



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

POLIMERTECHNIKA TANSZÉK

DREMÁK CSENGE

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA

FAROST-ERŐSÍTÉSŰ POLIMEREK ELŐÁLLÍTÁSA
POLIOLEFIN ÉS FA HULLADÉKBÓL

Témavezető:

Dr. Czigány Tibor egyetemi tanár

Dr. Gere Dániel adjunktus

BUDAPEST, 2023

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnék köszönetet mondani témavezetőimnek, a Polimertechnika Tanszék munkatársainak, akik segítettek a mérések elvégzésében. Köszönet a Jász- Plasztik Kft.-nek a rendelkezésemre bocsátott alapanyagokért. A TDK dolgozat a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj (BO/00894/23/6) és a Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-23-5-BME-453 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült. Továbbá a dolgozatot az MTA Fenntartható Fejlődés és Technológiák Nemzeti Program (FFT NP FTA) és a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) OTKA PD 146135 és K 143623 pályázatai támogatták.

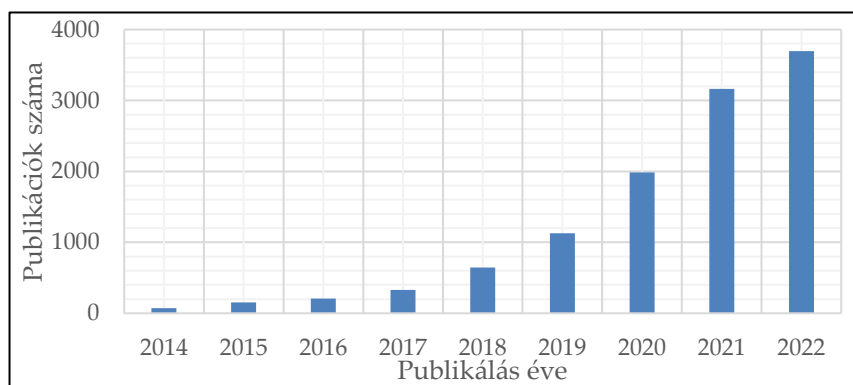
TARTALOMJEGYZÉK

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....	I
TARTALOMJEGYZÉK	II
1. BEVEZETÉS	1
2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS.....	3
2.1. VÍZBEN MEGTALÁLHATÓ HULLADÉKOK.....	3
2.2. MIKROMŰANYAGOK GYÚJTÉSE	5
2.3. MIKROMŰANYAGOK TISZTÍTÁSA	10
2.4. MIKROMŰANYAGOK AZONOSÍTÁSA	14
2.5. MIKROMŰANYAGOK ÚJRAHASZNOSÍTÁSA	19
2.6. FAROST-ERŐSÍTÉSŰ POLIMER KOMPOZITOK	20
2.7. SZAKIRODALOM KRITIKAI ELEMZÉSE, CÉLOK MEGFOGALMAZÁSA	24
3. FELHASZNÁLT ANYAGOK, ALKALMAZOTT BERENDEZÉSEK.....	28
3.1. FELHASZNÁLT ALAPANYAGOK	28
3.2. MINTAELŐKÉSZÍTÉS.....	28
3.3. VIZSGÁLATI MÓDSZEREK.....	30
3.3.1. Szakítóvizsgálat.....	30
3.3.2. Hajlítóvizsgálat.....	31
3.3.3. Charpy-féle ütvehajlító vizsgálat.....	32
3.3.4. Fénymikroszkópia.....	32
4. KÍSÉRLETI ÉS FEJLESZTÉSI EREDMÉNYEK	33
4.1. GYÁRTÁSI TAPASZTALATOK	33
4.2. KIÉRTÉKELÉS	34
4.2.1. Farost-erősítésű hPEPP polimer kompozitok szakítóvizsgálata.....	34
4.2.2. Farost-erősítésű hPEPP polimer kompozitok hajlítóvizsgálata.....	36
4.2.3. Farost-erősítésű hPEPP polimer kompozitok Charpy-féle ütvehajlító vizsgálata.....	37
4.2.4. Következtetések, h-Tisza-PEPP polimer kompozit paramétereinek választása	38
4.2.5. Farost-erősítésű h-Tisza-PEPP polimer kompozit szakítóvizsgálata	39
4.2.6. Farost-erősítésű h-Tisza-PEPP polimer kompozit hajlítóvizsgálata	40
4.2.7. Farost-erősítésű h-Tisza-PEPP polimer kompozit Charpy-féle ütvehajlító vizsgálata	41
4.2.8. Fénymikroszkópia.....	42
5. ÖSSZEFOGLALÁS.....	45
5.1. MAGYAR NYELVŰ ÖSSZEFOGLALÓ.....	45
5.2. IDEGEN NYELVŰ ÖSSZEFOGLALÓ.....	46
6. FELHASZNÁLT FORRÁSOK.....	47
7. MELLÉKLETEK	52

1. BEVEZETÉS

A műanyagokról ma már sokak számára a környezetszennyezés jut az eszébe, pedig a műanyag megszületését a károsanyag-kibocsátás mérséklése és a fenntarthatóság is jelentősen motiválta, például a romlandó élelmiszerek csomagolása, vagy a járművek tömegesökkentése ilyen törekvések mentén jött létre. Így a műanyagok előállítása forradalmi innovációt jelentett eddig használt anyagaink bizonyos mértékű kiváltására, a fogyasztói kultúra megérkezésével pedig a folyamatosan növekvő populáció fogyasztási igényeivel is „lépést tudott tartani”. Azonban ez az újítás a felesleges, környezeti szempontból meggondolatlan anyaghasználat „aranykorát” is elhozta, többek között többszörösen csomagolt termékek, marketing célú és egyszer használatos csomagolások formájában, amelyek jelentős környezetterheléssel járnak.

A termékek életútjuk végén való kezelésére a megfelelő infrastruktúra kiépítésének, a korai stádiumban való intézkedések bevezetésének, a megfelelő tájékoztatás és a társadalmi motiváció hiánya hatalmas terhet ró mai napig az emberiségre. A természetben felhalmozódott műanyag hulladék elkezd aprózódni, szétesni és parányi részecskék formájában a földön, vízben, levegőben és az emberi szervezetben is megjelenni: ezek a mikroműanyagok. Kezelésük egyre sürgetőbb kérdéssé válik, amelyet a mikroműanyagokkal foglalkozó cikkek szignifikáns növekedése is bizonyít (1. ábra [1]).



1. ábra: A "mikroműanyag" kifejezést tartalmazó publikációk száma évenkénti lebontásban 2014-2022 között [1] adatai alapján.

A hulladékok, ha a természetbe kerülnek például eldobálás, mosás következtében, az esővíz összegyűjti őket, és végül a felületi vizeinkbe mosva őket jelennek meg, gyűlnek össze és aprózódnak. A mikroműanyagok parányi mérete és az őket érő környezeti hatások miatt már gyűjtésük is komoly problémát jelent.

Fontos, hogy a mikroműanyag ne a természetben halmozódjon fel, hiszen értékes nyersanyaggá válhatnak. Ahhoz, hogy ipari szinten kezelhetővé tegyük a problémát, olcsó,

gyors és hatékony megoldásra van szükség. A poliolefinnek teszik ki a mikroműanyagok egy jelentős részét [2], így célszerű ezekre az anyagokra helyezni a hangsúlyt, hiszen ezáltal számottevően mérsékelhető a mikroműanyag-szennyezés.

A vízben különböző szerves és szervetlen anyagok találhatóak, amelyek érintkezhetnek a mikroműanyagokkal, ezek közül a legnagyobb mennyiséget a növényi, elsősorban fa uszadék jelenti. A mikroműanyagok gyűjtésénél már a faanyagtól való elkülönítésük során is problémákkal nézünk szembe, mivel rendkívül körülményes és időigényes folyamat. Ebből adódóan kézenfekvő megoldás lehet a fára inkább potenciális alapanyagként tekinteni, amely újrahasznosítható a műanyaggal együtt. Így kiváló mechanikai tulajdonságú, farost-erősítésű polimer kompozit állítható elő, amely új esélyt adhat a mikroműanyagok fenntartható, energiaszegény újrahasznosítására, körforgásba való visszaintegrálására.

Fentiek alapján dolgozatom célja vízből gyűjtött poliolefin mikroműanyagból és farostból új kompozit anyag készítése, mechanikai tulajdonságainak elemzése és alkalmazási lehetőségeinek bemutatása.

Jelen kutatómunka három részből áll:

1. Szelektíven gyűjtött poliolefin kupakhulladék és gyártásközi hulladékfarostból készített polimer kompozit vizsgálata.
2. Folyóból, illetve ártérről gyűjtött poliolefin kupakhulladék és gyártásközi hulladékfarostból készült polimer kompozit vizsgálata.
3. Folyóból lehalászott poliolefin mikroműanyag és uszadék farostból készült polimer kompozit vizsgálata.

A kutatómunka végigköveti a poliolefin hulladék útját és vizsgálja a hulladék életciklusának különböző fázisaiban tapasztalható hasznosíthatóságát. Az irodalmi áttekintés átöleli mindhárom részét a kutatómunkának, míg jelen TDK dolgozat gyakorlati fejezete az első két lépés ismertetését tűzi ki célul, majd a következő hónapokban szakdolgozattá fejlesztve lesz teljes a kutatás. A szelektíven gyűjtött poliolefin kupakhulladékból készült farost erősítésű polimer kompozitokkal kapcsolatban részletes elemzést végeztem, hiszen ennek a lépésnek a keretén belül határoztam meg a farostarányt, amelynek segítségével még végrehajtható a gyártás és nem romlanak jelentősen a mechanikai tulajdonságok. A kiválasztott poliolefin-farost arány alkalmazásával gyártottam le az „ártéri” farost-erősítésű polimer kompozitot.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

Dolgozatomban áttekintem a vizekben található műanyag hulladékok eredetét, formáit. Bemutatom továbbá a leszűrt mikroműanyagok tisztítási, azonosítási és újrafeldolgozási módszereit. Külön kitérek a farost-erősítésű polimer kompozitokra, mint a mikroműanyagok lehetséges alkalmazási területére.

2.1. Vízben megtalálható hulladékok

A vízben található hulladékok felméréséhez fontos statisztikát jelentenek a globálisan elterjedt hulladékgyűjtő akciók eredményei.

Immár minden évben hagyományosan megrendezésre kerül az Ocean Conservancy szervezésében az International Coastal Cleanup elnevezésű program, amelyben világszerte önkéntesek vesznek részt, a partszakaszok és vizek hulladékoktól való megtisztítása érdekében [3]. A 2022. évben az önkéntesek összesen 3 700 589 kg, 15 519 392 db hulladékot gyűjtöttek, amelyek közül a 10 legnagyobb mértékben előforduló hulladék az 1. táblázatban látható [4].

Rangsor	Hulladék típusa	Hulladék anyaga	Darabszám
1	Cigarettszikk	-	1 860 651
2	Italos palack	Műanyag	1 175 045
3	Ételcsomagolás (cukor, chips...stb.)	-	998 661
4	Kupak	Műanyag	844 375
5	Bevásárló táska	Műanyag	622 780
6	Más típusú táska	Műanyag	567 763
7	Ételdoboz	Hab	463 269
8	Ételdoboz	Műanyag	425 637
9	Csésze, tányér	Papír	423 551
10	Szívószál/keverő	Műanyag	406 557

1. táblázat: 2022. évi International Coastal Cleanup: 10 legfőbb gyűjtött hulladék [4].

Természetesen a rangsor összetételében évről évre tapasztalható változás, de összességében elmondható, hogy a legmeghatározóbb hulladékok tekintetében hasonló eredmények születtek. 2020. és 2021. évi beszámolóban a cigarettszikk, műanyag italos palack, műanyag kupak, műanyag bevásárló táska szintén szerepel a legjelentősebb 10 hulladék között [5-6]. Különbség, hogy az üveghulladék 2022. évtől eltérően 2020-ban a 10. helyen, 2021-ben pedig a 7. helyen végzett [5-6].

Érdemes megemlíteni egy hazánkban is megalakuló kezdeményezést. Az Interreg Danube

Transnational Program Tid(y)Up Projektjén belül valósult meg a Tiszta Tisza Térkép készítése, amely a Tiszában, Tisza mentén található hulladékkal szennyezett területeket mutatja 5 ország esetében, köztük Magyarországon [7-8]. Az oldalon nemcsak a hulladék fajtája és helyszíne tekinthető meg, hanem a szükséges elszállítás módjáról is informálja az olvasót, lehetővé téve a tiszai hulladékok folyamatos monitorozását. Jelenleg 2304 műanyaggal szennyezett terület van bejelentve Magyarországon, de emellett például 703 fémhulladékkal, 580 üveghulladékkal szennyezett területet mutat a felület az utolsó megtekintés során [8]. Ezek az adatok nem biztosítanak pontos, számszerű információt a hulladékokkal kapcsolatban, de hulladéktípusok tekintetében fontos eszközt jelenthetnek.

Mivel jelentős műanyag hulladék kerül begyűjtésre globálisan vizeinkből, célszerű jobban megvizsgálni ezt az anyagcsaládot. Az ENSZ környezetvédelmi programjának elemzése [9] szerint a tengerben megtalálható hulladékok 85%-áért ez az anyagcsalád felelős. Becslések alapján 1950 és 2017 között 7000 millió tonna műanyag hulladék keletkezett, amelyből 5250 millió tonnát nem hasznosítottak újra, hanem hulladéklerakóban vagy a környezetben került elhelyezésre. Az egyik előrejelzés szerint, a vízi ökoszisztémába kerülő évi 9-14 millió tonna műanyag hulladék 2040-re elérheti az évi 23-37 millió tonna hulladékot megfelelő intézkedések nélkül.

A műanyag hulladék a környezetbe kerülve mikroműanyaggá tördelődhet, eshet szét. Az általam talált egyik lehetséges definíció a következő: „a mikroműanyagok olyan szilárd részecskék, amelyekhez adalékok vagy egyéb anyagok lehetnek hozzáadva és a részecskék legalább 1 m/m%-ának (a) méretei $1\text{ nm} \leq x \leq 5\text{ mm}$ közé esnek vagy (b) hosszúsága $3\text{ nm} \leq x \leq 15\text{ mm}$ közé esik és a hossz/átmérő arány > 3 ” [10].

Felmerülhet a kérdés, hogy Magyarországot mennyire érinti a vízi mikroműanyag-szennyezés. 2017-ben a Tiszánál végzett méréseket az Eurofins Analytical Services Hungary Kft. [11]. A mintavételezés segítségével $300\text{ }\mu\text{m} < x < 2\text{ mm}$ mérettartományba eső, $4,9\text{ db/m}^3$ és $15\text{ }\mu\text{m} < x < 300\text{ mm}$ mérettartományba eső, $62,5\text{ db/m}^3$ mikroműanyag-koncentrációt detektáltak. A Dunából 1 évvel később vettek mintát Budapest északi (Megyeri híd) és déli (Csepeli Szabadkikötő) szakaszán, a laboratóriumi elemzést követően rendre 45 db/m^3 és 55 db/m^3 részecskét realizáltak [11]. A Dunából nyert részecskék összetételében megfigyelhető, hogy a polietilén (PE) és a polipropilén (PP) a domináló műanyag típusok. Ezekkel az eredményekkel kapcsolatban felmerül, hogy 5-6 évvel ezelőtt készültek és elavultnak tekinthetők. Emellett a szerzők is jegyzik, hogy ezek az eredmények egy mérésből származnak, így hosszútávú következtetés nem vonható le belőlük. Azonban egy 2023-as tanulmányban Liu és társai [12] az Eurofins Analytical Services Hungary Kft. által fejlesztett módszerrel

tisztítottak meg Dunából vételezett mikroműanyagokat és ennek eredményeképpen 45,4 db/m³ koncentrációt állapítottak meg, amely a 2018-as mérés eredményének nagyságrendjébe esik. A módszer segítségével azonosított mikroműanyag részecskék relatív arányában a PE és a PP jelentkezett a leghangsúlyosabban. Elmondható, hogy hazánkat is elérte a mikroműanyag- szennyezés, amely ellen intézkedés szükséges.

2.2. Mikroműanyagok gyűjtése

Számos eljárás létezik mikroműanyagok gyűjtésére, Spreafico és Russo [13] tanulmányukban a mikroműanyag-gyűjtő berendezések szabadalmait mechanikus, dinamikus, mágneses, kémiai eljárásokra bontja. Prata és társai [14] 20 db tényleges mikroműanyag-gyűjtéssel összefüggő tanulmányt vizsgáltak meg, amelyek közül 58% hálóval, 26% szivattyúval, 16% szitával végezte a gyűjtést, így én is ezekre a gyűjtési módszerekre helyezem a hangsúlyt. Hálóból jelen munkában kétfélet különíték el, ezek a manta háló és a plankton háló. Az elemzett módszerek előnyeit és hátrányait a 2. táblázat ismerteti [14]. A tanulmányok elemzése során részletesen kifejtem az alkalmazott módszer paramétereit. Külön kitérek, ha rendelkezésre áll ilyen eredmény, a vízben mért mikroműanyag-koncentrációra.

Gyűjtési mód	Előnyök	Hátrányok
Plankton háló	100 µm - ig kinyerhető minta.	Tömődés felléphet.
	Gyors és egyszerű használat.	Vízáramlás szükséges statikus gyűjtésnél.
Szita	Nem igényel speciális berendezést.	Időigényes.
	Egyszerű mintavételezés.	Szivattyúhoz képest kisebb mennyiségű víz szűrhető.
Szivattyú	Nagy mennyiségű víz szűrhető.	Működtetéséhez energia szükséges.
	Szemcseméret választható.	Mintavételi helyek közötti szállítás körülményes.

2. táblázat: Plankton hálós, szitás, illetve szivattyús gyűjtési eljárások előnyei és hátrányai [14].

Voltak olyan szerzők, akiknek a munkájában a gyűjtést azzal a céllal végezték, hogy minőségi és/vagy mennyiségi szempontból felmérjék egyes területek mikroműanyag- tartalmát. Rodrigues és társai [15] a portugál Antuã folyóban található mikroműanyagokat tanulmányozták vízminták vételével 3 db állomásról. A mikroműanyag-szennyezés több lehetséges forrását is vizsgálni kívánták: (a) különböző népsűrűséggel rendelkező állomások (b) Márciusi és októberi mintagyűjtés (c) Szennyvíztisztító telep jelenléte. Minden állomáson 1200 l vizet egy 55 µm-es cellaméretű poliamid (PA) hálóval felszerelt szivattyúval vételezték a folyófelszínről és a folyófenékről egyaránt, és a legalább 55 µm-es részecskéket vizsgálták meg laboratóriumban. Mikroműanyagokat 58–1265 db/m³-es koncentráció-tartományban

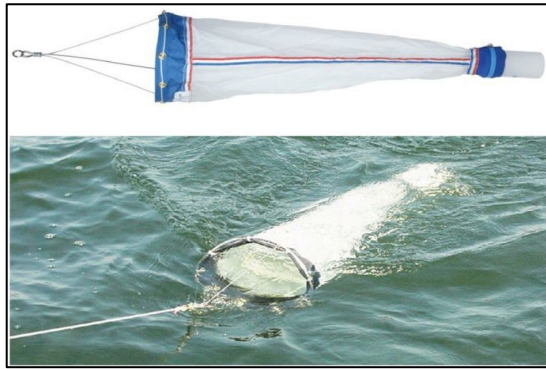
mutattak ki. A legnagyobb mikroműanyag-koncentráció a legnagyobb népsűrűséggel rendelkező állomáson, de a kevésbé intenzív esőzés után, októberben adódott, amelyet a lehetséges nagy mennyiségű helytelen hulladéklerakással magyaráztak.

Napper és társai [16] a Gangesz folyó mikroműanyag-eloszlását mérték fel 10 db mintavételező pont megjelölésével. A mintavételi helyek esetükben úgy értelmezendők, hogy a folyó 5 km-es szakaszait választották ki, és az adott 5 km-es szakasznak a 0 km-es, 2,5 km-es és 5 km-es pontján végezték a mintavételezést, a folyó közepéről. Ezeken a gyűjtőpontokon 2 egymást követő napon 0,5 m-rel a vízfelszín alatt szivattyúztak 30 l mintát monszun előtti és monszun utáni időszakban. A gyűjtött minta 330 μm -es cellaméretű hálón került átszűrésre. Az általuk mért mikroműanyag-koncentráció átlagosan 38 db/ m^3 értékre adódott. A monszun előtti, száraz időszakban mért mikroműanyag-koncentráció magasabb volt, mint a monszun utáni, nedves időszakban. Ezt annak tulajdonítják, hogy a folyó „kimoshatja” a mikroműanyagokat a monszun időszakban. Becslésük szerint naponta 1-3 billió db mikroműanyag részecske áramlik a Gangeszből a Bengáli-öbölbe.

Rajeswari és társai [17] az indiai Kolavai-tóban vizsgálták mikroműanyagok jelenlétét. Összesen 18 db állomást jelöltek ki, amelyek esetén vödörbe szivattyúval gyűjtöttek felszíni vízmintákat, amelyeket 37 μm cellaméretű hálóval szűrtek át. A Kolavai-tavat átlagosan 6100 db/ m^3 mikroműanyag-koncentrációval jellemezték.

Sathish és társa [18] az indiai Mannar-öböl különböző pontjairól gyűjtöttek felszíni vízmintákat, hogy jellemezzék a térségben található mikroműanyagokat mennyiségi és minőségi szempontból egyaránt nyáron, monszun előtti, monszun és monszun utáni időszakban. Ehhez plankton hálót alkalmaztak, amelyet hajóval vontattak. A plankton háló nyílása 0,2 m átmérőjű, hosszúsága 1 m, cellamérete 120 μm . A mikroműanyagokat a plankton háló végén található zsákvégben gyűjtötték össze. Az átlagos mikroműanyag-koncentráció az általuk közölt információkból nem adható meg.

Higgins és társa [19] Angliában található Plymouth körüli felszíni vizekben gyűjtöttek 6 db helyről mintákat plankton háló segítségével. A plankton háló, illetve alkalmazása gyűjtés közben a 2. ábrán látható [20]. Az általuk alkalmazott plankton háló 53 μm cellaméretű, PA anyagú. Emellett 25 cm átmérőjű nyílással rendelkezik és menetes polivinil-klorid (PVC) alkatrészben végződik. A hálót felfújható csónakra erősítették és 7 m-rel mögötte úsztatták. Minden kiválasztott szakaszon 0,9-1,2 m/s sebességgel haladva, kb. 200-250 m távolságot tettek meg. A detektált átlagos mikroműanyag-koncentráció 0,44 db/ m^3 értékre adódott.



2. ábra: Plankton háló vízminta gyűjtés közben [20].

Sari és társai [21] az indonéz Pasaran-sziget körül 4 db jellemző területről,- torkolat (mangrovefa terület), híd (mangrovefa terület), lakott terület, halászati terület - gyűjtöttek mintákat plankton háló segítségével. A szerzők a kutatásban lefedett felszíni vizek mikroműanyag-tartalmának és morfológiájának jellemzését tűzték ki célul. Az általuk alkalmazott plankton háló 100 cm hosszú, nyílása 30 cm átmérőjű, PA anyagból készült és 5 μm cellaméretű. Átlagosan 82750 db/ m^3 mikroműanyag- koncentrációt határoztak meg. A legmagasabb mikroműanyag-koncentráció a halászati terület közelében adódott. Emellett azt feltételezik, hogy például, a torkolatot követő hídnál azért alacsonyabb a mikroműanyag-koncentráció, mivel a torkolatban található mangrovefák megakadályozták a mikroműanyagok továbbáramlását az óceánba.

Diez-Pérez és társai [22] a 3. ábrán látható rozsdamentes acél szitakonstrukciót alkalmazták a paraguay-i Asunción-öböl és főbb mellékfolyóiból történő mintavételezésre.



3. ábra: Szita vízminta-gyűjtés közben [22].

Céljuk a gyűjtött mikroműanyagok azonosítása és számszerűsítése volt, amelyet 6 db állomás kijelölésével valósítottak meg, 300 μm és 4750 μm cellaméretű acélsziták alkalmazásával. A 300 μm -es szitán gyűjtött mikroműanyagokat vizsgálták később laboratóriumban. Míg az öbölben hajó segítségével átlagosan 2,11 km/h sebességgel haladva, addig a mellékfolyókban a 3. ábrán látható módon gyűjtötték a mintákat. Állításuk szerint az öbölben (13,2 db/ m^3) magasabb mikroműanyag-koncentráció jelentkezett, a mellékfolyókkal (1,0 db/ m^3) való összehasonlításban.



4. ábra: Manta háló vízminta-gyűjtés közben [24].

Más tanulmányok összehasonlító vizsgálatokat végeztek kettő vagy többféle gyűjtési módszer tekintetében. Tamminga és társai [23] szivattyúval és manta hálóval vízmintákat gyűjtöttek a német Tollense folyóból, a kétféle gyűjtési technikával nyert eredmények összehasonlítására tettek kísérletet. A manta háló használatára vízminták gyűjtésére a 4. ábra mutat példát [24].

A gyűjtést 8 db különböző állomáson végezték a tó mentén. A szivattyú egy 63 μm -es, 200 μm -es, 300 μm -es, 630 μm -es, 1000 μm -es és 5000 μm -es szitákból álló szitaoszlophoz volt csatlakoztatva. A manta háló 300 μm cellaméretű volt, a gyűjtés sebessége és a megtett távolság átlagosan rendre 5,3 km/h és 1334 m volt. Azt találták, hogy a manta háló nem alkalmas szálak és kisebb méretű mikroműanyagok, míg a szivattyú képes kisebb méretű mikroműanyagok gyűjtésére, így a kutatás céljától függően kiegészítve érdemes a két eljárást alkalmazni.

Schönlau és társai [25] Svédország körüli vizeket vitorlášhajóval bejárva 24 db manta hálóval és 11 db szivattyúval gyűjtött mintát vizsgáltak. Egy mintavétel során 0,5-1,5 m/s sebességgel haladva, 4-5 km hosszú szakaszon vontatták a manta hálót, amelyet egy alumínium keret és háló alkotott. Az alumínium keret téglalap alakú volt, 16x61 cm keresztmetszetű nyílással, míg a háló 3 m hosszú volt, 333 μm -es cellamérettel. A gyűjtést követően a háló végére erősített, 30x10 cm keresztmetszetű gyűjtőzsákba öblítették a mintát, amelyet még 300 μm -es cellaméretű szitán átszűrtek. A szivattyúval a hajó haladása közben gyűjtött vizet szűrtek át a szivattyúba épített 50 μm , 300 μm és 500 μm cellaméretű rozsdamentes acélszűrők segítségével. Azt tapasztalták, hogy a kisebb cellaméretű szűrő alkalmazásával több mikroműanyagot tudtak kinyerni.

Karaban és társai [26] munkájukban különböző paraméterekkel rendelkező plankton hálókat hasonlítottak össze a tekintetben, hogy melyik teljesít jobban mikroműanyagok mennyiségi gyűjtése szempontjából. A vizsgálatok helyszínéül Közép-Lengyelország jelentős alga,-és vízinövény-szaporodással terhelt édesvíztavát és víztározóját választották. Három plankton

hálóval végezték a gyűjtést a partszakasztól 5 m távolságra, amelyek mindegyike 23 cm átmérőjű nyílással rendelkezett, viszont cellaméretük különböző volt: 20 µm, 200 µm és 500 µm. A cellaméreten kívül az átszűrt víztérfogatok tértek el, számszerűen 14,4 dm³, 57,6 dm³, és 100,8 dm³ értékek formájában. A vizsgálatokat követően több megállapítást is tettek. Az átlagos mikroműanyag-koncentráció nem állapítható meg a szerzők által megadott adatokból. Az eredményekből kiolvasható, hogy <200 µm alatti mikroműanyagokat csak 20 µm-es hálóval tudtak kinyerni, míg a nagyobb méretű mikroműanyagok aránya nőtt az alkalmazott cellaméret növekedésével. A 20 µm-es hálóval realizálták a legkevesebb mikroműanyagot, amelyet a terület szerves szennyezettségéből fakadó hálótörmödésnek tulajdonítottak.

A 3. táblázat ismerteti az elemzett tanulmányok legfontosabb jellemzőit. A fő gyűjtési módszer mellett számos szerző alkalmazott valamilyen egyéb szűrőeszközt már a gyűjtés során a megfelelő részecske-mérettartomány beállításához, így ezeket az eszközöket, illetve az eszközök, ha van ilyen jellemzője, cellaméretét is megadtam. Ezen kívül a kutatás során realizált átlagos mikroműanyag-koncentrációt jelenítettem meg. Számos munkában azonban kizárólag a legmagasabb, illetve a legalacsonyabb koncentráció került pontos érték szerint feltüntetve, a többi érték grafikonos ábrázolásban érhető el, amely nem teszi lehetővé az átlagos koncentráció meghatározását.

Sorszám	Szerzők	Gyűjtés helyszíne	Gyűjtési módszer	Egyéb gyűjtés során használt szűrőeszköz	Cellaméret (µm)		Átlagos mikroműanyag-koncentráció (db/m ³)
					Gyűjtő	Egyéb	
1	Rodrigues és társai [15]	Antuã folyó (Portugália)	Szivattyú	Háló	-	55	Az adatokból nem állapítható meg.
2	Napper és társai [16]	Gangesz folyó, (Banglades, India)	Szivattyú	Háló	-	330	38
3	Tamminga és társai [23]	Tollense-tó (Németország)	Szivattyú	Szita	-	63, 200, 300, 630, 1000, 5000	12,7
			Manta háló	-	300	-	0,045
4	Schönlau és társai [25]	Svédország körüli vizek	Szivattyú	Szűrő	-	50	53,3
					-	300	6,58
					-	500	6,43
			Manta háló	Szita	333	300	Az adatokból nem állapítható meg.
5	Higgins és társai [19]	Plymouth körüli vizek (Anglia)	Plankton háló	-	53	-	0,44
6	Sari és társai [21]	Pasaran-sziget körüli vizek (Indonézia)	Plankton háló	-	5	-	82750

3.1. táblázat: Az elemzett gyűjtési módszerek összehasonlítása.

Sorszám	Szerzők	Gyűjtés helyszíne	Gyűjtési módszer	Egyéb gyűjtés során használt szűrőeszköz	Cellaméret (µm)		Átlagos mikroműanyag-koncentráció (db/m³)
					Gyűjtő	Egyéb	
7	Karaban és társai [26]	Dziekanowskie-tó, Ruda víztározó (Lengyelország)	Plankton háló	-	20	-	Az adatokból nem állapítható meg.
				-	200	-	
				-	500	-	
8	Diez-Pérez és társai [22]	Asunción-öböl (Paraguay)	Szita	-	300,4750	-	13,2
		Asunción-öböl főbb mellékfolyói (Paraguay)					1
9	Rajeswari és társai [17]	Kolavai-tó (India)	Szivattyú	(Vödör) + Háló	-	37	6100
10	Sathish és társa [18]	Mannari-öböl (India)	Plankton háló	-	120	-	Az adatokból nem állapítható meg.

3.2. táblázat: Az elemzett gyűjtési módszerek összehasonlítása.

Látható, hogy a szivattyúval végzett gyűjtések mellett Schönlaue és társai [25] a manta hálóval kivitelezett gyűjtés esetén is alkalmaztak például szitát a vizsgált mikroműanyag-mérettartomány beállításához. Ezen kívül általánosságban megfigyelhető, hogy a gyűjtésnél hálót vagy szitát alkalmazók nem használtak egyéb szűrőeszközt. A gyűjtőeszközök cellamérete különböző értékeket mutat, de számos tanulmányban alkalmaztak 300 µm-es szitát vagy hálót. A legmagasabb átlagos mikroműanyag-koncentráció indonéz és indiai vízkészlet vizsgálata esetén adódott, azonban Schönlaue és társai [25] munkájából is látható, hogy a gyűjtési módszer és a cellaméret is befolyásolhatja a lehalászott mikroműanyag mennyiségét.

2.3. Mikroműanyagok tisztítása

Ahhoz, hogy vizsgálhatók legyenek a mikroműanyagok, több lépésen is keresztül kell menniük. Prata és társai [14] ezeket a lépéseket két részre bontják: elsőként a mikroműanyagokat el kell választani a mintától, ezt követően a szerves anyagoktól kell megtisztítani. A mintáktól való elválasztásra a szűrést, a szitálást és a sűrűség szerinti elválasztást, míg a szerves anyagok eltávolítására a savas (pl. HCl, salétromsav (HNO₃)), lúgos (pl. nátrium-hidroxid (NaOH), kálium-hidroxid (KOH)), oxidatív (hidrogén-peroxid (H₂O₂)) és az enzimátikus eljárást nevezték meg. Ezen kívül Pfeiffer és társai [27] az oxidatív eljárásoknál említik a nátrium-hipoklorit (NaClO) és a Fenton- reagens (H₂O₂ + vas(II)-szulfátot (Fe(II)SO₄))

alkalmazását. A továbbiakban áttekintem, hogy a szerzők a gyűjtés után hogyan tisztították meg a mintákat.

Higgins és társai [19], Schönlau és társai [25], illetve Napper és társai [16] nem alkalmaztak vegyszereket a mikroműanyagok tisztítására. Higgins és társai [19] minden mintavételezést követően a zsákvégben összegyűlt mintát üvegbe öblítették. Ezután vákuumszűrést hajtottak végre kerámiaüveg Buchner szűrőkészlettel. A részecskéket 3-6 db cellulóz-nitrát szűrővel nyerték ki, amelyek 47 mm átmérővel és 0,45 µm cellamérettel rendelkeztek. Végül a szűrőket üveg Petri-csészéken szárítószekrényben 40 °C-on, 5 órán keresztül tárolták. Schönlau és társai [25] a gyűjtött mintákat 4 °C-on történő tárolást követően csipesszel kiemelték a szemmel látható szerves anyagokat, majd ezeket átöblítették, hogy visszanyerjék a hozzájuk tapadt mikroműanyagokat. A szivattyúval gyűjtött minták szűrése a szivattyúba szerelt 300 µm-es rozsdamentes acélszűrő alkalmazásával valósult meg, míg a manta hálózattal gyűjtött mintákat utólag is átöblítették ugyanilyen cellaméretű rozsdamentes acélszűrőn. Ezenkívül az 50 µm-es acélszűrőn átszűrt, szivattyúval gyűjtött mintát 0,2 µm-es üvegszálszűrőn engedték át. Napper és társai [16] a gyűjtést követően tisztítási lépések nélkül laboratóriumi vizsgálatoknak vetették alá a részecskéket. Ide sorolható még Rajeswari és társai [17] munkája, mivel ők sem alkalmaztak vegyszereket a mikroműanyagok tisztítására, egyedül formaldehidet (CH₂O) használtak a kinyert részecskék tartósítása végett.

Tamminga és társai [23] munkájában a minták szivattyúzást követően minden szűrőről le lettek öblítve üvegbe és 1 ml HCl-val lettek stabilizálva, azután hűtőládába helyezték őket. 60 ml, 30%-os H₂O₂-nak szobahőmérsékleten, 7 napon át, majd 16,7 ml NaClO oldatnak szobahőmérsékleten, 24 órán át tették ki a mintákat. Végül, átszűrték őket 413 típusú szűrőpapíron rozsdamentes acéltölcsérrel, és 48 órán keresztül száradni hagyták.

Rodrigues és társai [15] a minták tisztítását egy továbbfejlesztett NOAA eljárással végezték. Először 55 µm-es és 5000 µm-es fémszitákon engedték át a mintákat és az 5000 µm-es szitán fennakadt részecskéket nem kezelték tovább. Ezt követően a szerves anyagok eltávolítását végezték el. Az ehhez alkalmazott peroxidos oxidáció során 30%-os H₂O₂-ot és 0,05 M Fe(II) katalizátort adagoltak. Hozzáadást követően 75 °C-on 0,5 percig hagyták állni a mintákat forrásig, majd 15 órán át szobahőmérsékleten tárolták. Az ezt követően végrehajtott cink-kloridos (ZnCl₂) sűrűség szerinti elválasztás lehetővé tette a mikroműanyag felszínre kerülését és a szerves anyagok lesüllyedését. 4 óra elteltével a mikroműanyagokat 0,45 µm-es vákuum membránszűrőn engedték keresztül, majd 40 °C-on 3-5 napig szárították.

Diez-Pérez és társai [22] a mintákat 300 µm cellaméretű rozsdamentes acélszitán még egyszer átengedték, majd 90 °C-on 6 órán keresztül szárították. Ezután a peroxidos

oxidációs kezeléshez 30%-os H_2O_2 -ot és 0,05 M Fe(II)SO_4 -ot használtak egy már létező protokoll alapján 75 °C-on, 30 percen át, majd sűrűség szerinti elválasztást alkalmaztak nátrium-kloriddal (NaCl), ezen kívül a mellékfolyókból származó minták esetén nátrium-jodiddal (NaI) is. Végül 0,45 μm -es PA szűrővel fogták fel a részecskéket és levegőn száradni hagyták.

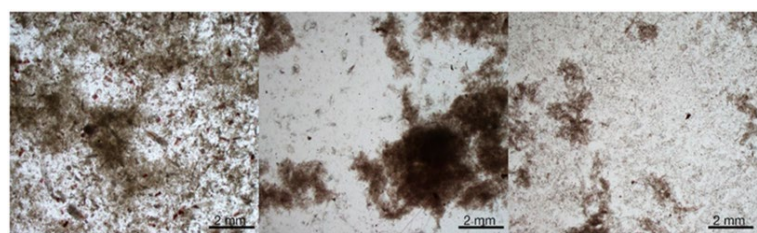
Karaban és társai [26] először 60 °C-on, 72 órán keresztül szárították a mintákat. Majd a szerves anyagok eltávolítása következett, amelyhez 15 cm^3 , 69%-os HNO_3 -val és 5 cm^3 30%-os H_2O_2 -dal kezelték a mintákat 72 órán át, szobahőmérsékleten. Az idő leteltével egy vákuumszivattyúval és 47 mm átmérőjű, 1,2 μm pórusú üvegszál szűrő alkalmazásával nyerték ki a mintákat, a fennakadt részecskéket szűrővel együtt 24 órán át száradni hagyták.

Sari és társai [21] a szerves anyagok eltávolításához H_2O_2 -ot, a sűrűség szerinti elválasztáshoz pedig NaCl -ot adtak a mintákhoz, majd 24 órán át állni hagyták. Ezután 1,2 μm -es szűrőpapírral szűrték át a mintákat, majd a szűrőpapírokat részecskével együtt 105 °C-on, 30-45 percen keresztül szárították.

Sathish és társa [18] először egy oxidatív eljárást alkalmaztak, amely során szobahőmérsékleten, 72 órán át H_2O_2 -dal kezelték a mintákat, majd NaI oldat segítségével választották le a mikroműanyagokat 24 órán keresztül. Végül a 0,8 μm -es szűrőpapíron fennakadt mikroműanyagokat környezeti hőmérsékleten hagyták száradni.

Volt olyan szerző, aki egyfajta tisztítási protokoll hatását vizsgálta mikroműanyagokra. Enders és szerzőtársai [28] 5x10 mm^2 méretű háztartási műanyagtermékeket vizsgáltak a Nemzetközi Tengerkutató Tanács (ICES) által javasolt savas protokoll [29] alapján. HNO_3 : perklórsav (HClO_4) 4:1 térfogatarányú keverék segítségével végezték el a tisztítást, amely során 5 órán keresztül állni hagyták, majd 80 °C hőmérsékleten 10 percen keresztül szárítószekrényben kezelték a mintákat. A kezelt minták szemrevételezése során a legdrasztikusabb változást a PA, poliuretán (PUR) és gumiabroncs esetén észlelték.

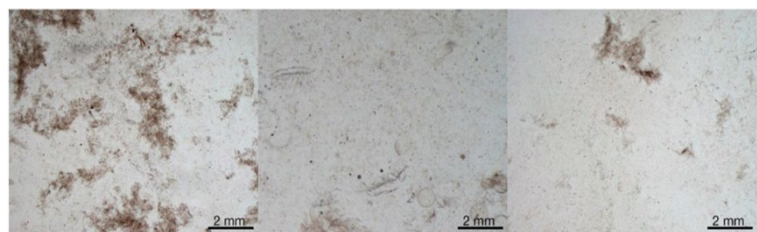
Löder és társai [30] enzimatisztítási eljárás segítségével északi-tengeri plankton mintákban található mikroműanyagokat tisztítottak meg szerves anyagoktól. Ezt a következő lépéssorozat segítségével tették meg: a lefagyasztott mintákat kiolvasztásukat követően egy 500 μm -es rozsdamentes acélszita alkalmazásával egy 500 μm feletti, illetve alatti méretfrakcióra osztották. Az 500 μm alatti mérettartományba eső frakción végrehajtottak egy enzimatisztítási eljárást, amelynek lényege, hogy különböző enzimeket és vegyszert adagoltak a mintákhoz (5. ábra). Az eljárás segítségével kb. 84,5%-os visszanyerési arányt tudtak elérni.



1. nap: olvasztás után

2. nap: SDS után

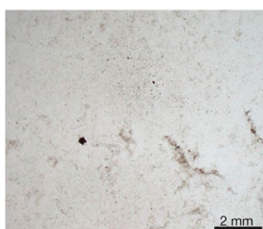
3. nap: proteáz után



7. nap: celluláz után

8. nap: H₂O₂ I után

13. nap: Kitináz után



14. nap: H₂O₂ II után

5. ábra: Mintáról készült felvételek az enzimatikus tisztítás lépései után [30].

A 4. táblázat összegzi a tanulmányok tisztítási folyamatainak lépéseit. Feltüntettem, ha a laboratóriumban végrehajtottak még valamilyen szűrési eljárást a tisztítás előtt, illetve, hogy milyen tartományban állapították meg a mikroműanyagok vizsgált mérettartományát. A tisztítási folyamat végén jelöltem a mikroműanyagok visszanyerésének módját.

Sorszám	Szerzők	Tisztítási eljárás				
		Utószitálás vagy szűrés/vizsgált mérettartomány (µm)	Savas	Oxidatív	Sűrűség szerinti elválasztás	Visszanyerés
1	Rodrigues és társai [15]	Szita/55-5000	-	H ₂ O ₂ és Fe(II) katalizátor	ZnCl ₂	Vákuumszűrés membránszűrővel
2	Napper és társai [16]	Egyik sem/>330	-	-	-	-
3	Tamminga és társai [23]	Egyik sem/63-5000	(HCl)	H ₂ O ₂ , NaClO	-	Szűrőpapír
		Egyik sem/300-5000				
4	Schönlau és társai [25]	Egyik sem/>50	-	-	-	Üvegszálszűrő
		Szűrő/>300				Acélszűrő
5	Higgins és társai [19]	Egyik sem/>53	-	-	-	Vákuumszűrés cellulóz-nitrát szűrővel

4.1. táblázat: Az elemzett tisztítási módszerek összehasonlítása.

Sorszám	Szerzők	Tisztítási eljárás				
		Utószítálás vagy szűrés/vizsgált mérettartomány (μm)	Savas	Oxidatív	Sűrűség szerinti elválasztás	Visszanyerés
6	Sari és társai [21]	Egyik sem >5	-	H_2O_2	NaCl	Szűrőpapír
7	Karaban és társai [26]	Egyik sem >0	HNO_3	H_2O_2	-	Vákuumszűrés üvegszálászűrővel
8	Diez-Pérez és társai [22]	Szita/300-4750	-	H_2O_2 és Fe(II) katalizátor	NaCl, NaI	PA szűrő
9	Rajeswari és társai [17]	Egyik sem >37	(CH_2O)	-	-	-
10	Sathish és társa [18]	Egyik sem >120	-	H_2O_2	NaI	Cellulóz-nitrát szűrőpapír

4.2. táblázat: Az elemzett tisztítási módszerek összehasonlítása.

Megjegyzendő, hogy lúgos tisztítás egyik tanulmányban sem szerepel, illetve, hogy a tanulmányok 60%-ában szerepel oxidatív tisztítási lépés, amely így a leggyakoribb tisztítási eljárásnak minősül a vizsgált tanulmányok között. Emellett kiemelendő, hogy a tanulmányok 40%-a nem tesz említést kémiai tisztításról (beleszámolva a CH_2O -del tartósított mikroműanyagokat).

2.4. Mikroműanyagok azonosítása

A következőkben a mikroműanyagok azonosítására használt eljárásokat mutatom be.

Fénymikroszkópia

Davidson és társa [31] tanulmányukban ismertetik a fénymikroszkóp működési elvét. A mikroszkópi lámpából kilépő látható fény egy része áthalad a mintán, míg másik része eltérül. A képsíkra érkező az áthaladó és a visszavert fény destruktív interferenciát hoz létre, mivel fél hullámhossz késéssel jelenik meg a visszavert fény az áteső fényhez képest.

A fénymikroszkóp, illetve a további ismertetett módszerek előnyeit és hátrányait az 5. táblázat foglalja magába [31-33].

Vizsgálati mód	Előnyök	Hátrányok
FM	Nagyobb mikroműanyagok gyors azonosítása.	Csak nagyobb méretű részecskék (min. 50 μm).
	Mikroműanyag-mennyiség becsülhető.	Azonosításhoz más eljárás alkalmazása is szükséges.

5.1. táblázat: Vizsgálati módszerek előnyei és hátrányai [31-33].

Vizsgálati mód	Előnyök	Hátrányok
FTIR	Roncsolásmentes.	Csak IR aktív minták.
	Az automatikus FTIR kifejlesztése lerövidíti az elemzési időt.	Eredményt befolyásolja a környezeti mátrix.
Raman	1-20 μm közötti minta is detektálható.	Minták tisztítása szükséges mérés előtt.
	Nem átlátszó és sötét minta is detektálható.	Időigényes.
SEM	Sokféle minta vizsgálható.	Mintaméret korlátozott.
	Nagy mélységélesség.	Drága berendezés.

5.2. táblázat: Vizsgálati módszerek előnyei és hátrányai [31-33].

Számos szerző alkalmazott fénymikroszkópiát, mégpedig az általuk vizsgált részecskék morfológiai jellemzéséhez. Rodrigues és társai [15], Higgins és társai [19], illetve Diez-Pérez és társai [22] a mikroműanyagok színét és formáját határozta meg, míg Napper és társai [16], Sari és társai [21], Rajeswari és társai [17], Sathish és társa [18] a megnevezett jellemzőkön túl a mikroműanyagok méretét is megállapították. Karaban és társai [26] az egyedüli szerzői az általam elemzett tanulmányok között, akik a részecskék színét nem vizsgálták, hanem a formai és méretbeli jellemzőkre helyezték a hangsúlyt. A 6. táblázatban található meg a legjelentősebb mennyiségben megjelenő színbeli és formai jellemzők. Látható, hogy a kék színű és a szál formájú mikroműanyagok dominálnak a kutatási eredmények tekintetében.

Fourier-transzformációs infravörös (FTIR) spektroszkópia

Az FTIR elméleti tárgyalását Pokol és társai [34] munkája alapján végzem. Ehhez érdemes először a hagyományos infravörös (IR) spektroszkópiát bevezetni. Az infravörös spektroszkópia az 12820 $1/\text{cm}$ - 33 $1/\text{cm}$ hullámhossztartományú elektromágneses sugárzás mintával történő kölcsönhatásán alapszik.

Az IR spektroszkópiai vizsgálat során az infravörös sugárzást a minta elnyeli, visszaveri vagy átereszt, amelynek eredményeként a molekula rezgési sávjai megjeleníthetők. Megkülönböztetünk vegyérték,- illetve deformációs rezgést. Vegyértékrezgés a kötés hossz tengelye mentén történik, a kötésszögek változása nélkül, míg deformációs rezgés esetén a kötésszög módosul.

A mérés során nyert spektrum vízszintes tengelyén a hullámszám, míg a függőleges tengelyén az abszorbancia (elnyelőképeség) vagy százalékos transzmittancia (áteresztőképeség) jelenik meg. A minta azonosítását jelentősen elősegítik a számítógépes spektrumkönyvtárak.

Az FTIR előnyeit és hátrányait az 5. táblázat tartalmazza.

Napper és társai [16], Higgins és társai [19], illetve Diez-Pérez és társai [22] FTIR spektroszkópiát használtak mikroműanyagok azonosítására. A szerzők által detektált részecskék közül kiemelkedő mennyiségben a PP és a cellulóz szál fordul elő.

Az FTIR spektroszkópia egyik speciális változata a csillapított, teljes reflexiós (ATR- FTIR) módszer [34], amely esetén a mintát egy nagy törésmutatójú kristályra helyezik. A sugár reflexiója előtt kis mértékben behatol a közegbe, amely a sugárzás egy részét elnyeli, ezáltal a detektált visszavert sugárzásból információ nyerhető a közeg anyagi minőségét, összetételét illetően.

Rodrigues és társai [15], Rajeswari és társai [17], illetve Sathish és társa [18] ATR- FTIR spektroszkópiával azonosították az általuk gyűjtött mikroműanyagokat, amelyek közül a legnagyobb mértékben minden tanulmány esetén PE és PP részecskéket detektáltak.

Raman spektroszkópia

Wachs és Bañares [35] írja, hogy a Raman-effektus alapelvét a beeső fény és az átvilágított anyag között fellépő rugalmatlan fényszórás adja. A Raman spektroszkópiával nyert ábrákat Raman spektrumoknak nevezzük. Olyan lézerforrással kell átsugározni a mintát, amely látható, vagy közel infravörös monokromatikus fényt állít elő. A besugárzást követően háromféle típusú szórt fény különböztethető meg, az ún. Rayleigh-szórás, Stokes-szórás és az anti-Stokes-szórás. A Raman-spektrumon a hullámszám-eltolódást, azaz a besugárzás és a sugárforrás közötti hullámszámkülönbséget az abszcissa jelöli. Raja és Barron [36] jegyzi, hogy mindhárom szórásfajta esetén a beeső foton egy adott rezgési állapotból a molekulát az alapállapot és az első elektronállapot között megtalálható végtelen számú virtuális állapot egyik energiaállapotába helyezi. A molekula gerjesztést követő relaxációja határozza meg a szórás típusát. A Raman spektroszkópia előnyei és hátrányai az 5. táblázatban találhatók.

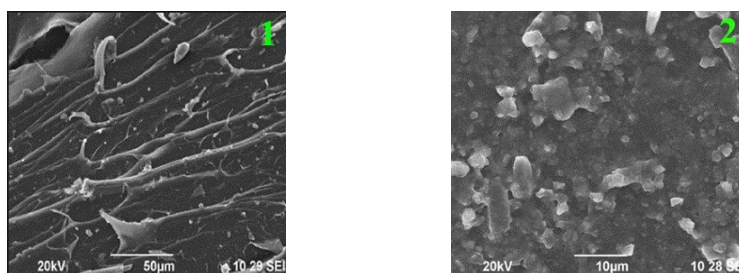
Tamminga és társai [23] μ Raman spektroszkópiával mutatták ki a mintáikban található mikroműanyagokat, amelyek többségében PE és polietilén-tereftalát (PET) voltak.

Pásztázó elektronmikroszkópia (SEM)

Anwar Ul-Hamid könyvében [32] jegyzi, hogy a módszer működési elve szerint egy elektronnyaláb hatol be néhány mikron mélységig a vizsgálandó mintába, a mintában található atomokkal való kölcsönhatás eredményeképpen képződött jeleket pedig a jeltípusnak megfelelő detektor gyűjti össze. Képalkotás szempontjából két kiemelkedően fontos detektált jel a visszaszórt elektron és a szekunder elektron. Míg a visszaszórt elektronok rendszám

szerinti kontrasztot, addig a szekunder elektronok domborzati kontrasztot adnak eredményül az általuk generált képen. Ennek következtében a módszer segítségével többek között az adott minta morfológiájáról, felületi domborzatáról nyerhető információ. Emellett az elemi összetétel meghatározása is lehetséges röntgenfoton jelek gyűjtésével, amelyet energia- diszperzív röntgen spektroszkóp (EDS) detektor végez. A SEM előnyeit és hátrányait az 5. táblázat ismerteti.

Rajeswari és társai [17] és Sathish és társa [18] a mikroműanyagok felületét figyelték meg SEM segítségével. Sathish és társa [18] a 6. ábrán látható képeket készítették szál (1) és darab (2) morfológiájú mikroműanyagról. Az (1) felvételen pórusokat és nagyobb foszlányokat, míg a (2) felvételen töredékeket észleltek.



6. ábra: SEM felvételek szál (1) és darab (2) morfológiájú mikroműanyagról [18].

A 6. táblázat summázza az azonosítási módszereket és az általuk kimutatott jellemzőket. A szín, forma és típus esetén a két legjellemzőbb tulajdonságot emeltem ki, kivéve Schönlaue és társai [25] esetén, ahol felsorolták a detektált színeket, így azok közül az első két említett színt tüntettem fel a táblázatban. A méret esetén a szerzők által kijelölt mikroműanyag-tartományokat adtam meg, amelyekbe kategorizálták a talált részecskéket, figyelmen kívül hagyva az 5 mm feletti kategóriát, mivel afelett már nem beszélünk mikroműanyagról.

Sorszám	Szerzők	Azonosítási módszer	Azonosított jellemzők				
			szín	méret (µm)	forma	típus	felület
1	Rodrigues és társai [15]	Fény	kék, zöld	-	hab, szál	-	-
		ATR-FTIR	-	-	-	PE, PP	-
2	Napper és társai [16]	Fény	kék, fekete	Nem megállapítható.	szál, darab	-	-
		FTIR	-	-	-	cellulóz szál, akrilszál	-
3	Tamminga és társai [23]	µRaman	-	63-150, 150-300, 300-1000, 1000-5000	-	PE, PET	-
				300-1000, 1000-5000			

6.1. táblázat: Az elemzett azonosítási módszerek összehasonlítása.

Sorszám	Szerzők	Azonosítási módszer	Azonosított jellemzők				
			szín	méret (µm)	forma	típus	felület
4	Schönlau és társai [25]	Hiperspektrális képalkotás	kék, fehér	-	-	PE, PP	-
5	Higgins és társai [19]	Fény	fekete, kék	<3000, 3000-5000	szál, darab	-	-
		FTIR	-	-	-	PP, cellulóz szál	-
6	Sari és társai [21]	Fény	kék, fekete	50-200, 201-400, 401-1000, 1001-2000, 2001-4500	szál, darab	-	-
7	Karaban és társai [26]	Fény	-	10-200, 201-1000, 1001-5000	szál	-	-
8	Diez-Pérez és társai [22]	Fény	átlátszó, fehér	-	darab, film	-	-
		FTIR	-	-	-	PP, HDPE	-
9	Rajeswari és társai [17]	Fény	átlátszó, kék	<100, 100-300, >300	szál, darab	-	-
		ATR-FTIR	-	-	-	PE, PP	-
		SEM	-	-	-	-	Nem tesz megállítást.
10	Sathish és társa [18]	Fény	átlátszó, fehér	200-500, 500-1000, 1000-3000, 3000-5000	szál, darab	-	-
		ATR-FTIR	-	-	-	PE, PP	-
		SEM	-	-	-	-	szál: foszlány, pórus
							darab: töredékek

6.2. táblázat: Az elemzett azonosítási módszerek összehasonlítása.

Látható, hogy fénymikroszkópia a tanulmányok 80%-ában szerepel, mint a mikroműanyagok morfológiai meghatározásának eszköze. A publikációk 50%-ában a kék, 70%-ában a szál rendre a legjelentősebb színek és formák között jelenik meg. A tanulmányok 60%-a FTIR vagy az FTIR egyik változatát választotta mikroműanyagok kimutatására, amelyek között a leghangúlyosabban PE és PP mikroműanyagokat detektáltak.

PE – grafit keverék bizonyult megfelelő Li-ion akkumulátor anód anyagként.

2.6. Farost-erősítésű polimer kompozitok

A kompozit Czvikovszky és társai munkája [39] nyomán egy többfázisú, összetett szerkezeti anyagként definiálható, amely nagy szilárdságú és rugalmassági modulusú erősítőanyagból és szívós befoglaló anyagból áll, amelyek között kiváló adhéziós kapcsolat van nagyobb deformáció, igénybevétel esetén is.

A kompozitok széles spektrumot felölelő anyagcsaládjában a farost-erősítésű kompozitok a mikroműanyagok újrahasznosításában lehetséges alkalmazási területet jelentenek, így ezek fogalmi meghatározásával és tulajdonságainak elemzésével folytatott tovább dolgozatom.

A farost-erősítésű polimer kompozit definícióját tekintve különböző értelmezések lelhetők fel a szakirodalomban. Ashori [40] munkájában általánosságban a növényi szálakból és hőre lágyuló vagy hőre nem lágyuló polimerekből felépülő kompozitként nevezi meg. Ugyanakkor Gardner és társai [41] kizárólag a faalapú, illetve hőre lágyuló és a hőre nem lágyuló polimerekből előállított kompozitot értik alatta. Bhaskar és társai [42] szintén csak a faanyagot nevezik meg a növényi anyagcsaládon belül, illetve csak a hőre lágyuló anyagot, kizárják a hőre nem lágyuló polimereket a potenciálisan alkalmazható kompozit anyagok közül, mivel nem újrahasznosíthatóak.

A farost-erősítésű kompozitok megjelenése a 20. századra tehető. Kenaga [43-46] 1963-ban szabadalmaztatta a faalapú termékek méretstabilizálására irányuló, többek között epoxi-vegyületekkel, vinil-, és akrilszerű vegyületekkel végzett eljárásait. A farost-erősítésű kompozitok ipari szintű termelésének történelméhez kapcsolódóan Schut [47] kifejti, hogy 1971-ben Fiat autókhoz kezdtek el 50% faőrleménnyel töltött extrudált PP ajtóburkolati elemeket gyártani.

Számos szerző foglalkozott originál műanyagból előállított farost-erősítésű kompozitok elemzésével, amely kompozitok tömegszázalékos összetételét a 7. táblázat tartalmazza. A továbbiakban a mechanikai vizsgálatok eredményeit foglalom össze, minimális kitekintéssel a dolgozat szempontjából más releváns eredményre.

Sorszám	Szerzők	Feldolgozási technológia/ Fa szemcseméret [µm]	Fafaj és polimer	Fa/polimer/egyéb arány (m/m%)									
1	Redhwi és társai [48]	Fröccsöntés /nem ismert	Lucfenyő	-	18	27	36	-	18	27	36		
			oHDPE	100	82	73	64	-	-	-	-		
			oPP	-	-	-	-	100	82	73	64		
2	Pokhrel és társai [49]	Extrúzió + Fröccsöntés/<400	hCédrusl	20	-	20	-						
			hCédrusp	-	20	-	20						
			oPP	80	80	78	78						
			MAPP	-	-	2	2						
3	Mosavi-Mirkolaei és társai [50]	Extrúzió + Fröccsöntés /250-400	Bükk	40	40	40			Degradált original				
			1b	60	-	-			HDPE	LDPE	PET		E-GMA
			2b	-	60	-		1b	50	50	0		0
			3b	-	-	60		2b	40	40	20	0	
			MAPE	3 pph	3 pph	3 pph		3b	40	40	20	2 pph	
			4	Ezzahrae és társai [51]	Belső keverő + Préselés/<150	hErdeifenyő		40	50	60			
oHDPE	57,5	47,5				37,5							
MA	2	2				2							
PA60	0,5	0,5				0,5							

7. táblázat: Original polimer hozzáadásával készült farost-erősítésű kompozitok összetétele.

Redhwi és társai [48] mesterkeverékből elkészült farost-erősítésű kompozitok ASTM D638 szabvány szerinti szakítóvizsgálatát végezték el. A nagysűrűségű polietilén (HDPE) kompozitok esetén mind a szakítószilárdság, mind pedig a húzási rugalmassági modulus növekedést mutatott a fatartalom emelkedésével. A szakítószilárdság HDPE kompozitok esetén $23,67 \pm 0,11$ MPa-ról $35,36 \pm 0,35$ MPa-ra nőtt. A PP kompozitok esetén csak a húzási rugalmassági modulus mutatott növekvő trendet. A szakítószilárdság közel állandó maradt a vizsgált tartományon belül, azonban már a referencia PP esetén is nagyobb szakítószilárdság érték adódott ($37,84 \pm 0,11$ MPa), mint a 36%-os fával nyert HDPE kompozit szakítószilárdsága. A PP kompozitok esetén a szakítószilárdság fatartalomtól való függetlenségének kimutatását az alacsony feldolgozási hőmérsékletnek tulajdonították, amely így inhomogén keveréket eredményezett. A szakadási nyúlás mindkét fajta kompozit esetén hasonlóan csökkenő tendenciát mutatott a fatartalom növekedésével, más mértékben a kétféle polimer anyag tekintetében. HDPE esetén $1011,87 \pm 1,84\%$ -ról $9,45 \pm 0,40\%$ - ra, PP esetén $43,15 \pm 4,28\%$ -ról $5,87 \pm 0,09\%$ -ra csökkent. A húzási rugalmassági modulus HDPE esetén $619,01 \pm 17,94$ MPa -ról $1461,73 \pm 25,46$ MPa -ra, PP esetén $991,73 \pm 1,77$ MPa -ról $1712,30 \pm 6,49$ MPa-ra nőtt.

Pokhrel és társai [49] vizsgálták kapcsolószer, jelen esetben maleinsav-anhidriddel ojtott polipropilén (MAPP), illetve különböző fafajok alkalmazásának hatását farost- erősítésű polimer kompozitok tulajdonságaira. Ezt ASTM D 638-14 szerinti szakítóvizsgálattal, ASTM D 790-17 szerinti hajlítóvizsgálattal, illetve ASTM D 256-10 szerinti bemetszett Izod-féle

ütvehajlító vizsgálattal mérték fel, majd a kapott értékeket táblázatosan feltüntették. Tanulmányukban a MAPP hatására, az általuk előállított farost-erősítésű kompozitok mechanikai tulajdonságaiban bekövetkező javulást tapasztaltak, illetve jegyzik, hogy jelentős, trendbeli különbség nem észlelhető a kompozitok mechanikai tulajdonságai között liszt vagy pellet faanyag alkalmazása esetén.

Mosavi-Mirkolaei és társai [50] az általuk alkalmazott originál polimereket termomechanikusan degradálták ikercsigás extruder alkalmazásával a kompozitok előállítása előtt. Ezen kívül etilén-glicidil metakrilát kopolimer (E-GMA), illetve PET mikroszálként való jelenlétének hatását vizsgálták. A mechanikai tulajdonságokat ASTM D790-03 szabvány szerinti hajlítóvizsgálattal, ASTM D638-03 szabvány szerinti szakítóvizsgálattal, illetve ASTM D256-10 szerinti, bemetszett Izod-féle ütvehajlító vizsgálattal mérték fel. A vizsgálatok során kapott eredményeket nem általánosságban értékelték, hanem a PET mikroszál és az E-GMA kopolimer hatását emelték ki. Mivel nemcsak a fatartalmú, hanem a fát nem tartalmazó polimer blendek mechanikai tulajdonságát is vizsgálták, így célszerű inkább a HDPE-LDPE blend, és az abból készült farost-erősítésű kompozit tulajdonságait összehasonlítani. A hajlítószilárdsági érték a blend esetén $23,1 \pm 2,4$ MPa -ról $49,8 \pm 1,1$ MPa -ra, a szakítószilárdság $19,1 \pm 1,2$ MPa -ról $27,2 \pm 1,7$ MPa -ra, a hajlító rugalmassági modulus $0,6 \pm 0,0$ MPa -ról $2,3 \pm 0,1$ MPa -ra nőtt, a szakadási nyúlás $19,8 \pm 3,4\%$ -ról $2,8 \pm 0,2\%$ -ra csökkent. Az Izod-féle ütőszilárdság $5,9 \pm 3,1$ kJ/m²-ről $3,0 \pm 0,2$ kJ/m²-re változott.

Ezzahrae és társai [51] különböző fatartalmú kompozitok mechanikai tulajdonságait vizsgálták ISO 14125 szabvány szerinti hajlítóvizsgálattal. A szerzők nem bocsátották rendelkezésre a pontos mért értékeket, így az ő megállapításait tudom prezentálni, amelyek szerint a hajlító rugalmassági modulus a fatartalom növekedésével nőtt, illetve, hogy a hajlítószilárdság a fatartalom növelésével csökkenő tendenciát mutatott.

Más szerzők újrahasznosított polimer anyagot is alkalmaztak farost-erősítésű polimer kompozitok előállítására. Az összegyűjtött tanulmányokban található fajtáj- polimer összetétel arányokat a 8. táblázat tartalmazza, amelyek esetén az originál polimer anyagból készült kompozitokhoz hasonlóan főképpen a létrehozott kompozitok mechanikai tulajdonságait elemzem.

Sorszám	Szerzők	Feldolgozási technológia /Fa szemcseméret [µm]	Fafaj és polimer	Fa/polimer/egyéb arány (m/m%)											
1	Bhaskar és társai [52]	Extrúzió + Fröccsöntés /354-500	Fenyő	-	-	40	40	50	50	50	50				
			oPP	100	-	60	-	50	-	-	-				
			rPP	-	100	-	60	-	50	47	45				
			MAPP	-	-	-	-	-	-	3	5				
2	Chaharmahali és társai [53]	Belső keverő + Préselés/nem ismert	Forgácslap	100	60	70	80	-	-	-	-	30	35	40	
			Farostlemez	-	-	-	-	100	60	70	80	30	35	40	
			rPE	-	40	30	20	-	40	30	20	40	30	20	
3	Najafi és társai [54]	Belső keverő + Préselés / <297	Bükk	50	50	50	50	50	50	50	50				
			oHDPE	50	25	-	-	-	-	25	-				
			rHDPE	-	25	50	-	-	-	-	25				
			oPP	-	-	-	50	25	-	25	-				
			rPP	-	-	-	-	25	50	0	25				

8. táblázat: Újrahasznosított polimer anyag hozzáadásával (is) készült farost-erősítésű kompozitok összetétele.

Bhaskar és társai [52] originál, illetve újrahasznosított PP hulladékból készült kompozitok nedvességfelvételi hajlamát tanulmányozták. Azt találták, hogy a fatartalom 10 m/m%-os növekedésével a nedvességfelvétel nőtt, az újrahasznosított PP eltérő mértékben, illetve a kompozitokhoz hozzáadott MAPP adalék jelentősen mérsékelte a felvett nedvességtartalom mennyiséget.

Chaharmahali és társai [53] magas fatartalmú kompozitok mechanikai tulajdonságait hasonlították össze hajlítószilárdság, hajlító rugalmassági modulus és ütőszilárdsági mérőszámok felhasználásával. Ehhez a DIN-EN 310 szerinti hárompontos hajlítóvizsgálatot, bemetszetlen próbatestekkel Izod-féle ütvehajlító vizsgálatot végeztek ASTM D 256-90 szabvány alapján. A szerzők nem közölték a számszerű mérési adatokat, így szintén a grafikonokra és a megállapításaikra tudok hagyatkozni. Ők magas fatartalommal dolgoztak, 60-80%-os fatartalom-tartományt lefedve. A hajlító rugalmassági modulus 60-70% között nőtt, majd 80%-nál lecsökkent. A hajlítószilárdság a bemetszetlen Izod-féle ütőszilárdsággal nőtt a fatartalom növekedésével. A kereskedelembe kapható forgácslapokéval összehasonlítható hajlítószilárdságot 80%-os, hajlító rugalmassági modulus pedig 70%-os fatartalommal tudtak reprodukálni.

Najafi és társai [54] az általuk gyártott kompozit próbatesteket ASTM D638-89 szerinti szakító-, ASTM D790-90 szerinti hajlító és ASTM D256-90 szerinti bemetszetlen Izod-féle ütvehajlító vizsgálatnak vetették alá. Ők sem közlik a pontos értékeket. PP-fa kompozitok esetén adódott a legmagasabb hajlító rugalmassági modulus és hajlító szilárdság. Emellett azt állítják, hogy nem romlottak a mechanikai tulajdonságok azáltal, hogy PP-t és HDPE-t, illetve,

hogy újrahasznosított HDPE-t és PP-t tartalmazott a kompozit.

Egyéb szerzők különböző töltőanyagok, például Zhang és társai [55] grafit pehely, Hong és társai [56] kukoricacsutka biofinomításából visszamaradt hulladék, Lopez és társai [57] mészkő farost-erősítésű kompozitok tulajdonságaira gyakorolt hatását vizsgálták.

2.7. Szakirodalom kritikai elemzése, célok megfogalmazása

Bolygónkat nagy mennyiségű hulladék terheli makro-és mikroszinten egyaránt. Fontos lenne olyan megoldást találni, amely többféle hulladék kezelését teszi lehetővé, olyan mechanikai tulajdonságokat hordozva, amely a mindennapi életben is hasznosíthatóvá teszi. Az International Coastal Cleanup gyűjtési akcióin az egyik legjelentősebb hulladék a műanyag kupak volt. A kupak általában kétféle termoplasztikus polimerből, PE-ből vagy PP-ből készül. A PE és a PP a hazánkban, illetve az általam elemzett nemzetközi szinten végzett mikroműanyag-mérések során a legjelentősebb mennyiségben előforduló mikroműanyagoknak bizonyultak. Emellett gyártási szempontból is viszonylag egyszerű a feldolgozhatósága, hiszen darálást és mosást követően kompaundálható. Mindezek alapján a kupakhulladékot választom újrahasznosítási alapanyagnak.

A mikroműanyagok vízi környezetből való visszanyerésének szakirodalmát több okból is célszerű volt áttekinteni. Egyrészt, kiderült számomra, hogy az általam feldolgozott irodalomban nem lelhetők fel egyezményes módszerek a mikroműanyagok visszanyerését illetően. Ez megnehezíti a szakirodalom értékelését és a mikroműanyagok kutatásában kihívás elé állítja a szakembereket. Másrészt, ezáltal a jelentős szennyezésnek kitett, akár parányi anyagok feldolgozhatósági lehetőségét is fel tudtam mérni. A 9. táblázat összesíti a tanulmányok gyűjtési, tisztítási és azonosítási módszereit, illetve említést tesz a beazonosított mikroműanyagokról.

Sorszám	Szerzők	Gyűjtési	Tisztítási	Azonosítási	Azonosított mikroműanyagok
		módszer			
1	Rodrigues és társai [15]	Szivattyú + háló	H ₂ O ₂ és Fe(II) katalizátor + ZnCl ₂	Fény + ATR-FTIR	PE, PP
2	Napper és társai [16]	Szivattyú + háló	-	Fény + FTIR	cellulóz szál, akrilszál
3	Tamminga és társai [23]	Szivattyú + szita, Manta háló	(HCl) + H ₂ O ₂ + NaClO	μRaman	PE, PET
4	Schönlau és társai [25]	Szivattyú + szűrő, Manta háló + szita	-	Hiperspektrális képalkotás	PE, PP
5	Higgins és társai [19]	Plankton háló	-	Fény + FTIR	PP, cellulóz szál

9.1. táblázat: Az elemzett tanulmányok összefoglaló táblázata.

Sorszám	Szerzők	Gyűjtési	Tisztítási	Azonosítási	Azonosított mikroműanyagok
		módszer			
6	Sari és társai [21]	Plankton háló	H ₂ O ₂ + NaCl	Fény	-
7	Karaban és társai [26]	Plankton háló	HNO ₃ + H ₂ O ₂	Fény	-
8	Diez-Pérez és társai [22]	Szita	H ₂ O ₂ és Fe(II) katalizátor + NaCl, NaI	Fény + FTIR	PP, HDPE
9	Rajeswari és társai [17]	Szivattyú + háló	(CH ₂ O)	Fény + ATR-FTIR + SEM	PE, PP
10	Sathish és társai [18]	Plankton háló	H ₂ O ₂ + NaI	Fény + ATR-FTIR + SEM	PE, PP

9.2. táblázat: Az elemzett tanulmányok összefoglaló táblázata.

A gyűjtési eljárások tekintetében Tamminga és társai [23] azzal a problémával néztek szembe, hogy nem létezett olyan szivattyú, amely kifejezetten mikroműanyagok gyűjtését tenné lehetővé, így ők állítottak fel kritériumokat a konstrukcióra. Azonban számos cikk, mivel végigköveti a teljes mikroműanyag visszanyerési folyamatot, nem ismerteti a pontos gyűjtési konstrukciót, nehezítve a folyamat reprodukálását. Például Rodrigues és társai [15] az általuk használt szivattyúval kapcsolatban nem közölnek információkat, így nem összehasonlítható más ilyen eljárással végzett gyűjtésből származó eredménnyel.

A mikroműanyagok tisztításával foglalkozó cikkek általában valamilyen átvett protokollt alkalmaztak a mikroműanyagok visszanyeréséhez, amely az összehasonlításukat nem teszi lehetővé. Ezenkívül például Enders és társai [28] kimutatták, hogy az egyik savas eljárás roncsol néhány mikroműanyag típust, így nem javasolja a használatát. Az ilyen típusú eredmények megkérdőjelezzik azokból a munkákból kapott mikroműanyag kinyerési eredményeket, amelyek olyan protokollokat alkalmaztak, amelyek mikroműanyagokra gyakorolt hatása még nem ismert. Ezen kívül ezek a vegyszerek toxikus hatást gyakorolhatnak az emberi egészségre, például a NaOH és a H₂O₂ égési sérülést, szemkárosodást okozhat [58-59].

Összességében elmondható, hogy rendkívül bonyolult, költséges, hosszú, adott esetben toxikus, mire vegyi eljárások útján a mikroműanyagok megtisztíthatók, közben nagymértékben degradálódhatnak, veszíthetnek mechanikai tulajdonságaikból, amely súlyosan megnehezíti a mikroműanyagok újrahasznosítási lehetőségeit. Emellett a használt energia és vegyi anyag mennyiségével nagymértékben terhelhetjük a környezetet. Ebből adódóan munkám során törekszem a lehető legkevesebb adalékanyag, vegyszer, illetve előkészítési lépés beiktatására.

A következőkben kitérek a farost-erősítésű polimer kompozitok szakirodalmi elemzésére, majd a gyártási folyamatot illetően következtetéseket vonok le.

Ezzahrae és társai [51] nem bocsátották rendelkezésre a pontos mért értékeket, és azok

jelentős szórása, illetve adott esetben egymást átfedő szórásmezői miatt nehéz egyértelmű következtetést levonni a mechanikai tulajdonságokra vonatkozó trendeket illetően, amelyeket megállapítottak. Chaharmahali és társai [53] nem közölték a pontos mérési értékeket és olyan ábrát mutattak be, amelyekkel az eredmények külső objektív értékelése nem valósítható meg, mivel az összetételek jelei többségében fekete színűek és átfedik egymást. Pokhrel és társai [49] vizsgálatuk során olyan következtetéseket vontak le, amelyek nem állapíthatók meg egyértelműen. Állításuk szerint a lucfenyő mutatja átlagosan a vizsgált faanyagok közül a legjobb mechanikai tulajdonságokat, de ez nem következtethető ki az eredményekből, mivel a mérési eredmények közötti eltérések minimálisak voltak. Véleményem szerint az általuk használt 20%-os fatartalom túl alacsonynak bizonyult ahhoz, hogy felmérjék a különböző faanyagok ilyen irányú hasznosíthatóságát.

Az újrahasznosított polimerek újrahasznosított voltával kapcsolatban is kérdések merülnek fel. Chaharmahali és társai [53], illetve Najafi és társai [54] alkalmaztak újrahasznosított polimerekből készült kompozitokat (is), de rendre a polimerek származásával kapcsolatban annyi információ áll rendelkezésre, hogy tejespalackokból gyűjtötték, vagy egyáltalán nincs megnevezve. Így úgy ítélt meg, hogy célszerű lenne a munkámban felmérni, mi az optimális fatartalom mechanikai tulajdonságok tekintetében a tanulmányokban tett állításoktól függetlenül. Ehhez 25 m/m%-os, 50 m/m%-os és 60 m/m%-os farost-erősítésű polimer kompozit gyártását fogom megvalósítani. A gyártás lebonyolításához extrúziót és fröccsöntést választok.

Redhwi és társai [48] adalékanyag használata nélkül tettek kísérletet 50%-os farost-erősítésű polimer kompozit előállítására, amely sikertelennek bizonyult, mivel a polimer töltőanyag nem volt elegendő ahhoz, hogy meggátolja a farostok szétesését. Ennek következtében a munkámban kapcsolószert fogok alkalmazni, hogy lehetővé tegyem nagyobb fatartalmú polimer kompozitok előállítását. A mechanikai tulajdonságok mellett a nedvességfelvétel jelen kutatásban nem képvisel elsődleges szempontot, de fontos, hogy olyan kompozitokat állítsak elő, amelyek a magasabb fatartalom ellenére is ellenállóak a nedveséggel szemben. Bhaskar és társai [52] 5% MAPP-t alkalmaztak 50%-os fatartalom esetén, jelentős csökkenést tapasztalva nedvességfelvétel szempontjából, így én is ezt a %-os mennyiséget fogom alkalmazni.

Ahhoz, hogy felmérjem az elhasznált, szennyezettebb körülményekből származó polimerek újrahasznosításának „határait”, végigkövetem a polimerhulladék „állomásait”: első lépésben szelektíven gyűjtött kupakhulladékot fogok alkalmazni. Ezt követően szennyezett, Tiszai PET Kupa gyűjtőakcióról származó kupakhulladék újrahasznosítására teszek kísérletet. A szelektíven gyűjtött kupakhulladék segítségével meghatározom a megfelelő faarányt, a

mérésekhez szükséges 25-50-60%-os fatartalmú és 5% MAPP-t tartalmazó próbatesteket extrúzióval, majd fröccsöntéssel fogom előállítani. Ezután szakítóvizsgálatot, hajlítóvizsgálatot, Charpy-féle ütvehajlító vizsgálatot fogok végezni a mechanikai tulajdonságok felmérésére. A kiválasztott faaránnyal fogom a második lépésben a szennyezett kupakhulladékból készült polimereket előállítani. Ehhez ugyanazt a fafeldolgozási hulladékot fogom alkalmazni, hogy a műanyagok szennyezettségének hatását felmérjem.

3. FELHASZNÁLT ANYAGOK, ALKALMAZOTT BERENDEZÉSEK

Ebben a fejezetben bemutatom a kísérleti munka során alkalmazott anyagokat, berendezéseket, ismertetem a mintaelőkészítési folyamatot.

3.1. Felhasznált alapanyagok

A kísérleti munka során alkalmazott alapanyagokat a 10. táblázat tartalmazza.

Jelölés	Megnevezés	Alapanyag típus	Származási hely	Jellemző
hPEPP	Szelektíven gyűjtött poliolefin kupakhulladék	PE, PP	Jász-Plasztik Kft. (Jászberény)	Mosott, válogatott kupakdarálék
h-Tisza-PEPP	Tiszai PET Kupa poliolefin kupakhulladék	PE, PP	Tisza folyó, ártér	Szennyezett kupak
hW250	Fafeldolgozási hulladék	Lucfenyő	Szalay Fatelep (Szigetszentmiklós)	Szemcseméret: <250 µm
hW500	Fafeldolgozási hulladék	Lucfenyő	Szalay Fatelep (Szigetszentmiklós)	Szemcseméret: 250- 500 µm
MAPE	Kompatibilizálószer	Fusabond E100	Dow (USA)	Maleinsav anhidriddel ojtott HDPE

10. táblázat: Felhasznált alapanyagok jellemzői.

3.2. Mintaelőkészítés

A továbbiakban bemutatom a mintaelőkészítés lépéseit.

Szitálás

A fahulladék szitálását BA – 200N típusú szitarázó gép segítségével végeztem. Az általam alkalmazott konstrukció paraméterei a 11. táblázatban olvashatók.

Ciklusidő [min]	Ciklus mód [s]	Amplitúdó [mm]	Sziták száma [db]	Szitaméret [µm] csökkenő sorrendben
5	9 - rázó	2	4	1000, 710, 500, 250
	1 - álló			

11. táblázat: Szitálási paraméterek.

Mosás, darálás

A Tiszai PET Kupáról származó poliolefin kupakhulladék (h-Tisza-PEPP) a folyóról lehalászott, illetve az ártérről összegyűjtött állapotban, előkészítés nélkül érkezett a laboratóriumba. A kupákat először a Fritsch 4ERKK90 daráló segítségével ledaráltam, majd kétlépcsős mosással ((a) melegvizes, mosószeres, (b) hidegvizes) készítettem elő a gyártáshoz.

Szárítás

A szitált fahulladék, a szelektíven gyűjtött poliolefin kupakdarálék (hPEPP) és a h-Tisza-PEPP kupakdarálék Yamato DKN600 típusú szárítószekrényben került szárításra 80 °C hőmérsékleten, 4 óra szárítási idővel.

Szárazkeverék készítés

A szárítást követően a 12. táblázatban foglalt arányoknak megfelelően készítettem el a fa-polimer keverékeket.

Keverék	Összetételarány [m/m%]	Kompatibilizálószer
hPEPP	100	-
hW250/hPEPP + MAPE	25/75	5 pph
	50/50	5 pph
	60/40	5 pph
hW500/hPEPP + MAPE	25/75	5 pph
	50/50	5 pph
	60/40	5 pph
h-Tisza-PEPP	100	-
hW500/h-Tisza-PEPP + MAPE	60/40	5 pph

12. táblázat: Keverékek összetételarányai (pph (parts per hundred): rész vagy gramm per 100 rész vagy gramm).

Kompaundálás

A szárazkeverékek elkészítését követően a kompaundálás a Labtech Scientific 26-44 típusú ikercsigás extruder, majd az azt követő levegő hűtésű ventilátoros szalag segítségével valósult meg. Ezután a granulálást az LZ-120/VS típusú granuláló alkalmazásával végeztem. Az extrúziós és a granulálási paraméterek a 13. táblázatban tekinthetők meg.

Csigák fordulatszáma [1/perc]	Ömledéknomás [bar]	Hőmérsékletprofil [°C] (garattól a szerszám felé)	Granulátum hossza [mm]
150	30-60	190 - 190 - 195 - 195 - 200 - 200 - 205 - 205 - 210 - 210 - 210	3

13. táblázat: Extrúziós és granulálási paraméterek.

Fröccsöntés

A vizsgálandó próbatestek Arburg Allrounder Advance 270S 400-170 típusú fröccsöntőgép felhasználásával készültek a 14. táblázatban feltüntetett paraméterekkel a hPEPP kompaundok, illetve a 15. táblázatban feltüntetett paraméterekkel a h-Tisza-PEPP kompaundok esetén.

Szerszám-hőmérséklet [°C]	Befröccsöntési sebesség [cm ³ /s]	Hőmérsékletprofil [°C]	Maradék hűtési idő [s]	Utónyomási idő [s]	Utónyomás [bar]
30	50	185 - 190 - 195 - 200 - 200	30	5,20	100-300

14. táblázat: Fröccsöntési paraméterek a hPEPP kompaundok esetén.

Szerszám-hőmérséklet [°C]	Befröccsöntési sebesség [cm ³ /s]	Hőmérsékletprofil [°C]	Maradék hűtési idő [s]	Utónyomási idő [s]	Utónyomás [bar]
30	45	185 - 190 - 195 - 200 - 200	40	5,10	25-400

15. táblázat: Fröccsöntési paraméterek a h-Tisza-PEPP kompaundok esetén.

3.3. Vizsgálati módszerek

A következőkben ismertetem az alkalmazott vizsgálati módszereket.

3.3.1. Szakítóvizsgálat

A szakítóvizsgálatokat Zwick Z005 univerzális szakítógéppel végeztem szobahőmérsékleten, 45%-os páratartalom mellett, a vizsgálat jellemzőit a 16. táblázat tartalmazza.

Próbatest típusa	Próbatest mérete [mm]	Szakítási sebesség [mm/perc]	Befogási hossz [mm]
MSZ EN ISO 527-2/1A	4x10x170	50	115

16. táblázat: Szakítóvizsgálati paraméterek [60].

A húzófeszültség, illetve a névleges nyúlás az (1) és (2) összefüggések [61] szerint határozható meg:

$$\sigma = \frac{F_h}{a_0 \cdot b_0} \quad (1)$$

ahol σ a húzófeszültség [MPa], F_h a húzóerő [N], a_0 a próbatest keresztmetszeti magassága [mm], b_0 a próbatest keresztmetszeti szélessége [mm].

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100 \quad (2)$$

ahol ε a névleges nyúlás [%], ΔL a hosszváltozás [mm], L_0 a kezdeti hossz [mm].

A húzószilárdság a (3) összefüggés [61] alapján adódik:

$$\sigma_h = \frac{F_{max}}{a_0 \cdot b_0} \quad (3)$$

ahol σ_h a húzószilárdság [MPa], F_{max} az első lokális maximális erő [N], a_0 a próbatest keresztmetszeti magassága [mm], b_0 a próbatest keresztmetszeti szélessége [mm].

A nyúlás a húzószilárdságnál a (4) összefüggéssel [61] határozható meg:

$$\varepsilon_{F_{max}} = \frac{L_{F_{max}}}{L_0} \cdot 100 \quad (4)$$

ahol $\varepsilon_{F_{max}}$ a nyúlás a húzószilárdságnál [%], $L_{F_{max}}$ a húzószilárdsághoz tartozó hosszváltozás [mm], L_0 a kezdeti hossz [mm].

A húzási rugalmassági modulus az (5) összefüggés [61] felhasználásával számítható:

$$E_h = \frac{\sigma_{h0,25} - \sigma_{h0,05}}{\varepsilon_{h0,25} - \varepsilon_{h0,05}} \quad (5)$$

ahol E_h a húzási rugalmassági modulus [MPa], $\sigma_{h0,25}$ a 0,25%-os nyúlásnál fellépő húzófeszültség [MPa], $\sigma_{h0,05}$ a 0,05%-os nyúlásnál fellépő húzófeszültség [MPa], $\varepsilon_{h0,25}$ a 0,25 %-os nyúlás [%], $\varepsilon_{h0,05}$ a 0,05%-os nyúlás [%].

3.3.2. Hajlítóvizsgálat

A hajlítóvizsgálatokat szobahőmérsékleten, 43%-os páratartalom mellett, Zwick Z005 univerzális szakítógéppel segítségével hajtottam végre, a vizsgálat jellemzőit a 17. táblázat ismerteti.

Alátámasztási távolság [mm]	Próbatest típusa [-]	Próbatest mérete [mm]	Maximális lehajlás [%]	Hajlítási sebesség [mm/perc]
64	MSZ EN ISO 178:2019	4x10x80	10	10

17. táblázat: Hajlítási paraméterek [62].

A hajlítószilárdság a (6) összefüggés [62] segítségével határozható meg:

$$\sigma_{bh} = \frac{3 \cdot F_t \cdot L}{2 \cdot b_0 \cdot a_0^2} \quad (6)$$

ahol σ_{bh} a hajlítószilárdság [MPa], F_t a törőerő [N], L az alátámasztási távolság [mm], b_0 a próbatest keresztmetszeti szélessége [mm], a_0 a próbatest keresztmetszeti magassága [mm].

Ha a próbatest vastagságának 1,5-szeresét meghaladó lehajlás (3,5%) esetén sem törik el a próbatest, akkor az előbb definiált σ_{bh} hajlítószilárdság helyett a σ_h határhajlító feszültség alkalmazható, amely a (6) összefüggéssel számítható azzal a különbséggel, hogy a törőerő helyett a próbatest vastagságának 1,5-szeres lehajlása esetén fellépő erőt kell behelyettesíteni.

A hajlító rugalmassági modulus a (7) összefüggés [62] felhasználásával adódik:

$$E_{bh} = \frac{\sigma_{bh0,25} - \sigma_{bh0,05}}{\varepsilon_{bh0,25} - \varepsilon_{bh0,05}} \quad (7)$$

ahol E_{bh} a hajlító rugalmassági modulus [MPa], $\sigma_{bh0,25}$ 0,25%-os hajlító alakváltozásnál fellépő hajlítófeszültség [MPa], $\sigma_{bh0,05}$ a 0,05%-os hajlító alakváltozásnál fellépő hajlítófeszültség [MPa], $\varepsilon_{bh0,25}$ a 0,25%-os hajlító alakváltozás [%], $\varepsilon_{bh0,05}$ a 0,05%-os hajlító alakváltozás [%].

3.3.3. Charpy-féle ütvehajlító vizsgálat

A Charpy-féle ütvehajlító vizsgálatok Ceast Resil Impactor Junior típusú ütőmű segítségével valósultak meg, az alkalmazott paraméterek a 18. táblázatban találhatóak.

Próbatest típusa	Próbatest mérete [mm]	Alátámasztási távolság [mm]	Bemetszés mérete [mm]	Kalapács üténergiája [J]	Kalapács által bejárt szög [°]
MSZ EN ISO 179-1/1eA	4x10x80	62	2	15	115

18. táblázat: Charpy-féle ütvehajlító vizsgálat paraméterei [63].

A Charpy-féle ütvehajlító szilárdság a (8) összefüggés [63] alkalmazásával adódik:

$$a_c = \frac{E_{max} - E_0}{a_0 \cdot b_m} \cdot 10^3 \quad (8)$$

ahol a_c a Charpy-féle ütvehajlító szilárdság [kJ/m²], E_{max} a maximális erőhöz tartozó törési energia [J], E_0 a kalapács üresjáratú energiája [J], a_0 a próbatest keresztmetszeti magassága [mm], b_m a próbatest keresztmetszeti bemetszett szélessége [mm].

3.3.4. Fénymikroszkópia

Az fénymikroszkópos felvételek Keyence VHX-5000 típusú fénymikroszkóppal készültek. A Charpy-féle ütvehajlító vizsgálatok során nyert töretfelületek vizsgálatát végeztem el.

4. KÍSÉRLETI ÉS FEJLESZTÉSI EREDMÉNYEK

Ebben a fejezetben bemutatom mérési eredményeimet és azok kiértékelését.

4.1. Gyártási tapasztalatok

Ennek az alfejezetnek a célja, hogy a referencia és a különböző összetételű farost- erősítésű polimer kompozit próbatestek gyártási tapasztalatait összegezze.

Szitálás

Kétféle szemcseméretű – 250 μm alatti és 250-500 μm közötti – fa hulladékból készítettem el a farost-erősítésű polimer kompozit próbatesteket. A 250 μm alatti faszemcséből egy szitálás alatt lényegesen alacsonyabb mennyiséget tudtam kinyerni a 250-500 μm közötti faszemcséhez képest.

Kompaundálás

A kompaundálás során a 25 m/m%-os fatartalom esetén nem lépett fel probléma, sem az adagolás, sem pedig a hűtés során. 50 m/m%-os fatartalmú keverék esetén megnőtt az ömledéknomás. Megjegyzendő, hogy kísérletet tettem 75 m/m%-os fatartalmú keverék kompaundálására is. Azonban ebben az esetben le kellett állítani a gyártási folyamatot, mivel a kompaund megégett, az extruderben darabokra tört és a nyomáskülönbség hatására füsttel együtt távozott a szerszámnyílásból nagy sebességgel. A 75 m/m%-os keverék gyártási tapasztalatából származó iteráció eredménye lett a 60 m/m%-os fatartalmú keverék gyártása, amely esetén tovább nőtt az ömledéknomás. A hűtés esetén külön figyelmet kellett fordítanom a szerszámból távozó kompaundok összetapadásának, összecsavarodásának meggátlására, viszont ez nem volt mindig sikeres, jelentős veszteséget generálva a granulálás során. Elmondható, hogy a kompaund szerszámból történő kilépésének szabálytalansága által a kinyerhető granulátum aránya csökkent a fatartalom növelésével.

Fröccsöntés

A 25 m/m%-os fatartalmú próbatestek fröccsöntéséhez 1000 bar nyomáskorlát alkalmazása elegendő volt, a folyamat során nem volt tapasztalható probléma. Az 50 m/m%-os próbatestek fröccsöntéséhez már 1400 bar nyomáskorlát beállítása volt szükséges. A 60 m/m%-os próbatestek fröccsöntéséhez 1900 bar nyomáskorlátra volt szükség a gyártás lebonyolításához. Emellett a 60 m/m%-os próbatestek fröccsöntésekor számos esetben a folyási út végén gyűlt

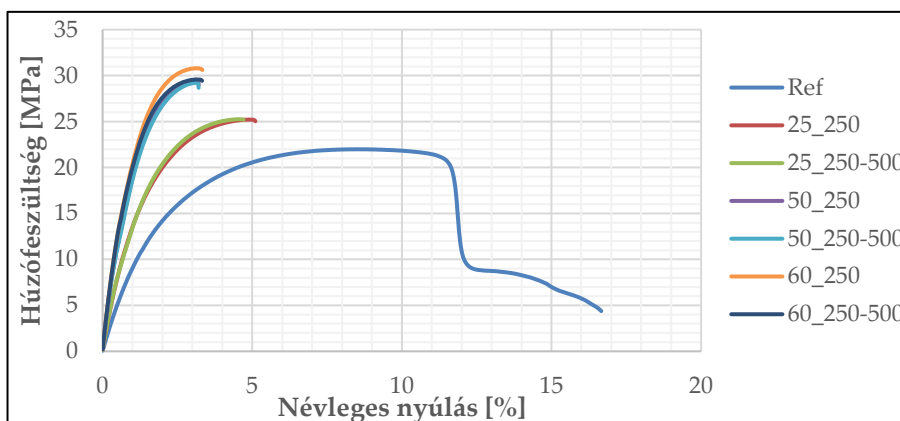
össze a faanyag, amely a három különböző fatartalmú keverék közül a legnagyobb hányadú selejt (pl. repedés keletkezése) előállítását eredményezte, azon belül is a 250 μm alatti szemcseméret esetén.

4.2. Kiértékelés

Összesen hatféle összetételű farost-erősítésű szelektíven gyűjtött kupakhulladékból készült polimer kompozit, illetve a referencia mechanikai tulajdonságainak vizsgálatát végeztem el szakító-, hajlító-, illetve Charpy-féle ütvehajlító vizsgálat segítségével. A vizsgálatok eredményeinek számítását Excel programban végeztem, azok értékelését ebben az alfejezetben ismertetem. Az eredmények alapján a PET Kupáról származó kupakhulladékból farost-erősítésű polimer kompozitot állítottam elő és vizsgáltam a mechanikai tulajdonságait.

4.2.1. Farost-erősítésű hPEPP polimer kompozitok szakítóvizsgálata

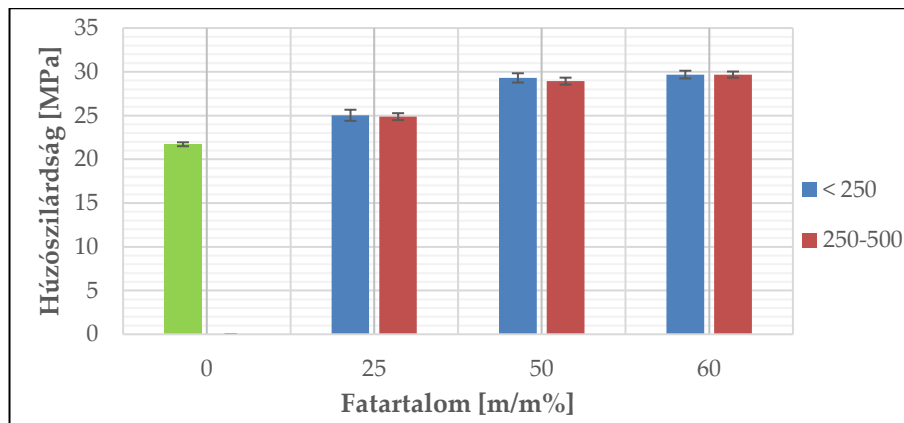
A kapott húzófeszültség, illetve névleges nyúlás értékeket ábrázoltam minden egyes összetétel esetén, amelyek közül egy-egy jellemző görbét mutat a 8. ábra.



8. ábra: Szakítógörbék: húzófeszültség [MPa] a névleges nyúlás [%] függvényében.

Látható, hogy a referencia próbatest szakítóvizsgálata során nyakképződés lépett fel. Megfigyelhető, hogy a fatartalom növekedésével nő az elérhető maximális húzófeszültség és csökken a névleges nyúlás 50 m/m%-os fatartalomig, a 60 m/m%-os összetételek esetén nem, vagy csak minimálisan tapasztalható változás. Ezen kívül látható, hogy az azonos fatartalmú, különböző szemcseméretet jellemző görbék hasonló karakterisztikát mutatnak.

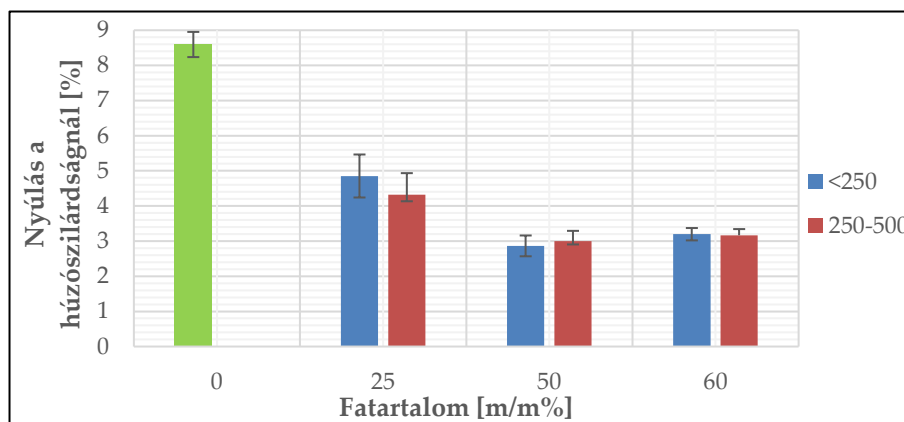
A húzószilárdsági eredményeket átlagoltam és kiszámoltam minden egyes összetétel esetén a szórásokat (M1. táblázat), amelyek a 9. ábrán láthatók.



9. ábra: Húzószilárdság [MPa] a fatartalom függvényében.

A húzószilárdság növekedést mutat a fatartalom növekedésével. A fa szemcse 50 m/m%-os jelenlétével a húzószilárdság eléri a maximumot a vizsgált tartományon belül, mivel 60 m/m%-nál stagnál ez az érték. Az eredmények alapján látható, hogy a fa nem töltőanyagként, hanem erősítőanyagként viselkedett a keverékekben a referenciához képest. A különböző szemcseméretű, azonos fatartalmú keverékek húzószilárdsági értékei nem mutatnak különbséget.

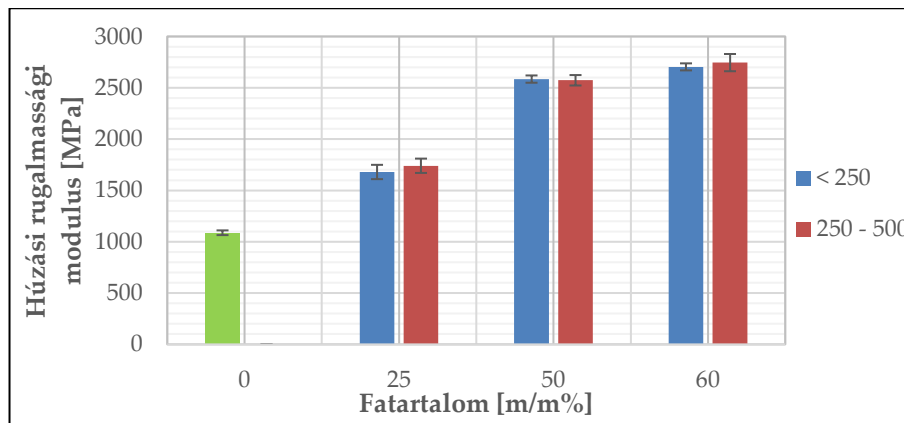
A nyúlás a húzószilárdságnál értékek átlagát, illetve szórását kiszámoltam (M1. táblázat) és a 10. ábrán ábrázoltam.



10. ábra: Nyúlás a húzószilárdságnál [%] a fatartalom függvényében.

Megfigyelhető, hogy a nyúlás a húzószilárdságnál értéke csökken a fatartalom növekedésével. Ez a csökkenés viszonylag jelentős 25 m/m%-os fatartalom esetén, majd 50 m/m%-ot elérve egy kismértékű csökkenést követően állandósul az érték 60 m/m% faanyag alkalmazása esetén. A húzószilárdsághoz hasonlóan azonos fatartalmú, eltérő szemcseméretű minták nyúlás a húzószilárdságnál értékei közötti eltérés elhanyagolhatónak tekinthető.

A húzási rugalmassági modulusok átlaga és szórása (M1. táblázat) az 11. ábrán látható.

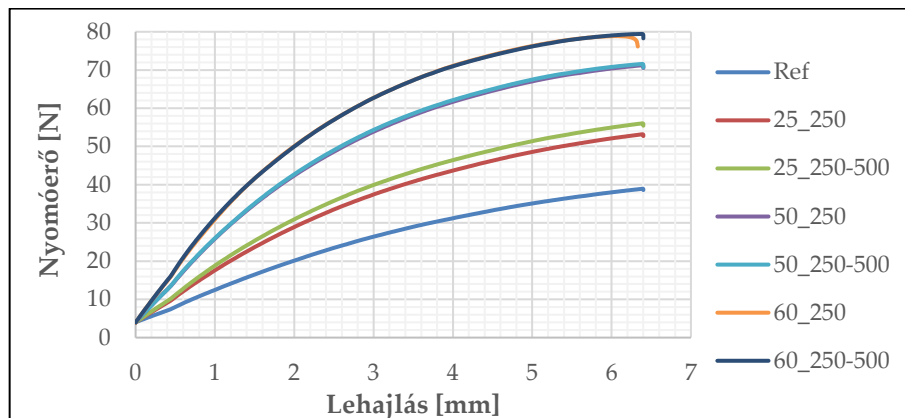


11. ábra: Húzási rugalmassági modulus [MPa] a fatartalom függvényében.

A húzási rugalmassági modulus az emelkedő fatartalommal növekszik. 50 m/m%-os fatartalommal több mint kétszeres modulus növekedés tapasztalható. További 10 m/m% faanyag hozzáadásával tovább növekszik a húzási rugalmassági modulus. Ennek oka, hogy a lucfenyőnek nagyobb a húzási rugalmassági modulusa, mint a poliolefineknek [64]. A szemcseméret továbbra sem befolyásolja a mérőszám értékének változását.

4.2.2. Farost-erősítésű hPEPP polimer kompozitok hajlítóvizsgálata

Minden keverék esetén kiválasztott egy-egy jellegzetes nyomóerő-lehajlás görbét a 12. ábra mutatja.

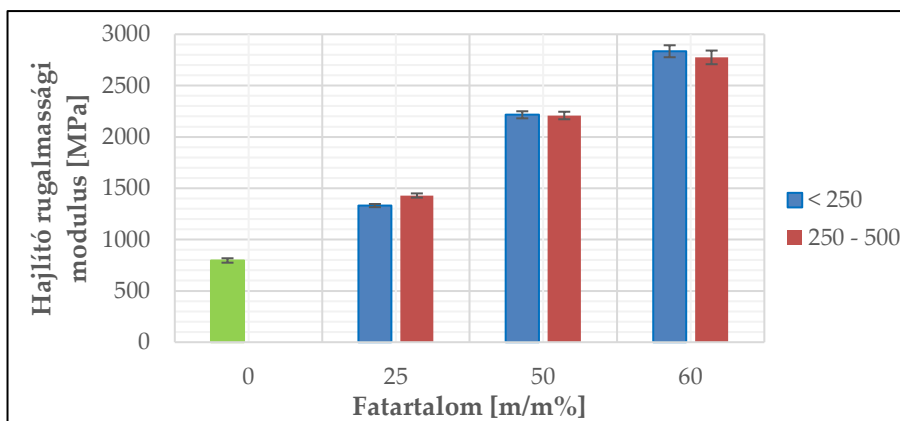


12. ábra: Hajlítógörbék: Nyomóerő [N] a lehajlás [mm] függvényében.

A fatartalom növelésével a görbe meredeksége nő, ugyanahhoz a lehajlás értékhez nagyobb nyomóerő érték rendelhető. Az alátámasztási távolság 10%-át elérő lehajlásnál, amely az én esetemben 6,4 mm, a lehajláshoz tartozó erő 60 m/m%-os fatartalmat elérve több mint kétszeresére nő. Az azonos fatartalmat, eltérő szemcseméretet jellemző görbék közel egymásra illeszthetők, kivéve a 25 m/m% fatartalmú görbék, amelyek között csupán kismértékű különbség érzékelhető.

A hajlító rugalmassági modulusok átlagának és szórásának (M1. táblázat) fatartalom

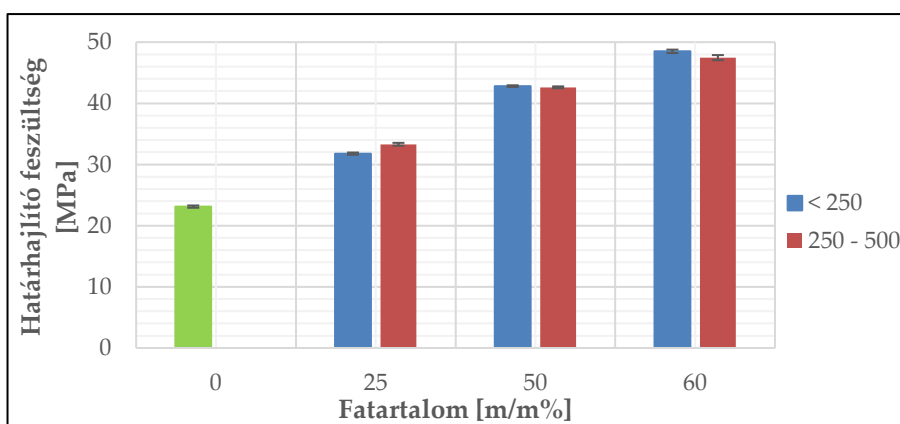
függvényében feltüntetett értékei a 13. ábrán láthatók.



13. ábra: Hajlító rugalmassági modulus [MPa] a fatartalom függvényében.

A hajlító rugalmassági modulus 25 m/m% fatartalmat elérve közel másfélszeresére, 50 m/m% fatartalmat elérve közel háromszorosára, míg 60 m/m%-ot elérve közel három és félszeresére emelkedett a referenciához képest, a szemcsemérettől függetlenül. Ez arra vezethető vissza, hogy a lucfenyő húzási rugalmassági modulusa nagyobb a poliolefinekénél [64].

A határhajlító feszültségi átlag értékek és szórások (M1. táblázat) a fatartalom függvényében a 14. ábrán figyelhetők meg.

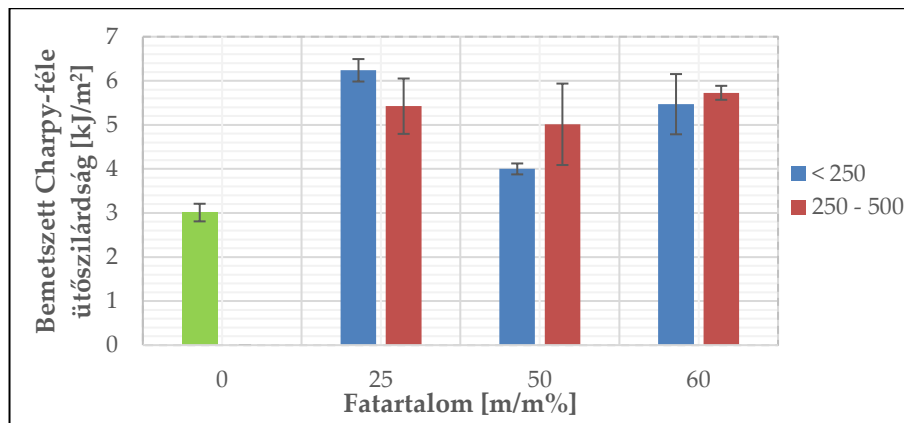


14. ábra: Határhajlító feszültség [MPa] a fatartalom függvényében.

A határhajlító feszültség a fatartalom növelésével emelkedik, 60 m/m%-os fatartalmat elérve a referenciához képest a határhajlító feszültség közel kétszeresére változik, szintén a szemcsemérettől függetlenül. A húzási tulajdonságokhoz hasonlóan az eredmények alapján látható, hogy a fa erősítőanyagként viselkedett a keverékekben a referenciához képest.

4.2.3. Farost-erősítésű hPEPP polimer kompozitok Charpy-féle ütvehajlító vizsgálata

A bemetszett Charpy-féle ütőszilárdsági eredményeket átlagoltam és meghatároztam a szórásukat (M1. táblázat), amelyek a 15. ábrán vannak feltüntetve.



15. ábra: Charpy-féle ütőszilárdság [kJ/m²] a fatartalom függvényében

A szórásmezők átfedik egymást, így a farost-erősítésű polimer kompozitok tekintetében körültekintően vonható le csak következtetés. Az biztosan állítható, hogy a referenciához képest a farost-erősítés minden összetétel esetén növeli a bemetszett Charpy-féle ütőszilárdságot. Ezen kívül az is elmondható, hogy a 250 µm-nél kisebb szemcseméretű fahulladékból előállított polimer kompozitok esetén 50 m/m%-os fatartalomnál adódott a legalacsonyabb ütőszilárdsági érték. A 250-500 µm szemcseméretű farost-erősítésű polimer kompozitok esetén a szórásmezők átfedése miatt nem állapítható meg az összetételek között egyértelmű különbség.

4.2.4. Következtetések, *h-Tisza-PEPP* polimer kompozit paramétereinek választása

Az eredmények alapján az alábbi megállapítások tehetők:

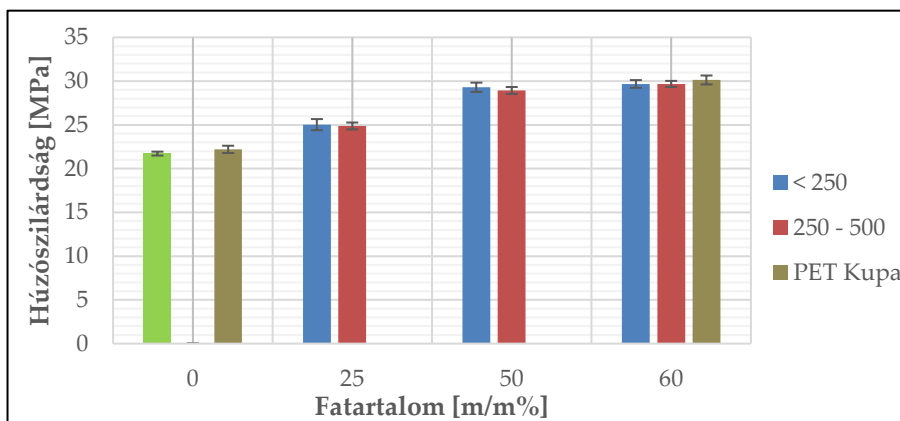
1. A fa szemcsemérete nem befolyásolja a mechanikai tulajdonságokat a vizsgált tartományon belül.
2. A fatartalom növelése egyes esetekben javítja, míg más esetekben nem rontja a mechanikai tulajdonságokat a vizsgált tartományon belül.

A megállapítások alapján célszerű 250-500 µm közötti szemcseméretű faanyagból, 60 m/m%-os farost-erősítésű polimer kompozit előállítása a Tiszai PET Kupáról származó kupakból.

Az alkalmazott berendezések, alapanyagok számára külön fejezetet nem szenteltem a Tiszai PET Kupáról származó kupakból előállított polimer kompozitok számára, mivel ugyanazokat a gyártási lépéseket alkalmazom a folyamat során. Különbség, hogy a Tiszai PET Kupáról származó hulladék darálása, mosása további lépést jelentett a folyamat során, amelyet külön feltüntettem és megneveztem, melyik típusú kupakról van szó. Emellett a fröccsöntés során módosított paraméterek külön táblázatban szerepelnek.

4.2.5. Farost-erősítésű h-Tisza-PEPP polimer kompozit szakítóvizsgálata

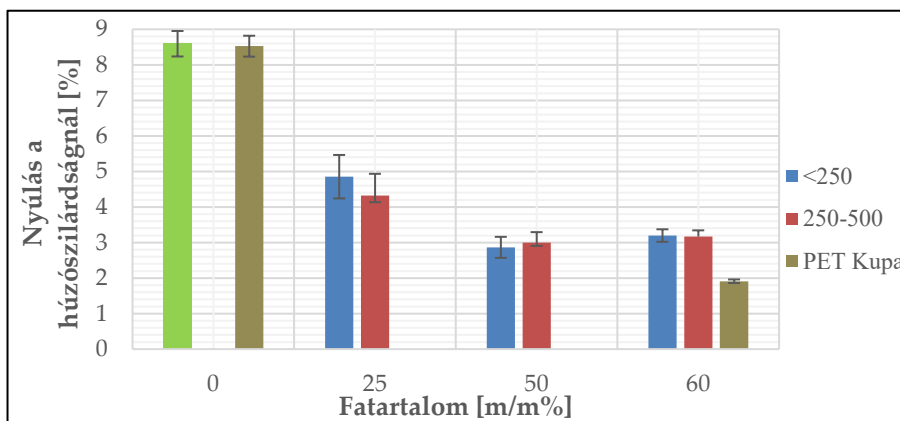
A h-Tisza-PEPP-ből előállított próbatestek esetén kapott húzószilárdsági értékeket átlagoltam és meghatároztam a szórásukat (M1. táblázat). Az összes összetétel esetén adódott eredmények a 16. ábrán láthatók.



16. ábra: Húzószilárdság [MPa] a fatartalom függvényében.

Látható, hogy mind a referencia, mind a 60 m/m%-os farost-erősítésű polimer kompozit esetén hasonló eredmények születtek, mint az ugyanilyen összetételű szelektíven gyűjtött kupakhulladék esetén.

A nyúlás a húzószilárdságnál értékek átlagát, illetve szórását kiszámoltam (M1. táblázat) és a 17. ábrán ábrázoltam.

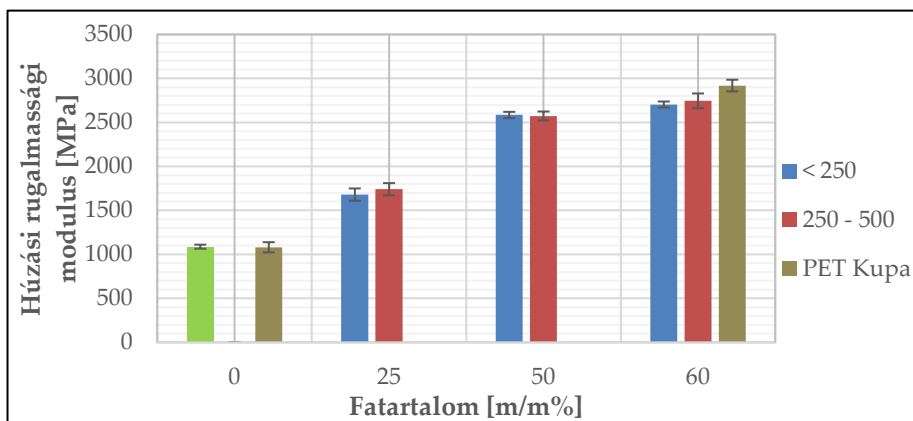


17. ábra: Nyúlás a húzószilárdságnál [%] a fatartalom függvényében.

A nyúlás a húzószilárdságnál érték a referencia esetén nem változott a PET Kupáról származó szennyezett kupak alkalmazásával, azonban a 60 m/m%-os farost-erősítés esetén 30%-os csökkenés figyelhető meg a nyúlás a húzószilárdságnál tekintetében a többi 60 m/m%-os összetételhez képest.

A húzási rugalmassági modulusok átlagának, illetve szórásának (M1. táblázat)

meghatározását követően a 18. ábrán jelenítettem meg az értékeket.

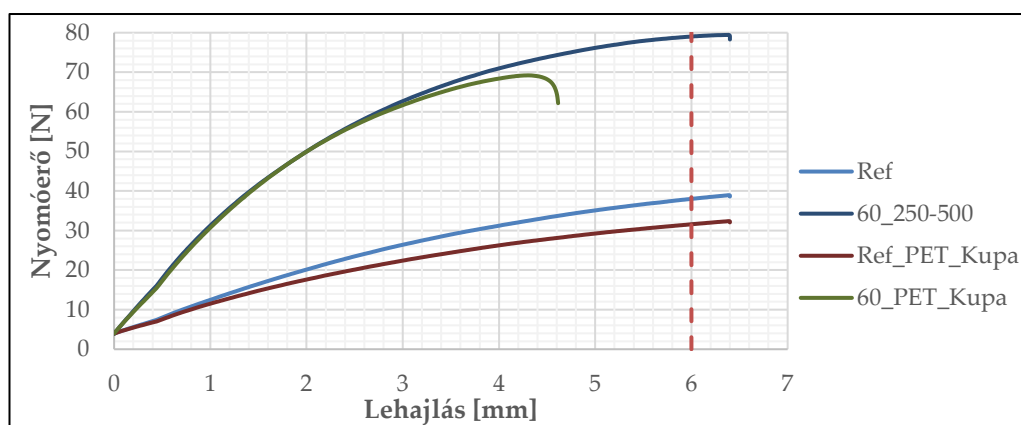


18. ábra: Húzási rugalmassági modulus [MPa] a fatartalom függvényében.

Megfigyelhető, hogy nem adódott különbség a szelektíven gyűjtött és a tiszai kupakhulladékból készült referencia próbatestek húzási rugalmassági modulusában. A tiszai ártérről gyűjtött kupakhulladékból készült 60 m/m%-os farost-erősítésű polimer kompozitok húzási rugalmassági modulusa nem csökkent a szelektíven gyűjtött kupakból készült 60 m/m%-os farost-erősítésű polimer kompozitokéhoz képest.

4.2.6. Farost-erősítésű h-Tisza-PEPP polimer kompozit hajlítóvizsgálata

A hPEPP és h-Tisza-PEPP referencia, 60 m/m%-os hPEPP és h-Tisza-PEPP polimer kompozitok egy-egy jellegzetes nyomóerő-lehajlás görbéje a 19. ábrán látható.



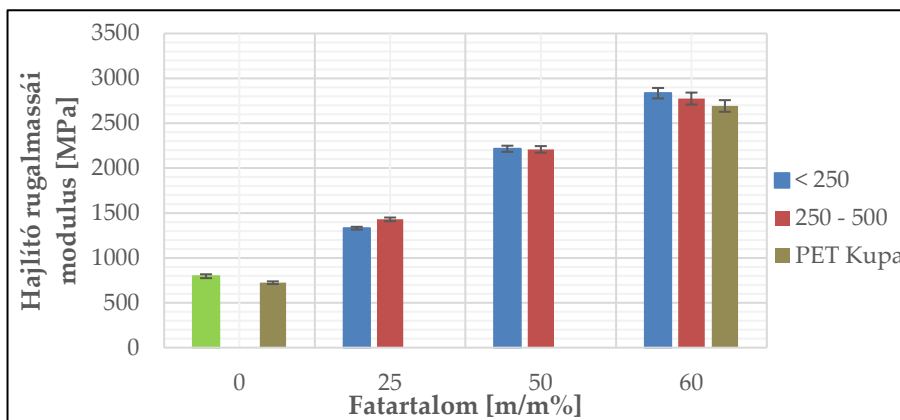
19. ábra: Nyomóerő [N] a lehajlás [mm] függvényében.

Ahogy a 3. fejezetben bevezetésre került, a határhajlító feszültség a vizsgálandó próbatest vastagságának 1,5-szeres lehajlása esetén fellépő hajlítófeszültség, amely számszerűen 6 mm. Látható, hogy a referencia és a hPEPP polimer kompozit próbatestek esetén értelmezhető a határhajlító feszültség, azonban a 60 m/m%-os h-Tisza-PEPP polimer kompozit próbatestek a 6 mm-es határlehajlás előtt eltörték, így ebben az esetben a hajlítószilárdság az értelmezendő

mérőszám.

Megfigyelhető, hogy a hPEPP referencia görbe meredeksége nagyobb a h-Tisza-PEPP referencia görbéhez képest. Emellett látható, hogy 60 m/m%-os hPEPP, illetve h-Tisza-PEPP polimerkompozitok nyomóerő-lehajlás görbéi 3 mm-es lehajlásig közel egy görbére illeszthetők, ezt követően csökken a h-Tisza-PEPP polimer kompozit nyomóerő-lehajlás görbe meredeksége, majd eltörik.

A h-Tisza-PEPP-ből készült próbatestek hajlító rugalmassági modulusok átlagát, illetve szórását (M1. táblázat) a hPEPP próbatestekhez képest a 20. ábra mutatja.

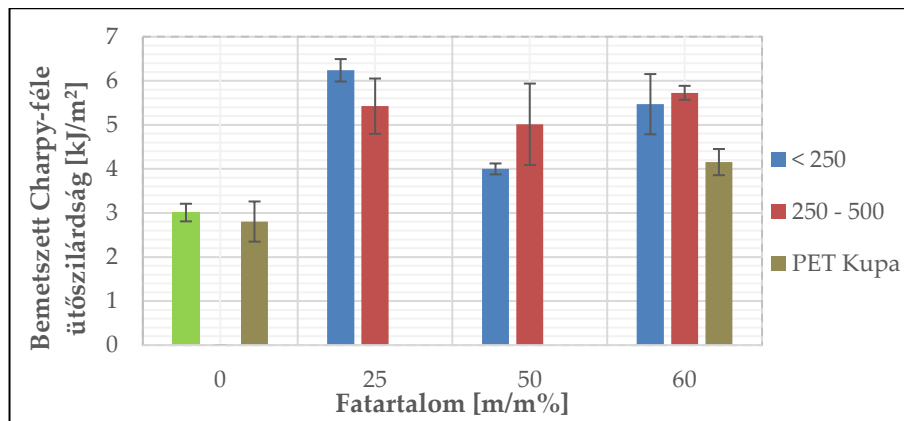


20. ábra: Hajlító rugalmassági modulus [MPa] a fatartalom függvényében.

A referencia hajlító rugalmassági modulusa a PET Kupáról származó kupakhulladék alkalmazása esetén minimálisan csökkent a szelektíven gyűjtött kupakhulladékhhoz képest. A 60 m/m% esetén 250 μm -nél kisebb szemcseméretű farostot tartalmazó polimerhez képest minimális csökkenés figyelhető meg. 250-500 μm közötti szemcseméretű, farostot tartalmazó polimerhez képest nem állapítható meg a hajlító rugalmassági modulus csökkenése.

4.2.7. Farost-erősítésű h-Tisza-PEPP polimer kompozit Charpy-féle ütvehajlító vizsgálata

A bemetszett Charpy-féle ütőszilárdsági értékek átlagát, illetve szórását (M1. táblázat) a 21. ábra foglalja magába.



21. ábra: Charpy-féle ütőszilárdság [kJ/m²] a fatartalom függvényében.

A tiszai kupakhulladékból készült referencia hasonló eredményt mutat a szelektíven gyűjtött kupakhulladékból készült referencia értékéhez képest. A 60 m/m%-os tiszai kupakhulladékból készült polimer kompozit Charpy-féle ütőszilárdsága a 250 μm alatti szemcseméretű faanyagból gyártott 50 m/m%-os farost-erősítésű polimer kompozithoz hasonló értéket mutat, azonban a 250-500 μm -es szemcseméretű faanyagból előállított 50 m/m%-os polimer kompozit kivételével elmondható, hogy a többi fa-polimer összetételhez képest alacsonyabb érték adódott.

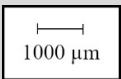
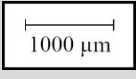
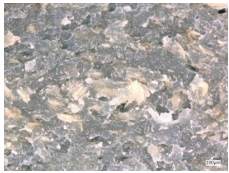
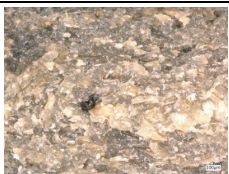
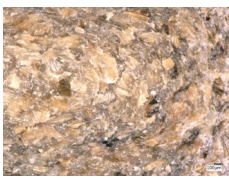
A vizsgálati eredményekből megállapítható, hogy a h-Tisza-PEPP mátrixú kompozitok mechanikai tulajdonságai kismértékben elmaradnak a szelektíven gyűjtött hulladék mátrixú kompozitokéhoz képest. Ennek oka a tiszai polimer hulladék degradációja (UV sugárzás) által okozott molekulalánc-törédelődés.

4.2.8. Fénymikroszkópia

Az összes összetétel Charpy-féle ütősejt vizsgálata során származó töretfelületekről 20x és 100x nagyítású képek a 19. táblázatban láthatók.

Összetétel	Nagyítás	
	20x 1000 μm	100x 1000 μm
Ref		

19.1. táblázat: Fénymikroszkópos felvételek a Charpy-féle ütősejt vizsgálatok során kapott töretfelületekről minden összetétel esetén, 20x-os és 100x-os nagyítással.

Összetétel	Nagyítás	
	20x 	100x 
25_250		
25_250-500		
50_250		
50_250-500		
60_250		
60_250-500		
Ref_PET_Kupa		
60_PET_Kupa		

19.2. táblázat: Fénymikroszkópos felvételek a Charpy-féle ütvehajlító vizsgálatok során kapott töretfelületekről minden összetétel esetén, 20x-os és 100x-os nagyítással.

A mikroszkópi felvételeken a polimer mátrix és a fa szemcsék között jó adhéziónak lehet számítani. A fa szemcsék eloszlása egyenletes minden összetétel esetén a polimer kompozit próbatestek töretfelülete mentén. Azonban néhány esetben, a piros körökkel jelölt területeken kitört szemcsék vagy lunkerképződés jelei láthatók.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

5.1. Magyar nyelvű összefoglaló

Dolgozatomban áttekintettem a mikroműanyagok természetes vizeinkből való gyűjtésének, tisztításának, elemzésének szakirodalmát. Megállapítottam, hogy a PE és a PP jelenléte kupakhulladék, illetve mikroműanyagok formájában jelentősen terheli a vízi környezetet. A hazánkat terhelő mikroműanyag-szennyezés témájában megjelent mérések, illetve tanulmányok is ezt az eredményt támasztják alá [11-12].

Áttekintettem továbbá a farost-erősítésű polimer kompozitok szakirodalmát, amelyek alapján meghatároztam a munkámban alkalmazott anyagösszetételi és gyártási paramétereket.

Fafeldolgozási hulladékból és szelektíven gyűjtött poliolefin kupakhulladékból extrúzióval és fröccsöntéssel 25 m/m%-os, 50 m/m%-os és 60 m/m%-os farost-erősítésű polimer kompozit próbatesteket gyártottam, 250 μm alatti és 250-500 μm -es szemcseméretű farost alkalmazásával. Kísérletet tettem 75 m/m%-os farost-erősítésű polimer kompozit előállítására, amely sikertelennek bizonyult. Ezt követően a farost-erősítésű polimer kompozitok szakítóvizsgálatát, hajlítóvizsgálatát, illetve Charpy-féle ütvehajlító vizsgálatát végeztem el. A mérések azt mutatták, hogy a vizsgált tartományon belül a szemcseméret összességében nem befolyásolja a mechanikai tulajdonságokat, illetve, hogy a 60 m/m%-os fatartalom egyes esetekben javítja, egyes esetekben pedig nem rontja a mechanikai tulajdonságokat.

Az előkísérletek alapján a PET Kupáról származó szennyezett kupakhulladékból referenciát és 60 m/m%-os, 250-500 μm -es szemcseméretű farost-erősítésű polimer kompozitokat gyártottam és elemeztem a tulajdonságaikat. Az eredmények azt mutatták, hogy a húzószilárdság és a húzási rugalmassági modulus lényegében nem változott a PET Kupáról származó kupakhulladék alkalmazásával. A hajlítási tulajdonságok tekintetében kismértékű csökkenés vagy stagnálás volt megfigyelhető. A 60 m/m%-os h-Tisza-PEPP polimer kompozit Charpy-féle ütőszilárdsága a farost-tartalmú összetételek többségével való összehasonlításban csökkent. A kapott eredmények alapján elmondható, hogy a műanyag szennyezettsége kismértékben rontotta a mechanikai tulajdonságokat.

További megoldásra váró feladat a szelektíven gyűjtött, valamint az Tiszai PET Kupáról származó mátrixok után, folyóból lehalászott mikroműanyag mátrix alkalmazása.

5.2. Idegen nyelvű összefoglaló

In my work, I reviewed the literature on the collection, purification, and analysis of microplastics from our natural waters. I have found that the presence of PE and PP in the form of cap waste and microplastics, respectively, are significant pollutants in the aquatic environment. The measurements and studies published about microplastic pollution in our country support this finding [11-12].

I have also reviewed the literature on wood-plastic composites, which have been used to determine the material composition and manufacturing parameters applied in my work.

From wood processing waste and selectively collected polyolefin waste, I fabricated 25 wt%, 50 wt% and 60 wt% wood-plastic composite test specimens by extrusion and injection moulding using wood fibres with particle sizes below 250 μm and 250-500 μm . An attempt was made to produce 75 wt% wood-plastic composite which proved to be unsuccessful. Subsequently, tensile test, flexural test and Charpy impact test of the wood-plastic composites were carried out. The measurements showed that, overall, within the range tested, the grain size did not affect the mechanical properties and that a wood content of 60 wt% improved the mechanical properties in some cases and did not deteriorate them in others.

Based on the preliminary experiments, I prepared reference and 60 wt% wood-plastic composites with 250-500 μm particle size from contaminated cap waste from PET Kupa and analysed their properties. The results showed that the tensile strength and tensile modulus of elasticity were essentially unchanged by using cap waste from PET Kupa. A slight decrease or stagnation was observed in the case of flexural properties. The Charpy impact strength of the 60 wt% h-Tisza-PEPP polymer composite decreased in comparison with most of the wood fiber containing compositions. The obtained results indicate that the plastic contamination slightly deteriorated the mechanical properties.

A further problem to be solved, after the selectively collected and contaminated caps originating from Tiszai PET Kupa, is the application of a microplastic matrix collected from river.

6. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

1. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/basic-search> (2023. 05. 01.)
2. Liška I., Wagner F., Sengl M., Deutsch K., Slobodník J., Paunovic M.: Joint Danube survey 4 scientific report: a shared analysis of the Danube River. International Commission for the Protection of the Danube River, Bécs (2021).
3. <https://oceanconservancy.org/trash-free-seas/international-coastal-cleanup/annual-data-release/> (2023. 11. 03.)
4. Ocean Conservancy: International Coastal Cleanup 2022 Report, Washington, D.C. (2023).
5. Ocean Conservancy: International Coastal Cleanup 2020 Report, Washington, D.C. (2021).
6. Ocean Conservancy: International Coastal Cleanup 2021 Report, Washington, D.C. (2022).
7. Molnár D. A., Hankó G., Istenes A., Rosta B.: Hotspot localisation /online pollution map & database, Interreg Danube Transnational Programme, Budapest (2022).
8. <https://tisztatizaterkep.hu/#/hu/> (2023. 11. 02.)
9. United Nations Environment Programme (UNEP): From pollution to solution – a global assessment of marine litter and plastic pollution, Nairobi (2021).
10. Technical Committee of Petroleum Additive Manufacturers in Europe: Document 141 - Definition of Microplastic within EU REACH Restriction, Brüsszel (2021).
11. <https://mikromuanyag.hu/> (2023. 10. 22.)
12. Liu Y., Prikler B., Bordós G., Lorenz C., Vollertsen J.: Does microplastic analysis method affect our understanding of microplastics in the environment? *Science of The Total Environment*, **902**, 166513 (2023).
13. Spreafico C., Russo D.: Investigating the evolution of the technologies for collecting microplastics. *Journal of Environmental Management*, **326**, 116710 (2023).
14. Prata J. C., Costa J. P. da, Duarte A. C., Rocha-Santos T.: Methods for sampling and detection of microplastics in water and sediment: A critical review. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, **110**, 150-159 (2019).
15. Rodrigues M. O., Abrantes N., Gonçalves F. J. M., Nogueira H., Marques J. C., Gonçalves A. M. M.: Spatial and temporal distribution of microplastics in water and sediments of a freshwater system (Antuã River, Portugal). *Science of The Total Environment*, **633**, 1549-1559 (2018).

16. Napper I. E., Baroth A., Barrek A. C., Bhola S., Chowdhury G. W., Davies B. F. R., Duncan E. M., Kumar S., Nelms S. E., Niloy M. N. H., Nishat B., Maddalene T., Thompson R. C., Koldewey H.: The abundance and characteristics of microplastics in surface water in the transboundary Ganges River. *Environmental Pollution*, **274**, 116348 (2021).
17. Rajeswari I. T., Iyyanar A., Govindarajulu B.: Microplastic pollution in Kolavai Lake, Tamil Nadu, India: quantification of plankton-sized microplastics in the surface water of lake. *Environmental Science and Pollution Research*, **30**, 94033–94048 (2023).
18. Sathish M. N., Pakerson J.: Comparative study on the status of microplastics in different functional areas of Tuticorin, Southeast coast of India. *Science of The Total Environment*, **894**, 164904 (2023).
19. Higgins C., Turner A.: Microplastics in surface coastal waters around Plymouth, UK, and the contribution of boating and shipping activities. *Science of The Total Environment*, **893**, 164695 (2023).
20. <https://pentairaes.com/plankton-nets.html> (2023. 11. 03.)
21. Sari N. K., Yuniar D., Alam F. C.: Exploring marine surface microplastic around Pasaran Island, Lampung Province. in 'International Conference on Research Collaboration of Environmental Science. Kitakyushu, Japan' 012033 (2023).
22. Díez-Pérez D. B., Arenas I., Maidana E., López-Rosales A., Andrade J. M., Muniategui-Lorenzo S.: Microplastics in surface water of the Bay of Asunción, Paraguay. *Marine Pollution Bulletin*, **192**, 115075 (2023).
23. Tamminga M., Stoewer S., Fischer E. K.: On the representativeness of pump water samples versus manta sampling in microplastic analysis. *Environmental Pollution*, **254**, 112970 (2019).
24. Booth A. M., Kubowicz S., Beegle-Krause C., Skancke J., Nordam T., Landsem E., Throne-Holst M., Jahren S.: Microplastic in global and Norwegian marine environments: Distributions, degradation mechanisms and transport. *Miljødirektoratet M-918*, 1-147 (2017).
25. Schönlaui C., Karlsson T. M., Rotander A., Nilsson H., Engwall M., Bavel B. van, Kärrman A.: Microplastics in sea-surface waters surrounding Sweden sampled by manta trawl and in-situ pump. *Marine Pollution Bulletin*, **153**, 111019 (2020).
26. Karaban K., Poniatowska A., Kaliszewicz A., Winczek M., Ilieva-Makulec K., Romanowski J.: The determination of microplastic contamination in freshwater environments using sampling methods - A case study. *Journal of Water and Land Development*, **57**, 140-146 (2023).

27. Pfeiffer F., Fischer E. K.: Various digestion protocols within microplastic sample processing - evaluating the resistance of different synthetic polymers and the efficiency of biogenic organic matter destruction. *Frontiers in Environmental Science*, **8**, 572424 (2020).
28. Enders K., Lenz R., Beer S., Stedmon C. A.: Extraction of microplastic from biota: recommended acidic digestion destroys common plastic polymers. *ICES Journal of Marine Science*, **74**, 326–331 (2017).
29. International Council for the Exploration of the Sea (ICES): OSPAR request on development of a common monitoring protocol for plastic particles in fish stomachs and selected shellfish on the basis of existing fish disease surveys. *ICES Special Request Advice*, **1**, 1-6 (2015).
30. Löder M. G. J., Imhof H. K., Ladehoff M., Löschel L. A., Lorenz C., Mintenig S., Piehl S., Primpke S., Schrank I., Laforsch C., Gerdt G.: Enzymatic purification of microplastics in environmental samples. *Environmental Science & Technology*, **51**, 14283–14292 (2017).
31. Davidson M. W., Abramowitz M.: Optical microscopy. *Encyclopedia of Imaging Science and Technology*, **2**, 120 (2002).
32. Ul-Hamid A.: A beginners' guide to scanning electron microscopy. Springer International Publishing, Svájci (2018).
33. Li J., Liu H., Chen P.: Microplastics in freshwater systems: A review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection. *Water Research*, **137**, 362-374 (2018).
34. Pokol Gy., Gyurcsányi E. R., Simon A., Bezúr L., Horvai Gy., Horváth V., Dudás K. M.: *Analitikai kémia*. Typotex Kiadó, Budapest (2011).
35. Wachs I. E., Bañares M. A.: Springer handbook of advanced catalyst characterization. Springer Nature, Berlin (2023).
36. [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Analytical_Chemistry/Physical_Methods_in_Chemistry_and_Nano_Science_\(Barron\)/04%3A_Chemical_Speciation/4.03%3A_Raman_Spectroscopy](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Analytical_Chemistry/Physical_Methods_in_Chemistry_and_Nano_Science_(Barron)/04%3A_Chemical_Speciation/4.03%3A_Raman_Spectroscopy) (2023. 11. 03.)
37. Buruiana D. L., Georgescu P. L., Carp G. B., Ghisman V.: Recycling micro polypropylene in modified hot asphalt mixture. *Scientific Reports*, **13**, 3639 (2023).
38. Lee J., Kim Y., Choi J.: Recycling microplastics to fabricate anodes for lithium-ion batteries: from removal of environmental troubles via electrocoagulation to useful resources. *Advanced Science*, **10**, 2205675 (2023).

39. Czvikovszky T., Nagy P., Gaál J.: A polimertechnika alapjai. Műegyetemi Kiadó, Budapest (2000).
40. Ashori A.: Wood–plastic composites as promising green-composites for automotive industries! *Bioresource Technology*, **99**, 4661-4667 (2008).
41. Gardner D. J., Han Y., Wang L.: Wood–plastic composite technology. *Current Forestry Reports*, **1**, 139-150 (2015).
42. Bhaskar K., Jayabalakrishnan D., Kumar M. V., Sendilvelan S., Prabhakar M.: Analysis on mechanical properties of wood plastic composite. *Materials Today: Proceedings*, **45**, 5886-5891 (2021).
43. Kenaga D. L.: Stabilization of wood and wood products with acrylic-like compounds. 3077417, Washington, D.C. (1963).
44. Kenaga D. L.: Stabilization of wood and wood products with styrene acrylonitrile, bis (2-chloroethyl) vinyl phosphonate. 3077418, Washington, D.C. (1963).
45. Kenaga D. L.: Stabilization of wood and wood products with vinyl compounds. 3077419, Washington, D.C. (1963).
46. Kenaga D. L.: Stabilization of wood and wood products with epoxy compounds. 3077420, Washington, D.C. (1963).
47. Schut J. H.: Wood is good for compounding, sheet & profile. *Plastics Technology*, **45**, 46-52 (1999).
48. Redhwi H. H., Siddiqui M. N., Andrady A. L., Furquan S. A., Hussain S.: Durability of high-density polyethylene (HDPE)- and polypropylene (PP)-based wood-plastic composites - part 1: mechanical properties of the composite materials. *Journal of Composites Science*, **7**, 163 (2023).
49. Pokhrel G., Gardner D. J., Han Y.: Properties of wood–plastic composites manufactured from two different wood feedstocks: wood flour and wood pellets. *Polymers*, **13**, 2769 (2021).
50. Mosavi-Mirkolaei S. T., Najafi S. K., Tajvidi M.: Physical and mechanical properties of wood-plastic composites made with microfibrillar blends of LDPE, HDPE and PET. *Fibers and Polymers*, **20**, 2156-2165 (2019).
51. Ezzahrae M. F., Nacer A., Latifa E., Abdellah Z., Mohamed I., Mustapha, J.: Thermal and mechanical properties of a high-density polyethylene (HDPE) composite reinforced with wood flour. *Materials Today: Proceedings*, **72**, 3602-3608 (2023).
52. Bhaskar J., Haq S., Pandey A. K., Srivastava N.: Evaluation of properties of propylene-pine wood plastic composite. *Journal of Materials and Environmental Science*, **3**, 605-612 (2012).

53. Chaharmahali M., Mirbagheri J., Tajvidi M., Najafi S. K., Mirbagheri Y.: Mechanical and physical properties of wood-plastic composite panels. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **29**, 310-319 (2010).
54. Najafi S. K., Hamidinia E., Tajvidi M.: Mechanical properties of composites from sawdust and recycled plastics. *Journal of Applied Polymer Science*, **100**, 3641-3645 (2006).
55. Zhang X., Hao X., Hao J., Wang Q.: Heat transfer and mechanical properties of wood-plastic composites filled with flake graphite. *Thermochimica Acta*, **664**, 26-31 (2018).
56. Hong J., Wang Z., Li L., Guo C.: Value-added utilization of corncob hydrolysis residues: Preparation of reinforced wood-plastic composite with highly water resistance and decay resistance. *Industrial Crops and Products*, **195**, 116497 (2023).
57. Lopez Y. M., Paes J. B., Gustave D., Gonçalves F. G., Méndez F. C., Nantet, A. C. T.: Production of wood-plastic composites using cedrela odorata sawdust waste and recycled thermoplastics mixture from post-consumer products - A sustainable approach for cleaner production in Cuba. *Journal of Cleaner Production*, **244**, 118723 (2020).
58. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Hydrogen-Peroxide#datasheet=LCSS> (2023. 11. 03.)
59. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Sodium-Hydroxide#datasheet=LCSS> (2023. 11. 03.)
60. EN ISO 527-2: Műanyagok. A húzási tulajdonságok meghatározása. 2. rész: A fröccs- és extrúziós műanyagok vizsgálati feltételei (2012).
61. EN ISO 527-1: Műanyagok. A nyúlási tulajdonságok meghatározása. 1. rész: Általános alapelvek (2020).
62. EN ISO 178: Műanyagok. A hajlítási tulajdonságok meghatározása (2019).
63. EN ISO 179-1: Műanyagok. A Charpy-féle ütési jellemzők meghatározása. 1. rész: Nem műszeres ütésvizsgálat (2010).
64. Bárczy P.: Faanyagok alkalmazástechnikája. Miskolci Egyetem, Miskolc (2009).

7. MELLÉKLETEK

Összetétel	Húzószilárdság [MPa]		Húzási rugalmassági modulus [MPa]		Nyúlás a húzószilárdságnál [%]		Határhajlító feszültség [MPa]		Hajlító rugalmassági modulus [MPa]		Charpy-féle ütőszilárdság [kJ/m ²]	
	Átlag	Szórás	Átlag	Szórás	Átlag	Szórás	Átlag	Szórás	Átlag	Szórás	Átlag	Szórás
Ref	21,72	0,22	1087,74	23,04	8,59	0,36	23,11	0,19	796,18	21,46	3,01	0,20
25_250	25,03	0,63	1679,73	69,76	4,85	0,61	31,78	0,18	1331,06	15,37	6,24	0,25
25_250-500	24,87	0,40	1740,30	69,76	4,32	0,57	33,30	0,23	1429,32	20,39	5,42	0,63
50_250	29,30	0,53	2584,90	35,44	2,86	0,30	42,82	0,13	2215,57	34,41	4,00	0,12
50_250-500	28,93	0,40	2573,33	50,81	3,00	0,19	42,62	0,15	2208,68	36,67	5,01	0,92
60_250	29,68	0,44	2703,93	34,20	3,20	0,18	48,50	0,28	2834,68	58,29	5,47	0,68
60_250-500	29,68	0,35	2745,35	83,92	3,17	0,09	47,47	0,42	2774,97	66,56	5,73	0,16
Ref_PET_Kupa	22,20	0,42	1080,69	57,87	8,53	0,29	19,60	0,18	723,61	14,99	2,80	0,46
60_PET_Kupa	30,13	0,51	2919,04	66,12	1,91	0,05	-	-	2692,67	64,78	4,15	0,30

M1. táblázat: Mechanikai vizsgálatok eredményei.

Jelölések jegyzéke

Latin betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
a_c	Charpy-féle ütvehajlító szilárdság	kJ/m^2
a_0	Próbatest keresztmetszeti magassága	mm
b_m	Próbatest keresztmetszeti bemetszett szélessége	mm
b_0	Próbatest keresztmetszeti szélessége	mm
E_{bh}	Hajlító rugalmassági modulus	MPa
E_h	Húzási rugalmassági modulus	MPa
$E_{\max}$	Maximális erőhöz tartozó törési energia	J
E_0	Kalapács üresjárat energiája	J
F_h	Húzóerő	N
$F_{\max}$	Első lokális maximális erő	N
F_t	Törőerő	N
L	Alátámasztási távolság	mm
$L_{F_{\max}}$	Húzószilárdsághoz tartozó hosszváltozás	mm
L_0	Kezdeti hossz	mm
ΔL	Hosszváltozás	mm

Görög betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
ε	Névleges nyúlás	%
$\varepsilon_{bh,0,05}$	0,05%-os hajlító alakváltozás	%
$\varepsilon_{bh,0,25}$	0,25%-os hajlító alakváltozás	%
$\varepsilon_{F_{\max}}$	Nyúlás a húzószilárdságnál	%
$\varepsilon_{h,0,05}$	0,05%-os nyúlás	%
$\varepsilon_{h,0,25}$	0,25%-os nyúlás	%
σ	Húzófeszültség	MPa
σ_{bh}	Hajlítószilárdság	MPa
$\sigma_{bh,0,05}$	0,05%-os hajlító alakváltozásnál fellépő hajlítófeszültség	MPa
$\sigma_{bh,0,25}$	0,25%-os hajlító alakváltozásnál fellépő hajlítófeszültség	MPa
σ_h	Húzószilárdság	MPa
$\sigma_{h,0,05}$	0,05%-os nyúlásnál fellépő húzófeszültség	MPa
$\sigma_{h,0,25}$	0,25%-os nyúlásnál fellépő húzófeszültség	MPa

Rövidítések

Rövidítés	Megnevezés, megjegyzés, érték
Ar	Argon
ATR-FTIR	Gyengített teljes reflexiós Fourier transzformációs infravörös spektroszkópia
CH ₂ O	Formaldehid
E-GMA	Etilén-glicidil metakrilát kopolimer
Fe ₃ O ₄	Vas(II,III)-oxid
Fe(II)SO ₄	vas(II)-szulfát
FTIR	Fourier transzformációs infravörös spektroszkópia
HCl	Sósav
HClO ₄	Perklórsav
HDPE	Nagysűrűségű polietilén
HNO ₃	Salétromsav
hPEPP	Szelektíven gyűjtött poliolefin kupakhulladék
h-Tisza-PEPP	Tiszai PET Kupa poliolefin kupakhulladék
hW250	250 µm alatti szemcseméretű fafeldolgozási hulladék
hW500	250-500 µm-es szemcseméretű fafeldolgozási hulladék
H ₂ O ₂	Hidrogén-peroxid
ICES	Nemzetközi Tengerkutató Tanács
KOH	Kálium-hidroxid
Li	Lítium
MAPE	Maleinsav-anhidriddel ojtott polietilén
MAPP	Maleinsav-anhidriddel ojtott polipropilén
NaCl	Nátrium-klorid
NaClO	Nátrium-hipoklorit
NaI	Nátrium-jodid
NaOH	Nátrium-hidroxid
PA	Poliamid
PE	Polietilén
PET	Polietilén-tereftalát
PP	Polipropilén
PUR	Poliuretán
PVC	Polivinil-klorid
SEM	Pásztázó elektronmikroszkópia
SEM-EDS	Pásztázó elektronmikroszkóp energia diszperzív röntgen spektroszkóppal
ZnCl ₂	Cink-klorid