

Lente Gábor

Jég-kilenc a Macskabölcsőben

Kurt Vonnegut (1922-2007), a jeles amerikai író legismertebb regényei az *Ötös számú vágóhíd*, a *Börleszk*, *A Titán szirénjei*, az *Időomlás*, a *Bajnokok reggelije* és az *Éj anyánk*. Egyik korai, 1963-ban írt regényében, a *Macskabölcsőben* olvashatjuk a következő sorokat:

– Többféle útja-módja van annak – kezdte magyarázatát dr. Breed –, ahogy bizonyos folyadékok kristályosodhatnak – megfagyhatnak –, többféle útja-módja van annak, ahogy az atomjaik szabályosan, mereven halmozódhatnak és összekapcsolódhatnak.

A májfoltos kezű öregember ösztökélt: gondoljak a többféle útmódra, ahogyan ágyúgolyókat felhalmozhatunk a törvényszéki palota kertjében, a többféle útmódra, ahogy a narancsot csomagolhatják a narancsosládába.

– Így áll a dolog a kristályokban található atomokkal is; és azonos anyag két különböző kristálya merőben különböző fizikai tulajdonságokkal rendelkezhet.

.....

– Most pedig tegyük fel – röfögött végtelen élvezettel dr. Breed –, hogy a víz kristályosodásának, fagyásának többféle lehetséges útja-módja van. Tegyük fel, hogy a jég, amelyen korcsolyázunk, és amit a whiskynkbe rakunk – nevezzük „jég-egy”-nek –, csupán többféle jég egyike. Tegyük fel, hogy a víz mindig jég-eggyé fagyott a földön, mert nem volt olyan magva, ami megtanította volna, hogyan lehet belőle jég-kettő, jég-három, jég-négy... És tegyük föl – és öreg kezével megint megkoppintotta az íróasztalt –, hogy van egy bizonyos forma, nevezzük jég-kilencnek avagy szuperjégnek – olyan kemény kristály, mint ez az asztal –, aminek az olvadáspontja, mondjuk, száz fok Fahrenheit, vagy talán inkább százharminc fok.

.....

És az öregember felszólított: képzeljem el az Egyesült Államok tengerészeit a kutyabagosi mocsár kellős közepén.

– Teherautók, tankok, tarackok, mind torkig iszappal! – jajongott az öreg. – Nyeli őket a nyálkás, nyúlós ingovány.

Felemelte ujját, és rám kacsintott. – Ám tegyük fel, fiatalember, hogy egyetlenegy tengerész zsebében van egy icipici kapszula, benne egy szemernyi *superjég*, ami megtanítja a vízatomokat, hogy kell ezentúl halmozódni-kapcsolódni, hogy kell megfagyni. Ha pedig a tengerész bedobja ezt a szemernyi magocskát a legközelebbi pocsótába...

– A pocsóta megfagy? – kockáztattam meg.¹

A *Macskabölcst* sokan Kurt Vonnegut egyik legjobb művének tartják. Kiderül belőle, miért is szokták stílusát a legsötétebb fekete humornak tartani, megismerhetjük a kitalált, de teljesen haszontalan San Lorenzo szigetét és a rajta egyeduralkodó, szintén kitalált, Bokononizmus nevű vallást. A regény lényegében a földi élővilág teljes pusztulását írja le szatirikus alapossággal, s a világvége eljövételében központi szerepe van a jég-kilencnek, amelyről dr. Breed magyaráz az idézett részletben. Minden víztartalmú anyag azonnal megfagy, ha jég-kilencsel érintkezik. Vajon csupán az írói fantázia szüleménye a jég-kilenc, vagy lehet esetleg tudományos alapokon nyugvó feltételezés is?

Még mielőtt erre a kérdésre választ keresnénk, olvassunk bele a „kivételes munkabírású francia tudományos-fantasztikus író”, Jules Verne (1828-1905) majd egy évszázaddal korábban papírra vetett regényébe, a *Hector Servadac*ba is:

Noha már elég hideg volt, a tenger még mindig nem állt be, mert vize meg sem mozdult, tükrét még csak szellő sem borzolta. Ilyen körülmények között a víz nehezebben fagy meg, de ha csak egy lökés is éri, bekövetkezik a fagyás.

A kis Nina és Pablo a felnőttekkel együtt ment a tenger fölé nyúló sziklára.

– Kislányom – szólt Ninához Servadac kapitány –, el tudnál-e jó messzire hajítani egy darab jeget a tenger felé?

– Igen! – mondta a kislány. – De Pablo sokkal messzebb tud dobni, mint én!

– Próbáld csak meg! – biztatta Hector Servadac, és egy darab jeget nyomott a kislány kezébe. Aztán még hozzátette: – Figyelj csak jól, Pablo! Most majd meglátod, milyen nagy varázsló a mi Ninánk!

¹ Kurt Vonnegut: *Macskabölcst*, Európa Könyvkiadó, 36-38. oldal. Fordította: Borbás Mária

Nina egyszer-kétszer meglendítette a kezét, majd elhajította a jeget.

Nyomban zizegés, zúgás hallatszott, s egyre tovább és tovább terjedt egészen a látóhatárig.

Nyomban jégpáncél borította az egész Galliai-tengert.²

Jules Verne és Kurt Vonnegut közös, és a hozzájuk hasonlóan elismert írók körében kivételes jellemzője, hogy természettudományosan igen műveltek voltak. Jules Verne, habár az egyetemen jogi diplomát szerzett, nagyon is otthonosan mozgott a XIX. századi tudományos elméletek körében, s munkáihoz igencsak alapos könyvtári előtanulmányokat végzett. Kurt Vonnegut egyetemi diplomáit kémiai és antropológiából szerezte, s írásaiban nem egyszer jegyzi meg ironikus hangon, hogy természettudományos végzettségét az íróársadalom soha nem fogja neki megbocsátani.

Jules Verne a *Hector Servadac*-ban egy nagyon is jól ismert tudományos jelenséget ír le: a túlhűtött vizet. Ha vizet úgy hűtenek le, hogy közben nem éri semmiféle mozgás, akkor hőmérséklete akár 10-15 fokkal is fagyáspontja alá csökkenhet anélkül, hogy jéggé változna. Ez azért fordulhat elő, mert a folyékony víz szerkezetében meglehetősen rendezetlenség uralkodik. Óvatos, rázkódásmentes hűtésnél a vízmolekulák még arra sem képesek, hogy a jég rendezett szerkezetébe kerüljenek. Így aztán a víz még fagyáspontja alatt is folyékony marad, de csak addig, amíg az első csekély rázkódás el nem indítja a kristályrácsba rendeződést. Ahogy azt Jules Verne is leírja, ekkor igen hirtelen megfagy az egész víztömeg.

Kurt Vonnegut regényében a jég-kilenc összetettebb gondolatmeneten alapul. Igen gyakori, hogy egy szilárd anyag többféle kristályos formában is előfordul. Elég, ha csak az elemi szénre gondolunk: kémiai összetétel szempontjából a grafit és a gyémánt teljesen azonos, csak a kristályrácsuk különböző. Ebből a példából az is nyilvánvaló, hogy az eltérő kristályszerkezet gyökeresen eltérő fizikai tulajdonságokat okozhat: a grafit igen puha, a gyémánt kivételesen kemény. Szobahőmérsékleten és légköri nyomáson a grafit a stabilabb módosulat, így elvileg minden gyémántdarab grafittá alakul át. Az már más kérdés,

² Jules Verne: *Hector Servadac*, Móra Könykiadó, 180. oldal. Fordította: Bartócz Ilona

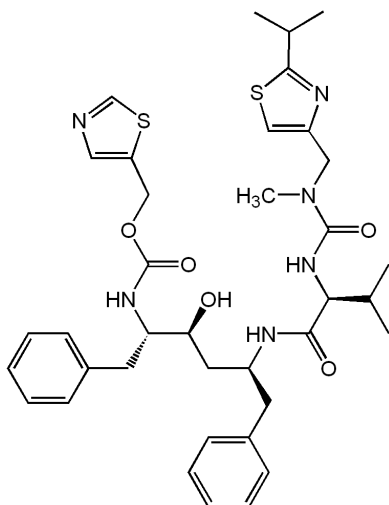
hogy ez a változás olyannyira lassú, hogy még évezredek után sem lehet kimutatni a legérzékenyebb mai műszerekkel sem.

Valójában a legtöbb szilárd kristályos anyagnak több lehetséges kristályrácsa van, néha egészen sok is. A szilícium-dioxidnak például rengeteg különböző szerkezete ismert: az α - és β -kvarc, α - és β -tridimit, α - és β -krisztobalit és a stishovit hét különböző SiO_2 -módosulat, de korántsem az összes ismert. A higany(II)-jodid szobahőmérsékleten stabil, narancsszínű α -szerkezete melegítve a halványsárga β - HgI_2 -dá alakul át.

Az is előfordul, hogy az egyik módosulattól a másikba való átmenet nagyon lassú (hasonlóan a gyémánt – grafit átalakuláshoz), de az átalakulási sebesség valamilyen külső tényező hatására hirtelen megnövekedhet. Erre talán a legszélesebb körben ismert példa az ónpestis. $13,2^\circ\text{C}$ felett az ón stabil módosulata a β -ón (fehér ón), amely ezüstösen csillogó színű és jól megmunkálható, így alkalmas arra, hogy mindennapi használati tárgyak készüljenek belőle. $13,2^\circ\text{C}$ alatt azonban az α -ón (szürke ón) a stabilabb, amely kevésbé hasonlít más fémekre, elég könnyen elporlik. Ennek ellenére a fehér ónból szobahőmérsékleten készült tárgyakat sokáig lehet nagy hidegben is tartani, mert a fehér ón csak lassan alakul át szürke ónná. Ha azonban már egy kis szürke ón jelen van, az felgyorsítja a folyamatot, vagyis katalizátorként működik. Az ilyen érdekes átalakulásokat, ahol az átalakulás termékének megjelenése felgyorsítja a folyamatot, autokatalitikusnak nevezik. A jelenség ezért is kapta az ónpestis nevet: hosszú ideig sértetlennek tűnő óntárgyak a hidegben időnként hirtelen elporladnak. Ezt a középkorban leggyakrabban Európa hűvösebb részein a templomi orgonák sípjainál észlelték. Az anekdota azt tartja, hogy Bonaparte Napóleon hadseregének egyenruháin óngombok voltak, s így az ónpestis szerepet játszott abban, hogy oroszországi téli hadjáratáról sikertelenül kellett visszafordulnia. A XX. századból származik a brit sarkkutató, Robert Scott szomorú története. 1910-ben, a Déli-sark elérésére indított expedíciója során az odafelé úton jelentős élelmiszer- és fűtőanyagkészleteket hagyott hátra néhány helyen. A fűtőanyag kerozin volt, amelyet ónvasalású tartályokban szállítottak. A kaland tragikus véget ért, de ezt nem a norvég Roald Amundsen okozta, aki végül is előbb érte el a célt. 1912 elején, visszafelé tartva Scotték kerozintartályaikat üresen találták. A vasalások valószínűleg az ónpestis áldozataként estek, habár ezt a magyarázatot soha senki nem bizonyította be. Az expedíció tagjai így nem éltek túl a sarki hideget és viharokat – habár

az egyik, használható fűtőanyaggal és élelmiszerrel feltöltött táborukhoz 20 kilométernél is közelebb jutottak. Az Antarktison viszont arra is ismert példa, hogy ónból készült konzervdobozok nyolcvan évig is sértetlenül elviselték a hideget.

Az is előforult már a tudománytörténetben, hogy egy már jól



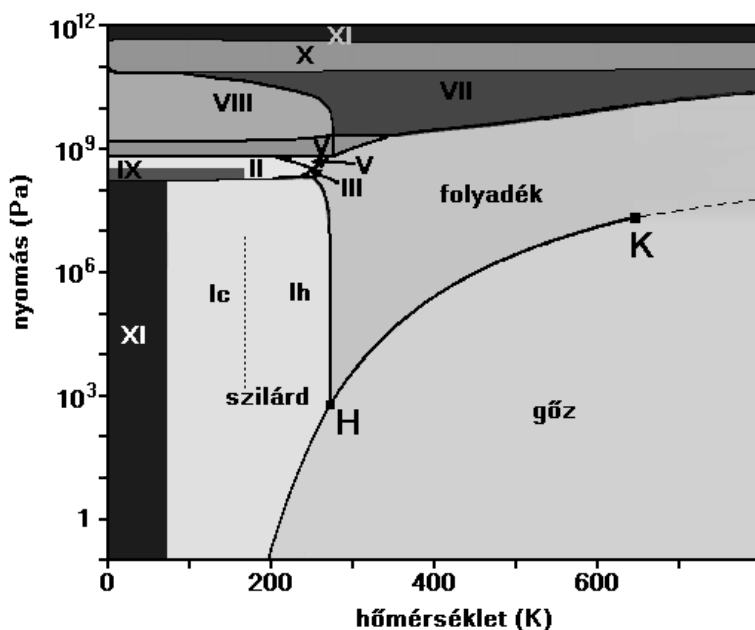
1. ábra A ritonavir szerkezete

ismert szilárd anyagnak addig ismeretlen, stabilabb kristályszerkezetű formáját fedezték fel hirtelen. Egy nem túl régi példa erre a ritonavir nevű AIDS-ellenes gyógyszer (1. ábra), amelyet az Abbot Laboratories nevű nemzetközi gyógyszergyártó cég kezdett forgalmazni 1996. március 1-én Norvir néven. 1998-ban először a vállalat chicagói, majd olaszországi üzemében is a ritnovair új kristályszerkezetű szilárd formájának keletkezését észlelték. Az új szerkezet stabilabb volt, mint a régi, és néhány nap múlva a régi szerkezetű kristályformát már előállítani sem sikerült. Az új

szerkezetű forma vízdoldhatósága jelentősen csekélyebb volt, mint a régié, így kapszula készítésére alkalmatlan volt. A gyártó cég több százmillió dollárt költött az új kristályszerkezettel kapcsolatos kutatásokra, a kapszula árusítását viszont így is meg kellett szüntetni.

De térjünk vissza a jég-kilencez. Itt tehát azt feltételezi Kurt Vonnegut, hogy a jégnek van egy, a Földön eddig még nem ismert, a szokásos jégnél stabilabb módosulata. A regény itt nem idézett részeiből kiderül, hogy ennek a módosulatlak az olvadáspontja 114,4 Fahrenheit fok, vagyis 45,8 °C. Így a folyékony víz ezen hőmérséklet alatt tulajdonképpen 'túlhűtött' állapotban van. A normális túlhűtött állapottal ellentétben viszont a fagyást itt nem rázkódás, hanem a jég-kilenc egy kis darabjával való érintkezés idézheti elő az ónpestishez hasonló autokatalitikus módon, vagyis egyetlen kis jég-kilenc kristály elég ahhoz, hogy a Föld teljes vízmennyiségét megfagyassza, beleértve az élőlényekben lévő vizet is, és így az élővilág teljes pusztulását okozza.

Ezzel a gondolatmenettel kapcsolatban a rossz hír az, hogy nem lehetetlen. Jó hír viszont, hogy igen valószínűtlen. Számtalan tudós tanulmányozta már a víz és jég tulajdonságait igen alaposan. Az ilyen jellegű tanulmányok eredményét **fázisdiagram** nevű ábrákon foglalják össze. A víz jelenleg pontosnak ismert fázisdiagramja látható a 2. ábrán.

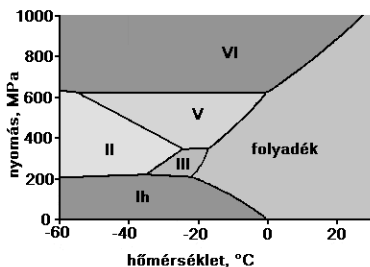


2. ábra A víz fázisdiagramja

Egy fázisdiagram eléggé összetett ábra. A vízszintes tengelyen a hőmérséklet, a függőleges tengelyén nyomás szerepel (az utóbbi logaritmikus skálán). A diagram egyik legegyszerűbb használati módja az, ha meg akarjuk tudni, hogy adott hőmérsékleten és nyomáson egy tiszta anyag milyen formája a legstabilabb. Ekkor csak meg kell keresnünk, hogy a hőmérséklet és nyomás által megadott pont a fázisdiagram melyik részére esik. A 2. ábrán például az 1 Pa nyomáshoz és 300 K (27 °C) hőmérséklethez tartozó pont a gőz feliratú területen van, így biztosan lehet állítani, hogy ilyen körülmények között a víz stabil formája a gázhalmazállapot. Ne ütközzünk meg azon, hogy a hőmérséklet a víz

forráspontja alatt van. Ugyanis az a hőmérséklet, ahol a folyékony víz forni kezd, függ a külső nyomástól. A víz forráspontja csak akkor 100 °C, ha a kísérletet normál légköri nyomáson (101325 Pa) végezzük. A fázisdiagramról megtudhatjuk, hogy mennyi a víz forráspontja más nyomásokon, csak meg kell keresnünk, hogy azon a nyomáson milyen hőmérsékleten van a határvonal a folyadék és a gőz között. Mexikóváros például 2300 méterrel a tengerszint felett van, ezért a légköri nyomás kevesebb a tengerszinten mértnél, csupán kb 78000 Pa. Ilyen nyomáson a víz már 93 °C-on forni kezd. Ha egy szakács kuktában főz, akkor a kuktát a főzés idejére nyomásbiztosan lezárja. A kuktában így megnövekedhet a nyomás, akár a légköri három-négyszeresére is. Ezért a víz magasabb hőmérsékleten forr, az étel pedig hamarabb elkészül, mert magasabb hőmérsékleten a kémiai reakciók, így a főzés is gyorsabb.

Mi történik 1 Pa nyomáson? Itt már a folyadék és a gőz területe nem is érintkezik egymással a fázisdiagramon. Ha alaposan átgondoljuk a dolgot, arra jutunk, hogy 1 Pa nyomáson nem is létezhet folyékony halmazállapotú víz. A jég közvetlenül gőzzé alakul, vagyis szublimál. A fázisdiagram egy nevezetes pontja a 2. ábrán **H**-val jelölt hármaspont. Ez az a nyomás és hőmérséklet (610 Pa és 0,01 °C), ahol a folyadék, gáz és szilárd halmazállapotú forma egyszerre lehet jelen. A hármasponti nyomásnál kisebb nyomásokon az anyagok szublimálnak. A másik nevezetes pont, amit a 2. ábrán **K** betű jelöl, a kritikus pont (21,8 MPa és 374 °C). A kritikus hőmérsékletnél nagyobb hőmérsékleten nincs különbség folyadék és gőz között. Így folyadékról csak a hármasponti nyomásnál nagyobb nyomásokon és a kritikus hőmérséklet alatt van értelme beszélni.



3. ábra A víz fázisdiagramjának egy kinagyított részlete

Egy tiszta anyagnak gázhalmazállapota csak egyféle lehet, említésre sem érdemesen ritka kivétellektől eltekintve folyadék-fázisa sem lehet több. Azt azonban már láttuk, hogy a szilárd állapotok különbözőek is lehetnek más és más kristályrácsokban. A jég esetében is elég sok szilárd forma van: a 2. ábrán a folyadék és gőz kivételével az összes többi terület különböző szerkezetű szilárd fázisokat (vagyis

jeget) jelöl. A jég különböző módosulatait római számokkal jelzik. A 2. ábra középső, zsúfolt részét kinagyítva mutatja be a 3. ábra.

A szokásos, mindennapokban is előforduló jeget az ábrán a jég-I jelöli. Ennek is két változata van, az Ih (hexagonális) és Ic (köbös). Légköri nyomáson még egy jégváltozat fordulhat elő nagyon alacsony hőmérsékleteken, a jég-XI. Érdekes módon a mindeddig elért legnagyobb nyomásokon is ez a forma stabil. Közepes és nagy nyomásokon a jég más kristályszerkezetű formái is ismeretesek. A különböző rács típusok egymásba alakulásának vagy megolvadásának körülményeit ugyanúgy lehet leolvasni az ábráról, mint a víz forráspontját különböző nyomásokon. Nagyjából 200 MPa nyomáson a víz fagyáspontja -20 °C alá süllyed, de itt már a jég-III, és nem a jég-I a stabil rács típus. Egészen nagy nyomásokon (10^{10} Pa) a jég-VII olvadáspontja már elérheti a víz kritikus hőmérsékletét is.

A fázisdiagramot szemlélve feltűnhet, hogy jég-IV egyáltalán nem található rajta. Ettől függetlenül a jég-IV előállítható, de nincs olyan nyomás és hőmérséklet, ahol ez a rácsszerkezet lenne a legstabilabb módosulat: a körülményektől függően lassan jég-III-má, jég-V-té vagy jég-VI-tá alakul át. Hasonló a helyzet az 1996-ban felfedezett jég-XII-vel, valamint a 2006-ban felfedezett jég-XIII-mal és jég-XIV-gyel is. Tudományos tévedés történt viszont a folyékony vízzel kapcsolatban: az 1960-as évek második felében többen azt vélték kimutatni, hogy igen keskeny kapillárisokban egy polivíznek nevezett, második folyékony módosulat létezik, amelynek légköri nyomáson mért fagyáspontja -40 °C , forráspontja 150 °C , sűrűsége pedig $1,2\text{ g/cm}^3$ körül van. Később kimutatták, hogy nehezen eltávolítható szennyeződések tévesztettek meg sok-sok kísérletezőt, polivíz pedig nem is létezik.

Ami pedig a *Macskabölcst*öt illeti: ha jég-kilencről nem is, de a jég-IX létezéséről valóban tudunk. Azonban ennek tulajdonságai korántsem egyeznek meg a Kurt Vonnegut által elképzelttel. A fázisdiagramból láthatóan a jég-IX csak elég nagy nyomásokon ($> 100\text{ MPa}$) létezik, és nem is határos a folyadékfázissal. Tehát jég-IX-et melegítve először a jég más szerkezetű, de még mindig szilárd módosulatai keletkeznek (jég-II és jég-III), és csak utána olvad meg.

Kurt Vonnegut saját emlékei szerint a jég-kilenc ötletét Irving Langmuirnak (1881-1957), az 1932-es kémiai Nobel-díjasnak köszönheti, aki azt eredetileg H. G. Wellsnek (1866-1946) vetette fel. Az akkor már

híres tudományos-fantasztikus író nem mutatott nagyobb érdeklődést, így hát a nála jóval fiatalabb Kurt Vonnegut játszadozott tovább a gondolattal. Végezetül pedig ne feledkezzünk meg a *Macskabölcső* egy tudósok számára nagyon is megszívlelendő részletéről sem:

– Ha nem ért valamit – unszolta dr. Breed –, kérje meg dr. Horvathot, hogy magyarázza el. Remekül magyaráz. Dr. Hoenikker mondta mindig – fordult hozzám –, hogy az a tudós, aki egy nyolcéves gyereknek nem tudja megmagyarázni, mit csinál, sarlatán.³

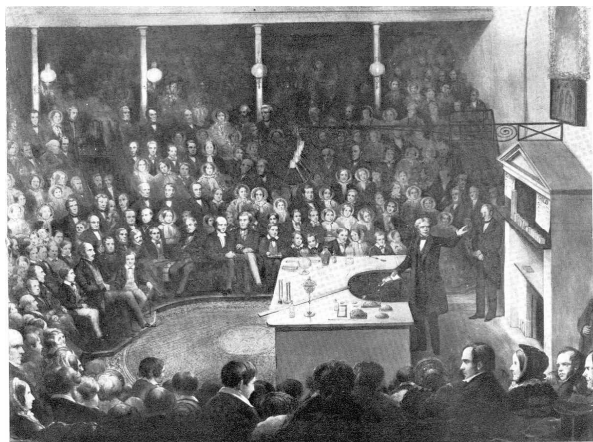
Turányi Tamás

Miről beszél a gyertya lángja? Az égés kémiája 150 évvel Faraday után

"A gyertya természetrajzát már egy régebbi előadásomban ismerttettem és ha tőlem függne, az előadásaimat évről évre ezzel a témával fejezném be: ugyanis *annyira érdekes tárgy ez* és annyi módot nyújt a természet tanulmányozásához vezető út megismerésére. A világegyetemet irányító természeti törvények mind-mind feltáruznak előttünk; és aligha találunk kényelmesebb módot a természet műhelyébe való betekintésre, mint ezt." Ezek Faraday 1860. évi Karácsonyi Előadásának első szavai.

Faraday (1791-1867) minden idők egyik legnagyobb fizikusa és vegyésze volt. Felfedezte a mágneses indukció jelenségét és elsőként készített működő villanymotort. Felfedezte a benzolt és elsőként cseppfolyósított klórgázt. Bevezette a kémiába az oxidációs szám fogalmát és elterjesztette az anód, katód, elektród, és ion szavakat. Nevét őrzi Faraday induktivitási törvénye, a Faraday-kalitka, a Faraday-effektus (fény és mágneses tér kölcsönhatása) és a Faraday-állandó. Ez utóbbi azt mutatja meg, hogy egy mól elektron töltése 96485 coulomb.

³ Kurt Vonnegut: *Macskabölcső*, Európa Könykiadó, 29. oldal. Fordította: Borbás Mária



Michael Faraday a Karácsonyi Előadást tartja a Királyi Intézet előadótermében, 1856-ban

Faraday 1825-ben lett a Királyi Intézet (Royal Institution) igazgatója. A Királyi Intézetet 1799-ben alapították, hogy falai között tudományos kutatást és ismeretterjesztést végezzenek. A Királyi Intézet épületében kezdettől fogva tartottak ismeretterjesztő előadásokat egy nagy előadóteremben. Az intézet laboratóriumaiban magas színvonalú tudományos kutatás folyt és folyik. Tíz kémiai elemet fedeztek fel ebben az intézetben és az intézet munkatársai közül 14-en kaptak Nobel-díjat. A Királyi Intézet Web oldala: <http://www.rigb.org>

Faraday nagyon fontosnak tartotta a tudományos ismeretterjesztést, ezért 1825-ben elindította a Karácsonyi Előadások (Christmas Lectures) sorozatát. Az első két évben az előadást nem Faraday tartotta, de 1827-ben már maga Faraday tartott kémiai tárgyú előadást. Később is az előadásokat vagy Faraday tartotta (összesen 19 alkalommal), vagy egy általa felkért előadó. A Karácsonyi Előadásokat azóta is minden évben megtartják és azokat 1966. óta közvetíti az angol televízió.

Faraday 1848-ban és 1860-ban előadását „Miről beszél a gyertya lángja?” (The Chemical History of a Candle) címmel tartotta meg. Az 1860. évi Karácsonyi Előadást egyik hallgatója, William Crookes gyorsírással lejegyezte és az 1861. januárban és februárban megjelent a “Kémiai Hírek” (Chemical News) című újságban. Az előadás szövege már 1861-ben megjelent könyvben is. Angol nyelven azóta is folyamatosan, újra és

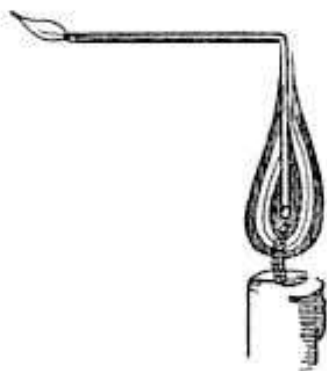
újra kiadják. A könyv 1921-ben megjelent magyarul is „A gyertya természetrajza” címmel (Athenaeum kiadó, Budapest, 1921, fordította: Bálint András). Ezt a könyvet 1949-ban újra kiadták magyarul, ez alkalommal Zemplén Jolán fordítása alapján „Miről beszél a gyertya lángja?” címmel. Általános iskolás koromban ez a könyv még megvolt a helyi Szabó Ervin könyvtárban. Néhány éve újra ki akartam kölcsönözni, de megtudtam, hogy mint elavult könyvet, minden Szabó Ervin fiókkönyvtárban leselejtezték, csak néhány központi könyvtárban maradt belőle példány. Szerencsére ma már az Internetről letölthetők akár teljes könyvek is és az 1921-es magyar kiadás olvasható a Chemonet Web oldalain (www.chemonet.hu). Érdemes is elolvasni, csaknem 150 év után is lenyűgöző Faraday előadásának eleganciája és gördülékenysége.

Faraday már tudta, hogy az égések során milyen anyagok reagálnak és milyen anyagok keletkeznek. Számszerűen is pontosan ismerte a résztvevő anyagok elemi összetételét és sokat tudott az égés fizikájáról. Természetesen az égések kémiájáról és fizikájáról sok új ismeret látott napvilágot Faraday előadása után. A XX. század elején ismerték fel, hogy az egyetlen bruttó reakcióval leírható kémiai folyamatok gyakran több tucat, vagy akár több száz reakciólépésből állnak. A legtöbb ilyen reakciólépésben részt vesznek párosítatlan elektront tartalmazó anyagfajták, úgynevezett gyökök. Az égés tulajdonságai a gyökök reakciói ismeretében érthetők meg. Bodenstein vizsgált meg először (1907) részletesen egy gázfázisú összetett gyökreakciót, a hidrogéngáz és a brómgáz reakcióját. Szemjonov (1926) és Hinshelwood (1927) azt tanulmányozták, hogy a foszfor illetve a hidrogén égése során milyen reakciólépések játszódnak le és az elért eredményekért 1956-ban megosztott Nobel-díjat kaptak.

Az 1950-es években a technikai és technológiai fejlesztések középpontjába került égésekkel kapcsolatos problémák megoldása. Katonai és űrhajózási célokra megbízható és nagy tolóerejű rakétákat állítottak elő. Ugyanekkor jelentkezett az igény jobb és nagyobb teljesítményű autómotorokra és repülőgép gázturbinákra. A technikai fejlesztéseket lehetővé tette, hogy évről évre egyre pontosabban ismerték meg a különféle anyagok égésének kémiáját és ennek alapján lehetett tervezni berendezéseket. 1973-tól a kőolaj-származékok ára egyre nőtt és egyre fontosabbá vált a hatékonyság és az üzemanyag-takarékosság is. Az 1990-es évektől a tervezések legfőbb szempontja a környezetvédelem lett. Alapvetően fontossá vált, hogy az égéseken alapuló háztartási és ipari

berendezések, közlekedési eszközök nem csak megbízhatók, nagy teljesítményűek és üzemanyag-takarékosak legyenek, de ugyanakkor kevés szennyezőanyag keletkezzen működésük közben. Ma már nagyon sok berendezést lehet úgy megtervezni, hogy közben a kémiai folyamatokat is minőségileg és mennyiségileg pontosan írják le. Az égések kémiájának kutatása a gyertya égésének vizsgálatával kezdődött.

A gyertya közelről



Nézzünk meg egy égő gyertyát közelről! A gyertya lángja megolvasztja a paraffint. A megolvadt paraffint kis csészeként szilárd paraffin veszi körül, amely nem engedi elfolyni az olvadt paraffint. Ha egy gyertyában függőleges bevágások vannak, azon elfolyik az olvadt paraffin és a gyertya rosszul ég. Egyes díszgyertyák túl vastagok, és az ilyen gyertya elégeése után oldalt sok paraffin marad vissza.

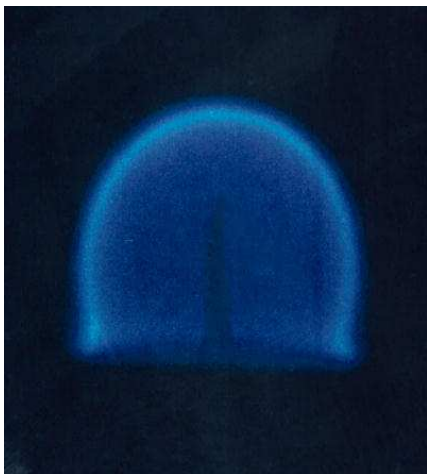
Közelről látható az is, hogy a kanóc alja ázik a paraffinban, míg a kanóc teteje száraz. A hajszálcsovésség miatt a paraffin folyamatosan felszívódik a kanóc tetejére. Az olvadt paraffin egyre fogy, a láng lejjebb jön, és újabb paraffin olvad meg. A kanóc teteje belelóg a láng forró részébe és elég. Néha lehet olyan gyertyát is vásárolni, amely nem szívja fel jól az olvadt paraffint és emiatt túl kicsi a gyertya lángja. Olyan gyertyát is láttam már, amelynek nem égett el a kanóca és az üszkös csonkként felül kilógott a lángból.

A kanóc tetején a paraffin elpárolog, a paraffingőzők elbomlanak, és olefinek keletkeznek. Ezek az olefinek a gyertya lángjában elégnak. A gyertya lángjának belsejében tehát éghető gázok vannak. Ezt egy egyszerű kísérlettel lehet bizonyítani: ha a gyertya lángjába üvegcsövet teszünk, az éghető gázokat ki lehet vezetni és azokat az üvegcső végén meg lehet gyújtani.

Miért csepp alakú a gyertya lángja? A láng széle forró, emiatt a láng melletti levegő felmelegszik. A forró levegő sűrűsége sokkal kisebb, mint a hideg levegőé és gyorsan felfelé száll. A láng melletti gyors

levegőáramlás alakítja ki a jellegzetes csepp alakot. A légáramlás állandóan friss oxigént szállít a lángba, és elszállítja a keletkező CO_2 és H_2O gázokat.

Súlytalanságban nem számít a forró és hideg gázok közötti



sűrűségkülönbség és így nincs felhajtóerő. Ilyen körülmények között nem jön létre légáramlás a láng mellett és emiatt a gyertya lángja nem lesz csepp alakú. Súlytalanságban a láng félgömb alakú. Ebbe a lángba csak diffúzióval, lassan jut be az oxigén és lassan jut ki belőle a keletkező széndioxid és víz. Több űrsikló-küldetés során (STS-43, STS-83, STS-94, STS-105, STS-107) volt eddig a tudományos program része az égések vizsgálata a súlytalanságban. Ilyen kísérletek

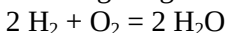
során vizsgálták például kis lánggömbök (flame ball) viselkedését nagyon kis hidrogéntartalmú $\text{H}_2\text{--O}_2$ gázelegyenben.

A űrsikló-küldetések során több órán át tartó égési kísérleteket is folytattak, de ezek a kísérletek drágák és kivételesek. A Földön sokkal olcsóbban és gyakrabban lehet létre hozni súlytalanságot ejtőtorony segítségével. Az ejtőtorony egy 100-120 méter magas vasbeton torony, amelynek a belsejében légüres tért hoznak létre. Az itt leejtett műszerdobozban néhány másodpercig súlytalanság van. A műszerdobozok egy puha zsákra esnek, hogy többször felhasználhatók legyenek. Az ejtőtornyokban végzett kísérletek egyik fő témája égések vizsgálata súlytalanságban.

A hidrogén égése

Ha hidrogéngázt és oxigéngázt összekeverünk, egy nagyon reakcióképes elegyhez jutunk, amit durranógáznak hívnak. Ha ezzel a gázeleggyel megtöltünk egy lufit, és az oldalához lángot érintünk, az nagy durranással felrobban. Ha hidrogént fejlesztünk, a keletkező gázt egy üvegcsövön elvezetjük és meggyújtjuk, békésen égő kis lángot kapunk.

A hidrogén égését a következő bruttó egyenlet írja le:



Ez az egyenlet pontosan adja meg az elreagáló hidrogén és oxigénmolekulák mólarányát, de valójában ilyen kémiai reakció nem játszódik le. A hidrogéngáz és oxigéngázt elegyében a molekulák ütköznek egymással:



A H_2 és O_2 molekulák ütközésekor H-atom és HO_2 gyök keletkezik. A HO_2 gyök reakcióképessége kicsi, de a mellette keletkező H-atom nagyon reaktív. Ha a képződő H-atom egy O_2 molekulával ütközik, akkor OH gyök és O-atom keletkezhet:

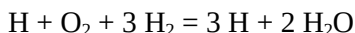


Ha a nyomás kicsi, a gázt alkotó részecskék közepes szabad úthossza nagy. Ez azt jelenti, hogy a részecskék hosszú utat, akár több tucat centiméternyit is megtehetnek két ütközés között. Ha a lombik kicsi a közepes szabad úthosszhoz képes, a fenti két reakcióban keletkező H, O, OH és HO_2 anyagfajták más molekulákkal ütközés nélkül és emiatt kémiai reakció nélkül jutnak el a lombik falához, ahol megkötődnek. Kis nyomáson (pl. 1 torr alatt) ezért a gázelegy nem robban fel, ha a hőmérséklet közepesen nagy, pl. 750 K.

Ha nagyobb a nyomás, egy nyomáshatár felett („első robbanási határ”) a közepes szabad úthossz kicsi és a H-atomok nagy része átalakul OH-gyökökké és O-atomokká, majd azokból kémiai reakciókkal újra H-atomok keletkeznek:



Ha e három reakciólépés egyenletét összeadjuk, az alábbi összevont egyenletet kapjuk:



Minden H-atomból tehát három másik keletkezik és a H-atomok koncentrációja folyamatosan növekszik. Mivel a H_2 és O_2 molekulák átalakulását vízzé a H-atomok katalizálják, a reakciósebesség egyre nő és a gázelegy felrobban.

Ha az ^{235}U -atommal egy neutron ütközik, az atom bomlása során három neutron keletkezik. Minden egyes neutron kiválthatja egy újabb ^{235}U atom bomlását, és ha az urántömb tömege a kritikus tömeg fölött van, atomrobbanás következik be. Ha a tömeg kisebb, mint a kritikus tömeg,

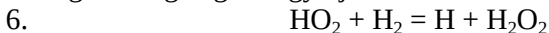
akkor nem következik be robbanás. Könnyű észrevenni a hasonlóságot a hidrogén–oxigén kémiai reakciórendszer és az atomrobbanás, az első robbanási nyomáshatár és a kritikus tömeg között.

A hidrogén–oxigén elegy azonban még érdekesebb dolgokra is képes. A reakcióképes hidrogénatomok egy része a következő reakcióban kevésbé reakcióképes HO_2 -gyökké alakul.



Itt M tetszőleges ütközőpartnert, tehát tetszőleges jelenlévő részecskét jelent. „M” koncentrációja csak a nyomástól függ és a nyomás növekedésével növekszik. Egy küszöb nyomásérték („második robbanási határ”) felett ez a reakció a H-atomok olyan nagy hányadát távolítja el, hogy gázelegy újra nem lesz robbanásképes.

A nyomás további növekedésével, egy újabb küszöb nyomásérték („harmadik robbanási határ”) felett további reakciók lesznek fontosak és a hidrogén–oxigén gázelegy újra felrobban:



A hidrogén–oxigén gázelegyben lejátszódó reakciólépések közül nyolcat mutattunk be. A részletesebb, számszerűen is pontos leírások mintegy 30 reakciólépést tartalmaznak. A hidrogén égése az egyik legegyszerűbb égési reakció.

Láttuk, hogy állandó hőmérsékleten a nyomást növelve az 5. reakció sebessége nagyobb lesz, mint a 2. reakcióé. Állandó nyomáson a hőmérsékletet változtatva észrevehetjük, hogy a fenti 2. és 5. reakciók hőmérsékletfüggése is különböző. Légköri nyomáson 900 K hőmérséklet alatt főleg a



egyenlet szerint fogynak a H-atomok és nem lesz robbanás, míg 900 K hőmérséklet felett a



reakció a gyorsabb és ez robbanáshoz vezet.

Lángok

A fenti kémiai egyenletek alapján nem csak a hidrogén–oxigén gázelegyek robbanása, de a hidrogén–oxigén vagy hidrogén–levegő lángok

viselkedése is megérthető. Tételezzük fel, hogy egy nagy tartályban légköri nyomású hidrogén–oxigén gázelegy van és a tartály egyik oldalán van a lángfront. Képzeljük el, hogy a lángfrontból H-atomok lépnek be a mellette levő hideg gázrétegbe. Ekkor ez a gázréteg nem fog felrobbanni, hiszen a hőmérséklete 900 K alatt van. Most azt képzeljük el, hogy a forró gázréteg előbb felmelegíti a mellette levő gázréteget 900 K felé, majd diffúzióval H-atomok jutnak a forró gázba. A 2. reakció, majd azt azt követő reakciók útján a gázréteg felrobban.

Egy lángfront terjedését gázelegyben el lehet képzelni, mint gázrétegek egymás utáni felrobbanását. A hideg gázréteg felmelegszik, reakcióképesé válik, a diffúzóval érkező H-atomok robbanást idéznek elő, a keletkező hő a mellette levő gázréteget is felmelegíti és így tovább. Mivel a hőátadás és az anyagdiffúzió időigényes folyamatok, emiatt a tartályban a gázelegy nem egy pillanat alatt robban fel, hanem egy lángfront fog végigterjedni a tartály egyik oldalától a másikig.

A hidrogén égése 30 reakciólépéssel leírható, de a földgáz égése kémiájának leírásához mintegy 350 reakciólépésre van szükség. Ezeket most nem soroljuk fel, de a lényegük az, hogy a CH_4 molekulából sorozatosan CH_3 gyök, formaldehid, CHO gyök, szénmonoxid, majd széndioxid keletkezik. Ezeket az átalakulásokat a H- és O-atomok, valamint az OH gyökök katalizálják. Ez utóbbi anyagfajták a fenti 2.–4. reakciókban keletkeznek.



Kémiai laboratóriumokban melegítésre, hevítésre Bunsen-égőt használnak, amiben földgáz ég. Nézzünk meg egy működő Bunsen-égőt közelről! Az első feltűnő dolog, hogy közvetlenül a fémcső felett nincsen láng. A fémcsőbe ütköző gyökök megkötődnek a fémfelületen és így eltűnnek a gázfázisból. Ugyanakkor a fémcső lehűti a gázelegyet és ezzel nem reakcióképesé teszi. Ezek miatt nincs égés a gázcső közelében.

A Bunsen-égő alsó részén egy fémgyűrű van, amivel a földgázhoz kevert levegő mennyiségét lehet szabályozni. Ha a gyűrűt

úgy fordítjuk, hogy a levegőt beeresztő nyílás teljesen nyitva legyen, akkor kicsi kék, kúp alakú lánggal ég a Bunsen-égő. Ha a gyűrű elfordításával a levegőt beeresztő nyílást elzárjuk, akkor nagy, lobogó, sárga színű lángot kapunk. Ez olyan, mint a gyertya lángja !

Egy láng lehet *lamináris* vagy *turbulens*. A lamináris lángok „nyugodtak” és a láng megzavarására visszaáll a láng eredeti alakja. A Bunsen-égő lángja lamináris láng. A turbulens lángok erősen kavarnak és örvénylenek.

Az *előkevert lángoknál* a tüzelőanyagot és az oxidálószer (levegőt) összekeverjük és az égőben ez a gázelegy ég el. Ilyen a Bunsen-égő kék lánggal. A *nem-előkevert lángokban* az égés helyére külön jut a tüzelőanyag és az oxidálószer. Ilyen a gyertya lángja vagy a Bunsen-égő sárga lánggal. A lángok tulajdonságai ismeretében olyan rendkívüli eseményeket is jobban megérthetünk, mint a Hindenburg-léghajó katasztrófája.

A Hindenburg-léghajó katasztrófája



A Hindenburg-léghajó az eddig épített legnagyobb légi jármű volt. Sokkal nagyobb volt (legalábbis térfogatra), mint egy kétszintes Airbus 380 repülőgép. A hidrogénnel töltött léghajó 245 méter hosszú és 41 méter átmérőjű volt. Teherbírása 112 tonna volt és 135 km/óra sebességre volt képes. A Hindenburg-léghajó 1936. márciusában

készült el és Németországból indulva még ebben az évben 17-szer kelt át az Atlanti-óceánon: 10-szer járt az USA-ban és 7-szer Brazíliában. 1937 elején átépítették és akkor már 72 utast tudott vinni. Az utasok biztonságáról és kényelméről 61 fős személyzet gondoskodott. A léghajó alján volt egy kis irányítófülke („hajóhíd”), míg az egy és kétágyas

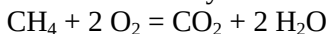
utaskabinok, a személyzet szálláshelyei, a társalgó, az étterem, és a dohányzóhelyiség (!) a léghajó *belsejében* voltak.

A Hindenburg léghajó 1937-ben május 3-án érkezett meg először az USA-ba. A léghajó kikötésének megörökítésére több filmforgató-csoportot és fotoriportert is a helyszínre küldtek, így az eseményekről több film- és fényképfelvétel készült. Este 19:25-kor a léghajó még 100 méter magasan volt, amikor egy valószínűleg sztatikus elektromosságtól eredő szikrától kigyulladt. A lángoló léghajó a földre hullott és 34 másodperc alatt teljesen elégett. A fedélzeten 97 fő utas és személyzet volt, főleg a léghajó belsejében levő helyiségekben és ezeket a helyiségeket 200.000 m³ hidrogén vette körül gumitartályokban. Úgy gondolhatnánk, hogy teljesen lehetetlen, hogy egy ilyen katasztrófát bárki túlélhessen. Valójában a fedélzeten levő emberek csaknem kétharmada, 62 fő túlélte a katasztrófát! Hogyan lehetséges ez?

A Hindenburg égésekor felcsapó láng egy nem-előkevert hidrogén–levegő láng volt. Csak a léghajó külsején folyt az égés és a forró gázok azonnal magasba emelkedtek. Azoknak az embereknek, akik túléltek a léghajó gyors leereszkedését és nem szorultak be a roncsok közé, jó esélyük volt a túlélésre. Az első 15-20 másodpercben a föld közelében még nem érte el őket a forróság és volt ennyi idejük arra, hogy kiszabaduljanak és elfussanak.

A lángok terjedésének sebessége

Az előkevert lángok egyik legfontosabb jellemzője az ekvivalenciaarány. A metán égését az alábbi bruttó egyenlet írja le:



Ez az egyenlet megadja, milyen mólarányban kell összekeverni a metánt és az oxigént, hogy teljesen elreagáljanak. Ha a CH₄ és O₂ mólaránya éppen 1:2, akkor *sztoichiometrikus* ekvivalenciaarányú előkevert lángról beszélhetünk. Az ilyen lángban a tüzelőanyag és az oxigén is teljesen elreagál.

Ha kevés tüzelőanyagot sok oxidálószerrel elegyítenek, akkor *tüzelőanyagban szegény* ekvivalenciaarányú előkevert lángot kapunk. Az égés után a feleslegben levő oxigén megmarad. Ha a tüzelőanyagot a sztoichiometrikus arányhoz képest kevés oxidálószerrel elegyítik, akkor *tüzelőanyagban gazdag* ekvivalenciaarányú előkevert láng keletkezik és ekkor az égés után a feleslegben levő tüzelőanyag marad meg.

Egy tüzelőanyag–oxidálószer gázelegyben a lángfront terjedési sebességét *lamináris lángsebességnek* nevezik. A lamináris lángsebesség függ attól, hogy milyen anyagokat kevernek össze, de ezen kívül függ az ekvivalenciaaránytól, a hőmérséklettől és a nyomástól. Légköri nyomású, szobahőmérsékletű, sztöchiometrikus metán–levegő gázelegyben a lamináris lángsebesség 36 cm/másodperc. Ez 1,3 km/óra-nak felel meg, ami a sétálási sebesség egyharmada, tehát nem is olyan nagy sebesség. A legtöbb szerves anyagnak levegővel alkotott légköri nyomású, szobahőmérsékletű elegyének lamináris lángsebessége 15–50 cm/másodperc és szénhidrogének esetén a sztöchiometrikus elegy lángsebessége a legnagyobb. Egy légköri nyomású, szobahőmérsékletű, sztöchiometrikus hidrogén–levegő gázelegyben a lamináris lángsebesség 200 cm/másodperc. Ez átszámítva 7,2 km/óra, tehát egy lassú futás („kocogás”) sebessége.

A lamináris lángsebesség nagyobb, ha a gázelegy kezdeti hőmérséklete nagyobb. Növelve a gázelegy nyomását, egyre kisebb lamináris lángsebességet mérhetünk. A lamináris lángsebesség ilyen viselkedésének alapvető oka a fenti 2. és 5. reakció sebességének változása a hőmérséklettel és nyomással. Magas hőmérséklet és kis nyomás esetén az égést gyorsító 2. reakció kerül előtérbe, míg alacsonyabb hőmérséklet és nagyobb nyomás esetén a lassító 5. reakció a fontosabb.

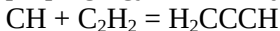
Játsszunk most újra a Bunsen-égővel! Nyissuk ki teljesen a levegőbeeresztő nyílást, ekkor kék előkevert lángot kapunk. Változtassuk most a földgáz beáramlási sebességét a gázcsap lassú tekergetésével! Ha kevés földgáz érkezik a Bunsen-égőbe, kis, lapos lángkúpot kapunk. Ha nagyra nyitjuk a gázcsapot, a Bunsen-égő fémcsöve felett hosszú, hegyes lángkúpot figyelhetünk meg. A földgáz–levegő láng sebessége csak a hőmérséklettől, nyomástól és a gázelegy összetételétől függ, de nem függ a gázelegy áramlási sebességétől. Hogy változatlan lángsebesség mellett több földgáz éghessen el, a nagyobb gázáramlási sebességre a láng alakja változik meg.

A tűzoltók számára fontos tudni, hogy az egyes vegyszerek gőzei milyen gyorsan égnak, és a levegővel alkotott elegyükben milyen gyorsan terjed a lángfront. Ha egy új vegyi anyagot kell minősíteni, ezt az anyagot sztöchiometrikus arányban keverik levegővel és a gázelegyet Bunsen-

égőben égetik el. A láng alakja alapján kiszámítható a lamináris lángsebesség.

A gyertya lángja

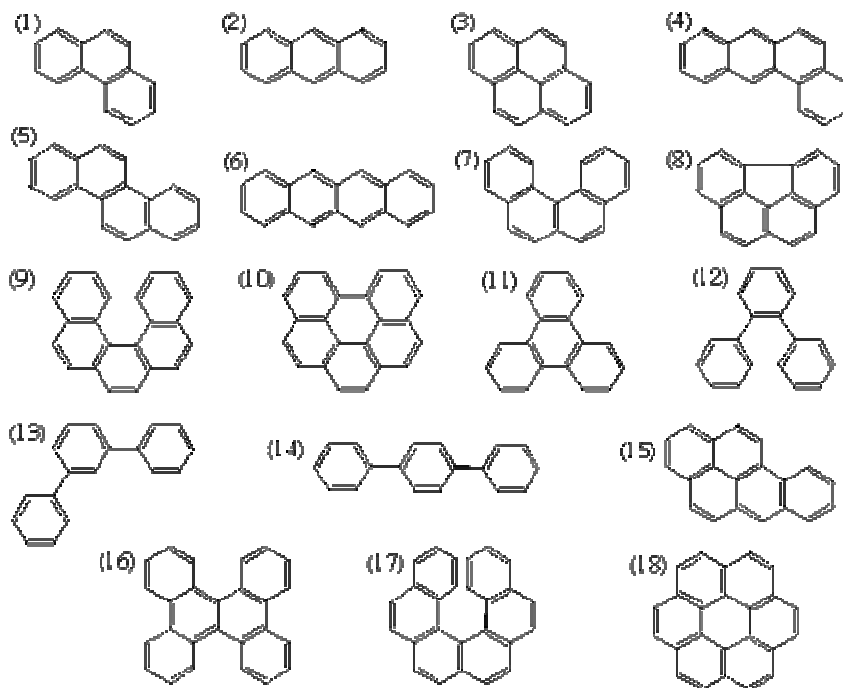
A gyertya kanóca közelében kizárólag éghető anyag, a gyertyától távol pedig csak levegő van. Ez azt jelenti, hogy a lángon belül az ekvivalenciaarány folyamatosan változik. Láttuk, hogy szénhidrogének esetén a sztöchiometrikus elegy ég a leggyorsabban. Ennek következtében amikor meggyújtjuk a gyertyát, a lángfront arra a felületre húzódik rá, ahol az éghető anyag – levegő arány éppen a sztöchiometrikus aránynak felel meg. A gyertyaláng frontján kívül a gázelegy oxigénben gazdag és tüzelőanyagban szegény. Az összes oxigén elreagál a gyertyaláng frontjában, emiatt a gyertyalángon belül nincsen oxigén. Amikor a gyertya tüzelőanyagát alkotó alkán- és olefinmolekulák a lángfront felé közelednek, a magas hőmérsékleten elbomlanak, és nagy részben keletkeznek acetilén molekulák (C_2H_2) és CH gyökök. Ha acetilén molekula és CH gyök reagál egymással, propargil gyök keletkezik. Két propargil gyök reakciója benzol molekulát eredményez.



A policiklusos aromás szénhidrogének (PAH) úgy néznek ki, mintha sok benzolmolekulát ragasztanának egymás mellé. Ha egy benzolmolekula kis gyökökkel (H, O, OH) reagál és utána acetilénmolekulákkal ütközik, egy másik benzolgyűrű nő mellé. Újabb reakció gyökökkel és újabb acetilén addíció után újabb benzolgyűrűk nőnek az addigi molekulára.

A keletkező újabb és újabb PAH molekulák tömege egyre nő, és kb. 2000 Daltonnál már szilárd részecskékké, apró koromszemcsékké állnak össze. Ezeknek a kis koromszemcséknek a mérete kémiai reakciókkal nő, de kb. 20 nm részecskeméretnél a növekedés leáll. Az ilyen friss koromszemcsékben a szén – hidrogén elemarány még 1 : 1. Amikor a friss koromszemcsék a forró lángfront felé közelednek, a szén aránya egyre nő és a hidrogén aránya egyre csökken. A lángfronton áthaladó parányi koromszemcsék felizzanak és a lángfront hőmérsékletén az izzásuk sárga színű. Emiatt sárga színű a gyertya és a nem- előkevert Bunsen-égő lángja. A lángfronton áthaladt koromszemcsék forró, oxigénben gazdag gázba jutnak és nyomtalanul elégnek. Néha látni rossz

gyertyát: az ilyen gyertya kormoz, mert olyan nagy koromszemcsék keletkeznek, amelyek utána nem égnek el a lángfrontban.



Néhány policiklusos aromás szénhidrogén

Emlékszünk, hogy a kinyitott levegőnyílású, előkevert Bunsen-égő lángja kék színű. Előkevert metán–levegő lángban nagy a CH gyökök koncentrációja, de kicsi az acetilén koncentráció és így nem alakulnak ki benne aromás és policiklusos aromás szénhidrogének. Emiatt nem alakulnak ki koromszemcsék sem és a láng nem sárga. A magas hőmérsékletű lángban a CH gyökök ütközések útján egy magasabb energiájú elektronállapotba juthatnak. Amikor a gyökök visszatérnek alapállapotba, kisugározzák a gerjesztett és az alapállapot energiája különbségének megfelelő kék színű fényt. Általában a szerves anyagok nem-előkevert lángja sárga a koromszemcsék miatt és minden szénhidrogén előkevert lángja kék. A hidrogén–oxigén láng viszont

színtelen, mert nincsenek benne CH gyökök, sőt semmilyen olyan anyagfajta nincs benne, amely megszínezné a lángot. Tűzijáték készítésénél a lángokat szándékosan színezik különféle szép színekre fém sók hozzáadásával.

Zárjuk ezt a írást Faraday előadásának utolsó szavaival: "A felolvasásaim befejezéséül még csak azt kívánom nektek, hogy míg csak éltek, legyetek hasonlóak a gyertyához, hogy ti is fényt áraszthatok a környezetetekre, minden tettetekben a gyertyaláng szépsége tükröződjék és kötelességeket hű teljesítésében szépet, jót, nemeset cselekedjete az emberiségért."

Az ELTE Kémiai Intézetében 2007. december 13-án, az „Alkímia ma” sorozatban elhangzott előadás szerkesztett változata.

Ajánlott Web oldalak

Az előadás Web oldala:

<http://garfield.chem.elte.hu/Turanyi/gyertya.html>

Ez az oldal tartalmazza a kísérletekről készült videókat és fényképeket, valamint az előadás PowerPoint formátumú fóliáit.

Az “Alkímia ma” előadássorozat Web oldala:

http://www.chem.elte.hu/pr/alkimia_ma.html

Faraday előadásának magyar fordítása:

<http://www.chemonet.hu/hun/teazo/karacson/gyertya.html>

Az itt olvasható szöveg az 1921-es magyar kiadáson alapul (Bálint András fordítása) és tartalmazza a könyv rajzait is.