BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR ENERGETIKAI GÉPEK ÉS RENDSZEREK TANSZÉK



TDK DOLGOZAT

Perdítőelem kialakítások égésre gyakorolt hatásának elemzése

készítette: Füzesi Dániel

Konzulens Dr. Józsa Viktor Egyetemi adjunktus

Budapest, 2018

Absztrakt

Napjainkban egyre fontosabbá válik a hagyományos tüzelőanyagokkal üzemelő energiatermelő erőgép berendezések káros anyag kibocsátásnak csökkentése a környezetünk megóvása érdekében.

Az energiatermelésre használt gázturbinák hagyományosan diffúz lángot használtak a nagy stabilitási tulajdonságaik és a megfelelő teljesítményük miatt, azonban igen magas a termikus NO_x kibocsátásuk, amely a jelenlegi szabályozások értelmében nem elfogadható. Az új koncepciók jellemzően az előkevert égőket preferálják, ugyanis így nagyobb lesz az elégett-elégetlen frakciók részaránya. A perdítőelem segítségével pedig a láng stabilizálható, így homogén égés valósítható meg. Stacionárius, turbulens tüzelést perdítőelemmel ellátott égővel számos mérnöki alkalmazásban találunk egészen az erőművi gázturbináktól a repülőgépekig.

Az égés egy önmagában is összetett folyamat, ugyanis a termodinamikai és áramlási jelenségeken felül a reakciókinetika is szerepet játszik a láng kialakulásában. Az időfüggő folyamatok eleve oszcillációkhoz vezethetnek, melyek károsíthatják a berendezést. A dinamikus terhelés kézben tartása ma elengedhetetlen a manőverező képesség biztosításához, mely jelenleg korlátozottan lehetséges csak, a legtöbb hőerőgép csupán kitüntetett terhelési állapotokban tud hatékonyan működni. Annak érdekében, hogy a stabil láng létrejöjjön, és ne legyenek veszélyes instabilitások, szükséges, hogy a fenti megoldásokat a legmegfelelőbb paraméterek mellett alkalmazzuk.

Az alternatív folyékony és légnemű tüzelőanyagok egyaránt jól alkalmazhatók perdületes égőkben, azonban dolgozatom célja a perdítőelem hatásának a vizsgálata, ezért tüzelőanyagként földgázt alkalmazok, amelynek égése jól ismert az irodalomban, így referenciának tekinthető eset. A kutatás későbbi lépésében más tüzelőanyagokat is elemzek majd. A számításaimat ANSYS Fluent szoftverkörnyezetben végzem, az égőt egy hengeres vizsgálótérrel és egy perdítőelemmel látom el. 30 kW-os teljesítmény mellett elemzem a lángstabilitás feltételeinek teljesülését, valamint a lángsebességet, hőmérsékletet és az égés különböző összetevőinek alakulását. A megfelelő paraméterek megválasztása után a légfelesleg hatását mutatom meg a lángstabilitásra és az égéstermékekre vonatkozóan.

A geometriát perdítőelemmel ellátva kialakul a jellemző áramlási kép, a beesési szögek változtatásával pedig különböző lángkarakterisztikák különböztethetőek meg. Mivel a tranziens szimuláció jobban közelíti a valóságot a turbulens jelenségek miatt, a megfelelően beállított stacionárius számítások után ezt alkalmaztam.

A kapott eredmények előrevetítik egy kísérlet berendezés vizsgálatát, melyek validációként is szolgálhatnak a numerikus számításnak.

Célkitűzés

Dolgozatom elsődleges célja egy gyakorlatban jól ismert égési paraméterekkel rendelkező tüzelőanyag lángstabilitásának vizsgálata CFD szimuláció segítségével. Természetes földgáz keverőcsőben történő bevezetésére és előkevert égetésére építek a valóságot közelítő modellt Ezáltal képet kapok a láng kialakulásában részt vevő folyamatokról, a légfeleslegtényező, perdület paraméter, ill. további tényezők hatásáról Célom egy olyan numerikus modell létrehozása, amely alkalmas további kutatások végrehajtására, valamint különböző perdítőelemek vizsgálatára. Továbbá szerepe lehet egy kísérleti berendezés létrehozásában is. Mindehhez egy megfelelő, vagyis nem túl nagy elemszámú, ugyanakkor jó minőségű térfogati hálót hozok létre a számítási kapacitások végett. A hálón stacioner és tranziens számításokat végzek, mivel az égés alapvetően egy időben változó folyamat, így ki tudom alakítani a perdületet jellemző karakterisztikákat.

Tartalomjegyzék

Al	osztr	akt	i
Cé	elkití	izés	ii
Áł	oraje	gyzék	v
Τź	bláz	atok listája	vii
Je	lölés	legyzék	vii
1.	Bev	ezetés	1
2.	Irod	almi áttekintés	2
	2.1.	Lángstruktúrák	2
		2.1.1. Nem előkevert égés	2
		2.1.2. Előkevert égés	3
		2.1.3. Részlegesen előkevert égés	3
	2.2.	Perdületes áramlás [1]	4
	2.3.	Perdületes égés	6
	2.4	Perdítőelemek	7
	2.5	Turbulencia-viszkozitás modellek	9
	2.0.	$251 k$ - ε modell	9
		$2.5.2$ k- ω SST modell	10
		2.5.2. Reviser model	10
		2.5.4 SAS modell	10
		$2.5.4$. Ship modeli \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots $2.5.5$. Ω -kritárium	11
	2.6.	Égés modellezése [2]	11
3.	A m	odell ismertetése	14
	3.1.	Geometria	14
	3.2.	Ηάló	14
	3.3.	Hálófüggetlenségi vizsgálat	17
		3.3.1. Hálók értékelése	18
4.	Eree	dmények	23
	4.1.	Égés paraméterei, számítási peremfeltételek	23
	4.2.	Stacionárius égés	25
	4.3.	Perdületszám változása	31
	4.4.	Tranziens égés	31

5. Összefoglalás, fejlesztési lehetőségek	37
Hivatkozások	39
Köszönetnyilvánítás	41

Ábrák jegyzéke

1.	Lángtípusok: a) előkevert láng, b) részlegesen előkevert láng,	
	c) diffúz láng [3].	2
2.	Propán-levegő keverék lángképe erős turbulencia esetén [4]	3
3.	A recirkulációs zóna mérete a perdületszám függvényében [1].	5
4.	Gázturbina égő áramlási struktúra koaxiális perdítőelemmel [5].	6
5.	Fő áramlási mező áramvonalai S=0,35 és S=0,49 perdületszám	
	esetén [5]	7
6.	Axiális és radiális perdítőelemek sematikus ábrázolása [5]	8
7.	Perdítőelemes égő axiális és tangenciális beömlőkkel [1]	8
8.	Az égéstér geometriája	14
9.	A blokkstruktúra felépítése.	15
10.	A keresztmetszeti háló O-grid felépítése.	15
11.	A háló a hosszmentén.	16
12.	Sűrítés a palástfelületen.	16
13.	Sebességeloszlás meghatározás a hossz menti felületeken	17
14.	Független mennyiségek kiértékelése a vonalak mentén	18
15.	Független mennyiségek kiértékelése a vonalak mentén	19
16.	Független mennyiségek kiértékelése a vonalak mentén	19
17.	Független mennyiségek kiértékelése a vonalak mentén	20
18.	Sebesség eloszlás a középsíkon 10°-os perdítés esetén	21
19.	OH-gyök kép a középsíkon 10°-os perdítés esetén	21
20.	A mass-imbalance értéke a középsíkon 10°-os perdítés esetén	22
21.	OH gyök koncentráció a középsíkon perdületmentes (a), 10°-	
	os (b), 20°-os (c), 30°-os (d), 40°-os (e), 45°-os (f), 50°-os (g),	
	60° -os (h), 75^{\circ}-os (i) perdületes égés esetén.	25
22.	Sebesség eloszlás a középsíkon 45°-os perdítés esetén	26
23.	Sebesség eloszlás a középsíkon 60°-os perdítés esetén	27
24.	Sebesség eloszlás a középsíkon 75°-os perdítés esetén	27
25.	Vonalmenti sebesség értékek 45°-os és 60°-os perdítés es etén	28
26.	Sebesség vektorok nagyság szerint színezve a középsíkon per-	
	dület nélküli esetben	28
27.	Sebesség vektorok nagyság szerint színezve a középsíkon 45°-os	
	perdítés esetén.	29
28.	Sebesség vektorok nagyság szerint színezve a középsíkon 60°-os	
	perdítés esetén.	29
29.	Sebesség vektorok nagyság szerint színezve a középsíkon 75°-os	
	perdítés esetén.	30
30.	Hőmérséklet-eloszlás a középsíkon 45°-os perdítés esetén.	30

31.	Perdületszám értéke különböző axiális távolságú síkokon	31
32.	OH gyök koncentráció a középsíkon 45°-os tangenciális kom-	
	ponens esetén 20,66 ms-nál.	33
33.	OH gyök koncentráció a középsíkon 45°-os tangenciális kom-	
	ponens esetén 29,2 ms-nál	33
34.	Sebességeloszlás a középsíkon 45°-os tangenciális komponens	
	esetén 29,2 ms-nál	33
35.	OH gyök koncentráció a középsíkon perdületmentes esetben	
	9,5 ms-nál	34
36.	OH gyök koncentráció a középsíkon perdületmentes esetben	
	19,2 ms-nál	34
37.	Sebességeloszlás a középsíkon perdületmentes esetben 23,55	
	ms-nál	34
38.	$Q = 800 \ [m^2/s^2]$ kritérium érték felületeken az axiális sebesség	
	eloszlása 45°-os tangenciális komponens esetén	35
39.	$Q = 800 \ [m^2/s^2]$ kritérium érték felületeken az axiális sebesség	
	eloszlása perdületmentes esetben.	36

Táblázatok jegyzéke

1.	Elemszámok 4 különböző sűrű háló esetén	18
2.	Nettó felületi sebesség átlaga vizsgált felületeke	20

Jelölésjegyzék

Az alábbi táblázatok tartalmazzák a dolgozatban használt jelöléseket, ill. változókat. A mennyiségek mértékegységei SI rendszerben szerepelnek.

Latin betűk

Jelölés	Leírás	Mértékegység
G_{φ}	a perdület tengelyirányú árama	Nm
G_x	tolóerő	Ν
W, v_t	sebesség tangenciális irányú komponense	m/s
U, v_a	sebesség axiális irányú komponense	m/s
R	keverőcső sugara	m
p	statikus nyomás	Pa
LHV	Lower Heating Value (Fűtőérték)	MJ/kg
$\dot{m}_{t\ddot{u}z}$	tüzelőanyag tömegárama	m kg/s
\dot{m}_{lev}	égési levegő tömegárama	m kg/s
$\dot{Q}_{t\ddot{u}z}$	tüzelőhő teljesítmény	W
r	radiális koordináta	m
\overline{v}	sebességvektor	m/s

Görög betűk

Jelölés	Leírás	Mértékegység
λ	légfelesleg-tényező	kg/kg
μ	levegő szükséglet	m kg/kg
ρ	sűrűség	$ m kg/m^3$
φ	perdítőelem lapátszögállás	0
α	perdítés szöge	0
ε	turbulens disszipációs energia	$m^2 s^{-3}$
ω	örvényfrekvencia	s^{-1}

Dimenziótlan számok

Leírás
perdületszám
Courant-szám
légfelesleg-tényező

Kémiai összetevők

Jelölés	Leírás
С	szén
Н	hidrogén
CH_4	metán
NO_X	nitrogén oxidok
OH	OH gyökök

Rövidítések

	Jelölés	Leírás
-	CFD	Numerikus áramlástani szimuláció - computational fluid dynamics
	LPM	Szegény előkevert égés - lean premixed (burner)
	RQL	Lépcsős tüzelés - rich-burn quick-quench lean-burn
	IRZ	Belső recirklulációs zóna - inner recirculation zone
	PVC	Perdületes örvénymag - precessing vortex core
	RANS	Reynolds átlagolt Navier-Stokes modell - Reynolds averaged Navier-Stokes
	SST	Nyíró feszültség transzport modell - shear stress transport
	SAS	Skála alapú modellezés - scale adaptive simulation
	RNG	Renormalizációs csoport módszer - renormalization group
	LES	Nagyörvény szimuláció - large eddy simulation
	RTE	Sugárzási átviteli egyenlet - radiative transfer equation
-	PDF	Valószínűségi sűrűség függvény - probability density function

1. Bevezetés

Ugyan az égés és a tüzelés, ill. maga a technológia már több évszázadra nyúlik vissza, az égés, égőtér, láng kialakítására ma is különös figyelmet kell fordítani a különféle alkalmazási területein.

A lángjelenség, mint maga komplex fizikai és kémiai folyamatokat és elveket foglal magába, úgy mint termodinamika, reakciókinetika, áramlástan [1]. Az összetett folyamatoknak köszönhetően a tüzelés-stabilitás továbbra is kritikus kérdés a különféle felhasználási területeken. A megbízhatósága miatt az energiatermelésre vagy repülőben használt gázturbinákban korábban diffúz lángot alkalmaztak, azonban az NO_x összetevők okozta környezetszennyezést csökkentő regulációk miatt más koncepciókra kellett áttérni. A tüzelőanyagban szegény előkevert égés (Lean-Premixed, LPM),a lépcsős tüzelés (Rich-Burn Quick-Quench Lean-Burn, RQL), ill. katalitikus égés egyaránt alkalmas a károsanyag-kibocsátás csökkentésére. LPM tüzelés esetén természetesen lehet alkalmazni gáznemű és folyékony tüzelőanyagokat is, utóbbi esetben porlasztani szükséges a tüzelőtérbe történő bevezetés előtt. A stabilitási problémák mellett felléphetnek különböző szerkezeti hibák vibrációk által, melyeket szintén kezelni kell [5].

Az instabilitások mérséklése nagy kihívás, ezért kezdték el alkalmazni a perdület-stabilizált égőket. A tüzelőanyag-levegő belépésnél a perdítőelemek megfelelő perdületes áramlást hoznak létre a lángstabilitás fenntartásához. A perdítőelemnek számos kialakítása lehet, és folyamatosan fejlesztik az áramlástechnika és tüzeléstechnikai paraméterek optimális beállítása érdekében. Munkámban arra keresem a választ, hogy milyen perdületszám mellett tudok modellezni stabil égést.

Dolgozatomban elsőként a téma aktualitását és a felmerülő problémákat mutatom be a szakterületet érintő forrásokon keresztül. Itt kitérek az égés, a turbulencia numerikus modellezésének lehetőségeire és módszereire, valamint általánosságban az égés típusaira. A 3. fejezetben a modellt ismertetem a megépített geometriától a hálón keresztül egészen a numerikus modellig. Továbbá részletezem a hálófüggetlenségi vizsgálat folyamatát és eredményeit (3.3. fejezet). A 4. fejezetben a stacionárius és az időben változó égés eredményeit mutatom be és vonom le a tapasztalatokat. Külön figyelmet fordítok a perdületparaméter hatására a tüzelőanyag-keverék különböző beesési szögének esetén.

2. Irodalmi áttekintés

2.1. Lángstruktúrák

Az égést az áramlás, valamint a bevezetett oxidáló anyag (levegő) helye és ideje szerint szokták csoportosítani. Ezek szerint megkülönböztetünk lamináris és turbulens lángot, valamint nem előkevert, előkevert és részlegesen előkevert égést. A különböző struktúrák lángalakját az 1. ábra szemlélteti.



1. ábra. Lángtípusok: a) előkevert láng, b) részlegesen előkevert láng, c) diffúz láng [3].

2.1.1. Nem előkevert égés

A nem-előkevert égés ún. diffúz lánggal jár. Ugyan az égés stabil, de jelentős a káros anyag, valamint a korom képződés, amely egyébként a sárga lángszínt is okozza. A tüzelőanyag és a levegőáram külön lépnek be az égéstérbe, így ott keverednek el egymással, így nem lesz teljes tüzelőanyag kiégés. Ennek köszönhetően alakul ki a korom és a füst. A rendszer aerodinamikája, amely magában foglalja a levegő és az égéstermékek áramlási körülményeit mint turbulencia intenzitást és arányait a legfontosabb tényező a láng stabilitásának és méretének meghatározásában [4].

2.1.2. Előkevert égés

Teljesen előkevert égésnél az égőtér előtt keverik a levegőt a tüzelőanyaggal molekuláris szinten. A térfogati reakciók dominanciája által jobb minőségű égés hozható létre. Folyékony tüzelőanyag esetén elsőként előbb porlasztják az anyagot, majd keverik a levegővel. Lamináris égés esetén a lángfronttal együtt mozgó sebességről beszélhetünk a felületének irányába a még elégetlen gázokon keresztül, mely egy alapvető tulajdonsága a keveréknek, és így fontos a a lángstabilitás szempontjából. A lamináris lángterjedési sebesség természetesen több tényezőtől függ, úgy mint a hősugárzás, konvektív hőtranszport, lánghőmérséklet, nyomás, kémiai reakciók stb. Az áramlás az lehet lamináris vagy turbulens a Reynolds-számtól függően. A jelenlegi vizsgálati módszerek alapján a turbulens láng struktúrájában megegyezik a lamináris jelleggel, ugyanakkor, turbulencia jelenlétében a lángsebesség jelentősen megnő. Ekkor kiterjeszti a lángfront területét [4]. A propán egy kialakult turbulens lángja a 2. ábrán látható.



2. ábra. Propán-levegő keverék lángképe erős turbulencia esetén [4].

2.1.3. Részlegesen előkevert égés

A harmadik fajta tüzelőanyag-oxidálószer bevezetés esetén a keveréken felül a többlet előmelegített levegőt a már égő elegyhez külön belépéssel adják hozzá. Ezáltal a NO_x és korom égéstermékek jelentős mértékben csökkenthetőek például a belsőégésű motorok esetében [6]. A részlegesen előkevert láng a nem előkevert és az előkevert típus jellegeit is őrzi.

2.2. Perdületes áramlás [1]

Perdítőelemeket előszeretettel alkalmaznak égőterekben a láng stabilizálása céljából. Perdületes áramlással ugyanúgy találkozhatunk például ciklonokban, vagy szivattyúknál. Amikor egy forgó mozgás adódik át a folyadéknak ellenáramban, az áramlási sebességnek egy 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. Tangenciális irányú keverék bevezetés esetén a fúvókában az áramlást spirális formára kényszeríti. A centrifugális erő fog egyensúlyt tartani a falra ható nyomással.

A perdületszámot a forgási sebességet leíró dimenziótlan számmal (S) tudjuk jellemezni. Perdületes szabad sugár vagy láng esetén a perdületszám a perdület tengelyirányú áramából (G_{φ}) és a tolóerőből számítható (G_x) :

$$G_{\varphi} = \int_0^R (Wr) \rho U 2\pi r dr = konstans, \qquad (1)$$

$$G_x = \int_0^R U\rho U2\pi r dr + \int_0^R p2\pi r dr = konstans, \qquad (2)$$

ahol

W: a sebesség tangenciális irányú komponense

U: a sebesség axiális irányú komponense

r: a sugárirányú koordináta

R: a keverőcső kilépő felületének sugara

p: a statikus nyomás

 $\rho:$ a közeg sűrűsége

Továbbá a perdület paraméter az (1) és a (2) egyenletekből adódik [1]:

$$S = \frac{G_{\varphi}}{G_x R},\tag{3}$$

Amennyiben e nyomást elhanyagoljuk és a sűrűséget figyelembe vesszük, továbbá a sebességvektorokkal határozzuk meg a perdület paramétert, akkor a a (4) összefüggésre jutunk [7].

$$S = \frac{\int r W \vec{v} d\vec{A}}{R \int U \vec{v} d\vec{A}},\tag{4}$$

ahol

R:a hidraulikus sugár

Különböző egyszerűsítéseket figyelembe véve a perdületszám geometriailag is megadható [1]:

$$S = \frac{2}{3}tan\varphi,\tag{5}$$

ahol

 $\varphi:$ a lapátszögállás

A perdület hatására az áramlás terjedésének szöge növekszik a perdületszámmal. A 3. ábra a belső recirkulációs zóna (IRZ) növekedését mutatja a perdületszámtól függően. Az S = 0,39-es esetben a visszaáramlási zóna ugyanakkora, mint perdületmentes esetben. Erős perdületről beszélhetünk, amennyibe S > 0,6 és gyenge perdületről, ha S < 0,6 [1].



3. ábra. A recirkulációs zóna mérete a perdületszám függvényében [1].

2.3. Perdületes égés

Az áramlási struktúra egy perdítőelemmel ellátott égő esetén a 4. ábra szerint alakul.



4. ábra. Gázturbina égő áramlási struktúra koaxiális perdítőelemmel [5].

Az áramlási tér három zónára osztható fel. Az örvényleválás egy hirtelen változást okoz a megnyúlt örvény magjában és egy recirkulációs buborékot, ill. spirális alakzatot alakít ki az áramlási irányában. Ez az áramlási régió biztosítja a lángstabilizációs mechanizmust, melyet a belső stagnációs pontok és ellentétes irányú áramok alakítanak ki. Az örvénylehajlás lamináris csőáramlás esetén alakja szerint lehet tengelyszimmetrikus (buborék), valamint kettős hélix. A buborék inkább a nagyobb perdületszámok esetén lép fel, míg a spirál az alacsonyaknál. Kettős-hélix az örvénymag kibővülésével és az áramlás tekeredésével fejlődik. Az ún. PVC örvénymag akkor jön létre, amikor a középső mag precesszálni kezd a szimmetriatengely körül a rendszert jellemző frekvencián, mely a perdületszámtól és az égőtér kialakítástól függ. A jelenség az örvényleváláshoz kötött és magas Reynolds számok esetén alakul ki, a tömegárammal lineárisan növekszik. A PVC erősen befolyásolja az áramlást és a lángfejlődést. Az örvénymag elmozdulása nekinyomja az áramlásmezőt az égőtér falának, amely a tangenciális sebesség növekedését okozza. A nyíróréteg a keverőcső és az égőtér kapcsolódó felületéhez kötődik. A keverék kilépésénél alakul ki a nagy sebességkülönbség miatt az áramlás irányával megegyezően. Itt figyelni kell a modell háló megfelelő sűrítésére, ugyanis a lejátszódó folyamatok nagyon vékony rétegben történnek, ugyanakkor jelentősek [5]. Az örvénymag változását a két különböző perdületszám esetén az 5. ábra áramvonalai szemléltetik.



5. ábra. Fő áramlási mező áramvonala
i $\rm S{=}0{,}35$ és $\rm S{=}0{,}49$ perdületszám esetén [5].

2.4. Perdítőelemek

A közegáram forgómozgásának indukálását háromféle elv alapján lehet létrehozni [1]:

- Tangenciális belépő sebességkomponenssel egy hengeres csőbe.
- Vezető lapátok használatával axiális csőáramlásnál.
- Mechanikai eszközökkel, például forgó lapátokkal és csövekkel átadott forgómozgással.

A gyakorlatban az első két alkalmazás az elterjedt. Jellemzően a perdítőelem az áramlás a sugár vagy axiális elrendezésű lapátozásával vezeti (6. ábra). Egyszerű és összetett berendezéseket is használnak, annak érdekében, hogy elérjék a kívánt tüzelőanyag/levegő arányt. Az összetett elemek koncentrikus elrendezésűek együtt-vagy ellentétes irányú forgó megoldással [5]. Az együtt-forgó elrendezésekkel kisebb NO_x kibocsátás érhető el, mint a másik konfigurációval [8]. Egy perdítőelem elrendezést axiális keverőcsővel szemléltet a 7. ábra. A teljes égési levegő bevezethető a tangenciális nyílásokon, ill. a maradék a tüzelőanyaggal keverve az axiális égőcsövön.



6. ábra. Axiális és radiális perdítőelemek sematikus ábrázolása [5].



7. ábra. Perdítőelemes égő axiális és tangenciális beömlőkkel [1].

2.5. Turbulencia-viszkozitás modellek

A gyakorlatban a legtöbb áramlás turbulens jelleget mutat. Egy időfüggő, kaotikus, háromdimenziós jelenség, ahol az ingadozást az elúszó örvények okozzák. A turbulencia kialakulásának három eredetét különböztethetjük meg:

- Fali határréteg
- Szabad nyíróréteg
- Instabil sűrűség rétegződés

Mivel a turbulencia egy finomszerkezetű, instacionárius struktúrát hoz létre, olyan kis és sokszámú elemre lenne szükségünk, amely már a háló minőségét jelentősen csökkenti. Ezt a keverő hatást turbulencia modellekkel tudjuk közelíteni a finom részletek ismerete nélkül. Az alábbi fejezetekben a munkám során használt modelleket részletezem. Először a RANS modelleket mutatom be. Ide tartoznak azok a modellek, ahol a Reynolds-átlagolt Navier-Stokes egyenleteket oldja meg a szoftver. A k- ε és k- ω modellekre azért van szükség, mert így az örvényviszkozitást tudjuk turbulens esetben számolni, mely lamináris esetben egyébként egy egyszerű anyagjellemző. A modellek különböző megközelítések és sok mérés eredménye alapján tartalmaznak 2-2 egyenletet a turbulens kinematikai viszkozitásra.

2.5.1. k- ε modell

A k- ε modell a legegyszerűbb összetevőket tartalmazó és a legelsőként használt modellek közé tartozik. A két egyenletes modell a turbulens energia konvekcióját és diffúzióját veszi figyelembe. Tehát a két transzport mennyiség a turbulens kinetikus energia (k) és a turbulens disszipációs energia (ε , epszilon). A turbulencia mértékét az epszilon definiálja, az energiát pedig a k változó [9]. A modell nagyon jól használható szabad nyíróréteg jellegű áramlások és kis nyomásgradiensek esetén. Továbbá fallal határolt belső áramlások esetén is jó eredményeket szolgáltat. Azonban nagy nyomásgradiensek esetén nem alkalmazható, így például kompresszorok modellezésére. Három k- ε modellt különböztethetünk meg [10]:

- Standard k- ε modell
- Realisable k- ε modell
- RNG k- ε modell

Dolgozatomban csak a modell kialakításának kezdeti szakaszában használtam, ezután áttértem a fejlettem k- ω modellre.

2.5.2. k- ω SST modell

A szimpla k- ω modell az ω örvényfrekvenciára oldja meg az egyenletet a k disszipációja helyet. Gyakorlatilag tehát ez ε/k -nak felel meg. Fal közeli áramlásnál kedvezőbben viselkedik a k- ε modellnél, azonban szabad áramlásnál pontatlanabb eredményeket szolgáltat [9].

Az SST (Shear Stress Transport) k- ω nyírófeszültség transzport örvényviszkozitás kétegyenletes modell az előzőekben bemutatott két modell tulajdonságait ötvözi. A k- ω a határréteg belső részeiben zajló folyamatok leírására közvetlen használható, így az SST k- ω modellt alkalmazható az alacsony Reynolds-számú áramlások esetén is további csillapítási függvények nélkül. Az SST a szabad áramlásban k-epszilon viselkedésre vált, ezáltal elkerüli k-omega előbb említett problémáit. Az SST k- ω modell viszonylag magas turbulenciaszintet eredményez nagy deformációkkal a stagnáló és az erős gyorsulású régiókban. Ez a tendencia sokkal kevésbé hangsúlyos, mint a normál k- ε modell esetében. Lehetővé teszi a határréteg átmenet modellezését is [11].

Végül munkámban a stacionárius folyamatok esetében ezt a modellt használtam, mivel pontosabb eredményeket adott a k- ε modellnél, és futtatási időt tekintve nem volt hosszabba a konvergencia beállta.

2.5.3. RANS modell

A RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) modellek tekinthetők a legaktuálisabban használtaknak. A RANS modellek transzport egyenletekre épülnek, a mozgásegyenlet Reynolds-féle átlagolással nyert alakját alkalmazzák a főáramlás meghatározására. Célja a Reynolds-átlagolt mozgásegyenletben található Reynolds-feszültségek kiszámítása, így 7 egyenletes modell [9].

Korábbi tanulmányaim alatt végzett számítási tapasztalatokból adódóan úgy ítéltem meg, hogy a jelenlegi probléma nem követelte meg az egyik legfejlettebb modell használatát [12].

2.5.4. SAS modell

A SAS (Scale Adaptive Simulation) modellt a tranziens eseteknél alkalmaztam. A SAS egy fejlesztett URANS forma, amely lehetővé teszi a turbulens spektrum felbontását instabil áramlási körülmények között. A SAS koncepció alapja a Kármán-féle hasonlósági kritérium bevezetése a turbulencia egyenletbe. A Kármán-féle hasonlósági kritériummal szolgáltatott információk lehetővé teszik, hogy a SAS modellek dinamikusan illeszkedjenek a felbontott struktúrákhoz egy URANS szimulációban, amely LES (Large Eddy Simulation)-szerű viselkedést eredményez az instabil áramlási régiókban. Ugyanakkor a modell sztenderd RANS összetevőket is biztosít a stabil régiókhoz. Q-kritérium alapján lehet benne keresni [2].

2.5.5. Q-kritérium

A Q-kritérium alkalmas arra, hogy ún. iso-surfacek (azonos potenciálú felületek) segítségével vizuálisan tudjuk vizsgálni a turbulens struktúrákat, ill. az örvényeket. A Q változó definíciója a következő [13]:

$$Q = C_Q(\Omega^2 - S^2), (6)$$

ahol

Cq:konstans, értéke Ansys CFD-Post esetén 0,25 $\varOmega:$ az örvényesség abszolút értéke,

$$\Omega = \sqrt{2\Omega_{ij}\Omega_{ij}} \tag{7}$$

S: a deformáció aránya,

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \tag{8}$$

Egy adott Q küszöbérték által definiált isofelülettel megjeleníthetők a perdület által generált örvények. A megjelenítéshez számítás szükséges.

2.6. Égés modellezése [2]

Ansys Fluentben lehetőség van mind a nem előkevert, mind az előkevert, valamint a részlegesen előkevert égés modellezésére is. A következőkben az általam alkalmazott előkevert égéshez szükséges fontosabb beállítási jellemzőket mutatom be.

• Partially Premixed Combustion (részlegesen előkevert égés)

Annak érdekében, hogy az alábbi PDF (Probability Density Function) keverék módszert tudjuk használni, az Ansys Fluentben részlegesen előkevert modellt kell alkalmazni. Ugyanakkor a kezdeti peremfeltételek a teljes előkevert modell beállításait tartalmazzák. Annak érdekében, hogy az OH gyökök kiégjenek, és a hősugárzást figyelembe lehessen venni, nem-adiabatikusként kezeltem a rendszert.

A részben előkevert modell egy transzport egyenletet old meg. A reakció futó változója (Progress Variable) egy átlagos \overline{c} érték, mely a lángfront helyzetét határozza meg, tehát gyakorlatilag egy mérnöki közelítő, ill. egyszerűsítő változó. A lángfront mögött $\overline{c} = 1$ a teljesen elégett elegyet jelöli, a lángfront előtt pedig a kezdeti állapotot, vagyis a nem égő keveréket ($\overline{c} = 0$). A lángon belül az elégett és még nem elégő keverék ($0 \le \overline{c} \le 1$) lineáris kombinációjából számol a program az előre kiszámolt termokémiai PDF alapján.

• PDF

A turbulencia és a reakciókinetika kölcsönhatását a Probability Density Function (valószínűségi sűrűség függvény) segítségével vehetjük figyelembe. A függvény valószínűségi úton határozza meg a keverék egyes komponenseinek paramétereit idő átlagolt úton.

• Hősurágzás figyelembevétele (P-1 sugárzási modell)

A P-1 sugárzási modell a legegyszerűbb esete az általánosabb P-N modellnek, amely a sugárzás intenzitásának kiterjesztésén alapul. A modell azt feltételezi, hogy az intenzitás sorba fejthető egy ortogonális gömbi rendszerben. A P-1 modell egyik előnye, hogy a sugárzási átviteli egyenletet (RTE) oldja meg, amely kevésbé terheli a CPU-t. A modell tartalmazza a szóródás hatását, továbbá könnyen alkalmazható bonyolult geometriákra is. A feketeségi fok meghatározására, ill. megadására több lehetőség is van. A keveréknél ezt egy abszorpciós tényezőként kell definiálni. A tényezőre is több megadási mód létezik, én a "tartomány alapú" (Weighted-Sum-of-Gray-Gases Model Domain Based) módszert választottam, ugyanis ekkor a szoftver határozza meg az emissziós tényezőt a keverék minden egyes komponensét (széndioxid, vízgőz) figyelembe véve.

3. A modell ismertetése

3.1. Geometria

Mivel az égés kialakulása jellemzően egy turbulens áramlás és tranziens folyamat, az égés vizsgálatához egy megfelelő paraméterekkel rendelkező vizsgáló teret választottam. A geometriámat Ansys ICEM CFD szoftverrel készítettem el. A keverőcső átmérője 40 mm nagyságú, melyhez a 150 mm átmérőjű hengeres vizsgálótér kapcsolódik. A további paraméterek a 8. ábrán láthatóak (a méretek milliméterben értendők). A közeg kilépésénél, tehát a hossz végén párhuzamos felület helyett egy kúpos konfúzoros kilépést alkalmaztam a visszaáramlás zavaró hatásának csökkentése érdekében. Korábbi számítási tapasztalatokból kiindulóan a lángfront szélessége az alkalmazott átmérőn belül marad.



8. ábra. Az égéstér geometriája.

3.2. Háló

Annak érdekében, hogy CFD számításokat tudjak végezni egy térfogati elemekből álló hálót kellet létrehoznom. Ezt szintén Ansys ICEM CFD programban végeztem el. A hálót hexa elemekből építettem fel, ugyanis a gemometria kellően egyszerű egy struktúrált hálóhoz, így kevesebb elemszám hozható létre, ugyanakkor pontos eredményeket is szolgáltat a modell. Annak érdekében, hogy egy kezdeti hálót kapjak, egy megfelelő blokkstruktúrát alakítottam ki (9. ábra).



9. ábra. A blokkstruktúra felépítése.

A szoftver alapbeállítása H-típusú hálót generál, azonban ebben az esetben a körfelület szélein kicsit és torzul elemek jönnének létre, amelyek negatív térfogatokhoz, ill. rossz hálóminőséghez vezethetnek. Ennek elkerülése végett ún. O-gridet hoztam létre. A definiált blokkon kétszer alkalmaztam a módszert, mivel a keverőcső és a vizsgálótér találkozásánál ügyelni kell a nyíróréteg helyes modellezésére, vagyis itt sűríteni kell a módszer lévén létrehozz megfelelő minőségű elemeket. A kialakult O-grid a 10. ábrán figyelhető meg.



10. ábra. A keresztmetszeti háló O-grid felépítése.

Az eleve bonyolult és több összetevővel rendelkező számítás miatt ügyeltem az elemszám optimális értéken tartására. Így a hossz mentén és a konfúzor elemen, tehát a falon kevesebb elemet vettem fel, mely a mérést nem befolyásolja a hálófüggetlenségi vizsgálat alapján (11. ábra). Továbbá mindkét henger palástfelületén sűrítettem a hálót, hogy az y+ paraméter a lehető legmegfelelőbb értéken maradjon (12. ábra). A lamináris alapréteg határán y+ értéke 5 és 10 között mozoghat, az egyensúlyi réteg felső határárára 300 és 1000 is lehet, azonban ennek értéke jelentős mértékben függ a határáréteg teljes hosszára jellemző Reynolds-számtól is, például atmoszférikus áramlások esetében nagy y+ értékig fennáll az egyensúlyi állapot [14][9]. A maximális y+ értékem 7,6 elsősorban a keverőcső és a vizsgálótér kapcsolódásánál. A vizsgálótér falán pedig végig 5 alatt marad. Így a hálót e szerint is megfelelőnek ítéltem.

ANSYS R18.0 Academic



11. ábra. A háló a hosszmentén.



12. ábra. Sűrítés a palástfelületen.

3.3. Hálófüggetlenségi vizsgálat

A következő lépésben 4 különböző méretű hálót hasonlítottam össze. A 13. ábrán az látszik, hogy a felületi átlag sebességeket vettem ki a tengellyel párhuzamos normálisú felületeken 30 mm, 100 mm és 300 mm-es axiális távolságban. A 14. ábra azt a három vonalat mutatja, amelyek mentén három egymástól független jellemző (statikus nyomás, hőmérséklet, turbulens kinetikus energia) értékét vizsgáltam. A dolgozatban csak a középvonal menti értékeket illesztettem be, mivel a többi sem mutat lényegi eltérést a végleges háló kiválasztásában.



13. ábra. Sebességeloszlás meghatározás a hossz menti felületeken.



14. ábra. Független mennyiségek kiértékelése a vonalak mentén.

Az 1 a 4 különböző hálót mutatja. Mivel a Mass Imbalance értéke a nyíróréteg fellépésénél magas volt, első lépésként a kezdeti (1-es) hálót sűrítettem ezeken a helyeken. Majd a 2-es, legnagyobb cellaszámú hálót ritkítottam elsősorban a hossz mentén.

1. táblázat. Elemszámok 4 különböző sűrű háló esetén.

Háló	Cellaszám
1-es háló	490752
2-es háló	640784
3-as háló	358848
4-es háló	509679

3.3.1. Hálók értékelése

A hálókon stacionárius számításokat végeztem k- ω SST turbulencia modellel. A számítást két lépésben végeztem el: tüzelés nélkül, majd bekapcsoltam az égéshez szükséges beállításokat. Minden egyes hálónál mind a hideg, mind a meleg esetben azonos számú iterációt alkalmaztam, ugyanazokkal a paraméterekkel.

A 15.-17. diagramokon a statikus nyomás, a hőmérséklet és a turbulens kinetikus energia látható a hossz mentén a középvonalon. Megfigyelhető, hogy az 1-es háló jelentős mértékben eltér a másik három hálótól. A másik három háló eredményei nagyban közelítik egymást. Ezeken belül a 2-es, vagyis a legnagyobb elemszámú hálót vettem alapul. A turbulens kinetikus energia változása alapján a 4-es háló által szolgáltatott eredmények állnak legközelebb a 2-es hálóéhoz.



15. ábra. Független mennyiségek kiértékelése a vonalak mentén.



16. ábra. Független mennyiségek kiértékelése a vonalak mentén.



17. ábra. Független mennyiségek kiértékelése a vonalak mentén.

A 2. táblázatban a nettó felületi átlagsebességeket szemléltetem. Itt is megfigyelhető, hogy a 2-es, 3-as és 4-es hálók eredményeit viszonylag megegyeznek, század értékben van eltérés.

Háló	Felületi sebesség $[m/s]$
1-es háló	$4,\!25$
2-es háló	$3,\!91$
3-as háló	$3,\!90$
4-es háló	$3,\!93$

2. táblázat. Nettó felületi sebesség átlaga vizsgált felületeke.

Általánosan levonható a következtetés, hogy a tengely menti cellafelbontás kevésbé befolyásolja az eredményeket. Tehát a határréteg, a sugárirányú és fali találkozásoknál kell odafigyelni a megfelelő felbontásra, és a nagy ugrások kerülésére. A fenti eredmények alapján a 4-es hálót választottam ki, melyen a további számításaimat végeztem (4 fejezet). A kutatás további szakaszaiban majd lehet még durvítani a hálón a számítási idő csökkentése érdekében.

A hálófüggetlenségi vizsgálatot minden esetben 10°-os (4.1. fejezetben részletezem a belépő peremfeltételeket) perdület esetén végeztem el, ugyanis ekkor egyenes lángot kapunk eredményül, és így egy stabil égést eredményez. A sebesség eloszlását a középfelületen a 18. ábra mutatja. A nagyobb sebesség értékek a kis perdítés miatt inkább a belső régiók felé tolódnak el. A lángalakot az OH-gyökök tömegaránya szemlélteti leginkább (19. ábra), megfigyelhető az egyenes lángalak. A 20. ábra a Mass Imbalance értékét szemlélteti. A Mass Imbalance-nek, azaz a nettó tömegegyensúly-hiánynak a teljes tömegáram 0,5 %-a alatt kell lennie. E téren is megfelelőnek bizonyul a háló.



18. ábra. Sebesség eloszlás a középsíkon $10^\circ\text{-}\mathrm{os}$ perdítés esetén.



19. ábra. OH-gyök kép a középsíkon 10°-os perdítés esetén.



20. ábra. A mass-imbalance értéke a középsíkon $10^\circ\text{-}\mathrm{os}$ perdítés esetén.

4. Eredmények

4.1. Égés paraméterei, számítási peremfeltételek

Munkám során 30 kW tüzelőteljesítményű metán gáz égését vizsgáltam. A metán fűtőértéke 50 MJ/kg (LHV-Lower Heating Value). Ezek alapján már meg tudtam határozni a belép keverék tömegáramát, melyet a keverőcső belépő felületére adtam meg. A tüzelőteljesítmény a (9) egyenlet alapján írható fel:

$$\dot{Q}_{t\ddot{u}z} = \dot{m}_{t\ddot{u}z}LHV \tag{9}$$

$$\dot{m}_{t\ddot{u}z} = \frac{\dot{Q}_{t\ddot{u}z}}{LHV} = \frac{30kW}{50MJ/kg} = 0,0006kg/s \tag{10}$$

Légfeles
leg-tényező: $\lambda=1,\!15$

CH4 égése:

1 kmol C = 12 kg C

4 kmol H = 4 kg H

5 kmol C + H = 16 kg C + H = 1 kmol CH₄

$$\frac{1kmolC}{5kmolCH_4} = 0, 2\frac{kmolC}{kmolCH_4} \tag{11}$$

$$\frac{4kmolH}{5kmolCH_4} = 0.8\frac{kmolH}{kmolCH_4} \tag{12}$$

$$\frac{12kgC}{16kgCH_4} = 0,75\frac{kgC}{kgCH_4} \tag{13}$$

$$\frac{4kgH}{16kgCH_4} = 0,25\frac{kgH}{kgCH_4} \tag{14}$$

Fajlagos levegő szükséglet a sztöchiometriai együtthatók felhasználásával [15]:

$$\mu'_{Lo} = 11,484C + 34,209H =$$

$$= 11,484 * 0,75 + 34,209 * 0,25 = 17,1653 \frac{kg}{kgCH_4}$$
(15)

Így a levegő szükséglet a többlet levegővel:

$$\mu_L' = \lambda \mu_L' = 1,15 * 17,1653 \frac{kg}{kgCH_4} = 19,74 \frac{kg}{kgCH_4}$$
(16)

Ezzel már a levegő tömegárama meghatározható:

$$\dot{m}_{lev} = \dot{m}_{t\ddot{u}z}\mu'_L = 0,0006kg/s*19,74\frac{kg}{kgCH_4} = 0,0118kg/s$$
(17)

Mivel előkevert égésem van, a tüzelőanyag és a levegő tömegáramának az összegét szükséges megadni:

$$\dot{m}_{lev} + \dot{m}_{t\ddot{u}z} = 0,0118kg/s + 0,0006kg/s = 0,0124kg/s$$
(18)

Az előbbi két jellemző aránya pedig az ún. Mean Mixture Fraction megadásához szükséges:

$$\frac{\dot{m}_{t\ddot{u}z}}{\dot{m}_{lev}} = \frac{0,0006kg/s}{0,0118kg/s} = 0,0507\tag{19}$$

Kilépő peremfeltételnél a nyomást vettem figyelembe, ill. ezáltal a visszaáramlást. A falnak pedig 0,5-ös feketeségi fokot választottam [16] alumíniumként kezelve.

A perdületes áramlást munkámban a belépő peremfeltételen megadott sebességkomponensek változtatásával tudtam elérni. Mivel hengerszimmetrikus esetem van, így a belépő tömegáram mellett meg tudtam adni az axiális és tangenciális sebességkomponens értékét, melyek közti összefüggést a (20) és a (21) egyenletek írnak le.

$$tan(\alpha) = \frac{v_t}{v_a},\tag{20}$$

ahol

 v_t : a sebesség tangenciális komponense

 v_a : a sebesség axiális komponense

 $\alpha:$ a sebesség tangenciális és axiális komponense által bezárt szög

$$v_t = v_a tan(\alpha) \tag{21}$$

Továbbá, mivel $v_a = 1$ mindet esetben $v_t = tan(\alpha)$.

4.2. Stacionárius égés

A stacionárius, időben állandó számításokat az előzőekben részletezett peremfeltételek (4.1. fejezet) mellett végeztem el. A 21. ábrák az OH gyökök alakját szemléltetik a geometria szimmetriasíkján. Az OH gyökök alkalmasak leginkább a láng alakjának bemutatására. Az ábrák a perdületi nélküli esetet és a 10°-os, 20°-os, 30°-os, 40°-os, 45°-os, 50°-os, 60°-os, 75°-os perdületes égéseket tartalmazzák. Munkámban a perdületet a belépő felületen definiáltam.



21. ábra. OH gyök koncentráció a középsíkon perdületmentes (a), 10° -os (b), 20° -os (c), 30° -os (d), 40° -os (e), 45° -os (f), 50° -os (g), 60° -os (h), 75° -os (i) perdületes égés esetén.

Az OH gyököknél megfigyelhető, hogy alacsony perdület esetén egyenes lángképeket kapunk (0-tól 20-fokig) majd ezen értékek fölött a nagy tangenciális komponensek hatása érvényesül, és a a sebesség maximum értékei a fal felé tolódnak el. Ezt bizonyítva, azon részen, ahol az áramlás szétválik egy a tengelyre merőleges vonal mentén kiértékeltem a sebességeket $z = 0,06 \ [m]$ magasságban (25. ábra). Az OH gyökök képe ezeket követi és a láng szétnyílik, ahogy például ez a 45°-os perdítés esetén is látszik (21. ábra (f)). Nagy perdület esetén azonban nem stabil az égés, a magasabb sebesség értékek a belsőbb régiókban alakulnak ki. Miután az égés beindult a nagyobb keresztmetszetű tárben a vektorok szétnyílnak (27. ábra), követve ezzel a lángalakot. A sebesség eloszlásokat, alább a 22.- a 24. ábrák mutatják 45°os 60° -os, és 75° -os perdület esetén. A 10° -os esetet, mely közel megegyezik a perdület nélküli áramlással már korábban felvázoltam (18. ábra). A perdület miatt kialakulnak alacsony, vagy akár nulla sebességű zónák. A 21. ábra (h) és (i) metszetein, vagyis 60°-os és 75°-os perdület esetén jól látszik, hogy nem létezik stacionárius megoldás, a számítás oszcillált, ezért térek át tranziens számításra a 4.4 fejezetben. Ugyanis mindkét esetben a láng visszaég a keverőcsőbe, ami annak a roncsolódását okozhatja hosszútávon. A perdület növekedésével a maximális sebesség is növekszik. Kisebb perdület esetén, ahol nem ég vissza a láng a keverőcsőbe a maximális sebességek a visszaáramlásnál alakulnak ki, ez azonban a kialakítás miatt nem zavarja az láng kialakulását, így az eredményeket sem befolyásolja. Az ábrákon ezeket a területeket nem jelöltem a jobb érzékeltetés végett, tehát a lángkörnyéki maximális sebességek szerint skáláztam.



22. ábra. Sebesség eloszlás a középsíkon 45°-os perdítés esetén.



23. ábra. Sebesség eloszlás a középsíkon 60°-os perdítés esetén.



24. ábra. Sebesség eloszlás a középsíkon $75^\circ\text{-}\mathrm{os}$ perdítés esetén.



25. ábra. Vonalmenti sebesség értékek 45°-os és 60°-os perdítés esetén.

A sebességvektorokkal szemléltethetjük az áramlás irányát, ill. a kialakuló örvénymagokat (26.-29. ábra). Mindegyik esetben megfigyelhető a sarkokban kialakuló recirkulációs zóna a Borda-Carnot átmenetnek köszönhetően. A 45°-os perdítés esetén látható egy kialakulni kezdő belső recirkulációs zóna a láng belsejében. 60° és 75° esetén feltételezhetően a nagy perdület és az égés tranziens mivolta miatt a láng visszaég a keverőcsőbe, így adódnak ki az alábbi vektormezők (28. és 29. ábra).



26. ábra. Sebesség vektorok nagyság szerint színezve a középsíkon perdület nélküli esetben.



27. ábra. Sebesség vektorok nagyság szerint színezve a középsíkon $45^\circ\text{-}\mathrm{os}$ perdítés esetén.



28. ábra. Sebesség vektorok nagyság szerint színezve a középsíkon $60^\circ\text{-}\mathrm{os}$ perdítés esetén.



29. ábra. Sebesség vektorok nagyság szerint színezve a középsíkon $75^\circ\text{-}\mathrm{os}$ perdítés esetén.

A hőmérséklet eloszlást a 45 °-os perdítés esetén szeretném bemutatni (30). A maximális hőmérséklet 2200 K körül alakul. Az égés hamar eléri a maximális hőmérsékletét a perdületes előkeverés miatt.



30. ábra. Hőmérséklet-eloszlás a középsíkon $45^\circ\text{-}\mathrm{os}$ perdítés esetén.

4.3. Perdületszám változása

A perdületparaméter értéket a 2.2. fejezetben részletezett összefüggések ((1), (2) és (3)) alapján tudtam meghatározni a különböző perdületek esetére. A hossz mentén a keverőcsőtől indulva vettem fel felületeket melyeken integráltam a perdületszámban szereplő tagokat. A 31. ábra a perdületszámot ábrázolja a z-tengely mentén definiált síkokon 10°-os, 45°-is, valamint 75°-os perdületes áramlás esetén. Megfigyelhető, hogy a kevésbé perdületes esetekben (10°, 45°) a keverőcsőben a perdületszám értékét jól közelíti az egyszerűsítésekből adódó geometriai (5) összefüggést. Nagy perdület esetén ez nem mondható el, a láng ugyanis visszaég, az égés nem stabil, az áramlási folyamatok nem jól meghatározhatóak. A nagyobb áramlási térbe kiérve a közeg tömegárama lecsökken a tolóerővel együtt, ezáltal a perdületparaméter megugrik, majd a hossz mentén nő az értéke. Tehát a nagy perdületszámmal nem szabályozható megfelelően az égő, míg a kisebb perdítési szögek esetén viszonylag stabil égést kapunk.



31. ábra. Perdületszám értéke különböző axiális távolságú síkokon.

4.4. Tranziens égés

Maga az égés időben változó jelenség, így a stacioner esetben tulajdonképpen egy egyszerűsített, valóságos képet kapunk a folyamatról. Az égés pl. lamináris esetben lehet stacionárius, azonban a perdületes, turbulens áramlás már kontinuum szemléletben is akkora mezőváltozó oszcillációkat jelent, hogy tranziens módon kell kezelni a problémát 3 dimenzióban. Ezért egyszerűsítéseket sem lehet végrehajtani, vagyis nem vizsgálhatjuk például csak a negyed modellt, vagy egyszerűen 2 dimenzióban. Az eredményekből lehet következtetni, hogy a kutatás további fázisaiban szükséges-e a 3D-s modell, vagy áttérhetünk a kevesebb számítási kapacitást igénylő 2D-s modellre. Tehát szükséges vizsgálni a láng felépülését tranziens esetben. Továbbá már a stacionárius számítás oszcilláló rezidumjain is látszik, hogy nem időben állandósult folyamatról van szó. A Fluentben van lehetőség tranziens számítás futtatására is. Ekkor, ahogy a 2.5.4. fejezetben is említettem a SAS turbulencia modell használata válik szükségessé határolt másodrendű implicit metódussal. A kezdeti peremfeltétel a stacionárius számítás eredménye.

A tranziens számítás egyik legmeghatározóbb eleme az időlépés mértéke. Az időlépést a Courant-szám határozza meg. A Courant-szám (C_r) azt adja meg, hogy a megoldásban kialakult hullámok (folyadék csomagok) mennyi cellát tesznek meg egy időlépés alatt. Vagyis, ahogyan a (22) egyenlet is leírja:

$$C_r = \frac{\overline{v}\Delta t}{\Delta x},\tag{22}$$

ahol

 $\overline{v}:$ a közeg átlagos axiális sebessége [m/s]
 $\varDelta t:$ az időlépés [s]

 $\varDelta x$: a háló legkisebb cellájának magassága [m]

Értékét 1 alatt szükséges tartani a megfelelő számítási stabilitási feltételek végett, így kezdetben $C_r = 0,8$ értékű Courant-számból határoztam meg az időlépést, majd néhány lépés után iteráltam az értéket. A tranziens számításokat 45°-os perdítés, ill. anélkül végeztem el. A 45°-os esetet egész jól közelíti a stacionárius számítás. A lángmérete egyre inkább V alakot vesz fel, és stabilan ég (33. ábra). Így a keverőcsőre jellemző hozzávetőleges S = 0,67-es perdületszámmal az égés stabilizálható. A sebességeloszláson pedig megfigyelhető a sebességmaximumok eltolódása, erőteljesebb a fal felé történő perdítés (34. ábra). A perdületmentes esetben pedig az egyenes lángalak átalakul és egyre inkább instabillá válik (35. - 37. ábra).



32. ábra. OH gyök koncentráció a középsíkon 45°-os tangenciális komponens esetén 20,66 ms-nál.



33. ábra. OH gyök koncentráció a középsíkon $45^\circ\text{-}\mathrm{os}$ tangenciális komponens esetén 29,2 ms-nál.



34. ábra. Sebességeloszlás a középsíkon 45°-os tangenciális komponens esetén 29,2 ms-nál.



35. ábra. OH gyök koncentráció a középsíkon perdületmentes esetben 9,5 ms-nál.



36. ábra. OH gyök koncentráció a középsíkon perdületmentes esetben 19,2 ms-nál.



37. ábra. Sebességeloszlás a középsíkon perdületmentes esetben 23,55 ms-nál.

A fenti 45°-os és perdületmentes esetben a kialakult örvényeket is detektáltam. Az örvények kirajzoltatására a Q-kritériumot használtam, melyet a 2.5.5. fejezetben részleteztem. Annak érdekében, hogy örvényeket definiáljunk, vagyis olyan áramlási teret, ahol a forgás dominál a $Q > 0 \ [m^2/s^2]$ kell, hogy legyen. A tranziens esetben 45°-os és perdület nélküli esetben vizsgáltam a kialakult örvényeket. Ehhez Q-kritérium szerint azonos potenciálú, szintfelületeket definiáltam, ahol a Q-kritérium értéke 800 $\ [m^2/s^2]$. A felületeken pedig az axiális sebességek eloszlását ábrázoltam. A módszer azért előnyös, mert animációt készítve az egymást követő időlépésekről követhető az örvény felépülése, mozgása, ill. elhalása.



38. ábra. $Q = 800 \ [m^2/s^2]$ kritérium érték felületeken az axiális sebesség eloszlása 45°-os tangenciális komponens esetén.



39. ábra. $Q=800\ [m^2/s^2]$ kritérium érték felületeken az axiális sebesség eloszlása perdületmentes esetben.

5. Összefoglalás, fejlesztési lehetőségek

Összességében kijelenthető, hogy sikerült egy megfelelő felbontású és minőségi hálót találnom az égés modellezése céljából. A stacionárius számítások jól szemléltetik a különböző perdületekhez tartozó lángalakokat, azonban ezek nem a valóságos állapotot tükrözik. Ugyanakkor kimondható, hogy egy megfelelő közelítő képet adnak. A perdületmentes esetben és kis perdület esetén egyenes, stabil láng jön létre. Összevetve azonban a tranziens képpel egy instabilabb struktúrát látunk. Továbbá az egyenes láng a koncentrált hőfelszabadulás miatti károsanyag-kibocsátás szempontjából sem alkalmazható. A perdületszám növelésével egyre inkább V alakot ölt a láng, majd egy kritikus érték után visszaesik a keverőcsőbe. A vektor ábrákon és az intenzitásokon is meg tudjuk különböztetni a perdületes áramlásra jellemző áramlási zónákat, vagyis a recirkulációs zónákat, melyekkel stabilabb láng és jobb tüzelőanyag-levegő keveredés érhető el.

A perdület paraméterekkel jobban lehet jellemezni a gyengén, ill. erősen perdületes áramlásokat, mint a belépő közeg axiális és tangenciális sebességének bezárt szögével. Így tehát, ahogy a 2.2. fejezetben részletezett irodalom is írja, gyenge és erős perdületes áramlás határa a perdületparaméter kb. 0,6-os értékénél található. A perdületszám ezen felül nő a hossz mentén, a keverőcső és a vizsgálati tér közötti átmenetnél figyelhető meg egy nagy ugrás. Továbbá a perdületparaméter növekedésével instabil égés jön létre, a láng akár a keverőcsőbe is visszaéghet, valamint a kritikus M alakú struktúra is megfigyelhető.

A Q-kritérium szerint tudtam detektálni az örvényeket több esetben is. Ehhez ekvipotenciális felületeket definiáltam a Q értékét állítottam egy nullánál nagyobb számra (800 m^2/s^2 megfelelőnek bizonyult), ameddig a jellemző örvények kivehetővé váltak. Ezekre a felületekre az axiális sebesség eloszlást kértem le. Animáció készítése során megfigyelhettem a jellemző áramlási struktúrák kialakulását és mozgását. Hátránya a módszernek, hogy az örvényeket mind időben, mind térben nehéz azonosítani.

Úgy gondolom, hogy a jelenlegi modell még koránt sem végleges, ugyanakkor jó kiindulási alap további kutatások elvégzésre. Mint már korábban említettem a jelenlegi háló cellaszámát még lehet csökkenteni a dolgozatban kapott eredményekkel összevetve, így a számítási idő még jobban rövidül. A tapasztalatok alapján tehát az elsődleges cél a visszaégés elkerülése, így a perdületszámot szabályozni szükséges különböző üzemállapotokban, mivel a visszaült, illetve az M alak egyaránt nagy hőterhelést jelent, előbbi a keverőcsőnek, utóbbi az égőtér belépésénél a falnak. Ennek megfelelően a perdületszám szabályzása igen fontos feladat, aminek az első állomásaként különböző beállítási szögeket állítottam be. 40° és 50° közötti szög esetén stabil láng adódik V alakú struktúrákkal. Az eredmények már alkalmasak a megfelelő üzemi tartomány első közelítésére, a továbbiakban pedig a valós geometriát figyelembe véve a perdítőelemre fókuszálok, valamint változó tüzelőanyagokra, ill. a perdítőelem optimalizálására. A munkám segíti az OTKA-FK 124704 pályázatban szereplő égő fejlesztésében, amelyet a későbbiekben meg is építünk.

Hivatkozások

- N. A. Beér, J. M. Chigier. *Combustion Aerodynamics*. Robert E. Krieger publishing company, inc., London, 1972.
- [2] Inc. ANSYS. ANSYS FLUENT Theory Guide. Release 18.2, 15317:724– 746, 2017.
- [3] Dr. Lezsovits Ferenc. Combustion Technology tárgy, Combustion process előadás. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2018.
- [4] D. R. Lefebvre, A. H. Ballal. *GAS Turbine Combustion*. CRC Press, Boca Raton, third edition, 2010.
- [5] Vigor Huang, Ying, Yang. Dynamics and stability of lean-premixed swirl-stabilized combustion. *Progress in Energy and Combustion Scien*ce, 35(4):293–364, 2009.
- [6] Christof Noehre, Magnus Andersson, Bengt Johansson, and Anders Hultqvist. Characterization of Partially Premixed Combustion. (724):776–790, 2006.
- [7] Werner Heisenberg. Swirling flows előadás.
- [8] E. J. Li, G, Gutmark. Effects of swirler configurations on flow structures and combustion characteristics. *Proceedings of ASME Turbo Expo 2004*, pages 1–11, 2004.
- [9] dr. Kristóf Gergely. Aramlások numerikus modellezése-elektronikus tankönyv. 2014.
- [10] K-epsilon models CFD-Wiki, the free CFD reference https://www.cfd-online.com/Wiki/K-epsilon_models.
- [11] SST k-omega model CFD-Wiki, the free CFD reference https://www.cfd-online.com/Wiki/SST_k-omega_model.
- [12] Füzesi Dániel. ALLEGRO gázhűtésű gyorsreaktor egyszerűsített MOX kazettájának vizsgálata CFD kóddal, Szakdolgozat. 2017.
- [13] Inc. All rights reserved. Release 17.0 © SAS IP. 12.5.1. Visual Inspection.
- [14] T.Wintergerste M.Casey. {ERCOFTAC} Special Interest Group on "Quality and Trust in Industrial {CFD}". 2000.

- [15] Kun-Balog Ferenc, Dr. Lezsovits, Attila. Tüzeléstechnika Gyakorlata Segédlet és Példatár. Budapest, 2018.
- [16] Engineering Toolbox https://www.engineeringtoolbox.com/, 2018.

Köszönetnyilvánítás

Nagyon szeretném megköszönni a konzulensemnek, Dr. Józsa Viktornak a sok segítséget és szakmai tudást, amit nyújtott, melyek nélkül ez a munka most nem valósulhatott volna meg; valamint, hogy használhattam a számítógépét a modell megépítésére. Továbbá hálás vagyok az Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszéknek, hogy használhattam az újonnan beüzemelt szervereket a tranziens számítások elvégzésére. Ezen felül szeretném megköszönni a kollégiumi szobatársamnak, Bohunka Dávidnak, hogy elviselte a szoftverrel vívott küzdelmemet és lelket öntött belém.