

---

# Perdületszám égésre gyakorolt hatásának elemzése

## INVESTIGATION OF THE EFFECT OF SWIRL NUMBER ON COMBUSTION

FÜZESI Dániel, MSc hallgató, fuzesidaniel95@gmail.com  
dr. JÓZSA Viktor, egyetemi adjunktus, jozsa@energia.bme.hu

BME, Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék  
1111 Budapest, Bertalan Lajos u. 4-6.  
Tel/Fax: +36-1-463-2596 / +36-1-463-1762  
<http://www.energia.bme.hu>

### ABSTRACT

*Nowadays, the reduction of the pollutant emission from the power generation equipment is becoming more important. By using a swirler, the stable operating range of the flame extends, hence, homogeneous combustion can be achieved. The aim of the present paper is the investigation of the combustion of natural gas in a 30 kW test equipment which is under development. The analysis focuses on the effect of the swirl number on combustion, using numerical simulation.*

**Keywords:** gas combustion, CFD, swirl combustion, flame shape, swirl number

### KIVONAT

*Napjainkban egyre fontosabbá válik a hagyományos tüzelőanyagokkal üzemelő energiatermelő erőgép berendezések káros anyag kibocsátásának csökkentése. Perdítőelem segítségével a láng stabil üzemi tartománya jelentősen kitolható, így homogén égés valósítható meg. A cikk a kutatási célra épülő 30 kW-os tüzelőteljesítményű tesztberendezés vizsgálatát tárgyalja földgáz tüzelés esetén, azon belül is kifejezetten a perdületszám hatásának értékelése numerikus szimuláció segítségével.*

**Kulcsszavak:** gáztüzelés, CFD, perdületes égés, lángalak, perdületszám

### 1. BEVEZETÉS

A tüzelés bár több évszázados történelemmel rendelkezik, az égés szabályozása, az égőtér kialakítása ma is kiemelt kutatási terület számos alkalmazási területen. Az égés komplex fizikai és kémiai folyamatokat és elveket foglal magába, ezek a termodinamika, reakciókinetika és áramlástan [1]. A tüzelőanyagban szegény, előkevert égés, a lépcsős tüzelés, valamint a katalitikus égés egyaránt alkalmas a károsanyag-kibocsátás csökkentésére [2]. Az égés stabilitási problémái mellett felléphetnek különböző szerkezeti hibák, vibrációk melyeket körültekintő tervezéssel lehet kiküszöbölni [3].

Az instabilitások mérséklése nagy kihívás, ezért kezdték el alkalmazni a perdületstabilizált égőket. A perdítőelemek az égéslevegő égőbe történő bevezetésénél perdületes áramlást hoznak létre a láng stabilizálása céljából. A perdítőelemnek számos kialakítása lehet, amelyeket folyamatosan fejlesztenek az áramlástechnikai és tüzeléstechnikai paraméterek optimális beállítása érdekében [4]. Munkánkban arra keresük a választ, hogy milyen perdületszám mellett tudunk kialakítani stabil égést.

Amikor forgómozgás adódik át a folyadéknak ellenáramban, az áramlási sebességnek tangenciális komponense is lesz az axiális és radiális összetevőkön kívül. A perdülettel jelenlévő radiális és axiális nyomásgradiensek befolyásolják áramlási mezőt. Erős perdület esetén az ellenkező axiális nyomásgradiens elegendően magas, hogy visszaáramlást, és így egy belső recirkulációs zónát építsen fel. Ez az áramlási struktúra az impulzuszemmaradás miatt jellemzően egy külső recirkulációs zónával társul. Tangenciális irányú keverék bevezetés esetén a fűvókában az áramlást spirális formára kényszeríti. Itt a centrifugális erő fog egyensúlyt tartani a falra ható nyomással [1].

A perdületszámot ( $S$ ) a relatív forgási sebességet leíró dimenziótlan számmal tudjuk jellemezni. Perdületes szabadsugar vagy láng esetén a perdületszám a perdület tengelyirányú áramából ( $G_\varphi$ ), a tolóerőből ( $G_x$ ), valamint a keverőcső sugarából ( $R$ ) számítható [1]:

$$S = \frac{G_\varphi}{G_x R} \quad (1)$$

Egyenletes sebességeloszlást, súrlódásmentességet, agy nélküli axiális perdítőelem esetén a perdületszám a következő, geometriától függő összefüggésre egyszerűsödik, melyben csak a perdítőelem állásszöge a paraméter [1]:

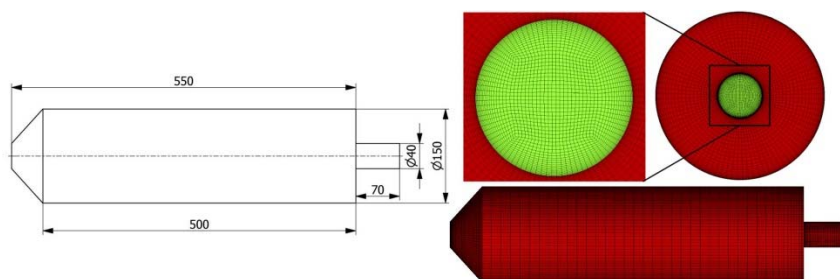
$$S = \frac{2}{3} \tan \alpha \quad (2)$$

A perdület hatására az áramlás irányszöge növekszik a perdületszámmal. Erős perdületről beszélhetünk, amennyiben  $S > 0,6$  és gyenge perdületről, ha  $S < 0,6$  [1].

## 2. GEOMETRIA ÉS HÁLÓ

Az égés esetünkben turbulens, így a numerikus egyenletek sajátosságait szem előtt tartva készítettük elő a probléma megoldását. A geometriát és a hálót Ansys ICEM CFD szoftverrel készítettük el, melynek paraméterei az 1. ábrán láthatóak. A kilépésnél konfúziót alkalmaztunk a visszaáramlás zavaró hatásának csökkentése érdekében. Korábbi számítási [5] és mérési tapasztalatokból kiindulva [6] a lángfront szélessége az alkalmazott átmérőn belül marad.

A CFD számításokhoz szükséges hálót téglatest alakú cellákból építettük fel, ugyanis a geometria kellően egyszerű egy strukturált hálózathoz, így relatíve kis cellaszám alkalmazható [7]. A kialakított blokkstruktúra és az O eljárással készített hálót az 1. ábra szemlélteti.



1. ábra

*A forgásszimmetrikus geometria méretei és a strukturált háló O hálózási eljárással.*

A tüzelési számítások nagy fajlagos számításigénye miatt a cellaszámra gondosan figyeltünk. A hossz mentén és a konfúziópalástján, tehát a falon kevesebb osztást alkalmaztunk, melynek kezdeti értékei nem befolyásolták az eredményeket a hálófüggetlenségi vizsgálat alapján. A maximális  $y^+$  értéke 7,6 volt, elsősorban a keverőcső és a vizsgálótér kapcsolódásánál. A vizsgálótér falán pedig végig 5 alatt marad. Így a hálót megfelelőnek ítéltük [7, 8]. 4 különböző hálón végeztünk hálófüggetlenségi vizsgálatot, mely alapján végül 509679 cellaszámú hálót alkalmaztunk.

## 3. PEREMFELTÉTELEK

Számításaink során 30 kW tüzelőteljesítményű előkevert metán gáz égését vizsgáltuk. A légfelesleg-tényezőt  $\lambda = 1,15$ -nek definiáltuk. Sztöchiometriai számítások alapján a tüzelőanyag és a levegő tömegáramát a belépő keresztmetszeten  $\dot{m}_{\text{tüz}} + \dot{m}_{\text{lev}} = 0,0124$  [kg/s]-ra vettük fel, tehát tömegáram belépést írtunk elő. A kilépésnél atmoszférikus nyomású feltételt írtunk elő. A falnak pedig 0,5-ös feketeségi fokot választottunk alumíniumként kezelve [9]. A közeg hőszugárzását a P-1 sugárzási modell segítségével vettük figyelembe. A keverék belépő hőmérséklete 300 K volt.

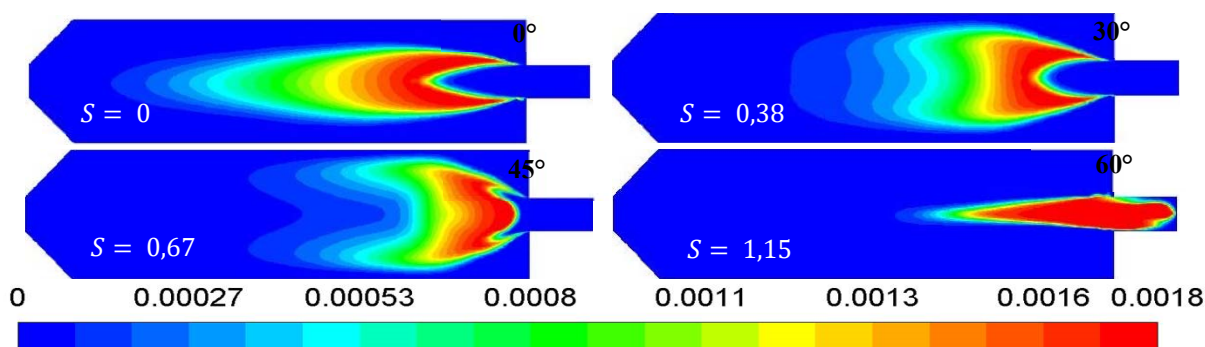
A perdületes áramlást a belépő peremfeltételen megadott sebességkomponensek változtatásával tudtuk elérni. Mivel hengersizmetrikus esetről beszélünk, így a belépő tömegáram mellett az axiális ( $v_a$ ) és tangenciális ( $v_t$ ) sebességkomponenseket, valamint az általuk közbezárt perdítési szög ( $\alpha$ ) tangensét adtuk meg (3) alapján.

$$\tan \alpha = \frac{v_t}{v_a} \quad (3)$$

Mivel a megoldó szoftver normálja az értékeket, az egyik komponenst tetszőlegesnek vehettük fel. A számításainat az  $\alpha = 0-75^\circ$  tartományban végeztük el.

#### 4. A STACIONÁRIUS ÉS TRANZIENS SZÁMÍTÁS EREDMÉNYEI

A számításainkat Ansys Fluent szoftverkörnyezetben végeztük. Stacionárius esetben a 2. ábra szemlélteti az OH gyök eloszlását a geometria szimmetriasíkján, ugyanis ez a jellemző követi legjobban a láng alakját.

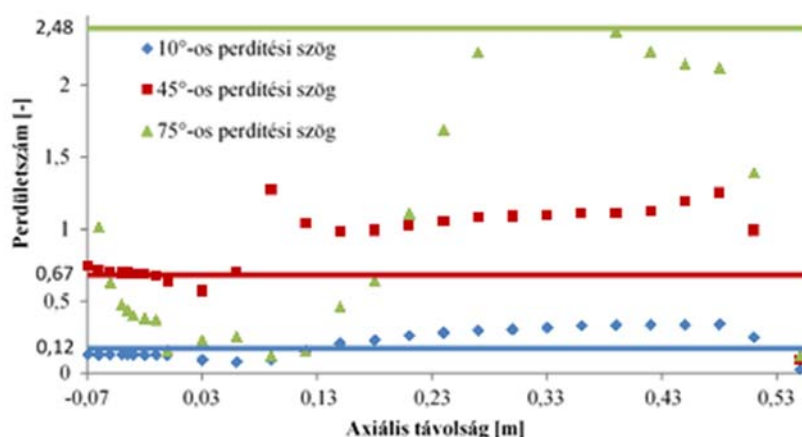


2. ábra

OH gyök tömegtört alakok a középsíkon különböző perdítési szögek (perdületszámok) mellett.

Az OH gyök eloszlásánál megfigyelhető, hogy alacsony perdületszám esetén egyenes lángképeket kapunk ( $0^\circ$ -tól  $20^\circ$ -ig) majd ezen értékek fölött perdület növekedése miatt a sebesség maximum értékei a fal felé tolódnak el, szétnyílik a láng a perdületes struktúra és a hirtelen keresztmetszet-növekedés miatt  $S = 0,67$  esetén megfigyelhető az M lángalak, melynél a keverőcső sarkai túlhevülhetnek.  $S \geq 1,15$  esetén ( $60^\circ$  felett) azonban a láng visszaég a keverőcsőbe, a magasabb sebességértékek a belsőbb régiókban alakulnak ki; ekkor a stacionárius megoldás a gyakorlati tapasztalatoktól jelentősen eltérő lángalakot mutat [6], így tranziens számításokkal folytattuk a vizsgálatokat. Ilyen mértékű visszaégés esetén a keverőcső fala roncsolódhat.

A hossz mentén a keverőcsőtől indulva több keresztmetszetben numerikusan határoztuk meg (1) alapján a perdületszámot, amely így a hossz tengely diszkrét függvénye, ez a 3. ábrán látható  $10^\circ$ -os,  $45^\circ$ -os, valamint  $75^\circ$ -os perdítőszög esetén. Megfigyelhető, hogy a kevésbé perdületes esetekben ( $10^\circ$  és  $45^\circ$ ) a keverőcsőben a perdületszám értékét jól közelíti (2), ami egyszerűsítéseket tartalmaz, ezeket egyenesekkel jelöltük, mivel ez csak a keverőcsőre érvényes, azonban a súrlódásmentesség feltételezése miatt a hossz tengelynek nem függvénye.  $75^\circ$  perdítési szög mellett a láng visszaég, így a becült és a numerikusan számolt értékek jelentősen eltérnek, az áramlási tér jelentősen eltér a feltételezettől. A hirtelen keresztmetszet növekedés esetén a közeg tömegárama lecsökken a tolóerővel együtt, ezáltal a perdületszám megugrik, majd a hossz mentén nő az értéke, ahogy az áramlás egyre nagyobb effektív keresztmetszetű lesz.

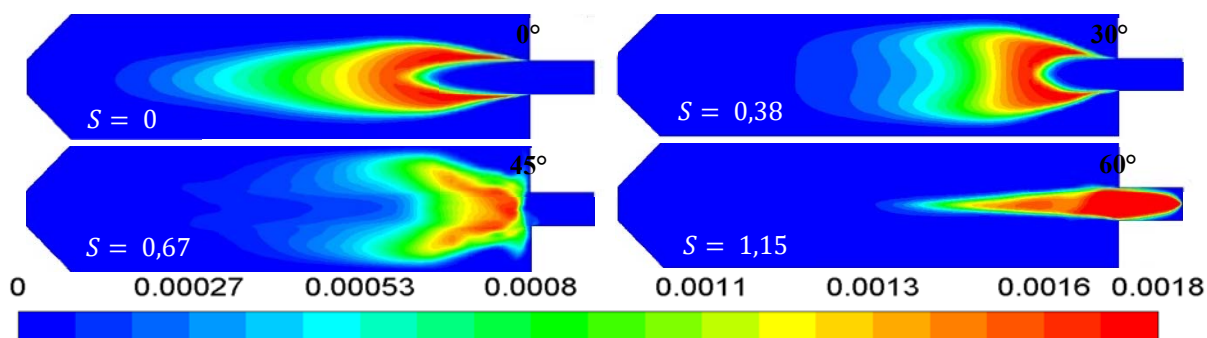


3. ábra

A geometriai és a numerikusan számolt perdületszám a hossz mentén stacionárius esetben.

Az égés általánosan kvázistacionárius jelenség, amiben a tranziens hatások a perdület növekedésével egyre dominánsabbak, amit a stacionárius vizsgálatok alátámasztottak. A tranziens számítás eredményeinek időátlagolt alakja közelíti a stacionárius eset lángképeit, ahogy ezt a 4. ábra mutatja azonos előperdítési

beállítások mellett. Az  $S=0,67$  értékhez tartozó eredmény mutatja a legjelentősebb eltérést a 3. ábrával összehasonlítva, ugyanis a kritikus perdületszámhoz közel esik ez a beállítás.



4. ábra

*OH gyök tömegtört tranziens időátlagolt alakok a középsíkon különböző perdítési szögek (perdületszámok) mellett.*

## 5. ÖSSZEFOGLALÁS

A stacionárius számítások jól szemléltetik az  $S < 0,67$  értékekhez tartozó lángalakokat, azonban a magasabb perdületszámok esetén tranziens számításokra volt szükség. A perdületmentes esetben és kis perdület esetén egyenes láng jön létre. A stacionárius láng magasabb adiabatikus lánghőmérséklettel jár.  $45^\circ$  alatt kialakul egy stabil V alak, összhangban az irodalmi adatokkal [1], nagyobb perdítési szög esetén azonban visszaégés tapasztalható, ami nem valós viselkedést takar, így tranziens számításokra van szükség az erősen perdületes áramlások esetén. A perdületszám nő a hossz mentén a keverőcső és az égőtér közti átmenetnél található jelentős keresztmetszetváltozás miatt. Visszaégés esetén a keverőcsőben lejátszódó folyamatok miatt a perdületszám értéke nem jól meghatározható.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Jelen cikk a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal támogatásával, az NKFI Alapból az OTKA-FK 124704 projekten keresztül valósult meg, a számításokhoz használt Quadro P6000-es kártyát az NVIDIA Corporation adományozta a BME Tüzeléstechnikai Kutatócsoportjának.

## IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] J. M. Beér, N. A. Chigier, Combustion Aerodynamics, Robert E. Krieger Publishing Company, London, 1972, ISBN: 0-89874-545-4.
- [2] A. H. Lefebvre, D. R. Ballal, GAS Turbine Combustion Alternative Fuels and Emissions, CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2010, ISBN: 978-1-4200-8605-8.
- [3] Y. Huang and V. Yang, "Dynamics and stability of lean-premixed swirl-stabilized combustion," Prog. Energy Combust. Sci., vol. 35, no. 4, pp. 293–364, 2009, DOI: 10.1016/j.pecs.2009.01.002
- [4] B. Khandelwal, D. Lili, V. Sethi, "Design and study on performance of axial swirler for annular combustor by changing different design parameters", Journal of the Energy Institute, vol. 35, pp. 372–382, 2014, DOI: 10.1016/j.joei.2014.03.022.
- [5] Koncz Gergő, Perdületes turbulens égés CFD szimulációja Diplomaterv, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, 2017.
- [6] V. Józsa, A. Kun-Balog, Effect of Quarls on the Blowout Stability and Emission of Pollutants of a Liquid-Fueled Swirl Burner, J. Eng. Gas Turbines Power, vol. 140(11), 111502, p. 7, 2018, DOI: 10.1115/1.4039056
- [7] Dr. Kristóf Gergely, Áramlások numerikus modellezése, Áramlástan tanszék, elektronikus tankönyv, 2014.
- [8] M. Casey, T. Wintergerste, ERCOFTAC Best Practice Guidelines, Fluid Dynamics Laboratory Sulzer Innotec, 2000.
- [9] Engineering Toolbox - <https://www.engineeringtoolbox.com>, Utolsó elérés ideje: 2018. november 08.