

Energetikai szektorban előforduló por közegek robbanási és gyulladási tulajdonságainak vizsgálata

Siménfalvi Zoltán , Kállai Viktória , Mikáczó Viktória ,
Petrik Máté , Pusztai Tamás , Pusztai-Spisák Bernadett ,
Szamosi Zoltán , Tugyi Levente , Szepesi L. Gábor* 

Miskolci Egyetem, Miskolc, Magyarország

*Levelező szerző, e-mail: gabor.szepesi@uni-miskolc.hu

Beérkezett: 2023. november 5.; elfogadva: 2024. január 23.

Összefoglalás

Ipari környezetben, ahol az alapanyagok között por alapanyagú termékek találhatók, felmerül a porrobbanás lehetősége, ez alól az energiaszektor sem kivétel. Ebben az iparágban is megjelentek a biomasszákat mint energiahordozókat, amely termékekről számos esetben bebizonyosodott, hogy porrobbanás-veszélyesek, ezért szükséges védelmi intézkedéseket tenni. Jelen közleményünkben összefoglaljuk azon vizsgálati eljárásokat, amelyekkel meghatározhatók a későbbi védelmi intézkedések alapadatául szolgáló paraméterek. Ismertetjük a vizsgálati eljárásokat, berendezéseket, valamint néhány konkrét vizsgálati eredményt is bemutatunk.

Kulcsszavak: porrobbanás, K_{St} , P_{max}

Investigation of the explosion and ignition properties of dust media occurring in energy sector

Zoltán Siménfalvi, Viktória Kállai, Viktória Mikáczó, Máté Petrik, Tamás Pusztai, Bernadett Pusztai-Spisák, Zoltán Szamosi, Levente Tugyi, Gábor L. Szepesi*

University of Miskolc, Miskolc, Hungary

Summary

In an industrial environment where dust-based products are among the raw materials, the potential for dust explosion arises, and the energy sector is no exception. This industry has also started to use biomass as a source of energy, which has been shown in many cases to be explosive and therefore requires protective measures. In this article, we have presented the distribution of dust explosion accidents in the US in 2021, which shows that 4% of the accidents directly related to the energy industry are much higher than the direct proportion. The set of conditions required for such accidents to occur is described and the investigation procedures that can be used to determine the parameters that will form the basis for future protection measurements are summarized. These parameters include the maximum explosion overpressure (P_{max}), the explosion constant (K_{St}), the lower explosibility rate (LEL), the limiting oxygen concentration (LOC), the minimum ignition temperature of dust clouds (MIT), the layer ignition temperature (LIT), and finally the minimum ignition energy (MIE). The test procedures and equipment are described, and some concrete test results are presented. Determining these variables is essential for the design of explosion protection for a dust explosion hazardous technology or area. The description of the test procedures is based mainly on the standard specifications applicable in the European Union. The structure of the measurements and the interpretation of the results obtained are described through the analysis of a fermentation residual solid.

Keywords: dust explosion, K_{St} , P_{max}

Bevezetés

Az ipari környezetben és háztartásokban előforduló porok többsége gyúlékony, sok esetben pedig robbanóképes. Ilyenek lehetnek például a liszt, cukor, műanyagipari porok, gyógyszeripari alapanyagok, valamint az energetikai szektorban is számos ilyen tulajdonságokkal rendelkező anyag található (pl. fa, szénpor, biomasszák pora, fermentációból visszamaradt szárazanyagok). Ezt jól szemlélteti az 1. ábra (Cloney 2021), amely az Amerikai Egyesült Államokban, a 2021. év első fél évében bekövetkezett porrobbanásos balesetek iparági diverzitását mutatja be. Látható, hogy az ipari termelés minden szegmensében felmerülhet ez a veszély, amely alól az energetikai szektor sem kivétel.

Porfelhő számos esetben jelen van silókban, elevátorokban, szállítószalagok és pneumatikus szállítórendszerek környékén vagy egyéb műveleti berendezésekben, amelyekben az esetleges robbanás során hirtelen nyomásnövekedés következik be.

Az égés és porrobbanás bekövetkezésének feltételrendszere

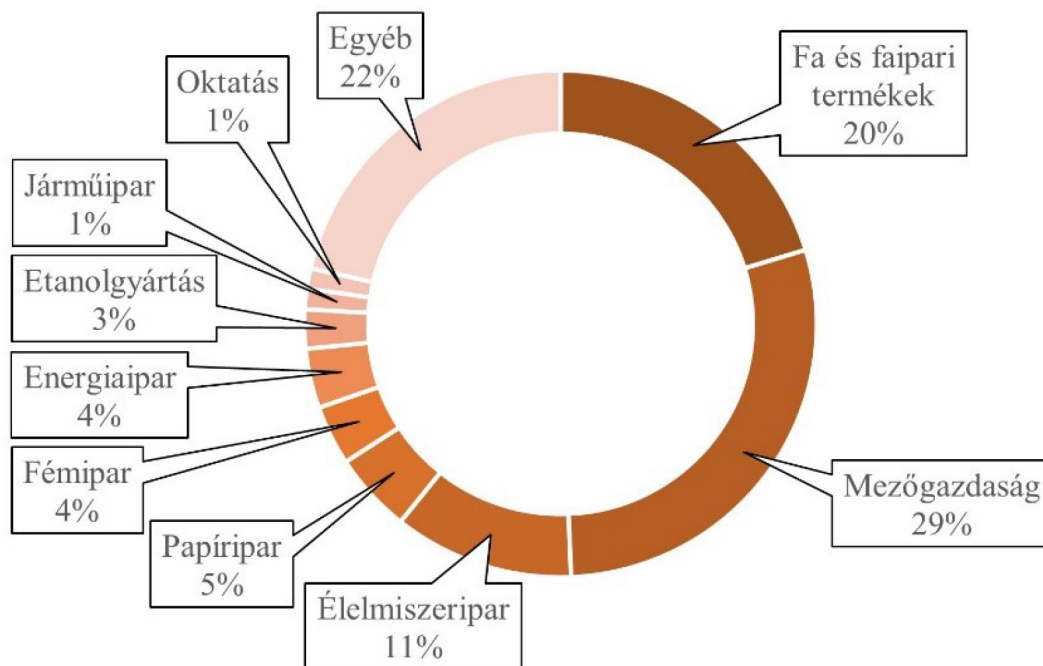
Az égés feltételrendszerének széles körben ismert elnevezése az úgynevezett „égési háromszög”, a szükséges három feltételt – amelyeknek térben és időben egyszerre kell rendelkezésre állnia – pedig a 2. ábra bal oldala szemlélteti.

Az éghető anyag lehet gáz (pl. metán), gőz (pl. etanol) vagy por (pl. szénpor). Az oxidáló közeget leggyakrabban a levegő oxigéntartalma adja, bár más közegek is

hatékonyan segítik a gyulladást (pl. nitrogén-oxid vagy klór). Gyújtóforrások közül a BM Országos Katasztrófavédelmi Főigazgatóság által összefoglalt Tűzvédelmi Műszaki Irányelv (röviden TvMI) összesen 13-féle típust határoz meg (TvMI 13.3 2022), ezek közül a leggyakrabban a következők fordulnak elő: forró felületek (pl. kazánok felülete), mechanikus szikrák (pl. súrlódó csapágyak, leeső csavarok), láng, forró gázok (pl. dohányzás, égetők környezete), elektromos szikra (pl. elektronikai eszközök), elektrosztatikus feltöltődés (pl. műszálás ruházat), villámvédelem stb. A gyújtáshoz szükséges energia mértéke poronként eltérő.

Ha az éghető anyag homogénen elegyet képez az oxidálószerrel és a gyújtóforrás is rendelkezésre áll, akkor az égési folyamat akár 10 ms-on belül is befejeződhet. Eckhoff definíciója szerint robbanásnak nevezzük azt az exoterm kémiai folyamatot, amely egy véges térfogatban következik be hirtelen és jelentős nyomásnövekedés kíséretében (Eckhoff 2003). Por-levegő keverékek esetén további követelmény, hogy a megfelelő részecskeméretű robbanóképes por (definíció szerint $\leq 500 \mu\text{m}$ [MSZ EN ISO/IEC 80079-20-2:2016]) a megfelelő koncentrációban és eloszlásban álljon rendelkezésre. Ezen körülmények egyidejű, zárt térben való fennállása miatt a feltételrendszer elterjedt neve a „robbanási ötszög”, amely a 2. ábra jobb oldalán látható.

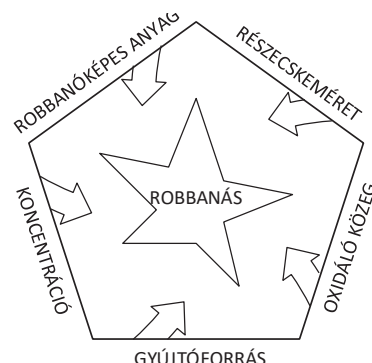
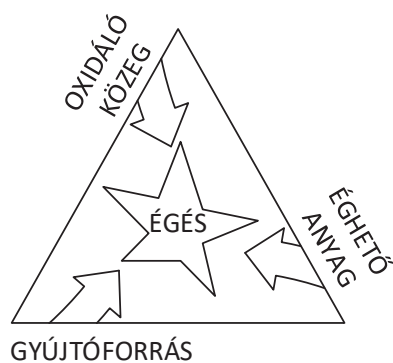
A megadott feltételeken kívül az adott por fizikai-kémiai tulajdonságaiban jelentős eltérések tapasztalhatók attól függően, hogy lerakódott rétegben van jelen, vagy homogén porfelhőt alkot. Az előbbi por megfelelő hőmérsékletű felületen képes izzásba jönni vagy bomlani, míg a porfelhő valamely gyújtóforrással találkozva rob-



1. ábra

Az Amerikai Egyesült Államokban a 2021. évben bekövetkezett porrobbanásos balesetek iparági megoszlása

Forrás: Cloney 2021



2. ábra

Az égés bekövetkezésének feltételrendszere (bal oldal) és a robbanás bekövetkezésének feltételrendszere (jobb oldal)

Forrás: saját szerkesztés

banhat. Az elsődleges robbanásveszély tehát lebegő porok esetén alakul ki, mert ilyenkor lehet jelen a robbanás-hoz szükséges arányú éghető anyag-levegő keverék. A leülepedett por hatalmas másodlagos veszélyt rejt magában, hiszen nemcsak gyújtóforrásként viselkedik, hanem a takarítás, hirtelen légmozgás vagy egy robbanás a nyugvó port is felkeverheti.

A robbanási nyomásgörbe jellegzetes értékei

A robbanóképes anyagok levegővel alkotott különböző arányú keverékeinek robbanóképessége attól függ, hogy az adott összetétel a keverék robbanási tartományába esik-e, amelyet az alsó és felső robbanási határok fognak közre. A munkahelyek biztonságának meghatározásakor az alsó robbanási határ az egyik legfontosabb mérhető paraméter, ez alatt – megfelelő biztonsági ráhagyással számolva – ugyanis nem kell robbanásveszéllyel számolni. A robbanási folyamat bekövetkezése során a reakció hevességéről a maximális robbanási túlnyomás ($P_{\max}$) és a maximális nyomásemelkedési sebesség $((dP/dt)_{\max})$ adnak információt.

A fent említett jellemző nyomásértékek a robbanóképes anyag alsó és felső robbanási határokon belüli koncentrációjának függvényében változnak, az esetek nagy részében egyetlen jól behatárolható maximumértékkel. A megfelelő védelem kialakításánál ezen maximumértékek veendő figyelembe. További koncentrációtól függő paraméter az oxidáló közeg jelenléte és mennyisége, amely alatt szintén akadályozott a robbanás.

A nyomásemelkedési sebesség maximumértékéből nyerhető a robbanási konstans, más néven deflagrációs index (porokra K_{St}). Számítása az úgynevezett köbös törvény alapján történik ((1) egyenlet). A robbanási konstans segítségével az egyes porok robbanási hevessége válik egymással összehasonlíthatóvá.

$$K_{St} = \left(\frac{dP}{dt} \right)_{\max} V^{1/3}, \quad (1)$$

ahol P a nyomás [bar_g], t az idő [s], V a tesztkamra térfogata [m^3].

A K_{St} értéket figyelembe véve a porokat három veszélyességi osztályba soroljuk: St-1, St-2, St-3. Ezek az osztályok adnak iránymutatást a robbanóképességre és a biztonsági elemek méretezésére vonatkozó követelményekkel kapcsolatban (1. táblázat). Amennyiben az adott porra jellemző robbanási konstans zérus, a por nem robbanóképes.

1. táblázat | Veszélyességi osztályok és azok jellemzői

Veszélyességi osztály	K_{St} [$\text{bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]	$P_{\max}$ [bar_g]	Robbanóképesség
St-1	$0 < K_{St} \leq 200$	10	Gyengén vagy mérsékelt robbanóképes
St-2	$200 < K_{St} \leq 300$	10	Erősen robbanóképes
St-3	$300 < K_{St}$	12	Nagyon erősen robbanóképes

Forrás: NFPA 68 2018

A fenti ismeretek birtokában könnyen belátható, hogy a porok minimális gyulladási hőmérsékletének, minimális gyújtási energiájának, robbanóképességének, robbanási határértékeinek és robbanási jellemzőinek megállapítása a megfelelő szintű védelem kialakításának alapja.

A robbanási károk mérséklésének előírásai és lehetőségei

A robbanások megelőzése és a bekövetkezése esetén fellépő károk mérséklése az ipari gyakorlat egy rendkívül fontos területe, amely kiterjedt jogi és szabványi szabályozással bír. Az Európai Parlament és a Tanács 1999/92/EK irányelve (1999/92/EK 1999) kimondja, hogy a munkáltató kötelezettségei közé tartozik a robbanások megelőzése és a robbanásvédelem, valamint a robbanási kockázatok felmérése. Ennek megvalósítási alapelvei a következők:

- A robbanásveszélyes légkör kialakulásának megelőzése, azaz az elsődleges védelmi intézkedések alkalmazása. Ide tartozik pl. a korábban említett porrobbanási

ötszög legalább egy feltételének kiküszöbölése, mint a robbanásveszélyes anyag kiváltása a technológiában, vagy inertizálás (nem éghető védőgázok használata a kritikus helyzetek megelőzésére vagy a nemkívánatos reakciók elkerülésére vagy csökkentésére). Porrobbanások esetén kivételt képez ez alól a behatároltság megszüntetése, mivel ez önmagában még nem jelenti a robbanás lehetőségének kizárását.

- A robbanásveszélyes légtér begyulladásának elkerülése, azaz a másodlagos védelmi intézkedések alkalmazása, amely a lehetséges gyújtóforrások kialakulásának megakadályozását takarja.
- A robbanás hátrányos hatásainak az enyhítése a munkavállalók egészségének és biztonságának a biztosítása érdekében, azaz a harmadlagos védelmi intézkedések alkalmazása, például robbanási nyomásálló építési móddal, lefűvósos védelem alkalmazásával, elfojtással stb.

Ezeket szükség szerint a robbanás továbbterjedése ellen ható intézkedésekkel kell ötvözni, illetve kiegészíteni, továbbá rendszeresen és minden olyan alkalommal felül kell vizsgálni, amikor a körülményekben lényeges változások állnak be. Ennek megfelelően a harmadlagos védelem számos típusát különböztethetjük meg: a robbanásterjedés szakaszolása, elkülönítése, az elfojtás, a lefűvátás, valamint a veszélyes készülék vagy üzemszám megfelelő létesítési helyének kiválasztása (Barton 2002).

Ahogy a TvMI is javasolja (TvMI 13.4 2024.02.01.), nemcsak az abban foglalt számítási módok, hanem a nemzeti szabványok alkalmazása is megfelelő műszaki megoldásnak tekinthető a robbanás elleni védelmi megoldások tervezése és alkalmazása kapcsán. Ezek a teljes igénye nélkül:

- MSZ EN 1127-1:2019. Robbanóképes közegek. Robbanásmegelőzés és robbanásvédelem. 1. rész: Alapelvek és módszertan;
- MSZ EN 13237:2013. Potenciális robbanásveszélyes közegek. A potenciális robbanásveszélyes közegekben való használatra tervezett berendezések és védelmi rendszerek szakkifejezései és meghatározásuk;
- MSZ EN IEC 60079-31:2014. Robbanóképes közegek. 10-1. rész: Téréségbesorolás. Robbanóképes gázközegek;
- MSZ EN 60079-10-2:2015. Robbanóképes közegek. 10-2. rész: Téréségek osztályozása. Robbanóképes poros közegek;
- MSZ EN ISO/IEC 80079-20-1:2020. Robbanóképes közegek. 20-1. rész: Anyagjellemzők a gázok és gőzök osztályozásához. Vizsgálati módszerek és adatok.

Ezek mellett, kifejezetten a robbanás bekövetkezése esetén alkalmazható szabvány az MSZ EN 14460:2018 (Robbanásbiztos berendezések). Előírásai szerint az adott berendezés akkor őrzi meg integritását egy bekövetkező robbanás során, ha megfelelő tervezéssel ellenáll a robbanási nyomásnak vagy nyomáshullámnak.

A hatékony lefűvátáshoz szükséges nyílófelületek nagyságát, valamint az azok kiegészítő elemeivel – lefűvóvezetékekkel, terelőlemezekkel – szemben támasztott alapvető követelményeket por-levegő keverékek esetén hazánkban az MSZ EN 14491:2013 szabvány (Szellőzőnyílásos porrobbanás-védelmi rendszerek) határozza meg.

A fentebb jelzett szabványok és jelen cikkünk sem térnek ki részletesen és nem veszik figyelembe a porokkal kapcsolatos események egyéb hatásait, mint például a mérgezési vagy ökotoxicitási hatásokat; nem tartalmaznak folyamatbiztonságtechnikai részleteket és készülék- vagy szerelvényválasztási gyakorlati tanácsokat, így ezek a tényezők szintén figyelembe veendők a megfelelő robbanásvédelem kialakítása során.

Jellemző mérési eljárások

A porrobbanásra veszélyes iparági területeken számos olyan vizsgálati eljárás alkalmazható, amelyekkel megállapítható, hogy adott alapanyagok esetén szükséges-e robbanásvédelmi kérdésekkel foglalkozni. Az alábbiakban röviden ismertetjük ezen eljárásokat, amelyeket nemzetközi és hazai szabványok részletesen definiálnak.

Go/No go teszt KSEP robbanóképesség meghatározására

A vizsgálat célja annak meghatározása, hogy az adott por környezeti körülmények között robbanóképes-e. A vizsgálat elvégzésére vonatkozó szabvány az MSZ EN ISO/IEC 80079-20-2:2016.

A méréshez használt berendezés a 3. ábrán látható 20 liter belső térfogatú Kühner robbantókamra. A vizsgálandó por a kamra jobb oldalán elhelyezett nagy nyomású tölcseren keresztül, mágnesszelep segítségével 20 bar túlnyomással kerül az edénybe. A méréshez használt gyújtóforrás 2 db 1 kJ energiájú gyújtópatron, amelyek a por belövését követően 0,06 s késleltetéssel sülnak ki. A vizsgálatot 30–2000 g/m³ koncentrációtartományon kell elvégezni. Ha a por bármelyik koncentrációnál robban, akkor robbanóképesnek kell minősíteni, és további koncentrációnövelésre nincs szükség (MSZ EN ISO/IEC 80079-20-2:2016).

Alsó robbanási határérték meghatározása

A vizsgálat célja az alsó robbanási határérték (LEL – Lower Explosibility Limit) meghatározása g/m³-ben, vagyis annak a legnagyobb porkoncentrációnak a megállapítása, amelynél három egymást követő teszt esetén sem következik be robbanás. A vizsgálat elvégzésére vonatkozó szabvány az MSZ EN 14034-3:2006+A1:2011.

A méréshez használt berendezés a 3. ábrán látható 20 liter belső térfogatú Kühner robbantókamra. A vizsgálat menete megegyezik a Go/No go teszténél bemutatott



3. ábra Kühner által gyártott gömb alakú robbantókamra

Forrás: saját fotó

lépésekkel. A mérés során számítógép segítségével rögzítésre kerül a nyomás az idő függvényében, és megadásra kerül a nyomás és a nyomásnövekedési sebesség maximális értéke. Minden mérés után az edényt ki kell takarítani. Ebben az esetben a vizsgálatot addig kell folytatni csökkenő porkoncentráció mellett, amíg háromszor nem következik be robbanás az adott koncentráció esetén (MSZ EN 14034-3:2006+A1:2011).

A meghatározott LEL értékek poros levegőt szállító rendszerek tervezése, üzemeltetése során használhatók fel, annak érdekében, hogy a porkoncentráció ne okozhasson robbanást. Mivel a gyakorlatban előforduló porfelhők ritkán egyenletesek, ezért ezt megfontolásokkal kell kezelni.

Robbanási jellemzők meghatározása

A vizsgálat célja az éghető por és levegő keverék hirtelen elégségi paramétereinek meghatározására szolgáló vizsgálat. Ezek a paraméterek a maximális nyomás ($p_{\max}$) bar_g-ben és a maximális nyomásnövekedés sebessége $(dp/dt)_{\max}$ bar_g/s-ban. A módszerrel meghatározott paramétereket védelmi rendszerek tervezésénél használják. A vizsgálat elvégzésére vonatkozó szabványok az

MSZ EN 14034-1:2004+A1:2011 és MSZ EN 14034-2:2006+A1:2011.

A vizsgálat megkezdése előtt szükséges a porminta előzetes vizsgálata: nedvességtartalma nem haladhatja meg a 10 m/m%-ot, különben szárítás szükséges; valamint, ha a szemcsehalmaz medián értéke 63 µm feletti, akkor aprítani kell azt.

A méréshez használt berendezés a 3. ábrán látható 20 liter belső térfogatú Kühner robbantókamra. A vizsgálandó por az előzőkhez hasonlóan a kamra jobb oldalán elhelyezett nagynyomású tölcseren keresztül, mágnesszelep segítségével 20 bar túlnyomással kerül az edénybe. Fontos különbség, hogy méréshez használt gyújtóforrás a korábban bemutatott merésektől eltérően 2 db 5 kJ energiájú gyújtópatron, amelyek a por belövését követően 0,06 s késleltetéssel sülnek ki. Minden mérés után az edényt ki kell takarítani (MSZ EN 14034-1:2004+A1:2011; MSZ EN 14034-2:2006+A1:2011).

A mérés során számítógép segítségével rögzítésre kerül a nyomás az idő függvényében, és megadásra kerül a nyomás és a nyomásnövekedési sebesség maximális értéke. A pormintát legalább három sorozatban szükséges tesztelni több koncentráció esetén. Az első méréssel megállapításra kerül a ($p_{\max}$) és a $(dp/dt)_{\max}$, valamint az ehhez tartozó koncentráció. A második és harmadik so-

rozatot ezen koncentráció környezetében kell elvégezni (MSZ EN 14034-1:2004+A1:2011; MSZ EN 14034-2:2006+A1:2011).

Oxigén-határkoncentráció meghatározása

A vizsgálat célja azon legnagyobb oxigén-határkoncentráció (LOC – limiting oxygen concentration) meghatározása, amelynél egy adott porminta környezeti hőmérsékleten és nyomáson gyulladásra nem képes. A vizsgálat elvégzésére vonatkozó szabvány az MSZ EN 14034-4:2004+A1:2011.

A vizsgálat megkezdése előtt szükséges a porminta előzetes vizsgálata: nedvességtartalma nem haladhatja meg a 10 m/m%-ot, különben szárítás szükséges; valamint, ha a szemcseshalmaz medián értéke 63 µm feletti, akkor aprítani kell azt.

A méréshez használt berendezés a 3. ábrán látható 20 liter belső térfogatú Kühner robbantókamra. A vizsgálat menete megegyezik a Go/No go teszt során leírtakkal. Továbbá minden mérés után az edényt ki kell takarítani (MSZ EN 14034-4:2004+A1:2011).

A vizsgálatához a szükséges összetételű nitrogén/levegő keverék könnyen előállítható résznyomásos módszerrel. A tesztek előtt műszeres ellenőrzés is javasolt.

Ha a mérés során van pozitív eredményű teszt, akkor 1%-kal csökkentve az O₂-arányt, meg kell ismételni a sorozatot. Ha negatív eredményű a teszt, akkor 1%-kal meg kell növelni az O₂-arányt a nitrogénben, és úgy kell megismételni a sorozatot. A vizsgálatot addig kell folytatni, amíg megtaláljuk azt az O₂-koncentrációt, ahol

nem történik robbanás. A biztos eredményhez három egymás utáni, azonos porkoncentráció mellett végzett vizsgálat szükséges (MSZ EN 14034-4:2004+A1:2011).

Porfelhő minimális gyulladási hőmérsékletének meghatározása

A vizsgálat célja a porfelhő gyulladáshoz szükséges minimális falhőmérséklet meghatározása (MIT – minimum ignition temperature). A vizsgálat elvégzésére vonatkozó szabvány az MSZ EN ISO/IEC 80079-20-2:2016.

A méréshez használt berendezés a 4. ábrán látható Godbert–Greenwald-kemence, amely elektromosan fűtött, a méréstartomány 20 °C és 1000 °C között változik. A berendezésben található egy függőlegesen elhelyezett cső, amelynek alja a környezetre nyitott, és ezt egy üvegből készült figyelőkamra köti össze a porminta adagolóval. A mintatartóból a vizsgálandó por sűrített levegő segítségével jut a kemencébe. A gyulladás esetén megjelenő láng a készülék alján és a figyelőkamrán keresztül is látható (MSZ EN ISO/IEC 80079-20-2:2016).

A mérés során a hőmérséklet mérése két hőelemmel történik. A vizsgálandó por mennyisége 0,05–2 g között változtatandó.

Negatív mérés, azaz látható lángjelenség nélküli teszt esetén 50 °C-kal magasabb hőmérsékleten szükséges megismételni a vizsgálatot. Pozitív mérés esetén különböző pormennyiséggel és sűrített levegő-nyomással meg kell ismételni a tesztet, és meg kell határozni, hogy melyik esetben volt a leghevesebb a gyulladás. Ezt követően 300 °C felett 20 °C-os, míg 300 °C alatt 10 °C-os



4. ábra

Godbert–Greenwald-kemence

Forrás: saját fotó

hőmérséklet-csökkentési lépcsőkben meg kell ismételni a vizsgálatot addig, amíg már nem tapasztalható gyulladás. Azon a hőmérsékleten, amelyen már nem volt tapasztalható gyulladás, 10 negatív tesztet kell produkálni. Ezen a hőmérsékleten ismét változtatni kell a pormennyiséget és a sűrített levegő nyomását. Amennyiben nem tapasztalunk egyik esetben sem gyulladást, akkor ez a hőmérséklet lesz a végeredmény, ha gyulladás tapasztalható, akkor 20 °C-kal/10 °C-kal alacsonyabb hőmérsékleten kell folytatni a vizsgálatot. A végeredményt 300 °C felett 20 °C, 300 °C alatt 10 °C pontossággal kell feljegyezni (MSZ EN ISO/IEC 80079-20-2:2016).

Porréteg legkisebb gyulladási hőmérsékletének meghatározása

A vizsgálat célja azon forró felület minimális hőmérsékletének meghatározása, amelyen a vizsgált porminta gyulladásra vagy öngyulladásra képes (LIT – layer ignition temperature). A vizsgálat elvégzésére vonatkozó szabvány az MSZ EN ISO/IEC 80079-20-2:2016.

A mérés az 5. ábrán látható Dekra CTL-015 berendezéssel valósítható meg, amelynél a maximális hőmérséklet 400 °C, és a mérhető porminta 100 mm átmérőjű és 5, 12,5 vagy 15 mm magas ún. „mintatartó” fémgyűrűbe helyezhető (MSZ EN ISO/IEC 80079-20-2:2016).

A porréteg gyulladása akkor következik be, ha látható izzás vagy lángolás figyelhető meg, vagy a por hőmérséklete eléri a 450 °C értéket, vagy a beállított forró felülethez képest minimum 250 °C melegedés tapasztalható. Amennyiben 30 perc elteltével nem állapítható meg gyulladás, akkor a vizsgálatot be kell fejezni, és nagyobb hőmérsékleten szükséges megismételni. Minden tesztet friss porréteggel kell végrehajtani (MSZ EN ISO/IEC 80079-20-2:2016).

Ha gyulladás vagy öngyulladás tapasztalható, akkor a vizsgálatot egy kisebb hőmérsékleten szükséges megis-

mételni. A vizsgálat végeredménye az a hőmérséklet, amelyen még tapasztalható gyulladás, illetve öngyulladás, azonban az ettől 10 °C-kal kisebb hőmérsékleten már nem (MSZ EN ISO/IEC 80079-20-2:2016).

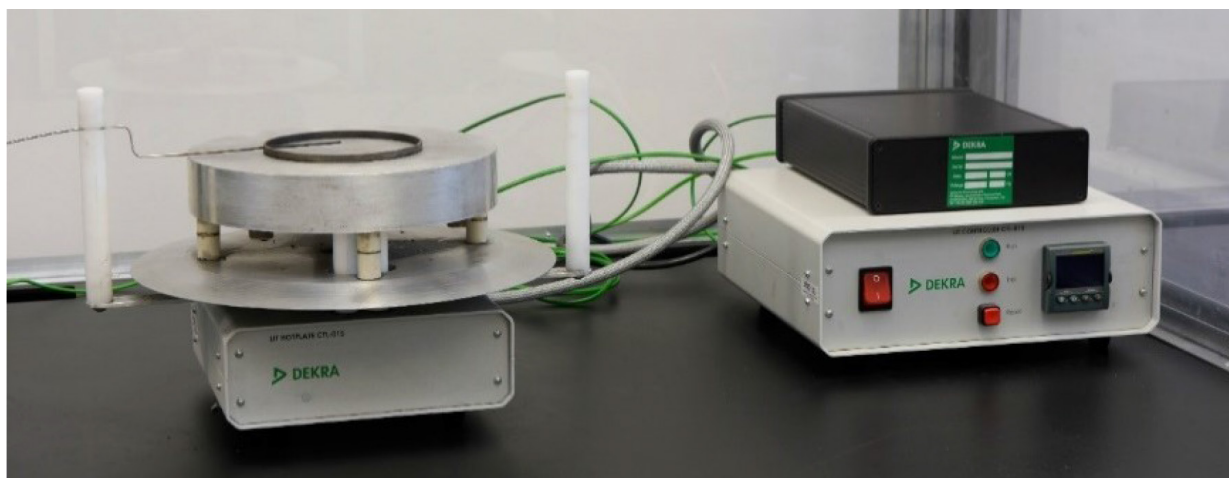
Minimális gyulladási energia meghatározása

A vizsgálat célja a felporzásra képes porminta begyulladásához szükséges minimális külső energia (MIE – minimum ignition energy) nagyságának a meghatározása. Ez a szemcseméret-closzlástól, a szemcsék alakjától és a minta nedvességtartalmától is erősen függő érték. A vizsgálat elvégzésére vonatkozó szabvány az MSZ EN ISO/IEC 80079-20-2:2016.

A méréshez használt berendezés a 6. ábrán látható, amely egy áttetsző anyagból készült, 1 liter térfogatú Hartmann-cella.

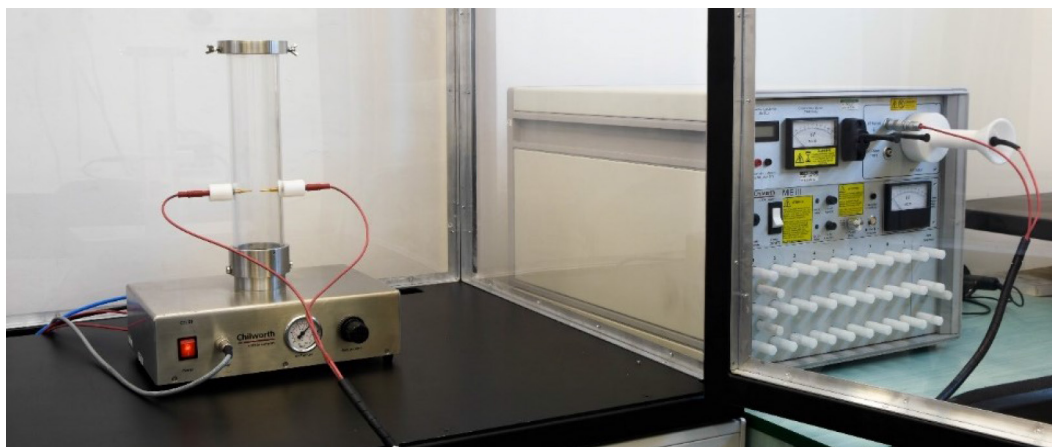
A vizsgálat során a port a Hartmann-cella aljában lévő csészébe kell helyezni, amelyben sűrített levegő befúvásával hozható létre a porfelhő. A cellába két sárgaréz elektróda nyúlik be, melyek között a manuálisan beállított kondenzátorok kisüléséből adódóan, ismert energiájú szikrák jönnek létre. A mérés során különböző koncentrációjú porfelhőket különböző ismert energiájú szikrakisülésekkel kell vizsgálni. Addig kell a vizsgálatot végezni, amíg gyulladás már nem keletkezik, és ebben az esetben 20 ismételt negatív eredményt kell tapasztalni (MSZ EN ISO/IEC 80079-20-2:2016).

A mérés eredménye az a minimális gyújtási energia (maga a MIE), amely a legérzékenyebb porkoncentráció gyulladásához szükséges energia. Ezt mindig tartományként kell megadni, ahol az alsó határ az a legnagyobb energia, amelyen még nem tapasztaltunk robbanást, a felső határ pedig az a legkisebb energia, amelyen már bekövetkezik a gyulladás (MSZ EN ISO/IEC 80079-20-2:2016).



5. ábra Dekra CTL-015 berendezés

Forrás: saját fotó



6. ábra | MIE-mérés berendezése
Forrás: saját fotó

Energetikai szektorban megjelenő anyagokkal kapcsolatos vizsgálati eredmények

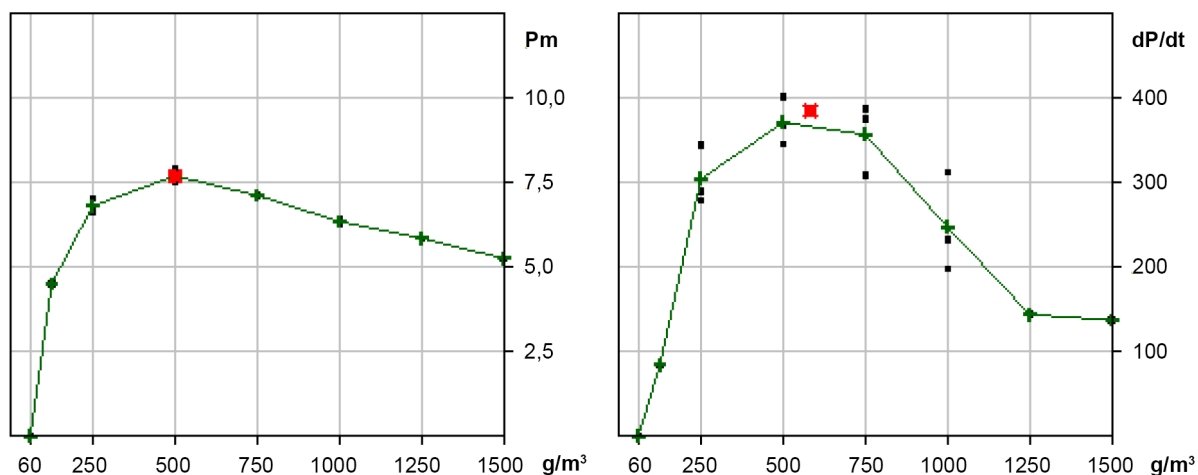
Ahogy azt már az előző részben is ismertettük, az energetikai szektorban előforduló porok, amelyek lehetnek alapanyagok, melléktermékek, félkész termékek vagy végtermékek, a porrobbanás veszélyének a potenciálját hordozzák magukban. A Miskolci Egyetem DustLab laboratóriuma ezen porok vizsgálatára specializálódott. Az elmúlt években laborunk számos olyan megkeresést kapott ipari partnerektől, amely során az energetikai iparhoz valamilyen formában kötődő portermék robbanás-technikai tulajdonságait kellett meghatározni. Ilyen porminták voltak például fűrészpороk, mezőgazdasági termékek (búza, kukorica, árpa, napraforgó, repce), továbbá vizsgáltunk anaerob erjesztésből visszamaradt kukoricaalapú szárazanyagot, biomassza tüzelésű kazán hamutartalmát, akkumulátor-újrahasznosító üzemben keletkező pormintákat.

Fermentációból visszamaradt szárazanyag vizsgálati eredményei

Annak érdekében, hogy a fentebb részletezett mérési eljárások felépítése és a kapott eredmények értelmezése áttekinthetőbb legyen, az alábbi részben ismertetjük, hogy egy fermentációból visszamaradt kukoricaalapú szárazanyag milyen gyulladási és porrobbanási tulajdonságokkal is rendelkezik.

A vizsgált anyaghalmoz jellemző szemcsemérete, vagyis medián értéke $40\ \mu\text{m}$. A mintán elvégeztük a maximális robbanási túlnyomás (P_{max}), a maximális nyomásnövekedési sebesség ($(dp/dt)_{\text{max}}$), a porréteg minimális gyulladási hőmérséklet (LIT), a szálló por minimális gyulladási hőmérséklet (MIT), valamint a porfelhő minimális gyulladási energia (MIE) meghatározására irányuló laboratóriumi méréseket.

A vizsgált porminta a 7. ábra szerinti robbanási nyomás (bal oldal) és nyomásnövekedési sebesség (jobb oldal) eredményeket produkálta a mérés során különböző



7. ábra | P_{max} , $(dp/dt)_{\text{max}}$ mérési eredmény
Forrás: saját ábra

2. táblázat | Porréteg minimális gyulladási hőmérséklet (LIT) mérési eredmények

Felületi hőmérséklet [°C]	Látható izzás, lángolás	Legalább 450 °C porréteg hőmérséklet	Legalább 250 °C-os hőmérséklet-növekedés	Mérési idő [perc]	Minősítés
250	–	–	–	30	nincs gyulladás
260	–	–	–	30	nincs gyulladás
270	igen			9	gyulladt
290	igen			4	gyulladt
300	igen			5	gyulladt
320	igen			5	gyulladt
340	igen			3	gyulladt
360	igen			6	gyulladt
400	igen			2	gyulladt

vizsgálati koncentrációk mellett. A mérés eredményeként a $P_{\max}$ érték $7,7 \text{ bar}_g \pm 10\%$, míg a $K_{\max}$ érték $104 \text{ m}\cdot\text{bar/s} \pm 12\%$, valamint a porminta az St-1 porrobbanási osztályba sorolható.

A porréteg minimális gyulladási hőmérsékletének meghatározásához a porminta 9 különböző felületi hőmérséklet-értéken lett vizsgálva. A vizsgált hőmérsékleteket, valamint a kapott eredményeket a 2. táblázat szemlélteti, amely tartalmazza a gyulladás okát és a szükséges időt. Ahogy a táblázatból látható, ha 30 perc elteltével sem történik meg a gyulladás, akkor az adott hőmérsékletérték „nincs gyulladás” minősítést kap. A 8. ábra mutatja be a minta 270 °C-os induló felületi hőmérséklet mellett mért hőmérséklet-idő lefutási görbét. A vizsgálati eredményekből látható, hogy a pozitív mérés minden esetben a látható izzás feltételével valósult meg, továbbá megállapítható, hogy a vizsgált porminta LIT értéke 270 °C lett.

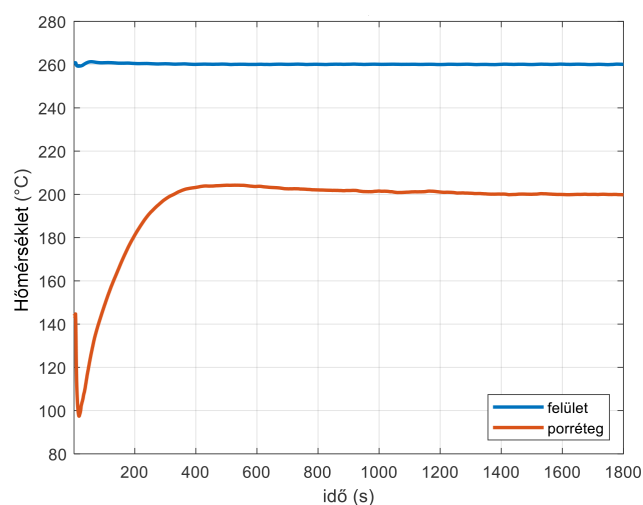
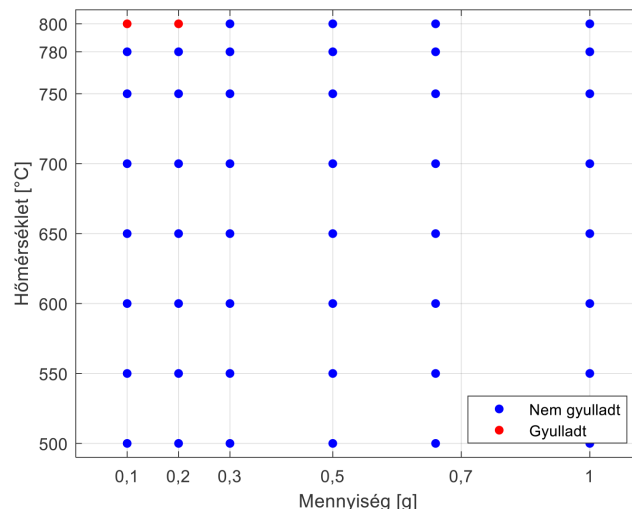
A 2. táblázatban szereplő mérések 400 °C-on kezdődnek, majd onnan kerül a hőmérsékletérték folyamatosan

csökkentésre. A mérés során környezeti hőmérsékletű pormintát helyezünk az előre felmelegített felületre, ez okozza a 8. ábrán látható, a mérés kezdeti szakaszában látható hirtelen hőmérséklet-csökkenést.

A szálló por minimális gyulladási hőmérsékletének meghatározása közben kapott mérési eredményeket a 9. ábra mutatja be. Az ábrából jól látható, hogy a vizsgálat 500–800 °C közötti hőmérséklet tartományban került elvégzésre. A mérési eredmények alapján a minta MIT értéke 780 °C-ra adódott.

A porfelhő minimális gyulladási energiájának meghatározása során a méréseket 544 mJ kisülési energia mellett kezdtük meg, azonban az említett kisülési energiánál egyik vizsgált koncentráció esetén sem volt tapasztalható gyulladás, így a vonatkozó szabvány szerint azt a megállapítást tettük, hogy a minimális gyulladási energia (MIE) értéke nagyobb, mint 500 mJ.

Az elvégzett vizsgálatok során meghatározott mérési eredményeket a 3. táblázat tartalmazza összefoglalva.


8. ábra | LIT mérési eredmény
Forrás: saját ábra

9. ábra | MIT mérési eredmény
Forrás: saját ábra

3. táblázat | Összesített vizsgálati eredmények

Vizsgált minta	P_{max} [bar]	K_{max} [mbar/s]	LIT [°C]	MIT [°C]	MIE [mJ]
Fermentációból visszamaradt szárazanyag	7,7	104	270	780	>500

Összefoglalás

Ebben a közleményben ismertettük a porrobbanás kialakulásának feltételeit, annak veszélyeit, amelyek relevanciáját valós ipari balesetek említésével igazoltuk. Röviden bemutatásra kerültek a porrobbanási károk mérséklésének előírásai és lehetőségei. Részletesen ismertettük azon mérési eljárásokat, amelyekkel igazolható egy por robbanóképessége (Go/NoGo eljárás), valamint amelyekkel meghatározhatóak az egyes robbanási és gyulladási tulajdonságok (P_{max} , K_{max} , LEL, LOC, LIT, MIT, MIE). Ezen paraméterek meghatározása elengedhetetlen egy porrobbanás-veszélyes technológia vagy térség robbanás elleni védelmének tervezéséhez. Konkrét, az energetikai szektorban előforduló pormintának ismertettük a robbanási és gyulladási tulajdonságait. A bemutatott minta mérési eredményei alapján megállapítható, hogy az ipar számos területén, amely alól az energetikai szektor sem képez kivételt, előfordulnak olyan porok, amelyek robbanásveszélyesek lehetnek. Ezen porok robbanási és gyulladási tulajdonságai a legtöbb esetben nem ismertek, ezért azok laboratóriumi bevizsgálása a megfelelő porrobbanás elleni védelem kialakítása érdekében elengedhetetlen.

Irodalomjegyzék

- 1999/92/EK. Az Európai Parlament és a Tanács irányelve a robbanás-veszélyes légkör kockázatának kitett munkavállalók biztonságának és egészségvédelmének javítására vonatkozó minimumkövetelményekről
- Barton J. (2002) Dust explosion prevention and protection – A practical guide. Gulf Professional Publishing
- Cloney, C. T. (2021) 2021 Mid-year combustible dust incident report – Version #1. Ipari jelentés. DustEx Research Ltd.
- Eckhoff, R. K. (2003) Dust explosions in the process industries. Gulf Professional Publishing
- MSZ EN 14460:2018. Robbanásbiztos berendezések. Magyar Szabványügyi Testület
- MSZ EN 14491:2013. Dust Explosion Venting Protective Systems. Magyar Szabványügyi Testület
- MSZ EN ISO/IEC 80079-20-2:2016. Explosive atmospheres – Part 20-2: Material characteristics – Combustible dusts test methods. Magyar Szabványügyi Testület
- MSZ EN 14034-3:2006+A1:2011. Porfelhők robbanási jellemzőinek meghatározása. 3. rész: A porfelhők alsó robbanási határának (ARH) meghatározása, Magyar Szabványügyi Testület.
- MSZ EN 14034-1:2004+A1:2011. Porfelhők robbanási jellemzőinek meghatározása. 1. rész: A porfelhők legnagyobb robbanási nyomásának (p_{max}) meghatározása. Magyar Szabványügyi Testület
- MSZ EN 14034-2:2006+A1:2011. Porfelhők robbanási jellemzőinek meghatározása. 2. rész: A porfelhő legnagyobb robbanásnyomás-növekedési sebességének $(dp/dt)_{max}$ meghatározása. Magyar Szabványügyi Testület
- MSZ EN 14034-4:2004+A1:2011. Porfelhők robbanási jellemzőinek meghatározása. 4. rész: A porfelhők oxigén-határkoncentrációjának (OHK) meghatározása. Magyar Szabványügyi Testület
- NFPA 68, 2018. Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting. National Fire Protection Association
- TvMI 13.4, Tűzvédelmi Műszaki Irányelv – Robbanás elleni védelem. Hatályos: 2024. 02.01-től. BM Országos Katasztrófavédelmi Főigazgatóság