



DIPLOMAMUNKA

**Németh Násfa Zsuzsanna
2023**

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
Gazdaság- és Társadalomtudományi Kar
Műszaki menedzser mesterszak

**Műanyagok fenntarthatóságát vizsgáló módszerek alkalmazása és
értékelése**

Készítette: Németh Násfa Zsuzsanna

**Témavezető: SZALMÁNÉ DR. HABIL.
CSETE MÁRIA**

Budapest
2023

Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft.-nek eszközeik és anyagaik használatának lehetőségét. Munkám a TKP2021-NKTA-07 számú projekt keretein belül az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a TKP2021 program finanszírozásában valósulhatott meg.

Tartalmi kivonat

Napjaink egyik népszerű környezetvédelemmel kapcsolatos témája a műanyagok kérdésköre. Ezek a népszerű és hétköznapi életünkben mindenhol jelen lévő anyagok számos környezeti problémát vonnak maguk után felhasználásukkal. A fenntartható fejlődés és körforgásos gazdaság ideájának fejlődésével számos módszer létezik, amelyek a polimerek környezeti hatását tűzik ki célul. Az újrahasznosítás, bioműanyagok és természetes eredetű adalékanyagok használata technológiai szempontból bizonyítottan működőképes módszerek, azonban a szakirodalomban ritkán alkalmaznak környezeti teljesítmény értékelő módszereket ezek validálására. Céлом ezek alapján az volt, hogy megvizsgáljam a műanyagok fenntarthatóságának javítását célzó módszereket technológiai és környezeti szempontból is, néhány egyszerűbben alkalmazható módszer segítségével. Az öko-mérlegek elemzése, öko-hatékonysági mutatók kiszámítása és összehasonlítása, valamint a termékgyártás során felmerülő környezeti hatások kvalitatív értékelése jól rámutatott a mechanikai úton történő újrahasznosítás és természetes töltőanyagok használatának előnyeire és hátrányaira. A módszerek összehasonlító célú értékelése pedig segített meghatározni, hogy műanyagok esetében mely módszereket a legcélszerűbb alkalmazni a környezeti teljesítmény értékelésére.


Abstract

One of the popular topics related to environmental protection today is the issue of plastics. They are present everywhere in our everyday life, but many environmental problems arise from their use. With the development of the idea of sustainable development and circular economy, there are many methods that try to lower the environmental impact of polymers. The use of bioplastics, recycling, and additives of natural origin are technologically proven methods, however, environmental performance evaluation methods are rarely used in the same literature to validate them. Based on these, my goal was to examine the methods for manufacturing more sustainable plastics from a technological and environmental point of view, with the help of some easy-to-use methods. The analysis of eco-scales, the calculation and comparison of eco-efficiency indicators, as well as the qualitative evaluation of the environmental effects arising during product production, pointed out the advantages and disadvantages of mechanical recycling and the use of natural fillers. The comparative evaluation of the methods determines which methods are the most appropriate to use for the assessment of environmental performance in the case of plastics.

Feladatkiírás

Hallgató neve és Neptun kódja	Németh Násfa Zsuzsanna - VOMOSD
Szak	Műszaki menedzser mesterszak MSc
Téma és témavezető	Környezeti innováció, fenntartható megoldások - Szalmáné Dr. Csete Mária
Dolgozat címe	Műanyagok fenntarthatóságát vizsgáló módszerek alkalmazása és értékelése
Dolgozat célja és megválaszolandó kérdések	Napjaink egyik legismertebb fenntarthatósági kérdése a műanyagok használatához és a belőlük keletkező hulladék mennyiségéhez kötődik. A dolgozatban feltárása kerül, hogy milyen módszerek léteznek műanyagok fenntarthatóságának javítására. Az alapanyag megválasztásától kezdve a terméktervezés környezettudatos szempontjain át a különböző újrahasznosítási technológiákon keresztül bemutatásra kerülnek az alkalmazott módszerek, valamint az ezek értékelésére létező metódusok. A diplomamunka által megválaszolandó kérdések közé tartozik, hogy a feltárt módszerek közül melyiket, milyen esetben érdemes alkalmazni, valamint egy esettanulmányon értékelésre kerül a fenntarthatóság növelésére irányuló törekvések néhány példája.
Kutatás leírása	A munkát irodalomkutatással kezdtem, amelyben összegyűjtöttem a napjainkban alkalmazott módszereket. Az irodalmi összefoglaló után konkrét példán alkalmazom a kiválasztott környezeti teljesítmény értékelő módszereket.
Várható eredmények	Az adott téma irodalmának összefoglalása. A vizsgált gyakorlati példa bemutatása, környezeti teljesítmény értékelő módszerek összevetése egymással, előnyök, hátrányok és levonható következtetések megfogalmazása.




Környezetgazdaságtan és Fenntartható
Fejlődés Tanszék

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	8
2. Szakirodalmi háttér	10
2.1. Fenntarthatóság és fenntartható fejlődés	10
2.2. ENSZ fenntartható fejlődési célok	11
2.3. Körforgásos gazdaság.....	13
2.4. Környezeti teljesítményértékelés	15
2.4.1. Környezeti teljesítményértékelő módszerek csoportosítása.....	16
2.4.2. Megalapozó módszerek	16
2.4.3. Indikátor módszerek	16
2.4.4. Anyag- és energiaforgalmi módszerek.....	19
2.4.5. Hierarchizáló módszerek	22
2.4.6. Szintetizáló módszerek.....	22
2.4.7. Összegzés	24
2.5. Műanyagok fenntarthatósága	24
2.5.1. Mi is pontosan a műanyag?	25
2.5.2. Biopolimerekről bővebben	26
2.5.3. Műanyagok környezeti hatása	27
2.6. Műanyagok fenntarthatóságának javítása	30
2.6.1. Alapanyag megválasztása.....	30
2.6.2. Természetes adalékanyagok használata	31
2.6.3. Újrahasznosítási módok a termék életciklusa végén.....	32
2.6.4. Mechanikai újrahasznosítás.....	33
3. Elvégzett kísérletek és alkalmazott módszerek.....	36
3.1. Felhasznált anyagok, mintakészítés és elvégzett vizsgálatok	36
3.2. Környezeti teljesítményértékelő módszerek	37
4. Eredmények és kiértékelésük.....	38
4.1. Anyagvizsgálatok eredményeinek rövid összefoglalása	38
4.1.1. Újrahasznosított anyag használatának hatása a termék tulajdonságaira	38
4.1.2. Kukoricacsutka darálék alkalmazásának hatása a termék tulajdonságaira	39
4.2. Öko-mérleg.....	41
4.1. Környezetközpontú irányítási rendszer hatásértékelési eljárása	46
4.2. Öko-hatékonyság.....	52
5. Következtetések	62
6. Összegzés	65
7. Irodalomjegyzék.....	67

1. BEVEZETÉS

Napjaink egyik legismertebb környezetvédelmi problémáját a műanyagok jelentik. Ezek az anyagok szerves részei a hétköznapjainknak, nélkülük nehezen tudjuk elképzelni az életünket. Az általuk nyújtotta számos előny, köztük az olcsóság, könnyű alakíthatóság, jó mechanikai tulajdonságok mellett ismeretesebb hátrányaik is. A legtöbb műanyag előállítása kőolajból történik, meglehetősen nagy környezeti kibocsátások mellett, illetve kémiai szerkezetük stabilitásából adódóan felhasználásuk után nem bomlanak le, így hulladékként szennyezik a környezetet. (Pukánszky Béla & Móczó János, 2011)

A téma jelentőségéből és nagy hírből fakadóan számos törekvés indult már a műanyagok környezeti terhelésének csökkentésére. Kitűnő példát szolgáltatnak erre az olyan bioműanyagok, melyeket lehetséges megújuló forrásokból előállítani, felhasználásuk után pedig komposztálni. A bioműanyagok elterjedését jelenleg magas árak és nem minden igényt kielégítő tulajdonságaik korlátozzák. Az egyre szigorodó, és az egyszer használatos műanyagok forgalomba hozatalát korlátozó rendelkezések elterjedésével azonban egyre égetőbb feladatot jelent a kőolaj alapú műanyagok kiváltása. Egy másik, a fenntarthatóság javítására egyre szélesebb körben alkalmazott módszer az újrahasznosítás, melyre szintén több Európai Uniósi irányelv vonatkozik. Köztük az Európai Parlament és Tanács (2019) 2019/904 direktívája, ami célul tűzte ki, hogy 2025-től az üdítőitalok csomagolására legszélesebb körben alkalmazott PET palackok legalább 25 %-ban újrafeldolgozott műanyagból készüljenek.

A természetes adalékanyagok alkalmazása is gyakori módszere a műanyagok környezeti hatásának javításának. Tipikusan alkalmazott természetes anyagok például a kender- és lencsázalak, melyek népszerűségüket olcsó árúknak és erősítő tulajdonságaiknak köszönhetik. Ezen anyagok adott mennyiségben a műanyagtermékhez adva csökkenthetik annak előállítási költségeit a tulajdonságok romlása nélkül. (Cinelli et al., 2019)

Az előbb említett módszerek első ránézésre egyértelműen környezetbarátabbá tehetik a műanyagokat, azonban a környezeti hatásokban bekövetkezett tényleges változások vizsgálata elengedhetetlen a hiteles eredmények kinyeréséhez. A környezeti teljesítmény értékelésére módszerek széles köre áll rendelkezésünkre. A műanyagiparban alkalmazhatóak közé tartoznak többek között az öko-hatékonyság értékelés, a különböző anyag- és energiaáramokon alapuló öko-mérlegek és életciklus-elemzés. A módszerek a vizsgált folyamat vagy termék más-más hiányosságaira tudnak rámutatni, így az alkalmazni kívánt módszer kiválasztása előtt fontos a vizsgálat tárgyának pontos ismerete.

Jelen dolgozat célja műanyagok fenntarthatóságának növelésére irányuló módszerek – mechanikai újrahasznosítás, a természetes adalékanyagok használata bioműanyagban – gyakorlatba ülteté-

se és környezeti szempontú értékelése. A bioműanyagból készült és újrahasznosított termékek környezeti teljesítményének értékelésére több, a szakirodalmi összefoglalóban részletesen tárgyalt módszer alkalmazása után ezeket előre meghatározott szempontrendszer szerint értékelem. A szempontrendszer kialakításának célja, hogy egy műanyagipari vállalat egyszerűen ki tudja választani a módszerek közül azt, ami a saját folyamatainak vagy termékeinek értékelésére a legalkalmasabb. A szempontrendszer figyelembe veszi az adott módszer idő- és erőforrásigényét is, így alkalmazkodni tud a vállalat rendelkezésre álló forrásaihoz.

2. SZAKIRODALMI HÁTTÉR

Az alábbiakban összefoglalásra kerültek a napjainkban legnagyobb jelentőséggel bíró környezetvédelemmel kapcsolatos fogalmak, mint fenntarthatóság, a fenntartható fejlődés, az ENSZ fenntartható fejlődési célok, valamint a körforgásos gazdaság. Az összefoglaló fontos részét képezi a környezeti teljesítmény értékelésére alkalmas módszerek összegyűjtése és bemutatása. Megvizsgálásra kerültek a műanyagokkal kapcsolatos legfontosabb alapfogalmak és legjelentősebb környezeti problémák. Ezután következik a műanyagok fenntarthatóságának javítására irányuló törekvések bemutatása, annak a kiemelésével, hogy a kutatások során alkalmaztak-e célok elérésének ellenőrzésére környezeti hatásértékelő módszert.

2.1. Fenntarthatóság és fenntartható fejlődés

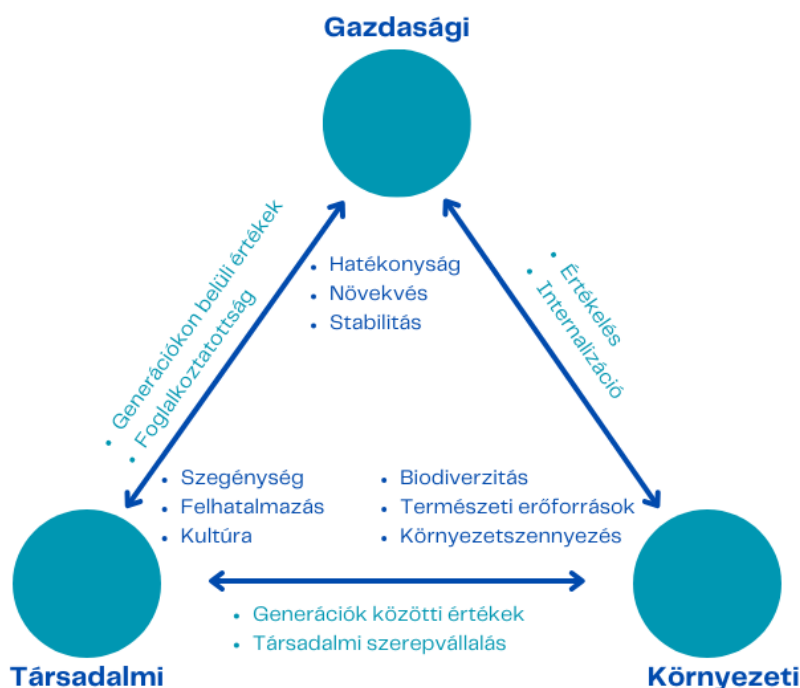
A fenntarthatóság fogalmával szakirodalmi munkák hosszú sora foglalkozik. Pontos definíciója régóta vita tárgya, számos megközelítése létezik. A fenntarthatóság az 1980-as években vált az egyik legfontosabb közgazdasági és környezetvédelmi kérdéssé a világon. Megfogalmazásának kialakulásában számos tényező játszott szerepet, például a növekvő környezeti problémák, a természeti erőforrások kimerülése, valamint a globális gazdasági és társadalmi fejlődés kihívásai.

Fogalma először az 1970-es években jelent meg, amikor az ENSZ-konferencián felmerült a kérdés, hogy hogyan lehet fenntartható módon használni a természeti erőforrásokat. Az 1980-as években a Brundtland-jelentés (Commission on Environment, 1987) is nagy hatással volt a fenntarthatóság fogalmának definíciójának. A jelentés szerint a fenntarthatóság a jelen szükségleteinek kielégítése anélkül, hogy a jövő generációk lehetőségeit veszélyeztetnénk arra, hogy kielégítsék saját szükségleteiket. (Scoones, 2007)

Beckerman (1992) és Spaiser (2017) szerint a fenti definíció ellentmondásos, ami abból adódik, hogy az emberi tevékenységek és az erőforrások korlátlan használata nem fenntartható hosszú távon. Az emberiség növekvő igényei és a folyamatos gazdasági növekedés arra kényszerítik az embereket, hogy egyre több erőforrást használjanak fel, és ezáltal egyre nagyobb hatással legyenek a környezetre. Az erőforrások és a környezet azonban korlátozottak, és egy idő után nem képesek kiszolgálni az emberi tevékenységek növekvő igényeit. Az ellentmondás feloldásához az szükséges, hogy az erőforrások használata olyan mértékben történjen, amely nem veszélyezteti az ökoszisztémát, és biztosítja a jövő generációk számára az életfenntartást és fejlődést.

Az 1990-es években a fenntarthatóság fogalma tovább fejlődött, és egyre inkább az életminőség javításával és a társadalmi igazságossággal kapcsolatos kérdésekre is kiterjedt, következő lépését pedig Ruggerio szerint (2021) az ENSZ Fenntartható Fejlődési Céljai (SDG-k) jelentik, amelyek célja a fenntartható fejlődés biztosítása a világ minden országában.

Munasinghe (1992) szerint a fenntartható fejlődésnek három fő pillére van (1. Ábra). Az első a gazdasági fenntarthatóság. Ez a pillér a gazdasági növekedés és fejlődés fontosságát hangsúlyozza, de ezt úgy kell megtenni, hogy közben az fenntartható módon történjen. Ez azt jelenti, hogy a gazdasági tevékenységeknek összhangban kell lenniük a környezettel, és nem szabad veszélyeztetniük az erőforrásokat és az ökoszisztémákat a jövő generációk számára.



1. Ábra Fenntartható fejlődés ábrázolása
 Forrás: Munasinghe, 1992, p. 2 alapján saját ábra

A társadalmi fenntarthatóság azt jelenti, hogy a jelenlegi és jövőbeli generációknak biztosítaniuk kell a jogokat és az esélyeket ahhoz, hogy boldog és egészséges életet éljenek. Ez a pillér a szegénység csökkentését, az egyenlőtlenségek megszüntetését, a jó egészség és az oktatás biztosítását tartalmazza. A környezeti fenntarthatóság a környezetvédelmi szempontokat hangsúlyozza, és azt jelenti, hogy a gazdasági és társadalmi tevékenységeknek fenntarthatóknak kell lenniük az ökoszisztémák, a biodiverzitás és a természeti erőforrások védelme érdekében. Az ábra azt sugallja, hogy a fenntartható fejlődés nem csak az egyik pillérre, hanem az összes háromra egyaránt épül. Egy tevékenység csak akkor lehet sikeres és fenntartható, ha mindhárom pillér egyszerre van jelen, és ha a gazdasági, társadalmi és környezeti szempontok egyensúlyban vannak.

2.2. ENSZ fenntartható fejlődési célok

2015 szeptemberében a New Yorkban megrendezett ENSZ Fenntartható Fejlődési Csúcson elfogadásra került a 2030-as Fenntartható Fejlődési Keretrendszer (2030 Agenda for Sustainable Development), amely 2030-ig elérendő 17 fenntarthatósági célt (Sustainable Development Goals, SDGs) és 169 alcélt fogalmaz meg az emberiség, a Föld, a jólét és egyetemes béke érdekében. A célok teljesítéséhez szükséges a Globális Partnerség létrejötte, azaz valamennyi kormány, a magán-

szektor, a civil társadalom, az ENSZ további szereplőinek összefogása. A célok összefogják a gazdasági, társadalmi és környezeti értelemben vett fenntartható fejlődést egyaránt. A keretrendszer értelmében az országok saját gazdasági és társadalmi fejlődéséért elsődlegesen az országok felelnek, illetve a célok végrehajtásának nyomon követése és felülvizsgálata is a kormányok elsődleges felelőssége.

A célok (2. Ábra) magukba foglalják a szegénység és éhezés csökkentését, az egészséges élet és friss, tiszta víz biztosítását mindenki számára, valamint a megfelelő oktatás teljeskörűvé tételét. A nemek közötti egyenlőség, a megfizethető, megbízható és fenntartható energiához való hozzáférés is szerves részét képezik a keretrendszernek. A méltányos foglalkoztatottság és gazdasági növekedés mellett megjelenik a fenntartható termelés, fogyasztás és infrastruktúrák létrehozása, a városok és egyéb települések fejlesztése is. Előtérbe kerül az országokon belüli és országok közötti egyenlőtlenségek csökkentése és a békés, befogadó társadalmak létrehozása is. A célok szerint azonnali fellépés szükséges az éghajlatváltozás mérséklésére, az óceánok, tengerek és szárazföldi ökoszisztémák megóvása érdekében. Mindezek megvalósításához pedig nagyban hozzájárulhat a globális partnerség, együtt gondolkodás és cselekvés.



2. Ábra ENSZ fenntartható fejlődési célok
 Forrás: United Nations, 2015

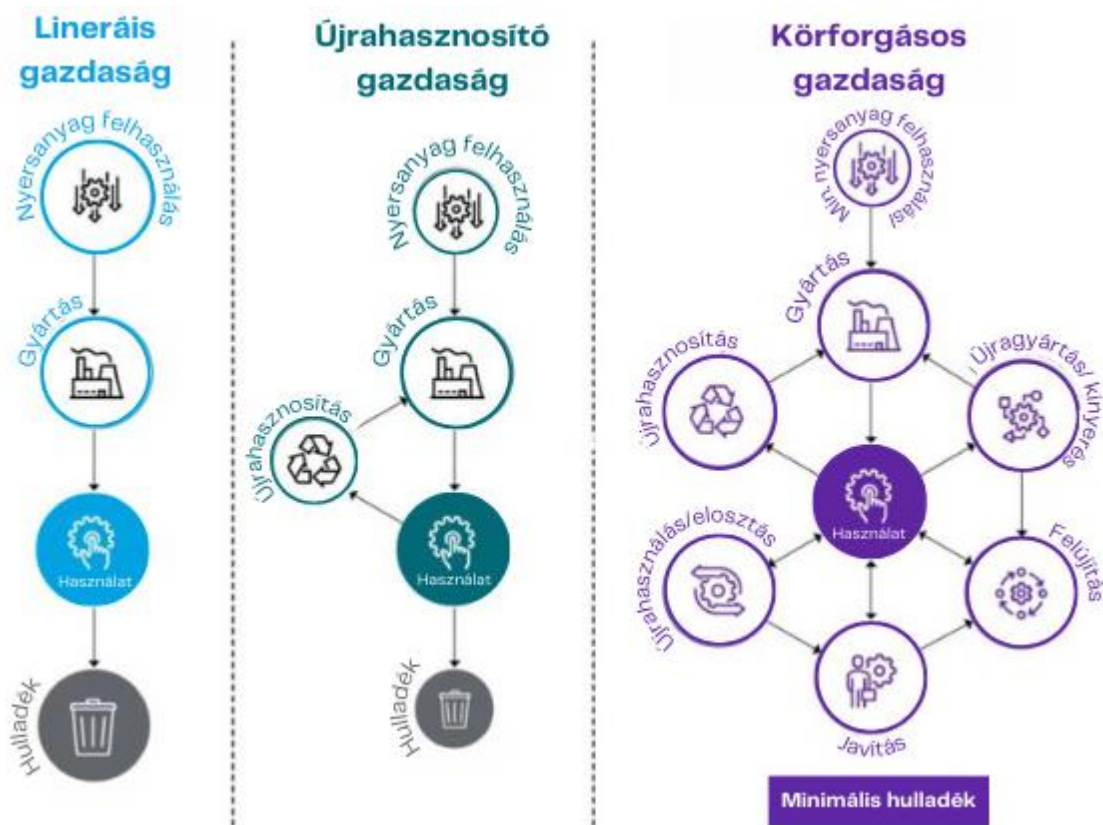
A célok közül a műanyagok fenntarthatóságának és környezeti hatásának témakörében a legfontosabbak a 8-ik, 9-ik és 12-ik célok, amelyek főként az ipar és az innováció fenntarthatóságát és a fenntartható fogyasztás emelik ki. A célok megfogalmazásánál kihangsúlyozásra kerül, hogy innováció útján növelni kell a termelőfolyamatok hatékonyságát az erőforrások és termékek szempontjából is.

2.3. Körforgásos gazdaság

A körforgásos gazdaság fogalmának kialakulásának kezdete Boulding (1966) nevéhez fűződik, aki, „The Economics of the Coming Spaceship Earth” című írásában elsőként fogalmazta meg, hogy a körforgásosan működő gazdasági rendszerek elengedhetetlenek az emberi életforma hosszú távú megőrzéséhez a Földön. Ebből a gondolatból kiindulva bontakoztak ki az első körforgásos gazdaság elvet implementáló intézkedések, mint például a Németországban elsőként bevezetett kiterjesztett gyártói felelősség törvény 1972-ben. (Geisendorf & Pietrulla, 2018)

A fogalom és annak fejlődése jól szemléltethető a korábban gazdasági modellek bemutatásával (3. Ábra). Boulding gondolataira támaszkodva más úttörők közé tartozik Pearce és Turner (1989), akik egyetértettek abban, hogy a hagyományos, újrahasznosítási elemek nélküli lineáris gazdaság, amelyben a gyártott termékek felhasználásuk után teljes mértékben hulladékká alakulnak, nem fenntartható, és ennek következtében azt körforgásos rendszerre kell cserélni. Az érvelésük alapját a termodinamika második főtételének Clausius szerinti értelmezése képezte, amely szerint az zárt rendszer és ebben az értelmezésben világegyetem entrópiája idővel növekszik, és a hasznos energia fokozatosan haszontalan energiává alakul át. Neves és Marques (2022) környezeti, gazdasági és társadalmi szempontokat vizsgálva hívják fel a figyelmet a két gazdaság közötti átmenet lehetséges akadályaira. Kutatásuk alapján a sikeresség nagymértékben függ a népesség hozzáállástól és edukációjától. Szabályozói szinten pedig rendkívül fontos, hogy az áttérés elősegítése érdekében hozott jogszabályok minél inkább célozzák meg az egész értékláncot. Végül pedig elkerülhetetlennek találják az újfajta üzleti modellek létrejöttét és alkalmazását ahhoz, hogy a 3 Ábrán is látható körforgásos gazdaság modellben felmerülő egyéb tevékenységek megvalósulhassanak egy termék életciklusa során. A kettő közötti átmenetet az újrahasznosító gazdaság képezi, ami a termék körforgását megvalósítja annak elemeinek újrahasznosításával, de egy egyszerűsített koncepció alapján.

A korábban leírtakból is következik, de a leggyakrabban használt definíció az Ellen MacArthur Alapítványé (2013): “A körforgásos gazdaság olyan rendszer, amely helyreállító és regeneráló hatású, és célja, hogy a termékeket, komponenseket és anyagokat mindig a lehető legmagasabb hasznossági és értékbeli szinten tartsa, megkülönböztetve a technikai és biológiai ciklusokat.” A körforgásos gazdaság a műszaki anyagoknál annak a modellnek a növekvő használatát támogatja, amelyben a gyártók vagy kiskereskedők megőrzik termékeik tulajdonjogát vagy visszavásárlási megállapodással rendelkeznek, és lehetőség szerint szolgáltatóként viselkednek, a termékek használatát vagy teljesítményét értékesítik, nem pedig fogyasztásukat. Ez a váltás közvetlen következményekkel jár az üzleti modellek szempontjából, hiszen a gyártók elsődleges céljává a minél magasabb minőség és hosszabb élettartam válik.



3. Ábra Lineáris, újrahasznosító és körforgásos gazdaság
 Forrás: World Economic Forum (2023)

A témához kapcsolódó fogalom a 10R stratégia, ami a termék életciklusát és körforgásosságát javító lehetséges tevékenységeket gyűjti össze. Morseletto (2020) 3 csoportra osztotta ezek listáját: elsőként a megfontolt fogyasztás és gyártás csoportjába tartozó tevékenységeket definiálták. Az elutasítás (Refuse) szerint a nem körforgásos termék használatát el kell kerülni annak funkcióinak más termékekbe történő átültetésével, amivel az eredeti termék feleslegessé válik, így a rá irányuló igény is megszűnik. Az újragondolás (Rethink) arra sarkalja a gyártókat, hogy a termék vagy szolgáltatás hasznosságát növeljék például hosszabb élettartam vagy megosztott használat útján. Az csökkentés (Reduce) segítségével az alacsonyabb anyaghasználat jelent megtakarítást. A késztermék életciklusa során alkalmazható stratégiák közé tartozik az újrahasználat (Reuse), javítás (Repair), a felújítás (Refurbish), újragyártás (Remanufacture) és új célból történő felhasználás (Repurpose). Azokban az esetekben, amikor a korábbiakban említett lehetőségek már nem megvalósíthatók, újrahasznosítás (Recycle) során, a termék anyagaiból újrafeldolgozási technológiák segítségével ugyanazt a terméket, vagy annál alacsonyabb minőségűt érdemes előállítani. Energetikai hasznosítással (Recovery) pedig a nyersanyagokból történő energiakinyerés lehetséges.

Ghisellini (2016) felhívja a figyelmet annak a veszélyeire, ha a körforgásos gazdaság koncepcióját csupán a hulladékkezelés szempontjából értelmezzük. Ekkor nem érhetőek el jelentős sikerek,

hiszen a körforgásos gazdaságnak kulcs elemei a termékek tervezése és új környezetbarát technológiák kialakítása is. Hasonlóan gondolkodik Stahel (2016) is, aki szerint egy széles körű "alulról felfelé" mozgalom csak akkor bontakozhat ki, ha a kis- és közepes vállalkozások alkalmazni tudnak olyan szakembereket, akik rendelkeznek a gazdasági és műszaki ismeretekkel ahhoz, hogy vállalati modellváltást érhessenek el. A kormányoknak és szabályozóknak alkalmazniuk kell a politikai eszközeiket, beleértve az adóztatást, a körforgásos gazdaság előmozdítása érdekében az iparban. A kutatás-fejlesztéssel foglalkozó vállalatoknak pedig olyan innovációkat kell feltalálniuk, amelyek szabadalmaztathatók és alkalmazhatók a gyakorlatban, annak érdekében, hogy elősegítsék az atomi szintű újrahasznosítási folyamatokat.

2.4. Környezeti teljesítményértékelés

Napjainkban egyre jelentősebbé váló környezeti problémák kialakulásában Torma (2007) szerint egyértelmű szerepet játszik a gazdasági szektor, ezen belül is az ipar. Ebből kifolyólag pedig az ipar a szabályozások és beavatkozások fő célcsoportja. Ahhoz, hogy ezek az intézkedések reálisak lehessenek és érdemi változást hozhassanak, elengedhetetlen a megfelelő információk és adatok ismerete. Ennek a biztosítására szolgálnak a különböző környezeti teljesítményértékelő módszerek.

A környezeti teljesítmény definícióját az ISO 14031 szabvány határozza meg. „Környezeti teljesítmény egy szervezetnek a környezeti tényezők irányításával kapcsolatos eredményei.” A környezeti tényező pedig „valamely szervezet tevékenységének, termékeinek vagy szolgáltatásainak olyan eleme, amely kölcsönhatásba kerülhet a környezettel.” (ISO 14031, 2002, p. 12.) Eszerint az értékelés során a vállalat minden potenciálisan környezetet terhelő folyamatát figyelembe kell venni. A környezeti hatás meghatározása pedig „a környezetben végbemenő mindennemű változás - akár káros, akár hasznos, amely részben vagy egészben a szervezet környezeti tényezőitől származik.” (ISO 14001, 2005, p. 12.)

Környezeti teljesítményértékelés során a legjobb módszer, ha figyelembe vesszük a vállalat összes környezeti tényezőjét, és az összegyűjtött adatokat olyan módszerrel értékeljük, amely figyelembe veszi a környezeti terhelések közti minőségbeli különbségeket is. Jól elvégzett értékelés mellett a vállalat pontosabb képet kaphat az anyag- és energiaáramairól, belső folyamatairól és azok hatékonyságáról.

Tekintettel arra, hogy jelen dolgozat esettanulmányában egy olyan folyamat szerepel, amely során egy műanyagból készült termék előállításának és újrahasznosításának környezeti hatása kerül megvizsgálásra, az alább tárgyalt módszerek közül azokat igyekeztem részletesebben bemutatni, melyek az említett esetre a leginkább alkalmazhatók.

2.4.1. Környezeti teljesítményértékelő módszerek csoportosítása

Tóth (2002) a különböző környezeti teljesítményértékelési módszereket azok összetettsége, bonyolultsága, információigénye és a ráfordítani szükséges idő és erőforrás alapján osztotta csoportokra. Az ismert módszereket öt csoportba sorolta be, ami szerint léteznek megalapozó, indikátor, anyag- és energiaforgalmi, hierarchizáló és szintetizáló módszerek.

2.4.2. Megalapozó módszerek

Ezen módszerek alkalmazása a legegyszerűbb, főként arra alkalmasak, hogy segítségükkel meghatározzuk a vállalat problémás területeit és legjelentősebb környezeti hatásait. Alkalmazásuk csupán néhány napot vesz igénybe, de önmagukban nem tekinthetők megfelelően megalapozottnak, hiszen főként becsléseken és „szemmértéken” alapulnak. Olyan vállalatok, akiknek célja a folyamatos fejlődés, mindenképpen egyéb, alaposabb módszerek használatára szorúlnak. Megalapozó módszerek közé tartozik az ökotérképezés, mely során az üzem vagy telephely rajzán a különböző területeken talált problémákat egyszerű jelrendszer segítségével jelenítik meg. Ökotérkép készíthető a települési elhelyezkedésről, a telephely környezetében fellépő zavarásokról (pl. zaj), a talajról, levegőről, munkvégből származó zajról és porról, a felhasznált vízről, energiáról, a keletkező hulladékról és fellépő kockázatokról.

Környezetközpontú Irányítási Rendszer (KIR)

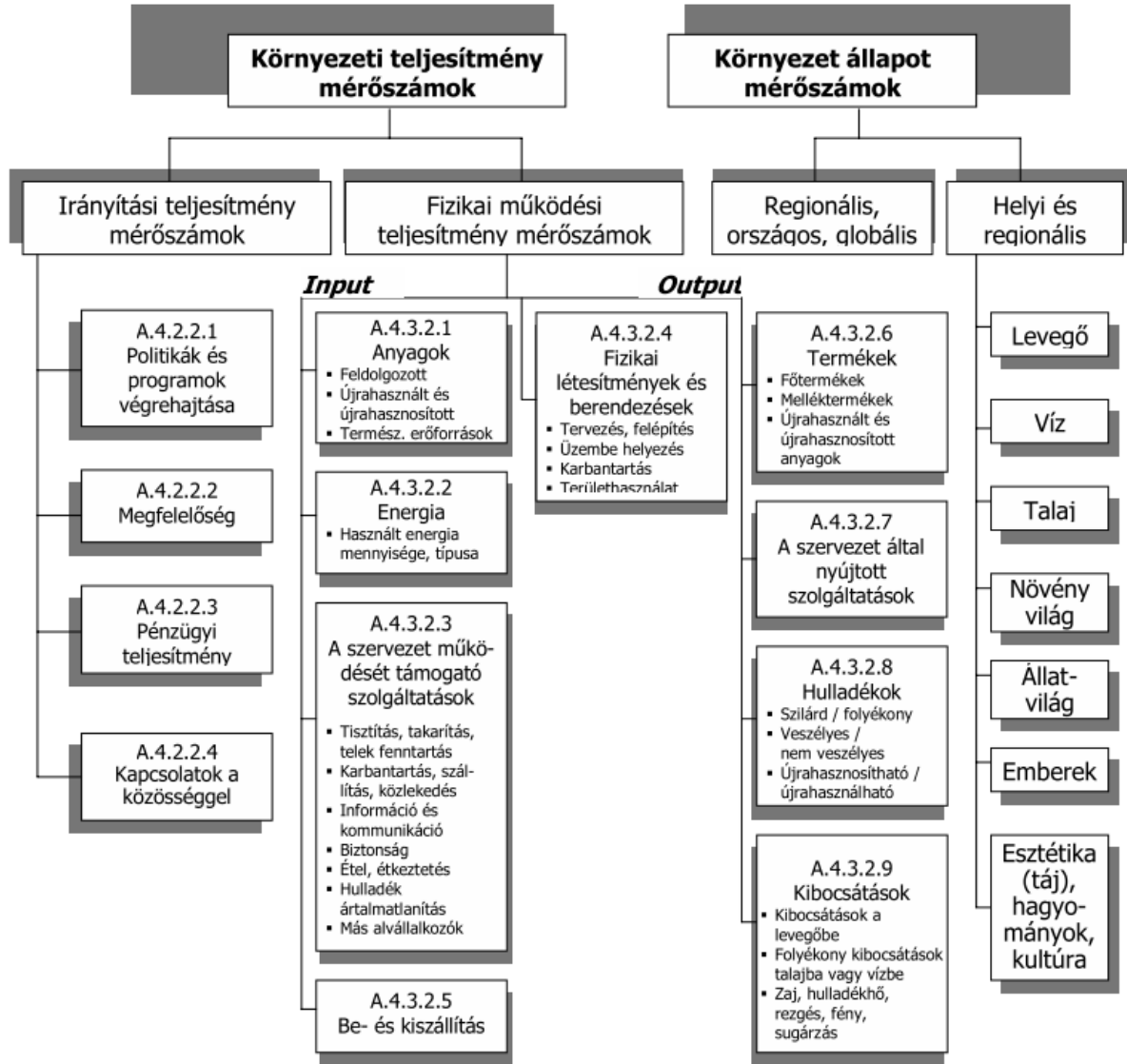
Környezetközpontú Irányítási Rendszer (KIR) hatásértékelési eljárása is a megalapozó módszerek csoportjába tartozik. Az ISO 14001 szabvány követelménye alapján a szervezetnek meg kell határoznia a tevékenységéből, termékéből vagy szolgáltatásából adódó környezeti tényezőket, hogy azonosíthassa közülük a jelentős környezeti hatásokat. A környezeti tényezők azonosítása után, azok számszerűsítése és osztályozása révén választhatók ki közülük a jelentősek. Jelentősnek általában akkor tekinthető egy tényező, ha jogszabály rendelkezik róla, károsodást okozhat a környezetben, vagy valamely érdekelt felet érinti. Értékelt felek lehetnek a hatóság, a helyi közösség, a dolgozók, tulajdonosok vagy a vevők. A tényezők értékelése során fontos figyelembe venni a káros hatás bekövetkezésének valószínűségét és súlyosságát, valamint törekedni kell arra, hogy az értékelő módszer a lehető legobjektívebb legyen.

2.4.3. Indikátor módszerek

Az indikátor módszerek alapja a környezeti teljesítmény mérőszámai. Ezen mérőszámok összefoglalják a mérésekből származó adathalmazt, és kifejezetten alkalmasak az időbeli változások követésére, segítségükkel a gyengepontok is jól azonosíthatók. Egzakt jellegükből kifolyólag jól kommunikálhatók és a célok megfogalmazását is leegyszerűsíthetik.

Enviromental Performance Evaluation (EPE)

Ezen módszerek legismertebb példája az ISO 14031, -32-es szabványokban megfogalmazott Enviromental Performance Evaluation (EPE), ami leginkább környezeti teljesítményértékelésnek fordítható. A szabvány a környezeti mérőszámokat több kategóriára osztja (4. ábra).



4. Ábra Környezeti mérőszámok kategóriái az ISO 14031 szabvány alapján

Forrás: Tóth, (2002): p. 56

A környezeti teljesítmény mérőszámok a szervezet teljesítményéről szolgáltatnak információt, a környezeti állapot mérőszámok pedig a környezet helyi, regionális esetleg országos állapotát mutatják be. Az előbbi csoportot a szabvány két további alcsoportra osztja, melyek külön mérik a szervezet menedzsmenti erőfeszítéseiből származó eredményeket és a működésből adódó környezeti teljesítmény mérőszámokat.

A mérőszámok alkalmazhatóságát az ISO 14031 számos követelmény alapján határozza meg. Fontos, hogy a mérőszámok összehasonlíthatóak legyenek más vállalatok adataival, és jól mutassák

a környezeti hatások különbségeit. Nyújtsanak lehetőséget a cég által befolyásolható környezeti hatások javítására, legyenek összhangban a vállalat kitűzött céljaival. Adott környezeti hatás mérőszámára érdemes mindig ugyanazon mutatót használni és a mérést adott időközönként rendszeresen elvégezni, annak érdekében, hogy az adatok valós és aktuális képet fessenek az adott hatásról. Megemlíthető az előbbieken kívül, hogy az adott mérőszám mérésének nem szabad túl nagy költséggel járnia, valamint érdemes törekedni a közérthető formára, hiszen a mérőszámok a laikusok tájékoztatásának fő eszközei. A szervezetnek saját értékelő rendszerének kialakításához feltétlenül figyelembe kell vennie a környezeti tényezők közül azokat, amelyeket tevékenysége befolyásol, vagy hatást gyakorolhat rá. Ezen kívül okvetlenül szem előtt kell tartani az elérendő környezeti célokat és az érdekelt felek véleményét is.

Az értékelés folyamata a PDCA cikluson alapul (Plan-Do-Check-Act). A tervezés fázisban a rendelkezésre álló és az értékeléshez szükséges mérőszámok meghatározása, a végrehajtás során pedig ezek begyűjtése és értékelése történik. Az értékelésből a vállalat következtetéseket vonhat le arra vonatkozóan, hogy mely területeken van szükség fejlődésre. Az ellenőrzés és javítás során validálásra kerülnek az információk és számos kérdés tehető fel annak érdekében, hogy a vállalat eldönthesse, hogy megfelelő adatokból indult-e ki, ezek az adatok valóban jó mérőszámai a vállalat környezeti teljesítményének, és hogy a korábban bevezetett intézkedések a terveknek megfelelően kerültek-e alkalmazásra. (ISO 14031, 1999)

Öko-hatékonyság értékelés

Egy másik indikátor módszer az öko-hatékonyság értékelés, melynek koncepciója S. Schmidheiny, (1992) nevéhez fűződik. Az öko-hatékonyság lényegét Tóth (2002) úgy fogalmazta meg, hogy a vállalat az érték maximalizálására törekszik, a káros környezeti hatások minimalizálása mellett. A módszer előnye, hogy a gazdasági növekedést és a környezeti hatások javítását együttesen tűzi ki célul, így a profitorientált vállalati szemlélettel nagyobb összhangot teremt, mint a korábban említett módszerek. (H. A. Verfaillie és R. Bidwell, 2000)

Az öko-hatékonyságot az ISO 14045 (2012) szabvány szerint a termék vagy szolgáltatás értéke és az adott környezeti hatás hányadosaként értelmezzük.

$$\text{Öko-hatékonyság} = \frac{\text{termék vagy szolgáltatás értéke}}{\text{környezeti hatás}}, \quad (1)$$

A World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), (2000) szerint általánosan alkalmazható mérőszámok három csoportba sorolhatók. Az első csoportot a termék/szolgáltatás értékére vonatkozó mérőszámok alkotják. Ilyenek lehetnek a termék/szolgáltatás mennyiségére és értékére vonatkozó számok, vagy vállalatra specifikusan a nyereségesség és hozzáadott érték. A második csoportba a termék/szolgáltatás előállításának környezeti hatásait leíró adatok tartoznak,

mint például az anyag-, energia-, és vízfelhasználás, üvegházhatású gázok kibocsátása, vagy a keletkezett lerakásra estleg égetésre kerülő hulladék mennyisége.

Harangozó (2008) szerint a módszer hátrányai közé tartozik, hogy az eredményül kapott mérőszám nem veszi figyelembe, hogy a vállalat tevékenysége vagy az adott termék/szolgáltatás mennyire hasznos társadalmi szempontból. Egy másik gyakorlati probléma a gazdasági és természeti környezet közötti rendszerhatárok pontatlan definiálásából ered. Ezek nélkül nehezen elválasztható, hogy a termékkel összefüggésben mi számít káros környezeti hatásnak és mi nem. (Hukkinen, 2003)

2.4.4. Anyag- és energiaforgalmi módszerek

Anyag- és energiaforgalmi mérlegek célja általánosan egy vállalat teljesítményének értékelésekor a költségek csökkentése, a hatékonyság növelése. Innen nézve az anyag- és energiaforgalmi módszerek az öko-hatékonysággal hozhatók összefüggésbe, annak javítását szolgálják, azonban sokkal részletesebb adatgyűjtést igényelnek. (Tóth, 2002)

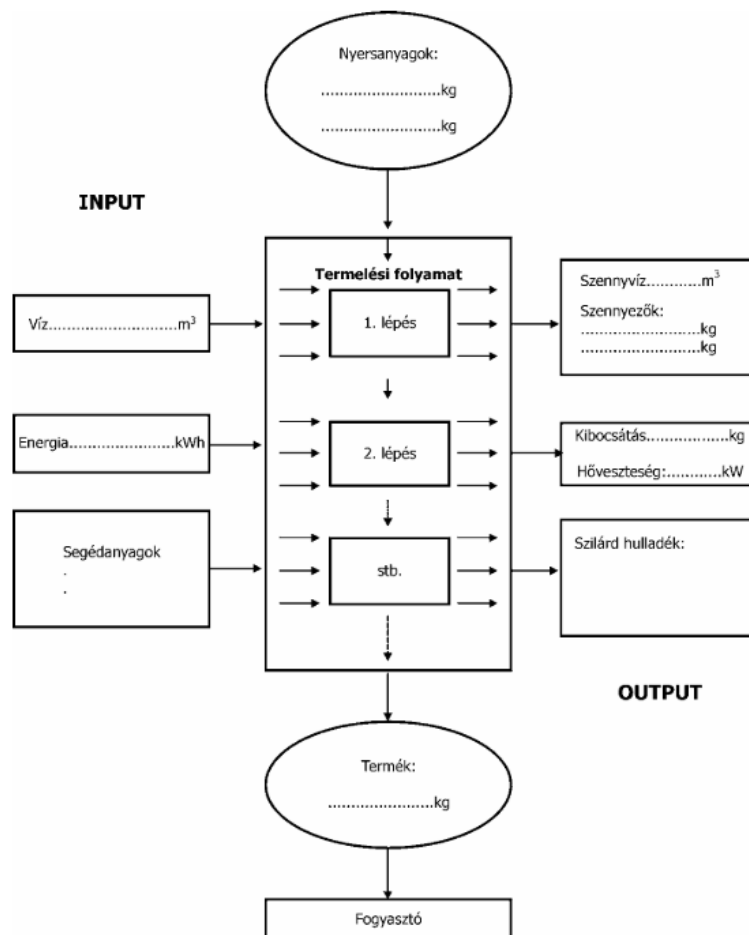
Öko-mérlegek

Az öko-mérleg módszer az adott vállalat vagy folyamat anyag- és energiamérlegének teljeskörű felállítását és értékelését jelenti. Elkészítése során az input oldalon meg kell jelennie minden felhasznált anyagnak (alapanyag, segédanyag, feldolgozott anyagok), szennyező kibocsátásnak (lég-, víz-, talaj-, szilárd hulladék, zaj, sugárzás), energiavesztésnek és termék kibocsátásnak, értve ezalatt a kész- és félkész termékeket. (Winter, 1997) Annak érdekében, hogy a mérleg pontos és megbízható képet adjon a vizsgálni kívánt folyamatról, termékről, telephelyről vagy vállalatról, különösen fontos a rendszerhatárok és az adatok gyűjtésének időbelli intervallumának meghatározása. Ennek érdekében a Tisztább Termelés Magyarországi Központja (TMK), (1998, p. 6-7.) hét lépésre osztotta az öko-mérleg elkészítésének folyamatát:

1. A vizsgálat céljának és tárgyának meghatározása: az öko-mérleg készítésének célja lehet egy adott anyag nyomonkövetése a folyamaton belül, vagy a pazarlás és veszteségek keletkezési helyének, okainak feltárása is.
2. A rendszerhatárok pontos meghatározása, hiszen ahogy fentebb is említésre került, a vizsgálat tárgya lehet egy folyamat, termék, telephely, de a vállalat egésze is.
3. Következő lépésként a vizsgálat időintervallumát érdemes meghatározni, amellyel szemben támasztott fő követelmény, hogy jól reprezentálja a vizsgált rendszert. Értéke lehet egy műszaktól kezdődően akár egy év is, vagy adott mennyiségű termék előállításához szükséges idő.

4. A vizsgált rendszer kisebb részegységekre bontása, ami azért szükséges, hogy az adatgyűjtést megkönnyítse, de ügyelni kell arra is, hogy ne válasszunk túl kisméretű egységeket.
5. Ezután következik egy anyagforgalmi diagram készítése, amely bemutatja az anyagáramok útját a részfolyamatok között.
6. A következő lépés az anyagmérlegek elkészítése, amely kvantitatív módon is meghatározza a vizsgált áramokat.
7. Utolsó lépésként pedig az adatok értelmezése történik. Ebben a szakaszban a feltett kérdéseinkre keressük a válaszokat. Számos eszköz alkalmazható a kiértékelésre, például grafikonok, Shankey-diagramok, folyamatábrák.

Egy termelési folyamat öko-mérlegének általános felépítése az 5. Ábrán látható. Az input oldalon szerepelnek a felhasznált nyersanyagok, víz, energia és segédanyagok. A gyártási folyamat során ezeket alakítják át termékekké, miközben melléktermékek, hulladék és különböző kibocsátások keletkezhetnek.



5. Ábra Egy termelési folyamat általános öko-mérlegének ábrázolása
 Forrás: Tóth, (2002): p. 74

Az öko-mérlegek előkészítése nagyobb rendszerek esetén hosszú időt vesz igénybe, objektív volta miatt azonban megbízható és hiteles információk kinyerésére alkalmas módszer. Olyan vállalatok esetében lehet különösen hasznos alkalmazni, amelyeknél jelentős megtakarítási lehetőségeket feltételeznek. (Tóth, 2002)

Környezeti költségszámítás

A környezeti költségszámítás szerteágazó terület, felhasználásának célja főként a vállalat környezetszennyezéseinek feltárása és az azokhoz kapcsolódó költségek meghatározása. A környezeti költségeknek két kategóriája létezik, a környezetvédelmi és környezetszennyezési költségek. Általánosan igaz, hogy a jövőben felmerülő költségek megelőzését szolgáló beruházások nagyobb befektetést igényelnek, mint a gyorsabb és részleges megoldást kínáló módszerek, azonban környezeti költségszámítás segítségével rávilágíthatunk a megelőző megoldások gyorsabb megtérülésére. A fogalmak közti különbségek jól személtethetők hulladékkezelés példáján. Egy megelőző megoldás környezetvédelmi költsége lehet egy hatékonyabb technológia alkalmazása, vagy a szigorúbb munkaellenőrzés bevezetése. Részleges megoldás ebben az esetben az üzemen belüli hulladék újrahasznosításának költsége. A környezetszennyezési költségként a lerakás díja, külső költségként pedig az éghajlatváltoáshoz való hozzájárulás jelenhet meg.

A US Environmental Protection Agency (1998) a környezeti költségek könnyebb azonosításához négy kategóriát határozott meg. A hagyományos költségek kategóriájába az alap- és segédanyagok tartoznak, amelyek minden esetben megjelennek a hagyományos könyvelésben is, valamint elengedhetetlen részei a gyártásnak, de kisebb mennyiségben való használatuk csökkenti képes a vállalat környezeti hatását. A potenciálisan rejtett költségek közé tartozik például a beszállítók környezeti minősítése során felmerülő költségek, egy környezettudatos termék tervezésének költségei, valamint a környezetközpontú irányítási rendszerek fenntartásának költségei. Felételes költség lehet egy baleset elhárításának költsége, vagy esetleges bírságokból származó költségek. Az utolsó csoportot a cég jóhírének fenntartásához kötődő költségek alkotják. Ezek közé tartozhat egy nyilvános környezeti jelentés elkészítésének, vagy a cég által szervezett edukációs programok szervezésének költsége.

A költségek számításának alapjául a vizsgált vállalat anyag- és energiamérlegei szolgálnak. Ezek segítségével az összes költségből kiszűrt környezeti költségek allokálhatók a költséghe-lyekhez, amely alatt az előre meghatározott folyamatokat és műveleteket értjük. Ezzel még nem deríthető fel teljesen, hogy az költségnek mi az okozója, így a költségeket tovább kell osztani a költséghe-lyekről a költségokozókra. Költségokozó gyakran a vállalat tevékenysége során gyártott termékeket jelenti. Ezen a módon a környezeti költségszámítással feltárhatjuk egy termék valódi rejtett költségeit, de egy új beruházást is értékelhetünk vele. (Tóth, 2002)

2.4.5. Hierarchizáló módszerek

A hierarchizáló módszerek célja, hogy a különböző vállalatok között, azok környezeti teljesítménye alapján sorrendet állítson fel. Ebből kifolyólag ezen módszereket főként külső felek alkalmazzák, például államigazgatási szervek, elemző cégek vagy környezetvédő szervezetek. A többlépcsős környezeti besorolások kiválasztott szempontok alapján több kategóriába sorolják a cégeket. Környezeti minősítés esetén pedig arányskála és pontszámok segítségével állítható fel sorrend a vállalatok között. Legjelentősebb alkalmazási területébe a tőzsdei elemzések tartoznak. Ezen módszerek részletesebb kifejtésével azért nem foglalkozom, mert a későbbiekben vizsgált esettanulmányoknak nem célja több vállalat egyidejű értékelése és azok közötti környezeti szempontok szerinti sorrend felállítása. (Tóth , 2002)

2.4.6. Szintetizáló módszerek

A szintetizáló módszerek igyekeznek a vállalatok környezeti teljesítményére vonatkozó adatok minél magasabb szintű aggregálására. Amennyiben kialakításra kerülne egy olyan értékelő rendszer, amely képes megtalálni olyan eszközöket, amelyek segítségével a különböző tevékenységeket végző vállalatok összehasonlíthatók, az jelentősen megkönnyítené az elemzések laikusok által történő értelmezését.

A környezeti teljesítmény index készítése nem teszi lehetővé a különböző vállalatok összehasonlítását, azonban a környezeti teljesítmény mérőszámokat közös skálán értékeli és ezek súlyozásával az adott vállalatra jellemző összpontszámot generál. A módszer során különböző kategóriákba osztjuk az értékelni kívánt tényezőket. A tényezőkhez, azok jelentősége szerint súlyszámokat, aktuális értékük alapján pedig bázisértékeket, a jövőre nézve célértékeket rendelünk. Így képződik egy maximálisan elérhető pontszám, illetve egy a vállalat jelenlegi és feltételezett jövőbeli teljesítményéből adódó pontszám. A pontszámok viszonyából pedig következtethetünk a vállalat teljesítményére, illetve utólagosan a cél elérése érdekében hozott intézkedések hatásosságára.

A hatásokban való megjelenítés módszerének lényege, hogy az azonosított problémás területeknél meg kell vizsgálni, hogy milyen erőforrás felhasználás és kibocsátás történik, majd ezek hozzájárulását arányosítottan kell értékelni. A z összegyűjtött környezeti problémákhoz mértékegységeket lehet meghatározni és egyenértékek szerint összehasonlítani az azonos típusú tényezőket. Erre az Egyesült Nemzetek Szövetségének Környezetvédelmi Programja (UNEP, 1996) kiadványa tíz környezeti problémát határozott meg, melyekhez az értékelés végett egyenmértékegységeket és viszonyítási alapokat is hozzárendelt (1. Táblázat).

1. táblázat: Környezeti problémák és mérőszámaik
 Forrás: ENSZ, 1996, p. 68-72

Környezeti probléma	Viszonyítási alap, mértékegység
Élettelen források kimerülése (pl. ércek bányászata)	Az elérhető teljes készlet
Nem megújuló energiaforrások kimerülése	MJ/kg, MJ/m ³
Globális felmelegedés	Széndioxid egyenérték, 1 kg CO ₂ üvegház hatása
Fotokémiai oxidáció termékei	Etilén egyenérték, 1 kg etilén hatása
Elsavasodás	Kéndioxid egyenérték, 1 kg kéndioxid hatása
Emberekre vetített toxikusság	Az a testtömeg, ami károsodás nélkül képes elviselni 1kg anyagnak való expozíciót
Ökotoxikusság (vizek)	Az a vízmennyiség, amelyet 1 kg anyag kritikus szintre szennyez
Ökotoxikusság (talaj)	Azon talajmennyiség, amelyet 1 kg anyag kritikus szintre szennyez
Tápanyag-feldúsulás	Foszfát egyenérték (1 kg foszfát hatása)
Ózonréteg vékonyodása	CFC-11 egyenérték (1 kg CFC-11 hatása)

Életciklus-elemzés

Torma A., (2007) a szintetizáló módszerek közé sorolja az életciklus-értékelést (Life-Cycle Assessment, LCA) is. Az ISO 14040 szabvány szerint az életciklus elemzés nem más, mint: „egy termékrendszerhez tartozó bemenet, kimenet és a potenciális környezeti hatások összegyűjtése és értékelése a termék teljes életciklusa során.” (ISO 14040, 1998, p. 6.). Az LCA készítésének első lépésként meg kell határozni az elemzés célját és tárgykörét, majd leltárelemzés következik a folyamat anyag- és energiamérlegéről, valamint környezeti hatásairól. Ezután az eredmények értékelése következik, majd az eredmények értelmezése és jelentéskészítés. Utolsó lépésként pedig kiemelten fontos a kritikai átvizsgálás. Alkalmazási területét tekintve elmondható, hogy az LCA használható termékek, szolgáltatások esetleg telephely értékelésére és általa figyelembe vehetők mind környezeti mind pedig gazdasági tényezők is.

Az életciklus-elemzés leltárkészítés idő- és költségigényes feladat, elvégzése során minden, az elemzés szempontjából fontos input és output adat összegyűjtése szükséges. Az adatokból összeálló leltárt életciklus leltárnak (Life-Cycle Inventory, LCI) is szokás nevezni. Input oldalon a nyersanyagok és energiaforrások, valamint termékek, félkész termékek és egyéb folyamatok outputjai szerepelhetnek. Az előbbiek környezeti, az utóbbiak gazdasági inputok. Az output oldalon szintén szerepelhetnek az előbb említett kész- és félkész termékek, energia outputok, ezeket gazdasági outputnak nevezzük. Az emissziós outputok pedig a környezeti outputok közé tartoznak. A következő lépés az életciklus hatásértékelése (Life-Cycle Impact Assessment, LCIA). Ebben a fázisban a begyűjtött adatok értékelése és a környezeti terhelések kiszámítása történik. Az adatokat az értékelés során környezeti hatáskategóriákhoz rendeljük, így folyamat végén megkapjuk, hogy adott környezeti hatások milyen mértékben járulnak hozzá az adott problémakörhöz. (Tóthné Szita, 2008)

Az életciklus költségbecslés (Life-Cycle Costing) módszer segítségével a termék/szolgáltatás életciklusának költségoldalai elemezhetőek. Főként beruházási döntések meghozásának segítésére használják dizájn kérdéseknél a vevő szempontjából. Olyan vállalatoknál is előnyösnek bizonyulhat a használata, ahol különösen nagy szerepet élvez a vevőközpontúság, és ebből piaci előny kovácsolható. (Korpi és Ala-Risku, 2008)

A fenntarthatósági életciklus-elemzés (Life-Cycle Sustainability Assessment, LCSA), egyesíti a klasszikus életciklus elemzést, az életciklus költségbecslést és a társadalmi életciklus vizsgálatot, így egyszerre vizsgálhatók a környezeti, gazdasági és társadalmi aspektusok. Ezzel elősegíthető a valóban fenntartható és környezettudatos termékek kiválasztása, mind a fogyasztók, mind pedig a vállalatok szempontjából. (UNEP, 2012)

2.4.7. Összegzés

A fentebb bemutatott módszerek különböző összetettségűek, alkalmazásukhoz szükséges adatmennyiség nagy szórást mutat. Céljuk többnyire hasonló, segítségükkel felmérhető egy vállalat környezeti teljesítménye, de a fókusz bizonyos esetekben az anyag- és energiamérlegen van, máskor költségalapú a megközelítés, de előfordulnak közöttük menedzsment módszerek hatékonyságát célzó is. A dolgozat esettanulmányában a biológiai alapú polimer mechanikai újrahasznosításának környezeti tényezőkre gyakorolt hatása kerül megvizsgálásra. Egy másik példán pedig azt vizsgálom meg, hogy egy természetes töltőanyag használata mennyiben tudja javítani a termék/alapanyag környezeti teljesítményét.

2.5. Műanyagok fenntarthatósága

Feltehetően mindannyian hallottunk már az utóbbi évtized egyik legismertebb környezetvédelemmel kapcsolatos kérdéséről, amely a műanyagokhoz kötődik. A műanyagok igen széles körben alkalmazott anyagok, melyek sikerüket alacsony árúknak és kiváló tulajdonságaiknak, könnyű fel-

dolgozhatóságuknak köszönhetik. Ezek az anyagok nagyon stabil kémiai szerkezetükből adódóan felhasználásuk után nem bomlanak le a természetes környezetben, csupán aprózódásra képesek, amely mikroműanyagok keletkezését eredményezi. A probléma gyökere azonban nem feltétlen a műanyagok létezésében keresendő, hanem a hulladékkezelési gyakorlatokban és az emberi fogyasztói szokásokban.

2.5.1. Mi is pontosan a műanyag?

A műanyagokkal kapcsolatban több fogalom is ismeretes a köztudatban: műanyag, polimer, monomer, makromolekula, kompozit. Ezek pontos definíciója és azok használata sem mindig következetes gyakran a szakemberek köreiből sem, ezért ebben az alfejezetben ezeket szeretném tisztázni.

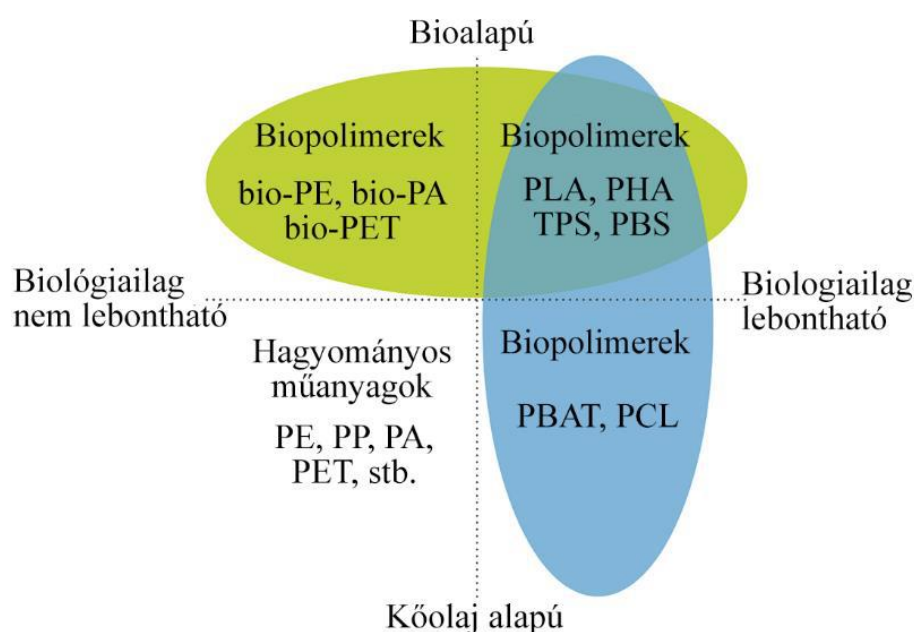
Makromolekulának nevezzük azokat a nagy molekulatömeggel rendelkező óriásmolekulákat, amelyek kisméretű ismétlődő egységekből állnak, és molekulatömegük nagyobb, mint 5000 g/mol. Az ismétlődő egységek kiindulás elemei a monomerek, amelyekből polimerizációs reakció útján képződnek a makromolekulák. Polimeren pedig általában a makromolekulák összességét értjük. Hétköznapjainkban a legismertebb polimerek közé tartozik a polipropilén (PP), a kis- és nagysűrűségű polietilén (LDPE, HDPE), a polivinil-klorid (PVC), és a polisztirol (PS). Műanyagok nevezük azokat a polimereket, amelyek valamilyen adalékanyagot tartalmaznak. Adalékanyagok számítnak a színezéshez használt pigmentek, a feldolgozást segítő anyagok és tulajdonságok javítására használt erősítőanyagok (üveg- és szénszál, természetes szálak). Egyre szélesebb körben terjednek el az úgynevezett biopolimerek, amelyek jellemzően megújuló forrásokból készülnek és biológiai úton lebonthatók kis molekulatömegű anyagokká, amelyek nem mikroműanyagok. Legnépszerűbb képviselőjük a polihidroxialkanoátok csoportjába tartozó polilaktid (PLA) (Pukánszky, 2012)

Napjainkban el sem tudjuk képzelni az életünket műanyagok nélkül. Lépten nyomon találkozunk velük, és ha igyekszünk is kerülni azok használatukat, például nem fogyasztunk egyszer használatos PET palackokból italt vagy nem csomagoljuk műanyag zacskóba a vásárolt zöldséget és gyümölcsöket, akkor is szerves részei a hétköznapoknak. Műanyagból van ugyanis elektronikai eszközeink számos alkatrésze és borítása, de a gépjárművek, közlekedési eszközök sok eleme is. Nélkülözhetetlen a műanyagok használata a csomagolóiparban is, ahol a termékek védelmét, élelmiszerek esetén pedig azok hosszútávú szavatosságát garantálják. Mindazonáltal a műanyag termékekből keletkező hulladék mennyiségéből, és a műanyagipar körforgásosságának hiányából kifolyólag szükségesek az olyan törekvések, amelyek növelik a műanyagok fenntarthatóságát.

2.5.2. Biopolimerekről bővebben

Az utóbbi években egyre nagyobb az igény mind a fogyasztók mind pedig a nagyvállalatok részéről a fenntarthatóság és környezettudatosság fejlesztésére, amelybe a fenntartható termékek gyártása, fenntartható alapanyagokból is beletartozik.

A műanyagiparban ezen célokat főként a poliolefinnek (LDPE, HDPE, PP), meghatározott felhasználási területeken történő kiváltásával lehetne elérni, amelyre a biopolimerek ígéretes lehetőséget nyújtanak. Az, hogy mit nevezünk biopolimernek, széles körben változhat. Csoportosításuk alapját az 6. Ábra szemlélteti, miszerint a biopolimerként való kvalifikáció két szempontja, hogy a polimer biológiai forrásból származzon és biológiai úton lebontható legyen. Bizonyos polimerek biológiai alapúak, de nem lebomlóak például a bio polietilén (bio-PE). Más anyagok kőolaj alapúak, de biológiailag lebonthatók, például polibutilén-adipát-tereftalát (PBAT) (European Bioplastics, 2017). A továbbiakban a dolgozatban az olyan anyagokra hivatkozok biopolimerként amelyek egyszerre származnak megújuló, biológiai alapú forrásból származnak és biológiailag lebomlóak, ami azt jelenti, hogy kismolekulájú szerves anyagokra esnek szét a lebontási folyamatok során. (Bugnicourt., 2014)



6. Ábra Biopolimerek csoportosítása
Forrás: (European Bioplastics, 2017)

A lebontható bioműanyagok csoportjába tartoznak a polihidroxi-alkanoátok (PHA-k), amelyek közül az ipari felhasználás szempontjából legígéretesebb a politejsav (PLA), de nagy jelentőséggel bírhat a polihidroxi-butirát (PHB), polihidroxi-valerát (PHV), polihidroxi-hexanoát (PHH), és még számos másik poliészter, valamint azok kopolimerei.

Ezen polimerek ismétlődő egységeit észterkötések kötik össze, mechanikai tulajdonságaik többnyire hasonlóak a népszerű termoplasztikus polimerek tulajdonságaihoz, így alternatívát kínál

nak azok kiváltására. A PLA szemikristályos polimer, 58 °C körüli üvegesedési hőmérséklettel és 160-180 °C közötti olvadásponttal rendelkezik. A PHA-k közül a PLA dolgozható fel legkönnyebben a hagyományos műanyag feldolgozó technológiák (extrúzió, fröccsöntés) segítségével. A PLA azonban így is igen érzékeny a degradációra, ami főleg magasabb hőmérsékletek, hosszú tartózkodási idők vagy nagy nyírás mellett válik jelentőssé.

Megfelelő adalékanyagokkal (csúsztatók, lágyítók, stabilizátorok) és a megfelelő feldolgozási körülmények (hőmérséklet, tartózkodási idő, nyírás) megválasztásával PLA-ból extrúzió vagy fröccsöntés segítségével gyárthatók akár csomagolóanyagok, fóliák vagy egyszer használatos termékek is, amelyek ma alapvetően nem lebomló, kőolaj alapú poliolefinekből készülnek (Lim, 2008). Széles körű elterjedésének jelenleg az alapanyag és a polimer előállításának magas költségei szabnak határt, ami a poliolefinekének akár 2-5-szöröse is lehet. (Sabapathy, 2020)

A jelenleg elérhető PLA-ból készült termékek közé tartoznak az egyszer használatos, műanyag evőeszközök, poharak, szívószálak, tányérok és ételtárolók, amelyek használatát más alapanyag esetén jogszabályok korlátozzák. A köznyelvben nejlon zacskóként ismert PE hordtáskák kiváltására egyre több helyen használnak PLA-ból készült zacskókat., de az alumíniumból vagy tömegműanyagokból készülő kavé kapszulák alternatívájaként is megjelentek már PLA alapú kapszulák.

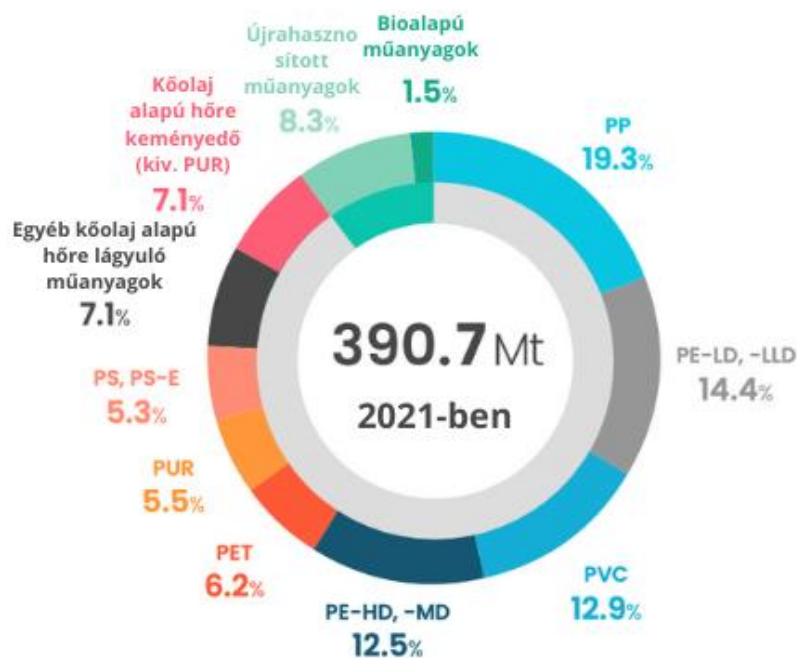
A hagyományos műanyagoknál jól ismert fenntarthatóság növelő módszer az újrahasznosítás. Ekkor a már egyszer feldolgozott alapanyagból készült terméket, vagy selejtet megfelelő tisztítás és válogatás után ledarálják, és újbóli feldolgozásnak vetik alá. Ez az eljárás megfontolandó bioműanyagok eseténben is, mielőtt még azokat komposztálásnak vetjük alá. Ezzel feltehetően tovább csökkenthető az adott termék ökológiai lábnyoma és környezeti hatása, így még inkább zöld alternatívává válhatnának. Ez a gyakorlat azonban napjainkban még nem elterjedt, és viszonylag kevesen foglalkoznak a témával a tudományos életben. Jelen dolgozatban azt is meg fogom vizsgálni, hogy a többszöri újrahasznosítás hogyan hat a PLA tulajdonságaira és környezeti hatására.

2.5.3. Műanyagok környezeti hatása

Annak érdekében, hogy világossá váljon, mi is a probléma a műanyagokkal és miért van szükség változásra a használatukban és hulladékuk kezelésében, érdemes megvizsgálni néhány adatot a felhasznált anyagok és a keletkező hulladék mennyiségével kapcsolatban. A műanyagok környezet-szennyezését három fronton értelmezik a leggyakrabban. Az első a polimer előállításának környezetszennyezése, a második a hulladéklerakáshoz kapcsolódik (szárazföld, vagy tengeri), az utolsó pedig az élővilágra jelentő veszélyeket foglalja magába.

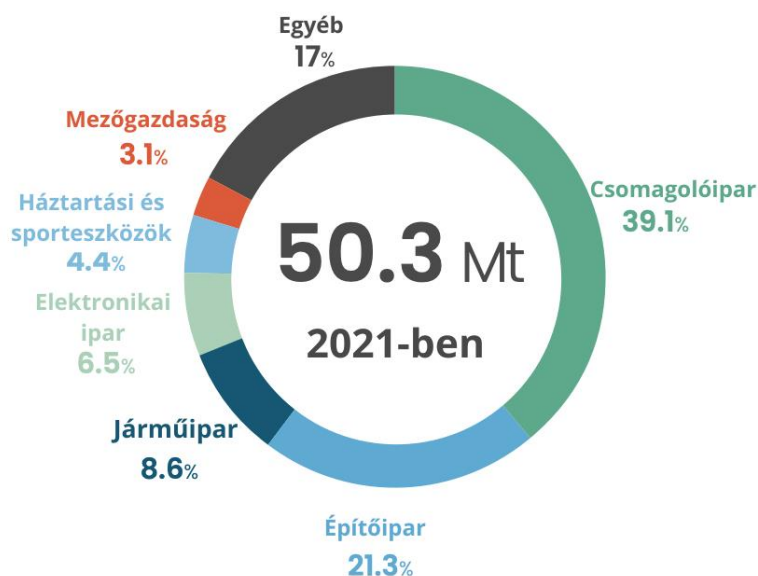
Az Gazdasági Együttműködési és Fejlesztési Szervezet (OECD) (2019) statisztikai adatai alapján 2019-ben a világ üvegházhatású gázkibocsátásának 3,4 %-áért volt felelős a műanyagipar, ez

1,8 milliárd tonna CO₂-nak felel meg. A kibocsátás 90 %-a a polimerek előállításából származik, aminek alapja főként kőolaj.



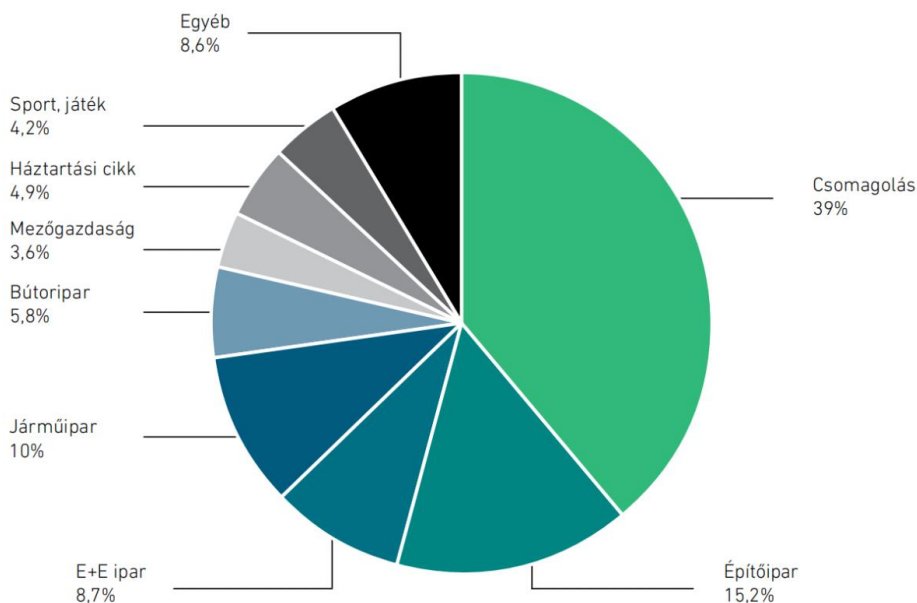
7. Ábra 2021-ben előállított globális műanyag mennyisége és megoszlása a különböző műanyag fajták között
 Forrás: Nova-Institute (2022)

Abban a tekintetben, hogy mennyi az évente megtermelt műanyag mennyiség a Nova-Institute (2022) adatai szolgáltatnak információt. A statisztikák szerint 2021-ben a világ műanyag termelése 390,7 millió tonna volt, ennek 8,3%-át tették ki a fogyasztói használat után újrahasznosított műanyagok (post-consumer plastic, PCR), és 1,5 %-át a biopolimerek. A maradék 90,2 % pedig fosszilis energiahordozókból előállított műanyag volt. (7. Ábra) Európára vetítve az éves össztermelés 57,2 millió tonna, és az újrahasznosított-, valamint bioműanyagok mennyisége 12,4 %. A termelt mennyiség iparágak szerinti megoszlása hasonló európai és világviszonylatban is. Az Európában keletkező 50,3 millió tonna műanyag (ebben a statisztikában nem jelenítették meg az újrahasznosított-, és bioműanyagokat a rendelkezésre álló adatok csekély mennyisége miatt) jelentős részét, 39,1 %-ot a csomagolásra használt anyagok tették ki (8. Ábra). Csomagolásnak tekintjük az ételek és kozmetikumok tárolására és szavatosságának biztosítására szolgáló anyagokat (PET palackok, PP tusfürdős palackok), fóliák, de nagy jelentőséggel bírnak az elektronikai eszközök, bútorok vagy kisebb csomagolási egységek (kartonok) csomagolására használt PE fóliák is.



8. Ábra Európában felhasznált műanyag mennyiség 2021-ben a felhasználás területe szerint
 Forrás: Nova-Institute (2022)

A Magyar Műanyagipari Szövetség adatai szerint 2021-ben Magyarország 1182,6 ezer tonna műanyagot használt fel, melynek meghatározó hányadát, 36 %-át teszik ki poliolefinnek (PE és PP). Felhasználási szektorok szerint Magyarországon is a csomagolóipar használja a legnagyobb mennyiséget, 39%-ot, (9. Ábra) a második pedig az építőipar az éves mennyiség 15,2 %-ával (MMSZ (2022)).



9. Ábra Magyarországon felhasznált műanyag mennyiség 2021-ben a felhasználás területe szerint
 Forrás: (MMSZ, 2022)

A magas számok arra sarkallják a törvényhozó szerveket és ezzel a piaci szereplőket, hogy változás következzen be a műanyagokkal kapcsolatban. Változás alatt érthetünk új előírásokat, amelyek korlátozzák az egyes műanyag fajtákat, vagy terméktípusokat. Előírássá válhat a keletkezett műanyag hulladék kötelezően újrahasznosítandó mennyisége, vagy lerakóba kerülhető maximális

arány. Ilyen törekvést fogalmaz meg a bevezetőben már említett, az Európai Parlament és Tanács (2019) 2019/904 direktívája, ami célul tűzte ki, hogy 2025-től az üdítőitalok tárolására legszélesebb körben alkalmazott PET palackok legalább 25 %-ban újrafeldolgozott műanyagból készüljenek. Ezek az intézkedések kihívást jelentenek a műanyagipari vállalatoknak, akiknek így egyre nagyobb hangsúlyt kell fordítaniuk a termékeik és folyamataik környezeti hatásainak vizsgálatára és értékelésre, valamint ezek fejlesztésére és innovációjára.

Magyarországi példákat nézve több törekvés is létezik a műanyag termékek és hulladék visszacsorítására, amelyek közé tartozik az említett Unió direktívára épülő 301/2021. (VI. 1.) Korm. rendelet az egyes egyszer használatos, valamint egyes egyéb műanyagtermékek forgalomba hozatalának korlátozásáról is. A rendelet értelmében 2021 július 1-jétől tilos az egyszer használatosnak tekintett műanyag termékek (fültisztító pálcika, evőeszköz, tányér, szívószál, italkeverő pálcika és expandált polisztirolból készült ételhordók nagy része, valamint a 15 mikronnál vastagabb falú könnyű műanyag hordtasakok) forgalomba hozatala.

2.6. Műanyagok fenntarthatóságának javítása

Az alábbiakban azokat a módszereket elemeztem, amelyeket a polimertechnológiai kutatások gyakran használnak azzal a céllal, hogy az adott műanyagot fenntarthatóbbá tegyék, csökkentsék annak környezeti hatásait. Nem minden szakirodalom használ azonban törekvéseik igazolására környezeti teljesítményértékelést. Ez alapján összegyűjtöttem a témával foglalkozó aktuális szakirodalmat, és a technológiai megoldások értelmezése mellett, megfigyeltem, hogy az adott kutatás, hogyan értékeli a környezeti hatásokat.

2.6.1. Alapanyag megválasztása

Fontos pont a műanyagok környezeti hatásának meghatározásában, hogy mi a választott kiindulási anyag. A biopolimer gyártók és felhasználók gyakran hivatkoznak arra, hogy ezen anyagok környezeti hatása jóval alacsonyabb, mint a hagyományos polimereké, a kijelentés szakszerű vizsgálata nélkül. Az alábbiakban összevetésre kerül, hogy a „zöldebb” alapanyagok valóban fenntarthatóbb terméket eredményeznek-e.

Morschbacker (2009) szerint számos, hagyományosan kőolaj alapú műanyag előállítható megújuló forrásokból is. Ezek közé tartozik a PE is, amelyet hagyományos úton etilénből állítanak elő, amelyet a kőolaj krakkolása során választanak el. A bio-polietilén (bio-PE) esetében az etilén forrása a főként cukornádból előállított bioetanol. Az ilyen módon nyert etilénből polimerizációval előállított polietilén molekulaszervezete, felépítése és ebből kifolyólag tulajdonságai megegyeznek a hagyományos polietilénével. A polietilénen mellett a leggyakrabban biológiai forrásból előállított hagyományosan fosszilis eredetű polimer a polietilén-tereftalát (PET) . A European Bioplastics (2022) adatai szerint a globális bioműanyag gyártás kapacitásának 14,8 %-át PE és 4,2 %-át PET

teszi ki. Emellett nagy jelentőséggel bír a PLA és a termoplasztikus keményítő, amelyek együttesen a kapacitás 37,9 %-át fedik le. A bioműanyagok jelentőségét mutatja, hogy a becslések szerint 2027-re a kapacitás a 2022-es 2,23 millió tonnáról kb. 6,3 millió tonnára fog emelkedni.

Tsiropoulos és társai (2015) 100 %-ban bioalapú PE és részben bioalapú PET környezeti hatását vizsgálta életciklus-elemzés segítségével. A vizsgált polimereket brazil és indiai természetű cukornádból kivont bioetanolból állították elő. Mindkét anyag esetében vizsgálták a potenciális környezeti hatásokat az előállítás minden szakaszában, az eredményeket pedig a megfelelő kőolaj alapú polimeréhez hasonlították. PE esetében megállapítható volt, hogy a biológiai alapú PE termeléssel csökkenthető az üvegház hatású gázok kibocsátása (közel 140 %-kal) és a nem megújuló forrásból származó energiafelhasználás is 65 %-kal. Az aspektus, ami a rontotta az anyag környezeti tényezőjét a földterületeken emberi fogyasztásra alkalmas élelmiszer helyetti bioetanol termelés, valamint a felhasznált termelésserkentő vegyületek és peszticidek voltak. Hasonló következtetéseket vontak le a PET esetében is. A hatások csökkenése azonban nem volt olyan drasztikus, mint a PE esetében, hiszen a kutatásban vizsgált polimer csak 30 w%-ban volt bioalapú.

2.6.2. Természetes adalékanyagok használata

Az utóbbi években egyre népszerűbb trend a természetes szálak alkalmazása műanyagokban. Ezek általában könnyen elérhető, olcsó anyagok, amelyek bizonyos esetben akár javíthatják a polimer tulajdonságait. Alkalmazásuk célja kettős lehet: természetes szálakat igyekeznek a nem természetes erősítőanyagok (üveg-, és szénzál) kiváltására alkalmazni, vagy töltőanyagként a termék olcsósítására és környezeti lábnyomának csökkentésére. Gyakran használt természetes szálak közé tartozik a kender, len, kókusz, szizál, juta. (Khalid és társai, 2021) Szálak mellett alkalmazhatók egyéb formájú, például szemcsés természetes adalékok is, amelyek erősítésre kevésbé alkalmasak, de a termék árát és környezettudatosságát befolyásolják. Természetes adalékok használatát Tonk (2020) szerint nehezítheti a nedvszívó képességük, mesterséges szálakhoz viszonyított rossz hőállóságuk és gyenge adhéziójuk a polimer mátrixhoz. Ezek a tulajdonságok különösen akkor fontosak, amikor az adott terméknek kifejezetten jó mechanikai tulajdonságokkal kell rendelkeznie. Csomagolásipari alkalmazásokban éppen ezért nagy lehetőség rejlik a biokompozitokban.

Első ránézésre a természetes alapú biokompozitok egyértelműen fenntarthatóbb alternatívának tűnnek, a kőolaj alapú és üvegszál erősítettekhez képest. Ennek validálására és számszerűsítésére többen tettek már kísérletet. Joshi és társai., (2004)Joshi és társai., (2004)Joshi és társai., (2004) több szempontból hasonlították össze természetes szál tartalmú kompozitokat üvegszálak kompozitokkal LCA segítségével. Az említett szempontok közül a legfontosabbak a következők voltak: a természetes szálak előállítása alacsonyabb környezeti hatással jár, mint az üvegszálaké; természetes szál tartalmú kompozitok nagyobb mennyiségű szálat tartalmaznak, így előállításukhoz kevesebb

műanyagra van szükség. A vizsgálat során kimutatható volt, hogy a természetes szálak előállítása akár 5-10-szer kevesebb nem megújuló energiaforrás felhasználásával jár. Ezzel összefüggésben a gyártásból származó CO₂ kibocsátás az üvegszálak esetén 2,04 kgCO₂/kg, nádszálak esetén pedig csupán 0,66 kgCO₂/kg. A természetes szálak sűrűsége jelentősen kisebb az üvegszálénál, ezért adott erősítőanyag térfogat mellett a kompozit alkatrész tömege alacsonyabb, ami előnyt jelenthet autóiipari alkalmazásokban.

Correa és társai (2019) tiszta PP és kenáf szálát tartalmazó PP környezeti hatását hasonlították össze. Elemzésükhöz cradle-to-gate, azaz bölcsőtől kapuig módszert használtak, ami azt jelenti, hogy a termék környezeti teljesítményét az előállítástól a felhasználás kezdetéig követik. Mivel a természetes szálak hozzáadása külön technológiai lépést igényel, ezért annak jelentős energiafelhasználása miatt a kompozit ekvivalens CO₂ kibocsátása 30 w% kenáf tartalom esetén csak 0,9%-kal volt alacsonyabb, mint a tiszta PP kibocsátása. Fontos azonban kiemelni, hogy a szálerősítésű kompozitok gyakran más termék formájában kerülnek felhasználásra, így nem minden esetben optimális a tiszta anyag kiváltására kalkulálni velük. Emellett a kutatás rámutatott annak a jelentőségére is, hogy a szálak gyártásával összefüggésben megjelenő CO₂ kibocsátás jelentős része származik annak szállítmányozásából, ezért környezeti szempontból érdemes lokálisan megtalálható természetes szálakat alkalmazni környezetbarát kompozitokban.

Annak érdekében, hogy a PLA környezeti lábnyoma és ára is eredményesen csökkenthető legyen, olyan természetes töltőanyag keresése szükséges, amely állandó jelleggel nagy mennyiségben rendelkezésre áll és nincs jelentősen hasznosabb felhasználási területe. A Központi Statisztikai Hivatal adatai szerint 2022-ben a magyarországi szántók vetésterületének közel 40 %-án termesztettek kukoricát. Az évente megtermelt kukoricaszemek tömegének Hajdú (2015) szerint közel négyszere a visszamaradó kukoricacsutka. A kukoricacsutkát viszonylag magas fűtőértéke miatt korábban a vidéki lakosság hasznosította tüzelőanyagként. Manapság a betakarítási technológiák fejlődésével a kukoricacsutka visszaforgatásra kerül a termőföldre. Tulajdonságaiból fakadóan azonban számos célra felhasználható lenne. A Cobex Hungária Kft. által előállított és forgalmazott kukoricacsutka darálék alkalmazható takarmányozás céljából, állati alomként vagy adalékanyagként papírgyártás során. Hőre lágyuló műanyagokban történő alkalmazására még nem volt példa a szakirodalomban. Olcsó ára és könnyű elérhetősége miatt érdemes lehet tesztelni biopolimerek adalékanyagként.

2.6.3. Újrahasznosítási módok a termék életciklusa végén

Az alapanyag tudatos megválasztása mellett a műanyag termékek környezeti hatása főként az életciklusuk végén befolyásolható. Attól függően, hogy mi a termék alapanyaga és felhasználási területe, az elérhető legjobb technológia más és más lehet. A lehetőségek közé tartozik a műanyag hulladék tisztítás után történő darálása és újrafeldolgozása (mechanikai újrahasznosítás), a kémiai

úton keresztül zajló lebontás, amely során a makromolekulákból visszkapjuk a kiindulási monomereket, amelyekből polimerizációval ismét új alapanyag keletkezik. Az, hogy milyen kémiai folyamattal kapható vissza a kiindulási monomer, nagyban függ a polimer kémiai szerkezetétől. Mivel a kémiai folyamatok különböznek, így a módszer környezeti hatása is anyagonként változik. Általánosságban elmondható azonban, hogy a kémiai újrahasznosítás energia-, és vegyszerigényes folyamat és ipari alkalmazása még csak kisebb kapacitások mellett megoldott. (Thiounn & Smith, 2020)

Egy Magyarországon is széles körben alkalmazott út a műanyag hulladék elégetése. A legnagyobb mennyiségben használt polimerek fűtőértéke igen magasnak számít, de a módszer környezeti hatása nagy. Égetés során számos mérgező hatású kismolekulájú anyag keletkezik, amelyek megfelelő szűrése elengedhetetlen. (Nagy és Kuti, 2016) Eriksson és Finnveden, (2009) vizsgálták a lakossági hulladék kontrollált égetésének környezeti hatását a hulladék lerakáshoz képest. Magas hatásfokú égetés mellett megvalósítható, hogy az égetési folyamat nettó CO₂ kibocsátása alacsonyabb legyen, mintha a műanyag hulladék lerakásra kerülne.

Biológiailag lebomló polimereknél népszerű út lehet a komposztálás. Komposztálás során nagy szerepet játszik az alkalmazott anyag típusa, a termék geometriája (nagyobb falvastagság mindig lassítja a lebomlást) és az alkalmazott körülmények. PLA esetében. Gioia és társai (2021) összefoglalója szerint a PLA háztartási komposztálási körülmények között nem bontható le rövid idő alatt. Ipari körülmények (60 °C, magas páratartalom) között történő komposztálással azonban közel 120 nap alatt 90 %-os biodegradáció érhető el. Fontos körülmény a komposzt összetétele is, mivel a PLA lebomlása tejsav képződéssel jár, túl magas PLA tartalom a komposzt elsavasodását okozhatja, a savas környezet pedig gátolhatja a lebontási folyamatokat. Cosate de Andrade és társai (2016) LCA segítségével hasonlították össze PLA újrahasznosíthatóságát mechanikai és kémiai úton, valamint komposztálással. A kémiai és mechanikai újrahasznosítás terméke értékes nyersanyag, ami újból polimerizálható, vagy feldolgozható. A komposztálásból azonban nem származik ilyesfajta végtermék, ezért környezeti szempontból ez bizonyult a legkevésbé előnyösnek. A szerzők azonban kihangsúlyozták, hogy azokban az esetekben, amikor nem lehetséges a másik két újrahasznosíthatósági módszer, a komposztálás jó alternatívaként szolgál az égetéssel vagy hulladéklerakóban történő elhelyezéssel szemben.

2.6.4. Mechanikai újrahasznosítás

A műanyagok újrahasznosításának napjainkban talán legelterjedtebb módja a mechanikai újrahasznosítás. Elterjedtségét a technológia egyszerűségének köszönheti, azonban ez a módszer is számos hátránnyal rendelkezik. Ipari környezetben kétféle mechanikai újrahasznosítást különböztethetünk meg. Az első a gyártásközi hulladék visszavezetése a folyamatba. Amennyiben például fröccsöntés során hidegcsatornás alakadó szerszámból kifolyólag minden gyártási ciklusban kelet-

kezik valamilyen melléktermék (elosztócsatornában maradó anyagmennyiség), általános ipari gyakorlat, hogy az darálásra kerül, és adott arányban hozzákeverik a kiindulási alapanyaghoz. Ez legtöbbször néhány w%-os arányt jelent. A műanyag feldolgozás során magas hőmérsékletnek és nagy nyírásnak van kitéve, melynek következtében az hosszúláncú óriásmolekulák degradálódhatnak, rövidebb láncokat eredményezve. Ez a folyamat jelentősen befolyásolhatja a műanyagok feldolgozás szempontjából egyik legfontosabb tulajdonságát, a viszkozitást. A polimer ömledék viszkozitása meghatározza a feldolgozás körülményeit, ettől függ a fröccsöntés vagy extrúzió sebessége és így a termék minőége. A mechanikai újrafeldolgozás során az anyag nem ömledékállapotú tulajdonságai, pl. mechanikai tulajdonságok, nem változnak jelentősen, az ömledék viszkozitása azonban már egyszeri újrafeldolgozás hatására is eltérhet, ami megnehezíti a feldolgozási folyamatokat. Mindig állandó mennyiségű és minőségű regranulátum így nem jelent problémát. Briassoulis és társai (2021) vizsgálták az úgynevezett post-consumer recycled (PCR) műanyag újrahasznosításának problémáit. Ennél a módszernél a már egyszer termék formában felhasznált műanyagot szelektív hulladékgyűjtés segítségével nyerik vissza. Ehhez a hulladékot tisztítani, válogatni és darálni szükséges. Mivel ebben a válogatott műanyagfolyamban különböző termékek találhatóak, amelyek más-más felhasználási móddal rendelkeznek, ezért az azokban található adalékanyagok is sokfélék. Ez, valamint annak a bizonytalansága, hogy az adott termék milyen hosszú életciklussal és ebből fakadó degradációval rendelkezik, nagyon megnehezíti, az állandó minőségű regranulátum biztosítását, pedig ez egyértelmű igény mind a gyártók, mind pedig a piac részéről. További problémát jelenthet a hulladékkezelési rendszer hiányosságaiból adódó műanyag mennyiségi kérdések, valamint a regranulátumok megfelelő árának biztosítása.

Számos szakirodalmi cikk foglalkozik az újrahasznosítás kérdéskörével. Schyns és Shaver, (2021) több polimer mechanikai újrahasznosíthatóságát is értékelte. Azért is fontos minden polimer típus esetén más úton megy végbe a degradáció, így más mértékben változnak az anyag tulajdonságai is. PET esetében körülményektől függően, láncszakadás és enyhe térhálósodás is végbemehet. (La Mantia és Vinci (1994) 5 ciklus újrahasznosításnak vetett alá használt PET palackokat. Azt tapasztalták, hogy már egy ciklus hatására is jelentősen változnak a mechanikai tulajdonságok. A szakítószilárdság 36 MPa-ról, 23 MPa-ra csökkent, az ütésállóság 1,55 kJ/m²-ről 1,4 majd 1,3 kJ/m²-ra romlott. A szakadási nyúlás értékek, amik PET palackok fűvésánál fontos tulajdonságnak számítanak, közel 40 %-os csökkentést mutattak. Az eredményekből látható, hogy a PET teljes mértékben újrafeldolgozható, azonban minden esetben számolni kell a tulajdonságok megváltozásával.

Schyns és Shaver (2021) hasonló eredményekről számoltak be PE és PP. Feldolgozás során degradáció következik be, ami a feldolgozhatóság és a mechanikai tulajdonságok romlásához vezet. Ennek ellensúlyozására különböző stabilizátorok alkalmazhatók, amik meggátolják a káros folyamatokat. Míg a mechanikai újrahasznosítás technológiai nehézségeiről és ezek lehetséges megoldá-

sairól számos szakirodalmi cikk létezik, a módszerrel járó környezeti hatásokról már kevesebb információ található. Azok az esetek pedig igen ritkák, ahol egyszerre említik a technológiai és környezetmenedzsment szempontokat.

Briassoulis és munkatársai (2021) biopolimerek potenciális életciklus végi lehetőségeit vizsgálta technológiai és gazdasági szempontból. Véleményük szerint, abban az esetben, ha a keletkező hulladékfolyamban a PLA mennyisége eléri azt a szintet, amely felett pénzügyi szempontból is érdemes a szeparált gyűjtés, akkor a mechanikai újrahasznosítás az egyik legjobb életciklus végi opció lehet. PLA újrahasznosítását illetően technikai akadály lehet a PLA hidrofilitása. Feldolgozás során a polimer által megkötött víz növeli a hidrolízis útján végbemenő degradációt, ami a tulajdonságok nagyobb mértékű romlásához, és alacsony viszkozitáshoz vezet, megnehezítve a feldolgozást. Az ilyesfajta degradáció nagymértékben megelőzhető az alapanyag megfelelő szárításával. Hasonló eredményre jutottak Hopmann és társai (2015), akik 10, 30, 50 és 100 %-ban újrahasznosított PLA-t tartalmazó keverékek tulajdonságait vizsgálták. Eredményeik alapján a minták Young modulusa nem változott az újrahasznosítás hatására, a rugalmas tulajdonságaik viszont romlottak. Nagy újrahasznosított PLA tartalom mellett kimutatható volt a molekulatömeg csökkenése is, ami a viszkozitás csökkenéséhez vezetett. Eredményeik alapján látható, hogy a PLA egyszer újrahasznosítható mechanikai úton. Azt azonban a cikk nem vizsgálta, hogy feldolgozás szempontjából milyen nehézségek adódnak, és hogyan megoldható technológiai szempontból az újrahasznosított anyag részleges visszavezetése, valamint, hogy környezeti és költségszempontból milyen hatásai lehetnek az újrahasznosításnak.

3. ELVÉGZETT KÍSÉRLETEK ÉS ALKALMAZOTT MÓDSZEREK

A munkám során politejsav (PLA) mechanikai újrahasznosítását és természetes töltőanyaggal való társítását értékeltem környezeti szempontból. Az értékeléshez magam állítottam elő a mintákat, amelyeken mechanikai és szerkezeti tulajdonságokra irányuló vizsgálatokat is végeztem, annak érdekében, hogy az adott anyag környezeti teljesítménye, az elérhető tulajdonságok figyelembevételével történhessen. Az alábbiakban bemutatom az alkalmazott alapanyagokat és gyártási technológiákat, a mintákon elvégzett vizsgálatokat, valamint az alkalmazott környezeti teljesítmény értékelő módszerek használatát. A különböző módszereket egy általam meghatározott szempontrendszer szerint hasonlítottam össze, amelyet igyekeztem úgy kialakítani, hogy segítsen rámutatni az módszerek előnyeire és hátrányaira is.

3.1. Felhasznált anyagok, mintakészítés és elvégzett vizsgálatok

A minták előállításának fő alapanyagaként a NatureWorks Ltd. Ingeo™ Biopolymer 3025 D típusú politejsavat használtam. Ez a típus kifejezetten fröccsöntött termékek előállítására alkalmas. Első lépésként az említett típusú PLA-ból fröccsöntés segítségével állítottam elő MSZ EN ISO 527 1A szabványnak megfelelő próbatesteket, amelyeken mérhetők az anyag jellemzői. A mechanikai újrahasznosítás modellezéséhez a fröccsöntött próbatesteket ledaráltam, majd a tiszta PLA és darált PLA 50-50 w%-os keverékéből készítettem fröccsöntött próbatesteket. A fröccsöntést Arburg 570 S típusú 200 tonna záróerejű hidraulikus fröccsöntőgép segítségével végeztem el. A PLA-t feldolgozás előtt legalább 8 órán keresztül 80 °C-on szárítottam, a nedvességtartalom eltávolítása érdekében.

A biokompozit előállításához a Cobex Hungária Kft. által forgalmazott FEEDS 300/100 kukoricacsutka örleményt használtam fel. A termék a kukorica csutkájának legfelső részének darálásával és méret szerinti szitálásával készül, a szemcsék mérete 180 és 1000 µm között mozog. A természetes adalékanyagok polimer mátrixban történő eloszlataása leggyakrabban alkalmazott módszer az extrúzió. Ennek megfelelően a kukoricacsutka darálékot LabTech LTE26-48 típusú kétcsigás extruder segítségével kevertem a PLA mátrixhoz 10 w% arányban. Az extrúzió eredménye a kukorica tartalmú kompaund volt, ami már felhasználható volt a fröccsöntés alapanyagaként. Az extrúzió és fröccsöntés előtt minden alapanyagot legalább 8 órán keresztül 80°C-on szárítottam. Minden alapanyagot, gyártó és mérőberendezést munkahelyem, a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft. bocsátott rendelkezésemre.

A gyártott anyagok tulajdonságait több módszer segítségével vizsgáltam. A műanyagok elemzésére gyakran alkalmazott folyásindexet (Melt flow rate, MFR) INSTRON MF20 folyásmérő segítségével mértem. A mechanikai tulajdonságok vizsgálatát az MSZ EN ISO 527-1,2 szabvány sze-

rint végeztem, Instron 8850 típusú szakítógéppel segítségével. Az erőt 1%-os hibahatárú 5 kN-os erőmérőcellával mértem.

3.2. Környezeti teljesítményértékelő módszerek

Az újrahasznosított politejsav és a kukoricacsutka tartalmú politejsav alapanyagokat és gyártásokat három környezeti teljesítmény értékelésére szolgáló, egyszerűbb módszerrel értékeltem, amelyeket irodalmi kutatómunkám során választottam ki. Öko-mérlegek segítségével feltérképeztem a folyamatok anyag- és energiamérlegeit, a környezetközpontú irányítási rendszer (KIR) hatásértékelési eljárásával sorra vettem a folyamatok során fellépő környezeti hatásokat, majd öko-hatékonyság értékelésével megvizsgáltam, hogy az egyes lépések és anyagok számszerűsítetten milyen költségeket és környezeti hatásokat vonnak maguk után.

A módszerekkel egyik célom annak a kimutatása, hogy egy műanyag feldolgozással foglalkozó vállalatnak milyen környezeti hatásai lehetnek, és ezeket hogyan tudja egyszerűen feltérképezni. Mivel a bonyolultabb környezeti teljesítmény értékelő módszerek nagyobb ráfordítást igényelnek, ezért igyekeztem egyszerűbb módszereket választani. Másik célom pedig a korábban leírt fenntartható vagy újrahasznosított alapanyagból, illetve töltőanyaggal történő termékgyártás esetlegesen alacsonyabb környezeti hatásainak kimutatása volt. A módszerek eltérő mértékben bizonyultak alkalmasak a két cél elérésére. A későbbiekben bemutatásra kerülő eredmények és szempontrendszer alapján pedig értékelni tudtam, hogy adott esetben mely módszerek lehetnek a legalkalmasabbak műanyagok feldolgozásának környezeti hatásának értékelésére.

A módszerek minél hatékonyabb összehasonlításának érdekében meghatároztam a legfontosabb szempontokat, ami alapján az alkalmazott módszereket a bemutatott esetpéldák szerint értékelni érdemes. Ezek a szempontok lehetnek a későbbiekben mérvadóak egy műanyagipari vállalat esetén, aki a fenti módszerek valamelyikét használná a folyamatainak elemzésére.

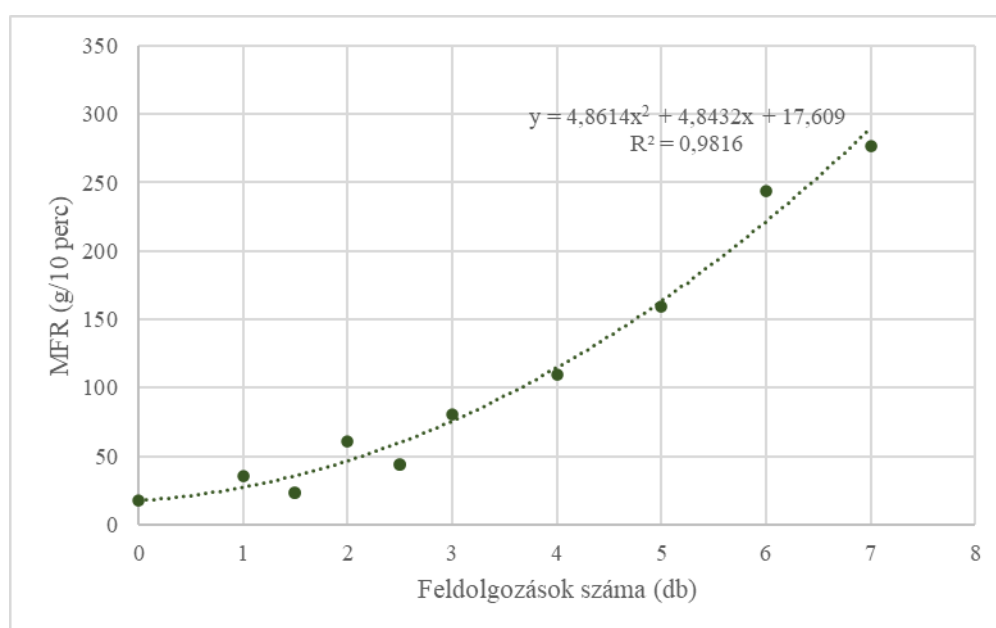
4. EREDMÉNYEK ÉS KIÉRTÉKELÉSÜK

4.1. Anyagvizsgálatok eredményeinek rövid összefoglalása

Az alábbiakban röviden összefoglaltam az PLA ömledék viszkozitásának és mechanikai tulajdonságainak változását az újrahasznosított anyagtartalom és a kukoricacsutka darálék alkalmazásának hatására. Ezzel igyekeztem szemléltetni azt, hogy az újrahasznosítás és természetes adalékanyag hozzáadása technológiai szempontból is megvalósítható, ezért a későbbiekben érdemes annak környezeti hatásával foglalkozni.

4.1.1. Újrahasznosított anyag használatának hatása a termék tulajdonságaira

A mechanikai vizsgálatok mellett a polimerek minősítésének egyik közkezdvelt módja a folyásindex (Melt Flow Rate - MFR) meghatározása. Ez egy egyszerű mérés technika, melynek során azt vizsgáljuk, hogy adott hőmérsékletre fűtött kapillárison adott tömegű terhelés hatására adott idő alatt milyen mennyiségű anyag folyik át g/10 perc mértékegységben megadva. Az MFR érték közelítőleg jól tudja jellemezni a polimer folyási tulajdonságait és segítségével behatárolható, hogy az adott anyag milyen feldolgozási technológiákhoz használható leginkább. Kísérleteim során a PLA-t 9-szer hasznosítottam újra mechanikai úton, annak érdekében, hogy az anyag tulajdonságai szélesebb körben nyomon követhetők legyenek.



10. Ábra MFR értékek az újrafeldolgozási körök számának függvényében
Saját ábra

Ahogy az a 10. Ábrán is látható a feldolgozások számával nőtt az MFR érték, ami azt jelenti, hogy a polimer ömledék állapotban mérhető viszkozitása jelentősen csökken. Az 50 w%-ban 1-szer újrahasznosított PLA tartalmú terméket is vizsgáltam, ami az ábrán a 1 és 2 feldolgozás között található. A feldolgozási körök sorába illesztve elmondható, hogy az MFR értéke a granulátuméhoz

képest 18,05 g/10percről 35,48 g/10 percre változott az első feldolgozás hatására, valamint 23,10 g/10 percrek adódott az újrahasznosított tartalom hozzákeverésével. Az MFR növekedését a feldolgozás során jelentkező magas hőmérséklet és nyírás hatására bekövetkező degradáció okozza. (Zenkiewicz és társai, 2009) A degradáció és ezzel az MFR változása azonban nem volt annyira jelentős, hogy hatással legyen fröccsöntés paramétereire, ugyanis az 50 w% újrahasznosított PLA tartalmú minták ugyanazon beállítások mellett előállíthatók voltak, mint a granulátumból történő gyártás esetén.

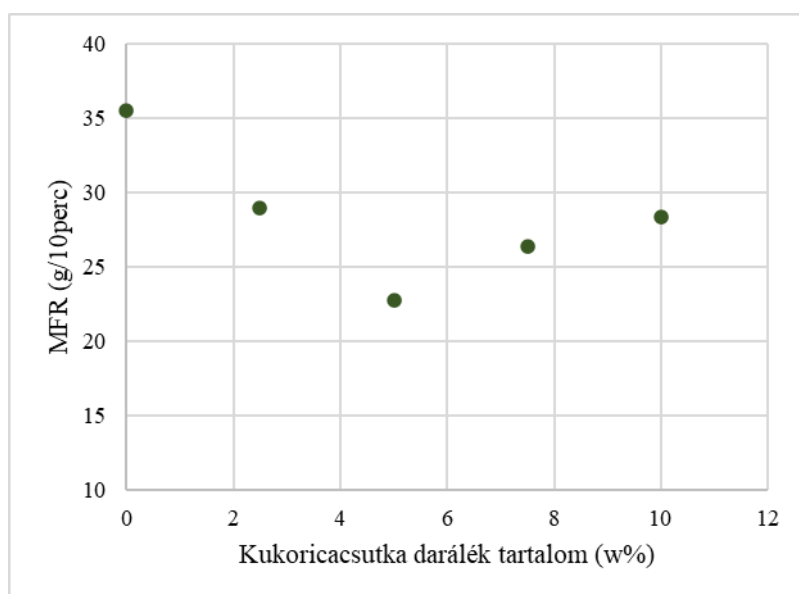
2. Táblázat PLA újrasznosításának hatása a mechanikai tulajdonságokra
Saját táblázat

	Szakítószilárdság (MPa)	Szakadási nyúlás (%)	Modulus (GPa)
PLA (nem újrafeldolgozott)	53,17	1,97	3,44
PLA/RePLA (granulátum és 1-szer újrafeldolgozott)	47,82	3,01	3,70
RePLA_2 (2-szer újrafeldolgozott)	51,47	1,98	3,44
RePLA_4 (4-szer újrafeldolgozott)	49,01	2,09	3,42
RePLA_7 (7-szer újrafeldolgozott)	37,88	1,17	3,46
RePLA_9 (9-szer újrafeldolgozott)	29,79	0,94	3,33

Az 2. Táblázat foglalja össze a szakítóvizsgálatok eredményeit. Hasonló következtetések vonhatók le, mint az előző esetben. A részben újrahasznosított tartalommal rendelkező minták közel hasonló tulajdonságokkal rendelkeznek, mint a tiszta PLA, valamint a teljes mértékben 2-szer újrahasznosított. Az is jól látható, hogy a 7-szer és 9-szer újrahasznosított anyag szakítószilárdsága és szakadási nyúlása jelentősen alacsonyabb, mint a többi esetben. A vizsgálatok alapján kijelenthető, hogy 50 w% újrahasznosított anyagtartalom nem befolyásolja jelentősen a termék feldolgozását és tulajdonságait. Az eredmények alátámaszthatók lehetnének még a termikus tulajdonságok vizsgálatával és a degradációs mechanizmusok nyomonkövetésével.

4.1.2. Kukoricacsutka darálék alkalmazásának hatása a termék tulajdonságaira

A kukoricacsutka tartalom a 11. Ábra alapján csökkentette a termék MFR értékét a tiszta PLA-hoz képest. A különböző adalékanyag mennyiségek azonban nem voltak jelentős változással az MFR-re, mindegyik 22,7 és 28,9 g/10 perc között mozgott. Ebben az esetben is elmondható, hogy a kukoricacsutka darálék nem befolyásolta jelentősen a PLA feldolgozhatóságát. A fröccsöntés során a fűtés hőmérsékletprofilja 25 °C-kal alacsonyabb volt, mint a tiszta PLA esetén.



11. Ábra MFR értékek a kukoricacsutka darálék tartalom függvényében
Saját ábra

3. Táblázat Kukoricacsutka darálék alkalmazásának hatása a PLA mechanikai tulajdonságaira
Saját táblázat

	Szakítószilárdság (MPa)	Szakadási nyúlás (%)	Modulus (GPa)
PLA	53,17	1,97	3,44
PLA/Kukorica_2,5	49,14	2,09	3,88
PLA/Kukorica_5	47,10	2,26	3,53
PLA/Kukorica_7,5	46,46	1,75	4,14
PLA/Kukorica_10	45,19	1,89	3,78

A mechanikai tulajdonságok alakulását az 3. Táblázat tartalmazza. A szakítószilárdság csökken a természetes adalékanyag mennyiségének növelésével. A szakadási nyúlás értékek nagyjából hasonlóan alacsonyak minden esetben, az minták ridegen szakadtak. A minták modulusa nőtt a kukoricacsutka tartalom növekedésével, ami szintén egyre ridegebb viselkedésre utal. Összességében elmondható, hogy a kukoricacsutka darálék erősítőanyagként nem alkalmazható a PLA-ban. Érdekes azonban megvizsgálni, hogy a termék környezeti hatásának és árának csökkentésére milyen mértékben alkalmas.

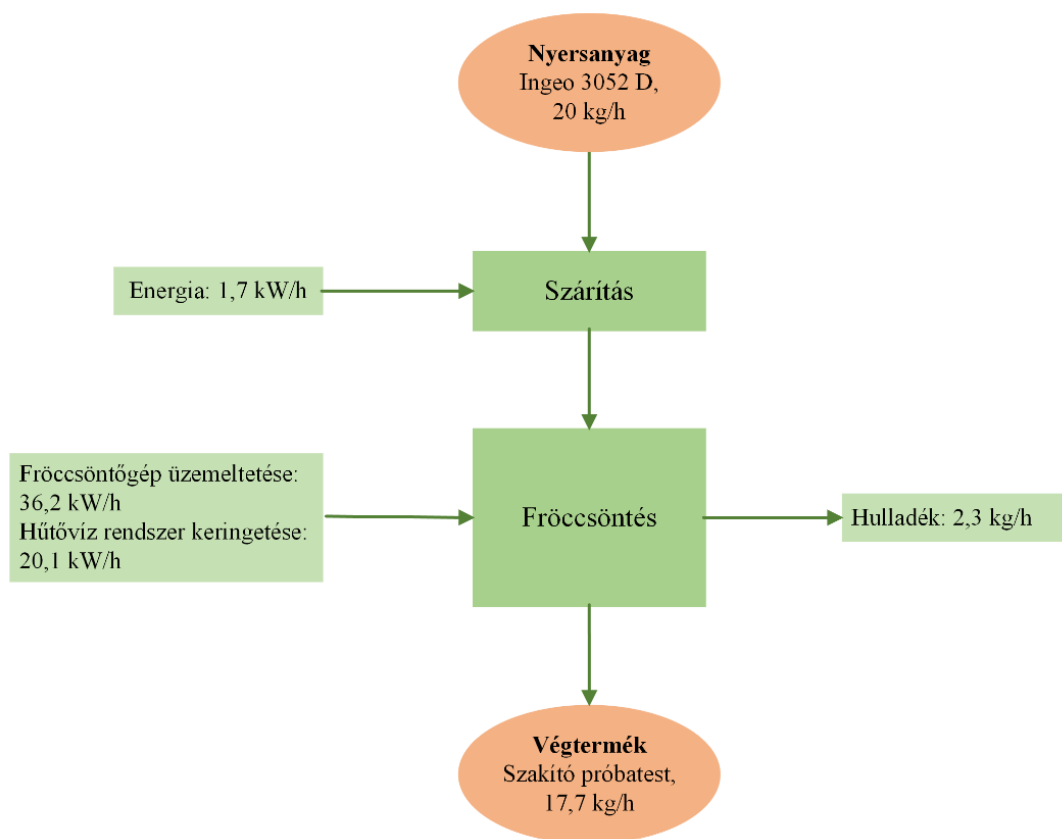
4.2. Öko-mérleg

Öko-mérleg készítésénél az első lépés minden esetben a vizsgálat tárgyának és céljának meghatározása. Ez jelen esetben a fröccsöntött PLA termékek előállítási folyamatának elemzését jelentette. Három különböző folyamatot vizsgáltam: elsőként a 100 w% virgin PLA-ból fröccsöntött termék előállítását, majd 50 w% virgin és 50 w% újrahasznosított PLA-ból készített terméket, harmadikként pedig PLA és kukoricacsutka darálék 90/10 tömegarányú keverékének előállítását, és ebből ugyancsak fröccsöntéssel gyártott termék előállításának folyamatát. Célom az volt, hogy felderítsem, hogy az egyes folyamatok milyen részfolyamatokból tevődnek össze, és az egyes lépések milyen nyersanyag és energiaigénnyel rendelkeznek. A célok kitűzését a rendszer határainak meghatározása követte. A folyamatokat az alapanyagok beérkezésétől a késztermékekig követtem. Az anyag és energiaáramokat pedig óránkénti mértékegységben adtam meg, három napnyi gyártásmodellezés során végzett adatgyűjtés alapján. A vizsgált folyamatokat részlépésekre bontottam, amelyeket külön ábrázoltam, minden lépéshez megadva az ott felhasznált anyagmennyiséget, elektromos áramot és keletkező hulladékot.

A kezdeti adatokat a Bay Zoltán Kutatóközpont biopolimerek tulajdonságait vizsgáló kísérlet-sorozathoz történő mintagyártásból nyertem ki. Mivel ebben az esetben nem a minél nagyobb megtermelt mennyiség volt a cél, így a folyamatok a valós gyártási körülményekhez képest jóval kevesebb nyersanyagot és arányaiban sokkal több energiát használnak fel. A gyártott termék MSZ EN ISO 527 1A szabvány szerinti próbatest volt, amelynek nagy falvastagsága (4 mm) lassítja a fröccsöntés hűtési lépését, így a folyamat ciklusidejét is jelentősen növeli. A vizsgált időintervallumban az óránként fröccsöntéssel feldolgozott anyagmennyiség 4,46 kg volt, ami ipari körülmények között rendkívül alacsonynak számít, viszont a gépek üzemeltetéséhez szükséges energia kifejezetten magas alacsony termelés mellett is, a feldolgozott anyag mennyiségével pedig nem egyenes arányban nő. Annak érdekében, hogy a későbbiekben a kalkulált környezeti hatások reális képet adjanak egy gyártási folyamatról és valóban elemezhető legyen, hogy a mechanikai újrahasznosítás és természetes töltőanyag használata fenntarthatóbb műanyag terméket eredményez-e, néhány becslést alkalmaztam a mérlegek felállításakor. Először is, több potenciális gyártási szituációt állítottam fel, melyek közül az első a valójában felhasznált anyagmennyiség (4,46 kg/h) volt. Ezen kívül vizsgáltam 10, 15 és 20 kg/h nyersanyagfelhasználással bíró gyártást is, ami közelebb áll a valós gyártási körülményekhez fröccsöntéssel gyártott termékek előállításánál. A felhasznált villamosenergia kiindulási alapját is a valójában mért mennyiség adta, és a növekvő gyártott mennyiséghez további 5, 10 és 15% többletfelhasználást vettem.

Ezeket a becsléseket alapulva a teljes mértékben PLA granulátumból történő fröccsöntés folyamata az 12. Ábrán látható. A beérkezett alapanyagot feldolgozás előtt a PLA hidrofíliája miatt szárítani szükséges, annak érdekében, hogy a feldolgozás során ne következzen be hidrolízis,

ami jelentősen rontja a termék minőségét. A szárítást szárítószekrény segítségével végeztem, amit ipari gyakorlatban folyamatos, a fröccsöntőgéppel adagolótölcsérére szerelhető szárítófeltéttel szokás helyettesíteni. A szárítást azonnal a fröccsöntés követi, amelyhez óránként 36,2 kW energiafelhasználás tartozik. Ez a folyamat legenergiaigényesebb része, hiszen a fröccsöntőgép üzemelése során nagy tömegeket mozgat meg és magas hőmérsékletre fűtött elemekkel rendelkezik, valamint a polimer megömlesztéséhez szükséges csiga forgatása is nagy befektetett energiát igényel. A gyártás helyszínénél szolgáló csarnoképület saját vízűtő körrel rendelkezik, amely zárt rendszernek tekinthető: állandó mennyiségű víz kering körbe egy elosztórendszeren, amely egy temperálóegységgel is rendelkezik, ami biztosítani tudja az állandó beállított hűtővíz hőmérsékletet. Ezért ennek használata tényleges vízfogyasztással és szennyvíztermeléssel nem jár, hanem a rendszer működtetéséhez szükséges szivattyú és hőcserélő energiafogyasztásával jellemezhető.



12. Ábra PLA fröccsöntésének anyag- és energiamérlege
Saját ábra

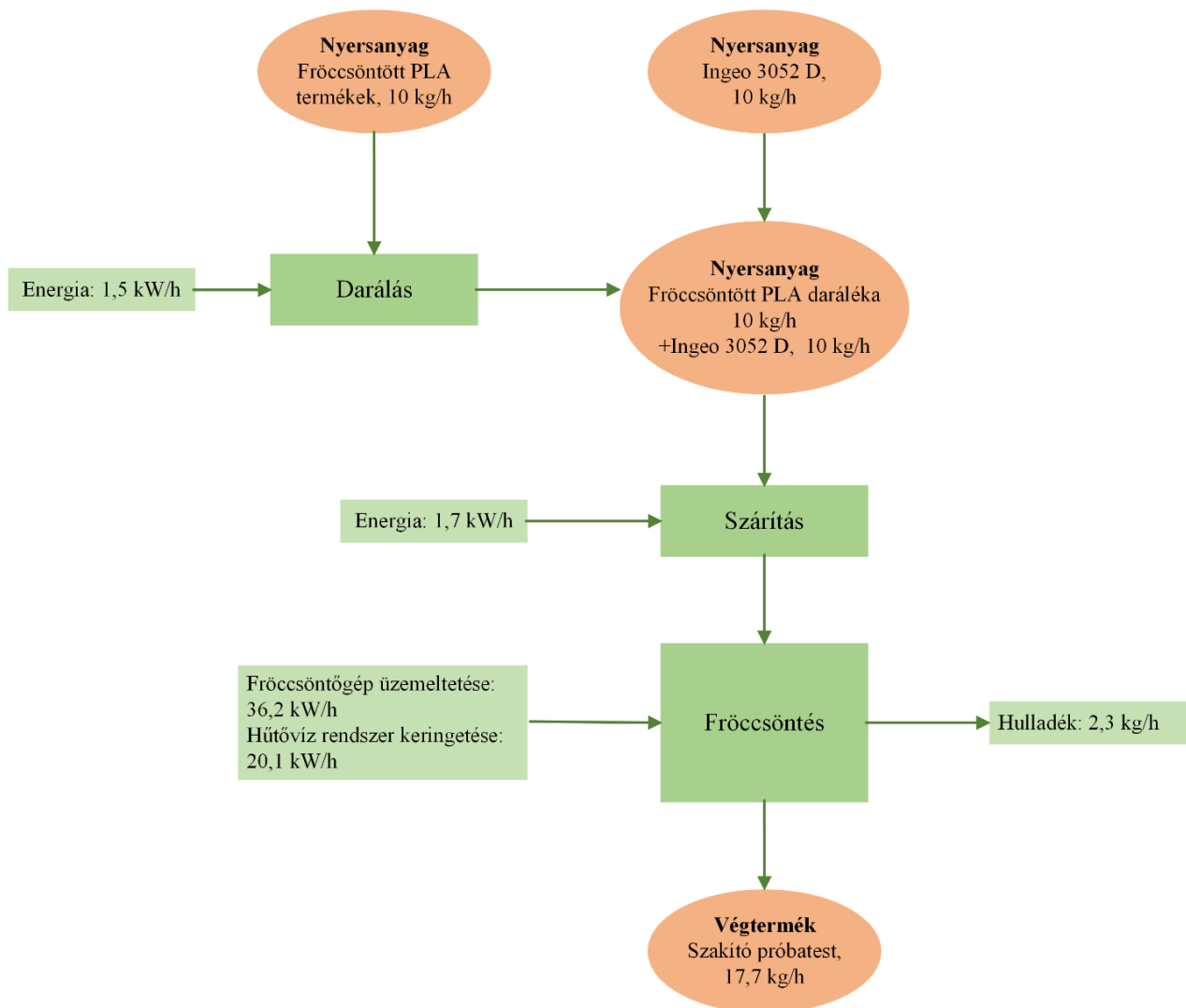
A tiszta PLA-ból történő fröccsöntés a folyamat mérlege szerint a termelés óránként 2,3 kg hulladékkal jár, ami a selejtes termékeket és a minden gyártási ciklusban keletkező elosztócsatornákat takarja. Mivel a gyártáshoz egyéb segédanyag (pl formaleválasztó) csupán minimális mennyiségben használatos, ezért ennek megjelenítését elhanyagoltam, de egy valódi gyártási környezetben több más hulladékforrás jelentkezhetne.

Összességében elmondható, hogy az egyszerű fröccsöntött termék gyártása könnyen értelmezhető, rövid folyamat. Ipari körülmények között valószínűsíthetően tartalmazna még egy csomagolási és raktározási lépést is. Jelen formájában óránként 20 kg kiindulási termékből 17,7 kg végtermék és 2,3 kg hulladék keletkezik. A termék előállítása 58 kW/h felhasználásával jár óránként, ami 3,27 kW/h jelent előállított termék kilogrammonként.

Az 50 w%-ban újrahasznosított PLA-t tartalmazó termék előállításának lépései és mérlege a 13. Ábrán látható. Ennél a folyamatnál olyan, jelen esetben elképzelt alaphelyzetet vázoltam fel, ami-ben egy adott műanyagfeldolgozó vállalat egyik gyártófolyamatában keletkezett gyártásközi hulladékát egy másik termék előállításának részalapanyagként használja fel. Mivel az eredeti folyamatban előállított mennyiségű termék megtermeléséhez mindenképpen szükséges a később hulladékká váló alapanyag betáplálása is, ezért a hulladék másik folyamatba történő átvezetése gyakorlatilag csak az előkészítés (darálás) költségbe kerül.

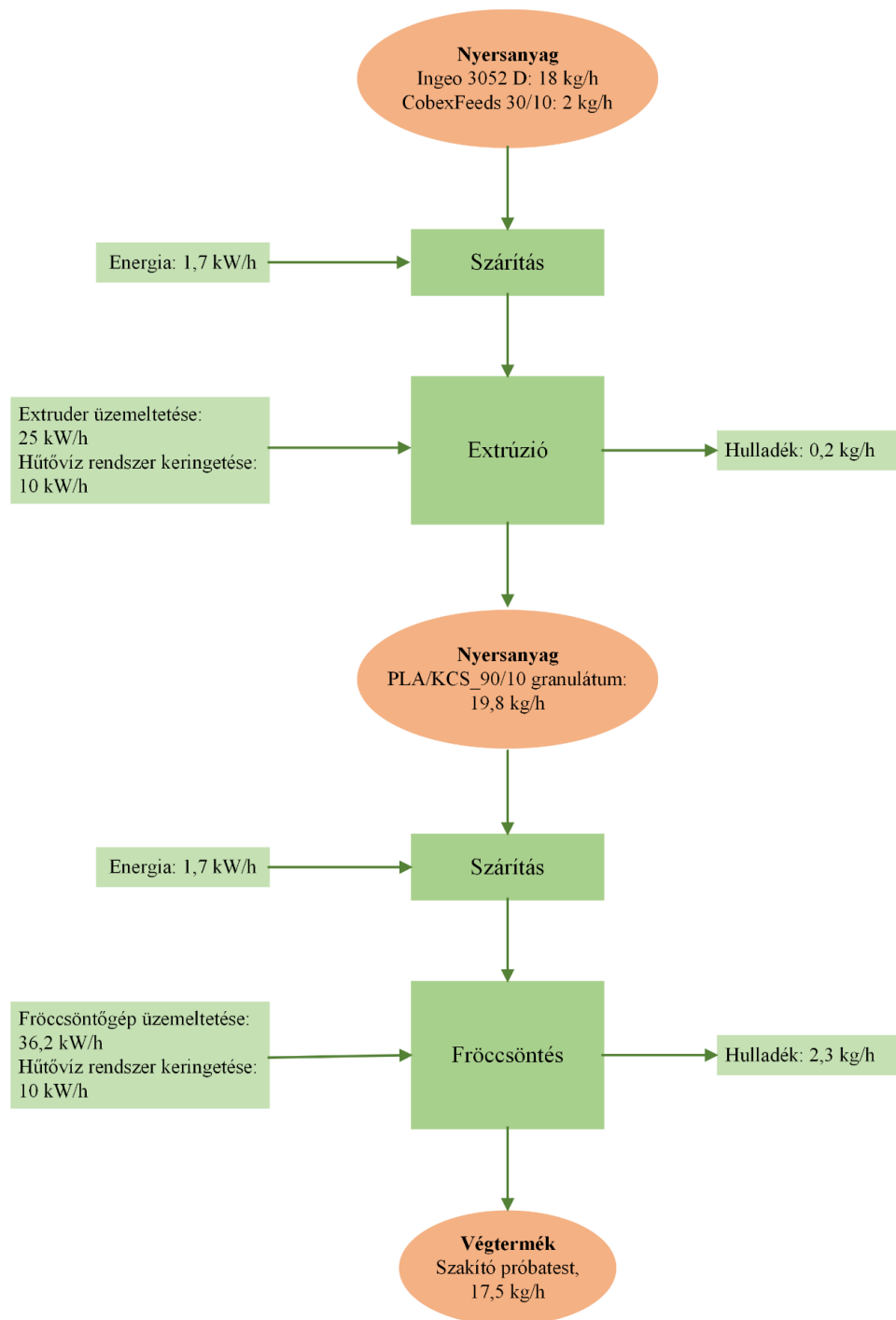
A mechanikai vizsgálatok eredményei (4.1.1 fejezet) és a szakirodalom is alátámasztja, hogy a gyártásközi hulladék visszaforgatható a gyártási folyamatba ilyen mennyiségben. Az energiamérlegben és gyártási folyamatban nem következett be nagy változás a korábbiakhoz képest. A legnagyobb változást a korábbi gyártási folyamatokból hulladékként keletkező fröccsöntött PLA jelenti, ami a vizsgált folyamatban már nyersanyagként szerepel. Újrafeldolgozás előtt a fröccsöntött selejtes termékeket és elosztócsatornákat darálni szükséges, hogy fröccsöntés szempontjából alkalmas alapanyagként bizonyuljanak. Így egy darálási lépés közbeiktatása után a folyamat gyakorlatilag megegyezik az előzőekben bemutatottal. Az alapanyag feldolgozását szárítás előzi meg, majd pedig fröccsöntés következik. A keletkező hulladék aránya is azonos az előzőekben vizsgáltakkal, mivel a darálás nem jár kimutatható mennyiségű hulladék keletkezésével.

A folyamatban szereplő anyag- és energiaáramok hasonlóan alakulnak az előző esethez, csupán a darálásból származó áramfelvétellel kell őket korrigálni. Így 20 kg kiindulási anyagból 17,7 kg termék és 2,3 kg hulladék keletkezik óránként. A folyamat energiafogyasztása 59,5 kW/h, ami 3,36 kW/kg terméknek felel meg



13. Ábra PLA mechanikai újrahasznosításának anyag- és energiamérlege
Saját ábra

Harmadik lépésként a kukoricacsutka daralékot tartalmazó kompozit előállításának folyamatát vizsgáltam. A kevert anyag előállításával elsődleges célom egy potenciálisan olcsóbb és környezetbarátabb termék előállítása volt. Az adalékanyag megfelelő elkeverésének érdekében a fröccsöntés előtt egy extrúziós lépés közbeiktatására volt szükség. Az 14. Ábrán látható, hogy az extrúzió rendkívül energiaigényes folyamatnak számít, így beépítése a folyamatba komoly költségeket vonhat maga után. Ebben az esetben az áramfogyasztás költségéből és a kukoricacsutka PLA-nál alacsonyabb árából származó megtakarításból alakul ki a végső költség.



14. Ábra PLA és kukoricacsutka darálék keverékének előállításának anyag- és energiamérlege
Saját ábra

Látható, hogy az extrúzió óránként 0,2 kg anyagvesztéssel is jár, így az anyagmérleg szerint a gyártás 20 kg/h kiindulási anyagból indulva 17,5 kg/h terméket eredményez, összesen 2,5 kg/h hulladék mellett. Az energiamérleg minden gyártási lépést figyelembe véve 84,6 kW egy óra termelésre. Az energiamérleg felállításánál feltételeztem, hogy az extruder és a fröccsöntőgép egyszerre használják a hűtővízrendszert, így az annak üzemeltetéséhez szükséges áram megoszlik a két gép között. Gyártott termék kilogrammonkénti mennyiségére vetítve az energiaigény 4,84 kW/h.

A három termékgyártási folyamat mérlegeinek legfontosabb értékeit az alábbi táblázatban foglaltam össze. A táblázat adatai alapján kimondható, hogy az újrahasznosított PLA használata nem jár jelentősen nagyobb energiafogyasztással, ellenben a kiindulási anyagszükségletet a felére csökkenthető, ha a feldolgozatlan PLA-t már feldolgozottal helyettesítjük. A kukoricacsutka darálék alkalmazása jelentősen megnöveli a gyártás energiaigényét, ami komoly költséggel és környezeti terheléssel járhat. Ennek számszerűsítésére azonban a módszer nem biztosít lehetőséget.

4. Táblázat A folyamatok mérlegeinek összefoglalása
Saját táblázat

	PLA	PLA-RePLA 50/50 w%	PLA- Kukoricacsutka 90/10 w%
Bemenő anyagáram (kg/h)	20	10 +10	18 + 2
Kimenő anyagáram, termék (kg/h)	17,7	17,7	17,5
Kimenő anyagáram, hulladék (kg/h)	2,3	2,3	2,5
Felhasznált energia óránként (kW/h)	58	59,5	84,6
Felhasznált energia a termék tömegére vonatkozóan (kW/kg termék)	3,27	3,36	4,84

Az öko-mérlegek készítése alkalmas volt a gyártási folyamatok lépéseinek tisztázására. Elkészítésükkel feltárható, hogy melyik részfolyamatnak milyen bemeneti és kimeneti anyagai vannak, és hogy a termék előállításához mennyi energiára van szükség. Könnyen alkalmazható módszer, amely gyors képet adhat arról, hogy hol jelentkezik túlzottan nagy fogyasztás vagy hulladékmennyiség. Annak számszerűsítésére, hogy a műanyag termék fenntarthatóságának javítását célzó módszerek környezeti és költség szempontból mennyire hatékonyak, más módszerek alkalmazása is szükséges.

4.1. Környezetközpontú irányítási rendszer hatásértékelési eljárása

Az eljárás alapjait az ISO 14001 szabvány adja, ami kimondja, hogy az hatásértékelést végző szervezetnek meg kell határoznia a tevékenységeiből, termékeiből vagy szolgáltatásaiból adódó környezeti tényezőket, majd ezek közül a jelentőseket kell kiválasztania egy pontrendszer alapján. A lehetséges pontszámok 0; 1; 2 és 3, az összpontszámot pedig a különböző kategóriákra kapott pontok szorzata adja, ami alapján az adott környezeti hatás jelentősnek minősíthető. Ehhez a módszerhez először összegyűjtöttem a modellezett gyártás során jelentkező környezeti hatásokat és elvégeztem értékelésüket Bezegh és társai (1999) rendszere alapján. A tényezőkből származó hatások és azok forrásának azonosításához alapul szolgáltak a korábbiakban összeállított anyag- és energiaforgalmi diagramok. Az értékeléshez üzemszerű és tervezett nem üzemszerű, valamint nem tervezett nem üzemszerű működés esetén előre meghatározott szempontok (5-6. Táblázatok) szerint pontoztam a hatások súlyosságát.

5. Táblázat Jelentős tényezők kiválasztása üzemszerű és tervezetten nem üzemszerű működés esetén
Tóth, 53. oldal (2002)

Szempont	Pontszám
Jogi, vállalati vagy egyéb előírások	
Nemmegfelelőség vagy annak lehetősége	0
Megfelelőség minden esetben	1
Nincs előírás	2
A felismerhetőség valószínűsége	
Alacsony, nem figyelik a tényezőt	1
Közepes, időnkénti megfigyelés	2
Magas, folyamatos megfigyelés és vizsgálat	3
Felhasznált és kibocsátott mennyiség	
Nagy, vagy nincs adat	1
Közepes	2
Kicsi	3
A hatás természete és kiterjedtsége	
Hosszútávú, kimutatható környezeti változás	1
Rövidtávú környezeti változás	2
Nincs mérhető környezeti változás	3
Érdekelt felek	
Panaszok, jogi útra terelt eljárások a múltban vagy elbírálás alatt	1
Valamely érdekelt csoport érdeklődésének tárgya	2
Nincs érdeklődés, sem a múltban, sem előrejelezve	3

6. Táblázat Jelentős tényezők kiválasztása nem tervezett nem üzemszerű működés esetén
Tóth, 54. oldal (2002)

Szempont	Pontszám
Bekövetkezés valószínűsége	
Magas, évente egyszer, vagy gyakrabban	0
Közepes, ritkábban, mint évente	1
Alacsony, valószínűtlen a telephely élettartama miatt	2
A felismerés valószínűsége	
Alacsony, nincs figyelés vagy vizsgálat	1
Közepes, időnkénti figyelés vagy vizsgálat	2
Nagy, folyamatos figyelés vagy rendszeres vizsgálat	3
Felkészültség	
Nincs készülségi terv vagy lehetetlen elhárítás	1
Némi intézkedés	2
Részletes tervek, tréning és gyakorlatok	3
A hatás természete és kiterjedtsége	
Hosszútávú, mérhető környezeti változás	1
Rövidtávú környezeti változás	2
Nincs mérhető környezeti változás	3

Első tényezőként az energiafelhasználásból adódó CO₂ kibocsátást azonosítottam, ami ugyan nem közvetlenül a telephelyen keletkezik, de mégis a vállalat tevékenységéből fakad. Jogi előírásoknak a tényező megfelel, a vállalat a villamosenergiáját meghatározott szolgáltatótól szerzi be. Felismerhetősége magasnak tekinthető, hiszen a vállalat folyamatosan figyeli az energiafogyasztását. Az energiaáramok elemzéséből látható, hogy a felhasználás kifejezetten nagy, illetve a szakirodalom (Chaves és Pereira, 1992) a CO₂ kibocsátás környezeti hatásairól egyértelműen nyilatkozik, ezért hosszútávon kimutatható hatásként értékeltem. Nem üzemszerű működés az áramellátás esetén kimaradásként nyilvánulhat meg. Ekkor a gyártás leáll, de környezeti hatás formájában nem jelentkeznek következmények. Ilyenkor a gépekben maradó anyagmennyiség nem használható fel a későbbiekben, de ennek a mennyisége nem több 1-2 kg-nál leállásonként. Készültségi terv erre az eshetőségre nincs kialakítva, mivel nem megoldott a szolgáltatótól beszerzett áram helyettesítése.

A technológiai hulladék elszállítását a vállalat szerződött partnerrel bonyolítja le, az esetlegesen keletkező veszélyes hulladéknak minősülő anyagokat (pl. olajos rongyok) pedig elkülönítetten gyűjtjük a telephelyen. Könnyen nyomon követhető tényezőnek számítanak, a gyártásközi hulladék mennyisége viszonylag alacsony és állandó jelleggel keletkezik. Az elszállított hulladék nem kerül újrahasznosításra, az elszállító tevékenységétől függően lerakásra kerül vagy energetikailag hasznosítják. A keletkező hulladék mennyisége nem üzemszerű működés esetén nő a selejtes termékek gyártása miatt. Ezt okozhatja gépmeghibásodás, nem megfelelő alapanyag minőség vagy feldolgozási körülmények. Az ilyesfajta problémák miatti ideiglenes (általában rövid távú, néhány órás) leállások során keletkező selejtes termék keletkezése nem nagy mennyiségű, ellenben évente akár többször is jelentkező probléma, ami a megfelelő szakképesítéssel rendelkező munkavállalók számára gyorsan megoldható üzemzavarnak számítanak.

A fröccsöntőgép és extruder magas hőmérsékleten (190-250 °C) üzemelő berendezések, számos forró felülettel rendelkeznek, valamint a gyártott termékek is forrók lehetnek közvetlenül gyártás után. Emiatt gyártás közben a megfelelő védőeszközök használata kötelező. Mivel azonban a termelt hő nem jelentős, ezért nem mutatható ki vele összefüggésben környezeti hatás és az érdekelt feleknél sem képezi érdeklődés tárgyát. Nem üzemszerű működés ebben az esetben jelentheti a nem megfelelő védőeszköz hiánya miatti égési sérüléseket, de a hőhatás fokozódása nem valósul meg nem üzemszerű esetben, így nagyobb hatással nem járhat. A szokásostól eltérő működés ebben az esetben is azonnal érzékelhető a termék minőségének romlása miatt, de a gyártóberendezésekben található hőmérsékletmérő szenzorok is jelzik a beállítottól eltérő értéket.

Légszennyezés üzemszerű működés közben a kukoricacsutka darálék bekeverésénél történhet, de ebben az esetben is csak lokálisan, a keverést végző munkavállalóra jelenthet veszélyt a szálló por. Az előírt FFP2 minősítésű munkavédelmi maszk hordásával azonban elhárítható ennek bármilyen potenciális hatása. Nem üzemszerű működés esetén, amikor a feldolgozni kívánt anyag a ter-

vezettnél jóval hosszabb ideig tartózkodik a feldolgozóberendezésben, a magas hőmérséklet hatására a műanyag degradációjával légnemű bomlástermékek keletkezhetnek. Ezek eliminálására a feldolgozóberendezések felett elszívó berendezés található, melynek kivezetése az üzemcsarnokból szűrőberendezéssel rendelkezik.

Szennyvízkibocsátással a vizsgált folyamatok üzemszerű működés esetén nem rendelkeznek, hiszen az üzemcsarnok hűtővízrendszere zárt. Tervezetten nem üzemszerű működés, például karbantartás esetén leengedésre kerülhet a hűtőkör egy része, de mivel a hűtőközeg minden folyamatban csak egy határfelületen keresztül, közvetetten fejt ki hatását, ezért szennyezőként feltehetően csak a csövekből származó szilárd formájú fémmaradványokat tartalmaz. Nem üzemszerű működés alatt az esetleges csőtöréseket, tömítések sérülését érthetjük, amikor a hűtővíz rendszer tartalma az üzemcsarnokba és onnan potenciálisan a telep többi területére szivároghat. Ennek bekövetkezésének kicsi a valószínűsége és még nem volt rá példa a kutatóközpontban. A tömítéseket és csatlakozásokat rendszeresen ellenőrizzük működés közben szivárgások észrevételének érdekében.

Talajszennyezés veszélye egyedül nem üzemszerű működés közben léphet fel. Erre példa az előzőekben említett hűtővíz szivárgás. Amennyiben a hűtővíz tartalmaz a csövekből származó fémhulladékot, és a csőtörés olyan mértékű, hogy a víz a kutatóközpont telephelyén lévő füves területre is behatol, akkor az ottani földterület károsodását okozhatja (Akhtar és társai, 2022). A fröccsöntőgép hidraulikaolajának szivárgása is hasonló veszélyeket rejt magában, de ennek bekövetkezési valószínűsége is meglehetősen alacsony.

A folyamatokban használt berendezések üzemi zajszintje a daráló kivételével nem haladja meg a 66/2005. (XII. 22.) EüM rendeletben előírt 87 dB-es beavatkozási határértéket. Ezért a daráló használata közben vállalt elõírás a zajvédõ eszköz (fülvédõ, fûldugó) használata. Nem üzemszerű működés esetén sem számíthatunk magasabb hanghatásokra, amely hosszútávon károsíthatná a munkavállalók hallását, vagy a környezetbe kiszűrődve zavarhatja az üzemcsarnok környezetét és az elővilágot.

Az 5-6. Táblázatok szempontrendszerei alapján kapott értékeket és összesítésüket az alábbi 7. Táblázat tartalmazza. A módszer szerint üzemszerű és tervezetten nem üzemszerű működés esetén, amennyiben az adott pontszámok szorzata 0, mindenképpen jelentős hatással/tényezővel állunk szemben. 1 és 8 közötti pontszám jelentős tényezőre és hatásra utal, de a meglévő intézkedések elegendőek lehetnek a hatás mérsékléséhez. Ezen pontszámok felett pedig nem jelentősnek tekinthető a tényezők által okozott hatás.

7. Táblázat Környezeti tényezők értékelése üzemszerű és tervezetten nem üzemszerű működés esetén
Saját táblázat

Környezeti tényező	Jogi, vállalati vagy egyéb előírások	Felismerhetőség valószínűsége	Felhasznált és kibocsátott mennyiség	A hatás természete és kiterjedtsége	Érdekeltek	Összpontszám
Energiafelhasználásból származó CO₂ kibocsátás	1	3	1	1	2	6
Gyártási folyamat során keletkező hulladék	1	2	2	1	2	8
Hőszennyezés	2	2	3	3	3	108
Légszennyezés	2	1	3	3	3	54
Szennyvízkibocsátás	1	3	3	3	3	81
Zajszennyezés	2	2	3	3	3	108

Ahogy a 7. Táblázatban látszik, az azonosított tényezők közül a pontszámok alapján az energiafelhasználásból származó CO₂ kibocsátás és a gyártás során keletkező hulladék minősülnek jelentős tényezőknek 6 és 8 ponttal. A CO₂ kibocsátás esetén ezt az indokolja, hogy a gyártófolyamatok energiafelhasználása magas és a kibocsátás környezetre gyakorolt hatása is hosszútávú. A keletkező hulladék mennyisége nem kifejezetten magas (óránként 2,3 -2,5 kg), azonban elszállítás után nem kerül újrafeldolgozásra. A pontszámok alapján tehát a vállalatnak ezekkel a tényezőkkel lehet érdemes alaposabban foglalkozni, például megújuló forrásból származó energiát használni a gyártáshoz, illetve a folyamatokban keletkező hulladék visszaforgatását elvégezni. A hatásértékelési eljárás módszerével azonosíthatók voltak a jelentős hatások. A különböző gyártási szituációk (tisztá PLA, újrahasznosított PLA és kukoricacsutka darálékkal adalékolt PLA) alapján pedig néhány következtetés is levonható a hatékonyságukat illetően. Az újrahasznosított PLA alkalmazásával a vállalat csökkenteni tudja a hulladék termelését, ami erre a tényezőre mindenképpen jótékony hatással van. Az kukorica adalékolásából jelentős többlethulladék keletkezés nem származik, így ez a hatás nem súlyosbodik. A por formájú légszennyezés veszélye üzemszerű működésnél csak ennél a folyamatnál merült fel, de a pontszámok alapján nem minősült jelentős tényezőnek, ezért jelen pillanatban további intézkedéseket nem igényel. Elgondolkodtató azonban, hogy az extrúziót is igénylő gyártási folyamat energiaigénye jóval magasabb, mint a többi termék előállításához szükséges, így a folyamatból származó CO₂ kibocsátás is feltételezhetően nagyobb lesz. Ilyen szempontból a kukoricával történő költségcsökkentés és környezetbarátabb termék előállításának hatásossága nem ítéhető meg pontosan.

A nem tervezett, nem üzemszerű működés értékelésének eredményei az 8. Táblázatban találhatóak. Az értékelési módszer szerint az 5-nél alacsonyabb pontszámot kapó tényezők minősülnek jelentősnek, 6-8 pont között a hatályban lévő intézkedések megfelelők lehetnek és 9 pont felett a

vizsgált hatás nem jelentős. Azonnal 0 pontot kapott az hatás, amelynek bekövetkezési valószínűsége magas, így ezek minden esetben jelentősnek számítanak.

8. Táblázat Környezeti tényezők értékelése nem tervezett nem üzemszerű működés esetén
Saját táblázat

Környezeti tényező	Bekövetkezés valószínűsége	A felismerés valószínűsége	Felkészültség	A hatás természete és kiterjedtsége	Összpontszám
Energiafelhasználásból származó CO ₂ kibocsátás	2	3	1	3	18
Gyártási folyamat során keletkező hulladék	0	3	3	2	0
Hőszennyezés	2	3	2	3	36
Légszennyezés	0	3	2	2	0
Szennyvízkibocsátás	2	2	2	2	16
Talajszennyezés	2	2	2	1	8
Zajszennyezés	2	2	1	3	12

A 8. Táblázat alapján jelentős tényezőnek minősül a gyártási hulladék keletkezése, aminek magyarázata abban keresendő, hogy nem üzemszerű működés esetén mindig keletkezik, illetve, hogy fröccsöntés során viszonylag gyakran fordulnak elő, rövid ideig tartó üzemzavarok, amelyek némi hulladék keletkezésével járnak. A légszennyezés a bekövetkezés valószínűsége miatt minősült a pontrendszer szerint jelentősnek tényezőnek. A fröccsöntés jellegéből adódóan kis mennyiségű bomlástermék keletkezik, viszonylag nagy gyakorisággal. Ennél a tényezőnél érdemes lehet a bomlástermék összetételére vonatkozóan vizsgálatokat végezni, annak érdekében, hogy a veszélyes anyagok pontosabban azonosíthatók legyenek. Potenciálisan jelentős tényezőként mutatkozik meg a talajszennyezés 8 ponttal, ami bekövetkezésének kis valószínűsége miatt nem igényel további beavatkozást.

A környezetközpontú irányítási rendszer hatásértékelési eljárása alkalmas volt a vizsgált folyamatokból származó környezeti tényezők azonosítására. Értékelő szempontrendszer a vizsgálatot végző személy a folyamatok és potenciális veszélyek alapos végiggondolására készíti. Hasznos kiegészítő eleme a nem üzemszerű működésből származó potenciális hatások figyelembevétele, amit más környezeti teljesítményértékelő módszerek nem mindig vesznek figyelembe. Jelentős hatásként többnyire ugyanazok voltak azonosíthatók, mint az anyag- és energiaforgalmi diagramok elemzésénél, ez azonban inkább a jelen példában vizsgált folyamatok jellegéből adódik, mintsem a módszer hiányosságai miatt. Ez alatt azt lehet érteni, hogy a műanyag alapanyagból fröccsöntéssel történő gyártás a felhasznált anyag és energia mennyiségén kívül kevés környezeti tényezővel ren-

delkezik, nem igényli nagy mennyiségű veszélyes anyag használatát, nincs nagy mennyiségű károsanyag kibocsájtás, hő- illetve hanghatás. Tehát a hatásértékelési eljárás megalapozottabb kimutatást biztosít a környezeti hatásokra vonatkozóan, azok számszerűsítésére nem alkalmas.

4.2. Öko-hatékonyság

Az előző módszerek eredményeiből láthatjuk, hogy a műanyagfeldolgozás tevékenysége jellemezhető volt anyag és energiafelhasználás szempontjából, valamint a folyamat során jelentkező környezeti szempontból jelentős tényezők és általuk okozott hatások is azonosíthatók voltak, de arra vonatkozóan, hogy a környezetbarát alapanyag, a mechanikai újrahasznosítás vagy a természetes töltőanyag használata milyen környezeti hatás csökkenéssel járhat, nem tudtak számszerűsíthető választ adni.

Ahogy az a környezeti hatásértékelő módszerek bemutatásánál is említettem az ökohatékonyságot az alábbi hányadosként szokás értelmezni.

$$\text{Öko-hatékonyság} = \frac{\text{termék vagy szolgáltatás értéke}}{\text{környezeti hatás}}$$

A módszer magába foglalja a környezeti tényezők értékelését, szem előtt tartva a költség szempontokat is. Elemzésem során a különböző módon előállított termékeket az előállításukhoz szükséges energiamennyiség, anyag- és energiaköltség szerint hasonlítottam össze. Környezeti hatásként pedig az egyes részelemek CO₂ ekvivalensét becsültem meg vagy számítottam ki. Választásom azért erre a mérőszámra esett, mert képes a környezeti hatások uniformizálására, valamint irodalmi adatok alapján egyszerűen és viszonylag pontosan becsülhető. Alkalmazására azért is szükség volt, mert ahogyan az a korábbi módszerek arra rámutattak, a műanyagokkal kapcsolatos gyakran emlegetett környezeti problémák nem a granulátumból történő termékgyártás során keletkeznek, hanem sokkal inkább az alapanyag előállításánál, valamint a termékek életútja végén keletkező hulladék mennyiségéből és kezeléséből fakadnak. Tulajdonképpen, ha egy műanyag feldolgozással foglalkozó vállalat mérlegeit vizsgáljuk, arról nem kapunk információt, hogy felhasznált alapanyagának és gyártott termékeinek milyen környezeti hatása van. Abban az esetben, ha az adott vállalat ilyen területen folytatja a tevékenységét és bár közvetlenül nem nála jelentkezik a környezetszennyezés, de mégis felelősségének érzi, hogy ezzel tisztában legyen, jó módszer lehet az alapanyagaira és folyamataira CO₂ ekvivalenst számolni. Ezért irodalmi adatok alapján megkíséreltem a PLA granulátum, a kukoricacsutka darálék, a mechanikailag újrahasznosított PLA, valamint a gyártás villamos energiafelhasználása CO₂ ekvivalensének kiszámítását.

A PLA granulátum előállításához a CO₂ egyenérték érték számítása számos összetevőből áll. Amennyiben növényi alapanyagból indulnak ki, az első fázis, a növény életútja CO₂ elnyelő folyamat és a tejsav előállítás és polimerizáció végére a PLA granulátum 501 kg CO₂/tonna PLA egyen-

értékkel rendelkezik (Morão és de Bie, 2019). Hasonló eredményt kaptak Vink és társai (2003), akik a NatureWorks Ltd alapanyagának előállítását vizsgálták, szerintük 1 tonna PLA előállítása 580 kg CO₂ kibocsátásával jár. Számításaim során az utóbbit használtam, mert az adat ugyanannak a vállalatnak a termékére vonatkozik, ahonnan a kísérletekben használt PLA is származik. Az alapanyag beszerzésénél a szállításból származó CO₂ mennyiségét a szükséges információk hiányában nem vettem számításba, valamint az, hogy a mechanikai újrahasznosítás és a természetes adalék használata javít-e a termék CO₂ lábnyomán, enélkül is kimutatható.

A kukoricacsutka darálékra vonatkozóan már nehezebb ilyen adatot találni, hiszen ezt az alapanyagot ilyen szempontból még kevesen vizsgálták. A Cobex Hungria Kft 2022-es energetikai jelentéséből kiderül, hogy működésük során 1,2 millió kg CO₂ egyenértéknek megfelelő kibocsátásuk van, és éves szinten 11 000 tonna kukoricacsutkát dolgoznak fel. Egyszerűsítéssel élve ez 109 kg CO₂-t jelent tonna kukoricacsutkára nézve. Holka és Bienkowski (2020) Holka és Bienkowski (2020) Holka és Bienkowski (2020) a lengyelországi kukorica termesztésből származó CO₂ kibocsátást vizsgálták és arra jutottak, hogy egy tonna kukorica termeléséhez közel 180 kg CO₂ kibocsátással jár. A két adat összegéből, valamint a kukoricacsutka terméshez viszonyított tömegarányából (~12 w% (Hajdú, 2015)) becsülhető a kukoricacsutka darálék előállításával járó CO₂ kibocsátás.

A termelés villamosenergia-felhasználásából származó CO₂ ekvivalens érték 2021-re vonatkozóan az MVM honlapján megtalálható és a magyar energiamixre vonatkozóan 264 gCO₂/kWh értékű. Az irodalmazásból és becslésekből származó adatokat a 9. Táblázatban foglaltam össze. További számításaim alapját ezek az információk adták.

9. Táblázat Felhasznált alapanyagok és energiafogyasztás CO₂ ekvivalens értékei
Saját táblázat

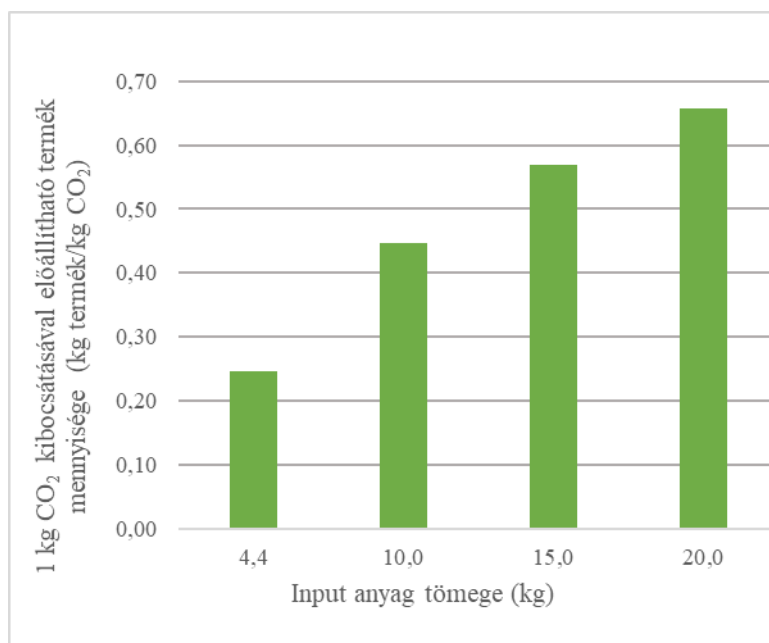
	CO₂ ekvivalens
PLA alapanyag	580 kg CO ₂ /tonna PLA 580 g CO ₂ /kg PLA
Kukoricacsutka darálék	131 kg CO ₂ /tonna kukoricacsutka 131 g CO ₂ /kg kukoricacsutka
Villamosenergia-felhasználás	264 g CO ₂ /kWh

Az öko-hatékonyság értékelést az alkalmazható mérőszámok összegyűjtésével és megértésével kezdtem. Jelen esetben a környezeti hatás modellezéséhez a részfolyamatok származtatott CO₂ kibocsátását vettem alapul. Első lépésként meghatároztam a csak feldolgozatlan PLA-ból gyártott termék CO₂ ekvivalensét. Az eredetileg mért anyagmérleg adta a kiindulópontomat, ahol az órán-

ként feldolgozott anyag mennyisége 4,4 kg/h volt ehhez pedig 50,5 kWh energiára volt szükség. Az anyagáramot az alapanyagra vonatkozó CO₂ ekvivalenssel, az energiaszükségletet pedig annak CO₂ ekvivalensével összeszorozva, a két értéket pedig összeadva számítható a gyártás óránkénti CO₂ ekvivalense, ami ebben az esetben 15900 gCO₂/h-nak adódott, ami az óránként keletkező 3,9 kg terméket figyelembe véve 4049 gCO₂/kg terméknek adódik. Mint már említettem, az ilyen mennyiségű feldolgozás rendkívül alacsonynak számít a műanyagiparban, ezért ebben az esetben is alkalmaztam a 10 kg/h feldolgozott alapanyag 105%-os fogyasztás, 15 kg/h alapanyag 110%-os fogyasztás és 20 kg/ alapanyag 115%-os fogyasztás értékeket.

Az öko-hatékonysági mutatószám azt mutatja meg, hogy a termék előállításához szükséges egységnyi anyagmennyiség, energia, ezzel kapcsolatos költségek adott egysége mekkora környezeti terheléssel jár. A kiszámítható mutatók közül az általam vizsgált folyamatra nézve a legtöbb jelentéssel bírók közé tartozik az a termékmennyiség, aminek előállításával 1 kg CO₂ kibocsátás keletkezik. Érdekes még környezeti szempontból az egységnyi villamosenergia fogyasztással hány kg termék állítható elő. Költségszempontból elemezve a folyamatot pedig fontosnak találtam azt is megvizsgálni, hogy mekkora összeget költ a vállalat gyártásra, miközben 1 kg CO₂ egyenérték keletkezik.

Az 1 kg CO₂ kibocsátással járó termék mennyisége könnyen számítható volt, a termék CO₂ ekvivalensének reciprokát véve. A számított értékeket az 15. Ábrán személtettem. Látható, hogy a termelési kapacitás növelésével nőtt az a termék tömeg, aminek előállítása 1 kg CO₂ kibocsátással jár. 4,4 kg/h nyersanyag esetén 0,25 kg termék állítható elő, 20 kg/h anyagáram esetén viszont már 0,66 kg. A csökkenés annak tudható be, hogy a termelési kapacitás növekedésével nem egyenes arányban nő az energiafelhasználás.



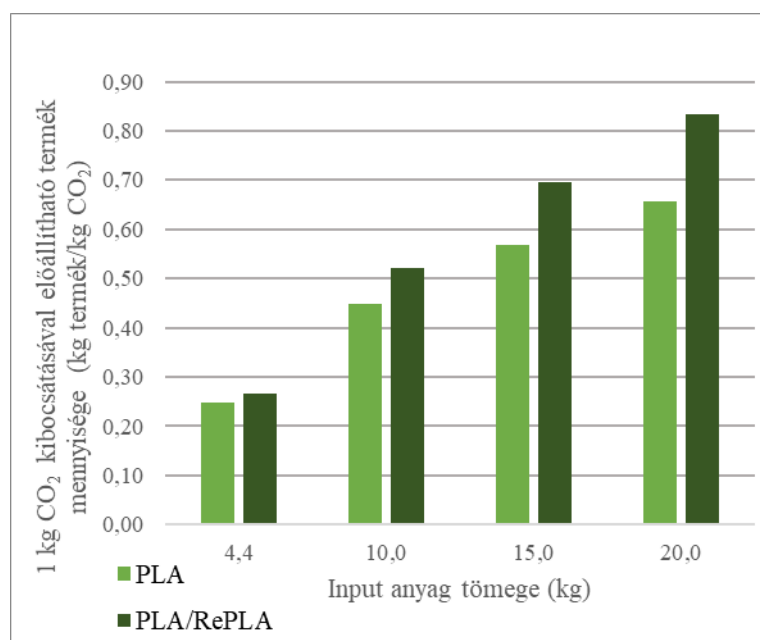
15. Ábra Egységnyi CO₂ kibocsátásra vonatkoztatott termékmennyiség, növekvő gyártási kapacitás mellett

A másik két mutató értékei az 10. Táblázatban található. Hasonló tendenciát mutatnak, azaz az energiafelhasználás hatékonysága jelentősen nő a feldolgozott anyag mennyiségével, 0,078 kg helyett 0,305 kg anyag állítható elő 1 kWh áram felhasználásával. Amellett, hogy a termék előállításának környezeti hatásait vizsgáljuk érdemes megnézni a termelés költségoldalát is. Ehhez szükséges a PLA granulátum ára (1567 Ft/kg) és az áramfogyasztás költségvonzata, ami a Kutatóközpont esetén a 2023-ban 87 Ft/kWh-t jelent. Innen a korábbiakban is alkalmazott számítási módszerrel megkapható, hogy a vállalatnak mekkora költséget jelent óránként és megtermelt kilogrammonként a gyártás. Az adatokból látható, hogy 1 kg CO₂ egyenérték keletkezésével összefüggésben a gyártás költsége is 713 Ft-ról közel duplájára 1351 Ft-ra emelkedett.

10. Táblázat Öko-hatékonysági mutatók tiszta PLA esetén
Saját táblázat

Input anyag tömege (kg/h)	1 kg CO ₂ kibocsátásával előállítható termék tömege (kg termék/kg CO ₂)	1 kWh energia felhasználásával előállított termék tömege (kg termék/ kWh)	1 kg CO ₂ kibocsátásával járó termelés költsége (Ft/kg CO ₂)
4,4	0,247	0,078	713
10	0,447	0,167	1024
15	0,568	0,239	1213
20	0,657	0,305	1351

Következő lépésként megvizsgáltam a mechanikai újrahasznosítás hatását a termék CO₂ ekvivalensére és előállítási költségére. Számításaim során feltételeztem, hogy az újrahasznosított PLA teljes egészében gyártási hulladékból (fröccsöntés elosztócsatornája vagy selejtes termék) származik egy az adott vállalatnál lévő másik gyártási folyamatból. Az előzőekben a termék CO₂ ekvivalensébe belekalkuláltam a teljes kiindulási anyag CO₂ ekvivalensét, ezért a keletkező hulladék anyagmennyiségéből származó CO₂ ekvivalens is hozzátartozik a termékhez. Emiatt az újrahasznosított alapanyag CO₂ ekvivalense a darálásból származó kibocsátással egyenlő és nem tartalmazza az alapanyag előállításából származó kibocsátásokat. Ez alapján kiszámítottam, hogy az újrahasznosított PLA-t tartalmazó termék mekkora CO₂ egyenértékkel rendelkezik. A kapott értékeket minden öko-hatékonysági mutató esetében a tiszta PLA-t tartalmazó termék eredményeihez hasonlítottam.

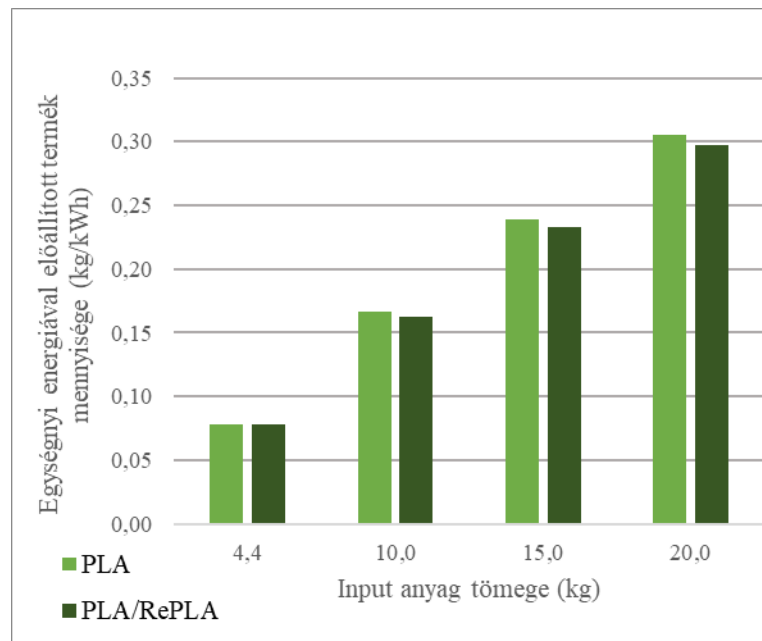


15. Ábra Újrahasznosított PLA tartalmú termék fajlagos CO₂ ekvivalens értékei növekvő gyártási kapacitás mellett
Saját ábra

11. Táblázat Öko-hatékonysági mutatók újrahasznosított PLA tartalom esetén
Saját táblázat

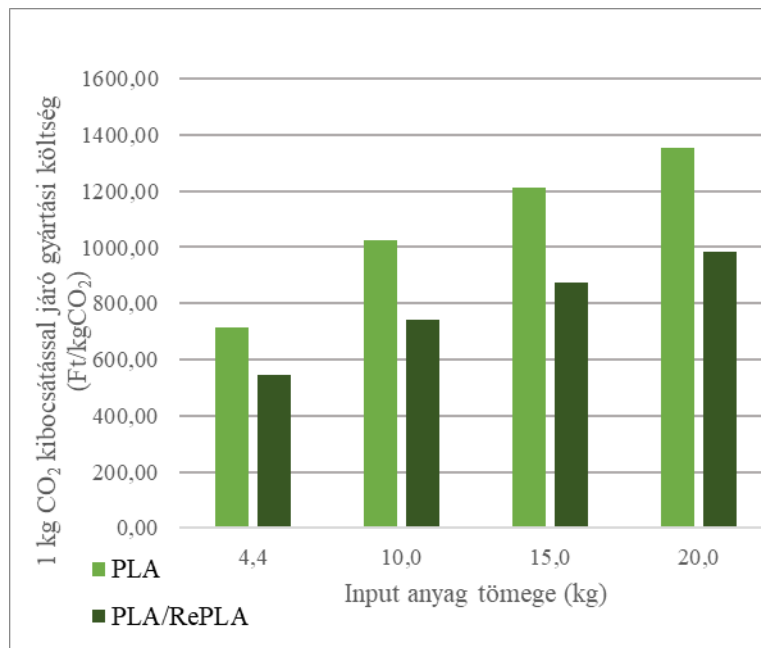
Input anyag tömege (kg/h)	1 kg CO ₂ kibocsátásával előállítható termék tömege (kg termék/kg CO ₂)	1 kWh energia felhasználásával előállított termék tömege (kg termék/ kWh)	1 kg CO ₂ kibocsátásával járó termelés költsége (Ft/kg CO ₂)
4,4	0,267	0,078	542,9
10	0,521	0,163	739,7
15	0,695	0,233	874,4
20	0,834	0,297	982,2

Ahogy az az 15. Ábrán is látható, mechanikailag újrahasznosított PLA használatával növelhető az 1 kg CO₂ ekvivalens képződésével járó termék tömege, azaz 1 kg termék előállítása kevesebb CO₂ kibocsátással jár a tisztán PLA granulátumból előállított termékhez képest. 20 kg/h kiindulási anyag esetén ez a mutató tisztán PLA termék esetén 0,66 kg termék/kg CO₂ volt, az újrahasznosított PLA tartalommal azonban 0,83 kg termékre emelkedett. A pontos eredmények a 11. Táblázatban találhatóak. Jól látható az is, hogy a feldolgozott anyag mennyiségének növelésével nagyobb különbség érhető el. Emellett, ha csak a feldolgozáshoz szükséges energiamennyiséget vizsgáljuk, arra jutunk, hogy a gyártás energiahatékonysága romlik a tiszta PLA-hoz képest (16. Ábra), mivel a gyártási folyamatba bekerült egy új lépés és ennek energiafogyasztása mindig hozzáadódik a termék energiaszükségletéhez. Ez a különbség azonban nem számottevő, 0,297 kg termék/kWh újrahasznosított PLA esetén és 0,305 a feldolgozatlan PLA-nál.



16. Ábra Tiszta PLA és újrahasznosított PLA tartalmú termék előállításának energiaszükséglete növekvő gyártási kapacitás mellett
Saját ábra

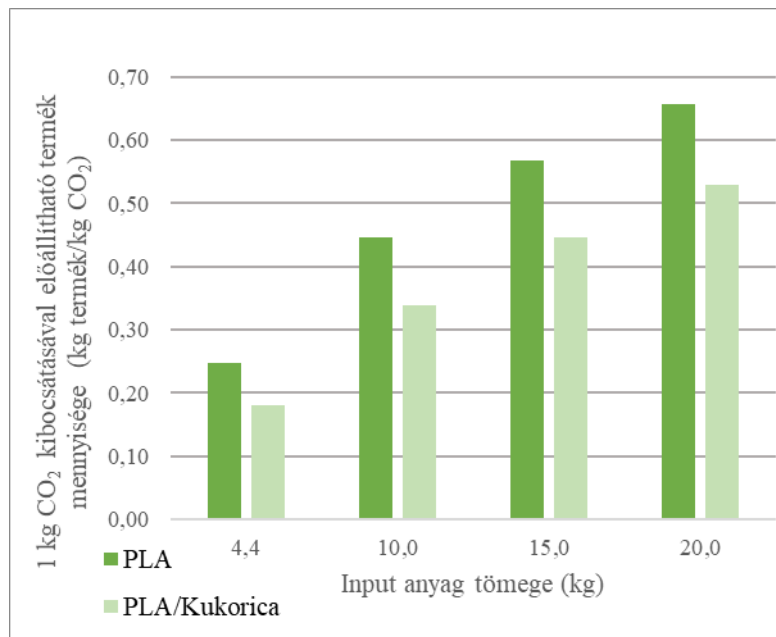
Költségoldalról vizsgálva a folyamatot, könnyen belátható, hogy ha egy folyamatban keletkező hulladékot egy másik termék előállításához felhasználunk, akkor jelentős mértékben csökkenthetők az anyagköltségek. Ezt persze a hulladék újrafeldolgozáshoz történő előkészítésének költsége ellensúlyozhatja, ami jelen esetben csak a darálás miatt fellépő áramfogyasztás költségével egyenlő. A 17. Ábrán látható módon, 20 kg/h kiindulási anyagból zajló termékgyártás esetén, az újrahasznosított anyagtartalom hatására 1 kg CO₂ kibocsátással összefüggő gyártási költség 1350 Ft/kgCO₂-ról 983 Ft/kgCO₂-ra csökkent. Emögött azonban nem az a magyarázat áll, hogy az újrahasznosított PLA-ból történő gyártás nagyobb CO₂ kibocsátással jár (sőt a korábbiakban láthattuk, hogy éppen az ellenkezője történik), hanem hogy a hulladékból történő termékgyártás jelentősen lecsökkenti a gyártás költségeit. A PLA granulátum ára 1567 Ft/kg, ezzel szemben óránként 20 kg-os alapanyag-szükséglet esetén az 50 w% újrahasznosított PLA tartalmú alapanyagé 1042 Ft/kg-nak adódik.



17 Ábra Tiszta PLA és újrahasznosított PLA tartalmú termék előállításából származó CO₂ értékei növekvő gyártási kapacitás mellett
Saját ábra

Az öko-hatékonysági mutatók segítségével szemléletesen kimutatható a mechanikai újrahasznosítás hatása a termék környezeti hatására érzékeltetve a gyártási folyamat energiaigényét és költségvonzatát. A környezeti hatás kimutatására szolgáló CO₂ ekvivalens irodalmi adatok alapján viszonylag kis energiabefektetéssel becsülhető, azonban ennek elvégzéséhez bizonyos mértékű szakértelem szükséges.

A kukoricacsutka darálékot tartalmazó PLA alapú kompozit öko-hatékonysági hányadosának számításakor is hasonló módon jártam el, mint ahogyan azt a korábbiakban bemutattam. Az energiamérleg eredményeiből korábban is látható volt, hogy az extrúziós lépés miatt a termékgyártás energiaszükséglete jelentősen megnőtt. Ezért bár a kukoricacsutka darálék fajlagos CO₂ ekvivalense alacsonyabb, mint a PLA-é, a feldolgozás energiaigénye miatt nem kimutatható a termék környezeti hatásának javulása. Ezt jól mutatja a 18. Ábra is, miszerint a kukoricacsutkát tartalmazó termékből jelentősen kevesebb állítható elő 1 kg CO₂ kibocsátása mellett. A termelékenység növelése mellett a két anyag közti különbség csökkenő tendenciát mutat, 20 kg/h gyártás mellett csak 20 % a különbség, de reális ipari gyártási körülmények mellett nem megtérülő a kukoricacsutka darálék alkalmazása. A részletes eredményeket a 12. Táblázat tartalmazza.

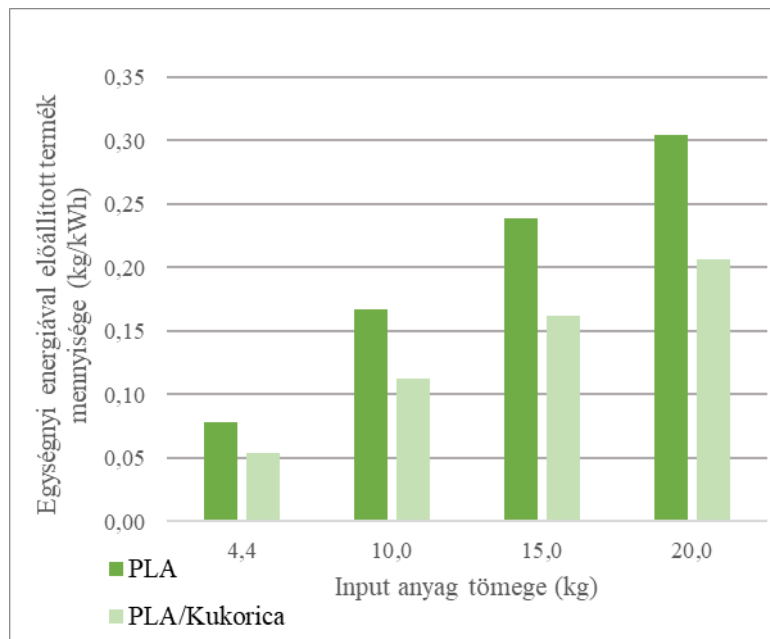


18. Ábra Kukoricacsutka darálék tartalmú PLA termék fajlagos CO₂ ekvivalens értékei növekvő gyártási kapacitás mellett
Saját ábra

12. Táblázat Öko-hatékonysági mutatók kukoricacsutka darálékot tartalmazó PLA esetén
Saját táblázat

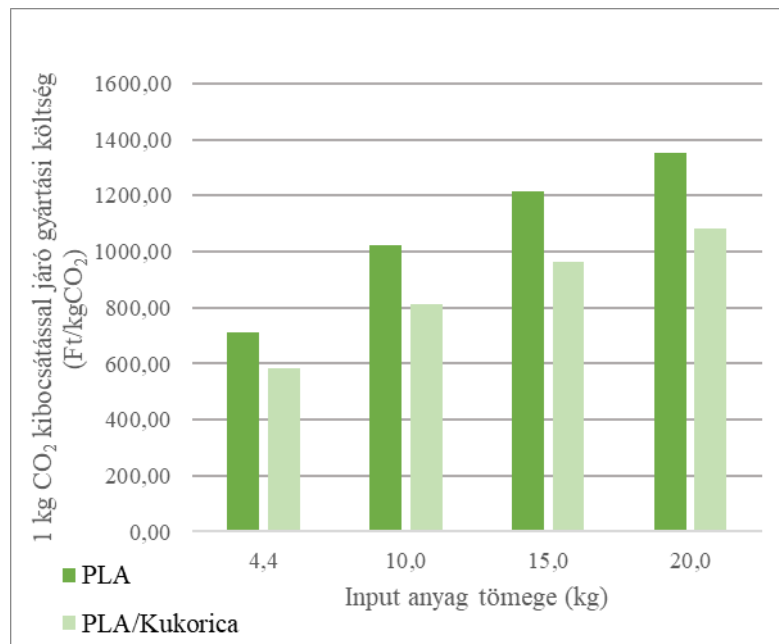
Input anyag tömege (kg/h)	1 kg CO ₂ kibocsátásával előállítható termék tömege (kg termék/kg CO ₂)	1 kWh energia felhasználásával előállított termék tömege (kg termék/ kWh)	1 kg CO ₂ kibocsátásával járó termelés költsége (Ft/kg CO ₂)
4,4	0,181	0,054	584,4
10	0,339	0,113	812,6
15	0,446	0,162	964,4
20	0,529	0,206	1082,6

Nem hoz váratlan eredményt az egységnyi energiával előállítható termék mennyiségének alakulása sem. Ebben az esetben is minden gyártási kapacitás érték mellett rosszabbul teljesít a kukoricát tartalmazó kompozit (19. Ábra). Az extrúzió beiktatása miatt mindössze 0,206 kg termék állítható elő 1 kWh energia felhasználásával a tisztán PLA-ból készült termék 0,305 kg-jához képest.



19. Ábra Tiszta PLA és kukoricacsutka darálék tartalmú PLA termék előállításának energiaszükséglete növekvő gyártási kapacitás mellett
Saját ábra

Ebben az esetben is érdemes megvizsgálni a műanyag termék fenntarthatóságának javítására irányuló módszer költségvonzatait is. (20. Ábra) Mivel a kukoricacsutka darálék ára nettó 115 Ft/kg, a termék alapanyagának ára jelentősen csökkenthető alkalmazásával. Azonban, ha figyelembe vesszük az energiaszükséglet költségét azt találjuk, hogy a kukoricacsutka darálék tartalmú kompozit kg-jának előállítási költsége 20 kg/h gyártási kapacitás esetén 2047 Ft. Ugyanez az érték a tiszta PLA termék esetén 2055 Ft, ami elhanyagolható különbségnek számít. Ebből egyértelmű, hogy az ábrán mutatkozó különbség nem a termék anyagköltségéből fakad, hanem a kompozit előállításának hoz felhasznált többletenergiával járó CO₂ kibocsátásból. Abban az esetben, hogyha a gyártáshoz használt energia nagyobb mértékben származna megújuló forrásból (pl. napelemek, szélenergia), lehetséges lenne csökkenteni a termék CO₂ ekvivalensét.



20. Ábra Tiszta PLA és kukoricacsutka darálék tartalmú PLA termék előállításából származó CO₂ mennyisége a gyártás költségének függvényében
Saját ábra

Az öko-hatákonysági mutatók alkalmas voltak annak egyszerű szemléltetésére, hogy valóban sikeresen csökkenthető-e a műanyag termék környezeti hatása a gyártásközi hulladék újrahasznosításával és természetes töltőanyag használatával. Azokban az esetekben, ahol nem volt kimutatható javulás a kiindulási PLA termékhez képest a hányadosokból következtetést lehetett levonni a gyengepontokról és ez alapján az adott vállalat intézkedéseket hozhat az értékek javítására.

5. KÖVETKEZTETÉSEK

A következtetések könnyebb levonásához összegyűjtöttem a különböző környezeti teljesítményértékelési módszerek összehasonlításának szempontjait. Minden szempont szerint 1-től 5-ig tartó skálán értékeltem az alkalmazott környezeti teljesítményértékelő módszereket, ahol az 1 legkedvezőtlenebb, az 5 pedig a legkedvezőbb eredménynek számított, így az a módszer számít a legalkalmasabbnak, amelynek a legmagasabb összpontszámmal rendelkezik. Fontos, hogy a pontszámokat a konkrét példákra vetítve határoztam meg, így a felállított sorrend is csak a kontextussal együtt értelmezhető. A szempontok több oldalról világítanak rá a módszerek erősségeire és gyengeségeire. Értékelésre került az alkalmazhatóság, az eredmények minősége és formája, valamint közérthetősége. Ezzel igyekeztem biztosítani, hogy a fenntarthatóság környezeti, társadalmi és gazdasági oldala is beleszámítson az összpontszámomba.

Meghatározó tulajdonságok közé tartozik az elemzést végző szempontjából, hogy mennyi időt vesz igénybe az értékelés. A folyamatait elemző vállalatnak előnyösebb, ha az adott módszert gyorsan el lehet végezni, hiszen ekkor kisebbek az ezzel kapcsolatban felmerülő munkaköltségek. Egy gyorsan elvégezhető értékelési módszert pedig nagyobb valószínűséggel választ egy vállalat, aki újonnan nyit a környezeti fenntarthatóság felé és nincs nagy költségkerete a feladat elvégzésére. A korábban bemutatott műanyagipari példából kiindulva az öko-mérleg készítése gyorsan elvégezhető volt, ezért 5 pontot kapott az értékelésen. A KIR hatásértékelési eljárása valamennyivel több időt igényelt, ami 4 pontot eredményezett. Mivel az öko-hatékonyság értékelés hosszas előzetes utána-nézést, irodalmi adatok és előzetes becsléseket igényelt, 3 pontot kapott, hiszen még így is határozottan rövidebb idő alatt végrehajtható volt mint egy teljeskörű LCA elemzés.

Az előző szemponttal ezekben az esetekben szorosan összefügg a módszer egyszerűsége. Ez a szempont arra utal, hogy az elvégzéshez szükséges adatok milyen mértékben állnak rendelkezésre és mennyire nehéz hozzájuk jutni. Az előzőkben bemutatott indokok szerint, az öko-mérleg 4, a KIR eljárás az öko-hatékonyság pedig 3-3 pontot kapott.

Érdeemes azt is értékelni az egyes módszerek esetében, hogy azok mennyire tudnak rugalmasan reagálni a vizsgált folyamatban bekövetkező változásokra. Például, ha megváltoztatjuk az újrahasznosított anyag arányát, vagy a természetes töltőanyag mennyiségét. A KIR eljárásban az ilyesfajta különbségek minimális változást jelentenének. Az öko-mérleg és öko-hatékonyság esetében a bemenő adatok változása maga után vonja az outputok változását is, ezek azonban egyszerűen kalkulálhatók, így a módszerek 4-4 pontot érdemeltek ebben a kategóriában.

A valós környezeti hatások kimutathatósága is fontos szempont volt az értékelés során. Ahogy az előző fejezetekben is látszott az öko-mérleg módszerrel sikeresen fel lehetett deríteni a folyamatok anyag- és energiamérlegeit, ezek azonban átalakítást igényelnek ahhoz, hogy a velük kapcsola-

tos környezeti hatások számszerűsíthetők legyenek. Mivel előzetes következtetések így is levonhatók az eredményekből (például, hogy a természetes töltőanyag alkalmazásával jelentősen nő a felhasznált energia mennyisége, vagy az újrahasznosított anyag hozzáadásával csökkenthető a tiszta alapanyagfelhasználás), így a módszer 2 pontot kapott ebben a kategóriában. A KIR eljárással már lefordítható volt az energiafelhasználás potenciális környezeti hatásokra és a többi módszerrel nem kimutatható kisebb tényezők is vizsgálat tárgyává váltak. Az öko-hatékonyság segítségével jól elemezhető volt a különbség az eredeti PLA termék és az újrahasznosított és töltőanyag tartalommal rendelkező PLA esetén a CO₂ ekvivalens bevonásával. Ezen kívül költségoldalról is bemutatathatók voltak a különbségek, ami nem elhanyagolható szempont az értékelést végző vállalat nézőpontjából. Az eredmények ez alapján legjobban az öko-hatékonyság esetében értelmezhetők és legkevésbé pontosan a mérlegek segítségével.

Egy másik szempont, hogy ha a vállalat a környezeti teljesítményértékelés eredményeit kommunikálni szeretné a partnerei vagy vevői számára, akkor azok olyan formában legyenek, hogy a valóságot a legjobban tükrözzék és könnyen érthető formában legyenek bárki számára. A vizsgált példában az öko-mérleg elemzésével jöttek létre a legkevésbé szemléletes eredmények, így az ebben a kategóriában 3 pontot kapott. A KIR eljárás a jelentős környezeti hatásokat jól tudta azonosítani és jól szemléltette a környezeti tényezők széleskörű számbavételét. Az öko-hatékonyság szemléletes diagrammokkal és adatokkal jól be tudta mutatni, hogy milyen változások érhetők el a termék CO₂ ekvivalensének változásában, ha újrahasznosított anyagot használunk, vagy kukoricacsutka darálék alkalmazásával igyekszünk csökkenteni a környezeti hatásokat. A szempontok és kapott pontszámok összefoglalását az 13. Táblázat tartalmazza.

13. Táblázat Környezeti teljesítményértékelő módszerek összehasonlításának szempontjai és kapott pontszámok
Saját táblázat

	Öko-mérleg	Környezetközpon-tú irányítási rendszer hatásértékelési eljárása	Öko-hatékonyság
Időigény	5	4	3
Egyszerűség	4	3	3
Alkalmazhatóság rugalmassága	4	5	4
Valós környezeti hatások kimutathatósága	2	3	4
Eredmények értelmezhetősége	3	4	5
Eredmények kommunikálhatósága	3	4	5
Összesen	21	23	24

Az összesített pontszámok alapján a műanyag termék újrahasznosítási arányának és természetes töltőanyag alkalmazásának környezeti hatásának kimutatására az öko-hatékonysági mutató volt a legalkalmasabb. Kifejezetten nagy előnye az volt, hogy a környezeti hatások számszerűsített értékelését valósította meg. Fontos megjegyezni, hogy bár az öko-mérlegek módszere kapta a legkisebb összpontszámot jelentősége mégis nagy, hiszen mindkét másik módszer kiindulópontját és alapját képezi. Második helyen végzett a Környezetközpontú irányítási rendszer hatásértékelési eljárása, aminek legnagyobb előnye az előre meghatározott értékelési struktúra volt, ami a potenciális környezeti hatásokat széles körben figyelembe veszi, így biztosítja, hogy az értékelő teljeskörű vizsgálatot végezzen.

6. ÖSSZEGZÉS

Napjaink egyik legismertebb környezeti problémáját a műanyagok jelentik. Ennek megfelelően ezen anyagok környezeti hatásának csökkentésére számos törekvés létezik. Népszerű megoldás a biopolimerek alkalmazása, a mechanikai újrahasznosítás vagy a természetes adalékanyagok alkalmazása a műanyag egy bizonyos hányadának kiváltására. Ezeket a technikákat anyagtechnológiai szempontból sokan értékelték már, azonban hiányosság mutatkozik azon kutatásokban, amelyek egyszerre minősítik a fenntarthatóság javítására irányuló módszert anyagtechnológia és környezeti hatás szempontjából is.

A dolgozat célja kettős volt. Először is egyszerűen alkalmazható környezeti teljesítményértékelő módszerek segítségével megvizsgálni, hogy a politejsav mechanikai újrahasznosítása valamint természetes adalékanyaggal történő társítása képes-e javítani a termék környezeti hatását. Ennek céljából öko-mérlegek felvázolását, a környezetközpontú irányítási rendszer (KIR) hatásértékelési eljárást és az öko-hatékonysági mutatók kiszámítását alkalmaztam. Emellett az előállított mintákat mechanikai és szerkezeti vizsgálatnak vettem alá annak érdekében, hogy ellenőrizhető legyen az alkalmazott gyártástechnológia és környezeti teljesítmény javító módszer anyagtechnológiai alkalmazhatósága is. A dolgozat másik célja pedig környezeti teljesítményértékelő módszerek használatának és a belőlük kapható eredmények összehasonlítása volt, annak érdekében, hogy egy műanyagipari vállalat számára könnyebben meghatározható legyen, hogy milyen egyszerű módszerek alkalmasak a környezeti terhelésének azonosítására és számszerűsítésére.

A műanyagok környezeti hatásának csökkentése érdekében fröccsöntés és extrúzió segítségével próbatesteket állítottam elő tisztán PLA granulátumból, 50 w% egyszer újrafeldolgozott PLA és 50 w% PLA granulátum keverékéből, valamint 10 w% kukoricacsutka darálék és 90 w% PLA granulátum keverékéből. A termékgyártás anyag- és energiaáramainak összeállításával meghatározható volt a folyamat során felhasznált villamosenergia mennyisége, valamint az időegység alatt legyártott termék tömege és keletkező hulladék mennyisége is. Jól kimutatható volt, hogy a mechanikai újrahasznosítás jótékony hatással van az anyagfelhasználás hatékonyságára úgy, hogy a gyártás energiaszükségletét nem növeli meg jelentősen. A természetes adalékanyag használatával összefüggésben a mérlegek elemzésével kimutatható volt, hogy az előállítás folyamatába belépő extrúziós lépés nagy többletenergia felhasználással jár. Ezen felül azonban a környezeti hatásokról számszerűen ez a módszer nem szolgáltatott információt.

A KIR hatásértékelési eljárásának segítségével azonosítható volt több potenciális környezeti tényező és általuk okozott hatás is, üzemszerű és nem üzemszerű működés során is. Az azonosított tényezők között szerepelt az energiefelhasználásból származó CO₂ kibocsátás, a gyártási folyamat során keletkező hulladék, a hő-, lég- és zajszennyezés, valamint a szennyvízkibocsátás, melyek kö-

zül a vizsgált folyamatok esetén a CO₂ kibocsátás és a gyártás során keletkező hulladék bizonyult jelentősnek üzemszerű működés esetén. Nem tervezett, nem üzemszerű gyártás esetén pedig a hulladék keletkezése, valamint a műanyag magas hőmérsékleten bekövetkező degradációjából származó légnemű bomlástermékek okozta légszennyezés volt azonosítható. A hatásértékelési eljárás segítségével szisztematikusan azonosítható volt a gyártás során felmerülő összes környezeti tényező és pontozásos rendszerrel megfelelően különbséget lehetett tenni közöttük.

Az ökohatékonysági mutatók meghatározásához a kiindulási anyagok és a villamosenergia felhasználás CO₂ ekvivalensét irodalmi adatok alapján megbecsültem, majd a folyamat anyag- és energiamérlegei alapján meghatároztam a termékek CO₂ ekvivalensét is. Ezután kiválasztottam a folyamatok szempontjából legszemléletesebb öko-hatékonysági mutatókat, amelyekkel jellemezhető volt az előállított termék környezeti hatása. Így a mutatók közé tartozott az 1 kg CO₂ kibocsátásával előállítható termék mennyisége és az ezzel kapcsolatban felmerülő gyártási költségek, valamint az 1 kWh energia felhasználásával előállított termék mennyisége. Jól kimutatható volt, hogy a mechanikai újrahasznosítás segítségével nőtt az 1 kg CO₂ kibocsátásával előállítható termék mennyisége, valamint a gyártással összefüggő költségek is alacsonyabbak voltak. A kukoricacsutka darálék esetében azonban a tisztán PLA-ból történő gyártáshoz képest romlott az energiahatékonyság, az 1 kg CO₂ kibocsátásával előállítható termékmennyiség is jelentősen alacsonyabb volt, és az alapanyag költsége sem volt csökkenthető az alkalmazott gyártási kapacitás mellett.

A módszerek összehasonlításához több szempontot is figyelembe vettem, majd ezek szerint 1-5-ig terjedő skálán értékeltem a teljesítményüket. A szempontok közé tartozott a valós környezeti hatások kimutathatósága, a módszer egyszerűsége és energiaigénye, alkalmazhatóságának rugalmassága, valamint a kopott eredmények értelmezhetősége és kommunikálhatósága is szerepet játszott. Az értékelés alapján a legmagasabb pontszámot az öko-hatékonyság módszere kapta, főként a számszerűsíthető eredmények miatt. Emellett nem volt elhanyagolható, hogy az anyag- és energiamérlegek megléte mindkét másik módszer elvégzésében nagy szerepet játszott, így bár önállóan nem hozott eredményt a műanyag környezeti hatásának csökkenését célzó lehetőségek eredményességéről, fontos alapinformációkat szolgáltatott az értékelés során. Emiatt összességében elmondható, hogy egy műanyagfeldolgozó vállalatnak a saját gyártásával kapcsolatban felmerülő környezeti hatásokat anyag- és energiamérlegek, valamint öko-hatékonysági mutatókkal érdemes jellemeznie. Amennyiben az adott vállalat szerteágazóbb környezeti hatásokkal és kibocsátásokkal rendelkezik, ezek kimutatására jó lehetőséget nyújthat a KIR hatásértékelési eljárása is.

7. IRODALOMJEGYZÉK

- Akhtar, S., Luqman, M., Awan, M. U. F., Saba, I., Khan, Z. I., Ahmad, K., Muneeb, A., Nadeem, M., Batool, A. I., Shahzadi, M., Memon, H., Shad, H. A., Mustafa, G., & Zubair, R. M. (2022). Health risk implications of iron in wastewater soil-food crops grown in the vicinity of peri urban areas of the District Sargodha. *PLoS ONE*, *17*(11 November). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0275497>
- Beckerman, W. (1992). Economic Growth and the Environment: Whose Growth? Whose Environment? In *World Development* (Vol. 20, Issue 4).
- Bezegh, A., Frigyer, A., Bándi, G., Galli, M., Kerekes, S., & Tóth, G. (1999). *Környezeti auditálás* (Budapest). Magyar Szabványügyi Testület (MSZT).
- Boulding, K. E. (1966). *The Economics of the Coming Spaceship Earth*. <http://www.geocities.com/RainForest/3621/BOULDING.HTM>
- Briassoulis, D., Pikasi, A., & Hiskakis, M. (2021a). Recirculation potential of post-consumer /industrial bio-based plastics through mechanical recycling - Techno-economic sustainability criteria and indicators. In *Polymer Degradation and Stability* (Vol. 183). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109217>
- Briassoulis, D., Pikasi, A., & Hiskakis, M. (2021b). Recirculation potential of post-consumer /industrial bio-based plastics through mechanical recycling - Techno-economic sustainability criteria and indicators. In *Polymer Degradation and Stability* (Vol. 183). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109217>
- Bugnicourt, E., Cinelli, P., Lazzeri, A., & Alvarez, V. (2014). Polyhydroxyalkanoate (PHA): Review of synthesis, characteristics, processing and potential applications in packaging. *Express Polymer Letters*, *8*(11), 791–808. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2014.82>
- Chaves, M. M., & Pereira, J. S. (1992). Water Stress, CO₂ and Climate Change. In *Journal of Experimental Botany* (Vol. 43, Issue 253). <http://jxb.oxfordjournals.org/>
- Cinelli, P., Mallegni, N., Gigante, V., Montanari, A., Seggiani, M., Coltelli, M. B., Bronco, S., & Lazzeri, A. (2019). Biocomposites based on polyhydroxyalkanoates and natural fibres from renewable byproducts. *Applied Food Biotechnology*, *6*(1), 35–43. <https://doi.org/10.22037/afb.v6i1.22039>
- Commission on Environment, W. (1987). *Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future Towards Sustainable Development 2. Part II. Common Challenges Population and Human Resources 4*.
- Correa, J. P., Montalvo-Navarrete, J. M., & Hidalgo-Salazar, M. A. (2019). Carbon footprint considerations for biocomposite materials for sustainable products: A review. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 208, pp. 785–794). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.099>
- Cosate de Andrade, M. F., Souza, P. M. S., Cavalett, O., & Morales, A. R. (2016). Life Cycle Assessment of Poly(Lactic Acid) (PLA): Comparison Between Chemical Recycling, Mechanical Recycling and Composting. *Journal of Polymers and the Environment*, *24*(4), 372–384. <https://doi.org/10.1007/s10924-016-0787-2>
- Ellen MacArthur Foundation. (2013). *Toward the circular economy Vol. 2 - opportunities for the consumer goods sector*.
- Eriksson, O., & Finnveden, G. (2009). Plastic waste as a fuel - CO₂-neutral or not? *Energy and Environmental Science*, *2*(9), 907–914. <https://doi.org/10.1039/b908135f>
- Európai Parlament és Tanács. (2019). *DIRECTIVE (EU) 2019/904 -on the reduction of the impact of certain plastic products on the environment*.
- European Bioplastics. (2017, February 7). *What are bioplastics?* [Www.European-Bioplastics.Org](http://www.European-Bioplastics.Org).
- European Bioplastics. (2022). *Bioplastics Market Development Update 2022*.
- Geisendorf, S., & Pietrulla, F. (2018). The circular economy and circular economic concepts—a literature analysis and redefinition. *Thunderbird International Business Review*, *60*(5), 771–782. <https://doi.org/10.1002/tie.21924>

- Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, *114*, 11–32. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>
- Gioia, C., Giacobazzi, G., Vannini, M., Totaro, G., Sisti, L., Colonna, M., Marchese, P., & Celli, A. (2021). End of Life of Biodegradable Plastics: Composting versus Re/Upcycling. In *Chem-SusChem* (Vol. 14, Issue 19, pp. 4167–4175). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/cssc.202101226>
- H. A. Verfaillie, & R. Bidwell. (2000). *Measuring eco-efficiency – A guide to reporting company performance, Final Draft Report*.
- Hajdú, J. (2015). Van megoldás a kukoricacsutka betakarítására. *Agro Napló*, 63–64.
- Harangzó Gábor. (2008). A környezeti teljesítményértékelés módszerei. *Vezetéstudomány*, *39*(2), 38–50.
- Holka, M., & Bieńkowski, J. (2020). Carbon footprint and life-cycle costs of maize production in conventional and non-inversion tillage systems. *Agronomy*, *10*(12). <https://doi.org/10.3390/agronomy10121877>
- Hopmann, C., Schippers, S., & Höfs, C. (2015). Influence of recycling of poly(lactic acid) on packaging relevant properties. *Journal of Applied Polymer Science*, *132*(9). <https://doi.org/10.1002/app.41532>
- Hukkinen, J. (2003). From groundless universalism to grounded generalism: Improving ecological economic indicators of human-environmental interaction. *Ecological Economics*, *44*(1), 11–27. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(02\)00283-5](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(02)00283-5)
- International Organization for Standardization. (2012). *ISO 14045:2012 Environmental Management—Eco-Efficiency Assessment of Product Systems—Principles, Requirements and Guidelines*.
- ISO (International Organization for Standardization). (1999). *Environmental Management – Environmental Performance Evaluation – Guidelines*. ISO/ANSI.
- Joshi, S. V., Drzal, L. T., Mohanty, A. K., & Arora, S. (2004). Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites? *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *35*(3), 371–376. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2003.09.016>
- Khalid, M. Y., Al Rashid, A., Arif, Z. U., Ahmed, W., Arshad, H., & Zaidi, A. A. (2021). Natural fiber reinforced composites: Sustainable materials for emerging applications. In *Results in Engineering* (Vol. 11). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100263>
- Korpi, E., & Ala-Risku, T. (2008). Life cycle costing: A review of published case studies. In *Managerial Auditing Journal* (Vol. 23, Issue 3, pp. 240–261). <https://doi.org/10.1108/02686900810857703>
- Központi Statisztikai Hivatal. (2022). *A fontosabb növények vetésterülete*.
- La Mantia, F. P., & Vinci, M. (1994). Recycling poly(ethyleneterephthalate). In *Polymer Degradation and Stability* (Vol. 45).
- Lim, L. T., Auras, R., & Rubino, M. (2008). Processing technologies for poly(lactic acid). In *Progress in Polymer Science (Oxford)* (Vol. 33, Issue 8, pp. 820–852). <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2008.05.004>
- MMSZ, Buzási Lajosné, Farkass Gábor, & Fekete Alíz. (2022). *A gazdaság erősödése 2021-ben magával hozta a műanyagipar előbbre lépését is*.
- Mohan Munasinghe. (1992). *Environmental economics and sustainable development*.
- Morão, A., & de Bie, F. (2019). Life Cycle Impact Assessment of Poly(lactic acid) (PLA) Produced from Sugarcane in Thailand. *Journal of Polymers and the Environment*, *27*(11), 2523–2539. <https://doi.org/10.1007/s10924-019-01525-9>
- Morschbacker, A. (2009). Bio-ethanol based ethylene. *Polymer Reviews*, *49*(2), 79–84. <https://doi.org/10.1080/15583720902834791>
- Morseletto, P. (2020). Targets for a circular economy. *Resources, Conservation and Recycling*, *153*. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104553>

- Nagy, Á., & Kuti, R. (2016). The Environmental Impact of Plastic Waste Incineration. *AARMS*, 15(3), 231–237.
- Neves, S. A., & Marques, A. C. (2022). Drivers and barriers in the transition from a linear economy to a circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 341. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130865>
- Nova-Institute. (2022). *Data for bio-based structural polymers, preliminary estimations for 2021*.
- OECD.Stat. (2019). *Greenhouse gas emissions from plastics lifecycle*. https://stats.oecd.org/viewhtml.aspx?datasetcode=PLASTIC_GHG_2&lang=en, 2023.05.23.
- Pearce, D. W. (David W., & Turner, R. Kerry. (1990). *Economics of natural resources and the environment*. Harvester Wheatsheaf.
- Pukánszky Béla. (2012). *Bevezetés a műanyagok fizikájába*.
- Pukánszky Béla, & Móczó János. (2011). *Műanyagok*. Typotex. www.tankonyvtar.hu
- Ruggerio, C. A. (2021). Sustainability and sustainable development: A review of principles and definitions. In *Science of the Total Environment* (Vol. 786). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147481>
- S. Schmidheiny. (1992). *Changing course: A Global Business Perspective on Development and the Environment*. MA: MIT Press.
- Sabapathy, P. C., Devaraj, S., Meixner, K., Anburajan, P., Kathirvel, P., Ravikumar, Y., Zabed, H. M., & Qi, X. (2020). Recent developments in Polyhydroxyalkanoates (PHAs) production – A review. In *Bioresource Technology* (Vol. 306). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123132>
- Schyns, Z. O. G., & Shaver, M. P. (2021). Mechanical Recycling of Packaging Plastics: A Review. In *Macromolecular Rapid Communications* (Vol. 42, Issue 3). Wiley-VCH Verlag. <https://doi.org/10.1002/marc.202000415>
- Scoones, I. (2007). Sustainability. *Development in Practice*, 17(4–5), 589–596. <https://doi.org/10.1080/09614520701469609>
- Spaiser, V., Ranganathan, S., Swain, R. B., & Sumpter, D. J. T. (2017). The sustainable development oxymoron: quantifying and modelling the incompatibility of sustainable development goals. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 24(6), 457–470. <https://doi.org/10.1080/13504509.2016.1235624>
- Thiounn, T., & Smith, R. C. (2020). Advances and approaches for chemical recycling of plastic waste. In *Journal of Polymer Science* (Vol. 58, Issue 10, pp. 1347–1364). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/pol.20190261>
- Tonk, R. (2020). Natural fibers for sustainable additive manufacturing: A state of the art review. *Materials Today: Proceedings*, 37(Part 2), 3087–3090. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.017>
- Torma A. (2007). *A Környezeti teljesítményértékelés aggregáló módszerei és az anyagáram- elemzés kapcsolatrendszer. egy integrált vállalati modell megalapozása*.
- Tóth, G. (2002). *Vállalatok környezeti teljesítményének értékelése, A környezeti teljesítményértékelés elméleti gyökerei, módszerei, alkalmazási lehetőségei, terjedése, hasznai és korlátai*.
- Tóthné Szita, K. (2008). *Életciklus-elemzés, Életciklus hatásértékelés*. Miskolci Egyetemi Kiadó.
- Tsiropoulos, I., Faaij, A. P. C., Lundquist, L., Schenker, U., Briois, J. F., & Patel, M. K. (2015). Life cycle impact assessment of bio-based plastics from sugarcane ethanol. *Journal of Cleaner Production*, 90, 114–127. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.071>
- TTMK (Tisztább Termelés Magyarországi Központja). (1998). *Ökoprofit kézi-könyv*. TTMK, BKE.
- UNEP. (2012). *Toward a Life-Cycle Sustainability Assessment, Making informed choices on products*.
- UNEP, C. N. rivm,. (1996). *Life Cycle Assessment: What it is and how to do it, UNEP (United Nations Environment Program)*. Industry and Environment.

- US Environmental Protection Agency (US EPA). (1998). *An Introduction to Environmental Accounting as a Business Management Tool – Key Concepts and Terms*, in M. Bennett, and P. James (eds.): *The Green Bottom Line*. Greenleaf Publishing.
- Vink, E. T. H., Rábago, K. R., Glassner, D. A., & Gruber, P. R. (2003). Applications of life cycle assessment to NatureWorks™ polylactide (PLA) production. *Polymer Degradation and Stability*, 80(3), 403–419. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(02\)00372-5](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(02)00372-5)
- Walter L. Stahel. (2016). *Circular economy*.
- Winter, G. (1997). *Zölden és nyereségesen – Útmutató a környezettudatos vállalatirányításhoz*. Műszaki Könyvkiadó.
- World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). (2000). *Eco-efficiency indicators and reporting*.
- World Economic Forum. (2023). *Why the circular economy is a business imperative*.
- Zenkiewicz, M., Richert, J., Rytlewski, P., Moraczewski, K., Stepczyńska, M., & Karasiewicz, T. (2009). Characterisation of multi-extruded poly(lactic acid). *Polymer Testing*, 28(4), 412–418. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2009.01.012>