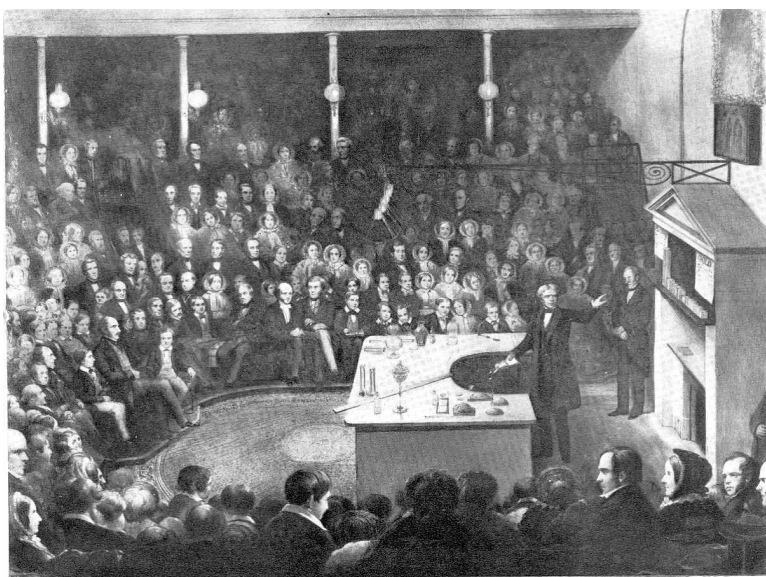


Miről beszél a gyertya lángja? Az égés kémiája 150 évvel Faraday után

Turányi Tamás
ELTE Kémiai Intézet

"A gyertya természetrajzát már egy régebbi előadásomban ismertettem 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 feltárulnak előttünk; és aligha találunk kényelmesebb módot a természet műhelyébe való betekintésre, mint ezt.*" Ezek Faraday 1860. évi Karácsonyi Előadásának első szavai.

Michael 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.



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.

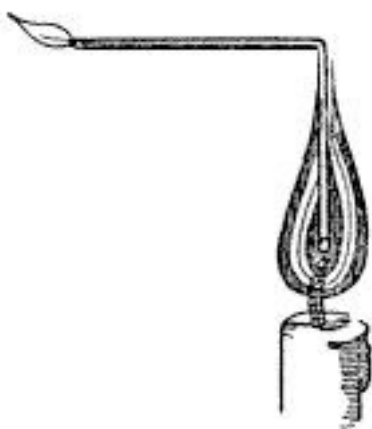
Faraday 1848-ban és 1860-ban előadását „Miről beszél a gyertya lángja?” (The Chemical History of a Candle) címmel tartotta meg. Az 1860. évi Karácsonyi Előadást egyik hallgatója, William Crookes gyorsírással lejegyezte és az 1861. januárban és februárban megjelent a “Kémiai Hírek” (Chemical News) című 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 leselejteztek, 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 érthetőek meg. Bodenstein vizsgálta 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



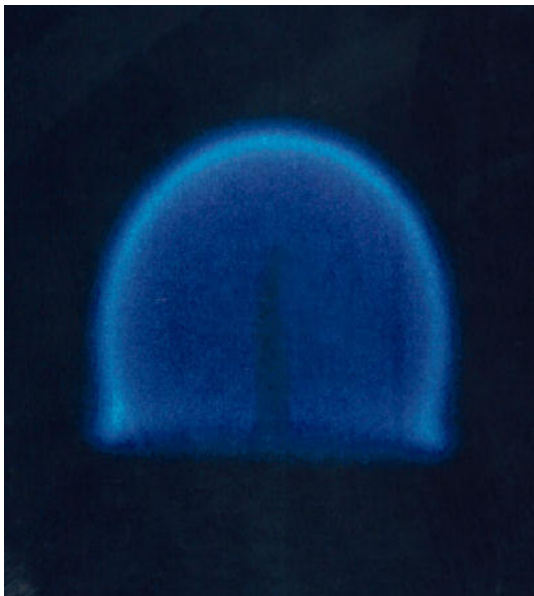
Nézzünk meg egy égő gyertyát közelről! A gyertya lángja megolvasztja a paraffint. A megolvadt paraffint kis csészeként szilárd paraffin veszi körül, amely nem engedi elfolyni az olvadt paraffint. Ha egy gyertyában függőleges bevágások vannak, azon elfolyik az olvadt paraffin és a gyertya rosszul ég.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

Közelről látható az is, hogy a kanóc alja ázik a paraffinban, míg a kanóc teteje száraz. A hajszálcsöveség 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 paraffingőzök 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

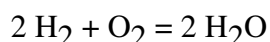
lánggömbök (flame ball) viselkedését nagyon kis hidrogéntartalmú $\text{H}_2\text{-O}_2$ gázelegyenben.

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 ejtőtorny segítségével. Az ejtőtorny egy 100-120 méter magas vasbeton torony, amelynek a belsejében légüres tétet 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.

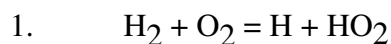
A hidrogén égése

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.

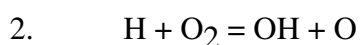
A hidrogén égését a következő bruttó egyenlet írja le:



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:

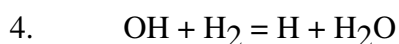
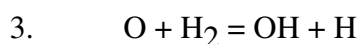
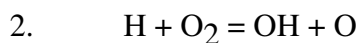


A H_2 és O_2 molekulák ütközésekor H-atom és HO_2 gyök keletkezik. A HO_2 gyök reakcióképessége kicsi, de a mellette keletkező H-atom nagyon reaktív. Ha a képződő H-atom egy O_2 molekulával ütközik, akkor OH gyök és O-atom keletkezhet:

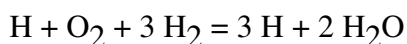


Ha a nyomás kicsi, a gázt alkotó részecskék közepes szabad úthossza nagy. Ez azt jelenti, hogy a részecskék hosszú utat, akár több tucat centiméternyit is megtehetnek két ütközés között. Ha a lombik kicsi a közepes szabad úthosszhoz képes, a fenti két reakcióban keletkező H, O, OH és HO_2 anyagfajták 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:



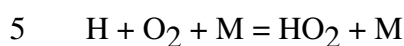
Ha e három reakciólépés egyenletét összeadjuk, az alábbi összevont egyenletet kapjuk:



Minden H-atomból tehát három másik keletkezik és a H-atomok koncentrációja folyamatosan növekszik. Mivel a H₂ és O₂ molekulák átalakulását vízzé a H-atomok katalizálják, a reakciósebesség egyre nő és a gázelegy felrobban.

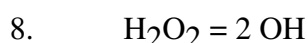
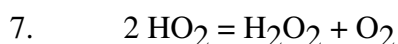
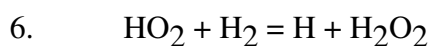
Ha az ²³⁵U-atommal egy neutron ütközik, az atom bomlása során három neutron keletkezik. Minden egyes neutron kiválthatja egy újabb ²³⁵U atom bomlását, és ha az urántömb tömege a kritikus tömeg fölött van, atomrobbanás következik be. Ha a tömeg kisebb, mint a kritikus tömeg, akkor nem következik be robbanás. 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 HO₂-gyökké alakul.



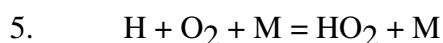
Itt M tetszőleges ütközőpartnert, tehát tetszőleges jelenlévő részecskét jelent. „M” koncentrációja csak a nyomástól függ és a nyomás növekedésével növekszik. Egy küszöb nyomásérték („második robbanási határ”) felett ez a reakció a H-atomok olyan nagy hányadát távolítja el, hogy gázelegy újra nem lesz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

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

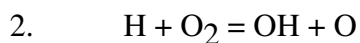


A hidrogén–oxigén gázelegyben lejátszódó reakciólépések közül nyolcat mutattunk be. A részletesebb, számszerűen is pontos leírások mintegy 30 reakciólépést tartalmaznak. A hidrogén égése az egyik legegyszerűbb égési reakció.

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. Tétélezzük 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 gágrétegbe. Ekkor ez a gágréteg nem fog felrobbanni, hiszen a hőmérséklete 900 K alatt van. Most azt képzeljük el, hogy a forró gágréteg előbb felmelegíti a mellette levő gágréteget 900 K felé, majd diffúzióval H-atomok jutnak a forró gázba. A 2. reakció, majd azt követő reakciók útján a gágréteg felrobban.

Egy lángfront terjedését gázelegyben el lehet képzelni, mint gágrétegek egymás utáni felrobbanását. A hideg gágréteg felmelegszik, reakcióképesé válik, a diffúzóval érkező H-atomok robbanást idéznek elő, a keletkező hő a mellette levő gágréteget 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.



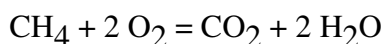
A Hindenburg léghajó 1937-ben május 3-án érkezett meg először az USA-ba. A léghajó kikötésének megörökítésére több filmforgató-csoportot és fotóriportert is a helyszínre küldtek, így az eseményekről több film- és fényképfelvétel készült. Este 19:25-kor a léghajó még 100 méter magasan volt, amikor egy 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, sztoichiometrikus 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.

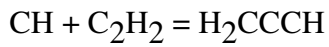
Játsszunk most újra a Bunsen-égővel! Nyissuk ki teljesen a levegőbeeresztő nyílást, ekkor kék előkevert lángot kapunk. Változtassuk most a földgáz beáramlási sebességét a gázcsap lassú tekergetésével! Ha kevés földgáz érkezik a Bunsen-égőbe, kis, lapos lángkúpot kapunk. Ha nagyra nyitjuk a gázcsapot, a Bunsen-égő fémcsőve 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.

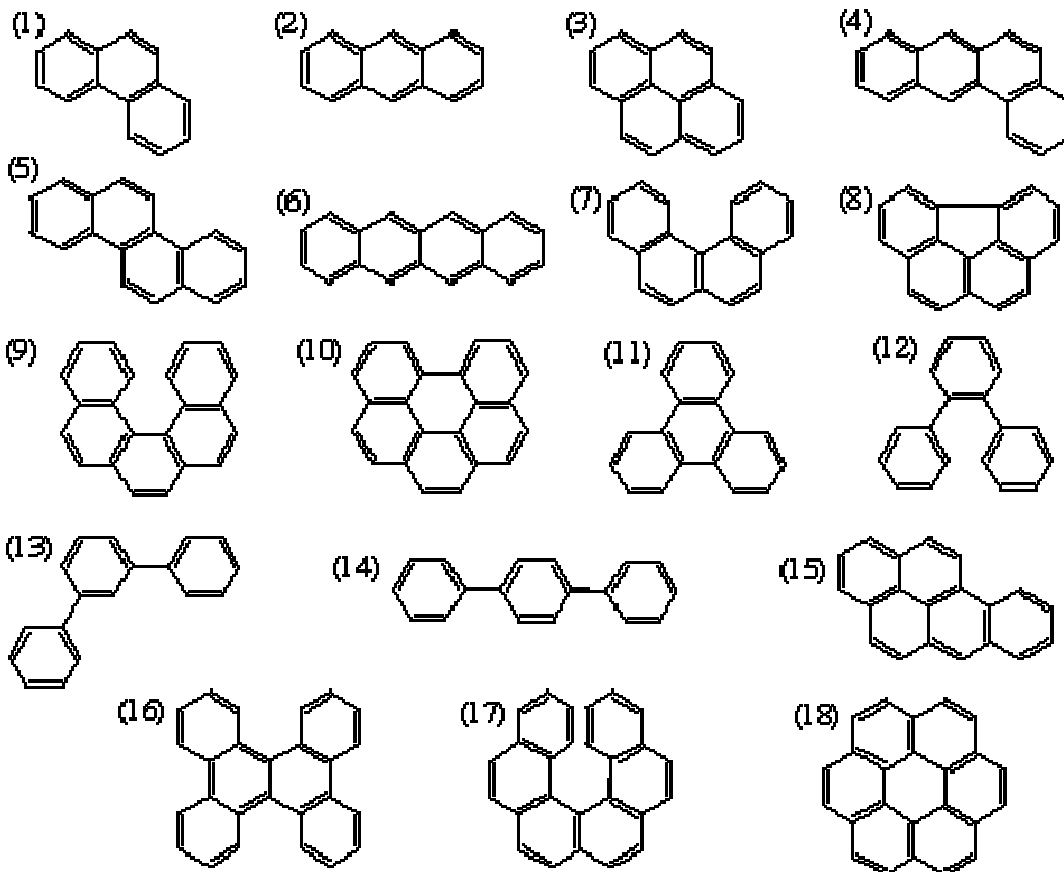
A gyertya lángja

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 arálynak 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 (C₂H₂) 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.



Néhány policiklusos aromás szénhidrogén

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

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 fémsók 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 “Alkimia 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.