

## Kelvin, mól, kandela

*Egységek és etalonok* gyűjtőcím alatt a hosszúság, a tömeg, az idő és az áramerősség egységét és etalonját honlapunk korábbi számaiban ismertettük. Bemutattuk a négy mennyiség egységének és etalonjának létrehozását, továbbfejlesztését, és az etalonok megvalósításához használt technikai eszközöket. Most folytatjuk, és egyúttal befejezzük ezt a sorozatot a Nemzetközi Mértékegység-rendszer további három alapegysége – a termodinamikai hőmérséklet, az anyagmennyiség és a fényerősség – egységének és etalonjának ismertetésével. A cikket elsősorban azoknak az olvasóknak ajánljuk, akik a téma metrológiai hátterének részletei iránt is érdeklődnek.

### 1. A termodinamikai hőmérséklet egysége és etalonja

A  $T$ -vel jelölt termodinamikai hőmérséklet<sup>1</sup> a Nemzetközi Mértékegység-rendszerben (az SI-ben) alaplammennyiség, egysége a kelvin (jele: K). *A kelvin a víz hármaspontja hőmérsékletének 1/273,16-szorosa.* Ezt a meghatározást a 13. Általános Súly- és Mértékügyi Értekezlet (francia elnevezésének rövidítésével: a CGPM) fogadta el, 1968-ban. A víz hármaspontja az a termodinamikai állapot, amikor a víz három fázisa, - a vízgőz, a víz és a jég – egyidejűleg van jelen. A víz hármaspontjának hőmérséklete az egyes fázisok mennyiségétől függetlenül mindaddig változatlan marad, amíg mindhárom fázis egyidejű jelenléte fennáll.

A  $t$ -vel jelölt Celsius hőmérsékletet a

$$t = T - 273,15 \text{ K}$$

egyenlet definiálja. Egysége, a Celsius fok (jele  $^{\circ}\text{C}$ ), egyenlő a kelvin egységgel. A hőmérsékletkülönbséget egyaránt lehet kelvinben vagy Celsius fokban megadni.

A kelvin megvalósítása alatt általában a víz hármaspontja termikus egyensúlyi állapotának előállítását értik. Ezt az állapotot a vízhármaspont készülékkel alakítják ki. Mivel a termodinamikai hőmérséklet intenzív mennyiség, a kelvinnek a víz hármaspontja segítségével történő megvalósítása csak szükséges, de nem elégséges feltétele annak, hogy más hőmérsékleteket is kelvinben tudjunk mérni. Ehhez az is szükséges, hogy egy *elsődleges hőmérő* álljon rendelkezésre. Az elsődleges hőmérő olyan hőmérő, amelynek az állapotegyenlete egzaktul leírható, anélkül, hogy ismeretlen, a hőmérséklettől függő állandókat kellene bevezetni. Egy ilyen hőmérőnek természetesen meg kell felelnie a termodinamikai hőmérséklet lord Kelvintől származó, a reverzibilis Carnot-körfolyamaton alapuló meghatározásának, amely a  $Q$  hőmennyiséget a  $T$  hőmérsékletet a következő összefüggéssel kapcsolja össze:

$$Q_1/Q_2 = T_1/T_2.$$

Csak egyetlen hőmérsékletet, a  $T_1 = 273,16 \text{ K}$ -t definiálva azt kapjuk, hogy

$$T_2 = 273,16 (Q_2/Q_1) \text{ K}.$$

---

<sup>1</sup> A „termodinamikai hőmérséklet” elnevezés feltehetően onnan ered, hogy ezt a mennyiséget az anyag (gáz) adott termodinamikai állapota határozza meg.

Ám egy olyan elsődleges hőmérő, amely a Carnot-körfolyamatban kicserélődött hő mérését igényli, nem nagyon tekinthető gyakorlati mérőeszköznek. Ehelyett a leginkább elterjedt elsődleges hőmérő a *gázhőmérő*, amelynél az alacsony nyomások tartományában a gáz  $n$  molekulájának  $v$  térfogatát és hőmérsékletét a következő egyenlet kapcsolja össze:

$$pv = nRT,$$

ahol  $p$  a nyomás, és  $R$  a moláris gázállandó. Ez az egyenlet a következőképpen is írható:

$$pv = N_A k T$$

ahol  $N_A$  az Avogadro-állandó és  $k$  a Boltzmann-állandó. Az Avogadro-állandó  $N_A = N/n$ , ahol  $N$  a részecskék (pl. molekulák vagy más elemi egységek) száma a rendszerben, és  $n$  az anyagmennyiség.  $N_A = 6,022\ 045 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ . A Boltzmann-állandó:  $k = R/N_A$ ,  $k = 1,380\ 662 \times 10^{-23}$ .

Olyan anyag, amelynek a viselkedését ezzel az egyszerű egyenlettel le lehetne írni, a természetben nem létezik. Az ideális gázt úgy közelítik, hogy csökkenő nyomásértékeknél végeznek méréseket és „0” nyomásra extrapolálnak. Az ideális gáz állapotegyenlete, ha a  $pv$ -t a  $T$  függvényében ábrázoljuk, lineáris hőmérsékleti skálát definiál. A skála nullapontjának a termodinamika második főtétele alapján abszolút jelentése lesz: ennél alacsonyabb hőmérséklet nem lehetséges. Mivel a termodinamikai hőmérséklet-skála nullapontja meg van állapítva, csak egy további fixpontot kell kiválasztani a skála léptékeként. Ez a fixpont, a kelvin mértékegység jelenleg érvényes definíciója alapján, a víz hármaspontjának a már említett hőmérséklete.

További elsődleges hőmérők: az *akusztikus gázhőmérő*, az *összsugárzás hőmérő*, és a *zajhőmérő*.

Az elsődleges hőmérők itt nem ismertett állapotegyenletében közös az, hogy bennük megjelenik vagy  $R$  vagy  $k$  vagy mindkettő. Ezeknek a fizikai állandóknak a jelentősége abban áll, hogy a hő és a mechanikai mennyiségek közötti átszámítási (konverziós) tényezők. Értéküket bármelyik elsődleges hőmérővel végzett kísérlettel lehet megadni, a víz hármaspontjának hőmérsékletén. Ha ez megtörtént, akkor a  $T$  más hőmérsékleten való mérése, az elsődleges hőmérőket az így meghatározott  $R$  és  $k$  értékekkel használva, korrektül adja kelvinben a hőmérsékletet.

A hőmérséklet gyakorlati mérését nem elsődleges hőmérőkkel végzik, mert ezek túl bonyolultak, nehéz a használatuk, és igen költségesek. Gyakorlati hőmérsékletmérésekhez úgynevezett *másodlagos hőmérők* állnak rendelkezésre: a platina ellenálláshőmérők és a hőelemek. A gyakorlati hőmérsékletméréseknek a termodinamikai hőmérsékletre való visszavezetése céljából jól reprodukálható, könnyen beszerezhető, de kellőképpen pontos eszközöket állítottak elő, és nemzetközileg elfogadott gyakorlati hőmérsékleti skálákat fejlesztettek ki.

### ***Gyakorlati hőmérsékleti skálák***

A hőmérsékletskála létrehozására már a XVIII. századtól kezdve voltak próbálkozások. Lemaradandóbb Celsius munkája volt. Világszerte egységes skála létrehozását a villamos mérések fejlődése tette lehetővé. A XIX. században Callander a platina fém „hőmérséklet-

ellenállás” jelleggörbéjével tette meg az első lépést a bárhol jól reprodukálható, egységes skála felé.

A méteregegyezmény keretében 1927-ben több ország hozta létre az első egységesített skálát. A mérés technika fejlődése eredményezte, hogy a 9. Általános Súly-és Mértékügyi Értekezlet 1948-ban új skáláról határozott. Ez a víz hármaspontjára alapozott egy-fixpontos termodinamikai skála volt. A víz hármaspontja a jég olvadáspontjánál nagyobb pontosságú fixpontot tudott biztosítani. Ezt a skálát 1975-ben a módosított IPTS-68 követte.

#### *A Nemzetközi Gyakorlati Hőmérsékleti Skála*

A gyakorlati hőmérsékleti skálának nem az a feladata, hogy helyettesítse a termodinamikai hőmérsékleti skálát, hanem az, hogy a mérés technikai színvonalnak megfelelően, a gyakorlati szempontok figyelembevételével, a lehető legjobban megközelítse azt. A Nemzetközi Gyakorlati Hőmérsékleti Skála (IPTS) alapját egy sor jól meghatározott egyensúlyi állapot (az úgynevezett fixpontok), a fixpont-hőmérsékleteknél kalibrált, meghatározott etalon-berendezések, valamint az interpolációs képletek képezik. A képletek segítségével megállapítható az etalon-berendezések értékmutatása és a Nemzetközi Gyakorlati Hőmérsékleti Skála értékei közötti összefüggés. Mivel a leszármaztatás bizonytalansága a mérés technikának a skála közzétételekor elért szintjétől függ, a skálát bizonyos időnként át kell dolgozni, és tökéletesíteni kell.

Az 1968 utáni években kapott eredmények azt mutatták, hogy az IPTS-68 és a termodinamikai hőmérsékleti skála között nagyobb az eltérés, mint a becsült mérési bizonytalanságok. Az IPTS-68 javított kiadását, a 15. CGPM 1975-ben fogadta el.

1976-ban a Nemzetközi Súly- és Mértékügyi Bizottság (francia elnevezésének rövidítésével: a CIPM) kis hőmérsékleteknél való használatra elfogadta az *Ideiglenes, 0,5 K-tól 30 K-ig terjedő Hőmérsékleti Skálát* [1976 Provisional 0,5 K to 30 K Temperature Scale (EPT-76)].

1990 január 1-jén az IPTS-68-at és az EPT-76-ot felváltotta az *1990-es Nemzetközi Hőmérsékleti Skála* [International Temperature Scale of 1990 (ITS-90)], amelyet a CIPM 1989-ben, az 5. Ajánlással (CI-1989) fogadott el. A 19. CGPM (1991, 3. határozat) azt javasolta, hogy a nemzeti laboratóriumok folytassák erőfeszítéseiket a hőmérsékletmérések világméretű egységességének és hosszú idejű stabilitásának a fokozása érdekében azzal, hogy gyorsan bevezetik az ITS-90-et.

#### *A Nemzetközi Hőmérsékleti Skála, az ITS-90*

Az ITS-90 a következőkből áll:

- (a) fixpontok sorozata (általában gázok és fémek olvadás-, fagyás- és hármaspontjai), amelyeknek a speciális hőmérséklete úgy van kiválasztva, hogy a lehető legközelebb legyen az elsődleges hőmérőkkel korábban meghatározott termodinamikai hőmérsékletekhez;
- (b) interpoláló másodlagos hőmérők, speciális interpolációs egyenletekkel;
- (c) a skála kialakítására vonatkozó utasítások és ajánlások.

Az ITS-90 előnyei az IPTS-68-cal összehasonlítva: Kiterjed a 0,65 K, alatti alacsony hőmérsékletekre, és ezért felülmúlja az EPT-76-ot; lényegesen jobb egyezésben van a megfelelő termodinamikai hőmérsékletekkel; teljes tartományában jelentősen megjavította a

folytonosságot, a precizitást és a reprodukálhatóságot, és olyan altartományai és alternatív meghatározásai vannak, amelyek nagymértékben megkönnyítik a használatát.

A CIPM javasolta, hogy 1990. január 1-jén az ITS-90 lépjen érvénybe, és ugyanettől a dátumtól kezdve érvénytelenítsék az IPTS-68-at és az EPT-76-ot<sup>2</sup>.

Az ITS-90 definiál egy  $T_{90}$  (és egy  $t_{90} = T_{90} - 273,15$  K) mennyiséget, amit *nemzetközi gyakorlati hőmérsékletnek* neveznek, és amelynek egysége a kelvin. A  $T_{90}$  a  $T_{68}$  utóda, azé a mennyisége, amelyet az IPTS-68 korábbi nemzetközi skála definiált, és amelynek az egysége ugyancsak a kelvin volt. Az ITS-90 és az IPTS-68 skálán mért hőmérsékletek közötti különbségeket, mint  $T_{90} - T_{68}$ -at foglalták táblázatba. Szobahőmérsékleten a  $T_{90} - T_{68} \approx 5$  mK, és  $t \approx 100$  °C hőmérsékleten  $T_{90} - T_{68} \approx 25$  mK.

A hőmérsékletmérésekben a nemzetközi visszavezethetőség könnyen biztosítható a gyakorlati hőmérőknek az ITS-90 szerinti kalibrálása, valamint az ITS-90 nemzeti metrológiai intézetekben való gyakorlati megvalósításainak nemzetközi összehasonlítása útján. A folyékony hélium hőmérsékletétől 500 °C-ig terjedő tartományban az ITS-90 néhány millikelvin pontossággal megvalósítható. Az ITS-90 interpoláló (definiáló) eszközei 13,8 K-tól (ez a hidrogén hármaspontja) 962 °C-ig (ez az ezüst fagyáspontja) a platina ellenálláshőmérők. Az ezüst fagyáspontjapontja felett az ITS-90 a fagyásponti értékre és a Planck-féle sugárzási törvényre alapozva adja meg a hőmérsékletskálát.

Az ellenálláshőmérő számos ipari alkalmazásban is használt gyakorlati eszköz, de az ipari célú ellenálláshőmérők kialakítása eltérő. Az iparban alkalmazott platina ellenálláshőmérőkkel való mérésekhez nemzetközileg egyeztetett referencia táblázat készült, amely megadja az ellenállásnak a hőmérséklettől való függését. Ugyancsak van egy sor szabványos hőelem-kombináció, amelyekre az ITS-90 szerinti nemzetközi referencia táblázatot dolgoztak ki. Az ellenálláshőmérőkre és a hőelemekre vonatkozó referencia táblázatok lehetővé teszik az ITS-90-re, és ennek folytán az elérendő termodinamikai hőmérsékletekre, való visszavezetést.

Ha időközben kiderül, hogy a  $T_{90}$  jelentősen eltér a  $T$ -től, akkor közre kell adni a  $T - T_{90}$  különbségek táblázatát, ugyanúgy, ahogyan az a  $T - T_{68}$  különbségekre történt az ITS-90 elfogadása előtt. Így tartható fenn továbbra is a gyakorlati hőmérsékletmérések visszavezetettsége.

## 2. Az anyagmennyiség egysége és etalonja

### Az anyagmennyiség egysége (a mól)

A kémia alapvető törvényeinek felfedezését követően a kémiai elemek vagy vegyületek mennyiségének megadására olyan egységeket használtak, mint a „gramm-atomsúly” és a „gramm-molekulasúly”. Ezek az egységek közvetlenül kapcsolódtak az „atomsúlyokhoz” és a „molekulasúlyokhoz”, amelyek voltaképpen relatív tömegek voltak. Az „atomsúlyokat” eredetileg az oxigén atomsúlyára vonatkoztatták, amit általános megállapodással 16-nak vettek. Amikor azonban a fizikusok tömeg-spektrométerrel szétválasztották az izotópokat, és

---

<sup>2</sup> A világ vezető metrológiai intézeteiben folyamatos az ITS-90 fejlesztése. Mindjobban közelednek a termodinamikai skálához, és ahhoz az ideális helyzethez, mikor a hőmérséklet egysége, a kelvin, megszűnik alapegység lenni.

a 16 értéket az egyik oxigén izotópnak tulajdonították, a vegyészek továbbra is ugyanazt az értéket tulajdonították a 16, 17 és 18 izotópok (kissé változó) keverékének, ami számukra a természetben előforduló oxigén elem volt. Végül megállapodás született az Nemzetközi Elméleti és Alkalmazott Fizikai Szövetség [International Union of Pure and Applied Physics, (IUPAP)] és a Nemzetközi Elméleti és Alkalmazott Kémiai Szövetség [International Union of Pure and Applied Chemistry, (IUPAC)] között ennek a kettősségnek a felszámolására. 1959/1960-ban. A fizikusok és a vegyészek végül is megállapodtak abban, hogy a 12 tömegszámú szén izotóp (szén 12,  $^{12}\text{C}$ ) atomsúlyának, pontosabban relatív atomtömegének, a 12 értéket tulajdonítják. Az így megalkotott, egységesített skála megadja a relatív atomtömeg és a molekulatömeg értékeket, amelyeket atom- illetve molekulaszámoknak is neveznek.

Azt a mennyiséget, amelyet a vegyészek ma a kémiai elemek vagy vegyületek mennyiségének megadására használnak, „anyagmennyiségnek” hívják. Az anyagmennyiség úgy van meghatározva, hogy arányos legyen a mintában levő megadott elemi részek számával. Az arányossági tényező egy fizikai állandó, amelynek értéke minden mintára ugyanakkora. Az anyagmennyiség egysége a *mól*, amely annak a szén 12-nek a tömegével van meghatározva, ami egy mól szén 12 atomot tartalmaz. Nemzetközi megállapodással ezt az értéket 0,012 kilogrammban, azaz 12 grammal határozták meg.

A IUPAP, a IUPAC és az ISO javaslatait követve a CIPM 1967-ben megadta, majd 1969-ben megerősítette a mól meghatározását. A meghatározást a 14. CGPM fogadta el (1971, 3. határozat; CR, 78 és *Metrologia*, 1972, 8, 36):

- 1. A mól annak a rendszernek az anyagmennyisége, amely annyi elemi egységet tartalmaz, mint ahány atom van 0,012 kilogramm szén-12-ben; jelölése: mol.**
- 2. A mól alkalmazásakor meg kell határozni az elemi egység fajtáját; ez atom, molekula, ion, elektron, más részecske vagy ilyen részecskék meghatározott csoportja lehet.**

Ebből következik, hogy a szén 12 molekulatömege pontosan 12 gramm per molekula, vagyis  $M(^{12}\text{C}) = 12 \text{ g/mol}$ .

1980-ban a CIPM jóváhagyta a CCU (1980) jelentést, amely előírta, hogy

**ez a meghatározás a nyugalmi helyzetben és alapállapotban levő, szabad szén 12 atomra vonatkozik**

A mól definíciója meghatározza annak a fizikai állandónak az értékét is, amely a részecskék számát a bármelyik mintában levő anyagmennyiségre vonatkoztatja. Ezt az állandót Avogadro-állandónak nevezik, jele  $N_A$  vagy  $L$ . Ha  $N(X)$  jelöli az adott mintában levő  $X$  részecskék számát, és ha  $n(X)$  jelöli az  $X$  részecskék anyagmennyiségét, ugyanabban a mintában, akkor az összefüggés

$$N(X) = n(X) \cdot N_A$$

Jegyezzük meg, hogy míg  $N(X)$  dimenzió nélküli és  $n(X)$  SI egysége a mól, az Avogadro-állandó koherens SI egysége a reciprok mól (vagy másképp: a mól reciproka).

Az „anyagmennyiség” szakkifejezésben az „anyag” egyszerűség kedvéért azzal a szóval helyettesíthető, amire az adott alkalmazás vonatkozik. Így például, beszélhetünk a „sósav

mennyiségéről” vagy a „C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> benzol mennyiségéről”. Fontos, mindig pontosan megadni az anyagban levő részecskét (ez van kihangsúlyozva a mól meghatározásának második mondatában), aminek célszerű módja a kérdéses anyag tapasztalati kémiai összetételét leíró képlet megadása. Bár a „mennyiség” szónak a szótári jelentése bővebb, célszerű lehet a teljes „anyagmennyiség” szakkifejezés helyett, rövidség kedvéért, a teljes név egyszerűsített változatát használni. Ez vonatkozik az olyan származtatott mennyiségekre is, mint az anyagmennyiség-hányad, ami röviden „mennyiséghányadnak” is nevezhető. Az orvosi kémiában azonban az „anyagmennyiség-hányadot” általánosan „anyaghányadra” rövidítik.

### ***Az Avogadro-állandó számértékének meghatározása***

Az Avogadro-állandó számértéke a 0,012 kg szén-12-ben levő atomok számával egyenlő. Ennek a számnak a meghatározásához egy szén-12 egykristályban meg kellene mérni az atomok tömegét, sűrűségét és távolságát. E mennyiségek mérése tekintetében az utóbbi időben figyelemre méltó előrehaladás volt tapasztalható. A szén-12 és a szilícium atomtömegeinek aránya tömegspektrométerrel meghatározható.

Az Avogadro-állandó 2006.évi elfogadott értéke:  $N_A = 6,022\ 141\ 79(30) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ , relatív bizonytalansága:  $5 \times 10^{-8}$ .

## **1. A fényerősség etalonja és egysége**

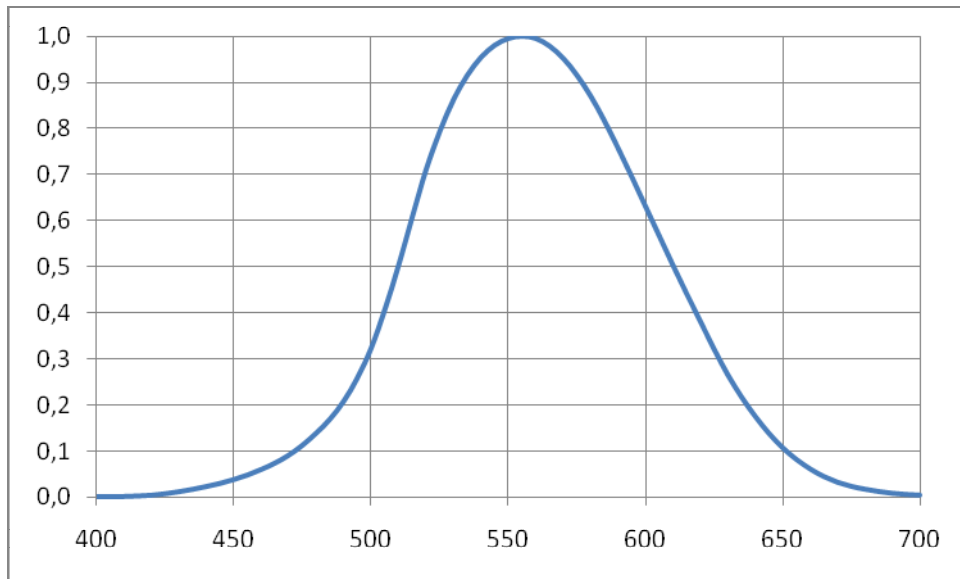
A fotometriai mérések körébe sorolhatók a fényerősség- és fényáram méréseken kívül a megvilágítás-, a fénysűrűség- és a színhőmérséklet mérések. Ezek közül ebben a cikkben a fényerősség és a fényáram egységét, valamint a fényerősség egységének, mint SI-alapegységnek, az etalonnal történő megvalósítását tárgyaljuk.

### **A kandela meghatározása**

A fényforrás *fényerősségét* az a szemérzékenységi görbével ( $V(\lambda)$ ) súlyozott fényenergia-mennyiség határozza meg, amelyet a fényforrás 1 s alatt az 1 m sugarú gömb 1 m<sup>2</sup> felületén át kisugároz. A fényerősség SI-egysége a kandela, jele cd.

*A kandela az olyan fényforrás fényerőssége adott irányban, amely  $540 \times 10^{12}$  hertz frekvenciájú monokromatikus fényt bocsát ki, és sugárerőssége ebben az irányban 1/683-ad watt per szteradián.*

A fény olyan elektromágneses sugárzás, amely a szemben lévő fényérzékenyekben (csapokban és pálcikákban) *világosság* és a *szín* érzetet kelt. A szem  $V(\lambda)$  *spektrális fényhatásfokának* (vagy a szemérzékenységi görbének) meghatározása és szabványosítása a XX. század első felében tette lehetővé a fotometria kialakulását. Az alábbi ábra mutatja, hogy ugyanolyan világosság érzetű 510 és 610 nm-en kétszer akkora energiára van szükség, mint 555 nm-en (maximális érzékenység), 470 és 650 nm-en pedig ez az arány tízszeresére növekszik. A szem érzékenysége a látható spektrális tartomány határain ( $\lambda_1 = 380 \text{ nm}$  és  $\lambda_2 = 780 \text{ nm}$ ) a maximális értéknek csupán százszázad részét teszi ki.



A szem által érzékelt fényáram a szembe érkező fényenergiának a fényhatásfok (szemérzékenység) görbével súlyozott értéke. Matematikailag ez a  $\Phi_{e,\lambda}$  spektrális sugárteljesítménynek és a  $V(\lambda)$  spektrális fényhatásfok szorzatának hullámhossz szerinti integrálját jelenti:

$$\Phi_v \approx \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{e,\lambda} * V(\lambda) * d\lambda$$

Itt  $\Phi_v$  a fényáram. Az integrálási határokat a már említett  $\lambda_1 = 380$  nm és  $\lambda_2 = 780$  nm hullámhosszak képezik.

A *fényáram* a fényforrásból másodpercenként a teljes térbe kisugárzott összes fényenergia-mennyiség. A fényáram a fényforrás teljesítményét határozza meg. Mértékegysége: a *lumen*, jele: lm.

A lumen az 1 kandela fényerősségű, pontszerű fényforrás által az egységnyi térszögbe (1 szteradián) kisugárzott fényáram. Eszerint az 1 cd erősségű, pontszerű fényforrás 1 s alatt az 1 m sugarú gömb  $4\pi$  m<sup>2</sup> felületén át a térbe  $4\pi$  lumen fényáramot sugároz. A  $\Phi$  fényáram és az  $I$  fényerősség között az összefüggés:

$$\Phi = 4\pi I.$$

A kandela jelenleg érvényben lévő meghatározása szigorúan fizikai szakkifejezésekkel van megadva. A fotometria tárgya azonban a fény olyan módon történő mérése, amely szoros korrelációban van az emberi szem érzékelőképességével. Ebből a célból a Nemzetközi Világítástechnikai Szövetség [International Commission on Illumination (CIE)] két különleges (speciális) függvényt vezetett be: a *spektrális fényhatásfok* függvényeknek nevezett  $V(\lambda)$ -t és  $V'(\lambda)$ -t, amelyek leírják az átlagos emberi szem relatív spektrális válaszadását fotopikus (fényhez adaptálódott vagy nappali) illetőleg szkotopikus (sötétséghez adaptálódott vagy éjszakai) látás esetén. E kettő közül a  $V(\lambda)$ , vagyis a fényhez adaptálódott relatív spektrális válaszadás a fontosabb, amelynek relatív értéke a monokromatikus

sugárzásra van vonatkoztatva, vagyis arra, amelyekre a magas szintű megvilágításhoz adaptálódott szem a legérzékenyebb.  $V(\lambda)$  az  $540 \times 10^{12}$  Hz frekvenciájú sugárzásra van definiálva, ami a szabványos légkörben 555,016 nm hullámhossznak felel meg.

A CIPM a spektrális fényhatásfok függvények használatát, azzal a kitéttel hagyta jóvá, hogy a megfelelő fotometriai mennyiségeket tisztán fizikai kifejezésekkel kell definiálni, mint olyan mennyiségeket, amelyek arányosak a spektrális teljesítmény-eloszlásnak a hullámhossz egy megadott függvényével súlyozott integráljával.

### ***Fotometria és radiometria***

Ahhoz, hogy a wattban kifejezett  $\Phi_e$  sugárzott teljesítményből megkapjuk a lumenben kifejezett  $\Phi_v$  fényáramot, a hullámhossztól függő kiértékelésen kívül szükség van még a  $K_m$  átszámítási tényezőre, ami az úgynevezett „maximális spektrális fényhasznosítás”, (egysége a lumen per watt, lm/W),  $K_m$  értéke  $\approx 683$  lm/W.

Ez az összefüggés egy fotometriai mennyiség és a megfelelő radiometriai mennyiség között általánosan érvényes, így fennáll a kandela definíciójában szereplő  $I_v$  fényerősség és  $I_{e,\lambda}$  spektrális sugárerősség mennyiségekre is:

$$I_v = K_m \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{e,\lambda} \cdot V(\lambda) d\lambda$$

A fényerősség és a sugárerősség a fényforrás egy-egy tulajdonságának felel meg. E mennyiségek megadják, hogy a fényáram vagy sugárzási teljesítmény mekkora hányadát bocsátja ki egy (pontszerű) fényforrás kis  $d\Omega$  térszögben, azaz megadja az  $I = d\Phi/d\Omega$ -t. A térszöget szteradián<sup>3</sup> egységben mérik.

A fényerősség és a sugárerősség rendszerint függ a kisugárzás irányától. A fényerősség egységének a definíciójában megjelenik a sugárzás  $\nu$  frekvenciája is. Ennek az oka az, hogy a hullámhossz függ annak az anyagnak az  $n$  törésmutatójától, amelyben a sugárzás terjed ( $\lambda = c/n \cdot \nu$ ). A levegő törésmutatója csak közelítőleg egyenlő a vákuuméval (a vákuum törésmutatója = 1), függ a levegő összetételétől, a nyomástól, a hőmérséklettől és a hullámhossztól. A kandela definíciójában olvasható  $\nu = 540$  THz számérték a spektrális fényhatásfokra vonatkozó  $\lambda = 555$  nm hullámhosszból, a  $c = 299\,792\,458$  m/s fénysebességből és a levegő  $n = 1,00028$  törésmutatójából adódik.

A fényerősség egységének a  $\nu = 540$  THz frekvenciájú monokromatikus sugárzásra vonatkozó definíciója a fotometriai sugárzási egyenérték  $K_m$  maximális értékének meghatározásaként is értelmezhető. Ha  $\lambda = 555$  nm hullámhossznál egy nagyon kicsi  $d\lambda$  hullámhossz intervallumot tekintünk, akkor  $V(555 \text{ nm}) = 1$  következtében az előbbi egyenletből azt kapjuk, hogy

$$dI_v(555 \text{ nm}) = K_m \cdot dI_e(555 \text{ nm}),$$

azaz, mivel  $I_v = 1$  cd fényerősségnek  $I_e = 1/683$  W/sr sugárerősség felel meg,  $K_m$ -nek a  $683$  cd/(W/sr) =  $683$  lm/W értéket kell tulajdonítani. A fényerősség egységének definíciójában az  $1/683$  számértéket úgy választották meg, hogy az összhangban legyen a korábbi fényforrás

<sup>3</sup> A térszög egysége, a szteradián a gömbfelületen a gömb középpontjából kiinduló kúp által kimetszett „A” felületnek és az R gömbsugar négyzetének a hányadosa:  $\Omega = A/R^2$ .



alapú definícióval, és a már meglévő fotometriai etalonok az új definíció elfogadása után, korrekció nélkül, továbbra is használhatók legyenek.

Az SI elfogadása óta a kandela lett az egyik alapegység, és alapegység státuszát megőrizte az után is, hogy hozzákapcsolták a teljesítmény származtatott SI egységéhez, a watt-hoz. Az eredeti fotometriai etalonok *fényforrások* voltak, ezek között is legrégebbi a *Hefner gyertya*, innen származik a kandelának, mint fotometriai alapegységnek a neve.

### **A kandela meghatározásának gyakorlata**

A CGPM a kandela jelenleg érvényes meghatározásának elfogadáskor (16. CGPM 1979. évi 3. Határozat) az azt megelőző fényforrás-alapú meghatározáshoz képest gyökeres változásokat eredményezett. Míg korábban az etalonok nehezen stabilizálható fényforrások voltak, addig az új meghatározás lehetővé tette a precíziós fotométerekből álló detektor alapú etalonok kifejlesztését. Mindez a spektrális ipari fejlesztési igények és a fotometriai mérés technika közeledését is eredményezte a mérési bizonytalanságok jelentős csökkenése mellett.

### **A kandela megvalósítása**

Kérdés, hogyan lehet megkapni az  $I_e$  sugárerősségnek, mint radiometriai mennyiségnek a W/sr egységét. Az optikai sugárzásmérésben, a radiometriában a mértékegységek megvalósítására alapvetően két lehetőséget használnak fel.

Az első lehetőség, hogy igen jó közelítéssel készíthető olyan sugárzó, amelynek a fényerőssége a mindenkor hullámhossz-intervallumnak megfelelően, ismert „ $A$ ” sugárzási felület és ismert  $T$  sugárzási hőmérséklet esetén a Planck-féle sugárzási törvényből kiszámítható. Az ilyenfajta sugárzókat nevezik „fekete sugárzónak” is. Ilyenfajta sugárzóval és  $\lambda = 555$  nm hullámhossznál, egy kis  $\Delta\lambda$  intervallumba eső sugárzás elkülönítésére szolgáló elrendezéssel, elvileg megvalósítható a fényerősség egysége. Lényeges, hogy ennél az eljárásnál a kandela végső soron a hőmérséklet-skála kelvin egységére van visszavezetve.

A második lehetőség a sugárzási teljesítmény meghatározása különleges termikus sugárzásdetektorokkal, az úgynevezett „abszolút sugárzásdetektorokkal”. Egy termikus sugárzásdetektorban a sugárzás elnyelése hőmérséklet-emelkedést okoz, ami termoelektromos módszerrel ellenállás-változásként, vagy egy másik hőmérséklettől függő jellemző felhasználása útján kimutatható. Az abszolút sugárzásdetektorokban ilyen hőmérséklet-emelkedés a sugárzáselnyelőn elhelyezett elektromos fűtőkészülékkel állítható elő. Ha az elektromos fűtőteljesítményt úgy szabályozzák, hogy a sugárzással, valamint az elektromos fűtéssel váltakozva előállított hőmérséklet-emelkedések egyenlő nagyságúak legyenek, akkor – bizonyos korrekciók figyelembevételével – a két teljesítmény is egyenlő. Ez a módszer a detektálás területén 0,01%-os abszolút pontosság elérését tette lehetővé. A gyakorlatban Si standard fotodiódákat használnak a detektorok spektrális érzékenység skálájának realizálására. Ezek hosszúidejű stabilitása és homogenitása is igen jónak mondható. Így a Si detektorokat nem szükséges sűrűn újrakalibrálni.

A fotométer olyan eszköz, amelynek  $s(\lambda)_{rel}$  relatív spektrális érzékenysége a  $V(\lambda)$  spektrális fényhatásfok görbét a lehető legjobban közelíti. A fent említett termikus detektoron alapuló skála teszi lehetővé detektorok abszolút és relatív spektrális érzékenységének pontos mérését. A fényerősség meghatározásához a fotométerek  $s(\lambda)_{rel}$  relatív spektrális érzékenységét és 555 nm-en az  $s(555 \text{ nm})$  abszolút spektrális érzékenységet (A/W-ban) kell meghatározni. Ha

ismert a fotométer „A” detektorfelülete és a forrás és a fotométer egymástól való  $d$  távolsága, akkor a sugárforrás fényerősségét a mért  $i$  fotoáramból az így kalibrált fotométerrel kandelá egységben kapjuk meg, a következő egyenlet szerint:

$$I_v = K_m \cdot i \cdot d^2 / [s(555 \text{ nm}) \cdot A \cdot F]$$

A dimenzió nélküli  $F$  korrekciós tényező azt a hibát veszi figyelembe, ami a fotométer relatív spektrális érzékenységének a  $V(\lambda)$ -hoz való nem tökéletes illesztéséből ered. Ahhoz, hogy  $F$ -et ki lehessen számítani, ismerni kell a mérendő sugárzás  $P(\lambda)$  relatív spektrális eloszlását, és a fotométer  $s(\lambda)_{rel}$  relatív spektrális érzékenységét:

$$F = \frac{\int P(\lambda) s_{rel}(\lambda) d\lambda}{\int P(\lambda) V(\lambda) d\lambda}$$

A fényerősség meghatározásának bizonytalansága függ a kalibrálandó lámpa tulajdonságaitól is. Jól illesztett fotométer és standard fényforrás esetén mérésügyi hivatali szinten elérhető 0,5 % alatti kiterjesztett mérési bizonytalanság  $k=2$  esetén.

Ennél talán még jelentősebb, hogy a fényerősség mérés bizonytalansága akár ipari szinten is 1% alatt tartható. Köszönhető ez annak is, hogy a precíziós fotométerek ipari változatai kereskedelmi úton beszerezhetők és ezzel a technikával a hőmérsékleti sugárzástól gyökeresen eltérő modern fényforrások is mérhetők.

A változást elsősorban az jelentette, hogy a korábbi izzólámpa standardokat felváltották a fotométer standardok. Míg az izzólámpák abszolút kalibrálását csak a legnagyobb mérésügyi hivatalok tudták elvégezni, addig a fent vázolt kalibrációs technika világszerte hozzáférhető lett. Alkalmazásuk speciális ipari feladatoknál jelenti a mérési bizonytalanság jelentős csökkenését.

A pontos fotometriai és radiometriai mennyiségek fő felhasználói: a fény és a színek tekintetében a világítástechnika, a festék- és a textilipar; a radiometria tekintetében a telekommunikáció, az űrkutatás és a hadsereg. Mindezekben a területeken a visszavezettség biztosítása a nemzeti metrológiai intézetekhez vezető csatlakozás útján valósul meg, lámpák vagy szilícium fotodetektorok segítségével. Az ezeknek megfelelő hullámhossztartományon kívül rendelkezésre áll egyéb detektorok vagy fekete testek kalibrálása.

## Magyar vonatkozások

A kandelának a 16. CGPM által 1979-ben elfogadott új meghatározása lehetővé tette, hogy hazánkban is megvalósítsák a fényerősség elsődleges etalonját. Az Egyesült Államok metrológiai társintézetével együttműködésben ezt a feladatot az Országos Mérésügyi Hivatalban amerikai fejlesztésű szilícium fotodiódák önkalibrációs mérési módszerére alapozva oldották meg. A kandelá etalon hazai megvalósítása 1993-ban fejeződött be. A magyar nemzeti etalon a nemzetközi összehasonlító mérések eredményei alapján 0,2 %-on belüli egyezést mutatott a CCPR körmérés világátlagával.

## **Köszönetnyilvánítás**

Köszönetemet fejezem ki **Andor György, Deák Éva és Horváth Győző** kollégáimnak, akik észrevételeikkel és kiegészítéseikkel segítették a kéziratban előfordult pontatlanságok és hibák kiküszöbölését.

## **Irodalmak:**

- [1] Mills I M, Mohr P J, Quinn T J, Taylor B N and Williams E R 2005 *Metrologia* **42** 71–80
- [2] Ian M Mills, Peter J Mohr, Terry J Quinn, Barry N Taylor és Edwin R Williams: *Redefinition of the kilogram, ampere, kelvin and mole: a proposed approach to implementing CIPM recommendation 1 (CI-2005)* *Metrologia* **43** (2006) 227–246.
- [3] BIPM 2006 *The International System of Units 7<sup>th</sup> edn and Supplement 2000: Addenda and Corrigenda to the 8<sup>th</sup> edition (2006)* (S`evres, France: Bureau International des Poids et Mesures)
- [4] Quinn T J 2000 *Metrologia* **37** 87–98
- [5] A PTB kiadványa az etalonokról (1983)
- [6] További fejezetek a magyar mérésügy történetéből

Összeállította: Bánkuti László