

Füstgázvezető-csatornában kialakuló áramlás és hőtranszport numerikus modellezése

Bolló B.^{1*}, Fodor B.², Szaszák N.³

¹ Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet, betti.bollo@uni-miskolc.hu

² Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet, belafodor@uni-miskolc.hu

³ Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet, norbert.szaszak@uni-miskolc.hu

Absztrakt

Jelen tanulmány egy biomassza tüzelésű kazánhoz épített, vízszintes és függőleges csőszakaszokból és az ezeket összekötő könyökökből álló füstgázvezető csatornában kialakuló áramlás numerikus szimulációjának eredményeit mutatja be. Az elvégzett kutatómunka egy olyan kutatáshoz kapcsolódik, amelynek célja a nehéz- és/vagy ritkaföldfémekkel szennyezett talajokra telepített növények hőenergetikai hasznosítása során felszabaduló fémgázok és -vegyületek minél nagyobb fokú kinyerése a füstgázból. A csatornarendszer numerikus modelljének elkészítését követően a peremfeltételeket a megépített rendszer mérési eredményei szolgáltatták. Az elvégzett numerikus szimuláció segítségével mind az átlagsebességek, mind pedig a csatornafal-hőmérsékletek meghatározásra kerültek. A szimulációs eredmények alapján meghatározhatók a csatorna azon részei, amelyek környezetében a legnagyobb valószínűséggel ülepedhet ki a füstgáz által szállított pernye, továbbá azok a felületek, amelyek alacsonyabb hőmérséklete miatt a füstgázban lévő fémek kicsapódhatnak. A szimulációs eredmények alapján olyan rendszer tervezhető, amely segítségével a füstgázban található nehéz- és ritkaföldfémek minél nagyobb arányban kinyerhetők.

1 Bevezetés

Napjainkban egyre elterjedtebb a biomassza energetikai célú hasznosítása. Többnyire a fűtőművek állnak át a fosszilis energiahordozókról a – minél nagyobb arányú – biomassza-típusú energiahordozók tüzelésére, azonban a hagyományos tüzelőrendszerek nem alkalmasak a biomassza környezeti kockázat nélküli elégetésére. A növényi biomassza-hasznosítás egyik fő érve, hogy a fosszilis tüzelőanyagokéhoz képest jelentősen kisebb mértékű az üvegházhatású gázok kibocsátása. A biomassza elégetése közel CO₂-semleges, mivel égetéskor annyi CO₂ kerül a légkörbe, mint amennyit a növény fejlődése alatt megkötött. Fontos azonban megjegyezni, hogy a növény termesztéséhez szükséges műtrágya, szerves trágya, növényvédőszer előállítás és kijuttatása során, ezek mellett a telepítés, betakarítás, szállítás és előkészítés során fellépő CO₂-kibocsátásokat ez a szemlélet nem veszi figyelembe. A biomassza hasznosítás CO₂-mérlege azonban ezek figyelembevétele mellett is kedvezőbb, mint a fosszilis energiahordozók felhasználásával keletkezett szén-dioxid mennyisége. A biomassza égetése azonban más környezetterheléssel is jár: pernye, korom és egyéb veszélyes vegyületek (például policiklikus aromás szénhidrogének) kerülhetnek a légkörbe. Ezenkívül az ipari tevékenységek által okozott kibocsátások a talaj és a vizek nehézfémzennyezését okozhatják, amelyeket a növények a gyökérrendszerükön keresztül a vízzel és a tápanyagokkal együtt felveszik és elraktározzák, így a belőlük készült biomassza nehézfémeket tartalmaz. A szennyezett biomassza elégetésénél ezek a nehézfémek egy része a hamuban marad, másik része pedig a füstgázzal a környezetbe távozik. [1, 2]

A kutatás alapja, hogy a szennyezett területről származó biomassza eltüzelésénél minél több értékes fém (pl. arany), és minden veszélyes fém (pl. ólom) bent tartunk a rendszerben, azok füstgázzal való távozását

megakadályozzuk. Cél, hogy ezek a fémek a füstgáz portartalmában dúsulva maradjanak vissza, ami már visszanyerési lehetőségeknek is utat enged. Ehhez azonban kulcs tényező a füstgázvezető rendszer hőmérsékleti és áramlási viselkedésének meghatározása, hiszen mindkettő alapvetően befolyásolja a fémek kicsapódását, azok füstgázáramból történő kinyerhetőségét. A nehézfémek – mint például az arany – valamilyen vegyülethez kapcsolódnak, ezért a kinyerésükhöz például alumíniumport kevernek a füstgázcsatornába, hogy ilyen módon megnöveljék a fajlagos felületet, és ezáltal a kinyerendő fémvegyület hozzátapadhasson a fémporhoz, így nem a füstgázcsatorna falán fog kicsapódni, hanem az megfelelő szűrő(k) segítségével leválasztható.

A biomassza eltüzelése a Miskolci Egyetem Energia és Minőségügyi Intézetben rendelkezésre álló kazánban történt, amelyhez egy erre a célra készült füstgázvezető rendszer lett kiépítve. Az elvezető csatorna egyenes csőszakaszokból és 90°-os – 2×45°-os törésű hengerpalást-szakaszokból felépített– könyökökből áll, amely csatorna végén egy elszívó ventilátor található, ami a külső környezetbe juttatja a tüzelésnél keletkezett füstgázt. Jelen tanulmányban a füstgázcsatorna numerikus szimulációval történt hő- és áramlástechnikai vizsgálatai és azok eredményei kerülnek bemutatásra. A modellezéshez szükséges peremfeltételek megadásához előzetes tesztmérések lettek elvégezve mind hőmérséklet, mind pedig az áramlási sebességek szempontjából. Az előzetes mérési eredményekből megállapítottuk, hogy a csatornában turbulens jellegű az áramlás.

A csővezetékek íveiben súrlódási veszteség lép fel a folyadékrétegek közötti viszkózus kölcsönhatás miatt. Kialakul egy ún. másodlagos áramlás, ennek hatására a falról leváló örvények hozzájárulnak az intenzívebb keveredéshez és ezáltal a nagyobb áramlási veszteségekhez. A könyökcsövekben kialakuló áramlás kísérleti és numerikus előrejelzésével kapcsolatos tanulmányok részletesen leírják és magyarázzák az áramlás jellemzőit [3-5].

Kim et al. (2014) [4] egy csőív utáni szakaszban vizsgálták a kialakuló áramlást numerikus szimulációval, méghozzá az OpenFOAM szoftver segítségével. A kutatásuk célja a különböző turbulenciamodellek pontosságának meghatározása volt. A szimulációs eredményeiket Lézeres Doppler Anemométerrel (LDA) mért értékekkel hasonlították össze. Azt tapasztalták, hogy az RNG $k-\varepsilon$ turbulenciamodell pontosabb eredményeket ad az elsődleges áramlási sebesség- és a másodlagos örvénylési sebességprofilok tekintetében más turbulenciamodellekhez képest. Dutta és Nandi (2015) [5] szintén az RNG $k-\varepsilon$ turbulenciamodellt alkalmazták egy 90°-os könyökben kialakuló áramlási viszonyok elemzéséhez. A numerikus számításaikból kapott eredményeik jó egyezést mutattak a mért értékekkel.

A jelen vizsgálat célja a füstgázvezető csatorna azon felületeinek meghatározása volt, ahol a fémek kicsapódása bekövetkezhet, illetve azoknak a falrészeknek a kimutatása, amelyek ütközés következtében elősegítik a fémek kicsapódását.

2 Az alkalmazott matematikai modell

A füstgázcsatornában kialakuló áramlási és hőtani folyamatokat az Ansys Fluent programcsomaggal végeztük el, ami a véges térfogatok módszerét alkalmazza. A háromdimenziós áramlás leírására használt alapegyenletek közül a folyékony kontinuum mozgását a Navier-Stokes mozgásegyenlettel írjuk le:

$$\frac{\partial \vec{c}}{\partial t} + (\vec{c} \cdot \nabla) \vec{c} = \vec{f} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \vec{c} + \frac{1}{3} \nu \nabla (\operatorname{div} \vec{c}), \quad (1)$$

ahol a \vec{c} a sebességvektor, t az idő, az \vec{f} a nehézségi erőtér tömegegységre vonatkoztatott intenzitása, ρ a folyadék sűrűsége, p az abszolút nyomás és ν folyadék kinematikai viszkozitása. A tömegmegmaradást kifejező kontinuitási egyenlet differenciális alakja:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{c}) = 0. \quad (2)$$

A füstgázvezető-csatornában a termikus jelenségekkel is foglalkozunk, ezért szükséges az energiaegyenlet alkalmazása, melynek differenciális alakja:

$$\frac{de_B}{dt} + p(\nabla \cdot \vec{c}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \varphi_D + \varphi_Q, \quad (3)$$

ahol e_B az áramló folyadék tömegegységére vonatkoztatott fajlagos belső energiája, λ a hővezetési tényező, φ_D a hővé disszipált fajlagos mechanikai energia, a φ_Q pedig a termodinamikai rendszerrel időegység alatt közölt (vagy elvont) hő jelöli [6].

A füstgázcsatornában kialakuló áramlás turbulens jellegű, ami azt jelenti, hogy az áramló közeg fizikai jellemzői (például a nyomás, sebesség) gyorsan, kaotikusan változnak. A kaotikusan, sztochasztikusan változó áramlás szerkezetének leírása meglehetősen bonyolult. A turbulens áramlásban örvények jelennek meg, amelyek különböző méretűek lehetnek és egymással is kölcsönhatásban változnak. A turbulens mozgás energiájának nagy részét a nagyméretű örvényalakzatok, áramlási egységek hordozzák. Az energia azonban folyamatosan tovább adódik az egyre kisebb méretű örvényeknek, s így az örvényeknek egy hierarchiája van jelen a turbulens áramlásban.

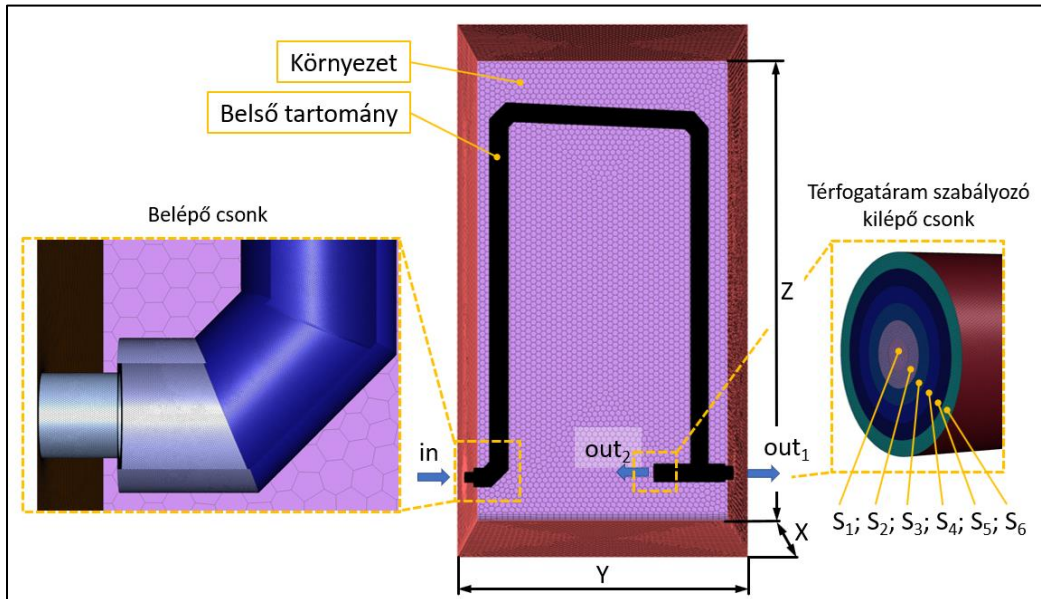
A mérnöki gyakorlatban a turbulens áramlások vizsgálatára jelenleg a Reynolds-időátlagolt Navier-Stokes egyenlet (Reynolds Averaged Navier-Stokes, RANS) a legáltalánosabban használt módszer. A mérnökök számára általában az időben átlagolt értékek a fontosabbak, számukra az ingadozás kevésbé érdekes. Ezek a modellek a mozgásegyenlet Reynolds-féle átlagolással nyert alakját alkalmazzák a főáramlás meghatározására, a turbulenciamodell célja pedig a Reynolds-átlagolt mozgásegyenletben található látszólagos feszültségek (Reynolds-feszültségek) kiszámítása. A szakirodalom [4, 5] a nem egyenes csővezetékben létrejövő turbulens áramlás modellezéséhez az ún. RNG k - ε turbulencia modellt ajánlja, ezért a számítások során mi is ezt alkalmaztuk.

2.1 Geometriai kialakítás és hálózás

A tüzelőberendezéshez csatlakozó kísérleti füstgázvezető-csatorna geometriai modellje az 1. ábra látható. Az áramlási- és hőtani viszonyok megismeréséhez először elkészítettük a geometriai modellt, majd a diszkretizációra alkalmas numerikus hálót. A numerikus háló készítésének szempontjából fontos, hogy a feladat egy termodinamikailag nyitott rendszer vizsgálata, ahol egy kazánból kilépő, különböző összetételű füstgáz lép be a numerikus számítási tartományba. A számítási tartomány egy $x=1,77$ m, $y=2,12$ m és $z=4$ m befoglaló méretű téglatest, amely a külső környezetet reprezentálja. Ebben a térben helyeztük el a csővezeték, amelynek belső tartományában áramlik a füstgáz (1. ábra).

A teljes tartományt poliéder hálóelemekre osztottuk fel. A csatorna belépő keresztmetszetén (*in*), a kilépő keresztmetszeteiben (*out₁*, *out₂*) és a csővezeték falán 2 mm-es, a környezetet határoló felületeknél pedig 50 mm-es cellaméretet alkalmaztunk. A teljes tartomány legkisebb réseiben legalább 5 db cellaelemet használtunk, amelyet a megadott hálósűrítési jellemzőkkel paramétereztünk is. Az összes, falként definiált felület mentén hat rétegből álló hálósűrítést alkalmaztunk, továbbá a füstgázcsatorna belső tartományának minél részletesebb felosztására törekedtünk annak érdekében, hogy a füstgáz jellemzőinek és állapotának megváltozását minél

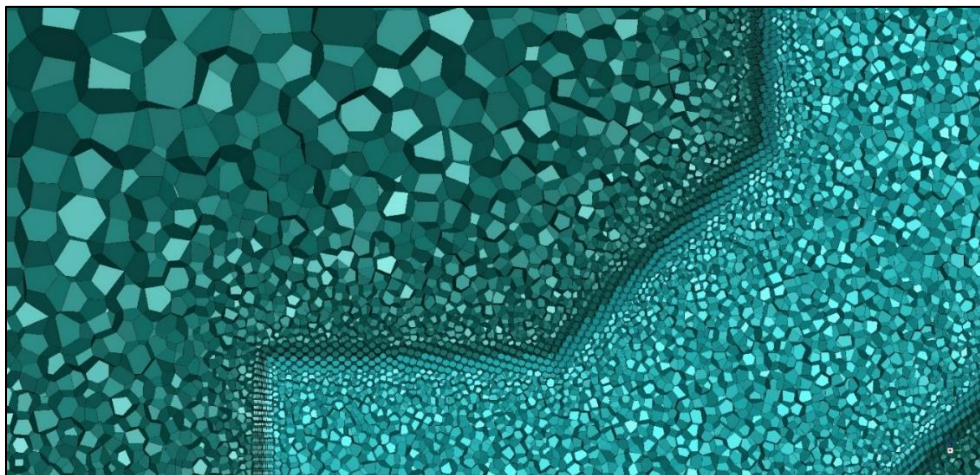
pontosabban modellezhessük (2. ábra). A felosztás során a füstgázcsatorna 1,5 mm falvastagságát a hálókészítés szempontjából elhanyagoltuk. A megadott feltételek mellett 21 millió cellaelemből álló numerikus hálót készítettünk.



1. ábra: A modell számítási tartománya és peremei.

A két térfogati tartományban az elkészült cellák száma közel azonos: a belső tér esetén 10 millió, a külső tér esetén pedig 11 millió. A hálómínőség szempontjából két fontosabb tényezőt vettünk alapul, ezek a ferdeség, amely a legrosszabb cella esetén 80%-os (20%-os ortogonalitás), továbbá az oldalarány, amely maximum 24-szeres.

A vizsgálat kísérleti jellegéből adódóan a numerikus tartomány peremeit és a legtöbb technikai felület elszeparáltuk annak érdekében, hogy minél több helyen lehetőség legyen peremfeltételek előírására vagy az eredmények kinyerésére. Többek között a belépő (*in*) és kilépő (*out₁*) keresztmetszetek mellett egy másodlagos kilépő (*out₂*) peremen S_i ($i=1-6$) gyűrű alakú keresztmetszetet alkalmaztunk a megfelelő térfogatáram szabályozás érdekében.



2. ábra: A belépő csomk térfogati felosztásának eredménye.

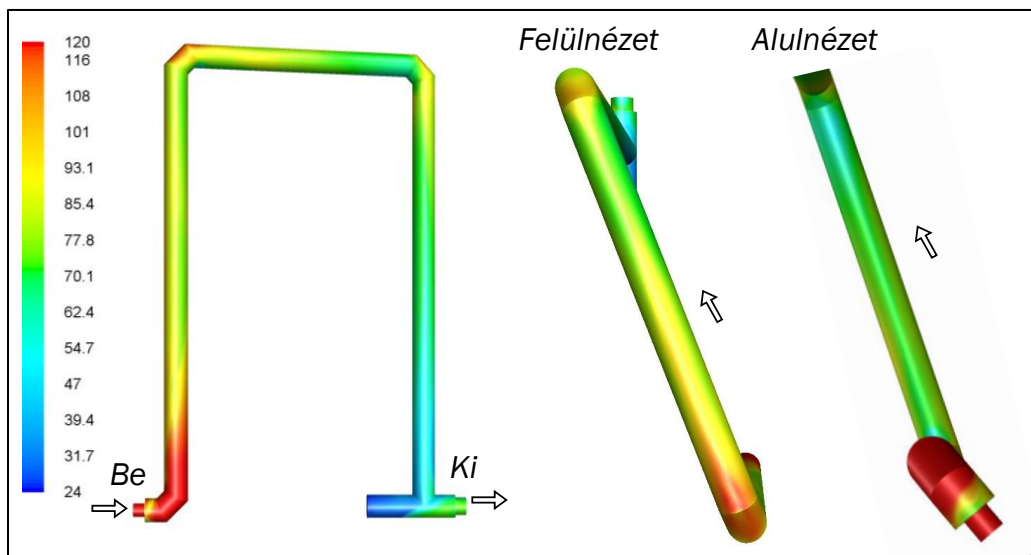
2.2 Kezdeti- és peremfeltételek

A tesztmérések során a kazánból kilépő füstgáz hőmérséklete 150°C volt, a külső tér hőmérséklete pedig 24°C , ezért ezeket az értékeket írtuk elő a peremeken. A kimeneten elszívást adtunk meg, méghozzá $0,0232\text{ kg/s}$ tömegáramot. Jelen vizsgálatainkban a csatornában kialakuló hőmérséklet- és áramlási teret kívántuk meghatározni, ezért a biomassza eltüzelésénél keletkezett füstgázösszetétellel nem foglalkoztunk. A kazánból érkező füstgázt meleg levegőként vettük figyelembe, amelynek a tulajdonságait (sűrűség, viszkozitás, hővezetési tényező) a hőmérséklet függvényében adtuk meg [7].

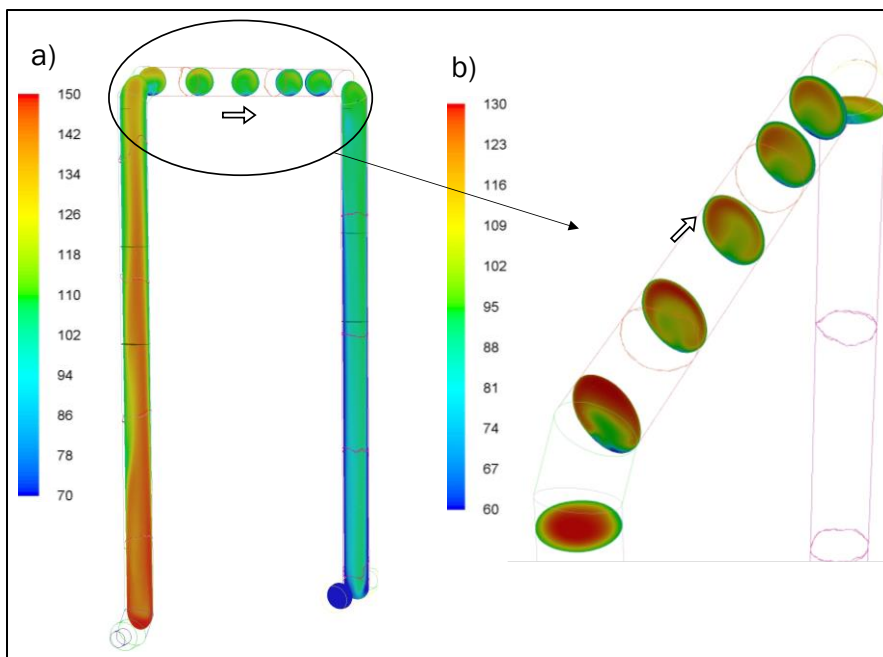
A füstgázvezető rendszer numerikus szimulációjának elvégzésére az ANSYS Fluent kereskedelmi szoftvercsomagot alkalmaztuk. A füstgázcsatornában és a körülötte zajló folyamatokat időben állandósult állapotúként modelleztük. A nyomás-sebesség kapcsolatára a SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) algoritmust használtuk. A konvektív tagok térbeli diszkrétizálása során az impulzusegyenletben az ún. „second order upwind” sémát alkalmaztuk.

3 Számítási eredmények

A numerikus szimuláció eredményeként a füstgázcsatornában létrejövő hőmérséklet- és áramlási teret elemeztük. A 3. ábra a csővezetékrendszer falán kialakuló hőmérsékletmező látható különböző nézetekben, míg a 4. ábra a csatorna különböző keresztmetszeteiben mutatja a kialakult hőmérsékleteloszlást. A füstgáz folyamatosan hűl a csatornában való haladása során, azonban a hőmérsékleteloszlás a csőfalán – jellemzően a belső áramlási viszonyoknak megfelelően – inhomogén. Ez például jól látszik a felső vízszintes szakaszon, ahol a csőszakasz alja $\sim 8\text{-}10^{\circ}\text{C}$ -kal hidegebb, mint a teteje. Ennek oka a csatornában kialakuló egyenetlen áramlás, amit a 4. ábrán látható keresztmetszeti képek is igazolnak.

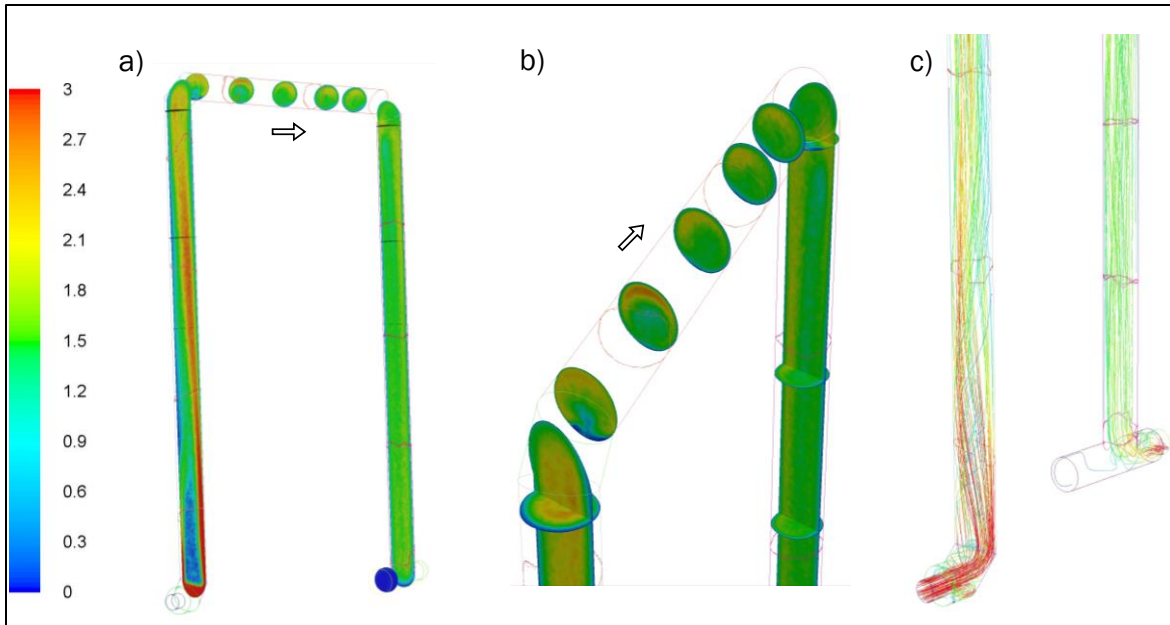


3. ábra Hőmérséklet-eloszlás a csatornarendszer felületén [$^{\circ}\text{C}$].

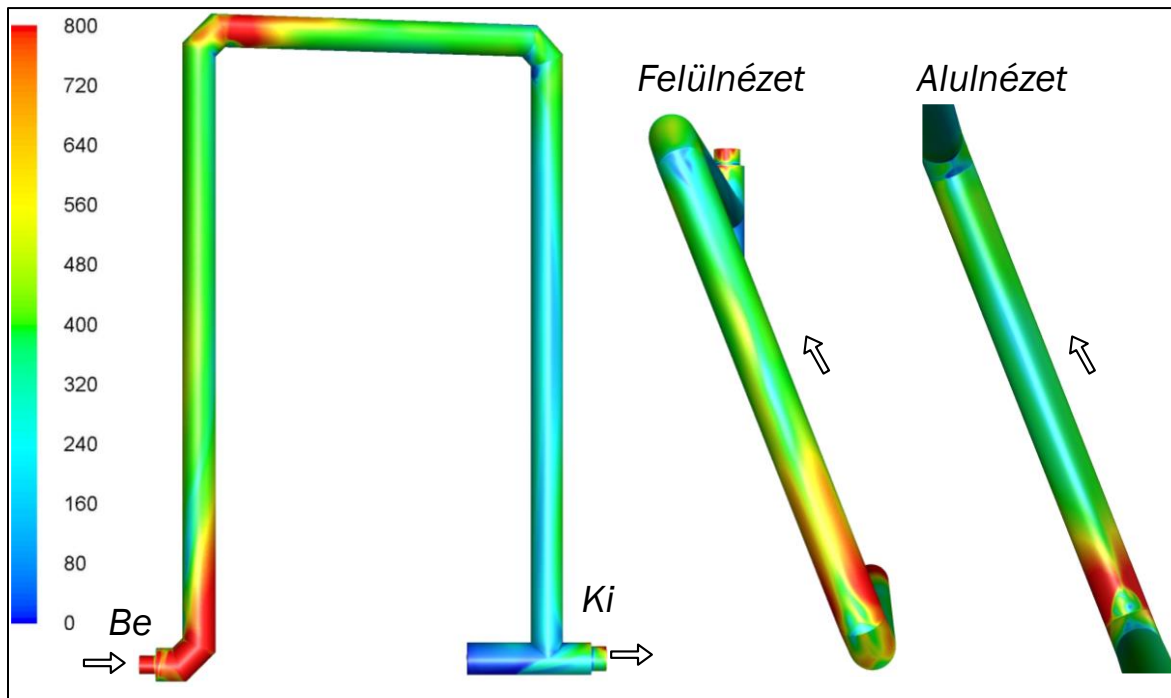


4. ábra Hőmérsékleteloszlás a csatornában [°C].

Az 5. ábra az elvezetőcsatornában kialakuló sebességeloszlást mutatja, illetve annak c) része a belépési szakasz utáni áramvonalak útját jeleníti meg. A kazánt követően egy rövid és kis átmérőjű csőszakaszt helyeztek el, amely a 82 mm átmérőről kibővül 148 mm-re, majd ezt követően az rögtön egy könyökben folytatódik, amelyet egy felfelé irányuló függőleges, egyenes szakasz követ. Az áramló közeg beleütközik a könyökbe, melynek hatására a sebesség iránya hirtelen megváltozik, továbbá perdület figyelhető meg az áramlásban (5. ábra). Ez a perdülettel rendelkező áramlás érkezik tehát a felső, vízszintes csőszakaszba. A felső csőszakaszban (5. ábra) különböző metszetekben látszik, hogy a csővezeték-keresztmetszet alsó részén jelentősen kisebb a sebesség, mint a keresztmetszet felső részében. Ebből következik az egyenletlen hőmérséklet-eloszlás is: a nagyobb sebességgel feláramló, s így melegebb füstgáz a csővezeték felső részén a nagyobb sebessége (s így magasabb hőátadási tényezője), továbbá magasabb hőfoka miatt nagyobb hőáramot indukál a csőfalon keresztül, így azt magasabb hőfokúra melegíti, mint az alsó részt (6. ábra).



5. ábra Sebességeloszlás (a) a teljes csatornában, (b) csatorna felső szakaszában és (c) áramvonalak a belépés utáni csőszakaszban [m/s].



6. ábra Hőátadás a falon [W/m^2]

4 Összefoglalás

A dolgozatban bemutatott biomassza tüzelésű kazánhoz épített füstgázvezető csatornában kialakuló áramlás numerikus szimulációjának eredményei alapján számos, a kutatási projektben hasznosítható eredményt kaptunk. A csatorna teljes hossza mentén, a beállított áramlási és hőtani paraméterek esetén jelentős mértékben csökken a csőfal, s ezzel együtt a füstgáz hőmérséklete, amely befolyással van a füstgázban található egyes fémek/ fémvegyületek kiválására. A hirtelen irányváltoztatások egyrészt hatással vannak a sebességprofilokra, másrészt – ebből adódóan – a környezet felé irányuló konvektív hőátadásra is. Ezek eredményeként inhomogén hőmérsékleteloszlás figyelhető meg a csatorna különböző részein, amely így jelentős szerepet játszhat a fémvegyületek kinyerése tekintetében. A szimulációs eredmények alapján a csatorna felső, vízszintes szakaszának keresztmetszeteiben is inhomogén a füstgáz hőmérsékleteloszlása: a felső térrészben magasabb hőmérséklet, az alsó részen pedig alacsonyabb füstgázhőmérséklet a jellemző. Amennyiben a kutatás szempontjából előnyös a homogén hőmérsékletmező létrehozása, úgy az áramlás homogenizálásához annak turbulenciáját növelő elemek beépítése ajánlott.

5 Köszönetnyilvánítás

A tématerületi kutatás a Miskolci Egyetem „Társadalmi hasznosság növelő fejlesztések a hazai felszín alatti természeti erőforrások hatékonyabb kiaknázása és hasznosítása területén” című, az Innovációs és Technológia Minisztérium Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal által kibocsátott támogatói okirat (Támogatói Okirat ikt. száma: TKP-17-1/PALY-2020) alapján zajló projektje részeként valósult meg.”

6 Irodalomjegyzék

- [1] Hutkainé Göndör Zs., Koós T., Szűcs I.: A faalapú biomassza energiacélú hasznosításának levegőkörnyezeti hatásai globálisan és Csernelyen. Miskolci Egyetem Közleményei: Anyagmérnöki Tudományok Vol. 38(1), 137-147, 2013.
- [2] Kovacs, H., Szemmelveisz, K.: Disposal options for polluted plants grown on heavy metal contaminated brownfield lands – a review. Chemosphere 166, 8–20, 2017.
- [3] Ikarashi, Y., Uno, T., Yamagata, T., Fujisawa N.: Influence of elbow curvature on flow and turbulence structure through a 90°elbow. Nuclear Engineering and Design 339,181–193, 2018.
- [4] Kim, J., Yadav, M., Kim, S.: Characteristics of Secondary Flow Induced by 90-Degree Elbow in Turbulent Pipe Flow. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics Vol. 8(2), 229–239, 2014.
- [5] Dutta, P., Nandi, N.: Study on pressure drop characteristics of single phase turbulent flow in pipe bend for high Reynolds number. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol.10(5), 2221-2226, 2015.
- [6] Czibere T.: Vezetékes hőátvitel. Miskolci Egyetemi Kiadó, 1998.
- [7] VDI, VDI-Wärmeatlas, 7th ed., Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 1994.