystawiony na działanie otwartego morza, – dostępny przez cały rok, – wolny od zabudowań (w tym sezonowych), – nie powinien być objęty programami sprzątania. Minimalna długość przeprowadzania pomiarów: 100 m	100 m do identyfikacji wszystkich odpadów morskich. 1000 m do identyfikacji przedmiotów o wymiarach większych niż 50 cm.	Selektywna z wykorzystaniem wcześniej przygotowanego klucza identyfikacji odpadów.	Zima: połowa grudnia – połowa stycznia. Wiosna: kwiecień. Lato: połowa czerwca – połowa lipca. Jesień: połowa września – połowa października. Preferowane jest przeprowadzanie badań w jak najkrótszym czasie w ramach jednego okresu badań na wszystkich wyznaczonych do badań plażach.
European Commission	Charakterystyka terenu: – minimalna długość 100 m, – Niskie lub umiarkowane nachylenie (15 – 45°), – dostępny przez cały rok, – dostęp do morza (nie blokowany przez falochrony lub nabrzeża), – nie powinien być objęty programami sprzątania. Monitorowanie powinno być prowadzone tak, aby nie wpływać na żadne zagrożone lub chronione gatunki lub wrażliwą roślinność. W wielu przypadkach wyklucza to parki narodowe.	Zaleca się pobieranie próbek wzdłuż linii brzegowej na plażach piaszczystych. Na plażach lekko lub średnio zaśmieconych zaleca się co najmniej 2 odcinki 100 m na tej samej plaży. Na plażach silnie zaśmieconych 2 odcinki 50 m na tej samej plaży.	Oddzielne pobieranie próbek dla dwóch zakresów rozmiarów: (1-5 mm i 20 µm – 1 mm) Metoda sitowa z wykorzystaniem metalowych sit o wymiarach oczek 5 mm i 1 mm. Przesiewanie piasku z pól kwadratowych o wymiarach 50 cm x 50 cm. Głębokość zbierania materiału z powierzchni 5 cm.	Zima: połowa grudnia – połowa stycznia. Wiosna: kwiecień. Lato: połowa czerwca – połowa lipca. Jesień: połowa września – połowa października. Preferowane jest przeprowadzanie badań w jak najkrótszym czasie w ramach jednego okresu badań na wszystkich wyznaczonych do badań plażach.
A Rocha International	Charakterystyka terenu: – piaszczysty lub żwirowy, – nie powinien zawierać dużej ilości kamyków, żwiru, muszli itp., – dostępny przez cały rok, – wolny od zabudowań (w tym sezonowych), – nie powinien być objęty programami sprzątania, – długość co najmniej 100 m. Próbki należy zbierać po przypływie	100 m na plażach o niewielkim zanieczyszczeniu mikroplastikami. 50 m na plażach o dużym zanieczyszczeniu mikroplastikami. 5 transektów wyznaczonych za pomocą generatora liczb losowych rozmieszczonych w odległości co najmniej 5 m od siebie.	Metoda sitowa z wykorzystaniem metalowych sit o wymiarach oczek 5 mm i 1 mm. Do przepłukiwania sit należy wykorzystać przefiltrowaną wodę morską (filtry z siatki o średnicy oczek 100-300 µm). Przesiewanie piasku z pól kwadratowych o wymiarach 50 cm x 50 cm. Głębokość zbierania materiału z powierzchni 5 cm.	Zima: połowa grudnia – połowa stycznia. Wiosna: kwiecień. Lato: połowa czerwca – połowa lipca. Jesień: połowa września – połowa października.

	WYBÓR PLAŻ	JEDNOSTKA PRÓBKOWANIA	METODA POBIERANIA PRÓBEK	TERMINY POBIERANIA PRÓBEK
U.S. Environmental Protection Agency	Charakterystyka terenu: – plaże oceaniczne lub eustaria, – obszar poboru próbek znajduje się między linią ostatniego przypływu (zwaną także linią wysokiej wody lub linią skał, gdzie wodorosty i inne szczątki organiczne są osadzone przez przypływ), a tyłem plaży, gdzie piasek kończy się na falochronie, ścieżce, lub gdzie rośnie roślinność.	Odcinki główne o długości 100 m. Pomiar wykonany z 12 kwadratów wzdłuż 4 transektów, do których wyznaczenia wykorzystywany jest generator liczb losowych.	Metoda sitowa z wykorzystaniem metalowych sit o wymiarach oczek 5 mm i 1 mm. Do przepłukiwania sit należy wykorzystać przefiltrowaną wodę morską. Wstępne usuwanie dużych kawałków odpadów tj. gruz, wodorosty, drewno itp.. Przesiewanie piasku z pól kwadratowych o wymiarach 100 cm x 100 cm. Głębokość zbierania materiału z powierzchni 2,5 cm.	Brak informacji

5. Cel, tezy i zakres pracy

Obecność mikroplastiku w środowisku jest w ostatnich latach przedmiotem licznych badań i opracowań, jednakże jego monitoring i charakterystyka, jak i konsekwencje występowania są niewystarczająco poznane. Badania naukowe na poziomie globalnym skupiają się głównie na źródłach mikroplastiku oraz jego obecności w poszczególnych produktach. Z analizy danych literaturowych wynika, że problematyczny jest przede wszystkim brak standardów analitycznych związanych z przyjęciem metody oznaczania oraz ustaleniem wielkości i formy cząsteczek mikroplastiku. Nie powstały dotychczas międzynarodowe, ujednolicone procedury, które regulowałyby wszystkie aspekty monitoringu (tj. pobieranie próbek, ich przygotowanie, identyfikacja, charakterystyka, ocena degradacji itp.), co powoduje, że porównanie danych jest utrudnione.

Celem naukowym rozprawy doktorskiej było opracowanie metody badawczej do oceny stopnia i formy degradacji, a także podatności na rozkład mikroplastiku.

Postawiono następujące hipotezy badawcze:

HIPOTEZA 1

Do oceny stopnia i podatności na degradację mikroplastiku konieczna jest zaawansowana mikroskopowa analiza powierzchni, umożliwiająca identyfikację i kwantyfikację uszkodzeń mechanicznych.

HIPOTEZA 2

Możliwe jest opracowanie metody badawczej, która pozwala na określenie stopnia i formy degradacji mikroplastiku, integrując informacje o właściwościach tworzyw sztucznych, kształcie próbki, nasyceniu koloru, obecności biofilmu oraz wyniki analizy uszkodzeń mechanicznych.

HIPOTEZA 3

Czynniki środowiskowe (promieniowanie UV, uszkodzenia mechaniczne, substancje chemiczne i mikroorganizmy) w różnym stopniu wpływają na degradację mikroplastiku.

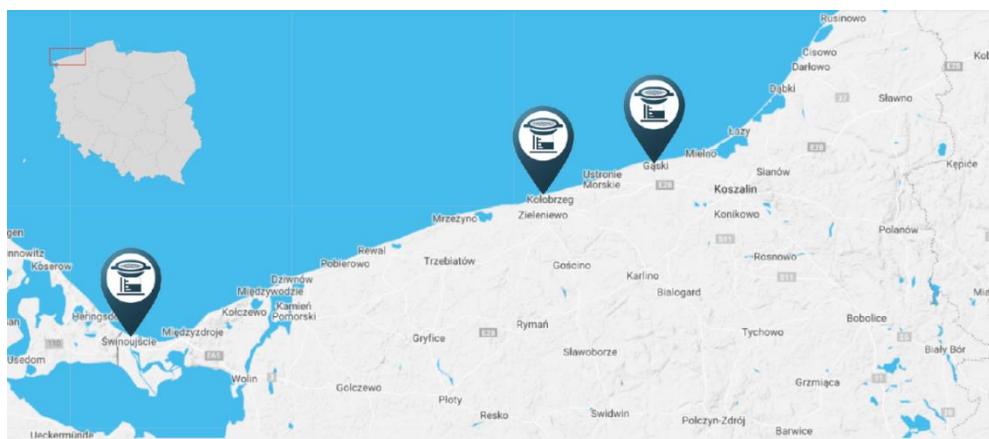
Na podstawie postawionych hipotez badawczych sprecyzowano kolejne etapy prac:

1. wybór metod i technik pomiarowych do oceny stanu degradacji próbek mikroplastiku, metod przygotowania próbek do badań i ustalenie kryteriów niezbędnych do oceny stanu degradacji na podstawie przeglądu literatury;

2. opracowanie procedury badań pilotażowych, wybór plaż referencyjnych i pobór próbek;
3. opracowanie metody badawczej w tym drzewa decyzyjnego (rys. 12), które określa za pomocą algorytmu wpływ atrybutów danych na predykcję wyników;
4. wprowadzenie do modelu wyników mikroskopowej analizy powierzchni;
5. charakterystyka badanej próbki mikroplastiku z uwzględnieniem właściwości tworzywa sztucznego, kształtu, koloru, obecności biofilmu i uszkodzeń mechanicznych;
6. ustalenie wpływu czynników środowiskowych (promieniowanie UV, uszkodzenia mechaniczne, substancje chemiczne i mikroorganizmy) na proces degradacji mikroplastiku;
7. weryfikacja opracowanej procedury metody badawczej.

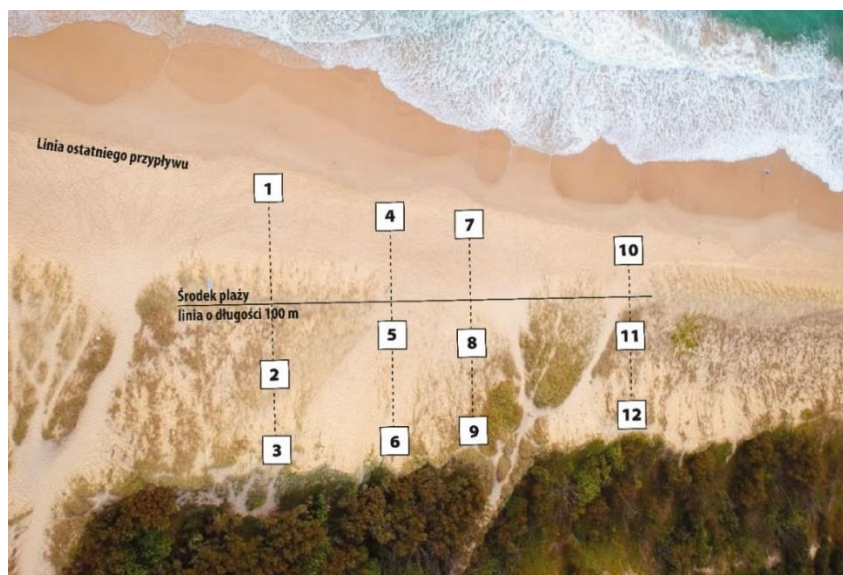
6. Metodyka poboru próbek środowiskowych

Obszarem badań były plaże w pasie nadbrzeżnym Morza Bałtyckiego w Polsce, zlokalizowane w miejscowościach: Świnoujście, Kołobrzeg oraz Gąski. Badania terenowe przeprowadzono w terminach: Kołobrzeg 9-10.10.2021r., Świnoujście 7- 9.01.2022 r., Gąski 29.04.-3.05.2022 r. Lokalizację punktów poboru próbek podano na rys. 4.



Rys. 4 Mapa lokalizacji miejsc pobierania próbek do badań środowiskowych.

Metodykę poboru próbek opracowano na podstawie przeglądu metod opisanych w literaturze (rozdział 4). Na rys 5. Przedstawiono schemat wyznaczania transektów na plażach referencyjnych dla pól pomiarowych.



Rys. 5 Schemat wyznaczania transektów na plaży referencyjnej dla pól pomiarowych opracowany na podstawie: EPA's Microplastic Beach Protocol a Community Science Protocol for Sampling Microplastic Pollution [169]

W badaniach terenowych wykorzystano:

- a. Metodę sitową z wykorzystaniem metalowych sit o wymiarach oczek 5 mm i 1 mm, wyznaczono pole o powierzchni 1 m², (boki kwadratu 100 x 100 cm), głębokość zbierania materiału 2,5 cm. (EPA's Microplastic Beach Protocol [169]).
- b. Metodę selektywną z wykorzystaniem wcześniej przygotowanego fotograficznego klucza identyfikacji odpadów opracowanego w ramach *Guideline for Monitoring Marine Litter on the Beaches in the OSPAR Maritime Area* [166].

Do metod sitowych użyto kalibrowanych sit laboratoryjnych firmy Retsch®. Jedno o rozmiarze oczek 1 mm spełniające normę EN 10204 2.1 wyprodukowane w standardzie ISO 3310-1:2016, którego średnica całkowita wynosiła 203 mm oraz głębokości 50 mm o numerze seryjnym: 21253804. Drugie o rozmiarze oczek 5 mm spełniające normę EN 10204 2.1 wyprodukowane w standardzie ISO 3310-1:2016, którego średnica całkowita wynosiła 203 mm oraz głębokości 50 mm o numerze seryjnym: 21240119.

7. Metody badań analitycznych

W pierwszym etapie postępowania z próbkami określono kształt każdej badanej próbki, nasycenie koloru oraz czy posiada na powierzchni zanieczyszczenia oraz materiał biologiczny w postaci widocznego stałego biofilmu. Na tym etapie dokonano również oceny, czy próbka powinna zostać oczyszczona z zanieczyszczeń przytwierdzonych do powierzchni przed dalszym etapem, czyli analizą mikroskopową.

Kolejnym etapem było uzyskanie zdjęć mikroskopowych zebranych z przynajmniej dwóch powierzchni rzutowych w celu określenia za pomocą analizy planimetrycznej obszaru powierzchni tych płaszczyzn oraz rozmiarów powierzchni charakterystycznych dla erozji mechanicznej (szczegółowo elementy erozji zostały omówione w podrozdziale 8.2 Opis metody badawczej). Ostatnim etapem badań było określenie rodzaju tworzywa z wykorzystaniem metod spektroskopowych. Jako główną metodę spektroskopową zastosowano spektroskopię FTIR z wykorzystaniem przystawki ATR (Attenuated Total Reflectance), a dopiero w przypadku dużej rozbieżności uzyskanych wyników stosowano spektroskopię Raman jako metodę komplementarną z FTIR. Wszystkie uzyskane w ten sposób dane wprowadzano kolejno do opracowanego w ramach pracy doktorskiej narzędzia badawczego. Wyniki analiz i pomiarów zapisano w kartach oceny próbki środowiskowej (załącznik 1). Dokładnie przeanalizowano 87 próbek.

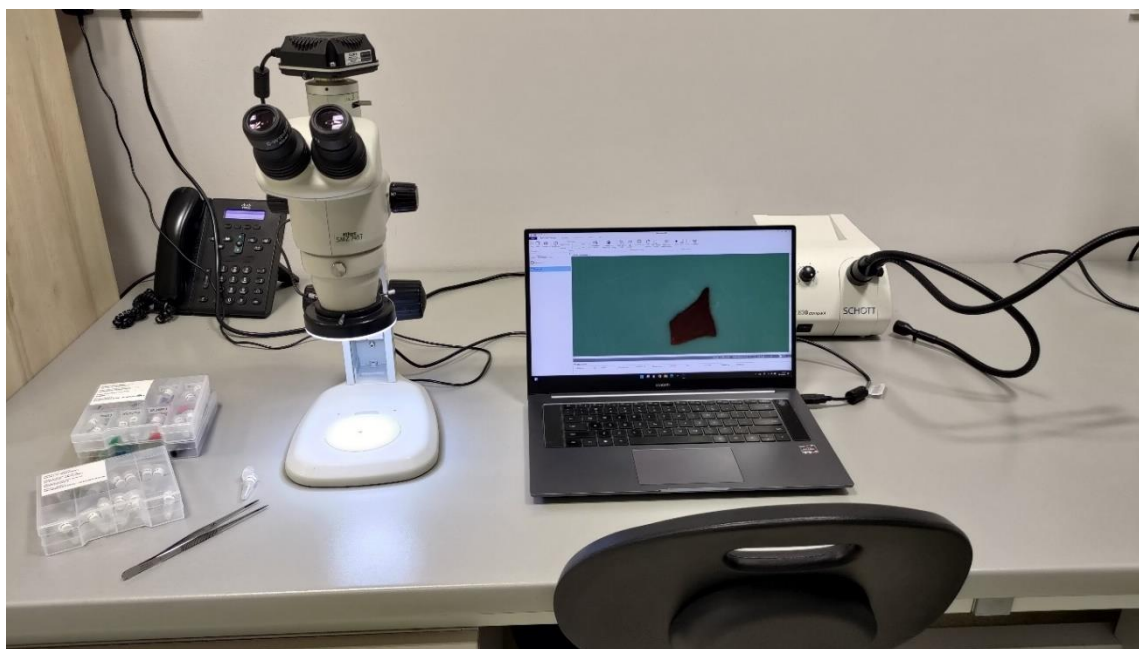
Przyjęto, że dopasowanie widma FTIR próbki do bazy danych wzorcowych powyżej 80% jest miarodajne i wskazuje właściwy polimer syntetyczny. Jeżeli widmo badanego materiału wskazywało możliwość zanieczyszczenia powierzchni oraz były widoczne zmiany związane z degradacją, uznawano za poprawne wartości dopasowania widm w zakresie od 60 do 80%.

Reineccius i in. podczas poszukiwania mikroplastiku w lodzie północnego Bałtyku [176] nie brali pod uwagę cząstek, których dopasowanie widma uzyskanego metodami spektroskopowymi do widma wzorcowego z baz danych było mniejsze niż 80%. Natomiast Dereszewska i in. [177] podczas poszukiwania mikroplastiku w porcie w Gdyni obniżyli wartość dopasowania widma do 60%.

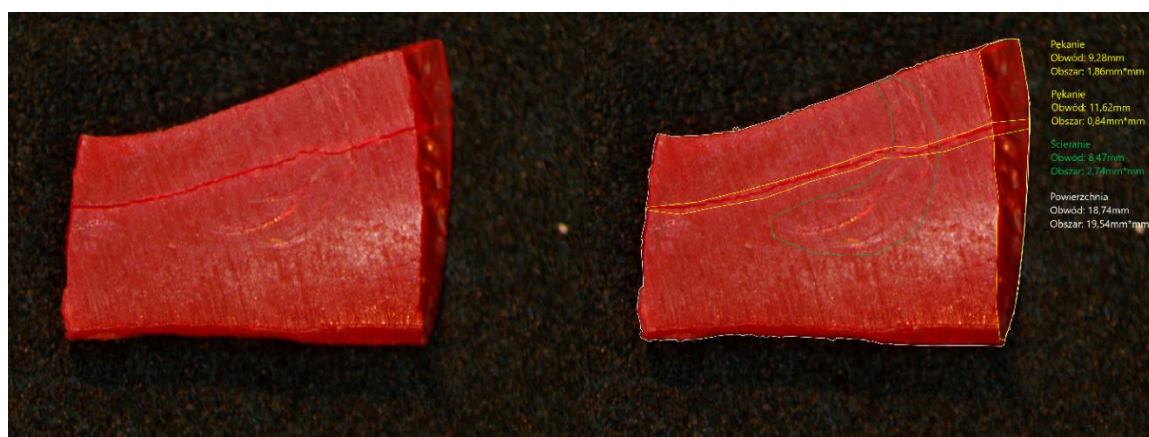
7.1. Metody mikroskopowe

Metody mikroskopowe są kluczowym narzędziem badawczym wówczas, gdy niemożliwa jest obserwacja obiektów ze względu na ich rozmiar. Najczęściej stosowaną techniką w mikroskopii świetlnej jest metoda jasnego pola, pozwalająca na obserwację próbek przy wykorzystaniu światła przechodzącego. Współcześnie stosowana mikroskopia wykorzystuje bardziej zaawansowane techniki, takie jak mikroskopia fluorescencyjna, z wykorzystaniem barwników fluorescencyjnych oraz mikroskopia elektronowa, które umożliwiają analizę struktur biologicznych na poziomie molekularnym.

Powierzchnię próbek mikroplastiku badano mikroskopem Nikon SMZ 745T (rys. 6), zapewniającym wysoką jakość obrazowania, z zakresem powiększenia od 0,67x do 5x. Bardzo istotnym elementem tego mikroskopu jest trójokularowy system optyczny (trino) umożliwiający równoczesną obserwację przez okulary mikroskopowe oraz połączenie z kamerą cyfrową KERN Optics ODC 824 o rozdzielczości 3,1 megapiksela. Dedykowane oprogramowanie *Microscope VIS*, umożliwiało zastosowanie kalibracji rozmiaru badanych obiektów oraz stosowanie mikroskopowej analizy planimetrycznej (do określania rodzaju degradacji w analizowanej powierzchni próbki). Przykład zastosowania tej metody przedstawiono na rys. 7.



Rys. 6 Zestaw mikroskopowy Nikon SMZ 745T razem z kamerą KERN Optics ODC 824. Laboratorium Mikroskopii Konfokalnej w Centrum Innowacji: Technologie dla Zdrowia Człowieka Parku Naukowo-Technologicznego Uniwersytetu Zielonogórskiego Sp z o. o.



Rys. 7 Próbka mikroplastiku składającego się z polistyrenu ataktycznego przed analizą planimetryczną (po lewej) oraz po wprowadzeniu danych planimetrycznych (po prawej) [opracowanie własne]

7.2. Spektroskopia FTIR

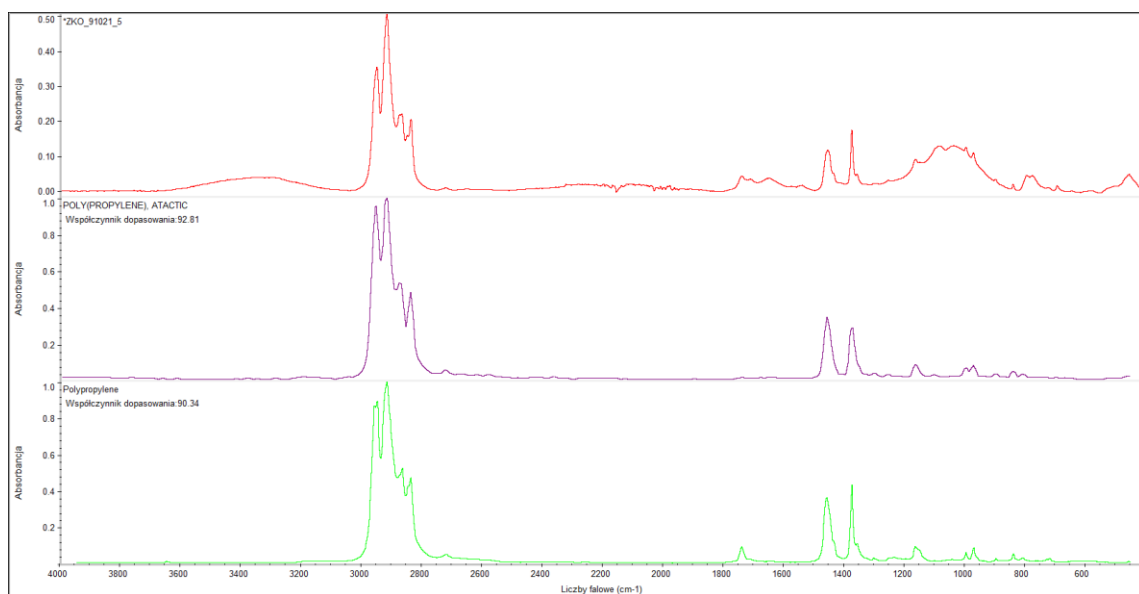
Spektroskopia FTIR, uznawana jest za technikę nieniszczącą (w przypadku badań prowadzonych z wykorzystaniem przystawki ATR z dociskiem, próbka może ulec odkształceniu), która odgrywa kluczową rolę w różnorodnych dziedzinach nauki i badaniach. Metoda ta jest wykorzystywana w analizowaniu odpadów, badaniu charakterystyk materiałów polimerowych i ich degradacji [178,179], w badaniach żywności, paliw kopalnych oraz środków ochrony roślin i nasion w rolnictwie [180], a także w przemyśle motoryzacyjnym do analizy olejów i smarów [181]. Ponadto, spektroskopia FTIR znajduje zastosowanie w inżynierii biomedycznej, w diagnostyce chorób [182,183].

Metoda spektroskopii absorpcyjnej w podczerwieni (FTIR) bazuje na absorpcji fotonów światła w zakresie podczerwieni (IR) przez substancje, co prowadzi do zmian energii między kwantowymi poziomami oscylacyjnymi. Dzięki interakcji materii z promieniowaniem elektromagnetycznym, możliwe jest rejestrowanie widm składających się z pasm o określonej częstotliwości, kształcie i intensywności, co umożliwia identyfikację i analizę ilościową związków chemicznych [184]. Technika ta umożliwia badanie substancji w różnych stanach skupienia: ciekłym, stałym i gazowym.

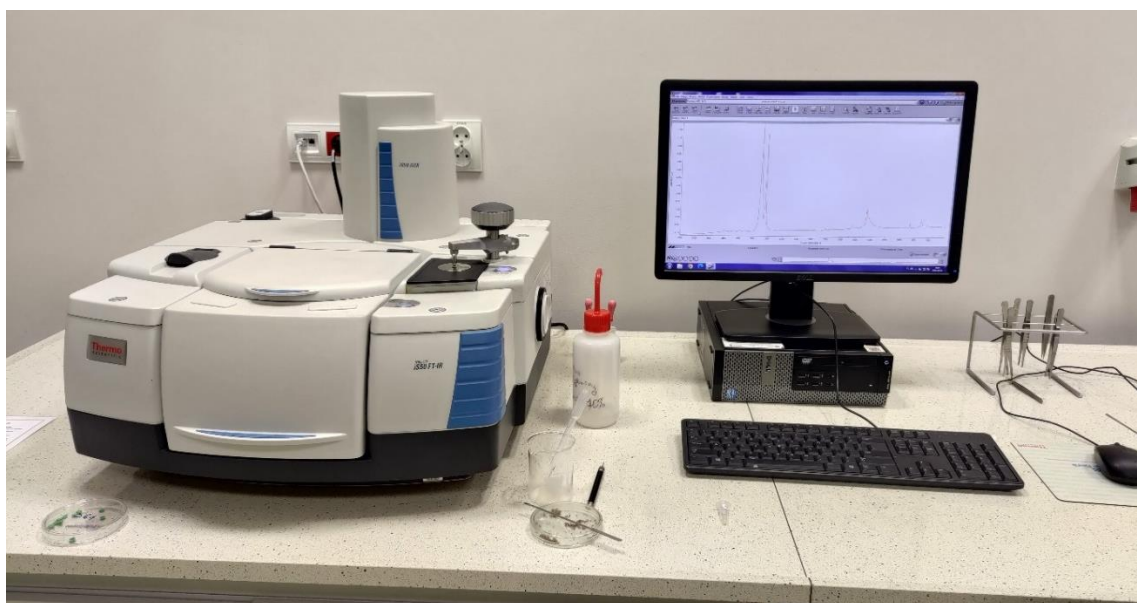
Spektrometry FTIR zazwyczaj składają się z elementów takich jak źródło światła, komora pomiarowa, interferometr i detektor. Źródło światła emituje wiązkę polichromatyczną, dopasowaną do przejść oscylacyjnych [184]. Taka wiązka jest kierowana do interferometru, a następnie przez serię luster na próbkę, która umieszczona jest w komorze pomiarowej.

W zakresie spektroskopii FTIR kluczowe są następujące parametry pomiarowe: zakres mierzonych długości fal (np. $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$), liczba wykonywanych skanów, rozdzielczość i format widm (absorbancja lub transmitancja), jak również automatyczna korekcja atmosferyczna. Wartości te są niezbędne do dokładnej analizy próbek i pozwalają na identyfikację charakterystycznych grup funkcyjnych w tworzywach sztucznych, co ma istotne znaczenie w badaniach nad mikroplastikiem [185–187].

W badaniach posłużono się spektrometrem wielozakresowym Thermo Scientific Nicolet iS50, pracującym w zakresach NIR-, MID- oraz FARIR. Przykład uzyskanego widma ze spektrometru FTIR przedstawiono na rys. 8, aparaturę badawczą na rys. 9.



Rys. 8 Widmo próbki uzyskane za pomocą spektrometru FTIR iS50 wraz z przykładami dopasowania do bazy danych oraz współczynnikiem dopasowania (polipropylen ataktyczny – współczynnik dopasowania 92,81%)



Rys. 9 Spektrometr FTIR THERMO SCIENTIFIC NICOLET iS50 Laboratorium Spektroskopii Molekularnej w Centrum Innowacji: Technologie dla Zdrowia Człowieka Parku Naukowo-Technologicznego Uniwersytetu Zielonogórskiego Sp z o. o.

7.3. Spektroskopia Ramana

Rozwój spektroskopii Ramana był możliwy dzięki obserwacji zjawiska rozpraszania światła nieelastycznego, znanego jako efekt Ramana. Efekt Ramana charakteryzuje się zmianą poziomów energetycznych oscylacyjnych lub rotacyjnych cząsteczek pod wpływem światła, co umożliwia szczegółową analizę struktury molekularnej badanych próbek. Wczesne eksperymenty z wykorzystaniem efektu Ramana opierały się na świetle słonecznym i specjalnych filtrach do obserwacji zmian barw w świetle rozproszonym [188]. Dalsze badania skupiły się na użyciu lampy rtęciowej jako źródle światła, co jednak początkowo ograniczało popularność tej techniki ze względu na wymagania dotyczące długiego czasu ekspozycji i czułości detekcji. Mimo tych wyzwań, wprowadzenie monochromatycznych źródeł światła, jakimi są lasery widzialne, umożliwiło znaczący postęp w spektroskopii Ramana. Nowoczesne techniki pozwoliły na badanie bardzo małych ilości substancji, a także próbek w różnych stanach skupienia i w niestandardowych warunkach, co zrewolucjonizowało tę metodę badawczą. Oprócz ulepszeń w źródłach światła, rozwój mikroelektroniki przyczynił się do zwiększenia możliwości spektroskopii Ramana, czyniąc ją narzędziem przydatnym w wielu dziedzinach nauki. Zjawisko rozpraszania światła, będące fundamentem działania spektroskopii Ramana, pozwala na szczegółową analizę molekularną próbek, co otwiera nowe możliwości w badaniach naukowych [184].

W ramach realizowanych badań zastosowano spektroskop ramanowski inVia firmy Renishaw rys. 10. Technika Ramana posłużyła jako uzupełnienie metod spektroskopii FTIR, wówczas, gdy uzyskane za pomocą spektroskopii FTIR wyniki były niejasne lub niewystarczające do jednoznacznej identyfikacji analizowanych próbek. Na przykład dla próbki przedstawionej na rys. 11 nie udało się uzyskać prawidłowego dopasowania widma FTIR, więc posłużono się analizą widma ramanowskiego, która zidentyfikowała próbkę jako: natrolit (dopasowanie 96%) materiał niesyntetyczny. Połączenie metody FTIR i spektroskopii Ramana pozwoliło dokonać analizy i identyfikacji próbek zapewniając komplementarne informacje niezbędne do ich pełnej charakterystyki.



Rys. 10 Spektroskop Ramanowski inVia Renishaw Laboratorium Skaningowej Mikroskopii Próbnikowej w Centrum Innowacji: Technologie dla Zdrowia Człowieka Parku Naukowo-Technologicznego Uniwersytetu Zielonogórskiego Sp z o. o.



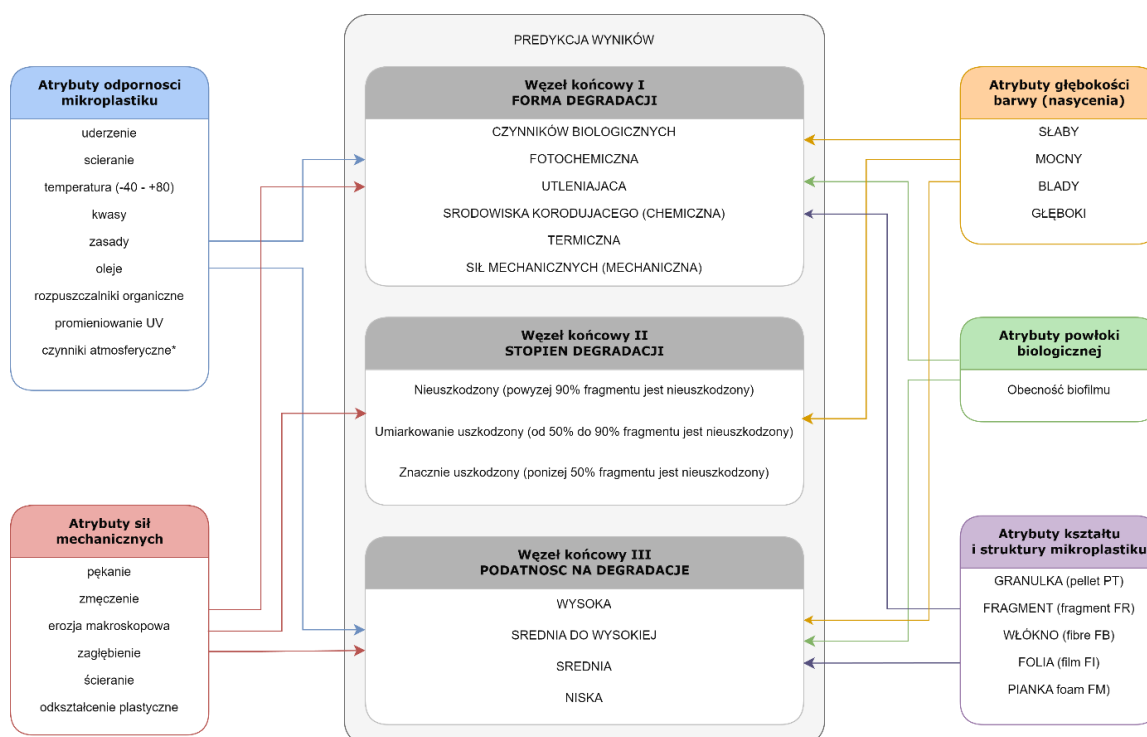
Rys. 11 Widmo Ramana próbki w analizie spektroskopu Raman (po lewej) oraz obraz analizowanej próbki (po prawej)

8. Wyniki badań i dyskusja

8.1. Algorytm drzew decyzyjnych w badaniu degradacji powierzchni mikroplastiku jako element metody badawczej

Algorytm drzewa decyzyjnego, został opracowany dla predykcji wyników różnych form degradacji mikroplastików (rys. 12) tj.

- biologicznej, fotochemicznej, utleniającej, środowiska korodującego (chemicznej), termicznej oraz sił mechanicznych;
- stopnia degradacji w trzech wariantach: próbka nieuszkodzona, w której powyżej 90% powierzchni pozostaje nieuszkodzona przez czynniki mechaniczne, próbka umiarkowanie uszkodzona – od 50% do 90% powierzchni jest nieuszkodzona oraz próbka znacznie uszkodzona w przypadku gdy poniżej 50% powierzchni jest nieuszkodzona,
- podatności na degradację z czterostopniową skalą wyników: wysoka, średnia do wysokiej, średnia, niska.



Rys. 12 Drzewo decyzyjne przedstawiające algorytm wpływu atrybutów danych na predykcję wyników

Celem utworzenia takiego algorytmu drzewa decyzyjnego jest uporządkowanie i analiza danych w sposób, który pozwala na automatyczną klasyfikację i predykcję wyników na

podstawie dostępnych danych wejściowych. Rodzaj atrybutów danych (czyli danych wejściowych) ma istotny wpływ na prognozę wyników generowanych przez algorytm drzewa decyzyjnego. W przypadku analizy mikroplastiku, atrybuty danych obejmują między innymi odporność mikroplastiku na różne czynniki środowiskowe, siły mechaniczne, nasycenie barwy, kształt mikroplastiku, a także obecność powłoki biologicznej.

Atrybuty odporności mikroplastiku są danymi pozyskanymi z literatury. Obejmują odporność mikroplastików na różne czynniki środowiskowe, takie jak: uderzenia, ścieranie, ekstremalne temperatury (w zakresie od -40 do +80°C), kwasy, zasady, rozpuszczalniki organiczne, promieniowanie UV oraz czynniki atmosferyczne, uwzględniając rodzaj tworzywa sztucznego.

Atrybuty sił mechanicznych to dane, zebrane podczas obserwacji próbki pod mikroskopem. Odnoszą się do cech charakterystycznych możliwych do zaobserwowania na powierzchni próbki i przypisanych do działania konkretnej siły mechanicznej. Siły mechaniczne, jakie uwzględniono, to m.in.: pękanie, zmęczenie, erozję makroskopową, zagłębienie, ścieranie i odkształcenie plastyczne.

Atrybuty głębokości nasycenia koloru są to obserwacyjne dane dotyczące intensywności koloru mikroplastików, w takich cechach jak: słaby, mocny, blady oraz głęboki odcień.

Atrybuty kształtu to dane obserwacyjne, w których uwzględniono powszechnie stosowany podział na granulki, fragmenty, włókna, folię, piankę i listki.

Atrybuty powłoki biologicznej są informacjami pochodzącymi z obserwacji próbki na temat obecności lub braku biofilmu na powierzchni mikroplastików.

Precyzyjne zdefiniowanie i klasyfikacja tych atrybutów umożliwia algorytmowi dokładniejsze przewidywanie form, stopnia oraz podatności na degradację. Utworzenie tego algorytmu stało się kluczowym elementem porządkującym prace nad metodą badawczą.

Zależności predykcji wyników od atrybutów danych przedstawiono na rys. 12 i wyglądają one następująco:

Forma degradacji: wynik uwzględnia wszystkie pięć kategorii atrybutów danych, co sugeruje, że proces degradacji jest złożony i zależy od wielu czynników, w tym od odporności mikroplastiku, sił mechanicznych, nasycenia koloru, kształtu i struktury oraz obecności biofilmu.

Stopień degradacji: założono, że za wynik predykcji odpowiadają jedynie siły mechaniczne i nasycenie koloru, co oznacza, że właśnie te dwa aspekty mają kluczowe znaczenie dla określenia stopnia, w jakim mikroplastik uległ degradacji. Pozostałe atrybuty łączą się w narzędziu pośrednio, mając wpływ na wynik.

Podatność na degradację: podobnie jak w przypadku formy degradacji, predykcja podatności na degradację uwzględnia analizę wszystkich pięciu kategorii atrybutów. Oznacza to, że zarówno właściwości fizyczno-chemiczne mikroplastików, jak i ich interakcje z otoczeniem mają istotny wpływ na ich podatność na degradację.

8.2. Opis narzędzia badawczego

Narzędzie badawcze przeznaczone do szczegółowej charakterystyki próbek skonstruowane jest jako zestaw dziewięciu arkuszy kalkulacyjnych w programie Microsoft Excel (modułów), które są ze sobą ściśle powiązane, opisanych w punktach od 8.2.1 do 8.2.8. Każdy arkusz ma wyznaczoną specyficzną funkcję, co pozwala na kompleksową analizę i interpretację danych:

ARKUSZ DANYCH OCENY WIZUALNEJ: Arkusz przeznaczony jest do zbierania danych z obserwacji wizualnych próbek. Umożliwia zapisywanie informacji o wyglądzie zewnętrznym, strukturze powierzchni oraz wszelkich zauważalnych cechach próbek wraz z pomiarami.

BIOFILM: Arkusz służy do opisu obecności i charakterystyki biofilmu na próbkach. Ma kluczowe znaczenie dla zrozumienia interakcji biologicznych zachodzących na powierzchni materiału.

DATA_attributes_1: Arkusz przeznaczony jest do szczegółowego opisu atrybutów próbek w kategoriach odporności na: uderzenie, ścieranie, temperaturę (od -40 do +80°C), działanie kwasów, zasad, olejów, rozpuszczalników organicznych, promieniowania UV oraz szeroko rozumianych czynników atmosferycznych, na które składają się temperatura powietrza, wilgotność, ruch powietrza i ciśnienie atmosferyczne. Dane uzyskane do utworzenia bazy informacji pozyskane są z literatury oraz informacji udostępnionych przez producentów danego tworzywa sztucznego.

KSZTAŁT: Arkusz przeznaczony jest do analizy kształtu próbek. Moduł ten pozwala na zrozumienie wpływu geometrii próbek na ich właściwości i interakcje z otoczeniem.

NASYCENIE_KOLORU: Arkusz służy do analizy nasycenia koloru, od której może zależeć wynik analizy w zakresie oceny możliwej formy degradacji, a także stopnia degradacji badanej próbki.

ODPORNOŚĆ: w arkuszu ocenia się odporność próbek na różne czynniki zewnętrzne określone w atrybutach odporności („DATA_attributes_1”) i analizuje ich podatność na degradację oraz formę degradacji.

SILY_MECHANICZNE: Arkusz koncentruje się na badaniu wpływu zmierzonych poszczególnych sił mechanicznych na próbki w korelacji do ich powierzchni całkowitej.

SUMY_CZĘŚCIOWE: Arkusz służy do zbierania i podsumowywania częściowych wyników z pozostałych arkuszy, co ułatwia ostateczną analizę danych.

ARKUSZ WYNIKÓW: Arkusz jest przeznaczony do agregacji i prezentacji wyników badań. Dane z innych arkuszy są przetwarzane i prezentowane w sposób uporządkowany, co ułatwia analizę i wyciąganie wniosków.

Na rys. 13 przedstawiono diagram (mapę) zależności pomiędzy arkuszami, która służy wyjaśnieniu, jak dane i informacje są przesyłane i połączone pomiędzy poszczególnymi arkuszami. Taki system linkowania zapewnia, że analiza jest spójna i kompleksowa, umożliwiając efektywną i dokładną interpretację wyników badań.



Rys. 13 Diagram zależności pomiędzy poszczególnymi plikami arkuszy kalkulacyjnych zastosowanych w narzędziu badawczym

8.2.1. Plik: 1. Arkusz danych oceny wizualnej.xlsx – opis zawartości arkusza

Plik programu Microsoft Excel zatytułowany: *1. Arkusz danych oceny wizualnej* jest przeznaczony do zbierania danych z obserwacji wizualnych próbek. Umożliwia zapisywanie informacji o wyglądzie zewnętrznym, rozmiarze, powierzchni oraz wszelkich zauważalnych cechach próbek.

PARAMETRY WEJŚCIOWE DANYCH PRÓBEK MIKROPLASTIKU						
PODSTAWOWE INFORMACJE						
RODZAJ POLIMERU						
KSZTAŁT I STRUKTURA						
NASYCENIE KOLORU						
OBECNOŚĆ BIOFILMU [%]						
PARAMETRY ROZMIARU PŁASZCZYZNY RZUTOWEJ [mm ²]						
POLE POWIERZCHNI 1						
POLE POWIERZCHNI 2						
PARAMETRY DEGRADACJI MECHANICZNEJ						
		ILOŚĆ	PRZEKSZTAŁCENIE	ILOŚĆ	PRZEKSZTAŁCENIE	SUMA POWIERZCHNI
SIŁY MECHANICZNE		P1	POWIERZCHNIA 1	P2	POWIERZCHNIA 2	PŁASZCZYZNY RZUTOWEJ
PĘKANIE			≈		≈	
ZMĘCZENIE			≈		≈	
EROZJA MAKROSKOPOWA			≈		≈	
ZAGŁĘBIENIE			≈		≈	
ŚCIERANIE			≈		≈	
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE		≈		≈		

Rys. 14 Widok zawartości arkusza kalkulacyjnego: 1. Arkusz danych oceny wizualnej

Sekcja PODSTAWOWE INFORMACJE podzielona jest na cztery podpunkty:

RODZAJ POLIMERU – w tej pozycji należy wybrać z listy rozwijanej połączonej z bazą danych zawartą w pliku: DATA_attributes_1, rodzaj tworzywa sztucznego, z którego składa się próbka mikroplastiku.

KSZTAŁT – w tej pozycji należy wybrać z listy rozwijanej jaki kształt ma badana próbka z następujących możliwości: GRANULKA (pellet PT), FRAGMENT (fragment FR), WŁÓKNO (fibre FB), FOLIA (film FI), PIANKA (foam FM), LISTEK (leaf LF).

NASYCENIE KOLORU – w tej pozycji należy wybrać z listy rozwijanej informacje o nasyceniu koloru danej próbki z następujących możliwości: słaby, mocny, błady, głęboki.

OBECNOŚĆ BIOFILMU – w tej pozycji należy wybrać z listy rozwijanej informacje o obecności biofilmu na powierzchni danej próbki oraz o stopniu pokrycia próbki tym biofilmem. Parametry do wyboru w pięciostopniowej skali to odpowiednio: NIE, 1-25, 25-50, 50-75, 75-100. Dane liczbowe wyrażone zostały procentowym [%] stopniem pokrycia próbki określanym metodą obserwacyjną.

Sekcja **PARAMETRY ROZMIARU PŁASZCZYZNY RZUTOWEJ [mm²]** skonstruowana jest z dwóch kluczowych komponentów: Pole Powierzchni 1 (P1) oraz Pole Powierzchni 2 (P2). W odpowiadających im komórkach arkusza kalkulacyjnego notowane są wartości powierzchni próbki wyznaczone z wykorzystaniem obrazowania mikroskopowego. Założono, że analizowane próbki charakteryzują się wyłącznie dwiema płaszczyznami rzutowymi. Uzasadnienie tego założenia wynika z faktu, iż obszary zlokalizowane na krawędziach badanych próbek, dzięki ich nieregularności, są również widoczne w procesie analizy. Natomiast obszary, które pozostają poza zakresem obserwacji mikroskopowych, są uznawane za błąd pomiarowy. Taka skala błędu jest akceptowalna.

Sekcja PARAMETRY DEGRADACJI MECHANICZNEJ stanowi szczegółową charakterystykę uszkodzeń materiału, wynikających z procesów mechanicznych, które można zaobserwować na powierzchni badanej próbki.

Sekcja zawiera następujące elementy:

- Erozja mechaniczna mająca wpływ na fragmentację:

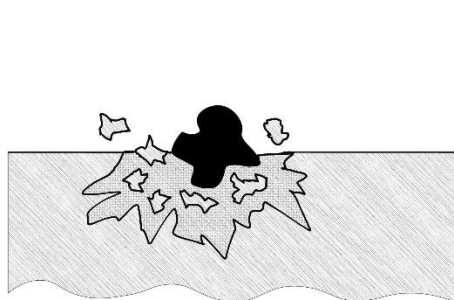
PĘKANIE, czyli proces w wyniku którego dochodzi do powstawania pęknięć lub rozłamów w materiale może prowadzić do jego uszkodzenia lub nawet całkowitego zniszczenia. W przypadku tworzyw sztucznych, pękanie może przyjąć różne formy, z których najbardziej charakterystyczną do zaobserwowania na powierzchni materiału wydaje się być pękanie kruche z wytworzeniem tzw. łuski [189]. Sam proces pękania można podzielić na kilka etapów:

- Początkowe całkowite odkształcenie: etap charakteryzujący się znacznym odkształceniem materiału, wskazującym na istotną zmianę jego struktury, odzwierciedla początkowe uszkodzenie i inicjację pęknięć w materiałach zwłaszcza kruchych. Jest to faza krytyczna, w której materiał przechodzi poważną zmianę w swojej strukturze z powodu rozwoju pęknięć i złamań [189–192].
- Odkształcenie resztkowe: może wynikać z częściowej redukcji naprężeń lub ruchów w mikroskali w materiale; ma kluczowe znaczenie, ponieważ może wpływać na właściwości mechaniczne materiału, w tym na jego wytrzymałość i trwałość [189,191–193].
- Ewolucja modułu Younga: etap charakteryzujący się zmianami w sztywności i elastyczności materiału, zazwyczaj związanymi z uszkodzeniami i degradacją jego struktury. Zmiany w module Younga wskazują na zmieniające się właściwości mechaniczne materiału, odzwierciedlając skumulowane skutki trwających procesów uszkodzeń i degradacji [189,191,192,194]. Schemat obrazujący pękanie przedstawiono na rys. 15.

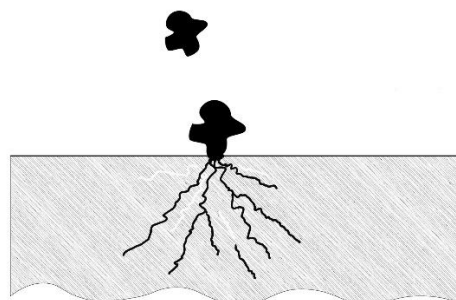
ZMĘCZENIE, które występuje szczególnie przy wysokich kątach uderzenia i niskich prędkościach materiału erozyjnego, jest procesem zachodzącym pod wpływem powtarzających się, cyklicznych obciążeń działających na materiał (rys. 16). Proces ten może prowadzić do powstawania mikrouszkodzeń, które z czasem mogą skutkować pęknięciami makroskopowymi. Zazwyczaj wyróżnia się trzy fazy w procesie zmęczenia materiału:

- Inicjacja mikrouszkodzeń: materiały syntetyczne poddawane cyklicznym obciążeniom doświadczają koncentracji naprężeń, często na poziomie mikroskopijnym. W tym etapie procesu zmęczenia dochodzi do występowania lokalnych odkształceń plastycznych, które powodują lokalne wzmocnienie i osłabianie struktury materiału [189,195,196].

- Rozwój i rozprzestrzenianie się mikrouszkodzeń w materiałach: w miarę trwania cyklicznego obciążenia, mikrouszkodzenia, takie jak mikropęknięcia, gromadzą się i rozszerzają w strukturze materiału. Jest to szczególnie widoczne w przypadku twardych materiałów poddawanych cyklicznym obciążeniom o wysokiej częstotliwości i niskiej amplitudzie. W tej fazie procesu zmęczenia materiału dochodzi do formowania się mikropęknięć, których ilość zwiększa się w miarę narastania liczby cykli obciążeniowych [189,196–198].
- Przejście do pęknięć makroskopowych: ostatecznie nagromadzone mikrouszkodzenia mogą przekształcić się w pęknięcia makroskopowe. W tym etapie następuje rozwój i łączenie się mikropęknięć, na skutek czego powstają makropęknięcia, które mogą prowadzić do całkowitego zniszczenia elementu. To przejście jest krytyczne dla uszkodzenia materiału i ma na nie wpływ kilka czynników, w tym charakter materiału, wielkość obciążeń i środowisko, w którym materiał jest używany [196–198].



Rys. 15 Pęknięcie. Źródło: opracowanie własne na podstawie [189]



Rys. 16 Zmęczenie. Źródło: opracowanie własne na podstawie [189]

- Erozja mechaniczna mająca wpływ na zmianę kształtu:

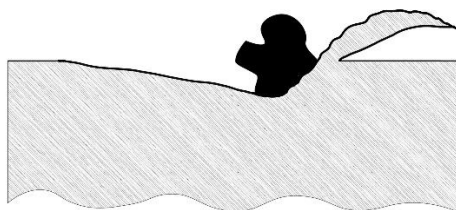
ŚCIERANIE, jest jednym z kluczowych procesów fizycznego zużywania się materiałów, w tym tworzyw sztucznych, które są narażone na działanie różnych czynników (rys. 17). Główną przyczyną ścierania jest tarcie, które powoduje uszkodzenia powierzchniowe materiału. Ścieranie może być obserwowane jako zmiany na powierzchni materiału, takie jak:

- Ubytek masy, objętości lub grubości materiału.
- Mikroskrawanie: charakteryzuje się usunięciem nierówności powierzchniowych materiału. Może to być widoczne jako drobne ubytki lub zarysowania na powierzchni materiału.
- Rysowanie (pęknięcie wgłębne): powstawanie nieciągłości, czyli pęknięć na powierzchni materiału, widoczne jako drobne linie na powierzchni.
- Bruzdowanie: jest to proces, w którym dochodzi do przemieszczenia materiału, co może być obserwowane jako większe zmiany struktury powierzchni, np. widoczne rowki lub bruzdy.

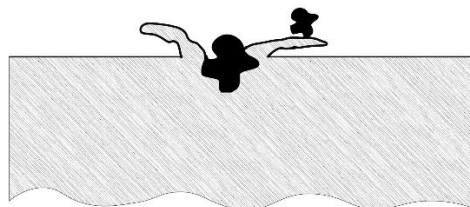
- Zmiany powierzchni pod wpływem czynników zewnętrznych: na skutek tarcia o powierzchnie gładkie czy nierówności twardszego materiału, który działa jak mikroostrze, może dojść do zmian w strukturze i wyglądzie powierzchni.
- Ścieranie przy niskim kącie uderzenia: w tym przypadku, cząsteczki abrazyjne przesuwają się równoległe do powierzchni, co prowadzi do mikroskopijnych ubytków.

Obserwując zmiany na powierzchni tworzyw sztucznych, takie jak ubytki, pęknięcia, rowki, czy zmiany w strukturze i wyglądzie, można zidentyfikować działanie ścierania jako czynnik wpływający na zużycie materiału [189,199–202].

ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE: to trwała zmiana kształtu lub objętości obiektu, spowodowana działaniem sił zewnętrznych, która nie ustępuje nawet po ich usunięciu (rys. 18). W przypadku uderzenia, odkształcenie to jest efektem wysokiej energii zderzenia, szczególnie, gdy uderzenie następuje pod wysokim kątem i przy umiarkowanej prędkości. Taki rodzaj oddziaływania powoduje nieodwracalne zmiany w geometrii materiału, ponieważ jego cząstki ulegają stałemu przemieszczeniu względem siebie, co prowadzi do trwałej deformacji struktury materiału [189,203–205].



Rys. 17 Ścieranie. Źródło: opracowanie własne na podstawie [189]

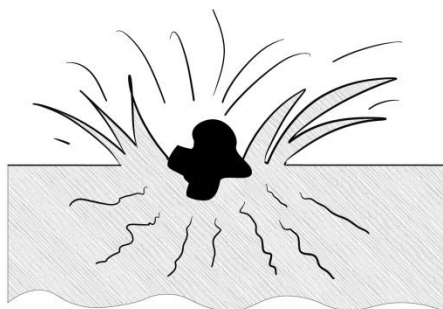


Rys. 18 Odkształcenie plastyczne. Źródło: opracowanie własne na podstawie [189]

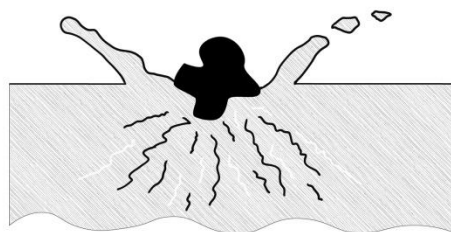
- Erozja mechaniczna mająca wpływ na fragmentację i zmianę kształtu:

EROZJA MAKROSKOPOWA: odnosi się do zauważalnych fizycznych zmian na powierzchni materiału, które wynikają z różnych procesów środowiskowych i mechanicznych (rys. 19). Erozję makroskopową można scharakteryzować jako proces, w którym dochodzi do różnych zjawisk uszkadzających materiał. Wśród nich znajduje się topnienie warstwy powierzchniowej materiału, które jest wynikiem intensywnego tarcia i ciśnienia wywieranego przez uderzające w powierzchnię cząstki. Innym zjawiskiem jest nadplastyczność materiału, co w efekcie oznacza jego nieodwracalną deformację pod wpływem działających sił. Ponadto, w wyniku tej erozji tworzą się liczne resztki zużycia tzw. „chmury”, które są bezpośrednim efektem odrywania się fragmentów materiału. Mechanizm ten zachodzi na skutek uderzenia dużych cząstek erodujących w powierzchnię materiału, co prowadzi do jego stopniowego niszczenia [189,206].

ZAGŁĘBIENIE: to lokalna deformacja powierzchni materiału, charakteryzującą się wklęsłością oraz spękaniem wewnątrz materiału (rys. 20). Może być określana jako skutek zużycia zmęczeniowego. Jest wynikiem działania sił mechanicznych, takich jak uderzenia, obciążenia punktowe lub naciski, których amplituda nie przekracza wytrzymałości granicznej tworzywa sztucznego. Zjawisko to może występować w różnych materiałach, od metali, przez materiały niemetaliczne, po substancje mineralne i może prowadzić do zwiększenia lokalnej koncentracji naprężeń wewnątrz materiału, co z kolei może przyczynić się do inicjacji procesów korozyjnych, uszkodzeń mechanicznych lub zmian strukturalnych materiału. Powodowane jest zazwyczaj przez uderzenia cząstek abrazyjnych przy wysokim kącie natarcia i dużej prędkości uderzenia w materiał [189,207].



Rys. 19 Erozja makroskopowa. Źródło: opracowanie własne na podstawie [189]



Rys. 20 Zagłębienie. Źródło: opracowanie własne na podstawie [189]

Komórki odpowiadające: ILOŚĆ P1 oraz ILOŚĆ P2 są uzupełniane przez użytkownika o rzeczywiste wymiary powierzchni, które zostały wyznaczone metodą planimetryczną powierzchni rzutowej polegającą na wyznaczeniu obszaru (poligonu).

Komórki odpowiadające: PRZEKSZTAŁCENIE POWIERZCHNIA 1 (P1) oraz PRZEKSZTAŁCENIE POWIERZCHNIA 2 (P2) są komórkami wynikowymi arkusza kalkulacyjnego, w których zastosowano skalowanie do określonego wzorca. Wzorcem tym jest powierzchnia o wielkości 25 mm². Przyjęcie tej powierzchni jako wzorca wynika z założenia dotyczącego górnej granicy rozmiaru cząstek, uznawanych w literaturze za mikroplastik, czyli 5 mm.

Skalowanie liniowe polega na zmianie wymiarów próbki proporcjonalnie do wymiarów wzorcowych. Zależność w tym przypadku można wyrazić wzorem:

$$\text{PRZEKSZTAŁCENIE POWIERZCHNIA 1} = \frac{\text{ILOŚĆ P1} \times 25}{\text{POLE POWIERZCHNI 1}} \quad (1)$$

$$\text{PRZEKSZTAŁCENIE POWIERZCHNIA 2} = \frac{\text{ILOŚĆ P2} \times 25}{\text{POLE POWIERZCHNI 2}} \quad (2)$$

Komórki: SUMA POWIERZCHNI PŁASZCZYZNY RZUTOWEJ to suma powierzchni P1 oraz P2 po przekształceniu metodą skalowania liniowego.

8.2.2. Plik BIOFILM – opis zawartości arkusza

Arkusz zawarty w pliku BIOFILM.xlsx (rys. 21) zawiera trzy kolumny. W kolumnie ATRYBUTY POWŁOKI BIOLOGICZNEJ wartość odpowiadająca wynikowi to łącze do pliku: „1. Arkusz danych oceny wizualnej.xlsx”, z którego wartość została przeniesiona z pozycji OBECNOŚĆ BIOFILMU [%] do dalszych obliczeń logicznych w pliku BIOFILM. W kolumnie: „Wynik logiczny” umieszczona została formuła logiczna wyrażona odpowiedziami: „PRAWDA” i „FAŁSZ” wskazująca na odpowiednią wartość w kolumnie PREDYKCJA WYNIKÓW.

	ATRYBUTY POWŁOKI BIOLOGICZNEJ	Wynik logiczny	PREDYKCJA WYNIKÓW
ŁĄCZE:	25-50		W1. FORMA DEGRADACJI
		PRAWDA	CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH
			W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ
		FAŁSZ	WYSOKA (75-100)
		FAŁSZ	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ (50-75)
		PRAWDA	ŚREDNIA (25-50)
		FAŁSZ	NISKA (1-25)

Rys. 21 Widok zawartości arkusza kalkulacyjnego: BIOFILM

Dla predykcji wyników w węźle W1. FORMA DEGRADACJI, zgodnym z opracowanym dla badania algorytmem drzew decyzyjnych, wynik logiczny opisany został następującą formułą:

=JEŻELI (ATRYBUTY POWŁOKI BIOLOGICZNEJ="NIE"; "FAŁSZ"; "PRAWDA")

Opis: „FAŁSZ” jest zwracane, gdy wartość dla ATRYBUTY POWŁOKI BIOLOGICZNEJ jest równa „NIE”.

„PRAWDA” jest zwracane, gdy wartość dla ATRYBUTY POWŁOKI BIOLOGICZNEJ należy do któregoś z przedziałów: 1-25, 26-50, 51-75, 76-100.

Dla predykcji wyników w węźle W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ, zgodnym z opracowanym dla badania algorytmem drzew decyzyjnych, wynik logiczny opisany został następującymi formułami:

=JEŻELI (ATRYBUTY POWŁOKI BIOLOGICZNEJ ="75-100"; "PRAWDA"; "FAŁSZ")

Wartość „PRAWDA” odpowiada dla W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ:
WYSOKA (75-100)

Opis: Wartość „PRAWDA” jest zwracana, gdy atrybuty powłoki biologicznej mieszczą się w przedziale 75-100, co wskazuje na wysoką podatność na degradację.

=JEŻELI (ATRYBUTY POWŁOKI BIOLOGICZNEJ ="50-75"; "PRAWDA"; "FAŁSZ")

Wartość „PRAWDA” odpowiada dla W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ:
ŚREDNIA DO WYSOKIEJ (50-75)

Opis: Wartość „PRAWDA” jest zwracana, gdy atrybuty powłoki biologicznej mieszczą się w przedziale 50-75, co wskazuje na średnią do wysokiej podatność na degradację.

=JEŻELI (ATRYBUTY POWŁOKI BIOLOGICZNEJ ="25-50"; "PRAWDA"; "FAŁSZ")

Wartość „PRAWDA” odpowiada dla W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ:
ŚREDNIA (25-50)

Opis: Wartość „PRAWDA” jest zwracana, gdy atrybuty powłoki biologicznej mieszczą się w przedziale 25-50, co wskazuje na średnią podatność na degradację.

=JEŻELI (ATRYBUTY POWŁOKI BIOLOGICZNEJ ="1-50"; "PRAWDA"; "FAŁSZ")

Wartość „PRAWDA” odpowiada dla W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ:
NISKA (1-25)

Opis: Wartość „PRAWDA” jest zwracana, gdy atrybuty powłoki biologicznej mieszczą się w przedziale 1-25, co wskazuje na niską podatność na degradację.

8.2.3. Plik DATA_attributes_1 – opis zawartości arkusza

Plik: DATA_attributes_1, zawiera bazę danych o odporności danego tworzywa sztucznego na czynniki określone zgodnie z algorytmem drzew decyzyjnych w: „Atrybutach danych właściwości mikroplastiku – Atrybuty odporności mikroplastiku”. Dane zostały zebrane i zorganizowane tak, aby szczegółowo określić reakcje poszczególnych typów tworzyw sztucznych na wybrane warunki. Wśród badanych atrybutów odporności mikroplastiku znalazły się: odporność na uderzenie, odporność na ścieranie, wytrzymałość w zakresie temperatur od -40°C do +80°C, reakcja na kwasy, zasady, oleje, rozpuszczalniki organiczne, promieniowanie UV oraz ogólnie na czynniki atmosferyczne, takie jak temperatura powietrza, wilgotność, ruch powietrza czy ciśnienie atmosferyczne.

Baza danych została opracowana na podstawie informacji pochodzących z literatury naukowej oraz danych udostępnionych przez producentów tworzyw sztucznych.

Odporność dla każdego z dziewięciu czynników, została określona w dwóch zakresach: 1 - duża odporność, 0 - niska odporność.

W oparciu o założenia, które czynniki mogą być przynależne do danej formy degradacji (rys. 22), określono też w bazie danych zestawienie podsumowujące brak odporności na każdy czynnik zgodnie z zależnościami: im większa liczba będąca sumą wystąpień niskiej odporności tym mniejsza odporność na dany czynnik.

uderzenie	M					
ścieranie	M					
temperatura (-40 - +80)		T		U		
kwasy			K	U		
zasady			K	U		
oleje			K	U		
ropuszczalniki organiczne			K	U		
UV				U	F	
czynniki atmosferyczne*		T		U		B
Czynników biologicznych B						
Fotochemiczna F						
Utleniająca U						
Środowiska korodującego (chemiczna) K						
Termiczna T						
Sił mechanicznych (mechaniczna) M						

Rys. 22 Zależność formy degradacji od braku odporności na poszczególne czynniki zgodnie z algorytmem drzew decyzyjnych

8.2.4. Plik KSZTAŁT – opis zawartości arkusza

Arkusz zawarty w pliku KSZTAŁT.xlsx (rys. 23), zawiera trzy kolumny. W kolumnie ATRYBUTY KSZTAŁTU wartość odpowiadająca wynikowi to łączy do pliku: „1. Arkusz danych oceny wizualnej.xlsx”, z którego wartość została przeniesiona z pozycji KSZTAŁT do dalszych obliczeń logicznych w pliku KSZTAŁT. W kolumnie: „Wynik logiczny” umieszczona została formuła logiczna wyrażona odpowiedziami: „PRAWDA” i „FAŁSZ” wskazująca na odpowiednią wartość w kolumnie PREDYKCJA WYNIKÓW.

	ATRYBUTY KSZTAŁTU I STRUKTURY	Wynik logiczny	PREDYKCJA WYNIKÓW
ŁĄCZE:	FRAGMENT (fragment FR)		W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ
		FAŁSZ	WYSOKA (75-100)
		FAŁSZ	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ (50-75)
		PRAWDA	ŚREDNIA (25-50)
		FAŁSZ	NISKA (1-25)

Rys. 23 Widok zawartości arkusza kalkulacyjnego: KSZTAŁT

Charakterystyka kształtu fragmentów mikroplastiku ma znaczący wpływ na ich interakcje ze środowiskiem, stabilność strukturalną oraz zdolność do interakcji z innymi składnikami ekosystemu, w tym mikroorganizmami.

Założenia, które zostały przyjęte do ustalenia predykcji wyników dla atrybutów kształtu w węźle W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ, są zgodne z opracowanym dla badania algorytmem drzew decyzyjnych.

Granulka (pellet PT) – podatność na degradację NISKA (1-25)

Granulki mikroplastiku wykazują niską podatność na degradację, głównie ze względu na ich twardą strukturę i stabilność materiału. Kształt sferyczny granulek mikroplastiku ma zdecydowany wpływ na ich wytrzymałość ze względu na kilka czynników:

- Równomierny rozkład naprężeń. W cząstkach o kształcie sferycznym, naprężenia są rozłożone równomiernie na całej powierzchni. To oznacza, że nie ma słabych punktów, w których mogłoby dojść do pęknięć pod wpływem zewnętrznych sił.
- Brak ostrych krawędzi. Sferyczne granulki nie posiadają ostrych krawędzi (lub posiadają niewiele), które są bardziej podatne na uszkodzenia mechaniczne. Ostre krawędzie w innych kształtach mogą łatwiej ulegać erozji lub pęknięciom.
- Lepsza odporność na ściskanie. Kształt sferyczny zapewnia lepszą odporność na siły ścisające, ponieważ rozkładają się one równomiernie po całej powierzchni granulki, zamiast skupiać się w pojedynczych punktach.

Dzięki kulistemu kształtowi cząsteczki mikroplastiku mogą być bardziej odporne na działanie czynników zewnętrznych i biodegradację, niż inne kształty [208].

Fragment (fragment FR) – podatność na degradację ŚREDNIA (25-50)

Mikroplastik w formie fragmentów wykazuje średnią podatność na degradację. Założenie takie zostało oparte na kilku właściwościach:

- Nieregularny kształt. Fragmenty mikroplastiku często mają nieregularne kształty, co wpływa na ich interakcje ze środowiskiem. Nieregularność powoduje różnorodne naprężenia wewnątrz materiału, co może zwiększać jego podatność na dalsze uszkodzenia fizyczne.
- Mało niewypełnionych przestrzeni wewnątrz fragmentów.
- Powierzchnia fragmentów mikroplastiku może stanowić miejsce zaczepienia dla różnych mikroorganizmów, w tym patogenów. Nieregularne kształty i tekstury

tych fragmentów tworzą idealne warunki dla kolonizacji przez mikroorganizmy, co może prowadzić do bioakumulacji i degradacji biologicznej.

- Różnorodne naprężenia wynikające z nieregularnego kształtu mogą sprawić, że fragmenty mikroplastiku są bardziej podatne na dalszą fragmentację, co prowadzi do powstawania jeszcze mniejszych cząstek mikroplastiku, w tym nanoplastiku.

Włókno (fibre FB) – podatność na degradację ŚREDNIA DO WYSOKIEJ (50-75)

Włókna mikroplastiku są podatne na degradację ze względu na swoją specyficzną formę, co przyczynia się do ich większej interakcji ze środowiskiem i organizmami żywymi, a także zwiększonej ekspozycji na procesy mechaniczne i chemiczne prowadzące do ich rozkładu. Włókna charakteryzują się większą powierzchnią w stosunku do objętości, co ułatwia ich przemieszczanie się w środowisku i sprawia, że mogą docierać nawet do stratosfery [209]. Właściwość ta zwiększa także ich ekspozycję na czynniki degradujące, takie jak promieniowanie UV, tlen, i mikroorganizmy. Mikroplastik w formie włókien jest z natury cieńszy i dłuższy, co może powodować jego łatwiejsze uszkodzenie mechaniczne i ścinanie pod wpływem sił zewnętrznych.

Folia (film FI) – podatność na degradację ŚREDNIA DO WYSOKIEJ (50-75)

Mikroplastik w formie folii ma dużą powierzchnię ekspozycji na czynniki zewnętrzne w porównaniu do swojej objętości, co zwiększa potencjał do absorpcji szkodliwych substancji i reakcji z czynnikami degradującymi [210,211]. Dodatkowo będąc cienką warstwą materiału, jest mniej odporny na uszkodzenia mechaniczne i łatwiej ulega rozkładowi fizycznemu niż inne formy mikroplastiku. Duża powierzchnia folii może sprzyjać intensywniejszej degradacji pod wpływem promieniowania UV, co prowadzi do jej szybszego rozpadu na mniejsze cząstki. Nieregularne powierzchnie folii mogą służyć jako doskonałe siedlisko dla rozwoju mikroorganizmów, które mogą przyspieszać biodegradację materiału.

Pianka (foam FM) – podatność na degradację ŚREDNIA DO WYSOKIEJ (50-75)

Mikroplastik w formie pianki ma wysoką podatność na degradację z kilku przyczyn:

- Słaba odporność na promieniowanie UV: większość pianek polietylenowych, które są formą mikroplastiku, szybko degraduje się pod wpływem promieniowania UV, co prowadzi do zmian ich parametrów, a w konsekwencji do rozpadu [212].

- Delikatna struktura: pianki mikroplastikowe są z delikatne, co sprawia, że są bardziej podatne na mechaniczne uszkodzenia i procesy środowiskowe prowadzące do ich rozpadu.
- Ułatwiony dostęp do wewnętrznych części: porowata struktura sprawia, że czynniki degradujące, takie jak woda, mikroorganizmy, związki chemiczne, mogą łatwiej przenikać do wewnętrznych części pianki.

8.2.5. Plik NASYCENIE_KOLORU – opis zawartości arkusza

Arkusz zawarty w pliku NASYCENIE_KOLORU.xlsx (rys. 24), zawiera trzy zatytułowane kolumny. W kolumnie ATRYBUTY NASYCENIA KOLORU wartość odpowiadająca wynikowi to łączy do pliku: 1. Arkusz danych oceny wizualnej.xlsx, z którego wartość została przeniesiona z pozycji NASYCENIE KOLORU do dalszych obliczeń logicznych w pliku NASYCENIE_KOLORU.xlsx. W kolumnie: Wynik logiczny umieszczona została formuła logiczna wyrażona odpowiedziami: „PRAWDA” i „FAŁSZ” wskazująca na odpowiednią wartość w kolumnie PREDYKCJA WYNIKÓW.

	ATRYBUTY NASYCENIA KOLORU	Wynik logiczny	PREDYKCJA WYNIKÓW
ŁĄCZE:	Błady		W1. FORMA DEGRADACJI
		PRAWDA	CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH
		PRAWDA	FOTOCHEMICZNA
		PRAWDA	UTLENIAJĄCA
		PRAWDA	ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO
		PRAWDA	TERMICZNA
		PRAWDA	SIŁ MECHANICZNYCH
			W2. STOPIEŃ DEGRADACJI
		FAŁSZ	Nieuszkodzony (powyżej 90% fragmentu jest nieuszkodzony)
		-	Umiarkowanie uszkodzony (od 50% do 90% fragmentu jest nieuszkodzony)
		PRAWDA	Znacznie uszkodzony (poniżej 50% fragmentu jest nieuszkodzony)

Rys. 24 Widok zawartości arkusza kalkulacyjnego: NASYCENIE_KOLORU

Moduł posiada cztery atrybuty danych, jednakże grupy predykcji wyników są dwie: jedna dla określenia: mocny i głęboki, druga dla określenia: słaby, błady.

Takie działanie wynika z potrzeby ograniczenia błędów obserwacyjnych poprzez zwiększenie rozdzielczości klasyfikacji. Ta standaryzacja, czyli ujednolicenie metod oceny, może przyczynić się do zmniejszenia błędów wynikających z subiektywnego odczytu czy interpretacji próbek. Poprzez zdefiniowanie i stosowanie większej liczby kategorii (w tym przypadku czterech stopni nasycenia koloru) można próbować ograniczyć błędy, które mogłyby wynikać z jedynie dwóch kategorii, które są mniej wyraźnie zdefiniowane.

Założenia, które zostały przyjęte do ustalenia predykcji wyników dla atrybutów nasycenia koloru w węźle W1. FORMA DEGRADACJI, zgodnym z opracowanym dla badania algorytmem drzew decyzyjnych.

Czynniki biologiczne. Degradacja mikroplastiku pod wpływem czynników biologicznych obejmuje procesy chemiczne i mechaniczne powodowane przez mikroorganizmy. Mikroorganizmy, takie jak bakterie, mogą przyczyniać się do degradacji mikroplastiku poprzez różne mechanizmy, w tym działanie enzymów, które rozbijają polimery na prostsze związki. Taki proces może prowadzić do zmiany właściwości powierzchni mikroplastiku. Blednienie barwy mikroplastiku jest często związane z głębszymi zmianami strukturalnymi tworzywa, które wynikają z działania mikroorganizmów. Czynniki biologiczne mogą obejmować zarówno fizyczne uszkodzenia powierzchni mikroplastiku, jak i chemiczną modyfikację składu tworzywa sztucznego [37,213,214].

Fotodegradacja. Fotodegradacja mikroplastiku jest procesem degradacji wywołanym przez działanie promieniowania słonecznego, promieniowania UV, powodujące zmiany chemiczne i fragmentację materiału. Taki rodzaj degradacji często prowadzi do zmiany barwy mikroplastików, co może być wykorzystywane jako wskaźnik ich długotrwałej ekspozycji na światło słoneczne [215–218].

Utlenianie. Proces utleniania mikroplastików polega na reakcji tworzyw sztucznych z tlenem z powietrza atmosferycznego, co może prowadzić do degradacji ich struktury chemicznej oraz powierzchni. Zmiany te mogą wpływać na kolor mikroplastików – mocne i intensywne kolory mogą wskazywać na mniejsze działanie utleniania, natomiast wyblakłe i słabe mogą świadczyć o bardziej zaawansowanym procesie utleniania. Proces utleniania może być szczególnie widoczny u mezo- i makroplastików, które z czasem rozpadają się do formy mikroplastików [217,219].

Środowisko korodujące. Degradacja mikroplastiku w środowiskach korozyjnych, jak kwasy, zasady czy sole, może prowadzić do zmniejszenia nasycenia koloru. Korozyjne środowiska wywołują reakcje chemiczne, które rozkładają tworzywa, powodując blaknięcie kolorów i utratę właściwości fizycznych [214]. W środowisku wodnym kluczowymi czynnikami chemicznymi mającymi wpływ na degradację tworzyw sztucznych są wartość pH i zasolenie wody. Wysokie stężenia H^+ (w środowisku kwaśnym) lub OH^- (w środowisku zasadowym) mogą przyspieszać degradację materiałów sztucznych, które są podatne na hydrolizę np. poliamidy [220,221].

Działanie termiczne. Działanie termiczne i jego wpływ na materiały, w tym tworzywa sztuczne, może prowadzić do znaczących zmian w ich strukturze. Przy zmianach temperatury, zwłaszcza w zakresie termoplastyczności, tworzywa mogą wykazywać różnorodne zachowania. Na przykład, pod wpływem ciepła mogą przechodzić ze stanu szklanego w stan lepkosprężysty, aż do plastycznopłynnego. Te przejścia mają wpływ nie tylko na właściwości mechaniczne, ale również na estetykę materiału, w tym nasycenie koloru. Zmiany te mogą być różne w zależności od struktury i składu chemicznego materiału. W przypadku niektórych tworzyw, podwyższona temperatura może prowadzić do intensyfikacji koloru. Jednak w innych przypadkach, przegrzewanie materiału może powodować degradację barwników, prowadząc do wyblaknięcia lub zmiany koloru. Specyfika procesu termicznego i typ tworzywa decydują o końcowym

efekcie. W obecności tlenu typowe tworzywa sztuczne zawierające wodór powodują utlenianie egzotermiczne w temperaturze bliskiej 200°C, przy czym w przypadku tworzyw o wyższej temperaturze topnienia (T_m) wymagane są zazwyczaj wyższe temperatury [222]. W naturalnych warunkach rzadko dochodzi do egzotermicznego utleniania. Jednakże, istnieje możliwość powolnego utleniania termicznego materiałów syntetycznych, przy bezpośredniej ekspozycji na światło słoneczne. Dodatkowo, interakcja między temperaturą, a promieniowaniem UV może synergicznie przyspieszać degradację materiałów, z nasilającym się procesem utleniania w miarę wzrostu temperatury [223,224].

Na potrzeby opracowania narzędzia badawczego przyjęto założenie, że na mikroplastik znajdujący się w środowisku nie oddziałują temperatury tak wysokie, aby powodować przegrzanie tworzywa. Powierzchnie próbki mające jednolity szklisty i połyskliwy kolor mogą zostać sklasyfikowane jako powierzchnie nie poddane potencjalnej degradacji termicznej.

Siły mechaniczne: Degradacja mechaniczna tworzyw sztucznych jest procesem, który odgrywa kluczową rolę w powstawaniu mikroplastiku. Siły mechaniczne, takie jak tarcie, nacisk, czy uderzenia, prowadzą do uszkodzenia struktury polimerów, tworząc mikroplastik. W efekcie tej degradacji, często obserwuje się zmniejszenie nasycenia koloru tworzywa. Jest to spowodowane zmianą w sposobie odbicia i rozpraszania światła przez nierówności w powierzchni materiału. Mechaniczne uszkodzenia, takie jak pęknięcia czy zarysowania, nie tylko wpływają na właściwości wizualne tworzywa, ale również mogą wpływać na jego dalszą degradację i rozpad na coraz mniejsze części [225–227].

Wyniki predykcji w węźle W1, dotyczącym formy degradacji, zostały opisane zgodnie z algorytmem drzew decyzyjnych opracowanym dla tego badania. Decyzja opiera się na analizie atrybutów nasycenia koloru. Jeśli jeden z wybranych atrybutów spełnia określone warunki związane z głębokim lub mocnym nasyceniem koloru, wynik uznaje się za negatywny. W przeciwnym wypadku wynik jest pozytywny.

Wyniki predykcji w węźle W2, dotyczącym stopnia degradacji, zostały opisane zgodnie z algorytmem drzew decyzyjnych opracowanym dla tego badania. W tym przypadku decyzja opiera się na ocenie atrybutów nasycenia koloru. Jeżeli nasycenie koloru jest określone jako "Głęboki" lub "Mocny", wynik predykcji wskazuje na wysokie prawdopodobieństwo degradacji. Natomiast, jeśli atrybuty wskazują na "Słaby" lub "Błady" odcień, wynik predykcji będzie oznaczał niski stopień degradacji.

8.2.6. Plik ODPORNOŚĆ – opis zawartości arkusza

Arkusz zawarty w pliku ODPORNOŚĆ.xlsx (rys.25), zawiera trzy kolumny: Wynik logiczny, WARTOŚĆ oraz PREDYKCJA WYNIKÓW z podkategoriami: W1. FORMA DEGRADACJI i W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ. W arkuszu znajduje się także łącze do pliku: 1. Arkusz danych oceny wizualnej.xlsx, z którego wartość została

przeniesiona z pozycji: RODZAJ POLIMERU. Arkusz służy do kumulacji informacji o właściwościach ustalonego tworzywa sztucznego z pliku: DATA_attributes_1.xlsx w następujący sposób.

W pozycji WARTOŚĆ zastosowano formułę wyszukiwania z pliku DATA_attributes_1.xlsx informacji zawartych w pozycjach odpowiadających za kolumny WĘZEL KOŃCOWY I, odpowiednich dla ustalonego rodzaju tworzywa i przypisanym dla niego formom degradacji.

Wynik logiczny dla PREDYKCJI WYNIKÓW W1. FORMA DEGRADACJI, jest formułą, która zwraca wynik „PRAWDA”, kiedy odpowiadająca danej formie degradacji WARTOŚĆ jest większa od „0”.

Wynik logiczny dla PREDYKCJI WYNIKÓW W2. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ, jest formułą opartą o czterostopniową skalę zgodną z opracowanym dla badania algorytmem drzew decyzyjnych.

Najwyższy możliwy do uzyskania wynik sumy wartości dla materiału nie posiadającego żadnej odporności wynosi 15. Został on podzielony na cztery części w zakresach podatności na degradację: NISKA: 11.25 – 15; ŚREDNIA: 7.5 - 11.25; ŚREDNIA DO WYSOKIEJ: 3.75 - 7.5; WYSOKA: 0 - 3.75.

ŁĄCZE:		PREDYKCJA WYNIKÓW
ABS Acrylonitrile-butadiene-styrene		
Wynik logiczny	WARTOŚĆ	W1. FORMA DEGRADACJI
PRAWDA	1	CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH
PRAWDA	1	FOTOCHEMICZNA
PRAWDA	1	ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)
FAŁSZ	0	TERMICZNA
PRAWDA	3	UTLENIAJĄCA
FAŁSZ	0	SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)
SUMA	6	
		W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ
FAŁSZ		WYSOKA (75-100)
PRAWDA		ŚREDNIA DO WYSOKIEJ (50-75)
FAŁSZ		ŚREDNIA (25-50)
FAŁSZ		NISKA (1-25)

Rys. 25 Widok zawartości arkusza kalkulacyjnego: ODPORNOŚĆ

8.2.7. SIŁY_MECHANICZNE – opis zawartości arkusza

Arkusz zawarty w pliku SIŁY_MECHANICZNE.xlsx, zawiera sześć kolumn wynikowo-obliczeniowych oraz dwie kolumny opisowe pomagające w systematyzowaniu obliczeń i wyników.

Kolumna: **Powierzchnia obliczona** zawiera wartości przeniesione z pliku 1. Arkusz danych oceny wizualnej.xlsx, z pozycji SUMA POWIERZCHNI PŁASZCZYZNY RZUTOWEJ odpowiedniej dla danej siły mechanicznej.

Kolumna: **% zdegradowanej powierzchni [%]**, zawiera formułę mającą na celu przekształcenie obliczonych powierzchni zdegradowanych pod wpływem odpowiadających sił mechanicznych na wartość procentową w stosunku do powierzchni wzorcowej czyli 25 mm². Ze względu na badanie dwóch powierzchni rzutowych, przekształcenie obliczane jest dla 50 mm².

Kolumna: **SUMA POWIERZCHNI W3. [%]**, zawiera formułę sumy procentowej zdegradowanej powierzchni w odpowiedniej klasie (WAGA) ustalonej podatności na degradację w sposób następujący:

WAGA 1 – ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE

WAGA 2 – ZAGŁĘBIENIE + ŚCIERANIE

WAGA 3 – ZMĘCZENIE + EROZJA MAKROSKOPOWA

WAGA 4 – PĘKANIE

Kolumna: **MNOŻNIK W3**. Zawiera formułę stanowiącą iloczyn procentowej sumy powierzchni i wagi.

Dla predykcji wyników w węźle W1. FORMA DEGRADACJI, zgodnym z opracowanym dla badania algorytmem drzew decyzyjnych wynik logiczny opisany został następującą formułą:

=JEŻELI (SUMA POWIERZCHNI ZDEGRADOWANEJ [%]>0;"PRAWDA";"FAŁSZ")

"PRAWDA" jest zwracane, gdy wartość dla SUMA POWIERZCHNI ZDEGRADOWANEJ [%] jest większa od "0" co potwierdza obecność w próbce formy degradacji mechanicznej.

Dla predykcji wyników w węźle W2. STOPIEŃ DEGRADACJI, zgodnym z opracowanym dla badania algorytmem drzew decyzyjnych wynik logiczny opisany został następującymi formułami:

=JEŻELI (SUMA POWIERZCHNI ZDEGRADOWANEJ [%]< lub =
10;"PRAWDA";"FAŁSZ")

"PRAWDA" jest zwracane, gdy wartość dla SUMA POWIERZCHNI ZDEGRADOWANEJ [%] jest większa lub równa "10" co odpowiada wynikowi: „Nieuszkodzony (powyżej 90% fragmentu jest nieuszkodzony)”.

=LUB (ILOZYN (SUMA POWIERZCHNI ZDEGRADOWANEJ [%]>10; SUMA
POWIERZCHNI ZDEGRADOWANEJ [%]<50); SUMA POWIERZCHNI
ZDEGRADOWANEJ [%]=50)

"PRAWDA" jest zwracane, gdy wartość dla SUMA POWIERZCHNI ZDEGRADOWANEJ [%] jest większa od "10" oraz mniejsza niż "50" co odpowiada wynikowi: „Umiarkowanie uszkodzony (od 50% do 90% fragmentu jest nieuszkodzony)”.

=JEŻELI (SUMA POWIERZCHNI ZDEGRADOWANEJ [%]> lub =
50;"PRAWDA";"FAŁSZ")

"PRAWDA" jest zwracane, gdy wartość dla SUMA POWIERZCHNI ZDEGRADOWANEJ [%] jest większa lub równa "50" co odpowiada wynikowi: „Znacznie uszkodzony (poniżej 50% fragmentu jest nieuszkodzony)”.

Dla predykcji wyników w węźle W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ, zgodnym z opracowanym dla badania algorytmem drzew decyzyjnych wynik logiczny opisany został następującymi formułami:

=JEŻELI (ORAZ (WYNIK W.3>=1; WYNIK W.3<25); "PRAWDA"; "FAŁSZ")

"PRAWDA" jest zwracane, gdy wartość dla WYNIK W.3 jest większa lub równa "1" oraz mniejsza niż "25" co odpowiada wynikowi W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ: „NISKA (1-25)”.

=JEŻELI (ORAZ (WYNIK W.3>=25; WYNIK W.3<50); "PRAWDA"; "FAŁSZ")

"PRAWDA" jest zwracane, gdy wartość dla WYNIK W.3 jest większa lub równa "25" oraz mniejsza niż "50" co odpowiada wynikowi W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ: „ŚREDNIA (25-50)”.

=JEŻELI (ORAZ (WYNIK W.3>=50; WYNIK W.3<75); "PRAWDA"; "FAŁSZ")

"PRAWDA" jest zwracane, gdy wartość dla WYNIK W.3 jest większa lub równa "50" oraz mniejsza niż "75" co odpowiada wynikowi W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ: „ŚREDNIA DO WYSOKIEJ (50-75)”.

=JEŻELI (ORAZ (WYNIK W.3>=75; WYNIK W.3<=100); "PRAWDA"; "FAŁSZ")

"PRAWDA" jest zwracane, gdy wartość dla WYNIK W.3 jest większa lub równa "75" oraz mniejsza lub równa "100" co odpowiada wynikowi W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ: „WYSOKA (75-100)”.

8.2.8. SUMY_CZĘŚCIOWE – opis zawartości arkusza

Arkusz zawarty w pliku SUMY_CZĘŚCIOWE.xlsx został specjalnie zaprojektowany do obsługi zaawansowanych funkcji przetwarzania danych w programie Excel. Jego głównym celem jest przenoszenie wartości logicznych z innych arkuszy, które są z nim powiązane w ramach innych plików. Wartości logiczne reprezentowane w innych plikach jako PRAWDA i FAŁSZ, są w tym arkuszu przekształcane na bardziej uniwersalny format liczbowy: „0” i „1”. Konwersja tego rodzaju jest wymagana ze względu na uzyskanie liczbowych wartości wynikowych, które następnie są przenoszone do pliku: „2. Arkusz wyników.xlsx”.

8.2.9. Arkusz wyników – opis zawartości arkusza

Arkusz zawarty w pliku "2. Arkusz wyników.xlsx" to graficzno-tekstowe podsumowanie działania kompleksowego narzędzia badawczego składającego się z dziewięciu plików Excela. Podsumowanie podzielone jest na cztery główne części:

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA

Ta sekcja prezentuje podatność na degradację próbki pod wpływem sześciu czynników: biologicznych, fotochemicznych, chemicznych, termicznych, utleniających i mechanicznych. Dane są przedstawione w formie graficznej.

W1. FORMA DEGRADACJI ZMIERZONA

W tej części przedstawiono w sposób graficzny udział procentowy degradacji mechanicznej. Udział ten obliczony jest na podstawie danych dotyczących powierzchni próbki, która uległa degradacji przez określone siły mechaniczne.

W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

Ta sekcja określa stopień degradacji, opierając się na informacjach uzyskanych z działań narzędzia badawczego.

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

Ostatnia część podsumowania określa podatność próbki na degradację, również na podstawie danych wynikających z pracy narzędzia badawczego.

8.3. Walidacja narzędzia badawczego

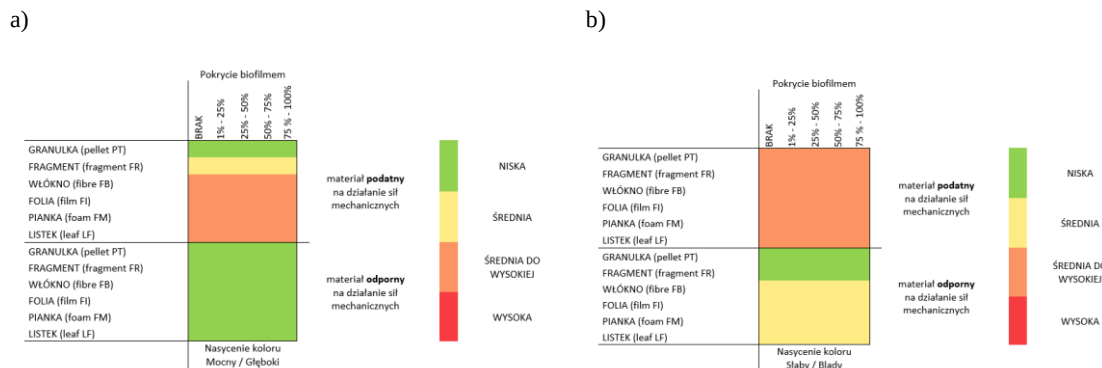
Przeprowadzenie pierwszego etapu walidacji narzędzia badawczego polegało na sprawdzeniu poprawności działania algorytmów i systemów obliczeniowych w opracowanym narzędziu badawczym, będącym w tym przypadku swoistym oprogramowaniem. Istnieje wiele metod walidacji oprogramowania, jak np. walidacja krzyżowa lub walidacja logiczna, [228]. Opracowane narzędzie poddano walidacji testowania granic lub inaczej testowania skrajnych przypadków (ang. *boundary testing*), która polega na ocenie danych na podstawie ich wartości granicznych lub dwóch przeciwległych końców, takich jak wartości minimalne i maksymalne [229]. W celu przeprowadzenia walidacji opracowano wartości maksymalne i minimalne dla materiałów testowych (próby zerowej) w arkuszu zawierającym bazę danych.

Walidację poprawności działania narzędzia badawczego przedstawiono z wykorzystaniem *heat maps*, które służą do wizualizacji zależności oraz trendów (rys. 26-31). Takie opracowanie graficzne wyników badań jest szczególnie przydatne w przypadku dużych zbiorów danych i pomaga w ich analizie i interpretacji. Zestawienia

dla węzła W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA przedstawiono jako macierze danych, takich jak kształt, nasycenie koloru, pokrycie biofilmem, w odniesieniu do próby zerowej. Najbardziej podatny materiał to taki, który najłatwiej ulega degradacji, czyli zmienia swoje właściwości pod wpływem danego czynnika (np. warunki atmosferyczne, promieniowanie UV, itd.). Najbardziej odporny materiał z kolei to ten, który najtrudniej ulega degradacji, czyli zachowuje swoje właściwości nawet w obecności czynnika degradacyjnego. Zestawienie dla węzła W1. FORMA DEGRADACJI ZMIERZONA zostało wykonane poprzez wprowadzenie do narzędzia zakresu danych w przedziale od 0 do 100% w stopniowaniu co 10 oraz odczytaniu prawidłowości wyświetlania wyników w arkuszu: 2. Arkusz wyników. Zestawienie potwierdzające poprawność działania narzędzia badawczego przedstawiono na rys 32. Tą samą metodą sprawdzono również poprawność działania narzędzia badawczego w węźle W2. STOPIEŃ DEGRADACJI.

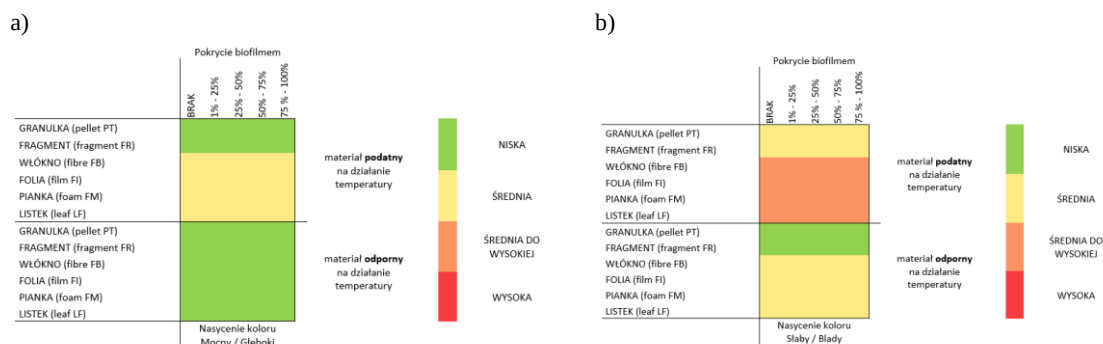
Dokonano również walidacji narzędzia badawczego w oparciu o dane dla próbek środowiskowych, a jej wyniki wraz interpretacją zostały przedstawione w rozdziałach 8.4 i 8.5.

Walidacja węzła: W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA w odniesieniu do czynników mechanicznych.



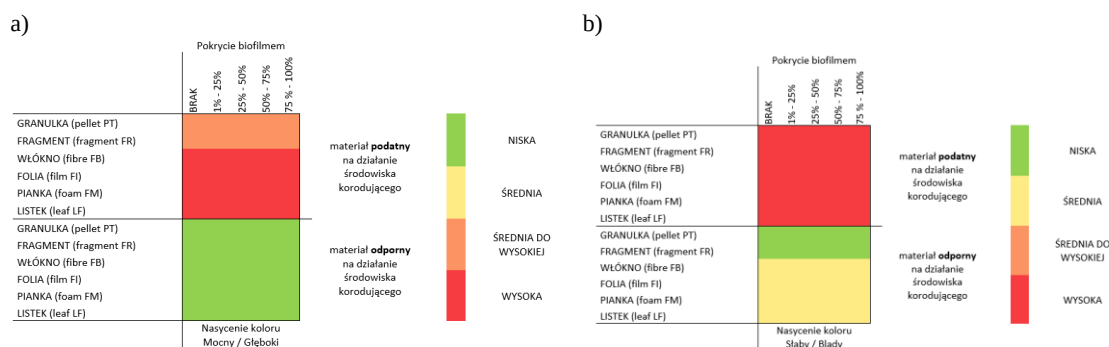
Rys. 26 Mapy cieplne zależności kształtu, mocnym lub głębokim (a) oraz słabym lub bladym (b) nasyceniem koloru, stopnia pokrycia biofilmem w odniesieniu do odporności na działanie sił mechanicznych

Walidacja węzła: W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA w odniesieniu do odporności na działanie temperatury.



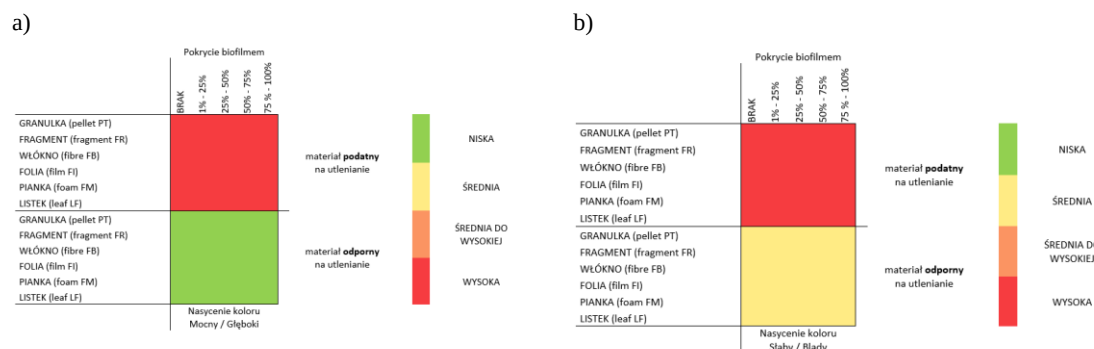
Rys. 27 Mapy cieplne zależności kształtu, mocnym lub głębokim (a) oraz słabym lub bladym (b) nasyceniem koloru, stopnia pokrycia biofilmem w odniesieniu do odporności na działanie temperatury

Walidacja węzła: W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA w odniesieniu do odporności na działanie temperatury.



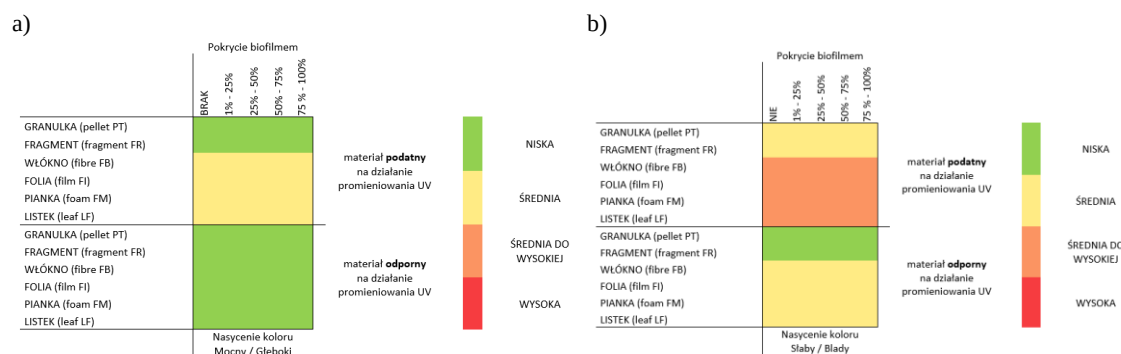
Rys. 28 Mapy cieplne zależności kształtu, mocnym lub głębokim (a) oraz słabym lub bladym (b) nasyceniem koloru, stopnia pokrycia biofilmem w odniesieniu do odporności na działanie środowiska korodującego

Walidacja węzła: W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA w odniesieniu do odporności na utlenianie.



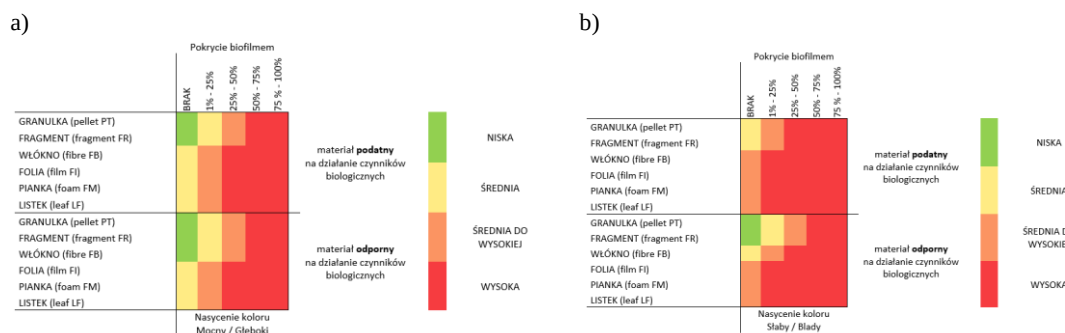
Rys. 29 Mapy cieplne zależności kształtu, mocnym lub głębokim (a) oraz słabym lub bladym (b) nasyceniem koloru, stopnia pokrycia biofilmem w odniesieniu do odporności na utlenianie

Walidacja węzła: W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA w odniesieniu do odporności na działanie promieniowania UV.



Rys. 30 Mapy cieplne zależności kształtu, mocnym lub głębokim (a) oraz słabym lub bladym (b) nasyceniem koloru, stopnia pokrycia biofilmem w odniesieniu do działania promieniowania UV

Walidacja węzła: W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA w odniesieniu do odporności na działanie czynników biologicznych.



Rys. 31 Mapy ciepłe zależności kształtu, mocnym lub głębokim (a) oraz słabym lub bladym (b) nasyceniem koloru, stopnia pokrycia biofilmem w odniesieniu do działania czynników biologicznych

Walidacja węzła: W1. FORMA DEGRADACJI ZMIERZONA oraz węzła: W2. STOPIEŃ DEGRADACJI.

Węzeł	Siły mechaniczne	Zdegradowana powierzchnia	Siła zmierzonej formy degradacji										
			BRAK	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
W1. FORMA DEGRADACJI ZMIERZONA	PEKANIE ZMĘCZENIE EROZIA MAKROSKOPOWA ZAGŁĘBIENIE ŚCIERANIE ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	<10%											
		=10 < 20%											
		=20 < 30%											
		=30 < 40%											
		=40 < 50%											
		=50 < 60%											
		=60 < 70%											
		=70 < 80%											
		=80 < 90%											
		=90 <= 100%											
W2. STOPIEŃ DEGRADACJI	Nieuszkodzony (powyżej 10% fragmentu jest uszkodzone)		×										
	Umiarkowanie uszkodzony (od 50 do 90% fragmentu jest nieuszkodzone)			×	×	×	×						
	Znacznie uszkodzony (powyżej 50% fragmentu jest uszkodzone)							×	×	×	×	×	×

Rys. 32 Walidacja poprawności działania narzędzia badawczego w węźle W1. FORMA DEGRADACJI ZMIERZONA oraz w węźle W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

Na rys. 32 przedstawiono wyniki wprowadzenia danych dla próby zerowej i potwierdzenia poprawnego działania narzędzia. W przypadku braku powierzchni

z widocznymi elementami degradacji wynik oznaczony jest jako nieuszkodzony, w przedziale od 10 do 50% widocznych elementów degradacji wynik to umiarkowanie uszkodzony, natomiast powyżej 50% stopień degradacji to znacznie uszkodzony.

8.4. Analiza statystyczna badanych próbek mikroplastiku pod względem dopasowania widma FTIR

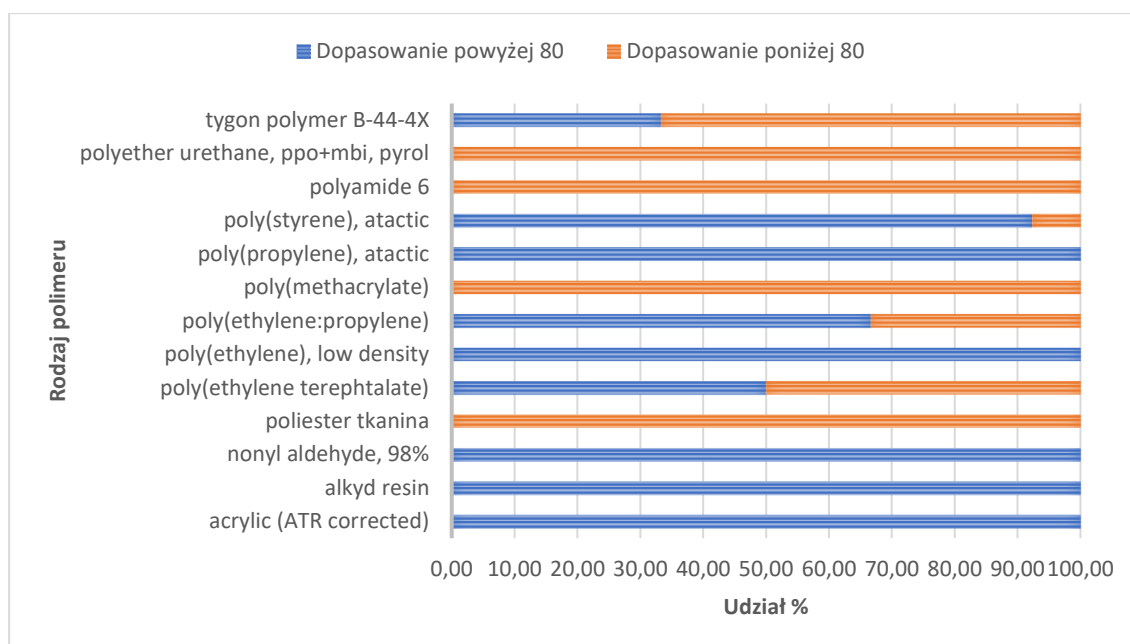
W tabeli 2 zestawiono dane jakościowe wyników badań spektroskopii FTIR. Przyjmuje się, że dopasowanie powyżej 80% jest właściwe z punktu widzenia dokładności w identyfikacji materiału. Szczegółowy arkusz klasyfikacji i wartości współczynnika dopasowania widm badanych próbek do wzorcowych baz danych zestawiono w załączniku nr 2.

Tabela 2. Zestawienie jakościowe wyników badań spektroskopii FTIR i wartości współczynnika dopasowania badanych próbek do wzorcowych baz danych.

Współczynnik dopasowania powyżej 80%	
Ilość próbek	62
Udział (%)	84,93
Odchylenie standardowe	4,34
Mediana	91,96
Średnia	90,38
SEM	0,55
Współczynnik dopasowania poniżej 80%	
Ilość próbek	11
Udział (%)	15,07
Odchylenie standardowe	5,20
Mediana	72,83
Średnia	71,34
SEM	1,57

Ze wszystkich zbadanych próbek 11 pomiarów wykazywało dopasowanie do bazy danych widm spektroskopowych poniżej 80% co stanowi 15,07% wszystkich próbek, natomiast 62 pomiary (84,93%) sklasyfikowano powyżej tej wartości. Dla obu zbiorów danych obliczono błąd standardowy średniej (tzw. standard error of the mean, SEM), którego wartości potwierdzają większą precyzję pomiarów dla zbioru danych uzyskanych z dopasowaniem widma powyżej 80%.

Wartości współczynnika dopasowania do bazy danych widm wzorcowych FTIR w zależności od rodzaju tworzywa sztucznego przedstawiono na rys. 33



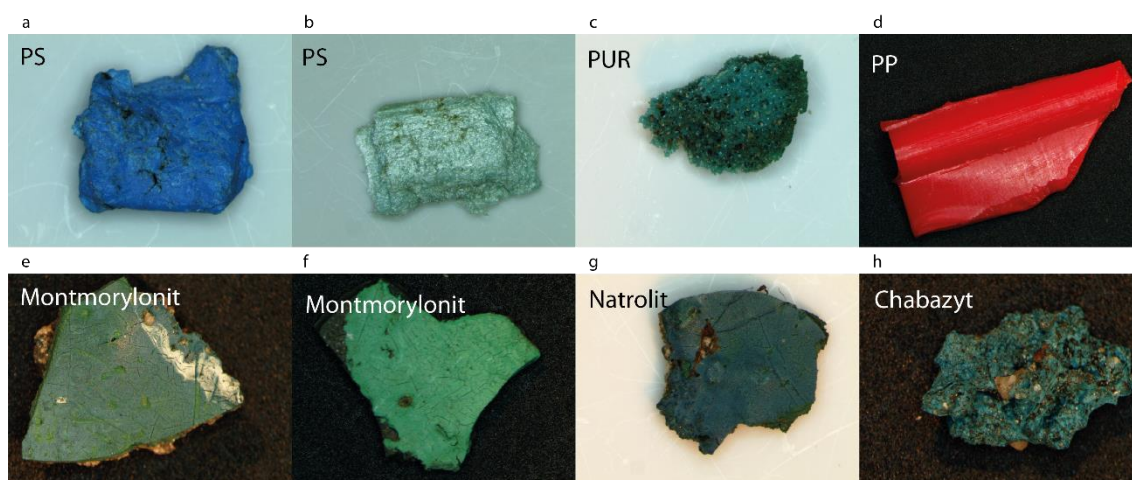
Rys. 33 Współczynnik dopasowania do bazy danych widm FTIR w zależności od rodzaju próbki

Stuprocentowe dopasowanie widma FTIR do bazy danych wzorcowych osiągnięto dla pięciu przypadków: acrylic (ATR corrected) (1), alkyd resin (1), nonyl aldehyde (1), poly(ethylene) low density (6), poly(propylene) atactic (37). Poly(styrene), atactic wykazuje wysoką skuteczność identyfikacji (92,31%).

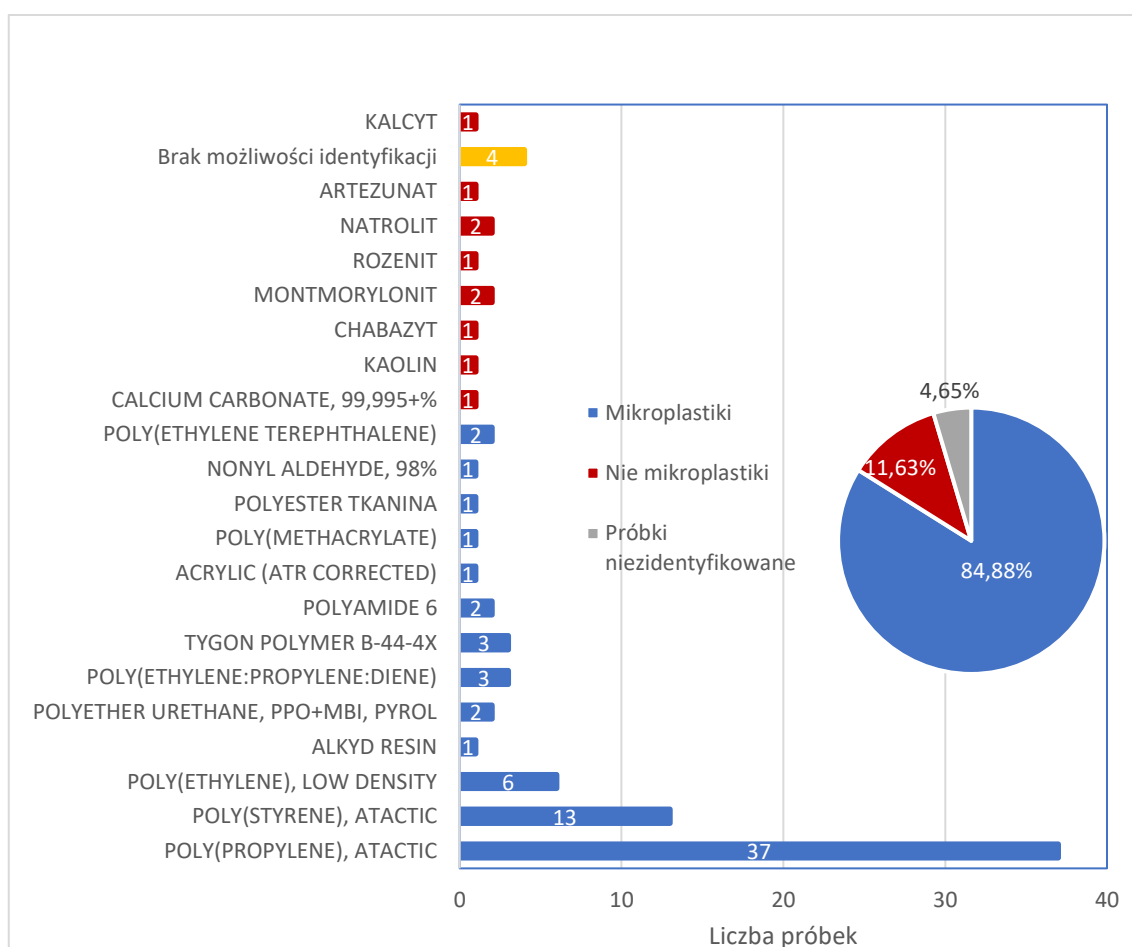
8.5. Ocena degradacji badanych próbek mikroplastiku

Próbki mikroplastiku pobrane z polskich terenów przybrzeżnych Morza Bałtyckiego analizowano w zakresie rodzaju materiału, jego kształtu oraz oddziaływania czynników degradacyjnych. Przykładowe cząstki mikroplastiku oraz cząstki wizualnie przypominające mikroplastik pokazano na rys. 34.

Zestawienie ilościowe cząstek mikroplastiku z podziałem na rodzaj materiału przedstawiono na rys. 35.



Rys. 34 Przykładowe cząstki mikroplastiku (a-d) oraz cząstki wykazujące wizualne cechy mikroplastiku (e-h)



Rys. 35 Klasyfikacja próbek z podziałem na mikroplastik i inne cząstki wykazujące wizualne cechy tworzyw sztucznych

Analiza jakościowa próbek wykazała, że najwięcej cząstek mikroplastiku stanowiły drobiny polipropylenu (51,39%), polistyrenu (18,06%) i polietylenu (8,33%). W badaniach na otwartym Morzu Bałtyckim i plażach Zatoki Ryskiej Dimante-Deimantovica i in. wykazali udział najczęściej wykrywanych polimerów w zebranych cząstkach mikroplastiku: 70,3% polietylen, 3,8% polistyren i 21,5% polipropylen [230]. Mimo braku bezpośredniego odniesienia co do największego udziału pomiędzy polietylenem, polistyrenem a polipropylenem, można zauważyć, że w obu badaniach te trzy tworzywa stanowią największą ilość próbek.

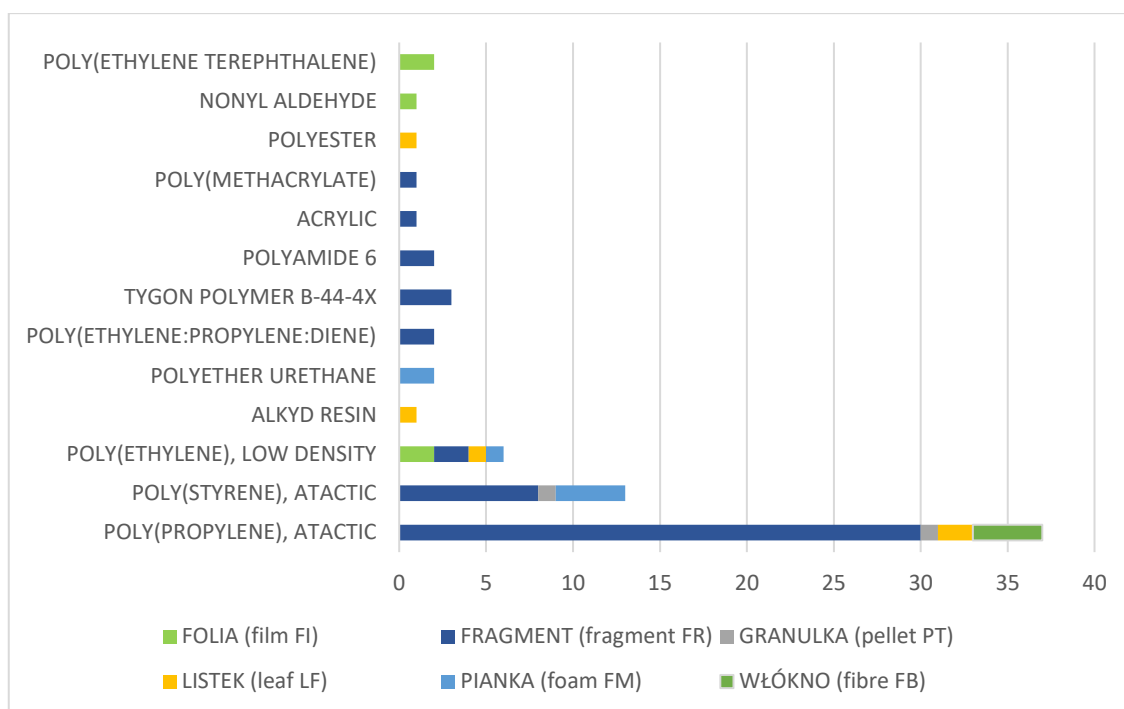
Kooi i Koelmans [231] wskazali, że najliczniej spotykane cząstki mikroplastiku w środowisku wodnym to polietylen (PE) (25%), politereftalan etylenu (PET) (16,5%) oraz polipropylen (PP) (14%). PE, PP, PVC, PS i PET należą do najczęściej produkowanych tworzyw sztucznych na świecie, a ich wszechstronność i powszechność użycia w różnych produktach konsumenckich decydują o występowaniu w środowisku wodnym [232–234].

Około 13% (10 próbek) wyizolowanych cząstek pomimo posiadania wizualnych cech tworzyw sztucznych nie zostało zakwalifikowanych jako cząstki mikroplastiku. Próbki te to głównie natrolit, montmorylonit, kaolin, kalcyt. Dla 4 próbek nie ustalono składu i pochodzenia materiałowego. Podobny problem związany z identyfikacją mikroplastiku w próbkach środowiskowych wskazali Schröder i in. [235], którzy badając obecność mikroplastiku w osadach linii dryftu w Fiordzie Kilońskim na zachodnim Bałtyku poprawnie zidentyfikowali metodami spektroskopowymi tylko 77% zebranych próbek. W niektórych przypadkach stosuje się badanie tylko mikroplastiku o określonym składzie nie włączając cząstek niezidentyfikowanych.

Poprawna identyfikacja próbki mikroplastiku z wysokim dopasowaniem widm wymaga również dostępu do rozbudowanej bazy danych. Obecnie prowadzone są prace nad tworzeniem baz nie tylko dla tworzyw sztucznych, ale również dla cząstek mikroplastiku, który poprzez degradację w środowisku, może emitować inne widmo niż widmo charakterystyczne dla tworzywa sztucznego. Takie bazy są tworzone przez Uniwersytet w Toronto w Kanadzie oraz Thermo Fisher Scientific, w Stanach Zjednoczonych [175].

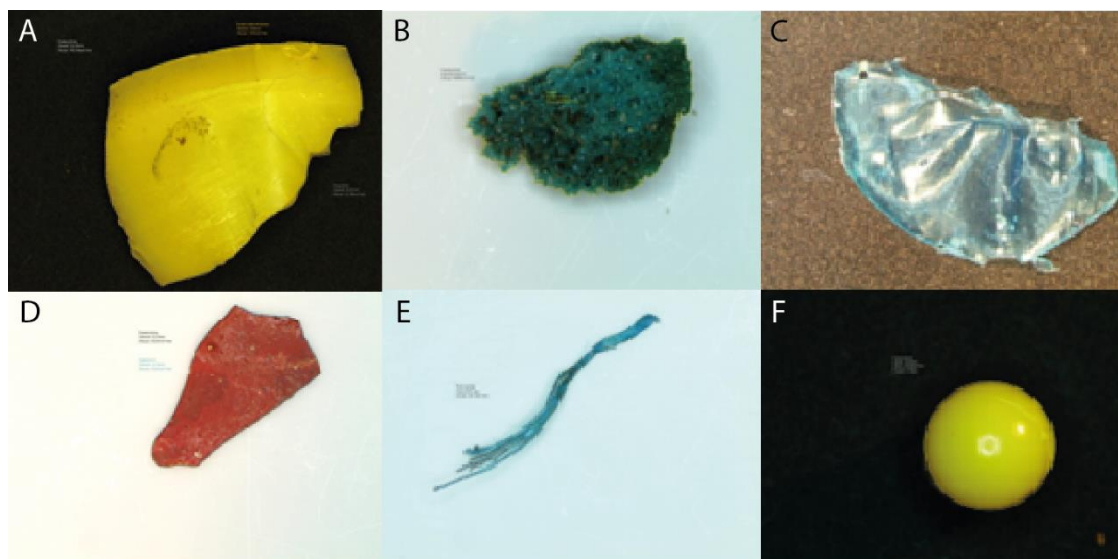
Dane literaturowe wskazują również, że jednym z kluczowych problemów powodujących błędy w ocenie cząstek mikroplastiku jest brak standardów dotyczących metod pobierania próbek i jednolitych procedur przygotowania materiału do analizy. W różnych badaniach stosuje się odmienne techniki, co prowadzi do znaczących rozbieżności w uzyskanych wynikach [235–237].

Wyniki analizy badanych próbek mikroplastiku z podziałem na kształt przedstawiono na rys. 36.



Rys. 36 Klasyfikacja próbek mikroplastiku z podziałem na kształt

Dla większości zebranych cząstek, kształt zdefiniowano jako fragment (49), a następnie pianka (7), folia (5), listek (5), włókno (4) i granulka (2). Przykłady kształtów cząstek mikroplastiku przedstawiono na rys. 37.



Rys. 37 Przykłady kształtów cząstek mikroplastiku: A – fragment (PS), B – pianka (PUR), C – folia (NONYL ALDEHYDE), D – listek (ALKYD RESIN), E – włókno (PP), F – granulka (PP)

Stwierdzona dominacja cząstek mikroplastików w formie fragmentów jest zgodna z wynikami badań z obszaru Morza Bałtyckiego. Na przykład, w badaniach przeprowadzonych w porcie w Gdyni, fragmenty i włókna były najczęściej spotykanymi formami mikroplastików [177]. Podobne obserwacje są wynikiem badań w zachodniej części Bałtyku, gdzie fragmenty stanowiły dominującą formę mikroplastików w próbkach osadów. Poza tym zidentyfikowano również inne formy, takie jak włókna i folie [235]. W próbkach z plaż wybrzeża Morza Bałtyckiego, przeprowadzonych przez Dimante-Deimantovica i in. [230], stwierdzono, że mikroplastiki zostały sklasyfikowane głównie jako włókna, fragmenty i pianki. Włókna dominowały szczególnie w pobliżu obszarów zurbanizowanych. Zauważono również, że ilość cząstek mikroplastików była wyższa na piaszczystych plażach w porównaniu do ilości w osadach przybrzeżnych, gdzie najczęstsze formy to włókna i fragmenty [238].

Wyniki przeprowadzonej analizy wpływu różnych czynników na degradację cząstek mikroplastiku przedstawiono na rys 38. Wyniki opracowano graficznie z wykorzystaniem wykresu radarowego (inaczej nazywanego wykresem pajęczynowym), który bardzo dobrze sprawdza się przy porównywaniu wielowymiarowych danych.



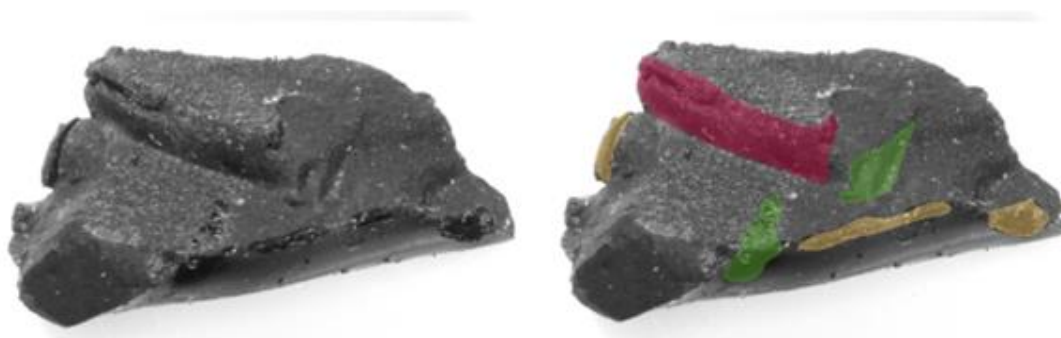
Rys. 38 Siły oddziaływania czynników degradacyjnych na próbki mikroplastiku

Najwyższe wartości przypadają na formę degradacji utleniającą: 22 wystąpienia w zakresie degradacji wysokiej, 41 wystąpień w zakresie degradacji średniej do wysokiej,

4 wystąpienia dla degradacji o średnim nasileniu oraz 6 wystąpień dla degradacji o niskim nasileniu. Najniższe wartości degradacji przypadają dla formy degradacji termicznej: 55 wystąpień dla wartości niskich, 15 wystąpień dla wartości średnich, tylko 3 wystąpienia dla wartości średniej do wysokiej i brak wystąpień dla wartości wysokiej. Najwyższe wartości ze zbioru danych przypadające dla średniej siły oddziaływania przypadają degradacji sił mechanicznych 39 wystąpień, czynników biologicznych 28 wystąpień oraz fotochemicznej 22 wystąpienia.

Stopień oddziaływania degradacji mechanicznej oceniono na podstawie mikroskopowej metody planimetrycznej, zgodnie z opisem narzędzia badawczego przedstawionym w rozdziale 8.2. Obecność charakterystycznych identyfikatorów degradacji mechanicznej na powierzchni mikroplastiku może dostarczyć wielu informacji o ich dalszych losach i przemianach w środowisku. Mechaniczne procesy degradacji, takie jak tarcie, ścieranie, czy uderzenia, prowadzą do zmian tekstury powierzchni mikroplastików co może przyspieszyć ich dalszą degradację poprzez zwiększenie powierzchni narażonej na działanie innych czynników. Degradacja mechaniczna odgrywa zatem kluczową rolę w fragmentacji mikroplastików i wpływa na podatność i szybkość dalszego rozkładu.

Przykład obrazu mikroskopowego próbki mikroplastiku z polietylenu, o wyraźnych cechach degradacji mechanicznej takiej jak pęknięcia, zagłębienia, widoczne ślady ścierania przedstawiono na rys 39.



Rys. 39 Obraz mikroskopowy próbki mikroplastiku z wyraźnymi elementami degradacji mechanicznej tj. zagłębienia (kolor zielony), ścieranie (kolor czerwony), pęknięcie (kolor żółty)

Kategoria "czynniki biologiczne" została utworzona, aby ocenić nie tylko proces biodegradacji spowodowany działaniem drobnoustrojów, ale również dodatkowy aspekt dostępności cząstek pokrytych biofilmem dla innych organizmów.

Ocena czynników biologicznych wykazała, że ich wpływ na degradację jest intensywny przy średniej wartości (28), co potwierdza, że mają one umiarkowane znaczenie dla szybkości procesów degradacyjnych. Biodegradacja jest procesem zależnym od wielu czynników, przede wszystkim od właściwości polimeru, rodzaju mikroorganizmów, ich aktywności i wydajności metabolicznej [11]. Na biodegradację wpływają również takie cechy polimeru, jak jego mobilność, czyli zdolność cząsteczek polimeru do przemieszczania się względem siebie (tactyczność) [239,240]. Polimery ataktyczne są bardziej amorficzne i przez to mogą łatwiej ulegać biodegradacji [131,132,241]. Stopień

krystaliczności, masa cząsteczkowa, rodzaj obecnych grup funkcyjnych oraz dodane plastyfikatory i inne dodatki to kolejne cechy decydujące o podatności na biodegradację. Wszystkie te elementy odgrywają znaczącą rolę w procesie biodegradacji polimeru [239,240].

Dane literaturowe wskazują, że degradacja mikroplastików w warunkach kompostowania ma największy potencjał ze względu na bogactwo drobnoustrojów i korzystne warunki środowiskowe. Procesy kompostowania, zarówno w warunkach domowych, jak i przemysłowych, charakteryzują się wysoką aktywnością mikrobiologiczną, zwłaszcza przy zapewnieniu odpowiedniego napowietrzania, co sprzyja rozwojowi mikroorganizmów odpowiedzialnych za biodegradację [242]. Wykazano, że mikroorganizmy obecne w kompostowniach przemysłowych mają zdolność do rozkładu różnorodnych polimerów [214,243]. Efektywny rozkład mikroplastików w procesie kompostowania zachodzi przy udziale mikroorganizmów, takich jak *Actinobacteria*, *Proteobacteria* i *Fungi*, w szczególności przez szczepy *Aspergillus* i *Penicillium*. Przykładem może być badanie z 2023 r., które wykazało, że szczepy *Pseudomonas* i *Bacillus* w warunkach kompostowania były w stanie rozłożyć polimery o wysokiej gęstości np. HDPE [243].

Natomiast w środowisku wodnym, zwłaszcza morskim, mikroorganizmy wykazują znacznie mniejszą aktywność biologiczną w biodegradacji mikroplastików, przez m.in. rozcieńczenie wydzielanych enzymów, co utrudnia efektywną biodegradację. Ponadto niska temperatura oraz brak odpowiednich zasobów odżywczych w wodach głębinowych dodatkowo spowalniają ten proces. W warunkach morskich degradacja mikroplastików jest ograniczona, a procesy fotodegradacji dominują nad biodegradacją, co prowadzi do fragmentacji, ale nie pełnego rozkładu tworzyw sztucznych [214].

Warto również zwrócić uwagę na badania nad wpływem dodatków chemicznych w mikroplastikach, które mogą hamować proces biodegradacji. Stwierdzono, że mikroplastiki zawierające ftalany (PAE) i inne plastyfikatory są nierozkładalne w warunkach naturalnych, co wymaga stosowania bardziej specyficznych mikroorganizmów lub zmodyfikowanych warunków środowiskowych, takich jak wyższe temperatury i lepszy dostęp do tlenu [214].

Degradacja fotochemiczna tworzyw sztucznych jest spowodowana ekspozycją na promieniowanie UV [244]. W przeprowadzonych badaniach 43 próbki mikroplastiku wykazały niską podatność na degradację fotochemiczną (rys. 38). Tego typu mikroplastik będzie dłużej utrzymywał się w środowisku, wpływając na ekosystemy przybrzeżne. Decydujący jest dodatek stabilizatorów UV. Zjawisko to potwierdzili w badaniach Gewert i in. uznając za czynniki limitujące fotodegradację mikroplastiku zawartość dodatków oraz np. osłonięcie cząstek przez wodę lub biofilm [245]. Andrady [235] stwierdził, że degradacja zapoczątkowana przez promieniowanie UV jest bardzo wydajna w przypadku plastików wystawionych na działanie tlenu z powietrza lub leżących na powierzchni plaży. Jednak gdy ten sam materiał jest wystawiony na działanie światła słonecznego w tym samym miejscu, ale unosi się w wodzie morskiej, degradacja jest poważnie opóźniona [21]. W badaniach próbek mikroplastiku [246], porównano zjawisko fotodegradacji fragmentów z polietylenu w warunkach zewnętrznych oraz podczas unoszenia się na powierzchni wody morskiej. Porównanie danych z różnych lokalizacji

w tym badaniu pokazało, że w warunkach morskich próbki degradowały wolniej niż te wystawione na działanie powietrza. Na przykład w jednej z badanych lokalizacji, tempo degradacji było nawet o 72% wolniejsze w wodzie morskiej niż w warunkach zewnętrznych. Dodatkowo, próbki pokrywały się biofilmem złożonym z glonów i innych organizmów morskich, co jeszcze bardziej utrudniało dostęp promieniowania UV do powierzchni mikroplastiku, a tym samym hamowało proces fotodegradacji.

Analiza danych wykazuje szerokie spektrum podatności badanych próbek na degradację chemiczną i utleniającą. Aż 63 próbki wykazywały podatność na degradację utleniającą w zakresie wysokiej i średniej do wysokiej, a tylko 10 jako średnia i niska. W przypadku podatności na degradację chemiczną 28 próbek wykazywało wysoką podatność lub średnią do wysokiej, natomiast 35 próbek średnią i niską (rys. 38).

Uzyskane wyniki wykazują znaczącą zgodność z danymi literaturowymi w odniesieniu do wpływu czynników chemicznych i warunków środowiskowych na szybkość degradacji [21,245,247–250].

W przeglądzie badań przeprowadzonym przez Gewert i in. [245] wykazano, że promieniowanie UV oraz obecność tlenu atmosferycznego prowadzą do intensywnego procesu utleniania, który skutkuje degradacją polimerów, takich jak polietylen i polipropylen. Procesy te prowadzą do rozrywania wiązań chemicznych w polimerach, co powoduje fragmentację materiału i powstawanie mniejszych cząstek, a to z kolei zwiększa ich reaktywność w innych procesach chemicznych.

Kolejne badania, opisane przez Andrady [21], potwierdzają, że utlenianie atmosferyczne ma kluczowe znaczenie w degradacji mikroplastików. W szczególności w warunkach podwyższonej temperatury i intensywnego promieniowania słonecznego, procesy utleniania prowadzą do pęknięcia łańcuchów polimerowych. Andrady podkreśla, że długotrwała ekspozycja na działanie tych czynników powoduje nieodwracalne zmiany w strukturze chemicznej materiałów polimerowych, a to skutkuje ich osłabieniem mechanicznym i przyspieszoną degradacją.

Badania Song i in. [247,248] również koncentrują się na procesach chemicznej degradacji mikroplastików w wyniku utleniania. Wykazano, że obecność reaktywnych form tlenu w środowisku wodnym może znacząco przyspieszać degradację chemiczną mikroplastików, co prowadzi do dalszej fragmentacji materiałów polimerowych. Song podkreśla, że takie procesy są szczególnie intensywne w miejscach o wysokim zanieczyszczeniu i obecności metali ciężkich, które mogą katalizować reakcje chemiczne.

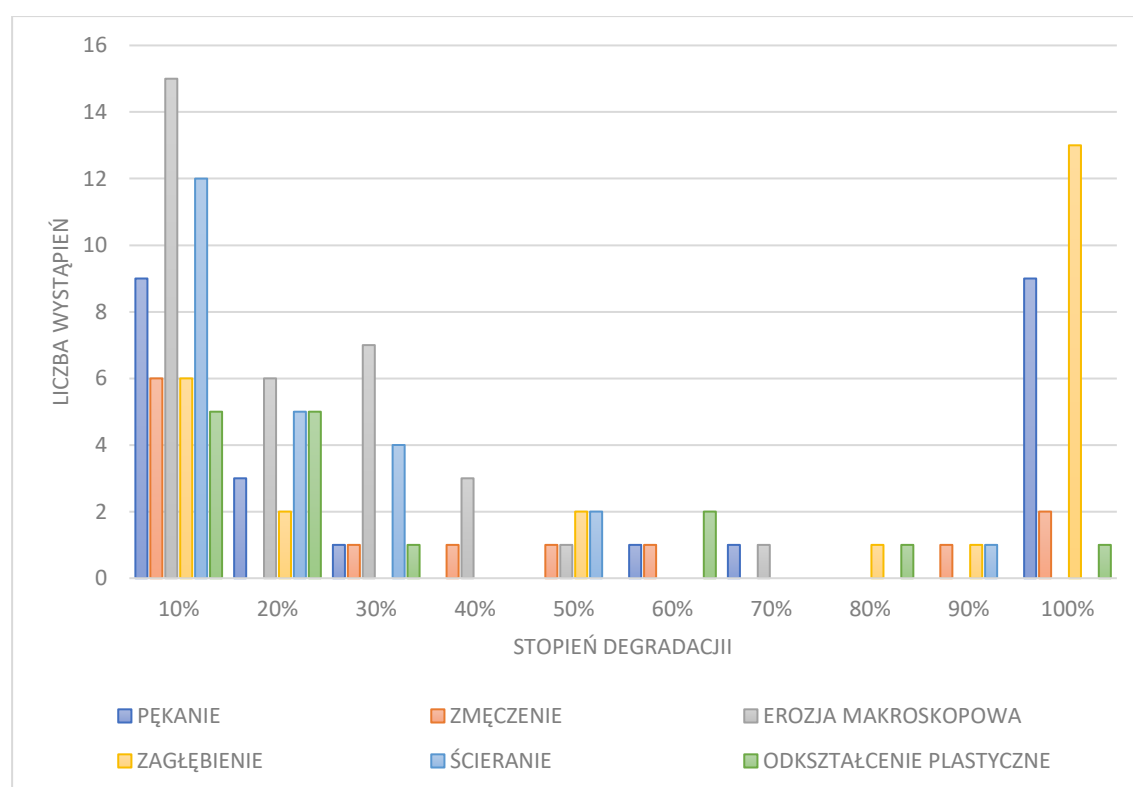
Mikroplastiki w środowiskach morskich są narażone na działanie soli, która może przyspieszać procesy korozyjne. Sól morską, zawierającą jony chlorkowe, może powodować degradację polimerów poprzez mechanizmy hydrolizy i oksydacji [245,249]. Dodatkowo mikroorganizmy znajdujące się w wodzie morskiej mogą produkować kwasy organiczne, które działają na powierzchnię mikroplastików, przyspieszając ich chemiczną degradację [250].

Stabilność termiczna jest na ogół wysoka dla większości polimerów syntetycznych, co jest zgodne z zaobserwowaną w badaniach niską podatnością na degradację termiczną (rys. 38), którą wykazało 55 badanych próbek mikroplastików, średnią – 15 badanych

próbek a średnią do wysokiej tylko trzy próbki. Oznacza to, że w badanych próbkach znajdowały się przede wszystkim polimery syntetyczne, które są stabilne w szerokim zakresie temperatur, np. PE i PP. Zauważyć należy, że zgodnie z przyjętą metodyką analizowane temperatury mieszczą się w zakresie od -40°C do $+80^{\circ}\text{C}$. Nie wykazano żadnej próbki posiadającej cechy wysokiej podatności na degradację termiczną. Co jest również zgodne z danymi literaturowymi dotyczącymi odporności termicznej analizowanych tworzyw sztucznych [100,117,131,132,134,135].

Degradacja mechaniczna jest szeroko opisywana w literaturze. Prowadzone są badania polegające na postarzaniu próbek w warunkach naturalnych w czasie jak np. w badaniu Maddison, C., Sathish, C.I., Lakshmi, D. i in. [251]. Do szczegółowej analizy wykorzystywane są bardzo zaawansowane techniki badawcze, jak np. skaningowa mikroskopia elektronowa SEM do charakterystyki powierzchni próbek poddanym wietrzeniu w kontrolowanych warunkach, lub analiza termogravimetryczna (TGA) do pomiarów zmian właściwości termicznych mikroplastików podczas procesów degradacji.

Szczegółowe wyniki oceny stopnia degradacji mechanicznej próbek mikroplastiku przedstawiono na rys. 40. Ustalono udział próbek wykazujących specyficzne ślady degradacji mechanicznej tj. pękanie, zmęczenie, erozja makroskopowa, zagłębienie, ścieranie i odkształcenie plastyczne o różnej intensywności.

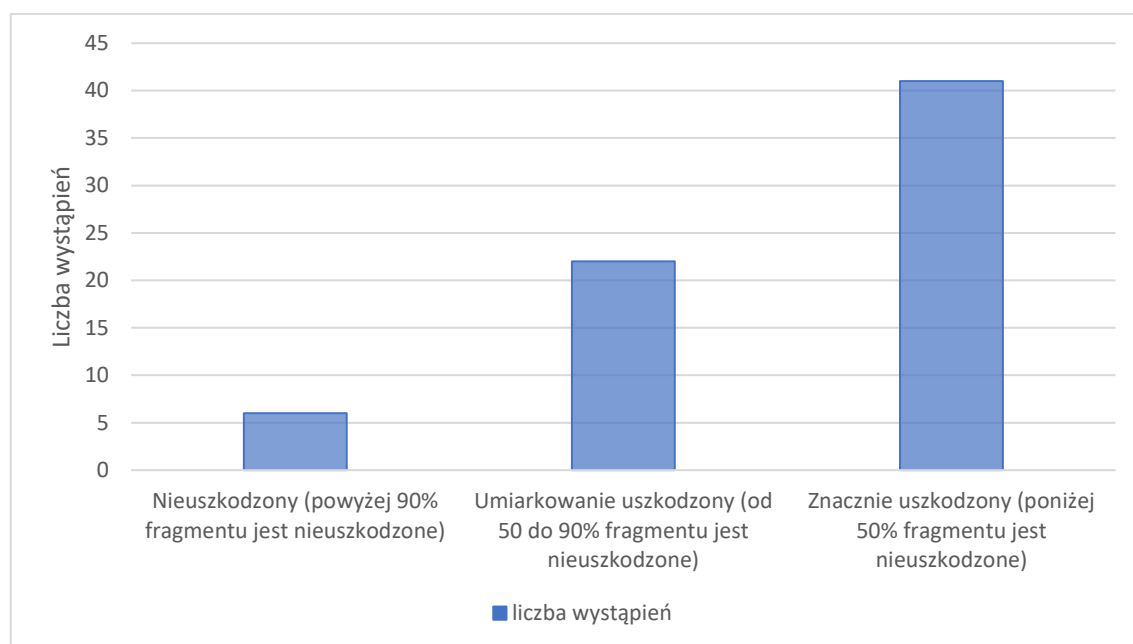


Rys. 40 Stopień degradacji mechanicznej próbek mikroplastików

Analiza wyników badań, wykazała znaczne zróżnicowanie stopnia mechanicznej degradacji w zależności od jej typu. Dominują siły mechaniczne związane z pękaniem

i zagłębieniami. W tym przypadku najwięcej było próbek z obszarem pokrycia czynnikiem erozyjnym na poziomie 100% (pękanie: 9 przypadków, zagłębienie: 13 przypadków), natomiast najmniej powierzchni uległo degradacji pod wpływem erozji makroskopowej – 15 przypadków z pokryciem do 10 %. W związku z tym, że taka klasyfikacja została użyta po raz pierwszy w analizie degradacji mikroplastiku, nie można się odnieść do innych danych literaturowych.

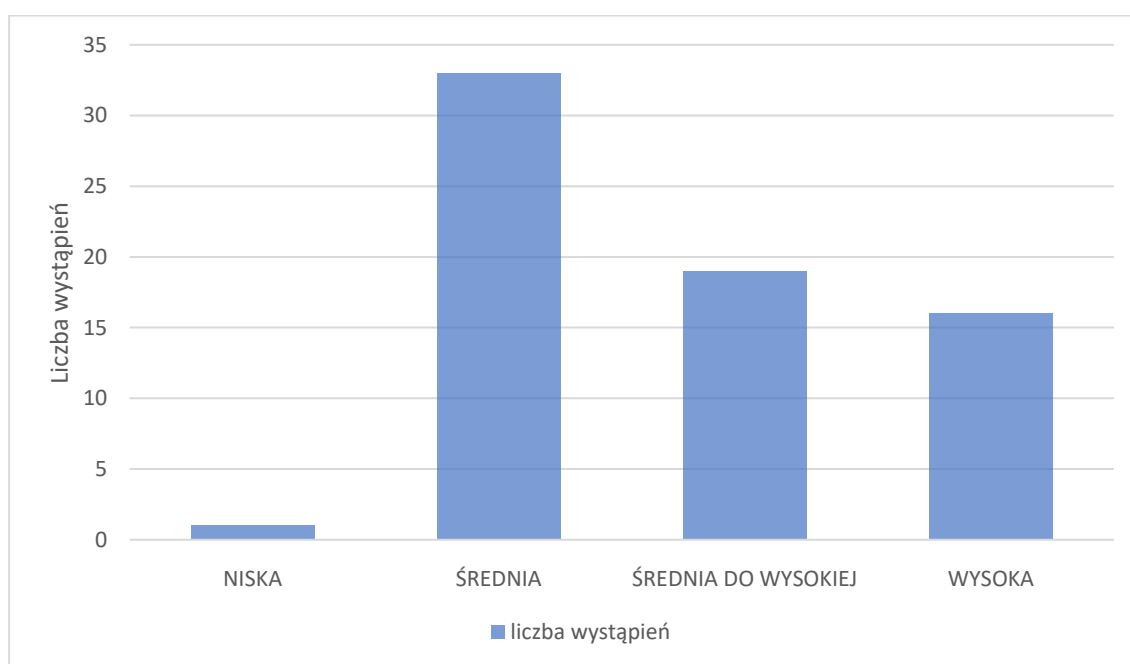
Skumulowanie wartości stopnia degradacji próbek mikroplastiku (rys. 41) pozwala na stwierdzenie, że największą grupę (67%) stanowią próbki znacznie uszkodzone. Badania wykazały, że większość mikroplastiku w środowisku ulega znaczącej degradacji. Literatura wskazuje że degradacja mikroplastiku wynika z długotrwałej ekspozycji na działanie czynników środowiskowych, takich jak promieniowanie UV, ścieranie mechaniczne oraz działanie mikroorganizmów. Mikroplastiki mogą znajdować się w stanach przejściowych w zależności od czasu ich ekspozycji i intensywności czynników degradacyjnych [252]. Przeprowadzone badanie wykazało, że 59% zbadanych próbek miało niską podatność na degradację fotochemiczną i żadna próbka nie była klasyfikowana w stopniu wysokim.



Rys. 41 Skumulowane wartości stopnia degradacji próbek mikroplastików

Skumulowaną podatność na degradację badanych próbek mikroplastików zestawiono na rys. 42. Dominują próbki wykazujące średnią podatność na degradację (45,21%). Tylko w jednym przypadku zaobserwowano stopień podatności na degradację określony jako niski. Próbka ta, to mikroplastik w formie granulki z polipropylenu bez oznak uszkodzeń mechanicznych, a ta forma i ten rodzaj tworzywa sztucznego charakteryzują się większą odpornością na działanie różnych czynników zewnętrznych [208]. Wysoką podatność na degradację wykazywały próbki składające się zarówno z polistyrenu (5), polietylenu (3), polipropylenu (2), poliuretanu (2) oraz po jednym wystąpieniu dla poliestru oraz Tygon

polymer B-44-4X[®]. Ze względu na kształt największą grupę stanowiły listki, pianki i folia (11), fragmenty były cztery, a granulka jedna. Uzyskane wyniki badań znajdują potwierdzenie w danych literaturowych. Maddison i in. [254] przeprowadzili badania w warunkach symulacji starzenia tworzyw sztucznych poprzez umieszczenie próbek mikroplastików w sieciach zanurzonych w wodzie morskiej. Wykazano wyższą podatność na degradację polistyrenu oraz poliuretanu. Natomiast Ali i in. [255], stwierdzili wysoką podatność tych polimerów na rozkład pod wpływem działania promieniowania UV oraz erozji mechanicznej. Meides i in. [253] na podstawie badań dotyczących degradacji polipropylenu ustalili, że próbki szybko ulegały fragmentacji w symulowanych warunkach odpowiadających dwuletniemu starzeniu po 350 godzinach testów.



Rys. 42 Skumulowana podatność na degradację próbek mikroplastików

9. Wnioski

Wyniki przeprowadzonych badań nad degradacją mikroplastiku dostarczyły istotnych informacji na temat czynników wpływających na procesy degradacyjne. Badania pozwoliły na weryfikację postawionych hipotez badawczych oraz opracowanie funkcjonalnej metody, która umożliwi analizowanie degradacji mikroplastiku w różnych warunkach środowiskowych. Analiza wzajemnych oddziaływań wielu czynników, takich jak właściwości tworzywa sztucznego, kształt próbki, tekstura powierzchni, obecność biofilmu oraz uszkodzenia mechaniczne, była kluczowa dla zrozumienia złożoności procesów degradacji.

HIPOTEZA 1

Do oceny stopnia i podatności na degradację mikroplastiku konieczna jest zaawansowana mikroskopowa analiza powierzchni, umożliwiająca identyfikację i kwantyfikację uszkodzeń mechanicznych.

W celu dokładnego określenia rodzajów uszkodzeń mechanicznych powierzchni próbek mikroplastiku zastosowano techniki mikroskopowe. Aby wprowadzone dane miały charakter obliczeniowy, posłużono się metodą planimetrii przy wykorzystaniu kalibrowanych kamer mikroskopowych oraz dedykowanego oprogramowania, pozwalającego zmierzyć obszar każdego charakterystycznego elementu odpowiadającego uszkodzeniom mechanicznym na powierzchni badanej próbki.

W badaniach wykazano, że uszkodzenia mechaniczne powierzchni mikroplastików przyspieszają ich dalszą fragmentację i inicjują kolejne procesy rozkładu poprzez zwiększenie powierzchni narażonej na działanie innych czynników jak np. promieniowanie UV i działanie mikroorganizmów.

Ustalono, że czynnikiem o średniej sile oddziaływania dla największej liczby badanych próbek była degradacja sił mechanicznych. Stwierdzono znaczne zróżnicowanie stopnia mechanicznej degradacji w zależności od jej typu. Dominowały siły mechaniczne związane z pękaniem i zagłębieniami. Najmniej powierzchni mikroplastików uległo degradacji pod wpływem erozji makroskopowej. Przyjęta po raz pierwszy w procedurach badawczych klasyfikacja typów degradacji mechanicznej w połączeniu z zaawansowanymi metodami mikroskopowymi daje możliwość szybkiej i wiarygodnej analizy stopnia i podatności na degradację mikroplastiku.

HIPOTEZA 2

Możliwe jest opracowanie metody badawczej, która pozwala na określenie stopnia i formy degradacji mikroplastiku, integrując informacje o właściwościach tworzywa sztucznego, kształcie próbki, nasyceniu koloru, obecności biofilmu oraz wyniki analizy uszkodzeń mechanicznych.

Analiza danych zebranych w trakcie badań terenowych i laboratoryjnych umożliwiła opracowanie algorytmów decyzyjnych, które uwzględniając wzajemne oddziaływanie tych czynników, pozwalają na określenie degradacji mikroplastiku w różnych warunkach środowiskowych. Na tej podstawie opracowano metodę badawczą, w której powiązано informacje o właściwościach tworzyw sztucznych, dane pomiarowe (kształt, nasycenie kolorów, obecność biofilmu), z analizą uszkodzeń mechanicznych.

Interpretacja wyników badań oraz walidacja narzędzia badawczego w oparciu o dane dla próbek środowiskowych potwierdzają, że możliwe jest na ich podstawie określenie stopnia i formy degradacji mikroplastiku, a także jego podatności na rozkład.

Wyznaczona skumulowana wartość stopnia degradacji oraz podatność na degradację badanych próbek mikroplastiku była zgodna z właściwościami tworzyw sztucznych podawanymi w kartach charakterystyk materiałów, np. podatność na degradację wykazywały próbki polistyrenu, polietylenu, polipropylenu i poliuretanu. Wyniki badań były spójne z danymi literaturowymi, wskazując że ze względu na kształt podatne na rozkład są listki, pianki i folie, a najbardziej odporną formą jest granulka. Potwierdzono również charakterystyczną dla tworzyw syntetycznych stabilność termiczną oraz umiarkowany wpływ czynników biologicznych na degradację mikroplastiku z morskich ekosystemów przybrzeżnych.

HIPOTEZA 3

Czynniki środowiskowe (promieniowanie UV, uszkodzenia mechaniczne, substancje chemiczne i mikroorganizmy) w różnym stopniu wpływają na degradację mikroplastiku.

Analiza wyników badań wykazała, że większość próbek mikroplastików charakteryzuje średnia lub wysoka podatność na degradację. Degradacja tworzyw sztucznych o wysokiej odporności na rozkład zachodzi głównie pod wpływem działania czynników chemicznych oraz fotodegradacji, natomiast próbki o wysokiej podatności na degradację ulegają niszczeniu przede wszystkim z powodu działania sił mechanicznych oraz pod wpływem utleniania tlenem z powietrza atmosferycznego.

W narzędziu badawczym przyjęto szczegółowy podział czynników degradacyjnych (uderzenie, ścieranie, temperatura, kwasy, zasady, oleje, rozpuszczalniki organiczne, UV, inne czynniki atmosferyczne, czynniki biologiczne), jednak interpretacja analizy wpływu sił oddziaływania tych czynników na degradację cząstek mikroplastiku wykazała, że niemożliwe jest przypisanie stopnia i formy degradacji dla pojedynczego czynnika.

Ogólne wnioski z przeprowadzonych badań:

1. Bariera poprawnej analizy widmowej w identyfikacji materiałowej próbek mikroplastiku jest brak dostępu do rozbudowanych baz danych uwzględniających

zmiany na powierzchni cząstek, które mogą emitować inne widmo niż wzorcowego tworzywa sztucznego.

2. Analiza jakościowa próbek z pasa nadbrzeżnego Morza Bałtyckiego wykazała, że najczęściej cząstek mikroplastików stanowiły drobiny polipropylenu, polistyrenu i polietylenu. Dla większości zebranych cząstek kształt zdefiniowano jako fragment, pianka, folia, listek i granulka. Spostrzeżenia te są zgodne z innymi wynikami badań z obszaru Morza Bałtyckiego.

3. W ocenie stopnia i formy degradacji mikroplastiku z plaż referencyjnych niemożliwe jest ustalenie czasu przebywania cząstek w wodzie i na powierzchni plaży, co jest jednym z głównych czynników decydujących o fotodegradacji.

Bibliografia

1. de Sá LC, Oliveira M, Ribeiro F, Rocha TL, Futter MN. Studies of the effects of microplastics on aquatic organisms: What do we know and where should we focus our efforts in the future? *Sci Total Environ.* 2018;645: 1029–1039. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.07.207
2. Plastics - the Facts 2022 •. Plastics Europe AISBL; 2023 mar. Pobrano: <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2022-2/>
3. „Tworzywa -Fakty”. [cytowane 6 czerwiec 2023]. Pobrano: <https://plasticseurope.org/pl/wp-content/uploads/sites/7/2023/04/Tworzywa-Fakty-2022.pdf>
4. Laist DW. Overview of the biological effects of lost and discarded plastic debris in the marine environment. *Mar Pollut Bull.* 1987;18: 319–326. doi:10.1016/s0025-326x(87)80019-x
5. Mato Y, Isobe T, Takada H, Kanehiro H, Ohtake C, Kaminuma T. Plastic resin pellets as a transport medium for toxic chemicals in the marine environment. *Environ Sci Technol.* 2001;35: 318–324. doi:10.1021/es0010498
6. Eriksson C, Burton H. Origins and biological accumulation of small plastic particles in fur seals from Macquarie Island. *Ambio.* 2003;32: 380–384. doi:10.1579/0044-7447-32.6.380
7. Endo S, Takizawa R, Okuda K, Takada H, Chiba K, Kanehiro H, i in. Concentration of polychlorinated biphenyls (PCBs) in beached resin pellets: variability among individual particles and regional differences. *Mar Pollut Bull.* 2005;50: 1103–1114. doi:10.1016/j.marpolbul.2005.04.030
8. Plastics in the marine environment nnuual Review of Marine Science. 2016;9: 205–229.
9. Van Emmerik T, Strady E, Kieu-Le TC, Nguyen L. Gratiot Seasonality of riverine macroplastic transport *Sci. Gratiot Seasonality of riverine macroplastic transport Sci Rep.* 2019;9.
10. Rech S, Macaya-Caquilpan V, Pantoja JF, Rivadeneira MM, Madariaga D. Thiel Rivers as a source of marine litter--a study from the SE Pacific *Mar. Pollut Bull.* 2014;82: 66–75.
11. Lin Z, Jin T, Zou T, Xu L, Xi B, Xu D, i in. Current progress on plastic/microplastic degradation: Fact influences and mechanism. *Environ Pollut.* 2022;304: 119159. doi:10.1016/j.envpol.2022.119159
12. Thompson RC, Olsen Y, Mitchell RP, Davis A, Rowland SJ, John AWG, i in. Lost at sea: where is all the plastic? *Science.* 2004;304: 838. doi:10.1126/science.1094559
13. Thompson A. Earth Has a Hidden Plastic Problem-Scientists Are Hunting It Down. *Scientific American* Retrieved. 2020.
14. To Save the Oceans, Should You Give Up Glitter? *National Geographic News.* 2017.
15. Microplastic waste: This massive (tiny) threat to sea life is now in every ocean. *The Independent* 13. 2014.
16. Carpenter EJ, Smith KLJ. Plastics on the Sargasso Seasurface. *Science.* 1972;175: 1240–1241.
17. Majewski K. W poszukiwaniu brakującego ogniwa czyli nowa propozycja definiowania mikroplastiku. *Kosm Ser A Biol.* 2023;72: 497–503. doi:10.36921/kos.2022_2885
18. Hartmann NB, Hüffer T, Thompson RC, Hassellöv M, Verschoor A, Dagaard AE, i in. Are We Speaking the Same Language? Recommendations for a Definition and Categorization Framework for Plastic Debris. *Environ Sci Technol.* 2019;53: 1039–1047. doi:10.1021/acs.est.8b05297
19. Browne M, Galloway T, Thompson R. Microplastic - an emerging contaminant of potential concern? *Integr Environ Assess Manag.* 2007;preprint: 1. doi:10.1897/ieam_2007-048

20. Singh B, Sharma N. Mechanistic implications of plastic degradation. *Polym Degrad Stab.* 2008;93: 561–584. doi:10.1016/j.polymdegradstab.2007.11.008
21. Andrady A, Zhu L. Microplastics as pollutants in the marine environment. *Anthropogenic Pollution of Aquatic Ecosystems.* Cham: Springer International Publishing; 2021. s. 373–399. doi:10.1007/978-3-030-75602-4_17
22. Barnes DKA, Galgani F, Thompson RC, Barlaz M. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci.* 2009;364: 1985–1998. doi:10.1098/rstb.2008.0205
23. Verschoor AJ. Towards a definition of microplastics: Considerations for the specification of physico-chemical properties. 2015. Pobrano: <https://rivm.openrepository.com/bitstream/handle/10029/575986/2015-0116.pdf?sequence=3>
24. International Organization for Standardization. *Plastics — Vocabulary.* 2013. Report No.: 472.
25. Vert M, Doi Y, Hellwich K-H, Hess M, Hodge P, Kubisa P, i in. Terminology for biorelated polymers and applications (IUPAC Recommendations 2012). *Pure Appl Chem.* 2012;84: 377–410. doi:10.1351/pac-rec-10-12-04
26. Ojeda T. *Polymers and the environment.* W: Yılmaz F, redaktor. *Polymer Science.* London, England: InTech; 2013. doi:10.5772/51057
27. Rabek JF. *Polimery.* 2013.
28. Rabek JF. *Współczesna wiedza o polimerach: Polimery naturalne i syntetyczne, otrzymywanie i zastosowania.* Wydawnictwo Naukowe PWN; 2017.
29. European Chemicals Agency. *Guidance for monomers and polymers.* 2023. Report No.: 3.0.
30. European Parliament. Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council. *Official Journal of the European Union;* 2006 grudz. Report No.: 1907/2006.
31. *Plastics Technology.* [cytowane 7 czerwiec 2023]. Pobrano: <https://polymerdatabase.com/Additives/Polymer>
32. *Wiley encyclopedia of composites.* Choice (Middletown). 2012;50: 50-1826-50–1826. doi:10.5860/choice.50-1826
33. Gregory MR, Andrady AL. *Plastics in the Marine Environment. Plastics and the Environment.* Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.; 2004. s. 379–401. doi:10.1002/0471721557.ch10
34. Masura J, Baker J, Foster G, Arthur C. *Laboratory Methods for the Analysis of Microplastics in the Marine Environment: Recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments.* 2015. Pobrano: <https://repository.oceanbestpractices.org/handle/11329/1076>
35. Browne MA, Galloway T, Thompson R. Microplastic—An emerging contaminant of potential concern? *Integr Environ Assess Manage.* 2007;3: 559–561.
36. HISTORY. W: Captain Charles Moore [Internet]. [cytowane 10 maj 2023]. Pobrano: <http://www.captain-charles-moore.org/about>
37. Moore CJ. Synthetic polymers in the marine environment: a rapidly increasing, long-term threat. *Environ Res.* 2008;108: 131–139. doi:10.1016/j.envres.2008.07.025
38. Costa MF, Ivar do Sul JA, Silva-Cavalcanti JS, Araújo MCB, Spengler A, Tourinho PS. On the importance of size of plastic fragments and pellets on the strandline: a snapshot of a Brazilian beach. *Environ Monit Assess.* 2010;168: 299–304. doi:10.1007/s10661-009-1113-4
39. Commission recommendation of 18 October 2011 on the definition of nanomaterial. *Official Journal of the European Union;* 2011 paź. Pobrano: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32011H0696>
40. Litter MTS on. *Guidance on monitoring of marine litter in European seas.* Publications Office of the European Union; 2014. doi:10.2788/99475
41. Desforges J-PW, Galbraith M, Dangerfield N, Ross PS. Widespread distribution of microplastics in subsurface seawater in the NE Pacific Ocean. *Mar Pollut Bull.* 2014;79: 94–99. doi:10.1016/j.marpolbul.2013.12.035

42. Wagner M, Scherer C, Alvarez-Muñoz D, Brennholt N, Bourrain X, Buchinger S, i in. Microplastics in freshwater ecosystems: what we know and what we need to know. *Environ Sci Eur.* 2014;26: 12. doi:10.1186/s12302-014-0012-7
43. Koelmans AA, Besseling E, Shim WJ. Nanoplastics in the aquatic environment. Critical review. *Marine Anthropogenic Litter*. Cham: Springer International Publishing; 2015. s. 325–340. doi:10.1007/978-3-319-16510-3_12
44. Andrady AL. *Plastics and Environmental Sustainability*. 1. wyd. Nashville, TN: John Wiley & Sons; 2015. doi:10.1002/9781119009405
45. Kershaw P. Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment. Kershaw P, redaktor. GESAMP; 2015. Report No.: 90. doi:10.13140/RG.2.1.3803.7925
46. Presence of microplastics and nanoplastics in food, with particular focus on seafood. *EFSA j.* 2016;14. doi:10.2903/j.efsa.2016.4501
47. Koelmans AA, Kooi M, Law KL, van Sebille E. All is not lost: deriving a top-down mass budget of plastic at sea. *Environ Res Lett.* 2017;12: 114028. doi:10.1088/1748-9326/aa9500
48. Courtney A, Baker J, Bamford H. Proceedings of the international research workshop on the occurrence, effects, and fate of microplastic marine debris, September 9-11, 2008. Tacoma, WA, USA; 2009.
49. Albuquerque J. Sprawozdanie w sprawie wniosku dotyczącego rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie zapobiegania stratom granulatu z tworzyw sztucznych w celu ograniczenia zanieczyszczenia mikrodrobinami plastiku. [cytowane 22 wrzesień 2024]. Pobrano: https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-9-2024-0148_PL.html
50. Teksty przyjęte - Zapobieganie utracie granulatu z tworzyw sztucznych w celu ograniczenia zanieczyszczenia mikrodrobinami plastiku - Wtorek, 23 kwietnia 2024 r. [cytowane 22 wrzesień 2024]. Pobrano: https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2024-0307_PL.html
51. Broniewski T, Płaczek JK, Thomalla W. Metody badań i ocena właściwości tworzyw sztucznych.
52. Żuchowska D. *Polimery konstrukcyjne. Wprowadzenie do technologii i stosowania*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne; 1995.
53. OpenAGH e-podręczniki |. [cytowane 31 marzec 2023]. Pobrano: <https://prepodreczniki.open.agh.edu.pl/tiki-index.php?page=Temperatura+charakterystyczne+polimerow>
54. Ascons. Stany fizyczne polimerów. W: ASCONS [Internet]. 28 czerwiec 2017 [cytowane 3 kwiecień 2023]. Pobrano: <https://www.ascons.pl/stany-fizyczne-polimerow/>
55. Callister WD, Rethwisch DG. *Materials Science and Engineering*. 10. wyd. Nashville, TN: John Wiley & Sons; 2020.
56. Seefeldt J. Viscoelastic properties of polymers and plastics. W: *Advancing Materials* [Internet]. Thermo Fisher Scientific; 21 październik 2019 [cytowane 3 kwiecień 2023]. Pobrano: <https://www.thermofisher.com/blog/materials/studying-the-viscoelastic-properties-of-polymers-and-plastics/>
57. Solubility of polymers. W: *Materials Square* [Internet]. [cytowane 4 kwiecień 2023]. Pobrano: <https://www.materialsquare.com/blog/solubility-of-polymers-en>
58. *Plastics Technology*. [cytowane 4 kwiecień 2023]. Pobrano: <https://polymerdatabase.com/polymer>
59. Broniewski T, Jerzy K, Płaczek W, Thomalla J. *Metody badań i ocena właściwości tworzyw sztucznych*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne; 2000.
60. Charles H. Thesis: The Three Dimensional Solubility Parameter and Solvent Diffusion Coefficient. CRC Press; 1967.
61. Rozdział XX: Rozpuszczalniki i ciecze specjalne. Pobrano: <https://gacol.pl/files/UserFiles/rozdzial%2020.pdf>
62. Wu C, Zhang K, Xiong X. Microplastic pollution in inland waters focusing on Asia. *The Handbook of Environmental Chemistry*. Cham: Springer International Publishing; 2018. s. 85–99. doi:10.1007/978-3-319-61615-5_5

63. Decyzja 2024/1441 uzupełniająca dyrektywę Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2020/2184 poprzez ustanowienie metodyki pomiaru... - Prawo.pl. [cytowane 17 wrzesień 2024]. Pobrano: <https://www.prawo.pl/akty/dz-u-ue-l-2024-1441,72310229.html>
64. Fabian J, Hartmann H, redaktorzy. Light absorption of organic colorants. New York, NY: Springer; 2014.
65. Shaw DG, Day RH. Colour- and form-dependent loss of plastic micro-debris from the North Pacific Ocean. *Mar Pollut Bull.* 1994;28: 39–43. doi:10.1016/0025-326x(94)90184-8
66. Su L, Xue Y, Li L, Yang D, Kolandhasamy P, Li D, i in. Microplastics in taihu lake, China. *Environ Pollut.* 2016;216: 711–719. doi:10.1016/j.envpol.2016.06.036
67. Peters CA, Thomas PA, Rieper KB, Bratton SP. Foraging preferences influence microplastic ingestion by six marine fish species from the Texas Gulf Coast. *Mar Pollut Bull.* 2017;124: 82–88. doi:10.1016/j.marpolbul.2017.06.080
68. Wang W, Ndungu AW, Li Z, Wang J. Microplastics pollution in inland freshwaters of China: A case study in urban surface waters of Wuhan, China. *Sci Total Environ.* 2017;575: 1369–1374. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.09.213
69. Rezaia S, Park J, Md Din MF, Mat Taib S, Talaiekhazani A, Kumar Yadav K, i in. Microplastics pollution in different aquatic environments and biota: A review of recent studies. *Mar Pollut Bull.* 2018;133: 191–208. doi:10.1016/j.marpolbul.2018.05.022
70. Zhang K, Shi H, Peng J, Wang Y, Xiong X, Wu C, i in. Microplastic pollution in China's inland water systems: A review of findings, methods, characteristics, effects, and management. *Sci Total Environ.* 2018;630: 1641–1653. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.02.300
71. Chen Q, Zhang H, Allgeier A, Zhou Q, Ouellet JD, Crawford SE, i in. Marine microplastics bound dioxin-like chemicals: Model explanation and risk assessment. *J Hazard Mater.* 2019;364: 82–90. doi:10.1016/j.jhazmat.2018.10.032
72. Norwegian Environment Agency. Sources of microplastic- pollution to the marine environment. MEPEX; 2014 grudź.
73. The European Commission. Decyzja Komisji (UE) 2021/1870 z dnia 22 października 2021 r. ustanawiająca kryteria oznakowania ekologicznego UE dla produktów kosmetycznych i produktów do pielęgnacji zwierząt. 2021 paź. Report No.: C(2021) 7500.
74. Fendall LS, Sewell MA. Contributing to marine pollution by washing your face: microplastics in facial cleansers. *Mar Pollut Bull.* 2009;58: 1225–1228. doi:10.1016/j.marpolbul.2009.04.025
75. Market Study Synthetic Rubber. 2013; 2015–2018.
76. ASA - poli(akrylonitryl-co-akrylan-co-styren) - wzór, właściwości, zastosowanie. W: Grupa Azoty [Internet]. Pobrano: <https://nowotechnologie.grupaazoty.com/nowe-technologie/asa-poli-akrylonitryl-co-akrylan-co-styren-wzor-wlasciwosci-zastosowanie>
77. Mokwena KK, Tang J. Ethylene vinyl alcohol: a review of barrier properties for packaging shelf stable foods. *Crit Rev Food Sci Nutr.* 2012;52: 640–650. doi:10.1080/10408398.2010.504903
78. Lagaron JM, Catalá R, Gavara R. Structural characteristics defining high barrier properties in polymeric materials. *Materials Science and Technology.* 2004;20: 1–7. doi:10.1179/026708304225010442
79. Polyisobutylene (PIB). W: TER HELL & Co. GmbH [Internet]. [cytowane 19 luty 2024]. Pobrano: <https://www.terchemicals-cee.com/szczegoly-produktu/polyisobutylen-pib>
80. Material Breakdown: What is Butyl Rubber? [cytowane 19 luty 2024]. Pobrano: <https://www.timcorubber.com/blog/archive/material-breakdown-what-is-butyl-rubber/>
81. Butyl rubber. [cytowane 19 luty 2024]. Pobrano: https://www.chemeurope.com/en/encyclopedia/Butyl_rubber.html
82. Meng TT. Volatile organic compounds of polyethylene vinyl acetate plastic are toxic to living organisms. *J Toxicol Sci.* 2014;39: 795–802. doi:10.2131/jts.39.795
83. Antosik A, Nataniel Adrian Antosik A. Klasyfikacja klejów samoprzylepnych ze względu na rodzaj polimeru. *Wiadomości Chemiczne.* 2019;73: 452–463.
84. Teng H. Overview of the Development of the Fluoropolymer Industry Appl. Overview of the Development of the Fluoropolymer Industry Appl Sci. 2012;2: 496–512.

85. Sztucznych SBT. Kopolimer Fluorowy Etylen/Propylen [FEP]. W: tworzywa.pl [Internet]. [cytowane 21 luty 2023]. Pobrano: <https://www.tworzywa.pl/wiedzopedia/slownik/kopolimer-fluorowy-etylenpropylen-fep,9.html>
86. Biomaterials Science An Introduction to Materials in Medicine Book • Third Edition • 2013 Fluorinated Biomaterials Fang Liu and David W. Grainger Pages. : 92–103.
87. Market Study Synthetic Rubber". Ceresana. 2013; 2015–2018.
88. Gumowe O. Guma NBR- Właściwości - Kauczuk butadienowo-akrylonitrylowy. W: Powerrubber.com [Internet]. 15 styczeń 2019 [cytowane 1 luty 2023]. Pobrano: <https://powerrubber.com/mieszanki-gumowe/guma-nbr/>
89. Piotrowski R. BR-Butadiene rubber-properties. W: Powerrubber.com [Internet]. 24 maj 2021 [cytowane 22 wrzesień 2024]. Pobrano: <https://powerrubber.com/en/rubber-compounds/rubber-br/>
90. Charakterystyka kauczuku butadienowo-akrylonitrylowego. W: Usługowy [Internet]. [cytowane 1 luty 2023]. Pobrano: <https://www.uslugowy.com.pl/artukul/charakterystyka-kauczuku-butadienowo-akrylonitrylowego-199245>
91. Ethylene Propylene Rubbers - Properties and Applications of Ethylene Propylene Diene (EPDM) and Ethylene Propylene Copolymers (EPM).
92. Lei Z, Song J, Tian M, Cui X, Li C, Wen M. Partial discharges of cavities in ethylene propylene rubber insulation. IEEE Trans Dielectr Electr Insul. 2014;21: 1647–1659. doi:10.1109/tdei.2014.004297
93. Hasegawa N, Okamoto H, Usuki A. Preparation and properties of ethylene propylene rubber (EPR)-clay nanocomposites based on maleic anhydride-modified EPR and organophilic clay. J Appl Polym Sci. 2004;93: 758–764. doi:10.1002/app.20546
94. Ethylene propylene rubber (EPR, EPM) properties and applications. W: polymerdatabase [Internet]. [cytowane 3 luty 2023]. Pobrano: <https://blog.polymerdatabase.com/Polymer%20Brands/EPMS.html>
95. SBC - Styrene Butadiene Copolymer. [cytowane 19 luty 2024]. Pobrano: <https://www.biesterfeld.com/pl/pl/product/sbc-styrene-butadiene-copolymer-1/>
96. A complete guide on styrene butadiene copolymer resins. [cytowane 19 luty 2024]. Pobrano: <https://adhesives.specialchem.com/selection-guide/selection-of-styrene-butadiene-copolymer-resins>
97. Vision Design. RTP 2700 series styrenic block copolymer thermoplastic elastomer (SBC) compounds. W: RTP Company - Your Global Compounder of Custom Engineered Thermoplastics [Internet]. RTP Company; 29 sierpień 2013 [cytowane 4 marzec 2024]. Pobrano: <https://www.rtpcompany.com/products/product-guide/styrenic-block-copolymer-thermoplastic-elastomer-sbc-tes/>
98. Technical information - Neoprene" (PDF). October. 2003; 2017–2028.
99. Obrecht W, Lambert J-P, Happ M, Oppenheimer-Stix C, Dunn J, Krüger R. Rubber, 4. Emulsion Rubbers" in Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Weinheim: Wiley-VCH; 2012. doi:10.1002/14356007.o23_o01
100. DuPont Elastomers. 2008.
101. Neopren. W: MAPA Professional [Internet]. [cytowane 1 luty 2023]. Pobrano: <https://www.mapa-pro.pl/centrum-informacji/glosariusz/definicja/neopren>
102. Polichlorek winylu PVC: zastosowanie i właściwości. W: Portal Produktowy Grupy PCC [Internet]. PCC Group; 10 maj 2022 [cytowane 6 marzec 2024]. Pobrano: <https://www.products.pcc.eu/pl/blog/polichlorek-winyłu-zastosowanie-i-wlasciwosci/>
103. Wąsowski J, Bogdanowicz A. Mikroplastiki w środowisku wodnym. Wydawnictwo Naukowe PWN SA; 2020. Pobrano: <https://play.google.com/store/books/details?id=gZnCzQEACAAJ>
104. Jan F R. Polimery. Otrzymywanie, metody badawcze, zastosowanie. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN; 2013.
105. Halar® ECTFE Design & Processing Guide, Solvay Specialty Polymers, R 08/2016 | Version 2.7. Halar® ECTFE Design & Processing Guide, Solvay Specialty Polymers.

106. Ethylene chlorotrifluoroethylene (ECTFE). W: POLYPLAST [Internet]. [cytowane 2 luty 2023]. Pobrano: <https://www.fluoropolymers.net/ethylene-chlorotrifluoro-ethylene.html>
107. ECTFE Fluoropolymer with outstanding mechanical properties and dimensional stability. W: Curbell Plastics [Internet]. [cytowane 2 luty 2023]. Pobrano: <https://www.curbellplastics.com/Research-Solutions/Materials/ECTFE>
108. Crawford CB, Quinn B. Microplastic identification techniques. Microplastic Pollutants. Elsevier; 2017. s. 219–267. doi:10.1016/b978-0-12-809406-8.00010-4
109. Saechtling H. Tworzywa Sztuczne: Poradnik. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. 2000.
110. Współczesna Wiedza o Polimerach: Polimery Naturalne i Syntetyczne, Otrzymywanie i Zastosowania. Wydawnictwo Naukowe PWN; 2017.
111. Kondo MY, Montagna LS, Morgado GF de M, Castilho ALG de, Batista LAP dos S, Botelho EC, i in. Recent advances in the use of Polyamide-based materials for the automotive industry. Polímeros. 2022;32. doi:10.1590/0104-1428.20220042
112. Fangueiro R, Pereira CG, de Araújo M. Applications of polyesters and polyamides in civil engineering. Polyesters and Polyamides. Elsevier; 2008. s. 542–592. doi:10.1533/9781845694609.3.542
113. Shakiba M, Rezvani Ghomi E, Khosravi F, Jouybar S, Bigham A, Zare M, i in. Nylon—A material introduction and overview for biomedical applications. Polym Adv Technol. 2021;32: 3368–3383. doi:10.1002/pat.5372
114. Chlorosulfonated polyethylene (CSPE). W: greenspec [Internet]. [cytowane 2 luty 2023]. Pobrano: <https://www.greenspec.co.uk/building-design/chlorosulfonated-polyethylene-cspe-environment-and-health/>
115. Hypalon® 30. W: SpecialChem [Internet]. [cytowane 2 luty 2023]. Pobrano: <https://coatings.specialchem.com/product/r-dupont-hypalon-30>
116. Hype about discontinuing Hypalon®. W: Anixter [Internet]. [cytowane 2 luty 2023]. Pobrano: <https://www.anixter.com/content/dam/Anixter/Wire%20Wisdom/13A2303X00-Wire-Wisdom-Hypalon-EN-US.pdf>
117. LDPE Soft, flexible, lightweight plastic material that is easy to fabricate and form. W: curbellplastics [Internet]. [cytowane 7 luty 2024]. Pobrano: <https://www.curbellplastics.com/materials/plastics/ldpe/>
118. Low density polyethylene (LDPE) manufacturing process. W: Polychem USA [Internet]. 15 listopad 2017 [cytowane 7 luty 2024]. Pobrano: <https://polychem-usa.com/low-density-polyethylene-manufacturing/>
119. Low density polyethylene (LDPE). W: Xometry [Internet]. 29 kwiecień 2022 [cytowane 7 luty 2024]. Pobrano: <https://www.xometry.com/resources/materials/low-density-polyethylene-ldpe/>
120. High density polyethylene report. W: Scribd [Internet]. [cytowane 3 marzec 2023]. Pobrano: <https://www.scribd.com/document/480967490/High-density-polyethylene-report>
121. Plastech. HDPE PE HD, polietylen dużej gęstości - Plastechopedia - Wortal Plastech. [cytowane 3 marzec 2023]. Pobrano: <https://www.plastech.pl/plastechopedia/HDPE-PE-HD-98>
122. Askeland DR, Wright WJ. The science and engineering of materials. South Melbourne, VIC, Australia: Cengage Learning; 2015.
123. HDPE vs. LDPE. [cytowane 3 marzec 2023]. Pobrano: <https://www.makeitfrom.com/compare/High-Density-Polyethylene-HDPE/Low-Density-Polyethylene-LDPE>
124. Kompendium tworzyw - HDPE i LDPE - czym się różnią? W: opakowanianawynos.pl [Internet]. 20 styczeń 2021 [cytowane 3 marzec 2023]. Pobrano: <https://www.opakowanianawynos.pl/blog/czysty-profesjonalizm/kompendium-tworzyw-hdpe-i-ldpe-czym-sie-roznia>
125. Buza D, Sas W, Szczeciński P. Chemia organiczna: kurs podstawowy. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej; 2006.
126. Właściwości fizykochemiczne i zastosowanie tworzywa PMMA (Polimetakrylanu Metylu). W: PlastPro [Internet]. [cytowane 29 styczeń 2024]. Pobrano: <http://plastpro.pl/oferta/tworzywo-pmma>

127. PMMA. [cytowane 29 styczeń 2024]. Pobrano: <https://www.resinex.pl/rodzaje-polimerow/pmma.html>
128. PMMA. Zastosowanie, właściwości oraz obróbka. [cytowane 29 styczeń 2024]. Pobrano: <https://rokad.pl/pmma-zastosowanie-wlasciwosci-obrobka>
129. Polimetakrylan metylu PMMA: plexi glass. W: BORAL [Internet]. [cytowane 29 styczeń 2024]. Pobrano: <https://www.boral.pl/produkty/plexi-polimetakrylan-metylu/34-plexi-glass-polimetakrylan-metylu-pmma>
130. Bryce DM. Chemical Resistance Chart. [cytowane 29 styczeń 2024]. Pobrano: https://plastictroubleshooter.com/chemical_resist.html
131. Polypropylene vs. Polycarbonate: Material differences and comparisons. W: Xometry [Internet]. 6 styczeń 2023 [cytowane 7 luty 2024]. Pobrano: <https://www.xometry.com/resources/materials/polypropylene-vs-polycarbonate/>
132. Polypropylene vs. Polystyrene: Material differences and comparisons. W: Xometry [Internet]. 6 styczeń 2023 [cytowane 7 luty 2024]. Pobrano: <https://www.xometry.com/resources/materials/polypropylene-vs-polystyrene/>
133. Atkins P, Cząsteczki C. Wydawnictwo naukowe PWN. 2004; 524–525.
134. Plastech. Polistyren. [cytowane 19 luty 2024]. Pobrano: <https://www.plastech.pl/plastechopedia/Polistyren-26>
135. Brzozowska M. Polistyren ekstrudowany w ociepleniu budynku: tańszy niż styropian? Murator.pl; 12 styczeń 2010 [cytowane 19 luty 2024]. Pobrano: <https://murator.com.pl/budowa/elewacja/ocieplenie-budynku-polistyren-ekstrudowany-tansze-styropian-aa-DEJE-eNwU-Ejj3.html?cat=14/>
136. Plastech. Poliaddycja. [cytowane 5 marzec 2024]. Pobrano: <https://www.plastech.pl/plastechopedia/Poliaddycja-287>
137. Gumowe O. EU rubber - Polyether urethane rubber. W: Powerrubber.com [Internet]. 24 maj 2021 [cytowane 5 marzec 2024]. Pobrano: <https://powerrubber.com/en/rubber-compounds/rubber-eu/>
138. PSI Urethanes, Inc. Polyester vs. Polyether: What's the difference? [cytowane 5 marzec 2024]. Pobrano: <https://psiurethanes.com/polyester-vs-polyether-whats-the-difference/>
139. What's the difference between polyester and polyether polyurethanes? Gallagher Corporation; 2 październik 2017 [cytowane 5 marzec 2024]. Pobrano: <https://gallaghercorp.com/polyester-and-polyether/>
140. Panszin JA., Makiewicz S.G., Dunajewska C.S. Tworzywa fluorowe. Warszawa: WNT; 1982.
141. Encyclopedia of polymer science and engineering. New York: Wiley-Interscience; 1987.
142. Szlezyngier W. Tworzywa sztuczne. / T. 1 ; Chemia, technologia wytwarzania, właściwości, przetwórstwo, zastosowanie / Włodzimierz Szlezyngier. Rzeszów: Wydawnictwo Politechniki Rzeszowskiej; 1998.
143. Florjańczyk Z, Penczek S. Chemia polimerów : praca zbiorowa. T. 2, Podstawowe polimery syntetyczne i ich zastosowania. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej; 1997. Pobrano: <https://www.worldcat.org/title/chemia-polimerow-praca-zbiorowa-t-2-podstawowe-polimery-syntetyczne-i-ich-zastosowania/oclc/749316161>
144. Olabisi O. Handbook of thermoplastics. New York, NY: Marcel Dekker; 1997.
145. Schué F. Modern fluoropolymers Edited by John Scheirs John Wiley & Sons, Chichester, 1997 637 pp, price: ??145.00 ISBN 0-471-97055-7. Polym Int. 1999;48: 426–426. doi:10.1002/(sici)1097-0126(199905)48:5<426::aid-pi162>3.0.co;2-2
146. Hougham G. Fluoropolymers 1. Hougham GG, Cassidy PE, Johns K, Davidson T, redaktorzy. New York, NY: Kluwer Academic/Plenum; 1999. doi:10.1007/b114559
147. Hougham GG. Fluoropolymers 2. Hougham GG, Cassidy PE, Johns K, Davidson T, redaktorzy. New York, NY: Kluwer Academic/Plenum; 2002.
148. Hiorns R. Polymer handbook, 4th edn, edited by J brandup, EH immergut and EA grulke, associate editors A Abe and DR Bloch, John Wiley and sons, New York, 1999, pp 2250, price £210 ISBN 0-471-16628-6. Polym Int. 2000;49: 807–807. doi:10.1002/1097-0126(200007)49:7<807::aid-pi436>3.3.co;2-t

149. Hans Rytger K, Nuyken O, Swift G. Handbook of Polymer Synthesis. New York: Marcel Dekker; 2005.
150. Drobny J. Fluoroplastics. Shrewsbury, England: Rapra Technology; 2006.
151. Drobny J. Technology of Fluoropolymers. London, England: CRC Press; 2008.
152. Peters EN. Plastics: Thermoplastics, Thermosets, and Elastomers. Handbook of Materials Selection. New York: John Wiley & Sons, Inc.; 2007. s. 335–355. doi:10.1002/9780470172551.ch11
153. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Praca zbiorowa: Chemia Małgorzata Wiśniewska (red). 2001.
154. Benj Edwards Vintage Computing and Gaming | Archive » Why Super Nintendos Lose Their Color: Plastic Discoloration in Classic Machines. Vintagecomputing. 2007;12.
155. Wężę ciśnieniowe, Tygon® S3™ B-44-4X I.B. W: VWR [Internet]. [cytowane 4 marzec 2024]. Pobrano: <https://pl.vwr.com/store/product/577469/przewody-cisnieniowe-tygon-s3tm-b-44-4x-i-b>
156. Tygon S3™ B-44-4X. [cytowane 4 marzec 2024]. Pobrano: <https://www.ics.saint-gobain.com/tygon-tubing-accessories/thermoplastic-elastomer-flexible-tubing/tygon-s3-b-44-4x>
157. Tygon® B-44-4X I.B. Pressure Tubing. [cytowane 4 marzec 2024]. Pobrano: <https://www.professionalplastics.com/TYGONB44-4X-IB>
158. Saint-Gobain Performance Plastics. TYGON. Application specific tubing. Pobrano: <https://www.pooleyinc.com/wp-content/uploads/tygon.pdf>
159. Ataei S, Khorasani SN, Neisiany RE. Biofriendly vegetable oil healing agents used for developing self-healing coatings: A review. Prog Org Coat. 2019;129: 77–95. doi:10.1016/j.porgcoat.2019.01.012
160. Żywice alkidowe w wyrobach lakierowych. [cytowane 17 czerwiec 2024]. Pobrano: <https://www.lakiernictwo.net/dzial/142-aktualnosci-i-przeglad-rynku/artykuly/zywice-alkidowe-w-wyrobach-lakierowych,85>
161. synthesis and characterization of palm oil based air-drying alkyd resin for surface coating February 2013 Journal of Engineering and Applied.
162. What properties do alkyd resins need to be tested? W: Lonroy Equipment [Internet]. 11 sierpień 2023 [cytowane 17 czerwiec 2024]. Pobrano: <https://www.lonroy.com/what-properties-do-alkyd-resins-need-to-be-tested/>
163. Mcube. Why use alkyd resins in the manufacturing sector ? 27 październik 2023 [cytowane 17 czerwiec 2024]. Pobrano: <https://industry.groupeberkem.com/en/news/alkyd-resins-manufacturing/>
164. Hidalgo-Ruz V, Gutow L, Thompson RC, Thiel M. Microplastics in the marine environment: a review of the methods used for identification and quantification. Environ Sci Technol. 2012;46: 3060–3075. doi:10.1021/es2031505
165. Calcutt J, Nussbaumer A, Robert S. Guidelines for sampling microplastics on sandy beaches. Technical Report. A Rocha International, London. URL: www.arocha.org; 2018.
166. Lex WBO. Guideline for Monitoring Marine Litter on the Beaches in the OSPAR Maritime Area. OSPAR Commission London, UK; 2010. doi:10.25607/OBP-968
167. Gago J, Filgueiras A, Pedrotti ML, Caetano M, Frias J. Standardised protocol for monitoring microplastics in seawater. Deliverable 4.1. JPI-Oceans BASEMAN Project; 2019. doi:10.25607/OBP-605
168. Lusher AL, Welden NA, Sobral P, Cole M. Sampling, isolating and identifying microplastics ingested by fish and invertebrates. Anal Methods. 2017;9: 1346–1360.
169. EPA's Microplastic Beach Protocol - A Community Science Protocol for Sampling Microplastic Pollution. United States Environmental Protection Agency ; 2021 wrz.
170. Razeghi N, Hamidian AH, Wu C, Zhang Y, Yang M. Microplastic sampling techniques in freshwaters and sediments: a review. Environ Chem Lett. 2021;19: 4225–4252. doi:10.1007/s10311-021-01227-6
171. Zurcher N. Small plastic debris on beaches in Hong Kong: an initial investigation. Thesis for the degree of. 2009.

172. Guidance on Monitoring of Marine Litter in European Seas. a guidance document within the Common Implementation Strategy for the Marine Strategy Framework Directive.
173. Charity no. 1136041 (England and Wales) Company No. Our Story. W: A Rocha International [Internet]. 3 marzec 2021 [cytowane 28 listopad 2022]. Pobrano: <https://arocha.org/>
174. Majewski KA. Microscopic method to verify the efficiency of removal of organic pollutants from microplastic surfaces. *Civ Environ Eng Rep.* 2023;33: 90–98. doi:10.59440/ceer-2023-0006
175. De Frond H, Rubinovitz R, Rochman CM. MATR-FTIR spectral libraries of plastic particles (FLOPP and FLOPP-e) for the analysis of microplastics. *Anal Chem.* 2021;93: 15878–15885. doi:10.1021/acs.analchem.1c02549
176. Reineccius J, Heck M, Waniek JJ. Microplastic Particles and Fibers in Seasonal Ice of the Northern Baltic Sea. *Toxics.* 2024;12: 542. doi:10.3390/toxics12080542
177. Dereszewska A, Krasowska K, Popek M. Microplastics in Harbour Seawaters: A Case Study in the Port of Gdynia, Baltic Sea. *Sustain Sci Pract Policy.* 2023;15: 6678. doi:10.3390/su15086678
178. Barbeş L, Rădulescu C, Stihl C. ATR-FTIR spectrometry characterisation of polymeric materials. *Romanian Reports in Physics.* 2014;66: 765–777.
179. Celina M, Ottesen DK, Gillen KT, Clough RL. FTIR emission spectroscopy applied to polymer degradation. *Polymer degradation and stability.* 1997;58: 15–31.
180. Farrukh M. Advanced aspects of spectroscopy. *BoD-Books on Demand;* 2012.
181. Dahmani R, Gupta N. Spectroscopic analysis of automotive engine oil. W: Jensen JO, Spellicy RL, redaktorzy. *Instrumentation for Air Pollution and Global Atmospheric Monitoring.* SPIE; 2002. doi:10.1117/12.455157
182. Paraskevaidi M, Martin-Hirsch PL, Martin FL. ATR-FTIR Spectroscopy Tools for Medical Diagnosis and Disease Investigation. W: Kumar C, redaktor. *Nanotechnology Characterization Tools for Biosensing and Medical Diagnosis.* Berlin, Heidelberg: Springer; 2018.
183. Kesner F, Dominak I, Linhartova M. Kidney stone analysis by Nicolet FTIR spectrometer. *Chemical Papers-Slovak Academy Of Sciences.* 2000;54: 320–323.
184. Praca zbiorowa pod redakcją Kamili Małek: *Spektroskopia oscylacyjna od teorii do praktyki.* PWN, Wydanie I. Warszawa. 2016.
185. Silva D, Wiebeck DJ. Using PLS, iPLS and siPLS linear regressions to determine the composition of LDPE/HDPE blends: a comparison between confocal Raman and ATR-FTIR spectroscopies. *Vibrational Spectroscopy.* 2017;92: 259–266.
186. Smith BC. The Infrared Spectra of Polymers II: Polyethylene. *Polyethylene Spectroscopy.* 2021;36: 24–29.
187. Prajapati S, Beal M, Maley J, Brinkmann M. Qualitative and quantitative analysis of microplastics and microfiber contamination in effluents of the City of Saskatoon wastewater treatment plant.
188. Hazle MA, Mehicic M, Gardiner DJ, Graves PR. Practical Raman spectroscopy. *Vib Spectrosc.* 1990;1: 104. doi:10.1016/0924-2031(90)80015-v
189. Stachowiak GW, Batchelor AW. *Engineering Tribology. Abrasive, erosive and cavitation wear.* Elsevier; 2005.
190. Vaughn N, Kononov A, Moore B, Rougier E, Viswanathan H, Hunter A. Statistically informed upscaling of damage evolution in brittle materials. *Theor Appl Fract Mech.* 2019;102: 210–221. doi:10.1016/j.tafmec.2019.04.012
191. Qian H, Chen M, Qi Z, Teng Q, Qi H, Zhang L, i in. Review on research and development of abrasive scratching of hard brittle materials and its underlying mechanisms. *Crystals (Basel).* 2023;13: 428. doi:10.3390/cryst13030428
192. Papanikolaou S, Shanthraj P, Thibault J, Woodward C, Roters F. Brittle to quasi-brittle transition and crack initiation precursors in crystals with structural Inhomogeneities. *Mater Theory.* 2019;3. doi:10.1186/s41313-019-0017-0
193. Kuhn C, Schlüter A, Müller R. On degradation functions in phase field fracture models. *Comput Mater Sci.* 2015;108: 374–384. doi:10.1016/j.commatsci.2015.05.034

194. LongJohn T, Morgan JK, Dugan B. Microstructural evolution of porosity and stress during the formation of brittle shear fractures: A discrete element model study. *J Geophys Res Solid Earth*. 2018;123: 2228–2245. doi:10.1002/2017jb014842
195. Chai G. A study on fatigue damage and crack initiation in austenitic steel matrix during very high cycle fatigue. *Int J Fatigue*. 2024;179: 108033. doi:10.1016/j.ijfatigue.2023.108033
196. Drewniak J, Hojdys L. Determination of distributions of fatigue crack length by Monte Carlo method. *Mechanik*. 2017; 568–570. doi:10.17814/mechanik.2017.7.75
197. Kłysz S. Publisher: Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych. Lewitowicz J, redaktor. *Podstawy mechaniki pękania Podstawy eksploatacji statków p o-wietrznych*. 2007;4: 495–510.
198. Wytrzymałość materiałów. W: eia.pg.edu.pl [Internet]. [cytowane 6 styczeń 2024]. Pobrano: <https://eia.pg.edu.pl/documents/184160/35666145/Mechanika%20skrypt%20cz.%202>
199. Jinaga R, Kolekar S, Jagadeesha T. *Tribology of Intelligent Magnetorheological Materials. Tribology in Materials and Applications*. Cham: Springer International Publishing; 2020. s. 123–156. doi:10.1007/978-3-030-47451-5_7
200. Zużycie trybologiczne. W: www.tribologia.eu [Internet]. [cytowane 8 styczeń 2024]. Pobrano: <https://www.tribologia.eu/ptt/try/tr08.htm>
201. Wieleba W. The mechanism of tribological wear of thermoplastic materials. *Arch Civ Mech Eng*. 2007;7: 185–199. doi:10.1016/s1644-9665(12)60236-2
202. Czichos H. Preface. *Tribology: A systems approach to the science and technology of friction, lubrication and wear*. Elsevier; 1978. s. v–vii. doi:10.1016/s0167-8922(09)70003-3
203. Kazemi SR. Plastic deformation due to high-velocity impact using ordinary state-based peridynamic theory. *Int J Impact Eng*. 2020;137: 103470. doi:10.1016/j.ijimpeng.2019.103470
204. odkształcenie plastyczne. W: Encyklopedia PWN [Internet]. [cytowane 8 styczeń 2024]. Pobrano: <https://encyklopedia.pwn.pl/encyklopedia/odkształcenie>
205. Czerni S. *Leksykon naukowo-techniczny*. 1984.
206. Mahadeshwara MR. Erosive wear – about tribology. [cytowane 8 styczeń 2024]. Pobrano: <https://www.tribonet.org/wiki/erosive-wear/>
207. Bogdanovich PN, Tkachuk DV. *Polymer Fatigue. Encyclopedia of Tribology*. Boston, MA: Springer US; 2013. s. 2578–2585. doi:10.1007/978-0-387-92897-5_818
208. Xiang P, Zhang T, Wu Q, Li Q. Systematic review of degradation processes for microplastics: Progress and prospects. *Sustainability*. 2023;15: 12698. doi:10.3390/su151712698
209. Simmons J, Etumnu D, Omanga M, Pham H, Pham P, Tovar C, i in. A method for sampling microplastics and extremophiles in the stratosphere. *AIAA SCITECH 2022 Forum*. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics; 2022. doi:10.2514/6.2022-2621
210. Liro M, Van Emmerik T, Wyżga B, Liro J, Mikuś P. Macroplastic storage and removal in rivers. *Water*. 2020;12: 1–14.
211. Rzeki i mikroplastik. „Najbardziej podatne na fragmentację będą obiekty o bardzo dużej powierzchni i małej masie”. W: TVN Meteo [Internet]. 8 październik 2023 [cytowane 12 styczeń 2024]. Pobrano: <https://tvn24.pl/tvnmeteo/nauka/rzeki-i-mikroplastik-najbardziej-podatne-na-fragmentacje-beda-obiekty-o-bardzo-duzej-powierzchni-i-malej-masie-st7381645>
212. Pianki modyfikowane – Polting Foam Sp. z o.o. [cytowane 12 styczeń 2024]. Pobrano: <https://foam.polting.com.pl/materialy/pianki-modyfikowane/>
213. Hu L, Fu J, Zheng P, Dai M, Zeng G, Pan X. Accumulation of microplastics in tadpoles from different functional zones in Hangzhou Great Bay Area, China: Relation to growth stage and feeding habits. *J Hazard Mater*. 2022;424: 127665. doi:10.1016/j.jhazmat.2021.127665
214. Cai Z, Li M, Zhu Z, Wang X, Huang Y, Li T, i in. Biological degradation of plastics and microplastics: A recent perspective on associated mechanisms and influencing factors. *Microorganisms*. 2023;11: 1661. doi:10.3390/microorganisms11071661

215. Lozano YM, Gordillo-Rocha H, Waldman WR, Rillig MC. Photodegradation modifies microplastic effects on soil properties and plant performance. *J Appl Ecol*. 2024;61: 13–24. doi:10.1111/1365-2664.14514
216. Zhao S, Liu L, Li C, Zheng H, Luo Y, Pang L, i in. Photodegradation of biobased polymer blends in seawater: A major source of microplastics in the marine environment. *Front Mar Sci*. 2022;9. doi:10.3389/fmars.2022.1046179
217. Kinyua E, Nyakairu G, Tebandeke E, Odume N. Photocatalytic degradation of microplastics: Parameters affecting degradation. *Adv Environ Eng Res*. 2023;04: 1–21. doi:10.21926/aer.2303039
218. Dacewicz E, University of Agriculture in Krakow, Bergel T, Łobos-Moysa E, Moraczewska-Majkut K, Nocoń W, i in. Mikroplastik i mezoplastik w zastoiskach wód Wisły na obszarach silnie zurbanizowanych powiatu krakowskiego – badania wstępne. *Acta Sci Pol Form Circumiectus*. 2021;3/4: 5–17. doi:10.15576/asp.fc/2021.20.3/4.5
219. Sutkar PR, Gadewar RD, Dhulap VP. Recent trends in degradation of microplastics in the environment: A state-of-the-art review. *Journal of Hazardous Materials Advances*. 2023;11: 100343. doi:10.1016/j.hazadv.2023.100343
220. Hocker S, Rhudy AK, Ginsburg G, Kranbuehl DE. Polyamide hydrolysis accelerated by small weak organic acids. *Polymer (Guildf)*. 2014;55: 5057–5064. doi:10.1016/j.polymer.2014.08.010
221. Wadsö L, Karlsson OJ. Alkaline hydrolysis of polymers with ester groups studied by isothermal calorimetry. *Polym Degrad Stab*. 2013;98: 73–78. doi:10.1016/j.polymdegradstab.2012.10.031
222. Rudin A, Choi P. Mechanical properties of polymer solids and liquids. *The Elements of Polymer Science & Engineering*. Elsevier; 2013. s. 149–229. doi:10.1016/b978-0-12-382178-2.00004-3
223. Kamweru PK, Ndiritu FG, Kinyanjui TK, Muthui ZW, Ngumbu RG, Odhiambo PM. Study of temperature and UV wavelength range effects on degradation of photo-irradiated polyethylene films using DMA. *J Macromol Sci Phys*. 2011;50: 1338–1349. doi:10.1080/00222348.2010.516172
224. Andradý AL, Hamid HS, Torikai A. Effects of climate change and UV-B on materials. *Photochem Photobiol Sci*. 2003;2: 68–72. doi:10.1039/b211085g
225. Sun J, Zheng H, Xiang H, Fan J, Jiang H. The surface degradation and release of microplastics from plastic films studied by UV radiation and mechanical abrasion. *Sci Total Environ*. 2022;838: 156369. doi:10.1016/j.scitotenv.2022.156369
226. Klein S, Dimzon IK, Eubeler J, Knepper TP. Analysis, occurrence, and degradation of microplastics in the aqueous environment. *The Handbook of Environmental Chemistry*. Cham: Springer International Publishing; 2018. s. 51–67. doi:10.1007/978-3-319-61615-5_3
227. Manzoor S, Naqash N, Rashid G, Singh R. Plastic Material Degradation and Formation of Microplastic in the Environment: A Review. *Materials Today: Proceedings*. 2022;56: 3254–3260. doi:10.1016/j.matpr.2021.09.379
228. Kozon T. Walidacja danych w programowaniu: metody, narzędzia i potencjalne pułapki. Boringowl; 22 wrzesień 2023 [cytowane 21 wrzesień 2024]. Pobrano: <https://boringowl.io/blog/jak-poprawnie-przeprowadzic-walidacje-danych>
229. Indeed Editorial Team. What Is Boundary Testing? (Plus How It Works and Examples). W: indeed [Internet]. 16 sierpień 2024 [cytowane 21 wrzesień 2024]. Pobrano: <https://www.indeed.com/career-advice/career-development/what-is-boundary-testing>
230. Dimante-Deimantovica I, Bebrite A, Skudra M, Retike I, Viška M, Bikše J, i in. The baseline for micro- and mesoplastic pollution in open Baltic Sea and Gulf of Riga beach. *Front Mar Sci*. 2023;10. doi:10.3389/fmars.2023.1251068
231. Kooi M, Koelmans AA. Simplifying microplastic via continuous probability distributions for size, shape, and density. *Environ Sci Technol Lett*. 2019;6: 551–557. doi:10.1021/acs.estlett.9b00379

232. Vermeiren P, Muñoz CC, Ikejima K. Sources and sinks of plastic debris in estuaries: A conceptual model integrating biological, physical and chemical distribution mechanisms. *Mar Pollut Bull.* 2016;113: 7–16. doi:10.1016/j.marpolbul.2016.10.002
233. Geyer R, Jambeck JR, Law KL. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Sci Adv.* 2017;3. doi:10.1126/sciadv.1700782
234. Kooi M, Besseling E, Kroeze C, van Wezel AP, Koelmans AA. Modeling the fate and transport of plastic debris in freshwaters: Review and guidance. *The Handbook of Environmental Chemistry.* Cham: Springer International Publishing; 2018. s. 125–152. doi:10.1007/978-3-319-61615-5_7
235. Schröder K, Kossel E, Lenz M. Microplastic abundance in beach sediments of the Kiel Fjord, Western Baltic Sea. *Environ Sci Pollut Res Int.* 2021;28: 26515–26528. doi:10.1007/s11356-020-12220-x
236. She J, Buhhalko N, Lind K, Mishra A, Kikas V, Costa E, i in. Uncertainty and consistency assessment in multiple microplastic observation datasets in the Baltic Sea. *Front Mar Sci.* 2022;9. doi:10.3389/fmars.2022.886357
237. FanpLESStic-sea project. “FanpLESStic-sea. Review of existing policies and research related to microplastics – Summary for Policy Makers. ”. FanpLESStic-sea; 2019.
238. Mikroplastiki w wodach przybrzeżnych Bałtyku południowego. [cytowane 21 wrzesień 2024]. Pobrano: <https://mir.gdynia.pl/mikroplastiki-w-wodach-przybrzeżnych-baltyku-poludniowego/>
239. Artham T, Doble M. Biodegradation of aliphatic and aromatic polycarbonates. *Macromol Biosci.* 2008;8: 14–24. doi:10.1002/mabi.200700106
240. Restrepo-Flórez J-M, Bassi A, Thompson MR. Microbial degradation and deterioration of polyethylene – A review. *Int Biodeterior Biodegradation.* 2014;88: 83–90. doi:10.1016/j.ibiod.2013.12.014
241. Yokaryo H, Nakayama A, Kawasaki N, Yamano N, Ida S, Tokiwa Y. Synthesis and biodegradation of atactic polymer based on 3-hydroxybutanoic acid. *Chem Lett.* 2024;53. doi:10.1093/chemle/upae038
242. Kliem S, Kreutzbruck M, Bonten C. Review on the Biological Degradation of Polymers in Various Environments. *Materials .* 2020;13: 4586. doi:10.3390/ma13204586
243. Cao Y, Bian J, Han Y, Liu J, Ma Y, Feng W, i in. Progress and prospects of microplastic biodegradation processes and mechanisms: A bibliometric analysis. *Toxics.* 2024;12: 463. doi:10.3390/toxics12070463
244. Andrady AL, Hamid SH, Hu X, Torikai A. Effects of increased solar ultraviolet radiation on materials. *J Photochem Photobiol B.* 1998;46: 96–103. doi:10.1016/s1011-1344(98)00188-2
245. Gewert B, Plassmann MM, MacLeod M. Pathways for degradation of plastic polymers floating in the marine environment. *Environ Sci Process Impacts.* 2015;17: 1513–1521. doi:10.1039/c5em00207a
246. Andrady AL, Pegram JE, Song Y. Studies on enhanced degradable plastics. II. Weathering of enhanced photodegradable polyethylenes under marine and freshwater floating exposure. *J Environ Polym Degrad.* 1993;1: 117–126. doi:10.1007/bf01418205
247. Song YK, Hong SH, Jang M, Han GM, Jung SW, Shim WJ. Combined Effects of UV Exposure Duration and Mechanical Abrasion on Microplastic Fragmentation by Polymer Type. *Environ Sci Technol.* 2017;51: 4368–4376. doi:10.1021/acs.est.6b06155
248. Devi K, Singh AD, Dhiman S, Kour J, Bhardwaj T, Sharma N, i in. Current studies on the degradation of microplastics in the terrestrial and aquatic ecosystem. *Environ Sci Pollut Res Int.* 2023;30: 102010–102026. doi:10.1007/s11356-023-29640-0
249. Rummel CD, Löder MGJ, Fricke NF, Lang T, Griebeler E-M, Janke M, i in. Plastic ingestion by pelagic and demersal fish from the North Sea and Baltic Sea. *Mar Pollut Bull.* 2016;102: 134–141. doi:10.1016/j.marpolbul.2015.11.043
250. Zettler ER, Mincer TJ, Amaral-Zettler LA. Life in the “plastisphere”: Microbial communities on plastic marine debris. *Environ Sci Technol.* 2013;47: 7137–7146. doi:10.1021/es401288x

251. Thermal properties and stability of weathered microplastics Thermal gravimetric analysis (TGA) provides an accurate measurement of changes in the thermal properties of microplastics during the degradation process. Here, TGA analysis revealed a slight decrease in the onset of thermal decomposition for 12-monthaged ePS.
252. Corcoran PL. Degradation of microplastics in the environment. Handbook of Microplastics in the Environment. Cham: Springer International Publishing; 2021. s. 1–12. doi:10.1007/978-3-030-10618-8_10-1
253. Meides N, Mauel A, Menzel T, Altstädt V, Ruckdäschel H, Senker J, i in. Quantifying the fragmentation of polypropylene upon exposure to accelerated weathering. Microplast nanoplast. 2022;2. doi:10.1186/s43591-022-00042-2
254. Maddison C, Sathish CI, Lakshmi D, Wayne O, Palanisami T. An advanced analytical approach to assess the long-term degradation of microplastics in the marine environment. Npj Mater Degrad. 2023;7. doi:10.1038/s41529-023-00377-y
255. Ali SS, Elsamahy T, Al-Tohamy R, Sun J. A critical review of microplastics in aquatic ecosystems: Degradation mechanisms and removing strategies. Environ Sci Ecotechnol. 2024;21: 100427. doi:10.1016/j.ese.2024.100427

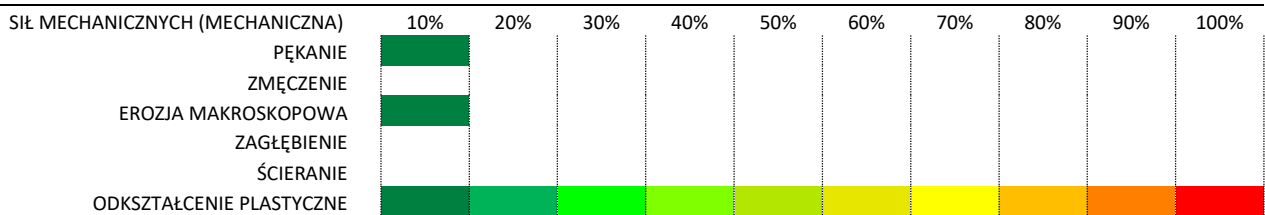
Załącznik nr 1

Karty oceny próbek środowiskowych

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
FOTOCHEMICZNA	ŚREDNIA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	WYSOKA
TERMICZNA	ŚREDNIA
UTLENIAJĄCA	WYSOKA
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ

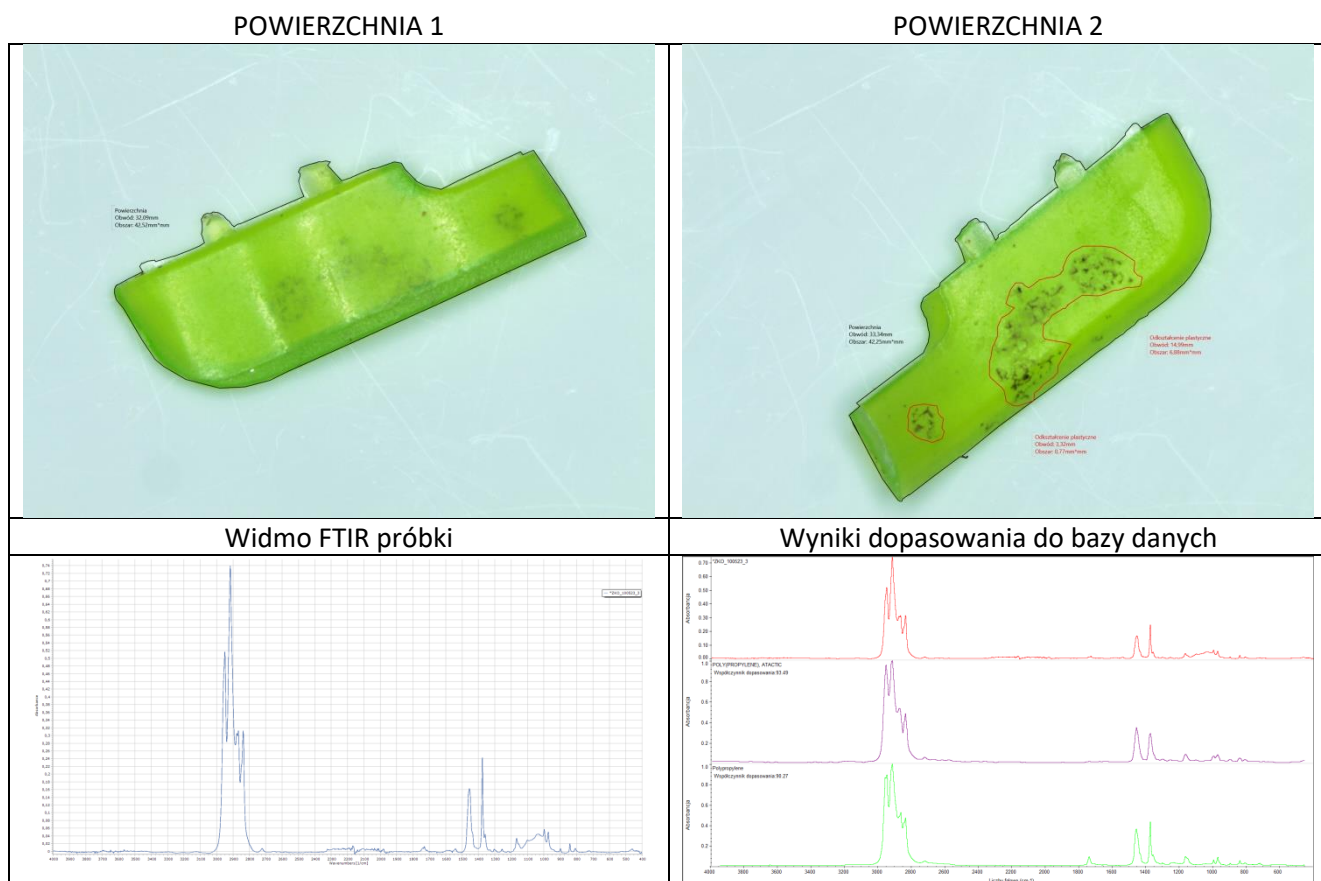
**W1. FORMA DEGRADACJI
ZMIERZONA**



W2. STOPIEŃ DEGRADACJI Znacznie uszkodzony (poniżej 50% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ ŚREDNIA DO WYSOKIEJ

NR PRÓBKİ:	ZKG_100523_3
MIEJSCOWOŚĆ	Gąski
KSZTAŁT I STRUKTURA	FRAGMENT (fragment FR)
KOLOR	Zielony (Green GN)
NASYCENIE KOLORU	Słaby
IDENTYFIKACJA PRÓBKİ:	POLY(PROPYLENE), ATACTIC
BAZA DANYCH:	Humel Polymer Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	93,49
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	1-25



Pomiary [mm²]

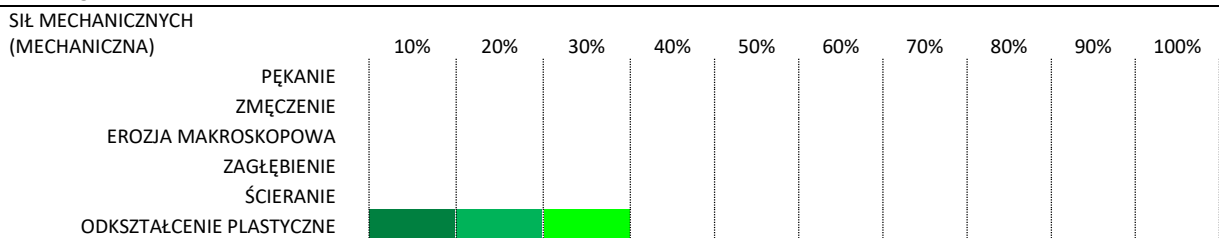
POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	42,52	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	42,25
PĘKANIE	-	PĘKANIE	-
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	-	EROZJA MAKROSKOPOWA	-
ZAGŁĘBIENIE	-	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	-
ODKSZTAŁENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁENIE PLASTYCZNE	18,31

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
FOTOCHEMICZNA	ŚREDNIA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	ŚREDNIA
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ

W1. FORMA DEGRADACJI

ZMIERZONA



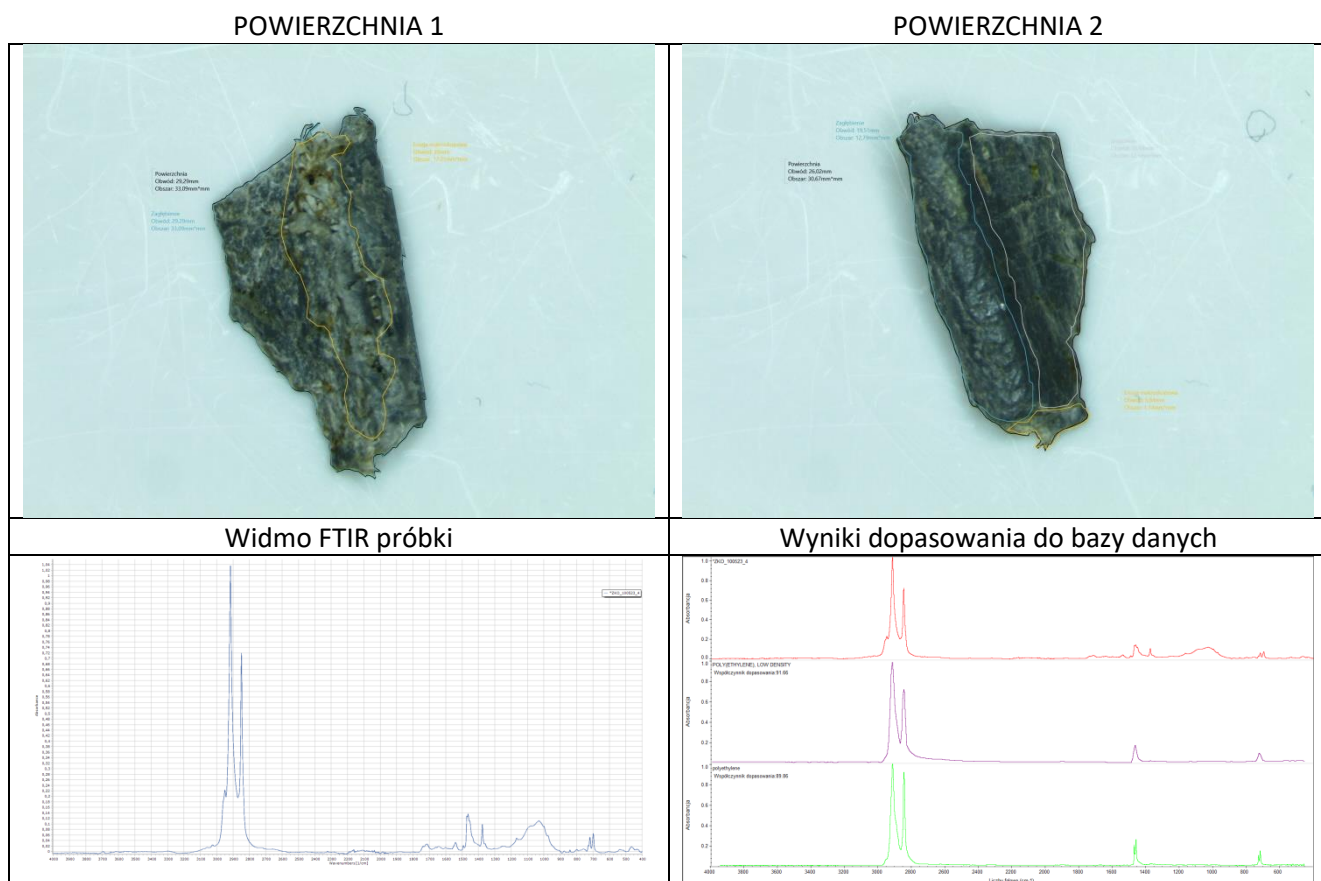
W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

Umiarkowanie uszkodzony (od 50% do 90% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

ŚREDNIA DO WYSOKIEJ

NR PRÓBKİ:	ZKG_100523_4
MIEJSCOWOŚĆ	Gąski
KSZTAŁT I STRUKTURA	FRAGMENT (fragment FR)
KOLOR	Szary (Grey GY)
NASYCENIE KOLORU	Słaby
IDENTYFIKACJA PRÓBKİ:	POLY(ETHYLENE), LOW DENSITY
BAZA DANYCH:	Aldrich Condensed Phase Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	91,66
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	1-25



Pomiary [mm²]

POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	33,09	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	30,67
PĘKANIE	-	PĘKANIE	-
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	12,60
EROZJA MAKROSKOPOWA	12,21	EROZJA MAKROSKOPOWA	5,84
ZAGŁĘBIENIE	33,09	ZAGŁĘBIENIE	12,79
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	-
ODKSZTAŁENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁENIE PLASTYCZNE	-

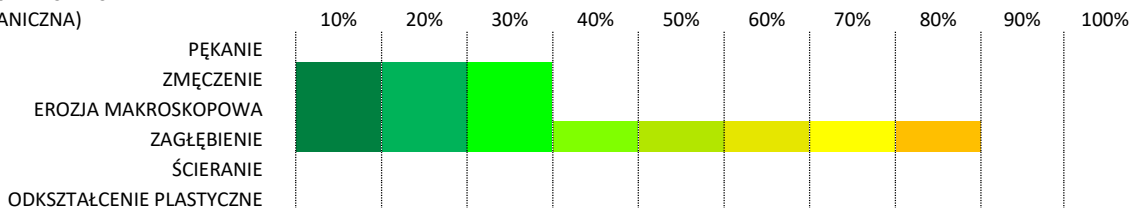
W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
FOTOCHEMICZNA	ŚREDNIA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	ŚREDNIA
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA

W1. FORMA DEGRADACJI

ZMIERZONA

SIŁ MECHANICZNYCH
(MECHANICZNA)



W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

Znacznie uszkodzony (poniżej 50% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

WYSOKA

NR PRÓBK:	ZKG_100523_5
MIEJSCOWOŚĆ	Gąski
KSZTAŁT I STRUKTURA	PIANKA (foam FM)
KOLOR	Żółty (Yellow YL)
NASYCENIE KOLORU	Mocny
IDENTYFIKACJA PRÓBK:	POLY(ETHYLENE), LOW DENSITY
BAZA DANYCH:	Aldrich Condensed Phase Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	94,02
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	Nie

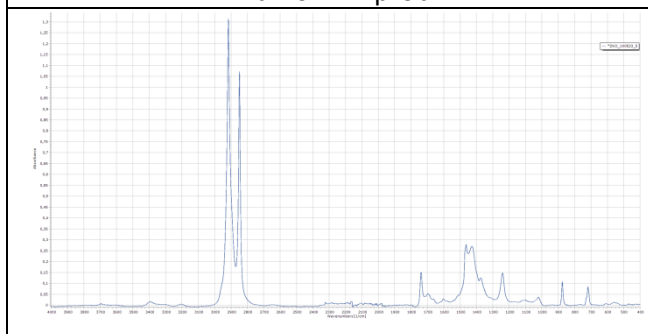
POWIERZCHNIA 1



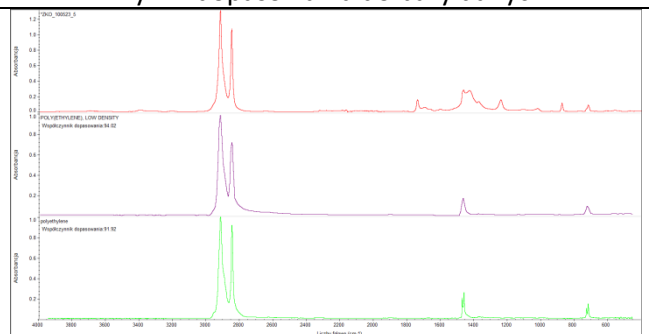
POWIERZCHNIA 2



Widmo FTIR próbki



Wyniki dopasowania do bazy danych



Pomiary [mm²]

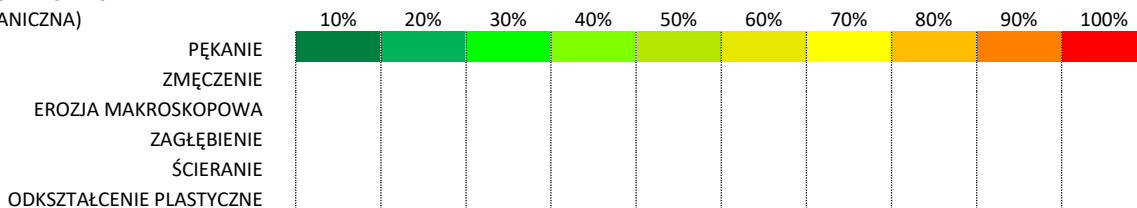
POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	7,79	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	8,59
PĘKANIE	7,79	PĘKANIE	8,59
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	-	EROZJA MAKROSKOPOWA	-
ZAGŁĘBIENIE	-	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	-
ODKSZTAŁENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁENIE PLASTYCZNE	-

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	ŚREDNIA
FOTOCHEMICZNA	ŚREDNIA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	ŚREDNIA
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA

W1. FORMA DEGRADACJI**ZMIERZONA**

SIŁ MECHANICZNYCH
(MECHANICZNA)

**W2. STOPIEŃ DEGRADACJI**

Znacznie uszkodzony (poniżej 50% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

WYSOKA

NR PRÓBK:	ZKG_100523_6
MIEJSCOWOŚĆ	Gąski
KSZTAŁT I STRUKTURA	PIANKA (foam FM)
KOLOR	Żółty (Yellow YL)
NASYCENIE KOLORU	Słaby
IDENTYFIKACJA PRÓBK:	Polyether urethane, PPO+MBI, pyrol
BAZA DANYCH:	Hr Nicolet Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	73,74
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	25-50

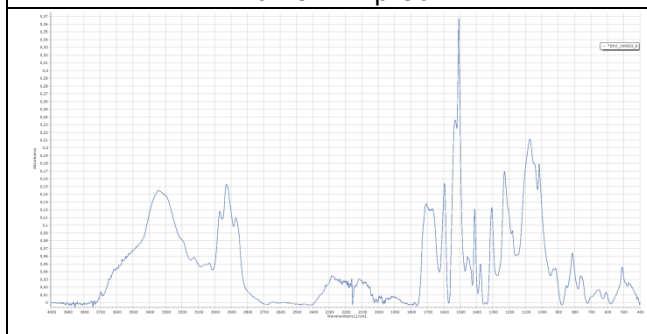
POWIERZCHNIA 1



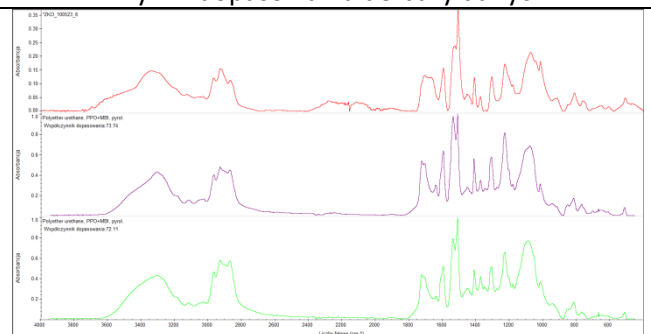
POWIERZCHNIA 2



Widmo FTIR próbki



Wyniki dopasowania do bazy danych



Pomiary [mm²]

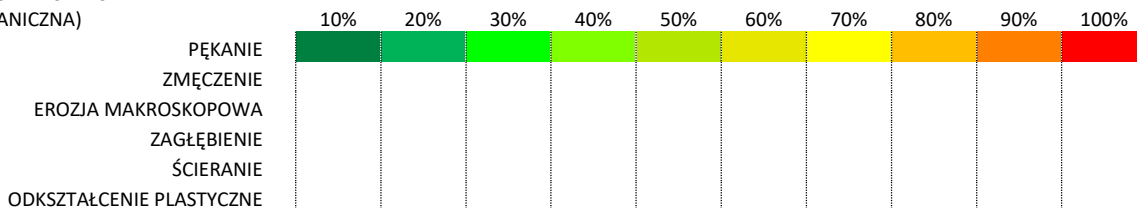
POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	51,37	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	50,64
PĘKANIE	51,37	PĘKANIE	50,64
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	-	EROZJA MAKROSKOPOWA	-
ZAGŁĘBIENIE	-	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	-
ODKSZTAŁENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁENIE PLASTYCZNE	-

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	WYSOKA
FOTOCHEMICZNA	ŚREDNIA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
TERMICZNA	ŚREDNIA
UTLENIAJĄCA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA

W1. FORMA DEGRADACJI**ZMIERZONA**

SIŁ MECHANICZNYCH
(MECHANICZNA)

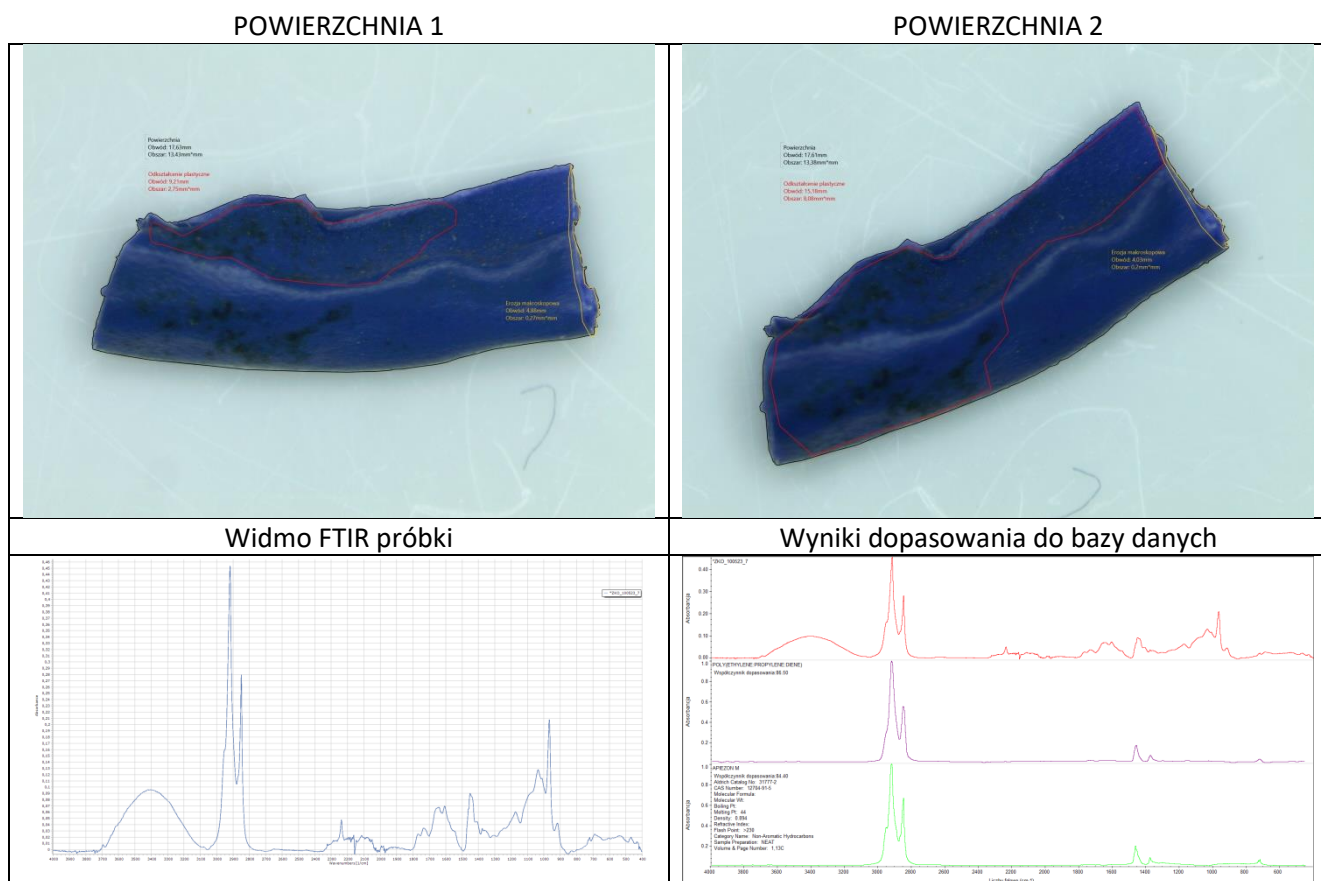
**W2. STOPIEŃ DEGRADACJI**

Znacznie uszkodzony (poniżej 50% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

WYSOKA

NR PRÓBKİ:	ZKG_100523_7
MIEJSCOWOŚĆ	Gąski
KSZTAŁT I STRUKTURA	FRAGMENT (fragment FR)
KOLOR	Fioletowy (Violet VT)
NASYCENIE KOLORU	Głęboki
IDENTYFIKACJA PRÓBKİ:	POLY(ETHYLENE:PROPYLENE:DIENE)
BAZA DANYCH:	Humel Polymer Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	86,5
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	1-25

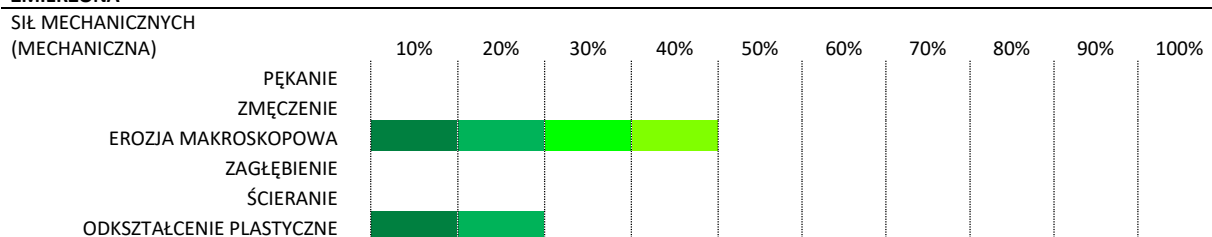


Pomiary [mm²]

POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	13,43	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	13,38
PĘKANIE	-	PĘKANIE	-
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	0,27	EROZJA MAKROSKOPOWA	8,08
ZAGŁĘBIENIE	-	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	-
ODKSZTAŁENIE PLASTYCZNE	2,75	ODKSZTAŁENIE PLASTYCZNE	0,20

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	ŚREDNIA
FOTOCHEMICZNA	NISKA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	ŚREDNIA
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	NISKA

W1. FORMA DEGRADACJI**ZMIERZONA****W2. STOPIEŃ DEGRADACJI**

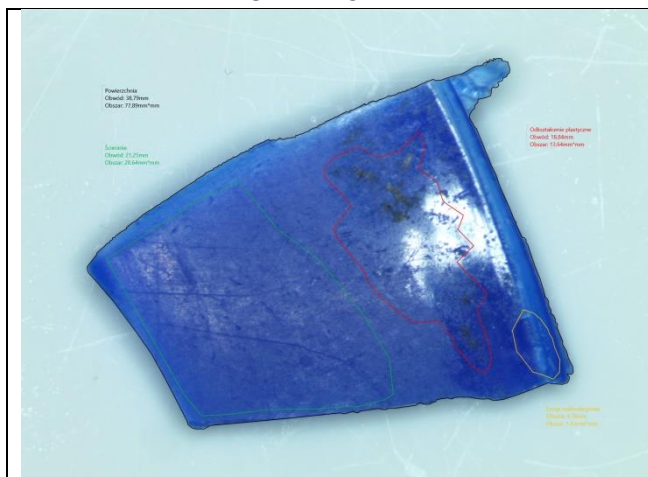
Umiarkowanie uszkodzony (od 50% do 90% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

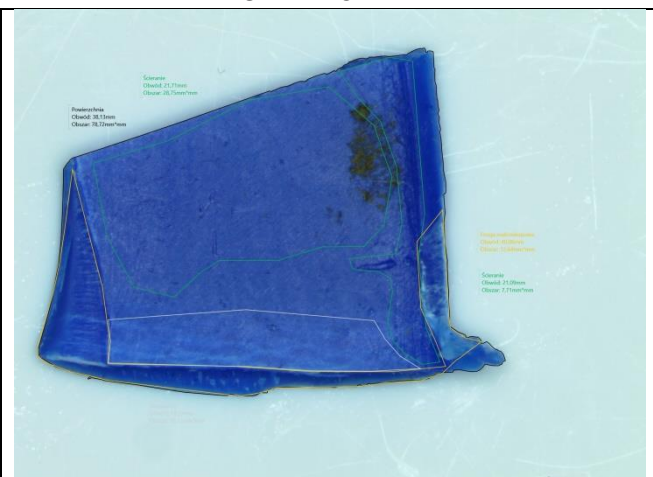
ŚREDNIA

NR PRÓBKİ:	ZKG_100523_8
MIEJSCOWOŚĆ	Gąski
KSZTAŁT I STRUKTURA	FRAGMENT (fragment FR)
KOLOR	Niebieski (Blue BL)
NASYCENIE KOLORU	Głęboki
IDENTYFIKACJA PRÓBKİ:	POLY(PROPYLENE), ATACTIC
BAZA DANYCH:	Humel Polymer Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	93,6
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	1-25

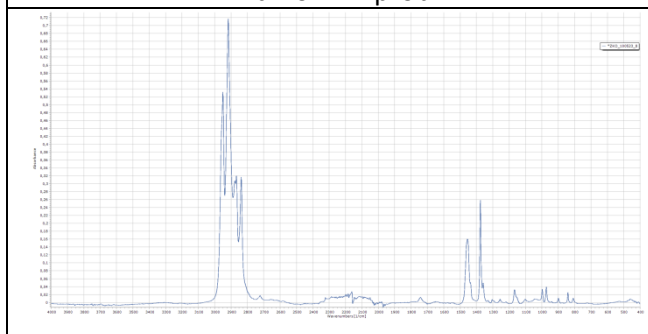
POWIERZCHNIA 1



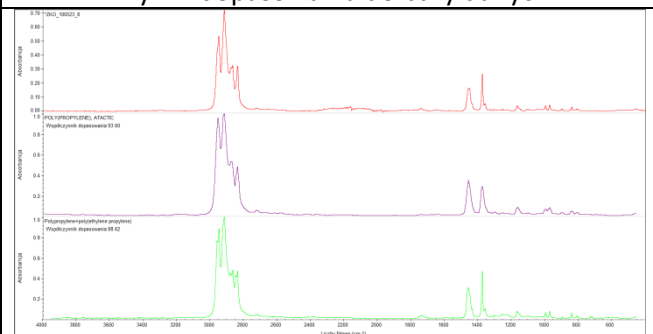
POWIERZCHNIA 2



Widmo FTIR próbki



Wyniki dopasowania do bazy danych



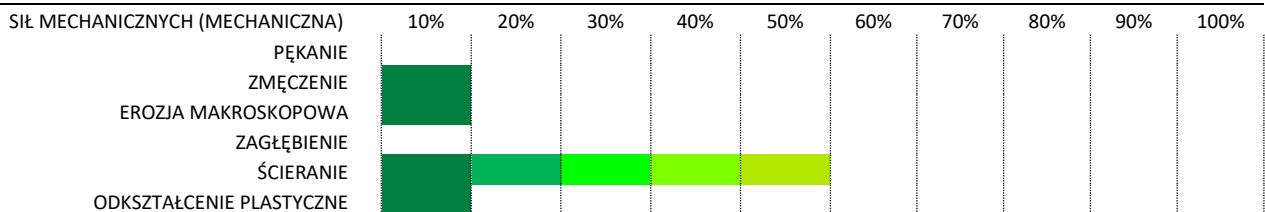
Pomiary [mm²]

POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	77,89	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	78,72
PĘKANIE	-	PĘKANIE	-
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	10,37
EROZJA MAKROSKOPOWA	1,43	EROZJA MAKROSKOPOWA	12,64
ZAGŁĘBIENIE	-	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	28,64	ŚCIERANIE	36,46
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	13,64	ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	ŚREDNIA
FOTOCHEMICZNA	NISKA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	NISKA
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA

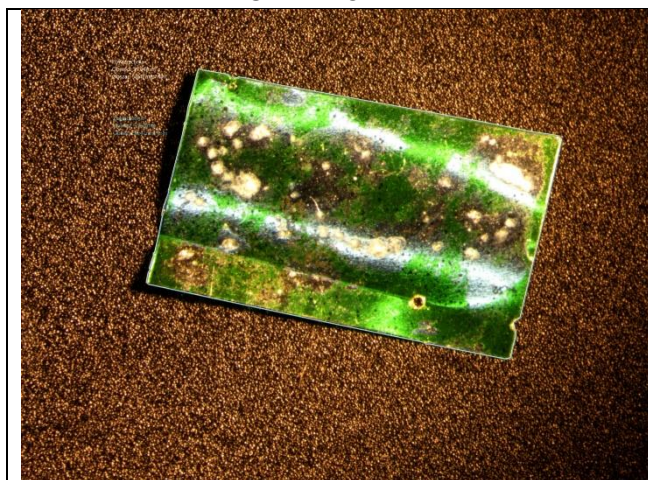
W1. FORMA DEGRADACJI
ZMIERZONA



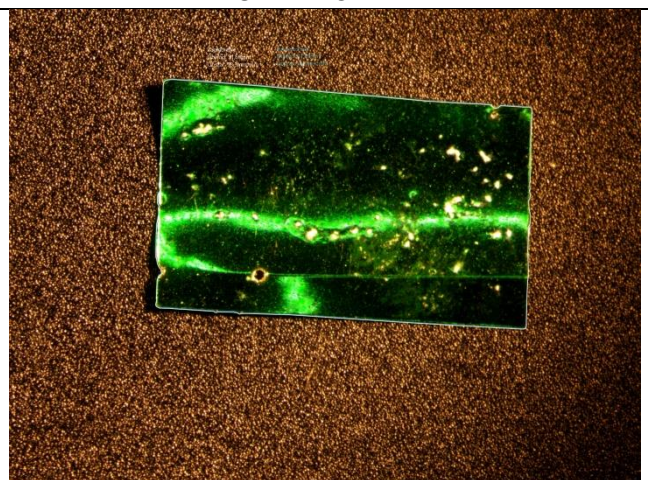
W2. STOPIEŃ DEGRADACJI	Znacznie uszkodzony (poniżej 50% fragmentu jest nieuszkodzony)
W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ	ŚREDNIA

NR PRÓBKİ:	ZKG_100523_9
MIEJSCOWOŚĆ	Gąski
KSZTAŁT I STRUKTURA	FOLIA (film FI)
KOLOR	Metaliczny (Metallic MT)
NASYCENIE KOLORU	Głęboki
IDENTYFIKACJA PRÓBKİ:	polyethylene terephthalate
BAZA DANYCH:	Primpke_FTIR_Microplastics
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	96,8
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	Nie

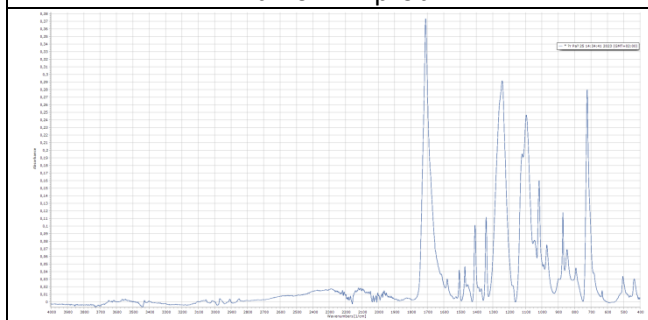
POWIERZCHNIA 1



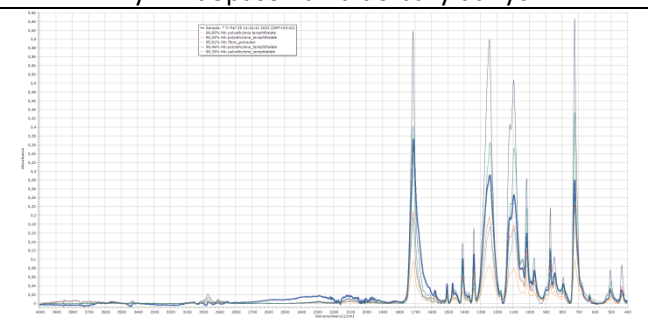
POWIERZCHNIA 2



Widmo FTIR próbki



Wyniki dopasowania do bazy danych

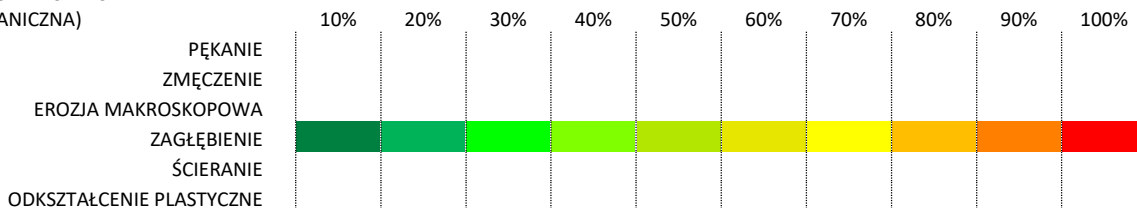


Pomiary [mm²]

POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	58,47	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	58,30
PĘKANIE	-	PĘKANIE	-
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	-	EROZJA MAKROSKOPOWA	-
ZAGŁĘBIENIE	58,47	ZAGŁĘBIENIE	58,30
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	-
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	NISKA
FOTOCHEMICZNA	NISKA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	ŚREDNIA
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	ŚREDNIA
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	NISKA

W1. FORMA DEGRADACJI**ZMIERZONA**SIŁ MECHANICZNYCH
(MECHANICZNA)**W2. STOPIEŃ DEGRADACJI**

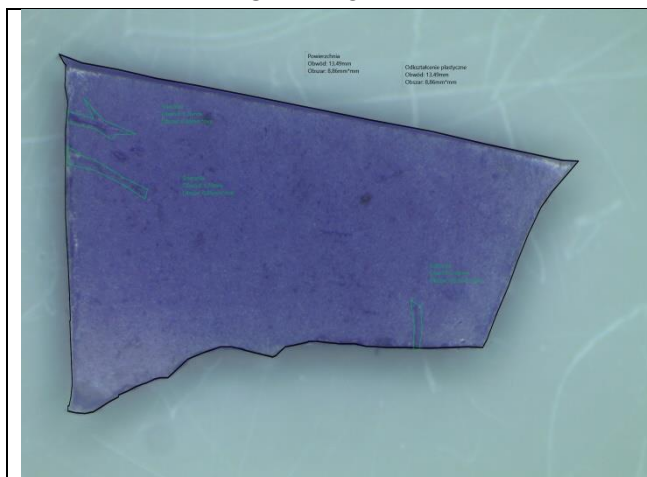
Znacznie uszkodzony (poniżej 50% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

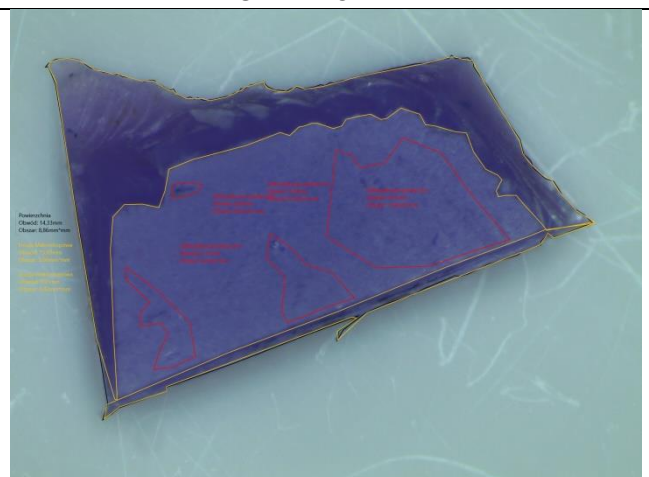
ŚREDNIA

NR PRÓBK:	ZKG_200523_1
MIEJSCOWOŚĆ	Gąski
KSZTAŁT I STRUKTURA	FRAGMENT (fragment FR)
KOLOR	Fioletowy (Purple PR)
NASYCENIE KOLORU	Głęboki
IDENTYFIKACJA PRÓBK:	POLY(PROPYLENE), ATACTIC
BAZA DANYCH:	Humel Polymer Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	92,16
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	Nie

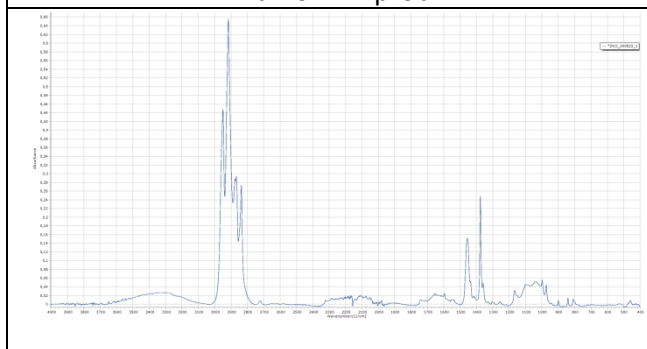
POWIERZCHNIA 1



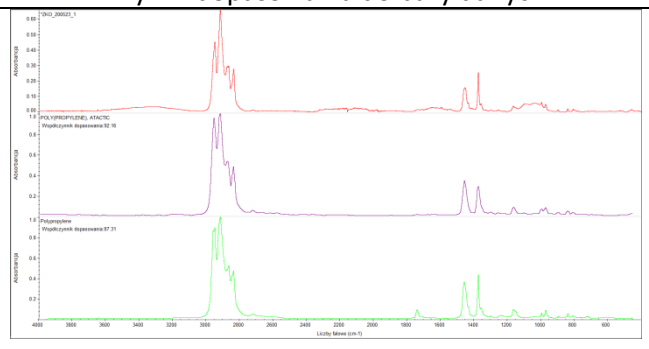
POWIERZCHNIA 2



Widmo FTIR próbki



Wyniki dopasowania do bazy danych



Pomiary [mm²]

POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	8,86	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	8,86
PĘKANIE	-	PĘKANIE	-
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	-	EROZJA MAKROSKOPOWA	3,48
ZAGŁĘBIENIE	-	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	0,15	ŚCIERANIE	-
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	8,86	ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	1,77

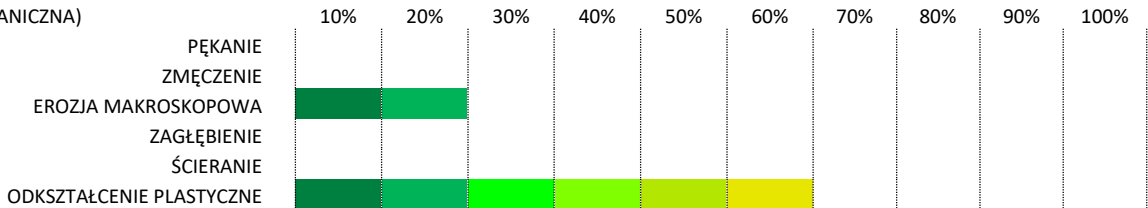
W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	NISKA
FOTOCHEMICZNA	NISKA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	NISKA
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA

W1. FORMA DEGRADACJI

ZMIERZONA

SIŁ MECHANICZNYCH
(MECHANICZNA)



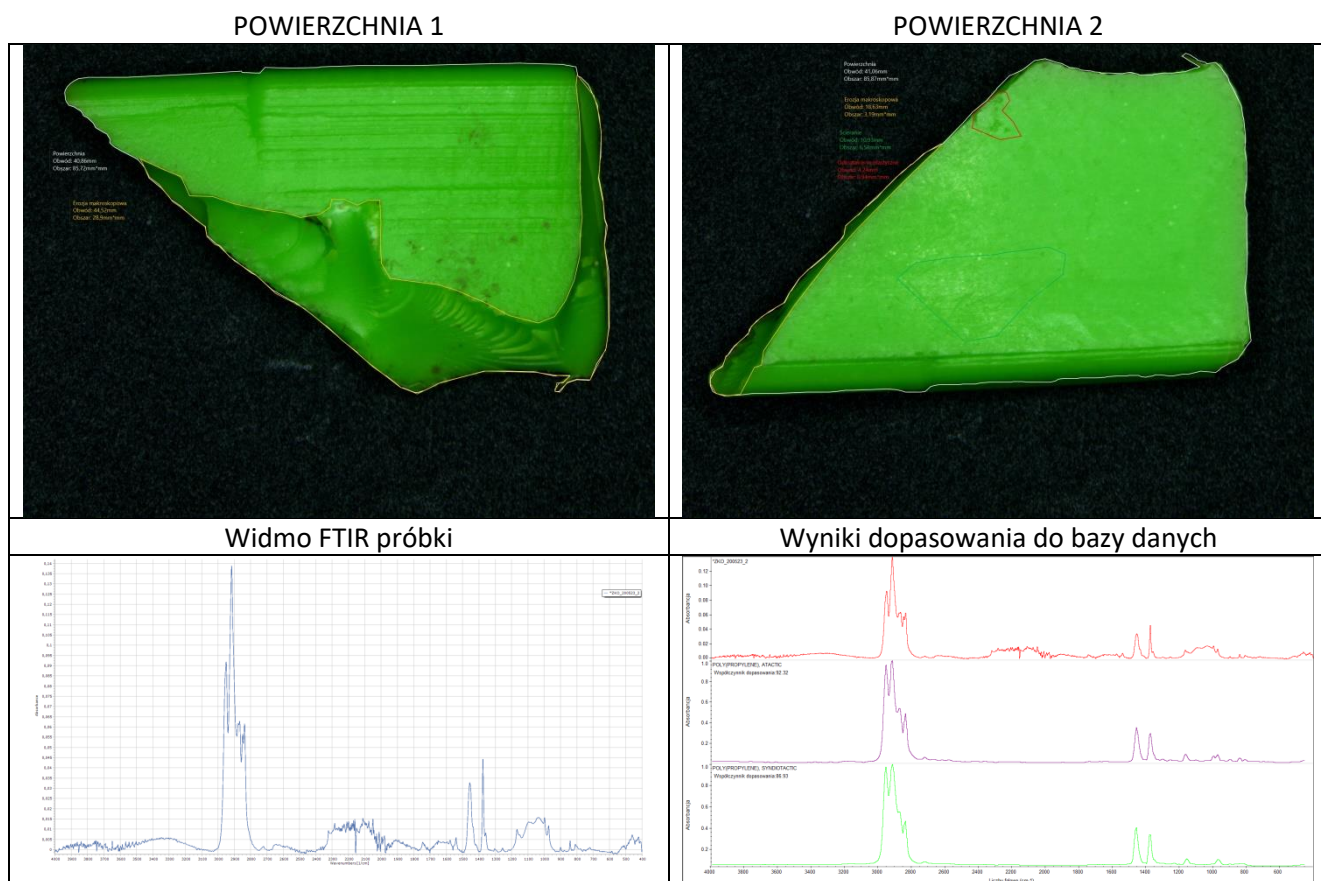
W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

Znacznie uszkodzony (poniżej 50% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

ŚREDNIA

NR PRÓBKİ:	ZKG_200523_2
MIEJSCOWOŚĆ	Gąski
KSZTAŁT I STRUKTURA	FRAGMENT (fragment FR)
KOLOR	Zielony (Green GN)
NASYCENIE KOLORU	Głęboki
IDENTYFIKACJA PRÓBKİ:	POLY(PROPYLENE), ATACTIC
BAZA DANYCH:	Humel Polymer Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	92,32
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	1-25



Pomiary [mm²]

POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	85,72	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	85,87
PĘKANIE	-	PĘKANIE	-
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	28,90	EROZJA MAKROSKOPOWA	3,19
ZAGŁĘBIENIE	-	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	6,58
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	0,94

UWAGA

Na powierzchni 1 oraz 2 niektóre elementy widoczne mogą być scharakteryzowane jako ścieranie lub odkształcenie plastyczne, ale noszą znamiona kształtu pierwotnego nie będącego wynikiem degradacji.

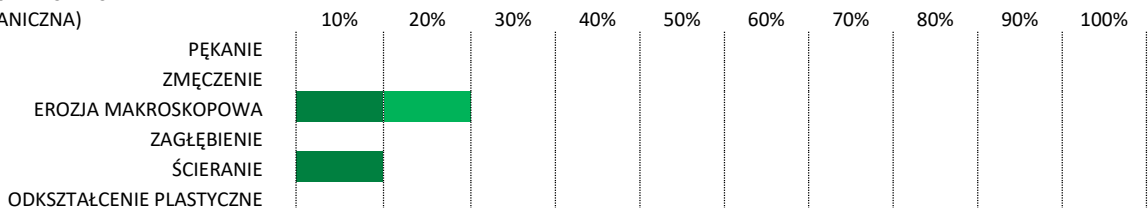
W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	ŚREDNIA
FOTOCHEMICZNA	NISKA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	NISKA
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA

W1. FORMA DEGRADACJI

ZMIERZONA

SIŁ MECHANICZNYCH
(MECHANICZNA)



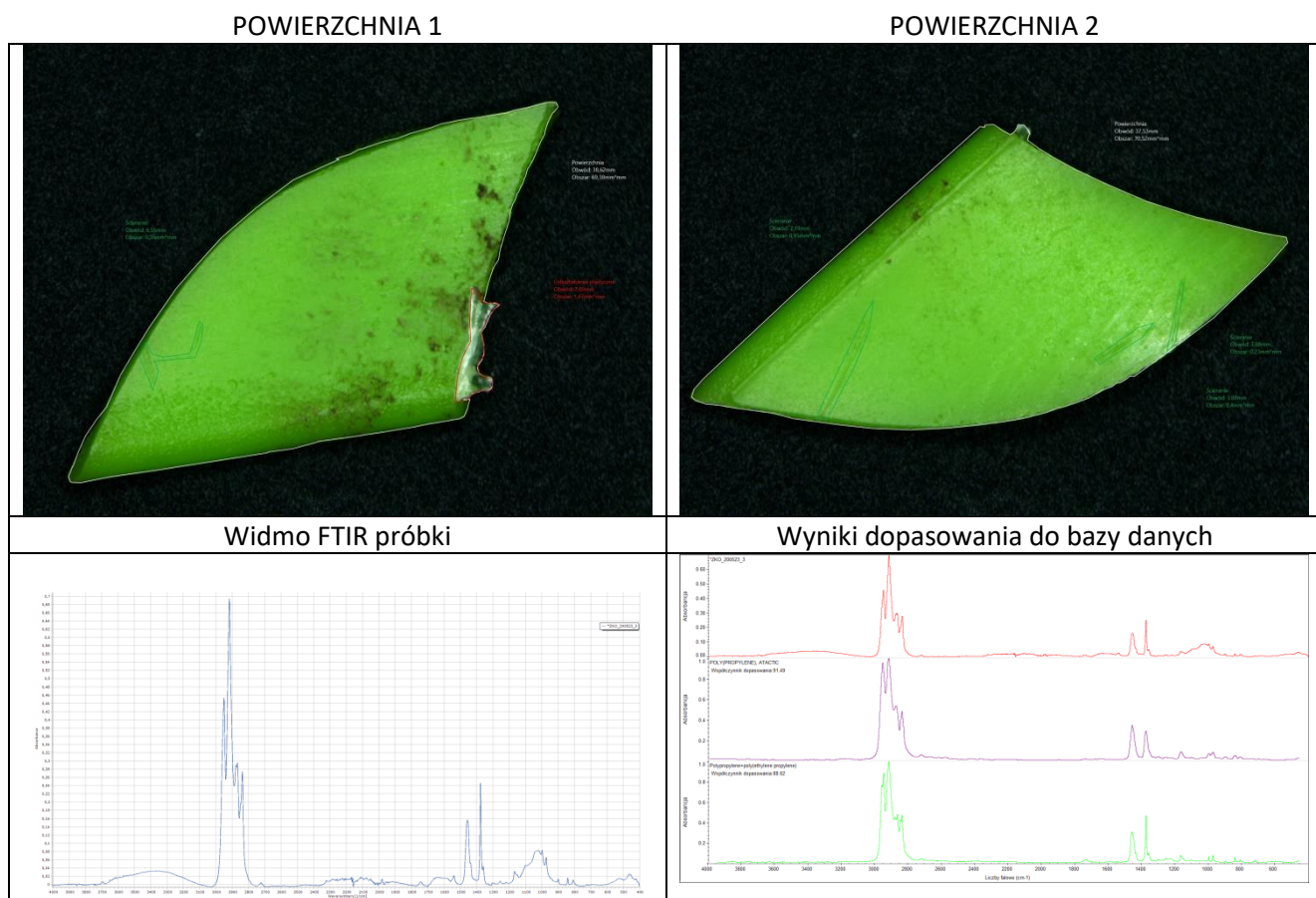
W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

Umiarkowanie uszkodzony (od 50% do 90% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

ŚREDNIA

NR PRÓBKİ:	ZKG_200523_3
MIEJSCOWOŚĆ	Gąski
KSZTAŁT I STRUKTURA	FRAGMENT (fragment FR)
KOLOR	Zielony (Green GN)
NASYCENIE KOLORU	Głęboki
IDENTYFIKACJA PRÓBKİ:	POLY(PROPYLENE), ATACTIC
BAZA DANYCH:	Humel Polymer Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	91,49
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	1-25



Pomiary [mm²]

POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	69,38	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	70,52
PĘKANIE	-	PĘKANIE	-
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	-	EROZJA MAKROSKOPOWA	-
ZAGŁĘBIENIE	1,47	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	0,56	ŚCIERANIE	1,58
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-

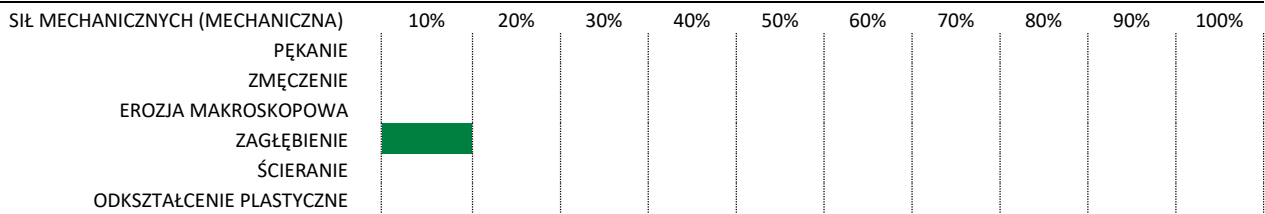
UWAGA

Na powierzchni 1 oraz 2 niektóre elementy widoczne mogą być scharakteryzowane jako ścieranie lub odkształcenie plastyczne, ale noszą znamiona kształtu pierwotnego nie będącego wynikiem degradacji.

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

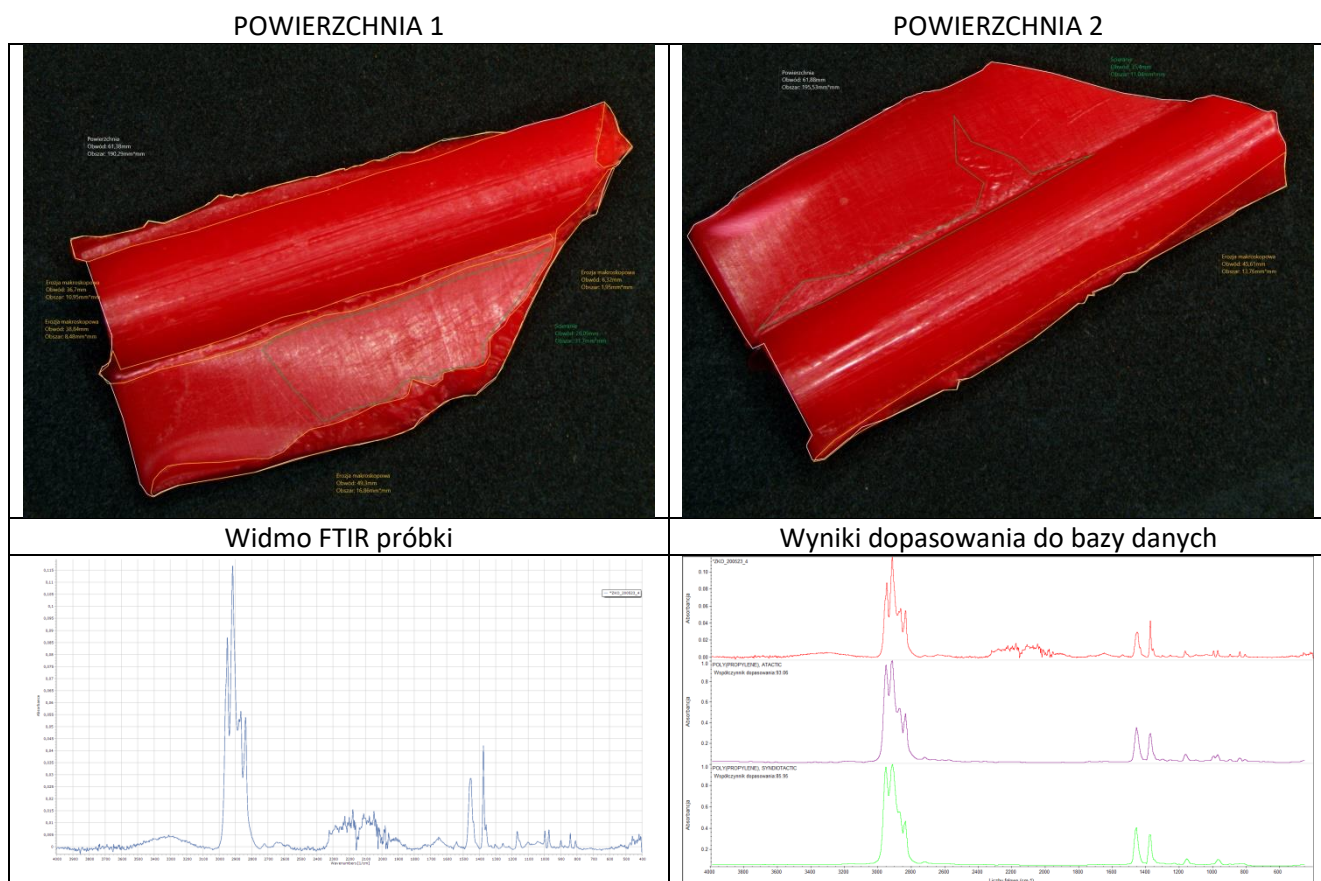
CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	ŚREDNIA
FOTOCHEMICZNA	NISKA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO	
(CHEMICZNA)	NISKA
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA

**W1. FORMA DEGRADACJI
ZMIERZONA**



W2. STOPIEŃ DEGRADACJI	Nieuszkodzony (powyżej 90% fragmentu jest nieuszkodzony)
W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ	ŚREDNIA

NR PRÓBKII:	ZKG_200523_4
MIEJSCOWOŚĆ	Gąski
KSZTAŁT I STRUKTURA	FRAGMENT (fragment FR)
KOLOR	Czerwony (Red RD)
NASYCENIE KOLORU	Głęboki
IDENTYFIKACJA PRÓBKII:	POLY(PROPYLENE), ATACTIC
BAZA DANYCH:	Humel Polymer Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	93,06
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	Nie



Pomiary [mm²]

POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	190,29	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	195,53
PĘKANIE	-	PĘKANIE	-
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	38,24	EROZJA MAKROSKOPOWA	13,76
ZAGŁĘBIENIE	-	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	31,70	ŚCIERANIE	11,04
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-

UWAGA

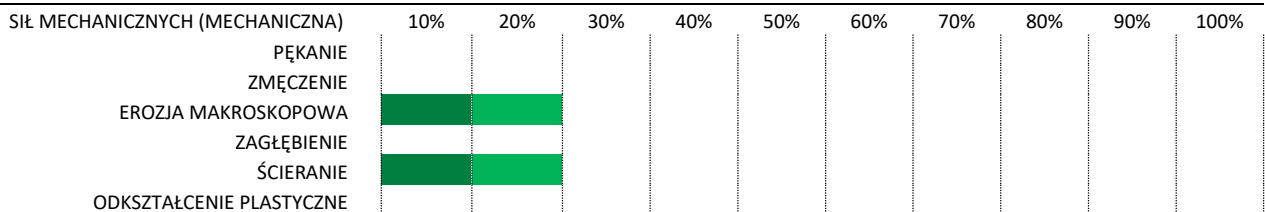
Na powierzchni 1 oraz 2 niektóre elementy widoczne mogą być scharakteryzowane jako ścieranie lub odkształcenie plastyczne, ale noszą znamiona kształtu pierwotnego nie będącego wynikiem degradacji.

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	NISKA
FOTOCHEMICZNA	NISKA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	NISKA
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA

W1. FORMA DEGRADACJI

ZMIERZONA



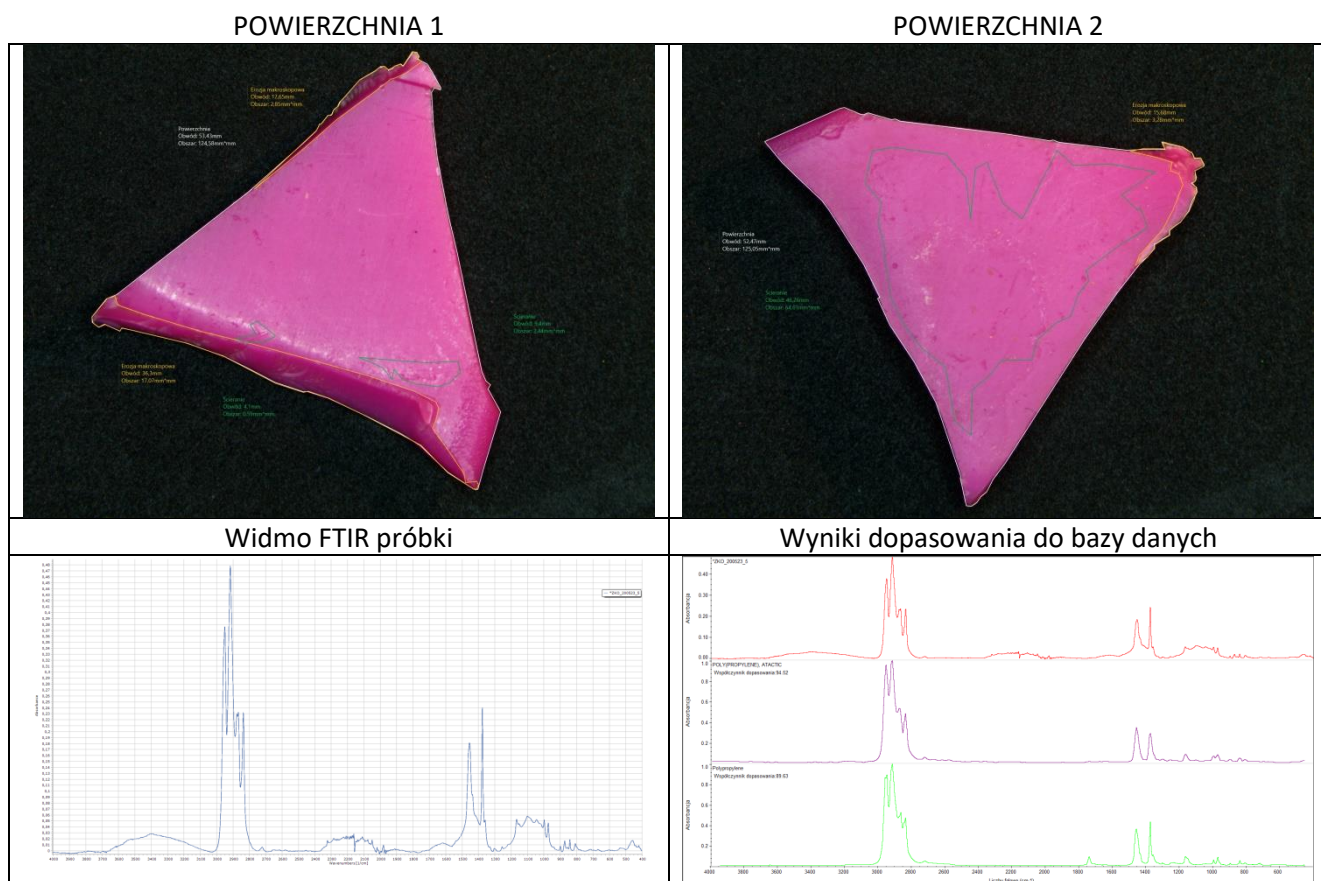
W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

Umiarkowanie uszkodzony (od 50% do 90% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

ŚREDNIA

NR PRÓBKII:	ZKG_200523_5
MIEJSCOWOŚĆ	Gąski
KSZTAŁT I STRUKTURA	FRAGMENT (fragment FR)
KOLOR	Różowy (Pink PK)
NASYCENIE KOLORU	Głęboki
IDENTYFIKACJA PRÓBKII:	POLY(PROPYLENE), ATACTIC
BAZA DANYCH:	Humel Polymer Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	94,52
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	Nie



Pomiary [mm²]

POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	124,58	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	125,05
PĘKANIE	-	PĘKANIE	-
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	19,92	EROZJA MAKROSKOPOWA	3,28
ZAGŁĘBIENIE	-	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	0,03	ŚCIERANIE	64,61
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-

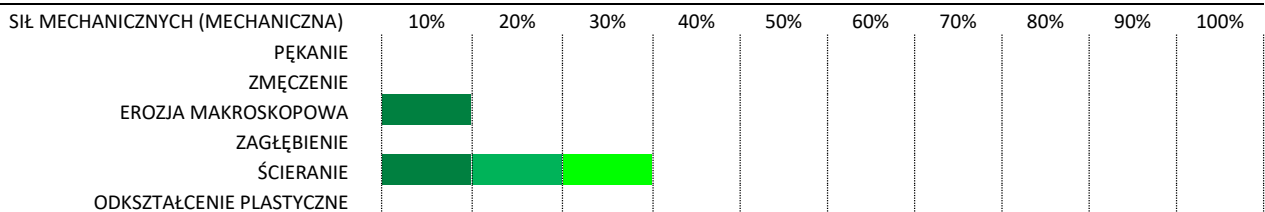
UWAGA

Na powierzchni 1 oraz 2 niektóre elementy widoczne mogą być scharakteryzowane jako ścieranie lub odkształcenie plastyczne, ale noszą znamiona kształtu pierwotnego nie będącego wynikiem degradacji.

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	NISKA
FOTOCHEMICZNA	NISKA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	NISKA
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA

**W1. FORMA DEGRADACJI
ZMIERZONA**



W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

Umiarkowanie uszkodzony (od 50% do 90% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

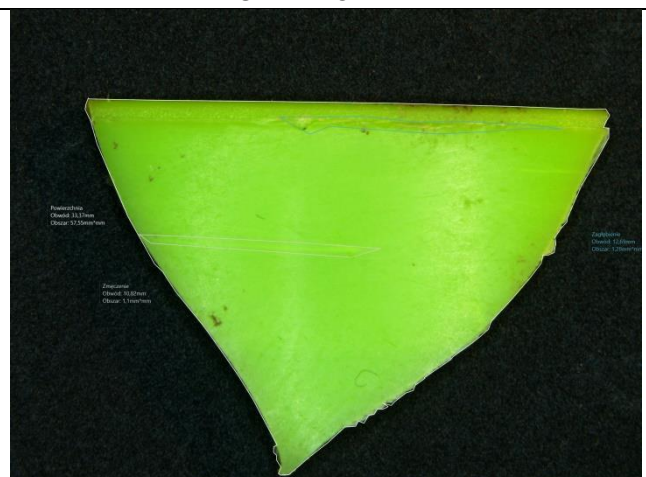
ŚREDNIA

NR PRÓBKİ:	ZKG_200523_6
MIEJSCOWOŚĆ	Gąski
KSZTAŁT I STRUKTURA	FRAGMENT (fragment FR)
KOLOR	Zielony (Green GN)
NASYCENIE KOLORU	Głęboki
IDENTYFIKACJA PRÓBKİ:	POLY(PROPYLENE), ATACTIC
BAZA DANYCH:	Humel Polymer Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	93,03
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	1-25

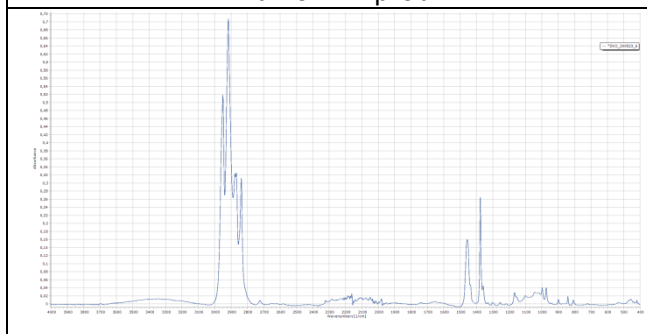
POWIERZCHNIA 1



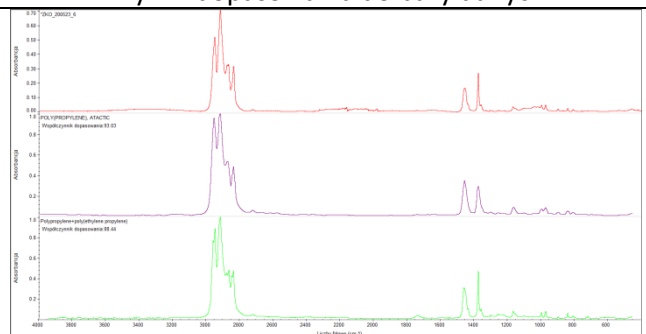
POWIERZCHNIA 2



Widmo FTIR próbki



Wyniki dopasowania do bazy danych



Pomiary [mm²]

POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	56,83	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	57,55
PĘKANIE	-	PĘKANIE	-
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	1,10
EROZJA MAKROSKOPOWA	9,48	EROZJA MAKROSKOPOWA	-
ZAGŁĘBIENIE	17,63	ZAGŁĘBIENIE	1,28
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	-
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-

UWAGA

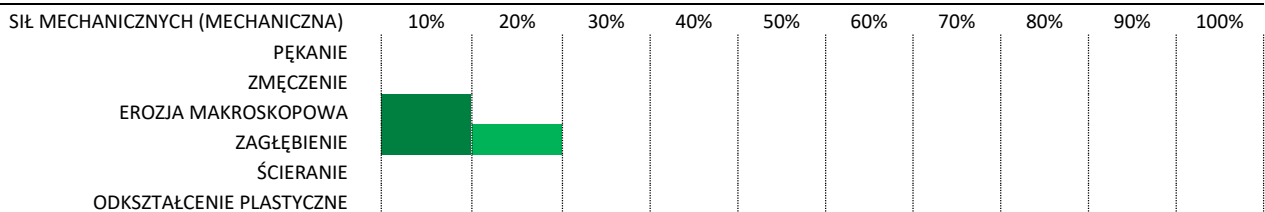
Na powierzchni 1 oraz 2 niektóre elementy widoczne mogą być scharakteryzowane jako ścieranie lub odkształcenie plastyczne, ale noszą znamiona kształtu pierwotnego nie będącego wynikiem degradacji.

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	ŚREDNIA
FOTOCHEMICZNA	NISKA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	NISKA
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA

W1. FORMA DEGRADACJI

ZMIERZONA



W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

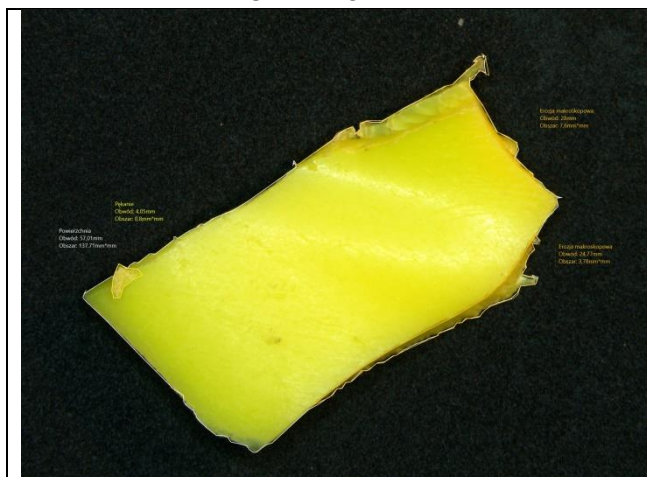
Umiarkowanie uszkodzony (od 50% do 90% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

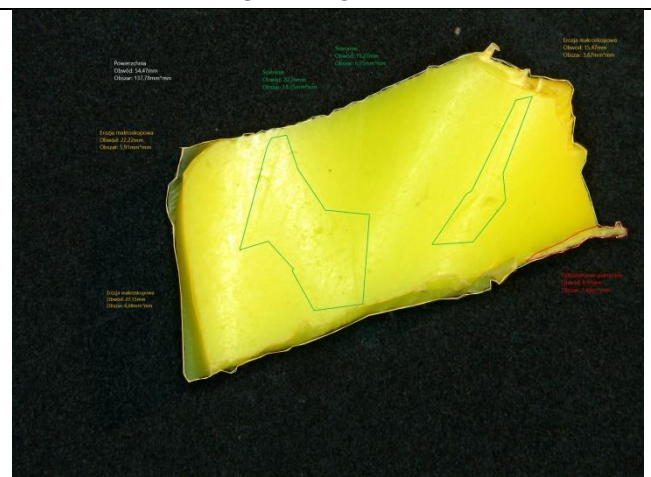
ŚREDNIA

NR PRÓBKİ:	ZKG_200523_7
MIEJSCOWOŚĆ	Gąski
KSZTAŁT I STRUKTURA	FRAGMENT (fragment FR)
KOLOR	Żółty (Yellow YL)
NASYCENIE KOLORU	Głęboki
IDENTYFIKACJA PRÓBKİ:	POLY(PROPYLENE), ATACTIC
BAZA DANYCH:	Humel Polymer Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	95,21
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	Nie

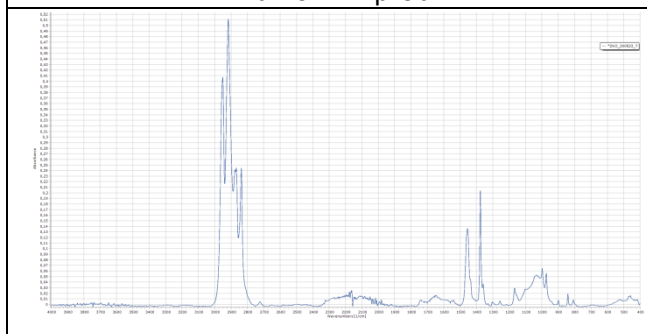
POWIERZCHNIA 1



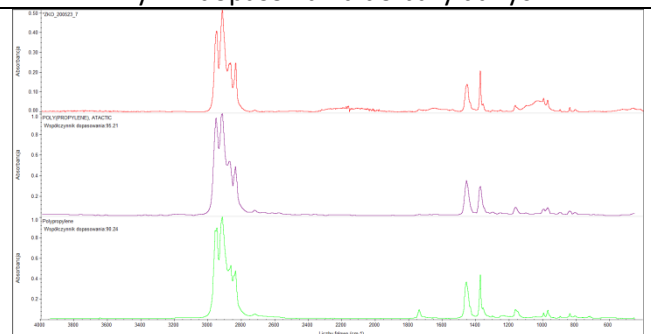
POWIERZCHNIA 2



Widmo FTIR próbki



Wyniki dopasowania do bazy danych



Pomiary [mm²]

POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	137,71	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	138,78
PĘKANIE	0,80	PĘKANIE	-
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	11,38	EROZJA MAKROSKOPOWA	22,21
ZAGŁĘBIENIE	-	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	24,4
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	1,4

UWAGA

Na powierzchni 1 oraz 2 niektóre elementy widoczne mogą być scharakteryzowane jako ścieranie lub odkształcenie plastyczne, ale noszą znamiona kształtu pierwotnego nie będącego wynikiem degradacji.

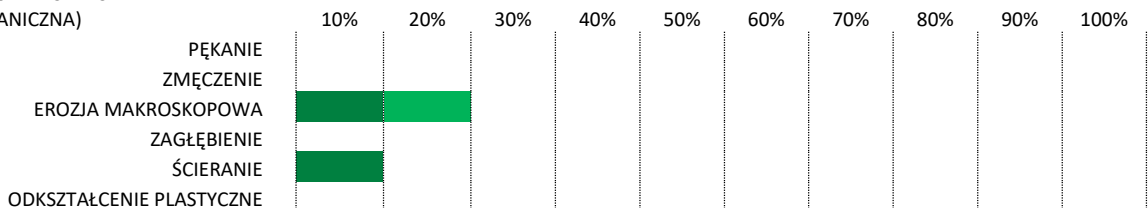
W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	NISKA
FOTOCHEMICZNA	NISKA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	NISKA
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA

W1. FORMA DEGRADACJI

ZMIERZONA

SIŁ MECHANICZNYCH
(MECHANICZNA)



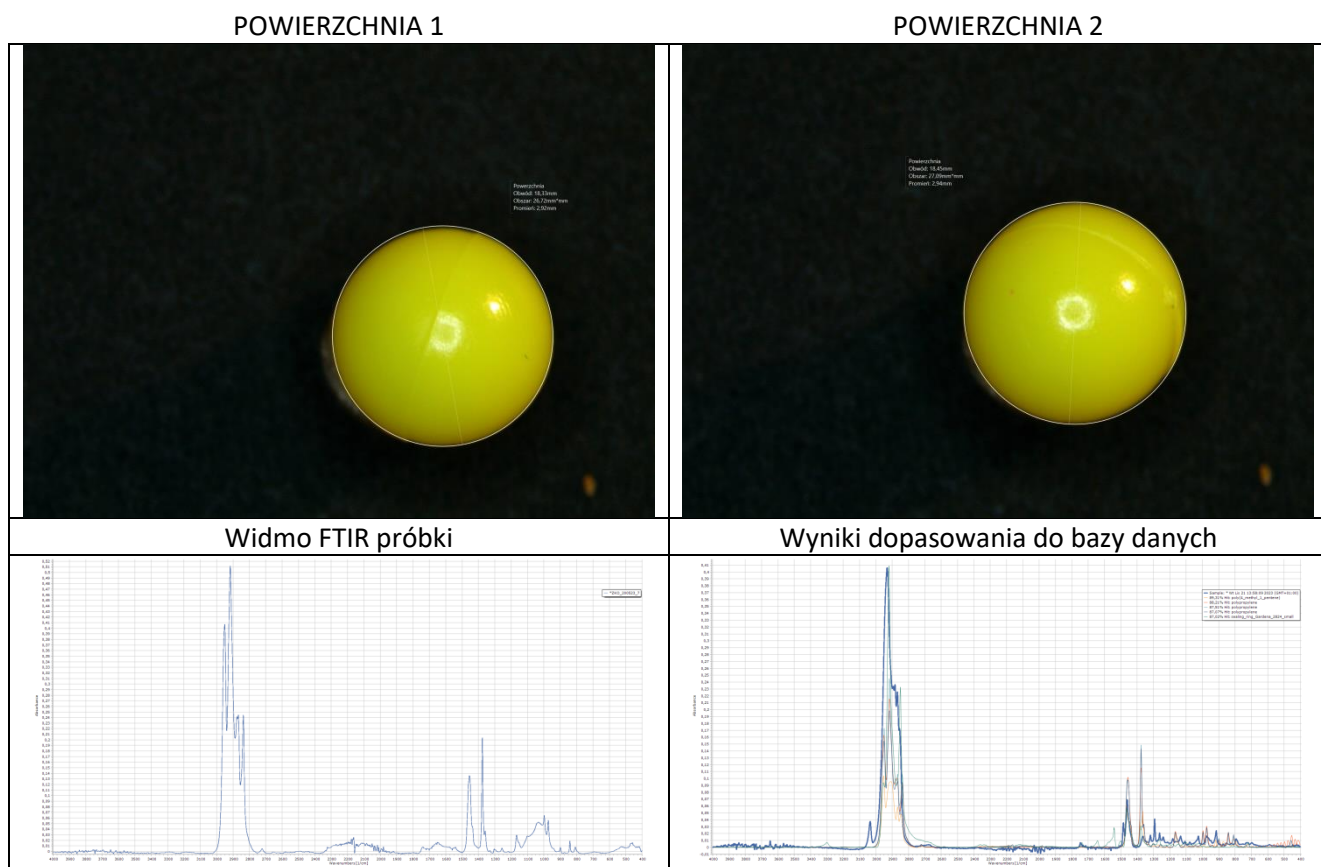
W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

Umiarkowanie uszkodzony (od 50% do 90% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

ŚREDNIA

NR PRÓBKII:	ZKG_200523_8
MIEJSCOWOŚĆ	Gąski
KSZTAŁT I STRUKTURA	GRANULKA (pellet PT)
KOLOR	Żółty (Yellow YL)
NASYCENIE KOLORU	Głęboki
IDENTYFIKACJA PRÓBKII:	POLY(PROPYLENE), ATACTIC
BAZA DANYCH:	Primpke_FTIR_Microplastics
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	89,31
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	Nie



Pomiary [mm²]

POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	26,72	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	27,09
PĘKANIE	-	PĘKANIE	-
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	-	EROZJA MAKROSKOPOWA	-
ZAGŁĘBIENIE	-	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	-
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-

UWAGA

Na powierzchni 1 oraz 2 niektóre elementy widoczne mogą być scharakteryzowane jako ścieranie lub odkształcenie plastyczne, ale noszą znamiona kształtu pierwotnego nie będącego wynikiem degradacji. Brak zmian świadczących o degradacji mechanicznej.

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	NISKA
FOTOCHEMICZNA	NISKA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	NISKA
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	NISKA
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	NISKA

W1. FORMA DEGRADACJI**ZMIERZONA**

SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
PĘKANIE										
ZMĘCZENIE										
EROZJA MAKROSKOPOWA										
ZAGŁĘBIENIE										
ŚCIERANIE										
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE										

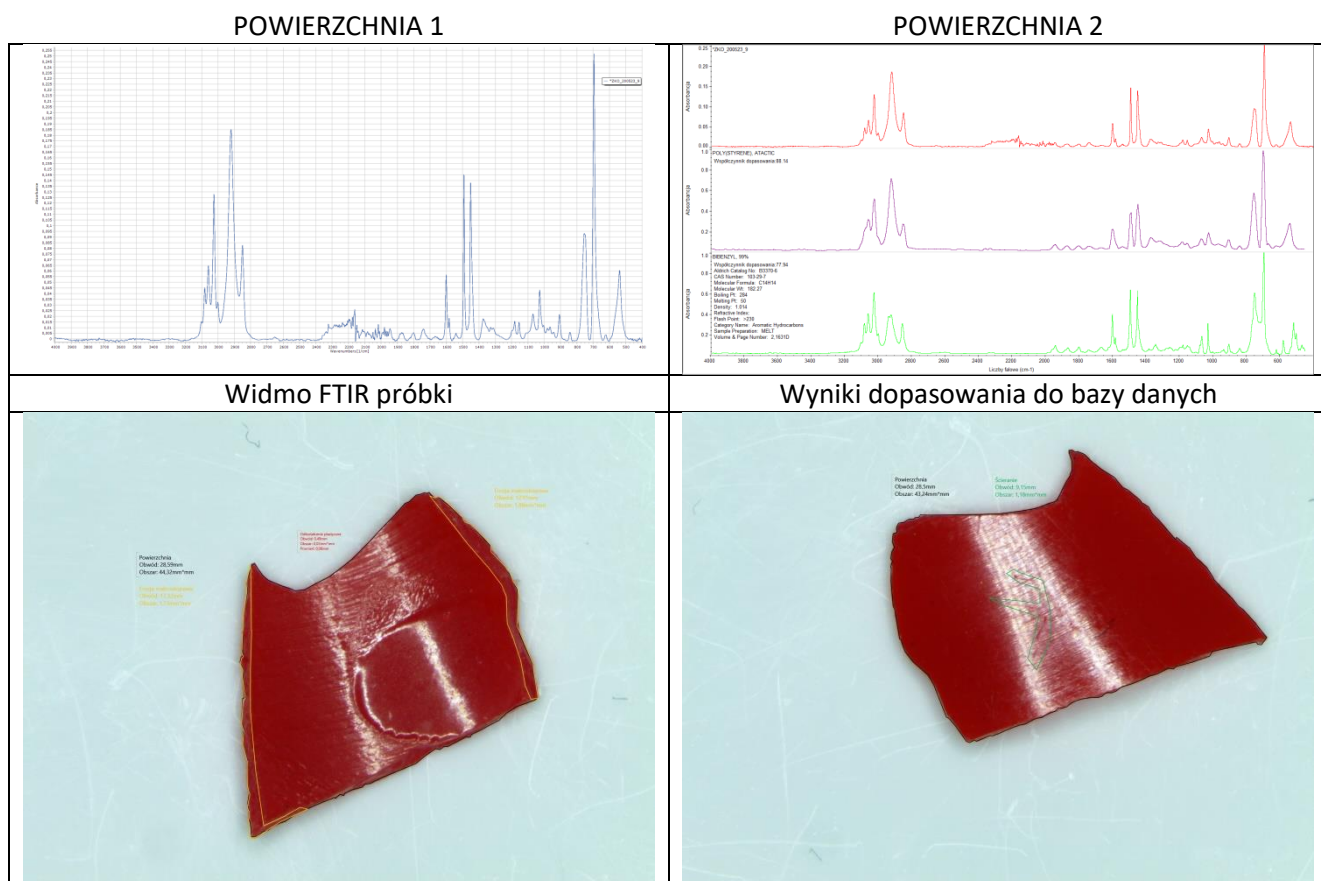
W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

Nieuszkodzony (powyżej 90% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

NISKA

NR PRÓBKİ:	ZKG_200523_9
MIEJSCOWOŚĆ	Gąski
KSZTAŁT I STRUKTURA	FRAGMENT (fragment FR)
KOLOR	Czerwony (Red RD)
NASYCENIE KOLORU	Mocny
IDENTYFIKACJA PRÓBKİ:	POLY(STYRENE), ATACTIC
BAZA DANYCH:	Humel Polymer Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	88,14
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	Nie



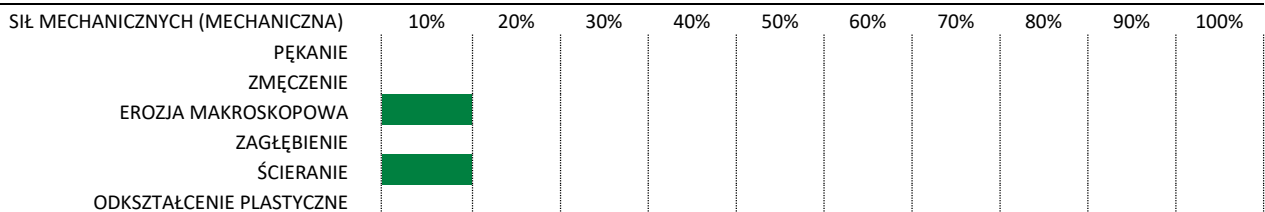
Pomiary [mm²]

POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	44,32	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	43,24
PĘKANIE	-	PĘKANIE	-
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	3,59	EROZJA MAKROSKOPOWA	-
ZAGŁĘBIENIE	-	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	1,18
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	0,02	ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

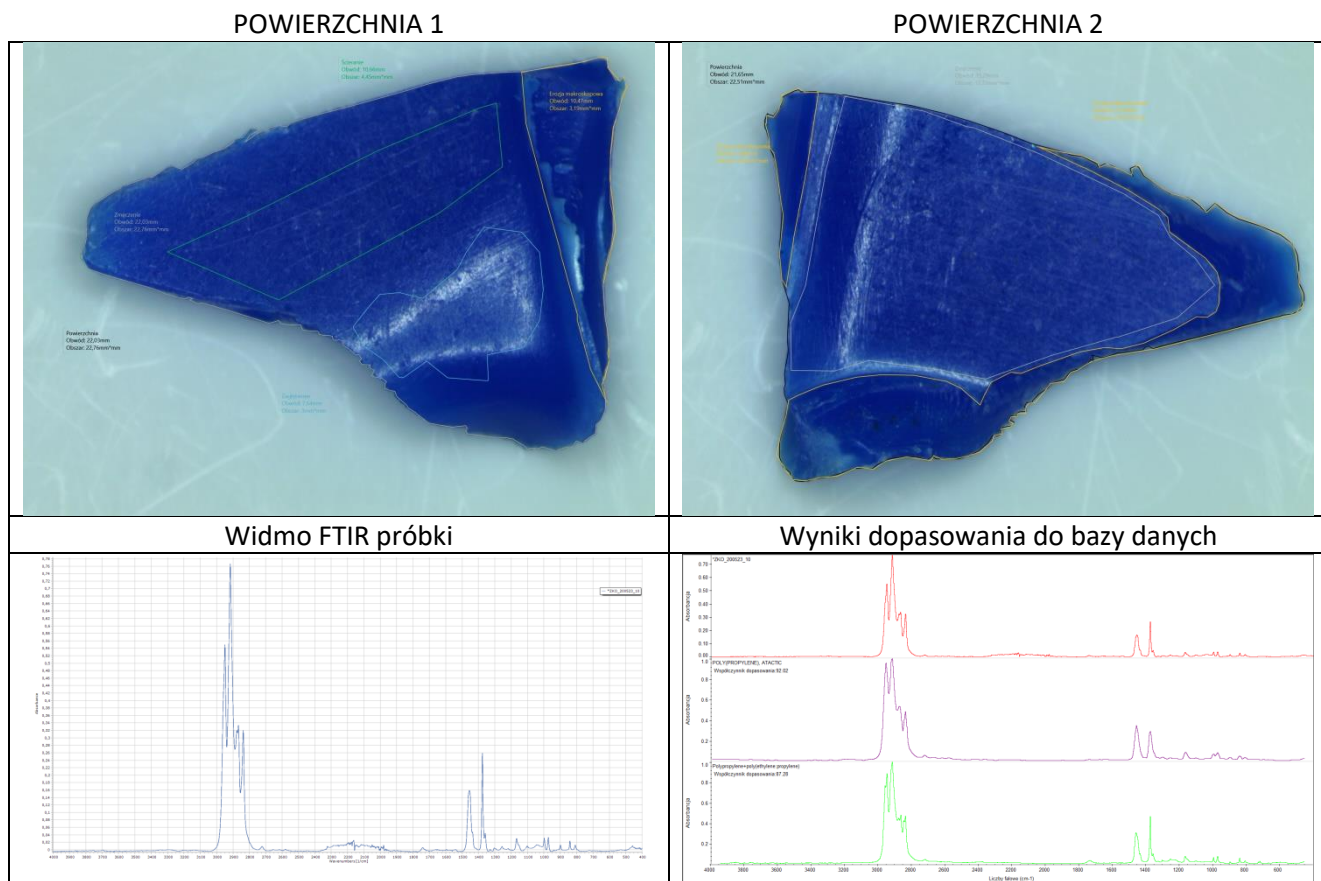
CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	NISKA
FOTOCHEMICZNA	NISKA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	WYSOKA
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA

W1. FORMA DEGRADACJI ZMIERZONA



W2. STOPIEŃ DEGRADACJI	Nieuszkodzony (powyżej 90% fragmentu jest nieuszkodzony)
W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ	ŚREDNIA

NR PRÓBKII:	ZKG_200523_10
MIEJSCOWOŚĆ	Gąski
KSZTAŁT I STRUKTURA	FRAGMENT (fragment FR)
KOLOR	Niebieski (Blue BL)
NASYCENIE KOLORU	Głęboki
IDENTYFIKACJA PRÓBKII:	POLY(PROPYLENE), ATACTIC
BAZA DANYCH:	Humel Polymer Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	92,02
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	Nie



Pomiary [mm²]

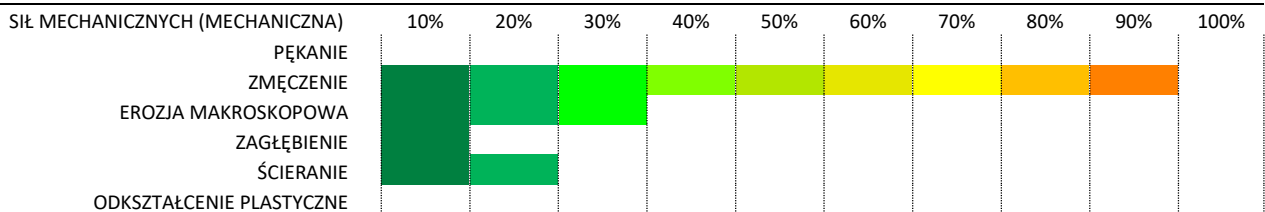
POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	22,76	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	22,51
PĘKANIE	-	PĘKANIE	-
ZMĘCZENIE	22,76	ZMĘCZENIE	13,72
EROZJA MAKROSKOPOWA	3,19	EROZJA MAKROSKOPOWA	6,75
ZAGŁĘBIENIE	3,00	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	4,45	ŚCIERANIE	-
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	NISKA
FOTOCHEMICZNA	NISKA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	NISKA
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA

W1. FORMA DEGRADACJI

ZMIERZONA



W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

Znacznie uszkodzony (poniżej 50% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

ŚREDNIA DO WYSOKIEJ

POWIERZCHNIA 1



Powierzchnia
Obiekt 10.00mm
Obiekt 62.00mm

Najmniejsza rozdzielczość
10.00mm

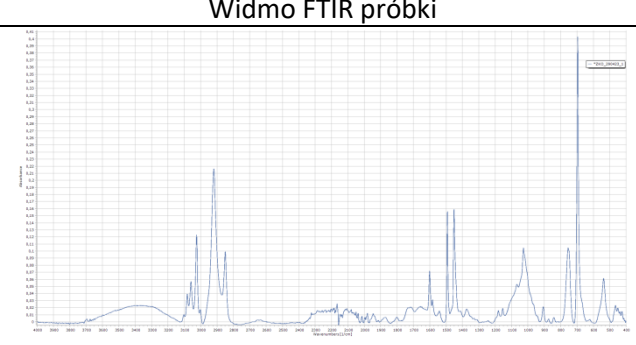
POWIERZCHNIA 2



Powierzchnia
Obiekt 10.00mm
Obiekt 62.00mm

Najmniejsza rozdzielczość
10.00mm

Widmo FTIR próbki



Widmo FTIR próbki

Wyniki dopasowania do bazy danych



Wyniki dopasowania do bazy danych

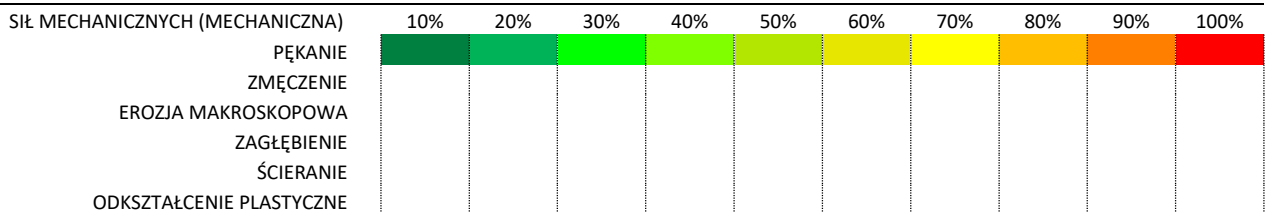
POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	62,18	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	62,05
PĘKANIE	62,18	PĘKANIE	62,05
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	-	EROZJA MAKROSKOPOWA	-
ZAGŁĘBIENIE	-	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	-
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	WYSOKA
FOTOCHEMICZNA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
TERMICZNA	ŚREDNIA
UTLENIAJĄCA	WYSOKA
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ

W1. FORMA DEGRADACJI

ZMIERZONA



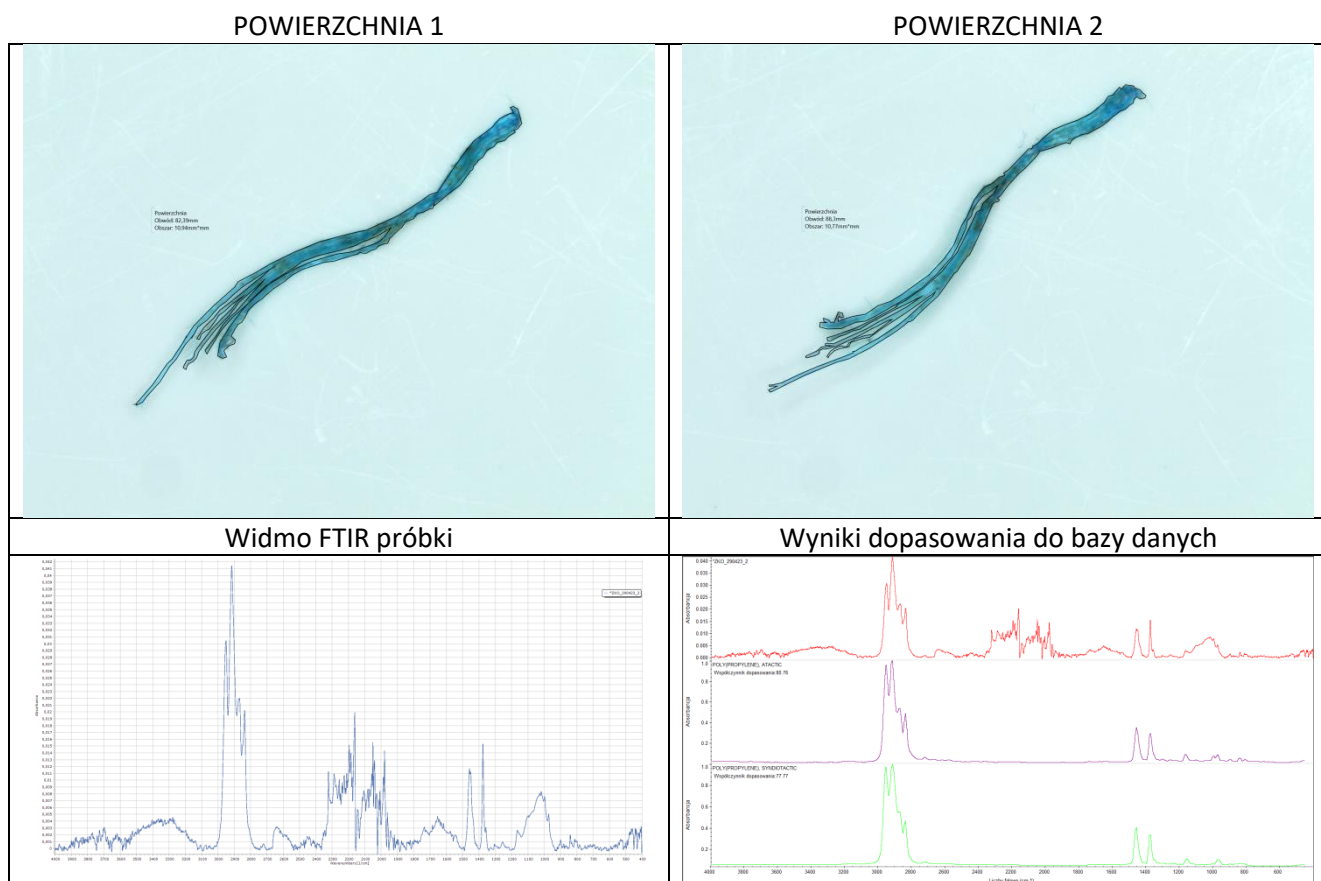
W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

Znacznie uszkodzony (poniżej 50% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

WYSOKA

NR PRÓBK:	ZKG_290423_2
MIEJSCOWOŚĆ	Gąski
KSZTAŁT I STRUKTURA	WŁÓKNO (fibre FB)
KOLOR	Niebieski (Blue BL)
NASYCENIE KOLORU	Mocny
IDENTYFIKACJA PRÓBK:	POLY(PROPYLENE), ATACTIC
BAZA DANYCH:	Humel Polymer Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	80,76
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	1-25



Pomiary [mm²]

POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	10,94	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	10,77
PĘKANIE	-	PĘKANIE	-
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	-	EROZJA MAKROSKOPOWA	-
ZAGŁĘBIENIE	-	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	-
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-

UWAGA

Włókno bardzo trudno sklasyfikować pod względem degradacji mechanicznej zachodzącej na powierzchni.

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
FOTOCHEMICZNA	ŚREDNIA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	ŚREDNIA
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ

W1. FORMA DEGRADACJI

ZMIERZONA

SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
PEKANIE										
ZMĘCZENIE										
EROZJA MAKROSKOPOWA										
ZAGŁĘBIENIE										
ŚCIERANIE										
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE										

W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

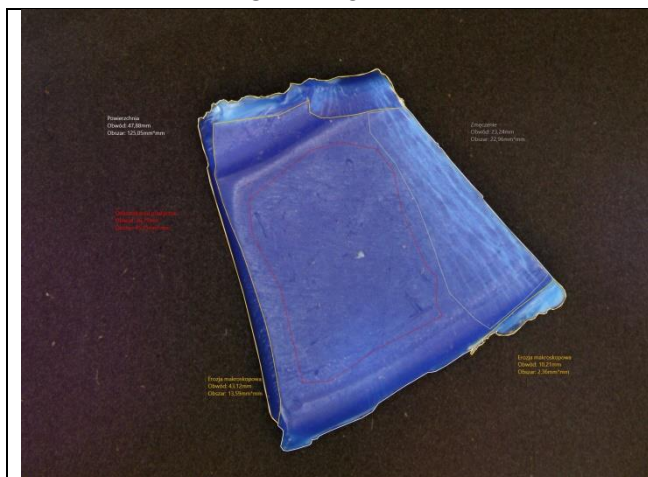
Brak możliwości obliczenia

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

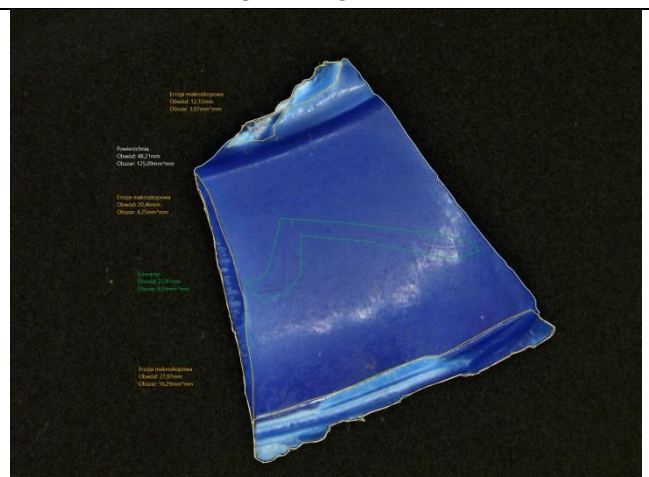
Brak możliwości obliczenia

NR PRÓBKII:	ZKG_290423_3
MIEJSCOWOŚĆ	Gąski
KSZTAŁT I STRUKTURA	FRAGMENT (fragment FR)
KOLOR	Niebieski (Blue BL)
NASYCENIE KOLORU	Głęboki
IDENTYFIKACJA PRÓBKII:	POLY(PROPYLENE), ATACTIC
BAZA DANYCH:	Humel Polymer Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	93,91
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	Nie

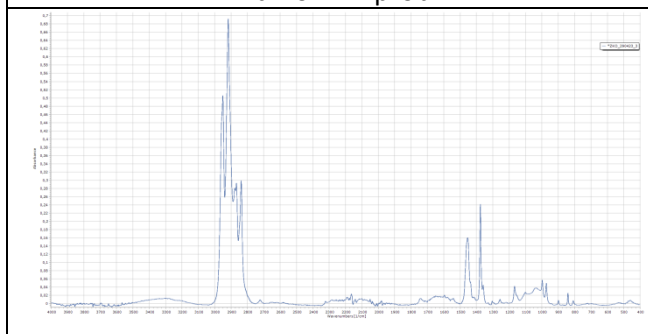
POWIERZCHNIA 1



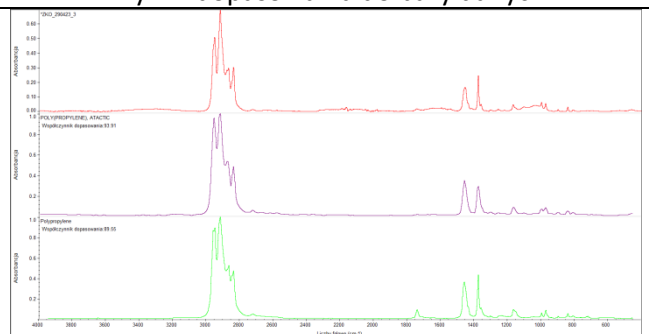
POWIERZCHNIA 2



Widmo FTIR próbki



Wyniki dopasowania do bazy danych



Pomiary [mm²]

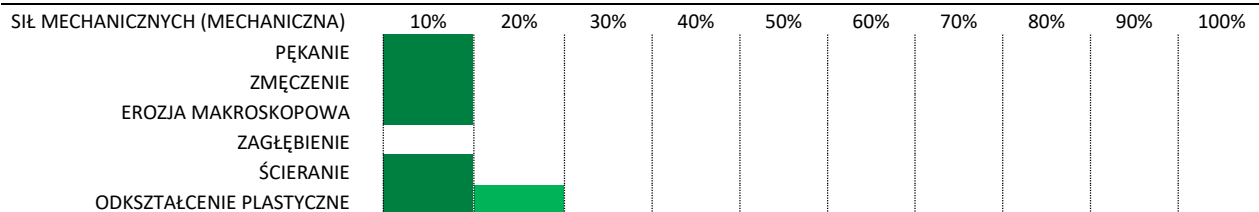
POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	125,05	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	125,09
PĘKANIE	-	PĘKANIE	23,63
ZMĘCZENIE	22,96	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	16,05	EROZJA MAKROSKOPOWA	-
ZAGŁĘBIENIE	-	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	8,59
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	45,95	ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	NISKA
FOTOCHEMICZNA	NISKA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	NISKA
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA

W1. FORMA DEGRADACJI

ZMIERZONA



W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

Umiarkowanie uszkodzony (od 50% do 90% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

ŚREDNIA

NR PRÓBKII:	ZKG_290423_4
MIEJSCOWOŚĆ	Gąski
KSZTAŁT I STRUKTURA	FRAGMENT (fragment FR)
KOLOR	Żółty (Yellow YL)
NASYCENIE KOLORU	Głęboki
IDENTYFIKACJA PRÓBKII:	POLY(STYRENE), ATACTIC
BAZA DANYCH:	Humel Polymer Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	85,55
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	1-25

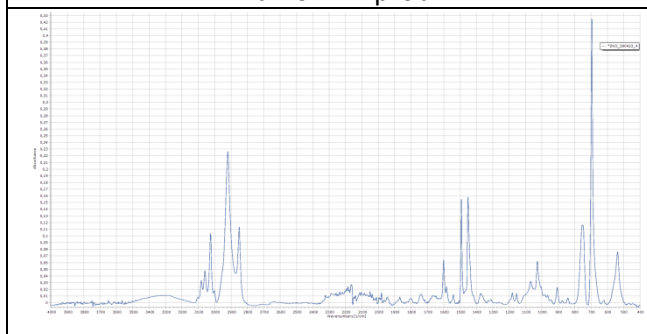
POWIERZCHNIA 1



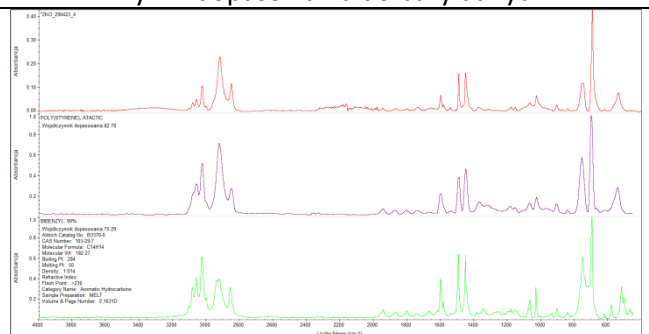
POWIERZCHNIA 2



Widmo FTIR próbki



Wyniki dopasowania do bazy danych



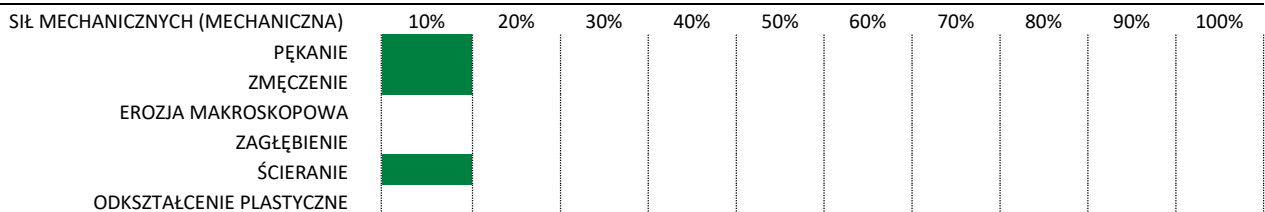
Pomiary [mm²]

POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	187,34	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	187,02
PĘKANIE	-	PĘKANIE	23,63
ZMĘCZENIE	22,38	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	1,95	EROZJA MAKROSKOPOWA	-
ZAGŁĘBIENIE	-	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	8,59
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	ŚREDNIA
FOTOCHEMICZNA	NISKA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	WYSOKA
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA

**W1. FORMA DEGRADACJI
ZMIERZONA**



W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

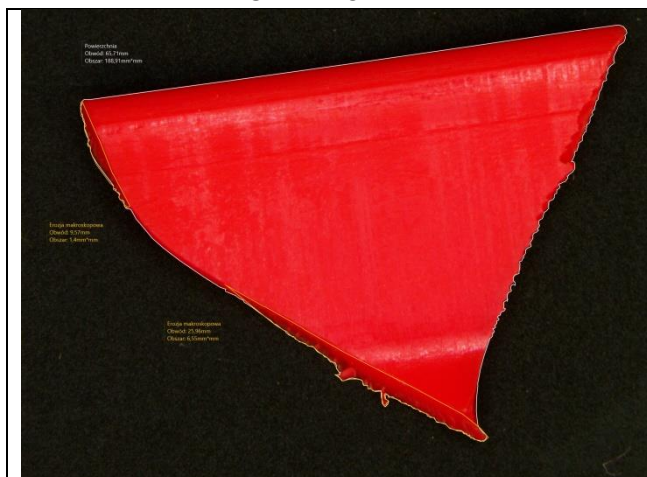
Umiarkowanie uszkodzony (od 50% do 90% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

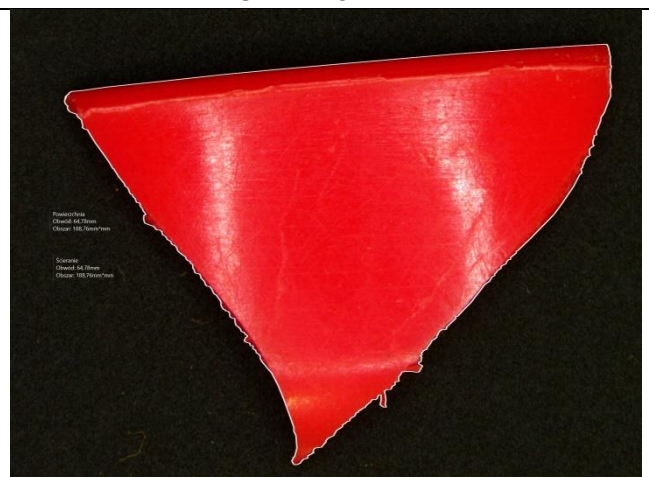
ŚREDNIA

NR PRÓBKİ:	ZKG_290423_5
MIEJSCOWOŚĆ	Gąski
KSZTAŁT I STRUKTURA	FRAGMENT (fragment FR)
KOLOR	Czerwony (Red RD))
NASYCENIE KOLORU	Głęboki
IDENTYFIKACJA PRÓBKİ:	POLY(PROPYLENE), ATACTIC
BAZA DANYCH:	Humel Polymer Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	91,18
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	Nie

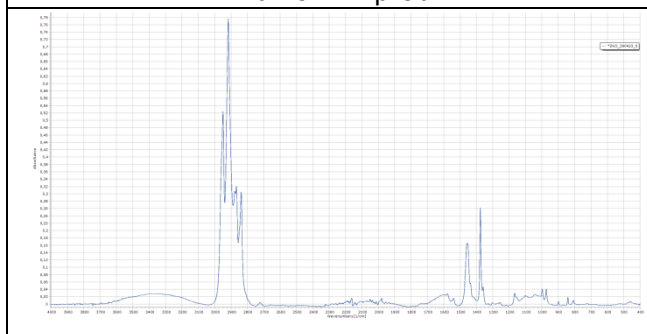
POWIERZCHNIA 1



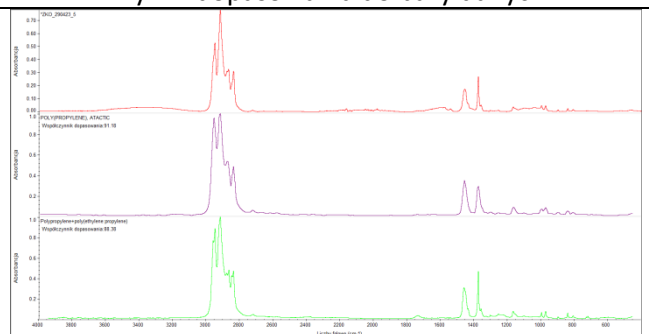
POWIERZCHNIA 2



Widmo FTIR próbki



Wyniki dopasowania do bazy danych



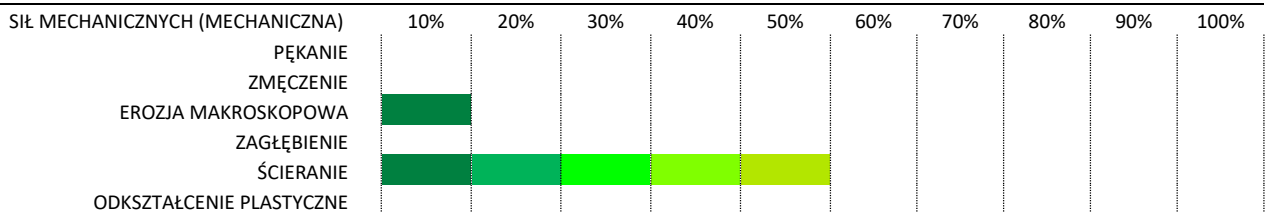
Pomiary [mm²]

POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	188,91	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	188,76
PĘKANIE	-	PĘKANIE	-
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	7,95	EROZJA MAKROSKOPOWA	-
ZAGŁĘBIENIE	-	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	188,76
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	NISKA
FOTOCHEMICZNA	NISKA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	NISKA
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA

**W1. FORMA DEGRADACJI
ZMIERZONA**



W2. STOPIEŃ DEGRADACJI Znacznie uszkodzony (poniżej 50% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ ŚREDNIA

NR PRÓBK:	ZKG_290423_6
MIEJSCOWOŚĆ	Gąski
KSZTAŁT I STRUKTURA	FRAGMENT (fragment FR)
KOLOR	Czerwony (Red RD))
NASYCENIE KOLORU	Głęboki
IDENTYFIKACJA PRÓBK:	POLY(PROPYLENE), ATACTIC
BAZA DANYCH:	Humel Polymer Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	95,11
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	Nie

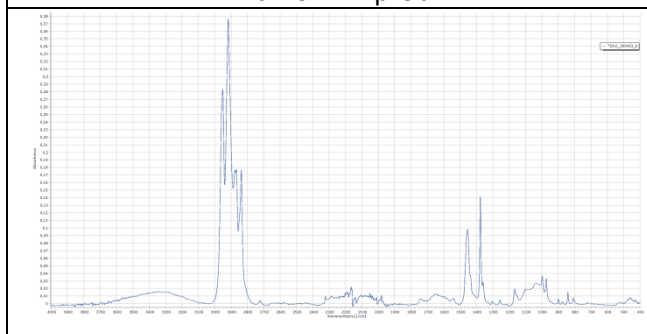
POWIERZCHNIA 1



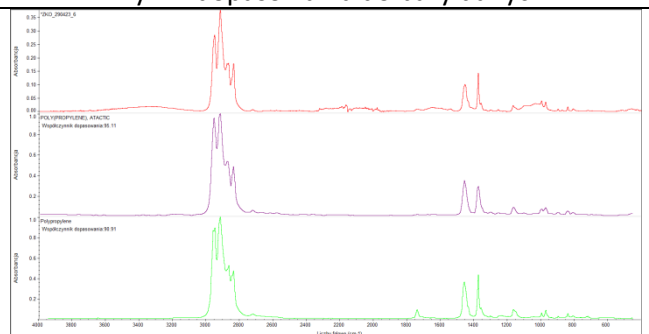
POWIERZCHNIA 2



Widmo FTIR próbki



Wyniki dopasowania do bazy danych



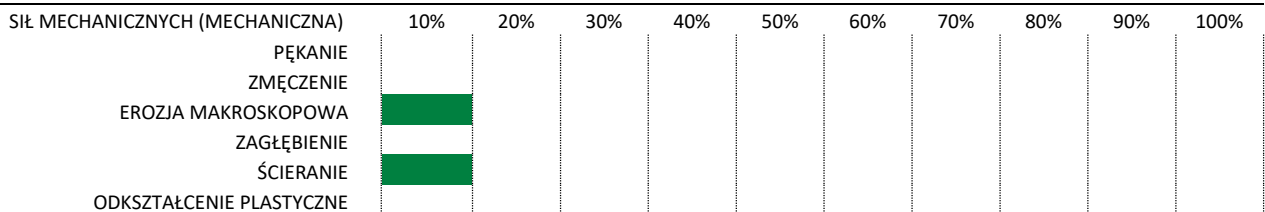
Pomiary [mm²]

POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	213,44	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	208,96
PĘKANIE	-	PĘKANIE	-
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	13,99	EROZJA MAKROSKOPOWA	13,78
ZAGŁĘBIENIE	-	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	15,50	ŚCIERANIE	-
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	NISKA
FOTOCHEMICZNA	NISKA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	NISKA
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA

**W1. FORMA DEGRADACJI
ZMIERZONA**



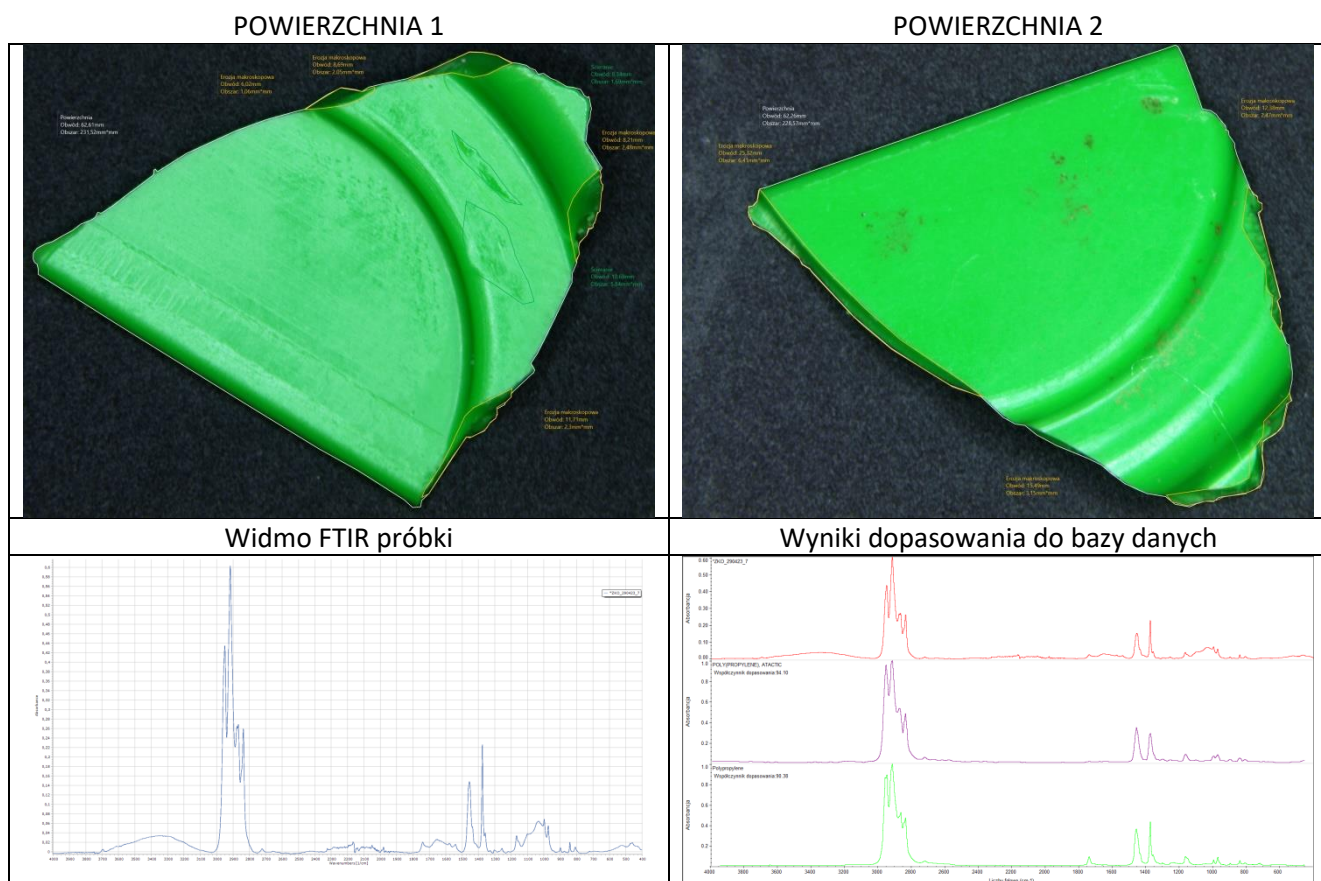
W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

Umiarkowanie uszkodzony (od 50% do 90% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

ŚREDNIA

NR PRÓBKİ:	ZKG_290423_7
MIEJSCOWOŚĆ	Gąski
KSZTAŁT I STRUKTURA	FRAGMENT (fragment FR)
KOLOR	Zielony (Green GN)
NASYCENIE KOLORU	Mocny
IDENTYFIKACJA PRÓBKİ:	POLY(PROPYLENE), ATACTIC
BAZA DANYCH:	Humel Polymer Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	94,1
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	1-25



Pomiary [mm²]

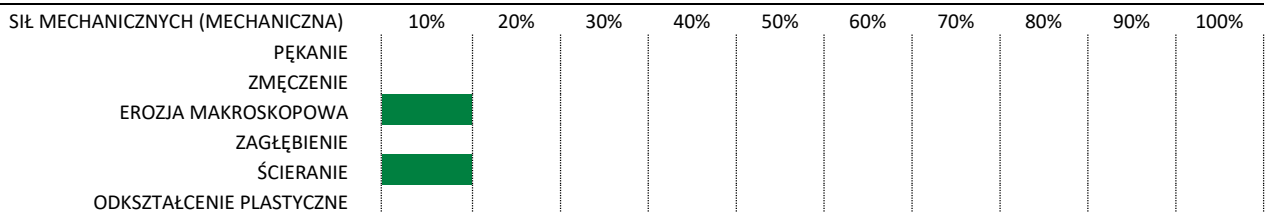
POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	231,52	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	228,57
PĘKANIE	-	PĘKANIE	-
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	7,89	EROZJA MAKROSKOPOWA	12,03
ZAGŁĘBIENIE	-	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	7,43	ŚCIERANIE	-
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	ŚREDNIA
FOTOCHEMICZNA	NISKA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	NISKA
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA

W1. FORMA DEGRADACJI

ZMIERZONA



W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

Nieuszkodzony (powyżej 90% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

ŚREDNIA

NR PRÓBKİ:	ZKG_290423_8
MIEJSCOWOŚĆ	Gąski
KSZTAŁT I STRUKTURA	FRAGMENT (fragment FR)
KOLOR	Zielony (Green GN)
NASYCENIE KOLORU	Głęboki
IDENTYFIKACJA PRÓBKİ:	POLY(STYRENE), ATACTIC
BAZA DANYCH:	Humel Polymer Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	87,18
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	Nie

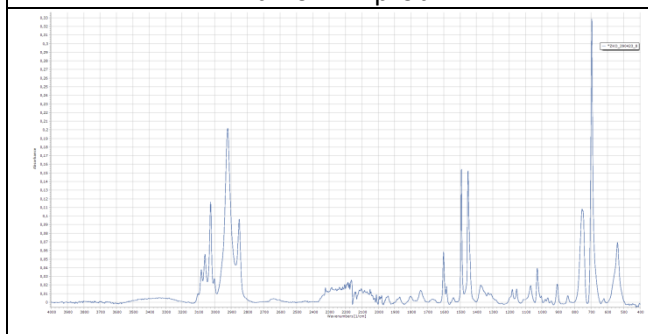
POWIERZCHNIA 1



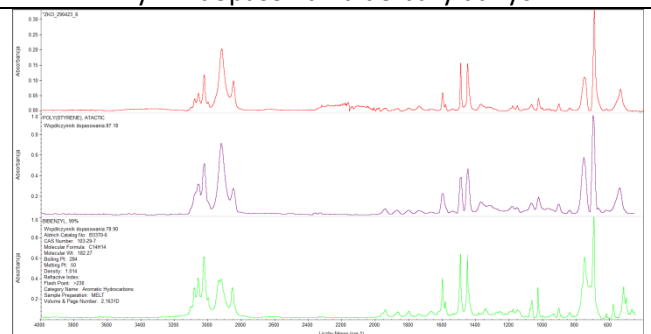
POWIERZCHNIA 2



Widmo FTIR próbki



Wyniki dopasowania do bazy danych



Pomiary [mm²]

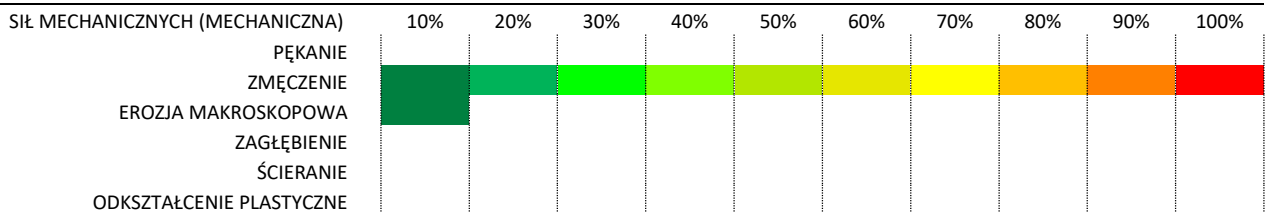
POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	110,38	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	109,01
PĘKANIE	-	PĘKANIE	-
ZMĘCZENIE	110,38	ZMĘCZENIE	109,01
EROZJA MAKROSKOPOWA	-	EROZJA MAKROSKOPOWA	19,41
ZAGŁĘBIENIE	-	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	-
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	ŚREDNIA
FOTOCHEMICZNA	NISKA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	WYSOKA
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA

W1. FORMA DEGRADACJI

ZMIERZONA



W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

Znacznie uszkodzony (poniżej 50% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

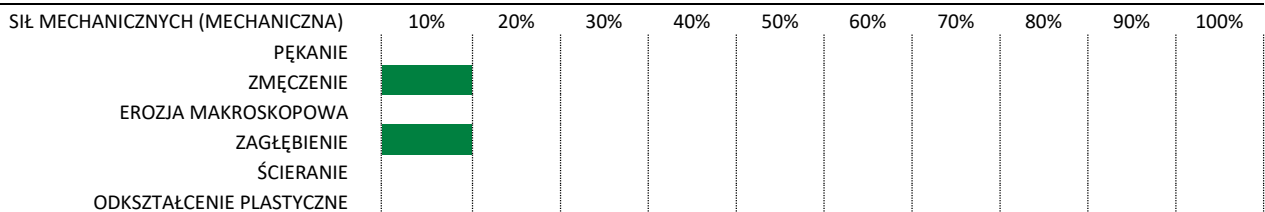
ŚREDNIA DO WYSOKIEJ



W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	ŚREDNIA
FOTOCHEMICZNA	NISKA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	NISKA
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA

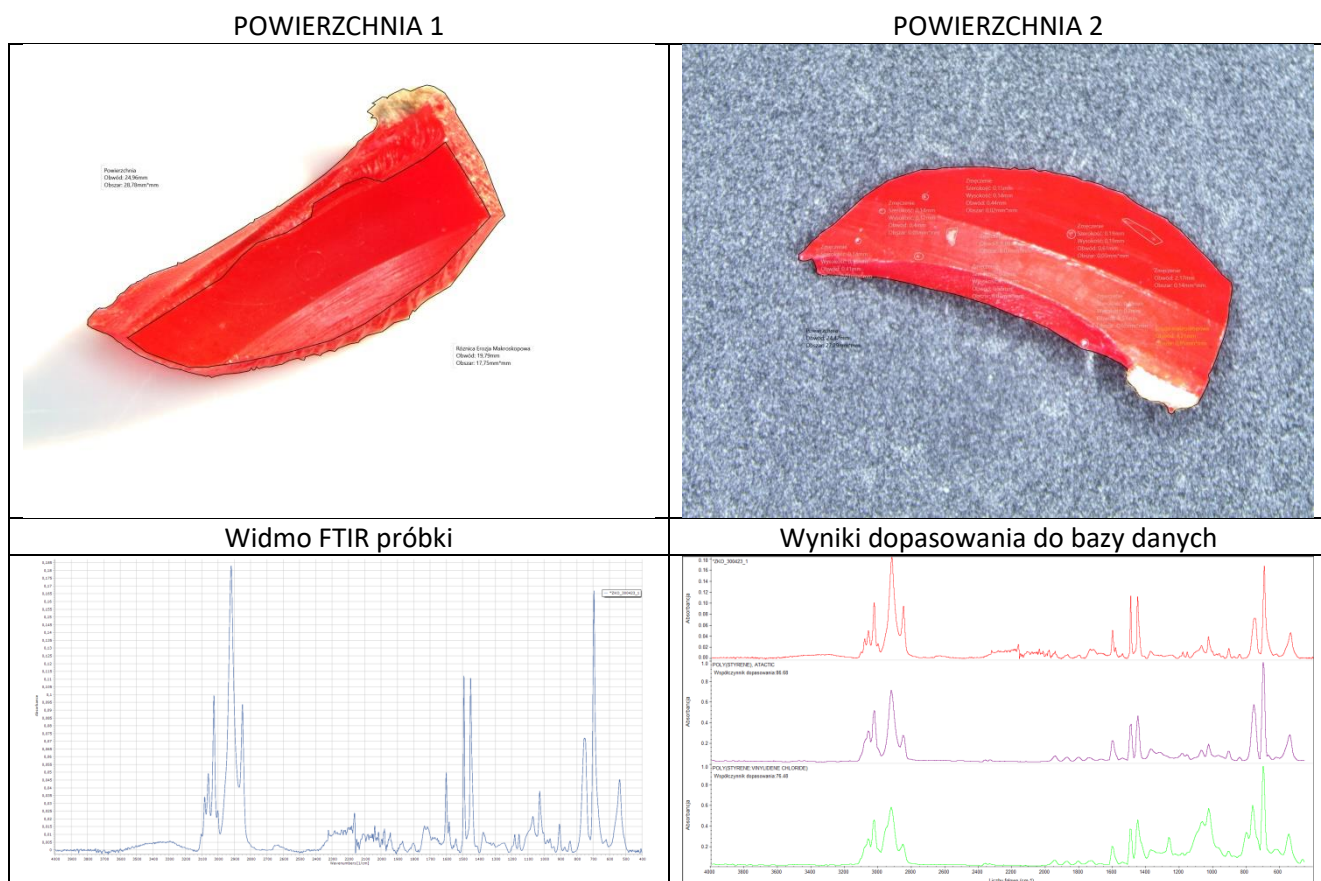
W1. FORMA DEGRADACJI
ZMIERZONA



W2. STOPIEŃ DEGRADACJI Nieuszkodzony (powyżej 90% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ ŚREDNIA

NR PRÓBKİ:	ZKG_300423_1
MIEJSCOWOŚĆ	Gąski
KSZTAŁT I STRUKTURA	FRAGMENT (fragment FR)
KOLOR	Czerwony (Red RD)
NASYCENIE KOLORU	Mocny
IDENTYFIKACJA PRÓBKİ:	POLY(STYRENE), ATACTIC
BAZA DANYCH:	Humel Polymer Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	86,68
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	Nie



Pomiary [mm²]

POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	28,78	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	27,29
PĘKANIE	-	PĘKANIE	-
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	0,33
EROZJA MAKROSKOPOWA	11,03	EROZJA MAKROSKOPOWA	0,85
ZAGŁĘBIENIE	-	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	-
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-

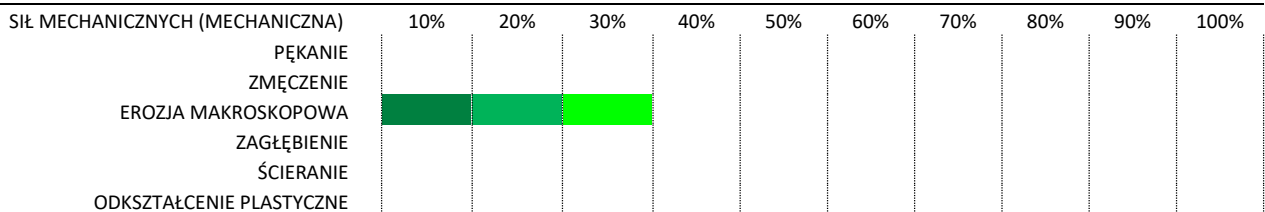
UWAGA

Zastosowano odejmowanie planimetryczne w powierzchni 1 celem wytyczenia powierzchni erozji makroskopowej, ponieważ takie działanie było bardziej efektywne

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	ŚREDNIA
FOTOCHEMICZNA	NISKA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	WYSOKA
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA

**W1. FORMA DEGRADACJI
ZMIERZONA**



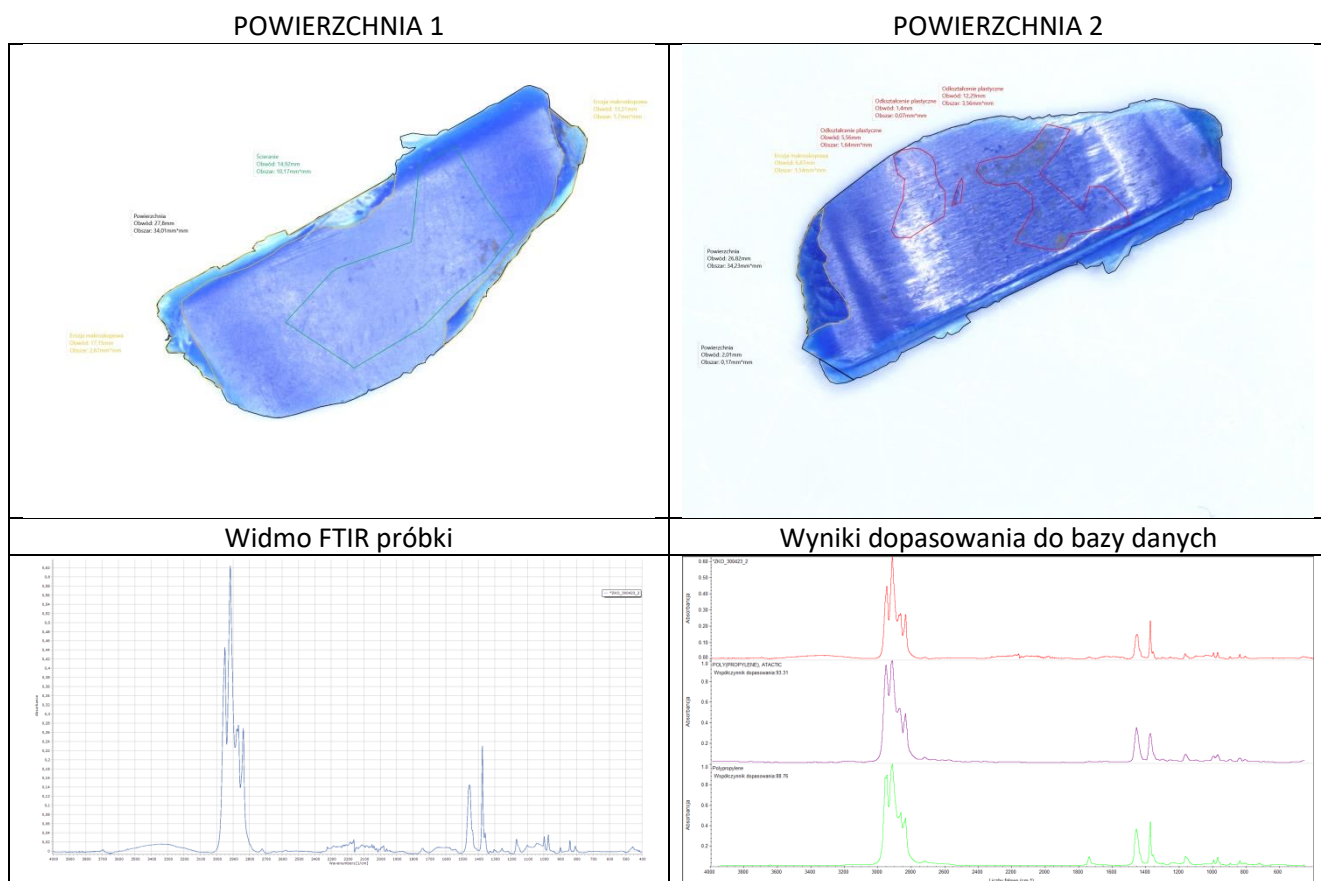
W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

Umiarkowanie uszkodzony (od 50% do 90% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

ŚREDNIA

NR PRÓBKİ:	ZKG_300423_2
MIEJSCOWOŚĆ	Gąski
KSZTAŁT I STRUKTURA	FRAGMENT (fragment FR)
KOLOR	Niebieski (Blue BL)
NASYCENIE KOLORU	Głęboki
IDENTYFIKACJA PRÓBKİ:	POLY(PROPYLENE), ATACTIC
BAZA DANYCH:	Humel Polymer Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	93,31
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	1-25



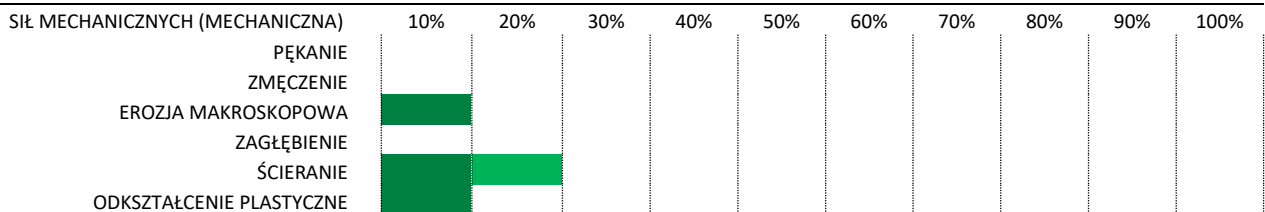
Pomiary [mm²]

POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	34,01	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	34,40
PĘKANIE	-	PĘKANIE	-
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	4,37	EROZJA MAKROSKOPOWA	1,54
ZAGŁĘBIENIE	-	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	10,17	ŚCIERANIE	-
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	5,27

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	ŚREDNIA
FOTOCHEMICZNA	NISKA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	NISKA
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA

**W1. FORMA DEGRADACJI
ZMIERZONA**



W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

Umiarkowanie uszkodzony (od 50% do 90% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

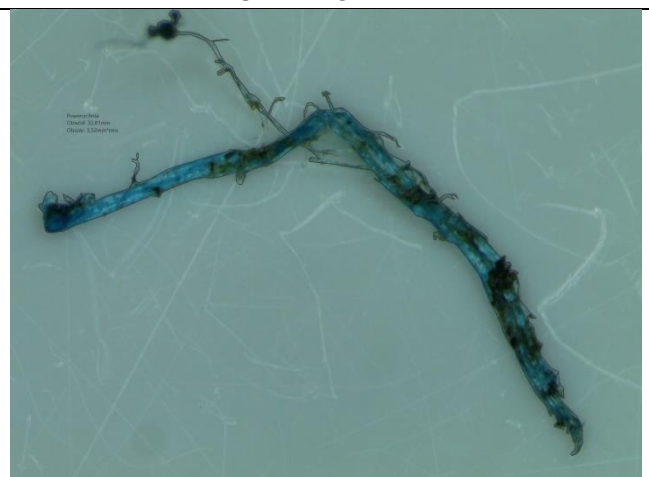
ŚREDNIA

NR PRÓBK:	ZKG_300423_3
MIEJSCOWOŚĆ	Gąski
KSZTAŁT I STRUKTURA	FRAGMENT (fragment FR)
KOLOR	Niebieski (Blue BL)
NASYCENIE KOLORU	Słaby
IDENTYFIKACJA PRÓBK:	POLY(PROPYLENE), ATACTIC
BAZA DANYCH:	Humel Polymer Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	94,59
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	25-50

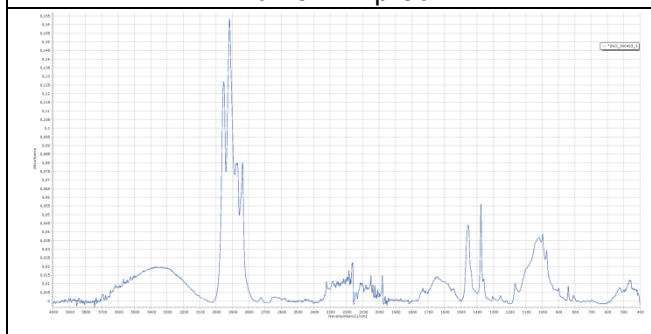
POWIERZCHNIA 1



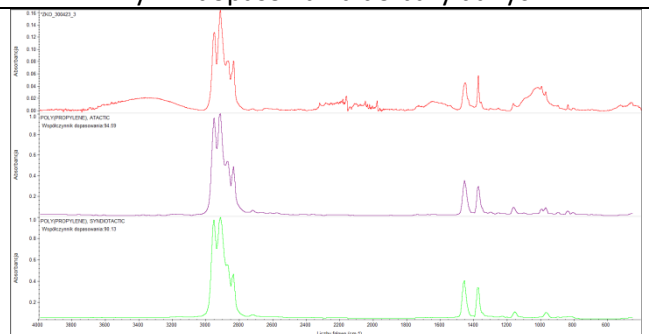
POWIERZCHNIA 2



Widmo FTIR próbki



Wyniki dopasowania do bazy danych



Pomiary [mm²]

POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	3,11	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	3,52
PĘKANIE	-	PĘKANIE	-
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	-	EROZJA MAKROSKOPOWA	-
ZAGŁĘBIENIE	-	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	-
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-

UWAGA

Włókno bardzo trudno sklasyfikować pod względem degradacji mechanicznej zachodzącej na powierzchni.

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	WYSOKA
FOTOCHEMICZNA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
TERMICZNA	ŚREDNIA
UTLENIAJĄCA	WYSOKA
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ

W1. FORMA DEGRADACJI**ZMIERZONA**

SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
PEKANIE										
ZMĘCZENIE										
EROZJA MAKROSKOPOWA										
ZAGŁĘBIENIE										
ŚCIERANIE										
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE										

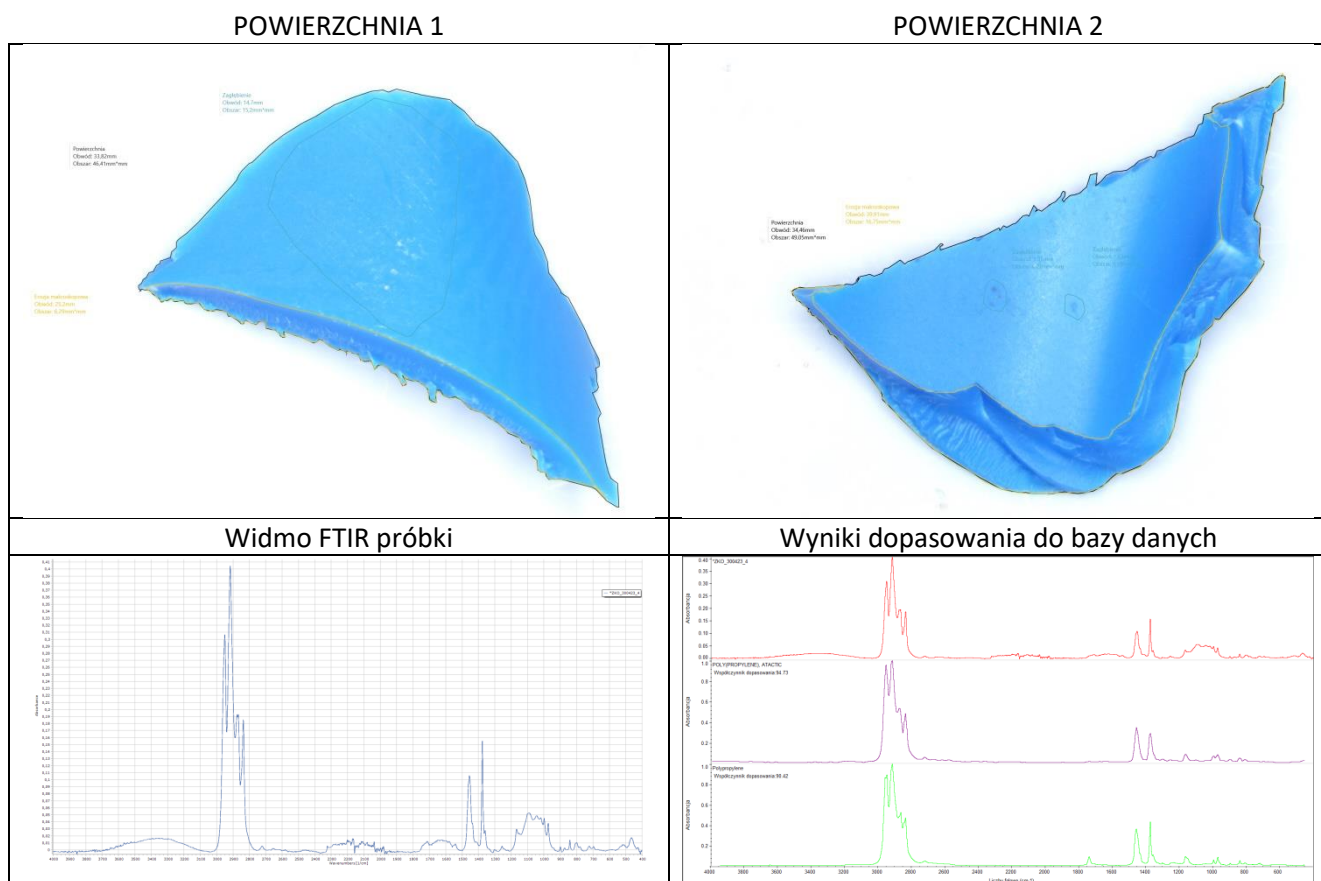
W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

Brak możliwości obliczenia

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

Brak możliwości obliczenia

NR PRÓBKİ:	ZKG_300423_4
MIEJSCOWOŚĆ	Gąski
KSZTAŁT I STRUKTURA	FRAGMENT (fragment FR)
KOLOR	Niebieski (Blue BL)
NASYCENIE KOLORU	Mocny
IDENTYFIKACJA PRÓBKİ:	POLY(PROPYLENE), ATACTIC
BAZA DANYCH:	Humel Polymer Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	94,73
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	Nie



Pomiary [mm²]

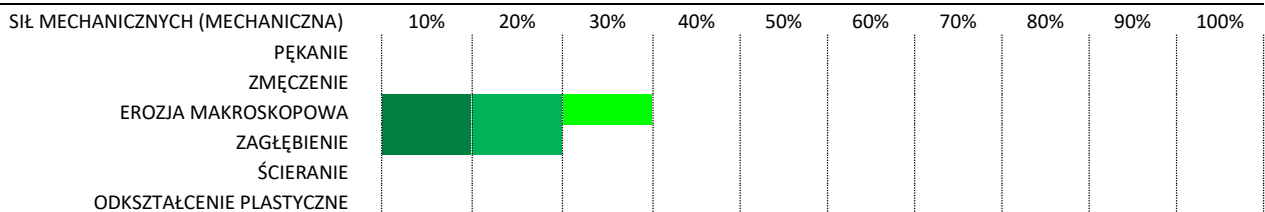
POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	46,41	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	49,05
PĘKANIE	-	PĘKANIE	-
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	6,29	EROZJA MAKROSKOPOWA	16,75
ZAGŁĘBIENIE	15,20	ZAGŁĘBIENIE	0,47
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	-
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	NISKA
FOTOCHEMICZNA	NISKA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	NISKA
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA

W1. FORMA DEGRADACJI

ZMIERZONA



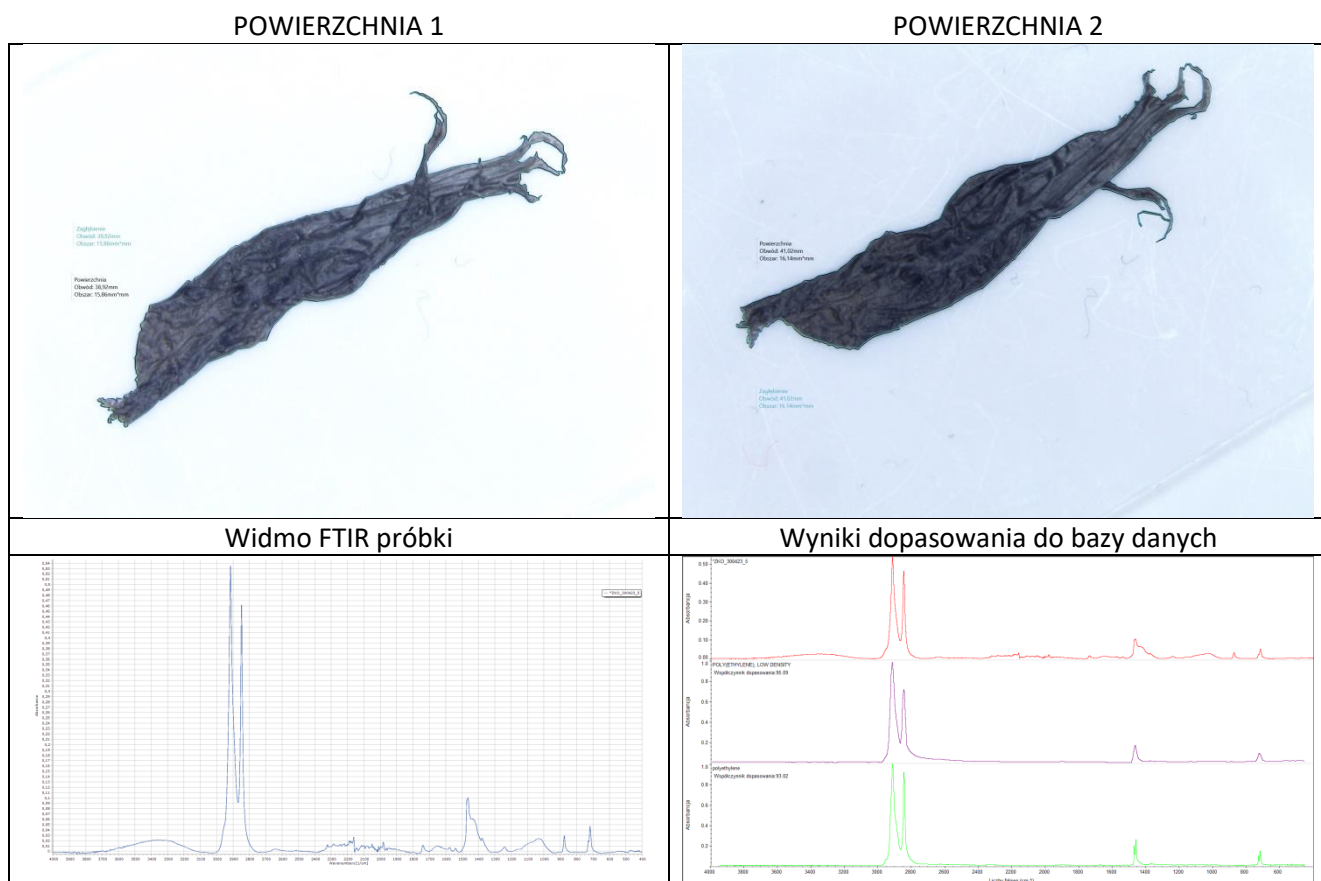
W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

Umiarkowanie uszkodzony (od 50% do 90% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

ŚREDNIA

NR PRÓBK:	ZKG_300423_5
MIEJSCOWOŚĆ	Gąski
KSZTAŁT I STRUKTURA	FOLIA (film FI)
KOLOR	Czarny (Black BK)
NASYCENIE KOLORU	Słaby
IDENTYFIKACJA PRÓBK:	POLY(ETHYLENE), LOW DENSITY
BAZA DANYCH:	Aldrich Condensed Phase Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	95,09
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	Nie



Pomiary [mm²]

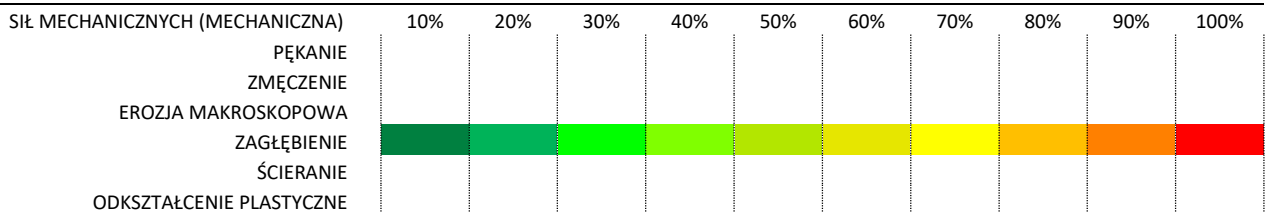
POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	15,86	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	16,14
PĘKANIE	-	PĘKANIE	-
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	-	EROZJA MAKROSKOPOWA	16,14
ZAGŁĘBIENIE	15,86	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	-
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
FOTOCHEMICZNA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
TERMICZNA	ŚREDNIA
UTLENIAJĄCA	WYSOKA
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ

W1. FORMA DEGRADACJI

ZMIERZONA



W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

Znacznie uszkodzony (poniżej 50% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

ŚREDNIA DO WYSOKIEJ

[illegible]

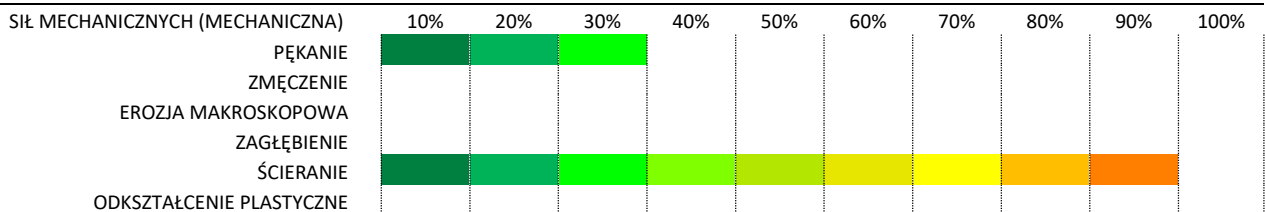
POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	41,63	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	41,63
PĘKANIE	21,25	PĘKANIE	3,07
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	-	EROZJA MAKROSKOPOWA	-
ZAGŁĘBIENIE	-	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	32,62	ŚCIERANIE	41,63
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	NISKA
FOTOCHEMICZNA	NISKA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	NISKA
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	NISKA
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	NISKA

W1. FORMA DEGRADACJI

ZMIERZONA



W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

Znacznie uszkodzony (poniżej 50% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

ŚREDNIA DO WYSOKIEJ

NR PRÓBK:	ZKG_300423_7
MIEJSCOWOŚĆ	Gąski
KSZTAŁT I STRUKTURA	FRAGMENT (fragment FR)
KOLOR	Niebieski (Blue BL)
NASYCENIE KOLORU	Głęboki
IDENTYFIKACJA PRÓBK:	POLY(PROPYLENE), ATACTIC
BAZA DANYCH:	Humel Polymer Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	94,65
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	Nie

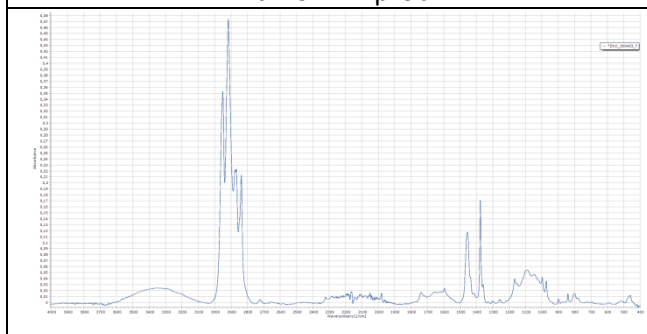
POWIERZCHNIA 1



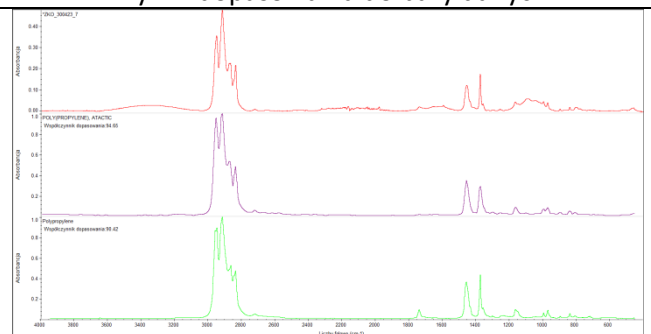
POWIERZCHNIA 2



Widmo FTIR próbki



Wyniki dopasowania do bazy danych



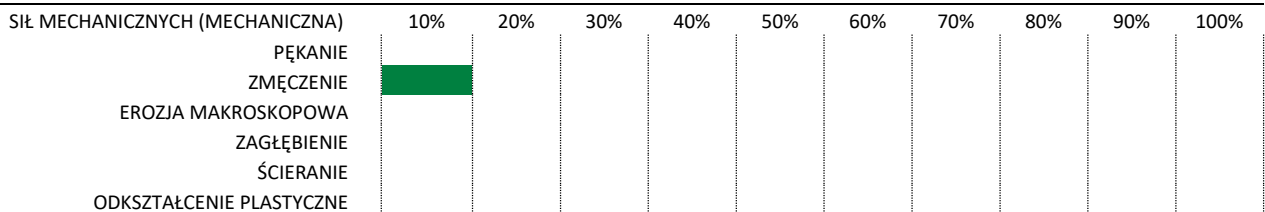
Pomiary [mm²]

POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	14,12	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	13,92
PĘKANIE	-	PĘKANIE	-
ZMĘCZENIE	0,42	ZMĘCZENIE	0,22
EROZJA MAKROSKOPOWA	-	EROZJA MAKROSKOPOWA	-
ZAGŁĘBIENIE	-	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	-
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	NISKA
FOTOCHEMICZNA	NISKA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	NISKA
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA

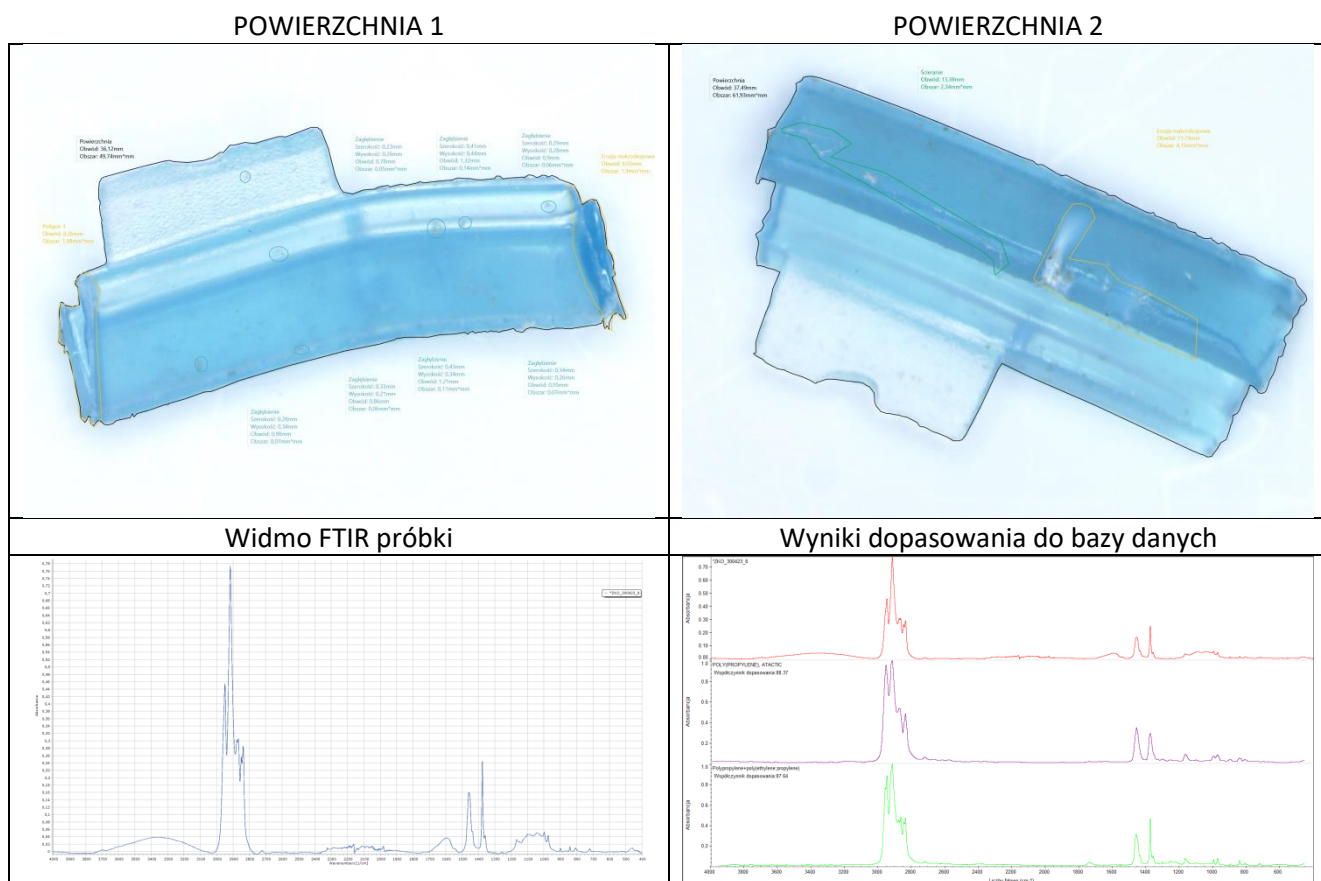
W1. FORMA DEGRADACJI
ZMIERZONA



W2. STOPIEŃ DEGRADACJI Nieuszkodzony (powyżej 90% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ ŚREDNIA

NR PRÓBKII:	ZKG_300423_8
MIEJSCOWOŚĆ	Gąski
KSZTAŁT I STRUKTURA	FRAGMENT (fragment FR)
KOLOR	Niebieski (Blue BL)
NASYCENIE KOLORU	Słaby
IDENTYFIKACJA PRÓBKII:	POLY(PROPYLENE), ATACTIC
BAZA DANYCH:	Humel Polymer Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	88,37
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	1-25



Pomiary [mm²]

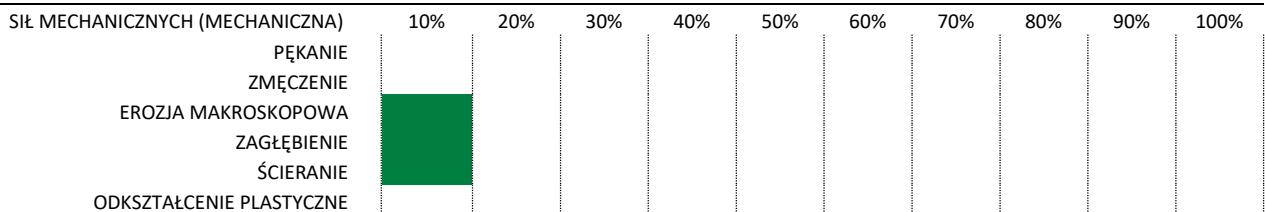
POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	49,74	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	61,93
PĘKANIE	-	PĘKANIE	-
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	3,88	EROZJA MAKROSKOPOWA	4,19
ZAGŁĘBIENIE	4,84	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	2,34
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
FOTOCHEMICZNA	ŚREDNIA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	ŚREDNIA
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ

W1. FORMA DEGRADACJI

ZMIERZONA



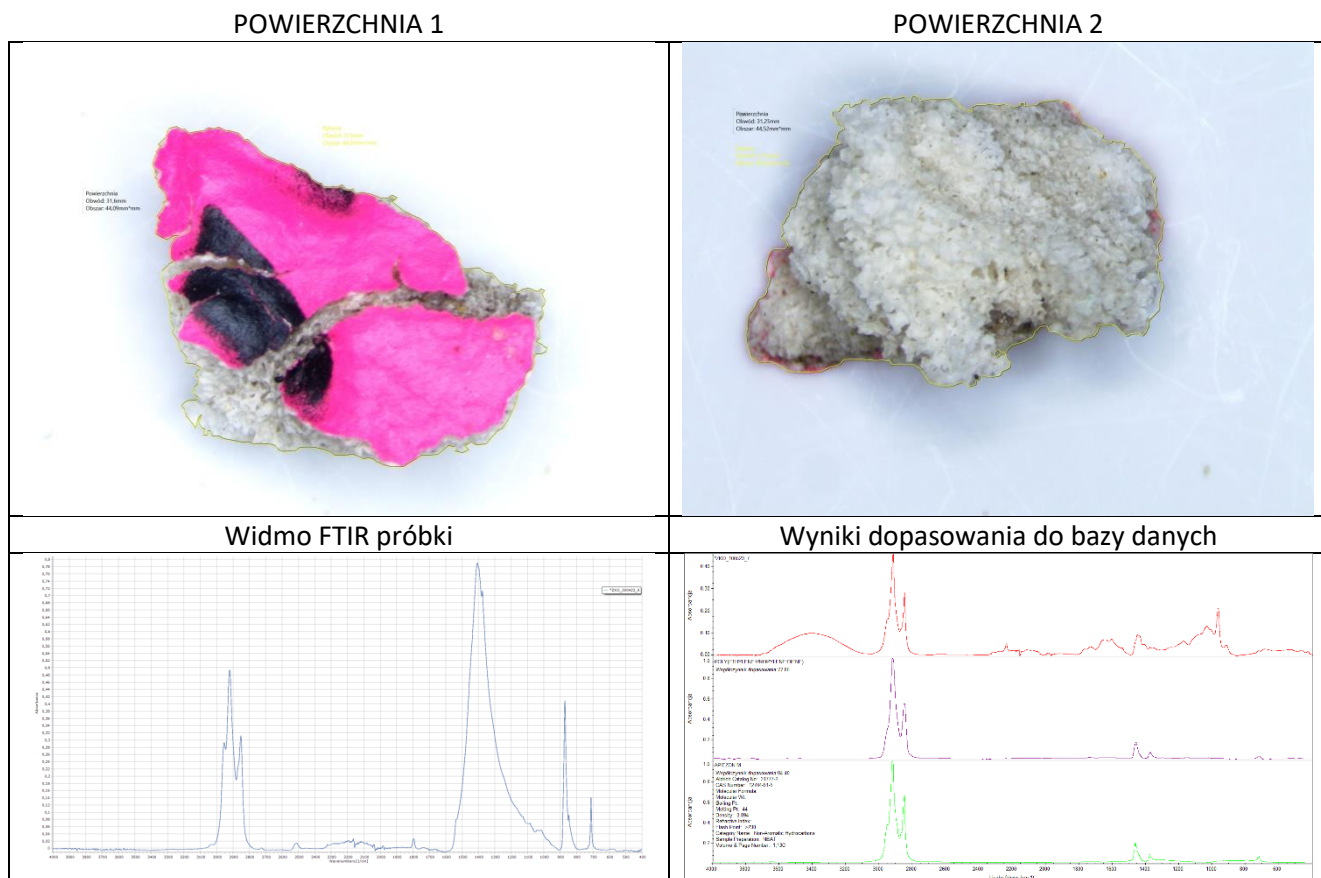
W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

Umiarkowanie uszkodzony (od 50% do 90% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

ŚREDNIA DO WYSOKIEJ

NR PRÓBK:	ZKG_300423_9
MIEJSCOWOŚĆ	Gąski
KSZTAŁT I STRUKTURA	PIANKA (Foam FM)
KOLOR	Wszystkie nieprzezroczyste (All opaque AO)
NASYCENIE KOLORU	Mocny
IDENTYFIKACJA PRÓBK:	POLY(ETHYLENE:PROPYLENE:DIENE)
BAZA DANYCH:	HR Aldrich Organometallic, Inorganic, Silanes, Boranes
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	77,44
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	1-25



Pomiary [mm²]

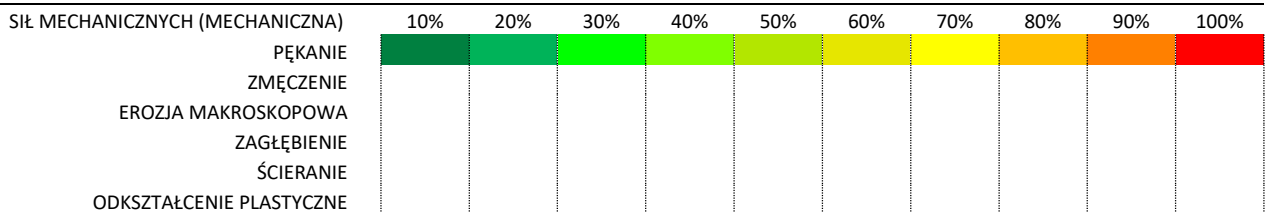
POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	44,09	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	44,52
PĘKANIE	44,09	PĘKANIE	44,52
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	-	EROZJA MAKROSKOPOWA	-
ZAGŁĘBIENIE	-	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	-
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	ŚREDNIA
FOTOCHEMICZNA	ŚREDNIA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA

W1. FORMA DEGRADACJI

ZMIERZONA



W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

Znacznie uszkodzony (poniżej 50% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

ŚREDNIA DO WYSOKIEJ

NR PRÓBK:	ZKG_300423_10
MIEJSCOWOŚĆ	Gąski
KSZTAŁT I STRUKTURA	WŁÓKNO (fibre FB)
KOLOR	Zielony (Green GN))
NASYCENIE KOLORU	Blady
IDENTYFIKACJA PRÓBK:	POLY(PROPYLENE), ATACTIC
BAZA DANYCH:	Humel Polymer Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	80,89
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	1-25

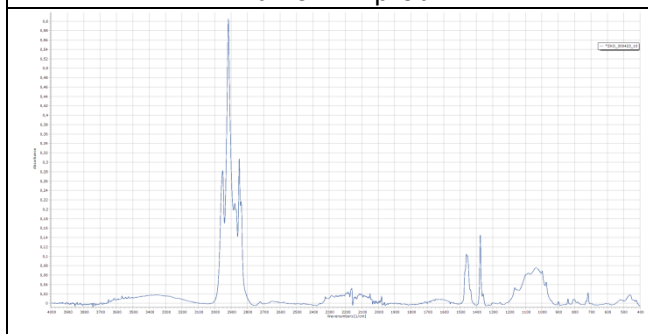
POWIERZCHNIA 1



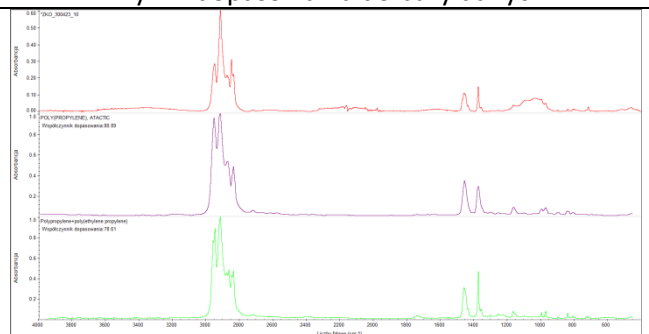
POWIERZCHNIA 2



Widmo FTIR próbki



Wyniki dopasowania do bazy danych



Pomiary [mm²]

POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	16,80	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	17,54
PĘKANIE	-	PĘKANIE	-
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	-	EROZJA MAKROSKOPOWA	-
ZAGŁĘBIENIE	-	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	-
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	WYSOKA
FOTOCHEMICZNA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
TERMICZNA	ŚREDNIA
UTLENIAJĄCA	WYSOKA
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ

**W1. FORMA DEGRADACJI
ZMIERZONA**

SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
PEKANIE										
ZMĘCZENIE										
EROZJA MAKROSKOPOWA										
ZAGŁĘBIENIE										
ŚCIERANIE										
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE										

W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

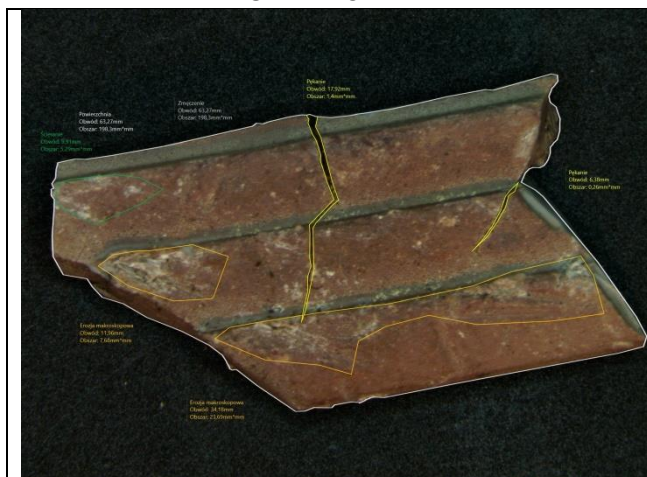
Brak możliwości obliczenia

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

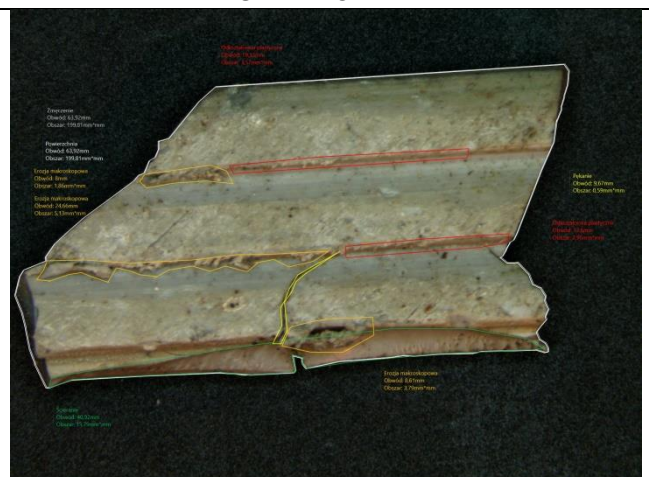
Brak możliwości obliczenia

NR PRÓBKİ:	ZKO_91021_1
MIEJSCOWOŚĆ	Kołobrzeg
KSZTAŁT I STRUKTURA	FRAGMENT (fragment FR)
KOLOR	Szary (Grey GY)
NASYCENIE KOLORU	Słaby
IDENTYFIKACJA PRÓBKİ:	Tygon polimer B-44-4X
BAZA DANYCH:	HR Nicolet Sampler Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	84.17
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	1-25

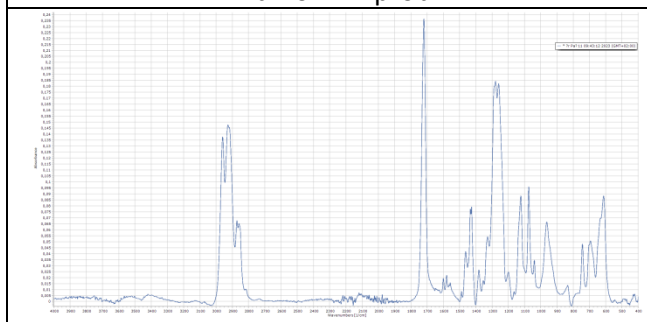
POWIERZCHNIA 1



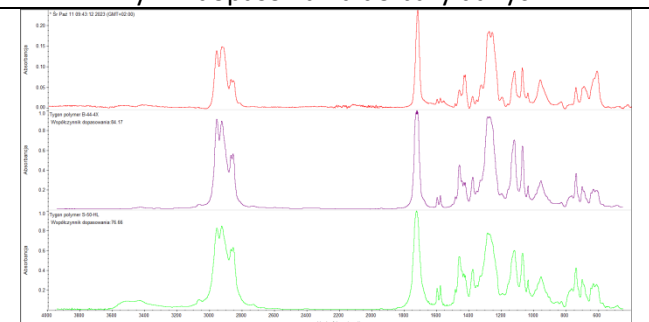
POWIERZCHNIA 2



Widmo FTIR próbki



Wyniki dopasowania do bazy danych



Pomiary [mm²]

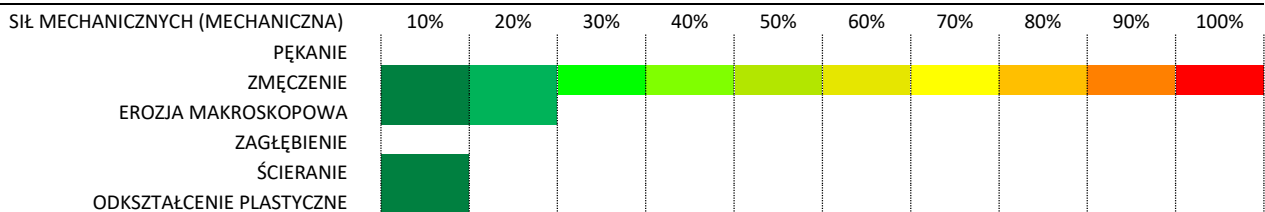
POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	198,30	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	199,81
PĘKANIE	1,66	PĘKANIE	0,59
ZMĘCZENIE	198,30	ZMĘCZENIE	199,81
EROZJA MAKROSKOPOWA	31,37	EROZJA MAKROSKOPOWA	10,78
ZAGŁĘBIENIE	-	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	5,29	ŚCIERANIE	15,79
ODKSZTAŁENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁENIE PLASTYCZNE	6,53

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	ŚREDNIA
FOTOCHEMICZNA	NISKA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	NISKA
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	NISKA
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	NISKA

W1. FORMA DEGRADACJI

ZMIERZONA



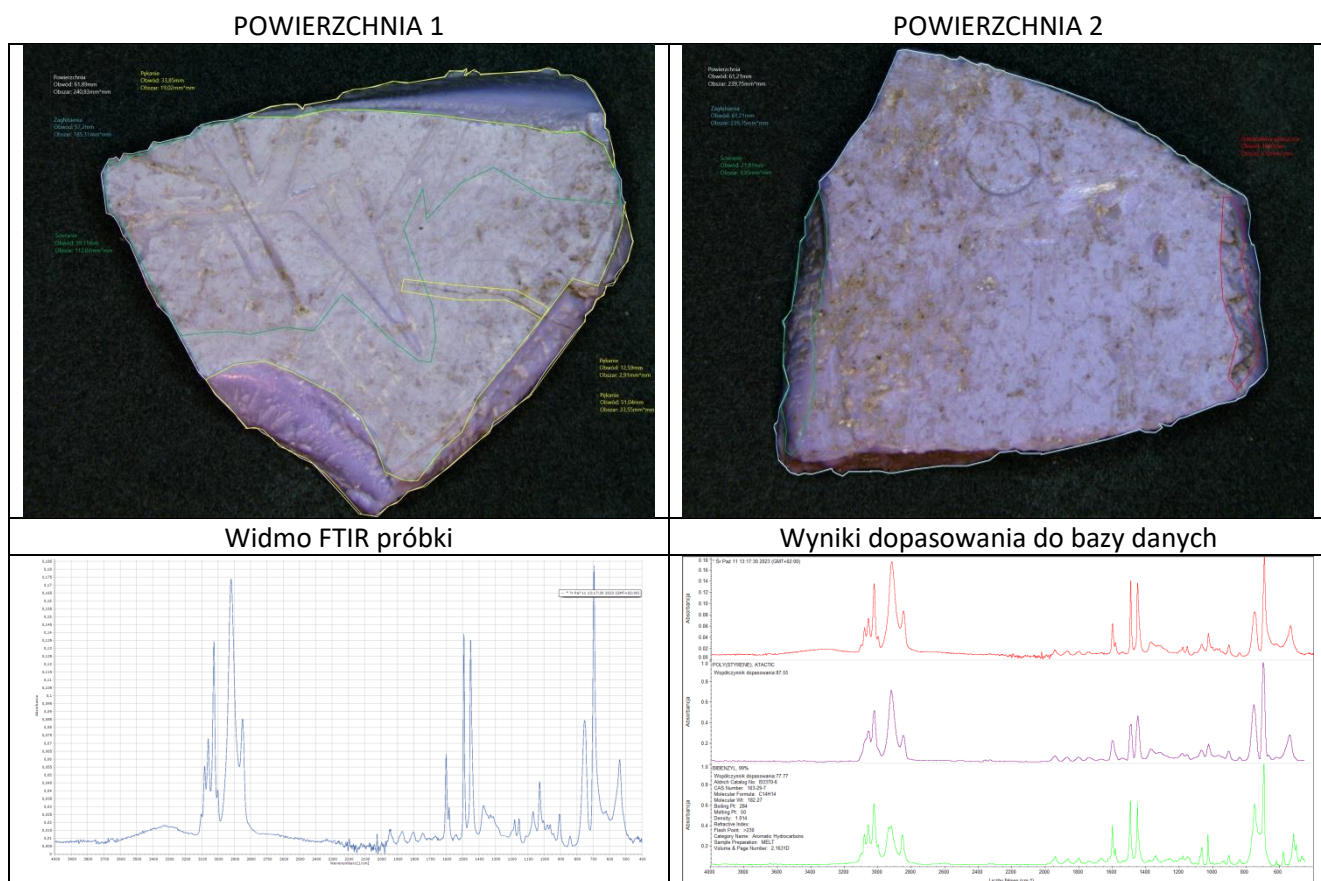
W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

Znacznie uszkodzony (poniżej 50% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

ŚREDNIA DO WYSOKIEJ

NR PRÓBKİ:	ZKO_91021_2
MIEJSCOWOŚĆ	Kołobrzeg
KSZTAŁT I STRUKTURA	FRAGMENT (fragment FR)
KOLOR	Turkusowy (Turquoise TQ)
NASYCENIE KOLORU	Słaby
IDENTYFIKACJA PRÓBKİ:	POLY(STYRENE), ATACTIC
BAZA DANYCH:	Humel Polymer Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	87,55
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	1-25



Pomiary [mm²]

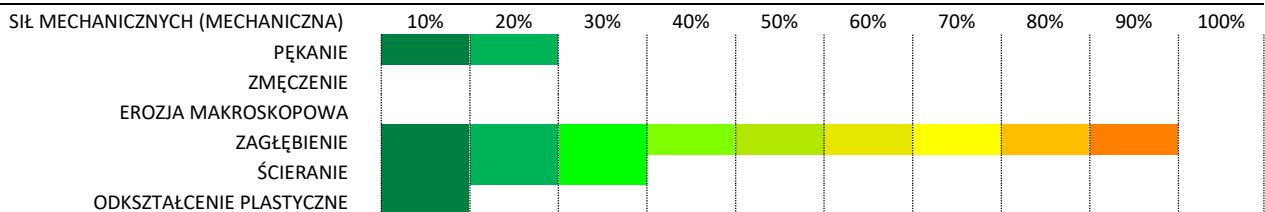
POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	240,83	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	239,75
PĘKANIE	55,48	PĘKANIE	-
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	-	EROZJA MAKROSKOPOWA	-
ZAGŁĘBIENIE	185,31	ZAGŁĘBIENIE	239,75
ŚCIERANIE	112,02	ŚCIERANIE	9,85
ODKSZTAŁENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁENIE PLASTYCZNE	6,12

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
FOTOCHEMICZNA	ŚREDNIA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	WYSOKA
TERMICZNA	ŚREDNIA
UTLENIAJĄCA	WYSOKA
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ

W1. FORMA DEGRADACJI

ZMIERZONA



W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

Znacznie uszkodzony (poniżej 50% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

WYSOKA

The figure consists of four panels. The top-left panel, titled 'POWIERZCHNIA 1', shows a 3D surface map of the sample with a legend indicating 'Powierzchnia' (Surface), 'Kanal 21 (um)' (Channel 21 (um)), and 'Kanal 22 (um)' (Channel 22 (um)). The top-right panel, titled 'POWIERZCHNIA 2', shows a similar 3D surface map with a legend indicating 'Powierzchnia', 'Kanal 21 (um)', and 'Kanal 22 (um)'. The bottom-left panel, titled 'Widmo FTIR próbk', shows the FTIR spectrum of the sample, plotting transmittance (%) on the y-axis (0 to 100) against wavenumber (cm⁻¹) on the x-axis (4000 to 500). The bottom-right panel, titled 'Wyniki dopasowania do bazy danych', shows three stacked FTIR spectra for comparison with a library. The top spectrum is red, the middle is purple, and the bottom is green. Each spectrum has a legend indicating the sample name and the channel used for the measurement.

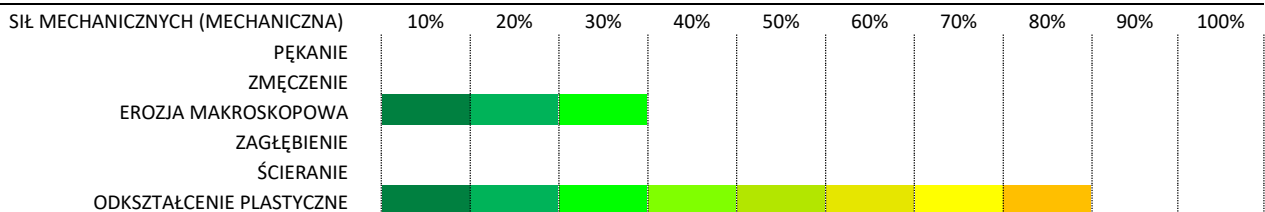
POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	16,20	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	16,15
PĘKANIE	-	PĘKANIE	-
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	3,30	EROZJA MAKROSKOPOWA	4,62
ZAGŁĘBIENIE	-	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	-
ODKSZTAŁENIE PLASTYCZNE	24,03	ODKSZTAŁENIE PLASTYCZNE	-

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	ŚREDNIA
FOTOCHEMICZNA	ŚREDNIA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	WYSOKA
TERMICZNA	ŚREDNIA
UTLENIAJĄCA	WYSOKA
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ

W1. FORMA DEGRADACJI

ZMIERZONA



W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

Znacznie uszkodzony (poniżej 50% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

ŚREDNIA DO WYSOKIEJ

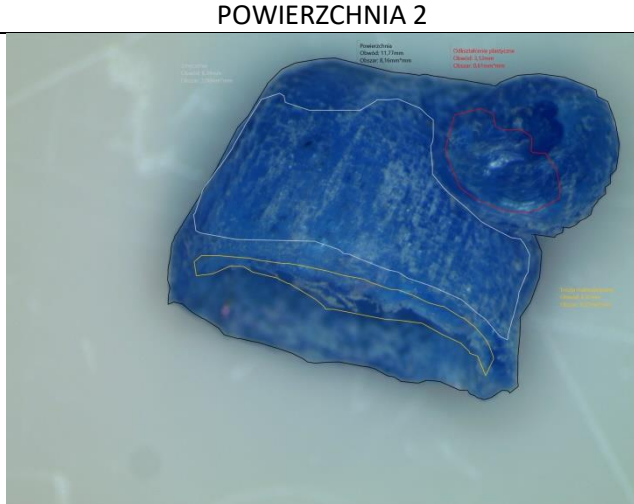
POWIERZCHNIA 1



Przebiegła
Ciężko: 11.50mm
Ciężko: 1.20mm/1mm

Calculation: 11.50mm
Ciężko: 1.20mm/1mm

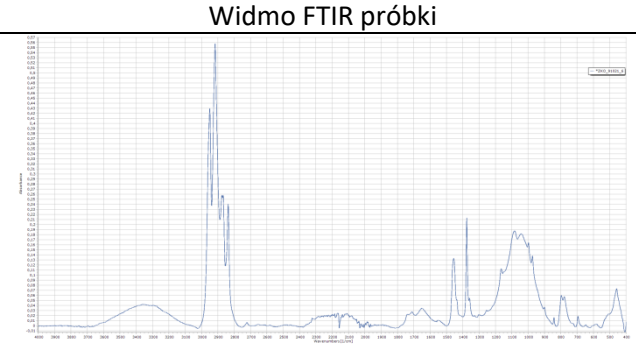
POWIERZCHNIA 2



Przebiegła
Ciężko: 11.70mm
Ciężko: 1.20mm/1mm

Calculation: 11.70mm
Ciężko: 1.20mm/1mm

Widmo FTIR próbki



Wavenumber (cm⁻¹)

Absorbance

Wyniki dopasowania do bazy danych



Reference spectra for:

- POLYPROPYLENE (PP)
- POLYPROPYLENE (PP) + ATACTIC POLYPROPYLENE (AP)

Wavenumber (cm⁻¹)

Absorbance

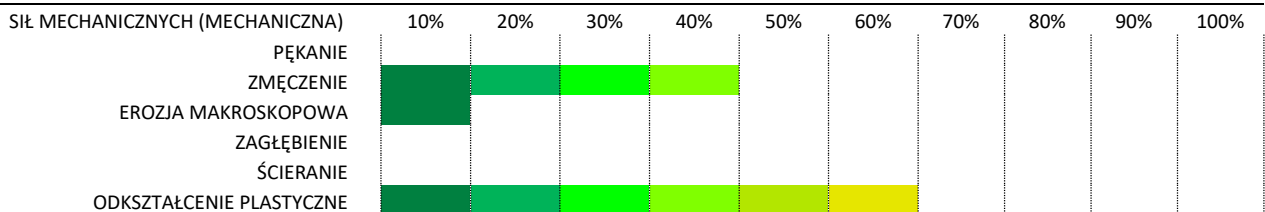
POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	7,75	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	8,16
PĘKANIE	-	PĘKANIE	-
ZMĘCZENIE	2,68	ZMĘCZENIE	3,08
EROZJA MAKROSKOPOWA	-	EROZJA MAKROSKOPOWA	0,57
ZAGŁĘBIENIE	-	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	-
ODKSZTAŁENIE PLASTYCZNE	7,75	ODKSZTAŁENIE PLASTYCZNE	0,61

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	ŚREDNIA
FOTOCHEMICZNA	ŚREDNIA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	ŚREDNIA
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ

W1. FORMA DEGRADACJI

ZMIERZONA



W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

Znacznie uszkodzony (poniżej 50% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

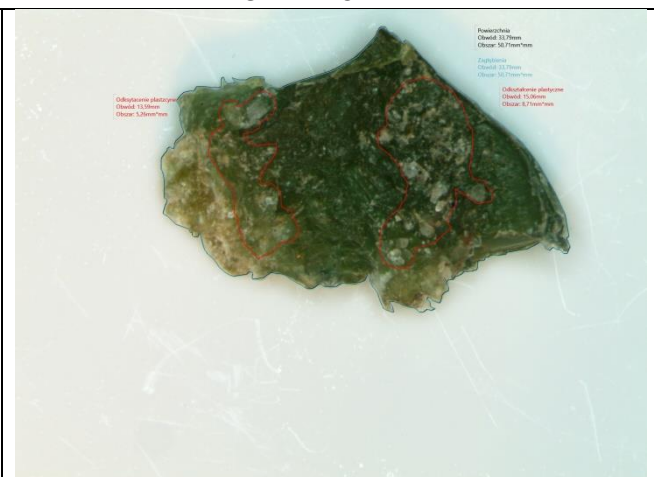
ŚREDNIA DO WYSOKIEJ

NR PRÓBKİ:	ZKO_91021_7
MIEJSCOWOŚĆ	Kołobrzeg
KSZTAŁT I STRUKTURA	FRAGMENT (fragment FR)
KOLOR	Oliwkowy (Olive OL)
NASYCENIE KOLORU	Blady
IDENTYFIKACJA PRÓBKİ:	Tygon polymer B-44-4X
BAZA DANYCH:	Hr Nicolet Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	79,08
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	1-25

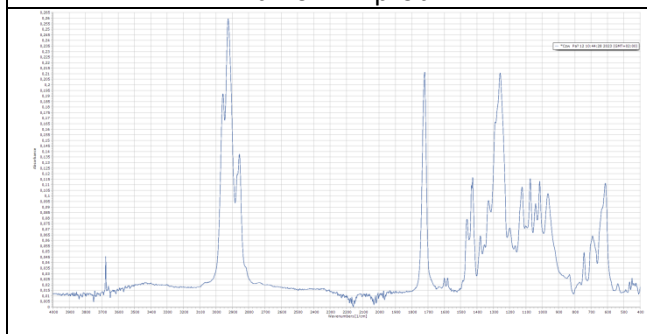
POWIERZCHNIA 1



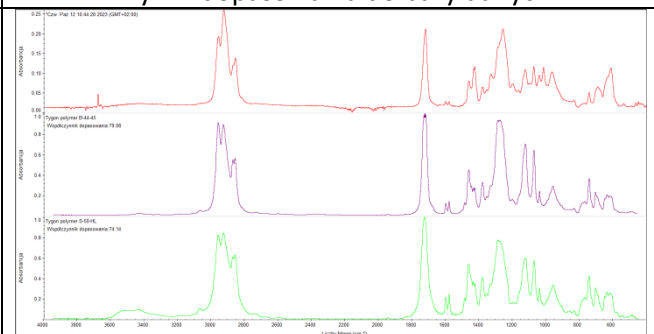
POWIERZCHNIA 2



Widmo FTIR próbki



Wyniki dopasowania do bazy danych



Pomiary [mm²]

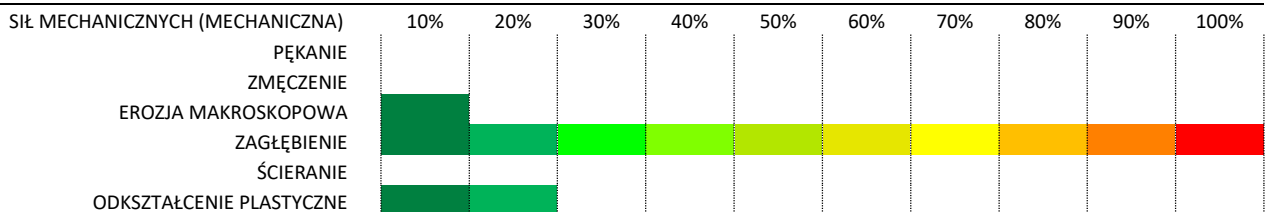
POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	50,51	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	50,71
PĘKANIE	-	PĘKANIE	-
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	8,56	EROZJA MAKROSKOPOWA	-
ZAGŁĘBIENIE	50,51	ZAGŁĘBIENIE	50,71
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	-
ODKSZTAŁENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁENIE PLASTYCZNE	13,97

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	ŚREDNIA
FOTOCHEMICZNA	NISKA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	NISKA
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	NISKA
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	NISKA

W1. FORMA DEGRADACJI

ZMIERZONA



W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

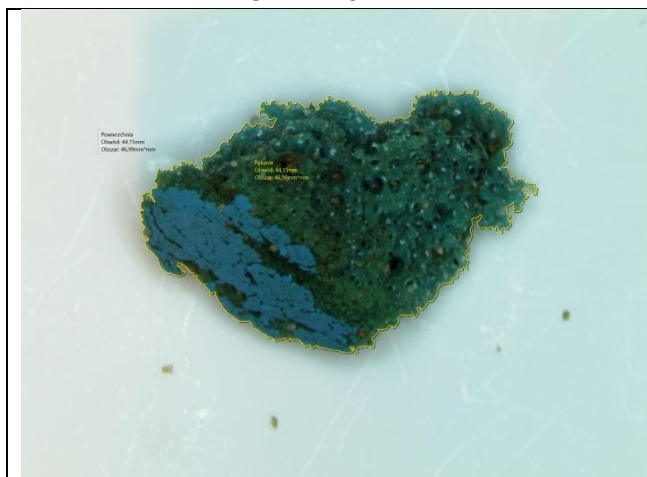
Znacznie uszkodzony (poniżej 50% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

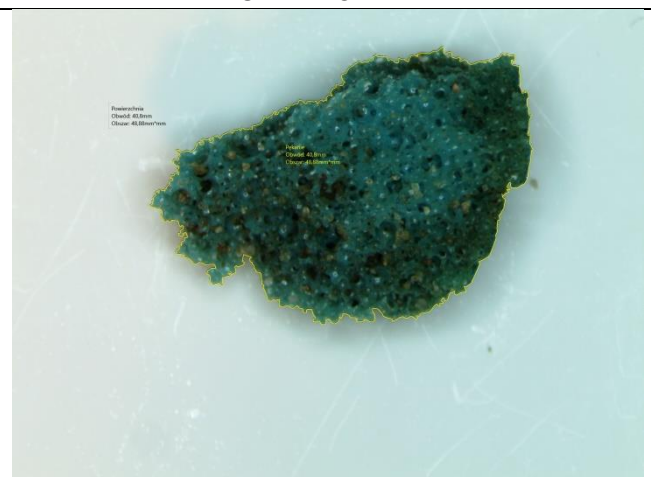
WYSOKA

NR PRÓBKİ:	ZKO_91021_8
MIEJSCOWOŚĆ	Kołobrzeg
KSZTAŁT I STRUKTURA	PIANKA (foam FM)
KOLOR	Turkusowy (Turquoise TQ)
NASYCENIE KOLORU	Słaby
IDENTYFIKACJA PRÓBKİ:	Polyether urethane, PPO+MBI, pyrol
BAZA DANYCH:	Hr Nicolet Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	77,02
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	Nie

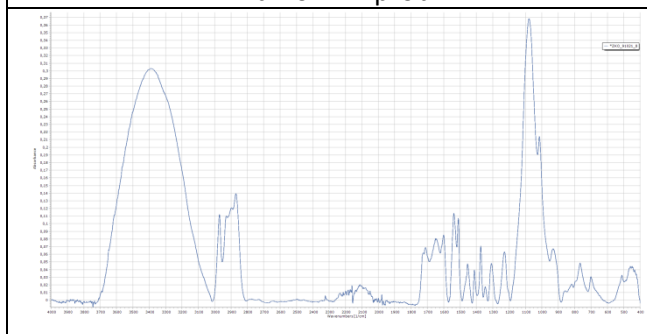
POWIERZCHNIA 1



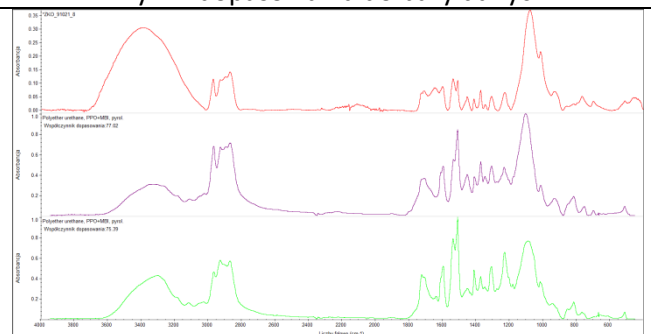
POWIERZCHNIA 2



Widmo FTIR próbki



Wyniki dopasowania do bazy danych



Pomiary [mm²]

POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	46,99	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	48,88
PĘKANIE	46,99	PĘKANIE	48,88
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	-	EROZJA MAKROSKOPOWA	-
ZAGŁĘBIENIE	-	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	-
ODKSZTAŁENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁENIE PLASTYCZNE	-

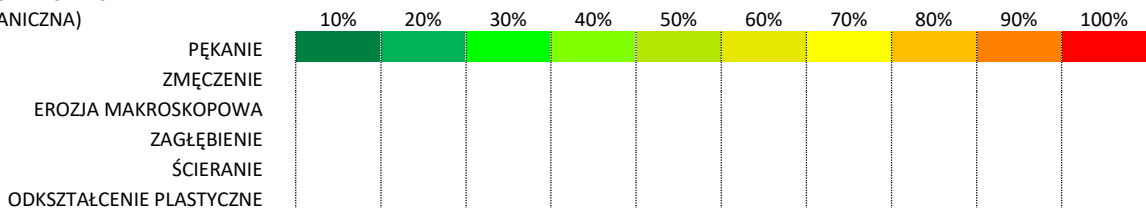
W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	ŚREDNIA
FOTOCHEMICZNA	ŚREDNIA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
TERMICZNA	ŚREDNIA
UTLENIAJĄCA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA

W1. FORMA DEGRADACJI

ZMIERZONA

SIŁ MECHANICZNYCH
(MECHANICZNA)



W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

Znacznie uszkodzony (poniżej 50% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

WYSOKA

NR PRÓBKİ:	ZKO_91021_10
MIEJSCOWOŚĆ	Kołobrzeg
KSZTAŁT I STRUKTURA	FRAGMENT (fragment FR)
KOLOR	Zielony (Green GN)
NASYCENIE KOLORU	Głęboki
IDENTYFIKACJA PRÓBKİ:	POLY(PROPYLENE), ATACTIC
BAZA DANYCH:	Humel Polymer Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	93,68
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	Nie

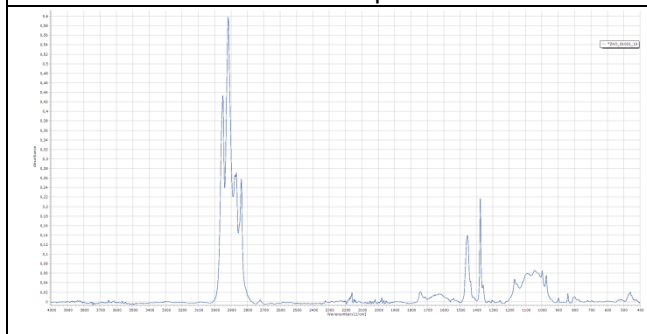
POWIERZCHNIA 1



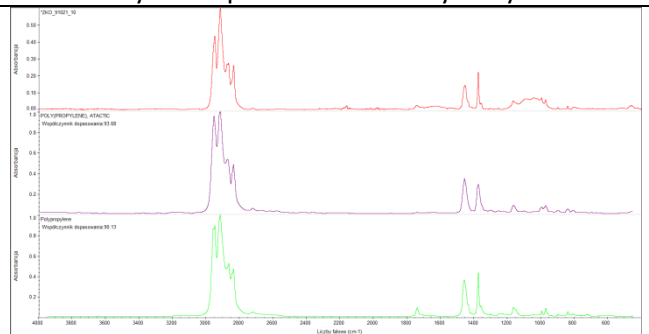
POWIERZCHNIA 2



Widmo FTIR próbki



Wyniki dopasowania do bazy danych



Pomiary [mm²]

POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	77,21	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	79,95
PĘKANIE	-	PĘKANIE	-
ZMĘCZENIE	4,9	ZMĘCZENIE	5,09
EROZJA MAKROSKOPOWA	-	EROZJA MAKROSKOPOWA	22,74
ZAGŁĘBIENIE	-	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	-
ODKSZTAŁENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁENIE PLASTYCZNE	-

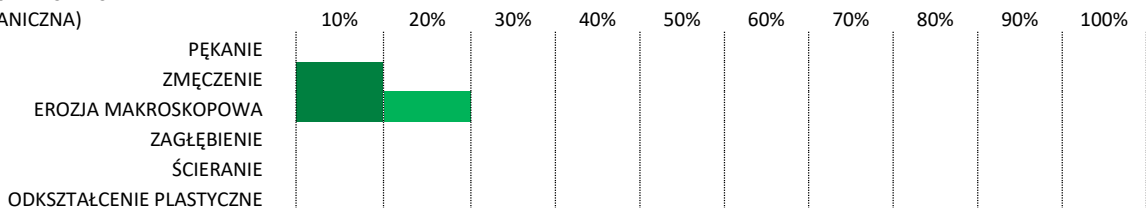
W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	NISKA
FOTOCHEMICZNA	NISKA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	NISKA
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA

W1. FORMA DEGRADACJI

ZMIERZONA

SIŁ MECHANICZNYCH
(MECHANICZNA)



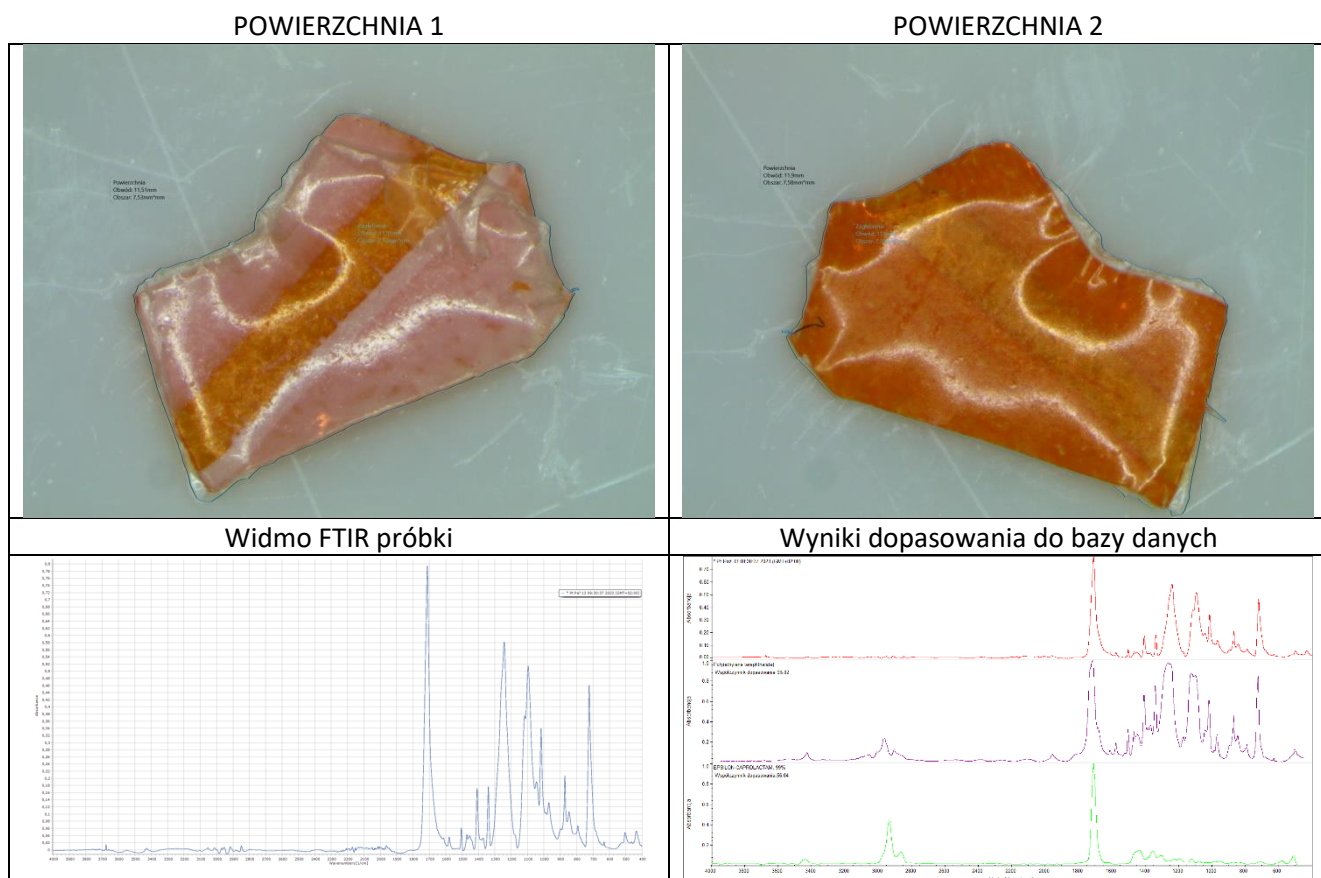
W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

Umiarkowanie uszkodzony (od 50% do 90% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

ŚREDNIA

NR PRÓBKİ:	ZKO_91021_11
MIEJSCOWOŚĆ	Kołobrzeg
KSZTAŁT I STRUKTURA	FOLIA (film FI)
KOLOR	Pomarańczowy (Orange OR)
NASYCENIE KOLORU	Mocny
IDENTYFIKACJA PRÓBKİ:	Poly(ethylene terephthalene)
BAZA DANYCH:	Primpke 227
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	95,82
POKRYCIE BIOFILMEM	Nie



Pomiary [mm²]

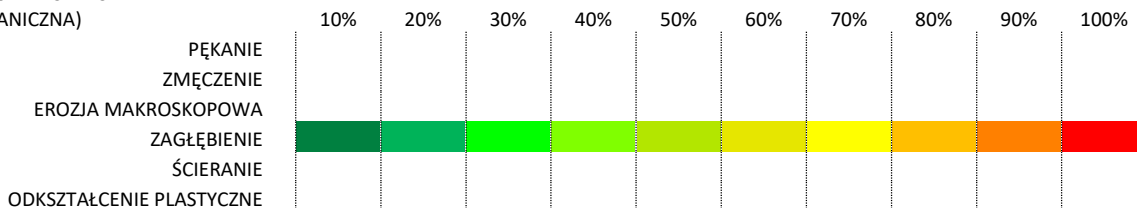
POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	7,53	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	7,58
PĘKANIE	-	PĘKANIE	-
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	-	EROZJA MAKROSKOPOWA	-
ZAGŁĘBIENIE	7,53	ZAGŁĘBIENIE	7,58
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	-
ODKSZTAŁENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁENIE PLASTYCZNE	-

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	NISKA
FOTOCHEMICZNA	NISKA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	ŚREDNIA
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	ŚREDNIA
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	NISKA

W1. FORMA DEGRADACJI**ZMIERZONA**

SIŁ MECHANICZNYCH
(MECHANICZNA)

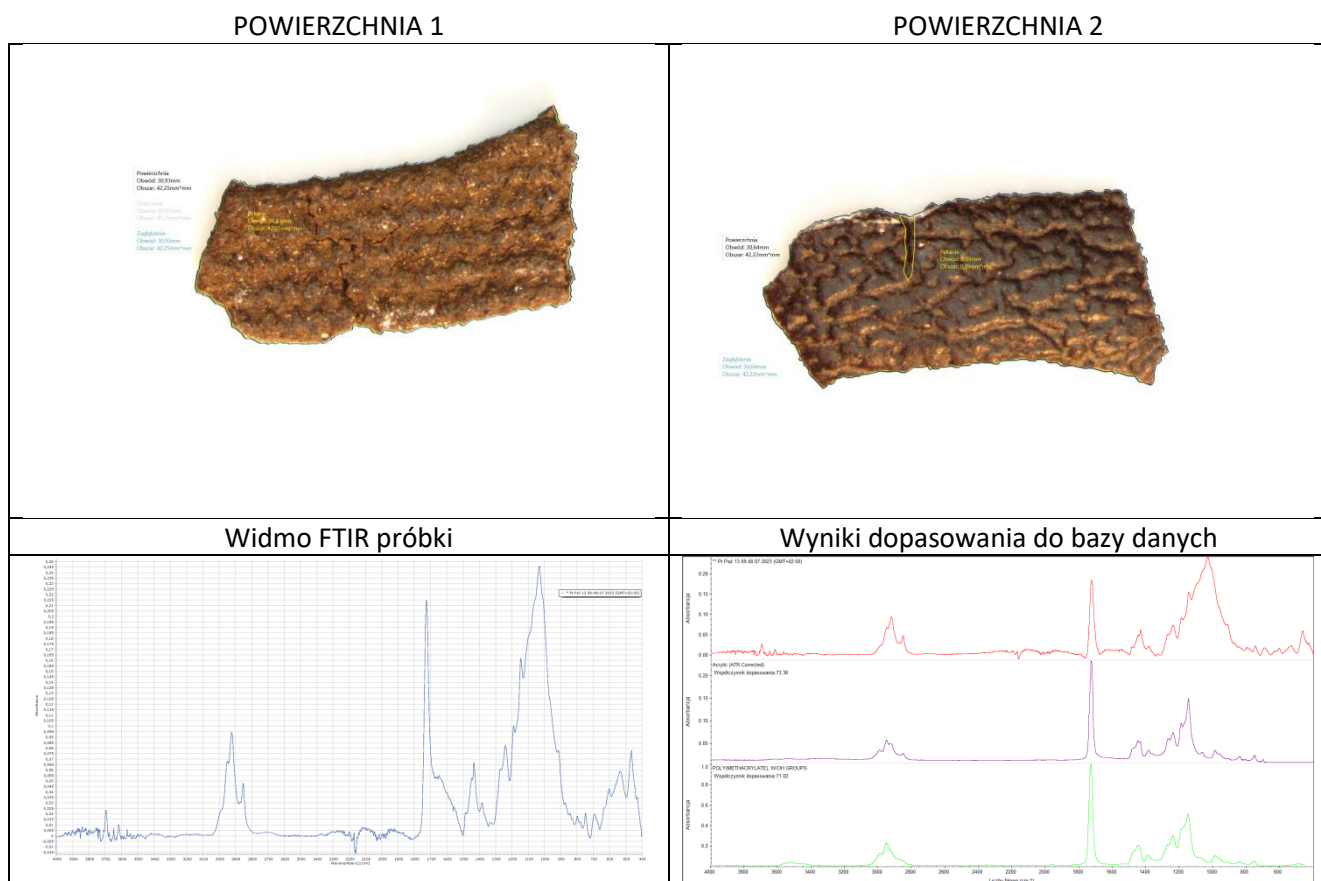
**W2. STOPIEŃ DEGRADACJI**

Znacznie uszkodzony (poniżej 50% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

WYSOKA

NR PRÓBKİ:	ZKO_91021_12
MIEJSCOWOŚĆ	Kołobrzeg
KSZTAŁT I STRUKTURA	FRAGMENT (fragment FR)
KOLOR	Czarny (Black BK)
NASYCENIE KOLORU	Głęboki
IDENTYFIKACJA PRÓBKİ:	Acrylic (ATR Corrected)
BAZA DANYCH:	Humel Polymer Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	73,36
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	25-50



Pomiary [mm²]

POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	42,25	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	42,22
PĘKANIE	42,25	PĘKANIE	0,39
ZMĘCZENIE	42,25	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	-	EROZJA MAKROSKOPOWA	-
ZAGŁĘBIENIE	42,25	ZAGŁĘBIENIE	42,22
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	-
ODKSZTAŁENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁENIE PLASTYCZNE	-

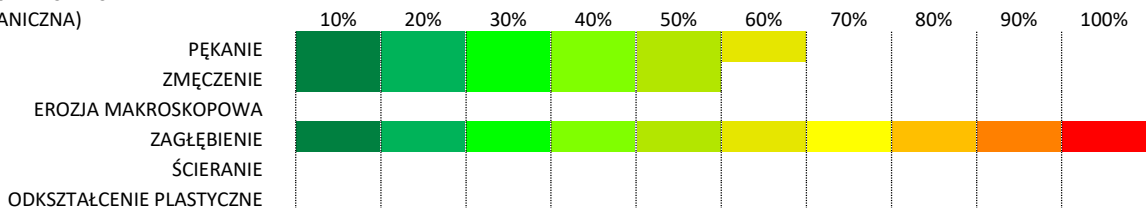
W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
FOTOCHEMICZNA	NISKA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	NISKA
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	NISKA
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	NISKA

W1. FORMA DEGRADACJI

ZMIERZONA

SIŁ MECHANICZNYCH
(MECHANICZNA)



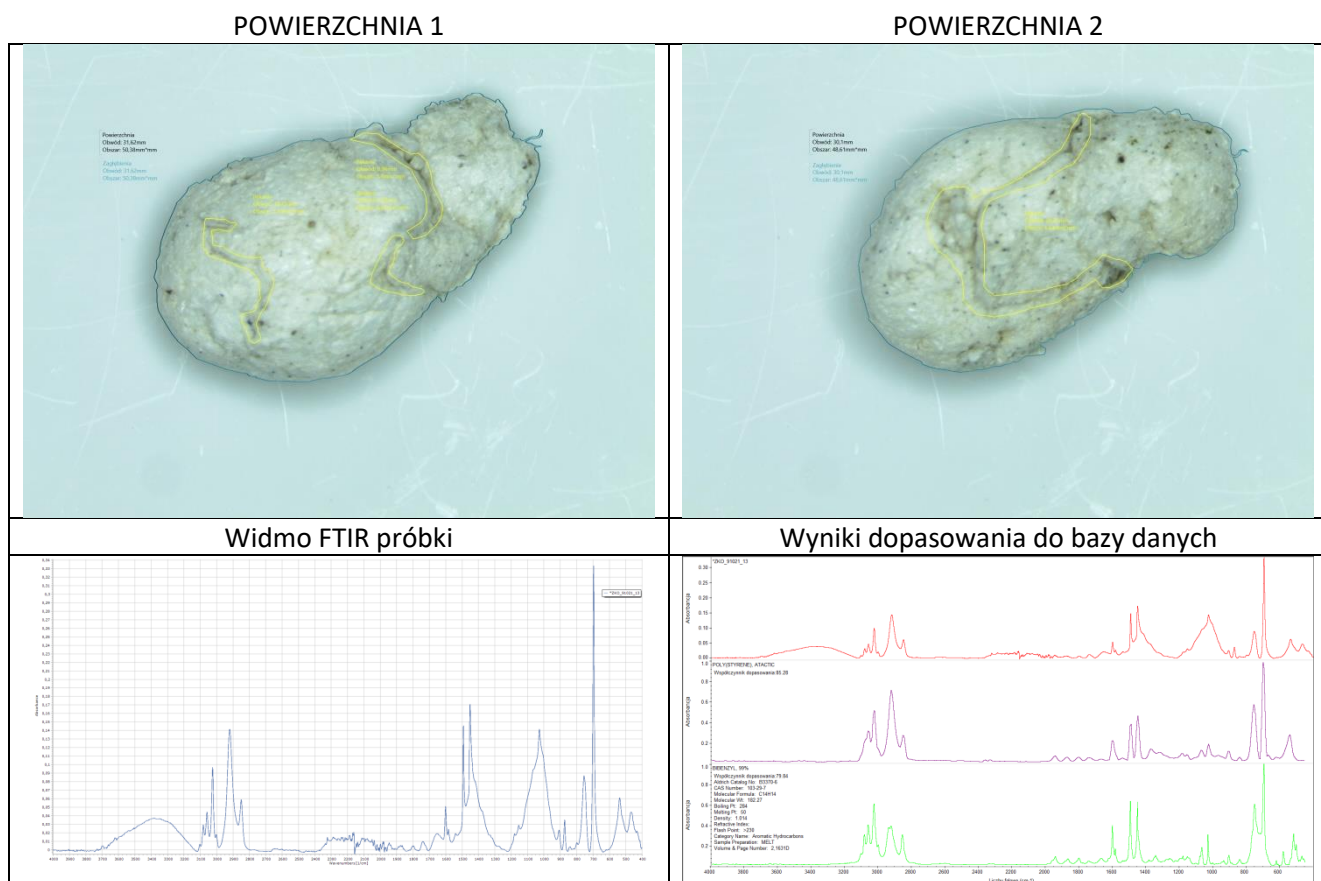
W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

Znacznie uszkodzony (poniżej 50% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

ŚREDNIA DO WYSOKIEJ

NR PRÓBKİ:	ZKO_91021_13
MIEJSCOWOŚĆ	Kołobrzeg
KSZTAŁT I STRUKTURA	PIANKA (foam FM)
KOLOR	Biały (White WT)
NASYCENIE KOLORU	Mocny
IDENTYFIKACJA PRÓBKİ:	POLY(STYRENE), ATACTIC
BAZA DANYCH:	Humel Polymer Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	85,31
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	1-25



Pomiary [mm²]

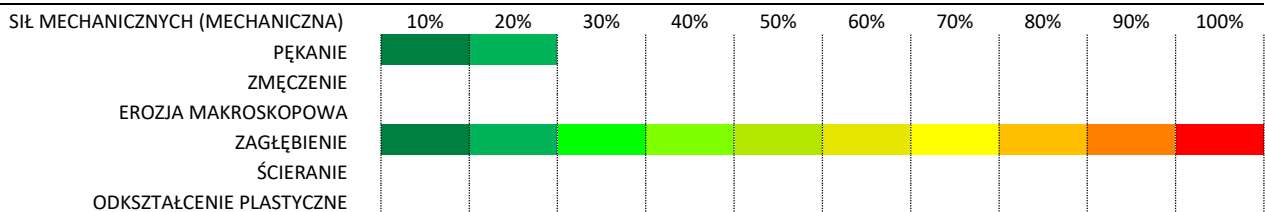
POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	50,38	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	48,61
PĘKANIE	3,65	PĘKANIE	6,64
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	-	EROZJA MAKROSKOPOWA	-
ZAGŁĘBIENIE	50,38	ZAGŁĘBIENIE	48,61
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	-
ODKSZTAŁENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁENIE PLASTYCZNE	-

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
FOTOCHEMICZNA	ŚREDNIA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	WYSOKA
TERMICZNA	ŚREDNIA
UTLENIAJĄCA	WYSOKA
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ

W1. FORMA DEGRADACJI

ZMIERZONA



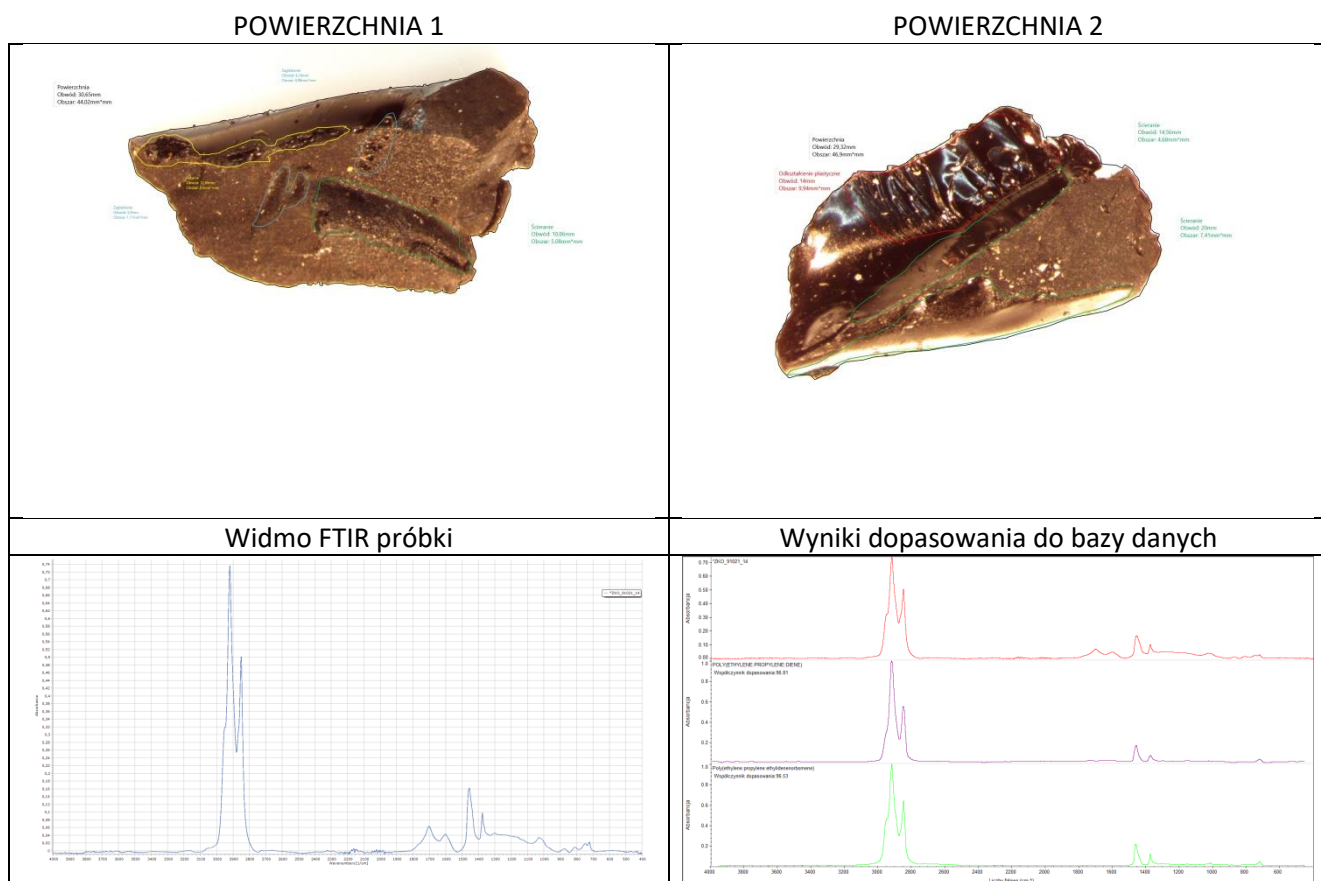
W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

Znacznie uszkodzony (poniżej 50% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

WYSOKA

NR PRÓBKİ:	ZKO_91021_14
MIEJSCOWOŚĆ	Kołobrzeg
KSZTAŁT I STRUKTURA	FRAGMENT (fragment FR)
KOLOR	Czarny (Black BK)
NASYCENIE KOLORU	Głęboki
IDENTYFIKACJA PRÓBKİ:	POLY(ETHYLENE:PROPYLENE:DIENE)
BAZA DANYCH:	Humel Polymer Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	96,81
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	Nie



Pomiary [mm²]

POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	44,02	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	46,90
PĘKANIE	2,6	PĘKANIE	-
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	-	EROZJA MAKROSKOPOWA	-
ZAGŁĘBIENIE	2,1	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	5,08	ŚCIERANIE	14,62
ODKSZTAŁENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁENIE PLASTYCZNE	9,94

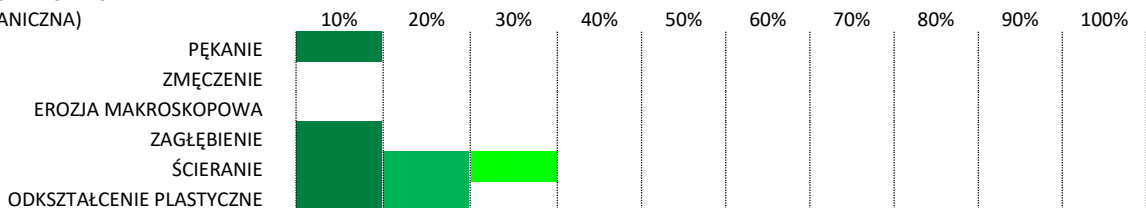
W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	NISKA
FOTOCHEMICZNA	NISKA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	ŚREDNIA
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	NISKA

W1. FORMA DEGRADACJI

ZMIERZONA

SIŁ MECHANICZNYCH
(MECHANICZNA)



W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

Umiarkowanie uszkodzony (od 50% do 90% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

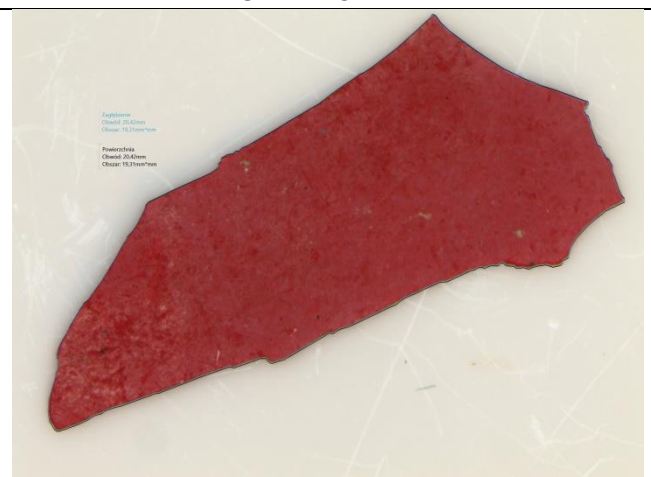
ŚREDNIA

NR PRÓBKİ:	ZKO_91021_15
MIEJSCOWOŚĆ	Kołobrzeg
KSZTAŁT I STRUKTURA	LISTEK (leaf LF)
KOLOR	Czerwony (Red RD)
NASYCENIE KOLORU	Głęboki
IDENTYFIKACJA PRÓBKİ:	POLYESTER
BAZA DANYCH:	Primpke 25
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	85,05
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	Nie

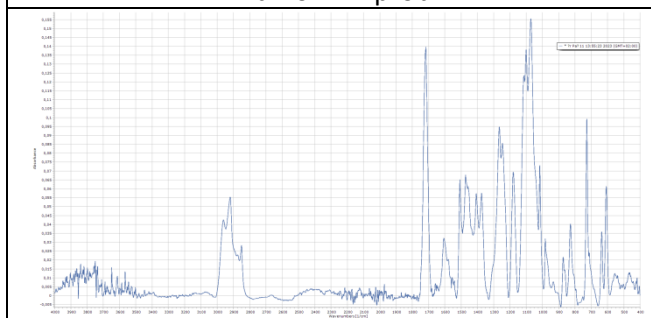
POWIERZCHNIA 1



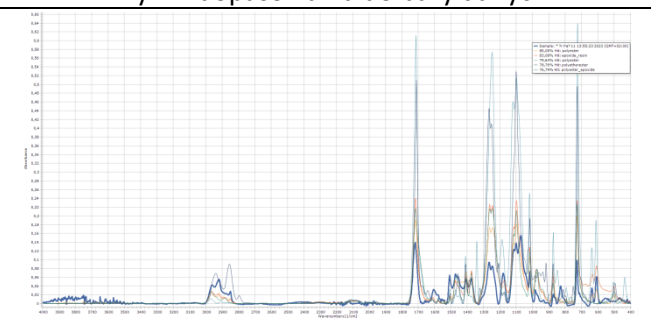
POWIERZCHNIA 2



Widmo FTIR próbki



Wyniki dopasowania do bazy danych



Pomiary [mm²]

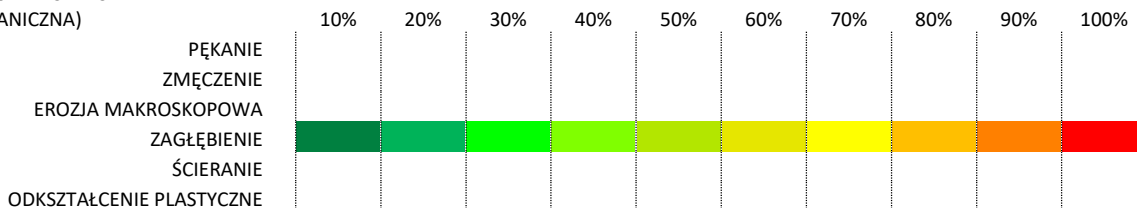
POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	19,25	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	19,31
PĘKANIE	-	PĘKANIE	-
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	-	EROZJA MAKROSKOPOWA	-
ZAGŁĘBIENIE	19,25	ZAGŁĘBIENIE	19,31
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	-
ODKSZTAŁENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁENIE PLASTYCZNE	-

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	NISKA
FOTOCHEMICZNA	NISKA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	ŚREDNIA
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	ŚREDNIA
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	NISKA

W1. FORMA DEGRADACJI**ZMIERZONA**

SIŁ MECHANICZNYCH
(MECHANICZNA)

**W2. STOPIEŃ DEGRADACJI**

Znacznie uszkodzony (poniżej 50% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

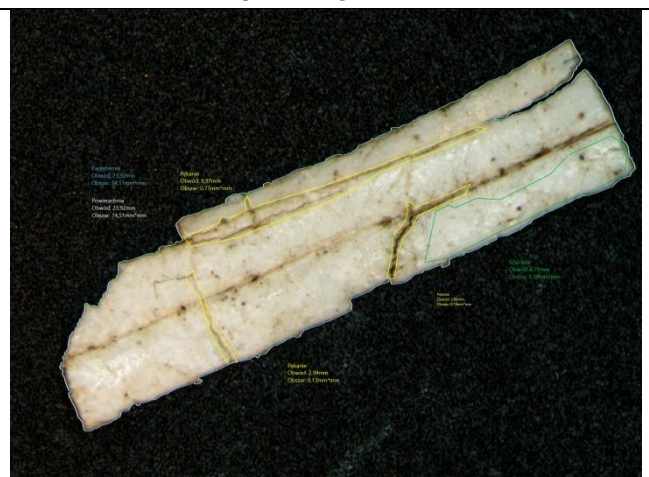
WYSOKA

NR PRÓBKİ:	ZKO_91021_16
MIEJSCOWOŚĆ	Kołobrzeg
KSZTAŁT I STRUKTURA	LISTEK (leaf LF)
KOLOR	Biały (White WT)
NASYCENIE KOLORU	Blady
IDENTYFIKACJA PRÓBKİ:	POLY(PROPYLENE), ATACTIC
BAZA DANYCH:	Humel Polymer Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	88,24
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	1-25

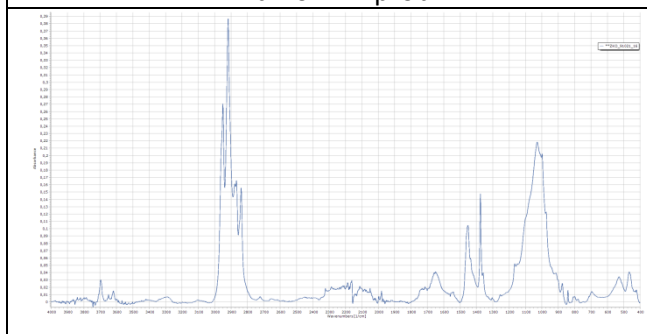
POWIERZCHNIA 1



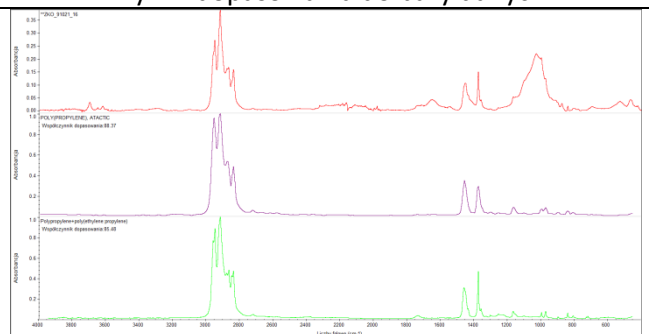
POWIERZCHNIA 2



Widmo FTIR próbki



Wyniki dopasowania do bazy danych



Pomiary [mm²]

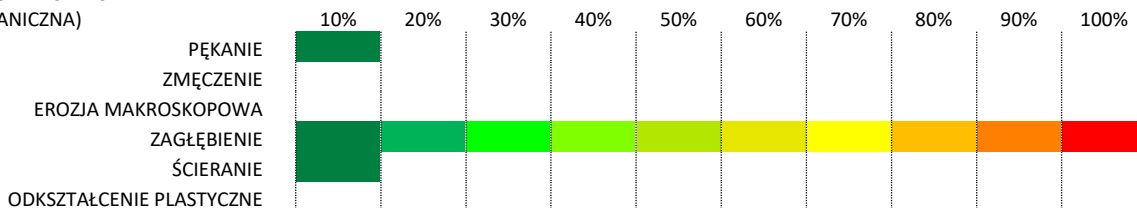
POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	14,44	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	14,51
PĘKANIE	0,43	PĘKANIE	1,9
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	-	EROZJA MAKROSKOPOWA	-
ZAGŁĘBIENIE	14,44	ZAGŁĘBIENIE	14,51
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	1,38
ODKSZTAŁENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁENIE PLASTYCZNE	-

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
FOTOCHEMICZNA	ŚREDNIA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	ŚREDNIA
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ

W1. FORMA DEGRADACJI**ZMIERZONA**

SIŁ MECHANICZNYCH
(MECHANICZNA)

**W2. STOPIEŃ DEGRADACJI**

Znacznie uszkodzony (poniżej 50% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

WYSOKA

NR PRÓBK:	ZKO_91021_17
MIEJSCOWOŚĆ	Kołobrzeg
KSZTAŁT I STRUKTURA	LISTEK (leaf LF)
KOLOR	Czerwony (Red RD)
NASYCENIE KOLORU	Blady
IDENTYFIKACJA PRÓBK:	ALKYD RESIN
BAZA DANYCH:	Humel Polymer Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	82,60
POKRYCIE BIOFILMEM	Nie

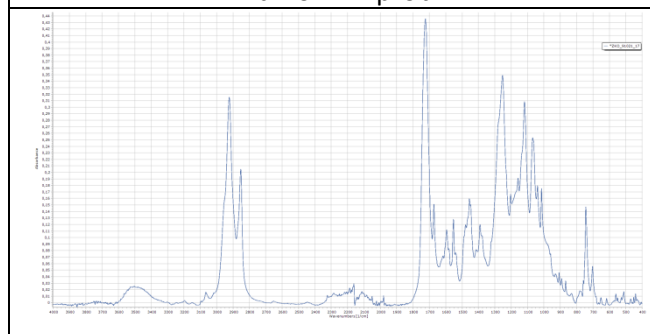
POWIERZCHNIA 1



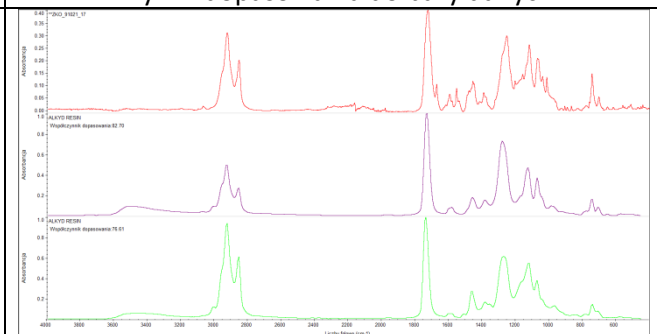
POWIERZCHNIA 2



Widmo FTIR próbki



Wyniki dopasowania do bazy danych



Pomiary [mm²]

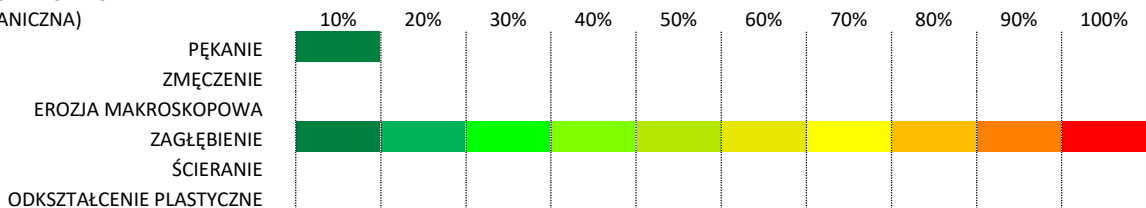
POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	29,63	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	29,75
PĘKANIE	-	PĘKANIE	2,53
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	-	EROZJA MAKROSKOPOWA	-
ZAGŁĘBIENIE	29,63	ZAGŁĘBIENIE	29,75
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	-
ODKSZTAŁENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁENIE PLASTYCZNE	-

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	ŚREDNIA
FOTOCHEMICZNA	ŚREDNIA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
TERMICZNA	ŚREDNIA
UTLENIAJĄCA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ

W1. FORMA DEGRADACJI**ZMIERZONA**

SIŁ MECHANICZNYCH
(MECHANICZNA)

**W2. STOPIEŃ DEGRADACJI**

Znacznie uszkodzony (poniżej 50% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

ŚREDNIA DO WYSOKIEJ

NR PRÓBKİ:	ZKO_91021_18
MIEJSCOWOŚĆ	Kołobrzeg
KSZTAŁT I STRUKTURA	PIANKA (foam FM)
KOLOR	Zielony (Green GN)
NASYCENIE KOLORU	Blady
IDENTYFIKACJA PRÓBKİ:	POLY(STYRENE), ATACTIC
BAZA DANYCH:	Humel Polymer Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	85,17
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	25-50

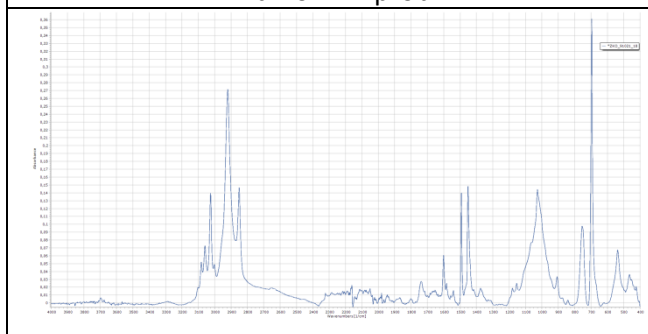
POWIERZCHNIA 1



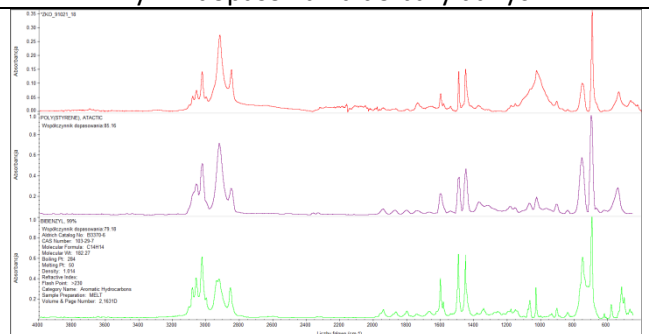
POWIERZCHNIA 2



Widmo FTIR próbki



Wyniki dopasowania do bazy danych



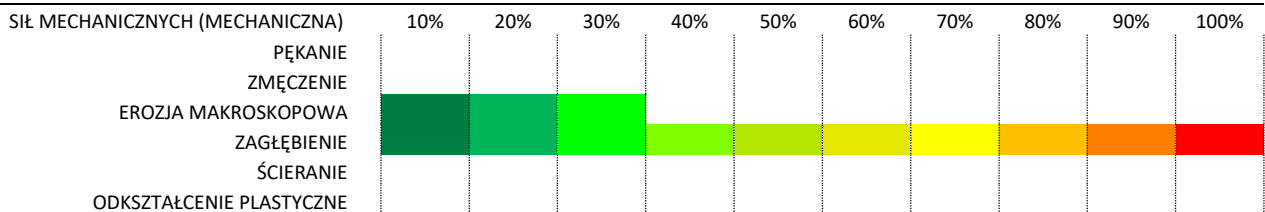
Pomiary [mm²]

POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	17,74	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	18,36
PĘKANIE	-	PĘKANIE	-
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	3,64	EROZJA MAKROSKOPOWA	4,26
ZAGŁĘBIENIE	17,74	ZAGŁĘBIENIE	18,36
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	-
ODKSZTAŁENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁENIE PLASTYCZNE	-

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	WYSOKA
FOTOCHEMICZNA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	WYSOKA
TERMICZNA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
UTLENIAJĄCA	WYSOKA
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ

**W1. FORMA DEGRADACJI
ZMIERZONA**



W2. STOPIEŃ DEGRADACJI Znacznie uszkodzony (poniżej 50% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ WYSOKA

NR PRÓBK:	ZKO_101021_1
MIEJSCOWOŚĆ	Kołobrzeg
KSZTAŁT I STRUKTURA	FOLIA (film FI)
KOLOR	Wszystkie przezroczyste (All transparent AT)
NASYCENIE KOLORU	Słaby
IDENTYFIKACJA PRÓBK:	NONYL ALDEHYDE
BAZA DANYCH:	Primpke_FTIR_Microplastics
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	81,73
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	Nie

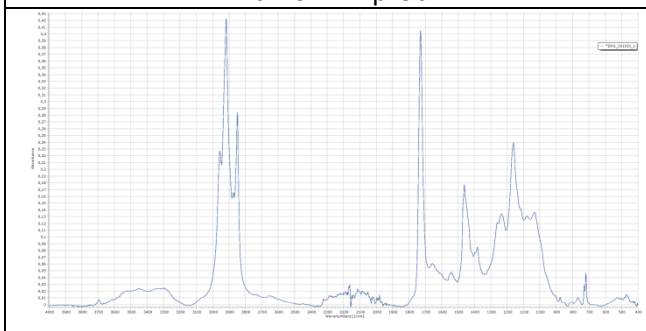
POWIERZCHNIA 1



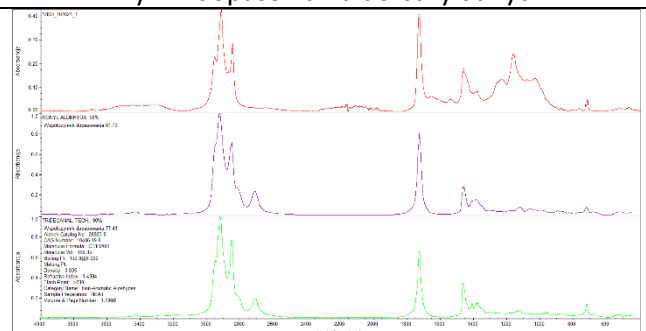
POWIERZCHNIA 2



Widmo FTIR próbki



Wyniki dopasowania do bazy danych



Pomiary [mm²]

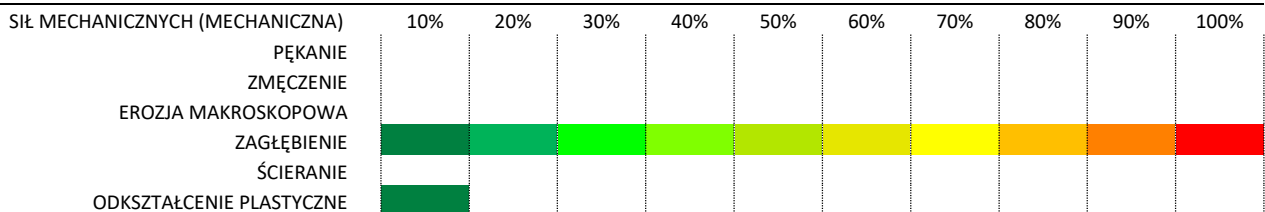
POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	77,38	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	78,97
PĘKANIE	-	PĘKANIE	-
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	-	EROZJA MAKROSKOPOWA	-
ZAGŁĘBIENIE	77,38	ZAGŁĘBIENIE	78,79
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	-
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	12,64	ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	ŚREDNIA
FOTOCHEMICZNA	ŚREDNIA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
TERMICZNA	ŚREDNIA
UTLENIAJĄCA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA

W1. FORMA DEGRADACJI

ZMIERZONA



W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

Znacznie uszkodzony (poniżej 50% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

ŚREDNIA DO WYSOKIEJ

NR PRÓBKİ:	ZKO_101021_2
MIEJSCOWOŚĆ	Kołobrzeg
KSZTAŁT I STRUKTURA	FRAGMENT (fragment FR)
KOLOR	Czerwony (Red RD)
NASYCENIE KOLORU	Słaby
IDENTYFIKACJA PRÓBKİ:	POLYAMIDE 6
BAZA DANYCH:	Humel Polymer Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	72,83
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	Nie

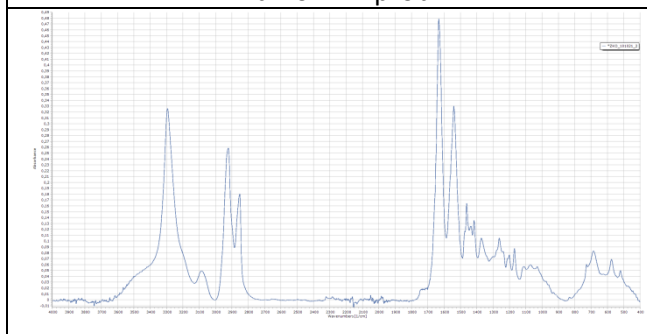
POWIERZCHNIA 1



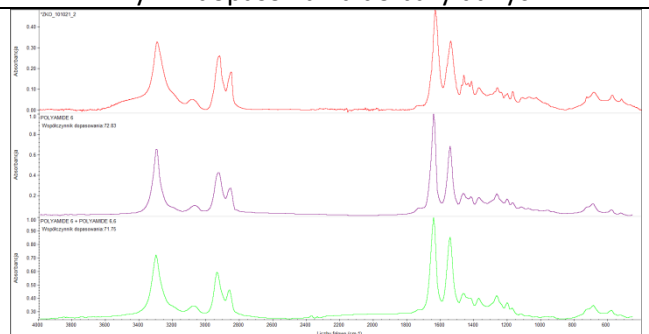
POWIERZCHNIA 2



Widmo FTIR próbki



Wyniki dopasowania do bazy danych



Pomiary [mm²]

POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	46,36	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	43,46
PĘKANIE	-	PĘKANIE	-
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	4,56	EROZJA MAKROSKOPOWA	-
ZAGŁĘBIENIE	7,09	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	23,51
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-

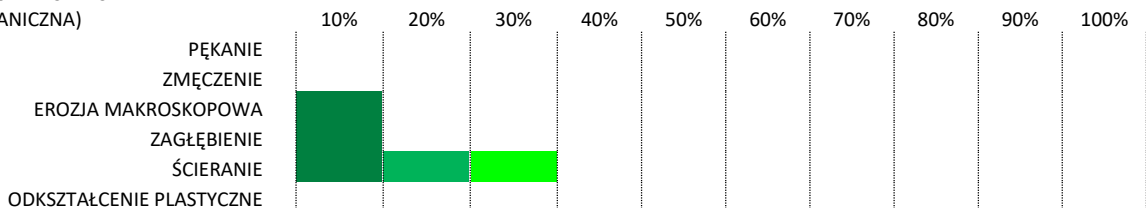
W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	ŚREDNIA
FOTOCHEMICZNA	ŚREDNIA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	WYSOKA
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	NISKA

W1. FORMA DEGRADACJI

ZMIERZONA

SIŁ MECHANICZNYCH
(MECHANICZNA)



W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

Umiarkowanie uszkodzony (od 50% do 90% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

ŚREDNIA DO WYSOKIEJ

NR PRÓBKİ:	ZKO_101021_4
MIEJSCOWOŚĆ	Kołobrzeg
KSZTAŁT I STRUKTURA	FRAGMENT (fragment FR)
KOLOR	Niebieski (Blue BL)
NASYCENIE KOLORU	Głęboki
IDENTYFIKACJA PRÓBKİ:	POLY(PROPYLENE), ATACTIC
BAZA DANYCH:	Humel Polymer Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	93,46
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	Nie

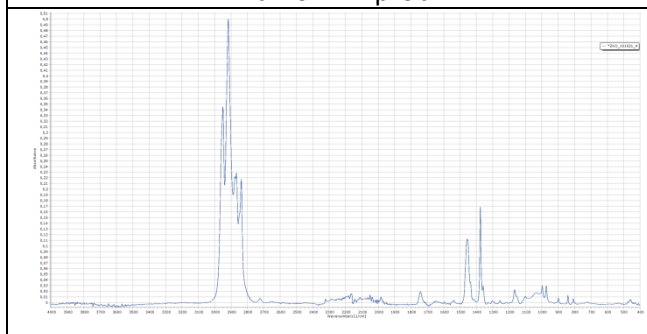
POWIERZCHNIA 1



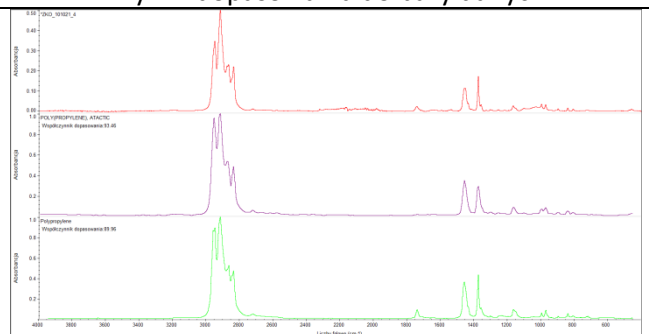
POWIERZCHNIA 2



Widmo FTIR próbki



Wyniki dopasowania do bazy danych



Pomiary [mm²]

POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	18,07	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	17,53
PĘKANIE	-	PĘKANIE	-
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	12,67	EROZJA MAKROSKOPOWA	-
ZAGŁĘBIENIE	-	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	2,40
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-

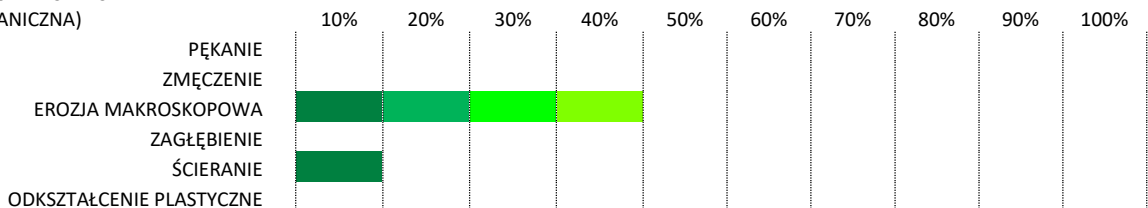
W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	NISKA
FOTOCHEMICZNA	NISKA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	NISKA
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA

W1. FORMA DEGRADACJI

ZMIERZONA

SIŁ MECHANICZNYCH
(MECHANICZNA)



W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

Umiarkowanie uszkodzony (od 50% do 90% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

ŚREDNIA

NR PRÓBKİ:	ZKO_101021_5
MIEJSCOWOŚĆ	Kołobrzeg
KSZTAŁT I STRUKTURA	FRAGMENT (fragment FR)
KOLOR	Niebieski (Blue BL)
NASYCENIE KOLORU	Słaby
IDENTYFIKACJA PRÓBKİ:	POLY(ETHYLENE), LOW DENSITY
BAZA DANYCH:	Aldrich Condensed Phase Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	95,97
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	1-25

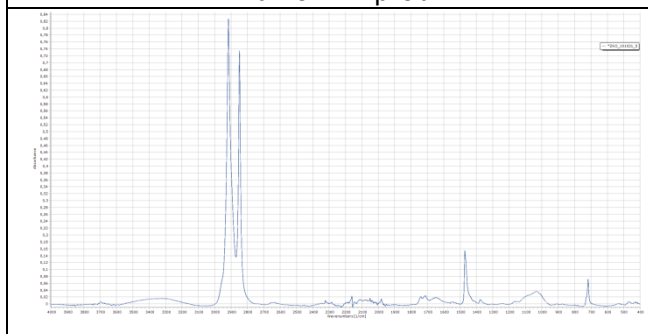
POWIERZCHNIA 1



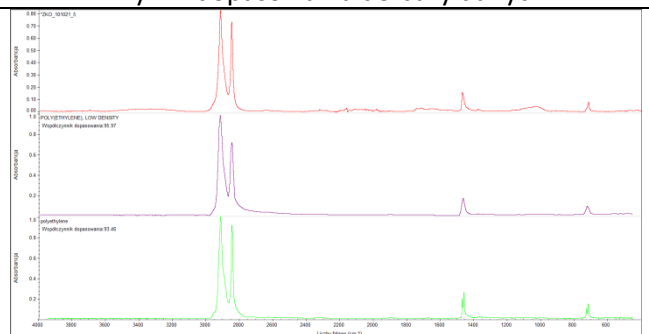
POWIERZCHNIA 2



Widmo FTIR próbki



Wyniki dopasowania do bazy danych



Pomiary [mm²]

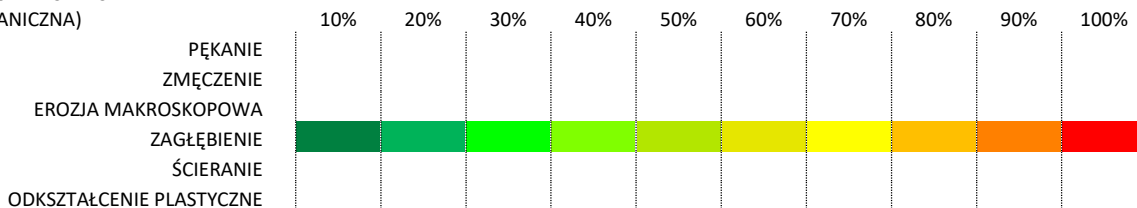
POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	7,72	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	7,72
PĘKANIE	-	PĘKANIE	-
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	-	EROZJA MAKROSKOPOWA	-
ZAGŁĘBIENIE	7,72	ZAGŁĘBIENIE	7,72
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	-
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
FOTOCHEMICZNA	ŚREDNIA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	ŚREDNIA
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA

W1. FORMA DEGRADACJI**ZMIERZONA**

SIŁ MECHANICZNYCH
(MECHANICZNA)

**W2. STOPIEŃ DEGRADACJI**

Znacznie uszkodzony (poniżej 50% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

WYSOKA

NR PRÓBK:	ZKO_101021_7
MIEJSCOWOŚĆ	Kołobrzeg
KSZTAŁT I STRUKTURA	FRAGMENT (fragment FR)
KOLOR	Zielony (Green GN)
NASYCENIE KOLORU	Mocny
IDENTYFIKACJA PRÓBK:	POLY(PROPYLENE), ATACTIC
BAZA DANYCH:	Humel Polymer Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	93,51
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	Nie

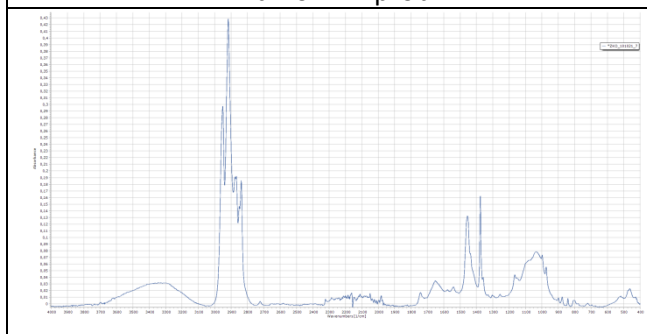
POWIERZCHNIA 1



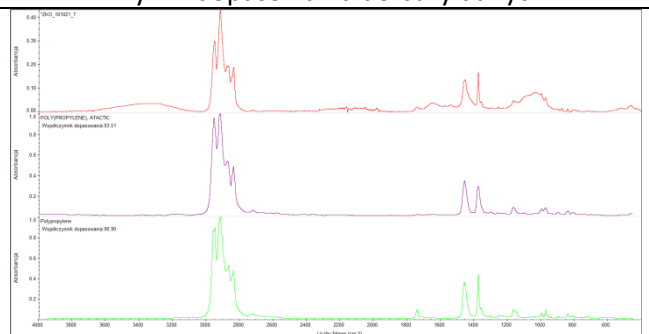
POWIERZCHNIA 2



Widmo FTIR próbki



Wyniki dopasowania do bazy danych



Pomiary [mm²]

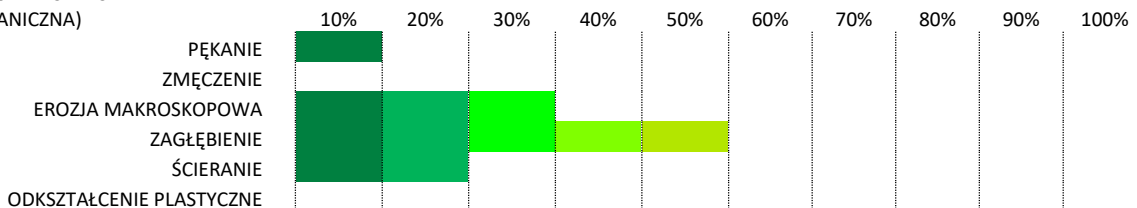
POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	21,05	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	20,96
PĘKANIE	1,29	PĘKANIE	0,17
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	-	EROZJA MAKROSKOPOWA	9,33
ZAGŁĘBIENIE	21,05	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	6,83
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	NISKA
FOTOCHEMICZNA	NISKA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	NISKA
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA

W1. FORMA DEGRADACJI**ZMIERZONA**

SIŁ MECHANICZNYCH
(MECHANICZNA)

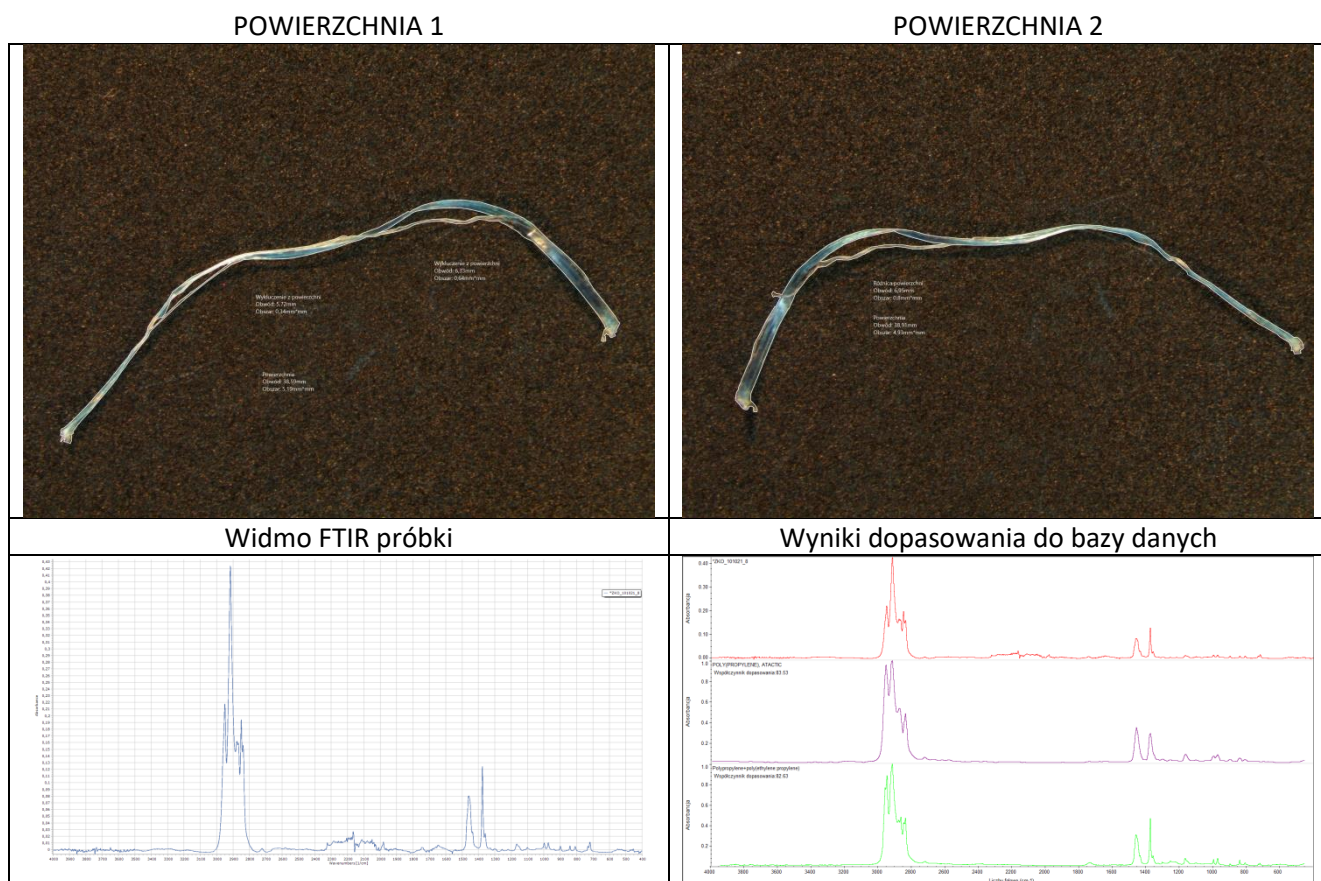
**W2. STOPIEŃ DEGRADACJI**

Znacznie uszkodzony (poniżej 50% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

ŚREDNIA DO WYSOKIEJ

NR PRÓBK:	ZKO_101021_8
MIEJSCOWOŚĆ	Kołobrzeg
KSZTAŁT I STRUKTURA	WŁÓKNO (fibre FB)
KOLOR	Wszystkie przezroczyste (All transparent AT)
NASYCENIE KOLORU	Blady
IDENTYFIKACJA PRÓBK:	POLY(PROPYLENE), ATACTIC
BAZA DANYCH:	Humel Polymer Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	83,53
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	Nie



Pomiary [mm²]

POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	4,21	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	4,13
PĘKANIE	-	PĘKANIE	-
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	-	EROZJA MAKROSKOPOWA	-
ZAGŁĘBIENIE	-	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	-
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-

UWAGI:

Włókno bardzo trudno sklasyfikować pod względem degradacji mechanicznej zachodzącej na powierzchni, dlatego degradacja włókien zostaje w narzędziu zaklasyfikowana jako osobna kategoria właściwości mechanicznych włókien

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
FOTOCHEMICZNA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
TERMICZNA	ŚREDNIA
UTLENIAJĄCA	WYSOKA
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ

W1. FORMA DEGRADACJI**ZMIERZONA**

SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
PĘKANIE										
ZMĘCZENIE										
EROZJA MAKROSKOPOWA										
ZAGŁĘBIENIE										
ŚCIERANIE										
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE										

W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

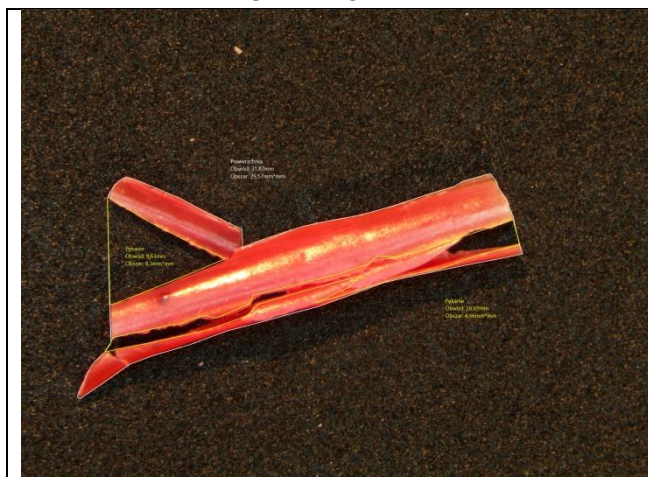
Brak możliwości obliczenia

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

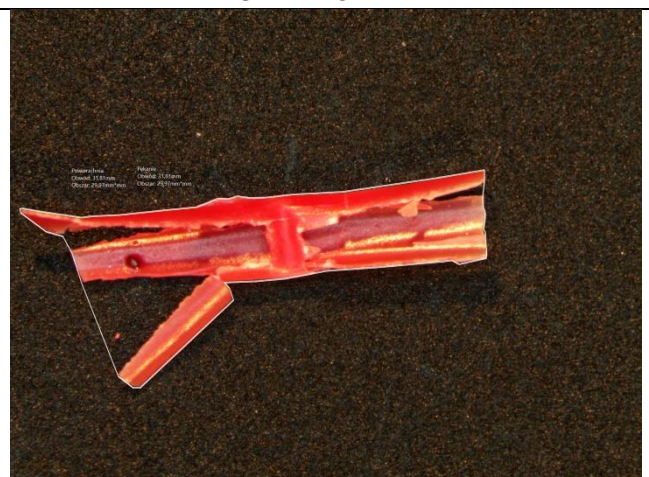
Brak możliwości obliczenia

NR PRÓBK:	ZKO_101021_9
MIEJSCOWOŚĆ	Kołobrzeg
KSZTAŁT I STRUKTURA	FRAGMENT (fragment FR)
KOLOR	Czerwony (Red RD)
NASYCENIE KOLORU	Słaby
IDENTYFIKACJA PRÓBK:	POLY(PROPYLENE), ATACTIC
BAZA DANYCH:	Humel Polymer Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	89,2
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	Nie

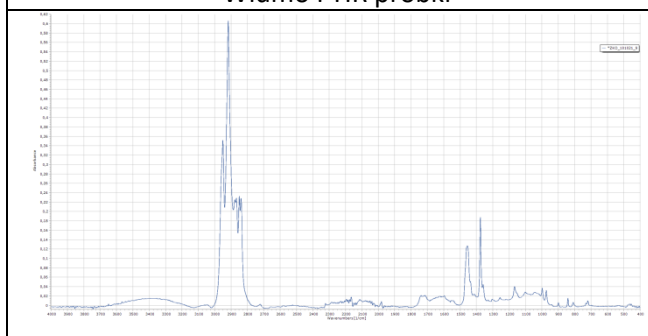
POWIERZCHNIA 1



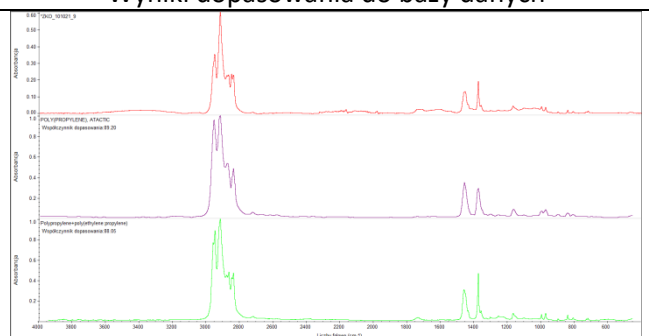
POWIERZCHNIA 2



Widmo FTIR próbki



Wyniki dopasowania do bazy danych



Pomiary [mm²]

POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	29,57	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	29,97
PĘKANIE	8,96	PĘKANIE	29,97
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	-	EROZJA MAKROSKOPOWA	-
ZAGŁĘBIENIE	-	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	-
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-

UWAGA

Do opracowania pełnych właściwości widocznych spękań, należało obiekt płaszczyzny rzutowej określić jako powierzchnia pozorną w miejscu widocznych spękań

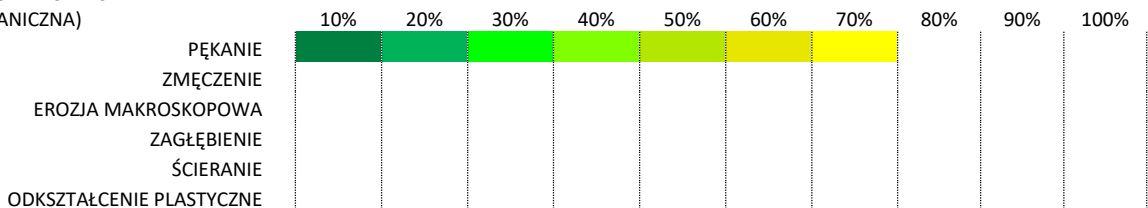
W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	ŚREDNIA
FOTOCHEMICZNA	ŚREDNIA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	ŚREDNIA
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ

W1. FORMA DEGRADACJI

ZMIERZONA

SIŁ MECHANICZNYCH
(MECHANICZNA)



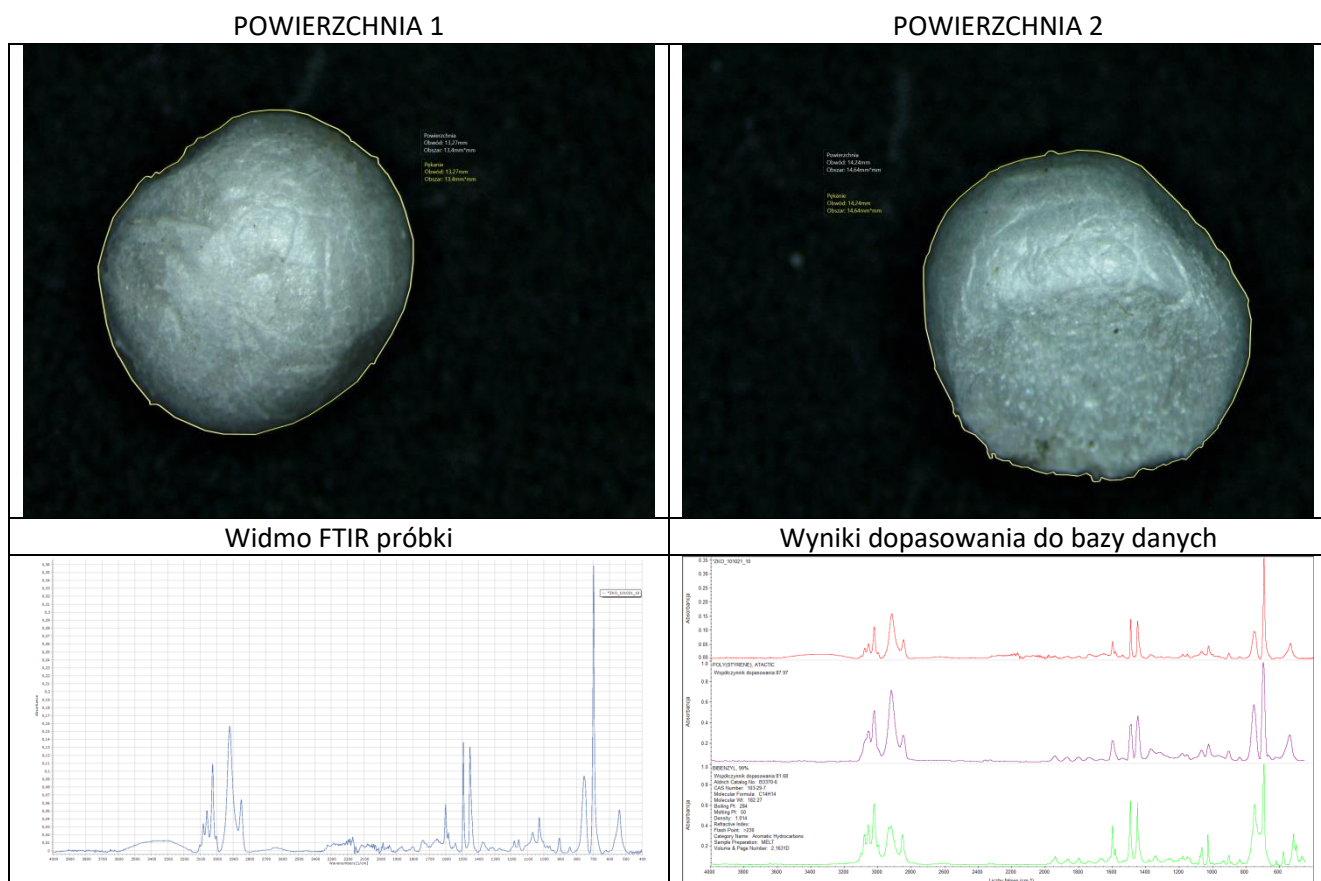
W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

Znacznie uszkodzony (poniżej 50% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

WYSOKA

NR PRÓBKII:	ZKO_101021_10
MIEJSCOWOŚĆ	Kołobrzeg
KSZTAŁT I STRUKTURA	PIANKA (foam FM)
KOLOR	Biały (White WT)
NASYCENIE KOLORU	Słaby
IDENTYFIKACJA PRÓBKII:	POLY(STYRENE), ATACTIC
BAZA DANYCH:	Humel Polymer Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	87,97
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	1-25



Pomiary [mm²]

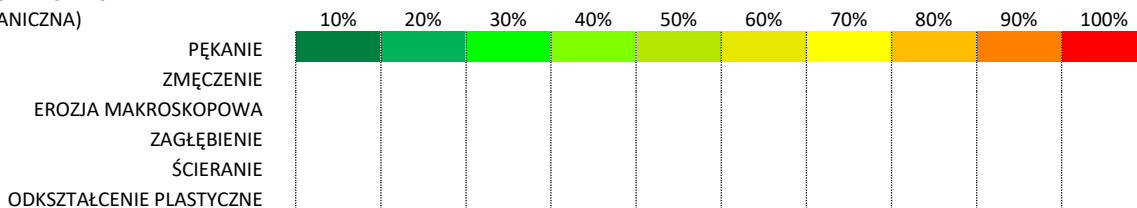
POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	14,64	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	14,64
PĘKANIE	14,64	PĘKANIE	14,64
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	-	EROZJA MAKROSKOPOWA	-
ZAGŁĘBIENIE	-	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	-
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	WYSOKA
FOTOCHEMICZNA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	WYSOKA
TERMICZNA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
UTLENIAJĄCA	WYSOKA
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ

W1. FORMA DEGRADACJI**ZMIERZONA**

SIŁ MECHANICZNYCH
(MECHANICZNA)

**W2. STOPIEŃ DEGRADACJI**

Znacznie uszkodzony (poniżej 50% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

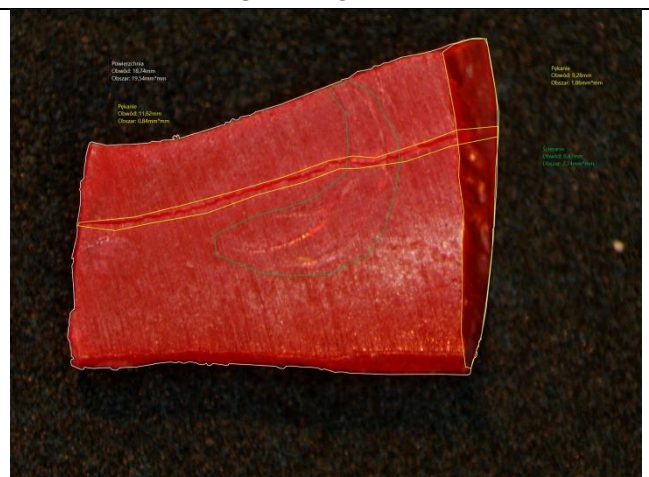
WYSOKA

NR PRÓBKİ:	ZKO_101021_11
MIEJSCOWOŚĆ	Kołobrzeg
KSZTAŁT I STRUKTURA	FRAGMENT (fragment FR)
KOLOR	Czerwony (Red RD)
NASYCENIE KOLORU	Mocny
IDENTYFIKACJA PRÓBKİ:	POLY(STYRENE), ATACTIC
BAZA DANYCH:	Humel Polymer Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	81,63
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	Nie

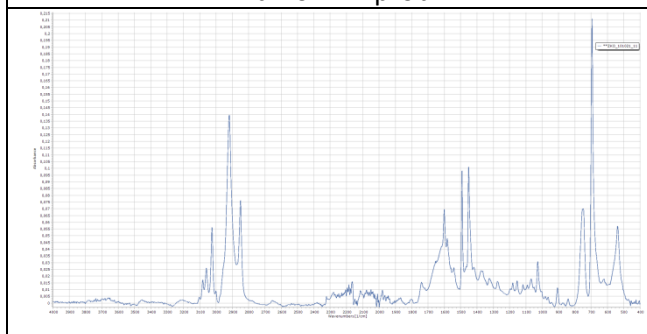
POWIERZCHNIA 1



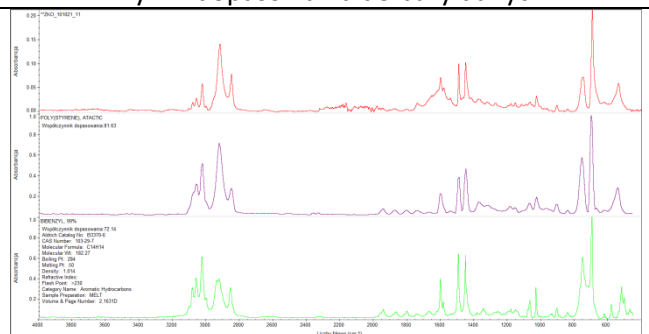
POWIERZCHNIA 2



Widmo FTIR próbki



Wyniki dopasowania do bazy danych



Pomiary [mm²]

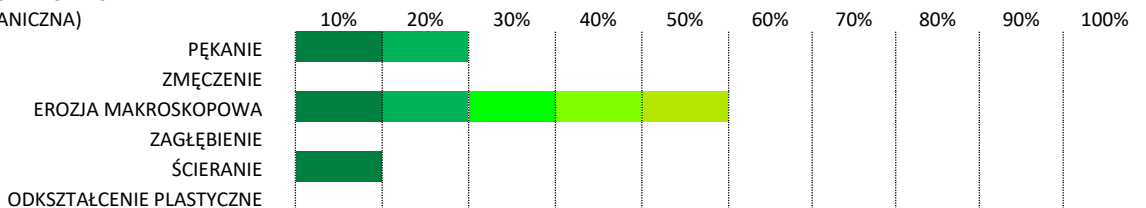
POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	19,59	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	19,54
PĘKANIE	1,26	PĘKANIE	2,7
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	16,76	EROZJA MAKROSKOPOWA	-
ZAGŁĘBIENIE	-	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	2,74
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	NISKA
FOTOCHEMICZNA	NISKA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	WYSOKA
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA

W1. FORMA DEGRADACJI**ZMIERZONA**

SIŁ MECHANICZNYCH
(MECHANICZNA)

**W2. STOPIEŃ DEGRADACJI**

Znacznie uszkodzony (poniżej 50% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

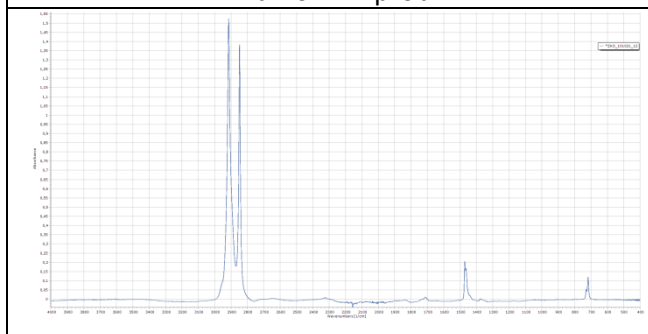
ŚREDNIA

NR PRÓBKİ:	ZKO_101021_12
MIEJSCOWOŚĆ	Kołobrzeg
KSZTAŁT I STRUKTURA	LISTEK (leaf LF)
KOLOR	Przezroczysty (Transparent TP)
NASYCENIE KOLORU	Słaby
IDENTYFIKACJA PRÓBKİ:	POLY(ETHYLENE), LOW DENSITY
BAZA DANYCH:	Hr Nicolet Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	91,89
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	Nie

POWIERZCHNIA 1



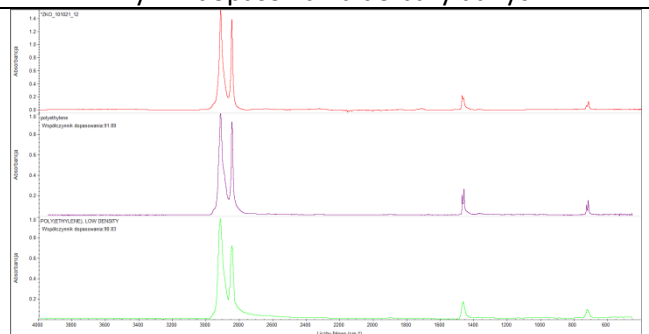
Widmo FTIR próbki



POWIERZCHNIA 2



Wyniki dopasowania do bazy danych



Pomiary [mm²]

POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	19,18	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	19,45
PĘKANIE	-	PĘKANIE	-
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	-	EROZJA MAKROSKOPOWA	-
ZAGŁĘBIENIE	19,18	ZAGŁĘBIENIE	19,45
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	-
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-

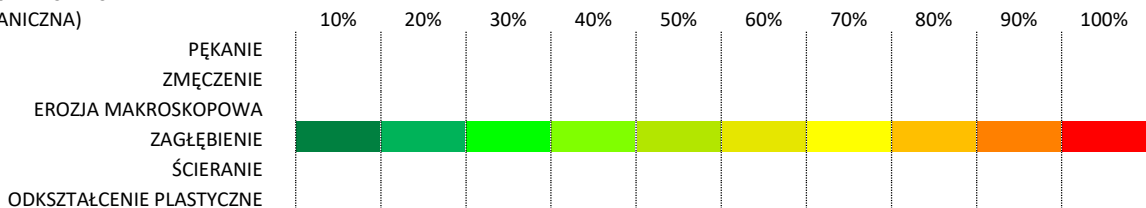
W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	ŚREDNIA
FOTOCHEMICZNA	ŚREDNIA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	ŚREDNIA
TERMICZNA	ŚREDNIA
UTLENIAJĄCA	ŚREDNIA
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA

W1. FORMA DEGRADACJI

ZMIERZONA

SIŁ MECHANICZNYCH
(MECHANICZNA)



W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

Znacznie uszkodzony (poniżej 50% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

ŚREDNIA DO WYSOKIEJ

NR PRÓBKİ:	ZKO_101021_13
MIEJSCOWOŚĆ	Kołobrzeg
KSZTAŁT I STRUKTURA	FRAGMENT (fragment FR)
KOLOR	Turkusowy (Turquoise TQ)
NASYCENIE KOLORU	Mocny
IDENTYFIKACJA PRÓBKİ:	POLY(PROPYLENE), ATACTIC
BAZA DANYCH:	Humel Polymer Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	92,17
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	1-25

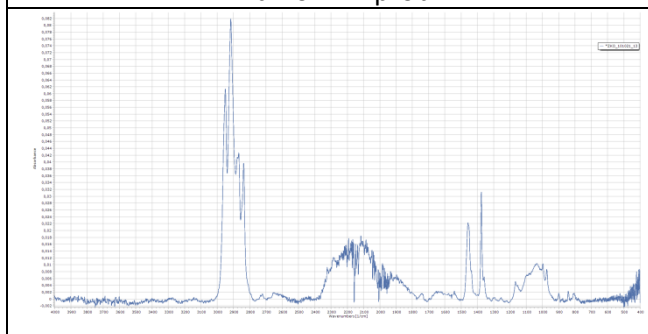
POWIERZCHNIA 1



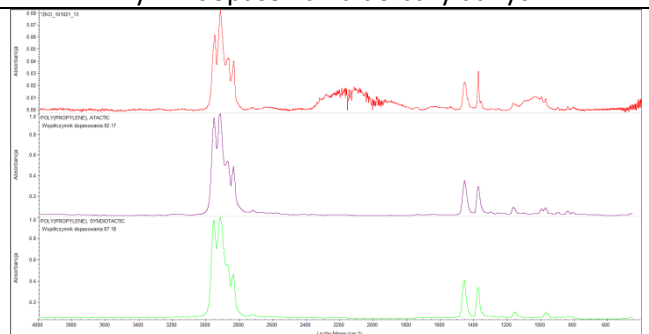
POWIERZCHNIA 2



Widmo FTIR próbki



Wyniki dopasowania do bazy danych

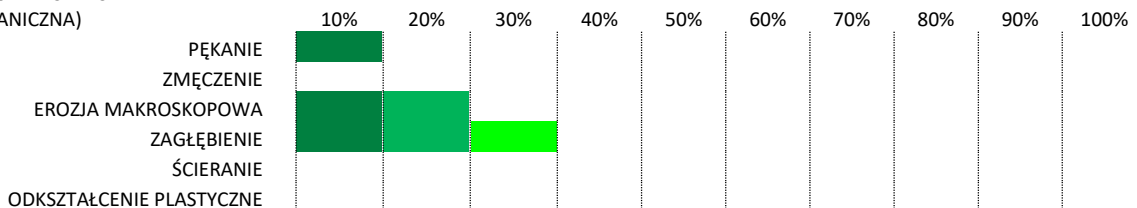


Pomiary [mm²]

POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	67,33	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	69,80
PĘKANIE	4,41	PĘKANIE	-
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	14,90	EROZJA MAKROSKOPOWA	-
ZAGŁĘBIENIE	36,93	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	-
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	0,08

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	ŚREDNIA
FOTOCHEMICZNA	NISKA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	NISKA
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA

W1. FORMA DEGRADACJI**ZMIERZONA**SIŁ MECHANICZNYCH
(MECHANICZNA)**W2. STOPIEŃ DEGRADACJI**

Umiarkowanie uszkodzony (od 50% do 90% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

ŚREDNIA

NR PRÓBKİ:	ZKO_101021_14
MIEJSCOWOŚĆ	Kołobrzeg
KSZTAŁT I STRUKTURA	FRAGMENT (fragment FR)
KOLOR	Biały (White WT)
NASYCENIE KOLORU	Słaby
IDENTYFIKACJA PRÓBKİ:	POLY(PROPYLENE), ATACTIC
BAZA DANYCH:	Humel Polymer Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	92,74
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	1-25

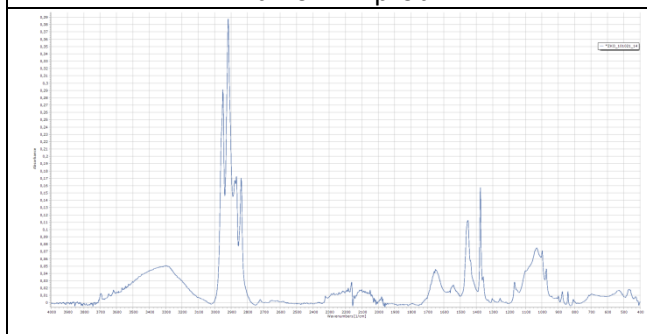
POWIERZCHNIA 1



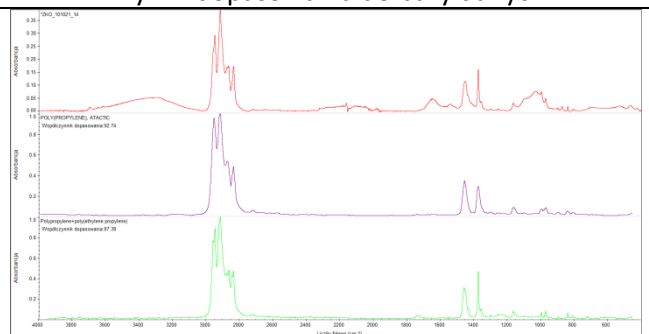
POWIERZCHNIA 2



Widmo FTIR próbki



Wyniki dopasowania do bazy danych



Pomiary [mm²]

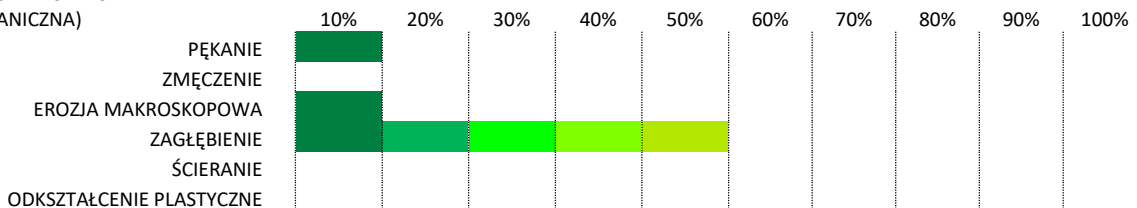
POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	14,69	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	14,62
PĘKANIE	0,51	PĘKANIE	1,84
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	-	EROZJA MAKROSKOPOWA	1,07
ZAGŁĘBIENIE	14,69	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	-
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
FOTOCHEMICZNA	ŚREDNIA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	ŚREDNIA
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ

W1. FORMA DEGRADACJI**ZMIERZONA**

SIŁ MECHANICZNYCH
(MECHANICZNA)

**W2. STOPIEŃ DEGRADACJI**

Znacznie uszkodzony (poniżej 50% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

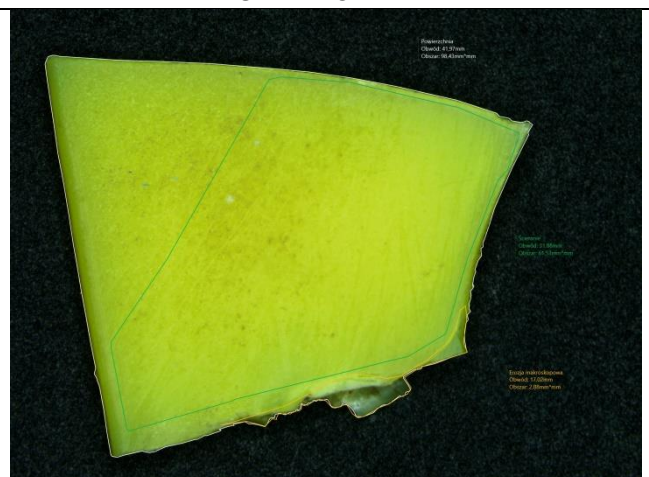
ŚREDNIA DO WYSOKIEJ

NR PRÓBKİ:	ZSW_60123_1
MIEJSCOWOŚĆ	Świnoujście
KSZTAŁT I STRUKTURA	FRAGMENT (fragment FR)
KOLOR	Żółty (Yellow YL)
NASYCENIE KOLORU	Mocny
IDENTYFIKACJA PRÓBKİ:	POLY(PROPYLENE), ATACTIC
BAZA DANYCH:	Humel Polymer Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	91,66
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	1-25

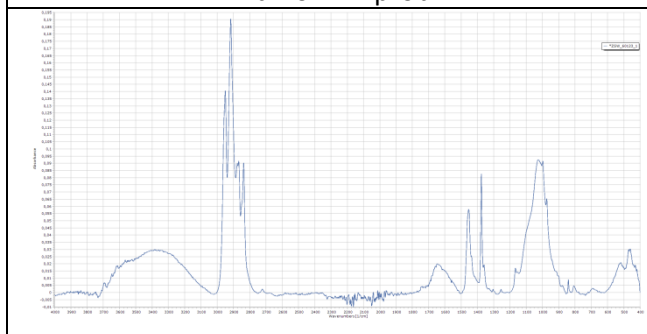
POWIERZCHNIA 1



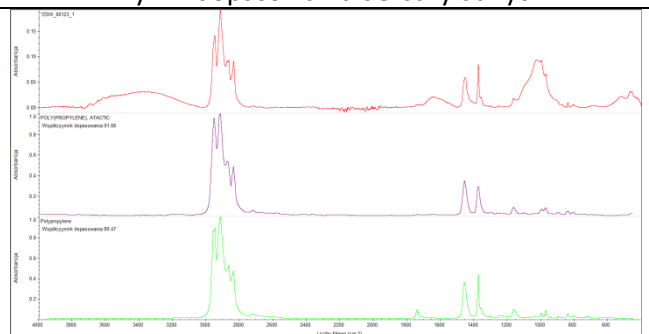
POWIERZCHNIA 2



Widmo FTIR próbki



Wyniki dopasowania do bazy danych



Pomiary [mm²]

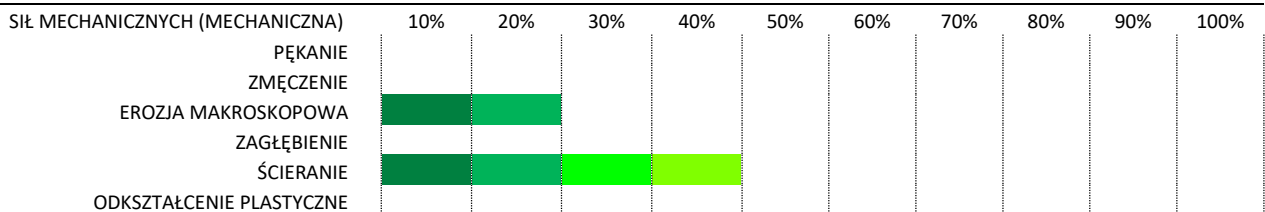
POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	97,83	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	98,43
PĘKANIE	-	PĘKANIE	-
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	17,92	EROZJA MAKROSKOPOWA	2,88
ZAGŁĘBIENIE	-	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	16,69	ŚCIERANIE	61,53
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	ŚREDNIA
FOTOCHEMICZNA	NISKA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	NISKA
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA

W1. FORMA DEGRADACJI

ZMIERZONA



W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

Znacznie uszkodzony (poniżej 50% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

ŚREDNIA

NR PRÓBKİ:	ZSW_60123_2
MIEJSCOWOŚĆ	Świnoujście
KSZTAŁT I STRUKTURA	FRAGMENT (fragment FR)
KOLOR	Zielony (Green GN)
NASYCENIE KOLORU	Mocny
IDENTYFIKACJA PRÓBKİ:	POLY(PROPYLENE), ATACTIC
BAZA DANYCH:	Humel Polymer Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	94,09
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	1-25

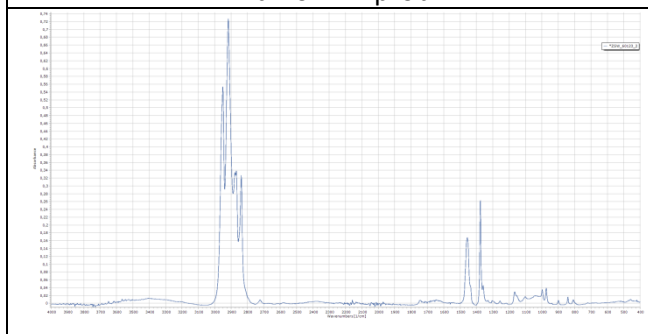
POWIERZCHNIA 1



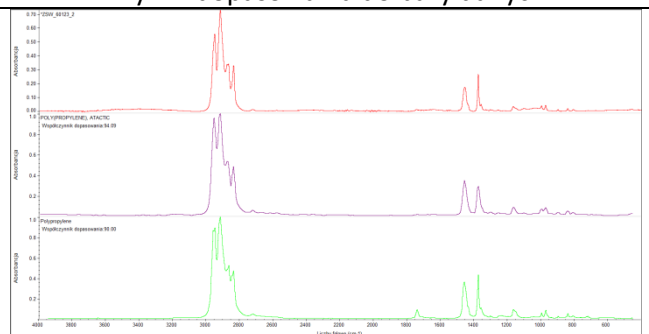
POWIERZCHNIA 2



Widmo FTIR próbki



Wyniki dopasowania do bazy danych



Pomiary [mm²]

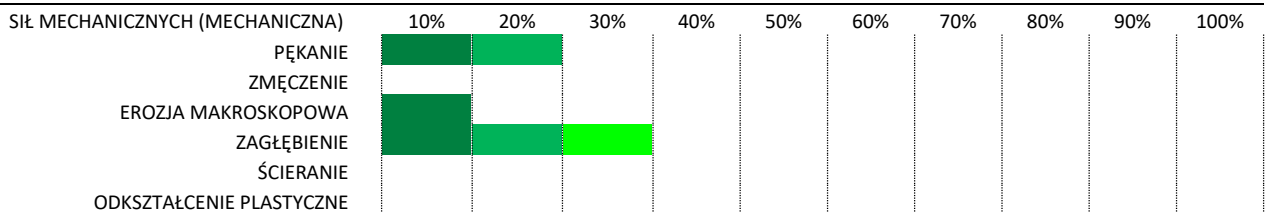
POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	113,32	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	112,08
PĘKANIE	-	PĘKANIE	36,11
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	15,84	EROZJA MAKROSKOPOWA	-
ZAGŁĘBIENIE	22,28	ZAGŁĘBIENIE	32,06
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	-
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	ŚREDNIA
FOTOCHEMICZNA	NISKA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	NISKA
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA

W1. FORMA DEGRADACJI

ZMIERZONA



W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

Umiarkowanie uszkodzony (od 50% do 90% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

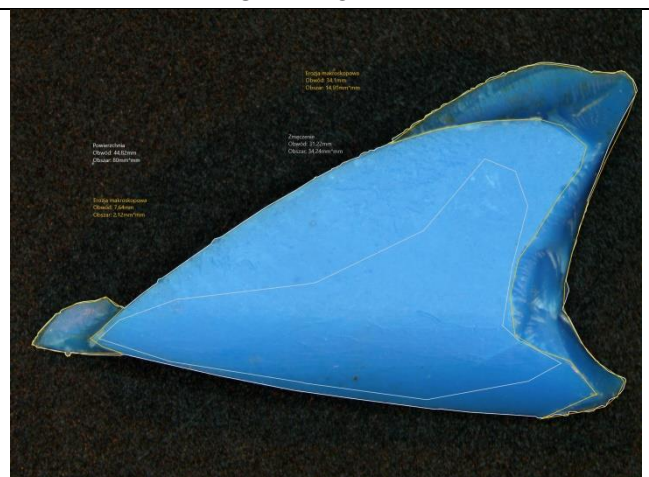
ŚREDNIA

NR PRÓBKİ:	ZSW_60123_3
MIEJSCOWOŚĆ	Świnoujście
KSZTAŁT I STRUKTURA	FRAGMENT (fragment FR)
KOLOR	Niebieski (Blue BL)
NASYCENIE KOLORU	Mocny
IDENTYFIKACJA PRÓBKİ:	POLY(PROPYLENE), ATACTIC
BAZA DANYCH:	Humel Polymer Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	93,46
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	1-25

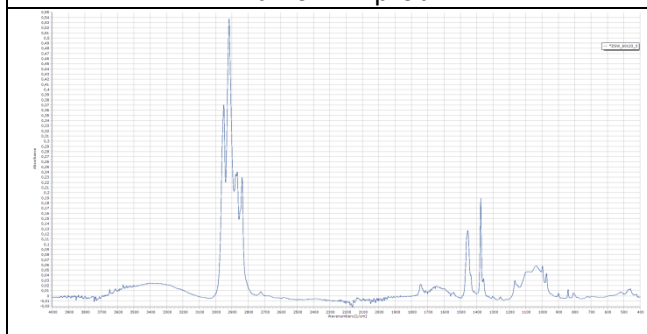
POWIERZCHNIA 1



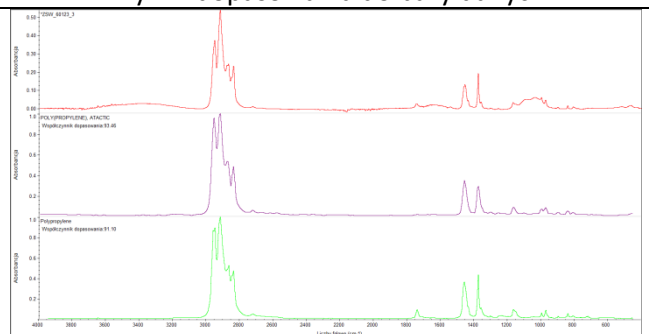
POWIERZCHNIA 2



Widmo FTIR próbki



Wyniki dopasowania do bazy danych



Pomiary [mm²]

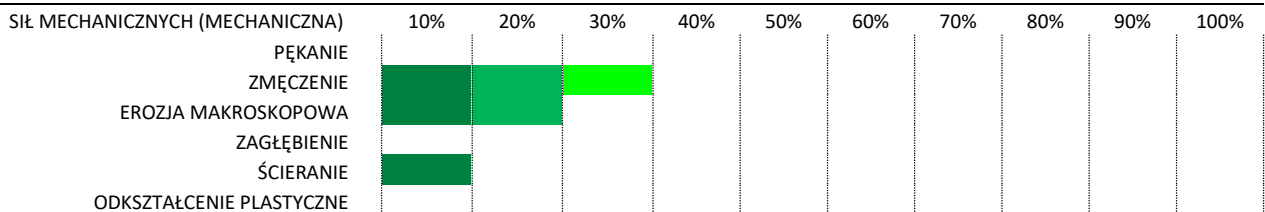
POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	80,33	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	80,00
PĘKANIE	-	PĘKANIE	-
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	34,24
EROZJA MAKROSKOPOWA	9,28	EROZJA MAKROSKOPOWA	17,03
ZAGŁĘBIENIE	-	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	3,88	ŚCIERANIE	-
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	ŚREDNIA
FOTOCHEMICZNA	NISKA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	NISKA
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA

W1. FORMA DEGRADACJI

ZMIERZONA



W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

Umiarkowanie uszkodzony (od 50% do 90% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

ŚREDNIA

NR PRÓBKİ:	ZSW_60123_4
MIEJSCOWOŚĆ	Świnoujście
KSZTAŁT I STRUKTURA	PIANKA (foam FM)
KOLOR	Biały (White WT)
NASYCENIE KOLORU	Słaby
IDENTYFIKACJA PRÓBKİ:	POLY(STYRENE), ATACTIC
BAZA DANYCH:	Humel Polymer Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	87,89
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	1-25

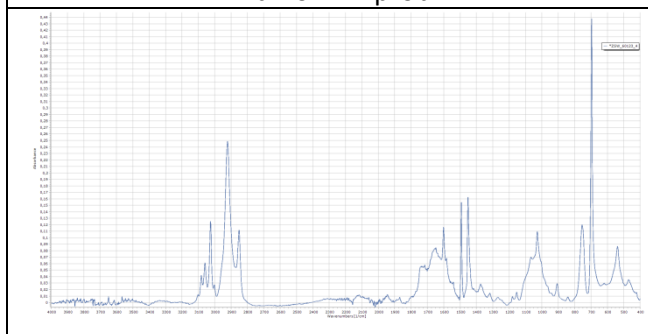
POWIERZCHNIA 1



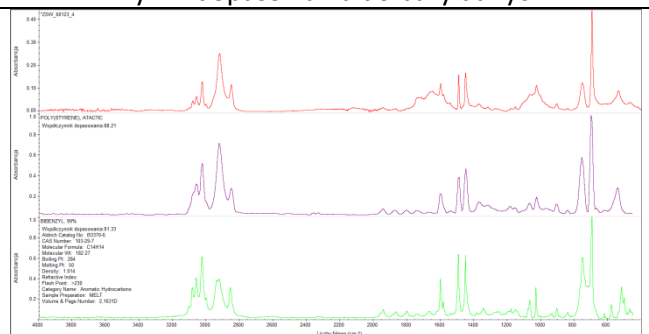
POWIERZCHNIA 2



Widmo FTIR próbki



Wyniki dopasowania do bazy danych



Pomiary [mm²]

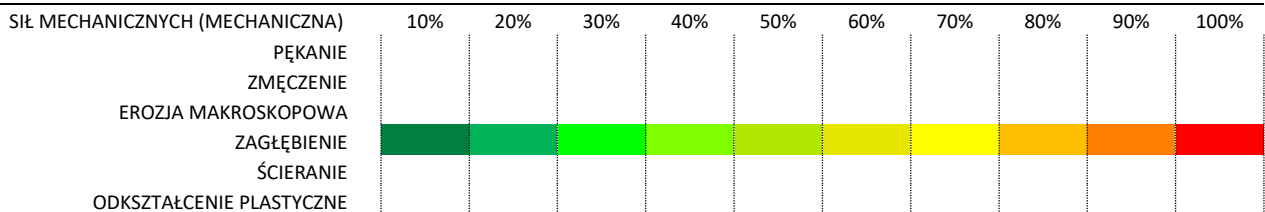
POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	11,31	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	10,87
PĘKANIE	-	PĘKANIE	-
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	-	EROZJA MAKROSKOPOWA	-
ZAGŁĘBIENIE	11,31	ZAGŁĘBIENIE	10,87
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	-
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	WYSOKA
FOTOCHEMICZNA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	WYSOKA
TERMICZNA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
UTLENIAJĄCA	WYSOKA
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ

W1. FORMA DEGRADACJI

ZMIERZONA



W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

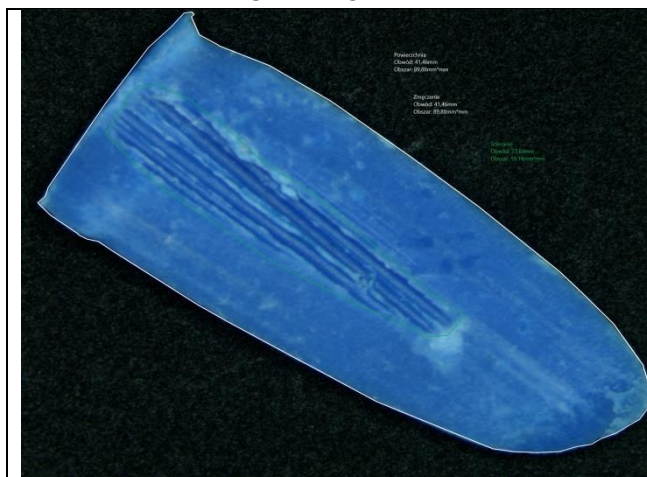
Znacznie uszkodzony (poniżej 50% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

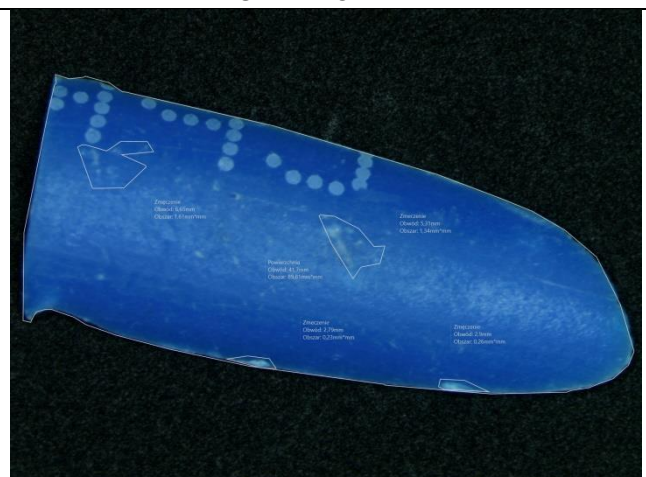
WYSOKA

NR PRÓBKİ:	ZSW_70122_2
MIEJSCOWOŚĆ	Świnoujście
KSZTAŁT I STRUKTURA	FRAGMENT (fragment FR)
KOLOR	Niebieski (Blue BL)
NASYCENIE KOLORU	Mocny
IDENTYFIKACJA PRÓBKİ:	Tygon polymer B-44-4X
BAZA DANYCH:	Hr Nicolet Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	69,19
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	Nie

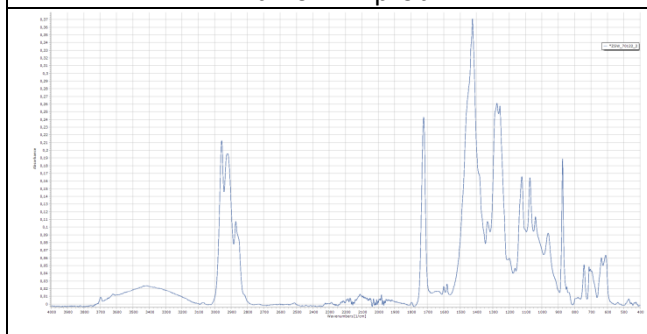
POWIERZCHNIA 1



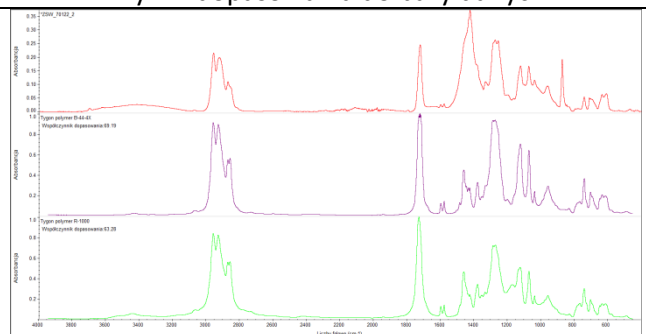
POWIERZCHNIA 2



Widmo FTIR próbki



Wyniki dopasowania do bazy danych



Pomiary [mm²]

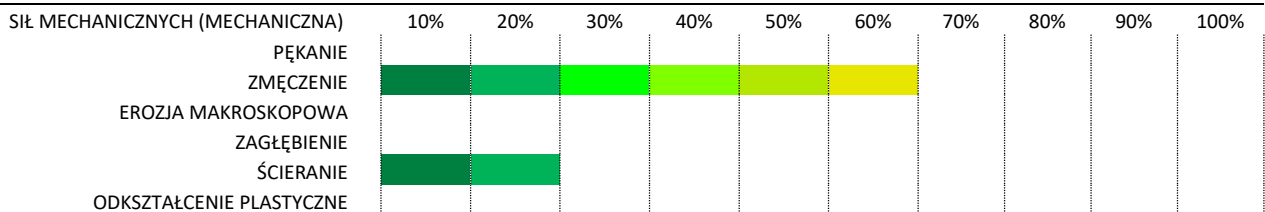
POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	89,88	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	89,81
PĘKANIE	-	PĘKANIE	-
ZMĘCZENIE	89,88	ZMĘCZENIE	3,54
EROZJA MAKROSKOPOWA	-	EROZJA MAKROSKOPOWA	-
ZAGŁĘBIENIE	-	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	19,47	ŚCIERANIE	-
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	NISKA
FOTOCHEMICZNA	NISKA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	NISKA
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	NISKA
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	NISKA

W1. FORMA DEGRADACJI

ZMIERZONA



W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

Znacznie uszkodzony (poniżej 50% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

ŚREDNIA

NR PRÓBKİ:	ZSW_70122_3
MIEJSCOWOŚĆ	Świnoujście
KSZTAŁT I STRUKTURA	FRAGMENT (fragment FR)
KOLOR	Szary (Grey GY)
NASYCENIE KOLORU	Mocny
IDENTYFIKACJA PRÓBKİ:	POLYAMIDE 6
BAZA DANYCH:	Humel Polymer Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	70,14
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	Nie

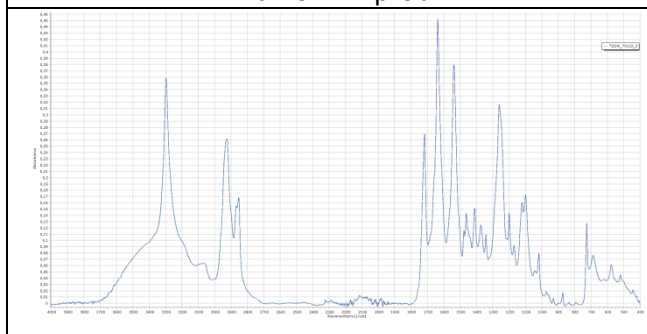
POWIERZCHNIA 1



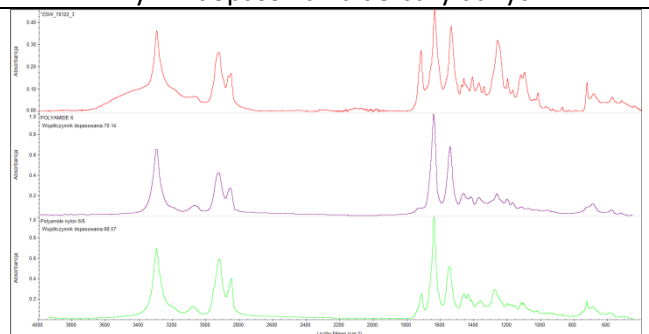
POWIERZCHNIA 2



Widmo FTIR próbki



Wyniki dopasowania do bazy danych



Pomiary [mm²]

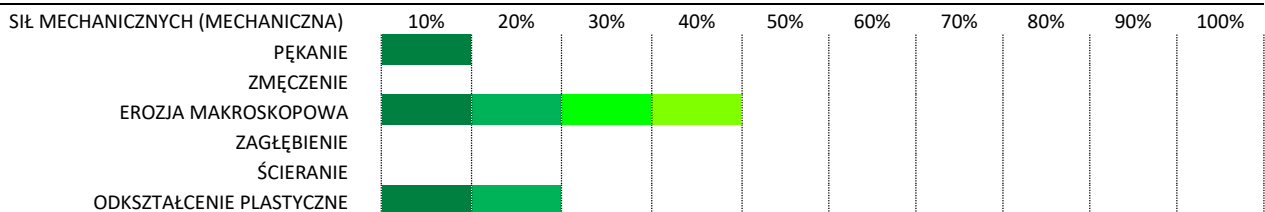
POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	59,90	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	60,48
PĘKANIE	3,09	PĘKANIE	-
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	36,67	EROZJA MAKROSKOPOWA	-
ZAGŁĘBIENIE	-	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	-
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	22,82

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	NISKA
FOTOCHEMICZNA	NISKA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	WYSOKA
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	NISKA

W1. FORMA DEGRADACJI

ZMIERZONA



W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

Znacznie uszkodzony (poniżej 50% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

ŚREDNIA

NR PRÓBK:	ZSW_70122_4
MIEJSCOWOŚĆ	Świnoujście
KSZTAŁT I STRUKTURA	FRAGMENT (fragment FR)
KOLOR	Zielony (Green GN)
NASYCENIE KOLORU	Głęboki
IDENTYFIKACJA PRÓBK:	POLY(STYRENE), ATACTIC
BAZA DANYCH:	Humel Polymer Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	87,47
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	Nie

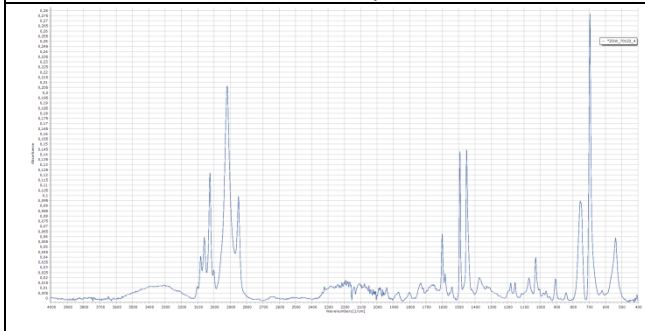
POWIERZCHNIA 1



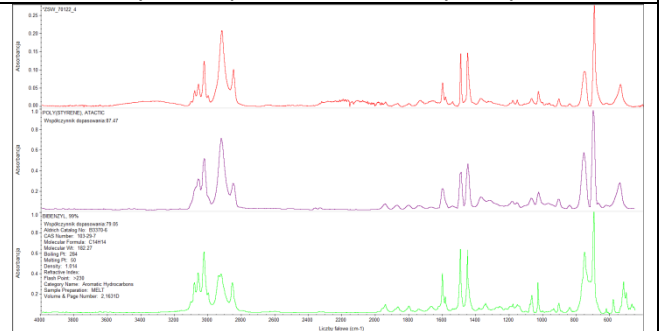
POWIERZCHNIA 2



Widmo FTIR próbki



Wyniki dopasowania do bazy danych



Pomiary [mm²]

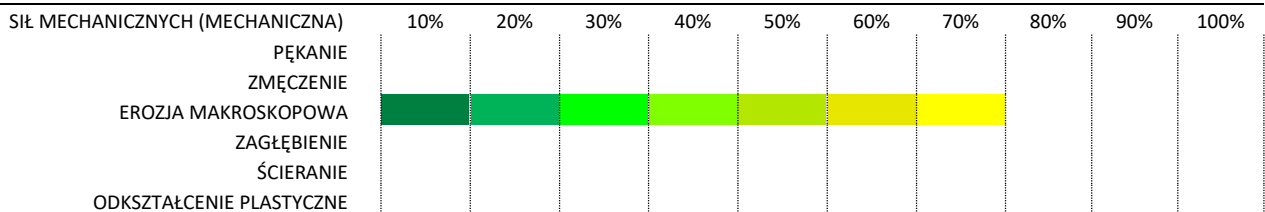
POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	7,57	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	7,38
PĘKANIE	-	PĘKANIE	-
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	7,57	EROZJA MAKROSKOPOWA	2,10
ZAGŁĘBIENIE	-	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	-
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	NISKA
FOTOCHEMICZNA	NISKA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	WYSOKA
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA

W1. FORMA DEGRADACJI

ZMIERZONA



W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

Znacznie uszkodzony (poniżej 50% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

ŚREDNIA

NR PRÓBK:	ZSW_70122_6
MIEJSCOWOŚĆ	Świnoujście
KSZTAŁT I STRUKTURA	LISTEK (leaf LF)
KOLOR	Wszystkie nieprzezroczyste (All opaque AO)
NASYCENIE KOLORU	Blady
IDENTYFIKACJA PRÓBK:	Acrylic (ATR Corrected)
BAZA DANYCH:	User Example Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	87,05
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	Nie

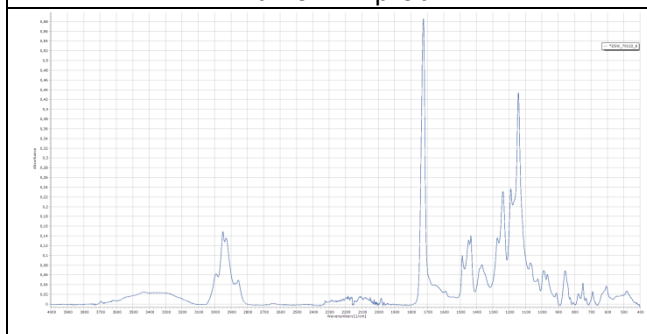
POWIERZCHNIA 1



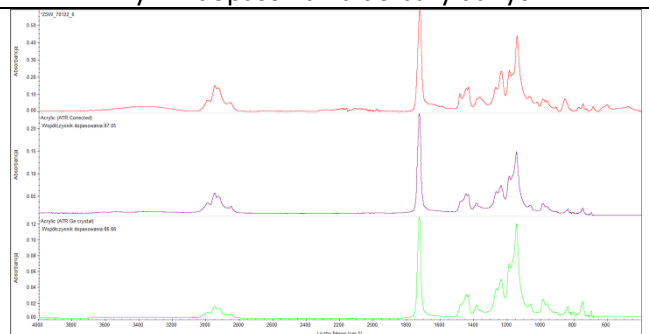
POWIERZCHNIA 2



Widmo FTIR próbki



Wyniki dopasowania do bazy danych



Pomiary [mm²]

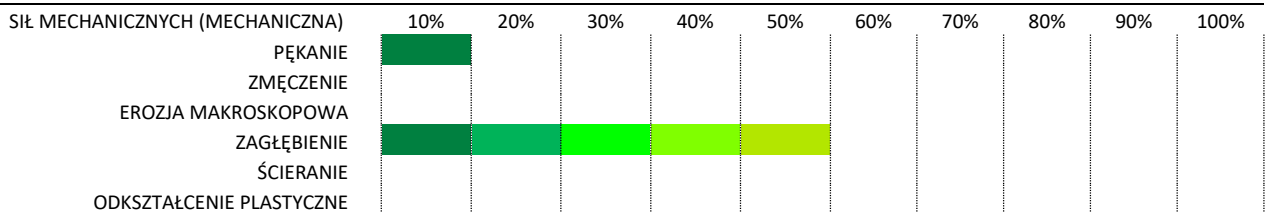
POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	13,73	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	13,69
PĘKANIE	0,22	PĘKANIE	0,12
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	-	EROZJA MAKROSKOPOWA	-
ZAGŁĘBIENIE	13,73	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	-
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-	ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	-

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	ŚREDNIA
FOTOCHEMICZNA	ŚREDNIA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
TERMICZNA	ŚREDNIA
UTLENIAJĄCA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ

W1. FORMA DEGRADACJI

ZMIERZONA



W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

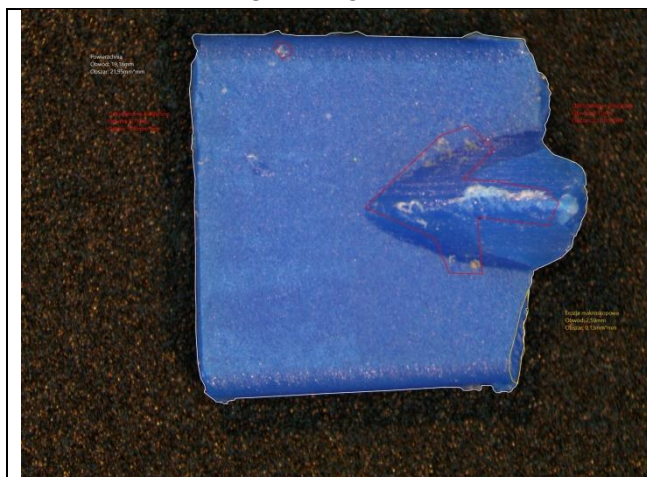
Znacznie uszkodzony (poniżej 50% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

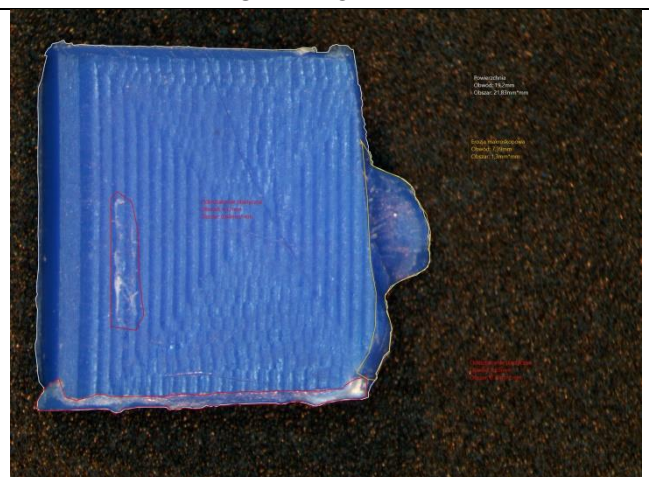
ŚREDNIA DO WYSOKIEJ

NR PRÓBKII:	ZSW_70123_2
MIEJSCOWOŚĆ	Świnoujście
KSZTAŁT I STRUKTURA	FRAGMENT (fragment FR)
KOLOR	Niebieski (Blue BL)
NASYCENIE KOLORU	Mocny
IDENTYFIKACJA PRÓBKII:	POLY(PROPYLENE), ATACTIC
BAZA DANYCH:	Humel Polymer Sample Library
WSPÓŁCZYNNIK DOPASOWANIA:	92,75
POKRYCIE BIOFILMEM [%]	Nie

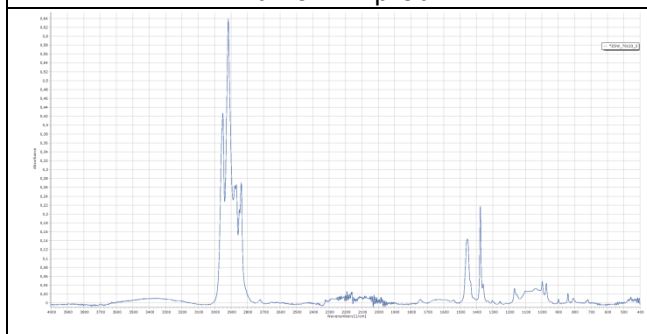
POWIERZCHNIA 1



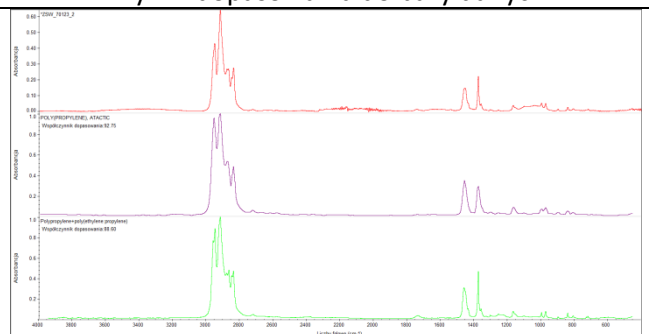
POWIERZCHNIA 2



Widmo FTIR próbki



Wyniki dopasowania do bazy danych



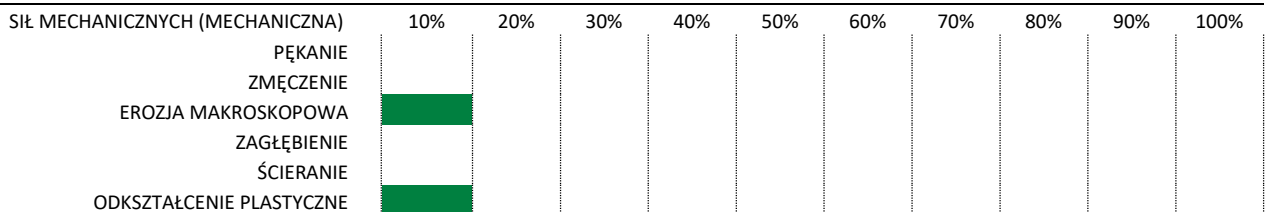
Pomiary [mm²]

POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	21,95	POWIERZCHNIA CAŁKOWITA	21,83
PĘKANIE	-	PĘKANIE	0,12
ZMĘCZENIE	-	ZMĘCZENIE	-
EROZJA MAKROSKOPOWA	0,13	EROZJA MAKROSKOPOWA	1,3
ZAGŁĘBIENIE	-	ZAGŁĘBIENIE	-
ŚCIERANIE	-	ŚCIERANIE	-
ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	2,16	ODKSZTAŁCENIE PLASTYCZNE	1,43

W1. FORMA DEGRADACJI POTENCJALNA (NISKA, ŚREDNIA, ŚREDNIA DO WYSOKIEJ, WYSOKA)

CZYNNIKÓW BIOLOGICZNYCH	NISKA
FOTOCHEMICZNA	NISKA
ŚRODOWISKA KORODUJĄCEGO (CHEMICZNA)	NISKA
TERMICZNA	NISKA
UTLENIAJĄCA	ŚREDNIA DO WYSOKIEJ
SIŁ MECHANICZNYCH (MECHANICZNA)	ŚREDNIA

**W1. FORMA DEGRADACJI
ZMIERZONA**



W2. STOPIEŃ DEGRADACJI

Umiarkowanie uszkodzony (od 50% do 90% fragmentu jest nieuszkodzony)

W3. PODATNOŚĆ NA DEGRADACJĘ

ŚREDNIA

Załącznik nr 2
Arkusz klasyfikacji próbek

Lp.	Indywidualny numer próbki	Miejscowość	Kolor	Nasycenie koloru	Rodzaj polimeru	Współczynnik dopasowania widma	Kształt
1.	ZKG_100523_1	Gąski	Niebieski (Blue BL)	Słaby	POLY(STYRENE), ATACTIC	83,13	FRAGMENT (fragment FR)
2.	ZKG_100523_3	Gąski	Zielony (Green GN)	Słaby	POLY(PROPYLENE), ATACTIC	93,49	FRAGMENT (fragment FR)
3.	ZKG_100523_4	Gąski	Szary (Grey GY)	Słaby	POLY(ETHYLENE), LOW DENSITY	91,66	FRAGMENT (fragment FR)
4.	ZKG_100523_5	Gąski	Żółty (Yellow YL)	Mocny	POLY(ETHYLENE), LOW DENSITY	94,02	PIANKA (foam FM)
5.	ZKG_100523_6	Gąski	Żółty (Yellow YL)	Słaby	Polyether urethane, PPO+MBI, pyrol	73,74	PIANKA (foam FM)
6.	ZKG_100523_7	Gąski	Fioletowy (Violet VT)	Głęboki	POLY(ETHYLENE:PROPYLENE:DIENE)	86,5	FRAGMENT (fragment FR)
7.	ZKG_100523_8	Gąski	Niebieski (Blue BL)	Głęboki	POLY(PROPYLENE), ATACTIC	93,6	FRAGMENT (fragment FR)
8.	ZKG_100523_9	Gąski	Metaliczny (Metallic MT)	Głęboki	Poly(ethylene terephthalate)	96,8	FOLIA (film FI)
9.	ZKG_200523_1	Gąski	Fioletowy (Purple PR)	Głęboki	POLY(PROPYLENE), ATACTIC	92,16	FRAGMENT (fragment FR)
10.	ZKG_200523_2	Gąski	Zielony (Green GN)	Głęboki	POLY(PROPYLENE), ATACTIC	92,32	FRAGMENT (fragment FR)
11.	ZKG_200523_3	Gąski	Zielony (Green GN)	Głęboki	POLY(PROPYLENE), ATACTIC	91,49	FRAGMENT (fragment FR)
12.	ZKG_200523_4	Gąski	Czerwony (Red RD)	Głęboki	POLY(PROPYLENE), ATACTIC	93,06	FRAGMENT (fragment FR)
13.	ZKG_200523_5	Gąski	Różowy (Pink PK)	Głęboki	POLY(PROPYLENE), ATACTIC	94,52	FRAGMENT (fragment FR)
14.	ZKG_200523_6	Gąski	Zielony (Green GN)	Głęboki	POLY(PROPYLENE), ATACTIC	93,03	FRAGMENT (fragment FR)
15.	ZKG_200523_7	Gąski	Żółty (Yellow YL)	Głęboki	POLY(PROPYLENE), ATACTIC	95,21	FRAGMENT (fragment FR)
16.	ZKG_200523_8	Gąski	Żółty (Yellow YL)	Głęboki	POLY(PROPYLENE), ATACTIC	89,31	GRANULKA (pellet PT)

Lp.	Indywidualny numer próbki	Miejscowość	Kolor	Nasycenie koloru	Rodzaj polimeru	Współczynnik dopasowania widma	Kształt
17.	ZKG_200523_9	Gąski	Czerwony (Red RD)	Mocny	POLY(STYRENE), ATACTIC	88,14	FRAGMENT (fragment FR)
18.	ZKG_200523_10	Gąski	Niebieski (Blue BL)	Głęboki	POLY(PROPYLENE), ATACTIC	92,02	FRAGMENT (fragment FR)
19.	ZKG_290423_1	Gąski	Zielony (Green GN)	Blady	POLY(STYRENE), ATACTIC	85,39	PIANKA (foam FM)
20.	ZKG_290423_2	Gąski	Niebieski (Blue BL)	Mocny	POLY(PROPYLENE), ATACTIC	80,76	WŁÓKNO (fibre FB)
21.	ZKG_290423_3	Gąski	Niebieski (Blue BL)	Głęboki	POLY(PROPYLENE), ATACTIC	93,91	FRAGMENT (fragment FR)
22.	ZKG_290423_4	Gąski	Żółty (Yellow YL)	Głęboki	POLY(STYRENE), ATACTIC	85,55	FRAGMENT (fragment FR)
23.	ZKG_290423_5	Gąski	Czerwony (Red RD)	Głęboki	POLY(PROPYLENE), ATACTIC	91,18	FRAGMENT (fragment FR)
24.	ZKG_290423_6	Gąski	Czerwony (Red RD)	Głęboki	POLY(PROPYLENE), ATACTIC	95,11	FRAGMENT (fragment FR)
25.	ZKG_290423_7	Gąski	Zielony (Green GN)	Mocny	POLY(PROPYLENE), ATACTIC	94,1	FRAGMENT (fragment FR)
26.	ZKG_290423_8	Gąski	Zielony (Green GN)	Głęboki	POLY(STYRENE), ATACTIC	87,18	FRAGMENT (fragment FR)
27.	ZKG_290423_9	Gąski	Czerwony (Red RD)	Głęboki	POLY(PROPYLENE), ATACTIC	91,78	FRAGMENT (fragment FR)
28.	ZKG_300423_1	Gąski	Czerwony (Red RD)	Mocny	POLY(STYRENE), ATACTIC	86,68	FRAGMENT (fragment FR)
29.	ZKG_300423_2	Gąski	Niebieski (Blue BL)	Głęboki	POLY(PROPYLENE), ATACTIC	93,31	FRAGMENT (fragment FR)
30.	ZKG_300423_3	Gąski	Niebieski (Blue BL)	Słaby	POLY(PROPYLENE), ATACTIC	94,59	WŁÓKNO (fibre FB)
31.	ZKG_300423_4	Gąski	Niebieski (Blue BL)	Mocny	POLY(PROPYLENE), ATACTIC	94,73	FRAGMENT (fragment FR)
32.	ZKG_300423_5	Gąski	Czarny (Black BK)	Słaby	POLY(ETHYLENE), LOW DENSITY	95,09	FOLIA (film FI)

Lp.	Indywidualny numer próbki	Miejscowość	Kolor	Nasycenie koloru	Rodzaj polimeru	Współczynnik dopasowania widma	Kształt
33.	ZKG_300423_6	Gąski	Biały (White WT)	Mocny	POLY(ETHYLENE), LOW DENSITY	90,08	FRAGMENT (fragment FR)
34.	ZKG_300423_7	Gąski	Niebieski (Blue BL)	Głęboki	POLY(PROPYLENE), ATACTIC	94,65	FRAGMENT (fragment FR)
35.	ZKG_300423_8	Gąski	Niebieski (Blue BL)	Słaby	POLY(PROPYLENE), ATACTIC	88,37	FRAGMENT (fragment FR)
36.	ZKG_300423_9	Gąski	Wszystkie nieprzezroczyste (All opaque AO)	Mocny	POLY(ETHYLENE:PROPYLENE:DIENE)	77,85	PIANKA (foam FM)
37.	ZKG_300423_10	Gąski	Zielony (Green GN)	Blady	POLY(PROPYLENE), ATACTIC	80,89	WŁÓKNO (fibre FB)
38.	ZKO_91021_1	Kołobrzeg	Szary (Grey GY)	Słaby	Tygon polymer B-44-4X	84,17	FRAGMENT (fragment FR)
39.	ZKO_91021_2	Kołobrzeg	Turkusowy (Turquoise TQ)	Słaby	POLY(STYRENE), ATACTIC	87,55	FRAGMENT (fragment FR)
40.	ZKO_91021_5	Kołobrzeg	Niebieski (Blue BL)	Słaby	POLY(PROPYLENE), ATACTIC	92,81	FRAGMENT (fragment FR)
41.	ZKO_91021_6	Kołobrzeg	Niebieski (Blue BL)	Słaby	POLY(PROPYLENE), ATACTIC	93,44	FRAGMENT (fragment FR)
42.	ZKO_91021_7	Kołobrzeg	Oliwkowy (Olive OL)	Blady	Tygon polymer B-44-4X	79,08	FRAGMENT (fragment FR)
43.	ZKO_91021_8	Kołobrzeg	Turkusowy (Turquoise TQ)	Słaby	Polyether urethane, PPO+MBI, pyrol	77,02	PIANKA (foam FM)
44.	ZKO_91021_10	Kołobrzeg	Zielony (Green GN)	Głęboki	POLY(PROPYLENE), ATACTIC	93,68	FRAGMENT (fragment FR)
45.	ZKO_91021_11	Kołobrzeg	Pomarańczowy (Orange OR)	Mocny	Poly(ethylene terephthalate)	95,82	FOLIA (film FI)
46.	ZKO_91021_12	Kołobrzeg	Czarny (Black BK)	Głęboki	Acrylic (ATR Corrected)	73,36	FRAGMENT (fragment FR)
47.	ZKO_91021_13	Kołobrzeg	Biały (White WT)	Mocny	POLY(STYRENE), ATACTIC	85,31	PIANKA (foam FM)

Lp.	Indywidualny numer próbki	Miejscowość	Kolor	Nasycenie koloru	Rodzaj polimeru	Współczynnik dopasowania widma	Kształt
48.	ZKO_91021_14	Kołobrzeg	Czarny (Black BK)	Głęboki	POLY(ETHYLENE:PROPYLENE:DIENE)	96,81	FRAGMENT (fragment FR)
49.	ZKO_91021_15	Kołobrzeg	Czerwony (Red RD)	Głęboki	POLIELSTER	85,05	LISTEK (leaf LF)
50.	ZKO_91021_16	Kołobrzeg	Biały (White WT)	Blady	POLY(PROPYLENE), ATACTIC	88,24	LISTEK (leaf LF)
51.	ZKO_91021_17	Kołobrzeg	Czerwony (Red RD)	Blady	ALKYD RESIN	82,6	LISTEK (leaf LF)
52.	ZKO_91021_18	Kołobrzeg	Zielony (Green GN)	Blady	POLY(STYRENE), ATACTIC	85,17	PIANKA (foam FM)
53.	ZKO_101021_1	Kołobrzeg	Wszystkie przezroczyste (All transparent AT)	Słaby	NONYL ALDEHYDE, 98%	81,73	FOLIA (film FI)
54.	ZKO_101021_10	Kołobrzeg	Biały (White WT)	Blady	POLY(STYRENE), ATACTIC	87,97	PIANKA (foam FM)
55.	ZKO_101021_11	Kołobrzeg	Czerwony (Red RD)	Mocny	POLY(STYRENE), ATACTIC	81,63	FRAGMENT (fragment FR)
56.	ZKO_101021_12	Kołobrzeg	Przezroczysty (Transparent TP)	Słaby	POLY(ETHYLENE), LOW DENSITY	91,89	LISTEK (leaf LF)
57.	ZKO_101021_13	Kołobrzeg	Turkusowy (Turquoise TQ)	Mocny	POLY(PROPYLENE), ATACTIC	92,17	FRAGMENT (fragment FR)
58.	ZKO_101021_14	Kołobrzeg	Biały (White WT)	Słaby	POLY(PROPYLENE), ATACTIC	92,74	LISTEK (leaf LF)
59.	ZKO_101021_2	Kołobrzeg	Czerwony (Red RD)	Słaby	POLYAMIDE 6	72,83	FRAGMENT (fragment FR)
60.	ZKO_101021_4	Kołobrzeg	Niebieski (Blue BL)	Głęboki	POLY(PROPYLENE), ATACTIC	93,46	FRAGMENT (fragment FR)
61.	ZKO_101021_5	Kołobrzeg	Niebieski (Blue BL)	Słaby	POLY(ETHYLENE), LOW DENSITY	95,97	FOLIA (film FI)
62.	ZKO_101021_7	Kołobrzeg	Zielony (Green GN)	Mocny	POLY(PROPYLENE), ATACTIC	93,51	FRAGMENT (fragment FR)

Lp.	Indywidualny numer próbki	Miejscowość	Kolor	Nasycenie koloru	Rodzaj polimeru	Współczynnik dopasowania widma	Kształt
63.	ZKO_101021_8	Kołobrzeg	Niebieski (Blue BL)	Blady	POLY(PROPYLENE), ATACTIC	83,53	WŁÓKNO (fibre FB)
64.	ZKO_101021_9	Kołobrzeg	Czerwony (Red RD)	Słaby	POLY(PROPYLENE), ATACTIC	89,2	FRAGMENT (fragment FR)
65.	ZSW_60123_1	Świnoujście	Żółty (Yellow YL)	Mocny	POLY(PROPYLENE), ATACTIC	91,66	FRAGMENT (fragment FR)
66.	ZSW_60123_2	Świnoujście	Zielony (Green GN)	Mocny	POLY(PROPYLENE), ATACTIC	94,09	FRAGMENT (fragment FR)
67.	ZSW_60123_3	Świnoujście	Niebieski (Blue BL)	Mocny	POLY(PROPYLENE), ATACTIC	93,46	FRAGMENT (fragment FR)
68.	ZSW_60123_4	Świnoujście	Biały (White WT)	Słaby	POLY(STYRENE), ATACTIC	87,89	PIANKA (foam FM)
69.	ZSW_70122_2	Świnoujście	Niebieski (Blue BL)	Blady	Tygon polymer B-44-4X	69,19	FRAGMENT (fragment FR)
70.	ZSW_70122_3	Świnoujście	Szary (Grey GY)	Blady	POLYAMIDE 6	70,14	FRAGMENT (fragment FR)
71.	ZSW_70122_4	Świnoujście	Zielony (Green GN)	Głęboki	POLY(STYRENE), ATACTIC	87,47	FRAGMENT (fragment FR)
72.	ZSW_70122_6	Świnoujście	Wszystkie nieprzezroczyste (All opaque AO)	Blady	Acrylic (ATR Corrected)	87,05	LISTEK (leaf LF)
73.	ZSW_70123_2	Świnoujście	Niebieski (Blue BL)	Głęboki	POLY(PROPYLENE), ATACTIC	92,75	FRAGMENT (fragment FR)