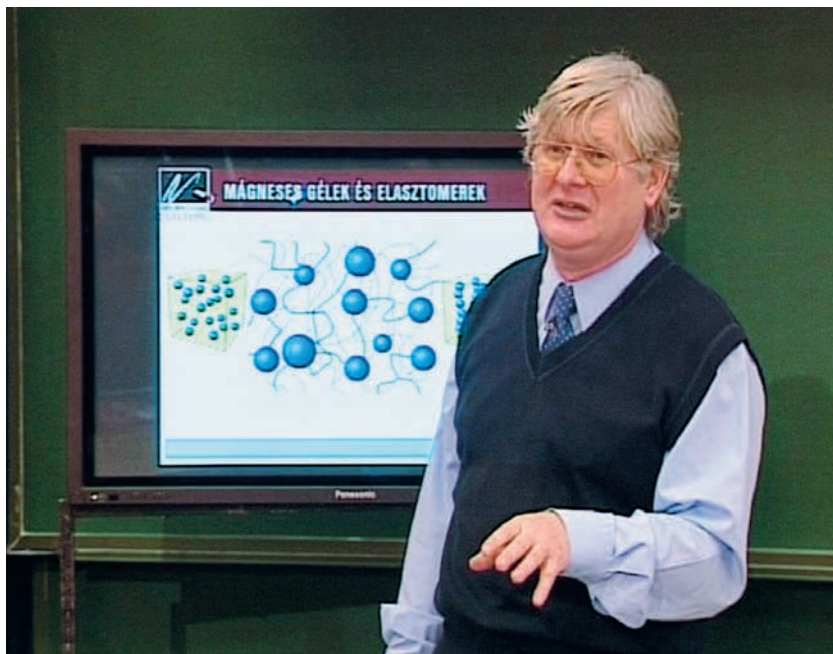


ZRÍNYI MIKLÓS

A huszonegyedik század anyagai: az intelligens anyagok



Zrínyi Miklós
kémikus
egyetemi tanár

1949-ben született. 1974-ben az ELTE Természettudományi Karának vegyész szakán végzett. 1985-ben a kémiai tudományok kandidátusa, 1993-ban akadémiai doktora lett. 1996-tól az MTA Fizikai-Kémiai és Szeretlen Kémiai Bizottságának tagja.

Pályáját az ELTE TTK Kolloid-kémiai és kolloidtechnológiai Tanszékén kezdte. 1987–1989 között Humboldt-ösztöndíjasként az ulmi egyetemen kutatózott. 1992 óta a BME Fizikai Kémiai Tanszékének vezető kutatója, 1994-től tanszékvezető egyetemi tanára. Szakterületének nemzetközileg elismert művelője, több mint 140 tudományos közlemény szerzője, illetve társszerzője.

Főbb kutatási területei: az intelligens anyagok előállítása és tulajdonságainak vizsgálata, polimergélek mechanikai, termodinamikai és orvosi biológiai tulajdonságainak tanulmányozása, mintázatképződések vizsgálata gélekben.

Az előadás címe első hallásra talán meglepőnek tűnik. Az intelligencia szó egyik jelentése, amely felbátorított e terminológia használatára: alkalmazkodóképesség új helyzetekhez. Ilyen értelemben beszélhetünk tehát anyagok és anyagi rendszerek intelligenciájáról. Az elnevezés az anyagtudomány olyan új területére utal, amely az anyag és közvetlen környezete – az élő rendszerekhez hasonló – aktív kapcsolatát igyekszik feltárni és kiaknázni. E tudományág elsődleges célja olyan szintetikus anyagok tervezése, előállítása és tulajdonságainak vizsgálata, amelyek felhasználói szempontból előnyösen reagálnak a környezetből származó hatásokra.

Az intelligens anyag fogalma a tudományos szakirodalomban először az 1980-as évek végén jelent meg. A témának ma már több saját szakfolyóirata van (pl. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* és *Smart Materials and Structures*), és évente rendeznek rangos nemzetközi konferenciákat a tudomány és az élenjáró technológia képviselőinek részvételével. Az intelligens anyagok vizsgálata az Európai Unió soron következő tudományos programjában a kiemelt kutatások közé tartozik.

Előadásunkban áttekintjük az anyagtudomány fejlődését, azt, hogy milyen tulajdonságok teszik az anyagot intelligenssé. Foglalkozunk az intelli-

**Szintetikus anyag:**

alkotóelemeiből vegyi úton előállított anyag.

Kerámiák:

általában többé-kevésbé nehezen olvadó ipari termékek, amelyeket agyagásványtartalmú nyersanyagokból szobahőmérsékleten végzett formázással, majd 900–2000 °C közötti égéssel állítanak elő. Újabban egyre nagyobb jelentőségűek a szintetikus alapanyagokból készült kerámiák.

Monolit:

egy darabból, nem elemekből álló szerkezet.

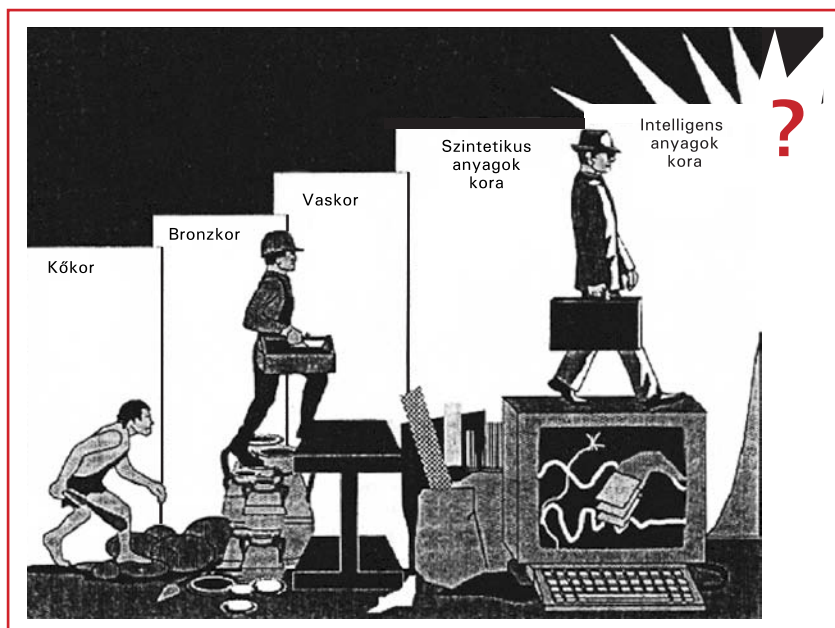
gens kemény anyagokkal, megnézzük, mi a lényeges különbség a szerkezeti anyag és az intelligens anyag között; továbbá az intelligens lágy anyagokkal, amikor is magyarázatot keresünk arra, hogy mi okozza az elektroreológiai folyadék elektromos tér hatására bekövetkező megszilárdulását, valamint arra, hogy miért különleges anyagok az intelligens polimergélek. Választ keresünk arra, hogy milyen tulajdonságok összekapcsolásával született meg a gélüveg, melyik jelenség alkalmazása teremtette meg a hatóanyag-kioldódás szabályozásának új módszerét, azaz a szabályozott hatóanyag-leadást intelligens géllal. Végül a polimergél mint mesterséges izom kérdésével foglalkozunk. Áttekintjük, hogy milyen hátránnyal rendelkeznek a gélkollapszus elvén működő izommodellek, és milyen előnyöket jelent az elektromos és/vagy mágneses tér alkalmazása.

Az anyagtudomány fejlődése

Az intelligens anyagok megjelenése az anyagtudomány hihetetlenül nagy fejlődésének következménye. E fejlődés szorosan kötődik a különböző korokban fellelhető tipikus anyagokhoz. A kő-, bronz- és vaskort a 20. században a **szintetikus anyagok** kora követte.

A kémia és a társtudományok szédítő fejlődése, a kémiai szerkezet és a tulajdonságok közötti kapcsolat felismerése ma már lehetővé teszi adott célra tudatosan tervezett anyagok előállítását. Speciális fémek, **kerámiák**, műanyagok, valamint ezek kombinációi képezik modern szerkezeti anyagainkat. Ezek alapvető feladata a felhasználó számára minél előnyösebb mechanikai (főként szilárdságtani) és termikus tulajdonságok biztosítása. Az egyedi (**monolit**) anyagok tulajdonságait még jelentősen javíthatjuk is társított (kompozit) anyagok alkalmazásával. A modern anyagtudomány-

Anyagok és történelmi korszakok





Anyagok hierarchiája

Szerkezeti anyagok:

gépek, készülékek, építmények anyagai.

Funkcionális anyag:

olyan anyag, amelyben más-más anyagra jellemző, egyedi – főleg fizikai – tulajdonságok összekapcsolódnak. Funkcionális anyag például a szelén, mivel a fényerősség-változás hatására változtatja a vezetőképességét, tehát az optikai és elektromos tulajdonságok kapcsolódnak össze egy anyagban.

Intelligencia:

alkalmazkodóképesség új helyzetekhez; képesség a jelenségek lényeges vonásainak felismerésére, a dolgok közötti összefüggések meglátására, a tények helyes megítélésére.

Intelligens anyag:

azok a multifunkcionális anyagok, amelyek közvetlen környezetük fizikai vagy kémiai állapotának egy vagy több jellemzőjét érzékelik, e jeleket feldolgozzák, majd pedig ezekre, állapotuk jelentős megváltoztatásával, gyors és egyértelmű választ adnak.

Multifunkcionális anyag:

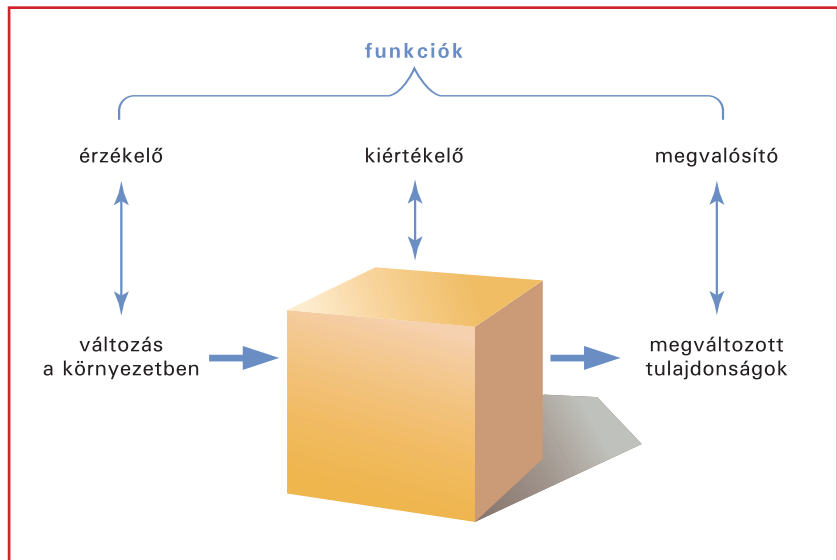
Kettőnél több fizikai tulajdonság összekapcsolódása egyetlen anyagi rendszeren belül. Ilyen például a Terfenol ötvözet, amelynek elektromos térben változik a mérete, és ez a kapcsolat függ a hőmérséklettől is. Tehát egy anyagban háromféle fizikai tulajdonság: a méret, az elektromos és a termikus tulajdonságok kapcsolódik össze.

ban a szerkezeti anyagokat első generációs szintetikus anyagoknak nevezhetjük. Ezek egyik jellemzője, hogy környezetükkel passzív módon érintkeznek, az általános felfogás szerint annál jobbak, minél hosszabb ideig őrzik meg változatlan formájukat és tulajdonságaikat.

A **szerkezeti anyagok** választékának bővítése és az új típusú felhasználói igények megjelenése elindította a **funkcionális anyagok** kutatását. E második generációs anyagok kifejlesztésénél már nem a legelőnyösebb mechanikai tulajdonságok elérése a fő cél, hanem a különböző anyagokat jellemző individuális, főként fizikai tulajdonságok összekapcsolása egyetlen anyagi rendszeren belül. Néhány elem önmagában is mutat funkcionális tulajdonságot. Például a szelénnek az egyébként kis elektromos vezetőképessége erős megvilágítás hatására ezerszeresére növekszik. A fényhatás megszűnése után a vezetőképesség visszaáll az eredeti értékére. A szilícium a fényerősség változását feszültséggé alakítja át. Ezek az elemek az optikai és az elektromos tulajdonságok között teremtenek kapcsolatot. A különböző fizikai tulajdonságok egy anyagon belüli összekapcsolásának elvileg nincs akadálya, ennek ellenére a funkcionális anyagok száma nem túl nagy.

Intelligens anyagoknak azokat a funkcionális anyagokat nevezzük, amelyek érzékelik közvetlen környezetük fizikai, illetve kémiai állapotának egy vagy több jellemzőjét, e jeleket feldolgozzák, majd pedig ezekre, állapotuk jelentős megváltoztatásával, gyors és egyértelmű választ adnak. Az érzékelő funkció leggyakrabban a szóban forgó anyag és környezete közötti dinamikus egyensúly következtében valósulhat meg. A környezet megváltozása szükségszerűen az egyensúlyi állapot megváltozását idézi elő. Az újonnan kialakuló állapotban pedig az anyag más tulajdonságokkal rendelkezik.

Fontos szempont a változást előidéző hatás és az erre adott reakció kapcsolata. Intelligens anyagokra olyan hatás–válasz kapcsolat a jellemző, amelynél a környezet kis változására igen nagyfokú tulajdonságbeli változás következik be, azaz a válasz mértéke nem arányos, hanem jóval nagyobb az inger nagyságánál. További ismérv a megfordíthatóság, azaz a változást kiváltó hatás megszűnte után az eredeti állapotnak kell visszaállni. A gyors reakcióidő szintén szükséges követelmény.



Anyagi intelligencia

Fototróp anyag:

fényáteresztő képessége látható fénnel történő besugárzásakor visszafordítható módon lényegesen csökken.

Terfenol:

terbium-diszpróziium-vas ötvözet (Tb-Dy-Fe); termomagnetostruktív anyag, amelynek magnetostruktív tulajdonsága hőmérsékletfüggő.

Magnetostrikció:

szilárd anyagok méretének megváltozása mágneses tér hatására. A próbatest hossza a tér irányában mérve megnő, arra merőlegesen pedig csökken.

Elektrostrikció:

szilárd anyagok méretének megváltozása elektromos tér hatására. A próbatest hossza a tér irányában megnő, arra merőlegesen csökken.

Az új típusú anyagok egyik előfutára az 1967-ben, az Egyesült Államokban kifejlesztett fototróp üveg. Ha látható fénnel sugározzuk be, az ilyen üveg fényáteresztő képessége – visszafordítható módon – lényegesen csökken. Ez az üveg kiválóan alkalmas olyan szemüvegek gyártására, amelyeknek a fényáteresztő képessége a napsugárzás erősségétől függ. A **fototróp** üvegnél két lényegesen különböző jelenség – a kémiai egyensúly és a fényáteresztő képesség – összekapcsolása eredményez minőségileg új tulajdonságokat. A tudomány már régóta ismeri az anyag több más „intelligens” megnyilvánulását, de ezek tudatos keresése és kiaknázása csak az utóbbi időben került előtérbe.

Az intelligens anyagokat két nagy csoportra oszthatjuk. Az egyik csoportba tartoznak azok az anyagok, amelyek a természetes környezet változásaira (hőmérséklet, kémiai környezet, mechanikai hatás, fény stb.) reagálnak. A másik csoportba pedig azok, amelyek a változásukhoz szükséges információt a számítógépből elektronikus jel formájában kapják. A számítógéppel befolyásolható anyagi tulajdonságoknak határt szab az a kapcsolat, amit a számítógép és az anyag között létesíthetünk. Szabályozástechnikai szempontból az elektromos és/vagy a mágneses tér alkalmazása tűnik a legkézenfekvőbbnek. Ezeket a tereket ugyanis számítógéppel vezérelt elektronikával pillanatszerűen kelthetjük, változtathatjuk és megszüntethetjük. Éppen ezért fontos kutatási irányzat az anyagi tulajdonságok említett terekkel történő befolyásolása.

Anyagaink lehetnek kemények vagy lágyak. A kemény anyagok – mint például a fémek, kerámiák és a műanyagok nagy többsége – széles határok között ellenállnak a nyomásnak, nyírásnak és más mechanikai hatásoknak. A lágy anyagokat mechanikai hatásokkal szemben kis tehetetlenség jellemzi, aminek következtében ezek az anyagok folyékonyak vagy képlékenyek. Az anyag keménységének és mechanikai ellenálló képességének elektromos és/vagy mágneses terekkel történő megváltoztatása jelentősen csökkenthetné a felhasználandó anyagok mennyiségét és növelhetné az alkalmazási lehetőségek számát.

Intelligens kemény anyagok

Az intelligens anyagok jelentős hányadát alkotják azok a szilárd anyagok, amelyeknek tulajdonságai elektromos vagy mágneses tér hatására változnak meg. Bizonyos ötvözetek, főként a ritkafémek (Tb, Dy, Sa) ötvözetei, mint például a **Terfenol-D** vagy a Samfenol, mágneses tér hatására változtatják méretüket. Ezt a jelenséget **magnetostrikciónak** nevezzük. A próbatest hossza a tér irányában mérve megnő, arra merőlegesen pedig csökken. Az elektromos tér hatására bekövetkező méretváltozás (**elektrostrikció**) különleges esete a **piezoelektromosság**.

A méretváltozás általában igen kicsi, ezért ezek a jelenségek nagyon sokáig csak tudományos érdekességek voltak. Néhány évtizeddel a felfedezésük után azonban megszülettek azok a speciális mikroszkópok, amelyekkel az anyag nemcsak atomi szinten vizsgálható, hanem mozgatható is. Ebben már nagyon fontos szerephez jutnak ezek az anyagok, mivel nagy pontosságú pozicionáló eszközök készíthetők belőlük.

Az alakmemóriával rendelkező anyagok az intelligens anyagok nagy, önálló csoportját alkotják. Ide tartoznak az emlékező fémek és műanyagok. A legismertebb alakmemóriával rendelkező fém egy nikkeltitán ötvözet, a Nitinol. Amennyiben az emlékező fém formáját egy kritikus hőmérséklet felett hozzuk létre, akkor a fém erre az alakra a kritikus hőmérséklet alatt bekövetkező maradandó alakváltozás után is emlékszik. Ha alacsony hőmérsékleten valamilyen mechanikai hatás miatt a fémtárgy alakja megváltozik, akkor ez a kritikusnál magasabb hőmérsékletre hevítve visszanyeri az eredetileg kialakított formáját. Felmelegítés nélkül megállapíthatatlan, hogy a fém memóriája milyen eredeti formát őriz. E szokatlan tulajdonság az alak és a termikus kölcsönhatás szoros kapcsolatának köszönhető. Speciális **polimerekkel** is lehet alakot tárolni. Az emlékező anyagok megjelenése új lehetőségekkel gyarapíthatja a modern technikát. Gondoljunk például arra, hogy a világűrben használt nagy kiterjedésű eszközeink célba juttatása milyen nehéz és költséges feladat. Megfelelő memóriával rendelkező anyagok kifejlesztésével megvalósítható, hogy az egyik állapotban az anyag nagyon kompakt, a másikban pedig a feladat ellátásához szükséges nagy kiterjedésű szerkezetnek felel meg. Az állapotváltozással, amit előidézhetünk például a hőmérséklet megváltoztatásával, előhívhatjuk a „memóriában” tárolt alakzatot. A feladat elvégzése után a műtárgy eltávolítása ismét a „csomagolással” kezdődhet.

Az emlékező anyagokat az orvosi gyakorlatban is eredményesen használhatják. Például elzáródott erek újbóli megnyitásakor alkalmaznak emlékező fémeket és polimereket. Az anyag kémiai szerkezetének megfelelő megválasztásával a kritikus hőmérsékletet éppen az emberi test hőmérsékletére állítják be, majd a fémet vagy **műanyagot** melegen spirál alakúra hajtják össze. Ezt követően az így nyert rugót lehűtik, aztán egyenesre nyújtják. Betolják az érbe, majd a testmeleg hatására az egyenes szál ismét spirállá ugrik össze, így tágítja az eret és megakadályozza azt, hogy az esetleges vérrögöket a véráram magával ragadja.

Piezoelektromosság:

poláris tengelyű kristályokban (pl. kvarc, turmalin) mechanikai feszültség hatására fellépő elektromos potenciálkülönbség. Az atomok polarizációján alapszik: nyomás hatására a külső elektronhéjak eltolódnak az atomtörzshöz viszonyítva. Ha a kristályra húzóerők hatnak, hasonló, de ellentétes előjelű potenciálkülönbség keletkezik. Az elektromos potenciálkülönbség a nyomó/húzóerők megszűnésével eltűnik. Piezoelektromosan gerjeszthető kristályok elektromos tér hatására kisméretű alakváltozást szenvednek.

Kvarc:

kristályos szilícium-dioxid, az egyik legelterjedtebb ásvány a Földön, a földkéreg ásványainak 12,6 százaléka. A gyakori ásványok közül a legkeményebb, vegyileg is rendkívül ellenálló.

Polarizáció:

elektromos töltésmegosztás, valamely elektromos töltés erőterében elhelyezett eredetileg semleges anyagban bekövetkező töltésszétválás.

Polimer:

azonos vagy különböző kis-molekulákból kémiai reakcióval keletkező óriásmolekula.

Műanyag:

szerkezeti anyag, amelynek egyik fontos alkotórésze valamely vegyipari módszerrel előállított nagy molekulájú anyag. Elsősorban ez az óriásmolekula határozza meg a műanyag legfontosabb tulajdonságait.



Intelligens lágy anyagok

Gél:

a gélek olyan anyagi rendszerek, amelyek alaktartók, de könnyen deformálhatók. Nagy folyadék-tartalmuk miatt fizikai tulajdonságaik az oldatokéhoz hasonlóak. A polimergélek alaktartása a gélben szerteágazó polimerváznak köszönhető, mely útját állja a folyadék spontán „kifolyásának”. A jelentős mennyiségű folyadék pedig megakadályozza a laza térhálós szerkezet összeomlását. A polimergélek környezetükkel egyensúlyban lehetnek. Az egyensúlyt az ún. egyensúlyi térfogattal jellemezhetjük. Egyensúlyban a folyadékmolekulák duzzasztó (ozmotikus) hatását kompenzálja a polimer molekulákban e deformáció ellen ébredő visszahúzó erő hatása.

Komplex folyadékok:

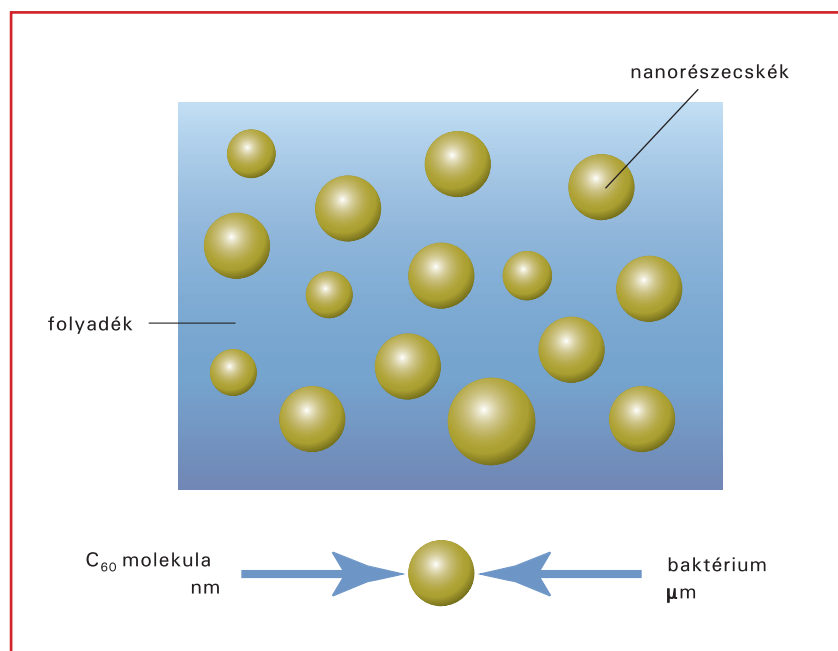
olyan folyadék közegű anyagrendszerek, amelyek nanométeres vagy mikrométeres méretű, egyenletes eloszlású szilárd részecskéket tartalmaznak. A kis méret következtében a szilárd alkotók nem ülepednek ki a folyadékban. Ha ezek a részecskék speciális elektromos vagy mágneses tulajdonságokkal rendelkeznek, akkor azt a látszatot keltik, mintha a folyadék mutatna elektromos vagy mágneses tulajdonságokat.

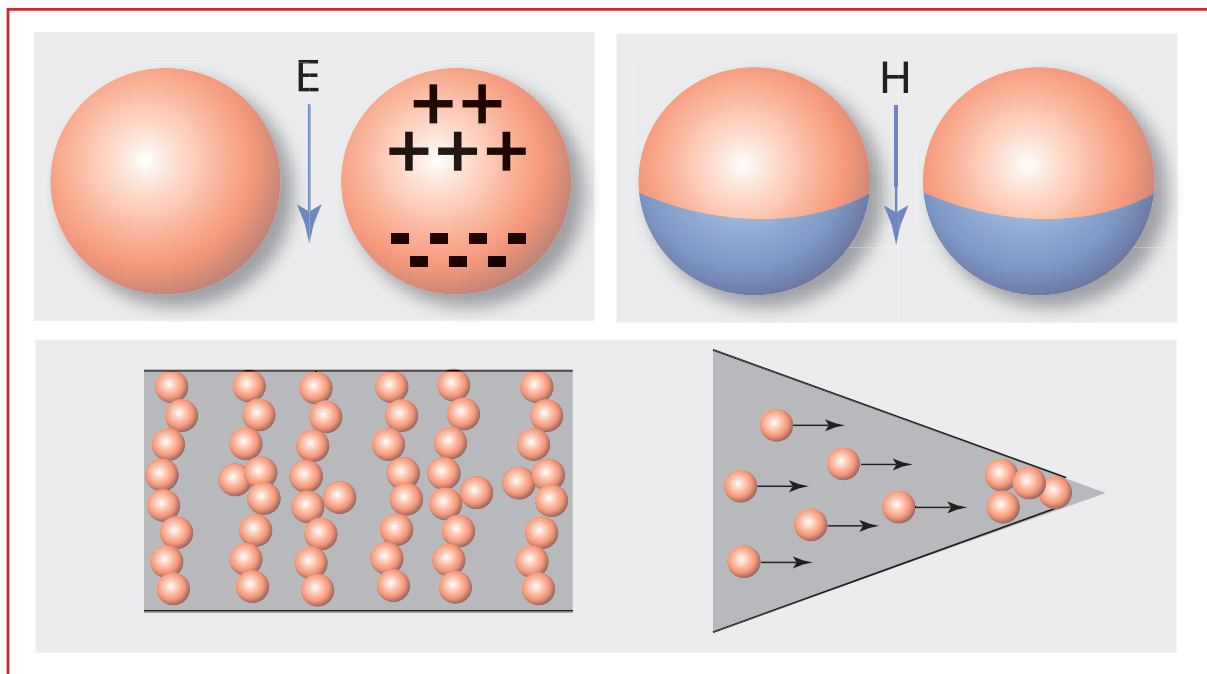
Nanotechnológia:

nanostrukturált anyagok előállítását, tulajdonságainak megváltoztatását és nanoméretű termékek, eszközök, illetve készülékek kifejlesztését és gyártását célzó technológia.

Ha összehasonlítjuk a mindennapi életben használt szerkezeti anyagainkat a kétségkívül sokkal tökéletesebb biológiai anyagokkal, akkor megállapíthatjuk, hogy igen nagy különbség van közöttük. Ipari anyagaink többnyire kemények, merevek és szárazak, a biológiai anyagok nagy többsége pedig lágy, rugalmas és nedves. Magától adódik a kérdés, hogy mi az oka ennek a szakadéknak, és miért ne lehetne a lágy anyagokat a modern technikában szélesebb körben alkalmazni. A lágy anyagok közé sorolhatjuk a folyadékokat, a rugalmas műanyagokat, biológiai anyagaink nagy többségét, valamint a szilárd és a folyadék halmazállapot között elhelyezkedő nagy folyadéktartalmú **géleket**.

Az utóbbi időben igen nagyfokú érdeklődés mutatkozik az ún. **komplex folyadékok** iránt. Ezek olyan folyadék halmazállapotú anyagok, amelyek egyenletes eloszlású, nanométeres (a mm milliommód része) vagy mikrométeres (a mm ezred része) méretű szilárd részecskéket tartalmaznak. A kis méret következtében a szilárd alkotók nem ülepednek ki a folyadékban. Ha ezek a részecskék speciális elektromos vagy mágneses tulajdonságokkal rendelkeznek, akkor azt a látszatot keltik, mintha a folyadék mutatna elektromos vagy mágneses tulajdonságokat. Ezzel a módszerrel lehet lényegesen különböző anyagi tulajdonságokat egyetlen anyagon belül „ötvözni”. Ez olyan vegyészeti munka, amelynél az anyag előállítása érdekében a kémikusnak már nemcsak a megfelelő molekulaszervezet kialakítása a feladata, hanem az is, hogy a parányi szilárd részecskék megfelelő számú atomját vagy molekuláját adott méret és alak szerint összetapasztja. Az ilyen kisméretű anyagok előállításával napjaink kiemelten fontos technológiája, a **nanotechnológia** foglalkozik. Ennek kémiai alapjait egy több mint száz éves múltra visszatekintő tudomány, a **kolloidika** képezi.





Az intelligens folyadékok két nagy csoportját a mágneses és az elektroreológiai folyadékok alkotják. A **reológia** a folyási tulajdonságok tudománya. Az **elektroreológiai folyadék** olyan anyag, amelynek folyási tulajdonságai elektromos térrel változtathatók. Mágneses folyadékoknál ezeket a tulajdonságokat mágneses térrel befolyásolhatjuk.

Ezek a folyadékok egyenletesen eloszlaltot mikro- vagy nanoméretű szilárd részecskéket tartalmaznak. E folyadékok tulajdonságait vizsgálva célszerű megkülönböztetni kétféle esetet.

Ha a külső elektromos vagy mágneses tér változatlan térerősséggel tölti ki a geometriai teret, akkor homogén térerőről beszélünk.

Ha a térerősség változik a hely függvényében, akkor inhomogén erőteret kapunk.

Először vizsgáljuk meg ez utóbbi esetet. A részecskék az elektromos vagy a mágneses tér bekapcsolásakor a nagyobb térerősségű hely irányába mozdulnak el. Mivel a parányi részecskék nagymértékben kötődnek a folyadékmolekulákhoz, a részecskék elmozdulása a teljes folyadék elmozdulását jelenti. A folyadék a legnagyobb térerősségű helyek irányába mozdul el, majd a tér megszűntetéséig ott marad. A folyadék mozgását és adott helyen tartását irányítani lehet a külső térrel. Ezt ki lehet használni a kenés-technikában: az olajos közegű mágneses folyadék kiváló kenőanyag, mivel nem folyik ki a felmágnesezett mozgó fém alkatrészek között lévő szélesebb résekből sem.

A mágneses és az elektroreológiai folyadékok másfajta viselkedést mutatnak homogén mágneses vagy elektromos térben. Ekkor a szilárd részecskékre nem hat a külső tér mozgató ereje, a folyadék nyugalomban marad. A látszólagos nyugalom ellenére a folyadék tulajdonságai nagymértékben megváltoznak. A részecskék elektromos vagy mágneses térben polarizálódnak, az indukált **dipólusaik** kölcsönhatása következtében lán-

Elektromos és mágneses hatások

Kolloidika:

a kolloidrendszerek kémiai és fizikai vizsgálatával foglalkozó tudomány.

Kolloid rendszer:

kolloid részecskékből felépülő rendszer, vagy amelyben ilyen nagyságú rések, hézagok vannak.

Reológia:

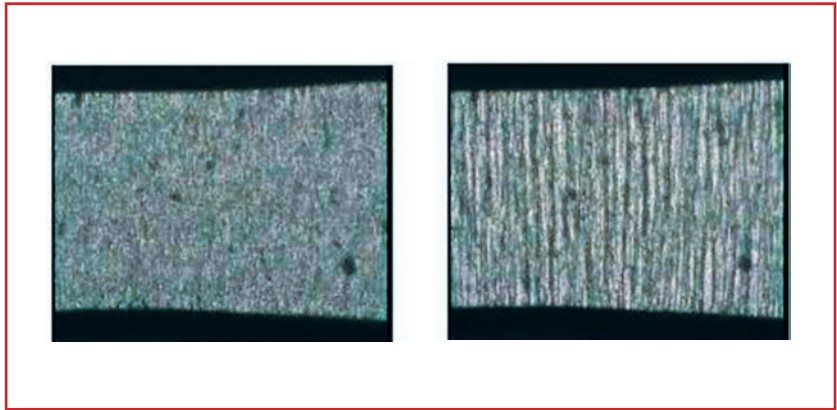
fizikai tudományág, amely az anyagok deformációját és folyását (áramlását) vizsgálja. Tanulmányozza az alakváltozás, az alakváltozást létrehozó erő, a hőmérséklet és az idő közötti kapcsolatot.

Elektroreológiai folyadék:

viszkózitása elektromos tér hatására nagymértékben megnő. Az eredetileg folyékony anyag megszilárdul, majd az elektromos tér megszűnése után visszaáll az eredeti folyékony állapot.



Elektroreológia



szerű **aggregátum**okat képeznek. A fenti ábrán a szilikonolajban szétoszlatott részecskék elektromos tér hatására bekövetkező rendeződése látható.

Az ábrán jól megfigyelhető, hogy a részecskék füzészerű aggregátumokat képeznek. Ha az elektromos teret megszüntetjük, a hőmozgás ezt a rendezett struktúrát megbontja, és rövid időn belül visszaáll az eredeti egyenletes eloszlás. A részecskék elektromos térrel előidézett füzészerű összekapcsolódásának makroszkopikus megnyilvánulása a folyadék **viszkozitásának** jelentős növekedése, majd a folyadék megszilárdulása. Az elektroreológiai folyadékok **konzisztenciája** elektromos térrel igen széles határok között változtatható: a kis viszkozitású folyadéktól a szilárd anyagok tulajdonságait mutató gél állapotig.

Hasonló rendeződés idézi elő mágneses folyadékok mágneses tér hatására bekövetkező „megszilárdulását” is. A folyadék–szilárd „állapotváltozás” mindkét irányban gyorsan megy végbe. A folyadék homogén tér hatására történő megszilárdulása más perspektivikus alkalmazási lehetőséggel is kecsegtet. Olyan új típusú erőátviteli rendszerek kifejlesztését teszi lehetővé, amelyek nem tartalmaznak kopásnak kitétt alkatrészeket, így jelentősen különböznek a hagyományos súrlódáson alapuló tárcsás erőátviteli rendszerektől.

Az elektroreológiai folyadékból olyan erőátviteli rendszer készíthető, amely a folyadék elektromos tér hatására bekövetkező megszilárdulását használja ki. A következő ábra felső két képe az elektromos kuplung működési elvét mutatja. A kis viszkozitású folyadékban a felső tárcsa könnyen forog, miközben az alsó mozdulatlanul áll. Elektromos tér hatására a folyadék megszilárdul, ennek következtében a felső forgó egység magával viszi és forgatja az alsó tengelyt. Az ábra alsó két képén látható szerkezet az elektromos hatásra megszilárduló folyadékot használja ki a felülről lefelé mozgó tengely fékezésére. A fékezőhatás nagysága és időtartama megfelelő elektronikával szabályozható, és így szabályozható fékezőerőt biztosító lengéscsillapító konstruálható. Mind a kuplung, mind pedig a lengéscsillapító mágneses folyadékkal is működtethető. Ebben az esetben a mágneses teret elektromágnes beépítésével kell biztosítani. A mágneses és elektroreológiai folyadékok a jövőben kiszoríthatják a hagyományos kuplungokat, lengéscsillapítókat és más erőátviteli rendszereket.

Dipólus:

a fizikában pontszerű töltések szétválását, a kémiában pedig poláris molekulát jelent.

Aggregátum:

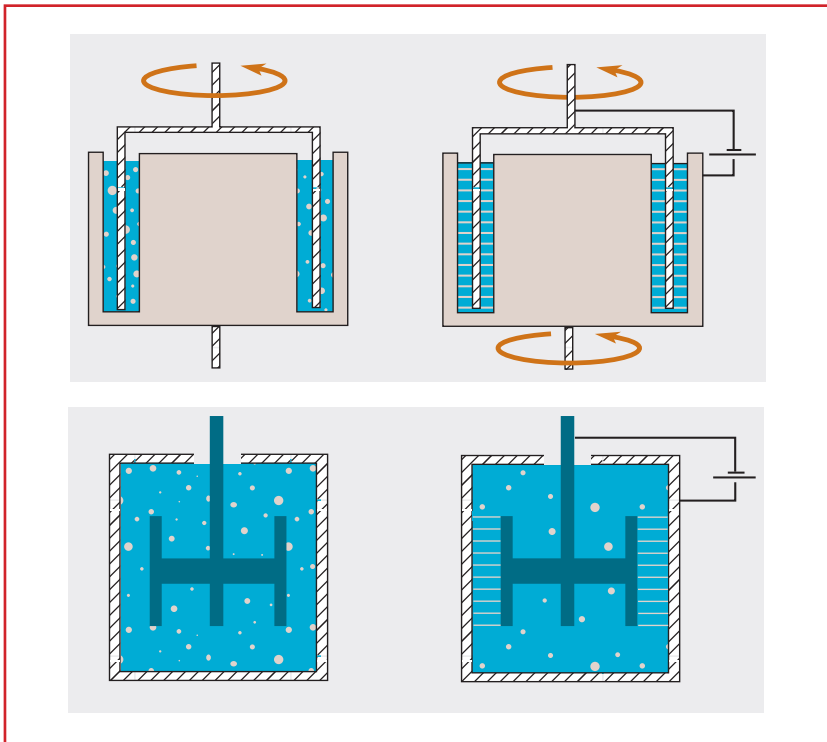
kolloid részecskékből vonzó kölcsönhatás eredményeként kialakult, szabályos vagy szabálytalan szerkezetű halmaz.

Viszkozitás:

adott hőmérsékleten a folyadékok folyási képességét kifejező mérőszám.

Konzisztencia:

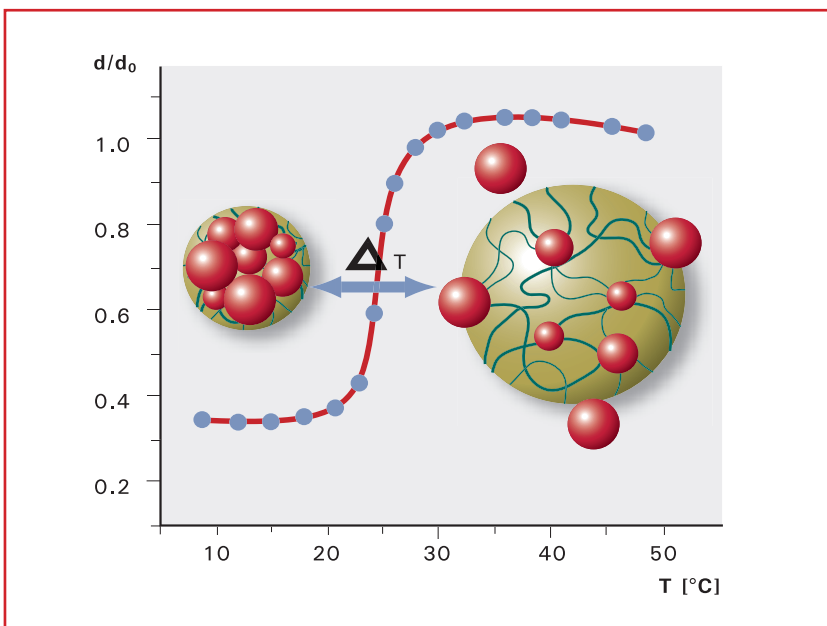
valamely anyag reológiai tulajdonságainak gyűjtőfogalma; magában foglalja az egyes (részben egymástól függő), hőmérséklettől függő tulajdonságok (pl.: viszkozitás, felületi feszültség, adhézió stb.) összefüggését. Köznapi értelemben az anyag állapota, állaga, külső erőhatással szembeni viselkedése.



Intelligens kuplung és lengéscsillapító

Intelligens polimergélek

A polimergélek olyan rendszerek, amelyek átmenetet képeznek a szilárd és a folyadék halmazállapot között. Alaktartók és könnyen deformálhatók, ugyanakkor nagy folyadéktartalmuk miatt tulajdonságaik az oldatokéhoz hasonlóak. Az alaktartás a gélben szerteágazó polimerváznak köszönhető. A jelentős mennyiségű folyadék megakadályozza a laza térhálós szerkezet



Gélkollapszus

**pH:**

oldatok hidrogénion-koncentrációjának 10-es alapú, negatív logaritmus. A tiszta víz hidrogénion-koncentrációja 10^{-7} mol/dm³, tehát a pH-ja 7-es. A 7-nél nagyobb pH-jú oldatok lúgosak, a 7-nél kisebb pH-jú oldatok savasak.

Gélkollapszus:

a környezeti paraméterek (hőmérséklet, elegyösszetétel, pH stb.) változására a gél térfogatának változtatásával válaszol. A változás lehet folytonos vagy az elsőrendű fázisátalakulásokhoz hasonlóan ugrásszerű. Ez utóbbit nevezzük gélkollapszusnak. Több gélre jellemző, hogy a térfogatuk a hőmérséklet igen kis megváltoztatására jelentős mértékben változik. Ez a változás a gél szerkezetétől függő kritikus hőmérsékleten játszódik le. A hőmérséklet változtatásával tehát előidézhető olyan folyamat, amelynek során a gél térfogata jelentős mértékben változik. E térfogatváltozás alkalmas mechanikai munkavégzésre, valamint különleges alakváltozások és mozgások megvalósítására. A gélkollapszust a hőmérsékleten kívül több más hatással is kiválthatjuk. Előidézhető a pH, az elegyösszetétel megváltoztatásával, bizonyos ionokkal, valamint fény és elektromos tér alkalmazásával.

összeomlását, ez utóbbi pedig útját állja a folyadék spontán „kifolyásának”. A polimergélekre jellemző, hogy környezetükkel egyensúlyban lehetnek. A környezeti paraméterek (hőmérséklet, elegyösszetétel, pH stb.) változására a gél főként térfogatának megváltoztatásával válaszol. E térfogatváltozás lehet folytonos vagy ugrásszerű. Ez utóbbit **gélkollapszusnak** nevezzük.

Ma már több mint egy tucat kollapszusra képes gél ismerünk. A térfogatváltozás, amelynek nagysága több százszoros is lehet, alkalmas mechanikai munkavégzésre, valamint különleges alakváltozások és mozgások megvalósítására. A gélkollapszust többféle külső hatással is kiválthatjuk. Előidézhető a pH, az elegyösszetételének megváltoztatásával, bizonyos ionokkal, valamint fény és elektromos tér alkalmazásával. E tulajdonságok miatt a polimergélek különleges helyet foglalnak el az intelligens anyagok között. Nincs ugyanis még egy olyan anyagi rendszer, amely olyan sokféle környezeti hatásra reagálna, mint a polimergél. A gélkollapszus vagy ennek ellentéte, a nagymérvű duzzadás, az említett környezeti paraméterek kismérvű változtatásával is előidézhető. A válasz során nemcsak a gél térfogata, hanem az ettől függő összes tulajdonsága is hirtelen megváltozik: jelentős mértékben módosulnak az optikai, mechanikai és transzport tulajdonságok.

A gélüveg

Polimergélek optikai tulajdonságainak hirtelen megváltozása kihasználható erős napsütés ellen védelmet nyújtó speciális táblaüveg vagy optikai kijelző előállítására. A gélüveg olyan szendvics szerkezetű konstrukció, amely két üveglap vagy átlátszó műanyag réteg között egy vékony intelligens polimergélt tartalmaz. Külső megjelenési formájában megtévesztésig hasonlít a kereskedelmi forgalomban lévő síküveghez, azaz a gél jelenléte nem rontja le az optikai tulajdonságokat. A gélüveg alkalmazkodóképességét az intelligens polimerréteg biztosítja. Ennek optikai tulajdonságait (pl. átlátszóságot) nagymértékben befolyásolják olyan környezeti hatások, mint például a hőmérséklet-változás vagy elektromos tér jelenléte. A környezeti változás előidézhet olyan szerkezeti átalakulást a gélben, amelynek hatására az eredetileg átlátszó üveg opálos, a fényt csak sokkal kisebb mértékben áteresztő tejüveggé válik. A kutatócsoportunk által kifejlesztett gélüveg egyik típusánál a környezet hőmérsékletének változása idézi elő az üveg–tejüveg átmenetet. Megfelelő összetétellel elérhető, hogy a napsugárzás is kiváltsa ezt a változást. A gélüvegből készített ablak egyrészt kényelmes megoldást nyújt az erős, direkt napsugárzás elleni védelemben, másrészt alkalmas új típusú kijelző készítésére is. Lehetőség van ugyanis arra, hogy az átlátszó polimer rendszerbe kívánt méretű betűket írjunk vagy ábrát rajzoljunk. Ezek termikus hatással előhívhatók és eltüntethetők. Az optikai tulajdonságok megváltoztatását nemcsak a hőmérséklet változásával, hanem elektromos hatással is kiválthatjuk.

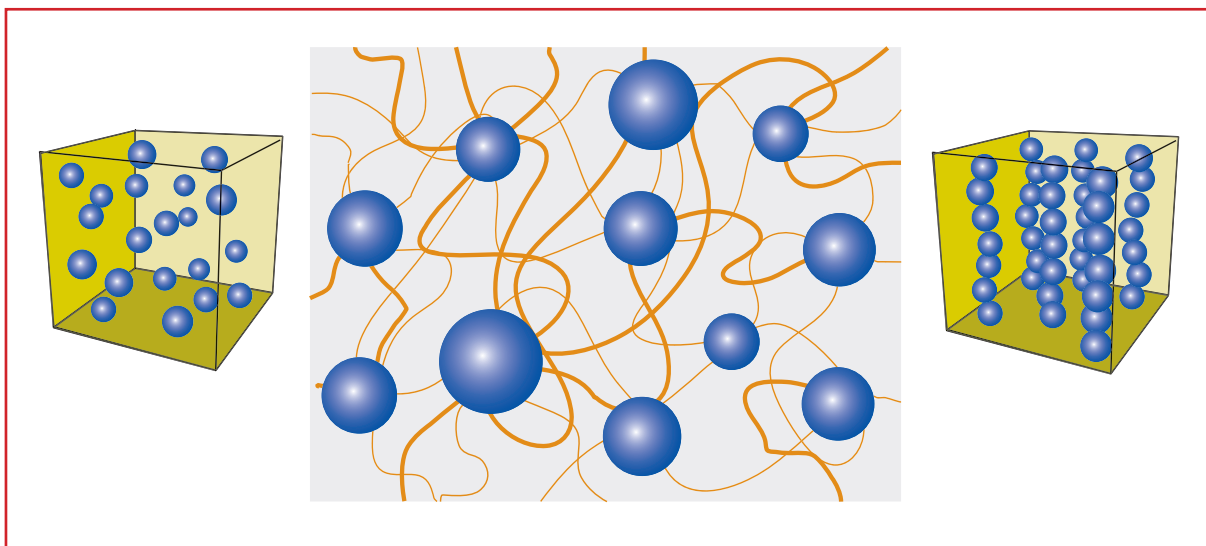
Szabályozott hatóanyag-leadás intelligens géllal

A hatékony gyógyszeres terápiának legalább három fontos kívánalmat kell kielégítenie. Olyan molekulát kell találni, amely gyógyító hatású. Ha a hatóanyaggal már rendelkezünk, akkor azt a megfelelő helyre kell eljuttatni, továbbá folyamatosan biztosítani kell a hatóanyag optimális koncentrációját a gyógyulási folyamat során. Ismert, hogy a méregdrága gyógyszerhatóanyagoknak csak igen kis hányada jut el oda, ahol hatnia kell, nagyobb mennyisége kárba vész vagy nemkívánatos változásokat okoz. A hagyományos módszer ezért pazarló. Fontos követelmény még, hogy a „célba juttatott” hatóanyag koncentrációja csak megfelelő értékek között változzon. A kívánatosnál nagyobb mennyiségű hatóanyag ugyanis toxikus hatást is kifejthet. A minimális koncentrációnál kisebb mennyiség pedig nem hatékony. Ezek a követelmények sokszor nem teljesíthetők a hagyományos eljárásokkal. E problémák megoldásához új eljárások kidolgozására és új gyógyszerhordozók előállítására van szükség.

A polimergélek térfogatának befolyásolása környezeti hatásokkal a szabályozott gyógyszerhatóanyag-leadás teljesen új lehetőségét teremtette meg. Képzeljük el, hogy a hatóanyagot kisméretű gélgömbökbe „csomagoljuk”, azaz a polimeroldatot a hatóanyag jelenlétében gélesítjük. A gélesítés a polimerláncok összekapcsolását jelenti kémiai kötésekkel. A térhálósítás megfelelő megválasztásával olyan gél szerkezet hozható létre, amelynél a hatóanyag molekuláinak mérete jóval nagyobb, mint a hálóláncok közötti átlagos távolság. Ebben az esetben a hatóanyag nem képes a gélből kioldódni.

Ha a gélgömbök térfogatát a hőmérséklet kismérvű megváltoztatásával jelentős mértékben megnöveljük, azaz külső hatással duzzadást idézünk elő, akkor a térfogatváltozással arányos módon növekszik a hálóláncok közötti távolság, aminek következtében a gélbe zárt hatóanyag kioldódásá-

Mágneses gélek és elasztomerek



**Mágneses hiszterézis:**

a mágneses térbe helyezett anyagban a dipólusok beállása, majd a tér megszüntetése utáni visszaállása az erőtér nélküli rendezetlen állapotba nem következik be azonos mértékben.

Hidrofil („vízkedvelő”)**anyag:**

vízben oldódó, vízzel nedvesedő, illetve vízzel könnyen kolloid rendszert alkotó anyag.

Hidrofób („víztasító”)**anyag:**

vízben nem oldódó, vízzel nem nedvesedő, vízzel kolloid rendszert nem alkotó anyag.

Adhézió:

felületek közötti vonzó kölcsönhatás.

Kontrakció:

összehúzódás kisebb térfogatra, keresztmetszetre vagy hosszúságra.

nak már nincsenek geometriai akadályai, így a kioldódási sebesség jelentősen megnő, ahogy azt az előző oldalon lévő ábra mutatja.

Ha a hatóanyagot tartalmazó gélgömbökbe nanométeres méretű mágneses anyagot építünk be, akkor ezzel lehetővé tesszük a gélgömbök külső mágneses térrel irányított mozgását, illetve a célterületen tartását. A gél térfogatával szabályozott hatóanyag-kioldódás alkalmazását megnehezíti a hőmérséklet változtatásának technikai problémája. Ennek egy lehetséges megoldását is a mágnesesség kínálja. Ha a gélgömbökbe olyan mágneses anyagot építünk be, amelynek **mágneses hiszterézise** van, akkor dinamikusán változó mágneses térben a hiszterézisvesztés hő formában jelenik meg, és ez úgy növeli a gélgömb hőmérsékletét, és ezen keresztül a kioldódási sebességét, hogy közben a környezet hőmérséklete nem változik.

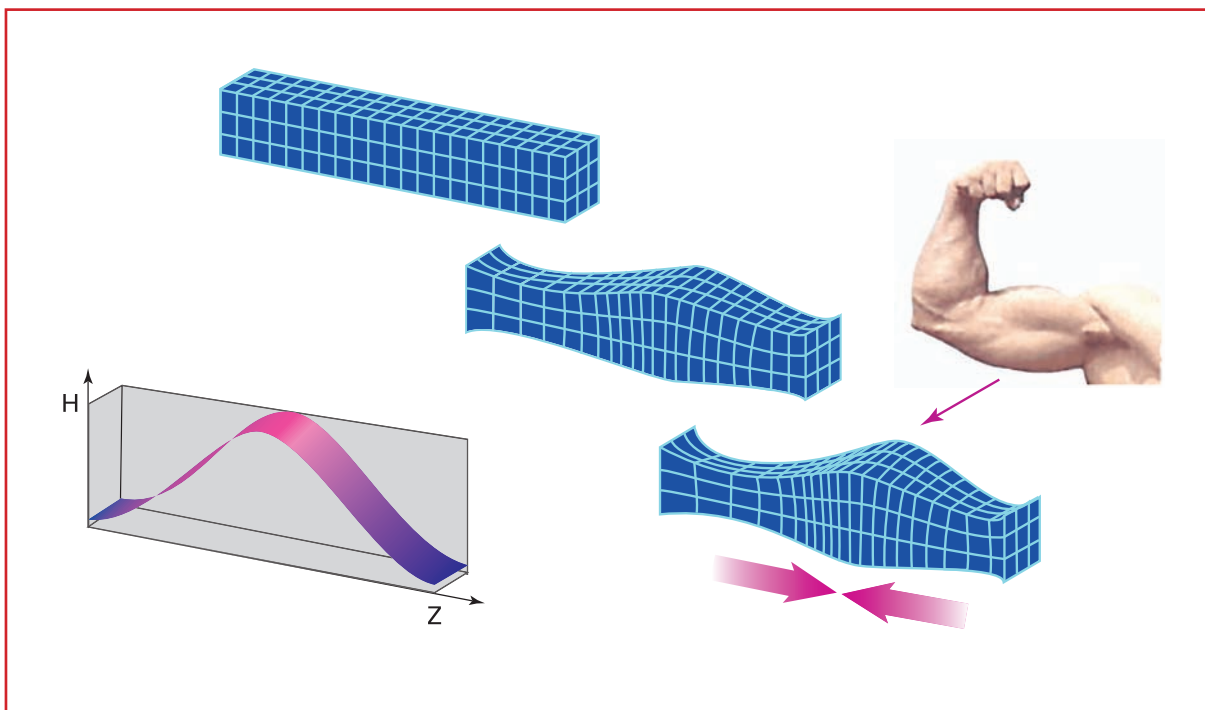
A környezeti hatásokra érzékeny gélek a biológia és az orvosbiológia más területén is új lehetőségeket nyithatnak meg. A gél térfogatának nagymértékű megváltozása a **hidrofil** és **hidrofób** csoportok egymással versengő kölcsönhatásainak következménye. A külső hatással kiváltott átmenet jelentősen befolyásolja a gél felszínének **adhéziós** tulajdonságait. Ez utóbbi pedig fontos tényezője sejt kultúrák és szövettenyészetek előállításának.

A polimergél mint mesterséges izom

Az élő szervezetben igen sok eltérő típusú, energiafelhasználással járó folyamat játszódik le. Ezek közül talán a legjelentősebbek az izomban végbeménő, mechanikai energiát eredményező folyamatok. Az izom feladatát olyan makromolekulák végzik, amelyeknek alapvető tulajdonsága a **kontrakcióra** való képesség.

A mindennapi életben is sokféle mesterséges energiaátalakító rendszerrel találkozunk, mivel számos útját ismerjük annak, hogyan lehet az energiát egyik formából a másikba alakítani. Meglepő azonban, hogy ezek között nincs olyan, amely a kémiai vagy fizikai-kémiai kölcsönhatások energiáját – az izomhoz hasonlóan – közvetlenül alakítaná át mechanikai energiává.

Készíthető-e szintetikus izom? Lehet-e lágy anyagból hasznos technikai-technológiai eszközöket készíteni? Ezek a kérdések egyre több kutatót foglalkoztatnak. A japán, angol, olasz és amerikai szakemberek (ezekben az országokban folyik intenzív géll kutatás) optimisták. Elképzelhetőnek tartják, hogy már a közeljövőben pótolható az emberi izom. Lágy, hangtalan motorok és pumpák (mint például a műszív) kifejlesztése már több laboratóriumban folyik nagy intenzitással. Ezeknek a titokban tartott kutatásoknak az eredményeiről meglehetősen keveset tudunk. A tudományos szakfolyóiratokban vagy az ismeretterjesztő újságokban csak részeredményekről olvashatunk. A továbbiakban néhány olyan eredményt mutatok be, amely alátámasztja az ezen a területen dolgozó kutatók optimizmusát. Ezek mindegyike a mímelt biológiai mozgásokkal vagy az izomhoz hasonló működéssel kapcsolatos.



A polimergélek környezeti hatásokra bekövetkező jelentős mértékű térfogatváltozása akkor is bekövetkezik, ha a gél terhelésnek vetjük alá, azaz a duzzadó gél felszínére súlyt helyezünk vagy az összehúzódó géllal tömeget mozdítunk el. A gél mindkét esetben munkát végez, mégpedig úgy, hogy a környezete energiáját alakítja át mechanikai munkává. Ha a környezeti hatás kémiai természetű, akkor az energia hasznosításának az izomra jellemző módja valósul meg. Ez a különleges tulajdonság már az 1950-es évektől mesterséges izmok és új típusú gépek kifejlesztésére inspirálta a kutatókat. A vizsgálatok alapján egyértelművé vált, hogy reális cél a polimergélek műizomként való alkalmazása.

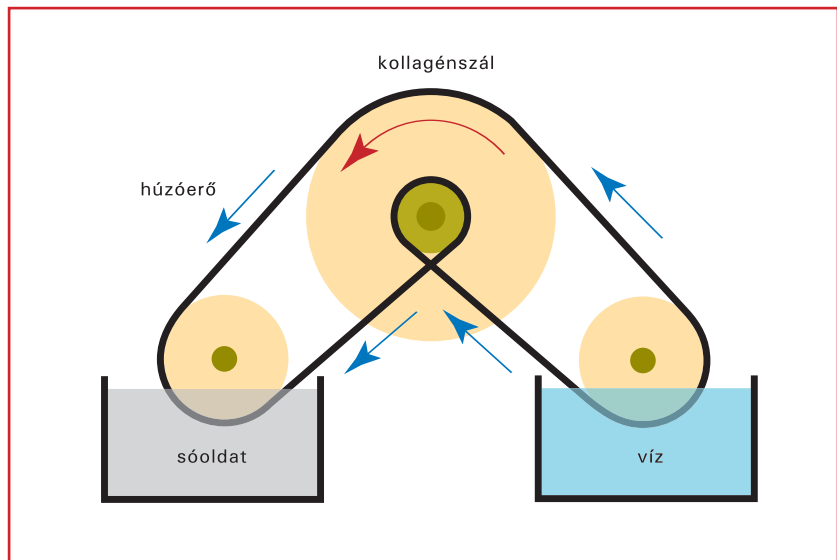
Cél: a mesterséges izom

A polimergélek energiaátalakító képessége annak köszönhető, hogy a gél térfogata felnagyítva mutatja a gél felépítő makromolekulák méretének változását. Ha a molekulák térszerkezetét valamilyen külső hatással befolyásoljuk, a molekuláris méretváltozás akkumulálódik, a gél alakja vagy térfogata megváltozik. E makroszkopikus változást munkavégzésre is fel lehet használni. A korai kutatásokban két rendszertípust vizsgáltak különös előszeretettel: az egyik az ún. pH-izom, a másik pedig a kollagén gélgép volt.

A pH-izom olyan savas tulajdonságokat mutató makromolekulákból áll, amelyek **disszociáció**jának mértéke a környezet pH-jától függ. Savas közegben a gél gyakorlatilag nem tartalmaz ionokat. Ha a közeg pH-ját növeljük, azaz lúgosítjuk, akkor a disszociáció következtében a polimer molekulákon töltések jelennek meg. Ezeknek taszító hatására, valamint az ellenionok ozmózisnyomásának következtében a gél térfogata jelentős mértékben megnő. Ha a töltéseket a pH csökkentésével megszüntetjük, akkor az eredeti méret áll vissza. A környezet sav-, illetve lúgkoncentrációjának szakaszos változtatásával a gél mérete periodikusan változik, így munkavégzésre alkalmas. A géleknek mint izommodelleknek a további vizsgálata mellett

Disszociáció:

egyensúlyra vezető bomlási folyamat, amelyben egy-egy molekulából két vagy több kisebb molekula, atom vagy ion keletkezik úgy, hogy a körülmények megfelelő változásának hatására a disszociáció termékei ismét az eredeti molekulává egyesülnek, vagyis a folyamat kémiai értelemben megfordítható.



Az első gélmotor működési elve

Hélix-szerkezet:

hosszú láncmolekulák olyan szerkezete, ahol a molekula alakja egy képzeletbeli henger palástján lévő csavarmenetet követ.

szólt az a kísérleti tapasztalat is, hogy a pH-izom munkavégző képessége összemérhető az emberi izom munkavégző képességével.

A kísérleti vizsgálatoknak újabb lendületet adott a térhálósított kollagénből készített rendszerek nagyfokú mechanikai szilárdsága és méretváltozása. A kollagénszál alkáli ionok által kiváltott, ún. kémiai olvadása, ami a rendezett **hélix-szerkezet**ből a molekulák szabálytalan összegombolyodását eredményezi, igen jelentős kontrakcióval jár együtt. Ez a kontrakció akkor is bekövetkezik, ha a szállal – a kontrakció ellenében – munkát végeztünk. Az összehúzódás következtében fellépő erő jóval nagyobb, mint hasonló keresztmetszetű izom esetén. Az eredmények birtokában lehetővé vált az energiaátalakítás folytonos üzemmódban is. A fenti ábra az első folyamatosan működő gélgép működési elvét mutatja. A sóoldatba merülő kollagénszál kémiai olvadása miatt a sóoldatból a kútkerékhez vezető mindkét szállban azonos nagyságú húzóerő ébred. Mivel e két géliszál a kútkerék eltérő sugarú hengerére tekeredik, a forgatónyomatékok különbözősége miatt a kútkerék elfordul. Hasonló, csak ellentétes irányú erőhatások ébrednek a vízzel érintkező szálrészben is. A gép addig forog, amíg a két, eredetileg eltérő összetételű folyadéktartályban a koncentrációk ki nem egyenlítődnek, ugyanis a gép működése során az alkáli ionok a hígabb oldatba kerülnek át. A valóságban is működő gépek az ábránál jóval bonyolultabb szerkezetűek.

Az 1960-as évek elején fokozatosan előtérbe került a gélekkel megvalósított energiatermelés (amely során például az édesvíz és a tengervíz eltérő só-tartalmát használták volna ki) és -hasznosítás technikai alkalmazásai iránti érdeklődés. Lágy mozgatószervezetek, különböző típusú emelők és vezérlések kifejlesztése kezdődött el. A kutató-fejlesztő munkát már ebben az időben nagymértékben befolyásolta a gél szerkezetek „üzemanyagának”, a savaknak, a lúgoknak és a sóknak környezetkárosító hatása, valamint a humán alkalmazások számára reménytelennek tűnő felhasználása. Napjainkban előtérbe kerültek a termikusan aktiválható intelligens gélek, amelyek a géllkollapszussal járó térfogatváltozást használják ki munkavégzésre. Ezek

munkavégző képessége kellően nagy, teljesítményük azonban a térfogatváltozás lassúsága miatt meglehetősen kicsi. A teljesítmény növelése érdekében olyan mechanizmusokat kellett keresni, amelyeknél a térfogatváltozással kapcsolatos meglehetősen lassú anyagtranszport nem játszik szerepet. A munkavégzés szempontjából az elmozdulás a fontos, amit nemcsak térfogatváltozással, hanem alakváltozással is elő lehet idézni. A kemény anyagok közül az elektro- vagy magnetostrikciót mutató ötvözetek és az emlékező fémek alkalmasak erre a célra. Előnyük, hogy a méretváltozás megfelelő elektronikával vezérelhető, és igen nagy erőket lehet kifejteni velük. Hátrányuk, hogy csak egyirányú és igen kismérvű mozgásra alkalmasak. Az összetett mozgások megvalósítása bonyolult technikai feladat. A munkavégzéshez elengedhetetlenül szükséges alakváltozás nagysága különleges polimerekkel (polimer dielektrikumokkal) jelentősen növelhető. Ezekre jellemző, hogy felületükre kapcsolt nagyfeszültség hatására változtatják alakjukat. Az alakváltozás munkavégzésre is használható.

Szabályozástechnikai szempontból a számítógéppel vezérelhető hatások rendkívül sok előnyt jelentenek a mesterséges izmok alkalmazásánál. Ezért az utóbbi évek kutatásainak súlypontja átkerült az elektromos hatásokkal aktiválható anyagok kifejlesztésére. E kutatások intenzitását mi sem bizonyítja jobban, mint az, hogy ma már évente rendeznek nagy nemzetközi konferenciákat e témakörben. Az elektromos térrel előidézett deformációk gyorsak és jól szabályozhatók. Sokféle igen komplex mozgás valósítható meg velük.

Az elektromos hatásokkal mozgatható rugalmas anyagok egy különleges csoportját képezik a mágneses gélek és **elasztomerek**. Ezek mechanikai állapota elektromágnesek által keltett mágneses térrel befolyásolható. Alkalmasan megválasztott mágneses tér segítségével nyújthatók, hajlíthatók, forgathatók és összehúzhatók. Az alakváltozás jelentős mértékű és igen gyors. Az elemi mozgások mindegyike könnyedén megvalósítható. Elektromágnesek megfelelő elrendezésével megvalósítható olyan eset is, amikor a gél egyik részét nyújtjuk, a mellette lévő pedig összenyomjuk. Ez lehetővé teszi számunkra a rendkívül bonyolult biológiai mozgások mímelését.

Dinamikusan változó mágneses térben a gél alakja periodikusan változik. Ez lehetővé teszi olyan új típusú gélgépek konstruálását, amelyek nem tartalmaznak súrlódásnak kitett alkatrészeket. Ez pedig tág lehetőséget nyújt a lágy robottechnika vagy lágy műszaki szerkezetek (pl. lágy és nedves dugattyúk, hengerek és szelepek) kifejlesztésére.

Az intelligens anyagok megjelenése a technikai fejlődés új útját nyitotta meg. E rövid és korántsem teljes ismertetővel néhány olyan törekvést és eredményt mutattam be, amelyek még a 20. században születtek. Hogy ezek az anyagok valóban a jövő anyagai lesznek-e, az mindenekelőtt az emberi intelligenciától függ.

Elasztomer:

olyan hajlékony láncú polimerből álló rugalmas anyag, amely a terhelés megszűnése után eredeti alakját veszi fel.



Ajánlott irodalom

Bar-Cohen, Yoseph (ed.): *Electroactive Polymer (EAP): Actuators as Artificial Muscles*. Washington, 2001.

Barsi László – Szabó Dénes – Büki András – Zrínyi Miklós: Ferrogel: mágneses térre érzékeny rugalmas anyag. *Magyar Kémiai Folyóirat*, 1997/103. évf. 9. sz.

DeRossi, D. – Kajiwara, K. – Osada, Y. – Yamauchi, A. (ed.): *Polymer gels: Fundamentals and Biomedical Applications*. New York, 1989.

Filipcsei Genovéva – Fehér J. – Szilágyi András – Gyenes Tamás – Zrínyi Miklós: Intelligens lágy anyagok. *Közgyűlési Előadások, Akadémiai Műhely*, 2000/3.

Gandhi, M. V. – Thompson, B. S.: *Smart Materials and Structures*. Glasgow – New York etc., 1992.

Gyenes Tamás – Zrínyi Miklós: Szabályozott hatóanyag-leadó rendszerek: Paradigmaváltás a gyógyszerészetben. *Acta Pharmaceutica Hungarica*, 2001/71 (4).

Peppas, N. A. – Kormeyer, R. W. (ed.): *Hydrogels in Medicine and Pharmacology*. Boca Raton, Florida, 1987.

Smart Materials: Emerging Markets for Intelligent Gels; Ceramics; Alloys; and Polymers. Technical Insights, Inc. 2002.

Zrínyi Miklós: A szintetikus izom és a szabályozott hatóanyag-leadás. *Magyar Tudomány*, 1999/6.

Zrínyi Miklós: Intelligens anyagok. *Magyar Tudomány*, 1999/6.