

Tüzelőanyag cseppek párolgásának modellezése előkeveréses égőben: Konvektív hőátadás és hősugárzás hatásának vizsgálata

Modeling of fuel droplet evaporation in an atmospheric premixed burner: Analysis of the effects of convective and radiative heat transfer

Modellierung der Verdampfung von Brennstofftropfen in einem atmosphärischen Vormischbrenner: Analyse der Effekte von konvektiver Wärmeübertragung und Heizen mittels Strahlung

Csemány Dávid

Energetikai mérnök; csemany.david@gmail.com

Dr. Józsa Viktor

Okleveles gépészmérnök; jozsa@energia.bme.hu

BME, Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3, Magyarország

Absztrakt: *A modern hőerőgépekben alkalmazott különféle korszerű folyékony tüzelőanyagok párolgási folyamatainak leírása ma is aktívan kutatott terület. Jelen cikk a tüzelési folyamatok egyik fontos paraméterének, a folyadékcseppek párolgási idejének meghatározására gyakorlati szempontból jól használható D^2 -törvény alkalmazására fókuszál. Az alapmodell egyik gyakori egyszerűsítő feltétele, hogy a nyugalomban lévő csepp irányába az őt körülvevő forró közeg felől a hő vezetéssel jut el. A gyakorlatban széleskörűen alkalmazott előkeveréses égők esetében azonban intenzív a folyadékcseppek besugárzása a forró felületek és a láng irányából. Továbbá a cseppek és a porlasztólevegő között sebességkülönbség lép fel, így a konvektív hőátadás is előtérbe kerül. A cikkben e két utóbbi jelenség párolgási időre gyakorolt hatását mutatjuk be dízel, etanol és nyers repceolaj tüzelőanyagokra.*

Abstract: *The evaporation of liquid fuels in modern heat engines is still an active research topic. This paper focuses on the D^2 -law, an easy estimation method of the evaporation time of droplets, which is an important parameter in liquid fuel combustion. One of the main assumptions of the base model is that heat flows from the hot medium to the static droplet only by thermal conduction. However, radiative heat transfer from the flame and hot surfaces to droplets is significant in the widely applied lean premixed prevaporized burners. Furthermore, the relative velocity of the droplets facilitate convection. The implementation of these phenomena and their influence on evaporation time of diesel, ethanol and crude rapeseed oil droplets are discussed in this paper.*

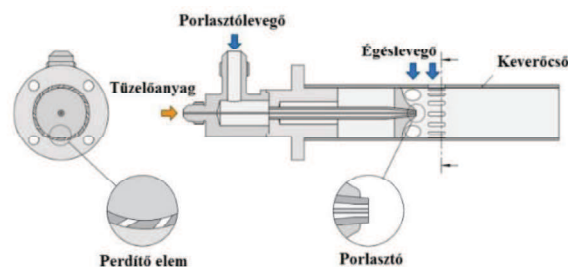
1. BEVEZETÉS

Folyékony tüzelőanyagokat előszeretettel alkalmaznak mind az energetikában, mind pedig a közlekedésben. Magas energiasűrűségük miatt olyan területeken, ahol kulcsfontosságú az alacsony tömeg, ott szinte egyeduralkodónak számítanak, tipikusan ilyen a repülőipar. Ezen

tüzelőanyagok jellemzően fosszilis alapúak, azonban az utóbbi évtizedekben intenzív kutatások folytak és jelenleg is folynak a megújuló forrásból származó folyékony tüzelőanyagok alkalmazásával kapcsolatosan [1–3].

Ahhoz, hogy folyékony tüzelőanyagot el tudjunk égetni, el kell párologtatni, mivel az égés csak gőz fázisban megy végbe. Ehhez először a tüzelőanyag porlasztására van szükség, hogy a több nagyságrenddel megnövelt fajlagos felület következtében a párolgás minél hamarabb végbe menjen [4]. A porlasztást követően a folyadékcseppek ideális esetben elpárolognak és homogén keveréket képeznek az égéslevegővel. A párolgáshoz szükséges hő érkezik a cseppet körülvevő forró közegből hővezetés útján, de szerepet kaphat a konvektív hőátadás, illetve a hősugárzás is, melynek egy tipikus forrása lehet maga a láng. Amennyiben az említett részfolyamatok közül valamelyik nem megfelelő, úgy lángstabilitási problémák léphetnek fel, növekedhet a károsanyag kibocsátás, illetve károsodhat a berendezés [5].

Jelen vizsgálat során a tüzelőanyagcseppek párolgási folyamatát egy előkeverés égőben vizsgáljuk, ahol a tüzelőanyag pára a levegővel megfelelő keveréket képez, mielőtt eléri a lángfrontot. A vizsgált konstrukció az 1. ábrán látható.



1. ábra. A vizsgált előkeveréses égő geometriája.

A tüzelőanyag bevezetése a keverőcsőbe egy 0,4 mm átmérőjű csövön keresztül történik, mely a tengelyvonal mentén helyezkedik el. A porlasztás levegő segédközeggel valósul meg, mely egy 0,8 mm belső és 1,4 mm külső átmérőjű gyűrűs keresztmetszeten lép a keverőcsőbe. Az égéslevegő négy darab furaton, valamint tizenöt darab 45°-os vágaton keresztül jut a keverőcsőbe, sebessége a porlasztólevegő sebességéhez képest gyakorlatilag elhanyagolható.

A porlasztólevegő gyűrű alapú szabadsugar-áramlásként modellezhető, ahol az axiális sebesség a kezdeti állandó szakasz után hiperbolikus jelleggel csökken. Az áramló levegő a cseppeket magával ragadja, így a cseppek a keverőcső vége felé haladnak. A nagyobb méretű cseppek a tehetetlenségükből fakadóan nem tudják követni a lassuló áramló közeg sebességét, így fellép a túllövés (overshooting) jelensége, így a csepp az áramló közegnél gyorsabban is mozoghat [6]. Esetünkben egy csepp tartózkodási ideje az az időtartam, amíg megtesz egy keverőcsőhossznyi utat. Ennyi idő alatt kell bekövetkeznie a teljes elpárologásnak. Mivel a sebessége eltér az áramló levegő sebességétől, ezért a konvektív hatások szerepet kapnak, ezzel a párolgás fokozódik. A keverőcső fala jellemzően magas, nagyságrendileg 1000 K hőmérsékletű, vagyis intenzív hősugárzás érkezik az irányából a csepp felé. Továbbá a keverőcső kilépő keresztmetszeténél lévő lángfront is visszasugároz a folyadékcseppekre, melyből az egyenértékű feketeségi foknak megfelelő részarányt nyelnek el [7].

Amennyiben ismert a folyadékcsepp párolgási ideje és keverőcsőben való tartózkodási ideje, úgy meghatározható a párolgási szám, mely a kettő hányadosa. Abban az esetben, amikor értéke egy alatti, úgy a folyadékcsepp teljes elpárologása bekövetkezik a tartózkodási idő alatt, vagyis

mielőtt eléri a lángfrontot. Ez a viselkedés a kívánatos az alacsony károsanyag kibocsátás érdekében.

2. A PÁROLGÁSI MODELL BEMUTATÁSA

A párolgás folyamatával [8] részletesen foglalkozik, a következőkben a modell megértése szempontjából leglényegesebb összefüggések közlése következik. Az alkalmazott D^2 -törvény a csepp pillanatnyi átmérőjének négyzete és az eltelt idő között lineáris összefüggést fogalmaz meg. A csepp felé a hő vezetéssel jut el. A párolgási folyamat két szakaszra bontható. A felfűtési időszak alatt a cseppel közölt hő túlnyomó része a csepp felmelegítésére fordítódik, a párolgás kevésbé intenzív, de itt is jelen van. A felfűtési időszak végét az egyenletes párolgási hőmérséklet elérése jelenti, ekkorra már a párolgási folyamatok kezdenek dominálni, a hőmérséklet további növekedése csekély, az érkező hőáram a párolgásra fordítódik.

$$D_0^2 - D_{hu,e}^2 = \lambda_{hu} t_{hu}, \quad (1)$$

$$D_{hu,e}^2 = \lambda_{st} t_{st}, \quad (2)$$

ahol D, λ , valamint t a cseppátmérő, a párolgási konstans, illetve az idő, 0 és e indexek a kezdeti, valamint a szakasz véget jelölik, hu és st indexek pedig a felfűtésre, illetve az egyenletes párolgásra vonatkoznak. A párolgási konstans a (3)-as egyenlettel írható le.

$$\lambda = \frac{8 k_g \ln(1+B_M)}{c_{p,g} \rho_f}, \quad (3)$$

ahol k, c_p , és ρ a hővezetési tényező, fajhő, illetve sűrűség, g és f indexek a tüzelőanyag gőz-levegő keverékre, valamint a folyadék állapotra vonatkoznak, B_M pedig a tömegátadásra jellemző Spalding-szám, dimenziótlan hasonlósági szám.

$$B_M = \frac{Y_{f,s}}{1 - Y_{f,s}} \quad (4)$$

$$B_T = \frac{c_{p,g}(T_\infty - T_s)}{L} \quad (5)$$

B_T szintén dimenziótlan, a hőátadásra jellemző hasonlósági szám. $Y_{f,s}$ a tüzelőanyag-áram részaránya a csepp felületén T_∞ a csepp körüli keverék hőmérséklete, mely tartalmazhat égéslevegőt, tüzelőanyag párákat, valamint égéstermékeket is. T_s a csepp felszínének átlaghőmérséklete, L pedig a tüzelőanyag párolgáshője. Az egyenletes párolgási szakaszban a két dimenziótlan mennyiség egyenlő, azaz:

$$B_M = B_T. \quad (6)$$

A folyadékcsepp felfűtéséhez szükséges idő a (7)-es összefüggés alapján határozható meg:

$$t_{hu} = \frac{c_{p,f} \cdot \rho_f \cdot c_{p,g} \cdot D_{hu}^2 (T_{s,st} - T_{s,0})}{12 \cdot k_g \cdot \ln(1+B_M) L (B_T/B_M - 1)^2} \quad (7)$$

ahol D_{hu} a felfűtési időszakra jellemző átlagos cseppátmérő. A csepp teljes élettartama a felfűtési idő és az egyenletes párolgás idejének összege:

$$t_e = t_{hu} + t_{st} \quad (8)$$

A sugárzásos hőáram modellbe történő implementálásához a következőkben ismertetett megfontolások szükségesek. A csepp felé a hőáram vezetéssel érkezik. Egy adott i -edik sugárzó felületről a sugárzásos hőáram nagysága a (9)-es egyenlet szerint számolható:

$$\dot{Q}_{rad,i} = \sigma \cdot \varepsilon_i \cdot \varphi_i \cdot D_{hu}^2 \cdot \pi \cdot (T_i^4 - T_{s,hu}^4), \quad (9)$$

ahol σ a Stefan-Boltzmann állandó, ε az emissziós tényező, φ a geometriafüggő iránytényező T pedig a hősugárzást kibocsátó objektum hőmérséklete. A sugárzásos hőáram és a vezetéssel érkező hőáram összegeként felírható a csepp felé érkező teljes hőáram [8,9]:

$$\dot{Q}_{tot} = \rho_f \cdot \frac{D^3 \pi}{6} c_{p,f} \frac{dT_s}{dt} = 2 \cdot \pi \cdot D_{hu} \cdot k_g \cdot \ln(1 + B_M) \cdot \left(\frac{T_{eff} - T_{s,hu}}{B_M} - \frac{L}{c_{p,g}} \right), \quad (10)$$

ahol T_{eff} az effektív hőmérséklet. Az effektív hőmérséklet a sugárzás hatását figyelembe vevő környezeti hőmérséklet. Hősugárzás nélküli esetben az effektív hőmérséklet megegyezik a cseppet körülvevő forró közeg hőmérsékletével, azaz T_∞ -nel.

A konvektív hőátadás figyelembevételéhez ismerni kell a csepp és a körülötte áramló nagyobb sebességű porlasztólevegő közötti sebességkülönbséget. A porlasztó után kialakuló permet áramlása gyűrű alapú szabadsugárként modellezhető. A porlasztólevegő kiömlése adiabatikus expanzióknak tekinthető, így az alkalmazott porlasztónyomás meghatározza a kiömlő levegő tömegáramát és a szabadsugár kezdősebességét [5]. A szabadsugár x irányú hosszmenti sebességfutása a (11)-es összefüggéssel határozható meg [10].

$$w_a(x) = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_a + \dot{m}_f} \cdot \frac{e^{d_e \cdot w_{a,0}}}{x}, \quad (11)$$

ahol \dot{m}_a a porlasztólevegő tömegáram, \dot{m}_f a tüzelőanyag tömegáram, d_e a porlasztó kilépő keresztmetszetének egyenértékű hidraulikai átmérője, $w_{a,0}$ a porlasztólevegő kezdősebessége a porlasztó ajaknál. A sebességfutás tömegáramokkal történő korrekciója az impulzusmegmaradás következménye, mivel nem tisztán levegő, hanem levegő és tüzelőanyag keveréke áramlik. A beporlasztott folyadék-csepp gyorsulását a (12)-es egyenlet írja le.

$$\frac{dw_D}{dt} = c_D \cdot \frac{3}{D} \cdot \frac{\rho_g}{\rho_f} \cdot w_r^2, \quad (12)$$

ahol w_D a csepp pillanatnyi sebessége, c_D a gömbszimmetrikus csepp ellenállás-tényezője, w_r pedig a levegő és a csepp közötti relatív sebesség. Feltételezzük, hogy a csepp a keverőcső középvezetékén halad. Az ellenállás-tényező értéke függ a Reynolds-számtól [11], melynek meghatározása a (14)-es összefüggéssel történik:

$$Re = \frac{w_r \cdot \rho_g \cdot D}{\mu_g}, \quad (14)$$

ahol μ_g a tüzelőanyag-levegő keverék dinamikai viszkozitása. A (12)-es egyenlet megoldásával meghatározható a csepp keverőcsőben való tartózkodási ideje, amely tehát az az időtartam, amíg a csepp megtesz egy keverőcsőhossznyi utat. A relatív sebesség ismeretében a párolgási konstansok értéke korrigálható a konvektív hőátadás figyelembevételéhez:

$$\lambda_{konv} = \lambda [1 + 0.3 \sqrt{Re} \cdot Pr_g^{0.33}], \quad (15)$$

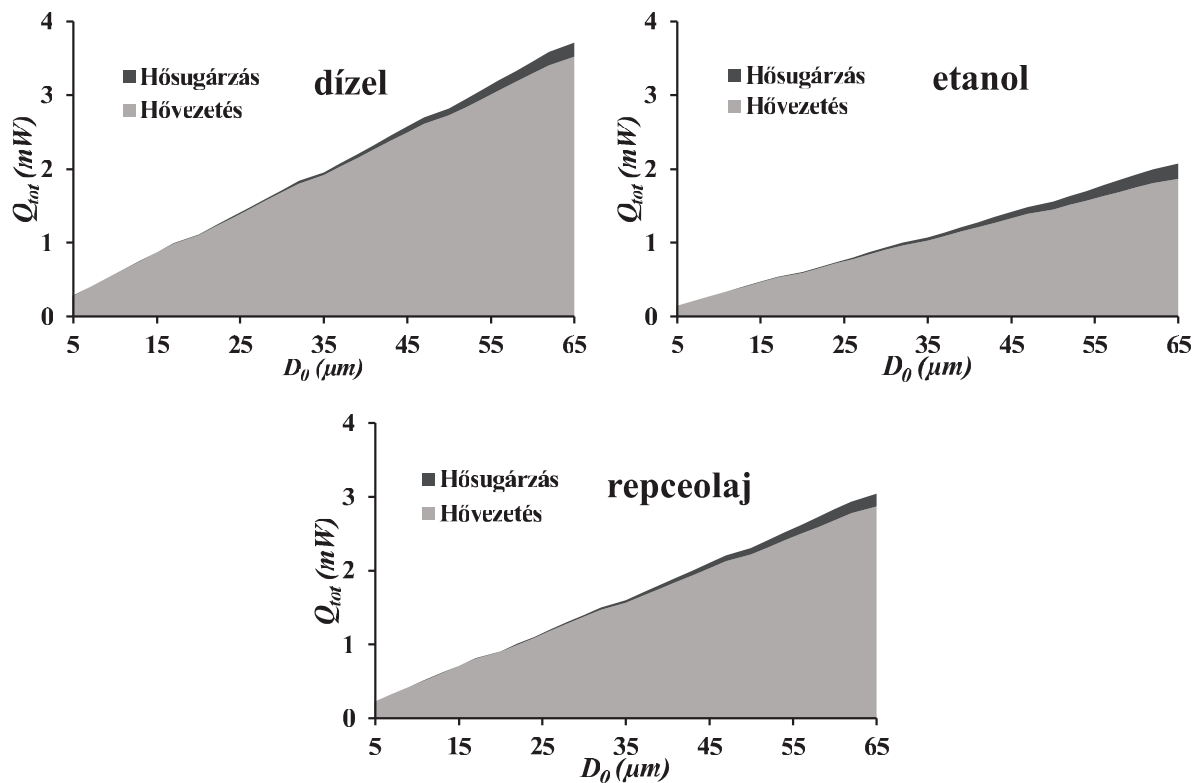
ahol Pr a Prandtl-szám. A párolgási idő és a tartózkodási idő ismeretében bevezethető a párolgási szám, mely tehát egy dimenziótlans mennyiség:

$$Ev = \frac{t_e}{t_{tart}}, \quad (16)$$

ahol t_{tart} a tartózkodási idő. Amennyiben tehát a párolgási szám értéke egy alatti, úgy a folyadékcsepp elpárolgása bekövetkezik a keverőcsőben való tartózkodás ideje alatt.

3. AZ EREDMÉNYEK BEMUTATÁSA

A modell validációját [12] alapján egy korábbi cikkünk tartalmazza [13]. A 2. ábrán a hősugárzásból, illetve hővezetésből származó hőáram megoszlása látható három különböző tüzelőanyag esetére. Megfigyelhető, hogy a kezdeti cseppméret növekedésével a teljes hőáram növekszik a nagyobb felület következtében. A sugárzásos hőáram jellemzően csak a nagyobb mérettartományban játszik szerepet. Kis cseppeknél a hatás elenyésző a kis cseppfelület miatt. A sugárzásos hőáram hozzájárulása a teljes hőáramhoz a különböző tüzelőanyagok esetében hasonló, tehát a jelenséget döntően a hősugárzást kibocsátó objektumra vonatkozó peremfeltételek befolyásolják. Ezzel ellentétben a hővezetés esetében a hőáramokat tekintve a három tüzelőanyag közötti különbség már jelentősebb az eltérő anyagjellemzők miatt. A cseppet körülvevő tüzelőanyag gőz és levegő keverékének hővezetési tényezője, fajhője és a tüzelőanyag párolgáshője mind meghatározó a vezetési hőáram szempontjából.



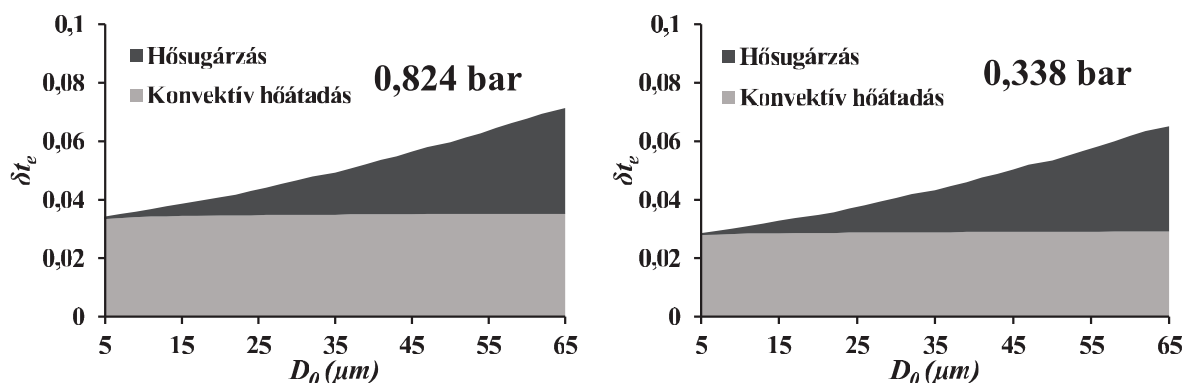
2. ábra. Hősugárzás és hővezetés megoszlása a cseppméret függvényében dízelt, etanol és repceolaj esetén.

A modell továbbfejlesztésének célja a cseppek párolgási idejének pontosabb meghatározása a hősugárzás és a konvektív hőátadás figyelembevételével. Ennek megfelelően elemeztük, hogy az egyes hatások külön-külön, illetve együttesen mekkora mértékben csökkentik a tüzelőanyag csepp párolgási idejét. A relatív eltérés a (17)-es összefüggéssel számolható:

$$\delta t_{e,i} = \frac{t_{e,hővezetés,i} - t_{e,i}}{t_{e,hővezetés,i}} \quad (17)$$

ahol $t_{e,hővezetés,i}$ az adott átmérőjű csepp párolgási ideje adott porlasztónyomás mellett kizárólag vezetési hőáram jelenlétében, $t_{e,i}$ pedig az adott csepp párolgási ideje adott porlasztónyomás

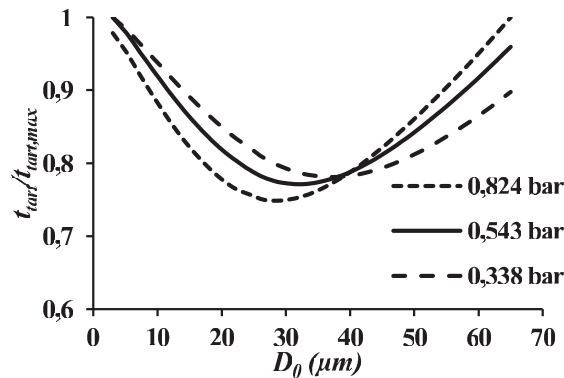
mellett az új hatások külön-külön történő, valamint együttes figyelembevételével. Ennek az elemzésnek az eredményeit szemlélteti a 3. ábra repceolaj tüzelőanyagra két különböző porlasztónyomásra. Megjegyzendő, hogy jellegében hasonló tendenciát mutat a dízel, valamint az etanol tüzelőanyag cseppek viselkedése is a vizsgált égő konstrukcióra.



3. ábra. A párolgási idő csökkenésének mértéke repceolaj tüzelőanyag esetében.

A 2. ábra kapcsán láthattuk, hogy a kezdeti cseppméret növekedésével a sugárzásos hőáram értéke növekszik a nagyobb felület következtében. Ebből következik, hogy a párolgási idő csökkenése a hősugárzás hatására a cseppméret növekedésével szintén jelentősebb. A jelenséget a porlasztónyomás értéke nem befolyásolja. Ami a konvektív hőátadást illeti, látható, hogy a vizsgált cseppméret-tartományban a párolgási idő csökkenésének mértéke gyakorlatilag független a kezdeti cseppmérettől. A porlasztónyomás azonban befolyásoló tényező, mivel döntően meghatározza a porlasztó után kialakuló szabadsugar-áramlás sebességmezőjét, ennek következtében a cseppek és az őket körülvevő közeg közötti relatív sebesség alakulását, így a konvektív hőátadás mértékét. Nagyobb porlasztónyomás esetén a porlasztóközeg áramlása nagyobb sebességű. A cseppek kezdősebessége közel zérus, így a relatív sebesség szintén nagyobb, ezzel a párolgás fokozottabb mértékű. Érdekes azonban megjegyezni, hogy bár a konvekció és a hősugárzás jogosan merül fel tüzelés esetében, viszont a vezetékes átadási folyamatok egyértelműen dominálnak egy megfelelően finom cseppeloszlású permetnél, mely a valós eseteket jellemzi. Mivel az anyagjellemzők bizonytalansága eleve hatással van a párolgási időre [13], így a konvekció és a hősugárzás elhanyagolása nem feltétlenül okoz számottevő hibát.

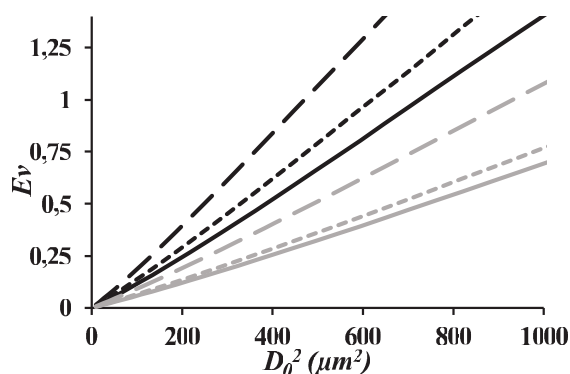
A porlasztó utáni keverőcsőben kialakuló sebességmező a konvektív hőátadáson kívül a cseppek tartózkodási idejére is hatással van. A korábban említett túllövés jelenségének következtében azonban a nagyobb cseppméret nem feltétlenül jelent nagyobb tartózkodási időt. A különböző méretű beporlasztott repceolaj cseppek adott nyomáshoz tartozó maximális tartózkodási idejével dimenzióatlanított tartózkodási idejének alakulását mutatja a 4. ábra három különböző porlasztónyomás esetére.



4. ábra. Repceolaj cseppek dimenziótlan tartózkodási ideje.

Látható, hogy a görbe minimummal rendelkezik, vagyis adott porlasztónyomáson a tartózkodási idő a kezdeti cseppméret növelésével csökken, majd ismét növekszik. A kisméretű cseppek kisebb tehetetlenségükből fakadóan hamarabb felgyorsulnak az áramlás sebességére, és a szabadsugár csökkenő sebességét is követni tudják, így kevésbé jelentős a túllövés. A közepes mérettartományban a cseppek már nehezebben gyorsulnak fel az áramlás sebességére, illetve a szabadsugár sebességének csökkenését is nehezebben követik le, a nagyobb túllövés kisebb tartózkodási időt eredményez. A nagyméretű cseppek eleve nagyon lassan érik el az áramlás sebességét, ekkor már maga a szabadsugár is lassabb, sebességgradiense kisebb, a túllövés nem számottevő, ezért a tartózkodási idő nagyobb.

A párolgási idő és a tartózkodási idő ismeretében meghatározható a párolgási szám. A 4. ábrán láthattuk, hogy a tartózkodási idő a kezdeti cseppméret függvényében nem monoton. A párolgási idő azonban szigorúan monoton a kezdeti cseppméret függvényében, nagyobb méretű csepp elpárolgásához számottevően több időre van szükség. A párolgási számot tekintve ez utóbbi hatás dominál, így a hányados szigorúan monoton növekszik a cseppátmérővel. Az 5. ábra a párolgási szám alakulását szemlélteti a kezdeti cseppátmérő négyzetének függvényében két különböző porlasztónyomás esetében dízel, etanol és repceolaj tüzelőanyagokra.



5. ábra. Párolgási szám és kezdeti cseppátmérő kapcsolata. A fekete a 0,824 bar, a szürke a 0,338 bar porlasztónyomást jelöli. A folytonos vonal a dízelre, a szaggatott vonal az etanolra, a pontvonal a repceolajra vonatkozik.

A párolgási szám értékének alakulásából látható, hogy adott kezdeti cseppátmérőnél a repceolaj esetén a legnagyobb a párolgási szám, vagyis a rendelkezésre álló tartózkodási idő alatt a repceolaj párolgási ideje a legnagyobb az adott porlasztónyomás mellett. Ez összhangban van

a repceolajra vonatkozó tüzeléses mérések eredményeivel [14]. A porlasztónyomás növelése növeli a párolgási számot, mivel csökken a cseppek tartózkodási ideje.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A hősugárzás és konvektív hőátadás párolgási modellbe történő implementálásának célja az volt, hogy a tüzelőanyag cseppek párolgási idejére minél pontosabb értéket tudjunk mondani, továbbá ezen mechanizmusok párolgási időre gyakorolt hatásának mértékét értékelni lehessen. A megfelelő mérlegegyenletek és összefüggések módosítása mellett a folyadékcseppek sebességének időbeli alakulását is meg kellett határozni a porlasztó után kialakuló áramlás sebességletűtésének ismeretében. Mindezeket figyelembe véve konklúzióként az alábbi megállapítások tehetők:

1. A hősugárzás hozzájárulása a teljes hőáramhoz nagy kezdeti cseppátmérő esetében jelentősebb. Mivel egy valós porlasztási folyamat során a cseppek méretbeli eloszlása inhomogén, azaz vannak kisebb, illetve nagyobb cseppek, a hősugárzás enyhe homogenizáló hatást fejt ki a teljes permetre vonatkozóan a párolgási idő szempontjából.
2. Mivel nagyobb cseppméret esetében jelentősebb a hősugárzás, így a párolgási idő csökkenésének mértéke is nagyobb a cseppméret növelésével. A jelenséget a porlasztónyomás nem befolyásolja.
3. A konvektív hőátadásból fakadó párolgási idő csökkenés mértéke a kezdeti cseppátmérőtől gyakorlatilag nem függ, azonban a keverőcsőben kialakuló sebességmezőt befolyásoló porlasztónyomás meghatározó paraméter. A porlasztónyomás növelésével a konvektív hatások felerősödnek.
4. Megfelelően finom permet, azaz kis cseppátmérők esetén a hővezetési átadási folyamatok dominálnak, így a hősugárzás és konvektív hőátadás elhanyagolása nem okoz számottevő hibát a párolgási idő tekintetében.
5. A tartózkodási idő a kezdeti cseppátmérő függvényében minimummal rendelkezik, ez a túllövés jelenségre vezethető vissza. Mivel azonban a párolgási idő a kezdeti cseppátmérő szigorúan monoton függvénye, ezért a párolgási szám a cseppátmérővel növekszik. A vizsgált tüzelőanyagok közül a repceolaj esetében a legnagyobb a párolgási szám értéke adott porlasztónyomás és kezdeti cseppátmérő mellett, vagyis a rendelkezésre álló tartózkodási idő mellett a repceolaj párolgási folyamata a leglassabb.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Jelen cikket az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-17-2-I kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programja, a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj, illetve az 124704 számú projekt a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból biztosított támogatással, az OTKA-FK pályázati program finanszírozásaiban valósult meg.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] L. G. Anderson, Effects of using renewable fuels on vehicle emissions, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 47, no. Supplement C, pp. 162–172, 2015.
- [2] A. Gómez-De la Cruz, A. G. Romero-Izquierdo, C. Gutiérrez-Antonio, F. I. Gómez-Castro, és S. Hernández, Modelling of the hydrotreating process to produce renewable aviation fuel from micro-algae oil, *27 European Symposium on Computer Aided*

- Process Engineering*, vol. 40, no. Supplement C, pp. 655–660, 2017.
- [3] M. Buffi, A. Valera-Medina, R. Marsh, D. Pugh, A. Giles, J. Runyon, és D. Chiaramonti, Emissions characterization tests for hydrotreated renewable jet fuel from used cooking oil and its blends, *Appl. Energy*, vol. 201, no. Supplement C, pp. 84–93, 2017.
- [4] A. Penninger, *Tüzeléstechnika*. Budapest: BME Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék, 2014.
- [5] V. Józsa, D. Csemány, Evaporation of renewable fuels in a lean premixed prevaporized burner, *Period. Polytech. Mech. Eng.*, vol. 60, no. 2, 2016.
- [6] J. C. Lasheras, E. Villermaux, és E. J. Hopfinger, Break-up and atomization of a round water jet by a high-speed annular air jet, *J. Fluid Mech.*, vol. 357, pp. 351–379, 1998.
- [7] L. Dombrovsky, S. Sazhin, Absorption of thermal radiation in a semi-transparent spherical droplet: a simplified model, *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol. 24, no. 6, pp. 919–927, 2003.
- [8] A. H. Lefebvre, *Atomization and Sprays*. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1989.
- [9] B. Abramzon, S. Sazhin, Droplet vaporization model in the presence of thermal radiation, *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 48, no. 9, pp. 1868–1873, 2005.
- [10] L. Zawadzki, J. Cichoń, J. Jarzębowski, és H. Kapusta, Determination of the Air Velocity in the Free Stream Flowing Out of a Cylindrical and Two-Gap Skewed Jet (Dual Slot Die), *FIBRES Text. East. Eur. 2010*, vol. 18, no. 5 (82), pp. 39–43, 2010.
- [11] A. Haider, O. Levenspiel, Drag coefficient and terminal velocity of spherical and nonspherical particles, *Powder Technol.*, vol. 58, no. 1, pp. 63–70, 1989.
- [12] S. S. Sazhin, T. Kristyadi, W. A. Abdelghaffar, és M. R. Heikal, Models for fuel droplet heating and evaporation: Comparative analysis, *Fuel*, vol. 85, no. 12, pp. 1613–1630, 2006.
- [13] D. Csemány, V. Józsa, Fuel Evaporation in an Atmospheric Premixed Burner: Sensitivity Analysis and Spray Vaporization, *Processes*, vol. 5, no. 4, 2017.
- [14] V. Józsa, A. Kun-Balog, Stability and emission analysis of crude rapeseed oil combustion, *Fuel Process. Technol.*, vol. 156, pp. 204–210, 2017.