

## Bioanyagok felosztása és orvosi célú felhasználása

A közleményben a gyógyászatban leggyakrabban használt, testnedvekkel vagy szövetekkel közvetlenül érintkező mesterséges és természetes polimereket és ezek főbb alkalmazási területeit ismertetjük.

*Tárgyszavak: biokompatibilitás, toxicitás, sterilizálhatóság, allergén hatás, felületi jellemzők, biomechanikai tulajdonságok*

### Bioanyagok osztályai

Bioanyagok alatt olyan természetes, mesterséges vagy hibrid anyagokat értünk, amelyeket implantátumként vagy orvosi eszközökben olyan módon használunk fel, hogy azok a szervezettel közvetlen kontaktusba kerülnek, és pótolják annak valamilyen hiányosságát. Ide tartoznak a mesterséges szívbillentyűk, csontpótlások, pacemakerek stb. valamint a biokerámiák, különféle polimerek és fémek. Noha ebben az összefoglalóban a polimerekre fogunk koncentrálni, a kerámiákkal és fémekkel való összevetés (előnyök, hátrányok) is szóba fog kerülni. A polimerek terén szó lesz a kontrollált gyógyszer hatóanyag kibocsátásról és a rákterápiáról is.

A bioanyagok esetében a kulcskérdés az élő szövettel való kölcsönhatás. A bioanyagok között vannak valóban biológiai eredetű polimerek, mint amilyen a keményítő, a kitozán, a kollagén, biológiai kompozitok, mint a csont; vannak teljesen szintetikus anyagok (mesterséges polimerek, kerámiák, fémek) és vannak olyan hibridek, amelyekben mind természetes, mind mesterséges komponensek szerepelnek. A bio-orvosi eszközök, az in situ diagnosztika és a tudatos szövetépítés (szövetmérnöki tevékenység) fejlesztése nagyon fontossá vált az utóbbi évtizedekben. Noha bioanyagokat már a történelem hajnala óta alkalmaznak a sérülések gyógyítására (sajnos a háborúk erős ösztönzést jelentettek az ilyen megoldások fejlesztésére), ezek tudatos, anyag-tudományi és biológiai megközelítése viszonylag új fejlemény. A bioanyagok osztályozásának egy lehetséges módja aszerint történik, hogy milyen szervekben, szervrendszerekben vagy egyéb testrészekben használják fel őket (lásd az 1. táblázatot). Egyes anyagoknál (pl. fémek, kerámiák, bizonyos műanyag alapú rendszerek) a hosszú távú stabilitás a döntő, más esetekben (varratok, felszívódó támasztékok, gyógyszerleadó anyagok) éppen a program szerinti lebomlás. A biodegradálható bioanyagok között elsőbbséget élveznek a természetes eredetű polimerek, a protézisek, fogászati anyagok; egyszer használatos orvosi eszközök esetében viszont a mesterséges polimerek használatosak. A mesterséges polimereket eredetileg nem erre a célra fejlesztették, de mivel mechanikai tulajdonságaik hasonlítanak bizonyos biológiai szövetekére, erre is felhasználják őket. A leggyakrabban alkalmazott szintetikus polimerek a polietilén, polipropilén, poli(metil-metakrilát), poli(etilén-tereftalát), poliuretánok. Ezeknek az anyagoknak néhány alkalmazását sorolja fel a 2. táblázat. A műanyagok előnye a kerámiákkal és fémekkel szemben, hogy sokkal változatosabb módszerekkel, olcsóbban feldolgozhatók és nagyon sok alakban, formában felhasználhatók. Mivel sokféle műanyag létezik, könnyebb kiválasztani az adott célra legalkalmasabbat. A műanyagoknak természetesen számos hátrányuk is van: vizet vehetnek fel,

a felületük fehérjéket köthet meg, nehéz őket sterilizálni, kioldható anyagokat tartalmaznak, mechanikai fáradásuk, kopásuk gyorsabb a kerámiáknál és a fémeknél.

A polimer alapú hidrogélek (mind a természetes alapúak, mint a kitozán, alginát vagy fibrin-alapúak, mind a mesterséges alapúak, mint a poli(vinil alkohol), széles körben felhasználást találnak különböző terápiás eljárásokban, elsősorban mint hordozóanyagok (nukleinsavak, citokinek, proteinek hordozására). Amfifil (azaz vízkedvelő és víztaszító részeket is tartalmazó) polimerekből felépülő micellákat ugyancsak szívesen használnak hatóanyagok célba juttatására.

1. táblázat.

A bioanyagok osztályozása szervek, szervrendszerek vagy egyéb testrészek szerint.  
(Forrás: Chong és társai (2022))

Felosztás		Példa
Felosztás szervek szerint	Szem Fül Vese Húgyhólyag	Intraokuláris lencse Mesterséges kengyel, fülcsiga Vesedialízis berendezések Katéterek és sztentek*
Felosztás szervrendszerek szerint	Idegrendszer Keringés Vázrendszer Izomzat Légzőszervek Húgyuti Epidermális	Idegstimulátorok Mesterséges erek Ízületek, csontok pótlása Izomstimulátorok és varratok Hörgő sztentek Katéterek, sztentek, dialízis készülékek Varratok, égési sérülés védelem, mesterséges bőr
Felosztás egyéb szervek szerint	Szervek működésének segítése Gyógyulás segítése Törött csontok pótlása Kezelés segítése Diagnózis segítése	Pacemakerok Varratok, csavarok, csontlemezek Medence protézisek Katéterek és dréncsövek Szenzorok és katéterek

\*Szent alatt olyan merevítő szerkezeteket értünk, amelyek kis átmérővel, hajlékonyan bejuttathatók erekbe vagy más, eltömődött henger alakú testrészekbe, ott szétnyithatók és stabilizálják a folyadék vagy levegőáramlást a sérült testrészben.

2. táblázat.

Mesterséges polimerek néhány tipikus bio-orvosi alkalmazása.  
(Forrás: Chong és társai (2022))

Műanyag	Alkalmazás
Polipropilén	Vérbetegségek gyógyítása, vér oxigéntartalmát növelő membrán, mesterséges ér
Polietilén	Sebészeti implantátumok, inak, katéter és dréncső, csípőízületi betétek
Poli(metil-metakrilát)	Fogpótlás, koronák, csontcement
Poli(etilén-tereftalát)	Mesterséges ér, szívbillentyű
Poliuretán	Sebkötöző anyagok, mell implantátum, szívszövet pótlására alkalmas tapasztok, gyógyszer célbajuttató eszközök, mesterséges ér, lágyszövetpótlás

## Polimerek újszerű alkalmazásai az egészségügyben

Sokat hallani az elektronika újszerű alkalmazásairól az orvosi diagnosztikában, amelyek ugyancsak látványosak, de ezzel párhuzamosan folyik egy másik forradalom is a biológia és kémia határvidékén, amely a kezelés egyedivé tételét szolgálja és teszi lehetővé. A modern orvostudomány a fejlett országokban jelentősen megnyújtotta az élettartamot, de a szövethelyettesítés, különösen az inszalagok pótlása nagyon nagy nehézségekbe ütközik. Az első ínhelyettesítő implantátumok az 1980-as években jelentek meg, de nem voltak elég tartósak, a műtétet időnként meg kellett ismételni. Manapság az úgynevezett poloxamerekből, amelyek etilénoxid-propilénoxid-etilénoxid triblokk kopolimerek, politejsavval történő körfonatolás (braiding) után megfelelően rugalmas és tartós implantátumokat lehet készíteni. Sokan az ilyesmit már a transzhumanizmus jelének tartják, amelynek célja az emberi test gyakorlatilag halhatatlanná tétele. Ettől még nagyon messze vagyunk, de kétségtelen, hogy az anyagtudomány fejlődésével sok korábban elképzelhetetlen probléma megoldható. A Stanfordi Egyetemen olyan öngyógyuló polimert fejlesztettek, amelynek szakadási nyúlása 300% körüli, és villamos behatásra nyúlik vagy húzódik össze (úgynevezett elektroaktív polimer). A polimer térhálós, de a hálószerkezetben ionok is vannak, amelyek reagálni képesek a villamos térre. Távlatilag elképzelhető izmok részleges helyettesítése ilyen anyagokkal, vagy mesterséges bőr kialakítása. Még az is lehetséges, hogy csonkolt testrészekben a tapintóérzék helyreállítása is sikerül.

A nanotechnológia, nanoanyagok alkalmazása ugyancsak sok lehetőséget rejt. Nanorészecskéknek nevezzük az olyan aggregált vagy agglomerált struktúrákat, amelynek legalább 50%-a az 1–100 nm tartományba esik. Az orvostudomány régi célja a kezelés teste szabása, amelynek része az, hogy csak annyi hatóanyagot használjunk fel és csak ott, amennyi és ahol szükséges. Ennek tipikus példája a rákterápia, ahol az intravénásan beadott kemoterápiás szer sok esetben az egészséges sejteket is támadja. Egy francia kutatócsoport a kemoterápiás hatóanyagot egy közelebről nem megadott vinilpolimerhez kapcsolta, a megoldandó probléma az, hogy a kémiai kötés ott és akkor bomoljon föld, ahol szükség van rá a kezeléshez. A szervspecifikus kötődést úgy érik el, hogy a nanorészecskékhez olyan kötőhelyeket is rendelnek, amelyek adott sejtreceptorokhoz kapcsolódnak. Különösen nehéz az agytumor kezelése egyrészt az úgynevezett vér-agy gát miatt, másrészt azért, mert az agyban levő folyadékban annak nagy viszkozitása miatt lassan diffundálnak a nanorészecskék. Ennek javítására a részecskék felületét polietilén-glikollal vonják be („pegilezés”), amely nem toxikus és „csúszósabbá” teszi a felületet.

Tekintettel arra, hogy csökken a vérdonorok száma, nagy erőfeszítéseket tesznek a vérpótlékok előállítására. Ennek részeként hidrogélekből olyan mesterséges vörösvértesteket készítenek fluorpolimer szerszámokban, amelyek egerekbe injektálva hatékonyak és ellenállónak bizonyultak, és a „mű-vörösvértestek” rugalmasságuk miatt a szűkebb ereken is át tudnak hatolni. A találmányt nemcsak erre a célra lehet használni, hanem mindenféle hatóanyag célba juttatására is a szervezet olyan részeibe, ahová csak szűk erek vezetnek.

Van egy sokat vitatott terület, amelynek nem mindenki örül, a mikro- és nanorobotok fejlesztése. Inszulinkezelésre az MIT tudósai kifejlesztettek egy áfonyaszem méretű kapszulát, amelyben egy fagyasztva szárított inzulin tű van, és ezt egy cukormáz borítja, amely addigra oldódik fel, mire a kapszula a gyomorba ér, ebben a pillanatban az inzulin-tű felszabadul és a gyomorfallon át a véráramba jut. Maga a kapszula felszívódik. A probléma csak az, hogy jelenleg a kapszula ára sokszorosa a hagyományos inzulin injektoroknak.

Kisméretű lágy robotokat készítenek szilikongumiból is, a Max Planck Intézetben pl. egy 4 mm méretű robotot fejlesztettek ki, amely mágneses térrel távolról vezérelhető. Ez a kis

kukac-szerű robot végig mehet az emésztő vagy a húgycsatornán, vagy akár a testüregen belül is mozoghat, és a hatóanyagot akár a szív felszínén is elhelyezheti. A robot specialitása a rendkívül mozgékony, amivel az akadályokat ki tudja kerülni.

A jövő gyógyászatának része a 3D nyomtatás is, amelyet a kórházakban alkalmazva egyedi méretű és alakú implantátumok gyárthatók le. Arra is vannak kísérletek, hogy a szintetikus műanyagokat pl. őssejtekkel kombinálják és így mesterséges szerveket hozzanak létre. Kiborgok? Hát attól még messze vagyunk, de az ötlet a gyógyászatban is hasznosítható.

Az első műanyag protézisek között voltak a PMMA (plexiüveg) lencsék, amelyeket azóta rugalmas szilikon, hidrofil és hidrofób akrilát lencsék váltottak fel, amelyeket sokkal kisebb sebméreten lehetett bejuttatni a szembe. A kontaktlencsék ugyan nem tekinthetők protézisnek, de ugyancsak nagyon nagy fejlődési utat jártak be, mert itt a zavartalan oxigéndiffúziót is biztosítani kell.

A mozgásszervi protézisek látványos eredményeket mutattak a sérült atléták esetében, ahol a szénszálas epoxi végtagok segítségével hasonló vagy jobb eredményeket értek el a kezelt atléták, mint egészséges társaik. A kézprotézisek esetében inkább a 3D nyomtatott, csak műanyagból készült megoldások terjedtek el. A PEEK (poliéter-éter-keton) biokompatibilitása olyan jó, hogy sok esetben az addig legjobbnak tekintett titán helyettesítésére is alkalmas. Használják nyakcsigolyák helyettesítésére, csípőprotézisekben és fogászatban is. Szilárdsága hasonló a csonthoz és jól össze is épül vele. Mindezen felül viszonylag könnyen megoldható 3D nyomtatása is.

A testen belül enzimek hatására lebomló polimerek közül a legismertebbek a politejsav (PLA) és poliglikolsav (PGA) alapú varratok, de kísérleteznek egyéb, ezeknél merevebb lebomló polikarbonátokkal is, amelyek akár csontpótlásra is alkalmasak lesznek az osteoarthritis (idült ízületi gyulladást kísérő csontbetegség) és osteoporosis (csonttrikulás) kezelésénél, és ha funkciójukat betöltötték, fokozatosan feloldódnak.

A polimereket a gyógyszeripar is szívesen használja. Nemcsak lágy kapszulák borítására (a rossz íz kiküszöbölésére), hanem hordozóként is. A ciklodextrinek (gyűrűs, keményítőből készült vegyületcsalád) alkalmas különböző hatóanyagok zárványkomplekként való megkötésére, ami segíti a szervezetbe történő bejuttatást. A lassan lebomló hordozóanyagok lehetővé teszik, hogy a hatóanyag ne a nyelőcsőben vagy a gyomorban, hanem a vékonybélben szívódjon fel.

## **Gyógyászatban használt anyagok összehasonlító vizsgálata**

Egy közlemény fogászati és koponyasérülések gyógyításánál használt anyagokat hasonlít össze, az utóbbiak esetében hangsúlyt fektetve a 3D nyomtatás lehetőségeire. A fogászati anyagok esetében alapkövetelmény, hogy ne oldódjon fel a szájból előforduló folyadékokban, se ne abszorbeálja azokat, mert az méretváltozást okoz. A jó tapadás a többi jelenlevő természetes és mesterséges anyaghoz ugyancsak alapkövetelmény, ahogy a toxicitás hiánya és a biokompatibilitás is. Külön előnyt jelent, ha a használt anyagok gátolják a baktériumok szaporodását és a biofilm képződést. A protézisek esetében a nagy szilárdságnak rugalmassággal kell párosulnia, hogy megvédje az alatta levő lágyabb szöveteket a rágás során fellépő erőktől. A kopásállóság fogpótlásoknál ugyancsak nagyon lényeges, a hőtágulási tényezőnek hasonlóan kell lennie a foganyagához és a lágyuláspontnak a forrásban levő víz felett kell lennie. Az anyagnak színezhetőnek kell lennie, hogy be lehessen állítani a megfelelő természetes színt, amely személyenként is változik. Fontos a tartósság és a javíthatóság, valamint nem lehet túlságosan drága. A modern bioanyagok már arra is képesek, hogy kimondottan stimulálják a csontszövetek növekedését,

miközben maguk fészívódnak. A koponyasérülések gyógyításánál használt műanyag elemeket 3D nyomtatással állítják elő, mert ezek tetszőleges formák előállítását lehetővé teszik.

### Fogászati alkalmazások

A fogászati és egyéb orvosi alkalmazásokban használt polimerek tulajdonságait foglalja össze a 3. táblázat. A fogászatban legtöbbször alkalmazott polimerek a PEEK, a PLA és ennek majdnem tiszta sztereomerje a PLLA, a PMMA. Antimikrobiális tulajdonságaik miatt gyógyszerhordozókként is felhasználhatók a regeneratív, rekonstruktív (helyreállító) és a profilaktikus (megelőző) terápiában. Segítenek a sűrűség csökkentésében, korrózióállóak és fogászati ragasztókban segítik a pulpa és a dentin regenerációját.

A PEEK fogászati alkalmazása nagy jövő előtt áll. Nemcsak hőre lágyuló és jól alakítható, de fizikai jellemzői megközelítik a csontét és nem nyelik el a Röntgen-sugarakat. Ezért kiválóan alkalmazható fogpótlásban, fogsorok vagy becsavarozható implantátumok gyártásában is. A 3D nyomtathatóság is nagy előny, ezen felül nem oldódik vízben és hőálló (akár 300 °C-ig), tehát

### 3. táblázat.

A fogászatban és egyéb orvosi alkalmazásokban használt polimerek jellemzői.

(Forrás: Kroczeck és társai (2022))

Polimer	Felhasználás	Biodegradáció/ felszívódás	Biokompatibilitás
Politejsav (PLA)	Diffúziógátló membránok, gyógyszer célba juttatás, irányított szövetregenerálódás (fogászat), ortopédia, sztent, kapocs, varrat, szövetmérnöki alkalmazás	+	+
Poliglikolsav (PGA)	Diffúziógátló membránok, gyógyszer célba juttatás, irányított szövetregenerálódás (fogászat), ortopédia, sztent, kapocs, varrat, szövetmérnöki alkalmazás	+	+
Polikaprolakton (PCL)	Hosszútávú gyógyszer célba juttatás, ortopédia, kapocs, sztent	+	+
Poli(1,8-oktándiol-ko-citrát) (POC)	Véredények mechanikai tulajdonságainak utánzása, emberi aorta hámsejtek szaporodásának elősegítése emberi aorta izomsejtek növekedésének gátlása in vitro, terápiás bevonat	+	+
Politejsav-glikolsav kopolimer (PLGA)	Diffúziógátló membránok, gyógyszer célba juttatás, irányított szövetregenerálódás (fogászat), ortopédia, sztent, kapocs, varrat, szövetmérnöki alkalmazás	+	+
Poli(dimetil-sziloxán) (PDMS)	Kontaktlencsék	+	+
Poli(metil-metakrilát) (PMMA)	Ortopédiai, sebészeti és fogászati protézisekhez készülő ötömasszák, intraokuláris lencsék, gentamicin hordozó fertőzött ízületek kezeléséhez	+	+
Polietilén (PE)	Protézisekben és implantátumokban alkalmazott kötőanyag	-	+

3. táblázat. Folytatás

Polimer	Felhasználás	Biodegradáció/ felszívódás	Biokompatibilitás
Poli(hidroxi-alkanoátok) (PHA)	Varratok, sebészeti kötözőanyagok, kardiovaszkuláris tapaszok, ortopédiai csapok, adhezív diffúziógátlók, sztentek, vezérelt szövetgyógyító és regeneráló eszközök, ízületi porcgyógyító eszközök, idegvezetékek, íngyógyító eszközök, csontvelő támaszok	+	n/a
Poli( $\beta$ -hidroxibutirát) (PHB)	Lassított gyógyszerleadás, ortopéd alkalmazások, kengyelcsont sztent (fül)	+	n/a
Poli(para-dioxanon) (PPD)	Filmek, habok, laminátumok és felületi bevonatok	+	+
Poli(hidroxivalerát) (PHV)	Lassított gyógyszerleadás, ortopéd alkalmazások, kengyelcsont sztent (fül)	+	n/a
Poli(éter-éter-keton) (PEEK)	Implantátumok területén használják mesterséges koponyacsont pótlásként, ujj- és térdimplantátumok alkatrészeként, gerincimplantátumokban, a fogászatban egyre gyakrabban hídtámaszként, részleges fogpótlásnál és teljes (rögzített) fogpótlásnál, beleértve a pontos rögzítést is	+	+
Polifoszfazének (PPZ)	Vérrel érintkező eszközök, gyógyszerbevitel, vázszerkezetek rekonstrukciója	n/a	n/a
Polidioxanon (PDS)	Törés rögzítése nem teherviselő csontos esetében, varratok, sebcsipeszek	+	n/a
Polikarbonát (PC)	Vérszeparátorok, sebészeti maszkok, nagy nyomású injekciós tűk, eldobható fogászati termékek, dializáló berendezések alkatrészei	-	+
Polietilén-glikol (PEG)	Nyílt sebek kezelésénél használják kötéseket komponense, idegrendszeri károsodások kezelésénél is használják, javítja a génterápia hatékonyságát	+	+
Poliuretánok (PUR)	Mesterséges szervek, mell-implantátumok, mesterséges szív, transzplantátumok, membránok, katéterek, mesterséges bőr, nyelvcső protézis, csatorna ideg-regenerálódáshoz, szívbillentyűk, szívkamrák aorta transzplantátumokban	+	+
Polipirrol (PPy)	Villamosan vezérelhető szövet vagy sejt-támasztó közeg, idegprotézisek, bioszenzorok és gyógyszer bejuttatás	+	-

n/a: nem alkalmazható

jól hősterilizálható. Míg modulusa hasonló a csontéhoz (3,1 GPa), szilárdsága kisebb (80 MPa) mint a fog dentinjének, ezért sokszor kompaundálják is (pl. szénszállakkal), aminek a hatására szilárdsága 120 MPa-ra, Young modulusa 18 GPa-ra nőhet. Kopásállósága összemérhető

a fémekével, sőt, oldalirányú igénybevétel esetében még jobb is. Az anyag biokompatibilisnek minősül és nem találtak toxikus, karcinogén, mutagén vagy immunogén hatást. A csontokhoz való tapadását javítani lehet, ha pl. hidroxipatit tartalmú felületi bevonatot hoznak létre rajta.

A PLA ugyancsak széles körben használt biopolimer, amely biodegradálható és megújuló forrásokból szintetizálható. Az FDA (az amerikai gyógyszer és élelmiszer engedélyező hivatal) a PLA testfolyadékokkal való érintkezést engedélyezi, ezért a regeneratív terápia, szövetépítés, implantátum-gyártás, bőr- és íngyógyítás területén is használják. Számos orvosi berendezés gyártására is alkalmas. Itt is előnyt jelent a 3D nyomtatás. A mechanikai jellemzők változtathatók, mert a tejsav monomerek sztereoizomereinek arányával a kristályosság befolyásolható. A PLA számos szintetikus polimerrel ömledék állapotban keverhető (blendek), bár ilyenkor a teljes biológiai lebonthatóság nem teljesül. A molekulatömeg, a kristályosság, a pH és a gyártási körülmények változtatásával a PLA lebomlási sebessége változtatható és bizonyos határok között beállítható. Ezt a tulajdonságát mind az implantátumok gyártásakor, mind a szabályozott gyógyszerleadás tervezésekor hasznosítják. Ha hordozóanyagként használják gyógyszer célba juttatásához, meg lehet kerülni egyes fiziológiai változásokat és felszívódási gátakat, amelyekkel a hatóanyag találkozna, ha nem hordozóanyaggal együtt juttatnák a szervezetbe. Ez célzott terápiáknál (pl. rák kezelésénél) is fontos és kevésbé áll fenn annak a veszélye, hogy a kisebb mól-tömegű hatóanyag még azelőtt kiszűrődik a vérből, hogy a hatás helyére eljutna. A PLA-ból készített implantátumokba helyezett terápiás anyagok csökkentik a helyi fertőzés és a kilökődés veszélyét is. A PLA ugyan felszívódik a szervezetben, de hidrofób felülete miatt a sejtekkel való kölcsönhatása nem túl erős, ami önmagában felerősíti a gyulladással való válasz kialakulását, ezért tisztán ritkán használják, inkább módosított változatait vagy kompozitjait. Hidroxipatit hozzáadásával pl. jelentősen nő a hajlítószilárdság és nő a csontokkal való összeépülésre való hajlam (osteogenezis). A felület érdessége és hidrofilitása nő, a gyulladás veszélye csökken. Ezt a jellemvonását fogászati implantátumokban is hasznosítják. Átmeneti implantátumként is használják, ahol a csontszövet fokozatosan pótolja a lebomló PLA-t.

Fontos biopolimer csoportot képeznek azok a polimerek, amelyek oldhatósága vagy duzzadóképesége függ a hőmérséklettől – ezeket szokták „intelligens polimereknek” is nevezni, mivel válaszolnak a környezeti ingereire. Számos területen felhasználják őket, pl. a szövetnövesztésben, gyógyszer hatóanyagok célba juttatásában, elválasztástechnikában és a nanomedicinában. A hő hatására bekövetkező változások között említhető a szol-gél átmenet, az indukált duzzadás vagy szinerézis, a felületi jellemzők megváltozása. Olyan polimereket választottak ki ezekre az alkalmazásokra, amelyeknek átmeneti hőmérséklete még a szervezet által tolerálható tartományban van. Az egyik legismertebb ilyen polimer a poli(N-izopropil-akrilamid) (PNIPAM) és származékai. A hőre érzékeny polimerek egy része az ún. LCST (alsó kritikus elegyedési hőmérséklet), más részük az UCST (felső kritikus elegyedési hőmérséklet) szerinti viselkedést mutatja. Az LCST esetben a kritikus hőmérséklet alatt a polimer homogén oldatot képez, fölötte azonban kicsapódik, mert gombolyag alakot vesz fel. Az átmenet gyors és többnyire teljesen reverzibilis. Az UCST eset ennek a fordítottja: ilyenkor hűtés közben lép fel kicsapódás vagy gélesedés, de ezek nem olyan „megbízhatóan” működnek, mint az LCST polimerek.

### *Ortopédiai alkalmazások*

Az ortopédiai alkalmazásokban meg kell különböztetni a felszívódó és a nem felszívódó polimereket. A nem felszívódók között a legszélesebb körben a poli(metil-metakrilát) (PMMA) alapú csontcementeket használják, amivel az implantátumot a csonthoz kötik, de teljes ízületpótlásra is használják. A fogászati protézisekhez hasonlóan itt is egy polimerizált anyagot

kevernek monomerrel, és a kapott pasztát polimerizálják végleges alakba. A manipuláció ideje alatt a keveréknek elég folyékonnak kell lennie ahhoz, hogy behatoljon a csonttörés belsejébe. A cementeket három folyási kategóriába sorolják: a kis, a közepes és a nagy viszkozitású anyagok közé. A bioaktivitás elősegítésére itt is szívesen alkalmazzák a hirdoxiapatit töltőanyagot, amelyek lassabban kötnek, kevésbé melegszenek polimerizáció közben és nagyobb a kötés utáni szilárdságuk. Próbálkoztak atibiotikum adagolással is, hogy csökkentsék a fertőzés veszélyét, de voltak kísérletek más, nem antibiotikum jellegű baktericid termékekkel is (pl. kitozán és grafén együttes alkalmazása).

A csontpótlás területén a polietilén (PE) a PMMA után a leggyakrabban alkalmazott polimer. A kopásállóság javítása érdekében gyakran használnak erősen térhálósított, sőt újabban E-vitaminnal stabilizált erősen térhálósított polietilént. A PEEK polimert és annak kompozitjait kiváló mechanikai jellemzőik, stabilitásuk miatt különösen gerinc-implantátumokban alkalmazzák. A sokkal olcsóbb polipropilént is használják jó feldolgozhatósága és viszonylag jó mechanikai jellemzői miatt pl. nagy szilárdságú rudak készítésére csontok rögzítéséhez, de esetenként gerinc implantátumokban is.

A szilikongumi (poli(dimetil-sziloxán), PDMS) egészen más mechanikai jellemzői miatt kedvelt: nagy rugalmasságú, biokompatibilis elasztomer, amelynek kiváló vegyi és hőstabilitása van (sterilizálhatóság). Az ortopédián belül elsősorban a kéz és lábsebészetben alkalmazzák.

A felszívódó polimerek előnyei között említhető, hogy nem kell őket kioperálni és hatóanyagok bejuttatására is használhatók, ugyanakkor kisebb a szilárdságuk és jóval drágábbak, mint a nem felszívódó polimerek. A biológiai jellemzők javítására itt is gyakran használnak töltőanyagokat, pl. hidroxipapatitot, kalcium-foszfátot, kerámiákat vagy bioaktív üvegeket. A természetes biodgradálható polimerek között említhetünk egyes proteineket (kollagén, fibrin), poliszaharidokat (keményítő, alginátok, hialuronsav és származékai. A degradálható szintetikus polimerek között leggyakrabban a politejsavat (PLA), a poliglikolidot (PGA), ezek kopolimerjeit és a polikaprolaktont használják. Ezeket a polimereket az ortopédiában csontok gyógyítására és regenerálására, sérülések gyógyítására (traumatológia és sportsebészet) használják.

Összeállította: Dr. Bánhegyi György

Chong E.T.J., Ng J.W., Lee P.C. = Classification and Medical Applications of Biomaterials – a Mini Review, BioIntegration, 2022, 3.k.,

<https://doi.org/10.15212/bioi-2022-0009>

<https://plastics-themag.com/Plastics-explore-new-territories> 2020, november

Krocze K., Turek P., Mazur D., Szczygielski J., Filip D., Brodowski R., Balawender K., Przeszlowski L., Lewandowski B., Orkisz S., Mazur A., Budzik G., Cebulski J., Olesky M. = Characterisation of Selected Materials in Medical Applications, Polymers, 2022, 14.k., 1526