

MISKOLCI EGYETEM



GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR  
VEGYIPARI GÉPÉSZETI INTÉZETI TANSZÉK

ROBBANÁS ELLENI VÉDELEMMEL ELLÁTOTT RENDSZEREK ELMÉLETI,  
SZIMULÁCIÓS ÉS KÍSÉRLETI VIZSGÁLATA

**Mikáczó Viktória**  
okleveles gépészmérnök

*PhD értekezés*

Miskolci Egyetem  
Sályi István Gépészeti Tudományok Doktori Iskola  
Gépészeti Alaptudományok szakterület  
Transzportfolyamatok és gépek témacsoport

A DOKTORI ISKOLA VEZETŐJE:  
**Vadászné Prof. Dr. Bognár Gabriella**  
az MTA doktora

A TÉMACSOPORT VEZETŐJE:  
**Prof. Dr. Czibere Tibor**  
az MTA rendes tagja

TÉMAVEZETŐK:  
**Prof. Dr. Siménfalvi Zoltán**  
egyetemi tanár  
**Dr. habil. Szepesi L. Gábor**  
egyetemi docens

MISKOLC, 2023

# Tartalomjegyzék

|  |          |
|--|----------|
| <b>1. Bevezetés, célkitűzések</b>  | <b>1</b> |
| 1.1. A robbanásvédelem jelentősége . . . . .   | 1        |
| 1.2. Célkitűzések . . . . .  | 2        |
| <b>2. Szakirodalmi és szabványi háttér áttekintése</b>   | <b>4</b> |
| 2.1. Zárt térben végbemenő robbanások . . . . .  | 4        |
| 2.1.1. A robbanás bekövetkezésének feltételrendszere . . . . .                                 | 4        |
| 2.1.2. A robbanási nyomásgörbe jellegzetes értékei . . . . .                                   | 5        |
| 2.1.3. Robbanási károk mérséklésének lehetőségei . . . . .                                     | 6        |
| 2.1.3.1. EU direktívák és hazai jogszabályok . . . . .   | 7        |
| 2.1.3.2. Tűzvédelmi Műszaki Irányelv . . . . .   | 8        |
| 2.1.3.3. Szabványi háttér . . . . .  | 8        |
| 2.1.4. A lefúvásos védelem . . . . .   | 9        |
| 2.1.5. Nyomásemelkedés, robbanóképesség, robbanási határok . . . . .                           | 11       |
| 2.1.5.1. Égés és robbanás, deflagráció és detonáció . . . . .                                  | 11       |
| 2.1.5.2. A por- és gázrobbanások közötti hasonlóságok és különbségek                           | 11       |
| 2.1.5.3. Robbanóképességet befolyásoló tényezők . . . . .                                      | 12       |
| 2.1.5.4. Elsődleges és másodlagos robbanások . . . . .   | 15       |
| 2.1.6. Por- és gázfelhőben történő lángterjedés mechanizmusa . . . . .                         | 16       |
| 2.1.6.1. Lamináris lángterjedés . . . . .  | 16       |
| 2.1.6.2. Turbulens lángterjedés . . . . .  | 18       |
| 2.1.6.3. Hővesztések . . . . .   | 19       |
| 2.1.6.4. A lángterjedés jellegzetes értékei . . . . .  | 19       |
| 2.1.7. Szimulációs módszerek . . . . .   | 21       |
| 2.1.7.1. Empirikus modellek . . . . .  | 21       |
| 2.1.7.2. Fenomenologikus modellek . . . . .  | 23       |
| 2.1.7.3. CFD modellek . . . . .  | 26       |
| 2.2. A robbanás elvezetése lefúvóvezeték alkalmazása nélkül . . . . .                          | 26       |
| 2.2.1. A lefúvás során fellépő fizikai-kémiai jelenségek . . . . .                             | 26       |
| 2.2.2. A lefúvatást befolyásoló tényezők . . . . .   | 28       |
| 2.2.3. A maximális redukált robbanási nyomás számítására szolgáló össze-<br>függések . . . . . | 28       |
| 2.3. Robbanás elvezetése lefúvató csatornák alkalmazásával . . . . .                           | 31       |
| 2.3.1. Lefúvató csatornák . . . . .  | 31       |
| 2.3.2. A lefúvató csatornában lejátszódó folyamatok . . . . .                                  | 31       |
| 2.3.3. A lefúvató csatorna hatása a készülékben mérhető robbanási jellemzőkre                  | 33       |

## TARTALOMJEGYZÉK

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| 2.3.4.    | Lehetséges csatornakialakítások, szabványi előírások . . . . .                           | 34        |
| 2.3.4.1.  | Az MSZ EN 14491:2013 előírásai – porokra vonatkozó összefüggések . . . . .               | 35        |
| 2.3.4.2.  | Az MSZ EN 14994:2007 előírásai – gázokra vonatkozó összefüggések . . . . .               | 35        |
| 2.3.4.3.  | Az NFPA 68:2018 előírásai – porokra vonatkozó összefüggések . . . . .                    | 36        |
| 2.3.4.4.  | NFPA 68:2018 előírásai – gázokra vonatkozó összefüggések . . . . .                       | 36        |
| 2.3.5.    | Redukált nyomásra és lefúvásra vonatkozó modellek . . . . .                              | 37        |
| 2.4.      | Lefúvatott robbanás terelőlemez alkalmazásával . . . . .                                 | 39        |
| 2.4.1.    | Terelőlemezek . . . . .  | 39        |
| 2.4.2.    | A lefúvatás után a környezetben lejátszódó folyamatok . . . . .                          | 39        |
| 2.4.3.    | Külső nyomásértékekre vonatkozó modellek . . . . .                                       | 40        |
| 2.4.4.    | Terelőlemezekre vonatkozó szabványi előírások . . . . .                                  | 41        |
| 2.4.5.    | A lefúvatáskor fellépő nyomásmaximum számítására szolgáló szabványi előírások . . . . .  | 42        |
| 2.4.5.1.  | MSZ EN 14491:2013 – porokra vonatkozó előírások . . . . .                                | 42        |
| 2.4.5.2.  | MSZ EN 14994:2007 – gázokra vonatkozó összefüggések . . . . .                            | 43        |
| 2.4.5.3.  | VDI 3673:2002 – porokra vonatkozó összefüggések . . . . .                                | 43        |
| 2.4.5.4.  | NFPA 68:2018 – porokra vonatkozó összefüggések . . . . .                                 | 44        |
| 2.4.5.5.  | NFPA 68:2018 – gázokra vonatkozó összefüggések . . . . .                                 | 44        |
| <b>3.</b> | <b>Kutatási eredmények</b>   | <b>45</b> |
| 3.1.      | Zárt térben bekövetkező robbanás vizsgálata . . . . .                                    | 45        |
| 3.1.1.    | Kísérleti környezet bemutatása . . . . .   | 45        |
| 3.1.1.1.  | A robbantókamra felépítése . . . . .   | 45        |
| 3.1.1.2.  | Gázok vizsgálata . . . . .   | 46        |
| 3.1.2.    | Zárt térben bekövetkező robbanással kapcsolatos mérések, módosított eljárással . . . . . | 47        |
| 3.1.2.1.  | A mérések menete . . . . .   | 47        |
| 3.1.2.2.  | A maximális robbanási nyomás és a robbanási konstans meghatározása . . . . .             | 49        |
| 3.1.3.    | Zárt térben bekövetkező robbanás modellezése . . . . .                                   | 51        |
| 3.1.3.1.  | A Frolov-modell . . . . .  | 51        |
| 3.1.3.2.  | A modell leírása . . . . .   | 51        |
| 3.1.3.3.  | Eredmények . . . . .   | 53        |
| 3.1.3.4.  | Az ideális gáz modell . . . . .  | 54        |
| 3.1.3.5.  | A modell leírása . . . . .   | 54        |
| 3.1.3.6.  | A modell kiterjesztése . . . . .   | 56        |
| 3.1.4.    | A zárt terű robbanások vizsgálata során elért eredmények . . . . .                       | 59        |
| 3.2.      | Lefúvatott robbanások vizsgálata . . . . .   | 60        |
| 3.2.1.    | Lefúvatott robbanásokkal kapcsolatos mérések – lefúvató csatornával és anélkül . . . . . | 60        |
| 3.2.1.1.  | A mérések menete . . . . .   | 60        |
| 3.2.1.2.  | Az eredmények megengedhető tűrései . . . . .   | 62        |
| 3.2.1.3.  | A fóliák nyitónyomása . . . . .  | 63        |
| 3.2.1.4.  | Mért karakterisztikus jellemzők . . . . .  | 63        |

## TARTALOMJEGYZÉK

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 3.2.1.5.  | Nyomásveszteség az $l/d = 33,3$ hosszúságú csatorna mentén                                | 66        |
| 3.2.2.    | A lefúvató csatornában lejátszódo jelenségek és nyomáscsúcsok azonosítása . . . . .       | 68        |
| 3.2.3.    | A megnövekedett redukált nyomás számítására alkalmas új összefüggés kidolgozása . . . . . | 73        |
| 3.2.4.    | A csősúrlódási veszteség részarányának meghatározása . . . . .                            | 75        |
| 3.2.4.1.  | Alkalmazott összefüggések . . . . .   | 75        |
| 3.2.4.2.  | Anyagjellemzők, paraméterek, kezdeti- és peremfeltételek . .                              | 77        |
| 3.2.4.3.  | A megoldás menete . . . . .   | 78        |
| 3.2.4.4.  | Nyomásesések a 2,8 V/V% propántartalmú keverék esetén .                                   | 78        |
| 3.2.4.5.  | Nyomásesések a 3,8 – 6,3 V/V% propántartalmú keverékek esetén . . . . .                   | 79        |
| 3.2.5.    | A lefúvatott robbanások vizsgálata során elért eredmények . . . . .                       | 81        |
| 3.2.5.1.  | A mérési eljárás módosításával elért eredmények . . . . .                                 | 81        |
| 3.2.5.2.  | A szabványi összefüggések vizsgálatával kapcsolatos eredmények . . . . .                  | 81        |
| 3.2.5.3.  | A lefúvató csatorna nyomásvesztésének vizsgálatával kapcsolatos eredmények . . . . .      | 82        |
| <b>4.</b> | <b>Tézisek</b>  | <b>83</b> |
| <b>5.</b> | <b>Összefoglalás, további kutatási irányok</b>  | <b>85</b> |

# Témavezetői ajánlás

Mikáczó Viktória egyetemi tanulmányait 2008-ban kezdte a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Karán, ahol 2012-ben gépészmérnöki alapszakon, vegyipari és energetikai gépészeti specializáción BSc oklevelet szerzett. Már ekkor érdeklődést mutatott a tudományos kutatások iránt, valamint egyetemi tanulmányai alatt demonstrátori feladatokat látott el. Elvégzett munkája eredményeképpen a 2013/14-es tanévben Köztársasági Ösztöndíjat nyert el. 2014-ben gépészmérnöki mesterszakon Vegyipari gépészeti specializáción kitüntetéses MSc diplomát szerzett.

PhD tanulmányait szintén 2014-ben kezdte meg. Már az első perctől kezdve bekapcsolódott az akkori Vegyipari Gépek Tanszék projektjeibe, amelyek zászlóshajója a robbanásbiztonságtechnika témaköre. Megismerkedett a zárt terű robbanások fizikai-kémiai alapjaival és lefúvásos védelemmel kapcsolatos szabványi háttérrel, valamint aktívan részt vett a Tanszék biztonságtechnikai témájú projektjeiben, és a témakörhöz kapcsolódó tantárgyak oktatásában alap-, mester- és szakmérnöki szinten. Mára a tevékenysége kiegészült a DustLab porvizsgáló laboratórium működtetésében való aktív részvétellel, így a témakör mérés-technikai háttere sem ismeretlen számára. Emellett olyan matematikai modellezési technikákat is elsajátított, amelyek lehetővé tették a robbanás és lefúvatás közben lezajló folyamatok vizsgálatát. A témakörben való elmerülés jelen PhD értekezés elkészítését eredményezte. A fáradtságos munkával összegyűjtött ismerethalmaz jelentős része a klasszikus gépészmérnöki képzés anyagában nem szerepel, a témakör pedig olyan határterület, amely mind a biztonságtechnikai, mind az áramlástani, mind pedig a vegyészeti tudomány hasznára válhat.

Publikációs tevékenysége megfelelő, az MTMT adatbázisa alapján jelenleg 23 publikációval rendelkezik, amelyek közül 14 kötődik a dolgozat témájához, valamint további kettő megjelenés alatt van. Ezek közül két darab Scopus által referált, idegen nyelvű lektorált Q3-as, valamint Scopus által referált, idegen nyelvű lektorált közlemény.

PhD fokozatszerzése esetén az Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet egy nagyon lényeges területén (biztonságtechnika, robbanás-biztonságtechnika) folytatná tudományos és oktatói tevékenységét.

Miskolc, 2022. november 14.

Prof. Dr. Siménfalvi Zoltán sk.  
egyetemi tanár, témavezető

Dr. habil. Szepesi L. Gábor sk.  
egyetemi docens, társtémavezető

# Jelölésjegyzék, indexek

## Latin betűk

| Jel             | Megnevezés  | Mértékegység      |
|-----------------|---|-------------------|
| $\bar{A}$       | Dimenziótlan lefúvófelület  | -                 |
| $a$             | Empirikus paraméter   | -                 |
| $A$             | Pre-exponenciális faktor, frekvencia-faktor   | 1/s               |
| $A_{eff}$       | Effektív lefúvófelület  | m <sup>2</sup>    |
| $A_f$           | Láng felülete   | m <sup>2</sup>    |
| $A_s$           | Készülék belső felülete   | m <sup>2</sup>    |
| $A_v$           | Lefúvófelület   | m <sup>2</sup>    |
| $A_{v,f}$       | Megnövelt lefúvófelület   | m <sup>2</sup>    |
| $A_{v1}$        | A lefúvató csatorna nélküli szerkezet biztosításához szükséges lefúvófelület nagysága | m <sup>2</sup>    |
| $A_{x,min}$     | Legkisebb felület   | m <sup>2</sup>    |
| $A_{x,v}$       | A készülék falának belső felülete   | m <sup>2</sup>    |
| $b$             | Empirikus paraméter   | -                 |
| $Br$            | Bradley-szám  | -                 |
| $Br_t$          | Turbulens Bradley-szám  | -                 |
| $Br_{t,vd}$     | Turbulens Bradley-szám lefúvató csatorna alkalmazása mellett                          | -                 |
| $c$             | Empirikus paraméter   | -                 |
| $c$             | Koncentráció  | kg/m <sup>3</sup> |
| $c$             | Hangsebesség  | m/s               |
| $C_D$           | Lefúvási tényező  | -                 |
| $c_p$           | Közeg állandó nyomáson vett fajhője   | J/kgK             |
| $c_0$           | Hangsebesség a kezdeti állapotban   | m/s               |
| $d$             | Empirikus paraméter   | -                 |
| $d$             | Lefúvató csatorna átmérője  | m                 |
| $D$             | Készülék átmérője   | m                 |
| $D_v$           | Lefúvófelület egyenértékű átmérője  | m                 |
| $dP/dt$         | Nyomásemelkedési sebesség   | bar/s             |
| $(dP/dt)_{max}$ | Maximális nyomásemelkedési sebesség   | bar/s             |
| $e$             | Empirikus paraméter   | -                 |
| $E$             | Expanziós faktor  | -                 |
| $E_a$           | Aktiválási energia  | J/mol             |
| $E_0$           | Expanziós faktor a kezdeti pillanatban  | -                 |
| $f$             | Frekvencia  | Hz, 1/s           |
| $f_d$           | D'Arcy-féle súrlódási tényező   | -                 |
| $k$             | Reakciósebességi állandó  | 1/s, mol/s        |

| Jel              | Megnevezés   | Mértékegység      |
|------------------|--|-------------------|
| $K, K_{St}, K_G$ | Robbanási konstans, deflagrációs index                 | bar· m /s         |
| $K_i$            | Gyulladásí együttható                                  | -                 |
| $L$              | Turbulens örvények hosszának nagyságrendje             | m                 |
| $L$              | Készülék magassága                                     | m                 |
| $l, l_{duct}$    | Lefűvóvezeték hossza                                   | m                 |
| $l_{eff}$        | Lefűvóvezeték maximális hossza                         | m                 |
| $(l/d)_s, l_s$   | Leghangsúlyosabb lefűvóvezeték hossz                   | -, m              |
| $m$              | Empirikus paraméter                                    | -                 |
| $M_b$            | Elégett gáz móltömege                                  | kg/kmol           |
| $M_u$            | El nem égett gáz móltömege                             | kg/kmol           |
| $n$              | Empirikus paraméter                                    | -                 |
| $n_e$            | Végső mólszám  | mol               |
| $n_0$            | Kezdeti mólszám  | mol               |
| $n_{45}, n_{90}$ | A 45° és 90°-os ívek száma                             |                   |
| $P$              | Nyomás   | bar               |
| $P_a$            | Környezeti nyomás                                      | bar <sub>a</sub>  |
| $P_{din}$        | Dinamikus aktivációs nyomás                            | bar <sub>g</sub>  |
| $P_I$            | Hasadófelület tehetetlenségének hatása a végnyomásra   | Pa                |
| $P_{max}$        | Maximális robbanási nyomás                             | bar <sub>g</sub>  |
| $P_{red,max}$    | Maximális redukált robbanási nyomás                    | bar <sub>g</sub>  |
| $P'_{red,max}$   | Megnövekedett redukált robbanási nyomás                | bar <sub>g</sub>  |
| $P_{stat}$       | Statikus aktivációs nyomás                             | bar <sub>g</sub>  |
| $P_0$            | Kezdeti nyomás   | bar <sub>a</sub>  |
| $R$              | Robbantókamra sugara                                   | m                 |
| $r_b$            | Lángfront sugara                                       | m                 |
| $R_0$            | Egyetemes gázállandó                                   | J/molK            |
| $Re_f$           | Láng Reynolds-száma                                    | -                 |
| $S_{CH_4}$       | Metán égési sebessége                                  | m/s               |
| $S_f$            | Égési sebesség   | m/s               |
| $S_l$            | Lamináris lángterjedési sebesség                       | m/s               |
| $S_{l,ad}$       | Lamináris adiabatikus lángterjedési sebesség           | m/s               |
| $S_{l,0}$        | Lamináris lángterjedési sebesség a kezdeti pillanatban | m/s               |
| $S_t$            | Turbulens lángterjedési sebesség                       | m/s               |
| $*S_0$           | Dimenziótlan égési paraméter                           | -                 |
| $t$              | Idő  | s                 |
| $T$              | Közeg hőmérséklete                                     | K                 |
| $T_b$            | Elégett gáz hőmérséklete                               | K                 |
| $T_{f,p}$        | Robbanás lánghőmérséklete izobár környezetben          | K                 |
| $T_u$            | El nem égett gáz hőmérséklete                          | K                 |
| $T_0$            | Kezdeti gázhőmérséklet                                 | K                 |
| $u'$             | Lángsebesség ingadozásának intenzitása                 | m/s               |
| $v$              | Reakciósebesség  | mol/s             |
| $V$              | Térfogat   | m <sup>3</sup>    |
| $V_b$            | Elégett gáz térfogata                                  | m <sup>3</sup>    |
| $V_u$            | El nem égett gáz térfogata                             | m <sup>3</sup>    |
| $V_p^*$          | Propán térfogatkoncentrációja                          | V/V%              |
| $V_t$            | Készüléktérfogat                                       | m <sup>3</sup>    |
| $V_0$            | Robbantókamra térfogata                                | m <sup>3</sup>    |
| $w$              | Lefűvónyílás tehetetlensége                            | kg/m <sup>2</sup> |
| $x$              | Empirikus konstans                                     | -                 |
| $y$              | Empirikus konstans                                     | -                 |

## Görög betűk

| Jel                   | Megnevezés                                   | Mértékegység      |
|-----------------------|--|-------------------|
| $\alpha$              | Empirikus konstans                           | -                 |
| $\alpha$              | Korrektációs tényező                         | -                 |
| $\beta$               | Empirikus konstans                           | -                 |
| $\gamma$              | Empirikus konstans                           | -                 |
| $\Delta P_{be}$       | Lefúvató csatorna belépési vesztesége        | Pa                |
| $\Delta P_{csatorna}$ | Lefúvató csatorna nyomásesése                | Pa                |
| $\Delta P_{css}$      | Csősúrlódási veszteség                       | Pa                |
| $\Delta P_{ki}$       | Kiáramlási veszteség a csatornából           | Pa                |
| $\Delta P_{mr}$       | Másodlagos robbanásból fakadó nyomásesés     | Pa                |
| $\epsilon$            | Felületi érdesség                            | m                 |
| $\epsilon$            | Korrektációs tényező                         | -                 |
| $\zeta$               | Lefúvóvezeték-ellenállás                     | -                 |
| $\eta_0$              | Lángfront vastagsága                         | m                 |
| $\kappa$              | Pillanatnyi izentropikus kitevő              | -                 |
| $\kappa_b$            | Elégett keverék izentropikus kitevője        | -                 |
| $\kappa_u$            | Kiindulási keverék izentropikus kitevője     | -                 |
| $\lambda$             | Csősúrlódási veszteség                       | -                 |
| $\mu$                 | Általánosított lefúvási együttható           | -                 |
| $\pi_{i\#}$           | Dimenziótlan kezdeti abszolút nyomás         | -                 |
| $\pi_{max}$           | Dimenziótlan robbanási nyomás                | -                 |
| $\pi_{red}$           | Dimenziótlan lefúvási nyomás                 | -                 |
| $\pi_v$               | Dimenziótlan nyitónyomás                     | -                 |
| $\rho_p$              | Por anyagának sűrűsége                       | kg/m <sup>3</sup> |
| $\rho_u$              | El nem égett gáz sűrűsége                    | kg/m <sup>3</sup> |
| $\phi$                | Ekvivalencia arány, egyenértékűségi hányados | -                 |
| $\chi$                | Turbulencia faktor                           | -                 |
| $\chi/\mu$            | DOI-szám                                     | -                 |

## Indexek

| Jel         | Megnevezés                |
|-------------|---------------------------|
| <i>ad</i>   | adiabatikus               |
| <i>b</i>    | elégett                   |
| <i>f</i>    | láng                      |
| <i>g, G</i> | gáz                       |
| <i>l</i>    | lamináris                 |
| <i>max</i>  | maximális                 |
| <i>n</i>    | normál irányú             |
| <i>p</i>    | izobár körülmények között |
| <i>red</i>  | redukált                  |
| <i>St</i>   | por                       |
| <i>stat</i> | statikus                  |
| <i>u</i>    | el nem égett              |
| 0           | kezdeti                   |



# 1. fejezet

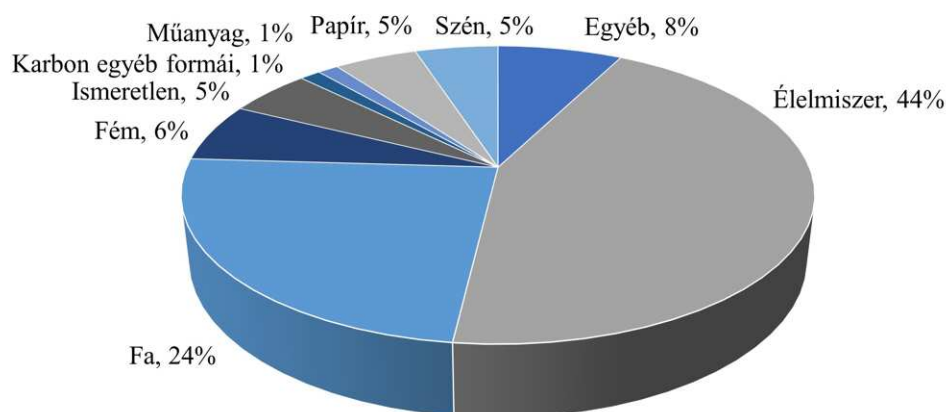
## Bevezetés, célkitűzések

### 1.1. A robbanásvédelem jelentősége

A legtöbb, iparban és háztartásban előforduló por gyúlékony, sok esetben pedig robbanóképes. Ilyenek például a liszt, szén, fa, cukor, keményítő, bizonyos fűszerek, műanyagok, gyógyszeripari alapanyagok, növényvédő szerek, fémek csiszolatai vagy vágás során keletkező porok. Ezen kívül különösen nagy veszélyforrást jelentenek azok az ipari létesítmények, amelyekben robbanóképes gázok, ködök, porok vagy hibrid keverékek fordulnak elő, mint például:

- olaj- és földgázkitermelő és feldolgozó egységek: szárazföldi és offshore létesítmények, finomítók, szállítási tevékenységek;
- petrokémiai, vegyipari és metallurgiai tevékenységek: vegyipari üzemek, növényvédő szerek előállítása, porkohászati egységek, élelmiszer-előállítás, papírgyártás stb.;
- mechanikus nyersanyag-előkészítés vagy -feldolgozás: malomipar, cukorgyártás, bútorgyártás stb.;
- különleges folyamatok: robbanóanyagok, pirotechnikai eszközök, gyújtópatronok előállítása, kezelése, tárolása, szállítása [1];
- gyógyszeripari létesítmények, növényvédő és rovarirtó szerek előállításának létesítményei stb. Ez utóbbiak ismertetője, hogy nem csak nagyméretű, de kis űrtartalmú készülékeket is nagy számban alkalmaznak, így ezekben is bekövetkezhet robbanás.

A 2021. évben bekövetkezett porrobbanásos balesetek iparági sokféleségét szemlélteti a 1.1. ábra, amely az Amerikai Egyesült Államokbeli DustEx Research Ltd. jelentéséből [2] származik. Látható, hogy az ipari termelés minden szegmenséből származnak robbanóképes anyagok.



1.1. ábra. Robbanást okozó porok 2021. évi megoszlása az Amerikai Egyesült Államokban [2]

A legelső, porrobbanásról szóló írásos esettanulmányt 1785-ben Count Morozzo készítette el, amely egy Torinoban létesített lisztraktárban bekövetkezett balesetet ír le igen részletesen [3]. A XX. századtól kezdve számos irodalmi feljegyzés készült az ilyen jellegű esetekkel kapcsolatban. Ezek dokumentációja az idők során egyre pontosabbá és gyakoribbakká vált mind hazánkban, mind világviszonylatban, így számos részletes leírás áll a kutatók rendelkezésére a témában.

A bekövetkezett eseményekből a megfelelő következtetéseket levonva, napjaink ipari gyakorlatában egyre nagyobb szerepet játszanak a robbanás-biztonságtechnikai intézkedések is. Ezek foganatosítása során fő szempont az emberi élet és az anyagi javak megóvása, valamint a környezetvédelem. Robbanással járó balesetek bekövetkezésekor egyidejűleg okozhat kárt a kikerülő anyag, a készülékről leszakadó repeszek, a robbanás nyomáshulláma és hőhatása. A rendszerek, készülékek integritásának megóvása tehát nem csak anyagi érdek.

## 1.2. Célkitűzések

A por- és gázrobbanások fizikai-kémiai háttere rendkívül összetett, a közben lejátszódó jelenségek pedig számos paramétertől függenek. A folyamatok összetettsége okán a zárt téri és lefúvatott robbanások szabványi előírásai nagyszámú kísérlet eredményeiként álltak elő, és minél szélesebb spektrumot igyekeznek lefedni mind a robbanóképes közegek, mind a geometriai jellemzők (csatorna-kialakítások és készülékgeometriák) terén. Azonban az összefüggések alkalmazási tartományának szélein, például a kisméretű készülékekben bekövetkező zárt téri vagy lefúvatott robbanásokra, esetleg az összetett geometriájú lefúvató csatornákra ezek az összefüggések már pontatlan eredményt szolgáltatnak.

A zárt téri robbanások közben lejátszódó folyamatok leírása és a lefúvásos védelem tehát egy olyan témakör a robbanás-biztonságtechnikában, amely számos kutatási lehetőséget tartogat. A disszertációmban vizsgált kisméretű készülékek mérettartománya előfordul a gyógyszeripari, a vegyipari vagy akár a félüzemi kísérleti laboratóriumi alkalmazások körében, amelyek robbanásveszély szempontjából különösen veszélyeztetett területek.

Disszertációmiban a por- és gázrobbanások jelenségét, feltételrendszerét, körülményeit és a közben végbemenő fizikai-kémiai folyamatokat vizsgálom. Áttekintem az ipari gyakorlatban alkalmazott, lefúvásos védelmi módokhoz kapcsolódó hazai és nemzetközi jogszabályi és szabványi hátteret, valamint feltárom a zárt térben bekövetkező robbanás és a lefúvatás során fellépő fizikai-kémiai folyamatokat.

Kutatásaim során a céloom egy olyan laboratóriumi mérési eljárás kidolgozása, amely tetszőleges gázkeverék esetén alkalmas mind a zárt téri, mind a lefúvatott gázrobbanások közben lejátszódó folyamatok vizsgálatára, a robbanási jellemzők meghatározására és a lefúvató csatornában a nyomásértékek rögzítésére. A vizsgálatokat légköri kezdeti nyomáson és környezeti hőmérsékleten végzem el.

A zárt kamrás mérések eredményeinek segítségével megvizsgálom a Frolov-modell és az ideális gáz modell alkalmazhatóságát a robbanási nyomás-idő függvény számítására. A modellek felhasználásával a robbanási nyomásgörbe kezdeti szakaszának leírását tűztem ki célul, mivel ez a szakasz jelentős szerepet játszik a lefúvatott robbanások és a lefúvásos védelmi berendezések nyitónyomásának leírásában. Kutatásaim során nem céloom a robbanási folyamat teljes szimulációja, mindössze olyan eszközként kívánom alkalmazni, amely feltétlenül szükséges a lefúvásos védelemmel kapcsolatos vizsgálatok elvégzéséhez. További cél, hogy az általam kidolgozott módszer más, az ipari gyakorlatban jellemzően előforduló robbanóképes gázok esetére szintén alkalmazható legyen.

A lefúvatott robbanásokkal kapcsolatos kutatások elvégzéséhez az általam kialakított, zárt téri vizsgálatra alkalmas laboratóriumi mérési eljárás módosítása szükséges. Ennek érdekében elkészíték egy olyan hasadóelemet és annak befogószerkezetét, amely a mérőkörbe illesztve alkalmas a lefúvatott robbanások vizsgálatára, valamint kidolgozom annak előkészítési eljárását. A mérőkört különböző hosszúságú lefúvató csatornákkal egészítem ki, hogy a lefúvatott robbanásokat lefúvóvezeték nélkül, majd kétféle hosszúságú lefúvóvezetékkel vizsgálhassam, amelyekhez szintén propán-levegő keveréket alkalmazok.

Mérési eredményeim segítségével megvizsgálom, hogy az MSZ EN 14491:2013 és NFPA 68:2018 szabványok lefúvató csatorna alkalmazása mellett megnövekedett redukált nyomásra vonatkozó összefüggései a vizsgált geometriák és gázkeverék-összetételek esetén milyen pontossággal közelítik a mért nyomásmaximum-értékeket. Amennyiben szükséges, céloom, hogy az MSZ EN 14994:2007 és az NFPA 68:2018 szabványban szereplő összefüggések mintájára kidolgozzak egy új összefüggés meghatározására alkalmas eljárást a lefúvató csatorna használata mellett fellépő, megnövekedett redukált nyomásmaximum számítására.

Továbbá, a lefúvatott robbanásokra vonatkozó eredményeim felhasználásával meghatározom a lefúvóvezeték által okozott ellenállás mértékét és abban a csősúrlódási veszteség részarányát. Ennek eszközeként megvizsgálom a csősúrlódásból származó nyomásvesztések összefüggéseinek alkalmazhatóságát a lefúvatott robbanásokra, valamint számszerűsítem az egyéb hatásokból eredő veszteségeket is. Továbbá vizsgálom a másodlagos robbanás helyét és maximumértékét, valamint a lefúvatás során a csatornában kialakuló nyomáscsúcsok nagyságát.

## 2. fejezet

# Szakirodalmi és szabványi háttér áttekintése

### 2.1. Zárt térben végbemenő robbanások

A fejezetben bemutatom a zárt téri robbanások bekövetkezésének feltételrendszerét és a robbanási nyomásgörbe jellegzetes értékeit. Összefoglalom a robbanási károk mérséklésének lehetőségeit, amelyek közé a későbbiekben vizsgált lefűvásos védelem is tartozik. Ezután a lezajló folyamatok megismeréséhez áttekintem a por- és gázfelhőben történő lángterjedés mechanizmusait és annak jellegzetes értékeit. Végül ismertetem az értékek meghatározására szolgáló jelentősebb szimulációs módszereket.

#### 2.1.1. A robbanás bekövetkezésének feltételrendszere

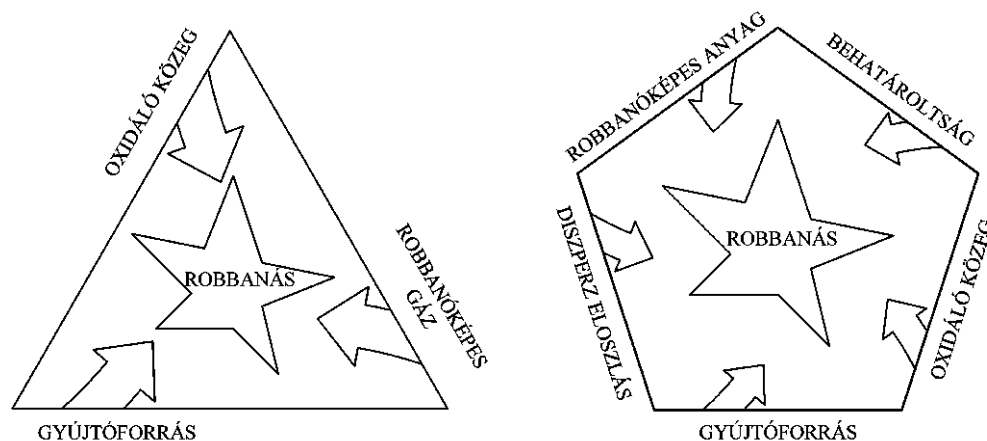
Az égés feltételrendszerének széles körben ismert neve az úgynevezett „égési háromszög”, amely magában foglalja azt a kritériumot is, miszerint három tényezőnek térben és időben egyszerre kell rendelkezésre állnia ahhoz, hogy az égés bekövetkezzen.

Az éghető anyag lehet gáz (például metán), gőz (például etanol gőze, különböző oldószerek) vagy por (például napraforgómag-héj pora). Az oxidáló közeget leggyakrabban a levegő oxigéntartalma adja, bár más közegek is hatékonyan segítik a gyulladást (például nitrogén-oxid vagy klór). Gyújtóforrásokból 13-féle típust különítünk el [4], ezek közül a leggyakoribbak a következők: forró felületek, mechanikus szikrák, láng, elektromos szikra, elektrosztatikus feltöltődés, kémiai reakciók és öngyulladás stb. Röviden, gyújtóforrásként funkcionálhat bármi, ami elegendő energiát képes biztosítani a gyulladás bekövetkezéséhez.

Ha az éghető anyag homogénen egyesül az oxidálószerrel és a gyújtóforrás is rendelkezésre áll, akkor bizonyos körülmények között az égési folyamat akár néhány tíz milliszekundumon belül is befejeződhet, és zárt térben (légköri nyomásról indulva) akár 10-12 bar<sub>g</sub> nyomás-emelkedést okozhat. Eckhoff definíciója szerint robbanásnak nevezzük azt az exoterm kémiai folyamatot, mely egy véges térfogatban következik be hirtelen és jelentős nyomásnövekedés kíséretében [5].

Gáz-levegő keverékek esetén a robbanás létrejöttéhez továbbra is az égésnél említett három feltétel szükséges. Az égéshez képest az elsődleges különbség a folyamat sebességében van, így a feltételrendszert a 2.1. ábra bal oldalán látható „robbanási háromszög” mutatja be. Por-levegő keverékek esetén további követelmény, hogy a megfelelően apró részecskeméretű

robbanóképes por (definíció szerint  $\leq 500 \mu\text{m}$ ) a megfelelő koncentrációban és eloszlásban álljon rendelkezésre. Ezen körülmények egyidejű, zárt térben való fennállása miatt a feltételrendszer elterjedt neve a „robbanási ötszög”, amely a 2.1. ábra jobb oldalán látható.



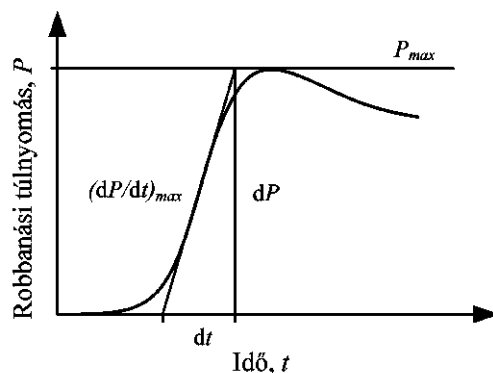
2.1. ábra. A gázrobbanás (balra) és a porrobbanás (jobbra) bekövetkezésének feltételrendszere

További különbségek is tapasztalhatók az egyes közeztípusok között. A porok fizikai-kémiai tulajdonságai jelentős szórást mutatnak attól függően, hogy lerakódott rétegben vannak jelen, vagy homogén porfelhőt alkotnak. Az előbbiek megfelelő hőmérsékletű felületen képesek izzásba jönni vagy bomlani, míg a porfelhő izzó anyaggal vagy meleg felülettel történő érintkezés által robbanhat. Az elsődleges robbanásveszély tehát lebegő porok esetén alakul ki, mert ebben az esetben lehet jelen a robbanáshoz szükséges arányú tüzelőanyag-levegő keverék. A leülepedett por az esetleges izzáson felül óriási másodlagos veszélyt rejt magában, hiszen bármilyen légmozgás, vagy más érkező nyomáshullám a nyugvó port is felkeverheti, másodlagos robbanást okozva [5].

Robbanási tulajdonságok szempontjából a gázok könnyebben alkotnak homogén keveréket a levegővel, így ez esetben nem kell tartani a leülepedett közeg felkeveredésével létrejövő másodlagos robbanásoktól. Itt az el nem égett gáz friss oxigénnel való keveredése okozhat másodlagos robbanást.

### 2.1.2. A robbanási nyomásgörbe jellegzetes értékei

A robbanási folyamat zárt térben való bekövetkezése során – függetlenül attól, hogy por vagy gáz a robbanóképes közeg – a reakció hevességéről a maximális robbanási túlnyomás ( $P_{max}$ ) és a maximális nyomásemelkedési sebesség ( $(dP/dt)_{max}$ ) adnak információt, a 2.2. ábra szerint.



2.2. ábra. Adott koncentrációjú robbanóképes elegy nyomásnövekedési karakterisztikája zárt térben, és annak jellemző 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 ugyanis nem kell robbanásveszéllyel számolni.

A maximális robbanási nyomás és a nyomásemelkedési sebesség ezen határokon belül is változnak, az esetek nagy részében egy-egy jól behatárolható maximumértékkel. A megfelelő védelem kialakításánál a cél értelemszerűen a legkedvezőtlenebb eset megállapítása, így a tervezés során ezen görbék maximumértékei veendőek figyelembe.

A robbanási tartományon belül a por-levegő vagy gáz-levegő keverékek robbanása esetén meghatározott nyomásemelkedési sebességek maximumértékéből nyerhető a robbanási konstans, más néven a deflagrációs index ( $K_{St}$  porokra,  $K_G$  gázokra). Számítása a „kőbös törvény” alapján történik, a (2.1) összefüggés szerint. Ez az érték megegyezik azzal a maximális robbanási nyomásemelkedéssel, amely az adott anyag esetén, 1 m<sup>3</sup> térfogatú köbös edényben adódna meghatározott körülmények között, így ennek ismeretében az egyes porok robbanási hevessége egymással összehasonlíthatóvá válik.

$$K = \left( \frac{dP}{dt} \right)_{max} \cdot V^{1/3} \quad (2.1)$$

A deflagrációs index értékeit figyelembe véve a porok három veszélyességi osztályba sorolhatók: St-1, St-2, St-3 osztályokba. Amennyiben az adott porra jellemző robbanási konstans zérus, a por nem robbanóképes. Gázok és gőzök esetén ilyen alapon történő osztályba sorolás az ipari gyakorlatban nem használatos. Mind a por-, mind a gázkeverékek tulajdonságait számos tényező befolyásolja, így az aktuális állapotuktól függően a laboratóriumi körülmények között megállapított tulajdonságaiktól jelentősen eltérő jellemzőket is mutathatnak.

### 2.1.3. Robbanási károk mérséklésének lehetőségei

A robbanások megelőzése és a bekövetkezés esetén fellépő károk mérséklése az ipari gyakorlat egy rendkívül fontos területe, amely éppen ezért kiterjedt jogi szabályozással bír. Az alábbiakban ezt a keretrendszert ismertetem röviden.

### 2.1.3.1. EU direktívák és hazai jogszabályok

Az Európai Parlament és a Tanács 1999/92/EK irányelve a robbanásveszélyes légkör kockázatának kitett munkavállalók biztonságának és egészségvédelmének javítására vonatkozó minimumkövetelményekről [6] kimondja, hogy a munkáltató kötelezettségei közé tartozik a robbanások megelőzése és a robbanásvédelem, valamint a robbanási kockázatok felmérése. Ezekkel összhangban az irányelv megállapítja a robbanásveszélyes légkör kockázatának kitett munkavállalók biztonságára és egészségvédelmére vonatkozó minimumkövetelményeket, amelyek megvalósulásának érdekében a munkáltató köteles az alábbi három alapelvvel összhangban védelmi intézkedéseket hozni.

- A robbanásveszélyes légkör kialakulásának megelőzése, azaz az elsődleges védelmi intézkedések alkalmazása. Ide tartozik a 2.1. ábrán látható robbanási ötszög vagy a robbanási háromszög legalább egy feltételének kiküszöbölése, például a robbanásveszélyes anyag kiváltása a technológiában, vagy inertizálás. 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, lefúvósos 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: robbanásterjedés szakaszolása, elkülönítése, az elfojtás, a lefúvatás, valamint a veszélyes készülék vagy üzembrész megfelelő létesítési helyének kiválasztása [7].

A robbanásbiztonság alapelveit minden résztvevőnek be kell tartani a biztonságos üzemelés megvalósításának érdekében:

- törvényhozási szinten: a vonatkozó EU direktívákkal összhangban megfelelő hazai jogszabályi háttér kidolgozásával, alapvető tervezési szabályok felállításával;
- gyártói szinten: jogszabályi előírások és egyéb tervezési szabályok betartása útján;
- felhasználók szintjén: gyártói előírások szerinti beszerelés, üzemeltetés és karbantartás eszközeivel;
- minden résztvevőre vonatkozóan: személyes felelősség és elővigyázatossági intézkedések megtételével.

Az 1999/92/EK irányelv hazai jogrendbe való átültetését és alkalmazását szolgálja többek között az 54/2014. (XII. 5.) BM rendelet az Országos Tűzvédelmi Szabályzatról [8] (röviden: OTSZ), valamint szorosan kapcsolódik hozzá például az 1993. évi XCIII. törvény a munkavédelemről [9], a 3/2003. (III.11.) FMM-ESzCsM együttes rendelet a potenciálisan robbanásveszélyes környezetben levő munkahelyek minimális munkavédelmi követelményeiről [10], vagy a 2011. évi CXXVIII. törvény a katasztrófavédelemről és a hozzá kapcsolódó egyes törvények módosításáról [11].

Az OTSZ robbanásvédelemmel kapcsolatos fejezetében lefektetett követelmények célja a magasabbrendű EU direktívával összhangban az életvédelmi, közösségi értékvédelmi és tulajdonosi értékvédelmi célok teljesülése. Ennek érdekében megjelenik követelményként a robbanásveszélyes terek robbanásvédelmi zónába sorolása, valamint a robbanásveszélyes zónák nagyságának, alakjának, minőségének és a telepített berendezések megengedett legmagasabb felületi hőmérsékletének meghatározása is. A rendelet továbbá a hazai jogrendbe ülteti át a robbanásvédelem három alappilléret is, valamint kimondja, hogy a megfelelően kialakított tűz- és robbanásvédelmi szint folyamatos fenntartása és az előírások betartása az üzemeltető feladata.

### **2.1.3.2. Tűzvédelmi Műszaki Irányelv**

A jogszabályi háttér leggyakrabban nem közöl konkrét utasítást vagy megoldási módot a követelmények teljesítésére, ezekre más dokumentumok adnak ajánlást. A tűz- és robbanásvédelem területére vonatkozó Tűzvédelmi Műszaki Irányelv (a dolgozat készítésekor a TvMI Robbanás elleni védelem című témakörének aktuális verziója: 13.3:2022.6.13.) [4] a robbanás elleni védelem jogszabályi követelményeit teljesítő műszaki megoldások részletes ismertetése. Ennek megfelelően a TvMI szerint az OTSZ-ben meghatározott biztonsági szint a következő megoldásokkal érhető el:

- tűzvédelmet érintő nemzeti szabvány betartásával,
- a TvMI-kben kidolgozott műszaki megoldások, számítási módszerek alkalmazásával, vagy
- a TvMI-től vagy a nemzeti szabványtól részben vagy teljesen eltérő megoldással, ha az azonos biztonsági szintet a tervező igazolja.

Az irányelvek a robbanások elkerüléséhez a robbanás elleni védelem alkalmazása során először a feldolgozott, tárolt, szállított vagy előállított anyagok közül a robbanásveszélyes tulajdonságokkal rendelkezőkre vonatkozóan a – már az 1999/92/EK direktívában is meghatározott – zónabesorolás elkészítésére, az egyes zónákon belül alkalmazható telepített és üzemeltetett robbanásbiztos kivitelű villamos és nem villamos gyártmányokra, a munkafolyamatok megtervezésére, valamint az esetlegesen ezek ellenére bekövetkező robbanások hatása elleni védelem alkalmas műszaki megoldásaira, többek között a lefűvasos robbanásvédelmi intézkedések kivitelezésére adnak konkrét számítási módokat és eljárásrendet.

### **2.1.3.3. Szabványi háttér**

Ahogy a TvMI is javasolja, nem csak 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 teljesség igénye nélkül:

- MSZ EN 1127-1:2019 szabvány (Robbanóképes közegek. Robbanásmegelőzés és robbanásvédelem. 1. rész: Alapelvek és módszertan),
- MSZ EN 13237:2013 szabvány (Potenciális robbanásveszélyes közegek. A potenciális robbanásveszélyes közegekben való használatra tervezett berendezések és védelmi rendszerek szakkifejezései és meghatározásuk),
- MSZ EN IEC 60079-10-1:2021 szabvány (Robbanóképes közegek. 10-1 rész: Térségbesorolás. Robbanóképes gázközegek),
- MSZ EN 60079-10-2:2015 szabvány (Robbanóképes közegek. 10-2: rész: Térségek osztályozása. Robbanóképes poros közegek),



- MSZ EN ISO/IEC 80079-20-1:2020 szabvány (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) [12]. Előírásai szerint az adott berendezés akkor őrzi meg integritását egy bekövetkező robbanás során, ha megfelelő tervezéssel ellenáll a robbanási nyomásnak vagy nyomáshullámnak. Mivel azonban a robbanás dinamikus folyamat, így egy-egy készülék esetén a megengedett feszültségek számítása is eltérő lehet a statikus nyomásra való méretezéstől. Ekkor a mérvadó tervezési állapotok az alábbiak lehetnek:

- maximális robbanási nyomásra való tervezés vagy,
- redukált nyomásra való tervezés lefúvásos védelemmel vagy elfojtással kombinálva.

A szabvány kitér a szerkezeti anyagoktól elvárt tulajdonságokra, valamint a megengedett feszültségek számítására tervezési és próba állapotban, ezen kívül ismerteti a próbanyomás értékek meghatározásának módját is.

Az említett lefúvásos védelmi eszközökre vonatkozik az MSZ EN 14797:2007 szabvány (Robbanásvédelmi szellőztetőeszközök) [13], amely a következő típusokba sorolja azokat:

- többszörhasználatos elemeket tartalmazó lefúvásos védelmi eszközök:
  - automatikusan visszazáró eszközök: súly- vagy rugóterhelésű robbanóajtók,
  - nem automatikusan visszazáródó eszközök: kihajlórudas eszközök,
- egyszerhasználatos elemeket tartalmazó lefúvásos védelmi eszközök: hasadópnelek, hasadótárcsák.

A szabvány kitér továbbá az ellennyomással szembeni támaszok típusaira (nyíló és nem nyíló kivétel), a lefúvásos védelmi berendezések jellemző értékeinek vizsgálati módjára (nyitónyomás, működésvizsgálat, mechanikai szilárdság és lefúvási teljesítmény); valamint ezen berendezések kötelező jelöléseiről, feltüntetendő adatairól és csomagolásának módjáról is rendelkezik.

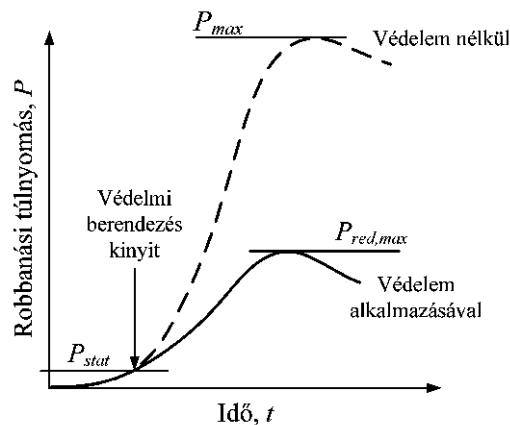
Hazánkban a hatékony lefúvatáshoz szükséges nyílófelületek nagyságát, valamint az azok kiegészítő elemeivel – lefúvóvezetékekkel, terelőlemezekkel – szemben támasztott alapvető követelményeket gáz-levegő keverékek esetén az MSZ EN 14994:2007 szabvány (Gázrobbanás elleni szellőztetőeszközök védelmi rendszerek) [14], míg por-levegő keverékek esetén az MSZ EN 14491:2013 szabvány (Szellőzőnyílásos porrobbanás-védelmi rendszerek) [15] határozza meg.

#### 2.1.4. A lefúvásos védelem

Ahogy az előbbiekben bemutatott jogszabályi és szabványi háttér is utal rá, ha a zárt térben bekövetkező robbanás megfelelően lefúvatásra kerül, annak kedvezőtlen hatása minimalizálható, gyakran teljes mértékben kiküszöbölhető. Mivel disszertációmban a lefúvásos védelemmel kapcsolatos kutatásaimat mutatom be, azon belül pedig a hasadótárcsával történő lefúvatást vizsgáltam, így a káros túlnyomás kialakulása elleni intézkedések ezen témakörével foglalkozok a továbbiakban.

A lefúvatás biztonságtechnikai szempontú megközelítése röviden a következő: por- vagy gázrobbanás esetére a szerkezeten annak teherviselő-képességénél alacsonyabb nyitónyomású elemeket helyeznek el. Ezek megfelelő méretezése esetén a robbanás korai szakaszában (névlegesen a  $P_{stat}$  statikus aktivációs nyomás elérésekor) kinyílnak, és elvezetik a lángokat, el nem égett anyagokat és égéstermékeket, így mérsékelve biztonságos értékig a nyomást a készülék, berendezés vagy épület belsejében (2.3. ábra). A várható maximális robbanási

nyomás ( $P_{max}$ ) helyett így kialakuló redukált maximális robbanási nyomás ( $P_{red,max}$ ) nem haladhatja meg a szerkezet teherviselő-képességét. Sun és mtsai. [16] munkájából kitűnik, hogy a készülék belsejében mért maximális redukált nyomás a tér különböző pontjaiban azonos értékűnek vehető. Maga a robbanás ezzel nem szűnik meg, azonban annak káros következményei jelentősen mérséklődnek. Továbbá, a lefúvatást követően az elvezetett lángok és nyomáshullámok által okozott hatásokkal is számolni kell.



2.3. ábra. A zárt térben bekövetkező és lefúvatott robbanások nyomásgörbéi [3]

Az általam vizsgált, lefúvásos védelmet ellátó berendezések közé tartozó a hasadótárcsák és -panelek kis tömegűek, és szinte tehetetlenség nélkül reagálnak a nyomásemelkedésre. Működésbe lépésükkor ellenállásuk pillanatnyi, mindössze néhány milliszekundumon belül megkezdődik a készülék mentesítése, elvezetve az elégett és el nem égett anyagokat, valamint az égéstermékeket melyek nyomásnövekedésükkel károkat okoznának a szerkezetben [3]. Alkalmazásukkal kétféle cél valósítható meg:

- kiváltható a berendezések szükségtelen szilárdsági túlméretezése,
- előre meghatározható és korlátozható a lefúvatás folyamata.

A nyitás pillanatára vonatkozó meghatározott nyomásérték a már említett statikus aktivációs nyomás ( $P_{stat}$ ), az a túlnyomás, amely aktiválja a hasadótárcsát vagy a robbanóajtót. Meghatározása legfeljebb 0,1 bar/min nyomásemelkedési sebességgel történő terheléssel történik. Definiálható a dinamikus aktivációs nyomás ( $P_{din}$ ) is, amely az a nyomás, amely aktiválja a hasadótárcsát vagy a robbanóajtót robbanás esetén. Ez általában kisebb, mint a statikus aktivációs nyomás értéke [15]. A kettő közül a hasadófelületek gyártó által megadott és ismert paramétere a statikus aktivációs nyomás.

Igény szerint a szükséges nyílófelület több panel vagy tárcsa együttesének felhasználásával is kialakítható. Ekkor a lefúvófelületeket a védett készüléken úgy kell elhelyezni, hogy működésük közben fellépő erőhatások lehetőleg kiegyenlítsék egymást. Legelterjedtebb szerkezeti anyagaik a különböző fémötvözetek, de készülhetnek polimerekből vagy akár grafitból is.

A hasadófelületek a távozó közeg, a kicsapó lángok hatásainak mérséklésére kiegészítő elemekkel is elláthatók, amelyek ellenállásként jelentkeznek a lefúvatással szemben. A lángok

hatásainak mérséklésére alkalmazhatók például a lángzárak vagy a Q-csővek, míg a távozó közeg irányítására használhatók a terelőlemezek és/vagy a lefúvató csatornák.

### 2.1.5. Nyomásemelkedés, robbanóképesség, robbanási határok

A zárt térben bekövetkező és a lefúvatott robbanások közben lezajló folyamatok pontos leírásához és megértéséhez a következő alfejezetekben ismertetett jellemzők tárgyalása szükséges.

#### 2.1.5.1. Égés és robbanás, deflagráció és detonáció

Az égés Turns [17] szerint olyan gyors oxidációs folyamat, mely hőfelszabadulással, vagy egyidejű hőfelszabadulással és fényjelenséggel jár; vagy pedig lassú oxidáció mely relatíve kismértékű hőfelszabadulással, látható fényjelenség nélkül megy végbe. A robbanás egy részben gyors égésnek tekinthető, szintén energiafelszabadulással járó kémiai reakció. Am robbanás az a folyamat is, amelynek során az anyagok fizikai állapotjelzői hirtelen megváltoznak, és nagy mennyiségű energia szabadul fel, de a komponensek nem szenvednek kémiai átalakulást. Így kétféle típusát különböztethetjük meg, a közben lezajló változások alapján: fizikai és kémiai robbanást. Zárt rendszerű és lefúvatott robbanási folyamatok esetén a két mechanizmus együttesével számolhatunk, változó arányban. Hevességét tekintve a lángterjedés kétféle módon zajlik : deflagráció és detonáció.

- Deflagráció: a legáltalánosabb lángterjedési mód. Az el nem égett gázhoz viszonyítva hangsebesség alatti lángterjedési sebességgel jellemezhető reakció, melyben a tipikus lángterjedési sebesség (az álló megfigyelőhöz képest) 1 és 1000 m/s közé esik.
- Detonáció: ez esetben az el nem égett gázhoz viszonyított hangsebességnél nagyobb sebességű lángterjedéssel jellemezhető a folyamat. A deflagráció a lángterjedés és egyéb részecskemozgási folyamatok következtében átalakulhat detonációvá (angol nyelvű irodalmakban: DDT, azaz Deflagration to Detonation Transition).

A Magyarországon bevett gyakorlat szerint más értékekkel számolhatunk. A 54/2014. (XII. 5.) BM rendelet az Országos Tűzvédelmi Szabályzatról szerint a robbanás „nagy sebességű égési folyamat, ahol a mozgó lángfront sebessége 10 m/s vagy afelett van, de 100 m/s-nál kisebb.” [8]. A Tűzvédelmi Műszaki Irányelv szerint pedig a detonáció esetén „a lángfront terjedési sebessége nagyobb, mint 340 m/s” [4].

Disszertációmban bővebben a deflagráció fogalmkörébe tartozó reakciókat tárgyalom, így ahol külön nem teszek erről említést, a továbbiakban használt „robbanás” kifejezés is erre vonatkozik.

#### 2.1.5.2. A por- és gázrobbanások közötti hasonlóságok és különbségek

A robbanás és az aközben lejátszódó folyamatok modellezéséhez szükséges a folyamat közben fellépő jelenségek pontos ismerete. Mivel azonban az egyes részfolyamatok tárgyalása gázrobbanás esetén egyszerűbb modellekhez vezet, így fontos a por- és gázrobbanások hasonlóságainak és különbségeinek tárgyalása is. A szakirodalom szerint a megfelelő megfontolások megtételével a porrobbanások is elemezhetők a gázkeverékek robbanására érvényes eszközök segítségével.

Eckhoff vizsgálatai alapján [18] a kialakult homogén porfelhőkben és gázfelhőkben lejátszódó folyamatok alábbi paraméterei lényegében rendkívül hasonlóak egymáshoz:

1. gyulladási/robbanási határok,
2. lamináris lángterjedési sebességek és elhalási hosszok,
3. a lángterjedési sebesség változása a helyi turbulencia függvényében,
4. a detonációba való átmenet lehetősége,
5. az adiabatikus, állandó térfogaton végbemenő robbanási nyomások maximumértékei,
6. jól definiálható és mérhető minimális gyújtási energiák,
7. jól definiálható és mérhető minimális gyulladási hőmérséklet adott mérési körülmények között.

A porfelhő keletkezésének és fennmaradásának fizikája alapvetően eltér a gázfelhőétől. Egy gázkeverék kialakulása esetén a robbanás bekövetkezik, ha annak összetétele az alsó és felső robbanási határok között van, lángterjedési tulajdonságai a keveréken belül nem mutatnak ugrásszerű változásokat. Ezzel szemben a por-levegő keverék lángterjedési tulajdonságai a dinamikusan változó porfelhő adott pontbeli koncentrációjától és homogenitásától függenek.

A különbségek oka a porszemcsék és gázmolekulák eltérő mozgásdinamikája. A robbanóképes gáz- vagy ködfelhő kvázi-homogénean keveredik a levegővel és az is marad a molekulák véletlenszerű mozgása révén. Ezzel szemben a por-levegő keverékekben a porszemcsék és a levegő gázmolekuláinak mérete nagyságrendekkel eltér egymástól, így mozgásukat olyan külső erők határozzák meg, mint a gravitációs vagy a tehetetlenségi erő. Ezen felül a gázmolekulák közötti ütközés rugalmas, viszont a porszemcsék ütközésük révén összetapadhatnak és ülepedhetnek.

Míg az iparban használatos készülékek belsejében könnyen fennmarad a robbanóképes homogén por-levegő elegy, addig szabad térben ezek fennállása rövid ideig tart. (Kivételt képeznek például a pneumatikus szállítórendszerek szivárgási helyei, ám ekkor a robbanóképes koncentrációjú felhő igen kis térfogatban van tartósan jelen.) Továbbá, a lebegő részecskék zárt térből való kijutását is számos tényező akadályozza. A részecskék méretüknél fogva is lényegesen nagyobb (minimum körülbelül 1 mm széles) réseken képesek áthaladni, mint a gázmolekulák. A porszemcsék a járatok falán ki tudnak válni, elzárva a további szemcsék útját. A mégis átjutó részecskék a hirtelen megnövekvő áramlási keresztmetszet miatt veszítenek a sebességükből és azonnal elkezdnek ülepedni [18]. A leülepedett por innentől egy másfajta veszélyt hordoz magában: a másodlagos robbanás lehetőségét.

Ezen kívül a porfelhőben a szemcsék nagyobb tehetetlensége és a gáz fázishoz viszonyított elmozdulása helyi koncentráció-változásokat eredményezhet. Továbbá, a lángoktól az el nem égett porfelhő irányába hősugárzás alakul ki a részecskék anyagától függő mértékben, amely szintén befolyásolja a helyi részecskemozgási jelenségeket.

### 2.1.5.3. Robbanóképességet befolyásoló tényezők

Számos, az adott közeg robbanóképességét befolyásoló tényező ismert, ezek közül a következőkben részletezettek [19, 20] határozzák meg leginkább a keverékek robbanási tulajdonságait. A felsorolásból kitűnik, hogy a szemcseméret és a poreloszlás hatása mindössze porok esetén bír jelentőséggel, míg a többi tulajdonság mind a porok, mind a gázok esetén befolyásolja a vizsgált jellemzőket.

**A szemcseméret hatása** A szilárd anyagok szemcséi között a lángterjedés kétféle módon következhet be.

1. Az első, hogy a szemcsék által kibocsátott gyúlékony gázok égésével a részecskék elgőzölgésig melegszenek. Az elgőzölgés állapotába Beda szerint [21] összesen ötféle módon kerülhet a szemcse.
2. A második típus a részecskék felszínén végbemenő direkt oxidáció [22].

A legtöbb, iparban használatos por az első mechanizmussal ég, viszont az anyagalmaz nagyobb méretű szemcséi nem vesznek részt kielégítő mértékben a lángterjedési folyamatban [23]. Ennek oka, hogy a finomabb részecskék nagyobb fajlagos felülettel rendelkeznek, könnyebben eloszthatók levegőben és hosszabb ideig lebegnek. Amennyiben a lebegés közben agglomerátumokká állnak össze, ismét nagyobb szemcseméretű részecskére jellemző tulajdonságokat mutatnak.

Rendkívül apró szemcseméret esetén a lángterjedés mechanizmusa a lángterjedés mechanizmusa általában véve hasonlóságot mutat az előkevert gázok esetével.

**A robbanóképes anyag típusa és koncentrációja** A robbanóképes porok és gázok is csak az alsó és felró robbanási határaik (LEL – Lower Explosion Limit; UEL – Upper Explosion Limit) között képesek robbanni [24]. Lebegő porok esetén a robbanás alsó határa általánosságban  $50 - 100 \text{ g/m}^3$ , felső határa pedig  $2 - 3 \text{ kg/m}^3$  [25]. Gázok esetén ez a tartomány jóval kevésbé behatárolt.

A felső robbanási határ értelmezése porok esetén az ipari gyakorlatban kisebb súllyal esik a latba, mivel a nagyobb koncentrációjú por-levegő keverékben a szemcsék könnyedén leülepedhetnek. Gázkeverékek esetén ilyen típusú szeparációval nem kell számolni, ott a nyílt térben fellépő légmozgás és a diffúziós terjedés könnyen a robbanóképes tartományba hígíthatja az elegyet. A robbanóképes koncentráció-tartomány felső határát a robbanáshoz szükséges oxigén minimális mennyisége szabja meg. Ilyen szempontból a legkevésbé reaktív gáz a metán, míg például a hidrogén robbanása kifejezetten heves robbanást okoz [20]. A legnagyobb maximális robbanási nyomás és nyomásemelkedési sebesség értéket a tüzelőanyagban enyhén gazdag keverék adja.

**Oxidáló komponens koncentrációja** A por- és gázrobbanásos esetek során az oxidáló közeg általában a környezeti levegő oxigénje. A  $21 \text{ V/V\%}$ -nál nagyobb oxigénmennyiség növeli a közeg égési sebességét, annál kisebb pedig csökkenti. Általánosságban elmondható, hogy a lángok csak  $10 \text{ V/V\%}$ -nál nagyobb oxigéntartalom esetén maradnak fenn stabilan, és hogy a közegek felső robbanási határa jelöli ki az adott anyag robbanásához szükséges oxigén mennyiségét [19].

Az égés és robbanás folyamatát a lángterjedés fizikai-kémiai részfolyamatai határozzák meg, amelyeket a 2.1.6. fejezetben tárgyalok.

**Gyulladás hőmérséklet** Adott keverék egyik jellemző értéke a porfelhő minimális gyulladási hőmérséklete (MIT – Minimum Ignition Temperature), az a legkisebb hőmérséklet amelyen a keverék forró felület környezetében még éppen begyulladhat. Értéke a nedvességtartalommal, valamint a hozzáadott inert anyag koncentrációjával arányosan növekszik, azonban csökken a nagyobb illóanyag-tartalom, kisebb szemcseméret, magasabb oxigén-koncentráció és nagyobb porréteg-vastagság hatására [19]. Látható, hogy a gyulladási hőmérséklet nem

csak a robbanóképes anyag, hanem a rendszer jellemzője is, ezért csak hőmérséklet-határok között adható meg. Befolyásolja az keverék összetétele, gázok esetén általában a sztöchiometriai arányúhoz közeli összetételeknél a legkisebb [25].

**A turbulencia hatása** Eredete szerint a turbulencia két típusra osztható. A kezdeti turbulencia a por feldolgozásából és kezeléséből adódik, valamint a kezdeti gázáramlásból kifolyólag lehet jelen. Egy kevésbé turbulens közeg gyulladásakor kezdetben a hőenergia felszabadulása viszonylag kis helyre koncentrálódik, mivel terjedése és disszipációja is alacsony sebességgel megy végbe. A folyamat közben ráadásul a porszemcsék ülepedése helyi inhomogenitásokat okoz, míg gázok esetén ez utóbbi hatással nem kell számolni. Egy erősen turbulens felhő eleve homogéneen tartalmazza a lebegtetett port vagy az eloszlatott gázt, meggyulladás esetén pedig a turbulencia elkeveri a forró égő és elégett anyagokat a friss keverékkel. Így a láng gyorsan terjed, heves robbanást okozva.

A második típusba tartozó turbulencia a robbanási folyamat során alakul ki. Az áramlás sebessége, az elégett gázok expanziója és az áramlási tér geometriai változásai határozzák meg az örvényesség mértékét. A két típus egymáshoz való viszonyára igaz, hogy a lángfront által generált turbulencia a kezdeti zavaroknál sokkal nagyobb mértékű [26].

Di Benedetto és mtsai. [27] kísérleti úton bizonyították, hogy a robbanási konstans értéke a kezdeti turbulencia növekedésével arányosan növekszik. Ugyanakkor azt is kimutatták, hogy ez a tényező mérsékelt hatással van a zárt téri maximális robbanási nyomás értékére.

**Hozzáadott inert anyag koncentrációja** Chatrathi és Going [28] kísérletei rámutattak, hogy éghető és inert anyagból álló porkeverékek esetén felvehető úgyszerűsített égési inertizálási görbék mind a porkoncentráció, mind az inert anyag koncentrációjának függvényében. Ezen görbék porok és gázok esetén is igen hasonló karakterisztikát mutatnak, és a következő paraméterekkel jellemezhetők: alsó és felső gyulladási határ és minimális inertizálási koncentráció (Minimum Inerting Concentration). Az elfojtással kapcsolatos eredmények azt mutatják, hogy a nagy robbanási konstanssal jellemezhető anyagok porai és a fémporok kiolthatók, és a maximális robbanási nyomás értéke a védelem kialakításához szükséges szintre csökkenthető.

**Gyúlékony gázok jelenléte** Ha gyúlékony gáz is jelen van a keverékben, a közeg robbanóképessége fokozódik. A minimális robbanóképes koncentráció, a minimális gyújtási energia és a legkisebb gyulladási hőmérséklet csökkennek, míg a robbanási nyomásemelkedés maximuma emelkedik. Így a gyúlékony gáztartalom olyan port is robbanóképesé tud tenni, mely a minimális robbanóképes koncentrációja alatt van [29]. Szénhirdogének porokkal való keverése esetén La Chatelier keverési törvénye alkalmazható [23].

**Poreloszlás és gyújtási pozíció hatása** Hauert és mtsai. [30] a por eloszlásának hatását vizsgálták a robbanási jellemzőkre.  $12\text{ m}^3$  térfogatú siló segítségével megállapították, hogy a hossz tengelyen történő betároláshoz képest sokkal kisebb szállópor-koncentráció érhető el a siló felső peremén vízszintes irányból történő töltés alkalmazásával. Ezen kívül különböző magasságokban begyűjtve a port, megállapították, hogy a láng minél hosszabb utat tesz meg a készülék belsejében, úgy lesz a robbanási nyomás maximuma egyre nagyobb. Ezekre a tényezőkre a porrobbanásra vonatkozó, lefűvósos védelemről szóló szabványok is kitérnek.

**Gyújtóforrások** A lehetséges gyújtóforrások hőmérsékletükben, energiájukban és intenzitásukban is különböznek, így hatásuk a robbanási paraméterekre igen összetett. A sugárszerű és a térbeli kiterjedéssel rendelkező gyújtóforrások magasabb robbanási túlnyomásokat eredményeznek, mint a síkbeli vagy pontszerű kiterjedéssel bíró gyújtóforrások. A gyújtóforrás helyzete szintén lényeges, de minden esetben a védendő szerkezet geometriájával összefüggésben kell vizsgálni [19].

**Készüléktérfogató hatása** Kisméretű készülékekben bekövetkező gázrobbanásakor a lángok ráncolódása (lásd 2.1.6.1. fejezet) és nyúlása közvetlenül a kamra falának elérése előtt következik be, így jelentős hatásuk van a robbanási konstans értékére. Minél kisebb a készülék űrtartalma, a befolyás annál erősebb. Porok esetén, ahol a láng ráncolódása normál esetben hosszabb út megtétele után következik be, a jelenség szükségszerűen nagyobb térfogatú készülékekben játszódik le. Ezért porvizsgálatok lebonyolításához legalább 16 liter űrtartalmú készülék alkalmazása ajánlott [31].

Yan és mtsai. [32] 22 és 110 liter űrtartalmú robbantókamrán mérésrel validált CFD (Computational Fluid Dynamics) szimulációs vizsgálatokat végeztek a készüléktérfogató hatásának vizsgálatára. Kimutatták, hogy adiabatikus körülmények között a vizsgált készüléktérfogatókban azonos mértékűre adódott a maximális robbanási nyomás, azonban a robbanás intenzitása az energiaveszteségek következtében a nagyobb készülékben kisebb volt. Később a konvektív hőátadás és a hőszugárzás figyelembe vételével már jelentősen változott a robbanás intenzitása. Megállapították, hogy a maximális robbanási nyomás a készüléktérfogattal arányosan növekszik, a nyomásemelkedési sebesség pedig összhangban a (2.1) köbös törvénnyel, csökken.

#### 2.1.5.4. Elsődleges és másodlagos robbanások

Amikor a robbanás feltételeit a robbanóképes anyag levegővel alkotott elegye teremti meg és a gyújtóforrást nem egy robbanás lángfrontja adja, a bekövetkező robbanást elsődleges robbanásnak nevezzük. Az elsődleges robbanás által okozott nyomáshullám felkavarja az terjedés irányába eső leülepedett port, amelyet azonnal be is gyújt. Az eseménylánc következhet például csővezetékekkel összekapcsolt készülékek között, vagy üzemek belsejében. A keresztmetszet-változások és az akadályok fokozzák a turbulenciát, amely a lángterjedési sebesség növekedését eredményezi, így a második robbanás hevesebb lehet mint az előző. Lunn és mtsai. [33] eredményei alapján az alábbi megállapítások tehetők.

- Általánosságban véve, az a robbanás amely egy adott méretű zárt térből indul és egy annál kisebb térbe terjed tovább, magasabb robbanási nyomást okoz mint a kiinduló térben.
- Készülékek közötti porrobbanás-terjedés nem minden esetben lép fel: minél kisebb átmérőjű az őket összekötő csővezeték, annál kisebb a másodlagos robbanás veszélye.
- Az egyik készülékben kialakuló robbanás nem szükségszerűen gyújtja be a hozzá kapcsolt készülékben lévő port. Ez a jelenség a második készülékben lévő por tulajdonságaitól, koncentrációjától, a második készülék robbanásvédelmétől, az összekötő vezeték átmérőjétől, az elsődleges robbanás hevesességétől, valamint az összekötő vezeték áramlási veszteségeitől, esetleges szerelvényeitől függ.

Továbbá, a másodlagos robbanás bekövetkezési valószínűsége a robbanási konstans értékével,

valamint a keletkező lángok nagyságával együtt növekszik [7].

Ezek a megállapítások gázok esetén is érvényesek azzal a különbséggel, hogy értelem-szerűen a másodlagos robbanás veszélyét a leülepedett por helyett a helyi gázszivárgások hordozzák magukban.

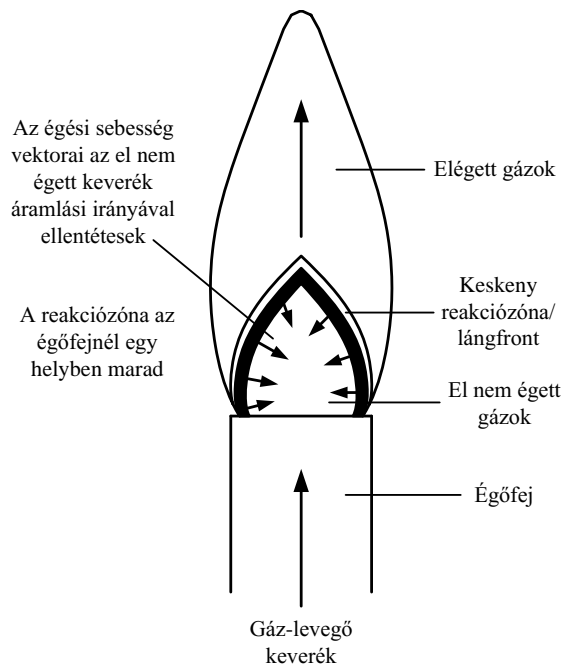
### 2.1.6. Por- és gázfelhőben történő lángterjedés mechanizmusa

A gyulladást követően, lánggal történő égés esetén egy jól elkülöníthető reakciózóna figyelhető meg, mely a robbanóképes keverékhez képest, azon keresztül halad előre, és égéstermék-eket hagy maga mögött. Ahogyan a láng keresztülhalad a friss keveréken, a hőmérséklet és a nyomás emelkedését okozza.

A lángterjedési mechanizmusokról szóló ismereteink jelentős része az előkevert gázkeverékek lángterjedésének vizsgálatából származik. Ezek kiinduló pontja minden esetben a zavartalan lamináris láng. Ehhez képest a valós por- és gázfelhőkben bekövetkező lángterjedés folyamatai jelentősen eltérőnek mutatkoznak.

#### 2.1.6.1. Lamináris lángterjedés

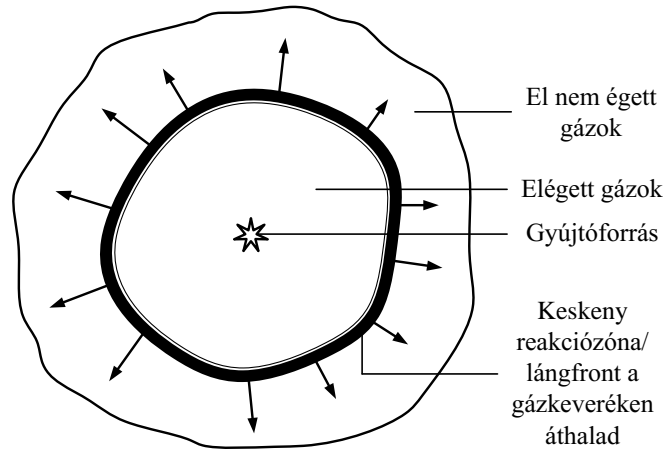
Nyugvó előkevert gázokban a forró égéstermék hűvezetés útján továbbítják a hőenergiát [34]. A hő kis része sugárzás útján terjed, ám ez általában nem haladja meg a teljes hőmennyiség néhány százalékát, így elhanyagolható. Mivel a hőcsere és az égés sebessége az adott keverékre jellemző, a robbanóképes anyag fogyási sebességének is a keverékre jellemző tulajdonságnak kell lennie. Ez a sebesség a robbanóképes anyag térfogati fogyási sebessége egységnyi lángfelületre vonatkoztatva, más néven az égési sebesség ( $S_f$ ). Amennyiben a friss keverék az égésnek megfelelő sebességgel pótlódik, a reakciózóna a fizikai térben nem mozdul, így álló lángról beszélünk (2.4. ábra).



2.4. ábra. Álló előkevert láng [35]



Ha a keverék áll és a láng halad előre, a lángfront sebessége az égéstermékek nyomásának és hőmérsékletének növekedése miatt változik, ez a lamináris lángterjedési sebesség ( $S_l$ , vagy  $S_{l,ad}$  ha a folyamat adiabatikus voltának kiemelésére is szükséges) (2.5. ábra).



2.5. ábra. Terjedő vagy robbanási láng [35]

Ahogy a fentebb leírásból is látható, az égési sebesség és a lamináris lángterjedési sebesség nem azonos paraméterek. Az égés kezdeti szakaszában, amikor még a láng izobár körülmények között halad előre, az égési sebesség ( $S_f$ ) és a lamináris lángterjedési sebesség ( $S_l$ ) között a (2.2) összefüggés áll fenn [36]:

$$A_f \cdot \rho_u \cdot S_l = A_f \cdot \rho_b \cdot S_f, \quad (2.2)$$

amelyből

$$S_l = \frac{\rho_b S_f}{\rho_u}. \quad (2.3)$$

Az  $E$  expanziós faktor (expansion factor) definíció szerint a gáz sűrűségváltozása a kiindulási állapothoz képest, így Brinzea és mtsai. szerint [37]:

$$E = \frac{\rho_u}{\rho_b} = \left( \frac{T_{f,p}}{T_0} \right) \left( \frac{n_e}{n_0} \right). \quad (2.4)$$

Az égés során bekövetkezett expanzió a lángfrontot maga előtt tolja és gyorsulásra kényszeríti, így a lángterjedési sebesség az égési sebesség és a közeg mozgási sebességének összegeként áll elő. A készülék fala mentén kialakuló Rayleigh-Taylor instabilitás turbulenciát generálhat. A faltól eltávolodva terjedő láng szintén instabil, a helyben lejátszódó mikrofolyamatok révén a lángfrontban kitüremkedések alakulnak ki. A keletkező égéstermékek a lángfrontra normális irányban terjednek, azaz annak konvex irányába, amely tovább növeli a front adott helyének görbületét (Darrieus-Landau instabilitás). Az enyhén ráncolódott lángfrontban a diffúziós folyamatok is kiegyensúlyozatlanul játszódnak le [38]. Az így kialakuló turbulencia tehát a reagensek és égéstermékek közötti fázisérintkezésnek kedvez, így gyorsítva a lángterjedést. A lángfront sejtes szerkezetűvé válik (cellular flame). A folyamat láncreakció-szerűen önmagát gyorsítja [39].

Dahoe és mtsai. [40] és Dahoe [41] vizsgálataik során a lamináris lángterjedési sebességet lézer Doppler anemometriás (LDA) mérések segítségével határozták meg, és úgy találták, hogy ez az érték a láng alakjának függvényében változik. Ez az eredmény vezetett a Markstein-hossz fogalmának bevezetéséhez, amely a láng nyúlásra adott válaszána mérőszáma, amely számos tényezőtől függ: a reagáló keverék anyagi tulajdonságaitól, a láng nyúlásától (ezzel analóg módon az ahhoz vezető transzportfolyamatoktól), a láng szerkezetének hatásaitól (adiabatikus vagy sugárzás vagy felületek miatt kialakuló, időben állandó vagy változó).

Proust [42] mérési eredményei rámutattak, hogy a lamináris lángterjedési sebesség széles koncentráció-tartományon maximumértéket vesz fel a sztöchiometriai arányú összetétel környezetében, globálisan pedig haranggörbe-szerű alakot mutat. Ez a megállapítás szintén egybevág a megfigyelt gázszerű lángterjedési mechanizmussal. Ugyanez a tulajdonság számos más kutató munkája segítségével is bizonyításra került [36, 43, 44].

Továbbá, Proust [45] vizsgálatai során megállapította, hogy a tényleges lánghőmérséklet akár néhány száz °C-kal kisebb is lehet, mint az elméleti maximális lánghőmérséklet. Az eltérésre kétféle lehetséges magyarázat adható: az első a láng hőszugárzása során fellépő hőenergia-veszteség a környezet (leginkább a környező tárgyak, falak) felé, a másik a tökéletlen égés. A hőszugárzással a környezetet felé leadott hőenergia-veszteség számítások szerint a teljes felszabaduló hőenergia 20–30%-ának csökkenését jelenti. Ráadásul, ilyen nagy hőmérsékletek esetén a reakcióban részt vevő komponensek disszociációjával is számolni kell, amely szintén csökkentheti a lánghőmérsékletet. A lánggal terjedő égés narancsos-sárgás fénye pedig a koromképződésnek tudható be, amely a reagáló komponensek tökéletlen keveredése miatt alakul ki. Azaz a tökéletlen keveredés egyszerre okoz jellegzetes fényjelenséget, koromképződést és entalpia-veszteséget a rendszerben.

### 2.1.6.2. Turbulens lángterjedés

A turbulens lángfront úgy jön létre, hogy a lamináris lángfront az örvények mentén torzul, így az össz lángfelület megnövekszik, a láng pedig ráncolódik. A ráncolódás mértéke a láng felületnövekedéssel szembeni teherviselő-képességétől függ, az úgynevezett lángnyúlási mechanizmus szerint (Williams, említve [39]-ben), amely rámutat hogy a túlzott nyúlás a láng adott helyen történő kialakulását eredményezheti.

Egy teljesen felépült turbulens áramlás kielégítően leírható a sebességingadozás  $u'$  intenzitásával (a sebességkomponensek négyzetes közepe), valamint a turbulens örvények hosszának  $L$  nagyságrendjével. Ha  $u'$  lényegesen nagyobb, mint  $S_{l,ad}$ , a robbanás gyorsan áthalad a közegeken, ekkor a tökéletesen kevert reaktor modelljével írható le a rendszer. Amennyiben  $u'$  az  $S_{l,ad}$  nagyságrendjébe esik, a kezdetben lamináris láng szerkezetét örvények zavarják meg, melyek hatással vannak a hőfelszabadulás módjára, a lángfront pedig megvastagszik. Ez az úgynevezett flamelet model (közelítő fordításban lángszerkezet-modell), amely a turbulens lángot lokálisan egydimenziós lángszerkezetek együttesének tekinti a turbulens áramlási mezőben.

A turbulens lángterjedési sebesség ( $S_t$ ) az a sebesség, amellyel az átlagos elemi lángfelület halad át a reagenseken. Az  $S_t$  értéke a (2.5) alakú egyenlet szerint számítható [39]:

$$S_t/S_{l,ad} = K (u'/S_{l,ad})^a \cdot (L/\eta_0)^b. \quad (2.5)$$

Az összefüggés egy széles körben alkalmazott változata Gülder [46] nevéhez fűződik:

$$S_t/S_{l,ad} = 0,65 \cdot (u'/S_{l,ad})^{3/4} \cdot (L/\eta_0)^{1/4}. \quad (2.6)$$

Rzal és Veyssiere (említve: Abbasi által [19]) néhány lehetséges különbséget említenek az előkevert gázok és porfelhők robbanásával kapcsolatosan. Kukoricakeményítő lamináris lángjának interakcióját vizsgálták különböző geometriájú akadályokkal. Bizonyos esetekben ütközéskor a láng aprózódása volt megfigyelhető, melyet a porszemcsék és a levegő centrifugális erőter hatására bekövetkező szétválasztódásának tulajdonítottak az örvényekben. Megállapításuk azért jelentős, mert bizonyítja, hogy a porfelhő nem minden esetben reagál ugyanúgy, ahogyan az előkevert gáz.

### 2.1.6.3. Hőveszteségek

A hőveszteségek egyes fajtái makrofolyamati szinten is jelentősen befolyásolják a robbanási jellemzőket.

A robbanási folyamatok során az energiafelszabadulással szemben a hősugárzással átadott hőmennyiség gyakran elhanyagolásra kerül. Azonban a robbanás előrehaladtával a láng felszínének és térfogatának aránya csökken, a hősugárzás hatása pedig növekvő jelentőséggel bír [47]. A reagáló gáz sugárzása kétféle mechanizmus szerint valósulhat meg [34]: a nagy hőmérsékletű gáz nagy energiaszintjének köszönhetően elektromágneses sugarakat bocsájt ki; vagy kemilumineszcens sugárzás segítségével, melyet az aktív molekulák bocsátanak ki kémiai reakció közben.

A hővezetés és a konvektív hőátvitel a lángok fallal való érintkezésével válnak lényegessé. A hőelvonás harmadik módja a vízgőz kondenzációja a kamra falán. Ez utóbbi két mechanizmus számszerű értékelése azonban nehézkes.

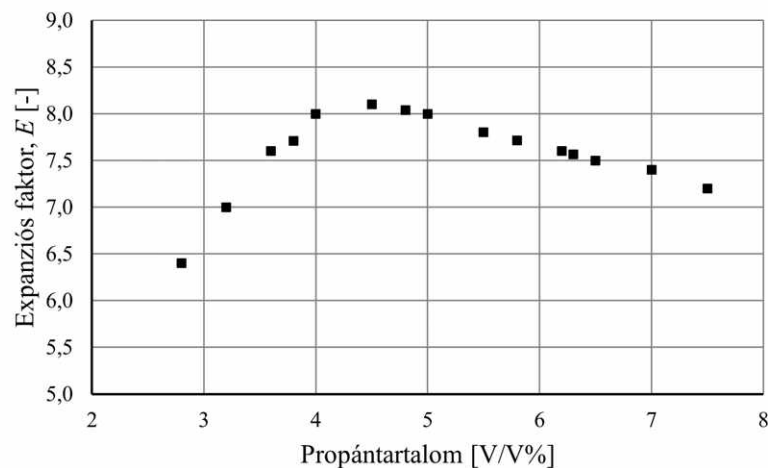
Yan és mtsai. [32] 22 és 110 liter úrtartalmú robbantókamrán végeztek mérésrel validált CFD szimulációs vizsgálatokat metán-levegő keverékekre. Azt találták, hogy a készülék falán keresztül mind a konvektív hőveszteség, mind a hősugárzás befolyásolja a robbanás intenzitását – bár az utóbbi dominánsabb.

### 2.1.6.4. A lángterjedés jellegzetes értékei

**Expanziós faktor** Az  $E$  expanziós faktor (expansion factor) definíció szerint a gáz sűrűségváltozása a kiindulási állapothoz képest, így Brinzea és mtsai. szerint [37]:

$$E = \frac{\rho_u}{\rho_b} = \left( \frac{T_{f,p}}{T_0} \right) \left( \frac{n_e}{n_0} \right). \quad (2.7)$$

Az expanziós faktor a robbanás kezdetén bármely éghető keverékre meghatározható az izobár körülmények között végbemenő robbanás során mért adiabatikus lánghőmérséklet és a keverék mólszámainak ismeretében. Értékei változó összetételű propán-levegő keverékekre Brinzea és mtsai. [48] szerint a 2.6. ábrán láthatók. Az értékek 1 bar<sub>a</sub> kezdeti nyomású és 293 K kezdeti hőmérsékletű esetekre vonatkoznak.



2.6. ábra. Az expanziós faktor értékei propán-levegő keverékekben a propántartalom függvényében [48]

**Lamináris lángterjedési sebesség** A lamináris lángterjedési sebesség anyagi jellemző, amely erősen függ a robbanóképes keverék összetételétől. Ezt a sebességet a különböző vegyületek molekuláris diffúziója, a hőátviteli folyamatok és a reakciók sebessége befolyásolja, az értékek gázkeverékek esetén – a hidrogén kivételével – a 0,3 – 0,6 m/s tartományban mozognak. Propán robbanása esetén (1 bar<sub>a</sub> kezdeti nyomás mellett) az égési sebesség  $S_f = 40,7 - 41$  cm/s, a lamináris lángterjedési sebesség  $S_l = 325 - 328$  cm/s [37]. Meghatározása méréssel történik, amelynek számos módszere ismert [48]:

- az állólángok tulajdonságait kihasználó módszerek, például az égő módszer vagy az ellenáramú ikerláng módszere; vagy
- a terjedő lángfrontot felhasználó módszerek, például a cső-módszer vagy az állandó térfogaton elvégzett robbantás-vizsgálatok.

Az adott keverékre jellemző lamináris lángterjedési sebesség a méréseken kívül számítással is meghatározható a (2.8) összefüggés segítségével [48][49]:

$$S_l = R \cdot \left[ \frac{K_{St,G}}{P_0 \cdot E^2 \cdot (E - 1) \cdot \kappa_u} \right]^{1/3}, \quad (2.8)$$

Mivel ismert, hogy a lángsebesség erősen függ a hőmérséklet és nyomás változásaitól, ezeket figyelembe véve annak pillanatnyi értéke Brinzea és mtsai. szerint [37]:

$$S_l(t) = S_{l,0} \left( \frac{T_{f,p}(t)}{T_0} \right)^\alpha \cdot \left( \frac{P(t)}{P_0} \right)^\beta. \quad (2.9)$$

Az összefüggés 293 K kezdeti hőmérséklet és 1 bar<sub>a</sub> kezdeti nyomás esetén érvényes. Az  $\alpha$  és  $\beta$  kitevők értékei például propán és levegő sztöchiometriai arányú keverékére  $\alpha = 2,13$ ,  $\beta = -0,17$  [50].

**Turbulens lángterjedési sebesség** Turbulens áramlási viszonyok között az előkevert lángot létrehozó közegáramlási sebesség jóval nagyobb, mint a lamináris lángsebesség. Ennek eredményeképpen a turbulencia olyan örvényeket okoz, amelyek jelentősen eltorzítják a lamináris

lángfrontot. Így bár az átlagsebesség nagyobb, mint a lamináris lángsebesség, a (ráncolódó) lángfront sebessége megegyezik a lamináris lángterjedési sebességgel. Nagy Reynolds-szám értékek esetén az átlagos turbulens lángsebesség a lamináris lángsebesség négy-ötszöröse [25]. Számítása például a (2.5) és a (2.6) összefüggések segítségével történhet.

**A nyomásemelkedés maximális értéke** A nyomásemelkedés maximális értéke nem csak a por robbanóképességére utaló adat, hanem számos robbanásérzékelő és védelmi berendezés méretezési alapadata. A klasszikus robbanáselmélet szerinti [34] ideális esetet feltételezve (állandó térfogatban bekövetkező robbanás és gömb alakú lángfront esetén, középponti gyújtással), a kamra abszolút nyomása az idő függvényében a következőképpen változik [19]:

$$\frac{P(t) - P_0}{P_{max} - P_0} = k \cdot \frac{V(t)}{V_0}, \quad (2.10)$$

Néhány matematikai átalakítást elvégezve adódik, hogy:

$$K_{St} = \left[ \frac{dP(t)}{dt} \right]_{max} \cdot V_0^{1/3} = 4,84 \cdot \left( \frac{P_{max}}{P_0} - 1 \right) \cdot P_{max} \cdot S_f. \quad (2.11)$$

Wiemann (említve: Abbasi és Abbasi [19]) mérései alapján a kezdeti nyomás növelése esetén (1 – 4 bar<sub>g</sub> tartományban) a maximális robbanási nyomás lineárisan nő, a robbanási konstans értéke pedig szintén növekszik.

### 2.1.7. Szimulációs módszerek

A robbanás jellemző értékei, ahogyan az előző fejezetek is mutatták, számos paramétertől függenek. Ezek zárt téri, majd lefúvatott robbanásokra történő meghatározására különböző alapokon nyugvó modellek és eljárások alkalmazhatók. Ide tartoznak az empirikus, a fenomenologikus valamint a CFD alapú modellek is, azonban az egyes típusok eltérő mértékű egyszerűsítéseket alkalmaznak. Az ezekből következő információvesztés mértékét és elfogadhatóságát mérési eredményekkel történő validáció útján lehet meghatározni [20].

#### 2.1.7.1. Empirikus modellek

Az empirikus modellek a kísérletek és analitikus vizsgálatok eredményeiből meghatározott összefüggéseket használják fel. A továbbiakban két, kifejezetten a propánrobbanás jellemző értékeinek meghatározására szolgáló módszert ismertetek röviden.

**Huzayyin és mtsai. modellje** Huzayyin és mtsai. [43] számos, mérésen alapuló vizsgálatot végeztek LPG gáz és propán levegővel alkotott különböző arányú keverékeinek robbanási jellemzőivel kapcsolatban. A méréseket egy 144,5 mm átmérőjű, 150 mm hosszúságú hengeres robbantókamrában végezték. Munkájuk során összefoglalták a lángterjedési sebesség számítására vonatkozó jelentősebb irodalmi összefüggéseket, majd számos mérési eredmény alapján saját modelleket alkottak.

Így propán-levegő elegyek esetén a maximális robbanási nyomás az adott keverék sztöchiometriai arányának és a kezdeti nyomás függvényében a (2.12) egyenlet segítségével határozható meg:

$$P_{max} = -26,9 + (-6,2 + 25,6 \cdot \phi - 18,7 \cdot \phi^2 + 9,4 \cdot \phi^3 - 3,26 \cdot \phi^4) \cdot P_0. \quad (2.12)$$

Az összefüggés érvényességi tartománya:  $0,7 \leq \phi \leq 1,4$ ;  $50 \leq P_0 \leq 400$  kPa;  $T_0 = 305$  K. Az összefüggés  $R^2 = 0,972$  determinációs együtthatóval közelíti a mérési eredményeket. Szintén propán-levegő keverékekre a lángterjedési sebesség a (2.13) szerint számítható:

$$S_l = S_{l,0} \cdot (P/P_0)^\beta, \quad (2.13)$$

ahol

$$S_{l,0} = 5766,8 - 24761,3 \cdot \phi + 38798,1 \cdot \phi^2 - 25188,3 \cdot \phi^3 + 5795,9 \cdot \phi^4, \quad (2.14)$$

$$\beta = -0,463 + 0,56 \cdot \phi - 0,354 \cdot \phi^2. \quad (2.15)$$

Az összefüggés érvényességi tartománya:  $0,7 \leq \phi \leq 1,4$ ;  $50 \leq P_0 \leq 400$  kPa;  $T_0 = 305$  K. Az összefüggés  $R^2 = 0,971$  determinációs együtthatóval közelíti a mérési eredményeket. A robbanási konstans a vizsgált esetben a (2.16) összefüggés szerint számítható.

$$K_G = 18 + 0,64 \cdot P_0 \quad (2.16)$$

Az itt felsorolt (2.12) – (2.16) összefüggések propán-levegő keverékek esetén érvényesek.

**Razus és mtsai. modellje** Razus és mtsai. [44] modellje szintén kiterjedt mérési eredményhalmazon alapuló empirikus összefüggések rendszere, amelyek alkalmazásának korlátai propán-levegő keverékekre: 2,5 – 6,2 V/V% propántartalmú keverék,  $P_0 = 0,3 - 1,2$  bar<sub>a</sub> kezdeti nyomás, valamint  $T_0 = 298 - 423$  K kezdeti hőmérséklet.

Az elvégzett mérések eredményei alapján propán-levegő keverékekre a maximális robbanási nyomás kezdeti hőmérséklettől való függése a (2.17) összefüggés szerint adható meg.

$$\pi_{max} = a + \frac{b}{T_0}, \quad (2.17)$$

ahol a dimenziótlan maximális robbanási nyomás értéke a (2.18) összefüggés szerint számítható:

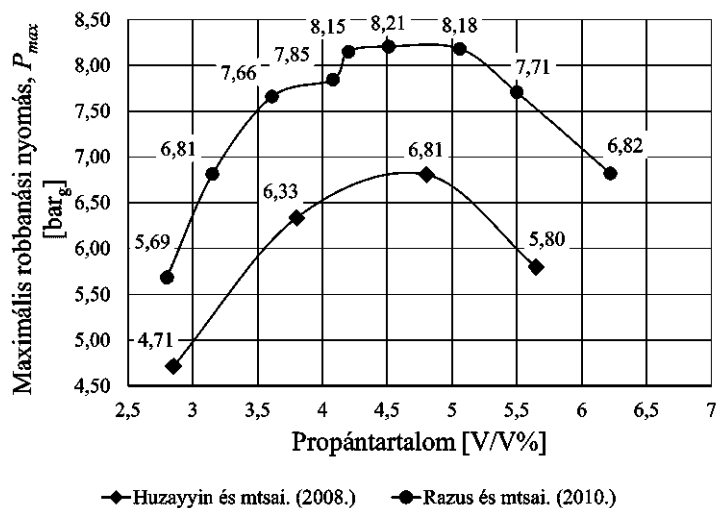
$$\pi_{max} = \frac{P_{max}}{P_0}. \quad (2.18)$$

A (2.18) összefüggés paramétereit 10 cm átmérőjű gömb alakú robbantókamrában,  $P_0 = 1$  bar<sub>a</sub> kezdeti nyomáson környezeti hőmérsékleten végzett kísérletekre a 2.1. táblázat tartalmazza.

| Propántartalom [V/V%] | $a$ [-] | $b \times 10^3$ [K] |
|-----------------------|---------|---------------------|
| 2,8                   | 1,71    | 1,458               |
| 3,15                  | 1,151   | 1,952               |
| 3,61                  | 1,23    | 2,177               |
| 4,08                  | 1,042   | 2,287               |
| 4,2                   | 1,125   | 2,352               |
| 4,51                  | 0,907   | 2,432               |
| 5,06                  | 1,167   | 2,349               |
| 5,5                   | 1,674   | 2,061               |
| 6,22                  | 2,106   | 1,674               |

2.1. táblázat. A (2.17) összefüggésben szereplő együtthatók [44]

A fentebb bemutatott két számítási modell összehasonlítását szemlélteti a 2.7. ábra. Az összehasonlítást propán-levegő keverékek esetén végeztem el,  $P_0 = 1 \text{ bar}_a$  kezdeti nyomással és  $T_0 = 293 \text{ K}$  kezdeti hőmérséklettel. Köztük a legnagyobb eltérés a maximális nyomások között található meg, amelynek mértéke a Razus-moddellhez képest 21%.



2.7. ábra. A Huzayyin- [43] és Razus-modellek [44] összehasonlítása a propántartalom függvényében ( $P_0 = 1 \text{ bar}_a$ ,  $T_0 = 293 \text{ K}$ )

Ezekből a megközelítésekben is látható, hogy a tisztán empirikus modellek nem a teljes nyomásemelkedési görbére adnak közelítést, mindössze a robbanási jellemzők értékeit becslik, így önmagukban nem írják le a teljes folyamatot. Az általuk adott eredmények közti eltérés rendkívül nagy, valamint az egyenletek csak behatárolt feltételek esetén alkalmazhatók. Azonban előnyük, hogy más modellek részszámításaiként való használatuk jelentősen leegyszerűsíti a modellezési folyamatot, valamint redukálja annak megoldási idejét.

### 2.1.7.2. Fenomenologikus modellek

A fenomenologikus modellek olyan, félempirikusnak tekinthető egyszerűsített fizikai modellek, amelyek mindössze a legszükségesebb alapegyenleteket tartalmazzák. Bizonyos paramétereket (például a lángterjedési sebességet) empirikus összefüggésekkel határoznak meg, másokat pedig a fizikai törvényszerűségek alapján írják fel. A modellek közös jellemzője, hogy bennük a legnagyobb egyszerűsítés a modellezett geometriára vonatkozik. Általában nem kísérlük meg a tényleges folyamat leírását, ehelyett egy idealizált rendszerre vonatkoznak a megközelítések – például egy tökéletes gömb alakú zárt vagy egyszerűen lefűtatott robbantókamrára, amely több, turbulenciát generáló csomópontot tartalmaz. Ez a megközelítés összetettebb problémák megoldására már nem megfelelő. Bonyolultságukat tekintve az empirikus és a CFD modellek közé helyezhetők el. Előnyük, hogy rövid futási idejük nagyszámú, különböző kimenetelű eset szimulációjára teszi őket alkalmassá.

Ebbe a csoportba tartozik például a széles körben alkalmazott SCOPE modell (Shell Code for Overpressure Prediction in Gas Explosions). A lángterjedés vizsgálata szempontjából

egydimenziós, és alapja egy olyan idealizált geometria, amely egy lefúvatott tartályt és turbulenciát generáló akadályok sorozatát tartalmazza. Az egyes akadályokon való áthaladással örvények generálódnak, melyek megnövelik a turbulens lángterjedés sebességét. A módszer a lefúvást összenyomható közegáramlásként modellezi [20].

A CLICHE (Confined LInked CHamber Explosion) modell leginkább épületekben bekövetkező és összekapcsolt készülékek közötti robbanások modellezésére szolgál. A módszer alapjai elsősorban Fairweather és Vasey [51] valamint Chippett [31] zárt kamrás és lefúvatott modelljei. A tipikus üzemekben előforduló készülékek és csővezetékek turbulencianövelő hatását megfelelően megválasztott ellenállás-értékekkel veszi figyelembe. A szükséges szilárdsági és láng-készülék interakciós paramétereket numerikus adatbázisból határozza meg a program. A robbanás szubmodellje az elégett és el nem égett gázkeverék megmaradási törvényeit alkalmazza, és feltételezi, hogy az anyagjellemzők állandóak, mindössze az anyagáramok impulzusa változik a terjedés során. Ez a megközelítés nem alkalmas a résztérfoogatokon (például elégett vagy el nem égett keverékrészekben) belüli áramlás számítására, és a lángtorzulások meghatározására sem. Következésképp a láng alakja empirikusan becsült érték a geometria és az elégett gáz térfogata alapján. A gázok lefúvásából származó külső égés számítása külön modell segítségével történik [20].

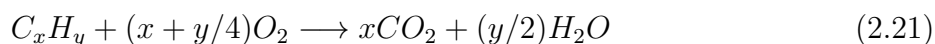
**Reakciókinetikai módszerek** A kémiai reakciók lejátszódásának üteme a reakciósebességgel jellemezhető, melyet a  $C + D = CD$  reakcióegyenlet esetén a (2.19) összefüggés segítségével definiálhatunk:

$$v = -\frac{d[C]}{dt} = -\frac{d[D]}{dt} = \frac{d[CD]}{dt} = k \cdot [C] \cdot [D], \quad (2.19)$$

A kinetikus gázelmélet szerint a reakciósebesség az időegység alatt bekövetkező eredményes alapanyag-molekula ütközések számával arányos, az ütközések száma pedig a rendelkezésre álló molekulák koncentrációjával. Ez a (2.19) egyenletben is szereplő reakciósebességi állandóval ( $k$ ) írható le, amelynek pillanatnyi értéke számos tényezőtől függ, ám elmondható hogy a reakciósebesség a hőmérséklet növelése következtében exponenciálisan nő. Meghatározása Arrhenius-típusú egyenletek segítségével történhet. Bimolekuláris reakciókra ennek egy, a gyakorlatban is könnyen kezelhető formája:

$$k(T) = A \cdot T^b \cdot e^{(-E_a/R_0T)}. \quad (2.20)$$

Globális reakcióra alkalmazható a szénhidrogének oxidációjára vonatkozó (2.21) összegképlet.



A tüzelőanyag koncentrációjának idő szerinti változása a (2.19) és a (2.20) egyenletek szerint:

$$\frac{d[C_xH_y]}{dt} = -A \cdot e^{(-E_a/R_0T)} \cdot [C_xH_y]^m \cdot [O_2]^n. \quad (2.22)$$

A fentebb említett tagokon kívül az  $m$  és az  $n$  kitevők szintén empirikus paraméterek [17].

A szénhidrogének oxidációját a (2.21) egyenlet írja le, amely alapján az általam részletesen vizsgált propán levegőben történő égésének egyensúlyi egyenletét a (2.23) fejezi ki, amennyiben a levegőt 21 V/V% oxigén és 79 V/V% nitrogén keverékének feltételezzük.





Azonban az égés különösen nagy sebességgel és folyamatosan változó hőmérséklet- és nyomásviszonyainak köszönhetően az abban részt vevő vegyületek közt egyidejűleg nagyszámú részreakció zajlik le változó sebességgel és arányban. A propán égésének teljes reakciókinetikai leírását például több, mint 140 egyensúlyi egyenlet megoldásával lehet megfogalmazni. Ezek mindegyike eltérő hevésséggel és arányban zajlik le, amely folyamatok reakciókinetikai állandói a rendszer hőmérsékletétől és nyomásától is jelentősen függenek [52]. Mivel ez még közel sem a teljes robbanási folyamat és/vagy paraméterek leírására alkalmas egyenletrendszer, ezért a számítások egyszerűsítése érdekében szükség van az égés egyszerűbb, ám kielégítő pontossággal történő matematikai tárgyalására.

Andreis és mtsai. [53] egy 10 lépéses reakciókinetikai mechanizmust írtak fel a propán égésére, amelyben összesen 33-féle egyensúlyi egyenlet lezajlása után alakul ki a keverék végső, elégett állapota. Mind a teljes mechanizmus, mind a redukált mechanizmus egyenleteinek rendszere megoldható például az úgynevezett aszimptotikus analízis módszerével [54]. A feltételezett tízlépéses mechanizmusra elvégzett aszimptotikus analízis és matematikai szimuláció eredményei igazolják a szerzők módszerének helyességét.

**Egy-egyenlet modellek** Az egyszerűsített reakciókinetikai modelleknél kevésbé pontos, de a mérnöki gyakorlatban használható eredményt adnak az úgynevezett egy-egyenlet modellek, amelyek az égés (2.21) egyensúlyi reakcióegyenletét veszik alapul, majd erre az egy összefüggésre vonatkozóan határozzák meg a tüzelőanyag-fogyás mértékét. A fogyás differenciálegyenlete empirikus összefüggés, amely alapján a többi komponens időbeli változása is modellezhető.

Westbrook és Dryer [55] mérési eredményekkel validált egy-egyenlet modelleket dolgoztak ki különböző szénhidrogén keverékekre (a 10-es szénatomszámú vegyületekkel bezárólag). Ezek közül például a propánrobbanás során a tüzelőanyag-fogyás számítására a (2.24) összefüggés alkalmazható.

$$-\frac{d[C_3H_8]}{dt} = 8,6 \cdot 10^{11} \cdot e^{(-15000/T)} \cdot [C_3H_8]^{0,1} [O_2]^{1,65} \quad (2.24)$$

Frolov és mtsai. [56] szintén propán robbanására vonatkozóan a (2.25) egyenletet alkották meg.

$$-\frac{d[C_3H_8]}{dt} = 7 \cdot 10^{14} \cdot P^n \cdot e^{(-E_a/R_0T)} \cdot [C_3H_8] [O_2] \quad (2.25)$$

Wen és Wang 2013-as modellje [57] szerint a propán robbanása közben a tüzelőanyag-fogyás mértéke a (2.26) összefüggés szerint számítható.

$$-\frac{d[C_3H_8]}{dt} = 3,11 \cdot 10^{14} \cdot e^{(-55910/R_0T)} \cdot [C_3H_8]^{0,1} [O_2]^{1,65} \quad (2.26)$$

Látható, hogy a (2.24) - (2.26) összefüggések közül mindössze a (2.25) szerinti Frolov-modell veszi figyelembe a rendszer pillanatnyi nyomását.

A fenomenologikus modellek közé tartozik továbbá az úgynevezett ideális gáz modell. Ezt, valamint a Frolov-modellt a 3.1. fejezetben tárgyalom részletesebben.

### 2.1.7.3. CFD modellek

A CFD modellek a robbanási folyamatot leíró differenciálegyenletek rendszerét numerikus módszerekkel oldják meg. A megmaradási törvények minden egyes elemi térfogatra alkalmazhatók, így olyan – egymástól függő – algebrai egyenletrendszert nyerve, amely iterációs módszerekkel megoldható. A modellek előnye, hogy a megfelelő beállításokkal rendkívül pontos eredményeket szolgáltatnak, ám hátrányuk a nagy számítási időigény, valamint alkalmazásuk megköveteli a rendkívüli szakmai tájékozottságot is. A robbanásbiztonság-technika területén az előbb említett nehézségeken felül a robbanás és lefúvatás közben – különösen a lefúvató csatornában – lezajló folyamatok rendkívüli összetettsége miatt a robbanások közvetlen modellezése CFD szimulációk alkalmazásával a gyakorlatban nem mondható elterjedtnek. Az irodalmakban publikált tudományos eredmények leginkább gyakorlati összefüggésekre támaszkodnak.

A CFD modellek egyik ismert fajtája az EXSIM kód. Ez egy kartéziuszi hálót használó, fél-implicit, véges térfogat módszeren alapuló megoldó, mely a porózus testekként veszi figyelembe a kisméretű objektumokat a térben. A megoldó kis-, közepes- és nagyméretű rendszerekben történő áramlások esetén is nagyszámú mérésel lett validálva. További előnye, hogy külső robbanások esetén is alkalmazható. Hátránya, hogy  $k - \epsilon$  turbulencia-moddal számol, holott a CFD szimuláció rohamos fejlődésének köszönhetően ennél pontosabb turbulencia-modellek is elérhetők. További gyengesége, hogy helyi hálósűrítések nem alkalmazhatók a geometrián.

A másik, a témában az egyik legjelentősebb szoftver a CMR-GEXCON által fejlesztett FLACS (FLame ACceleration Simulator). Szintén véges térfogat módszeren alapuló, strukturált hálót használó szoftver. A hálóméretnél kisebb objektumok turbulenciageneráló hatásának figyelembe vételére az EXSIM-hez hasonló módon szintén porozitás/részleges ellenállás közelítést alkalmaz. Szintén kiterjedt mérettartományban került validálásra. Külső térben történő robbanások és vízfelszín modellezésére is alkalmas. Hátránya, hogy szintén  $k - \epsilon$  turbulencia-modellt alkalmaz, bár a falak közelségének hatását numerikusan is figyelembe veszi. Súlyozott centrális sémát alkalmaz, a reakciót leíró változók kivételével elsőrendben pontos.

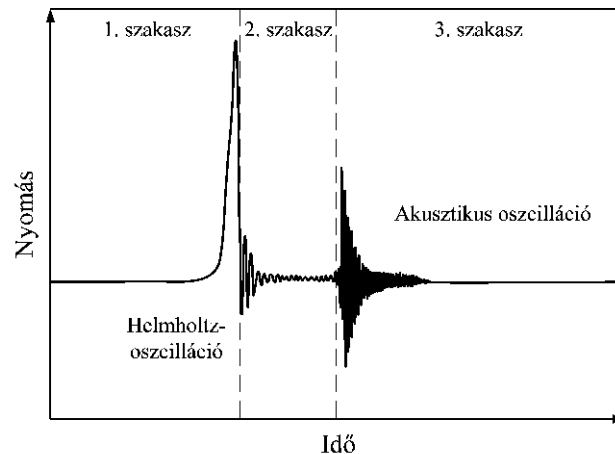
Az előbbieken kívül természetesen számos módszer alkalmazható a robbanás jellemzőinek nem mérésel történő meghatározására, amelyeket a rendelkezésre álló hely korlátozottsága miatt itt nem kívánok bemutatni.

## 2.2. A robbanás elvezetése lefúvóvezeték alkalmazása nélkül

### 2.2.1. A lefúvás során fellépő fizikai-kémiai jelenségek

Amikor a zárt téri robbanás közben a közeg egy lefúvónyíláson át a szabadba kerül, a távozó gázok miatt a lángfront az ideális gömb alakúhoz képest hirtelen torzulást szenved. A lángfront előtti gázok felgyorsulnak, és az ebből generálódott nyomáshullám további instabilitást okoz a lángfrontban. A teljes lángfelület rendkívüli mértékben megnő, ez pedig az égési sebesség jelentős növekedését vonja magával a kamrában. A folyamat eredménye, hogy a hasadófelület nyitását követően gyakran egy második helyi maximumérték is megfigyelhető a robbanási nyomásgörbén [31, 58].

A készülékben mért nyomásnövekedés lefúvatott gázrobbanások esetén három különböző szakaszra bontható, amelyeket a 2.8. ábra szemléltet. Az első szakaszban a robbanóképes keverék meggyullad, a láng terjed és expandál. Amikor ez eléri a hasadóelem nyitónyomását, az kiszakad és a közeg elkezd kiáramlani a térből. Minél nagyobb a lefúvófelület, a nyomás annál gyorsabban redukálódik, ezzel együtt pedig a folyamat első szakaszának is vége.



2.8. ábra. A lefúvatás során kialakuló nyomásgörbe jellegzetes szakaszai [16]

A második szakaszban az úgynevezett Helmholtz-oszcilláció léphet fel. Ennek oka, hogy a hasadóelem tönkremenetele után a térben a közeg nyomása és emiatt a hőmérséklete hirtelen lecsökken, amely a kamra belsejében vákuumot okoz. Ekkor a friss levegő és a már lefúvatott keverék kívülről elkezd visszaáramlani a kamrába, amely turbulens zavart okoz a lángfrontban, és a kamrában újabb lokális nyomásmaximumot generál. A turbulens zavar az égési sebességet növeli, és újabb kiáramlást okoz a lefúvónyíláson át. Ezek a folyamatok ismétlődnek, közben fokozatosan elhalnak. Az oszcilláció frekvenciája [59]:

$$f = \frac{c}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{A_v}{\alpha \cdot V}}, \quad (2.27)$$

ahol az  $\alpha$  korrekciós tényező a  $D_v$  lefúvófelület egyenértékű átmérőjével kifejezve:

$$\alpha = 0,51 \cdot \frac{D_v}{2}. \quad (2.28)$$

A harmadik szakasz az akusztikus oszcillációk néven ismert nagyfrekvenciájú rezgések szakasza, ám ez nem minden esetben figyelhető meg a lefúvatás során. A távozó nyomáshullám a készüléket sajátfrekvencia-közeli akusztikus rezgésbe hozhatja. Mivel a lefúvatás a gázkeverék termodinamikai állapotjelzőit is megváltoztatja, amely a hőenergia-fel szabadulás mértékében is változást eredményez, így ez is az akusztikus rezgések kialakulásának kedvez. A rezgések visszaverődései a lángfront felszínének jellegzetes sejtes struktúráját hozzák létre és megnövelik a láng felületét. Ezért, az akusztikus oszcillációk szorosan összefüggnek a fel szabaduló energia mennyiségével: csak akkor következik be, amikor a robbanás hevessége egy bizonyos minimumszintet elér, így az alsó és felső robbanási határok közelében nem fordul elő [16].

A fenti jelenségeken kívül a lefúvatott közeg még el nem égett keveréket is tartalmazhat. Az oxigénnel való keveredés folytán a készüléken kívül, vagy az oszcillációknak köszönhetően a készülék belsejében másodlagos robbanás is bekövetkezhet. Sun és mtsai. [60] megfigyelték, hogy a nagyméretű lefúvófelületek szimpla robbanási nyomáscúcsot eredményeztek a karmában, míg a kisméretű felületek esetén a másodlagos robbanás már a készülékben bekövetkezett és olyan heves volt, hogy esetenként meghaladta a robbanás nyomásmaximumát is.

### 2.2.2. A lefúvatást befolyásoló tényezők

A lefúvatás során végbemenő folyamatokat természetesen minden olyan paraméter befolyásolja, amely a zárt téri robbanás során is szerepet játszik. Azonban kiemelhető néhány olyan tényező, amelyek hatása a lefúvatás során fokozottan érvényesül.

A keverék robbanóképes anyag tartalmának hatásai ugyanúgy megjelennek a maximális nyomásértékekben és a nyomásemelkedés sebességében, mint a zárt terű robbanások során. Mindkét érték a tüzelőanyagban enyhén gazdag keverék esetén veszi fel a maximumát, azonos lefúvónyílás-paraméterek alkalmazása mellett parabolikus függvény szerint.

A koncentráció másik jelentős befolyása az oszcillációk tulajdonságaira van. Sun és mtsai. [16] megállapították, hogy a Helmholtz-oszcilláció időtartama és frekvenciája szoros összefüggésben áll a lángterjedési sebességgel, így a keverék összetételével. Metán-levegő keverékkel végzett vizsgálataik során meghatározták, hogy az oszcilláció frekvenciája 20 és 40 Hz közé esik, időtartama pedig 300 és 500 ms közé tehető. Ugyanezen kutatásban Sun és mtsai. [16] kimutatták, hogy az akusztikus oszcillációk a sztöchiometriai arányú keverék környezetében jelennek meg. Az akusztikus oszcillációs szakasz időtartama a robbanási folyamat jellemző időtartamához képest hosszú, mintegy 1000 ms, frekvenciája 250 és 400 Hz közé esik, azonban Bauwens [61] szerint ez 700 Hz értéket vesz fel.

A turbulencia hatását a robbanások lefúvására számos tanulmány vizsgálja [30, 62]. A lefúvatás során a kezdeti és a robbanás során kialakult turbulencia kiegészül a lefúvatás során keletkező turbulenciával. Ahogyan a zárt téri robbanásoknál is látható volt, még a kezdeti közegmozgásból származó mérsékelt turbulencia is jelentős növelő hatással van a lefúvatott robbanások esetén mérhető nyomásértékekre [16, 19]. A lefúvatás során kialakuló turbulencia az ahhoz vezető részfolyamatok függvénye, így külön ennek a tényezőnek a vizsgálatára nem irányulnak kutatások.

Sun és mtsai. [60]  $2 \times 1,2 \times 0,6$  m méretű kamra lefúvatását vizsgálták etilénrobbanás esetén. Arra jutottak, hogy kisebb vastagságú (0,4 mm) hasadóelem dinamikus nyitónyomása megegyezik a statikus aktivációs nyomással, és nem függ a keverék koncentrációjától. Ezzel ellentétben a kifejezetten vastag hasadóelemek (10 és 18 mm) dinamikus állapotban bekövetkező nyitónyomása a keverék koncentrációjával együtt haranggörbe szerint változik.

### 2.2.3. A maximális redukált robbanási nyomás számítására szolgáló összefüggések

A lefúvós robbanásvédelemmel kapcsolatos szabványokban a  $P_{red,max}$  maximális robbanási nyomás nem számítandó paraméter, hanem méretezési alapadat, így ezek nem tartalmazzanak közvetlenül ennek a meghatározására szolgáló összefüggéseket. Ennek meghatározására

azonban számos modell született, amelyek közül a jelentősebbeket foglalja össze a 2.2. táblázat. Bradley és Mitcheson [63], valamint Yao [63], valamint Lautkaski [64] modelljeinek számításához az alábbi egyenletek használhatók:

$$\bar{A} = \frac{C_D \cdot A_v}{A_s}, \quad (2.29)$$

$$S = \frac{S_{l,ad}}{c_0} \cdot \left( \frac{\rho_u}{\rho_b} - 1 \right) = \frac{S_{l,ad}}{c_0} \cdot (E - 1). \quad (2.30)$$

A Bradley-szám és a turbulens Bradley-szám meghatározása az alábbiak szerint lehetséges (Molkov modellje [65]):

$$Br = \frac{A_v}{V^{2/3}} \frac{c_0}{S_{l,ad} \left( E - \frac{1-1/\kappa_b}{1-1/\kappa_u} \right)}, \quad (2.31)$$

$$Br_t = \frac{\sqrt{E/\kappa_u}}{\sqrt[3]{36\pi}} \cdot Br \cdot \frac{\mu}{\chi}, \quad (2.32)$$

ahol a DOI-szám (deflagration-outflow interaction):

$$\frac{\chi}{\mu} = \alpha \cdot \left[ \frac{(1 + V^{1/3}) \cdot (1 + 0,5Br^\beta)}{1 + \frac{P_{stat}}{P_0}} \right]^\gamma. \quad (2.33)$$

A maximális redukált robbanási nyomáson kívül Cabbage és Simmonds [66] a lefúvatáskor fellépő második nyomáscsúcs értékének megállapítására, míg Chippett [31] a lefúvatott tömegáramra, valamint a lefúvatáskor fellépő nyomásgörbe felfelé ívelő szakaszára dolgoztak ki számítási módot.

| Forrás  | Összefüggés  |
|---|--|
| Dragosavic (1973.) [66]   | $P_{red,max} = P_0 + 1000 \cdot \left[ 3 + 0,5 \cdot (P_{stat} - P_0) + \frac{0,04 \cdot V_0^2}{A_v^2} \right]$ <p>Alkalmazhatóság: <math>20,8 \text{ m}^3 \leq V \leq 36 \text{ m}^3</math>; <math>P_{stat} \geq 0,3 \text{ bar}_g</math></p>   |
| Yao (1969.) [67] Bradley és Mitcheson alkalmazásában (1978.) [63] | $P_{red,max} = \left( \frac{0,375 \cdot \chi^{0,675} \cdot E_0^{7/6}}{E_0 - 1} \right)^2 \cdot \left( \frac{\bar{A}}{*S_0} \right)^{-2}$ <p>Yao [67] szerint <math>\chi = 4</math> hasadótárcsára, <math>\chi = 3</math> hasadópanelre [67]. Bradley és Mitcheson [63] szerint <math>\chi = 4</math>.</p>  |
| Rasbash (1976.) [66]  | $P_{red,max} = 1,5 \cdot (P_{stat} - P_0) + 1000 \cdot \chi \cdot \frac{S_0}{0,45} \cdot \left( P_I + 2,5 \cdot \frac{A_{x,min}}{A_v} \right)$ $P_I = \left( 0,203 \cdot \frac{A_{x,min}}{A_v} \cdot w + 1,17 \right) \cdot V_0^{1/3}$   |
| Bradley és Mitcheson (1978.) [68]                                 | $P_{red,max} = 4,8 \cdot (P_{stat} - 1)^{0,375} \cdot \left( \frac{\bar{A}}{S} \right)^{-1,25}$  |
| Molkov (2001.) [69][65]   | $\frac{\pi_{red}}{\pi_v^{1,5}} = Br_t^{-2,4} \left( \frac{\pi_{red}}{\pi_v^{1,5}} \leq 1; Br_t \geq 1 \right)$ $\frac{\pi_{red}}{\pi_v^{1,5}} = 7 - 6 \cdot Br_t^{-0,5} \left( \frac{\pi_{red}}{\pi_v^{1,5}} > 1; Br_t < 1 \right)$ $Br_t \cdot \sqrt[3]{36 \cdot \pi \cdot V^{2/3} \cdot S_{l,ad} \cdot (E_i - 1)} =$ $c_0 \cdot \sqrt{E_i / \kappa_u}$ $= \frac{F \cdot (1 + \pi_v)^{0,4} \cdot \pi_{i\#}^{-0,6}}{\alpha \cdot (1 + 10 \cdot V^{1/3})^{0,4} \cdot \left[ 1 + 0,5 \cdot \left( \frac{F \cdot c_0}{V^{2/3} \cdot S_{l,ad} \cdot (E_i - 1)} \right)^\beta \right]^{0,4}}$ |
| Sustek (2006.) [66]   | $P_{red,max} = P_a + P_0 \cdot (E - 1) \cdot \frac{V_{cl}}{V} \cdot e^{-\left[ \frac{C_D \cdot A_v}{A_{x,v}} \cdot \frac{S_{CH_4} \cdot K_E}{S_0 \cdot K_i} + \frac{0,05 \cdot A_v \cdot w}{V} - \frac{0,2 \cdot P_{stat}}{P_0} \right]}$ <p><math>C_D = 0,81</math>, <math>K_E = 5,118</math>, <math>K_i</math> a gyulladási együttható (1 a lefúvónylással szembeni gyújtásnál, 0,75 központi gyújtásnál). Metánrobbanás esetén alkalmazható.</p>  |
| Lautkaski (2012.) [64]  | $P_{red,max} = 4,82 \cdot P_{stat}^{0,375} \cdot \left( \frac{\bar{A}}{S_0} \right)^{-1,25}$   |

2.2. táblázat. Jelentősebb összefüggések a maximális redukált robbanási nyomás számítására

## 2.3. Robbanás elvezetése lefúvató csatornák alkalmazásával

### 2.3.1. Lefúvató csatornák

Ahhoz, hogy a lefúváskor távozó anyagok elkerüljék a munkaterületet vagy a szomszédos készülékeket és csővezetéseket, lefúvató csatornák alkalmazhatók. Azonban ez a megoldás számos tényezőtől összetevődő ellenállást jelent a lefúvatott közeg áramlásával szemben, amely ellennyomásként jelentkezik a lefúvás szempontjából. Mértéke jelentősen függ a csatorna áramlástani viszonyaitól, így többek között annak hosszától, átmérőjétől, felületi érdességétől és geometriai kialakításától (keresztmetszetének alakjától, íveitől stb.). Ez az ellenállás kedvezőtlen befolyással van a védendő szerkezetben mérhető redukált nyomásra is [1][70].

A lefúvató csatornákra vonatkozó vizsgálatok kevés kivételtől eltekintve kétféle irányba haladnak. A lefúvatásra érvényes számítási összefüggések többsége – így a szabványokban megtalálható képletek nagy része is – kiterjedt mérésorozatok eredménye, amelyekből a megfelelő következtetéseket levonva empirikus vagy félempirikus egyenletek származnak. A másik kutatási irány a szimulációk segítségével végrehajtott vizsgálatokat takarja. Ezek többségében CFD szimulációk, amelyekre a 2.1.7.3. alfejezetben említett modellek is alkalmazhatók lehetnek. Azonban a szimulációk futtatása a lefúvató csatornában lezajló folyamatok összetettsége miatt rendkívül nagy számítási igénnyel jár, így a kutatók jellemzően jelentősen leegyszerűsített geometriák esetén alkalmazzák ezeket a vizsgálatokat.

### 2.3.2. A lefúvató csatornában lejátszódó folyamatok

A lefúvató csatornában lejátszódó folyamatok igen összetettek, amelyek jelentősen befolyásolják a lefúvatást és a készülékben mérhető robbanási jelzőszámokat. A megfigyelhető szakaszok és lezajló jelenségek összefoglalva, Ponizy és Leyer [71] nyomán, Pang és mtsai. [72] megfigyeléseivel kiegészítve az alábbiak.

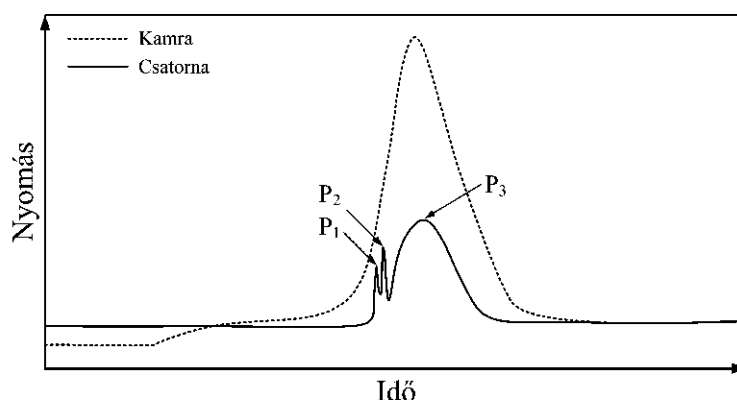
1. Gyújtás, majd a láng gyorsul és a készülék fala felé terjed. Lamináris, később turbulens lángterjedés a készülékben.
2. Az el nem égett keverék feltorlódik a hasadóelem előtt, a láng kissé lefékeződik, a keverék nyomása tovább nő.
3. A nyomásnövekedéstől a hasadóelem kiszakad, a csatorna szabaddá válik.
4. A hirtelen keresztmetszet-változás miatt a láng benyomul a csatornában nyugvó gázba és a széle felkavarodik (Rayleigh-Taylor instabilitás). Eközben a nyomáshullám ugyan folytonos marad, de a lángfront helyenként szakadást szenved így a friss keverék egy része égés nélkül ki tud áramlani a csatornába. A felkavarodott, még megmaradt láng begyűjtja a csatornába került el nem égett keveréket is, másodlagos robbanást okozva. Ez töréspont formájában megjelenhet a készülékben mérhető nyomásgörbén.
5. A másodlagos robbanás hatására annak helyétől előrefelé és hátrafelé irányuló impulzusok indulnak.
6. Az előreáramló impulzus és az anyagjellemzőkben bekövetkezett változás gyorsuló lángot eredményez (ez segíti a lefúvatást), amelyet a maga előtt tolt légtömeg tehetetlensége és a csatorna hidraulikai ellenállása fékez, a csatornában való haladással egyidejűleg egyre kisebb mértékben. Emiatt a csatorna fala mentén akusztikus oszcillációk is felléphetnek.

7. A készülékben a reakció tovább folytatódik, azonban a lefúvatást a másodlagos robbanás akadályozza, így további nyomásemelkedés figyelhető meg.
8. A másodlagos robbanás elhalása után ismét beindul a lefúvatás a kamrából. Az anyagjellemzők változása a lefúvatott közeget szintén gyorsulásra készíti.
9. A távozó gáztömeg a kamrában lévő közeg sűrűségének csökkenését okozza, így vákuumot indukál a kamrában, amelynek hatására kismértékű visszaszívás tapasztalható a csatornán keresztül.
10. A 7-9. pontok addig ismétlődnek, míg a csatorna fala menti súrlódás vagy a robbanás befejeződése miatt a jelenség meg nem szűnik.

A közeg lefúvóvezetékben történő áramlása közben fellépő ellenállások tehát a következők lehetnek [73]:

- a lefúvórendszer áramlási veszteségei,
- a csatornában lévő légtömeg tehetetlensége,
- másodlagos robbanás a csatornában,
- oszcillációk.

Ezek értelmében a lefúvató csatornában nem csak egyetlen nyomáscsúcs azonosítható. Pang és mtsai. [72] kukoricakeményítővel végzett vizsgálataik során a 2.9. ábrán látható nyomáscsúcsokat azonosították.



2.9. ábra. Jellegzetes nyomáscsúcsok a csatornával lefúvatott robbanásokban [72]

Az első,  $P_1$ -gyel jelölt csúcsérték a hasadóelem nyitását követő turbulens zavar és az ebből induló lökéshullám hatása. Megnevezése a külföldi szakirodalomban „membrane break shock”, amelyet Ye és mtsai. [74] 2004-ben azonosítottak. A  $P_2$ -vel jelölt második csúcs maga a másodlagos robbanás, amelynek jelenléte már az 1990-es évektől kezdve ismert [75]. Pang és mtsai. [72] kimutatták, hogy minél hevesebb robbanást produkál egy keverék, időben annál közelebb helyezkedik el egymáshoz a  $P_1$  és  $P_2$  csúcs. A legkönnyebben megfigyelhető, így legrégebb óta [76] ismert nyomáscsúcs a  $P_3$  jelű, amely akkor keletkezik, mikor a másodlagos robbanás hatása gyengül, és a készülékből újra megindul a lefúvatás. Míg az előző két maximumérték rendkívül gyorsan leépül, addig a  $P_3$  csúcs hatása elnyújtottan marad fenn.

Újabb kutatások szerint [77] egy második másodlagos robbanás is létrejöhet a következő feltételek mellett: nagyméretű, nagy  $L/D$  viszonyú készülékek esetén ( $0,92 \times 0,62 \times 2$  m),



szintén nagyméretű hasadóelem ( $800 \times 500$  mm) alkalmazásával. Ekkor olyan körülmények léphetnek fel, amelyek egy, a másodlagos robbanásnál magasabb lokális nyomáscúcsot eredményeznek. Ez a nagyméretű lefúvófelületnek köszönhető, amely lehetővé teszi a Helmholtz-oszcilláció során nagy tömegáramú közeg megmozdítását és újra keveredését. Azonban ilyen jelenséget kisméretű köbös készülékek, relatíve kis lefúvófelület esetén, valamint lefúvató csatornák alkalmazása mellett még nem rögzítettek.

Ezekon felül a lefúvatást követően, már a vezetéken kívül is kialakulhat másodlagos robbanás, amelynek létrejöttét például Cao és mtsai. [78] vizsgálták.

### 2.3.3. A lefúvató csatorna hatása a készülékben mérhető robbanási jellemzőkre

Lunn és mtsai. [79] egyértelműen kimutatták, hogy a redukált nyomás jelentősen változik, amennyiben lefúvató csatorna is csatlakozik a készülékhez. Hatását legintenzívebben az alábbi paraméterek befolyásolják:

- a csatorna hossza és átmérője,
- a hasadóelem nyitónyomása,
- a készülék térfogata, és
- a gyújtási pozíció.

A témával foglalkozó kutatók többségében csak az adott keverék leghevesebben reagáló koncentrációit vizsgálják. Mivel a robbanási konstans értéke számos paramétertől függ, ezért annak meghatározása nagymértékű bizonytalansággal jár, így ezt az értéket a szakirodalmak többsége nem tartalmazza.

**A csatornahossz és -átmérő hatása** Yang és mtsai. [80] kimutatták, hogy a redukált maximális nyomások nem csak a keverékösszetételnek megfelelően változnak haranggörbe szerint, hanem a csatorna  $l/d$  viszonya is befolyásolja azt: a hossz kezdetben jelentős és növekvő hatással van a redukált nyomásra, majd mérséklődik.

Yan, Yu és Gao [81] azt találták, hogy bár nem minden esetben lép fel másodlagos robbanás a lefúvócsőben, de a nagyobb csatornaátmérők és kisebb nyitónyomások kedveznek a másodlagos robbanásnak. A tüzelőanyag koncentrációjának változtatása a robbanási jellemzőkhöz hasonlóan haranggörbe-szerűen befolyásolja a másodlagos robbanás bekövetkezését [82]. Amennyiben bekövetkezik, a csatornában kialakuló másodlagos robbanás játssza a legnagyobb szerepet a lefúvatást gátló tényezők közül [73][83].

Bartknecht [73] továbbá kimutatta, hogy  $l > 10 - 20$  m csatornahosszok esetén az áramló közeg sebessége meghaladhatja a hangsebességet és a lángterjedés átléphet detonációba (DDT – deflagration to detonation). Ezen okból a csatornahosszt ajánlott 10 méternél rövidebbre, vagy legalább  $10 \text{ bar}_g$  belső nyomásterhelésre tervezni. A Bartknecht által kidolgozott számítási összefüggések jelenleg is az NFPA 68:2018 és az MSZ EN 14994:2007 szabványok számítási módszereinek alapját képezik.

Blanchard és mtsai. (2010.) [84] vizsgálataikat kifejezetten  $90^\circ$ -os ívet tartalmazó csővezetékre végezték el. Kimutatták, hogy egy viszonylag kis távolságra elhelyezett  $90^\circ$ -os ív képes megnövelni a láng sebességét és a túlnyomást, valamint csökkentheti a gyújtási pont és a DDT bekövetkezési helyének távolságát. Így látható, hogy a lefúvató csatornában elhelyezett egyetlen iránytörés is jelentősen megváltoztatja a közeg áramlási viszonyait.

**A nyitónyomás hatása** Yan, Yu és Gao [81] kimutatták, hogy ha nagyobb a hasadóelem statikus aktivációs nyomása, az csökkenti a másodlagos robbanás intenzitását, ennél fogva csökkenti a redukált nyomás emelkedésének mértékét is.

Guo és mtsai. [85] különböző vastagságú hasadóelemek szerepét tanulmányozták a maximális redukált robbanási nyomásra valamint a lefúvás időtartamára vonatkozóan. Míg a redukált nyomás a hasadóelem vastagságával (így a nyitónyomásával) lineáris kapcsolat szerint növekedett, addig a lefúvás időtartama másodfokú jelleget követett.

**A készüléktérfogató hatása** A kísérleti vizsgálatok nagy része kisméretű készülékekben zajlik, ezért kulcsfontosságú a megállapítások ipari méretű készülékekre való megfelelő átültetése. Nagy térfogatú készülékek esetén a robbanás és lángterjedés homogenitása nem biztosított, így lefúváskor nagyobb valószínűséggel jut ki a készülékből jelentős mennyiségű el nem égett por- vagy gázfelhő, igen heves másodlagos robbanást okozva a készüléken kívül is [86].

**A gyújtási pozíció hatása** Taveau [86] számos kísérleti eredményt összefoglalva bizonyította, hogy a készülékben mérhető maximális robbanási nyomás fordítottan arányos a gyújtási pozíció és a lefúvófelület közti távolsággal. Továbbá megállapította, hogy kisméretű lefúvófelületek és intenzív kezdeti turbulencia esetén a másodlagos robbanás kevésbé intenzív, mint a nagy lefúvófelület, kis kezdeti turbulencia és lefúvófelülettől távoli gyújtási pozíció esetén.

Ferrara és mtsai. [83] azt is kimutatták, hogy a lefúvócső átmérőjének, hosszának és a gyújtás helyének változtatása közül ez utóbbi gyakorolja a legnagyobb hatást a készülékben mérhető túlnyomásra. Ennek kiváltó oka szintén a csatornában tapasztalható másodlagos robbanás.

### 2.3.4. Lehetséges csatornakialakítások, szabványi előírások

A következőkben a lefúvató csatornák hatásának megállapítására vonatkozó főbb szabványi előírásokat ismertetem. Az egyes módszerek végén említett relatív hibák értékeit Lautkaski [64] állapította meg széles vizsgálati tartományban elvégzett kísérletek alapján. A szerző propán, metán, acetón, földgáz és városi gáz 4 V/V% – 30 V/V% közötti gáz-levegő keverékével végzett kísérletek szakirodalmi adatait gyűjtötte össze. Ezeket a kísérleteket 3,7 dm<sup>3</sup> – 10 m<sup>3</sup> térfogatú edényekben végezték el, többségében középponti gyújtással és 0,3 – 25 méter hosszúságú lefúvató csatornákkal. A továbbiakban említett relatív hibák ezen kísérletek adataira vonatkoznak.

A lefúvató csatornákra vonatkozó kritériumok többnyire hasonlóak az MSZ EN 14491:2013, MSZ EN 14994:2007, NFPA 68:2018 és VDI 3673:2002 szabványok esetén:

- a csatorna legyen annyira rövid és egyenes, amennyire lehetséges;
- a csatorna keresztmetszete legyen akkora (MSZ EN 14491:2013) vagy legalább akkora, mint a lefúvó keresztmetszet (MSZ EN 14994:2007, NFPA 68:2018);
- az egyenes csatorna kezdeti keresztmetszetében a lefúvató felület normálisával maximum 20°-os szöget zárjon be;
- az enyhén görbült lefúvató csatorna görbületi sugarának és a csatornaátmérő hányadosára teljesüljön, hogy  $r/d > 2$ ,

- azok a csatornakialakítások, melyek egyetlen 45° vagy 90°-os ívet tartalmaznak, megfelelő mérnöki megfontolások mellett, az UK Institution of Chemical Engineers iránymutatásai mentén alkalmazhatók. (MSZ EN 14491:2013)

### 2.3.4.1. Az MSZ EN 14491:2013 előírásai – porokra vonatkozó összefüggések

Az MSZ EN 14491:2013 szabvány [15] a szabadon álló,  $V$  térfogatú köbös edényekre a (2.34) összefüggést ajánlja a  $d$  átmérőjű,  $l$  hosszúságú lefűvóvezeték által megnövelt redukált nyomás maximumának meghatározására.

$$\frac{P'_{red,max}}{P_{red,max}} = 1 + 17,3 \cdot \left[ \frac{A}{V^{0,753}} \right]^{1,6} \cdot \frac{l}{d} \quad (2.34)$$

Továbbá megállapítja, hogy a lefűvató csatorna hatására bekövetkező nyomásnövekedés a (2.35) szerint meghatározott csatornahossz-átmérő viszonynál a legjelentősebb.

$$(l/d)_s = 4,564 \cdot P_{red,max}^{-0,37} \quad (2.35)$$

A szabvány feltételezése szerint ennél nagyobb hosszúság-átmérő viszony alkalmazása sem növeli tovább a redukált robbanási túlnyomás maximumát. A (2.34) – (2.35) összefüggések érvényességi korlátai:  $0,1 \text{ m}^3 \leq V \leq 10000 \text{ m}^3$ ;  $0,1 \text{ bar}_g \leq P_{stat} \leq 2 \text{ bar}_g$ ;  $0,1 \text{ bar}_g \leq P_{max} \leq 2 \text{ bar}_g$ ;  $5 \text{ bar}_g \leq P_{red,max} \leq 12 \text{ bar}_g$ ;  $10 \text{ bar} \cdot \text{m/s} \leq K_{St} \leq 800 \text{ bar} \cdot \text{m/s}$ .

Az összefüggések központi gyújtás esetén 32,5%-os relatív hibával adják vissza a Lautkaski [64] munkája szerint vizsgált mérési eredményeket.

### 2.3.4.2. Az MSZ EN 14994:2007 előírásai – gázokra vonatkozó összefüggések

A gázrobbanásokra vonatkozó MSZ EN 14994:2007 jelű szabvány [14] gázok robbanási nyomásának lefűvátása esetén a Bartknecht [87] kutatásai alapján megfogalmazott összefüggéseket ajánlja.

A csatorna redukált nyomást növelő hatása, amennyiben a lefűvóvezeték hossza 3 méternél rövidebb:

$$P'_{red,max} = 1,24 \cdot P_{red,max}^{0,8614} \quad (2.36)$$

míg 3 méternél hosszabb, de 6 méternél rövidebb lefűvóvezetékek esetén:

$$P'_{red,max} = 2,48 \cdot P_{red,max}^{0,5165} \quad (2.37)$$

A 6 méternél hosszabb csatornákra nem érhető el mérési adat, így ezeket kísérleti vagy szimulációs módon kell meghatározni [14]. Az összefüggések relatív hibája Lautkaski szerint [64] bármely lefűvóvezeték-hosszúság esetén 27 – 27,5%.

A szükséges lefűvófelület számítására alkalmas összefüggések alkalmazhatósági tartománya szabadon álló, közel köbös készülékekre (a készülék hosszúság-átmérő viszonya 2-nél kisebb):  $V \leq 10000 \text{ m}^3$ ;  $0,1 \text{ bar}_g \leq P_{stat} \leq 0,5 \text{ bar}_g$ ;  $P_{red,max} \leq 2 \text{ bar}_g$  és  $P_{red,max} > P_{stat} + 0,5 \text{ bar}$ ;  $K_G \leq 500 \text{ bar} \cdot \text{m/s}$ .

### 2.3.4.3. Az NFPA 68:2018 előírásai – porokra vonatkozó összefüggések

Az NFPA 68:2018 szabvány [24] Ural kutatási eredményei alapján [88] fogalmaz meg összefüggéseket. A lefúvóvezeték hatására megnövekedett redukált robbanási nyomás számítása helyett a jelenleg hatályos szabvány a (2.38) összefüggésben egy olyan megnövelt  $A_{vf}$  lefúvófelület számítását javasolja, amelynek segítségével a lefúvóvezeték által okozott nyomás-emelkedés hatása is kezelhető.

$$A_{vf} = A_v \cdot (1 + 1,18 \cdot E_1^{0,8} \cdot E_2^{0,4}) \cdot \sqrt{\frac{\zeta}{\zeta_n}}, \quad (2.38)$$

ahol az egyes tényezők (2.39) – (2.42) szerint számíthatók. Az  $A_v$  lefúvófelület számításakor figyelembe kell venni a készülék hosszúság-átmérő viszonyát, a hasadóelem tehetetlenségét, valamint a szabvány által meghatározott egyéb tényezőket. A (2.38) egyenletben szereplő tényezők:

$$E_1 = \frac{A_{vf} \cdot l}{V}, \quad (2.39)$$

$$E_2 = \frac{10^4 \cdot A_{vf}}{\left(1 + 1,54 \cdot P_{stat}^{4/3}\right) \cdot K_{St} \cdot V^{3/4}}. \quad (2.40)$$

A lefúvóvezeték-rendszer (2.38) egyenletben szereplő teljes ellenállása a (2.41) egyenlet szerint határozható meg:

$$\zeta \equiv \zeta_{inlet} + \frac{f_d \cdot l}{d} + \zeta_{elbows} + \zeta_{outlet} + \dots \quad (2.41)$$

Az  $f_d$  D’Arcy-féle súrlódási tényező általános meghatározása turbulens áramlásra:

$$f_d = \left\{ \frac{1}{1,14 - 2 \cdot \log_{10}(\epsilon/d)} \right\}^2 \quad (2.42)$$

Az összefüggések az eddigi NFPA 68:2018 szerinti feltételeken felül a következő esetekben alkalmazhatók:  $P_0 \leq 1,2 \text{ bar}_a$ ;  $1 < L/D < 6$ ; a hasadóelem tehetetlensége  $\leq 40 \text{ kg/m}^2$ .

A módszer relatív hibája Lautkaski [64] szerint bármely lefúvóvezeték-hosszra 35,5 – 36%.

A szabvány szerint a lefúvóvezeték maximális hossza a következőképpen határozható meg:

$$l_{eff} \leq \min \left[ \frac{1000 \cdot d}{K_{St}}, \frac{11000}{K_{St}} \right], \quad (2.43)$$

ahol  $l_{eff} = \min(l_{duct}, l_{dusty})$ ,  $l_{dusty} = (P_{max} - P_{red}) \cdot V/A_v$ .

### 2.3.4.4. NFPA 68:2018 előírásai – gázokra vonatkozó összefüggések

Gázok és ködök robbanási nyomásának lefúvatása esetén azonban a szabvány a redukált robbanási nyomásnövekményre a (2.44) és (2.45) összefüggéseket adja, amennyiben a vizsgálati paraméterek teljesítik a szabvány további előírásait.

Amennyiben a lefúvató csatorna hossza 3 méternél vagy a hidraulikai átmérő négyszeresénél rövidebb, a megnövekedett redukált nyomás a (2.44) összefüggés segítségével számítható.

$$P'_{red,max} = 0,779 \cdot P_{red,max}^{1,161}. \quad (2.44)$$

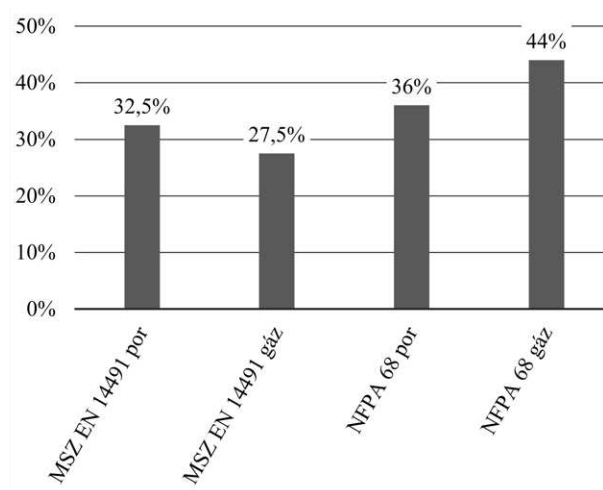
Ha a lefűvóvezeték hossza 3 és 6 méter közé esik, vagy annál rövidebb, de a hossza a hidraulikai átmérő négyszeresénél nagyobb, a csatorna hatására megnövekedett redukált nyomás a (2.45) összefüggés segítségével számítható.

$$P'_{red,max} = 0,172 \cdot P_{red,max}^{1,936}. \quad (2.45)$$

Russo és mtsai. [73] vizsgálatai alapján ez utóbbi összefüggések alulbecsülik a redukált nyomás csúcsértékét a csatorna alkalmazása esetén. A számítások relatív hibája: 44%.

### A szabványi számítások relatív hibái

Az említett szabványok Lautkaski [64] által meghatározott relatív hibáit a 2.10. ábra szemlélteti. Látható, hogy bár a szabványok széles körben alkalmazhatók, az összefüggésekből nyert eredmények jelentős hibával terheltek.



2.10. ábra. A vizsgált szabványok maximális nyomásra vonatkozó összefüggéseinek relatív hibái [64]

### 2.3.5. Redukált nyomásra és lefűvásra vonatkozó modellek

A lefűvató csatorna alkalmazása mellett felállított jelentősebb számítási modelleket a 2.3. táblázat foglalja össze. Látható, hogy ezen összefüggések fejlesztése folyamatos.

Azonban megjegyzendő, hogy Ural [88] modelljén kívül a többi megközelítés mindössze egyenes lefűvató csatorna alkalmazására ad közelítéseket. Továbbá ezen összefüggések közös jellemzője, hogy – az Ural-modellt leszámítva – mindennapi mérnöki gyakorlatban az alkalmazásuk nehézkes és időigényes.

| Forrás  | Összefüggés   |
|---|---|
| Bartknecht (1993.)<br>(említve: [64])                                 | Gázrobbanás esetén, ha $l < 3$ m:<br>$P_{red,vd} = 1,24 \cdot P_{red}^{0,8614}, \quad (2.46)$ ha $3 \text{ m} < l \leq 6$ m:<br>$P_{red,vd} = 2,48 \cdot P_{red}^{0,5165}. \quad (2.47)$ Porrobbanásra, ha $l < 3$ m:<br>$P_{red,vd} = 1,84 \cdot P_{red}^{0,654}, \quad (2.48)$ ha $3 \text{ m} < l \leq 6$ m:<br>$P_{red,vd} = 3,00 \cdot P_{red}^{0,4776}. \quad (2.49)$   |
| Tamanini és Fischer<br>(2003.) (említve: [64])                        | $\frac{A_v}{A_{eff}} = 1 + 5 \cdot \Gamma^{3/2} \cdot \Phi_d \cdot \Psi_d^{1/4} \quad (2.50)$ $\Gamma = C_d \sqrt{\kappa_u \frac{\kappa_u + 1 R_0 T_0}{2 M_u}} \cdot \frac{A_v}{V^{2/3}} \cdot \frac{P_m}{K_{St}} \quad (2.51)$ $\Phi_d = \frac{l \cdot V^{1/3}}{A_v} \cdot \frac{M_u}{R_0 T_0} \cdot \left( \frac{K_{St}}{P_{max}} \right)^2 \quad (2.52)$ $\Psi_d = 0,005 \cdot \pi \cdot \frac{d \cdot V}{A_v^2} \quad (2.53)$ |
| Ural (2005.) [88]   | $A_{v,f} = A_{v1} \left( 1 + 1,18 \cdot E_1^{0,8} \cdot E_2^{0,4} \right) \sqrt{\frac{\sum_i \zeta_i}{1,5}} \quad (2.54)$ $E_1 = \frac{A_v \cdot l}{V}, E_2 = \frac{10^4 \cdot A_v}{K_{St} \left( 1 + 1,54 \cdot P_{stat}^{3/4} \right) V^{3/4}} \quad (2.55)$ $\sum_i \zeta_i = 1,5 + \frac{l/d}{\left[ 1,14 + 2 \cdot \log \left( \frac{d}{\epsilon} \right) \right]^2} + 0,35 \cdot n_{45} + 1,12 \cdot n_{90} \quad (2.56)$   |
| Di Benedetto és mtsai.<br>[89]: Yao kiterjesztett<br>elmélete (2007.) | $\frac{P_{red,vd}}{P_0} = \left( \frac{Br_t}{Br_{t,vd}} \right)^2 \cdot \frac{1}{Br_t^2} =$ $\frac{1}{(1,38 \cdot a)^2} \frac{E^{7/3}}{(E-1)^2} \cdot Re_f^{-2b} \cdot \left( \frac{A}{S} \right)^{-2(c+1)} \cdot \left( \frac{l}{d} \right)^{-2e} \quad (2.57)$  |
| Lautkaski (2012.) [64]  | $\frac{Br_{t,vd}}{Br_t} = 0,36 \cdot Re_f^{-0,364} \left( \frac{P_{max}}{P_0} \right)^{1,922} \left( \frac{l}{d} \right)^{0,027} \cdot \left( \frac{P_{stat}}{P_0} \right)^{-1,699} \quad (2.58)$   |

2.3. táblázat. Jelentősebb összefüggések a maximális redukált robbanási nyomás számítására, lefúvató csatorna alkalmazásával

## 2.4. Lefúvatott robbanás terelőlemez alkalmazásával

### 2.4.1. Terelőlemezek

A terelőlemezek a lefúvatott robbanásokból származó közegáram adott irányba terelésére szolgálnak, az emberi élet és az anyagi javak védelme érdekében. Nem csak a lángoktól védik a környezetet, de a védelmi berendezés működése következtében kiáramló szilárd részecskéket is felfogják. Azonban, ha a lemez túlságosan közel esik a lefúvófelülethez vagy a készüléktér fogat túl kicsi, a redukált nyomás olyan mértékben megnőhet, amely már a lefúvatást akadályozza. Az ipari gyakorlatban leginkább hasadópanelek kiegészítőiként fordulnak elő, és porrobbanással kapcsolatos védelmi rendszerek részét képezik.

A korábbiakban említett MSZ EN 14491:2013 [15], MSZ EN 14994:2007 [14], NFPA 68:2018 [24] és VDI 3673:2002 [90] szabványok is rendelkeznek a terelőlemezek alkalmazásával kapcsolatban, bár az előírások igen szűk mozgásteret engednek a tervezés szempontjából. A szabványok nem terjednek ki a terelőlemez és a lefúvófelület távolságának változására, szükséges szilárdságára, valamint a lefúvóvezetékek és terelőlemezek együttes alkalmazására sem. Ennek folyománya, hogy az ipari gyakorlatban gyakran a  $P'_{red,max}$  nyomásértékre való méretezéssel biztosítják a lemezek szilárdsági megfelelőségét.

### 2.4.2. A lefúvatás után a környezetben lejátszódó folyamatok

A következőkben ismertetett folyamatok a lefúvató csatorna nélküli esetekre vonatkoznak, a csatorna alkalmazása módosíthatja a bekövetkező jelenségeket. A kifejezetten terelőlemezekre vonatkozó tudományos vizsgálatok köre szűk, a megjelent tanulmányok ehelyett inkább a lefúvatott nyomáshullám maximumértékére és a kicsapó láng hosszúságára koncentrálnak.

Ismert, hogy amikor a láng a lefúvatást követően a környezetbe kerül, a belső túlnyomás mérséklődik, kellően nagy lefúvófelület esetén akár nullára is csökkenhet. Megfigyelhető, hogy a láng terjedése kissé le van maradva a nyomáshullámhoz képest, ezért az ezek által okozott károk nincsenek szinkronban egymással: a környezetet előbb a nyomáshullám rongálja meg, majd a másodlagos, hő által okozott károk következnek. Ezeket érdemes lehet figyelembe venni a tervezési és védelmi szempontok kialakításánál [91].

A lefúvatott láng struktúrája a Darrieus-Landau instabilitásnak és a diffúziós-termikus instabilitásnak köszönhetően négy különböző fázisra osztható [91]:

1. „lapos” lángfront: a hasadóelem kiszakadása után a lefúvatás korai szakaszában alakul ki, amikor a láng sík formában terjed;
2. „gomba” alakú lángfront: a terjedés során a lángfront ívelt felületűvé válik, a környezeti levegőbe való benyomulás eredményeképpen pedig örvények képződnek a széleken;
3. ellipszoid lángfront: a széleken kialakuló örvények eltűnnek, a lángfront pedig ellipszoid alakot vesz fel;
4. elhaló láng: az el nem égett keverék elfogy, így a reakció nem tud tovább fennmaradni, ezért a lángfront felszakadozik, majd elhal.

Eközben mind a sebesség, mind a láng nyúlásának mértéke csökken, előbbi változását az alábbi egyenlet írja le [91]:

$$v = \frac{dL}{dt} = \alpha \cdot t^{(\alpha-1)}. \quad (2.59)$$

A lefúvatott „felhő” maximális  $R_{Cl}$  sugara [92]:

$$R_{Cl} = 0,5 \cdot V^{0,3}. \quad (2.60)$$

Wang és mtsai. [93] metán-levegő keverékek vizsgálatával megállapították, hogy bizonyos körülmények között a készüléken kívül két nyomáscsúcs is kialakulhat. Az első csúcsot a lefúvatott anyagáram okozza, míg a második csúcs szintén a lefúvatásnak vagy a másodlagos robbanásnak köszönhető. Mind a készüléken kívüli maximális nyomás, mind a nyomásemelkedési sebesség növekszik a kezdeti nyomással, a lefúvónyomással, valamint a lefúvófelülettel arányosan. A készüléken kívüli robbanási paraméterek azonban a készülék térfogatának növelésével csökkennek. Mind a külső nyomás maximuma, mind a nyomásemelkedési sebesség a vizsgált keverék maximális robbanási nyomást adó összetételének környékén tapasztalható.

Bao és mtsai. szintén a lefúvatáskor fellépő külső nyomáscsúcsokat vizsgálták [94]. Különböző összetételű metán-levegő keverékekre megállapították, hogy a lefúvatás során akár négy külső nyomáscsúcs is kialakulhat. Az első csúcsot a lefúvófelület nyitása utáni lökéshullám okozza, míg a negyedik csúcsot a robbanás akusztikus oszcillációja. A két köztes nyomáscsúcs okáról a szerzők nem tesznek említést. Később a szerzők mérési eredményeit felhasználva Yang és mtsai. [95] adtak számítási összefüggéseket ezen nyomáscsúcsok értékeire, amelyek a 2.4. táblázatban (lentebb) található meg.

Taveau [86] szerint a készüléken kívüli másodlagos robbanás intenzívebbé válik, ha a gyújtási pozíció távolsága a lefúvófelülettől növekszik, valamint a lefúvófelület előtt akadályok is vannak. A távolság növelése növeli a lefúvási sebességet, valamint a készülékben a robbanás során kialakuló turbulenciát is. Ebből kifolyólag a külső nyomáscsúcs akár tartósan is meghaladhatja a belső nyomást [59].

### 2.4.3. Külső nyomásértékekre vonatkozó modellek

A lefúvatott robbanások által a terelőlemezre kifejtett erőhatások maximumértékeinek meghatározására irodalmi adatokat a kutatásaim során nem találtam. Azonban a lefúvatott robbanások külső nyomásmaximumainak becslésére korlátozott számban, de elérhető számítási összefüggések a szakirodalomban. Ezek közül a jelentősebbeket a 2.4. táblázat foglalja össze.

A táblázatban szereplő összefüggésekből is látható, hogy a külső nyomáscsúcs számítására szolgáló módszerek nem veszik figyelembe a nyomás időbeli változását. Azonban a szerkezetek dinamikus válaszána vizsgálatokor a külső nyomás időbeli változásának ismerete is elengedhetetlen. Yang és mtsai. [95] metán-levegő keverékekkel végzett vizsgálataik során erre is közöltek számítási összefüggéseket.



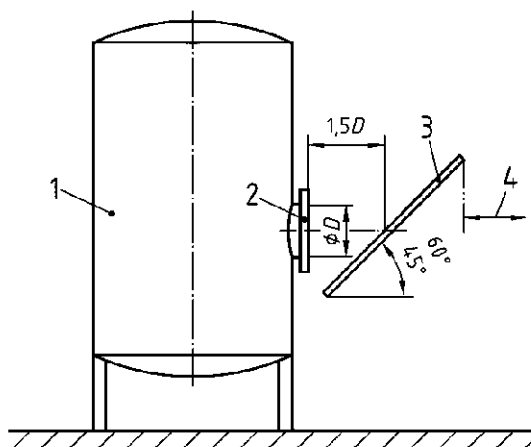
| Forrás                                   | Összefüggés  |
|--|--|
| Palmer és Tonkin (1980.) (említve: [96]) | $P_{max} = k/(d + d_0) \quad (2.61)$   |
| Hattwig (1980.) (említve: [5])           | $P_{max} = P_{red,max} \cdot C_1 \cdot C_2/d \quad (2.62)$ $C_1 = -0,26/A_v + 0,49 \cdot A_v \quad (2.63)$ $C_1 = 1m \quad (2.64)$   |
| Forcier és Zalosh (2000.) [96]           | $\frac{P_{max}}{P_a} = 1 + \frac{\gamma \left( \frac{(\gamma+1) \cdot P_{red}}{\rho_a \cdot c_0^2} \right)^{1/2}}{(\gamma + 1)(\log \hat{r})^{1/2} \cdot \hat{r}}, \quad (2.65)$ <p>ahol <math>\hat{r} = r/c</math>. Az <math>r</math> a robbanási nyomáshullám elülső frontjának távolsága a robbanás középpontjától.</p>                       |
| Yang és mtsai. (2021.) [95]              | $\Delta P_{max} = 19,265 \cdot K_v \cdot \left[ e^{0,015 \cdot P_{stat} - 13,53 \cdot (\phi - 1)^2} - e^{-2,32 \cdot P_{stat}} \right] \quad (2.66)$ $K_v = \frac{V^{2/3}}{A_v} \quad (2.67)$ <p>ahol <math>0,3 \text{ kPa} \leq P_{stat} \leq 55 \text{ kPa}</math>; <math>0,684 \leq \phi \leq 1,315</math> metán-levegő keverékek esetén.</p> |

2.4. táblázat. Jelentősebb összefüggések a külső maximális robbanási nyomás számítására, lefúvatott robbanások esetén

#### 2.4.4. Terelőlemezekre vonatkozó szabványi előírások

A terelőlemezek lehetséges kialakítását és beépítését a 2.11. ábra szemlélteti. Az általam vizsgált MSZ EN 14491:2013, MSZ EN 14994:2007 és az NFPA 68:2018 és VDI 3673:2002 szabványok ezt az elrendezést ajánlják, ám eltérő kritériumok mellett. Az alkalmazási feltételeket a 2.5. táblázat foglalja össze. Mivel a VDI 3673 nem fogalmaz meg terelőlemezekre vonatkozó összefüggéseket, így ez nem szerepel a felsorolásban.

Az egyes szabványok meghatározzák a terelőlemez és a lefúvónyílás területének viszonyát, ezek befoglaló méreteinek arányát, valamint a terelőlemez dőlésszögét. Úgy kell továbbá elhelyezni a lemezt, hogy a lefúvónyílás és a terelőlemez tengelyének egybe kell esnie. Ezen felül a lemezt úgy kell felszerelni, hogy ne akadályozza a lefúvatást, és középpontjának a lefúvónyílástól vett távolsága a szabványi ajánlás szerint  $1,5 \cdot D$ , ám ez az érték a tervezés során módosítható. Továbbá a terelőlemezek ellen kell állnia a robbanás nyomáshulláma által kifejtett erőnek, amely a szabványi ajánlás szerint a  $P'_{red,max}$  redukált nyomásmaximum és a terelőlemez felületének szorzatával adható meg [15].



2.11. ábra. Terelőlemez lehetséges kialakítása  
1. készülék 2. hasadófelület 3. terelőlemez 4. védőtávolság [15]

| Előírás   | MSZ EN 14491:2013 | MSZ EN 14994:2007 | NFPA 68:2018      |
|---|-------------------|-------------------|-------------------|
|   | por               | gáz               | por és gáz        |
| Terelőlemez befoglaló mérete a lefúvónyílás befoglaló méretéhez képest: | 1,6×              | 1,75×             | 1,75×             |
| Terelőlemez dőlésszöge:   | 45° – 60°         | 45° – 60°         | 45° – 60°         |
| A terelőlemez középpontjának lefúvónyílástól vett távolsága:            | 1,5·D             | 1,5·D             | 1,5·D             |
| Maximális készüléktérfogat:   | 20 m <sup>3</sup> | 20 m <sup>3</sup> | 20 m <sup>3</sup> |

2.5. táblázat. A tárgyalt szabványok szerinti terelőlemez-előírások összehasonlítása

Az NFPA 68:2018 szabvány [24] alternatív megoldásként nagy görbületi sugarú könyököt tartalmazó lefúvató csatornát javasol, feltéve, hogy annak hatását a tervező figyelembe veszi a lefúvófelület méretezése során.

A terelőlemezre ténylegesen ható erő a lefúvatott anyagáram nyomásával – amely helytől függő paraméter – van összefüggésben. A következőkben a nyomásértékek meghatározására alkalmazható szabványi előírásokat foglalom össze.

## 2.4.5. A lefúvatáskor fellépő nyomásmaximum számítására szolgáló szabványi előírások

### 2.4.5.1. MSZ EN 14491:2013 – porokra vonatkozó előírások

Az MSZ EN 14491:2013 szabvány [15] szerint a készüléken kívül lefúvatáskor kialakuló maximális nyomásérték:

$$P_{ext} = 0,2 \cdot P_{red,max} \cdot A^{0,1} \cdot V^{0,18}. \quad (2.68)$$

A horizontális irányban mért maximális külső nyomásérték  $R_s$  távolságban várható:

$$R_s = 0,25 \cdot L_f, \quad (2.69)$$

ahol  $L_f$  a láng maximális kinyúlása függőleges irányú lefúvatásra:

$$L_f = 8 \cdot V^{1/3}, \quad (2.70)$$

míg vízszintesre:

$$L_f = 10 \cdot V^{1/3}. \quad (2.71)$$

Ennél nagyobb  $r$  távolságokban a külső nyomás értéke:

$$P_r = 1,24 \cdot (1,13 \cdot A^{0,5}/r) / [1 + (\alpha/56)^2] \cdot P_{red,max}. \quad (2.72)$$

Az összefüggések érvényesek, ha  $0,1 \text{ m}^3 \leq V \leq 250 \text{ m}^3$ ;  $P_{stat} \leq 0,1 \text{ bar}_g$ ;  $0,1 \text{ bar}_g \leq P_{red,max} \leq 1,0 \text{ bar}_g$ ;  $r > R_s$ ;  $P_{max} \leq 9 \text{ bar}_g$ ;  $K_{St} \leq 200 \text{ bar} \cdot \text{m/s}$ ;  $L/D < 2$ ;  $0,2 \text{ bar}_g \leq P_r \leq 1,0 \text{ bar}_g$ ;  $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ .

#### 2.4.5.2. MSZ EN 14994:2007 – gázokra vonatkozó összefüggések

Az MSZ EN 14994:2007 gázokra vonatkozó szabvány [14] összefüggései a lefúvatás készüléken kívüli hatásaira a következők.

A láng hossza a lefúvatásra normális irányban:

$$L_f = 5 \cdot V^{1/3}, \quad (2.73)$$

ahol az összefüggés érvényességi korlátai:  $0,1 \text{ m}^3 \leq V \leq 50 \text{ m}^3$ ;  $P_{stat} \leq 0,1 \text{ bar}_g$ ;  $0,1 \text{ bar}_g \leq P_{red,max} \leq 1,0 \text{ bar}_g$ ;  $P_{max} \leq 9 \text{ bar}_g$ ;  $K_G \leq 100 \text{ bar} \cdot \text{m/s}$ ;  $L/D < 2$ .

A maximális külső nyomás a (2.74) összefüggés szerint számítható.

$$P_r = \left[ 1,24 \cdot P_{red,max} \cdot \left( \sqrt{A/r} \right)^{1,35} \right] / [1 + (\alpha/56)^2] \quad (2.74)$$

Az összefüggés érvényes, ha  $0,1 \text{ m}^3 \leq V \leq 250 \text{ m}^3$ ;  $P_{stat} \leq 0,1 \text{ bar}_g$ ;  $0,1 \text{ bar}_g \leq P_{red,max} \leq 1,0 \text{ bar}_g$ ;  $P_{max} \leq 9 \text{ bar}_g$ ;  $K_G \leq 200 \text{ bar} \cdot \text{m/s}$ ;  $L/D < 2$ ;  $0,2 \text{ bar}_g \leq P_{ext} \leq 1,0 \text{ bar}_g$ ;  $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ . Az  $\alpha$  a lefúvatott sugár beesési szöge a terelőlemeze ( $\alpha = 0^\circ$ : közvetlenül a lefúvónyílás előtt;  $\alpha = 90^\circ$ : a lefúvónyílás oldalai).

#### 2.4.5.3. VDI 3673:2002 – porokra vonatkozó összefüggések

A VDI 3673:2002 szabvány szerint [90] a készüléken kívül kialakuló maximális nyomásérték a lefúvatáskor szintén a (2.68) egyenlet szerint határozható meg. Ennek  $R_s$  távolsága a lefúvófelülettől:

$$R_s = 0,25 \cdot L_f. \quad (2.75)$$

Itt a láng  $L_f$  maximális kinyúlása szintén a (2.70) és (2.71) egyenletek szerint határozható meg. A  $P_r$  külső nyomáscsúcs a lefúvónyílástól mért  $r$  ( $r \geq R_s$ ) távolságra a következő összefüggés szerint számítható:

$$P_r = P_{max} \cdot \left( \frac{R_s}{r} \right). \quad (2.76)$$

Az összefüggések alkalmazhatósági tartománya többségében megegyezik az MSZ EN 14491:2013-ban foglalt feltételekkel:  $V \leq 250 \text{ m}^3$ ;  $P_{stat} \leq 0,1 \text{ bar}_g$ ;  $0,1 \text{ bar}_g \leq P_{red,max} \leq 1,0 \text{ bar}_g$ ;  $P_{max} \leq 9 \text{ bar}_g$ ;  $K_{St} \leq 200 \text{ bar} \cdot \text{m/s}$ ;  $L/D < 2$ .

**2.4.5.4. NFPA 68:2018 – porokra vonatkozó összefüggések**

Az NFPA 68:2018 szabvány [24] porokra vonatkozó összefüggése a lefúvatás tengelyében mért külső nyomásmaximumra a következő:

$$P_{max,a} = 0,2 \cdot P_{red,max} \cdot A_v^{0,1} \cdot V^{0,18} \quad (2.77)$$

Az  $\alpha \cdot D$  távolságnál messzebbi terelőlemezek esetén a horizontális irányban mért maximális külső nyomásérték  $R_s$  távolságban várható:

$$P_{max,r} = P_{max,a} \cdot (\alpha \cdot D/r), \quad (2.78)$$

ahol  $\alpha = 0,2$  horizontális lefúvatás esetén.

Az összefüggések alkalmazhatósági feltételei:  $0,3 \text{ m}^3 \leq V \leq 250 \text{ m}^3$ ;  $P_{stat} \leq 0,1 \text{ bar}_g$ ;  $P_{red,max} \leq 1 \text{ bar}_g$ ;  $P_{max} \leq 9 \text{ bar}_g$ ;  $K_{St} \leq 200 \text{ bar} \cdot \text{m/s}$ ;  $L/D < 2$ .

**2.4.5.5. NFPA 68:2018 – gázokra vonatkozó összefüggések**

Az NFPA 68:2018 szabvány [24] nem fogalmaz meg hasonló összefüggéseket gázokra és gázkeverékekre vonatkozóan.

## 3. fejezet

# Kutatási eredmények

### 3.1. Zárt térben bekövetkező robbanás vizsgálata

Ebben az alfejezetben a zárt térben bekövetkező robbanásokkal kapcsolatos vizsgálataimat és eredményeimet mutatom be. Az elvégzett vizsgálatok célja egy olyan eljárás megalkotása, amelynek segítségével a zárt térben bekövetkező robbanás nyomásgörbéjének kezdeti szakasza leírható.

A fejezetben először ismertetem a kutatásaim első fázisaként kialakított mérőkört, amely lehetővé teszi a berendezésben bekövetkező robbanás folyamatának vizsgálatát. A mérőkör alkalmasságát propán-levegő keverékkel, mint az ipari gyakorlat egyik gyakran előforduló robbanóképes gázelegyével vizsgálom.

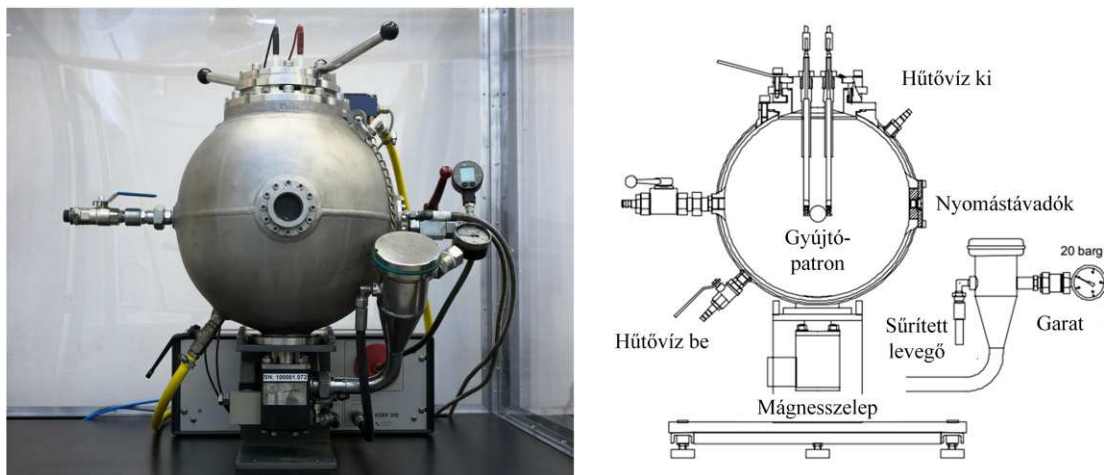
A mérési eredmények bázisát felhasználva megalkotok egy olyan, mérnöki gyakorlatban használható matematikai modellt, amely a robbanási folyamat kezdeti fázisát kellő pontossággal írja le, mivel ez az irodalomban ritkán vizsgált fázis játszik döntő szerepet a lefűvások védelem működésében.

#### 3.1.1. Kísérleti környezet bemutatása

##### 3.1.1.1. A robbantókamra felépítése

A vizsgálataimhoz kapcsolódó méréseket a Miskolci Egyetem Vegyipari Gépészeti Intézeti Tanszékének DustLab laboratóriumában végeztem. A vizsgálatok központi berendezése egy, az EN 14034-1:2004+A1:2011 szabvány [97] előírásainak megfelelő 20 liter űrtartalmú, Kühner gyártmányú robbantókamra volt, amelyet a 3.1. ábra szemléltet. Az ábrán porrobbanás-vizsgálatok elvégzésére alkalmas elrendezésben látható. Fő egysége a robbanásálló kivitelben készült, gömb alakú, duplafalú, korrózióálló acélból készült kamratest. A két falréteg között a kontrollált teszt hőmérsékletek biztosítása érdekében hűtővíz, fűtőgőz vagy egyéb közeg áramoltatható.

Porrobbanások vizsgálatára alkalmas elrendezésben a minta bejuttatásáért a kamra oldalán elhelyezett garat és az alsó mágnesszelep felelős.



3.1. ábra. A 20 liter űrtartalmú Kühner robbantókamra fotója, porvizsgálatra alkalmas elrendezésben

A gyújtóforrás mind por-, mind gázrobbanás-vizsgálatok esetén a kamra középpontjában helyezkedik el. Az itt felépülő nyomásprofil rögzítését két darab Kistler gyártmányú piezoelektromos szenzor végzi, továbbá lehetőség van egy harmadik távadó felszerelésére is. A kamra középső övén kialakított karimára további mérőegységek rögzíthetők vagy kémlelőnyílás szerelhető fel, ez utóbbi az ábrán is látható. Az egység mérés utáni tisztítása a felső csonkon át, gázzal (többnyire környezeti levegővel) történő átöblítése pedig az oldalsó gömbcsapon keresztül történik.

A mérési program vezérlését, valamint a Kistler távadók által továbbított jel feldolgozását és az eredeti funkció szerinti robbanásvizsgálatok eredményeinek kiértékelését a KSEP számítógépes szoftver végzi.

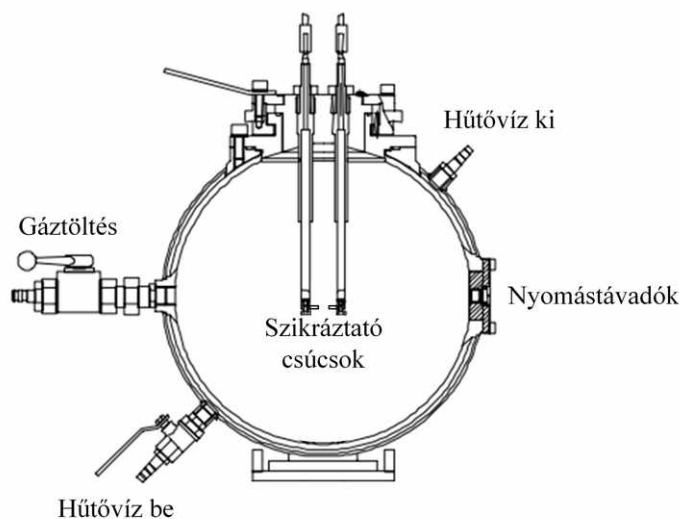
### 3.1.1.2. Gázok vizsgálata

A robbantókamra vázlatát és főbb részeit gázok robbanási tulajdonságainak vizsgálatára alkalmas elrendezésben a 3.2. ábra szemlélteti. Gázok, gázkeverékek vizsgálata esetén a kamra oldalsó betöltő garata és az ehhez csatlakozó mágnesszelep leszerelésre kerül, ezek helyett a megfelelő arányú töltést külső forrásról kell megoldani.

Gázok esetén az elegy gyújtását a kémiai patronok helyett szikráztató csúcsok végzik, amelyek távolsága előre beállított 5 mm, a közöttük létrejövő 10 J energiájú folyamatos villamos ív végzi a gyújtást.

A mérés kezdetén, annak érdekében, hogy a kamra belsejében a robbanóképes elegy betöltése után légköri nyomás alakuljon ki, a kamra előzetes vákuumozása szükséges 0,4 bar<sub>a</sub> értékre. A kamra gyártójának előírásai szerint [98] a bejuttatandó gázelegy egyes komponenseinek mennyiségét a kamrában mért nyomás segítségével kell beállítani úgy, hogy mérőóráról olvassuk le a szükséges parciális nyomások értékét bar egységben, legfeljebb két tizedesjegy pontossággal. Ekkor az adagolásért és a vákuumozásért felelős szerelvények kézi vezérlésűek. A gyújtás időzítése gázelegyekkel végzett mérések esetén szintén kézzel történik. Ez a töltési és leolvasási mód megfelelőnek bizonyul a gázok robbanási jellemzőinek meghatározásához, ám tudományos kutatások elvégzéséhez nem eléggé pontos.

Az adott gázelegyre jellemző robbanási karakterisztika felvételéhez több méréssorozatot is el kell végezni, előre meghatározott koncentrációk sorozata szerint.



3.2. ábra. Gázmérésre szerelt 20 liter űrtartalmú Kühner robbantókamra vázolata Cesana [98] nyomán

### 3.1.2. Zárt térben bekövetkező robbanással kapcsolatos mérések, módosított eljárással

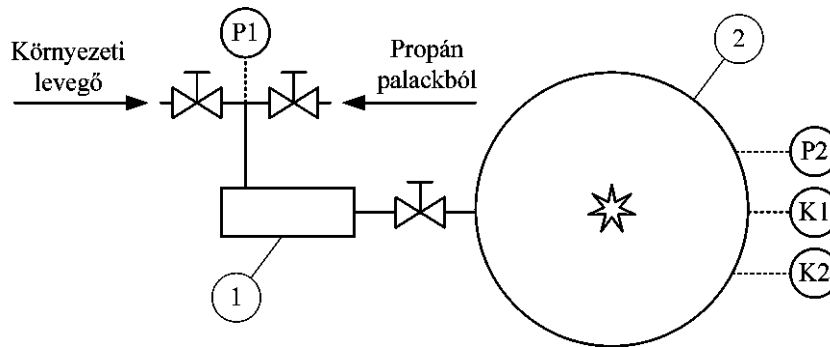
#### 3.1.2.1. A mérések menete

A mérési elrendezés vázlatát a 3.3. ábra szemlélteti. A felhasznált gáz az előzetesen levákuumozott robbantókamrába (2) került bevezetésre. A mérésekhez kereskedelmi forgalomban elérhető, Linde gyártmányú 99,5% tisztaságú propánt használtam, az előre meghatározott összetételű keverék másik összetevője pedig a környezeti levegő volt. A gyújtóforrást a kamra mértani középpontjában elhelyeztem, 10 J energiájú elektromos szikra adta. A robbanás során a kamra nyomásértékeit a már korábban említett két darab Kistler nyomástávadón ( $K1$  és  $K2$ ) kívül még egy nyomástávadó szenzorral ( $P2$ ) rögzítettem, 9600 Hz frekvenciaértékekkel.

A méréseket atmoszférikus kezdeti nyomáson ( $1 \text{ bar}_a$ ) és környezeti kezdeti hőmérsékleten (298 K) végeztem. A mérésekhez a megfelelő nyomás biztosításához a Kühner robbantókamra vákuumozását vákuumszivattyú segítségével oldottam meg, amelyet az ábrán nem jelöltem.

A mérések megbízhatóságának növelése érdekében a kívánt mennyiségű gáz betöltésére egy – csatlakozó szerelvényekkel együtt – 0,6 liter űrtartalmú töltőkamrát (1) terveztem és alkalmaztam, fotója a 3.4 ábrán látható. A kívánt gázmennyiséget a töltőkamrán elhelyezett  $P1$  jelű nyomástávadó segítségével ellenőriztem, szintén 9600 Hz frekvencián.

Vizsgálataim során a mérőprogram vezérlését és a Kistler távadók által mért nyomásértékek rögzítését a KSEP szoftverrel, míg az azokon kívüli nyomásértékek rögzítését külső távadókkal és HBM mérő-adatgyűjtő egységgel oldottam meg.

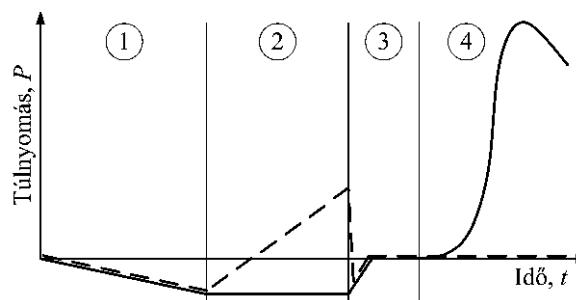


3.3. ábra. Propán-levegő töltőrendszer vázlata;  
1 – gáztöltő kamra, 2 – robbantókamra



3.4. ábra. A 0,6 liter űrtartalmú gáztöltő kamra fényképe

A zárt kamrás mérések egyes szakaszait a 3.5. ábra szemlélteti. Az ábrán a folytonos vonallal jelzett görbe a robbantókamrában, míg a szaggatott vonal a töltőkamrában rögzített nyomásértékek jelleggörbéjét mutatja.



3.5. ábra. A zárt kamrás mérések jellemző szakaszai  
Folytonos vonal – nyomás a robbantókamrában; szaggatott vonal –  
nyomás a töltőkamrában

Az 1. szakaszban zajlott a töltőkamra és a robbantókamra egyidejű vákuumozása a kívánt értékre. Ezt követően a két kamra közötti elzáró szerelvény zárásával a köztük lévő



anyagáram megszűnt. A töltőkamrába a 2. szakaszban került betöltésre a propán, szintén előre meghatározott nyomásértékig. Ezután a két kamra közötti elzáró szerelvény ismét nyitásra került, a propán egy része a 3. szakaszban beáramlott a robbantókamrába. A vákuum teljes megszüntetése és a töltőkamra átöblítése érdekében a hiányzó légmennyiséget a szabadból, annak a töltőkamrán keresztül történő átáramoltatásával biztosítottam. A 4. szakaszban szoftveresen vezérelt, 60 ms-os késleltetés után megtörtént a gyújtás. A kamrában a robbanás közbeni nyomásértékeket a 3.4. ábrán is feltüntetett  $P2$  jelű nyomástávadó és HBM adatgyűjtő egység segítségével rögzítettem.

A bekövetkező robbanás után a teljes rendszert körülbelül 20-szoros légcserével szellőztettem át a maradék gázok és égéstermékek eltávolítása érdekében.

### 3.1.2.2. A maximális robbanási nyomás és a robbanási konstans meghatározása

A lefúvási folyamat vizsgálata előtt célszerű a zárt térben bekövetkező robbanások jellemző értékeit (a  $P_{max}$  maximális robbanási nyomást és a  $K_G$  robbanási konstans) megvizsgálni, valamint a megfelelő szakirodalmi adatokkal összehasonlítani.

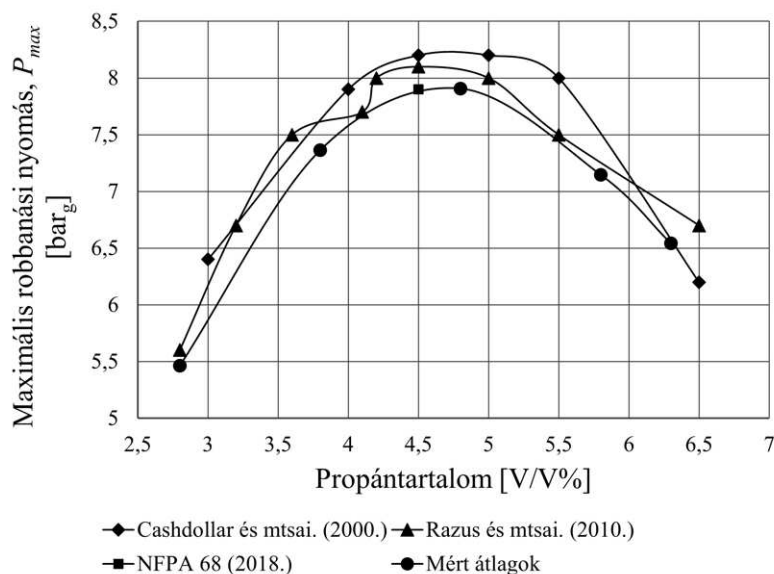
Ahogy már korábban is említettem, vizsgálataimat propán-levegő keverékekkel végeztem, amelynek vizsgált összetételei rendre a következők voltak: 2,8, 3,8, 4,8, 5,8 és 6,3 V/V% propántartalmú keverék.

A vizsgálatok eredményeképpen előálló robbanási jelzőszámokat a 3.1. táblázat foglalja össze. Minden egyes feltüntetett koncentrációhoz legalább három különböző mérés tartozik oly módon, hogy az adott koncentrációhoz tartozó méréseket legalább ötször ismételttem meg, ezek közül a legkisebb és legnagyobb eredményt elhagytam, a többinek pedig a számtani közepét képeztem. Továbbá, ahogyan a mérés leírásából is kitűnik, a nyomásértékeket a robbantókamrában három különböző nyomástávadó rögzítette, így egyetlen koncentrációhoz tartozó maximális robbanási nyomás legalább 9 különböző mérés átlaga, míg a robbanási nyomásemelkedés legalább 3 különböző mérési eredmény átlagából tevődik össze. A maximális robbanási nyomás eredmények átlagtól való eltérései így -3% és +3,5% közé, míg a robbanási konstansok átlagtól való eltérései -18,5% és +23% közé estek.

| Propántartalom<br>[V/V%] | Maximális robbanási nyomás<br>$P_{max}$ [bar <sub>g</sub> ] | Robbanási konstans<br>$K_G$ [bar·m/s] |
|--------------------------|---|---------------------------------------|
| 2,8                      | 5,46  | 21                                    |
| 3,8                      | 7,36  | 85                                    |
| 4,8                      | 7,91  | 111                                   |
| 5,8                      | 7,15  | 49                                    |
| 6,3                      | 6,54  | 23                                    |

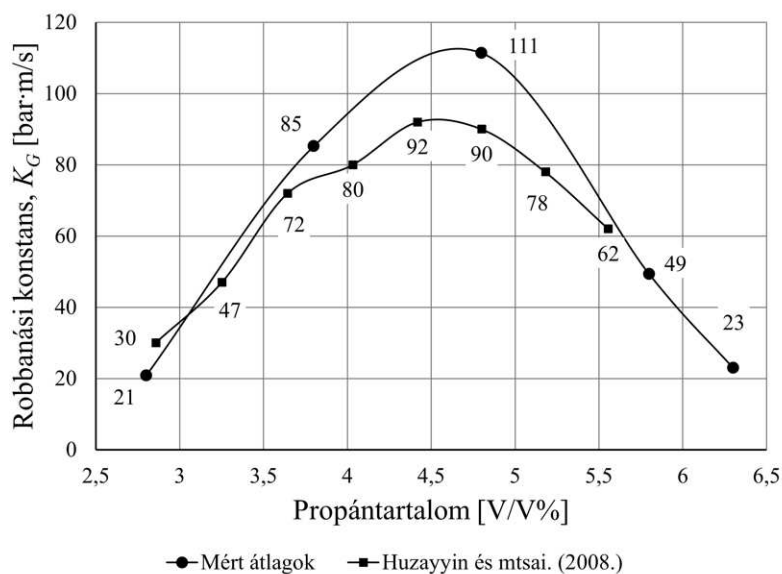
3.1. táblázat. Zárt kamrával végzett mérési eredmények

A maximális robbanási nyomás eredmények összevetését a szakirodalomban megtalálható adatokkal a 3.6. ábra szemlélteti. Az ábra magyarázatában szereplő értékek forrásai a következők: Cashdollar és mtsai. [23], NFPA 68:2018 szabvány [24], Razus és mtsai. [99]. Látható, hogy a mérési eredmények megfelelően közelítik a szakirodalmi eredményeket, azoktól -3%-on belüli átlagos eltérést mutatnak.



3.6. ábra. Zárt kamrában mért maximális robbanási nyomások [23][24][99]

Mivel a robbanási nyomásemelkedés értékét számos külső tényező befolyásolja – ilyenek a kezdeti turbulencia, a környezeti hőmérséklet és nyomás, a robbantókamra térfogata stb. – ezért a szakirodalomban ilyen jellegű adatokat a szerzők nem, vagy csak diagram formában közölnek. Egy erre vonatkozó mérési eredmény Huzayyin és mtsai. [43] munkájából származik (3.7. ábra). A saját mérési eredmények hibája az irodalomhoz képest a -19%. Mivel a kezdeti turbulencia extrém mértékben befolyásolja a pillanatnyi lángsebességet, ezzel együtt pedig a robbanási nyomásemelkedés sebességét, ez megmagyarázhatja a saját eredmények jelentő szórását, valamint az irodalomtól való eltérést – bár erre vonatkozó információt a forrásban nem találtam.



3.7. ábra. A zárt kamrában mért robbanási konstansok [43]

### 3.1.3. Zárt térben bekövetkező robbanás modellezése

#### 3.1.3.1. A Frolov-modell

A reakciókinetikai modelleknél kevésbé pontos, de a mérnöki gyakorlatban használható eredményt adnak az úgynevezett egy-egyenlet modellek, amelyek az égés (2.21) egyensúlyi reakcióegyenletét veszik alapul, majd erre vonatkozóan határozzák meg a robbanóképes anyag fogyásának mértékét. A fogyás differenciálegyenlete empirikus összefüggés, amely alapján a többi komponens időbeli változása is modellezhető.

Kutatásaim célja ezek közül egy olyan, a mérnöki gyakorlatban is egyszerűen alkalmazható modell megtalálása volt, amely kielégítően alkalmazható a zárt téri robbanások nyomásemelkedésének számításához.

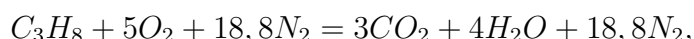
#### 3.1.3.2. A modell leírása

A korábban már röviden ismertetett egy-egyenlet modellek közül a Frolov és mtsai. [56] által meghatározott összefüggés – számos hasonló modellel ellentétben – tartalmazza a rendszer pillanatnyi nyomását, így figyelembe is veszi azt. Ebből kifolyólag a továbbiakban ezen modell segítségével vizsgáltam a zárt rendszerben bekövetkező propán-robbanást, és kíséreltem meg a nyomásemelkedési görbe leírását.

A kiválasztott egy-egyenlet modell alkalmazhatóságát 4,8 V/V%-os összetételű propán-levegő keverék esetén vizsgáltam a robbantókamrában végzett kísérleteim segítségével, így a számítások kezdeti feltételeit is ezek alapján választottam meg. A kamrában a kezdeti nyomás légköri, azaz 1 bar<sub>a</sub> volt, a kezdeti hőmérséklet pedig 298 K. Teljesen előkevert állapotú keveréket feltételeztem a vizsgált tér minden pontjában. Az egyes komponensek koncentráció-változásainak differenciálegyenleteit felírva számítottam azok pillanatnyi értékeit.

A modell szerint a gyulladás bekövetkezéséhez egy kezdeti emelt hőmérséklet szükséges, amelyet 1450 K értékűre vettem fel. A keveréket a gyulladás előtt a bevett gyakorlat szerint ideálisnak feltételezve, az egyesített gáztörvény értelmében a kezdeti nyomás így 4,7 bar<sub>g</sub>-re adódott.

A vizsgált propán levegőben történő égésének egyensúlyi egyenlete a már említett (2.23) formula:



amennyiben a levegőt 21 V/V% oxigén és 79 V/V% nitrogén keverékének feltételezzük. Ekkor az égés reakciósebességét a (2.19) összefüggéssel analóg módon számíthatjuk:

$$v = k \cdot [C_3H_8] [O_2], \quad (3.1)$$

ahol  $v$  a reakciósebesség;  $k$  az adott körülmények között érvényes reakciósebességi állandó; a szögletes zárójelek pedig az adott komponens pillanatnyi koncentrációjára utalnak.

A Frolov és mtsai. [56] által kidolgozott (2.25) összefüggés a reakciókinetikai állandó számítására, matematikailag kissé átalakított formában:

$$k = 7 \cdot 10^{14} \cdot P^{-0,2664} \cdot e^{(-E_a/(R_0 \cdot T))}. \quad (3.2)$$

A nyomás és a hőmérséklet az oxidációs folyamat során változtak, az  $E$  aktiválási energia értéke pedig 45,460 kcal/mol (azaz 190,204 kJ/mol) volt.

Amikor a robbanási folyamatot kinetikusan kívánjuk leírni, a reakcióegyenlet minden egyes tagjára megmaradási törvények kell, hogy érvényesek legyenek. A koncentráció változások differenciálegyenleteit a (3.3) – (3.7) összefüggések írják le.

$$\frac{d[C_3H_8]}{dt} = -k \cdot [C_3H_8][O_2], \quad (3.3)$$

$$\frac{d[O_2]}{dt} = -5 \cdot k \cdot [C_3H_8][O_2], \quad (3.4)$$

$$\frac{d[CO_2]}{dt} = 3 \cdot k \cdot [C_3H_8][O_2], \quad (3.5)$$

$$\frac{d[H_2O]}{dt} = 4 \cdot k \cdot [C_3H_8][O_2], \quad (3.6)$$

$$\frac{d[N_2]}{dt} = 0, \quad (3.7)$$

ahol  $d[...]/dt$  az adott komponens koncentráció-változása idő szerint.

Mivel az egyes elemi reakciók mólszám-növekedéssel és energiefel szabadulással járnak, minden időpillanatban szükséges a hőmérséklet korrekciója is. Ez a felszabaduló hőenergia ismeretében a fázisváltozás nélküli energiaváltozás (3.8) általános egyenlete segítségével végezhető el.

$$Q = c_{p,mix} \cdot \rho_{mix} \cdot V \cdot \Delta T, \quad (3.8)$$

ahol  $c_{p,mix}$  a kamrában lévő keverék átlagos, állandó nyomáson vett fajhője;  $\rho_{mix}$  a keverék átlagos sűrűsége a kamrában;  $V$  a vizsgált kamra térfogata;  $\Delta T$  pedig a hőmérséklet-változás a térben.

A fajhő változása a (3.9) – (3.13) összefüggések segítségével fejezhető ki a hőmérséklet függvényében. A megadott összefüggések alkalmazási tartománya 200 K és 2000 K közé esik. Az egyes függvények felvételéhez szükséges adatokat a UniSim Design szoftver segítségével határoztam meg.

$$c_{p,C_3H_8} = -1,142 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 + 4,976 \cdot 10^{-3} \cdot T + 0,399 \quad (3.9)$$

$$c_{p,O_2} = -8,083 \cdot 10^{-8} \cdot T^2 - 3,313 \cdot 10^{-4} \cdot T + 0,833 \quad (3.10)$$

$$c_{p,CO_2} = 1,100 \cdot 10^{-10} \cdot T^3 - 6,359 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 + 1,229 \cdot 10^{-3} \cdot T + 0,531 \quad (3.11)$$

$$c_{p,H_2O} = -7,415 \cdot 10^{-8} \cdot T^2 - 7,351 \cdot 10^{-4} \cdot T + 1,636 \quad (3.12)$$

$$c_{p,N_2} = 1,075 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - 4,458 \cdot 10^{-3} \cdot T + 1,013 \quad (3.13)$$

A keverék átlagos hőkapacitását a (3.14) összefüggés alapján, az egyes komponensek tömegtörtjei szerint súlyozva számítottam ki:

$$c_{p,mix} = c_{p,C_3H_8} \cdot \frac{m_{C_3H_8}}{m_{sum}} + c_{p,O_2} \cdot \frac{m_{O_2}}{m_{sum}} + c_{p,CO_2} \cdot \frac{m_{CO_2}}{m_{sum}} + c_{p,H_2O} \cdot \frac{m_{H_2O}}{m_{sum}} + c_{p,N_2} \cdot \frac{m_{N_2}}{m_{sum}} \quad (3.14)$$

ahol  $m_i$  az  $i$ -edik komponens gáz/gőz fázisbeli tömege.

A reakció során felszabaduló energiát 2220 kJ/mol értékkel vettem figyelembe, a kamra falán keresztül elvont hőt pedig a Newtoni hőátadási törvény alapján számítottam. A

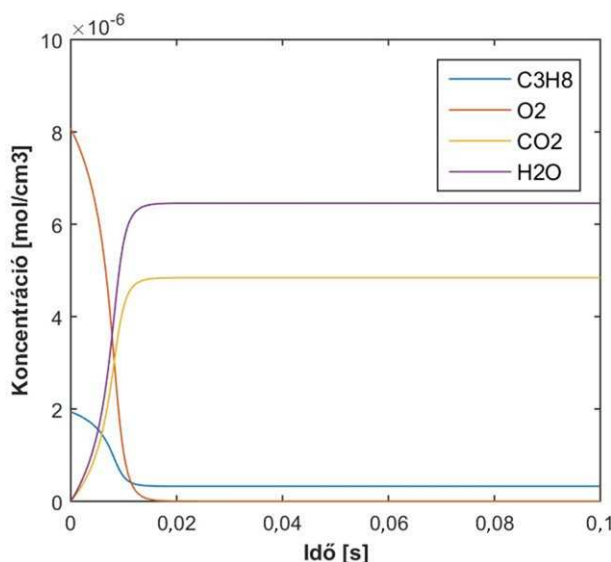
kamra falát – annak folyamatos vízűtéses kialakítása folytán – állandó hőmérsékletűnek tekintetem. Azonban, a falmenti hőátadási tényező és a pontos gyújtási hőmérséklet ismeretlenek voltak, ezeket saját mérési eredmények alapján egy rövid iterációs folyamattal határoztam meg. Ennek eredményeképp a konvektív hőátadási tényezőt a fal mellett gyakorlati tapasztalatok alapján  $900 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , a gyújtási hőmérsékletet pedig  $1450 \text{ K}$  értékkel vettem figyelembe.

A fentebb leírt egyenletrendszer megoldását Matlab szoftver segítségével, *ode23s* megoldóval végeztem. A számítást elegendőnek bizonyult  $0,1 \text{ s}$ -ig lefuttatni,  $10^{-4} \text{ s}$ -os időlépték alkalmazásával.

### 3.1.3.3. Eredmények

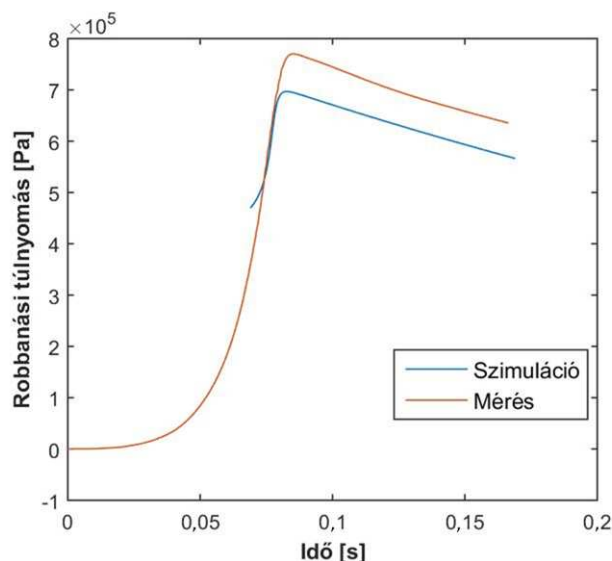
A szimulációs számítások során – ahogyan már korábban említettem – a mérésekhez használt geometriával és körülményekkel megegyező kezdeti- és peremfeltételeket vettem figyelembe.

A kamrában előforduló komponensek koncentrációjának szimulált változását a 3.8. ábra szemlélteti. Ezek felhasználásával a hőmérséklet- és nyomásértékeket is meghatároztam, ezek a tér minden pontjában azonosnak tekinthetők.



3.8. ábra. Az egyes komponensek koncentráció-változása

A 3.9. ábra a  $4,8 \text{ V}/\text{V}\%$ -os propántartalmú keverék esetén hasonlítja össze a mért és szimulált eredményeket. Látható, hogy amíg a mért eredmény nyomásértékének maximuma  $7,9 \text{ bar}_g$ , addig a szimulált érték maximuma  $7,2 \text{ bar}_g$ , ez  $8,9\%$ -os eltérést jelent a két érték között. Robbanás szimulációja esetén a lezajló részfolyamatok bizonytalansága és rendkívüli összetettsége miatt ez elfogadható eltérés.



3.9. ábra. Mért és szimulált nyomásemelkedési görbék a sztöchiometriai arány közelében (4,8 V/V% propántartalom esetén)

A modell legfőbb hibáját is kifejezően szemlélteti a 3.9. ábra. Az előkevert közeg és a gyújtáshoz szükséges nagy láng hőmérséklet a számítások során eredendően magas kezdeti nyomást eredményez, amellyel így elvész a nyomásgörbe kezdeti szakasza. A további vizsgálatok során a lefúvatott robbanást kívántam vizsgálni, így ez a modell ebben a formájában alkalmatlan a további matematikai szimulációk elvégzéséhez.

Mivel a célom egy olyan, egyszerűen alkalmazható matematikai formula megalkotása volt, amely a mérnöki gyakorlatban is kielégítően alkalmazható a zárt téri robbanások nyomásemelkedésének számításához, így a továbbiakban ezen modell alkalmazásától eltekintettem.

#### 3.1.3.4. Az ideális gáz modell

#### 3.1.3.5. A modell leírása

Az ideális gáz modell a fenomenológiai modellek közé sorolható. Zárt térben történő gáz-levegő keverék robbanása során a „thin flame model” értelmében a lángfront vastagsága elhanyagolható. A 2.1. fejezetben azt is kifejtettem, hogy a robbanás kezdeti szakaszában, még ha zárt térben következik is be, az elégett és el nem égett komponensek keveréke ideális gáznak tekinthető, hőmérsékletük és nyomásuk pedig homogénnek feltételezhető az elégett és el nem égett térrészekben belül. Ebben az esetben mindkét fázisra felírható az egyesített gáztörvény (3.15) és (3.16) alakja. Ugyanakkor a láng még elhanyagolható mértékben nyúlik, nem is tapasztalható ráncolódás. Ezek az állítások nagy biztonsággal a kezdeti nyomáshoz viszonyított nyomásemelkedés 10%-áig [36] érvényesek.

$$P \cdot V_u = \frac{m_u \cdot R_0 \cdot T_0}{M_u} \quad (3.15)$$

$$P \cdot V_b = \frac{m_b \cdot R_0 \cdot T_b}{M_b} \quad (3.16)$$

Az összefüggésekben az  $u$  index az el nem égett keverékre, míg a  $b$  index az elégett keverékre, és mindig az adott időpillanatban mérhető értékekre vonatkozik. Mivel a nyomást a rendszerben állandónak tekintjük, így  $P = P_u = P_b$ . A robbanás során az elégett anyag mennyiségi változása:

$$\frac{dm_b}{dt} = A_f \cdot \rho_u \cdot S_l. \quad (3.17)$$

A (3.17) összefüggés bal oldalán álló tag két részre bontható, amely utal a láng terjedési sebességére és égési sebességére:

$$\rho_b \frac{dV_b}{dt} + V_b \frac{d\rho_b}{dt} = A_f \cdot \rho_u \cdot S_l. \quad (3.18)$$

Legyen  $r$  az a pillanatnyi távolság, amelyet a láng a robbanás középpontjától már megtett. Ebben az esetben a láng felülete a következő módon értelmezhető:  $dV_b/dr = A_f$ . A láng sebessége  $dr/dt = S_f$ . Felhasználva (3.18)-t írható, hogy:

$$S_f = \left( \frac{\rho_u}{\rho_b} \right) \cdot S_l - \left( \frac{V_b}{\rho_b \cdot A_f} \right) \left( \frac{d\rho_b}{dt} \right). \quad (3.19)$$

A láng terjedési irányába eső felület nagysága  $A_n$ , amely csőben történő egydimenziós-nak tekinthető lángterjedés esetén megegyezik a  $d^2 \cdot \pi/4$  áramlási keresztmetszettel (ahol  $d$  a csőátmérő). Azonban, ha a lángfront geometriája komplex (ráncolódik, nyúlik, helyenként felszakadozik),  $A_f \neq A_n$ , ekkor a (3.19) egyenlet módosítása szükséges. Mivel a robbanás kezdeti szakaszán a sűrűségváltozás kismértékű, a (3.19) egyenlet jobb oldalán lévő sűrűségváltozást kifejező tag elhanyagolható, így a lángsebesség:

$$S_f = \left( \frac{\rho_u}{\rho_b} \right) \cdot S_l. \quad (3.20)$$

Megállapítható, hogy a (3.20) egyenlet  $\rho_u/\rho_b$  tagja maga az expanziós faktor a (2.7) egyenlet szerint. A robbanási folyamat elején  $T_u$  és  $T_b$  időben állandónak tekinthető, így a (3.15) és a (3.16) összefüggések felhasználásával kapjuk, hogy:

$$V_t \cdot \frac{dP}{dt} = \frac{dm_b}{dt} \left[ \frac{R_0 \cdot T_b}{M_b} - \frac{R_0 \cdot T_u}{M_u} \right], \quad (3.21)$$

ahol zárt térben bekövetkező robbanás esetén a teljes térfogat  $V_t = V_u + V_b$ , valamint a tömegmegmaradási egyenlet értelmében  $dm_u/dt = -dm_b/dt$ . Figyelembe véve a (3.15) és a (3.17) egyenleteket, valamint a  $\rho_u = m_u/V_u$  összefüggést, a (3.21) a következő alakban írható:

$$V_t \cdot \frac{dP}{dt} = A_f \cdot S_l \cdot P \cdot \frac{M_u}{R_0 \cdot T_u} \left[ \frac{R_0 \cdot T_b}{M_b} - \frac{R_0 \cdot T_u}{M_u} \right]. \quad (3.22)$$

Felhasználva a (2.7) összefüggést, a (3.22) egyszerűsített alakja:

$$V_t \cdot \frac{dP}{dt} = A_f \cdot S_l \cdot P(E - 1). \quad (3.23)$$

A robbanás kezdeti szakaszán a láng a jelentős hőmérséklet-változás (és a jelenleg elhanyagolható mértékű sűrűségváltozás) miatt  $r_b$  sugárra expandál, így a láng felülete:

$$A_f = 4 \cdot \pi \cdot r_b^2. \quad (3.24)$$

Az adott pillanatban a lángterjedési sebesség segítségével felírható a láng sugara:

$$r_b = S_f \cdot t = E \cdot S_l \cdot t. \quad (3.25)$$

Felhasználva a (3.23), (3.24) és (3.25) összefüggéseket írható, hogy:

$$V_t \frac{dP}{dt} = P \cdot E^2(E-1) \cdot S_l^3 \cdot 4 \cdot \pi \cdot t^2, \quad (3.26)$$

illetve

$$\frac{1}{P} \frac{dP}{dt} = \frac{4 \cdot \pi \cdot E^2 \cdot (E-1) \cdot S_l^3 \cdot t^2}{V_t}. \quad (3.27)$$

Integrálva az összefüggést, a (3.28) egyenlet adódik.

$$\ln P = \frac{4 \cdot \pi \cdot E^2(E-1)}{3 \cdot V_t} \cdot S_l^3 \cdot t^3 + const, \quad (3.28)$$

illetve  $P_0$  és  $P$  tartományon:

$$P = P_0 \cdot e^{\frac{E^2 \cdot (E-1) \cdot (S_l \cdot t)^3 \cdot 4 \cdot \pi}{V_t}}. \quad (3.29)$$

Figyelembe véve, hogy az általam vizsgált robbantókamra  $R$  sugarú gömb, a (3.29) egyenlet egyszerűbb alakban írható:

$$P = P_0 \cdot e^{E^2 \cdot (E-1) \left(\frac{S_l \cdot t}{R}\right)^3}. \quad (3.30)$$

### 3.1.3.6. A modell kiterjesztése

A modell feltételeiből jól látható, hogy a (3.30) egyenlet a robbanás során a kezdeti nyomás +10%-os értékéig, azaz megközelítőleg a lángterjedés lamináris szakaszán érvényes.

Célom a modell alkalmazhatóságának kiterjesztése volt az 1 bar<sub>a</sub> kezdeti nyomás +150%-áig, azaz 2,5 bar<sub>a</sub> értékig, hogy a robbanási nyomásemelkedés kezdeti szakaszát nagy pontossággal írja le, a lehető legegyszerűbb összefüggések segítségével.

Látható, hogy a (3.30) összefüggés matematikai formulája – annak exponenciális alakja folytán – alkalmas arra, hogy a valós nyomásemelkedési görbe inflexiós pontjáig szolgáltatson megfelelő eredményeket.

Mivel az eredeti modell a lamináris lángterjedést veszi figyelembe, a kiterjesztett esetben pedig a turbulens lángterjedés tartományában is zajlik a robbanási folyamat, ezért a kiterjesztett alkalmazás a modell paramétereinek módosításával valósítható meg. Ez a megközelítés egyben kijelöli a paraméterek módosításának a formáját is: a két állapot közötti különbséget a lamináris és turbulens lángterjedési sebesség közötti kapcsolat adja meg (lásd 2.1.6.2. fejezet), amely adott paraméterek, mint szorzótényezők segítségével írható le. Ezen



tényezőket egy  $\epsilon$  tényezőben egyesítve a (3.30) egyenlet módosított formáját a (3.31) alakban kerestem:

$$P = P_0 \cdot e^{\epsilon \cdot E^2 \cdot (E-1) \left(\frac{S_l \cdot t}{R}\right)^3} \quad (3.31)$$

ahol  $\epsilon$  az az általam bevezetett tényező, amely a turbulens lángterjedés közben lejátszódó részfolyamatok hatását fejezi ki számszerűen.

Vizsgálataim során a (3.31) összefüggés  $E$  expanziós faktorát,  $T_{f,p}$  adiabatikus izobár lánghőmérsékletét és  $S_l$  lamináris lángterjedési sebességét irodalmi adatok felhasználásával állapítottam meg.

Az  $E$  expanziós faktort Brinzea és mtsai. [37] munkájában szereplő értékekre vettem fel a propántartalom függvényében. A felvett értékekre a további számításokat megkönnyítendő, a (3.32) függvény illeszthető. A függvény determinációs együtthatója:  $R^2 = 0,9817$ .

$$E = 0,0795 \cdot V_p^{*3} - 1,4415 \cdot V_p^{*2} + 8,2717 \cdot V_p^* - 7,2286 \quad (3.32)$$

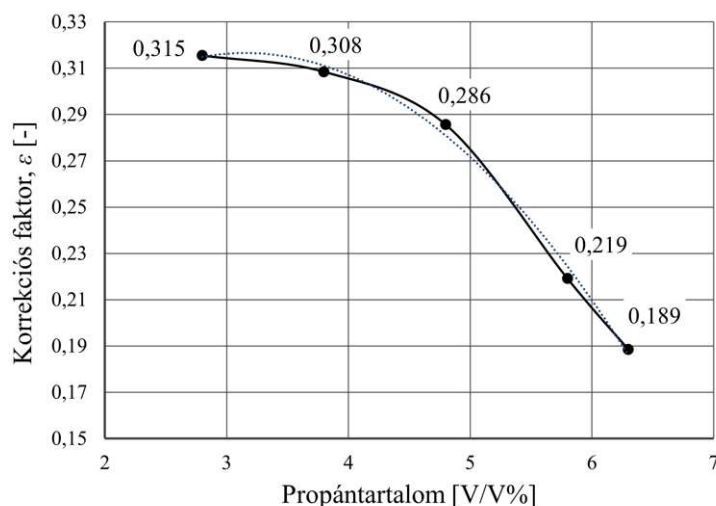
A  $T_{f,p}$  izobár körülmények között megállapított adiabatikus lánghőmérsékletet szintén Brinzea és mtsai. [37] munkájában szereplő értékekre vettem fel a propántartalom függvényében. Ezen értékekre a további számításokat megkönnyítendő, a (3.33) függvény illeszthető. A függvény determinációs együtthatója:  $R^2 = 0,9869$ .

$$T_{f,p} = 24,174 \cdot V_p^{*3} - 440,5 \cdot V_p^{*2} + 2446,3 \cdot V_p^* - 2066,1 \quad (3.33)$$

Az  $S_l$  lamináris lángterjedési sebességet a következő forrásokban közölt értékek alapján határoztam meg: Liu és mtsai. [36], Babkin (említve: [43]), Brinzea és mtsai. [48], Metgalchi és Keck [50]. Az ezekben szereplő mérési eredmények közé illesztett értékek a (3.34) függvény szerint közelíthetők, így a (3.31) egyenletben is ezt alkalmaztam. A közelítő függvény determinációs együtthatója:  $R^2 = 1$ .

$$S_l = 0,0232 \cdot V_p^{*4} - 0,4247 \cdot V_p^{*3} + 2,7618 \cdot V_p^{*2} - 7,4914 \cdot V_p^* + 7,4164 \quad (3.34)$$

A valós mérési eredményekhez illesztve a Microsoft Excel Solver bővítményének segítségével határoztam meg a (3.31) egyenletben keresett  $\epsilon$  faktor értékét, ezen függvényillesztés hibáinak négyzetösszege minden esetben  $0,6 \text{ bar}^2$ -en belül volt. Az ezzel a módszerrel nyert  $\epsilon$  korrekciós tényező értékeit szemlélteti a 3.10. ábra.

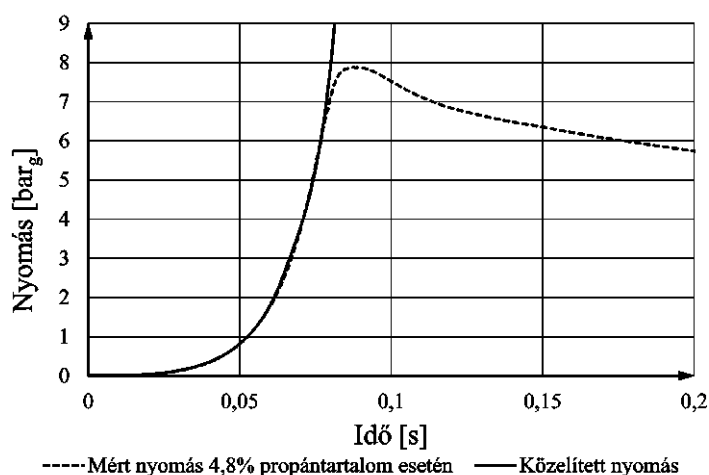
3.10. ábra. Az  $\epsilon$  faktor értékei

Ahogy az ábrán látható, az  $\epsilon$  tényező értéke a propánkoncentrációtól erősen függ, a függvénykapcsolat pedig másodfokú függvénnyel írható le. Ez utóbbit az ábrán pontozott vonallal jelöltem. A  $\epsilon$  értékekre illesztett másodfokú függvény egyenlete:

$$\epsilon = -0,0132 \cdot V_p^{*2} + 0,0832 \cdot V_p^* + 0,1853, \quad (3.35)$$

amelyben az előbbieken kívül a  $V_p^*$  a propán térfogatkoncentrációját jelenti a kiindulási keverékben. A közelítő parabola determinációs együtthatójának értéke  $R^2 = 0,9952$ .

Egy ilyen módon közelített nyomásgörbét szemléltet a 3.11. ábra, amely a legkritikusabb, 4,8 V/V% propántartalmú keverékre vonatkozik. Látható, hogy a kiterjesztett modell nem csak a vizsgált +150%-os nyomástartományon, de azon túl is igen jól közelíti a mért nyomásértékeket.



3.11. ábra. A mért és a kiterjesztett modellel számított nyomásgörbék összehasonlítása 4,8 V/V% propántartalmú keverék esetén

### 3.1.4. A zárt terű robbanások vizsgálata során elért eredmények

Kialakítottam egy laboratóriumi mérőkört a zárt téri robbanások készülékben mérhető nyomásértékeinek vizsgálatára. A mérőkör kitűzött feladatra való alkalmasságát az ipari gyakorlatban elterjedten alkalmazott propán-levegő keverékek segítségével igazoltam. A vizsgálatokat nem szükséges a teljes robbanóképességi tartományon elvégezni, mivel biztonságtechnikai szempontból legveszélyesebbek a sztöchiometriai arányú keverék környezetében lévő összetételek. Ezen megfontolásból propán esetén a vizsgálati tartományt 2,8 V/V% – 6,3 V/V% közé választottam. A vizsgálatokat légköri kezdeti nyomáson és környezeti hőmérsékleten végeztem el.

A zárt kamrás mérések eredményeinek segítségével megvizsgáltam a Frolov-modell alkalmazhatóságát a robbanási nyomásgörbe kezdeti szakaszának modellezésére. Megállapítottam, hogy a modell a maximális nyomást a leghevesebben reagáló keverék esetén a kielégítő 10%-os pontosságon belül közelíti, ám a nyomásgörbe kezdeti szakaszának leírására jelenlegi formájában nem alkalmas.

A következőkben megvizsgáltam az ideális gáz modell nyomás-idő függvényre való alkalmazhatóságát. Az eredeti modellt kifejezetten a nyomásgörbe kezdeti szakaszának leírására dolgozták ki, alkalmazási tartománya a szakirodalom szerint a kezdeti  $P_0$  nyomáshoz képesti maximum +10% nyomásemelkedésig terjedt. Mérési eredményeimet felhasználva a eredeti formulába illesztettem egy  $\epsilon$  módosító tényezőt, amely segítségével a modell alkalmazhatóságát kibővítettem a  $P_0+150\%$ -os tartományra.

Összefoglalva, a fejezetben ismertetett eredmények felhasználási lehetőségei a következők:

- A bemutatott mérési eljárás segítségével nem csak propán-levegő keverékek esetén, hanem tetszőleges robbanóképes gázelegy jelölt robbanási jellemzői vizsgálhatók.
- Az ideális gáz modellt egy  $\epsilon$  korrekciós tényezővel egészítettem ki, amely korrekciós tényezőket propán-levegő keverékre meghatároztam.
- A bemutatott eljárás alkalmazásával az  $\epsilon$  tényező tetszőleges robbanóképes gáz levegővel alkotott keverékére meghatározható.

További célom, hogy más, az ipari gyakorlatban jellemzően előforduló anyagpárok és -kombinációk esetére meghatározzam az  $\epsilon$  korrekciós tényezőt, amely így egy mérnöki gyakorlatban könnyen alkalmazható tudáscsomagot jelent majd.

## 3.2. Lefúvatott robbanások vizsgálata

Ebben az alfejezetben a lefúvásos védelem alkalmazása mellett bekövetkező robbanásokkal kapcsolatos vizsgálataimat és eredményeimet mutatom be. A vizsgálatok célja az elérhető mérési eljárások és szabványi számítási összefüggések kiterjesztése annak érdekében, hogy azokon a területeken (kis készüléktérfogatok és ezekhez kapcsolt lefúvató csatornák területén) is megbízható adatokat nyerjek, ahol a szabványi összefüggések nem feltétlenül adnak pontos eredményt. Ennek érdekében a vizsgálatok és így a fejezet is három fő részre tagolódik.

A fejezet első felében bemutatom a zárt kamrás mérésekhez kidolgozott mérési eljárás módosított változatát, amely így a lefúvatott robbanások vizsgálatára is alkalmassá vált. Az új mérési eljárás alkalmazásával a lefúvatott robbanás közben lezajló, nyomásváltozással járó részfolyamatok is kellő pontossággal vizsgálhatók tetszőleges robbanóképes gázelegy esetén, különös tekintettel a másodlagos robbanások létrejöttére, a lefúvató csatorna hatásainak vizsgálatára és a csatornában bekövetkező nyomásveszteségekre.

A fejezet második részében a lefúvásos védelemre vonatkozó szabványokat vizsgálom. Ezen szabványok célja, hogy olyan széles körben alkalmazható összefüggéseket határozzanak meg az egyes védelmi intézkedésekre vonatkozóan, amelyek nagy biztonsággal alkalmazhatók a legtöbb vizsgált robbanóképes keverék és készülékgeometria esetében. A szabványi megközelítések tehát olyan általános összefüggések, amelyek a legtöbb közegre és geometriára alkalmazhatók, viszont az általam vizsgált esetekre nem adnak pontos becslést. Az MSZ EN 14994:2007 és az NFPA 68:2018 szabványban szereplő összefüggések mintájára megalkotok egy új összefüggést a lefúvató csatorna használata mellett fellépő, megnövekedett redukált nyomásmaximum számítására. Az összefüggésben szereplő ismeretlen konstansok értékeit a mérési eredményeim felhasználásával állapítom meg.

A fejezet harmadik részében a lefúvató csatornák nyomásveszteségét és a csatornában fellépő csősúrlódási veszteségek számítási összefüggéseit vizsgálom. Mivel az összefüggések általános alakúak, így egyéb, iparban használatos gázkeverékekre is alkalmazhatók. Segítségükkel számszerűsíthetők a csatornában létrejövő másodlagos robbanások nyomásértékei, valamint azok egyéb jellemzői (összetétel, elhalási hossz) is vizsgálhatók.

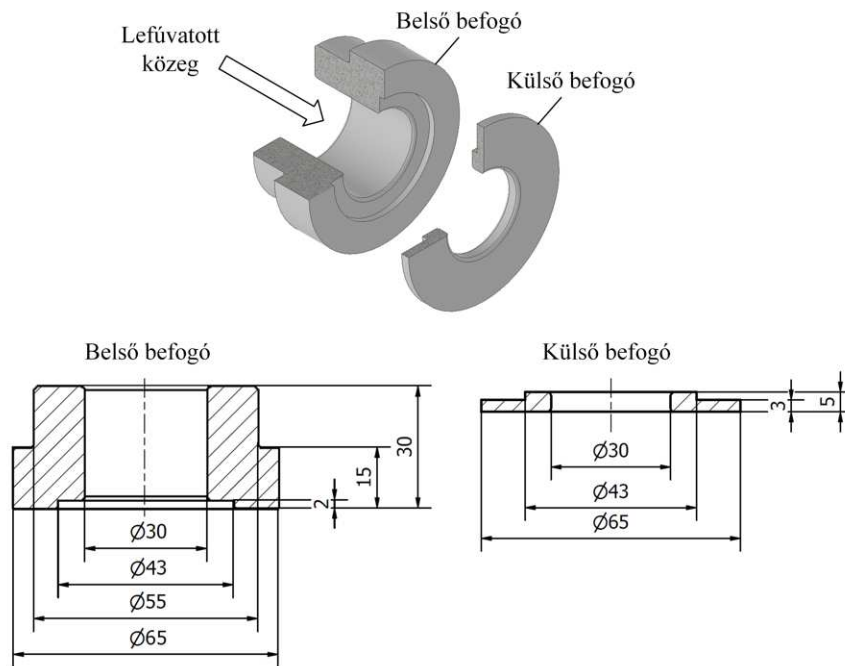
### 3.2.1. Lefúvatott robbanásokkal kapcsolatos mérések – lefúvató csatornával és anélkül

#### 3.2.1.1. A mérések menete

A lefúvatott robbanásokat a 3.1.2. fejezetben bemutatott Kühner robbantókamrával és annak általam kidolgozott töltési módjával vizsgáltam. A vizsgált keverékkoncentrációk a zárt terű mérésekkel megegyezően itt is 2,8, 3,8, 4,8, 4,8, 6,3 V/V% propánt tartalmaztak. Mivel a propán-levegő keverék felső robbanási határa 9,5 – 10,5 V/V%, ezért 7,8 és 9,8 V/V% propántartalmú keverék esetén is vizsgáltam a csatornában megfigyelhető nyomáscsúcsokat. Ezeket a koncentrációkat – mivel nem tartoznak a legveszélyesebb koncentrációk közé – zárt terű robbanás kapcsán nem vizsgáltam. A korábbiaknak megfelelően, minden egyes feltüntetett koncentrációhoz legalább három különböző mérés tartozik.

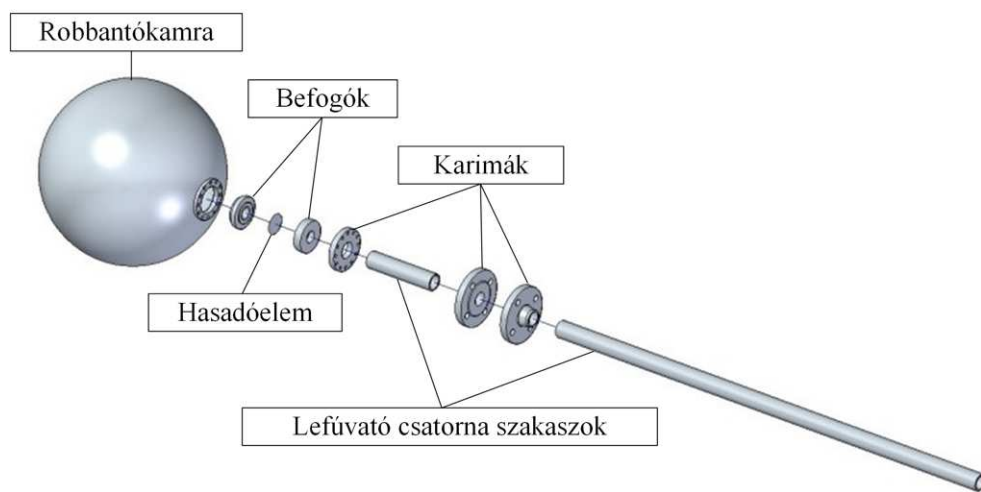
Hasadóelemként kereskedelmi forgalomban is elérhető alumínium fóliákat alkalmaztam. Ahhoz, hogy ezek nyitónyomásának szórását csökkentsem, hőkezelő kemencében 300°C-on 30 percig hűn tartottam, majd levegőn hűtöttem őket.

A hasadóelemeket a kamrán kialakított kémlőnyílás helyére illesztettem, amelyhez speciális befogókat terveztem az ipari gyakorlatban alkalmazott hasadótárcsa-befogók mintájára. Ezeket karimás kötéssel rögzítettem a szerkezeten. A befogókat a 3.12. ábracsoport szemlélteti. A metszeti képek zsúfoltságát elkerülendő, az ábrán látható lekerekítések sugara 2 mm volt.



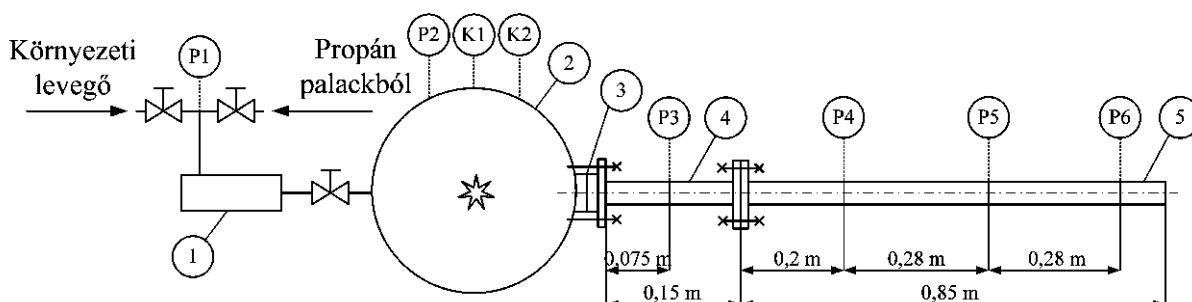
3.12. ábra. A vizsgálatok elvégzéséhez fejlesztett befogó modellje és rajza

A lefúvatásért felelős elemek robbantott vázlatát a 3.13. ábra, míg a mérési elrendezés sémáját a 3.14. ábra (lentebb) szemlélteti.



3.13. ábra. Robbantókamra és lefúvóvezeték szerelési vázlata

Vizsgálataim során lefúvató csatorna nélkül (0 m hosszúságú csatorna), valamint 0,15 m és 1 m hosszú csatornával végeztem méréseket. Az 1 m hosszú csatornát egy 0,15 m-es és egy 0,85 m-es toldat segítségével állítottam össze, ahogyan az az ábrákon is megfigyelhető. Mind a hasadóelem nyílófelülete, mind a csatornák belső átmérője 30 mm volt. Tehát az általam vizsgált csatornák  $l/d$  viszonya rendre 0, 5 és 33,3 értékre adódott. A csatorna hossza mentén nyomástávadókat helyeztem el, a 3.14. ábrán látható módon.



3.14. ábra. A lefúvatót robbanások mérési elrendezésének vázlata

A 3.14. ábra jelölései a következők:

- 1 gáztöltő kamra,
- 2 20 liter űrtartalmú robbantókamra,
- 3 hasadóelem a befogókkal,
- 4 0,15 m hosszúságú lefúvató csatorna elem,
- 5 0,85 m hosszúságú lefúvató csatorna elem,
- K1, K2 Kistler gyártmányú piezoelektromos távadó vezérlésre, maximumértékek rögzítésére,
- P1 – P6 Hottinger gyártmányú nyomástávadó a teljes nyomásgöbék rögzítésére.

Minden mérési adatsorból három fő paramétert határoztam meg:

- a fólia nyitónyomását ( $P_{set}$ ),
- a propán-levegő keverék maximális redukált nyomását ( $P_{red,max}$ ),
- a lefúvató hatására módosult robbanási konstans értékét ( $K_G$ ).

Ezeket felül az eredmények kiértékeléséhez felhasználtam a lefúvató csatornán elhelyezett P3 – P6 nyomástávadók segítségével rögzített értékeket. Mivel a robbanásvizsgálatok eredményei számos paramétertől függenek, ezért nem hanyagolható el azok tűrése sem.

### 3.2.1.2. Az eredmények megengedhető tűrései

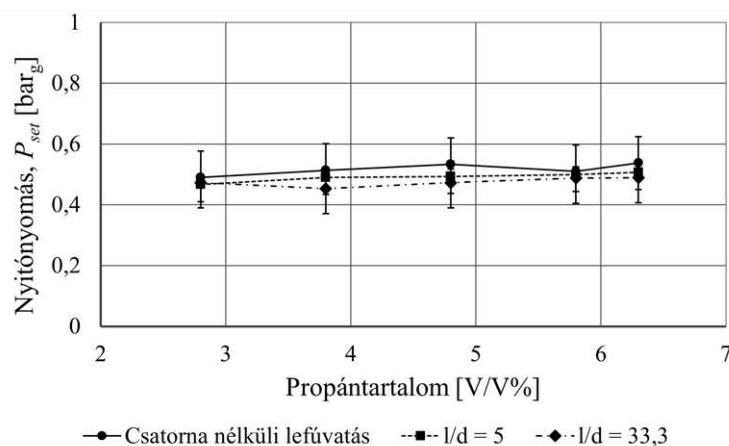
Az alkalmazott alumínium fólia működése során sík hasadótárcsaként viselkedik. Az EN ISO 4126-6:2014 jelű szabványban megtalálhatók [100] a leggyakrabban alkalmazott hasadótárcsa típusokra jellemző maximális nyitónyomás-tűrések. A szabvány által említett legegyszerűbb típus a bekarcolt síktárcsa, amely a karcoknak köszönhetően stabilabb nyitónyomással rendelkezik az egyszerű sík tárcsánál. Az említett szabvány által az előbbire megfogalmazott maximális ajánlott tűrés  $\pm 50\%$ , amely egy igen széles tartomány, és amelyet a korábban említett hőkezelésnek köszönhetően a mérések során  $10\%$  alá sikerült csökkentenem.

A zárt téri maximális nyomás meghatározása során a maximumértékek túrései porok esetén az EN 14034-1:2004+A1:2011 szabvány szerint [97] 10%-on belül kell, hogy legyenek. Gázok esetén nincs ilyen kritérium a túrésekre vonatkozóan [98]. Ilyen jellegű laboratóriumi vizsgálatok elvégzése a lefúvatott robbanásokra nem az ipari gyakorlat része, ám a lefúvatott esetek vizsgálata során is a porokra előírt toleranciát tartottam mérvadónak.

A robbanási konstansok gyakran nagy szórást mutatnak az átlaghoz képest. A jelenség oka a lángterjedés és lefúvatás összetett fizikai-kémiai folyamataiban keresendő. Mint ahogy korábban ismertettem, a turbulencia rendkívül nagy hatással van a pillanatnyi lángterjedési sebességre és a nyomásemelkedési sebességre, amely a mért robbanási konstansokban jelentkező nagy szórást magyarázza. Lefúvatott robbanások esetén további turbulenciafokozó tényezők is szerepet játszanak: éles szélű peremen történő kiáramlás, sugárösszehúzódnás majd szétterülés. Éppen ezért a szakirodalomban rendkívül kevés zárt téri robbanásból megállapított deflagrációs index érték található meg, míg lefúvatott robbanásokra vonatkozó ilyen adatokat egyáltalán nem találtam a kutatómunkám során.

### 3.2.1.3. A fóliák nyitónyomása

A fóliák nyitónyomását a robbanás során felvett nyomásgörbékből határoztam meg, mind lefúvóvezeték nélküli, mind a későbbiekben ismertetett lefúvóvezetékkel végzett esetben. Ezt a készüléken elhelyezett  $P2$  jelű nyomástávadó jelében a robbanás kezdeti szakaszán bekövetkezett változásból, azaz a görbe meredekségének szakadásából állapítottam meg.



3.15. ábra. Hasadóelemek mért nyitónyomásai a propántartalom függvényében

Ezzel a módszerrel a fóliák átlagos nyitónyomására  $P_{set} = 0,49 \text{ bar}_g$  adódott,  $+8,81\%$  és  $-8,25\%$  túrésen belül. Bár az átlagtól való eltérés magasnak tűnhet, jóval az EN ISO 4126-6:2014 szabvány által megfogalmazott  $\pm 50\%$ -os határ alá esik. Továbbá az is megállapítható volt, hogy a vizsgált csatornahosszok nem befolyásolták jelentősen a nyitónyomások értékét.

### 3.2.1.4. Mért karakterisztikus jellemzők

A 3.2. táblázat foglalja össze a mért karakterisztikus jellemzőket: a redukált maximális robbanási nyomást a kamrában és a lefúvatott robbanás során mérhető robbanási konstans.

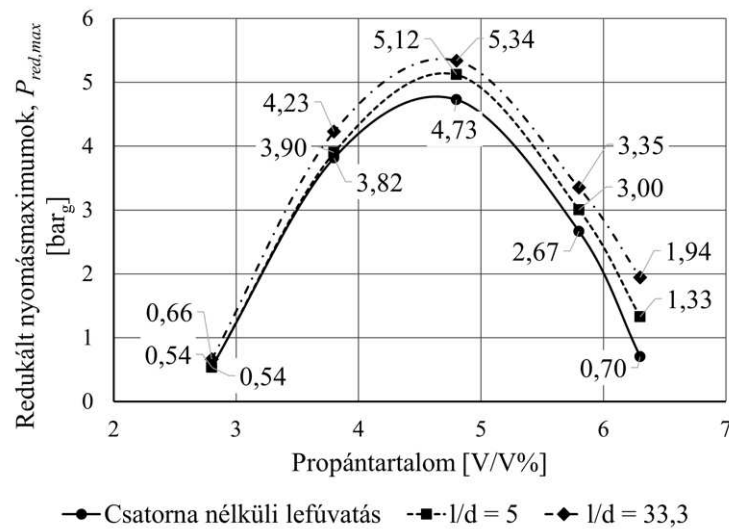
A táblázat a 7,8 és 9,8 V/V%-os keverékek értékeit nem tartalmazza, mivel utóbbi esetén egyáltalán nem tapasztaltam robbanást már a kamrában sem, míg a 7,8 V/V%-os keverék esetén rendkívül gyenge robbanás volt megfigyelhető. A 7,8 V/V%-os keverék esetén az átlagos maximális robbanási nyomás 0,44 bar<sub>g</sub> volt.

| Lefúvóvezeték $l/d$ viszonya [-] | Kezdeti propántartalom [V/V%] | Redukált maximális robbanási nyomás, $P_{red,max}$ [bar <sub>g</sub> ] | Robbanási konstans $K_G$ [bar·m/s] |
|----------------------------------|-------------------------------|--|------------------------------------|
| 0                                | 2,8                           | 0,54 +5% -5%   | 3 +7%, -11%                        |
|                                  | 3,8                           | 3,82 +6% -5%   | 33 +8%, -8%                        |
|                                  | 4,8                           | 4,73 +2% -3%   | 53 +5%, -1%                        |
|                                  | 5,8                           | 2,67 +10% -7%  | 34 +13%, -10%                      |
|                                  | 6,3                           | 0,70 +8% -6%   | 5 +5%, -9%                         |
| 5                                | 2,8                           | 0,54 +4% -6%   | 3 +3%, -2%                         |
|                                  | 3,8                           | 3,90 +1% -1%   | 27 +1%, -2%                        |
|                                  | 4,8                           | 5,12 +0% -2%   | 58 +10%, -7%                       |
|                                  | 5,8                           | 2,99 +3% -2%   | 19 +2%, -1%                        |
|                                  | 6,3                           | 1,33 +2% -5%   | 5 +4%, -4%                         |
| 33,3                             | 2,8                           | 0,66 +5% -5%   | 2 +37%, -2%                        |
|                                  | 3,8                           | 4,23 +5% -5%   | 31 +11%, -18%                      |
|                                  | 4,8                           | 5,34 +2% -1%   | 43 +34%, -27%                      |
|                                  | 5,8                           | 3,35 +2% -3%   | 26 +19%, -34%                      |
|                                  | 6,3                           | 1,94 +10% -10%   | 7 +22%, -19%                       |

3.2. táblázat. Lefúvatáskor mért redukált maximális robbanási nyomások és robbanási konstansok

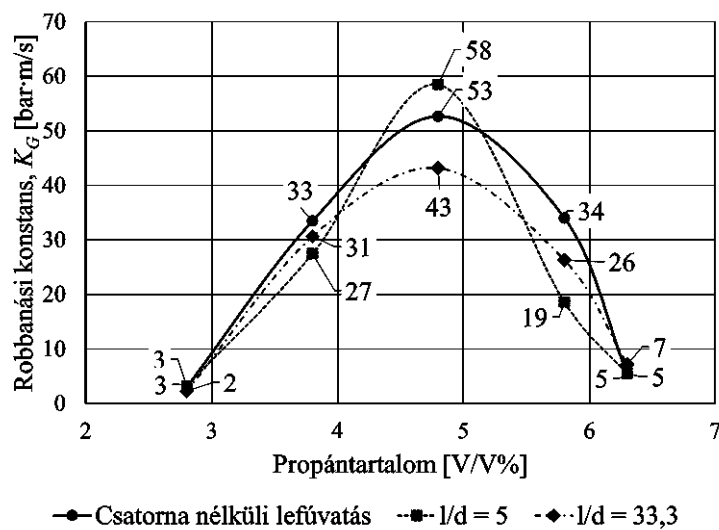
A 3.16. ábra grafikusán is szemlélteti a redukált nyomások átlagértékeit a kezdeti propántartalom függvényében. Ahogyan az ábrán is látható, a csatorna alkalmazása és annak hossza jelentős hatással van a kamrában mérhető nyomásértékekre. Továbbá az is megfigyelhető, hogy a tüzelőanyagban szegényebb keverék kisebb hatást gyakorolt a kamrában mérhető maximumértékekre. Például 2,8 V/V% propántartalom esetén a maximális redukált nyomások átlagértékei megegyeznek a csatorna nélküli és az  $l/d = 5$  hosszúságú csatorna esetén. Emelkedő propánmennyiségeknél a nyomások közötti különbségek is egyre jelentősebbé válnak. Ennek magyarázata, hogy a gazdagabb keverékek a lefúvatás pillanatában nagyobb el nem égett propánmennyiséget tartalmaznak, amely a csatornába érve friss oxigénnel keveredik és másodlagos robbanást okoz. Minél hevesebb a másodlagos robbanás, annál nagyobb hatást gyakorol a tesztkamrában mérhető nyomásra.





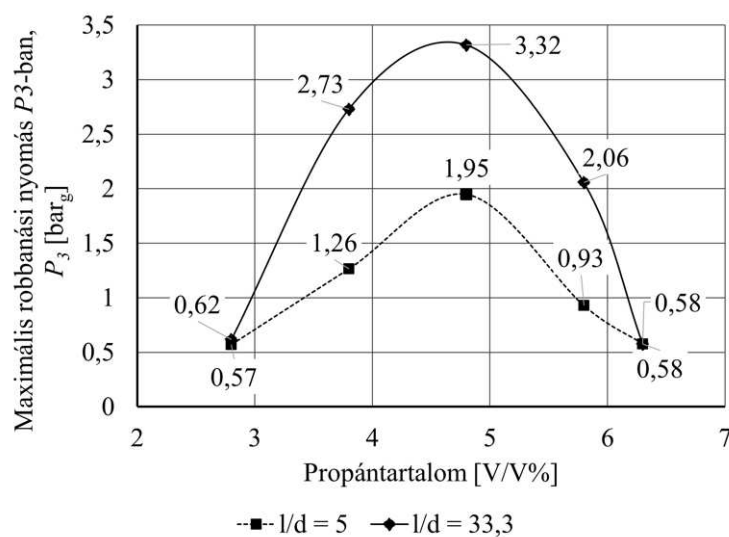
3.16. ábra. A robbantókamrában mért redukált nyomások átlagos maximumértékei

A 3.17. ábra grafikusán szemlélteti a mért robbanási konstansok átlagértékeit. Ezek az értékek – hasonlóan a nyomásmaximumokhoz – szintén összefüggést mutatnak a csatornahosszal. Az íves karakterisztikát azonban az  $l/d = 5$  hosszúságú csatornához tartozó görbe nem követi, ez haranggörbe-szerű alakot vesz fel.



3.17. ábra. A robbantókamrában mért robbanási konstansok átlagos maximumértékei

Ahhoz, hogy az  $l/d = 5$  hosszúságú csatornához tartozó görbe átlagostól eltérő alakját megvizsgáljam, felvettem a  $P3$  távadó által mért nyomásmaximumokat is. Ezek a 3.18. ábrán láthatók. Megfigyelhető, hogy a lefűtató csatornák kezdeti szakaszán a  $P3$  távadó által mért nyomásértékek átlagos maximumai a robbanási konstansokhoz hasonló jelleget mutatnak.

3.18. ábra. A  $P_3$  távadó által mért nyomások átlagos maximumértékei

A jelenség magyarázata a következő. Csatorna nélküli lefúvatás esetén a sugár a lefúvónyílást elhagyva expandál, majd szabadon kiáramlik a környezetbe. A nagysebességű kiáramlásnak és jelentős keresztmetszet-változásnak köszönhetően a másodlagos robbanás hatása elhanyagolható. A kiáramlás sebességét és hatásos felületét jelen esetben a kiáramlási keresztmetszet geometriája és a kiáramló friss keverék robbanási tulajdonságai határozzák meg. Ebből kifolyólag a kamrában mérhető redukált nyomás és deflagrációs index a megszokott függvény szerint változik.

Az  $l/d = 33,3$  hosszúságú csatorna esetén a távozó anyagáram folyamatos, és közvetlenül a lefúvófelületet elhagyva is koncentrált marad. A folyamat során a korábban már említett akadályozó tényezők gátolják a szabad kiáramlást: súrlódási veszteségek, a csőben nyugvó gázoszlop tehetetlensége, akusztikus oszcillációk, másodlagos robbanás. Ezek közül a súrlódási veszteségek a csatorna teljes hosszán fennállnak. Ahogyan azt korábban bemutattam, a gázoszlop tehetetlensége elhanyagolható mértékű ellenállást jelent. A másodlagos robbanás hatása jelentős, ám az előresiető nyomáshullám szintén a súrlódási veszteségeket növeli. A mért nyomásgörbékből továbbá az is megállapítható, hogy az akusztikus oszcillációk nyomásmaximumai szintén jelentősen elmaradnak az egyes távadók által mért maximumoktól, valamint a csatorna végén el is halnak.

Ezzel szemben az  $l/d = 5$  csatornahosszon közvetlenül a másodlagos robbanást követően megtörténik a szabadba való kilépés, amely az oszcillációknak köszönhetően megkönnyíti a friss levegő visszajutását a környezetből. A legnagyobb robbanási konstanssal rendelkező 4,8 V/V%-os vizsgált koncentráció kivételével a közeg könnyen a szabadba tud áramolni, míg a 4,8 V/V% esetén az újrakeveredés szintén heves másodlagos robbanással járul hozzá a további nyomásnövekedéshez.

### 3.2.1.5. Nyomásvesztés az $l/d = 33,3$ hosszúságú csatorna mentén

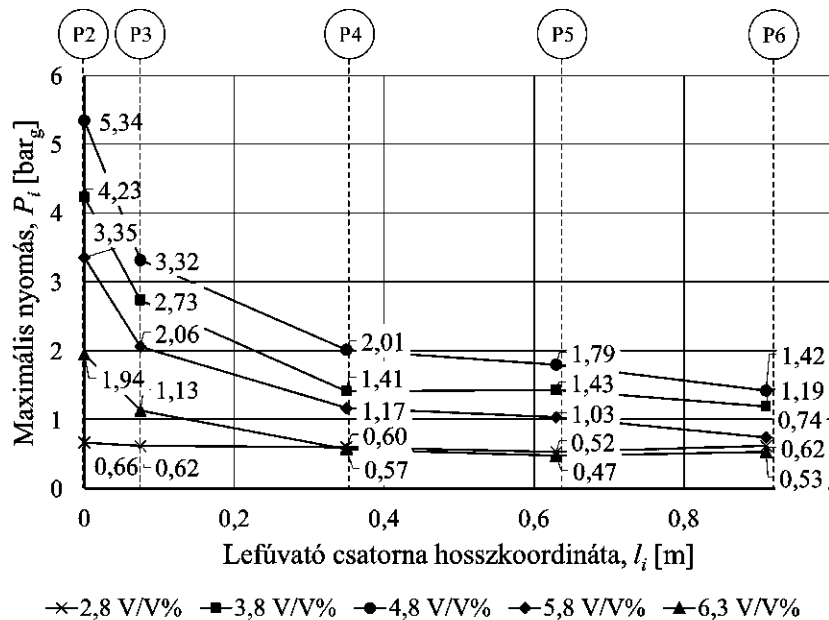
A továbbiakban az  $l/d = 33,3$  hosszúságú lefúvató csatorna nyomásvesztését vizsgáltam. A 3.3. táblázat és a 3.19. ábra az egyes nyomástávadók által mért maximumértékeket foglalják össze. Általában elmondható, hogy minél közelebb helyezkedett el az adott nyomástávadó

a csatorna kilépési keresztmetszetéhez, annál nagyobb szórást mutattak a mérési eredmények is. Ezen felül megállapítható, hogy a propántartalom-skála két végén elhelyezkedő koncentrációk eredményei nagyobb szórást mutattak, mint a sztöchiometriai arány közelébe esők.

| Propánt.<br>[V/V%] | Maximális nyomások [bar <sub>g</sub> ]   |  |  |  |  |
|--------------------|--|--|--|--|--|
|                    | <i>P</i> 2 távadó, <i>P</i> <sub>2</sub> | <i>P</i> 3 távadó, <i>P</i> <sub>3</sub> | <i>P</i> 4 távadó, <i>P</i> <sub>4</sub> | <i>P</i> 5 távadó, <i>P</i> <sub>5</sub> | <i>P</i> 6 távadó, <i>P</i> <sub>6</sub> |
| 2,8                | 0,66 +5%,<br>-5%                         | 0,62 +18%,<br>-27%                       | 0,60 +11%,<br>-13%                       | 0,52 +11%,<br>-15%                       | 0,62 +12%,<br>-20%                       |
| 3,8                | 4,23 +5%,<br>-5%                         | 2,73 +5%,<br>-6%                         | 1,41 +6%,<br>-6%                         | 1,43 +6%,<br>-6%                         | 1,19 +9%,<br>-10%                        |
| 4,8                | 5,34 +2%,<br>-1%                         | 3,32 +2%,<br>-3%                         | 2,01 +15%,<br>-26%                       | 1,79 +2%,<br>-3%                         | 1,03 +6%,<br>-9%                         |
| 5,8                | 3,35 +2%,<br>-3%                         | 2,06 +2%,<br>-2%                         | 1,17 +4%,<br>-4%                         | 1,03 +6%,<br>-9%                         | 0,74 +6%,<br>-3%                         |
| 6,3                | 1,94 +10%,<br>-10%                       | 1,13 +13%,<br>-13%                       | 0,57 +21%,<br>-12%                       | 0,47 +24%,<br>-18%                       | 0,53 +22%,<br>-13%                       |

3.3. táblázat. Lefúvatáskor mért redukált maximális robbanási nyomások és robbanási konstansok

Továbbá, a 2,8, 3,8 és 6,3 V/V% propántartalmú keverékek esetén a csatorna kilépési keresztmetszete felé haladva a várt nyomáscsökkenés helyett nyomásnövekedés volt megfigyelhető. Ez a hatás nem jelentkezett a 4,8 és 5,8 V/V% összetételű keverékekénél.



3.19. ábra. A *P*2 – *P*6 távadók által mért nyomások átlagos maximumértékei az 1 méter ( $l/d = 33,3$ ) hosszúságú csatorna esetén

A 3.19. ábrán is jól látható, hogy a csatorna kezdeti szakaszán jelentős nyomásvesztés figyelhető meg. Az ábrán  $P_i$  jelenti az  $i$ -edik nyomástávadó által mért maximumértékek átlagát,  $l_i$  pedig az  $i$ -edik távadó hosszkoordinátáját a csatorna mentén.

| Propántartalom<br>[V/V%] | Abszolút nyomásesés<br>$P_2$ és $P_3$ között, bar<br>( $P_2 - P_3$ ) | Nyomásesés egységnyi<br>hosszon $P_2$ és $P_3$<br>között, bar/m<br>( $P_2 - P_3$ )/( $l_3 - l_2$ ) | Nyomásesés egységnyi<br>hosszon $P_3$ és $P_6$<br>között, bar/m<br>( $P_3 - P_6$ )/( $l_6 - l_3$ ) |
|--------------------------|--|--|--|
| 2,8                      | 0,04   | 0,59   | 0,05   |
| 3,8                      | 1,5  | 19,97  | 3,34   |
| 4,8                      | 2,02   | 26,95  | 4,31   |
| 5,8                      | 1,29   | 17,25  | 2,87   |
| 6,3                      | 0,82   | 10,89  | 1,56   |

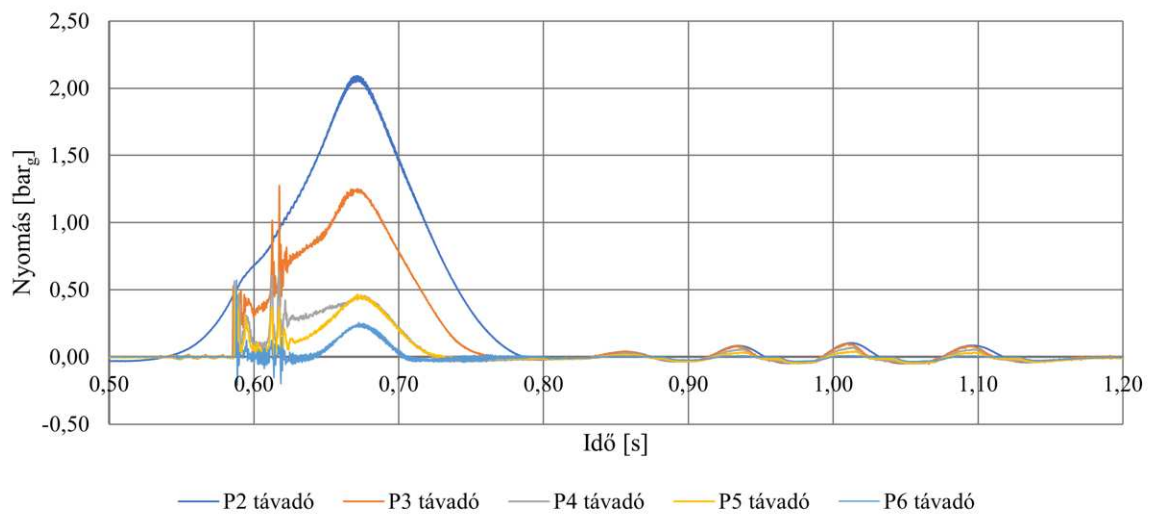
3.4. táblázat. Nyomásesések az  $l/d = 33,3$  hosszúságú csatorna mentén

A 3.4. táblázat a fentebb említett nyomásesésre vonatkozó adatokat foglalja össze. Látható, hogy a  $P_2$  és  $P_3$  távadók eredményei közötti abszolút nyomáskülönbség, valamint az egységnyi hosszra vonatkoztatott különbség is jelentősen eltér a 2,8 V/V%-os keverék esetén. Ekkor a kezdeti szakaszon a teljes nyomásesés 97%-a esik, míg a többi koncentráció esetén ez átlagosan mindössze 52%. Azonban az egységnyi hosszra vonatkoztatott nyomásesések nagyságrendileg kisebbek, mint a magasabb propánkoncentrációjú keverékek esetén. A jelentős eltérés oka az alábbiakban keresendő.

A 3.16. ábrán megfigyelhető, hogy a 2,8 V/V% propántartalmú keverék esetén a robbantókamrában mért nyomásmaximumok a  $l/d = 0$  és az  $l/d = 5$  hosszúságú csatornák esetén megegyeztek (a kerekítés szabályai szerint, valójában minimális eltérés volt megfigyelhető köztük), valamint az  $l/d = 33,3$  hosszúságú csatorna esetén mérttől csak minimálisan különböztek. Ugyanez az állítás igaz a 3.17. ábra robbanási konstans értékeire is. Ezek az észrevételek, valamint az a tény, hogy a 3.19. ábrán és a 3.4. táblázatban feltüntetett nyomásesések jóval alacsonyabbak a más koncentrációk esetén mérthez képest, azt mutatják, hogy ennél a keverékösszetételnél nem következik be vagy elhanyagolható a lefúvatás során a másodlagos robbanás. Így ez az eredmény a későbbiekben a csatorna belépési és súrlódási veszteségeinek számításához használható fel.

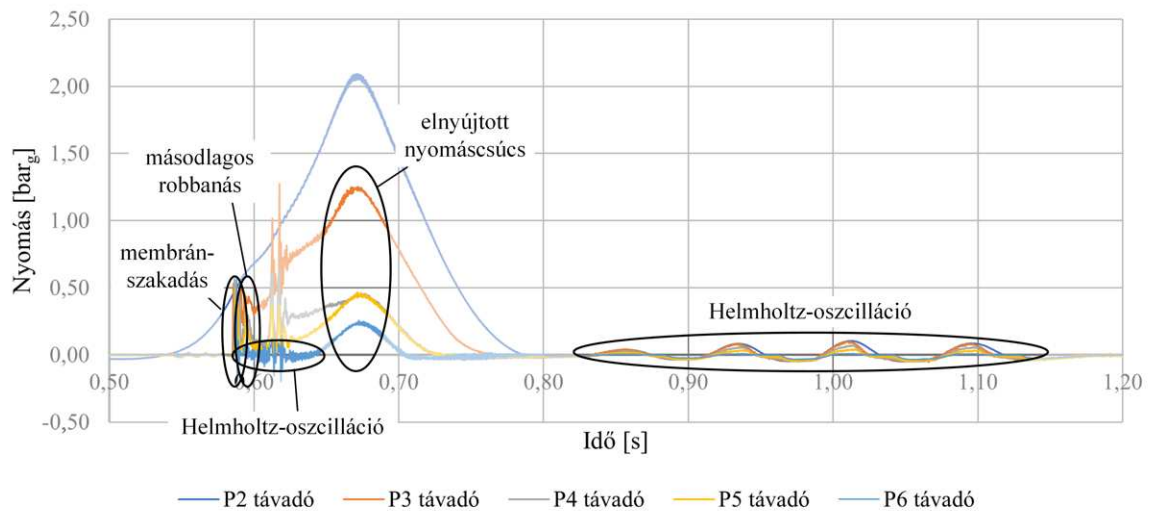
### 3.2.2. A lefúvató csatornában lejátszódó jelenségek és nyomáscsúcsok azonosítása

A 2.3.2. fejezetben összefoglaltak szerint a lefúvató csatornában fellépő Helmholtz- és akusztikus oszcillációk mellett a membránszakadásból származó lokális maximumnak, a lehetséges másodlagos robbanásnak és elnyújtott nyomásnövekedési szakasznak is azonosíthatónak kell lennie. Ennek érdekében megvizsgáltam az  $l/d = 33,3$  hosszúságú csatorna esetén eltérő pozíciókban mért nyomásértékeket. Ezeket a 3.20. ábra szemlélteti egy 6,3 V/V% összetételű keverék példáján keresztül.



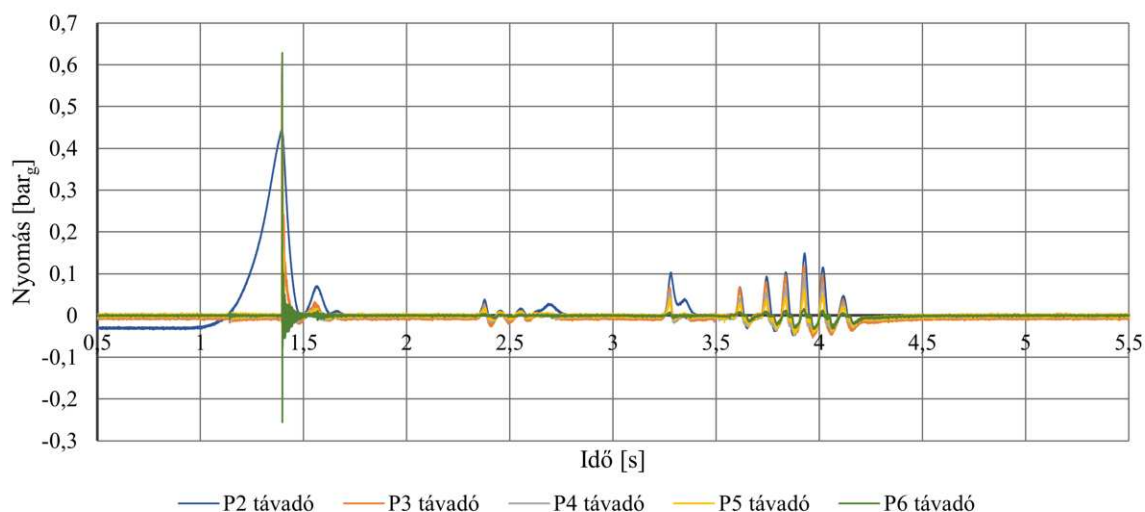
3.20. ábra. A  $P2 - P6$  távadók által mért nyomások görbéi egy  $6,3 \text{ V/V\%}$  propántartalmú keverék és  $l/d = 33,3$  hosszúságú lefúvató csatorna esetén

A korábban említett jellegzetes maximumértékek jól azonosíthatók a 3.21. ábra segítségével, amely a 3.20. ábra módosított változata.



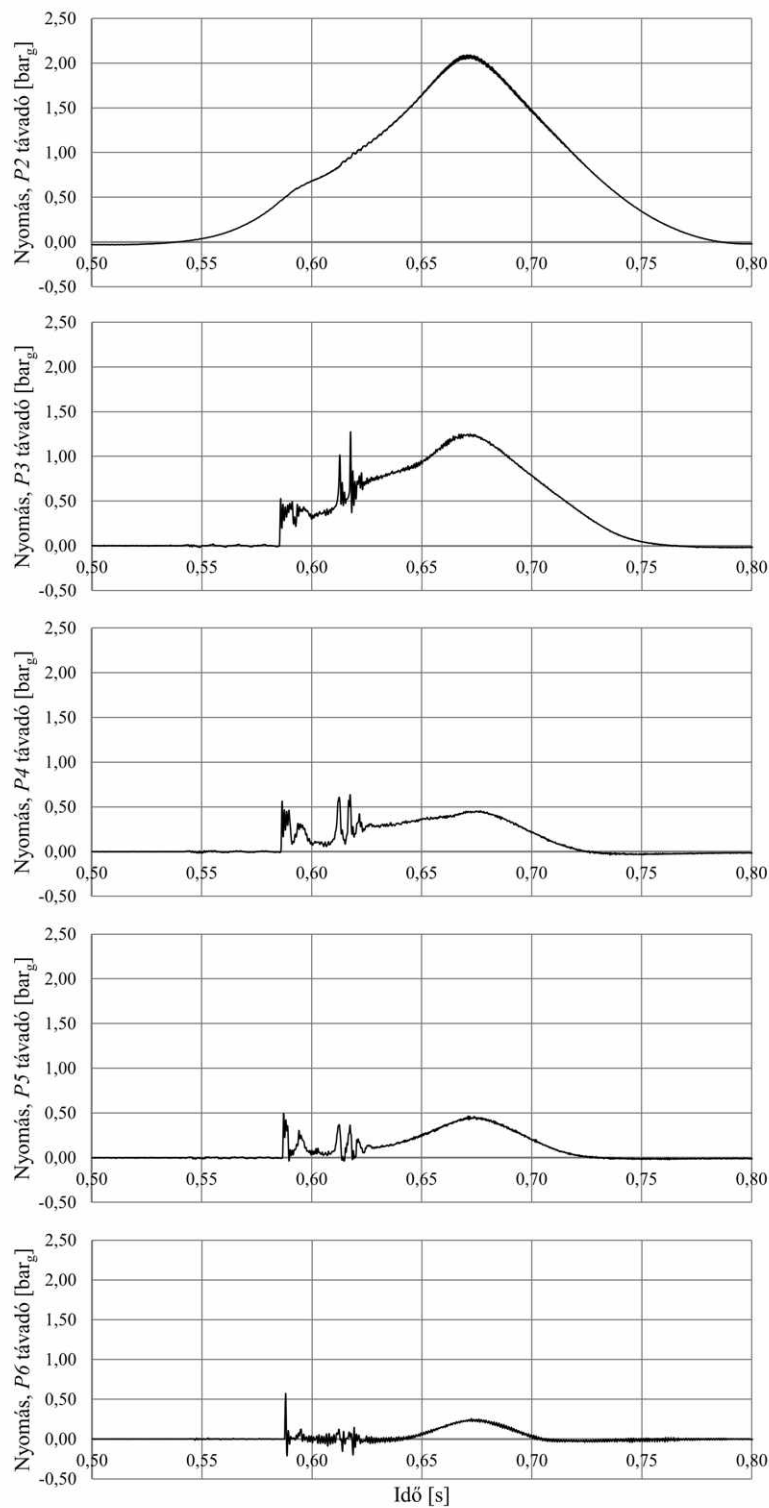
3.21. ábra. A 3.20. ábrán látható nyomásgörbék jellegzetes szakaszai

A 3.23. ábrán nem látható, és a mérések során nem is volt megfigyelhető az akusztikus oszcillációk szakasza. A mérések során egyedül a  $7,8 \text{ V/V\%}$  összetételű keverék esetén tudtam azonosítani ezt a szakaszt, a jelenség bekövetkezése pedig tisztán hallható volt. A 3.22. ábra egy ilyen összetételű görbesereget mutat, a diagram időtengelyén  $2 \text{ s}$  és  $4,5 \text{ s}$  között pedig megfigyelhető az akusztikus oszcillációk szakasza. Továbbá az is látható, hogy a lefúvató csatornában fellépő maximális nyomás meghaladja a készülékben mérhető nyomásmaximumot.



3.22. ábra. A  $P2 - P6$  távadók által mért nyomások görbéi egy 7,8 V/V% propántartalmú keverék és  $l/d = 33,3$  hosszúságú lefúvató csatorna esetén

A 3.20. ábra görbéinek nyomástávadónként elkülönített változatát szemlélteti a 3.23. ábra, amely azonban a nyomáshullám Helmholtz-oszcillációs szakaszát már nem tartalmazza. A legfelső görbe a robbantókamrában  $P2$  távadó jelét mutatja. Alatta sorrendben a  $P3 - P6$  távadók által rögzített nyomásgörbék figyelhetők meg. Az ábrán is látható, de a többi koncentráció esetén is megfigyelhető volt, hogy a membránszakadás nyomáshullámának maximuma a csatorna hossza mentén közel állandó értéket vett fel.



3.23. ábra. A 3.20. ábra nyomásgörbéi egyesével ábrázolva

Mivel az általam vizsgált szakirodalmak szerzői nem említik, így a 3.21. ábrán sem került jelölésre a  $P3$  görbén is megfigyelhető, másodlagos robbanást követő két kiugró nyomáscsúcs. Ezek egyikének maximumértéke az elnyújtott nyomáscsúcs maximumát is meghaladja. Az

irodalomban nem definiált, új nyomáscsúcsok a további távadók jelében is megfigyelhetők, bár az elhalásnak megfelelően csökkenő intenzitással.

Extra nyomáscsúcsból az 5,3 V/V%-os propán-levegő keveréknél egy darab, míg a 6,3 V/V%-os keveréknél két darab volt konzekvensen megfigyelhető. A jelenség magyarázata, hogy a hasadóelem kiszakadásakor friss tüzelőanyag-levegő keverék is áramlik a csatornába (minél nagyobb a kiindulási koncentráció, annál több), amely begyullad, ez a szokásosan megfigyelhető másodlagos robbanás. A csatorna kis  $l/d = 33,3$  hosszúság-átmérő viszonya miatt a láng homlokfelülete még a turbulens lángfrontot figyelembe véve is kicsi, így az összes kiáramlott friss keverék nem tud azonnal elégni. A másodlagos robbanás miatt a keverék egy része visszaáramlik a kamrába, majd annak elhalása után újra kiáramlik onnan, és újra begyullad. A legnagyobb vizsgált propántartalmú keverék (6,3 V/V%) esetén a jelenség újból megismétlődik.

Az elvégzett méréseim alapján az egyes kiindulási propánkoncentrációk függvényében a 3.5. táblázat szerinti másodlagos robbanások figyelhetők meg. A táblázat a csatorna hossza mentén mért legmagasabb, azaz a  $P3$  nyomástávadó által rögzített értékek átlagait foglalja össze. Megfigyelhető, hogy a csatornában megfigyelhető másodlagos robbanások száma a kiindulási propánkoncentrációtól függ. A legtöbb pedig a sztöchiometriai arányú keverék környezetében tapasztalható, és a robbanási jellemzőkhöz hasonlóan ezek is haranggörbeszerűen függenek a kiindulási propántartalomtól. A 7,8 V/V%-os keverék esetén a csatornában pedig a membránszakadáson kívül egyetlen másodlagos robbanást figyeltem meg.

| Propántartalom [V/V%] | Másodlagos robbanások száma [db] | Másodlagos robbanások átlagos maximumértékei [bar <sub>g</sub> ] |       |       |
|-----------------------|----------------------------------|--|-------|-------|
| 2,8                   | 0 – 1                            | 0,26   | –     | –     |
| 3,8                   | 1                                | 0,875  | –     | –     |
| 4,8                   | 1                                | 1,343  | –     | –     |
| 5,8                   | 2                                | 0,809  | 1,563 | –     |
| 6,3                   | 3                                | 0,538  | 0,843 | 0,979 |
| 7,8                   | 1                                | 0,242  | –     | –     |
| 9,8                   | 0                                | –  | –     | –     |

3.5. táblázat. Másodlagos robbanások  $P3$  távadó által mért átlagos értékei

Az egyedi méréseket és nyomásmaximumokat – tehát nem az átlagértékeket – figyelembe véve megállapítható volt, hogy bizonyos esetekben a másodlagos robbanások maximális nyomásértékeinek egyike meghaladja az elnyújtott nyomásmaximumot.

A megállapításnak a lefúvató csatornák szilárdsági tervezése szempontjából van kiemelt jelentősége.



### 3.2.3. A megnövekedett redukált nyomás számítására alkalmas új összefüggés kidolgozása

A kamrában mérhető redukált robbanási nyomás maximumértékének becslésére mind az MSZ EN 14994:2007, mind az NFPA 68:2018 szabvány közöl számítási módokat. A továbbiakban megvizsgáltam, hogy az elvégzett méréseim tekintetében ezek az ajánlások mennyiben feleltek meg a redukált nyomás értékének előre jelzésére.

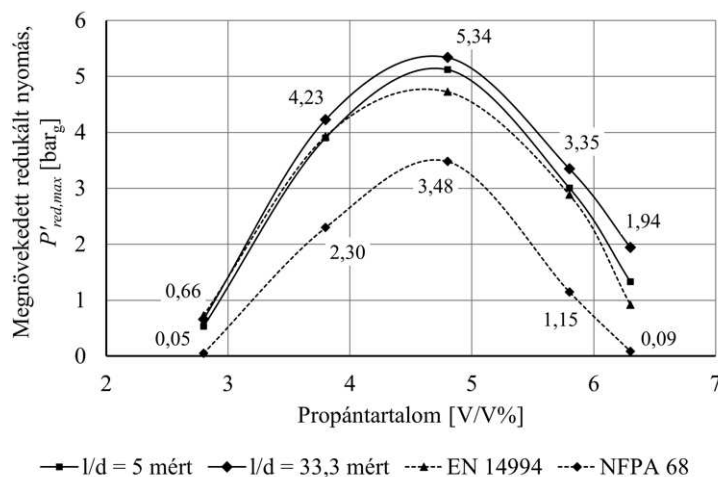
Az MSZ EN 14994:2007 szabványban szereplő (2.36) összefüggés szerint a csatorna redukált nyomást növelő hatása, amennyiben a lefűvóvezeték hossza 3 méternél rövidebb:

$$P'_{red,max} = 1,24 \cdot P_{red,max}^{0,8614}$$

Az NFPA 68:2018 szabvány szerint, ha a lefűvóvezeték hossza 3 és 6 méter közé esik, vagy annál rövidebb de a hossza a hidraulikai átmérő négyszeresénél nagyobb, a csatorna hatására megnövekedett redukált nyomás a (2.45) összefüggés segítségével számítható:

$$P'_{red,max} = 0,172 \cdot P_{red,max}^{1,936}$$

A 2.3.4. fejezetben részletesen ismertettem az összefüggések alkalmazhatósági feltételeit, amelyeknek az általam vizsgált esetek megfelelnek. Mivel az összefüggések nem tartalmazzák a csatornahossz hatását, ezért a nyomásemelkedés szempontjából kedvezőtlenebb,  $l/d = 33,3$  hosszúságú lefűvató csatorna mérési eredményeivel hasonlítottam össze őket. A számítási eredmények összevetését a kamrában mért átlagos nyomásmaximumokkal a 3.24. ábra és a 3.6. táblázat tartalmazza.



3.24. ábra. A mért, valamint az MSZ EN 14994:2007 és NFPA 68:2018 szabványok szerint meghatározott redukált nyomásmaximumok

A mért és a lefűvátott értékek mért eredményekre vonatkoztatott különbsége az NFPA 68:2018 szabvány szerinti számítások esetén adódott a legnagyobbra. Ekkor az  $l/d = 33,3$  csatorna esetén az eltérések 34,8% és 95,5% között mozogtak. A nagymértékű pontatlanságok úgymond szokványosak a robbanásbiztonság-technika területén, ám ezek az értékek már nem kívánt eltérést jelentenek a valós eredményekhez képest. Ráadásul, a szabványi számítások a legkritikusabb koncentrációk esetén alulról közelítik a mérési eredményeket, amelyek

önmagukban is kockázatosak a lefúvások védelem tervezése során, ezért egy olyan egyenlet megalkotását tűztem ki célul, amely pontosabban közelíti a megnövekedett redukált nyomás értékét a kamrában.

| Propántartalom<br>[V/V%] | Mért maximumok               |                                 | Szabványi számítások            |                         |
|--------------------------|------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------|
|                          | $l/d = 5$<br>csatorna esetén | $l/d = 33,3$<br>csatorna esetén | MSZ EN<br>14994:2007<br>szerint | NFPA 68:2018<br>szerint |
| 2,8                      | 0,54                         | 0,66                            | 0,73                            | 0,05                    |
| 3,8                      | 3,9                          | 4,23                            | 3,93                            | 2,3                     |
| 4,8                      | 5,12                         | 5,34                            | 4,73                            | 3,48                    |
| 5,8                      | 3                            | 3,35                            | 2,89                            | 1,18                    |
| 6,3                      | 1,33                         | 1,94                            | 0,92                            | 0,09                    |

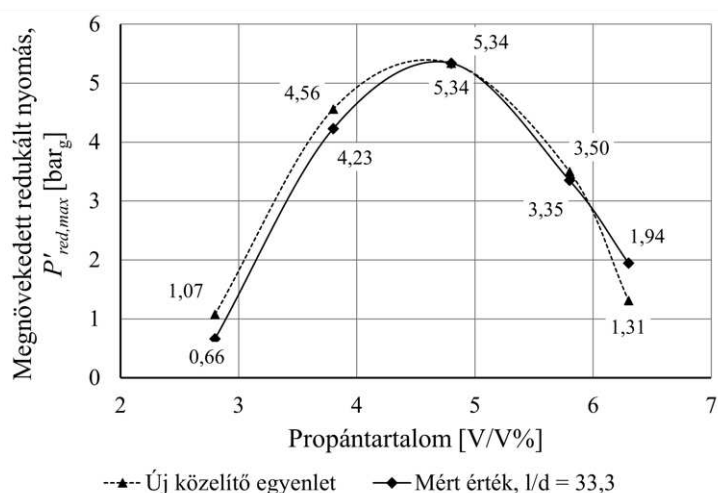
3.6. táblázat. A megnövekedett redukált nyomás maximumértékei

Az új egyenletet az MSZ EN 14994:2007 szabványban szereplő (2.36) és az NFPA 68:2018 szabványban szereplő (2.45) összefüggések mintájára a következő alakban állítottam fel:

$$P'_{red,max} = a \cdot P_{red}^b, \quad (3.36)$$

ahol  $a$  és  $b$  az ismeretlen konstansok. Ezek értékét az  $l/d = 33,3$  hosszúságú lefúvató csatorna esetén kapott redukált nyomásértékekhez igazítottam a legkisebb négyzetek módszerével úgy, hogy eközben az egyenlet a maximális nyomást eredményező koncentrációnál is felülről közelítse a mérési eredményeket. Így a következő értékek adódtak:  $a = 1,6953$  és  $b = 0,7384$ , amelyekkel az új közelítő egyenlet:

$$P'_{red,max} = 1,6953 \cdot P_{red}^{0,7384}. \quad (3.37)$$



3.25. ábra. A mért redukált nyomásmaximumok összevetése a (3.37) egyenlet szerinti eredményekkel

A (3.37) összefüggés segítségével kapott redukált robbanási nyomások a 3.25. ábrán láthatók. Megfigyelhető, hogy az új összefüggés az elvárásoknak megfelelően a maximumértéknél 0%-os hibával közelíti a mérési eredményeket, valamint annak szomszédos értékeinél is -8%-os pontosságon belül, felülről burkolják a mérési eredmények görbáját. Így az új egyenlet alkalmas a redukált nyomásmaximumok megfelelő közelítésére a 20 literes űrtartalmú edény és 30 mm átmérőjű,  $l/d = 33,3$  hosszúságú csatorna esetén.

### 3.2.4. A csősúrlódási veszteség részarányának meghatározása

A lefúvató csatornában fellépő hatások közül az alábbi veszteségtípusok lépnek fel minden egyes esetben:

- belépési veszteség (a közeg kontrakciója a csatornába történő belépéskor);
- csősúrlódási veszteség (a lefúvató csatorna ellenállása a közeg áramlásából fakadóan);
- kilépési veszteség (jelen esetben a csatornából kilépő közeg össznyomásának és a környezeti nyomás különbsége).

A további hatások ezen nyomásvesztés-komponensekre szuperponálódnak, és együttesen adják a redukált nyomás növekedését eredményező ellenállást. Ahhoz tehát, hogy az egyéb hatásokat – másodlagos robbanásokat, oszcillációkat, elnyújtott nyomáscsúcsot – számszerűsíthessük, ismerni kell a csatornában fellépő súrlódásból származó veszteséget a lefúvató során. Ez utóbbi meghatározásához a lefúvató csatorna nélküli, valamint az 1 méter ( $l/d = 33,3$ ) hosszúságú csatornával elvégzett mérési eredményeimet használtam fel.

Mivel a mért nyomásgörbék részletes elemzéséből megállapítható volt, hogy a 2,8 V/V% propántartalmú keverék lefúvatásakor a csatornában nem következett be másodlagos robbanás vagy annak hatása elhanyagolható volt, a csatornában fellépő csősúrlódási veszteség meghatározását ennek a keveréknek a vizsgálatával kezdem. Meghatározom a csatornában fellépő súrlódási veszteségekből származó nyomáscsökkenést, majd a csatorna kilépési pontjában ezzel a módszerrel kapott nyomást összevetem a lefúvató csatorna nélküli eset kamrában mérhető nyomásával. A két érték egyezése esetén a bemutatott módszer alkalmas a csősúrlódási veszteség meghatározására, mivel ez azt jelenti, hogy a kamrában lefúvóvezeték nélkül és lefúvóvezetékkel mért nyomások közti különbséget mindössze a csősúrlódási veszteség okozza.

#### 3.2.4.1. Alkalmazott összefüggések

A kamrából lefúvatáskor – leegyszerűsítve a lejátszódó folyamatokat – a közeg a lefúvató csatornába áramlik, amely hatás  $\Delta P_{be}$  beáramlási veszteségként vehető figyelembe. A csatorna hossza mentén csősúrlódási veszteség, ennek következtében  $\Delta P_{css}$  csősúrlódásból származó nyomásvesztés lép fel. A 2.2. fejezetben leírtak értelmében a fellépő akusztikus- és Helmholtz-oszcillációk hatása elhanyagolható. A csatornában fellépő másodlagos robbanások  $\Delta P_{mr}$  nyomásvesztésként jelentkeznek, amelyek számszerűsítése a robbanásból eredő nyomásnövekedés, valamint az előre- és visszainduló nyomáshullám miatt rendkívül nehéz, leginkább egy összesített veszteségként vehető figyelembe. Másodlagos robbanás nélküli esetben ez a tag zérus értéket vesz fel. A csatornából a közeg nagy sebességgel lép ki egy jóval nagyobb térfogatba, így az, hogy a közeg össznyomása csökken,  $\Delta P_{ki}$  kilépési veszteségként jelentkezik. Így a lefúvató csatorna teljes nyomásvesztése:

$$\Delta P_{csatorna} = \Delta P_{be} + \Delta P_{css} + \Delta P_{mr} + \Delta P_{ki}. \quad (3.38)$$

A (3.38) összefüggésben szereplő belépési veszteség miatti nyomáscsökkenés egy adott kontrolltérfogat 1-es belépési és 2-es kilépési pontja között az alábbi egyenlet szerint [101] számítható ki:

$$\Delta P_{be} = \zeta_{be} \cdot \frac{v_2^2}{2} \cdot \rho_2, \quad (3.39)$$

ahol a  $\zeta_{be}$  belépési veszteségtényező lekerekített torkolat esetén 0,1-nek vehető, a sugárkontrakció pedig elhanyagolható [101].

Mivel a lezajló folyamatok rendkívül gyorsan mennek végbe, ezért a csővezetékben a sűrűlódás hatására bekövetkező nyomáscsökkenés jó közelítéssel adiabatikus állapotváltozásnak tekinthető. Ezzel egyidejűleg, mivel a kamrából kiáramló közeg áramlási sebessége vizsgálataim során nem haladta meg a helyi hangsebességet, a közeg állapotfüggvényei nem szenvedtek szakadást, így a számítások elvégzésére a következő egyenletek valóban alkalmazhatók. A sűrűlódási veszteség következtében bekövetkező nyomáscsökkenés például az 1 és 2 jelű pozíciók közt adiabatikus csőáramlásra a (3.40), (3.41) és a (3.42) egyenletek felhasználásával határozható meg [102].

$$\Delta P_{css} = P_1 - P_2 \quad (3.40)$$

$$\frac{P_1^2 - P_2^2}{2 \cdot P_1} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v_1^2}{2} \cdot \rho_1 \quad (3.41)$$

$$T_2 \approx T_1 \cdot \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad (3.42)$$

A csatornában fellépő csősűrűlódási tényező meghatározásához a Colebrook-összefüggés használható [24]:

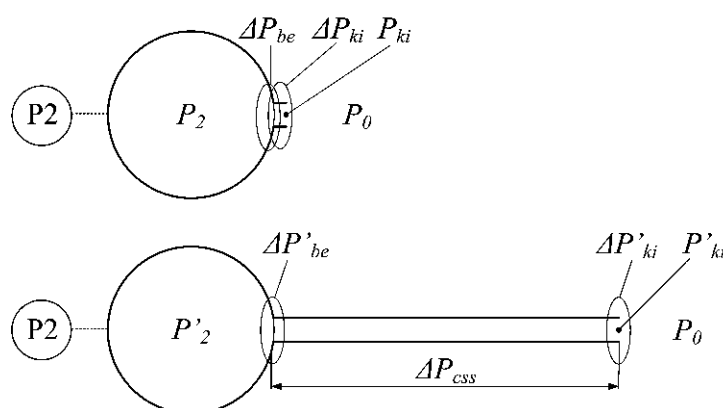
$$\lambda = \left\{ \frac{1}{1,14 - 2 \cdot \lg \left( \frac{\epsilon}{d} \right)} \right\}^2. \quad (3.43)$$

A csatornából történő kilépés után a közeg össznyomása fokozatosan a környezeti nyomás értékére, sebessége pedig nullára csökken, amely a környezeti nyomáshoz képest nyomáskülönbségként („veszteségként”) jelentkezik. Ennek mértéke a (3.44) egyenlet szerint számítható [102]:

$$\Delta P_{ki} = \zeta_{ki} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_{ki}^2. \quad (3.44)$$

A 3.26. ábra a lefúvató csatorna nélküli és a csatornával lefúvatott esetek nyomásesés-komponenseit szemlélteti a másodlagos robbanás nélküli esetekben, például a 2,8 V/V%-os propántartalmú keverék esetén. Az ábrán is látható, hogy a lefúvató csatorna nélkül és az azzal lefúvatott esetek közti különbség:

$$P'_2 - P_2 = \Delta P'_{be} - \Delta P_{be} + \Delta P'_{ki} - \Delta P_{ki} + \Delta P_{css}.$$



3.26. ábra. A csatorna nélküli és csatornával lefúvatott, másodlagos robbanás nélküli esetek nyomásesés-komponenseinek összehasonlítása

Tehát feltételezésem szerint, ha a (3.38) – (3.44) egyenletek megfelelően írják le a lefúvató csatorna hatását nagysebességű áramlás esetén is, a következő egyenlőségnek kell teljesülnie:

$$P'_2 = P_2 + \Delta P'_{be} - \Delta P_{be} + \Delta P'_{ki} - \Delta P_{ki} + \Delta P_{css}, \quad (3.45)$$

ahol a  $P_2$  és  $P'_2$  mért eredmények, a  $\Delta P_{css}$ ,  $\Delta P'_{be}$ ,  $\Delta P_{be}$ ,  $\Delta P_{ki}'$  és  $\Delta P_{ki}$  pedig számított értékek. Vizsgálataim során az elméletem ellenőrzésére a (3.45) összefüggést használom.

### 3.2.4.2. Anyagjellemzők, paraméterek, kezdeti- és peremfeltételek

A fenti egyenletek megoldásához számos paraméter és anyagjellemző megadása szükséges, így az alábbiakban ezeket részletezem.

A lefúvató csatornába való belépés előtt a közeg nyomását minden esetben a  $P_2$  nyomástávadó által mért maximális nyomás értékűnek feltételeztem.

A hirtelen keresztmetszet-változás okozta  $\zeta_{be}$  belépési veszteség Perry [101] szerint 0,1-nek tekinthető abban az esetben, ha a keresztmetszet-változás lekerekítési sugara nagyobb, mint a kilépési keresztmetszet átmérőjének 0,15-szöröse. A hasadóelem befogójának kialakítása miatt ez a feltétel teljesül, így ez az érték a számítások során is alkalmazható.

A csatornába való belépési veszteség és a csősúrlódás meghatározásához elengedhetetlen a csatorna torkolatában mérhető áramlási sebesség ismerete. Ez az érték a csatornával lefúvatott mérések nyomás-idő diagramjaiból szintén leolvasható, a következőképpen. A membránszakadás nyomáshulláma tisztán megjelenik a csatorna hossza mentén elhelyezett  $P_3 - P_6$  nyomástávadók által rögzített értékekben. Ezen nyomáshullám terjedési sebessége a kezdeti kiáramlási sebesség, amely propánkoncentrációtól függetlenül 374,7 m/s-ra adódott. A sebesség propántartalom-függetlenségének oka, hogy a kamrában mérhető közegnyomás és a lefúvó oldali nyomás különbsége az alacsony nyitónyomás-tűrésnek köszönhetően állandó volt. A lefúvatott közeg összetételének eltéréseiből fakadó anyagjellemzőkbeli változás a mérési eredmények alapján elhanyagolhatónak bizonyult.

A kamrából kiáramló közeg hőmérsékletét 1450 K értékűnek feltételeztem, mivel a 3.1.3. fejezetben igazoltam, hogy a teljesen előkevert égés során a gyújtási hőmérséklet 1450 K-nek tekinthető, amely megközelítőleg megfelel a lefúvatott közeg hőmérsékletének is. A környezet nyomását atmoszférikusnak feltételeztem.

A robbanás során tökéletesen előkevert állapotot feltételeztem, ezért a lefúvatott keverékekre is azzal a közelítéssel éltem, hogy a kamrában már az összes lehetséges propán elégett, így a tüzelőanyagban szegény kezdeti összetételek esetén oxigénfelesleg, míg a tüzelőanyagban gazdag kiindulási keverékek esetén maradék propán is távozott az égéstermékekkel együtt. Ez a megközelítés természetesen elhanyagolja a lángfront előtt felhalmozódó el nem égett keverékmennyiséget a lefúvatás kezdetén, ám az összetételben bekövetkező ilyen kis változás nem befolyásolja nagy mértékben a lefúvatott keverék anyagjellemzőit.

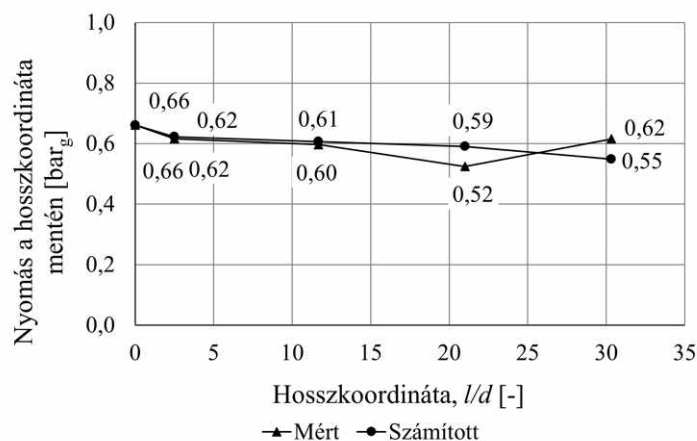
### 3.2.4.3. A megoldás menete

Az  $l/d = 33,3$  hosszúságú csatorna esetén, a súrlódási veszteség meghatározása során a kamrában mért  $P2$  nyomásmaximumból indultam ki, és nyomástávadótól nyomástávadóig, véges differenciák segítségével számítottam az értékeket. Minden egyes szakasz végén a kapott nyomás és hőmérséklet függvényében újraszámítottam az anyagjellemzőket (a keverék sűrűségét, viszkozitását, izentropikus kitevőjét), a csősúrlódási tényezőt és az áramlási sebességet a kontinuitási egyenletnek megfelelően. Az egyes szakaszokon az alábbi veszteségeket vettem figyelembe, a 3.14. ábra szerint:

- a  $P2 - P3$  szakaszon:  $\Delta P'_{be} + \Delta P_{css,2-3}$ ;
- a  $P3 - P4$  szakaszon:  $\Delta P_{css,3-4}$ ;
- a  $P4 - P5$  szakaszon:  $\Delta P_{css,4-5}$ ;
- a  $P5 - P6$  szakaszon:  $\Delta P_{css,5-6}$ ;
- a  $P6 - kilépési\ pont$  szakaszon:  $\Delta P_{css,6-ki} (+\Delta P'_{ki})$ .

### 3.2.4.4. Nyomásesések a 2,8 V/V% propántartalmú keverék esetén

A csatorna mentén mért és számított nyomásértékeket a 3.27. ábra és a 3.7. táblázat foglalja össze. Ezek eltérései a számított értéket a mért értékre vonatkoztatva a  $P2$  pozícióban 0%, a  $P3$ -ban -1%,  $P4$ -ben -2%,  $P5$ -ben -13% és  $P6$ -ban +11%.



3.27. ábra. A mért és számított nyomásértékek összehasonlítása a lefúvató csatorna hossza mentén ( $l/d = 33,3$ ; 2,8 V/V%-os keverék)

Az ábrán a  $P5$  és  $P6$  pozíciókban nem jelentős, de jól látható különbségek figyelhetők meg

a mért és számított nyomáscsúcsok között. A jelenség magyarázata a Helmholtz-oszcilláció, valamint a lefúvatáskor végbemenő jelentős turbulencia együttes hatásának tudható be.

| Nyomástávadó koordinátája [m] | Nyomástávadó $l/d$ koordinátája [-] | Nyomástávadó száma | Mért maximális nyomás [bar <sub>g</sub> ] | Számított maximális nyomás [bar <sub>g</sub> ] |
|-------------------------------|-------------------------------------|--------------------|---|--|
| 0                             | 0                                   | $P_2$              | 0,66                                      | 0,66   |
| 0,075                         | 2,5                                 | $P_3$              | 0,62                                      | 0,62   |
| 0,35                          | 11,7                                | $P_4$              | 0,6                                       | 0,61   |
| 0,63                          | 21                                  | $P_5$              | 0,52                                      | 0,59   |
| 0,91                          | 30,3                                | $P_6$              | 0,62                                      | 0,55   |
| 1                             | 33,3                                | $(P_{ki'})$        | –   | 0,54   |

3.7. táblázat. A megnövekedett redukált nyomás maximumértékei

A (3.45) összefüggés szolgál az elmélet ellenőrzésére:

$$P'_2 = P_2 + \Delta P'_{be} - \Delta P_{be} + \Delta P'_{ki} - \Delta P_{ki} + \Delta P_{css},$$

ahol az egyes tagok rendre:

- a csatorna nélküli lefúvatáskor a kamrában mért nyomás:  $P_2 = 0,54$  bar<sub>g</sub>;
- lefúvató csatornával számított nyomásveszteségek:  $\Delta P'_{be} + \Delta P'_{ki} + \Delta P_{css} = 0,66$  bar;
- lefúvató csatorna nélküli nyomásveszteségek:  $\Delta P_{be} + \Delta P_{ki} = 0,55$  bar.

Az összefüggésbe behelyettesítve adódik, hogy  $P'_2 = 0,65$  bar<sub>g</sub>. Ez a ténylegesen mért 0,66 bar<sub>g</sub> értéktől mindössze 2%-os eltérést jelent.

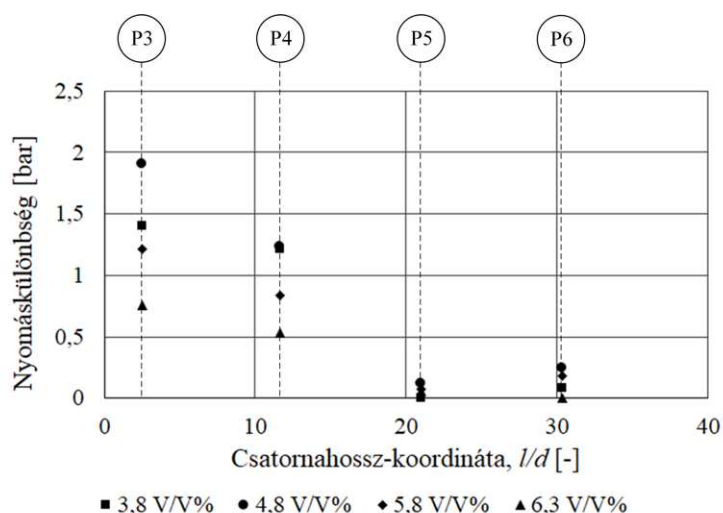
A feltétel teljesült, így igazoltam, hogy a másodlagos robbanás nélküli esetben a kamrában mérhető redukált nyomás növekményét a lefúvató csatorna súrlódási vesztesége okozza.

A vázolt számítási módszer a másodlagos robbanást nem okozó keverékek esetén alkalmas a csatornában történő nyomásesés számítására, még nagy hőmérséklet és áramlási sebesség esetén is. A módszerrel a lefúvató csatorna hatására megnövekedő redukált nyomás értéke nagy pontossággal számítható. Ezen felül olyan keverékek esetén, ahol másodlagos robbanás is tapasztalható, a csatorna teljes áramlástanai veszteségének csősúrlódási veszteségi része is meghatározható.

### 3.2.4.5. Nyomásesések a 3,8 – 6,3 V/V% propántartalmú keverékek esetén

Vizsgálataim során kimutattam, hogy azon propán-levegő keverékek esetén, ahol másodlagos robbanások is fellépnek a csatornában, azok nyomásra gyakorolt hatásával is számolni kell. A 3.2.2. fejezetben megállapítottam, hogy a lefúvató csatorna hossza mentén esetenként nem csak egyetlen másodlagos robbanás lép fel, így ezek számszerű leírása rendkívül összetett.

A csatorna meghatározott hosszkoordinátáinál mért nyomásokból kivonva a számított csősúrlódási veszteségeket, a lefúvatáskor fellépő egyéb ellenállások mértéke meghatározható. Ezek azok az értékek, amelyek tisztán a másodlagos robbanás hatásai, és amelyek a csősúrlódási veszteségre szuperponálódnak. Propán-levegő keverékeken elvégzett vizsgálataim során az egyes keverékösszetételeknek megfelelően a 3.28. ábrán és a 3.8. táblázatban láthatók.



3.28. ábra. A 3,8 – 6,3 V/V%-os összetételű keverékek mért nyomásmaximumainak és számított csősúrlódási veszteségeinek különbségei

A 3.8. táblázat értékeiből is kitűnik, hogy a legelső, azaz a  $P3$  távadó értékeinél a legnagyobb a különbség a mért és számított nyomások között. Ez arra enged következtetni, hogy a legintenzívebb másodlagos robbanás a  $P3$  távadó környezetében következett be. Az ezen a helyen mérhető nyomásmaximumok szintén haranggörbe szerint alakulnak a kiindulási koncentráció függvényében, amely a csúcst a 4,8 V/V%-os keverék esetén éri el. Ez azt bizonyítja, hogy ezen a helyen az a keverék robbant be, amelyet a lángfront maga előtt tolt és a lefúvatáskor hirtelen expandált. Technikailag a  $P3$  helyen tapasztalható másodlagos robbanás a kiindulási összetételű keverék robbanása a csatornában.

A későbbi másodlagos robbanások a lefúvatott (már égéstermékeket tartalmazó) keverék maradék propántartalmának újbóli berobbanásai. A lefúvató csatorna kezdeti szakasza kis térfogatú, félig zárt térfogatnak tekinthető. Mivel Yan és mtasi. [32] rámutattak, hogy kisebb készüléktérfogatban kisebb a maximális robbanási nyomás is, így a másodlagos robbanásra rendelkezésre álló térfogat változtatása, azaz a lefúvató csatorna átmérőjének változtatásával járó hatások vizsgálata a tématerületben rejlt további kutatási irányok egyike.

| Koordináta,<br>$l/d$ [-] | Az adott pontbeli mért és számított nyomásmaximum különbsége [bar] |          |          |          |
|--------------------------|--|----------|----------|----------|
|                          | 3,8 V/V%   | 4,8 V/V% | 5,8 V/V% | 6,3 V/V% |
| 2,5                      | 1,402  | 1,906    | 1,212    | 0,757    |
| 11,7                     | 1,213  | 1,231    | 0,837    | 0,528    |
| 21                       | 0  | 0,116    | 0,072    | 0,057    |
| 30,3                     | 0,081  | 0,243    | 0,181    | 0        |

3.8. táblázat. A megnövekedett redukált nyomás maximumértékei

Továbbá megállapítható, hogy a vizsgált koncentráció-skála két szélső értékén, azaz a 3,8 és 6,3 V/V% összetételű keverékek esetén a másodlagos robbanás hatása a csatorna végéhez érve elhal. Az is megfigyelhető, hogy jelentős nyomáscsökkenés minden egyes vizsgált keverék esetén a csatorna  $l/d = 21$  koordinátájáig áll fenn, ezt követően nagyságrendi változás



áll be az értékekben. A kezdeti szakaszon tehát leginkább a másodlagos robbanások hatása érvényesül, míg az ezt követő nyomáskülönbség növekményért a csatornában kialakuló oszcilláció felel, amely azonban elhanyagolható mértékű a másodlagos robbanás hatásához képest.

A csőúrlódási modellt a 3.8. táblázat nyomásértékeivel kiegészítve a valós robbanási nyomásgörbék átlagértékei  $\pm 3\%$  pontossággal közelítik a vizsgált eseteket.

### 3.2.5. A lefúvatott robbanások vizsgálata során elért eredmények

Az alábbiakban a lefúvatott robbanások vizsgálatával kapcsolatos eredményeimet és azok várható hasznát, valamint további kutatási lehetőségeit foglalom össze.

#### 3.2.5.1. A mérési eljárás módosításával elért eredmények

A korábban kialakított, zárt téri robbanások vizsgálatára alkalmas laboratóriumi mérési eljárásomat úgy módosítottam, hogy az a lefúvatott robbanások vizsgálatára is alkalmassá vált. Kialakítottam egy olyan hasadóelemet és annak előkészítési eljárását, amelynek nyitónyomás-tűrése jóval a szabványi ajánlás szerinti hasadótárcsa-tűrések alatt helyezkedik el. Az új mérési eljárás segítségével a lefúvatott robbanás közben lezajló, nyomásváltozással járó részfolyamatok is kellő pontossággal vizsgálhatók.

A korábban megkezdett kutatómunka folytatásaként továbbra is 2,8 V/V% – 6,3 V/V% összetételű propán-levegő keveréket vizsgáltam légköri kezdeti nyomáson és környezeti hőmérsékleten. Az eljárás alkalmazásával igazoltam, hogy a 20 literes űrtartalmú, gömb alakú robbantókamra és  $l/d = 33,3$  hosszúság-átmérő viszonyú lefúvató csatorna esetén a szakirodalomban említett egyetlen másodlagos robbanáson kívül további másodlagos robbanások is fellépnek a kezdeti propántartalommal arányosan növekvő számban, amelyek esetenként a csatornában mérhető elnyújtott nyomáscsúcs maximumértékét is meghaladják.

#### 3.2.5.2. A szabványi összefüggések vizsgálatával kapcsolatos eredmények

A gázrobbanásokkal kapcsolatos szabványok célja, hogy olyan széles körben alkalmazható összefüggéseket határozzanak meg az egyes védelmi intézkedésekre vonatkozóan, amelyek nagy biztonsággal alkalmazhatók a legtöbb vizsgált robbanóképes keverék és készülékgeometria esetében. A szabványi megközelítések tehát olyan általános összefüggések, amelyek a legtöbb közegre és geometriára alkalmazhatók, viszont az általam vizsgált esetekre nem adnak pontos becslést.

Mérési eredményeim segítségével kimutattam, hogy az MSZ EN 14491:2013 és NFPA 68:2018 szabványok lefúvató csatorna alkalmazása mellett megnövekedett redukált nyomásra ( $P'_{red,max}$ -ra) vonatkozó összefüggései a jelen kutatásban vizsgált geometriák és propán-levegő összetételek esetén jelentősen alulbecsülik a mért nyomásmaximum-értékeket.

Az MSZ EN 14994:2007 és az NFPA 68:2018 szabványban szereplő összefüggések mintájára megalkottam egy új összefüggést a lefúvató csatorna használata mellett fellépő, megnövekedett redukált nyomásmaximum számítására. Az összefüggésben szereplő ismeretlen konstansok értékeit az  $l/d = 33,3$  hosszúságú lefúvató csatorna esetén kapott redukált nyomásértékekhez igazítottam a legkisebb négyzetek módszerével úgy, hogy a közelítő függvény is felülről burkolja a mérési eredményeket.

Ahhoz, hogy az eljárás gyakorlati haszna érvényesülhessen, nem elegendő egyetlen anyagra megalkotni ezeket az összefüggéseket. Viszont a jelen disszertációban ismertetett mérési és számítási eljárás lehetővé teszi a tetszőleges anyaggal történő vizsgálatot és új összefüggések megalkotását.

### 3.2.5.3. A lefúvató csatorna nyomásvesztésének vizsgálatával kapcsolatos eredmények

A lefúvató csatornák nyomásvesztésének vizsgálatával kapcsolatban megállapítottam és igazoltam, hogy a vizsgált propán-levegő keverékekre a másodlagos robbanás nélküli esetben a kamrában mérhető redukált nyomás növekményét a lefúvató csatorna csősúrlódási vesztesége okozza. Ehhez a csőbe történő belépési és a csőben történő áramlási veszteség számítására szolgáló összefüggéseket használtam, amelyekre így igazoltam, hogy lefúvatott robbanások esetén is alkalmazhatók a vizsgált feladatra, amennyiben nem lép fel a csatornában másodlagos robbanás. Mivel az összefüggések általános alakúak, így egyéb, iparban használatos gázkeverékekre is alkalmazhatók.

A másodlagos robbanások hatását a csősúrlódási veszteség számítására alkalmas modell segítségével számszerűsítettem. Minden egyes kiindulási keverék esetén meghatároztam az arra jellemző csősúrlódási veszteséget a csatorna hossza mentén, majd ezeket az adott pozíciókban mért nyomásértékekből kivonva adódott a másodlagos robbanások parciális nyomása. Ezek azok az értékek, amelyek tisztán a másodlagos robbanás hatásai, és amelyek a csősúrlódási veszteségre szuperponálódhatnak. A propán-levegő keverékeken végzett vizsgálataim azt mutatták, hogy a másodlagos robbanások hatása a csatorna  $l/d = 21$  koordinátájáig állt fenn. Az ezt követő nyomáskülönbség-növekményért a csatornában kialakuló oszcilláció felel, amely azonban elhanyagolható mértékű a másodlagos robbanás hatásához képest. A másodlagos robbanások száma és azok nyomásmaximumai gázkeverék és készülékgeometria-specifikus értékek. Az eredmények azonban igazolják, hogy a lefúvató csatorna teljes hossza mentén számolni kell ezek hatásával.

A fejezetben ismertetett eredmények felhasználási lehetőségei a következők:

- Az általam kidolgozott mérési eljárás bemutatott módosításával nem csak propán-levegő keverékek esetén, hanem tetszőleges robbanóképes gázelegy lefúvatott robbanásának egésze és részfolyamatai vizsgálhatók.
- A lefúvató csatornában azonosított másodlagos robbanási nyomáscsúcsok jelenléte a lefúvató csatornák szilárdsági tervezésénél figyelembe veendő paraméter.
- A kidolgozott mérési és számítási eljárás lehetővé teszi a szabványi összefüggések mintájára megalkotott összefüggés tetszőleges gázkeverékre történő megalkotását. Segítségével a laboratóriumi méretű készülékek esetén is elérhetővé válnak a megnövekedett redukált nyomás számítására szolgáló összefüggések.
- A lefúvató csatornák nyomásvesztésének vizsgálata esetén a másodlagos robbanás nélküli esetben a kamrában mérhető redukált nyomás növekményét a lefúvató csatorna csősúrlódási vesztesége okozza. Az ennek meghatározására alkalmazott áramlási veszteség számítására szolgáló összefüggések általános alakúak, így egyéb, iparban használatos gázkeverékekre is alkalmazhatók.
- A másodlagos robbanások bekövetkezési helye, és azok részaránya a lefúvató csatorna nyomásvesztésében az egyéb ellenállásokhoz képest olyan alapinformációk, amelyek a későbbi tudományos előrelépést szolgálhatják és a lefúvásos védelmi berendezések fejlesztési irányaira is hatással lehetnek.

## 4. fejezet

# Tézisek

A 2,8 – 6,3 V/V% propántartalmú propán-levegő keverékek 20 literes űrtartalmú, gömb alakú robbantókamrában, módosított gáztöltési eljárással végzett robbanásának zárt terű és lefúvatott (0,49 bar<sub>g</sub> nyitónyomású hasadóelem, valamint  $l/d = 0, 5$  és  $33,3$  hosszúság-átmérő viszonyú lefúvató csatornák) elméleti és szimulációs vizsgálati, valamint mérési eredményei alapján az alábbi új tudományos eredményeket fogalmazom meg.

### 1. tézis

Laboratóriumi méretű (20 literes űrtartalmú) készülék esetén az MSZ EN 14994:2007 és NFPA 68:2018 szabványokban található összefüggések pontosítására, a lefúvóvezeték hatására bekövetkező redukált nyomás növekedésére egy új összefüggést határoztam meg, amelynek alakja a következő:

$$P'_{red,max} = a \cdot P_{red,max}^b.$$

Az összefüggés az említett szabványok megengedett alsó készülékméret-tartományában pontosabb eredményt szolgáltat, mint az eredetiek.

Propán-levegő keverékek esetén meghatároztam az összefüggés  $a$  és  $b$  konstansait ( $a = 1,6953$  és  $b = 0,7384$ ) a robbanásveszély szempontjából legveszélyesebb koncentrációk tartományában.

### 2. tézis

Kidolgoztam a zárt téri robbanás kezdeti szakaszán a nyomásváltozás modellezésére szolgáló, mérnöki gyakorlatban alkalmazható eljárást. A zárt téri robbanást ideális gázként közelítő nyomásfüggvénybe illesztett  $\epsilon$  módosító tényező alkalmazásával a függvény értelmezési tartományát kiterjesztettem. A módosított összefüggés a következő alakban írható fel:

$$P = P_0 \cdot e^{\epsilon \cdot E^2 \cdot (E-1) \left(\frac{S_{l-t}}{R}\right)^3}.$$

Az összefüggés alkalmazhatóságát propán-levegő keverék esetén méréssel és szakirodalmi adatokkal való összevetéssel igazoltam, továbbá propán-levegő keverék esetén meghatároztam az  $\epsilon$  korrekciós tényező propántartalomtól való függését az

$$\epsilon = -0,0132 \cdot V_p^{*2} + 0,0832 \cdot V_p^* + 0,1853$$

alakban. A bemutatott eljárás alkalmazásával az  $\epsilon$  tényező tetszőleges robbanóképes gáz levegővel alkotott keverékére meghatározható.

### 3. tézis

Kísérleti vizsgálatokkal igazoltam, hogy 20 literes űrtartalmú, gömb alakú robbantókamrából történő lefúvatás esetén, lefúvató csatorna alkalmazása mellett, a szakirodalomban általánosan megjelenő egyetlen másodlagos robbanáson kívül további másodlagos robbanások is felléphetnek, amelyek esetenként a csatornában mérhető elnyújtott nyomáscsúcs maximum-értékét is meghaladhatják.

A mérési eljárás alkalmazásával propán-levegő keverék különböző koncentrációira igazoltam, hogy 20 literes űrtartalmú, gömb alakú robbantókamra,  $l/d = 33,3$  hosszúság-átmérő viszonyú lefúvató csatorna esetén a szakirodalomban említett egyetlen másodlagos robbanáson kívül további másodlagos robbanások is fellépnek. A másodlagos robbanások száma a propánkoncentráció függvénye, amely maximumát a sztöchiometriai arányú keverék közelében éri el.

### 4. tézis

A elvégzett elméleti, szimulációs és kísérleti vizsgálatok segítségével a lefúvóvezetékkel ellátott, lefúvatott gáz-levegő keverékek robbanása esetén az alábbi megállapításokat tettem.

- a) Igazoltam, hogy a másodlagos robbanás nélküli esetben a kamrában mérhető redukált nyomás növekményét a lefúvató csatorna csősúrlódási vesztesége okozza.
- b) Kísérletek és számítások segítségével igazoltam, hogy a csőbe történő belépési és a csőben történő áramlási veszteség számítására szolgáló összefüggések lefúvatott robbanás esetén is alkalmazhatók a csatornában fellépő csősúrlódási veszteség számítására.
- c) Propán-levegő keverékek esetén kimutattam, hogy amennyiben másodlagos robbanás is megfigyelhető a csatornában, a legintenzívebb másodlagos robbanás a lefúvónyílás környezetében következik be. Az ezen a helyen mérhető nyomásmaximumok szintén a kiindulási koncentráció függvényei, amely a csúcsát sztöchiometriai arányú keverék környezetében éri el.
- d) Megállapítottam, hogy az először bekövetkező másodlagos robbanást a csatornában megjelenő kiindulási összetételű keverék robbanása okozza. Az esetlegesen létrejövő későbbi másodlagos robbanások a lefúvatott (már égéstermékeket is tartalmazó) keverék maradék tüzelőanyag-tartalmának újbóli berobbanása következtében alakulnak ki.
- e) A másodlagos robbanások hatása a csatornaszakasz adott tartományában jelenik meg. A vizsgált csatorna kilépési keresztmetszete környezetében bekövetkező nyomáskülönbség-növekmény oka a csatornában kialakuló oszcilláció, amely azonban elhanyagolható mértékű a másodlagos robbanás hatásához képest.

## 5. fejezet

# Összefoglalás, további kutatási irányok

Dolgozatomban kiterjedten vizsgáltam a zárt téri és lefúvatott robbanások elméleti alapjait, feltételrendszerét, körülményeit és a közben végbemenő fizikai-kémiai folyamatokat. Áttekintettem az ipari gyakorlatban alkalmazott, lefúvásos védelmi módokhoz kapcsolódó hazai és nemzetközi szabványi háttérrel, valamint feltártam a zárt térben bekövetkező robbanás és a lefúvatás során fellépő fizikai-kémiai folyamatokat.

Kidolgoztam egy mérési eljárást a kamrában és a lefúvató csatornában mérhető nyomásértékek rögzítésére és vizsgálatára. Mérési eredményeim felhasználásával jelentősen kiterjesztettem a robbanási nyomásgörbe kezdeti szakaszát leíró ideális gáz modell alkalmazási határát.

Elméleti és gyakorlati módszerekkel részletesen tanulmányoztam a lefúvatás közben mérhető robbanási jellemzőket, amelynek eredményeképpen új, a másodlagos robbanáshoz köthető nyomáscsúcsokat azonosítottam a lefúvató csatornában. Megállapítottam, hogy a másodlagos robbanási nyomáscsúcsok száma a kiinduló keverék propánkoncentrációjától függ. Amennyiben – akár több – másodlagos robbanás is megfigyelhető a csatornában, a legintenzívebb másodlagos robbanás a lefúvónyílás környezetében következik be. Az ezen a helyen mérhető nyomásmaximumok haranggörbe szerint alakulnak a kiindulási koncentráció függvényében, amely a csúcsát a sztöchiometriai arányú keverék környezetében éri el. Vizsgálataim azt mutatták, hogy a másodlagos robbanások hatása a vizsgált csatorna egy adott szakaszán áll fenn. Az ezt követő nyomáskülönbség-növekményért a csatornában kialakuló oszcilláció felel, amely azonban elhanyagolható mértékű a másodlagos robbanás hatásához képest.

Számítások segítségével kimutattam, hogy a másodlagos robbanás nélküli esetben a kamrában mérhető redukált nyomás növekményét a lefúvató csatorna súrlódási vesztesége okozza. Ezt követően bizonyítottam, hogy a csőbe történő belépési és a csőben történő áramlási veszteség számítására szolgáló összefüggések lefúvatott robbanások esetén is alkalmazhatók a csatornában végbemenő nyomásveszteség meghatározására, amennyiben nem lép fel másodlagos robbanás.

Részletesen tanulmányoztam a vizsgált szabványok összefüggéseinek alkalmazhatóságát kisméretű készülékek csatornával történő lefúvatása esetén. Az MSZ EN 14491:2013 és NFPA 68:2018 szabványokban szereplő, lefúvóvezeték hatására bekövetkező redukált nyomásnövekedésre vonatkozó szabványos összefüggések mintájára megalkottam egy propánlevegő keverékre alkalmazható új összefüggést ugyanezen paraméter számítására. Ez az összefüggés a vizsgált esetek redukált robbanási nyomásnövekményére pontosabb közelítést ad, mint a szabványi megoldások.

Ahogy az elvégzett munka is mutatja, a témakör rendkívül kiterjedt, és számos kutatási irányt magában foglal.

Jelen dolgozatban összefoglalt vizsgálataimat propán-levegő keverékek esetén végeztem el, így ezekre határoztam meg az ideális gáz modellbe illesztett  $\epsilon$  korrekciós tényezőt, valamint a megnövekedett redukált nyomás számítására szolgáló  $a$  és  $b$  konstansokat. Ahhoz, hogy ezek valóban a mérnöki gyakorlat számára hasznos kutatási eredmények lehessenek, az első és legfontosabb szempont ezek kiterjesztése az iparban előforduló egyéb gázkeverékekre is. Így elsődleges kutatási irányként ezt a vonalat preferálom.

A lefúvató csatornára vonatkozó vizsgálataim mindössze a hangsebesség alatti áramlásokra terjedtek ki, azonban a DDT átmenet után a csatornában hangsebesség fölötti áramlás is kialakulhat, amely egészen eltérő áramlás- és nyomásviszonyokat okoz a csatornában és a készülékben egyaránt. További kutatási lehetőség ezen folyamatok vizsgálata.

A jelen disszertációban áttekintett szabványok közül egyedül az NFPA 68:2018 szabvány porrobbanásokra vonatkozó része közöl számítási módot az egyenestől eltérő kialakítású csatornák nyomásveszteségének számítására, ám azok is korlátozott mennyiségű mérési eredményen alapuló empirikus összefüggések. Ilyen szabványi ajánlások a gázrobbanásokra vonatkozóan az általam vizsgált körben nem léteznek. Ezek pontosítása vagy a felhasználható összefüggések körének bővítése is kijelölhető további kutatási irányként.

A másodlagos robbanások bekövetkezési helye, és azok részaránya a lefúvató csatorna nyomásveszteségében az egyéb ellenállásokhoz képest olyan alapinformációk, amelyek a későbbi tudományos előrelépést szolgálhatják és további munkával a lefúvósos védelmi berendezések fejlesztési irányaira is hatással lehetnek.

Ahogy a dolgozatról is kitűnik, a robbanásvédelem témaköre minden egyes vizsgált területen bőven rejt magában tudományos potenciált. Ebből kiindulva a továbbiakban is szeretném folytatni a kutatásaimat a témában.

# Summary

In my thesis, theoretical background of explosions in closed vessels and vented explosions have been extensively studied, involved their physico-chemical processes and the parameters which have influence to them.

I reviewed the Hungarian national and international standards related to venting explosion protection methods in industrial practice, and discussed the occurring physical and chemical processes in closed vessel explosion and venting.

During my work, a measurement procedure were developed to record and investigate pressure values in the chamber and the vent duct. Using theoretical and practical methods, I have studied in detail the pressure values during venting, resulting the identification of new pressure peaks in the vent duct related to secondary explosion. I have shown, that maximum values of secondary explosions may exceed the reduced maximum explosion overpressure in the vessel. The number of the secondary pressure peak is proportional to the propane concentration of the initial mixture. If several secondary explosions are observed in the duct, the most intensive of them occurs near the vent area. The pressure maxima at this location also follow a bell-shape curve as a function of initial concentration, with the peak at near stoichiometric propane content. Current investigations showed, that the effect of secondary explosions persists in a given section of the investigated channel. When further increase in pressure occurs, this is due to oscillations in the duct, which is negligible compared to the effect of the secondary explosion.

Using the measurement results, I have developed and successfully applied a mathematical model to calculate the pressure maximum of a closed vessel explosion and the amount of each component during the reaction. With this model and the measurement results, I have significantly extended the application limits of the ideal gas model describing the initial phase of the explosion pressure curve.

Using my measuring results, the scope of the ideal gas model describing the initial phase of the explosion pressure curve have been significantly extended.

With mathematical method, I have shown that the increase in reduced explosion overpressure with the lack of secondary explosion is due to the frictional loss of the vent duct. I have proven, that these common relationships are applicable in case of vented explosions.

I have studied in detail the applicability of the examined standards in the context of small vessels during the venting. Using the MSZ EN 14491:2013 and NFPA 68:2018 standard equations, I have created a correlation for the calculation of the increased reduced pressure maximum in case of duct vented propane explosion. This equation gives a more accurate approximation than the standard solutions.

As the thesis shows, the subject of the explosion protection is very broad and encompasses many research directions.

The investigations which are summarized in this thesis were carried out for propane-air mixtures, for which I determined the correction factor  $\epsilon$  fitted in the ideal gas model, and the constants  $a$  and  $b$  for the calculation of the increased reduced pressure. To make these results truly useful in engineering practice, the first and most important aspect is to extend them to other gas mixtures occurring in industry. Thus, this line of research is the leading further direction.

The background of vented explosions is also extremely complex. This is particularly valid for the use of vent ducts, whose many parameters have not been investigated in this thesis.

Current investigations on the vent ducts have only regards below the speed of sound, but after the DDT, outflow above the sound speed can develop in the channel, causing different flow pattern and pressure conditions both in the channel and in the device. A further research opportunity is to investigate these processes.

Of the standards I have reviewed, only the dust explosion part of NFPA 68:2018 provides equations for the pressure drop and resistance of vent ducts with non-straight design. However, these empirical formulas based on a limited amount of measured data. Moreover, such standard recommendations for gas explosions are not available. To reach higher precision of the equations and extension of their application could be identified as a further research direction.

The location of the secondary explosion and their ratio compared to other resistances in the venting process can serve for future scientific advances and, with further work, can influence the development directions of explosion protection equipment.

As this thesis shows, the topic of explosion protection has a great scientific potential in each of the areas I studied in this thesis. Starting of this statement and my previous work, I would like to continue my research on this field.



# Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom témavezetőimnek, Dr. habil. Szepesi L. Gábornak és Prof. Dr. Siménfalvi Zoltánnak, akik kitartóan támogattak sokéves munkám során, és akikhez bármikor fordulhattam szakmai kérdésekben.

Szeretnék köszönetet mondani az Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet munkatársainak a doktori képzésem alatt és a disszertáció elkészítése közben nyújtott támogatásukért. Továbbá, a mérőkör egyes kulcselemeinek megvalósításáért köszönettel tartozom Ramada Zoltánnak és Krámer Gyulának. Külön köszönettel tartozom Pusztai Tamásnak, aki nélkül a dolgozat mérései nem valósulhattak volna meg, és aki szakmai támogatásával és barátságával mindig segített a kutatás közben felmerülő holtponatokon való átlendülésben.

Továbbá szeretném hálámat kifejezni mindazoknak, akik elolvasták a dolgozatot, és építő jellegű megjegyzéseikkel hozzájárultak a disszertáció jelenlegi formájához.

Végül, de nem utolsó sorban szeretném megköszönni a férjemnek, családomnak és a barátaimnak a sokéves támogatást, odaadást és türelmet, amely végigkísérte ennek a dolgozatnak a megszületését.

Miskolc, 2023. január 19.

Mikáczó Viktória sk.  
okleveles gépészmérnök, tanársegéd

# A disszertációhoz kapcsolódó publikációk jegyzéke

1. V. Mikáczó, G. L. Szepesi „*Theoretical Investigation of Pressure-Characteristic in case of Gas Explosion*”, Proceedings of the International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2014) Debrecen, Magyarország : University of Debrecen Faculty of Engineering (2014) pp. 82-90. , 8 p.
2. Mikáczó V., Szepesi L. G. „*Nyomás-idő függvény elméleti vizsgálata gázrobbanás esetén*”, GÉP 65: 1 pp. 33-37 (2014)
3. Mikáczó V. „*Hydrodynamical Investigation of Vent Duct in case of Dust Explosion*”, Tavaszi Szél 2014 Konferencia: Konferenciakötet VII., Debrecen, Magyarország : Doktoranduszok Országos Szövetsége (DOSZ) (2014) 570 p. pp. 460-470. Paper: ISBN 978-615-80044-6-6, 11 p.
4. Mikáczó V. „*Lefúvóvezeték hatásának vizsgálata töltetrobbanás hasadópaneles védelme esetén*”, Pokorádi, László; Vámosy, Zoltán (szerk.) XXXII. OTDK Műszaki Tudományok Szekció : Tartalmi kivonatok, Budapest, Magyarország : Óbudai Egyetem, (2015) pp. 298.
5. V. Mikáczó, G. L. Szepesi „*Theoretical and Experimental Investigation of Pressure Rise Generated by Dust Explosion*”, Tavaszi Szél : Absztraktkötet 2015 Budapest, Magyarország, Győr, Magyarország : Doktoranduszok Országos Szövetsége (DOSZ), Publio Kiadó (2015) pp. 332.
6. Mikáczó V. „*Gázkeverék robbanása során történő lefúvatás vizsgálata - I. rész*”, The Publications of the MultiScience - XXX. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference, Miskolc, Magyarország : University of Miskolc (2016) Paper: D4.8 , 5 p.
7. V. Mikáczó, Z. Siménfalvi, G. L. Szepesi „*Investigation of deflector plates in case of gas explosion*”, Proceedings of the 4th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2016) Debrecen, Magyarország : University of Debrecen Faculty of Engineering (2016) 654 p. pp. 330-335. , 6 p.
8. V. Mikáczó, Z. Siménfalvi, G. L. Szepesi „*Influence of the vent duct design in case of gas explosion in 20 litre sphere apparatus*”, 22nd International Congress of Chemical and Process Engineering, CHISA 2016 and 19th Conference on Process Integration,

Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction, PRES 2016, Prága, Csehország : Czech Society of Chemical Engineering (2016) p. 682 *Scopus*

9. V. Mikáczó, Z. Siménfalvi, G. L. Szepesi „*Simulation of propane explosion in closed vessel*”, *Annals of Faculty of Engineering Hunedoara - International Journal of Engineering* 15 : 3 pp. 49-54. , 6 p. (2017)
10. V. Mikáczó, G. L. Szepesi „*Phenomenological modeling of gas explosion in closed vessel*”, *MultiScience - XXXIII. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference, Miskolc-Egyetemváros, Magyarország : Miskolci Egyetem (2019) pp. 1-9. Paper: D3-4 , 9 p.*
11. Mikáczó V., Szepesi L. G., Siménfalvi Z. „*Lefúvóvezeték hatása a redukált robbanási nyomásra - elméleti modellek*”, *GÉP LXXII. : 1-2 pp. 26-30. , 5 p. (2021)*
12. Mikáczó V., Szepesi L. G. „*Por- és gázrobbanásokkal kapcsolatos vizsgálatok alapjai és tapasztalatai*”, *Multidiszciplináris Tudományok: A Miskolci Egyetem közleménye* 11 : 2 pp. 93-99. , 7 p. (2021)
13. V. Mikáczó, Z. Siménfalvi, G. L. Szepesi „*Practical Extension of Ideal Gas Model for Propane Explosions*”, *Abstract book for the 17th Miklós Iványi International PhD & DLA Symposium: Architectural, Engineering and Information Sciences, Pécs, Magyarország : Pollack Press (2021) 227 p. p. 143*
14. V. Mikáczó, Z. Siménfalvi, G. L. Szepesi „*Practical Extension of Ideal Gas Model for Propane Explosions*”, *Pollack Periodica: An International Journal for Engineering and Information Sciences, Paper: 10.1556/606.2022.00603 (2022) Scopus, Q3*
15. V. Mikáczó „*Gas explosion venting of 20-litre vessel with and without various length of vent ducts*”, *Multidiszciplináris Tudományok: A Miskolci Egyetem közleménye*, 12 : 3 pp. 207-216. , 7 p. (2021), DOI: <https://doi.org/10.35925/j.multi.2022.3.19>
16. Mikáczó V., Siménfalvi Z. „*Lefúvatott robbanások maximális redukált nyomásának vizsgálata az EN 14994 és NFPA 68 szabványok tükrében*”, *GÉP LXXIII : 5 pp. 52-55., 4 p. (2022)*

# Irodalomjegyzék

- [1] R. K. Eckhoff, „Current status and expected future trends in dust explosion research,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 18, no. 4-6, pp. 225–237, 2005.
- [2] C. T. Cloney, „2021 Mid-year combustible dust incident report - Version 1,” tech. rep., DustEx Research Ltd. Retrieved, 2021.
- [3] I. Bokros, V. Mannheim, Z. Siménfalvi, and G. Szepesi L., *Por- és gázrobbanás elleni védelem*. Miskolc: Nemzeti Tankönyvkiadó, 2009.
- [4] TvMI 13.3, *Tűzvédelmi Műszaki Irányelv - Robbanás elleni védelem*. hatályos: 2022.06.13-tól.
- [5] R. K. Eckhoff, *Dust explosions in the process industries*. Gulf Professional Publishing, third edit ed., 2003.
- [6] Az Európai Parlament és a Tanács, „1999/92/EK irányelve a robbanásveszélyes légkör kockázatának kitett munkavállalók biztonságának és egészségvédelmének javítására vonatkozó minimumkövetelményekről,” 1999.
- [7] J. Barton, *Dust explosion prevention and protection - A practical guide*. Gulf Professional Publishing, 2002.
- [8] 54/2014. (XII. 5.) BM rendelet az Országos Tűzvédelmi Szabályzatról, *Országos Tűzvédelmi Szabályzat*. hatályos: 2022.06.13., 2022.
- [9] 1993. évi XCIII. törvény, *a munkavédelemről*. hatályos: 2023.01.01 - 2023.04.21.
- [10] 3/2003. (III.11.) FMM-ESzCsM együttes rendelet, *a potenciálisan robbanásveszélyes környezetben levő munkahelyek minimális munkavédelmi követelményeiről*. hatályos: 2008.05.16-tól.
- [11] 2011. évi CXXVIII. törvény, *a katasztrófavédelemről és a hozzá kapcsolódó egyes törvények módosításáról*. hatályos: 2023.01.12-től.
- [12] MSZ EN 14460, „Robbanásbiztos berendezések,” 2018.
- [13] MSZ EN 14797, „Robbanásvédelmi szellőztetőeszközök,” 2007.
- [14] EN 14994, „Gas Explosion Venting Protective Systems,” 2007.

- [15] MSZ EN 14491, „Dust Explosion Venting Protective Systems,” 2013.
- [16] S. Sun, Y. Qiu, H. Xing, and M. Wang, „Effects of concentration and initial turbulence on the vented explosion characteristics of methane-air mixtures,” *Fuel*, vol. 267, no. 1, pp. 1–9, 2020.
- [17] S. R. Turns, *An introduction to combustion - concepts and applications*. McGraw-Hill Higher Education, second ed., 2000.
- [18] R. K. Eckhoff, „Differences and similarities of gas and dust explosions: A critical evaluation of the European 'ATEX' directives in relation to dusts,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 19, no. 6, pp. 553–560, 2006.
- [19] T. Abbasi and S. A. Abbasi, „Dust explosions – Cases, causes, consequences, and control,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 140, pp. 7–44, 2007.
- [20] C. J. Lea and H. S. Ledin, „A review of the State-of-the-art in gas explosion modelling,” tech. rep., 2002.
- [21] L. Beda, *Égés- és oláselelmélet I*. Budapest: Ybl Miklós Műszaki Főiskola, 2001.
- [22] M. Hertzberg, I. A. Zlochower, and K. L. Cashdollar, „Metal dust combustion: Explosion limits, pressures, and temperatures,” *Twenty-Fourth Symposium (International) on Combustion*, pp. 1827–1835, 1992.
- [23] K. L. Cashdollar, „Overview of dust explosibility characteristics,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, no. 13, pp. 183–199, 2000.
- [24] NFPA 68, „Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting,” 2018.
- [25] Á. B. Palotás, *Ipari tüzeléstechnika*. Miskolc: Miskolci Egyetem, 2009.
- [26] S. Zhong and X. Deng, „Modeling of maize starch explosions in a 12 m<sup>3</sup> silo,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 13, no. 3-5, pp. 299–309, 2000.
- [27] A. Di Benedetto, A. Garcia-Agreda, P. Russo, and R. Sanchirico, „Combined effect of ignition energy and initial turbulence on the explosion behavior of lean gas/dust-air mixtures,” *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 51, no. 22, pp. 7663–7670, 2012.
- [28] K. Chatrathi and J. Going, „Dust deflagration extinction,” *Process Safety Progress*, vol. 19, no. 3, 2000.
- [29] P. R. Amyotte, „Solid inertants and their use in dust explosion prevention and mitigation,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 19, no. 2-3, pp. 161–173, 2006.
- [30] F. Hauert, A. Vogl, and S. Radandt, „Dust cloud characterization and the influence on the pressure-time-history in silos,” *Process Safety Progress*, vol. 15, no. 3, pp. 178–184, 1996.

- [31] S. Chippett, „Modeling of vented deflagrations,” *Combustion and Flame*, vol. 55, pp. 127–140, 1984.
- [32] C. Yan, Z. Wang, K. Liu, Q. Zuo, Y. Zhen, and S. Zhang, „Numerical simulation of size effects of gas explosions in spherical vessels,” *Simulation*, vol. 93, no. 8, pp. 695–705, 2017.
- [33] G. A. Lunn, P. Holbrow, S. Andrews, and J. Gummer, „Dust explosions in totally enclosed interconnected vessel systems,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 9, no. 1 SPEC. ISS., pp. 45–58, 1996.
- [34] B. Lewis and G. von Elbe, *Combustion, Flames and Explosions of Gases*. Elsevier Inc., third ed., 1987.
- [35] R. Lautkaski, „Understanding vented gas explosions,” tech. rep., 1997.
- [36] Q. Liu, Y. Zhang, F. Niu, and L. Li, „Study on the flame propagation and gas explosion in propane/air mixtures,” *Fuel*, vol. 140, pp. 677–684, 2015.
- [37] V. Brinzea, M. Mitu, C. Movileanu, A. Musuc, D. Razus, and D. Oancea, „Propagation velocities of propane-air deflagrations at normal and elevated pressures and temperatures,” *Revista de Chimie*, vol. 63, no. 3, pp. 289–292, 2012.
- [38] G. Ciccarelli and S. Dorofeev, „Flame acceleration and transition to detonation in ducts,” *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 34, no. 4, pp. 499–550, 2008.
- [39] C. Proust, „A few fundamental aspects about ignition and flame propagation in dust clouds,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 19, no. 2-3, pp. 104–120, 2006.
- [40] A. E. Dahoe, R. S. Cant, M. J. Pegg, and B. Scarlett, „On the transient flow in the 20-liter explosion sphere,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 14, pp. 475–487, 2001.
- [41] A. E. Dahoe, „Laminar burning velocities of hydrogen-air mixtures from closed vessel gas explosions,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 18, pp. 152–166, 2005.
- [42] C. Proust, „Experimental determination of the maximum flame temperatures and of the laminar burning velocities for some combustible dust-air mixtures,” *5. International Colloquium on Dust Explosions, Varsovie, Poland*, pp. 161–184, 1993.
- [43] A. S. Huzayyin, H. A. Moneib, M. S. Shehatta, and A. M. A. Attia, „Laminar burning velocity and explosion index of LPG-air and propane-air mixtures,” *Fuel*, vol. 87, no. 1, pp. 39–57, 2008.
- [44] D. Razus, V. Brinzea, M. Mitu, and D. Oancea, „Temperature and pressure influence on explosion pressures of closed vessel propane-air deflagrations,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 174, pp. 548–555, 2010.

- [45] C. Proust, „Flame propagation and combustion in some dust-air mixtures,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 19, no. 1, pp. 89–100, 2006.
- [46] Ö. L. Gülder, „Turbulent premixed flame propagation models for different combustion regimes,” *Symposium (International) on Combustion*, vol. 23, no. 1, pp. 743–750, 1991.
- [47] L. Rogstadkjernet, *Combustion of Gas in Closed, Interconnected Vessels: Pressure Piling*. PhD thesis, University of Bergen, Bergen, Norway, 2004.
- [48] V. Brinzea, M. Mitu, C. Movileanu, A. Musuc, and D. Razus, „Expansion coefficients and normal burning velocities of propane-air mixtures by the closed vessel technique,” *Analele Universitatii Bucuresti: Chimie*, vol. 19, no. 2, pp. 31–37, 2010.
- [49] M. Mitu, V. Giurcan, C. Movileanu, D. Razus, and D. Oancea, „Propagation of CH<sub>4</sub>-N<sub>2</sub>O-N<sub>2</sub> flames in a closed spherical vessel,” *Processes*, vol. 9, no. 5, pp. 1–14, 2021.
- [50] M. Metghalchi and J. C. Keck, „Burning velocities of mixtures of air with methanol, isooctane, and indolene at high pressure and temperature,” *Combustion and Flame*, vol. 48, no. C, pp. 191–210, 1982.
- [51] M. Fairweather and M. W. Vasey, „A mathematical model for the prediction of overpressures generated in totally confined and vented explosions,” *Nineteenth Symposium of Combustion*, pp. 645–653, 1982.
- [52] N. S. Titova, P. S. Kuleshov, and A. M. Starik, „Kinetic mechanism of propane ignition and combustion in air,” *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, vol. 47, no. 3, pp. 249–264, 2011.
- [53] G. S. L. Andreis, R. S. Gomes, and A. L. De Bortoli, „A reduced kinetic mechanism for propane,” *Thermal Engineering*, vol. 11, no. 1, pp. 37–43, 2012.
- [54] H. Haario, L. Kalachev, T. Salmi, and J. Lehtonen, „Asymptotic analysis of chemical reactions,” *Chemical Engineering Science*, vol. 54, no. 8, pp. 1131–1143, 1999.
- [55] C. K. Westbrook and F. L. Dryer, „Simplified reaction mechanisms for the oxidation of hydrocarbon fuels in flames,” *Combustion Science and Technology*, vol. 27, no. 1-2, pp. 31–43, 1981.
- [56] S. M. Frolov, V. S. Aksenov, and I. O. Shamshin, „Reactive shock and detonation propagation in U-bend tubes,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 20, no. 4-6, pp. 501–508, 2007.
- [57] J. Wen and C. Wang, „The new single-step reaction mechanism for propane explosions covering the entire spectrum of flame acceleration, transition to detonation and detonation,” tech. rep., The University of Warwick, 2013.
- [58] M. G. Cooper, M. Fairweather, and J. P. Tite, „On the mechanisms of pressure generation in vented explosions,” *Combustion and Flame*, vol. 65, no. 1, pp. 1–14, 1986.

- [59] X. Chen, J. Xu, T. Zhang, H. Jiang, Z. Zhang, C. Zhang, K. Zhang, and W. Gao, „Experimental investigation of the pressure characteristics in the dust explosion venting,” *Powder Technology*, vol. 406, no. March, p. 117582, 2022.
- [60] S. Sun, M. Wang, K. Gao, T. Zhao, and Q. Guo, „Effect of vent conditions on internal overpressure time-history during a vented explosion,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 54, no. 1, pp. 85–92, 2018.
- [61] C. R. Bauwens, J. Chaffee, and S. B. Dorofeev, „Vented explosion overpressures from combustion of hydrogen and hydrocarbon mixtures,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 3, pp. 2329–2336, 2011.
- [62] P. R. Amyotte and F. I. Khan, „An inherent safety framework for dust explosion prevention and mitigation,” *Journal de Physique IV (Proceedings)*, vol. 12, no. 7, pp. 189–196, 2002.
- [63] D. Bradley and A. Mitcheson, „The venting of gaseous explosions in spherical vessels. II-Theory and experiment,” *Combustion and Flame*, vol. 32, no. C, pp. 237–255, 1978.
- [64] R. Lautkaski, „Duct venting of gas explosions. Revision of two proposed engineering correlations,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 25, no. 2, pp. 400–413, 2012.
- [65] V. V. Molkov, „Unified correlations for vent sizing of enclosures at atmospheric and elevated pressures,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 14, no. 6, pp. 567–574, 2001.
- [66] J. Sustek and B. Janovsky, „Comparison of empirical and semi-empirical equations for vented gas explosion with experimental data,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 26, no. 6, pp. 1549–1557, 2013.
- [67] C. Yao, J. DeRis, S. N. Bajpai, and J. L. Buckley, „Evaluation of protection from explosion overpressure in AEC gloveboxes,” tech. rep., U. S. Atomic Energy Commission Chicago Operations Office, Argonne, Illinois, 1969.
- [68] D. Bradley and A. Mitcheson, „The venting of gaseous explosions in spherical vessels. I-Theory,” *Combustion and Flame*, vol. 32, no. C, pp. 221–236, 1978.
- [69] V. Molkov, R. Dobashi, M. Suzuki, and T. Hirano, „Modeling of vented hydrogen-air deflagrations and correlations for vent sizing,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 12, no. 2, pp. 147–156, 1999.
- [70] F. Tamanini and J. V. Valiulis, „A correlation for the impulse produced by vented explosions,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 13, no. 3-5, pp. 277–289, 2000.
- [71] B. Ponizy and J. C. Leyer, „Flame dynamics in a vented vessel connected to a duct: 1. Mechanism of vessel-duct interaction,” *Combustion and Flame*, vol. 116, pp. 259–271, 1999.



- [72] L. Pang, Z. Zhang, S. Cui, and S. Sun, „Experimental study of the venting characteristics of dust explosion through a vent duct,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 65, p. 104144, 2020.
- [73] P. Russo and A. Di Benedetto, „Effects of a duct on the venting of explosions - Critical review,” *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 85, no. 1 B, pp. 9–22, 2007.
- [74] J. F. Ye, X. H. Jiang, Z. W. Jia, and B. C. Fan, „Experimental investigations of external second-explosion induced by vented explosion,” *Explosion Shock Waves*, vol. 04, pp. 356–362, 2004.
- [75] M. Hey, „Pressure relief of dust explosions through large diameter ducts and effects of changing the position of the ignition source,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 4, no. 4, pp. 217–222, 1991.
- [76] W. Kordylewski and J. Wach, „Influence of ducting on the explosion pressure,” *Combustion and Flame*, vol. 66, no. 1, pp. 77–79, 1986.
- [77] M. Schiavetti, T. Pini, and M. Carcassi, „The effect of venting process on the progress of a vented deflagration,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 17, pp. 9080–9088, 2019.
- [78] W. Cao, W. Li, L. Zhang, J. Chen, S. Yu, Z. Zhou, Y. Zhang, X. Shen, and Y. Tan, „Flame characteristics of premixed H<sub>2</sub>-air mixtures explosion venting in a spherical container through a duct,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 52, pp. 26693–26707, 2021.
- [79] G. A. Lunn, A. M. Nicol, P. D. Collins, and N. R. Hubbard, „Effects of vent ducts on the reduced pressures from explosions in dust collectors,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 11, pp. 109–121, 1998.
- [80] F. Yang, J. Guo, C. Wang, and S. Lu, „Duct-vented hydrogen-air deflagrations: The effect of duct length and hydrogen concentration,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 45, pp. 21142–21148, 2018.
- [81] X. Yan, J. Yu, and W. Gao, „Duct-venting of dust explosions in a 20 l sphere at elevated static activation overpressures,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 32, pp. 63–69, 2014.
- [82] X. Q. Yan and J. Yu, „Overpressure characteristics of aluminium dust explosion vented through a relief pipe,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 26, no. 4, pp. 676–682, 2013.
- [83] G. Ferrara, A. Di Benedetto, E. Salzano, and G. Russo, „CFD analysis of gas explosions vented through relief pipes,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 137, no. 2, pp. 654–665, 2006.
- [84] R. Blanchard, D. Arndt, R. Grätz, M. Poli, and S. Scheider, „Explosions in closed pipes containing baffles and 90 degree bends,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 23, no. 2, pp. 253–259, 2010.

- [85] J. Guo, C. Wang, Q. Li, and D. Chen, „Effect of the vent burst pressure on explosion venting of rich methane-air mixtures in a cylindrical vessel,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 40, pp. 82–88, 2016.
- [86] J. Taveau, „Correlations for blast effects from vented dust explosions,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 23, no. 1, pp. 15–29, 2010.
- [87] W. Bartknecht, *Explosions*. Berlin: Springer-Verlag, 1981.
- [88] E. A. Ural, „Dust explosion venting through ducts,” in *AIChE 2005 Spring national meeting 39th annual loss prevention symposium, Atlanta, GA, April 11e13*, pp. Paper TG004–5, 2005.
- [89] A. Di Benedetto, P. Russo, and E. Salzano, „The Design of Duct Venting of Gas Explosions,” *Wiley InterScience*, 2007.
- [90] VDI 3673, „Pressure Venting of Dust Explosions,” 2002.
- [91] S. Sun, M. Wang, Y. Qiu, and K. Gao, „Study of flame propagation in an external space under vented explosion conditions,” *Energy*, vol. 178, pp. 186–194, 2019.
- [92] A. Sinha, V. C. Madhav Rao, and J. X. Wen, „Modular phenomenological model for vented explosions and its validation with experimental and computational results,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 61, no. March, pp. 8–23, 2019.
- [93] Z. Wang, M. Pan, S. Wang, and D. Sun, „Effects on external pressures caused by vented explosion of methane-air mixtures in single and connected vessels,” *Process Safety Progress*, vol. 25, no. 4, pp. 385–391, 2014.
- [94] Q. Bao, Q. Fang, Y. Zhang, L. Chen, S. Yang, and Z. Li, „Effects of gas concentration and venting pressure on overpressure transients during vented explosion of methane-air mixtures,” *Fuel*, vol. 175, pp. 40–48, 2016.
- [95] S. Yang, J. Cai, Y. Yang, Q. Fang, Q. Bao, and S. Wang, „Investigation of a semi-empirical load model of natural gas explosion in vented spaces,” *Journal of Safety Science and Resilience*, vol. 2, no. 3, pp. 157–171, 2021.
- [96] T. Forcier and R. Zalosh, „External pressures generated by vented gas and dust explosions,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 13, no. 3-5, pp. 411–417, 2000.
- [97] EN 14034-1+A1, „Determination of explosion characteristics of dust clouds - Part 1: Determination of the maximum explosion pressure Pmax of dust clouds,” 2004.
- [98] C. Cesana and R. Siwek, „Manual for 20-l-Apparatus 7.1.” 2022.
- [99] D. Razus, D. Oancea, V. Brinzea, M. Mitu, and C. Movileanu, „Experimental and computed burning velocities of propane-air mixtures,” *Energy Conversion and Management*, vol. 51, no. 12, pp. 2979–2984, 2010.

- [100] EN ISO 4126-6, „Safety devices for protection against excessive pressure – Part 6: Application, selection and installation of bursting disc safety devices,” 2003.
- [101] D. W. Green and R. H. Perry, *Perry's Chemical Engineers' Handbook (Process Safety)*. The McGraw-Hill Companies, Inc., 2008.
- [102] W. Bohl, *Műszaki áramlástan*. Budapest: Műszaki Könyvkiadó, 1983.