
**MŰANYAGOK
BIODEGRADÁCIÓJÁNAK
VIZSGÁLATA A KÖZÖNSÉGES
LISZTBOGÁR (TENEBRIO
MOLITOR) SEGÍTSÉGÉVEL**

P2P – Plastic to Protein

Szerzők:

Kónya Máté Bertalan
Turjanicza Boldizsár

Konzulensek:

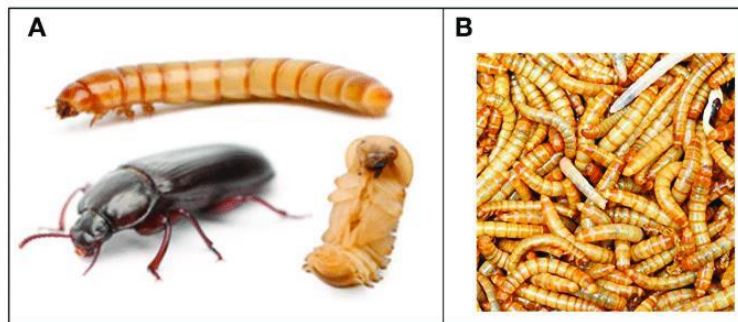
dr. Fiser Béla
Hegyi Flóra
Dóka Erzsébet

Mit hagyunk magunk után, avagy, hogy lesz a műanyagból biomassza?

A kérdések megválaszolásához időben egészen az őskorig visszamehetnénk, hiszen már az ősember is készített, létrehozott akarva-akaratlanul is olyan tárgyakat, kezdetleges műalkotásokat (mint például a barlangrajzok) melyek eredeti funkciójuk elvesztése után, a jövőnek megmaradva ma is az őskor emlékét őrzi. Mit hagy maga után a huszonegyedik századi ember? Az emberiség jelenlegi problémáit végig gondolva hamar eszünkbe juthat a környezetvédelem, a klímaválság, az általános felmelegedés és ezen belül is a hulladékok helyzete. Bolygónkat egyre súlyosabb mértékben érinti a műanyagok felhalmozódásának problémája, a műanyagok összömege már most meghaladja a bolygón élő emlősökét. Tényleg ezt hagyná emlékül a most embere? A keletkező műanyagok tárolására, megsemmisítésére, újrahasznosítására jelenleg nem áll rendelkezésre hosszútávon fenntartható, zöld, gazdaságos megoldás. Az említett megoldás eléréséhez mindenképpen fel kell ismernünk, hogy a probléma Damoklész kardjaként lebeg a fejünk felett, s ha nem cselekszünk gyorsan, lehet már késő lesz. Ezt a helyzetet felismerve az utóbbi években a kutatócsoportok számára világszerte trenddé vált a lebomló műanyagok előállításához köthető kutatások indítása, biodegradációra (azaz biológiai lebontásra) alkalmas élőlénycsoportok keresése.

Ebbe a trendbe bekapcsolódva indítottuk el kutatásunk 2021 szeptemberében, mely egy amerikai kutatás alapján [1][2] a közönséges lisztbogár (*Tenebrio molitor*) lárvája, a közismert nevén a lisztkukac műanyagokkal szemben mutatott biodegradációjával foglalkozik. Célunk egy környezettudatos, élő szervezetek (pl. lisztkukacok) segítségével történő, fenntartható, a körforgásos gazdaság irányelveit követő műanyagbontási módszer kialakítása.

A lisztkukac nem tartozik a „cuki”, illetve „szeretem állatok” közé, hisz a mezőgazdasági kártevőként számontartott közönséges lisztbogár (*T. molitor*) élelmiszerekbe, takarmányokba jutva nem csak elfogyasztja, hanem ürülékével és lárváival szennyezi is azt. Az emberi tevékenység hatására valamennyi földrészen elterjedt: egészen az északi sarkkörtől a déli sarkkörig. A természetes élőhelyek mellett gyakran élelmiszer raktárakban, pékműhelyekben, malmokban raktári kártevőként fordul elő, de természetben fő tápláléka a fa és növényi korhadék. A leginkább éjjel aktív kifejlett bogár teste hosszúkas, kb. 0,5-2 cm hosszú, színe fényes barna, gesztenyebarna, esetleg koromfekete (1. ábra). Tora egyenletesen pontozott, szélessége gyakran meghaladja hosszúságát, illetve szárnyfedőin finoman pontozott sávok futnak végig. Rövid csápjain az ízék vaskos jellegűek. Testéhez hasonlóan csápja és lába vörösesbarna (1. ábra). A szabadban a megtermékenyített nőstények petéiket az avarba, a kártevők, élősködők pedig lisztbe, illetve más élelmiszerekbe rakják. A lisztkukacok sárgásbarna, hosszúkas lárvák, egzotikus állatok eledelként tenyésztik őket (1. ábra). Kemény, kitines kutikulával rendelkeznek. Megfelelő hőmérsékelt és más pozitív hatások esetén évi több generáció is kifejlődhet. [3]



1. ábra *A Tenebrio molitor* életszakaszai [4]

A lisztgubacsokat a legtöbb hobbiallat szívesen fogyasztja (például madarak, hüllők, rágcsálók, vagy ízeltlábúak), emiatt nagy mennyiségben tenyésztik őket. Tenyésztése nem igényel különösebb szakértelmet, fejlődésük teljes átalakulással történik. A petéből lárva fejlődik (amely akár a bogár méretének duplája is lehet), mely többszöri vedlés után bebábozódik (2. ábra).

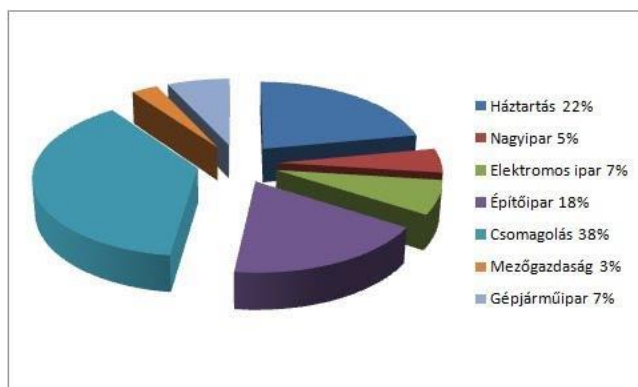


2. ábra *A lisztbogár* fejlődési szakaszai [5]

A végső stádiumban kikel a bábból a kifejlett bogár. Fejlődése pár hónapot vesz igénybe (3-4-6 hónap körülményektől függően). A fejlődésben lévő lárvákat korpával, liszttel, kenyérral, zabpehellyel, uborkával, répával, és egyéb lisztartalmú élelmiszerekkel is lehet etetni. A faj lárvális fejlődése nagyon hosszú, amely optimális hőmérsékleten és alacsony nedvességtartalom mellett körülbelül fél év után fejeződik be teljesen. A kifejlett lárvákat a világ egyes részein emberi táplálékként is hasznosítják. [4][6]

Az ember ősidők óta használ polimereket, gondoljunk csak a táplálékul szolgáló fehérjék, a cellulózzrostokból készült kötelek, de akár a mayák által használt kaucsuklabdákra. Ezek mindegyike hozzátartozott és bizonyos esetekben még ma is hozzátartozik az emberek életéhez. Ezeknek a természetes anyagoknak az átalakítása, feldolgozása a XIX. századtól kezdve ipari méreteket öltött. Hatalmas fejlődésnek indult az ipar a Goodyear által kidolgozott vulkanizálási technológiával kezdődően, amelyből Amerikában és Angliában alig 10 év alatt kialakult a gumiipar és a romahos növekedés nem állt meg itt, hanem folytatódott a cellulóz átalakításával celluloiddá, nitrocellulózzá, ami számos további területet forradalmasított. Ezeket a természetes alapú „műanyagok” -at aztán a XX. század elejétől követték az újabbnál-újabb mesterségesen előállított anyagok. Ezzel egyidőben az anyagszerkezeti kutatások bebizonyították a makromolekulák létezését. Hermann Staudinger bizonyította először, hogy léteznek makromolekulák (más néven polimerek), amelyek kovalens kötással összekapcsolódó kis

egységekből, ún. monomerekből állnak. [7] A 30-as évektől kezdve megindul a műanyagok területén a kutatás-fejlesztés és a tömeges gyártás. Ezt követően az iparág fejlődése messzemenően meghaladta a többi iparág fejlődését és ma széleskörűen elterjedtek a műanyagok a gazdaság legkülönbözőbb területein. (3. ábra).



3. ábra Műanyagok felhasználása a gazdaság különböző területein [8]

A műanyagok sikerének titka egyrészt az előnyös ár/érték arányban, másrészt a széleskörű felhasználási lehetőségükben rejlik. A műanyagok hasznossága mellett ma a környezetre gyakorolt terhelésük, ami leginkább jellemzi őket. Elsődleges felhasználásuk után gondot jelent a keletkező hulladékok elhelyezése, lebontása, vagy újrahasznosítása. Jelenleg a műanyagokkal kapcsolatos kutatások egy jelentős része ebben az irányban történik. A hulladékok hatásának a csökkentése és kezelése többféle módon érhető el: a hulladék mennyiségének csökkentésével, újrafeldozással, kémiai lebontással, égetéssel (a műanyag energiatartalmának visszanyerése hő vagy áramtermeléssel), személtérakókban való megfelelő elhelyezéssel. A kémiai lebontás mellett alternatívaként jelent meg a biológiai lebontás lehetősége, amelynek során különböző élőlények segítségével történik a műanyagok kezelése. [1] [2]

Kutatásunk során két különböző műanyag, a polisztrirol (PS) és a poliuretán (PUR) biológiai lebontását vizsgáltuk lisztkukacok segítségével. [1] [2]

A polisztrirol széles körben elterjedt, amelynek habosított formája (4. ábra), a hungarocell, nikecell néven alkalmazott hőszigetelő anyag, amelyet az építőanyagiparban jelentős mennyiségben alkalmaznak. Habosítás nélkül számos használati tárgy, például tejföldsdoboz, tubuskupak készül belőle. A különböző vastagságú hőszigetelő lapokat építkezéshez vagy utólagos szigeteléshez üvegszál szövetttel és speciális bevonattal alkalmazzák. A polisztrirol tiszta állapotban rideg és átlátszó, de színezhető hőre lágyuló műanyag, amely nagyon jó elektromos szigetelő. Melegítve könnyen préselhető formába. Égésével irritáló és mérgező füst keletkezik. Vízben nem, de szerves oldószerekben jól oldódik. Megjelenése és a mechanikai tulajdonságai tág határok között változtathatóak. Készítenek belőle háztartási eszközöket, poharakat és táányérokat, élelmiszer tároló dobozokat és joghurtos vagy egyéb tejtermékes poharakat, optikai lencsét is. Az ütésálló kivitelezésből burkolatokat és dobozokat, tartályokat, játékokat, evőeszközt, CD és DVD tartót.



4. ábra Polisztirol csomagolóanyagként használva [9]

A másik műanyag, amire kiterjedtek a vizsgálataink az a poliuretán volt. A poliuretánnak számos különböző megjelenési formája ismert, ezek közül az ún. purhab (5. ábra) használata a hőszigetelés egyik leghatékonyabb formája. Távol tartja a füstöt, bűzt, nedvességet és betömi a hiányosságokat.



5. ábra Poliuretán hab [10]

A poliuretánt Otto Bayer (1902 - 1982) német kémikus fejlesztette ki 1937-ben. Jelenleg kiindulási anyagai között a diizocianátok és a többértékű alkoholok szerepelnek. Utóbbiak forrásául a természetben előforduló szénhidrogének átalakítása szolgál. Ugyanakkor nagyon érdekes kutatások folynak abban az irányban, hogy az eddig felhasznált poliolo helyett a habokat xilit és fruktóz alapú ionos folyadékkal helyettesítsék. [11]

Minden olyan makromolekula poliuretánnak tekinthető, amelyben számos uretán funkcióscsoport található.

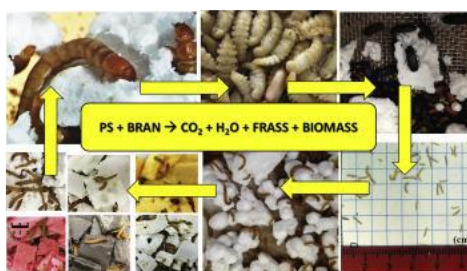
A poliuretán habok az alapanyagoktól és az előállítás körülményeitől függően lehetnek kemények, illetve lágyak, ami meghatározza felhasználási területüket is.

A poliuretán felhasználási területe többek közt a hézagok, rések, repedések tömítése pl.: az ablakok körüli hézagok kitöltése, üregek kitöltése, a hő- és hangszigetelés, a kárpitozott bútorok és habszivacs-betétek készítése, a ragasztó- és festékgyártás és a matracok, autóülések.

Műanyagból biomassza. Jól hangzik. De mégis hogyan?

Mint a jellemzéseinkből kiderül, a polisztirol egy olyan tartós műanyag, amely a legváltozatosabb környezeti tényezők mellett sem bomlik el jelentős mértékben. Nagy mennyiségben gyártják kereskedelmi céllal, így vált a talaj, a folyók, a tavak és az óceánok jelentős szennyezőanyagává. 2015-ben azonban a Stanford és Beihang Egyetem kutatói felfedezték, hogy a *Tenebrio molitor* (közönséges lisztbogár) lárvája képes a PS biológiai lebontására (6. ábra). [1] A kizárólag polisztirollal táplált lárvák esetében a lisztukacok bélrendszerének rövid (12-15 órás) tartózkodási ideje alatt eltávolított PS százalékos összetétele 2-3 héten keresztül fokozatosan nőtt, majd 65%-os értékeken stagnált. A polimermaradványok a bélsárban a részleges depolimerizáció és oxidáció jeleit mutatták. Minden vizsgált PS-

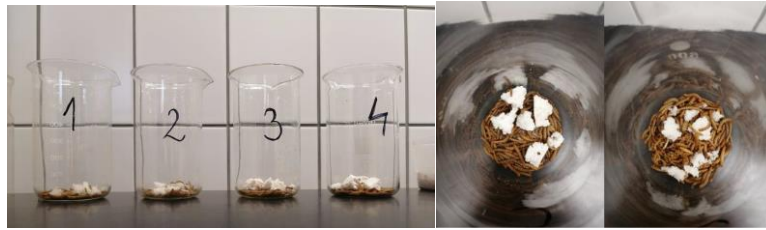
hulladék lebomlott, a kevésbé sűrű habok bomlottak a leggyorsabban. A korpával és polisztirollal etetett lisztkukacok az életsiklus minden szakaszát (lárva, báb, bogár, tojás) befejezték és a második generációban is kedvező volt a PS lebontása, ami megnyitotta az utat a szelektív tenyésztés előtt. [1] [2] Hogyan képesek erre? Az emésztés során a kukacok a műanyagokat CO₂-á és biomasszává alakítják, amit a bélbaktériumaik segítségével érnek el. A kutatók a kukacoknak a tápkeverékkel együtt antibiotikumot is adtak annak érdekében, hogy meg tudják határozni milyen bélbaktériumok játszanak szerepet a polimerek lebontásában. További vizsgálatokat követő izoláció során kiderült, hogy a PS lebontási folyamat az *Exiguobacterium* sp. jelenlétének köszönhető. Ezen PS-bontó bélbaktériumok jelenléte elengedhetetlen, hiszen miattuk megy végbe a biodegradáció. Ezek a baktériumok a lisztkukacok középső bélszakaszában élnek. Az izolációs vizsgálatok során találtak két polietilén (PE) lebontó baktériumtörzset is, a *Bacillus* sp.-t és *Enterobacter asburiae*-t. [1] Ezekre a vizsgálatokra alapozva két polimer, a polisztirol és a poliuretán biodegradációjának a vizsgálatát tűztük ki célul lisztkukacok segítségével.



6. ábra PS biológiai lebontása [1]

2021 szeptemberében a Lévay József Református Gimnázium és Diákotthonban működő Mentor program keretében kezdtünk el dolgozni egy rovarokkal kapcsolatos olvasmányélmény [12] kapcsán – amiben megemlítésre került az eredeti kísérlet [7] [8] – a közönséges lisztbogár lárvájának műanyagbontási képességeit vizsgáló kutatáson.

Kutatási célként azt tűztük ki, hogy egyrészt reprodukáljuk az eredeti kísérletet és megvizsgáljuk, hogy a polisztirol mellett más műanyagokat is képesek-e lebontani a lisztkukacok, illetve milyen hatással van ez a folyamat a lisztbogár populációra. A kutatási folyamat elején egymástól izolált egyedekkel és kis mennyiségű, 0,1-0,2 gramm műanyaggal (PS) kísérleteztünk. Ekkor, mivel mérhető fogyás nem volt és a lárvák többsége tartalékát felhasználva bebábozódott, segítséghez folyamodtunk és a kutatással megkerestük a Miskolci Egyetem Kémiai Intézetét. Itt segítséget kaptunk két konzulens - dr. Fiser Béla kutató és Hegyi Flóra vegyészmérnök hallgató - személyében. A személyi feltételek mellett a kutatás optimális környezeti feltételeinek betartása, reprodukálhatósága miatt az egyetem egyik laboratóriumába folytattuk a munkát. Itt pontosabb műszerekkel (pl. analitikai mérleg) tudtunk a továbbiakban dolgozni. Az itt végzett kísérletek (7. ábra), melyeket 50, illetve 100 egyeddel és 20-20 g műanyaggal végeztünk el, alátámasztották az eredeti kutatást [1] [2] és azt is megállapítottuk, hogy a lárvák napi 34-36 mg műanyagot képesek lebontani.



7. ábra Főzőpohárban egy hónapon keresztül alatt folytatott kísérletek polisztirol (PS, 1-2), illetve poliuretán (PUR, 3-4), illetve a lisztkeverék populációk felülnézetből.

A műanyagok önmagukban nem elegendőek a lisztkeverék életműködésének fenntartásához, illetve nem képesek a műanyagok teljes mértékű lebontására, így van olyan mikroműanyag, ami kiürül a szervezetükből. A bomlástermékek vizsgálata további méréseket igényel abban a tekintetben, hogy marad-e és mennyi mikroszemcsés műanyag az ürülékben. A továbbiakban szerettünk volna nagyobb mennyiségű műanyaggal is kísérletezni, ezért az iskolai laborban 4500 ml-es üvegedényekben (8. ábra) 1:3 arányban műanyagot etettünk a lárvákkal.



8. ábra Kísérleti elrendezés polisztirol és poliuretán lisztkeverékkel történő biodegradációjának vizsgálatához.

Ebben a kísérletben a műanyagok (PUR 80 g, PS 30 g) mennyiségének növelése eddig nem tapasztalt jelenségre világított rá: a lárvák etológiai változásokon is keresztülmennek. Az etológiai változás leginkább a túlélési ösztön ritkán látott viselkedési formákat váltott ki az egyedekből. A műanyag fogyasztása mellett megjelent a kannibalizmus is. A műanyagfogyasztás és a természetes táplálék hiánya morfológiai elváltozásokat is előidézett. Többek között a polisztirolt fogyasztó és később ennek fogyasztása után kifejlődő egyedek között több morfológiai elváltozás is szembetűnő: ilyen például a fedőszárny(ak), csáp(ok), lába(k) és hártás szárny(ak) hiánya, de volt teljes mértékben, hiánytalanul kifejlődő egyed is. A poliuretánt fogyasztó egyedek közül viszont egyik sem tudott teljesen kifejlődni.

Egy hónap vizsgálati idő után a lárvák táplálékát polimerekről természetes szerves táplálékra – búzakorpa és kovászos kenyér – változtattuk. A teljes táplálékváltás előtt egy átállási időszakot hagytunk, mely alatt szintén 1:3 arányban tartalmazott műanyagot és már a korábban említett természetes táplálékot a rendszer. Ebben az időszakban az átállított táplálékot nem voltak képesek megemészteni az egyedek, mivel bélrendszerük teljesen a műanyag fogyasztására állt át, így az új táplálék közül is a műanyagokat fogyasztották el először. A korábban polisztirolt fogyasztók többsége morfológiailag hiánytalan bogárrá fejlődött ki, míg a poliuretánt fogyasztók általánosságban elpusztultak. A lebontási folyamat végtermékeinek vizsgálata és az esetlegesen visszamaradó/keletkező mikroműanyagok mennyiségének meghatározása további méréseket igényel. Emellett pedig további élőlények (pl. *Zophobas morio* [13]) biodegradációs potenciálját is vizsgálni kívánjuk és összehasonlítjuk az eddigi eredményeinkkel.

Összességben a kutatás során kapott eredményeink, tapasztalataink alapján elmondható, a műanyagok gyártása terén kialakult új irányvonal, trend, vagyis a lebomló műanyagok előállítása mellett a már meglévő, sok problémát okozó műanyagok megsemmisítése, a hatékony hulladékkezelés még jó ideig központi témája lesz a kutatásoknak. Az élő organizmusok felhasználása a probléma megoldására néhány éve került előtérbe. Az elsődleges cél, vagyis a műanyagok lebontása mellett a lebontásért felelő élő szervezetek - mi esetünkben a lisztkukacok - fehérjeforrásként, takarmányként történő felhasználása nagyon ígéretes irány a fejlesztéseknek. Sikertörténet az irodalomban leírt kísérletek reprodukálása és megmutattuk, hogy a lisztbogár (*Tenebrio molitor*) lárvája, a lisztkukac képes a polisztirol biodegradációjára, viszont nem az eredeti tanulmányban leírt mennyiségekkel, arányokkal. Vizsgáltuk továbbá a lisztkukacok poliuretán bontó képességet is. További vizsgálatok szükségesek, hogy a visszamaradó/keletkező mikroműanyagok mennyiségét meghatározzuk. Általánosságban azonban elmondható, hogy a műanyaggal táplálkozó példányok morfológiai és etológiai változásokon mentek keresztül, de bizonyos mértékben sikeresen alkalmazkodtak a természetestől eltérő táplálékhoz és kis mennyiségben képesek a kísérlet során használt műanyagok biodegradációjára. Mindamelllett a lisztkukacok a polisztirol lebontására alkalmasabbnak bizonyultak, viszont általánosan elmondható, hogy mindkét műanyag biodegradációja során az élővilágban maradandó károsodás lép fel. A kutatásunk során alkalmazott technológia a globális műanyagproblémára jelenlegi eredményeink és kísérleteink alapján megoldást még nem kínál, viszont iránymutató trend lehet a további kutatások előtt.

Ezúton szeretnénk megköszönni a helyszínt, az eszközöket, a lehetőséget a Miskolci Egyetem Kémiai Intézetének és Prof. Dr. Viskolcz Béla intézetigazgató úrnak. A projekt koordinálását, a személyes segítséget, a felkészítést Dr. Fiser Bélának, a kutatásban nyújtott segítségét, szakmai tudását és tapasztalatát Hegyi Flóra másodéves vegyészmérnök hallgatónak, a projekt mentorálását és az ötleteket pedig Dóka Erzsébet tanárnőnek.

Forrásjegyzék

- [1] Y. Yang, J. Yang, W.Mi. Wu, J. Zhao, Y. Song; L. Gao, R. Yang, L. Jiang, Biodegradation and Mineralization of Polystyrene by Plastic-Eating Mealworms: Part 1. Chemical and Physical Characterization and Isotopic Tests. *Environmental Science & Technology*, **2015**, 12080–12086. DOI: 10.1021/acs.est.5b02661
- [2] Y. Yang, J. Yang, W.Mi. Wu, J. Zhao, Y. Song; L. Gao, R. Yang, L. Jiang (2015): Biodegradation and Mineralization of Polystyrene by Plastic-Eating Mealworms: Part 2. Role of Gut Microorganisms. *Environmental Science & Technology*, **2015**, 2087–12093. DOI: 10.1021/acs.est.5b02663
- [3] Nagy európai természetkalauz. Összeáll. és szerk. Roland Gerstmeier. 2. kiadás. Budapest: Officina Nova. 1993. ISBN 963 8185 40 6
- [4] De Loof Arnold, Schoofs Liliane, Intraluminal Farnesol and Farnesal in the Mealworm's Alimentary Canal: An Unusual Storage Site Uncovering Hidden Eukaryote Ca²⁺-Homeostasis-Dependent “Golgiicrine” Activities. *Frontiers in Endocrinology*, 10, **2019**, DOI: 10.3389/fendo.2019.00885
- [5] <https://www.bugburger.se/wp-content/uploads/2018/11/mealwormguide.pdf>

[6] <https://hullomagazin.hu/hu/blog/gerinctelenek/elesegallatok-a-lisztukac-tartasa-es-tenyesztese.271.ahtml>

[7] Pukánszky Béla, Móczó János (2011): Műanyagok, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vegyészmérnöki és Biomérnöki Kar Fizikai Kémia és Anyagtudományi Tanszék,
https://oszkdk.oszk.hu/storage/00/00/59/38/dd/1/Muanyagok_animaciok_nelkul.pdf

[8] <https://sites.google.com/site/adhifhaio/home/muanyagtermeles-es-felhasznalas-napjainkban>

[9] <https://hirmagazin.sulinet.hu/hu/tudomany/polisztrol>

[10] <https://hirmagazin.sulinet.hu/hu/tudomany/a-poliuretan>

[11] Pecsmány Dániel, Emma Zhang, Mester Enikő, Jánosi Benjámin, Juhász Koppány, Viskolcz Béla, Fiser Béla, Poliuretán habok szintézise cukor alapú ionos folyadékokkal, *Scientia Denique*, IX. évf., 1. kiadás, 167-18. old.
https://www.scientiadenique.net/files/books/Scientia_Denique11_IX_1_2019.pdf

[12] Anne Sverdrup-Thygeson: Terra Insecta ford. Merkl Ottó HVG Könyvek 2020 ISBN 9789633049617

[13] Jiarui Sun, Apoorva Prabhu, Samuel T. N. Aroney, Christian Rinke, Insights into plastic biodegradation: community composition and functional capabilities of the superworm (*Zophobas morio*) microbiome in styrofoam feeding trials, *Microbial Genomics*, **2022**, 8 (6), DOI: 10.1099/mgen.0.000842