

Dr. Róka András

A mindennapok megújuló kémiája (I.)

nanokémia + mikrokémia = kolloidika

A halmazállapot, az összetétel és az anyagszerkezeti jellemzők szempontjából külön-külön játszi könnyedséggel soroljuk be az anyagokat. A látvány alapján megkülönböztetjük egymástól a homogén és a heterogén rendszereket. Akár ismeretlenül is be tudjuk sorolni a koleszteril-benzoátot, miközben az olyan hétköznapi anyagok, mint a fogkrém, a rázókeverék, a húsleves, a tej, a sör, a puding, a méz, a kovászos uborka leve, a kenyér vagy a felhő, a köd, a szmog esetében a "keverék" besorolás semmitmondónak tűnik. Mert általában ugyan igaz, hogy a keverékek összetétele tág határok között változhat, mégsem lehet tésztát, majonézt, tejszínhabot vagy mondjuk homokvárat bármilyen összetétellel előállítani, ill. építeni! Nem beszélve arról, hogy az arányok mellett érzékelhetően van még valami más is, ami a részletgazdag jellemzéshez elengedhetetlen. Amitől a tulajdonság vagy a viselkedés megszokottsága ellenére is érthetetlennek tűnik. Mert miközben a Földön minden lefelé esik, a vízzoldhatatlan anyagok kiülepednek vagy felül úszóan elkülönülnek, az icipici porszemek hosszú időn át is táncolnak a beszűrődő napfényben, a tej vagy a szappan-oldat sohasem tisztul ki és a kocsonya annak ellenére sem folyik, hogy 98%-a víz. Az ellentmondásos viselkedés okát alighanem az alkotók méretében kell keresnünk.

A méret esetében a végleteket a szemmel még látható makroszkopikus és a már elektronmikroszkóppal sem "látható" atomi-molekuláris tartomány jelenti. A tized, század milliméteres és a pikométeres tartomány között azonban még sok nagyságrend húzódik! Mikroszkópjával először Leeuwenhoek tárta fel a mikrométeres tartományú világot. Majd háromszáz évvel később Svedberg és Staudinger bizonyították be a makromolekulák és ezzel a "nanoszkópikus" világ létezését. Ezáltal nemcsak a mérettartomány, hanem a tulajdonságok, a jelenségek és a folyamatok területén is új dimenziói nyíltak meg az amúgy csak háromdimenziós világnak. A szem elől többé-kevésbé rejtett világ megismerésével és jellemzésével a kémián belül a kolloidika foglalkozik. A kémiának ez az ága – az oktatásban, és talán a

tudományban is – mindannpi fontossága ellenére kissé elhanyagolt. A néhány évtizede divatossá vált „nanosturtúrák” felfedezésével azonban a kolloidika is megújulóban van.

Általános jellemzés

Kísérlet, megfigyelés:

Kálium-dikromát vagy kristályvizes réz-szulfát kristály elporítása és a változások megfigyelése.

Víz (folyadék) porlasztása.

A szappanoldat és a szappanbuborékok megfigyelése.

A gyertya (paraffin) és a polietilén tulajdonságának összehasonlítása.

A CD-lemez, a folpack-fólia és a vízen szétterülő olajréteg felületi tulajdonságainak megfigyelése.

Attól függően, hogy a háromból hány dimenzióban alakul ki kolloidális méret, illetve hány irányú a kiterjedés, különböző alakú és tulajdonságú kolloid részecskék ill. szerkezetek alakulhatnak ki (ld. 1. táblázat).

Mindhárom dimenzióban kicsinyek, vagyis pontszerűek, mint a porszem, a **mikrofázisok** (mikrobuborékok, mikrocseppek, mikrokristályok).

Csak egy irányban „nagyok”, vagyis hosszúak a láncmolekulák, a természetes makromolekulák és a mesterséges eredetű polimerek (keményítő, cellulóz, fehérjék, DNS, ill. polietilén, polipropilén, poliakrilnitril stb.)

Két dimenzióban terjednek ki a **vékonyrétegek**, a membránok és a hártyák (szappanhártya, sejtmembrán, CD-lemez tükröző rétege).

A mikrofázisok mérete a nanométeres finom tartománytól a mikrométeres dűrva tartományig terjed. A makromolekulák közül például a DNS-ek hossza "kitekeredve" néhány milliméter is lehet! Rutherford – alfa-sugarakkal bombázott – aranyfóliája 100 mikrométertől is vékonyabb volt. A TVK EXTRA FOL márkanévű csomagoló fóliája 15-25 mikrométer, a CD-lemezek – arany, ezüst vagy alumínium – fényvisszaverő rétege 50-100 nanométer, míg a sejtmembrán 10-20 nanométer vastagságú.

Ahhoz, hogy például egyre kisebb méretű kristályokat hozzunk létre, le kell győzni a rétegek között ható – elsődleges vagy másodlagos –

kötőerőket. A darabolódás vagy az aprítás során egyre kisebb a törmelékek tömege és térfogata, miközben összességében rohamosan nő a felület. A felület növekedését az összefelület és a (változatlan) össztömeg hányadosaként megadható **fajlagos felület** jellemzi. Minél nagyobb a fajlagos felület, annál több részecske kerül ki a felületre. A befektetett energia tehát az új felület létrehozására vagy, mint a szappanbuborék fújása, a nyers tézsa nyújtása során a felület növelésére fordítódik. Csak a korabeli kovács, karosszerialakatos, ötvös, üvegfúvó mesterek a megmondható, hogy mennyi munkát kell végezni még a makroszkopikus felületek alakításakor is.

Az aprítás, őrlés, nyújtás, hengerlés, fúvás során tehát **nő az anyag belső energiája**. A felület növekedésekor a rendszer éppúgy nagyobb energiájú állapotba kerül, mint melegítéskor, csak ilyenkor nem a részecskék mozgási energiája, hanem a kölcsönhatási energiája változik meg. Vagyis az energiatartalom nem a belső mozgáslehetőségek megváltozásában (ld. olvadás, párolgás, forrás), hanem a felület megnövekedett kölcsönható-képességében, a **felületi aktivitásban** nyilvánul meg. Ez egyúttal azt is jelenti, hogy kolloid rendszerek a felület csökkenésével jutnak kisebb energiájú (stabilabb) állapotba. A mikrokristályok aggregálódnak, a hárták összehúzódnak, a vékony fóliák összetapadnak.

A felületi aktivitás a felületi részecskék által kialakított töltéseloszlásának, ill. erőterének köszönhető. A diszperziós erőkhöz hasonlóan, az időben kiátlagoló felületi erők tulajdonképpen **összeadódó másodlagos kötőerők**. A múltban kialakult elnevezéseket megtartva az azonos minőségű részecskék-felületek között ébredő kölcsönhatást **kohézió**nak, a különbözők közöttit **adhézió**nak, míg a testek között megjelenőt egyszerűen **tapadási súrlódás**nak (röviden tapadásnak) nevezik. A felületi erők tehát mindenütt jelen vannak, de a kolloidális mérettartományban **összemérhetőekké válnak a mechanikai erőkkel**, ezért fokozott szerephez jutnak.

Egy kolloid rendszer létrehozása során azonban – a mikrofázisok mérete mellett – a közeggel történő kölcsönhatásnak is meghatározó szerepe van. Ahhoz, hogy a megnövekedett felületi energiájú állapotot fenntarthassuk, a mikrofázisok között jelentkező vonzó erőket le kell csökkenteni. Ennek érdekében a mikrofázisokat távol kell tartani egymástól. Ebből nemcsak a **közeg** szerepére, a **stabilizáló komponensek** hatására, hanem az **arányok** fontosságára is következtethetünk.

Kísérlet, megfigyelés:

Ammónia adszorbciónak, vörös bor elszíntelenedésének megfigyelése aktív szénnel.

Ólom-jodid leválasztása, oldhatóságának és újrakristályosodásának megfigyelése.

Tojásfehérje-oldat melegítése.

Habcsók készítése.

Az egymástól távoli részecskék között akár légüres tér is lehet, mint a planetáris ködök, kozmikus porok, esetében. A földi körülmények között azonban mindig jelen van valamilyen közeg. Ha más nem, a levegő. Ennek egyszerre több következménye is van:

A mikrokristályok aktív felülete azonnal magához vonzza és megköti (**adszorbeálja**) a közeg molekuláit. Ezáltal csökken az **aktív** helyek (**centrumok**) száma és ezzel együtt a mikrofelületek között ható vonzóerő. A nagy felületi aktivitáson alapul a mikroüreges vagy **porózus** szerkezetű anyagok rendkívül nagy adszorpciókészsége (ld. az aktív szén alkalmazásai: gázálcbetét, széntabletta, derítőszer).

A parányi kristályok, cseppecskék mindaddig lebegnek, amíg véletlenszerűen találkozva össze nem tapadnak (**aggregálódnak**) és tömegük akkorára nem nő, hogy a nehézségi erő már legyőzi a közeg hőmozgását.

A kolloid rendszer stabilitása, energiaminimuma szempontjából a másik meghatározó tényező a közeggel történő kölcsönhatás típusa és mértéke. Az oldhatóságot ill. elegyedést, a közeg (mikrofázishoz viszonyított) polaritása és a hőmérséklet együttesen határozza meg. Hiába őröljük a legfinomabbra (kolloidális méretűre) a porcukrot, vízzel összekeverve mindaddig nem jutunk kolloid oldathoz, amíg túl nem lépjük az oldhatóság határát. Tulajdonképpen így készül a habcsók, csak nem vízzel, hanem tojásfehérjével és sok-sok levegő-mikrobuborékkal.

Ha a közegben, pl. hőmérsékletváltozás hatására megnő az oldhatóság, mint a csapadékként leválasztott ólom-jodid esetében, akkor a rendszer hirtelen kitisztul, és valódi oldattá válik. Lassú lehűlés során csillogó mikrokristály-lemezeké válnak ki.

A kolloid rendszereket legegyszerűbben optikai viselkedésük alapján ismerhetjük fel. A fény, két egymástól eltérő minőségű, tulajdonságú (törésmutatójú) közeg határán **visszaverődik**, behatolás esetén **megtörik**, esetleg **teljesen visszaverődik**, illetve részlegesen vagy teljesen **elnyelődik**. A látható fény hullámhosszával összemérhető

mérettartományban (400-800 nm) a fényszórás hullámhossz- (szín-) függővé válik és a vékony rétegekről történő visszaverődés során az **interferencia** is megjelenik. Ezért válik pirossá a naplemente, ill. látszik a szivárvány színeiben a szappanbuborék, tócsákon elterülő olajréteg vagy a CD lemez.

Kolloid részecskék és rendszerek

A **mikrofázisok** az aktuális közegben felületnövelő elosztatással (diszpergálással) hozhatók létre, mint pl. az erős rázás, keverés, porlasztás vagy a habverés. A mikrofázisok lehetnek gáz, folyékony és szilárd halmazállapotúak. A mikrofázis és a közeg halmazállapotának lehetséges párosításáiból kikövetkeztethetjük, hogy hányféle kolloid rendszer létezik (ld. 1. táblázat).

A lehetőségek számbavétele során azonban a kolloid részecskék egymással történő kölcsönhatásának lehetőségét, vagyis a közeggel szembeni **arányukat** is figyelembe kell vennünk. **Diszperz rendszerről** beszélünk mindaddig, amíg a közeg feleslegben van és a részecskék függetlenek egymástól. A kohézió megjelenésével azonban a rendszer **kohézív rendszerré** válik (ld. 1. táblázat).

Gázok elosztatása, mikrobuborékok

Az amúgy is molekuláris eloszlású gázok keverékei szükségszerűen elegyet képeznek. Ezért a gázok csak folyékony vagy szilárd közegben alkotnak „mikrofázisokat”. Igaz ugyan, hogy a (mikro)buborékok nem rendelkeznek a mikrocseppekhez vagy mikrokristályokhoz hasonló önálló felülettel, de oldhatatlanságuk miatt mégis elhatárolódnak. A folyadék-gáz fázis határán nemcsak a sűrűség, hanem a törésmutató is változik. A nagyobb törésmutatójú közegben, a fénytörés határszögétől nagyobb szögben érkező fénysugarak teljes visszaverődést szenvednek. Ezért a parányi határfelületek tükrözve szórják a fényt és a folyadék tejszerűen átlátszatlanná, **opálossá** válik.

A frissen engedett csapvízben, ütés vagy rázás hatására a szódavízben, szénsavas üdítőkben, sörben, pezsgőben, a túlhevített folyadékokban hirtelen sok helyen indul meg a gázfejlődés. A mikrobuborékok azonban hamarosan látható buborékokká növekednek, a keverék pedig **durva diszperz rendszerré** válik. Ilyenkor a fejlődő gáz

nyomása váj önmagába záruló felületet a folyadékba. A határfelületet létrehozó – esetleg növelő – térfogati munkát maga a gáz végzi. A tágulás energiaszükségletét a rendszer belsőenergiája fedezi.

Az oldhatatlan gáz egyszerűen bekeveréssel oszlatható el a folyadékban. A tojás- a tejszínhab „felverésekor”, vagy hajmosáskor mi végezzük a felületnövelő munkát. Kezdetben még kevés a buborék és sok a folyadék. Ha nem elég gyors a habverés – a felhajtóerő hatására – a buborékok kiszöknek. Kellően gyors diszpergálás esetén azonban a folyadék „megszilárdul”! A tejszínhab képződésekor a bejuttatott levegő térfogata meghaladja a folyadék kiindulási térfogatát. A buborék-sokaság felszínét képző folyadék maga is kolloidális mérettartományú filmmé deformálódik. Amikor a buborékok falát képező vékony hártya olyan vékonyá válik, hogy már lassan nincs folyadék, ami közlekedhetne a járatokban, és a felületet csökkenteni igyekvő erő pedig egyensúlyt tud tartani a buborékokban uralkodó nyomással, a hab stabilizálódik. A hab kinagyított belső szerkezetét szabad szemmel is tanulmányozhatjuk a szívószállal felfújt szappanhabban. Jól látható, hogy a buborékok találkozása mentén síkfelületek alakulnak ki. A gömb „sokszögűsödése” mögött is az energiaminimum elve, a *legkisebb felület kialakulásának elve* rejlik.

A szilárd fázisban is változatos arányban („koncentrációban”) jelenhetnek meg a „buborékok”. Az egymástól független **mikrozárványoktól** az átjárhatóan **porózus rendszereken** keresztül egészen a lyukacsos **habkövekig** terjed a lehetőség. A földkéreg legősibb kőzeteinek gázzárványaiból határozták meg az őslégkör összetételét.

A gáz a szilárd fázisban természetesen nem oszlatható szét. Ezek a rendszerek a „képlékeny habok” megszilárdulásával jönnek létre. A tojás-, tejszín- vagy szappanhab szilárdsága csak látszólagos. A nehézségi erő végül is győzedelmeskedik: A hártyákba zárt folyadék lassan-lassan leszivárog és az elvékonyodó hártyák kipukkannak.

Ha a képlékeny fázis viszkozitása nagyon nagy, akkor a bezárt (vagy a benne képződő) buborékok akár hártyaképződés nélkül is bent rekednek. Ha a közeg idővel megszilárdul, akkor a váz maradandóan megőrzi a buborékok alakját. A felületi erők ugyan többé már nem formázhatják a buborékok méretét, de a porózus váz felületi aktivitása (nagy adszorpciós készsége) bizonyítja változatlan jelenlétüket (ld. nyers piskóta és kelt tészta).

A szilárd habok vázát többnyire elsőrendű kötések rögzítik (mint például a kisütött piskótában és a kenyérben). Összeadódó jellegű, másodlagos kötések például a habosított műanyagokban jelennek meg. Érdekes, hogy más körülmények között, mégis hasonló módon képződtek ill. készülnek az olyan eltérő tulajdonságú anyagok, mint a horzsakő, a habkövek, a kiégetett téglák, cserepek, mázatlan kerámiák, a porcelán, a hungarocell és poliuretán típusú habosított műanyagok vagy a habcsók, a kelt tészták, a kenyér és a lyukacsos sajtok.

Folyadékok eloszlata, mikrocseppek

A buborékokal szemben a mikrocseppek már mindhárom halmazállapotú közegben megjelenhetnek. Gáz fázisból a molekulák **kondenzációjával**, folyadékokból **porlasztással** keletkeznek. A mikrocseppek méretétől és koncentrációjától függően különböző típusú rendszerek különböztethetők meg (ld. 1. táblázat).

Finom diszperz rendszer a **gőz**, a különböző sűrűségű **köd a felhőig**, míg a durva diszperz részecskék mérettartománya a finom **permettől** az (eső)**cseppig** terjed. A folyadék-gáz (csepp-levegő) határfelületen ugrásszerűen változik a sűrűség, a folyadékokban a felületi energiát jellemző felületi feszültség és a törésmutató. Mivel a gáz nem deformálja a folyadék fázist, a felület méretét és a csepp alakját a **felületi feszültség** határozza meg. A legkisebb felületi energia elérésének megfelelően a mikrocseppek gömb alakúak. (Csak a függeszkedő cseppeket torzíttja csepp alakra a tömegvonzás). A nagyobb törésmutatójú közegről a fény jelentős része visszaverődik. A mikrocseppek fényszórása miatt átlátszatlan a köd, fehér a felhő. A téli szmog füstös köd, röviden füstköd. A páradús levegőben az apró cseppek felületén megtapadnak az oldhatatlan füst-mikrofázisok. Ezáltal megakadályozzák a cseppecskék összefolyását, a köd kicsapódását.

A változatos természeti megjelenés mellett a gázdiszperziók (másnéven **aeroszlok**) gyakorlati szempontból is fontosak. A túltelített gőz kondenzációján alapul az elemi részecskék mozgását megjelenítő Wilson-féle ködkamra, a köd- és a felhőképződés vagy a repülőgépek kondenzcsíkjának megjelenése. A porlasztó felfedezése óta a folyadékok eloszlata egyszerűbb, mint a habverés. Hiszen a folyadék magától szakad cseppekre, csak az áramlást fenntartó nyomáskülönbséget kell biztosítani. A fuvóka keresztmetszetének csökkenésével ugyanis annyira

megnő az áramlási sebesség, hogy a örvényképződés cseppekre szaggatja a folyadékot (**turbulens** áramlás). A porlasztó alkalmazása nagyon széleskörű. Kondenzátor lemezek közé porlasztott olajcseppecskék segítségével határozta meg Mulliken az elektron töltését. A porlasztáson alapul egyes gyógyszerek aeroszolos bejuttatása, a permetezés, az illatszereket vagy festéket szóró palackok, szórópisztolyok működése, a belsőégésű motorok karburátorában a robbanóelegy keverése vagy a látványos mesterséges ködök létrehozása.

Kísérlet, megfigyelés:

Étolaj-víz, ill. szén-tetraklorid-víz rendszerek vizsgálata összerázás előtt és után.

Majonéz alap készítése (tojássárgája és olaj összekeverése).

Olaj-víz emulzió stabilitásának vizsgálata szappanoldat, ill. mosogatószer adagolásával.

Az egymással nem elegyedő folyadékokból, erős rázás vagy keverés hatására opalizáló diszperz rendszerek, **emulziók** keletkeznek. A komponensek közül mindig az a közeg, amelyik nagyobb arányban jelenik meg. Ezért az arány növelésével a komponensek egyszerűen szerepet cserélhetnek: A vizes (poláris) fázisú emulzióból az olaj (apoláris) mennyiségének növelésével olaj fázisú emulzió keletkezik. Ezért kell a majonéz készítése során a tojássárgájához az olajat cseppenként adagolni! A tojássárgája (lecitin tartalma miatt) már önmagában emulzió. Az olajfelesleg megjelenésekor azonban a közeg polaritást vált, és a vizes fázis külön válik. Egy újabb tojássárgájával a rendszer visszabillenthető.

Ahogy vízből sem lehet stabil buborékot fújni, a két fázis eltérő polaritása miatt még a finom eloszlású emulziók sem stabilak. A mikrocseppek véletlenszerű „összeolvadásával”, egyesülésével ugyanis szerephez jut a sűrűség-különbség, ami – a nehézségi erő vagy a felhajtóerő hatásán keresztül – elősegíti a **fázisok szétválását**. Azonnal megváltozik a helyzet, ha az olaj-víz emulzióhoz felületaktív anyagot (szappanoldatot, sampont vagy mosogatószert) adunk. Az apoláros láncsal és poláros csoporttal rendelkező zsírsavanionok a határfelületen rendeződve **monomolekuláris átmenetet** képeznek az eltérő polaritású fázisok között. Ezek a kettős tulajdonságú molekulák (**tenzidek**) ráadásul a közeg polaritásának vagy polaritásváltásának megfelelően át is rendeződhetnek. A vizes közeghez képest az olajos közegben éppúgy ellentétes irányban állnak, mint a szappanbuborékban. A felületaktív anyagok tehát egyrészt elősegítik az eloszlást, másrészt azonos felületi

töltéseloszlást kialakítva megakadályozzák a mikrocseppek egyesülését. A stabilizáló anyagok (**emulgeátorok**) alkalmazása során azonban a kolloid részecskék már összetettekké, **komplex részecskékké** válnak. A mikrocseppek felületén egy monomolekuláris „kristály-hártya” alakul ki, melyet a diszperziós erők és ionos jellegű kölcsönhatások (**sóhidak**) együtt stabilizálnak. A gyakorlati életben csak a stabilizált emulzióknak van jelentősége. A fémmegmunkálás (esztergályozás, marás) során alkalmazott olaj-víz emulzióknak kettős szerepe van: a víz elvezeti a hőt, az olaj csökkenti a súrlódást. Az emulgeátorok segítségével nagy viszkozitású, sűrű emulziók, **krémek** is előállíthatók. Nagy számmal találunk ilyeneket a gyógyszeripari- valamint a tej- és kozmetikai termékek között.

Bár a szilárd fázisban a mikrocsepp zárványok is előfordulhatnak, gyakorlati jelentősége a folyadékkal telített **pórusrendszereknek** van. Ezeket a kohézív rendszereket **xerogéleknek** is hívják.

A folyadékok a porózus anyagokban éppúgy közlekedhetnek, mint a gázok. Az ásványok és kőzetek hidrotermális átalakulása, a fémionok vándorlása, kizsorításos helyettesítése, az érctelepek kialakulása bizonyítja, hogy a kéreg bizonyos rétegei a vízes oldatok számára átjárhatók. A járatok mérete a nanocsövektől, a hajszálcsoves pórusrendszereken keresztül a repedésekig terjed. A víz nagy része vagy a pórusrendszer felületéhez vagy az oldott ionokhoz kötődik. Ezért a szinte molekuláris szintű folyadéktranszport fenntartásában a nagy nyomás mellett a diffúciónak van nagy szerepe. Hasonló elven történik a vízlágyítás az üreges kristályszerkezetű zeolitokkal (Na-Ca-Al-szilikátok), ill. a térhálós szerkezetű, ioncsrelő műgyantákkal. Ugyancsak a kőzetek átjárhatóságát bizonyítja a kőolaj vándorlása az anyakőzetből a porózus szerkezetű tároló kőzetbe. De a fák, növények mikrocsoves edénnyalábrendszere is egy folyadékkal telített pórusrendszer. Érdekes, hogy ebben a folyadéktranszportot a hidrotermális folyamathoz hasonlóan szintén a nyomáskülönbség és a diffúzió tartja fenn. A belső nyomást ebben az esetben az ozmózis, a koncentrációkülönbséget pedig a magasban szintetizálódó szőlőcukor biztosítja.

Kísérlet, megfigyelés:

Ammónium-klorid füst képződésének megfigyelése ammónia és hidrogénklorid „gőzök” keveredése során.

A minden feltételt kielégítő, deformálhatatlan, ideális mikrofázisok igazából a **mikrokristályok**. A kristálytípusoknak megfelelően lehetnek atom-, ion-, fém- vagy molekularácsos valamint makromolekulás kristályok. De szintén szilárd mikrofázisoknak tekinthetők a levegőben lebegve közlekedő vírusok, spórák és pollenek is (ld. 1. táblázat).

A szilárd részecskéket tartalmazó gázdiszperziót a köznap nyelvvel megegyezően **füstnek**, durvább változatát **pornak**, porfelhőnek nevezzük. Kiülepedésük során kohézív jellegű rendszer, **porhalmaz**, hamu, a mikrokristályok tartós kötődésével pedig **pórusrendszer** (vagy xerogél) keletkezik.

A mikrokristályok aggregálódását a levegő molekuláinak adszorpciója csak lassítja, de nem akadályozza meg, mert a felületek között kialakuló kötőerők erősebbek, mint a molekulákat megkötő másodlagos erők. A forró nyári napokon a **szmog** mégis állandósul. A légkör felső rétegein átszűrődő ultraibolya sugárzás ugyanis elektronokat léptet ki a mikrokristályok felületéről. Az azonos felületi töltésű részecskék ettől kezdve taszítják egymást, ezért nem aggregálódnak.

A tűzhányók kitörései, majd a földalatti atomrobbantások által, esetenként egészen a sztratoszféráig juttatott finom por, vulkáni hamu sokáig tartózkodhat a légkörben. A parányi tükröző felületek sokasága visszaveri a napsugárzás jelentős részét. Ezzel megváltoztatja a hőmérsékleteeloszlást, a magaslégköri áramlásokat és a fotokémiai folyamatokat. Ezért a porszennyezés meteorológiai jelenségekhez, időjárás-változáshoz, szélsőséges esetben - mint a Föld történetében már többször - tartós éghajlatváltozáshoz vezet (ld.: jégkorszakok kialakulása). A kilencvenes években, az ózonréteg vékonyodása és a porszennyezés csökkenése miatt megkétszereződött a felszínre lejutó UV-B sugárzás mennyisége.

A porhalmazok folyadékszerű, fluid állapotának létrehozásához és fenntartásához a levegőt állandóan mozgásban kell tartani. A porok lebegtetésén és áramoltatásán alapuló fluidizációs technika megkönnyíti az anyagszállítást, lehetővé teszi a szénpor elégetését és megnöveli a szilárd fázisú katalitikus folyamatok termelékenységét.

A vulkánok kitörésekor szintén a forró gáz tartja áramlásban az akár 100 km/h sebességgel hömpölygő hamufolyamot, más néven izzó lavinát. Az összekristályosodott finom eloszlású vulkáni hamu zárta örökre kőbe a pompeji tragédia szenvedéseit is.

Kísérlet, megfigyelés:

Kalcium-oxid oldódásának és kiülepedésének megfigyelése.

Ezüst-klorid csapadék leválasztása különböző arányban adagolt nátrium-klorid oldat segítségével.

A folyadék fázisú mikrokristályos rendszerek különböző típusait az égetett mész oldása során egyszerre figyelhetjük meg. A kalcium-oxid a vízzel érintkezve kalcium-hidroxid formájában oldódni kezd. Csakhogy a közepes oldhatóság miatt az oldat hamar telítődik. Így a felületükön fokozatosan hidratálódó kalcium-oxid szemcsék mellett kalcium-hidroxid kristályok jelennek meg. Ezért a mikrokristályok mérete nagyon változatossá, a rendszer **polidiszperzzé** válik. Rövid várakozás után a különböző mérettartományú fázisok szét is válnak. A tejhez hasonló kolloid oldatot **szolnak** (mésztej), a durva diszperz oldatot **szuszpenzió**nak, a kiülepedett kohézív jellegű tartományt **pép**nek, pasztának, míg a mikrofázisok összekristályosodása esetén folyadékkal nedvesített **pórusrendszer**nek nevezzük.

Az ionreakciók során gyakran keletkezik kolloidális eloszlású csapadék és a szolok stabilitása nagyon eltér egymástól. Sőt, ugyanaz a vegyület leválasztható különböző eloszlású csapadék formájában is. Ha az ezüst-nitrát oldatba csak egy csepp nátrium-klorid-oldatot cseppentünk, akkor finom eloszlású (tejszerű) ezüst-klorid-szolhoz jutunk. Ilyenkor a feleslegben maradó ezüstionok a mikrokristályok felületén adszorbeálódnak, és az azonos felületi töltés (a nyári szmog képződéséhez hasonlóan) megakadályozza az aggregációt és a kiülepedést. Ugyanígyen hatást fejtenek ki a felületen adszorbeálódó felületaktív anyagok, melyeket a szolok stabilizálására is használnak.

A szolok optikai viselkedése nagyon változatos. A mindhárom irányban azonos méretű kristálykák minden irányban egyformán verik vissza (szórják) a fényt, ezért koncentrációjuktól függően opalizálnak vagy tejszerűen átlátszatlanok (**Faraday-Tyndall** féle **jelenség**) De ha az apró kristályok lemezek, lapocskák formájában jelennek meg, melyeket a közeg hőmozgása állandóan elforgat, akkor fel-fel villanóan tükröznek (mint például az ólom-jodid hűtés hatására újrakristályosodó oldata). Ettől olyan látványosak a metall-festékek is. A lakkfesték rétegben rendezetlenül beágyazódott fémlapocskák más-más irányban csillognak. A szolok átláthatatlanságát használja ki menekülése során a tintahal,

amikor kolloid eloszlású kék festéket ereget, vagy a fenéklakó lepényhal, amikor felkavarja a finom iszapot.

Kísérlet, megfigyelés:

Egy diavetítővel átvilágított, vízzel telt üvegcádba apró részletekben alkoholos kénoldatot csepegtetünk, majd mindig jól összekeverjük. Minden alkalommal figyeljük meg az oldalra szóródó és az áthaladó fény színét!

A látványból a mikrokristályok méretére is következtethetünk. Ha a részecskék mérete és a közöttük lévő távolság már összemérhető a látható fény hullámhosszával (400-800 nm), akkor a fényszórás – a fényelhajláshoz hasonlóan – **hullámhossz-függővé válik**. (A fényszórás mértéke pontos mérések szerint a hullámhossz negyedik hatványával fordítottan arányos.) Ezért a töményedő kénszol által oldal irányba szórt fény egyre kékebbnek, míg az áthaladó fény egyre pirosabbnak látszik.

Kísérlet, megfigyelés:

Száraz keményítő, liszt, homok nedvesítése különböző mennyiségű vízzel.

A nedvesített porhalmazok képlékenysége, alakállandóságának megfigyelése.

Lisztgyurma készítése és formázhatóságának vizsgálata.

Száraz homokból (porhalmazból) nem építhető homokvár. Ugyanakkor a sarat, iszapot sem lehet formázni. Ezek az egyszerű tapasztalatok is bizonyítják, hogy az arányok mennyire fontosak. A gázokhoz képest a folyadékok összefüggő réteget képeznek a kristályfelületek között. A kölcsönhatás során egy **nedvesített** porhalmaz keletkezik. Ha a mikrokristályok között a folyadékréteg kolloidális méretű filmmé válik, és folyadékréteg már nem csúszhat el egymáson, akkor a nagy felületűvé **deformált folyadék fázis** összeragasztja a kristályokat. Ilyenkor a rendszer éppúgy megszilárdul, mint a tejszínhab, miközben a másodlagos kötőerők továbbra is biztosítják a képlékenységet. Ezért tartja meg alakját a mézskőport tartalmazó fogkrém, építhető vár a nedves homokból, formázhatóan alaktartó a finom eloszlású agyag-, porcelán massa vagy a keményítő kristályokból gyúrt lisztgyurma.

A folyadék fázis elpárolgása után a mikrokristályok már közvetlenül érintkezhetnek egymással. Ezért a korábban csak látszólag kohézív rendszerek valóban azokká válnak. A formát azonban csak az összeolvasztó kiégetés merevíti maradandóvá, amikor a pórusrendszerben a felületi kötőerő elsődleges kötéssé alakul. Hasonló **szol - nedvesített**

porhalmaz - pórusrendszer átalakulás játszódik le az üledékes kőzetek képződése során is, amikor a hordalék, valamint a kova- vagy mészvázás moszatok üledéke a nagy nyomás, esetleg magas hőmérséklet hatására összekristályosodik. Folyadékkal telt pórusrendszer azonban keletkezhet telített oldatokból történő lassú kikristályosodással is. Ilyen módon alakul ki a szervesetlen eredetű mésztufa valamint a porózus szerkezetű meszes vázak, héjak, mint a korallok vagy a tojáshéj.

Kísérlet, megfigyelés:

Különböző típusú festékek előállítása, rántás készítése.

A folyadék fázis a víz, a vizes oldatokon kívül apoláris oldószer, sőt emulzió is lehet. A festészet történetében új korszakot nyitott az olajfestékek megjelenése, amikor a finomra őrölt, ásványi eredetű festékeket víz helyett „száradó” olajokkal keverték kenhető péppé. Például a terpentinolaj – a levegő oxigénje hatására bekövetkező – polimerizációja során a megszilárduló film magába zárja a pigment-kristályokat.

Olaj fázisú rendszer a készülő rántás, emulzió a közege a hidegen induló habarásnak. Az agyag mintájára készül az olajos vagy emulziós fázisú, kiégetést nem igénylő gitt, a gyurma valamint a krémpúderek, az alapozó vagy a gyógyhatású krémek. Ezekben finomeloszlású meszkőport, agyagásványt, cink-oxidot, a süthető gyurmában pedig színezett műanyagport oszlatnak el.

Kísérlet, megfigyelés:

A gipsz, a gipsz- és a mészhabarcs készítése és kötésének megfigyelése.

Különböző méretű alkotói miatt polidiszperz jellegű a mész- és a gipszhabarcs, melyeket már Mezopotámiában és Egyiptomban is alkalmaztak. Ezekben a „durva” homokszemcséket finom eloszlású mész-, ill. gipszpép vonja be.

Ugyan nem tekinthetők szoloknak, mégis folyadék fázisban megjelenő, kolloidális méretű szilárd fázis keletkezik a szálhúzás során is. A műszálak gyártásakor a tömény polimer oldatot apró lyukakon keresztül rossz oldószerbe préselik. A makromolekulák ekkor vékony szálként csapódnak ki. Az összegubancoló makromolekulák között az egyik húzza a másikat. Ezért a szál végtelenné válik.

A szilárd-szilárd típusú kolloid rendszerekben a komponensek eltérő polaritásuk vagy kristályszerkezetük miatt egymástól elhatárolódó,

nem feltétlen kristályos szerkezetű mikrofázisokat alkotnak. Szilárd halmazállapotban a komponensek nem tudnak szétválni és sokszor csak a képződés ismeretében dönthető el, hogy melyik komponens a közeg. A közeg a mikrokristályokhoz hasonlóan lehet atom-, ion-, fémes-, molekulárcsos, valamint makromolekulás anyag. Ezért a szemcsehatárok mentén minden tulajdonság ugrásszerűen változik.

Ezek a rendszerek keletkezhetnek emulziók vagy szuszpenziók megdermedésével, a komponensek olvadékból vagy oldatból történő elkülönülő kristályosodásával vagy különböző anyagok utólagos át- és összekristályosodásával. Ilyen szerkezettel rendelkeznek a kőzetek, a (kő)meteoritok, az ércek, a mészvázak, a csont, ill. a klasszikus és modern szerkezeti anyagok közül a vakolatok, a beton, az ötvözetek, a gumi, a papír, vagy az üveg- és szénszálas kompozit típusú műanyagok.

A folyékony magmából és a felszínre került lávából, az összetétel és a lehűlés sebességétől függően különböző, mikrokristályos szerkezetű kőzetek alakultak ki. A lassan kristályosodó gránit durva szemcsés, magmás kőzet. A szürke kvarc-, a rózsaszín vagy fehér földpát- és a fekete csillámszemcsék szabad szemmel is megkülönböztethetők benne. A vulkanikus eredetű, vagyis a gyorsabban kihűlő bazalt szemmel nem látható mikrokristályait szilikát ásványok (olivin, piroxén és plagioklász) alkotják.

A homokszemcsék kalcium-karbonátos vagy szilikátos összekristályosodásával képződtek a különböző keménységű homokkövek. A finom vulkáni hamu cementálódásával jöttek létre a réteges szerkezetű vulkáni kőzetek. A kavicsok és a kőtörmelékek üledékes kőzetbe ágyazódásával alakultak ki a kavics- és a törmelékkövek (konglomerátumok, ill. breccsák.)

Az építészetben, a díszítésben alkalmazott eljárások a természet módszereit utánozzák. A gipszhabarcs és a stukkó a gipsz szerkezetváltó átkristályosodása, a mészhabarcs a kalcium-hidroxid-réteg elkarbonátosodása miatt szilárdul meg. Ilyen több rétegű és egyre finomabb összetételű nedves vakolatra készültek a freskók, melyen a szilárd festékszemcséket az elkarbonátosodó mészréteg kötötte meg. A kiszáradt vakolatra enyvbe, tojásfehérjébe vagy sárgájába kevert festékporral készült a secco. Ebben az esetben a kiszáradó makromolekulás réteg rögzíti a pigment szemcséket. Az olajfestményeken a „száradó”, polimerizálódó lenolaj réteg foglalja magában a színes mikrokristályokat. A modern festékek esetében pedig az oldószer

elpárolgása után marad vissza a pigmentet rögzítő polimer összefüggő rétege. A gyorsan kötő kittekben a monomerbe keverik az agyag vagy műanyag szemcséket, majd a felhasználáskor pl. benzoil-peroxid adagolásával indítják be a gyökös polimerizációt, mely következtében a kitt kikeményedik.

A vulkáni hamu építőipari utódja a cement. A cement gyártás (klinkerégetés) során a mészkőport, agyagot, homokot esetleg vasoxidot olyan magas hőmérsékletre hevítik, hogy olvadákfázisú kémiai reakciók játszódhatnak le. Valójában mesterségesen hozzák létre a vulkáni hamut, csak hogy ebben az esetben a terméket porrá kell őrölni. A főleg kalcium-szilikátokat és alumínátot tartalmazó klinkerporhoz még gipszet is kevernek. A cement-porhalmaz a víz hatására összefüggő pórusrendszeré kristályosodik. Attól függően, hogy a cementhez homokot, sódert vagy apró kavicsot kevernek, különböző mechanikai tulajdonságú cementkövekhez, betonhoz jutnak. Ezek a mesterséges konglomerátumok a homok- és kavicskövek utódai.)

Kísérlet, megfigyelés:

Tojás meszes héjának reagens sósavban történő leoldódásának megfigyelése.

A meszes vázak, héjak képződése során az aktuális fehérjék bázikus oldalláncai lokálisan idézik elő a protonátvételt, és ezzel a hidrogén-karbonát tartalmú oldatból a karbonátionok képződését a mikrokristályos kalcium-karbonát kiválásához. Ily módon a makromolekulák beágyazódnak a porózus szerkezetű vázba, és módosítják a meszes héj mechanikai tulajdonságait. A reagens sósavba helyezett tojás meszes héjának oldódását a szén-dioxid fejlődés mellett habképződés kíséri, ami a fehérje jelenlétére utal. Hasonló módon képződhet a fogzománc és válhatnak ki a csontfehérjék (kollagén, elasztin) térhálós szerkezetében elhelyezkedő trikálcium-foszfát és kalcium-karbonát szemcsék is.

A kopásállóságot biztosító koromszemcséket és egyéb adalékanyagokat vulkanizálás előtt hengerléssel (kalanderezéssel) keverik be a makromolekulás nyersgumiba. A papírt a titán-dioxid, bárium-szulfát, gipsz, magnézium-karbonát, kaolin vagy talkum szemcséket és cellulóz szálakat tartalmazó pépszerű szuszpenzióból, a szűrést követő hőkezelő hengerléssel állítják elő.

A technikában leggyakrabban alkalmazott szerkezeti anyagok, az ötvözetek mechanikai és elektromos tulajdonságai is a különböző

összetételű, méretű és alakú mikrokristályoknak tulajdonítható. Az acélban pl. vas (ferrit) és vas-karbid (cementit) kristálykák keverednek. A mikroszkópi vizsgálatok szerint mikrokristályok keveréke építi fel az ittrium-oxid, réz-oxid és bárium-karbonát kihevítésével képződött szupravezető kerámiákat is. A legújabb szerkezeti anyagokban a csonthoz hasonlóan nagyon eltérő tulajdonságú anyagokat társítanak össze. A kompozitokban nem mikrokristályok, hanem nanocsövek vagy mikroszálak formájában jelenik meg az eltérő tulajdonságú fázis. A nanocsövek és kapszulák a különböző szénatomszámú fullerének világából kerülnek ki. A 10-100 mikrométer átmérőjű szálak pedig üvegből, volframból, bórból és szénből készülnek. A beágyazó anyagok a vágyott tulajdonságtól függően különböző típusú műanyagok, a csontokhoz hasonlóan makromolekulás anyagok.

Az üveg-, fém- és szénszálás műanyagok mellett terjedőben van a különböző vékonyrétegek összeillesztésén alapuló szendvics szerkezetek gyártása. (ld.: CD lemezek, csomagolóanyagok, speciális tulajdonságú borítórétegek előállítása pl. repülőgép és űrrepülőgép gyártáshoz). A jövő század nanotechnológiájához – úgy tűnik – élő szervezetek struktúráinak lemásolásán keresztül vezet az út.

A kollid részecskék és rendszerek osztályozása

A kolloid részecskékrészecskék száma, ill. típusa szerint		A kolloid a fázisok aránya szerint	
mikro- és nano szerkezetek	A közeg halmaz állapota	DISZPERZ rendszerek	KOHÉZIV rendszerek
Mikrofázisok			
Mikrobuborékok <i>nem oldódó gáz</i>	folyadék szilárd	buborékok gáz-zárványok	habok szilárd habok
Mikrocseppek <i>nem elegyedő folyadék</i>	gáz folyadék szilárd	gőz / köd / felhő emulziók zárványok	krémek pórusrendszer, xerogélek
Mikrokristályok <i>nem oldódó atom-, ion-, fémes- és molekularácsos makromolekulás anyagok</i>	gáz folyadék szilárd	füst, száraz porhalmaz szol, nedves porhalmaz	xerogélek xerogélek kompozitok
Asszociátumok	Asszociációs kolloidok		
<i>szappanok, lipidek</i>	folyadék	micella / liposzóma	micellás gélek
Makromolekulák	Makromolekulás kolloidok		
<i>műanyagok poliszacharidok fehérjék Nukleinsavak</i>	folyadék	makromolekulás oldat	gélek
Komplex részecskék	folyadék	stabilizált oldatok	stabilizált gélek
Mikroorganizmusok	Élő rendszerek, társulások		
<i>vírusok baktériumok spórák, pollenek, sejtek</i>	levegő víz talaj	oldat rendszerek sejtszuspenziók	telepek társulások hártyák szövetek